

Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse
Band: 103 (2012)
Heft: 12

Artikel: Fluides isolants pour transformateurs
Autor: Boss, Pierre
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-857380>

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: 07.02.2026

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

Fluides isolants pour transformateurs

Introduction des huiles végétales à base d'ester naturel

Afin de satisfaire aux nouvelles exigences en termes de protection de l'environnement et de sécurité en cas d'incendie, les huiles minérales, qui assurent l'isolation des différents composants des transformateurs ainsi que leur refroidissement, peuvent être remplacées par des huiles de substitution. Les huiles végétales à base d'ester naturel constituent une alternative très prometteuse. La normalisation en cours à la CEI devrait faciliter leur introduction à une plus grande échelle.

Pierre Boss

L'huile isolante est l'un des composants indispensables au bon fonctionnement des transformateurs. Elle doit assurer non seulement une bonne isolation des diverses parties de l'appareil, mais aussi son refroidissement. Ces fonctions doivent être remplies tout au long de la durée de vie du transformateur, et ce, malgré le vieillissement de l'huile qui peut être plus ou moins marqué selon les conditions de fonctionnement (température, humidité, oxydation par contact avec l'air ambiant, etc.).

Depuis quelques années, les huiles isolantes doivent également satisfaire d'autres exigences, telles que la protection de l'environnement et des personnes, ou encore la sécurité en cas d'incendie. Naturellement, l'aspect économique reste un paramètre essentiel et c'est la raison pour laquelle les fluides isolants pour transformateurs doivent aussi pouvoir être soumis à des traitements de maintenance afin de leur assurer une durée de vie suffisante.

Ces nouvelles contraintes motivent le développement depuis plusieurs années d'huiles de substitution destinées à remplacer les huiles minérales traditionnellement utilisées qui ne sont pas en mesure d'offrir les conditions de sécurité adéquates. L'arrivée des huiles végétales ou dites « ester naturel » sur le marché offre une solution à cette problématique.

Types d'huile et historique

La mise en œuvre des huiles végétales s'est pour l'instant principalement répandue aux USA dans le domaine des transformateurs de distribution. En ce qui

concerne l'Europe, les huiles à base d'ester synthétique sont utilisées en Allemagne depuis près de 20 ans et depuis peu également dans les transformateurs de puissance et de traction pour des questions de protection contre le feu. Il existe aussi, de par le monde, quelques cas d'applications d'huiles végétales dans de gros transformateurs.

Le rôle joué par ces nouvelles huiles reste cependant marginal en comparaison avec le volume d'huile minérale utilisé dans le monde. La normalisation en cours à la CEI va certainement faciliter l'utilisation de ces huiles de substitution à une plus grande échelle.

Huiles minérales

Toutes les huiles minérales contiennent des paraffines et des naphthènes. Selon la concentration de ces éléments de base, l'huile sera déclarée comme naphténique

ou paraffinique. Les huiles paraffiniques offrent cependant un mauvais écoulement à basse température (en général en dessous de -25°C), nécessitant ainsi l'adjonction d'additifs afin d'atteindre des températures limites d'écoulement de -45°C , voire de -60°C . En Suisse, une très large majorité de transformateurs sont remplis avec des huiles naphténiques, mais les huiles paraffiniques sont très utilisées dans certaines parties du monde, et ce, sans aucune difficulté.

L'industrie des huiles isolantes a par ailleurs développé des processus de fabrication permettant d'offrir des huiles pouvant absorber les gaz produits en service (on parle d'huile de type « gas absorbing »). Ces huiles ont une meilleure tenue au choc de foudre et ont donc été adoptées par certaines normes nationales. Les autres huiles sont classées comme de type « gas resorbing ». Les résultats de l'analyse des gaz dissous pour suivre le fonctionnement des transformateurs semblent peu influencés par l'utilisation de l'un ou l'autre de ces types d'huiles isolantes.

Les huiles minérales sont actuellement normalisées selon le document CEI 60296-2012. Les propriétés physiques des huiles selon cette norme, qui vient d'être modifiée pour tenir compte du problème des huiles corrosives, s'appliquent uniquement aux huiles neuves avant remplissage des transformateurs. Pour connaître les propriétés admises après remplissage, il faut se référer à la norme CEI 60422-2005. A noter que la norme CEI 62535-

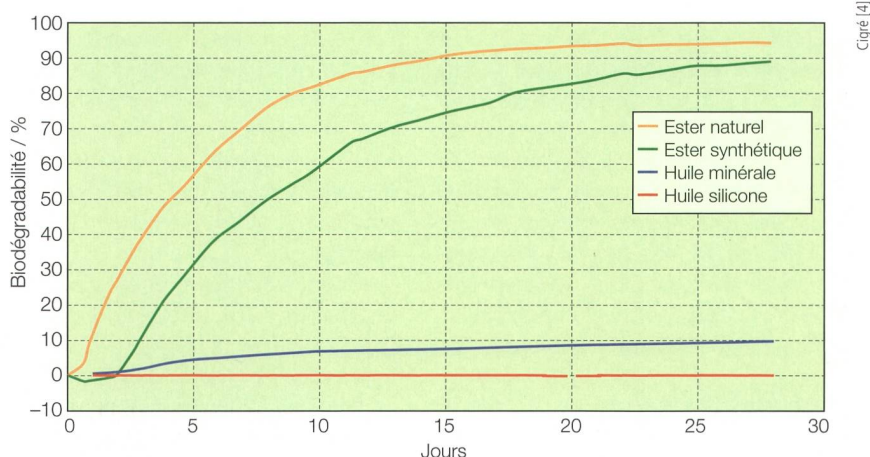


Figure 1 Biodégradabilité de divers fluides.

2008 a imposé de profonds changements dans la fabrication des huiles minérales déjà à partir de 2007, et ce, afin de réduire les risques de défaillance des transformateurs dus au soufre corrosif.

Vieillessement et huiles inhibées

Le vieillissement d'une huile est caractérisé par :

- une augmentation de l'acidité, mesurée en milligrammes d'hydroxyde de potassium à ajouter par gramme d'huile pour rétablir un pH neutre, selon la norme CEI 62021-1 ;
- une modification de sa couleur en comparaison avec des couleurs étalon selon ISO 2049. La couleur d'une huile est caractéristique de sa dégradation, tout comme son acidité et la formation de boue qui dépend de cette dernière ;
- $\tan \delta$, une mesure des pertes diélectriques d'un isolant. δ est l'angle complémentaire caractérisant le déphasage entre la tension appliquée et le courant par rapport à un isolant parfait.

La tension de claquage n'est, quant à elle, pratiquement pas influencée par le vieillissement.

Afin d'offrir une tenue supérieure de l'huile à l'oxydation, et donc au vieillissement, il est d'usage de lui ajouter un inhibiteur de type DBPC (2,6-di-tert-butyl-para-crésol) à un taux de 0,3 à 0,4 %. Cet inhibiteur de vieillissement est consommé en service et nécessite un contrôle permanent tout au long de la vie du transformateur. Il peut aussi être ajouté ultérieurement, par exemple lors de traitements de l'huile, et plus particulièrement au cours de traitements de régénération qui ont la particularité d'enlever tous les inhibiteurs de vieillissement (naturels, additifs) contenus dans l'huile. La durée de vie peut être facilement triplée pour les huiles inhibées. La

Tableau 1 Tenue au vieillissement de quelques huiles minérales [1].

Type d'huile	Acidité, max. / mg KOH/g	Boue, max. / %	Tan δ à 90 °C, max. / %
Limite CEI huile non inhibée	1,2	0,8	0,5
1-A1	0,16	0,05	0,05
1-N1	0,4	0,12	0,05
1-N2	0,35	0,1	0,03
2-A1	0,23	0,1	0,15
2-N1	0,9	0,3	0,1
Limite CEI huile inhibée	0,3	0,05	0,05
1-A1	0,04	0,02	0,03
1-N1	0,03	0,02	0,01
1-N2	0,01	0,02	0,01
2-A1	0,02	0,02	0,009
2-N1	0,02	0,01	0,005

norme CEI 61125-2004 prévoit d'ailleurs de tester ces dernières pendant 500 h, alors que cette durée d'essai est de 164 h pour les huiles non inhibées.

Lors du choix d'un type d'huile, il faut donc se référer aux résultats des tests de vieillissement figurant sur toutes les fiches techniques mises à disposition par les fabricants (**tableau 1**). Dans la colonne « type d'huile », les désignations 1-A1 ou 1-N1 ont la signification suivante :

- le premier chiffre se rapporte à un certain fournisseur ;
- la lettre « A » correspond à une huile produite avant 2007 et la lettre « N » à une huile plus récente ;
- le dernier chiffre indique une variante proposée par un même fournisseur.

Le **tableau 1** montre que les nouvelles huiles non inhibées vieillissent 2 à 3 fois plus rapidement que les anciennes huiles si l'on se réfère à l'augmentation d'acidité comme critère de vieillissement, c'est-à-dire à la tendance à produire de la boue. Les valeurs très similaires indiquées pour les anciennes et les nouvelles huiles inhibées, contenant déjà des additifs pour

lutter contre l'oxydation, montrent que ces huiles ont été peu touchées par la norme CEI 62535-2008. Par contre, pour les huiles non inhibées, cette norme a eu un impact important : on ne trouve depuis sur nos marchés pratiquement plus d'huiles offrant des performances suffisantes pour les grands transformateurs soumis à de fortes charges.

Huiles non minérales

Les huiles isolantes synthétiques sont utilisées depuis plus de 50 ans, d'abord grâce au développement des huiles de type PCB (polychlorobiphényle), puis à leur remplacement par les huiles silicones selon la norme CEI 60836-2005 au début des années 80. A partir de 1976, un grand développement a eu lieu dans le domaine des huiles synthétiques à base d'ester. Ce type d'huile a été à la base de la norme CEI 61099 qui a été élaborée en 1992 et révisée en 2010. Dans certaines régions du monde, l'huile d'ester synthétique a pris la place de l'huile silicone en raison de son excellente tenue au feu et de sa très bonne biodégradabilité dans l'eau.

	Huile minérale non inhibée	Ester synthétique Midel 7131	Ester naturel Biotemp	Ester naturel FR3
Viscosité à 40 °C / mm ² /s	9	30	42	33
Viscosité à 100 °C / mm ² /s	2,5	5,25	9	8
Densité à 25 °C / kg/m ³	0,88	0,97	0,91	0,92
Point de congélation / °C	-25/-50	-50	-20	-20
Chaleur spécifique à 25 °C / J/kgK	1860	1880	1963	1880
Conductivité thermique à 25 °C / W/mK	0,126	0,144	0,17	0,17
Coefficient d'expansion thermique / 1/°C	0,00075	0,00075	0,00068	0,00074
Tenue au claquage selon CEI 60156 / kV	> 70	> 75	> 75	> 75
Permittivité relative selon CEI 60247	2,2	3,2	3,2	3,2
Tangente δ à 90 °C selon CEI 60247	< 0,001	< 0,006	< 0,02	< 0,02
Acidité / mg KOH/g	0,01	0,03	0,03	0,022
Vieillessement RBOT ¹⁾ / min (ASTM D2112)	300	420	197	17
Biodégradation après 28 jours / %	25	89	95	95

Tableau 2 Propriétés physiques de diverses huiles [4].

Les huiles à base d'ester naturel (ou huile végétale) ont, quant à elles, été développées aux USA à partir de 1991. Une norme CEI est en préparation (publication fin 2012, début 2013). Elle s'appuie sur la norme IEEE déjà en place depuis 2008 [2]. Actuellement, de grands développements sont en cours dans ce domaine selon l'orientation choisie par les fabricants (type de l'huile de base, adjonction d'additifs, objectifs de biodégradabilité ou de sécurité au feu, etc.) [3].

Propriétés physiques de divers fluides

Le **tableau 2** permet de comparer les propriétés physiques [4], la tenue au vieillissement, la biodégradabilité et la tenue au feu de diverses huiles utilisées dans tous les types de transformateurs. Comme indiqué en début d'article, certaines huiles sont utilisées avec succès dans des applications particulières.

La **figure 1** met bien en évidence la très bonne biodégradabilité des huiles esters, surtout pour les huiles d'origine végétale, qui devraient trouver des applications en relation avec la recommandation 2.19-2006 de l'AES concernant la protection des eaux [5]. La **figure 2** montre, quant à elle, que la tenue diélectrique des divers fluides est comparable si elle est exprimée en fonction de l'humidité relative. A noter que la saturation en humidité est d'environ 40-60 ppm pour l'huile minérale, alors qu'elle est de 800-1000 ppm pour les esters naturels, voire plus pour les esters synthétiques.

En ce qui concerne la tenue au feu selon la norme CEI 61100-1992, l'huile minérale, avec un point de feu²⁾ inférieur à 300°C et une chaleur calorifique de 46 MJ/kg, rentre dans la classe O1. Par contre, les huiles esters avec un point de feu supérieur à 300°C rentrent dans la classe K, soit K2 pour les esters naturels avec une chaleur calorifique de 37 MJ/kg et K3 pour les esters synthétiques avec une chaleur calorifique de 31,5 MJ/kg. Il s'agit donc de fluides difficilement inflammables, dont l'utilisation peut être envisagée dans des applications critiques vis-à-vis du risque d'incendie.

Miscibilité des huiles isolantes

Aux USA, une large part du marché des huiles pour transformateurs correspond au remplacement de la charge d'huile minérale par une huile végétale, ce qui pose la question de la miscibilité de ces différents types d'huiles. Si le point de feu doit être situé au-dessus de 300°C,

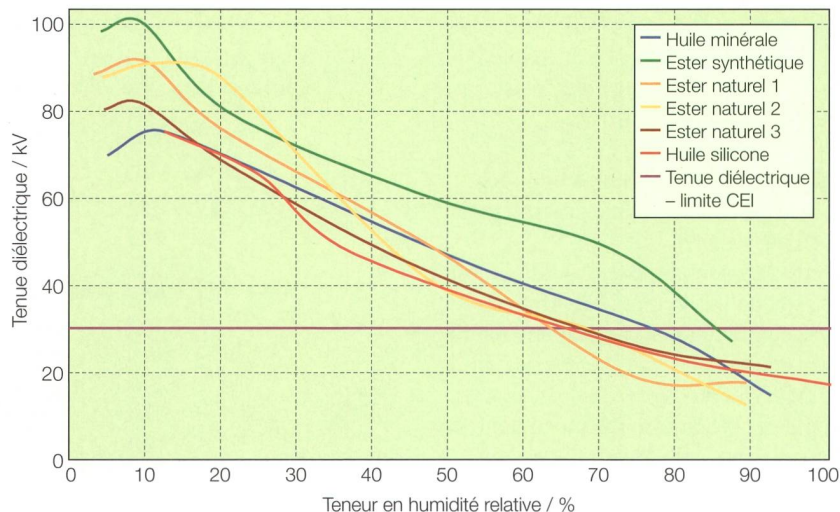


Figure 2 Teneur diélectrique en fonction de l'humidité.

il faut absolument éviter une trop grande contamination de l'huile végétale par l'huile minérale (au maximum 3 à 5 %).

Toutes ces huiles sont bien miscibles. Toutefois un mélange d'huile aura pour conséquence que la meilleure huile verra éventuellement ses propriétés légèrement dégradées. Comme indiqué ci-dessous, le remplacement de la charge d'huile nécessite quelques précautions pour les appareils à tension de service élevée et pour les transformateurs sans membrane ou non hermétiques.

Huile ester pour les grands transformateurs

Quelques gros transformateurs ont déjà été remplis avec des huiles de type « ester » dans plusieurs pays par différents fabricants :

- Siemens (ELIN) a rempli pour Vattenfall en 2004 quelques appareils de 240 kV, 130 MVA avec l'huile ester synthétique Midel 7131 ;
- ABB a rempli quelques appareils de 138 kV, 25 MVA avec l'huile ester naturelle Biotemp combinée au matériau isolant Nomex pour des utilisateurs au Brésil en 2007 [6] (**figure 3**) et de 66 kV, 40/50 MVA (ONAN/ONAF³⁾) pour l'Egypte en 2010 ;
- Areva a rempli plusieurs transformateurs de 130 kV, 90 MVA et réactances d'une tension allant jusqu'à 220 kV avec l'huile ester naturelle FR3 de Cooper en 2006.

Il convient d'être très prudent lors du remplissage de transformateurs ayant une tension de service supérieure à 145 kV car la tenue aux décharges électriques pour les grandes distances des huiles de

type « ester » est sensiblement différente de celle de l'huile minérale [7-8]. Dans le cas des huiles végétales, il faudra éventuellement ajouter une membrane dans le conservateur afin d'éviter tout contact avec l'air ambiant et ainsi une oxydation de l'huile. De plus, il faut tenir compte du fait qu'au-dessous de -10°C, l'huile sera trop visqueuse pour une utilisation normale du changeur de prise. Une procédure pour un démarrage à basse température devra alors être observée.

Contrôles périodiques des huiles

Un contrôle périodique est indispensable pour tous les types d'huiles, soit selon les normes CEI 60422-2005 pour les huiles minérales et CEI 61203-1992 pour les esters synthétiques. En ce qui concerne les esters naturels, il n'existe pas encore de norme CEI. Par contre, comme indiqué précédemment, il existe une norme aux USA [2] pour l'huile usagée.

Tenue à la chaleur

Pour des applications à haute température incluant l'utilisation d'esters synthétiques et naturels, il convient de tenir compte de la présence, ou non, d'additifs tels que les inhibiteurs pour l'huile minérale. Les fabricants d'huile d'ester naturel recommandent l'utilisation de protections permettant d'éviter le contact de l'huile avec l'air ambiant (transformateur hermétique, membrane dans le conservateur, etc.). En ce qui concerne les huiles d'ester synthétique, cette protection n'est pas nécessaire car elles résistent bien à l'oxydation. Néanmoins l'absence de contact avec l'air ambiant permet de freiner

ner le vieillissement, comme pour l'huile minérale. Des différences significatives en termes de tenue à la chaleur sont observées entre les diverses huiles, et ce, principalement pour les huiles végétales si elles contiennent ou non un inhibiteur de vieillissement.

Effet des esters sur la cellulose

Les isolants cellulotiques imprégnés d'huile à base d'ester affichent une vitesse de vieillissement réduite de plus de moitié par rapport à des isolants cellulotiques imprégnés d'huile minérale [9-10]. Ceci correspond à une capacité de surcharge permettant une augmentation de température de près de 20°C.

Conclusions

La norme CEI 62535-2008 a imposé de profonds changements dans la fabrication des huiles minérales à partir de 2007. Les huiles inhibées, contenant déjà des additifs pour lutter contre l'oxydation, ont été peu touchées par cette norme. Par contre, pour les huiles non inhibées, le changement est important puisque l'on ne trouve pratiquement plus sur nos marchés d'huiles non inhibées offrant des performances suffisantes pour les grands transformateurs soumis à de fortes charges.

Le développement des huiles isolantes de type ester offre une alternative à l'emploi des huiles minérales. L'expérience accumulée sur les transformateurs de distribution montre que les huiles végétales suffisent amplement pour une telle utilisation. En ce qui concerne les transformateurs de puissance, l'expérience avec les deux types d'ester, synthétique et naturel, est limitée mais est néanmoins positive à ce jour.

Leur bon comportement au feu a été reconnu dans le domaine du ferroviaire



Figure 3 Transformateur ABB de 25 MVA, 138 kV, rempli avec l'huile ester naturel Biotemp.

en Europe, puisque seules les huiles ayant un point de feu supérieur à 300°C y sont tolérées à l'avenir. Finalement, la normalisation en cours au sein de la CEI permettra d'accélérer la mise en œuvre des huiles à base d'ester naturel.

Références

- [1] D'après les fiches techniques des huiles non inhibées Nynas 3000 high grade (1-A1), Nynas Libra std grade (1-N1), Nynas Taurus std grade (1-N2), Shell Diala D std grade (2-A1), Shell Diala S2 ZU-I std grade (2-N1), ainsi que celles des huiles inhibées Nynas 10XN high grade (1-A1), Nynas Lyra X high grade (1-N1), Nynas 4000 X super high grade (1-N2), Shell Diala DX high grade (2-A1) et Shell Diala S3 ZX-I high grade (2-N1).
- [2] IEEE Guide C57.147-2008 – IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Natural Ester Fluids in Transformers.
- [3] S. Tenbohlen et al.: Application of vegetable oil-based insulating fluids to hermetically sealed power transformers. CIGRE Session 42, Paris, France, August 24-29, 2008.
- [4] Experiences in service with new insulating liquids. Brochure CIGRE n° 436, 2010.

- [5] Recommandation 2.19-2006 de l'AES concernant la protection des eaux lors de la construction et de l'exploitation d'installations électriques renfermant des liquides pouvant polluer les eaux.
- [6] P. Boss et al.: New insulating fluids for transformers based on biodegradable high oleic vegetable oil. MatPost'07, 3rd European Conference on HV & MV Substation Equipment, Lyon, France, November 15-16, 2007.
- [7] G. J. Pukel et al.: Environmental friendly insulating liquids – a challenge for power transformers. CIGRE 2009, 6th Southern Africa Regional Conference, Paper 510, Cape Town, South Africa, August 10-21, 2009.
- [8] R. Liu et al.: Fast streamer propagation in transformer oil and ester liquids. 21st Nordic Insulation Symposium, NORD-IS 09, Gothenburg, Sweden, June 15-17, pp. 217-220, 2009.
- [9] R. Asano et al.: Thermal evaluation of cellulosic board in natural ester fluid for hybrid insulation systems. 2011 Doble Engineering Company – 78th Annual International Conference of Doble Clients, Boston, USA, March 27-31, Paper IM-01, 2011.
- [10] C. P. Mc Shane et al.: Natural ester dielectric fluid development. IEEE/PES Conference, Dallas, USA, May 21-24, pp. 18-22, 2006.

Informations sur l'auteur



Pierre Boss est ingénieur ETS en électrotechnique. Il a travaillé principalement dans l'industrie des transformateurs chez ABB Sécheron, ainsi que dans le domaine de la normalisation qui y est associée. Entre 2004 et 2010, il a présidé les travaux du Cigré A2 « Transformateurs ». Il est consultant indépendant depuis 2009 et collabore avec des tiers en Suisse et à l'étranger.
Pierre Boss, 1233 Bernex, pierrehenriboss@bluewin.ch

¹⁾ Rotating bomb oxidation test.

²⁾ Le point de feu correspond à la température minimale à laquelle s'enflamme un liquide soumis à une flamme appliquée à sa surface dans des conditions spécifiées.

³⁾ ONAN pour Oil Natural Air Natural, c'est-à-dire que la circulation de l'huile et de l'air se fait sans pompe ni ventilateur; ONAF pour Oil Natural Air Forced, c'est-à-dire sans pompe pour l'huile, mais avec ventilateur pour l'air.

Zusammenfassung

Isolierflüssigkeiten für Transformatoren

Einführung von Pflanzenölen auf der Basis von natürlichem Ester

Die IEC-Norm 62535-2008 hat seit 2007 tief greifende Änderungen bei der Herstellung von Mineralölen bewirkt, die die Isolierung und Kühlung von Transformatoren gewährleisten. Inhibierte Öle, die bereits Zusätze enthalten, um die Oxidation zu bekämpfen, waren von dieser Norm nur wenig betroffen. Bei nichtinhibierten Ölen hingegen sind die Änderungen beträchtlich, da auf den internationalen Märkten praktisch keine für Grosstransformatoren geeigneten nichtinhibierten Öle mehr zu finden sind.

Die Entwicklung von Isolierölen auf Ester-Basis stellt eine Alternative zum Einsatz von Mineralölen dar. Die Erfahrungen, die mit Verteiltransformatoren gesammelt wurden, zeigen, dass Pflanzenöle hinlänglich für einen solchen Einsatz geeignet sind. Bei Leistungstransformatoren ist die Erfahrung mit beiden Esterarten – synthetisch und natürlich – zwar eingeschränkt, jedoch bisher positiv. Die laufenden IEC-Normvorhaben dürften ihre Einführung in grösserem Massstab erleichtern.

CHe