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: 72 (1981)

Heft: 3

Artikel: Silicon-Transformatorflüssigkeit : Einsatz, Wartung und Sicherheitsaspekte

Autor: Müller, R. E. / Hedinger, R. / Lonsky, P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-905073

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: 09.12.2025

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

Silicon-Transformatorflüssigkeit

Einsatz, Wartung und Sicherheitsaspekte

Von R. E. Miller, R. Hediger und P. Lonsky

621.314.21:678.842;

Die Silicon-Transformatorflüssigkeit wird in den USA für kleinere und mittlere Leistungstransformatoren seit 1972 eingesetzt. Siliconflüssigkeit ist chemisch inert, ungiftig und thermisch stabil. Die geringen Verluste, die guten dielektrischen Eigenschaften und die schwere Brennbarkeit machen sie zu einem geeigneten Material für den Einsatz in Leistungstransformatoren.

Le fluide silicone, employé depuis 1972 aux Etats-Unis dans des transformateurs de faible à moyenne puissance, est chimiquement inerte, non toxique et thermiquement stable. Ses pertes faibles, ses bonnes propriétés diélectriques et le fait qu'il est difficilement inflammable font qu'il convient pour des transformateurs de puissance.

1. Einleitung

Die Silicon-Transformatorflüssigkeit[1]) wird in den USA seit 1972 in kleineren und mittelgrossen Verteiltransformatoren eingesetzt. Weltweit sind heute mehr als 6000 mit Siliconflüssigkeit gefüllte Transformatoren in Betrieb. Seit 4 Jahren werden 136 dieser Transformatoren systematisch überwacht, um das Betriebsverhalten zu beobachten und statistische Angaben zu sammeln. Während dieser Zeit wurden keine grundlegenden Änderungen der Siliconflüssigkeit beobachtet, es entstanden keine bedeutenden Wartungsprobleme wie durch Überdruck oder Leckagen, und es gab keine Betriebsstörungen wie etwa durch zu hohe Temperaturen oder Überlastungen [1].

Dieses Ergebnis zusammen mit Informationen über das Betriebsergebnis einer Vielzahl anderer Transformatoren ergeben einen eindrucksvollen Beweis der Leistung und Zuverlässigkeit von Silicon-Transformatoren. Hier sollen nun die für die Betreiber wichtigen Informationen bezüglich Einsatz, Wartung, Prüfung und Sicherheit dargestellt werden.

[1]) Die generische Bezeichnung *Siliconflüssigkeit* in diesem Artikel bezieht sich auf Dow Corning 561 Silicon Transformatorflüssigkeit oder ein entsprechendes Polydimethylsiloxan mit 50 mm²/s, das in Transformatoren eingesetzt wird.

Typische Eigenschaften von Silicon-Transformatorflüssigkeit Tabelle I

Thermische Eigenschaften	
Flammpunkt: °C, offener Tiegel	> 300
Brennpunkt: °C, offener Tiegel	> 350
Stockpunkt: °C	− 55
Thermische Leitfähigkeit: W/km	0,151
Spez. Wärme: kJ/kgK	1,51
Wärmeausdehnungskoeffizient: K^{-1}	0,00104
Wärmeentwicklungsrate: kW/m², Gefäss 1,2 m ⌀	100–125
Feuergefährlichkeitsklassifikation (UL[2]):	4–5
Physikalische Eigenschaften	
Aussehen:	kristallklare Flüssigkeit
Dichte: 25 °C	0,96
Oberflächenspannung: dyn/cm	21
Viskosität: mm²/s 25 °C	50
50 °C	30
100 °C	16
150 °C	12
Brechungsindex: bei 25 °C	1,402
Wassergehalt: ppm	30
Dielektrische Eigenschaften	
Dielektrizitätskonstante: 50 Hz, 25 °C	2,7
Durchschlagsfestigkeit: 50 Hz, 25 °C, kV[3])	50
Verlustfaktor: 50 Hz, 25 °C	$2 \cdot 10^{-5}$
Spez. Durchgangswiderstand bei 25 °C-Ω/cm	1×10^{15}

[2]) UL = Underwriters Laboratories.
[3]) VDE 0370, BS 148, IEC 156 (1963) Testzelle, ein Test pro Zellenfüllung.

2. Eigenschaften der Silicon-Transformatorflüssigkeit

Die wichtigsten Eigenschaften der Siliconflüssigkeit sind aus Tabelle I ersichtlich.

Verträglichkeit

Polydimethylsiloxan-Flüssigkeiten (PDMS) werden seit über 30 Jahren in den verschiedensten Anwendungsbereichen eingesetzt, z. B. in Entschäumern (wie in der chemischen und der Nahrungsmittelindustrie), in Schmierstoffen, Dämpfungsflüssigkeiten, Wärmeübertragungsflüssigkeiten und in dielektrischen Kühlmitteln. Wegen der weiten Verbreitung wurden umfangreiche toxikologische Untersuchungen durchgeführt. Das Ergebnis war, dass die PDMS-Flüssigkeit eine der ungiftigsten Chemikalien überhaupt ist.

Bei Fütterungsversuchen zur Bestimmung der akuten Giftigkeit konnte keine tödliche Menge festgestellt werden, selbst wenn die Dosierung auf 50 ml/kg Körpergewicht gesteigert wurde. Bei Hautuntersuchungen zeigte PDMS keine sensibilisierende oder hautreizende Wirkung. Es wird auch durch die Haut nicht absorbiert. PDMS wird denn auch in Kosmetikprodukten eingesetzt, wie z. B. in Deodorants, Hautcremes, Handlotionen und Körperpflegemitteln. Im Auge kann PDMS vorübergehend eine leichte Reizung hervorrufen, die durch ein Gefühl der Trockenheit wegen der wasserabstossenden Wirkung entsteht. Dies ist eine physikalische und keine chemische Einwirkung, vergleichbar mit dem Gefühl, das nach langer Windeinwirkung in den Augen eintritt [2; 3].

Die Siliconflüssigkeit wurde auch hinsichtlich des Abbaus in der Natur sowie der Bioakkumulation geprüft. Umfangreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass PDMS zu in der Natur vorhandenen Substanzen abgebaut wird, wie z. B. Kieselerde (SiO_2), Methan und Kohlendioxyd. Weder in der Praxis noch bei Untersuchungen konnte eine Bioakkumulation festgestellt werden [4].

Die Flüssigkeit wurde auch auf mögliche Verunreinigung der Luft sowie der Gewässer geprüft, um festzustellen, ob eine potentielle Gefahr für Vögel und Fische besteht. Auch hier zeigten die Resultate keine nachteiligen Einflüsse [5; 6; 7].

Bei der Herstellung und der Wartung von Transformatoren ist es fast unvermeidlich, dass Flüssigkeit verschüttet wird. Kleinere Mengen der Siliconflüssigkeit können mit Lappen und Lösungsmittel aufgewischt werden. Bei der Auswahl der Lösungsmittel sollten die Entflammbarkeit und Giftigkeit die Hauptkriterien sein [8]. Eingehende Studien haben gezeigt, dass sich die Siliconflüssigkeit bei Leckagen ähnlich wie Mineralöl gleicher Viskosität verhält. Bei grösseren Leckagen gelten daher die gleichen Reinigungsmassnahmen.

Verschmutzung und Wiederaufbereitung Tabelle II

Verschmutzung	Aussehen der Silikonflüssigkeit	Ausrüstung	Filter-Hilfsmittel	Prüfung	Kommentar
Wasser	Klar bis milchigweiss	Vakuumtrockner oder Filterpresse	Keine	Wassergehalt, Durchschlagsfestigkeit	Abgeschiedenes Wasser sollte abgezogen oder abgelassen werden
Lichtbogen: Siliziumdioxid, Kohlenstoff, hochverkettete gelartige Polymere	Klar mit grau-weissen Teilchen, starker Geruch	Kartuschenfilter und Vakuum oder Filterpresse und Vakuum	Keine oder Kieselgur	Durchschlagsfestigkeit	
PCB (Askarel, Inerteen, Pyranol, Chlophen)	Klar bis zweiphasige Schichten, je nach PCB-Konzentration, typischer PCB-Geruch	Spezialfiltergerät	Aktivkohle	Brechungsindex, HPLC[4])	Bei Verunreinigungen durch PCB sich an die lokalen Vorschriften halten betr. Behandlung und Vernichtung
Mineralöl	Klar bis zweiphasige Schichten, je nach Konzentration	Keine	Keine	Brenn- und Flammpunkt	Es besteht keine Methode, Mineralöl zu entfernen
Feststoffteilchen	Klar mit Teilchen, trüb	Kartuschenfilter oder Filterpresse	Keine oder Kieselgur	Durchschlagsfestigkeit	
Verfärbung durch Reaktion mit dem Transformatormaterial	Schwache bis deutliche Färbung	Kartusche oder Filterpresse	Aktivkohle	Rücksprache mit Hersteller nehmen	Verlustfaktor, Säurezahl, Flammpunkt, Durchschlagsfestigkeit

[4]) HPCL = High Performance Liquid Chromatograph (Hochleistungs-Flüssigkeits-Chromatograph).

Verarbeitung

Die Lagerfähigkeit von Silicon-Transformatorflüssigkeit ist bei normalen Bedingungen für dielektrische Flüssigkeiten unbeschränkt. Es gelten die gleichen Vorsichtsmassnahmen wie für das Lagern von Mineralöl oder Askarel. Die Fässer sollen in geschützter Lage und vorzugsweise bei Raumtemperatur gelagert werden. Dies verringert das Atmen und damit eventuelle Wasserkondensation.

Einmal verunreinigte Siliconflüssigkeit kann meistens wieder aufbereitet werden. Grundsätzlich können dazu die gleichen Geräte wie für Mineralöl verwendet werden. Die beste Methode ist üblicherweise eine Kombination von Filtern, um Verunreinigungen durch Feststoffteilchen zu entfernen, und konventionellem Vakuumtrocknen, um gelöstes Wasser zu entfernen. Konventionelle Filterpressen können ebenfalls verwendet werden, insbesondere um Siliconflüssigkeit, die durch Lichtbogenüberschläge oder durch Wasser verunreinigt wurde, aufzubereiten.

Fullererde (Tonerde) kann die Siliconflüssigkeit chemisch verändern und kann deshalb weder zur Wiederaufbereitung noch als Filterhilfsmittel empfohlen werden. Die Siliconflüssigkeit altert im Betrieb in Transformatoren nicht und bildet im Gegensatz zu Mineralöl oder Askarel keinen Schlamm und keine sauren Reaktionsprodukte. Wenn ein Filterhilfsmittel für die Feinfiltration notwendig ist, empfiehlt sich die Verwendung von Kieselgur.

Wasser ist in allen dielektrischen Flüssigkeiten löslich. Die Siliconflüssigkeit hat einen höheren Sättigungspunkt als Askarel oder Mineralöl, behält aber ihre guten dielektrischen Eigenschaften noch bei wesentlich höherem Wassergehalt als Askarel oder Mineralöl [9]. Gelöstes Wasser wird am besten durch Vakuumtrocknung aus der Siliconflüssigkeit entfernt, dies in den hierzu üblichen Anlagen [10].

Tabelle II zeigt eine Zusammenfassung einiger Verunreinigungsarten und die empfohlenen Methoden zur Wiederaufbereitung der Flüssigkeit. Geeignete Pumpen für Siliconflüssigkeit sind Zentrifugalpumpen und doppelt angetriebene Zahnradpumpen.

3. Siliconflüssigkeit in Transformatoren

Die Wärmebeständigkeit der nichtpolaren Siliconflüssigkeit ergibt eine bedeutende Reduktion in der Wartung. Wie erwähnt, verändert sich die Siliconflüssigkeit über die normale Lebensdauer eines Transformators, der mit 65 °C Übertemperatur betrieben wird, nicht. Die Wartung beschränkt sich daher auf die seltenen Fälle, bei welchen Verunreinigungen aufgetreten sind.

Es wird jedoch empfohlen, für silicongefüllte Transformatoren dieselben Wartungskontrollen durchzuführen wie bei Mineralöl oder Askarel. Diese Kontrollen ergeben frühzeitige Hinweise auf Probleme, die sich in Transformatoren entwickeln können. Angaben für die Wartung sind in Tabelle III enthalten.

Zur Gasanalyse können die gleichen Methoden wie für mineralölgefüllte Transformatoren angewandt werden. Bei Überschlägen entwickelt die Siliconflüssigkeit die gleichen Gase wie Mineralöl [11]. Die Zusammensetzung dieser Gase

kann, wie aus Tabelle IV ersichtlich ist, bei analogen Lichtbogenverhältnissen unterschiedlich sein. Daten für eine vollständige Auswertung wurden bis jetzt noch nicht ausgearbeitet.

Prüfung der Siliconflüssigkeit

Sie kann im allgemeinen mit denselben Methoden wie für Mineralöl oder Askarel durchgeführt werden. Zwei Prüfungen benötigen jedoch leichte Änderungen: die Bestimmung des Wassergehaltes und die Durchschlagfestigkeit.

Der *Wassergehalt* in Siliconflüssigkeit kann gemäss ASTM D 1533 mit einer Änderung der Karl-Fisher-Titration bestimmt werden. Diese modifizierte Methode benutzt jedoch trockenes Formamid und trockenes Methanol anstelle von Chloroform und Methanol und ist in ASTM D2225 niedergelegt. Eine weitere, von ASTM ebenfalls anerkannte und von der Firma Dow Corning bevorzugte Methode ist der Photovolt Aquatest II oder Aquatest IV. Die entsprechenden Instrumente sind automatische Titriergeräte. Jegliche Nebenreaktionen mit Silanol-(OH-)Gruppen in der Siliconflüssigkeit können für grosse Genauigkeit kompensiert werden.

Die Prüfmethode zur Bestimmung der elektrischen *Durchschlagfestigkeit* ist in VDE 0370 festgelegt. Diese Methode wird als primäre Qualitätskontrolle von dielektrischen Flüssigkeiten für Leistungstransformatoren angewandt. Sie kann für Siliconflüssigkeit mit gewissen Änderungen verwendet werden, analog ASTM D2225. Unter der Einwirkung von Lichtbogen entsteht in der Siliconflüssigkeit ein gelartiges Material. Obwohl dies wenig Bedeutung für den praktischen Transformatorbetrieb hat, werden die eng aneinanderliegenden Elektroden mit einem Belag überzogen und somit die nachfolgend gemessenen Durchschlagswerte reduziert. Deshalb müssen die Zellen nach jedem Überschlag entleert und die Elektroden gründlich gereinigt werden.

Ersatz von Askarelen durch Siliconflüssigkeit

Die Siliconflüssigkeit hat das Askarel schon in vielen Transformatoren mit einem Minimum an Konstruktionsänderungen ersetzt. Die meisten Materialien, die im Bau von Mineralöl- oder Askarel-Transformatoren eingesetzt werden, sind mit der Siliconflüssigkeit verträglich. Dies ist bedingt durch die chemische Stabilität der Siliconflüssigkeit und durch die Ähnlich-

Empfohlene Wartungsprüfungen für Siliconflüssigkeit Tabelle III

Prüfung Minimum	Zulässige Werte	Unzulässige Werte bedeuten
Visuell	Kristallklar, frei von Feststoffteilchen	Feststoffteilchen, freies Wasser, Farbänderung
Geruch	Keine	Lichtbogenbeschädigung oder verbranntes Papier, Flüssigkeitsverschmutzung (Lösungsmittel, PCB)
Durchschlagsfestigkeit (ASTM D877)	Neu: 35 kV im Transformator 25 kV	Feststoffteilchen, Wasser
Zusätzlich: Wassergehalt (modifizierter Karl-Fisher-Photovolt-Aquatest)	100 ppm	Wasser
Oberflächenspannung (ASTM D971)	–	Verschmutzung
Verlustfaktor (ASTM D924)	< 0,1%	Polare/ionische Verschmutzung
Viskosität (ASTM D454)	50 mm²/s	Zersetzung der Flüssigkeit, Verschmutzung
Brennpunkt (ASTM D92)	> 350 °C	Verschmutzung durch flüchtige Materialien
Säurezahl BCP (ASTM D974, D644)	–	Zersetzung der Zelluloseisolation, Verschmutzung

Beispiele typischer Analysen von Gaskomponenten bei Lichtbogenbildungen Tabelle IV

	Siliconflüssigkeit			Mineralöl		
Ampere Elektrode	810 mA 24 U/min rotierend	715 mA 120 U/min rotierend	26,2 A stationär	345 mA 24 U/min rotierend	1,050 mA 120 U/min rotierend	15,9 A stationär
Gaskomponente (%)						
H_2	74,6	75,6	77,1	65,0	68,28	73,44
CO	19,0	17,2	14,0	–	–	–
CH_4	1,7	1,2	4,02	1,2	2,02	3,45
C_2H_2	4,3	5,7	3,76	32,8	26,59	20,74
C_2H_4	0,4	0,3	1,13	0,8	1,40	2,12
C_2H_6	Spur	Spur	–	Spur	Spur	–
C_3H_6	Spur	–	–	0,2	0,17	0,21
C_3H_8	–	–	–	Spur	Spur	Spur
Gasentwicklung (ml/kWs)						
Gemessen	22	35	43	45	45	48
Berechnet	88	89	82	65	57	47

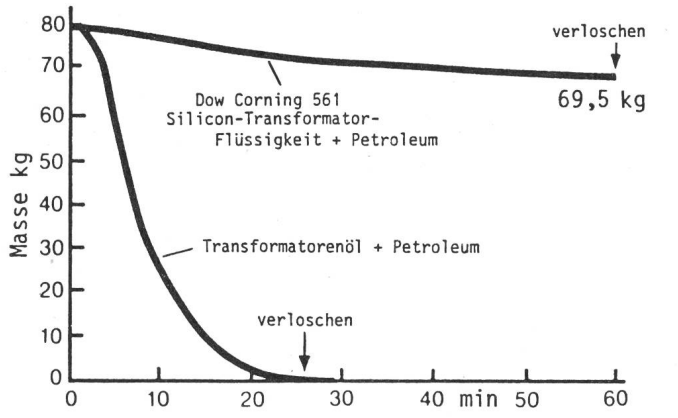

Fig. 1 Vergleich der Gewichtsverluste brennender Flüssigkeiten

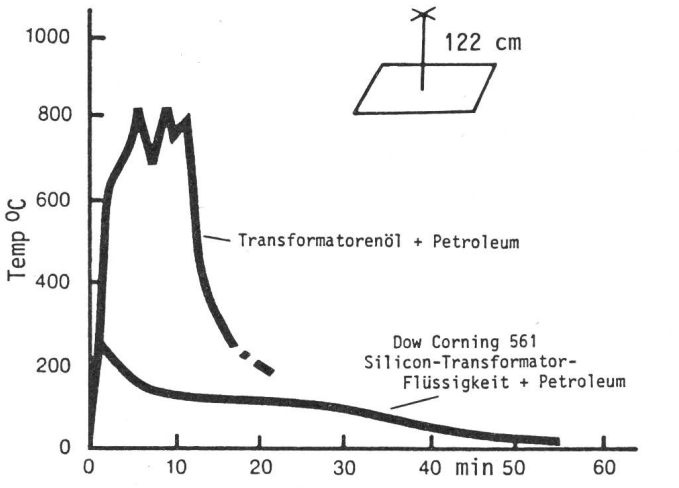

Fig. 2 Vergleich der Gastemperaturen brennender Flüssigkeiten

keit der dielektrischen Eigenschaften mit anderen Transformatorflüssigkeiten.

Ein wichtiger Grund für das Umfüllen von Transformatoren von Askarel auf Siliconflüssigkeit ist die Gefahr der Umweltverschmutzung durch Askarele. In den USA ist es beispielsweise erwünscht, den PCB-Anteil unter 500 ppm zu bringen, damit die Transformatorflüssigkeit nicht unter die strengen Auflagen der TSCA (Toxic Substance Control Act) fällt [12; 13].

Verschiedene Spezialfirmen entwickelten zusammen eine Technik für das Umfüllen. Diese beinhaltet viele Erwägungen, wie Materialverträglichkeit, ob die Konstruktion geeignet ist, Behandlung der Flüssigkeit, Handhabung und Vernichtung des Askarels usw. Diese sind ebenso wie spezielle Eigenschaften der Silicone hinsichtlich Wärmeübertragung, Wärmeausdehnung, Einfluss von Wasser und Verträglichkeit beim Umfüllen in [14; 15] ausführlich beschrieben.

Wie in Tabelle II angegeben ist, kann die Verunreinigung von Siliconflüssigkeit durch Askarel mittels Aktivkohlefilter beseitigt werden. Damit konnte der Anteil an Askarel in umgefüllten Transformatoren unter 500 ppm gesenkt werden.

4. Entflammbarkeit

Die grosse Zuverlässigkeit konventioneller Flüssigkeitstransformatoren führt dazu, dass an neue Flüssigkeiten, welche Askarel technisch ersetzen, ebenso hohe Forderungen gestellt werden und alle Sicherheitsbestimmungen erfüllt werden müssen. Heute ersetzt der Begriff der Feuergefährlichkeit von Systemen durchwegs den engeren Begriff der Entflammbarkeit von Materialien [16].

Die aussagekräftigsten Prüfungen bezüglich Brandgefahr sind jene, die ein System unter betriebsähnlichen Bedingungen bewerten. Die folgenden Eigenschaften sind wichtig: Lichtbogengase, Entflammbarkeit, Flammenausbreitung, Hitzeentwicklung, Rauch, Verbrennungsgase, Sauerstoffverarmung, Löschen. Ein Überblick über die vorhandenen Informationen über die Eigenschaften bezüglich der Feuergefährlichkeit von Siliconflüssigkeit und Paraffinölen mit hohem Brennpunkt ist in [17] enthalten. Die in jenem Aufsatz enthaltenen Angaben und Diskussionen zeigen die sehr niedrige Entflammbarkeit von Siliconflüssigkeit und das damit verbundene geringe Gefahrenrisiko.

Siliconflüssigkeit und Kohlenwasserstofföle entwickeln, wie erwähnt, im Katastrophenfall die gleichen Lichtbogengase. Diese Gase sind brennbar und können im schlimmsten Falle einen Feuerball bilden. Askarele bilden unter analogen Bedingungen ebenfalls einen Feuerball [18; 19; 20].

Die Wärmeentwicklungsrate ist eine der wichtigsten Eigenschaften in bezug auf Feuergefährlichkeit oder potentielle Schäden an Gebäuden oder Einrichtungen. Sie wurde von verschiedenen Unternehmen eingehend untersucht [19; 20] (Tabelle V). Wie auch aus Figur 1 bis 3 hervorgeht, zeigen die Resultate von Grossbrandversuchen einige sehr wichtige Unterschiede zwischen Siliconflüssigkeit und Kohlenwasserstoffölen:

1. Paraffinöle mit hohem Flammpunkt entwickeln eine 10...18mal grössere Wärmeabgabe als Siliconflüssigkeit.

2. Kohlenwasserstofföle brennen unter konstanter Wärmeabgabe bis kein Öl mehr übrigbleibt. Siliconflüssigkeit erreicht einen Höhepunkt der Wärmeabgabe, welche dann zeitlich absinkt bis zum Selbstverlöschen.

3. Die Wärmeabgabe von Siliconflüssigkeit pro Flächeneinheit zeigt absinkende Werte, je grösser der Durchmesser des Versuchsgefässes ist, da die Flammenhöhe nicht proportional mit dem Durchmesser zunimmt wie bei Kohlenwasserstoffölen. In Gefässen mit einem Durchmesser von 1,2 bis 3,3 m sinkt die Flammenhöhe der Siliconflüssigkeit rasch bis auf 0,3 bis 0,6 m. In Gefässen mit 1,2 m Durchmesser beträgt

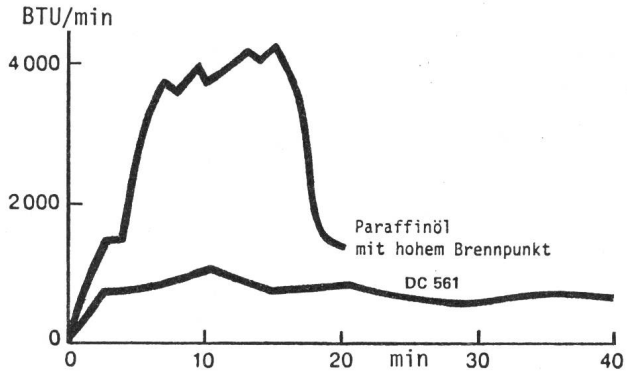

Fig. 3 Vergleich der Wärmeabgaberaten von Paraffinöl und Siliconflüssigkeit
Pfanne von 30 cm Durchmesser
1 BTU = 1,055 · 10^3 J (British thermal unit)

Gemessene Werte der Wärmeentwicklungsrate (kW/m²) Tabelle V

	Dow Corning	Factory Mutual	Southwest Research
Siliconflüssigkeit	65	104	109
Paraffinöl mit hohem Brennpunkt	1200	1020	1240

die Flammenhöhe für Paraffinöle mit hohem Brennpunkt während des ganzen Brandes 2,4 bis 3 m.

Die Wärmeentwicklungsraten werden von der amerikanischen Versicherung Factory Mutual dazu benutzt, die Transformatorenflüssigkeiten zu klassifizieren. Sie sollen auch dazu dienen, die Sicherheitsbestimmungen für einen Transformator festzulegen, wie den erforderlichen Platz, die Höhe und das Material von Decken sowie den Abstand von Wänden und Installationen. Die sehr niedrige Wärmeentwicklungsrate der Siliconflüssigkeit macht diese zu einem vorteilhaften und sicheren Medium vom Standpunkt der Gefährlichkeit für Bauten.

Die Hauptgefahr eines Feuers ist für Menschen nicht die Hitze, sondern die bei der Verbrennung entstehenden Nebenprodukte [16]. Rauch- und Gasentwicklungen bilden auf drei Arten eine Gefahr: Giftigkeit, Augenreizungen und Sichtbehinderung, welche die Möglichkeit einer Flucht vereiteln können, sowie Rauchschäden an Installationen. Untersuchungen über die Natur der Verbrennungsprodukte und deren Giftigkeit haben aufgrund von Versuchen gezeigt, dass Siliconflüssigkeit wesentlich ungiftiger ist als Kohlenwasserstofföle. Siliconflüssigkeit entwickelt ebenfalls vier- bis fünfmal weniger Rauch als Paraffinöle mit hohem Brennpunkt. Siliconflüssigkeit wie auch Kohlenwasserstofföle können leicht mit Kohlendioxyd oder Trockenpulver gelöscht werden [19].

Die niedrige Brennbarkeit, die niedrige Wärmeentwicklungsrate, das geringe Mass an Rauchgiftigkeit und Rauchdichte sowie die selbstverlöschenden Eigenschaften machen die Siliconflüssigkeit zu einer sehr sicheren Alternative für Askarel.

Literatur

[1] *T. Michaud* and *T. Orbeck:* Report of silicone transformer liquid commercial service life data program. Doble Conference South Boston, April 6, 1979.

[2] *V.K. Rowe, H.C. Spencer* and *S.L. Bass:* Toxicological studies on certain commercial silicones. Journal of Industrial Hygiene and Toxicology, 30(1948)6, p. 332...352.

[3] Toxicology of the silicones. Midland/Michigan, Dow Corning Center for Aid to Medical Research, 1964.

[4] *J.C. Calandra* a.o.: Health and environmental aspects of polydimethylsiloxane fluids. Midland/Michigan, Dow Corning Center for Aid to Medical Research, 1976.

[5] *E.J. Hobbs, M.L. Keplinger* and *J.C. Calandra:* Toxicity of polydimethylsiloxane in certain environmental systems. Midland/Michigan, Dow Corning Corporation, 1975.

[6] *E.J. Hobbs, O.E. Fancher* and *J.C. Calandra:* Effect of selected organopolysiloxanes on male rat and rabbit reproductive organs. Midland/Michigan, Dow Corning Corporation, 1972.

[7] *C. Frye:* Environmental chemistry of liquids polydimethylsiloxanes. An overview. Fifth International Organosilicon Symposium, Karlsruhe, 17 August, 1978.

[8] *T.S. Cox* and *D.N. Ingebrigtson:* Coping with spills of silicone fluids. Environmental Science and Technology 10(1976)6, p. 598.

[9] *T. Orbeck* and *W. Page:* Performance and safety capabilities of silicone liquid insulating liquid for high voltage transformers. 24th Annual IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference, Dallas, 1977; paper No. PCI–77–22.

[10] Instructions for handling silicone insulating fluid P.D.S. 53846BE and installation and maintenance of silicone transformers. Pittsburgh, Westinghouse Electric Corporation, 1978.

[11] *H. Kuwahara* a.o.: Study of explosion and fire hazards of silicone liquids under arc conditions. Tokyo, Mitsubishi Electric Corporation.

[12] Polychlorinated biphenyls (PCBs)—manufacturing, processing, distribution in commerce and use prohibitions. Washington, Environmental Protection Agency.

[13] *R.H. Parrish* and *J.J. Kelly:* Use, labeling and disposal of PCBs. 1979 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, Pittsburgh.

[14] *W.C. Page* and *T. Michaud:* Development of methods to retrofill transformers with silicone transformer liquid. Midland/Michigan, Dow Corning Corporation, 1977.

[15] Conference Record of the Annual IEEE-Meeting of the Industry Application Society, Toronto, Oct. 1...5, 1978.

[16] *A.F. Robertson:* Fire standards and safety. ASTM Special Publication No. 614, 1976.

[17] *J. Lipowitz, S.E. Jones* and *H. Kanakia:* Fire safety properties of some transformer dielectric liquids. IEEE Electrical/Electronics Insulation Conference, Boston, 8...11 October 1979.

[18] *D.A. Duckett:* Environmental acceptable insulation fluids may replace askarel. General Meeting of the Edison Electric Institute, Transmission and Distribution Committee, Minneapolis/Minnesota, May 8, 1975.

[19] *R.A. Hemstreet:* Flammability tests of askarel replacement transformer fluids. FMRC serial No 1A7R3.RC. Boston, Factory Mutual Research Corporation, 1978.

[20] *M. Kanakia:* Characterization of transformer fluid pool fires by heat release rate calorimetry. Fourth International Conference on Fire Safety, San Francisco, January 1979.

Adresse der Autoren

R.E. Miller, Dow Corning Corporation, Midland (USA), sowie *Rolf Hediger* und *Peter Lonsky*, Dow Corning GmbH, Pelkovenstrasse 152, D-8000 München.