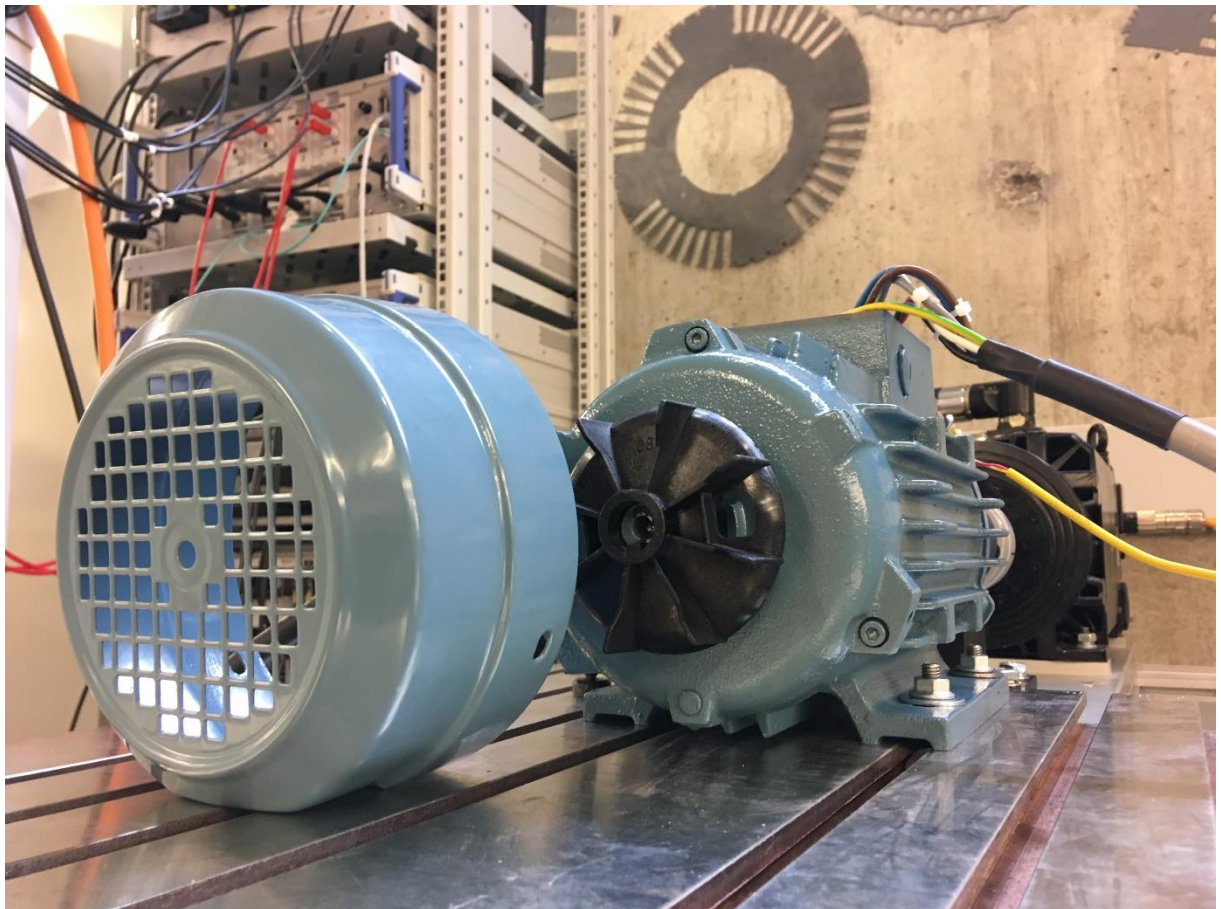




Schlussbericht vom 17.11.2018

Energiesparpotential von eigenbelüfteten IEC Norm-Motoren durch bedarfsabhängig angekoppelte Wellenlüfter





Datum: 17.11.2018

Ort: Biel

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch
energieforschung@bfe.admin.ch

Auftragnehmer/in:

Berner Fachhochschule – Institut für Energie- und Mobilitätsforschung
CH-2500 Biel/Bienne
www.ti.bfh.ch

Autor/in:

Fabian Eichin, M.Sc. Ing., Berner Fachhochschule, fabian.eichin@bfh.ch
Andrea Vezzini, Prof. Dr., Berner Fachhochschule, andrea.vezzini@bfh.ch

BFE-Bereichsleitung:

Dr. Michael Moser, michael.moser@bfe.admin.ch

BFE-Programmleitung:

Roland Brüniger, roland.brueeniger@brueniger.swiss

BFE-Vertragsnummer:

SI/501567-01

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



Zusammenfassung

Diese Studie analysiert das Energieeinsparpotential durch bedarfsabhängige Entkopplung der Eigenbelüftung von IC411 Asynchronmaschinen, wobei periodischem Teillastbetrieb sowie niedrigen Umgebungstemperaturen das Hauptaugenmerk galt. Zu diesem Zweck wurden mehrere Maschinen mit Nominalleistungen zwischen 0.75kW und 5.5kW Messungen und Modellrechnungen unterzogen. Insbesondere für Maschinen mit Nominalleistungen unter 3kW zeigt sich ein verschwindend kleines Energieeinsparpotenzial bezüglich eines zuschaltbaren Kühlerlüfters. Dies ist grundsätzlich auf den marginalen Anteil der Lüfterverluste an den Reibungs- resp. den Gesamtverlusten zurückzuführen. Die Untersuchung zeigt, dass sich erwärmende IE3 Asynchronmaschinen in der Effizienz dermassen verschlechtern, dass ein Entkoppeln des Kühlerlüfters für die Mehrzahl der Anwendungen die ersparten Lüfterreibungsverluste überkompensiert und zu einer Nettoverschlechterung des Wirkungsgrades führt. Die sich am ehesten eignende Maschine (5.5kW) erzielt unter guten Voraussetzungen eine marginale jährliche Energiekosteneinsparung von 1.2‰ resp. etwa vier Schweizer Franken. Dies wiederum schränkt das Kostendach für einen Koppelmechanismus erheblich ein und reduziert das Potenzial gesamtheitlich betrachtet auf ein Minimum. Die Projekt Autoren empfehlen aus diesem Grund, keine weiteren Untersuchungen hinsichtlich Lüfterkupplungen für IE3 Maschinen der betrachteten Grössen vorzunehmen.

Résumé

Dans ce travail, le potentiel énergétique des machines auto-ventilé IEC par un découplage du ventilateur selon les besoins a été étudié. L'idée d'un découplage a été analysé au niveau de service ininterrompu périodique à charge intermittente ainsi qu'au niveau de température ambiante bas. Des machines IEC entre 0.75kW et 5.5kW ont été mesuré et modélé regardant leur efficacité et la conduite thermique. Le travail montre que le potentiel énergétique au travers d'un embrayage est marginal jusque de zéro. Ceci est dû à la puissance de ventilateur relativement bas de même que dû à la sensibilité du rendement en fonction de la température de la machine. De cette manière, le gain par élimination des pertes du ventilateur est surcompensé par les pertes Ohmique additionnels pour la plupart des applications. Un service ininterrompu périodique à charge variable (S6) très optimiste d'une machine 5.5kW montre un potentiel des économies annuel de 1.2‰ ce qui correspond à environs quatre francs suisse. En conséquence les auteurs ne recommandent pas de poursuivre ce projet à l'avenir.

Summary

Within the scope of this work the energy saving potential of self-ventilated IEC standard induction motors by means of load dependent fan decoupling has been investigated. The decoupling is mainly evaluated with respect to periodical partial load operation and low ambient temperature. For this purpose, standard machines between 0.75kW and 5.5kW have been measured in terms of efficiency and thermal behaviour. Furthermore, thermal models of the machine were established and used for simulation steps. The work shows, that only marginal energy savings can be reached, if at all. IE3 induction machines show great sensitivity to temperature changes in terms of their efficiency, such that the already relatively small efficiency gain via the saved fan losses are overcompensated for most of the machines and for most lifelike use-cases. As a best-case scenario, a 5.5kW machine in periodical short-time duty (S6) has reached an annual potential of 1.2‰ energy savings, yielding roughly four Swiss Francs of cost savings. Thus, a mechanical decoupling has to be seen sceptical with regard to economics such that the authors advise to not further investigate this project.





Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Résumé.....	3
Summary	3
Inhaltsverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	6
Symbolverzeichnis.....	6
1 Einleitung	7
2 Ausgangslage	8
2.1 Verluste in der Asynchronmaschine	8
2.2 Ziel der Arbeit	8
3 Vorgehen und Methode.....	9
3.1 Effizienzmessung nach IEC 60034-2-1	9
3.2 Verwendete Maschinentypen	10
3.3 Thermische Modellierung	10
3.4 Identifikation der Lüfterleistung.....	12
3.5 Simulation des Wirkungsgrades	13
3.6 Betriebsart	13
4 Resultate.....	14
4.1 Wirkungsgrad und Verlustverhalten	14
4.2 Verlustanteile in IE3 Maschinen	15
4.3 Lüfterleistung	16
4.4 Thermisches Verhalten.....	17
4.5 Einsparpotenzial durch Teillastbetrieb oder Niedertemperatur	19
4.6 Geeignete Betriebsarten für Lüfterentkopplung	21
4.7 Potenzialanalyse	22
4.8 Zusammenfassung der Resultate	23
5 Diskussion der Ergebnisse	24
5.1 Energieeinsparpotenzial	24
5.2 Einschätzung des Kostenpotenzials.....	24
6 Schlussfolgerungen und Ausblick	25
7 Referenzen	26
8 Anhänge	27
8.1 Anhang 1: IEC Effizienzmessungen	27
8.2 Anhang 1: IEC Testprotokoll.....	32



Abkürzungsverzeichnis

ASM	Asynchronmaschine
BFE	Bundesamt für Energie
BFH	Berner Fachhochschule
IEC	International Electrotechnical Commission
IEM	Institut für Energie- und Mobilitätsforschung
TCO	Total Cost of Ownership

Symbolverzeichnis

A	Konvektionsfläche
c	Wärmekapazität
d	Lüfterreibungsbeiwert
f	Lagerreibungsbeiwert
J	Massenträgheit
k	Wärmeübergangskoeffizient
m	Thermische Maschinenmasse
M_{el}	Elektrisches Drehmoment
P_{fan}	Lüfterleistung
P_{fe}	Eisenverluste
P_{fw}	Reibungsverluste
P_{LL}	Zusätzliche Streuverluste
P_n	Nominalleistung
P_r	Rotorverluste
P_s	Statorverluste
P_T	Gesamtverluste
P_v	Verlustleistung
T_{amb}	Umgebungstemperatur
T_m	Motorgehäusetemperatur
T_s	Windungstemperatur
α	Wärmespezifischer Widerstandskoeffizient



1 Einleitung

Ein beträchtlicher Teil der elektrischen Energie, welche über das Schweizer Stromnetz transportiert wird, betreibt netzgeführte Asynchronmaschinen. Die Anwendungen reichen von Pumpen und Lüftern bis zu kleineren Antriebssystemen. Entsprechend hoch ist auch der Einfluss der Energieeffizienz solcher Maschinen auf den nationalen Energiehaushalt. Im Auftrag des BFE wurde das Einsparpotenzial erwähnter Maschinentypen (IC411) durch eine bedarfsgerechte Entkopplung des Kühlerlüfters analysiert. IC411 Maschinen besitzen einen an die Rotorwelle gekoppelten Kühlerlüfter (Abbildung 1a), welcher den Maschinenmantel zwangskonvektioniert. Moderne Asynchronmaschinen erzeugen durch am Kurzschlussring des Rotors angebrachte Luftschaukeln einen zusätzlichen den Rotor kühlenden Luftstrom im Inneren des Gehäuses (Abbildung 1b).

Die ständige Einsatz des Wellenlüfters verbunden mit dessen Luftreibungsverlusten legt die Idee

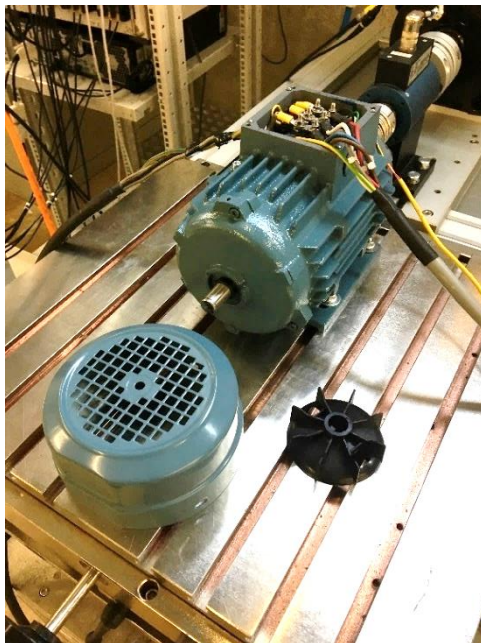


Abbildung 1a: IE3 Maschine mit demontiertem Kühlerlüfter

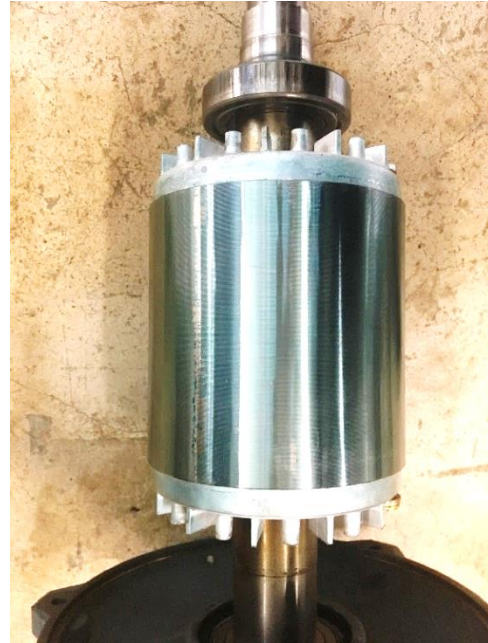


Abbildung 1b: IE3 Rotor

nahe, diesen bedarfsgerecht zu entkoppeln, um so einen Teil der Verlustenergie einzusparen. So lässt sich vermuten, dass niedrige Umgebungstemperaturen oder ein Teillastbetrieb für eine Entkopplung geeignet wären. Quantitativ kann das energetische und wirtschaftliche Potenzial einer solchen Entkopplung durch Vergleichsmessungen sowie ein thermisches Modell der Maschine evaluiert werden. In einem ersten Schritt muss hierfür die Kühlerlüfterleistung bestimmt werden, wodurch diese in einem zweiten Schritt gegenüber allfällig höheren übrigen Verlusten bilanziert werden kann. Mittels Simulation sowie einer Jahreshochrechnung können geeignete Einsatzprofile und Umgebungsvariablen auf ihre Eignung bezüglich Energieersparnis und Wirtschaftlichkeit untersucht werden. Einsatzmuster mit häufigen Teillastbetrieb resp. hohen Lastschwankungen empfehlen sich besonders für einen entkoppelten Lüfter, während dauerbelastete Maschinen thermisch überlastet werden dürften. Diese Arbeit liefert die Grundlage zur Evaluation des Optimierungspotenzials eigenbelüfteter IE3 Maschinen mittels Entkopplung des Wellenlüfters.



2 Ausgangslage

2.1 Verluste in der Asynchronmaschine

Untersuchungsgegenstand der Arbeit sind eigenbelüftete IE3 Asynchronmaschinen, welche in der Industrie aufgrund ihrer relativ hohen Effizienz und ihrem robusten Aufbau weite Verbreitung finden. In allen elektrischen Maschinen entstehen im Betrieb Verluste, welche die Effizienz mindern und zu Energiemehrkosten führen. Die Reduktion der Verluste kann für Industriebetriebe mit Grossanlagen erhebliche Kosteneinsparungen zur Folge haben. Die Asynchronmaschine weist im Betrieb folgende Verluste auf:

Verlusttyp	Beschreibung	Einteilung
Statorverluste $P_{s\theta}$	Verluste durch Ohmschen Widerstand an den Windungen	Last-variabel, temperaturabhängig
Rotorverluste $P_{r\theta}$	Verluste durch Ohmschen Widerstand im Rotor	Last-variabel, temperaturabhängig
Eisenverluste P_{fe}	Hysteres- und Wirbelstromverluste	Konstant, temperaturabhängig
Reibungsverluste P_{fw}	Verluste durch Lagerreibung und Lüfterverluste	konstant, temperaturabhängig
Zusätzliche Streuverluste P_{LL}	Verluste durch ungewollte Streuflüsse	variabel

Tabelle 1: Verluste in der Asynchronmaschine

Als Konstantverluste fasst man die Eisen- und Reibungsverluste zusammen, welche grundsätzlich von der Frequenz resp. der Rotordrehzahl abhängig sind. Jüngere Publikationen zeigen jedoch eine Temperaturabhängigkeit dieser Verluste, die jedoch in den Standard-Testverfahren nicht berücksichtigt wird.

Stator- und Rotorverluste lassen sich als $R I^2$ -Verluste zusammenfassen. Letztere verhalten sich quadratisch zum Strom und stellen damit eine Funktion der Last dar. Zusätzliche Streuverluste entstehen durch ungewollte Streufelder und dadurch induzierte Ströme, welche insbesondere mit der Last zunehmen.

2.2 Ziel der Arbeit

Die Arbeit soll unter der Prämisse, dass sich ein kostengünstiges mechanisches Entkoppeln des Wellenlüfters realisieren lässt, das Einsparpotenzial von IE3 Asynchronmaschinen untersuchen. Die Untersuchung dient somit als Vorarbeit zur Evaluation einer mechanischen Lüfterkupplung für Normmotoren mit Wellenlüfter (IC411). Das vorab ermittelte energetische Einsparpotenzial lässt eine Abschätzung der Stromkosteneinsparung zu, welche später in der TCO-Betrachtung den zusätzlichen Kosten der Kopplungseinrichtung gegenübergestellt werden können. Die eigentliche Entwicklung einer solchen Wellenlüfterkupplung ist nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeiten. Die Analyse nach IEC 60034-2-1 in modernen IE3 Maschinen bietet überdies einen Einblick in die Entwicklung der Verlusttypen von aktuellen Asynchronmaschinen. Ferner soll die Arbeit auch Ausgangslage für Publikation(en) der Untersuchung bieten.



3 Vorgehen und Methode

3.1 Effizienzmessung nach IEC 60034-2-1

Die indirekte Normmessung nach IEC 60034-2-1-1B erlaubt es, die in Kapitel 2.1 aufgeführten Verlusttypen zu messen. Hierfür wird ein Messprozedere gemäss Abbildung 2 durchgeführt, welches folgend kurz erläutert wird.

- Statorimpedanzmessung im kalten Zustand: Die Statorimpedanz wird im kalten Zustand ermittelt. Diese wird zur Berechnung der Ohmschen Windungsverluste benötigt.
- Nominale Belastung: Die Maschine wird mit nominaler Leistung solange betrieben, bis sie eine stabile Temperatur erreicht, worauf der Wicklungswiderstand umgehend ein zweites Mal gemessen wird.
- Die Stator- und Rotorverluste werden nun aufgrund der Strommesswerte, des Schlupfes sowie des temperaturkorrigierten Statorwiderstandes berechnet.
- Auf die erneute Impedanzmessung erfolgt umgehend der Lastkurventest, d.h. die Strom-, Drehmoment- und Schlupfmessung bei unterschiedlichen Lasten.
- Die Maschine wird darauf von der Last entkoppelt und ohne Last betrieben. Das ändern der angelegten Spannung und Stromauswertung erlaubt die Bestimmung der Reibungsverluste und Eisenverluste.
- Aufgrund der Eingangs- zu Ausgangsmessung der Leistung können letztlich die Streuverluste aus dem Residualwert entnommen werden

Die Berechnung des Wirkungsgrades erfolgt somit mittels Aufsummierung der Teilverluste:

$$P_T = P_{fe} + P_{fw} + P_{s\theta} + P_{r\theta} + P_{LL} \quad [1]$$

Der Wirkungsgrad bestimmt sich dann mit Hilfe der Inputleistung P_{in} :

$$\eta = \frac{P_{in}}{P_{in} + P_T} \quad [2]$$

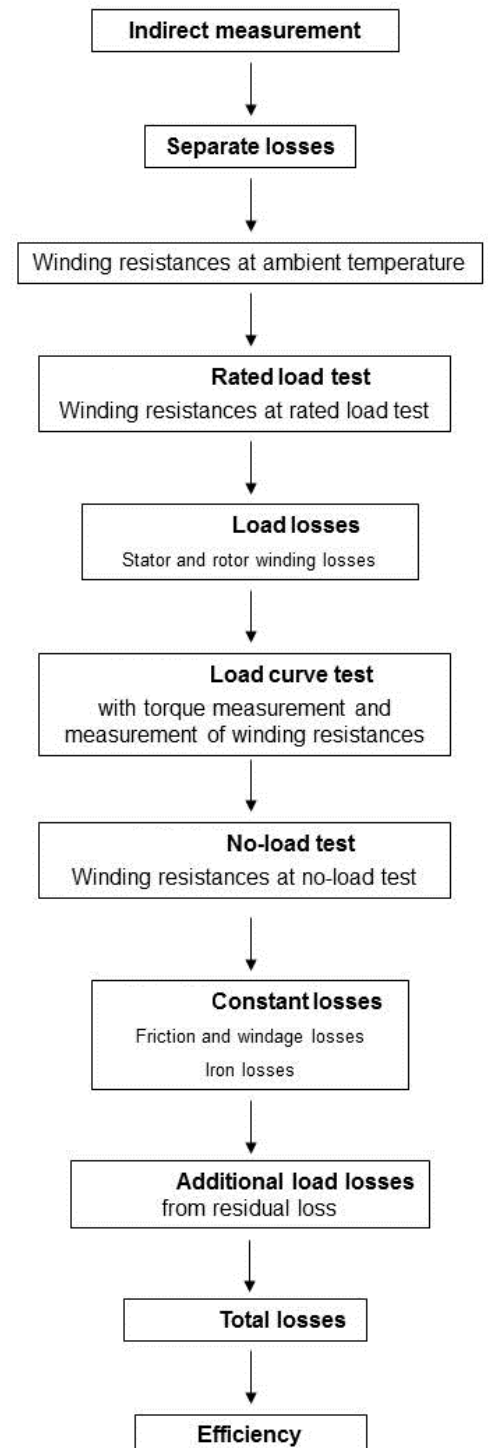


Abbildung 2: Verlustermittlung nach IEC 60034-2-1-1B



3.2 Verwendete Maschinentypen

Zur Untersuchung wurden Maschinen der Effizienzklasse IE3 herbeigezogen. Sämtliche Maschinen verfügen über einen Wellenlüfter nach IC411. Um weiter eine Aussage bezüglich der Eignung von Leistungsklassen zu machen, wurden innerhalb der gleichen Baureihe eines Herstellers verschiedene Leistungsgrößen getestet. Tabelle 2 zeigt die untersuchten Motoren und dazugehörigen Spezifikationen:

Typ	80MLA4	90SB4	100LB4	132SMA4	160MLA4	CV3094B
Hersteller	ABB M2B	ABB M2B	ABB M2B	ABB M2B	ABB M2B	SIEMENS
Nominalleistung [kW]	0.75	1.1	2.2	5.5	11	1.5
Nominalwirkungsgrad [%]	82.5	84.1	86.7	89.6	91.4	?
Frequenz [Hz]	50	50	50	50	50	50
Gewicht [kg]	24	24	35	68	135	35

Tabelle 2: Getestete IE3 Maschinen

3.3 Thermische Modellierung

Ein Modell erster Ordnung wird verwendet, um die Maschine thermisch abzubilden:

$$\frac{d}{dt}T(t) = \frac{P_v}{mc} - \frac{kA}{mc}(T(t) - T_{amb}) \quad [3]$$

Der Wärmeübergang k und die Wärmekapazität c können bei Kenntnis der Konvektionsfläche A sowie der Masse m mittels Least-Square (LS) Verfahren identifiziert werden.

Die Lösung von [3] im Frequenzbereich nach der Laplace-Transformation zeigt die Steady-State Lösung auf.

$$T(s) = \frac{1}{\frac{kA}{mc}s + 1} \cdot \left(\frac{P_v}{kA} + T_{amb} \right) \quad [4]$$

Die sich einstellende Motortemperatur bei konstanter Belastung ist dann gegeben durch den Gleichgrößenanteil von [4]:

$$T_{\infty} = \frac{P_v}{kA} + T_{amb} \quad [5]$$

Damit hängt die sich einstellende Motortemperatur bei konstanter Belastung von der Verlustleistung, der Umgebungstemperatur T_{amb} sowie dem Wärmeübergang k und der Konvektionsfläche A ab. Eine hohe thermische Masse erzeugt dabei intuitiv eine grössere Zeitkonstante.



Da die elektrische Maschine aus mehreren thermischen Subgruppen besteht, liegen jeweils unterschiedliche Temperaturen in diesen vor. Ein Netzwerk kann hierbei helfen, die thermischen Zusammenhänge zu modellieren. Im Sinne der Studie ist insbesondere der Zusammenhang der messbaren Temperaturen am Wicklungskopf T_s sowie die Motoraussentemperatur T_m von Interesse, da diese später mittels Systemidentifikation die Parametrierung der Verlustsimulation erlauben. Es wird zur Vereinfachung angenommen, dass die thermisch dynamischeren Komponenten (Stator, Rotor) als einheitliche Masse fungieren und dass deren Temperatur direkt durch die Verlustleistung bestimmt wird. Diese Annäherung liefert insbesondere im Hinblick auf die Evaluation der Effizienzpotenziale eine genügend genaue Annäherung. Die gekoppelten thermodynamischen Gleichungen der beiden Temperaturmessstellen sind:

$$m_s c_s \frac{d}{dt} T_s = P_v - k_s A_s (T_s - T_m) \quad [6]$$

$$mc \frac{d}{dt} T_m = k_s A_s (T_s - T_m) - kA (T_m - T_{amb}) \quad [7]$$

Mathematisch kann ein solches System als Zustandsraumdarstellung abgebildet werden, wobei jeder Zustand einem homogenen Temperaturknotenpunkt in der Maschine entspricht. Die Zustandsraumdarstellung sieht dann wie folgt aus:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad [8]$$

Dabei ist der Zustandsvektor x definiert als:

$$x = \begin{bmatrix} T_s \\ T_m \end{bmatrix} \quad [9]$$

Der Störgrössenvektor ist gegeben durch die Verlustleistung P_v :

$$u = [P_v] \quad [10]$$

Die Matrizen der Zustandsdarstellung ergeben sich durch die gekoppelten thermischen Zusammenhänge:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{k_s A_s}{m_s c_s} & \frac{k_s A_s}{m_s c_s} \\ \frac{k_s A_s}{mc} & -\frac{(k_s A_s + kA)}{mc} \end{bmatrix} ; \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_s c_s} \\ \frac{T_{amb} kA}{mc P_v} \end{bmatrix} ; \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} ; \quad D = [0] \quad [11]$$

Durch das Hinzufügen weiterer Knotenpunkte kann das Modell beliebig erweitert werden, was jedoch im Sinne der hier ausgeführten Untersuchung nicht zweckmässig ist, weshalb ein Modell mit zwei Subgruppen verwendet wird.



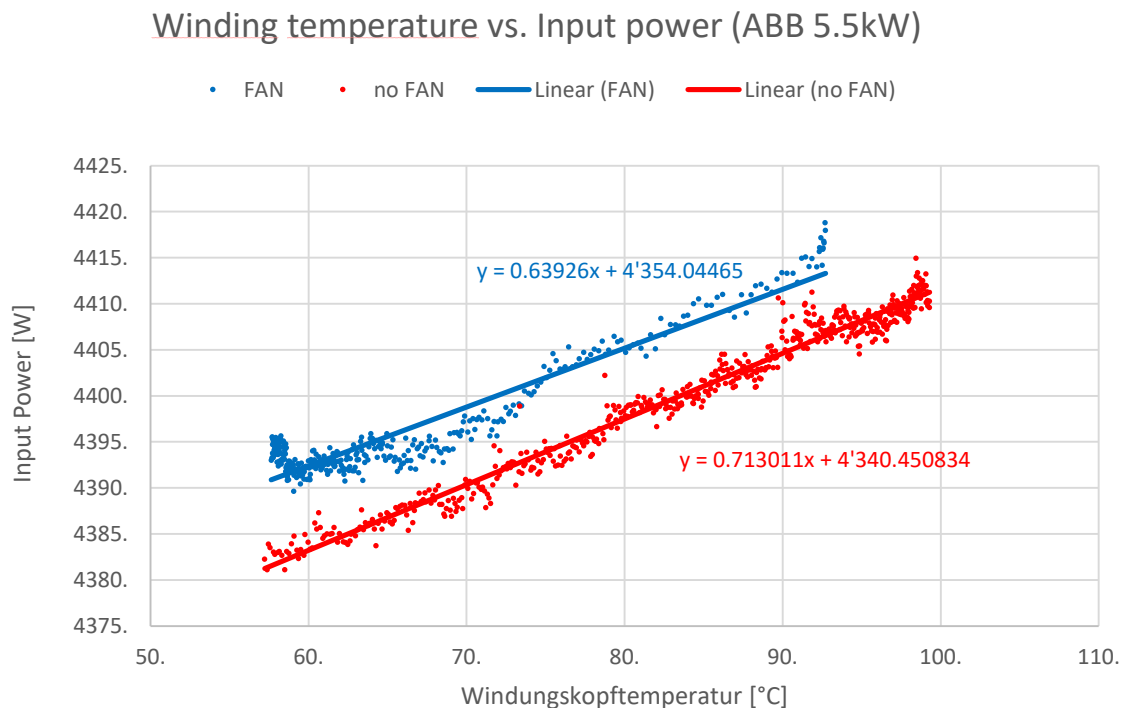
3.4 Identifikation der Lüfterleistung

Zur Evaluation der Lüfterleistung der Maschinen eignet sich die Messung nach IEC 60034-2-1 (Kapitel 3) nur bedingt, da die Maschinentemperatur durch das Abkoppeln des Lüfters und die Dauerbelastung während des Tests unzulässige Werte annimmt resp. nicht die erforderliche Stabilität erreicht. Falls die Lüfterleistung gegenüber den Lagerreibungsverlusten einen signifikanten Anteil ausmacht, kann diese mittels modellbasierter Systemidentifikation ermittelt werden. Hierfür wird ein dynamisches Modell der Drehmomente verwendet:

$$J\dot{\omega} = M_{el} - d\omega^2 - f\omega \quad [12]$$

Dabei entspricht d dem Lüfterwiderstandskoeffizienten und f dem Lagerreibungskoeffizienten. Da sich die Lagerreibungskraft näherungsweise linear und die Lüfterreibungskraft quadratisch mit der Drehgeschwindigkeit verhält kann so bei Kenntnis von k die Lüfterleistung in Funktion der Drehgeschwindigkeit bestimmt werden. In der Praxis zeigt sich, dass insbesondere kleinere Maschinen bis 2kW eine Dominanz der Lagerreibung aufweisen, was die Identifizierbarkeit der Lüfterleistung mittels dieser Methode erschwert bzw. ungenau macht.

Die Lüfterleistung lässt sich für die betrachteten Maschinen am genauesten mittels indirekter Vergleichsmessung ermitteln. Hierbei werden Eingangs- und Ausgangsleistung sowie die Maschinentemperatur mit und ohne Kühlerlüfter gemessen. Für denselben Lastpunkt und dieselbe Windungskopftemperatur bedeutet die Differenz der gemessenen Leistungen dann gerade die Lüfterverlustleistung. Dabei kann auch die Linearität resp. das Konfidenzintervall für die Lüfterleistung überprüft werden, wie es in Abbildung 3 ersichtlich wird.





3.5 Simulation des Wirkungsgrades

Der Wirkungsgrad der Maschine kann aus Messpunkten über Last und Statortemperatur erfasst werden (Abbildung 3). Hierfür wird ein Lastprofil abgefahren, welches eine stetige Temperaturerhöhung zur Folge hat, wobei wiederholend das Lastspektrum zur Aufnahme des Wirkungsgrades bei der jeweiligen Maschinentemperatur angelegt wird. Das nun resultierende

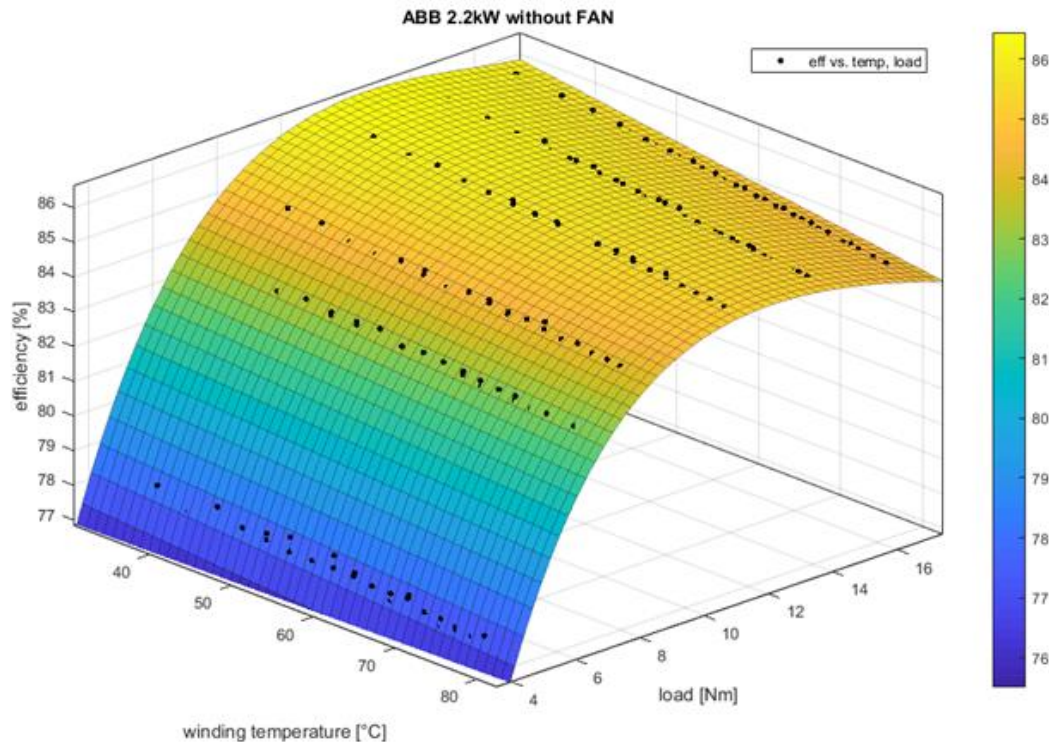


Abbildung 4: Wirkungsgradkennfeld IE3 Maschine mit 2D polynomial Fit

Kennfeld liefert den Wirkungsgrad aufgrund des Lastmomentes und der Windungstemperatur. Mittels polynomialer Interpolation werden die Daten zu einer 2D Funktion weiterverarbeitet, welche in Kombination mit dem thermischen Modell und den nun bekannten Lüfterverlustleistungen die Grundlage für Simulationen von beliebigen Lastprofilen resp. den resultierenden Wirkungsgraden ermöglichen.

3.6 Betriebsart

Das Einsparpotenzial der Entkopplung muss aufgrund der Betriebsart betrachtet werden. Neben dem Dauerbetrieb (S1) und dauerhaftem Teillastbetrieb ist insbesondere ein ununterbrochener periodischer Betrieb mit Teillast- und Vollastzyklen zu untersuchen. Die Maschine wird deswegen solchen Zyklen auf dem Prüfstand sowie in der Simulation unterzogen. Die Abschätzung des Jahreseinsparpotenzials erfordert zusätzlich die Angabe der Einsatzdauer resp. der Anzahl Betriebstage, welche jeweils mit 4000 und 8000 Einsatzstunden pro Jahr referenziert werden.



4 Resultate

4.1 Wirkungsgrad und Verlustverhalten

Aktuelle IE3 Maschinen der untersuchten Baureihe erreichen ab Baugrößen von 5 kW Wirkungsgrade von bis zu 90%. Erwartungsgemäss ergeben sich mit zunehmender Last quadratisch steigende Stator- und Rotorverluste. Reibungs- und Streuverluste weisen maximal 20% der Verluste auf, wobei die Streuverluste unter Nominallast dominant gegenüber den Reibungsverlusten ausfallen.

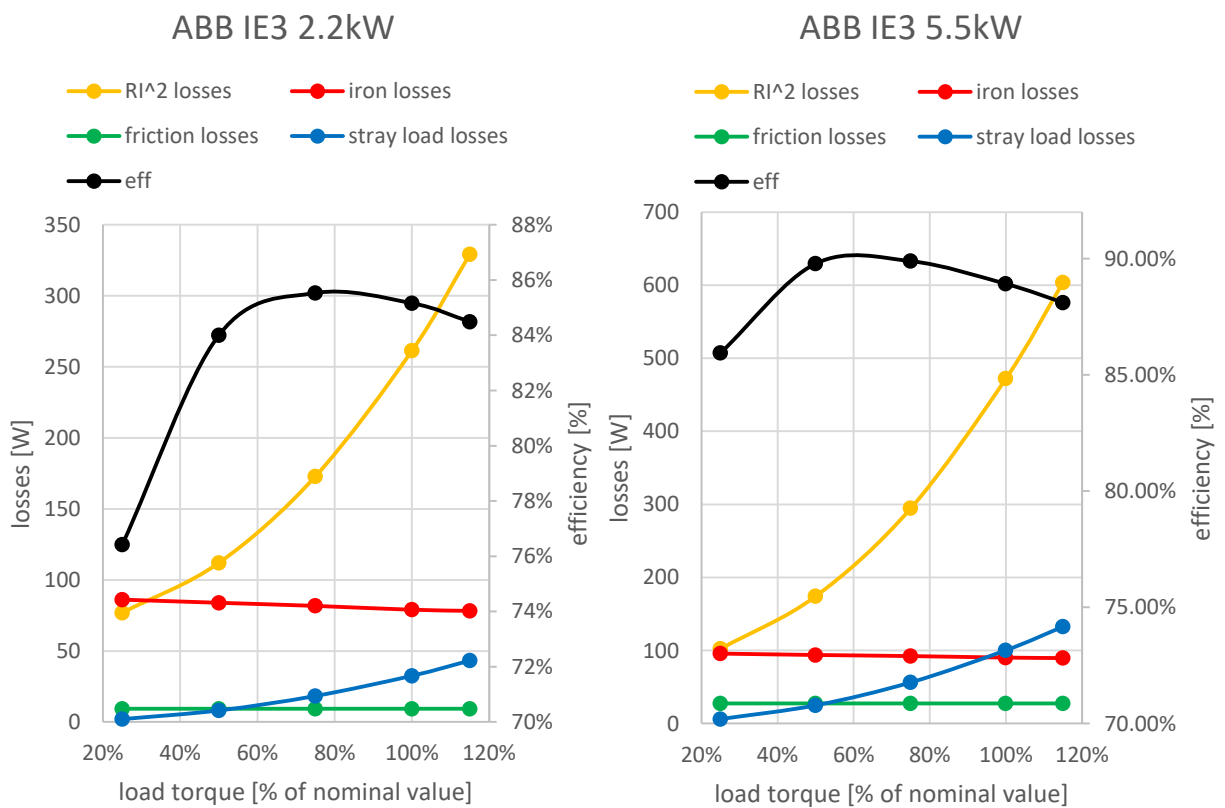


Abbildung 5: Verluste und Wirkungsgrad zweier IE3 Maschinen aus derselben Baureihe

Die Konstantverluste weisen mit höheren Maschinenlasten tendenziell eine leichte Abnahme auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Maschinen im netzgeführten Betrieb bei zunehmendem Schlupf eine Verminderung des Magnetisierungsstroms erfahren und gleichzeitig die Eisenverluste die dominanten Konstantverluste gegenüber den Reibungsverlusten stellen. Ferner führen höhere Lasten durch die Temperaturerhöhung im Blech zu geringeren Wirbelstromverlusten. Streuverluste erhöhen sich derweil aufgrund der sich grösser einstellenden Strömen bzw. Streuflüssen. Sämtliche erfasste Maschineneffizienzen und Verlustanteile sind in Anhang 8.1 dieses Dokumentes aufgeführt.



4.2 Verlustanteile in IE3 Maschinen

Für alle untersuchten Maschinen zeigt sich eine Dominanz von stromabhängigen Stator- und Rotorverlusten sowie Eisenverlusten an den Gesamtverlusten. Reibungs- und Streuverluste weisen maximal 20% der Verluste auf, wobei die Streuverluste unter Nominallast dominant gegenüber den Reibungsverlusten ausfallen.

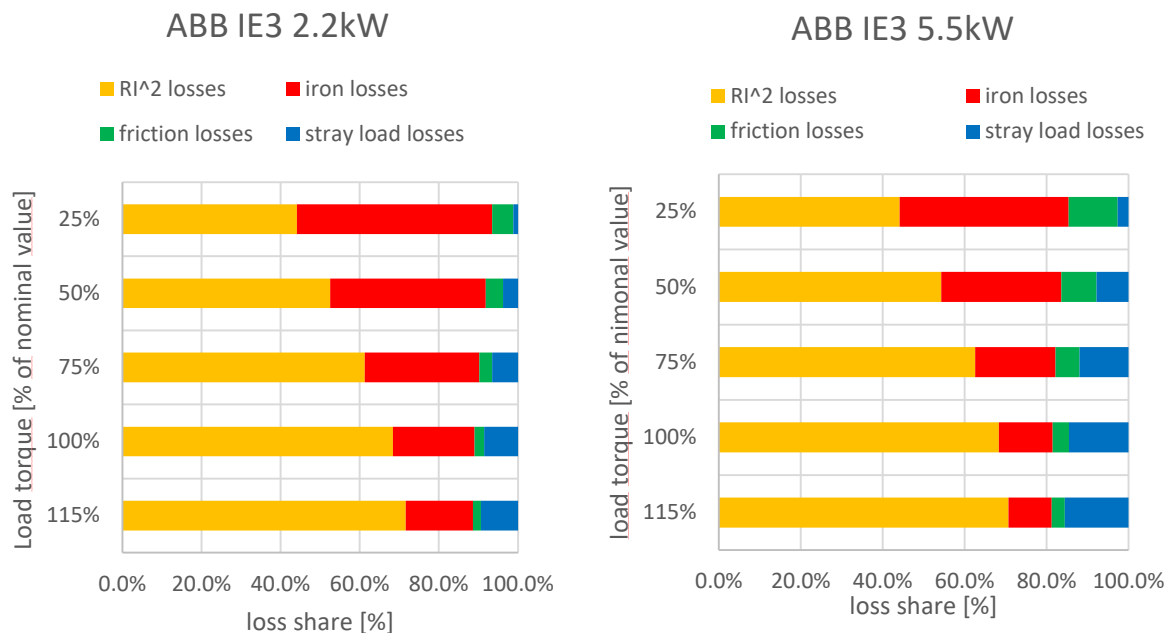


Abbildung 5: Verlustanteile zweier IE3 Maschinen

Die Reibungsverluste ihrerseits werden insbesondere bei kleinen Maschinen von der Lagerreibung dominiert (Abbildung 6a). Der Anteil der Statorverluste an den RI^2 Verlusten zeigt sich als dominant, wobei bei Lasten von weniger als 50% Nominallast rund 80% der Ohm'schen Verluste zu Lasten der Statorwindungen gehen.

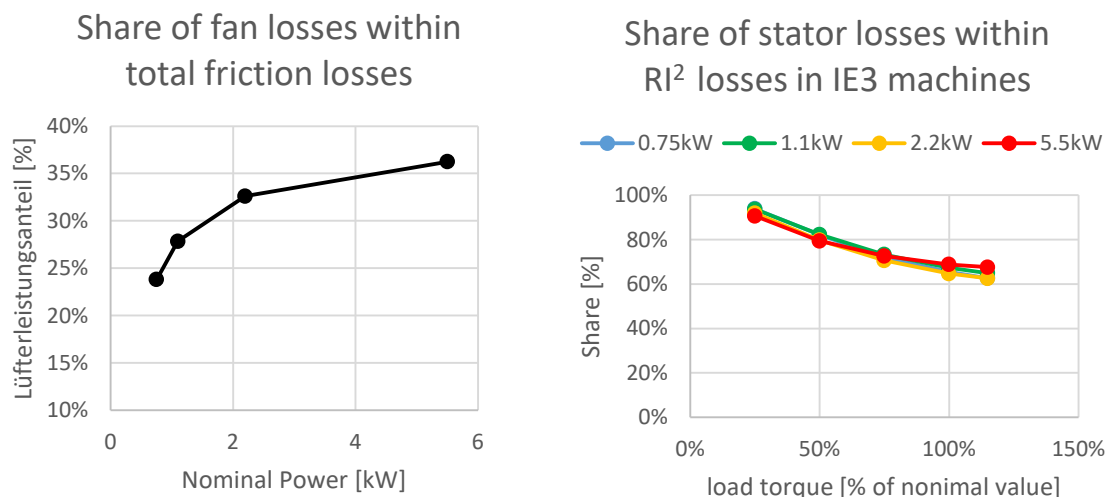


Abbildung 6a: Lüfterleistungsanteile nach Maschinenleistung bei Nominalbedingungen

Abbildung 6b: Anteil Statorverluste an RI^2 Verlusten



4.3 Lüfterleistung

Aktuelle IE3 Maschinen weisen grundsätzlich relativ kleine Lüfterleistungen von einigen Watt auf. Die relative Lüfterleistung, also das Verhältnis zwischen Lüfterleistung und der nominalen Eingangsleistung, liegt bei Maschinen zwischen 0.75kW und 5.5kW im Bereich von rund 1.5%. Eine Übersicht der gemessenen Lüfterleistungen ist in Tabelle 3 dargestellt.

Typ	Nominalleistung	Lüfterleistung	Relative Lüfterleistung
	kW	W	%
80MLA4	0.75	<2	<0.17
90SB4	1.1	2-2.5	0.15
100LB4	2.2	2-3.5	0.14
132SMA4	5.5	7-10	0.16
160MLA4	11	7-10	0.08

Tabelle 3: Lüfterleistungen von IE3 Maschinen

Ein relativer Lüfterleistungsanteil kann aufgrund der Messreihe nicht auf andere Maschinen projiziert werden, wie dies der Vergleich zwischen einer 5.5kW und 11kW Maschine zeigt. Beide Maschinen weisen ungefähr die gleiche absolute Lüfterleistung auf, wodurch sich die Lüfterverlustanteile bei der grösseren 11kW Maschine signifikant verkleinern. Abbildung 7 zeigt die erheblichen Unterschiede in der Dimensionierung der Lüftergrösse im Verhältnis zur Mantelfläche der Maschine. Der in Abbildung 6a dargestellte Anteil der Lüfterverluste an den Gesamtreibungsverlusten wird massgeblich durch die

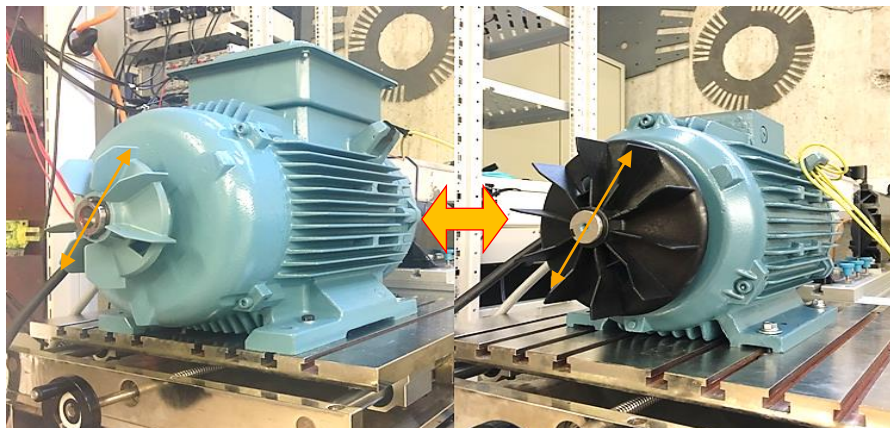


Abbildung 7: Vergleich der relativen Wellenlüfter-Dimensionen einer 11kW IE3 (links, Maschinenaussendurchmesser 305mm, Lüfterdurchmesser 155mm) und einer 5.5kW IE3 (rechts, Maschinenaussendurchmesser 255mm, Lüfterdurchmesser 165mm)

Lüftergrösse bestimmt. Da sich die Lüfterreibungskraft quadratisch mit der Drehzahl des Rotors vergrössert, besteht ein kubischer Zusammenhang zwischen der Lüfterleistung und der Rotordrehzahl. Selbst der Maschinenschlupf wird so die Lüfterleistung geringfügig verändern. Eine 20% höhere Rotordrehzahl (60Hz Betrieb) wird damit eine Erhöhung der Lüfterleistung von rund 80% nach sich ziehen.



4.4 Thermisches Verhalten

Die direkte Gegenüberstellung zwischen belüfteten und unbelüfteten Maschinen zeigt die starke Temperaturabhängigkeit zwischen dem Wirkungsgrad und der Motortemperatur exemplarisch auf. In Abbildung 8 ist ein Warmlauf aus kalten Anfangsbedingungen mit (blau) und ohne (rot) Wellenlüfter unter Nominallast dargestellt. Dabei stellt sich zu Beginn aufgrund der wegfallenden Lüfterverluste ein leicht höherer Wirkungsgrad bei der unbelüfteten Maschine ein.

Die sich im Warmlauf nun stärker erwärmende Maschine erzeugt jedoch bereits bei weniger als 10°C Mehrtemperatur einen merkbaren Mehrverlust durch die Erhöhung des Ohm'schen Stator- und Rotorwiderstandes, wodurch der Nutzen der entfallenen Lüfterverluste gerade kompensiert wird. Im weiteren Verlauf erwärmt sich die unbelüftete Maschine ungemein mehr, sodass sich im Bereich der zulässigen Höchsttemperaturen eine Degradierung des Wirkungsgrades von rund einem Prozent einstellt gegenüber der gekühlten Maschine einstellt.

Die temperaturabhängige Effizienzabnahme zwischen anfänglicher Raumtemperatur und maximal erlaubter Betriebstemperatur beträgt bei der betrachteten Maschine bis zu zwei Prozent.

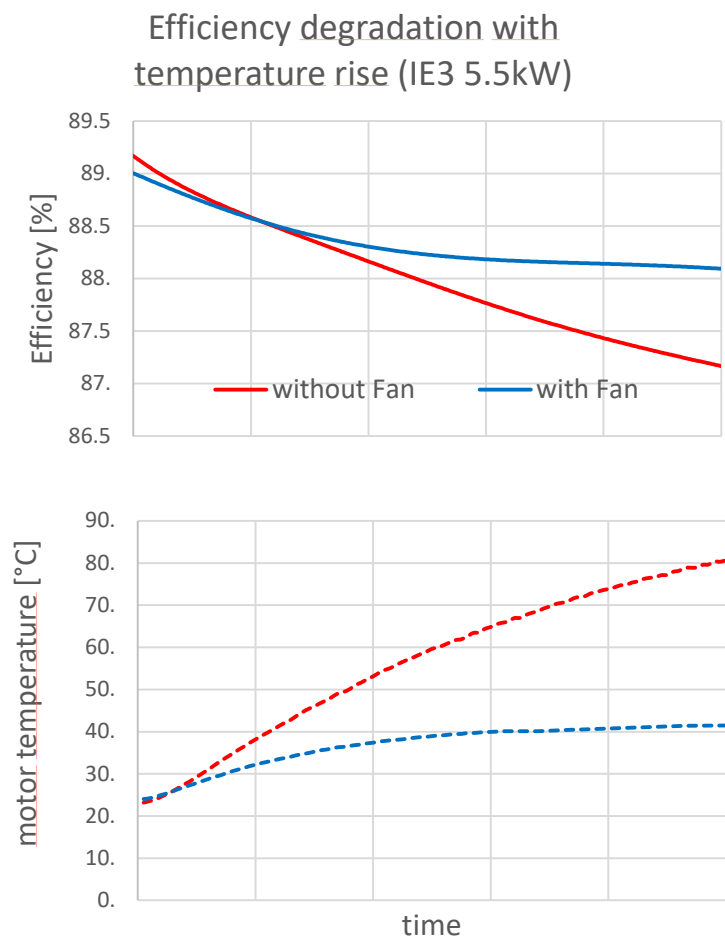


Abbildung 8: Effizienzabnahme aufgrund Temperaturzunahme

Der hier beschriebene starke Temperatureinfluss auf den Gesamtwirkungsgrad ist insbesondere auf die bereits dominanten RI^2 -Verluste zurückzuführen. Eine Erhöhung der Ohm'schen Widerstände erhöht bei konstanter Last die RI^2 -Verluste proportional zur Temperaturzunahme, wobei der Proportionalitätsfaktor vom materialabhängigen spezifischen Widerstandskoeffizienten α abhängt. Die linearen Temperaturkoeffizienten sind dabei für den Stator (Kupfer) und den Rotor (Aluminium) in etwa gleich.

Aufgrund der Wachstumsgesetze elektrischer Maschinen [VIA] steht kleineren Maschinen tendenziell eine grössere spezifische Konvektionsfläche zur Wärmeabfuhr zur Verfügung. Abbildung 9 zeigt die zunehmenden Verluste je Fläche nach Maschinengrösse.



Obwohl sich der Wirkungsgrad mit zunehmender Maschinengrösse erhöht, muss beispielsweise eine 11kW Maschine gegenüber einer 0.75kW Maschine naturgemäss rund 60% mehr Verlustwärme pro Flächeneinheit abstrahlen.

Surface specific losses vs. machine size

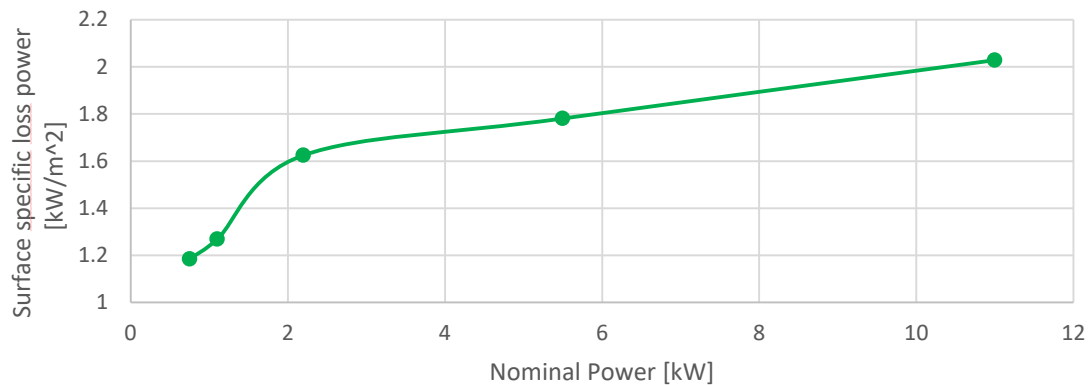


Abbildung 9: Oberflächenspezifische Nominalverlustleistung nach Maschinengrösse

Um eine gleichwertige Kühlung gegenüber kleineren Maschinen zu erzielen müssen grössere Maschinen folglich einen höheren Wärmeübergangskoeffizienten aufweisen resp. die Lüfterleistung überproportional erhöhen, wie dies mittels Messdaten der Steady-State Temperaturen und den Lüfterleistungen in Abbildung 10 gezeigt werden kann. Der ermittelte Wärmeübergangskoeffizient einer 5.5kW Maschine in Anwesenheit des Wellenlüfters ist dementsprechend deutlich höher gegenüber einer 1.1kW Maschine, wobei sich auch das Verhältnis zwischen dem Wärmeübergang bei An- resp. Abwesenheit der Zwangskonvektionierung mit zunehmender Maschinengrösse erhöht. Folglich steigt die nötige Lüfterleistung nicht linear an. Dies gilt offensichtlich nur, falls die sich einstellende Steady-State Temperatur für alle betrachteten Maschinen denselben Wert hat.

Fan power and steady temperature vs. machine size

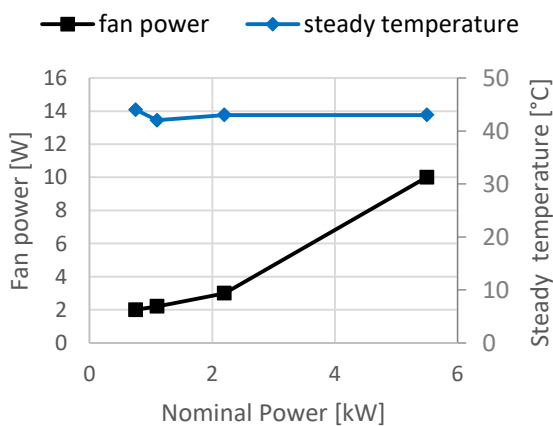


Abbildung 10a: Lüfterleistung und Steady-State Temperatur nach Maschinengrösse

Heat transfer coefficient vs. machine size

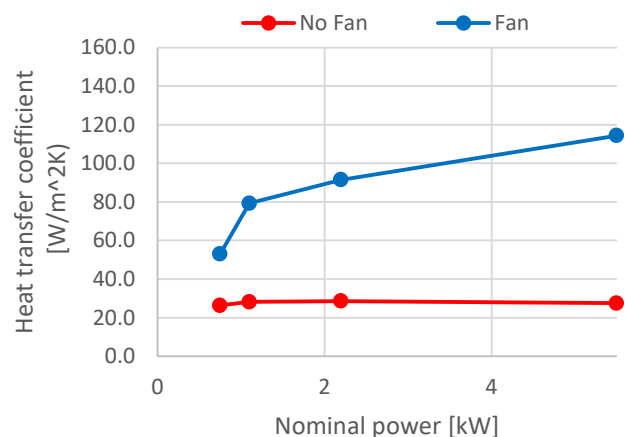


Abbildung 10b: Wärmeübergangskoeffizienten mit und ohne Lüfter nach Maschinengrösse



4.5 Einsparpotenzial durch Teillastbetrieb oder Niedertemperatur

Als temperaturabhängige Verluste treten die Stator- und Rotorverluste auf. Deren Erhöhung fällt näherungsweise proportional zur Temperaturänderung aus und ist abhängig vom wärmespezifischen Widerstandskoeffizienten α . Davon ausgehend, dass sich die übrigen Verluste nicht ändern, können die Verluste mit und ohne Lüfter gegenübergestellt werden. Dabei reduziert sich die Verlustgegenüberstellung auf folgende Gleichung:

$$P_{fan} + P_{RI^2_1} = P_{RI^2_2} \quad [13]$$

Nun kürzt sich Gleichung [13] zu:

$$P_{fan} + RI^2 = RI^2 + \Delta T \cdot \alpha \cdot RI^2 \quad [14]$$

Durch umstellen kann der Temperaturunterschied, welcher jeweils zu gleichen Gesamtverlusten führt, analytisch gefunden werden:

$$\Delta T = \frac{P_{fan}}{\alpha \cdot RI^2} \quad [15]$$

Der sich jedoch real einstellende Temperaturunterschied ergibt sich gemäss:

$$\Delta T = \left(\frac{P_{v1}}{k_1 A} + T_{amb} \right) - \left(\frac{P_{v2}}{k_2 A} + T_{amb} \right) \quad [16]$$

Die Temperaturunterschiede nach [15] und [16] zeigen in der Break-Even Analyse denjenigen Lastpunkt an, bei welchem sich durch Entkoppeln des Lüfters derselbe Wirkungsgrad einstellt. Es ist aus Abbildung 11 ersichtlich, dass für die gemessene 2.2kW Maschine kein Break-Even Lastpunkt erreicht wird, während dies bei der 5.5kW Maschine im Bereich von 35% Last geschieht.

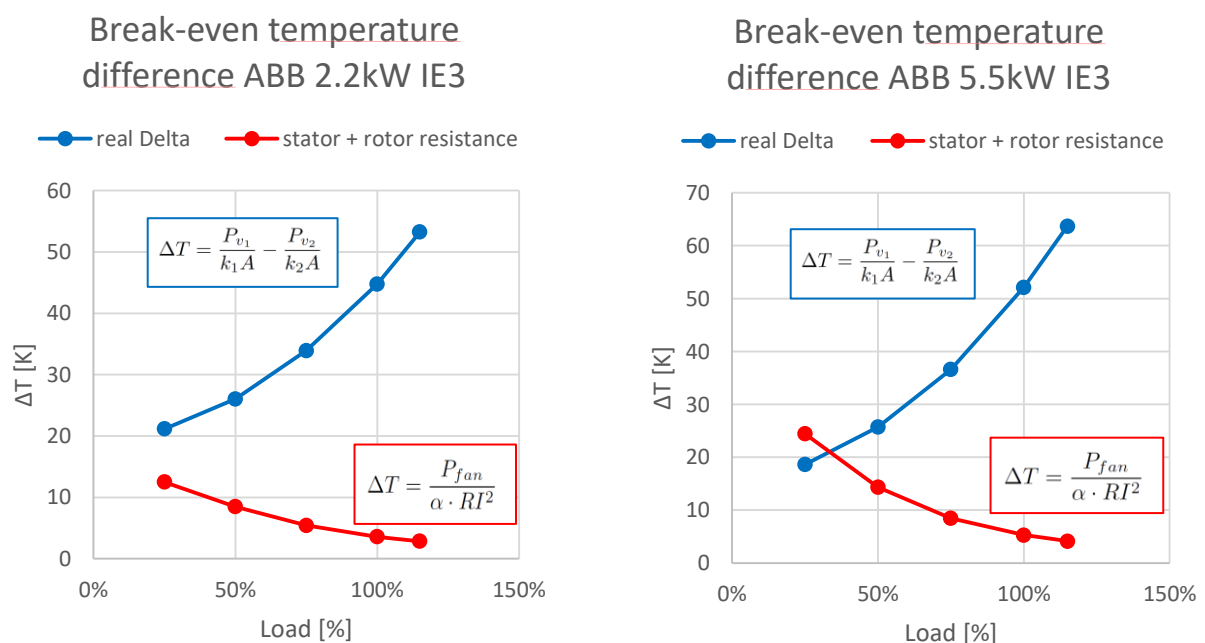


Abbildung 11: Break-Even Temperaturen zweier IE3 Maschinen zur Evaluation der Verlustleistungsreduktion



Das thermisch simulierte Verhalten nach [16] und Abbildung 11 konnte durch Messungen verifiziert werden, wie es in Abbildung 12 dargestellt ist. Während die besser geeignete 5.5kW Maschinen bei Teillast durch einen relativ geringen Temperaturunterschied eine Verbesserung des Wirkungsgrades erzielt, fallen ungeeignete Maschinen bis zu sehr kleinen Lasten durch einen hohen Temperaturunterschied auf, welcher seinerseits stets zu einer Verschlechterung der Effizienz führt.

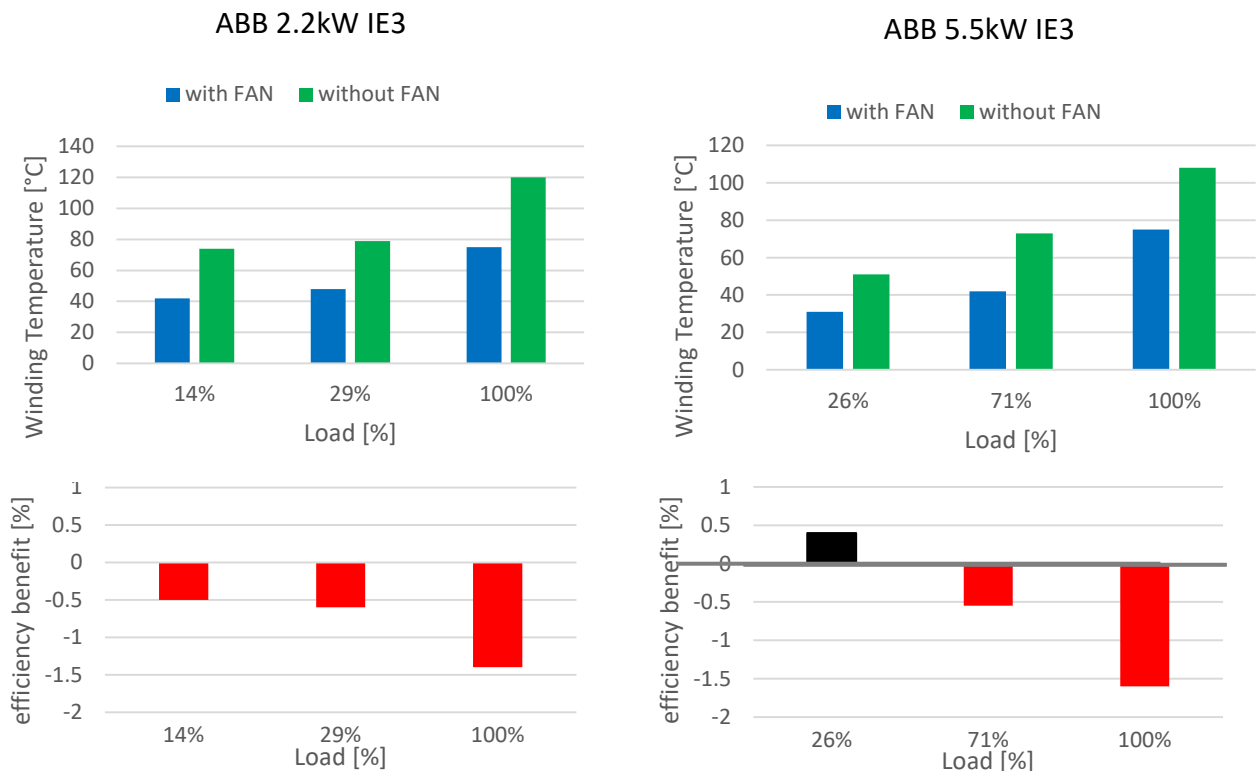


Abbildung 12: Effizienzunterschied durch Lüfterentkopplung in Funktion der Last für zwei IE3 Maschinen

In [16] ist ferner ersichtlich, dass die Umgebungstemperatur keinen Einfluss auf das beschriebene Verhalten hat bzw. nur als Offset fungiert. Da der Wärmeübergang k für die betrachteten Materialien und Temperaturbereiche als konstant approximiert wird resp. sich tendenziell eher zu Ungunsten der Wärmeabfuhr ändert [VDI], kann nicht mit einer Verbesserung der Situation bei Niedertemperaturen gerechnet werden.



4.6 Geeignete Betriebsarten für Lüfterentkopplung

Ein periodischer, ununterbrochener Betrieb erweist sich als jenes Lastspiel mit dem grössten Potenzial hinsichtlich des Einsparpotenzial einer Wellenlüfterkupplung. Einerseits wird dieses durch kürzere Nominallast Zykluszeiten erhöht, während ein von der Maschine abhängiger Teillastwert ein maximales Potenzial liefert. Allerdings ist in der Praxis davon auszugehen, dass diese beiden Parameter nicht beliebig klein auftreten werden resp. deutlich von den für die Entkopplung idealen Werten abweichen. Die in diesem Bericht verwendete Teillastzeit beträgt 20% der Periodendauer wobei der Teillastwert bei 25% der Nominallast liegt. Abbildung 13 zeigt die Messdaten eines solchen S6 Betriebes mit und ohne Wellenlüfter mit den resultierenden Effizienzen sowie zusätzlich die Simulationsdaten einer bedarfsgerecht geregelten Kupplung. Diese wird im Falle der Nominallast geschlossen und im Teillastbereich geöffnet.

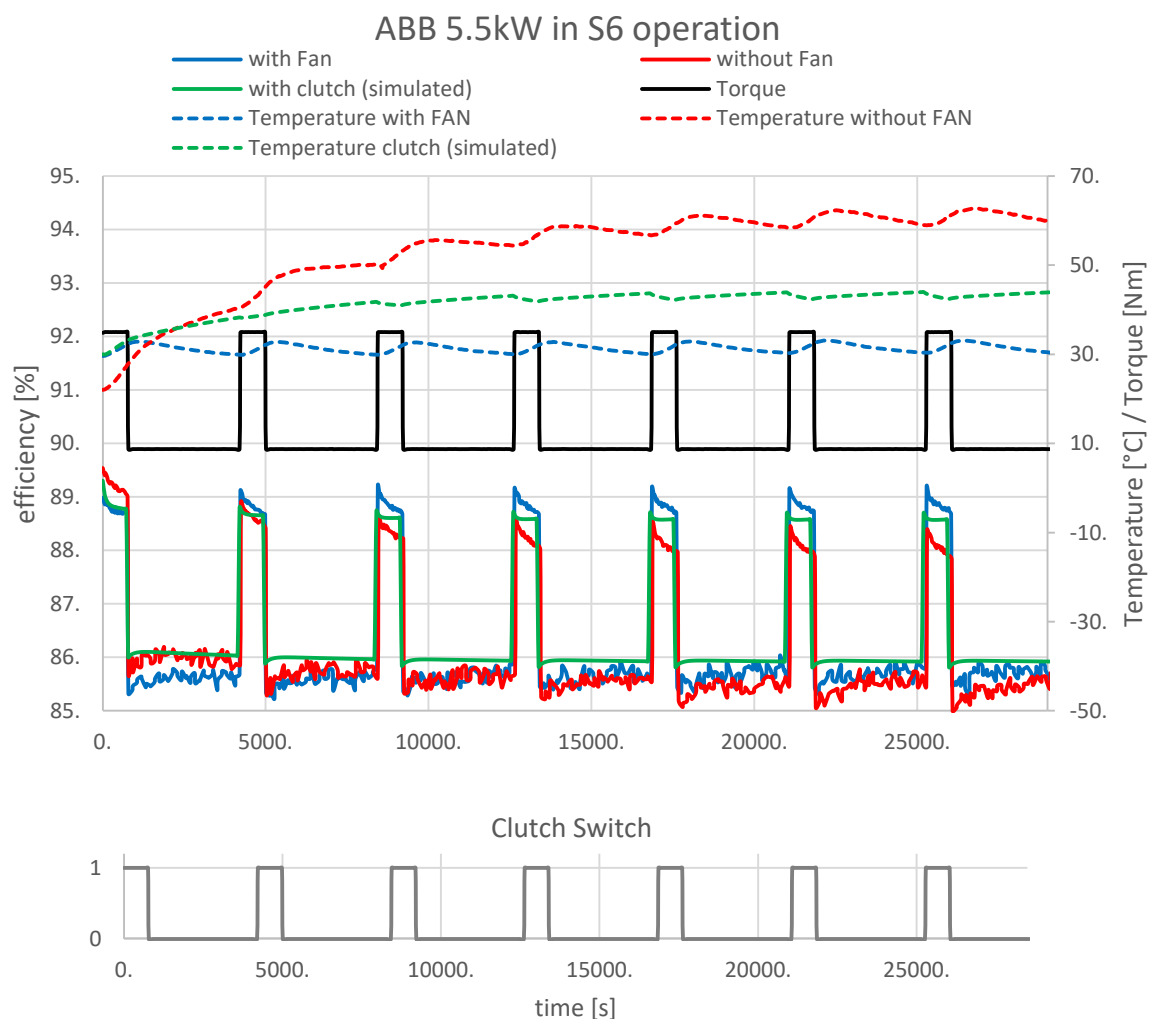


Abbildung 13: Gemessenes Temperaturverhalten im S6 Betrieb sowie Simulation einer bedarfsgeregelten Kupplung zum zu- und abschalten des Wellenlüfters



4.7 Potenzialanalyse

Die theoretisch maximal zu erreichende Energieeinsparung ist aufgrund der Lüfterleistung gegeben. Unter der exemplarischen Annahme einer jährlichen Einsatzzeit von 8000 Stunden, entspräche dies am Beispiel einer IE3 5.5kW Maschine rund 72kWh, was bei einem Strompreis von 15Rp./kWh ungefähr 13 CHF elektrische Energiekosten bedeutet.

In Wirklichkeit kann aufgrund der sich gleichzeitig erhöhenden RI^2 -Verluste nur ein Bruchteil dieser Einsparung realisiert werden. Ein oberer Wert, der hierfür in dieser Arbeit ermittelt wurde, beträgt rund 30%, womit fast ein Drittel der jährlichen Lüfterverlustenergie eingespart werden könnte. Allerdings entspricht dies einem Jahresbetrag von lediglich etwas über drei Schweizer Franken und stellt gleichzeitig den bestmöglich gefundenen Fall, während für die meisten Lastprofile und Anwendungen mit (teilweise starken) Nettoverlusten gerechnet werden muss. Tabelle 3 zeigt die Einsparmöglichkeiten mit einem geeigneten S6 Profil für die untersuchten Maschinentypen auf.

Typ	Leistung	Nominal- Wirkungsgrad	Lüfterleistung	Jahreseinspar- potenzial @ 8000h und S6 Betrieb (25% Last)	Kostensparnis bei 12 Jahren und 15Rp/kWh
	kW	%	W	kWh	CHF
80MLA4	0.75	82.5	<2	< 4	< 8
90SB4	1.1	84.1	2-2.5	< 5	< 9
100LB4	2.2	86.7	2-3.5	-6..0	-11..0
132SMA4	5.5	89.6	7-10	18..25	32..45
160MLA4	11	91.4	7-10	<25	<45

Tabelle 3: Getestete IE3 Maschinen

Die 2.2kW und 5.5kW Maschine auf dem Prüfstand den Profilen unterzogen wurden, während die restlichen Maschinen aufgrund der schlechteren Eignung mit einem oberen Grenzwert bewertet wurden.

Ein Einsparpotenzial durch Teillastbetrieb ist theoretisch gegeben, sobald die Maschine kontinuierlich unterhalb des Break-Even Last Bereiches betrieben wird (vgl. Kapitel 4.5). So kann eine Maschine, welche vorwiegend unter sehr kleiner Last betrieben wird, mittels Lüfterentkopplung signifikant Energie einsparen. Allerdings ist in diesem Fall nicht nur die Maschine für den Anwender überdimensioniert, sondern es erübrigt sich auch die Notwendigkeit einer Kupplung, da schlicht der Wellenlüfter abmontiert werden kann. Damit ergibt sich kein direktes Energieeinsparpotenzial durch die Anwesenheit eines Entkopplungsmechanismus, wodurch das Teillastpotenzial als nichtig betrachtet werden muss.



4.8 Zusammenfassung der Resultate

Eine Einsparung mittels Lüfterentkopplung ist grundsätzlich nur für die im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Lastanwendungen möglich, wobei die relative Einsparung aufgrund des Einsatzprofils resp. der mittleren Maschinenleistung ausfällt. Dementsprechend wird die Einsparung grösser ausfallen, wenn die Maschine bereits eine verhältnismässig niedrige mittlere Leistungsabgabe bei langen Einsatzdauern hat. Dadurch sind Einsatzmuster mit kurzen Hochlastsequenzen bezüglich der relativen Kosteneinsparung am potentesten. Allerdings muss die Praxisnähe solcher Einsätze kritisch und damit das Potenzial für relevante Anwender in der Industrie als überschaubar betrachtet werden. Tabelle 4 fasst die Ergebnisse der Untersuchung zusammen.

Typ	80MLA4	90SB4	100LB4	132SMA4	160MLA4
Hersteller	ABB M2B	ABB M2B	ABB M2B	ABB M2B	ABB M2B
Nominalleistung [kW]	0.75	1.1	2.2	5.5	11
Gemessener Nominalwirkungsgrad @ $T_{amb} = 24^{\circ}\text{C}$ [%]	83.3	83.5	85.2	88.9	-
Wärmeabfuhrreduktion durch Entkopplung [%]	50	64	69	76	56
Relative Lüfterleistung [%]	0.17	0.15	0.14	0.16	0.08
Maximal mögliches Einsparpotenzial @8000h/a [kWh/a]	16	20	28	80	80
Reales Einsparpotenzial [CHF/a]	<1	<1	<0	<4	<4
Break-Even Teillastpunkt [% der Nominallast]	20%	nicht erfüllt	nicht erfüllt	35%	-
Eignung Lüfterkupplung	NEIN*	NEIN	NEIN	NEIN*	NEIN

Tabelle 4: Resultateübersicht

* TCO- Betrachtung: Unter Berücksichtigung 12-jähriger Amortisationszeit und Stromkosten von 15 Rp./kWh ist das Kostendach für eine Kupplung unrealistisch klein



5 Diskussion der Ergebnisse

5.1 Energieeinsparpotenzial

Die betrachteten IE3 Maschinen zwischen 0.75kW und 11kW zeichnen sich durch eine für netzgeführte Asynchronmotoren verhältnismässig hohe Effizienz aus. Dies wiederum reduziert die Verlustleistung, welche als Wärme abgeführt werden muss, womit die Wellenlüfterleistung entsprechend klein dimensioniert werden kann. Die Untersuchung zeigt weiter, dass die Wellenlüfterleistungen der Motoren zwar bescheiden ausfallen, ihre Wirkung in Bezug auf die Wärmeabfuhr jedoch ungemein grösser ist. Die Kombination aus den zwei beschriebenen Eigenschaften kann letztlich als Erklärung für das schlechte Abschneiden des Einsparpotenzials durch eine bedarfsgerechte Entkopplung des Wellenlüfters herbeigezogen werden. Das energetische Einsparpotenzial, wie es im vorhergehenden Kapitel beschrieben wurde, ist hinsichtlich dem jährlichen Einsparpotenzial auch unter guten Voraussetzungen marginal. Es ist davon auszugehen, dass sich in industrienahen Anwendungen wie Pumpensystemen keine relevanten Einsparungen erzielen lassen, während in Nischenanwendungen unter günstigen Bedingungen bis zu 1.2% Einsparungen möglich sind.

5.2 Einschätzung des Kostenpotenzials

Das ökonomische Potenzial wird im Wesentlichen von zwei Faktoren diktiert: Einerseits ergeben die Lüfterleistungsanteile der Maschine deren absolutes Energiekosteneinsparpotential, während andererseits die mittlere Jahresleistung die relative Einsparung formt. Für die meisten Anwendungen sind die Energiekosten der Maschine über den Lebenszyklus von 10-15 Jahren dominant und folglich die Kosteneinsparung in den TCO näherungsweise proportional zur Energieeinsparung. Damit zeichnen sich eignende Maschinen durch eine hohe Lüfterleistung aus, während ein häufiger Teillastbetrieb zu einem hohen jährlichen Anteil an Lüfterverlusten am Gesamtenergieumsatz führt. Anders betrachtet erzeugt eine nicht effizient eingesetzte Maschine ein hohes Einsparpotenzial, da deren Leistung überdimensioniert ist und die Verluste stärker ins Gewicht fallen. Eine bedarfsgerechte Entkopplung kann für Nischenanwendungen mit häufigem und längerem Teillastbetrieb ein mildes Einsparpotenzial von bis zu 1.2% an Energiekosten erzeugen. Am Beispiel einer 5.5 kW Maschine, welche mit einer mittleren Leistung von 2 kW betrieben wird, entstehen 12-jährige Energiekosten von 25-30 kCHF, womit sich ein Kostenpotenzial von rund 40 CHF ergibt. Diesem Bruttokostengewinn müssen letztlich die Kosten einer mechanischen Kupplung zuzüglich einer geeigneten Ansteuerung gegenübergestellt werden, wodurch sich das ökonomische Potenzial des Gesamtsystems auch für geeignete Nischenanwendungen auf weniger als 1% beschränken dürfte.



6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Dieser Bericht tritt im ersten Kapitel an die Initialidee einer bedarfsgerechten Lüfterentkopplung und zeigt weiter die Verlustarten sowie deren Erfassung auf. In der Folge wird die Methodik zur Evaluation der Eignung einer Lüfterentkopplung präsentiert, bevor die Resultate wie auch eine Interpretation in den letzten Kapiteln dargestellt werden. Sämtliche IE3 Motoren, welche Gegenstand der Untersuchungen waren, zeigten relativ hohe Effizienzen im netzgeführten Betrieb auf. Dies deutet letztlich auch darauf hin, dass moderne Asynchronmaschinen von den Herstellern merklich verlustoptimiert wurden, während die Maschinen als Gesamtsysteme bereits relativ kostengünstig sind.

Die Evaluation der Eignung einer Lüfterentkopplung münden in einem verschwindend geringen Potenzial bezüglich Energie- und Kosteneinsparung. Wenngleich die betrachteten Lüfterverluste relativ klein sind, so erweist sich die daraus erhöhte Kühlung der Motoren als effizient im Hinblick auf die sich einstellende Temperatur in den Statorwindungen und im Rotor. Für alle betrachteten Maschinen konnte zumindest eine Verdoppelung des Wärmeübergangskoeffizienten durch den Wellenlüfter im Vergleich zu einer Maschine mit entkoppeltem Lüfter beobachtet werden. Dies führt dazu, dass sich Maschinen signifikant stärker erwärmen ohne einen Wellenlüfter, wodurch temperaturabhängige Verluste sensitiv gegenüber einer Lüfterdeaktivierung reagieren. Die Verlustbilanz belegt letztlich die beschränkte Eignung des Vorhabens hinsichtlich dem ökonomischen resp. energetischem Potenzial. Zwar können in Nischenanwendungen mit geeignetem Lastprofil geringfügige Energieeinsparungen entstehen, allerdings ist erstens das Kostendach für den geplanten Kupplungsmechanismus äusserst fragwürdig und zweitens die Anzahl an geeigneten Industrieanwendungen überschaubar.

Das im Eingangskapitel beschriebene und angestrebte Folgeprojekt umfasst die Realisierung einer kostengünstigen Wellenlüfterkupplung. Deren Umsetzung muss nach Prüfung der Eignung von IE3 Asynchronmaschinen als nicht zweckmässig betrachtet werden, . Die starke Temperaturabhängigkeit des Wirkungsgrades der betrachteten Maschinen legt einem konträr zu einer bedarfsgerechten Entkopplung die Idee nahe, die Maschine durch zusätzliche Kühlung effizienter zu betreiben. Dies dürfte zu einem gewissen Grad umsetzbar sein, da der Hersteller der Maschinen diese für unterschiedliche Einsatzbedingungen freigeben muss resp. nur für eine Standardbedingung thermisch optimieren kann. Da die Wärmeabfuhr durch den Kühlerluftstrom eine Sättigung aufweist, müsste indes die Art der zusätzlichen Kühlung geprüft werden. So stellt eine Möglichkeit die Strömungsoptimierung der Lüfter und damit die Erhöhung der Wärmeabfuhr bezüglich der Lüfterleistung. Ein verlustoptimierendes Thermomanagement könnte mit Blick auf die in diesem Bericht evaluierten Temperatursensitivität entsprechend Potenzial aufweisen.



7 Referenzen

MHN	Advanced Electrical Drives, Mohan Ned, Wiley (2014)
KRA	Rotor Temperature Estimation Induction Motors (...), Kral Christian, IEEE (2004)
VIA	Design and Simulation of Permanent Magnet Synchronous Machines, Vezzini Andrea, BFH (2016)
MTL	How the efficiency of induction motor is measured, Mantilla L.F., unican (2008)
DAL	Efficiency Testing of Electric Induction Motors, De Almeida AT, IEEE (1997)
VDI	VDI Wärmeatlas, VDI-Gesellschaft, Springer (2013)



8 Anhänge

8.1 Anhang 1: IEC Effizienzmessungen

ABB 0.75kW (80MLA4)

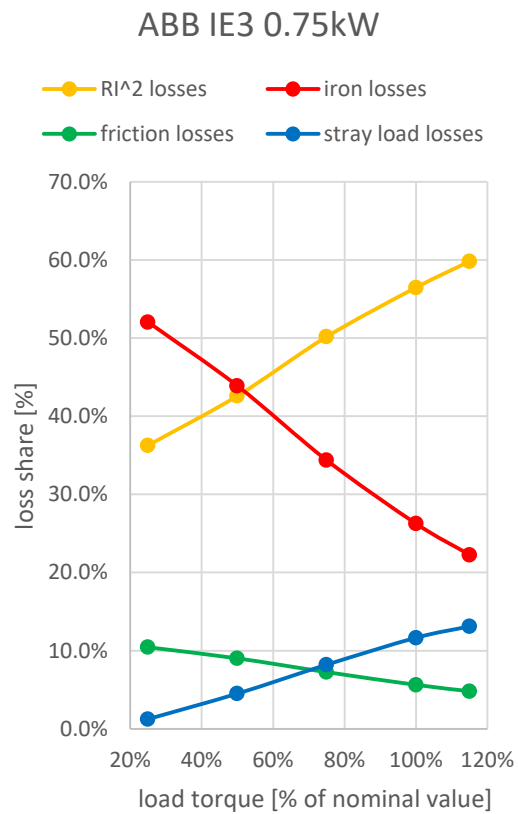
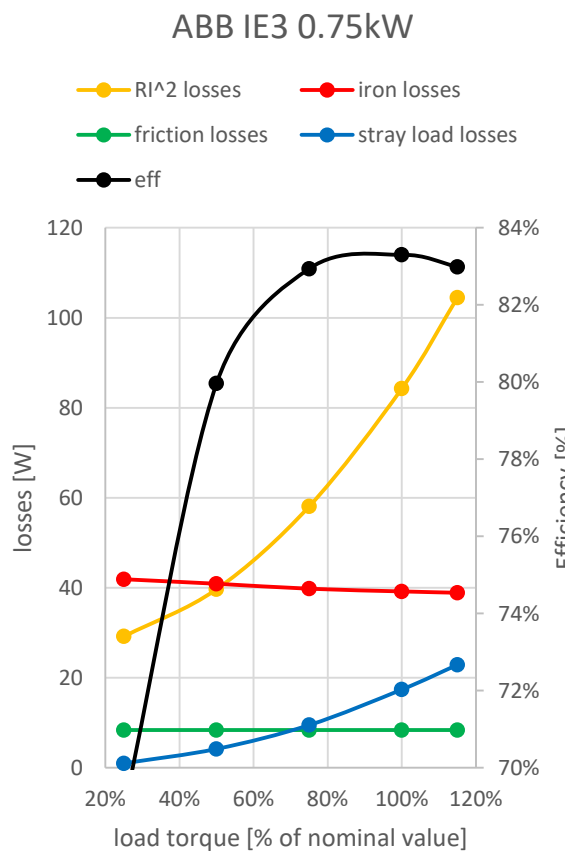
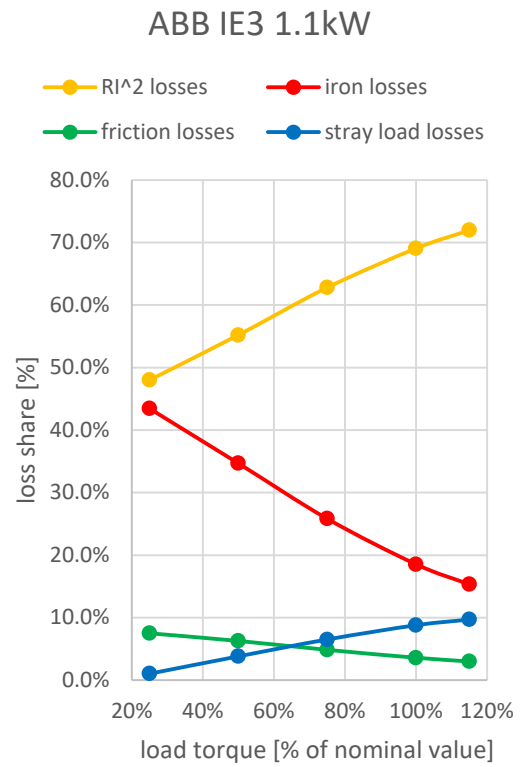
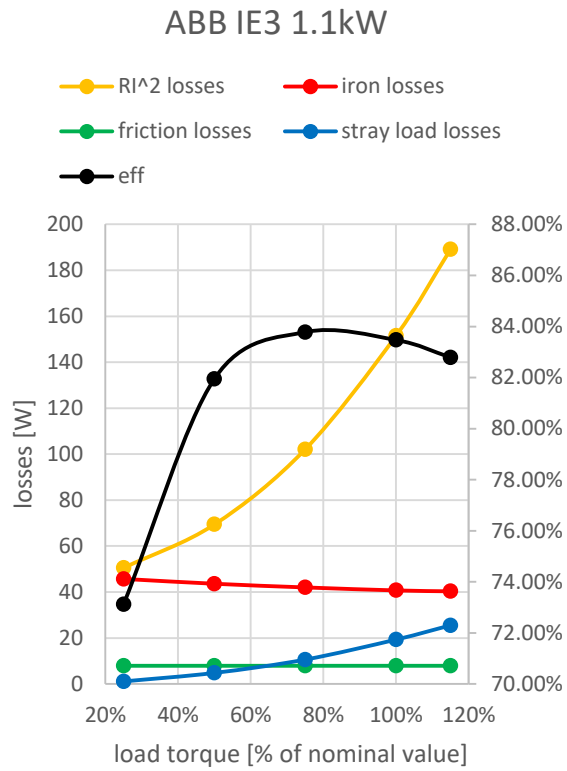




ABB 1.1kW (90SB4)





SIEMENS 1.5kW (CV3094B)

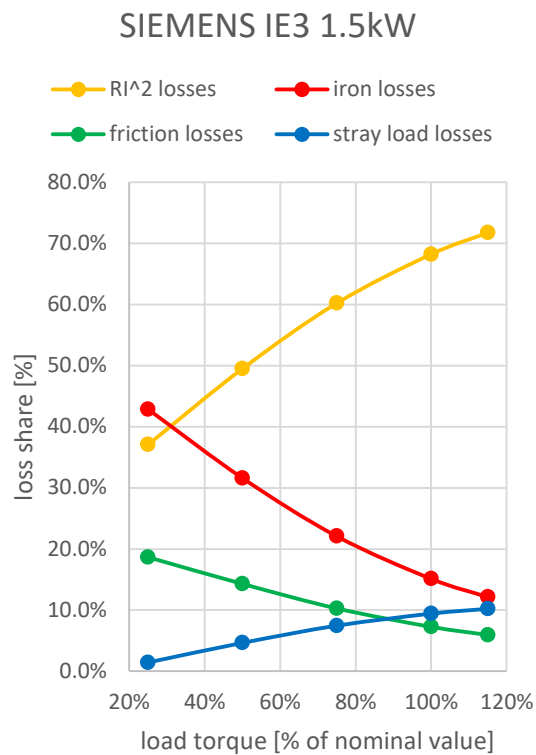
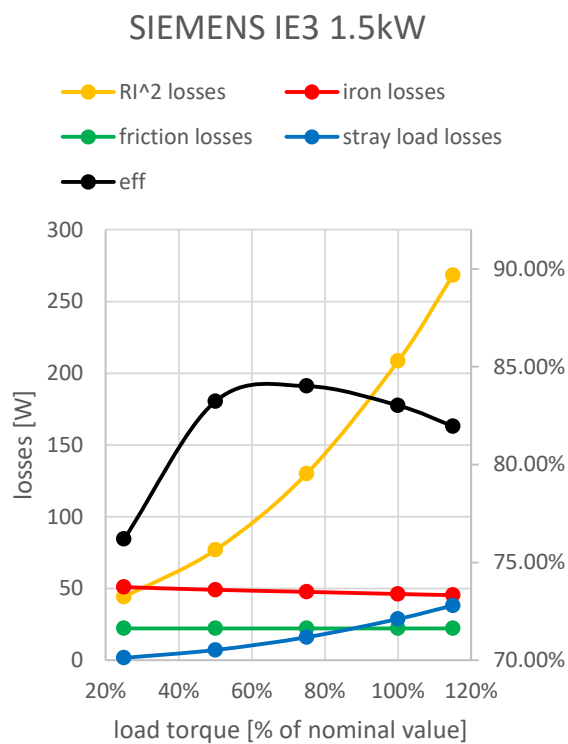




ABB 2.2kW (100LB4)

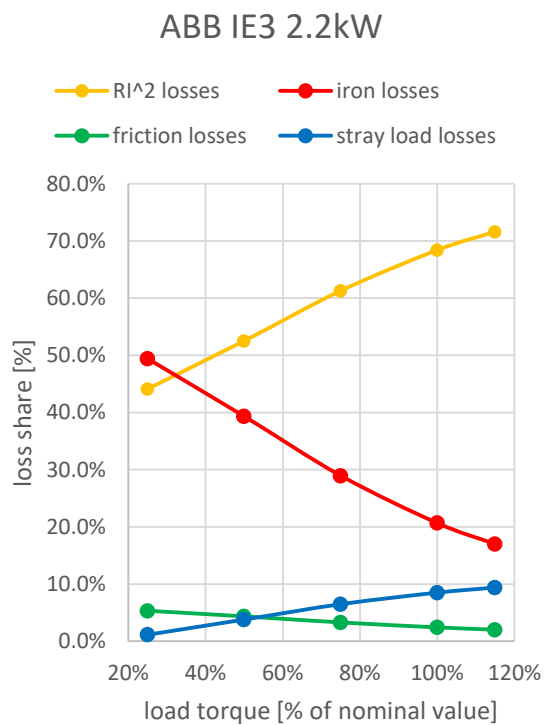
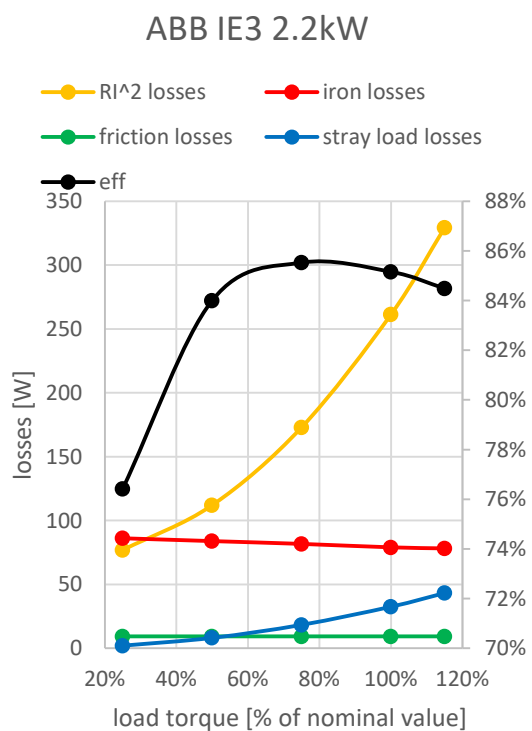
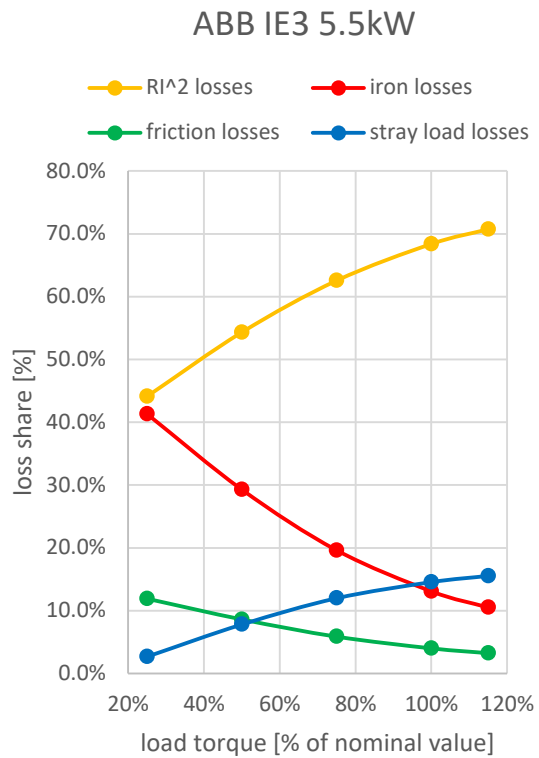
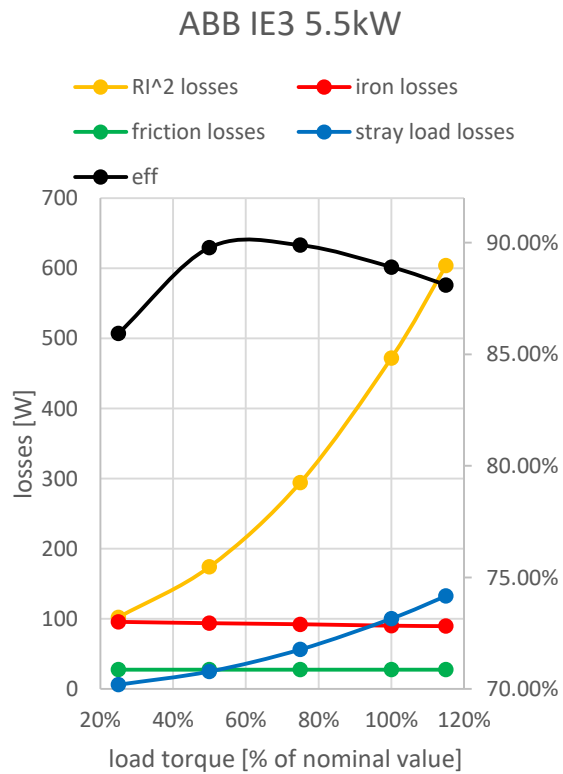




ABB 5.5kW (132SMA4)





8.2 Anhang 1: IEC Testprotokoll

Motor description										
Rated output power	kW		0.75		Manufacturer		ABB			
Rated voltage	V		230		Model Nr.		M2BAX80MLA4			
Rated current	A		3.2		Serial Nr.		x			
Rated speed	min ⁻¹		1445		Duty type IEC 60034-1					
Supply frequency	Hz		50		Design					
Number of Poles	-		4		Insulation class IEC 60085					
IEC 60034-30-1 (rated)				IE-Code		Max. ambient temperature °C				
Initial motor conditions				6.1.3.2.1 Rated load test						
Test resistance	R _i	Ω	3.5	Test resistance		R _N	Ω	3.781		
Winding temperature	T _s	°C	31.2	Winding temperature		T _s	°C	46.6		
Ambient temperature a °C 25				Ambient temperature a °C 24.8						
6.1.3.2.3 Load curve test				Test resistance before load test			R	Ω	3.781	
Rated output power		%	125 %	115 %	100 %	75 %	50 %	25 %		
Torque	T	N m	6.181	5.672	4.94	3.66	2.419	1.18		
Input power	P ₁	W	1116.47	1026.47	893.8	678.08	464.68	258.9		
Line current	I	A	3.593	3.395	3.12	2.713	2.397	2.198		
Operating speed	n	min ⁻¹	1430.2	1436.4	1445.4	1459.1	1472.8	1485.7		
Terminal voltage	U	V	230	230.4	230.3	229.8	230.2	230.4		
Frequency	f	Hz	50	50	50	50	50	50		
Winding temperature	T _s	°C	45.3	45.1	45.1	45	44.9	44.7		
				Test resistance after load test			R	Ω	3.755	
6.1.3.2.4 No-load test				Test resistance before no-load			R	Ω	3.755	
Rated voltage		%	110 %	100 %	95 %	90 %	60 %	50 %	40 %	30 %
Input power	P ₀	W	102.7	76.9	66.6	60.1	30.1	23.5	18.1	13.9
Line current	I ₀	A	2.563	2.14	1.952	1.812	1.098	0.892	0.705	0.535
Terminal voltage	U ₀	V	253.6	230.6	217.7	206.7	138.1	114.6	91.7	69.2
Frequency	f ₀	Hz	50	50	50	50	50	50	50	50
W. temperature	T _s	°C	44.8	44.5	44.4	44.3	44.2	44	43.9	43.6
				Test resistance after no-load test			R	Ω	3.716	
6.1.3.3 Efficiency determination										
Rated output power corr.	P _{2c}	%	125 %	115 %	100 %	75 %	50 %	25 %		
Output power corrected	P _{2c}	W	925.7	853.2	747.8	559.2	373	183.6		
Slip corrected	s _c	p.u.	4.57	4.2	3.55	2.64	1.76	0.9		
Input power corrected	P _{1c}	W	1116.5	1026.5	893.8	678.1	464.7	258.9		
Iron losses	P _{fe}	W	38.3	38.9	39.2	39.8	40.9	41.9		
Frict. and wind. losses corr.	P _{fw, c}	W	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4		
Additional-load losses	P _{LL}	W	27.2	22.9	17.4	9.5	4.2	1		
Stator losses corrected	P _s	W	73.2	65.4	55.2	41.8	32.6	27.4		
Rotor losses corrected	P _r	W	46.7	39.1	29.1	16.3	7.1	1.8		
Power factor	cos phi	%	78	75.7	71.8	62.8	48.6	29.5		
Efficiency	η	%	82.64	82.99	83.3	82.94	79.97	68.93		



Motor description									
Rated output power	kW	1.1		Manufacturer		ABB			
Rated voltage	V	230		Model Nr.		M2BAX90SB4			
Rated current	A	4.51		Serial Nr.		x			
Rated speed	min ⁻¹	1438		Duty type IEC 60034-1					
Supply frequency	Hz	50		Design					
Number of Poles	-	4		Insulation class IEC 60085					
IEC 60034-30-1 (rated)			IE-Code		Max. ambient temperature °C				
Initial motor conditions				6.1.3.2.1 Rated load test					
Test resistance	R _i	Ω	2.922	Test resistance		R _N	Ω	3.326	
Winding temperature	T _s	°C	25.5	Winding temperature		T _s	°C	42.7	
Ambient temperature a			°C	24.4			Ambient temperature a		
							°C		
							24.9		
6.1.3.2.3 Load curve test				Test resistance before load test			R	Ω	3.326
Rated output power		%	125 %	115 %	100 %	75 %	50 %	25 %	
Torque	T	N m	9.059	8.387	7.295	5.409	3.632	1.772	
Input power	P _i	W	1653.81	1526.64	1327.04	1002.22	695.48	391.13	
Line current	I	A	5.256	4.959	4.519	3.872	3.383	3.078	
Operating speed	n	min ⁻¹	1419.8	1426.9	1437.1	1453.8	1469.1	1483.7	
Teminal voltage	U	V	230.2	230.7	230	229.9	230.1	230.6	
Frequency	f	Hz	50	50	50	50	50	50	
Winding temperature	T _s	°C	40.9	40.7	40.5	40.5	40.3	40.2	
			Test resistance after load test			R	Ω	3.29	
6.1.3.2.4 No-load test				Test resistance before no-load			R	Ω	3.29
Rated voltage		%	110 %	100 %	95 %	90 %	60 %	50 %	40 %
Input power	P ₀	W	148.1	97.5	81.8	72	34.2	25.9	19.8
Line current	I ₀	A	3.792	2.973	2.682	2.461	1.441	1.156	0.918
Terminal voltage	U ₀	V	253.4	230	218	207.2	138.1	114.8	91.9
Frequency	f ₀	Hz	50	50	50	50	50	50	50
W. temperature	T _w	°C	40.5	39.8	39.6	39.4	39.1	38.9	38.5
			Test resistance after no-load test			R	Ω	3.206	
6.1.3.3 Efficiency determination									
Rated output power corr.	P _{2c}	%	125 %	115 %	100 %	75 %	50 %	25 %	
Output power corrected	P _{2c}	W	1346.9	1253.2	1097.8	823.5	558.7	275.4	
Slip corrected	s _c	p.u.	5.31	4.8	4.12	3.01	1.99	1	
Input power corrected	P _{1c}	W	1653.8	1526.6	1327	1002.2	695.5	391.1	
Iron losses	P _{fe}	W	39.6	40.3	40.7	42	43.6	45.7	
Frict. and wind. losses corr.	P _{fw, c}	W	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	
Additional-load losses	P _{ll}	W	29.7	25.5	19.3	10.6	4.8	1.1	
Stator losses corrected	P _{sc}	W	137.8	122.7	101.9	74.8	57.1	47.3	
Rotor losses corrected	P _{rc}	W	79	66.4	49.6	27.3	12.3	3.2	
Power factor	cos phi	%	78.9	77.1	73.7	65	51.6	31.8	



Efficiency	η	%	82.23	82.79	83.47	83.78	81.95	73.12
Motor description								
Rated output power	kW	2.2		Manufacturer		ABB		
Rated voltage	V	400		Model Nr.		M2BAX10LB4		
Rated current	A	4.77		Serial Nr.		3G1C18040641217003		
Rated speed	min ⁻¹	1451		Duty type IEC 60034-1				
Supply frequency	Hz	50		Design				
Number of Poles	-	4		Insulation class IEC 60085				
IEC 60034-30-1 (rated)			IE-Code			Max. ambient temperature °C		
Initial motor conditions			6.1.3.2.1 Rated load test					
Test resistance	R_i	Ω	3.628	Test resistance		R_N	Ω	4.732
Winding temperature	T_s	°C	23.3	Winding temperature		T_s	°C	71.1
Ambient temperature a °C 23.3			Ambient temperature a °C 25.5					
6.1.3.2.3 Load curve test			Test resistance before load test			R	Ω	4.732
Rated output power		%	125 %	115 %	100 %	75 %	50 %	25 %
Torque	T	N m	18.063	16.63	14.422	10.811	7.182	3.55
Input power	P_i	W	3225.01	2966.21	2574.71	1948.83	1333.12	738.53
Line current	I	A	5.735	5.385	4.88	4.145	3.547	3.155
Operating speed	n	min ⁻¹	1424.5	1431	1440.5	1456.3	1470.7	1484.1
Teminal voltage	U	V	400.1	400.5	399.6	400.6	400.4	400.1
Frequency	f	Hz	50	50	50	50	50	50
Winding temperature	w	°C	69.8	69.6	69.5	69.4	69.5	69.1
			Test resistance after load test			R	Ω	4.694
6.1.3.2.4 No-load test			Test resistance before no-load			R	Ω	4.694
Rated voltage		%	110 %	100 %	95 %	90 %	60 %	50 %
Input power	P_0	W	244.5	158.6	133.3	114.7	52.8	40.2
Line current	I_0	A	3.942	3.015	2.685	2.427	1.386	1.121
Terminal voltage	U_0	V	440	399.8	379.5	359.8	240	200.4
Frequency	f_0	Hz	50	50	50	50	50	50
W. temperature	T_s	°C	65.9	65.2	64.1	63.6	62.8	62.1
			Test resistance after no-load test			R	Ω	4.427
6.1.3.3 Efficiency determination								
Rated output power corr.	P_{2c}	%	125 %	115 %	100 %	75 %	50 %	25 %
Output power corrected	P_{2c}	W	2694.6	2492.1	2175.6	1648.7	1106.1	551.7
Slip corrected	s_c	p.u.	4.96	4.56	3.89	2.83	1.89	0.99
Input power corrected	P_{1c}	W	3225	2966.2	2574.7	1948.8	1333.1	738.5
Iron losses	P_{fe}	W	77.1	78.2	79	81.7	83.9	86.1
Frict. and wind. losses corr.	$P_{fw,i}$	W	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3
Additional-load losses	P_{LL}	W	51	43.2	32.5	18.3	8.1	2
Stator losses corrected	P_{sc}	W	233.4	205.9	169	122	89.3	70.7
Rotor losses corrected	P_{rc}	W	146.6	123.4	92.3	50.9	22.7	6.2
Power factor	cos phi	%	81.2	79.4	76.2	67.8	54.2	33.8
Efficiency	η	%	83.95	84.49	85.16	85.53	84	76.42



Motor description									
Rated output power	kW		5.5		Manufacturer		ABB		
Rated voltage	V		400		Model Nr.		M2BAX132SMA4		
Rated current	A		11.5		Serial Nr.		3G1C17360618333005		
Rated speed	min ⁻¹		1463		Duty type IEC 60034-1				
Supply frequency	Hz		50		Design				
Number of Poles	-		4		Insulation class IEC 60085				
IEC 60034-30-1 (rated)				IE-Code		Max. ambient temperature °C			
Initial motor conditions									
Test resistance	R _i	Ω	1.413						
Winding temperature	T _s	°C	24						
Ambient temperature a °C				23.7	Ambient temperature a °C				25.2
6.1.3.2.3 Load curve test				Test resistance before load test			R	Ω	1.66
Rated output power		%	125 %	115 %	100 %	75 %	50 %	25 %	
Torque	T	Nm	44.828	41.232	35.886	26.887	17.916	8.9	
Input power	P ₁	W	7825.46	7178.74	6223.91	4657.7	3139.43	1649.63	
Line current	I	A	13.778	12.802	11.424	9.272	7.452	6.102	
Operating speed	n	min ⁻¹	1451.5	1456.1	1462	1472.2	1481.5	1490.2	
Terminal voltage	U	V	400.1	400.3	399.5	400.3	400.1	400.2	
Frequency	f	Hz	50	50	50	50	50	50	
Winding temperature	w	°C	40.9	40.8	40.8	40.7	40.8	40.7	
			Test resistance after load test			R	Ω	1.645	
6.1.3.2.4 No-load test				Test resistance before no-load			R	Ω	1.645
Rated voltage		%	110 %	100 %	95 %	90 %	60 %	50 %	40 %
Input power	P ₀	W	262.8	198.2	176.3	158.5	82.1	65.6	52.3
Line current	I ₀	A	6.699	5.539	5.101	4.717	2.895	2.375	1.891
Terminal voltage	U ₀	V	439.7	400.2	379.9	360.3	240	200.1	159.9
Frequency	f ₀	Hz	50	50	50	50	50	50	50
W. temperature	T _s	°C	40.7	40.3	40	39.9	39.6	39.3	39.1
			Test resistance after no-load test			R	Ω	1.582	
6.1.3.3 Efficiency determination									
Rated output power corr.	P _{2c}	%	125 %	115 %	100 %	75 %	50 %	25 %	
Output power corrected	P _{2c}	W	6814.1	6287	5494	4145.2	2779.5	1388.8	
Slip corrected	s _c	p.u.	3.16	2.86	2.46	1.78	1.21	0.62	
Input power corrected	P _{1c}	W	7825.5	7178.7	6223.9	4657.7	3139.4	1649.6	
Iron losses	P _{fe}	W	89	89.7	90.3	92.4	93.9	95.8	
Frict. and wind. losses corr.	P _{fw,1}	W	27.6	27.6	27.6	27.6	27.6	27.6	
Additional-load losses	P _{LL}	W	156.7	132.6	100.4	56.4	25	6.2	
Stator losses corrected	P _{sc}	W	472.6	408.1	324.9	214	138.3	92.7	
Rotor losses corrected	P _{rc}	W	234.7	195.6	147.2	80.6	35.9	9.6	
Power factor	cos phi	%	82	80.9	78.7	72.4	60.8	39	
Efficiency	η	%	87.47	88.11	88.91	89.89	89.78	85.94	



Motor description									
Rated output power		kW	1.5		Manufacturer		SIEMENS		
Rated voltage		V	400		Model Nr.		1CV3094B		
Rated current		A	3.15		Serial Nr.		x		
Rated speed		min ⁻¹	1445		Duty type IEC 60034-1				
Supply frequency		Hz	50		Design				
Number of Poles		-	4		Insulation class IEC 60085				
IEC 60034-30-1 (rated)				IE-Code		Max. ambient temperature °C			
Initial motor conditions									
Test resistance		R _i	Ω	7.807					
Winding temperature		T _s	°C	27.5					
Ambient temperature a °C 25.6				Ambient temperature a °C 25.6					
6.1.3.2.3 Load curve test				Test resistance before load test			R	Ω	8.621
Rated output power			%	125 %	115 %	100 %	75 %	50 %	25 %
Torque		T	Nm	12.329	11.382	9.884	7.383	4.95	2.432
Input power		P ₁	W	2256.97	2074.91	1800.03	1351.34	927.75	499.91
Line current		I	A	3.897	3.631	3.24	2.641	2.138	1.747
Operating speed		n	min ⁻¹	1413.1	1421	1432.6	1450.7	1467.4	1483.1
Terminal voltage		U	V	399.9	400.2	400	400	399.8	400.5
Frequency		f	Hz	50	50	50	50	50	50
Winding temperature		T _s	°C	41.7	41.7	41.8	41.5	41.4	41.1
				Test resistance after load test			R	Ω	8.513
6.1.3.2.4 No-load test				Test resistance before no-load			R	Ω	8.513
Rated voltage			%	110 %	100 %	95 %	90 %	60 %	50 %
Input power		P ₀	W	133.8	105.8	94.1	85.7	48.7	40.8
Line current		I ₀	A	1.898	1.579	1.445	1.33	0.802	0.655
Terminal voltage		U ₀	V	440.2	400.1	380	360.6	240.5	199.6
Frequency		f ₀	Hz	50	50	50	50	50	50
W. temperature		T _s	°C	40.7	39.9	39.7	39.5	39.3	39
				Test resistance after no-load test			R	Ω	8.283
6.1.3.3 Efficiency determination									
Rated output power corr.		P _{2c}	%	125 %	115 %	100 %	75 %	50 %	25 %
Output power corrected		P _{2c}	W	1824.5	1693.7	1482.9	1121.6	760.6	377.7
Slip corrected		s _c	p.u.	5.71	5.23	4.42	3.22	2.12	1.05
Input power corrected		P _{1c}	W	2257	2074.9	1800	1351.3	927.7	499.9
Iron losses		P _{fe}	W	44.8	45.4	46.2	47.7	49.1	51
Frict. and wind. losses corr.		P _{fw,1}	W	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2
Additional-load losses		P _{LL}	W	44.9	38.2	28.8	16.1	7.2	1.7
Stator losses corrected		P _{sc}	W	196.4	170.5	135.8	90.2	59.1	39.5
Rotor losses corrected		P _{rc}	W	116.7	97.9	72.7	39.9	17.8	4.6
Power factor		cos phi	%	83.6	82.5	80.2	73.8	62.7	41.2
Efficiency		η	%	81.17	81.96	83.02	84.01	83.23	76.19