

Fachaufsatz ■ Verfasser: Fritz Sorg, Rudolf Hanov, Heinz Raithel

Gießharztransformatoren – Beim **Brandverhalten** die Nase vorn

Power Transmission and Distribution

SIEMENS

SIEMENS
siemens-russia.com

Überall dort, wo Verteilungstransformatoren in unmittelbarer Nähe des Menschen zum Einsatz kommen, sind GEAFFOL-Gießharztransformatoren risikoarm einsetzbar. Mit Gießharztransformatoren lassen sich die Einschränkungen ölisolierter Transformatoren vermeiden, deren Eigenschaften wie Betriebssicherheit und lange Lebensdauer aber übernehmen. Bis heute haben sich über 80.000 GEAFFOL-Gießharztransformatoren bei der Stromversorgung von Hochhäusern, Krankenhäusern, U-Bahn-Schächten, Bergwerken, Flughäfen, Windkraftanlagen und sogar auf Kreuzfahrtschiffen und in Kernkraftwerken bewährt. Dabei war häufig das gute Brandverhalten bei der Entscheidung des Betreibers für die Gießharzvariante das ausschlaggebende Kriterium. Die Ergebnisse von Brandversuchen bei renommierten Instituten belegen, dass GEAFFOL-Gießharztransformatoren – vor allem im Vergleich mit ölisierten Transformatoren – beim Brandverhalten erste Wahl sind.



Bild 1: GEAFFOL-Gießharztransformator im Prüffeld des Siemens-Transformatorwerks in Kirchheim/Teck: Werden GEAFFOL-Gießharztransformatoren in einen Umgebungsbrand einbezogen, tragen sie mit ihrer geringen Brandlast nur unwesentlich zum Brandgeschehen bei. Auch durch Kurzschlusslichtbögen bei Eigenfehlern entzünden sich ihre Spulen nicht. Es entstehen auch keine über die brandüblichen Rauchgase hinausgehenden toxischen Anteile.

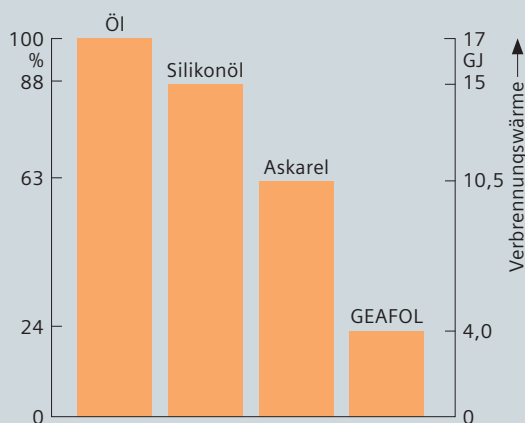


Bild 2: Verbrennungswärme der Isolierstoffe vergleichbarer 630-kVA-Transformatoren mit verschiedenen Isoliermedien: Die Verbrennungsenergie eines 630-kVA-Mineralöltransformators beträgt mehr als das vierfache eines GEAFFOL-Gießharztransformators.

Gießharztransformatoren – beim Brandverhalten die Nase vorn

Fritz Sorg, Rudolf Hanov, Heinz Raithel*

Die GEAFFOL-Gießharztransformatoren, die Siemens Power Transmission and Distribution (PTD) in seinen Transformatorenwerken produziert, sind schwer entflammbar und selbst verlöschend (Bild 1).

Werden sie in einen Umgebungsbrand einbezogen, tragen sie mit ihrer geringen Brandlast nur unwesentlich zum Brandgeschehen bei. Auch durch Kurzschlusslichtbögen bei Eigenfehlern entzünden sich die Spulen des GEAFFOL-Gießharztransformators nicht. Es entstehen auch keine über die brandüblichen Rauchgase hinausgehenden toxischen Anteile. Siemens rät seinen Kunden, vor allem im Hinblick auf das Brandverhalten, aus Sicherheitsgründen GEAFFOL-Gießharztransformatoren in Infrastrukturprojekten wie Kaufhäusern oder Bürogebäuden einzusetzen. Dabei profitiert der Betreiber nebenbei auch noch von weiteren Vorzügen wie hoher Wirtschaftlichkeit und bester Umweltverträglichkeit.

Trockentransformatoren sind grundsätzlich entsprechend der nachgewiesenen Umgebungs-, Klima- und Brandklasse zu kennzeichnen. Die GEAFFOL-Gießharztransformatoren erfüllen mit der Umgebungsstufe E2, der Klimaklasse C2 und der Brandklasse F1 die höchsten in IEC 60076-11 definierten Klassen und bieten somit größtmögliche Betriebssicherheit.

Stellt man den bei vollständiger Verbrennung aller Isolierstoffe frei werdenden Energieinhalt von Transformatoren, die mit Mineralöl, Silikonöl oder Esterflüssigkeiten gefüllt sind, dem von Gießharz isolierten Verteilungstransformatoren gegenüber, so fällt der Vergleich immer zugunsten des Gießharztransformators aus. Zum Beispiel beträgt die Verbrennungsenergie eines 630-kVA-Mineralöltransformators mehr als das vierfache eines GEAFFOL-Gießharztransformators (Bild 2).

Bei diesem Vergleich fehlen zwar Merkmale wie Entflammbarkeit und Brenngeschwindigkeit, doch er lässt erkennen, dass die Brandlast von gießharz-isolierten Transformatoren erheblich geringer ist als die flüssigkeitsgefüllter Umspanner.

* Dipl.-Ing. Fritz Sorg ist Entwicklungsleiter, Dipl.-Ing. Rudolf Hanov Projektleiter Entwicklung und Dipl.-Ing. Heinz Raithel Vertriebsleiter im Transformatorwerk Kirchheim/Teck des Siemens-Unternehmensbereichs Power Transmission and Distribution (PTD).

Wicklungsaufbau und Gießharzgemisch bestimmen Brandverhalten

Das Brandverhalten der Gießharztransformatoren, die Siemens u. a. in Kirchheim, Deutschland, herstellt, wird maßgeblich durch den Wicklungsaufbau bestimmt, weil dieser die Eigenschaften der einsetzbaren Gießharzgemische entscheidend beeinflusst: Das Geheimnis eines guten oder schlechten Brandverhaltens eines Gießharztransformators liegt unter anderem im Mischungsverhältnis der Isolierung, die beim GEAFOL-Transformator aus einer umweltfreundlichen und recyclebaren Epoxidharz-Quarzmehl-Mischung besteht. Die Kirchheimer stellen die Isolierung ihrer Gießharztrafos aus einer Mischung von zwei Dritteln Quarzmehl und einem Drittel Epoxidharz her, so dass die Transformatoren später hinsichtlich des Brandverhaltens auf der sicheren Seite liegen.

Renommierte Prüfinstitute, bei denen Siemens seine Gießharztransformatoren auf Brandschutz prüfen lässt, bestätigen dies. So wurden zuletzt an einem 1500-kVA-Transformator im Jahr 2005 im Prüfinstitut der CESI (Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano), Italien, umfangreiche Tests erfolgreich vorgenommen – unter anderem auch die Prüfung zum Nachweis der Brandklasse F1 gemäß IEC 600076 – 11 Kapitel 28.3 (Bild 3).

Dabei wurde in einer speziellen Kammer die Nachbildung eines Transformatorrenschenkels gleichzeitig mit

- Flammen aus einer Spirituswanne und
- Strahlungswärme von einer senkrecht stehenden Heizstrahlerwand (24 kW, 750 °C) geprüft.

Die Prüfkriterien waren:

- die maximale Abgastemperatur und deren zeitlicher Verlauf und
- die Rauchentwicklung (der Mittelwert des Lichttransmissionsgrads von der 20. bis zur 60. Minute nach Prüfbeginn durfte 20 % nicht unterschreiten).

Die guten Ergebnisse der Brandversuche wurden ohne Zugabe von flammhemmenden Mitteln, wie Halogene erzielt. Ebenso wurden keine Zusätze wie Aluminiumoxidtrihydrat verwendet, die die mechanische Festigkeit negativ beeinflussen.

Früher schon fanden Brandversuche mit Rauchgasuntersuchungen im Allianz-Zentrum für Technik sowie Untersuchungen der Pyrolyseprodukte des Gießharzformstoffes für GEAFOL-Transformatoren statt. Die Untersuchungsergebnisse haben gezeigt, dass sich die Transformatoren durch Kurzschlusslichtbögen bei Eigenfehlern nicht selbst entzünden können. Werden sie bei einem Umgebungsbrand in das Brandgeschehen einbezogen, intensivieren sie das Brandgeschehen nur unwesentlich mit ihrer eigenen geringen Brandlast. Gezeigt haben die Versuche auch, dass Behinderungen und Gefährdungen durch Hitzeeinwirkung und durch Brandgase bei der Brandbekämpfung weitgehend identisch sind mit denen bei konventionellen Bränden.

Ziel der Untersuchungen und Tests war es, das Verhalten von GEAFOL-Gießharztransformatoren in kritischen Betriebszuständen, zum Beispiel unter dem Einfluss energiereicher Kurzschlusslichtbögen und bei Einbezug des Transformators in Umgebungsbrände zu untersuchen. Dabei lag der Schwerpunkt auf der Untersuchung der Umweltbelastung und der möglichen Toxizität der Brandgase. Aber auch der Gewässerschutz spielte eine Rolle. Ein gießharzisolierter Trockentransformator kann die Forderungen einschlägiger Normen uneingeschränkt erfüllen, zum Beispiel die der VDE 0101 hinsichtlich Brandschutz und Gewässerschutz. Damit ist er prädestiniert für Einsatzfälle, in denen diese Bedingungen vorrangig erfüllt werden müssen.

Es waren aber auch die Folgen einer Brandeinwirkung sorgfältig und sachverständig zu erforschen, um Gefahren, wie sie von PCB gefüllten Transformatoren ausgehen, sicher auszuschließen (PCB = polychlorierte Biphenyle¹⁾). Als Hauptkriterium stellte sich die Frage, ob und unter welchen Bedingungen ein Gießharztransformator brennen kann und welche Brandprodukte dabei entstehen können. Eine Verbrennung ist nach Entfernung der Zünd- oder Brandquelle ein autonomer Prozess, das heißt, der Vorgang wird durch das energetische Gleichgewicht von Reaktionswärme und Wärmeabfuhr bestimmt. Von der Flamme wird der Kunststoff durch Wärmezufuhr aufgeheizt und zersetzt. Die gasförmigen Zersetzungsprodukte brennen. Es liegt in der Natur autothermer Prozesse, dass ohne ausreichende Wärmezufuhr aus der Verbrennung selbst keine stabile Verbrennung möglich ist. Im Falle der Beflammung von Gießharzformstoffen und darin eingebetteten Wicklungen oder von flüssigen Kunst- und Isolierstoffen, kann die Wärmezufuhr zu einem Temperaturanstieg bis zur Zündtemperatur führen. Bei hinreichender Sauerstoffzufuhr zünden die gasförmigen Produkte.

So sind zwei Bedingungen zu erfüllen, um eine selbständige Verbrennung stabil aufrechtzuerhalten: Es muss erstens die Stofftemperatur bis zur Brennpunkttemperatur ansteigen – die liegt beim GEAFOL-Gießharzformstoff über 450 °C. Es muss zweitens eine hinreichend große Wärmemenge durch die Verbrennung entstehen, um diese aufrechtzuerhalten.



Bild 3 a + b: Sehr gutes Verhalten bei direkter Flammeinwirkung bescheinigt: 1.500-kVA-GEAFOL-Gießharztransformatoren-Prüfling im Prüfinstitut der CESI im Juli 2005 vor (oben) und nach (unten) der Prüfung zum Nachweis der Brandklasse F1 gemäß IEC 600076.

1) Anmerkung: PCB-gefüllte Transformatoren dürfen heute nicht mehr produziert werden, sind aber teilweise noch unter strengen Auflagen im Einsatz.



Bild 4: GEAFOLE-Gießharztransformator im Kurzschlusslichtbogenversuch:
a) vor dem Versuch,
b) während des Versuchs sowie
c) nach dem Versuch.

Praxisnahe Versuche zum Brandverhalten von Gießharztransformatoren

Die experimentellen Untersuchungen zum Brandverhalten von Gießharz-Trockentransformatoren wurden praxisnah an kompletten Transformatoren in zwei Richtungen ausgeführt:

- Einwirkung von Hochleistungslichtbögen auf das Innere und die Oberfläche des Transformators sowie
 - Einwirkung von Umgebungsbränden auf einen Transformator und Analyse der Brandgase.
- Für diese Versuche sind 800-kVA-Transformatoren in Normalausführung ausgewählt worden.

Die geringe Brandlast von GEAFOLE-Gießharztransformatoren beruht auf der Tatsache, dass über 90 Prozent des Gewichts metallische Werkstoffe wie Elektroblech, Aluminium und Stahl ausmachen, und weniger als zehn Prozent auf Isolierstoffe entfallen. Von den Isolierstoffen wiederum ist lediglich etwa die Hälfte ihres Gewichts brennbar, weil die Gießharzisolierung zu zwei Dritteln aus Siliziumdioxid (SiO_2) besteht – also aus feinstem Quarzsand. Es tragen also weniger als fünf Prozent brennbare Substanzen zum Gesamtgewicht eines GEAFOLE-Gießharztransformators bei.

Brandversuche unter Lichtbogeneinwirkung

Ausgelöst durch innere Transformatorfehler – zum Beispiel Windungsschlüsse, Spulenschlüsse, seltene Überschläge (Phase-Phase oder Phase-Erde) oder Durchschläge der Oberspannungswicklung auf die Unterspannungswicklung – können an Gießharztransformatoren Kurzschlusslichtbögen entstehen, die mit ihrer Temperatur (bis 10.000 °C) auf die Isolierstoffe einwirken. Die Brenndauer solcher Lichtbögen wird durch die Sicherungseinrichtungen begrenzt, die dem Transformator vorgeschaltet sind. Deren Abschaltzeit liegt in der Praxis im Allgemeinen unter 0,3 Sekunden.

Um das Verhalten des Gießharztransformators unter Lichtbogeneinwirkung zu untersuchen, fanden im Hochleistungsprüffeld der Forschungsgemeinschaft für Hochspannungs- und Hochstromtechnik e. V. in Mannheim an einem 800-kVA-GEAFOLE-Transformator Lichtbogenversuche statt. Dabei wurden die Bedingungen gegenüber den in der Praxis zu erwartenden Voraussetzungen verschärft. Für die Versuche 1 und 2 galt:

- Dreiphasiger Oberspannungs-Klemmenkurzschluss, eingeleitet durch Zünddraht,
- Kurzschlüsse von 0,5 Sekunden und 2 Sekunden Dauer,
- Transformatoren betriebswarm (Wicklungen im Kurzschluss auf nahezu 100 °C aufgeheizt),
- Kurzschlussleistung 150 MVA.

Bild 4 zeigt den Transformator mit der Anordnung des Zünddrahts unmittelbar unter der Dreieckschaltleiste und den Lichtbogen während des Kurzschlusses und den Transformator nach dem

Zwei-Sekunden-Kurzschluss. Unter der Hitzeeinwirkung der Kurzschlusslichtbögen brannten die Harzanteile des Gießharzformstoffs aus einer dünnen Oberflächenschicht heraus. Zurück blieben das Quarzmehlgerüst und Russspuren, wobei die entstehenden Quarzmehlschichten eine Schutzwirkung für die tiefer liegenden Harzschichten übernahmen. An den Lichtbogen-Fußpunkten, also den metallischen Anschlussstücken, schmolz und verdampfte das Leitermaterial partiell. Nach dem Abschalten des Lichtbogens war kein Nachbrennen von Isolierstoffen zu beobachten. Dies zeigten auch Filmaufnahmen mit High-Speed-Kameras. Trotz der sichtbaren Oberflächenschäden blieb der Transformator funktionsfähig.

Nach den beiden Lichtbogenversuchen wurde der Transformator noch zwei weiteren Tests unterzogen: Die Oberspannungswicklungen aller drei Phasen wurden angebohrt, sechs Millimeter dicke Nägel eingetrieben und mit dem Zünddraht verbunden, um direkte Windungs- und Wicklungskurzschlüsse zu erzeugen. Das Ergebnis war das gleiche: Obwohl auf Phase U sogar eine Oberspannungs-Teilspule durch die extrem hohen Kurzschlusskräfte abgesprengt wurde, war kein Zünden und kein Nachbrennen des Gießharzformstoffs oder anderer Isolierteile zu erzwingen.

Brandversuche mit Holz- und Propangasfeuer

Bereits 1983 wurden Brandversuche mit einem 800-kVA-GEAFOL-Gießharztransformator im Brandhaus des Allianz-Zentrums für Technik in Ismaning ausgeführt. Zum Studium des Brandverhaltens wurden zwei Arten der Brandbeaufschlagung gewählt: Stützfeuer mit Holz und Stützfeuer mit Propangas. Mit den Brandbeaufschlagungen wurde eine unterschiedliche Flammeneinwirkung auf den Transformator nachgeahmt. Während das Stützfeuer mit Holz – angeordnet am Boden des Brandhauses – relativ großflächig angriff, seine Einwirkung auf die Isolierstoffe der Wicklung durch Eisenkern und Gestellteile dabei aber eine teilweise Abschirmung erfuhr, griffen die Flammen der Propangasbrenner direkt und ungehindert im unteren Wicklungsbereich an.

Der zweite Fall stellte von der Versuchsanordnung her den härteren Testfall dar. Obwohl die gesamte Verbrennungswärme im Falle Holz größer war als bei Propangas, waren bei Propangas die Brandschäden erkennbar größer. Der Transformator wurde an Kern, Unterspannungs- und Oberspannungs-Wicklung mit insgesamt 16 hochtemperaturbeständigen Nickel-Chromnickel-Thermoelementen bestückt, bei einer symmetrischen Anordnung mit je acht Thermoelementen für beide Versuche. Für das Holz-Stützfeuer wurden zehn Kilogramm unbehandeltes Fichtenholz auf Blechplatten „scheiterhaufenähnlich“ unter dem Transformatorschenkel W aufgeschichtet und mit Holzwolle angezündet. Der Heizwert der eingesetzten Fichtenholzmenge betrug etwa 188 MJ und die Flammentemperatur bis 1000 °C.

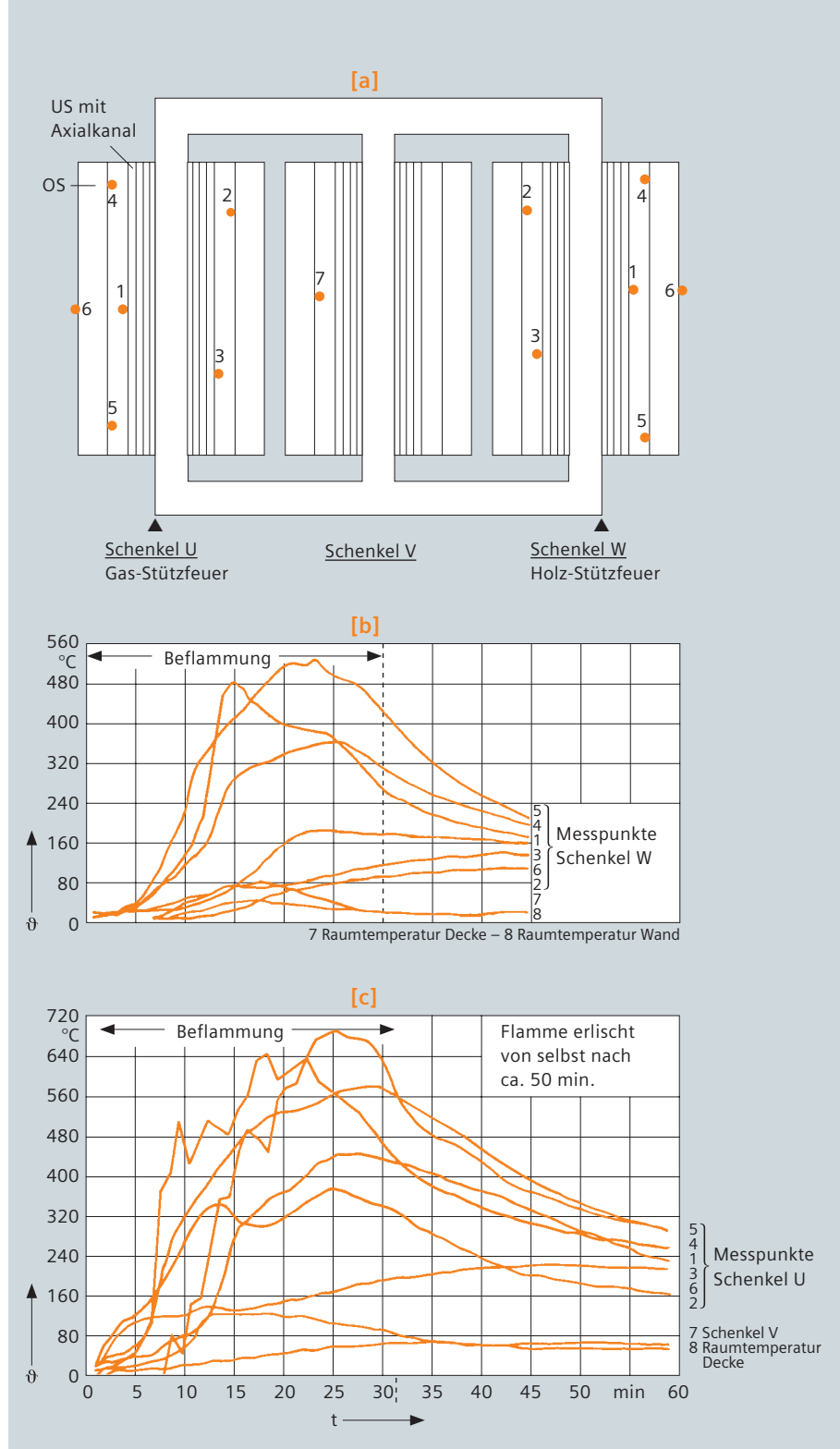


Bild 5: Temperaturverlauf am Versuchstransformator während des Brandverlaufs:
a) Lage der Thermoelemente am Transformator,
b) Versuch 1 mit Holzstützfeuer,
c) Versuch 2 mit Propangasstützfeuer.

Im Fall des Propangas-Stützfeuers beaufschlagten acht Propangas-Breitbrenner, gleichmäßig am Umfang verteilt, die Unterseite der Oberspannungswicklung des Schenkels U. Der Abstand der Brenner von der Spulenunterkante betrug rund 60 Millimeter, die Flammenrichtung etwa 45° und die Flammentemperatur bis 1.200 °C. Die Brenndauer während des Versuchs war 30 Minuten; der dabei gemessene Gasverbrauch betrug 2400 Gramm. Bei einem spezifischen Heizwert von 46.340 kJ/kg entspricht dies einem Gesamtheizwert von rund 111 MJ. Der zeitliche Temperaturverlauf an den Wicklungen des Transformators spiegelte das Brandgeschehen beim Stützfeuer Holz und Propangas wider (Bild 5).



Unter dem lang andauernden Einfluss der hohen Temperaturen des Stützfeuers entzündeten sich die Isolierstoffe der Unterspannungs- und Oberspannungswicklung, und durch die Kaminwirkung des Axial-Kanals in der Unterspannungswicklung und des Streukanals trat ein stärkeres Brennen mit Flammfackel über dem Transformator auf (Bild 6). Bemerkenswert war, dass die Außenfläche der Oberspannungswicklung nur im unmittelbaren Bereich des Stützfeuers zum Brennen gebracht werden konnte, und dass der Brand kaum zum Nachbarschenkel fortgeleitet wurde.

Bild 6: Brandablauf bei einer Beflammung mit Holzfeuer: Die Außenfläche der Oberspannungswicklung konnte nur im unmittelbaren Bereich des Stützfeuers zum Brennen gebracht werden, und der Brand wurde kaum zum Nachbarschenkel fortgeleitet.

Bild 7 zeigt das Brandverhalten des Transformators in zeitlicher Folge während des Versuchsablaufs mit Stützfeuer Propangas. Der Brand und die Flammfackel waren intensiver als beim Holzfeuer; trotzdem ging die Flammwirkung nach dem Abschalten der Propangasbrenner sofort zurück und erlosch nach ungefähr 20 Minuten von selbst.

Brennende Isolierteile verlöschten nach dem Wegfall der Energiezufuhr von selbst. Der Hartpapieranteil der Abstützklötze brannte mit kleinen Flammen weiter. Direkt den Flammen ausgesetzt Flächen wurden stark angegriffen, daneben liegende Isolierstoffpartien blieben weitgehend unbeschädigt. Selbst im Streukanal wurde der Brand – trotz der extremen Sauerstoffzufuhr – horizontal nicht fortgeleitet (Bild 9).

In Bild 9 ist deutlich zu erkennen, dass das Aluminium der Unterspannungswicklung des U-Schenkels über die Schmelztemperatur hinaus erhitzt war. Auch die Gesamtansicht der Oberspannungswicklungen zeigt, dass die Brände an den Außenschenkeln kaum auf den Mittelschenkel übergriffen (Bild 8).



Bild 8: Zustand des Prüflings nach dem Brandversuch: Auch die Gesamtansicht der Oberspannungswicklungen zeigt, dass die Brände an den Außenschenkeln kaum auf den Mittelschenkel übergriffen.

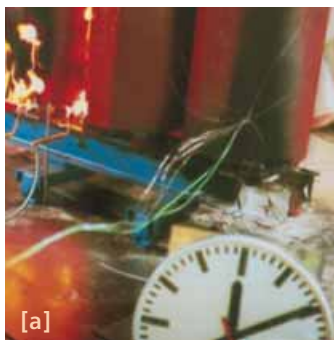


Bild 7: Brandablauf bei Beflammung mit Propangasfeuer.
a) nach sechs Minuten
c) nach 20 Minuten

b) nach acht Minuten
d) nach 33 Minuten



Bild 9: Unterspannungswicklungen nach dem Brandversuch: Direkt den Flammen ausgesetzte Flächen wurden stark angegriffen, daneben liegende Isolierstoffpartien blieben weitgehend unbeschädigt. Selbst im Streukanal wurde der Brand – trotz der extremen Sauerstoffzufuhr – horizontal nicht fortgeleitet.

Rauchgas: Probennahme und Analyseergebnisse

Der Brandraum, in dem die Tests stattfanden, hatte eine Grundfläche von vier mal vier Metern und eine Höhe von 4,1 Meter. Von der einen Stirnwand wurde er belüftet und an der gegenüberliegenden das Rauchgas abgesaugt. Hier befand sich das drei Zentimeter dicke Rohr zur Entnahme der Rauchgasproben. Das Rohr verlief in der Mitte der Wand senkrecht über die gesamte Raumhöhe. Etwa alle 50 Zentimeter waren etwa zehn Quadratzentimeter große Öffnungen zum Einlass der Rauchgase, die mit Staufiltern versehen waren. Die Rauchgase wurden von einer Membranpumpe angesaugt und mit 30 Litern je Minute direkt zum Gaschromatographie-Massenspektrometer gepumpt. Die Länge der Leitung betrug etwa 25 Meter. Die Leitung und die Membranpumpe heizten sich während der Messung auf 200 °C auf. Über ein Splitsystem und ein Gasdosiersystem wurden zehn Mikroliter Rauchgas im 20-Sekunden-Takt dem Messergebnis zur Online-Messung aufgegeben. Der hier vorgeschaltete Kapillargaschromatograph fungierte dabei nur als Schnittstelle zum Massenspektrometer und nicht zur Vortrennung der Brandgase. Im Abstand von etwa einer Sekunde wurden Massenspektren im Bereich von $m/e = 12$ bis $m/e = 650$ abgetastet und gespeichert (m/e : Masse-Ladungsverhältnis).

Parallel zur Online-Registrierung der Massenspektren wurden Gasproben zur quantitativen Analyse der Rauchgaskomponenten entnommen (Gasmäuse). Tabelle 1 fasst die massenspektrometrischen Ergebnisse der Brandgasanalysen zusammen und zeigt die qualitative Zusammensetzung der Brandgase aus der Online-Analyse in relativer Abhängigkeit der maximalen Spitzenintensität von $\text{CO}_2 = 100\%$.

m/e	Molekül- bzw. Fragment-Ion		Isotopen-Verhältnis	Maximale Peak-Intensität ²⁾ %	
				Holzfeuer	Gasfeuer
22	CO_2^{2+}	Kohlendioxid, doppelt geladen		0,27	0,34
25	C_2H^+	Fragment-Ion des Acetylen		0,025	0,03
26	C_2H_2^+	Acetylen		0,18	0,17
44	CO_2^+	Kohlendioxid	$^{12}\text{C}_{100} \quad ^{16}\text{O}_{100}$	100	100
45	$^{13}\text{CO}_2^+$	Kohlendioxid-Isotop	$^{13}\text{C}_{1,12}$	1,81	2,17
46	$\text{C}_2\text{H}_5\text{O}^+$	Fragment des Ethanol			
	$^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$	Kohlendioxid-Isotop	$^{18}\text{O}_{0,204}$	0,65	0,75
	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}^+$	Ethanol			
50	C_4H_2^+	Aromatenfragment		0,02	0,02
78	C_6H_6^+	Benzol		0,06	0,06
91	C_7H_7^+	Toluolfragment		0,05	0,04
92 ¹⁾	C_7H_8^+	Toluol		0,03	0,02

Tabelle 1: Massenspektroskopie der Verbrennungsprodukte eines Gießharztransformators

1) für m/e größer als 92 keine Angaben, die die genannten Prämissen erfüllen

2) CO_2 -Peak gleich 100 % gesetzt

An der Intensität des Molekül-Ions für Kohlendioxid CO_2^+ (Masse-Ladungs-Verhältnis $m/e = 44$) lässt sich der Brandverlauf verfolgen (Bilder 10 und 11). Kohlendioxid dient somit als Leitgas für die Beurteilung des Brandverlaufs.

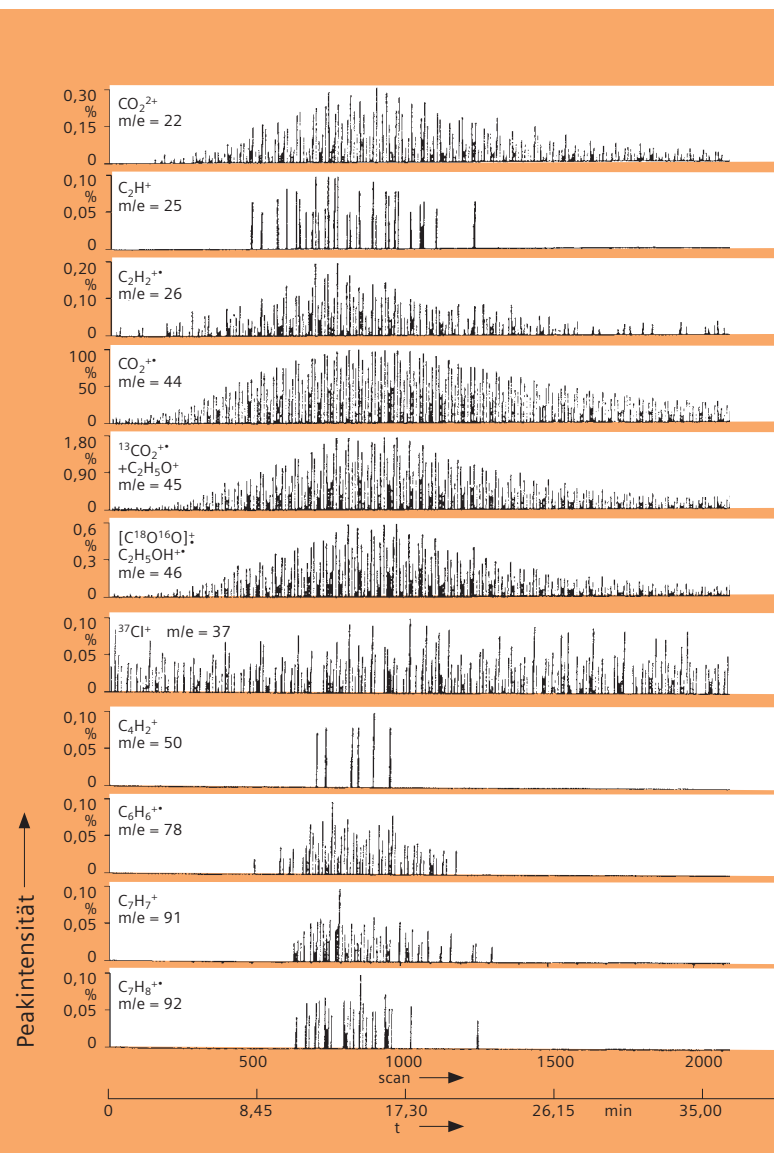


Bild 10: Massenchromatogramm bei Beflammung mit Holzfeuer (Scan 1 TO 2.278. Es wurden während des Versuchs 2.278 Gasproben entnommen)

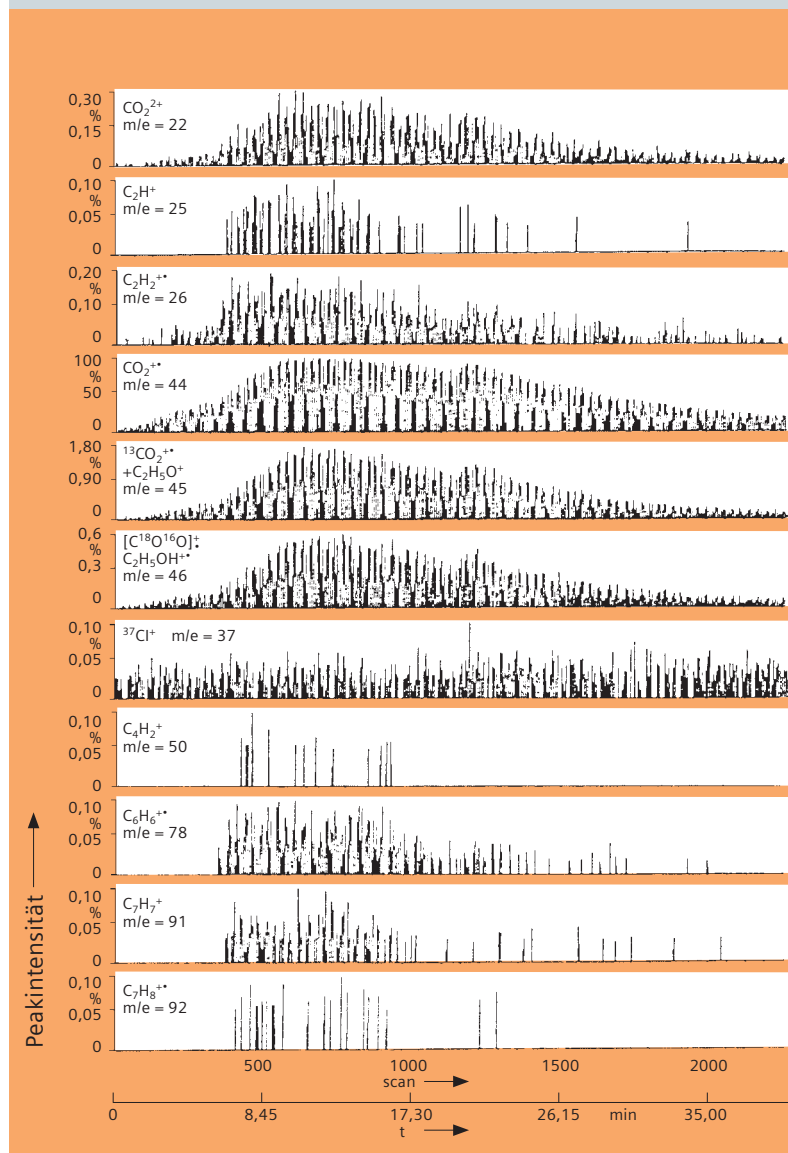


Bild 11: Massenchromatogramm bei Beflammung mit Propangasfeuer (Scan 1 TO 3.534. Es wurden während des Versuchs 3.534 Gasproben entnommen)

Eine Beflammung des Transformators kann nur solche Molekül- und Fragment-Ionen hervorrufen, die im Massenchromatogramm ein dem CO₂ analoges Verhalten zeigen, also nach dem Entzünden des Brands intensiver werden. Im Gegensatz dazu tritt beispielsweise das ³⁷CL⁺-Ion bereits in den ersten Massenspektren auf, seine Konzentration ist unabhängig vom Brandverlauf. Daraus muss geschlossen werden, dass Chlorionen nicht aus Brandgaskomponenten entstehen, sondern aus chlorhaltigen Verunreinigungen der Luft herrühren.

Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse der quantitativen Auswertung der Untersuchung der Gasproben aus den Gasmäusen. Bei der Beflammung mit Propangas zeigte sich erwartungsgemäß neben den Komponenten der Luft ein erhöhter Kohlendioxidanteil und zusätzlich nur noch geringe Mengen Acetylen. In den Brandgasen der Holzbeflammung fanden sich darüber hinaus Ethylen, Benzol, Toluol und Ethylbenzol. Zumindest Benzol und Toluol konnten aber nicht ausschließlich vom Holzfeuer verursacht worden sein, da diese beiden Komponenten auch durch die Online-Untersuchungen der Brandgase bei Propanbeflammung nachgewiesen wurden. Der Kohlenmonoxidgehalt wurde gaschromatographisch bestimmt. In der untersuchten Gasprobe aus einer Gasmaus wurde der höchste Kohlenmonoxidgehalt von 0,044 Milliliter pro 100 Milliliter gefunden.

Komponente	Gasmaus Nr.							
	Holzfeuer				Propangasfeuer			
	1	3	6	8	9	11	14	16
Wasser	0,17	–	–	–	–	–	0,13	–
Acetylen	–	0,003	0,002	0,002	0,003	0,005	0,004	–
Stickstoff	82,6	78,9	78,9	75,0	79,4	79,6	79,3	79,7
Kohlenmonoxid	0,003	0,01	0,012	0,08	–	0,012	0,013	0,003
Ethylen	0,005	–	0,005	–	–	–	–	–
Sauerstoff	15,4	18,8	18,9	23,4	19,4	18,1	17,9	19,2
Argon	1,29	0,95	0,99	1,19	0,92	0,90	0,92	0,92
Propen	0,001	–	–	–	–	–	–	–
Kohlendioxid	0,56	1,40	1,29	0,43	0,29	1,36	1,67	0,15
Buten	0,0002	–	–	–	–	–	–	–
Benzol	0,002	0,001	0,003	–	–	–	–	–
Toluol	0,001	0,001	0,002	–	–	–	–	–
Ethylbenzol ¹⁾	0,0009	–	–	–	–	–	–	–

Tabelle 2: Konzentration der Brandgaskomponenten in den Gasmäusen (evakuierte Glasgefäße), angegeben in ml je 100 ml
1) größere Moleküle als Ethylbenzol konnten nicht nachgewiesen werden

Verbrennungsprodukte „unter der Lupe“

Die Messungen zeigten, dass der Gießharzformstoff GEAFOLE als Verunreinigung in sehr geringen Mengen chorhaltige Verbindungen enthält, die aus der Herstellung des Epoxidharzes durch Umsetzung von Bisphenol A mit Epichlorhydrin resultieren.

Zur Beseitigung jeglichen Zweifels, dass die Verbrennungsprodukte die bei der Pyrolyse von Askarel möglichen toxischen Substanzen 2,3,7,8-Tetrachlordibenzodioxin (TCDD) und 2,3,7,8-Tetrachlordibenzofuran (TCDF) nicht enthalten, wurde der Gießharzformstoff in der Bayer-ICI-Shell-Apparatur (Pyrolysetemperatur 600 °C) verbrannt und die Verbrennungsprodukte auf diese beiden Substanzen untersucht.

Dazu wurden die entstandenen Verbrennungsprodukte an einem Filter und in Methanol als Absorptionslösung aufgefangen. Der Extrakt des Filters wurde mit der Absorptionslösung vereinigt, ein Teil dieser Lösung mit bekannten Mengen an 2,3,7,8-TCDD und 2,3,7,8-TCDF versetzt und wie der zweite Teil der Probelösung gaschromatographisch untersucht. Die Chromatogramme sind in Bild 12 dargestellt. Sie zeigen, dass 2,3,7,8-TCDD und 2,3,7,8-TCDF in den Verbrennungsprodukten nicht enthalten sind. Die Erfassungsgrenze beträgt 0,05 µg/g.

Bemerkungen zu den Untersuchungsergebnissen

Die Versuche mit fremdgezündeten Kurzschlusslichtbögen an der Außenfläche des GEAFOLE-Transformators und innerhalb seiner Wicklungen zeigten, dass der Gießharztransformator auch bei extremer Beanspruchung durch energiereiche Lichtbögen nicht zur Entzündung gebracht werden kann. Jedoch ist ein von außen auf den Transformator übergreifender Brand in der Lage, die Isolierstoffe zu entzünden; allerdings erlöschen die Flammen nach dem Entfernen der Zündquelle ohne wesentliche horizontale Brandfortleitung selbständig. Daraus folgt, dass sich der Gießharz-Trockentransformator durch energiereiche Lichtbögen nicht selbst entzünden kann und das Brandgeschehen bei Einbeziehung des Transformators in einen Umgebungsbrand nicht wesentlich, das heißt, nicht mehr als mit der eigenen, geringen Brandlast, intensiviert. In den durch den Brand dieses Transformators gebildeten Brandgasen konnten neben Kohlenmonoxid nur Benzol, Toluol und Ethylbenzol – jedoch keine typischen, der Gießharzmischung zuzuordnenden spezifischen Komponenten nachgewiesen werden.

Der Gehalt an Toluol und Ethylbenzol lag mit zehn Prozent der damals gültigen MAK-Werte (maximale Arbeitsplatz-Konzentration) im unbedenklichen Bereich, wenn man ins Kalkül zieht, dass hier die MAK-Werte mit Kurzzeitimmissionen während des Brandgeschehens verglichen werden. Selbst der vierfache TRK-Wert (technische Richtkonzentration) des Benzols ist bei dieser Betrachtungsweise unkritisch. Bei den neuen Untersuchungen im Jahre 2005 lagen die gemessenen Emissionswerte weit unter den derzeit zulässigen Arbeitsplatzgrenzwerten (seit 2005 Ersatz für MAK).

Als einzige, durch den Brand des Gießharztransformators erzeugte, relevante toxische Komponente erscheint Kohlenmonoxid. Bei Kohlenmonoxid handelt es sich jedoch um ein brandübliches Gas. In einer Laboratoriums-Untersuchung konnte gezeigt werden, dass die beiden hochtoxischen Substanzen, nämlich 2,3,7,8-Tetrachlordibenzodioxin und 2,3,7,8-Tetrachlordibenzofuran, beim Brand eines Gießharztransformators nicht gebildet werden.

So lassen die Ergebnisse dieser umfangreichen Untersuchungen die Aussage zu, dass der Betrieb von GEAFOLE-Gießharztransformatoren in elektrischen Anlagen in keinem Betriebszustand wesentlich Brandverschärfende oder toxische Risiken hervorruft, die über das normale Ausmaß von Haus- oder Industriebränden hinausgehen.

Doch nicht nur die Versuche belegen das sehr gute Brandverhalten der GEAFOLE-Gießharz-Transformatoren. Vielmehr haben die GEAFOLE-Transformatoren, die Siemens im Leistungsbereich von 50 kVA bis 40 MVA fertigt, zu Tausenden im langjährigen weltweiten Einsatz unter Beweis gestellt, dass sie selbst unter schwierigen Bedingungen sicher, wirtschaftlich und zuverlässig arbeiten.

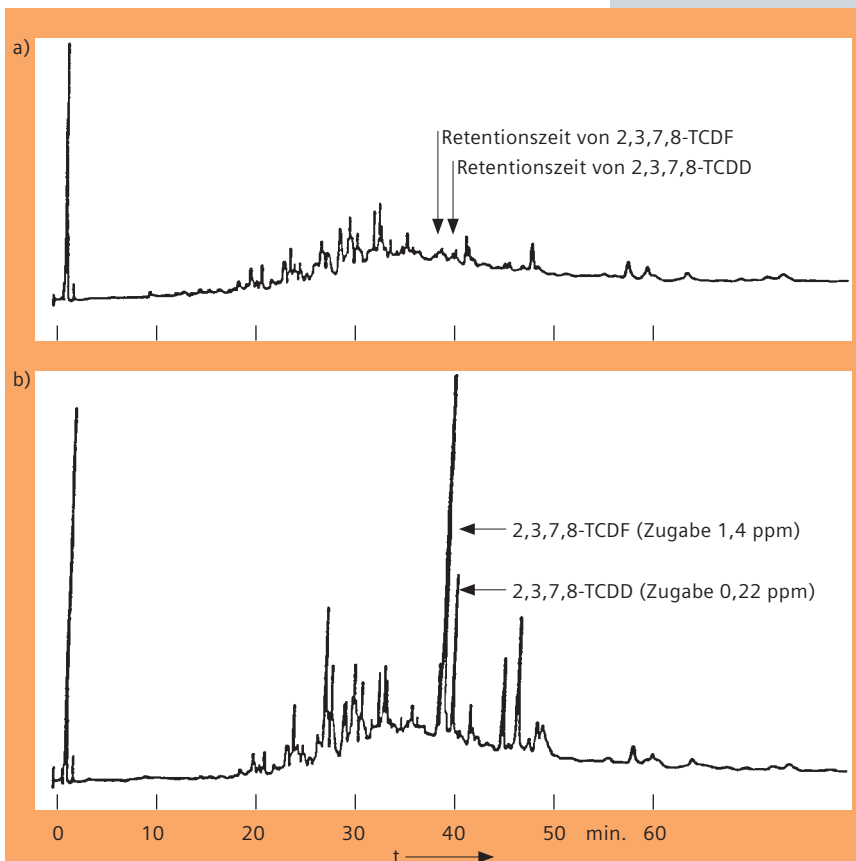


Bild 12: Gaschromatogramm von Verbrennungsprodukten aus Gießharzformstoff (Bayer-ICI-Shell-Apparatur; Pyrolysetemperatur 600 °C)

a) aus Gießharz (aliquoter Teil nach Probeaufarbeitung)

b) aus Gießharz (aliquoter Teil nach Probeaufarbeitung mit Zugabe von 1,4 ppm von 2,3,7,8-Tetrachlordibenzofuran (TCDF) und 0,22 ppm von 2,3,7,8-Tetrachlordibenzon-p-dioxin (TCDD) vor der Probeaufbereitung)

Siemens AG
Power Transmission and Distribution
Transformers Division
Hegelstr. 20
73230 Kirchheim/Teck
Germany

www.siemens.com/energy

Bestell-Nr. E50001-U413-A105
Printed in Germany
Dispo 19201
TH 101-060835 102060 WS 04070.5

Die Informationen in diesem Dokument enthalten allgemeine Beschreibungen der technischen Möglichkeiten, welche im Einzelfall nicht immer vorliegen müssen. Die gewünschten Leistungsmerkmale sind daher im Einzelfall bei Vertragsschluss festzulegen.