

Biologische Isolierflüssigkeiten – sicher, nachhaltig, umweltfreundlich

Ernst PAGGER¹, Ulrike SCHNEIDER²

¹ EPP Consulting GmbH, Heiligenstädter Lände 29 2.OG 1180 Wien, +436602367283, office@epp-consulting.at, www.epp-consulting.at

² VERBUND Thermal Power GmbH & Co KG, Betriebslabor, Kraftwerksstraße 1, 8410 Fernitz-Mellach, +436648286200, ulrike.schneider@verbund.com, www.verbund.com

Kurzfassung: Eine möglichst sichere, nachhaltige und umweltschonende Stromproduktion, Übertragung und Verteilung verstärkt den Einsatz von biologischen Isolierflüssigkeiten, was sich auf die Anzahl der Anbieter und den eingesetzten Mengen niederschlägt. Bedingt durch ihre chemischen und physikalischen Eigenschaften sind sie dem klassischen Mineralöl in einigen Bereichen überlegen. Durch ihren biologischen Ursprung und durch den wesentlich geringeren Energieeinsatz bei der Herstellung haben sie einen weit geringeren CO₂-Fußabdruck verglichen mit anderen Isolierflüssigkeiten. Isolierflüssigkeiten, die durch Cracken von Fetten und Ölen hergestellt werden, sind nicht Bestandteil dieses Beitrages.

Keywords: Transformator, feuersicher, nachhaltig, umweltfreundlich, papierfreundlich, Dekarbonisierung, biologische Isolierflüssigkeit

1 Allgemeines

Elektrische Energie hat in allen Bereichen unserer Zivilisation Einzug gehalten. Die Zunahme des Bedarfs an elektrischer Energie hat die Welt extrem abhängig von der Versorgung mit elektrischer Energie gemacht und eine gesicherte Energieversorgung ist die Basis unserer Wirtschaftsleistung und unseres Wohlstandes. Die Energiewirtschaft unterliegt zurzeit einem fundamentalen Wandel und dieser macht auch vor den elektrischen Betriebsmitteln und den dabei eingesetzten Materialien nicht halt [1]. Mit innovativen Technologien sind Netzbetreiber und Energieversorger bestrebt die Energieübertragung und Versorgung sicherer, nachhaltiger und umweltfreundlicher zu gestalten. Ein Schlüssel dazu ist die Verwendung von biologischen Isolierflüssigkeiten.

Seit Beginn der 1990er Jahre wird auf dem Gebiet der biologischen Isolierflüssigkeiten geforscht, sodass diese mittlerweile breite Anwendung in der Transformatortechnologie finden. International wird die biologische Isolierflüssigkeit FR3 bis zu einer Spannungsebene von 420 kV [2] und national bis 110 kV und einer Leistung von 40 MVA eingesetzt [3] [4].

1.1 Biologische Isolierflüssigkeiten am Markt

Den Autoren sind zurzeit die in Tabelle 1 angeführten biologischen Isolierflüssigkeiten bekannt. Die Art der Basisöle wird von den Herstellern teilweise nur sehr spärlich angegeben, sodass die Vergleichbarkeit erschwert wird. Eine weitere Isolierflüssigkeit, die aus der Pflanze *Jatropha curcas* (dt. Purgiernuss) stammt, befindet sich noch in der Entwicklung [5]. Diese

Pflanze bietet einiges an Potential. Die Purgiernuss (*Jatropha curcas*) ist eine sehr anspruchslose Pflanze und wächst auch auf sehr trockenen Böden. Der Samen ist nicht für den Verzehr geeignet und daraus gewonnene Produkte stehen somit in keiner direkten Konkurrenz zu Nahrungsmitteln. Durch ihre Eigenschaften wäre *Jatropha curcas* eine ideale Pflanze für ökosoziale Landwirtschaft. Da die Gewinnung der biologischen Isolierflüssigkeiten nicht mit komplexem technischem Aufwand verbunden ist, könnte die Isolierflüssigkeit direkt vor Ort hergestellt werden.

Tabelle 1: Natürliche Ester als Isolierflüssigkeiten am Markt

Bezeichnung der Isolierflüssigkeit	Basisöl	Hersteller
Envirotemp® FR3™ Fluid [6]	Sojaöl	Cargill, incorporated
Envirotemp® FR3r™ Fluid [7]	Rapsöl	Cargill, incorporated
Midel® eN 1204 [8]	Rapsöl	M&I Materials Ltd
Midel® eN 1215 [9]	Sojaöl	M&I Materials Ltd
NeuGen plus [10]	Keine Angaben	IMCD Australia Ltd
Paryol Electra 7426® [11]	Mischung von Pflanzenölen mit 12 Kohlenstoffatomen im Molekül	A&A Fratelli Parodi Spa
MATROL-BI® FDV01A [12]	Hoch ölhaltiger natürlicher Ester	Novamont Spa

Die am meisten geprüfte biologische Isolierflüssigkeit, die bereits am längsten auf dem Markt ist, ist mit Abstand der natürliche Ester FR3 auf der Basis von Sojabohnenöl. Es gibt praktisch keine vergleichenden Isolieröluntersuchungen und Forschungstätigkeiten, in denen FR3 nicht untersucht worden wäre [13].

2 Sicherheit

Die stärkste treibende Kraft auf der Suche nach Alternativen zum Mineralöl war dessen leichte Entzündlichkeit und die Gefahr für die Umwelt, die von Mineralölen ausgeht. Durch seine Eigenschaften ereigneten und ereignen sich auch heute noch Unfälle mit fatalen Personen- und schweren Umweltschäden. Die schrecklichsten Unfälle in Verbindung mit Transformatorbränden mit dutzenden Toten waren wohl jene 2010 in Daka [14] und Mai 2014 in der Türkei [15]. Neben dem betroffenen Gerät kann es im Zuge solcher Ereignisse zum Ausfall der benachbarten Infrastruktur kommen (Übergreifen des Brandes auf weitere Transformatoren, Einschläge von Porzellansplitter die von den Durchführungen stammen, Kurzschlüsse an den Hochspannungsleitungen durch ionisierten Rauch, Brände in Produktionshallen etc.).

Mögliche Brandursachen eines Transformators [16]:

- Mechanische Beschädigung der Isolierung der Wicklung während der Produktion
- Beschädigung der Isolierung durch eine lange andauernde Überlast oder Überspannung
- Isolationsfehler zwischen Tank und Wicklung durch kondensiertes Wasser in der Isolierflüssigkeit oder Schlamm im Öl
- Lockere Schraubverbindungen an Kabeln und Durchführungen
- Mangelnder Ölfluss innerhalb des Transformators
- Teilentladungen wegen mangelhafter Imprägnierung
- Wirbelströme im Magnetkern wegen mangelhaftem magnetischem Fluss
- Explosion des Lastschalters wegen der Ansammlung brennbarer Gase

- Auch die Sprinkleranlage selbst kann schuld an einem Transformatorbrand sein. In Brasilien löste eine Fehlfunktion die Sprinkleranlage, die auf die Durchführungen gerichtet war, aus. Dadurch kam es zu einem externen Funken und letztlich zur Explosion.

Mit biologischen Isolierflüssigkeiten gefüllte Transformatoren zeigen eine deutliche Verbesserung in Hinblick auf die Brandsicherheit gegenüber mineralölgefüllten Geräten. Wir sprechen hier von Isolierflüssigkeiten der K-Klasse [17] mit Brennpunkten von 330-360 °C gegenüber 165 °C beim Mineralöl (Abbildung 1). Zurzeit sind zum Beispiel mehr als drei Millionen mit dem natürlichen Ester FR3 gefüllte Transformatoren weltweit im Einsatz und bis dato wurde noch kein einziger Trafobrand mit dieser Isolierflüssigkeit gemeldet. Damit sind diese Flüssigkeiten für den Einsatz in Wohnblöcken, dicht verbauten Gebieten, Stahlwerken, Tunnels und Kavernenkraftwerken bestens geeignet. Feuerlöscheinrichtungen können bei ihrem Einsatz reduziert bzw. komplett weggelassen werden.

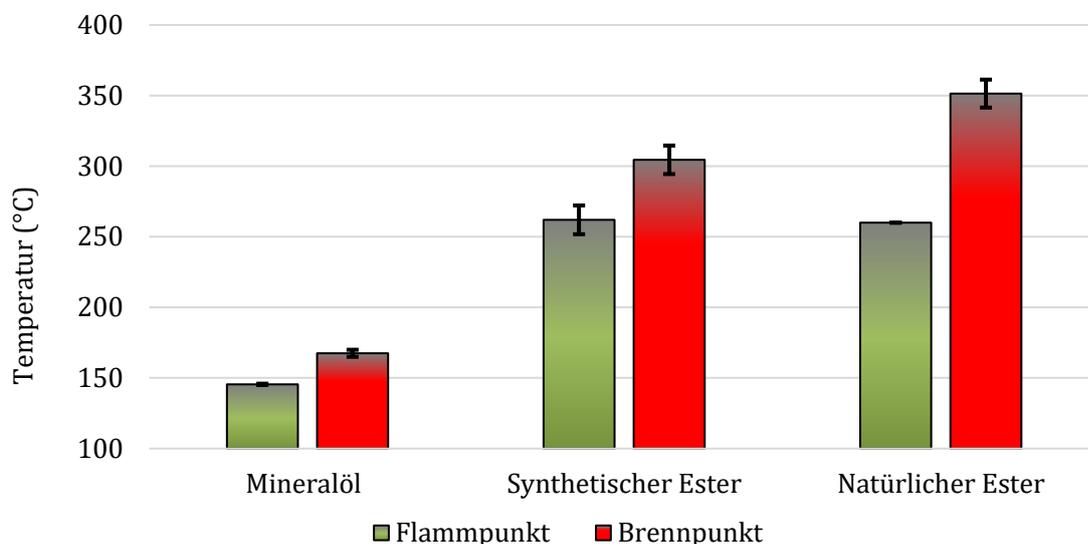


Abbildung 1: Flamm- und Brennpunkt verschiedener Isolierflüssigkeiten

3 Nachhaltigkeit

Für die Herstellung von biologischen Isolierflüssigkeiten werden meist Nebenprodukte, die bei der Verarbeitung von nachwachsenden Rohstoffen anfallen, verwendet [18]. Somit werden die Nebenprodukte einer sinnvollen Nutzung zugeführt und für die gewonnenen Isolierflüssigkeiten ergibt sich ein sehr geringer ökologischer Fußabdruck und ein Beitrag zur Dekarbonisierung der Energieübertragung. Abbildung 2 zeigt eine Gegenüberstellung der unterschiedlichen Isolierflüssigkeiten bezüglich der CO₂ Belastung im Laufe eines Lebenszyklus. Da die biologischen Isolierflüssigkeiten (natürliche Ester) aus nachwachsenden Rohstoffen stammen, starten diese mit einem negativen Ausgangswert. Die schlechte CO₂ Bilanz der synthetischen Ester ist darauf zurückzuführen, dass die Ausgangsstoffe größtenteils fossilen Ursprungs sind und ihre Herstellung im Autoklav mit einem deutlichen Energieaufwand verbunden ist [19], [20].

Die hervorragenden Eigenschaften, die Ester gegenüber der Cellulose aufweisen, führen zu einer deutlich längeren Lebenszeit der damit befüllten Geräte. Dies konnte durch umfangreiche Untersuchungen zweifelfrei bestätigt werden [13]. Die deutlich höheren Wasserabsorptions- und Adsorptionskapazitäten der Ester (synthetischen und natürlichen

Ursprungs) stehen hierfür als Ursache im Vordergrund. Dieser Vorteil kann auch in Form einer höheren Lastkapazität (bis zu 20%) genutzt werden und führt wiederum, bei neuen Transformatoren, zu kleineren Dimensionen der Geräte und damit zu unmittelbarer Material- und Kostenersparnis.

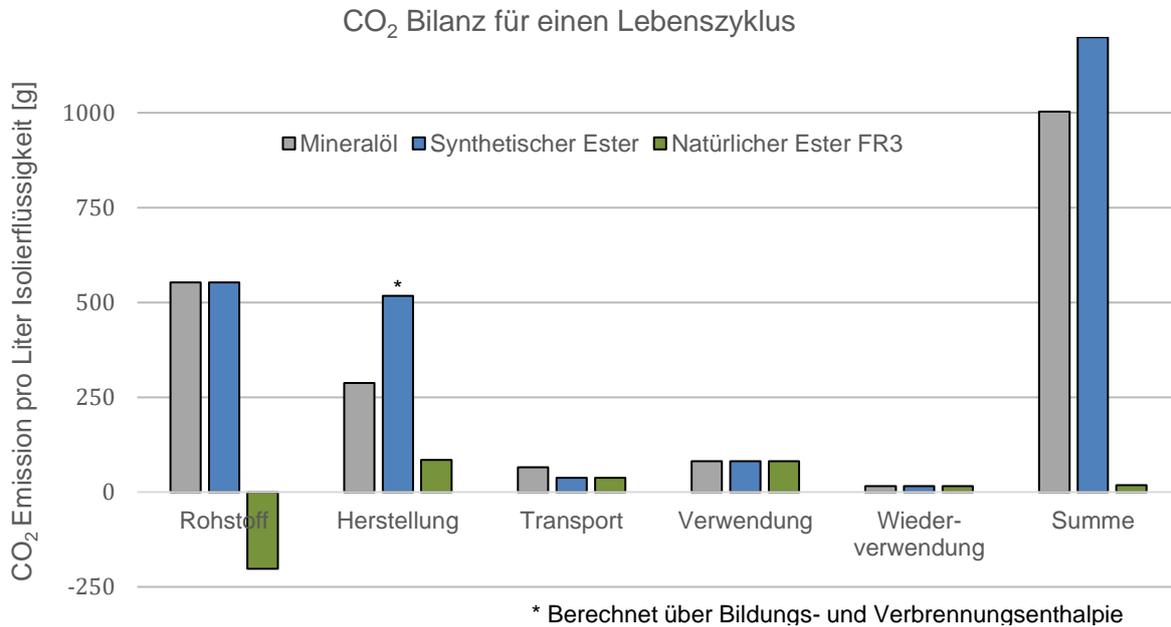


Abbildung 2: CO₂ Bilanz verschiedener Isolierflüssigkeiten

4 Umweltfreundlichkeit

Die hohe biologische Abbaubarkeit der meisten biologischen Isolierflüssigkeiten (> 95% nach 28 Tagen, Abbildung 3 aus [21], Tabelle 2 aus [13]) ist ein besonderes Asset, wenn Transformatoren in, für die Umwelt, sensiblen Regionen installiert werden. Von biologisch leicht abbaubar spricht man, wenn nach 28 Tagen mindestens 70% der organischen Substanz in Kohlendioxid und Wasser zersetzt wurde. Der Abbau organischer Substanzen in der Natur wird durch mikrobielle Enzyme verursacht. Der Prozess wird von mit Sonnenlicht aktiviertem Sauerstoff beschleunigt. Transformatoren selbst bieten für einen biologischen Abbau der Isolierflüssigkeit schlechte Voraussetzungen. Es ist dunkel, der Sauerstoffzutritt wird bei nicht frei atmenden Geräten behindert und bei erhöhten Temperaturen geht die katalytische Enzymaktivität stark zurück. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden in der Auswertung auch die zurzeit am meisten verwendeten Isolierflüssigkeiten im Bereich der Mineralöle und synthetischen Ester in die Auswertung mitaufgenommen.

Zusätzlich verhindert die höhere Viskosität ein rasches Eindringen ins Erdreich. Natürliche und synthetische Ester (vor allem FR3 und Midel 7131) haben bei Umgebungstemperatur sehr ähnliche Viskositätswerte (Abbildung 4) [13].

Der hohe Flamm- und Brennpunkt erlaubt geringere Abstände zu weiteren Geräten und Wänden, was sich unmittelbar in einem geringeren Bodenverbrauch niederschlägt. Die Reduzierung der Abstände ist in Abhängigkeit zur Füllmenge in der IEC 61936-1 festgeschrieben [22].

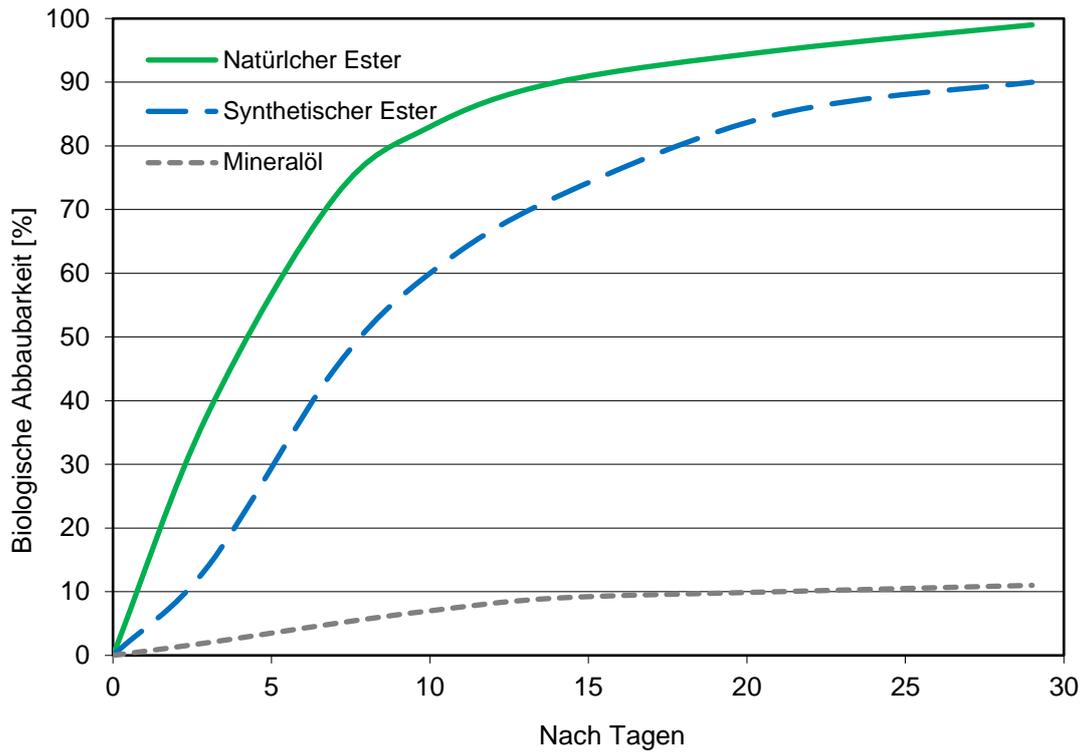


Abbildung 3: Abbaurrate nach Tagen [21]

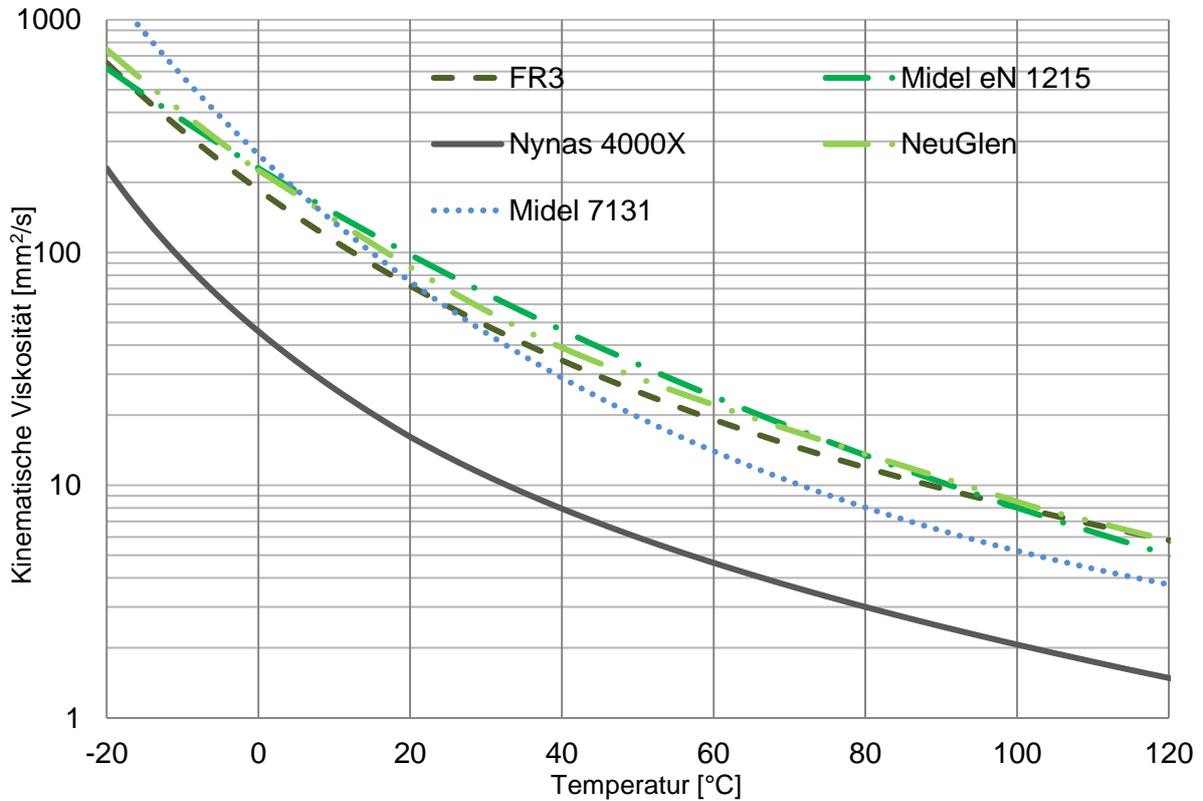


Abbildung 4: Viskosität in Abhängigkeit der Temperatur [13]

Tabelle 2: Biologische Abbaubarkeit

Isolierflüssigkeit	Testmethode	Biologische Abbaubarkeit
Nynas Nytro® 4000X [23]	OECD 301 [24]	Biologisch nicht abbaubar
Midel 7131 [25]	OECD 301 [24]	Biologisch vollständig/leicht abbaubar
Envirotemp® FR3™ Fluid [6]	EPA OPPTS 835.3110 [26]	Biologisch leicht abbaubar
Midel eN 1204 [8]	OECD 301 [24]	Biologisch vollständig/leicht abbaubar
Midel eN 1215 [9]	OECD 301 [24]	Biologisch vollständig/leicht abbaubar
NeuGen plus [10]	CEC-L-33-A-97	> 95%
Paryol Electra 7426 [11]	OECD 301 B, C or F [24]	Leicht biologisch abbaubar
MATROL-BI® FDV01A [12]	OECD 301 B [24]	Leicht biologisch abbaubar

5 Schlussfolgerung, Ausblick

Bei ähnlichen dielektrischen Eigenschaften sind die biologischen Isolierflüssigkeiten dem Mineralöl, was Sicherheit, Nachhaltigkeit und Umweltfreundlichkeit betrifft, deutlich überlegen. Neben dem ökologischen Nutzen führen diese Eigenschaften aber auch zu ökonomischen Vorteilen, wie beispielsweise zu niedrigeren Versicherungsprämien bei manchen Versicherungsgesellschaften [27].

Forschungen im Bereich des Einsatzes von Nanopartikeln zeigen Potentiale im Bereich der verbesserten Wärmeleitung und einer weiteren Erhöhung der Permittivität von biologischen Isolierflüssigkeiten, was zu einer noch höheren elektrischen Festigkeit führt [13].

Referenzen

- [1] Borghardt S, Transformatoren: Innovationen für die Umwelt, Natürliche Ester – Eine Alternative zu Mineralölen, ZVEI, Oktober 2019
- [2] Fritsche R, Nachhaltige elektrische Isolierung dank Pflanzenölen, Energy 2.0-Kompendium, 2015
- [3] <https://www.stw.at/news-presse/neues-umspannwerk-in-betrieb-genommen/> 30.6.2022
- [4] Sattlberger W., Siemens Energy Austria Transformatorenwerk in Linz liefert ersten grünen Trafo aus, APA, Natur & Technik, Siemens, 4.12.2020
- [5] Evangelista Jr. et al, Development of a New Bio-Based Insulating Fluid from Jatropha curcas Oil for Power Transformers, Advances in Chemical Engineering and Science, 7, 235-255, 2017
- [6] Cargill Industrial Specialties, Envirotemp® FR3™ Fluid, Guide for Storage, Installation, Commissioning and Maintenance of FR3 Fluid Filled Transformers, G2300, April, 2017
- [7] Cargill, FR3r Natural Ester fluid properties, 2023
- [8] Midel eN 1204, Natural Ester Transformer Fluid (Rapeseed), © M&I Materials, 2019
- [9] Midel eN 1215, Natural Ester Transformer Fluid (Soya), © M&I Materials, 2019
- [10] https://v1.cecdn.yun300.cn/site_1807060518/BioLectric_Tech_Neugen.pdf
- [11] Paryol Electra 7426® TG3 – Biodegradability, © A&A Fratelli Parodi Spa, 2014
- [12] MATROL-BI® FDV01A, NOVAMONT, Vers. 2.0, March 2020
- [13] Pagger E., Pattanadach N., Uhlig F., Muhr M., Biological Insulating Liquids, New Insulating Liquids for High Voltage Engineering, Springer Nature Switzerland AG, ISBN 978-3-031-22459-1, <https://www.doi.org/10.1007/978-3-031-22460-7>
- [14] TheHindu, June 4, 2010
- [15] El-Harbawi M., Al-Mubaddel F., Risk of fire and explosion in electrical substations due to the formation of flammable mixtures, Scientific Reports, 2020, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63354-4>

- [16] Hoole P.R.P. et al., Power transformer fire and Explosion: Causes and control, International Journal of Control Theory and Application, ©International Science Press, Volume 10, November 16, 2017
- [17] IEC 61039, Classification of insulating liquids, 2008
- [18] Pagger E., Bowers S., Warum der Einsatz von Pflanzenölen in der Hochspannungstechnik ökologisch und ökonomisch sinnvoll ist, 16. Symposium Energieinnovation, TU Graz, Februar 2020
- [19] BEES® 4.0, Building for Environmental and Economic Sustainability Technical Manual and User Guide, August 2007
- [20] Pagger E., Biologische Isolierflüssigkeiten – Neue Isolierflüssigkeiten für die Hochspannungstechnik, OVE Tagung, Klagenfurt, 2023
- [21] CIGRE Technical Brochure 436, Experience in service with new insulating liquids, Working Group A2.35, 2010
- [22] DIN EN IEC 61936-1, Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV AC und 1,5 kV DC, 2023
- [23] Nytro® 4000X, Product data sheet, Nynas, May 2021
- [24] OECD 301, OECD Guideline for Testing of Chemicals, Ready Biodegradability, 1992
- [25] Midel, Selection guide, June 2019
- [26] EPA, OPPTS 835.3110 Ready Biodegradability, Fate, Transport, and Transformation Test Guidelines 1998
- [27] Forsthuber R., Gefahren und Schadensverhütung in der Hochspannungstechnik aus Sicht der Versicherungen, 5.Workshop, VUM, Graz, 2014