

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 78 (1987)

**Heft:** 9

**Artikel:** Elektronischer Spannungswandler hoher Präzision, insbesondere für gekapselte Schaltanlagen

**Autor:** Siegenthaler, A.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-903855>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 14.07.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Elektronischer Spannungswandler hoher Präzision, insbesondere für gekapselte Schaltanlagen

A. Siegenthaler

**Mit steigender Systemspannung nimmt der Isolationsaufwand bei induktiven Spannungswandlern nahezu quadratisch zu. Es wurde daher ein neuartiger kapazitiver Wandler entwickelt, der bei einfachem Aufbau und kompakten Abmessungen des Primärteils eine Spannungsmessung hoher Klassengenauigkeit, verbunden mit grosser Störsicherheit, ermöglicht.**

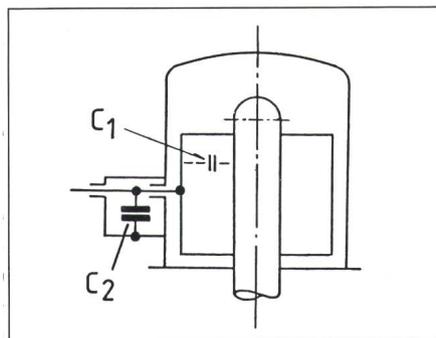
**En augmentant les tensions nominales des réseaux, les transformateurs de tension deviennent relativement coûteux. C'est pourquoi un nouveau transformateur de tension capacitif partiellement électronique a été développé, qui excelle dans un montage simple, peu de pièces détachées et des dimensions compactes. Il était possible de construire un appareil à haute précision, combiné avec une haute insensibilité aux perturbations transitoires.**

## Einleitung

Der stetig wachsende Energiebedarf erfordert die Einführung höherer Spannungsebenen. Beim herkömmlichen induktiven Spannungswandler steigen gegen höhere Spannungen hin die Schwierigkeiten bezüglich Linearität, die Eigenresonanzfrequenz und vor allem der Isolationsaufwand. Aus diesen Gründen wird nach anderen Möglichkeiten zur Messung der betriebsfrequenten Spannung in Hochspannungsnetzen gesucht. Eine Lösung stellt neben dem sonst üblichen passiven kapazitiven Wandler und den elektrooptischen Wandlerprinzipien (Kerr-Effekt, Pockels-Effekt) der im folgenden beschriebene aktive, kapazitive Spannungswandler dar.

## 2. Grundprinzipien kapazitiver Teiler mit elektronischem Verstärker

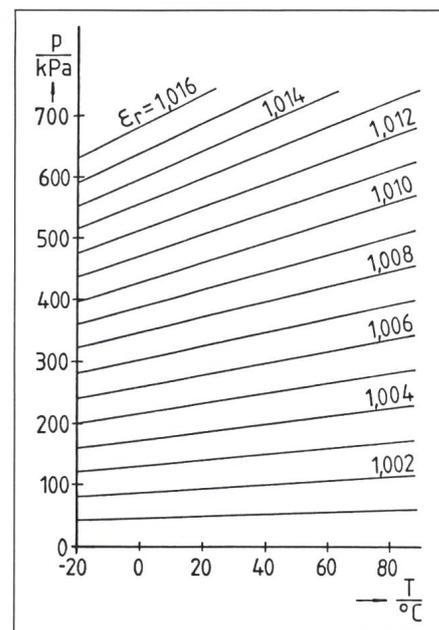
Das Prinzip ist bereits in konventionellen Freiluft- und gekapselten Anlagen angewandt worden. Für Freiluftanwendung entsprach die Bauart des Teilers derjenigen eines herkömmlichen kapazitiven Spannungswandlers [1].



Figur 1 Ausführung des kapazitiven Teilers als Pressgaskondensator

C<sub>1</sub> Hochspannungskapazität  
C<sub>2</sub> Niederspannungskapazität

Bei gekapselten, druckgasisolierten Schaltanlagen (Gas Insulated Switchgear, GIS) wird der hochspannungsseitige Teilerkondensator C<sub>1</sub> im allgemeinen als Pressgaskondensator (Fig.1) ausgeführt [2]. Der Niederspannungskondensator C<sub>2</sub> befindet sich bei dieser Konstruktion ausserhalb des Gasraums im Anschlusskasten des Teilers. Das Übersetzungsverhältnis eines solchen Teilers mit niederspannungsseitigem Folienkondensator ist eine Funktion der Gasdichte, da die relative Dielektrizitätskonstante des Isoliergases dichteabhängig ist. Figur 2 zeigt die Verhältnisse für SF<sub>6</sub> im Druck-Temperatur-Diagramm. Die Geraden konstanter Gasdichte (und somit konstanter Dielektrizitätszahl) treffen sich links ausserhalb des Bildes im absoluten Temperaturnullpunkt. Eine isochore Zustandsveränderung (erwärmungsbedingte Druckerhöhung bei konstantem Volumen) bewirkt, da die



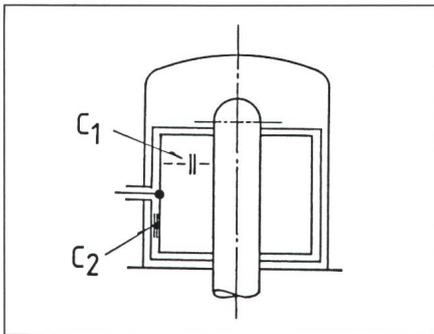
Figur 2 Dielektrizitätskonstante von SF<sub>6</sub> in Funktion von Druck und Temperatur

### Adresse des Autors

Andreas Siegenthaler, dipl. El.-Ing. ETH, BBC Oerlikon, Abt. ATX-A, 8050 Zürich.

Gasdichte konstant bleibt, keine Änderung von  $\epsilon_r$ . Demgegenüber ändert sich  $\epsilon_r$  bei isothermen Druckschwankungen (Leckage und Nachfüllen) um etwas über 0,2% pro 100 kPa.

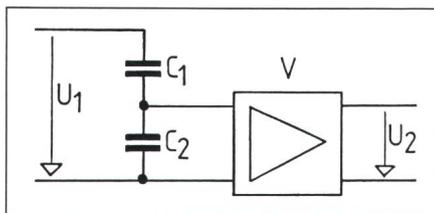
Beim beschriebenen Wandler werden durch Temperatur- und Druckschwankungen bedingte Veränderungen des Teilverhältnisses vermieden, indem die Dielektrika beider Teiler-



Figur 3 Kapazitiver Teiler, bei welchem auch die Niederspannungskapazität als Gaskondensator ausgebildet ist

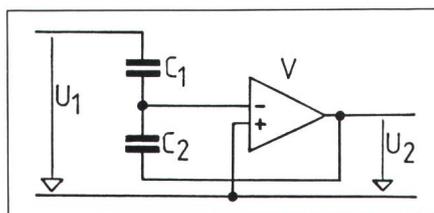
kondensatoren  $C_1$  und  $C_2$  (Fig. 3) durch das Isoliergas desselben Druckraumes gebildet werden [1].

Das Signal des kapazitiven Teilers kann auf zwei grundsätzlich verschiedene Arten weiterverarbeitet werden. In der Literatur wird zwischen passivem und aktivem Teiler unterschieden. Figur 4 zeigt den passiven Teiler mit



Figur 4 Ersatzschaltbild des passiven Teilers mit nachgeschaltetem Verstärker

- $C_1$  Hochspannungskapazität
- $C_2$  Niederspannungskapazität
- $U_1$  Primärspannung
- $U_2$  Sekundärspannung
- V Verstärker in der Schaltung als Spannungssignal-Verstärker bzw. Impedanzwandler



Figur 5 Ersatzschaltbild des aktiven Teilers

- V Verstärker in der Schaltung als Strommessverstärker

Figur 6 Prinzipien kapazitiver Teiler mit elektronischem Verstärker, Ausführungsbeispiele

Prinzipien	passiver Teiler „Spannungsmessung“	aktiver Teiler „Strommessung“
$C_2$ als Folienkondensator	Balteau [5] BBC (Kombiwandler)[3] Haefely [1] MWB [2]	Coq (Hazemeyer)[6] General Electric [7] Smit,Nijmegen [8]
$C_2$ als $SF_6$ -Gaskondensator	Haefely [1] Siemens (Pat.) Toshiba (Pat.)	BBC (beschriebener Typ)

nachgeschaltetem elektronischem Verstärker, dessen hochohmiger Eingang den Teiler nur äusserst schwach belastet, unabhängig von der am niederohmigen Ausgang angelegten Bürde.

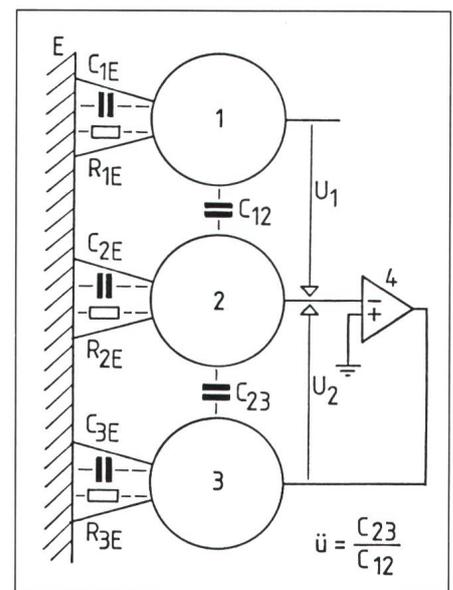
Beim aktiven Teiler (Fig. 5) ist die Niederspannungskapazität  $C_2$  als Gegenkopplungskondensator des Verstärkers geschaltet und führt den von der Hochspannungskapazität  $C_1$  eingepprägten Strom. Man spricht daher auch vom «Prinzip Strommessung», im Gegensatz zum «Prinzip Spannungsmessung» beim passiven Teiler [1]. Der aktive Teiler hat den Vorteil, dass Veränderungen der Kapazitäten der Elektrodenisolation und des vom Teiler wegführenden Kabels durch Temperatur, Feuchtigkeit oder Alterung keinen Einfluss auf das Teilverhältnis haben, da diese Kapazitäten spannungslos zwischen den beiden Eingängen des Verstärkers liegen.

In Figur 6 sind diese beiden Teilerarten (passiv und aktiv) und beide Arten der Ausführung der niederspannungsseitigen Teilerkapazität (Folien und Gaskondensator) in einer Tabelle zusammengestellt. Einige in der Literatur publizierte Wandler sind darin aufgeführt. Der beschriebene Wandler liegt im rechten unteren Feld, welches den Teiler aus zwei Gaskondensatoren mit dem aktiven Messprinzip vereinigt.

### 3. Prinzip und Wirkungsweise des neuen Wandlerprototyps

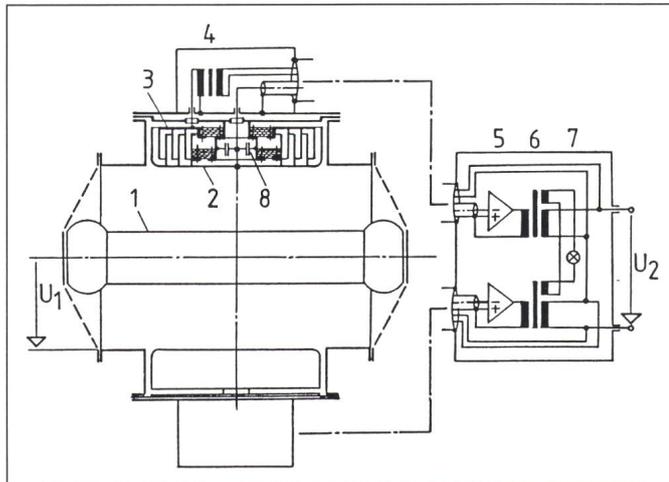
Figur 7 zeigt ein Ersatzschaltbild der Elektrodenanordnung eines aktiven, kapazitiven Teilers. Die Hochspannungselektrode (1), die Messelektrode (2) und die Gegenelektrode (3) sind als Kugeln dargestellt. Die beiden Mess-

kapazitäten des Spannungsteilers bestehen aus den Teilkapazitäten  $C_{12}$  und  $C_{23}$ , welche durch reine Gasstrecken gebildet werden. Es existieren keine durch Isolationsmaterialien gebildete Parallelpfade, deren Impedanzen von verschiedenen äusseren Einflüssen abhängig sind. Wesentlich ist, dass jede Elektrode separat auf Erdpotential abgestützt ist und dass die Messelektrode (2) durch den Operationsverstärker (4) ebenfalls auf Erdpotential gehalten wird. Der in der Kapazität  $C_{23}$  eingepprägte Strom wird somit nur durch  $C_{12}$  bestimmt (abgesehen von den vernachlässigbaren Eingangsströmen des Ver-



Figur 7 Ersatzschaltbild des aktiven Teilers, bestehend aus den beiden reinen Gaskapazitäten  $C_{12}$  und  $C_{23}$  zwischen den Elektroden 1, 2 und 3

- 1 Hochspannungselektrode
- 2 Messelektrode
- 3 Gegenelektrode
- 4 Operationsverstärker



**Figur 8**  
**Schematische Darstellung des Zwillingswandler-Prototyps**  
 1 Hochspannungselektrode (Leiterrohr)  
 2 Messelektrode  
 3 Gegenelektrode  
 4 Gegenkopplungstransformator  
 5 Operationsverstärker  
 6 Ausgangstransformator  
 7 Störanzeige des Quervergleichs  
 8 Schutzkondensator

stärkers), und die Übersetzung des Teilers besteht einzig aus dem Verhältnis  $C_{23}/C_{12}$ .

Figur 8 zeigt, schematisch dargestellt, den konstruktiven Aufbau und die Funktionsweise des Spannungswandler-Prototyps, hier für den Einsatz in GIS. Die Hochspannungselektrode wird unmittelbar durch das Stromleiterrohr gebildet. Es handelt sich hier, im Gegensatz zum sogenannten «Endtyp» (Fig. 1 und 3), um einen «Durchgangstyp» [3].

Die Elektroden (2) und (3) des Niederspannungskondensators bestehen aus radialachsig zum Leiterrohr angeordneten Scheiben. Diese weisen zur Erhöhung der Kapazität in den einander gegenüberliegenden Stirnflächen ringförmige Ausnehmungen auf, die ineinandergeschoben werden können. Die Gegenelektrode (3) ist hier, in Abweichung vom Ersatzschaltbild (Fig. 7), nicht unmittelbar mit dem Ausgang des Operationsverstärkers verbunden. Zur galvanischen Trennung des Wandlerausgangs und zur Anpassung der verschiedenen Arbeitspunkte sind zwei Transformatoren dazwischengeschaltet: Der Ausgangstransformator (6) und der Gegenkopplungstransformator (4). Die Signalspannung liegt für primäre Nennspannung am Ausgang des Operationsverstärkers (5) bei etwa 10 V, am Wandlerausgang ( $U_2$ ) in der Größenordnung von 100 V und am niederspannungsseitigen Messkondensator des Teilers bei etwa 1000 V. Da der Gegenkopplungstransformator im Anschlusskasten des Wandlers untergebracht ist, muss diese hohe Spannung nicht über das Verbindungskabel geführt werden. Der wesentlichste Vorteil dieser Bauart liegt jedoch in der

Tatsache, dass damit alle das Teilverhältnis beeinflussenden Teile im Teilergehäuse untergebracht sind. Die Verstärker mit den zugehörigen Ausgangstransformatoren können somit beliebig ausgetauscht werden.

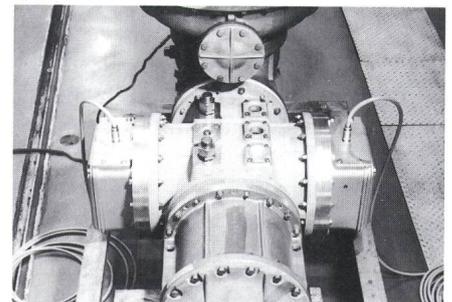
Aus Redundanzgründen wurde der Wandler in doppelter Ausführung als Zwillingsprototyp aufgebaut. Das Ausgangssignal entsteht durch Summierung der Einzelsignale im Ausgangstransformator und steht massiefrei zur Verfügung. Dadurch kompensieren sich Verschiebungen des Hochspannungs-Leiterrohres (1) in ihrer Auswirkung auf die Wandlerantwort.

Störungen im gesamten Signalpfad können durch eine Meldelampe (7) oder auch ein Relais, gespeist von der Differenz der Ausgangssignale, einfach erfasst werden. Mit diesem Quervergleich werden nebst den Verstärkern auch die Teiler miterfasst.

Teiler und Verstärker sind durch Triaxialkabel mit Steueradern miteinander verbunden. Der äussere Mantel übernimmt die Schirmfunktion und führt die Ausgleichsströme. Er bildet als Ausstülpung der Gehäusewände einen allgemeinen Faradaykäfig [4]. Der innere Mantel bildet die Rückleitung des Messkreises und stellt die Erdung der Verstärkerstromkreise sicher. Diese saubere Trennung der beiden Funktionen Schirmung und Messrückleitung ergibt einen hohen Störabstand des Messsignals. Die über den Kopplungswiderstand des äusseren Mantels noch übertragenen Störspannungen treten zwischen den Wicklungen der Ausgangs- und Versorgungstransformatoren auf.

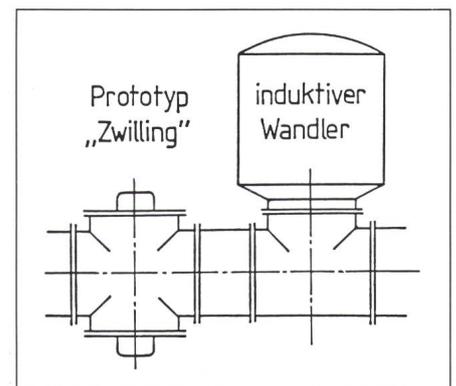
Die das Teilverhältnis nicht beeinflussende Erdkapazität  $C_{2E}$  in Figur 7 wurde noch zusätzlich vergrössert

durch den Einbau von stossfesten Schutzkondensatoren (Fig. 8, Pos. 8). Diese begrenzen die Überspannungen bei transienten Vorgängen, welche oberhalb der Grenzfrequenz des Verstärkers liegen. Bei abgeschaltetem oder abgetrenntem Verstärker bestimmt die Schutzkapazität das Teilverhältnis des nunmehr passiven Teilers. In diesem Fall steht hier eine Spannung von maximal 10 V an.



**Figur 9** Hochspannungsteil des Wandlerprototyps für 245 kV, eingebaut in X-Gehäuse

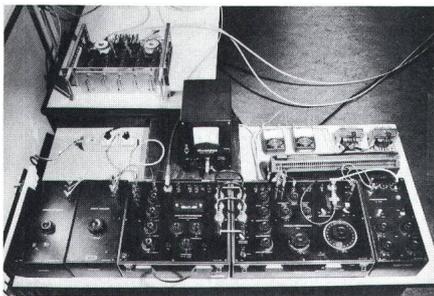
Figur 9 zeigt den in ein X-Gehäuse eingebauten Hochspannungsteil des Wandlerprototyps. Die Gegenkopplungstransformatoren befinden sich in den beiden seitlichen Anschlusskästen.



**Figur 10** Grössenvergleich zwischen einem kapazitiven Zwillingswandler und einem induktiven Wandler

Figur 10 zeigt einen schematischen Grössenvergleich zwischen einem induktiven Spannungswandler und dem kapazitiven Zwillingswandler.

Der Verstärkerteil ist als 19"-Einschub ausgeführt und umfasst fünf Teileinschübe: Versorgung 1, Verstärker 1, Quervergleich, Verstärker 2,



Figur 11 Verstärkerteil (hinten links), angeschlossen an die Wandler-Vergleichsbrücke nach Schering-Alberti (vorne)

Versorgung 2. Figur 11 zeigt den Verstärkerteil in der Versuchsanordnung zur Genauigkeitsmessung, verbunden mit der Wandler-Vergleichsbrücke nach Schering-Alberti.

#### 4. Grundlagenversuche, Dauerversuch unter Laborbedingungen

Zur Untersuchung der Funktionsweise und zur Überprüfung der technischen Daten (Tab. I) wurden am Prototyp folgende Versuche durchgeführt:

##### Variation von Primärspannung und Bürde (Fig. 12)

Der Messfehler nach IEC Publ. 186 im Spannungsbereich zwischen 80 und 120%  $U_n$  und bei 25 bis 100% der Nennbürde liegt innerhalb der Grenzen von  $f_u = \pm 0,08\%$  und  $\delta_u = \pm 1,5'$  (gestrichelte Linie).

Parameter	Bereich	Fehler ( $f_u, \delta_u$ )
Spannung Bürde, $\cos \varphi = 0,8$	80–120% von $U_n$ 25%, 100%	Spannung und Bürde $\pm 0,08\%$ $\pm 1,5'$
Frequenz	99–101% (49,5–50,5 Hz)	$\pm 0,002\%$ $\pm 3'$
Gasdruck	$\pm 100$ kPa	$\pm 0,01\%$
Temperatur	-5 bis +40 °C	$\pm 0,014\%$
Strombelastung	3 kA	$\pm 0,025\%$
$\frac{\Sigma f}{\sqrt{(\Sigma f^2)}}$	(worst case) («Standard»-Fehler-summe)	$\pm 0,131\%$ $\pm 4,5'$ $\pm 0,086\%$ $\pm 3,4'$
Fehlergrenzen nach IEC 186	Klasse 0,1 Klasse 0,2	$\pm 0,1\%$ $\pm 5'$ $\pm 0,2\%$ $\pm 10'$

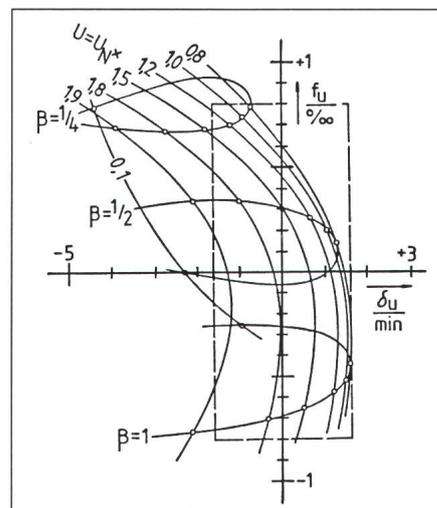
Tabelle II Zusammenstellung des Messfehlers in Funktion der verschiedenen Einflussparameter

##### Frequenzvariation im Netzfrequenzbereich

Bei Frequenzschwankungen zwischen 49,5 und 50,5 Hz liegt der Fehler innerhalb von  $f_u = \pm 0,002\%$  und  $\delta_u = \pm 3'$ .

##### Variation des Gasdrucks

Bei Variation des Gasdrucks wurde eine Änderung der Hochspannungsteilerkapazität von 0,234%/100 kPa, an der Niederspannungskapazität eine solche von 0,225%/100 kPa gemessen. Die Übersetzung des Teilers ändert sich somit um knapp 0,01%/100 kPa.



Figur 12 Fehlerdiagramm bei Variation der Spannung und der Bürde, bei  $\cos \varphi = 0,8$

$f_u$  Amplitudenfehler  
 $\delta_u$  Winkelfehler  
 $\beta$  Bürde  
 $U_n$  Nennbetriebsspannung

##### Temperaturabhängigkeit

Die Messung der Temperaturabhängigkeit der Teilerübersetzung im Klimaraum ergab einen Messfehler von  $\pm 0,014\%$  im Temperaturbereich von -5...+40 °C.

##### Erwärmungsversuch

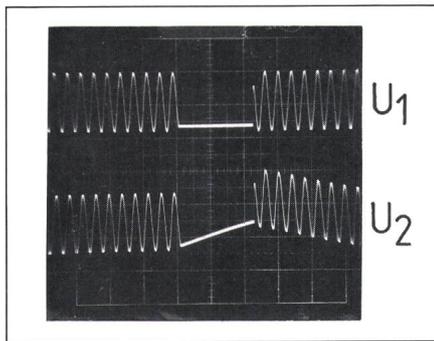
Ein Erwärmungsversuch mit einem Stromdurchfluss von 3 kA ergab durch die entstehende inhomogene Temperaturverteilung Genauigkeitsschwankungen von  $\pm 0,025\%$ .

##### Gesamtfehler

Tabelle II zeigt eine Zusammenstellung aller Messfehler. Addiert man

<b>Hochspannungsteil</b>	
Übersetzung	etwa 200
Hochspannungs-Messkapazität	6,44 nF
Niederspannungs-Messkapazität	1,37 pF
Primärspannung	bis $245/\sqrt{3}$ kV
<b>Verstärkerteil</b>	
Bei Betrieb mit $U_n = 170/\sqrt{3}$ kV (Überspannungsfaktor $1,9 \times U_n$ )	
Ausgangsleistung bei $U_n$	10 VA
Ausgangsleistung bei $1,9 \times U_n$	36 VA
Bei Betrieb mit $U_n = 245/\sqrt{3}$ kV (Überspannungsfaktor $1,2 \times U_n$ )	
Ausgangsleistung bei $U_n$	20 VA
Ausgangsleistung bei $1,2 \times U_n$	29 VA
Frequenzgang:	
30–300 Hz	$< \pm 0,2\%$
30–800 Hz	$< -1\%$
30– 5 kHz	$< -3$ dB
Verstärker:	Leistungs-Operationsverstärker Burr Brown 3572 AM

Tabelle I Technische Daten des Wandlerprototyps



**Figur 13** Oszillogramm einer Aus-Ein-Schaltung, gemessen mit einem kapazitiven Teiler

$U_1$  Spannung auf der Hochspannungsseite  
 $U_2$  Spannung am ohmisch belasteten kapazitiven Teiler

alle Fehler linear, so ergibt sich ein Worst-Case-Gesamtfehler von  $f_u = \pm 0,131\%$  und  $\delta_u = \pm 4,5'$ . Bildet man eine «Standard»-Fehlersumme als Wurzel aus der Summe der Fehlerquadrate, ergibt sich  $f_u = \pm 0,086\%$  und  $\delta_u = \pm 3,4'$ , was der Präzisionsklasse 0,1 entspricht.

#### Verhalten bei transienten Vorgängen

Das Verhalten bei transienten Vorgängen wurde durch Trenner-Schaltversuche, bei welchen sich der Wandler als sehr störfest erwies, und durch Aus-Ein-Schaltungen mit kapazitiver Last untersucht. Figur 13 zeigt das Oszillogramm einer solchen Aus-Ein-Schaltung. Die obere Kurve zeigt das Originalsignal. Nach dem Ausschalten

bleibt an der Kapazität eine Gleichspannung (Trapped Charge) stehen. Die untere Kurve zeigt das Übertragungsverhalten eines kapazitiven Teilers, welcher mit einem hochohmigen Verstärker belastet wurde. Die Trapped Charge führt beim Wiedereinschalten zu einem stark verzerrten Spannungsverlauf.

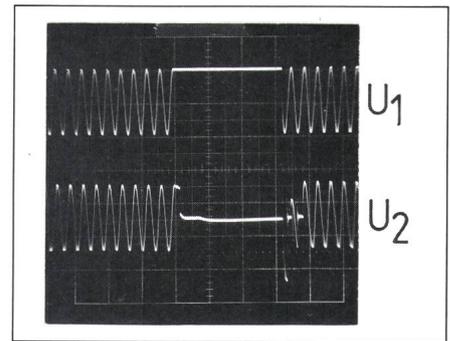
Figur 14 zeigt, wie derselbe Schaltvorgang durch den aktiven Spannungswandler-Prototyp wiedergegeben wird. Bemerkenswert ist die rasche Symmetrierung des Signals beim Wiedereinschalten der Spannung.

#### Dauerversuch

Während zwei Jahren stand der Wandler im BBC-Hochspannungslaboratorium in Oerlikon im Dauerbetrieb. Bei einer Nennleistung von 20 VA und einem Überspannungsfaktor von 1,2  $U_n$  betrug die dauernde Belastung 28,8 VA bei  $\cos \varphi$  von 0,8. Während des gesamten Versuches im intensiven Störklima des Hochspannungslabors sind keine Störungen aufgetreten.

#### Literatur

- [1] P. Matthiessen und U. Weigel: Spannungswandler für Hochspannungsanlagen mit kapazitivem Teiler und elektronischem Messverstärker. Bull SEV/VSE 71(1980)9, S. 450...455.
- [2] H. Bommer: Elektronische Hochspannungswandler. Elektrizitätswirtsch. 78(1979)4, S. 103...104.
- [3] H. Hartmann: Kombiniertes Strom-/Spannungswandler für Einbau in metallgekapselte, SF<sub>6</sub>-isolierte Schaltanlagen. Brown Boveri Mitt. 65(1978)4, S. 240...242.



**Figur 14** Oszillogramm einer Aus-Ein-Schaltung, gemessen mit dem aktiven kapazitiven Teiler

$U_1$  Spannung auf der Hochspannungsseite  
 $U_2$  Spannung am Wandlerausgang

- [4] K. Berger: Notwendigkeit und Schutzwert metallischer Mäntel von Sekundärkabeln in Höchstspannungsanlagen und in Hochgebirgsstollen, als Beispiel der Schutzwirkung allgemeiner Faradaykäfige. Bull. SEV 51(1960)11, S. 549...563.
- [5] M. Kirschvink et F. Plunus: Mesure de tension dans les postes HT extérieurs et dans les postes blindés par diviseur capacitif à amplificateur électronique. Journées Internationales d'étude sur le traitement des données dans les postes à haute tension: Mesures et automatismes. Liège, les 9 et 10 mai 1977.
- [6] J. Lisser: Amplifier-type voltage transformer, design and experience. IEE Journal on Electric Power Applications 2(1979)5, p. 174...178.
- [7] J.M. Houston: New techniques for current and voltage measurement on power transmission lines, Report Nr. 77 CRD 111. Schenectady, General Electric Company; Corporate Research and Development, May 1977.
- [8] M. Groenenboom and H.A.J.M. Spoorenberg: The ESPOM, a capacitor-coupled electronic voltage transformer. Smit-Meddelingen (Netherlands) 24E(1969)4, p. 223...232.



