



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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

**Schlussbericht** 26. Oktober 2010

---

# **Effizienter Betrieb von Asynchronmotoren**

---



**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien & -anwendungen  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Auftragnehmer:**

Fachhochschule Nordwestschweiz  
Institut für Aerosol und Sensortechnik  
Klosterzelgstrasse 2  
5210 Windisch  
<http://www.fhnw.ch>

**Autoren:**

Nick Beeli, FHNW, [nick.beeli@students.fhnw.ch](mailto:nick.beeli@students.fhnw.ch)  
Felix Jenni, FHNW, [felix.jenni@fhnw.ch](mailto:felix.jenni@fhnw.ch)

**BFE-Bereichsleiter:** Dr. Michael Moser

**BFE-Programmleiter:** Roland Brüniger

**BFE-Vertrags- und Projektnummer:** 154231/ 103210

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.



# Inhaltsverzeichnis

A.	Zusammenfassung.....	4
B.	Projektziele .....	7
C.	Arbeiten und Ergebnisse .....	8
1.	Mathematische Beschreibung der ASM.....	8
1.1.	Allgemeine Formeln des Motors .....	10
1.2.	Wirkleistungsaufnahme .....	11
1.3.	Belastung.....	11
1.4.	Wirkungsgrad.....	11
1.5.	Weitere Formeln.....	12
2.	Bestimmung und Modellierung der Ersatzelemente einer ASM .....	13
2.1.	Vorbereitungsversuch .....	13
2.2.	Kurzschlussversuch .....	13
2.3.	Leerlaufversuch.....	14
2.4.	Stromverdrängung im Rotorwiderstand .....	17
2.5.	Identifizierung der mechanischen Verluste .....	20
3.	Typische Steuerung eines Frequenzumrichters mit $U/f = \text{konstant}$ .....	24
4.	Flussführung für maximale Wirkungsgrad .....	25
5.	Beschreibung des Algorithmus für Konstantfluss.....	27
6.	Theoretische Ergebnisse.....	28
6.1.	Ohne Berücksichtigung der Eisensättigung .....	28
6.2.	Mit Berücksichtigung der Eisensättigung .....	33
6.3.	Vergleich der Gewinne mit und ohne Berücksichtigung der Eisensättigung.....	38
6.4.	Gewinn bei Sättigung mit und ohne Berücksichtigung der Reibungen.....	39
6.5.	Welche Anpassung für optimalen Wirkungsgrad .....	40
7.	Käufliche FU mit Wirkungsgradoptimierung.....	40
7.2.	Firma B (Nenndrehzahl 1410 U/min, 1.5kW) .....	42
7.3.	Firma C (Nenndrehzahl 1465 U/min, 5.5kW) .....	43
7.4.	Vergleich und Diskussion der Resultate .....	44
8.	Einfluss auf den Wirkungsgrad eines speisenden FU's .....	46
8.1.	Theorie.....	46
8.2.	Abschätzung .....	46
9.	Synchron- versus Asynchronmaschine.....	47
9.1.	Ausgangslage .....	47
9.2.	Synchronmotor mit Permanentmagneterregung .....	47
10.	Einsparpotential in der Schweiz .....	51
10.1.	Endverbrauch der ASM .....	51
10.2.	Einsparungspotential pro Leistungsklasse .....	54
10.3.	Wirtschaftliches Potential.....	59
10.4.	Zusammenstellung für das Jahr 2006.....	60
10.5.	Zusammenstellung für das Jahr 2007 .....	61
10.6.	Finanzielle Bedeutung der Ergebnisse .....	62
D.	Bewertung .....	63
E.	Symbolverzeichnis .....	64
F.	Referenzen .....	65
G.	Quellen.....	65
H.	Liste der Abbildungen.....	66
I.	Dank.....	68
J.	Anhänge.....	69



## A. Zusammenfassung

Untersuchungen zeigen, dass die elektrischen Verluste in Motoren ein grosses Sparpotential aufweisen. Der grösste Anteil der Verluste kann Käfigläufer-Asynchronmotoren (ASM) im mittleren Leistungsbereich zugeordnet werden. Vom ausgewiesenen Sparpotential wiederum kann ein grosser Anteil mit der Verwendung von Frequenzumrichtern (FU) ausgeschöpft werden. Aber auch beim Betrieb mit FU werden die Maschinen noch nicht optimal betrieben: Mit einer geschickten Reduktion des Magnetisierungsstromes ist bei Teillast eine weitere Erhöhung des Wirkungsgrades möglich.

Die theoretischen Ermittlungen des Sparpotentials wurden ohne und mit Sättigung des Eisens durchgeführt. Das Verhalten der Maschinen in den verschiedenen Betriebsfällen wird mittels Simulationen beschrieben. Zwei Algorithmen zur Steuerung eines FUs wurden eingesetzt: Einer entsprechend einem typischen FU-Einsatz mit konstantem Fluss in der Maschine als Referenz und einer für Betrieb bei bestem Wirkungsgrad.

Die Ergebnisse zeigen, dass für alle ASM in der Schweiz zusammen im stationären Betrieb ein *theoretisches* Einsparpotential von bis zu 643 GWh, möglich ist, entsprechend 4% des gesamten elektrischen Verbrauchs der ASM in der Schweiz. Das entspräche bei einem Preis von 0.15 CHF/kWh einer Einsparung von etwa 95 Mio. CHF p.A. für die Kunden! An dieser Stelle muss aber betont werden, dass sich das Potential nur dort ausschöpfen lässt, wo die Motoren über Stromrichter gespeist werden.

FU mit Wirkungsgradoptimierung sind heute von einzelnen Herstellern erhältlich. Es interessiert, ob die Energieeinsparungen dieser FU den theoretisch möglichen Werten entsprechen. Dazu wurden drei FU von verschiedenen Herstellern ausgemessen. Es zeigte sich, dass die Optionen zur Energieeinsparung nur im stationären Betrieb wirksam sind und die Algorithmen für Drehmomente kleiner als 10% offenbar noch nicht optimiert sind. Der Grund dafür ist nicht klar, da die von den Herstellern verwendeten Algorithmen nicht bekannt sind (und auf Nachfrage auch nicht bekannt gegeben werden).

Vorwärtsgerichtet wäre es erstrebenswert, Verfahren zu haben, die in jedem Betriebspunkt, und auch bei dynamischen Vorgängen, immer einen optimalen Wirkungsgrad ergeben.



## Résumé

Des recherches ont montré que la réduction des pertes électriques dans les moteurs présente un important potentiel d'économie. La plus grande part des pertes est due aux machines asynchrones (ASM) dans la gamme des moyennes puissances. Ces pertes ont pu être minimisées en majeure partie grâce à l'utilisation de convertisseurs de fréquence. Même lorsqu'on opère avec des convertisseurs, les machines ne fonctionnent encore pas de façon optimale. C'est pourquoi, en situation de régime non-dynamique, il est possible d'améliorer l'efficacité de la machine à l'aide d'une réduction intelligente du courant magnétisant.

Les études théoriques sur cette économie ont été réalisées avec et sans prise en compte de la saturation du fer. Le comportement des machines dans les différents cas de fonctionnement est décrit au moyen de simulations. Deux algorithmes de contrôle, que pourraient utiliser des convertisseurs, ont été développés: l'un correspondant à une commande typique (flux constant dans la machine comme référence) et un autre pour obtenir un rendement optimal.

Les résultats montrent qu'une économie allant jusqu'à 643 GWh par année est possible pour l'ensemble des machines asynchrones fonctionnant à régime non-dynamique en Suisse, ce qui correspond à 4% de la consommation électrique totale des ASM du pays. Avec un prix de 0.15 CHF / kWh, ceci représenterait un gain d'environ 95 millions CHF pour les clients! A ce stade, il convient de souligner, que ce potentiel peut s'exploiter à condition que chaque moteur soit équipé d'un convertisseur de fréquence.

Des convertisseurs avec optimisation du rendement sont aujourd'hui disponibles chez certains fabricants. Il est intéressant de vérifier si ces économies d'énergie correspondent aux résultats théoriques. C'est ainsi que trois de ces convertisseurs ont été mesurés. Il a été constaté que ces améliorations sont efficaces uniquement pour des régimes non-dynamiques et que ces algorithmes ne sont pas encore optimaux pour des couples inférieurs à 10%. La raison n'est pas claire, car les algorithmes utilisés ne sont pas connus et impossibles à obtenir.

Il serait souhaitable de disposer d'une méthode recherchant le point optimal pour des processus dynamiques. Ceci pourrait se faire dans une prochaine étude.



## Abstract

Research has shown that the reduction of energy losses in electrical machines offers an enormous saving potential. The largest share of these losses is represented by induction motors in the medium power range. A significant fraction of these losses could be minimized by using modern frequency converters instead of traditional drive systems. However, even when operated with converters, the efficiency of these machines is still not optimal: By implementing an intelligent control scheme which involves a reduction in the magnetizing current, a significant improvement in efficiency can be achieved.

Theoretical studies of the economical potential were conducted with and without the iron saturation taken into account. The behavior of the machines in the two cases of operation was described by numerical simulation. Two control algorithms that could be used in a converter have been developed: One utilizing a typical control methodology (constant flux in the machine as a reference) and another designed for optimal performance.

The results show that an economical potential of up to 643 GWh per year is possible in Switzerland for all asynchronous machines, which corresponds to 4% of the total power consumption of these machines in Switzerland. With a price of 0.15 CHF / kWh, this represents a saving of approximately 95 million CHF in savings potential. At this stage, it should be emphasized that this potential can be exploited provided that each machine is already equipped with a frequency converter.

Converters with optimized performance are available from select manufacturers. Further investigation was required to determine if the measured savings correspond to the theoretical results. Thus, three converters have been measured in the laboratory using a controlled experiment. It was found that these saving options are effective only for non-dynamic regimes and that the algorithms are not yet ideal for torques below 10% of nominal. The reason for these results are unclear, as the algorithms used are proprietary and not disclosed by the manufactures of the frequency converters.

In a subsequent investigation the methods employed in this study should be applied to determine the savings potential of these algorithms within the dynamic regimes of the systems.



## B. Projektziele

### Ausgangssituation

In runden Zahlen beträgt der elektrische Energieverbrauch in der Schweiz knapp 60 TWh, entsprechend etwa einem Viertel des gesamtschweizerischen Energieverbrauchs. Davon wiederum wird knapp die Hälfte für Antriebszwecke eingesetzt. Diese Antriebe weisen gemäss verschiedenen Untersuchungen ein Einsparpotential von 20 bis 25% auf, was mindestens 6 TWh entspricht, also 10% des gesamten elektrischen Verbrauches. Der grösste Teil dieser Verluste fällt in Käfigläufer Asynchronmaschinen an, die in sehr grossen Stückzahlen im Einsatz sind.

Vom genannten elektrischen Einsparpotential kann im Mittel etwa ein Viertel durch den Einsatz von Frequenzumrichtern (FU) realisiert werden, d.h. 1.5 TWh entsprechend 2.5% des gesamten Elektrizitätsverbrauchs. Aber auch beim Betrieb mit einfachen FU werden die Maschinen noch nicht optimal betrieben: Bei Käfigläufer-Asynchronmaschinen kann bei Schwachlast durch die Reduktion des Magnetisierungsstromes (Feldschwächung) der Wirkungsgrad verbessert werden. Ein zu grosser Magnetisierungsstrom erhöht die Eisen- und Kupferverluste in der Maschine unnötig. Es wird geschätzt, dass so im Schwachlastbereich der Wirkungsgrad um mehrere Prozente angehoben werden kann.

### Vorgehen

Im ersten Teil dieses Projektes soll die theoretisch mögliche Wirkungsgradverbesserung quantifiziert und anschliessend, daraus das gesamtschweizerische Einsparpotential bestimmt werden.

In einem zweiten Teil soll anschliessend mittels Messungen an kommerziell erhältlichen FU verifiziert werden, wie weit das theoretisch mögliche Einsparpotential heute ausgeschöpft wird. Dieser Schritt soll wenn möglich in Zusammenarbeit mit FU-Herstellern (ABB, Danfoss, Fuji, Mitsubishi, Siemens,...) bearbeitet werden.



# C. Arbeiten und Ergebnisse

## 1. Mathematische Beschreibung der ASM

Für die Berechnung des optimalen Wirkungsgrades der ASM wird ein mathematisches Modell benötigt. Für den stationären Betrieb kann dieses aus der Transformator-Ersatzschaltung der Maschine in Abbildung 1 hergeleitet werden.

In einem ersten Schritt werden die Statorimpedanzen zusammengefasst: Ein lineares Netzwerk, welches einen Dipol an den Klemmen A und B versorgt, (Referenz [4] „Don H.Johnson“) kann durch eine ideale Spannungsversorgung  $\underline{U}_e$  und eine Impedanz  $\underline{Z}_e$  ersetzt werden:

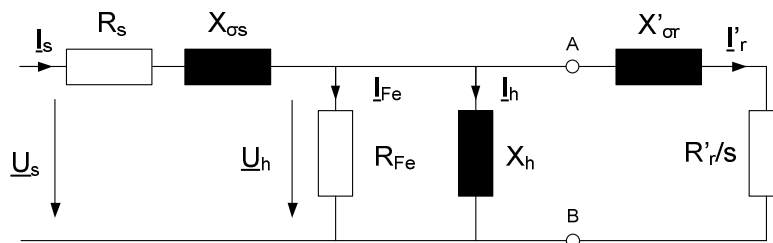


Abbildung 1: Modell der Asynchronmaschinen

Entsprechend lässt sich die obige Schaltung der ASM vereinfachen:

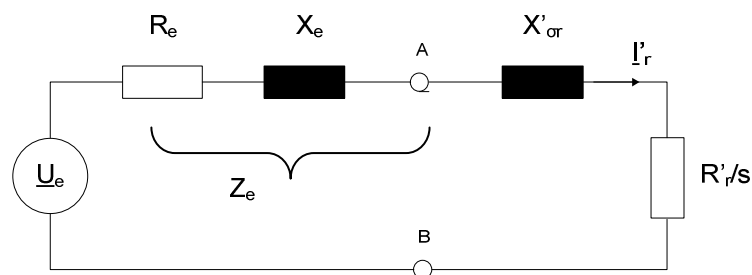


Abbildung 2: Vereinfachtes Modell des ASM

$R_s$ ,  $X_{\sigma s}$ ,  $R_{Fe}$  und  $X_h$  sind darin mit  $R_e$  und  $X_e$  modelliert und die Spannung  $\underline{U}_s$  ist durch die Ersatzspannung  $\underline{U}_e$  ersetzt.

Um das Modell (Abbildung 2) zu bestimmen werden zwei Berechnungen notwendig:

- Berechnung der Leerlaufspannung  $\underline{U}_e$
- Berechnung der Impedanz  $\underline{Z}_e$



## Berechnung der Thevenin-Leerlaufspannung und -Impedanz

Abbildungen 3 und 4 zeigen, wie die äquivalente Spannung  $\underline{U}_e$  und die Impedanz  $Z_e$  bestimmt werden:

Aus der Spannung  $\underline{U}_s$  am Eingang wird die Spannung über den Klemmen A und B berechnet.

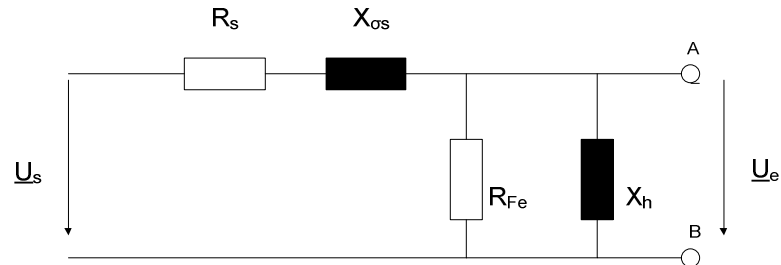


Abbildung 3: Schaltung zur Bestimmung der Leerlaufspannung

Im zweiten Schritt wird mit einem Kurzschluss am Eingang die Impedanz, die von den Klemmen A und B aus gesehen wird, bestimmt.

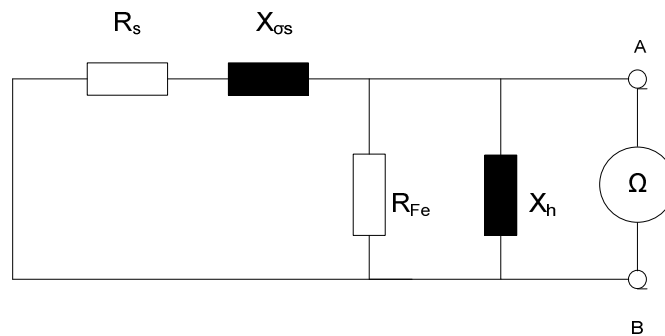


Abbildung 4: Schaltung zur Bestimmung der Impedanz suchen

Die Ersatzimpedanz  $\underline{Z}_e$  wird schliesslich durch  $R_e$  und  $X_e$  in Abbildung 2 modelliert.

$$\underline{U}_e = \underline{U}_s \cdot \frac{\frac{R_{Fe} \cdot j \cdot X_h}{R_{Fe} + j \cdot X_h}}{\underbrace{\frac{R_{Fe} \cdot j \cdot X_h}{R_{Fe} + j \cdot X_h} + R_s + j \cdot X_{\sigma s}}_{\alpha}} \quad (\alpha \text{ wird auf der Seite 12 weiterverwendet})$$

$$\underline{U}_e = \underline{U}_s \cdot \frac{R_{Fe} \cdot j \cdot X_h}{\underbrace{R_{Fe} \cdot j \cdot X_h + R_s \cdot (R_{Fe} + j \cdot X_h) + j \cdot X_h \cdot (R_{Fe} + j \cdot X_h)}_{\alpha}} \quad (1.1)$$

$$\underline{Z}_e = R_e + j \cdot X_e = \frac{R_{Fe} \cdot j \cdot X_h \cdot (R_s + j \cdot X_{\sigma s})}{(R_s + j \cdot X_{\sigma s}) \cdot R_{Fe} + (R_s + j \cdot X_{\sigma s}) \cdot j \cdot X_h + R_{Fe} \cdot j \cdot X_h} \quad (1.2)$$



## 1.1. Allgemeine Formeln des Motors

Die nachfolgenden Gleichungen für die ASM gelten bei Speisung der Maschine mit symmetrischen, sinusförmigen Spannungen! Es werden die Formeln vorgestellt, die für die Berechnungen benutzt wurden. Auf die schrittweise Herleitung wird verzichtet.

$$s = \frac{\omega_s - p \cdot \omega_{mec.}}{\omega_s} = \frac{f_r}{f_s} \text{ Schlupf} \quad (1.3)$$

$$P_\delta = \frac{P_{mec.}}{(1-s)} \text{ Luftspaltleistung} \quad (1.4)$$

$$M_\delta = \frac{P_\delta}{2 \cdot \pi \cdot n_s} = \frac{m}{2 \cdot \pi \cdot n_s} \cdot \frac{R_r'}{s} \cdot \frac{U_e^2}{\left(R_e + \frac{R_r'}{s}\right)^2 + (X_e + X_{\sigma r}')^2} \text{ Luftspalt- Moment} \quad (1.5)$$

$$U_e = \sqrt{\frac{P_\delta \cdot \left[ \left(R_e + \frac{R_r'}{s}\right)^2 + (X_e + X_{\sigma r}')^2 \right] \cdot s}{m \cdot R_r'}} \text{ Klemmen- Spannung (Ersatz-Spannung)} \quad (1.6)$$

$$U_s = \left| U_e \cdot \frac{\frac{R_{Fe} \cdot j \cdot X_h + R_s + j \cdot X_{\sigma s}}{R_{Fe} + j \cdot X_h}}{\frac{R_{Fe} \cdot j \cdot X_h}{R_{Fe} + j \cdot X_h}} \right| \quad (1.7)$$

$$\underline{I}_s = \frac{U_s}{\underline{Z}_{tot}} \text{ Stator-Strom} \quad (1.8)$$

$$\underline{I}_s = \frac{\underline{U}_s}{\underbrace{R_s + j \cdot X_{\sigma s} + \left[ \frac{R_{Fe} \cdot j \cdot X_h \cdot \left( \frac{R_r'}{s} + j \cdot X_{\sigma r}' \right)}{\left( \frac{R_r'}{s} + j \cdot X_{\sigma r}' \right) \cdot R_{Fe} + \left( \frac{R_r'}{s} + j \cdot X_{\sigma r}' \right) \cdot j \cdot X_h + R_{Fe} \cdot j \cdot X_h} \right]}_{\underline{Z}_{tot}}}$$

$$\underline{S} = \underline{U}_s \cdot \underline{I}_s^* \cdot m \text{ Stator -Scheinleistung} \quad (1.9)$$

$$\eta = \frac{P_{mec.}}{\text{real}(\underline{S})} \cdot 100 \text{ Wirkungsgrad} \quad (1.10)$$

$$P_v = \text{real}(\underline{S}) - P_{mec.} \text{ Verluste} \quad (1.11)$$



## 1.2. Wirkleistungsaufnahme

$$\underline{S} = \underline{U}_s \cdot \underline{I}_s^* \cdot m = \left( \frac{\underline{U}_s \cdot \underline{U}_s^*}{\underline{Z}_{tot}} \cdot m \right)^* \text{ Stator- Scheinleistung} \quad (1.12)$$

$$\underline{Z}_{tot} = \underline{Z}_e + j \cdot X'_{\sigma r} + \frac{R'_r}{s} = R_{tot} + j \cdot X_{tot} \text{ Impedanz des Modells der ASM} \quad (1.13)$$

$\underline{U}_s$  wird auf die reelle Achse gelegt  $\underline{U}_s = U_s$

$$\underline{S}_{in} = \left( \frac{U_s^2 \cdot 3}{\underline{Z}_{tot}} \right)^* = \left( \frac{U_s^2 \cdot 3}{R_{tot} + j \cdot X_{tot}} \right)^* \text{ Stator- Scheinleistung} \quad (1.14)$$

$$\underline{S}_{in} = P_{in} + j \cdot Q_{in} = \underbrace{\frac{R_{tot} \cdot U_s^2 \cdot 3}{R_{tot}^2 + X_{tot}^2}}_{P_{in}} + j \cdot \underbrace{\frac{X_{tot} \cdot U_s^2 \cdot 3}{R_{tot}^2 + X_{tot}^2}}_{Q_{in}}$$

$$P_{in} = \frac{R_{tot} \cdot U_s^2 \cdot 3}{R_{tot}^2 + X_{tot}^2} \text{ Stator- Wirkleistung} \quad (1.15)$$

## 1.3. Belastung

$$\underline{I}'_r = \frac{U_e}{\underline{Z}_{tot}} = \frac{U_e}{\underline{Z}_e + j \cdot X'_{\sigma r} + \frac{R'_r}{s}} \text{ Rotor-Strom} \quad (1.16)$$

$$M_\delta = \frac{m}{2 \cdot \pi \cdot n_s} \cdot \frac{R'_r}{s} \cdot I_r'^2 = \frac{m}{2 \cdot \pi \cdot n_s} \cdot \frac{R'_r}{s} \cdot \frac{U_e^2}{\left( R_e + \frac{R'_r}{s} \right)^2 + \left( X_e + X'_{\sigma r} \right)^2} \text{ Luftspalt-Moment} \quad (1.17)$$

$$P_{mec} = M_{mec} \cdot \omega_{mec} = M_{mec} \cdot \omega_s \cdot (1-s) = M_{mec} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_s \cdot (1-s) \text{ Mechanische Leistung} \quad (1.18)$$

$$P_{mec} = m \cdot (1-s) \cdot \frac{R'_r}{s} \cdot \frac{U_e^2}{\left( R_e + \frac{R'_r}{s} \right)^2 + \left( X_e + X'_{\sigma r} \right)^2} \quad (1.19)$$

## 1.4. Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{in}} = \frac{m \cdot (1-s) \cdot \frac{R'_r}{s} \cdot \frac{U_e^2}{\left( R_e + \frac{R'_r}{s} \right)^2 + \left( X_e + X'_{\sigma r} \right)^2}}{\frac{R_{tot} \cdot U_s^2 \cdot m}{R_{tot}^2 + X_{tot}^2}}$$



$$\eta = (1-s) \cdot \frac{R'_r}{s} \cdot \frac{U_e^2}{\left(R_e + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + (X_e + X'_{\sigma r})^2} \cdot \frac{R_{tot}^2 + X_{tot}^2}{R_{tot} \cdot U_s^2} \quad (1.20)$$

Gleichung (1.1) können wir vereinfachen zu:  $U_e = U_s \cdot \alpha$

$$\eta = (1-s) \cdot \frac{R'_r}{s} \cdot \frac{U_s^2 \cdot \alpha^2}{\left(R_e + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + (X_e + X'_{\sigma r})^2} \cdot \frac{R_{tot}^2 + X_{tot}^2}{R_{tot} \cdot U_s^2}$$

$$\eta = (1-s) \cdot \frac{R'_r}{s} \cdot \frac{\alpha^2}{\left(R_e + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + (X_e + X'_{\sigma r})^2} \cdot \frac{R_{tot}^2 + X_{tot}^2}{R_{tot}} \text{ Wirkungsgrad} \quad (1.21)$$

Die Gleichung (1.20) braucht nur noch die Elemente der ASM und den Schlupf!

### 1.5. Weitere Formeln

Wirkungsgrad, ausgedrückt durch das Lastmoment.

$$M_\delta = \frac{m}{2 \cdot \pi \cdot n_s} \cdot \frac{R'_r}{s} \cdot I_r'^2 = m \cdot \frac{(1-s)}{\omega_{mec}} \cdot \frac{R'_r}{s} \cdot I_r'^2 \text{ Luftspalt-Moment} \quad (1.22)$$

$$I_r' = \sqrt{\frac{M_\delta \cdot s \cdot \omega_{mec}}{m \cdot (1-s) \cdot R'_r}} \text{ Rotor-Strom} \quad (1.23)$$

$$U_h = \left| I_r' \cdot \left( \frac{R'_r}{s} + j \cdot X'_{\sigma r} \right) \right| \text{ Spannung über Ersatz- Widerstand und Hauptinduktivität} \quad (1.24)$$

$$\underline{I}_s = \underline{I}_{Fe} + \underline{I}_h + \underline{I}_r' = \frac{U_h}{R_{Fe}} + \frac{U_h}{j \cdot X_h} + \frac{U_h}{\frac{R'_r}{s} + j \cdot X'_{\sigma r}} \text{ Stator-Strom} \quad (1.25)$$

$$\underline{U}_s = U_h + \underline{I}_s \cdot (R_s + j \cdot X_{\sigma s}) \text{ Stator-Spannung} \quad (1.26)$$

$$P_{mec} = M_{mec} \cdot \omega_{mec} \text{ Belastung} \quad (1.27)$$

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{in}} = \frac{M_{mec} \cdot \omega_{mec}}{\text{real}(\underline{U}_s \cdot \underline{I}_s^* \cdot m)} \text{ Wirkungsgrad} \quad (1.28)$$

Mit den Gleichungen aus diesem Unterkapitel wird die Berücksichtigung der Eisensättigung möglich. Dazu wird die Spannung über der Hauptinduktivität benötigt, um die Werte von  $R_{Fe}$  und  $L_h$  mit der Hilfe der Sättigungskurve zu berechnen (Abbildungen 9 und 10 Seite 16).



## 2. Bestimmung und Modellierung der Ersatzelemente einer ASM

Um quantitative Aussagen über das Einsparpotential machen zu können, müssen Daten von realen Maschinen eingesetzt werden. Diese werden von einer typischen Maschine aus dem Leistungsbereich bestimmt, in dem mengenmässig am meisten ASM in Einsatz sind.

Im Kapitel „Projektziele“ wurde angegeben, dass eine Maschine mit Eisensättigung simuliert werden soll. Dazu wurden Messreihen durchgeführt, um die Daten einer typischen Asynchronmaschine zu bestimmen. Es gibt dazu verschiedenen Möglichkeiten: Verwendet wurde der Vorschlag der Schweizernorm (Anhang [1] Seite 69). Gemäss dieser Norm, sind drei Versuchen zu machen:

- Vorbereitungsversuch
- Kurzschlussversuch
- Leerlaufversuch

Die Versuche werden in den folgenden Abschnitten beschrieben. Für die Versuche, wurde eine Labormaschine der Fachhochschule Nordwest Schweiz in Brugg-Windisch (Anhang [2] Seite 70) von 5.5kW (IE2) verwendet. Diese Baugrösse repräsentiert mengenmässig den grössten Teil der Elektromotoren, wie das die Abbildungen 58 und 59 auf Seite 53 zeigen.

### 2.1. Vorbereitungsversuch

Der erste Schritt ist ein Leerlaufversuch mit Nennspannung und Nennfrequenz, um die Polpaarzahl zu finden. Mit einem Stroboskop oder einem Tachometer wird die Drehzahl gemessen.

$$p \approx \frac{\omega_{mec}}{f_s \cdot 2 \cdot \pi} = \frac{n_{mec}}{f_s} \quad (2.1)$$

Im zweiten Schritt wird der Statorwiderstand  $R_s$  mit einem Ohmmeter, oder einer Strom-Spannungs-Messung bestimmt.

### 2.2. Kurzschlussversuch

Für diesen Versuch, wird der Rotor blockiert. Das bedeutet, dass der Schlupf  $s$  immer gleich Eins ist und keine Leistung an die Last abgegeben wird.  $R_r/s$  im Modell der Asynchronmaschinen (Abbildung 1, Seite 8) wird gleich  $R'_r$ . Aus Erfahrung ist bekannt, dass die Hauptreaktanz  $X_h$  und der Eisenwiderstand  $R_{Fe}$  viel grösser sind als die anderen Impedanzen des Modells. Deshalb können diese vernachlässigt werden. Damit kann das Modell (Abbildung 5) des Kurzschlussversuchs geschätzt werden:

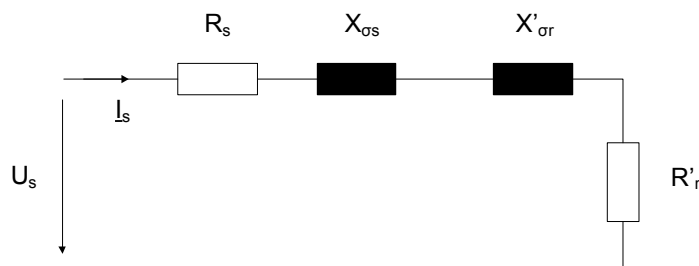


Abbildung 5: Modell des Kurzschlussversuchs



Weiter wird angenommen, dass die Werte von  $X_{\sigma s}$  und  $X'_{\sigma r}$  gleich sind. Eine exakte Aufteilung ist auf einfache Art nicht möglich. Die Spannung  $U_s$  wird ausgehend von Null erhöht, bis Nennstrom fließt. Aus den Messpunkten werden  $X_{\sigma s}$ ,  $X'_{\sigma r}$  und  $R'_r$  bestimmt. Die Ergebnisse des Kurzschlussversuchs sind im Anhang [2.1] Seite 70 zu finden.

### 2.3. Leerlaufversuch

Für diesen Versuch wird die Maschine ohne Belastung betrieben. Das bedeutet, dass der Schlupf  $s$  fast gleich Null ist. Man kann sehen, dass  $R'_r/s$  im Modell der Asynchronmaschine (Abbildung 1, Seite 8) gegen unendlich strebt, und erhält das Leerlaufmodell (Abbildung 6):

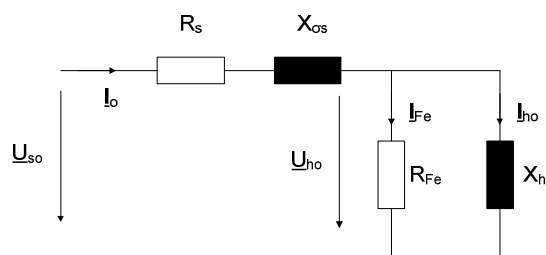


Abbildung 6: Modell des Leerlaufversuchs

Die Wirkleistung  $P_0$  stellt die Summe der folgenden drei Verluste dar:

- Kupferverluste im Stator  $P_{\text{Kupfer}}$  (Aufgrund des Leerlaufstromes)
- Eisenverluste  $P_{\text{Fe}}$
- Mechanische Verluste ( Reibungsverluste  $P_r$  + Ventilator-Verluste  $P_v$ )

Mit dieser Beziehung kann man eine Darstellung (Abbildung 7, Seite 15) der Verlust-Aufteilung zeichnen, und daraus die mechanischen Verluste berechnen.

$$P_0 - P_{\text{Kupfer}} = P_{\text{Fe}} + P_{r+v} = P_0 - 3 \cdot R_s \cdot I_0^2 \quad (2.2)$$



Die Ergebnisse des Leerlaufversuchs sind im Anhang [2.2] Seite 71 zu finden.

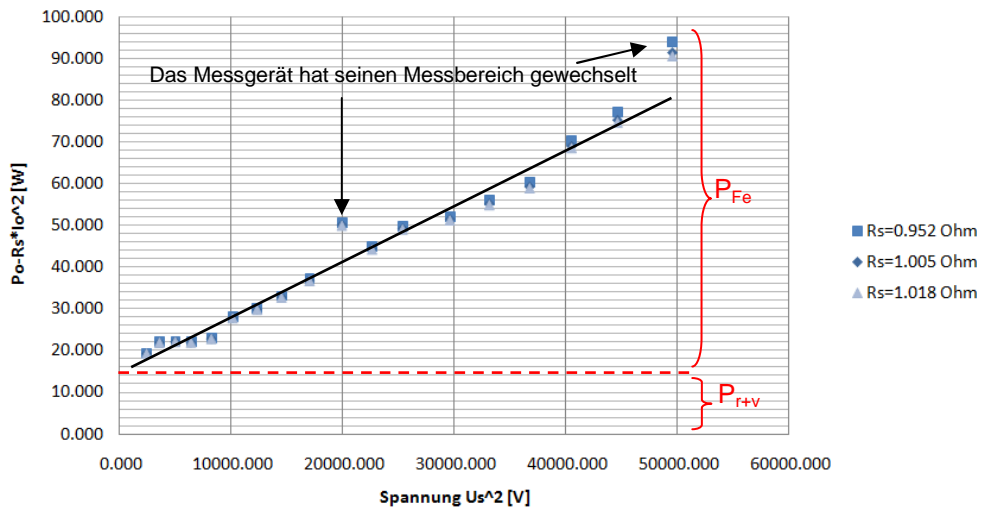


Abbildung 7: Trennung von Eisen und mechanischen Verlusten.

Normalerweise ist im Nennbetriebspunkt die Asynchronmaschine aus Kostengründen schon im Sättigungsbereich.

Die Leerlaufcharakteristik der Eingangsimpedanz (Abbildung 8) zeigt den Einfluss der Sättigung der Maschine (Gelb) sehr deutlich:

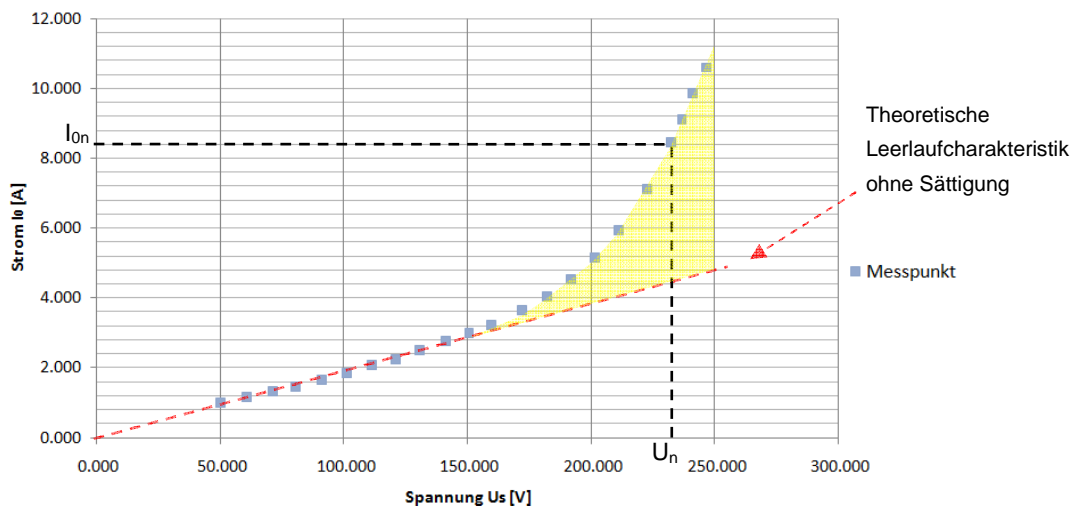


Abbildung 8: Leerlaufstrom in Funktion der Spannung



Diese Sättigung hat einen Einfluss auf den Eisenwiderstand  $R_{Fe}$  und auf die Hauptinduktivität  $L_h$ . Deshalb müssen wir für ein gutes Modell eine Gleichung der Sättigung haben.

Für  $R_{Fe}$  und  $L_h$  werden die folgenden Näherungen gemacht:

$$R_{Fe} \approx \frac{U_{s0}^2}{P_0} - R_s \quad (2.3)$$

$$L_h \approx \frac{U_{s0}^2}{Q_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_s} = \frac{U_{s0}^2}{Q_0 \cdot \omega_s} \quad (2.4)$$

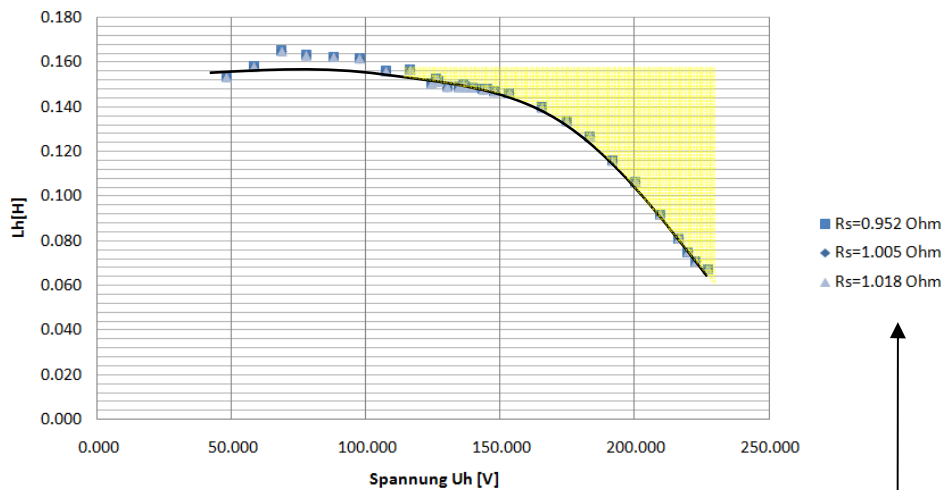


Abbildung 9: Hauptinduktivität

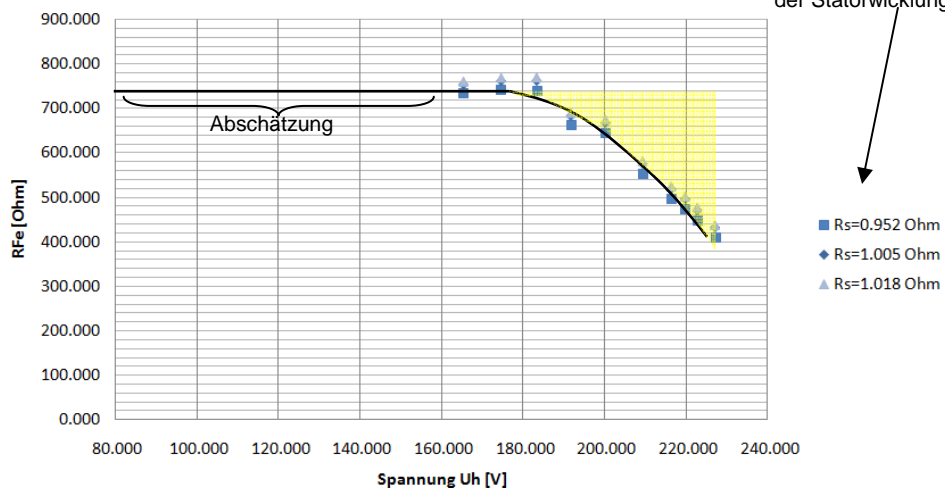


Abbildung 10: Eisenwiderstand

Berechnung von  $L_h$  und  $R_{Fe}$  für verschiedene Werte des Widerstands der Statorwicklung

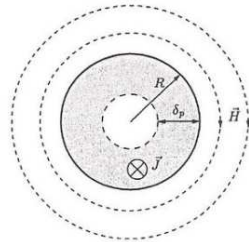
Aus den Messungen wird eine Polynom-Approximation für die Modellierung von  $L_h$  und  $R_{Fe}$  erstellt (Anhang [3] Seite 73). Diese Funktionen werden anschliessend für die Modellierung der ASM mit Sättigung eingesetzt.



## 2.4. Stromverdrängung im Rotorwiderstand

Zusätzlich wurde untersucht, ob bei den zu erwartenden hohen Rotorfrequenzen die Stromverdrängung im Rotor einen nennenswerten Einfluss hat.

Allgemein bekannt ist die Fragestellung für den einfachen Fall eines runden Kupferleiters in Luft. Wenn die Frequenz des Stroms klein genug ist, wird er eine gleichmässige Verteilung über den ganzen Leiter haben. Sonst wird sich der Strom in einer äusseren Schicht mit der Dicke  $\delta_p$  konzentrieren.



Die graue Farbe stellt die effektiv stromführende Fläche dar.

Abbildung 11: Stromverdrängung für einen runden Leiter (Quelle: [13] ULB,2006-2007)

Die Eindringtiefe  $\delta_p$  ist durch die folgende Gleichung gegeben:

$$\delta_p = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu_0 \cdot f}} \quad (2.5)$$

Der spezifische Widerstand  $\rho$  von Kupfer ist zusätzlich abhängig der Temperatur T in °C:

$$\rho = \beta \cdot [1 + \alpha \cdot (T - 20)] = 17.24 \cdot 10^{-9} \cdot [1 + 0.0042 \cdot (T - 20)] \quad [\Omega \cdot m] \quad (2.6)$$

Die effektive Fläche wird damit:

$$A_{eff} = \pi \cdot \left( R^2 - (R - \delta_p)^2 \right) \text{ wenn } \delta_p < \text{als der Radius } R \text{ ist.} \quad (2.7)$$

Zurück zum Käfigläufer einer Asynchronmaschine: Wir nehmen eine einfache, rechteckige Fläche. Diese Stange ist auf drei Seiten von magnetischem Material umgeben. Angenähert ist  $\mu \gg \mu_0$ . Die letzte Seite ist Luft mit  $\mu = \mu_0$ .

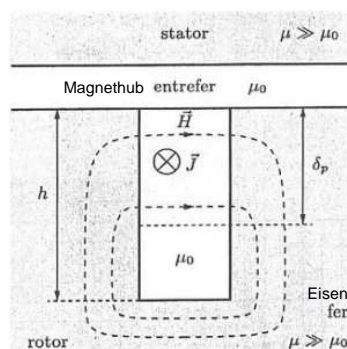


Abbildung 12: Stromverdrängung bei rechteckiger Fläche (Quelle: [13] ULB,2006-2007)

Die Flusslinien (Streufluss der Nut), die von dem Strom erzeugt werden, dringen durch die Nut und die Kupferstange. Die Stromverdrängung wird signifikant, wenn die Eindringtiefe  $\delta_p$  (2.5) kleiner als die Höhe h der Stange ist. In diesem Fall wird der Strom im oberen Teil  $\delta_p$  konzentriert. Der äquivalente Widerstand der Stange erhöht sich mit dem Faktor  $h/\delta_p$ .



Wir können damit die Gleichung des Rotorwiderstands in Funktion der Rotorfrequenz schreiben:

$$R'_r(f_r) = R'_r \cdot \frac{h}{\delta_p} = R'_r \cdot \frac{h}{\sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu_0 \cdot f_r}}} \quad \text{wenn } \delta_p < h \text{ ist.} \quad (2.8)$$

Der resultierende Widerstand lässt sich mit Hilfe der Gleichung (2.8) skizzieren:

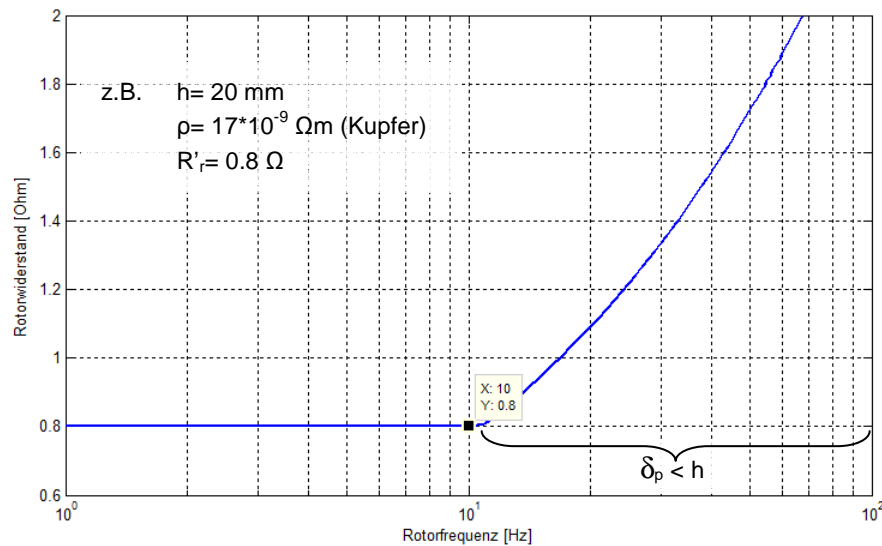


Abbildung 13: Skizze der Stromverdrängung mit Kupferstange

Mit dem Modell (Abbildung 1 Seite 8) kann die Frequenz im Rotor berechnet werden. Sie beträgt ausgedrückt durch den Schlupf  $s$ :

$$f_r = s \cdot f_s \quad (2.9)$$

In der Gleichung (3.8) werden der Schlupf und die Statorfrequenz eingesetzt:

$$R'_r(f_s) = R'_r \cdot \frac{h}{\sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu_0 \cdot s \cdot f_s}}} \quad \text{wenn } \delta_p < h \text{ ist.} \quad (2.10)$$

Die Wirkung der Stromverdrängung muss in unserem Modell berücksichtigt werden, falls sie einen Einfluss hat.

Es ist zu beachten, dass die Frequenzrichter keine perfekte sinusförmige Ausgangsspannung haben, weil diese mit einer PWM erzeugt wird. Deshalb wäre es interessant, diese Modulationsfrequenzen zu berücksichtigen, denn sie ergeben weitere Verluste in Stator und Rotor.



## Messung der Stromverdrängung

Für die Messungen wird der Rotor blockiert und bei verschiedenen Frequenzen gemessen. Wie im Unterkapitel „Identifikation einer Asynchronmaschine“, gezeigt, ist der Rotorwiderstand viel kleiner als der Eisenwiderstand. Deshalb kann das Modell vereinfacht werden. Es wird gleich wie beim Kurzschlussversuch (Abbildung 5 Seite 13).

Für den Versuch wird wieder die Labormaschine (Anhang [2] Seite 70) benutzt. Die Ergebnisse der Rotorwiderstandmessung sind im Anhang [2.3] Seite 72 zu finden.

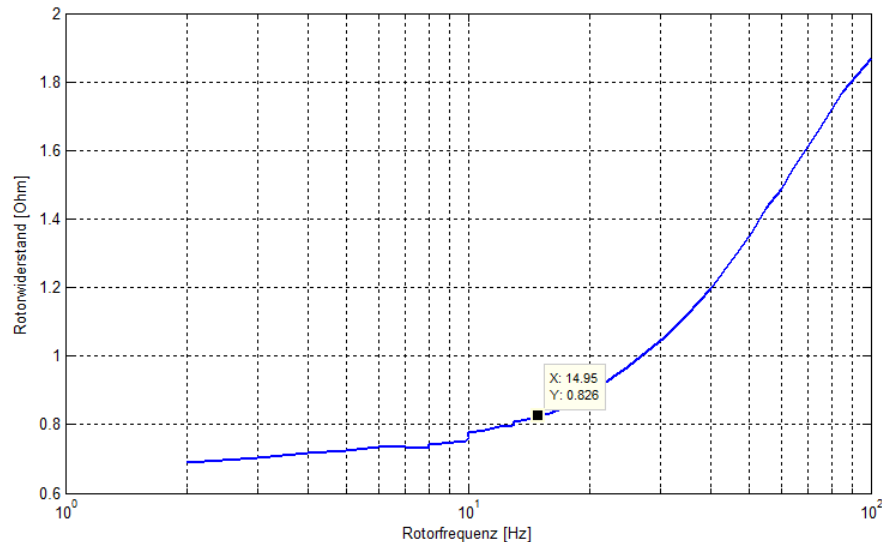


Abbildung 14: Stromverdrängung einer 5.5 kW ASM

Die Messung zeigt, dass die Näherung für den Einfluss der Stromverdrängung (Abbildung 13, Seite 18) qualitativ stimmt. Deshalb lässt sich sagen, dass diese Asynchronmaschine wahrscheinlich eine Stange von etwa 20mm Höhe hat, wie in unsere Skizze angenommen. Man sieht, dass der Rotorwiderstand für Frequenzen kleiner als 10Hz fast „konstant“ ist. Die Abweichung kommt von den Berechnungen, weil wir das Modell des Kurzschlussversuchs benutzen. Dieses Modell vernachlässigt die Hauptimpedanz und den Eisenwiderstand. Das für die weitere Arbeit wichtige Resultat ist, dass die Grenze, an der die Wirkung der Stromverdrängung beginnt, ungefähr bei 14Hz liegt. Damit lässt sich jetzt der Schlupf bei Nennfrequenz im Stator bestimmen, bei dem die Stromverdrängung beginnt:

$$s = \frac{f_r}{f_s} = \frac{14\text{Hz}}{50\text{Hz}} = 0.28$$

Dieser sehr grosse Schlupf kann nicht gefahren werden, weil die Grenzen des Drehmoments und des Stroms der Maschine überschritten würden. Dies kann in Kapitel 6 Seite 28 „Theoretische Ergebnisse“ nachvollzogen werden.



## 2.5. Identifizierung der mechanischen Verluste

In der Leistungsbilanz einer Asynchronmaschine, können vier verschiedene Verluste identifiziert werden:

- 1) Ohmsche Verluste im Stator
- 2) Magnetische Verluste im Stator (Eisenverluste)
- 3) Ohmsche Verluste im Rotor
- 4) Mechanische Verluste

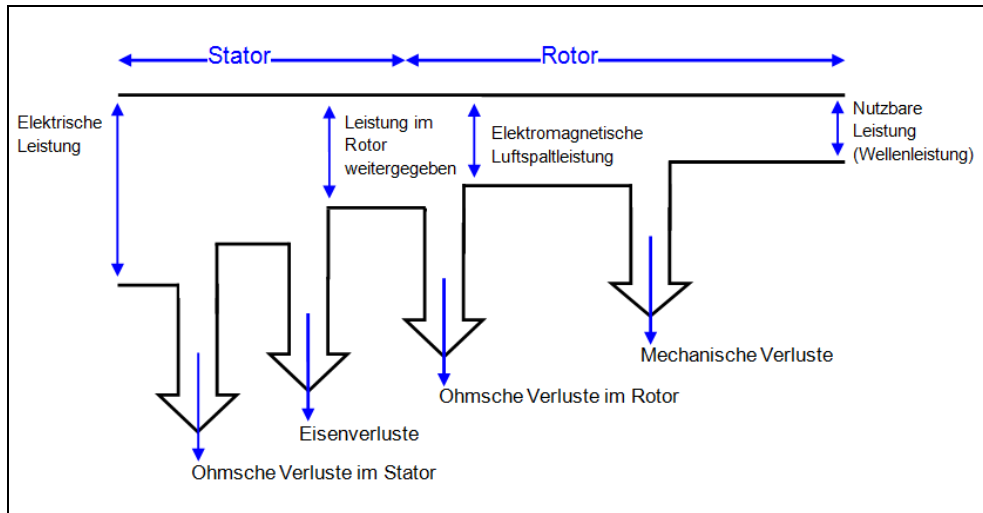


Abbildung 15: Leistungsbilanz

Bis jetzt wurden die drei ersten Verluste analysiert. Nun interessieren die mechanischen Verluste, Betrachtet wird eine typische Asynchronmaschine:

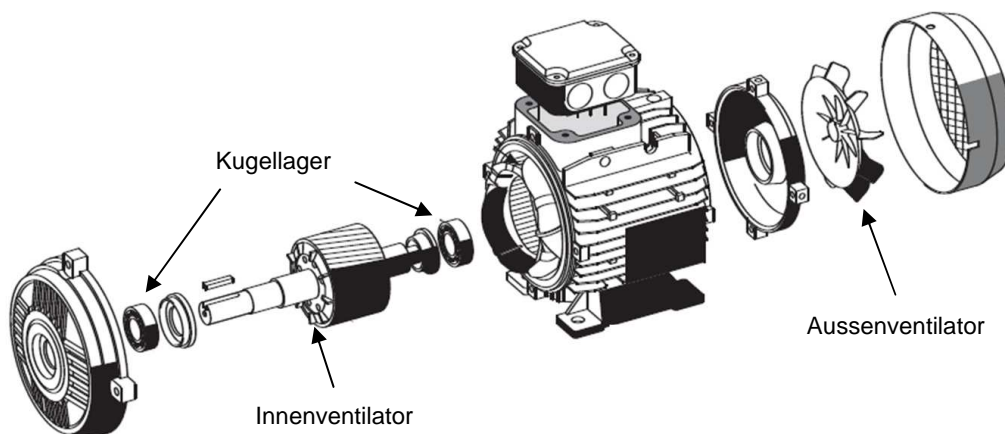


Abbildung 16: Explosionszeichnung der ASM

In der Abbildung 16 sind drei verschiedene Ursachen für Verlust sichtbar:

- 1) Reibung der Kugellager → konstant
- 2) Gegenkraft des Innenventilators → abhängig der Drehzahl im Quadrat
- 3) Gegenkraft des Aussenventilators → abhängig der Drehzahl im Quadrat



Mit diesen Informationen ist es jetzt möglich, ein Modell der mechanischen Verluste zu erstellen. Das Modell entspricht einem elektrischen Schema:

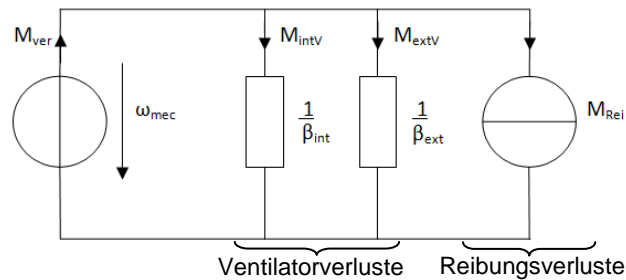


Abbildung 17: Modell der mechanischen Verluste

### Messungen der mechanischen Verluste

Für diesen Versuch, wurde eine andere Labormaschine (Anhang [2] Seite 70) von 5.5kW (IE2) verwendet. Die Baugröße ist gleich, wie die der Maschine für den Kurzschluss- und den Leerlaufversuch, jedoch kann der Aussenventilator entfernt werden. Diese Möglichkeit ist wichtig um die Verluste des Aussenventilators zu bestimmen.

Im ersten Schritt wurden die elektrischen Messungen bei einer kleinen konstanten Belastung (3.5% der Nennbelastung) durchgeführt. Dazu wurden Messpunkte für verschiedene Drehzahlen aufgenommen. Die Messungen sind im Anhang [2.4] Seite 72 zusammengefasst.

Im zweiten Schritt werden gemäss dem Diagramm der Leistungsbilanz (Abbildung 15 Seite 20), die mechanischen Verluste isoliert.

Um die Eisenverluste zu bestimmen, muss der Leerlaufversuch für verschiedene Frequenzen durchgeführt werden, da die Eisenverluste abhängig vom Magnetisierungsstrom und der Frequenz sind. Damit können die zwei Wirkungen getrennt werden:

- 1) Verluste nach Foucault (Wirbelstromverluste)

$$P_F = \sigma_F \cdot \left( \frac{f}{100} \cdot \hat{B} \cdot d \right)^2 \cdot m \quad (2.11)$$

- 2) Hystereseverluste

$$P_H = \sigma_H \cdot \frac{f}{100} \cdot \hat{B}^2 \cdot m \quad (2.12)$$

$$[P_H, P_F] = W \quad [\hat{B}] = \left[ \frac{\mu_0 \cdot n \cdot I}{L} \right] = \frac{Vs}{m^2} \quad [f] = Hz$$

$$[\sigma_H, \sigma_F] = \text{Material Konstanten} \quad [d] = mm \text{ (Blechdicke)} \quad [m] = kg$$

Diese zwei Wirkungen ergeben die Gleichung der gesamten Eisenverluste:

$$P_{Fe} = P_F + P_H = \hat{B}^2 \cdot m \cdot \left[ \sigma_H \cdot \frac{f}{100} + \sigma_F \cdot \left( \frac{f}{100} \cdot d \right)^2 \right] \quad (2.13)$$

Die Materialkonstanten  $\sigma_H$  und  $\sigma_F$  sind im Anhang [5] Seite 75 ersichtlich.



Abbildung 18 zeigt die elektrischen Leistungen und die Belastung. Es zeigt sich, wie erwartet, dass die Verluste des Aussenventilators von der Drehzahl im Quadrat abhängig sind.

$$P_{ExtV} = P_{elek\_mit\_AussV} - P_{elek\_ohne\_AussV}$$

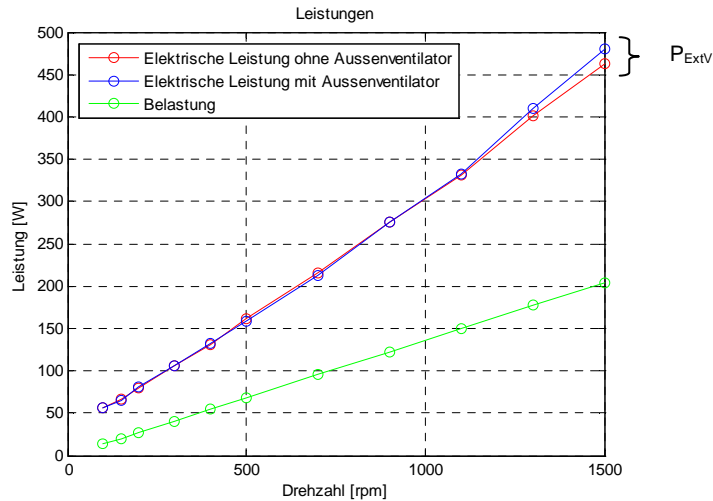


Abbildung 18: Elektrische Leistung mit und ohne Aussenventilator und Belastung

Die Reibungs- und Innenventilatorverluste entsprechen der elektrischen Leistung minus Aussenventilator, Eisenverluste und Kupferverluste:

$$P_{Rei} + P_{InnenV} = P_{elek\_ohne\_AussV} - P_{Fe} - P_{Kupfer}$$

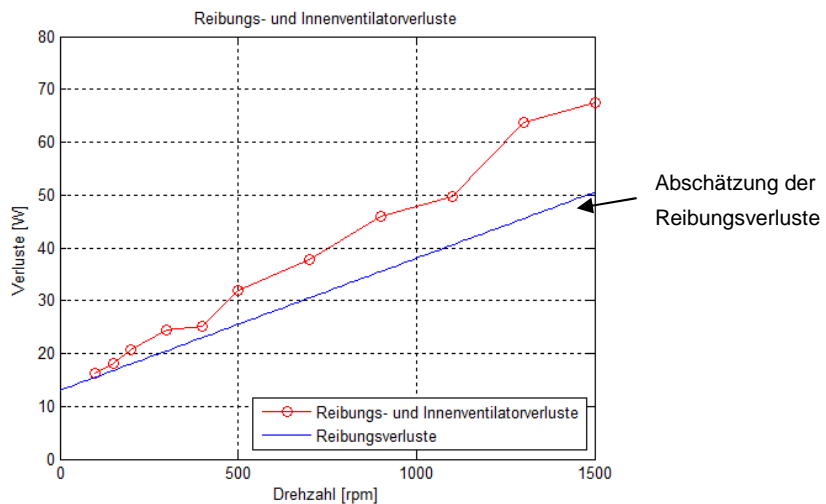


Abbildung 19: Reibungs- und Innenventilatorverluste

Reibungsverluste:

Bei kleinen Drehzahlen sind die Ventilatorverluste vernachlässigbar. In diesem Punkt können die drehzahlproportionalen Reibungsverluste bestimmt und die Abschätzung der Reibungsverluste gemacht werden. Die Software-Routine zur Verlustbestimmung ist im Anhang [7] Seite 95 ersichtlich.



Mit der Trennung der verschiedenen Verluste ergeben sich die Rosa Punkte (Messungen) in Abbildung 20. Um die Abschätzungskurve (blau) zu berechnen, wird auf einen minimalen quadratischen Fehler optimiert. Man sieht, dass es für einige Punkte eine maximale Abweichung von 4 Watt gibt. Obwohl dies, bezogen auf den Maximalwert der Verluste von 400W, ein kleiner Wert ist, kann er in der Aufteilung in die Teilverluste einen relativ grossen Einfluss haben.

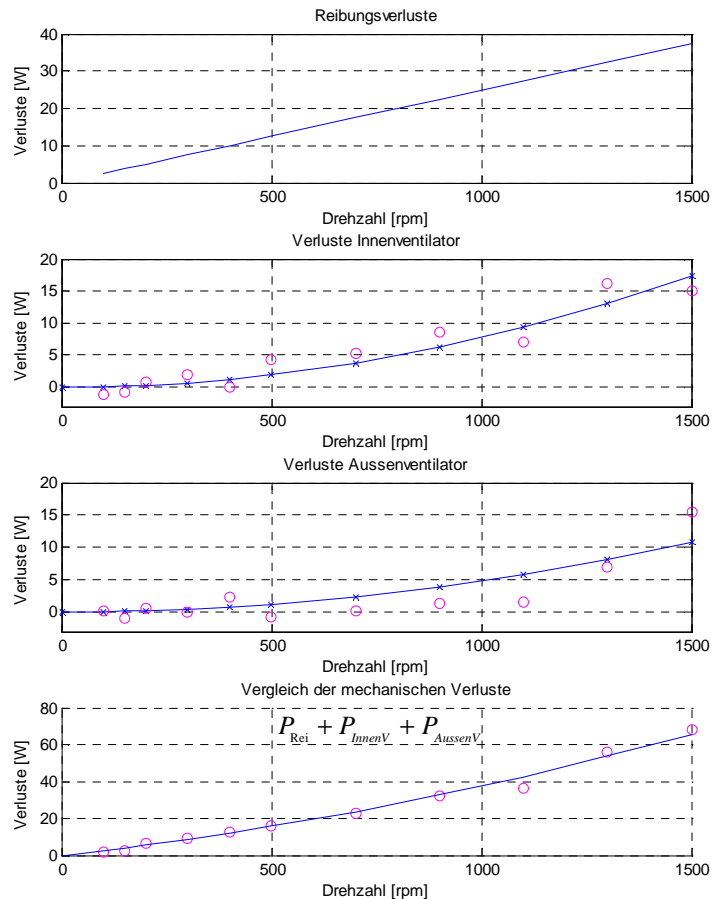


Abbildung 20: Mechanische Verluste

Aufgrund der Messungen kann jetzt ein vollständiges Modell der mechanischen Verluste erstellt werden. Die Gleichungen der Funktionen sind bekannt und damit ist es möglich, die Koeffizienten des Modells zu bestimmen:

Gleichung der Reibungsverluste:

$$P_{\text{Rei}} = 0.2387 \cdot \omega_{\text{mec}} \quad \rightarrow \quad M_{\text{Rei}} = 0.2387 \text{ [Nm]}$$

Gleichung der Innenventilatorverluste:

$$P_{\text{InnenV}} = 0.7064 \cdot 10^{-3} \cdot \omega_{\text{mec}}^2 \quad \rightarrow \quad \beta_{\text{int}} = \frac{1}{0.7064 \cdot 10^{-3}} \approx 1416 \left[ \frac{\text{Nm} \cdot \text{s}}{\text{rad}} \right]$$

Gleichung der Aussenventilatorverluste:

$$P_{\text{InnenV}} = 0.4368 \cdot 10^{-3} \cdot \omega_{\text{mec}}^2 \quad \rightarrow \quad \beta_{\text{ext}} = \frac{1}{0.4368 \cdot 10^{-3}} \approx 2289 \left[ \frac{\text{Nm} \cdot \text{s}}{\text{rad}} \right]$$



### 3. Typische Steuerung eines Frequenzumrichters mit $U/f = \text{konstant}$

In den meisten Fällen wird für die Versorgung einer Asynchronmaschine ein Frequenzumrichter mit  $U/f = \text{konstant}$  eingesetzt ( $U$ : Grundsprungspannung,  $f$ : Statorfrequenz). Dies ergibt in der Maschine etwa konstanten Fluss. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass der Algorithmus sehr einfach zu implementieren ist. Auch bei flussorientierten Regelungen wird den Fluss normalerweise konstant gehalten.

Das Konstanthalten des Flusses bedeutet, dass der Magnetkreis näherungsweise immer im gleichen Zustand für  $f_{\min} \leq f < f_{\text{Nenn}}$  ist. Wenn die Frequenz sinkt, sinkt der Effektivwert der der Spannungsgrundsprung im gleichen Verhältnis. Mit dieser Flussführung resultiert für den Statorfrequenzbereich  $f_{\text{Nenn}} \leq f \leq f_{\text{Nenn}}$  immer die gleiche Drehmomentkurve in Funktion des Schlupfes. Der Wirkungsgrad ist für den ganzen Drehzahlbereich verhältnismässig gut. Wird die Frequenz grösser als die Nennfrequenz ( $|f| > f_{\text{Nenn}}$ ) (Feldschwächung, im Beispiel oberhalb 50 Hz), sinkt die Drehmomentkurve und der Wirkungsgrad.

Definition: 
$$\psi_{S,N} = I_{s,N} \cdot X_{\delta_s} + \underbrace{I_{h,N} \cdot X_h}_{\text{Nennfluss}}$$

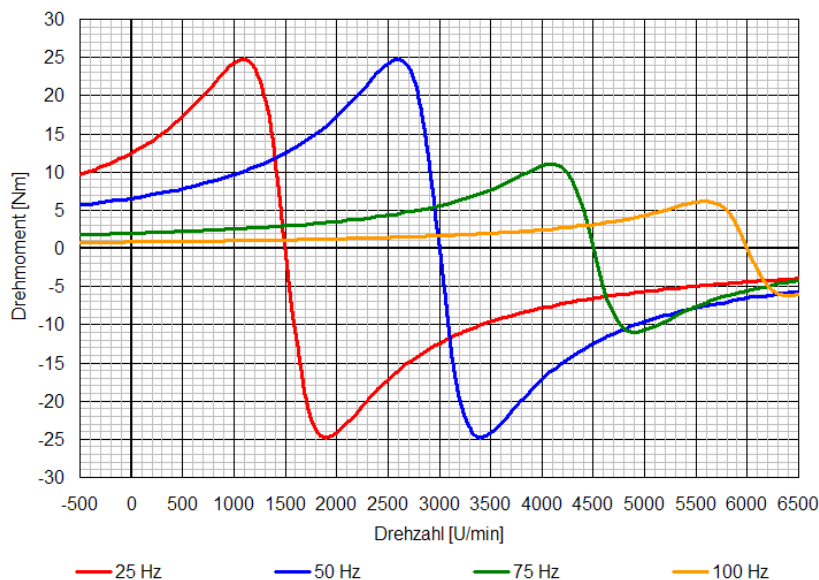


Abbildung 21: Frequenzumrichter mit  $U/f = \text{konstant}$  (Quelle: [6] Energie.ch,2008)

#### Bemerkung:

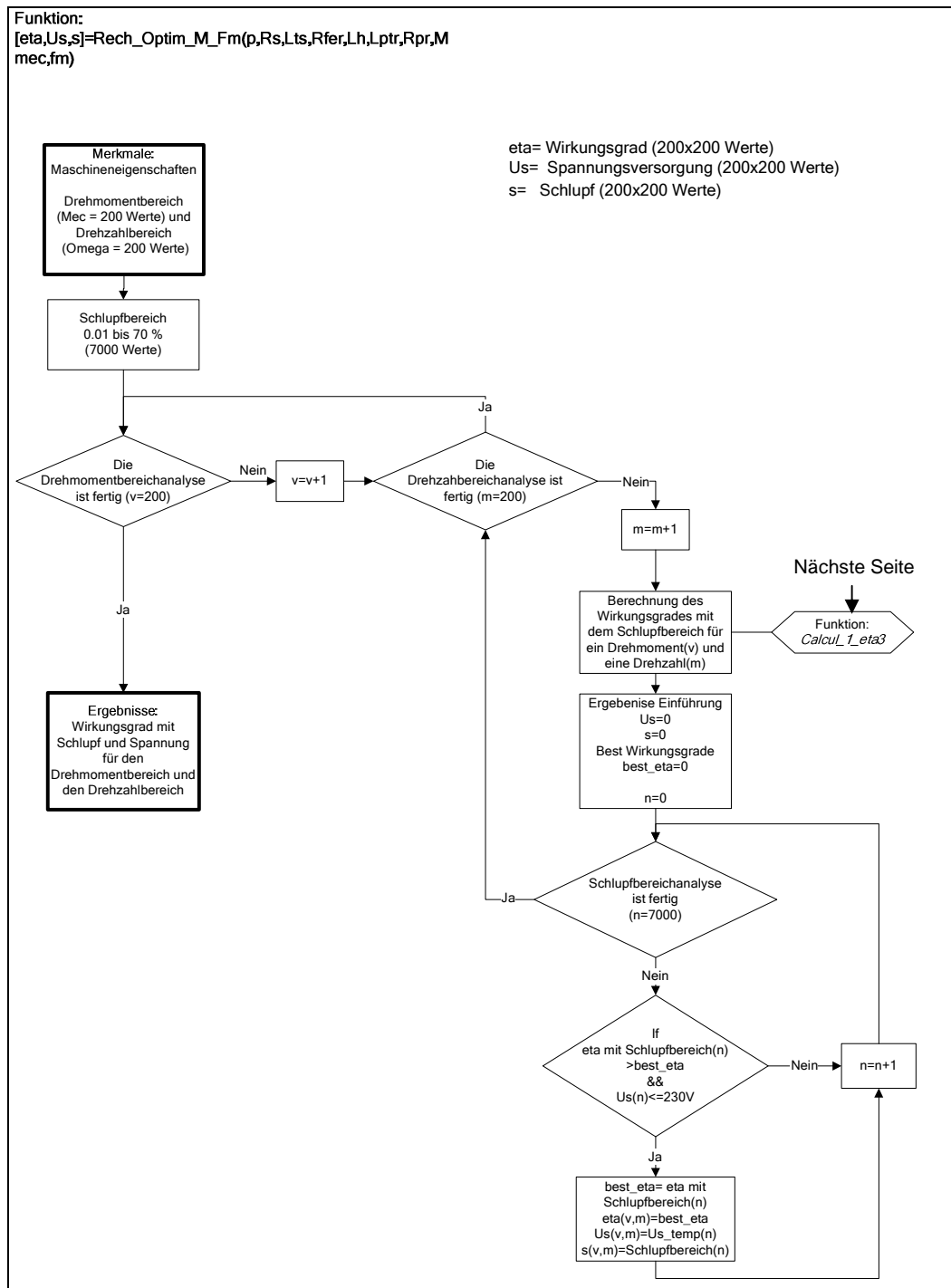
Bei kleinen Statorspannungen muss von der Funktion  $U/f = \text{konstant}$  abgewichen werden, um den Spannungsabfall über dem ohmschen Statorwiderstand zu kompensieren. Das hat bei den folgenden Betrachtungen aber keine Relevanz, und wird deshalb weggelassen!

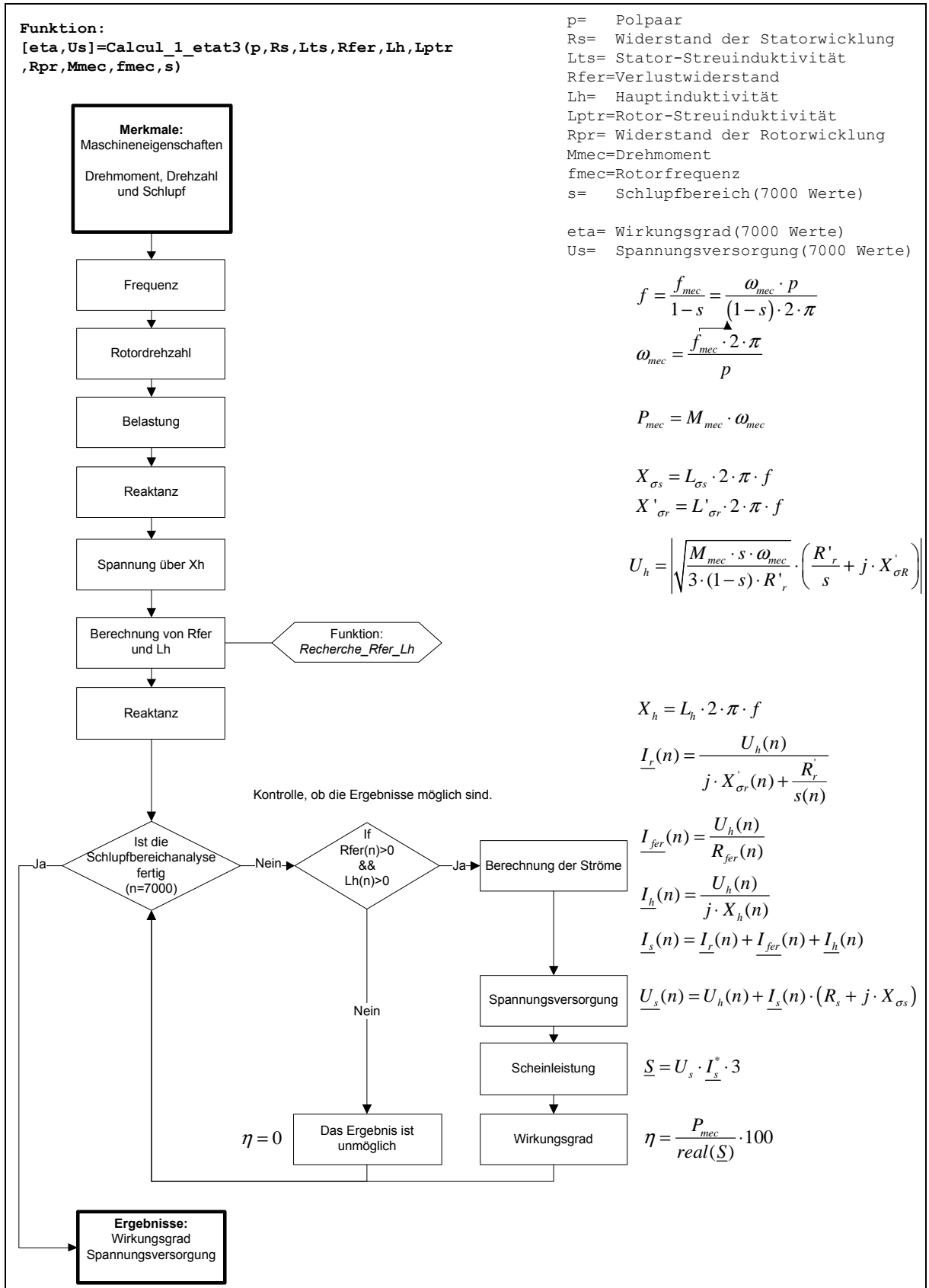


## 4. Flussführung für maximale Wirkungsgrad

Es wäre sehr angenehm, wenn ein einfacher analytischer Ausdruck für die Führung des Flusses für maximalen Wirkungsgrad bekannt wäre. Leider ist die Herleitung an der Komplexität der Ausdrücke gescheitert. Deshalb wird der optimale Wirkungsgrad mittels numerischer Berechnung ermittelt:

Der Algorithmus startet mit einem Arbeitspunkt Drehzahl(x), Drehmoment(y). Er berechnet die Wirkungsgrade in Funktion des Schlupfes und bestimmt daraus den höchsten Wert. Dies ist der optimale Wirkungsgrad für den gewählten Arbeitspunkt. Die Berechnung wird für den ganzen vorgegebenen Bereich der Arbeitspunkte durchgeführt.





Bemerkung: Die Berechnung der Funktion „Recherche\_Rfer\_Lh“ ist im Anhang [3] Seite 73 beschrieben.





## 6. Theoretische Ergebnisse

Es gibt zwei Gruppen von Ergebnissen: Im ersten Schritt wurden die Simulationen ohne Sättigung des Eisens gemacht und im zweiten Schritt mit Sättigung. Die Versuche (vgl. Kapitel 2 „Bestimmung und Modellierung der Ersatzelemente einer ASM“ Seite 13) zeigen den Einfluss der Sättigung für die Labormaschine (Anhang [2] Seite 70).

### 6.1. Ohne Berücksichtigung der Eisensättigung

Die Abbildung 22 zeigt den Wirkungsgrad, wie er mit dem Algorithmus eines konventionellen Frequenzumrichters (Fluss gleich Nennfluss) bestimmt wurde. Zur besseren Sichtbarkeit ist die Darstellung einmal als 3D-Plot und einmal mit Einfärbung gemacht. Das Bild stimmt überein mit Bildern in den Quellen [5] topotors.ch, [6] BFE und [7] energie.ch.

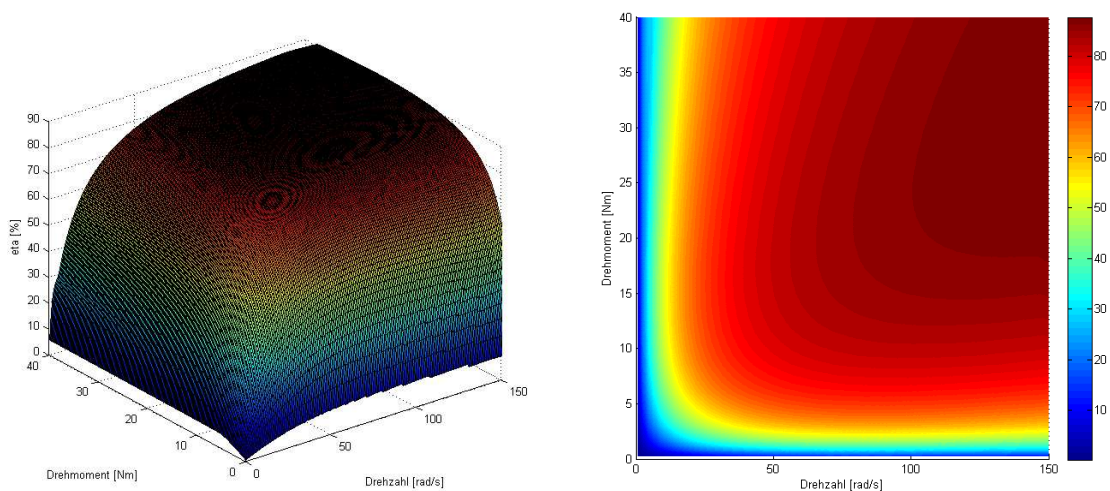


Abbildung 22: Wirkungsgrad ohne Sättigung des Eisens (der Fluss ist konstant)

Die Abbildung 23 zeigt den Wirkungsgrad mit dem Algorithmus für den besten Wirkungsgrad.

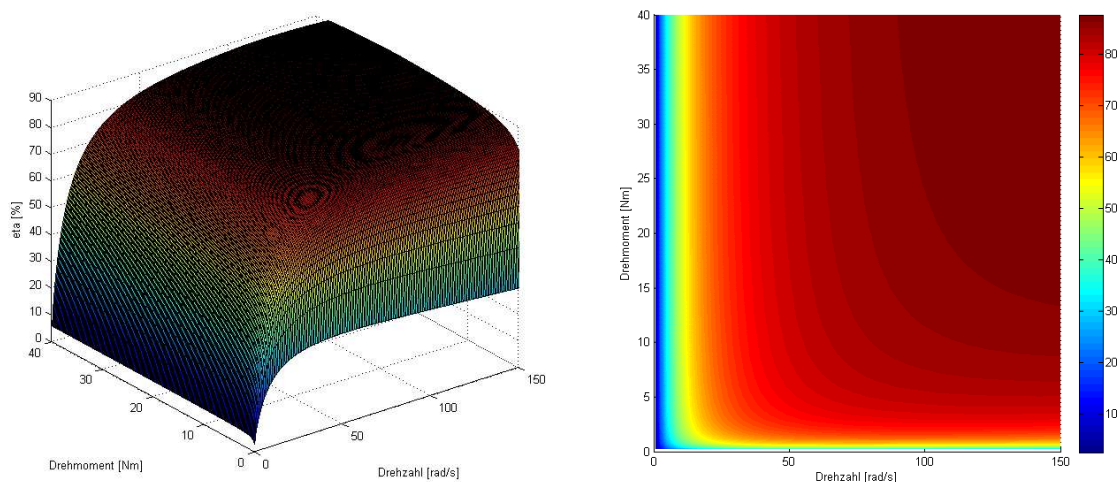


Abbildung 23: Wirkungsgrad ohne Sättigung des Eisens (bester Wirkungsgrad)

Der Vergleich der beiden Betriebsarten zeigt, dass sich das Verhalten vor allem für kleine Drehmomente zwischen den Abbildungen 22 und 23 unterscheidet. (Da ein quantitativer



Vergleich aufgrund der Bilder schwierig ist, werden nachfolgend ausgewählte Arbeitspunkte betrachtet.)

Auch Schlupf und Spannung unterscheiden sich, wenn mit Nenn- oder optimalem Fluss gefahren wird. Dies illustrieren die folgenden beiden Abbildungen 24 und 25.

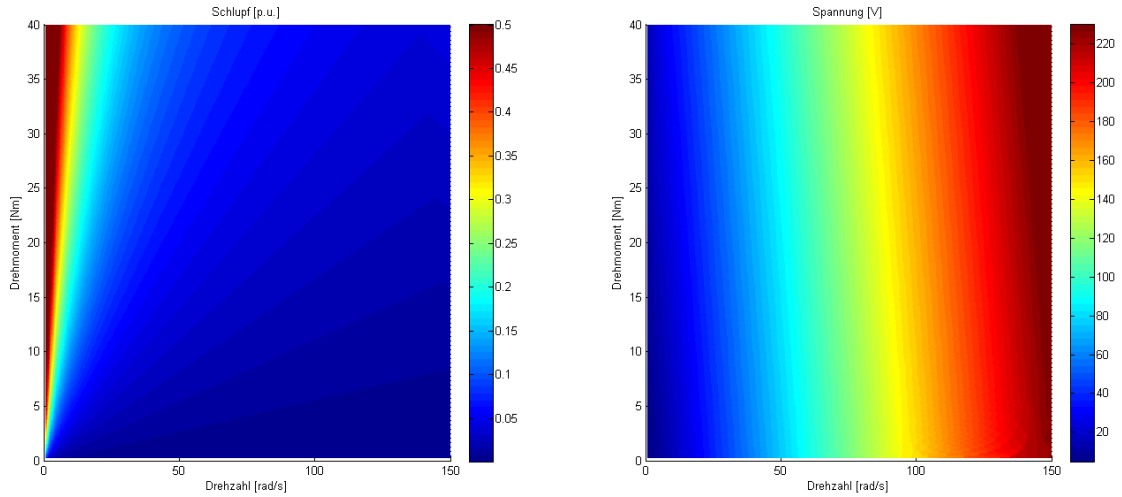


Abbildung 24: Schlupf und Phasenspannung ohne Sättigung des Eisens (der Fluss ist konstant)

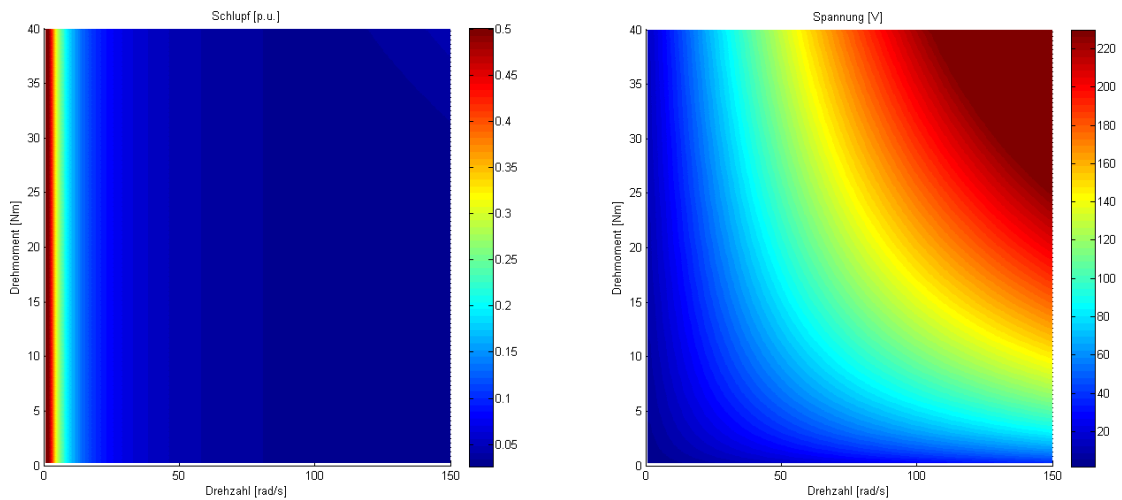


Abbildung 25: Schlupf und Phasenspannung ohne Sättigung des Eisens (bestser Wirkungsgrad)



Wie schon erwähnt, sind die vorhergehenden Darstellungen für quantitative Betrachtungen schwierig zu interpretieren. Um die Verständlichkeit der Ergebnisse zu verdeutlichen, werden deshalb vier Drehzahlen gewählt und die Resultate dafür dargestellt: 10%, 30%, 50% und 100% der Nenndrehzahl:

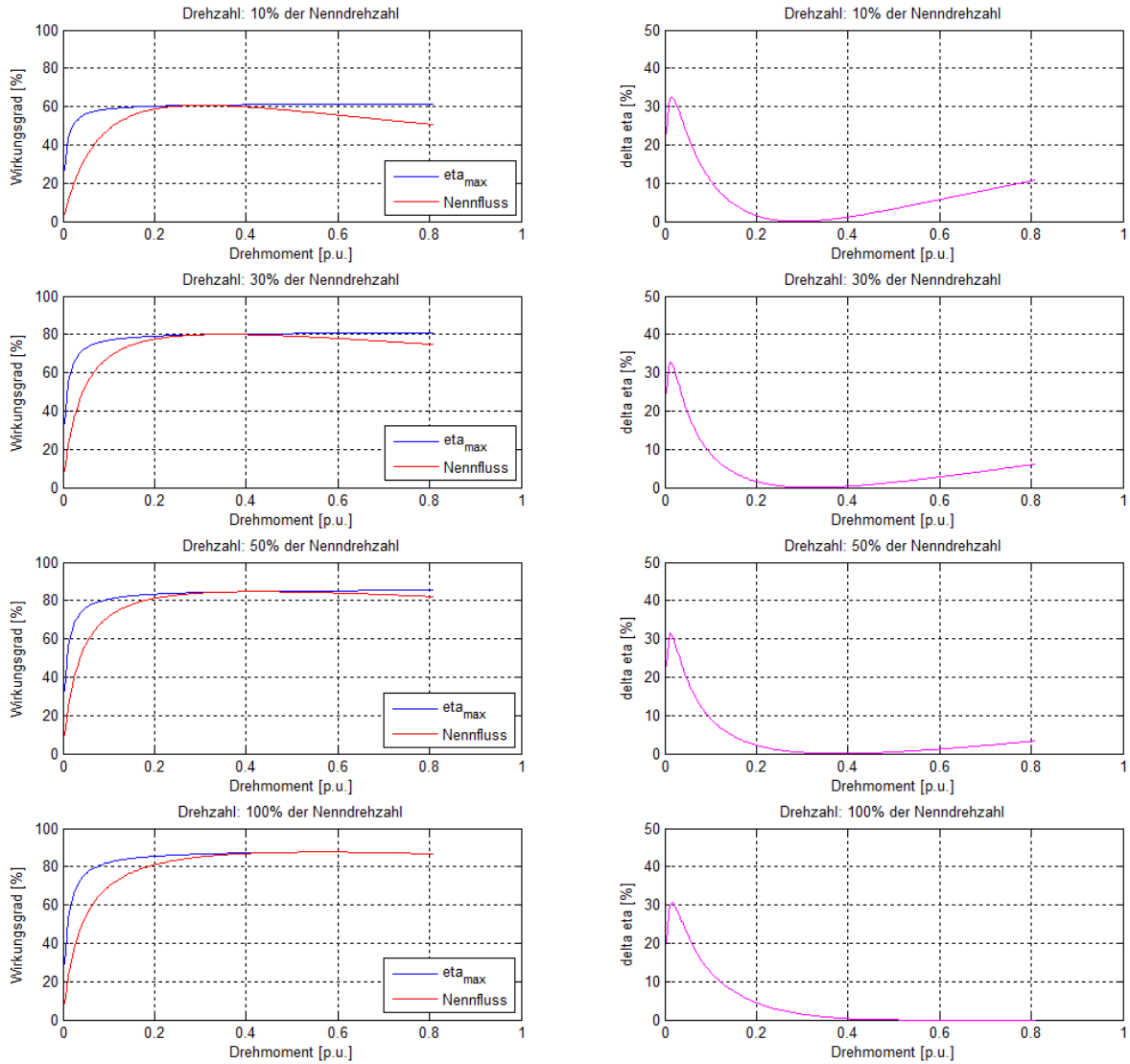


Abbildung 26: Wirkungsgrad ( $\eta$ ) in Funktion des Drehmoments für 10% 30% 50% und 100% der Nenndrehzahl (ohne Sättigung des Eisens)

Es zeigt sich, dass der beste Wirkungsgrades von 10% bis 100% des Nenndrehmoments praktisch konstant ist.

Die rechte Kolonne stellt den Gewinn dar, welcher später im Kapitel 10 Seite 51 „Einsparpotential in der Schweiz“ verwendet wird. Der Gewinn ist gross für die Drehmomente kleiner als 20% des Nenndrehmoments.



Mit der Hilfe der Abbildung 27 können wir das Verhalten von Spannung und Schlupf bei Steuerung mit dem besten Wirkungsgrad sehen:  
Für Drehmomente kleiner als etwa 35% werden die Spannungen kleiner und der Schlupf grösser und umgekehrt für Drehmomente grösser als 35%.

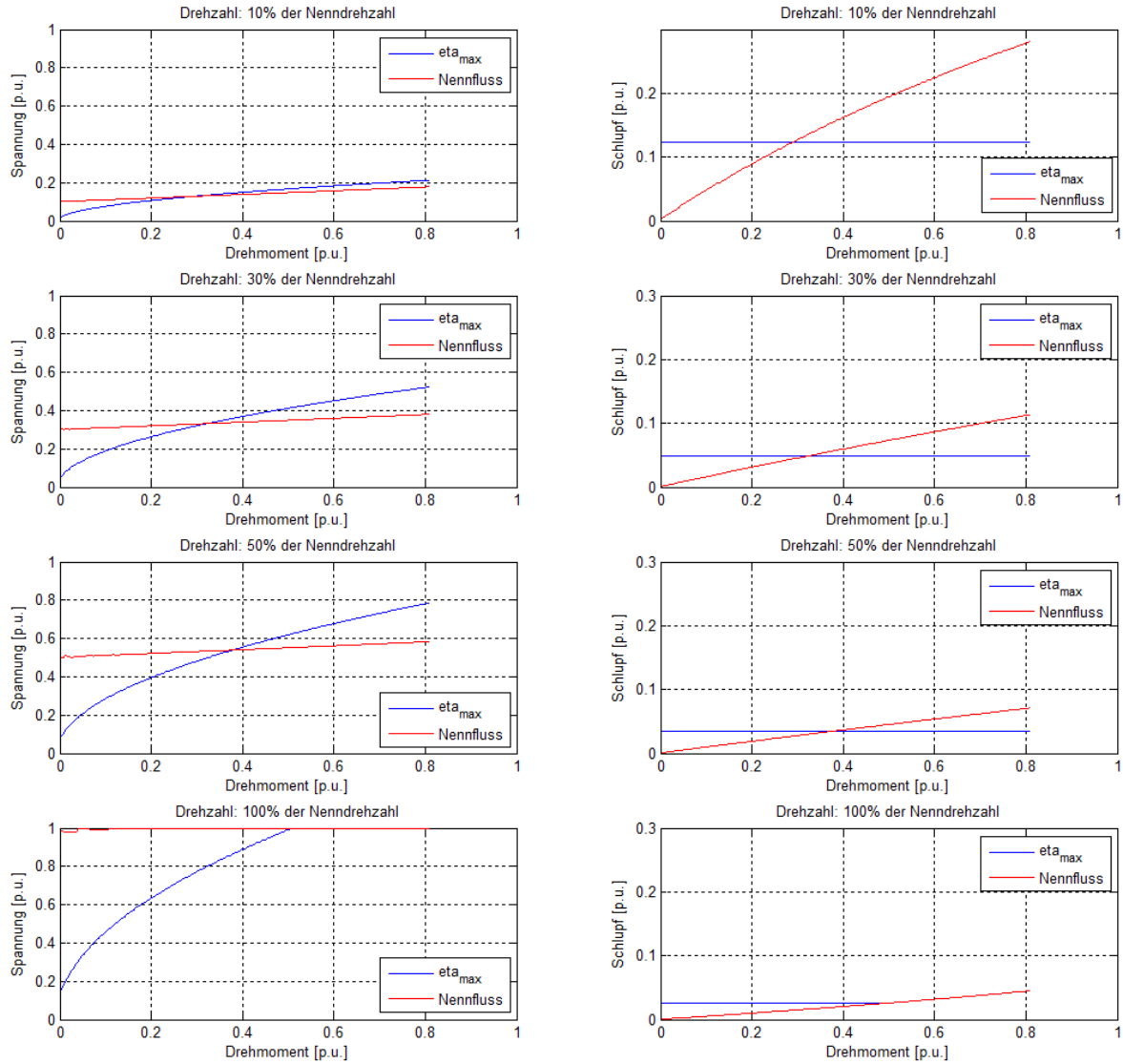


Abbildung 27: Spannung und Schlupf (ohne Sättigung des Eisens)

Es ist interessant, dass der Schlupf bei bestem Wirkungsgrad fast konstant wird. Daraus lässt sich auch die Aussage ableiten, dass keine wesentliche Stromverdrängung auftreten wird.

Beispiel Nenndrehzahl (maximale Rotorfrequenz):  $f_r = f_s \cdot s = 50\text{Hz} \cdot 0.03 = 1.5\text{Hz}$



Wie bei der Betrachtung der Spannung festgestellt, ist diese bei bestem Fluss und kleinen Drehmomenten kleiner als bei Führung mit Nennfluss. Dies führt entsprechend auch zu einer Flussreduktion, was sich vor allem für Maschinen die eine grosse Sättigung haben in einer wesentlichen Wirkungsgradverbesserung äussert. Im nächsten Unterkapitel 6.2 zeigt sich, dass der Wirkungsgrad tatsächlich signifikant besser wird, wenn die Eisensättigung mitberücksichtigt wird.

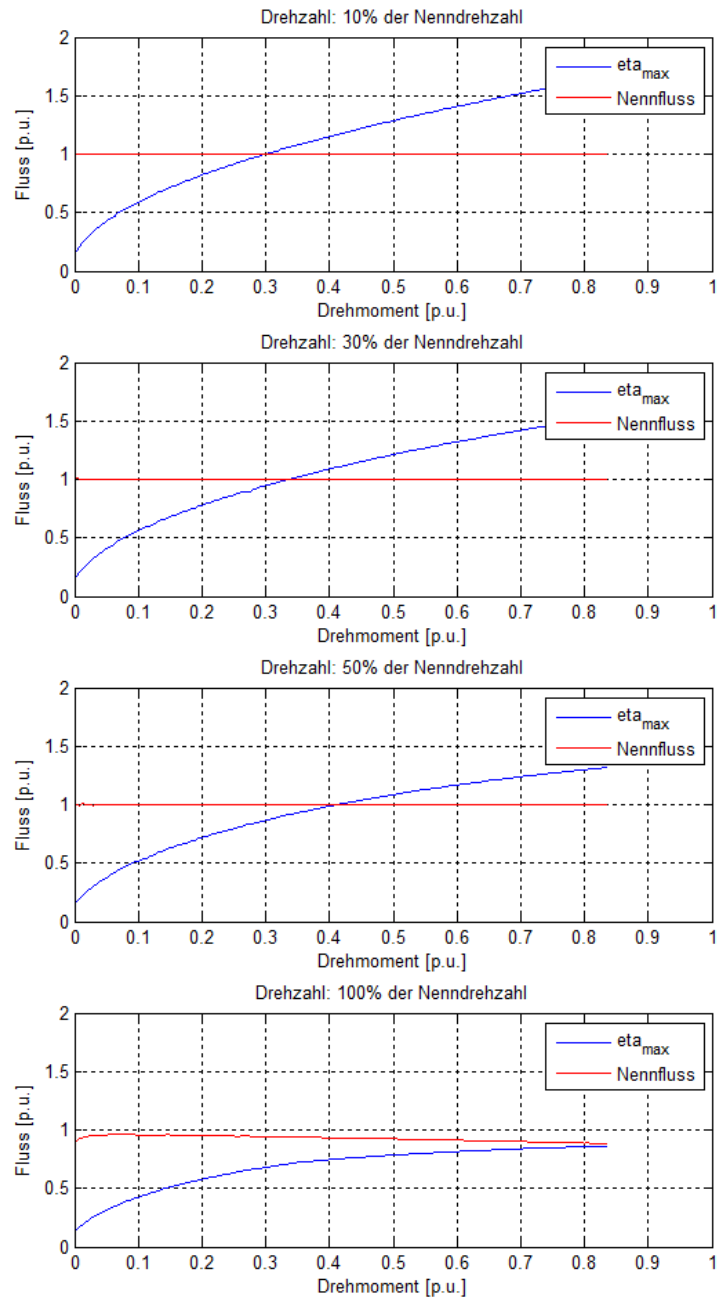


Abbildung 28: Fluss (ohne Sättigung des Eisens)



## 6.2. Mit Berücksichtigung der Eisensättigung

Die folgende Abbildung 29 illustriert den Wirkungsgrad bei Nennfluss, wie das bei einem konventionellen Frequenzumrichter der Fall ist.

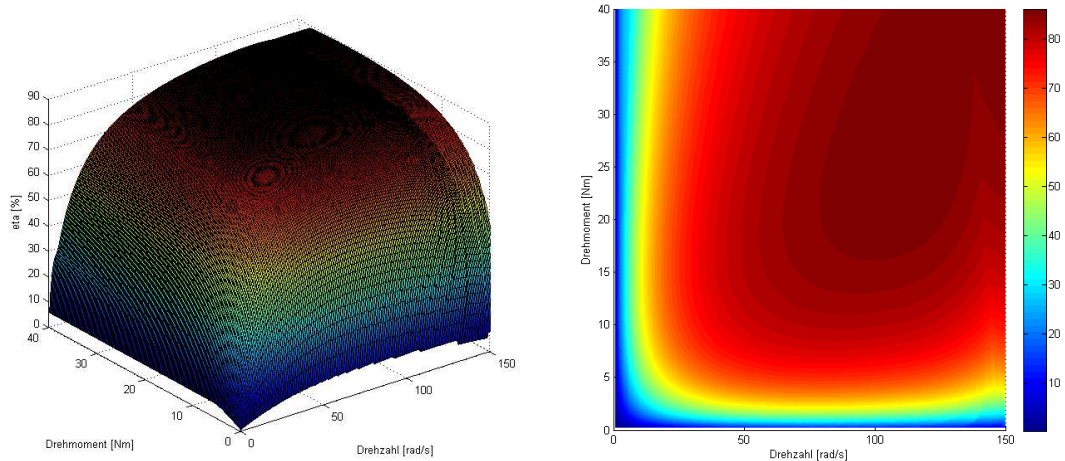


Abbildung 29: Wirkungsgrad mit Sättigung des Eisens (Fluss konstant Nennfluss)

Bemerkung: Die Abbildung 29, rechts zeigt knapp unterhalb 150rad/s eine feine Linie. Alle Punkte oberhalb dieser Linie verlangen eine Statorfrequenz grösser als die Nennfrequenz (50 Hz) aber die Spannung ist auf der Nennspannung festgehalten (Abbildung 31, rechts), weil die Grenze der Aussteuerung des Frequenzumrichters erreicht ist.

Bei Flussführung für besten Wirkungsgrad resultieren die Verläufe in Abbildung 30. Es zeigt sich wieder die Verbesserung bei kleinem Moment und kleinen Drehzahlen.

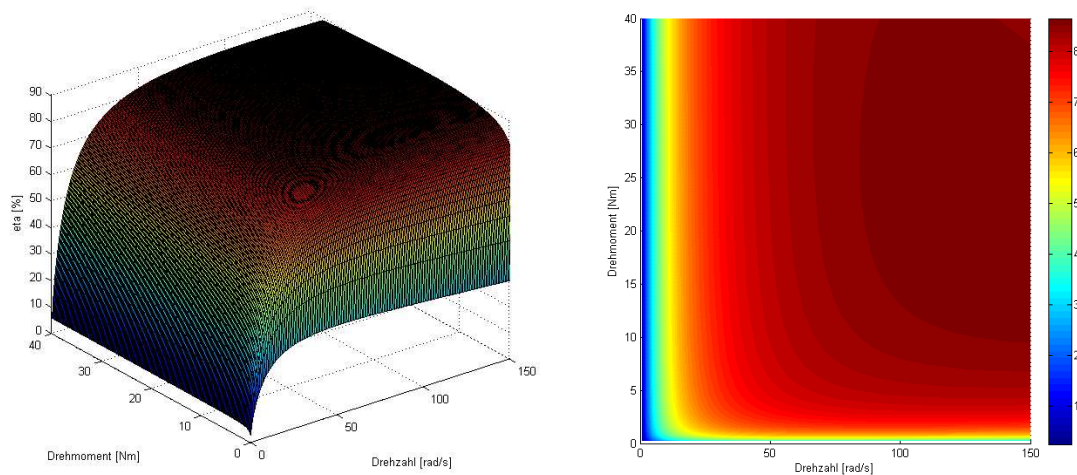


Abbildung 30: Wirkungsgrad mit Sättigung des Eisens (besten Wirkungsgrad)

Bemerkung: Es ist sichtbar, dass der Wirkungsgrad in Abbildung 22 Seite 28 (ohne Sättigung des Eisens) ein bisschen schlechter als in Abbildung 29 ist. Dies wird nachfolgend in Abbildung 36, Seite 38 betrachtet.



Auch Schlupf und Spannung unterscheiden sich wieder, wenn mit Nenn- oder optimalem Fluss gefahren wird. Dies illustrieren die folgenden beiden Abbildungen 31 und 32.

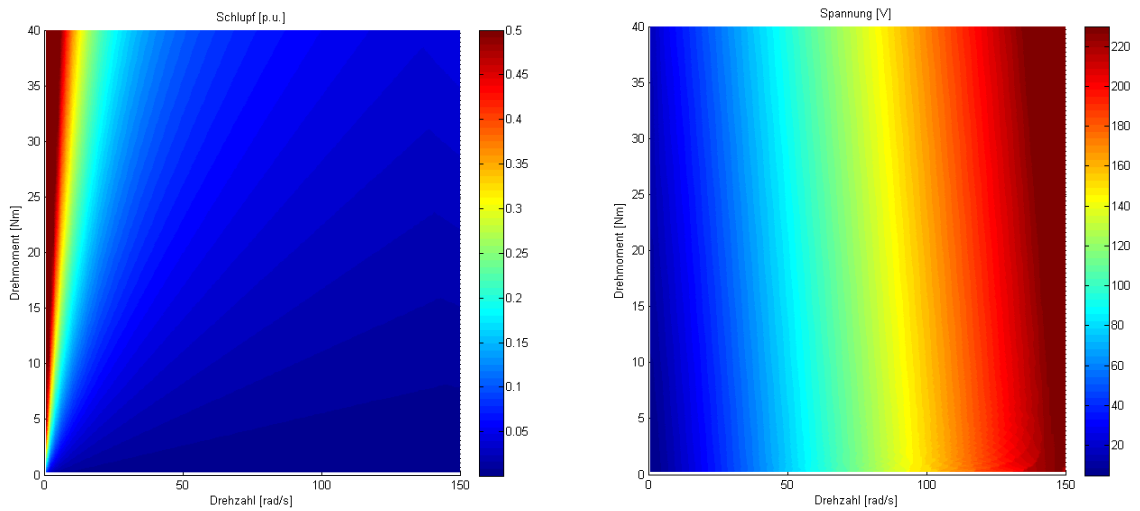


Abbildung 31: Schlupf und Spannung mit Sättigung des Eisens (der Fluss ist konstant)

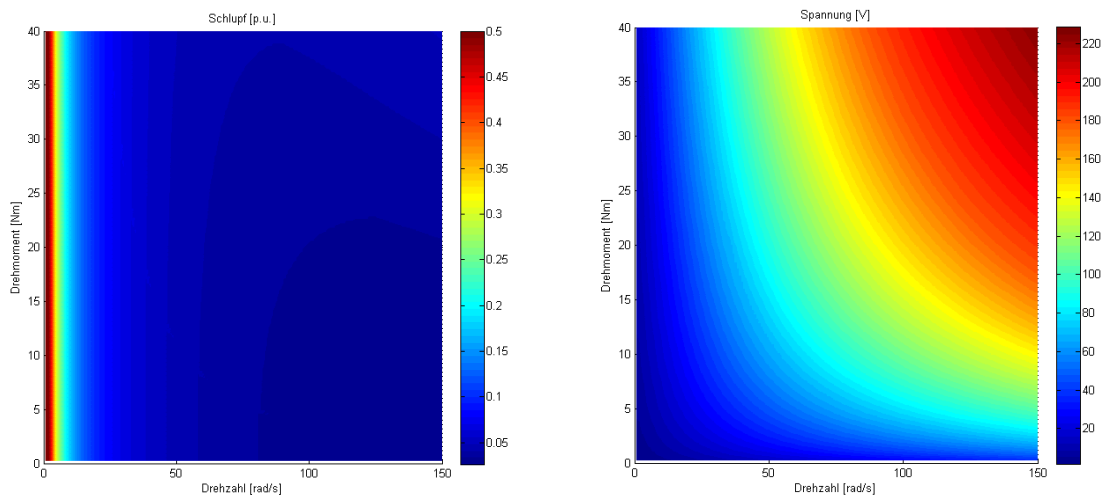


Abbildung 32: Schlupf und Spannung mit Sättigung des Eisens (bester Wirkungsgrad)



Um die Verständlichkeit der Ergebnisse zu verdeutlichen, werden wieder vier Drehzahlen genauer betrachtet. Als erstes ist wiederum der Wirkungsgrad in Abbildung 33 dargestellt:

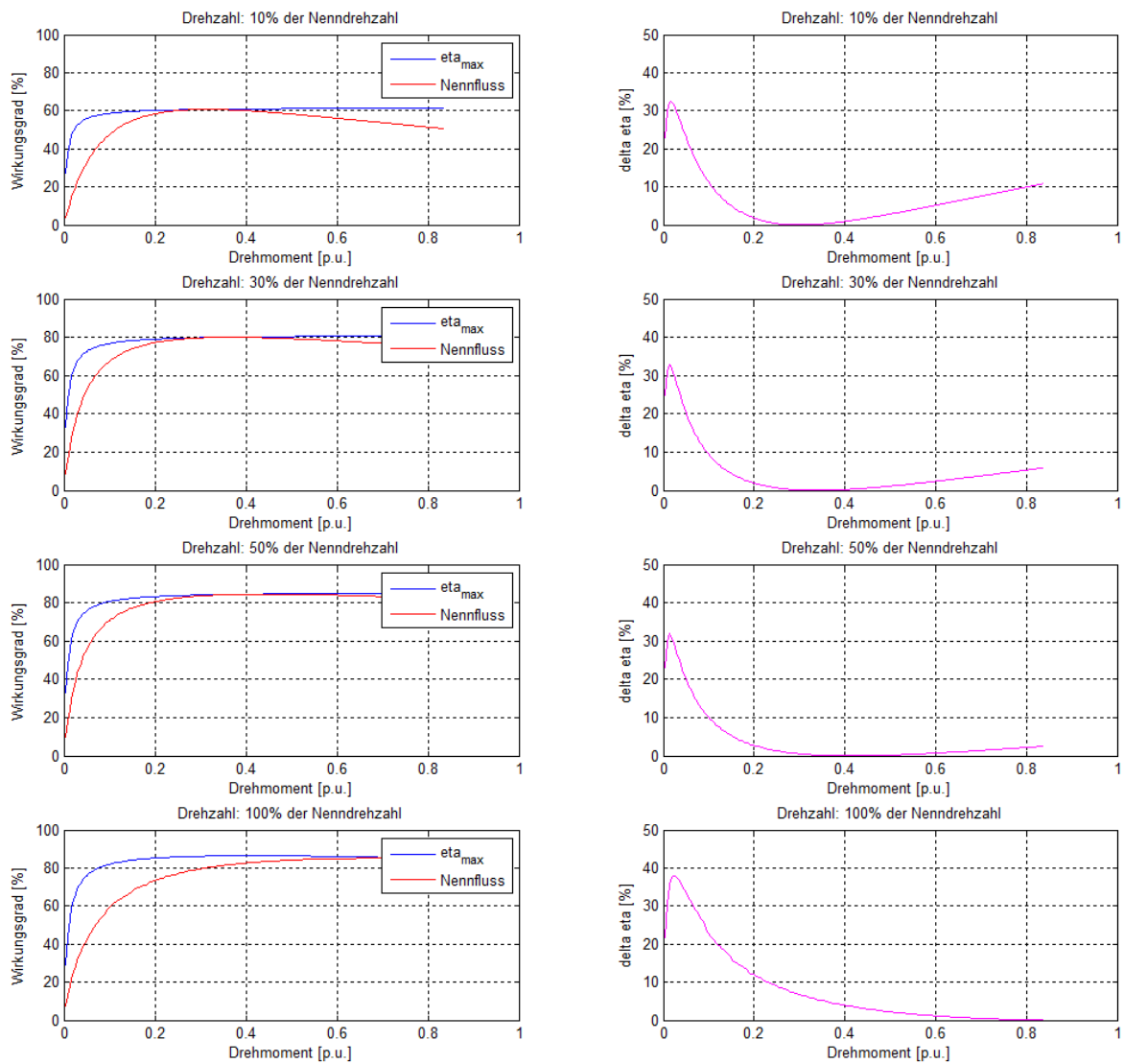


Abbildung 33: Wirkungsgrad im Funktion des Drehmoments für 10% 30% 50% und 100% % der Nenndrehzahl (mit Sättigung des Eisens)

Verglichen mit den Ergebnissen ohne Sättigung (Abbildung 26, Seite 30) zeigt sich, dass der Gewinn bei Berücksichtigung der Sättigung grösser ist, wie dies auch die Abbildung 36 auf Seite 38 verdeutlicht.



Spannung und Schlupf bei Berücksichtigung der Sättigung zeigt Abbildung 34:

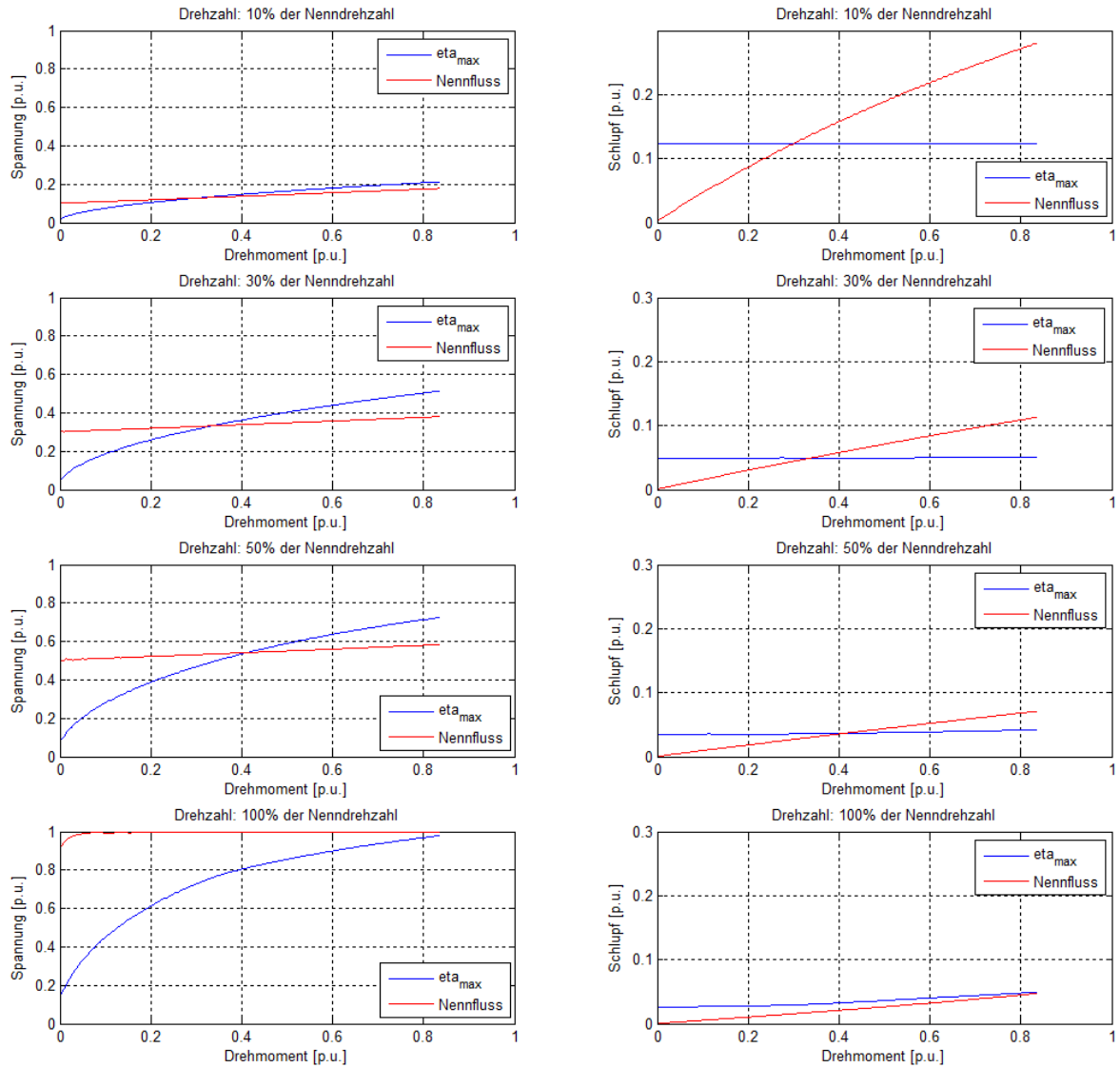


Abbildung 34: Spannung und Schlupf (mit Sättigung des Eisens)



In Abbildung 35 zeigt sich, dass der Fluss (blaue Kurve für 100% der Nenndrehzahl) als Folge der Sättigung früher den Nennfluss erreicht.

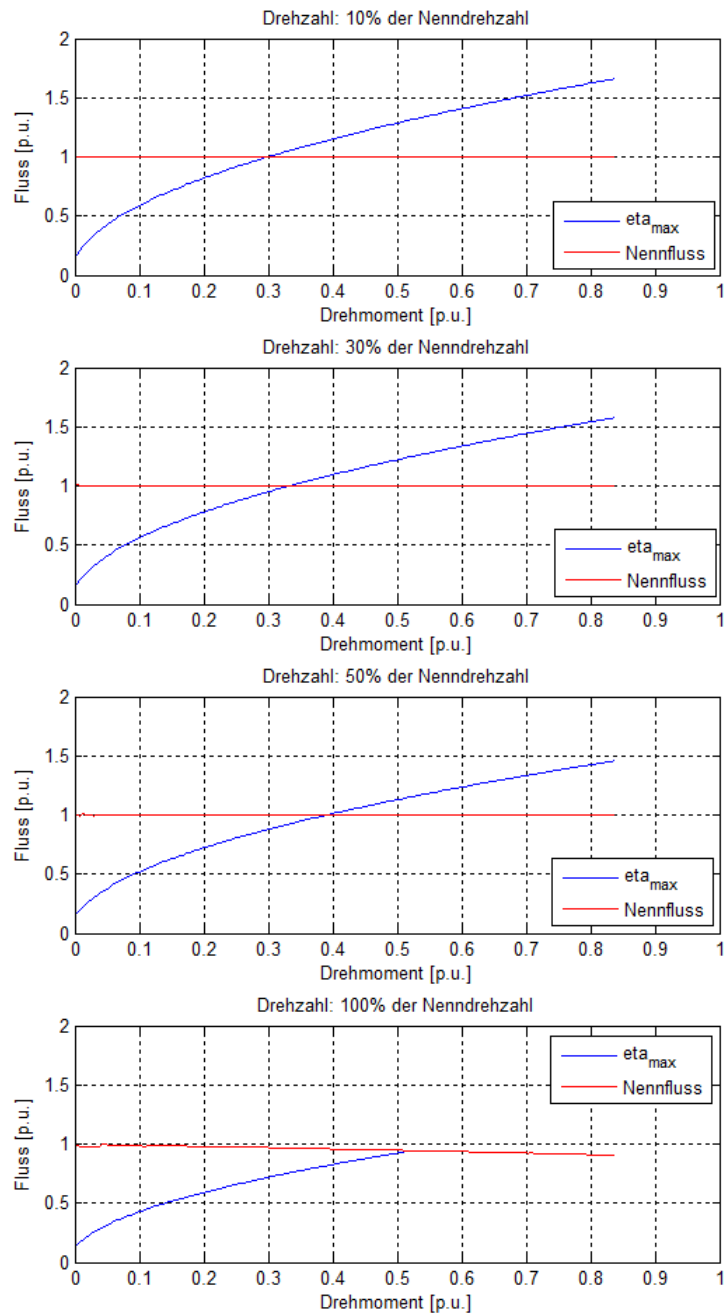


Abbildung 35: Fluss (mit Sättigung des Eisens)



### 6.3. Vergleich der Gewinne mit und ohne Berücksichtigung der Eisensättigung

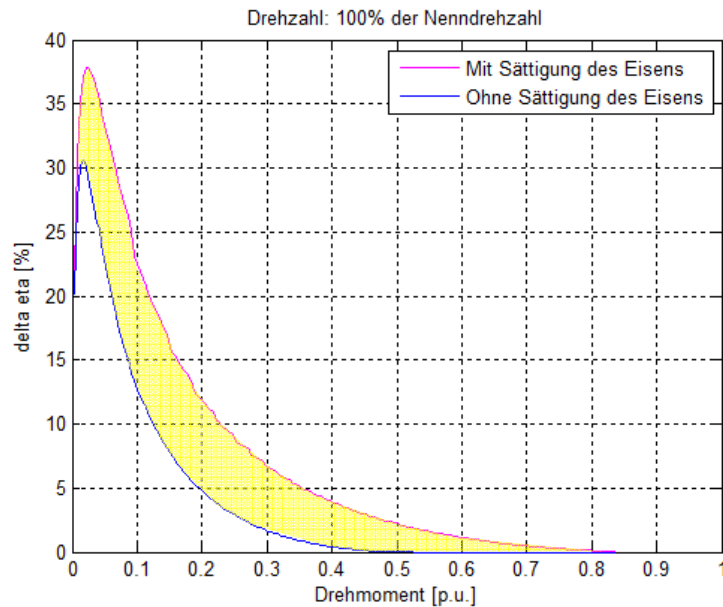


Abbildung 36: Gewinne mit und ohne Berücksichtigung der Sättigung bei Nenndrehzahl

Die Grafik zeigt, dass der Unterschied im Gewinn (Gelb) bei Nenndrehzahl im Bereich von 2 bis 30% des Nenndrehmoments (zwischen den zwei Kurven) ungefähr 7% ist und anschliessend mit grösseren Drehmomenten kleiner wird. Die Abbildung illustriert, dass das Sparpotential für ASM, die im Bereich der Sättigung betrieben werden, gross ist. Bekanntlich gilt das aus ökonomischen Gründen für den grössten Teil aller ASM.



## 6.4. Gewinn bei Sättigung mit und ohne Berücksichtigung der Reibungen

In den bisherigen Betrachtungen wurde die Reibung immer mit modelliert. Wird die Reibung nicht berücksichtigt, so lässt sich der Wirkungsgrad theoretisch, wie zu erwarten, im kleinen Leistungsbereich noch signifikant steigern. Dies ist in Abbildung 37 zu sehen. Die korrekte Berücksichtigung der Reibung ist entsprechend wichtig!

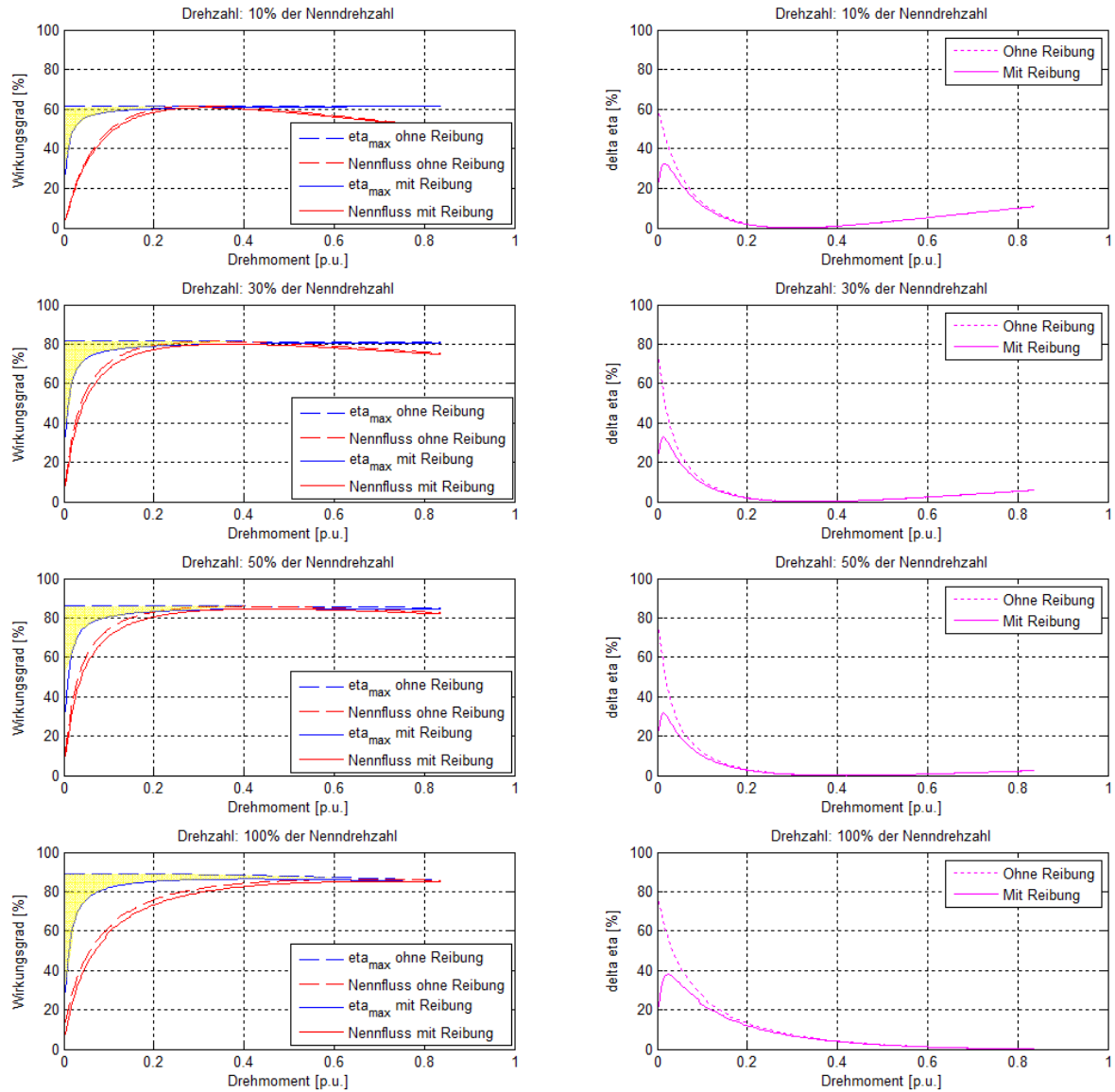


Abbildung 37: Gewinne bei Sättigung des Eisens mit und ohne Berücksichtigung der Reibung



## 6.5. Welche Anpassung für optimalen Wirkungsgrad

Gemäss den vorgestellten Ergebnissen ist es also möglich, eine Verbesserung des Wirkungsgrads für einen breiten Drehmoment und Drehzahlbereich zu erreichen (Abbildung 33 Seite 35). Das bedeutet, dass Spannung und Frequenz angepasst werden müssen um die Verbesserung zu erzielen.

Dies ist analog zu einer MPPT-Optimierung.

## 7. Käufliche FU mit Wirkungsgradoptimierung

Verschiedene Hersteller bieten Frequenzumrichter (FU) mit der Option zur Energieeinsparung im stationären Betrieb an.

Das Ziel der Untersuchung war die Beantwortung der folgenden Fragen:

- Wie funktioniert der Energiespar-Algorithmus dieser FU?
- Gibt es eine wirkliche Verbesserung?
- Ist der Gewinn gleich oder kleiner als bei den theoretischen Ergebnissen?

In der Arbeit wurde versucht, diese Fragen in Zusammenarbeit mit FU-Herstellern (ABB, Siemens, Danfoss, Fuji, Mitsubishi, ...) zu bearbeiten. Dabei wurde festgestellt, dass die Firmenvertreter den wirklichen Gewinn mit dieser neuen Option oft nicht kennen. Daraus resultierte ein grosses Interesse von beiden Seiten an Messungen. Drei Hersteller haben einer Zusammenarbeit zugestimmt. Aus Gründen der Vertraulichkeit werden diese nicht namentlich genannt - die Firmen werden im Bericht mit Firma A, Firma B, Firma C bezeichnet.

Leider konnten die Messungen auch nicht mit identischen Maschinen durchgeführt werden. Es wurden die Maschinen gemessen, die von den Firmen zur Verfügung gestellt wurden.

In diesem Kapitel werden nur die Kurven des Wirkungsgrades dargestellt. Die kompletten Messungen und Ergebnisse sind im Anhang [6] Seite 77 ersichtlich.

Um einfache Vergleiche zu ermöglichen, wurden die gleichen Darstellungen wie in Kapitel 8 gewählt, soweit das möglich war (10%, 30%, 50% und 100% der Nenndrehzahl).



### 7.1.1. Firma A (Nenn Drehzahl 1460 U/min, 11kW)

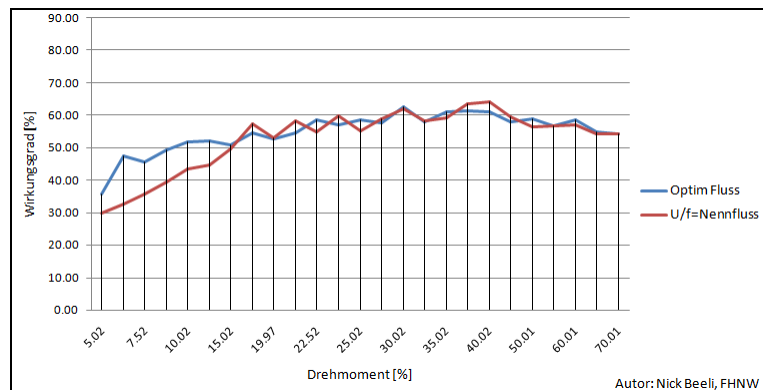


Abbildung 38: Firma A - 10% der Nenn Drehzahl

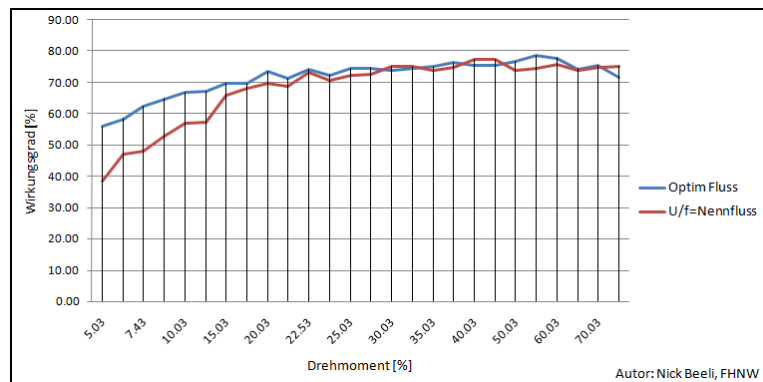


Abbildung 39: Firma A - 30% der Nenn Drehzahl

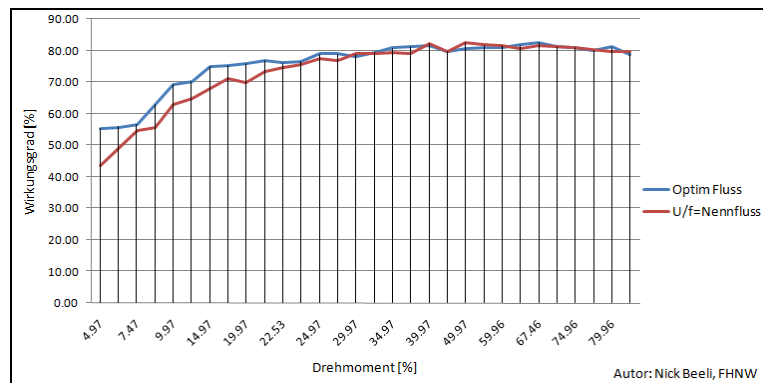


Abbildung 40: Firma A - 50% der Nenn Drehzahl

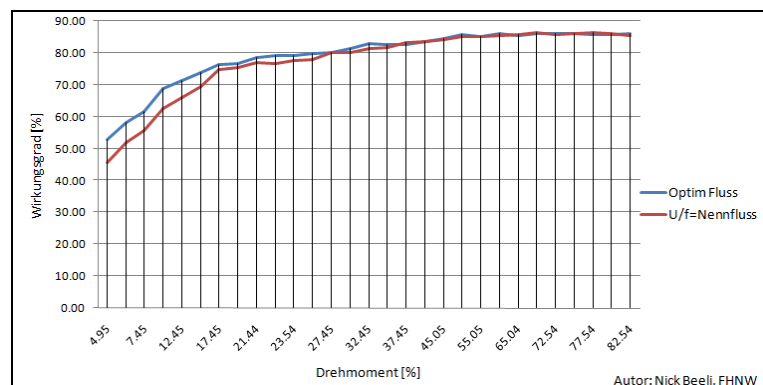


Abbildung 41: Firma A - 100% der Nenn Drehzahl



## 7.2. Firma B (Nenn Drehzahl 1410 U/min, 1.5kW)

Mit dieser Maschine war keine Messung mit 10% der Nenn Drehzahl möglich, da es Probleme mit der Eigenerwärmung des Motors gab.

In den nächsten Abbildungen sind drei Kurven dargestellt: Eine für eine konventionelle Steuerung und zwei mit neuen Algorithmen. Der Unterschied zwischen den beiden Algorithmen konnte nicht in Erfahrung gebracht werden. Es wurden beide gemessen.

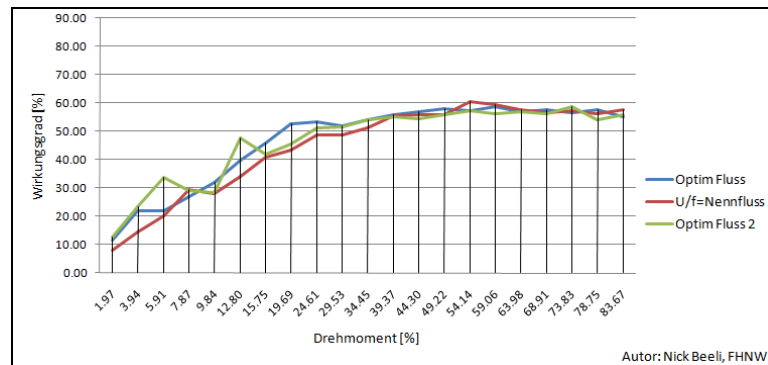


Abbildung 42: Firma B - 30% der Nenn Drehzahl

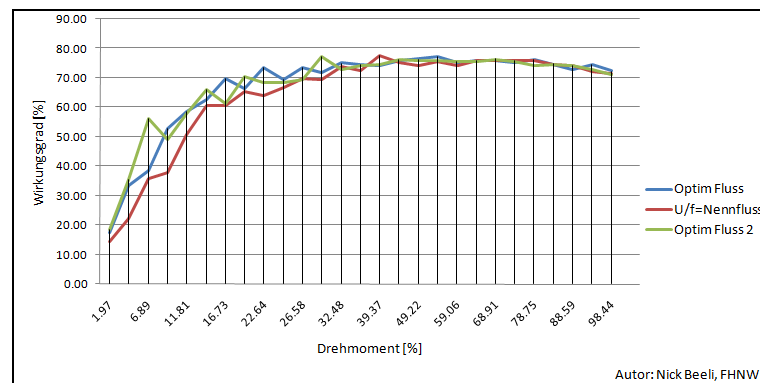


Abbildung 43: Firma B - 50% der Nenn Drehzahl

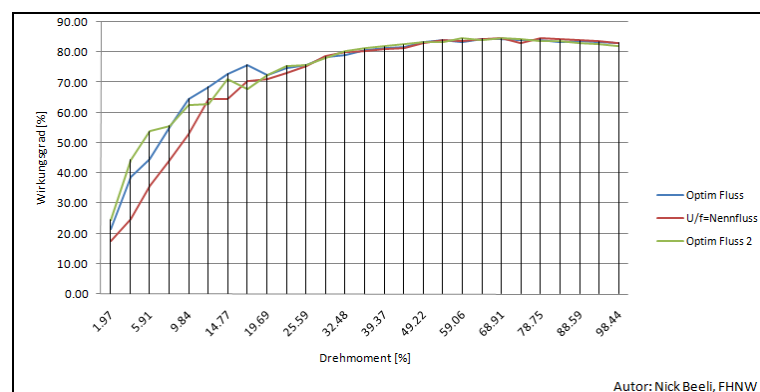


Abbildung 44: Firma B - 100% der Nenn Drehzahl

Ein Unterschied zwischen den beiden neuen Algorithmen lässt sich aufgrund der vorliegenden Daten nicht klar angeben. Dazu wären weitere, sehr spezifische Messungen nötig.



### 7.3. Firma C (Nenn Drehzahl 1465 U/min, 5.5kW)

Der Hersteller C schlägt ebenfalls zwei neuen Algorithmen vor. Es waren auch keine Messungen für 10% der Nenn Drehzahl möglich, da es Probleme mit der Belastung bei kleinen Drehzahlen gab.

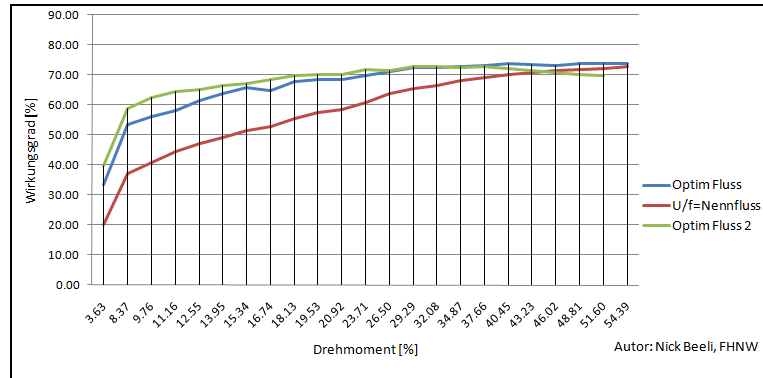


Abbildung 45: Firma C - 30% der Nenn Drehzahl

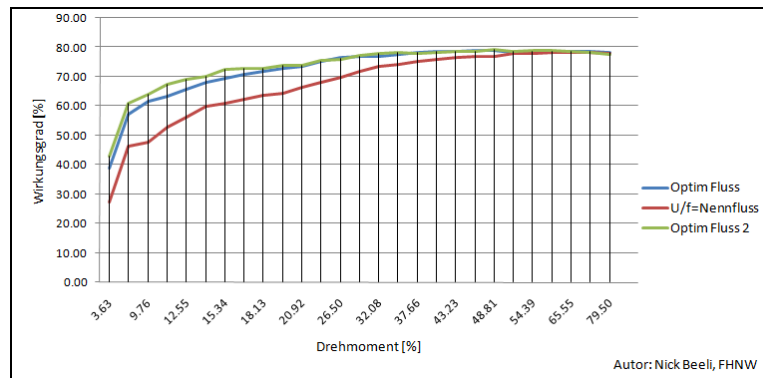


Abbildung 46: Firma C - 50% der Nenn Drehzahl

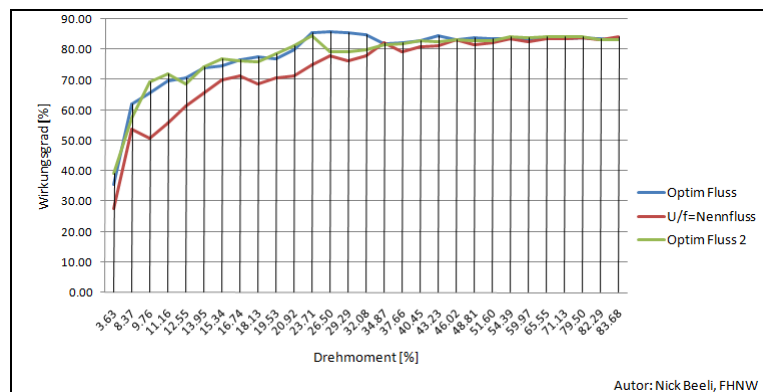


Abbildung 47: Firma C - 100% der Nenn Drehzahl

Zum Unterschied zwischen den beiden Algorithmen stellen sich die gleichen Fragen wie bei Hersteller B.



## 7.4. Vergleich und Diskussion der Resultate

In den nachfolgenden Grafiken wird der Gewinn (Wirkungsgrad bei Nennfluss minus Wirkungsgrad mit dem Energiespar-Algorithmus des Herstellers) dargestellt. Als Referenz für den Gewinn sind zusätzlich die Gewinne der theoretischen Untersuchungen in den Grafiken dargestellt.

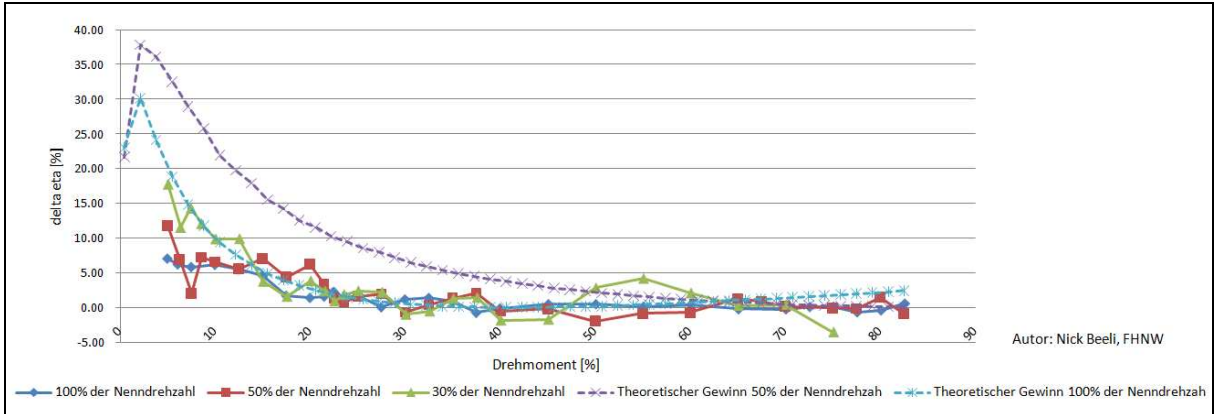


Abbildung 48: Firma A Vergleich (Nennpunkt 1460 rpm 11kW)

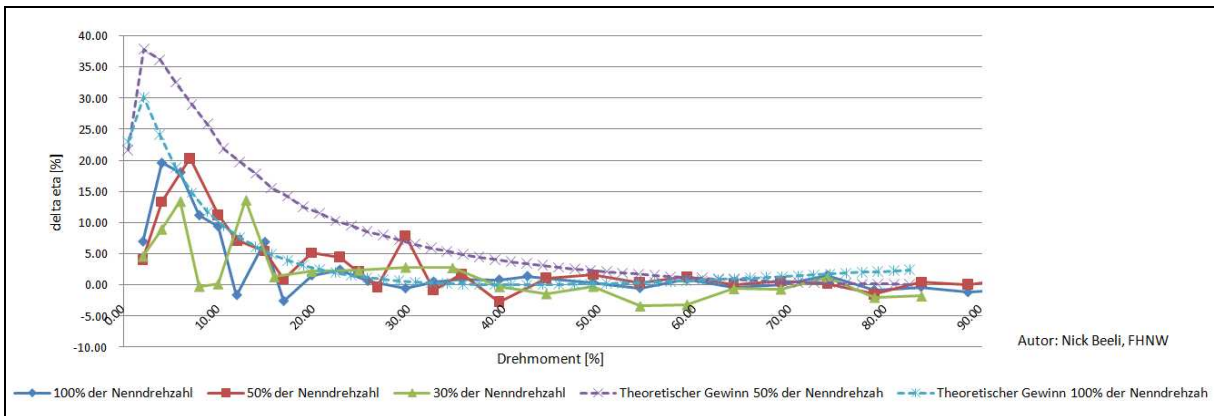


Abbildung 49: Firma B Vergleich (Nennpunkt 1410 rpm 1.5kW)

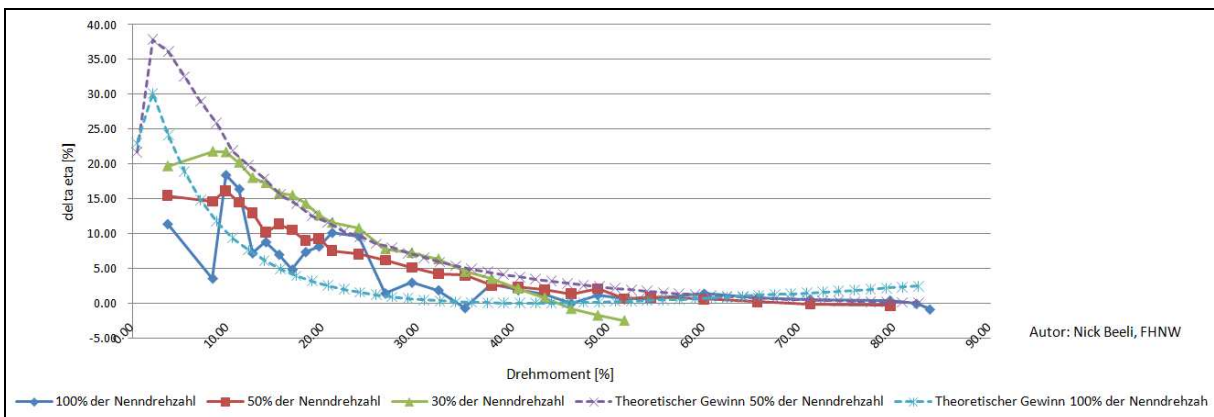


Abbildung 50: Firma C Vergleich (Nennpunkt 1465 rpm 5.5kW)



Die theoretischen Kurven in den Abbildungen 48 bis 50 Seite 44 gelten für eine Asynchronmaschine von 5.5kW. Allerdings hat nur die Asynchronmaschine der Firma C diese Nennleistung. Die anderen haben 1.5kW (Firma A) und 11kW (Firma B). Die theoretischen Kurven stimmen erstaunlich gut für den Umrichter der Firma C!

Eine genauere Untersuchung der Eigenschaften der anderen Motoren wäre interessant um die Abweichungen entweder dem Modell oder dem Algorithmus zuordnen zu können. Dies würde aber den Rahmen dieser Arbeit sprengen!

Interessant sind bei allen Messungen die Abweichungen bei sehr kleinen Momenten.

Wie bereits erwähnt, war das Ziel dieser Untersuchung nicht den besten FU zu finden. Als Folge der nachstehenden Gegebenheiten kann darüber auch keine klare Aussage gemacht werden:

- Die Messungen wurden nicht auf der gleiche Anlage durchgeführt
- Die Motoren hatten nicht die gleiche Leistung
- Die Temperaturen waren nicht gleich
- ...

Das Ziel war zu untersuchen, ob die neuen Algorithmen einen Gewinn liefern lassen. Die Messungen zeigen, dass bei kleinen Drehmomenten ein Gewinn resultiert - er ist aber kleiner als erwartet.

Wie die Algorithmen der Optimierung funktionieren konnte nicht herausgefunden werden. Es scheint, dass auch die Firmenvertreter nicht wirklich wissen, wie ihre Algorithmen funktionieren, da dies Firmengeheimnisse sind, und der Verkäufer keine Information darüber hat. Nur ein Hersteller gab an, dass sie mit der Motorspannung „spielen“ - aber wie?

Bei der Suche nach Frequenzumrichtern zum Ausmessen wurde deutlich, dass diese neuen Optionen noch nicht lange erhältlich sind. Entsprechend bieten auch noch nicht alle Hersteller diese Möglichkeit an.



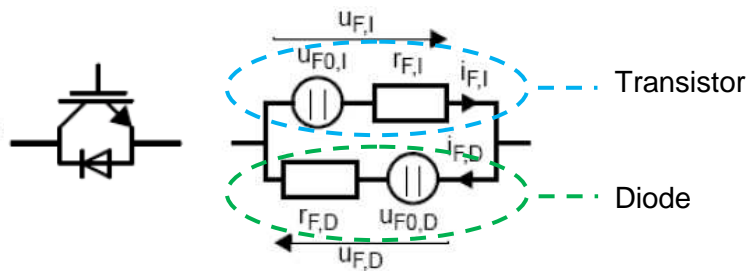
## 8. Einfluss auf den Wirkungsgrad eines speisenden FU's

### 8.1. Theorie

Die Verluste von Frequenzumrichtern können wir in drei grosse Gruppen unterteilen:

- Schaltverluste
- Leitverluste
- Verbrauch der Elektronik

Betrachtet wird das Modell eines IGBT's:



Für dieses Modell resultiert die Gleichung der Leitverluste pro Brückenweig:

$$P_L = \underbrace{U_{F0,D} \cdot I_d + r_{F,D} \cdot I_{eff}^2}_{Diode} + \underbrace{U_{F0,I} \cdot I_d + r_{F,I} \cdot I_{eff}^2}_{Transistor} \quad (8.1)$$

Für die Schaltverluste wird die Annahme gemacht, dass sie konstant und gleich gross wie die Nennleitverluste sind. Dieser Ansatz hat sich in der Praxis als gute Näherung erwiesen.

$$P_S \approx P_{L_{Nenn}} \quad (8.2)$$

Um den Verbrauch der Steuerelektronik zu bestimmen, wurde eine Messung am FU der Firma C gemacht. Dieser verbraucht bei ausgeschalteter Leistungsstufe konstant 25 Watt. Dazu muss noch die Leistungen der zwei Ventilatoren (11W) für die Kühlung des Frequenzumrichters hinzu gefügt werden.

### 8.2. Abschätzung

Für die Verluste des FU's im Nennbetrieb bei Nennleistung, werden die typischen Daten eines IGBT / Diode -Moduls eingesetzt.

IGBT:  $U_{F0} = 1.8V$   
 $r_F = 38m\Omega$   
 Diode:  $U_{F0} = 1.2V$   
 $r_F = 26m\Omega$   
 Strom:  $11A_{RMS}$   
 $9A_{Mittel}$



$$P_{tot} = (P_L + P_S) \cdot m + P_{Elek} + P_{Kühl} \quad (8.3)$$

$$P_{tot} = \left[ \underbrace{\left( \underbrace{1.2V \cdot 9A + 26m\Omega \cdot 11A^2}_{Diode} + \underbrace{1.8V \cdot 9A + 38m\Omega \cdot 11A^2}_{Transistor} \right) \cdot 2}_{P_{LNenn}} \right] \cdot 3 + 25W + 11W = \underline{\underline{245W}} \quad (8.4)$$

$P_{LNenn} + P_S$

Im Vergleich mit der Nennleistung der 5.5kW Asynchronmaschine entsprechen die FU-Verluste ungefähr 4.5%.

**Beachte:**

Bei optimalen Wirkungsgrad ist der Strom in der Maschine kleiner als bei Nennfluss, deshalb werden die Verluste in den Transistoren und in den Dioden kleiner. D.h. die Reduktion der Maschinenverluste ergibt auch eine Reduktion der Stromrichtsverluste!

## 9. Synchron- versus Asynchronmaschine

### 9.1. Ausgangslage

Bis jetzt wurden nur Asynchronmaschinen behandelt. Bekanntlich sind aber auch Synchronmaschinen im Einsatz. Deshalb sollen die erhaltenen Wirkungsgrade, und die erhaltenen Verbesserungen, mit den Wirkungsgradkurven von verschiedenen Asynchron- (IE1...IE3) sowie Synchronmotoren verglichen und bewertet werden.

### 9.2. Synchronmotor mit Permanentmagneterregung

Als Quelle, wurden die Kurven von Synchronmotoren mit Permanentmagneterregung von „Leroy Somer“ studiert. Dieser Hersteller ist eine der grössten Firmen für Motoren „kleinerer“ Leistung (0.75 bis 400 kW).

Mit dem Typ 5.4 kW LSRPM 100 L wurde ein Motor mit der gleichen Leistung wie die bisher verwendete ASM gefunden. Von dieser Maschine sind zwei Kennliniensätze verfügbar: Das zulässige Drehmoment in Funktion der Drehzahl und der Wirkungsgrad bei Nennmoment.

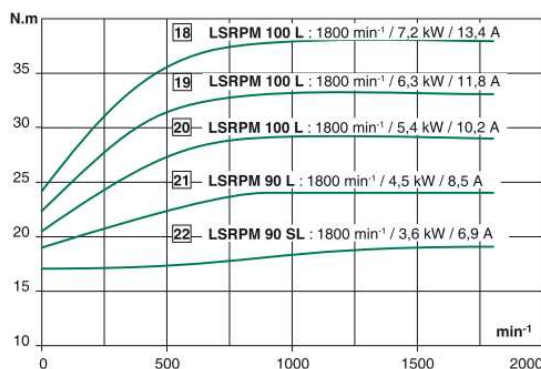


Abbildung 51: Drehmoment MS (Quelle: [14] Leroy Somer)

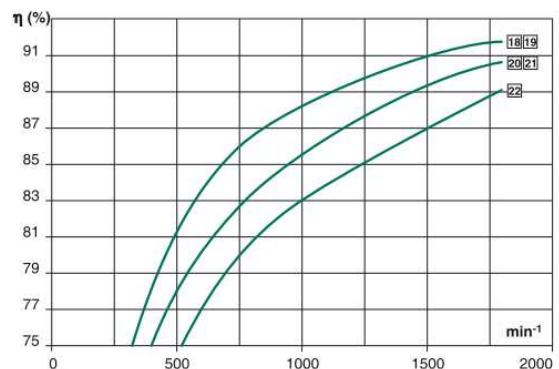


Abbildung 52: Wirkungsgrad MS



Mit den Wirkungsgradkurven aus den Datenblättern wurde ein mathematisches Modell geschätzt. Es werden vier Teilleistungen angenommen:

$$\begin{array}{ll} \text{Die Belastung} & P_{mec} \\ \text{Die Kupferverluste} & k_1 \cdot M_{mec}^2 \end{array} \quad (9.1)$$

$$\text{Die Reibungsverluste} \quad k_2 \cdot \omega_{mec} \quad (9.2)$$

$$\text{Die Ventilationsverluste} \quad k_3 \cdot \omega_{mec}^2 \quad (9.3)$$

Die Gleichung des Wirkungsgrades ergibt sich wie folgt:

$$\eta = \frac{P_{mec}}{\underbrace{P_{mec} + k_1 \cdot M_{mec}^2 + k_2 \cdot \omega_{mec} + k_3 \cdot \omega_{mec}^2}_{P_{in}}} \quad (9.4)$$

$$\eta = \frac{1}{1 + k_1 \cdot \frac{M_{mec}^2}{P_{mec}} + k_2 \cdot \frac{\omega_{mec}}{P_{mec}} + k_3 \cdot \frac{\omega_{mec}^2}{P_{mec}}} \quad (9.5)$$

$$\frac{1}{\eta} = 1 + k_1 \cdot \frac{P_{mec}}{\omega_{mec}^2} + k_2 \cdot \frac{\omega_{mec}}{P_{mec}} + k_3 \cdot \frac{\omega_{mec}^2}{P_{mec}} \quad (9.6)$$

Mit Hilfe der Wirkungsgradkurven auf Seite 47 lassen sich die Koeffizienten  $k_1$ ,  $k_2$  und  $k_3$  bestimmen. Dazu werden die Kurven in ein Simulationsprogramm übernommen aus einigen Punkten die Koeffizienten berechnet.

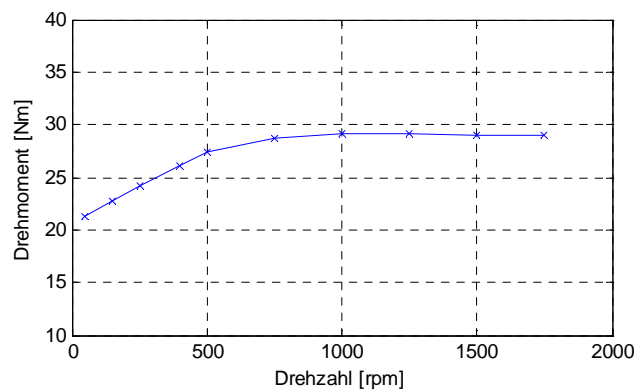
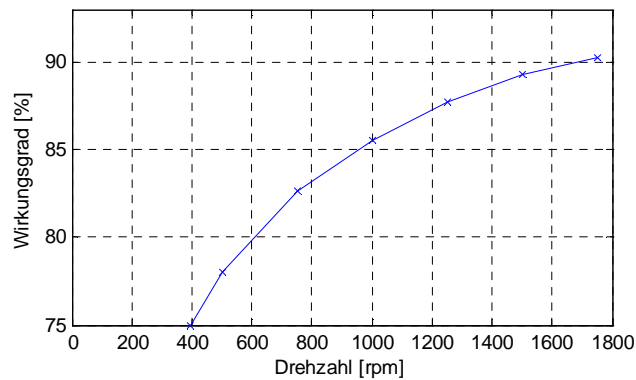


Abbildung 53: Mathematische Nachbildung der Messungen



Im nächsten Bild sind die Messungen von Leroy Somer und die Resultate der Abschätzung dargestellt.

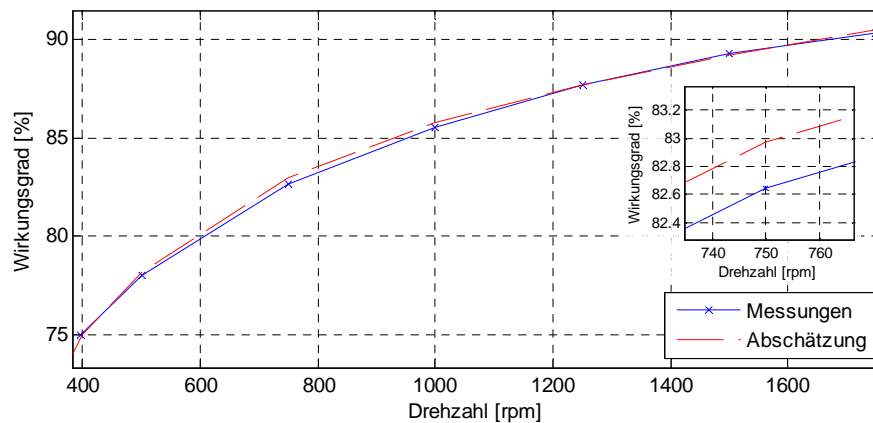
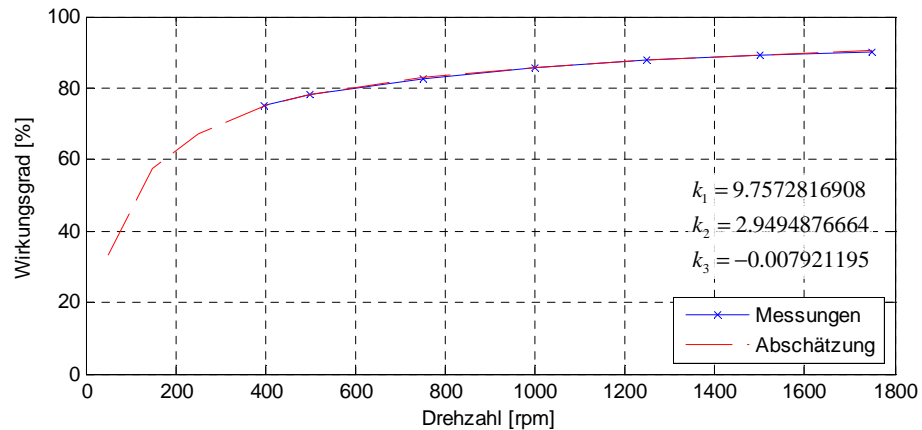


Abbildung 54: Abschätzung der Messungen Leroy Somer

Der maximale Unterschied zwischen den Kurven beträgt 0.33% (Abbildung 54), was genügend genau ist.

Die Resultate werden mit der Bezugs-ASM (Labormaschine der FHNW (IE2)) verglichen. Abbildung 55 Seite 50 zeigt drei verschiedene Kurven:

- Synchronmaschine mit Permanentmagnet
- Asynchronmaschine mit Nennfluss
- Asynchronmaschine mit optimiertem Wirkungsgrad

Anmerkung: Es ist anzunehmen, dass der Wirkungsgrad einer ASM entsprechend IE3 oder IE4 Motor noch höher ist.



Da die Drehzahlbereiche der beiden Maschinen nicht identisch sind, werden die Achsen in p.u. skaliert. Es zeigt sich, dass es für Drehmomente kleiner als 0.5 p.u. kaum einen Unterschied gibt. Oberhalb von 0.5 p.u. wird der Wirkungsgrad für die Synchronmaschine aber besser.

Beachte:

Um einen exakten Vergleich zu machen, müssten von der Synchronmaschine genauere Daten verfügbar sein, insbesondere Kennlinien bei reduziertem Drehmoment. Aus Zeitgründe konnte leider dieser Frage nicht weiter nachgegangen werden.

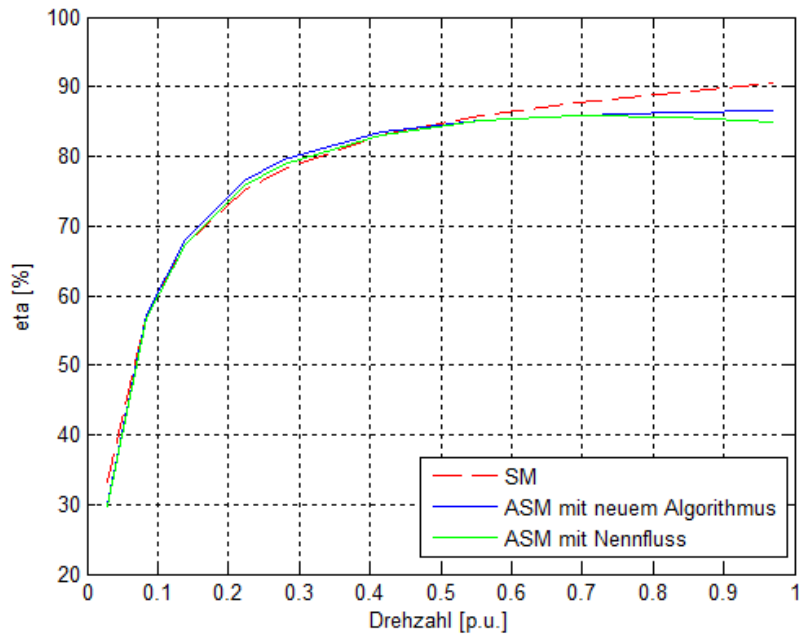


Abbildung 55: SM vs ASM



## 10. Einsparpotential in der Schweiz

Mit den Ergebnissen der Untersuchung sind die Werte des möglichen Einsparpotentials bei Verwendung der Feldschwächung bekannt. Um das gesamte Potential zu schätzen, werden Statistiken verwendet. Weil die neuesten Statistiken noch nicht vorliegen, wird auf die Werte der Jahre 2006 und 2007 abgestützt.

Es interessieren der Endverbrauch aller ASM, sowie der Endverbrauch pro Leistungsklasse. Annahmen und Verteilungsstatistiken werden erklärt. Schliesslich wird das ökonomische Potential der Schweiz abgeschätzt

### 10.1. Endverbrauch der ASM

Laut Quelle [11] BFE, beträgt der Endverbrauch der elektrischen Energie in der Schweiz für die Jahre 2006 und 2007:

Jahr	2006	2007
Endverbrauch [GWh]	57782	57432

Dieser Verbrauch lässt sich gemäss verschiedenen Graphiken weiter aufschlüsseln.

#### 10.1.1. Motorverbrauch

Laut den Quellen [6] BFE und [8] A+B International, beträgt der Motorverbrauch für die Jahre 2006-2007 ungefähr 45 - 46% des totalen Verbrauchs.

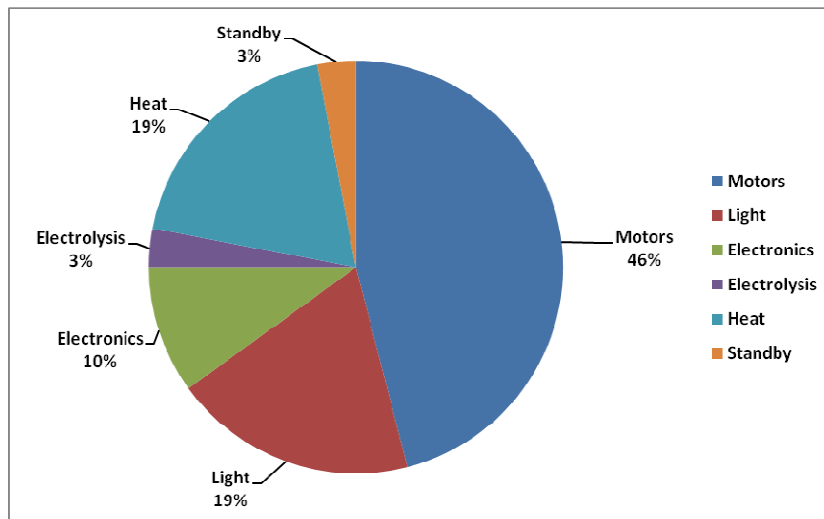


Abbildung 56: Electricity Demand 2006 (Quelle: [8] A+B International 2009)

Motoren sind die grösste Verbraucher-Gruppe für Elektrizität! Sie sind in vielen Geräten eingesetzt: z.B. Kühlschränken, Ventilatoren, Pumpen, elektrische Türen, Rolläden, Waschmaschine, Herd, ....



### 10.1.2. Anteil der ASM

Die nächste Abbildung ist von der IEA (International Energy Agency), aus der Quelle [7] „A+B International“.

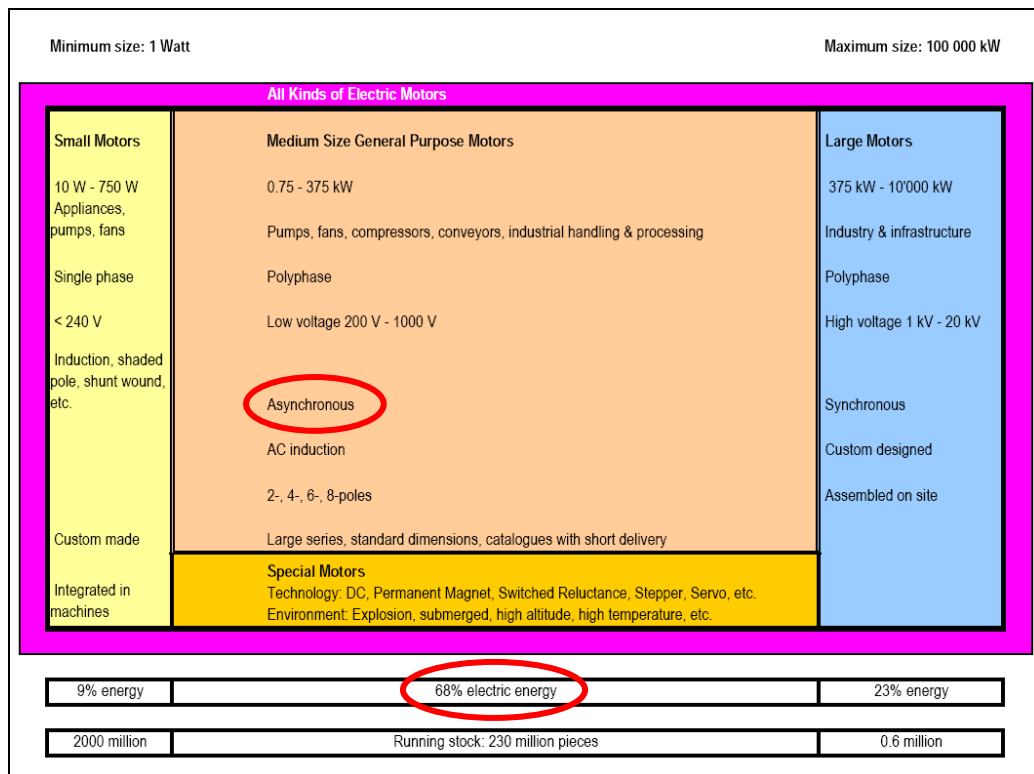


Abbildung 57: Electric motor definitions (Quelle: [7] A+B International)

Die Grafik zeigt, dass im mittleren Leistungsbereich 68% der gesamten elektrischen Leistung für Motoren bezogen wird (die speziellen Motoren haben keinen wesentlichen Anteil). Konservativ wird der Anteil für ASM's auf 60% geschätzt, was 27.6% des Gesamtverbrauchs entspricht. (Es ist zu vermuten, dass der Wert bis zu 65% betragen könnte, aber dazu konnten keine Informationen gefunden werden.)



### 10.1.3. Leistungsklasse der ASM

Die Werte der Leistungsklassen werden wieder aus der Tabelle der Quelle [8] „A+B International“ genommen, diese bezieht sich auf die Quelle [9] „Eurostat 2008“. Diese Statistiken stellen den Anteil der verkauften ASM pro Jahr in Europa dar. Es wird angesetzt, dass dieser auch in etwa den Maschinen in Betrieb entspricht. Interessant ist dabei der sehr hohe Anteil an Motoren unter 10kW!

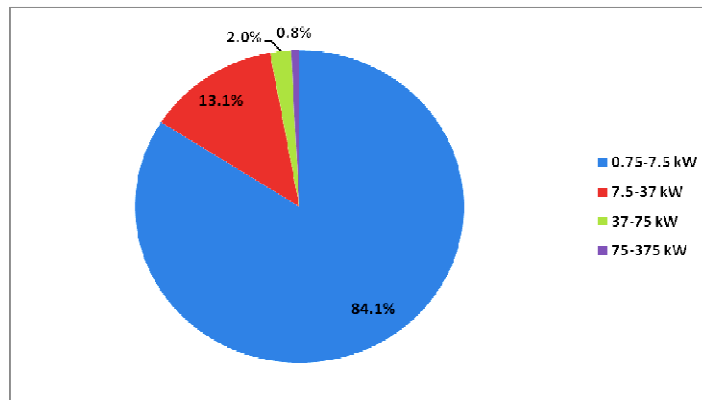


Abbildung 58: Motor demand in the EU-27 for 2006 (Quelle: [9] Eurostat, 2008)

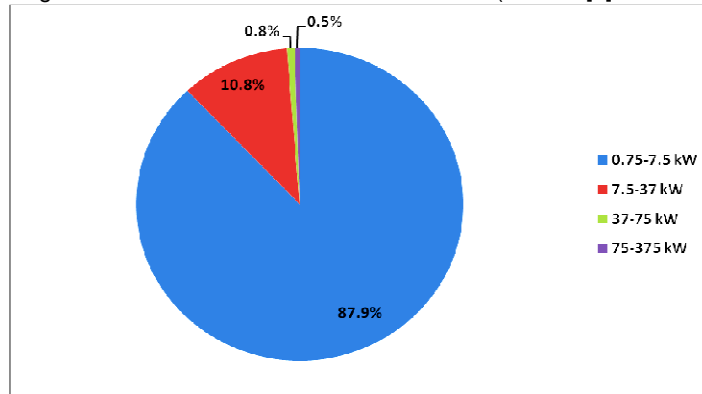


Abbildung 59: Motor demand in the EU-27 for 2007 (Quelle: [9] Eurostat, 2008)

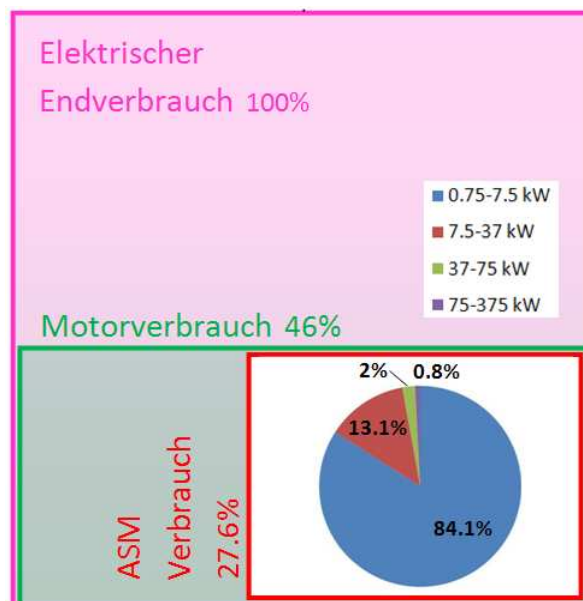


Abbildung 60: Verbrauch der Elektrizität für ASM für 2006



## 10.2. Einsparungspotential pro Leistungsklasse

### 10.2.1. Lastfaktor und Statistik der Benutzung

Es sind kaum Informationsquellen über die Belastungsverteilung bei Maschinen auffindbar. Deshalb werden zwei Annahmen gemacht: Laut der Quelle [10] topmotors.ch, ist die mittlere Auslastung pro Leistungsklasse bekannt, aber keinen Daten über die Verteilung. Deshalb stellen wir die Annahme auf, dass es sehr wenige Maschinen gibt, die in kleiner Teillast oder in Überlast (max. 110%) funktionieren. Mit dieser Annahme, und mit der Information des Lastfaktors, wird die Statistikverteilung mit zwei cosinusförmigen Kurven modelliert. Das Ergebnis ist eine unsymmetrische „Gauss“-Kurve. In den nächsten Abbildungen werden die zwei Annahmen im Detail erklärt.

Leistungsklasse	Mittel der Auslastung
< 100 kW	40%
100 kW bis 1000 kW	60%
1000 kW bis 10000 kW	80%
> 10000 kW	90%

Abbildung 61: Mittlere Auslastung der Leistungsklassen (Quelle: [10] topmotors.ch)

Beispiel: Die mittlere Auslastung sei 40%. In den Formeln, wird das Mittel der Auslastung  $\beta$  [%] genannt. Die Statistikverteilung wird mit zwei cosinusförmigen Kurven, A und B, mit einem „Offset“ modelliert.

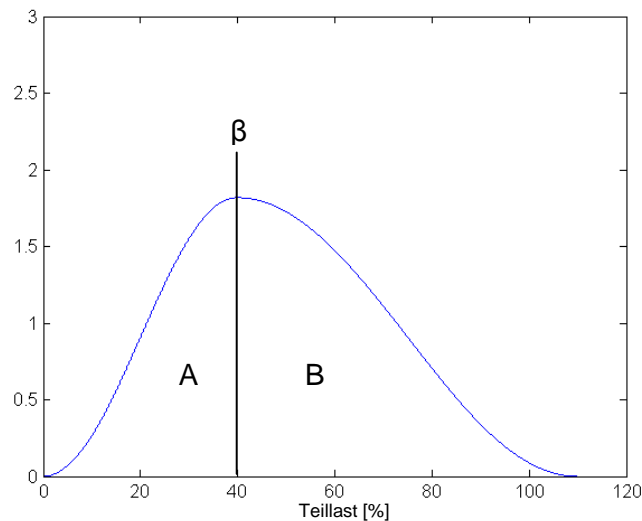


Abbildung 62: Unsymmetrische Verteilungskurve

Die Gleichungen der zwei Kurven lauten:

$$\boxed{\text{A}} \quad 1 + \cos\left(\frac{x \cdot \pi}{\beta} - \pi\right) \quad 0 < x \leq \beta \quad (10.1)$$

$$\boxed{\text{B}} \quad 1 + \cos\left(\frac{(x - \beta) \cdot \pi}{110 - \beta}\right) \quad \beta < x \leq 110 \quad (10.2)$$

Das Integral der Verteilungskurve muss gleich 100% sein.

$$\int_0^{\beta} \boxed{\text{A}} + \int_{\beta}^{110} \boxed{\text{B}} = 100 \quad (10.3)$$



Damit kann die Gleichung 10.4 angesetzt werde:

$$\underbrace{\int_0^{\beta} 1 + \cos\left(\frac{x \cdot \pi}{\beta} - \pi\right) \cdot dx}_{\beta} + \underbrace{\int_{\beta}^{110} 1 + \cos\left(\frac{(x - \beta) \cdot \pi}{110 - \beta}\right) \cdot dx}_{110 - \beta} = 100$$

$$\beta + 110 - \beta = 100 \quad (10.4)$$

$$110 \neq 100$$

Es zeigt sich, dass die Gleichung 10.4 nicht 100% ergibt. Dies wird mit einem Korrekturfaktor von 1.1 korrigiert.

$$\boxed{\text{A}} \quad \frac{1 + \cos\left(\frac{x \cdot \pi}{\beta} - \pi\right)}{1.1} \quad 0 < x \leq \beta \quad (10.5)$$

$$\boxed{\text{B}} \quad \frac{1 + \cos\left(\frac{(x - \beta) \cdot \pi}{110 - \beta}\right)}{1.1} \quad \beta < x \leq 110 \quad (10.6)$$

Mit diesem Vorgehen resultieren die nachfolgenden Verteilungskurven für die verschiedenen Leistungsklassen:

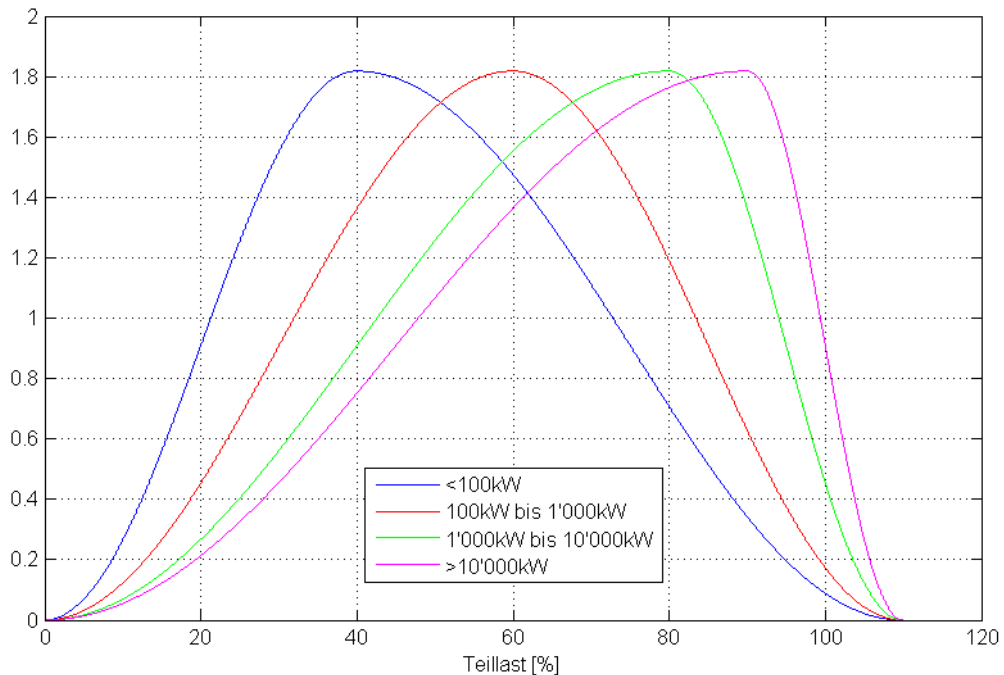


Abbildung 63: Unsymmetrische Verteilungskurven für die verschiedenen Leistungsklassen



## 10.2.2. Potential pro Leistungsklasse

Jetzt liegen alle Werkzeuge und Daten vor, um ein Modell des Potentials pro Leistungsklasse zu machen. Dazu wird die Belastungsverteilungskurve mal die Kurve des Einsparpotentials multipliziert, um eine Kurve des Potentials in % der Nennleistung zu haben (Abbildung 65 Seite 57).

Mit dem Beispiel des Unterkapitels 10.2.1 „Lastfaktor und Statistik der Benutzung“ mit dem Lastfaktor der Leistungsklasse < 100 kW (Abbildung 63, Seite 55) und der Gleichungen der Gewinne der letzten Seite erhält man das folgende Bild.

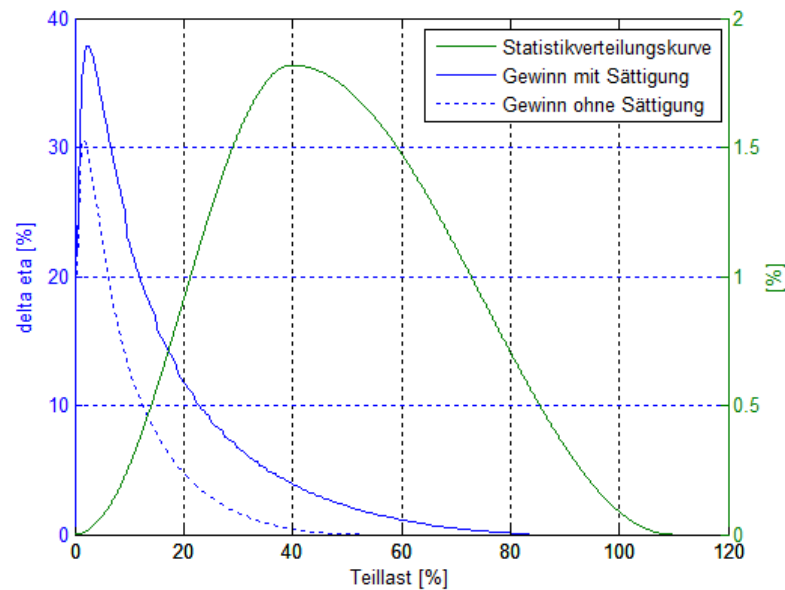


Abbildung 64: Graphik des Gewinns und der Verteilungskurve für die Leistungsklasse < 100 kW

Man sieht, dass der grosse Teil des Potentials bei Leistungen kleiner als 50 % der Nennlast sein wird.



Die Resultate von diesen Multiplikationen zeigt das nachfolgende Bild:

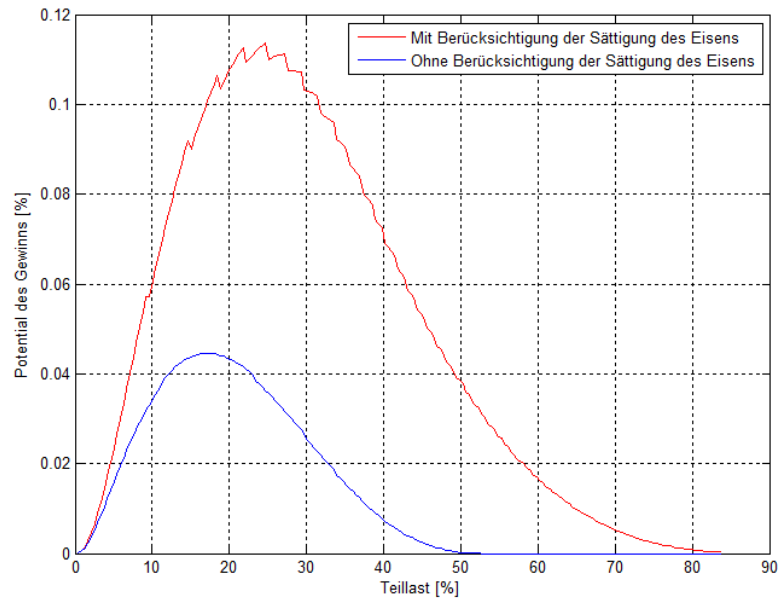


Abbildung 65: Potential des Gewinns für die Leistungsklasse < 100 kW (Graphik)

Man kann einige „Zähne“ auf der roten Kurve mit Sättigung bemerken. Diese werden durch die begrenzte Zahl von Messpunkten verursacht.

Um das endgültige Ergebnis des Potentials pro Leistungsklasse zu finden, müssen wir das Integral der Kurven berechnen.

$$\int_0^{110} f(x) \cdot dx$$

Es resultiert:

	Mit Sättigung	Ohne Sättigung
Mit Berechnung „Punkt pro Punkt“ von Matlab	4.062%	1.124%

Abbildung 66: Potential des Gewinns für die Leistungsklasse < 100 kW (Tabelle)



Um die Einsparungen aller Maschinen zu berechnen, wurden eine Software-Routine (Anhang [7] Seite 99) geschrieben, mit welcher das Potential der verschiedenen Leistungsklassen ermittelt wurde:

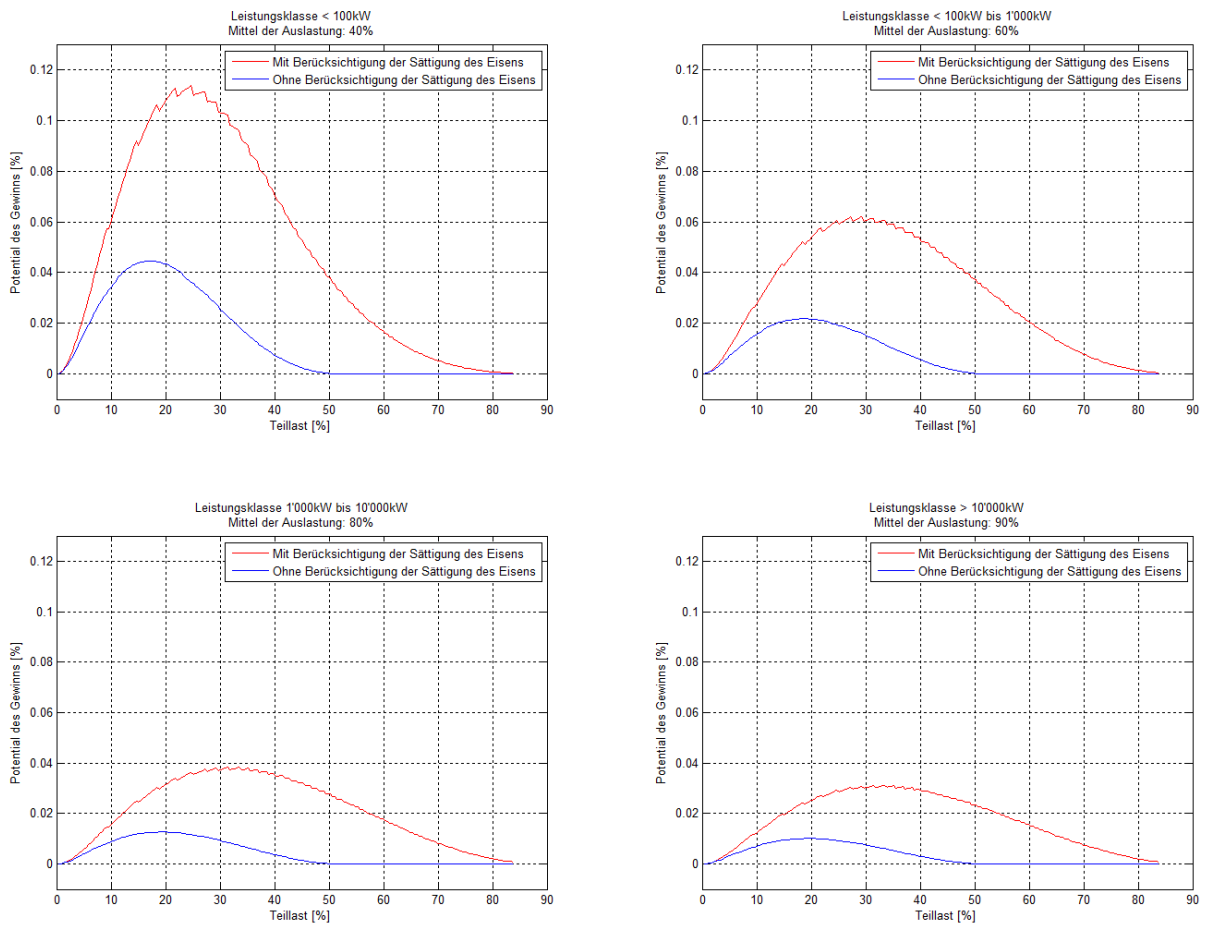


Abbildung 67: Potential pro Leistungsklasse (Graphik)

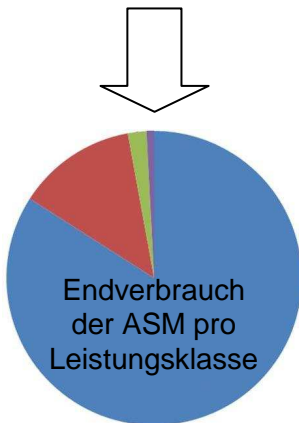
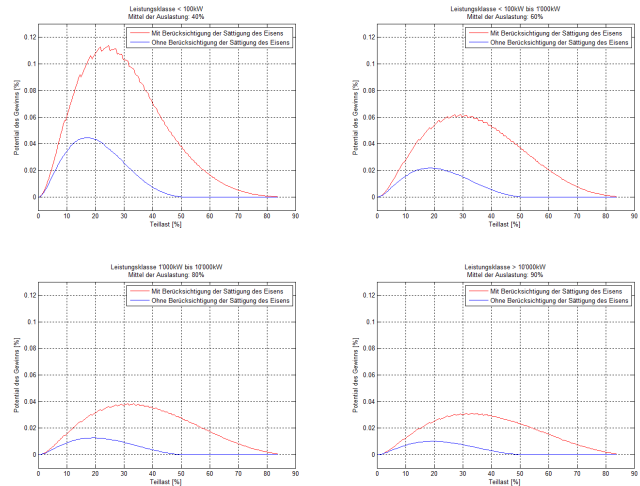
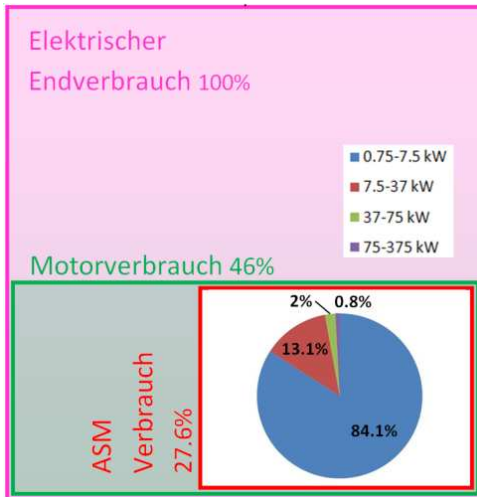
Leistungsklasse	Mittel der Auslastung	Einsparpotential	
		Mit Sättigung	Ohne Sättigung
< 100 kW	40%	4.0621%	1.1236%
100 kW bis 1000 kW	60%	2.6357%	0.5886%
1000 kW bis 10000 kW	80%	1.7629%	0.3517%
> 10000 kW	90%	1.4621%	0.2825%

Abbildung 68: Potential pro Leistungsklasse (Tabelle)

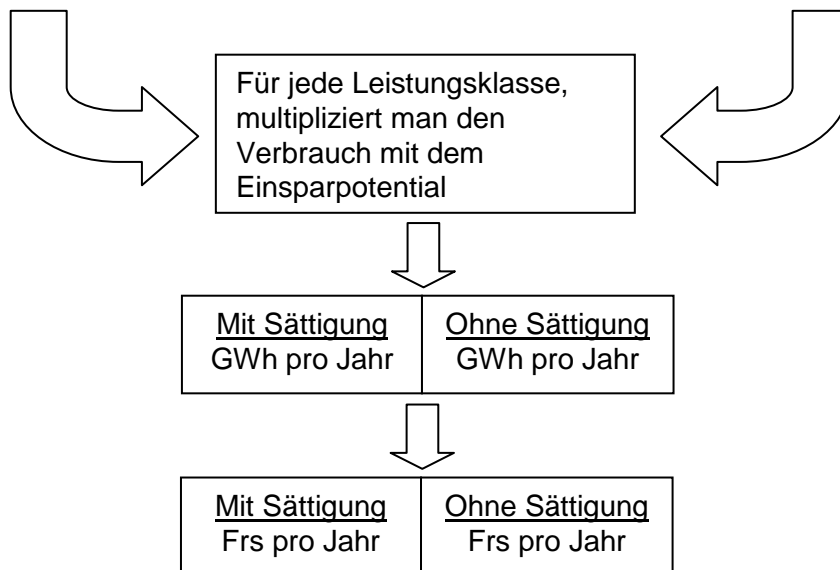


### 10.3. Wirtschaftliches Potential

Mit den vorhergehenden Resultaten, lässt sich das wirtschaftliche Potential in der Schweiz für die Jahre 2006 und 2007 bei einem optimalen Betrieb evaluieren. Dazu eine kleine Zusammenfassung der Berechnung:



Leistungsklasse	Mittel der Auslastung	Einsparpotential	
		Mit Sättigung	Ohne Sättigung
< 100 kW	40%	4.0621%	1.1236%
100 kW bis 1000 kW	60%	2.6357%	0.5886%
1000 kW bis 10000 kW	80%	1.7629%	0.3517%
> 10000 kW	90%	1.4621%	0.2825%





## 10.4. Zusammenstellung für das Jahr 2006

### Aufschlüsselung des Verbrauchs der Elektrizität

Endverbrauch in Schweiz 2006	[%]	[GWh]
	100	57782
Motorverbrauch	46	26579.7
Asynchronmaschineverbrauch	60	15947.8

Verbrauch der ASM		
Motorart	[%]	[GWh]
0.75-7.5 kW	84.1	13412.1
7.5-37 kW	13.1	2089.2
37-75 kW	2	319.0
75-375 kW	0.8	127.6

### Einsparpotential pro Leistungsklasse

Motorart	Ohne Sättigung des Eisens		Mit Sättigung des Eisens	
	Potential des Gewinns[%]	[GWh]	Potential des Gewinns[%]	[GWh]
0.75-7.5 kW	1.1242	150.8	4.0625	544.9
7.5-37 kW	1.1242	23.5	4.0625	84.9
37-75 kW	1.1242	3.6	4.0625	13.0
75-375 kW	0.5554	0.7	2.6374	3.4
<b>Total</b>		<b>178.6</b>		<b>646.1</b>

Die Werte des Einsparpotentials sind aus der Abbildung 68 Seite 58 „Potential pro Leistungsklasse“.

### Zusammenstellung über die verschiedenen Leistungsklassen

Um eine optimale Darstellung des Potentials zu erhalten, wird ein Vergleich mit dem Endverbrauch, dem Motorverbrauch und dem Asynchronmaschinenverbrauch gemacht.

Motorart	Ohne Sättigung des Eisens			
	[GWh]	[‰] des Endverbrauchs	[‰] des Motorverbrauchs	[‰] des Asynchronmaschine- verbrauchs
0.75-7.5 kW	150.8	2.61	5.67	9.45
7.5-37 kW	23.5	0.41	0.88	1.47
37-75 kW	3.6	0.06	0.13	0.22
75-375 kW	0.7	0.01	0.03	0.04
<b>Total</b>	<b>178.6</b>	<b>3.1</b>	<b>6.7</b>	<b>11.2</b>

Motorart	Mit Sättigung des Eisens			
	[GWh]	[‰] des Endverbrauchs	[‰] des Motorverbrauchs	[‰] des Asynchronmaschine- verbrauchs
0.75-7.5 kW	544.9	9.43	20.50	34.17
7.5-37 kW	84.9	1.47	3.19	5.32
37-75 kW	13.0	0.22	0.49	0.81
75-375 kW	3.4	0.06	0.13	0.21
<b>Total</b>	<b>646.1</b>	<b>11.2</b>	<b>24.3</b>	<b>40.5</b>



## 10.5. Zusammenstellung für das Jahr 2007

### Aufschlüsselung des Verbrauchs der Elektrizität

Endverbrauch in Schweiz 2007	[%]	[GWh]
	100	57432
Motorverbrauch	46	26418.7
Asynchronmaschineverbrauch	60	15851.2

Verbrauch der ASM		
Motorart	[%]	[GWh]
0.75-7.5 kW	87.9	13933.2
7.5-37 kW	10.8	1711.9
37-75 kW	0.8	126.8
75-375 kW	0.5	79.3

### Einsparpotential pro Leistungsklasse

Motorart	Ohne Sättigung des Eisens		Mit Sättigung des Eisens	
	Potential des Gewinns[%]	[GWh]	Potential des Gewinns[%]	[GWh]
0.75-7.5 kW	1.1242	156.6	4.0625	566.0
7.5-37 kW	1.1242	19.2	4.0625	69.5
37-75 kW	1.1242	1.4	4.0625	5.2
75-375 kW	0.5554	0.4	2.6374	2.1
<b>Total</b>	<b>Total</b>	<b>177.7</b>		<b>642.8</b>

### Zusammenstellung über die verschiedenen Leistungsklassen

Motorart	Ohne Sättigung des Eisens			
	[GWh]	[‰] des Endverbrauchs	[‰] des Motorverbrauchs	[‰] des Asynchronmaschine- verbrauchs
0.75-7.5 kW	156.6	2.73	5.93	9.88
7.5-37 kW	19.2	0.34	0.73	1.21
37-75 kW	1.4	0.02	0.05	0.09
75-375 kW	0.4	0.01	0.02	0.03
<b>Total</b>	<b>177.7</b>	<b>3.1</b>	<b>6.7</b>	<b>11.2</b>

Motorart	Mit Sättigung des Eisens			
	[GWh]	[‰] des Endverbrauchs	[‰] des Motorverbrauchs	[‰] des Asynchronmaschine- verbrauchs
0.75-7.5 kW	566.0	9.86	21.43	35.71
7.5-37 kW	69.5	1.21	2.63	4.39
37-75 kW	5.2	0.09	0.19	0.32
75-375 kW	2.1	0.04	0.08	0.13
<b>Total</b>	<b>642.8</b>	<b>11.2</b>	<b>24.3</b>	<b>40.6</b>

Da der Endverbrauch der Elektrizität und die Anteile der Leistungsklassen der ASM wenig ändern, sind die resultierenden Ergebnisse der Jahren 2006 und 2007 fast gleich. Der Unterschied von 4 GWh ist belanglos.



## 10.6. Finanzielle Bedeutung der Ergebnisse

Um eine Vorstellung über das Potential zu vermitteln, wird ein Vergleich mit der Produktion des Kernkraftwerkes Leibstadt gemacht.

Dieses hat eine installierte Leistung von 1165 MW für eine mittlere Jahresproduktion von 7660 GWh.

Für das Jahr 2007 können bei Berücksichtigung der Sättigung theoretisch bis zu 643GWh eingespart werden.

Diese Einsparung entspricht ungefähr einer Monatsproduktion, was, bei einem angenommenen Preis von 15 Rappen pro kWh, für die Kunden einem Gewinn von 95 Millionen Schweizer Franken darstellt.



## D. Bewertung

Der Vergleich der theoretischen Resultate mit den Resultaten der Messung hat gezeigt, dass beides tendenziell übereinstimmt. Die Messresultate erreichen aber nicht die Werte, die gemäss Theorie möglich sein sollten. Die Messungen ergaben insbesondere, dass ein Verbesserungspotenzial der Algorithmen bei Drehmomenten kleiner 10% des Nenndrehmoments vorliegt. Leider bieten noch nicht viele Firmen die Option des optimierten stationären Motorbetriebes an.

Was völlig offen ist, sind Verfahren, bei denen auch dynamisch optimal gefahren werden könnte.

Unter verschiedenen Annahmen wurde ein Sparpotential beim Endverbrauch der Elektrizität von bis zu 1.1% für stationären Motorbetrieb ermittelt. Bezogen auf alle ASM ist das Potential sogar 4%. An dieser Stelle sei festgehalten, dass die ökonomische Untersuchung für den gesamten ASM-Bestand der Schweiz gemacht wurde. Diese Maschinen werden aber nur zu einem begrenzten Teil über FU gespeist und für diese FU ist oft noch für längere Zeit kein Ersatz geplant. Entsprechend muss das ausgewiesene Potential als langfristiger Zielwert verstanden werden.

Umgekehrt ist es schade, dass nicht alle FU's diese Möglichkeit zur Wirkungsgrad-Verbesserung automatisch ausschöpfen. Im Aufbau der FU's würde diese keine zusätzlichen Kosten verursachen. Hier besteht noch ein signifikantes Entwicklungspotential!

Das ermittelte Einsparpotential ist nicht zu vernachlässigen, wenn man bedenkt, dass der Verbrauch der Elektrizität stetig steigt und der Verbrauch in anderen Ländern ebenfalls zunimmt.

Nick Beeli



## E. Symbolverzeichnis

$\eta, \text{ eta}$	[%]	Wirkungsgrad
$U_s$	[V]	Stator-Spannungsversorgung der Asynchronmaschine
$U_h$	[V]	Spannung über der Hauptinduktivität
$U_e$	[V]	Ersatz-Spannung
$I_s$	[A]	Stator-Strom
$I_{Fe}$	[A]	Strom im Modellwiderstand des Eisens
$I_h$	[A]	Strom in der Hauptinduktivität
$I_r$	[A]	Strom im Rotor
$R_s$	[ $\Omega$ ]	Widerstand der Statorwicklung
$R_{Fe}$	[ $\Omega$ ]	Widerstand des Eisens
$R_r$	[ $\Omega$ ]	Widerstand der Rotorwicklung
$L_{\sigma s}$	[H]	Stator-Streuinduktivität
$L_{\sigma r}$	[H]	Rotor-Streuinduktivität
$L_h$	[H]	Hauptinduktivität
$R_e$	[ $\Omega$ ]	Ersatz-Widerstand
$X_e$	[ $\Omega$ ]	Ersatz-Reaktanz
$Z_e$	[ $\Omega$ ]	Ersatz-Impedanz
$s$		Schlupf
$X_{\sigma r}$	[ $\Omega$ ]	Reaktanz in der Rotor-Streuinduktivität
$X_{\sigma s}$	[ $\Omega$ ]	Reaktanz in der Stator-Streuinduktivität
$X_h$	[ $\Omega$ ]	Reaktanz der Hauptinduktivität
$m$		Phasenzahl
$P_{mec}$	[W]	Mechanische Belastung
$P_{\delta}$	[W]	Luftspaltleistung
$P_o$	[W]	Leerlaufwirkleistung
$P_v$	[W]	Verluste
$Q_o$	[Var]	Leerlaufblindleistung
$S$	[VA]	Scheinleistung
$n_s$	[U/min]	Feld-Drehzahl im Stator (f/p)
$\eta$	[%]	Wirkungsgrad
$M_{mec}$	[Nm]	Drehmoment
$M_{\delta}$	[Nm]	Luftspalt-Moment ( $M_{mec} + \text{mechanische Verluste}$ )
$\omega_{mec}$	[rad/s]	Kreisfrequenz des Rotors
$f_s$	[Hz]	Stator-Frequenz
$f_{s,Nenn}$	[Hz]	Stator-Nennfrequenz
$f_r$	[Hz]	Rotor-Frequenz
$p$		Polpaarzahl
*		Konjugiert-komplex
,		Auf die Statorseite umgerechnet



## F. Referenzen

- [1] Felix Jenni: *Untersuchung eines netzfreundlichen Asynchronmotor-Antriebes mit hochfrequent getakteten Stromzwischenkreis-Umrichtern*, Diss. ETH Nr.8743, Seiten 130 – 135, 1989.
- [2] Andrea Vezzini: *Optimierung des elektrischen Antriebssystem für ein Hybrid-Fahrzeug*, Diss. ETH Nr.11784, Seiten 89 – 100, 1996.
- [3] Joseph El Hayek: *Machines électriques à courant alternatif*, Ecole d'Ingénieurs de Fribourg, Chapitre 6, Seiten 97- 106, 2003.
- [4] Don H. Johnson : *Origins of the Equivalent Circuit Concept: The Voltage-Source Equivalent*, Computer & Information Technology Institute, Rice University MS366, Houston TX 77251, September 2002.

## G. Quellen

- [5] Conrad U. Brunner: *Efficiency Classes Electric Motors and Systems*, MEPSA 2009, <http://www.topmotors.ch> , Seiten 10- 11, Sydney 4 February 2009.
- [6] Ronny Bachmann und Rolf Gutzwiller: *Energieeffiziente Elektrische Antriebe in der Ausbildung*, Bundesamt für Energie BFE, Seiten 1-7, 28.02.2007.
- [7] GLOOR ENGINEERING: *Asynchronmaschinen – Veränderung*, <http://energie.ch/at/asm/index.htm>, 27.01.2008.
- [8] Conrad U. Brunner, A+B International: *Electric Motor Systems*, Zürich Switzerland, <http://www.abinternational.ch/>, Seiten 10- 11, 30 June 2009.
- [9] European Commission: Eurostat, Brussels Belgiums 2009, <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/statistics/themes> .
- [10] Topmotors : Effizienz Antrieb,Switzerland 2008, [http://www.topmotors.ch/Intelligente\\_Liste/](http://www.topmotors.ch/Intelligente_Liste/) .
- [11] Bundesamt für Energie BFE, *Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2008*, Schweizerische Eidgenossenschaft, <http://www.bfe.admin.ch/suchen/index.html?lang=de&keywords=vorjah#volltextsuche> ,2008
- [12] Leroux, *Electrotechnique*, Université de Sherbrook, Chapitre 4,Retour théorique sur l'Electrotechnique, <http://www.gel.usherbrooke.ca/leroux/projet/data/Reseaux/chap04.htm> , September 2002.
- [13] Université Libre de Bruxelles, Sciences Appliquées, *Chapitre 7 Entraînements à moteurs asynchrones*, BEAMS, [http://ir2008.bepolytech.be/tmp/IR4/ELEC269%20-%20G%E9nie%20%E9lectrique/Slides/ELEC269\\_slides07.pdf](http://ir2008.bepolytech.be/tmp/IR4/ELEC269%20-%20G%E9nie%20%E9lectrique/Slides/ELEC269_slides07.pdf) , Année académique 2006-2007.
- [14] Leroy Somer, *Synchronmotoren mit Permanentmagneten Gehäuse Aluminiumlegierung 0.75 bis 400W*, LSRPM, [http://www.leroysoomerservice.de/fileadmin/user\\_upload/PDF\\_Produkte/DyneoMotoren\\_de.pdf](http://www.leroysoomerservice.de/fileadmin/user_upload/PDF_Produkte/DyneoMotoren_de.pdf) , 2008.



## H. Liste der Abbildungen

Abbildung 1: Model der Asynchronmaschinen .....	8
Abbildung 2: Vereinfachtes Modell des ASM .....	8
Abbildung 3: Schaltung zur Bestimmung der Leerlaufspannung .....	9
Abbildung 4: Schaltung zur Bestimmung der Impedanz suchen.....	9
Abbildung 5: Modell des Kurzschlussversuchs.....	13
Abbildung 6: Modell des Leerlaufversuchs.....	14
Abbildung 7: Trennung von Eisen und mechanischen Verlusten.....	15
Abbildung 8: Leerlaufstrom in Funktion der Spannung.....	15
Abbildung 9: Hauptinduktivität.....	16
Abbildung 10: Eisenwiderstand.....	16
Abbildung 11: Stromverdrängung für einen runden Leiter (Quelle: [13] ULB,2006-2007) .....	17
Abbildung 12: Stromverdrängung bei rechteckiger Fläche (Quelle: [13] ULB,2006-2007) ....	17
Abbildung 13: Skizze der Stromverdrängung mit Kupferstange .....	18
Abbildung 14: Stromverdrängung einer 5.5 kW ASM .....	19
Abbildung 15: Leistungsbilanz .....	20
Abbildung 16: Explosionszeichnung der ASM.....	20
Abbildung 17: Modell der mechanischen Verluste.....	21
Abbildung 18: Elektrische Leistung mit und ohne Aussenventilator und Belastung .....	22
Abbildung 19: Reibungs- und Innenventilatorverluste .....	22
Abbildung 20: Mechanische Verluste .....	23
Abbildung 21: Frequenzumrichter mit $U/f = \text{konstant}$ (Quelle: [6] Energie.ch,2008).....	24
Abbildung 22: Wirkungsgrad ohne Sättigung des Eisens (der Fluss ist konstant) .....	28
Abbildung 23: Wirkungsgrad ohne Sättigung des Eisens (bester Wirkungsgrad) .....	28
Abbildung 24: Schlupf und Phasenspannung ohne Sättigung des Eisens (der Fluss ist konstant).....	29
Abbildung 25: Schlupf und Phasenspannung ohne Sättigung des Eisens (bester Wirkungsgrad) .....	29
Abbildung 26: Wirkungsgrad ( $\eta$ ) in Funktion des Drehmoments für 10% 30% 50% und 100% der Nenndrehzahl (ohne Sättigung des Eisens).....	30
Abbildung 27: Spannung und Schlupf (ohne Sättigung des Eisens).....	31
Abbildung 28: Fluss (ohne Sättigung des Eisens) .....	32
Abbildung 29: Wirkungsgrad mit Sättigung des Eisens (Fluss konstant Nennfluss) .....	33
Abbildung 30: Wirkungsgrad mit Sättigung des Eisens (bester Wirkungsgrad) .....	33
Abbildung 31: Schlupf und Spannung mit Sättigung des Eisens (der Fluss ist konstant).....	34
Abbildung 32: Schlupf und Spannung mit Sättigung des Eisens (bester Wirkungsgrad) .....	34
Abbildung 33: Wirkungsgrad im Funktion des Drehmoments für 10% 30% 50% und 100% % der Nenndrehzahl (mit Sättigung des Eisens) .....	35
Abbildung 34: Spannung und Schlupf (mit Sättigung des Eisens).....	36
Abbildung 35: Fluss (mit Sättigung des Eisens) .....	37
Abbildung 36: Gewinne mit und ohne Berücksichtigung der Sättigung bei Nenndrehzahl ....	38
Abbildung 37: Gewinne bei Sättigung des Eisens mit und ohne Berücksichtigung der Reibung .....	39
Abbildung 38: Firma A - 10% der Nenndrehzahl .....	41
Abbildung 39: Firma A - 30% der Nenndrehzahl .....	41
Abbildung 40: Firma A - 50% der Nenndrehzahl .....	41
Abbildung 41: Firma A - 100% der Nenndrehzahl .....	41
Abbildung 42: Firma B - 30% der Nenndrehzahl .....	42
Abbildung 43: Firma B - 50% der Nenndrehzahl .....	42
Abbildung 44: Firma B - 100% der Nenndrehzahl .....	42
Abbildung 45: Firma C - 30% der Nenndrehzahl.....	43



Abbildung 46: Firma C - 50% der Nenndrehzahl.....	43
Abbildung 47: Firma C - 100% der Nenndrehzahl.....	43
Abbildung 48: Firma A Vergleich (Nennpunkt 1460 rpm 11kW) .....	44
Abbildung 49: Firma B Vergleich (Nennpunkt 1410 rpm 1.5kW) .....	44
Abbildung 50: Firma C Vergleich (Nennpunkt 1465 rpm 5.5kW) .....	44
Abbildung 51: Drehmoment MS (Quelle: [14] Leroy Somer) MS	47
Abbildung 52: Wirkungsgrad	47
Abbildung 53: Mathematische Nachbildung der Messungen.....	48
Abbildung 54: Abschätzung der Messungen Leroy Somer.....	49
Abbildung 55: SM vs ASM .....	50
Abbildung 56: Electricity Demand 2006 (Quelle: [8] A+B International 2009) .....	51
Abbildung 57: Electric motor definitions (Quelle: [7] A+B International).....	52
Abbildung 58: Motor demand in the EU-27 for 2006 (Quelle: [9] Eurostat, 2008) .....	53
Abbildung 59: Motor demand in the EU-27 for 2007 (Quelle: [9] Eurostat, 2008) .....	53
Abbildung 60: Verbrauch der Elektrizität für ASM für 2006 .....	53
Abbildung 61: Mittlere Auslastung der Leistungsklassen (Quelle: [10] topmotors.ch).....	54
Abbildung 62: Unsymmetrische Verteilungskurve .....	54
Abbildung 63: Unsymmetrische Verteilungskurven für die verschiedenen Leistungsklassen	55
Abbildung 64: Graphik des Gewinns und der Verteilungskurve.....	56
Abbildung 65: Potential des Gewinns für die Leistungsklasse < 100 kW (Graphik) .....	57
Abbildung 66: Potential des Gewinns für die Leistungsklasse < 100 kW (Tabelle).....	57
Abbildung 67: Potential pro Leistungsklasse (Graphik) .....	58
Abbildung 68: Potential pro Leistungsklasse (Tabelle) .....	58



# I. Dank

An dieser Stelle sei den verschiedenen Firmen ganz herzlich gedankt. Sie haben die Untersuchungen durch Auskünfte, das zur Verfügung stellen von Frequenzumrichtern und Motoren und sogar den Möglichkeiten, in ihren Räumlichkeiten zu messen, in dieser Form ermöglicht.

Gedankt sei auch den Herrn Jürg Nipkow, Dipl. El. Ing. ETH, S.A.F.E, Prof. Andrea Vezzini, Dipl. El. Ing. ETH, BFH für die Auskünfte, die sie uns grosszügig erteilten

Last but not least gehört der Dank dem Bundesamt für Energie für die finanzielle Unterstützung der Arbeit!



# J. Anhänge

## 1. Schweizernorm

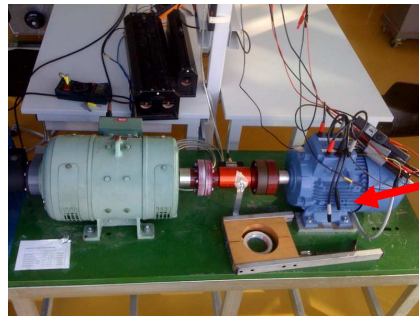
(Art. 7 Abs. 1 und 2, 10 Abs. 1–4, 11 Abs. 1 und 21a Abs. 1 Bst. c)  
Anforderungen an die Energieeffizienz von netzbetriebenen, elektrischen Normmotoren

[http://www.admin.ch/ch/d/sr/730\\_01/app16.html](http://www.admin.ch/ch/d/sr/730_01/app16.html)



## 2. Versuch an einer Maschine

Maschine:  
 Asynchronmaschine  
 Werder Elektromaschinen LEA-M2  
 No. 146696  
 5.5 kW  
 1450 U/min  
 50 Hz  
 380-420 D



ASM

### 2.1. Kurzschlussversuch

Kurzschlussversuch (Die Werte sind pro Phase)													
	Messpunkte						Berechnung				Mittelwert der Messpunkte		
	U [V]	I [A]	P [W]	S [VA]	Q [Var]	PF	Winkel [°]	Hz	Temp [°C]	P [W]	U [W]	I [W]	P [W]
Anstieg	4.83	0.593	1	2.9	2.7	0.335	-	-	22	1.06	4.673	0.588	0.967
	4.59	0.585	0.9										
	4.6	0.587	1										
	13.57	2.605	13.5	35.4	32.7	0.3745	67.9	50.02	-	13.56	13.323	2.577	13.067
	13.2	2.547	12.6										
	13.2	2.58	13.1										
	20.44	4.638	41.1	94.9	85.5	0.4206	65.1	50.02	-	41.18	20.037	4.596	39.400
	20.03	4.58	38.6										
	19.64	4.57	38.5										
	25.02	6	88.3	150	133.6	0.4406	63.8	50.005	-	68.20	24.407	5.943	65.333
	24.26	5.9	63										
	23.94	5.93	64.7										
	29.82	7.5	105.6	223	197	0.4679	62.1	50	-	104.50	29.373	7.483	103.533
	29.26	7.45	101.7										
	29.04	7.5	103.3										
36.13	9.47	167.2	342	297.6	0.489	60.6	49.998	-	168.52	35.517	9.430	164.500	
35.12	9.34	160.3											
35.3	9.48	166											
39.83	10.57	211.4	420	363.4	0.503	59.7	49.993	-	210.57	39.227	10.553	209.000	
38.74	10.46	203.4											
39.11	10.63	212.2											
43.06	11.52	253.2	495	425.1	0.5173	58.8	49.984	27	253.60	42.320	11.470	250.767	
41.63	11.33	243.4											
42.27	11.56	255.7											
42.98	11.48	251.3	492	422	0.517	58.8	50.01	31	252.94	42.207	11.433	248.833	
41.54	11.3	241.7											
42.1	11.52	253.5											
38.88	10.14	201.9	395.9	338.9	0.5134	59.1	49.986	31	204.65	38.463	10.140	200.100	
38.35	10.1	198.7											
38.16	10.18	199.7											
35.67	9.079	163.3	325.1	281	0.5025	59.8	49.998	33	163.49	35.063	9.057	161.067	
34.63	8.972	156.7											
34.89	9.12	163.2											
31.99	7.96	126.4	254.6	221.1	0.493	60.5	49.998	34	126.24	31.580	7.952	124.667	
31.3	7.87	121.7											
31.45	8.027	125.9											
28.82	6.975	96.7	200.6	175.8	0.4835	61.1	50.002	35	96.62	28.340	6.948	95.367	
28.03	6.894	93.4											
28.17	6.976	96											
25.62	6.032	72.8	154.5	136.3	0.4705	61.9	49.991	36	72.75	25.280	6.025	71.967	
25.08	5.986	70.6											
25.14	6.057	72.5											
22.2	4.995	51	110.9	98.5	0.4475	63.4	49.979	37	50.96	21.737	4.961	49.167	
21.63	4.932	47.7											
21.38	4.957	48.8											
19.26	4.096	34.5	78.9	70.9	0.4241	64.9	49.979	37	34.62	18.633	4.039	32.933	
18.26	3.974	30.8											
18.38	4.048	33.5											
15.8	3.094	20.1	48.9	44.5	0.3954	66.7	49.993	38	20.27	15.220	3.045	19.100	
14.87	2.994	17.6											
14.99	3.047	19.6											
11.66	2.027	9.2	23.6	21.8	0.37	68.3	-	37	9.04	11.447	1.993	8.633	
11.48	1.981	8.4											
11.2	1.972	8.3											
7.48	1.02	2.7	7.6	7.1	0.3365	70.3	-	38	2.71	7.260	0.996	2.533	
7.16	0.98	2.4											
7.14	0.988	2.5											

Statorwiderstand					
	R [Ω]	Temp [°C]	R [Ω]	Temp [°C]	R [Ω]
RS	1.898	22	2.017	30	2.02
RT	1.912		2		2.04
ST	1.904		2.01		2.05
Mittel [Ω]	1.90		2.01		2.04
Rs [Ω]	2.86		3.01		3.06
Rs s [Ω]	0.952		1.005		1.018

Messgeräte:

Messung von Rs:  
 MULTIMETER METRA HIT 29 S LEA-A117  
 Weitere Messungen:  
 POWER METER Yokogawa WT230 EEL-B29

Maschine:

Asynchronmaschine  
 Werder Elektromaschinen LEA-M2  
 No. 146696  
 5.5 Kw 1450 u/min  
 50 Hz 380-420 D



## 2.2. Leerlaufversuch

Leerlaufversuch (Die Werte sind pro Phase)													
u/min	Messpunkte									Berechnung		Mittelwert der Messpunkte	
	U [V]	I [A]	P [W]	S [VA]	Q [Var]	PF	Winkel [°]	Hz	Temp [C]	P [W]	U [W]	I [W]	P [W]
1495	50.99	1.06	20.1	54.1	50.2	0.3718	68.2	49.993	22	20.17	50.347	1.010	20.333
	49.88	0.953	17.7										
	50.17	1.018	23.2										
1496	61.45	1.228	24.9	75.5	71.2	0.2825	73.6	49.995	22	25.12	60.780	1.164	23.300
	60.5	1.129	19.3										
	60.39	1.134	23.7										
1498	72.03	1.352	23.5	97.4	94.5	0.2338	76.5	49.979	22	23.59	71.433	1.312	23.867
	70.94	1.274	21.1										
	71.33	1.31	27										
1499	81.53	1.526	23.8	124.4	122.1	0.173	80	49.986	22	23.81	80.690	1.465	24.167
	80.13	1.412	19.6										
	80.41	1.457	29.1										
1499	92.12	1.725	24.5	158.9	157	0.1382	82.1	49.988	22	24.50	91.260	1.649	25.600
	90.54	1.582	19.8										
	91.12	1.641	32.5										
1499	102.3	1.917	30.5	196.1	193.7	0.1359	82.2	49.998	22	30.59	101.190	1.841	31.267
	100.34	1.778	24.2										
	100.93	1.829	39.1										
1499	112.66	2.187	35.2	246.4	243.9	0.1033	84.1	49.982	22	35.01	111.453	2.076	34.233
	110.73	2.004	22.9										
	110.97	2.038	44.6										
1499	122.14	2.357	38.1	287.9	285.4	0.1011	84.2	49.988	22	37.86	120.867	2.253	37.933
	119.84	2.183	26.4										
	120.62	2.22	49.3										
1499	130.55	2.623	47.7	342.4	339	0.1159	83.3	50.014	22	48.13	129.250	2.507	49.133
	128.18	2.415	35.9										
	129.02	2.482	63.8										
1499	132.13	2.615	42	345.5	342.9	0.1053	84	50.007	22	42.31	130.837	2.509	43.133
	129.78	2.416	33										
	130.6	2.496	54.4										
1499	133.23	2.659	48.4	354.3	351	0.1138	83.5	50.009	22	48.24	131.890	2.541	50.100
	130.83	2.446	36.4										
	131.81	2.519	65.5										
1499	136.6	2.768	47	378.3	375.2	0.1048	84	50	22	48.33	135.293	2.642	50.067
	134.23	2.532	35.6										
	135.05	2.626	67.6										
1499	140.94	2.865	48.6	403.8	400.8	0.1044	84	49.988	22	49.13	139.753	2.747	52.067
	138.73	2.642	39.3										
	139.59	2.734	69.3										
1499	142.64	2.887	58	411.7	407.6	0.1144	83.4	49.995	22	57.96	141.453	2.775	57.867
	140.65	2.697	43.3										
	141.07	2.74	72.3										
1499	143.85	2.928	53.7	421.1	417.7	0.0981	84.4	50	22	53.40	142.673	2.817	52.900
	141.9	2.745	38.2										
	142.27	2.779	66.8										
1499	146.2	2.972	49.8	434.4	431.6	0.0927	84.7	49.996	22	49.24	144.900	2.845	52.333
	143.8	2.742	36.5										
	144.7	2.82	70.7										
1499	150.39	3.082	54.3	463.5	460.3	0.0903	84.8	49.995	22	54.37	149.253	2.971	53.933
	148.25	2.902	38.8										
	149.12	2.928	68.7										
1499	151.79	3.101	49.3	470.7	468.12	0.0908	84.8	49.991	22	49.22	150.703	2.985	53.367
	149.78	2.881	39.2										
	150.54	2.974	71.6										
1499	154.65	3.191	58.1	493.4	490	0.0933	84.6	50.002	22	57.82	153.573	3.074	58.600
	152.81	2.99	42.7										
	153.26	3.041	75										
1499	160.5	3.335	60	535.2	531.8	0.0894	84.9	49.998	22	60.23	159.523	3.233	59.733
	158.91	3.165	44.9										
	159.16	3.2	74.3										
1499	173.26	3.76	67.5	651.5	648	0.0761	85.6	50.004	22	67.44	172.270	3.652	64.867
	171.65	3.592	46.9										
	171.9	3.604	80.2										
1499	183.16	4.153	74.8	760.6	756.9	0.0709	85.9	50.004	22	74.93	182.217	4.037	71.567
	181.56	3.976	51.2										
	181.93	3.981	89.7										
1499	192.46	4.597	74.6	884.7	881.5	0.0803	85.4	49.996	22	75.18	191.863	4.521	79.800
	191.36	4.44	68.2										
	191.77	4.525	96.6										
1499	202.14	5.261	93.2	1063.4	1059.3	0.0745	85.7	49.998	22	93.29	201.397	5.147	95.600
	200.81	5.056	75.7										
	201.24	5.125	117.9										
1500	211.72	5.993	101.5	1268.9	1264.8	0.0823	85.3	50.009	22	101.92	211.373	5.926	110.533
	210.93	5.835	101.2										
	211.47	5.951	128.9										
1500	223.21	7.264	124.2	1621.4	1616.6	0.0787	85.5	50.011	22	124.67	222.687	7.124	142.367
	221.92	6.95	121.4										
	222.93	7.159	181.5										
1500	232.3	8.508	151.6	1976.7	1970.9	0.0914	84.8	50.004	22	151.31	232.267	8.457	177.400
	231.9	8.307	176.1										
	232.6	8.557	204.5										
1500	237.58	9.318	209.1	2213.8	2203.9	0.07	86	49.986	22	209.13	236.727	9.111	196.100
	236.51	8.997	149										
	236.09	9.017	230.2										
1500	241.93	10.025	242.7	2425.4	2413.2	0.0738	85.8	49.991	22	242.96	241.093	9.859	218.333
	241.12	9.811	174.5										
	240.23	9.74	237.8										
1500	246.14	10.847	280.4	2669.8	2655	0.0711	85.9	50.018	23	280.73	246.777	10.600	247.600
	244.98	10.522	183.2										
	244.21	10.43	279.2										

Messgeräte:

Messung von Rs:  
MULTIMETER METRA HIT 29 S LEA-A117  
Weitere Messungen:  
POWER METER Yokogawa WT230 EEL-B29

Maschine:

Asynchronmaschine  
Werder Elektromaschinen LEA-M2  
No. 146696  
5.5 Kw 1450 u/min  
50 Hz 380-420 D

Transformator:

EAB S.A.  
No. A5280/1  
36kVA  
127V/95A 380V/33A



## 2.3. Rotorwiderstand

U [V]	I [A]	P [W]	Q [Var]	S [VA]	PF	Hz	R <sub>tot</sub>	R' <sub>r</sub>
16.107	5.567	152.4	30.45	155.41	-0.98	2	1.639	0.689
16.187	5.494	149.6	37.29	154.17	-0.97	3	1.652	0.702
15.742	5.24	137.47	39.17	142.94	-0.961	4	1.669	0.719
15.79	5.168	134.03	45.29	141.47	-0.947	5.004	1.673	0.723
15.86	5.072	130.04	50.39	139.46	-0.932	6.003	1.685	0.735
15.939	5	126.41	55.73	138.15	-0.915	7.006	1.685	0.735
15.355	4.646	108.93	57.65	123.24	-0.883	7.957	1.682	0.732
16.018	4.909	122.28	60.23	136.3	-0.897	8.002	1.691	0.741
18.047	5.199	138.09	85.15	162.23	-0.851	9.923	1.703	0.753
16.097	4.675	112.22	66.47	130.43	-0.86	10.008	1.712	0.762
16.595	4.79	118.88	69.71	137.81	-0.862	10.01	1.727	0.777
16.673	4.687	114.24	72.8	135.46	-0.843	11.008	1.733	0.783
16.737	4.572	109.38	75.1	132.68	-0.824	12.005	1.744	0.794
32.53	8.71	397.5	285.6	489.4	-0.812	12.957	1.747	0.797
16.833	4.46	104.93	77.01	130.16	-0.806	13.005	1.758	0.808
16.888	4.355	100.36	78.63	127.5	-0.787	14.011	1.764	0.814
28.42	7.119	270	220.6	348.7	-0.774	14.949	1.776	0.826
16.932	4.239	95.73	79.5	124.44	-0.769	15.004	1.776	0.826
16.977	4.133	91.42	80.23	121.63	-0.751	16.001	1.784	0.834
17.022	4.022	87.24	80.5	118.7	-0.734	17.009	1.798	0.848
52.08	11.335	716.1	723	1017.6	-0.703	20.92	1.858	0.908
64.53	12.832	948.8	992.9	1373.3	-0.96	24.93	1.921	0.971
53	8.867	473.4	660.2	812.4	-0.582	30.94	2.007	1.057
60.19	9.285	535.2	800.8	963.2	-0.555	34.95	2.069	1.119
68.72	9.669	601.8	980.3	1150.3	-0.523	39.97	2.146	1.196
81.38	10.213	705.8	1256.2	1440.8	-0.489	46.95	2.256	1.306
50.74	5.765	230.8	449.3	505.1	-0.457	50.99	2.315	1.365
51.01	5.447	211.9	430.7	480	-0.441	54.97	2.381	1.431
51.3	5.131	192.36	412.1	454.8	-0.422	60.04	2.436	1.486
51.28	4.868	177.19	395.7	433.6	-0.408	64.04	2.492	1.542
51.18	4.325	146.38	354.1	383.1	-0.382	74.08	2.608	1.658
77.05	5.875	281.9	731.1	783.5	-0.359	85.17	2.722	1.772
17.768	1.1882	11.942	34.5	36.57	-0.326	100.02	2.820	1.870

## 2.4. Mechanische Verluste

Ohne Ausseventilator											
M	Drehzahl	I	M Berechnung	Frequenz	U	I	P	Q	S	PF	Hz
[Nm]	[rpm]	[A]	[Nm]	[Hz]	[V]	[A]	[W]	[Var]	[VA]		
1.3	100	2.36	0	3.3	429.8	2.397	56.58	1785.3	1786.2	-0.031	0
1.3	150	2.1	0.03	5.1	431.7	2.182	65.88	1630.7	1632	-0.04	0.869
1.3	200	2.19	0.04	6.8	435.8	2.207	79.93	1663.9	1665.7	-0.047	2.045
1.3	300	2.27	0.06	10.1	439.2	2.286	106.7	1738.7	1742	-0.061	2.879
1.3	400	2.35	0.09	13.5	439.8	2.38	131.17	1807.2	1811.9	-0.172	4.32
1.3	500	2.42	0.12	16.8	445.5	2.42	161.37	1860.6	1867.6	-0.086	5.596
1.3	700	2.54	0.16	23.5	446.7	2.574	216.2	1980.9	1992.7	-0.108	3.663
1.3	900	2.78	0.19	30.1	452.9	2.776	275.9	2166	2183	-0.126	5.48
1.3	1100	2.95	0.26	36.8	456.9	2.924	331.5	2294	2317	-0.143	6.004
1.3	1300	3.14	0.42	43.4	464.1	3.152	400.8	2501	2532	-0.158	5.916
1.3	1500	3.45	0.48	50.1	469.7	3.417	462.2	2744	2783	-0.166	11.194

Mit Ausseventilator											
M	Drehzahl	I	M Berechnung	Frequenz	U	I	P	Q	S	PF	Hz
[Nm]	[rpm]	[A]	[Nm]	[Hz]	[V]	[A]	[W]	[Var]	[VA]		
1.3	100	2.36	0	3.3	436.8	2.36	56.2	1776.8	1777.6	-0.031	13.075
1.3	150	2.16	0.03	5.1	436.1	2.221	65.47	1678	1679	-0.038	1.111
1.3	200	2.19	0.04	6.8	439.1	2.217	80.58	1683.2	1685	-0.047	2.276
1.3	300	2.27	0.07	10.1	440.2	2.258	106.26	1720.9	1724.2	-0.61	2.464
1.3	400	2.3	0.1	13.5	445.3	2.31	132.32	1777.3	1782.1	-0.074	5.665
1.3	500	2.29	0.13	16.8	443.1	2.268	158.26	1739.5	1746.6	-0.09	2.009
1.3	700	2.4	0.18	23.5	447.4	2.393	213.4	1840.2	1852.5	-0.115	4.643
1.3	900	2.61	0.19	30.1	458.1	2.667	275.2	2099	2116	-0.13	9.734
1.3	1100	2.87	0.34	36.8	459.3	2.869	332	2260	2285	-0.145	5.204
1.3	1300	3.17	0.39	43.4	465.4	3.234	409.4	2575	2607	-0.157	8.818
1.3	1500	3.56	0.47	50.1	471.1	3.529	480.3	2845	2885	-0.166	13.5796



### 3.Gleichung der Kurven der Sättigung

#### L<sub>h</sub>

```
if(Uh(u)<=62.27310847)

    Lh(u)=0.157;
else
    Lh(u)=-2e-8.*Uh(u).^3+4e-6.*Uh(u).^2-3e-4.*Uh(u)+0.1647;
    if(Lh(u)<0)
        Lh(u)=0;
    end
end;
else
    Lh= 0.157 ;
end
```

#### R<sub>Fe</sub>

```
if(Uh(u)<=165.468)
    Rfer(u)=765.755836;
else
    Rfer(u)=-0.0902.*Uh(u).^2+29.81.*Uh(u)-1697.2;
    if(Rfer(u)<0)
        Rfer(u)=0;
    end
end;
else
    Rfer=765.755836 ;
end
```

#### Calcul psy nom

```
function [eta,psy,Ih,Uh]=Calcul_psy_nom(p,Rs,Lts,Rfer,Lh,Lptr,Rpr,Pmec,Us,f,vnom,saturation)
%-----
%           Input                               Output
%-----
% Merkmals von dem Motor                       eta= Wirkungsgrad
% Mmec= Drehmoment                             Uh= Spannung über die Hauptinduktivität
% fmec= Frequenz von dem Rotor                 psy= Fluss in der Hauptinduktivität
% s = Schlupf                                  Ih= Strom in der Hauptinduktivität
%-----

s=((f.*60./p)-vnom)./(f.*60./p);
wmec=vnom./60.*2.*pi;
Mmec=Pmec./wmec;

% Berechnung des Reactanzs
Xts=Lts*2*pi.*f;
Xptr=Lptr*2*pi.*f;

Uh=abs(sqrt(Mmec.*s.*wmec./(3.*(1-s).*Rpr)).*(Rpr./s+i.*Xptr))
[Rfer,Lh]=Recherche_Rfer_Lh(Uh,saturation)
Xh=Lh.*2.*pi.*f;

    Ir=Uh./(i.*Xptr+Rpr./s);
    Ifer=Uh./Rfer;
    Ih=Uh./(i.*Xh);
% Stator-Strom
Is=Ir+Ifer+Ih;
% Stator-Spannung
Us=Uh+Is.*(Rs+i.*Xts);
% Scheinleistung
S=3*Us.*conj(Is);
% Wirkungsgrad
eta=Pmec./real(S)*100;
% Psy
psy=Lh.*abs(Ih)
end
```



## 4. Algorithmus

**Funktion:**

[eta, Us, psy, Ih, Uh]=Calcul\_Flux\_eta(p, Rs, Lts, Rfer, Lh, Lptr, Rpr, Mmec, fmec, s)

p= Polpaar

Rs= Widerstand der Statorwicklung

Lts= Stator-Streuinduktivität

Rfe= Widerstand des Eisens

Lh= Hauptinduktivität

Lptr=Rotor-Streuinduktivität

Rpr= Widerstand der Rotorwicklung

Mmec=Drehmoment

fmec=Rotorfrequenz

s= Schlupf

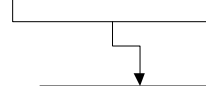
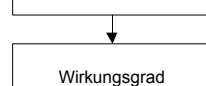
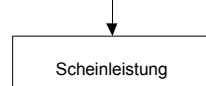
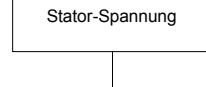
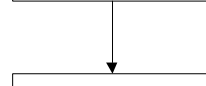
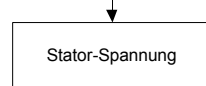
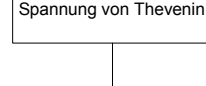
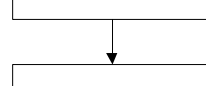
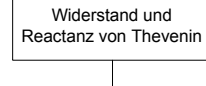
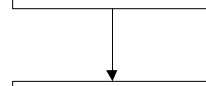
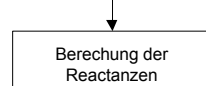
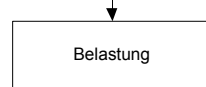
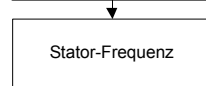
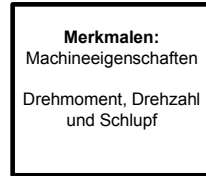
eta= Wirkungsgrad

Us= Stator-Spannung

psy= Fluss in der Hauptinduktivität

Ih= Strom in der Hauptinduktivität

Uh= Spannung über die Hauptinduktivität



$$f = \frac{f_{rot}}{1-s} = \frac{\omega_{rot} \cdot p}{(1-s) \cdot 2 \cdot \pi}$$

$$P_{mec} = M_{mec} \cdot \omega_{mec} = M_{mec} \cdot \frac{f_{mec} \cdot 2 \cdot \pi}{p}$$

$$X_{\sigma s} = L_{\sigma s} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$X_h = L_h \cdot 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$X'_{\sigma r} = L'_{\sigma r} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$\underline{Z}_e = \frac{R_{Fe} \cdot i \cdot X_h \cdot (R_s + i \cdot X_{\sigma s})}{(R_s + i \cdot X_{\sigma s}) \cdot R_{Fe} + (R_s + i \cdot X_{\sigma s}) \cdot i \cdot X_h + R_{Fe} \cdot i \cdot X_h}$$

$$R_e = \text{real}(\underline{Z}_e)$$

$$X_e = \text{imag}(\underline{Z}_e)$$

$$P_\delta = \frac{P_{mec}}{1-s}$$

$$U_e = \sqrt{\frac{P_\delta \cdot \left[ \left( R_e + \frac{R'_r}{s} \right)^2 + (X_e + X'_{\sigma r})^2 \right] \cdot s}{3 \cdot R'_r}}$$

$$U_s = \left| U_e \cdot \frac{\frac{R_{Fe} \cdot i \cdot X_h}{R_{Fe} + i \cdot X_h} + R_s + i \cdot X_{\sigma s}}{\frac{R_{Fe} \cdot i \cdot X_h}{R_{Fe} + i \cdot X_h}} \right|$$

$$\underline{I}_s = \frac{U_s}{\underline{Z}_{tot}} = \frac{U_s}{R_s + i \cdot X_{\sigma s} + \left[ \frac{R_{Fe} \cdot i \cdot X_h \cdot \left( \frac{R'_r \cdot i \cdot X'_{\sigma r}}{s} \right)}{\left( \frac{R'_r \cdot i \cdot X'_{\sigma r}}{s} \right) \cdot R_{Fe} + \left( \frac{R'_r \cdot i \cdot X'_{\sigma r}}{s} \right) \cdot i \cdot X_h + R_{Fe} \cdot i \cdot X_h} \right]}$$

$$\underline{S} = U_s \cdot \underline{I}_s^* \cdot 3$$

$$\eta = \frac{P_{mec}}{\text{real}(\underline{S})} \cdot 100$$

$$\underline{U}_h = U_s - \underline{I}_s \cdot (R_s + i \cdot X_{\sigma s})$$

$$\underline{I}_h = \underline{I}_s - \frac{\underline{U}_h}{R_{Fe}} - \frac{\underline{U}_h}{\frac{R'_r}{s} + i \cdot X'_{\sigma r}}$$

$$\psi = L_h \cdot I_h$$



## 5. Koeffizienten $\sigma_H$ und $\sigma_W$

**Tabelle:** Werkstoffeigenschaften von magnetischen Legierungen und Sonderlegierungen für Elektrobleche:

Blech- typ	Si- gehalt %	Spez. Gewicht ent- zundert $\rho_{kp}$ dm <sup>3</sup>	Spez. Wider- stand $\rho$ $\Omega \cdot mm^2$ m	Wärme- leit- fähig- keit $\lambda$ $\frac{W}{cm \cdot ^\circ C}$	Bie- ge- zahl min.	Werkstoff- ziffern		rel. An- fangs- permea- bilität $\mu_{rA}$ ca.	maxim. relat. Permea- bilität $\mu_{rmax}$ ca.	Sätti- gungs- induk- tion $B_{Sätt.}$ T
						$\sigma_H$ ca.	$\sigma_W$ ca.			
A	1,0	7,8	0,2	0,4	5	3,8	18	500	4000	2,1
B	2,0	7,75	0,35	0,3	5	3,1	12	800	5000	2,06
C	3,3	7,65	0,5	0,2	3	2,2	7,5	1000	6000	2,02
D	4,8	7,55	0,65	0,15	2	1,6	6	2000	9000	1,95
E	---	7,87	0,10	0,55	5	-	-	600	10000	2,15
K	ca. 3,3	7,65	0,5	0,2	2	0,65 0,45	7,5	3000 10000	25000 40000	2,03
M	---	8,6	0,55		2	0,3	6	45000	130000	0,80

\*kann für bessere Bearbeitbarkeit bis zu max. 0,4 % durch Aluminium ersetzt werden.

Blechtypen A, B, C & D o h n e Kornorientierung, warm- oder kaltgewalzt

Blechtyp E : Magnetreineisen (im Vakuum erschmolzen), zum Vergleich

Blechtyp K : m i t Kornorientierung, kaltgewalzt. Die magnetischen Eigenschaften kornorientierter Bleche gelten n u r in Vorzugs- (Walz-) Richtung und zwar nach einer Glühung bei ca. 800 °C. Curietemperatur 750°C.

Blechtyp M : Mu-Metall, magnetische Sonderlegierung, 70...80 % Nickel, Rest Eisen mit Zusätzen von Cu, Mo u.a., Curietemp. 400°C

Die Blechtypen A B C D & K unterscheiden sich in erster Linie durch den zwischen 1 & 5 % betragenden Silizium-Gehalt

-- wovon direkt abhängig sind:

- das spez. Gewicht  $\rho$
- der spez. elektr. Widerstand  $\rho$
- die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$
- die Biegezahl\*\*
- die Werkstoffziffer  $\sigma_W$  betr. die Wirbelstromverluste

Zusätzlich sind abhängig von der Verarbeitung (warm/kalt, mit/ohne Kornorientierung):

- die Werkstoffziffer  $\sigma_H$  betr. die Hysterisisverluste
- die Sättigungsinduktion  $B_{Sätt.}$
- Anfangs- & maximale Permeabilität

\*\*Die Biegezahl ist ein Mass für die Zähigkeit bzw. Sprödigkeit der Bleche. Die Biegungen werden zwischen Klemmböcken mit 5 mm Radius abwechselungsweise in beiden Richtungen ausgeführt, wobei die ohne Anriss gehaltene Zahl von Biegungen um je 90° und zurück gilt.

Die Werkstoffziffern  $\sigma_H$  und  $\sigma_W$  haben teilweise eine nach Blechdicke, Verarbeitung, Frequenz und Induktion grosse Streuung.

TW/KEM 13.5.69 Sn.



Tabelle: Auswahl gebräuchlicher Elektrobleche

Blech- typ	Dicke d mm	Kurzbe- zeichnung	Sta- pel- fak- tor%	Isolations- art	Richtpreise (1.1.1966) Fr/kp	B = 1 T; f=50Hz			B = 1,5 T; f=50Hz			Verwendung:	
						Ph W/kp	P <sub>w</sub> W/kp	pFe= V10 W/kp	Ph W/kp	P <sub>w</sub> W/kp	pFe= V15 W/kp		
B	1,0	3,5W/1,0mm	97 %	Papier oder eins.Lack	0.85...1.05	1,5	2,0	3,5	3,4	5,2	8,6	Bleche ohne Kornorientie- rung:  (allg.für magnet.Kreise mit kleiner Frequenz f < 15 Hz  Rotoren von Gleichstrom- und Asynchronmaschinen  Statoren von Synchron- und Asynchronmaschinen raschlaufende Gleichströ- motoren, Mittelfrequenz- Klein- & Leistungstransfor- matoren, Drosselspulen	
A	0,5	3,0W/0,5mm	96 %	"	0.85...1.05	1,9	1,1	3,0	4,4	2,5	6,9		
B	0,5	2,3W/0,5mm	96 %	"	0.90...1.10	1,5	0,8	2,3	3,4	1,9	5,3		
C	0,5	1,7W/0,5mm	96 %	"	1.00...1.40	1,1	0,6	1,7	2,6	1,4	4,0		
C	0,35	1,3W/0,35mm	94 %	"	1.20...1.60	1,05	0,25	1,3	2,4	0,6	3,0		
D	0,35	1,0W/0,35mm	94 %	"	1.60...1.90	0,8	0,2	1,0	1,9	0,5	2,4		
2)	0,35	K 7 <sub>3</sub> )	96 %	Carlite	1.80...2.20	0,72	0,50	V15	4)	0,8	2,0	Bleche mit Kornorien- tierung:  (Klein-(Netz-) & Leistungs- transformatoren, Drossel- spulen, Ring- & Schnittband- kerne, Messwandler, Trans- duktoren, (Segmentanschnitte für Grossmaschinen)	
K	0,35	K 6	96 %	"	1.90...2.30	0,61	0,50	1,11	1,0	0,8	1,8		
	0,35	K 5	96 %	"	2.00...2.40	0,51	0,50	1,01	0,85	0,8	1,65		
	0,30	K 4	95 %	"	2.20...2.60	0,51	0,39	0,90	0,85	0,6	1,45		
M	0,20	Mu-Metall	90 %	leichte Oxydschicht	20...27.-	0,03	0,01	V5	B = 0,5 T; f=50 Hz	0,3	0,9	1,2	Mu - Metall:  (Stromwandler, Transduktoren, Impulsübertrager, Drosseln, magnet.Abschir- mungen, Messinstrumente

1) merkbare Feldverdrängung  
 2) Die magnetischen Eigenschaften kornorientierter Bleche gelten nur in Vor-  
 zugs-(Walz-)Richtung und zwar nach einer Glühung bei ca. 800 °C.  
 3) werden auch als M7, M6 ... bezeichnet  
 4) pFe steigt stärker als ~ B2

TW/KEM 13.5.69 Sn.



## 6.Frequenzumrichter von Herstellern

### 6.1.Firma A

<u>Geräte für messen:</u>		<u>Maschine:</u>	
Powermeter:	AV Power Power Analyser PA4400 LEA-B47 Altrona AG	Asynchron:	<input type="text"/> IFF 1 <input type="text"/> IEC 160 ML 42 No: <input type="text"/> 380V Δ 50Hz 11kW 1460 rpm 2ZA cos φ 0.84 Prod code: <input type="text"/>
<u>Frequenzumrichter:</u>			
<b>Firma A</b>			
Nick Beeli, den 22.03.2010			

146 rpm												
Frequenzumrichter						Powermeter						
M	Optim	I	M berechnet	U	ω	U	I	P	Q	S	PF	Hz
[%]	Fluss	[A]	[%]	[V]	[rpm]	[V]	[A]	[W]	[Var]	[VA]		
5.02	ja	5.38	7.53	27.3	144.91	354.4	5.319	153.99	3.248	3.251	-0.047	5.09
	nein	8.44	6.95	43.2	146.19	302.4	8.314	185.51	4.361	4.365	-0.042	4.831
6.22	ja	5.58	8.81	28.3	146.45	356.6	5.647	144.13	3.483	3.486	-0.041	5.076
	nein	8.62	8.21	43.5	145.59	300.5	8.349	208.4	4.339	4.344	-0.047	4.988
7.52	ja	5.91	10.33	29.7	146.08	328.9	5.969	181.66	3.387	3.392	-0.053	5.157
	nein	8.51	9.56	43.5	145.41	302.5	8.42	230.2	4.486	4.492	-0.051	4.98
8.52	ja	5.97	11.29	30.1	147.11	277.2	6.202	190.84	2.996	3.002	-0.063	5.243
	nein	8.45	10.99	43.8	146.73	303.5	8.477	238.5	4.438	4.444	-0.053	4.96
10.02	ja	6.49	13.31	26.9	145.71	353.8	6.403	212.2	3.921	3.926	-0.054	5.106
	nein	8.63	12.39	44	146.48	306.9	8.583	254.7	4.56	4.567	-0.055	4.964
12.52	ja	7	15.91	28.3	146.32	368.2	7.066	264.4	4.502	4.51	-0.058	5.323
	nein	9.03	15.04	44.2	144.51	305	8.747	304.4	4.615	4.625	-0.065	5.048
15.02	ja	7.88	18.53	30.7	145.79	346.8	7.611	324.7	4.565	4.576	-0.07	5.363
	nein	9.22	17.62	44.7	144.96	309.1	8.927	330.2	4.76	4.771	-0.069	5.021
17.52	ja	8.25	20.99	32.2	145.5	295.3	8.178	352.3	4.138	4.153	-0.084	5.435
	nein	9.11	19.75	45	145.92	310.6	9.155	335.1	4.919	4.93	-0.067	5.024
19.97	ja	8.35	23.65	34.2	146.68	297.2	8.702	419.2	4.459	4.479	-0.093	5.723
	nein	9.71	22.63	45.1	145.51	311.6	9.416	413.1	5.086	5.102	-0.08	5.04
21.52	ja	9.12	25.17	35.4	146.11	297.8	8.997	434.4	4.624	4.644	-0.093	5.62
	nein	9.65	24.49	45.7	147.1	315.4	9.557	410	5.195	5.211	-0.078	5.161
22.52	ja	9.34	26.34	35.9	146.84	298.8	9.164	424.8	4.719	4.738	-0.089	5.444
	nein	9.97	25.32	45.9	145.9	316	9.677	450.6	5.289	5.308	-0.084	5.073
23.52	ja	9.62	27.18	36.8	145.62	300.6	9.371	453.2	4.854	4.875	-0.092	5.252
	nein	9.96	26.6	45.9	147.15	316	9.796	434.8	5.33	5.348	-0.082	5.18
25.02	ja	9.61	28.81	37.7	145.45	305.6	9.636	467.4	5.074	5.095	-0.091	5.41
	nein	10.15	28.05	46.3	144.69	316.4	9.958	495.4	5.428	5.451	-0.09	5.081
27.52	ja	10.06	31.44	39.3	145.58	305.5	10.053	522.2	5.293	5.319	-0.098	5.346
	nein	10.56	30.8	46.5	145.09	315.6	10.255	511.1	5.627	5.65	-0.09	5.217
30.02	ja	10.67	34.11	40.8	146.08	315.7	10.527	528.7	5.722	5.747	-0.092	5.444
	nein	10.49	33.53	47	146.41	315.3	10.61	533.3	5.772	5.797	-0.091	5.182
32.52	ja	11.21	36.62	41.9	145.43	310.7	10.978	614.6	5.851	5.883	-0.104	5.439
	nein	11.13	36.28	47.4	146.52	319.8	10.989	616.5	6.014	6.045	-0.101	5.221
35.02	ja	11.04	39.29	43.1	148.21	317.8	11.426	638.9	6.261	6.293	-0.101	5.472
	nein	11.05	38.8	47.8	147.31	324.5	11.342	655.8	6.35	6.384	-0.102	5.314
37.52	ja	12.13	42.04	44.7	146.05	314	11.876	671.9	6.472	6.506	-0.103	5.444
	nein	11.8	41.82	48.5	144.86	322	11.738	645.5	6.507	6.539	-0.098	5.351
40.02	ja	11.99	44.42	45.9	147.43	321.7	12.267	727.6	6.781	6.82	-0.106	5.412
	nein	12.1	44.5	48.8	146.59	322.2	12.129	688.6	6.757	6.792	-0.101	5.36
45.02	ja	12.76	49.81	48.2	147.66	323.5	13.093	865.1	7.292	7.343	-0.117	5.431
	nein	12.88	49.88	49.9	147.32	324.8	12.953	841.3	7.22	7.269	-0.115	5.331
50.01	ja	13.9	55.2	50.1	145.73	323.9	13.936	933.8	7.773	7.829	-0.119	5.415
	nein	13.88	55.21	50.8	145.69	327	13.868	970.7	7.753	7.813	-0.124	5.356
55.01	ja	14.6	60.92	52.3	146.52	329.7	14.836	1067.9	8.407	8.474	-0.126	5.49
	nein	14.82	60.62	51.9	145.35	335.5	14.806	1062.5	8.54	8.605	-0.123	5.507
60.01	ja	15.77	66.59	53.3	147.07	335.1	15.851	1136.5	9.14	9.21	-0.123	5.571
	nein	15.78	66.93	53.3	145.76	336.8	15.812	1157.2	9.147	9.219	-0.125	5.607
65.01	ja	16.46	72.7	54.4	147.09	335.7	16.934	1309	9.771	9.858	-0.132	5.63
	nein	16.65	72.78	54.5	145.58	339.8	16.937	1310.7	9.908	9.994	-0.131	5.66
70.01	ja	18.09	79.72	56.1	146.24	333.8	18.101	1421.8	10.392	10.489	-0.135	5.683
	nein	17.8	79.45	56.1	147.19	343.5	18.102	1429	10.682	10.777	-0.132	5.711



438rpm												
Frequenzumrichter						Powermeter						
M	Optim	I	M berechnet	U	ω	U	I	P	Q	S	PF	Hz
[%]	Fluss	[A]	[%]	[V]	[rpm]	[V]	[A]	[W]	[Var]	[VA]		
5.03	ja	5.15	7.1	70.4	438.64	303.6	5.227	296.1	2.74	5.756	-0.107	14.817
	nein	8.23	7.1	117.1	437.63	360.5	8.254	432.3	5.125	5.143	-0.084	14.762
6.32	ja	5.56	8.54	73.5	438.11	314.9	5.592	357	3.022	3.043	-0.117	14.723
	nein	8.55	8.74	117.3	437.56	361.5	8.34	444.2	5.223	5.242	-0.084	14.588
7.43	ja	5.83	9.7	76	437.82	314.3	5.838	393.1	3.161	3.186	-0.123	14.853
	nein	8.38	9.95	117.4	438.49	360.2	8.383	510.9	5.193	5.218	-0.097	14.64
8.53	ja	6.13	10.79	78.3	438.3	318.9	6.099	434.7	3.345	3.373	-0.128	14.818
	nein	8.6	10.88	117.5	437.64	359.5	8.462	533.8	5.249	5.276	-0.101	14.703
10.03	ja	6.36	12.41	75.3	438.39	321	6.321	495.7	3.489	3.524	-0.14	14.874
	nein	8.59	12.71	117.8	437.26	356.5	8.539	580.2	5.243	5.275	-0.109	14.722
12.53	ja	6.9	14.53	70.1	437.93	308.7	6.896	614.8	3.635	3.687	-0.166	15.102
	nein	8.79	15.07	118	437.67	359.8	8.731	720.5	5.392	5.44	-0.132	14.745
15.03	ja	7.64	17.29	72.8	437.44	315	7.488	710.8	4.03	4.092	-0.173	15.048
	nein	9.03	17.84	118.4	437.47	358	8.96	751.2	5.515	5.566	-0.134	14.746
17.53	ja	7.98	19.99	77.2	438.21	318.7	8.051	830	4.374	4.451	-0.186	15.129
	nein	9.12	20.21	118.9	437.73	358.3	9.18	848.2	5.635	5.699	-0.148	14.893
20.03	ja	8.7	22.64	82.2	437.9	325.4	8.556	897.5	4.736	4.82	-0.186	15.164
	nein	9.56	23.05	119.1	437.44	364.2	9.437	945.6	5.881	5.956	-0.158	14.866
21.53	ja	9.04	24.04	84.7	437.67	327	8.845	995.6	4.938	5.038	-0.197	15.14
	nein	9.65	24.33	119.4	437.92	362.5	9.597	1030.4	5.938	6.026	-0.17	14.876
22.53	ja	9.01	24.87	86	438.12	329.3	9.021	1001.7	5.035	5.133	-0.195	15.155
	nein	9.89	25.42	119.5	437.98	361.5	9.691	1013.8	5.986	6.071	-0.166	14.857
23.53	ja	9.37	26.19	87.4	437.9	331.3	9.244	1071.1	5.207	5.316	-0.201	15.16
	nein	9.83	26.59	119.6	437.74	363.3	9.806	1098.9	6.092	6.19	-0.177	14.862
25.03	ja	9.39	27.48	89.8	438.21	339.9	9.526	1106.6	5.346	5.459	-0.202	15.126
	nein	10.1	27.96	119.9	437.59	367.2	9.974	1141.6	6.257	6.36	-0.179	14.892
27.53	ja	9.84	29.72	93.6	438.29	341	9.963	1216.9	5.764	5.891	-0.206	15.131
	nein	10.25	30.49	120.4	438.43	361.5	10.263	1253.9	6.294	6.418	-0.195	14.943
30.03	ja	10.42	32.56	96.8	437.91	345.8	10.407	1337.2	6.08	6.225	-0.214	15.175
	nein	10.6	33.16	120.8	438.53	363.9	10.605	1321.1	6.537	6.669	-0.198	14.932
32.53	ja	10.84	35.51	100.8	438.86	348.7	10.846	1440.8	6.394	6.554	-0.219	15.114
	nein	10.88	35.51	121.1	437.74	362.9	10.924	1426.6	6.731	6.88	-0.207	14.944
35.03	ja	11.23	37.76	103.9	438.03	350.6	11.229	1538.9	6.651	6.826	-0.225	15.192
	nein	11.44	38.29	121.6	437.78	361.7	11.279	1564.8	6.922	7.097	-0.22	15
37.53	ja	11.77	40.14	106.3	437.69	351.3	11.665	1619.3	6.919	7.106	-0.227	15.205
	nein	11.76	40.26	122	437.57	364.4	11.614	1649.8	7.158	7.345	-0.224	15.028
40.03	ja	12.08	42.75	109.7	438.14	357.2	12.052	1747.3	7.25	7.457	-0.234	15.201
	nein	12	42.87	122.4	437.84	364.6	11.991	1704.1	7.397	7.59	-0.224	15.035
45.03	ja	13.12	48.18	115.1	437.22	359.5	12.862	1960.7	7.78	8.023	-0.244	15.177
	nein	12.98	48.06	123.4	437.63	364.5	12.752	1918.5	7.781	8.014	-0.239	15.097
50.03	ja	13.65	52.81	119.3	438.19	363.3	13.64	2149	8.327	8.6	-0.249	15.192
	nein	13.61	53.22	124.3	437.65	366.7	13.541	2228	8.338	8.631	-0.258	15.187
55.03	ja	14.31	58.38	123.7	438.29	362	14.456	2308	8.783	9.081	-0.254	15.237
	nein	14.49	58.23	125.4	437.57	363.1	14.366	2433	8.694	9.028	-0.269	15.228
60.03	ja	15.29	63.43	126.4	438.72	362.7	15.226	2548	9.22	9.565	-0.266	15.287
	nein	15.26	63.18	126.6	438.62	361.1	15.316	2617	9.222	9.586	-0.273	15.244
65.03	ja	16.17	68.87	127.4	438.1	361.8	16.199	2886	9.737	10.155	-0.284	15.338
	nein	16.15	68.92	127.6	438.12	362.6	16.202	2897	9.861	10.181	-0.284	15.327
70.03	ja	16.93	73.96	128.7	438.51	363.4	17.16	3068	10.36	10.805	-0.284	15.425
	nein	17.01	74	128.7	439.04	363.6	17.11	3088	10.325	10.776	-0.286	15.341
75.02	ja	18.19	79.6	129.8	438.26	362.7	18.15	3452	10.906	11.439	-0.301	15.47
	nein	18.15	79.35	129.8	438.11	364.4	18.142	3287	10.972	11.453	-0.287	15.398



730 rpm												
Frequenzumrichter						Powermeter						
M	Optim	I	M berechnet	U	ω	U	I	P	Q	S	PF	Hz
[%]	Fluss	[A]	[%]	[V]	[rpm]	[V]	[A]	[W]	[Var]	[VA]		
4.97	ja	5.37	7.65	116.9	730.05	357.3	5.319	493.5	3.267	3.304	-0.149	24.38
	nein	8.32	7.84	191	730.4	395	8.274	627	5.626	5.66	-0.11	24.43
6.23	ja	5.7	8.71	120.3	730.12	365	5.616	614	3.494	3.548	-0.173	24.55
	nein	8.39	9	191.1	729.56	395.6	8.32	700.2	5.667	5.71	-0.122	24.46
7.47	ja	5.95	10.33	125.4	730.09	362	5.947	725.3	3.664	3.735	-0.194	24.52
	nein	8.39	10.41	191.3	729.85	388.6	8.404	752	5.168	5.668	-0.132	24.44
8.54	ja	6.24	11.21	127.6	730.17	367.8	6.176	746.8	3.866	3.938	-0.189	24.61
	nein	8.52	11.38	191.3	730.23	394.9	8.46	844	5.734	5.796	-0.145	24.5
9.97	ja	6.24	12.89	107.7	730.37	351.2	6.327	791.1	3.767	3.849	-0.205	24.77
	nein	8.58	13.13	191.6	730.66	393	8.538	874.3	5.75	5.816	-0.15	24.44
12.47	ja	7.07	15.57	112.1	730.1	354.8	6.964	976.8	4.159	4.272	-0.228	24.81
	nein	8.77	15.78	191.9	729.95	396.7	8.736	1060.6	5.912	6.006	-0.176	24.55
14.97	ja	7.65	18.17	119	729.96	361.3	7.538	1098	4.597	4.726	-0.232	24.8
	nein	9.13	18.48	192.2	730.16	392.1	8.956	1212.1	5.962	6.084	-0.199	24.53
17.47	ja	8.18	20.9	126.7	730.21	359.5	8.092	1275.9	4.818	4.984	-0.255	24.8
	nein	9.16	21.03	192.6	730.24	395.8	9.184	1354.7	6.15	6.297	-0.215	24.54
19.97	ja	8.54	23.28	134.2	729.93	370	8.618	1445.9	5.342	5.534	-0.261	24.84
	nein	9.6	23.5	192.9	729.87	394	9.45	1574.9	6.288	6.482	-0.242	24.6
21.43	ja	9.1	24.15	134	729.64	364.4	8.887	1536	5.407	5.621	-0.273	24.87
	nein	9.66	24.51	193.2	729.89	393.6	9.61	1606.6	6.356	6.555	-0.245	24.58
22.53	ja	9.22	25.35	137.8	730.27	371.9	9.071	1631.6	5.617	5.849	-0.278	24.88
	nein	9.88	25.75	193.5	730.04	397.4	9.741	1661	6.492	6.701	-0.247	24.61
23.53	ja	9.26	26.31	139.8	729.73	370.4	9.289	1692.8	5.72	5.965	-0.283	24.93
	nein	9.95	26.97	193.6	730.21	397.5	9.858	1712.2	6.557	6.776	-0.252	24.65
24.97	ja	9.64	28.52	147	730.05	366.6	9.573	1740.8	5.809	6.064	-0.287	24.83
	nein	10.15	28.71	193.7	730.13	396.6	9.965	1776.7	6.628	6.862	-0.258	24.64
27.47	ja	10.08	31.02	153	729.98	373.3	9.992	1916.9	6.17	6.461	-0.296	24.89
	nein	10.37	31.28	194.1	730.17	394.7	10.28	1965.8	6.752	7.032	-0.279	24.71
29.97	ja	10.55	33.72	158.3	730.24	377.7	10.457	2110	6.515	6.848	-0.308	24.89
	nein	10.73	33.96	194.5	730.48	392.2	10.596	2092	6.883	7.194	-0.29	24.66
32.47	ja	10.95	36.23	162.8	729.23	383.5	10.911	2250	6.894	7.251	-0.31	24.92
	nein	11	36.28	194.9	729.86	390.9	10.995	2262	7.098	7.45	-0.303	24.69
34.97	ja	11.41	38.94	169.6	729.73	384	11.349	2382	7.171	7.556	-0.315	24.98
	nein	11.22	38.69	195.4	730.33	395.4	11.327	2424	7.365	7.757	-0.312	24.76
37.47	ja	11.65	41.14	172.5	729.87	387.2	11.729	2538	7.469	7.888	-0.321	24.8
	nein	11.63	41.43	195.7	729.9	393.7	11.697	2605	7.544	7.981	-0.326	24.75
39.97	ja	12.14	43.81	176.6	729.82	387.6	12.116	2694	7.683	8.142	-0.33	24.88
	nein	12.01	43.85	196.3	730.18	392.3	12.082	2677	7.773	8.221	-0.325	24.81
44.97	ja	13.02	48.95	185.3	729.92	392.1	12.905	3112	8.205	8.775	-0.354	24.89
	nein	12.75	49.34	197	730.11	393.3	12.884	3105	8.214	8.781	-0.353	24.88
49.97	ja	13.66	54.04	191.7	730.54	392	13.702	3418	8.662	9.311	-0.367	24.88
	nein	13.7	53.93	198	730.08	394.1	13.602	3335	8.682	9.3	-0.358	24.89
54.97	ja	14.58	59.2	198.4	729.85	395.9	14.446	3740	9.184	9.915	-0.377	24.93
	nein	14.51	58.84	199.2	729.82	395.5	14.432	3700	9.183	9.9	-0.373	24.96
59.96	ja	15.16	63.96	200	730.85	396	15.29	4084	9.655	10.483	-0.389	25.05
	nein	15.38	63.76	200.1	730.03	394.8	15.323	4043	9.686	10.496	-0.385	24.95
64.96	ja	16.15	68.99	201.1	730.47	395.9	16.188	4376	10.192	11.092	-0.394	25.06
	nein	16.22	69.11	201.1	729.82	394.2	16.192	4440	10.129	11.059	-0.401	24.98
67.46	ja	16.63	71.83	201.7	730.16	394.8	16.627	4504	10.431	11.361	-0.396	25.1
	nein	16.53	71.48	201.7	730.31	396.4	16.608	4554	10.461	11.409	-0.399	25.11
69.96	ja	17.21	74.18	202.2	729.95	395.5	17.076	4740	10.7	11.702	-0.405	25.13
	nein	16.9	73.68	202.2	730.62	397.2	17.062	4752	10.747	11.75	-0.404	25.12
74.96	ja	18.13	79.31	203.3	729.76	397.4	18.014	5104	11.347	12.442	-0.41	25.22
	nein	18.06	78.58	203.3	729.84	398.7	17.98	5100	11.369	12.46	-0.409	25.2
77.46	ja	18.49	81.4	203.9	729.89	397.1	18.468	5330	11.531	12.703	-0.419	25.21
	nein	18.29	81.41	203.9	730.27	398.1	18.474	5323	11.583	12.747	-0.417	25.22
79.96	ja	19.04	84.01	204.4	729.77	396.5	18.946	5420	11.853	13.032	-0.415	25.27
	nein	18.92	83.47	204.3	730.42	398.7	18.938	5525	11.883	13.104	-0.421	25.26
82.45	ja	19.28	86.14	204.9	730.5	399	19.426	5778	12.162	13.465	-0.429	25.31
	nein	19.29	85.64	205	730.72	398.1	19.403	5712	12.101	13.381	-0.426	25.27



1460rpm													
Frequenzumrichter							Powermeter						
M	Optim	I	M berechnet	U	ω	U	I	P	Q	S	PF	Hz	
[%]	Fluss	[A]	[%]	[V]	[rpm]	[V]	[A]	[W]	[Var]	[VA]			
4.95	ja	5.62	8.05	230.9	1460.14	416.2	5.481	1031.3	3.822	3.958	-0.26	48.93	
	nein	8.38	8.68	375.6	1459.24	461.5	8.312	1189.3	6.542	6.649	-0.178	49.38	
6.04	ja	5.73	8.9	236.3	1460.21	416	5.691	1144.4	3.937	4.1	-0.279	49.86	
	nein	8.42	9.46	375.6	1460.3	462.5	8.326	1281.3	6.553	6.677	-0.191	48.86	
7.45	ja	6.05	10.69	244.9	1459.56	418.3	6.095	1330.7	4.217	4.422	-0.3	49.1	
	nein	8.47	11.19	375.8	1459.6	461	8.444	1470.1	6.603	6.764	-0.217	48.91	
9.95	ja	6.46	13.06	211.5	1460.02	407.8	6.308	1589.8	4.283	4.569	-0.347	48.92	
	nein	8.71	13.87	376.1	1460.23	460.2	8.632	1745.8	6.662	6.887	-0.253	48.45	
12.45	ja	7.01	15.5	216.6	1459.63	409.3	7.154	1917	4.683	5.06	-0.378	48.84	
	nein	8.87	16.41	376.5	1459.85	459	8.814	2077	6.701	7.015	-0.296	48.69	
14.95	ja	7.71	17.94	227.7	1460.17	414.6	7.669	2224	5.04	5.509	-0.403	49.32	
	nein	9.12	19.04	376.8	1459.66	458.6	9.038	2372	6.787	7.189	-0.329	49.43	
17.45	ja	8.43	20.7	241.6	1460.16	417.2	8.269	2513	5.427	5.98	-0.42	49.13	
	nein	9.29	21.53	377.1	1460.18	457.6	9.276	2571	6.893	7.357	-0.349	49.19	
19.95	ja	8.75	23.15	255.5	1460.03	421.2	8.725	2857	5.688	6.365	-0.448	49.07	
	nein	9.59	23.94	377.5	1459.77	459.3	9.528	2910	7.005	7.585	-0.383	48.87	
21.44	ja	9.04	24.35	260.9	1459.85	427.7	9.011	3003	6.013	6.721	-0.446	49.29	
	nein	9.7	25.13	377.8	1460.02	460	9.659	3066	7.07	7.706	-0.397	49.1	
22.45	ja	9.23	25.85	267.8	1459.84	425.2	9.246	3122	6.057	6.814	-0.458	49.1	
	nein	9.77	26.38	377.9	1459.9	457.7	9.799	3215	7.079	7.774	-0.413	48.82	
23.54	ja	9.54	26.6	271.7	1459.92	427.4	9.41	3274	6.159	6.975	-0.469	49.24	
	nein	9.95	27.28	378	1460.24	459.4	9.929	3335	7.169	7.907	-0.421	48.92	
24.95	ja	9.73	28.21	278.6	1460.39	429.4	9.668	3443	6.322	7.199	-0.478	48.67	
	nein	10.23	28.94	378.2	1460.07	457.1	10.068	3515	7.161	7.977	-0.44	48.93	
27.45	ja	10.11	30.81	290.9	1460.07	432.8	10.184	3769	6.649	7.643	-0.493	49.31	
	nein	10.47	31.53	378.7	1459.63	457.6	10.402	3771	7.336	8.248	-0.457	48.99	
29.95	ja	10.61	33.48	302.4	1459.65	435.6	10.538	4050	6.85	7.957	-0.508	48.86	
	nein	10.85	34.08	379	1460.04	457.4	10.702	4111	7.42	8.482	-0.484	49.09	
32.45	ja	10.97	35.91	311.7	1460.37	437.9	11.028	4310	7.213	8.403	-0.512	49.12	
	nein	11.06	36.5	379.4	1460.44	456.8	11.026	4384	7.545	8.726	-0.502	49.04	
34.95	ja	11.34	38.46	321	1460.19	442.4	11.428	4654	7.437	8.773	-0.53	49.28	
	nein	11.39	38.99	379.9	1459.76	456	11.387	4700	7.678	9.002	-0.522	49.16	
37.45	ja	11.78	41.5	332.5	1460.18	446.2	11.799	4990	7.643	9.128	-0.546	49.41	
	nein	11.78	41.87	380.2	1459.53	458.7	11.756	4944	7.926	9.341	-0.529	48.88	
39.95	ja	12.28	44.19	340.3	1459.92	448.2	12.215	5256	7.908	9.495	-0.553	49.21	
	nein	12.12	44.27	380.6	1460.04	458	12.148	5250	8.072	9.63	-0.545	49.1	
45.05	ja	13.11	49.34	357.3	1459.83	451.1	13.001	5854	8.319	10.172	-0.575	49.17	
	nein	12.81	49.44	381.5	1459.93	455.8	12.939	5889	8.352	10.219	-0.576	48.77	
50.05	ja	13.73	54.43	370.8	1460.5	451.8	13.889	6425	8.672	10.792	-0.595	49.3	
	nein	13.78	54.38	381.1	1459.74	455.6	13.66	6460	8.637	10.785	-0.598	49.1	
55.05	ja	14.44	59.25	380.5	1459.81	453.7	14.483	7101	8.914	11.397	-0.623	49.34	
	nein	14.43	59.31	379.9	1459.77	454.1	14.518	7112	8.954	11.435	-0.621	49.87	
60.05	ja	15.41	64.08	384.4	1460.39	452.9	15.38	7689	9.323	12.085	-0.636	49.18	
	nein	15.41	64.23	382.5	1458.96	453.1	15.343	7720	9.235	12.037	-0.641	49.49	
65.04	ja	16.33	69.22	380.8	1460.05	453.3	16.254	8364	9.659	12.777	-0.654	49.34	
	nein	16.13	69.04	383.8	1459.81	453.6	16.234	8342	9.68	12.777	-0.652	49.56	
70.04	ja	17.2	74.06	382.5	1460.49	453.1	17.154	8951	10.084	13.484	-0.663	49.45	
	nein	17.37	74.1	378.2	1460.63	453.2	17.202	8928	10.16	13.525	-0.66	49.39	
72.54	ja	17.87	76.49	379.6	1460.2	450.6	17.651	9280	10.218	13.803	-0.672	49.64	
	nein	17.62	76.26	379.5	1460.24	449.9	17.68	9292	10.193	13.793	-0.673	49.56	
75.04	ja	18.17	78.83	379.1	1459.84	450.2	18.144	9591	10.405	14.151	-0.677	49.72	
	nein	18.23	78.73	376.8	1459.94	449.7	18.114	9606	10.364	14.131	-0.679	49.54	
77.54	ja	18.7	81.19	381.4	1460.05	450.4	18.651	9955	10.617	14.554	-0.684	49.62	
	nein	18.59	81.37	378.7	1460.09	450.5	18.608	9880	10.639	14.519	-0.68	49.83	
80.04	ja	19.56	83.78	379.4	1460.23	450.6	19.094	10282	10.82	14.925	-0.688	49.65	
	nein	19.25	83.45	378.1	1459.86	451.9	19.127	10235	10.942	14.982	-0.683	49.74	
82.54	ja	19.94	85.94	376.7	1460.14	452	19.773	10550	11.332	15.483	-0.681	49.76	
	nein	19.58	85.91	379.5	1459.77	451.6	19.572	10619	11.051	15.326	-0.692	49.68	



## 6.2.Firma B

Powermeter:	AV Power Power Analyser PA4400 LEA-B47 Altrona AG	Asynchron:	[REDACTED] [REDACTED] No: [REDACTED] IEC/EN 60034 IP54 Δ400-230V 50 Hz 1410 rpm 1.5 kW cos φ 0.78 6.6/3.8 A
Frequenzrichter:	<b>Firma B</b>		
Nick Beeli, den 1.06.2010			

423rmp												
Frequenzrichter						Powermeter						
M	Optim	I	M berechnet	Frequenz	ω	U	I	P	Q	S	PF	Hz
[Nm]	Fluss	[A]	[Nm]	[Hz]	[rpm]	[V]	[A]	[W]	[Var]	[VA]		
0.2	ja home	1.67	0.7	14.2	423	439.7	4.6828	69.66	1283.1	1284.9	-0.054	14.124
	ja Indus	1.68	1	14.2	423	440.1	1.6957	77.09	1293.9	1296.1	-0.059	14.14
	nein	2.15	1.4	14.2	423	441.8	2.167	109.1	1655.2	1658.8	-0.065	14.059
0.4	ja home	1.66	0.9	14.2	423	440.1	1.6836	75.48	1283	1285.2	-0.058	14.161
	ja Indus	1.69	1.2	14.3	423	440.4	1.6964	80.87	1290.2	1292.7	-0.062	14.312
	nein	2.13	1.6	14.3	423	437.3	2.144	122.17	1606.2	1610.8	-0.075	14.261
0.6	ja home	1.68	1.1	14.2	423	441.2	1.6851	79.05	1283.9	1286.3	-0.061	14.215
	ja Indus	1.69	1.4	14.4	423	438.3	1.7076	120.37	1293.8	1299.4	-0.092	14.334
	nein	2.12	1.8	14.3	423	444.2	2.126	131.74	1632.7	1637.9	-0.08	14.269
0.8	ja home	1.68	1.6	14.4	423	438.4	1.7048	121.77	1298.5	1304.1	-0.093	14.343
	ja Indus	1.7	1.7	14.4	423	440.3	1.7316	131.35	1287.4	1294	-0.101	14.334
	nein	2.11	1.9	14.4	423	443.7	2.119	151.03	1621.8	1628.8	-0.092	14.339
1	ja home	1.69	1.9	14.5	423	440.6	1.7468	156.69	1336	1345.1	-0.0116	unknow
	ja Indus	1.71	1.9	14.5	423	446.2	1.7277	138.54	1315.2	1322.4	-0.104	14.501
	nein	2.1	2.2	14.4	423	443.6	2.105	157.6	1607.5	1615.2	-0.097	14.389
1.3	ja home	1.7	2.2	14.5	423	439.9	1.7021	120.41	1289.5	1295.1	-0.092	14.346
	ja Indus	1.73	2.2	14.6	423	446	1.7324	145.17	1330.8	1338.6	-0.108	14.534
	nein	2.07	2.4	14.5	423	442	2.099	168.45	1601.7	1610.6	-0.104	14.45
1.6	ja home	1.74	2.5	14.7	423	443.1	1.7587	168.69	1342	1352.5	-0.124	unknow
	ja Indus	1.76	2.6	14.7	423	432.4	1.7612	154.03	1292.3	1301.4	-0.118	14.688
	nein	2.08	2.7	14.6	423	440.7	2.097	174.02	1595.4	1604.8	-0.108	14.585
2	ja home	1.77	2.9	14.8	423	440.4	1.8275	194.86	1405.4	1418.8	-0.137	14.845
	ja Indus	1.8	3	14.8	423	435.1	1.7786	167.85	1322.8	1333.3	-0.125	14.757
	nein	2.07	3.1	14.7	423	438.9	2.094	204.6	1575.9	1589	-0.128	14.585
2.5	ja home	1.84	3.5	14.9	423	413.5	1.8489	216.6	1309	1326.7	-0.163	14.952
	ja Indus	1.86	3.8	14.9	423	435.2	1.8592	207.2	1383.9	1399.2	-0.148	14.952
	nein	2.1	3.6	14.6	423	437.9	2.105	226.8	1583.7	1599.8	-0.141	14.845
3	ja home	1.9	4.3	15.1	423	339.9	1.9215	257.2	1102.1	1131.6	-0.227	unknow
	ja Indus	1.93	4.2	15.1	423	443.4	1.8989	255.7	1434.1	1456.7	-0.175	15.033
	nein	2.12	4.1	14.9	423	443.2	2.135	272.2	1596.4	1619.5	-0.168	14.878
3.5	ja home	1.99	4.7	15.2	423	396.5	2.008	286.2	1343.6	1373.7	-0.208	15.114
	ja Indus	2.01	4.6	15.2	423	443.5	1.9988	285.9	1499.5	1526.5	-0.187	15.107
	nein	2.16	4.6	15.1	423	443.4	2.176	301.5	1644.8	1672.1	-0.18	14.981
4	ja home	2.08	5.2	15.3	423	439.6	2.104	321.3	1570	1602.5	-0.2	15.318
	ja Indus	2.1	5.2	15.4	423	441.2	2.114	317.5	1589.7	1621.1	-0.195	15.394
	nein	2.21	5.2	15.2	423	442.6	2.208	319.6	1661.7	1692.1	-0.188	15.281
4.5	ja home	2.19	5.8	15.5	423	438.2	2.206	366.4	1636.8	1677.3	-0.218	15.489
	ja Indus	2.19	5.8	15.5	423	441.7	2.213	349.4	1658.5	1694.8	-0.206	15.489
	nein	2.28	5.7	15.4	423	442.1	2.295	357	1701.8	1738.8	-0.205	15.351
5	ja home	2.29	6.4	15.6	423	438.6	2.305	397.3	1707.8	1753.4	-0.226	15.647
	ja Indus	2.3	6.4	15.7	423	441.2	2.317	382.2	1728.1	1769.8	-0.215	15.377
	nein	2.34	6.2	15.5	423	440.6	2.37	395.7	1766.1	1809.8	-0.218	15.518
5.5	ja home	2.4	7	15.8	423	434.3	2.422	426	1771.5	1822	-0.233	15.595
	ja Indus	2.39	6.9	15.8	423	440.5	2.361	425.8	1738	1789.3	-0.238	15.782
	nein	2.44	6.8	15.7	423	440.2	2.391	402	1771.3	1816.3	-0.221	15.673
6	ja home	2.52	7.5	16	423	433	2.534	473.6	1846.2	1905.9	-0.248	15.984
	ja Indus	2.52	7.5	16	423	442.1	2.527	453	1845	1899.8	-0.238	15.911
	nein	2.54	7.4	15.9	423	440.4	2.55	448.3	1891.2	1943.6	-0.23	15.933
6.5	ja home	2.63	8.1	16.1	423	430.8	2.645	504.8	1906.3	1972	-0.255	16.202
	ja Indus	2.62	8	16.2	423	440.9	2.637	504.6	1948.2	2012	-0.25	16.277
	nein	2.63	7.9	16	423	440.6	2.645	499.5	1952	2014	-0.247	16.005
7	ja home	2.75	8.7	16.3	423	422	2.767	552.9	1953.6	2030	-0.272	16.276
	ja Indus	2.73	8.5	16.3	423	439.2	2.758	537.3	2030	2099	-0.255	16.297
	nein	2.73	8.5	16.3	423	439.7	2.763	546.4	2031	2103	-0.259	16.209
7.5	ja home	2.87	9.2	16.5	423	424	2.797	566.7	1966.1	2046	-0.276	16.417
	ja Indus	2.86	9.2	16.5	423	432.2	2.8	588.2	2016	2100	-0.28	16.846
	nein	2.87	9.2	16.5	423	440.2	2.889	579.1	2049	2129	-0.271	16.491
8	ja home	2.97	9.7	16.7	423	420.3	2.998	653.7	2084	2184	-0.299	16.679
	ja Indus	2.97	9.7	16.7	423	435	2.974	614.5	2155	2241	-0.274	16.711
	nein	2.99	9.7	16.7	423	440.4	3.009	630.4	2201	2290	-0.275	16.622
8.5	ja home	3.12	10.3	16.9	423	411.9	3.14	674.3	2138	2241	-0.3	16.895
	ja Indus	3.13	10.4	16.9	423	438.2	3.153	683.4	2290	2390	-0.285	16.165
	nein	3.11	10.4	16.9	423	438.7	3.071	653.3	2236	2329	-0.28	17.103



705 rpm												
M	Optim Fluss	Frequenzrichter				Powermeter						
		I [A]	M berechnet [Nm]	Frequenz [Hz]	$\omega$ [rpm]	U [V]	I [A]	P [W]	Q [Var]	S [VA]	PF	Hz
0.2	ja home	1.7	0.6	23.6	705	386.7	1.7133	79.77	1144.6	1147.3	-0.069	23.59
	ja Indus	1.69	0.6	23.6	705	446.3	1.7042	85.01	1315.2	1317.8	-0.064	23.64
	nein	1.97	0.8	23.5	705	449.7	1.9831	102.33	1542.6	1545.9	-0.066	23.57
0.4	ja home	1.7	0.8	23.6	705	386.8	1.7141	83.33	1144.6	1147.6	-0.072	23.59
	ja Indus	1.7	0.8	23.6	705	446.1	1.7056	88.85	1317.2	1320.1	-0.067	23.64
	nein	1.97	0.9	23.6	705	446.3	1.9751	133.68	1508.4	1514.3	-0.088	23.59
0.7	ja home	1.7	1.1	23.7	705	387.1	1.7158	91.92	1146.4	1150	-0.079	23.73
	ja Indus	1.7	1	23.7	705	441	1.7156	134.74	1311.3	1318.2	-0.102	23.64
	nein	1.95	1.2	23.6	705	447.8	1.9734	143.97	1521.3	1526.1	-0.094	23.67
1	ja home	1.72	1.4	23.7	705	386.8	1.7364	150.13	1154.7	1164.3	-0.128	24.09
	ja Indus	1.71	1.4	23.8	705	444.2	1.7199	139.84	1319.6	1326.9	-0.105	23.09
	nein	1.95	1.4	23.7	705	452.3	1.9714	194.72	1537.8	1550	-0.125	23.73
1.2	ja home	1.73	1.5	23.8	705	387	1.7384	152.92	1153.6	1163.7	-0.131	23.95
	ja Indus	1.71	1.5	23.8	705	446.2	1.7253	151.06	1326.3	1334.8	-0.113	23.85
	nein	1.96	1.6	23.7	705	450.3	1.9697	174.49	1526.1	1538	-0.113	23.72
1.5	ja home	1.74	1.8	23.8	705	387.7	1.7462	167.32	1159.4	1171.4	-0.142	23.8
	ja Indus	1.74	1.8	23.9	705	444.9	1.745	176.86	1336	1347.6	-0.131	23.77
	nein	1.95	1.9	23.8	705	448.1	1.9696	182.34	1521	1531.9	-0.119	23.85
1.7	ja home	1.76	2	23.9	705	388.6	1.771	204.1	1174.4	1192	-0.171	23.9
	ja Indus	1.75	2	23.9	705	445.5	1.7464	180.19	1333.4	1345.4	-0.133	23.84
	nein	1.95	2.1	23.8	705	448.8	1.9803	207.1	1526.7	1540.7	-0.134	24.59
2	ja home	1.77	2.3	24	705	388.1	1.7762	209.5	1174.8	1193.2	-0.175	24.3
	ja Indus	1.76	2.2	24	705	446.5	1.7638	222.2	1363.1	1381	-0.16	23.85
	nein	1.96	2.2	23.9	705	448.3	1.9792	226	1520.5	1537.2	-0.147	23.86
2.3	ja home	1.8	2.6	24	705	388.8	1.8138	247.5	1173.6	1199.4	-0.206	24.17
	ja Indus	1.79	2.5	24	705	443.1	1.8042	231	1365	1384.4	-0.166	24.11
	nein	1.97	2.5	24	705	442.9	1.9852	264.8	1501.3	1524.4	-0.173	23.72
2.5	ja home	1.82	2.7	24.1	705	397.7	1.8206	268.8	1192.6	1222.5	-0.219	24.1
	ja Indus	1.82	2.6	24.1	705	445.9	1.8258	265.9	1389.4	1414.5	-0.187	24.16
	nein	1.98	2.7	24	705	448.7	1.9995	277.3	1528	1552.9	-0.178	24.01
2.7	ja home	1.83	2.9	24.1	705	393.2	1.8538	286.9	1219.7	1252.9	-0.229	24.14
	ja Indus	1.82	2.9	24.1	705	445.7	1.832	271	1386.9	1413.1	-0.191	24.14
	nein	2	2.9	24.1	705	447.9	2.004	285.6	1531.5	1567.8	-0.183	24.11
3	ja home	1.86	3.2	24.2	705	393.5	1.8537	286.1	1230.5	1263.2	-0.226	24.15
	ja Indus	1.85	3.2	24.2	705	446.1	1.8676	308.6	1419.1	1452.2	-0.212	24.3
	nein	2.02	3.2	24.1	705	447.4	2.033	318.7	1544.1	1576.6	-0.202	24.16
3.3	ja home	1.9	3.5	24.3	705	391.8	1.9192	333.5	1260.3	1303.6	-0.255	24.3
	ja Indus	1.89	3.5	24.3	705	445.5	1.9031	324.6	1435	1471.2	-0.22	24.3
	nein	2.03	3.4	24.2	705	447.4	2.04	329.8	1549.6	1584.2	-0.208	24.13
3.6	ja home	1.94	3.8	24.3	705	391	1.954	357.8	1266.7	1316.2	-0.271	24.32
	ja Indus	1.94	3.8	24.4	705	444.9	1.9508	356.4	1463.2	1505.9	-0.236	24.41
	nein	2.05	3.8	24.3	705	446.3	2.073	366.2	1560	1602.4	-0.228	24.27
4	ja home	2	4.2	24.4	705	391.8	2.011	394.8	1306.8	1365.1	-0.289	24.45
	ja Indus	1.99	4.2	24.5	705	439.5	2.009	397.7	1471.2	1524	-0.26	24.52
	nein	2.1	4.1	24.4	705	446.4	2.087	380.9	1567.9	1613.5	-0.236	24.44
4.5	ja home	2.06	4.7	24.6	705	392.4	2.079	435.5	1343.8	1412.6	-0.308	24.59
	ja Indus	2.06	4.7	24.6	705	441.6	2.08	437.9	1509.7	1571.9	-0.278	24.66
	nein	2.15	4.6	24.5	705	445.6	2.163	441.9	1613.5	1672.9	-0.264	24.52
5	ja home	2.15	5.2	24.7	705	393.9	2.166	496.1	1397.2	1479.2	-0.328	24.71
	ja Indus	2.14	5.2	24.7	705	442.3	2.152	483.2	1539.1	1673.1	-0.299	24.74
	nein	2.21	5.2	24.6	705	443	2.231	496.8	1617.8	1692.2	-0.293	24.57
5.5	ja home	2.24	5.7	24.8	705	393.5	2.256	534.8	1442.4	1538.3	-0.347	24.94
	ja Indus	2.23	5.7	24.9	705	442.3	2.247	525.8	1648.9	1730.6	-0.303	24.8
	nein	2.29	5.7	24.8	705	442.5	2.304	537.3	1687	1770.4	-0.303	24.8
6	ja home	2.32	6.2	25	705	393.7	2.35	586.3	1491.2	1602.3	-0.365	24.92
	ja Indus	2.32	6.3	25.1	705	442.7	2.343	590	1696.5	1796.1	-0.328	25.06
	nein	2.36	6.2	24.9	705	435.9	2.382	596.6	1700.7	1798.9	-0.326	24.97
6.5	ja home	2.42	6.7	25.1	705	397.2	2.446	633.2	1560.7	1684	-0.376	25.11
	ja Indus	2.42	6.7	25.1	705	441.9	2.436	631.3	1758.1	1868	-0.337	25.11
	nein	2.44	6.7	25.1	705	443.4	2.46	633.6	1783.4	1892.6	-0.334	25.23
7	ja home	2.52	7.2	25.2	705	397.8	2.532	676.1	1610.2	1746.4	-0.387	25.23
	ja Indus	2.53	7.3	25.3	705	443.4	2.549	682.4	1837.5	1960.1	-0.348	25.34
	nein	2.54	7.2	25.2	705	443	2.536	681.6	1840.2	1962.3	-0.347	25.23
7.5	ja home	2.62	7.7	25.4	705	398	2.643	729.8	1670.9	1823.3	-0.4	25.37
	ja Indus	2.63	7.8	25.5	705	443.2	2.665	736.6	1902	2039	-0.361	25.52
	nein	2.64	7.7	25.3	705	441.7	2.656	731.6	1902.1	2037	-0.359	25.4
8	ja home	2.75	8.3	25.6	705	401.7	2.77	795.6	1757.2	1928.8	-0.412	25.67
	ja Indus	2.74	8.3	25.6	705	433.6	2.755	774	1939.7	2068	-0.37	25.55
	nein	2.74	8.2	25.5	705	436.1	2.759	780.2	1939.9	2090	-0.373	25.55
8.5	ja home	2.85	8.8	25.7	705	402	2.877	838.7	1620.7	2004	-0.418	25.68
	ja Indus	2.86	8.9	25.8	705	442.2	2.88	841.7	2056	2222	-0.378	25.82
	nein	2.86	8.8	25.7	705	441.4	2.878	844	2030	2199	-0.383	25.69
9	ja home	2.97	9.3	25.9	705	402.1	2.996	893.9	1886.5	2087	-0.428	25.94
	ja Indus	2.97	9.4	25.9	705	442.4	2.992	913.6	2102	2291	-0.398	25.91
	nein	2.96	9.4	25.9	705	443.4	2.989	894.5	2113	2294	-0.389	25.93
9.5	ja home	3.1	9.9	26.1	705	403.6	3.124	959.6	1963.8	2185	-0.439	26.05
	ja Indus	3.1	10	26.1	705	442.5	3.134	942.8	2139	2337	-0.403	26.15
	nein	3.11	10.1	26.1	705	446.2	3.133	974.3	2218	2422	-0.402	26.01
10	ja home	3.24	10.5	26.3	705	406.4	3.267	1034	2063	2308	-0.447	26.29
	ja Indus	3.25	10.6	26.3	705	442.8	3.268	1021.2	2290	2507	-0.407	26.31
	nein	3.25	10.7	26.3	705	445.5	3.27	1035.6	2301	2523	-0.41	26.29



1410 rpm													
Frequenzrichter							Powermeter						
M	Optim	I	M	Frequenz	w	U	I	P	Q	S	PF	Hz	
(Nm)	Fluss	[A]	Motorstrom	[Hz]	[rpm]	[V]	[A]	[W]	[Var]	[VA]			
			[Nm]										
0.2	ja home	1.69	0.8	47.1	1410	466.9	1.7099	119.8	1378.3	1383.5	-0.086	47.01	
	ja Indus	1.72	0.6	47.1	1410	465.4	1.732	138.05	1369.8	1396.6	-0.098	47.19	
	nein	1.83	0.5	47.1	1410	468.4	1.8527	166.98	1498.4	1507.6	-0.11	47.19	
0.4	ja home	1.7	0.8	47.1	1410	466.4	1.712	133.02	1377	1383.4	-0.096	47.1	
	ja Indus	1.72	0.8	47.1	1410	465.2	1.7344	152.26	1369.4	1397.6	-0.108	47.19	
	nein	1.83	0.7	47.1	1410	464.2	1.8536	238.1	1471.7	1490.8	-0.159	47.19	
0.6	ja home	1.7	1	47.2	1410	465.5	1.7173	164.59	1375.5	1385.3	-0.118	47.19	
	ja Indus	1.73	0.9	47.2	1410	464.7	1.7424	199.02	1369.3	1403.4	-0.141	47.29	
	nein	1.83	0.9	47.2	1410	464	1.8541	247.9	1470.3	1491	-0.166	47.14	
0.8	ja home	1.71	1.2	47.2	1410	464.4	1.7154	212	1371.6	1387.9	-0.152	47.09	
	ja Indus	1.74	1.1	47.2	1410	464.6	1.7463	213.9	1389.2	1405.5	-0.152	47.25	
	nein	1.84	1.1	47.2	1410	463.8	1.8567	265.2	1468.8	1492.6	-0.177	47.19	
1	ja home	1.72	1.3	47.3	1410	463.3	1.7312	236.3	1368.5	1386.7	-0.17	47.24	
	ja Indus	1.74	1.3	47.3	1410	464.1	1.751	228.5	1388.8	1407.4	-0.162	47.27	
	nein	1.84	1.3	47.3	1410	463.4	1.8583	278.2	1467.4	1493.5	-0.186	47.39	
1.2	ja home	1.73	1.5	47.3	1410	462.3	1.7471	282.3	1369.2	1397.9	-0.201	47.34	
	ja Indus	1.74	1.4	47.3	1410	461.3	1.7854	258.3	1385.7	1431.2	-0.25	47.29	
	nein	1.84	1.4	47.3	1410	463.4	1.8573	275	1490	1515.1	-0.181	47.4	
1.5	ja home	1.74	1.7	47.4	1410	461.3	1.7561	311.1	1368	1402.9	-0.221	47.38	
	ja Indus	1.75	1.7	47.4	1410	461.1	1.7648	303.5	1369.1	1402.3	-0.216	47.39	
	nein	1.85	1.7	47.4	1410	463.8	1.8687	344.3	1462.9	1502.8	-0.229	47.39	
1.7	ja home	1.76	2	47.4	1410	460.6	1.7794	369.4	1371.2	1420	-0.26	47.48	
	ja Indus	1.77	1.9	47.5	1410	461.2	1.7742	330.5	1373.2	1412.4	-0.234	47.42	
	nein	1.87	1.9	47.4	1410	463	1.8895	355.7	1474.5	1516.8	-0.234	47.45	
2	ja home	1.78	2.2	47.5	1410	461.2	1.8014	407	1361.1	1439.8	-0.282	47.49	
	ja Indus	1.79	2.2	47.5	1410	461.3	1.814	408.5	1361.8	1421.1	-0.286	47.44	
	nein	1.87	2.2	47.5	1410	463	1.899	415.7	1464.7	1522.5	-0.273	47.45	
2.3	ja home	1.81	2.5	47.5	1410	461.6	1.829	449.8	1377.2	1448.7	-0.31	47.55	
	ja Indus	1.83	2.5	47.6	1410	460.1	1.8499	454.3	1405.4	1476.9	-0.307	47.55	
	nein	1.91	2.5	47.5	1410	460.6	1.9283	464.5	1467.5	1539.2	-0.301	47.57	
2.6	ja home	1.83	2.8	47.6	1410	462.1	1.8577	506.2	1386.7	1476.2	-0.342	47.58	
	ja Indus	1.86	2.8	47.6	1410	459.8	1.8717	505	1402.7	1480.8	-0.338	47.65	
	nein	1.93	2.8	47.6	1410	460.1	1.95	510.4	1469.3	1555.4	-0.328	47.55	
3	ja home	1.87	3.1	47.7	1410	461	1.8965	567.8	1392	1503.3	-0.377	47.68	
	ja Indus	1.9	3.1	47.7	1410	458.5	1.9194	564.4	1416.5	1524.8	-0.37	47.76	
	nein	1.96	3.1	47.7	1410	457.2	1.9791	563.6	1465.8	1570.4	-0.358	47.7	
3.3	ja home	1.91	3.4	47.8	1410	455.2	1.9256	606.6	1387.9	1514.6	-0.4	47.81	
	ja Indus	1.93	3.4	47.8	1410	458.3	1.9563	616.1	1426.3	1553.6	-0.396	47.85	
	nein	1.98	3.4	47.7	1410	457.8	2.008	610.2	1472.4	1593.7	-0.382	47.75	
3.6	ja home	1.95	3.7	47.8	1410	457.9	1.9731	653.7	1422.1	1565.1	-0.471	47.91	
	ja Indus	1.97	3.7	47.9	1410	457	1.992	656.3	1418.9	1563.3	-0.419	47.81	
	nein	2.02	3.7	47.8	1410	456.7	2.043	660.6	1474.7	1616	-0.408	47.81	
4	ja home	2.01	4.2	47.9	1410	457.8	2.031	721.4	1440.9	1611.3	-0.447	48.02	
	ja Indus	2.03	4.1	48	1410	456.4	2.048	724	1421.8	1595.5	-0.453	47.97	
	nein	2.08	4.1	47.9	1410	455.3	2.095	728.6	1484.8	1653.8	-0.44	47.99	
4.3	ja home	2.05	4.4	48	1410	456.4	2.071	769	1446.8	1638.4	-0.469	48.02	
	ja Indus	2.08	4.4	48	1410	456.3	2.094	776.3	1463.2	1656.3	-0.468	48.07	
	nein	2.12	4.4	48	1410	456.2	2.141	782.1	1502.4	1693.7	-0.461	48.05	
5	ja home	2.17	5.1	48.2	1410	465.5	2.185	884.8	1483.1	1726.9	-0.512	48.16	
	ja Indus	2.17	5.1	48.2	1410	456.2	2.197	883.5	1498.1	1739.2	-0.506	48.18	
	nein	2.21	5	48.1	1410	456.9	2.227	888.9	1524.6	1764.8	-0.503	48.14	
5.5	ja home	2.25	5.6	48.3	1410	457.9	2.278	973.5	1523.5	1808	-0.538	48.41	
	ja Indus	2.27	5.6	48.3	1410	456.1	2.282	963.3	1525	1803.7	-0.534	48.28	
	nein	2.28	5.5	48.3	1410	455.8	2.316	967.3	1557.8	1833.7	-0.527	48.4	
6	ja home	2.34	6.1	48.5	1410	458.5	2.363	1047	1558.6	1877.5	-0.557	48.39	
	ja Indus	2.36	6.1	48.5	1410	456.4	2.379	1059.6	1554.4	1881.1	-0.563	48.34	
	nein	2.36	6	48.4	1410	455.3	2.397	1058.1	1566.7	1890.4	-0.559	49.47	
6.5	ja home	2.44	6.6	48.6	1410	457.3	2.461	1144.7	1579.7	1950.8	-0.566	48.71	
	ja Indus	2.44	6.5	48.6	1410	456.8	2.467	1135.9	1589.8	1953.9	-0.581	48.79	
	nein	2.46	6.5	48.5	1410	455.8	2.478	1138.4	1593.9	1958.7	-0.581	48.5	
7	ja home	2.53	7.1	48.8	1410	457.6	2.557	1221.7	1620.5	2029	-0.602	48.62	
	ja Indus	2.55	7.1	48.7	1410	457.3	2.577	1224.9	1633.7	2041	-0.599	48.66	
	nein	2.55	7	48.7	1410	456.2	2.582	1222.2	1578.7	1996.5	-0.612	48.87	
7.5	ja home	2.65	7.8	48.9	1410	457.9	2.67	1313.7	1663.6	2119	-0.619	48.9	
	ja Indus	2.65	7.5	48.9	1410	457.3	2.674	1315.2	1662.6	2119	-0.62	49.62	
	nein	2.66	7.5	48.9	1410	456.9	2.709	1337.6	1624.9	2104	-0.635	48.46	
8	ja home	2.75	8.1	49.1	1410	457.6	2.782	1411	1698.2	2207	-0.639	49.1	
	ja Indus	2.76	8	49	1410	457.2	2.771	1401.8	1691.2	2196	-0.638	49.01	
	nein	2.76	7.9	49	1410	456.8	2.774	1396.5	1695.4	2196	-0.635	49.27	
8.5	ja home	2.86	8.6	49.2	1410	457.6	2.889	1498.2	1732.5	2290	-0.654	49.57	
	ja Indus	2.88	8.5	49.2	1410	457.2	2.9	1505	1738.6	2299	-0.654	49.22	
	nein	2.85	8.4	49.2	1410	456.8	2.886	1492	1729.3	2283	-0.653	49.35	
9	ja home	2.99	9.1	49.4	1410	457.2	3.018	1604.7	1774.6	2392	-0.67	49.78	
	ja Indus	2.98	9	49.4	1410	457.1	3.005	1584.2	1776.6	2380	-0.665	49.53	
	nein	2.97	8.9	49.3	1410	456.9	3.001	1581.7	1771.9	2375	-0.665	49.3	
9.5	ja home	3.11	9.5	49.6	1410	456.5	3.136	1694.1	1814.3	2482	-0.682	49.67	
	ja Indus	3.09	9.4	49.5	1410	457.2	3.122	1680.2	1816.5	2474	-0.679	49.52	
	nein	3.09	9.5	49.5	1410	456.7	3.119	1679.3	1811	2469	-0.679	49.95	
10	ja home	3.24	10	49.8	1410	457.9	3.269	1798.6	1871.1	2595	-0.693	49.83	
	ja Indus	3.22	9.9	49.7	1410	456.5	3.246	1774.3	1858.3	2569	-0.69	49.62	
	nein	3.22	10	49.7	1410	456.6	3.248	1779.9	1854.6	2570	-0.692	49.93	



### 6.3.Firma C

Geräte für messen:	Maschine:
Powermeter: AV Power Power Analyser PA4400 LEA-B47 Altrona AG	Asynchron: <input type="text"/> <input type="text"/> No: <input type="text"/> IEC34-1 Δ 380-420V 50 Hz 1440 rpm 5.5 kW cos φ 0.83 11.2/6.5 A
Frequenzrichter: <b>Firma C</b>	
Nick Beeli, den	

439.5 rpm												
Frequenzrichter						Powermeter						
M	Optim	I	M berechnet	Frequenz	ω	U	I	P	Q	S	PF	Hz
[Nm]	Fluss	[A]	[Nm]	[Hz]	[rpm]	[V]	[A]	[W]	[Var]	[VA]		
1.3		2.43	0.1	14.8	439.5	447.2	2.44	150.03	1887.5	1893.4	-0.079	5.293
	ja	4.81	0.15	14.7	439.5	448.5	3.647	177.9	2822	2828	-0.062	3.202
	nein	6.64	0.15	14.7	439.5	452.3	6.671	295.9	5218	5226	-0.056	13.657
3		2.8	0.18	14.9	439.5	447.1	2.818	234.7	2174	2186	-0.107	4.637
	ja	4.61	0.21	14.8	439.5	445.2	3.732	258.7	2868	2879	-0.089	4.196
	nein	6.5	0.26	14.8	439.5	452.4	6.576	372.4	5144	5158	-0.172	12.844
3.5		2.94	0.2	14.9	439.5	444.9	2.962	258.3	2269	2284	-0.113	6.215
	ja	3.78	0.23	14.8	439.5	447.4	3.789	286.2	2919	2933	-0.097	5.273
	nein	6.53	0.28	14.8	439.5	451.1	6.572	395.7	5124	5139	-0.077	13.461
4		3.1	0.24	15	439.5	448.1	3.111	285.2	2399	2416	-0.118	8.543
	ja	3.81	0.26	14.8	439.5	444.5	3.849	317	2951	2968	-0.106	5.427
	nein	6.48	0.29	14.8	439.5	452.1	6.544	414.9	5110	5127	-0.08	11.905
4.5		3.25	0.26	15	439.5	449.7	3.277	317.8	2535	2554	-0.124	9.534
	ja	3.92	0.28	14.8	439.5	445.1	3.907	336.1	2995	3014	-0.111	5.769
	nein	6.54	0.24	14.8	439.5	452	6.543	439	5105	5124	-0.085	14.396
5		3.39	0.29	15	439.5	446	3.446	346.3	2652	2675	-0.129	6.712
	ja	3.97	0.29	14.9	439.5	446.5	3.963	360.7	3044	3065	-0.117	8.218
	nein	6.49	0.32	14.8	439.5	452.2	6.534	487.7	5101	5122	-0.091	14.423
5.5		3.62	0.32	15	439.5	447.6	3.616	376.7	2780	2806	-0.134	8.659
	ja	4.04	0.32	14.9	439.5	445.7	4.033	384.9	3088	3111	-0.123	5.362
	nein	6.52	0.38	14.8	439.5	450.6	6.525	491.9	5079	5103	-0.096	12.421
6		3.74	0.34	15	439.5	451.8	3.779	403.3	2926	2953	-0.136	9.885
	ja	4.11	0.36	14.9	439.5	447.6	4.125	425	3176	3205	-0.132	9.779
	nein	6.56	0.36	14.8	439.5	451.9	6.533	521.1	5087	5114	-0.101	12.242
6.5		3.94	0.36	15	439.5	451.6	3.939	427.9	3043	3072	-0.139	8.717
	ja	4.18	0.37	14.9	439.5	447.7	4.194	441.7	3216	3246	-0.136	10.012
	nein	6.48	0.43	14.8	439.5	452.2	6.513	537.6	5077	5105	-0.105	14.446
7		4.08	0.39	15	439.5	448.8	4.087	458.4	3140	3173	-0.144	7.179
	ja	4.3	0.39	15	439.5	447.1	4.313	470.2	3305	3338	-0.14	6.477
	nein	6.52	0.43	14.9	439.5	451.1	6.533	558.9	5077	5107	-0.109	12.373
7.5		4.24	0.41	15	439.5	446.6	4.259	492	3263	3300	-0.149	7.893
	ja	4.41	0.44	15	439.5	449.2	4.413	502.9	3402	3438	-0.146	10.937
	nein	6.56	0.47	14.9	439.5	452.3	6.534	589.3	5084	5118	-0.115	12.898
8.5		4.49	0.48	15.1	439.5	449.7	4.517	545.7	3483	3526	-0.154	7.439
	ja	4.6	0.47	15	439.5	449	4.613	560.3	3542	3586	-0.156	10.664
	nein	6.54	0.49	14.9	439.5	452.4	6.566	642.1	5106	5146	-0.124	13.591
9.5		4.79	0.52	15.1	439.5	451.4	4.809	610.8	3704	3753	-0.162	11.146
	ja	4.9	0.53	15	439.5	451.8	4.87	615.3	3765	3814	-0.161	12.999
	nein	6.6	0.56	14.9	439.5	452.8	6.598	685.2	5134	5179	-0.132	14.501
10.5		5.09	0.56	15.2	439.5	451.3	5.127	663.3	3956	4011	-0.165	11.361
	ja	5.11	0.57	15.1	439.5	449.6	5.126	667	3931	3987	-0.167	10.689
	nein	6.58	0.61	15	439.5	452.1	6.645	736.4	5154	5206	-0.141	13.764
11.5		5.46	0.62	15.2	439.5	451.4	5.453	725.1	4201	4263	-0.17	12.434
	ja	5.4	0.61	15.1	439.5	449.4	5.374	728.5	4129	4193	-0.173	10.423
	nein	6.74	0.64	15	439.5	450.7	6.712	794.2	5175	5235	-0.151	14.438
12.5		5.8	0.67	15.3	439.5	452.1	5.783	792.3	4463	4532	-0.174	13.404
	ja	5.67	0.67	15.1	439.5	451.4	5.684	789.4	4376	4446	-0.177	11.941
	nein	6.79	0.71	15	439.5	452	6.793	844.8	5257	5324	-0.158	14.305
13.5		6.11	0.71	15.3	439.5	453	6.149	853.1	4753	4828	-0.176	14.441
	ja	5.92	0.73	15.1	439.5	451.5	5.977	849.9	4599	4677	-0.181	13.399
	nein	6.9	0.72	15	439.5	450.9	6.865	896.4	5314	5389	-0.166	15.086
14.5		6.52	0.76	15.4	439.5	452.3	6.53	923	5035	5118	-0.18	14.937
	ja	6.2	0.77	15.2	439.5	452.9	6.225	904.4	4801	4885	-0.185	14.613
	nein	6.99	0.78	15.1	439.5	450.8	7.021	951	5403	5486	-0.173	14.623
15.5		6.98	0.81	15.5	439.5	452	6.934	996.3	5338	5430	-0.183	14.338
	ja	6.46	0.81	15.2	439.5	451.9	6.479	970.4	4982	5075	-0.191	14.372
	nein	7.12	0.84	15.1	439.5	451.1	7.146	1007.7	5497	5588	-0.18	15.081
16.5		7.33	0.86	15.5	439.5	451.4	7.334	1072.4	5639	5740	-0.186	15.552
	ja	6.74	0.88	15.2	439.5	452.4	6.773	1036.5	5209	5311	-0.195	15.23
	nein	7.29	0.86	15.1	439.5	450.7	7.288	1060.2	5595	5694	-0.186	14.21
17.5		7.69	0.91	15.6	439.5	451.9	7.775	1148.8	5981	6090	-0.188	15.621
	ja	7.04	0.91	15.2	439.5	453.8	7.024	1092.5	5417	5526	-0.197	15.26
	nein	7.39	0.9	15.2	439.5	450.2	7.442	1120.8	5698	5807	-0.193	14.653
18.5		8.17	0.96	15.7	439.5	452.4	8.211	1219.6	6324	6440	-0.189	15.699
	ja	7.31	0.95	15.2	439.5	453.5	7.292	1155.3	5611	5729	-0.201	15
	nein	7.55	0.98	15.2	439.5	449.7	7.616	1177.5	5819	5937	-0.195	15.204
19.5												
	ja	7.56	1.01	15.2	439.5	453.5	7.575	1215.5	5831	5956	-0.204	15.246
	nein	7.77	1.01	15.2	439.5	449.3	7.795	1234.5	5947	6074	-0.203	14.995



732.5 rpm													
Frequenzumrichter						Powermeter							
M	Optim	I	M	Frequenz	ω	U	I	P	Q	S	PF	Hz	
[Nm]	Fluss	[A]	[Nm]	[Hz]	[rpm]	[V]	[A]	[W]	[Var]	[VA]			
1.3	ja	2.92	0.2	24.5	732.5	447.4	2.937	232.5	2264	2276	-0.102	3.522	
	nein	3.49	0.22	24.5	732.5	453.3	3.525	255.4	2757	2769	-0.092	11.066	
3	ja	6.12	0.23	24.5	732.5	462.1	6.124	362.8	4892	4805	-0.073	24.49	
	nein	3.03	0.26	24.6	732.5	449.2	3.032	377.7	2324	2355	-0.16	10.842	
3.5	ja	3.81	0.36	24.6	732.5	456.5	3.818	400.9	2833	2861	-0.14	10.356	
	nein	6.07	0.38	24.5	732.5	461.6	6.129	496.6	4877	4902	-0.101	19.718	
4	ja	3.11	0.35	24.6	732.5	447.2	3.106	420.3	2376	2412	-0.174	8.972	
	nein	3.85	0.36	24.6	732.5	456	3.683	435.4	2881	2914	-0.149	17.312	
4.5	ja	6.17	0.49	24.5	732.5	461.8	6.127	562.4	4878	4908	-0.144	19.933	
	nein	3.18	0.39	24.7	732.5	444.3	3.197	455.3	2419	2462	-0.184	4.184	
5	ja	3.81	0.41	24.6	732.5	452.9	3.784	485	2938	2977	-0.162	10.23	
	nein	6.15	0.5	24.5	732.5	462.2	6.123	579.6	4873	4907	-0.118	21.67	
5.5	ja	3.29	0.44	24.7	732.5	445	3.32	499.7	2506	2555	-0.195	7.713	
	nein	3.8	0.47	24.6	732.5	452.5	3.809	524.8	2948	2994	-0.175	13.89	
6	ja	6.13	0.54	24.6	732.5	461.1	6.147	615.1	4875	4913	-0.125	19.229	
	nein	3.47	0.49	24.8	732.5	447.1	3.472	548	2634	2691	-0.203	10.69	
6.5	ja	3.78	0.57	24.8	732.5	448.3	3.779	632.4	2873	2942	-0.214	10.988	
	nein	4.06	0.67	24.7	732.5	451.4	4.066	651.1	3121	3188	-0.204	12.277	
7	ja	6.15	0.63	24.6	732.5	462	6.193	739.1	4903	4958	-0.149	21.43	
	nein	3.92	0.6	24.8	732.5	448.5	3.938	688	2980	3058	-0.224	11.939	
7.5	ja	4.2	0.64	24.7	732.5	451.1	4.202	696.1	3205	3280	-0.212	10.671	
	nein	6.2	0.63	24.6	732.5	460	6.209	782.8	4889	4951	-0.158	18.558	
8	ja	4.07	0.65	24.8	732.5	449.7	4.066	726.5	3107	3191	-0.228	10.324	
	nein	4.25	0.69	24.7	732.5	451.3	4.278	736.5	3262	3344	-0.22	11.521	
8.5	ja	6.22	0.7	24.6	732.5	460.3	6.234	833.2	4904	4974	-0.167	19.549	
	nein	4.26	0.7	24.8	732.5	450.6	4.265	779.7	3236	3329	-0.234	11.183	
9	ja	4.37	0.7	24.7	732.5	452.8	4.38	784	3347	3438	-0.228	12.051	
	nein	6.29	0.73	24.6	732.5	460.2	6.255	868	4914	4990	-0.173	20.49	
9.5	ja	4.53	0.77	24.8	732.5	450.4	4.543	865.9	3440	3547	-0.244	13.322	
	nein	4.55	0.8	24.8	732.5	453.4	4.606	869.4	3510	3616	-0.24	14.656	
10	ja	6.34	0.82	24.7	732.5	460.9	6.338	955	4973	5063	-0.188	22	
	nein	4.81	0.87	24.8	732.5	451.1	4.826	960.1	3648	3772	-0.254	17.004	
10.5	ja	4.85	0.86	24.8	732.5	451.1	4.89	954.3	3703	3824	-0.249	13.922	
	nein	6.35	0.9	24.7	732.5	460.7	6.41	1044.8	5009	5117	-0.204	23.27	
11	ja	5.1	0.96	24.9	732.5	451.5	5.103	1046.1	3854	3993	-0.261	18.207	
	nein	5.19	0.95	24.8	732.5	453.3	5.204	1048.5	3956	4093	-0.256	15.539	
11.5	ja	6.47	1	24.7	732.5	460.5	6.497	1120.6	5065	5187	-0.216	22.76	
	nein	5.39	1.02	24.9	732.5	450.2	5.374	1133.1	4037	4192	-0.27	15.504	
12	ja	5.4	1.02	24.9	732.5	454.3	5.399	1148.1	4088	4246	-0.27	22.21	
	nein	6.56	1.06	24.7	732.5	461	6.604	1197.4	5139	5277	-0.266	23.97	
12.5	ja	5.62	1.1	24.9	732.5	451.4	5.649	1225.8	4249	4422	-0.277	22.8	
	nein	5.86	1.11	24.9	732.5	453.3	5.658	1237.1	4269	4444	-0.278	20.72	
13	ja	6.71	1.15	24.8	732.5	460.1	6.744	1291.7	5219	5376	-0.24	24.17	
	nein	5.94	1.19	24.9	732.5	452.3	5.932	1330	4455	4649	-0.286	22.94	
13.5	ja	5.94	1.21	24.9	732.5	454.2	5.944	1325.6	4487	4678	-0.283	22.05	
	nein	6.85	1.25	24.8	732.5	460	6.859	1375.6	5293	5468	-0.251	23.69	
14	ja	6.19	1.29	25	732.5	452	6.212	1420.3	4652	4864	-0.291	20.56	
	nein	6.23	1.28	24.9	732.5	453.6	6.241	1414.1	4701	4909	-0.288	18.248	
14.5	ja	7	1.34	24.8	732.5	460.3	6.99	1463.4	5383	5579	-0.262	24.86	
	nein	6.48	1.36	25	732.5	451.9	6.485	1516.2	4848	5080	-0.298	22.28	
15	ja	6.45	1.37	25	732.5	453.7	6.49	1514.1	4874	5104	-0.296	22.91	
	nein	7.11	1.39	24.9	732.5	459.8	7.15	1554.3	5482	5696	-0.272	24.24	
15.5	ja	6.74	1.45	25	732.5	452.4	6.775	1614.4	5060	5311	-0.303	24.42	
	nein	6.71	1.43	25	732.5	453.2	6.771	1606.6	5072	5320	-0.301	24.34	
16	ja	7.3	1.47	24.9	732.5	459.7	7.317	1642.2	5593	5829	-0.281	24.91	
	nein	7.01	1.54	25	732.5	451.7	7.014	1695.7	5223	5491	-0.308	24.36	
17	ja	7.05	1.53	25	732.5	452.8	7.043	1702	5260	5529	-0.307	24.41	
	nein	7.46	1.52	24.9	732.5	459.4	7.493	1741.4	5707	5967	-0.291	24.7	
17.5	ja	7.31	1.6	25	732.5	452.3	7.302	1804.3	5432	5724	-0.315	24.81	
	nein	7.57	1.56	25	732.5	453.5	7.521	1813.6	5620	5905	-0.307	24.33	
18	ja	7.68	1.62	24.9	732.5	458.9	7.666	1818.9	5822	6099	-0.298	24.79	
	nein	7.54	1.69	25.1	732.5	452.4	7.56	1899.2	5615	5827	-0.32	25.1	
19	ja	7.63	1.68	25	732.5	452.9	7.714	1905.5	5746	6053	-0.314	25.01	
	nein	7.86	1.73	25	732.5	459.2	7.871	1920	5965	6266	-0.306	24.99	
20	ja	8.12	1.85	25.2	732.5	451.4	8.116	2094	5995	6350	-0.329	25.17	
	nein	8.1	1.85	25.1	732.5	451.9	8.126	2097	6011	6366	-0.329	25.05	
21	ja	8.27	1.87	25	732.5	458.5	8.28	2109	6232	6579	-0.32	25.03	
	nein	8.69	2	25.2	732.5	451	8.703	2297	6403	6802	-0.337	25.25	
22	ja	8.65	2.05	25.1	732.5	451.8	8.654	2294	6374	6774	-0.338	25.13	
	nein	8.7	2.07	25.1	732.5	456.9	8.731	2302	6520	6914	-0.331	25.12	
23	ja	9.3	2.18	25.3	732.5	449.7	9.293	2505	6798	7245	-0.345	25.35	
	nein	9.08	2.18	25.2	732.5	451.2	9.167	2486	6725	7170	-0.346	25.19	
24	ja	9.15	2.2	25.2	732.5	458.2	9.21	2501	6837	7280	-0.343	25.18	
	nein	10.17	2.4	25.5	732.5	449.4	10.252	2820	7474	7988	-0.353	25.48	
25	ja	9.88	2.43	25.2	732.5	450.5	10	2798	7291	7810	-0.358	25.24	
	nein	9.96	2.46	25.3	732.5	455.7	9.975	2808	7362	7879	-0.356	25.29	
26	ja	10.51	2.53	25.5	732.5	449.3	10.564	2937	7689	8231	-0.356	25.5	
	nein	10.2	2.5	25.3	732.5	457.2	10.228	2913	7561	8103	-0.359	25.33	
27	ja	10.5	2.55	25.5	732.5	450.1	10.42	2958	7573	8130	-0.363	25.4	
	nein	10.35	2.55	25.3	732.5	457.2	10.361	2947	7668	8215	-0.358	25.35	



1465 rpm													
M	Frequenzumrichter					Powermeter							
	Optim Fluss	I [A]	P [%]	Frequenz [Hz]	ω [rpm]	U [V]	I [A]	P [W]	Q [Var]	S [VA]	PF	Hz	
1.3		4	0.41	48.9	1465	461.8	3.976	503.6	3146	3186	-0.158	11.566	
	ja	4.14	0.53	48.9	1465	468.9	4.954	531.4	3622	3660	-0.145	10.993	
	nein	5.75	0.55	48.9	1465	479.3	5.736	600.4	4729	4766	-0.125	30.31	
3		4.09	0.76	49	1465	462	4.194	782.3	3267	3360	-0.232	15.526	
	ja	4.26	0.85	49	1465	468.1	4.27	775.2	3368	3456	-0.224	16.939	
	nein	5.73	1.12	49	1465	480.4	5.774	843.5	4738	4812	-0.175	33.69	
3.5		4.09	0.66	49	1465	460.9	4.096	830.7	3168	3275	-0.253	23.53	
	ja	4.24	1.02	49	1465	466.9	4.274	819.2	3367	3465	-0.236	19.222	
	nein	5.74	0.86	49	1465	480.7	5.788	890.9	4744	4826	-0.184	41.43	
4		3.91	0.91	49	1465	452.8	3.842	910.7	2896	3021	-0.301	9.227	
	ja	4.23	0.85	49	1465	465.9	4.158	933	3.226	3356	-0.278	30.3	
	nein	5.79	1.12	49	1465	479.2	5.806	958	4727	4823	-0.198	46.66	
4.5		3.87	0.93	49	1465	451.5	3.821	976.5	2831	2994	-0.326	19.52	
	ja	4.26	0.88	49	1465	464.8	4.245	1028.5	3273	3430	-0.299	23.15	
	nein	5.84	1.22	49	1465	478.6	5.828	1054	4716	4832	-0.218	42.18	
5		3.85	1.04	49.1	1465	451.7	3.893	1071.4	2852	3047	-0.351	13.92	
	ja	4.17	1.15	49	1465	462	4.169	1061.9	3171	3344	-0.317	16.659	
	nein	5.81	1.12	49	1465	478.7	5.861	1190.1	4717	4865	-0.244	49.09	
5.5		3.94	1.1	49.1	1465	451.1	3.976	1156.8	2887	3110	-0.371	18.526	
	ja	4.3	1.16	49.1	1465	463.3	4.277	1158.1	3227	3428	-0.337	11.923	
	nein	5.87	1.23	49	1465	478.4	5.894	1273	4716	4885	-0.26	46.9	
6		4.07	1.19	49.1	1465	448.9	4.059	1239.9	2913	3166	-0.391	16.125	
	ja	4.23	1.21	49.1	1465	461.7	4.275	1243.7	3192	3426	-0.363	23.63	
	nein	5.93	1.42	49	1465	479	5.932	1303.3	4749	4924	-0.264	47.13	
6.5		4.18	1.22	49.1	1465	450.4	4.194	1315.9	2998	3274	-0.401	14.875	
	ja	4.4	1.31	49.1	1465	461.6	4.31	1280.5	3199	3445	-0.371	26.53	
	nein	6	1.57	49	1465	478.2	5.973	1430.3	4741	4952	-0.288	48.04	
7		4.25	1.33	49.1	1465	450.3	4.309	1402.9	3055	3361	-0.417	24.46	
	ja	4.51	1.36	49.1	1465	460.8	4.428	1349.6	3252	3521	-0.383	14.079	
	nein	6.05	1.42	49.1	1465	477.7	6.032	1513.3	4757	4992	-0.303	43.11	
7.5		4.43	1.43	49.1	1465	453.6	4.449	1496.8	3162	3494	-0.425	23.57	
	ja	4.54	1.43	49.1	1465	460.7	4.547	1457.8	3318	3624	-0.402	15	
	nein	6.03	1.64	49.1	1465	477.7	6.067	1582.4	4769	5025	-0.314	36.96	
8.5		4.66	1.52	49.2	1465	451.8	4.673	1660.6	3254	3653	-0.454	25.59	
	ja	4.79	1.63	49.2	1465	461.8	4.678	1577.1	3383	3732	-0.422	22.81	
	nein	6.21	1.64	49.1	1465	477.3	6.187	1764.3	4802	5115	-0.344	47.67	
9.5		4.95	1.77	49.2	1465	455.6	4.966	1820.2	3469	3917	-0.464	39.95	
	ja	5.05	1.79	49.2	1465	463.4	5.109	1858.5	3667	4111	-0.452	35.46	
	nein	6.27	1.96	49.1	1465	476.5	6.297	1947.4	4814	5192	-0.375	49.28	
10.5		5.19	1.94	49.2	1465	457.2	5.225	2007	3618	4137	-0.485	41.06	
	ja	5.29	2.03	49.2	1465	462.8	5.294	2008	3741	4246	-0.473	33.02	
	nein	6.36	1.94	49.1	1465	476.1	6.41	2084	4858	5286	-0.394	47.81	
11.5		5.41	2.07	49.3	1465	455.4	5.469	2173	3735	4321	-0.502	45.7	
	ja	5.52	2.08	49.2	1465	464.9	5.634	2188	3975	4537	-0.482	49.23	
	nein	5.56	2.16	49.2	1465	476.1	6.535	2238	4909	5395	-0.414	47.91	
12.5		5.7	2.25	49.3	1465	456.8	5.719	2329	3884	4529	-0.514	45.72	
	ja	5.89	2.29	49.3	1465	464.8	5.931	2365	4153	4779	-0.494	49.21	
	nein	6.79	2.32	49.2	1465	474.9	6.711	2423	4967	5526	-0.438	49.18	
13.5		6.02	2.33	49.3	1465	459.9	6.06	2512	4123	4828	-0.52	49.25	
	ja	6.13	2.49	49.3	1465	466.4	6.186	2540	4305	4999	-0.508	49.52	
	nein	6.82	2.53	49.2	1465	474.7	6.864	2563	5031	5646	-0.454	46.09	
14.5		6.32	2.63	49.3	1465	459.5	6.283	2696	4220	5007	-0.538	49.14	
	ja	6.41	2.67	49.3	1465	465.9	6.409	2713	4415	5182	-0.523	49.44	
	nein	7.08	2.65	49.2	1465	473.6	7.002	2752	5053	5753	-0.478	49.28	
15.5		6.51	2.75	49.3	1465	459.6	6.582	2865	4388	5240	-0.546	49.32	
	ja	6.64	2.69	49.3	1465	466.1	6.664	2878	4549	5383	-0.534	48.01	
	nein	7.14	2.84	49.3	1465	473.8	7.181	2922	5130	5904	-0.494	49.37	
16.5		6.84	2.93	49.4	1465	459.9	6.866	3064	4536	5474	-0.559	49.22	
	ja	6.97	2.94	49.3	1465	467.7	7.011	3070	4777	5678	-0.54	44.31	
	nein	7.36	2.94	49.3	1465	469.2	7.408	3098	5167	6025	-0.514	48.51	
17.5		7.05	3.13	49.4	1465	460	7.088	3231	4636	5651	-0.571	48.99	
	ja	7.2	3.02	49.4	1465	467.2	7.207	3263	4839	5836	-0.559	49.45	
	nein	7.59	3.13	49.3	1465	468.6	7.611	3270	5246	6182	-0.528	50.08	
18.5		7.3	3.25	49.5	1465	459.7	7.33	3408	4737	5835	-0.584	49.62	
	ja	7.43	3.28	49.4	1465	467.7	7.526	3413	5047	6093	-0.56	49.61	
	nein	7.78	3.31	49.4	1465	468.2	7.753	3423	5278	6290	-0.544	49.76	
19.5		7.57	3.4	49.5	1465	459.3	7.603	3564	4890	6051	-0.589	49.65	
	ja	7.65	3.47	49.4	1465	466.8	7.761	3617	5122	6270	-0.576	48.62	
	nein	8	3.39	49.4	1465	467.6	7.963	3603	5364	6461	-0.557	49.47	
21.5		8.16	3.77	49.6	1465	459.1	8.142	3944	5135	6475	-0.609	49.65	
	ja	8.18	3.75	49.5	1465	464.6	8.13	3956	5216	6546	-0.604	49.74	
	nein	8.47	3.76	49.5	1465	466.1	8.357	3943	5481	6752	-0.583	49.53	
23.5		8.84	4.18	49.5	1465	462.1	8.828	4269	5639	7073	-0.603	49.26	
	ja	8.73	3.99	49.5	1465	464.6	8.736	4290	5577	7036	-0.609	49.58	
	nein	8.81	4.08	49.5	1465	465.1	8.85	4314	5687	7139	-0.604	49.51	
25.5		9.33	4.5	49.6	1465	459.9	9.251	4648	5715	7366	-0.63	49.84	
	ja	9.37	4.45	49.6	1465	464.2	9.278	4652	5839	7466	-0.623	49.7	
	nein	9.27	4.42	49.6	1465	464.5	9.296	4687	5836	7485	-0.626	49.37	
28.5		9.97	4.95	49.7	1465	458.7	10.026	5241	6009	7974	-0.657	49.47	
	ja	9.92	4.87	49.7	1465	462.4	10.01	5230	6088	8026	-0.651	49.7	
	nein	9.95	4.93	49.7	1465	462.5	10.014	5229	6093	8029	-0.651	49.67	
29.5		10.26	5.07	49.8	1465	457.7	10.283	5423	6095	8158	-0.664	49.62	
	ja	10.26	5.07	49.7	1465	462.6	10.257	5402	6199	8222	-0.657	49.65	
	nein	10.35	5.13	49.7	1465	461.7	10.292	5424	6191	8231	-0.658	49.89	
30		10.39	5.2	49.7	1465	457.8	10.424	5533	6144	8268	-0.669	49.9	
	ja	10.38	5.1	49.7	1465	462.2	10.387	5500	6244	8321	-0.66	49.79	
	nein	10.48	5.16	49.7	1465	462.6	10.412	5495	6292	8353	-0.657	49.69	



## 7.Simulations-Code

```
Rs= 1.005 ; %Widerstand der Statorwicklung
Lts= 0.00572705 ; %Stator-Streuinduktivität
Lh= 0.157 ; %Hauptinduktivität
Lptr=0.00572705 ; %Rotor-Streuinduktivität
Rpr= 0.92 ; %Widerstand der Rotorwicklung
Rfer=765.755836 ; %Widerstand des Eisens
p=2; %Polpaarzahl
Pnom=5500; %Belastung [W]
vnom=1450; %Drehzahl u/min
Snom=7503.24 %Scheinleistung [VA]
fnom=50 %Nennfrequenz
saturation=1; %=0 ohne Sättigung =1 mit Sättigung
Usnom=230;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Verhalten mit einem Frequenzumrichter
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Frequenz 0.25 à 50Hz
% Drehmoment 0.2 à 40Nm
[Mmec, fm]=meshgrid(0.2:0.2:40, 0.25:0.25:50);
% Wirkungsgradberechnung
[eta, Us, s]=Rech_Optim_M_Fm(p, Rs, Lts, Rfer, Lh, Lptr, Rpr, Mmec, fm, saturation);
% Drehzah
Omega_rot=(fm.*2.*pi)./p;

%-----
% Berechnung
[eta_temp, Pmec_temp]=RechercheEta_pour_PmecConnu(eta, Mmec, Omega_rot);
[eta_f10, Pmec_f10, M_f10, Us_f10, s_f10, fm_f10]=RechercheEta_pour_fmecConnu(eta, Mmec, fm, p, vnom, 10, Us, s);
[eta_f30, Pmec_f30, M_f30, Us_f30, s_f30, fm_f30]=RechercheEta_pour_fmecConnu(eta, Mmec, fm, p, vnom, 30, Us, s);
[eta_f50, Pmec_f50, M_f50, Us_f50, s_f50, fm_f50]=RechercheEta_pour_fmecConnu(eta, Mmec, fm, p, vnom, 50, Us, s);
[eta_f100, Pmec_f100, M_f100, Us_f100, s_f100, fm_f100]=RechercheEta_pour_fmecConnu(eta, Mmec, fm, p, vnom, 100, Us, s);
;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Verhalten mit einem Frequenzumrichter (Nennfluss)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Frequenz 1 à 50Hz
% Drehmoment 0.5 à 40Nm
[Mmec3, fm3]=meshgrid(0.2:0.2:40, 0.25:0.25:50);

% Wirkungsgradberechnung
[eta3, Us3, s3, ecart3]=Rech_Optim_Flux(p, Rs, Lts, Rfer, Lh, Lptr, Rpr, Mmec3, fm3, Pnom, vnom, saturation, fnom);

% Drehzah
Omega_rot3=(fm3.*2.*pi)./p;

[eta_Flux_f10, Pmec_Flux_f10, M_Flux_f10, Us_Flux_f10, s_Flux_f10, fm_Flux_f10]=RechercheEta_pour_fmecConnu(eta3, Mmec3, fm3, p, vnom, 10, Us3, s3);
[eta_Flux_f30, Pmec_Flux_f30, M_Flux_f30, Us_Flux_f30, s_Flux_f30, fm_Flux_f30]=RechercheEta_pour_fmecConnu(eta3, Mmec3, fm3, p, vnom, 30, Us3, s3);
[eta_Flux_f50, Pmec_Flux_f50, M_Flux_f50, Us_Flux_f50, s_Flux_f50, fm_Flux_f50]=RechercheEta_pour_fmecConnu(eta3, Mmec3, fm3, p, vnom, 50, Us3, s3);
[eta_Flux_f100, Pmec_Flux_f100, M_Flux_f100, Us_Flux_f100, s_Flux_f100, fm_Flux_f100]=RechercheEta_pour_fmecConnu(eta3, Mmec3, fm3, p, vnom, 100, Us3, s3);

%-----
% Zeichnung des Ergebnis
figure(1)
surf(Omega_rot, Mmec, eta, 'FaceColor', 'interp', 'EdgeColor', 'none', 'FaceLighting', 'phong')
xlabel('Drehzahl [rad/s]')
xlim([0 150])
ylabel('Drehmoment [Nm]')
zlabel('eta [%]')
title('Verhalten mit einen Frequenzumrichtern ( Beste Wirkungsgrad )')
%view([0 90])
view([0 90])
colorbar
figure(2)
surf(Omega_rot, Mmec, Us, 'FaceColor', 'interp', 'EdgeColor', 'none', 'FaceLighting', 'phong')
xlabel('Drehzahl [rad/s]')
ylabel('Drehmoment [Nm]')
zlabel('Us [V]')
title('Spannung [V]')
view([0 90])
colorbar
xlim([0 150])
figure(3)
```



```
surf(Omega_rot,Mmec,s,'FaceColor','interp','EdgeColor','none','FaceLighting','phong')
xlabel('Drehzahl [rad/s]')
ylabel('Drehmoment [Nm]')
zlabel('Schlupf [p.u.]')
title('Schlupf [p.u.]')
view([0 90])
colorbar
xlim([0 150])

figure(5)
surf(Omega_rot3,Mmec3,eta3,'FaceColor','interp')
xlabel('Drehzahl [rad/s]')
ylabel('Drehmoment [Nm]')
zlabel('eta [%]')
xlim([0 150])
figure(6)
surf(Omega_rot3,Mmec3,ecart3,'FaceColor','interp')
xlabel('Drehzahl [rad/s]')
ylabel('Drehmoment [Nm]')
xlim([0 150])
zlabel('Abstand den MagnetisierungFluss mit dem MagnetisierungnennFluss')
title('Verhalten mit einen Frequenzumrichtern ( Der Fluss ist konstant )')
colorbar
figure(7)
surf(Omega_rot3,Mmec3,s3,'FaceColor','interp','EdgeColor','none','FaceLighting','phong')
xlabel('Drehzahl [rad/s]')
ylabel('Drehmoment [Nm]')
xlim([0 150])
zlabel('s')
title('Schlupf [p.u.]')
view([0 90])
colorbar
figure(8)
surf(Omega_rot3,Mmec3,Us3,'FaceColor','interp','EdgeColor','none','FaceLighting','phong')
xlabel('Drehzahl [rad/s]')
ylabel('Drehmoment [Nm]')
xlim([0 150])
zlabel('Us [V]')
title('Spannung [V]')
view([0 90])
colorbar

%-----
%%
Messungen=get(0,'ScreenSize');
fnom=50;
Mref=Snom*p/(2*pi*fnom);
M_f10_pu=M_f10./Mref;
M_Flux_f10_pu=M_Flux_f10./Mref;
M_f100_pu=M_f100./Mref;
M_Flux_f100_pu=M_Flux_f100./Mref;
M_f30_pu=M_f30./Mref;
M_Flux_f30_pu=M_Flux_f30./Mref;
M_f50_pu=M_f50./Mref;
M_Flux_f50_pu=M_Flux_f50./Mref;
fnom=vnom*p/60;

% -----
figure('Position',Messungen,'Name','Spannung und Schlupf mit einem Drehmomentbereich
[p.u.]','NumberTitle','off')
subplot(4,2,1)
plot(M_f10_pu,Us_f10./Usnom,'b',M_Flux_f10_pu,Us_Flux_f10./Usnom,'r')
grid
xlabel('Drehmoment [p.u.]')
ylabel('Spannung [p.u.]')
legend('eta_m_a_x','Nennfluss')
title('Drehzahl: 10% der Nenndrehzahl');
xlim([0 1]);
ylim([0 1]);
subplot(4,2,3)
plot(M_f30_pu,Us_f30./Usnom,'b',M_Flux_f30_pu,Us_Flux_f30./Usnom,'r')
grid
xlabel('Drehmoment [p.u.]')
ylabel('Spannung [p.u.]')
legend('eta_m_a_x','Nennfluss')
title('Drehzahl: 30% der Nenndrehzahl');
xlim([0 1]);
ylim([0 1]);
subplot(4,2,5)
plot(M_f50_pu,Us_f50./Usnom,'b',M_Flux_f50_pu,Us_Flux_f50./Usnom,'r')
grid
xlabel('Drehmoment [p.u.]')
ylabel('Spannung [p.u.]')
legend('eta_m_a_x','Nennfluss')
title('Drehzahl: 50% der Nenndrehzahl');
xlim([0 1]);
ylim([0 1]);
subplot(4,2,7)
```



```
plot(M_f100_pu,Us_f100./Usnom,'b',M_Flux_f100_pu,Us_Flux_f100./Usnom,'r')
grid
xlabel('Drehmoment [p.u.]')
ylabel('Spannung [p.u.]')
legend('eta_m_a_x','Nennfluss')
title('Drehzahl: 100% der Nenndrehzahl');
xlim([0 1]);
ylim([0 1]);
subplot(4,2,2)
plot(M_f10_pu,fnom.*0.1./(1-s_f10),'b',M_Flux_f10_pu,fnom.*0.1./(1-s_Flux_f10),'r')
grid
xlabel('Drehmoment [p.u.]')
ylabel('Frequenz [Hz]')
legend('eta_m_a_x','Nennfluss')
title('Drehzahl: 10% der Nenndrehzahl');
xlim([0 1]);
subplot(4,2,4)
plot(M_f30_pu,fnom.*0.3./(1-s_f30),'b',M_Flux_f30_pu,fnom.*0.3./(1-s_Flux_f30),'r')
grid
xlabel('Drehmoment [p.u.]')
ylabel('Frequenz [Hz]')
legend('eta_m_a_x','Nennfluss')
title('Drehzahl: 30% der Nenndrehzahl');
xlim([0 1]);
subplot(4,2,6)
plot(M_f50_pu,fnom.*0.5./(1-s_f50),'b',M_Flux_f50_pu,fnom.*0.5./(1-s_Flux_f50),'r')
grid
xlabel('Drehmoment [p.u.]')
ylabel('Frequenz [Hz]')
legend('eta_m_a_x','Nennfluss')
title('Drehzahl: 50% der Nenndrehzahl');
xlim([0 1]);
subplot(4,2,8)
plot(M_f100_pu,fnom./(1-s_f100),'b',M_Flux_f100_pu,fnom./(1-s_Flux_f100),'r')
grid
xlabel('Drehmoment [p.u.]')
ylabel('Frequenz [Hz]')
legend('eta_m_a_x','Nennfluss')
title('Drehzahl: 100% der Nenndrehzahl');
xlim([0 1]);

% -----
%%
Messungen=get(0,'ScreenSize');
fnom=50;
Mref=Snom*p/(2*pi*fnom);
M_f10_pu=M_f10./Mref;
M_Flux_f10_pu=M_Flux_f10./Mref;
M_f100_pu=M_f100./Mref;
M_Flux_f100_pu=M_Flux_f100./Mref;
M_f30_pu=M_f30./Mref;
M_Flux_f30_pu=M_Flux_f30./Mref;
M_f50_pu=M_f50./Mref;
M_Flux_f50_pu=M_Flux_f50./Mref;

fnom=vnom*p/60;
figure('Position',Messungen,'Name','Spannung und Schlupf mit einem Drehmomentbereich
[p.u.]','NumberTitle','off')
subplot(4,2,1)
plot(M_f10_pu,Us_f10./Usnom,'b',M_Flux_f10_pu,Us_Flux_f10./Usnom,'r')
grid
xlabel('Drehmoment [p.u.]')
ylabel('Spannung [p.u.]')
legend('eta_m_a_x','Nennfluss')
title('Drehzahl: 10% der Nenndrehzahl');
xlim([0 1]);
ylim([0 1]);

subplot(4,2,3)
plot(M_f30_pu,Us_f30./Usnom,'b',M_Flux_f30_pu,Us_Flux_f30./Usnom,'r')
grid
xlabel('Drehmoment [p.u.]')
ylabel('Spannung [p.u.]')
legend('eta_m_a_x','Nennfluss')
title('Drehzahl: 30% der Nenndrehzahl');
xlim([0 1]);
ylim([0 1]);

subplot(4,2,5)
plot(M_f50_pu,Us_f50./Usnom,'b',M_Flux_f50_pu,Us_Flux_f50./Usnom,'r')
grid
xlabel('Drehmoment [p.u.]')
ylabel('Spannung [p.u.]')
legend('eta_m_a_x','Nennfluss')
title('Drehzahl: 50% der Nenndrehzahl');
xlim([0 1]);
```



```
ylim([0 1]);

subplot(4,2,7)
plot(M_f100_pu,Us_f100./Usnom,'b',M_Flux_f100_pu,Us_Flux_f100./Usnom,'r')
grid
xlabel('Drehmoment [p.u.]')
ylabel('Spannung [p.u.]')
legend('eta_m_a_x','Nennfluss')
title('Drehzahl: 100% der Nenndrehzahl');
xlim([0 1]);
ylim([0 1]);
subplot(4,2,2)
plot(M_f10_pu,fnom.*0.1.*s_f10,'b',M_Flux_f10_pu,fnom.*0.1.*s_Flux_f10,'r')
grid
xlabel('Drehmoment [p.u.]')
ylabel('Rotorfrequenz [Hz]')
legend('eta_m_a_x','Nennfluss')
title('Drehzahl: 10% der Nenndrehzahl');
xlim([0 1]);
subplot(4,2,4)
plot(M_f30_pu,fnom.*0.3.*s_f30,'b',M_Flux_f30_pu,fnom.*0.3.*s_Flux_f30,'r')
grid
xlabel('Drehmoment [p.u.]')
ylabel('Rotorfrequenz [Hz]')
legend('eta_m_a_x','Nennfluss')
title('Drehzahl: 30% der Nenndrehzahl');
xlim([0 1]);
subplot(4,2,6)
plot(M_f50_pu,fnom.*0.5.*s_f50,'b',M_Flux_f50_pu,fnom.*0.5.*s_Flux_f50,'r')
grid
xlabel('Drehmoment [p.u.]')
ylabel('Rotorfrequenz [Hz]')
legend('eta_m_a_x','Nennfluss')
title('Drehzahl: 50% der Nenndrehzahl');
xlim([0 1]);
subplot(4,2,8)
plot(M_f100_pu,fnom.*s_f100,'b',M_Flux_f100_pu,fnom.*s_Flux_f100,'r')
grid
xlabel('Drehmoment [p.u.]')
ylabel('Rotorfrequenz [Hz]')
legend('eta_m_a_x','Nennfluss')
title('Drehzahl: 100% der Nenndrehzahl');
xlim([0 1]);

%-----
%%

fnom=50;
Mref=Snom*p/(2*pi*fnom);
M_f10_pu=M_f10./Mref;
M_Flux_f10_pu=M_Flux_f10./Mref;
M_f100_pu=M_f100./Mref;
M_Flux_f100_pu=M_Flux_f100./Mref;
M_f30_pu=M_f30./Mref;
M_Flux_f30_pu=M_Flux_f30./Mref;
M_f50_pu=M_f50./Mref;
M_Flux_f50_pu=M_Flux_f50./Mref;
figure('Position',Messungen,'Name','Wirkungsgard mit einem Drehmomentbereich [p.u.]','NumberTitle','off')
subplot(4,1,1)
plot(M_f10_pu,eta_f10,'b',M_Flux_f10_pu,eta_Flux_f10,'r')
grid
xlabel('Drehmoment [p.u.]')
ylabel('Wirkungsgrad [%]')
legend('eta_m_a_x','Nennfluss')
title('Drehzahl: 10% der Nenndrehzahl');
xlim([0 1]);
ylim([0 100]);
subplot(4,1,2)
plot(M_f30_pu,eta_f30,'b',M_Flux_f30_pu,eta_Flux_f30,'r')
grid
xlabel('Drehmoment [p.u.]')
ylabel('Wirkungsgrad [%]')
legend('eta_m_a_x','Nennfluss')
title('Drehzahl: 30% der Nenndrehzahl');
xlim([0 1]);
ylim([0 100]);
subplot(4,1,3)
plot(M_f50_pu,eta_f50,'b',M_Flux_f50_pu,eta_Flux_f50,'r')
grid
xlabel('Drehmoment [p.u.]')
ylabel('Wirkungsgrad [%]')
legend('eta_m_a_x','Nennfluss')
title('Drehzahl: 50% der Nenndrehzahl');
xlim([0 1]);
ylim([0 100]);
subplot(4,1,4)
plot(M_f100_pu,eta_f100,'b',M_Flux_f100_pu,eta_Flux_f100,'r')
grid
```



```
xlabel('Drehmoment [p.u.]')
ylabel('Wirkungsgrad [%]')
legend('eta_m_a_x', 'Nennfluss')
title('Drehzahl: 100% der Nenndrehzahl');
xlim([0 1]);
ylim([0 100]);

%-----

%%

[eta7_f10,Us7,psy7_f10,Ih7,Uh7]=Calcul_Flux(p,Rs,Lts,Rfer,Lh,Lptr,Rpr,M_f10,fm_f10,s_f10,0);
[eta7_f10,Us7,psy7_Flux_f10,Ih7,Uh7]=Calcul_Flux(p,Rs,Lts,Rfer,Lh,Lptr,Rpr,M_Flux_f10,fm_Flux_f10,s_Flux_f10,0);
[eta7_f30,Us7,psy7_f30,Ih7,Uh7]=Calcul_Flux(p,Rs,Lts,Rfer,Lh,Lptr,Rpr,M_f30,fm_f30,s_f30,0);
[eta7_f30,Us7,psy7_Flux_f30,Ih7,Uh7]=Calcul_Flux(p,Rs,Lts,Rfer,Lh,Lptr,Rpr,M_Flux_f30,fm_Flux_f30,s_Flux_f30,0);
[eta7_f50,Us7,psy7_f50,Ih7,Uh7]=Calcul_Flux(p,Rs,Lts,Rfer,Lh,Lptr,Rpr,M_f50,fm_f50,s_f50,0);
[eta7_f50,Us7,psy7_Flux_f50,Ih7,Uh7]=Calcul_Flux(p,Rs,Lts,Rfer,Lh,Lptr,Rpr,M_Flux_f50,fm_Flux_f50,s_Flux_f50,0);
[eta7_f100,Us7,psy7_f100,Ih7,Uh7]=Calcul_Flux(p,Rs,Lts,Rfer,Lh,Lptr,Rpr,M_f100,fm_f100,s_f100,0);
[eta7_f100,Us7,psy7_Flux_f100,Ih7,Uh7]=Calcul_Flux(p,Rs,Lts,Rfer,Lh,Lptr,Rpr,M_Flux_f100,fm_Flux_f100,s_Flux_f100,0);
figure('Position',Messungen,'Name','Fluss mit einem Drehmomentbereich [p.u.]','NumberTitle','off')
subplot(4,1,1)
plot(M_f10./Mref,psy7_f10./0.7299,'b',M_Flux_f10./Mref,psy7_Flux_f10./0.7299,'r')
grid
xlabel('Drehmoment [p.u.]')
ylabel('Fluss [p.u.]')
legend('eta_m_a_x', 'Nennfluss')
title('Drehzahl: 10% der Nenndrehzahl');
xlim([0 1]);
ylim([0 2]);
subplot(4,1,2)
plot(M_f30./Mref,psy7_f30./0.7299,'b',M_Flux_f30./Mref,psy7_Flux_f30./0.7299,'r')
grid
xlabel('Drehmoment [p.u.]')
ylabel('Fluss [p.u.]')
legend('eta_m_a_x', 'Nennfluss')
title('Drehzahl: 30% der Nenndrehzahl');
xlim([0 1]);
ylim([0 2]);
subplot(4,1,3)
plot(M_f50./Mref,psy7_f50./0.7299,'b',M_Flux_f50./Mref,psy7_Flux_f50./0.7299,'r')
grid
xlabel('Drehmoment [p.u.]')
ylabel('Fluss [p.u.]')
legend('eta_m_a_x', 'Nennfluss')
title('Drehzahl: 50% der Nenndrehzahl');
xlim([0 1]);
ylim([0 2]);
subplot(4,1,4)
plot(M_f100./Mref,psy7_f100./0.7299,'b',M_Flux_f100./Mref,psy7_Flux_f100./0.7299,'r')
grid
xlabel('Drehmoment [p.u.]')
ylabel('Fluss [p.u.]')
legend('eta_m_a_x', 'Nennfluss')
title('Drehzahl: 100% der Nenndrehzahl');
xlim([0 1]);
ylim([0 2]);

%-----
%-----
%-----
function [eta,Us,s,ecart]=Rech_Optim_Flux(p,Rs,Lts,Rfer,Lh,Lptr,Rpr,Mmec,fm,Pnom,vnom,saturation,fnom)
% Schupfbereich 0.001 bis 50%
s_Plage=linspace(0.0001,0.5,5000);
eta=zeros(200,200);
Us =zeros(200,200);
s =zeros(200,200);
psy=zeros(200,200);
ecart=zeros(200,200);
[eta_n,psy_n,Ih_n,Uh_n]=Calcul_psy_nom(p,Rs,Lts,Rfer,Lh,Lptr,Rpr,Pnom,230,fnom,vnom,saturation)
for f=1:200
    for m=1:200
        [eta_temp,Us_temp,psy_temp]=Calcul_Flux_eta(p,Rs,Lts,Rfer,Lh,Lptr,Rpr,Mmec(f,m),fm(f,m),s_Plage,saturation)
        ;
        best_ecart=99999999;
        ecart_temp=0;
        for n=1:5000
            if(psy_temp(n)>=psy_n)
                ecart_temp=psy_temp(n)-psy_n;
            end
            if(psy_temp(n)<psy_n)
                ecart_temp=psy_n-psy_temp(n);
            end
        end
    end
end
```



```
        if(ecart_temp<best_ecart && Us_temp(n)<=230)
            best_ecart=ecart_temp;
            eta(f,m)=eta_temp(n);
            Us(f,m)=Us_temp(n);
            s(f,m)=s_Plage(n);
            psy(f,m)=psy_temp(n);
        end
    end
    if(best_ecart==9999999)
        ecart(f,m)=-1;
    else
        ecart(f,m)=best_ecart;
    end
end
end
end

%-----
%-----
%-----
function [eta,Us,s]=Rech_Optim_M_Fm(p,Rs,Lts,Rfer,Lh,Lptr,Rpr,Mmec,fm,saturation)
% Schupfbereich 0.001 bis 50%
s_Plage=linspace(0.0001,0.5,5000);
eta=zeros(200,200);
Us =zeros(200,200);
s =zeros(200,200);
for f=1:200
    for m=1:200
        [eta_temp,Us_temp]=Calcul_1_etat3(p,Rs,Lts,Rfer,Lh,Lptr,Rpr,Mmec(f,m),fm(f,m),s_Plage,saturation);
        best_eta=0;
        for n=1:5000
            if(eta_temp(n)>best_eta && Us_temp(n)<=230)
                best_eta=eta_temp(n);
                eta(f,m)=best_eta;
                Us(f,m)=Us_temp(n);
                s(f,m)=s_Plage(n);
            end
        end
    end
end
end
end

%-----
%-----
%-----
function [eta,Us]=Calcul_1_etat3(p,Rs,Lts,Rfer,Lh,Lptr,Rpr,Mmec,fmec,s,saturation)
f=fmec./(1-s);
% Drehzahl
wmec=fmec.*2.*pi./p;
% Belastung
Pmec=Mmec.*wmec;
Mmec=Mmec+0.2387+(7.0635*10^-4+4.3676*10^-4).*wmec;
Xts =Lts*2.*pi.*f;
Xptr=Lptr*2.*pi.*f;
Uh=abs(sqrt(Mmec.*s.*wmec./(3.*(1-s).*Rpr)).*(Rpr./s+i.*Xptr));
[Rfer,Lh]=Recherche_Rfer_Lh(Uh,saturation);
Xh =Lh.*2.*pi.*f;
taille=size(s);
taille=taille(2);
Ir=zeros(1,taille);
Ifer=zeros(1,taille);
Ih=zeros(1,taille);
Is=zeros(1,taille);
Us=zeros(1,taille);
eta=zeros(1,taille);
for cp=1:taille

    if(Rfer(cp)>0 && Lh(cp)>0)
        Ir(cp)=Uh(cp)./(i.*Xptr(cp)+Rpr./s(cp));
        Ifer(cp)=Uh(cp)./Rfer(cp);
        Ih(cp)=Uh(cp)./(i.*Xh(cp));
        Is(cp)=Ir(cp)+Ifer(cp)+Ih(cp);
        Us(cp)=Uh(cp)+Is(cp).*(Rs+i.*Xts(cp));
        S=3*Us(cp).*conj(Is(cp));
        eta(cp)=Pmec./real(S)*100;
        Us(cp)=abs(Us(cp));
    else
        eta(cp)=0;
        Us(cp)=8000;
    end
end
end
end
```



```
%-----  
%-----  
%-----  
function [eta,Us]=Calcul_etat(Rs,Lts,Rfer,Lh,Lptr,Rpr,Pmec,s,f)  
Xts=Lts*2*pi.*f;  
Xh=Lh*2*pi.*f;  
Xptr=Lptr*2*pi.*f;  
Ze=(Rfer.*i.*Xh.*(Rs+i.*Xts))./(Rs+i.*Xts).*Rfer+(Rs+i.*Xts).*i.*Xh+Rfer.*i.*Xh);  
Re=real(Ze);  
Xe=imag(Ze);  
Pd=Pmec./(1-s);  
Ue=sqrt((Pd.*(Re+Rpr./s).^2+(Xe+Xptr).^2).*s)/(3*Rpr));  
Us=abs(Ue.*(Rfer.*i.*Xh)/(Rfer+i.*Xh)+Rs+i.*Xts)/((Rfer.*i.*Xh)/(Rfer+i.*Xh));  
Is=Us./(Rs+i.*Xts+(Rfer.*i.*Xh.*(Rpr./s+i.*Xptr))./(Rpr./s+i.*Xptr).*Rfer+(Rpr./s+i.*Xptr).^j.*Xh+Rfer.*i.*Xh));  
S=3*Us.*conj(Is);  
eta=Pmec./real(S)*100;  
end  
  
%-----  
%-----  
%-----  
function [eta,Us,psy,Ih,Uh]=Calcul_Flux(p,Rs,Lts,Rfer,Lh,Lptr,Rpr,Mmec,fmec,s,saturation)  
f=fmec./(1-s);  
wmec=fmec.*2.*pi./p;  
Pmec=Mmec.*wmec;  
Mmec=Mmec+0.2387+(7.0635*10^-4+4.3676*10^-4).*wmec;  
Xts=Lts*2*pi.*f;  
Xptr=Lptr*2*pi.*f;  
wmec=fmec.*2.*pi./p;  
Uh=abs(sqrt(Mmec.*s.*wmec)/(3.*(1-s).*Rpr)).*(Rpr./s+i.*Xptr));  
[Rfer,Lh]=Recherche_Rfer_Lh(Uh,saturation);  
Xh=Lh.*2.*pi.*f;  
Ir=Uh./(i.*Xptr+Rpr./s);  
Ifer=Uh./Rfer;  
Ih=Uh./(i.*Xh);  
Is=Ir+Ifer+Ih;  
Us=Uh+Is.*(Rs+i.*Xts);  
S=3*Us.*conj(Is);  
eta=Pmec./real(S)*100;  
Us=abs(Us);  
psy=Lh.*abs(Ih);  
end  
  
%-----  
%-----  
%-----  
function [eta,Us,psy,Ih,Uh]=Calcul_Flux_eta(p,Rs,Lts,Rfer,Lh,Lptr,Rpr,Mmec,fmec,s,saturation)  
f=fmec./(1-s);  
wmec=fmec.*2.*pi./p;  
Pmec=Mmec.*wmec;  
Mmec=Mmec+0.2387+(7.0635*10^-4+4.3676*10^-4).*wmec;  
Xts=Lts*2*pi.*f;  
Xptr=Lptr*2*pi.*f;  
Uh=abs(sqrt(Mmec.*s.*wmec)/(3.*(1-s).*Rpr)).*(Rpr./s+i.*Xptr));  
[Rfer,Lh]=Recherche_Rfer_Lh(Uh,saturation);  
Xh=Lh.*2.*pi.*f;  
taille=size(s);  
taille=taille(2);  
Ir=zeros(1,taille);  
Ifer=zeros(1,taille);  
Ih=zeros(1,taille);  
Is=zeros(1,taille);  
Us=zeros(1,taille);  
eta=zeros(1,taille);  
psy=zeros(1,taille);  
for cp=1:taille  
if (Rfer(cp)>0 && Lh(cp)>0)  
Ir(cp)=Uh(cp)/(i.*Xptr(cp)+Rpr./s(cp));  
Ifer(cp)=Uh(cp)/Rfer(cp);  
Ih(cp)=Uh(cp)/(i.*Xh(cp));  
Is(cp)=Ir(cp)+Ifer(cp)+Ih(cp);  
Us(cp)=Uh(cp)+Is(cp).(Rs+i.*Xts(cp));  
S=3*Us(cp).*conj(Is(cp));  
eta(cp)=Pmec./real(S)*100;  
Us(cp)=abs(Us(cp));  
psy(cp)=Lh(cp)*abs(Ih(cp));  
else  
eta(cp)=0;  
Us(cp)=8000;  
psy(cp)=-1;  
end  
end  
end
```



```
%-----  
%-----  
%-----  
function [etat_correspondant]=Recherche_Best_Eta_pour_Drehzahlbereich(eta,Mmec,fm,p,vnom,w_ref)  
M=Mmec(1,:);  
fm=fm(:,1)';  
w_Arechercher=(vnom.*w_ref)*p/60;  
etat_correspondant=zeros(1,size(w_Arechercher,2));  
for m=1:size(w_Arechercher,2)  
    best_pr_vitesse=0;  
    best_pr_eta=0;  
    best_pr_moment=0;  
    for n=1:200  
        if w_Arechercher(m)>=fm(n)  
            best_pr_vitesse=n;  
        end  
    end  
    for n=1:200  
        if eta(best_pr_vitesse,n)>=best_pr_eta  
            best_pr_eta=eta(best_pr_vitesse,n);  
            best_pr_moment=n;  
        end  
    end  
    etat_correspondant(m)=eta(best_pr_vitesse,best_pr_moment);  
end  
end  
  
%-----  
%-----  
%-----  
function [eta,psy,Ih,Uh]=Calcul_psy_nom(p,Rs,Lts,Rfer,Lh,Lptr,Rpr,Pmec,Us,f,vnom,saturation)  
s=((f.*60./p)-vnom)./(f.*60./p);  
wmec=vnom./60.*2.*pi;  
Mmec=Pmec./wmec;  
Xts=Lts*2*pi.*f;  
Xptr=Lptr*2*pi.*f;  
Uh=abs(sqrt(Mmec.*s.*wmec./(3.*(1-s).*Rpr)).*(Rpr./s+i.*Xptr))  
[Rfer,Lh]=Recherche_Rfer_Lh(Uh,saturation)  
Xh=Lh.*2.*pi.*f;  
    Ir=Uh./(i.*Xptr+Rpr./s);  
    Ifer=Uh./Rfer;  
    Ih=Uh./(i.*Xh);  
    Is=Ir+Ifer+Ih;  
    Us=Uh+Is.*(Rs+i.*Xts);  
    S=3*Us.*conj(Is);  
    eta=Pmec./real(S)*100;  
    psy=Lh.*abs(Ih)  
end  
  
%-----  
%-----  
%-----  
function [Rfer,Lh]=Recherche_Rfer_Lh(Uh,saturation)  
if(saturation==1)  
    taille=size(Uh);  
    taille=taille(2);  
    Rfer=zeros(1,taille);  
    Lh=zeros(1,taille);  
    for u=1:taille  
        if(Uh(u)<=62.27310847)  
            Lh(u)=0.157;  
        else  
            Lh(u)=-2e-8.*Uh(u).^3+4e-6.*Uh(u).^2-3e-4.*Uh(u)+0.1647;  
            if(Lh(u)<0)  
                Lh(u)=0;  
            end  
        end;  
    end;  
    if(Uh(u)<=165.468)  
        Rfer(u)=765.755836;  
    else  
        Rfer(u)=-0.0902.*Uh(u).^2+29.81.*Uh(u)-1697.2;  
        if(Rfer(u)<0)  
            Rfer(u)=0;  
        end  
    end;  
end  
end  
else  
    taille=size(Uh);  
    taille=taille(2);  
    Rfer=765.755836*ones(1,taille);  
    Lh= 0.157*ones(1,taille);  
end  
end
```



```
%-----  
%-----  
%-----  
function [etat_correspondant]=RechercheEta_pour_Drehzahlbereich(eta,Mmec,fm,p,vnom,M_ref,w_ref)  
M=Mmec(1,:);  
fm=fm(:,1)';  
M_Arechercher=M_ref.*(5500/(vnom/60*2*pi));  
w_Arechercher=(vnom.*w_ref)*p/60;  
etat_correspondant=zeros(1,size(M_Arechercher,2));  
for m=1:size(M_Arechercher,2)  
    best_pr_vitesse=0;  
    best_pr_Moment=0;  
    for n=1:200  
        if w_Arechercher(m)>=fm(n)  
            best_pr_vitesse=n;  
        end  
    end  
    for n=1:200  
        if M_Arechercher(m)<=M(n)  
            best_pr_Moment=n;  
        end  
    end  
    etat_correspondant(m)=eta(best_pr_vitesse,best_pr_Moment);  
end  
end  
  
%-----  
%-----  
%-----  
Rs=0.91744;  
w=[100 150 200 300 400 500 700 900 1100 1300 1500];  
out=1.3.*w./60.*2.*pi;  
in=[56.58 65.88 79.93 106.7 131.17 161.37 216.2 275.9 331.5 400.8 462.2];  
i=[2.397 2.182 2.207 2.286 2.38 2.42 2.574 2.776 2.924 3.152 3.417];  
inV=[56.2 65.47 80.58 106.26 132.32 158.26 213.4 275.2 332 409.4 480.3];  
iV=[2.36 2.221 2.217 2.258 2.31 2.268 2.393 2.667 2.869 3.234 3.529];  
perteOHNE=in-out;  
perteMIT=inV-out;  
perteV=inV-in;  
perteSANS=perteOHNE-3.*i.^2.*Rs*1.2;  
perteAVEC=perteMIT-3.*iV.^2.*Rs*1.2;  
figure(3)  
plot(w,perteAVEC,'o-')  
xlim([0 1500])  
hold on  
plot(w,perteSANS,'ro')  
grid  
xlabel('Drehzahl [rpm]')  
ylabel('Verluste [W]')  
title('Verluste')  
legend('Mit Ventilator','Ohne Ventilator')  
figure(48)  
plot(w,in,'ro-')  
hold on  
plot(w,inV,'o-')  
plot(w,out,'go-')  
grid  
xlabel('Drehzahl [rpm]')  
ylabel('Leistung [W]')  
title('Leistungen')  
legend('Elektrische Leistung ohne Aussenventilator','Elektrische Leistung mit Aussenventilator','Belastung')  
figure(44)  
plot(w(1:5),perteSANS(1:5),'bx')  
grid  
hold on  
plot(w,perteSANS,'ro-')  
ylim([0 250])  
sigmaH=3;  
sigmaW=8;  
d=0.5;  
f=(50*w./1465);  
beta=sigmaH.*f./100+sigmaW.*(f./100.*d).^2;  
gamma=beta./beta(size(beta,2))  
PerteFER=152.*gamma;  
plot(w,PerteFER,'bo-')  
grid  
xlabel('Drehzahl [rpm]')  
ylabel('Verluste [W]')  
title('Eisenverluste')  
PerteSansFER=perteSANS-PerteFER;  
figure(45)  
plot(w(1:5),PerteSansFER(1:5),'bx')  
hold on  
plot(w,PerteSansFER,'ro-')  
ylim([0 80])  
d=linspace(0,1500,100);  
dd=d.*0.025+13;
```



```
plot(d,dd,'b')
grid
xlabel('Drehzahl [rpm]')
ylabel('Verluste [W]')
title('Reibungs- und Innenventilatorverluste')
legend('Reibungs- und Innenventilatorverluste','Reibungsverluste')
Inconnu=15
PerteReibung=0.025.*w;
PerteVentilInterne=PerteSansFER-PerteReibung-Inconnu;
figure(5)
subplot(4,1,1)
plot(w,PerteReibung)
grid
xlabel('Drehzahl [rpm]')
ylabel('Verluste [W]')
title('Reibungsverluste')
w2=[0 w]';
I=(w2.^2);
y=[0 (PerteVentilInterne)]';
O=( (I.*I)^-1*I' )*y;
sortie=O.*I;
subplot(4,1,2)
plot(w2,sortie,'x-')
hold on
plot(w,PerteVentilInterne,'mo')
grid
xlabel('Drehzahl [rpm]')
ylabel('Verluste [W]')
title('Verluste Innenventilator')
ylim([-3 20])
yy=[0 (perteAVEC-perteSANS)]';
OO=( (I.*I)^-1*I' )*yy;
sortie2=OO.*I;
subplot(4,1,3)
plot(w2,sortie2,'x-')
hold on
plot(w,perteAVEC-perteSANS,'mo')
grid
xlabel('Drehzahl [rpm]')
ylabel('Verluste [W]')
title('Verluste Aussenventilator')
ylim([-3 20])
subplot(4,1,4)
grid
hold on
plot(w,PerteSansFER+(perteAVEC-perteSANS)-Inconnu,'mo')
PerteMecCalcul=sortie+sortie2+[0 (PerteReibung)]';
plot(w2,PerteMecCalcul)
xlabel('Drehzahl [rpm]')
ylabel('Verluste [W]')
title('Vergleich der mechanischen Verluste')
figure(6)
plot(w2,sortie+sortie2+[0 (PerteReibung)]','k--')
grid
xlabel('Drehzahl [rpm]')
ylabel('Verluste [W]')
title('Reibung- und Ventilatorverluste')
figure(49)
s=sortie+sortie2+[0 (PerteReibung)]'+[0 (PerteFER)]'+Inconnu;
plot(w2,s,'bx-')
hold on
plot(w,perteAVEC,'mo')
grid
xlabel('Drehzahl [rpm]')
ylabel('Verluste [W]')
title('Vergleich')
```



```
%-----  
%-----  
%-----  
[Eco_satur,Eco_pas_satur]=Calcul_economie(100,40)  
Calcul_economie_RegarResult(100,40,M_f100_pu,diff_wirk_f100,Pas_diff_wirk_f100)  
x=linspace(0,0.9,50);  
y=polyval(p,x);  
for n=1:50  
    if x(n)>0.83  
        y(n)=0;  
    end  
end  
plot(M_f100_pu_Mit,diff_wirk_f100_Mit,'r')  
hold on  
plot(x,y,'g')  
x2=linspace(0,0.9,50);  
y2=polyval(p2,x);  
for n=1:50  
    if x2(n)>0.83  
        y2(n)=0;  
    end  
end  
plot(M_f100_pu,diff_wirk_f100,'b')  
hold on  
plot(x2,y2,'m')  
grid  
xlabel('Drehmoment [p.u.]');  
ylabel('delta eta [%]');  
title('Drehzahl: 100% der Nenndrehzahl')  
legend('Ergebnis: Mit Sättigung','Gleichung: Mit Sättigung','Ergebnis: Ohne Sättigung','Gleichung: Ohne Sättigung')  
Gwh_Art=100;  
Prozent_BeeliGauss_Mittel=40;  
[Eco_satur,Eco_pas_satur,Eco_sat_vec,Eco_Pas_sat_vec]=Calcul_economie(Gwh_Art,Prozent_BeeliGauss_Mittel,p,p2);  
xx=linspace(0,110,7000);  
[Eco_satur_Resu,Eco_pas_satur_Resu,Eco_sat_vec_Resu,Eco_Pas_sat_vec_Resu]=Calcul_economie_RegarResult(Gwh_Art,Prozent_BeeliGauss_Mittel,M_f100_pu,diff_wirk_f100_Mit,diff_wirk_f100);  
plot(xx,Eco_sat_vec,'b',M_f100_pu.*100,Eco_sat_vec_Resu,'r')  
hold on  
plot(xx,Eco_Pas_sat_vec,'b',M_f100_pu.*100,Eco_Pas_sat_vec_Resu,'r')  
grid  
xlabel('Teillast [%]');  
ylabel('Potential des Gewinns [%]');  
legend('Mit Gleichung der Kurve und mit Sättigung','Mit Gleichung der Kurve und ohne Sättigung','Mit Punkte der Ergebnisse von Matlab und mit Sättigung','Mit Punkte der Ergebnisse von Matlab und ohne Sättigung');  
x=linspace(0,110,7000);  
b=Prozent_BeeliGauss_Mittel;  
y1=(1+cos(x.*pi./b-pi))/1.1;  
y2=(1+cos((x-b).*pi./(110-b)))/1.1;  
y1=y1./100.*Gwh_Art;  
y2=y2./100.*Gwh_Art;  
for n=1:7000  
    if x(n)<=Prozent_BeeliGauss_Mittel  
        y(n)=y1(n);  
    else  
        y(n)=y2(n);  
    end  
end  
[AX,H1,H2]=plotyy(M_f100_pu.*100,diff_wirk_f100_Mit,x,y);  
hold on  
plot(M_f100_pu.*100,diff_wirk_f100,':')  
  
set(get(gca,'YLabel'),'String','delta eta [%]')  
set(get(AX(2),'YLabel'),'String','[%]')  
grid  
legend('Statistikverteilungskurve','Gewinn mit Sättigung','Gewinn ohne Sättigung')  
xlabel('Teillast [%]');  
Gwh_Art=100;  
Messungen=get(0,'ScreenSize');  
figure('Position',Messungen,'Name','chien','NumberTitle','off')  
subplot(2,2,1)  
Prozent_BeeliGauss_Mittel=40;  
[Eco_satur,Eco_pas_satur,Eco_sat_vec,Eco_Pas_sat_vec]=Calcul_economie(Gwh_Art,Prozent_BeeliGauss_Mittel,p,p2);  
xx=linspace(0,110,7000);  
[Eco_satur_Resu,Eco_pas_satur_Resu,Eco_sat_vec_Resu,Eco_Pas_sat_vec_Resu]=Calcul_economie_RegarResult(Gwh_Art,Prozent_BeeliGauss_Mittel,M_f100_pu,diff_wirk_f100_Mit,diff_wirk_f100);  
plot(xx,Eco_sat_vec,'b',M_f100_pu.*100,Eco_sat_vec_Resu,'r')  
hold on  
plot(xx,Eco_Pas_sat_vec,'b',M_f100_pu.*100,Eco_Pas_sat_vec_Resu,'r')  
grid  
xlabel('Teillast [%]');  
ylabel('Potential des Gewinns [%]');  
legend('Mit Gleichung der Kurve und mit Sättigung','Mit Gleichung der Kurve und ohne Sättigung','Mit Punkte der Ergebnisse von Matlab und mit Sättigung','Mit Punkte der Ergebnisse von Matlab und ohne Sättigung');  
title({'Leistungsklasse < 100kW'; 'Mittel der Auslastung: 40%'});  
ylim([-0.01 0.13])
```



```
subplot(2,2,2)
Prozent_BeeliGauss_Mittel=60;
[Eco_satur,Eco_pas_satur,Eco_sat_vec,Eco_Pas_sat_vec]=Calcul_economie(Gwh_Art,Prozent_BeeliGauss_Mittel,p,p
2);
xx=linspace(0,110,7000);
[Eco_satur_Resu,Eco_pas_satur_Resu,Eco_sat_vec_Resu,Eco_Pas_sat_vec_Resu]=Calcul_economie_RegarResult(Gwh_A
rt,Prozent_BeeliGauss_Mittel,M_f100_pu,diff_wirk_f100_Mit,diff_wirk_f100);
plot(xx,Eco_sat_vec,'b',M_f100_pu.*100,Eco_sat_vec_Resu,'r')
hold on
plot(xx,Eco_Pas_sat_vec,'b',M_f100_pu.*100,Eco_Pas_sat_vec_Resu,'r:')
grid
xlabel('Teillast [%]');
ylabel('Potential des Gewinns [%]');
legend('Mit Gleichung der Kurve und mit Sättigung','Mit Gleichung der Kurve und ohne Sättigung','Mit Punkte
der Ergebnisse von Matlab und mit Sättigung','Mit Punkte der Ergebnisse von Matlab und ohne Sättigung');
title({'Leistungsklasse < 100kW bis 1''000kW'; 'Mittel der Auslastung: 60%'})
ylim([-0.01 0.13])
subplot(2,2,3)
Prozent_BeeliGauss_Mittel=80;
[Eco_satur,Eco_pas_satur,Eco_sat_vec,Eco_Pas_sat_vec]=Calcul_economie(Gwh_Art,Prozent_BeeliGauss_Mittel,p,p
2);
xx=linspace(0,110,7000);
[Eco_satur_Resu,Eco_pas_satur_Resu,Eco_sat_vec_Resu,Eco_Pas_sat_vec_Resu]=Calcul_economie_RegarResult(Gwh_A
rt,Prozent_BeeliGauss_Mittel,M_f100_pu,diff_wirk_f100_Mit,diff_wirk_f100);
plot(xx,Eco_sat_vec,'b',M_f100_pu.*100,Eco_sat_vec_Resu,'r')
hold on
plot(xx,Eco_Pas_sat_vec,'b',M_f100_pu.*100,Eco_Pas_sat_vec_Resu,'r:')
grid
xlabel('Teillast [%]');
ylabel('Potential des Gewinns [%]');
legend('Mit Gleichung der Kurve und mit Sättigung','Mit Gleichung der Kurve und ohne Sättigung','Mit Punkte
der Ergebnisse von Matlab und mit Sättigung','Mit Punkte der Ergebnisse von Matlab und ohne Sättigung');
title({'Leistungsklasse 1''000kW bis 10''000kW'; 'Mittel der Auslastung: 80%'})
ylim([-0.01 0.13])
subplot(2,2,4)
Prozent_BeeliGauss_Mittel=90;
[Eco_satur,Eco_pas_satur,Eco_sat_vec,Eco_Pas_sat_vec]=Calcul_economie(Gwh_Art,Prozent_BeeliGauss_Mittel,p,p
2);
xx=linspace(0,110,7000);
[Eco_satur_Resu,Eco_pas_satur_Resu,Eco_sat_vec_Resu,Eco_Pas_sat_vec_Resu]=Calcul_economie_RegarResult(Gwh_A
rt,Prozent_BeeliGauss_Mittel,M_f100_pu,diff_wirk_f100_Mit,diff_wirk_f100);
plot(xx,Eco_sat_vec,'b',M_f100_pu.*100,Eco_sat_vec_Resu,'r')
hold on
plot(xx,Eco_Pas_sat_vec,'b',M_f100_pu.*100,Eco_Pas_sat_vec_Resu,'r:')
grid
xlabel('Teillast [%]');
ylabel('Potential des Gewinns [%]');
legend('Mit Gleichung der Kurve und mit Sättigung','Mit Gleichung der Kurve und ohne Sättigung','Mit Punkte
der Ergebnisse von Matlab und mit Sättigung','Mit Punkte der Ergebnisse von Matlab und ohne Sättigung');
title({'Leistungsklasse > 10''000kW'; 'Mittel der Auslastung: 90%'})
ylim([-0.01 0.13])

%-----
%-----
%-----
function
[Eco_satur,Eco_pas_satur,Eco_sat_vec,Eco_Pas_sat_vec]=Calcul_economie(Gwh_Art,Prozent_BeeliGauss_Mittel,p,p
2)
x=linspace(0,110,7000);
b=Prozent_BeeliGauss_Mittel;
y1=(1+cos(x.*pi./b-pi))/1.1;
y2=(1+cos((x-b).*pi./((110-b)))/1.1;
y1=y1./100.*Gwh_Art;
y2=y2./100.*Gwh_Art;
for n=1:7000
    if(x(n)<=Prozent_BeeliGauss_Mittel)
        y(n)=y1(n);
    else
        y(n)=y2(n);
    end
end
Gain_Satur=polyval(p,x./100)./100;
Gain_sans_Satur=polyval(p2,x./100)./100;
Eco_sat_vec=0;
Eco_Pas_sat_vec=0;
Eco_satur=0;
Eco_pas_satur=0;
for m=1:7000
    if(x(m)<=83)
        Eco_Pas_sat_vec(m)=Gain_sans_Satur(m)*y(m);
        Eco_pas_satur=Eco_pas_satur+Eco_Pas_sat_vec(m)*110/7000;
    else
        Eco_Pas_sat_vec(m)=0;
        Eco_pas_satur=Eco_pas_satur+Eco_Pas_sat_vec(m)*110/7000;
    end
end
if(x(m)<=83)
    Eco_sat_vec(m)=Gain_Satur(m)*y(m);
    Eco_satur=Eco_satur+Eco_sat_vec(m)*110/7000;
```



```
    else
        Eco_sat_vec(m)=0;
        Eco_satur=Eco_satur+Eco_sat_vec(m)*110/7000;
    end
end
end

%-----
%-----
%-----
function
[Eco_satur,Eco_pas_satur,Eco_sat_vec,Eco_Pas_sat_vec]=Calcul_economie_RegarResult(Gwh_Art,Prozent_BeeliGaus
s_Mittel,M_f100_pu,diff_wirk_f100,Pas_diff_wirk_f100)
xx=M_f100_pu.*100;
b=Prozent_BeeliGauss_Mittel;
y1=(1+cos(xx.*pi./b-pi))/1.1;
y2=(1+cos((xx-b).*pi./((110-b)))/1.1;
y1=y1./100.*Gwh_Art;
y2=y2./100.*Gwh_Art;
for n=1:200
    if(xx(n)<=Prozent_BeeliGauss_Mittel)
        y(n)=y1(n);
    else
        y(n)=y2(n);
    end
end
Gain_Satur=diff_wirk_f100./100;
Gain_sans_Satur=Pas_diff_wirk_f100./100;
Eco_sat_vec=0;
Eco_Pas_sat_vec=0;
Eco_satur=0;
Eco_pas_satur=0;
for m=1:200
    Eco_Pas_sat_vec(m)=Gain_sans_Satur(m)*y(m);
    Eco_pas_satur=Eco_pas_satur+Eco_Pas_sat_vec(m)*xx(200)/200;

    Eco_sat_vec(m)=Gain_Satur(m)*y(m);
    Eco_satur=Eco_satur+Eco_sat_vec(m)*xx(200)/200;
end
end
```