



Bericht vom 5. Mai 2026

Marktstudie zu effizienten Transformatoren



Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Leistungstransformator_neu.jpg [Neuer Leistungstransformator]

Datum: 5. Mai 2026

Ort: Windisch

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmerin:

Fachhochschule Nordwestschweiz
Hochschule für Technik und Umwelt
Institut für Elektrische Energietechnik
Klosterzelgstrasse 2, 5210 Windisch
www.fhnw.ch/iee

Autor:

Christian Stamm, christian.stamm@fhnw.ch

BFE-Begleitgruppe:

Frédéric Renkens, frederic.renkens@bfe.admin.ch

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

Bundesamt für Energie BFE

Pulverstrasse 13, CH-3063 Ittigen; Postadresse: Bundesamt für Energie BFE, CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	4
Zusammenfassung	5
Résumé	5
Riassunto	6
1 Effizienzangaben von Transformatoren	7
1.1 Verluste	7
1.1.1 Leerlaufverlust	7
1.1.2 Lastverlust	7
1.1.3 Kühlungsverlust	7
1.2 Effizienz	7
1.3 Peak Efficiency Index	8
2 Vorgehen zur Datenerhebung	9
2.1 Umfrage	9
2.2 Publierte Datenblätter	10
2.3 Klassifizierung der Transformatoren	10
2.4 Erhaltene Daten	10
3 Ergebnisse	12
3.1 Mittelleistungs-Transformatoren	12
3.1.1 Korrekturfaktoren	12
3.1.2 Relative Differenz der Verlustwerte	13
3.1.3 Anzahl Hersteller je Leitungsstufe	14
3.1.4 Einfluss des Kernmaterials	16
3.1.5 Einfluss des Wicklungsmaterials	17
3.1.6 Mögliche erhöhte Anforderungen	18
3.1.7 Abmessungen verbesserter Transformatoren	19
3.1.8 Gewicht verbesserter Transformatoren	21
3.1.9 Schalldruckpegel verbesserter Transformatoren	22
3.1.10 Kühlungsart	23
3.1.11 Peak Efficiency Index	23
3.2 Grossleistungs-Transformatoren	24
4 Diskussion	25
4.1 Allgemeine Trends	25

4.2	Mittelleistungs-Transformatoren	25
4.2.1	Flüssigkeitsgefüllte Transformatoren	25
4.2.2	Trockentransformatoren.....	26
4.2.3	Fazit Mittelleistungs-Transformatoren	26
4.3	Grossleistungstransformatoren.....	28
	Literaturverzeichnis	30
	Anhang A: Tabelle der angefragten Parameter	31
	Anhang B: Anonymisierte Marktdaten.....	32

Abkürzungsverzeichnis

BFE	Bundesamt für Energie
EnEV	Energieeffizienzverordnung
FHNW	Fachhochschule Nordwestschweiz
k	Lastfaktor
k_PEI	Lastfaktor für maximale Effizienz
P0	Leerlaufverlust
Pc0	Leistung des Kühlsystems im Leerlaufbetrieb
Pck	Zusätzliche Leistung des Kühlsystems im Betrieb
Pk	Lastverlust (Kurzschlussverlust)
Pn	Bemessungsleistung
PEI	Peak efficiency index

Zusammenfassung

Die vorliegende Marktstudie fasst die Ergebnisse einer Umfrage unter Herstellern von Leistungstransformatoren zusammen. Ziel war es, einen umfassenden Überblick über die in der Schweiz erhältlichen Transformatoren und deren Energieeffizienz zu gewinnen, als Grundlage für die gezielte Ausgestaltung von Förderprogrammen wie *ProKilowatt*. Da nicht alle angefragten Unternehmen Daten geliefert haben, wurden zusätzlich öffentlich verfügbare technische Datenblätter ausgewertet, sofern sie die erforderlichen Angaben enthielten. Insgesamt enthält die Studie Energieeffizienzdaten von knapp 300 Leistungstransformatoren.

Im Mittelleistungsbereich bis 3'150 kVA weisen die meisten Transformatoren genau die in der Energieeffizienzverordnung festgelegten Verlustgrenzwerte auf. Zur weiteren Verringerung der Verluste können der Einsatz von amorphen Magnetkernen sowie verbesserte Wicklungen beitragen. Bereits sind einige effizienzgesteigerte Transformatoren auf dem Markt, die aber noch in der Minderheit sind. In einem Szenario wird in einem zweiten Teil des Berichts eine Reduktion der Verlustgrenzwerte vorgeschlagen, um effizienzverbesserte Transformatoren für mögliche Förderprogramme zu identifizieren.

Im Grossleistungsbereich, in dem eine gesteigerte Effizienz besonders grosse Energieeinsparungen ermöglichen würde, liegen die Werte bereits über den gesetzlichen Vorgaben. Der Markt besteht hier überwiegend aus Einzelanfertigungen, deren Effizienz vertraglich festgelegt wird, inklusive Wirtschaftlichkeitsberechnungen und Vertragsstrafen bei Nichterreichen der Zielwerte. Die geringe Zahl an Rückmeldungen erlaubt keine Handlungsempfehlung zu möglichen Anforderungen für Förderprogramme von Grossleistungstransformatoren.

Résumé

La présente étude de marché synthétise les résultats d'une enquête menée auprès des fabricants de transformateurs de puissance. Son objectif est de dresser un panorama des modèles disponibles sur le marché suisse et de leur performance énergétique, afin de fournir une base solide pour la définition ciblée de programmes d'encouragement tels que *ProKilowatt*. Comme toutes les entreprises sollicitées n'ayant pas transmis de données, des fiches techniques publiquement accessibles ont également été analysées lorsque celles-ci comportaient les informations requises. Au total, l'étude réunit des données d'efficacité énergétique portant sur près de 300 transformateurs de puissance.

Dans la gamme moyenne, jusqu'à 3'150 kVA, la plupart des transformateurs présentent des seuils de pertes identiques à ceux fixés par l'Ordonnance sur l'efficacité énergétique. Pour réduire davantage ces pertes, l'utilisation de noyaux magnétiques amorphes ainsi que l'optimisation des enroulements peuvent apporter une contribution significative. Des transformateurs avec une efficacité plus élevée sont déjà présents sur le marché, mais ils restent minoritaires. Dans la seconde partie du rapport, une réduction des seuils de pertes est proposée dans le cadre d'un scénario afin d'identifier les transformateurs à rendement amélioré susceptibles d'être éligibles à d'éventuels programmes de subventionnement.

Dans le segment haute puissance, où une efficacité accrue se traduirait par des économies d'énergie substantielles, les niveaux mesurés dépassent déjà les prescriptions légales. Le marché est dominé par

des fabrications sur mesure, dont l'efficacité est définie par contrat, intégrée dans une analyse de rentabilité et assortie de pénalités en cas de non-conformité. Compte tenu du faible nombre de réponses concernant ce segment, aucune recommandation n'est formulée à ce stade quant aux exigences minimales pour des programmes de subventionnement des transformateurs de grande puissance.

Riassunto

Il presente studio di mercato sintetizza i risultati di un'indagine condotta tra i produttori di trasformatori di potenza. Il suo obiettivo è quello di tracciare un quadro generale dei modelli disponibili sul mercato svizzero e delle loro prestazioni energetiche, al fine di fornire una solida base per la definizione mirata di programmi di incentivazione come ProKilowatt. Poiché non tutte le aziende interpellate hanno fornito i dati richiesti, sono state analizzate anche le schede tecniche accessibili al pubblico, purché contenessero le informazioni richieste. In totale, lo studio raccoglie dati sull'efficienza energetica relativi a circa 300 trasformatori di potenza.

Nella gamma media, fino a 3'150 kVA, la maggior parte dei trasformatori presenta soglie di perdita identiche a quelle fissate dall'Ordinanza sull'efficienza energetica. Per ridurre ulteriormente queste perdite, l'utilizzo di nuclei magnetici amorfi e l'ottimizzazione degli avvolgimenti possono dare un contributo significativo. Trasformatori con un'efficienza più elevata sono già presenti sul mercato, ma rimangono una minoranza. Nella seconda parte del rapporto viene proposta una riduzione dei limiti di perdita nell'ambito di uno scenario, al fine di identificare i trasformatori a rendimento migliorato che potrebbero essere ammissibili a eventuali programmi di sovvenzionamento.

Nel segmento dell'alta potenza, dove una maggiore efficienza si tradurrebbe in notevoli risparmi energetici, i livelli misurati superano già i requisiti di legge. Il mercato è dominato da prodotti su misura, la cui efficienza è definita contrattualmente, integrata in un'analisi di redditività e accompagnata da penali in caso di non conformità. Considerato il numero esiguo di risposte relative a questo segmento, in questa fase non viene formulata alcuna raccomandazione in merito ai requisiti minimi per i programmi di sovvenzionamento dei trasformatori di grande potenza.

1 Effizienzangaben von Transformatoren

1.1 Verluste

In einem Transformator treten elektrischen Verluste auf und definieren dadurch die Effizienz. Es wird unterschieden zwischen Leerlaufverlust P_0 und Lastverlust (oft auch «Kurzschlussverlust») P_k . Die für eine allfällige Kühlung notwendige elektrische Leistung zählt in der Energiebilanz ebenfalls zu den Verlusten.

1.1.1 Leerlaufverlust

Im Leerlauf steht der Transformator zwar unter Spannung, es ist jedoch an der Sekundärseite keine Last angeschlossen. Die auftretenden Leerlaufverluste werden mit P_0 bezeichnet, sie sind bedingt durch die Ummagnetisierungsprozesse im Transformatorkern.

1.1.2 Lastverlust

Die Lastverluste P_k treten auf, wenn der Transformator im Betrieb ist und Energie überträgt. Dem durch die Windungen fließende Strom stellt sich ein elektrischer Widerstand entgegen, was zu Verlusten führt, die quadratisch von der Stärke des Stromes abhängen.

1.1.3 Kühlungsverlust

Falls bei grösseren Transformatoren eine elektrisch betriebene Kühlung vorhanden ist, wird die dazu notwendige Leistung auch als Verlust angesehen. Es wird unterschieden zwischen Kühlungsverlust im Leerlauf P_{c0} und zusätzlichen Verlusten im Betrieb P_{ck} .

1.2 Effizienz

Die Effizienz des Transformators gibt an, wie gross der Anteil der nutzbaren Leistung ist im Vergleich zur verwendeten Leistung. Sie ist als sogenannter «Efficiency Index» EI folgendermassen definiert:

$$EI = \frac{\text{übertragene Scheinleistung} - \text{Verlustleistung}}{\text{übertragene Scheinleistung}}$$

Die Auslastung des Transformators ist gegeben durch den Lastfaktor k (Verhältnis des Eingangsstroms zum nominalen Strom, üblicherweise ist k zwischen 0 und 1). Die übertragene Scheinleistung ist gegeben durch das Produkt $k \cdot P_n$, wobei P_n die Bemessungsleistung bezeichnet. Die Effizienz ist abhängig vom Lastfaktor, gemäss Methode A in der Norm IEC 60076-20:

$$EI(k) = \frac{kP_n - P_0 - k^2P_k - P_{c0} - P_{ck}(k)}{kP_n}$$

Eine Beispielkurve ist in Abbildung 1 zu sehen.

1.3 Peak Efficiency Index

Die Effizienzkurve $EI(k)$ weist ein Maximum auf, das mit «Peak Efficiency Index» PEI bezeichnet wird. Vor allem bei Grossleistungstransformatoren wird der PEI an Stelle der einzelnen Verluste als Kriterium für die Energieeffizienz genutzt. In Abbildung 1 ist der PEI als gestrichelte Linie eingezeichnet. Er wird wie folgt berechnet:

$$PEI = 1 - \frac{2}{P_n} \sqrt{(P_0 + P_{c0} + P_{ck}(k)) \cdot P_k}$$

Der zum Maximum gehörende Lastfaktor wird mit k_{PEI} bezeichnet. Für diesen Lastfaktor erreicht der Transformator seine beste Effizienz. k_{PEI} wird über folgende Formel berechnet:

$$k_{PEI} = \sqrt{\frac{P_0 + P_{c0} + P_{ck}}{P_k}}$$

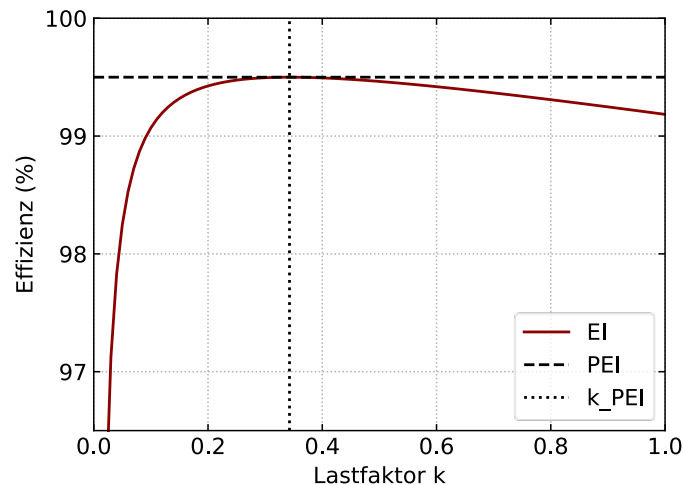


Abbildung 1: Effizienzindex EI in Prozent als Funktion des Lastfaktors. Eingezeichnet sind als gestrichelte Linie das Effizienz-Maximum PEI und als gepunktete Linie der dazugehörige Lastfaktor k_{PEI} .

2 Vorgehen zur Datenerhebung

2.1 Umfrage

Das zentrale Element dieser Marktstudie war eine Umfrage unter Herstellern von Leistungstransformatoren mit dem Ziel, die momentan erhältlichen Transformatoren mit ihren technischen Parametern in Erfahrung zu bringen. Die gesamte Liste aller angefragten Werte ist im Anhang wiedergegeben. Von insgesamt 23 angeschriebenen Firmen haben sechs Firmen die angefragten Angaben geliefert, wobei in einigen Fällen nur Daten zu Mittelleistungstransformatoren mitgeteilt wurden. Zusammen mit den unten erwähnten publizierten Datenblättern bilden sie die Datenbasis für den vorliegenden Bericht. Die Datenlage erlaubt einen guten Überblick über die auf dem schweizerischen Markt verfügbaren Leistungstransformatoren, ohne jedoch den Anspruch zu erheben, alle Geräte zu berücksichtigen. Die Liste der Hersteller, deren Daten in die Studie einfließen, ist in Tabelle 1 wiedergegeben.

Tabelle 1: In der Studie berücksichtigte Hersteller von Leistungstransformatoren und Quelle der Angaben.

Herstellername	Datenquelle
Hitachi Energy	Umfrage
J. Schneider Elektrotechnik	Umfrage
Kolektor	Umfrage
Rauscher & Stöcklin	Umfrage
Siemens Energy	Umfrage
Tesar	Umfrage
Legrand	Internet
Schneider Electric	Internet
SEA	Internet
SGB-SMIT	Internet
Wilson	Internet

2.2 Publierte Datenblätter

Auf Internet-Seiten der Herstellerfirmen werden Transformatoren meistens sehr detailliert beworben, jedoch sind nur selten Informationen zu deren Energieverlust zu finden. Von fünf Firmen enthielten die im Internet publizierten Daten alle notwendigen Angaben und konnten in dieser Studie verwendet werden. Auch sie sind in der Tabelle 1 aufgeführt. Haben Firmen auch in der Umfrage Daten geliefert, so wurden die Antworten aus der Umfrage bevorzugt und die frei erhältlichen Datenblätter nur dann verwendet, wenn keine Diskrepanzen auftraten. Es wurden nur Geräte aufgenommen, die die geltende Energieeffizienz-Richtlinie laut EnEV erfüllen.

2.3 Klassifizierung der Transformatoren

In den Effizienzvorschriften des Bundes wird auf die in der EU geltenden Regeln verwiesen. Dort werden Transformatoren nach der Bemessungsleistung sowie der maximalen Spannung klassifiziert und in Klein- Mittel- und Grossleistungstransformatoren unterschieden. Zudem wird zwischen flüssigkeitsgefüllten Transformatoren und Trockentransformatoren unterschieden, wobei zu jedem der beiden Typen eigene Grenzwerte für die Effizienzberechnung bestehen. Folgende Begriffe sind in der Verordnung (EU) Nr. 548/2014, aktualisiert in der Verordnung 2019/1783 definiert:

- «**Mittelleistungstransformator**» bezeichnet einen Leistungstransformator, bei dem alle Wicklungen eine Nennleistung bis zu 3150 kVA aufweisen, mit einer höchsten Spannung für Betriebsmittel über 1,1 kV bis zu 36 kV.
- «**Großleistungstransformator**» bezeichnet einen Leistungstransformator mit mindestens einer Wicklung mit einer Nennleistung über 3150 kVA oder einer höchsten Spannung für Betriebsmittel über 36 kV.
- «**Flüssigkeitsgefüllter Transformator**» bezeichnet einen Transformator, in dem der magnetische Kreis und die Wicklungen in Flüssigkeit getaucht sind.
- «**Trockentransformator**» bezeichnet einen Transformator, in dem der magnetische Kreis und die Wicklungen nicht in Isolierflüssigkeit getaucht sind.

2.4 Erhaltene Daten

In Tabelle 2 sind die Anzahl an erhaltenen Datensätze in den verschiedenen Kategorien zusammengefasst. Abbildung 2 und Abbildung 3 schlüsseln die Daten nach Bemessungsleistung auf.

Tabelle 2: Anzahl der Transformatoren-Daten, aufgeschlüsselt nach Leistungskategorie und Transformatortyp.

Leistungskategorie	Anzahl flüssigkeitsgefüllte Transformatoren	Anzahl Trockentransformatoren
Mittelleistung	78	187
Grossleistung	33	0

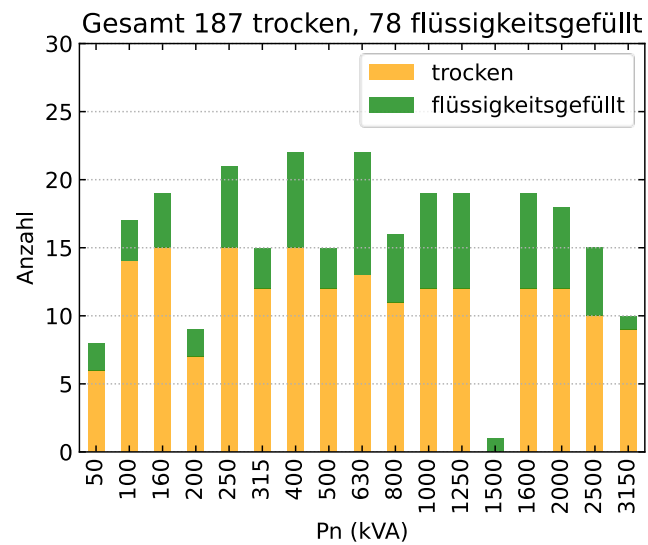


Abbildung 2: Anzahl Datensätze für Mittelleistungstransformatoren je Bemessungsleistung P_n , unterschieden für die zwei Typen Trockentransformatoren und flüssigkeitsgefüllte Transformatoren.

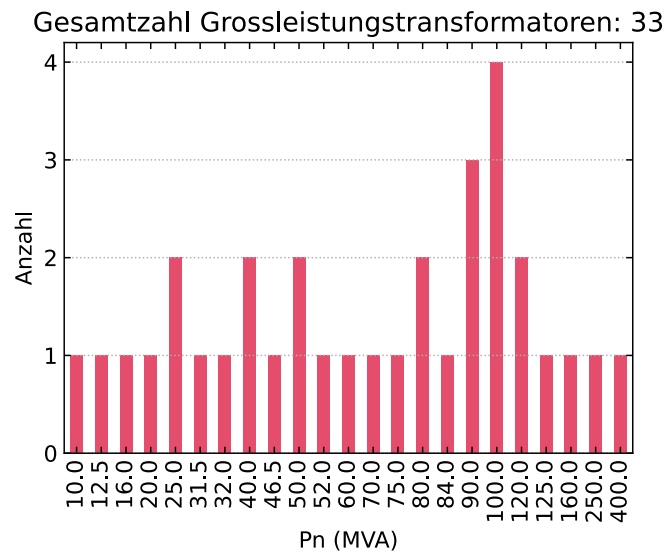


Abbildung 3: Anzahl Datensätze für Hochleistungstransformatoren je Bemessungsleistung P_n (alle flüssigkeitsgefüllt).

3 Ergebnisse

3.1 Mittelleistungs-Transformatoren

Für Mittelleistungs-Transformatoren gelten gemäss EnEV, die auf Verordnung 2019/1783 der EU-Kommission verweist, Obergrenzen für Leerlauf- und Lastverluste (P_0 und P_k). Dabei sind die Werte unterschiedlich für flüssigkeitsgefüllte Transformatoren und für Trockentransformatoren. In Abbildung 4 sind die Verlustdaten als Funktion der Bemessungsleistung P_n aufgetragen. Punkte bezeichnen jeweils einen Datensatz aus dieser Studie, und gestrichelte Linien bezeichnen die ab Juli 2021 gültigen Grenzwerte des sogenannten «Tier2». Während die Anforderungen bezüglich der Lastverluste ähnlich sind für flüssigkeitsgefüllte Transformatoren und Trockentransformatoren, sind für letztere deutlich höhere Leerlaufverluste erlaubt. Für einige Transformatoren sind höhere Grenzwerte vorgesehen, die durch Korrekturfaktoren berücksichtigt werden. Die entsprechenden Geräte dürfen wie in Abschnitt 3.1.1 beschrieben höhere Verluste aufweisen und sind in Abbildung 4 durch weiss ausgefüllte Punkte gekennzeichnet.

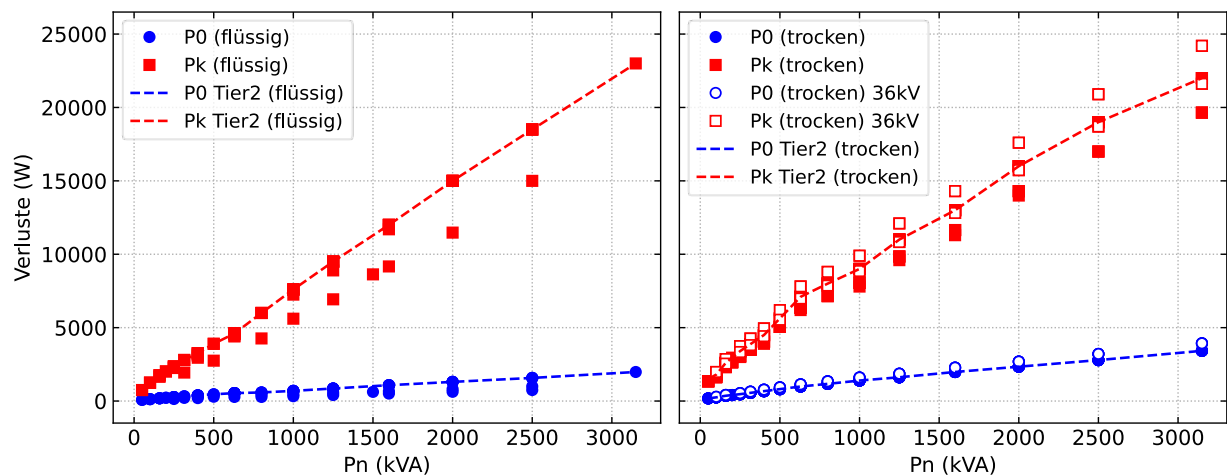


Abbildung 4: Leerlauf- und Lastverluste von flüssigkeitsgefüllten Transformatoren (links) und Trockentransformatoren (rechts). Gestrichelte Linien zeigen die gemäss Verordnung geltenden Obergrenzen ab 2021 (Tier2). Weiss gefüllte Datenpunkte bezeichnen Trockentransformatoren mit Betriebsspannung 36 kV, für die eine Korrektur des Grenzwerts angewendet werden muss (siehe Abschnitt 3.1.1).

3.1.1 Korrekturfaktoren

Die Verordnung 2019/1783 sieht vor, dass die Obergrenzen für Leerlauf- und Lastverluste in bestimmten Fällen um klar definierte Prozentsätze angehoben werden. Dies betrifft im vorhandenen Datensatz die folgende Situation:

- Höchste Primärspannung für Betriebsmittel $U_m = 36$ kV.

Insgesamt 27 Trockentransformatoren haben eine Primärspannung von 36 kV und erfüllen somit die Bedingung für eine Korrektur. Für sie werden die zulässigen Verlustobergrenzen wie folgt angehoben:

- $P_0 + 15\%$
- $P_k + 10\%$.

Die nun folgenden Abbildungen der relativen Verbesserung verwenden die angehobenen Verlustobergrenzen.

Diese Korrektur ist notwendig, sodass die Transformatoren regelkonform sind: Bei 13 der 27 Transformatoren würden zwar die Tier2-Obergrenzen für die Lastverluste P_k eingehalten, jedoch nicht diejenige für die Leerlaufverluste P_0 . Die restlichen 14 Transformatoren würden ohne Korrekturfaktor weder die Obergrenze von P_k noch diejenige von P_0 einhalten. Zusammenfassend würde kein Transformator mit einer Primärspannung von 36 kV die Verordnung erfüllen, falls die Korrektur nicht angewendet werden würde.

3.1.2 Relative Differenz der Verlustwerte

Die relative Differenz der Verlustwerte zu den vorgeschriebenen Obergrenzen ist in Abbildung 5 zu sehen. Die Differenzen wurden folgendermassen berechnet:

$$\text{Relative Verbesserung (\%)} = \frac{\text{Verlust}_{\text{Tier2}} - \text{Verlust}_{\text{Trafo}}}{\text{Verlust}_{\text{Tier2}}} * 100$$

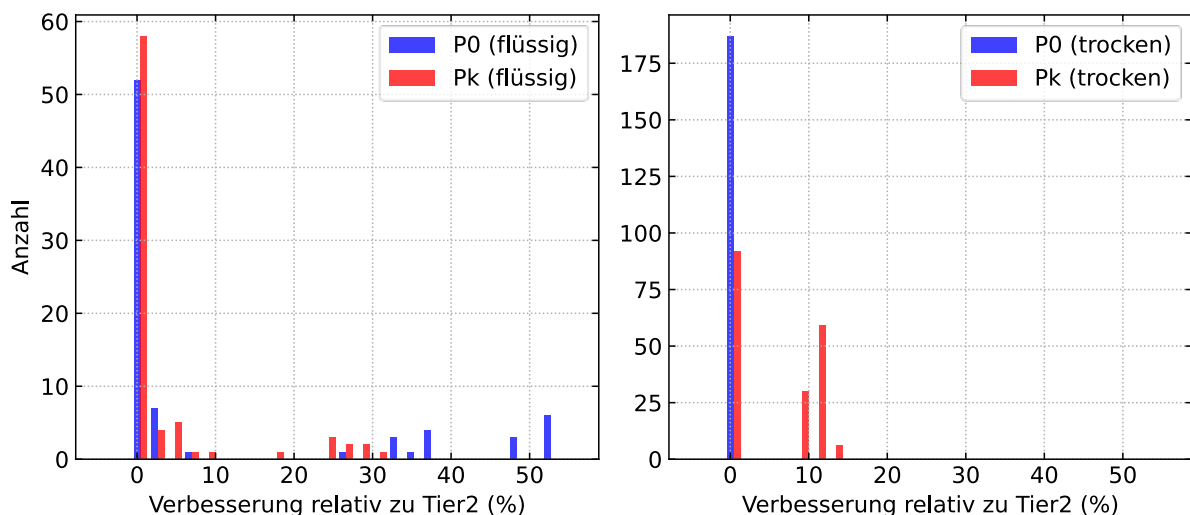


Abbildung 5: Histogramme der relativen Differenz zwischen Obergrenze (Tier2) und Verlustwert des Transformators, links flüssigkeitsgefüllt und rechts trocken. Die Häufigkeit der Leerlauf- und Lastverluste sind durch blaue bzw. rote Balken dargestellt.

Für diese Berechnung wurden die erlaubten Verlustwerte (Tier2) zuvor gemäss Abschnitt 3.1.1 angepasst, falls dies für den entsprechenden Transformator vorgesehen ist. Es ist eine deutliche Häufung bei Differenz 0 zu sehen: Die allermeisten Transformatoren halten genau die erforderliche Obergrenze

der Verluste ein. Im Weiteren liegen die meisten Abweichungen im Bereich bis 15%. Eine Ausnahme bilden Maschinen mit etwa 30-50% verbesserten Leerlaufverlusten bei flüssigkeitsgefüllten Transformatoren. Die entsprechenden Transformatoren setzen amorphes Kernmaterial ein, worauf später noch genauer eingegangen wird.

3.1.3 Anzahl Hersteller je Leistungsstufe

Im Folgenden wird die Anzahl der Hersteller ausgewertet, die Transformatoren mit Leerlauf- und Lastverlusten anbieten, die geringer sind als die Werte im Tier2. In Abbildung 6 ist die Anzahl Hersteller von flüssigkeitsgefüllten Transformatoren und in Abbildung 7 die Anzahl Hersteller von Trockentransformatoren für jede Leistungsstufe einzeln dargestellt. Dabei wurde die Gesamtzahl je Leistungsstufe aufgeschlüsselt je nach dem, wie stark die Verlustwerte P_0 und P_k von den geforderten Werten in der Tier2 verschieden sind.

Gemäss Abbildung 6 zeigt die Mehrzahl der flüssigkeitsgefüllten Transformatoren keine Verbesserung gegenüber den geforderten Tier2-Werten. Die ist ersichtlich an der Häufung der Punkte für mehrere Hersteller bei relativer Verbesserung null. Für die Leerlaufverluste P_0 gibt es ab einer Mindestleistung von 250 kVA zu fast jedem Leistungswert mindestens einen Hersteller mit 30-50% Verbesserung, was in einigen Fällen einer Halbierung des Leerlaufverlusts entspricht. Insgesamt handelt es sich um drei Hersteller, die amorphes Kernmaterial einsetzen, jedoch nicht alle den gesamten Leistungsbereich abdecken. Bei den Lastverlusten P_k in flüssigkeitsgefüllten Transformatoren sind vereinzelte Verbesserungen von 20-30% zu beobachten.

Konkret bieten die drei Hersteller von Transformatoren mit amorphem Kern eine der folgenden Verbesserungen:

- Verbesserung von P_0 um ~50%, P_k ist unverändert,
- Verbesserung von P_0 um ~45%, und P_k um ~5%,
- Verbesserung von P_0 um ~35%, und P_k um ~20%.

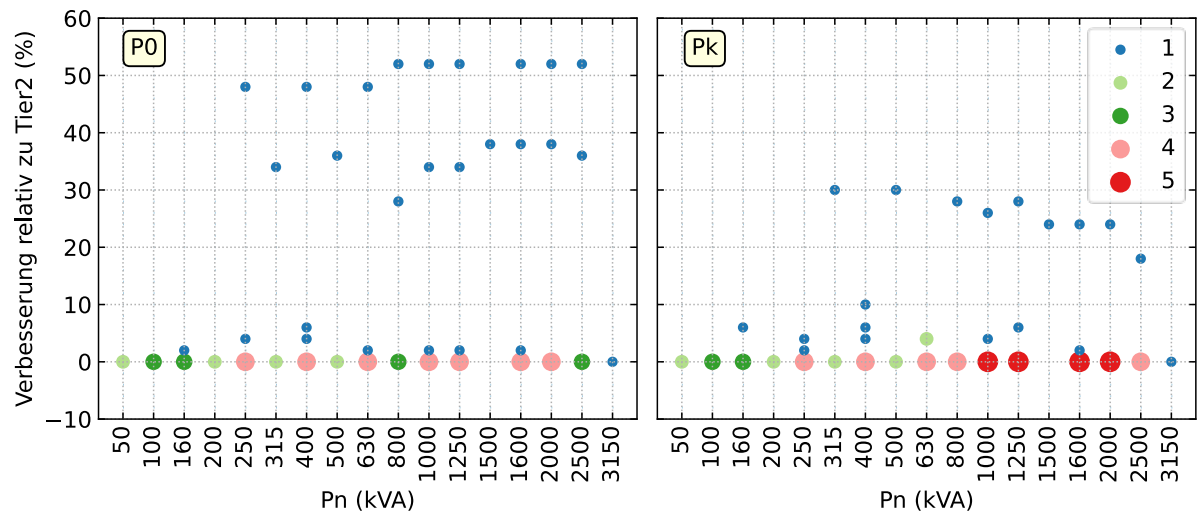


Abbildung 6: Flüssigkeitsgefüllte Transformatoren: Relative Differenz der Leerlauf- und der Lastverluste bezüglich der Tier2 Grenzwerte. Die Anzahl Hersteller für die entsprechende Leistungsstufe wird durch Farbe und Grösse der Punkte angezeigt, die Skala ist in der rechten Figur eingeblendet.

Bei Trockentransformatoren ist in Abbildung 7 eine noch stärkere Häufung ohne Verbesserung ersichtlich. Die Leerlaufverluste P_0 folgen gesamthaft über alle Leistungswerte exakt den vorgeschriebenen Tier2-Werten ohne mögliche Verbesserungen. Bei den Lastverlusten hingegen gibt es zwei Hersteller von Geräten mit 8-13% verbesserten (geringeren) Lastverlusten P_k , wobei ein Hersteller zu jeder Bemessungsleistung P_n verschiedene Modelle mit jeweils unterschiedlichen Oberspannungs-Werten anbietet.

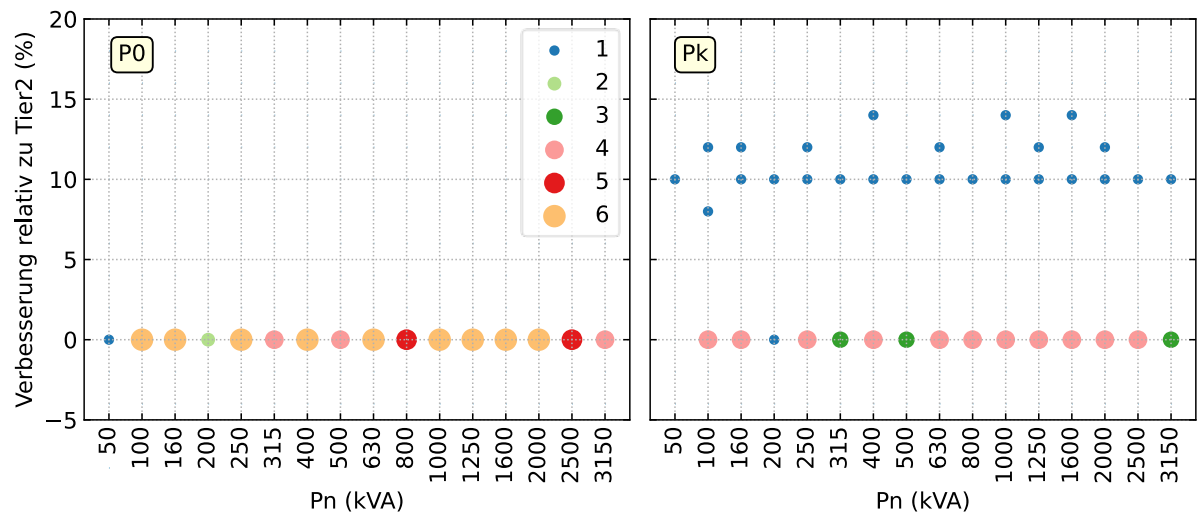


Abbildung 7: Trockentransformatoren: Relative Differenz der Leerlauf- und der Lastverluste bezüglich der Tier2 Grenzwerte. Die Anzahl Hersteller für die entsprechende Leistungsstufe wird durch Farbe und Grösse der Punkte angezeigt.

3.1.4 Einfluss des Kernmaterials

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der verwendeten Technologie im Transformatorbau beschrieben, genauer die Abhängigkeit der Verluste vom verwendeten Magnetkern-Material. Als Standardmaterial wird Elektroblech (electrical steel) oder dessen verlustärmere Variante kornorientiertes Elektroblech (grain-oriented electrical steel, GOES), verwendet. Zunehmend werden auch amorphe Magnetmaterialien eingesetzt, welche geringere Ummagnetisierungsverluste und damit geringere P_0 zur Folge haben. Abbildung 8 zeigt die Anteile der verschiedenen eingesetzten Materialien, wobei einige Hersteller das Material nicht spezifiziert haben.

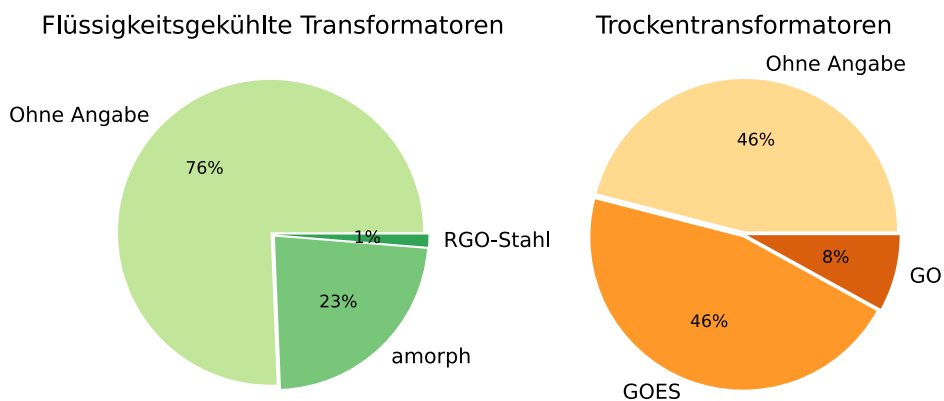


Abbildung 8: Verteilung des Magnetkern-Materials von flüssigkeitsgekühlten und Trockentransformatoren.

Bei flüssigkeitsgekühlten Transformatoren werden in Abbildung 9 die Verbesserungen von Leerlauf- und Lastverlusten aufgeschlüsselt nach Material: Der Einsatz von amorphen Kernmaterial ermöglicht Verbesserungen von 30-50% bei P_0 , und bis zu 30% bei P_k .

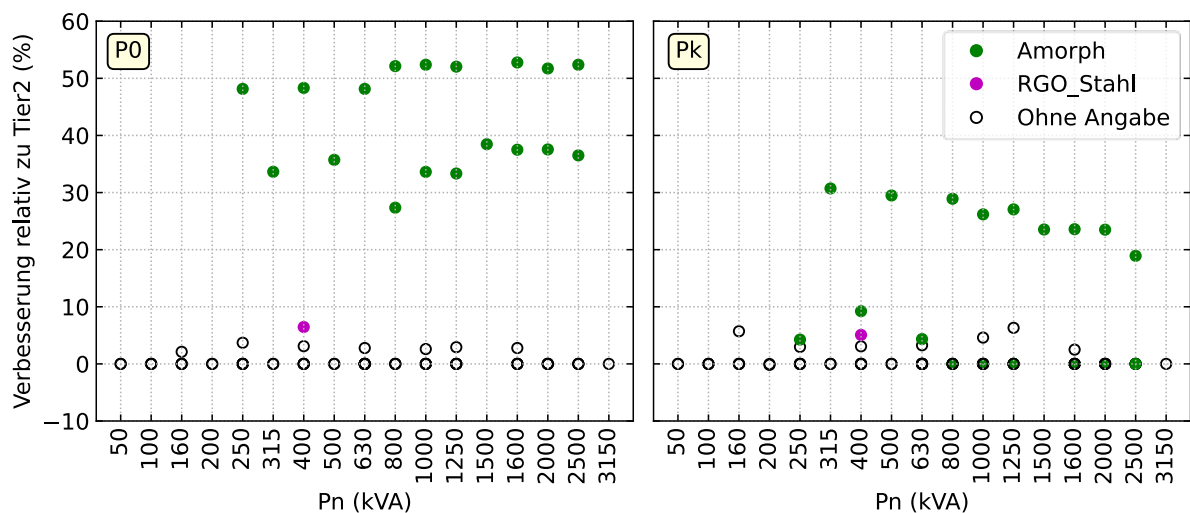


Abbildung 9: Relative Verbesserung der Verluste von flüssigkeitsgekühlten Transformatoren, unterschieden nach Kernmaterial.

Bei Trockentransformatoren sind die Bezeichnungen GO und GOES als gleichbedeutend anzusehen, fast die Hälfte der Geräte hat jedoch keine Angaben zum Kernmaterial. Über den Einsatz von amorphen Materialien ist bei diesem Transformatortyp nichts bekannt. Wie in Abbildung 10 ersichtlich ist, kann für Trockentransformatoren keine Materialabhängigkeit der Verluste gefunden werden, da die Verbesserungen in P_k nicht eindeutig einer einzelnen Materialklasse zugeordnet werden können.

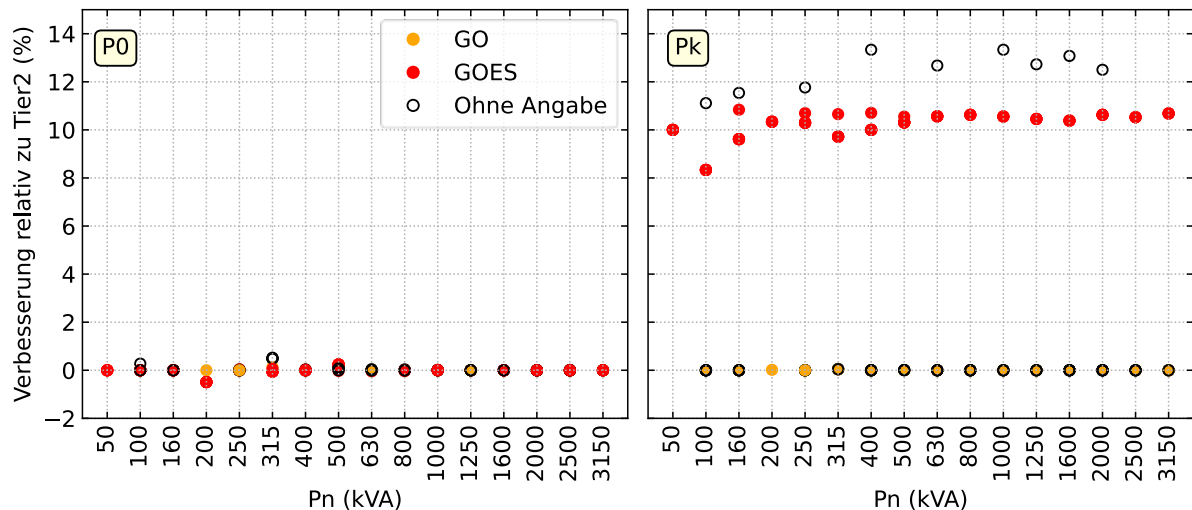


Abbildung 10: Relative Verbesserung der Verluste von Trockentransformatoren, unterschieden nach Kernmaterial.

3.1.5 Einfluss des Wicklungsmaterials

Auch das Wicklungsmaterial, Kupfer oder Aluminium, beeinflusst die Verluste in Transformatoren. Der geringere ohmsche Widerstand von Kupfer favorisiert dieses Material gegenüber Aluminium im Hinblick auf Leitungsverluste, die vor allem unter Last auftreten und sich besonders im Wert P_k niederschlagen. Die Verteilung der Wicklungsmaterialien ist in Abbildung 11 für die beiden Transformatorentypen dargestellt. Es fällt auf, dass für keinen Trockentransformator Kupfer als Wicklungsmaterial angegeben ist.

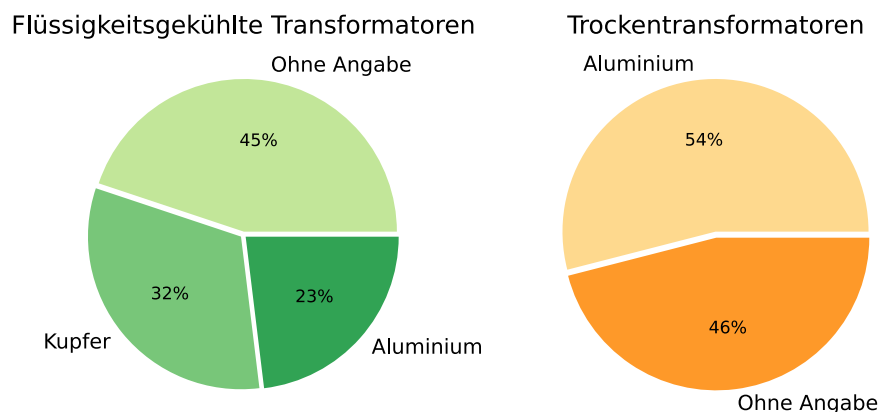


Abbildung 11: Verteilung des Wicklungsmaterials auf Transformatoren, links flüssigkeitsgekühlt, rechts trocken.

Mit den vorhandenen Daten ist nur bei flüssigkeitsgekühlten Transformatoren ein Vergleich der Verluste der beiden Wicklungsmaterialien möglich. Das in Abbildung 12 gezeigte Ergebnis ist uneinheitlich: Während bei den Leerlaufverlusten P_0 die Transformatoren mit Kupfer-Wicklung am effizientesten sind, ist es bei den Lastverlusten P_k genau umgekehrt. Eine direkte Korrelation zwischen dem Wicklungsmaterial und der Effizienz des Transformators kann daher nicht beobachtet werden.

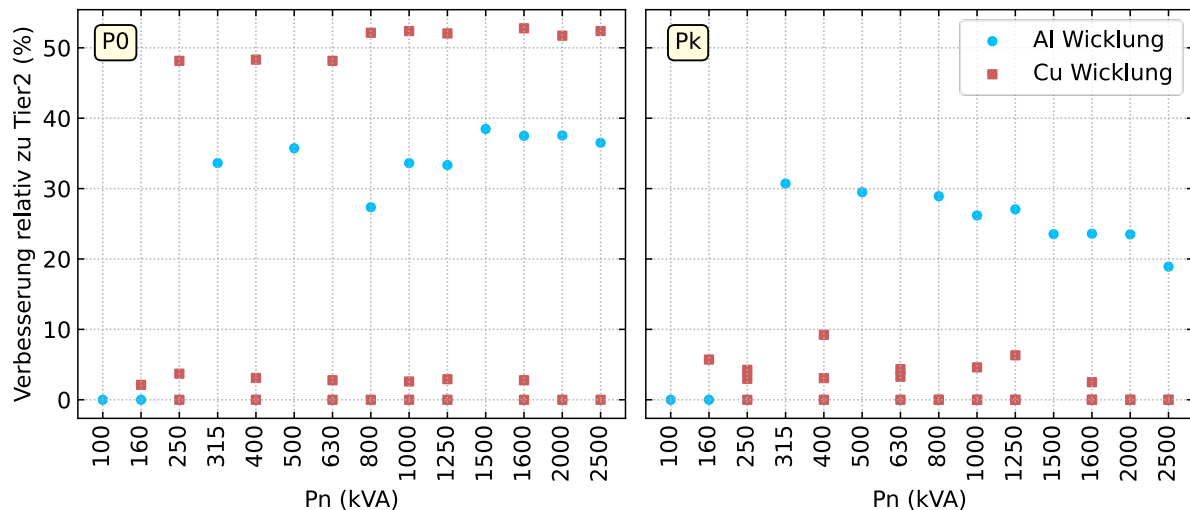


Abbildung 12: Verbesserung der Verlustwerte für flüssigkeitsgekühlte Transformatoren, aufgeschlüsselt nach Wicklungsmaterial.

3.1.6 Mögliche erhöhte Anforderungen

In den vorangegangenen Abschnitten wurden Transformatoren identifiziert, die niedrigere Verlustwerte aufweisen als in der geltenden Verordnung gefordert wird. Da aber sowohl die Leerlaufverluste P_0 als auch die Lastverluste P_k Grenzwerte aufweisen, müssen die Geräte jeweils die Grenzwerte für beide erfüllen. Im Folgenden wird ein mögliches Szenario von erhöhten Anforderungen verwendet, in welchem die Obergrenzen derart gesenkt werden, dass sie von genügend Transformatoren erfüllt werden (Abbildung 13), mit 1-2 verschiedenen Herstellern über dem gesamten Leistungsbereich (Abbildung 14):

- flüssigkeitsgekühlt P_0 – 30% P_k
- trocken P_0 P_k – 10%

Weitere Szenarien wären bei flüssigkeitsgekühlten Transformatoren denkbar, wie z.B. P_0 -45% oder P_0 -30% und P_k – 20%. In den folgenden Abschnitten, wird allerdings von den oben genannten Anforderungen ausgegangen.

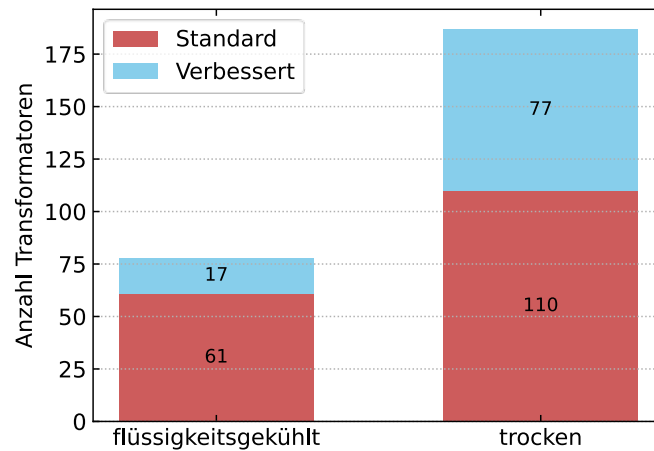


Abbildung 13: Anzahl der Transformatoren, die strengere Anforderungen als Tier2 erfüllen (Verbessert), sowie Anzahl die nur Tier2 erfüllen (Standard).

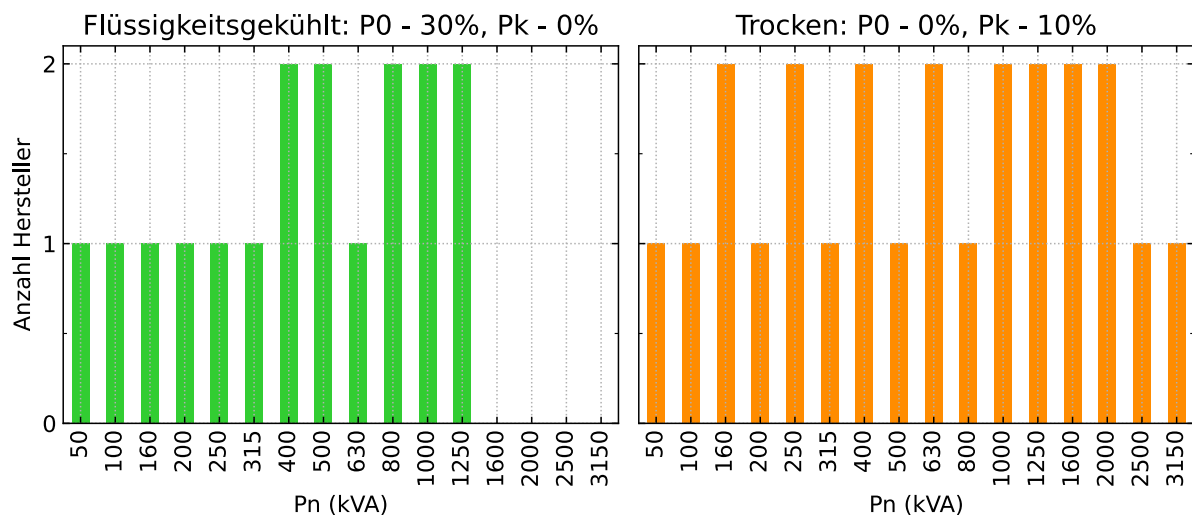


Abbildung 14: Anzahl Hersteller für Transformatoren mit erhöhten Anforderungen.

3.1.7 Abmessungen verbesserter Transformatoren

Um gemäss den Grenzwerten aus Abschnitt 3.1.6 verbesserte Transformatoren zu bauen, sind neben den oben erwähnten Änderungen an Kern- und Wicklungsmaterial ein neu dimensionierter Magnetkern, ein vergrößerter Wicklungsquerschnitt oder beide Massnahmen notwendig. Die dadurch veränderten Abmessungen werden als relativer Unterschied in Abbildung 15 gezeigt. Verbesserte flüssigkeitsgekühlte Transformatoren sind durchschnittlich 10-20% länger und 20-40% breiter, dafür 10% weniger hoch. Ein Blick in die Daten einzelner Geräte weist auf die Tendenz hin, dass vor allem Transformatoren mit verbesserten P_k -Werten länger und breiter ausfallen, während Geräte, die nur in P_0 verbessert sind, Abmessungen haben, die nahe am Durchschnitt liegen.

Bei verbesserten Trockentransformatoren sind die Abmessungen innerhalb ca. 10% unverändert.

Abbildung 16, Abbildung 17 und Abbildung 18 zeigen die Länge, Breite und Höhe der einzelnen Geräte, mit verbesserter und mit normaler Effizienz.

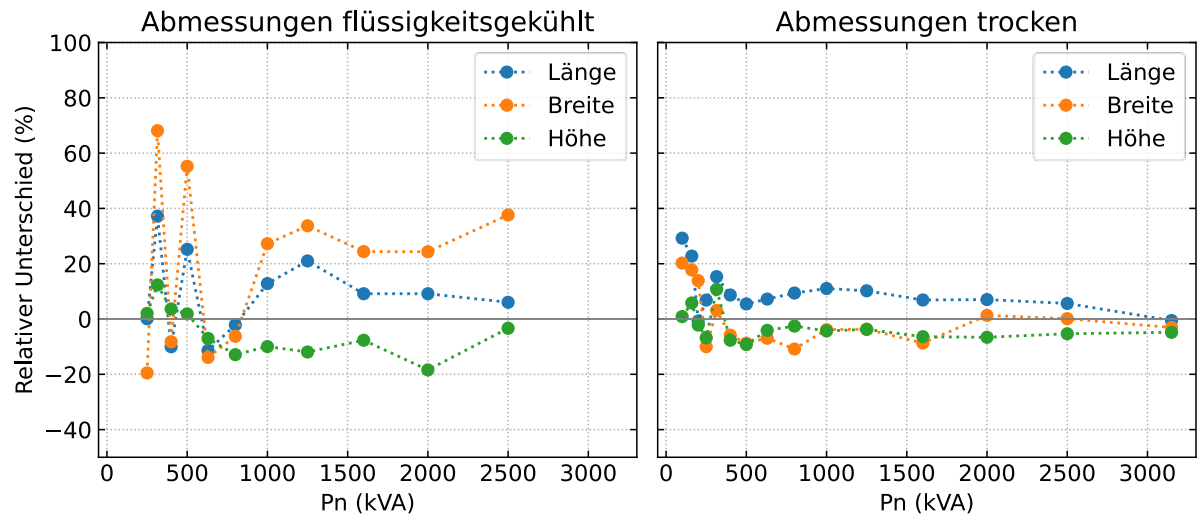


Abbildung 15: Relativer Unterschied der durchschnittlichen Abmessungen (Länge, Breite, Höhe) von verbesserten Transformatoren, bezogen auf Geräte mit Standardverlustwerten.

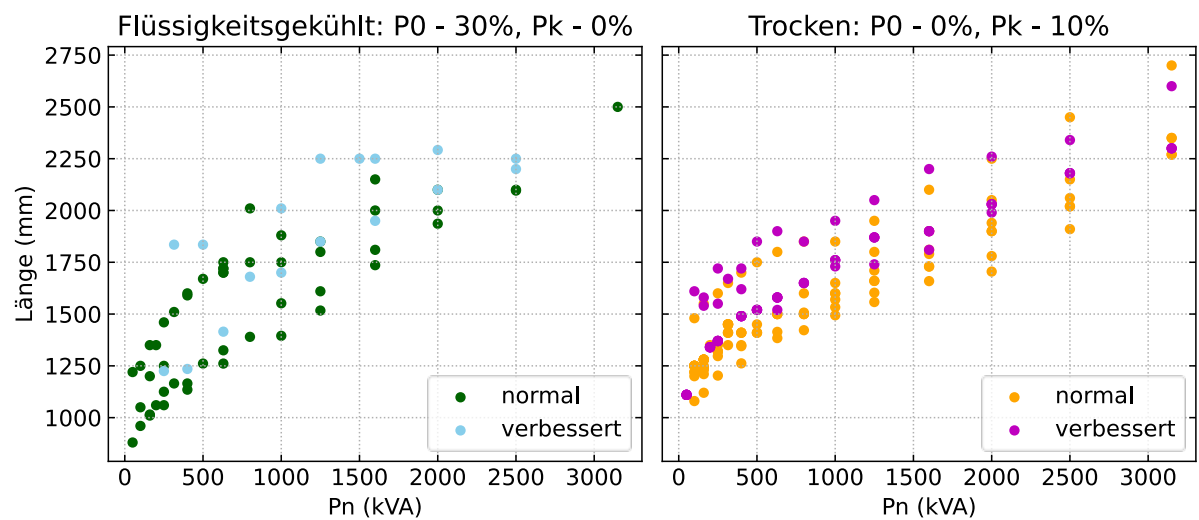


Abbildung 16: Länge einzelner Transformatoren, normale und verbesserte Effizienz, links flüssigkeitsgekühlt und rechts trocken.

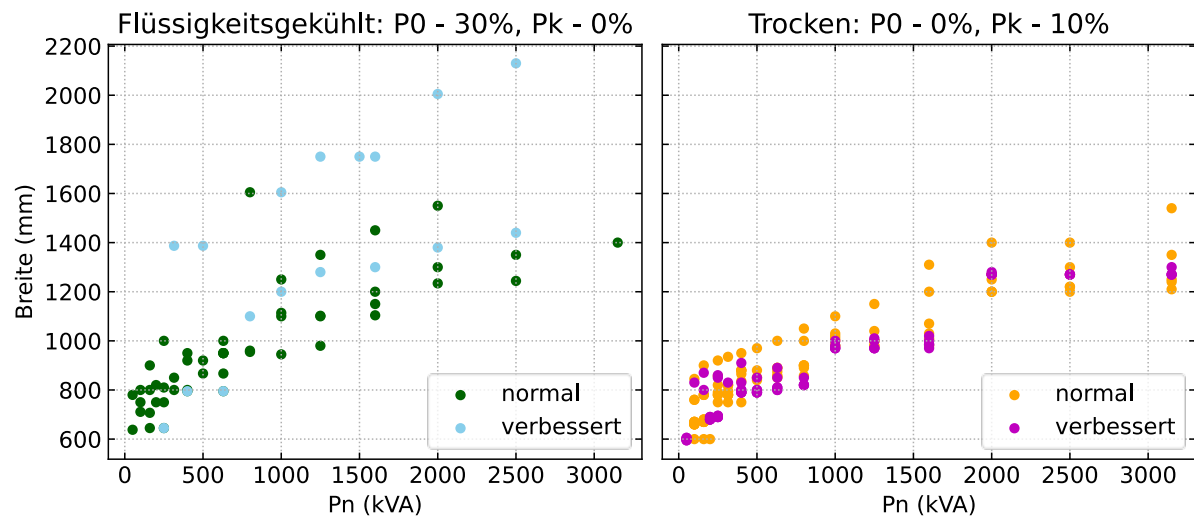


Abbildung 17: Breite einzelner Transformatoren, normale und verbesserte Effizienz, links flüssigkeitsgekühlt und rechts trocken.

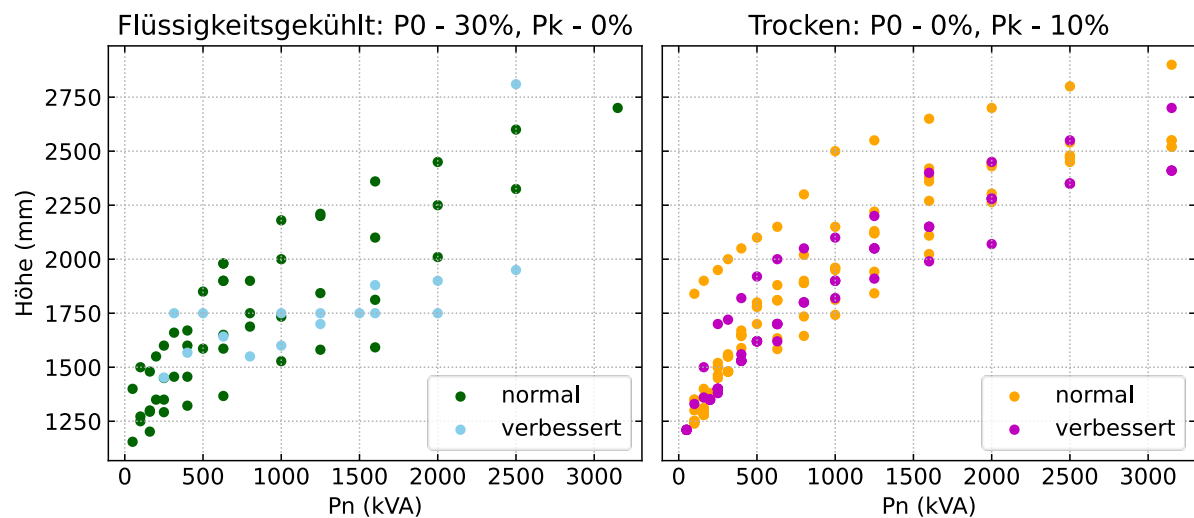


Abbildung 18: Höhe einzelner Transformatoren, normale und verbesserte Effizienz, links flüssigkeitsgekühlt und rechts trocken.

3.1.8 Gewicht verbesserter Transformatoren

Ändern sich die Abmessungen der Transformatoren, wenn diese nach strengeren Vorgaben gebaut werden, so wird sich auch deren Gewicht ändern. Entsprechend der Unterschiede in den Abmessungen sehen wir in Abbildung 16 eine Zunahme des durchschnittlichen Gewichts um etwa 20% für flüssigkeitsgekühlte Transformatoren, wobei vor allem die Verbesserung der P_k -Werte zu höherem Gewicht führt, wie aus den einzelnen Daten ersichtlich ist. Die Trockentransformatoren bleiben annähernd beim gleichen Gewicht.

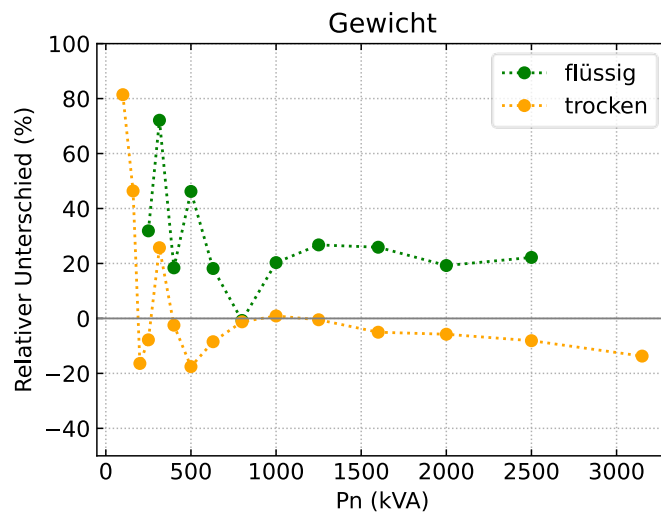


Abbildung 19: Relativer Unterschied des Gewichts von verbesserten Transformatoren, bezogen auf Geräte mit Standardverlustwerten.

3.1.9 Schalldruckpegel verbesserter Transformatoren

Für den Schalldruckpegel gibt es gute Nachrichten: Die Verbesserung der Effizienz wirkt sich positiv aus, verringerte Verluste führen im Durchschnitt zu leiseren Transformatoren (Abbildung 17). Es muss aber erwähnt werden, dass für flüssigkeitsgekühlte Transformatoren nur zwei Werte des Schalldruckpegels bei kleinen Bemessungsleistung P_n vorhanden sind.

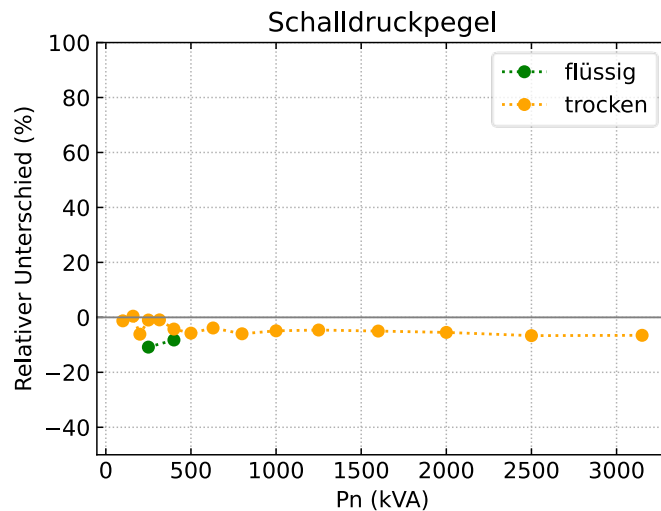


Abbildung 20: Relativer Unterschied des Schalldruckpegels von verbesserten Transformatoren, bezogen auf Geräte mit Standardverlustwerten.

3.1.10 Kühlungsart

Flüssigkeitsgekühlte Mittelleistungs-Transformatoren in dieser Studie haben alle die Kühlungsart ONAN (Öl Natürlich Luft Natürlich), mit der Ausnahme eines einzelnen KNAN (Kühlflüssigkeit mit Flammpunkt über 300°C). Die Trockentransformatoren in der Studie sind ausschliesslich AN (Luft natürlich) gekühlt.

Zusammenfassend werden alle Transformatoren im Mittelleistungsbereich natürlich gekühlt, ohne Einsatz von Ventilatoren oder Pumpen. Es fallen daher keine zusätzlichen Kühlungsverluste im Leerlauf oder Betrieb an.

3.1.11 Peak Efficiency Index

Aus den Verlustdaten lässt sich wie in 1.3 beschrieben den maximalen Effizienzindex PEI berechnen. Dies ist rein informativ, da die Verordnungen über Mittelleistungs-Transformatoren keine Bedingungen an den PEI stellen. In Abbildung 21 ist der PEI für alle Mittelleistungs-Transformatoren aufgezeichnet, mit Ausnahme derjenigen, für die ein Korrekturfaktor angewendet werden muss und daher andere Grenzwerte resultieren. Aus den Grenzwerten des Tier2 für P_0 und P_k wurde ebenfalls der PEI berechnet, er ist als gestrichelte Linie in der Abbildung wiedergegeben. Hier ist deutlich zu sehen, dass flüssigkeitsgekühlte Transformatoren im Durchschnitt etwa 0.3-0.4 Prozentpunkte effizienter sind als Trockentransformatoren. Effizienzgesteigerte Geräte sind nochmals 0.1-0.2 Prozentpunkte besser, wie an den deutlich über den Tier2-Werten liegenden Punkten erkennbar ist.

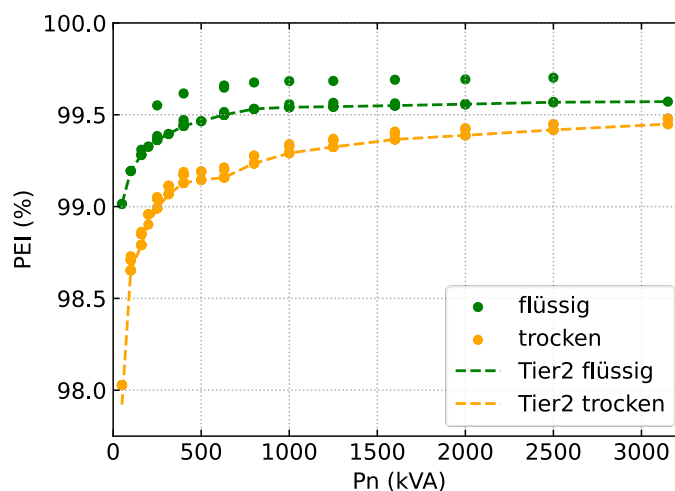


Abbildung 21: Berechneter Peak Efficiency Index, getrennt nach flüssigkeitsgefüllten Transformatoren und Trockentransformatoren. Der berechnete Grenzwert «Tier2» aus der Verordnung ist als gestrichelte Linie eingezeichnet.

3.2 Grossleistungs-Transformatoren

Für Grossleistungstransformatoren schreibt die Verordnung 2019/1783 die Einhaltung eines Mindest-*PEI* vor. Die Anzahl der eingegangenen Datensätze ist mit 34 zu klein für eine gesonderte statistische Auswertung. Stattdessen zeigen wir in Abbildung 19 die Werte des *PEI* zusammen mit dem seit 1.7.2021 geforderten Mindest-*PEI* (Tier 2). Alle Grossleistungs-Transformatoren im Datensatz erfüllen den Mindest-*PEI*. Der zuvor seit 1.7.2015 gültige Wert (Tier 1) ist ebenfalls eingezeichnet.

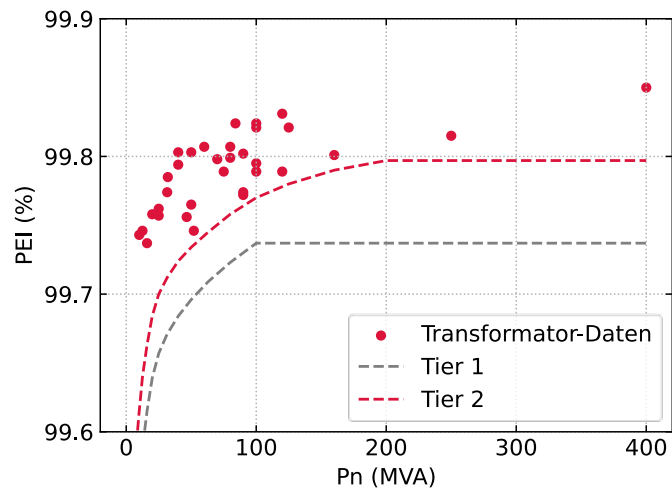


Abbildung 22: *PEI* als Funktion der Bemessungsleistung von Grossleistungstransformatoren. Die gestrichelten Linien illustrieren die Minimal-Anforderungen der Stufen Tier 1 (ab 1.7.2015) und Tier 2 (ab 1.7.2021).

4 Diskussion

4.1 Allgemeine Trends

Für Transformatoren ist zuvorderst die zu übertragende Leistung ausschlaggebend. Grosse Bemessungsleistungen erfordern zu Recht eine grössere Effizienz, da dort am meisten Energie gespart werden kann. Auch aus technischen Gründen ist dies wichtig: Geringe Effizienz bedeutet hohe Verluste, und Verluste sind immer gleichbedeutend mit einer Wärmequelle, die entsprechende Kühlung benötigt und vorzeitiges Altern verursachen kann.

Für eine bestimmte Installation mit gegebener Übertragungsleistung wird daher empfohlen, einen Transformator mit möglichst hohem Effizienzindex zu wählen, wobei zu berücksichtigen ist, dass die Effizienz gemäss Lastkurve (Abbildung 1) gegeben ist. In der konkreten Planung muss zusätzlich ein Lastprofil (d.h. eine zeitliche Darstellung des Leistungsverbrauchs) einfließen. Soll auch die Wirtschaftlichkeit beurteilt werden, ist die Kenntnis des Energiepreises und eine Prognose dessen Entwicklung während der Lebensdauer des Transformators notwendig. Solch eine detaillierte Planung wird wahrscheinlich eher im Grossleistungsbereich stattfinden, in dem die eingesparte Energie deutlich höher ausfällt.

4.2 Mittelleistungs-Transformatoren

Die Transformatoren im Mittelleistungs-Bereich dürfen gewisse Obergrenzen für die Leerlauf- und Lastverluste nicht überschreiten. Aktuell gelten die Werte der Verordnung 2019/1783 (Tier2). Für flüssigkeitsgefüllte Transformatoren und für Trockentransformatoren gelten jeweils verschiedene Grenzwerte, wobei für Trockentransformatoren höhere Verluste erlaubt sind.

In der vorliegenden Marktstudie wurde untersucht, wie viele Transformatoren die Grenzwerte unterbieten, und um welchen Betrag. In einem spezifischen Szenario wurden für Transformatoren mit verbesserten Verlustwerten die Abmessungen, das Gewicht und der Schalldruckpegel verglichen mit den Werten von Transformatoren ohne Verbesserung.

4.2.1 Flüssigkeitsgefüllte Transformatoren

Die Verteilung der flüssigkeitsgefüllten Transformatoren in Abbildung 6 zeigt eine starke Konzentration der Verlustwerte um die seit 2021 gültigen Grenzwerte der EnEV.

Bei etwa 20% der Transformatoren weisen die Leerlaufverluste P_0 eine Reduktion von mindestens 30% auf (Abbildung 13). Es handelt sich um Transformatoren mit amorphem Kernmaterial. Dieses Material zeigt geringere Ummagnetisierungsverluste, dadurch sinkt P_0 deutlich. In dieser Studie gingen Daten von drei Herstellern von Transformatoren mit amorphem Kern ein. Es ist damit zu rechnen, dass in Zukunft noch mehr Hersteller diese Technologie verwenden wird, um effizientere Transformatoren herzustellen. Im Gespräch mit Lieferanten wurde jedoch auch auf folgende Nachteile hingewiesen:

- Die Kosten für Transformatoren mit amorphem Kern sind um einen Faktor 2 bis 2.5 höher, wie von zwei Herstellern erwähnt wurde. Andere Quellen deuten auf einen deutlich geringeren Kostenunterschied hin.
- Das Material muss eigens im asiatischen Raum beschafft werden, was zeit- und kostenintensiv ist. Es gibt jedoch Hinweise, dass zukünftig die Anzahl und Verbreitung der Lieferanten zunimmt.
- Die Verarbeitung des empfindlichen Materials ist aufwendiger und zeitintensiver.

Die Vermutung liegt nahe, dass zwar die Hersteller mit amorphen Kernen ein energieeffizienteres Produkt anbieten können, aber dass der Markt momentan wegen der höheren Preise noch nicht darauf einsteigt. Im Weiteren ist es plausibel zu erwarten, dass sich die anfänglich stark erhöhten Kosten für Transformatoren mit amorphem Kern normalisieren, sobald die Nachfrage und damit die Produktion steigt und weitere Hersteller diese Technologie anbieten können.

Der Einsatz amorpher Magnetkerne verursacht im Durchschnitt eine moderate Zunahme der Abmessungen um 10-40%, wobei dies stark von Modell zu Modell variiert. Das Gewicht von Transformatoren mit amorphem Kern ist durchschnittlich um etwa 20% höher als dasjenige mit herkömmlichem Kern. Insgesamt sollten diese Werte kein Hinderungsgrund für den Ersatz eines herkömmlichen durch einen effizienteren Transformator sein, eine Prüfung im konkreten Fall ist jedoch angebracht.

4.2.2 Trockentransformatoren

Etwa 40% der Trockentransformatoren haben mindestens 10% geringere Lastverluste als in der EnEV gefordert (Abbildung 13). Dies gilt im gesamten Leistungsbereich, wie aus Abbildung 7 ersichtlich ist. Die Abmessungen des Transformators, das Gewicht und der Schalldruckpegel ändern nur leicht (10%) von Geräten mit Standard-Verlusten zu solchen mit P_k -10%. Eine Verringerung der Verluste von Trockentransformatoren wäre begrüßenswert, da die EnEV im Vergleich zu flüssigkeitsgefüllten Transformatoren höhere Grenzwerte erlaubt. Dies führt auch zu einer durchschnittlich 0.2-0.5 Prozentpunkte niedrigeren Effizienz, wie aus Abbildung 21 ersichtlich ist.

Die technischen Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung sind dieselben wie oben erwähnt. Bisher wurden noch keine Trockentransformatoren mit amorphem Kern gefunden. Beim Wicklungsmaterial hat kein Transformator Kupfer spezifiziert. Beide Massnahmen haben das Potential zur Verringerung der Verluste P_k und P_0 . Hier ist noch Entwicklungsarbeit zu leisten.

4.2.3 Fazit Mittelleistungs-Transformatoren

Im Mittelleistungs-Bereich sind die meisten Transformatoren so konzipiert, dass sie genau die geforderten Verlustwerte einhalten. Eine Verringerung der Verluste ist aus physikalischen Gründen möglich, sei es durch verlustärmere Kernmaterialien oder -dimensionierung (Verringerung von P_0) oder Verwendung von grösseren Wicklungsquerschnitten und/oder verbesserten Stromleitern (Verringerung von P_k). Diese Massnahmen sind mit höheren Kosten verbunden und wurden bisher nur zurückhaltend umgesetzt. Eine gezielte Förderung von Transformatoren mit verbesserter Effizienz könnte diesen Prozess jedoch beschleunigen.

Vorausschauend kann in einem Szenario verdeutlicht werden, wie stark sich die Effizienz durch den Einsatz eines Transformators mit geringeren Verlusten verändert. Bereits heute ist bei flüssigkeitsgefüllten Transformatoren eine Verringerung der Leerlaufverluste um 30% oder mehr möglich, und bei Trockentransformatoren liegt die Verringerung der Lastverluste um 10% im Rahmen des Möglichen. Als Ergebnis sind in Abbildung 23 die Effizienzkurven von Transformatoren mit Verlusten entsprechend den Grenzwerten sowie mit verbesserten Werten aufgetragen. Der flüssigkeitsgefüllte Transformator bleibt auch bei den verbesserten Geräten der Effizientere.

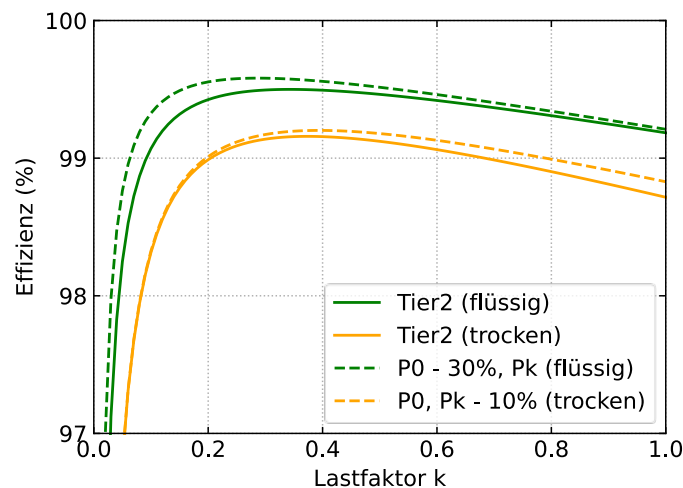


Abbildung 23: Effizienzkurven von Modell-Transformatoren mit 630 kVA Bemessungsleistung. Die durchgezogenen Linien entsprechen Geräten mit Verlustwerten entsprechend Tier2, flüssigkeitsgefüllt und trocken. Die gestrichelten Linien stehen für verbesserte Transformatoren, die bereits heute erhältlich sind: flüssigkeitsgefüllt mit P0 reduziert um 30%, trocken mit Pk reduziert um 10%.

Eine bereits erwähnte Effizienzsteigerung beim Einsatz von Trockentransformatoren ist daher der Wechsel zu flüssigkeitsgefüllten Transformatoren. Dies ist allerdings nicht in jeden Fall möglich, da flüssigkeitsgefüllte Transformatoren höhere Anforderungen z.B. an den Brandschutz stellen und daher nicht an allen Standorten ein Wechsel möglich ist.

Nur je zwei Hersteller von flüssigkeitsgefüllten Transformatoren und Trockentransformatoren haben Angaben zum Preis bekanntgegeben, sie sind in Abbildung 24 als Funktion der Bemessungsleistung aufgetragen. Wegen der geringen Anzahl von Preis-Angaben lässt sich daraus nicht beurteilen, welcher Transformatortyp ökonomischer im Einsatz ist.

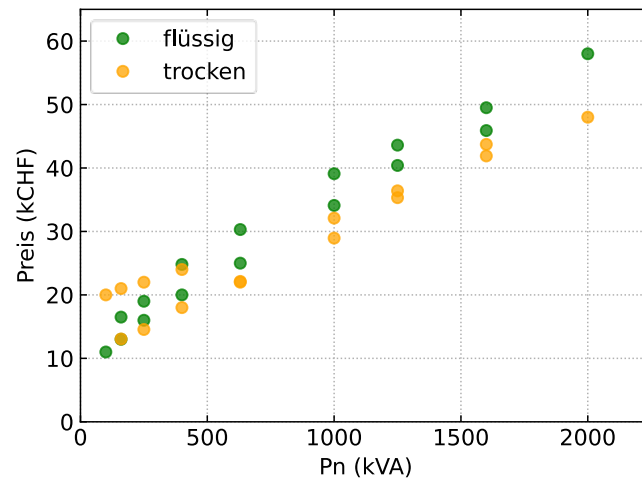


Abbildung 24: Preis aufgetragen gegen Bemessungsleistung, für flüssigkeitsgefüllte Transformatoren und Trockentransformatoren. Je Kategorie sind Daten von 16 Transformatoren vorhanden.

4.3 Grossleistungstransformatoren

Im Leistungsbereich über 3150 kVA wurden insgesamt Datensätze von 33 Transformatoren gesammelt. Die geltenden Bestimmungen zur minimalen Effizienz sind gut erfüllt, siehe Abbildung 22. Wegen der geringen Anzahl von Rückmeldungen und der damit resultierenden statistischen Ungenauigkeit wird auf eine weitergehende Analyse verzichtet.

Im Gespräch mit dem Vertreter einer Herstellerfirma wurde betont, dass die maximalen Verlustwerte bzw. die minimal zu erreichende Effizienz ein wesentlicher Teil des Angebots während des Bietens für einen Auftrag sind. Für die Betreibergesellschaft ist der gesamte finanzielle Aufwand über die Lebensdauer (40-50 Jahre) ausschlaggebend. Wird eine höhere Effizienz gefordert, so muss der zusätzliche finanzielle Aufwand durch Einsparungen bei den Energiekosten während der Lebensdauer ausgeglichen werden. Als Referenz zeigen wir in Abbildung 25 den Preis für Grossleistungstransformatoren als Funktion der Bemessungsleistung.

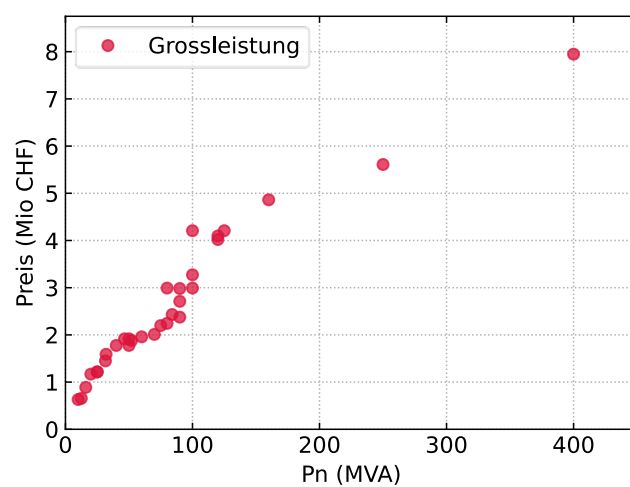


Abbildung 25: Preis eines Grossleistungstransformators als Funktion der Bemessungsleistung.

Literaturverzeichnis

IEC TS 60076-20 (2017), Power transformers – Part 20: Energy efficiency

Verordnung über die Anforderungen an die Energieeffizienz serienmässig hergestellter Anlagen, Fahrzeuge und Geräte (Energieeffizienzverordnung, EnEV) vom 1. November 2017 (Stand am 1. Januar 2025), Anhang 2.10: Anforderungen an die Energieeffizienz und an das Inverkehrbringen und Abgeben von Leistungstransformatoren.

VERORDNUNG (EU) Nr. 548/2014 DER KOMMISSION vom 21. Mai 2014 zur Umsetzung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich Kleinleistungs-, Mittelleistungs- und Großleistungstransformatoren.

VERORDNUNG 2019/1783 DER KOMMISSION vom 1. Oktober 2019 zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 548/2014 der Kommission zur Umsetzung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich Kleinleistungs-, Mittelleistungs- und Großleistungstransformatoren.

Anhang A: Tabelle der angefragten Parameter

Power Transformer Data

Model name/description				
Rated Power PN, in kVA				
No Load Loss P0, in W				
Load Loss Pk, in W				
Peak Efficiency Index PEI, in % (Large power transformer)				
Load Factor of Peak Efficiency Index k_PEI (Large power transformer)				
Type liquid/dry				
Cooling Method ONAN, ONAF,...				
Technology NOES, GOES, amorph,...				
Electrical Power Required by Cooling System for No Load Operation Pc0, in W				
Additional Electrical Power Required (in Addition to Pc0) by Cooling for Continuous Operation at k_PEI Times the Rated Load Pck(k_PEI), in W				
Percent Impedance xk (uk), in %				
1st Dimension: Length in m				
2nd Dimension: Width in m				
3rd Dimension: Height in m				
Weight in kg				
Sound Pressure Level in dB(A)				
Approximative Cost in CHF				
Availability/Approx. Delivery Time in weeks				
Voltage high U1, in V				
Voltage low U2, in V				

24 Sept 2025

Please send filled forms to: trafo.technik@fhnw.ch

Anhang B: Anonymisierte Marktdaten

Zu Projektbeginn wurde durch das BFE als Auftraggeberin und die FHNW als Auftragnehmerin gemeinsam der Grundsatz festgelegt, dass die im Zuge der Marktstudie von Herstellern erhobenen Angaben zu Transformatoren vertraulich behandelt werden sollen. Insbesondere werden die Angaben zu Hersteller und Modellname nur in anonymisierter Form verwendet. Um diesem Grundsatz Rechnung zu tragen, wurden zur Speicherung der Daten die Firmennamen durch Aliase ersetzt, und Modellnamen gänzlich entfernt. Die Anonymisierung der Daten wurde durch die FHNW durchgeführt, und keine vertraulichen Daten wurden an das BFE weitergegeben. Dieses Vorgehen wurde den Unternehmen, die in der Marktstudie um Daten angefragt wurden, mitgeteilt.

Die von Herstellern direkt für diese Studie zur Verfügung gestellten Angaben wurden ergänzt durch Datenblätter, die auf den Internetseiten der Herstellerfirmen öffentlich zugänglich sind. Auch diese Daten flossen in anonymisierter Form in den Bericht ein, solange sie die Vorgaben der EnEV erfüllen.