



**TRANSFORMER-LIFE-MANAGEMENT
CONFERENCE**

**Einsatz natürlicher Ester-Flüssigkeiten in
Leistungstransformatoren – Betriebserfahrung**

**Gernot Adamietz
TransnetBW GmbH**



Gernot Adamietz hat Ende 2006 sein Studium am Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik (IEH) der Universität Karlsruhe absolviert.

Ab Februar 2007 war er Mitglied im Technikteam der EnBW-Regional AG und dort zuständig für den Schwerpunkt Hochspannungsmeßwandler.

Im März 2012 wechselte er in das Technikteam der TransnetBW GmbH und ist seitdem dort zuständig für induktive Betriebsmittel, mit dem Schwerpunkt Leistungstransformatoren.





Einsatz natürlicher Ester-Flüssigkeiten in Leistungstransformatoren – Betriebserfahrung

Transformer Life Management Tagung 2015

(21. September bis 22. September im Radisson Blu Hotel, Oberaltenburg 4, 06217 Merseburg)

Einsatz natürlicher Esterflüssigkeiten in Leistungstransformatoren - Betriebserfahrung

Gernot Adamietz

Kurzfassung

Umweltschutz, Akzeptanz der Bevölkerung für Bauprojekte und Rohstoffverknappung sind Schlagworte, die im Bereich der Energieversorgung eine immer größere Rolle spielen. Für die elektrischen Betriebsmittel bedeutet dies, dass alternative Materialien wie nachwachsende Rohstoffe in Form von natürlichen Estern immer interessanter werden. In diesem Beitrag soll auf die Motivation zum Einsatz alternativer Materialien eingegangen werden. Zusätzlich werden Vergleiche zwischen konventionellen Isolierölen sowie synthetischen und natürlichen Estern gezogen. Es werden die Eigenschaften der Ester vorgestellt und wie damit umzugehen ist. Schließlich werden Betriebserfahrungen beim Einsatz von natürlichen Estern als Isoliermittel bei einem 110kV- und einem 380kV-Leistungstransformator vorgestellt.

Einführung

Die Isolierflüssigkeit in einem Transformator hat zwei Hauptaufgaben. Zum einen die Isolation der spannungsführenden Teile als Imprägnierflüssigkeit in einer Papierisolation. Zum anderen als Kühlflüssigkeit innerhalb des Transformators zur Wärmeabfuhr. Damit ist die Isolierflüssigkeit mit ihrer Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit ein wesentlicher Faktor für die Übertragungskapazität und die Funktionalität eines Leistungstransformators.

Leistungstransformatoren sind sehr langlebige Betriebsmittel. Dementsprechend ist die Langzeitstabilität und Alterungsbeständigkeit eine wesentliche Eigenschaft von Isolierflüssigkeiten. Bisher kamen hier hauptsächlich Mineralöle zum Einsatz, deren Eigenschaften aufgrund jahrzehntelanger Einsatzerfahrung gut erforscht sind und sich bewährt haben. Die zunehmende Verknappung und schwankende Qualität des Rohstoffs hat die Hersteller zunehmend dazu gebracht, sich Gedanken über Alternativen zu machen. Hersteller von Isolierölen weichen zunehmend auf Verfahren aus, bei denen Erdgas oder andere fossile Rohstoffe in aufwändigen Prozessen zu synthetischen Ölen verarbeitet werden. Parallel werden natürliche Esterflüssigkeiten daraufhin entwickelt. Das wachsende Umweltbewusstsein in der Gesellschaft und den Unternehmen führt zudem zu einem Wechsel in den Prioritäten.

Während früher technische und kommerzielle Belange an erster Stelle standen, hat sich über die Jahre ein Bewusstseinswandel abgezeichnet, bei dem die Schonung von Rohstoffquellen und die ökologische Verträglichkeit immer weiter in den Vordergrund rücken.

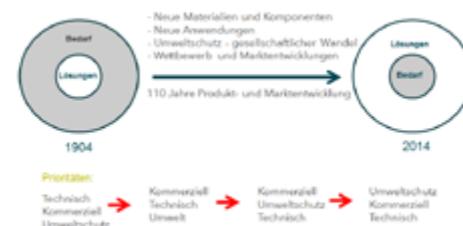


Bild 1: Erweiterung der technischen Möglichkeiten und Änderung der Prioritäten durch die Produkt und Marktentwicklung bei Transformatoren [1]

Gründe, die im Zuge dieses Bewusstseinswandels für natürliche Ester sprechen, sind die biologischen und umweltverträglichen Eigenschaften dieser natürlichen Ester. Das hier verwendete natürliche Ester ist als nicht wassergefährdend eingestuft und ist biologisch leicht abbaubar [2]. Dieser biologische Vorteil scheint gleichzeitig aus technischer Sicht ein Nachteil, wenn man die Langlebigkeit von Transformatoren betrachtet. Unter hermetischen Bedingungen zeigen die natürlichen Ester allerdings eine hohe Langzeitstabilität, so dass hier die Bauform des Transformators aufgrund der Eigenschaften des natürlichen Esters vorgegeben ist [3].

Die im Prinzip unbegrenzte Verfügbarkeit aufgrund seiner Eigenschaften als nachwachsender, CO₂-neutraler Rohstoff mit recht konstanter Qualität, machen natürliche Ester zudem aus wirtschaftlicher Sicht interessant.

Aus technischer Sicht sind die erhöhte Temperaturbelastbarkeit bei Luftabschluss, das bessere Brandverhalten und die damit erhöhte Sicherheit des Betriebsmittels interessant.

Zum Einsatz von natürlichen Estern ist es hier allerdings auch notwendig die Eigenschaften von natürlichen Estern genauer zu betrachten und evtl. Designvorschriften im Transformatorbau anzupassen und zu überarbeiten um sie an die Eigenschaften der Ester anzupassen.



**TRANSFORMER-LIFE-MANAGEMENT
CONFERENCE**

Einsatz natürlicher Ester-Flüssigkeiten in Leistungstransformatoren – Betriebserfahrung

Transformer Life Management Tagung 2015

(21. September bis 22. September im Radisson Blu Hotel, Oberaltenburg 4, 06217 Merseburg)

Eigenschaften natürlicher Esterflüssigkeiten

Um die Eigenschaften natürlicher Ester als Isolierflüssigkeit zu untersuchen, wurden zunächst verschiedene Isolierflüssigkeiten verglichen.

Tabelle 1: Eigenschaften unterschiedlicher Isolierflüssigkeiten [1]

	Mineral- öl	Syn. Ester	nat. Ester
Viskosität bei 20°C	22 mm ² /s	70 mm ² /s	85 mm ² /s
Brennpunkt (°C)	170	325	360
Flammpunkt (°C)	160	275	325
Stockpunkt (°C)	-50	-60	-21
Biologische Abbaubarkeit	langsam	schnell	sehr schnell
wasser-gefährdung	WGK 1	keine	keine
Oxidationsstabilität	+	+	-

Die höhere Viskosität, der natürlichen Ester machen Anpassungen im Design der Transformatoren notwendig. Im speziellen sind hier die Kühlkanäle zu betrachten. Der Stockpunkt wirkt sich in gewissem Maße auf die Steuerung, evtl. vorhandener Pumpen, aus. So wird bei niedrigen Außentemperaturen ein Stocken des Esters in den Kühleinrichtungen verhindert, indem durch ein früheres Einsetzen der Pumpen warmes Öl aus dem Kessel die Kühleinrichtungen durchströmt. Ebenso müssen beispielsweise die Buchholzrelais betrachtet werden ob diese aufgrund der Viskosität des natürlichen Esters genauso zuverlässig reagieren wie bei konventionellem Isolieröl.

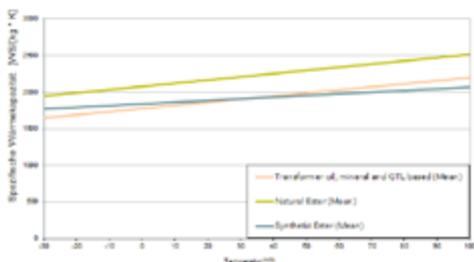


Bild 2: Spezifische Wärmekapazität verschiedener Isolierflüssigkeiten im Vergleich

Im Vergleich zu konventionellem Isolieröl und synthetischen Ester, hat das natürliche Ester eine höhere Wärmekapazität. Siehe Bild2.

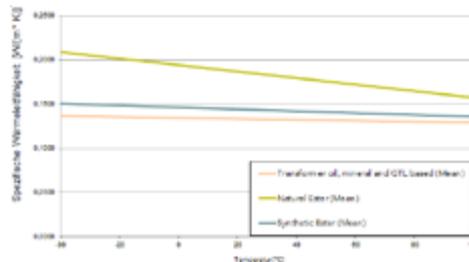


Bild 3: Spezifische Wärmeleitfähigkeit verschiedener Isolierflüssigkeiten im Vergleich

Die spezifische Wärmeleitfähigkeit des natürlichen Esters ist ebenfalls höher als bei synthetischem Ester oder konventionellem Isolieröl. Siehe Bild 3. Dies wirkt sich wiederum positiv auf die Übertragungsfähigkeit des Transformators aus. Insgesamt zeigen Untersuchungen, dass Esterflüssigkeiten unter hermetischen Bedingungen eine höhere thermische Stabilität als Mineralöle haben. [1]

Entwicklung und Betriebserfahrung mit natürlichen Estern 110kV

Der nächste Schritt in der Einführung natürlicher Esterflüssigkeit als Isoliermedium, war dessen Verwendung in einem 40MVA 110kV Transformator bei der damaligen EnBW-Regional AG (heute NetzeBW).

Um die Alterungsstabilität näher zu untersuchen, wurden in geschlossenen Gefäßen, verschiedene Öle unter Luftabschluss in Verbindung mit Kupfer und Papier für 164 Stunden einer Temperatur von 150°C ausgesetzt.



Bild 4: Alterungsuntersuchung von links nach rechts: nichtinhibiertes Öl, inhibiertes Öl, natürliches Ester. [4], [5]

Das Ergebnis dieser Alterungsuntersuchung ist in Bild 4 zu sehen. Von links nach rechts ist das nichtinhibierte Mineralöl, das inhibierte Mineralöl und das natürliche Ester zu sehen. Es ist deutlich zu erkennen, dass das natürliche Ester am stabilsten blieb [4], [5].

Das Ergebnis dieser Untersuchungen führte nun zu einem 40 MVA Transformator mit den folgenden technischen Daten.

Tabelle 2: technische Daten 110kV Transformator mit natürlichem Ester als Isolationsmedium



**TRANSFORMER-LIFE-MANAGEMENT
CONFERENCE**

Einsatz natürlicher Ester-Flüssigkeiten in Leistungstransformatoren – Betriebserfahrung

Transformer Life Management Tagung 2015

(21. September bis 22. September im Radisson Blu Hotel, Oberaltenburg 4, 06217 Merseburg)

Art	Daten
Spannung	110 kV
Leistung	40 MVA
Kühlart	100% KNAN
Bauart	Hermetikausführung
Gesamtgewicht	70 t
Ölinhalt	ca. 16 t

Eingesetzt wurde dieser Transformator in Hermetikbauweise im Umspannwerk Teinach, der heutigen Netze BW.



Bild 5: 110kV Transformator im Umspannwerk Teinach der Netze-BW

Das unterschiedliche Betriebsverhalten eines Transformators mit natürlichem Ester kann anhand der Erwärmungsmessung deutlich gemacht werden. Zu diesem Zweck wurden zwei baugleiche Transformatoren einer Erwärmungsprüfung unterzogen: einer mit natürlichem Ester, der andere mit Mineralöl gefüllt. In Bild 6 sind die Ergebnisse der Erwärmungsprüfungen dargestellt.

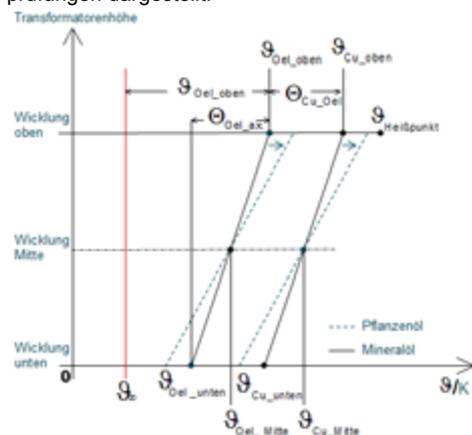


Bild 6: 110kV Transformator im Umspannwerk Teinach der Netze-BW [6]

Es fällt auf, dass der Temperaturunterschied zwischen dem Öl unten am Boden ϑ_{Oel_unten} und dem Öl oben ϑ_{Oel_oben} am Deckel beim natürlichen Ester wesentlich größer ist als beim Mineralöl. Natürliche Ester haben aufgrund ihrer höheren Viskosität eine kleinere Fließgeschwindigkeit als Mineralöl. Das führt zu einer längeren Aufenthaltszeit des Esters im Bereich der Wicklung was zu einer größeren Erwärmung des Esters führt. Dies wiederum führt zu den höheren Temperaturen am Deckel. Gleichzeitig ist die Fließgeschwindigkeit in den Radiatoren langsamer. Das bedeutet, die Abkühlperiode ist länger als bei Mineralöl. Aus diesem Grund ist das Ester auch kühler wenn es den Radiator wieder verlässt. Im Resultat ergeben sich die größeren Temperaturunterschiede für das Ester im Vergleich zum Mineralöl.

Dass die Öl- und Kupfertemperaturen in der Mitte für Mineralöl und Ester nahezu gleich sind, zeigt dass das Kühlsystem für beide Öle dieselbe Kühlleistung aufbringt. [1]

Aufgrund dieser Ergebnisse wurde der Transformator, unter Einbeziehung von Alterungsuntersuchungen [4], [5], bezüglich seiner thermischen Auslegung Neuberechnet. Daraus ergaben sich folgende Neuberechnete Grenztemperaturen:

Tabelle 3: Grenztemperaturen für 110kV Bioöltransformator

Übertemperatur Öl oben	85K
Wicklungstemperatur	95K
Heißpunkttemperatur	110k

Zusammen mit den Werten der Kurzschluss- und Leerlaufverluste wurde die Bemessungsleistung für den mit Ester gefüllten Transformator von 40 MVA auf 48 MVA festgelegt. [1]

Ständige Kontrollen und Ölanalysen zeigten keine signifikanten Änderungen der Estereigenschaften. Es ist bekannt, dass natürliche Ester höhere Konzentrationen an Wasserstoff und Ethan bilden können als Mineralöle. Dieser Vorgang ist eine Folge von Oxidationsprozessen [5]. Nach 2 Jahren im Betrieb erreichte die Ethankonzentration im Transformator einen konstanten Wert. Der Wasserstoffanteil dagegen sank. Diese Vorgänge können ein Resultat des Verbrauchs des verfügbaren Sauerstoffs (beispielsweise in der Papierisolation) sein. [1]

Einsatz natürlicher Ester-Flüssigkeiten in Leistungstransformatoren – Betriebserfahrung

Transformer Life Management Tagung 2015

(21. September bis 22. September im Radisson Blu Hotel, Oberaltenburg 4, 06217 Merseburg)

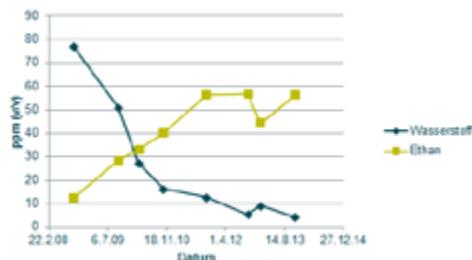


Bild 7: Wasserstoff- und Ethankonzentration von 2008-2013 [1]

Bei den physikalischen Ölkennzahlen war keine Veränderung erkennbar. Bild 8 zeigt den Wassergehalt und die Durchschlagspannung in einem Zeitraum von 5 Jahren. Der Verlauf der Ölfeuchte bewegt sich dabei in einem sehr kleinen Bereich. Die gemessene Feuchte entspricht ca. 1% relativer Sättigung und damit praktisch Neuwert. [1]

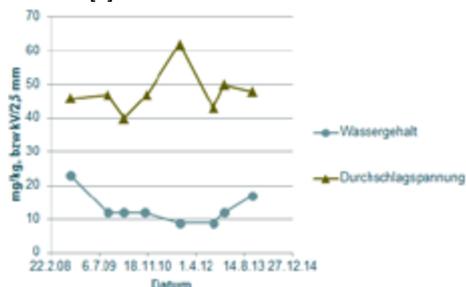


Bild 8: Verlauf des Wassergehalts und der Durchschlagspannung in einem Zeitraum von 5 Jahren [1]

Entwicklung und Betriebserfahrung mit natürlichen Estern 380kV

Aufgrund der positiven Betriebserfahrungen wurde der nächste Schritt die Konstruktion eines 380kV-Transformators in Angriff genommen.



Bild 8: 380kV Transformator im Umspannwerk Bruchsal-Kandelweg der TransnetBW

Am 18. Februar 2014 ging der erste 380kV-Leistungstransformator mit Esterflüssigkeit als Isoliermedium im Umspannwerk Bruchsal-Kandelweg bei Karlsruhe in Betrieb.

Tabelle 4: technische Daten 380kV Transformator mit natürlichem Ester als Isolationsmedium

Art	Daten
Spannung	405 kV
Leistung	180/300/400 MVA
Kühlart	KNAN/KDAF1/KDAF2
Bauart	Hermetikausführung
Gesamtgewicht	400 t
Ölinhalt	97 t

Zur Konstruktion des Transformators war es notwendig, den Imprägnierprozess, die Anordnung und Steuerung der Pumpen sowie die thermische Auslegung des Transformators zu überdenken.

Bisher läuft der Transformator problemlos. In Bild 9 ist die Belastung des Transformators in einem Zeitraum von etwas mehr als einem Jahr dargestellt.

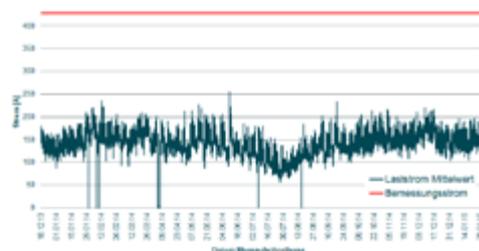


Bild 9: Laststrom Transformator Bruchsal Kandelweg mit Esterfüllung von Dezember 2013 bis Januar 2015

Auch hier zeigt sich im Betrieb des Transformators, wie bei dem 110kV-Transformator der Netze BW auch, ein Ansteigen des Ethan bis zu einem Sättigungswert bei einem gleichzeitigen Abfall des Wasserstoffgehalts.

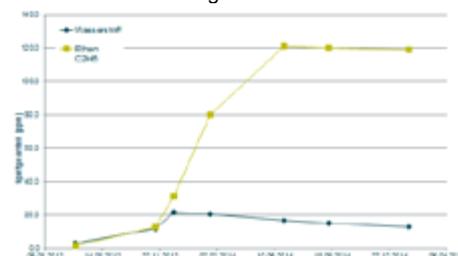


Bild 9: Wasserstoff- und Ethankonzentration von 2013-2015



Einsatz natürlicher Ester-Flüssigkeiten in Leistungstransformatoren – Betriebserfahrung

Transformer Life Management Tagung 2015

(21. September bis 22. September im Radisson Blu Hotel, Oberaltenburg 4, 06217 Merseburg)

Ein wesentliches Thema bei Transformatoren mit Esterfüllung sind Leckagen. Treten kleine Mengen des natürlichen Esters durch Leckagen aus, so steigt die Viskosität des ausgelaufenen Esters bis es fest wird. Das natürliche Ester bildet eine Art Harz (Thin Film Polymerisation). Dies kann bei kleinen Undichtigkeiten ein Vorteil sein, da so die Möglichkeit besteht, dass diese sich selbst abdichten.

Untersuchungen und praktische Beispiele zeigen, dass wenn Umgebungsluft mit großen Mengen des natürlichen Esters über Leckagen in Kontakt kommt, beispielsweise durch einen Defekt am Luftsack des Ausdehners, dies ein vergleichsweise kleines Problem ist. Es gibt Beispiele bei denen sich Viskosität und Feuchtegehalt über Jahre nur wenig verändert haben [7]. Instandsetzungsmaßnahmen können also geplant durchgeführt werden.

Zusammenfassung

Alternative Isolierflüssigkeiten, wie die natürlichen Ester, dringen neben den synthetischen Estern und den GTL-Ölen immer weiter in den Markt für Isolierflüssigkeiten vor. Die Eigenschaften und ihre physikalischen Eigenschaften haben Einfluss auf das Layout und das Design von Transformatoren. Anhand der Beispiele des 110kV-Transformators der Netze BW und des 380kV-Transformators der TransnetBW zeigen die Ester ihre Einsatzfähigkeit in Leistungstransformatoren der Höchst- und Hochspannungsebene. Das Alterungsverhalten und Luftabschluss ist vielversprechend. Betriebsbegleitende Untersuchungen, z.B. in Form von Ölprobenuntersuchungen laufen und zeigen keine Auffälligkeiten. Die höhere Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des natürlichen Esters wirken sich positiv auf die Übertragungskapazität der Transformatoren aus. Die höheren Flamm- und Brennpunkte erhöhen zudem die Sicherheit der Geräte. Weitere mögliche Anwendungen im Zusammenhang mit natürlichen Estern könnten Anwendungen in Hochspannungsmesswandlern sein.



TRANSFORMER-LIFE-MANAGEMENT CONFERENCE

Einsatz natürlicher Ester-Flüssigkeiten in Leistungstransformatoren – Betriebserfahrung

Transformer Life Management Tagung 2015

(21. September bis 22. September im Radisson Blu Hotel, Oberaltenburg 4, 06217 Merseburg)

Literatur

- [1] I. Atanasova-Hoehlein, R. Fritsche, C.Schmied, M.Schäfer, Einsatz natürlicher Ester in Leistungstransformatoren-Betriebserfahrungen und Stand der Technik, Stuttgarter Hochspannungssymposium, Neue Konzepte und Systemkomponenten für die Netze der Zukunft, Stuttgart 2014
- [2] Sicherheitsdatenblatt gemäß 1907/2006/EC, Artikel 31 für Envirotemp™ FR3™ fluid Revision vom 04.03.2014
- [3] A. Sbravati, S. Bowers, K.J. Rapp, I.P. Arantes Aging performance and oxidation stability of natural esters in sealed versus breathing environments, EuroDoble, Manchester 2014
- [4] S. Tenbohlen, D. Vukovic, M. Koch, A. Weinländer, J. Baum, J. Harthun, M. Schäfer, S. Baker, R. Frotscher, D. Dohnal, P. Dryer, Application of vegetable oil-based insulating fluids to hermetically sealed power transformers, Cigre Session 2008, Paris, A2-102
- [5] I. Atanasova-Hoehlein, Th. Hammer, M. Schäfer, Diagnostic Markers for Oxidation Condition of Mineral Oil and Ester Insulating Fluids, Cigre Session Paris, D1.213 2010
- [6] R. Frotscher, J. Harthun, C. Perrier, D. Vukovic, M. Jovalekic, S. Tenbohlen, M. Schäfer Behavior of Ester Liquids under Dielectric and Thermal Stress- From Laboratory to Practical Use, Cigre Session 2012, Paris D1-105
- [7] A. Sbravati, S. Bowers, K.J. Rapp, Aging performance and oxidation stability of natural esters in sealed versus breathing environments.
- [8] R. Fritsche, Prototype 420 kV Power Transformer using Natural Ester Dielectirc Fluid, Weidmann Seminar 2014 July 2nd-4th
- [9] R. Fritsche, I. Atanasova-Hoehlein, K. Loppach, F. Trautmann, U. Rimmele, M. Schäfer, G. Adamietz, Großtransformatoren mit natürlichen Isoliermitteln – Aspekte im Design und erste Betriebserfahrungen, Konferenz: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel 2014 - Beiträge der 6. ETG Fachtagung, Berlin 2014
- [10] Experiences in Service with New Insulating Liquids. CIGRE Brochure 436, Working Group A2. 35, Oktober 2010.
- [11] J. Hill, oil reserves, Market Report, 2012.
- [12] H. Gensior, Chancen, Potentiale, Risiken und Grenzen von biogenen Kraftstoffen, Technology Report, 2012.
- [13] IEC 62770 Ed.1: Fluids for electrotechnical applications- Unused natural esters liquids for transformers and similar electrical equipment.
- [14] IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Natural Ester Fluids in Transformers. IEEE C57.147-2008.
- [15] ASTM D6871-03: Standard specification for natural (vegetable oil) ester fluids used in electrical apparatus.
- [16] S. Tenbohlen, D. Vukocic, M. Jovalekic, M. Schäfer, J. Harthun, Dielectric performance and dissolved gas analysis of natural esters for application in power transformers, CIGRE SC D1 Colloquium, Budapest, 2009, D1-PS1
- [17] M. Konermann, M. Schäfer, Einsatz von Pflanzenöl in Leistungstransformatoren, Energiewirtschaftliche Tagesfragen 59 Jg (2009) Heft 3
- [18] Pukel G.J., Schwarz R., Baumann F., Muhr H.M., Eberhardt R., Wieder B., Chu D., Power transformers with environmentally friendly and low flammability ester liquids, 2012, Cigre Session, SC A2-201 Paris, France, 2012-08

Anschrift

TransnetBW GmbH
Gernot Adamietz
Osloer Str. 15-17, 70173 Stuttgart
Tel.:+49 711 21858 3016
Fax:+49 711 21858 4451
E-mail: g.adamietz@transnetbw.de

