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: 66 (1975)

Heft: 12

Artikel: Faserverstärkte Kunststoffe im Elektromaschinen- und Elektroapparatebau

Autor: Greenwood, J. H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915294

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: 13.12.2025

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

BULLETIN des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
de l'Association Suisse des Electriciens
des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke
de l'Union des Centrales Suisses d'Electricité

Elektrotechnik – Electrotechnique

Faserverstärkte Kunststoffe im Elektromaschinen- und Elektroapparatebau [1])

Von J. H. Greenwood

621.315.616.9-494

1. Einleitung

Faserverstärkte Kunststoffe werden für folgende Anwendungen in der Elektrotechnik eingesetzt:

- Mechanisch feste Isolationen;
- Grossflächige Bauteile.

Als Isolation stehen faserverstärkte Kunststoffe in Konkurrenz mit Materialien wie unverstärkte Kunststoffe, Phenol-Hartpapier, Holz, Keramik, Beton und Glas. Sie sind in ihren mechanischen Eigenschaften diesen Materialien überlegen. Zudem können Holz und Phenol-Hartpapier viel Feuchtigkeit aufnehmen. Andererseits sind faserverstärkte Kunststoffe meist teurer. Für grossflächige Bauteile stehen faserverstärkte Kunststoffe eher in Konkurrenz mit Stahl und Aluminium, wobei die Kunststoffe besser formbar und insbesondere leichter sind. Die Anwendung der faserverstärkten Kunststoffe auf diesem Gebiet beschränkt sich nicht auf die Elektrotechnik allein. Man denke nur an Kunststoffdächer, Boote und Schwimmbäder aus Kunststoff.

In diesem Artikel seien vor allem die mit langen Glasfasern verstärkten Kunststoffe (GFK) untersucht, die einen beträchtlichen Anteil der verstärkten Kunstoffe ausmachen. Kurzgeschnittene Glasfasern seien hier nicht betrachtet [1] [2]).

2. Herstellung und Eigenschaften von GFK

GFK besteht aus Glasfasern und Kunststoff. Die Fasern werden kontinuierlich aus der Schmelze gezogen und mit einer Schlichte versehen, die die Fasern schützt und die Haftung zum Harz verbessert. Zur Herstellung des Verbundes lassen sich die kontinuierlichen Fasern direkt verwenden oder sie können vorher zu Geweben oder Matten verarbeitet werden (diese verursachen zusätzliche Kosten). Als Kunststoffe werden für grossflächige Teile fast ausschliesslich Polyesterharze, für Isolationen mehrheitlich Epoxidharze verwendet.

Die Herstellung des Verbundes erfolgt durch eine der in Fig. 1 schematisch gezeigten Methoden:

- *Handlaminieren und Faserspritzen* (Fig. 1a) eignen sich für grossflächige Teile in kleinen Stückzahlen. Löcherbefestigungen usw. können von Hand eingelegt werden.
- *Harzinjektion* (Fig. 1b) ist sauberer als Handlaminieren, braucht jedoch ein teureres Werkzeug, aber keine Presse. Das Vakuumimprägnieren ermöglicht die Herstellung besonders luftfreier Bauteile und ist deshalb für die Elektrotechnik von grosser Bedeutung. Nach dieser Methode werden z. B. elektrisch und mechanisch hochwertige Glas- oder Glas-Glimmer-Isolationen hergestellt. Man wickelt dazu Glasgewebebänder, die Glimmer tragen können, auf den zu isolierenden Leiter (Fig. 2) und tränkt das gesamte System mit Harz.
- Durch *Pressen* (Fig. 1c) werden Prepregs (Blätter aus Fasern und Harz) nass oder vorgetrocknet, kalt oder warm zusammengepresst. Auf diese Weise werden die erwähnten Formpressmassen («Sheet moulding compounds») verarbeitet.
- Man kann auch flache Laminate pressen und anschliessend mit Diamantwerkzeugen *spanabhebend bearbeiten* (Fig. 1d). Diese Methode wird in der Elektrotechnik sehr häufig angewendet. Die spanabhebende Bearbeitung hat den Vorteil, dass das Halbzeug gelagert und jeweils auf Mass zugeschnitten werden kann.
- Rotationssymmetrische Körper werden aus Fasern oder Gewebe auf einen Dorn *gewickelt* (Fig. 1e), wobei der Dorn nach der Aushärtung entfernt wird. Metallische oder keramische Körper können zur Befestigung auf ähnliche Weise bandagiert werden.
- Das *Strangziehen* (Fig. 1f) eignet sich für Bauteile mit gleichmässigem Profil.

Die mechanischen, elektrischen und thermischen Eigenschaften von GFK-Laminaten werden in den Tabellen I bis

[1]) Vortrag gehalten am Institut für elektrische Anlagen und Energiewirtschaft der ETHZ am 11. Juni 1974.
[2]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Mechanische Eigenschaften von GFK-Laminaten Tabelle I

	Matte	Gewebe (bidirektional)	Rovings	Einheit
Zug- und Biegefestigkeit parallel zu den Fasern	150...300	250...500	600...1300	N/mm^2
E-Modul parallel zu den Fasern	10...14	16	40...46	kN/mm^2
Dichte	1500...1700	1650...1850	1900...2000	kg/m^3
Fasergehalt	25...50	45...55	50...65	Vol.-%

III angegeben. Aus Tabelle I ist ersichtlich, dass die mechanischen Eigenschaften in der Reihenfolge Matte, Gewebe, Rovings (parallele Fasersträne) zunehmen. Andererseits wird die Richtung der zu erreichenden Eigenschaften durch die Anisotropie immer mehr beschränkt. Bei Mattenlaminaten gelten die mechanischen Eigenschaften für alle Richtungen in einer Ebene, bei Gewebelaminaten in zwei Richtungen und bei Rovings in nur einer Richtung. Die mechanischen Eigenschaften sind vom Fasergehalt abhängig.

Wenn ein Anteil der Fasern senkrecht zur Hauptspannungsrichtung liegt, entstehen bei Dehnungen weit unter der Bruchdehnung Risse parallel zu diesen Fasern. Die Risse führen zu einer kleinen aber irreversiblen Senkung der Steifigkeit und können die elektrischen Eigenschaften und die Dichtheit beeinträchtigen. Ob und wie weit diese Rissgrenze überschritten werden darf, muss von Fall zu Fall entschieden werden.

Die elektrische Durchschlagfestigkeit (Tabelle II) in der Faserrichtung hängt u. a. von der Anwesenheit von Lufteinschlüssen zwischen den Fasern ab. Durch Vakuumimprägnierung lässt sich ein weitgehend luftfreier Verbund herstellen, wofür in der Literatur Durchschlagfestigkeitswerte bis zu 190 kV/cm in der Faserrichtung angegeben werden [2]. Solche Werte hängen jedoch stark von der Prüflänge sowie von der Prüfzeit ab. Dauerwerte liegen weit unter der 1-Minuten-Prüfspannung. Bei der Konstruktion mit diesen Kurzzeitwerten ist grosse Vorsicht geboten.

Die Wärmebeständigkeit (Tabelle III) und die Alterung von GFK hängen vor allem vom verwendeten Harzsystem ab. Kurzzeitig (bis zu 1 h) kann ein Harzsystem wesentlich höhere Temperaturen ertragen, als seiner Dauergebrauchstemperatur entspricht. Die Wärmeformbeständigkeit des verstärkten Harzes ist wegen der Verstärkung an sich besser als diejenige des Reinharzes. Dazu kommt ein weiterer Effekt: Die Erweichungstemperatur des Harzes selbst im Verbund liegt etwas höher als die des Reinharzes. Dies führt zur Frage, ob der physikalische Zustand des Harzes im Verbund der gleiche ist.

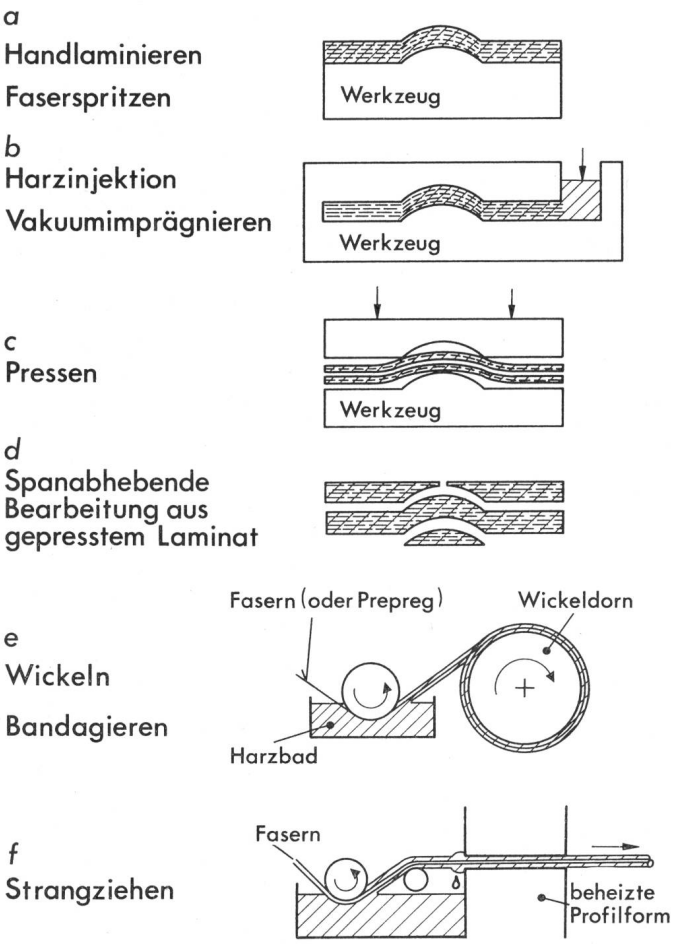

Fig. 1 Herstellungsmethoden von mit langen Glasfasern verstärkten Kunststoffen

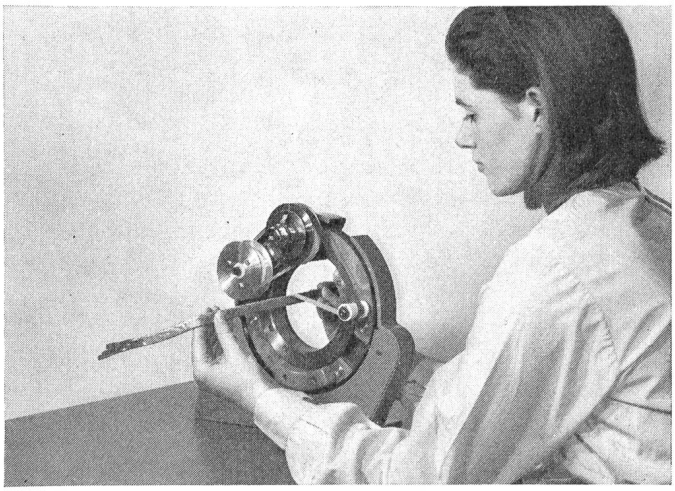

Fig. 2 Aufwickeln von Glasfasergewebeband auf einen Kupferleiter

3. Anwendungen

Über einige Anwendungen von GFK in der Elektrotechnik wird in [3] und [4] berichtet. In dieser Veröffentlichung werden Beispiele aus den Gebieten der rotierenden Maschinen, des Schalter- und Transformatorenbaus und der Elektronik beschrieben.

3.1 Rotierende Maschinen, Motoren und Generatoren

In Motoren und Generatoren wird GFK vor allem als mechanisch feste Isolation der Kupferleiter in der Nut und im Wickelkopf verwendet. Es seien zuerst Anwendungen in grossen Generatoren beschrieben, anschliessend einige in Motoren.

Im Nutenteil des Stators wird die Isolation hohen elektrischen Spannungen von ca. 30 kV Nennspannung, jedoch keinen grossen mechanischen Kräften ausgesetzt. Als direkte Isolation für die Kupferleitungen kann man ein mit Glimmerteilchen versehenes Glasband verwenden, das, wie bereits beschrieben, aufgewickelt und anschliessend mit Harz vakuumimprägniert wird. Der Leiter wird in die Nut gelegt, die dann mit einem Nutenkeil (Fig. 3) geschlossen wird. Der Keil muss in diesem Fall isolierend sein und eine gewisse mechanische Spannung nach aussen aufnehmen. Er wird bei der Montage in der Längsrichtung hineingeschoben und muss daher in zwei Richtungen Festigkeit haben. Solche Keile werden aus Gewebe- oder Mattenlaminat spanabhebend bearbeitet.

Im Statorwickelkopf (Fig. 4) treten die Leiter aus den Nuten und müssen mit einer isolierenden Konstruktion abgestützt werden. Zu diesem Zweck werden sie zwischen drei grossen Ringen mit Hilfe verschiedener radial gerichteter Keile, Wickelstücke und Platten geklemmt (Fig. 5). Die Ringe, die unter reiner Zug- oder Druckbeanspruchung stehen, werden aus GFK gewickelt; die zusätzlichen Teile, die mehrachsiger Beanspruchung unterstellt sind und recht komplizierte Formen haben, bestehen aus spanabhebend bearbeitetem Gewebe- und Mattenlaminat. Eine Spezialität sind die federnden Abstützblätter aus Gewebelaminat, die den thermischen Dehnungsunterschied zwischen Kupfer und Stahl im Stator aufnehmen.

Im Rotor erfahren die Bauteile enorme Fliehkräfte. Die Nutisolation muss daher im Gegensatz zum Stator eher mechanische (≈ 90 N/mm²) als elektrische (≈ 5 kV) Spannungen aufnehmen. Die Leiter werden in die Nut blank eingelegt, die aber vorher mit GFK vollständig verkleidet wird (Fig. 6). Die Verkleidung (flache Streifen sowie sog. U- und L-Kanäle) besteht aus Gewebelaminat und wird an die Nutwände geklebt.

Wie im Stator wird auch im Rotor die Nut mit einem Keil geschlossen. Bei den grossen Generatoren, wo der Keil nicht isolierend sein muss, wird unmagnetisches Material verwendet. Auch im Wickelkopf ist der tragende Teil, die Rotorkappe, ein unmagnetischer Stahlring.

Um den weiteren Einsatz von GFK in Rotoren zu sehen, muss man zu kleineren Maschinen, vor allem Motoren, übergehen. Dort werden Nutenkeile aus spanabhebend bearbeitetem Gewebe- oder Mattenlaminat wie im Stator verwendet.

Elektrische Eigenschaften von GFK — Tabelle II

Durchschlagfestigkeit		
quer zu den Fasern	100...200	kV/cm
längs zu den Fasern	10...20	kV/cm
Spezifischer Durchgangswiderstand	$> 10^{12}$	Ωcm
Verlustfaktor, tan δ	0,005...0,05	
Dielektrizitätskonstante	4...5	

Thermische Eigenschaften von GFK — Tabelle III

Ausdehnungskoeffizient		
parallel zu den Fasern	6...25	10^{-6} K^{-1}
senkrecht zu den Fasern	50...120	10^{-6} K^{-1}
Wärmeleitfähigkeit	0,3	W/mK
Dauerwärmebeständigkeit	70...≈150 °C	

Da es sich um einen Bauteil mit einheitlichem Profil handelt, können anstelle der spanabhebend bearbeiteten Keile hier auch im Strangziehverfahren gefertigte Keile verwendet werden. Der Nachteil besteht darin, dass die Fasern nur in der

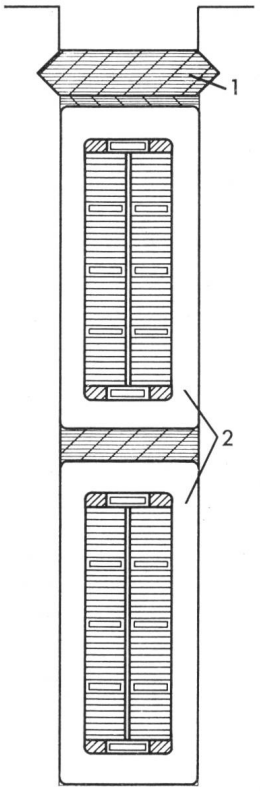

Fig. 3
Querschnitt einer Statornut
1 Nutenkeil; *2* Isolation

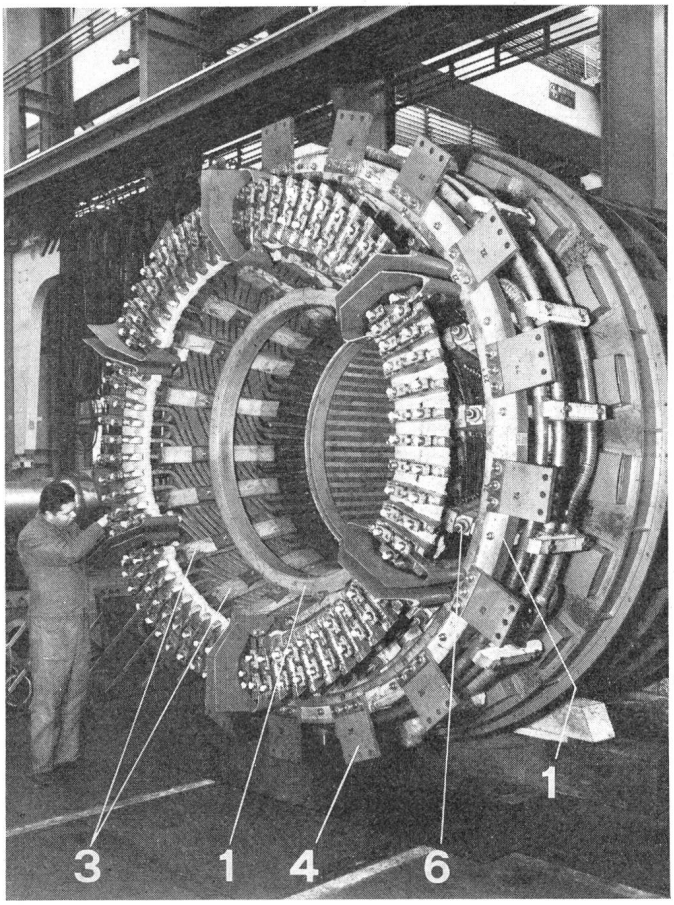

Fig. 4 Stator eines grossen Generators
Bezeichnung siehe Fig. 5

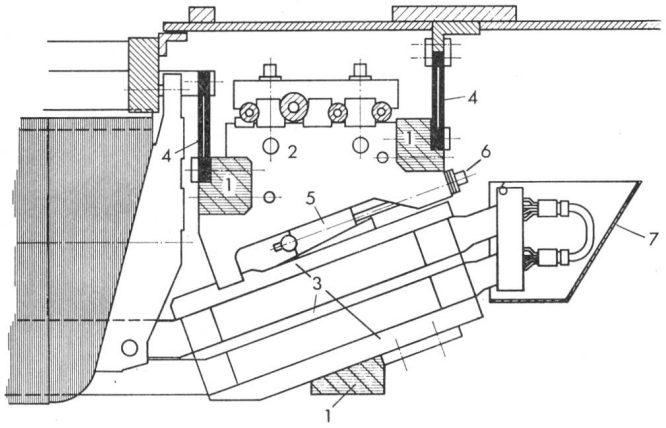

Fig. 5 Querschnitt durch den Wickelkopf eines Stators

1 Abstützringe
2 Abstützwinkel
3 Zuglaschen
4 Abstützblätter (Federn)
5 Abstützkeil
6 GFK-Bolzen
7 GFK-Hülse

Längsrichtung liegen und die Biegefestigkeit in der Querrichtung damit klein ist. Trotzdem erweist sich das Strangziehverfahren als die wirtschaftlichste Methode, Nutenkeile mit kleinen Querschnitten herzustellen.

Bei kleinen Maschinen kann man auch GFK im Rotorwickelkopf verwenden. Zur Befestigung der Kupferleiter werden anstatt eines Stahlrings Bandagen auf den fertigen Rotor gewickelt. Die Prepreg-Bandagen bestehen aus längsgerichteten Glasfasern sowie aus Harz, das soweit angehärtet ist, dass es bei Raumtemperatur fest ist. Die Bandage wird unter grosser Vorspannung, bis zu 80 % der Festigkeit, aufgewickelt. Beim Aufheizen wird das Harz wieder flüssig und härtet dann aus. Ein Teil der Vorspannung geht verloren; der Rest muss ausreichen, um die Fliehkräfte ohne Lockerung des Wickelkopfes zu halten.

Eines der Hauptprobleme bei GFK liegt in der Krafteinleitung und -übertragung. Als Befestigungsstück (Armaturen, Bolzen, Nieten) verwendet man, wenn möglich, Metallteile. Wo aber, wie oft bei rotierenden Maschinen, die Konstruktion völlig isolierend sein muss, werden andere Fügetechniken notwendig. In der Elektrotechnik verwendet man unter anderem:

- Verklebungen;
- Bandagen;
- Nieten aus stranggezogenem Material;
- Bolzen.

Die letzte Methode sei noch kurz beschrieben:

Bolzenverbindungen aus GFK scheinen zunächst – wie Bolzen aus Holz – ungünstig zu sein. Sie haben aber die Vorteile, dass sie leicht nachzustellen und auszubauen sind und dass der Konstrukteur mit Bolzenverbindungen umzugehen versteht. GFK-Bolzen (Fig. 7) werden aus Laminat spanabhebend bearbeitet. Das Laminat hat die Mehrheit der Fasern in der Längsrichtung, aber auch, im Gegensatz zu Holz, einen Anteil in der Querrichtung, um das Gewinde zu verstärken. Die Muttern haben die Laminatrichtung senkrecht zur Achse und sind etwa doppelt so hoch wie Muttern aus Stahl. Solche Bolzen lassen sich etwa wie Metallbolzen verwenden. Unter Torsionsbeanspruchung spalten sie jedoch bei kleinen Drehmomenten parallel zur ursprünglichen Laminatrichtung. Beim Anziehen der Muttern muss beispielsweise ein Schmiermittel verwendet werden, um die Reibung und damit das Drehmoment klein zu halten.

Eine besondere Anwendung von GFK im Generatorenbau kommt bei grossen wassergekühlten Generatoren vor. Der Rotor muss hier im Unterdruck laufen, um die Luftreibung herabzusetzen. Der Unterdruck wird mittels eines «Luftspaltzylinders» aufrechterhalten, der im Spalt zwischen Stator und Rotor und sowohl isolierend als mechanisch fest und steif sein muss. Dieser grosse Zylinder (Fig. 8) wird aus GFK gewickelt.

In rotierenden Maschinen verwendet man auch Glaskordeln, d. h. Glasfaserseile mit einem gewobenen Glasfaserschlauch umwickelt, um die Kupferleiter zu befestigen und zu distanzieren. Solche Glaskordeln sind wärmebeständig, nehmen keine Feuchtigkeit auf und lassen sich mit Imprägnierharz gut tränken. Ferner wird GFK überall als Distanzstück sowie für weniger beanspruchte Teile wie Verkleidungen, Polrahmen, Ventilatorflügel, Bürstenhalter, Schalterschränke und Isolierhülsen verwendet.

3.2 Apparatebau, Freileitungen

Ein grosses Anwendungsgebiet für GFK liegt im Schalterbau. Als Beispiel sei zunächst ein Druckluft-Generatorschalter (Fig. 9) betrachtet, bei welchem GFK für verschiedene Zwecke und nach fast allen Methoden hergestellt verwendet wird. Dieser Schalter dient als Trenn- bzw. als Leistungsschaltelement zwischen dem Generator und dem Haupttransformator. Auf Grund dieses für ein Kraftwerk äusserst wichtigen Einsatzpunktes sowie der ungewöhnlich hohen Nenndaten, bis zu 36 kA Nennstrom bei bis zu 30 kV Nennspannung, ist es klar, dass hier nur die Verwendung von hochwertigen Werkstoffen zulässig ist. Auffallend sind die Hauben (*1* in Fig. 9) aus gefärbtem, handlaminiertem oder fasergespritztem GFK, wobei Versteifungsrippen, Löcher und Verbindungen mit eingelegt werden. Die Seite wird mit einer weiteren ähnlichen Verkleidung abgedeckt. Unter der Haube liegen die Ausschaltwiderstände, die auf U-Trägern und Klöt-

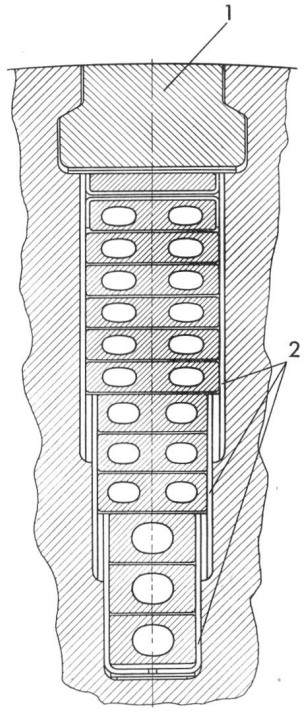

Fig. 6
Querschnitt einer Rotornut
Bezeichnung siehe Fig. 3

zen aus z. T. spanabhebend bearbeitetem Gewebelaminat befestigt sind. Am mittleren, aktiven Teil des Schalters wird GFK am meisten verwendet. Das Schaltkammerrohr (*2*) besteht aus gewickeltem Glasgewebe. Ferner muss dieser ganze, zentrale, aktive Teil des Schalters gegenüber dem Gehäuse völlig isoliert sein. Die Verbindungsteile bestehen mit Ausnahme der Polyamidstützer (*3*) ausschliesslich aus GFK. Als Beispiel gilt das Auspuffrohr (*4*), durch das die durch den Schaltlichtbogen erhitzte Luft in die Haube und dann ins Freie strömt. Ebenfalls gibt es unten ein Einspeiserohr für die Druckluft. Diese Rohre müssen mechanisch fest, höchstisolierend und luftdicht sein, wofür sich vakuumimprägniertes Glasgewebe eignet. Bevor die Druckluft durch das Auspuffrohr strömt, geht sie in ein Expansionsvolumen, wo sie sich entspannt und abkühlt. Dieser Dom (*5*), der auch im Raum zwischen Aktivteil und Gehäuse liegt und damit isolierend sein muss, wird aus GFK durch das Wickelverfahren

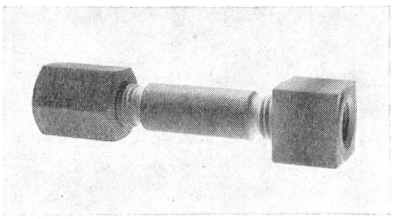

Fig. 7 Bolzen und Muttern aus GFK

mit schwarz eingefärbtem Harz hergestellt. Unten liegt ein Hebel (*6*), mit dem die Schaltstellung an die diversen Steuer- und Kontrollelemente gemeldet wird. Dieser Hebel besteht aus Gewebelaminat und wird mit einfachen Lochverbindungen befestigt und betätigt.

Dieses Beispiel zeigt, in wie vielen Formen GFK in einem Apparat verwendet werden kann. Solche Anwendungen wiederholen sich bei anderen Schaltertypen. Spezielle Anforderungen kommen jedoch bei ölarmen Schaltern, SF_6-Schaltern und in Freiluftanlagen vor.

In ölarmen Schaltern muss GFK bei gewissen Anwendungen wesentlich höhere elektrische Spannungen als in Druckluftschaltern aushalten. Gleichzeitig müssen die Teile, vor allem Rohre und Löschkammern, bei mechanischer Stossbeanspruchung durch Zug, Druck und Torsion öldicht bleiben. Es müssen z. B. vakuumimprägnierte Geweberohre verwendet werden. Allein die Einführung dieses Materials hat die heutige Konstruktion der Löschkammern ermöglicht.

Die höchsten elektrischen Beanspruchungen treten in SF_6-Schaltern auf, wo die GFK die sehr hohe elektrische Festigkeit des Schwefelhexafluoridgases erreichen sollte. Mit diesem Gas gibt es jedoch ein chemisches Problem. SF_6 ist an sich chemisch inert; durch den Lichtbogen und besonders in Anwesenheit von Feuchtigkeit werden jedoch fluorhaltige Zersetzungsprodukte gebildet, die das Glas angreifen und sowohl die mechanische als auch die elektrische Festigkeit beeinträchtigen können.

Bei Freiluftisolatoren, sei es im Schalterbau oder in allgemeinen Freileitungen, wird noch fast ausschliesslich Porzellan verwendet. Mit GFK kann man eine höhere Zugfestigkeit und Schlagzähigkeit erreichen, oder den Isolator leichter und kleiner auslegen. Die Kraft wird über Keile oder Schlau-

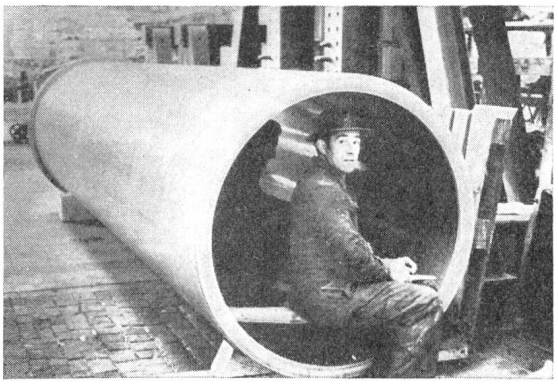

Fig. 8 Luftspaltzylinder eines grossen wassergekühlten Generators

fen mit Metallarmaturen eingeleitet (Fig. 10). Eine ausreichende elektrische Durchschlagfestigkeit kann durch Vakuumimprägnieren erreicht werden. Das Problem liegt bei den Schirmen. Schirme müssen auch bei Porzellanisolatoren vorhanden sein, um den Kriechweg zu verlängern. Bei einem Kunststoffisolator muss das entsprechende Material leicht und über einem grossen Temperaturbereich witterungsbeständig sein. Es muss auch in diesem Temperaturbereich, trotz des Unterschiedes in den Ausdehnungskoeffizienten zum GFK, gut haften, um keinen Durchschlag entlang der Grenzschicht zu gestatten. Isolatoren mit Schirmen aus zykloaliphatischen Epoxidharzen sowie aus Silikonkautschuk sind bereits entwickelt worden [2; 5; 6]. Ob man jedoch durch die kleinere Dimensionierung und das geringere Gewicht die zusätzlichen Kosten gegenüber Porzellan ausgleichen kann, bleibt noch abzuwarten.

3.3 Transformatoren, Wandler

Bei den Transformatoren, Wandlern und ähnlichen Apparaten wird GFK als Isolation und für Distanzierstücke (aus Laminat geschnitten oder stranggezogen) ähnlich wie in rotierenden Maschinen verwendet. In Spulen für grosse Magnete ist die gute Strahlenbeständigkeit von Vorteil. Eine einfache, in Transformatoren verwendete Art von Zugverbindung ist die Zuglasche (Fig. 11), eine Schlaufe aus GFK-Rovings oder Band.

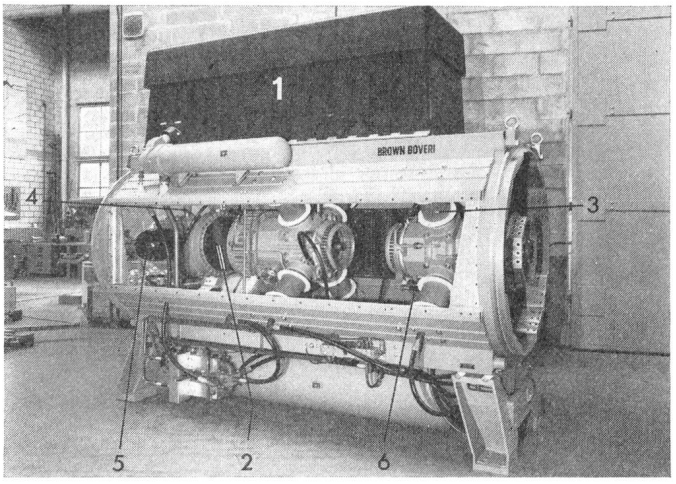

Fig. 9 Druckluft Generatorschalter

1 Deckhaube
2 Schaltkammerrohr
3 Stützer
4 Auspuffrohr
5 Auspuffdom
6 Hebel

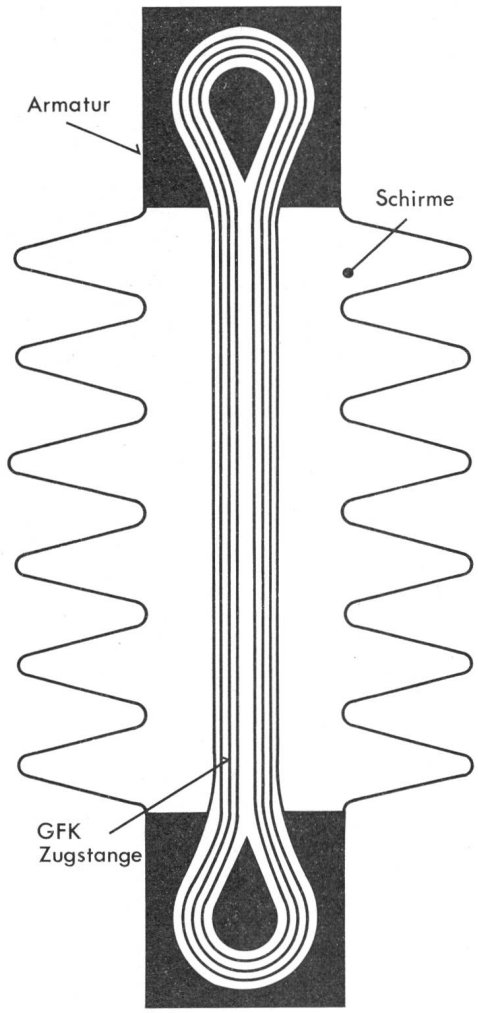

Fig. 10 Schematischer Querschnitt eines Freiluftisolators aus GFK

Im Transformatorenbau bietet GFK auch die Möglichkeit, die Dimensionen und das Gewicht zu verkleinern. Der ganze Kessel lässt sich aus GFK herstellen, was bedeutet, dass man die Kesselwand näher an die Wicklungen stellen und die Gesamtmasse wesentlich reduzieren kann. Es muss noch das elektrische und mechanische Feld nach aussen abgeschirmt werden. Eine weitere Entwicklung ist die Verwendung von Preßstangen aus GFK anstelle von Stahl. Diese Stangen halten die Wicklungen zusammen, besonders im Kurzschlussfall, müssen aber wegen des hohen elektrischen Feldes weit ausserhalb der Wicklungen gestellt werden. Wenn man diese Stangen unmittelbar neben und zwischen die Wicklungsblöcke stellen kann, wird das Gesamtausmass des Transformators wesentlich verkleinert. Dafür müssen die Stangen hochisolierend sein, was mit Vakuumimprägnieren ermöglicht wird. Solche Stangen mit keilförmigen Enden zeigen die Fig. 12 und 13. Die Armaturen, die auch isolierend sein müssen, bestehen aus zwei Halbkonen aus Gewebelaminat und werden von einem gewickelten Ring gehalten.

Bei der Entwicklung dieser Stange zeigte es sich, wie nicht alle extremen Anforderungen mit vakuumdruckimprägnierten Teilen zu erreichen sind. Es werden mechanische Festigkeit, hohe elektrische Durchschlagfestigkeit und Wärmebeständigkeit verlangt. Für die mechanische Festigkeit sollte der Fasergehalt möglichst hoch sein. Über einem gewissen Fasergehalt wird aber die elektrische Durchschlagfestigkeit nicht erreicht, weil das Harz beim Vakuumdruckimprägnieren nicht in die Zwischenräume eindringen kann. Aus dem gleichen Grund muss das Harz eine möglichst kleine Anfangsviskosität aufweisen. Thermisch muss das Harz noch eine hohe Erweichungstemperatur haben, was zusammen mit der Anforderung nach einer kleinen Viskosität die Auswahl sehr begrenzt. Die wärmebeständigen Harze sind jedoch meist spröder, was wiederum die mechanische Festigkeit beeinträchtigt. Es muss je nach den genauen Anforderungen ein Kompromiss hinsichtlich Fasergehalt und Harzsystem getroffen werden.

3.4 Elektronik, Stossgeneratoren, Senderbau

In der Elektronik werden Gewebelaminate häufig als Printplatten verwendet (Fig. 14). Die Platten werden mit Kupfer beschichtet, das Leiterbild aufgebracht und das nicht gebrauchte Kupfer wieder abgeätzt. GFK ist bezüglich mechanischer Stabilität und Feuchtigkeitsaufnahme dem billigeren Phenol-Hartpapier überlegen. Die Transparenz hilft auch bei einer visuellen Kontrolle der Platten.

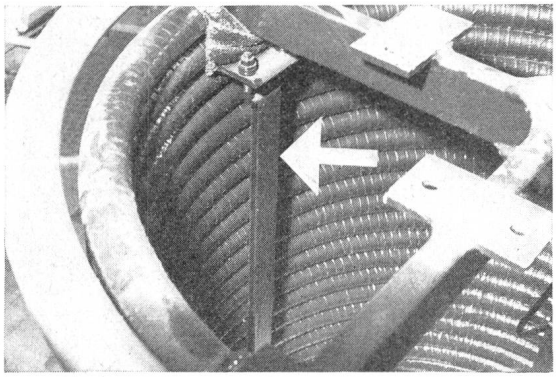

Fig. 11 Zuglasche in einer Trägerfrequenzsperre

Fig. 12 Transformatorzugstange aus GFK

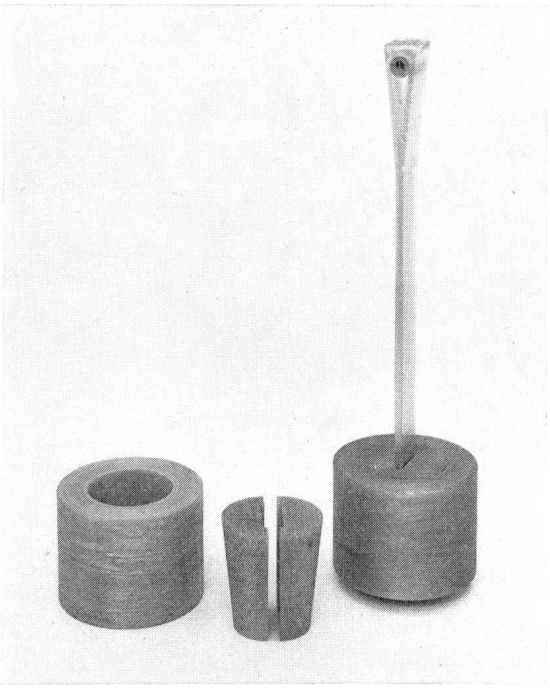

Fig. 13 300 mm lange Prüfstange mit Armaturen aus GFK

Besonders auffallend ist die Verwendung von GFK in im Freien aufgestellten Stossgeneratoren für die Prüfung von Isolatoren. Zu diesem Zweck werden ganze Türme, die die Kondensatorreihe enthalten, aus GFK gebaut [7].

Im Sender- und Antennenbau wird GFK als struktureller Teil sowie als Verkleidungsmaterial verwendet. Hier werden oft die teureren Silikonharze als Matrix eingesetzt, weil sie in hohen Frequenzbereichen einen niedrigen Verlustfaktor aufweisen. Ausserdem sind sie witterungsbeständig. Aus dem gleichen Grund werden Radarhauben für Flugzeuge auch aus glasfaserverstärktem Silikonharz hergestellt.

4. Neue Entwicklungen

4.1 Harze und Verfahrenstechnik

Für GFK ist schon eine reiche Auswahl an Harzen vorhanden. Es werden zunehmend die zykloaliphatischen Epoxidharze eingesetzt, die in ihrem elektrischen Verhalten, vor allem Kriechwegfestigkeit, Witterungsbeständigkeit und z. T. Wärmebeständigkeit Vorteile gegenüber den gewöhnlichen Epoxidharzen aufweisen. Für hohe Temperaturen, die in der Elektronik vor allem bei Traktionsmotoren vorkommen, stehen Silikon- und Polyimidharze mit Dauerbeständigkeit bis zu 200 °C schon im Einsatz; weitere Harze sind in Entwicklung. Solche Harze sind meist noch teuer und schwierig zu verarbeiten. Was andere Matrixwerkstoffe anbelangt, sind die Entwicklungen auf dem Gebiet der faserverstärkten Keramik in Kombination mit den neuen alkalibeständigen Glasfasern nicht zu vernachlässigen. Solche Materialien finden allmählich Anwendung im Bausektor; ob sie in der Elektroindustrie einsetzbar sind, bleibt noch abzuwarten.

Vakuumimprägnierte Teile werden, wie schon gesehen, an vielen Stellen wegen deren Luftfreiheit und entsprechend hoher elektrischer Durchschlagfestigkeit verwendet. Weitgehende Porenfreiheit kann man aber jetzt beim Wickel- und Strangziehverfahren durch entsprechende Wahl der Herstellungsbedingungen erreichen [8]. Bei grossflächigen Teilen wird das Handlaminieren zunehmend durch das Harzinjektionsverfahren und durch Pressmassen ersetzt, wo die Stückzahlen es rechtfertigen. Schwundarme Polyesterharze («Low Profile») lassen eine glättere Oberfläche zu. Sandwichkonstruktionen, beispielsweise mit GFK verkleidete Schaumstoffe, sind besonders steif und ermöglichen leichtere Konstruktionen.

Als Presslaminate für spanabhebende Bearbeitung sind jetzt Mattenlaminate erhältlich, deren Eigenschaften diejenigen von Gewebelaminaten fast erreichen, und das in allen, statt nur in zwei Richtungen. Mischlaminate, die aus abwechselnden Gewebe- und Mattenschichten aufgebaut sind, haben mehrere Vorteile; wie bessere Haftung zwischen den Schichten, bessere mechanische Bearbeitbarkeit und einen billigeren Preis als reines Gewebelaminat. Hohe Zugfestigkeit in zwei senkrecht zueinander liegenden Richtungen, wenn diese Anforderung wirklich gestellt wird, lässt sich besser mit einem Laminat aus aufeinandergestapelten, abwechselnd senkrecht gelegten Rovingssträngen als mit einem Gewebelaminat erreichen.

4.2 Konstruktion

Auf mehreren Gebieten gibt es eine Tendenz zu verbesserter Konstruktion, vor allem aber beim Wickelverfahren, wo die Spannungen beim Auftreten der Risse sowie beim Faserbruch genau im voraus zu berechnen sind. Die Faserrichtungen und die Abmessungen werden den Anforderungen genau angepasst. Dazu wird eine Rationalisierung bei der Herstellung angestrebt, indem möglichst eine Maschine für die Fabrikation eines besonderen Bauteils gebaut wird, was selbstverständlich nur bei grossen Stückzahlen möglich ist.

In der Elektrotechnik spielt vor allem die Zuverlässigkeit eine wesentliche Rolle. Es müssen zunächst nicht nur die Kurzzeiteigenschaften, sondern es muss vor allem das Dauerverhalten des Werkstoffs bekannt sein. Solche Daten sind für GFK nur zum kleinen Teil vorhanden. Ferner gibt es das Problem der Streuung der Eigenschaften. Diese Streuung, die ± 20 % erreichen kann, hat viele Ursachen: uneinheitliche Harzmischung, Aushärtung und Faserverteilung, Poren, unvollständige Faser-Harz-Bindung. Der Konstrukteur muss jedoch einen «sicheren» Wert annehmen, der oft weit unter dem Durchschnittswert liegt, bzw. einen grossen Sicherheitsfaktor einführen, oder es muss jedes einzelne Stück geprüft werden, was sehr teuer ist. Man sollte unbedingt versuchen, homogenere GFK herzustellen.

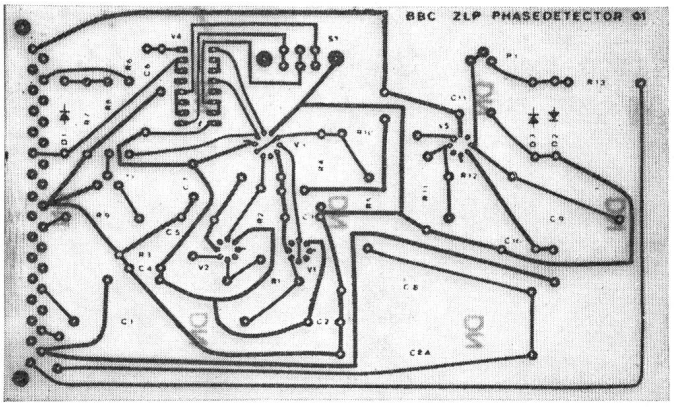

Fig. 14 Printplatte aus GFK

Eigenschaften der mit hochfesten Fasern verstärkten Verbundstoffe Tabelle IV

	Dichte kg/m³	Festigkeit N/mm²	E-Modul kN/mm²	Materialpreis ohne Arbeit 1000 Fr./m³
E-Glas	1900	1300	46	13
Hochfestes Glas	1900	mind. 1500	50	50
Bor	1900	1100	230	2300
Polyamid	1350	1500	80	55...160
Kohlenstoff (niedriger Modul)	1600	1400	100	480
Kohlenstoff (hoher Modul)	1700	600	250	850

4.3 Fasern

Die bekanntesten Fortschritte in den letzten 10 Jahren auf dem Gebiet der faserverstärkten Kunststoffe liegen bei den Fasern, insbesondere bei denen aus Bor, Kohlenstoff und Polyamid. Die wichtigsten Eigenschaften sind aus Tabelle IV ersichtlich. Die Festigkeit von gewöhnlichen E-Glasfasern lässt sich durch Änderung der Zusammensetzung und der Oberflächenbehandlung («R- oder S-Glas») erhöhen, aber ohne eine entsprechende Erhöhung des E-Moduls, so dass die hohe Festigkeit nur bei immer höheren Dehnungen ausgenützt werden kann. Borfasern sind und bleiben teuer. Polyamid-Fasern bieten dem Elektrotechniker mehr, weil sie isolierend sind. Sie sind dazu doppelt so steif wie Glas, sehr fest, zäh und leicht. Andererseits sind sie mechanisch schwierig zu bearbeiten, sie haften oft schlecht am Harz und haben eine niedrige Druckfestigkeit, die auch die Biegefestigkeit beschränkt. Polyamid- wie auch Kohlenstofffasern werden ihre Anwendung vor allem im Flugzeugbau finden. Gegenüber Glas zeichnen sie sich dort durch ihre höhere Steifigkeit und niedrige Dichte aus. In der Elektrotechnik spielen aber diese Eigenschaften meist keine grosse Rolle. Viele Anwendungsvorschläge liegen vor: Bandagen, die Rotorkappe für die Befestigung des Rotorwickelkopfes in grossen Generatoren, Schwungräder für Energiespeicherung, schnell bewegte Computerteile, Kohlebürsten für Stromübertragung. Beim letzteren sind schon mit metallplattierten Kohlenstoffasern sehr hohe Stromübertragungsdichten gemeldet worden [9]. Ein definitiver Einsatz dieser Fasern in der Elektrotechnik liegt noch nicht vor und wartet nicht zuletzt darauf, bis durch zunehmende Anwendung auf anderen Gebieten die Faserpreise herabgesetzt werden.

Insgesamt gesehen gibt es im Moment keine «welterschütternde» Entwicklung auf dem Gebiet der faserverstärkten Kunststoffe, sondern eine Reihe kleiner Entwicklungen und dazu einen Trend zu Rationalisierung, Normung und werkstoffgerechter Ausnützung vorhandener Materialien.

Der Autor dankt Dr. *E. Jülke, H. Fuchs* und Dr. *A. Puck* für wertvolle Anregungen.

Literatur

[1] *K.-H. Decker* und *W. Schönthaler:* Glasfaserverstärkte härtbare Formmassen in der Elektrotechnik. Kunststoffe 63(1973)12, S. 822...828.
[2] *M. Kuhl:* Langstabisolatoren aus Kunststoffen für Hochspannungsfreileitungen. Mitteilungen der Rosenthal-Isolatoren GmbH -(1970)36, S. 21 ...51.
[3] *H. W. Rotter:* GFK-Bauelemente im Elektromaschinenbau. Kunststoffe 60(1970)12, S. 974...978.
[4] *E. K. L. Pollard* and *B. R. Kemeys:* The manufacture, quality control, design, testing and application of high strength glass fibre reinforced products. Proceedings of the 7th International Reinforced Plastics Conference (1970), Paper 22.
[5] *O. Ernst, A. Puck* und *W. Wehrli:* Konstruktion und Berechnung der GFK-Stab-Verstärkung eines Hochspannungs-Hängeisolators. Kunststoffe 60(1970)12, S. 978...983.
[6] *P. Dey, B. J. Drinkwater* and *S. H. R. Proud:* Developements in insulation for high voltage overhead transmission systems. Proceedings of the IEEE 9th Electrical Insulation Conference (1969), p. 38...43.
[7] *J. E. Swainson* and *D. J. Wade:* The design and use of reinforced plastics for outdoor impulse generators. Proceedings of the 8th International Reinforced Plastics Conference (1972), Paper 6.
[8] *D. Lissewski, J. Moeller* und *A. Puck:* Höchstspannungs-Prüftransformator für 2,4 MV mit GFK/Giessharz-Iosliermantel. Kunststoffe 64 (1974)12, S. 734...741.
[9] *I. R. McNab* and *G. A. Wilkin:* Carbon-fibre brushes for superconducting machines. Electronics and Power 18(1972)1, p. 8...10.

Adresse des Autors:
Dr. *J. H. Greenwood,* BBC AG Brown, Boveri & Cie., Abt. ZLK, 5401 Baden.