



Institut für Elektrische
Antriebstechnik & Maschinen
Technische Universität Graz



DIPLOMARBEIT

ENTWURF EINES EQUIPMENTS ZUR DEMONSTRATION
VON SITRAM- COOL

Stephan Dunkl

Weiz, am 13. September 2011

Vorwort und Danksagung

Auf der Suche nach einem interessanten Thema für meine Diplomarbeit erfuhr ich im Jahr 2010 von einem, von der Firma Siemens, geplanten Transformator Projekt. Da ich auch schon während meines Studiums im Transformatorbereich gearbeitet habe und ich gerne tiefer in diesen eintauchen wollte, fiel die Entscheidung auf die vorliegende Arbeit.

Mein erster Dank geht an Herrn DI Gerhard Buchgraber für die Unterstützung während des Studiums und der Hilfestellung bei der Auswahl sowie Organisation der Diplomarbeit mit der Firma. Ich danke auch meiner Betreuerin seitens der Universität Frau Professorin Annette Mütze, sowie meinen Ansprechpartnern und Arbeitskollegen in der Firma, Herrn DI Mario Scala, Herrn DI Günter Fleck und Herrn DI Georg Becker. Sie wurden nicht müde, mir bei sämtlichen Anliegen unter die Arme zu greifen und mich zu unterstützen. Ebenfalls möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mir das Studium und die Ausbildung erst ermöglichten.

Ich erkläre hiermit eidesstattlich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig verfasst, andere als die angegeben Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Weiz, am 13. September 2011

(Stephan Dunkl)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Theoretische Grundlagen	9
2.1	Funktionsweise eines Transformators	9
2.1.1	Magnetisches Feld eines geraden Leiters	10
2.1.2	Magnetisches Feld einer Spule	11
2.1.3	Elektromagnetische Induktion	14
2.1.4	Transformatorverhalten bei Belastung	15
2.1.5	Zusammenfassung	17
2.2	Aufbau von Leistungstransformatoren	18
2.2.1	Allgemeines	18
2.2.2	Material und Aufbau des Kerns	19
2.2.3	Kernbauarten von Leitungstransformatoren	20
2.2.4	Wicklungsarten	23
2.2.5	Isolierung	25
2.2.6	Der Kessel	25
2.2.7	Das Ausdehnungsgefäß und das Buchholz-Relais	26
2.2.8	Der Stufenschalter	27
2.2.9	Kühlsystem	28
2.3	Wärmequellen im Transformator	31
2.3.1	Verluste im Eisenkern	31
2.3.2	Verluste im Stromkreis	34
2.3.3	Zusätzliche Verluste	35
2.3.4	Zusammenfassung	36
2.4	Wärmetransport	37
2.4.1	Wärmeleitung	37
2.4.2	Wärmestrahlung	38

2.4.3	Konvektion	39
2.5	Thermische Auslegung von Leitungstransformatoren	44
2.5.1	Alterung und Lebensdauer von Transformatoren	44
2.5.2	Referenzpunkte für Temperaturen in Transformatoren	46
2.5.3	Thermisches Modell eines Transformators	48
2.5.4	Kühlkörper	55
2.5.5	Belastungsgrenzen von Transformatoren	56
3	Berechnung der Transformatortemperaturen	59
3.1	Das Berechnungsprogramm „KUL“	59
3.1.1	Die Eingabedatei für „KUL“	60
3.1.2	Die Ausgabedatei von „KUL“	61
3.2	Das Variationsprogramm „KUL_SIM“	61
3.2.1	Grafische Eingabehilfe	62
3.2.2	Speichern und Laden von Eingabedateien	65
3.2.3	Einzeltemperaturberechnung	65
3.2.4	Temperaturberechnung mit variabler Belastung und variable Kühlbedingungen	67
4	Auswertung der Temperaturberechnung	79
4.1	MatLab- Funktionen zur Datenaufbereitung	79
4.1.1	MatLab- Funktion zum Einlesen der „KUL_SIM“- Daten	79
4.1.2	MatLab- Funktionen zum Visualisieren der „KUL_SIM“- Daten	86
4.1.3	MatLab- Funktionen zum Erzeugen von Visual Basic Variablen	91
4.2	Transformatormodelle	94
4.2.1	Transformatormodell als Konsolenprogramm	94
4.2.2	Transformatormodell als „VB.net- dll“	102
5	Ergebnisse	105
5.1	Transformatorsimulation	105
5.2	Ergebnisse ausgewählter Betriebspunkte	143

6	Zukünftige Arbeiten	151
	Literaturverzeichnis	153
	Abkürzungen	163
	Symbole	165
	Index	171

1 Einleitung

Leistungstransformatoren sind statische Anlagen in elektrischen Versorgungsnetzen. Dabei stellen sie die teuersten und zugleich wichtigsten Anlagen dieser elektrischen Netze dar. Betreiber dieser Anlagen sind, durch die Liberalisierung der Strommärkte, darauf bedacht, ihre Betriebsmittel bestmöglich auszunutzen.

Transformatoren haben generell ein geringes Ausfallrisiko, doch kann besonders bei strategisch wichtigen Punkten im Netz ein Ausfall, auch wenn er nur vorübergehend ist, zu enormen Kosten führen. Durch eine kontinuierliche Überwachung und Echtzeitanalyse von Transformatoren sollen kritische Zustände frühzeitig erkannt und somit das Ausfallrisiko weiter reduziert werden. Weiters kann durch die Erfassung der Betriebswerte und Messgrößen von Transformatoren die Belastung bestimmt werden, so dass Abschätzungen über die zu erwartende Lebensdauer des Transformators getroffen, sowie eine Lebensdaueroptimierung durchgeführt werden können.

Die thermischen Verhältnisse im Transformator spielen eine wesentliche Rolle bei der Zustandsdiagnose von Transformatoren. Diese dürfen vor allem gewisse Grenzen nicht überschreiten, da es sonst zu einer stark beschleunigten Alterung des Transformators kommt.

Diese Diplomarbeit zeigt nun auf, dass eine Kühlanlagensteuerung ("*SIT®AM COOL*"), welche mit Hilfe von drehzahlgesteuerten Lüftern betrieben wird, die Temperaturen von Leistungstransformatoren, ebenso wie die derzeitig eingesetzten Kühlanlagensteuerungen, auf einem akzeptablen Niveau halten und somit eine beschleunigte Alterung verhindern kann. Ei-

ne Simulation eines Transformators in über 2880 Arbeitspunkten (ca. 100000 berechnete Transformatorzustände) hat jedoch gezeigt, dass durch die Verwendung von "SIT®AM COOL" eine verbesserte Kühlung eintritt, da sich weitere Vorzüge wie Laststeigerung, Minimierung des Geräuschpegels, Minimierung der Eigenverluste der Kühlanlage und der Gesamtverluste ergeben.

Diese Vorteile der Kühlanlage "SIT®AM COOL" wurden während der Diplomarbeit so ausgearbeitet, dass sie, in einem tragbaren Equipment, einem Kunden gegenüber veranschaulicht werden können.

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel wird die theoretische Basis, auf die diese Arbeit aufbaut, erarbeitet. Dabei werden jene physikalischen Phänomene betrachtet, welche für eine detaillierte Temperaturbetrachtung eines Leistungstransformators notwendig sind.

2.1 Funktionsweise eines Transformators

In diesem Abschnitt soll prinzipiell die Funktionsweise eines Transformators erklärt werden. Dazu wird ein einfacher Einphasentransformator nach Abbildung 2.1 herangezogen.

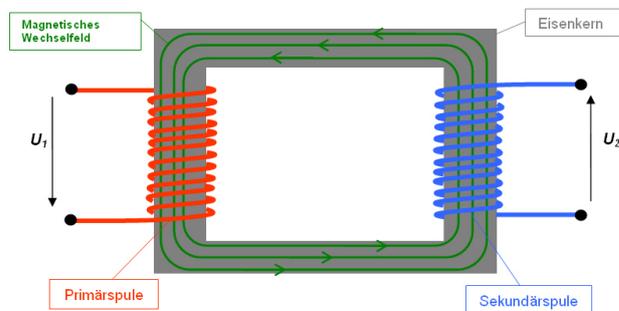


Abbildung 2.1: Einfacher Einphasentransformator

Der Transformator besteht aus zwei Spulen, welche um einen gemeinsamen Eisenkern gewickelt sind. Dabei sind die beiden Spulen galvanisch voneinander getrennt. Legt man eine veränderliche Spannung (Wechselspannung) an eine Spule an, so bildet sich im Eisenkern ein veränderli-

ches Magnetfeld aus. Dieses Magnetfeld durchsetzt auch die zweite Spule und erzeugt in dieser wieder eine Wechselspannung. Über das Windungszahlverhältnis stellt sich ein anderes, den Windungszahlen entsprechendes, Spannungsniveau ein, das zu einer verlustärmeren Übertragung von elektrischer Energie im Netz führt.

2.1.1 Magnetisches Feld eines geraden Leiters

Um zu verstehen, wie das Magnetfeld aus Abbildung 2.1 zustande kommt, schauen wir uns zuerst das Feld eines geraden stromdurchflossenen Leiters an.

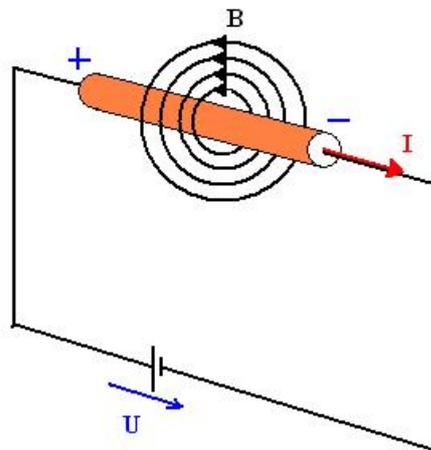


Abbildung 2.2: Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters

Die magnetischen Feldlinien bilden konzentrische Kreise um den Leiter herum (Abb: 2.2). Wäre der Leiter unendlich lang, wäre das Feld zylindersymmetrisch. Formal lässt sich das erzeugte Feld außerhalb des Leiters (im Abstand r vom Leitemittelpunkt) aus den Maxwell Gleichungen ableiten. Dabei bezeichnet H die magnetische Feldstärke und B die magnetische Flussdichte/ Induktion. [34]

$$\oint \vec{H} \, d\vec{s} = \int_{\text{Leiter}} \vec{j} \, d\vec{A} = \vec{H} \oint_{\text{Kreis } r} d\vec{s} = H(r) 2\pi r = I$$

$$H(r) = \frac{I}{2\pi r} \quad (2.1)$$

$$B = \mu H = \mu \frac{I}{2\pi r}$$

Die magnetische Flussdichte/ Induktion ist abhängig von der magnetische Feldstärke und vom Material, das sie durchsetzt. Dabei gilt, dass diese Materialabhängigkeit durch die Permeabilitätszahl μ_r beschrieben wird ($\mu_{r,\text{Luft}} = 1$). Die Permeabilität gibt also an, wie gut sich Stoffe magnetisieren lassen.

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \quad (2.2)$$

$$\mu = \mu_r \mu_0$$

2.1.2 Magnetisches Feld einer Spule

Wickelt man den Leiter aus Abbildung 2.2 zu einer Spule, so erzeugt jede einzelne Windung ein Magnetfeld wie in Abschnitt 2.1.1 beschrieben. Da das magnetische Feld ein Vektorfeld ist, addieren sich die einzelnen Komponenten, dabei entsteht im Außenbereich der Spule ein Magnetfeld, welches nahezu identisch dem Feld eines Stabmagneten ist, und im Inneren bildet sich ein homogenes Feld aus. Abbildung 2.3 zeigt das Magnetfeld einer Luftspule.

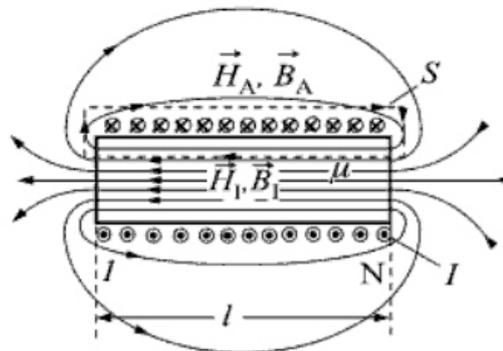


Abbildung 2.3: Magnetfeld einer langen Luftspule [35]

Um die magnetische Feldstärke zu bestimmen, gehen wir wieder von den Maxwellschen Gleichungen aus. Der in der Abbildung 2.3 gekennzeichnete Integrationsweg S spaltet sich in einen Innenbereich S_I sowie einen Außenbereich der Spule S_A auf. Da die Feldstärke im Inneren der Spule weitaus größer ist als im Außenbereich, ergibt sich folgende Feldstärke. [35]

$$\begin{aligned}
 IN &= \oint_S \vec{H} \, d\vec{s} && N \dots \text{Anzahl der Windungen} \\
 &= \oint_{S_I} \vec{H}_I \, d\vec{s} + \oint_{S_A} \vec{H}_A \, d\vec{s} \\
 &\approx \oint_{S_I} \vec{H}_I \, d\vec{s} = \int_l H_I \, dl && (2.3) \\
 \rightarrow H_I &\approx \frac{NI}{l} \\
 B_I &= \mu H_I \approx \mu \frac{NI}{l}
 \end{aligned}$$

Wie bereits in Abschnitt 2.1.1 erwähnt, hängt die magnetische Flussdichte über die Permeabilität mit der magnetischen Feldstärke zusammen. Bei einer Spule mit einem ferromagnetischen Eisenkern richten sich, unter Einfluss eines magnetischen Feldes, die Elementarmagnete (Weisschen Bezirke¹) in eine gemeinsame Richtung aus (Abb. 2.4). Dadurch erhöht sich die magnetische Flussdichte im Innenbereich der Spule (also im Eisenkern) erheblich. Diese Flussdichteerhöhung lässt sich, wie zuvor erwähnt, mathematisch über die Permeabilitätszahl μ_r des verwendeten Materials beschreiben.

¹Diese Bezirke wurden nach dem französischen Physiker Pierre-Ernest Weiss benannt. (1865 bis 1940)

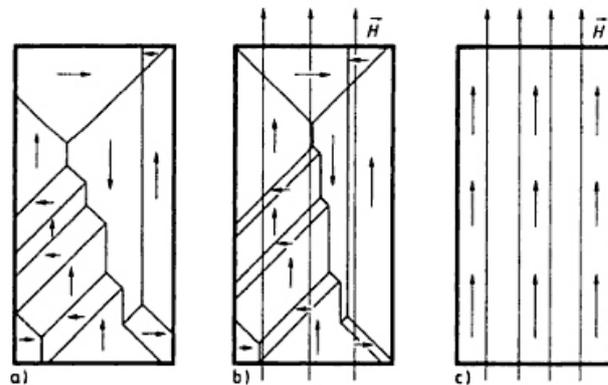


Abbildung 2.4: Weißsche Bezirke a) un ausgerichtet, b) durch externes Magnetfeld teilweise ausgerichtet, c) völlig ausgerichtet (Sättigung) [9]

Einen grafischen Zusammenhang der magnetischen Feldstärke und Flussdichte, für eine Spule mit Eisenkern, erhält man über die Hystereseschleife, wie sie in Abbildung 2.5 dargestellt ist.

War der Eisenkern anfangs unmagnetisch, erhält man bei steigender Feldstärke die Neukurve. Der zunächst starke Zuwachs der Flussdichte, bei steigender Feldstärke, wird schwächer, wenn die magnetische Sättigung des Eisens erreicht wird, das heißt, wenn alle Elementarmagnete in Richtung des erregenden Feldes umgeklappt sind. Verringert man nun die Feldstärke auf Null, so verbleibt eine restliche Flussdichte, welche als Remanenzflussdichte, oder einfach nur Remanenz B_r , bezeichnet wird. Um den Eisenkern vollkommen zu entmagnetisieren, muss man die Feldstärke weiter auf die Koerzitivfeldstärke $-H_c$ verringern. Senkt man die magnetische Feldstärke noch weiter, so kommt man wieder in den Sättigungsbereich. [3]

Es ist zu erkennen, dass die relative Permeabilität von ferromagnetischen Materialien nicht konstant, sondern von der externen Feldstärke H abhängig ist.

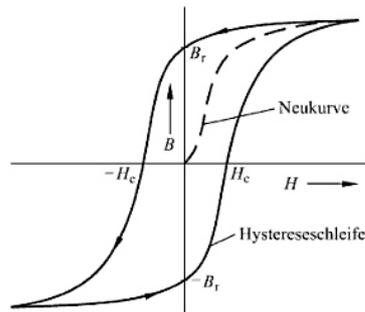


Abbildung 2.5: Hystereseschleife eines ferromagnetischen Stoffes [12]

2.1.3 Elektromagnetische Induktion

Um die elektromagnetische Induktion näher zu erklären, werden zwei neue Begriffe eingeführt.

- magnetischer Fluss Φ : Bei einer Leiterschleife bezeichnet der magnetische Fluss die Gesamtheit der magnetischen Flussdichte durch die von der Leiterschleife aufgespannte Fläche:

$$\Phi = \int_A \vec{B} \, d\vec{A}$$

- Flussverketzung ψ : Wird eine Vielzahl solcher Leiterschleifen gebildet, wie es bei einer Spule der Fall ist, so wird jede Windung (bzw. Leiterschleife) vom gleichen magnetischen Fluss durchsetzt. Für eine Spule mit w_1 Windungen ergibt sich:

$$\Psi = \int_A \vec{B} \, d\vec{A} = w_1 \Phi$$

Das Entstehen einer Spannung in der Sekundärwicklung des in Abbildung 2.1 dargestellten Transformators wird durch das Induktionsgesetz in seiner Integralform erklärt (Gl. 2.4).

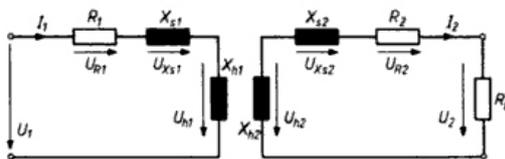
$$U_{ind} = \oint \vec{E} \, d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \, d\vec{A} = -\frac{d\psi}{dt} \quad (2.4)$$

Wenn sich das von der Spule umfassende Magnetfeld zeitlich ändert, wird eine Spannung in dieser Spule induziert. Diese induzierte Spannung ist abhängig von mehreren Faktoren und ist umso größer:

- je mehr Windungen die Spule aufweist
- je schneller und stärker sich das eingeschlossene Magnetfeld ändert
- je größer die von der Spule aufgespannte Fläche ist.

2.1.4 Transformatorverhalten bei Belastung

Wie bei jeder anderen Energiequelle, unterliegt auch die Ausgangsspannung eines Transformators, infolge des Innenwiderstandes, lastabhängigen Spannungsschwankungen. Um diese näher zu durchleuchten, werfen wir einen Blick auf das Ersatzschaltbild eines Transformators.



U_1	Spannung der Oberspannungsseite (OS)
U_2	Spannung der Unterspannungsseite (US)
I_1	Strom auf der Oberspannungsseite (OS)
I_2	Strom auf der Unterspannungsseite (US)
R_1	ohmscher Wicklungswiderstand OS
R_2	ohmscher Wicklungswiderstand US
X_{s1}	Streureaktanz OS
X_{s2}	Streureaktanz US
X_{h1}	Hauptreaktanz OS
X_{h2}	Hauptreaktanz US
	Übersetzungsverhältnis

Abbildung 2.6: Ersatzschaltbild eines belasteten Einphasentransformators
[15]

Im nächsten Schritt tätigen wir folgende Vereinfachungen:

- Die zwei galvanisch getrennten Kreise aus Abb. 2.6 werden auf einen elektrisch verbundenen Ersatzstromkreis umgerechnet.

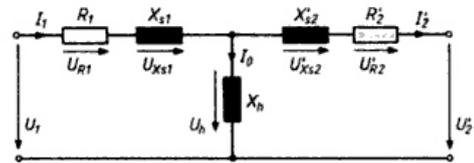
$$\frac{U_{h1}}{U_{h2}} = \frac{w_1}{w_2} = \ddot{u}$$

$$U'_{h2} = U_{h2} \ddot{u}$$

$$I'_2 = I_2 \frac{1}{\ddot{u}}$$

$$R'_2 = R_2 \ddot{u}^2$$

$$X'_{s2} = X_{s2} \ddot{u}^2$$



- Die beiden Hauptinduktivitäten L_{h1} und L_{h2} können zu einer Hauptinduktivität zusammengefasst werden. [13]
- Je größer die Hauptinduktivität eines Transformators wird, desto kleiner wird bei konstanter Speisespannung der Magnetisierungsstrom und damit auch I_0 . Bei großen Transformatoren wird mit zunehmender Übertragungsleistung der Strom I_0 gegenüber dem Strom I_1 prozentual so klein, dass dieser in erster Näherung vernachlässigt werden kann. [13]
- In diesem Fall können die Wicklungswiderstände sowie die induktiven Blindwiderstände der Streuinduktivitäten zusammengefasst werden.

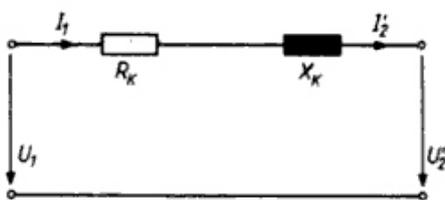


Abbildung 2.7: Vereinfachter Ersatzstromkreis [13]

Diese Vereinfachungen führen zu folgendem, stark vereinfachten, Ersatzschaltbild (Abb. 2.7), mit welchem es möglich ist, das Betriebsverhalten eines Transformators, bei konstanter Speisespannung U_1 und konstantem Belastungsstrom I'_2 , aufzuzeigen. Abbildung 2.8 zeigt verschiedene Belastungsszenarien. Dabei ist zu sehen, dass die Größe der Ausgangsspannung U'_2 von der Belastungsstärke I'_2 und die Phasenlage von der Belastungsart abhängen. [13]

Diese Vereinfachungen führen zu folgendem, stark vereinfachten, Ersatzschaltbild (Abb. 2.7), mit welchem es möglich ist, das Betriebsverhalten eines Transformators, bei konstanter Speisespannung U_1 und konstantem Belastungsstrom I'_2 , aufzuzeigen. Abbildung 2.8 zeigt verschiedene Belastungsszenarien. Dabei ist zu sehen, dass die Größe der Ausgangsspannung U'_2 von der Belastungsstärke I'_2 und die Phasenlage von der Belastungsart abhängen. [13]

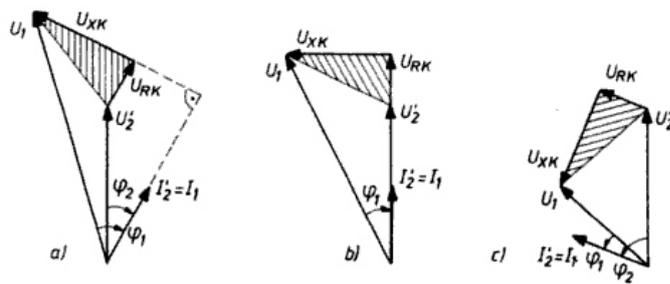


Abbildung 2.8: Betriebsverhalten eines Transformators bei unterschiedlicher Belastung: a) ohmsch-induktive b) rein ohmsche c) ohmsch-kapazitive Belastung [13]

2.1.5 Zusammenfassung

Wie in Abbildung 2.1 zu sehen ist, besteht ein Einphasentransformator aus einer, der Energiequelle zugewandten, Wicklung (Primärspule). Wird an diese Primärspule eine Wechselspannung angelegt, so bildet sich im Eisenkern des Transformators ein magnetischer Wechselfluss (nach Abschnitt 2.1.2) aus. Die am Eisenkern angebrachte zweite Wicklung (Sekundärspule) wird ebenfalls vom magnetischen Wechselfluss der Primärspule durchsetzt. Da die Sekundärspule eine Fläche aufspannt, welche vom Wechselfluss durchsetzt wird, bildet sich nach dem Induktionsgesetz (Abschnitt 2.1.3) eine Spannung aus.

2.2 Aufbau von Leistungstransformatoren

2.2.1 Allgemeines

Als Leistungstransformatoren bezeichnet man meist Dreiphasentransformatoren, welche für hohe Leistungen ausgelegt sind. Da ein Großteil der elektrischen Energieversorgung und Erzeugung über Dreiphasensysteme erfolgt, sind Leistungstransformatoren als Dreiphasensysteme ausgeführt [30]. Anstelle von Dreiphasentransformatoren können auch drei Einphasentransformatoren eingesetzt werden. Das hat zwar den Nachteil eines größeren Materialaufwandes, jedoch ergeben sich Vorteile bezüglich der Transportierbarkeit und Reservehaltung. Leistungstransformatoren bestehen im Wesentlichen aus einem Eisenkern, Ober- und Unterspannungswicklungen und einem Kessel. Meist sind die Kessel mit Öl gefüllt. Dies dient einerseits der Kühlung und andererseits der Isolation. Abbildung 2.9 zeigt einen Leistungstransformator und seine wesentlichen Komponenten.

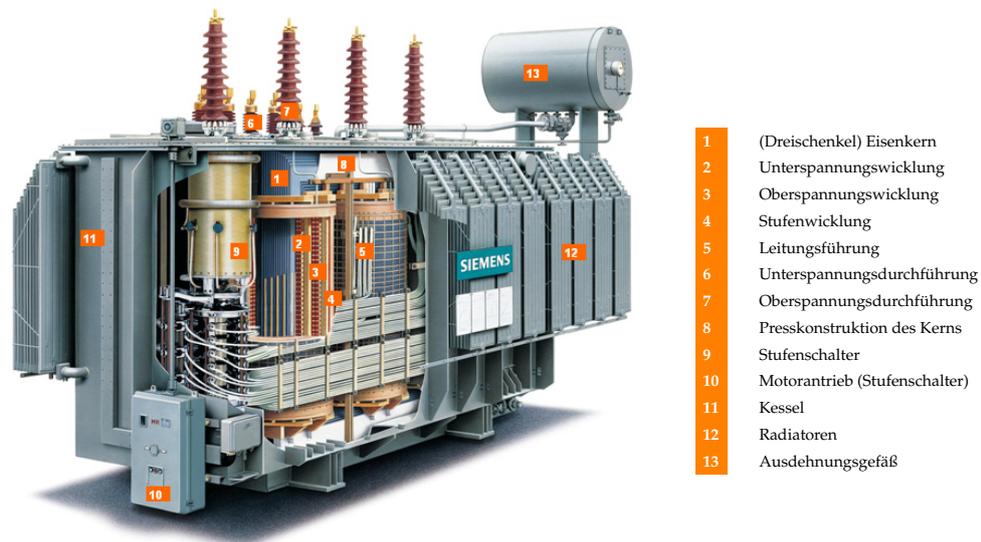


Abbildung 2.9: Hauptkomponenten eines Dreiphasen-(Leistungs) Transformators

2.2.2 Material und Aufbau des Kerns

Der Eisenkern eines Transformators besteht hauptsächlich aus einzelnen, zueinander isolierten, meist kaltgewalzten Blechen mit einer üblichen Dicke von $\approx 0,3$ mm. Durch das Ausführen des Kerns aus einzelnen Blechen wird versucht, die Wirbelstromverluste möglichst klein zu halten. Die einzelnen Bleche haben dabei eine magnetische Vorzugsrichtung, das heißt, sie lassen sich üblicherweise in Walzrichtung am leichtesten magnetisieren und weisen außerordentlich geringe Ummagnetisierungsverluste in dieser auf [41].

Aufgrund der zuvor erwähnten magnetischen Vorzugsrichtung und wegen der großen Abmessungen ist es üblich, die Kerne aus einzelnen Blechstreifen herzustellen und nicht aus einem ganzen Stück. Diese einzelnen Streifen werden zu einzelnen Blechpaketen zusammengefasst. Um die Joche mit den Schenkeln zu verbinden, werden diese an den Ecken verzapft¹. Die einzelnen Blechpakete bzw. Schenkel und Joche haben einen annähernd kreisförmigen Querschnitt. Damit erzielt man eine bestmögliche Ausnutzung des Wicklungsquerschnittes. Abbildung 2.10 zeigt den Aufbau eines Transformator-kerns aus einzelnen Blechstreifen, sowie die Stufung des Jochs bzw. Schenkels eines Transformators.

Bei Leistungstransformatoren bringt man am oberen und unteren Joch zusätzlich jeweils eine Presskonstruktion an (Abbildung 2.9 **8**). Diese werden paarweise gepresst, wodurch die Haftreibung an den Stoßstellen der Bleche den Kern zusammenhalten. Weiters haben die Jochpresspakete die Aufgabe, die während eines Kurzschlusses auftretenden Kräfte der Wicklung zu kompensieren.

¹ „Beim Verzapfen werden die Kernbleche so aufeinander geschichtet, dass die Stoßstellen (Überlappungen) schichtweise gegeneinander versetzt sind.“ [23]



(a) Transformatorkernaufbau



(b) Stufung des Blechpakets

Abbildung 2.10: Aufbau eines Transformatorkerns

2.2.3 Kernbauarten von Leistungstransformatoren

Für Leistungstransformatoren existieren eine Reihe von Kernaufbauten. Sie können einerseits aus drei getrennten Einphasentransformatoren aufgebaut sein oder die Einphasentransformatoren werden zu einer Transformatorbank zusammengelegt. Die gebräuchlichsten Ausführungen für Dreiphasenleistungstransformatoren sind die des unsymmetrischen Dreiphasentransformators, sowie die des Fünfschenkeltransformators. Es gibt auch noch die symmetrische Bauart, die für Leistungstransformatoren aber eher nur eine theoretische Bedeutung hat [2].

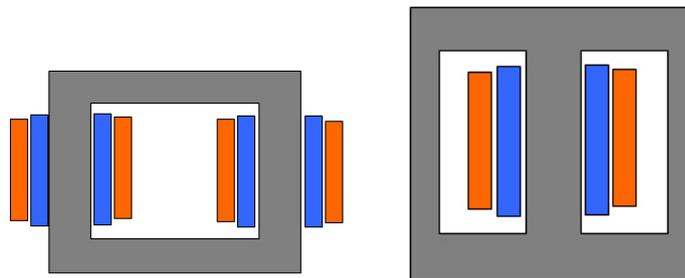
Alle nachstehenden Kernbauarten haben den Grundgedanken, die magnetischen Kreise dreier Einphasen-Kerntransformatoren zu vereinen.

Einphasen-Kerntransformator

Einphasentransformatoren können entweder als Kern- oder als Manteltransformatoren ausgeführt sein. Beim Kerntransformator (Abbildung 2.11 a) werden auf beide Schenkel jeweils die halbe Windungszahl der Primär- sowie Sekundärwicklung angebracht.

Beim Manteltransformator (Abbildung 2.11 b) hingegen trägt der Mit-

telschenkel beide Wicklungen. Dieser hat üblicherweise einen doppelt so großen Querschnitt wie ein Außenschenkel.



(a) Einphasen Kerntransformator (b) Einphasen Manteltransformator

Abbildung 2.11: Kernaufbau Einphasentransformator

Symmetrischer Dreiphasentransformator

Diese Bauart wird auch als Tempeltyp bezeichnet [2]. Sie ist konstruktiv sehr aufwendig und wird daher kaum verwendet. Nachstehende Abbildung zeigt den Aufbau eines Tempeltyp Transformators.

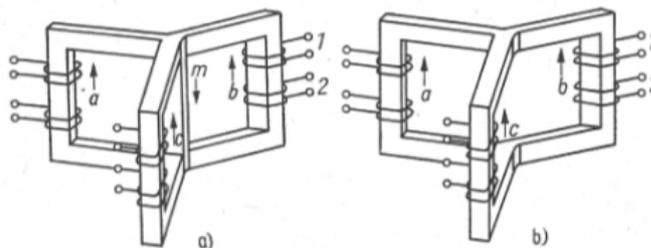


Abbildung 2.12: a) Vereinigung der magnetischen Kreise dreier Einphasen-Kerntransformatoren; b) symmetrischer Dreiphasen-Kerntransformator [30]

Es ist zu erkennen, dass sich die einzelnen Teilflüsse Φ_a , Φ_b , Φ_c , im Mittelschenkel zu Null ergänzen, wenn der Kerntransformator nach Abbildung 2.12a in einem symmetrischen Dreiphasensystem arbeitet und dabei

symmetrisch belastet wird. Da der resultierende Fluss im Mittelschenkel Null ist, kann letzterer weggelassen werden.

Unsymmetrischer Dreiphasentransformator

Diese Bauart stellt die wichtigste und gebräuchlichste Kernbauart von Leitungstransformatoren dar [41]. Hierzu werden alle drei wicklungstragenden Schenkel in eine Ebene gelegt (Abb. 2.13). Im Gegensatz zum Tempeltyp besitzt der unsymmetrische Aufbau eine magnetische Unsymmetrie, da der mittlere Schenkel einen kürzeren magnetischen Weg hat, als die beiden äußeren. Dadurch fließen auch unterschiedliche Magnetisierungsströme.



Abbildung 2.13: Unsymmetrischer Dreiphasen-Kerntransformator

Fünfschenkelkerntransformator

Werden zu den drei bewickelten Schenkeln, des in Abbildung 2.13 dargestellten Transformortyps, noch zwei unbewickelte Schenkel hinzugefügt, so kommt man zur Bauweise eines Fünfschenkeltransformators. Diese Bauart hat den Vorteil, dass es zur Symmetrierung der Flüsse kommt. Weiters wird erreicht, dass der Querschnitt der Joche auf ungefähr 60% der Schenkelquerschnitte reduziert werden kann, wodurch die Bauhöhe des Transformators verringert wird [41]. Nachstehende Abbildung zeigt das Eisengestell eines Drehstromtransformators mit fünf Schenkeln.



Abbildung 2.14: Eisenkern eines Fünfschenkeltransformators [41]

2.2.4 Wicklungsarten

Der Aufbau der Wicklungen von Leistungstransformatoren beschränkt sich hauptsächlich auf die Ausführung als Zylinderwicklung oder als Scheibenwicklung.

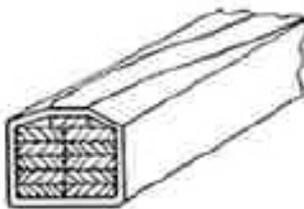


Abbildung 2.15: Leiterausführung als Drilleiter [18]

Diese bestehen hauptsächlich aus Drilleitern¹. Als Leiterwerkstoff wird meist Kupfer verwendet. Als Isolierung dienen Papier, anorganische Stoffe sowie Lack [7].

¹ „Bündel mit ungerader Zahl lackisolierter Flachdrähte, die mit ihren Schmalseiten hälftig in zwei Ebenen übereinander liegen und innerhalb des Bündels periodisch ihre Lage verändern.“ [7].

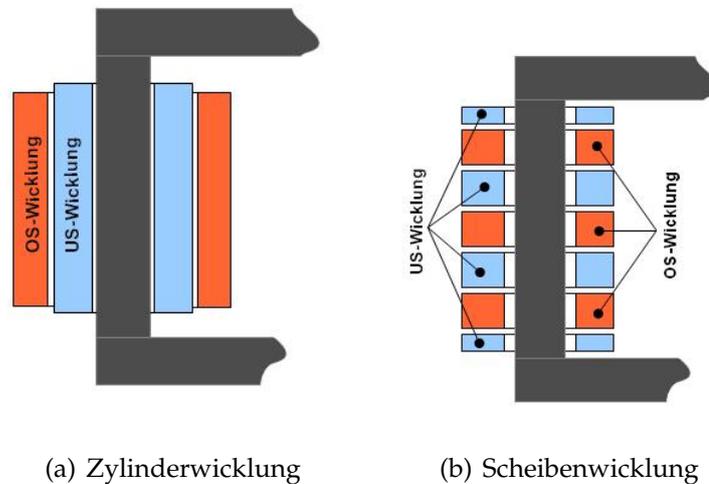


Abbildung 2.16: Prinzipieller Aufbau einer Transformatorwicklung

Zylinderwicklung

Diese Art der Wicklung wird auch Röhrenwicklung genannt (Abbildung 2.16a). Dazu werden beide Wicklungssysteme, bestehend aus Unterspannung und Oberspannungswicklung konzentrisch zum Kern (Schenkel) verlegt [13]. Die Unterspannungswicklung liegt dabei, aus isoliertechnischen Gründen, immer näher am Kern. Über die Unterspannungswicklung wird getrennt, durch eine Isolation, die Oberspannungswicklung aufgetragen. Diese Wicklungsart wird bei den meisten Transformatoren verwendet.

Scheibenwicklung

Bei dieser Art von Wicklungssystem wird sowohl die Ober- als auch die Unterspannungswicklung in mehrere Teile aufgespaltet (Abbildung 2.16 b). Dadurch erreicht man eine räumliche Annäherung der beiden Wicklungsstränge. Um einen symmetrischen Aufbau zu erhalten, werden die beiden Außenspulen als zwei Halbspulen ausgeführt und aus isoliertechnischen Gründen wieder der Unterspannungswicklung zugeordnet.

2.2.5 Isolierung

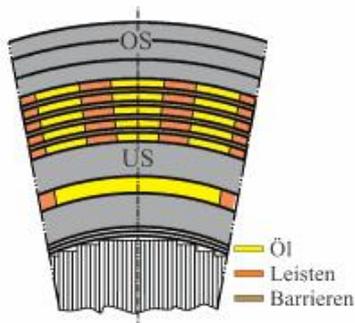


Abbildung 2.17: Isolationsaufbau der Hauptisolierung [16]

Nebenstehende Abbildung zeigt schematisch den Isolationsaufbau eines Öltransformators. Die Isolierung der Leiter, sowie die der einzelnen Wicklungsteile gegeneinander, wird als *innere Isolierung* bezeichnet. Diese ist von den auftretenden Spannungsbeanspruchungen abhängig. Bei Leistungstransformatoren werden die Scheiben bzw. Lagen spulen durch Isolierstrecken getrennt. Diese Isolierstrecken bestehen üblicherweise aus Isolierscheiben bzw. Isolierzylindern, aus Kanälen durch Leisten oder einer Kombination von beiden. Die *Hauptisolierung* bezeichnet hingegen die Isolierungen zwischen den Wicklungen und die Isolierung der Wicklung gegen Erde (Eisenkern, Konstruktionsteile, Kessel, usw.). Diese Isolation besteht im Wesentlichen aus einer Kombination aus Öl (Öl) und festem Isoliermaterial. Abstandshalter und Abstützteile sind aus Pressspan oder Holz. [7] [30] [2]

2.2.6 Der Kessel

Bei Leistungstransformatoren dient der Kessel einerseits als Behälter des Isolations- und Kühlmaterials, andererseits trägt er alle außenliegenden Komponenten wie Ausdehnungsgefäß, Kühlanlagen (Radiatoren, Lüfter, usw.), Steuerschränke und Durchführungen. Dabei besteht der Kessel meist aus Baustahl oder Eisen [11]. Die Abmessungen des Kessel sind so gewählt, dass die Lichtmaße¹ des Ölkessels dem Eisenkern und dessen Wicklungen soweit angepasst sind, wie es die Isolation der spannungsführenden Teile gegen Erde erlaubt [23].

¹Lichtmaß bezeichnet den innen gemessenen Abstand zwischen zwei voneinander entfernten Bauteilen.

2.2.7 Das Ausdehnungsgefäß und das Buchholz-Relais

Bei Öltransformatoren muss verhindert werden, dass das im Kessel des Transformators enthaltene Öl mit Luftsauerstoff in Verbindung kommt. Dazu wird über dem Transformatordeckel ein Ausdehnungsgefäß, auch Ölkonservator genannt, angeordnet (siehe Abbildung 2.9). Dieses Ausdehnungsgefäß ist über Rohrleitungen mit dem Kessel verbunden und nimmt die Volumenänderung des Öls unter verschiedenen Temperaturen auf. Dabei ist sicherzustellen, dass bei niedrigster Öltemperatur ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) der Ölspiegel noch im Ausdehnungsgefäß steht und bei Höchsttemperatur ($\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) das Ausdehnungsgefäß nicht überläuft [41].

In der Verbindungsleitung zwischen dem Kessel und dem Ausdehnungsgefäß sitzt üblicherweise das Buchholz-Relais. Dieses ist eine Schutzeinrichtung, welche so ausgebildet ist, dass eine Gasbildung im Buchholzrelais, ein Absinken des Ölstandes im Transformator und eine große Strömungsgeschwindigkeit des Öls vom Kessel zum Ausdehnungsgefäß (hervorgerufen durch einen massiven Fehler im Aktivteil, wodurch z.B. große Mengen Gas entstehen und es zu einem großem Druckerhöhung kommt) erkannt werden können [1]. Abbildung 2.18 zeigt den grundsätzlichen Aufbau eines Buchholzrelais.

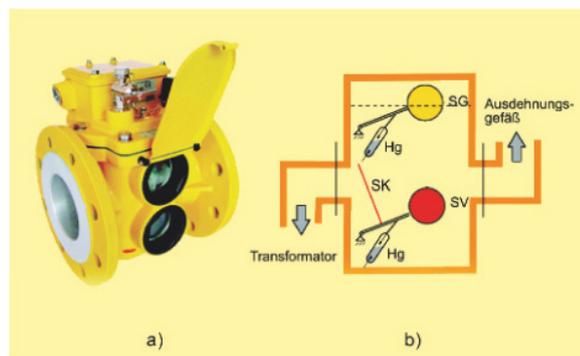
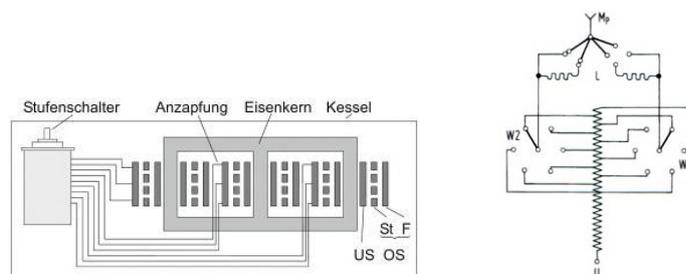


Abbildung 2.18: Buchholz-Schutzrelais (EMB). a) Technische Realisierung; b) Schematische Darstellung. SG: Schwimmer für Gasbildung, SV Schwimmer für Ölverlust, SK Stauklappe, Hg: Quecksilberschaltröhren [40]

2.2.8 Der Stufenschalter

Der Stufenschalter dient zur stufenweisen Einstellung der Übersetzung von Primärseite auf Sekundärseite unter Last. Dadurch können lastabhängige Spannungsänderungen bei Leistungstransformatoren kompensiert werden.



(a) Prinzipieller Aufbau eines Transformators mit Stufenschalter; *US*: Unterspannungswicklung, *OS*: Oberspannungswicklung, *St*: Stammwicklung, *F*: Feinstufung; [19]

(b) Prinzipschaltung eines Stufenschalters; *W1*, *W2*: Vorwähler, *L*: Lastumschalter; [46]

Abbildung 2.19: Transformator mit Stufenschalter

Wie in Abbildung 2.19 a zu erkennen, wird dazu die Oberspannungswicklung als eine Stamm- und eine Stufenwicklung ausgeführt. Die Stufenwicklung hat mehrere Anzapfungen. Durch den sogenannten Vorwähler werden im spannungsführenden, aber stromlosen Zustand die gewünschten Anzapfungen der Oberspannungswicklung ausgewählt. Durch den Lastumschalter wird unter Last auf die vom Vorwähler eingestellten Anzapfungen umgeschaltet. Da der Lastumschalter unter voller Last arbeitet, entstehen beim Umschalten Schaltlichtbögen, wodurch es zu einer Verschmutzung des Öls kommt. Daher wird der Stufenschalter fast immer in einem eigenem, mit Öl gefüllten Behälter, untergebracht.

2.2.9 Kühlsystem

Bei Transformatoren werden die Kühlungsarten hinsichtlich

- des verwendeten Kühlmediums, sowie der
- Art der Kühlmittelbewegung

unterschieden. Der Kühlkreislauf kann in zwei Bereiche aufgespalten werden. Der primäre Kühlkreislauf sorgt dafür, dass die Wärmeenergie, erzeugt durch die Verluste in den Wicklungen, Eisenteilen, usw., nach außen abgeführt wird. Der sekundäre Kreislauf ist für die Rückkühlung des inneren Kühlmittels verantwortlich. Es müssen jedoch nicht immer zwei Kühlkreisläufe vorhanden sein. So wird zum Beispiel ein Trockentransformator nur durch die ihn umgebende Luft gekühlt. Bei flüssigkeitsgefüllten Leistungstransformatoren hat man hingegen immer zwei Kühlkreisläufe.

Die Bezeichnung der Kühlungsart eines Transformators erfolgt über 4 Kennbuchstaben. [20].

$$\left(\begin{array}{c} \text{Kühlmittel} \\ \text{des inneren} \\ \text{Kühlkreislaufes} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{Kühlmittelbewegung} \\ \text{des inneren} \\ \text{Kühlmittels} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{Kühlmittel} \\ \text{des äußeren} \\ \text{Kühlkreislaufs} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{Kühlmittelbewegung} \\ \text{des äußeren} \\ \text{Kühlmittels} \end{array} \right)$$

Ebenfalls sind Buchstaben für die wichtigsten Kühlmittel sowie Kühlmittelbewegungen definiert (Tabelle 2.1).

Inneres Kühlmittel (im Kessel)		Äußeres Kühlmittel	
Kühlmittelart	Kühlmittelbewegung	Kühlmittelart	Kühlmittelbewegung
O	N	A	N
Mineralöl oder synthetische Isolierflüssigkeit mit Brennpunkt < 300°C	natürlicher, durch Thermosiphon-Antrieb bewirkter Umlauf	Luft	Natürliche Konvektion
K	F	W	F
Isolierflüssigkeit mit Brennpunkt > 300°C	erzwungener Umlauf durch Pumpen, Thermosiphon durch Wicklungen	Wasser	erzwungener Umlauf (Ventilatoren)
L	D		
Isolierflüssigkeit mit nicht Messbaren Brennpunkt	erzwungener Umlauf durch Pumpen und in die Wicklung gerichtet		

Tabelle 2.1: Kennzeichnung der Kühlungsarten von Öltransformatoren [18]

Es ist möglich, dass ein Transformator auch mehrere Kühlstufen besitzt. So kann zum Beispiel der, im Zuge dieser Diplomarbeit untersuchte, Transformator zwischen der Kühlstufe ONAN und ONAF wechseln, dadurch wird das äußere Kühlmittel verstärkt durch Lüfter bewegt.

Eine weitere wichtige Maßnahme bei Leistungstransformatoren bezüglich des Kühlsystems ist es, die Oberfläche, über welche das innere Kühlmittel seine Wärmeenergie an das äußere Kühlmittel abgibt, zu vergrößern. Dies wird meist dadurch erreicht, dass die Oberfläche des Gefäßes als Rippenkessel ausgeführt wird oder man zusätzliche Kühlelemente in Form von Rohrhafen oder Radiatoren am Kessel anbringt. Nachstehende Tabelle zeigt schematisch Ausführungsformen von luftgekühlten Gefäßen [31].

Ausführungsform	Glattblechkessel	Kühlrippen	Rohrhafen	Radiatoren
Ausschnitt der Kesselwand als Draufsicht				
Seitenansicht des Kessels				

Tabelle 2.2: Ausführungsarten luftgekühlter Gefäße [31]

2.3 Wärmequellen im Transformator

Bei einem Transformator sind fast alle metallischen Teile aktiv an der Erwärmung beteiligt (siehe Abbildung 2.1). Dabei wirken sich die einzelnen Wärmequellen jedoch recht unterschiedlich auf das gesamte Temperaturverhalten des Transformators aus. In den nachstehenden Abschnitten wird näher auf die einzelnen Wärmequellen im Transformator und deren Auswirkungen eingegangen.

2.3.1 Verluste im Eisenkern

Diese Verluste werden als Leerlaufverluste P_0 bezeichnet und setzen sich aus den Wirbelstrom- und den Hystereseverlusten zusammen. Die Höhe der Leerlaufverluste wird bestimmt durch: [18]

- den Magnetisierungsbedarf des Kerns und die spezifische magnetische Flussdichte im (Eisen-) Kernquerschnitt
- die Frequenz des Wechselstromes bzw. des Wechselfeldes
- die magnetischen Eigenschaften des Kernblechs
- die Verarbeitung der Bleche und deren Anordnung im Kern

Hystereseverluste

Anhand Abbildung 2.20 sollen die Hystereseverluste näher erklärt werden. Durch das magnetische Wechselfeld pendelt die magnetische Erregung, im Frequenzrhythmus des Stromes, zwischen $\pm H_e$.

Die magnetische Feldstärke sei nun im Punkt a angesiedelt ($H = 0$). Nun wird H , von diesem Punkt aus, bis auf H_e erhöht, dazu muss Arbeit aufgewendet werden, welche der waagrecht (grün) schraffierten Fläche entspricht. Anschließend wird die magnetische Feldstärke wieder bis auf Null verringert, dabei durchläuft die magnetische Feldstärke den zweiten Arm der Hystereseschleife und landet in Punkt b .

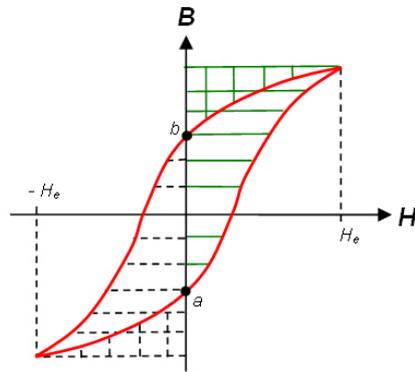


Abbildung 2.20: Berechnung Hystereseverluste

Dabei wird Energie zurückgewonnen, welcher der senkrecht (grün) schraffierten Fläche entspricht. Würde man die magnetische Feldstärke weiter bis auf $-H_e$ verringern, so wäre wieder Arbeit aufzuwenden (waagrecht (strichliert) schraffierte Fläche). Von diesem Punkt bis zum Punkt a würde wieder Energie zurückgewonnen werden (senkrecht (strichliert) schraffierte Fläche). [8]

Aus dem beschriebenen Magnetisierungszyklus ist zu erkennen, dass die Differenz zwischen aufgewendeter und abgegebener Energie ungleich Null ist. Insgesamt kommt es also zu einem Energieverlust, welcher der Fläche innerhalb der Hystereseschleife entspricht. Formal können die Hystereseverluste wie folgt beschrieben werden.

$$w_{Hyst} = \frac{W_{Hyst}}{V} = \oint H dB \quad w_{Hyst} \dots \text{Energieverlust durch Hysteresis je Volumen } V \quad (2.5)$$

$$P_{Hyst} = f V \oint H dB \quad f \dots \text{Frequenz}$$

$$P_{Hyst} \sim f B^2$$

„Die Hystereseverluste verhalten sich proportional zur Frequenz und etwa zum Quadrat der magnetischen Flussdichte B .“ [15]

Wirbelstromverluste

Da der Eisenkern auch elektrisch leitend ist, werden sich im Eisenkern selber, senkrecht zum magnetischen Fluss, aufgrund des Induktionsgesetzes (Abschnitt 2.1.3), Ströme ausbilden. Diese Ströme werden auch als Wirbelströme bezeichnet. Die induzierte Spannung im Eisenkern ist von dessen

Querschnittfläche abhängig, daher führt man den Eisenkern eines Transformator aus einzelnen Blechen, welche zueinander isoliert sind, aus. Nachstehende Abbildung soll dies verdeutlichen.

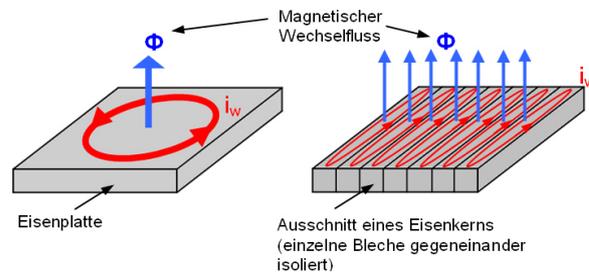


Abbildung 2.21: Prinzipbild Wirbelströme i_w : Links: Eisenplatte wird von magnetischem Wechselfeld durchsetzt; Rechts: Eisenkern eines Transformators mit magnetischem Wechselfeld

Diese Wirbelströme (Abbildung 2.21) erzeugen aufgrund des endlichen Widerstandes der Transformatorbleche Verluste, welche als Wirbelstromverluste bezeichnet werden und im Transformator Wärme erzeugen.

Die mathematische Formulierung der Wirbelstromverluste ist mit einfachen mathematischen Mitteln nicht möglich, daher versucht man, diese mit einem einfachen Modell zu erfassen. Dazu wird der Wirbelstromwiderstand R_w für niedrige Frequenzen und in einem schmalen Frequenzbereich definiert. [15] Dann gilt für die Wirbelstromverluste:

$$\begin{aligned}\omega &= 2\pi f \\ \phi &= \int_A \vec{B} \, d\vec{A} \stackrel{\text{konst. } A}{=} A B \\ U_{ind} = U_w &= \frac{d\Phi}{dt} = A \frac{dB}{dt} \\ P_w &= \frac{U_w^2}{R_w} = \frac{(A \omega B)^2}{R_w} \\ P_w &\sim f^2 B^2\end{aligned}\tag{2.6}$$

„Die Wirbelstromverluste verhalten sich proportional zum Quadrat der Frequenz und verändern sich etwa quadratisch mit der magnetischen Flussdichte B .“ [15]

2.3.2 Verluste im Stromkreis

In diesem Abschnitt werden jene Verluste behandelt, welche durch die zum Stromkreis des Transformators gehörenden Komponenten auftreten (Wicklungen, Stromleiter, Durchführungen, Umstellereinrichtungen, Wandler, usw.). [18]

Wicklungsverluste

In den Wicklungen eines belasteten Transformators entstehen Verluste, diese Verluste haben zwei Ursachen. Da man als Leitermaterial für die Wicklungen überwiegend Kupfer verwendet, kommt es aufgrund der endlichen Leitfähigkeit des Kupfers zu ohmschen Verlusten in den Leitungen der Wicklung. Diese werden auch als Kupferverluste P_{Cu} bezeichnet. Die Kupferverluste ändern sich mit der Temperatur, da der spezifische Widerstand ρ_{Cu} der Wicklung temperaturabhängig ist.

$$\begin{aligned} \rho_{Cu}(T) &= \rho(T_0) (1 + \alpha (T - T_0)) \\ R_{Cu,T} &= \rho_{Cu}(T) \frac{l}{A} \quad \text{oder:} \quad R_{Cu,T} = R_{Cu,T_0} \frac{235 + T}{235 + T_0} \\ P_{Cu,T} &= R_{Cu} I^2 \end{aligned} \tag{2.7}$$

mit: T_0 ... Bezugstemperatur

α ... linearer Temperaturkoeffizient

Die zweite Ursache für Verluste in den Wicklungen sind wieder Wirbelströme. Diese entstehen, da die Wicklungsleiter einem magnetischen Streufluss¹ ausgesetzt sind (siehe Abbildung 2.22a). Der wesentliche Teil des Streuflusses verläuft zwischen der Unterspannungs- und Oberspannungswicklung, aber er durchsetzt auch andere Teile der Wicklungen und zwar nicht kontinuierlich wie es in Abbildung 2.22b zu sehen ist. Eine Maßnahme, um

¹Der Streufluss beschreibt jenen Teil des magnetischen Flusses, welcher sich nicht über den Eisenkern schließt.

diese Wirbelstromverluste in den Wicklungen weitgehend zu vermeiden, ist die Wicklung als einzelne, zueinander isolierte, Teileiter auszuführen. Eine mögliche Ausführung der Leiter als Drillleiter wurde bereits unter Abschnitt 2.2.4 aufgezeigt. [18]

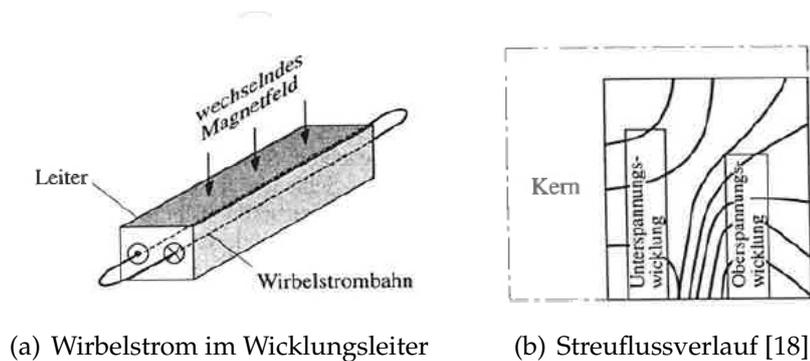


Abbildung 2.22: Wicklungsverluste durch Streufluss

Verluste in Stromleitern

Zu den Stromleitern zählen alle stromführenden Verbindungen, wie zum Beispiel die Verbindungen der Wicklungen mit den Durchführungen. Diese Stromleiter erzeugen einerseits ihr eigenes magnetisches Wechselfeld, welches wiederum in metallischen Komponenten Verluste hervorruft, andererseits werden teilweise auch sie von Streufeldern erfasst. Dadurch kommt es auch in den Stromleitern zu Wirbelstromverlusten. [18]

2.3.3 Zusätzliche Verluste

Der in den vorherigen Abschnitten beschriebene Streufluss durchsetzt auch die passiven Bauelemente eines Transformators (Abbildung 2.23).

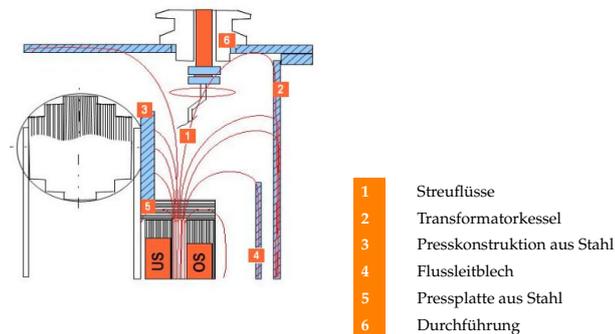


Abbildung 2.23: Streuflüsse im Transformator [18]

Dieser Streufluss erzeugt in allen metallischen Komponenten, die er durchsetzt, Wirbelströme. Dadurch kommt es in all diesen ebenfalls zu Wirbelstromverlusten, wodurch Wärme entwickelt wird.

Eine Abhilfe bringt das in Abbildung 2.23 dargestellte Flussleitblech (4). Dieses ist meist, wie der Transformator-kern, geblecht ausgeführt. Dadurch schirmt es einerseits die Kesselwand vor dem Streufluss ab und andererseits werden, durch die geblechte Ausführung, die Wirbelströme reduziert. [18]

2.3.4 Zusammenfassung

Die Gesamtverluste eines Transformators setzen sich aus den Verlusten im Eisenkern (Hystereseverluste & Wirbelstromverlusten im Kern), den Kupferverlusten sowie den streuflussbedingten Wirbelstromverlusten in Wicklungen, Stromleiter sowie in den anderen Konstruktionsteilen zusammen. Die Verluste im Eisenkern bezeichnet man als Leerlaufverluste P_0 , da diese aus der Leerlaufmessung ermittelt werden. Die Wicklungs-, Stromleiter- und Zusatzverluste lassen sich durch Anspeisung bei Kurzschlusschaltung mit Nennstrom ermitteln und werden daher als Kurzschlussverluste P_k betitelt.

2.4 Wärmetransport

Die in den Wicklungen und den anderen Konstruktionsteilen erzeugte Wärme wird über das Kühlsystem des Transformators nach außen abgeführt. Dabei wird die thermische Energie infolge eines Temperaturgradienten auf drei verschiedenen Arten transportiert, die gleichzeitig wirksam sein können. In diesem Abschnitt sollen nun die Grundlagen der Wärmeübertragung näher erläutert werden.

2.4.1 Wärmeleitung

Als Wärmeleitung bezeichnet man den Wärmetransport innerhalb eines festen Körpers. Dabei wird die Wärmeenergie innerhalb des Körpers durch molekulare Schwingungen und bei Metallen zusätzlich durch die Leitungselektronen transportiert. Auch hier erfolgt der Wärmetransport in Richtung des niedrigeren Temperaturniveaus. Der Wärmestrom hängt von der Form und Größe eines Körpers, dem Temperaturunterschied sowie der Wärmeleitfähigkeit λ des Körpers ab. [14]

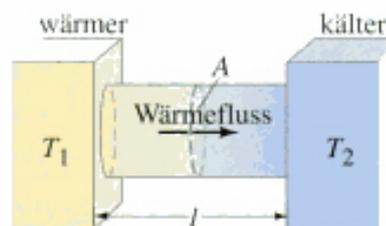


Abbildung 2.24: Wärmeleitung zwischen 2 Flächen [14]

Wärmeleitung

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad (2.8)$$

2.4.2 Wärmestrahlung

Bei der Wärmestrahlung erfolgt die Wärmeübertragung nicht über stoffliche Träger, sondern über elektromagnetische Strahlung. Die elektromagnetische Strahlung ist temperaturabhängig. [10] Bei zwei Körpern unterschiedlicher Temperaturen kommt es zu einem Strahlungsaustausch. Dabei emittieren sowohl warmer als auch kalter Körper, so dass die, bei dem Wärmeaustausch übertragene, Wärme gleich der Differenz der von den Körpern absorbierten Strahlungsanteilen entspricht. [26] Die Wärme, welche von einer Körperfläche A_1 (absolute Temperatur T_1) auf eine umgebende Fläche A_2 (absolute Temperatur T_2) übertragen wird, lässt sich wie folgt beschreiben.

$$\dot{Q} = C_r \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (2.9)$$

C_r beschreibt die Strahlungszahl, welche von mehreren Faktoren abhängt, wie z.B. Lage und Größe der beiden strahlenden Flächen zueinander oder spezifische Ausstrahlung der beiden Körper.

$$C_r = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_s} \right)} \quad (2.10)$$

In Gleichung 2.10 beschreiben A_1 und A_2 die strahlenden Flächen mit den dazugehörigen Strahlungszahlen C_1 und C_2 . C_s beschreibt in obiger Gleichung die Strahlungskonstante eines schwarzen Körpers ($C_s = \sigma \cdot 10^8 = 5,67 \left[\frac{\text{W}}{\text{K}^4 \text{m}^2} \right]^1$). Aus Zweckmäßigkeitsgründen führt man eine temperaturabhängige Wärmeübergangszahl der Strahlung ein.

$$\alpha_s = C_r \frac{\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4}{T_1 - T_2} \quad (2.11)$$

Mit obigen Gleichungen ergibt sich schlussendlich die Wärmeenergie, welche in einer Zeit von einer Fläche infolge von Strahlung abgegeben wird. [22] [26]

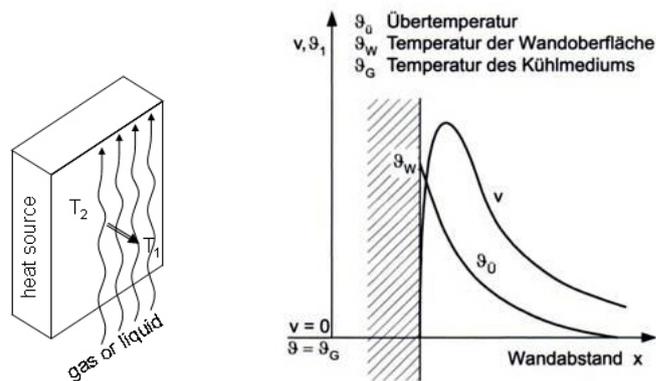
$$\dot{Q} = \alpha_s A (T_1 - T_2) = \alpha_s A \vartheta \quad (2.12)$$

¹Die Stefan-Boltzmann Konstante ist eine Naturkonstante und ergibt sich aus $\sigma = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15h^3 c^2} = (5,670\,400 \pm 0,000\,040) \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$

2.4.3 Konvektion

Als Konvektion bezeichnet man den Wärmetransport durch bewegte Gas- oder Flüssigkeitsteilchen. Befindet sich ein warmer Körper in einem bewegten Medium, findet ein Wärmetransport statt. Da die bewegten Teilchen Wärme aufnehmen oder abgeben, nimmt ihre Dichte ab oder zu und sie bewegen sich dadurch den warmen Körper entlang hinauf oder hinunter. Diese Art der Konvektion bezeichnet man als freie oder natürliche Konvektion, da die Bewegung des Mediums nur aufgrund des temperaturabhängigen Dichteunterschiedes der Teilchen hervorgerufen wird. Bei Konvektion ist jedoch noch zu erwähnen, dass sich die Wärmeübertragung nur auf eine dünne Schicht des bewegten Mediums erstreckt. (Abb. 2.25) [22] [18]

Gleichung 2.13 beschreibt die, durch natürliche Konvektion von einer Körperoberfläche A abgegebene oder aufgenommene, Wärmemenge \dot{Q} .



(a) Freie Konvektion an vertikaler Fläche

(b) Temperatur- und Geschwindigkeitsverlauf an der Grenzschicht im Kühlmedium bei Wärmeübertragung durch freie Konvektion [22]

Abbildung 2.25: Wärmeübergang durch Konvektion

Wärmeübertragung durch freie Konvektion:

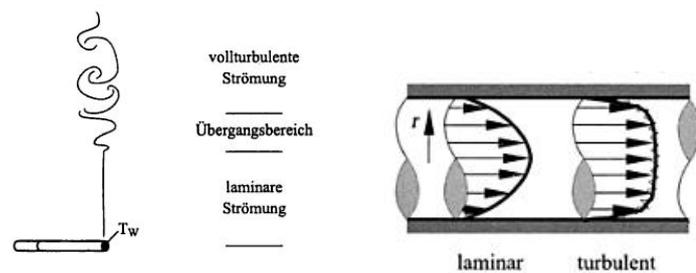
$$\dot{Q} = \alpha_k A (T_1 - T_2) = \alpha_k A \vartheta \quad (2.13)$$

α_k beschreibt in obiger Formel den Wärmeübergangskoeffizienten. Dieser ist keine Materialkonstante sondern hängt stark von folgenden Faktoren ab:

- den physikalischen Eigenschaften des Stoffes wie Viskosität, Dichte, Wärmeleitfähigkeit, Ausdehnungskoeffizient usw.
- der Strömungsart des Mediums (turbulent oder laminar) und der Strömungsgeschwindigkeit
- den geometrischen Abmessungen und der Oberflächenbeschaffenheit des beströmten Körpers

Wie aus den Einflussgrößen des Wärmeübergangskoeffizienten zu sehen ist, kann der Wärmeübergang merklich verbessert werden, wenn das Kühlmedium mit einer höheren Strömungsgeschwindigkeit den erwärmten Körper beströmt. Beim Transformator kann dieser Effekt genutzt werden, indem man Pumpen für das innere Kühlmedium verwendet und so eine höhere Strömungsgeschwindigkeit des Kühlmediums erhält oder die Luftströmung der Radiatoren durch Lüfter erhöht. Wird also die Strömungsgeschwindigkeit des bewegten Kühlmediums künstlich erhöht, spricht man von **erzwungener Konvektion** oder **forcierter Konvektion**.

Ein weiterer positiver Effekt bei forcierter Kühlung ist die Art der Strömung. Wie bereits angedeutet unterscheidet man zwischen laminarer und turbulenter Strömung.



(a) Prinzipbild einer turbulenten Strömung

(b) Strömungsprofile bei laminarer und turbulenter Strömung in einem Rohr [28] [32]

Abbildung 2.26: Prinzipbild sowie Strömungsprofil einer turbulenten Strömung

Bei der laminaren Strömung hat man ein Geschwindigkeitsprofil wie in Abbildung 2.25 angedeutet, dabei bewegen sich die einzelnen bewegten Teilchen in geordneten parallelen Bahnen. Bei weiterer Steigerung der Strömungsgeschwindigkeit, durch forcierte oder freie Konvektion, tritt zusätzlich eine Querbewegung der Teilchen zu den zuvor parallelen Bahnen auf. Diese Querbewegung wird immer heftiger mit zunehmender Geschwindigkeit, bis die Strömung vollkommen zu einer turbulenten Strömung übergeht. [28] Durch diese zusätzliche Querströmung erhält man einen besseren Abtransport der Wärme von der Oberfläche. Abbildung 2.26 zeigt eine solche turbulente Strömung an einer vertikalen Platte.

All diese Faktoren, welche den Wärmeübergangskoeffizienten bestimmen, lassen sich nun nur schwer oder gar nicht mathematisch beschreiben. Um den Wärmekoeffizienten trotzdem zu bestimmen, bedient man sich Kennzahlen, welche aus Ähnlichkeitsbetrachtungen stammen und die Einflussgrößen des Wärmeübergangskoeffizienten gut beschreiben. Im Nachfolgenden sollen diese Kennzahlen näher betrachtet werden.

- „Die **Reynolds-Zahl** (Re) sagt aus, ob und wie stark eine Wirbelbildung stattfindet.“ [4] Das heißt sie kennzeichnet die Art der Strömung,

$$Re = \frac{wl}{\nu}. \quad (2.14)$$

- „Die **Prandl-Zahl** (Pr) ist das Verhältnis der kinematischen Viskosität zur Temperaturleitfähigkeit.“ [5] Sie setzt sich aus Stoffwerten zusammen und ist daher auch eine Kennzeichnung der Stoffwerte des strömenden Mediums,

$$Pr = \frac{\vartheta}{a}. \quad (2.15)$$

- „Die **Grashof-Zahl** (Gr) ist bei Strömungen von übergeordneter Bedeutung, bei denen Dichteunterschiede, die von Temperaturdifferenzen hervorgerufen werden, die wesentliche Antriebsursache für eine Bewegung des Fluids

sind.“ [27] Sie ist also bei freier Konvektion von großer Bedeutung,

$$Gr = \frac{g \gamma l^3 \Delta \Theta}{\xi^2}. \quad (2.16)$$

- „Die **Nußelt-Zahl** (Nu) kennzeichnet das Verhältnis Wärmeübergang zu Wärmeleitung für das strömende Medium.“ [18] Sie beschreibt also das Verhältnis von konvektiver und diffuser Wärmeübertragung,

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}. \quad (2.17)$$

In obigen Gleichungen (Gl. 2.14 - Gl. 2.17) sind folgende Stoffwerte enthalten:

- w Geschwindigkeit der Strömung in $\frac{m}{s}$
- l kennzeichnet die Länge der überströmten Fläche in m
- ξ kinematische Zähigkeit in $\frac{m^2}{s}$
- α Wärmeübergangszahl in $\frac{W}{m^2 K}$
- λ Wärmeleitfähigkeit in $\frac{W}{m K}$
- a Temperaturleitfähigkeit in $\frac{m^2}{s}$, diese setzt sich aus folgender Gleichung zusammen $a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$
- c_p spezifische Wärmekapazität in $\frac{J}{kg K}$
- ρ Dichte des strömenden Mediums in $\frac{kg}{m^3}$
- g Erdbeschleunigung in $\frac{m}{s^2}$
- γ Ausdehnungskoeffizienten in $\frac{1}{K}$
- $\Delta \Theta$ Temperaturdifferenz in K

Aus den oben genannten Kennzahlen kann auf die Wärmeübergangskoeffizienten zurückgerechnet werden, denn die einzelnen Materialeigenschaften und deren Kennwerte lassen sich aus Tabellenbüchern entnehmen. Für Wicklungen mit forciertem oder natürlichem Ölumlauflassen sich zwei allgemein gültige Ansätze aufstellen.

natürlicher Ölumlaufl (ON)	forciertes Ölumlaufl (OF)
$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^m \cdot k$	$Nu = C \cdot (Re \cdot Pr)^m \cdot k$

Tabelle 2.3: Nußelt-Zahlen für Transformatorwicklungen [38]

Die Parameter C & m ergeben sich aus Messungen, und k spiegelt weitere geometrische Aspekte der Wicklungen wieder. [38]

2.5 Thermische Auslegung von Leitungstransformatoren

In diesem Abschnitt werden die Grenzen der Belastbarkeit von Transformatoren besprochen. Dabei wird speziell auf die Temperaturen in ölgefüllten Leistungstransformatoren, deren Übertragung, Kühlung und Auswirkungen eingegangen.

2.5.1 Alterung und Lebensdauer von Transformatoren

Meist wird für Transformatoren ein wirtschaftliches Lebensdauersoll von über 20 Jahren erwartet. Dieses Lebensdauersoll kann nur erfüllt werden, wenn bei der Belastung des Transformators bestimmte Grenzen eingehalten werden. Durch Überbelastung des Transformators büßt dieser aufgrund elektrischer, thermischer und mechanischer Beanspruchungen Lebensdauer ein. Eine beschleunigte Alterung tritt also bei überlasteten Transformatoren aufgrund folgender Phänomene ein:

- Alterung der Isolieröle: *„Die Alterung des Öls ist ein Oxydationsvorgang durch gelösten Luftsauerstoff, der durch erhöhte Temperaturen und durch Anwesenheit von Katalysatoren beschleunigt wird.“* [18]
- Alterung von Isolierpapier und Pressspan: Durch thermische Beanspruchung nimmt die mechanische und elektrische Festigkeit des Isolierpapiers ab. Das Isolierpapier zerfällt unter der Einwirkung von Wärmeenergie. Der Zerfall wird zusätzlich beim Vorhandensein von Sauerstoff und Feuchtigkeit beschleunigt. [18]
- Alterung metallischer Werkstoffe: Diese Werkstoffe altern hauptsächlich aufgrund von Korrosion.

Eine Möglichkeit, diese Alterung aufgrund von thermischer Beanspruchung zu beschreiben, ist die Gleichung nach Montsinger (Gleichung 2.18). Diese Gleichung beschreibt den relativen Lebensdauerverbrauch bzw. die

Alterungsgeschwindigkeit V_M einer Öl-Papier-Isolation eines Transformators. Sie wird auf die maximal auftretende Temperatur (Heißpunkttemperatur Θ_{HS}), welche im Wicklungsbereich auftritt, angewandt.

$$V_M = \frac{\text{Lebensdauerverbrauch bei } \Theta_{HS}}{\text{Lebensdauerverbrauch bei } \Theta_{hr}}$$

Θ_{hr} Nenn-Heißpunkttemperatur

(2.18)

Daraus ergibt sich nach Montsinger:

$$V = 2^{\left(\frac{\Theta_h - \Theta_{hr}}{6}\right)}$$

Für eine Nennheißpunkttemperatur von 98 °C tritt laut [21] ein relativer Lebensdauerverbrauch von $V_M = 1$ ein. Es kann weiters aus der Gleichung entnommen werden, dass bereits bei einer Heißpunkttemperatur von 104 °C, die Öl-Papier Isolation doppelt so schnell altert, als es bei 98 °C der Fall wäre.

Aus Gleichung 2.18 kann eine Gleichung für den absoluten Lebensdauerverbrauch L gebildet werden.

$$L = \int_{t_1}^{t_2} V dt \tag{2.19}$$

Würde man davon ausgehen, dass in zwei baugleichen Transformatoren für die Zeitdauer von einer Stunde die Heißpunkttemperaturen $T_1 = 98$ °C und $T_2 = 104$ °C betragen, so ergebe sich folgender absoluter Lebensdauerverbrauch für die beiden Transformatoren.

$$L_1 = \int_{t_1=12:00h}^{t_2=13:00h} 2^{\left(\frac{98-98}{6}\right)} dt = 1 \text{ Stunde absoluter Lebensdauerverbrauch}$$

$$L_2 = \int_{t_1=12:00h}^{t_2=13:00h} 2^{\left(\frac{104-98}{6}\right)} dt = 2 \text{ Stunden absoluter Lebensdauerverbrauch}$$

(2.20)

2.5.2 Referenzpunkte für Temperaturen in Transformatoren

Aufgrund der in Abschnitt 2.3 beschriebenen Verluste, kommt es im Transformator zu einer Wärmeentwicklung. Diese Wärmeenergie muss nun nach außen abgeführt werden, da sich diese nachteilig auf die Transformatorlebensdauer auswirkt (siehe Abschnitt 2.5.1). Nachstehende Abschnitte befassen sich intensiver mit der Wärmeerzeugung und -abfuhr eines Transformators.

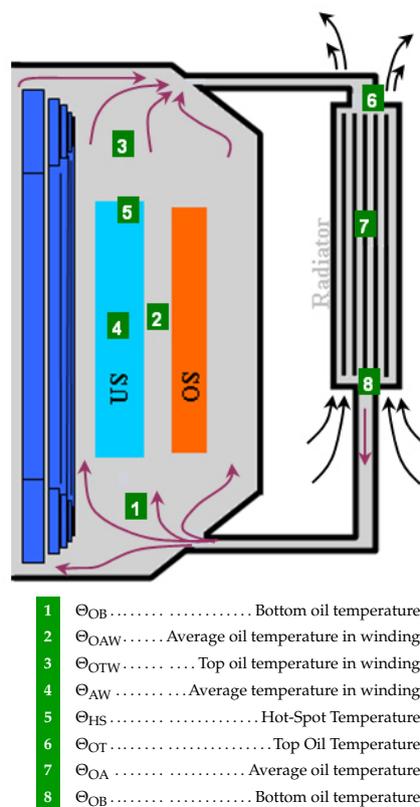


Abbildung 2.27: Temperaturbild eines Transformators

Das in Abbildung 2.27 dargestellte Schnittbild eines Transformators soll herangezogen werden, um einzelne markante Temperaturen, welche zur Temperaturberechnung eines Transformators wichtig sind, aufzuzeigen.

Unabhängig von der Kühlungsart (siehe Tabelle 2.1), hat das innere Kühlmittel des Transformators in Punkt **1** sein niedrigstes Temperaturniveau. Von diesem Punkt strömt es, aufgrund natürlicher Konvektion oder durch Pumpen forciert, in den Wicklungsbereich. Dabei nimmt es die Wärmeenergie der Wicklung und der beströmten Konstruktionsteile auf. Unter Punkt **3** strömt nun das erwärmte Kühlmedium zum Wärmetauscher **6**, hier als Radiator eingezeichnet. Im Radiator soll das innere Kühlmittel die aufgenommene Wärmeenergie an das äußere Kühlmittel abgeben. Das äußere Kühlmittel, hier Luft, strömt dabei in umgekehrter Richtung durch den Radiator. Die kalte Luft tritt in den Radiator unten ein,

nimmt Wärmeenergie auf und die erwärmte Luft tritt durch Konvektion im oberen Bereich des Radiators aus. Die Belüftung der Radiatoren kann durch Lüfter forciert werden. Erreicht das innere Kühlmedium Punkt **8**, so hat sich das innere Kühlmedium wieder abgekühlt und die Wärmeenergie an die Umgebung abgegeben. Nun strömt das Kühlmedium wieder in den Kessel und der Kühlkreislauf beginnt von vorne. Wird die über die Höhe der Wicklung abgegebene Wärme vereinfacht als konstant angenommen, ergibt sich ein nahezu linearer Temperaturanstieg der Kühlflüssigkeit. [18]

Die im Bild unter Punkt **4** gekennzeichnete Temperatur bezeichnet die mittlere Wicklungstemperatur. Von viel größerer Bedeutung ist jedoch die sogenannte Heißpunkt- oder Hot-Spot-Temperatur, da sie den größten Einfluss auf die Lebensdauer eines Transformators ausübt. Diese bezeichnet die Temperatur der wärmsten Zone in einer Wicklung und befindet sich üblicherweise im oberen, inneren Bereich der Wicklung **5**, da die Wicklung in einzelne Teilleiter aufgeteilt ist. Dadurch können die innen liegenden Leiter ihre Wärme nicht gleichermaßen, wie die außen liegenden, an das Öl abgeben.

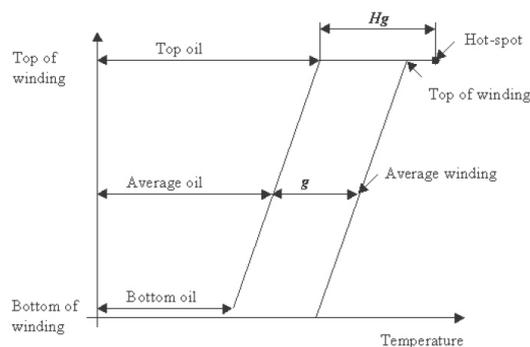


Abbildung 2.28: Temperaturdiagramm eines Transformators [42]

Abbildung 2.28 zeigt einen vereinfachten, stationären Temperaturverlauf der zuvor erwähnten Temperaturen in einem Transformator. Dabei gelten die Annahmen, dass der Temperaturanstieg in der Wicklung linear mit der Höhe innerhalb des Kessels steigt, und der Temperatursprung g zwischen Wicklung und innerem Kühlmittel konstant ist, sieht man vom Hotspot-Anstieg in Abbildung 2.28 ab. [21] Aus dem Temperaturdiagramm ist auch noch zu entnehmen, dass der Heißpunkt in der Wicklung über der oberen Wicklungstemperatur liegt. In früheren Zeiten wurde diese Heißpunkttemperatur nicht gemessen sondern berechnet, da sich die messtechnische

Erfassung als sehr schwierig erweist. Um die Heißpunkttemperatur rechnerisch zu ermitteln, wird der sogenannte Hotspotfaktor H eingeführt, der den Temperaturanstieg gegenüber dem mittleren Sprung g angibt.

2.5.3 Thermisches Modell eines Transformators

Wie bereits aus den vorherigen Abschnitten zu entnehmen, ist es wichtig, die thermischen Verhältnisse im Transformator nachzubilden. Da meist ein direktes Messen der essentiellen Temperaturen nicht möglich bzw. zu aufwendig ist, ist man versucht, ein mathematisches Abbild des lastabhängigen Temperaturverhaltens eines Transformators zu erstellen.

Es gibt dabei verschiedene Ansätze für diese mathematischen Modelle, einige davon werden in [25], [43], [44], [21] and [45] vorgestellt. In Abbildung 2.29 ist ein thermisches Modell zur Berechnung der Heißpunkttemperatur aus [21] zu sehen.

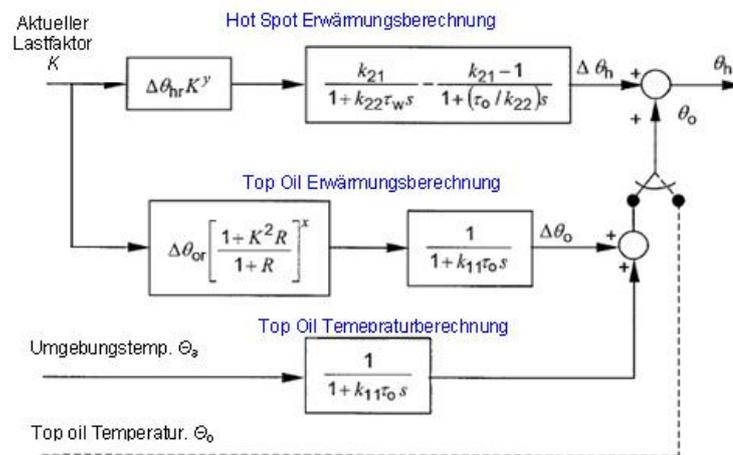


Abbildung 2.29: Blockdiagramm eines Transformator-Temperaturmodells [21]

Diese Modelle sind Umrechnungsmodelle zur Berechnung der Temperaturen bei unterschiedlicher Last. Die Auslegung und Berechnung von Transformatoren inklusive deren Kühlkreisläufen ist mit diesen Modellen nicht abgedeckt. Aus diesem Grund sind diese thermischen Modelle für

eine Simulation eines Transformators mit drehzahlgesteuerten Lüftern nur begrenzt brauchbar.

Siemens Transformer Weiz hat aus jahrelanger Erfahrung ein Berechnungsprogramm entwickelt, welches es zulässt, auch Parameter, wie Luftmenge der Lüfter, Abmessungen der Radiatoren, Abmessungen der Wicklungen und weitere Auslegungsparameter für einen Transformator in die Simulation einzubinden. Leider ist es aus datenschutzrechtlichen Gründen nicht möglich, das gesamte Berechnungsprogramm, mit dem Namen „KUL“, offenzulegen. Daher werden in den nachstehenden Abschnitten nur die einzelnen thermophysikalischen Effekte, auf welchen das Programm aufbaut bzw. welche in „KUL“ eingebaut sind, näher erläutert.

Modellierung des Kupfersprungs g

Wie bereits unter Abschnitt 2.5.2 erwähnt, kommt es Aufgrund der erzeugten Verluste in den Wicklungen und der Wärmeübertragung auf das innere Kühlmittel zu einem Temperatursprung zwischen Wicklung und dem inneren Kühlmittel. Abbildung 2.30 soll das Entstehen des radialen Temperatursprungs an einem stark vereinfachtem Wicklungsmodell näher erläutern.

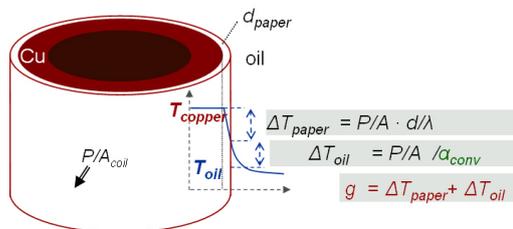


Abbildung 2.30: Temperaturgefälle zwischen Wicklung und Öl [37]

Ausgangspunkt der Temperaturbetrachtung in Abbildung 2.30 ist die Temperatur auf der Innenseite der Wicklung bei stationärem Bemessungsbetrieb T_{copper} . Da die Wärmeleitung des Kupfers sehr hoch ist, ist kein Temperaturgefälle von der Wicklungsin-nenseite bis zur Außenseite

eingetragen. Der Wärmedurchgang durch die Wicklungsisolation geschieht aufgrund von Wärmeleitung und kann nach Gleichung 2.8 beschrieben werden. Es kommt zum Temperaturgefälle ΔT_{paper} . Darauf folgt der Wärmeüber-

gang durch Konvektion und es entsteht das Temperaturgefälle ΔT_{oil} . ΔT_{oil} lässt sich über Gleichung 2.13 berechnen, wobei der Wärmeübergangskoeffizient bekannt sein, oder aus den zuvor beschriebenen Ähnlichkeitsbeziehungen (Gl. 2.14 - Gl. 2.17) ermittelt werden muss. Aus diesen zwei Effekten kann der Kupfersprung g berechnet werden (Abb. 2.30).

Der Wicklungsexponent

Im Falle einer forcierten Kühlung geht man in den Normen von einem linearen Zusammenhang zwischen den erzeugten Verlusten und der daraus resultierenden Wärmeübertragung aus,

$$\Delta T = \alpha P, \quad (2.21)$$

nimmt also einen konstanten Wärmeübergangskoeffizienten an. Daraus ergibt sich im Weiteren ein exponentieller Temperaturverlauf im Transformator.

Arbeitet ein Transformator mit natürlicher Kühlung, so ergibt sich, für den Wärmeübergangskoeffizienten ein etwas komplizierteres Verhalten. Bei natürlicher Kühlung ist der Wärmeübergangskoeffizient abhängig von der Temperaturdifferenz ΔT .

$$\begin{aligned} \alpha &\sim \Delta T^\varepsilon \\ \Delta T &\sim P^{\frac{1}{\varepsilon+1}} \text{ or } \Delta T \sim P^x \end{aligned} \quad (2.22)$$

Abhängig von der Kühlungsart werden in den Standards beispielhaft Exponenten $x \leq 1$ angeführt. Es hat sich jedoch gezeigt, dass es der Realität näher kommt, den Wicklungsexponenten in Abhängigkeit des Ölflusses, über thermisch hydraulische Modelle (THM) darzustellen. Tabelle 2.4 zeigt die vorgeschlagenen Wicklungsexponenten aus den Standards, sowie den thermisch hydraulischen Modellen¹.

¹Die im verwendeten Berechnungsprogramm gewählten Wicklungsexponenten können wieder, aus datenschutzrechtlichen Gründen, nicht angegeben werden.

Temperatursprünge: g „Wicklung – Öl“ und ΔT „Kühler – Luft“				
	IEEE		THM	
	Wicklung g $\sim P^x (\epsilon)$	Kühler ΔT $\sim P^x (\epsilon)$	Wicklung & Eisen	Kühler
ONAN	$P^{0.8} (0.25)$	$P^{0.8} (0.25)$	Statt ON OF OD: Öffluss $v \rightarrow$ $\epsilon(v): 0 \dots 0.5$ $\alpha \sim g^\epsilon \cdot f(T)$ $\rightarrow g \sim P/\alpha$ $x(v): 0.67 \dots 1$ für eine Wicklung	$\epsilon = 0.25$ or 0 acc. IEEE $\alpha \sim \Delta T^\epsilon \cdot f(T)$ AN: α (wind) P_{Sun} (sun radiation) $\rightarrow \Delta T \sim P/\alpha$ $x: 0.867$ oder 1 für ein Kühlelement
OFAF	$P^{0.8} (0.25)$	$P^1 (0)$		
ODAF	$P^1 (0)$	$P^1 (0)$		

Tabelle 2.4: Gegenüberstellung der Wicklungsexponenten aus IEEE & THM

Modellierung des vertikalen Temperaturgefälles D

Wie bereits in Abschnitt 2.5.2 erwähnt, und in Abbildung 2.28 zu sehen, kommt es aufgrund der Bewegung des inneren Kühlmittels ebenfalls zu einem vertikalen Temperaturanstieg in der Wicklung. Dieser Temperaturanstieg kann laut [21] als konstant angenommen werden, so dass sich ein stationäres lineares Temperaturgefälle in vertikaler Richtung der Wicklung entlang ergibt. Diese/r Temperaturspreizung bzw. Temperaturanstieg ergibt sich also aus dem Volumens- oder Massenstrom des inneren Kühlmittels und kann über folgende mathematische Beziehungen beschrieben werden. Für die Temperaturdifferenz des zu- und abstömenden Kühlmediums mit einem Volumenstrom Q_{flow} , also vom Kühlmedium aufgenommene Wärme, folgt:

$$T_{top} - T_{bottom} = D = \frac{PP}{c \rho Q_{flow}} \tag{2.23}$$

Der Volumenstrom aus obiger Gleichung ist bei natürlicher Strömung nicht bekannt. Deshalb wird eine weitere Beziehung herangezogen, welche die Auftriebskraft des strömenden Mediums aufgrund der natürlichen Konvektion beschreibt. Für forcierte Kühlmittelbewegung würde die Pumpe den Volumenstrom des inneren Kühlmittels bestimmen. Da aber in weiterer Folge nur der *ONAN* und *ONAF* Betrieb von Transformatoren betrachtet wird,

wird hier nur auf die Antriebskraft aufgrund natürlicher Konvektion eingegangen. Bei zwei gleich langen Ölsäulen der Höhe H ergibt sich:

$$\Delta p = g \Delta H \quad (2.24)$$

Nun wird der Volumenstrom des Kühlmittels noch aufgrund hydraulischer Widerstände R_{hy} gebremst, welche mit nachstehender Gleichung formuliert werden können.

$$\Delta p = R_{hy} Q_{flow} \quad (2.25)$$

Durch den Auftrieb (angedeutet in Gleichung 2.24) nimmt D in Gleichung 2.23 bei zunehmenden Verlusten P zu. Auch der Volumenstrom Q steigt, wodurch D nicht linear mit P zunimmt, sondern unterproportional.

Der Heißpunktfaktor H

Der Heißpunktfaktor ist abhängig vom Design der Wicklung und gibt den Temperaturanstieg des Öls an der heißesten Stelle, über der Temperatur des Öls am oberen Wicklungsende an (siehe Abbildung 2.28). Studien zeigen, dass der Heißpunktfaktor, abhängig von der Transformatorgröße, im Bereich zwischen 1.0 – 2.1 schwankt. [17] Es gibt auch Möglichkeiten, den Heißpunktfaktor über eine direkte Messung zu bestimmen. Lichtwellenleiter sind grundsätzlich zur Messung in Hochspannungsfeldern geeignet, jedoch sind diese Lichtleiter in den Hochspannungsteilen nicht wirklich erwünscht.

Auch kann der Heißpunktfaktor über ein Berechnungsverfahren, das auf Verlust- und Wärmeübertragungsgrundlagen beruht und durch Versuchsmessungen an Transformatoren aus der Produktion oder an Wicklungen oder Prototypen untermauert ist, ermittelt werden. [21] Dabei soll jedoch folgendes berücksichtigt werden:

- Die lokalen Öltemperaturen sind in der Wicklung wegen der Temperaturverteilung in der Strömung nur ungenau zu ermitteln.
- Die Öltemperaturen in der Wicklung unterscheiden sich von den aus dem Kessel bzw. Radiatoren oder Kühler gemessenen Öltemperaturen.

Dynamisches Verhalten

Für eine dynamische Betrachtung des Temperaturbildes eines Transformators ist es wichtig, die Zeitkonstanten der Wicklung, τ_w , sowie die des Öls, τ_o , zu kennen. Abbildung 2.31 zeigt den Temperaturverlauf in einem ODAF Transformator bei unterschiedlichen Lastperioden sowie unterschiedlicher Lüfteranzahl.

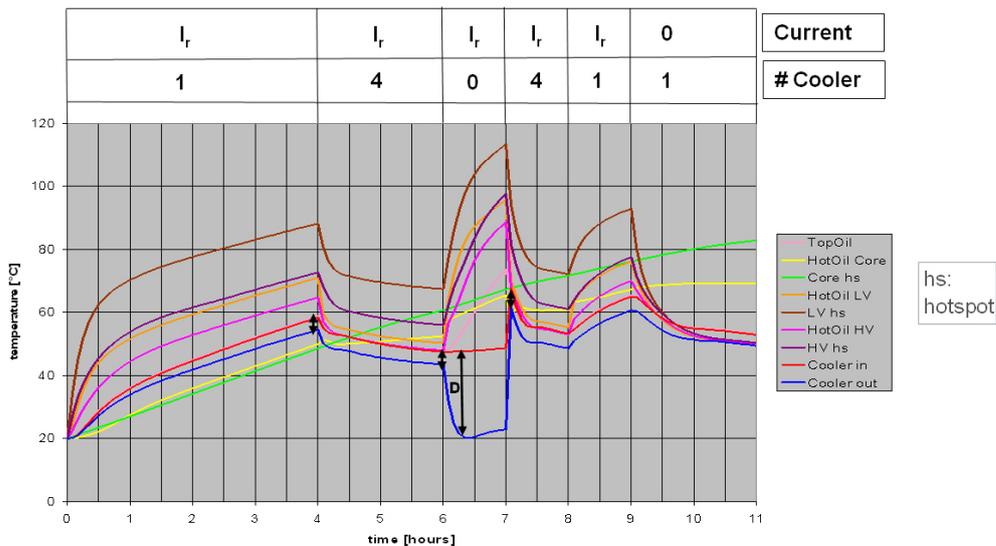


Abbildung 2.31: Temperaturverhalten eines Transformators unter verschiedenen Lastzyklen [37]

Es ist zu erkennen, dass die Temperaturen sich nicht sprunghaft ändern, der Temperaturverlauf zeigt ein exponentielles oder hyperbolisches Verhalten. Um dieses Verhalten auch mathematisch zu beschreiben, bedient man sich der thermischen Zeitkonstanten. Da ein Tranformator ein Mehrmassensystem darstellt, werden die Zeitkonstanten in [21] wie folgt nachgebildet.

Laut der thermisch - elektrischen Analogie definiert sich die thermische Zeitkonstante τ_{th} über [42]

$$\tau_{th} = R_{th} C_{th}. \tag{2.26}$$

Dabei stellt R_{th} den thermischen Widerstand in $\left[\frac{K}{W}\right]$ dar und C_{th} die thermische Kapazität, also die Fähigkeit eines Körpers thermische Energie zu

speichern, in $\left[\frac{\text{W}\cdot\text{min}}{\text{°C}}\right]$. Für stationäre Verhältnisse gilt

$$R_{th} = \frac{\Delta\Theta_{rated}}{q_{rated}} \quad (2.27)$$

$$C_{th} = c m$$

Hier stellt $\Delta\Theta$ eine Übertemperatur und q die dazugehörigen Verluste unter Nennbedingung (*rated conditions*) dar. c entspricht der spezifischen Wärmekapazität und m steht für eine Masse. Aus diesen zwei Gleichungen lassen sich für die Wicklungszeitkonstante und die Ölzeitkonstante folgende Gleichungen aufstellen. [21]

Wicklungszeitkonstante τ_w :

$$\tau_w = \frac{m_w c g}{60 P_w}$$

Wicklungszeitkonstante τ_o : (2.28)

$$C = 0,132 m_A + 0.0882 m_T + 0,4 m_O$$

$$\tau_o = \frac{C \Delta\Theta_{om} 60}{P}$$

Mit:

- g Gradient der Wicklungstemperatur zur Öltemperatur bei der betrachteten Last
- m_w Masse der Wicklung in kg
- c spezifische Wärmekapazität des Leiterwerkstoffes in $\frac{\text{W}\cdot\text{s}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$
- P_w Wicklungsverlust in W bei der betrachteten Last
- m_A Masse der Baugruppe aus Kern und Wicklung in kg
- m_T Masse des Kessels und der Armaturen in kg
(nur Teile, die mit dem Öl in Kontakt stehen)
- m_O Masse des Öls in kg
- $\Delta\Theta_{om}$ mittlere Ölübertemperatur gegenüber der Umgebungstemperatur
in K bei der betrachteten Last
- P bei der Last eingespeiste Verluste in W

Es sei noch erwähnt, dass die Zeitkonstanten nur konstant sind, solange auch die Wärmeübergangszahlen α konstant sind, was in der Regel jedoch

nicht der Fall ist. Wieder kann diese Eigendynamik der Zeitkonstanten über thermisch hydraulische Modelle beschrieben werden.

2.5.4 Kühlkörper

Wie bereits unter Abschnitt 2.2.9 erwähnt, gibt es eine Vielzahl verschiedener Kühlungseinrichtungen. Nachstehend wird jedoch nur mehr näher auf Radiatorkühleinrichtungen eingegangen, da diese auch bei den später simulierten Transformatoren angebracht sind.

Radiatoren

Abbildung 2.32 zeigt den nach *DIN 42559* genormten Radiator für Öl in drei verschiedenen Varianten.

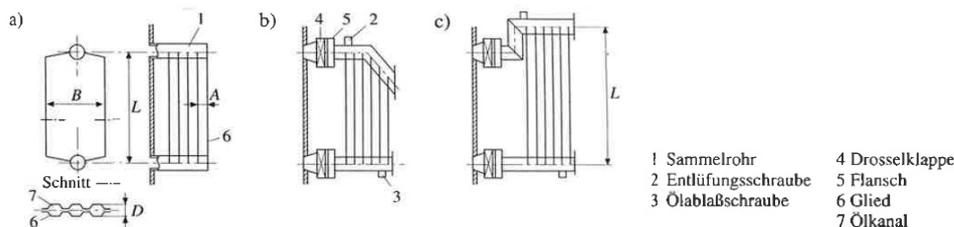


Abbildung 2.32: Radiatoren nach DIN 42559:

- a) Sammelrohre, an Kesselwand geschweißt
- b) Sammelrohre angeflanscht, Lademaßanpassung,
- c) Sammelrohre angeflanscht, vergrößerte Länge [18]

Die in obiger Abbildung dargestellten Radiatoren werden oft zu ganzen Radiatorbatterien zusammengefasst, wenn bei großen Transformatorleistungen und hohen abzuführenden Verlustwärmemengen die Lösung mit den, an den Kessel angeflanschten, Radiatoren nicht mehr zu realisieren ist. [18]

Der Wärmeübergang vom Öl zur umgebenden Luft geschieht dabei wieder über die gleichen thermischen Wärmeübergangseffekte wie unter Abschnitt 2.4 beschrieben. Auch hier können die einzelnen Wärmeübergangskoeffizienten wieder erheblich verbessert werden, indem man Ventilatoren

an den Radiatoren anbringt. Nachstehende Abbildung zeigt einen Transformator mit ventilatorenbestückten Radiatorbatterien als Kühlanlage.



Abbildung 2.33: Transformator mit getrennt aufgestellter Radiatorbatterie

2.5.5 Belastungsgrenzen von Transformatoren

Transformatoren sind üblicherweise für eine bestimmte Leistung ausgelegt. Bei Belastungsfragen im Zusammenhang mit Erwärmung ist zu beachten, dass der Strom die entscheidende Rolle spielt bzw. dessen Abweichung vom Bemessungsstrom.

In der Praxis kommt Dauerbetrieb mit voller Bemessungsleistung eher selten vor, da die meisten Transformatoren mit unterschiedlichen Lasten beaufschlagt werden. Weiters kommt es, zumindest bei luftgekühlten Transformatoren, zu ständigen Änderungen der Kühlmitteltemperaturen. Sie schwanken um den statistischen Jahresmittelwert, der als Basis für die thermische Lebensdauerbetrachtung dient. Belastungsanforderungen mit Strömen, die oberhalb des Bemessungsstromes liegen, sind also in gewissen Grenzen unproblematisch, solange sie zusammen mit niedrigen Umgebungstemperaturen auftreten, solange also die strombedingte zusätzliche Wicklungserwärmung unterhalb von kritischen Werten bleibt. [18]

Durch Belastungen über der Bemessungslast kann es jedoch im Transformator zu unzulässig hohen Temperaturen kommen, wodurch dieser stark

altert (siehe Abschnitt 2.5.1). Bei erhöhten Temperaturen kommt es weiters zu einer Zunahme der Ölfeuchte, wodurch die Durchschlagsfestigkeit herabgesetzt wird. Die Durchschlagsfestigkeit wird noch weiter verringert, wenn die Temperaturen in den Bereich über 140 °C steigen, denn dann kommt es zu einer Gasblasenbildung im Transformatoröl.

In Tabelle 2.5 sind Grenzwerte, aus der Norm „IEC60076“, für den Belastungsstrom, die Heißpunkttemperatur, die Temperatur der obersten Ölschicht und die Temperatur von Metallteilen außerhalb von Wicklungen und Zuleitungen angeführt.

Belastungsarten	Verteilungs- transformatoren (siehe Anmerkung)	Transformatoren mittlerer Leistung (siehe Anmerkung)	Transformatoren hoher Leistung (siehe Anmerkung)
Normale zyklische Belastung			
Strom (bezogener Wert)	1,5	1,5	1,3
Heißpunkttemperatur der Wicklung und von Metallteilen, die in Kontakt mit zellulosehaltigem Isolierstoff stehen (°C)	120	120	120
Heißpunkttemperatur sonstiger Metallteile (in Kontakt mit Öl, Aramidpapier, Glasfaserstoffen) (°C)	140	140	140
Temperatur der obersten Ölschicht (°C)	105	105	105
Notbetrieb über längere Zeit			
Strom (bezogener Wert)	1,8	1,5	1,3
Heißpunkttemperatur der Wicklung und von Metallteilen, die in Kontakt mit zellulosehaltigem Isolierstoff stehen (°C)	140	140	140
Heißpunkttemperatur sonstiger Metallteile (in Kontakt mit Öl, Aramidpapier, Glasfaserstoffen) (°C)	160	160	160
Temperatur der obersten Ölschicht (°C)	115	115	115
Kurzzeitiger Notbetrieb			
Strom (bezogener Wert)	2,0	1,8	1,5
Heißpunkttemperatur der Wicklung und von Metallteilen, die in Kontakt mit zellulosehaltigem Isolierstoff stehen (°C)	siehe 7.2.1	160	160
Heißpunkttemperatur sonstiger Metallteile (in Kontakt mit Öl, Aramidpapier, Glasfaserstoffen) (°C)	siehe 7.2.1	180	180
Temperatur der obersten Ölschicht (°C)	siehe 7.2.1	115	115
ANMERKUNG Die Temperatur- und Stromgrenzwerte gelten nicht gleichzeitig. Der Strom kann auf einen niedrigeren Wert als angegeben begrenzt werden, um die Anforderungen an die Temperaturbegrenzung einzuhalten. Umgekehrt kann die Temperatur auf einen niedrigeren Wert als angegeben begrenzt werden, um die Anforderungen an die Strombegrenzung zu erfüllen.			

Tabelle 2.5: Strom- und Temperaturgrenzwerte für die Belastung über Bemessungslast hinaus [21]

In obiger Tabelle sowie in [21] sind nur Grenzwerte, welche die Temperaturen nach oben beschränken, angeführt. Eine Verbesserung für wei-

terführende Arbeiten/ Steuerungen/ usw. wäre es, auch die Auswirkungen tiefer Temperaturen, sowie ein schnelles Abkühlen auf diese, näher zu untersuchen. Denn kühlt Isolieröl zu schnell ab, kommt es zu einer Übersättigung mit Luft, da das Gasaufnahmevermögen bei sinkender Temperatur abnimmt.

3 Berechnung der Transformatortemperaturen

In diesem Kapitel wird erläutert, wie anhand des Berechnungsprogrammes „KUL“, die Transformatortemperaturen unter unterschiedlichen Einflüssen ermittelt werden können.

3.1 Das Berechnungsprogramm „KUL“

Wie bereits unter Abschnitt 2.5.3 erwähnt, wird als Basis der Temperaturberechnung, das von *Siemens Transformer Weiz* entwickelte Berechnungsprogramm „KUL“, verwendet. Das Berechnungsprogramm ist als ausführbare Windowsdatei aufgebaut. Die einzelnen, zur Temperaturberechnung benötigten, Parameter werden dem Programm mittels einer Textdatei übergeben. Die vom Programm berechneten, stationären Temperaturen werden anschließend wieder in einer Textdatei abgelegt. Die Eingabedatei, sowie der Speicherort der Ausgabedatei werden „KUL“ über Argumente beim Aufruf mitgeteilt (z.B.: *KUL.exe Beispiel.ein Beispiel.out*). Abbildung 3.1 zeigt den Ablauf zur Berechnung der Transformatortemperaturen.

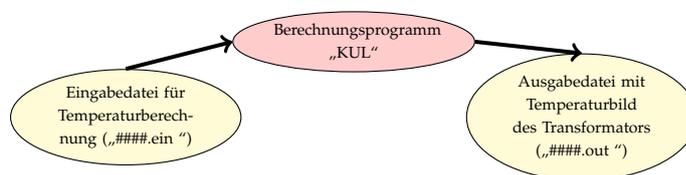


Abbildung 3.1: Berechnung des Temperaturbildes eines Transformators mittels „KUL“

3.1.1 Die Eingabedatei für „KUL“

Die Eingabedatei für „KUL“ ist eine Textdatei mit der Endung „.in“ und für die Übergabe aller relevanten Daten des zu berechneten Transformators verantwortlich. Sie enthält sowohl Konstruktionsangaben wie Kesselhöhe, Kernbreite und Schenkellanzahl, als auch Angaben zum Betrieb, wie Verluste der Wicklungen und beförderter Luftstrom der Lüfter. Die Daten für die einzelnen Transformatoren werden aus den Wicklungs- und Berechnenblättern, sowie aus Zeichnungen der Transformatoren bezogen. Abbildung 3.2 zeigt einen Ausschnitt einer solchen Eingabedatei.

```
TEXT Allgemein Konstruktions- und Betriebsdatendaten
KART ONAN
KESS 6000 2900 3105
DGAR 60 60 23 78
KWIC 1760 2250 0 0 2 65
SARO 2 207 2 0 1 8005
SARU 2 207 2 0 1 8005
TEXT Daten des Kerns
KERN 1068.2 2150 2274 0 1.69 110 200 150
TEXT Verlustdaten
VERL 360 215 110 35
TEXT Kuehler- und Luefterdaten
RADN 2600 655
RADT 18*37
TEXT Wicklungsdaten
TEXT PW - Wicklung
WICK 1244 1544 -6 6 6 -11
WINZ 1806 96 0 0 0.25 75 4 96 1,5 0,4
TEXT RW - Wicklung (Lagenwicklung)
WICK 1670 1730 -6 -11
WINZ 1724 19 16 20,8 0.3
TEXT SW - Wicklung
WICK 1908 2234 -6 6 6 -11
WINZ 1760 100 0 0 0.3 75 4 80 1,5 0,4
```

Abbildung 3.2: Eingabedatei für das Berechnungsprogramm „KUL“

Aus dem Ausschnitt in 3.2 ist zu sehen, dass „KUL“ die übergebenen Daten über Schlüsselwörter sortieren kann (z.B.: Kess... → KUL ordnet die darauffolgenden Angaben dem Kessel des Transformators zu).

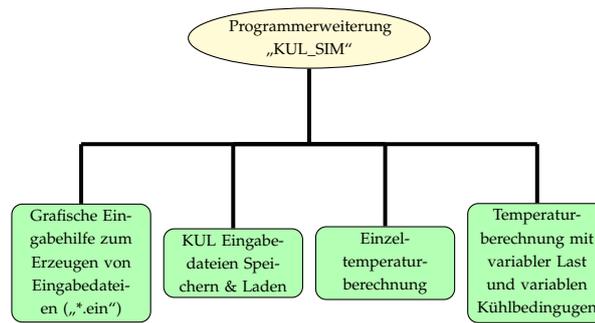


Abbildung 3.4: Funktionen der Programmerweiterung „KUL_SIM“

3.2.1 Grafische Eingabehilfe

„KUL_SIM“ wurde als GUI-Programm entwickelt. Die für eine Temperaturberechnung nötigen Transformatordaten können bequem über Register definiert werden. Im nachstehenden wird näher auf die Eingaberegister eingegangen.

Eingabe allgemeiner Transformatordaten

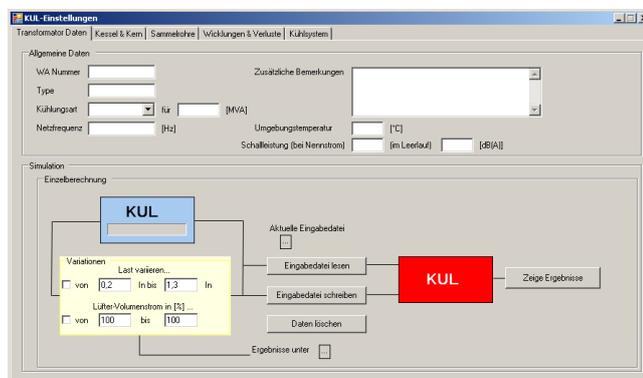


Abbildung 3.5: Eingabefenster der allgemeinen Transformatordaten

Abbildung 3.5 zeigt das Hauptfenster von „KUL_SIM“. Dieses Programmfenster lässt sich in 2 Bereiche unterteilen. Der obige Bereich ist für die Eingabe der allgemeinen Transformatordaten verantwortlich und der untere für die Einstellungen der Temperaturberechnung.

Der Einstellungsbereich ist nochmals in zwei Unterbereiche aufgeteilt. Dabei dient der rechte Teil der Einzeltemperaturberechnung und der linke der Temperaturberechnung mit variablen Betriebsparameter.

Eingabe der Kesseldaten des Transformators

Dieses Registerblatt beinhaltet die relevanten Daten zum Transformatorke-
ssel sowie zum Transformator Kern. Beim Großteil der Daten handelt es sich
um Konstruktionsdaten, welche aus dem Wickelblatt des Transformators
bezogen werden.

Eingabe der Sammelrohrdaten des Transformators

Verfügt der Transformator über Sammelrohre, welche das primäre Kühlmit-
tel vom Transformator zum Kühlsystem befördern, können diese Daten, in
das Register „Sammelrohre“ eingetragen werden. Hier werden einerseits
Konstruktionsdetails der Sammelrohre und andererseits Angaben zu den
hydraulischen Widerständen der Sammelrohre vermerkt.

Eingaben der Wicklungs- und Verlustdaten

The screenshot shows the 'KUL-Einstellungen' window with the 'Wicklungen & Verluste' tab selected. The 'Verlust Daten' section contains the following input fields:

- Verluste bei einer Temperatur von: [°C]
- Gesamtverluste: [kW]
- Eisenverluste: [kW]
- Kupfer-/Lastverluste: [kW]
- Kesselstrahlverluste: [kW]

Below these fields is a table with the following columns: Name, Innendurchmesser, Außendurchmesser, elektrische Höhe, Kühlkanäle, Verluste, Wicklungssprung, Hotspotwärnung, Abdeckung. The table is currently empty. At the bottom of the window, there are three buttons: 'Sprung für Lagerwicklung berechnen', 'Wicklung löschen', 'Wicklung bearbeiten', and 'Wicklung hinzufügen'.

Abbildung 3.6: Eingabefenster der Wicklungs- und
Verlustdaten

Abbildung 3.6 zeigt das Registerblatt für die Wicklungs- und Verlustdaten.
Auch dieses Eingabefenster lässt sich in 2 Bereiche unterteilen. Der obere
Bereich beinhaltet die Verlustdaten des Transformators.

Diese bestehen aus

- der Summe der Kupfer- oder Wicklungsverluste,
- der Summe der Kesselstreuverluste
- und den Eisenverlusten.

All diese Verlustangaben müssen auf eine Referenztemperatur bezogen sein, damit „KUL_SIM“ diese Verluste auf andere Temperaturwerte umrechnen kann.

Der untere Bereich stellt den Eingabebereich der Wicklungsdaten des Transformators dar. Hier können dynamisch bis zu 10 Wicklungen hinzugefügt, bearbeitet oder gelöscht werden. Die Eingabe der Wicklungsdaten erfolgt dabei über ein Dialogfeld. Unter den Wicklungseingaben bietet sich die Möglichkeit fixe Werte für die, unter Abschnitt 2.5.3 & 2.5.3 beschriebenen, Temperatursprünge einzugeben. Bleiben diese Eingabefelder jedoch undefiniert, so kümmert sich „KUL“ um die Temperatursprünge und berechnet diese. Das bringt den Vorteil temperaturabhängiger Sprünge mit sich. Diese Sprungberechnung mittels „KUL“ gilt jedoch nur für Spulenumwicklungen. Sollen ebenfalls Lagewicklungen eingegeben werden, so bietet das Programm die Möglichkeit, die Temperatursprünge über weitere Wicklungsangaben zu berechnen. Die Temperaturabhängigkeit wird dann von „KUL_SIM“ über den, in Tabelle 2.4 beschriebenen, Zusammenhang berechnet.

Eingabe der Daten des Kühlsystems

Dieses Fenster befasst sich mit jenen Daten, welche zum Definieren des Kühlsystems dienen. Das Programm erkennt selbst die, unter den allgemeinen Transformator Daten eingestellte, Kühlart und passt dieses Eingabefenster der Kühlart an (z.B.: ONAF → Daten für Lüfter gefordert).

Für ONAF- Transformatoren und deren Ventilatoren wurden Vorlagen in „KUL_SIM“ implementiert, diese dienen dazu die geforderten Daten der Kühlanlage zu ermitteln (siehe Abschnitt 3.2.4).

3.2.2 Speichern und Laden von Eingabedateien

Über zwei Schaltflächen im Einstellungsbereich des Programms besteht die Möglichkeit, gerade erstellte Eingabedateien zu speichern bzw. zuvor erstellte Eingabedateien zu laden.

Wichtig ist, dass vor jeder Temperaturberechnung die aktuelle Eingabedatei gespeichert werden muss, da sonst die Berechnung mit der zuletzt gespeicherten Version durchgeführt wird.

3.2.3 Einzeltemperaturberechnung

Hat man alle für eine Temperaturberechnung benötigten Daten in „KUL_SIM“ definiert, so kann man sich das Temperaturbild zu den eingetragenen Verlusten ermitteln lassen. Abbildung 3.7 zeigt das Ergebnis einer Einzelberechnung.

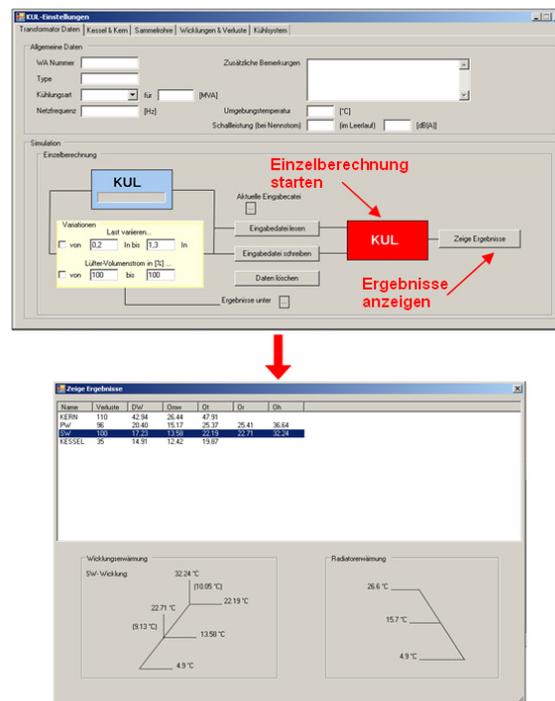


Abbildung 3.7: „KUL_SIM“ Einzelberechnung

Die Ergebnisse der Einzelberechnung bestehen im Wesentlichen aus 2

Teilen. Der erste umfasst die Tabelle im oberen Bereich des Programmfensters. In diesem sind die Erwärmungen aller berechneten Wicklungen, sowie die des Kerns und des Kessels vermerkt. Die Erwärmungen der einzelnen Wicklungen können, durch Markieren in der Tabelle, im unteren Bereich des Programmfensters in einem Temperaturdiagramm, nach Abbildung 2.28, angezeigt werden. Die Erwärmung des Kerns und die des Kessel werden hingegen nur in der Tabelle gezeigt. Weiters sind im unteren Bereich des Programmfensters, noch die Ölerwärmungen in den Radiatoren vermerkt.

Wichtig ist noch zu erwähnen, dass bei der Einzelberechnung keine Temperaturkorrektur der Verluste erfolgt. Das heißt, die Temperaturberechnung erfolgt mittels der eingegebenen Verlustwerte. Das Flussdiagramm in Abbildung 3.8, soll das Entstehen der Ergebnisse einer Einzelberechnung aufzeigen.

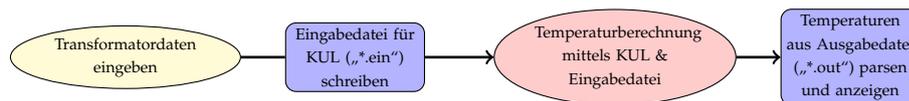


Abbildung 3.8: Flussdiagramm einer Einzeltemperaturberechnung mittels „KUL_SIM“

3.2.4 Temperaturberechnung mit variabler Belastung und variable Kühlbedingungen

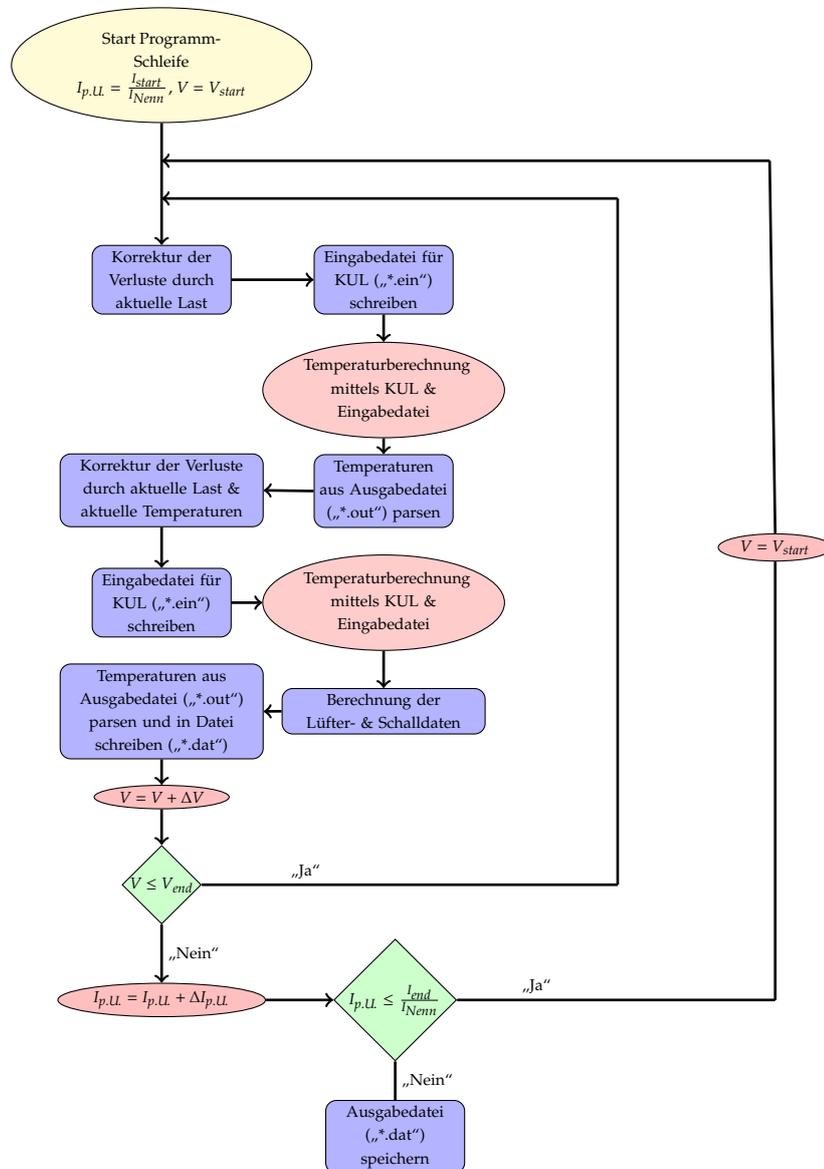


Abbildung 3.9: Flussdiagramm der Temperaturberechnung mit variabler Last & Luftstrom mittels „KUL_SIM“

Bei dieser Programmfunktion von „KUL_SIM“ besteht die Möglichkeit, das Temperaturbild eines Transformators für verschiedene Belastungen, so-

wie für verschiedene Luftströme der Lüfter zu berechnen. Es ist auch eine gleichzeitige Variation beider Betriebsparameter möglich. Im nachstehenden soll diese Programmfunktion näher erläutert werden, dabei werden die einzelnen Funktionsblöcke aus Abbildung 3.9 näher erklärt.

Programmstart

Die Programmschleife beginnt mit der, im Programm definierten, Startlast sowie dem anfänglich definierten Luftstrom der Lüfter, sofern beide Betriebsparameter vom Programm variiert werden sollen.

Korrektur der Verluste durch Belastung

Im darauffolgenden Schritt werden die, aus dem Berechnungsblatt stammenden, Verluste des Transformators auf die aktuelle Last umgerechnet. Die Eisenverluste sind belastungsunabhängig und müssen daher nicht auf die aktuelle Last umgerechnet werden. Für die Kupfer- und Streuverluste gilt hingegen:

$$\begin{aligned} I_{p.u.} &= \frac{I_{\text{aktuell}}}{I_{\text{Nenn}}} \\ P_{Fe,L} &= P_{Fe} \\ P_{Cu,L} &= (I_{p.u.})^2 P_{Cu} \\ P_{Streu,L} &= (I_{p.u.})^2 P_{Streu} \end{aligned} \tag{3.1}$$

Eingabedatei schreiben & „KUL“- Berechnung durchführen

Anhand der eingegebenen Daten in „KUL_SIM“, sowie der korrigierten Verlustwerte, wird eine temporäre Eingabedatei geschrieben und danach die Temperaturberechnung mittels „KUL“ durchgeführt.

Ausgabedatei auslesen

Ist die Berechnung der Temperaturen vollzogen, so werden diese aus der, von „KUL_SIM“ temporär erzeugten, Ausgabedatei ausgelesen und stehen dann dem Programm zu Verfügung.

Korrektur der Verluste durch aktuelle Temperatur

Die in „KUL_SIM“ eingegebenen Verluste eines Transformators müssen auf eine Temperatur bezogen werden (z.B: Verluste aus Berechnungsblatt bezogen auf 75 °C mittlere Wicklungstemperatur). Im nächsten Schritt müssen diese, auf eine Temperatur bezogene, Verluste noch anhand der im letzten Schritt errechneten, wahren Temperaturen korrigiert werden. Wieder sind die Eisenverluste nicht zu korrigieren, da die Temperaturabhängigkeit dieser praktisch vernachlässigt werden kann. Die Kupferverluste sowie die Zusatzverluste müssen hingegen korrigiert werden. Die Kupfer- oder Wicklungsverluste werden mit steigender Temperatur zunehmen, da der ohmsche Widerstand der Wicklungen mit der Temperatur zunimmt (siehe Abschnitt 2.3.2). Gleichzeitig verhalten sich die Zusatz- oder Wirbelstromverluste gegengleich, das heißt, sie nehmen mit steigender Temperatur ab. Mit nachstehenden Formeln können die zuvor lastkorrigierten Verluste auf die virtuell vorherrschenden Temperaturen umgerechnet werden.

$$\begin{aligned}
 P_{Fe,L,T} &= P_{Fe,L} \\
 P_{Cu,L,T} &= P_{Cu,L} \left(\frac{235 + T_{Umgebung} + T_{KUL}}{235 + T_{Ref.}} \right) \\
 P_{Streu,L} &= \frac{P_{Streu,L}}{\left(\frac{235 + T_{Umgebung} + T_{KUL}}{235 + T_{Ref.}} \right)}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Eingabedatei schreiben & „KUL“- Berechnung durchführen

Im darauffolgenden Schritt wird die Eingabedatei mit den last- und temperaturkorrigierten Verlusten geschrieben und die Temperaturberechnung „KUL“ aufgerufen.

Ermittelte Daten speichern

War die Temperaturberechnung erfolgreich, wurde ein Datensatz für die aktuelle Belastung und die aktuellen Kühlbedingungen erzeugt. Dieser wird aus der Ausgabedatei geparkt und in einem eigenem Dateiformat abgelegt (Abschnitt 3.2.4). Ist die, in „KUL_SIM“ eingegebene, Endlast und die definierte Endluftmenge der Lüfter erreicht, wird die Temperaturberechnung mit variablen Betriebsparameter an diesem Punkt beendet. Ist dies nicht der Fall, werden Belastung sowie Luftmenge der Lüfter erhöht und die Berechnung beginnt von vorne.

Lüfter- & Schalldaten berechnen

In Abbildung 3.9 ist zu erkennen, dass „KUL_SIM“ für jeden Schleifendurchlauf des Programms zusätzlich die Daten der Lüfter, sowie die Schalldaten des Transformators berechnet. Für diese Berechnungen wurde in „KUL_SIM“ ein Modul implementiert. Dieses Modul ist, wie unter Abbildung 3.10 zu sehen, aufgebaut.

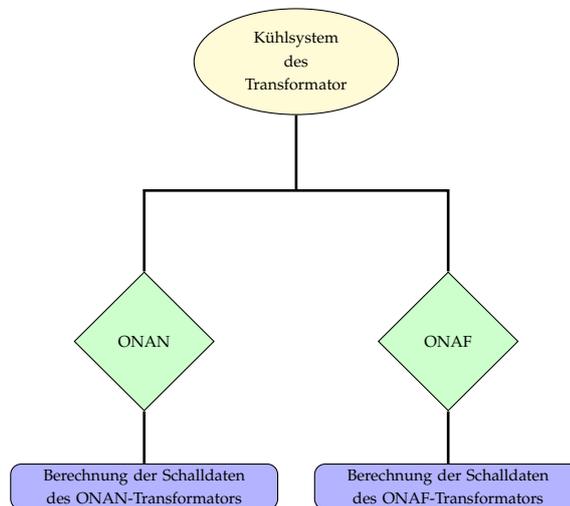


Abbildung 3.10: Flussdiagramm der Berechnung der Lüfter- sowie Schalldaten

Berechnung der Schalldaten des ONAN-Transformators

Liegt ein ONAN Transformator zur Berechnung vor, so werden die Schall-
daten des Transformator nach Gleichung 3.3 ermittelt.

L_{wAs,I_n} ... Schall des Transformators bei Nennstrom

$L_{wAs,leer}$... Schall des Transformators bei Leerlauf

Umrechnung des Schalls auf die aktuelle Last

$$L_{wAs,I_{p.U.}} = L_{wAs,I_n} + 40 \log(I_{p.U.}) \quad (3.3)$$

Gesamtschall des Transformators berechnen:

$$L_{Ges} = 10 \log \left(10^{\left(\frac{L_{wAs,I_{p.U.}}}{10} \right)} + 10^{\left(\frac{L_{wAs,leer}}{10} \right)} \right)$$

Berechnung der Schalldaten des ONAF-Transformators

Für ONAF Transformatoren und deren Kühlanlagen sind, wie unter Ab-
schnitt 3.2.1 erwähnt, folgende 2 Vorlagen im Berechnungsmodul vorhan-
den.

- Fa. Shormann Lüfter (SH1000-6): nicht regelbare Lüfter

Die Berechnung der Schall- und Lüfterdaten für nicht regelbare Lüfter
verläuft gleich, als ob keine Vorlage ausgewählt wurde. Jedoch werden
für die Berechnung der Schall- und Lüfterdaten für „SH1000-6“- Lüfter
Daten aus den Datenblättern der Lüfter in „KUL_SIM“ übernommen.
Nachstehende Gleichungen geben Auskunft über das Entstehen der
Schall- und Lüfterdaten.

L_{wAs,I_n} ... Schall des Transformators bei Nennstrom

$L_{wAs,leer}$... Schall des Transformators bei Leerlauf

$L_{wAs,luef}$... Schall eines Lüfters

N_{luef} ... Anzahl der betriebenen Lüfter (3.4)

$P_{1,luef}$... Lüfterverluste

Umrechnung des Schalls auf die aktuelle Last

$$L_{wAs,I_{p.U.}} = L_{wAs,I_n} + 40 \log(I_{p.U.})$$

Schall aller am Transformator montierten Lüfter

$$L_{wAs,luef,Ges} = 10 \log\left(10^{\left(\frac{L_{wAs,luef}}{10}\right)} N_{luef}\right)$$

Schall des Transformators berechnen:

$$L_{Trafo,Ges} = 10 \log\left(10^{\left(\frac{L_{wAs,p.L.}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{L_{wAs,leer}}{10}\right)}\right)$$

Gesamtschall des Transformators berechnen (inkl. Lüfter):

$$L_{Trafo,Ges} = 10 \log\left(10^{\left(\frac{L_{wAs,p.L.}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{L_{wAs,leer}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{L_{wAs,luef,Ges}}{10}\right)}\right)$$

Verlustleistung aller betriebenen Lüfter:

$$P_{1,luef,ges} = P_{1,luef} N_{luef}$$

- EBMpapst (A3G990AD0503-01A): regelbare Lüfter

Für „A3G990AD0503-01A“- Lüfter verläuft die Berechnung der Lüfterdaten über die Ventilatoren- bzw. Anlagenkennlinie.

In Abbildung 3.11 stellen die einzelnen Kurvenscharen mittels MatLab berechnete Ergebnisse zu Schall, Gegendruck und Verlustleistung der Ventilatoren für verschiedene Drehzahlen dar. Die schwarz bzw. rot eingetragene Linie steht für sogenannte Anlagenkennlinien. Diese beschreibt die Abhängigkeit des Druckverlustes der Kühlanlagenlage bei Änderung des Volumenstroms der Ventilatoren.

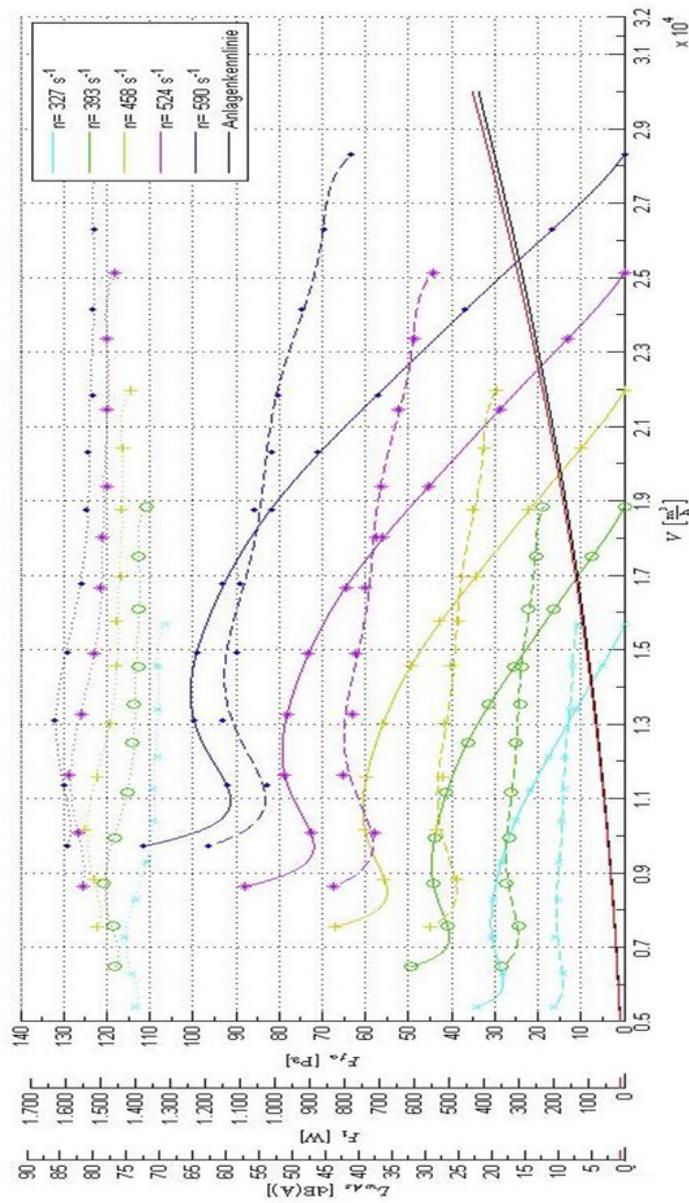


Abbildung 3.11: Berechnete Ventilatoren- und Anlagenkennlinien der EBMpast-Lüfter

Bei dem berechneten bzw. simulierten Transformator kann die montierte Kühlanlage (Kühlanlage besteht aus Radiatoren) über folgende Gleichung beschrieben werden.

$$P_{fa,Anlage} = 0,3 \left(\frac{V}{A_{luef}} \right)^2 \quad (3.5)$$

Sollen für einen bekannten Volumenstrom der Lüfter die übrigen Lüfterdaten, wie Schall und Leistung ermittelt werden, so muss zuerst über den Schnittpunkt der Anlagenkennlinie und der Gegendruckkennlinie des Ventilators ein Referenzpunkt ermittelt werden. Danach können aus diesem, vorher bestimmten Referenzpunkt, die geforderten Daten ermittelt werden. Über nachstehende Gleichungen können die geforderten Lüfterdaten für einen gegebenen Volumenstrom der Lüfter bestimmt werden. [6]

Daten des Referenzpunktes

L_{ref} ... Referenzschall der Lüfter (78.08db(A))

V_{ref} ... Referenzvolumenstrom der Lüfter ($7,06 \frac{m^3}{s}$)

n_{ref} ... Referenzdrehzahl der Lüfter ($590 s^{-1}$)

$P_{1,ref}$... Referenzleistung der Lüfter (0.864 kW)

V_{akt} ... Aktueller Volumenstrom der Lüfter

Berechnung der Lüfterdaten für geforderten Volumenstrom der Lüfter

$$\begin{aligned} n_{akt} &= n_{ref} \frac{V_{akt}}{V_{ref}} \\ P_{1,luef} &= P_{1,ref} \left(\frac{n_{akt}}{n_{ref}} \right)^3 = P_{1,ref} \left(\frac{V_{akt}}{V_{ref}} \right)^3 \\ L_{wAs,luef} &= L_{ref} \left(\frac{n_{akt}}{n_{ref}} \right)^{0,22} = L_{ref} \left(\frac{V_{akt}}{V_{ref}} \right)^{0,22} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Sind die Daten eines Ventilators ermittelt, so können der gesamte Transformator- und Ventilatorenschall sowie die Zusatzverluste der Kühlanlage nach Gleichung 3.4 berechnet werden.

Ausgabedatei der Temperaturberechnung mit variablen Betriebsparametern

Wie im vorherigen Abschnitt erwähnt, werden die Ergebnisse der Temperaturberechnung mit variablen Betriebsparametern in eine eigene, von „KUL_SIM“ erzeugte, Datei geschrieben. Diese Ausgabedatei wird als „*.dat“- Datei abgelegt und ist so aufgebaut, dass sie bequem in „MatLab“ eingelesen werden kann.

Die Ausgabedatei von „KUL_SIM“ besitzt ebenfalls Schlüsselwörter, über welche die nachfolgenden Werte Simulationsergebnissen zugeordnet werden können. Folgende Schlüsselwörter bzw. Ausgangsdaten der Temperaturberechnung werden geschrieben.

- **TEMPU:** Umgebungstemperatur der Temperaturberechnung [$^{\circ}\text{C}$].
- **LAST:** Kennzeichnet die Belastungsströme, für welche eine Temperaturberechnung erfolgte („per Unit“).
- **VSTROM:** Kennzeichnet die Volumenströme der Lüfter, für welche eine Temperaturberechnung erfolgte („ $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ “)
- **KESSEL:** Nachfolgend stehen Informationen über den Kessel des Transformators, wobei ein Datensatz folgende Werte enthält.

KESSEL Verluste [kW]; Vertikaler Temperaturgradient [$^{\circ}\text{C}$]; mittlere Ölerwärmung [$^{\circ}\text{K}$]; Obere Ölerwärmung [$^{\circ}\text{K}$]

- **KERN:** Kennzeichnet Informationen über den Eisenkern des Transformators, wobei ein Datensatz folgende Werte enthält.

KERN Verluste [kW]; Vertikaler Temperaturgradient [$^{\circ}\text{C}$]; mittlere Ölerwärmung [$^{\circ}\text{K}$]; Obere Ölerwärmung [$^{\circ}\text{K}$]

- **RADIATOR:** Kennzeichnet Informationen über die Kühlradiatoren des Transformators, wobei ein Datensatz folgende Werte enthält.

RADIATOR untere Ölerwärmung [$^{\circ}\text{K}$]; mittlere Ölerwärmung [$^{\circ}\text{K}$]; Obere Ölerwärmung [$^{\circ}\text{K}$]

- **WICKLUNGEN:** Kennzeichnet Informationen über die Wicklungen des Transformators, wobei ein Datensatz folgende Werte enthält.

WICKLUNGEN Name der Wicklung; Verluste [kW]; Vertikaler Temperaturgradient [$^{\circ}\text{C}$]; mittlere Ölerwärmung [$^{\circ}\text{K}$]; Obere Ölerwärmung [$^{\circ}\text{K}$]; mittlere Wicklungserwärmung [$^{\circ}\text{K}$]; Heißpunkterwärmung [$^{\circ}\text{K}$]

- **ZUSATZ:** Kennzeichnet zusätzliche Informationen über den Transformator und dessen Kühlanlage, wobei ein Datensatz folgende Werte enthält.

ZUSATZ Verluste der Kühlanlage [kW]; Schalleistung Gesamt [dB(A)]; Schalleistung des Transformators [dB(A)]; Schalleistung der Kühlanlage [dB(A)]

Der letztendliche Aufbau der Ausgabedatei von „KUL_SIM“ soll an einem kleinen Beispiel gezeigt werden.

TEMPU	23				Temperaturberechnung bei 23°C Umgebungstemperatur
LAST	0.9	1			Temperaturberechnung für $0.9 I_{Nenn}$ und I_{Nenn}
VSTROM	5	5.2	5.5		Temperaturberechnung für $5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$, $5.2 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ und $5.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ Volumenstrom
KESSEL	19.2	10	10	14	Kessel Daten für $0.9 I_{Nenn}$ & $5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
	19.2	10.1	9.9	13.8	Kessel Daten für $0.9 I_{Nenn}$ & $5.2 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
	19.2	10.3	9.6	13.7	Kessel Daten für $0.9 I_{Nenn}$ & $5.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
	22	11	13	17	Kessel Daten für I_{Nenn} & $5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
	22	11.2	12.7	16.8	Kessel Daten für I_{Nenn} & $5.2 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
	22	11.4	12.5	16.5	Kessel Daten für I_{Nenn} & $5.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
		:		:	

Tabelle 3.1: Ergebnisdatei einer Temperaturberechnung mit variabler Belastung und variablem Volumenstrom der Lüfter

4 Auswertung der Temperaturberechnung

In diesem Abschnitt wird näher auf die Ergebnisse der Temperaturberechnung des simulierten Transformators eingegangen. Weiters werden jene Programmhilfen vorgestellt, welche es ermöglichen, die, von „KUL_SIM“ ermittelten Daten zu visualisieren bzw. auszuwerten.

4.1 MatLab Funktionen zur Aufbereitung der „KUL_SIM“- Daten

In den nachstehenden Abschnitten werden nun einige MatLab- Funktionen vorgestellt, welche die von „KUL_SIM“ ermittelten Daten für eine weitere Verarbeitung aufbereiten.

4.1.1 MatLab- Funktion zum Einlesen der „KUL_SIM“- Daten

Zum Einlesen der unter Abschnitt 3.2.4 beschriebenen „*.dat“-Dateien wurden folgende 4 MatLab Funktionen erstellt.

- **read_ONAN**: MatLab- Funktion zum Einlesen von ONAN- Daten
- **read_ONAF1**: MatLab- Funktion zum Einlesen von ONAF1- Daten
- **read_ONAF2**: MatLab- Funktion zum Einlesen von ONAF2- Daten

- **read_reg**: MatLab- Funktion zum Einlesen von ONAF- Daten, wobei die Drehzahl und somit die beförderte Luftmenge der am Transformator montierten Lüfter geregelt wird.

Im Nachstehenden werden die einzelnen Funktionen sowie deren Ausgang näher erklärt.

read_ONAN

Da bei Transformatoren im ONAN- Betrieb keine Ventilatoren zur Kühlung beitragen, ist bei dieser Kühlstufe bzw. bei diesem Kühlmodus nur die Belastung des Transformators variabel. Werden also mittels der „read_ONAN“- Funktion Daten eines simulierten ONAN- Transformators eingelesen, so bekommt man als Resultat folgende MatLab- Strukturvariablen in folgender Form.

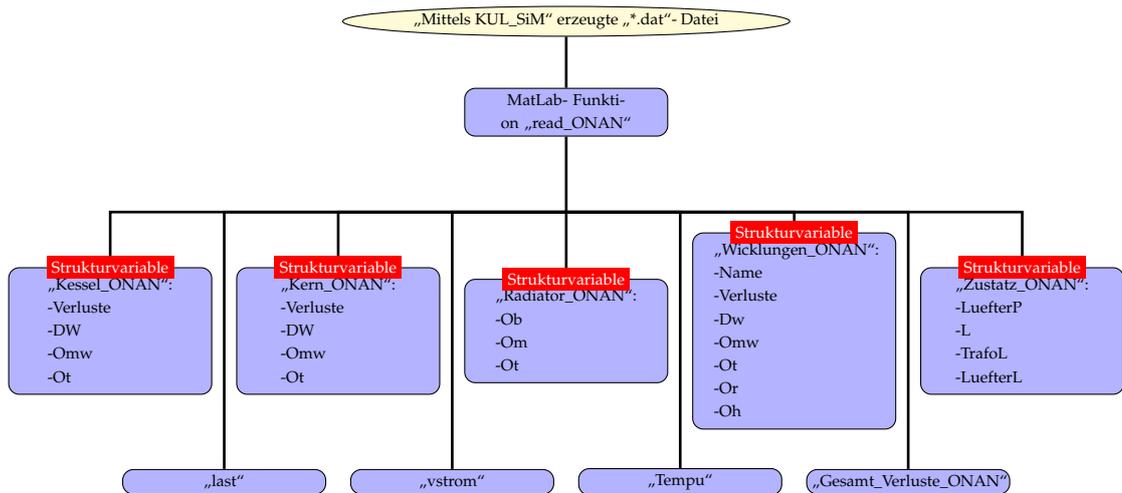


Abbildung 4.1: Flussdiagramm der MatLab- Funktion „read_ONAN“

Aus Abbildung 4.3 kann entnommen werden, welche Variablen bzw. Strukturvariablen Matlab erzeugt. Die Form der einzelnen Strukturvariablen bzw. Variablen soll nun noch näher erläutert werden.

- **„last“**: Diese Variable ist ein Vektor und enthält die von „KUL_sim“-

simulierten Belastungsschritte.

$$last = [I_{n,1}, I_{n,2}, I_{n,3}, \dots, I_{n,N-1}, I_{n,N}]$$

- „vstrom“: Diese Variable ist ebenfalls ein Vektor, da aber bei der Kühlungsart ONAN keine Ventilatoren zum Einsatz kommen, enthält dieser Vektor keine Daten.

$$vstrom = []$$

- „Tempu“: Diese Variable enthält die Umgebungstemperatur, welche bei der Simulation des Transformators vorherrschte.

$$Temp0 = \text{Umgebungstemperatur}$$

- „Gesamt_Verluste_ONAN“: Diese Variable ist wieder ein Vektor und enthält die bei den einzelnen Belastungsschritten auftretenden Gesamtverluste des Transformators.

$$Gesamt_Verluste_ONAN = [P_{Ges,I_{n,1}}, P_{Ges,I_{n,2}}, P_{Ges,I_{n,3}}, \dots, P_{Ges,I_{n,N-1}}, P_{Ges,I_{n,N}}]$$

- „Kessel_ONAN“: Diese Strukturvariable enthält mehrere Vektoren, welche Informationen des Transformator-Kessels bei den einzelnen Belastungsschritten beinhalten.

Kessel_ONAN:

- Verluste: Vektor mit den, bei den einzelnen Belastungsschritten, auftretenden Streuverlusten.

$$Verluste = [P_{Streu,I_{n,1}}, P_{Streu,I_{n,2}}, P_{Streu,I_{n,3}}, \dots, P_{Streu,I_{n,N-1}}, P_{Streu,I_{n,N}}]$$

- DW: Vektor mit den, bei den einzelnen Belastungsschritten, vorherrschenden Temperaturspreizungen im Kessel.

$$DW = [DW_{I_{n,1}}, DW_{I_{n,2}}, DW_{I_{n,3}}, \dots, DW_{I_{n,N-1}}, DW_{I_{n,N}}]$$

- Omw: Vektor mit den, bei den einzelnen Belastungsschritten, im Kessel vorherrschenden mittleren Übertemperaturen des Öls.

$$Omw = [Omw_{I_{n,1}}, Omw_{I_{n,2}}, Omw_{I_{n,3}}, \dots, Omw_{I_{n,N-1}}, Omw_{I_{n,N}}]$$

- Ot: Vektor mit den, im oberen Bereich des Kessels, vorherrschenden Übertemperaturen des Öls.

$$Ot = [Ot_{I_{n,1}}, Ot_{I_{n,2}}, Ot_{I_{n,3}}, \dots, Ot_{I_{n,N-1}}, Ot_{I_{n,N}}]$$

- „Kern_ONAN“: Diese Strukturvariable enthält die Vektoren, welche Informationen des Eisenkerns des Transformators bei den einzelnen Belastungsschritten beinhalten. (Details siehe: Kessel_ONAN)
- „Radiator_ONAN“: Diese Strukturvariable besteht aus Vektoren, welche die vorherrschenden Übertemperaturen in den Radiatoren bei den einzelnen Belastungsschritten beinhalten.

Radiator_ONAN:

- Ob: Vektor mit den, bei den einzelnen Belastungsschritten, vorherrschenden Ölüberemperaturen im unteren Bereich der Radiatoren.

$$Ob = [Ob_{I_{n,1}}, Ob_{I_{n,2}}, Ob_{I_{n,3}}, \dots, Ob_{I_{n,N-1}}, Ob_{I_{n,N}}]$$

- Om: Vektor mit den, bei den einzelnen Belastungsschritten, vorherrschenden Ölüberemperaturen im mittleren Bereich der Radiatoren.

$$Om = [Om_{I_{n,1}}, Om_{I_{n,2}}, Om_{I_{n,3}}, \dots, Om_{I_{n,N-1}}, Om_{I_{n,N}}]$$

- Ot: Vektor mit den, bei den einzelnen Belastungsschritten, vorherrschenden Ölüberemperaturen im oberen Bereich der Radiatoren.

$$Ot = [Ot_{I_{n,1}}, Ot_{I_{n,2}}, Ot_{I_{n,3}}, \dots, Ot_{I_{n,N-1}}, Ot_{I_{n,N}}]$$

- „Wicklungen_ONAN“: Dieser Vektor besteht aus mehreren Strukturvariablen, wobei jede Strukturvariable in diesem Vektor für eine simulierte Wicklung des Transformators steht. Die einzelnen Strukturvariablen bestehen selbst auch wieder aus Vektoren, welche dann die Informationen einer Wicklung enthalten,

Wicklungen_ONAN(„Index der Wicklung“):

- Name: Stringkette, welche den Namen der Wicklung enthält.
- Verluste: Vektor mit den, bei den einzelnen Belastungsschritten, auftretenden ohmschen Verlusten der Wicklung.

$$Verluste = [P_{\Omega, I_{n,1}}, P_{\Omega, I_{n,2}}, P_{\Omega, I_{n,3}}, \dots, P_{\Omega, I_{n,N-1}}, P_{\Omega, I_{n,N}}]$$

- DW: Vektor mit den, bei den einzelnen Belastungsschritten, vorherrschenden Temperaturspreizungen in der Wicklung.

$$DW = [DW_{I_{n,1}}, DW_{I_{n,2}}, DW_{I_{n,3}}, \dots, DW_{I_{n,N-1}}, DW_{I_{n,N}}]$$
 - Omw: Vektor mit den, bei den einzelnen Belastungsschritten, in dieser Wicklung vorherrschenden mittleren Übertemperaturen des Öls.

$$Omw = [Omw_{I_{n,1}}, Omw_{I_{n,2}}, Omw_{I_{n,3}}, \dots, Omw_{I_{n,N-1}}, Omw_{I_{n,N}}]$$
 - Ot: Vektor mit den, im oberen Bereich der Wicklung, vorherrschenden Übertemperaturen des Öls.

$$Ot = [Ot_{I_{n,1}}, Ot_{I_{n,2}}, Ot_{I_{n,3}}, \dots, Ot_{I_{n,N-1}}, Ot_{I_{n,N}}]$$
 - Or: Vektor mit den, bei den einzelnen Belastungsschritten, vorherrschenden mittleren Übertemperaturen der Wicklung.

$$Or = [Or_{I_{n,1}}, Or_{I_{n,2}}, Or_{I_{n,3}}, \dots, Or_{I_{n,N-1}}, Or_{I_{n,N}}]$$
 - Oh: Vektor mit den Hot Spot Übertemperaturen der Wicklung bei den einzelnen Belastungsschritten.

$$Oh = [Oh_{I_{n,1}}, Oh_{I_{n,2}}, Oh_{I_{n,3}}, \dots, Oh_{I_{n,N-1}}, Oh_{I_{n,N}}]$$
- „Zusatz_ONAN“: In dieser Strukturvariable werden zusätzliche Informationen wie Geräusch und Zusatzverluste des Transformators abgelegt. Wieder enthält die Strukturvariable mehrere Vektoren, wobei die einzelnen Einträge dieser für die simulierten Belastungsschritte des Transformators stehen.
 Zusatz_ONAN:
 - LuefterP: Vektor mit den, bei den einzelnen Belastungsschritten, auftretenden Lüfterverlusten (Bei ONAN Lüfterverluste $P_{luef,I_{n,\#}} = 0$).

$$LuefterP = [P_{luef,I_{n,1}}, P_{luef,I_{n,2}}, P_{luef,I_{n,3}}, \dots, P_{luef,I_{n,N-1}}, P_{luef,I_{n,N}}]$$
 - L: Vektor mit dem, bei den einzelnen Belastungsschritten, auftretenden Gesamtgeräusch des Transformators (Lüftergeräusch + Transformatorgeräusch).

$$L = [L_{I_{n,1}}, L_{I_{n,2}}, L_{I_{n,3}}, \dots, L_{I_{n,N-1}}, L_{I_{n,N}}]$$

- TrafoL: Vektor mit dem, bei den einzelnen Belastungsschritten, auftretenden Transformatorgeräusch.

$$\text{TrafoL} = [L_{Tr,I_{n,1}}, L_{Tr,I_{n,2}}, L_{Tr,I_{n,3}}, \dots, L_{Tr,I_{n,N-1}}, L_{Tr,I_{n,N}}]$$

- LuefterL: Vektor mit dem, bei den einzelnen Belastungsschritten, auftretenden Lüftergeräusch.

$$\text{LuefterL} = [L_{luef,I_{n,1}}, L_{luef,I_{n,2}}, L_{luef,I_{n,3}}, \dots, L_{luef,I_{n,N-1}}, L_{luef,I_{n,N}}]$$

read_ONAF1 & read_ONAF2

Diese MatLab- Funktionen dienen dem Lesen von ONAF- Daten. Die einzelnen Strukturvariablen sowie Vektoren sind dabei gleich wie zuvor aufgebaut (Abschnitt 4.1.1). Jedoch werden die Namen der einzelnen Variablen der eingelesenen Kühlart angepasst (Abbildung 4.2). Weiters bleibt auch die Variable „vstrom“ nicht leer, sondern enthält Informationen über den beförderten Luftstrom der am Transformator betriebenen Lüfter.

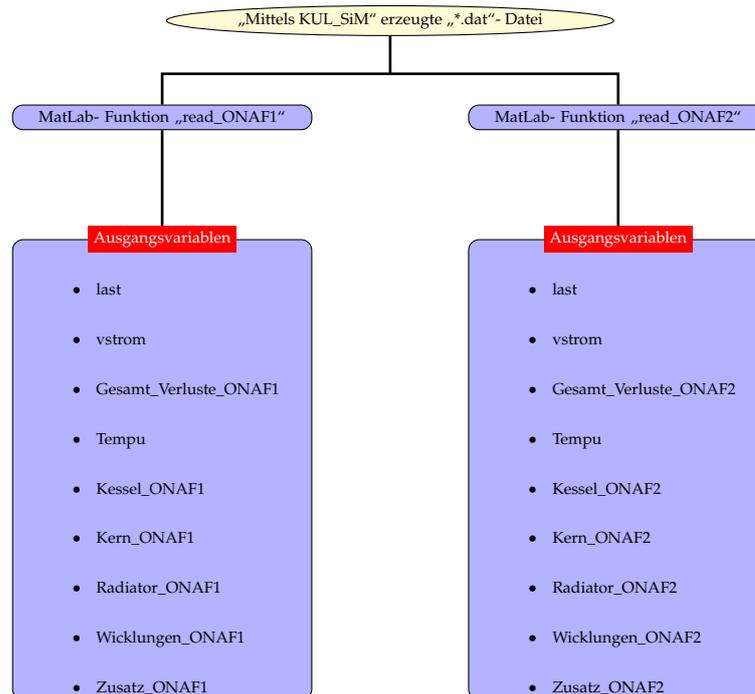


Abbildung 4.2: Flussdiagramm der MatLab- Funktionen „read_ONAF1“ & „read_ONAF2“

read_reg

Wurde in „KUL_SIM“ ein Transformator sowohl mit variabler Belastung als auch mit variabler Lüftermenge der am Transformator montierten Lüfter simuliert, so können diese Daten mittels der Funktion „read_reg“ eingelesen werden.

Wieder sind die einzelnen Strukturvariablen, gleich wie unter Abschnitt 4.1.1 erklärt, aufgebaut. Jedoch bestehen die einzelnen Strukturvariablen diesmal nicht aus Vektoren sondern aus Matrizen, da 2 Betriebsparameter variabel sind.

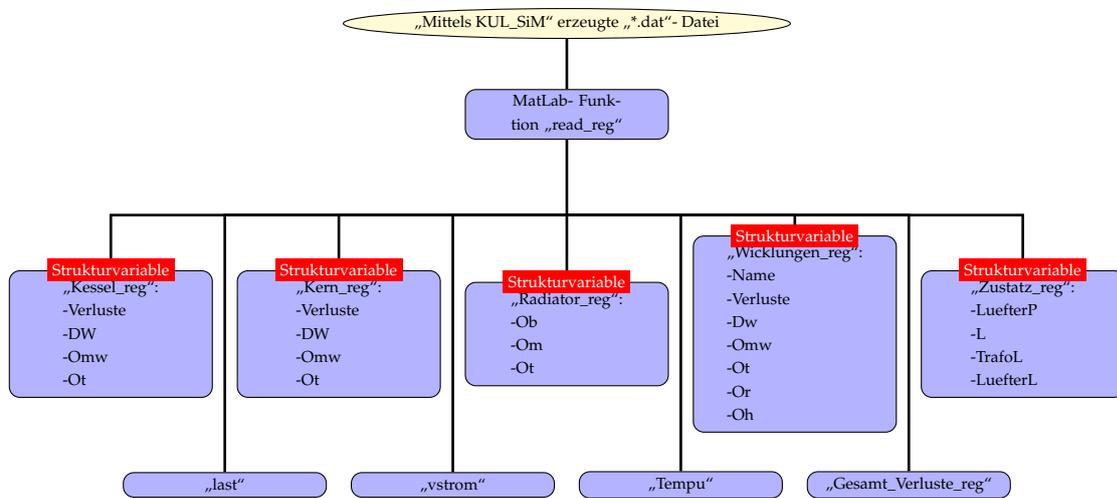


Abbildung 4.3: Flussdiagramm der MatLab- Funktion „read_reg“

Anhand der Strukturvariable „Radiator_reg“ soll der interne Aufbau näher aufgezeigt werden.

- „last“: Diese Variable ist wieder ein Vektor und enthält die von „KUL_sim“-simulierten Belastungsschritte.

$$last = [I_{n,1}, I_{n,2}, I_{n,3}, \dots, I_{n,N-1}, I_{n,N}]$$

- „vstrom“: Diese Variable ist diesmal ebenfalls ein Vektor und beinhaltet die Luftmengen der Transformatorlüfter, für welche eine Simulation mittels „KUL_SIM“ stattgefunden hat.

$$vstrom = [V_{30\%}, V_{35\%}, V_{40\%}, \dots, V_{95\%}, V_{100\%}]$$

- Radiator_reg:

$$\begin{aligned}
 - Ob &= \begin{pmatrix} Ob_{I_{n,1},V_{30\%}} & Ob_{I_{n,2},V_{30\%}} & \dots & Ob_{I_{n,N},V_{30\%}} \\ Ob_{I_{n,1},V_{35\%}} & Ob_{I_{n,2},V_{35\%}} & \dots & Ob_{I_{n,N},V_{35\%}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Ob_{I_{n,1},V_{100\%}} & Ob_{I_{n,2},V_{100\%}} & \dots & Ob_{I_{n,N},V_{100\%}} \end{pmatrix} \\
 - Om &= \begin{pmatrix} Om_{I_{n,1},V_{30\%}} & Om_{I_{n,2},V_{30\%}} & \dots & Om_{I_{n,N},V_{30\%}} \\ Om_{I_{n,1},V_{35\%}} & Om_{I_{n,2},V_{35\%}} & \dots & Om_{I_{n,N},V_{35\%}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Om_{I_{n,1},V_{100\%}} & Om_{I_{n,2},V_{100\%}} & \dots & Om_{I_{n,N},V_{100\%}} \end{pmatrix} \\
 - Ot &= \begin{pmatrix} Ot_{I_{n,1},V_{30\%}} & Ot_{I_{n,2},V_{30\%}} & \dots & Ot_{I_{n,N},V_{30\%}} \\ Ot_{I_{n,1},V_{35\%}} & Ot_{I_{n,2},V_{35\%}} & \dots & Ot_{I_{n,N},V_{35\%}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Ot_{I_{n,1},V_{100\%}} & Ot_{I_{n,2},V_{100\%}} & \dots & Ot_{I_{n,N},V_{100\%}} \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

4.1.2 MatLab- Funktionen zum Visualisieren der „KUL_SIM“- Daten

In diesem Abschnitt werden drei Funktionen beschrieben, welche es ermöglichen, die von „KUL_SIM“ berechneten Daten zu visualisieren. Dabei werden diese Daten einerseits in Graphen und andererseits in Tabellen ausgegeben.

Grafische Ausgabe der „KUL_SIM“- Simulationsdaten

Hierzu wurden in MatLab zwei GUI-Programme geschrieben.

- „show_KUL_Data.m“: GUI Programm, welches es ermöglicht Transformatoraten, welche mittels „KUL_SIM“ erzeugt wurden, zu vergleichen bzw. anzuzeigen.

Abbildung 4.4 zeigt das Hauptfenster des Programms. Über die zwei Schaltflächen „Read KUL_SIM Data1 & Read KUL_SIM Data2“ können

parallel zwei, von „KUL_SIM“ erzeugte, Transformator Daten gelesen werden (z.B.: ONAN- Daten bei -15°C Umgebungstemperatur und ONAF1- Daten bei 20°C). Sind die Daten eingelesen, können über Comboxen im Programm die anzuzeigenden Daten ausgewählt werden. Wichtig ist zu erwähnen, dass es mit diesem Programm nicht möglich ist, gleichzeitig ONAN-, ONAF1- oder ONAF2- Daten und Daten von Transformatoren mit regelbaren Lüftern einzulesen, da diese Daten unterschiedliche Dimensionen in ihrer Datengröße aufweisen.

Im Programm wurden ebenfalls Auswahlfelder implementiert, über welche eingestellt werden kann, ob Temperaturen als absolute Temperaturen oder Temperaturerhöhungen über der Umgebungstemperatur angezeigt werden sollen.

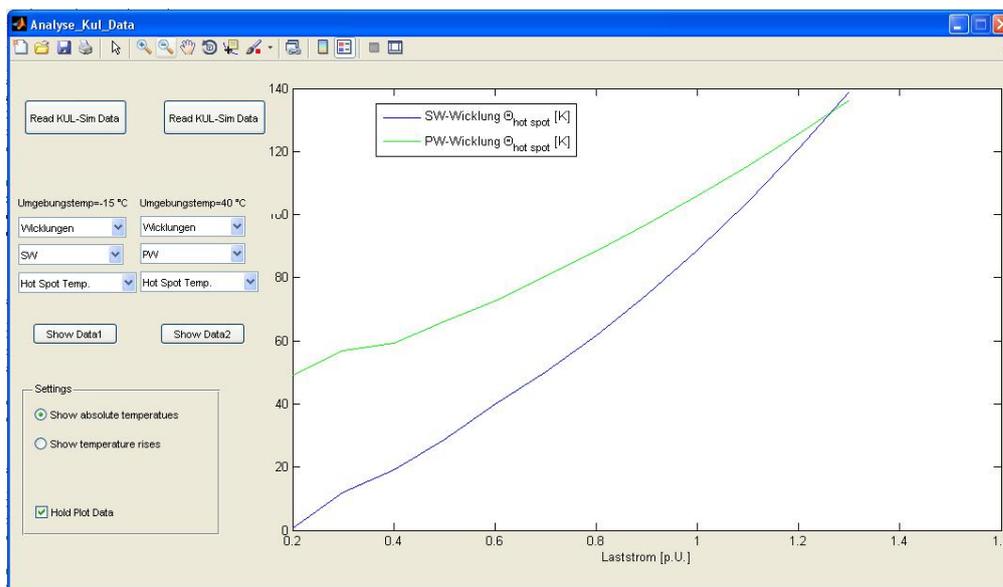


Abbildung 4.4: GUI Programm zum Visualisieren der „KUL_SIM“-Daten

- „show_Minimale_Verluste.m“: GUI Programm zum Ermitteln sowie Darstellen der Transformator Daten bei minimalen Verlusten (für Transformatoren mit regelbaren Lüftern). Für die Transformator Daten eines Transformators mit nicht regelbaren Lüftern kann mit Hilfe dieses Pro-

grammes der komplette Transformator inklusive der Lüftersteuerung simuliert werden. Das heißt, es werden die Transformator Daten der einzelnen Kühlstufen ONAN, ONAF1 & ONAF2 über die im Programm implementierte Lüftersteuerung zu einem Datenpaket zusammengefasst.

Um die Daten in dieses Programm zu laden, sollten diese zuerst in einem Ordner mit folgenden Dateinamen abgelegt werden.

- „ONAN.dat“- kennzeichnet die Transformator Daten bei der Kühlstufe ONAN.
- „ONAF1.dat“- kennzeichnet die Transformator Daten bei der Kühlstufe ONAF1.
- „ONAF2.dat“- kennzeichnet die Transformator Daten bei der Kühlstufe ONAF2.
- „reg.dat“- kennzeichnet die Transformator Daten, wobei hier regelbare Lüfter an dem Transformator montiert sind.

Wird anschließend das Programm gestartet, wird der Benutzer aufgefordert, den Ordner, der die oben beschriebenen Daten enthält, auszuwählen. Aus den geladenen Daten werden dann folgende Datenvariablen in MatLab erstellt:

- Kessel_reg, Kern_reg, Wicklungen_reg, Zusatz_reg, Radiator_reg: Diese Variablen enthalten nach der Aufbereitung die Transformator Daten des Transformators mit regelbaren Lüftern. Beim Erstellen der Variablen sucht das Programm für jeden Belastungsschritt jenen Volumenstrom, der am Transformator montierten Lüfter, welcher zu den geringsten Gesamtverlusten des Transformators führt. Ist der entsprechende Volumenstrom gefunden, werden für diesen alle Daten des Transformators (Temperaturen, Verluste, Geräusch, usw.) für diesen Belastungsschritt in den zugehörigen Variablen abgelegt.
- Kessel_konv, Kern_konv, Wicklungen_konv, Zusatz_konv, Radiator_konv: Diese Variablen enthalten nach der Aufbereitung die

Transformatordaten des Transformators mit nicht regelbaren Lüftern. Hier wurde im Programm eine konventionelle Lüftersteuerung nachgebildet. Dabei wird über die Hot- Spot Temperaturen der Wicklungen gesteuert. Bei Erreichen einer Schwelltemperatur von 50 °C wird von der Kühlstufe ONAN auf ONAF1 gewechselt. Erreichen die Hot- Spot Temperaturen 60 °C wird von der Kühlstufe ONAF1 auf ONAF2 gewechselt. Für das Programm bedeutet dies, dass es für jeden Belastungsschritt die Hot- Spot Temperaturen der ONAN, ONAF1 und ONAF2 Daten des Transformators betrachtet und über obige Temperaturschwellen entscheidet, welche Daten für die aktuelle Belastung in die zugehörigen Variablen abgelegt werden. Abbildung 4.5 zeigt die Hot- Spot Temperaturen eines Transformators nach der Aufbereitung mit der oben beschriebenen Lüftersteuerung.

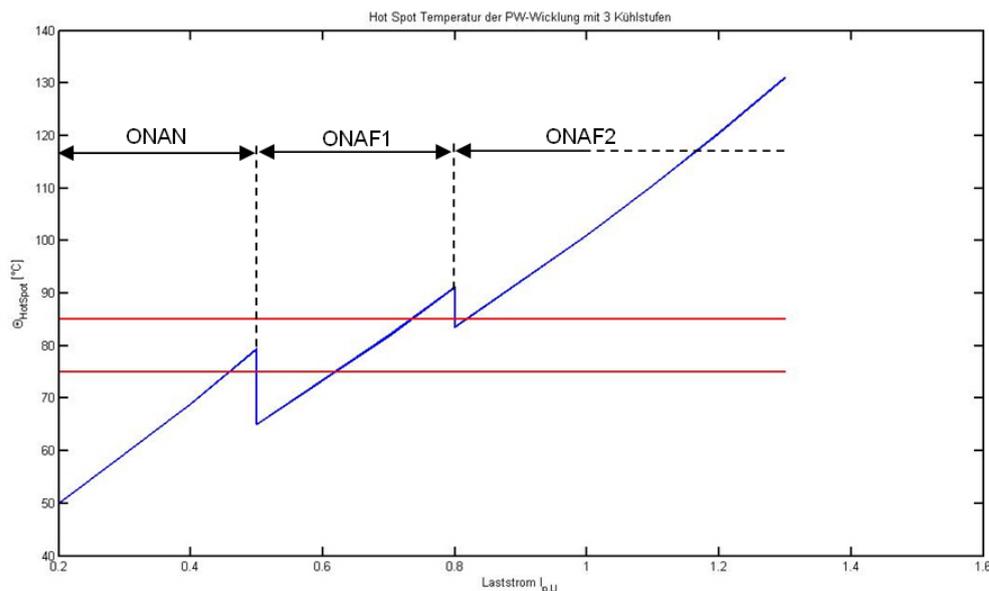


Abbildung 4.5: Hot Spot Temperaturen eines Transformators inklusive Lüftersteuerung

Wurden die Daten ohne Fehler geladen, erscheint ein GUI-Programm, welches in Abbildung 4.6 zu sehen ist. Im Programm kann wieder

über Comboboxen ausgewählt werden, welche Transformator Daten visualisiert werden sollen. Abbildung 4.6 zeigt die Gesamtverluste zu einem Spartransformator bei minimalen Gesamtverlusten mit regelbaren Lüftern, sowie im Vergleich dazu die Gesamtverluste desselben Transformators mit 3 Kühlstufen und der obig beschriebenen Lüftersteuerung.

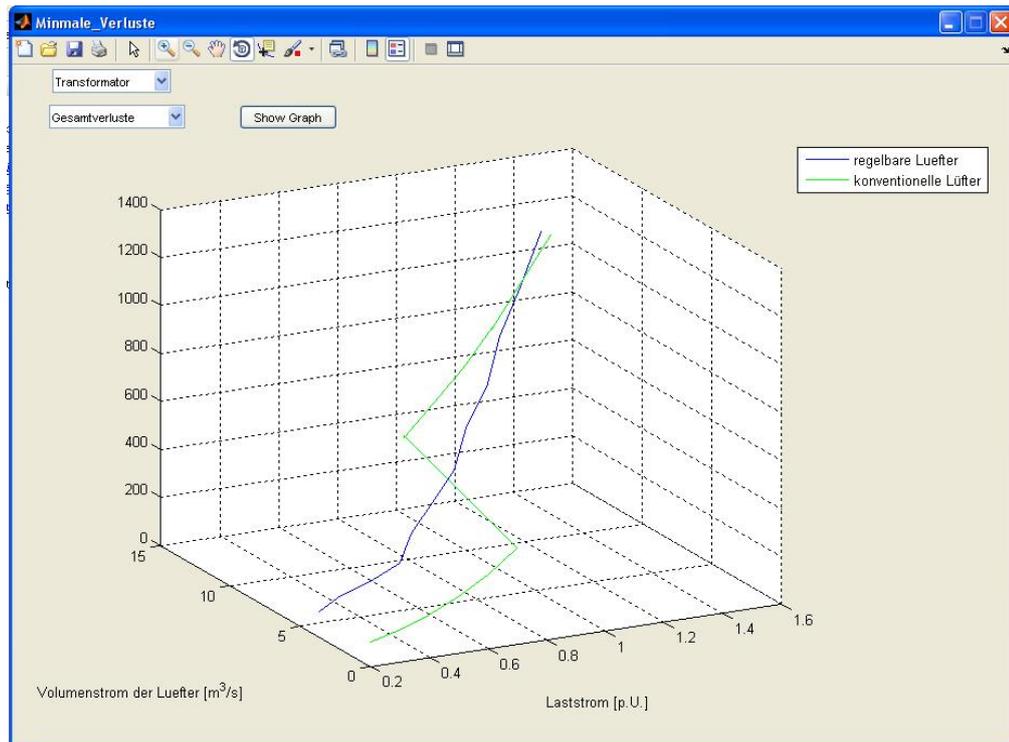


Abbildung 4.6: Programm zum Vergleichen eines Transformators mit und ohne regelbare Lüfter

- „make_csv.m“: Mit dieser Matlab-Funktion können die von „KUL_SIM“ erzeugten Daten eines Transformators in die Datenform „csv“ umgewandelt werden. Dazu sollten, wie auch bei der Funktion „show_Minimale_Verluste.m“, sowohl die Transformator Daten mit regelbaren Lüftern, als auch jene der 3 Kühlstufen ONAN, ONAF1 & ONAF2 in einem Ordner abgelegt werden. Wird das Programm gestartet, wird der Benutzer aufgefordert, den Ordner mit diesen 4 Dateien zu wäh-

len. Nach dieser Ordnerwahl erzeugt das Programm automatisch im gewählten Ordner eine „csv“- Datei mit den Transformator Daten.

Für diese „csv“- Dateien wurde weiters ein Excel- Makro erstellt, welches es ermöglicht, die Daten der „csv“-Dateien in eine Tabellenform zu konvertieren. Das Excel- Makro („read_data“) ist dabei so aufgebaut, dass es beim Start nach einem Ordner verlangt. In diesem verlangten Ordner sollten die „csv“- Dateien abgelegt sein. Das Excel- Makro erzeugt für jede „csv“- Datei ein eigenes Tabellenblatt inklusive der Datentabellen in Excel. Das bringt den Vorteil mit sich, dass für verschiedene Umgebungstemperaturen „csv“- Dateien angelegt und in ein Excel- Arbeitsblatt importiert werden können (siehe Abschnitt 5).

4.1.3 MatLab- Funktionen zum Erzeugen von Visual Basic Variablen

In diesem Abschnitt werden zwei Funktionen vorgestellt, welche es ermöglichen, die mittels „KUL_SIM“ ermittelten Transformator Daten in Visual Basic Variablen umzuwandeln. Die erzeugten VB- Variablen bilden das Grundgerüst der, unter Abschnitt 4.2 beschriebenen, Transformator Modelle und können direkt in den Programmcode der Modelle kopiert werden. Es stehen folgende 2 Funktionen zur Verfügung:

- „create_new_shell_data_reg.m“: Mit dieser Funktion können die mittels „KUL_SIM“ ermittelten Daten eines Transformators mit regelbaren Lüftern in VB- Variablen umgewandelt werden.

Bei Programmstart wird der Benutzer durch einen Dateidialog aufgefordert, alle vorhandenen Transformator Daten („*.dat“) des simulierten Transformators auszuwählen. Dabei müssen alle Transformator Daten die gleichen Belastungsschritte und dieselben Volumenstromschritte der Lüfter aufweisen. Lediglich die Umgebungstemperaturen der Transformator Daten dürfen und sollten sich unterscheiden. Abbildung 4.7 soll das Entstehen der VB- Variablen verdeutlichen.

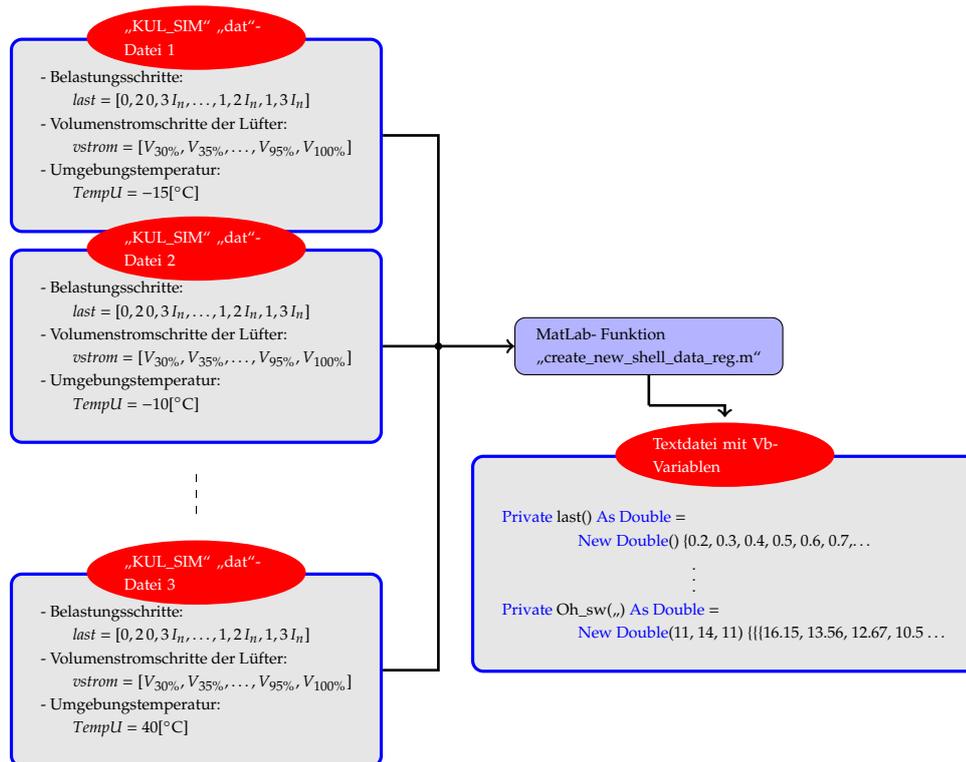


Abbildung 4.7: Prinzipbild der MatLab- Funktion
„create_new_shell_data_reg.m“

Aus den „dat“-Dateien entstehen dreidimensionale VB- Variablen wie in Abbildung 4.7 für die Variable Oh_sw zu sehen ist. Dabei haben die Datenvariablen die Größe

$$\text{Belastungsschritte} \times \text{Volumenstromschritte} \times \text{Umgebungstemperaturen}$$

Abbildung 4.10 verdeutlicht den Aufbau einer solchen Transformatorvariable.

- „create_new_shell_data_konv.m“: Mit dieser Funktion können die mittels „KUL_SIM“ ermittelten Daten eines Transformators mit nicht regelbaren Lüfter in VB- Variablen umgewandelt werden.

Der Programmablauf ist im Prinzip gleich wie der zuvor beschriebene für Transformatoren mit regelbaren Lüftern. Hier muss jedoch darauf geachtet werden, dass einzulesende Transformator Daten in ihren

Dateinamen die Kühlstufe der Transformatorsimulation vermerkt haben. Denn bei Transformatoren mit nicht regelbaren Lüftern ist kein variabler Volumenstrom der Lüfter zu erwarten, wodurch die Volumenstromschritte der Lüfter durch die Kühlstufen *ONAN*, *ONAF1* und *ONAF2* ersetzt werden. Daraus folgt, dass die entstehenden VB-Variablen bzw. Matrizen in ihrer zweiten Dimension eine feste Größe entsprechend der Anzahl der Kühlstufen des Transformators aufweisen. Die VB- Variablen haben jedoch wieder die Dimension drei.

Belastungsschritte × Kuehlstufen × Umgebungstemperaturen

Wieder kann ein Beispiel zu einer solchen VB- Variablen in Abbildung 4.13 eingesehen werden.

4.2 Transformatormodelle

4.2.1 Transformatormodell als Konsolenprogramm

Aus den Ergebnissen, welche mittels „KUL_SIM“ errechnet wurden, lassen sich für die errechneten Transformatoren Modelle erstellen. In diesem Abschnitt wird erklärt, wie die Transformatormodelle realisiert wurden. Weiters wird beschrieben, wie sich diese Modelle bedienen lassen. Abbildung 4.8 soll das Prinzip der Transformatormodelle als Konsolenprogramme verdeutlichen.

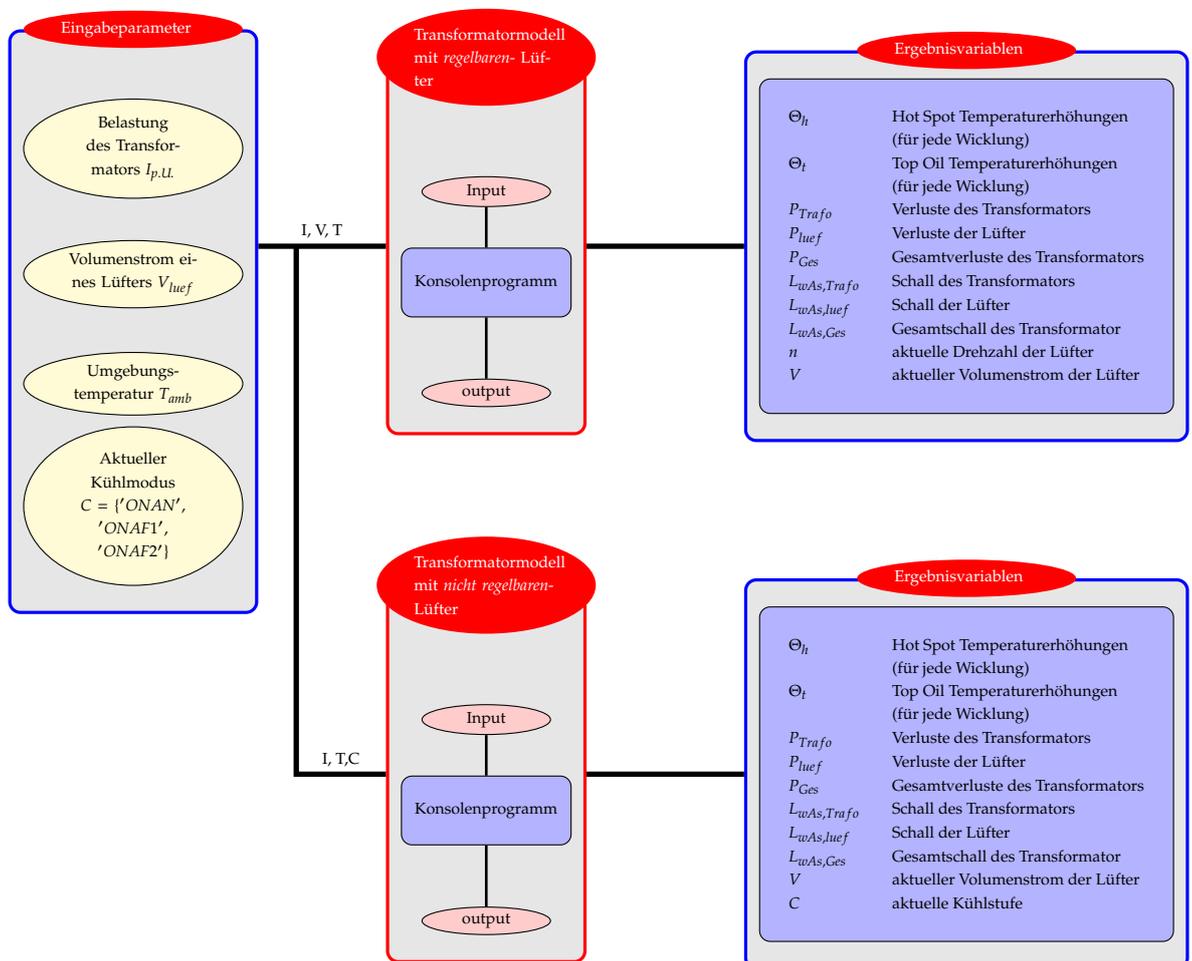


Abbildung 4.8: Prinzipbild der erstellten Transformatormodelle

Transformatormodell mit regelbaren Lüftern

Das Transformatormodell ist als Konsolenprogramm („66691_reg.exe“) aufgebaut. Dabei braucht dieses Programm, welches einen Transformator mit regelbaren Lüftern nachbildet, 3 Eingabeparameter, um aus diesen die in Abbildung 4.8 gezeigten Ergebnisvariablen zu bilden. Wird das Konsolenprogramm mit unzureichend vielen, keinen oder falschen Parametern aufgerufen, so gibt das Programm einen Fehlercode zurück. Um also zu einer gültigen Ausgabe zu gelangen, werden für das Transformatormodell mit regelbaren Lüftern folgende 3 Eingabeparameter, in folgender Reihenfolge benötigt:

- $I_{p.U}$ Belastung des Transformators
- V_{luef} Volumenstrom der am Transformator montierten Lüfter in $[\frac{m^3}{sec}]$
- T_{amb} Umgebungstemperatur in $[^{\circ}C]$

Dabei müssen diese 3 Eingabeparameter beim Aufruf durch Komma getrennt werden. Nachstehend soll nun ein gültiger Aufruf des Transformatormodells gezeigt werden:

```
... \66691_reg.exe 0.5,5.56,-8
```

Dieser Aufruf würde also das Transformatormodell mit folgenden Parameter füttern:

- $I_{p.U} = 0,5 I_{Nenn}$
- $V_{luef} = 5,56 [\frac{m^3}{sec}]$
- $T_{Amb} = -8 [^{\circ}C]$

Werden dem Konsolenprogramm die Eingabeparameter in gültiger Form übergeben, so erzeugt dieses die Ergebnisvariablen. Um das Entstehen der Ergebnisvariablen zu beschreiben, soll zuerst das Flussdiagramm des Transformatormodells bzw. des Konsolenprogramms gezeigt werden (Abbildung 4.9).

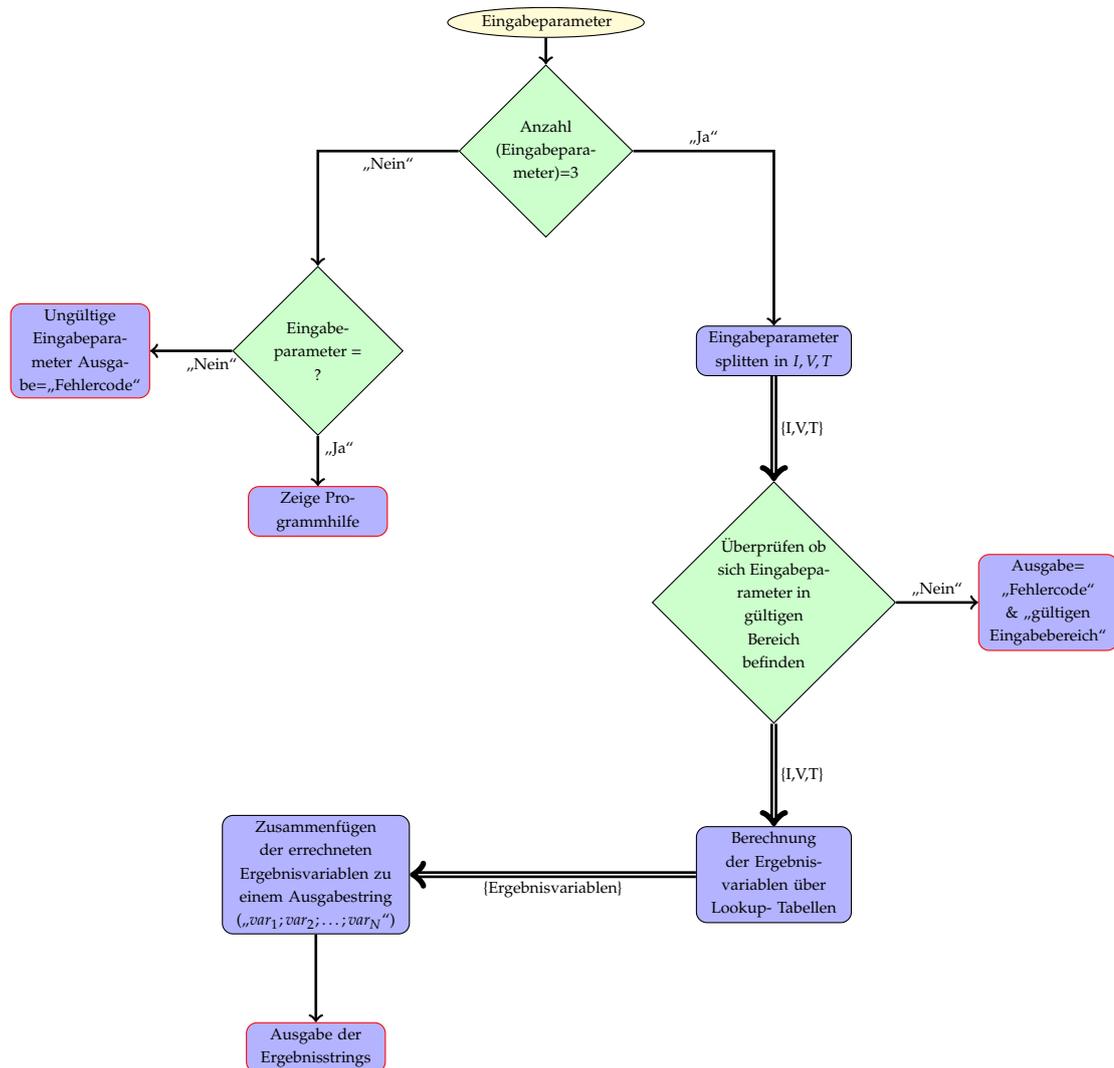


Abbildung 4.9: Flussdiagramm des Konsolenprogramms

Wie in Abbildung 4.9 zu erkennen werden die Ergebnisvariablen über Lookup- Tabellen gebildet. Diese Lookup- Tabellen enthalten die mittels „KUL_SIM“ berechneten Daten des Transformators und sind im Konsolenprogramm als Variablen abgelegt. Da diese Lookup- Tabellen bzw. Variablen über 3 Eingabeparameter angesprochen werden, handelt es sich um dreidimensionale Lookup- Tabellen bzw. Variablen. Die Form einer solcher dreidimensionalen Variable soll anhand eines Beispiels verdeutlicht werden.

Es handelt sich bei nachstehender Lookup- Tabelle um die Hot-Spot Temperaturen eines Transformators Θ_h . Dabei wurden die Hot-Spot Temperaturen mittels „KUL_SIM“ für folgenden Bereich berechnet.

- $I_{p.U.} = [0.2 I_{Nenn}, 0.3 I_{Nenn}, \dots, 1.3 I_{Nenn}]$
- $V_{luef} = [0.3 V_{luef,max}, 0.35 V_{luef,max}, \dots, V_{luef,max}]$
- $T_{Amb} = [-20^\circ C, -15^\circ C, \dots, 35^\circ C, 40^\circ C]$

Die Lookup- Tabelle nimmt für obigen Bereich nun folgende Gestalt an.

$$\Theta_h(I_{p.U.}, V_{luef}, T_{amb}) = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{Umgebungstemperatur} \\ \nearrow \end{matrix} & \begin{pmatrix} \Theta_{I_{0.3}, V_{20\%}, T_{40^\circ C}} & \Theta_{I_{0.3}, V_{30\%}, T_{40^\circ C}} & \dots & \Theta_{I_{0.3}, V_{100\%}, T_{40^\circ C}} \\ \Theta_{I_{0.4}, V_{20\%}, T_{40^\circ C}} & \Theta_{I_{0.4}, V_{30\%}, T_{40^\circ C}} & \dots & \Theta_{I_{0.4}, V_{100\%}, T_{40^\circ C}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Theta_{I_{1.3}, V_{20\%}, T_{30^\circ C}} & \Theta_{I_{1.3}, V_{30\%}, T_{30^\circ C}} & \dots & \Theta_{I_{1.3}, V_{100\%}, T_{30^\circ C}} \end{pmatrix} \\ & & \begin{pmatrix} \Theta_{I_{0.3}, V_{20\%}, T_{-10^\circ C}} & \Theta_{I_{0.3}, V_{30\%}, T_{-10^\circ C}} & \dots & \Theta_{I_{0.3}, V_{100\%}, T_{-10^\circ C}} \\ \Theta_{I_{0.4}, V_{20\%}, T_{-10^\circ C}} & \Theta_{I_{0.4}, V_{30\%}, T_{-10^\circ C}} & \dots & \Theta_{I_{0.4}, V_{100\%}, T_{-10^\circ C}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Theta_{I_{1.3}, V_{20\%}, T_{-20^\circ C}} & \Theta_{I_{1.3}, V_{30\%}, T_{-20^\circ C}} & \dots & \Theta_{I_{1.3}, V_{100\%}, T_{-20^\circ C}} \end{pmatrix} \\ & & \begin{pmatrix} \Theta_{I_{0.3}, V_{20\%}, T_{-20^\circ C}} & \Theta_{I_{0.3}, V_{30\%}, T_{-20^\circ C}} & \dots & \Theta_{I_{0.3}, V_{100\%}, T_{-20^\circ C}} \\ \Theta_{I_{0.4}, V_{20\%}, T_{-20^\circ C}} & \Theta_{I_{0.4}, V_{30\%}, T_{-20^\circ C}} & \dots & \Theta_{I_{0.4}, V_{100\%}, T_{-20^\circ C}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Theta_{I_{1.3}, V_{20\%}, T_{-20^\circ C}} & \Theta_{I_{1.3}, V_{30\%}, T_{-20^\circ C}} & \dots & \Theta_{I_{1.3}, V_{100\%}, T_{-20^\circ C}} \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Abbildung 4.10: Lookup- Tabelle für die Hot Spot Temperaturen in einem Transformator

Über die Lookup- Tabelle aus Abbildung 4.10 würden sich jedoch nur gequantelte Ergebnisse für die Hot-Spot Temperatur berechnen lassen, daher wurde das Konsolenprogramm zusätzlich noch mit einer trilinearen Interpolation ausgestattet, welche eine kontinuierliche Berechnung der Ergebnisvariablen erlaubt.

Auch diese Berechnung soll wieder an einem Beispiel gezeigt werden. Gesucht sei die HotSpot- Temperatur eines Transformators für folgende Betriebsparameter:

- $I_{p.U.} = 0.43 I_{Nenn}$
- $V_{luef} = 0.27 V_{luef,max}$

- $T_{Amb} = 32.5^\circ\text{C}$

Mit diesen 3 Eingabeparameter wird zuerst eine Teilmatrix bzw. ein Teil der Lookup- Tabelle ermittelt, welche den gesuchten Wert umschließt. Abbildung 4.11 soll dies verdeutlichen.

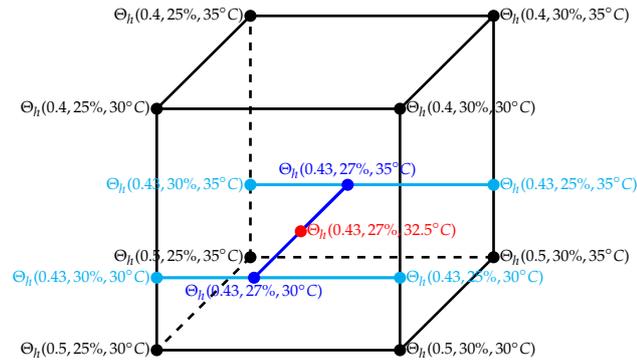


Abbildung 4.11: Teilmatrix für trilineare Interpolation des Ergebnisses

Danach wird zuerst in der ersten Dimension (hier: Belastung) linear interpoliert, das heisst, es werden zuerst folgende 4 Werte berechnet:

$$\begin{aligned}\Theta_h(0.43, 25, 30) &= \Theta_h(0.4, 25, 30) \left(\frac{\Theta_h(0.5, 25, 30) - \Theta_h(0.4, 25, 30)}{0.5 - 0.4} \right) (0.43 - 0.4) \\ \Theta_h(0.43, 30, 30) &= \Theta_h(0.4, 30, 30) \left(\frac{\Theta_h(0.5, 30, 30) - \Theta_h(0.4, 30, 30)}{0.5 - 0.4} \right) (0.43 - 0.4) \\ \Theta_h(0.43, 25, 35) &= \Theta_h(0.4, 25, 35) \left(\frac{\Theta_h(0.5, 25, 35) - \Theta_h(0.4, 25, 35)}{0.5 - 0.4} \right) (0.43 - 0.4) \\ \Theta_h(0.43, 30, 35) &= \Theta_h(0.4, 30, 35) \left(\frac{\Theta_h(0.5, 30, 35) - \Theta_h(0.4, 30, 35)}{0.5 - 0.4} \right) (0.43 - 0.4)\end{aligned}\quad (4.1)$$

Als nächstes werden die gerade errechneten Hot Spot Temperaturen in der zweiten Dimension (hier: Volumenstrom) linear interpoliert und man erhält:

$$\begin{aligned}\Theta_h(0.43, 27, 30) &= \Theta_h(0.43, 25, 30) \left(\frac{\Theta_h(0.43, 30, 30) - \Theta_h(0.43, 25, 30)}{30 - 25} \right) (27 - 25) \\ \Theta_h(0.43, 27, 35) &= \Theta_h(0.43, 25, 35) \left(\frac{\Theta_h(0.43, 30, 35) - \Theta_h(0.43, 25, 35)}{30 - 25} \right) (27 - 25)\end{aligned}\quad (4.2)$$

Letztlich werden diese Hot Spot Temperaturen noch in der dritten und letzten Dimension (hier: Temperatur) interpoliert und man erhält das schlussendliche Ergebnis.

$$\Theta_h(0.43, 27, 32.5) = \Theta_h(0.43, 27, 30) \left(\frac{\Theta_h(0.43, 27, 35) - \Theta_h(0.43, 27, 30)}{35 - 30} \right) (32.5 - 30) \quad (4.3)$$

In Abbildung 4.12 ist ein kompletter Aufruf des Transformatormodells mit regelbaren Lüftern aufgeführt.

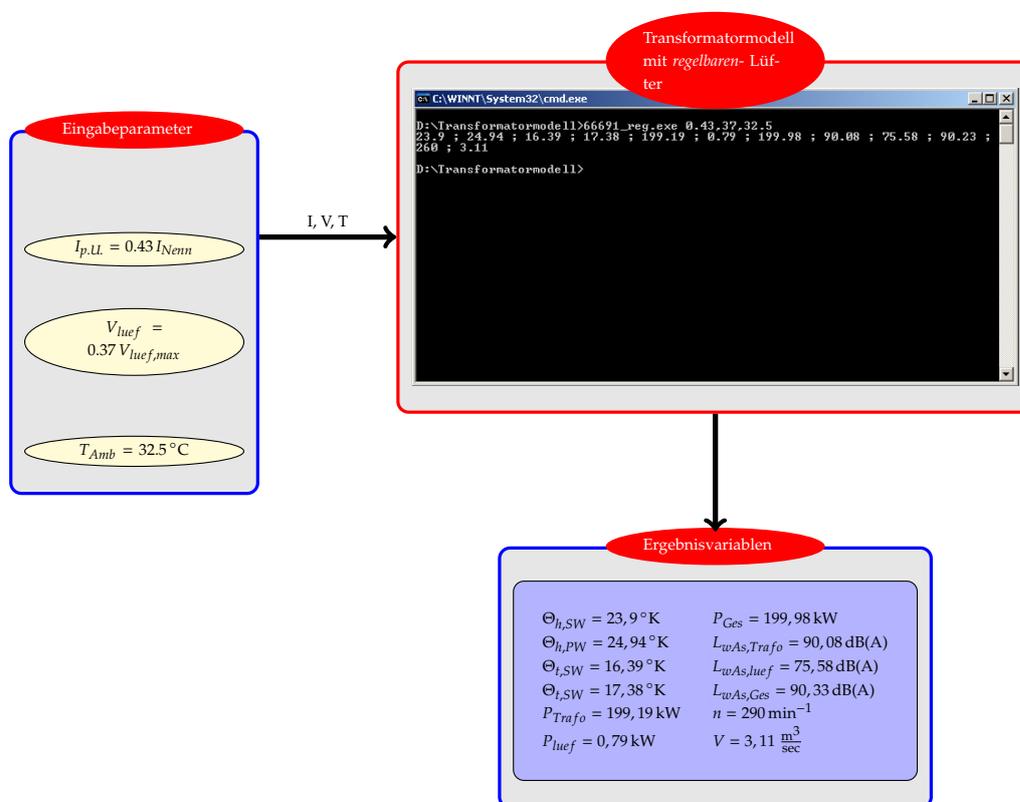


Abbildung 4.12: Aufruf des Transformatormodells mit regelbaren Lüftern

Transformatormodell mit nicht regelbaren Lüftern

Dieses Transformatormodell ist ebenfalls als Konsolenprogramm ausgeführt („66691_kon.exe“), unterscheidet sich jedoch vom Modell mit regelbaren Lüftern durch die Eingabeparameter. Das Modell wird wieder mit 3 Eingabeparametern gefüttert, jedoch wird hier der Eingabeparameter „Volumenstrom der Lüfter“ durch die aktuelle Kühlstufe des Transformators ersetzt.

Auch das Flussdiagramm des Transformatormodells ohne regelbare Lüfter ist dasselbe wie das mit regelbaren Lüftern (Abbildung 4.9). Einzig die abgelegten Lookup- Tabellen in dem Modell, welche den Zustand des Transformators beschreiben, unterscheiden sich. Abbildung 4.13 zeigt die im Modell abgelegte Lookup- Tabelle für die Hot-Spot Temperaturen des Transformators Θ_{ht} . Diese Lookup- Tabelle wurde wieder mittels „KUL_SIM“ berechnet.

$$\Theta_h(I_p, U, C, T_{amb}) =$$

The diagram illustrates a 3D interpolation of hot-spot temperatures. A dashed arrow labeled "Umgebungstemperatur" points from a 2D table at the bottom to a 3D table at the top. The 2D table has columns for ambient temperatures 20°C and 30°C, and rows for cooling stages ONAN, ONAF1, and ONAF2. The 3D table has columns for ambient temperatures 10°C, 20°C, and 30°C, and rows for cooling stages ONAN, ONAF1, and ONAF2. The 3D table is shown as a stack of the 2D tables.

Abbildung 4.13: Lookup- Tabelle für die Hot Spot Temperaturen in einem Transformator

Aus der Lookup- Tabelle in Abbildung 4.13 geht hervor, dass man hier nur in 2 Dimensionen interpolieren muss, denn die aktuelle Kühlstufe muss immer einer der folgenden Zahlen entsprechen:

- 1: ONAN -Kühlstufe
- 2: ONAF1 -Kühlstufe
- 3: ONAF2-Kühlstufe

In Abbildung 4.14 wird ein kompletter Aufruf des Transformatormodells mit nicht regelbaren Lüftern veranschaulicht.

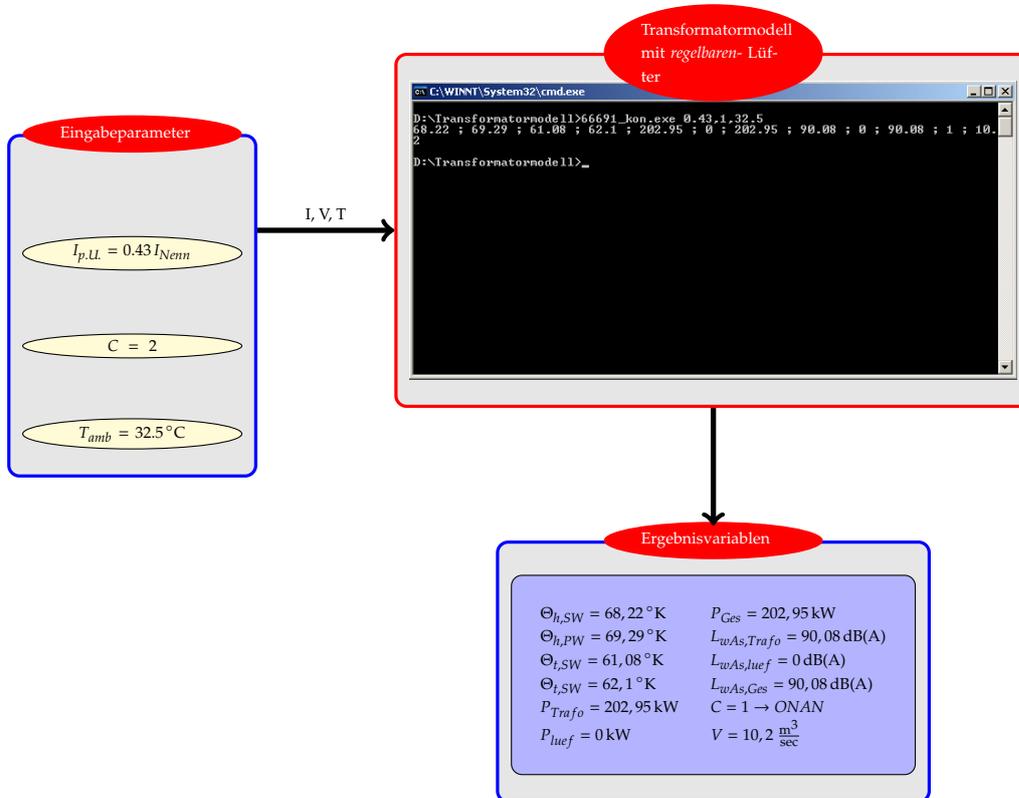


Abbildung 4.14: Aufruf des Transformatormodells mit nicht regelbaren Lüftern

4.2.2 Transformatormodell als „VB.net- dll“

Die beiden Transformatormodelle wurden ebenfalls als „VB.net- dlls“ realisiert. Dabei unterscheiden sich diese dynamischen Bibliotheken nur durch den Aufruf von den zuvor beschriebenen Modellen als Konsolenprogramme. In diesem Abschnitt wird erklärt, welche Funktionen die Modellbibliotheken besitzen und wie sich diese bedienen lassen. Abbildung 4.15 zeigt die Funktionen der Transformatormodelle.

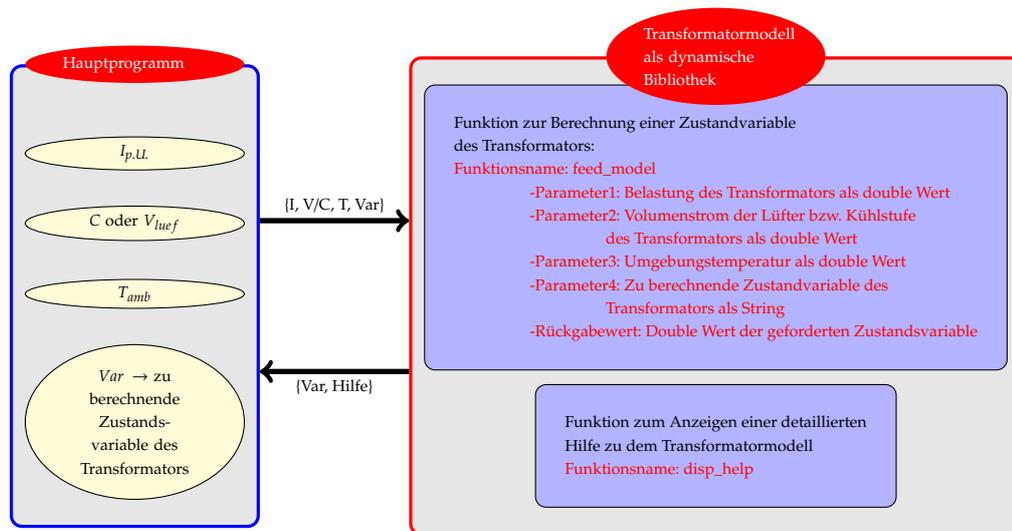


Abbildung 4.15: Funktionen der dynamischen Bibliotheken bzw. Transformatormodelle

Beide Modelle, also sowohl das Modell mit regelbaren Lüftern („reg_dll.dll“) als auch das Modell mit nicht regelbaren Lüftern („kon_dll.dll“), errechnen ihre Ergebnisse bzw. den Zustand des Transformators gleich wie die zuvor beschriebenen Konsolenprogramme.

Wieder sind in den dynamischen Bibliotheken Lookup- Tabellen abgelegt, welche den Zustand des Transformators beschreiben und gleich wie zuvor, wird eine kontinuierliche Berechnung der geforderten Ergebnisvariablen durch eine trilineare Interpolation unterstützt. Jedoch wird im Gegensatz zu den Konsolenprogrammen das Ergebnis der Berechnung nicht als

String-Kette mit den Einzellergebnissen, wie unter Abbildung 4.12 & 4.14 zu sehen zurückgegeben, sondern es wird beim Aufruf des Modells bereits ein zusätzlicher Eingabeparameter mit übergeben, welcher angibt, welche Zustandsvariable des Transformators berechnet werden soll (siehe Abbildung 4.15). Nachstehende Tabelle zeigt nun, welche Zustandsvariablen für die Transformatormodelle des Transformators „66691“ berechnet werden können.

Zustandsvariable	Modell mit regelbaren Lüftern	Modell mit nicht regelbaren Lüftern	Beschreibung
Oh_{sw}	X	X	Hot Spot Temperaturerhöhung der SW- Wicklung [$^{\circ}$ K]
Oh_{pw}	X	X	Hot Spot Temperaturerhöhung der SW- Wicklung [$^{\circ}$ K]
Ot_{sw}	X	X	Top Oil Temperaturerhöhung der SW- Wicklung [$^{\circ}$ K]
Ot_{pw}	X	X	Top Oil Temperaturerhöhung der PW- Wicklung [$^{\circ}$ K]
P_{tr}	X	X	Verluste des Transformators (Wicklungs- + Streu- + Eisenverluste) [kW]
P_{luef}	X	X	Verluste der Lüfter [kW]
P_{ges}	X	X	Gesamtverluste des Transformators [kW]
L_{tr}	X	X	Schall des Transformators [dB(A)]
L_{luef}	X	X	Schall der Lüfter [dB(A)]
L_{ges}	X	X	Gesamtschall des Transformators [dB(A)]
V_{luef}	X	X	Aktueller Volumenstrom der Lüfter [$\frac{m^3}{sec}$]
n_{luef}	X		Aktuelle Drehzahl der Lüfter [min^{-1}]
C		X	Aktuelle Kühlstufe [-]

Tabelle 4.1: Zustandsvariablen der Transformatormodelle

5 Ergebnisse

In diesem Abschnitt können Ergebnisse einer Simulation eines Transformators eingesehen werden. Dabei wurden diese Ergebnisse mittels dem, unter Abschnitt 3 beschriebenen Programm ermittelt und mittels den, unter Abschnitt 4 beschriebenen, Programmen aufbereitet.

5.1 Simulation eines Transformators mit unterschiedlichen Kühlbedingungen

Für die Simulation wurde ein einphasiger ÖL- Spar- Regel- Transformator mit einer Nennleistung von 500 MVA herangezogen. Mittels „KUL_SIM“ wurden Temperaturen, Geräusch sowie Verluste des Transformators für verschiedene Belastungen, Kühlstufen sowie Umgebungstemperaturen ermittelt. Insgesamt wurde das Verhalten des Transformators bei 2880 Arbeitspunkten ermittelt (12 Belastungsstufen, 12 Umgebungstemperaturen und 20 Kühlstufen bzw. Kühlbedingungen). Für diese Arbeitspunkte wurden jeweils die unter Abschnitt 4.1.1 beschriebenen Zustandsvariablen ermittelt. Bei dem simulierten ÖL- Spar- Regel- Transformator wurden daher ca. 100000 Zustandswerte für die 2880 Arbeitspunkte berechnet.

Nachstehende Wertetabellen stellen einen Auszug des beschriebenen Wertepools dar. Dabei wurde der Transformator mit folgenden Betriebsbedingungen simuliert:

- Belastung: Der Transformatorzustand wurde für folgende 12 Belastungsschritte ermittelt:

$$last = [0.2 I_{Nenn}, 0.3 I_{Nenn}, I_{Nenn}, \dots, 1.2 I_{Nenn}, 1.3 I_{Nenn}]$$

- Kühlung: Der Transformatorzustand wurde einerseits für natürliche Kühlung (ONAN) und 2 forcierten Kühlstufen ONAF1 & ONAF2 (mit EBMpapst- sowie Schormann-Lüfter) und andererseits für regelbare Lüfter der Firma EBMpapst ermittelt. Für die regelbaren Lüfter wurden der Transformatorzustand für folgende 15 Volumenstromschritte berechnet.

$$v_{\text{strom}} = [V_{30\%}, V_{35\%}, V_{40\%}, \dots, V_{95\%}, V_{100\%}]$$

Für die konventionelle Steuerung wurden alle betriebenen Lüfter jeweils mit $v_{\text{strom}} = V_{100\%}$ betrieben.

- Umgebungstemperatur: Der Transformatorzustand wurde für die beiden zuvor beschriebenen Betriebsbedingungen für folgende 12 Umgebungstemperaturen berechnet.

$$T_{\text{Umgebung}} = [-15\text{ °C}, -10 \dots \text{ °C}, 35\text{ °C}, 40\text{ °C}]$$

Wie bereits zuvor erwähnt, zeigen nachstehende Tabellen nur einen Ausschnitt dieser berechneten Werte. Dabei wurden zum Vergleich der unterschiedlichen Kühlstufen die Hot-Spot Temperaturen, welche für die Alterung des Transformators verantwortlich sind, die Geräusche sowie Verluste herangezogen.

Um weiters die ONAF1 & ONAF2 Berechnungen mit EBMpapst-Lüfter von den Berechnungen mit Schormann-Lüfter zu unterscheiden, wurden in nachstehender Tabelle die Simulationen, welche mit EBMpapst-Lüfter durchgeführt wurden, braun eingefärbt.

Umgebungstemperatur = -15°C

Drehzahl		470	487	501	514	526	538	548	558	567	575	584	592	599	606	613
VOLUMENSTROM		2,52	2,94	3,36	3,78	4,2	4,62	5,04	5,46	5,88	6,3	6,72	7,14	7,56	7,98	8,4
Last	OHAF1	OHAF2	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0,2	15,8	16,14	16,44	16,16	16,16	15,49	16,17	15,77	16,16	15,82	16,17	16,16	15,91	16,14	15,9	16,13
0,3	27,1	27,04	27,05	27,02	27,01	34,22	24,06	23,5	24,04	23,67	24,03	23,75	24,04	23,79	24,02	23,81
0,4	34,04	34,75	34,72	30,27	31,44	31,64	31,95	32,08	30,32	30,01	30,3	30,04	30,29	30,06	30,27	30,07
0,5	43,59	37,17	37,12	38,71	38,71	36,68	36,97	37,22	37,42	37,6	37,74	37,88	38	38,11	35,75	35,49
0,6	55,08	42,54	42,46	40,98	40,99	42,61	42,07	42,58	42,87	43,09	43,28	41,25	40,92	41,15	40,88	41,03
0,7	65,15	49,09	49,19	48,71	48,73	58,97	49,75	49,75	48,73	47,66	47,35	47,48	46,69	46,75	46,53	46,54
0,8	76,82	57,06	57,2	53,67	53,73	64,91	58,68	57,14	56,45	55,88	55,3	54,98	53,85	53,96	53,83	53,71
0,9	89,74	67,86	70,81	61,68	61,76	72,15	71,28	71,51	64,46	64,33	63,81	63,29	62,52	62,21	61,94	61,33
1	103,83	78,26	78,36	69,21	69,3	80,98	79,18	78,44	77,95	77,65	78,83	77,97	70,58	69,96	68,73	69,27
1,1	119,17	86,18	86,37	80,38	80,47	90,5	87,94	86,64	86,02	85,37	84,87	84,52	84,26	84,13	83,83	83,08
1,2	135,82	95,49	95,76	90,17	90,26	100,67	98,21	96,3	94,81	93,72	92,66	92,62	92,09	91,66	91,33	90,23
1,3	153,84	105,57	105,94	97,70	97,8	112,73	109,13	106,78	104,9	103,41	102,19	101,16	100,41	99,57	98,78	97,97

PW-Wicklung: Hot Spot Temperatur		OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0,2	16,53	16,81	16,82	16,82	16,82	16,31	16,83	16,43	16,82	16,49	16,83	16,54	16,82	16,57	16,8	16,57	16,79
0,3	28,1	27,97	27,97	27,93	27,93	35,2	25	24,44	24,97	24,54	24,97	24,6	24,97	24,69	24,97	24,72	24,74
0,4	35,3	33,12	33,09	31,38	31,38	33,01	33,47	33,47	31,08	31,43	31,43	31,41	31,15	31,4	31,17	31,38	31,18
0,5	44,77	38,68	38,63	39,95	39,95	38,16	38,47	38,73	38,94	39,13	39,29	39,43	39,56	39,67	37,02	36,76	36,77
0,6	56,52	44,19	44,11	42,41	42,41	44,24	43,71	44,98	44,77	44,98	42,71	42,38	42,6	42,33	42,52	42,28	42,26
0,7	67,17	50,92	51,04	50,59	50,6	60,79	51,66	50,93	50,34	49,85	49,48	49,22	49,35	48,92	48,63	48,72	48,49
0,8	79,13	59,41	59,56	55,97	56,04	67,14	60,94	59,5	58,81	58,24	57,66	57,35	56,94	56,46	55,94	55,73	56,29
0,9	92,38	76,22	73,59	64,30	64,37	74,59	73,45	73,41	70,79	67,6	66,89	66,36	66,03	65,64	65,25	64,91	64,38
1	106,8	80,93	81,06	72,01	72,11	83,9	82,27	81,16	80,51	80,03	81	81,43	77,3	76,79	79,99	73,4	73,02
1,1	122,43	89,35	89,55	84,72	84,82	93,83	91,49	89,83	89,47	88,46	87,86	87,39	87	86,7	87,29	86,93	87,65
1,2	139,47	99,12	99,4	93,00	93,1	104,44	101,97	99,95	98,41	97,35	96,26	96,46	95,52	95,01	94,59	94,24	93,95
1,3	157,83	109,63	110,09	101,30	101,41	116,83	113,28	110,93	108,95	107,43	106,17	105,11	104,41	103,54	102,97	102,53	101,51

SW-Wicklung: Top Oil Temperatur		OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0,2	10,81	11,28	11,28	11,31	11,31	11,29	10,51	11,29	11,31	10,91	11,32	10,98	11,31	11,01	11,28	11,01	11,27
0,3	20,21	20,22	20,22	20,20	20,19	28,14	16,73	16,04	16,71	16,17	16,73	16,7	16,37	16,71	16,42	16,69	16,43
0,4	24,58	21,21	21,47	20,28	20,28	20,85	21,08	21,26	21,43	21,58	20,33	19,88	20,33	19,95	20,31	20,02	20,28
0,5	31,98	23,76	23,71	26,62	26,62	23,21	23,54	23,82	24,05	24,25	24,42	24,57	24,71	24,83	22,94	22,62	22,89
0,6	41,55	26,35	26,29	25,23	25,24	26,85	26,06	26,38	26,68	26,93	27,16	25,48	25,05	25,39	25,32	25	25,23
0,7	49,59	30,65	30,8	30,76	30,77	42,67	31,56	30,67	29,92	29,33	28,87	28,54	28,55	28,16	27,8	27,65	27,77
0,8	59,2	36,41	36,59	32,17	32,24	45,79	38,22	36,53	35,63	34,87	34,12	33,65	33,2	32,72	32,41	32,14	31,92
0,9	70,03	45,12	48,1	37,89	37,96	50,45	48,82	48,82	41,59	41,72	40,8	40,12	39,56	39,04	38,62	38,26	37,96
1	81,95	53,12	53,27	42,47	42,58	56,86	54,34	53,39	52,67	52,26	52,27	44,76	44,18	44,18	43,55	43,99	43,52
1,1	95,06	58,70	58,93	51,74	51,84	63,93	60,86	59,26	58,4	57,57	56,87	56,36	55,76	55,35	54,95	54,52	54,48
1,2	109,41	65,65	65,96	58,81	58,92	71,61	68,81	66,6	64,85	63,53	62,27	62,04	61,39	60,81	60,34	59,98	59,5
1,3	125,93	73,31	73,73	63,79	63,9	81,39	77,35	74,69	72,54	70,82	69,38	68,17	67,25	66,25	65,19	64,66	64,29

PW-Wicklung: Top Oil Temperatur

Last	OHAIH	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0,2	11,55	11,95	11,93	11,98	11,97	11,96	11,99	11,98	11,97	11,97	11,98	11,98	11,64	11,97	11,68	11,94	11,67	11,94
0,3	21,2	21,43	21,44	21,40	21,49	29,1	17,67	16,99	17,65	17,42	17,64	17,27	17,63	17,31	17,64	17,35	17,63	17,37
0,4	25,83	22,63	22,59	21,39	21,39	22,26	22,87	23,03	21,45	21,01	21,45	21,08	21,43	21,1	21,42	21,14	21,4	21,14
0,5	33,45	25,34	25,28	27,86	24,75	25,1	25,39	25,85	26,19	26,34	26,46	26,46	24,23	23,9	24,2	23,91	24,18	23,92
0,6	42,38	28,06	28	26,71	26,72	28,53	27,76	28,09	28,41	28,68	28,92	27	26,57	26,9	26,54	26,82	26,49	26,72
0,7	51,6	32,57	32,73	32,69	32,7	44,49	33,55	32,59	31,82	31,21	30,79	30,5	30,51	30,22	29,83	29,71	29,9	29,62
0,8	61,51	38,85	39,03	34,59	34,66	48,03	40,84	38,97	38,08	37,33	36,6	36,14	35,68	35,16	34,84	34,56	34,32	34,78
0,9	72,65	53,52	50,92	40,61	40,7	52,92	51,03	50,16	47,95	44,54	43,19	43,12	42,43	41,92	41,47	41,1	40,78	40,5
1	84,92	55,86	56,03	45,79	45,9	59,81	57,5	55,29	54,69	55,5	55,78	51,52	51,05	53,96	47,36	46,89	46,5	45,87
1,1	98,34	61,94	62,18	53,16	64,17	62,53	61,93	60,74	59,95	59,33	58,85	58,42	58,88	58,49	59,17	58,86	58,61	57,52
1,2	113,08	69,37	69,69	64,75	64,86	75,45	72,65	70,33	68,54	67,26	65,97	64,92	64,28	63,73	63,27	62,84	62,55	61,82
1,3	129,05	77,48	77,99	67,54	67,66	85,57	81,59	78,94	76,7	74,95	73,49	72,24	71,37	70,35	69,15	68,99	68,49	67,64

Gesamtverluste

Last	OHAIH	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0,2	102,1	115,2	112,6	131,6	102,6	102,8	103,1	103,5	104,1	104,8	105,7	106,5	107,7	109,0	110,4	113,8	115,9	118,2
0,3	131,0	144,2	141,5	160,5	134,6	131,3	131,5	132,0	132,5	133,3	134,1	135,0	136,1	137,4	138,8	140,5	142,2	144,4
0,4	171,9	183,5	180,9	200,5	194,6	170,8	171,1	171,5	171,9	172,5	173,7	174,5	175,5	177,9	179,3	181,0	182,7	184,8
0,5	227,2	235,9	233,3	254,8	248,9	223,1	223,4	223,8	224,3	224,9	225,6	226,5	227,4	228,6	230,6	231,9	233,7	237,6
0,6	297,0	304,1	298,5	318,5	312,6	289,5	289,0	289,5	290,1	290,8	292,6	293,2	294,5	295,6	297,3	298,8	300,7	305,1
0,7	383,3	381,4	378,9	393,6	378,6	363,8	363,1	363,3	363,8	365,8	370,6	371,1	372,6	373,6	375,4	376,7	378,8	383,2
0,8	487,3	477,0	474,5	489,3	483,4	465,1	464,4	464,0	464,0	464,0	464,2	464,8	465,7	466,8	468,1	469,7	471,7	476,0
0,9	610,6	590,2	587,8	598,9	593,0	575,7	575,0	575,5	576,0	576,5	577,6	578,4	579,3	580,3	581,4	582,6	583,9	588,5
1	755,0	716,9	714,7	721,8	716,0	708,4	707,7	708,4	709,1	709,6	710,3	711,1	711,9	712,7	713,4	714,2	715,0	719,9
1,1	922,3	863,9	861,7	867,4	861,5	864,8	857,1	853,3	848,2	846,4	845,6	846,6	846,2	846,3	847,3	848,6	850,1	857,5
1,2	1114,7	1030,2	1028,4	1024,3	1018,5	1032,8	1026,1	1020,7	1016,5	1013,1	1010,6	1008,4	1006,9	1005,3	1004,2	1007,8	1009,1	1014,0
1,3	1334,3	1217,3	1215,8	1200,7	1194,9	1228,3	1216,5	1209,2	1203,4	1198,7	1194,8	1189,5	1187,5	1185,8	1185,0	1184,8	1185,1	1185,0

Verluste der Lüfter

Last	OHAIH	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0,2	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66
0,3	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66
0,4	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66
0,5	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66
0,6	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66
0,7	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66
0,8	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66
0,9	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66
1	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66
1,1	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66
1,2	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66
1,3	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66

Last	Gesamtverschall																			
	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%			
0,2	103,23	93,37	106,64	95,61	90,08	90,13	90,2	90,3	90,42	90,58	90,78	91,02	91,3	91,63	92	92,41	92,86	93,34	93,85	
0,3	90,02	103,23	93,38	106,64	95,61	90,1	90,15	90,22	90,31	90,44	90,59	90,79	91,03	91,34	91,66	92,01	92,42	92,88	93,36	93,87
0,4	90,06	103,23	93,39	106,64	95,62	90,13	90,18	90,25	90,35	90,47	90,63	90,82	91,06	91,34	91,66	92,03	92,44	92,88	93,36	93,87
0,5	90,13	103,24	93,43	106,64	95,65	90,21	90,26	90,33	90,42	90,54	90,7	90,89	91,12	91,4	91,72	92,08	92,48	92,93	93,4	93,91
0,6	90,27	103,25	93,5	106,64	95,69	90,35	90,4	90,46	90,55	90,67	90,82	91,01	91,23	91,5	91,82	92,17	92,57	93	93,47	93,97
0,7	90,49	103,26	93,6	106,65	95,75	90,56	90,61	90,67	90,76	90,87	91,01	91,19	91,41	91,67	91,97	92,32	92,7	93,12	93,57	94,06
0,8	90,81	103,27	93,76	106,66	95,85	90,88	90,92	90,98	91,06	91,16	91,3	91,47	91,67	91,91	92,2	92,53	92,89	93,29	93,73	94,2
0,9	91,23	103,30	93,98	106,67	95,98	91,29	91,33	91,39	91,46	91,56	91,68	91,83	92,02	92,25	92,51	92,82	93,16	93,54	93,95	94,4
1	91,76	103,33	94,27	106,68	96,17	91,82	91,85	91,9	91,96	92,05	92,16	92,3	92,47	92,67	92,91	93,19	93,51	93,86	94,25	94,67
1,1	92,39	103,38	94,63	106,71	96,41	92,44	92,47	92,51	92,56	92,64	92,73	92,86	93,01	93,19	93,4	93,65	93,93	94,25	94,61	95
1,2	93,09	103,44	95,07	106,73	96,7	93,13	93,16	93,19	93,24	93,31	93,39	93,49	93,62	93,78	93,97	94,19	94,44	94,73	95,05	95,4
1,3	93,86	103,52	95,57	106,77	97,05	93,89	93,91	93,94	93,98	94,04	94,11	94,2	94,31	94,44	94,6	94,79	95,01	95,27	95,55	95,86

Last	Schall der Lüfter																			
	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%			
0,2	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,3	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,4	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,5	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,6	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,7	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,8	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,9	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
1	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
1,1	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
1,2	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
1,3	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54

Tabelle 5.1: Transformatorzustände bei einer Umgebungstemperatur von -15°C

Umgebungstemperatur= -10°C

Drehzahl		470	487	501	514	526	538	548	558	567	575	584	592	599	606	613	
VOLUMENSTROM		2,52	2,94	3,36	3,78	4,2	4,62	5,04	5,46	5,88	6,3	6,72	7,14	7,56	7,98	8,4	
SW-Wicklung: Hot Spot Temperatur																	
Last	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0,2	14,48	13,59	13,6	13,43	13,51	13,51	13,49	13,5	13,48	13,48	13,46	13,46	13,46	13,44	13,44	13,46	13,43
0,3	25,53	23,85	23,87	23,6	23,59	20,38	20,31	20,29	20,27	20,26	20,24	20,22	20,22	20,21	20,19	20,18	20,18
0,4	33,52	26,71	26,73	25,99	26	35,65	26,62	26,62	26,22	26,18	26,14	26,11	26,08	26,06	26,04	26,02	26
0,5	44,5	34,54	34,57	33,63	33,65	39,96	33,09	32,76	32,53	32,22	32,11	31,88	31,82	31,77	31,73	31,7	31,66
0,6	53,51	40,04	40,15	37,75	37,79	47,29	40,66	39,99	39,42	38,84	38,61	38,21	38,1	38	37,92	37,85	37,78
0,7	64,66	47,77	47,97	44,97	45,02	53,85	48,64	47,85	47,14	46,61	46,19	45,79	45,49	44,86	44,7	44,57	44,45
0,8	76,71	60,37	60,4	51,95	52,02	61,58	59,87	59,87	59,87	59,87	59,87	59,87	59,87	59,87	59,87	59,87	59,87
0,9	89,96	67,53	67,65	58,77	58,84	70,25	68,42	67,68	67,09	66,38	65,97	65,66	65,4	65,12	64,88	64,63	64,38
1	104,36	75,48	75,68	71,57	71,65	79,42	77,18	75,84	74,65	73,97	73,65	73,32	73,06	72,86	72,62	72,31	72,05
1,1	120,02	84,81	85,06	78,84	78,93	90,57	87,1	85,42	84,04	82,95	82,06	81,5	81,3	80,83	80,43	80,11	79,95
1,2	137	94,66	94,96	87,05	87,13	100,68	97,68	95,57	93,92	92,58	91,44	90,5	89,67	88,96	88,47	88,05	87,66
1,3	155,36	105,1	105,46	94,79	94,91	112,34	108,98	106,4	104,37	102,71	101,34	100,14	99,14	98,28	97,53	96,86	96,27

PW-Wicklung: Hot Spot Temperatur																	
Last	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0,2	15,22	14,26	14,27	14,1	14,09	14,23	14,2	14,18	14,17	14,15	14,16	14,14	14,13	14,11	14,1	14,12	14,09
0,3	26,53	24,76	24,78	24,5	24,5	31,95	21,37	21,32	21,29	21,23	21,21	21,19	21,15	21,15	21,14	21,11	21,11
0,4	34,72	27,87	27,9	27,1	27,12	36,82	27,78	27,64	27,54	27,47	27,4	27,35	27,3	27,27	27,23	27,18	27,13
0,5	45,78	35,84	35,88	34,89	34,9	44,75	34,47	34,12	33,88	33,68	33,54	33,43	33,33	33,16	33,12	33,07	32,99
0,6	55,17	41,64	41,75	39,21	39,25	48,6	42,26	41,59	41,08	40,68	40,37	39,93	39,84	39,7	39,58	39,48	39,31
0,7	66,66	49,83	49,82	46,88	46,93	55,65	50,48	49,69	49,21	48,68	48,23	47,85	47,47	47,04	46,86	46,55	46,31
0,8	79,91	62,35	62,41	54,27	54,35	63,74	61,93	62,39	64,44	59,88	56,95	56,41	55,99	55,61	55,12	54,88	54,49
0,9	92,57	70,91	70,15	64,86	64,93	72,81	71,13	70,18	69,53	68,63	68,01	68,75	68,46	68,23	68,12	68,12	68,12
1	107,27	78,36	78,56	73,96	74,04	82,37	80,19	78,73	77,65	77,06	76,4	76,01	75,68	75,39	75,08	74,75	74,42
1,1	123,27	88,19	88,44	82,22	82,32	93,85	90,48	88,8	87,31	86,2	85,27	84,68	84,72	84,28	83,9	83,59	82,7
1,2	140,62	98,42	98,72	90,47	90,56	104,4	101,43	99,33	97,68	96,34	95,09	94,12	93,27	92,53	92,09	91,84	91,49
1,3	159,32	109,24	109,6	98,76	98,89	116,47	113,11	110,55	108,51	106,86	105,49	104,19	103,18	102,3	101,52	100,83	99,82

SW-Wicklung: Top Oil Temperatur																	
Last	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0,2	10,02	9,06	9,07	8,89	8,89	9,03	9	8,98	8,97	8,95	8,96	8,94	8,95	8,92	8,9	8,9	8,89
0,3	19,04	17,23	17,25	16,96	16,95	24,11	13,29	13,23	13,2	13,16	13,14	13,12	13,1	13,08	13,06	13,04	13,02
0,4	24,64	16,86	16,89	16,07	16,08	27,17	16,77	16,62	16,52	16,38	16,32	16,28	16,24	16,2	16,17	16,15	16,13
0,5	33,58	22,43	22,47	21,43	21,45	28,83	20,55	20,19	19,93	19,73	19,58	19,46	19,36	19,27	19,2	19,14	19,04
0,6	40,51	24,9	25,04	22,3	22,35	33,52	25,68	24,84	24,26	23,85	23,52	23,27	23,07	22,96	22,82	22,7	22,5
0,7	49,59	30,31	30,45	27,17	27,22	37,49	31,27	30,31	29,64	28,87	28,32	27,86	27,62	27,53	27,42	27,32	27,22
0,8	59,53	40,71	40,77	31,3	31,37	42,75	40,42	40,75	37,16	34,45	34,47	33,76	33,24	32,78	32,47	32,18	31,93
0,9	70,64	45,47	45,63	35,97	36,05	49,02	46,61	44,9	44,33	43,95	43,43	43,7	44,02	43,74	43,5	43,4	43,3
1	82,84	51,06	51,29	46,11	46,19	55,74	53,07	51,49	50,09	49,83	49,11	48,65	48,19	47,82	47,56	47,25	46,91
1,1	96,23	58,03	58,32	50,89	50,98	64,86	60,86	58,73	57,13	55,85	54,79	54,07	53,75	53,45	53,06	52,73	52,37
1,2	110,87	65,47	65,81	56,31	56,42	72,22	68,87	66,5	64,62	63,08	61,75	60,65	59,68	58,83	58,22	57,68	57,09
1,3	126,8	73,44	73,84	61,51	61,66	81,42	77,74	74,89	72,62	70,75	69,19	67,82	66,67	65,67	64,78	64	63,29

PW-Wicklung: Top Oil Temperatur																			
Last	OHAI	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%	
0.2	10.75	9.72	9.73	9.55	9.54	9.69	9.66	9.64	9.63	9.61	9.62	9.6	9.57	9.58	9.56	9.55	9.57	9.55	9.55
0.3	20.02	18.13	18.15	17.85	17.84	25.08	14.23	14.17	14.14	14.1	14.07	14.05	14.03	13.98	13.97	13.95	13.94	13.94	13.94
0.4	25.84	18.02	18.06	17.19	17.33	17.78	17.67	17.59	17.57	17.46	17.41	17.46	17.33	17.33	17.27	17.25	17.22	17.21	17.21
0.5	34.83	23.73	23.78	22.68	22.7	33.58	21.94	21.82	21.81	21.68	20.91	20.68	20.59	20.51	20.45	20.39	20.34	20.3	20.26
0.6	42.15	26.53	26.67	23.8	23.85	34.81	27.3	26.47	25.87	25.44	25.1	24.83	24.62	24.51	24.22	24.11	24.01	23.92	23.84
0.7	51.56	32.42	32.68	29.12	29.18	39.29	33.5	32.54	31.65	31	30.43	29.98	29.63	29.33	29.09	28.88	28.69	28.54	28.27
0.8	61.8	42.74	42.8	33.7	33.78	44.91	42.51	42.77	44.67	44.67	44.39	44.39	44.39	44.39	44.39	44.39	44.39	44.39	44.39
0.9	75.23	48	48.17	42.1	42.18	51.6	49.35	48.21	47.38	46.72	46.25	46.11	46.15	46.84	46.84	46.84	46.84	46.84	46.84
1	85.74	53.99	54.23	48.6	48.69	58.73	56.13	54.43	53.15	52.96	52.26	51.47	50.95	50.19	49.82	49.46	48.89	48.67	48.67
1.1	99.48	61.47	61.76	54.35	54.45	68	64.1	62.17	60.47	59.17	58.07	57.32	56.67	56.21	55.8	55.07	54.72	54.42	54.07
1.2	114.51	69.3	69.64	59.84	59.95	76	72.69	70.33	68.46	66.92	65.48	64.36	63.37	62.49	61.3	61.46	61.02	60.65	59.9
1.3	130.79	77.67	78.07	65.61	65.76	85.62	81.95	79.12	76.85	75	73.44	71.98	70.81	69.79	68.89	68.09	66.87	66.31	65.69

Gesamtverluste																			
Last	OHAI	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%	
0.2	102.3	115.4	112.7	131.7	125.8	102.7	103.0	103.3	103.7	104.3	104.9	105.8	106.7	107.8	109.1	110.5	112.2	114.0	118.4
0.3	131.5	144.4	141.8	160.8	154.8	132.8	131.4	131.8	132.2	132.8	133.4	134.3	135.2	136.3	137.6	139.0	140.7	142.4	144.5
0.4	173.1	184.4	181.7	200.6	194.7	174.5	172.0	172.3	172.7	173.2	173.9	174.7	175.6	176.7	178.0	179.5	181.1	182.9	185.0
0.5	229.0	238.4	235.8	254.5	248.6	228.5	225.0	225.3	225.7	226.2	226.8	227.7	228.5	229.6	230.9	232.3	234.0	235.7	237.8
0.6	299.9	303.8	301.3	319.3	313.4	296.2	291.9	291.7	291.9	292.3	292.9	293.7	294.5	295.6	296.8	298.2	299.9	301.6	303.7
0.7	387.4	385.2	383.2	400.1	394.2	378.2	374.2	373.6	372.9	373.1	373.7	374.4	375.4	376.6	378.0	379.6	381.3	383.3	385.6
0.8	492.7	482.9	480.5	493.3	487.4	475.9	471.9	471.0	470.5	470.3	470.4	469.6	469.9	470.5	471.3	472.6	474.1	475.7	479.9
0.9	617.6	594.9	592.6	606.1	600.2	590.5	584.8	583.3	582.0	581.0	582.0	582.2	583.3	584.4	585.7	587.6	589.2	592.2	599.3
1	763.9	725.1	722.9	731.3	725.4	722.1	716.6	714.0	711.9	710.6	709.5	708.3	708.2	710.2	711.0	712.4	714.0	715.9	718.0
1.1	933.4	874.1	872.1	873.7	867.8	877.0	863.6	860.5	858.2	856.3	856.3	855.0	854.8	853.5	853.5	853.5	853.5	853.5	853.5
1.2	1128.3	1042.6	1040.8	1031.5	1025.9	1046.7	1038.5	1033.4	1028.9	1025.4	1022.6	1020.5	1018.8	1017.6	1016.5	1016.5	1016.5	1017.4	1018.3
1.3	1350.7	1232.1	1230.6	1212.2	1206.7	1244.0	1231.4	1224.0	1218.1	1213.4	1209.4	1206.3	1203.7	1201.7	1199.2	1198.5	1198.5	1198.5	1199.1

Verluste der Lüfter																			
Last	OHAI	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%	
0.2	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	16.06
0.3	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	16.06
0.4	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	16.06
0.5	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	16.06
0.6	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	16.06
0.7	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	16.06
0.8	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	16.06
0.9	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	16.06
1	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	16.06
1.1	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	16.06
1.2	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	16.06
1.3	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	16.06

		Gesamteschall																				
Last	OIIAH	OIIAF1	OIIAF2	OIIAF30%	OIIAF35%	OIIAF40%	OIIAF45%	OIIAF50%	OIIAF55%	OIIAF60%	OIIAF65%	OIIAF70%	OIIAF75%	OIIAF80%	OIIAF85%	OIIAF90%	OIIAF95%	OIIAF100%				
0,2	90	103,23	93,37	106,64	95,61	90,08	90,13	90,22	90,31	90,33	90,42	90,44	90,58	90,78	91,02	91,31	91,63	92	92,86	93,34	93,85	
0,3	90,02	103,23	93,38	106,64	95,61	90,1	90,15	90,22	90,31	90,33	90,42	90,44	90,59	90,79	91,03	91,31	91,64	92,01	92,42	92,86	93,35	93,86
0,4	90,06	103,23	93,39	106,64	95,62	90,13	90,18	90,25	90,35	90,42	90,47	90,63	90,82	91,06	91,34	91,66	92,03	92,44	92,88	93,36	93,87	
0,5	90,13	103,24	93,43	106,64	95,65	90,21	90,26	90,33	90,42	90,45	90,54	90,7	90,89	91,12	91,4	91,72	92,08	92,48	92,93	93,4	93,91	
0,6	90,27	103,25	93,5	106,64	95,69	90,35	90,4	90,46	90,55	90,67	90,82	91,01	91,23	91,45	91,82	92,17	92,57	93	93,47	93,97		
0,7	90,49	103,26	93,6	106,65	95,75	90,56	90,61	90,67	90,76	90,87	91,01	91,19	91,41	91,67	91,97	92,32	92,7	93,12	93,57	94,06		
0,8	90,81	103,27	93,76	106,66	95,85	90,88	90,92	90,98	91,06	91,16	91,3	91,47	91,67	91,91	92,2	92,53	92,89	93,29	93,73	94,2		
0,9	91,23	103,3	93,88	106,67	95,98	91,29	91,33	91,39	91,46	91,56	91,68	91,83	92,02	92,25	92,51	92,82	93,16	93,54	93,95	94,4		
1	92,39	103,38	94,27	106,68	96,17	91,82	91,85	91,9	91,96	92,05	92,16	92,27	92,47	92,67	92,91	93,19	93,51	93,86	94,25	94,67		
1,1	93,09	103,44	95,07	106,71	96,41	92,44	92,47	92,51	92,56	92,64	92,73	92,86	93,01	93,19	93,4	93,65	93,93	94,25	94,61	95		
1,2	93,09	103,44	95,07	106,73	96,7	93,13	93,16	93,19	93,24	93,31	93,39	93,49	93,62	93,78	93,97	94,19	94,44	94,73	95,05	95,4		
1,3	93,86	103,52	95,57	106,77	97,05	93,89	93,91	93,94	93,98	94,04	94,11	94,2	94,31	94,44	94,6	94,79	95,01	95,27	95,55	95,86		

		Schall der Lüfter																				
Last	OIIAH	OIIAF1	OIIAF2	OIIAF30%	OIIAF35%	OIIAF40%	OIIAF45%	OIIAF50%	OIIAF55%	OIIAF60%	OIIAF65%	OIIAF70%	OIIAF75%	OIIAF80%	OIIAF85%	OIIAF90%	OIIAF95%	OIIAF100%				
0,2	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,63	91,54		
0,3	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,63	91,54		
0,4	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,63	91,54		
0,5	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,63	91,54		
0,6	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,63	91,54		
0,7	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,63	91,54		
0,8	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,63	91,54		
0,9	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,63	91,54		
1	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,63	91,54		
1,1	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,63	91,54		
1,2	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,63	91,54		
1,3	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,63	91,54		

Tabelle 5.2: Transformatorzustände bei einer Umgebungstemperatur von -10°C

Umgebungstemperatur= -5 °C																
	Drehzahl	470	487	501	514	526	538	548	558	567	575	584	592	599	606	613
	VOLUMENSTROM	2,52	2,94	3,36	3,78	4,2	4,62	5,04	5,46	5,88	6,3	6,72	7,14	7,56	7,98	8,4

Last	OHAF1	OHAF2	SW-Wichtung: Hot Spot Temperatur															
			OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%	
0,2	13,74	12,68	12,69	12,53	12,67	12,64	12,61	12,61	12,58	12,57	12,57	12,56	12,56	12,55	12,54	12,53	12,52	12,53
0,3	24,71	22,87	22,89	22,6	29,27	19,3	19,25	19,2	19,17	19,14	19,12	19,1	19,09	19,06	19,04	19,03	19,02	19,02
0,4	34,38	25,44	25,48	24,61	34,2	25,39	25,23	25,1	24,94	24,88	24,83	24,79	24,75	24,72	24,69	24,66	24,64	24,62
0,5	43,16	33,08	33,13	31,99	32,04	31,96	31,57	31,26	31,04	30,86	30,72	30,61	30,51	30,43	30,37	30,31	30,25	30,21
0,6	53,02	39,07	41,22	36,09	36,13	44,71	41,54	39,02	38,37	37,92	37,56	37,27	37,04	36,68	36,53	36,4	36,3	36,2
0,7	64,46	49,28	49,29	42,7	42,76	51,88	49,72	48,28	48,96	48,69	48,22	47,82	47,44	46,97	46,7	46,48	46,28	46,12
0,8	76,82	57,3	57,43	53,25	53,3	59,78	57,84	57,84	57,84	57,84	57,84	57,84	57,84	57,84	57,84	57,84	57,84	57,84
0,9	90,33	65,34	65,52	61,01	61,2	69,83	66,73	65,57	64,65	63,9	63,09	62,31	62,58	62,31	62,07	61,78	61,53	61,33
1	105,04	74,38	74,61	68,61	68,7	79,25	76,32	74,81	73,62	72,65	71,82	71,15	70,57	70,07	69,75	69,45	69,15	68,66
1,1	120,97	84,02	84,3	76,21	76,31	89,08	86,57	84,71	83,23	82,02	81,01	80,15	79,41	78,71	78,14	77,63	77,18	76,71
1,2	138,27	94,17	94,51	84,55	84,67	100,43	97,47	95,19	93,37	91,88	90,64	89,58	88,68	87,89	87,2	86,55	86	85,5
1,3	156,96	104,9	105,29	93,44	93,57	112,65	109,08	106,32	104,12	102,32	100,81	99,54	98,44	97,48	96,63	95,88	95,17	94,56

Last	OHAF1	OHAF2	PW-Wichtung: Hot Spot Temperatur															
			OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%	
0,2	14,46	13,33	13,34	13,17	13,16	13,32	13,29	13,26	13,25	13,23	13,22	13,21	13,2	13,19	13,18	13,17	13,16	13,16
0,3	25,82	23,91	23,92	23,62	23,62	30,11	20,23	20,17	20,12	20,09	20,06	20,03	20,02	20	19,98	19,95	19,94	19,92
0,4	35,51	26,59	26,63	25,7	25,72	35,2	26,54	26,36	26,23	26,13	26,06	26	25,94	25,9	25,82	25,79	25,76	25,74
0,5	44,44	34,36	34,41	33,2	33,22	40,21	33,38	32,93	32,6	32,37	32,18	32,03	31,91	31,81	31,72	31,65	31,59	31,48
0,6	54,68	40,38	43,03	37,64	37,68	46,26	43,37	39,7	39,48	39,1	38,8	38,55	38,33	38,16	38,03	37,91	37,82	37,74
0,7	66,43	50,87	51,09	44,49	44,56	53,78	51,52	50,88	50,36	51,03	52,27	52,03	51,84	51,84	51,84	51,84	51,84	51,84
0,8	79,09	59,55	59,68	55,19	55,25	62,02	60,09	59,04	59	57,8	57,41	57,08	56,89	56,57	56,33	55,92	55,71	55,53
0,9	92,9	67,99	68,17	63,62	63,6	72,37	69,39	68,23	67,22	66,46	65,74	65,9	65,41	65,07	64,77	64,51	64,19	63,7
1	107,91	77,38	77,61	71,68	71,78	82,48	79,33	77,82	76,62	75,66	74,73	74,04	73,45	72,93	72,43	72,51	72,22	71,99
1,1	124,2	87,4	87,67	79,37	79,47	92,43	89,94	88,08	86,6	85,39	84,38	83,52	82,79	81,97	81,38	80,86	80,39	79,58
1,2	141,87	97,92	98,25	88,13	88,26	104,17	101,21	98,93	97,12	95,63	94,39	93,33	92,43	91,64	90,95	90,19	89,63	88,2
1,3	160,9	109,03	109,42	97,45	97,59	116,76	113,2	110,45	108,25	106,45	104,95	103,68	102,57	101,62	100,77	100,02	99,22	98,64

Last	OHAF1	OHAF2	SW-Wichtung: Top Oil Temperatur															
			OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%	
0,2	9,69	8,58	8,59	8,42	8,41	8,56	8,54	8,51	8,5	8,47	8,46	8,45	8,45	8,44	8,43	8,43	8,42	8,41
0,3	18,54	16,59	16,6	16,3	16,29	23,53	12,7	12,64	12,59	12,56	12,53	12,5	12,48	12,47	12,44	12,43	12,42	12,39
0,4	26,05	16,22	16,26	15,32	15,34	26,01	16,17	15,99	15,86	15,76	15,68	15,62	15,56	15,52	15,48	15,44	15,38	15,33
0,5	32,72	21,51	21,56	20,32	20,35	28,28	20,14	19,69	19,36	19,11	18,92	18,77	18,65	18,54	18,45	18,38	18,26	18,16
0,6	40,47	24,63	27,08	21,43	21,43	31,34	27,44	24,57	23,97	23,39	22,98	22,67	22,42	22,2	22,03	21,86	21,72	21,61
0,7	49,79	32,62	32,72	25,26	25,33	35,98	33,21	32,62	32,23	32,87	29,94	28,78	28,56	28,31	28,09	27,81	27,65	27,52
0,8	60,02	38,26	38,42	33,6	33,67	41,39	39	38,38	37,61	36,4	35,92	35,52	35,33	35	34,75	34,35	33,79	33,65
0,9	71,35	43,94	44,16	38,86	39,06	49,21	45,57	44,22	43,13	42,24	41,3	40,93	40,52	40,16	39,85	39,53	39,27	38,83
1	83,8	50,61	50,87	45,65	45,75	56,19	52,83	51,11	49,73	48,61	47,64	46,84	46,15	45,54	44,81	44,53	44,31	43,71
1,1	97,47	57,84	58,15	48,73	48,83	63,49	60,7	58,61	56,94	55,56	54,4	53,41	52,55	51,74	51,06	50,46	49,43	48,78
1,2	112,39	65,54	65,91	54,52	54,66	72,42	69,18	66,66	64,64	62,97	61,57	60,37	59,34	58,44	57,63	56,88	56,23	55,4
1,3	128,62	73,76	74,19	60,85	61,01	82,18	78,32	75,32	72,9	70,92	69,24	67,81	66,57	65,49	64,53	63,67	62,86	62,16

PW-Wicklung: Top OH Temperatur

Last	OH/AH	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0,2	10,4	9,21	9,04	9,04	9,17	9,14	9,13	9,1	9,09	9,08	9,08	9,07	9,06	9,06	9,05	9,04	9,03	9,04
0,2	102,6	115,6	113,0	132,0	103,2	103,5	104,0	104,5	105,2	106,1	107,0	108,1	109,4	110,8	112,5	114,2	116,3	118,6
0,3	132,0	144,9	142,3	161,2	132,0	132,4	132,8	133,3	134,0	134,9	135,7	136,8	138,2	139,6	141,2	143,0	145,1	147,4
0,4	174,4	185,4	182,8	201,6	175,3	173,3	173,7	174,3	174,9	175,8	176,6	177,7	179,0	180,5	182,1	183,9	186,0	188,3
0,5	231,0	239,9	237,3	256,0	230,0	228,7	228,7	229,3	229,8	230,4	231,2	232,5	233,9	235,5	237,3	239,4	241,7	244,1
0,6	302,9	306,9	304,9	321,6	298,3	295,3	294,8	294,7	295,3	296,0	296,8	297,9	299,2	300,5	302,2	303,9	305,9	308,2
0,7	394,5	388,9	386,9	402,3	381,2	377,4	376,9	377,4	378,0	378,7	379,5	380,5	382,2	383,6	385,2	386,9	389,0	391,0
0,8	498,2	486,9	484,5	499,4	493,5	479,7	476,1	474,0	473,8	473,9	474,3	476,2	477,3	478,6	480,1	481,8	483,8	486,0
1,0	772,9	733,5	731,3	735,2	729,4	731,4	725,0	722,3	718,8	716,9	716,4	716,3	716,5	716,9	717,9	718,8	720,1	721,9
1,1	944,6	884,2	882,2	880,3	874,4	883,2	877,7	868,4	866,5	865,3	864,1	863,5	863,3	863,3	863,7	864,3	865,3	866,7
1,2	1142,0	1054,9	1053,2	1043,3	1037,7	1056,2	1051,0	1045,5	1037,7	1034,9	1032,8	1031,1	1029,8	1028,9	1028,4	1028,5	1029,2	1030,1
1,3	1367,2	1246,8	1245,3	1226,2	1220,7	1256,2	1246,4	1238,9	1232,8	1228,0	1223,0	1218,2	1214,7	1213,5	1212,8	1212,4	1212,6	1213,1

Gesamterluste

Last	OH/AH	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0,2	102,6	115,6	113,0	126,0	103,2	103,5	104,0	104,5	105,2	106,1	107,0	108,1	109,4	110,8	112,5	114,2	116,3	118,6
0,3	132,0	144,9	142,3	155,3	132,0	132,4	132,8	133,3	134,0	134,9	135,7	136,8	138,2	139,6	141,2	143,0	145,1	147,4
0,4	174,4	185,4	182,8	195,7	175,3	173,3	173,7	174,3	174,9	175,8	176,6	177,7	179,0	180,5	182,1	183,9	186,0	188,3
0,5	231,0	239,9	237,3	256,0	230,0	228,7	228,7	229,3	229,8	230,4	231,2	232,5	233,9	235,5	237,3	239,4	241,7	244,1
0,6	302,9	306,9	304,9	321,6	298,3	295,3	294,8	294,7	295,3	296,0	296,8	297,9	299,2	300,5	302,2	303,9	305,9	308,2
0,7	394,5	388,9	386,9	402,3	381,2	377,4	376,9	377,4	378,0	378,7	379,5	380,5	382,2	383,6	385,2	386,9	389,0	391,0
0,8	498,2	486,9	484,5	499,4	493,5	479,7	476,1	474,0	473,8	473,9	474,3	476,2	477,3	478,6	480,1	481,8	483,8	486,0
1,0	772,9	733,5	731,3	735,2	729,4	731,4	725,0	722,3	718,8	716,9	716,4	716,3	716,5	716,9	717,9	718,8	720,1	721,9
1,1	944,6	884,2	882,2	880,3	874,4	883,2	877,7	868,4	866,5	865,3	864,1	863,5	863,3	863,3	863,7	864,3	865,3	866,7
1,2	1142,0	1054,9	1053,2	1043,3	1037,7	1056,2	1051,0	1045,5	1037,7	1034,9	1032,8	1031,1	1029,8	1028,9	1028,4	1028,5	1029,2	1030,1
1,3	1367,2	1246,8	1245,3	1226,2	1220,7	1256,2	1246,4	1238,9	1232,8	1228,0	1223,0	1218,2	1214,7	1213,5	1212,8	1212,4	1212,6	1213,1

Verluste des Lüfter

Last	OH/AH	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%	
0,2	0	13,08	10,44	29,43	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	13,75	16,06
0,3	0	13,08	10,44	29,43	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	13,75	16,06
0,4	0	13,08	10,44	29,43	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	13,75	16,06
0,5	0	13,08	10,44	29,43	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	13,75	16,06
0,6	0	13,08	10,44	29,43	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	13,75	16,06
0,7	0	13,08	10,44	29,43	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	13,75	16,06
0,8	0	13,08	10,44	29,43	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	13,75	16,06
0,9	0	13,08	10,44	29,43	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	13,75	16,06
1	0	13,08	10,44	29,43	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	13,75	16,06
1,1	0	13,08	10,44	29,43	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	13,75	16,06
1,2	0	13,08	10,44	29,43	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	13,75	16,06
1,3	0	13,08	10,44	29,43	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	13,75	16,06

		Gesamteschall																				
Last	OHAH	OHA1	OHA2	OHA30%	OHA35%	OHA40%	OHA45%	OHA50%	OHA55%	OHA60%	OHA65%	OHA70%	OHA75%	OHA80%	OHA85%	OHA90%	OHA95%	OHA100%				
0.2	90	103.23	93.37	106.64	95.61	90.08	90.13	90.2	90.3	90.31	90.44	90.58	90.78	91.02	91.3	91.63	92	92.41	92.86	93.34	93.85	
0.3	90.02	103.23	93.38	106.64	95.61	90.1	90.15	90.22	90.31	90.44	90.59	90.79	91.03	91.34	91.64	92.01	92.42	92.86	93.35	93.86		
0.4	90.06	103.23	93.39	106.64	95.62	90.13	90.18	90.25	90.35	90.47	90.63	90.82	91.06	91.34	91.66	92.03	92.44	92.88	93.36	93.87		
0.5	90.13	103.24	93.43	106.64	95.65	90.21	90.26	90.33	90.42	90.54	90.7	90.89	91.12	91.4	91.72	92.08	92.48	92.93	93.4	93.91		
0.6	90.27	103.25	93.5	106.64	95.69	90.35	90.4	90.46	90.55	90.67	90.82	91.01	91.23	91.5	91.82	92.17	92.57	93	93.47	93.97		
0.7	90.49	103.26	93.6	106.65	95.75	90.56	90.61	90.67	90.76	90.87	91.04	91.19	91.41	91.67	91.97	92.32	92.7	93.12	93.57	94.06		
0.8	90.81	103.27	93.76	106.66	95.85	90.88	90.92	90.98	91.06	91.16	91.3	91.47	91.67	91.91	92.2	92.53	92.89	93.29	93.73	94.2		
0.9	91.23	103.3	93.88	106.67	95.98	91.29	91.33	91.39	91.46	91.56	91.68	91.83	92.02	92.25	92.51	92.82	93.16	93.54	93.95	94.4		
1	91.76	103.33	94.27	106.68	96.17	91.82	91.85	91.9	91.96	92.05	92.16	92.3	92.47	92.67	92.91	93.19	93.51	93.86	94.25	94.67		
1.1	92.39	103.38	94.63	106.71	96.41	92.44	92.47	92.51	92.56	92.64	92.73	92.86	93.01	93.19	93.4	93.65	93.93	94.25	94.61	95		
1.2	93.09	103.44	95.07	106.73	96.7	93.13	93.16	93.19	93.24	93.31	93.39	93.49	93.62	93.78	93.97	94.19	94.44	94.73	95.05	95.4		
1.3	93.86	103.52	95.57	106.77	97.05	93.89	93.91	93.94	93.98	94.04	94.11	94.2	94.31	94.44	94.6	94.79	95.01	95.27	95.55	95.86		

		Schall der Lüfter																				
Last	OHAH	OHA1	OHA2	OHA30%	OHA35%	OHA40%	OHA45%	OHA50%	OHA55%	OHA60%	OHA65%	OHA70%	OHA75%	OHA80%	OHA85%	OHA90%	OHA95%	OHA100%				
0.2	0	103.02	90.69	106.54	94.21	72.66	74.81	76.73	78.47	80.07	81.54	82.92	84.21	85.42	86.57	87.66	88.69	89.68	90.63	91.54		
0.3	0	103.02	90.69	106.54	94.21	72.66	74.81	76.73	78.47	80.07	81.54	82.92	84.21	85.42	86.57	87.66	88.69	89.68	90.63	91.54		
0.4	0	103.02	90.69	106.54	94.21	72.66	74.81	76.73	78.47	80.07	81.54	82.92	84.21	85.42	86.57	87.66	88.69	89.68	90.63	91.54		
0.5	0	103.02	90.69	106.54	94.21	72.66	74.81	76.73	78.47	80.07	81.54	82.92	84.21	85.42	86.57	87.66	88.69	89.68	90.63	91.54		
0.6	0	103.02	90.69	106.54	94.21	72.66	74.81	76.73	78.47	80.07	81.54	82.92	84.21	85.42	86.57	87.66	88.69	89.68	90.63	91.54		
0.7	0	103.02	90.69	106.54	94.21	72.66	74.81	76.73	78.47	80.07	81.54	82.92	84.21	85.42	86.57	87.66	88.69	89.68	90.63	91.54		
0.8	0	103.02	90.69	106.54	94.21	72.66	74.81	76.73	78.47	80.07	81.54	82.92	84.21	85.42	86.57	87.66	88.69	89.68	90.63	91.54		
0.9	0	103.02	90.69	106.54	94.21	72.66	74.81	76.73	78.47	80.07	81.54	82.92	84.21	85.42	86.57	87.66	88.69	89.68	90.63	91.54		
1	0	103.02	90.69	106.54	94.21	72.66	74.81	76.73	78.47	80.07	81.54	82.92	84.21	85.42	86.57	87.66	88.69	89.68	90.63	91.54		
1.1	0	103.02	90.69	106.54	94.21	72.66	74.81	76.73	78.47	80.07	81.54	82.92	84.21	85.42	86.57	87.66	88.69	89.68	90.63	91.54		
1.2	0	103.02	90.69	106.54	94.21	72.66	74.81	76.73	78.47	80.07	81.54	82.92	84.21	85.42	86.57	87.66	88.69	89.68	90.63	91.54		
1.3	0	103.02	90.69	106.54	94.21	72.66	74.81	76.73	78.47	80.07	81.54	82.92	84.21	85.42	86.57	87.66	88.69	89.68	90.63	91.54		

Tabelle 5.3: Transformatorzustände bei einer Umgebungstemperatur von -5°C

Umgebungstemperatur= 0°C															
Drehzahl	470	487	501	514	526	538	548	558	567	575	584	592	599	606	613
VOLUMENSTROM	2,52	2,94	3,36	3,78	4,2	4,62	5,04	5,46	5,88	6,3	6,72	7,14	7,56	7,98	8,4

Last	SW-Wicklung: Hot Spot Temperatur																
	OHA1	OHA2	OHA30%	OHA35%	OHA40%	OHA45%	OHA50%	OHA55%	OHA60%	OHA65%	OHA70%	OHA75%	OHA80%	OHA85%	OHA90%	OHA95%	OHA100%
0,2	13,93	10,51	10,52	10,28	10,47	10,43	10,39	10,37	10,35	10,34	10,33	10,32	10,31	10,3	10,29	10,29	10,28
0,3	23,49	18,96	18,98	18,54	18,55	16,37	16,27	16,2	16,15	16,1	16,06	16,03	16	15,97	15,95	15,93	15,9
0,4	32,7	22,75	22,84	21,07	21,1	28,62	23,11	22,59	22,47	21,96	21,78	21,64	21,43	21,36	21,23	21,18	21,13
0,5	42,29	29,77	29,88	27,7	27,73	33,5	30,29	29,64	29,42	28,68	28,3	27,97	27,43	27,01	26,86	26,73	26,53
0,6	53,01	37,37	37,52	32,8	32,87	39,78	38,14	37,31	36,63	36,07	35,58	34,79	34,47	33,91	33,67	33,44	32,84
0,7	64,8	45,38	45,55	40,05	40,13	47,75	46,44	45,4	44,56	43,84	43,24	42,72	42,26	41,85	41,48	41,09	40,1
0,8	77,77	53,94	54,15	47,49	47,59	57,04	55,39	54,1	53,04	52,16	51,42	50,77	50,2	49,7	49,25	48,85	47,84
0,9	91,99	63,69	63,3	55,34	55,46	66,99	64,97	63,38	62,1	61,02	60,1	59,32	58,62	58,01	57,46	56,98	55,76
1	107,53	72,69	72,99	63,55	63,68	77,67	75,2	73,26	71,7	70,39	69,28	68,33	67,5	66,76	66,1	65,51	64,04
1,1	124,44	82,91	83,26	72,16	72,31	89,12	86,13	83,79	81,9	80,33	79	77,86	76,86	75,98	75,19	74,48	73,26
1,2	142,78	93,73	94,14	81,18	81,35	101,38	97,8	95,01	92,74	90,87	89,29	87,93	86,74	85,7	84,78	83,93	81,28
1,3	162,63	105,18	105,65	90,64	90,82	114,5	110,25	106,93	104,26	102,04	100,17	98,56	97,16	95,93	94,84	93,85	91,42

Last	PW-Wicklung: Hot Spot Temperatur																
	OHA1	OHA2	OHA30%	OHA35%	OHA40%	OHA45%	OHA50%	OHA55%	OHA60%	OHA65%	OHA70%	OHA75%	OHA80%	OHA85%	OHA90%	OHA95%	OHA100%
0,2	14,5	11,04	11,05	10,79	10,8	10,99	10,95	10,92	10,9	10,88	10,86	10,84	10,82	10,81	10,8	10,8	10,79
0,3	24,29	19,7	19,72	19,26	19,27	24,74	17,28	17,14	17,04	16,96	16,9	16,85	16,81	16,77	16,74	16,72	16,7
0,4	33,66	23,75	23,84	21,99	22,02	29,55	24,11	23,59	23,47	22,94	22,75	22,6	22,48	22,38	22,3	22,23	22,06
0,5	43,54	31,05	31,16	28,9	28,93	34,68	31,58	30,92	30,38	29,92	29,53	29,18	28,89	28,62	28,38	28,19	28,06
0,6	54,52	38,91	39,05	34,3	34,37	41,27	39,67	38,85	38,17	37,61	37,42	36,7	36,33	36,01	35,71	35,45	34,78
0,7	66,57	47,19	47,36	41,86	41,95	49,56	48,25	47,21	46,36	45,65	45,05	44,53	44,07	43,66	43,29	42,97	42,45
0,8	79,83	56,05	56,26	49,6	49,7	59,14	57,5	56,21	55,45	54,27	53,53	52,88	52,31	51,81	51,36	50,96	49,66
0,9	94,37	65,46	65,71	57,78	57,89	69,4	67,38	65,8	64,51	63,43	62,53	61,73	61,05	60,44	59,91	59,41	57,85
1	110,23	75,43	75,73	66,32	66,45	80,41	77,94	76,01	74,44	73,14	72,03	71,07	70,24	69,5	68,84	68,25	66,4
1,1	127,47	86	86,35	75,29	75,44	92,2	89,22	86,88	84,99	83,42	82,09	80,95	79,94	79,06	78,27	77,57	75,37
1,2	146,15	97,17	97,58	84,68	84,84	104,82	101,24	98,49	96,19	94,31	92,78	91,42	90,23	89,19	88,26	87,42	85,98
1,3	166,34	109,03	109,5	94,51	94,69	118,33	114,08	110,77	108,1	105,89	104,03	102,42	101,02	99,79	98,7	97,72	96,83

Last	SW-Wicklung: Top Oil Temperatur																
	OHA1	OHA2	OHA30%	OHA35%	OHA40%	OHA45%	OHA50%	OHA55%	OHA60%	OHA65%	OHA70%	OHA75%	OHA80%	OHA85%	OHA90%	OHA95%	OHA100%
0,2	10,27	6,66	6,68	6,43	6,43	6,66	6,62	6,58	6,55	6,53	6,51	6,49	6,48	6,47	6,47	6,45	6,44
0,3	17,75	12,92	12,94	12,48	12,49	18,39	10,21	10,08	9,98	9,9	9,84	9,79	9,75	9,72	9,69	9,66	9,62
0,4	24,86	13,97	14,07	12,14	12,17	20,52	14,38	13,79	13,32	13,09	12,9	12,75	12,63	12,53	12,45	12,38	12,21
0,5	32,33	18,62	18,75	16,35	16,38	22,85	19,22	18,48	17,89	17,38	16,95	16,57	16,24	15,94	15,67	15,45	15,05
0,6	40,94	23,86	24,02	18,62	18,71	26,59	24,72	23,79	23,02	22,37	21,82	21,34	20,91	20,54	20,2	19,89	19,11
0,7	50,6	29,5	29,69	23,39	23,49	32,16	30,69	29,53	28,57	27,76	27,07	26,48	25,95	25,48	25,06	24,68	23,73
0,8	61,42	35,69	35,93	28,35	28,47	39,14	37,31	35,87	34,69	33,7	32,85	32,42	31,47	30,9	30,38	29,92	29,11
0,9	73,44	42,42	42,7	33,72	33,85	46,77	44,56	42,8	41,37	40,17	39,13	38,26	37,46	36,77	36,15	35,09	34,62
1	86,73	49,66	49,99	39,43	39,58	55,11	52,42	50,3	48,57	47,13	45,9	44,83	43,9	43,07	42,33	41,66	40,5
1,1	101,33	57,45	57,84	45,52	45,69	64,18	60,96	58,42	56,35	54,63	53,17	51,9	50,79	49,81	48,93	48,14	46,77
1,2	117,27	65,8	66,24	52	52,19	74,02	70,18	67,18	64,73	62,69	60,98	59,48	58,19	57,02	56	55,07	54,23
1,3	134,64	74,73	75,24	58,88	59,08	84,66	80,14	76,6	73,73	71,35	69,32	67,58	66,05	64,71	63,51	62,43	61,45

		PW-Wicklung: Top Oil Temperatur																	
Last	OH/AN	OH/AF1	OH/AF2	OH/AF30%	OH/AF35%	OH/AF40%	OH/AF45%	OH/AF50%	OH/AF55%	OH/AF60%	OH/AF65%	OH/AF70%	OH/AF75%	OH/AF80%	OH/AF85%	OH/AF90%	OH/AF95%	OH/AF100%	
0,2	10,82	7,17	7,48	6,91	6,92	7,07	7,04	7,02	7	6,98	6,97	6,96	6,95	6,94	6,93	6,92	6,92	6,92	6,91
0,3	18,52	13,63	13,65	13,16	13,18	10,87	10,82	10,63	10,57	10,52	10,47	10,44	10,41	10,38	10,35	10,33	10,31	10,31	10,3
0,4	25,78	14,94	15,04	13,03	13,06	21,41	14,76	14,29	14,04	13,69	13,56	13,45	13,36	13,28	13,21	13,16	13,11	13,11	13,06
0,5	33,54	19,87	20	17,53	17,56	24	20,47	19,73	19,42	18,15	17,16	17,11	16,84	16,62	16,48	16,36	16,26	16,17	16,18
0,6	42,4	25,37	25,53	20,12	20,21	28,06	26,23	25,3	24,64	23,34	22,86	22,44	22,06	21,73	21,42	21,14	20,88	20,64	20,18
0,7	52,33	31,29	31,48	25,2	25,3	33,94	32,48	31,32	30,36	29,56	28,87	28,28	27,75	27,29	26,87	26,49	25,83	25,54	25,27
0,8	63,44	37,79	38,03	30,59	31,22	39,41	37,97	36,79	35,8	34,96	34,23	33,91	33,5	33,04	32,64	32,04	31,23	30,87	30,54
0,9	75,78	44,83	45,11	36,17	36,31	45,21	43,78	42,58	41,47	40,67	39,91	39,22	38,6	38,05	37,54	37,08	36,65	36,26	35,8
1	89,41	52,41	52,74	42,24	42,38	51,85	50,35	49,88	48,65	47,59	46,66	45,83	45,1	44,43	43,82	43,3	42,8	42,33	41,8
1,1	104,34	60,56	60,94	48,7	48,87	61,52	59,46	57,75	56,28	55,02	53,91	52,93	52,06	51,27	50,6	49,9	49,35	48,8	48,3
1,2	120,65	69,27	69,72	55,56	55,74	71,47	73,65	70,69	68,21	66,18	64,5	63,01	61,71	60,56	59,54	57,77	57,01	56,31	55,66
1,3	138,37	78,62	79,13	62,82	63,03	80,49	77,63	75,25	73,23	71,5	69,98	68,63	67,44	66,36	65,39	64,5	63,68	62,93	62,33

		Gesamtverluste																
Last	OH/AN	OH/AF1	OH/AF2	OH/AF30%	OH/AF35%	OH/AF40%	OH/AF45%	OH/AF50%	OH/AF55%	OH/AF60%	OH/AF65%	OH/AF70%	OH/AF75%	OH/AF80%	OH/AF85%	OH/AF90%	OH/AF95%	OH/AF100%
0,2	103,0	115,9	113,2	132,2	126,3	103,4	103,8	104,2	104,7	105,4	106,3	107,2	108,3	111,0	112,7	114,4	116,5	118,8
0,3	132,8	145,3	142,7	161,6	155,7	133,4	132,8	133,8	134,4	135,3	136,2	137,3	138,6	140,0	141,7	143,4	145,5	147,8
0,4	176,0	186,3	183,7	202,3	196,4	174,0	174,2	175,0	175,6	176,5	177,4	178,4	179,8	181,2	182,8	184,6	186,7	189,0
0,5	233,6	241,2	238,6	256,9	251,0	230,5	229,1	229,3	229,6	230,1	230,8	231,5	232,5	233,7	235,1	236,7	238,4	240,5
0,6	306,8	310,1	307,6	323,5	317,7	298,2	296,0	296,2	296,5	299,1	299,8	300,6	301,7	303,0	304,5	306,1	308,0	310,2
0,7	397,0	393,9	391,4	405,5	399,6	383,4	382,5	381,9	381,6	382,0	382,5	383,2	384,2	385,3	386,7	388,2	390,0	392,1
0,8	505,8	493,6	491,2	502,4	496,6	481,7	480,9	480,5	480,3	480,4	480,6	481,1	481,9	482,9	484,1	485,4	487,2	489,1
0,9	635,0	610,1	607,8	615,3	609,6	603,0	600,5	598,6	597,2	596,2	595,5	595,2	595,4	596,6	597,6	598,7	600,3	602,1
1,0	786,5	744,7	742,6	745,1	739,4	740,5	736,6	733,4	729,7	726,5	727,1	727,1	726,9	727,4	728,1	729,0	730,3	731,8
1,1	962,3	898,5	896,6	892,6	887,0	888,2	884,9	882,3	880,2	878,8	877,6	876,8	876,5	876,4	876,7	877,2	878,2	879,4
1,2	1164,6	1072,9	1071,3	1059,1	1053,5	1077,7	1069,8	1063,8	1059,0	1052,1	1049,7	1047,7	1046,3	1044,7	1044,6	1044,6	1045,1	1045,9
1,3	1395,6	1269,2	1267,8	1245,5	1240,1	1280,6	1269,9	1261,6	1249,6	1245,2	1241,8	1238,8	1236,5	1234,8	1233,4	1232,1	1232,0	1232,4

		Verluste der Lüfter																	
Last	OH/AN	OH/AF1	OH/AF2	OH/AF30%	OH/AF35%	OH/AF40%	OH/AF45%	OH/AF50%	OH/AF55%	OH/AF60%	OH/AF65%	OH/AF70%	OH/AF75%	OH/AF80%	OH/AF85%	OH/AF90%	OH/AF95%	OH/AF100%	
0,2	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	16,06
0,3	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	16,06
0,4	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	16,06
0,5	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	16,06
0,6	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	16,06
0,7	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	16,06
0,8	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	16,06
0,9	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	16,06
1	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	16,06
1,1	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	16,06
1,2	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	16,06
1,3	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	16,06

		Gesamttschall																			
Last	OIAH	OIAF1	OIAF2	OIAF30%	OIAF35%	OIAF40%	OIAF45%	OIAF50%	OIAF55%	OIAF60%	OIAF65%	OIAF70%	OIAF75%	OIAF80%	OIAF85%	OIAF90%	OIAF95%	OIAF100%			
0,2	90	103,23	93,37	106,64	90,48	90,13	90,2	90,3	90,31	90,42	90,58	90,78	91,02	91,3	91,63	92,41	92,86	93,34	93,85		
0,3	90,02	103,23	93,38	106,64	95,61	90,1	90,22	90,31	90,44	90,59	90,79	91,03	91,31	91,64	92,01	92,42	92,86	93,35	93,86		
0,4	90,06	103,23	93,39	106,64	95,62	90,13	90,18	90,25	90,47	90,63	90,82	91,06	91,34	91,66	92,03	92,44	92,88	93,36	93,87		
0,5	90,13	103,24	93,43	106,64	95,65	90,21	90,26	90,33	90,42	90,54	90,7	90,89	91,12	91,4	91,72	92,08	92,53	93,4	93,91		
0,6	90,27	103,25	93,5	106,64	95,65	90,35	90,4	90,46	90,55	90,67	91,01	91,23	91,5	91,82	92,17	92,57	93	93,47	93,97		
0,7	90,49	103,26	93,6	106,65	95,75	90,56	90,61	90,67	90,87	91,01	91,19	91,41	91,67	91,97	92,32	92,7	93,12	93,57	94,06		
0,8	90,81	103,27	93,76	106,66	95,85	90,88	90,92	90,98	91,06	91,16	91,3	91,47	91,67	91,91	92,2	92,53	92,89	93,29	93,73		
0,9	91,23	103,3	93,98	106,67	95,98	91,29	91,33	91,39	91,46	91,56	91,68	91,83	92,02	92,25	92,51	92,82	93,16	93,54	93,95		
1	91,76	103,33	94,27	106,68	96,17	91,82	91,85	91,9	91,96	92,05	92,16	92,3	92,47	92,67	92,91	93,19	93,51	93,86	94,25		
1,1	92,39	103,38	94,63	106,71	96,41	92,44	92,47	92,51	92,56	92,64	92,73	92,86	93,01	93,19	93,4	93,65	93,93	94,25	94,61		
1,2	93,09	103,44	95,07	106,73	96,7	93,13	93,16	93,19	93,24	93,31	93,39	93,49	93,62	93,78	93,97	94,19	94,44	94,73	95,4		
1,3	93,86	103,52	95,57	106,77	97,05	93,89	93,91	93,94	93,98	94,04	94,11	94,2	94,31	94,44	94,6	94,79	95,01	95,27	95,86		

		Schall der Lüfter																			
Last	OIAH	OIAF1	OIAF2	OIAF30%	OIAF35%	OIAF40%	OIAF45%	OIAF50%	OIAF55%	OIAF60%	OIAF65%	OIAF70%	OIAF75%	OIAF80%	OIAF85%	OIAF90%	OIAF95%	OIAF100%			
0,2	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	90,63	91,54		
0,3	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	90,63	91,54		
0,4	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	90,63	91,54		
0,5	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	90,63	91,54		
0,6	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	90,63	91,54		
0,7	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	90,63	91,54		
0,8	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	90,63	91,54		
0,9	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	90,63	91,54		
1	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	90,63	91,54		
1,2	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	90,63	91,54		
1,3	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	90,63	91,54		

Tabelle 5.4: Transformatorzustände bei einer Umgebungstemperatur von 0°C

Umgebungstemperatur= 5°C

Drehzahl		470	487	501	514	526	538	548	558	567	575	584	592	599	606	613
VOLUMEHSTROM		2,52	2,94	3,36	3,78	4,2	4,62	5,04	5,46	5,88	6,3	6,72	7,14	7,56	7,98	8,4
Last	OHAF1	OHAF2	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0,2	12,52	11,91	11,91	11,88	11,85	11,83	11,82	11,81	11,8	11,78	11,77	11,76	11,75	11,74	11,73	11,73
0,3	23,75	21,85	21,86	21,84	21,82	21,81	21,8	21,79	21,78	21,77	21,76	21,75	21,74	21,73	21,72	21,72
0,4	32,85	24,92	24,96	24	24,01	24,02	24,02	24,01	24,01	24,01	24,01	24,01	24,01	24,01	24,01	24,01
0,5	42,31	31,99	32,04	30,84	30,86	30,86	30,86	30,86	30,86	30,86	30,86	30,86	30,86	30,86	30,86	30,86
0,6	52,97	38,09	38,21	34,92	34,98	34,98	34,98	34,98	34,98	34,98	34,98	34,98	34,98	34,98	34,98	34,98
0,7	64,61	46,3	46,46	42,37	42,41	42,41	42,41	42,41	42,41	42,41	42,41	42,41	42,41	42,41	42,41	42,41
0,8	77,42	54,77	54,96	49,23	49,31	49,31	49,31	49,31	49,31	49,31	49,31	49,31	49,31	49,31	49,31	49,31
0,9	91,38	63,78	64,01	57,01	57,11	57,11	57,11	57,11	57,11	57,11	57,11	57,11	57,11	57,11	57,11	57,11
1	106,16	73,32	73,59	65,18	65,3	65,3	65,3	65,3	65,3	65,3	65,3	65,3	65,3	65,3	65,3	65,3
1,1	123,12	83,36	83,68	73,74	73,87	73,87	73,87	73,87	73,87	73,87	73,87	73,87	73,87	73,87	73,87	73,87
1,2	141,02	93,96	94,34	82,65	82,8	82,8	82,8	82,8	82,8	82,8	82,8	82,8	82,8	82,8	82,8	82,8
1,3	160,36	105,15	105,58	91,96	92,12	92,12	92,12	92,12	92,12	92,12	92,12	92,12	92,12	92,12	92,12	92,12

PW-Wicklung: Hot Spot Temperatur		OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
Last	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0,2	15,62	12,55	12,56	12,36	12,38	12,47	12,44	12,44	12,42	12,41	12,41	12,4	12,39	12,4	12,38	12,37	12,37
0,3	24,68	22,68	22,7	22,36	22,38	22,56	22,56	22,56	22,56	22,56	22,56	22,56	22,56	22,56	22,56	22,56	22,56
0,4	33,94	26	26,04	25,02	25,04	25,04	25,04	25,04	25,04	25,04	25,04	25,04	25,04	25,04	25,04	25,04	25,04
0,5	43,63	33,2	33,25	31,98	32	32,66	32,66	32,66	32,66	32,66	32,66	32,66	32,66	32,66	32,66	32,66	32,66
0,6	54,61	39,7	39,83	36,43	36,48	36,48	36,48	36,48	36,48	36,48	36,48	36,48	36,48	36,48	36,48	36,48	36,48
0,7	66,53	48,29	48,45	44,26	44,32	44,32	44,32	44,32	44,32	44,32	44,32	44,32	44,32	44,32	44,32	44,32	44,32
0,8	79,63	57,07	57,26	51,53	51,62	51,62	51,62	51,62	51,62	51,62	51,62	51,62	51,62	51,62	51,62	51,62	51,62
0,9	93,91	66,3	66,41	66,64	66,64	66,64	66,64	66,64	66,64	66,64	66,64	66,64	66,64	66,64	66,64	66,64	66,64
1	109,45	76,3	76,57	68,17	68,29	68,29	68,29	68,29	68,29	68,29	68,29	68,29	68,29	68,29	68,29	68,29	68,29
1,1	126,31	86,7	87,02	77,1	77,23	77,23	77,23	77,23	77,23	77,23	77,23	77,23	77,23	77,23	77,23	77,23	77,23
1,2	144,55	97,67	98,05	86,39	86,53	86,53	86,53	86,53	86,53	86,53	86,53	86,53	86,53	86,53	86,53	86,53	86,53
1,3	164,25	109,23	109,67	96,08	96,24	96,24	96,24	96,24	96,24	96,24	96,24	96,24	96,24	96,24	96,24	96,24	96,24

SW-Wicklung: Top OH Temperatur		OHAF1	OHAF2	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
Last	OHAF1	OHAF2	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%	
0,2	9,03	8,39	8,39	8,2	8,22	8,3	8,28	8,28	8,26	8,25	8,25	8,24	8,24	8,22	8,21	8,21	
0,3	18,24	16,27	16,28	15,94	15,96	16,15	16,15	16,15	16,15	16,15	16,15	16,15	16,15	16,15	16,15	16,15	
0,4	25,23	16,66	16,71	15,7	15,71	16,45	16,45	16,45	16,45	16,45	16,45	16,45	16,45	16,45	16,45	16,45	
0,5	32,58	21,43	21,48	20,22	20,23	20,89	20,89	20,89	20,89	20,89	20,89	20,89	20,89	20,89	20,89	20,89	
0,6	41,11	24,97	25,1	21,45	21,51	22,69	22,69	22,69	22,69	22,69	22,69	22,69	22,69	22,69	22,69	22,69	
0,7	50,6	30,8	30,98	26,45	26,5	28,71	28,71	28,71	28,71	28,71	28,71	28,71	28,71	28,71	28,71	28,71	
0,8	61,24	36,89	37,1	30,58	30,67	33,33	33,33	33,33	33,33	33,33	33,33	33,33	33,33	33,33	33,33	33,33	
0,9	72,98	43,49	43,75	35,86	35,96	40,52	40,52	40,52	40,52	40,52	40,52	40,52	40,52	40,52	40,52	40,52	
1	85,32	50,6	50,9	41,5	41,63	47,51	47,51	47,51	47,51	47,51	47,51	47,51	47,51	47,51	47,51	47,51	
1,1	100,1	58,17	58,52	47,51	47,66	53,11	53,11	53,11	53,11	53,11	53,11	53,11	53,11	53,11	53,11	53,11	
1,2	115,58	66,26	66,67	53,84	54	61,38	61,38	61,38	61,38	61,38	61,38	61,38	61,38	61,38	61,38	61,38	
1,3	132,42	74,89	75,35	60,53	60,71	69,88	69,88	69,88	69,88	69,88	69,88	69,88	69,88	69,88	69,88	69,88	

PW-Wicklung: Top Oil Temperatur

Last	OIAH	OIAF1	OIAF2	OIAF30%	OIAF35%	OIAF40%	OIAF45%	OIAF50%	OIAF55%	OIAF60%	OIAF65%	OIAF70%	OIAF75%	OIAF80%	OIAF85%	OIAF90%	OIAF95%	OIAF100%
0,2	12,11	9,01	8,81	8,83	8,95	8,93	8,92	8,89	8,89	8,87	8,86	8,86	8,85	8,84	8,85	8,83	8,82	8,82
0,3	19,13	17,07	17,08	16,73	13,99	13,91	13,99	13,82	13,78	13,76	13,76	13,71	13,69	13,68	13,66	13,65	13,63	13,62
0,4	26,28	17,71	17,16	16,69	16,71	17,49	17,32	17,2	17,11	17,03	16,97	16,91	16,86	16,83	16,79	16,76	16,73	16,71
0,5	33,66	22,6	22,66	21,33	26,29	21,33	20,89	20,59	20,35	20,16	20,01	19,88	19,76	19,69	19,61	19,54	19,46	19,42
0,6	42,72	26,55	26,7	22,95	31,96	27,32	26,49	25,83	25,26	24,78	24,39	23,81	23,61	23,45	23,3	23,18	23,07	22,98
0,7	52,48	32,77	32,95	28,33	36,77	33,83	32,81	31,28	30,7	29,71	29,27	28,88	28,53	28,22	27,93	27,7	27,49	27,3
0,8	63,41	39,17	39,38	32,89	42,75	40,61	39,33	38,3	37,43	36,7	36,06	35,54	35,02	34,59	34,19	33,84	33,52	33,25
0,9	75,47	46,12	46,37	38,51	50,66	48,05	46,46	45,18	44,1	43,19	42,41	41,72	41,06	40,1	39,67	39,27	38,91	38,58
1	88,75	53,59	53,88	44,52	58,53	56,08	54,17	52,61	51,32	50,22	49,45	48,71	47,96	46,47	45,94	45,45	45,01	44,6
1,1	103,29	61,53	61,88	50,92	67,67	64,73	62,42	60,55	59,22	57,68	56,55	55,56	54,69	53,21	52,58	52,01	51,49	51
1,2	119,12	70,01	70,42	57,64	77,54	74,02	71,27	69,05	67,2	65,64	64,29	63,12	62,09	61,17	60,34	59,6	58,92	58,3
1,3	136,34	79,03	79,49	64,73	84,91	80,75	78,12	75,95	74,11	72,52	71,15	69,93	68,86	67,89	67,01	66,22	65,49	64,82

Gesamtverluste

Last	OIAH	OIAF1	OIAF2	OIAF30%	OIAF35%	OIAF40%	OIAF45%	OIAF50%	OIAF55%	OIAF60%	OIAF65%	OIAF70%	OIAF75%	OIAF80%	OIAF85%	OIAF90%	OIAF95%	OIAF100%
0,2	103,2	116,2	113,6	132,6	126,6	103,8	104,1	104,6	105,1	105,8	107,6	108,7	110,0	111,4	113,1	114,8	116,9	119,2
0,3	133,4	146,3	143,6	162,6	156,6	134,6	133,6	134,1	134,6	135,3	136,2	137,0	139,5	140,9	142,5	144,3	146,4	148,7
0,4	177,0	187,7	185,1	203,9	198,0	175,6	176,0	176,5	177,2	178,1	178,9	180,0	181,3	182,8	184,4	186,2	188,2	190,6
0,5	235,1	243,5	240,9	259,6	253,7	230,6	230,9	231,4	232,0	232,8	233,7	234,8	236,1	237,5	239,4	240,8	242,9	245,2
0,6	308,9	312,3	309,7	326,7	320,8	300,3	300,1	300,3	300,7	301,3	302,0	303,0	304,3	305,7	307,3	309,0	311,1	313,3
0,7	399,7	396,9	394,4	410,1	404,1	388,3	385,4	384,4	384,6	385,0	385,5	386,2	387,2	388,3	389,7	391,4	393,4	395,6
0,8	509,2	497,3	494,9	506,4	500,6	489,0	486,5	484,7	484,1	484,3	484,5	485,0	485,8	486,8	489,4	491,1	493,1	
1,0	791,0	750,2	748,0	751,1	745,4	745,6	741,9	739,1	735,3	734,1	732,9	732,7	732,9	733,3	734,0	735,0	736,3	737,8
1,1	967,2	904,8	902,8	899,7	894,1	903,9	898,5	894,4	888,7	885,4	884,3	883,6	883,3	883,3	883,7	884,2	885,2	886,5
1,2	1163,6	1079,9	1078,2	1067,2	1061,7	1083,9	1076,4	1070,6	1066,0	1062,4	1059,4	1057,2	1055,3	1052,6	1052,6	1052,6	1053,1	1054,1
1,3	1400,5	1276,7	1275,3	1254,7	1249,2	1287,1	1276,9	1270,1	1265,3	1259,0	1257,5	1255,3	1253,3	1250,0	1247,2	1244,1	1241,1	1241,6

Verluste der Leiter

Last	OIAH	OIAF1	OIAF2	OIAF30%	OIAF35%	OIAF40%	OIAF45%	OIAF50%	OIAF55%	OIAF60%	OIAF65%	OIAF70%	OIAF75%	OIAF80%	OIAF85%	OIAF90%	OIAF95%	OIAF100%
0,2	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	16,06
0,3	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	16,06
0,4	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	16,06
0,5	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	16,06
0,6	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	16,06
0,7	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	16,06
0,8	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	16,06
0,9	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	16,06
1	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	16,06
1,1	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	16,06
1,2	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	16,06
1,3	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	16,06

Last	OHAF	Gesamtschall																		
		OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%		
0,2	90	103,23	93,37	106,64	95,61	90,08	90,13	90,2	90,3	90,42	90,58	90,78	91,02	91,3	91,63	92	92,41	92,86	93,34	93,85
0,3	90,02	103,23	93,38	106,64	95,61	90,1	90,15	90,22	90,31	90,44	90,59	90,79	91,03	91,34	91,66	92,01	92,42	92,86	93,35	93,86
0,4	90,06	103,23	93,39	106,64	95,62	90,13	90,18	90,25	90,35	90,47	90,63	90,82	91,06	91,34	91,66	92,03	92,44	92,88	93,36	93,87
0,5	90,13	103,24	93,43	106,64	95,65	90,21	90,26	90,33	90,42	90,54	90,7	90,89	91,12	91,4	91,72	92,08	92,48	92,93	93,4	93,91
0,6	90,27	103,25	93,5	106,64	95,69	90,35	90,4	90,46	90,55	90,67	90,82	91,01	91,23	91,5	91,82	92,17	92,57	93	93,47	93,97
0,7	90,49	103,26	93,6	106,65	95,75	90,56	90,61	90,67	90,76	90,87	91,01	91,19	91,41	91,67	91,97	92,32	92,7	93,12	93,57	94,06
0,8	90,81	103,27	93,76	106,66	95,85	90,88	90,92	90,98	91,06	91,16	91,27	91,47	91,67	91,91	92,2	92,53	92,89	93,29	93,73	94,2
0,9	91,23	103,3	93,98	106,67	95,98	91,29	91,33	91,39	91,46	91,56	91,68	91,83	92,02	92,25	92,51	92,82	93,16	93,54	93,95	94,4
1	91,76	103,33	94,27	106,68	96,17	91,82	91,85	91,9	91,96	92,05	92,16	92,3	92,47	92,67	92,91	93,19	93,51	93,86	94,25	94,67
1,1	92,39	103,38	94,63	106,71	96,41	92,44	92,47	92,51	92,56	92,64	92,73	92,86	93,01	93,19	93,4	93,65	93,93	94,25	94,61	95
1,2	93,09	103,44	95,07	106,73	96,7	93,13	93,16	93,19	93,24	93,31	93,39	93,49	93,62	93,78	93,97	94,19	94,44	94,73	95,05	95,4
1,3	93,86	103,52	95,57	106,77	97,05	93,89	93,91	93,94	93,98	94,04	94,11	94,2	94,31	94,44	94,6	94,79	95,01	95,27	95,55	95,86

Last	OHAF	Schall der Lüfter																		
		OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%		
0,2	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,3	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,4	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,5	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,6	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,7	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,8	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,9	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
1	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
1,1	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
1,2	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
1,3	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54

Tabelle 5.5: Transformatorzustände bei einer Umgebungstemperatur von 5°C

Umgebungstemperatur= 10 °C															
Drehzahl															
VOLUME STROM															
	470	487	501	514	526	538	548	558	567	575	584	592	606	613	
	2,52	2,94	3,36	3,78	4,2	4,62	5,04	5,46	5,88	6,3	6,72	7,14	7,56	7,98	8,4

Last	SW-Wicklung: Hot Spot Temperatur																		
	OIAH	OIAF1	OIAF2	OIAF30%	OIAF35%	OIAF40%	OIAF45%	OIAF50%	OIAF55%	OIAF60%	OIAF65%	OIAF70%	OIAF75%	OIAF80%	OIAF85%	OIAF90%	OIAF95%	OIAF100%	
0,2	13,3	11,48	11,28	11,28	11,47	11,43	11,41	11,38	11,37	11,35	11,34	11,33	11,33	11,32	11,32	11,31	11,29	11,29	11,3
0,3	23,26	20,53	20,55	20,18	20,19	20,31	17,56	17,47	17,4	17,36	17,32	17,28	17,23	17,19	17,17	17,16	17,14	17,14	17,14
0,4	32,65	23,42	23,47	22,33	30,84	23,52	23,25	23,06	22,91	22,79	22,7	22,63	22,56	22,42	22,39	22,35	22,33	22,33	22,33
0,5	42,22	30,61	30,67	29,17	29,19	35,48	30,55	29,93	29,43	29	28,75	28,48	28,3	28,15	28,02	27,92	27,82	27,74	27,61
0,6	53,03	37,39	37,53	33,51	33,56	41,49	36,13	36,68	36,14	35,67	35,27	34,92	34,6	34,32	34,11	33,93	33,79	33,66	33,54
0,7	64,84	45,68	45,85	40,95	41,01	48,72	46,71	46,9	44,22	43,65	43,15	42,72	42,34	41,99	41,68	41,41	41,15	40,92	40,71
0,8	77,84	54,29	54,49	48,17	48,27	57,33	55,7	54,45	53,44	52,6	51,88	51,26	50,72	49,82	49,45	48,9	48,79	48,5	48,24
0,9	92,03	63,46	63,71	56,09	56,2	67,28	65,33	63,8	62,55	61,52	60,64	59,88	59,22	58,63	58,11	57,65	57,22	56,84	56,48
1	107,5	73,12	73,41	64,42	64,55	77,94	75,56	73,69	72,19	70,93	69,87	68,96	68,17	67,46	66,84	66,27	65,71	65,31	64,89
1,1	124,49	83,34	83,67	73,08	73,22	89,34	86,46	84,21	82,39	80,88	79,6	78,51	77,55	76,71	75,96	75,29	74,68	74,13	73,62
1,2	142,49	94,12	94,51	82,13	82,29	104,52	98,06	95,37	93,19	91,39	89,87	88,57	87,43	86,43	85,54	84,74	84,02	83,37	82,72
1,3	162,14	105,5	105,96	91,6	91,77	110,41	107,21	104,63	102,5	100,71	99,16	97,82	96,64	95,59	94,65	93,81	93,04	92,34	91,69

Last	PW-Wicklung: Hot Spot Temperatur																		
	OIAH	OIAF1	OIAF2	OIAF30%	OIAF35%	OIAF40%	OIAF45%	OIAF50%	OIAF55%	OIAF60%	OIAF65%	OIAF70%	OIAF75%	OIAF80%	OIAF85%	OIAF90%	OIAF95%	OIAF100%	
0,2	13,97	12,08	12,09	11,87	11,87	12,06	12,02	12	11,98	11,96	11,94	11,93	11,92	11,91	11,91	11,89	11,88	11,87	11,86
0,3	23,16	21,34	21,36	20,98	20,98	21,07	18,41	18,32	18,25	18,2	18,15	18,11	18,09	18,06	18,04	18,02	18	17,98	17,97
0,4	33,71	24,5	24,55	23,31	23,33	31,78	24,6	24,32	24,11	23,95	23,83	23,73	23,65	23,58	23,53	23,48	23,4	23,36	23,33
0,5	43,57	31,83	31,89	30,42	30,44	36,75	31,81	31,19	30,7	30,28	30	29,72	29,53	29,37	29,24	29,13	29,02	28,94	28,86
0,6	54,65	39,04	39,18	35,12	35,17	43,05	38,78	38,98	38,33	37,79	37,33	36,93	36,57	36,26	35,98	35,76	35,58	35,42	35,36
0,7	66,74	47,64	47,81	42,87	42,93	50,62	46,67	46,87	46,19	45,62	45,13	44,69	44,31	43,97	43,66	43,38	43,13	42,9	42,69
0,8	80,93	56,57	56,77	50,46	50,56	59,6	57,97	56,73	55,72	54,88	54,16	53,55	53,01	52,53	52,11	51,73	51,39	51,08	50,79
0,9	94,53	66,07	66,32	58,71	58,83	69,88	67,94	66,41	65,17	64,13	63,26	62,5	61,84	61,26	60,74	60,27	59,85	59,46	59,11
1	110,33	76,08	76,37	67,4	67,53	80,88	78,51	76,65	75,15	73,9	72,84	71,93	71,14	70,44	69,81	69,25	68,75	68,29	67,87
1,1	127,47	86,66	86,99	76,43	76,57	92,64	89,77	87,52	85,71	84,2	82,93	81,84	80,89	80,05	79,3	78,63	78,03	77,47	76,97
1,2	146	97,81	98,2	85,86	86,01	105,18	101,73	99,05	96,88	95,09	93,57	92,27	91,14	90,14	89,25	88,46	87,74	87,09	86,49
1,3	166	109,56	110,02	95,7	95,88	118,54	114,45	111,26	108,7	106,57	104,78	103,25	101,91	100,73	99,69	98,75	97,91	97,14	96,44

Last	SW-Wicklung: Top Oil Temperatur																		
	OIAH	OIAF1	OIAF2	OIAF30%	OIAF35%	OIAF40%	OIAF45%	OIAF50%	OIAF55%	OIAF60%	OIAF65%	OIAF70%	OIAF75%	OIAF80%	OIAF85%	OIAF90%	OIAF95%	OIAF100%	
0,2	10	8,13	8,14	7,93	7,93	8,12	8,08	8,05	8,03	8,01	8	7,98	7,98	7,97	7,97	7,96	7,95	7,94	7,93
0,3	17,98	15,14	15,16	14,78	14,79	21,19	14,99	14,9	14,83	14,79	14,74	14,7	14,68	14,66	14,59	14,54	14,48	14,44	14,37
0,4	25,31	15,48	15,53	14,33	14,34	23,45	15,59	15,31	15,1	14,95	14,83	14,73	14,66	14,59	14,54	14,48	14,44	14,37	14,34
0,5	32,77	20,37	20,43	18,86	18,89	25,68	20,28	19,6	19,05	18,58	18,31	18,03	17,84	17,68	17,55	17,44	17,34	17,26	17,18
0,6	41,46	24,72	24,87	20,47	20,52	29,22	25,53	24,66	23,95	23,35	22,83	22,38	21,99	21,64	21,33	21,09	20,91	20,76	20,62
0,7	51,11	30,64	30,82	25,45	25,51	33,99	31,77	30,67	29,79	29,04	28,4	27,85	27,37	26,94	26,56	26,21	25,9	25,61	25,35
0,8	61,92	36,86	37,08	30,08	30,18	40,18	38,4	37,04	35,93	35	34,21	33,53	32,93	32,4	31,93	31,5	31,12	30,77	30,45
0,9	73,87	43,61	43,88	35,48	35,61	47,75	45,64	43,98	42,63	41,49	40,53	39,69	38,96	38,32	37,74	37,22	36,75	36,32	35,92
1	87,05	50,83	51,14	41,28	41,42	56,91	53,46	51,45	49,82	48,45	47,3	46,3	45,42	44,65	43,96	43,34	42,78	42,27	41,86
1,1	101,49	58,56	58,92	47,37	47,53	64,98	61,91	59,5	57,54	55,91	54,52	53,33	52,29	51,37	50,55	49,81	49,14	48,53	47,97
1,2	117,24	66,82	67,24	53,82	54	74,68	71,01	68,15	65,82	63,89	62,25	60,84	59,61	58,53	57,56	56,69	55,9	55,18	54,53
1,3	134,37	75,62	76,1	60,65	60,84	85,14	80,81	77,43	74,69	72,42	70,5	68,84	67,4	66,13	64,99	63,98	63,06	62,22	61,45

PW-Wicklung: Top Oil Temperatur																		
Last	OHAI	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0.2	10.64	8.71	8.72	8.49	8.49	8.69	8.65	8.62	8.6	8.58	8.56	8.55	8.54	8.53	8.51	8.5	8.49	8.5
0.3	16.85	15.92	15.94	15.55	15.55	17.92	12.81	12.72	12.65	12.6	12.55	12.51	12.48	12.43	12.42	12.39	12.36	12.35
0.4	26.32	16.53	16.58	15.29	15.31	24.35	16.64	16.34	16.12	15.96	15.83	15.73	15.65	15.46	15.42	15.38	15.35	15.31
0.5	34.08	21.56	21.62	20.08	20.1	26.91	21.5	20.83	20.28	19.82	19.52	19.24	19.04	18.87	18.61	18.42	18.34	18.27
0.6	43.03	26.34	26.49	22.05	22.11	30.75	27.45	26.28	25.57	24.97	24.46	24.01	23.62	23.27	22.96	22.72	22.53	22.49
0.7	52.97	32.58	32.76	27.35	27.41	35.86	33.7	32.61	31.73	30.99	30.35	29.81	29.32	28.9	28.52	28.17	27.86	27.88
0.8	64.07	39.11	39.34	32.36	32.47	42.41	40.65	39.29	38.19	37.27	36.48	35.8	35.2	34.68	34.21	33.78	33.43	33.43
0.9	76.34	46.21	46.48	38.11	38.24	50.33	48.24	46.58	45.23	44.1	43.14	42.31	41.58	40.94	40.36	39.84	39.55	39.49
1	89.86	54.79	54.1	44.28	44.41	58.95	56.41	54.41	52.78	51.42	50.27	49.27	48.41	47.63	46.95	46.26	44.79	44.36
1.1	104.65	61.89	62.25	50.75	50.91	68.29	65.23	62.82	60.87	59.25	57.87	56.69	55.65	54.73	53.91	53.14	51.35	50.84
1.2	120.77	70.53	70.95	57.59	57.77	76.36	74.71	71.85	69.54	67.62	65.99	64.58	63.36	62.28	61.31	60.45	58.59	57.69
1.3	138.26	79.72	80.21	64.82	65.01	89.2	84.89	81.52	78.8	76.54	74.63	72.98	71.54	70.28	69.15	68.14	66.39	64.92

Gesamtverluste																				
Last	OHAI	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%		
0.2	10.35	11.65	113.8	132.8	126.9	103.8	104.1	104.4	104.8	105.4	106.0	106.9	107.8	108.9	110.2	111.6	113.3	115.1	117.1	119.5
0.3	13.41	146.8	144.2	163.1	157.2	135.1	133.9	134.2	134.7	135.2	135.9	136.7	137.6	138.7	140.0	141.5	143.1	144.9	147.0	149.3
0.4	17.83	188.7	186.1	204.9	199.0	178.4	176.3	176.6	177.0	177.6	178.2	179.1	179.9	181.0	182.4	183.8	185.4	187.2	189.3	191.6
0.5	23.71	245.1	242.5	261.1	255.2	235.0	232.5	232.5	232.5	233.1	233.6	234.5	235.3	236.4	237.7	239.1	240.7	242.4	244.5	246.8
0.6	31.19	315.2	312.6	329.1	323.2	305.6	303.3	303.0	303.0	303.2	303.5	304.1	304.8	305.7	306.8	308.1	309.7	311.4	313.4	315.7
0.7	40.39	400.8	398.3	413.2	407.3	391.3	389.4	388.8	388.5	388.4	388.5	388.9	389.4	390.1	391.1	392.2	393.6	395.1	397.0	399.1
0.8	51.43	502.6	500.2	511.5	505.7	493.5	491.8	490.7	489.9	489.5	489.3	489.4	489.7	490.2	491.0	491.9	493.2	494.5	496.2	498.2
0.9	64.63	621.5	619.2	626.8	621.0	614.3	611.7	609.9	608.5	607.6	606.9	606.7	606.6	607.3	608.0	609.0	610.2	611.7	613.5	615.5
1	80.22	758.6	756.5	759.2	753.5	745.2	742.5	741.7	740.5	739.7	738.7	737.7	736.7	735.7	734.7	733.7	732.7	731.7	730.7	729.7
1.1	97.66	915.2	913.3	909.7	904.0	914.6	909.1	904.9	901.6	899.0	897.0	895.6	894.4	893.7	893.4	893.4	893.7	894.2	895.2	896.5
1.2	1183.5	1092.5	1090.8	1079.2	1073.7	1096.9	1093.2	1083.3	1078.6	1074.9	1071.8	1069.5	1067.6	1066.2	1065.3	1064.5	1064.6	1065.2	1066.1	1066.9
1.3	1417.3	1291.9	1290.4	1269.0	1263.5	1302.7	1292.3	1284.2	1277.7	1272.5	1268.2	1264.8	1261.9	1259.7	1258.0	1256.7	1255.9	1255.4	1255.5	1255.9

Verluste der Lufte																				
Last	OHAI	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%		
0.2	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	13.75	16.06
0.3	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	13.75	16.06
0.4	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	13.75	16.06
0.5	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	13.75	16.06
0.6	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	13.75	16.06
0.7	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	13.75	16.06
0.8	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	13.75	16.06
0.9	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	13.75	16.06
1	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	13.75	16.06
1.1	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	13.75	16.06
1.2	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	13.75	16.06
1.3	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	13.75	16.06

		Gesamtanschall																	
Last	OHAI	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%	
0.2	90	103.23	93.37	106.64	95.61	90.08	90.13	90.42	90.58	90.78	91.02	91.3	91.63	92	92.41	92.86	93.34	93.85	
0.3	90.02	103.23	93.38	106.64	95.61	90.1	90.15	90.44	90.59	90.79	91.03	91.31	91.64	92.01	92.42	92.86	93.35	93.86	
0.4	90.06	103.23	93.39	106.64	95.62	90.13	90.18	90.47	90.63	90.82	91.06	91.34	91.66	92.03	92.44	92.88	93.36	93.87	
0.5	90.13	103.24	93.43	106.64	95.65	90.21	90.26	90.54	90.7	90.89	91.12	91.4	91.72	92.08	92.48	92.93	93.4	93.91	
0.6	90.27	103.25	93.5	106.64	95.69	90.35	90.4	90.68	90.85	91.01	91.23	91.5	91.82	92.17	92.57	93	93.47	93.97	
0.7	90.49	103.26	93.6	106.65	95.75	90.56	90.61	90.87	91.01	91.19	91.41	91.67	91.97	92.32	92.7	93.12	93.57	94.06	
0.8	90.81	103.27	93.76	106.66	95.85	90.88	90.92	91.16	91.3	91.47	91.67	91.91	92.2	92.53	92.89	93.29	93.73	94.2	
0.9	91.23	103.3	93.98	106.67	95.98	91.29	91.33	91.59	91.85	92.16	92.47	92.75	93.01	93.19	93.51	93.86	94.25	94.67	
1	91.76	103.33	94.27	106.68	96.17	91.82	91.85	92.05	92.16	92.3	92.47	92.67	92.91	93.19	93.51	93.86	94.25	94.67	
1.1	92.39	103.38	94.63	106.71	96.41	92.44	92.47	92.51	92.64	92.73	92.86	93.01	93.19	93.45	93.73	94.01	94.25	94.61	
1.2	93.09	103.44	95.07	106.73	96.7	93.13	93.16	93.19	93.24	93.31	93.39	93.49	93.62	93.78	93.97	94.19	94.44	94.73	
1.3	93.86	103.52	95.57	106.77	97.05	93.89	93.91	93.94	93.98	94.04	94.11	94.2	94.31	94.44	94.6	94.79	95.01	95.27	

		Schall der Lüfter																	
Last	OHAI	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%	
0.2	0	103.02	90.69	106.54	94.21	72.66	74.81	76.73	78.47	80.07	81.54	82.92	84.21	85.42	86.57	87.66	88.69	89.68	
0.3	0	103.02	90.69	106.54	94.21	72.66	74.81	76.73	78.47	80.07	81.54	82.92	84.21	85.42	86.57	87.66	88.69	89.68	
0.4	0	103.02	90.69	106.54	94.21	72.66	74.81	76.73	78.47	80.07	81.54	82.92	84.21	85.42	86.57	87.66	88.69	89.68	
0.5	0	103.02	90.69	106.54	94.21	72.66	74.81	76.73	78.47	80.07	81.54	82.92	84.21	85.42	86.57	87.66	88.69	89.68	
0.6	0	103.02	90.69	106.54	94.21	72.66	74.81	76.73	78.47	80.07	81.54	82.92	84.21	85.42	86.57	87.66	88.69	89.68	
0.7	0	103.02	90.69	106.54	94.21	72.66	74.81	76.73	78.47	80.07	81.54	82.92	84.21	85.42	86.57	87.66	88.69	89.68	
0.8	0	103.02	90.69	106.54	94.21	72.66	74.81	76.73	78.47	80.07	81.54	82.92	84.21	85.42	86.57	87.66	88.69	89.68	
0.9	0	103.02	90.69	106.54	94.21	72.66	74.81	76.73	78.47	80.07	81.54	82.92	84.21	85.42	86.57	87.66	88.69	89.68	
1	0	103.02	90.69	106.54	94.21	72.66	74.81	76.73	78.47	80.07	81.54	82.92	84.21	85.42	86.57	87.66	88.69	89.68	
1.1	0	103.02	90.69	106.54	94.21	72.66	74.81	76.73	78.47	80.07	81.54	82.92	84.21	85.42	86.57	87.66	88.69	89.68	
1.2	0	103.02	90.69	106.54	94.21	72.66	74.81	76.73	78.47	80.07	81.54	82.92	84.21	85.42	86.57	87.66	88.69	89.68	
1.3	0	103.02	90.69	106.54	94.21	72.66	74.81	76.73	78.47	80.07	81.54	82.92	84.21	85.42	86.57	87.66	88.69	89.68	

Tabelle 5.6: Transformatorzustände bei einer Umgebungstemperatur von 10°C

Umgebungstemperatur = 15°C

Drehzahl		470	487	501	514	526	538	548	558	567	575	584	592	599	606	613
VOLUMENSTROM		2,52	2,94	3,36	3,78	4,2	4,62	5,04	5,46	5,88	6,3	6,72	7,14	7,56	7,98	8,4
Laest	OHAF1	OHAF2	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0,2	13,42	10,77	10,77	10,68	10,66	10,64	10,62	10,61	10,6	10,59	10,58	10,58	10,56	10,57	10,56	10,54
0,3	23,23	19,54	19,54	19,15	19,15	19,15	19,15	19,15	19,15	19,15	19,15	19,15	19,15	19,15	19,15	19,15
0,4	32,57	22,49	22,55	21,48	21,48	21,48	21,48	21,48	21,48	21,48	21,48	21,48	21,48	21,48	21,48	21,48
0,5	42,25	29,62	29,69	27,94	27,94	27,94	27,94	27,94	27,94	27,94	27,94	27,94	27,94	27,94	27,94	27,94
0,6	53,19	36,92	37,07	32,56	32,56	32,56	32,56	32,56	32,56	32,56	32,56	32,56	32,56	32,56	32,56	32,56
0,7	65,17	45,3	45,48	39,85	39,85	39,85	39,85	39,85	39,85	39,85	39,85	39,85	39,85	39,85	39,85	39,85
0,8	78,33	54,01	54,23	47,47	47,47	47,47	47,47	47,47	47,47	47,47	47,47	47,47	47,47	47,47	47,47	47,47
0,9	92,74	63,28	63,54	55,48	55,48	55,48	55,48	55,48	55,48	55,48	55,48	55,48	55,48	55,48	55,48	55,48
1	108,46	73,08	73,38	63,87	63,87	63,87	63,87	63,87	63,87	63,87	63,87	63,87	63,87	63,87	63,87	63,87
1,1	125,53	83,45	83,8	72,64	72,64	72,64	72,64	72,64	72,64	72,64	72,64	72,64	72,64	72,64	72,64	72,64
1,2	144,02	94,41	94,82	81,82	81,82	81,82	81,82	81,82	81,82	81,82	81,82	81,82	81,82	81,82	81,82	81,82
1,3	163,99	105,97	106,45	91,42	91,42	91,42	91,42	91,42	91,42	91,42	91,42	91,42	91,42	91,42	91,42	91,42

PW-Wicklung: Hot Spot Temperatur		OHAF1	OHAF2	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0,2	14,05	11,34	11,35	11,1	11,11	11,12	11,2	11,19	11,18	11,16	11,15	11,14	11,14	11,12	11,13	11,12	11,1
0,3	24,1	20,33	20,35	19,91	19,93	19,93	19,93	19,93	19,93	19,93	19,93	19,93	19,93	19,93	19,93	19,93	19,93
0,4	33,6	23,57	23,63	22,17	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2
0,5	43,58	30,84	30,91	29,23	29,23	29,23	29,23	29,23	29,23	29,23	29,23	29,23	29,23	29,23	29,23	29,23	29,23
0,6	54,78	38,54	38,69	34,48	34,24	34,24	34,24	34,24	34,24	34,24	34,24	34,24	34,24	34,24	34,24	34,24	34,24
0,7	67,04	47,25	47,42	41,9	41,96	41,96	41,96	41,96	41,96	41,96	41,96	41,96	41,96	41,96	41,96	41,96	41,96
0,8	80,5	56,27	56,49	49,74	49,84	49,84	49,84	49,84	49,84	49,84	49,84	49,84	49,84	49,84	49,84	49,84	49,84
0,9	95,23	65,88	66,13	58,09	58,21	58,21	58,21	58,21	58,21	58,21	58,21	58,21	58,21	58,21	58,21	58,21	58,21
1	111,27	76,02	76,32	66,84	66,97	66,97	66,97	66,97	66,97	66,97	66,97	66,97	66,97	66,97	66,97	66,97	66,97
1,1	128,68	86,75	87,4	75,97	76,12	76,12	76,12	76,12	76,12	76,12	76,12	76,12	76,12	76,12	76,12	76,12	76,12
1,2	147,51	98,07	98,48	85,53	85,69	85,69	85,69	85,69	85,69	85,69	85,69	85,69	85,69	85,69	85,69	85,69	85,69
1,3	167,82	110,01	110,48	95,51	95,69	95,69	95,69	95,69	95,69	95,69	95,69	95,69	95,69	95,69	95,69	95,69	95,69

SW-Wicklung: Top Oil Temperatur		OHAF1	OHAF2	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0,2	10,28	7,56	7,57	7,33	7,34	7,34	7,33	7,42	7,41	7,39	7,38	7,37	7,37	7,36	7,36	7,35	7,34
0,3	18,15	14,33	14,35	13,92	13,94	13,94	13,92	14,06	14,05	14,03	14,02	14,01	14,01	14,01	14,01	14,01	14,01
0,4	25,46	19,83	19,89	18,48	18,5	18,5	18,48	18,62	18,61	18,6	18,59	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58
0,5	33,05	26,68	26,75	24,66	24,66	24,66	24,66	24,8	24,79	24,78	24,78	24,78	24,78	24,78	24,78	24,78	24,78
0,6	41,86	34,64	34,8	31,95	31,95	31,95	31,95	32,1	32,09	32,08	32,08	32,08	32,08	32,08	32,08	32,08	32,08
0,7	51,68	43,66	43,85	40,85	40,85	40,85	40,85	41,0	40,99	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98
0,8	62,65	53,68	53,9	50,96	50,96	50,96	50,96	51,1	51,09	51,08	51,08	51,08	51,08	51,08	51,08	51,08	51,08
0,9	74,84	64,83	65,1	61,93	61,93	61,93	61,93	62,1	62,09	62,08	62,08	62,08	62,08	62,08	62,08	62,08	62,08
1	88,22	76,17	76,5	72,64	72,64	72,64	72,64	72,8	72,79	72,78	72,78	72,78	72,78	72,78	72,78	72,78	72,78
1,1	102,91	88,04	88,5	84,53	84,53	84,53	84,53	84,7	84,69	84,68	84,68	84,68	84,68	84,68	84,68	84,68	84,68
1,2	118,94	102,07	102,6	97,53	97,53	97,53	97,53	97,7	97,69	97,68	97,68	97,68	97,68	97,68	97,68	97,68	97,68
1,3	136,37	118,43	119,0	113,99	114,0	114,0	114,0	114,2	114,19	114,18	114,18	114,18	114,18	114,18	114,18	114,18	114,18

PW-Wicklung: Top-Ohl Temperatur

Last	OHAIH	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0.2	10.89	8.11	8.12	8.06	8.02	8	7.98	7.96	7.95	7.93	7.92	7.91	7.91	7.91	7.89	7.9	7.89	7.87
0.3	18.99	15.09	15.11	14.67	14.68	20.82	12.11	11.99	11.84	11.74	11.67	11.65	11.65	11.62	11.6	11.59	11.57	11.55
0.4	26.44	15.87	15.93	14.43	14.45	15.75	15.47	15.26	15.1	14.97	14.78	14.7	14.7	14.64	14.58	14.53	14.49	14.45
0.5	34.34	20.87	20.94	19.18	19.21	25.87	20.93	19.54	19.13	18.76	18.47	18.26	18.06	17.94	17.81	17.7	17.61	17.53
0.6	43.41	26.22	26.38	21.49	21.55	29.91	27.35	26.16	25.42	24.8	23.42	23.06	22.73	22.43	22.16	21.91	21.69	21.53
0.7	53.51	32.57	32.76	26.76	26.83	35.33	33.75	32.61	31.68	30.9	29.65	29.14	28.69	28.28	27.92	27.27	27	26.74
0.8	64.78	39.21	39.44	32.1	32.22	42.59	40.81	39.4	38.25	37.28	36.46	35.75	35.12	34.07	33.62	33.24	32.49	32.17
0.9	77.26	46.4	46.68	37.96	38.08	50.66	48.51	46.79	45.39	44.22	43.22	42.36	41.6	40.93	39.78	38.83	38.42	38.04
1	91.01	54.1	54.42	44.17	44.31	59.43	56.83	54.75	53.06	51.45	49.41	48.5	47.69	46.33	45.74	45.2	44.71	44.26
1.1	106.06	62.35	62.72	50.74	50.9	68.98	65.81	63.32	61.3	59.62	58.18	56.91	54.91	54.06	53.29	52.59	51.37	50.84
1.2	122.45	71.14	71.58	57.7	57.88	79.25	75.48	72.53	70.43	68.43	66.44	64.98	63.71	62.58	61.58	60.68	59.11	58.43
1.3	140.24	80.5	81	65.05	65.24	90.31	85.86	82.38	79.56	77.22	75.24	73.53	72.04	70.73	69.55	68.5	67.55	66.68

Gesamtverluste

Last	OHAIH	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0.2	103.8	116.8	114.4	133.1	127.2	104.1	104.3	104.7	105.1	105.7	106.3	107.2	110.5	111.9	113.6	115.3	117.4	119.7
0.3	134.8	147.4	144.8	163.7	157.8	135.6	134.5	134.8	135.3	135.8	136.2	137.3	140.6	142.1	143.7	145.5	147.6	149.9
0.4	179.6	189.8	187.2	206.0	200.1	179.4	177.5	177.7	178.1	178.7	179.2	181.0	182.1	183.4	184.8	186.5	188.2	190.6
0.5	239.2	246.8	244.2	262.7	256.8	236.5	234.5	234.5	234.7	235.1	235.5	236.3	238.1	239.4	240.8	242.4	246.2	248.5
0.6	314.9	318.1	315.5	331.6	325.6	307.9	306.2	306.0	305.9	306.4	307.0	307.7	308.5	309.7	310.9	312.4	315.9	318.2
0.7	408.1	404.8	402.3	416.5	410.6	394.5	393.4	392.8	392.5	392.4	392.5	392.9	394.1	395.0	396.2	397.5	400.9	403.0
0.8	520.5	507.8	505.5	516.6	510.8	498.7	497.1	496.0	495.2	494.7	494.5	494.6	495.4	497.1	498.3	499.7	501.4	503.3
0.9	653.6	628.2	626.0	633.4	627.6	617.2	618.6	616.7	615.3	614.3	613.2	613.4	614.0	614.6	615.6	616.8	620.1	624.2
1.0	809.4	767.1	765.0	767.4	761.7	762.9	759.0	756.1	753.8	752.1	750.9	749.5	749.3	749.4	750.4	751.3	752.6	754.2
1.1	990.0	925.7	923.8	919.7	914.1	925.3	919.7	915.4	912.1	909.4	907.4	905.9	904.7	903.9	903.6	904.3	905.3	906.5
1.2	1197.5	1105.2	1103.6	1091.3	1085.8	1116.0	1102.1	1095.1	1091.3	1087.4	1084.4	1082.0	1078.6	1077.0	1076.8	1076.8	1077.3	1078.2
1.3	1434.2	1307.1	1305.7	1283.4	1278.0	1318.4	1307.8	1299.5	1292.9	1287.5	1283.2	1279.7	1276.7	1274.4	1276.5	1269.9	1269.9	1270.3

Verluste der Lüfter

Last	OHAIH	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0.2	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66
0.3	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66
0.4	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66
0.5	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66
0.6	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66
0.7	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66
0.8	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66
0.9	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66
1	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66
1.1	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66
1.2	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66
1.3	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66

		Gesamtsechall																		
Last	OH/IAH	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%		
0,2	90	103,23	93,37	106,64	95,61	90,08	90,13	90,2	90,3	90,42	90,58	90,78	91,02	91,3	91,63	92	92,41	92,86	93,34	93,85
0,3	90,02	103,23	93,38	106,64	95,61	90,1	90,15	90,22	90,31	90,44	90,59	90,79	91,03	91,31	91,64	92,01	92,42	92,88	93,36	93,87
0,4	90,06	103,23	93,39	106,64	95,62	90,13	90,18	90,25	90,35	90,47	90,63	90,82	91,06	91,34	91,66	92,03	92,44	92,88	93,36	93,87
0,5	90,13	103,24	93,43	106,64	95,65	90,21	90,26	90,33	90,42	90,54	90,7	90,89	91,12	91,4	91,72	92,08	92,48	92,93	93,4	93,91
0,6	90,27	103,25	93,5	106,64	95,69	90,35	90,4	90,46	90,55	90,67	90,82	91,01	91,23	91,5	91,82	92,17	92,57	93	93,47	93,97
0,7	90,49	103,26	93,6	106,65	95,75	90,56	90,61	90,67	90,76	90,87	91,01	91,19	91,41	91,67	91,97	92,32	92,7	93,12	93,57	94,06
0,8	90,81	103,27	93,76	106,66	95,85	90,88	90,92	90,98	91,06	91,16	91,3	91,47	91,67	91,91	92,2	92,53	92,89	93,29	93,73	94,2
0,9	91,23	103,3	93,88	106,67	95,98	91,29	91,33	91,39	91,46	91,56	91,68	91,83	92,02	92,25	92,51	92,82	93,16	93,54	93,95	94,4
1	92,39	103,33	94,27	106,68	96,17	91,82	91,85	91,9	91,96	92,05	92,16	92,3	92,47	92,67	92,91	93,19	93,51	93,86	94,25	94,67
1,1	93,09	103,38	94,63	106,71	96,41	92,44	92,47	92,51	92,56	92,64	92,73	92,86	93,01	93,19	93,4	93,65	93,93	94,25	94,61	95
1,2	93,09	103,44	95,07	106,73	96,7	93,13	93,16	93,19	93,24	93,31	93,39	93,49	93,62	93,78	93,97	94,19	94,44	94,73	95,05	95,4
1,3	93,86	103,52	95,57	106,77	97,05	93,89	93,91	93,94	93,98	94,04	94,11	94,2	94,31	94,44	94,6	94,79	95,01	95,27	95,55	95,86

		Schall der Lüfter																		
Last	OH/IAH	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%		
0,2	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,3	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,4	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,5	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,6	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,7	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,8	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,9	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
1	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
1,1	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
1,2	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
1,3	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54

Tabelle 5.7: Transformatorzustände bei einer Umgebungstemperatur von 15°C

Umgebungstemperatur= 20°C

Drehzahl		470	487	501	514	526	538	548	558	567	575	584	592	599	606	613	
VOLUMENSTROM		2,52	2,94	3,36	3,78	4,2	4,62	5,04	5,46	5,88	6,3	6,72	7,14	7,56	7,98	8,4	
SW-Wichtung: Hot Spot Temperatur																	
Last	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0,2	13,62	10,25	10,26	10,01	10,02	10,25	10,12	10,1	10,08	10,07	10,06	10,05	10,04	10,03	10,03	10,02	10,01
0,3	23,27	18,74	18,16	18,3	18,32	24,13	16,02	15,89	15,71	15,65	15,6	15,57	15,53	15,5	15,46	15,42	15,4
0,4	32,58	22,06	22,17	20,34	20,37	28,45	22,46	21,9	21,49	21,26	21,08	20,92	20,82	20,72	20,5	20,45	20,36
0,5	42,36	29,1	29,22	26,99	27,02	33,25	29,68	28,41	27,93	27,52	27,17	26,86	26,58	26,33	26,15	26	25,86
0,6	53,41	36,88	37,04	34,93	32,04	39,59	37,71	36,83	36,1	35,49	34,97	34,51	34,11	33,76	33,44	33,15	32,88
0,7	65,55	45,08	45,27	39,35	39,45	47,04	46,23	45,13	44,22	43,46	42,81	42,24	41,75	41,31	40,91	40,56	40,23
0,8	78,89	53,88	54,11	46,99	47,1	57,19	55,45	54,07	52,95	52,01	51,21	50,52	49,91	49,37	48,89	48,45	47,96
0,9	93,52	63,25	63,51	55,06	55,19	67,44	63,63	62,26	61,42	60,15	59,31	58,57	57,92	57,34	56,81	56,34	55,91
1	109,47	73,16	73,48	63,51	63,65	78,44	75,84	73,81	72,15	70,77	69,6	68,59	67,71	66,93	66,3	65,81	65,4
1,1	126,81	83,68	84,05	72,37	72,53	90,22	87,09	84,65	82,67	81,02	79,62	78,41	77,35	76,42	75,59	74,84	74,17
1,2	145,59	94,8	95,23	81,67	81,84	102,83	99,1	96,18	93,82	91,86	90,2	88,77	87,52	86,42	85,44	84,56	83,76
1,3	165,88	106,55	107,04	91,4	91,59	116,29	111,87	108,42	105,64	103,33	101,38	99,7	98,24	96,95	95,8	94,77	93,84

PW-Wichtung: Hot Spot Temperatur																	
Last	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0,2	14,23	10,81	10,82	10,55	10,56	10,81	10,76	10,68	10,66	10,62	10,61	10,6	10,59	10,57	10,57	10,56	10,55
0,3	24,11	19,52	19,54	19,05	19,07	24,86	16,85	16,7	16,6	16,52	16,45	16,4	16,36	16,33	16,29	16,27	16,2
0,4	33,57	23,12	23,22	21,31	21,34	29,46	23,51	22,96	22,55	22,3	22,1	21,95	21,82	21,72	21,63	21,55	21,49
0,5	43,67	30,46	30,58	28,27	28,3	34,49	31,04	30,34	29,76	29,26	28,84	28,47	28,15	27,86	27,6	27,44	27,3
0,6	54,98	38,52	38,67	33,54	33,62	41,16	39,34	38,46	37,74	37,42	36,61	36,16	35,76	35,4	35,09	34,8	34,53
0,7	67,4	47	47,19	41,29	41,38	49,55	48,15	47,04	46,14	45,38	44,73	44,17	43,68	43,24	42,85	42,49	42,17
0,8	81,04	56,12	56,34	49,24	49,35	59,41	57,68	56,31	55,19	54,25	53,45	52,76	52,15	51,62	51,14	50,7	50,31
0,9	95,99	65,79	66,05	57,66	57,78	69,97	67,85	66,17	64,83	63,69	62,72	61,89	61,16	60,51	59,93	59,4	58,93
1	112,27	76,05	76,36	66,45	66,6	81,31	78,72	76,69	75,04	73,7	72,53	71,52	70,64	69,86	69,16	68,54	67,97
1,1	129,84	86,95	87,32	75,68	75,84	93,44	90,32	87,92	85,94	84,3	82,9	81,7	80,65	79,72	78,89	78,15	77,47
1,2	149,06	98,44	98,86	85,35	85,52	106,44	102,72	99,81	97,46	95,51	93,86	92,43	91,19	90,09	89,11	88,24	87,44
1,3	169,89	110,56	111,05	95,46	95,65	120,27	115,87	112,43	109,65	107,35	105,41	103,74	102,28	100,99	99,85	98,82	97,89

SW-Wichtung: Top Oil Temperatur																	
Last	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0,2	10,62	7,18	7,19	6,93	6,94	7,17	7,13	7,09	7,06	7,04	7,02	7	6,99	6,98	6,97	6,96	6,95
0,3	18,36	13,7	13,72	13,25	13,27	19,27	10,86	10,72	10,62	10,55	10,48	10,43	10,4	10,36	10,33	10,31	10,28
0,4	25,66	14,67	14,78	12,88	12,91	21,4	15,09	14,5	14,07	13,83	13,65	13,5	13,37	13,28	13,19	13,12	13,05
0,5	33,37	19,45	19,59	17,29	17,29	23,87	20,07	19,32	18,72	18,21	17,78	17,39	17,06	16,76	16,5	16,31	16,15
0,6	42,3	24,93	25,1	19,63	19,72	27,83	25,81	24,87	24,1	23,44	22,88	22,4	21,97	21,59	21,24	20,93	20,64
0,7	52,28	30,78	30,98	24,62	24,72	33,5	32,01	30,83	29,86	29,04	28,35	27,74	27,21	26,73	26,31	25,93	25,57
0,8	63,42	37,2	37,44	29,78	29,9	40,71	38,87	37,4	36,2	35,2	34,34	33,59	32,94	32,36	31,84	31,37	30,94
0,9	75,78	44,14	44,42	35,35	35,48	48,59	46,34	44,55	43,09	41,87	40,83	39,93	39,14	38,44	37,81	37,24	36,73
1	89,42	51,6	51,93	41,25	41,4	57,17	54,44	52,28	50,52	49,05	47,8	46,72	45,77	44,93	44,18	43,51	42,89
1,1	104,37	59,61	60	47,53	47,7	66,49	63,21	60,83	58,53	56,78	55,29	54,01	52,88	51,88	50,99	50,19	49,46
1,2	120,68	68,17	68,62	54,2	54,39	76,58	72,68	69,62	67,13	64,79	62,47	60,29	58,25	57,31	56,45	55,68	54,97
1,3	138,41	77,3	77,82	61,26	61,47	87,47	82,87	79,27	76,35	73,92	71,86	70,09	68,55	67,18	65,96	64,86	63,87

PW-Wicklung: Top Oil Temperatur																		
Last	OH/AH	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0.2	11.2	7.71	7.72	7.44	7.46	7.44	7.66	7.66	7.54	7.52	7.51	7.5	7.49	7.48	7.47	7.47	7.46	7.45
0.3	19.17	14.44	14.46	13.96	13.98	13.98	11.65	11.51	11.32	11.25	11.19	11.16	11.12	11.09	11.06	11.04	11.02	10.99
0.4	26.61	15.68	15.79	13.81	13.84	22.37	16.1	15.52	14.63	14.47	14.34	14.24	14.14	14.06	14	13.94	13.88	13.84
0.5	34.63	20.77	20.91	18.49	18.52	25.07	21.39	20.64	20.03	19.5	18.66	18.31	18	17.73	17.56	17.42	17.3	17.1
0.6	43.82	26.52	26.69	21.21	21.3	29.36	27.4	26.47	25.69	25.04	24.49	24	23.57	23.19	22.85	22.55	22	21.48
0.7	54.08	32.66	32.86	26.53	26.63	35.37	33.89	32.71	31.74	30.93	30.24	29.64	29.1	28.63	28.21	27.83	27.48	26.86
0.8	65.53	39.4	39.64	32.01	32.13	42.9	41.06	39.6	38.41	37.41	36.55	35.81	35.16	34.58	34.06	33.59	33.16	32.09
0.9	77.22	46.66	46.94	37.93	38.06	51.1	48.85	47.07	45.63	44.42	43.38	42.49	41.7	41.01	40.38	39.81	39.3	38.01
1	92.2	54.46	54.8	44.19	44.35	60.03	57.3	55.14	53.39	51.97	50.72	49.64	48.76	47.82	47.12	46.44	45.83	44.76
1.1	107.49	62.88	63.27	50.86	51.02	69.71	66.44	63.9	61.84	60.07	58.58	57.3	56.48	55.19	54.3	53.5	52.12	51.51
1.2	124.16	71.83	72.27	57.92	58.1	80.21	76.32	73.27	70.79	68.73	66.98	65.47	64.15	62.99	61.94	61.01	60.16	58.82
1.3	142.26	81.35	81.87	65.38	65.58	91.48	86.9	83.31	80.4	77.98	75.93	74.17	72.63	71.27	70.05	68.96	67.97	65.49

Gesamtverluste																		
Last	OH/AH	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0.2	104.2	117.0	114.4	133.4	127.4	104.4	104.6	104.9	105.4	105.9	106.6	107.5	108.4	110.8	112.2	113.9	115.6	117.7
0.3	135.5	148.0	145.4	164.3	158.4	135.1	135.5	135.9	136.4	137.1	138.0	138.8	139.9	141.3	142.7	144.3	146.1	148.2
0.4	180.9	191.1	188.5	207.1	201.2	180.4	178.8	178.9	179.3	179.8	180.4	181.3	182.2	183.2	184.5	186.0	187.6	191.4
0.5	241.3	248.7	246.1	264.4	258.5	238.2	236.6	236.8	237.1	237.6	238.3	239.0	240.0	241.2	242.6	244.2	245.9	248.0
0.6	318.0	321.0	318.5	334.3	328.4	310.3	309.1	308.9	309.0	309.4	309.9	310.6	311.4	312.5	313.8	315.3	316.9	318.8
0.7	412.4	408.8	406.4	420.2	414.4	398.4	397.4	396.8	396.5	396.8	397.3	398.0	399.0	400.1	401.5	403.0	404.8	406.9
0.8	526.1	513.2	510.8	521.8	516.0	504.1	502.5	501.3	500.5	500.6	500.9	501.4	502.3	503.5	504.8	506.5	508.5	508.7
0.9	660.9	635.1	632.8	640.0	634.2	628.1	625.5	623.5	622.4	621.4	620.4	619.9	620.4	621.3	622.3	623.4	624.9	626.7
1.0	818.7	775.7	773.6	775.6	769.9	771.7	767.7	764.7	762.4	760.6	758.3	756.5	754.8	753.1	751.6	750.1	748.6	747.4
1.1	1001.6	936.3	934.4	929.8	924.2	936.1	930.4	926.0	922.6	919.9	917.8	916.2	915.0	913.7	912.4	911.1	909.8	908.6
1.2	1211.6	1118.1	1116.4	1116.4	1110.35	1098.0	1112.31	1115.2	1109.0	1104.1	1100.2	1097.0	1094.5	1091.0	1089.0	1089.1	1089.1	1090.4
1.3	1451.1	1322.4	1321.1	1297.9	1292.5	1334.2	1323.4	1315.0	1308.2	1302.7	1298.2	1294.7	1291.6	1287.5	1284.6	1284.6	1284.5	1284.8

Verluste der Lüfter																		
Last	OH/AH	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0.2	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66
0.3	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66
0.4	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66
0.5	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66
0.6	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66
0.7	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66
0.8	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66
0.9	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66
1	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66
1.1	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66
1.2	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66
1.3	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66

		Gesamtsechul																			
Last	OHAI	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%			
0.2	90	103,23	93,37	106,64	95,61	90,08	90,13	90,2	90,3	90,31	90,44	90,59	90,78	91,02	91,31	91,64	92,86	93,34	93,85		
0.3	90,02	103,23	93,38	106,64	95,61	90,1	90,15	90,22	90,35	90,47	90,63	90,89	91,17	91,45	91,72	92,03	92,36	93,35	93,86		
0.4	90,06	103,23	93,39	106,64	95,62	90,13	90,18	90,25	90,38	90,54	90,77	91,09	91,41	91,73	92,06	92,41	92,88	93,36	93,87		
0.5	90,13	103,24	93,43	106,64	95,65	90,21	90,26	90,33	90,46	90,67	91,01	91,39	91,76	92,14	92,54	92,98	93,4	93,91	94,42		
0.6	90,27	103,25	93,5	106,64	95,69	90,35	90,4	90,46	90,55	90,87	91,23	91,67	92,17	92,67	93,2	93,7	94,25	94,76	95,27		
0.7	90,49	103,26	93,6	106,65	95,75	90,56	90,61	90,76	91,01	91,49	92,01	92,59	93,2	93,8	94,4	95,0	95,6	96,2	96,8		
0.8	90,81	103,27	93,76	106,66	95,85	90,88	90,92	91,06	91,46	92,0	92,6	93,3	94,0	94,7	95,4	96,1	96,8	97,5	98,2		
0.9	91,23	103,3	93,98	106,67	95,98	91,29	91,33	91,39	91,46	91,56	91,68	91,83	92,02	92,25	92,51	92,82	93,16	93,54	93,95	94,4	
1	92,39	103,33	94,27	106,68	96,17	91,82	91,85	91,9	91,96	92,05	92,16	92,3	92,47	92,67	92,91	93,19	93,51	93,86	94,25	94,67	
1.1	93,09	103,38	94,63	106,71	96,41	92,44	92,47	92,56	92,64	92,73	92,86	93,01	93,19	93,4	93,65	93,93	94,25	94,61	95		
1.2	93,86	103,44	95,07	106,73	96,7	93,13	93,16	93,24	93,31	93,39	93,49	93,62	93,78	93,97	94,19	94,44	94,73	95,05	95,4		
1.3	93,86	103,52	95,57	106,77	97,05	93,89	93,91	93,94	93,98	94,04	94,11	94,2	94,31	94,44	94,6	94,79	95,01	95,27	95,56		

		Sechul der Lüfter																			
Last	OHAI	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%			
0.2	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	90,63	91,54		
0.3	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	90,63	91,54		
0.4	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	90,63	91,54		
0.5	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	90,63	91,54		
0.6	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	90,63	91,54		
0.7	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	90,63	91,54		
0.8	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	90,63	91,54		
0.9	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	90,63	91,54		
1	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	90,63	91,54		
1.1	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	90,63	91,54		
1.2	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	90,63	91,54		
1.3	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	90,63	91,54		

Tabelle 5.8: Transformatorzustände bei einer Umgebungstemperatur von 20°C

		Umgebungstemperatur = 25°C															
		470	487	501	514	526	538	548	558	567	575	584	592	599	606	613	
Drehzahl		2,52	2,94	3,36	3,78	4,2	4,62	5,04	5,46	5,88	6,3	6,72	7,14	7,56	7,98	8,4	
VOLUMENSTROM																	
		SW-Wicklung: Hot Spot Temperatur															
Last	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0,2	13,85	9,85	9,86	9,8	9,76	9,73	9,71	9,69	9,67	9,65	9,64	9,63	9,62	9,61	9,61	9,6	9,59
0,3	23,35	18,09	18,41	17,61	17,62	17,62	17,62	17,62	17,62	17,62	17,62	17,62	17,62	17,62	17,62	17,62	17,62
0,4	32,64	21,85	21,96	19,68	19,71	19,71	19,71	19,71	19,71	19,71	19,71	19,71	19,71	19,71	19,71	19,71	19,71
0,5	42,52	28,92	29,05	26,24	26,27	26,27	26,27	26,27	26,27	26,27	26,27	26,27	26,27	26,27	26,27	26,27	26,27
0,6	53,7	36,71	36,87	31,79	31,88	31,88	31,88	31,88	31,88	31,88	31,88	31,88	31,88	31,88	31,88	31,88	31,88
0,7	65,98	44,97	45,16	38,99	39,09	39,09	39,09	39,09	39,09	39,09	39,09	39,09	39,09	39,09	39,09	39,09	39,09
0,8	79,5	53,86	54,1	46,66	46,77	46,77	46,77	46,77	46,77	46,77	46,77	46,77	46,77	46,77	46,77	46,77	46,77
0,9	94,34	63,3	63,58	54,77	54,89	54,89	54,89	54,89	54,89	54,89	54,89	54,89	54,89	54,89	54,89	54,89	54,89
1	110,54	73,34	73,67	63,29	63,43	63,43	63,43	63,43	63,43	63,43	63,43	63,43	63,43	63,43	63,43	63,43	63,43
1,1	128,14	84	84,38	72,24	72,4	72,4	72,4	72,4	72,4	72,4	72,4	72,4	72,4	72,4	72,4	72,4	72,4
1,2	147,21	95,28	95,72	81,64	81,82	81,82	81,82	81,82	81,82	81,82	81,82	81,82	81,82	81,82	81,82	81,82	81,82
1,3	167,82	107,21	107,72	91,49	91,69	91,69	91,69	91,69	91,69	91,69	91,69	91,69	91,69	91,69	91,69	91,69	91,69

		PW-Wicklung: Hot Spot Temperatur															
Last	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0,2	14,44	10,39	10,4	10,41	10,42	10,4	10,34	10,26	10,24	10,22	10,2	10,18	10,17	10,14	10,14	10,12	10,11
0,3	24,17	18,85	18,87	18,36	18,36	18,36	18,36	18,36	18,36	18,36	18,36	18,36	18,36	18,36	18,36	18,36	18,36
0,4	33,61	22,88	22,98	20,63	20,66	20,66	20,66	20,66	20,66	20,66	20,66	20,66	20,66	20,66	20,66	20,66	20,66
0,5	43,8	30,25	30,38	27,5	27,54	27,54	27,54	27,54	27,54	27,54	27,54	27,54	27,54	27,54	27,54	27,54	27,54
0,6	55,25	38,32	38,48	33,42	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5
0,7	67,81	46,87	47,06	40,9	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
0,8	81,64	56,06	56,3	48,89	49,04	49,04	49,04	49,04	49,04	49,04	49,04	49,04	49,04	49,04	49,04	49,04	49,04
0,9	96,79	65,83	66,1	57,34	57,47	57,47	57,47	57,47	57,47	57,47	57,47	57,47	57,47	57,47	57,47	57,47	57,47
1	113,32	76,21	76,54	66,21	66,35	66,35	66,35	66,35	66,35	66,35	66,35	66,35	66,35	66,35	66,35	66,35	66,35
1,1	131,26	87,22	87,6	75,53	75,69	75,69	75,69	75,69	75,69	75,69	75,69	75,69	75,69	75,69	75,69	75,69	75,69
1,2	150,67	98,9	99,34	85,3	85,48	85,48	85,48	85,48	85,48	85,48	85,48	85,48	85,48	85,48	85,48	85,48	85,48
1,3	171,67	111,19	111,7	95,53	95,73	95,73	95,73	95,73	95,73	95,73	95,73	95,73	95,73	95,73	95,73	95,73	95,73

		SW-Wicklung: Top Oil Temperatur															
Last	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0,2	10,96	6,88	6,89	6,62	6,63	6,63	6,63	6,63	6,63	6,63	6,63	6,63	6,63	6,63	6,63	6,63	6,63
0,3	18,59	13,19	13,21	12,7	12,71	12,71	12,71	12,71	12,71	12,71	12,71	12,71	12,71	12,71	12,71	12,71	12,71
0,4	25,89	14,69	14,8	12,44	12,47	12,47	12,47	12,47	12,47	12,47	12,47	12,47	12,47	12,47	12,47	12,47	12,47
0,5	33,71	19,54	19,68	16,75	16,78	16,78	16,78	16,78	16,78	16,78	16,78	16,78	16,78	16,78	16,78	16,78	16,78
0,6	42,78	25,05	25,22	19,82	19,92	19,92	19,92	19,92	19,92	19,92	19,92	19,92	19,92	19,92	19,92	19,92	19,92
0,7	52,9	30,97	31,18	24,6	24,71	24,71	24,71	24,71	24,71	24,71	24,71	24,71	24,71	24,71	24,71	24,71	24,71
0,8	64,22	37,49	37,74	29,81	29,94	29,94	29,94	29,94	29,94	29,94	29,94	29,94	29,94	29,94	29,94	29,94	29,94
0,9	76,79	44,51	44,8	35,42	35,56	35,56	35,56	35,56	35,56	35,56	35,56	35,56	35,56	35,56	35,56	35,56	35,56
1	90,66	52,08	52,43	41,4	41,55	41,55	41,55	41,55	41,55	41,55	41,55	41,55	41,55	41,55	41,55	41,55	41,55
1,1	105,86	60,22	60,62	47,77	47,94	47,94	47,94	47,94	47,94	47,94	47,94	47,94	47,94	47,94	47,94	47,94	47,94
1,2	122,45	68,94	69,4	54,53	54,73	54,73	54,73	54,73	54,73	54,73	54,73	54,73	54,73	54,73	54,73	54,73	54,73
1,3	140,48	78,24	78,77	61,71	61,92	61,92	61,92	61,92	61,92	61,92	61,92	61,92	61,92	61,92	61,92	61,92	61,92

PW-Wichtung: Top Oil Temperatur

Last	OHAIH	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0,2	11,52	7,4	7,41	7,12	7,13	7,14	7,17	7,24	7,22	7,21	7,19	7,18	7,16	7,15	7,14	7,14	7,13	7,11
0,3	19,38	13,91	13,94	13,4	13,41	13,42	13,43	13,44	13,45	13,46	13,47	13,48	13,49	13,50	13,51	13,52	13,53	13,54
0,4	26,82	15,67	15,79	13,35	13,38	13,41	13,44	13,47	13,50	13,53	13,56	13,59	13,62	13,65	13,68	13,71	13,74	13,77
0,5	34,95	20,83	20,97	17,96	18	18,1	18,2	18,3	18,4	18,5	18,6	18,7	18,8	18,9	19,0	19,1	19,2	19,3
0,6	44,28	26,61	26,78	21,41	21,5	21,6	21,7	21,8	21,9	22,0	22,1	22,2	22,3	22,4	22,5	22,6	22,7	22,8
0,7	54,69	32,83	33,03	26,48	26,59	26,7	26,8	26,9	27,0	27,1	27,2	27,3	27,4	27,5	27,6	27,7	27,8	27,9
0,8	66,31	39,65	39,9	32,02	32,14	32,26	32,38	32,5	32,6	32,7	32,8	32,9	33,0	33,1	33,2	33,3	33,4	33,5
0,9	79,21	47	47,29	37,97	38,11	38,24	38,37	38,5	38,6	38,7	38,8	38,9	39,0	39,1	39,2	39,3	39,4	39,5
1	93,42	54,93	55,28	44,31	44,47	44,62	44,77	44,92	45,07	45,22	45,37	45,52	45,67	45,82	45,97	46,12	46,27	46,42
1,1	108,97	63,44	63,84	51,06	51,23	51,4	51,6	51,8	52,0	52,2	52,4	52,6	52,8	53,0	53,2	53,4	53,6	53,8
1,2	125,92	72,57	73,03	58,22	58,41	58,6	58,8	59,0	59,2	59,4	59,6	59,8	60,0	60,2	60,4	60,6	60,8	61,0
1,3	144,31	82,26	82,79	65,79	66	66,2	66,4	66,6	66,8	67,0	67,2	67,4	67,6	67,8	68,0	68,2	68,4	68,6

Gesamtverluste

Last	OHAIH	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%			
0,2	104,5	117,3	114,7	133,7	127,7	127,7	104,7	104,9	105,2	105,7	106,2	106,9	107,8	108,6	109,7	111,1	112,5	114,1	115,9	118,0	120,3
0,3	136,3	148,6	146,0	164,9	159,0	159,0	136,3	135,8	136,1	136,5	137,1	137,7	138,6	139,5	140,6	141,9	143,3	145,0	146,7	148,8	151,1
0,4	182,2	192,4	189,8	208,3	202,3	202,3	181,5	180,1	180,2	180,5	181,0	181,6	182,4	183,3	184,4	185,7	187,1	188,8	190,5	192,6	194,9
0,5	243,4	250,7	248,2	266,2	260,2	260,2	238,6	238,6	238,6	239,1	239,6	240,3	241,0	242,0	243,2	244,5	246,1	247,8	249,8	252,1	254,9
0,6	321,1	324,0	321,4	337,2	331,3	331,3	312,8	312,8	312,8	313,3	313,9	314,3	315,5	316,7	318,2	319,8	321,7	323,9	326,9	330,9	335,9
0,7	416,7	412,9	410,4	424,2	418,3	418,3	402,5	402,5	402,5	403,3	404,3	405,4	406,9	408,4	410,1	412,0	414,1	416,4	418,9	421,9	425,9
0,8	531,8	518,6	516,2	527,0	521,2	521,2	509,6	509,6	509,6	510,5	511,5	512,9	514,9	517,2	519,7	522,5	525,6	529,0	532,8	537,1	541,9
0,9	668,3	642,0	639,7	646,6	640,9	640,9	629,0	629,0	629,0	630,4	632,4	635,2	638,4	642,0	646,0	650,5	655,4	660,7	666,4	672,5	679,1
1,0	828,1	784,4	782,3	784,0	778,3	778,3	760,5	760,5	760,5	762,9	766,8	771,4	776,4	781,9	788,0	794,5	801,5	809,0	817,0	825,5	834,5
1,1	1013,2	946,9	945,0	940,0	934,4	934,4	917,1	917,1	917,1	920,4	924,3	928,7	933,2	938,0	943,3	949,0	955,1	961,6	968,6	976,1	984,1
1,2	1225,7	1131,0	1129,3	1115,8	1110,3	1110,3	1093,3	1093,3	1093,3	1107,2	1112,9	1119,7	1127,9	1137,3	1147,1	1157,4	1168,2	1179,5	1191,3	1203,6	1217,4
1,3	1468,2	1337,9	1336,6	1312,6	1307,2	1307,2	1290,5	1290,5	1290,5	1304,5	1310,2	1316,8	1324,4	1333,1	1342,8	1353,5	1364,6	1376,1	1388,1	1400,6	1414,6

Verluste der Lüfter

Last	OHAIH	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%			
0,2	0	13,08	10,44	29,43	23,49	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	13,75	16,06
0,3	0	13,08	10,44	29,43	23,49	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	13,75	16,06
0,4	0	13,08	10,44	29,43	23,49	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	13,75	16,06
0,5	0	13,08	10,44	29,43	23,49	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	13,75	16,06
0,6	0	13,08	10,44	29,43	23,49	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	13,75	16,06
0,7	0	13,08	10,44	29,43	23,49	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	13,75	16,06
0,8	0	13,08	10,44	29,43	23,49	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	13,75	16,06
0,9	0	13,08	10,44	29,43	23,49	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	13,75	16,06
1	0	13,08	10,44	29,43	23,49	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	13,75	16,06
1,1	0	13,08	10,44	29,43	23,49	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	13,75	16,06
1,2	0	13,08	10,44	29,43	23,49	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	13,75	16,06
1,3	0	13,08	10,44	29,43	23,49	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	13,75	16,06

		Gesamtschall																		
Last	OHAF	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%		
0,2	90	103,23	93,37	106,64	95,61	90,08	90,13	90,2	90,3	90,42	90,58	90,78	91,02	91,3	91,63	92	92,41	92,86	93,34	93,85
0,3	90,02	103,23	93,38	106,64	95,61	90,1	90,15	90,22	90,31	90,44	90,59	90,79	91,03	91,31	91,64	92,01	92,42	92,86	93,35	93,86
0,4	90,06	103,23	93,39	106,64	95,62	90,13	90,18	90,25	90,35	90,47	90,63	90,82	91,06	91,34	91,66	92,03	92,44	92,88	93,36	93,87
0,5	90,13	103,24	93,43	106,64	95,65	90,21	90,26	90,33	90,42	90,54	90,7	90,89	91,12	91,4	91,72	92,08	92,48	92,93	93,4	93,91
0,6	90,27	103,25	93,5	106,64	95,69	90,35	90,4	90,46	90,55	90,67	90,82	91,01	91,23	91,5	91,82	92,17	92,57	93	93,47	93,97
0,7	90,49	103,26	93,6	106,65	95,75	90,56	90,61	90,67	90,76	90,87	91,01	91,19	91,41	91,67	91,97	92,32	92,7	93,12	93,57	94,06
0,8	90,81	103,27	93,76	106,66	95,85	90,88	90,92	90,98	91,06	91,16	91,3	91,47	91,67	91,91	92,2	92,53	92,89	93,29	93,73	94,2
0,9	91,23	103,3	93,88	106,67	95,98	91,29	91,33	91,39	91,46	91,56	91,68	91,83	92,02	92,25	92,51	92,82	93,16	93,54	93,95	94,4
1	91,76	103,33	94,27	106,68	96,17	91,82	91,85	91,9	91,96	92,05	92,16	92,3	92,47	92,67	92,91	93,19	93,51	93,86	94,25	94,67
1,1	92,39	103,38	94,63	106,71	96,41	92,44	92,47	92,51	92,56	92,64	92,73	92,86	93,01	93,19	93,4	93,65	93,93	94,25	94,61	95
1,2	93,09	103,44	95,07	106,73	96,7	93,13	93,16	93,19	93,24	93,31	93,39	93,49	93,62	93,78	93,97	94,19	94,44	94,73	95,05	95,4
1,3	93,86	103,52	95,57	106,77	97,05	93,89	93,91	93,94	93,98	94,04	94,11	94,2	94,31	94,44	94,6	94,79	95,01	95,27	95,55	95,86

		Schall der Lüfter																		
Last	OHAF	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%		
0,2	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,3	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,4	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,5	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,6	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,7	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,8	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,9	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
1	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
1,1	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
1,2	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
1,3	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54

Tabelle 5.9: Transformatorzustände bei einer Umgebungstemperatur von 25°C

Umgebungstemperatur = 30°C															
Drehzahl	470	487	501	514	526	538	548	558	567	575	584	592	599	606	613
VOLUMENSTROM	2,52	2,94	3,36	3,78	4,2	4,62	5,04	5,46	5,88	6,3	6,72	7,14	7,56	7,98	8,4

Last	SW-Wichtung: Hot Spot Temperatur																
	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0,2	14,09	9,53	9,54	9,24	9,24	17,03	17,03	17,03	17,03	17,03	17,03	17,03	17,03	17,03	17,03	17,03	17,03
0,3	23,48	17,56	17,58	17,58	17,58	22,66	22,66	22,66	22,66	22,66	22,66	22,66	22,66	22,66	22,66	22,66	22,66
0,4	32,73	21,72	21,84	19,15	19,15	26,93	26,93	26,93	26,93	26,93	26,93	26,93	26,93	26,93	26,93	26,93	26,93
0,5	42,85	28,82	28,95	25,63	25,63	31,98	31,98	31,98	31,98	31,98	31,98	31,98	31,98	31,98	31,98	31,98	31,98
0,6	54,02	36,63	36,8	31,52	31,61	38,74	37,54	36,58	35,8	35,43	34,57	34,07	33,25	32,91	32,59	32,31	32,05
0,7	66,45	44,95	45,15	38,73	38,84	47,72	46,21	45,01	44,03	43,2	42,5	41,88	41,35	40,87	40,44	40,05	39,7
0,8	80,15	53,9	54,15	46,44	46,56	57,47	55,6	54,12	52,92	51,91	51,04	50,29	49,63	49,05	48,53	48,04	47,62
0,9	95,21	63,44	63,73	54,59	54,72	67,98	65,69	63,88	62,4	61,47	60,42	59,21	58,41	57,7	57,07	56,5	55,98
1	111,64	73,61	73,95	63,47	63,32	79,3	76,51	74,32	72,54	71,05	69,79	68,7	67,73	66,89	66,13	65,45	64,82
1,1	129,51	84,4	84,8	72,21	72,38	91,44	88,1	85,47	83,34	81,56	80,05	78,75	77,61	76,6	75,7	74,89	74,15
1,2	148,68	95,85	96,3	81,71	81,9	104,45	100,47	97,35	94,82	92,72	90,93	89,39	88,05	86,86	85,8	84,85	83,9
1,3	169,8	107,94	108,47	91,68	91,89	118,38	113,67	109,98	107	104,53	102,44	100,63	99,06	97,67	96,43	95,32	94,3

Last	PW-Wichtung: Hot Spot Temperatur																
	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0,2	14,66	10,06	10,07	9,75	9,75	10,08	10,01	9,96	9,92	9,89	9,86	9,84	9,83	9,81	9,8	9,79	9,77
0,3	24,27	18,3	18,33	17,74	17,74	17,75	17,74	17,75	17,74	17,75	17,74	17,75	17,74	17,75	17,74	17,75	17,74
0,4	33,75	22,72	22,83	20,09	20,13	27,91	23,14	22,56	22,07	21,66	21,31	21	20,82	20,66	20,54	20,43	20,34
0,5	44,14	30,13	30,26	26,88	26,92	33,24	30,76	30	29,38	28,86	28,41	28,02	27,67	27,37	27,09	26,84	26,61
0,6	55,55	38,22	38,38	33,13	33,21	40,32	39,12	38,17	37,38	36,73	36,16	35,67	35,24	34,85	34,5	34,19	33,91
0,7	68,26	46,82	47,02	40,63	40,73	49,58	48,08	46,88	45,9	45,08	44,38	43,77	43,23	42,75	42,32	41,94	41,59
0,8	82,27	56,08	56,33	48,66	48,77	59,64	57,78	56,3	55,1	54,09	53,23	52,48	51,82	51,24	50,72	50,25	49,81
0,9	97,65	65,95	66,24	57,41	57,25	70,47	68,49	66,39	64,91	63,68	62,64	61,73	60,93	60,22	59,59	59,02	58,51
1	114,41	76,46	76,8	66,04	66,19	82,13	79,36	77,17	75,39	73,91	72,65	71,56	70,6	69,75	69	68,31	67,69
1,1	132,61	87,61	88	75,48	75,65	94,63	91,29	88,67	86,54	84,77	83,26	81,96	80,82	79,82	78,92	78,11	77,38
1,2	152,32	99,44	99,89	85,35	85,54	108	104,02	100,94	98,41	96,32	94,54	93,01	91,67	90,48	89,43	88,48	87,62
1,3	173,68	111,9	112,43	95,7	95,9	122,3	117,61	113,94	110,97	108,5	106,42	104,62	103,05	101,67	100,44	99,33	98,33

Last	SW-Wichtung: Top Oil Temperatur																
	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0,2	11,29	6,66	6,67	6,36	6,37	6,68	6,61	6,56	6,53	6,49	6,47	6,45	6,44	6,43	6,41	6,4	6,39
0,3	18,64	12,79	12,81	12,24	12,25	18,01	10,34	10,14	10	9,89	9,81	9,74	9,68	9,64	9,6	9,56	9,53
0,4	26,13	14,76	14,88	12,1	12,13	20,18	15,21	14,6	14,09	13,66	13,29	12,97	12,65	12,33	12,03	11,73	11,43
0,5	34,21	19,67	19,81	16,35	16,39	22,98	20,33	19,54	18,89	18,34	17,86	17,45	17,09	16,77	16,47	16,21	15,97
0,6	43,28	25,22	25,39	19,84	19,93	27,43	26,17	25,17	24,34	23,65	23,05	22,53	22,08	21,67	21,3	20,97	20,67
0,7	53,55	31,22	31,43	24,66	24,77	34,13	32,54	31,28	30,25	29,38	28,64	27,99	27,42	26,92	26,46	26,05	25,68
0,8	65,04	37,8	38,06	29,92	30,04	41,54	39,58	38,03	36,76	35,7	34,79	34	33,3	32,68	32,13	31,62	31,17
0,9	77,83	44,92	45,23	35,57	35,71	49,67	47,28	45,38	43,83	42,54	41,43	40,47	39,62	38,87	38,21	37,6	37,05
1	91,92	52,62	52,98	41,61	41,78	58,56	55,66	53,37	51,5	49,94	48,61	47,46	46,45	45,55	44,75	44,02	43,37
1,1	107,34	60,9	61,31	48,07	48,25	68,23	64,75	62,01	59,78	57,92	56,34	54,97	53,77	52,71	51,76	50,9	50,13
1,2	124,28	69,77	70,24	54,93	55,13	78,7	74,57	71,33	68,69	66,5	64,63	63,02	61,61	60,36	59,25	58,25	57,34
1,3	142,58	79,23	79,77	62,21	62,43	90,02	85,46	81,34	78,25	75,68	73,49	71,61	69,96	68,51	67,21	66,05	64,93

Last	PVW-Wichtung: Top Oil Temperatur																
	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0,2	11,84	7,16	7,48	6,85	6,85	7,06	7,02	6,99	6,96	6,94	6,93	6,91	6,9	6,87	6,87	6,86	6,86
0,3	19,61	13,5	13,52	12,92	12,93	10,63	10,75	10,63	10,54	10,47	10,41	10,36	10,32	10,28	10,25	10,22	10,17
0,4	27,41	15,72	15,83	13	13,04	21,12	16,16	15,55	14,62	14,25	13,93	13,74	13,59	13,46	13,35	13,17	13,03
0,5	35,46	20,94	21,08	17,6	17,56	24,19	21,59	20,81	19,61	19,14	18,73	18,04	17,75	17,49	17,25	17,03	16,64
0,6	44,76	26,76	26,93	21,4	21,49	28,96	27,71	26,71	25,89	25,19	24,6	24,08	23,63	23,22	22,86	22,53	21,7
0,7	55,31	33,05	33,26	26,51	26,62	35,94	34,36	33,41	32,08	31,21	30,47	29,83	29,27	28,76	28,31	27,9	26,58
0,8	67,42	39,94	40,2	32,1	32,22	43,67	41,72	40,47	38,91	37,64	36,93	36,45	35,45	34,83	34,28	33,53	32,18
0,9	80,23	47,4	47,7	38,07	38,21	52,14	49,75	48,75	46,31	45,02	44,29	42,95	42,41	41,37	40,7	40,1	38,16
1	94,67	55,45	55,81	44,37	44,63	61,38	58,48	56,2	54,33	52,78	51,45	50,3	47,6	46,88	46,22	45,62	44,57
1,1	110,47	64,09	64,51	51,34	51,52	71,41	67,94	65,21	62,98	61,42	59,55	58,18	56,98	54,12	53,35	52,69	51,44
1,2	127,7	73,37	73,84	58,59	58,79	82,26	78,13	74,93	72,3	70,11	68,25	66,65	65,24	64	62,89	61,89	60,16
1,3	146,4	83,22	83,76	66,49	66,27	93,98	89,13	85,33	82,24	79,68	77,51	75,63	73,99	72,54	71,25	70,09	68,38

Last	Gesamtverluste																
	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0,2	104,8	117,6	115,0	134,0	128,0	105,0	105,2	105,5	106,0	106,5	107,2	108,9	110,0	111,4	112,8	114,4	120,6
0,3	137,0	149,3	146,6	159,6	159,6	137,4	136,5	137,2	137,7	138,4	139,3	140,1	141,2	142,6	144,0	145,6	151,8
0,4	183,6	193,7	191,1	209,4	203,5	182,6	181,4	181,5	181,8	182,3	182,8	184,5	185,6	186,9	188,3	189,9	196,1
0,5	245,5	252,8	250,2	268,0	262,0	241,6	240,6	241,2	240,8	241,2	241,6	242,3	244,0	245,2	246,5	248,1	254,0
0,6	324,2	326,9	324,4	340,1	334,2	315,6	315,1	314,8	314,8	314,9	315,2	316,4	317,3	318,4	319,6	321,1	326,8
0,7	421,0	417,0	414,5	428,1	422,3	406,6	405,6	404,9	404,6	404,5	404,9	405,3	406,0	407,0	408,1	409,4	414,8
0,8	537,6	524,0	521,6	532,3	526,4	515,1	513,3	512,1	511,3	510,7	510,5	510,7	511,2	511,9	512,8	514,0	519,0
0,9	675,7	648,9	646,7	653,3	647,6	642,2	639,4	637,4	635,9	634,8	633,7	633,5	633,7	634,4	634,8	635,7	640,1
1,0	837,5	793,1	791,0	792,3	786,6	789,4	785,2	782,1	779,7	777,8	775,6	774,9	774,6	774,6	774,9	775,6	779,1
1,1	1024,8	957,7	955,8	950,3	944,7	958,1	952,1	947,5	943,9	941,1	936,8	937,2	935,9	935,0	934,6	934,6	937,1
1,2	1240,0	1144,0	1142,4	1128,2	1122,7	1149,8	1141,5	1135,0	1129,9	1125,8	1122,5	1119,9	1117,8	1116,2	1115,1	1114,3	1115,1
1,3	1485,3	1353,5	1352,2	1327,3	1321,9	1366,2	1354,9	1346,1	1339,1	1333,4	1328,7	1325,0	1321,8	1317,3	1315,8	1314,8	1314,3

Last	Verluste der Lüfter																
	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0,2	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9
0,3	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9
0,4	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9
0,5	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9
0,6	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9
0,7	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9
0,8	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9
0,9	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9
1	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9
1,1	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9
1,2	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9
1,3	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9

		Gesamttschall																			
Last	OHAIH	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%			
0,2	90	103,23	93,37	106,64	95,61	90,48	90,13	90,42	90,58	90,78	91,02	91,3	91,63	92	92,41	92,86	93,34	93,85			
0,3	90,02	103,23	93,38	106,64	95,61	90,1	90,15	90,22	90,31	90,44	90,59	90,79	91,03	91,31	91,64	92,01	92,42	92,86	93,36		
0,4	90,06	103,23	93,39	106,64	95,62	90,13	90,18	90,25	90,35	90,47	90,63	90,82	91,06	91,34	91,66	92,03	92,44	92,88	93,36		
0,5	90,13	103,24	93,43	106,64	95,65	90,21	90,26	90,33	90,42	90,54	90,7	90,89	91,12	91,4	91,72	92,08	92,48	92,93	93,4		
0,6	90,27	103,25	93,5	106,64	95,69	90,35	90,4	90,46	90,55	90,67	90,82	91,01	91,23	91,5	91,82	92,17	92,57	93	93,47		
0,7	90,49	103,26	93,6	106,65	95,75	90,56	90,61	90,67	90,76	90,87	91,01	91,19	91,41	91,67	91,97	92,32	92,7	93,12	93,57		
0,8	90,81	103,27	93,76	106,66	95,85	90,88	90,92	90,98	91,06	91,16	91,3	91,47	91,67	91,91	92,2	92,53	92,89	93,29	93,73		
0,9	91,23	103,3	93,98	106,67	95,98	91,29	91,33	91,39	91,46	91,56	91,68	91,83	92,02	92,25	92,51	92,82	93,16	93,54	93,95		
1	91,76	103,33	94,27	106,68	96,17	91,82	91,85	91,9	91,96	92,05	92,16	92,3	92,47	92,67	92,91	93,19	93,51	93,86	94,25		
1,1	92,39	103,38	94,63	106,71	96,41	92,44	92,47	92,51	92,56	92,64	92,73	92,86	93,01	93,19	93,4	93,65	93,93	94,25	94,61		
1,2	93,09	103,44	95,07	106,73	96,7	93,13	93,16	93,19	93,24	93,31	93,39	93,49	93,62	93,78	93,97	94,19	94,44	94,73	95,05		
1,3	93,86	103,52	95,57	106,77	97,05	93,89	93,91	93,94	93,98	94,04	94,11	94,2	94,31	94,44	94,6	94,79	95,01	95,27	95,55		

		Schall der Lüfter																			
Last	OHAIH	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%			
0,2	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63		
0,3	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63		
0,4	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63		
0,5	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63		
0,6	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63		
0,7	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63		
0,8	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63		
0,9	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63		
1	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63		
1,1	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63		
1,2	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63		
1,3	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63		

Tabelle 5.10: Transformatorzustände bei einer Umgebungstemperatur von 30°C

Umgebungstemperatur = 35 °C																
Drehzahl		470	487	501	514	526	538	548	558	567	575	584	592	599	606	613
VOLUMENSTROM		2,52	2,94	3,36	3,78	4,2	4,62	5,04	5,46	5,88	6,3	6,72	7,14	7,56	7,98	8,4
0,2	14,32	9,27	9,28	8,95	8,95	9,3	9,23	9,17	9,13	9,1	9,07	9,05	9,03	9,01	8,99	8,97
0,3	23,62	17,12	17,14	16,54	16,55	22,08	22,1	21,49	21,48	21,42	21,32	21,28	21,26	21,24	21,22	21,2
0,4	32,88	21,66	21,77	18,76	26,35	22,1	21,49	20,99	20,56	20,2	19,88	19,6	19,35	19,21	19,1	18,91
0,5	43,11	28,78	28,92	25,13	25,17	31,51	29,43	28,66	28,01	27,47	27	26,6	26,24	25,92	25,64	25,42
0,6	54,38	36,62	36,79	31,34	31,43	38,79	37,56	36,57	35,76	35,07	34,49	33,98	33,53	33,13	32,77	32,45
0,7	66,96	45,01	45,21	38,57	38,68	47,87	46,31	45,07	44,06	43,2	42,47	41,84	41,27	40,78	40,35	39,93
0,8	80,85	54,02	54,27	46,31	46,44	57,71	55,78	54,25	53	51,95	51,06	50,28	49	48,46	47,97	47,52
0,9	96,12	63,66	63,96	54,49	54,63	68,35	65,99	64,12	62,59	61,32	60,23	59,29	58,46	57,73	57,07	56,48
1	112,79	73,95	74,29	63,45	63,3	79,83	76,96	74,69	72,85	71,31	70	68,87	67,88	67	66,21	65,51
1,1	130,93	84,88	85,28	72,27	72,44	92,15	88,7	85,99	83,79	81,95	80,39	79,04	77,87	76,82	75,89	75,05
1,2	150,58	96,47	96,94	81,87	82,07	105,37	101,26	98,04	95,42	93,26	91,41	89,82	88,43	87,2	86,11	85,12
1,3	171,82	108,74	109,28	91,95	92,17	119,51	114,66	110,86	107,79	105,24	103,08	101,21	99,59	98,15	96,87	95,72

PW-Wichtung: Hot Spot Temperatur																	
Last	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0,2	14,88	9,79	9,8	9,45	9,45	9,82	9,74	9,68	9,64	9,6	9,58	9,55	9,53	9,51	9,5	9,49	9,46
0,3	24,4	17,85	17,87	17,25	22,76	15,74	15,5	15,32	15,19	15,08	15	14,93	14,87	14,82	14,78	14,74	14,71
0,4	33,93	22,62	22,74	19,69	19,72	27,32	23,07	22,48	21,96	21,53	21,17	20,85	20,58	20,33	20,16	20,06	19,95
0,5	44,38	30,07	30,21	26,37	26,42	32,76	30,72	29,94	29,3	28,76	28,3	27,89	27,54	27,22	26,93	26,68	26,44
0,6	55,9	38,18	38,36	32,92	33,01	40,35	39,12	38,13	37,32	36,64	36,06	35,55	35,1	34,71	34,35	34,02	33,73
0,7	68,76	46,85	47,06	40,44	40,55	49,71	48,45	46,92	45,91	45,06	44,33	43,7	43,14	42,64	42,21	41,8	41,43
0,8	82,96	56,18	56,43	48,49	48,62	59,86	57,93	56,41	55,16	54,12	53,23	52,45	51,78	51,17	50,63	50,14	49,7
0,9	98,54	66,15	66,41	57	57,14	70,83	68,47	66,61	65,09	63,81	62,73	61,79	60,96	60,23	59,58	58,99	58,45
1	115,54	76,78	77,13	66	66,16	82,65	79,78	77,53	75,69	74,15	72,84	71,71	70,72	69,85	69,06	68,36	67,72
1,1	134,01	88,06	88,47	75,48	75,66	95,32	91,88	89,17	86,98	85,14	83,59	82,24	81,07	80,03	79,1	78,26	77,5
1,2	154,01	100,01	100,48	85,49	85,68	108,89	104,79	101,61	98,97	96,84	95	93,41	92,03	90,8	89,71	88,73	87,84
1,3	175,58	112,68	113,22	95,95	96,16	123,42	118,58	114,79	111,73	109,19	107,03	105,18	103,56	102,13	100,85	99,71	98,67

SW-Wicklung: Top Oil Temperatur																	
Last	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%
0,2	11,6	6,48	6,49	6,15	6,16	6,51	6,44	6,4	6,38	6,34	6,3	6,28	6,26	6,24	6,22	6,21	6,2
0,3	19,1	12,46	12,48	11,87	11,88	17,53	10,21	9,98	9,81	9,69	9,59	9,51	9,44	9,39	9,34	9,27	9,24
0,4	26,42	14,87	14,99	11,85	11,88	19,73	15,33	14,7	14,18	13,74	13,36	13,03	12,74	12,49	12,35	12,23	12,12
0,5	34,62	19,83	19,98	16,05	16,09	22,68	20,51	19,71	19,03	18,47	17,99	17,56	17,19	16,86	16,56	16,29	16,04
0,6	43,8	25,43	25,61	19,91	20	27,69	26,41	25,38	24,53	23,82	23,2	22,68	22,2	21,79	21,41	21,07	20,78
0,7	54,22	31,51	31,73	24,76	24,88	34,5	32,87	31,58	30,52	29,63	28,87	28,2	27,61	27,09	26,63	26,2	25,81
0,8	65,9	38,16	38,42	30,08	30,21	42,01	40	38,4	37,1	36	35,07	34,25	33,54	32,9	32,33	31,82	31,35
0,9	78,89	45,39	45,7	35,77	35,92	50,28	47,81	45,87	44,28	42,94	41,8	40,81	39,94	39,18	38,49	37,86	37,3
1	93,21	53,21	53,57	41,89	42,05	59,32	56,34	53,99	52,07	50,46	49,09	47,9	46,86	45,94	45,12	44,37	43,7
1,1	108,92	61,62	62,04	48,42	48,61	69,16	65,59	62,77	60,48	58,57	56,94	55,53	54,3	53,21	52,23	51,35	50,55
1,2	126,07	70,63	71,11	55,39	55,59	79,83	75,59	72,26	69,54	67,29	65,37	63,71	62,28	60,98	59,83	58,8	57,81
1,3	144,71	80,26	80,81	62,78	63	91,36	86,36	82,44	79,26	76,62	74,38	72,44	70,75	69,26	67,92	66,72	65,63

PW-Wichtung: Top Oil Temperatur

Last	OH/AN	OH/AF1	OH/AF2	OH/AF30%	OH/AF35%	OH/AF40%	OH/AF45%	OH/AF50%	OH/AF55%	OH/AF60%	OH/AF65%	OH/AF70%	OH/AF75%	OH/AF80%	OH/AF85%	OH/AF90%	OH/AF95%	OH/AF100%
0,2	12,13	6,97	6,39	6,62	6,63	7,01	6,93	6,82	6,79	6,76	6,73	6,72	6,68	6,67	6,66	6,65	6,64	6,63
0,3	19,84	13,15	13,18	12,53	12,54	18,18	10,38	10,38	10,42	10,31	10,32	10,16	10,1	10,05	10,01	9,97	9,93	9,88
0,4	27,42	15,8	15,92	12,77	12,8	20,66	16,25	15,41	14,67	14,29	13,97	13,68	13,42	13,15	13,04	12,94	12,93	12,8
0,5	35,04	21,08	21,22	17,25	17,29	23,88	21,75	20,28	19,72	19,24	18,81	18,44	18,11	17,82	17,55	17,3	17,06	16,67
0,6	46,27	26,95	27,13	21,44	21,54	29,21	27,92	26,9	25,34	24,73	24,2	23,73	23,32	22,94	22,6	22,3	22,01	21,51
0,7	55,97	33,31	33,53	26,59	26,71	36,29	34,67	33,38	32,32	31,44	30,67	29,43	28,91	28,45	28,02	27,64	27,29	26,67
0,8	67,96	40,28	40,54	32,22	32,35	44,12	42,41	40,52	39,22	38,13	37,19	36,38	35,04	34,47	33,95	33,49	33,06	32,3
0,9	81,27	47,85	48,16	38,25	38,4	52,72	50,27	48,32	46,74	45,4	44,27	43,28	42,41	41,65	40,96	40,34	39,75	38,34
1	95,94	56,02	56,38	44,73	44,89	62,12	59,14	56,8	54,88	53,28	51,91	50,73	49,69	48,77	47,95	47,21	46,53	44,82
1,1	112,01	64,8	65,22	51,63	51,82	72,33	68,76	65,95	63,67	61,75	60,13	58,73	57,5	56,41	55,45	53,75	53,02	51,74
1,2	129,51	74,18	74,67	59,02	59,22	83,37	79,13	75,83	73,1	70,88	68,97	67,31	65,87	64,59	62,42	61,48	60,63	59,13
1,3	148,52	84,23	84,78	66,81	67,03	95,3	90,32	86,41	83,24	80,61	78,37	76,44	74,75	73,26	71,93	70,74	69,65	68,92

Gesamtverluste

Last	OH/AN	OH/AF1	OH/AF2	OH/AF30%	OH/AF35%	OH/AF40%	OH/AF45%	OH/AF50%	OH/AF55%	OH/AF60%	OH/AF65%	OH/AF70%	OH/AF75%	OH/AF80%	OH/AF85%	OH/AF90%	OH/AF95%	OH/AF100%	
0,2	105,2	117,9	115,3	134,3	128,3	105,3	105,5	105,8	106,3	106,8	107,5	108,4	109,2	110,3	111,7	113,4	114,7	116,5	120,9
0,3	137,8	149,9	147,3	166,2	160,3	138,1	137,1	137,5	137,9	138,4	139,1	139,9	140,8	141,9	143,2	144,7	146,3	148,1	152,5
0,4	184,9	195,0	192,4	210,6	204,7	183,8	182,7	182,8	183,1	183,4	184,1	184,9	185,7	186,8	188,1	189,5	191,1	192,9	197,3
0,5	247,6	254,9	252,3	269,8	263,9	243,5	242,7	242,9	243,2	243,7	244,4	245,1	246,1	247,3	248,6	250,1	251,8	253,8	256,0
0,6	327,3	329,9	327,4	343,1	337,2	318,6	318,1	317,8	317,9	318,2	318,8	319,4	320,2	321,3	322,6	324,0	325,6	327,6	329,7
0,7	425,3	421,1	418,6	432,2	426,3	410,8	409,7	409,1	408,7	408,5	408,6	409,0	409,4	410,1	411,0	412,1	413,5	414,9	418,9
0,8	543,3	529,4	527,0	537,5	531,7	520,6	518,8	517,6	516,7	516,1	515,9	516,0	516,5	517,2	518,1	519,3	520,6	522,3	524,3
1,0	846,9	801,9	795,8	800,8	795,1	798,3	794,1	790,9	788,4	786,6	785,1	783,2	783,5	783,1	783,2	784,4	784,9	786,1	787,6
1,1	1036,5	968,5	966,6	960,6	955,0	969,1	963,0	958,3	954,7	951,8	949,5	947,8	946,4	945,1	944,9	945,0	945,4	946,3	947,4
1,2	1254,2	1157,1	1155,5	1146,7	1145,2	1163,2	1154,7	1148,2	1142,9	1138,8	1135,4	1132,7	1130,5	1128,9	1127,7	1126,9	1126,6	1126,8	1127,6
1,3	1502,5	1369,1	1367,8	1342,2	1336,8	1382,3	1370,8	1361,9	1354,7	1348,9	1344,1	1340,3	1337,0	1334,4	1332,4	1330,9	1329,8	1328,9	1329,1

Verluste der Lüfter

Last	OH/AN	OH/AF1	OH/AF2	OH/AF30%	OH/AF35%	OH/AF40%	OH/AF45%	OH/AF50%	OH/AF55%	OH/AF60%	OH/AF65%	OH/AF70%	OH/AF75%	OH/AF80%	OH/AF85%	OH/AF90%	OH/AF95%	OH/AF100%	
0,2	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	16,06
0,3	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	16,06
0,4	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	16,06
0,5	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	16,06
0,6	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	16,06
0,7	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	16,06
0,8	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	16,06
0,9	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	16,06
1	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	16,06
1,1	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	16,06
1,2	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	16,06
1,3	0	13,08	10,44	29,43	23,49	0,44	0,66	0,99	1,43	1,98	2,64	3,52	4,4	5,5	6,82	8,25	9,9	11,66	16,06

		Gesamtgeschall																		
Last	OH/AN	OH/AF1	OH/AF2	OH/AF30%	OH/AF35%	OH/AF40%	OH/AF45%	OH/AF50%	OH/AF55%	OH/AF60%	OH/AF65%	OH/AF70%	OH/AF75%	OH/AF80%	OH/AF85%	OH/AF90%	OH/AF95%	OH/AF100%		
0,2	90	103,23	93,37	106,64	95,61	90,08	90,13	90,2	90,3	90,42	90,58	90,78	91,02	91,3	91,63	92	92,41	92,86	93,34	93,85
0,3	90,02	103,23	93,38	106,64	95,61	90,1	90,15	90,22	90,31	90,41	90,59	90,79	91,03	91,31	91,64	92,01	92,42	92,86	93,35	93,86
0,4	90,06	103,23	93,39	106,64	95,62	90,13	90,18	90,25	90,35	90,47	90,63	90,82	91,06	91,34	91,66	92,03	92,44	92,88	93,36	93,87
0,5	90,13	103,24	93,43	106,64	95,65	90,21	90,26	90,33	90,42	90,54	90,7	90,89	91,12	91,4	91,72	92,08	92,48	92,93	93,4	93,91
0,6	90,27	103,25	93,5	106,64	95,69	90,35	90,4	90,46	90,55	90,67	90,82	91,01	91,23	91,5	91,82	92,17	92,57	93	93,47	93,97
0,7	90,49	103,26	93,6	106,65	95,75	90,56	90,61	90,67	90,76	90,87	91,01	91,19	91,41	91,67	91,97	92,32	92,7	93,12	93,57	94,06
0,8	90,81	103,27	93,76	106,66	95,85	90,88	90,92	91,08	91,16	91,3	91,47	91,67	91,91	92,2	92,53	92,89	93,29	93,73	94,2	
0,9	91,23	103,3	93,98	106,67	95,98	91,29	91,33	91,39	91,46	91,56	91,68	91,83	92,02	92,25	92,51	92,82	93,16	93,54	94,4	
1	91,76	103,33	94,27	106,68	96,17	91,82	91,85	91,9	91,96	92,05	92,16	92,3	92,47	92,67	92,91	93,19	93,51	93,86	94,25	94,67
1,1	92,39	103,38	94,63	106,71	96,41	92,44	92,47	92,51	92,56	92,64	92,73	92,86	93,01	93,19	93,4	93,65	93,93	94,25	94,61	95
1,2	93,09	103,44	95,07	106,73	96,7	93,13	93,16	93,19	93,24	93,31	93,39	93,49	93,62	93,78	93,97	94,19	94,44	94,73	95,05	95,4
1,3	93,86	103,52	95,57	106,77	97,05	93,89	93,91	93,94	93,98	94,04	94,11	94,2	94,31	94,44	94,6	94,79	95,01	95,27	95,55	95,86

		Schall der Lüfter																		
Last	OH/AN	OH/AF1	OH/AF2	OH/AF30%	OH/AF35%	OH/AF40%	OH/AF45%	OH/AF50%	OH/AF55%	OH/AF60%	OH/AF65%	OH/AF70%	OH/AF75%	OH/AF80%	OH/AF85%	OH/AF90%	OH/AF95%	OH/AF100%		
0,2	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,3	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,4	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,5	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,6	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,7	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,8	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
0,9	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
1	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
1,1	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
1,2	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54
1,3	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54

Tabelle 5.11: Transformatorzustände bei einer Umgebungstemperatur von 35°C

Umgebungstemperatur = 40 °C

Drehzahl	470	487	501	514	526	538	548	558	567	575	584	592	599	606	613
VOLUMENSTROM	2,52	2,94	3,36	3,78	4,2	4,62	5,04	5,46	5,88	6,3	6,72	7,14	7,56	7,98	8,4

Last	SW-Wichtung: Hot Spot Temperatur																	
	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%	
0,2	14,57	9,05	9,07	8,71	8,71	9,11	9,02	8,96	8,91	8,87	8,84	8,82	8,8	8,77	8,74	8,73	8,72	8,71
0,3	23,79	16,76	16,79	16,12	16,12	21,58	14,94	14,54	14,31	14,16	14,05	13,96	13,88	13,82	13,77	13,68	13,64	13,59
0,4	33,08	21,62	21,74	18,38	18,42	25,86	22,07	21,45	20,94	20,43	19,8	19,52	19,26	19,03	18,82	18,7	18,59	18,5
0,5	43,38	28,9	29,04	24,87	24,91	34,15	29,58	28,77	27,99	27,43	26,95	26,54	26,16	25,84	25,54	25,28	25,03	24,82
0,6	54,78	36,67	36,85	31,22	31,31	38,91	37,64	36,62	35,79	35,07	34,47	33,94	33,48	33,07	32,7	32,36	32,06	31,78
0,7	67,51	45,11	45,32	38,48	38,59	48,06	46,46	45,18	44,14	43,26	42,5	41,85	41,27	40,77	40,3	39,89	39,51	39,17
0,8	81,58	54,19	54,45	46,24	46,37	58	56,01	54,44	53,15	52,07	51,15	50,34	49,64	49,01	48,45	47,95	47,47	47,07
0,9	97,06	63,94	64,24	54,47	54,62	68,78	66,34	64,42	62,84	61,52	60,4	59,43	58,57	57,82	57,14	56,53	55,97	55,46
1	113,97	74,34	74,7	63,2	63,36	80,42	77,46	75,12	73,22	71,64	70,28	69,11	68,09	67,18	66,37	65,64	64,98	64,37
1,1	132,38	85,41	85,83	72,41	72,59	92,92	89,37	86,57	84,3	82,41	80,8	79,4	78,19	77,11	76,15	75,28	74,5	73,78
1,2	152,32	97,15	97,64	82,11	82,31	106,34	102,11	98,79	96,09	93,85	91,85	90,32	88,88	87,61	86,48	85,47	84,54	83,7
1,3	173,88	109,6	110,15	92,3	92,52	120,71	115,71	111,8	108,64	106,01	103,78	101,86	100,18	98,7	97,38	96,19	95,12	94,14

Last	PW-Wichtung: Hot Spot Temperatur																	
	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%	
0,2	15,11	9,56	9,58	9,19	9,2	9,62	9,52	9,46	9,41	9,37	9,34	9,31	9,29	9,27	9,25	9,23	9,22	9,21
0,3	24,55	17,48	17,54	16,8	16,84	22,24	15,72	15,28	15,08	14,92	14,8	14,7	14,62	14,55	14,49	14,44	14,36	14,33
0,4	34,11	22,62	22,74	19,39	19,43	26,83	23,08	22,45	21,93	21,49	21,11	20,78	20,48	20,22	19,99	19,77	19,58	19,49
0,5	44,63	30,19	30,33	26,14	26,18	32,41	30,87	30,06	29,26	28,7	28,22	27,81	27,44	27,11	26,82	26,55	26,31	26,1
0,6	56,28	38,21	38,39	32,78	32,87	40,45	39,18	38,17	37,33	36,62	36,02	35,5	35,04	34,62	34,25	33,92	33,61	33,34
0,7	69,29	46,94	47,15	40,33	40,44	49,89	48,29	47,01	45,97	45,09	44,34	43,69	43,11	42,61	42,15	41,73	41,36	41,01
0,8	83,67	56,34	56,59	48,4	48,53	60,14	58,15	56,58	55,3	54,22	53,3	52,49	51,79	51,17	50,61	50,1	49,64	49,23
0,9	99,47	66,41	66,71	56,97	57,11	71,24	68,81	66,89	65,32	64	62,88	61,91	61,06	60,3	59,63	59,02	58,46	57,95
1	116,71	77,16	77,52	66,04	66,2	83,22	80,26	77,94	76,04	74,46	73,11	71,94	70,92	70,01	69,2	68,47	67,81	67,21
1,1	135,45	88,58	89	75,6	75,78	96,07	92,53	89,74	87,47	85,58	83,88	82,59	81,37	80,3	79,34	78,47	77,69	76,91
1,2	155,73	100,68	101,17	85,7	85,9	109,85	105,63	102,34	99,63	97,39	95,49	93,89	92,46	91,16	90,03	89,05	88,13	87,29
1,3	177,63	113,52	114,07	96,28	96,49	124,59	119,61	115,71	112,56	109,93	107,71	105,8	104,13	102,65	101,34	100,15	99,08	98,11

Last	SW-Wichtung: Top Oil Temperatur																	
	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%	
0,2	11,92	6,33	6,35	5,99	5,99	6,39	6,3	6,24	6,19	6,15	6,12	6,1	6,08	6,06	6,04	6,02	6,01	6
0,3	19,36	12,2	12,23	11,55	11,56	17,12	10,33	9,88	9,69	9,54	9,43	9,33	9,26	9,19	9,14	9,09	9,05	9,02
0,4	26,74	14,99	15,11	11,65	11,7	19,36	15,45	14,81	14,28	13,84	13,42	13,12	12,82	12,55	12,32	12,1	11,98	11,87
0,5	35,02	20,13	20,28	15,97	16,04	22,47	20,83	20	19,19	18,62	18,12	17,69	17,34	16,97	16,66	16,38	16,13	15,91
0,6	44,34	25,68	25,86	20,01	20,11	28,01	26,69	25,63	24,77	24,02	23,4	22,85	22,37	21,94	21,55	21,2	20,89	20,6
0,7	54,78	31,83	32,05	24,92	25,03	34,89	33,23	31,9	30,82	29,9	29,12	28,44	27,84	27,31	26,82	26,39	26	25,64
0,8	66,77	38,56	38,82	30,26	30,39	42,51	40,45	38,81	37,47	36,35	35,39	34,55	33,82	33,16	32,58	32,04	31,56	31,12
0,9	79,97	45,89	46,21	36,02	36,17	50,92	48,39	46,39	44,75	43,38	42,21	41,2	40,31	39,52	38,81	38,17	37,58	37,05
1	94,53	53,83	54,21	42,21	42,38	60,12	57,06	54,64	52,67	51,02	49,61	48,39	47,33	46,38	45,53	44,76	44,07	43,43
1,1	110,5	62,37	62,81	48,83	49,02	70,14	66,47	63,58	61,22	59,26	57,58	56,14	54,87	53,75	52,74	51,84	51,02	50,26
1,2	127,82	71,53	72,03	55,89	56,1	81	76,64	73,22	70,43	68,11	66,14	64,45	62,96	61,63	60,45	59,4	58,44	57,56
1,3	146,87	81,32	81,9	63,39	63,61	92,74	87,61	83,59	80,33	77,61	75,31	73,32	71,58	70,05	68,68	67,44	66,32	65,3

PW-Wichtung: Top Oil Temperatur

Last	OIAH	OIAF1	OIAF2	OIAF30%	OIAF35%	OIAF40%	OIAF45%	OIAF50%	OIAF55%	OIAF60%	OIAF65%	OIAF70%	OIAF75%	OIAF80%	OIAF85%	OIAF90%	OIAF95%	OIAF100%
0.2	12.43	6.82	6.84	6.44	6.45	6.66	6.71	6.66	6.59	6.56	6.54	6.52	6.51	6.5	6.48	6.47	6.46	6.45
0.3	20.09	12.89	12.92	12.2	12.21	11.08	10.63	10.43	10.27	10.14	9.96	9.89	9.84	9.79	9.74	9.7	9.67	9.64
0.4	27.72	15.95	16.07	12.63	12.66	16.42	15.77	15.23	14.78	14.39	13.75	13.48	13.23	13.02	12.91	12.81	12.73	12.66
0.5	36.23	21.38	21.52	17.19	17.23	23.67	22.08	20.42	19.35	18.52	18.53	18.2	17.89	17.62	17.36	17.15	16.93	16.74
0.6	45.79	27.18	27.36	21.52	21.62	29.5	28.48	27.13	26.26	25.52	24.9	24.36	23.88	23.45	22.71	22.4	22.11	21.84
0.7	56.65	33.61	33.84	26.72	26.83	36.67	35.01	33.69	32.6	31.69	30.91	30.23	29.63	29.1	28.62	28.19	27.44	26.8
0.8	66.82	40.66	40.93	32.38	32.51	44.61	42.55	40.93	39.58	38.45	37.49	36.66	35.93	35.27	34.69	34.16	33.24	32.46
0.9	82.35	48.33	48.65	38.48	38.63	53.34	50.82	48.91	47.49	45.83	44.66	43.65	42.76	41.97	41.26	40.62	39.51	38.57
1	97.25	56.54	57	45.03	45.2	62.9	59.84	57.43	55.46	53.82	52.42	51.2	50.13	49.19	48.34	47.58	46.25	45.13
1.1	113.57	65.54	65.97	52.02	52.24	73.28	69.62	66.73	64.39	62.42	60.76	59.31	58.05	56.93	55.92	55.02	53.45	52.13
1.2	131.35	75.07	75.57	59.5	59.7	84.51	80.17	76.75	73.97	71.66	69.69	68.02	66.54	65.19	64.02	62.99	61.16	59.61
1.3	150.67	85.27	85.84	67.39	67.62	96.66	91.54	87.53	84.28	81.57	79.27	77.29	75.56	74.03	72.66	71.43	69.3	67.51

Gesamtverluste

Last	OIAH	OIAF1	OIAF2	OIAF30%	OIAF35%	OIAF40%	OIAF45%	OIAF50%	OIAF55%	OIAF60%	OIAF65%	OIAF70%	OIAF75%	OIAF80%	OIAF85%	OIAF90%	OIAF95%	OIAF100%	
0.2	105.5	118.2	115.6	134.6	128.6	105.6	105.8	106.1	107.1	107.8	108.7	109.5	110.6	112.0	113.4	115.0	116.8	118.9	121.2
0.3	138.5	150.6	148.0	166.9	161.0	137.9	138.7	139.1	139.8	140.6	141.5	142.6	143.9	145.3	147.0	148.7	150.8	153.1	156.2
0.4	186.3	196.3	193.7	211.8	205.9	184.9	184.0	184.5	184.9	185.4	186.2	187.0	188.1	189.3	190.7	192.3	194.1	196.2	198.5
0.5	249.8	256.9	254.3	271.7	265.7	245.3	244.8	244.9	245.3	245.7	246.4	247.2	248.1	249.3	250.6	252.2	253.8	255.8	258.1
0.6	330.4	332.9	330.4	346.0	340.1	321.6	321.1	320.8	320.9	321.2	321.7	322.3	323.2	324.3	325.5	327.0	328.6	330.5	332.7
0.7	429.6	425.2	422.8	436.2	430.4	415.0	413.9	413.2	412.8	412.7	413.1	413.5	414.1	415.1	416.2	417.5	419.0	420.8	422.9
0.8	549.1	534.9	532.5	542.9	537.1	526.2	524.3	523.0	521.6	521.3	521.4	521.9	522.6	523.5	524.7	526.0	527.7	529.6	531.7
0.9	690.7	663.0	660.7	666.9	661.2	656.5	653.6	651.5	649.9	648.7	647.9	647.3	647.4	647.8	648.5	649.4	650.5	651.9	653.7
1.0	856.4	810.7	808.7	809.3	803.6	807.4	803.0	799.8	797.2	795.3	793.9	792.9	792.1	791.8	792.0	792.6	793.4	794.6	796.1
1.1	1048.2	979.4	977.5	971.0	965.4	980.2	974.0	969.3	965.5	962.6	960.2	958.5	957.1	956.1	955.6	955.4	955.9	956.7	957.9
1.2	1268.6	1170.3	1168.7	1153.2	1147.8	1176.7	1168.1	1161.4	1156.1	1148.3	1145.6	1143.4	1141.7	1140.5	1139.6	1139.2	1139.1	1139.4	1140.1
1.3	1519.7	1384.8	1383.6	1357.4	1351.8	1377.7	1370.4	1364.5	1359.6	1355.6	1352.3	1349.7	1347.6	1346.0	1344.9	1344.1	1343.9	1343.9	1344.1

Verluste der Lüfter

Last	OIAH	OIAF1	OIAF2	OIAF30%	OIAF35%	OIAF40%	OIAF45%	OIAF50%	OIAF55%	OIAF60%	OIAF65%	OIAF70%	OIAF75%	OIAF80%	OIAF85%	OIAF90%	OIAF95%	OIAF100%		
0.2	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	13.75	16.06
0.3	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	13.75	16.06
0.4	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	13.75	16.06
0.5	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	13.75	16.06
0.6	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	13.75	16.06
0.7	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	13.75	16.06
0.8	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	13.75	16.06
0.9	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	13.75	16.06
1	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	13.75	16.06
1.1	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	13.75	16.06
1.2	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	13.75	16.06
1.3	0	13.08	10.44	29.43	23.49	0.44	0.66	0.99	1.43	1.98	2.64	3.52	4.4	5.5	6.82	8.25	9.9	11.66	13.75	16.06

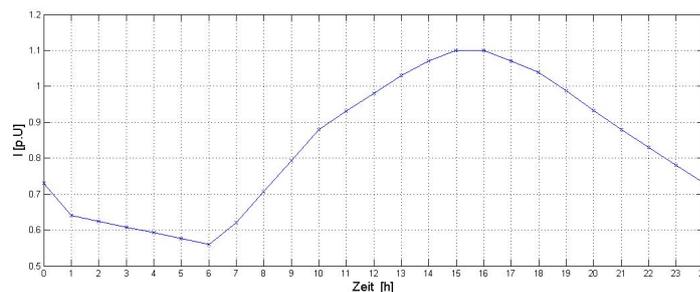
		Gesamteschall																			
Last	OH/AH	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%			
0,2	90	103,23	93,37	106,64	95,61	90,08	90,13	90,2	90,3	90,33	90,42	90,58	90,78	91,02	91,3	91,63	92,41	92,86	93,34	93,85	
0,3	90,02	103,23	93,38	106,64	95,61	90,1	90,15	90,22	90,31	90,44	90,59	90,79	91,03	91,31	91,64	92,01	92,42	92,86	93,35	93,86	
0,4	90,06	103,23	93,39	106,64	95,62	90,13	90,18	90,25	90,35	90,47	90,63	90,82	91,06	91,34	91,66	92,03	92,44	92,88	93,36	93,87	
0,5	90,13	103,24	93,43	106,64	95,65	90,21	90,26	90,33	90,42	90,54	90,7	90,89	91,12	91,4	91,72	92,08	92,48	92,93	93,4	93,91	
0,6	90,27	103,25	93,5	106,64	95,69	90,35	90,4	90,46	90,55	90,67	90,82	91,01	91,23	91,5	91,82	92,17	92,57	93	93,47	93,97	
0,7	90,49	103,26	93,6	106,65	95,75	90,56	90,61	90,67	90,76	90,87	91,01	91,19	91,41	91,67	91,97	92,32	92,7	93,12	93,57	94,06	
0,8	90,81	103,27	93,76	106,66	95,85	90,88	90,92	90,98	91,06	91,16	91,3	91,47	91,67	91,91	92,2	92,53	92,89	93,29	93,73	94,2	
0,9	91,23	103,3	93,98	106,67	95,98	91,29	91,33	91,39	91,46	91,56	91,68	91,83	92,02	92,25	92,51	92,82	93,16	93,54	93,95	94,4	
1	91,76	103,33	94,27	106,68	96,17	91,82	91,85	91,9	91,96	92,05	92,16	92,3	92,47	92,67	92,91	93,19	93,51	93,86	94,25	94,67	
1,1	92,39	103,38	94,63	106,71	96,41	92,44	92,47	92,51	92,56	92,64	92,73	92,86	93,01	93,19	93,4	93,65	93,93	94,25	94,61	95	
1,2	93,09	103,44	95,07	106,73	96,7	93,13	93,16	93,19	93,24	93,31	93,39	93,49	93,62	93,78	93,97	94,19	94,44	94,73	95,05	95,4	
1,3	93,86	103,52	95,57	106,77	97,05	93,89	93,91	93,94	93,98	94,04	94,11	94,2	94,31	94,44	94,6	94,79	95,01	95,27	95,55	95,86	

		Schall der Lüfter																			
Last	OH/AH	OHAF1	OHAF2	OHAF30%	OHAF35%	OHAF40%	OHAF45%	OHAF50%	OHAF55%	OHAF60%	OHAF65%	OHAF70%	OHAF75%	OHAF80%	OHAF85%	OHAF90%	OHAF95%	OHAF100%			
0,2	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54	
0,3	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54	
0,4	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54	
0,5	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54	
0,6	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54	
0,7	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54	
0,8	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54	
0,9	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54	
1	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54	
1,1	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54	
1,2	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54	
1,3	0	103,02	90,69	106,54	94,21	72,66	74,81	76,73	78,47	80,07	81,54	82,92	84,21	85,42	86,57	87,66	88,69	89,68	90,63	91,54	

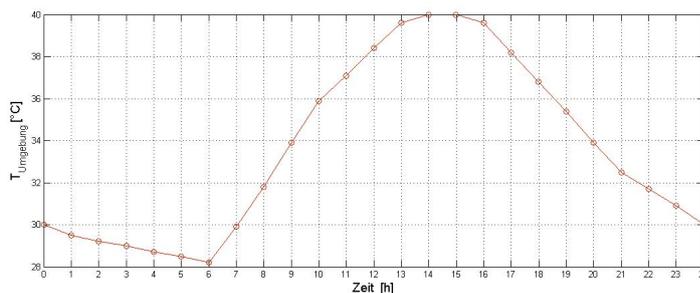
Tabelle 5.12: Transformatorzustände bei einer Umgebungstemperatur von 40°C

5.2 Ergebnisse ausgewählter Betriebspunkte

In diesem Abschnitt wird der zuvor beschriebene Transformator mit einem „normalen“ Tagesbelastungsprofil (siehe Abbildung 5.1) beaufschlagt. Dazu wurden die Trafomodelle aus Abschnitt 4.2 herangezogen.



(a) Belastungsprofil des Transformators



(b) Umgebungstemperatur über einen Tag

Abbildung 5.1: Tagesbelastungsprofil eines Transformators (oben); Umgebungstemperatur über einen Tag (unten) [33]

Wieder wurde der Transformator für EBMpast- sowie Fa. Schormann-Lüfter simuliert. Dabei wurden folgende Steuerungen bzw. Regelungen für die Lüfter implementiert.

- **EBMpast-Lüfter:** Hier wurde die Drehzahl bzw. der Volumenstrom der Lüfter so gewählt, sodass sich insgesamt minimale Verluste für den Transformator einstellen.

- **Fa. Schormann-Lüfter:** Hier wird über die Hot-Spot Temperaturen der Wicklungen gesteuert, dabei wird wie folgt vorgegangen:
 - Kühlstufe ONAN: ab 75 °C auf ONAF1 schalten
 - Kühlstufe ONAF1: ab 85 °C auf ONAF2 schalten
 - Kühlstufe ONAF2: ab 75 °C auf ONAF1 schalten
 - Kühlstufe ONAF1: ab 65 °C auf ONAN schalten

Nachstehende Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Simulation, dabei wurden jeweils die Ergebnisse beider Steuerungen gegenübergestellt.

In Abbildung 5.2 kann sowohl die aktuelle Kühlstufe des Transformators mit Schormann-Lüftern (ONAN, ONAF1, ONAF2), sowie der Volumenstrom der EBMpapst-Lüfter bei minimalen Verlusten abgelesen werden.

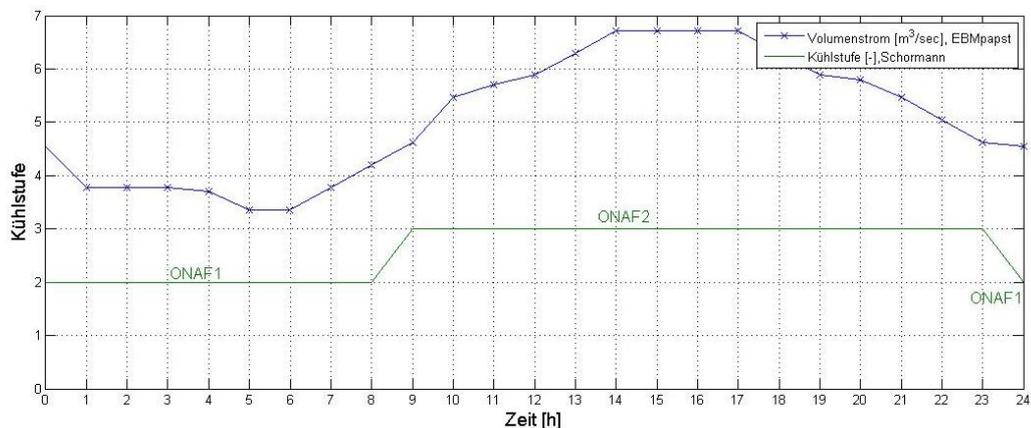
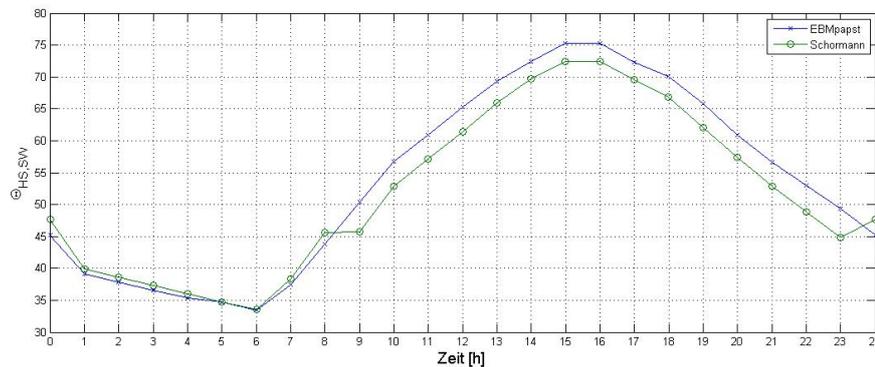
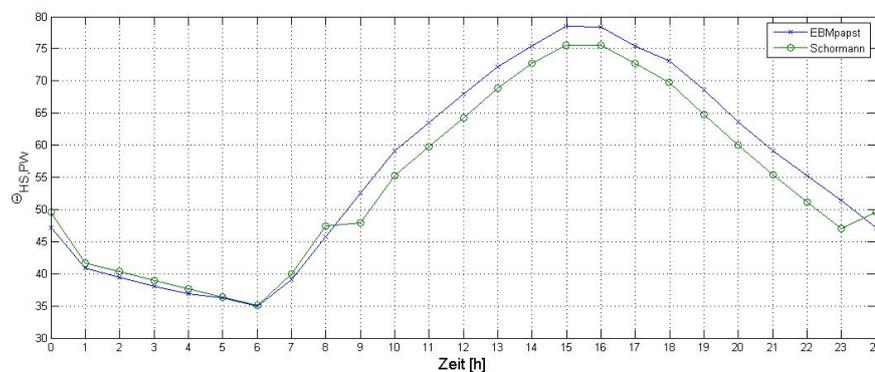


Abbildung 5.2: Kühlstufen des Transformators bei der der Tagessimulation

Abbildung 5.3 zeigt die Hot-Spot Temperaturerhöhungen der Transformatorwicklungen bei den beiden Lüftersteuerungen bzw. Lüftern.



(a) Hot-Spot Temperaturerhöhung der SW-Wicklung



(b) Hot-Spot Temperaturerhöhung der PW-Wicklung

Abbildung 5.3: Hot-Spot Temperatureerhöhungen der Tagessimulation

In Abbildung 5.3 ist zu erkennen, dass die Hot-Spot Temperaturen bei der konventionellen Lüftersteuerung mit Schormann- Lüftern niedrigere Werte annehmen. Jedoch kann dieser Temperaturunterschied durch eine Verfeinerung der EBMmpast-Lüftersteuerung kompensiert werden.

Abbildung 5.4 zeigt deutlich den Unterschied des Gesamtschalls des Transformators, wobei dieser hauptsächlich auf den Schallunterschied der beiden Lüfter zurückzuführen ist.

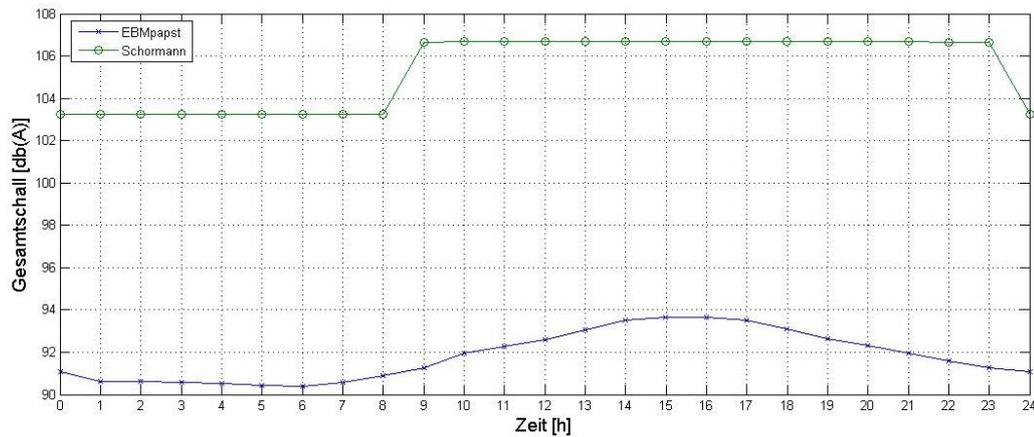


Abbildung 5.4: Gesamtschall des Transformators bei der Tagessimulation

Abbildung 5.5 zeigt schlussendlich die Verlustleistung beider Steuerungen. Wieder ist eine Verbesserung bei Verwendung der EBMpapst-Lüfter mit geeigneter Steuerung zu sehen.

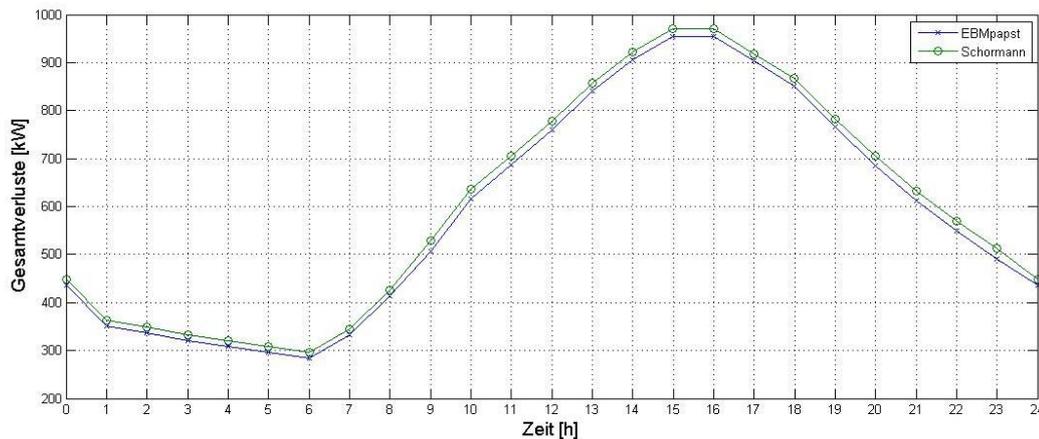


Abbildung 5.5: Gesamtverluste des Transformators bei der Tagessimulation

In Tabelle 5.13 sind nochmals alle Ergebnisse der Transformatorsimulation aufgeführt. Dabei wurden die Ergebnisse der Schormann-Lüfter blau eingefärbt.

Zeit	Last	Umgebungs- temperatur	Hot-Spot Temperatur		Kühlstufe	Gesamtschall	Gesamtverluste			
			SW-Wicklung	PW-Wicklung				Kühlstufe	Volumenstrom	
[h]	[p.u]	[°C]	[°K]	[°K]	[-]	[dB(A)]	[kW]			
00:00	0,730	30,00	47,64	45,21	49,60	47,18	103,26	91,07	449,07	436,30
01:00	0,640	29,50	39,96	39,10	41,67	40,80	103,25	90,63	362,61	350,35
02:00	0,624	29,20	38,64	37,79	40,30	39,44	103,25	90,60	348,02	335,81
03:00	0,608	29,00	37,31	36,48	38,93	38,09	103,25	90,57	333,52	321,35
04:00	0,592	28,70	36,03	35,36	37,60	36,93	103,24	90,52	320,25	308,11
05:00	0,576	28,50	34,78	34,71	36,31	36,24	103,24	90,43	308,31	296,19
06:00	0,560	28,20	33,54	33,46	35,02	34,94	103,24	90,41	296,34	284,21
07:00	0,620	29,90	38,30	37,45	39,94	39,09	103,25	90,59	344,88	332,67
08:00	0,707	31,80	45,60	43,81	47,48	45,70	103,26	90,89	425,98	413,39
09:00	0,793	33,90	45,80	50,46	47,96	52,61	106,66	91,28	529,02	507,17
10:00	0,880	35,90	52,85	56,71	55,29	59,14	106,67	91,95	636,76	616,71
11:00	0,930	37,10	57,09	60,87	59,70	63,47	106,67	92,29	705,37	686,42
12:00	0,980	38,40	61,44	65,26	64,22	68,02	106,68	92,59	778,20	760,25
13:00	1,030	39,60	65,96	69,29	68,90	72,23	106,69	93,06	857,08	840,21
14:00	1,070	40,00	69,65	72,39	72,73	75,47	106,70	93,51	922,51	906,38
15:00	1,100	40,00	72,41	75,28	75,60	78,47	106,71	93,65	971,03	955,38
16:00	1,100	39,60	72,40	75,26	75,59	78,45	106,71	93,65	970,19	954,54
17:00	1,070	38,20	69,61	72,32	72,70	75,41	106,70	93,51	918,96	902,80
18:00	1,040	36,80	66,83	70,15	69,82	73,14	106,69	93,11	868,05	851,32
19:00	0,987	36,40	62,03	66,81	64,83	68,61	106,68	92,62	783,15	765,27
20:00	0,933	33,90	57,36	60,93	59,99	63,55	106,67	92,34	704,91	685,95
21:00	0,880	32,50	52,91	56,67	55,36	59,12	106,67	91,95	632,35	612,24
22:00	0,830	31,70	48,84	52,97	51,14	55,25	106,66	91,58	570,53	549,47
23:00	0,780	30,90	44,87	49,33	47,02	51,46	106,66	91,24	512,34	490,19
24:00	0,730	30,00	47,64	45,21	49,60	47,18	103,26	91,07	449,07	436,30

Tabelle 5.13: Ergebnisse der Transformatorsimulation über einen Tag

Abschließend sollen nochmals die Vorteile der EBMpapst Lüfter aufgezeigt werden. So ergeben sich bei einem Tagesbelastungsprofil nach Abbildung 5.1 folgende Energieeinsparungen.

EBMpapst-Lüfter :

$$E_{1,tag} = \int_{t_1}^{t_2} P dt = 14598,98 \text{ kWh}$$

Fa. Schormann-Lüfter :

$$E_{2,tag} = \int_{t_1}^{t_2} P dt = 14998,5 \text{ kWh} \quad (5.1)$$

Energieersparnis :

$$E_{dif} = E_{1,tag} - E_{2,tag} \approx 400 \text{ kWh}$$

Durch die Verringerung des Energiebedarfs des Transformators könnte noch erwähnt werden, dass diese Energieeinsparung ebenfalls eine Reduzierung des CO_2 Ausstoßes zufolge hätte. Teilt man die Energieersparnis auf die Energieerzeuger nach Abbildung 5.6 auf und berücksichtigt die spezifischen CO_2 Emissionswerte der Energieerzeuger, ergibt sich insgesamt folgende Verringerung der CO_2 Emissionen.

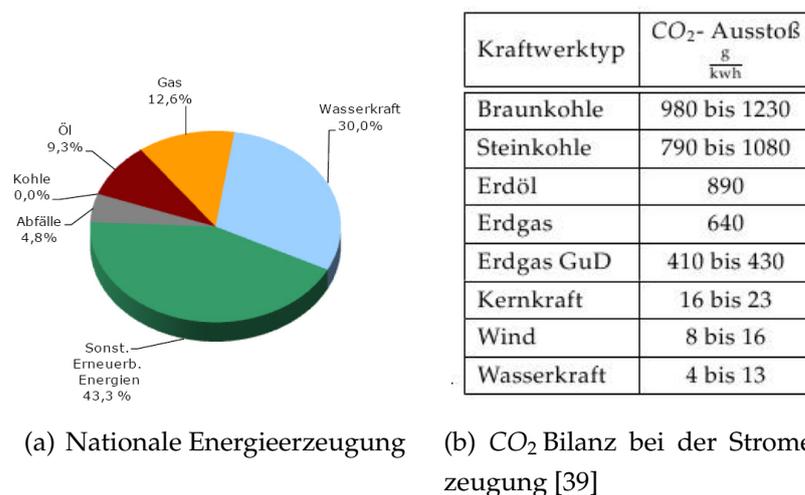


Abbildung 5.6: Energieerzeuger und deren CO_2 Emissionen [39] [29]

$$\begin{aligned}CO_{2\text{Ersparnis,Wasserkraft}} &= 400 \cdot 0,3 \cdot 10,5 = 480\text{g} \\CO_{2\text{Ersparnis,Gas}} &= 400 \cdot 0,126 \cdot 640 = 32256\text{g} \\CO_{2\text{Ersparnis,l}} &= 400 \cdot 0,093 \cdot 890 = 33108\text{g} \\CO_{2\text{Ersparnis,Wind}} &= 400 \cdot 0,433 \cdot 8 \approx 1386\text{g}\end{aligned}\tag{5.2}$$

Aus obiger Berechnung ist zu sehen, dass eine CO_2 Reduktion von ca. 67 kg/Tag erreicht würde. Das entspricht einer Reduktion von ungefähr 23,8 Tonnen pro Jahr.

6 Zukünftige Arbeiten

Ein Resultat dieser Diplomarbeit sind Transformatormodelle welche, gesteuert durch mehrere Eingabeparameter, den Transformatorzustand beschreiben. Diese Transformatorzustände sind jedoch stationäre Werte und enthalten keine zeitlichen Verläufe. Um noch weitere Vorteile einer Kühlanlagensteuerung, welche mit drehzahlgesteuerten Lüftern betrieben wird auszumachen, sollte als nächstes das dynamische Verhalten der Transformatoren in die zuvor erwähnten Transformatormodelle eingebunden werden.

Weiters wäre es noch interessant, alternative Kühlanlagensteuerungen zu untersuchen bzw. die, die in dieser Diplomarbeit beschrieben wurden, zu kombinieren. So könnten auch in diesem Bereich noch Informationen gesammelt, und dadurch Transformatoren noch effizienter gemacht werden.

Abschließend will ich auch nochmals anmerken, dass ich im Zuge meiner Diplomarbeit nur einen Transformator simuliert und untersucht habe, das heißt, auch hier wäre noch Handlungsbedarf. Dadurch würde man das thermische Verhalten unterschiedlicher Transformator Typen untersuchen und könnte weitere Aussagen treffen.

Literaturverzeichnis

- [1] *Technische Innovationen in Verteilungsnetzen: Vorträge der ETG-Fachtagung vom 1. bis 2. März 2005 in Würzburg*. VDE-Verl., 2005.
- [2] Schachenhofer A. Diagnostik an Transformatoren der elektrischen Energietechnik. Diplomarbeit, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Technische Universität Graz, August 2004.
- [3] H. Bausch and H. Steffen. *Elektrotechnik: Grundlagen*. Teubner, 2004.
- [4] T. Berger and M. Weis. *Modellbildung und Simulation einer Pipeline und Entwurf einer Lecküberwachung*. Akademische Schriftenreihe. GRIN Verlag GmbH, 2008.
- [5] P. Böckh and T. Wetzel. *Wärmeübertragung: Grundlagen und Praxis*. Springer, 2009.
- [6] L. Bommers and J. Fricke. *Ventilatoren*. Vulkan-Verl., 2003.
- [7] W. Böning. *Hütte. Taschenbücher der Technik. Elektrische Energietechnik, 29. Aufl.* Berlin : Springer, 1978.
- [8] H. Clausert and G. Wiesemann. *Grundgebiete der Elektrotechnik 1, 5. Aufl.* Number Bd. 1. Oldenbourg, 2005.
- [9] P. Dobrinski, G. Krakau, and A. Vogel. *Physik für Ingenieure*. Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, 2010.
- [10] J. Eichler. *Physik kompakt: Grundlagen für das Ingenieurstudium- kurz und prägnant*. Studium Technik. Vieweg, 2004.

-
- [11] R. Feinberg. *Modern power transformer practice*. Wiley, 1979.
- [12] G. Flegel and K. Birnstiel. *Elektrotechnik für Maschinenbau und Mechatronik*. Carl Hanser Verlag Muenchen, 2009.
- [13] K. Fuest and P. Döring. *Elektrische Maschinen und Antriebe: Lehr- und Arbeitsbuch für Gleich-, Wechsel- und Drehstrommaschinen sowie elektronische Antriebstechnik*. Vieweg+Teubner Verlag, 2007.
- [14] D.C. Giancoli. *Physik*. Pearson Studium, 2006.
- [15] H.U. Giersch, H. Harthus, and N. Vogelsang. *Elektrische Maschinen*. Teubner, 2003.
- [16] D. Giselbrecht. *Dielektrische Modellierung von Öl-Papier-Isolationssystemen im Frequenzbereich zur Diagnose von Leistungstransformatoren*. Cuvillier, 2008.
- [17] CIGRE Working Group. *Experimental determination of power transformer hot-spot factor*. Electra no. 161. 1995.
- [18] Vosen H. *Kühlung und Belastbarkeit von Transformatoren*. Vde- Verlag, 1997.
- [19] K. Heuck, K. Schulz, K.D. Dettmann, and D. Schulz. *Elektrische Energieversorgung: Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis*. Vieweg+Teubner Verlag, 2010.
- [20] International Electrotechnical Commission (IEC). *IEC 60076 Part 2: Power transformers, Temperature rise*. International Electrotechnical Commission, 1993.
- [21] International Electrotechnical Commission (IEC). *IEC 60076 Part 7: Leitfaden für die Belastung von ölgefüllten Leistungstransformatoren*. International Electrotechnical Commission, 2005.

- [22] E. Kallenbach, R. Eick, P. Quendt, T. Ströhla, K. Feindt, and M. Kallenbach. *Elektromagnete: Grundlagen, Berechnung, Entwurf und Anwendung*. Vieweg + Teubner, 2008.
- [23] R. Küchler. *Die Transformatoren: Grundlagen für ihre Berechnung und Konstruktion*. Number Bd. 2. Springer-Verlag, 1966.
- [24] K. Küpfmueller, W. Mathis, and A. Reibiger. *Theoretische Elektrotechnik*. Springer-Verlag, 2008.
- [25] B.C. Lesieutre, W.H. Hagman, and J.L. Kirtley. An improved transformer top oil temperature model for use in an on-line monitoring and diagnostic system. *IEEE, Transactions on Power Delivery*, January 1997.
- [26] P. Lutz. *Lehrbuch der Bauphysik: Schall - Wärme - Feuchte - Licht - Brand - Klima*. Teubner, 2002.
- [27] S. Menzel. *Ein Ansatz zur Optimierung des Luftströmungsverhaltens von Glas-Doppelfassaden unter Verwendung bionischer Prinzipien*. Schriftenreihe aus dem Institut für Massivbau. Cuvillier, 2004.
- [28] G.P. Merker and C. Eiglmeier. *Fluid- und Wärmetransport, Wärmeübertragung*. Teubner, 1999.
- [29] R. Mitterlehner. Energiestatus Österreich 2011. Website, March 2007. http://www.bmwfj.gv.at/EnergieUndBergbau/Energieversorgung/Documents/Energiestatus2011_Homepage.pdf.
- [30] G. Müller. *Elektrische Maschinen: Grundlagen, Aufbau und Wirkungsweise*. Number Bd. 6 in Elektrische Maschinen. Verlag Technik, 1985.
- [31] G. Müller and B. Ponick. *Grundlagen elektrischer Maschinen: .* Number Bd. 1. Wiley-VCH, 2006.
- [32] H. Oertel, M. Böhle, and U. Dohrmann. *Strömungsmechanik: Grundlagen-Grundgleichungen- Lösungsmethoden- Softwarebeispiele*. Studium Technik. Vieweg + Teubner, 2008.

- [33] Institute of Electrical, Electronics Engineers, Institute of Electrical, Electronics Engineers (Nueva York), and IEEE Power Engineering Society. *IEEE guide for loading mineral-oil-immersed transformers*. IEEE std C57.91-1995. IEEE, 1996.
- [34] H. J. Paus. *Physik in Experimenten und Beispielen*. Carl Hanser Verlag Muenchen, 2007.
- [35] R. Pitka, S. Bohrmann, H. Stöckler, G. Terlecki, and H. Zetsche. *Physik, Der Grundkurs*. Verlag Harri Deutsch, 2009.
- [36] Weiz RD/SM. Thermal modeling of transformers. *VA TECH ELIN Transformer GmbH & Co*, August 2007.
- [37] M. Scala. Transformer advanced, heating and cooling, 2009. Energy Sector.
- [38] M. Schäfer (Siemens AG), K. Feser, and E. Cardillo (Universität Stuttgart). Thermisches Verhalten und Überlastbarkeit von Leistungstransformatoren.
- [39] C. Schrader. Klimabilanz der Kraftwerke. Website, March 2007. <http://www.sueddeutsche.de/wissen/co-ausstoss-klimabilanz-der-kraftwerke-1.629631>.
- [40] A.J. Schwab. *Elektroenergiesysteme: Erzeugung, Transport, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie*. Springer, 2009.
- [41] H. Sequenz and T. Bödefeld. *Elektrische Maschinen: eine Einführung in die Grundlagen. 8., vollständig Neubearb. Aufl. von Heinrich Sequenz*. Springer-Verlag, 1971.
- [42] D. Susa. Dynamic thermal modelling of power transformers. Doctoral dissertation, Helsinki University of Technology, Department of Electrical and Communications Engineering Power Systems and High Voltage Engineering, 2005.

- [43] D. Susa, M. Lehtonen, and H. Nordman. Dynamic thermal modelling of power transformers. *IEEE, Transactions on Power Delivery*, january 2005.
- [44] G. Swift, T. S. Monlinski, and W. Lehn. A fundamental approach to transformer thermal modeling-part 1:theorie and equivalent circuit. *IEEE, Transactions on Power Delivery*, November 2006.
- [45] W. H. Tang, Q. H. Wu, and Z. J. Richardson. A simplified transformer thermal model based on thermal-electric analogy. *IEEE, Transactions on Power Delivery*, July 2004.
- [46] E. Vinaricky. *Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen*. Springer, 2002.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Einfacher Einphasentransformator	9
2.2	Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters	10
2.3	Magnetfeld einer Luftspule	11
2.4	Weißsche Bezirke	13
2.5	Hystereseschleife eines ferromagnetischen Stoffes	14
2.6	Ersatzschaltbild eines belasteten Einphasentransformators . .	15
2.7	Vereinfachter Ersatzstromkreis eines Einphasentransformators	16
2.8	Betriebsverhalten eines Transformators bei unterschiedlicher Belastung	17
2.9	Hauptkomponenten eines Dreiphasen-(Leistungs) Transfor- mators	18
2.10	Aufbau eines Transformator-kerns	20
2.11	Kernaufbau Einphasentransformator	21
2.12	Symmetrischer Kerntransformator	21
2.13	Unsymmetrischer Dreiphasen-Kerntransformator	22
2.14	Eisenkern eines Fünfschenkeltransformators	23
2.15	Drilleiter	23
2.16	Prinzipieller Aufbau einer Transformatorwicklung	24
2.17	Isolationsaufbau der Hauptisolierung	25
2.18	Das Buchholz-Schutzrelais (EMB)	26
2.19	Transformator mit Stufenschalter	27
2.20	Berechnung Hystereseverluste	32
2.21	Prinzipbild Wirbelstromverluste	33
2.22	Wicklungsverluste durch Streufluss	35
2.23	Streuflüsse im Transformator	36

2.24	Wärmeleitung zwischen 2 Flächen	37
2.25	Wärmeübergang durch Konvektion	39
2.26	Prinzipbild sowie Strömungsprofil einer turbulenten Strömung	40
2.27	Temperaturbild eines Transformators	46
2.28	Temperaturdiagramm eines Transformators	47
2.29	Blockdiagramm eines Transformator-Temperaturmodells . . .	48
2.30	Temperaturgefälle zwischen Wicklung und Öl	49
2.31	Temperaturverhalten eines Transformators unter verschiede- nen Lastzyklen	53
2.32	Radiatoren nach DIN 42559	55
2.33	Transformator mit getrennt aufgestellter Radiatorbatterie . . .	56
3.1	Berechnung des Temperaturbildes eines Transformators mit- tels „KUL“	59
3.2	Eingabedatei für das Berechnungsprogramm „KUL“	60
3.3	Ausgabedatei des Berechnungsprogramms „KUL“	61
3.4	Funktionen der Programmiererweiterung „KUL_SIM“	62
3.5	Eingabefenster der allgemeinen Transformatordaten	62
3.6	Eingabefenster der Wicklungs- und Verlustdaten	63
3.7	„KUL_SIM“ Einzelberechnung	65
3.8	Flussdiagramm einer Einzeltemperaturberechnung mittels „KUL_SIM“	66
3.9	Flussdiagramm der Temperaturberechnung mit variabler Last & Luftstrom mittels „KUL_SIM“	67
3.10	Flussdiagramm der Berechnung der Lüfter- sowie Schalldaten	70
3.11	Berechnete Ventilatoren- und Anlagenkennlinien der EBMpast- Lüfter	73
4.1	Flussdiagramm der MatLab- Funktion „read_ONAN“	80
4.2	Flussdiagramm der MatLab- Funktionen „read_ONAF1“ & „read_ONAF2“	84

4.3	Flussdiagramm der MatLab- Funktion „read_reg“	85
4.4	GUI Programm zum Visualisieren der „KUL_SIM“- Daten . . .	87
4.5	Hot Spot Temperaturen eines Transformators inklusive Lüf- tersteuerung	89
4.6	Programm zum Vergleichen eines Transformators mit und ohne regelbare Lüfter	90
4.7	Prinzipbild der MatLab- Funktion „create_new_shell_data_reg.m“	92
4.8	Prinzipbild der erstellten Transformatormodelle	94
4.9	Flussdiagramm des Konsolenprogramms	96
4.10	Lookup- Tabelle für die Hot Spot Temperaturen in einem Transformator	97
4.11	Teilmatrix für trilineare Interpolation des Ergebnisses	98
4.12	Aufruf des Transformatormodells mit regelbaren Lüftern . . .	99
4.13	Lookup- Tabelle für die Hot Spot Temperaturen in einem Transformator	100
4.14	Aufruf des Transformatormodells mit nicht regelbaren Lüftern	101
4.15	Funktionen der dynamischen Bibliotheken bzw. Transforma- tormodelle	102
5.1	Tagesbelastungsprofil eines Transformators	143
5.2	Kühlstufen des Transformators	144
5.3	Hot-Spot Temperaturen der Transformatorwicklungen (Ta- gessimulation)	145
5.4	Gesamtshell des Transformators (Tagessimulation)	146
5.5	Gesamtverluste des Transformators (Tagessimulation)	146
5.6	Energieerzeuger und deren CO ₂ Emissionen [39] [29]	148

Tabellenverzeichnis

2.1	Kennzeichnung der Kühlungsarten von Öltransformatoren . . .	29
2.2	Ausführungsarten luftgekühlter Gefäße	30
2.3	Nußelt- Zahlen für Transformatorwicklungen	42
2.4	Gegenüberstellung der Wicklungsexponenten aus IEEE & THM	51
2.5	Strom- und Temperaturgrenzwerte für die Belastung über die Bemessungslast hinaus	57
3.1	Ergebnisdatei einer Temperaturberechnung mit variabler Be- lastung und variablem Volumenstrom der Lüfter	77
4.1	Zustandsvariablen der Transformatormodelle	104
5.1	Transformatorzustände bei einer Umgebungstemperatur von −15°C	109
5.2	Transformatorzustände bei einer Umgebungstemperatur von −10°C	112
5.3	Transformatorzustände bei einer Umgebungstemperatur von −5°C	115
5.4	Transformatorzustände bei einer Umgebungstemperatur von 0°C	118
5.5	Transformatorzustände bei einer Umgebungstemperatur von 5°C	121
5.6	Transformatorzustände bei einer Umgebungstemperatur von 10°C	124
5.7	Transformatorzustände bei einer Umgebungstemperatur von 15°C	127
5.8	Transformatorzustände bei einer Umgebungstemperatur von 20°C	130
5.9	Transformatorzustände bei einer Umgebungstemperatur von 25°C	133

5.10	Transformatorzustände bei einer Umgebungstemperatur von 30°C	136
5.11	Transformatorzustände bei einer Umgebungstemperatur von 35°C	139
5.12	Transformatorzustände bei einer Umgebungstemperatur von 40°C	142
5.13	Ergebnisse der Transformatorsimulation über einen Tag	147

Abkürzungen

dll	Dynamic Link Library. 102
KUL	Ein Programm von Siemens Transformer Weiz, welches es erlaubt, das Temperaturbild eines Transformators zu berechnen. 49, 59
ONAF	Beschreibung der Kühlungsart eines Transformators: OilNaturalAirForced . 29, 70
ONAN	Beschreibung der Kühlungsart eines Transformators: OilNaturalAirNatural . 29, 70
OS	Oberspannung bzw. Oberspannungswicklung. 24
THM	thermo- hydraulische Modelle. 50
US	Unterspannung bzw. Unterspannungswicklung. 24

Symbole

Skalare

L	h	absoluter Lebensdauerverbrauch	[45]
I_{aktuell}	A	aktueller Laststrom (im Programm KUL_SIM wird in der Variationsrechnung ein aktueller Strom verwendet, über welchen die Verluste des Transformators umgerechnet werden)	[68]
D	°K	axiale Temperaturspreizung	[51]
T_0	°C	Bezugstemperatur für Widerstandsberechnung	[34]
ρ	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Dichte eines Mediums	[51]
n_{akt}	s^{-1}	Drehzahl des Lüfter bei Volumenstrom V_{akt}	[74]
P_{Fe}	kW	Eisenverluste des Transformators	[68]
$P_{\text{Fe,L}}$	kW	Eisenverluste des Transformators bei aktueller Last	[68]
I	A	elektrische Stromstärke	[11, 12]
w_{Hyst}	$\frac{\text{J}}{\text{m}^3} = \frac{\text{kg}}{\text{s}^2 \cdot \text{m}}$	Energieverlust durch Hystereseschleife je Volumen	[32]
f	$\text{Hz} = \frac{1}{\text{s}}$	Frequenz	[32]
$L_{wAs,Ges}$	dB(A)	Gesamtschall des Transformators	[71]
Θ_{HS}	°C	Hot-Spot oder Heißpunkt-Temperatur (auch : Θ_{h})	[45, 46]
H	–	Hotspotfaktor	[48]

P_{Hyst}	$W = \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^3}$	Hystereseverluste	[32]
U_{ind}	V	induzierte elektrische Spannung	[14]
H_c	$\frac{\text{A}}{\text{m}}$	Koerzitivfeldstärke	[13]
ω	$\text{Hz} = \frac{1}{\text{s}}$	Kreisfrequenz	[33]
P_{Cu}	kW	Kupfer- bzw. Wicklungsverluste einer Wicklung des Transformators	[68]
P_{Streu}	kW	Kupfer- bzw. Wicklungsverluste einer Wicklung des Transformators	[68]
P_k	$W = \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^3}$	Kurzschlussverluste des Transformators	[36]
$P_{Cu,L,T}$	kW	last- & temperaturkorrigierte Kupfer- bzw. Wicklungsverluste einer Wicklung des Transformators	[69]
$P_{Streu,L,T}$	kW	last- & temperaturkorrigierte Kupfer- bzw. Wicklungsverluste einer Wicklung des Transformators	[69]
$P_{Cu,L}$	kW	lastkorrigierte Kupfer- bzw. Wicklungsverluste einer Wicklung des Transformators	[68]
$P_{Streu,L}$	kW	lastkorrigierte Zusatz bzw. Wirbelstromverluste des Transformators	[68]
$I_{p.u.}$	–	Laststrom per Unit	[68]
P_0	$W = \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^3}$	Leerlaufverluste des Transformators	[31]
α	$\frac{1}{\text{K}}$	linearer Widerstandstemperaturkoeffizient	[34]
μ	$\frac{\text{Vs}}{\text{Am}} = \frac{\text{kg m}}{\text{A}^2 \text{s}^2}$	magnetische Permeabilität	[11]
μ_0	$\frac{\text{Vs}}{\text{Am}} = \frac{\text{kg m}}{\text{A}^2 \text{s}^2}$	magnetische Permeabilität des Vakuums	[11]

Φ	$\text{Wb} = \frac{\text{kg m}^2}{\text{A s}^2}$	magnetischer Fluss	[14]
Θ_{AW}	$^{\circ}\text{C}$	mittlere Wicklungstemperatur	[46]
τ_w	min	mittlere Wicklungszeitkonstante	[53]
Θ_{OA}	$^{\circ}\text{C}$	Mittlere Öltemperatur im Kessel/Radiator	[46]
Θ_{OAW}	$^{\circ}\text{C}$	Mittlere Öltemperatur in der Wicklung	[46]
τ_o	min	mittlere Ölzeitkonstante	[53]
R_w	Ω	modellierter Wirbelstromwiderstand	[33]
Θ_{hr}	$^{\circ}\text{C}$	Nenn-Hot-Spot oder Nennheißpunkt-Temperatur	[45]
I_{Nenn}		Nennstrom	[68]
T_{Ref}	$^{\circ}\text{C}$	Referenztemperatur für die in „KUL“ eingegebenen Verluste	[69]
μ_r	[-]	relative magnetische Permeabilität	[11]
V_M	-	relativer Lebensdauerverbrauch nach Montsinger	[45]
B_r	Tesla	Remanenzflussdichte	[13]
$L_{wAs,luef}$	dB(A)	Schall eines am Transformator montierten Lüfters	[71]
c	$\frac{\text{J}}{\text{kgK}} = \frac{\text{Ws}}{\text{kgK}}$	spezifische Wärmekapazität des Mediums	[51]
ρ_{Cu}	$\frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}}$	spezifischer Widerstand von Kupfer : $\rho_{Cu} = 1,678 \cdot 10^{-2}$	[34]
T_0	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur	[34]
T_{KUL}	$^{\circ}\text{C}$	Temperaturen bei aktueller Transformatorbelastung	[69]
g	$^{\circ}\text{K}$	Temperatursprung zwischen Wicklung und Öl	[47, 48]
$L_{wAs,I_{p.U.}}$	dB(A)	Transformatorschall bei Last $I_{p.U.}$	[71]
$L_{wAs,leer}$	dB(A)	Transformatorschall bei Leerlauf	[71]

L_{wAs,I_n}	dB(A)	Transformatorschall bei Nennstrom	[71]
$T_{Umgebung}$	°C	Umgebungstemperatur	[69, 95]
P	W	Verluste	[51]
$P_{1,luef}$	kW	Verluste eines am Transformator montierten Lüfters	[71]
V	m ³	Volumen	[32]
V_{luef}	$\frac{m^3}{sec}$	Volumenstrom der am Transformator montierten Lüfter	[95]
ε	–	Wicklungsexponent (auch :x)	[50]
R_{Cu}	Ω	Widerstand der Wicklung	[34]
P_w	$W = \frac{kgm^2}{s^3}$	Wirbelstromverluste	[33]
λ	$\frac{W}{mK}$	Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes	[37]
α_k	$\frac{W}{m^2K}$	Wärmeübergangskoeffizient durch Konvektion bzw. Konvektionszahl	[39]
α_s	$\frac{W}{m^2K}$	Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung bzw. Strahlungs- zahl	[38]
t	s	Zeit	[37]
Θ_{OT}	°C	Öltemperatur oben im Kessel/Radiator	[46]
Θ_{OTW}	°C	Öltemperatur oben in der Wicklung	[46]
Θ_{OB}	°C	Öltemperatur unten im Kessel/Radiator	[46]
ϑ	K	Übertemperatur bzw. Erwärmung	[39]
Vektoren			
E	$\frac{V}{m}$	elektrische Feldstärke	[14]
A	m ²	Fläche	[33]
H	$\frac{A}{m}$	magnetische Feldstärke	[10, 11]

B	Tesla	magnetische Flussdichte/ Induktion	[10, 11]
j	$\frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$	Stromdichte	[11]
Q_{flow}	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	Volumenstrom	[51]
\dot{Q}	W	Wärmestrom	[37–39]

Index

- Analgenkennlinie, 73
- Ausdehnungsgefäß, 26
- Buchholz-Relais, 26
- Flussverkettung, 14
- Hystereseschleife, 12, 14
- Induktion, 14
- Induktionsgesetz, 14
- Kühlanlagen, 25
- Kühlsystem, 28
 - Kühlkörper, 55
 - Kühlkreislauf, 28
 - Radiatoren, 29, 55
 - Rohrhafen, 29
- KUL, 48, 59
- KUL_SIM, 61
 - Einzeltemperaturberechnung, 65
 - Lastkorrektur I, 68
 - Lastkorrektur II, 69
 - Temperaturbild Transformator, 67
 - Variationsrechnung, 67
- Magnetische Feldstärke, 10
- Magnetischer Fluss, 10, 14
- MatLab-Funktionen, 79
 - Daten visualisieren, 86
 - read_ONAF, 84
 - read_ONAN, 80
 - read_reg, 85
- Permeabilität, 11, 12
- Scheibenwicklung, 24
- Stufenschalter, 27
- Transformator
 - Ölzeitkonstante, 54
 - Übersetzungsverhältnis, 9, 15
 - Alterung, 44
 - Belastung, 15
 - Belastungsgrenzen, 56
 - Dreiphasentransformator, 18
 - Fünfschenkeltransformator, 22
 - Symmetrischer Dreiphasentransformator, 21
 - Tempeltyptransformator, 21

- Unsymmetrischer Dreiphasen-
transformator, 22
- Einphasentransformator, 9, 15
- Kerntransformator, 20
- Manteltransformator, 20
- Eisenkern, 19
- Hauptreaktanz, 15
- Heißpunkt, 52
- Heißpunkt Temperatur, 46
- Hot Spot, 52
- Hot Spot- Temperatur, 46
- Hydraulischer Widerstand, 52
- Hystereseverluste, 31
- Kupfersprung, 49
- Kupferverluste, 34
- Kurzschlussverluste, 36
- Lasteinfluss, 15
- Lebensdauer, 44
- Leerlaufverluste, 31, 36
- Leistungstransformator, 18
- Magnetisierungsstrom, 16
- Montsinger Gleichung, 45
- Schall, 71
- Streufluss, 34, 35
- Streureaktanz, 15
- Temperaturen, 46
- Thermische Kapazität, 53
- Thermischer Widerstand, 53
- Thermisches Modell, 48
- Verluste, 36
- Vertikale Temperaturspreizung,
51
- Wicklungsexponent, 50
- Wicklungssprung, 49
- Wicklungsverluste, 34
- Wicklungszeitkonstante, 54
- Wirbelstromverluste, 31–33
- Wirbelstromwiderstand, 33
- Zeitkonstanten, 53
- Zusatzverluste, 35
- Transformatorkessel, 25
- Transformatormodelle, 94
- Lookup Tabellen1, 97
- Lookup Tabellen2, 100
- Trilineare Interpolation, 97
- Transformatorsimulation, 105
- Ergebnisse, 106
- Ergebnisse ausgewählter Betrieb-
spunkte, 143
- Ventilator Kennlinie, 73
- Wärmetransport
- Boltzmann- Konstante, 38
- Elektromagnetische Strahlung,
 38
- Grashof- Zahl, 41
- Konvektion, 39
- Nußelt- Zahl, 42
- Prandl- Zahl, 41
- Reynolds- Zahl, 41
- Strahlungskonstante, 38
- Wärmeübergangskoeffizient, 41
- Wärmeleitung, 37
- Wärmestrahlung, 38
- Weissche Bezirke, 12

Zylinderwicklung, 24