

# Transformatortechnologie für die Energiewende

**Ernst Pagger<sup>(1)</sup>, Mark-André Thelen<sup>(2)</sup>**

<sup>(1)</sup>EPP Consulting GmbH, Heiligenstädter Lände 29 2.OG 1190 Wien, +436602367283,  
[office@epp-consulting.at](mailto:office@epp-consulting.at), [www.epp-consulting.at](http://www.epp-consulting.at)

<sup>(2)</sup>Cargill Deutschland GmbH, Cerestarstraße 2 47809 Krefeld, +491723899080,  
[mark-andre\\_thelen@cargill.com](mailto:mark-andre_thelen@cargill.com), [www.envirotemfluids.com](http://www.envirotemfluids.com)

## Kurzfassung:

Die Erzeugung und Verwendung von elektrischer Energie im Zuge der Energiewende stellt die Übertragungsnetze vor neuen Aufgaben und Herausforderungen. Die Erzeugung aus Wind- und Sonnenkraft ist in unseren Breiten sehr Tages- und Jahreszeit abhängig und damit sehr volatil. Die Bereitstellung der elektrischen Energie für die Elektromobilität verlangt punktuell hohe Anschlussleistungen und wird zusätzlich vom Gleichzeitigkeitsfaktor beeinflusst. Passend zu den regenerativen Energien soll auch bei der Energieübertragung mit möglichst wenig fossilen Betriebsmitteln (Isolierflüssigkeit) das Auslangen gefunden werden. Durch den Einsatz natürlicher Ester (z. Bsp. FR3™ Fluid) als Isolierflüssigkeit besteht die Möglichkeit das Transformatordesign flexibler zu gestalten. Diese Transformatoren können mit einer Überlast von bis zu 150% der Auslegungsleistung betrieben werden.

**Keywords:** Energiewende, SPL Transformer, FR3 Fluid, Photovoltaik, Windenergie, E-Mobilität, Ladestation, Energieübertragung

## 1 Auswirkungen der Energiewende auf die Energietransformation

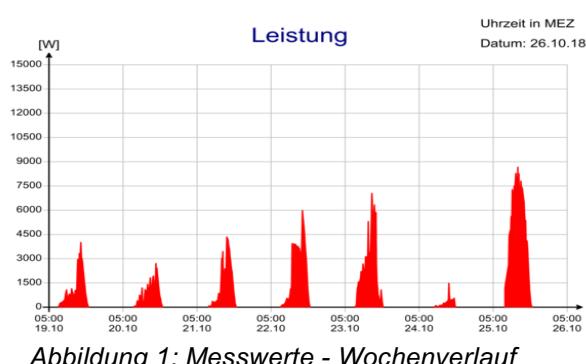


Abbildung 1: Messwerte - Wochenverlauf

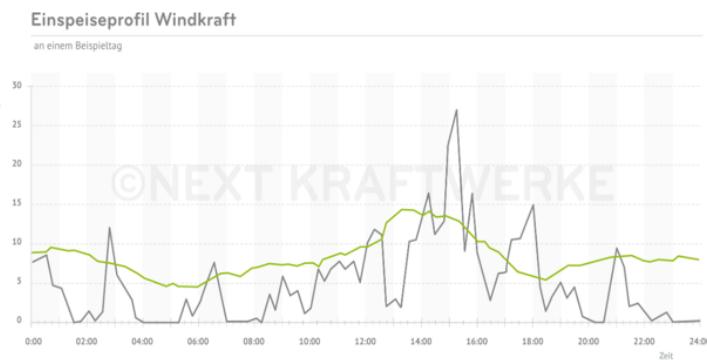


Abbildung 2: Einspeiseprofil Windkraft an einem Beispieltag

Üblicherweise werden die im elektrischen Netz befindlichen Transformatoren nach dem größten möglichen Lastfluss ausgelegt. Dies bedeutet, dass durch die Installierung großer Leistungen an regenerativer Energie, die oft nur für kurze Zeit zur Verfügung stehen, die Transformatoren entsprechend dimensioniert werden müssen. Diese Leistungen stehen meist jedoch nicht kontinuierlich zur Verfügung. Abbildung 1 zeigt beispielhaft den Wochenverlauf der PV-

Leistung am Landhaus in Vorarlberg [1] und Abbildung 2 aus [2] ein Einspeiseprofil von Windkraft über 24 Stunden. Abbildung 3 zeigt den durchschnittlichen Bedarf an elektrischer Energie des „National Integrated System“ in Brasilien im Jahre 2016. Auffallend ist der niedrigere Verbrauch im brasiliensischen Winter verglichen mit den Sommermonaten. Diese Diskre-

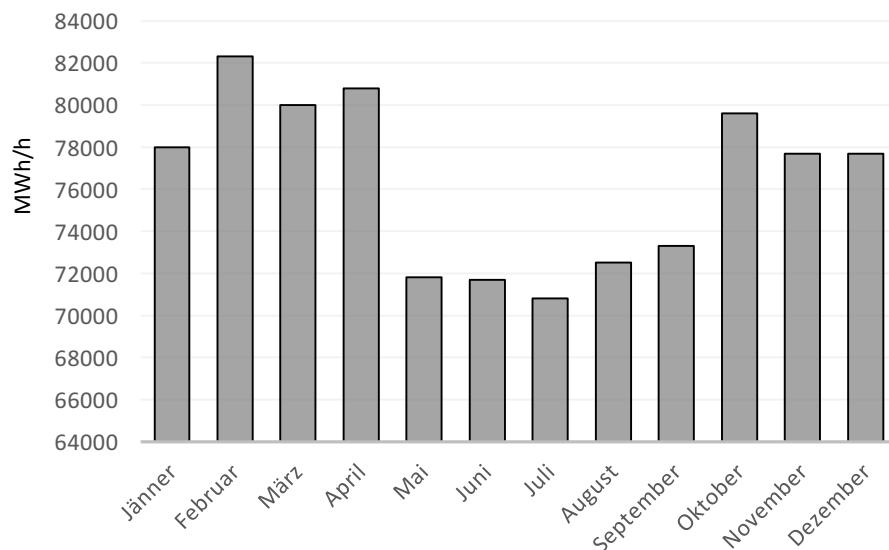


Abbildung 3: Durchschnittlicher Energiebedarf bezogen auf eine Stunde des „National Integrated System“ von Brasilien im Jahr 2016

fahrzeugen kurzfristig sich bis um den Faktor fünf erhöhen kann.

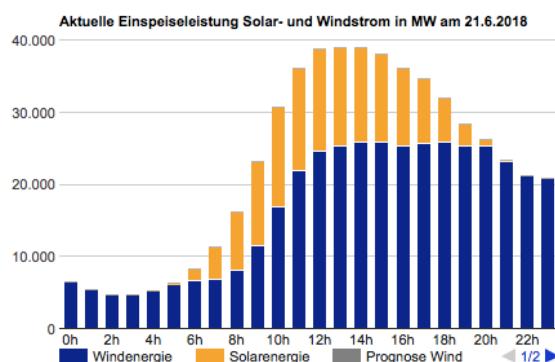


Abbildung 4: Einspeiseleistung - Sommertag

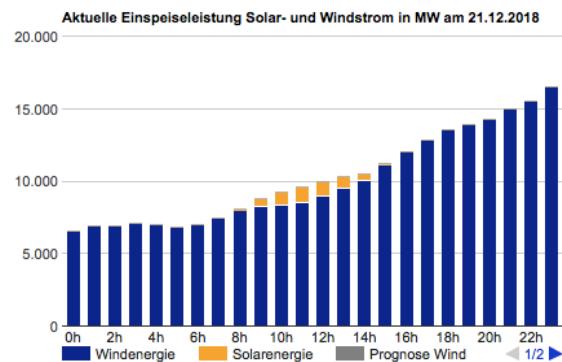


Abbildung 5: Einspeiseleistung - Wintertag

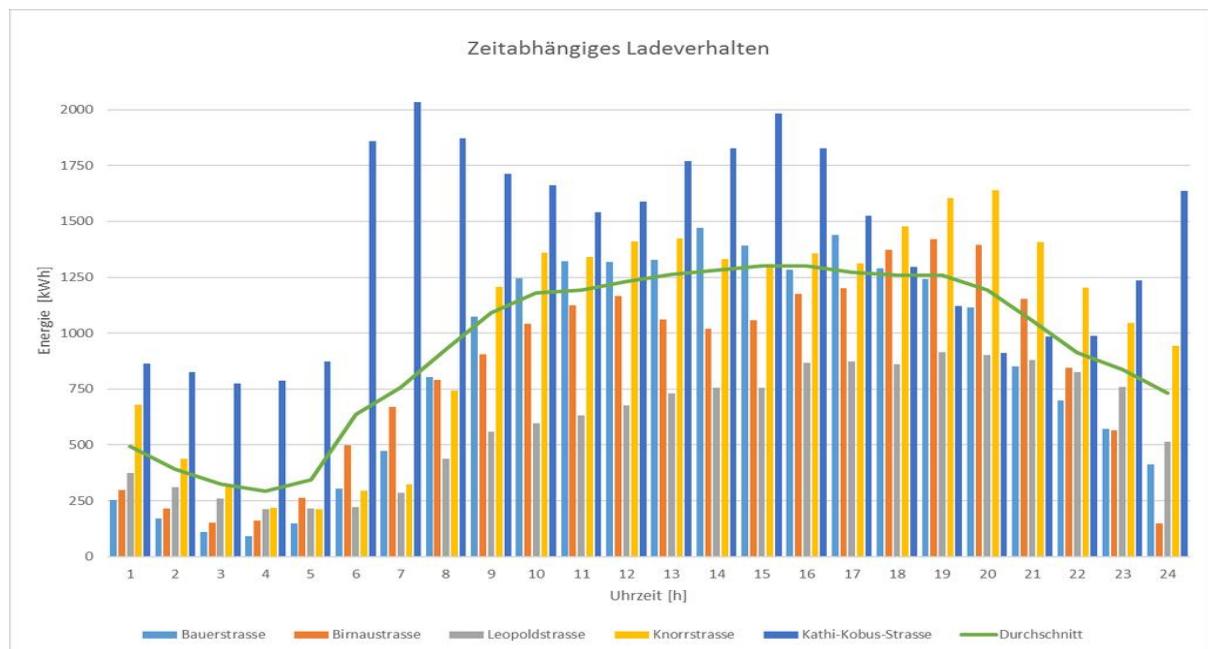


Abbildung 6: Untersuchung der Zeitabhängigkeit des Ladeverhaltens

panz wird durch die hohe Einschaltquote von Klimaanlagen in den Sommermonaten verursacht. Zusätzliche saisonale Unterschiede sind in Abbildung 4 und Abbildung 5 aus [3] ersichtlich. Ähnlich verhält es sich mit den Ladestationen der E-Mobilität. Stadler zeigt an einem Beispiel in [4], dass die benötigte elektrische Leistung des Haushaltsprofils bei Nutzung von Elektro-

Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen auch Hera U. et al. (Abbildung 6) in [5], wenn auch hier der Zeitraum der größten Energieentnahme über ein längeres Zeitintervall anhielt. Grundsätzlich zeigen die angeführten Beispiele, dass, falls die Geräte für die Spitzenlast ausgelegt werden, sie für die überwiegende Zeit überdimensioniert sind. Im Allgemeinen haben Transformatoren sehr unterschiedliche Lastprofile. Laut einer EU-Studie liegt die durchschnittlich übertragene Last, der von den EVU eingesetzten Verteiltransformatoren, bei 18,9 % des Auslegungswertes [6]. Bei solch niedriger Auslastung dominieren die Leerlaufverluste, während die Lastverluste weniger ins Gewicht fallen. Damit verursachen sie sowohl in der Produktion – höherer Materialeinsatz – als auch im Betrieb unnötige Verluste.

## 2 Das Konzept des Sustainable Peak Load (SPL) Transformer

Der natürliche Esters FR3™ Fluid ermöglicht den Betrieb von Transformatoren bei Temperaturen, die um 20 K über den für Mineralöl zulässigen liegen (Tabelle 1) [7]. Diese Isolierflüssigkeit hat gegenüber Mineralöl nachstehende weitere Vorteile, die mit diesem Transformatorkonzept genutzt werden können und in mehreren Literaturstellen, wie unter [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14] nachgewiesen und beschrieben sind. Dies sind z. Bsp.:

- Höherer Flamm- und Brennpunkt (bis zu 200 °C höher gegenüber Mineralöl)
- Vollständig biologisch abbaubar
- Aus nachwachsendem Rohstoff hergestellt – geringer CO<sub>2</sub> Footprint
- Hohe Feuchtigkeitsaufnahme
- Ausgesprochen papierfreundlich
- Grundsätzlich gute Verträglichkeit mit Trafowerkstoffen (kein korrosiver Angriff)
- Verschiebung des elektrischen Feldes in Richtung Feststoffisolierung

Paper	Dielectric Fluid	Thermal Class	Hot Spot	IEEE WAR	IEC WAR
TUK	Mineral Oil	120	110 °C	65 °C	75 K
TUK	Natural Ester	140	130 °C	85 °C	95 K

Tabelle 1: SPL Transformer – Thermische Eigenschaften, Quelle: [15]

Die Arrhenius Lebenserwartungskurve (Abbildung 7) zeigt, dass bei Nichtausnutzen der für den natürlichen Ester FR3™ Fluid möglichen Temperaturen, zusätzlich an Lebenszeit des Transformators gewonnen werden kann [15], [16].

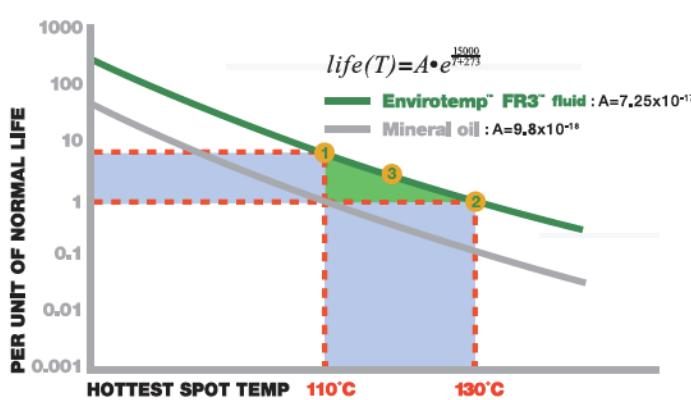


Abbildung 7: Lebensdauerkurven

- 1 Verlängerung der Lebensdauer (bis zum 8-Fachen) bei einer Hotspot Temperatur von 110 °C
- 2 Erhöhung der Lastkapazität um bis zu 20 % bei einer Hotspot Temperatur von 130 °C
- 3 Verlängerung der Lebensdauer bei gleichzeitiger Erhöhung des Lastflusses

## 2.1 Die Umsetzung des SPL Konzepts

- Eingangs soll eine Analyse der vorhandenen oder zu erwartenden Lastströme in Abhängigkeit der Zeit erfolgen. Abbildung 8 zeigt zum Beispiel die Auslastung eines Transformators eines großen brasilianischen Netzbetreibers, aufgestellt in einer touristischen Region, in Prozent des Auslegungswertes.
- Berechnung der Leerlauf- und Kurzschlussverluste. Während die Leerlaufverluste mehr oder weniger linear von der Leistung abhängen, steigen die Kurzschlussverluste mit dem Quadrat des Stromes. Dieser ist bei kleineren Transformatoren bei gleicher Arbeit naturgemäß höher. Damit ist die Lage des Schnittpunktes der Verluste, wie in Abbildung 9 am Beispiel eines 50 kVA Transformator verglichen mit einem 75 kVA Transformator dargestellt, die entscheidende Größe zur Transformatorauswahl [17].
- Wesentlich ist nun, über welchem Zeitraum, welche Last benötigt wird. Abbildung 10 aus [17] zeigt die Aufsummierung der Energieverluste und -gewinne eines 630 kVA mit Mineralöl gefüllten Transformator verglichen mit einem 400 kVA FR3™ Fluid gefüllten Transformator.
- Zur Überprüfung der Papieralterung können Papierproben an der Wicklung angebracht werden [18]. Die wesentlich bessere Wasseraufnahme des natürlichen Esters gegenüber dem Mineralöl hilft den Aktivteil trocken zu halten. Wolmarans schreibt in [19]: Die Minimierung des Wassergehaltes im Isoliersystem von Transformatoren ist wichtig. Denn zu viel Wasser birgt das Risiko, dass das Dielektrikum versagt und kann zudem die Alterung der Papierdämmung beschleunigen.

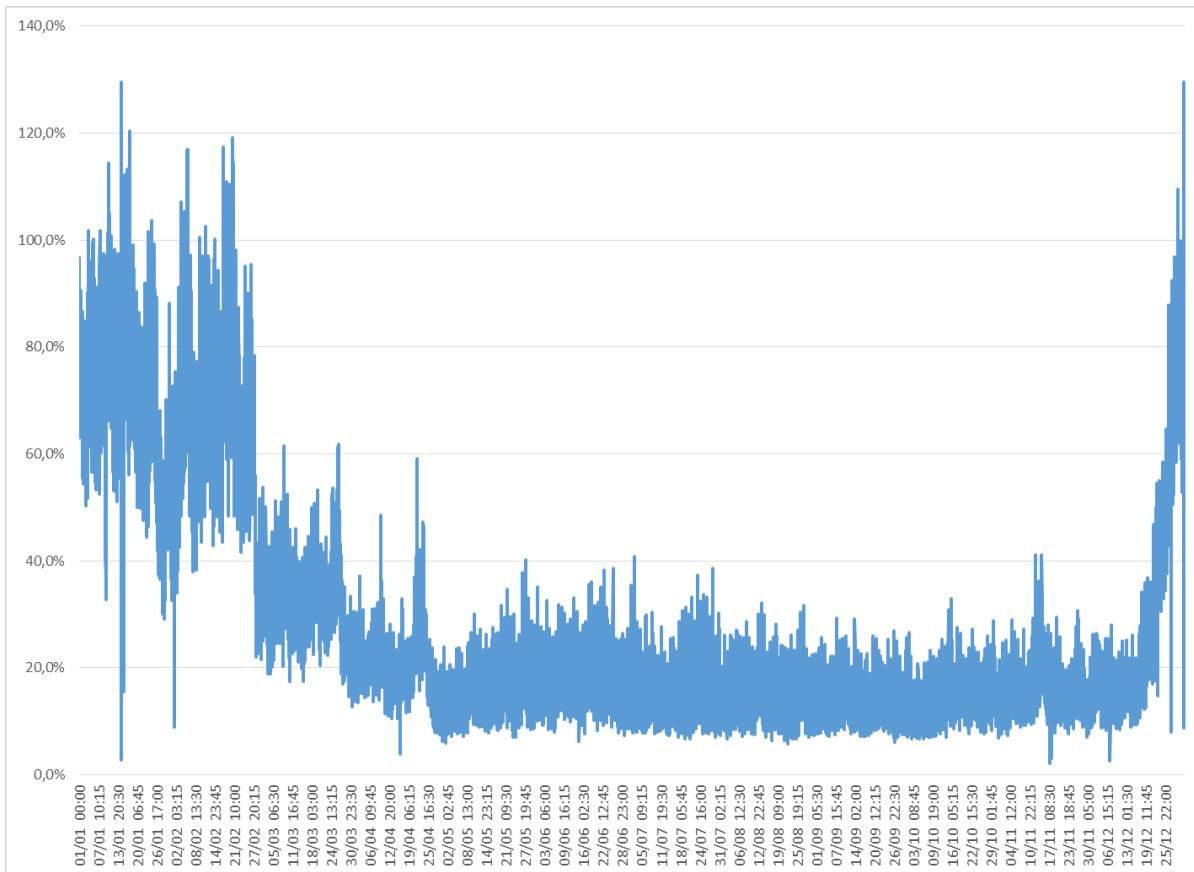


Abbildung 8: Vierstündliche Erfassung der Transformatorenbelastung über den Zeitraum eines Jahres

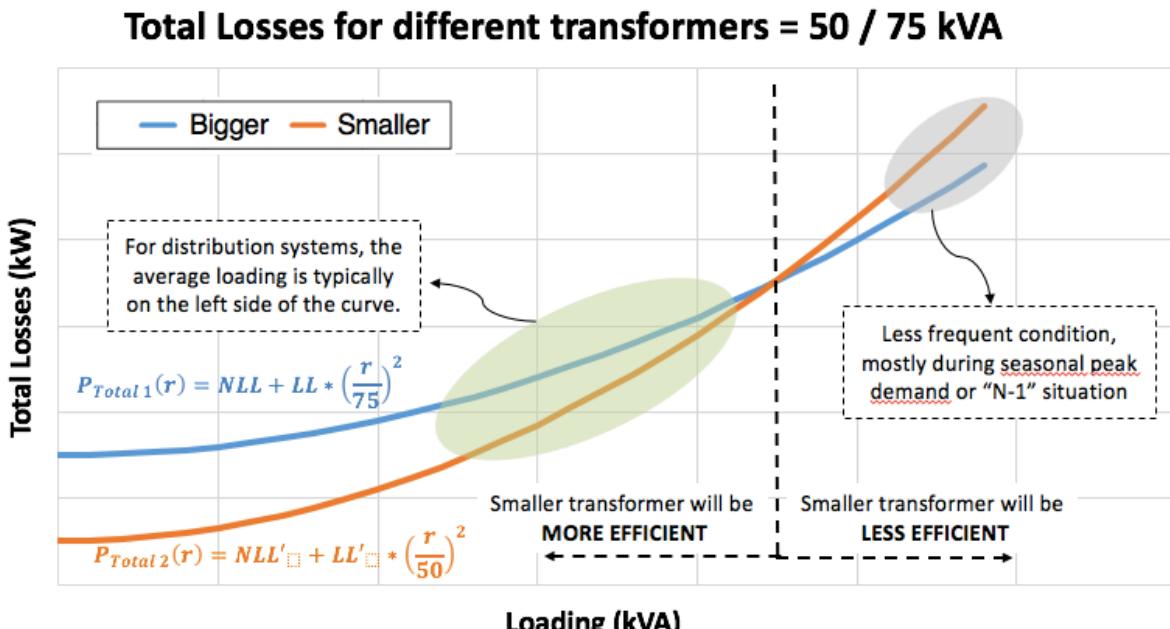


Abbildung 9: Vergleich der Verluste eines 50 kVA mit einem 75 kVA Transformator

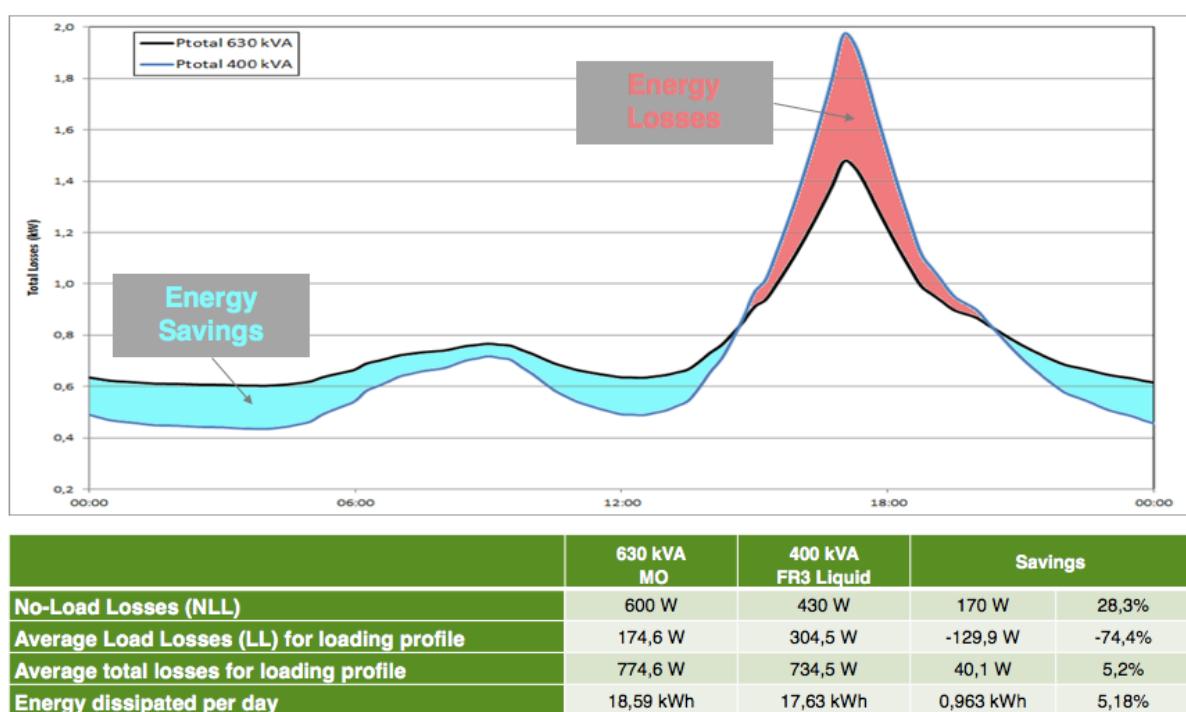


Abbildung 10: Vergleich der Energiegewinne und -verluste eines 630 kVA mineralölgefüllten mit einem 400 kVA FR3™ Fluid gefüllten Transformator

## 2.2 Die Auswirkungen auf die Brandschutzbestimmungen

Der natürliche Ester FR3™ Fluid ist gemäß IEC60076-14 [20] mit einem Brennpunkt >300 °C eine Isolierflüssigkeit der Klasse K. Dies bietet gerade für Ladestationen, die oft in eng verbauten urbanen Gebieten und sensiblen Räumen aufgestellt sind, Vorteile. Sugawa et al. zeigen in [21], dass der Strahlungswärmestrom zum Zünden des natürlichen Esters das 2,7 bis 3-Fache gegenüber Mineralöl und das 1,4-Fache gegenüber dem synthetischen Ester betragen muss. Die EN 61936-1 [22] erlaubt für Transformatoren mit Isolierflüssigkeiten der

Klasse K am Aufstellungsort reduzierte Abstände zu benachbarten Geräten und zu den angrenzenden Gebäuden. Wegen der Möglichkeit bei gleichem Platzangebot eine höhere Leistung zu platzieren, kann in bestimmten Fällen durchaus die Gelegenheit bestehen, die vorhandene Infrastruktur zu nutzen, was eine enorme Kosteneinsparung bringen kann.

### 3 Schlussfolgerung

Der Einsatz von SPL Transformatoren in Verbindung mit dem natürlichen Ester auf Basis Sojabohnenöl ermöglicht zugeschnittene Lösungen für die Energietransformation in Zusammenhang mit der Energiewende. Zur Verifizierung dieser Aussage sind genannte Transformatoren in Ländern wie Brasilien, Deutschland und Österreich bereits erfolgreich in Betrieb. Grundsätzlich wird mit diesem Transformator ein Betrieb bei höheren Temperaturen ermöglicht. Weiters besteht die Möglichkeit den Transformator bei gleicher Leistung kleiner und leichter zu bauen. Dies ist verbunden mit der Einsparung von Kern- Wicklungsmaterial und an Isolierflüssigkeit – passend zur Energiewende. Die kleineren Transformatoren bringen weniger Leerlaufverluste und können bei Bedarf die Spitzen abdecken, da sie thermisch höher belastbar sind. Zusätzlich kommt es, bedingt durch die kleinere Baugröße zu einer Reduktion der Anschaffungskosten. Weltweit sind bereits über 1,5 Millionen Transformatoren mit der Isolierflüssigkeit auf Basis Sojabohnenöl in Betrieb und dies teilweise bereits mit einer Laufzeit von über 20 Jahren. Ein Beweis dafür, dass diese ökologische, thermisch hoch belastbare und umweltverträgliche Isolierflüssigkeit für diese Anwendung bestens geeignet ist. Eine Energiewende ohne fossile Brennstoffe sollte nicht eine Isolierflüssigkeit fossilen Ursprungs zulassen.

### Literatur

- [1] Land Vorarlberg – Photovoltaik; [www.vorarlberg.at/voltaik](http://www.vorarlberg.at/voltaik)
- [2] Next Kraftwerke GmbH; Köln; [www.next-kraftwerke.de](http://www.next-kraftwerke.de)
- [3] Wind Journal, Windenergie – regenerative Energie, [www.windjournal.de](http://www.windjournal.de)
- [4] Stadler J.: Elektromobilität aus der Sicht der Verteilnetzbetreiber; OGE Fachtagung, Wien, 2018
- [5] Hera U. et al.: Planung von Elektromobilität im Großraum München „E-Plan München“; Oktober 2016
- [6] ee-news.ch; Energieforschung: Trafos haben noch Effizienzpotenzial; 13. Aug. 2015; [www.eenews.ch](http://www.eenews.ch)
- [7] IEEE Std C57.154™-2012; IEEE Standard for the Design, Testing and Application of Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers Using-Temperature Insulation Systems and Operating at Elevated Temperatures; 30 October 2012
- [8] Envirotemp™ FR3™ Fluid, Guide for Storage, Installation, Commissioning and Maintenance of FR3 Fluid Filled Transformers, G2300, Cargill; 2014
- [9] Pagger E., Bowers S.: Die Verwendung von Sojabohnenöl in der Hochspannungstechnik; 10. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien; 2017
- [10] Pagger E., Thelen M.: Reduzierung der Umweltgefährdung durch den Einsatz natürlicher Ester; Oberlausitzer Energie-Symposium; Zittau; 2017
- [11] Gruber M.: Machbarkeitsstudie über die Umstellung eines mineralölgefüllten Transformatoren auf pflanzenbasierte Isolierflüssigkeiten; Diplomarbeit, Hochschule Mittweida; 2017
- [12] Pagger E. et al.: New Impacts on Ecological Transformer Design; 15. Symposium Energieinnovation, Technische Universität Graz; 2018
- [13] Pagger E. et al.: Natural Ester FR3 Insulating Liquid - Very Paper Friendly; ICPADM; Xi'an; 2018
- [14] Pattanadech N. et al.: Studies of Electrical and Thermal Characteristics of Natural Ester Immersed Transformer Compared with Mineral Oil Immersed and Palm Oil Immersed Transformer; International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis; Perth; 2018

- [15] Sustainable Peak Load Distribution Transformers; Westrafo; Chiampo; 2017
- [16] Sbravati A. et al.: Aging performance and oxidation stability of natural esters in sealed versus breathing environments; EuroDobl; Manchester; 2014
- [17] Thelen M.: Alternative Isolierflüssigkeiten – Natürliche Ester für einen flexiblen Energiebedarf; Life Needs Power, Hannover; 2018
- [18] Westrafo; Guide for Checking the Status of the TPOX Paper; 13/06/2017
- [19] Wolmarans C.: Wieviel Wasser ist in meinem Trafo?; NAPHTHENICS MAGAZINE, I01I2018
- [20] IEC 60076-14, Liquid-immersed power transformers using high-temperature insulating materials; 2013
- [21] Sugawa O. et al.: Study on Evaluation of Combustion Behavior of Insulation Fluids for Environmental Disaster-Preventive Transformers; 15th International Symposium of High Voltage Engineering; Ljubljana, Slovenia; 2007
- [22] ÖVE/ÖNORM EN 61936-1, Starkstromanlagen mit Nennwechselspannung über 1kV; 2015