

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:	71 (1980)
Heft:	21
Artikel:	Kunststoffkabel für Elektrofilter
Autor:	Weber, B. W.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-905302

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: 23.01.2026

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

Kunststoffkabel für Elektrofilter

Von B. W. Weber

621.315.221.8:678

Elektrostatische Staubfilter zur Reinigung von Abgasen haben grosse Bedeutung erlangt. Die Gleichstromspeisekabel werden bei jeder Entladung des Filters starken Überspannungen ausgesetzt. Kunststoffkabel reagieren empfindlich auf Überspannungen. Mit einer an der ETHZ entwickelten Messeinrichtung wurden in einem Zementwerk Amplitude und Frequenz der das Speisekabel durchlaufenden Spannungswellen gemessen. Dank der Entwicklung spezieller Kunststoff-Elektrofilterkabel konnte auch die Qualität der gewöhnlichen Kunststoff-Netzkabel verbessert werden.

Les filtres électrostatiques servant à l'épuration de gaz d'échappement ont pris une grande importance. A chaque décharge dans le filtre, le câble d'alimentation en courant continu subit de fortes surtensions, auxquelles ceux à isolation synthétique sont très sensibles. Dans une cimenterie, l'amplitude et la fréquence des ondes de tension parcourant le câble ont été mesurées au moyen d'un équipement conçu à l'EPFZ. Grâce au développement de câbles spécialement prévus pour ces filtres, la qualité des câbles à isolation synthétique a pu être également améliorée.

1. Elektrostatische Staubfilter

Durch die immer höheren Anforderungen an die Technik und die starke Industrialisierung wird unsere Umwelt belastet. Gleichzeitig werden die gesetzlichen Vorschriften für die in die Luft entweichenden Abgase aus ökologischen Gründen zunehmend schärfster. Eine der besten Möglichkeiten, grosse Abgasmengen zu reinigen und zu entstauben und die hässlichen Rauchfahnen an manchen Hochkaminen zum Verschwinden zu bringen, ist der Einsatz von Elektrofiltern. Dadurch ist es möglich, je nach Betriebsbedingungen hohe Wirkungsgrade bis nahezu 100% zu erzielen und auch sehr kleine Staubpartikel, bis hinab zu den Abmessungen kolloidaler Teilchen, abzuscheiden, die durch andere Filtereinrichtungen kaum aufgehalten würden.

Die prinzipielle Trennwirkung des Elektrofilters sei an Hand der schematischen Darstellung in Figur 1 erläutert. Der Elektrofilter besteht aus parallel angeordneten Niederschlags-elektroden, die gemeinsam mit dem Gehäuse geerdet sind. Sie bilden Gassen, durch die das zu reinigende Gas mit einer Geschwindigkeit zwischen 1 und 4 m/s strömt. In der Mitte der Gassen befinden sich Sprühelektroden, die sind dünne Drähte oder mit Spitzen versehene Metallbänder, die negativ gepolt sind und von Isolatoren getragen werden. Bei den heute üblichen Gassenabständen von 20 bis 30 cm beträgt die zwischen den Elektroden angelegte Gleichspannung etwa 30 bis 70 kV.

In unmittelbarer Umgebung der Sprühelektroden ergeben sich besonders hohe Feldstärken. Ab einer bestimmten Spannung kommt es zu Koronaentladungen, die zur Bildung negativ geladener Gasionen führen. Die Gasionen wandern zur

Niederschlagselektrode und bewirken damit einen geringen elektrischen Stromfluss (Sprühstrom). Ein Teil dieser Gasionen lagert sich an den Feststoff- bzw. Flüssigkeitsteilchen an, so dass diese ebenfalls negativ aufgeladen und zu der Niederschlagselektrode verschoben werden. Eine Abscheidung aus dem trockenen Gas führt zu Staubbelaugen, die in bestimmten Zeitabständen durch Abklopfen mittels Hammerschlag von den Niederschlagselektroden entfernt werden müssen. Gleichzeitig bilden die Staubpartikel zwischen den Elektroden Brücken, über die eine Entladung stattfinden kann. Der dabei auftretende Spannungsimpuls wandert im Speisekabel weiter, wird reflektiert und bildet eine Wanderwelle.

Elektrofilter werden in vielen Industriezweigen eingesetzt, vor allem bei Verbrennungsanlagen, in der chemischen Industrie und in Zement- und Hüttenwerken [2]. In den Entstaubungsanlagen der Zementindustrie werden pro Stunde zwischen 75000 und 350000 m³ Gas entstaubt. Das Rohgas enthält bis 500 g Feststoffe pro m³, das gereinigte Gas nach dem Elektrofilter nur noch 75 mg. Es werden also pro Stunde viele Tonnen Staub aus dem Abgas der Öfen zurückgehalten.

2. Elektrofilterkabel

Je nach Grösse der Anlage ist die Gleichrichteranlage mit einem 20 bis 100 m langen Gleichstromkabel mit dem Elektrofilter verbunden. In Figur 2 ist eine solche Entstaubungsanlage schematisch dargestellt. Das Gleichstromkabel wird beim Reinigungsdurchschlag im Filter mehrmals pro Minute starken Überspannungen ausgesetzt. Eine solch extreme Beanspruchung tritt bei gewöhnlichen Netzkabeln nur äusserst selten auf.

Seit vielen Jahren werden papierisierte und mit Masse imprägnierte Bleikabel als Zuleitungskabel für Elektrofilter eingesetzt. Vor etwa zehn Jahren wurde die relativ dünnflüssige Imprägniermasse durch eine Haftmasse ersetzt. Damit konnte das Problem der Massenabwanderung im oberen Endverschluss beim Filter gelöst werden. Zu den neueren Kabelkonstruktionen gehören die kunststoffisierten Filterkabel mit Polyäthylen- oder vernetzter Polyäthylen (Sioplas)-Isolation. Als Hauptvorteil wird die einfachere Verlegungsart dieser Kabel geschätzt, sowie der trockene, lageunabhängige Endverschluss, der nicht senkrecht montiert werden muss. In Figur 3 sind beide Varianten, das Papierkabel sowie das Kunststoffkabel, im Querschnitt dargestellt. Dabei fällt vor allem die kleinere Außenabmessung des Kunststoffkabels auf, die hauptsächlich von der kleineren Isolationsdicke herröhrt.

Für das Errichten von Elektrofilteranlagen existiert eine deutsche Norm VDE 0146/3.80. Dort sind auch die Prüfbedin-

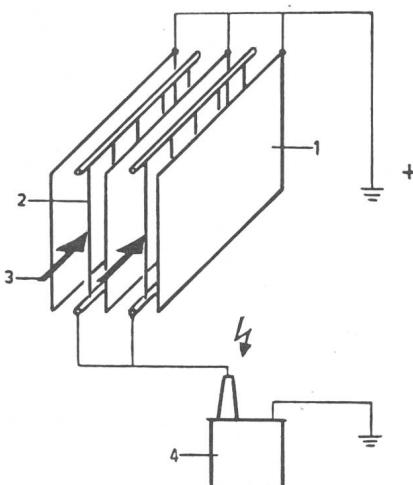


Fig. 1 Grundschema eines Plattenelektrofilters (1)

- | | |
|--------------------------|---------------------------|
| 1 Niederschlagselektrode | 3 staubbeladener Gasstrom |
| 2 Sprühelektrode | 4 Spannungsumsetzanlage |

Bevorzogene Spannungen

Tabelle I

Nennspannung	kV	36	50	68	90	150
Leerlaufspannung	kV	58	80	111	148	244

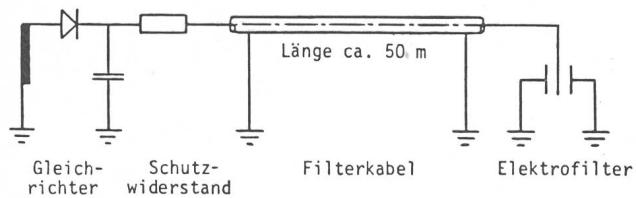


Fig. 2 Schema einer Elektrofilteranlage

gungen der Kabel festgelegt. Die Prüfwechselspannung entspricht der Leerlaufspannung (Scheitelwert der Ausgangsspannung des Gleichrichters im unbelasteten Zustand, Tab. I) und die Stoßspannung bei der Typenprüfung der 4,5fachen Leerlaufspannung. Die in Figur 3 dargestellten Kabel sind für eine maximale Leerlaufspannung von 111 kV konstruiert und werden mit einer Stoßspannung von 500 kV geprüft. Der maximale Gradient am inneren Halbleiter des Kunststoffkabels erreicht bei dieser Spannung 87 kV/mm, bei der 50-Hz-Prüfung 20 kV/mm. Diese Prüfbeanspruchung ist wesentlich höher als zurzeit noch bei Kunststoff-Netzkabeln üblich. Bei einem 45-kV-Kabel, das ungefähr die gleiche Isolationsdicke aufweist wie das Filterkabel, beträgt sie je nach Leiterquerschnitt zwischen 8 und 12 kV/mm.

3. Entwicklung der Kunststoffkabel

Die in den Jahren 1960–1970 fabrizierten Versuchskabel mit Polyäthylenisolation genügten der Forderung nach langer Lebensdauer noch nicht. Alle Versuchskabel schlugen im Betrieb mit Elektrofiltern innerhalb einiger Monate durch, obwohl sie zuvor die damals vorgeschriebenen Typen- und Routineprüfungen bestanden hatten. Auch die Verstärkung der inneren Halbleiterschicht über dem Leiter zur erhöhten Dämpfung der Überspannungen führte nicht zum Ziel.

Der Ersatz des Kupferleiters durch den Stahlleiter brachte eine kostengünstigere Lösung ins Gespräch. Hauptgrund für die Einführung eines Leiters aus einem magnetischen Material war jedoch, die hochfrequenten Impulsspitzen, die durch Überlagerung von am Kabelende reflektierten Impulsen entstehen, zu dämpfen. Für die Übertragung des Gleichstromes genügt der Stahlleiter mit einem Querschnitt von 50 mm^2 volllauf. Dieser grosse Querschnitt wurde gewählt, um die Feldstärke am Übergang zwischen innerem Halbleiter und der Isolation gering zu halten. Die Dämpfung der Impulsspitzen durch den hohen induktiven Widerstand des Stahlleiters hat den Zweck, die Kunststoffisolation von der Beanspruchung durch Überspannungen zu entlasten. Gleichzeitig mit der Einführung des Stahlleiters wurden eine Reihe von technologischen Verbesserungen bei der Kunststoffkabelherstellung durchgeführt. Es ist deshalb heute schwierig, aus der Praxis abzuleiten, welchen Einfluss der Stahlleiter auf die Verlängerung der Lebensdauer von Elektrofilterkabeln aufweist und in welchem Masse andere Faktoren beigetragen haben.

Die Verbesserungen bei der Herstellung der vernetzten Polyäthylenkabel hatten folgende Hauptziele:

- Vermeidung von Verunreinigungen in der Isolation

– Erzielung einer spiegelglatten Oberfläche auf der inneren Halbleiterschicht

– Vermeidung von Mikro-Hohlräumen in der Isolation

Das erste Ziel wird erreicht durch eine Vorreinigung des Polyäthylengranulates und Filterung der Schmelze im Extruder sowie durch saubere Fabrikationsanlagen und spezielle Vorsichtsmaßnahmen im fabrikatorischen Ablauf. Auch die spiegelblanken Oberflächen erzielt man durch ein optimales Zusammenwirken zwischen Materialeigenschaften und Extrusionsparametern. Die Mikrohohlräume werden klein gehalten durch den Einsatz von rechnergesteuerten Trockenvernetzungsanlagen, d.h. durch Vermeidung von Dampfdruck bei der Vernetzung des Polyäthylen oder durch die Anwendung des drucklosen Sioplas-Vernetzungsverfahrens [3].

4. Messungen der transienten Vorgänge an Elektrofilterkabeln

Um die Entwicklung der Kunststoffkabel voranzutreiben, war es nötig, die Ursache für die Durchschläge der Versuchskabel herauszufinden. Ein wesentlicher Bestandteil dazu war die genaue Kenntnis des Spannungsverlaufs im Filterkabel bei den Reinigungsüberschlägen. Mit den klassischen Ausrüstungen im Hochspannungslabor war es nicht möglich, diese kurzzeitigen Vorgänge einfach zu registrieren. Dem Laboratorium für Hochspannungstechnik an der ETHZ wurde deshalb der Auftrag erteilt, diese Messungen im Betrieb einer Elektrofilteranlage durchzuführen. Dort wurde im Rahmen einer Doktorarbeit [4] ein digitales Datenerfassungsgerät entwickelt, das für den Einsatz zur automatischen Messung von hochfrequenten, transienten Signalen in der Hochspannungstechnik bestimmt ist. Die Messanordnung ist in Figur 4 dargestellt. Die pulsierende Gleichspannung wird durch die Messung des

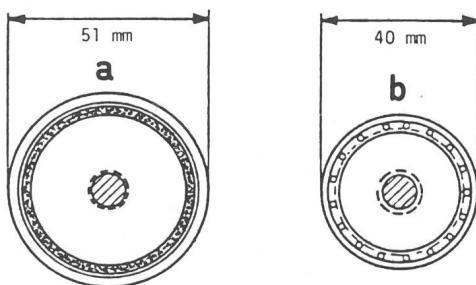


Fig. 3 Elektrofilterkabel-Querschnitte

a) Papierbleikabel PPb-CT

Kupferleiter	$19 \times 1,78 \text{ mm}$
3 Halbleiterpapiere	0,3 mm
Imprägnierte Papiere	14,7 mm
Halbleiter-, Hochstädtterpapier	
Bleimantel	2,3 mm
Halbleitendes PVC-Band	
2 verzinkte Eisenbänder	
PE-Mantel	2,4 mm
Kapazität	$0,13 \mu\text{F}/\text{km}$
Induktivität	$0,3 \text{ mH}/\text{km}$
Gleichstromwiderstand	$0,38 \Omega/\text{km}$

b) Kunststoffkabel TKT oder XKX

Stahlleiter	$19 \times 1,8 \text{ mm}$
Innerer Halbleiter	1 mm
PE- oder XLPE-Isolation	10 mm
Äusserer Halbleiter	1 mm
Kupferdrahtschirm	$17 \times 1,38 \text{ mm}$
Kupferband	$15 \times 0,1 \text{ mm}$
PE- oder XLPE-Mantel	1,8 mm
Kapazität	$0,12 \mu\text{F}/\text{km}$
Induktivität	$0,3 \text{ mH}/\text{km}$
Gleichstromwiderstand	$3,3 \Omega/\text{km}$

Fig. 4

Messanordnung

- R Messwiderstand 140 MΩ
 T Gedämpfter kapazitiver Spannungsteiler
 Übersetzungsverhältnis 1:1080
 Tr Isoliertransformator
 B Ausgelegtes Erdungsblech

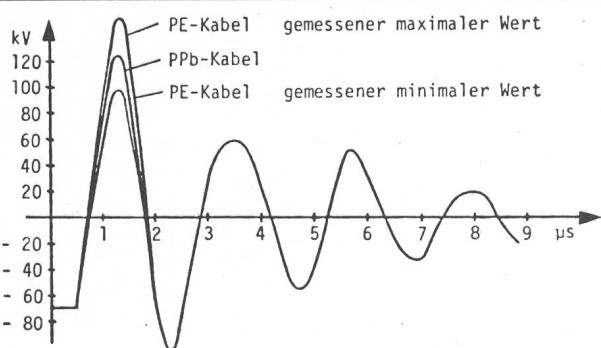
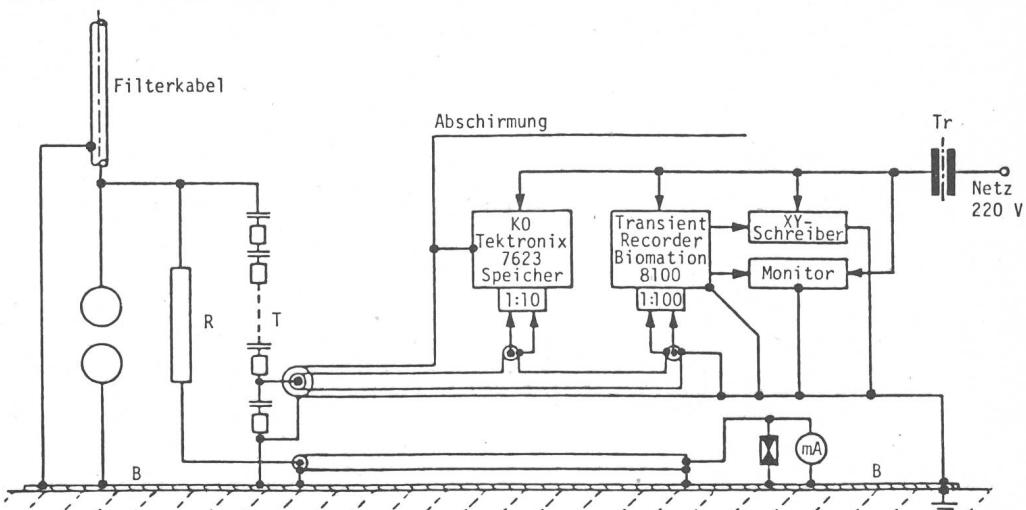


Fig. 5 Gedämpfte Schwingungen gemessen am Eingang des Filterkabels

Nennspannung 68 kV

Stromes durch einen hochohmigen Widerstand bestimmt. Die schnellen Vorgänge werden über einen gedämpften kapazitiven Spannungsteiler einerseits auf dem Speicheroszillographen und anderseits im digitalen Transient-Recorder registriert.

Beim digitalen Transient-Recorder wird das Analogsignal in ein Digitalsignal umgewandelt und die Folge von binären Daten in einem MOS-Schieberegister gespeichert. Die gespeicherte Information wird anschliessend wieder in analoger Form auf dem XY-Schreiber herausgeschrieben. Der Vorteil dieses Registriergerätes ist die Möglichkeit, schnelle Vorgänge vom Start des transienten Vorgangs an zu registrieren, ohne einen wertvollen Teil des Signals durch die Triggerverzögerung zu verlieren und sogar noch die Vorgänge unmittelbar vor dem Auftreten des Ausgleichsvorgangs zu betrachten.

Figur 5 zeigt typische Messresultate aus einer Meßserie an einem Papier- und einem Kunststoffkabel der gleichen Länge, die in der gleichen Elektrofilteranlage eines Zementwerkes, aber als Zuleitungskabel zu zwei verschiedenen Filterkammern, eingebaut waren. Beim Kunststoffkabel variierte der Überschwingfaktor zwischen 1,4 und 2,2 (unterschiedliche Belastung der beiden Filterkammern), während er beim Papierkabel konstant 1,8 betrug. Der Ausgleichsvorgang verlief bei beiden Kabeln praktisch gleich. Die Frequenz der gedämpften Schwingung, die im wesentlichen durch die Länge der Kabel bestimmt ist, betrug 500 kHz, die Spannungsdifferenz zwischen dem ersten und zweiten Scheitelwert ungefähr 200 kV. Die Messungen haben gezeigt, dass es sich bei den Überspannungen

um Wanderwellen, also Laufzeitphänomene innerhalb des Filterkabels handelt. Beim Durchschlag im Filter (Kabelende) läuft eine steile Wanderwelle zum Kabeleingang zurück. Wegen des relativ hochohmigen Schutzwiderstandes zwischen Filterkabel und Speisegleichrichter wird diese Wanderwelle am Kabeleingang reflektiert bzw. mit umgekehrtem Vorzeichen addiert und läuft dann wieder zum kurzgeschlossenen Kabelende zurück usw. Die gemessene Frequenz der gedämpften Schwingung stimmt gut mit der aus den Laufzeiten berechneten überein.

5. Schlussfolgerungen

Die aufwendigen Verbesserungen auf dem Gebiet der Kunststoffkabelfabrikation haben es ermöglicht, Kunststoffkabel für Elektrofilter herzustellen, die eine ähnliche Lebensdauer haben werden wie die Papierkabel. Dieses Resultat wurde aus einer Reihe von Versuchskabeln und Langzeitversuchen über 5 Jahre abgeleitet. Das neue Kunststoffkabel mit einem Stahl- statt einem Kupferleiter und einer dünneren Isolation ist leichter, montagefreundlicher und kostengünstiger geworden als das entsprechende Papierbleikabel. Die Messungen der Wanderwellenüberspannungen an Filterkabeln an Staubabscheidern in einem Zementwerk zeigten kurzzeitige gedämpfte Schwingungen einer Frequenz von 500 kHz und mit maximalen Spannungen von rund 200 kV bei einem 70 kV Gleichstromkabel. Die hohen 50-Hz-Prüfspannungen von 111 kV während 15 min sowie die Typenprüfung mit 500-kV-Stossimpulsen sind durch die strengen Betriebsbedingungen im Filterbetrieb bei elektrostatischen Staubabscheidern gerechtfertigt. Die Erfolge bei der Verbesserung der Kunststoffkabel für Elektrofilter können auch auf die anderen Netzkabel übertragen werden, die unter gleichen Bedingungen mit den gleichen Herstellungsverfahren fabriziert werden.

Literatur

- [1] G. Mayer-Schwinning und R. Rennhack: Neuere Erkenntnisse und Anwendungen bei der elektrischen Abscheidung von Stäuben und Nebeltröpfchen. Chemie-Ingenieur-Technik 52(1980)5, S. 375...383.
- [2] C. Scheidel: Elektrofilter in der Industrie. Bull. SEV 54(1963)10, S. 359...368.
- [3] B. W. Weber: Das Sioplaskabel, ein vernetztes Polyäthylenkabel. Bull. SEV/VSE 69(1978)2, S. 62...66.
- [4] P. Wiesendanger: Automatische, digitale Aufzeichnung und Auswertung von transientes Signalen in der Hochspannungstechnik. Dissertation der Eidgösischen Technischen Hochschule Zürich, Nr. 5863, 1977.

Adresse des Autors

B. Weber, dipl. Ing. ETH, Kabelwerke Brugg AG, 5200 Brugg.