

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:	69 (1978)
Heft:	2
Artikel:	Brandsichere Kabel
Autor:	Briker, H.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-914835

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: 15.01.2026

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

Brandsichere Kabel

Von H. Briker

621.315.2:614.848;

Durch Modifikation von bekannten und für die Kabelfertigung geeigneten Isolier- und Mantelmaterialien wurden schwerentflammbar, halogenfreie und wärmeformbeständige Polymerwerkstoffe entwickelt. In vergleichenden Versuchen wird gezeigt, dass es möglich ist, Kabel herzustellen, die einen lokalen Brand nur mit minimaler Geschwindigkeit weiterleiten und dabei keine korrosiven Gase und Dämpfe entwickeln. Im weiteren liegen Resultate vor über die Funktionstüchtigkeit im Brand- und Überlastfall.

Par une modification des matières isolantes connues et aptes à la fabrication de câbles, des matières en polymère ne contenant pas d'halogènes, résistant aux flammes et possédant une bonne résistance à la déformation sous chaleur ont été développées. Des essais comparatifs prouvent qu'il est possible de produire des câbles qui transmettent le feu avec une vitesse minimale et qui ne dégagent pas de gaz ou de vapeurs corrosives. Des résultats concernant l'aptitude de fonctionnement en cas d'incendie et de surcharge sont présentés.

1. Brandursachen und Folgeerscheinungen

Kabel stellen bei Brandfällen in doppelter Hinsicht bedeutsame Objekte dar: Einerseits beeinflusst ihr Weiterfunktionieren oder Versagen beim Ausbruch eines Brandes die Rettungs- und Löscharbeiten oft in entscheidendem Masse. Anderseits stellen sie, als langgestreckte Verbindungselemente, die oft durch Steigschächte und Kanäle führen, eine besondere Gefährdung bezüglich Brandweiterleitung dar. Betrachtet man alle Schadensfälle, bei denen Kabelanlagen beteiligt sind, so stellt man fest:

Es sind sehr wenig Fälle bekannt, wo Kabel einen Brand ausgelöst haben. Eine Brandentstehung durch innere Ursachen, d.h. durch Überlast oder Kurzschluss, ist zwar möglich, aber sehr selten. Die meisten Kabelbrände sind durch externe Ursachen, d.h. durch Einwirkung von Feuer oder Wärmestrahlung ausgelöst worden.

Tabelle I zeigt eine schematische Darstellung der heute bestehenden Verhältnisse und möglichen Brandursachen und

Folgeerscheinungen. Die Problematik der Kabelbrände und die damit verbundenen Diskussionen drehen sich um folgende Punkte:

Korrosionsschäden: Halogenhaltige Kabelisoliermaterialien spalten bei hohen Temperaturen korrosive Gase ab. Die durch Korrosion hervorgerufenen Schäden können das ursprüngliche Schadenmass um ein Mehrfaches übersteigen.

Qualmbildung, toxische Gase: Beim Verbrennen von Isoliermaterialien können dichter Rauch und toxische Gase entstehen, die den Einsatz der Löschmittel erschweren und die Flucht von Personen behindern.

Weiterleitung des Brandes: Sind Kabel aus leicht brennbaren Materialien aufgebaut und fehlen entsprechende Schutzzonen, so kann sich ein lokaler Brand entlang von Kabelanlagen ausbreiten.

Funktionstüchtigkeit unter extremen Bedingungen: Der Ausfall eines Kabelsystems kann unabsehbare Folgen haben. Es gibt Anlagen, bei denen Kabel unter extremen Bedingungen wie Überlast, Kurzschluss, Flammeneinwirkung, Wasserdampfeinbruch usw. über eine gewisse Zeit funktionstüchtig bleiben müssen.

Selbstentzündungsgefahr: Im Zusammenhang mit Starkstromanlagen taucht immer wieder die Frage auf, ob Kabel unter extremen Betriebsbedingungen einen Brand auslösen können.

2. Einsatz von brandsicheren Kabeln

Der Einsatz von speziellen, brandsicheren Kabeln erscheint dort notwendig, wo mindestens einer der nachfolgend aufgeführten Punkte zutrifft.

- Gebäude und Anlagen mit hoher Personenbelegung und begrenzten Fluchtmöglichkeiten, z.B. Hochhäuser, Warenhäuser, Hotels, Theater, Zivilschutzanlagen, Strassentunnels.
- Gebäude und Anlagen mit hoher Sachwertkonzentration, z.B. Industrieanlagen, EDV-Anlagen, Museen.

- Anlagen, bei denen hohe Betriebsausfallkosten entstehen können, z.B. Elektrizitätswerke, Industrieanlagen.

- Anlagen, für welche höchste Sicherheitsanforderungen gestellt werden, z.B. Kernkraftwerke, Ölraffinerien, Bohrinseln, Flugzeuge, Schiffe, Sprengstofffabriken.

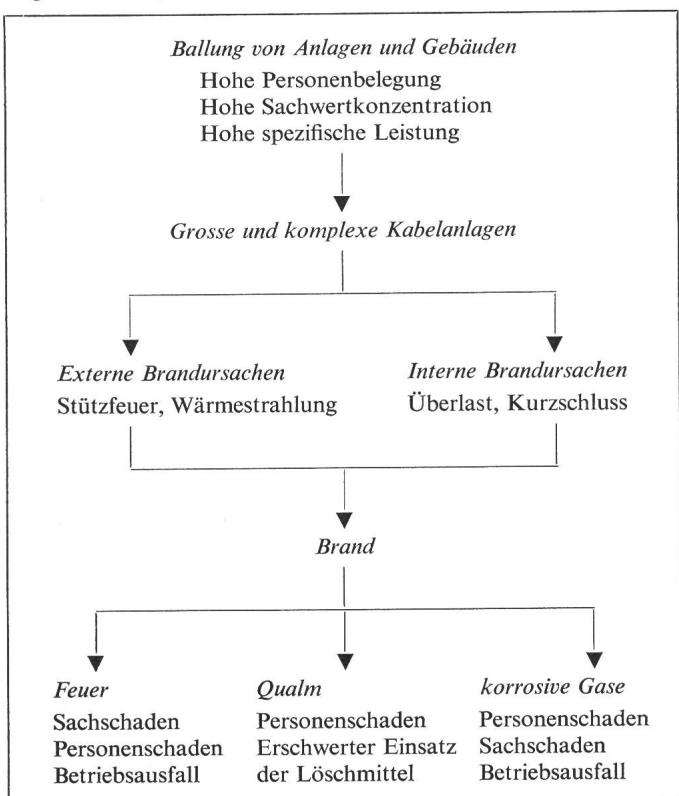
3. Anforderungen, Spezifikationen, Prüfmethoden

3.1 Allgemeine Anforderungen

Wenn hier von brandsicheren Kabeln die Rede ist, so handelt es sich nicht um feuerfeste Kabel, sondern um Kunststoffkabel, die erhöhten Sicherheitsanforderungen genügen müssen.

Kabelanlagen: Verhältnisse, Brandursachen, Folgeerscheinungen

Tabelle I



Anforderungen an ein brandsicheres Kabel

Tabelle II

Betriebsfall	Eigenschaft
Verlegung, Installation	Einfache Handhabung Mechanische Festigkeit
Normalbetrieb	Optimale elektrische Eigenschaften Alterungsbeständigkeit, d.h. Resistenz gegen verschiedene Umgebungseinflüsse
Notbetrieb	Funktionstüchtigkeit bei Überlast Funktionstüchtigkeit bei erhöhter Umgebungstemperatur Funktionstüchtigkeit bei mechanischer oder chemischer Beanspruchung Erhöhte Kurzschlussfestigkeit
Brandfall	Keine Brandfortleitung Keine korrosiven Spaltprodukte Wenig Rauchentwicklung Funktionstüchtigkeit über eine begrenzte Zeit

Diese Kabel sollen in den verschiedensten Ausführungen und Querschnitten hergestellt werden können und zu einem wirtschaftlich verantwortbaren Preis erhältlich sein. Die Anforderungen an ein solches Wunschkabel sind vereinfacht in Tabelle II zusammengestellt.

3.2 Kabelspezifikationen

Versucht man, die gestellten Anforderungen zu quantifizieren, d.h. in einer Kabelspezifikation festzulegen, stellt man dreierlei fest: Einerseits müssen die Kabelhersteller neue Isolier- und Mantelmaterialien entwickeln oder bis anhin nicht übliche Materialkombinationen einsetzen. Aus der Sicht des Anwenders und des Sicherheitsverantwortlichen sollte anderseits ein solches Kabel bekannten und bewährten Kabelspezifikationen entsprechen und zusätzlich erhöhten Sicherheitsanforderungen genügen. Dazu kommt, dass die bekannten nationalen und internationalen Kabel-Spezifikationen sehr oft Werte vorschreiben, die spezifisch auf die bis heute verwendeten Isolier- und Mantelmaterialien zugeschnitten sind.

Folgende Abweichungen von bekannten Spezifikationen sowie neue Anforderungen sind denkbar:

Kabelaufbau: Isolations- und Mantelwandstärken sowie Aussendurchmesser können von den bestehenden Spezifikationen abweichen.

Elektrische Eigenschaften: Es ist zusätzlich sicherzustellen, dass Kabel auch bei den maximal zulässigen Dauer- und Notbetriebstemperaturen elektrisch funktionstüchtig sind.

Mechanische Eigenschaften: Abweichungen von den bestehenden PVC- oder Gummikabel-Spezifikationen sind möglich. Je nach Verwendungszweck haben die heute üblichen Angaben über Zugfestigkeit und Bruchdehnung der verwendeten Materialien mehr oder weniger grosse Bedeutung.

Thermische Eigenschaften: Als wichtigste Eigenschaft muss hier die Wärmeformbeständigkeit des Isoliermaterials genannt werden. Wenn diese Bedingung erfüllt wird, ist die Funktions tüchtigkeit im Überlast- oder Kurzschlussfall weitgehend sichergestellt und damit auch die Selbstentzündungsgefahr auf ein Minimum beschränkt.

Brandfortleitung: Ein lokal entstandener Brand soll sich längs der Kabel nicht oder nur mit geringer Geschwindigkeit ausbreiten können. Je nach Anwendungsfall und Qualität der vorgesehenen Schottungen stellt sich diese Forderung verschieden hoch.

Korrosive Spaltprodukte: Die bei Flammeneinwirkung, Hitzestrahlung oder extremen Leitertemperaturen entstehenden Spaltprodukte dürfen keine stark korrosiven Gase und Dämpfe enthalten. Bei diesen korrosiven Spaltprodukten handelt es sich fast durchwegs um Halogenverbindungen, die ihrerseits eine gewisse flammhemmende Wirkung zeigen. Bis heute standen Halogenfreiheit und minimale Brandfortleitung gewissermassen im Widerspruch zueinander. Wenn Korrosionsschäden als Brandfolgeerscheinung weitgehend vermieden werden sollen, muss der Halogengehalt der verwendeten Materialien, d.h. der Gehalt an Fluor, Chlor oder Brom möglichst tief gehalten werden.

Toxische Spaltprodukte: Bei der Verbrennung von organischen Materialien entstehen Spaltprodukte, deren Art und Konzentration von Materialart, -menge und von den Brandbedingungen abhängig sind. Es ist bekannt, dass Chlorverbindungen, wie sie bei der Verbrennung von chlorhaltigen Kunststoffen entstehen, ebenso gefährlich oder gefährlicher sind als das praktisch bei jedem Brand entstehende Kohlenmonoxid. Als besonders toxisch werden Fluorverbindungen bezeichnet, die bei der Zersetzung von Fluorkunststoffen entstehen. Durch den Einsatz halogenfreier Kabelmaterialien kann das «Toxizitäts-Risiko» zwar verringert werden, Brandgase stellen aber immer eine gewisse Gefahr dar.

Qualmbildung: Auch das Entstehen von Qualm hängt von Materialart, -menge und Brandbedingungen ab. Bei sog. Schmelzbränden ist die Qualmbildung am stärksten. Spezifizieren lassen sich hier nur Relativwerte, die unter genormten Bedingungen ermittelt werden.

Funktionstüchtigkeit im Brandfall: Wird eine Kabelanlage durch einen lokalen Brand betroffen, so sollte diese je nach ihrer Bedeutung noch über eine gewisse Zeit funktionstüchtig bleiben. Diese Forderung hat für Kunststoffkabel ihre Grenzen. Für einzelne Anlageteile wie z.B. Notstromversorgung, Beleuchtung, Ventilation usw. bringen Kabel, die im Brandfall über die ersten entscheidenden 20 min funktionstüchtig bleiben, einen echten Sicherheitsbeitrag.

4. Untersuchungen und Resultate

4.1 Isolier- und Mantelmaterialien

Um die für ein brandsicheres Kabel aufgestellten Anforderungen weitgehend erfüllen zu können, mussten entsprechende Isolier- und Mantelmaterialien entwickelt werden. Aus nahe liegenden Gründen wurde in erster Linie einmal versucht, bekannte und für die Kabelfertigung geeignete Polymere und Polymermischungen zu modifizieren. Im einzelnen kamen folgende Prüfungen zur Anwendung:

SEV TP 201 (CEI 540)	Spannungsprüfung, Isolationswiderstand Wärmedruckfestigkeit, Zugfestigkeit
ISO 816	Weiterreissfestigkeit Delft
DIN 53505	Härte
ASTM 2863	Schwerentflammbarkeit Oxygen-Index
CEI 332	Flammprüfung
VKFA	Prüfung von Baustoffen, Richtlinien der kantonalen Feuerversicherungsanstalten für Qualmbildung, Lichtabsorption Chemische Analyse für Halogengehalt

Eigenschaften	PVC _n	XLPE _n	PVC _{wt}	EPDM _f	XLPE _f	SIR _f
Spannungsprüfung 3500 V bei 90 °C	+	+	+	+	+	+
Isolationswiderstand bei 90 °C	0.05 MΩ · km	20	0.07	10	10	150
Wärmedruck, Wandstärkeverminderung bei 110 °C	%	<5	15	<5	<5	<5
Wärmedruck, Wandstärkeverminderung bei 150 °C	%	50	12	6	10	<5
Dauerwärmestabilität °C	100	90	90	90	90	175
Korrosivität: Halogengehalt %	25	0	27	0	0	0
Qualmbildung: Lichtabsorption %	80	50	60	10	15	5
Entflammbarkeit: Oxygen-Index %	24	19	32	28	26	28
Flammprüfung	—	—	+	+	+	+
Materialpreis (Volumenpreis)	PVC _n = 100%	%	100	140	150	200
						800

+ bestanden, - nicht bestanden

4.1.1 Isoliermaterialien

Für die Beurteilung der Isoliermaterialien wurden folgende Hauptkriterien gewählt: elektrische Eigenschaften (Isolationswiderstand, Spannungsfestigkeit); thermisches Verhalten (Wärmedruckfestigkeit, Dauerwärmestabilität); Brandverhalten (Korrosivität der Brandgase, Qualmbildung, Schwerentflammbarkeit); Wirtschaftlichkeit (Materialpreis und Verarbeitungskosten). Die Gewichtung dieser Anforderungen wurde aufgrund folgender Überlegungen vorgenommen: Ein Isoliermaterial muss in erster Linie optimale elektrische Eigenschaften und Wärmedruckfestigkeit aufweisen. In zweiter Linie sollte ein möglichst gutes Brandverhalten realisiert werden.

Tabelle III zeigt eine Zusammenstellung der Resultate, die mit verschiedenen modifizierten Isoliermaterialien erzielt wurden. Im Vergleich dazu sind auch die Eigenschaften von zwei normalen, d.h. nicht speziell «brandsicheren» Materialien aufgeführt. Die Prüfung erfolgte, soweit möglich, an isolierten Leitern von 1,5 mm² Cu-Querschnitt. Im einzelnen wurden untersucht:

PVC _n	Polyvinylchlorid weich; Standardmischung ohne besondere Wärmebeständigkeit und Schwerentflammbarkeit
XLPE _n	Vernetztes Polyäthylen Standardqualität, hell gefüllt, ohne besondere Schwerentflammbarkeit
PVC _{wt}	Polyvinylchlorid weich, wärmebeständig und schwerentflammbar
EPDM _f	Ethylen-Propylen-Kautschuk, schwerentflammbar und halogenfrei
XLPE _f	Vernetztes Polyäthylen, schwerentflammbar und halogenfrei
SIR _f	Silikon-Kautschuk, schwerentflammbar und halogenfrei

4.1.2 Mantelmaterialien

Als Hauptbeurteilungskriterien wurden aufgestellt: Brandverhalten (Schwerentflammbarkeit, Korrosivität der Brandgase, Qualmbildung); mechanische Eigenschaften (Zugfestigkeit, Kerbzähigkeit, Härte, Flexibilität); thermisches Verhalten (Dauerwärmestabilität); Wirtschaftlichkeit (Materialpreis inkl. Verarbeitungskosten). Für die Gewichtung dieser Anforderungen war massgebend: Ein Mantelmaterial muss vor allen Dingen resistent sein gegen Umgebungseinflüsse. Dabei rückt in diesem Fall das Brandverhalten an die erste Stelle.

Tabelle IV zeigt eine Zusammenstellung der Resultate, die mit verschiedenen modifizierten Mantelmaterialien erzielt wurden. Zum Vergleich sind wiederum zwei Standardmaterialien aufgeführt. Die Prüfung erfolgte an extrudierten Mantelschläuchen. Neben den bereits erwähnten Materialien wurden untersucht:

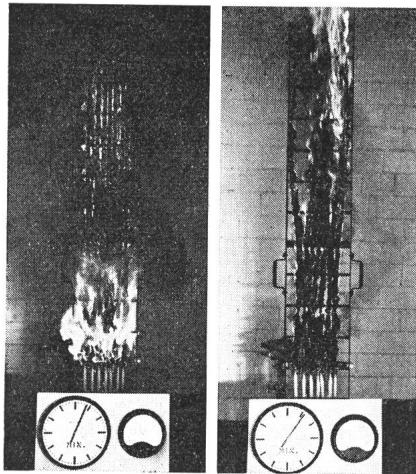
THPL _f	Thermoplastmischung auf der Basis von Polyäthylen und Ethylen-Propylen-Kautschuk, schwerentflammbar, halogenfrei
CR _f	Chloropren-Kautschuk, schwerentflammbar

4.2 Messungen an Kabeln

Aufgrund der beschriebenen Voruntersuchungen können Materialkombinationen für verschiedene «Brandsicherheits-Stufen» ausgewählt werden. So ergibt z.B. eine XLPE_f-Isolation mit einem Mantel aus PVC_{wt} ein Kabel mit geringer Brandfortleitung und guter Überlast- und Kurzschlußsicherheit, jedoch mit korrosiven Brandgasen und Qualmbildung. Ein Kabel mit geringer Brandfortleitung, sehr guter Überlast- und Kurzschlußsicherheit, minimaler Qualmbildung und ohne

Eigenschaften von Mantelmaterialien

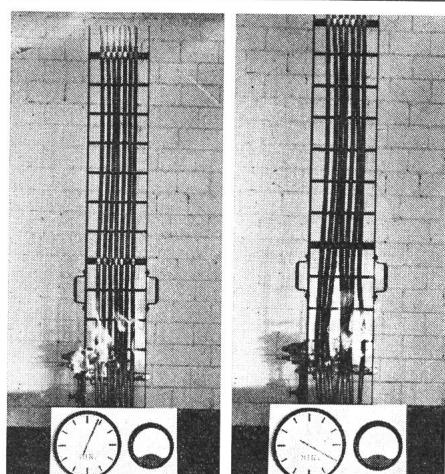
Eigenschaften	PVC _n	XLPE _n	PVC _{wt}	EPDM _f	THPL _f	CR _f	SIR _f
Entflammbarkeit: Oxygen-Index %	24	19	32	30	30	32	28
Korrosivität: Halogengehalt %	25	0	27	0	0	15	0
Qualmbildung: Lichtabsorption %	80	50	60	10	10	50	<5
Zugfestigkeit N/mm ²	15	15	15	9	6	10	6
Weiterreissfestigkeit N	75	80	85	30	35	35	18
Härte (Flexibilität) Shore A	80	95	85	75	85	75	60
Dauerwärmestabilität °C	70	90	90	90	90	80	175
Preis (Volumenpreis) PVC _n = 100 %	100	140	150	180	180	250	800



Prüfung nach IEEE 383: Brandfortleitung

Fig. 1 (links): Kabel M₂, PVC_n, 2 × 16 mm², Aufnahme nach 4 min Flammeneinwirkung

Fig. 2 (rechts): Kabel M₂, PVC_n, 2 × 16 mm², nach 6 min Flammeneinwirkung bei gelöschter Stützflamme



Prüfung nach IEEE 383: Brandfortleitung

Fig. 3 (links): Kabel M₄, EPDM_f/THPL_f, 2 × 16 mm², nach 4 min Flammeneinwirkung

Fig. 4 (rechts): Kabel M₄, EPDM_f/THPL_f, 2 × 16 mm², nach 20 min Flammeneinwirkung

Korrosivität erhält man mit einer Isolation aus EPDM_f und einem Mantel aus THPL_f oder EPDM_f. Im Zuge der weiteren Entwicklung wurden Kabel der letztgenannten Kombination hergestellt und geprüft. Die ersten Versuche zeigten, dass neben der Verwendung von speziellen Isolier- und Mantelmaterialien der Einbau einer «FlammbARRIERE» zwischen Aderbündel und Mantel notwendig ist. Eine gangbare Lösung brachte eine Bandagierung mit einem Glasfaser-Asbestband. In der Folge wurden 3 entsprechend aufgebaute Kabelmuster hergestellt und geprüft. Im Vergleich dazu wurden 2 normale nicht besonders schwerentflammable PVC-Kabelmuster getestet. Als Prüfmethoden kamen zur Anwendung:

Brandfortleitung nach IEEE 383: Bei dieser Prüfung wird eine energiereiche Gasflamme gegen eine mit Prüfkabeln be-

stückte, senkrecht angeordnete, 2,5 m lange Kabelpritsche gerichtet (Fig. 1...4). Die Flammentemperatur beträgt 800 °C. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn sich das Feuer nach 20 min Flammeneinwirkung nicht bis an das obere Ende der Pritsche ausbreitet. Eine bessere Differenzierung ergibt die Messung der Brandfortleitungsgeschwindigkeit.

Funktionstüchtigkeit im Brandfall: Für diese Prüfung existiert keine Norm. Die Durchführung erfolgt in Kombination mit der Brandfortleitungsprüfung. Dabei stehen alle Prüflinge unter Spannung (Ader-Ader 380 V, Pritsche an Erde). Ge- messen wird die Zeit bis zum Auslösen eines in die Zuleitung geschalteten, 2-A-Sicherungsautomaten.

Qualmbildung: Hier ist zurzeit nur eine visuelle Beurteilung möglich.

Prüfergebnisse von 5 Kabelmustern (Muster 3...5 mit FlammbARRIERE)

Tabelle V

Kabelmuster	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅
Isolation Mantel Aderzahl+Querschnitt	PVC _n PVC _n 7 × 1,5	PVC _n PVC _n 2 × 16	EPDM _f THPL _f 7 × 1,5	EPDM _f THPL _f 2 × 16	EPDM _f EPDM _f 2 × 16
<i>Brandprüfungen:</i>					
Brandfortleitungsgeschwindigkeit IEEE 383	cm/min	40	28	8	4
Brandfortleitung IEEE 383		—	—	+	+
Funktionstüchtigkeit im Brandfall	min	4	5	>20	>20
Qualmbildung	stark	stark	wenig	wenig	wenig
<i>Überlastprüfungen:</i>					
Stromstärke (dauernd nachreguliert)	A		330		330
Funktionstüchtigkeit bis	min		4		17
Funktionstüchtigkeit bis Leitertemperatur	°C		160		320
Zerstörung der Isolation nach	min		5		21
Zerstörung der Isolation bei Leitertemperatur	°C		180		380
<i>Prüfung nach SEV TP 201/TP 20:</i>					
Elektrische Eigenschaften	+	+	+	+	+
Mechanische Eigenschaften	+	+	+ ¹⁾	+ ¹⁾	+
Thermische Eigenschaften	+	+	+	+	+

⁺ bestanden, — nicht bestanden; ¹⁾ Negative Abweichung in bezug auf Zugfestigkeit und Bruchdehnung bei den Mantelmaterialien

Verhalten bei extremer Überlast: Die Prüfung erfolgt an Prüflingen, die auf einer rechtwinklig abgebogenen Kabelpritsche montiert sind. Die elektrische Belastung beträgt das 3fache des für den Normalbetrieb zulässigen Stromes (SEV 3062). Bestimmt werden die Zeit und die Leitertemperatur, bei der sich die Isolation des Prüfkabels irreversibel zu verändern beginnt, eine Spannungsprüfung mit 500 V aber noch bestanden wird. In gleicher Weise werden der Zeitpunkt und die Leitertemperatur ermittelt, bei der die Isolation des Prüfkabels verkohlt, wegschmilzt usw., so dass eine Kurzschlussgefahr besteht, bei der das Kabel entzündet werden könnte.

Prüfung nach den Sicherheitsvorschriften des SEV TP 201/7A und TP 20B/2A.

Die Ergebnisse all dieser Prüfungen sind in Tab. V zusammengestellt. Normale, nicht besonders schwer entflammbare PVC-Kabel (M_1, M_2) zeigen ein relativ schlechtes Brandverhalten (Fig. 1 und 2). Die Brandfortleitungsgeschwindigkeit ist hoch und hängt stark vom Kupferquerschnitt des Kabels ab. Kabel mit kleinem Kupferquerschnitt und im Verhältnis dazu grossem Anteil an organischem Material brennen schneller ab als Kabel mit grossem Kupferquerschnitt. Die Qualmbildung ist, wie Fig. 1 zeigt, als extrem stark zu bezeichnen. Die Verbrennungsprodukte von PVC sind elektrisch leitend, und als Folge davon ist die Funktionstüchtigkeit im Brandfall entsprechend kurz. Beim Überlastversuch wird ein Betriebszustand simuliert, der bei einer ordnungsgemäss ausgeführten Installation praktisch nicht vorkommen kann. Dennoch zeigt er die Nachteile einer Thermoplastisolation. Weich-PVC besitzt im weitern eine niedrige Wärmeleitfähigkeit. Aus diesem Grunde führen extreme Überlastströme sehr schnell zu hohen Leitertemperaturen.

Brandsichere EPDM-Kabel, Muster 3 bis 5, zeigen eine 3...7mal kleinere Brandfortleitungsgeschwindigkeit als gewöhnliche PVC-Kabel (Fig. 3 und 4). Auch hier besteht eine Abhängigkeit vom Kupferquerschnitt des Kabels. Die Forderung der IEEE-Norm konnte mit dem Kabel M_3 nur knapp erfüllt werden, dennoch stellt das erzielte Resultat eine wesentliche Verbesserung gegenüber dem PVC-Vergleichskabel dar. Der Überlastversuch bestätigt die Vorteile einer vernetzten und damit wärmeformbeständigen Isolation. Vernetzte Isoliermaterialien schmelzen nicht, und eine Brandgefahr besteht erst dann, wenn die Isolierschicht soweit thermisch zersetzt ist,

dass ein energiereicher elektrischer Durchschlag entstehen kann. Eine Selbstentzündung der Isolier- und Mantelmaterien konnte bis zu Leitertemperaturen von 500 °C nicht beobachtet werden.

Die Prüfung der übrigen Kabeleigenschaften nach bestehenden SEV-Vorschriften ergab einzig beim Thermoplast-Mantel THPL_f Abweichungen. In Anbetracht der übrigen Vorteile dieser Kabel sind die etwas geringeren mechanischen Eigenschaften der Mantelmaterialien zulässig und vertretbar.

5. Folgerungen, Ausblick

Die vorliegenden Resultate zeigen, dass es möglich ist, Niederspannungs-, Leistungs- und Steuerkabel herzustellen, die erhöhten Sicherheitsanforderungen genügen. Unter Verwendung von modifizierten Isolier- und Mantelmaterialien konnten im Vergleich zu den heute im Installationssektor verwendeten Kabeln folgende Verbesserungen realisiert werden:

- Kleinere Brandfortleitungsgeschwindigkeit bei einem lokalen Brand
- Halogenfreiheit und damit eine Reduktion der möglichen Brandfolgeschäden
- Längere Funktionstüchtigkeit im Brandfall
- Geringere Qualmbildung und niedrigere Toxizität der Brandgase
- Erhöhte elektrische Überlastsicherheit

Die neu entwickelten Kabel weisen in bezug auf die übrigen sicherheitstechnischen Anforderungen vorschriftenentsprechende oder bessere Eigenschaften auf.

Als Folge der höheren Materialkosten und des komplizierteren Herstellungsverfahrens werden die hier beschriebenen Produkte höhere, aber noch wirtschaftlich vertretbare Investitionskosten verursachen. Ihre Anwendung wird sich vorläufig auf Anlagen beschränken, die speziellen sicherheitstechnischen Anforderungen genügen müssen. Im Bereich der normalen Installationstechnik besteht kein zwingender Grund, die bewährten und bei sachgemäß ausgeführten Anlagen durchaus genügenden PVC-Kabel zu ersetzen. Aufgrund der bis heute durchgeführten Versuche lässt sich sagen, dass es möglich sein wird, weitere Kabeltypen, z.B. Mittespannungskabel, Telefonkabel usw. mit erhöhten Sicherheitsanforderungen herzustellen.

Adresse des Autors

H. Briker, Dätwyler AG, 6460 Altdorf.

Anwendung von Kabel- und Magnetisolierungen im nuklearen Strahlungsfeld

Von H. Schönbacher

621.315.6: 621.039.5: 621.384.6;

In diesem Bericht werden handelsübliche Materialien besprochen, wie sie im Europäischen Kernforschungszentrum CERN in Genf Verwendung finden. Die Resultate wurden hauptsächlich durch Versuche in einem Kernreaktor, aber auch aufgrund der Erfahrungen an den in Betrieb befindlichen CERN-Beschleunigern erzielt und beziehen sich auf Betriebsbedingungen im Temperaturbereich von 20...50 °C. Die Versuche erstrecken sich bis zu einem maximalen integrierten Dosiswert von 100 Megagray.

Dans cet exposé, il est question de matières du commerce employées au CERN, à Genève. Les résultats ont été obtenus principalement par des essais dans un réacteur, mais aussi en se basant sur l'expérience acquise avec des accélérateurs du CERN. Ils se rapportent aux conditions de service à des températures comprises entre 20 et 50 °C et ont été poursuivis jusqu'à une dose maximale intégrée de 100 mégagrays.

1. Einleitung

Energieriche Strahlung verursacht beim Durchdringen der Materie durch Wechselwirkung mit der Atomhülle oder mit dem Atomkern eine Veränderung der physikalischen und chemischen Eigenschaften. Isolationsmaterialien zur Anwendung im nuklearen Bereich wie in Kernkraftwerken, Hochenergiebeschleunigern für Forschung und medizinische Anwendung, industriellen Bestrahlungsanlagen usw. müssen daher einer besonders sorgfältigen Auswahl unterzogen werden, da in allen diesen Einrichtungen ein sehr hohes Mass an Sicherheit verlangt wird und unvorhergesehene Betriebsausfälle wegen Materialschäden möglichst zu vermeiden sind.

Bei den im Europäischen Kernforschungszentrum CERN in Genf betriebenen Hochenergiebeschleunigern, dem 600-MeV-Synchrozyklotron (MSC), dem 28-GeV-Protonen-Synchrotron (CPS) und dem 400-GeV-Super-Protonen-Synchrotron (SPS) treten an bestimmten Stellen jährliche Strahlungsbelastungen von 1...10 MGy¹⁾ auf. Eine Vielzahl von Materialien wie Kabel- und Magnetisolierungen [1; 2; 3]²⁾, elektronische Komponenten [4] sowie auch elektrische Leiter [5] wurden unter anderem auf ihre Bestrahlungsbeständigkeit hin untersucht. In dieser Arbeit wird eine Übersicht der bei diesen Untersuchungen erzielten Resultate gegeben, beschränkt auf Isoliermaterialien für Kabel und Elektromagnete, wie sie in der Hochenergiebeschleunigertechnik Anwendung finden.

Die Versuche werden in der Regel an charakteristischen Proben durchgeführt, welche in einem Forschungsreaktor bestrahlt wurden. Die hierzu zur Verfügung stehenden Bestrahlungspositionen sowie deren wichtigste Parameter sind in Tab. I zusammengestellt [6]. Die Proben werden je nach der angestrebten Integraldosis bei einer Dosisleistung von 10⁵ bis 10⁶ Gy/h bestrahlt. Diese Art von beschleunigten Tests ist gerechtfertigt, da die Erfahrung gezeigt hat, dass in Polymeren die Strahlenschäden proportional der absorbierten Dosis und weitgehend unabhängig von der Dosisleistung sind. Weiters ist erwiesen, dass die Strahlenschäden in erster Linie die mechanischen Eigenschaften von Isoliermaterialien verändern [7]; diese werden daher als Auswahl- und Endpunktikriterien verwendet. Die Änderung der elektrischen Eigenschaften erfolgt erst nach der mechanischen Veränderung.

Alle Versuche wurden bei Raumtemperatur durchgeführt, die Resultate können aber bis maximal 50 °C verwendet werden. Materialstudien bei tiefen Temperaturen sind in anderen Arbeiten beschrieben [8], bei erhöhten Temperaturen wurden im CERN bisher keine Bestrahlungsversuche gemacht.

¹⁾ 1 Gy = 1 Gray = 1 J/kg = 100 rad. Alle angegebenen Dosiswerte entsprechen einer Energieabsorption in einem CH_n-äquivalenten Material.

²⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

2. Kabelisolierungen

Im Zuge der Spezifikation der für den Bau des 400-GeV-SPS-Beschleunigers benötigten Kabel wurde ein grosses Versuchsprogramm über die Strahlenbeständigkeit von am Europäischen Markt hauptsächlich verwendeten Isolationsmaterialien durchgeführt [1]. Dabei wurden Proben von Polyvinylchlorid (PVC), Polyäthylen (PE), Chlorsulfonierte Polyäthylen (Hypalon), Äthylen-Propylen-Gummi und Silikongummi verschiedener Herstellerfirmen zu Dosiswerten von 5 · 10⁵, 1 · 10⁶ und 5 · 10⁶ Gy bestrahlt. Als Endpunktikriterium wurde eine Bruchdehnung von über 100 % nach einer Bestrahlung von 1 MGy verlangt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind ausführlich in [1] beschrieben. Hier sei eine Zusammenfassung der wichtigsten Resultate gegeben:

– Ungefähr 50 % der getesteten Materialien wie PVC, PE, Hypalon und Äthylen-Propylen-Gummi erfüllen das erwähnte Endpunktikriterium. Eine einwandfreie Funktion dieser Kabel nach einer Bestrahlung von 1 MGy kann deshalb noch mit grosser Wahrscheinlichkeit erwartet werden.

– Bei 5 MGy liegt die Bruchdehnung in allen Fällen unter 10 %, d.h., selbst wenn die elektrischen Eigenschaften noch zufriedenstellend sind (Isolationswiderstand gewährleistet), wird das Kabel bei geringer mechanischer Beanspruchung zerstört.

– Die Verwendung von Silikongummi kann in Dosisbereichen von über 0.5 MGy nicht empfohlen werden.

– Die Verwendung von Polytetrafluoräthylen (Teflon) und Butylgummi ist im nuklearen Strahlungsbereich zu vermeiden; ebenso ist die Verwendung von Ölen (z. B. Silikone) oder Gasen (z. B. Fluorkarbon) äusserst beschränkt.

Es hat sich auch gezeigt, dass dieselben Materialien, die von verschiedenen Firmen unter verschiedenen Handelsnamen geliefert werden, keine wesentlichen Unterschiede aufweisen. Die Fig. 1 und 2 zeigen die typische Änderung der Bruchdehnung mit zunehmender integrierter Dosis für die gegenwärtig in der Kabelindustrie am häufigsten verwendeten Materialien PVC und PE.

Neben der Strahlungsbeständigkeit ist auch die Feuerbeständigkeit in vermehrtem Masse ein entscheidendes Auswahlkriterium bei der Anschaffung von Kabeln in Kernkraftwerken und Beschleunigeranlagen. Anstelle der herkömmlichen konventionellen PVC-Isolierungen mit einem Sauerstoffindex von 24...25³⁾ werden deshalb «schwer brennbare» PVC-Mischungen in Betracht gezogen mit einem SI von 30...35. Die Erhöhung des SI wird durch Zusätze von u.a. Chlor und/oder

³⁾ Der Sauerstoffindex (SI) ist definiert als der minimale Prozentsatz von Sauerstoff, welcher in einem Gemisch von Sauerstoff-Stickstoff notwendig ist, um eine Materialprobe am Brennen zu erhalten. Der Test wird nach der Norm ASTM-2863 durchgeführt.

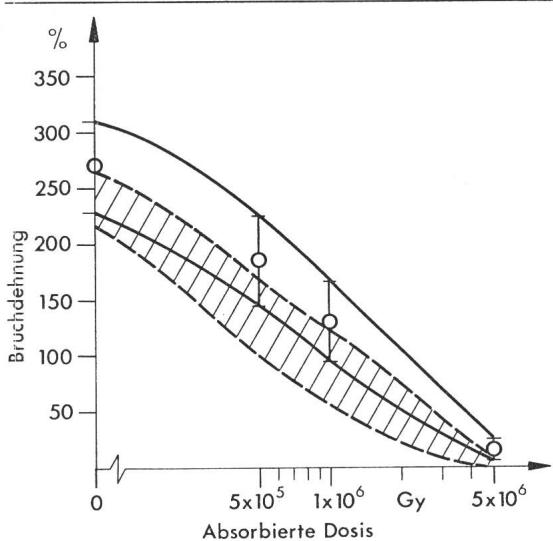


Fig. 1 Änderung der Bruchdehnung als Funktion der absorbierten Dosis für PVC

Durchgehende Linie: Standard-PVC
Schraffiert: Spezial-PVC mit erhöhtem Sauerstoffindex

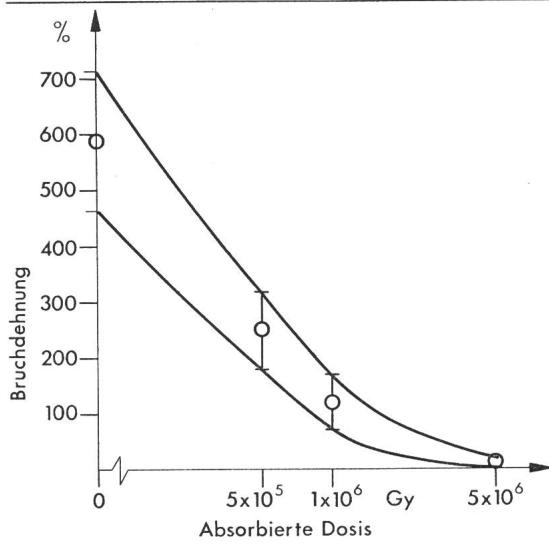


Fig. 2 Änderung der Bruchdehnung als Funktion der absorbierten Dosis für PE

mineralischen Füllstoffen erreicht, was zu einer geringfügigen bis zum Teil bedeutenden Verminderung der Bruchdehnung führt. Dies gilt für das unbestrahlte sowie für das bestrahlte Material. In Fig. 1 ist der Bereich der im CERN getesteten Spezial-PVC-Isolationen mit einem SI von 30...35 schraffiert gekennzeichnet. Materialien, die bei 1 MGy dem Normal-PVC gleichwertig sind, stehen zur Verfügung, jedoch ist die Auswahl beschränkt. Versuche haben auch gezeigt, dass sich der SI durch Bestrahlung nicht wesentlich ändert [1]. Trotzdem

erhöht sich indirekt die Feuergefahr, speziell bei Energiekabeln, dadurch, dass mit der Bestrahlung das Isolationsmaterial brüchig wird und somit das Risiko eines Kurzschlusses zunimmt.

Die Erhöhung des SI von PVC kann zwar die Entstehung eines Brandes hinauszögern oder verhindern; in einem Brandfalle ist man jedoch nach wie vor mit dem Problem der korrosiven Gase (HCl) im Rauch konfrontiert. Die Korrosionsschäden an Einrichtungsgegenständen, Apparaten und Geräten

Zusammenstellung der Charakteristiken der verschiedenen Bestrahlungspositionen im ASTRA-Reaktor sowie deren wichtigste Anwendungsbereiche

Tabelle I

Position	Bestrahlungsbehälter		Neutronenfluss		Gamma-dosisleistung Gy/h	Bestrahlungsmedium	Geeignet zur Bestrahlung von
	Diameter mm	Länge mm	$n_{\text{f}}/\text{cm}^2 \text{ s}$ $E_{\text{n}} > 1 \text{ MeV}$	$n_{\text{th}}/\text{cm}^2 \text{ s}$			
Position 11	46	300	$(2...3) \cdot 10^{12}$	$(4...5) \cdot 10^{12}$	$(1...2) \cdot 10^6$	Wasser	Stäbe für Biegeversuche von organischen und anorganischen Materialien. Spezielle Bestrahlungen z. B. Magnetspule Prototyp usw.
Position 35 abgestellter Reaktor	61	500	—	—	$1 \cdot 10^4...1 \cdot 10^5$	Luft, Wasser	Kabel mit Leiter, Schläuche mit Anschlägen, elektrische Bauteile, z. B. Spulen, Relais usw. Motorwicklungen, elektrische Komponenten mit Metallteilen usw.
Ebene 1	60 rechteckiger Behälter $300 \times 300 \times 35 \text{ (mm}^3)$	200	$(2...3) \cdot 10^{10}$	$(3...4) \cdot 10^{11}$	$(1...2) \cdot 10^5$	Luft, Wasser	Proben für Zugversuche, z. B. Kunststoffe, Gummi usw., Öle, Schläuche, Gläser
SNIF	56	120	$(3...5) \cdot 10^9$	$(1...2) \cdot 10^9$	$(1...2) \cdot 10^2$	Luft	Elektronische Komponenten, statisch und dynamisch, Gläser für optische Anwendungen
Reaktorkern	Spezialbehälter max. 30	max. 300	$3 \cdot 10^{13}...8 \cdot 10^{13}$	$5 \cdot 10^{13}...1 \cdot 10^{14}$	max $3 \cdot 10^6$	Luft, Wasser, N_2 , He	Metalle, Kupfer, Eisen

haben in vielen Fällen selbst die Feuerschäden bei weitem überstiegen. Die Kabelindustrie hat daher in den letzten Jahren vermehrte Anstrengungen unternommen, schwer brennbare halogenfreie Kabelisolationen zu entwickeln. Beispiele solcher Materialien sind Flamtrol (Raychem Corporation), Pyrofil (Dätwyler AG) und Radox 110 (Huber & Suhner AG). Die Strahlungsbeständigkeit dieser Produkte fällt gröszenordnungsmässig in die Kategorie von Spezial-PVC.

Isolationsmaterialien, welche bei 1 MGy noch gute mechanische und elektrische Eigenschaften aufweisen, sind in den meisten Fällen auch ausreichend, um den Betrieb der betreffenden Anlage bis zu mehreren Jahrzehnten zu gewährleisten. An Stellen, wo innerhalb der Betriebsdauer höhere Strahlungsbelastungen zu erwarten sind, ist der Einsatz der bisher besprochenen Kabelisolation nicht mehr zu empfehlen, es sei denn, ein routinemässiger Austausch der Kabel an den exporierten Stellen ist eingeplant. Fig. 3 zeigt ein PE-isoliertes Kabelstück, welches nach eineinhalbjähriger Betriebsdauer wegen Strahlenschäden ausgetauscht werden musste. Die absorbierte Dosis wurde auf 3...5 MGy geschätzt. Es zeigten sich deutliche Verfärbungen, Rissbildung und Versprödung des Materials (die groben Risse im Bild sind allerdings bei der Demontage des Kabels entstanden). Diese PE-Isolation wurde nun durch Polyurethan (PUR) ersetzt, wodurch eine Verbesserung der Strahlenbeständigkeit um einen Faktor 10 erwartet wird. PUR-isolierte Kabel sind seit mehreren Jahren mit Erfolg an Korrekturspulen der CPS-Magnete in Verwendung und nach einer Gesamtdosisbelastung von über 10 MGy noch funktionsfähig.

In der besonders strahlungsgefährdeten CERN-Neutrino-Target-Zone wurde eine Kombination von Kapton-Glasfasern (Du Pont de Nemours International S.A.) für mehradrige Kontrollkabel verwendet (Fig. 4). Man erwartet von diesen Kabeln Funktionstüchtigkeit bis zu einer integrierten Dosis von 100 MGy. Die Bruchdehnung von Kapton beträgt nach einer Bestrahlung von 10 MGy noch über 50 %, bei 100 MGy jedoch nur noch 10 % des ursprünglichen Wertes, während man bei Glasfasern aufgrund von deren Zusammensetzung (SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , MgO , B_2O_3) bei diesen Dosiswerten keine wesentlichen Änderungen der mechanischen und elektrischen Eigenschaften erwarten kann. Mit Polyimidlack imprägnierte Glasfasern stellen ebenfalls eine sehr strahlenbeständige Kabelisolation dar.

Bei Kabeln, die Dosiswerten von über 100 MGy ausgesetzt werden sollen, ist die Auswahl von Isolationsmaterialien äusserst beschränkt. Abgesehen von einigen wenigen Spezialprodukten wie Stilan (Raychem Corporation), welches nach Angaben des Herstellers bei 10^8 Gy seine Eigenschaften kaum ändert und flexibel bleibt, wird man hauptsächlich anorganische Materialien wählen müssen.

3. Magnetisolationen

Zur Lenkung und Fokussierung der hochenergetischen Teilchenstrahlen werden im CERN Elektromagnete von bis zu 6 m Länge verwendet. Allein im 400-GeV-SPS mit einem Beschleunigerumfang von ca. 7 km sind über 700 Dipol- und 200 Quadrupolmagnete installiert. Dabei führen die Protonenstrahlen sehr nahe an den Magnetspulen vorbei, wodurch deren

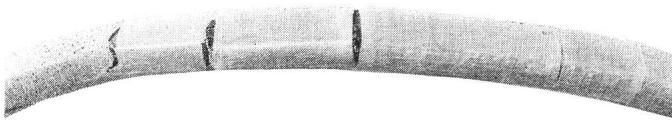


Fig. 3 Durch Strahlung beschädigtes PE-Kabelstück
Dosis ca. 3...5 MGy

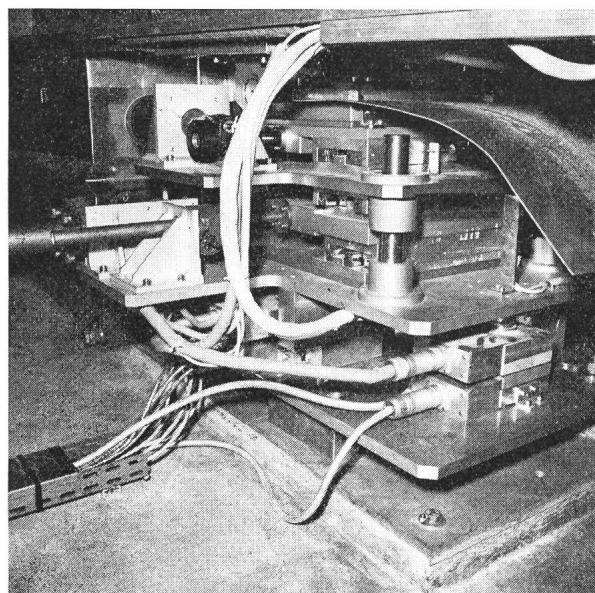


Fig. 4 Strahlungsbeständige Kontrollkabel in der CERN Neutrino-Target-Zone

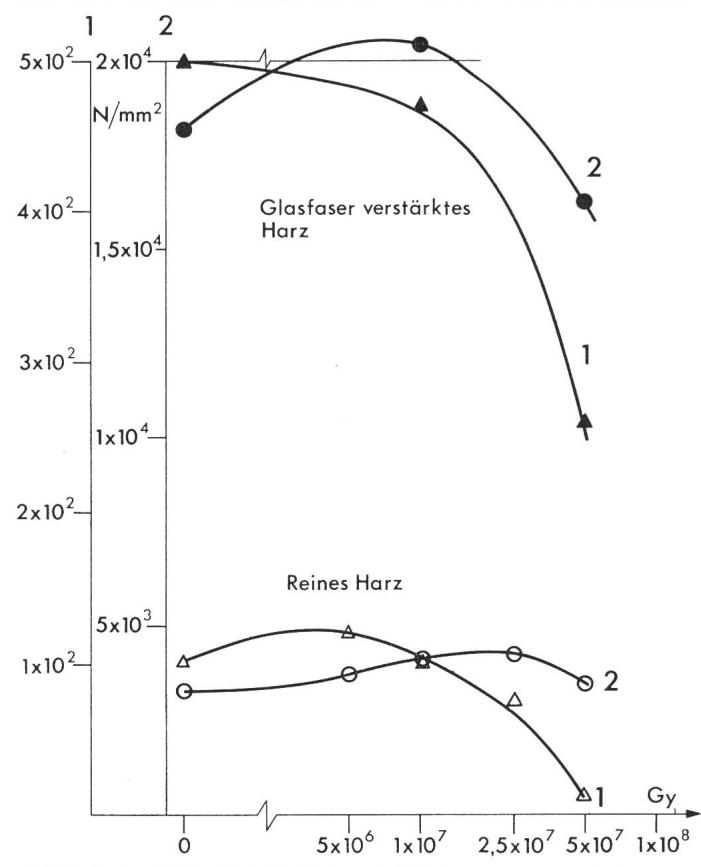


Fig. 5 Änderung von Biegefestigkeit (1) und Elastizitätsmodul (2) als Funktion der absorbierten Dosis eines Epoxyharzes
Zusammensetzung: MY745 + HY906 + XB2687 + Glasfaser

Material	Obere Dosisgrenze Gray
Aluminiumoxyd	> 10 ⁸
Aluminiumzement	> 10 ⁸
Asbestfaser	> 10 ⁸
Äthylen-Propylen-Gummi	1...3 · 10 ⁶
Butylgummi	nicht zu empfehlen
Chlorosulfonierte PE (Hypalon)	1...3 · 10 ⁶
Epoxydharz	1...3 · 10 ⁷
Epoxydharz mit Glasfaser	5 · 10 ⁷ ...1 · 10 ⁸
Epoxydharz mit Glimmer	5 · 10 ⁷ ...1 · 10 ⁸
Epoxydharz mit Siliziumpulver	5 · 10 ⁷
Flamtrol	1...3 · 10 ⁶
Fluorkarbongase	nicht zu empfehlen
Glasfaserstoffe	> 10 ⁸
Hypalon	1...3 · 10 ⁶
Kapton	5 · 10 ⁷ ...1 · 10 ⁸
Öle als Isolierstoff	nicht zu empfehlen
Polyäthylen (PE)	1...3 · 10 ⁶
Polyesterharz, rein	≈ 5 · 10 ⁴
Polyesterharz mit Glasfaser	1...2 · 10 ⁷
Polymidlack	1...5 · 10 ⁷
Polymidlack mit Glasfaser	≈ 10 ⁸
Polytetrafluoräthylen (Teflon)	nicht zu empfehlen
Polyurethangummi	≈ 10 ⁷
Polyurethanharz	1...5 · 10 ⁷
Polyvinylchlorid (PVC)	1...3 · 10 ⁶
Pyrofil	1...2 · 10 ⁶
Radox 110	1...2 · 10 ⁶
Samicanit	> 10 ⁸
Silikongummi	5 · 10 ⁵
Silikonharz, rein	1...2 · 10 ⁶
Silikonharz mit Glasfaser	1...2 · 10 ⁷
Stilan	> 10 ⁸
Teflon	nicht zu empfehlen

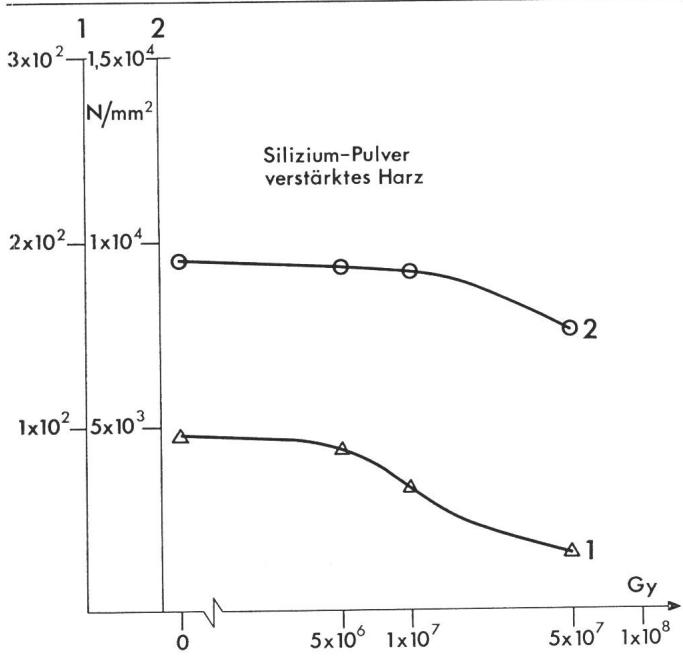


Fig. 6 Änderung von Biegefestigkeit (1) und Elastizitätsmodul (2) als Funktion der absorbierten Dosis eines Epoxyharzes mit Siliziumpulver-Verstärkung
Zusammensetzung: CY205 + HY906 + DY061 + Siliziumpulver

Isolation durch Strahlung besonders gefährdet ist. Es treten jährliche Dosiswerte von 10⁵...10⁷ Gy, an einigen exponierten Stellen bis zu 10⁸ Gy auf. Als Isolationsmaterial zur Imprägnation dieser Magnetspulen wird fast ausschliesslich eine Kombination eines Di-Epoxypropyläther-Bisphenol-A-Harzes mit einem Anhydridhärter und Aminbeschleuniger verwendet. Zahlreiche Bestrahlungsversuche wurden an Epoxyharzen verschiedener Zusammensetzung, Herstellungsverfahren und mit diversen Füllstoffen durchgeführt [2; 3; 9]. Als Endpunkt-kriterium wird in Spezifikationen 50 % der ursprünglichen Biegefestigkeit verlangt, welche bei unverstärkten oder ungefüllten Epoxyharzen bei 10⁷ Gy nicht unterschritten werden darf.

Fig. 5 zeigt die Änderung der mechanischen Eigenschaften als Funktion der absorbierten Dosis der SPS-Dipol-Magnetspulen, dies sowohl für das reine wie auch für das mit Glasfasern verstärkte Harz. Während die Bruchfestigkeit des ersten bei 50 MGy nur noch äusserst gering ist, zeigt das glasfaserverstärkte Material bei dieser Dosis noch sehr gute mechanische Eigenschaften. Durch Zugabe entsprechender Füllstoffe kann man die Strahlungsbeständigkeit des Isolationsmaterials bis zu einem Faktor 10 verbessern, d. h., man kann eine Funktionsfähigkeit solcher Spulen bis in die Größenordnung von 100 MGy erwarten. Anstelle der Glasfaserbänder wird auch häufig Glimmer (Mica) als Füllstoff verwendet. Bei Korrektursspulen der CPS-Magnete konnte man nach einer Bestrahlung von über 50 MGy zwar eine deutliche Zersetzung des Harzes feststellen, die Isolation war jedoch durch die Glimmerschichten nach wie vor gewährleistet. Die Beigabe von Siliziumpulver als Füllstoff, wie z. B. in den Spulen der Fokussiermagnete der 600-MeV-MSK-Protonenstrahlen, ergibt eine geringere mechanische Festigkeit als die mit Glasfasern oder Glimmer verstärkten Harze (Fig. 6).

Von anderen Harztypen sind Polyimide und Polyurethane bezüglich Strahlungsbeständigkeit mit den Epoxyharzen gleich-

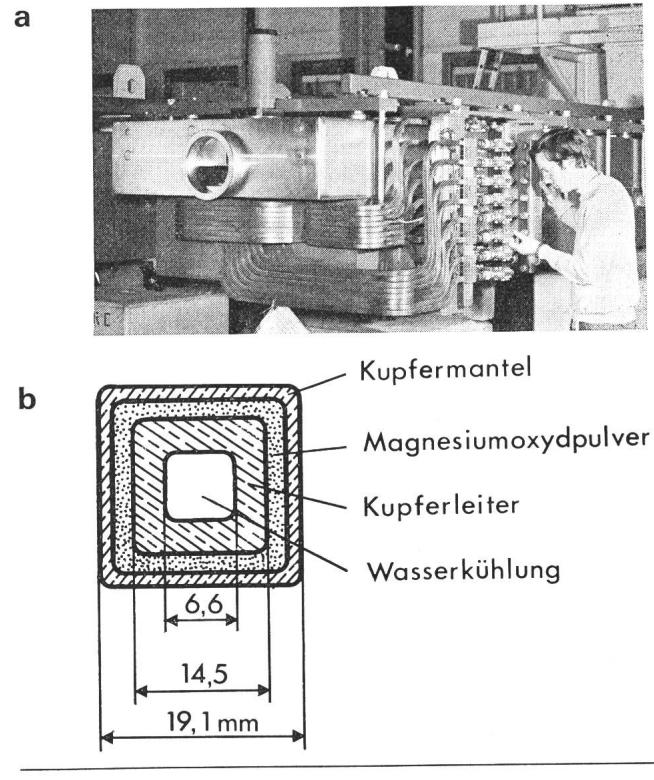


Fig. 7 Strahlungsbeständiger Spezialmagnet
a Teilansicht b Leiterquerschnitt

wertig, während Polyester und Silikonharze nur durch Beigabe entsprechender Füllstoffe ein ähnliches Mass an Strahlensbeständigkeit erreichen.

Sind während der erwünschten Betriebsdauer von Magnetspulen Dosiswerte von über 100 MGy zu erwarten, so bleibt wie bei den Kabelisolationen die Auswahl praktisch nur auf anorganische Materialien beschränkt. Im CERN sind solche Spezialspulen in Magneten installiert, welche zur Trennung der Primärprotonenstrahlen in Experimentierzonen verwendet werden (Fig. 7a). Jede Spule wurde aus einem «Kabel» gewickelt, dessen äusserer Mantel aus Kupfer und die Isolation aus Magnesiumoxydpulver besteht (Fig. 7b). Die Enden sind hermetisch abgeschlossen, um das hygrokopische Magnesiumoxydpulver gegen Feuchtigkeit zu schützen [10].

Auch andere speziell strahlenbeständige Ablenk- und Fokussiermagnete, die bei CERN gebaut wurden, sind seit Jahren mit Erfolg in Betrieb [11]. Für die Isolation dieser Spulen werden Aluminiumzement, Aluminiumoxyd, Asbestfasern und Glimmerprodukte (Samcanite, Schweizerische Isola-Werke) eingesetzt.

4. Zusammenfassung

In Tab. II ist eine Zusammenstellung der besprochenen Materialien sowie der auf den CERN-Erfahrungen beruhenden Grenzen für deren Anwendung im nuklearen Strahlungsbereich dargestellt. Diese Werte können jedoch nur als allgemeine Richtlinien angesehen werden. Genauere Aussagen können nur unter Berücksichtigung von Zusammensetzung, Herstellungsverfahren und Betriebsbedingungen gemacht werden. Bestrahlungsversuche sind deshalb in jedem individuellen Fall zu empfehlen. Es sei noch darauf hingewiesen, dass es in der

Praxis sehr schwierig, wenn nicht unmöglich ist, den Dosiswert genau vorauszusagen, bei welchem das bestrahlte Kabel oder der Magnet ausfällt. Ein entsprechender Sicherheitsfaktor (mindestens 10) ist deshalb bei der Auswahl der Materialien zu berücksichtigen. Die Dosiswerte in Tab. II geben nur die Grenze an, ab welcher ein Ausfall durch Strahlenschäden erwartet werden kann.

Literatur

- [1] H. Schönbacher and M.H. Van de Voerde: Radiation and fire resistance of cable-insulating materials used in accelerator engineering. CERN-Report 75-3. Geneva, CERN, 1975.
- [2] M.H. Van de Voerde and C. Restat: Selection guide to organic materials for nuclear engineering. CERN-Report 72-7. Geneva, CERN, 1972.
- [3] M.H. Van de Voerde: Effects of radiation on materials and components. CERN-Report 70-5. Geneva, CERN, 1970.
- [4] S. Battisti a.o.: Radiation damage to electronic components. CERN-Report 75-18. Nuclear Instruments and Methods 136(1976), p. 451...472.
- [5] B. McGrath, H. Schönbacher and M. Van de Voerde: Effects of neutron radiation on the electrical resistivity of copper. Nuclear Instruments and Methods 136(1976), p. 575...578.
- [6] H. Schönbacher u.a.: Studium der Strahlenschäden an Hochenergiebeschleuniger-Bauteilen durch Bestrahlung in einem Kernreaktor. Kerntechnik 17(1975)6, S. 268...280.
- [7] I.F. Kircher and R. Bowman: Effects of radiation on materials and components. London, Chapman and Hall, 1964.
- [8] M. Van de Voerde (Editor): Low-temperature irradiation effects on materials and components for superconducting magnets for high-energy physics applications. CERN-Report 77-03. Geneva, CERN, 1976.
- [9] M. Van de Voerde: Actions des radiations sur les résines époxydes. CERN-Rapport 70-10. Genève, CERN 1970.
- [10] L. Evans a.o.: The steel septum magnets for beam splitting at the CERN SPS. Paper presented at the sixth International Conference on Magnet Technology. Bratislava 29th august ... 2 september 1977. CERN-Report SPS/ABT 77-13. Geneva, CERN, 1977.
- [11] R.L. Keizer and M. Mottier: Mineral insulated magnets. Paper presented at the sixth International Conference on Magnet Technology, Bratislava 29th august ... 2 september 1977. CERN-Report SPS/EMA/77-3. Geneva, CERN, 1977.

Adresse des Autors

Helmut Schönbacher, Dr. phil., European Organization for Nuclear Research CERN, Health and Safety Division, 1211 Geneva 23.

Literatur – Bibliographie

DK: 537.311.33 : 621.382

SEV-Nr. A 670

Bänderstruktur und Stromtransport. Von W. Heywang und H. W. Plötzl. – Halbleiter-Elektronik Bd. 3. Berlin/Heidelberg/New York, Springer-Verlag, 1976; 8°, 281 S., 119 Fig. Preis: bro. DM 54.–.

Als dritter Band der Reihe Halbleiter-Elektronik vermittelt dieses Buch eine vertiefte Übersicht über die physikalisch-theoretischen Grundlagen, die den Halbleiterbauelementen der modernen Elektronik zu Grunde liegen.

Ein erstes Kapitel ist der Theorie des Bändermodells gewidmet. Ausgehend von der Schrödingerschen Wellengleichung und dem Blochschen Theorem der Gitterperiodizität wird für den eindimensionalen Fall gezeigt, wie die erlaubten und die verbotenen Energiebandzonen für die Elektronen und Löcher in einem Halbleiter zustande kommen. Reale Bandstrukturen werden diskutiert, wobei auch auf technisch wichtige Folgen wie optische Bandübergänge, Leitfähigkeit und Piezowiderstandseffekte eingegangen wird. Im zweiten Kapitel wird das gestörte Gitter behandelt. Neben Gitterfehlern, Korngrenzen, Störstellen, Oberflächeneffekten und Bandstrukturveränderungen bei hoher Dotierung finden auch amorphe Halbleiter kurze Erwähnung.

Das dritte Kapitel gibt eine gute theoretische Übersicht über die Rekombinationsvorgänge von den direkten Band-zu-Band-Übergängen bis zu den Übergängen über Störstellen. Im Abschnitt «Vergleich der Rekombinationsmechanismen» liessen sich

die für die Praxis wichtigen Situationen (wie Störstellenrekombination in Silizium, Konkurrenz zwischen lichtemittierenden und nicht emittierenden Übergängen in optischen Bauelementen) etwas besser herausstreichen.

Im vierten Kapitel wird der Stromtransport im Halbleiter eingehend besprochen, ausgehend von den Boltzmann-Gleichungen. Die Behandlung der Gitterschwingungen, Phononen und Störstellenstreuung ist mit instruktiven Bildern untermauert. Eine Tabelle über die verschiedenen Relaxationsmechanismen und Beweglichkeitsanteile erleichtert die Übersicht. Auch dem Stromtransport bei hohen elektrischen Feldern und der Stossionisation ist etliche Aufmerksamkeit gewidmet. Vielleicht noch ein Hinweis: bei den Ionisationsraten technisch wichtiger Halbleiter in Abb. 4.6/15 handelt es sich im Falle von Ge, GaAs und GaP um Extrapolationen. Messungen existieren meines Wissens nur im Bereich hoher Ionisationsraten.

Dieses Buch darf als gelungen bezeichnet werden. Es ist angenehm zu lesen. In knapper Form präsentiert es eine gutgetroffene Auswahl von Grundlagen aus der Festkörperphysik, die für das tiefere Verständnis der praktischen Halbleiter wichtig sind. Als Einführung in die Grundlagen kann es empfohlen werden sowohl für Studenten als auch für Praktiker der Halbleiterindustrie, die auf Grundlagen bedacht sind. Als Übersicht dürfte es auch gute Dienste leisten beim Studium der theoretischen wie auch der ins praktische Detail gehenden Fachliteratur im Bereich der Festkörperphysik. *H. Melchior*