



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 25.03.2014

Marktstudie zu Bestand und energetischem Verbesserungs-Potential der installierten Verteiltransformatoren in der Schweiz

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien & -anwendungen
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

ABB Schweiz AG
Country Service Organisation
Bruggerstrasse 72
5400 Baden
www.abb.ch

Autoren:

Fachhochschule Nordwestschweiz / Hochschule für Technik
Institut für Biomasse und Ressourceneffizienz IBRE,
Zentrum für Ressourceneffizienz ZEF
Steinackerstrasse 5
5210 Windisch
<http://www.fhnw.ch/technik/forschung-und-entwicklung/ressourceneffizienz>

Karin Dreyer, karindreyer@bluewin.ch
Dr. Martin Streicher-Porte, martin.streicher@fhnw.ch

BFE-Bereichsleiter:	Dr. Michael Moser
BFE-Programmleiter:	Roland Brüniger
BFE-Vertragsnummer:	SI/500921-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	7
2.	Projekthalt.....	7
2.1.	Ziele	7
2.2.	Inhalt der Studie	8
2.3.	Systemgrenze	8
3.	Verteilnetz Schweiz	8
3.1.	Netztopologie Schweiz	8
3.2.	Anwendungsbereiche.....	9
3.3.	Betreiber und Marktverhalten	10
4.	Transformatoren: die Technik.....	11
4.1.	Aufbau	11
4.2.	Leerlaufverluste P_0 (= no load Losses)	12
4.3.	Lastverluste P_k (= load losses).....	12
4.4.	Amorphe Verteiltransformatoren	12
4.5.	Verluste und Effizienz.....	13
5.	Richtlinien und Internationale Bestrebungen zur Reduktion von Verlusten	15
5.1.	Mindestanforderung oder Stand der Technik?	15
5.2.	EU-Ökodesign-Richtlinie.....	15
5.2.1.	Entwurf: Mindestanforderung für Verteiltransformatoren	16
5.2.2.	Kommentare zum Entwurf.....	17
6.	Methodik Marktdatenerfassung Schweiz	17
6.1.	Marktdatenerfassung.....	17
6.2.	Ermittlung Gesamtbestand Verteiltransformatoren:	18
6.3.	Berechnung der Verluste	19
6.4.	Berechnung übertragene Leistung.....	19
6.5.	Berechnung Einsparpotential.....	19
7.	Resultate	20
7.1.	Ermittlung Gesamtbestand Verteiltransformatoren.....	20
7.2.	Stichprobe	22
7.3.	Altersstruktur	22
7.4.	Leerlauf- und Lastverluste	23
7.6.	Einsparpotential Schweizer Gesamtnetz.....	29
8.	Interpretation und Diskussion.....	31
9.	Ergänzende Vorschläge aus Sicht von Marktteilnehmern	32
10.	Referenzen	34
11.	Verzeichnisse.....	35
11.1.	Abbildungen	35
11.2.	Tabellen.....	35
12.	Annex.....	36
12.1.	Entwurf einer Mindestanforderung für Verteiltransformatoren.....	36
12.2.	TCO-Berechnung (Total Cost of Ownership)	37

Zusammenfassung

Verteiltransformatoren der Mittelspannungs-/Niederspannungsebene kommen in grosser Stückzahl zu Einsatz und haben eine lange Lebensdauer. Mithilfe von modernen Transformatoren mit amorphem Eisenkernmaterial können Leerlauf- und Lastverluste reduziert werden. Basierend auf Marktdaten wurde der Bestand, Altersstruktur, Leerlauf- und Lastverluste sowie das Einsparpotential durch den Ersatz der installierten Basis ermittelt. Es kann von einer Gesamtzahl von 70'000 – 80'000 installierten Verteilnetztransformatoren in der Schweiz auf der Netzebene NE5 ausgegangen werden. Im arithmetischen Mittel weisen die Transformatoren ein Alter von 23 Jahren auf. Knapp 50% aller installierten Transformatoren sind vor 1990 installiert worden. In den nächsten 10 Jahren werden 60% der Transformatoren 40 Jahre und älter sein. Die Verluste die zum jetzigen Zeitpunkt installierten Verteiltransformatoren im Schweizer Gesamtnetz belaufen sich auf rund 406GWh pro Jahr. Würden die effizientesten amorphen Transformatoren eingesetzt, ergäben sich Stromeinsparungen in Höhe von 204GWh pro Jahr. Im Mittel können in den gebräuchlichsten drei Leistungsklassen 2,9MWh (400kVA), 3,6MWh (630kVA) resp. 2,8MWh (1000kVA) pro Trafo pro Jahr eingespart werden.

Résumé

En Suisse, les transformateurs de distribution des niveaux moyenne/basse tensions sont utilisés en grand nombre et ils ont une longue durée de vie. Grâce aux transformateurs modernes équipé d'un noyau en matériau ferreux amorphe, il est possible de réduire les pertes à vide et sous charge. Sur la base des données du marché les points suivant ont pu être investigué : le nombre d'unité, la distribution de l'âge des installations, les pertes à vide et sous-charge, ainsi que le potentiel d'économie au travers du remplacement des unités installées. On peut partir du principe qu'il entre 70'000 et 80'000 transformateur de distribution installé en Suisse au niveau de tension NE5. La moyenne arithmétique de l'âge de transformateur indique un âge moyen de 23 ans. Prés de 50% de tous les transformateurs installés ont été installé avant 1990. Dans les prochains dix ans 60% des transformateurs auront 40 ans et plus. Les pertes de tous les transformateurs de distribution installés jusqu'à maintenant sur tout le réseau Suisse se monte à 406 GWh par an. En installant les transformateurs les efficients avec un noyau ferreux amorphe, alors l'économie d'électricité pourrait se monter jusqu'à hauteur de 204 GWh par an. En se concentrant sur les trois classes de puissance, les plus communément installées, soit 400 kVA, 630 kVA et 1'000 kVA, alors le potentiel d'économie annuel moyen par transformateur a été estimé respectivement à 2.9 MWh, 3.6 MWh et 2.8 MWh.

Abstract

Distribution transformers in Switzerland are installed on several grid levels below sub-transmission. This study focuses on the savings potential by replacing distribution transformers below 24 kV. It is deducted from several sources that a total amount of 70.000 to 80.000 units are installed in the Swiss grid, with an average age of 23 yrs. The overall losses of this installed base are around 406 GWh / yr. Distribution transformers are often operated at 25...40 % of their nominal load, where the iron- or no-load losses are most stringent. By replacing the installed base with highly efficient transformers based on amorphous cores, these losses might be significantly reduced, the study deducts a savings potential of up to 204 GWh or roughly 50% of the current losses.

Focused on the three mostly commonly installed transformer type classes, the savings potential per unit is on average estimated as following: 2,9MWh (400kVA), 3,6MWh (630kVA) and 2,8MWh (1000kVA). These 3 classes might be focused on in a first step as the total savings potential estimated here are 132 GWh (52.4 GWh, 64.6 GWh and 15.4 GWh).

Danksagung

DIVERSE ELEKTRIZITÄTSUNTERNEHMEN DER SCHWEIZ

Aufgrund einer getroffenen Vereinbarung bleiben die diversen Elektrizitätsunternehmen hier anonym.

BUNDESAMT FÜR ENERGIE BFE

Herr Roland Brüniger, Forschungsprogrammleiter Elektrizitätstechnologien und -anwendungen

Herr Richard Phillips, Fachspezialist Geräte/Ausschreibungen

Herr Michael Moser, Bereichsleiter

FIRMA ABB SCHWEIZ AG, BADEN

Herr Andreas Surányi, Business Development -Energy Efficiency Solutions

Herr Roland Hasler, Market Manager Transformers

Herr Marco Spinelli, ABB Trasfor SA

Herr Marco Nunes, Verkauf Schweiz

EIDGENÖSSISCHES STARKSTROMINSPEKTORAT ESTI

Herr Urs Huber, Leiter Planvorlagen

Frau Nadia Ruoss, Projektleiterin Planvorlagen

FIRMA RAUSCHER & STÖCKLIN SISSACH

Herr Daniel Beutler, Key Account Manager

Herr Manfred Gasser, Techniker Trafobau

1. Einleitung

Seit 1960 hat sich der Landesverbrauch von Strom (Endverbrauch und Verluste) in der Schweiz um den Faktor 2,5 erhöht. 2011 lag er bei 63TWh (Verband schweizerischer Elektrizitätsunternehmen (VSE) 2012). Die Strommenge, die jede Schweizerin und jeder Schweizer direkt oder indirekt verbraucht, nimmt jährlich leicht zu. 1990 zählte die Schweiz 6,7 Millionen Einwohner, 2012 sind es 8 Millionen (+19%). Im selben Zeitraum erhöhte sich der Stromverbrauch um +25%, nämlich von 50TWh auf 63TWh (Verband schweizerischer Elektrizitätsunternehmen (VSE) 2012).

Das schweizerische Stromnetz ist insgesamt rund 250'000 km lang, was dem sechsfachen Erdumfang entspricht. Nebst den Leitungen gehören Transformatoren in der Kette vom Erzeuger bis zur Steckdose zu den wichtigsten Komponenten (ABB AG Energietechnik 2010).

Jede Energieübertragung ist mit Verlusten behaftet. Die Übertragungs- und Verteilverluste, vom Kraftwerk bis zum Verbraucher, betragen etwa 7 % der Stromproduktion, wovon der überwiegende Anteil auf dem Niederspannungsnetz verloren geht. Auf den Hoch- und Höchstspannungsnetzen betragen die Verluste lediglich 0,8 Prozent¹. Verluste fallen einerseits bei der Übertragung selbst sowie auch bei der Transformation der Spannung auf eine andere Netzebene an.

Moderne Verteiltransformatoren weisen ein Effizienzsteigerungspotential auf, durch das Verluste im Leerlauf und unter Lastbedingungen reduziert werden können. Es wird angenommen, dass relativ grosse Anteile der Gesamt-Verluste durch ältere Transformatoren mit relativ hohen Leerlaufverlusten und zum geringeren Teil durch Lastverluste verursacht werden.

Durch moderne hocheffiziente Transformatoren mit amorphen Kernen können vor allem die Leerlaufverluste bis zu 70% reduziert werden (Ramanan V.R. 2012). Diese Studie stützt sich auf die aktuellen Ergebnisse der Vorstudie für Mindestanforderungen von Transformatoren die im Rahmen der Umsetzung der EU Eco-Design Richtlinie für energierelevante Produkte (EU, 2009/125/EC 2009) erarbeitet wurde. Das Einsparpotential bei Verteil- und Kleintransformatoren in der EU wird dabei auf ca. 12 TWh /a beziffert (VITO, Bio Intelligence Service 2011).

2. Projektinhalt

2.1. Ziele

Mit dieser Marktstudie wird in einem ersten Schritt der aktuelle Bestand an Verteiltransformatoren in den Netzebenen 5-7 in der Schweiz durch verschiedene Methoden erfasst. Abgeleitet daraus werden die aktuellen Leerlauf- und Lastverluste der installierten Basis mit dem Stand der Technik verglichen. In einem weiteren Schritt sollen mit Hilfe dieser Daten Grundlagen geliefert werden, damit Entscheidungsträger Szenarien und Handlungsoptionen für eine Förderung oder gar Ersatz von weniger effizienten Verteiltransformatoren ableiten können (z.B. Labelling, gezielte Förderungen, Massnahmen zum Ersatz besonders ineffizienter Geräte o.ä.). Mit dieser Studie soll aufgezeigt werden,

¹ http://www.strom-online.ch/stromunterwegs_infos.html; Zugriff 29.01.2014

wie anhand Innovation und neuen Applikationen die Effizienz bestehender Netzinfrastuktur gesteigert werden kann.

2.2. Inhalt der Studie

Inhaltlich werden in dieser Projektarbeit folgende Themen behandelt:

- Verteilnetz und Strommarkt Schweiz: Überblick
- Transformatoren: Stand der Technik, Beschreibung der Verluste in Transformatoren (Leerlauf- und Lastverluste).
- Amorphe Verteiltransformatoren, die Technologie "in a nutshell".
- Erfassung der installierten Basis an Verteiltransformatoren in der Schweiz und Abschätzung der Leerlauf- und Lastverluste (Gesamtverluste).
- Gültige Standards und neue EU-Richtlinien: Darstellung der „bottom line“ und Eco-Design Massnahmen.
- Berechnung mögliches Einsparpotential durch amorphe Transformatoren im Schweizer Gesamtnetz.

2.3. Systemgrenze

Die Studie beschränkte sich auf die Verteilnetze mit einer Spannung kleiner 24kV in der Schweiz. Es wurden ölisierte Transformatoren mit einer Leistung von 100 – 2000kVA betrachtet. Insbesondere wurden die installierten Verteiltransformatoren bei den Schweizer Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EVU) als Datenbasis herangezogen. Die Verteiltransformatoren der Industrie wurden durch geeignete Methoden abgeschätzt.

3. Verteilnetz Schweiz

3.1. Netztopologie Schweiz

Ohne elektrische Energieversorgung ist heute das Leben und Arbeiten kaum mehr vorstellbar, denken wir nur an Computer oder Mobiltelefone. Es ist relativ einfach, grosse Energiemengen über weite Distanzen zu übertragen. Nebst den Leitungen gehören Transformatoren in der Kette vom Erzeuger bis zur Steckdose zu den wichtigsten Komponenten (ABB AG Energietechnik 2010).

Das Schweizer Stromnetz besteht aus über 250'000km Leitungen. Auf dem Weg zum Konsumenten wird die elektrische Spannung stufenweise von der Höchstspannung (zwischen 380kV und 220kV) auf 230V reduziert.

Es werden sieben Netzebenen unterschieden. Dabei zählen nebst Höchst-, Hoch-, Mittel und Niederspannung auch drei Transformierungsebenen dazu:

Netzebene 1: Dabei handelt es sich um das Übertragungsnetz, auch Höchstspannungsnetz genannt. Das Übertragungsnetz nimmt den produzierten Strom aus den Kraftwerken oder dem angrenzenden Ausland auf. Der Strom wird mit einer Spannung von 380kV bzw. 220kV in die Nähe der Verbraucher transportiert. Das Übertragungsnetz ist Eigentum der Swissgrid.

Netzebene 3 (Hochspannung im überregionalen Verteilnetz): Im überregionalen Verteilnetz wird der Strom mit 50 – 150kV an kantonale, regionale und städtische Verteilnetzbetreiber sowie an grosse Industriebetriebe verteilt.

Netzebene 5 (Mittelspannung im regionalen Verteilnetz): Im regionalen Verteilnetz wird der Strom mit einer Spannung von 10 – 35kV verteilt. Lokale Verteilnetze versorgen einzelne Stadtteile oder Dörfer sowie kleine und mittlere Industriebetriebe.

Netzebene 7 (Niederspannung im lokalen Verteilnetz): Auf dieser Netzebene wird mit einer Spannung von 400 oder 230V der Strom an Haushalte, an Landwirtschaftsbetrieb sowie an Gewerbebetriebe verteilt.

Netzebene 2, 4 und 6 (Transformatorstationen): Nebst der Übertragungsebene 1 und den Verteilnetzebenen 3, 5 und 7 werden in den Transformatorstationen die Spannungen auf die nächste Netzebene transformiert². Die Transformatoren zwischen den Spannungsebenen werden jeweils als eigene Netzebene betrachtet.

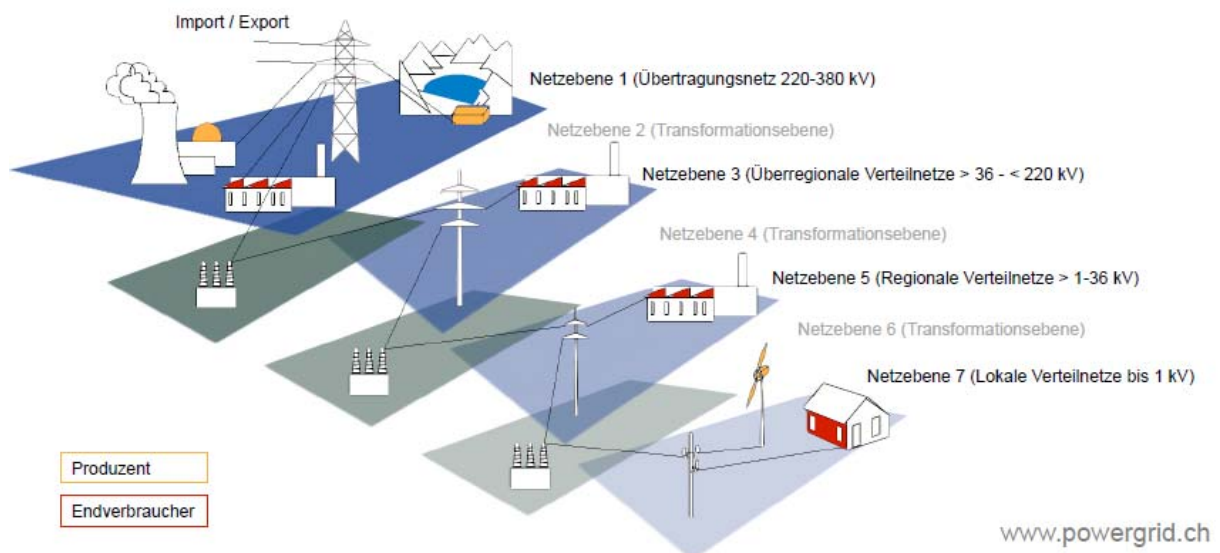


Abb 3-1: Netzebenen der Schweiz

3.2. Anwendungsbereiche

Energieübertragung lässt sich generell in zwei Kategorien einteilen: Die erste ist die Übertragung über lange Distanzen mit Höchstspannung (220 - 380kV), unterstützt durch **Hochspannungstransformatoren** (Netzebene 2). Die zweite Kategorie umfasst die Verteilung der Energie von den Transformatorstationen zu den unterschiedlichen Verbrauchern. Die Verteilung wird unterstützt durch die **Verteiltransformatoren** (Netzebene 4 resp. 6) in unterschiedlichster Ausführung und Grösse.

Transformatoren können nach unterschiedlichsten Kriterien in Klassen eingeteilt werden. Eine gängige Einteilung ist die nach Einsatzgebiet.

² http://www.swissgrid.ch/swissgrid/de/home/grid/transmission_system/grid_levels.html; Zugriff 13.01.2014

Mittelspannungs-/Niederspannungs- Verteiltransformatoren betrieben durch Verteilnetzbetreiber:

Verteiltransformatoren dieser Grösse werden durch Verteilnetzbetreiber, auch Energieversorgungsunternehmen (= EVU) betrieben. Diese können in der Grösse zwischen 50kVA und 2500kVA variieren, mit einer Primärspannung zwischen 1,1 und 36kV.

Mittelspannungs-/Niederspannungs- Verteiltransformatoren betrieben durch Industrieunternehmen:

Werden im Industriesektor verwendet und von diesen auch betrieben.

Niederspannungs-/Mittelspannung Transformatoren:

Werden dazu eingesetzt, Energieerzeuger wie Photovoltaikanlagen oder Windturbinen im Verteilnetz einzubinden. Diese weisen normalerweise höhere Leistungen wie Verteiltransformatoren auf. Niederspannungs- und Mittelspannung Transformatoren werden auch Versorgungstransformatoren genannt.

Hochspannungs- oder Leistungstransformatoren betrieben durch Übertragungsnetzbetreiber oder Kraftwerk:

Diese Transformatoren werden dazu eingesetzt, Generatoren mit dem Netz zu verbinden. Die primäre Spannung liegt meist über 36kV, Die Leistung variiert zwischen 5 bis 1500MVA. Diese Leistungstransformatoren werden im Mittel- und Höchstspannungsnetz (50kV/380kV) eingesetzt (VITO, Bio Intelligence Service 2011).

Da der Fokus in dieser Studie auf Verteiltransformatoren liegt, wird im Weiteren darauf verzichtet, näher auf Hochspannungs- und Leistungstransformatoren einzugehen.

Die vorliegende Marktstudie betrachtet in erster Linie **Mittelspannungs-/Niederspannungs- Verteiltransformatoren, betrieben durch Verteilnetzbetreiber.**

3.3. Betreiber und Marktverhalten

Die Verteiltransformatoren werden einerseits von Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EVU) andererseits von grösseren Industrieunternehmen bzw. Dienstleistungsbetriebe direkt betrieben (Nipkow dipl. El. Ing. ETH 1997). In der Schweiz gibt es rund 730 Netzbetreiber. Die Eidgenössische Elektrizitätskommission ElCom publizierte Bestände von rund 55'000 Verteiltransformatoren bei ca. 680 EVU für die Jahre 2010 und 2011 ("Tätigkeitsbericht Der ElCom 2012" 2013). Es fehlen dort aber Bestandsdaten über Transformatoren in Industriebetrieben.

Die Verteiltransformatoren werden in Trafostationen installiert. Die Grösse der Station und somit die Anzahl der installierten Verteiltransformatoren variiert dabei zwischen 1 – 6 (gegeben falls auch mehr) und ist stark vom Einsatzgebiet und der topografischen Lage abhängig.

Jährlich werden in der Schweiz ca. 2'000 Verteiltransformatoren (Öl-gekühlte, < 38MVA) auf den Markt gebracht (Spinelli Marco 2012). Diese Zahl hat sich in den letzten 10 Jahren ziemlich konstant gehalten (siehe Abb. 3-2). Wichtige Anbieter in der Schweiz sind ABB Switzerland Ltd, Rauscher & Stöcklin, Schneider Electric und einige andere. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass der Markt gesättigt ist und es im Wesentlichen um den Ersatz von Transformatoren geht, welche aus technischen Gründen ersetzt werden oder defekt sind. Neuinstallationen fallen nur im geringen Masse an, könnten jedoch durch die Energiewende wieder zunehmen (z.B. steigende Einspeisung von Solarstrom o.ä.).

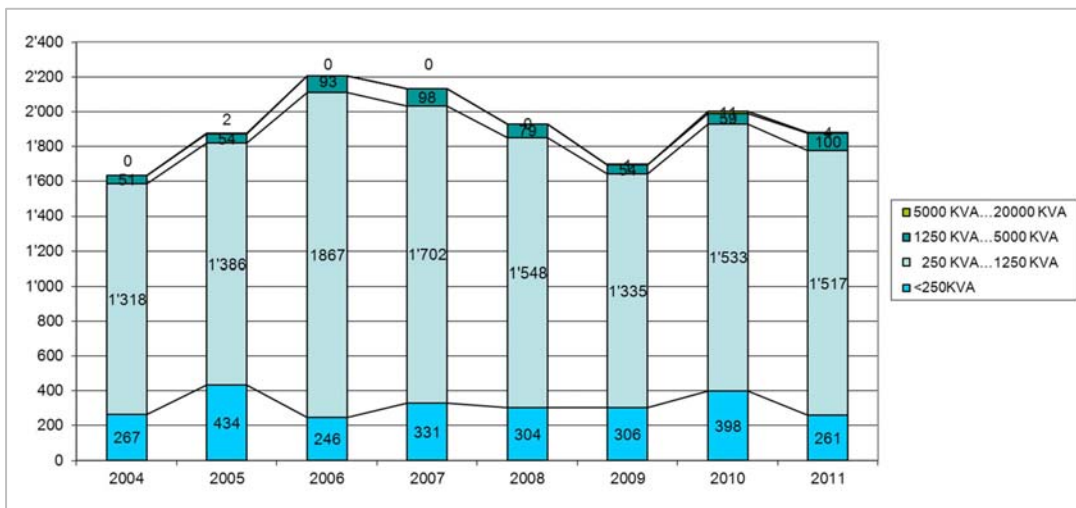


Abb 3-2: Marktvolumen Entwicklung Öl-Verteiltransformatoren

Transformatoren weisen eine lange Lebensdauer auf. Hersteller und Betreiber rechnen dabei mit Lebenszeiten von 30 Jahren und höher. Basierend auf der Studie: *LOT2. Distribution and power Transformers, Tasks 1 – 7* beträgt die Lebensdauer für Verteiltransformatoren der EVU's **40 Jahren**, diejenige für Industrieanwendungen **25 Jahre** (VITO, Bio Intelligence Service 2011, 157).

Aufgrund der Erfahrung eines Herstellers kann ausserdem festgehalten werden, dass Transformatoren für Industrieanwendungen im Mittel grössere Leistungen aufweisen; oftmals 630kVA, 1000kVA oder grösser.

4. Transformatoren: die Technik

4.1. Aufbau

Transformatoren werden in unterschiedlichsten Grössen und Ausführungen je nach Einsatzgebiet hergestellt. Für unsere Betrachtung legen wir das Hauptaugenmerk auf Kern und Wicklung, oder genauer auf die dort entstehenden Verluste.

Ein Transformator besteht im einfachsten Sinne aus zwei Spulen, welche auf einen gemeinsamen Eisenkern gewickelt wurden. In der Energieversorgung sind Transformatoren für Drehstrom, auch Drehstromtransformatoren genannt, erforderlich. Diese besitzen meist als Eisenkern einen Dreischenkelkern (Siehe Abb 4-1).

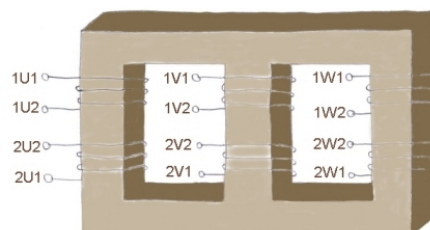


Abb 4-1: Drehstromtransformator mit drei Dreischenkelkern³

³ Bild von: <http://www.reimerhass.pmbrandt.de/drehstrom.html>, Zugriff 23.01.2014

Das Kerndesign ist ein wichtiger Faktor der Leistungsfähigkeit des Transformators. Die geometrische Kernanordnung und die gewählten Materialien sind für Verluste und den Geräuschpegel verantwortlich. Der Kern von herkömmlichen Transformatoren besteht aus kaltgewalzten, kornorientierten, hochwertigen Siliziumblechen. Die Kernbleche werden auf einer Kernschneidemaschine gefertigt und als fertige Blechpakete für Joche und Schenkel abgelegt.

Die Wicklungen werden aus dem Leitermaterial und dem Isolierstoff gebildet. Die Leiter bestehen aus Kupfer oder Aluminium. Isoliert werden sie mit reiner Zellulose oder doppelter Lackierung (ABB AG Energietechnik 2012).

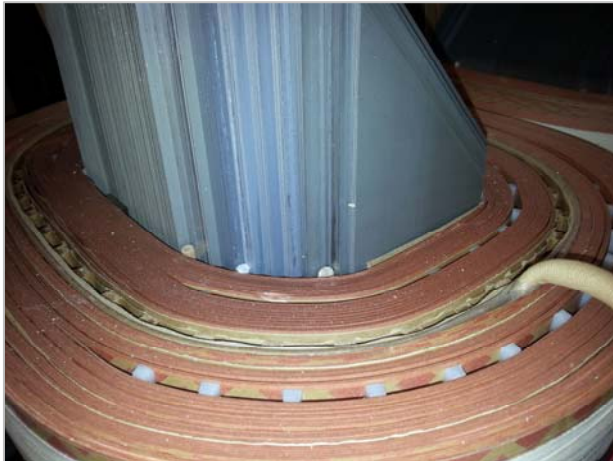


Abb 4-2: Aufbau eines Transformators: Ein Joch (Kernbleche) mit Wicklung; eigene Aufnahme

4.2. Leerlaufverluste P_0 (= no load losses)

In einem Transformatorkern treten hauptsächlich zwei Arten von Verlusten auf: Hystereseverluste und Wirbelstromverluste. Sobald eine Wechselspannung am Transformator anliegt, unabhängig davon, ob Leistung übertragen wird, entstehen Hystereseverluste. Ihre Grösse ist davon abhängig, wie leicht sich der Werkstoff magnetisieren lässt. Wirbelstromverluste entstehen durch innere Ströme, welche durch den Werkstoff erzeugt werden. Die Verluste im Transformatorkern werden als **Leerlauf- oder Eisenverluste** bezeichnet (ABB AG Energietechnik 2010).

4.3. Lastverluste P_k (= load losses)

Die Verluste in den Wicklungen sind abhängig von deren Widerstand sowie quadratisch vom Strom bzw. der Last. Diese werden **Last- oder Kupferverluste** genannt.

Durch die Wahl des Leitermaterials kann auf die Verluste direkten Einfluss genommen werden. Daneben spielt die übertragene Last eine wichtige Rolle (ABB AG Energietechnik 2010).

4.4. Amorphe Verteiltransformatoren

Im Gegensatz zu herkömmlichen Kernmaterialien bilden Eisenkerne aus amorphen Kernblechen keine kristalline Struktur. Bei der Herstellung wird die Legierungsschmelze so schnell verfestigt, dass eine Kristallisierung des Metalls ausbleibt. Dies geschieht in spezialisierten Betrieben durch Aufsprühen der flüssigen Legierung auf eine kalte Oberfläche. Durch die schnelle Erstarrung entsteht ein glasartiger Feststoff mit einer zufälligen oder amorphen Atomstruktur (siehe Abb 4-3).

Amorphes Metall lässt sich einfacher magnetisieren, wodurch die Hystereseverluste geringer werden. Auch die Wirbelstromverluste aufgrund der dünnen Metallblätter sind stark reduziert. Die Leerlauf- oder Eisenverluste können durch amorphes Metall bis zu 70% reduziert werden.

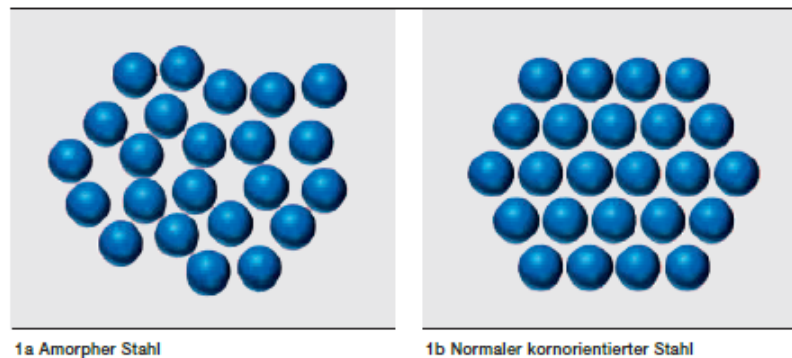


Abb 4-3: ungeordnete Struktur von amorphem Stahl und geordnete Struktur von normalem kornorientierten Stahl

Amorphe Verteiltransformatoren sind aufgrund der spezifischen Struktur des Metalls etwas grösser, der Geräuschpegel ist ausserdem stärker und die Anschaffungskosten sind auch höher als diejenigen eines Transformators herkömmlicher, nicht amorpher Technologie. Auch die Verarbeitung von amorphen Blechen ist nicht mehr mit herkömmlichen Methoden (Scheiden oder Stanzen) möglich, da die amorphen Strukturen sehr spröde sind (siehe Abb 4-4 offener Kern eines Amorphen Verteiltransformators). Die Mehrkosten können jedoch im Hinblick auf die Verlusteinsparung und dadurch eingesparte Kosten über die gesamte Lebensdauer betrachtet, mehr als kompensiert werden (Ramanan V.R. 2012).



Abb 4-4: Amorphes Blech als Kernmaterial, Quelle: www.siemens.com/energy

4.5. Verluste und Effizienz

Sind die Leerlauf- und Lastverluste eines Transformators bekannt, ergeben sich aus der Summe die Gesamtverluste. Daraus lassen sich der Wirkungsgrad sowie ein mögliches Einsparpotential errechnen. Bei ca. 38% Auslastung eines Verteiltransformators schneiden sich die Leerlauf- und Lastverluste, d.h. an dieser Stelle machen beide den gleich grossen Anteil aus (siehe auch Abb 4-5).

Bei **kleiner** Auslastung eines Transformators dominieren die **Leerlaufverluste**, bei **hoher** Auslastung hingegen die **Lastverluste**. Die jeweiligen Verluste tragen dann 80% oder mehr zu den Gesamtverlusten bei. (ABB AG Energietechnik 2010).

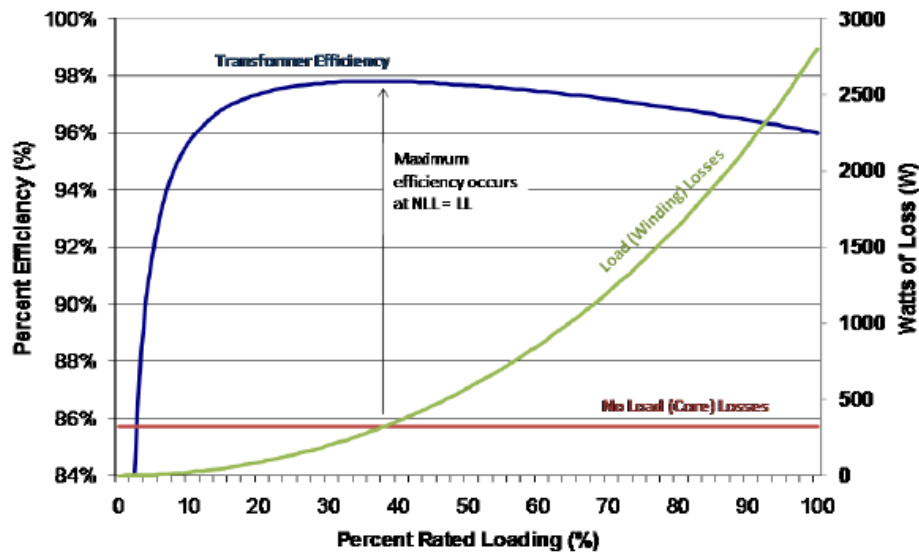


Abb 4-5: Leerlauf- und Lastverluste in Abhängigkeit der Transformatorenauslastung in % eines 75 kVA ölgekühlten Transformators (VITO, Bio Intelligence Service 2011)

Jeder Transformator hat ein eigenes Lastprofil, welches sehr spezifisch und oftmals für den einzelnen Transformator nicht bekannt ist. Bei EVU-Verteiltransformatoren ist die mittlere Auslastung oft recht gering. Gemäss SEEDT Studie beträgt die durchschnittlich übertragene Last in den EU-27 Ländern **18,9%** ("Selecting Energy Efficient Distribution Transformers A Guide for Achieving Least-Cost Solutions" 2008), und liegt daher unter dem Schwellenwert ab dem die Lastverluste grösser als die Leerlaufverluste werden. Um die Verluste einzelner Transformatoren zu optimieren und die Kosten niedrig zu halten ist es daher wichtig, das Lastprofil eines Transformators zu kennen.

EVUs versorgen in der Regel von allem Haushalte und Kleingewerbe. Nimmt man generell eine derart niedrige Auslastung an so lässt sich daraus schliessen, dass die grösseren Effizienzpotentiale in der Reduzierung der Leerlaufverluste herauszuholen sind. Bei Industrieanwendungen mit oft sehr hohen Auslastungen, kann es hingegen sinnvoller sein, die Lastverluste zu reduzieren (ABB AG Energietechnik 2010).

5. Richtlinien und Internationale Bestrebungen zur Reduktion von Verlusten

5.1. Mindestanforderung oder Stand der Technik?

Im Gegensatz zu einigen Länder der Welt, existiert in Europa bisher kein bindender Standard für Energieeffizienz für Verteiltransformatoren. Es gibt in Europa zwei grundlegende Dokumente, welche Verluste von Transformatoren beschreiben: Die EN 50464-1 Norm und die harmonisierte Norm HD428 für ölgekühlte Transformatoren. Die Schweiz hat sich bisher an der EN-Norm orientiert. Diese Normen haben sich als freiwillig Industrie Standard etabliert.

Die EN-Norm beinhaltet Effizienzklassen (oder auch „Labels“) für Leerlaufverluste (Do, Co, Bo, Ao) und für Lastverluste (Dk, Ck, Bk, Ak). Diese Klassierung lehnt sich an die inzwischen gebräuchliche A-G Kennzeichnung (z.B. von elektrischen Geräten) in der EU an. Die Indices kennzeichnen die maximale Kern- oder Leerlaufverluste mit "o" und maximale Wicklung- oder Lastverluste mit "k". Eine genaue Spezifizierung eines Verteiltransformators ergibt sich daher immer aus einer Kombination von Leerlauf- und Lastverlusten und kann mit „AoBk“ oder „AoAk“ angegeben werden. Die Effizienzklassen der EU-Norm können im internationalen Vergleich wie in Tabelle 5-1 wiedergegeben, eingeordnet werden. Im internationalen Vergleich stellen die Effizienzklassen AkAo schon einen relativ hohen Standard dar.

Effizienzkategorien	Kennzeichnung („Label“)
Ultra high (Amorphe Transformatoren)	India 5 Star W China S15
Very high	Australia Hi efficiency 2010 India 4 Star Europe AkAo
High	Australia Min efficiency 2010 India 3 Star China S13 USA DOE 2010 Europe BkBo
Average	Australia Min efficiency 2004 India 2 Star China S11 Europe CkCo
Low	India 1 Star China S9 Europe DkDo and below

Tabelle 5-1: Effizienzkategorien weltweit⁴

5.2. EU-Ökodesign-Richtlinie

Die EU-Ökodesign-Richtlinie (Directive 2009/125/EC) schafft einen verbindlichen Rahmen für die Festlegung von Anforderungen für energieverbrauchsrelevante Produkte (Energy related Products = ErP). Die Produkte werden in unterschiedlichste Produktgruppen („Lot“ genannt) eingeteilt. Für jede Produktgruppe werden intensive Vorstudien, welche Marktdaten, Stand der Technik und Empfehlun-

⁴ Zusammenstellung durch die ABB Group, 16. Januar 2014

gen berücksichtigen, durchgeführt. Diese werden in einer Kommission und auch mit Interessengruppen aus der Industrie diskutiert („Consultation Forum“ genannt). Das Ziel der Vorstudien ist, den Bedarf für energetische Mindestanforderungen der jeweiligen Produktgruppe überhaupt zu evaluieren und gegebenenfalls Vorschläge für solche Anforderungen formulieren. Die Vorstudie führt nicht automatisch zu verbindlichen rechtlichen Anforderungen. Falls solche erlassen werden gelten diese automatisch in allen EU Mitgliedsländern ohne weitere Umsetzung in nationales Recht (“Ecodesign and Product Standards” 2013).

5.2.1. Entwurf: Mindestanforderung für Verteiltransformatoren

Für kleine, mittlere und grosse Leistungstransformatoren existiert zum Zeitpunkt dieser Studie ein Entwurf einer Mindestanforderung für Verteiltransformatoren (Commission regulation of XXX implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to small, medium and large power transformers (The European Commission 2013)). Am 13. Dezember 2013 wurde im Regulatory Committee das sich aus Vertretern der Mitgliedstaaten zusammensetzt, über diesen Entwurf abgestimmt. Es ist denkbar, dass die Mindestanforderungen für Verteiltransformatoren in der ersten Jahreshälfte 2014 verabschiedet werden und dann -mit 20 Tage Zeitverzögerung- in Kraft treten. Voraussichtlich müssten dann Verteiltransformatoren, die ab Juli 2015 (Tier1) bzw. ab Juli 2021 (Tier 2) in der EU in Verkehr gebracht werden, die Mindestanforderungen dieser Durchführungsverordnung erfüllen. Neu auf dem Markt gebrachte Transformatoren, die diese Grenzwerte nicht erfüllen, dürfen ab den Stichdaten nicht mehr eingeführt und in Betrieb genommen werden. Schon installierte Transformatoren müssen diese Grenzwerte bis dato nicht erfüllen und müssen auch nicht ausgetauscht werden. Die Mindestanforderung werden in dem Entwurf für einen Dreiphasen-flüssigkeitsgekühlten Transformator mittlerer Leistung (Hochspannung < 24kV und Sekundärspannung 1,1kV) beschrieben (siehe Tabelle 12-2 im Annex dieses Berichtes).

Die in Tabelle 12-2 (Annex) dargestellten Werte sind Mindestanforderung für Verteiltransformatoren. Diese stellen einen unteren Grenzwert dar. Daraus ist ersichtlich, dass die geforderten Effizienzklassen für Tier 1 CkAo sind (siehe Tabelle 5-1). Diese geforderten Mindestanforderungen liegen weit unter dem Standard der durchschnittlich installierten Verteiltransformatoren in der Schweiz. Es kann auch davon ausgegangen werden, dass nahezu alle neu in Verkehr gebrachten Geräte die Mindestanforderungen erfüllen.

Eine Übernahme der EU Durchführungsverordnung für Verteiltransformatoren ins Schweizer Recht kann daher ohne weiteres erfolgen. Um allerdings Effizienzsteigerungen im Verteiltransformatoren-bereich zu erreichen sind diese Anforderungen nicht geeignet. Es bedarf weiterer Anreize um einer effizienten Technologie vermehrt zum Einsatz zu verhelfen.

Zum Abschluss dieser Studie war der oben genannte Entwurf von der Kommission in das Komitologie-Register eingestellt, das heisst vom Regulatory Committee gutgeheissen worden. Der Entwurf liegt zu diesem Zeitpunkt zur Überprüfung dem Europäischen Parlament und dem Rat vor.

5.2.2. Kommentare zum Entwurf

Verschiedene Organisationen haben auf den Entwurf der EU Kommission reagiert und Bedenken zur Wirksamkeit der Verordnung angemeldet⁵. So hat auch die Initiative *Super-efficient Equipment and Appliance Deployment (SEAD)*⁶ im Dezember 2013 umfassende Studien publiziert. Die Themen umfassen⁷:

- Internationalen Vergleich der Programme für effiziente Verteiltransformatoren.
- Vergleich von Test und Messmethoden für Verteiltransformatoren.
- Definitionen für Leistungsklassen von Verteiltransformatoren.
- Länderprofile zum Vergleich von Testmethoden und Leistungsklassen für Verteiltransformatoren.

Der technische Ausschuss zu Transformatoren von SEAD kommt zum Schluss, dass der Entwurf der EU Kommission in mehrfacher Hinsicht überarbeitet werden sollte. Folgende Punkte an dem Entwurf werden kritisiert:

- Begrenzter Geltungsbereich durch den weltweite häufig gebrauchte Transformatoren ausgeschlossen werden.
- Drei verschiedene und zum Teil widersprüchliche und inkonsistente Methoden zur Bestimmung der Effizienz von Transformatoren.
- Fehlender Einbezug von Effizienzprogrammen ausserhalb Europas insbesondere solche in asiatischen Ländern.
- Ungeeignete und zu wenige differenzierte Zielvorgaben um unterschiedliche ökonomische Entwicklungen weltweit zu berücksichtigen.
- Verwirrende und inkonsistente Anforderungstabellen. Die Tabellen sind zum Teil unvollständig beschriftet, kVA Angaben überlappen sich und Leistungsangaben, die im Geltungsbereich ausgeschlossen waren, sind weiterhin gelistet.
- Angaben zur Korrektur der Zielwerte bei unterschiedlichen Betriebstemperaturen sind inkonsistent bzw. es ist unklar ob diese Korrekturen angewendet wurden oder nicht.
- Die Berechnungen der maximalen Betriebsverluste sind nicht technologieneutral und könnten daher bestimmte Technologien und deren Marktanbieter bevorzugen.

6. Methodik Marktdatenerfassung Schweiz

6.1. Marktdatenerfassung

Um möglichst Netz nahe Daten als Basis für Auswertungen verwenden zu können, wurden Daten der installierten Transformatoren einiger ausgewählten EVU's (Elektrizitätsversorgungsunternehmen) ermittelt. Diese dienen als Berechnungsgrundlage und sollen das Schweizer Gesamtnetz repräsentieren. Die kooperierenden EVU's werden gemäss Absprache anonym behandelt. Es handelt sich dabei um EVU's unterschiedlicher Grösse. Es wurde kein Stadtwerk miteingeschlossen. Wie zu Stu-

⁵ http://www.eurelectric.org/media/68029/1128_eurelectric_position_eco-design_transformers_fin-2012-030-1009-01-e.pdf

⁶ SEAD ist eine multinationale Initiative deren Mitglieder folgende Staaten sind: Australien, Brasilien, Kanada, EU Kommission, Frankreich Deutschland, Indien, Japan, Korea, Mexiko, Russland, Südafrika, Schweden, Arabischen Emirate, Grossbritannien, USA (stand April 2011).

⁷ <http://www.superefficient.org/distributiontransformersreport>

dienbeginn festgelegt, wurde die Industrie nicht betrachtet. Deshalb liegen auch keine empirischen Daten zu Industrietransformatoren vor.

6.2.Ermittlung Gesamtbestand Verteiltransformatoren:

Im Jahre 1997 Veröffentlichte das Bundesamt für Energie (damals: Bundesamt für Energiewirtschaft) eine Studie zum Thema „Verminderung der Verluste von Netztransformatoren“. Damals wurde ein Bestand der Verteiltransformatoren von 50'000 Stück ausgewiesen.

Im Tätigkeitsbericht der ElCom 2012 werden die Verteiltransformatoren der Netzebene NE5 mit rund 49'000 Stück ausgewiesen („Tätigkeitsbericht der ElCom 2012“). Allerdings bezieht sich diese Zahl auf Daten von Netzbetreiber. Dies bedeutet, dass der Anteil der Industrieunternehmen in dieser Statistik nicht erfasst ist.

Um verlässliche Aussagen über Einsparpotentiale und Energieeffizienz im Bereich Verteiltransformatoren machen zu können wurden Anstrengungen unternommen, die Zahl der Verteiltransformatoren im Schweizer Verteilnetz genauer bestimmen zu können.

VORGEHEN:

1. Berechnungsgrundlage für Leerlauf- und Lastverluste, Einsparpotential, Altersstruktur u.a. basiert auf Daten einer Stichprobe von ausgewählten EVU's⁸.
2. Extrapolation der Stichprobe über die Haushalte soll Aufschluss über den Gesamtbestand der Verteiltransformatoren geben.
3. Ermittlung des Gesamtbestandes (inkl. Industrieanteil) gemäss Daten vom Eidgenössischen Starkstrominspektorat (ESTI). Dabei wurden folgenden Annahmen getroffen:
 - Es liegt eine Gesamtliste für alle Bewilligungen vom ESTI (ca. 190'000) vor. Diese beinhaltet auch Bewilligungen für Schaltanlagen, Leitungen u.a.
 - Bereinigung der Liste (Ausbau einer Trafostation, provisorische Trafostationen, doppelte u.a.). Bereinigte Liste gibt Auskunft über die Anzahl der Trafostationen.
 - Ermittlung Anzahl von Transformatoren in einer durchschnittlicher Trafostation. Dazu wurden willkürlich Akten studiert und so einen Mittelwert ermittelt.
 - Berechnung der Gesamtstückzahl: Mit den Daten der ElCom kann der Industrieanteil berechnet werden.
4. Verifizierung des Gesamtbestandes der Verteiltransformatoren durch verschiedene Methoden:
 - Gesamtstückzahl: $N_{Gesamt} = N_{verkaufte_Trafos} \times a_{Verteilt}$
 $N_{verkaufte_Trafos}$: Anzahl der verkauften Transformatoren pro Jahr. Gemäss swissT.net 2011 beträgt diese 2000 Stück/Jahr
 $a_{Verteilt}$: mittlere Lebensdauer. Nach Vito 2012 beträgt diese für Verteiltransformatoren 40 Jahre.
 - Verifizierung der Industriestückzahlen:
Die nach Trafostationen bereinigte ESTI-Gesamtliste wurde so bearbeitet dass nur noch Bewilligungsinhaber von **nicht EVU's** darin vorkommen. Somit kann die vorgängig ermittelte Industriestückzahl verifiziert werden.

⁸ EVU's sind dem Autor bekannt, werden anonym behandelt

6.3. Berechnung der Verluste

Die **jährlichen Gesamtenergieverluste** (Leerlauf- und Lastverluste) können nach folgender Formel berechnet werden ("Selecting Energy Efficient Distribution Transformers - A Guide for Achieving Least-Cost Solutions" 2008):

$$W_{LOSS} = (P_0 + P_K \times L^2) \times 8760h \text{ [kWh]} \quad [1]$$

- L: Mittelwert der durchschnittlichen Last eines Transformators
 P₀: Leerlaufverluste (= No load losses)
 P_K: Lastverluste (Load losses)

Wie in Kapitel 4.5 bereits beschrieben, wird für den mittleren Lastgang ein Wert von 18,9% angenommen (gemäss der SEEDT Studie Selecting Energy Efficient Distribution Transformers A Guide for Achieving Least-Cost Solutions 2008).

6.4. Berechnung übertragene Leistung

Die übertragene Leistung berechnet sich gemäss folgender Formel:

$$P_{N_{eff}} = S \times \cos \varphi \times L \quad [W]$$

- S: Scheinleistung des Transformators gemäss Daten aus der Stichprobe
 cosφ: Leistungsfaktor: Wird auch mit Power factor PF bezeichnet: Ist der Quotient aus Wirkleistung P und der Scheinleistung S. Der Leistungsfaktor kann Werte zwischen 1 und 0 annehmen. Der Leistungsfaktor wird gängiger Weise auch mit **cosφ** bezeichnet.

$$PF = \cos \varphi = \frac{P_N}{S}$$

- L: Mittelwert der durchschnittlichen Last eines Transformators

6.5. Berechnung Einsparpotential

Um ein mögliches Einsparpotential berechnen zu können, wurden folgende Verlustwerte für amorphe Transformatoren (ölgekühlte Transformatoren, Kupferwicklungen) verwendet:

	kVA	100	160	250	400	630	800	1000
Leerlaufverluste P ₀	W	90	112	160	240	282	425	450
Lastverluste P _K	W	1160	1640	2080	3100	4150	5000	5900

Tabelle 6-1: Herstellerangaben zu Verlusten Amorpher Transformatoren⁹

Die Gesamtverluste können wie in 6.3 berechnet werden. Diese berechneten Daten bilden die Grundlage zur Berechnung des Energieeinsparpotentials.

⁹ Hersteller dem Autor bekannt

7. Resultate

7.1. Ermittlung Gesamtbestand Verteiltransformatoren

EXTRAPOLATION AUF DAS GESAMTNETZ

Es wurden mit oben beschriebener Methode Daten von $n = 8836$ Verteiltransformatoren erfasst. Diese erfassten Daten sollen als Referenzdaten für das Schweizer Gesamtnetz dienen. Die gesamte Anzahl von Verteiltransformatoren im Schweizer Verteilnetz wurden mittels statistischer Extrapolation aus diesen Messwerten und der Gesamtanzahl von versorgten Haushalten berechnet.

Haushalte	CH	EVU's
Haushalte	3'115'399 ¹⁰	902'220 ¹¹
Anzahl Verteiltransformatoren Stichprobe		8'764
Berechnet: Anzahl Verteiltransformatoren Schweiz	30'262	

Tabelle 7-1: Extrapolation der erfassten Daten auf CH Gesamtnetz

Die Extrapolation über die Haushalte auf das schweizerische Gesamtnetz ergibt eine Verteiltransformatorenzahl von ca. 30'000 Stück. Wie in Kapitel 6.2 beschrieben geht die ElCom von rund 49'000 Verteiltransformatoren, betrieben durch Elektrizitätsversorgungsunternehmen, aus.

Die doch sehr grosse Differenz von fast 20'000 Stück zeigt, dass eine Hochrechnung aus einer Stichprobe auf das Gesamtnetz nur bedingt möglich ist.

ERMITTLUNG GESAMTBESTAND GEMÄSS DATEN VOM ESTI

Mit Daten vom Eidgenössischen Starkstrominspektorat (ESTI) wurde der Gesamtbestand resp. den Industrieanteil abgeschätzt (siehe Methodik Kapitel 6.2).

Nach Bereinigung der Gesamtliste konnte ein Bestand von 35'000 Trafostationen berechnet werden. In einer Trafostation sind sehr oft 2 Transformatoren, allerdings waren in der Stichprobe ($N = 20$) auch Stationen mit 4 und mehr Transformatoren. Durchschnittlich sind 2,3 Transformatoren in einer Trafostation. Geht man von 2 – 2,3 Stationen aus, ergibt sich ein Gesamtbestand an Verteiltransformatoren im Schweizer Verteilnetz auf 70'000 – 80'000.

VERIFIZIERUNG DER GESAMTSTÜCKZAHL:

Die Verifizierung der Gesamtstückzahl erfolgt nach beschriebener Methode:

$$N_{\text{Gesamt}} = N_{\text{verkaufte_Trafos}} \times a_{\text{Verteilt.}} = 2000 \text{ Stück / Jahr} \times 40 \text{ Jahre} = 80'000 \text{ Stück}$$

¹⁰ Zugriff November 2013: <http://www.media-stat.admin.ch/stat/haushalte/hhpop.php?lang=de&compch=1&q=1>

¹¹ Geschäftsberichte 2011/2013 der kooperierenden EVU's

Der Gesamtbestand stimmt mit beiden Berechnungsmethoden ziemlich gut überein.

ERMITTLUNG UND VERIFIZIERUNG DES INDUSTRIEANTEILS:

Mit dem errechneten Gesamtbestand an Verteiltransformatoren im Schweizer Verteilnetz von 70'000 – 80'000 kann nun der Industrieanteil zur Verifizierung berechnet werden:

$$N_{\text{Industrie}} = N_{\text{Gesamt}} - N_{\text{EVU}} = 80'000 \text{ Stück} - 49'000 \text{ Stück} = 31'000 \text{ Stück}$$

$$N_{\text{Industrie}} = N_{\text{Gesamt}} - N_{\text{EVU}} = 70'000 \text{ Stück} - 49'000 \text{ Stück} = 21'000 \text{ Stück}$$

Der Industrieanteil von 21'000 – 31'000 Stück wurde wiederum durch die Daten vom ESTI verifiziert: Die Bewilligungsliste wurde ein zweites Mal bereinigt: alle Bewilligungen für Elektrizitätsversorgungsunternehmen wurden herausgefiltert. Zurück blieben 9'000 von Industrieunternehmen betriebenen Trafostationen. Geht man wiederum von 2 – 2,3 Transformatoren pro Station aus, ergibt sich ein Industrietransformatorbestand von 18'000 – 20'700.

Wiederum stimmt der Bestand von 21'000 – 31'000 verglichen mit 18'000 – 21'000 einigermaßen gut überein, obwohl sehr unterschiedliche Datenquellen für die Berechnungen herangezogen wurden.

Es kann also davon ausgegangen werden, dass zwischen **70'000 – 80'000 Verteilnetztransformatoren in der Schweiz auf der Netzebene NE5 installiert** sind. Der Anteil von Elektrizitätsversorgungsunternehmen beläuft sich auf 49'000 Stück, der Industrieanteil variiert zwischen 21'000- und 31'000 Stück (je nachdem ob man von einem Gesamtbestand von 70'000 oder 80'000 ausgeht).

Sollte der Gesamtbestand vertiefend und korrekt erfasst werden, ist ein individueller manueller Abgleich der abgeschätzten Daten mit der beim ESTI dokumentierten industriellen installierten Basis erforderlich.

7.2. Stichprobe

Es wurden mit oben beschriebener Methode Daten von N = 8836 Verteiltransformatoren erfasst. Folgende Verteilung konnte ermittelt werden:

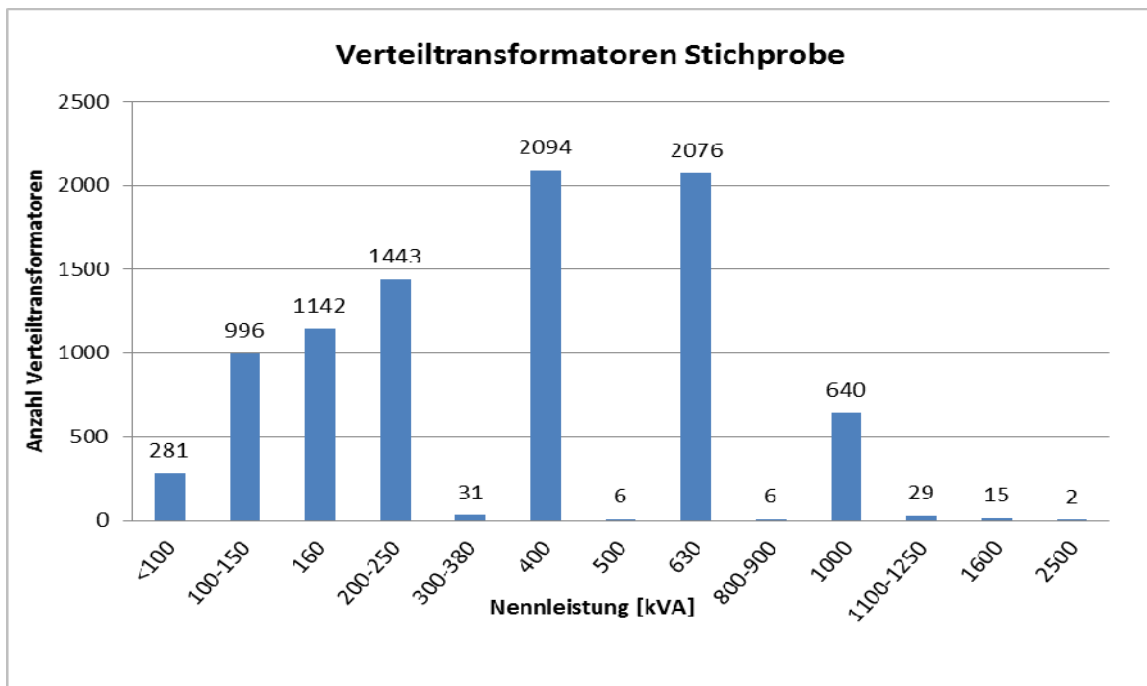


Abb 7-1: Zahl Verteiltransformatoren, gruppiert nach Nennleistung, N = 8761

Von einigen Verteiltransformatoren fehlen Daten über die Leistung, deshalb entspricht die totale Anzahl der erfassten Transformatoren nicht der dargestellten Verteilung.

7.3. Altersstruktur

Um das Einsparpotential abschätzen zu können, wurde die Altersstruktur der Verteiltransformatoren erfasst. In Abb 7-2 ist die totale Anzahl je Altersklassen der untersuchten Stichprobe angegeben.

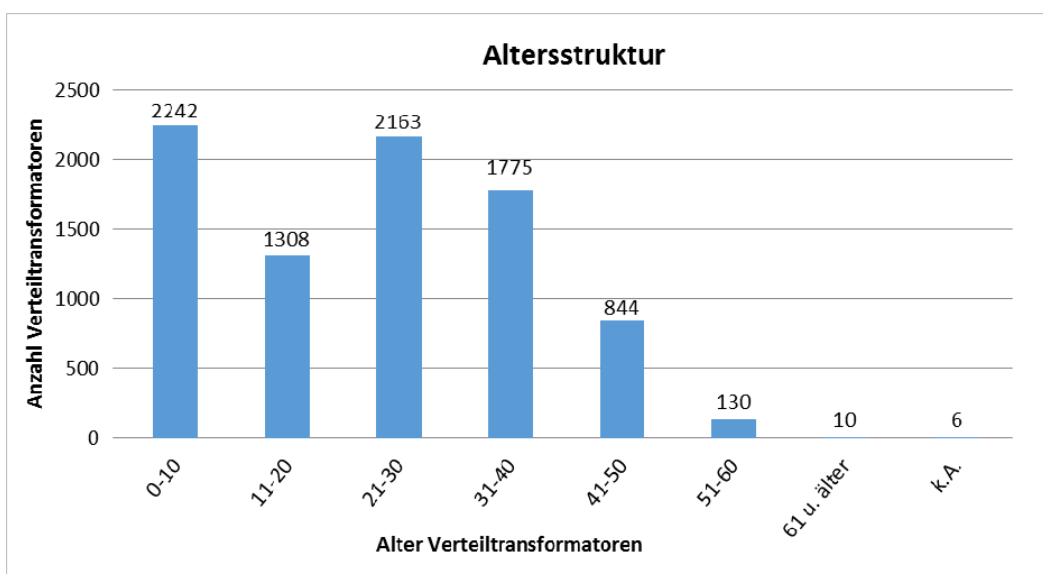


Abb 7-2: Altersstruktur der installierten Basis in der Schweiz, Stichprobe N= 8478

Knapp 50% der installierten Transformatoren sind älter als 25 Jahre (vor 1990 installiert). In den nächsten 10 Jahren werden 60% der Transformatoren 40 Jahre und älter sein. Geht man von einer durchschnittlichen Lebenszeit von 40 Jahren aus (VITO, Bio Intelligence Service 2011), wird dann ein Grossteil dieser Transformatoren am Ende ihrer Lebenszeit angekommen sein. In den letzten 10 Jahren wurden ca. 25% der Transformatoren bereits erneuert.

7.4. Leerlauf- und Lastverluste

Bei den Leerlauf- und Lastverlusten handelt es sich um direkte Angaben der EVU's. Um die Resultate für weitere Berechnungen zu verwenden, wurde pro Leistungsgruppe das arithmetische Mittel gebildet:

Nennleistung [kVA]	Anzahl Verteiltransformatoren	Mittelwert von Leerlaufverlusten Po [W]	Mittelwert von Lastverlusten Pk [W]
<100	281.0	374.7	1257.6
100-150	996.0	295.5	1473.4
160	1142.0	371.0	1975.7
200-250	1443.0	464.4	2607.2
300-380	31.0	827.1	4044.1
400	2094.0	554.6	3649.4
500	6.0	820.8	6304.0
630	2076.0	683.3	4577.5
800-900	6.0	789.3	8025.0
1000	640.0	753.3	6392.4
1100-1250	29.0	1012.3	8336.9
1600	15.0	1185.8	12289.6
2500	2.0	1611.0	21559.0
total	8761.0	526.4	3351.8

Tabelle 7-2: Anzahl Transformatoren, Mittelwert Leerlauf- und Lastverluste, gruppiert nach installierter Nennleistung

Abb 7-3 zeigt die grafische Darstellung der Leerlaufverluste und deren Standardabweichung. Abb 7-4 zeigt die grafische Darstellung der Lastverluste und deren Standardabweichung.

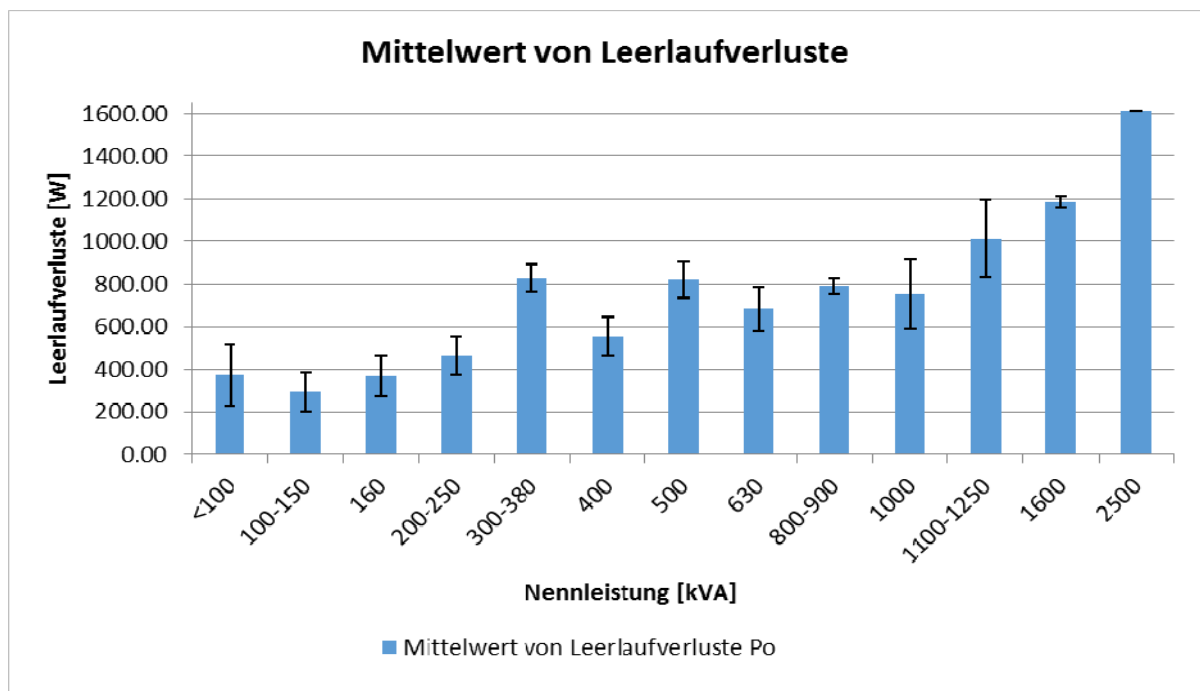


Abb 7-3: Leerlaufverluste [W], gruppiert nach Nennleistung [kVA]

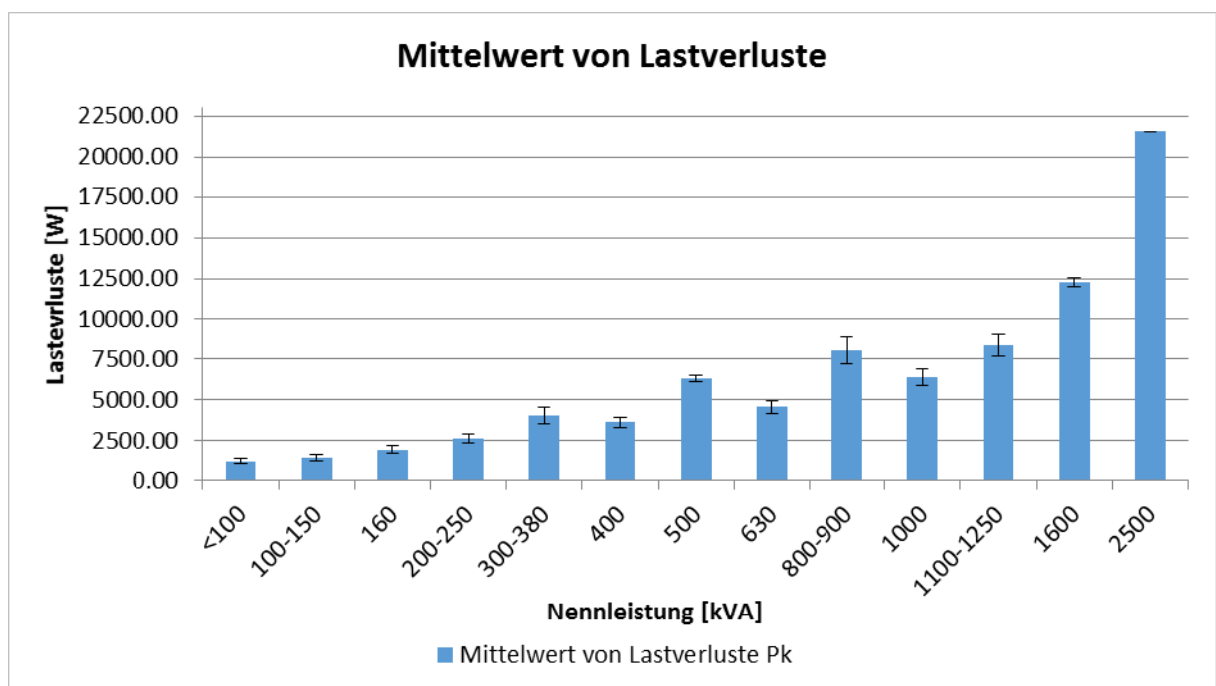


Abb 7-4: Lastverluste [W], gruppiert nach Nennleistung [kVA]

In Abb 7-5 wurden die Leerlaufverluste in Abhängigkeit des Alters dargestellt. In den jeweiligen Altersklassen ist die Standardabweichung eher klein. Je kleiner die Stückzahl umso mehr streuen die Werte. Wird der arithmetische Mittelwert einer Leistungsklasse über die gesamte Altersverteilung gebildet, variieren diese aufgrund des unterschiedlichen Alters und der doch teilweise kleinen Stückzahl (Abb 7-5 und 7-6).

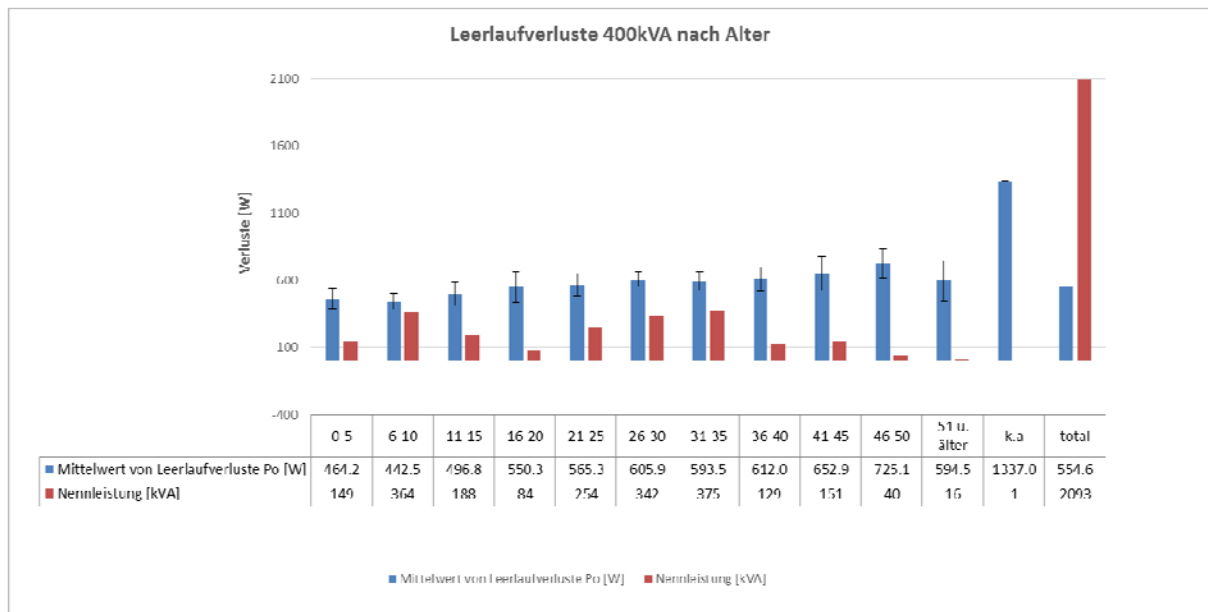


Abb 7-5: Leerlaufverluste 400kVA nach Alter

Die Leerlauf- und Lastverluste konnten aufgrund technischer Verbesserungen über die Jahre stetig reduziert werden (siehe Kapitel 4). Dies ist auch in Abb 7-5 sichtbar.

In Abb 7-6 sind Leerlaufverluste (P_o , grün und blau) und Lastverluste (P_k , rot und violett) in der Leistungsklasse 400kVA ($N = 2094$) grafisch abgebildet. Dies kann stellvertretend für alle Leistungskategorien angenommen werden. Nebst den Herstellerangaben sind auch die ermittelten Werte angegeben, welche grösstenteils gut korrelieren. Aufgrund dieser Korrelation kann für die Berechnung des Einsparpotentials mit den gemittelten Leerlauf- und Lastverlusten gerechnet werden.

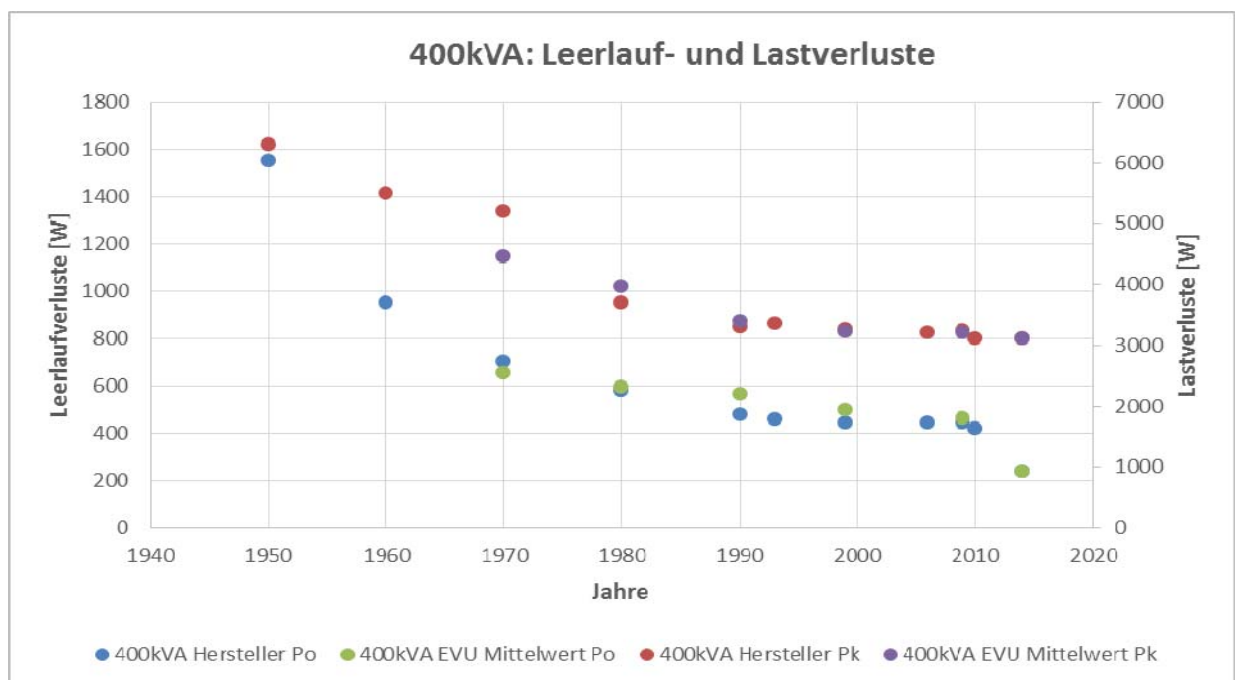


Abb 7-6: Leerlauf- und Lastverluste 400kVA, Herstellerangaben und ermittelte Mittelwerte, $N = 2094$

Die jährlichen Gesamtverluste konnten nach der in Kapitel 6.3 beschriebenen Methode ermittelt werden: Diese liegen für die Stichprobe bei 47'430MWh (arithmetisches Mittel pro Trafo liegt bei 5,4MWh). Bezogen auf das Schweizer Gesamtnetz (Berechnungsgrundlage 75'000Stück) ergibt dies einen Gesamtverlust von 406,03GWh. Die sich daraus ergebenden Einsparpotentiale werden nun noch detailliert ausgeführt.

7.5.Einsparpotential pro Trafo

Nach der in Kapitel 6.3 beschriebenen Methode wurden die ermittelten Gesamtverluste sowie die Gesamtverluste eines amorphen Transformators der jeweiligen Leistungsklassen berechnet. Daraus konnte folgendes Einsparpotential pro Transformator der jeweiligen Leistungsklassen ermittelt werden:

installierte Nennleistung [kVA]	Anzahl Verteiltransformatoren	Gesamtverluste/Trafo [W]	Gesamtverluste/Trafo Amorph [W]	Energieeinsparpotential pro Trafo [MWh]
<100	281.0	419.7	95.7	2.8
100-150	996.0	348.1	131.4	1.9
160	1142.0	441.6	170.6	2.4
200-250	1443.0	557.5	350.7	1.8
300-380	31.0	971.6	292.5	5.9
400	2094.0	685.0	350.7	2.9
500	6.0	1046.0	388.6	5.8
630	2076.0	845.8	430.2	3.6
800-900	6.0	1075.9	603.6	4.1
1000	640.0	981.6	660.8	2.8
1100-1250	29.0	1310.1	873.6	3.8
1600	15.0	1624.8	1075.8	4.8
2500	2.0	2381.1	1640.9	6.5

Tabelle 7-3: Energieeinsparpotential pro Transformator pro Leistungsklasse (Mittelwert)

Für die Leistungsklassen <100, 300 – 380, 1100 – 1250, 1600 und 2500kVA lagen keine Daten für die Leerlauf- und Lastverluste der amorphen Transformatoren vor. Es wurden Werte angenommen. Diese Leistungsklassen sind jedoch relative unüblich bzw. sind Sonderanfertigungen und fallen in der Gesamtbetrachtung nur gering ins Gewicht.

In Abbildung 7-1 ist ersichtlich, dass knapp 50% aller Verteiltransformatoren im Netz den Leistungsklassen **400kVA** (N=2094) und **630kVA** (N=2076) angehören. Da man davon ausgeht, dass von der Industrie tendenziell eher höhere Leistungen installiert sind wird als dritte Gruppe **1000kVA** (N=640) betrachtet. Der prozentuale Anteil dieser der Leistungskategorien liegt bei 55% der Gesamtstückzahl.

Im Mittel können in diesen drei Leistungsklassen 2,9MWh (400kVA), 3,6MWh (630kVA) resp. 2,8MWh (1000kVA) pro Trafo pro Jahr eingespart werden.

Interessant ist auch eine Betrachtung der Gesamtverluste in Abhängigkeit des Alters der Transformatoren. In den folgenden Abbildungen 7-7, 7-8 und 7-9 sind die Einsparpotentiale der drei Leistungsklassen 400 kVA, 630kVA und 100kVA nach den jeweiligen Altersklassen dargestellt.

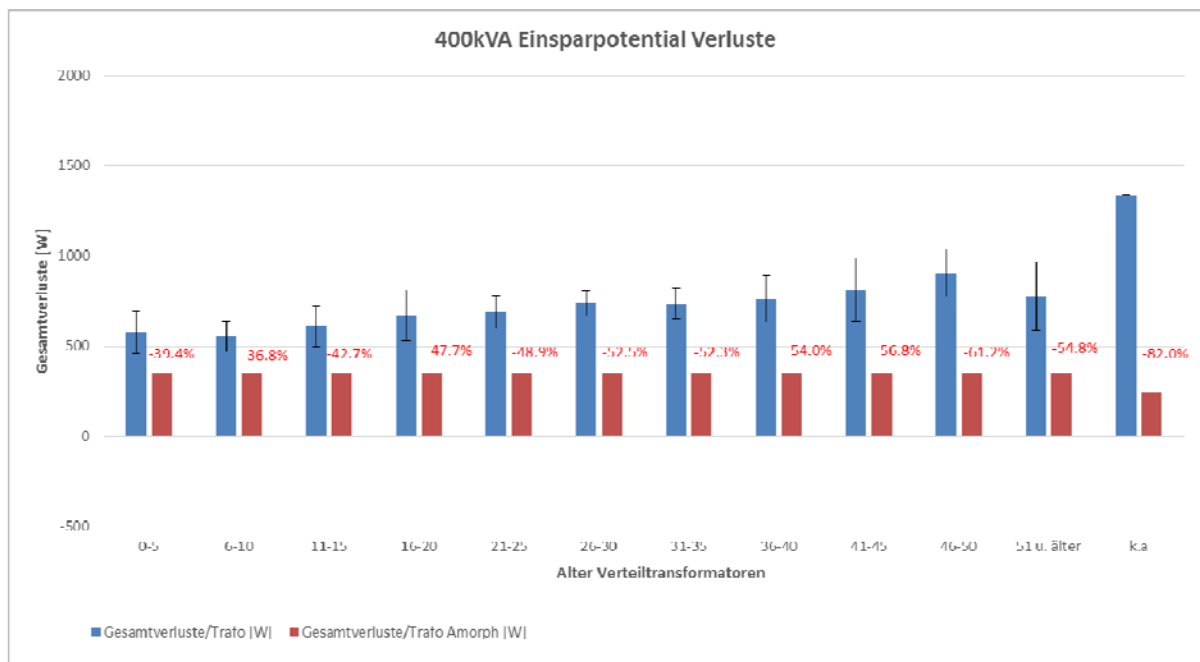


Abb 7-7: Einsparpotential Gesamtverluste 400kVA in Abhängigkeit des Alters

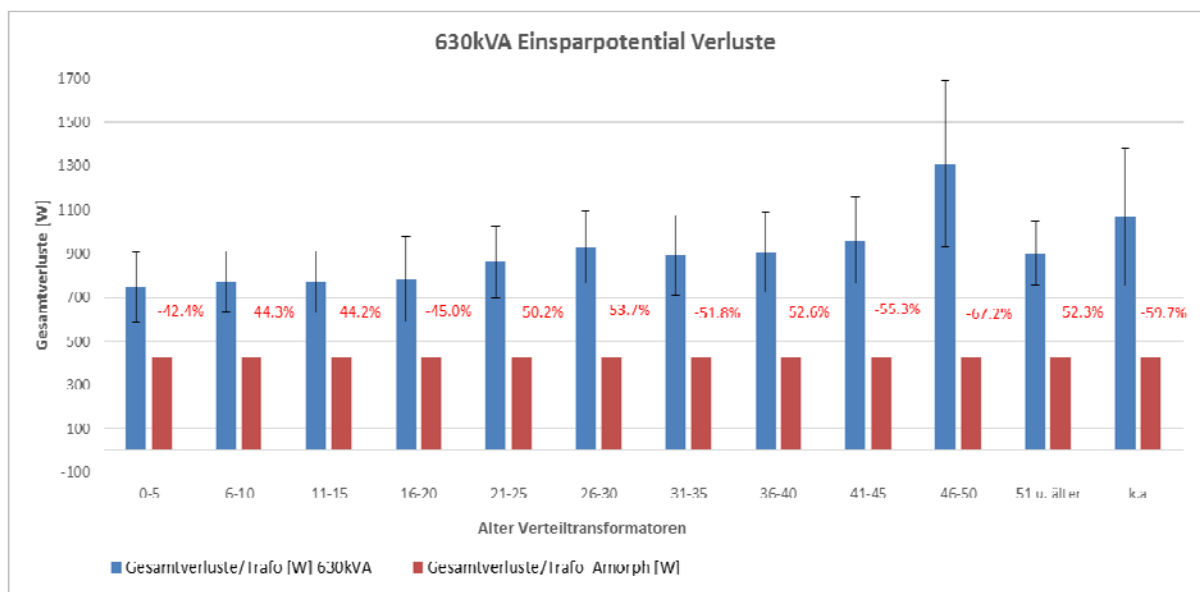


Abb 7-8: Einsparpotential Gesamtverluste 630kVA in Abhängigkeit des Alters

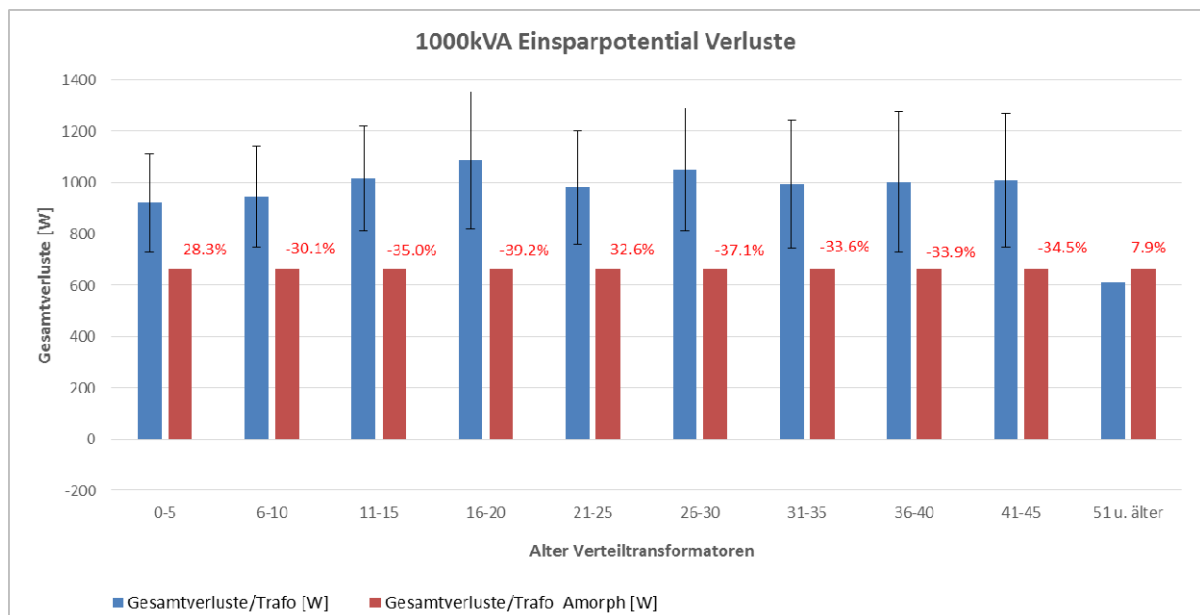


Abb 7-9: Einsparpotential Gesamtverluste 1000kVA in Abhängigkeit des Alters

Abbildung 7-7 und 7-8 zeigt die Altersverteilung der 400kVA und 630kVA Leistungsklassen. Mit zunehmendem Alter steigt auch das Einsparpotential. Unterschiede in den einzelnen Kategorien lassen sich signifikant feststellen. 0-5 jährige Transformatoren weisen ein Einsparpotential von 39,4% resp. 42,4% auf, während sich mit einem Austausch von 41 – 45 jährigen Transformatoren eine Reduktion von 54,8% resp. 52,3% erzielen liesse. Transformatoren der Leistungsklasse 1000kVA weisen keinen signifikanten Anstieg des Energieeinsparpotentials mit zunehmendem Alter auf (Abb 7-9).

Total ist ein Einsparpotential von knapp **50%** zu beobachten. Tendenziell steigt das mögliche Energieeinsparpotential mit zunehmendem Alter. Dieser Verlauf ist in Abbildung 7-7 gut zu beobachten. Hersteller gehen von einer Verlustreduktion von bis zu 70% aus (Ramanan V.R. 2012). Diese Werte können hier nicht bestätigt werden.

7.6. Einsparpotential Schweizer Gesamtnetz

Der Bestand wurde auf 70'000 – 80'000 Verteiltransformatoren im Schweizer Netz geschätzt. Aufgrund der berechneten Energieeinsparpotentiale pro Transformator kann das Einsparpotential für das Schweizer Gesamtnetz gemacht werden (Berechnungsgrundlage: 75'000 Verteiltransformatoren):

⇒ Es besteht ein Stromeinsparpotential durch Einsatz von amorphen Transformatoren auf der Verteilnetzebene im Schweizer Gesamtnetz, welches sich auf 204,7 GWh pro Jahr beläuft.

Nennleistung [kVA]	Einsparpotential Schweizer Gesamtnetz [GWh]	Einsparpotential in [%]
<100	6.8	3.3
100-150	16.3	7.9
160	23.3	11.3
200-250	22.4	10.9
300-380	1.6	0.8
400	52.4	25.6
500	0.3	0.1
630	64.6	31.5
800-900	0.1	0.1
1000	15.4	7.5
1100-1250	0.9	0.5
1600	0.4	0.3
2500	0.1	0.1
total	204.7	100.0

Tabelle 7-4: Einsparpotential Schweizer Gesamtnetz

Tabelle 7-4 gibt die Einsparpotentiale pro Leistungsklasse an. Transformatoren der Leistungsklassen 400kVA, 630kVA und 1000kVA machen zusammen knapp 65% des gesamten Einsparpotentials aus. In Zahlen ausgedrückt sind das 132,4GWh pro Jahr, welche alleine bei einem Austausch dieser Transformatoren eingespart werden können. Die Entscheidung, sich in einem ersten Schritt auf diese drei Leistungsklassen zu konzentrieren, macht durchaus Sinn. Auch im Hinblick auf die Industrietransformatoren, welche eher grösser zu sein scheinen (siehe Kapitel 3-2). Die Aufteilung der Einsparpotentiale pro Leistungsklasse ist in Abb 7-11 grafisch wiedergegeben.

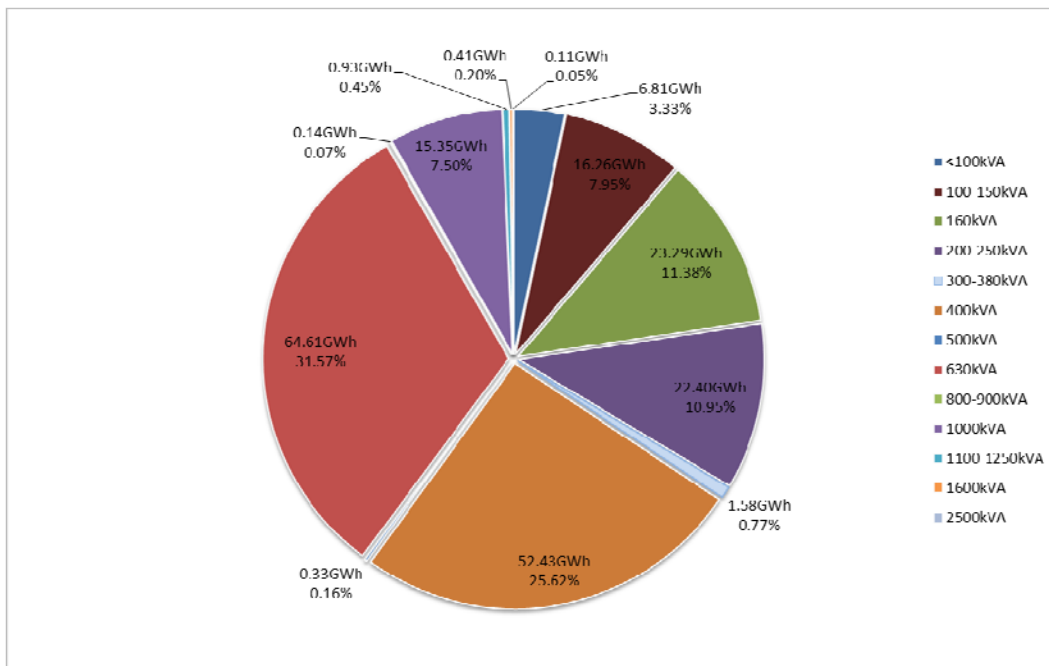


Abb 7-10: Jährliches Einsparpotential pro Leistungsklasse

Eine Auswertung des Gesamteinsparpotentials in Abhängigkeit des Alters ergibt folgende Verteilung:

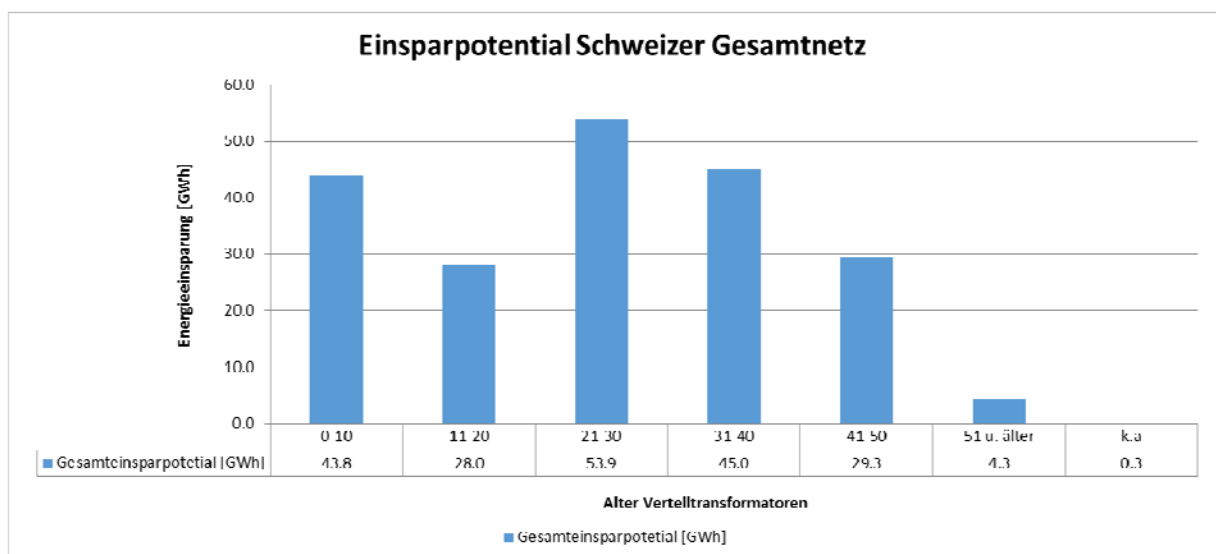


Abb 7-11: Einsparpotential Schweizer Gesamtnetz in Abhängigkeit des Alters

Auffällig ist doch der hohe Anteil 0 – 10jähriger Transformatoren. Allerdings zeigt die Abb 7-2, dass in dieser Altersklasse die Anzahl der installierten Transformatoren am höchsten ist. Obwohl die Leerlaufverluste (und somit auch die Gesamtverluste) aufgrund verlustarmer Transformatoren den niedrigsten Wert aufweisen (siehe Abb 7-5), ist das Potential aufgrund der anteilmässig hohen Stückzahl (ca. 25% des Gesamtbestandes) hier relativ hoch. Das höchste Einsparpotential weisen Transformatoren ab einem Alter von 20 Jahren und grösser auf (ca. 65%).

8. Interpretation und Diskussion

BESTAND SCHWEIZER GESAMTNETZ

Die Extrapolation auf das Gesamtnetz ist nur bedingt möglich. Eine Abschätzung der Stückzahl auf diesem Wege ist schwer möglich. Grund dafür kann die sehr diverse Verteilnetzstruktur in der Schweiz sein. Ein Stadtwerk unterscheidet sich doch sehr stark von einer ländlichen Netzstruktur. Der Bestand von 70'000 – 80'000 Verteiltransformatoren wurde von Experten als glaubwürdig und durchaus nachvollziehbar eingestuft. Die Verifizierungsmethoden stützen diese Zahlen.

STICHPROBE

Die Grösse der Stichprobe (N= 8500) kann als repräsentativ angeschaut werden (ca. 11% des Schweizer Gesamtbestandes). Da keine Industriedaten vorliegen, kann eine Extrapolation auf das Gesamtnetz allerdings nur unter Vorbehalt durchgeführt werden.

Es zeigt sich sehr deutlich, dass mehr als die Hälfte (55%) der installierten Transformatoren eine Nennleistung von 400, 630 und 1000kVA aufweisen. Industrietransformatoren weisen tendenziell grössere Leistungen auf. Es kann also davon ausgegangen werden, dass sich die Stückzahl dabei zugunsten von 630, 1000 und 2500kVA verändern würde.

ALTERSSTRUKTUR UND LEERLAUFVERLUSTE

Das Schweizer Gesamtnetz wurde während der letzten 10 Jahren verjüngt (ca. 25% der Transformatoren wurden ausgewechselt). Das Schweizer Gesamtnetz weist ein durchschnittliches Alter von 23 Jahren auf. Fast 60% aller Transformatoren sind älter als 20 Jahre (knapp 50% sind vor 1990 installiert worden). In den nächsten 10 Jahren werden 60% der Transformatoren 40 Jahre und älter sein.

Aufgrund dieser Altersstruktur ist ersichtlich, dass das Schweizer Verteiltransformatorennetz in den letzten Jahren zwar stark verjüngt wurde. Bezogen auf die Leerlaufverluste, wie in Abb. 7-5 dargestellt, konnten diese allerdings nicht signifikant reduziert werden. Dies lässt zwei Vermutungen zu:

- Es wurden Verteiltransformatoren eingesetzt, welche schon Jahre vorher gekauft wurden oder die neu angeschafften Transformatoren weisen betreffend den Verlusten nicht den heutigen Stand der Technik auf.
- Basierend auf diesen Daten lassen sich Handlungsoptionen im direkten Dialog mit den Elektrizitätsunternehmen und der Industrie erarbeiten. Es ist davon auszugehen, dass die Verluste in den nächsten Jahren signifikant sinken werden. Diese Studie liefert die Daten und dient als Basis für weitere Schritte.

Im Jahre 2011 betrug der Landesstromverbrauch 63TWh (Verband schweizerischer Elektrizitätsunternehmen (VSE) 2012). Gesamthaft könnten im Schweizer Gesamtnetz mit dem Einsatz von amorphen Transformatoren rund 200 GWh pro Jahr eingespart werden; dies entspricht 0,3% des gesamten Landesverbrauchs.

Die Energieeffizienzsteigerung ist ein wichtiger Eckpfeiler der Energiestrategie 2050 des Bundes¹². Nebst diversen politischen und wirtschaftlichen Massnahmen sind wir alle für eine sichere, effiziente und nachhaltige Energieversorgung mitverantwortlich und müssen unseren Beitrag dazu leisten; dies schliesst die Elektrizitätsunternehmen und die Industrie nicht aus. Überall dort, wo Energiesparpotential vorhanden ist, sollte versucht werden dieses auszuschöpfen.

Diese Studie zeigt auf, dass mit dem Austausch eines einzigen Transformators durch einen mit einem amorphen Kern bis zu 5 – 6 MWh elektrische Energie pro Jahr eingespart werden kann. Nicht jeder Transformator kann durch einen amorphen ersetzt werden: Grösse, Lärm, Kosten und andere Faktoren beeinflussen den wirtschaftlichen Entscheid massgeblich. Die Energieeffizienz sollte zukünftig aber im Entscheidungsprozess einen massgeblichen Platz einnehmen. Im folgenden Kapitel sind konkrete Handlungsempfehlungen aus Sicht von Marktteilnehmern dargestellt. Die Politik ist nun gefordert, basierend auf den vorliegenden Grundlagen, Massnahmen zur Effizienzsteigerung bei Verteiltransformatoren zu regulieren und Handlungsempfehlungen umzusetzen.

9. Ergänzende Vorschläge aus Sicht von Marktteilnehmern

Aus der Sicht von Marktteilnehmern wird angeregt folgende Massnahmen als konkrete Handlungsempfehlungen in ein weiteres Vorgehen zur Effizienzsteigerung von Verteiltransformatoren in Betracht zu ziehen (Interviews und Stellungnahmen von Marktteilnehmern):

1. Regulatorische Festlegung von Bewertungs- und Kalkulationsvorgaben für öffentlichen Energieversorger hinsichtlich der Rentabilitätsbetrachtungen von Verlustleistungen von Verteilnetztransformatoren. Die Rentabilitätsrechnungen sollten verbindlich mit Endverbrauchermarktpreisen und nicht -wie üblich- mit reinen Gestehungskosten bzw. Energieeinkaufspreisen, berechnet werden. Die möglichen Einsparungen durch verminderte Verlustleistungen wären so vergleichbar mit anderen Energieeffizienzmassnahmen oder Massnahmen zur Förderung von neuen erneuerbaren Energien.
2. Empfehlungen durch Energie Schweiz in Form von Merkblättern und weiteren Kommunikationsmitteln zum Einsatz von Life Cycle Cost Bewertungen (incl. Total Cost of Ownership -TCO) bei öffentlichen Ausschreibungen von Transformatoren.
3. Sensibilisierung von Marktteilnehmern im industriellen Umfeld durch geeignete Kommunikationsmittel, das Einsparpotential von effizienten Verteilnetztransformatoren stärker zu thematisieren und in Zielvereinbarungen aufzunehmen (z.B. mittels Checklisten zu Händen der von den Industrien beauftragen Energieagenturen).

¹² http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00527/index.html?dossier_id=05024&lang=de, Zugriff 31.01.2014

4. Überprüfung und Initiierung von Lenkungsmaßnahmen für Austauschprogramme von ineffizienten Verteiltransformatoren. Fokussierung von möglichen Lenkungs- und Fördermaßnahmen des BFE (z.B. Wettbewerbliche Ausschreibungen) auf den kosteneffizienten und standardisierten Ersatz bestimmter Kategorien und Altersklassen von Verteilnetztransformatoren (z.B. wie in dieser Studie vorgeschlagen: Klassen von 400 / 630 / 1000 kVA und Baujahre vor 1990).
5. Potentielle Einführung einer "Abwrackprämie" speziell für den energieeffizienten Austausch alter Transformatoren in der Industrie (z.B. älter 20 Jahre), da diese möglicherweise aus Kostengründen selbst bei einer Erneuerung der MS/NS- Schaltanlagen nicht ersetzt würden.
6. Einführung eines Energieeffizienz-Labeling für Verteilnetztransformatoren in Anlehnung an die bestehenden oder momentan entstehenden EU-Normen.

10. Referenzen

- ABB AG Energietechnik, ed. 2010. "Vom Kraftwerk Zum Verbraucher-Effizient, Sauber Und Sicher."
———, ed. 2012. "Ölgefüllte Verteiltrasformatoren Nach IEC-Norm, Nennleistung <2500kVA, OS <36kV."
- "Ecodesign and Product Standards." 2013. Eco Design Product. Accessed November 7.
http://www.eceee.org/ecodesign/products/distribution_power_transformers.
- EU, 2009/125/EC. 2009. *DIRECTIVE 2009/125/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 21 October 2009 Establishing a Framework for the Setting of Ecodesign Requirements for Energy-Related Products*.
- Nipkow dipl. El. Ing. ETH, Jürg. 1997. "Verminderung Der Verluste von Netztransformatoren".
Schlussbericht DIS-Proj. Nr. 18707.
- Ramanan V.R. 2012. "Umweltschonende Stromverteilung ABB-Verteiltransformatoren Mit Kernen Aus Amorphem Metall Ermöglichen Hohe Energieeinsparungen". ABB Power Products, Transformers.
- "Selecting Energy Efficient Distribution Transformers A Guide for Achieving Least-Cost Solutions."
2008. EIE/05/06/056/S12.419632.
- Spinelli Marco. 2012. "Branchenstatistik Sektion 82 Oel-Verteiltransformatoren 2011."
"Tätigkeitsbericht Der ElCom 2012." 2013. 06/2013.
- The European Commission, ed. 2013. "Commission Working Document with Regard to Small, Medium and Large Power Transformers."
- Verband schweizerischer Elektrizitätsunternehmen (VSE), ed. 2012. "Zahlen Und Fakten; Aktuelle Informationen Über Die Schweizerische Stromversorgung 2012-2013."
- VITO, Bio Intelligence Service, ed. 2011. "LOT 2: Distribution and Power Transformers Tasks 1-7."

11. Verzeichnisse

11.1. Abbildungen

Abb 3-1: Netzebenen der Schweiz	9
Abb 3-2: Marktvolumen Entwicklung Öl-Verteiltransformatoren	11
Abb 4-1: Drehstromtransformator mit drei Dreischenkelkern	11
Abb 4-2: Aufbau eines Transformators: Ein Joch (Kernbleche) mit Wicklung; eigene Aufnahme.....	12
Abb 4-3: ungeordnete Struktur von amorphem Stahl und geordnete Struktur von normalem kornorientierten Stahl	13
Abb 4-4: Amorphes Blech als Kernmaterial, Quelle: www.siemens.com/energy	13
Abb 4-5: Leerlauf- und Lastverluste in Abhängigkeit der Transformatorauslastung in % eines 75 kVA ölgekühlten Transformators (VITO, Bio Intelligence Service 2011)	14
Abb 7-1: Zahl Verteiltransformatoren, gruppiert nach Nennleistung, N = 8761	22
Abb 7-2: Altersstruktur der installierten Basis in der Schweiz, Stichprobe N= 8478	22
Abb 7-3: Leerlaufverluste [W], gruppiert nach Nennleistung [kVA]	24
Abb 7-4: Lastverluste [W], gruppiert nach Nennleistung [kVA]	24
Abb 7-5: Leerlaufverluste 400kVA nach Alter	25
Abb 7-6: Leerlauf- und Lastverluste 400kVA, Herstellerangaben und ermittelte Mittelwerte, N = 2094	25
Abb 7-7: Einsparpotential Gesamtverluste 400kVA in Abhängigkeit des Alters	27
Abb 7-8: Einsparpotential Gesamtverluste 630kVA in Abhängigkeit des Alters	27
Abb 7-9: Einsparpotential Gesamtverluste 1000kVA in Abhängigkeit des Alters	28
Abb 7-10: Jährliches Einsparpotential pro Leistungsklasse	30
Abb 7-11: Einsparpotential Schweizer Gesamtnetz in Abhängigkeit des Alters	30
Abb 13-1: grafische Darstellung des TCO für einen Transformator mit amorphen Kernmaterial (BAT) und durchschnittlich installierten Transformatoren der gleichen Klasse in der Schweiz: Schweiz versus BAT	38
Abb 13-2: grafische Darstellung des TCO für einen Transformator mit amorphen Kernmaterial (BAT) und durchschnittlich installierten Transformatoren der gleichen Klasse in Europa: Europa versus BAT	39

11.2. Tabellen

Tabelle 5-1: Effizienzkategorien weltweit	15
Tabelle 6-1: Herstellerangaben zu Verlusten Amorpher Transformatoren	19
Tabelle 7-1: Extrapolation der erfassten Daten auf CH Gesamtnetz	20
Tabelle 7-2: Anzahl Transformatoren, Mittelwert Leerlauf- und Lastverluste, gruppiert nach installierter Nennleistung	23
Tabelle 7-3: Energieeinsparpotential pro Transformator pro Leistungsklasse (Mittelwert)	26
Tabelle 7-4: Einsparpotential Schweizer Gesamtnetz	29
Tabelle 13-1: geforderte maximale Leerlauf- und Lastverluste nach Tier 1 + 2. Rot die für diese Marktstudie relevanten Leistungen (The European Commission 2013). *Die maximalen Lastverluste die zwischen die in der Tabelle gegebenen Werte fallen sollen mit Hilfe einer linearen Extrapolation ermittelt werden.	37
Tabelle 13-2: Grundlage zur Berechnung TCO Vergleich Europe Schweiz	38
Tabelle 13-3: Resultate TCO-Berechnung	38

12. Annex

12.1. Entwurf einer Mindestanforderung für Verteiltransformatoren

Wertetabelle des Entwurf einer Mindestanforderung für Verteiltransformatoren (Commission regulation of (date to be inserted) implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to small, medium and large power transformers (The European Commission 2013)).

Der Entwurf umfasst kleine, mittlere und grosse Verteiltransformatoren mit einer minimalen Leistungsklasse von 1kVA bei einer Übertragungs- und Verteilungsfrequenz von 50 Hz. Sowohl ölgekühlte- als auch Trockentransformatoren sind eingeschlossen. Ausgenommen werden folgende Transformatoren (Originaltext des Entwurfs):

- *"Instrument transformers, specifically designed to supply measuring instruments, meters, relays and other similar apparatus*
- *Transformers with low voltage windings specifically designed for use with rectifiers to provide a DC supply*
- *Transformers specifically designed to be directly connected to a furnace EN 4 EN*
- *Transformers specifically designed for offshore applications and floating offshore applications*
- *Transformers specially designed for emergency mobile installations*
- *Transformers and auto-transformers specifically designed for 16.7 Hz railway feeding systems*
- *Auto-transformers for 50 Hz railway feeding systems*
- *Earthing or grounding transformers, this is, three-phase transformers intended to provide a neutral point for system grounding purposes*
- *Traction transformers mounted on rolling stock, this is, transformers connected to an AC or DC contact line, directly or through a converter, used in fixed installations of railway applications*
- *Starting transformers, specifically designed for starting three-phase induction motors so as to eliminate supply voltage dips*
- *Testing transformers, specifically designed to be used in a circuit to produce a specific voltage or current for the purpose of testing electrical equipment*
- *Welding transformers, specifically designed for use in arc welding equipment or resistance welding equipment*
- *Transformers specifically designed for explosion-proof and underground mining applications*
- *Transformers specifically designed for deep water (submerged) applications*
- *Medium Voltage (MV) to Medium Voltage (MV) interface transformers up to 5 MVA*
- *Large power transformers where it is demonstrated that for a particular application, technically feasible alternatives are not available or where the minimum efficiency required by this Regulation cannot be achieved without entailing disproportionate costs associated to its transportation and/or installation."*

Die unten abgebildete Tabelle gibt die maximalen Verlustwerte für ölgekühlte Verteiltransformatoren wieder (der Entwurf enthält eine entsprechende Tabelle auch für Trockentransformatoren). Dabei werden die Kategorien A, B und C vergeben und maximale Kern- oder Leerlaufverluste mit "o"

und maximale Wicklung- oder Lastverluste mit "k" gekennzeichnet. Eine genaue Spezifizierung eines Verteiltransformators ergibt sich daher immer aus einer Kombination von Leerlauf- und Lastverlusten und kann z.B. mit "AoBk" oder "AoAk" angegeben werden.

	Tier 1 (from 1 July 2015)		Tier 2 (from 1 July 2021)	
RATED POWER (kVA)	Maximum load losses (in Watts) *	Maximum no-load losses (in Watts)	Maximum load losses (inWatts)	Maximum no-load losses (in Watts)*
25	Ck (900)	Ao(70)	Ak(600)	Ao-10%(63)
50	Ck (1100)	Ao(90)	Ak(750)	Ao-10%(81)
100	Ck (1750)	Ao(145)	Ak(1250)	Ao-10%(130)
160	Ck (2350)	Ao(210)	Ak(1750)	Ao-10%(189)
250	Ck (3250)	Ao(300)	Ak(2350)	Ao-10%(270)
315	Ck (3900)	Ao(360)	Ak(2800)	Ao-10%(324)
400	Ck (4600)	Ao(430)	Ak(3250)	Ao-10%(387)
500	Ck (5500)	Ao(510)	Ak(3900)	Ao-10%(459)
630	Ck (6500)	Ao(600)	Ak(4600)	Ao-10%(540)
800	Ck (8400)	Ao(650)	Ak(6000)	Ao-10%(585)
1000	Ck (105000)	Ao(770)	Ak(7600)	Ao-10%(693)
1250	Bk (11000)	Ao(950)	Ak(9500)	Ao-10%(855)
1600	Bk(14000)	Ao(1200)	Ak(12000)	Ao-10%(1080)
2000	Bk (18000)	Ao(1450)	Ak(15000)	Ao-10%(1305)
2500	Bk (22000)	Ao(1750)	Ak(18500)	Ao-10%(1575)
3150	Bk (27500)	Ao(2200)	Ak(23000)	Ao-10%(1980)

Tabelle 12-1: geforderte maximale Leerlauf- und Lastverluste nach Tier 1 + 2. Rot die für diese Marktstudie relevanten Leistungen (The European Commission 2013). *Die maximalen Lastverluste die zwischen die in der Tabelle gegebenen Werte fallen sollen mit Hilfe einer linearen Extrapolation ermittelt werden. Grau hingelegt ist der in dieser Studie berücksichtigte Leistungsbereich.

12.2. TCO-Berechnung (Total Cost of Ownership)

Die Lebenszykluskosten werden nach folgender Formel berechnet:

$$TCO = C_T + A \times P_0 + B \times P_k$$

Die einzelnen Terme sind folgendermassen definiert:

C_T : Anschaffungspreis in CHF

A-Faktor: Kapitalisationsfaktor für Leerlaufverluste (CHF/W) resp. NPV (net present value) für Leerlaufverluste.

B-Faktor: Kapitalisationsfaktor für Lastverluste (CHF/W) resp. NPV (net present value) für Lastverluste

Mit folgenden Werten wurde gerechnet (Umrechnung € in CHF: 1€ = 1.2CHF)

	Europa	Schweiz	BAT
Lebensdauer	40 Jahre	40 Jahre	40 Jahre
Anschaffungspreis	6'120€ ¹³ (7500CHF)	10'000CHF	13'000CHF
Energiekosten	0.13CHF/kWh	0.13CHF/kWh	0.13CHF/kWh
Zinssatz	4%	4%	4%
Durchschnittlich installierte Nennleistung P	400kVA	400kVA	400kVA
Leerlaufverluste P_0	750W	450W	240W
Lastverluste P_k	4600W	3400W	3100W
Betriebsstunden (mittlere Auslastung)	4800h	4800h	4800h

Tabelle 12-2: Grundlage zur Berechnung TCO Vergleich Europe Schweiz

Diese Werte dienen als Grundlage für die TCO-Berechnung. Folgende Life Cycle Costs konnten errechnet werden:

	Europa	Schweiz	BAT
TCO	38'608CHF	30'641 CHF	27'981CHF
A-Faktor	22.54CHF/W	22.54CHF/W	22.54 CHF/W
B-Faktor	3.09CHF/W	3.09CHF/W	3.09CHF/W

Tabelle 12-3: Resultate TCO-Berechnung

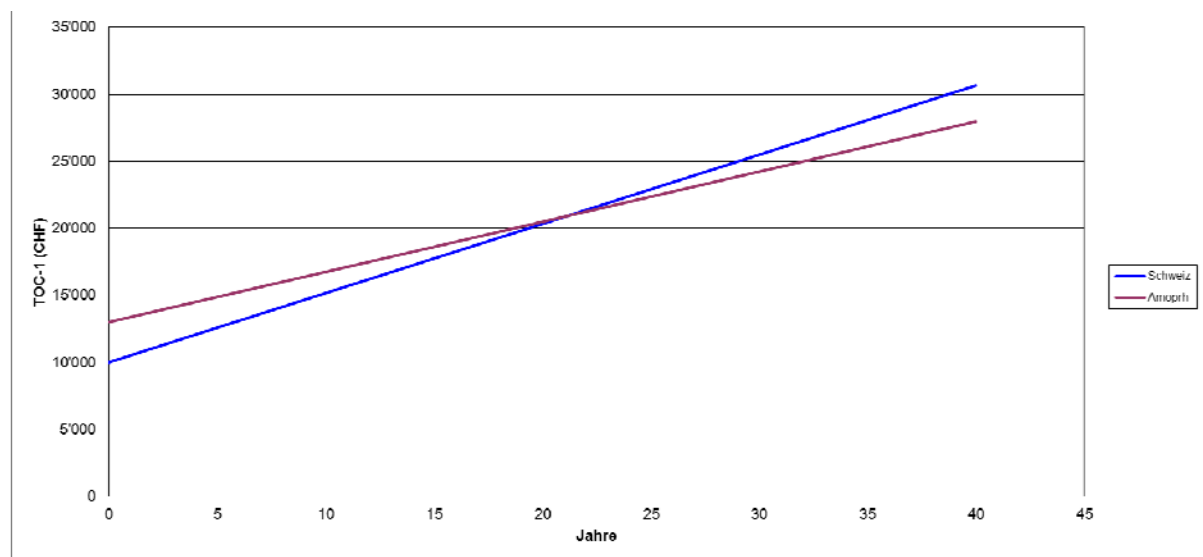


Abb 12-1: grafische Darstellung des TCO für einen Transformator mit amorphen Kernmaterial (BAT) und durchschnittlich installierten Transformatoren der gleichen Klasse in der Schweiz: Schweiz versus BAT

Grafische Darstellung TCO für Europa im Vergleich zu einem BAT-Transformator

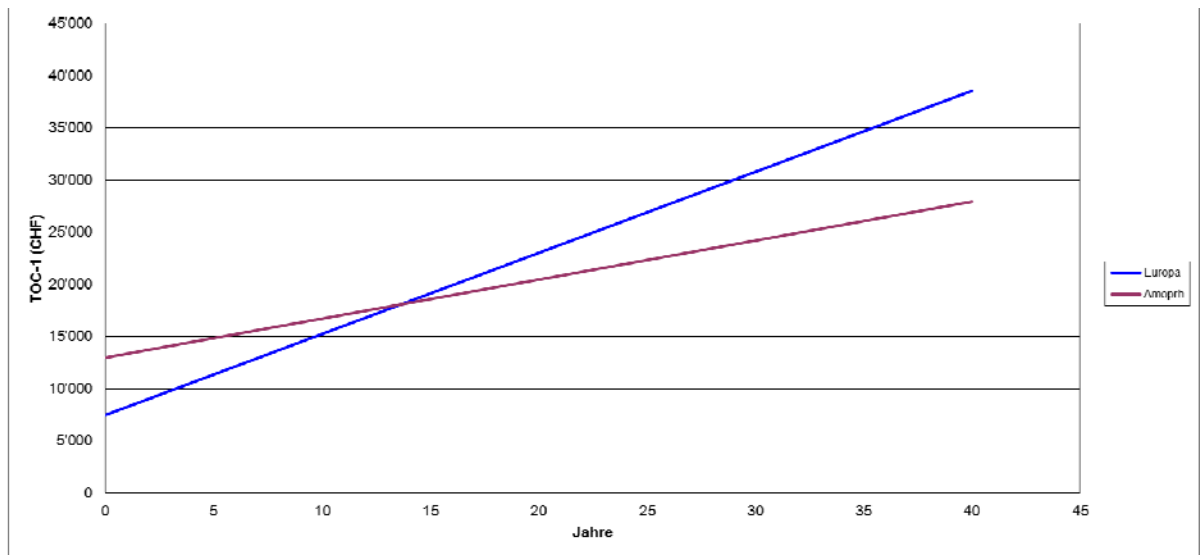


Abb 12-2: grafische Darstellung des TCO für einen Transformator mit amorphen Kernmaterial (BAT) und durchschnittlich installierten Transformatoren der gleichen Klasse in Europa: Europa versus BAT

Ein amorpher Transformator einzusetzen macht sowohl für die Schweiz wie auch für Europa Sinn. Die TCO-Kosten sind für einen amorphen Transformator in jedem Fall tiefer. In der Schweiz nach ca. 20 Jahren, in Europa nach ca. 15 Jahren übersteigen die Lebenszyklus für einen bisherigen Transformator diejenigen eines amorphen (Schnittpunkt der Grafiken in Abb 16-1 und 16-2).