

Anhang zum Schlussbericht **Dezember 2004**

# **Hocheffizienter, getriebeloser Antrieb (Anhang)**

ausgearbeitet durch

Ralph Niederer  
Vivatec GmbH  
Steinenbachgässlein  
4051 Basel

Unter Mitarbeit von:  
Gebrüder Meier AG; 8105 Regensdorf  
Hochschule Wallis; 1950 Sion



# GENEOLE

## Génératrice à Polarité 38 et 40

## T A B L E   D E S   M A T I E R E S

	<u>PAGE</u>
<b>2. INTRODUCTION .....</b>	<b>3</b>
<b>3. GÉOMÉTRIE .....</b>	<b>3</b>
<b>4. COUPLE RELUCTANT .....</b>	<b>5</b>
<b>5. TENSION À VIDE.....</b>	<b>5</b>
5.1    MODELE 19/48.....	5
5.2    MODELE 20/48.....	7
<b>6. INDUCTANCES DANS LES AXES D ET Q.....</b>	<b>8</b>
6.1    DETERMINATION DES INDUCTANCES DE PHASE .....	8
6.2    CALCUL DE L' INDUCTANCE DANS L' AXE D .....	9
6.3    CALCUL DES INDUCTANCES DANS L' AXE Q .....	10
<b>7. ESSAI EN CHARGE.....</b>	<b>11</b>
7.1    COUPLE STATIQUE.....	11
7.2    TENSION EN CHARGE.....	12
7.3    DECALAGE DE LA ROUE POLAIRE EN CHARGE .....	13
7.4    RENDEMENT.....	14
7.4.1 <i>Valeurs des résistances</i> .....	14
7.4.2 <i>Valeurs pour les pertes fer</i> .....	14
7.4.3 <i>Calcul du rendement pour le cas de charge nominal</i> .....	15
<b>8. CONCLUSION .....</b>	<b>16</b>

## 2. INTRODUCTION

Suite au dimensionnement de la génératrice pour éolienne à 19 paires de pôles, il nous a été demandé de comparer une configuration de machine à 20 paires de pôles (ci-après modèle 20/48) à celle d'une machine comprenant 19 paires de pôles (ci-après 19/48). Le nombre d'encoches statoriques est de 48 dans les deux cas.

Dans ce rapport, nous comparerons différents résultats de simulation relatifs aux paramètres fondamentaux de la machine. Nous allons en particulier observer l'allure du couple relâchant, celle de la tension à vide et effectuer un essai en charge qui nous permettra de déterminer le rendement final de la génératrice.

## 3. GÉOMÉTRIE

La géométrie des deux machines est similaire, à l'exception du nombre de pôles rotoriques et de la distribution des phases dans les encoches. Les aimants rotoriques sont de type tangentiel. Les phases partielles sont bobinées autour des dents. L'empilage statorique provient du stock de la société Bartholdi. Il a été modifié au niveau de la profondeur d'encoche. Celle-ci passe ainsi de 27 à 32 mm. Le modèle 19/48 est représenté en figure 1. Les étoiles des tensions pour les modèles 19/48 et 20/48 sont représentées en figures 2 et 3.

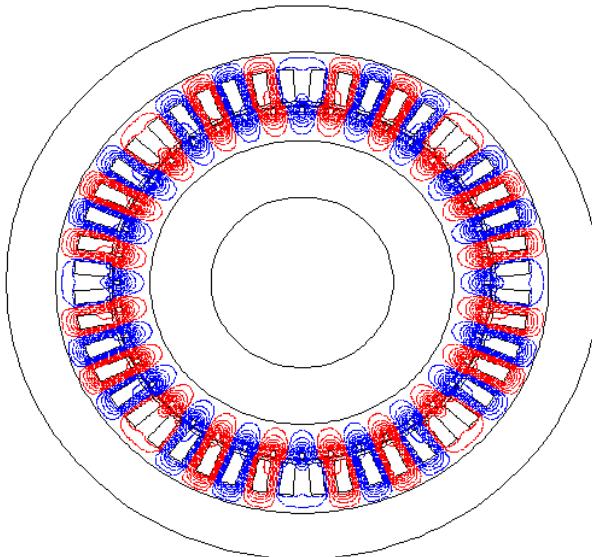


Figure 1 : Version 19/48 avec aimants tangentiels

### Principales caractéristiques de la machine

Rayon extérieur stator  
Rayon d'alésage  
Entrefer  
Longueur fer de la machine  
Hauteur d'encoche statorique  
Hauteur de la préencoche  
Largeur d'une encoche statorique  
Hauteur d'aimant

R\_STAT\_EXT = 195 mm  
R\_ALESAGE = 150 mm  
DELTA = 1 mm  
L = 300 mm  
HN\_1 = 32 mm  
HN\_2 = 3 mm  
BN\_1 = 9.8 mm  
HM = 20 mm

Largeur d'aimant  
Rayon intérieur de la culasse rotorique

BM = 10 mm  
R\_RIM\_INT = 106.5 mm

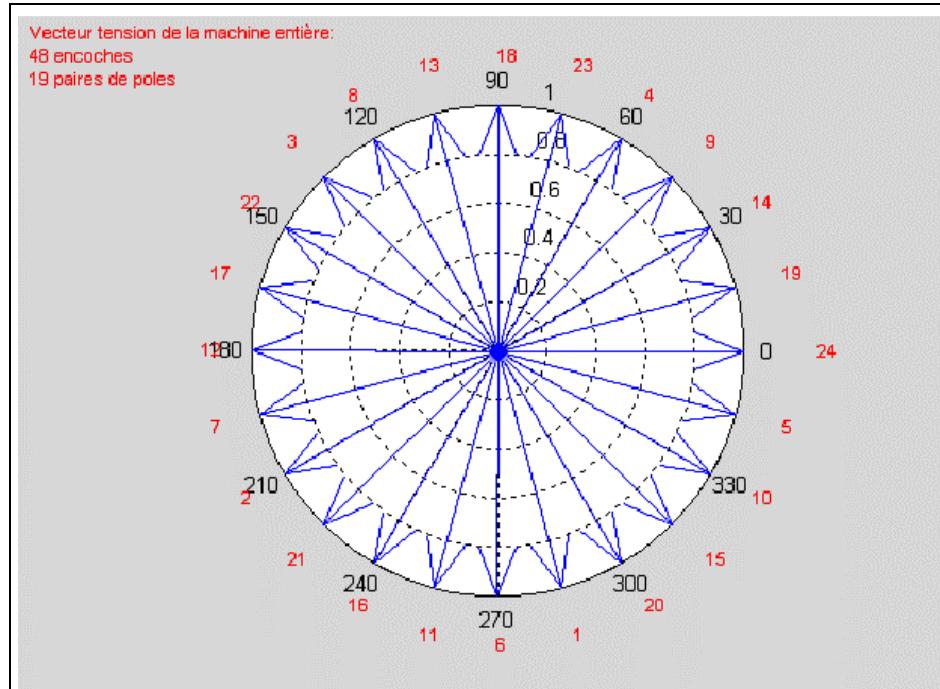


Figure 2: Etoile des tensions pour le modèle 19/48

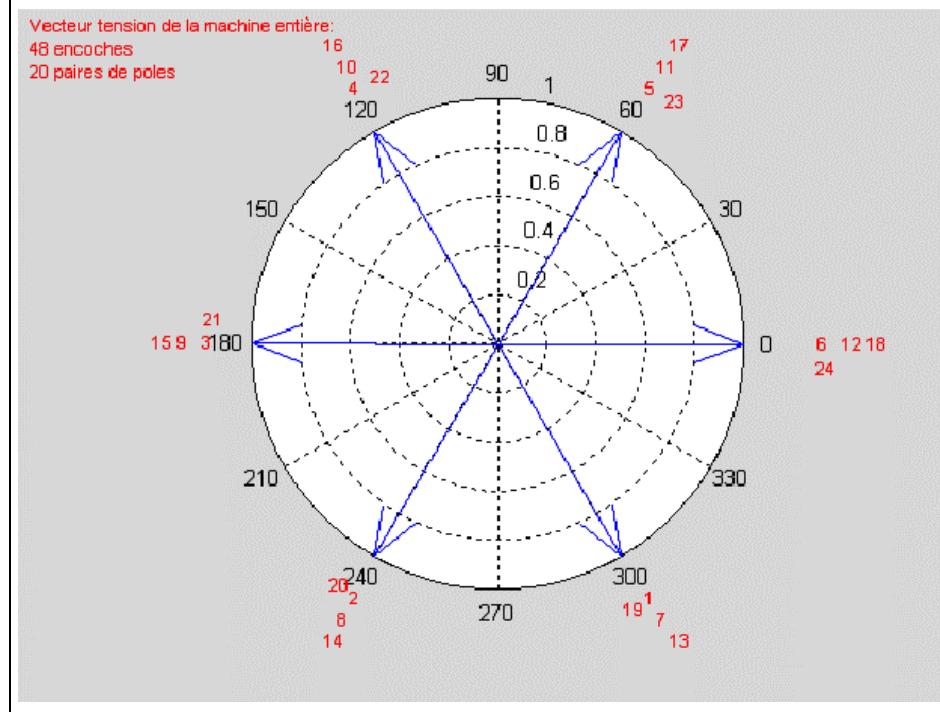
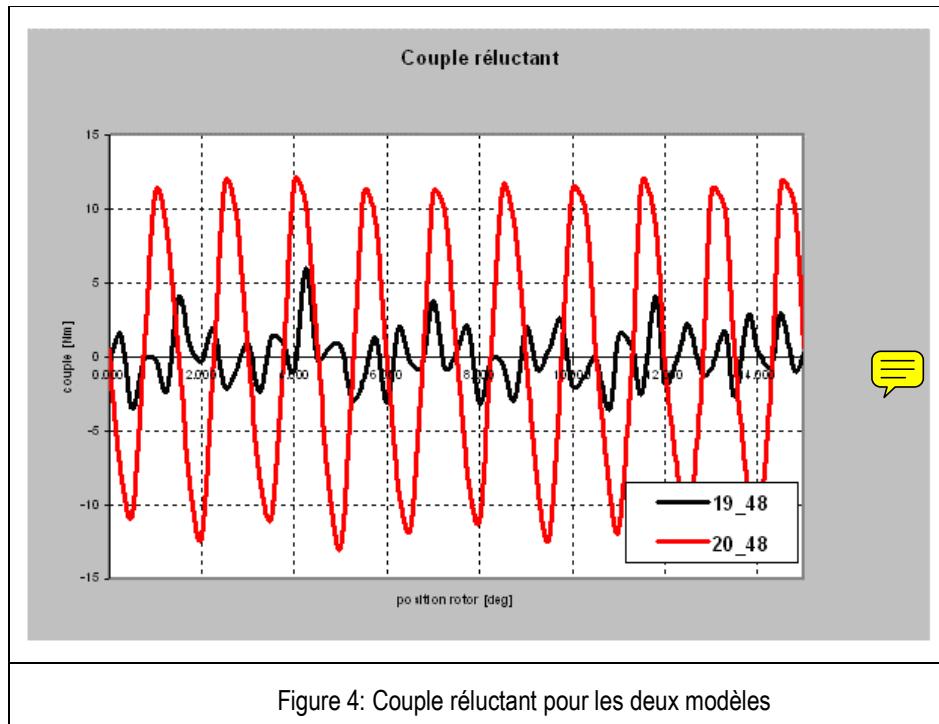


Figure 3: Etoile des tensions pour le modèle 20/48

#### 4. COUPLE RELUCTANT

Pour la détermination du couple reluctant, nous faisons tourner le rotor à vitesse constante, le circuit ferromagnétique étant supposé infiniment résistif. La position du rotor varie entre 0 et  $22.5^\circ$  par pas de  $0.25^\circ$ , soit 90 pas de calcul.

Fichiers utilisés : *MS\_COG\_TORQUE\_19.TRA* (19 paires de pôles)  
*MS\_COG\_TORQUE\_20.TRA* (20 paires de pôles)



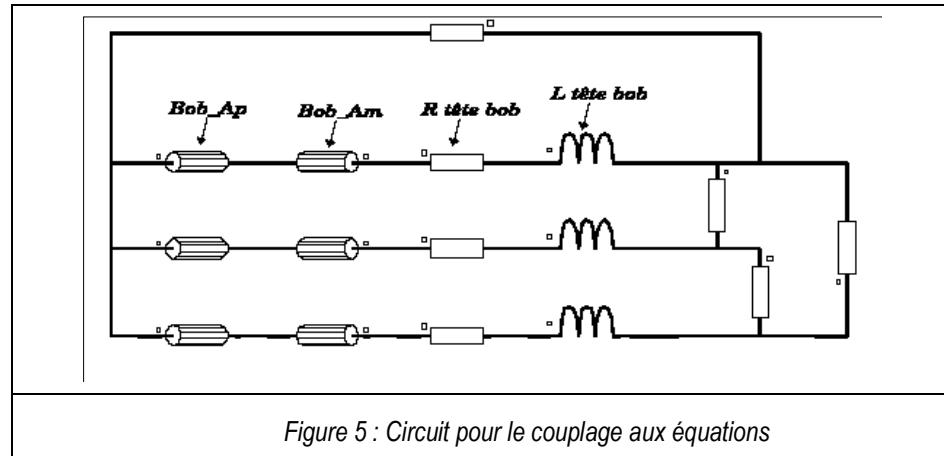
Le couple reluctant pour les deux variantes est représenté en figure 4. Nous remarquons que le couple reluctant est nettement moins bon avec la solution à 20 paires de pôles. La valeur de crête vaut 12 Nm pour le modèle à 20 paires de pôles et 6 Nm pour celui à 19 paires de pôles.

Avec la solution à 19 paires de pôles, le bobinage fractionnaire est meilleur. En effet, chaque vecteur de l'étoile des tensions est en face de son vecteur opposé (électriquement). En d'autres termes, l'attraction opérée par une phase partielle est compensée par celle enroulée autour de la dent diamétralement opposée.

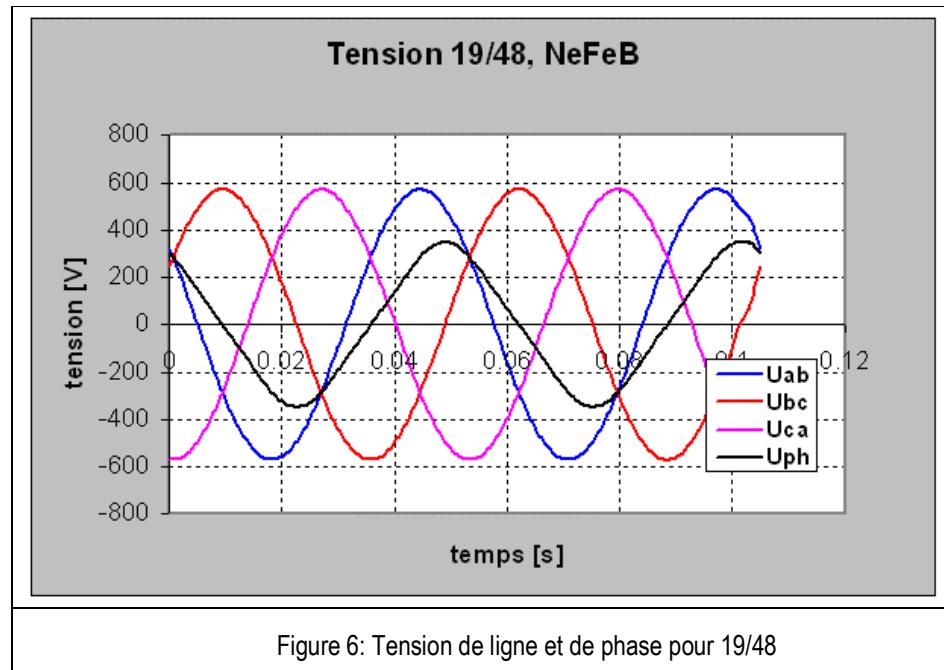
#### 5. TENSION À VIDE

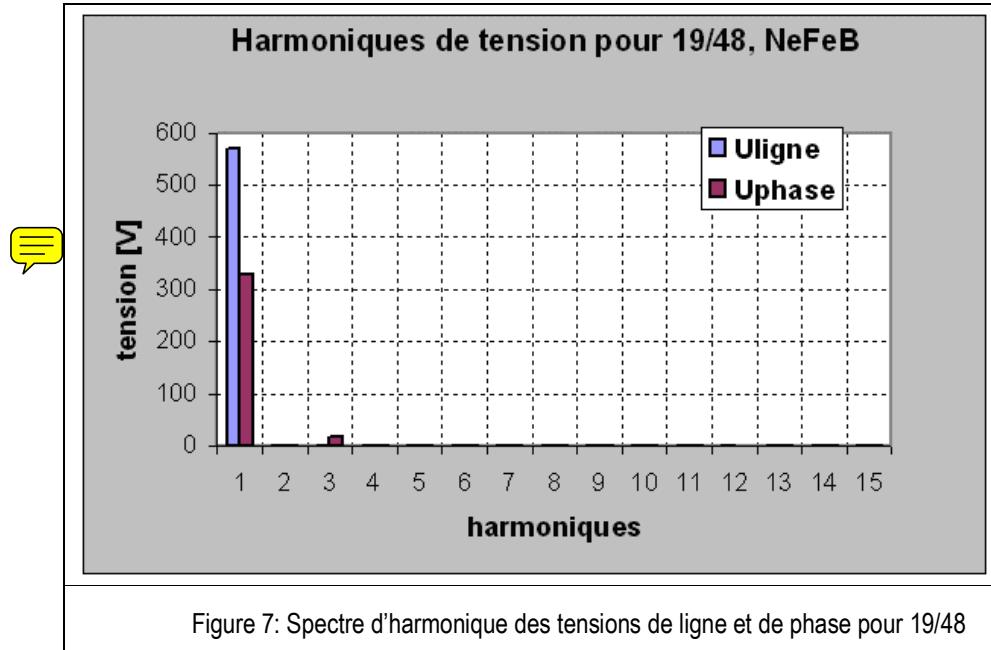
##### 5.1 MODELE 19/48

Fichiers utilisés : *MS\_DEMEVO\_19.TRA*  
*ME\_NO\_LOAD\_19.TRA*  
*NOLOAD\_CIRCUIT*



Le nombre de spires en série par phase est ajusté de manière à atteindre une valeur efficace de tension de ligne à vide de 400 V. Nous devons imposer **63 conducteurs par encoche, soit 504 conducteurs par phase**. Les tensions de ligne et de phase obtenues sont représentées en figure 6. La décomposition en série de Fourier de la tension de ligne et de phase est représentée en figure 7. Les tensions sont mesurées aux bornes du circuit représentatif des phases statoriques représenté en figure 5.

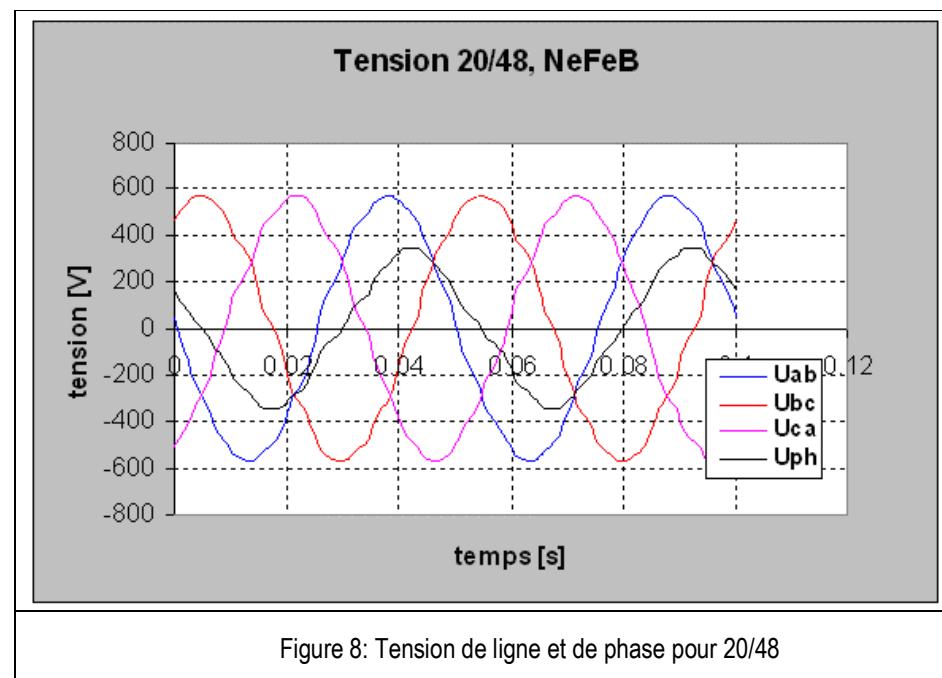




## 5.2 MODELE 20/48

Fichiers utilisés : *MS\_DEMEVO\_20.TRA*  
*ME\_NO\_LOAD\_20.TRA*  
*NOLOAD\_CIRCUIT*

Nous ajustons ici également le nombre de spire de manière à ce que la valeur efficace de la tension de ligne à vide soit égale à 400 V. Nous devons imposer **58 conducteurs par encoche, soit 464 conducteurs par phase**. Les tensions de ligne et de phase sont représentées en figure 8. Le spectre en fréquence correspondant est représenté en figure 9.



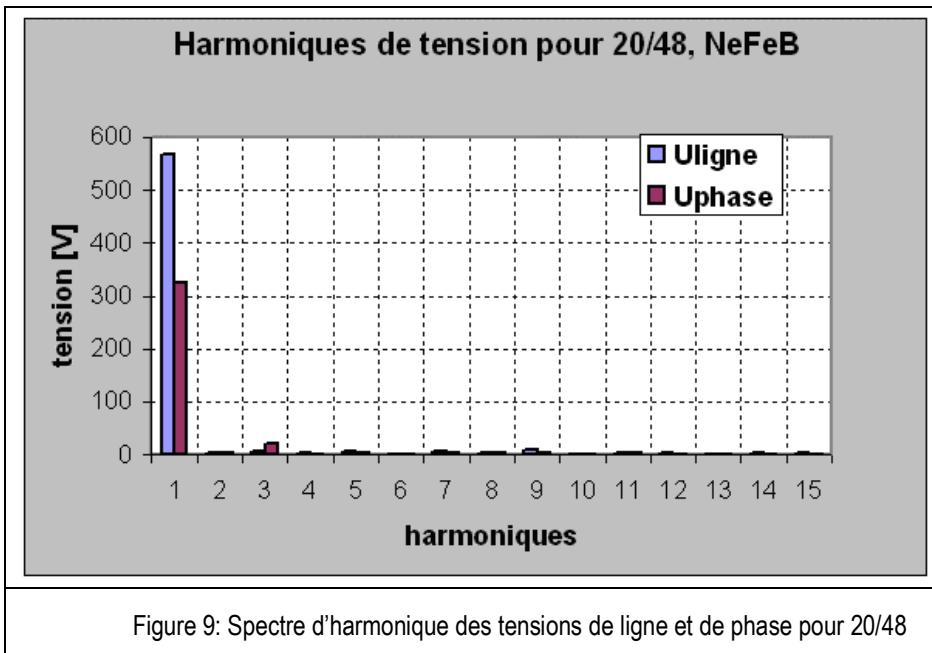


Figure 9: Spectre d'harmonique des tensions de ligne et de phase pour 20/48

En se basant sur l'étoile des tensions, nous pouvons justifier cette différence du nombre de conducteurs par phase. En effet, sur l'étoile relative à 19 paires de pôles, les vecteurs ne sont pas superposés, il en résulte donc un facteur de bobinage plus faible. Par contre sur l'étoile du modèle à 20 paires de pôles, tous les vecteurs sont superposés et la tension plus élevée. Cette différence du nombre de conducteurs par phase est également due à une fréquence électrique plus élevée. La vitesse nominale de la machine est dans les deux cas de 60 tours/min.

En comparant les figures 7 et 9, nous constatons cependant que les tensions de ligne et de phase sont plus riches en harmoniques avec le modèle à 20 paires de pôles qu'avec celui ayant 19 paires de pôles. Par contre, la différence entre les nombres de conducteurs par encoche va se traduire par une résistance plus élevée pour le modèle à 19 paires de pôles, donc des pertes cuivre à courant égal plus importantes.

## 6. INDUCTANCES DANS LES AXES D ET Q

### 6.1 DETERMINATION DES INDUCTANCES DE PHASE

Fichiers utilisés :

- MS\_DET\_AXE\_19.TRA*
- MS\_DET\_AXE\_20.TRA*
- MS\_AXE\_D\_19.TRA*
- MS\_AXE\_D\_20.TRA*
- MS\_AXE\_Q\_20.TRA*
- MS\_AXE\_Q\_20.TRA*

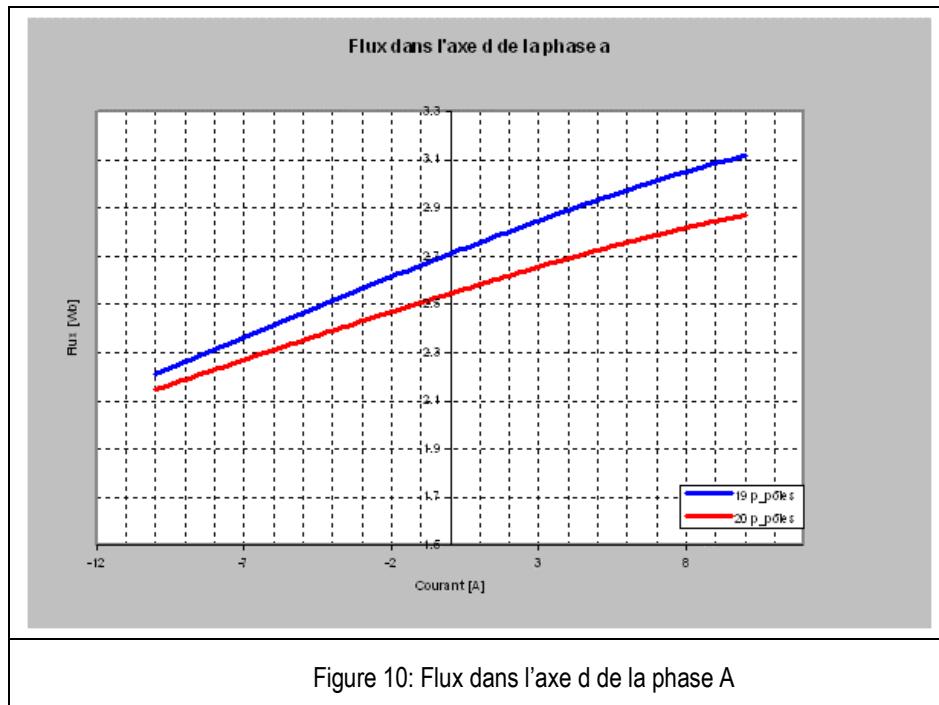
Pour déterminer la position de l'axe de la phase A, nous faisons tourner le rotor avec les phases non-alimentées. Lorsque le flux dans la phase A vaut 0, l'axe q est calé sur l'axe de la phase A. Pour le modèle à 19 paires de pôle, cet angle vaut  $7.896^\circ$ . Après une rotation de  $90^\circ$  degrés électriques dans le sens horaire, l'axe -d est calé sur l'axe de la phase, soit à  $12.633^\circ$ . Pour le

modèle à 20 paires de pôles,, l'axe q est calé sur l'axe de la phase pour un angle de 6° et l'axe -d pour un angle de 10.5°.

## 6.2 CALCUL DE L' INDUCTANCE DANS L'AXE D

Avec le fichier de simulation *MS\_AXE\_D\_19.TRA*, nous positionnons le rotor à 12.633° et faisons varier le courant de phase entre -10 et +10 A. Nous enregistrons le flux couplé avec la phase A. L'opération est ensuite répétée avec le modèle à 20 paires de pôles (fichier *MS\_AXE\_D\_20.TRA*), le rotor étant positionné à 10.5°. L'inductance est calculée à partir de la dérivée du flux par rapport au courant (figure 10).

$$L_d = \frac{d\phi}{di}$$



Dans le tableau 1, nous pouvons voir les valeurs des inductances dans l'axe d pour différentes valeurs du courant.

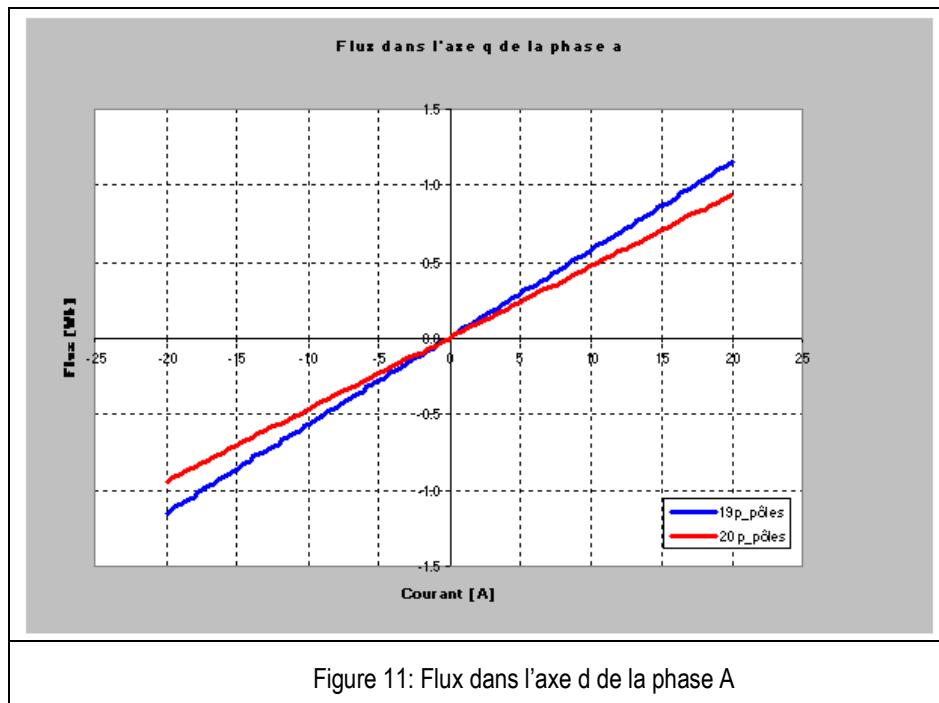
Courant	mod. 19/48	mod. 20/48
0.25 In	46.284	37.163
0.5 In	45.199	36.277
0.75 In	43.743	35.038
In	42.042	33.593
1.2 In	40.806	32.559

Tableau 1 : Inductance dans l'axe d pour les modèles 19/48 et 20/48

### 6.3 CALCUL DES INDUCTANCES DANS L'AXE Q

En faisant appel au fichier de simulation *MS\_AXE\_Q\_19.TRA*, nous positionnons le rotor à  $7.896^\circ$  et faisons varier le courant de phase entre  $-20$  et  $+20$  ampères. Nous enregistrons le flux couplé avec la phase A. Nous répétons l'opération avec le fichier *MS\_AXE\_Q\_20.TRA* avec le rotor positionné à  $6^\circ$ . L'inductance est calculée à partir de la dérivée du flux par rapport au courant (figure 11).

$$L_q = \frac{d\phi}{di}$$



Dans le tableau 2, nous pouvons voir la valeur des inductances dans l'axe q pour la valeur du courant nominal.

Courant	mod. 19/48	mod. 20/48
In	57.327	47.055

Tableau 2 : Inductance dans l'axe q pour les modèles 19/48 et 20/48

#### Remarque :

L'inductance  $L_d$  a été déterminée pour plusieurs valeurs du courant statorique, dû au fait que le flux de l'aimant couplé avec les phases statoriques influence notamment la perméabilité de la culasse statorique. Dans l'axe q par contre, la machine sature pour des valeurs de courant bien plus élevées, le flux d'aimant se refermant en général dans l'entrefer et la tête de dent.

## 7. ESSAI EN CHARGE

### 7.1 COUPLE STATIQUE

Fichiers utilisés : *MS\_STAT\_TORQUE\_19.TRA*  
*MS\_STAT\_TORQUE\_20.TRA*

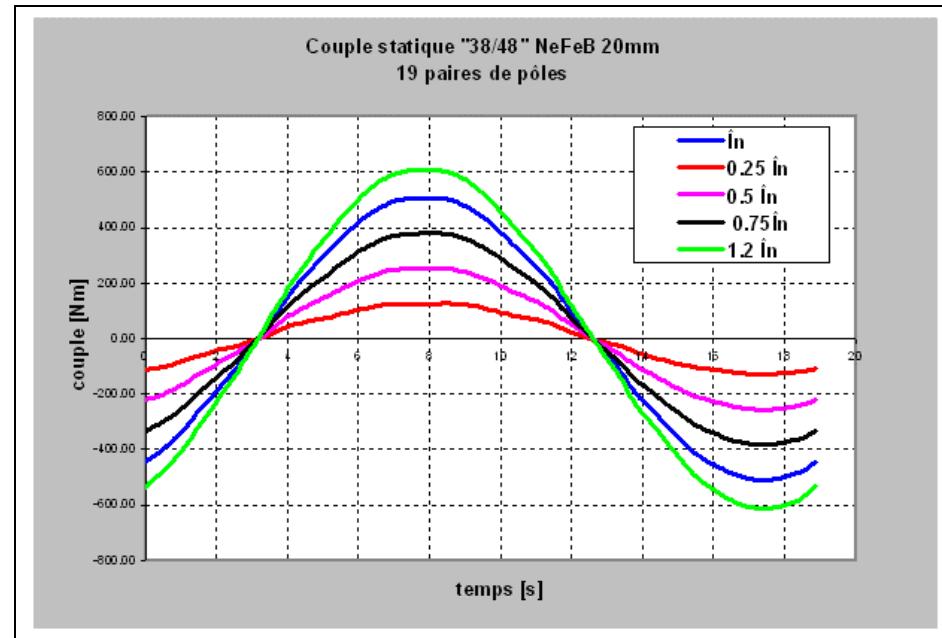


Figure 12: Couple statique pour différentes valeurs de courant. Mod 19/48

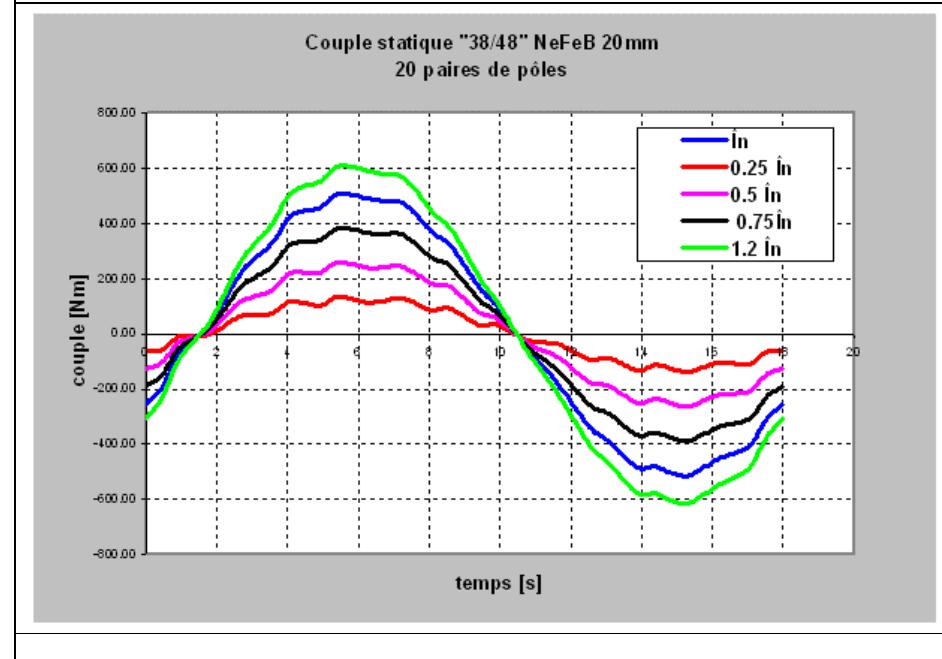


Figure 13: Couple statique pour différentes valeurs de courant. Mod 20/48

Pour déterminer les valeurs de tension en charge, d'angle interne et de rendement, nous procémons de la manière suivante. Nous effectuons des simulations magnétostatiques pour différentes valeurs de courant de phase (0.25, 0.5, 0.75, 1 et 1.2 In) et en incrémentant la position du rotor sur un pas polaire. Pour chaque cas, nous enregistrons les valeurs du flux couplé avec chacune des phases. En exploitant ces résultats avec la transformation de Park, il est possible de déterminer la valeur de la tension de ligne pour chaque cas de charge. De plus, en reconstituant le diagramme de Blondel nous pouvons déterminer le décalage de la roue polaire par rapport au cas à vide. Finalement, les résistances de phase connues et les pertes fer estimées avec FLUX2D, nous déterminons le rendement de la machine.

Nous constatons également que le couple statique (figures 12 et 13) est plus riche en harmoniques dans le cas à 20 paires de pôles. Ce point est synonyme de bruit plus important et de pertes dues aux harmoniques d'encoche plus conséquentes.

## 7.2 TENSION EN CHARGE

L'évolution de la tension de ligne en fonction du courant à  $\cos \phi$  unité est représentée dans les figures 14 et 15 (modèles 19/48 et 20/48). Les résultats sont résumés dans le tableau 3.

Courant	U 19/48	U 20/48
0	403.95	402.7
0.25 In	396.3	395.77
0.5 In	389.01	390.23
0.75 In	382.26	384.86
<b>In</b>	<b>375.85</b>	<b>379.83</b>
1.2 In	371.00	368.40

Tableau 3 : Tension aux bornes de la machine en charge pour les modèles 19/48 et 20/48

La tension de sortie en charge est légèrement moins élevée avec le modèle à 19 paires de pôles. Ceci s'explique par des inductances dans les axes d et q plus élevées pour le premier cas.

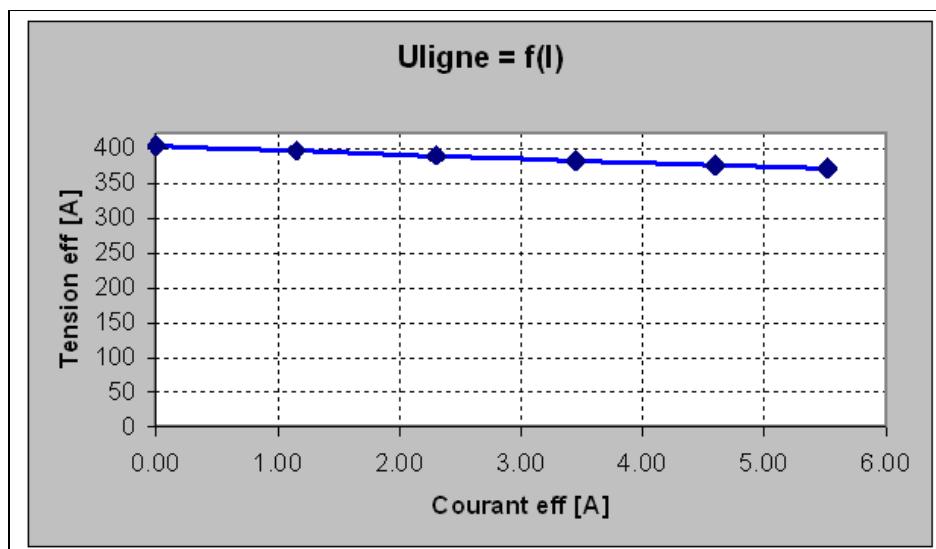
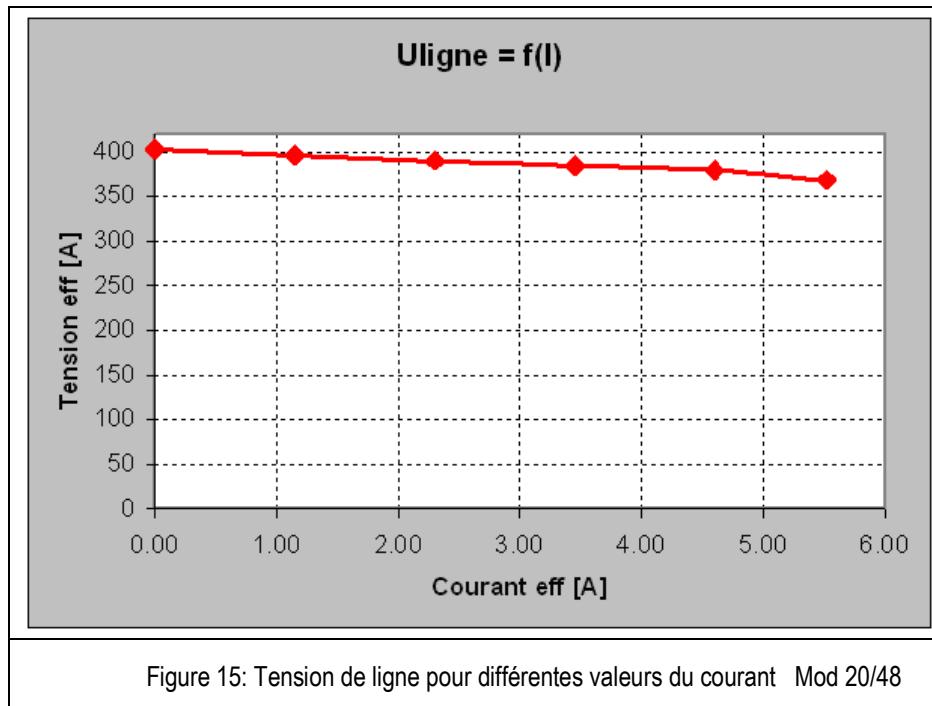
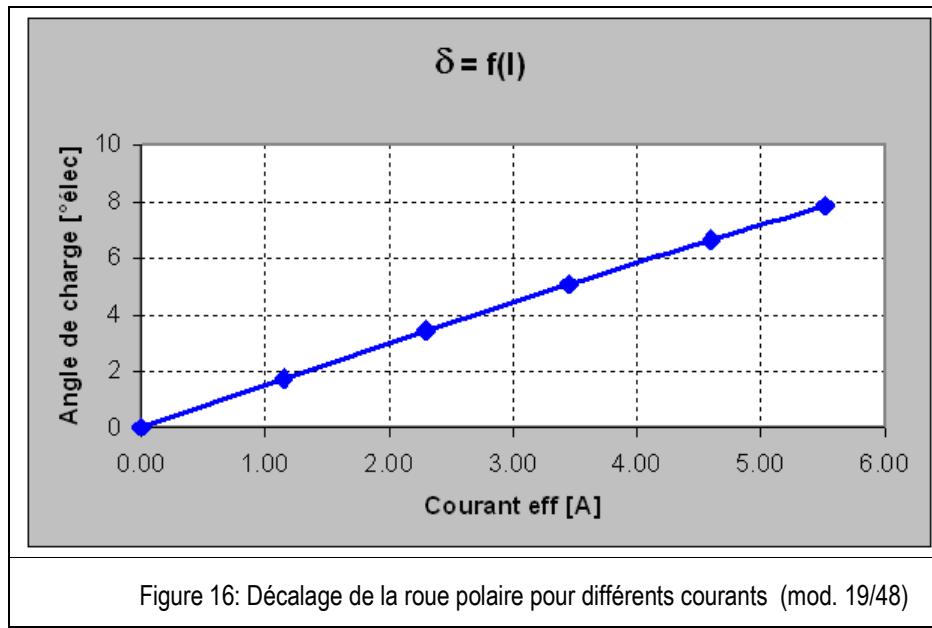


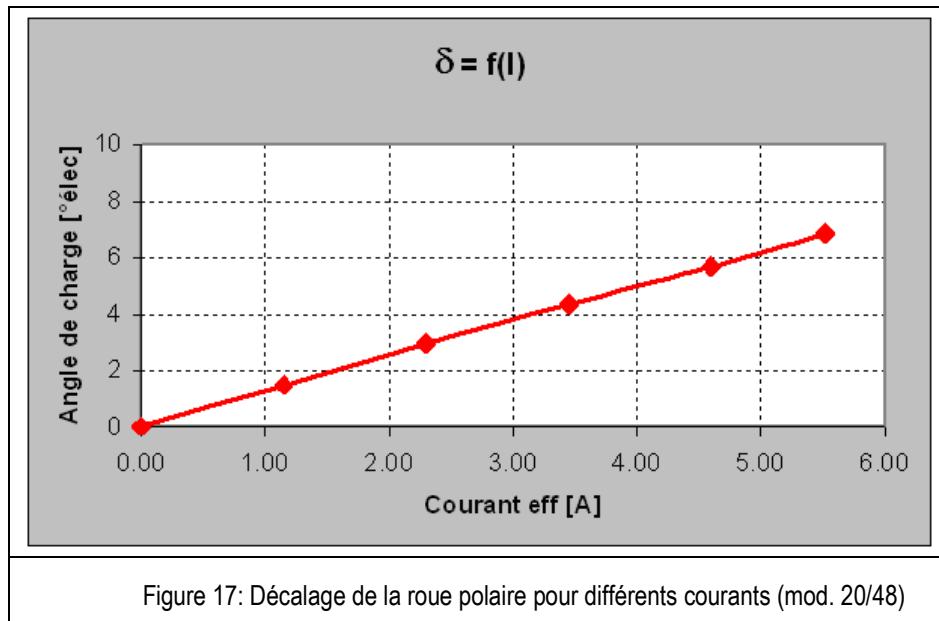
Figure 14: Tension de ligne pour différentes valeurs du courant Mod 19/48



### 7.3 DECALAGE DE LA ROUE POLAIRE EN CHARGE

Le décalage de la roue polaire entre les deux modèles en fonction du courant et  $\cos \phi$  1 unité est reporté sur le tableau 4 ainsi que dans les figures 16 et 17.





Courant	$\delta$ 19/48	$\delta$ 20/48
0	0	0
0.25 In	1.74	1.49
0.5 In	3.44	2.97
0.75 In	5.08	4.35
<b>In</b>	<b>6.65</b>	<b>5.69</b>
1.2 In	7.86	6.85

Tableau 4: Angle de charge de la machine pour les modèles 19/48 et 20/48

## 7.4 RENDEMENT

### 7.4.1 Valeurs des résistances

Comme nous avons pu le voir dans le paragraphe 4, nous avons besoin de moins de spires par phase pour la même tension de ligne avec le modèle à 20 paires de pôles. Cela nous permet d'utiliser du fil de diamètre plus élevé. De ce fait, et du fait d'un nombre de spires plus faible, la résistance va être légèrement plus faible que pour le modèle à 19 paires de pôles (Tableau 6).

	Mod. 19/48	Mod. 20/48
Cond/enc	63	58
Diam fil [mm]	1.7	1.76
J [A/mm <sup>2</sup> ]	2.035	1.873
<b>R/phase [ohm]</b>	<b>3.275</b>	<b>2.776</b>

Tableau 5: Caractéristiques électriques de la phase pour les modèles 19/48 et 20/48

### 7.4.2 Valeurs pour les pertes fer

Les pertes fer diffèrent très peu, du fait de flux et de fréquences très proches. Nous avons supposé que les deux machines possédaient des pertes similaires, ces dernières n'ayant été

calculées que pour la version à 19 paires de pôles. Ces pertes valaient 78 W pour le cas à courant nominal et  $\cos \phi$  unité.

### 7.4.3 Calcul du rendement pour le cas de charge nominal

La puissance électrique à  $\cos \phi$  unité s'écrit

$$P_e = \sqrt{3} \cdot U_{li} \cdot I_{li}$$

Les pertes Joules dans le cuivre s'écrivent

$$P_{cu} = 3 \cdot R_{ph} I_{li}^2$$

La puissance d'entrefer s'écrit

$$P_{em} = P_e + P_{cu}$$

Finalement le rendement de la machine sera défini par

$$\eta = \frac{P_e}{P_{em} + P_{fer}}$$

Les performances en termes de rendement et de pertes pour les versions 19/48 et 20/48 sont reportées dans le tableau 6.

	Mod. 19/48	Mod. 20/48
Pe	2994.6	3026.3
Pcu	207.9	176.2
Pem	3202.5	3202.5
Pfer	78	78
<b>rendement</b>	<b>0.913</b>	<b>0.923</b>

Tableau 6: Pertes et rendement nominal pour les modèles 19/48 et 20/48

## 8. CONCLUSION

La comparaison entre les versions à 19 et 20 paires de pôles a permis de mettre en évidence les principaux avantages et inconvénients de chacune des configurations. Le tableau 7 résume les principales caractéristiques de ces versions.

	Mod. 19/48	Mod. 20/48	Unité
Couple réluctant max	6	12	Nm
Conducteurs/enc	63	58	--
Pertes cuivres	208	176	W
Rendement	91.3	92.3	%

Tableau 7: Caractéristiques des modèles 19/48 et 20/48

Rappelons encore que la tension de ligne et le couple statique présentent un spectre de fréquence plus favorable pour la version 19/48.



Morges le 1<sup>er</sup> octobre 2003

Daho Taghezout, Professeur à l'eivd

Gilles Dutoit, ingénieurs HES-SO, assistants à l'eivd

Alain Grädel, ingénieurs HES-SO, assistants à l'eivd



# Prüfung des Windkraftgenerators WGP 1500 M56 Permanentmagnet

Erstellt von:

**SENSOPLAN AG**

Dipl.-Ing. (FH) Marc Bärmann

Gewerbestr. 6  
79801 Hohentengen

Tel.: 07742 / 9298 - 42

Fax: 07742 / 9298 - 20

Email: [marc.baermann@sensoplan.com](mailto:marc.baermann@sensoplan.com)

Kunde:

**Otto Bartholdi AG**

Tüftelstrasse 50

CH-5322 Koblenz

07.08.2003

Projekt Nr. : 307071Mai

Anzahl Seiten : 20

Anzahl Abbildungen : 17



PROJEKT 307071Mai  
NUMMER:



Sensoplan

TITEL: Prüfung des Windkraftgenerators WGP 1500 M56 Permanentmagnet

INDEX	DATUM	NAME	ÄNDERUNG	GEPRÜFT	DATUM
0	07.08.2003	Bae	Zur Durchsicht	EB	08.08.2003

Titel: Prüfung des Windkraftgenerators WGP 1500 M56 Permanentmagnet		 Sensoplan
Kunde: Otto Bartholdi AG	Projektnr.: 307071Mai	07.08.2003

## Zusammenfassung

Am 15. Juli 2003 installierte SENSOPLAN das Sensotorq® Drehmoment- und Leistungsmessgerät um Motordrehmoment, -leistung- und -zustandsmessungen am Synchro-Generator WGP 1500 M56 bei der Otto Bartholdi AG Koblenz durchzuführen. Aus den Ergebnissen lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen ableiten:

- Die Leerlaufmessung zeigte, dass das Leerlaufdrehmoment und die mechanische Leerlaufleistung bei Nenndrehzahl etwa 4,5 % der berechneten Nennwerte betragen.
- Bei den Messungen mit verschiedenen konstanten Drehzahlen im Leerlauf wurden Schwingungen im Bereich von 1,1 Hz bis 1,6 Hz und bei der doppelten elektrischen Betriebsfrequenz festgestellt. Diese sind auch in den Hochlaufversuchen deutlich sichtbar. Auch in den Hochlaufmessungen waren teilweise deutliche Schwingungen sichtbar.
- Vergleicht man den Leerlaufbetrieb bei Nenndrehzahl mit einem Wicklungssystem und mit zwei Wicklungssystemen so zeigen sich nur geringe Unterschiede in der Leistungsaufnahme. Dies lässt auf geringe elektrische Verluste der Maschine schließen, was auch durch den Vergleich der Leistungen beim Hochlaufversuch mit einem und mit zwei Wicklungssystemen bestätigt wird.
- Beim generatorischen Betrieb wurden starke Schwingungen bei der doppelten Betriebsfrequenz und bei mehreren weiteren Frequenzen festgestellt.
- Der Statorzustand und die Spannungsunsymmetrie waren bei den Hochlaufmessungen im normalen Bereich.

Titel: Prüfung des Windkraftgenerators WGP 1500 M56 Permanentmagnet	 Sensoplan
Kunde: Otto Bartholdi AG	Projektnr.: 307071Mai

## Inhalt

1	Aufgabenstellung.....	5
2	Messaufbau.....	5
3	Messausrüstung .....	5
4	Ergebnisse .....	6
4.1	Leerlaufmessung.....	6
4.2	Betrieb bei unterschiedlichen konstanten Drehzahlen.....	6
4.3	Betrieb mit einem und beiden Wicklungssystemen .....	10
4.4	Hochlauf.....	11
4.5	Auslauf .....	15
4.6	Belastung eines Wicklungssystems (Generatorbetrieb).....	17
4.7	Statorzustand und Spannungsunsymmetrie.....	19
5	Schlussfolgerungen.....	20
6	Motordaten und Geräteeinstellungen .....	21

C:\Dokumente und Einstellungen\gsc.SENSOPLANHQ\Lokale Einstellungen\Temporary Internet Files\OLK4\307071Mai.doc Eigentum der Bartholdi AG – Inhalt unterliegt Geheimhaltung.	Seite 4/20
---	------------

Titel: Prüfung des Windkraftgenerators WGP 1500 M56 Permanentmagnet	 Sensoplan	
Kunde: Otto Bartholdi AG	Projektnr.: 307071Mai	07.08.2003

## 1 Aufgabenstellung

Am 15. Juli 2003 installierte SENSOPLAN das Sensotorq® Messgerät um Motor-drehmoment-, -leistungs- und -zustandsmessungen am Synchron-Generator WGP 1500 M56 Permanentmagnet bei der Otto Bartholdi AG Koblenz durchzuführen.

## 2 Messaufbau

Das Motor-Luftspaltmoment wird direkt aus zwei gemessenen Motorspannungen und zwei gemessenen Motorströmen mit einer Abtastfrequenz von 1200 Hz bzw. 2400 Hz berechnet. Als Eingabedaten werden lediglich die Typenschilddaten, der Statorwicklungswiderstand und die Anschlussart (Stern oder Dreieck) benötigt. Die Berechnungsmethode beruht auf einem Motormodell, das aus Strom und Fluss im Luftspalt des Motors das Drehmoment berechnet.

## 3 Messausrüstung

Digitales Drehmoment- u. Leistungsmessgerät:	Sensotorq® Portabel
Stromwandler:	LEM~flex RR3030 (300A)
Spannungswandler:	Sensotorq® interne 1 kV Wandler

Zur Messung wurden, jeweils in der korrekten Zuordnung, die Ströme in zwei Phasen ( $I_1$  und  $I_2$ ) und zwei verkettete Spannungen ( $U_{12}$  und  $U_{23}$ ) im Sensotorq® erfasst und ausgewertet.

Die Motordaten und die Eingabeparameter sind in Kapitel 6 aufgelistet.

Titel: Prüfung des Windkraftgenerators WGP 1500 M56 Permanentmagnet		 Sensoplan
Kunde: Otto Bartholdi AG	Projektnr.: 307071Mai	07.08.2003

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Leerlaufmessung

Bei dieser Messung wurde der Motor im Leerlauf annähernd bei Nenndrehzahl betrieben. Die Messung zeigt, dass das Leerlaufmoment und die mechanische Leerlaufleistung bei Nenndrehzahl etwa 4,5 % der berechneten Nennwerte betragen. Tabelle 1 zeigt die einzelnen Messwerte.

Parameter	Nennwert <sup>1</sup>	Messwert <sup>2</sup>	Kommentar
Strom	547 A <sup>3</sup>	62,4 A	11,4 % vom Nennwert <sup>1</sup>
Spannung	660 V	601 V	91,1 % vom Nennwert <sup>1</sup>
Frequenz	10,0 Hz	9,95 Hz	99,5 % vom Nennwert <sup>1</sup>
Leistungsfaktor	0,940	0,451	
Wirkleistung	1,30 MW	29,6 kW	2,28 % vom Nennwert <sup>1</sup>
Blindleistung	472 kvar	58,6 kvar	12,4 % vom Nennwert <sup>1</sup>
Wirkungsgrad	95,85 %	-	
Drehzahl	21,5 min <sup>-1</sup>	21,4 min <sup>-1</sup>	99,5 % vom Nennwert <sup>1</sup>
Drehmoment	289 kNm <sup>3</sup>	13.1 kNm	4,53 % vom Nennwert <sup>1</sup>
Mech. Leistung	650 kW <sup>3</sup>	29,4 kW	4,52 % vom Nennwert <sup>1</sup>

Tabelle 1: Messwerte bei Leerlauf

<sup>1</sup> berechnete Nennwerte

<sup>2</sup> Motorbetrieb im Leerlauf bei konstant 21,4 min<sup>-1</sup>

<sup>3</sup> je Wicklungssystem

### 4.2 Betrieb bei unterschiedlichen konstanten Drehzahlen

De in

Tabelle 2 aufgeführten Werte wurden bei Betrieb des Motors mit unterschiedlichen Drehzahlen im Leerlauf gemessen.

Drehzahl	5,20 min <sup>-1</sup>	9,99 min <sup>-1</sup>	14,9 min <sup>-1</sup>	21,4 min <sup>-1</sup>	24,8 min <sup>-1</sup>
Drehmoment	16,7 kNm	13,9 kNm	13,3 kNm	13,1 kNm	13,4 kNm
Mech. Leistung	9,14 kW	14,6 kW	20,8 kW	29,4 kW	34,9 kW
Strom	49,1 A	52,5 A	56,6 A	62,4 A	64,9 A
Spannung	149 V	283 V	418 V	601 V	696 V
Frequenz	2,40 Hz	4,61 Hz	6,91 Hz	9,95 Hz	11,5 Hz
Leistungsfaktor	0,727	0,569	0,506	0,451	0,444
Wirkleistung	9,24 kW	14,7 kW	21,0 kW	29,6 kW	35,1 kW
Blindleistung	8,71 kvar	21,3 kvar	35,7 kvar	58,6 kvar	70,7 kvar

Tabelle 2: Messwerte bei unterschiedlichen Drehzahlen im Leerlauf

Bei allen Messungen dieser Messreihe mit Ausnahme der Messung bei 14,9 min<sup>-1</sup> wurden relative starke Drehmomentschwingungen im Bereich von etwa 1,1 Hz bis

Titel: Prüfung des Windkraftgenerators WGP 1500 M56 Permanentmagnet		 Sensoplan
Kunde: Otto Bartholdi AG	Projektnr.: 307071Mai	07.08.2003

1,6 Hz festgestellt. Diese Schwingungen waren auch im Spannungssignal, in den Leistungen und im Leistungsfaktor sehr deutlich zu erkennen. Teilweise waren diese Schwingungen über die gesamte Messdauer mit relativ konstanter Amplitude zu sehen (vgl. Abb. 1 und Abb. 2), teilweise änderte sich deren Amplitude während der Messzeit sehr deutlich (vgl. Abb. 3 und Abb. 4). Bei  $14,9 \text{ min}^{-1}$  waren sie praktisch überhaupt nicht zu sehen.

Außerdem zeigt sich bei allen Messungen ein mehr oder weniger deutlicher Peak im Spektrum des Drehmoment- und des Stromsignals bei der doppelten elektrischen Betriebsfrequenz. Beispielsweise ist dieser Peak in Abb. 2 bei 9,4 Hz und in Abb. 4 bei 20 Hz zu sehen.

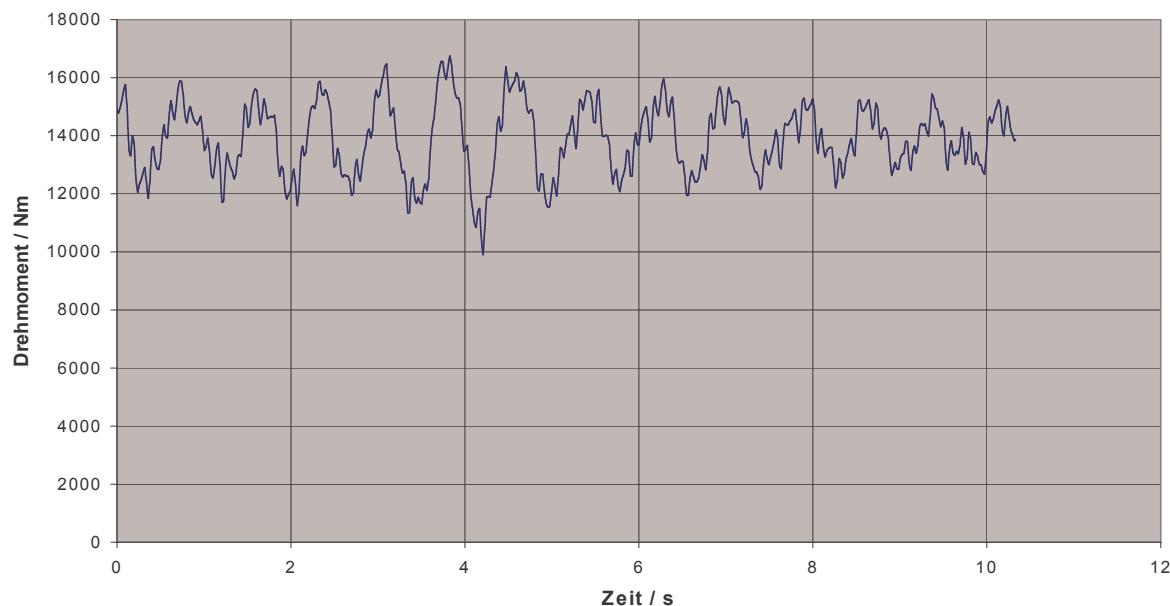


Abb. 1: Drehmomentsignal im Zeitbereich bei  $9,99 \text{ min}^{-1}$

Titel: Prüfung des Windkraftgenerators WGP 1500 M56 Permanentmagnet		 Sensoplan
Kunde: Otto Bartholdi AG	Projektnr.: 307071Mai	07.08.2003

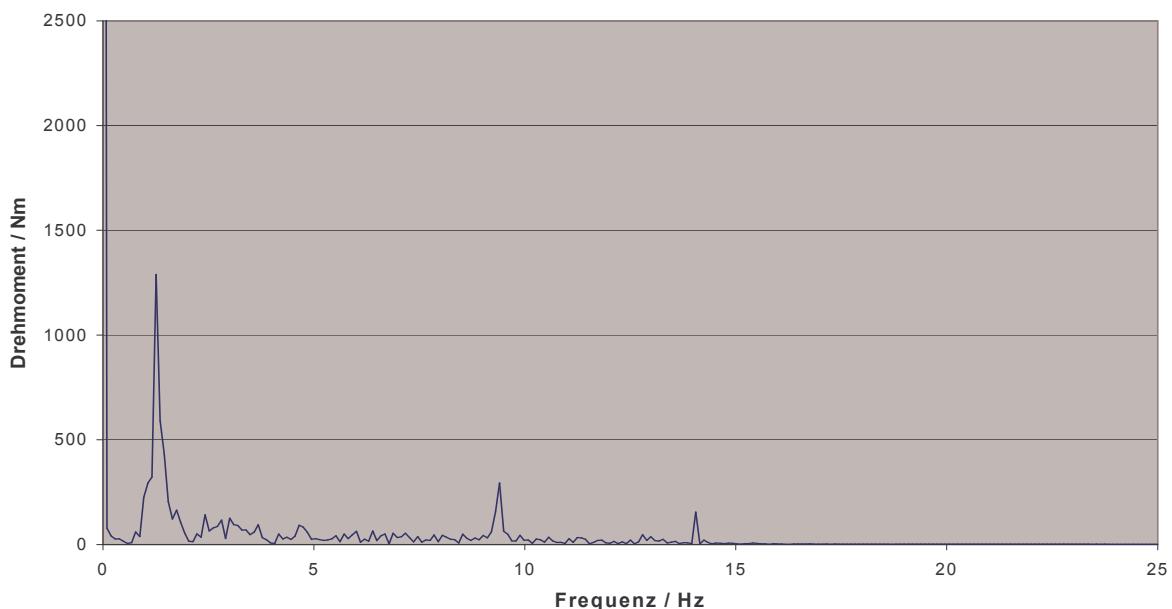


Abb. 2: Drehmomentsignal im Frequenzbereich bei  $9,99 \text{ min}^{-1}$

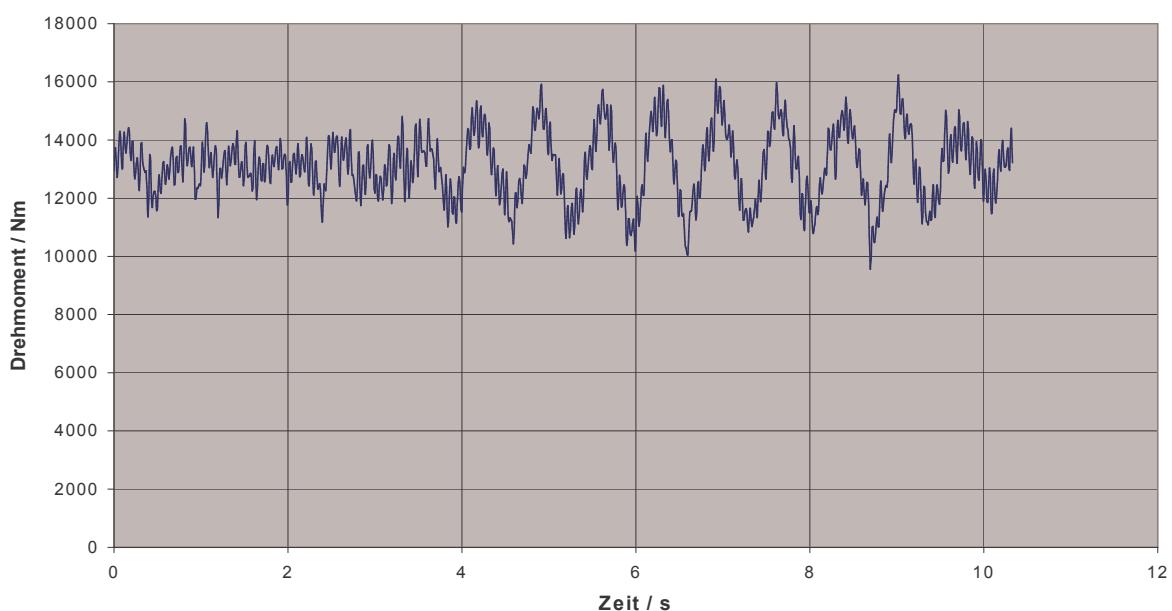


Abb. 3: Drehmomentsignal im Zeitbereich bei  $21,4 \text{ min}^{-1}$

Titel: Prüfung des Windkraftgenerators WGP 1500 M56 Permanentmagnet		 Sensoplan
Kunde: Otto Bartholdi AG	Projektnr.: 307071Mai	07.08.2003

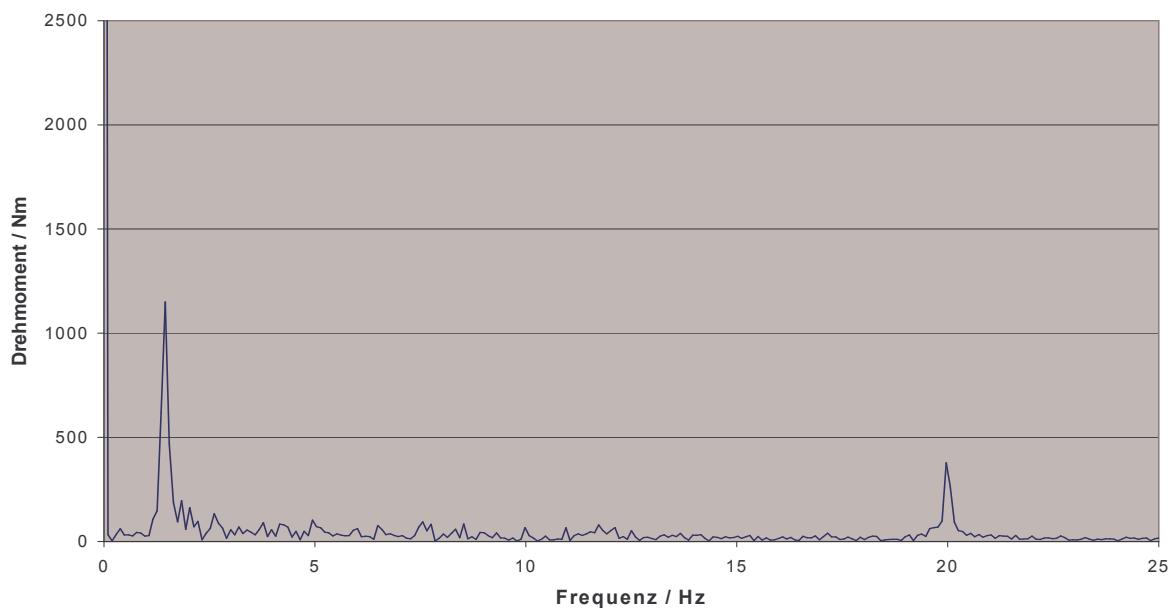


Abb. 4: Drehmomentsignal im Frequenzbereich bei  $21,4 \text{ min}^{-1}$

Titel: Prüfung des Windkraftgenerators WGP 1500 M56 Permanentmagnet		 Sensoplan
Kunde: Otto Bartholdi AG	Projektnr.: 307071Mai	07.08.2003

#### 4.3 Betrieb mit einem und beiden Wicklungssystemen

Die in

Tabelle 3 dargestellten Messwerte wurden aus den Hochlaufversuchen ermittelt. Alle Messwerte wurden nur auf einem Wicklungssystem gemessen, auch wenn beide Systeme in Betrieb waren.

Vergleicht man Messung A und C so zeigt sich, dass sich die Werte von Drehmoment, mechanischer Leistung und Wirkleistung fast halbieren. Unter der Annahme das bei Messung C für das zweite nicht mit gemessene Wicklungssystem die selben Werte gelten, bedeutet das für die gesamte Maschine dass sich beim Betrieb mit einem und mit zweit Wicklungssträngen im Leerlauf die Leistungsaufnahme nur geringfügig erhöht. Das lässt auf geringe elektrische Verluste der Maschine schließen.

Bei Messung B liegen die Werte von Drehmoment mechanischer Leistung und Wirkleistung bei ca. 66 % von A. Dies ist vermutlich auf erhöhte Verluste aufgrund des höheren Stromes (bezogen auf beide Wicklungssysteme) zurück zu führen.

Messung	A	B		C	
Einstellung Strom	1 Wicklungssystem 40 A Anfahrstrom + 1 A pro Umdrehung	2 Wicklungssysteme 40 A Anfahrstrom + 1 A pro Umdrehung		2 Wicklungssysteme 20 A Anfahrstrom + 0,5 A pro Umdrehung	
Drehmoment	13,5 kNm	8,97 kNm	66,4 % von A	6,81 kNm	50,4 % von A
Drehzahl	21,4 min <sup>-1</sup>	21,4 min <sup>-1</sup>	100 % von A	21,3 min <sup>-1</sup>	99,5 % von A
Mech. Leistung	30,3 kW	20,1 kW	66,3 % von A	15,3 kW	50,5 % von A
Strom	63,4 A	64,1 A	101 % von A	30,2 A	47,6 % von A
Spannung	609 V	610 V	100 % von A	602 V	98,9 % von A
Frequenz	9,95 Hz	9,95 Hz	100 % von A	9,93 Hz	99,8 % von A
Leistungsfaktor	0,450	0,295		0,484	
Wirkleistung	30,5 kW	20,3 kW	66,6 % von A	15,3 kW	50,2 % von A
Blindleistung	59,5 kvar	64,4 kvar	108 % von A	27,2 kvar	45,7 % von A

Tabelle 3: Messwerte beim Betrieb mit einem und beiden Wicklungssystemen mit unterschiedlichen Strömen. (Messwerte jeweils nur für ein Wicklungssystem)

Titel: Prüfung des Windkraftgenerators WGP 1500 M56 Permanentmagnet		 Sensoplan
Kunde: Otto Bartholdi AG	Projektnr.: 307071Mai	07.08.2003

#### 4.4 Hochlauf

Abb. 5, Abb. 6, Abb. 7 und Abb. 8 zeigen den Hochlauf bis  $25 \text{ min}^{-1}$  und wurden aus der Hochlaufmessung mit beiden Wicklungssystemen und  $20 \text{ A} + 0,5 \text{ A}$  pro Umdrehung ermittelt. Ähnlich wie bereits in Abschnitt 4.2 sieht man auch hier recht starke Schwingungen im Spannungssignal und in den Leistungen.

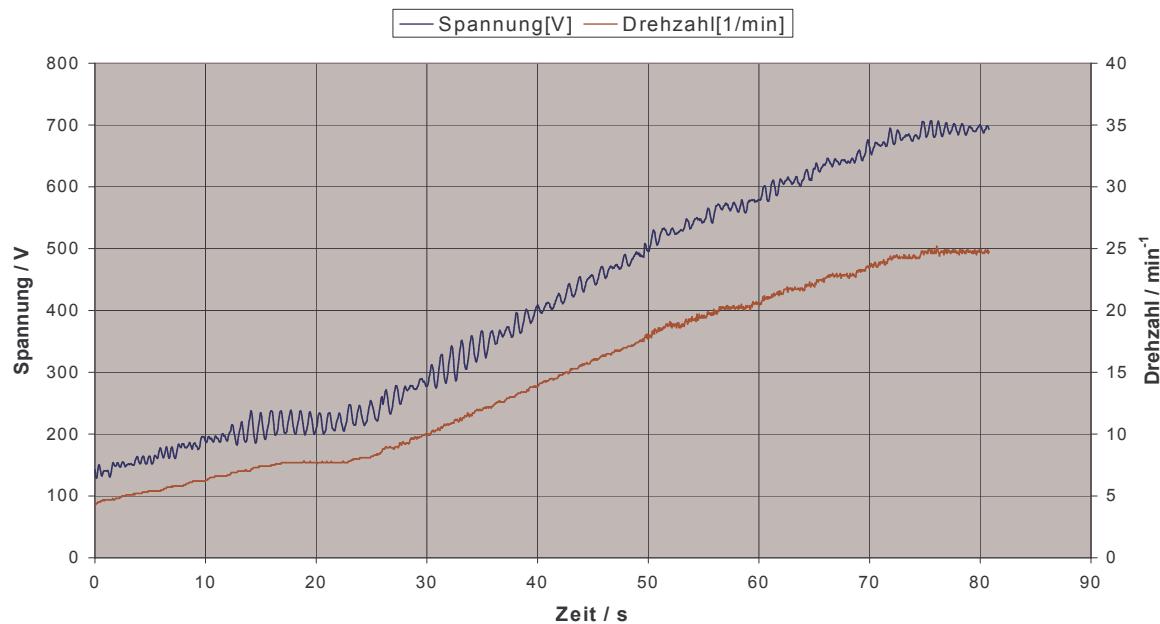


Abb. 5: Spannung und Drehzahl über der Zeit beim Hochlauf mit beiden Wicklungssystemen

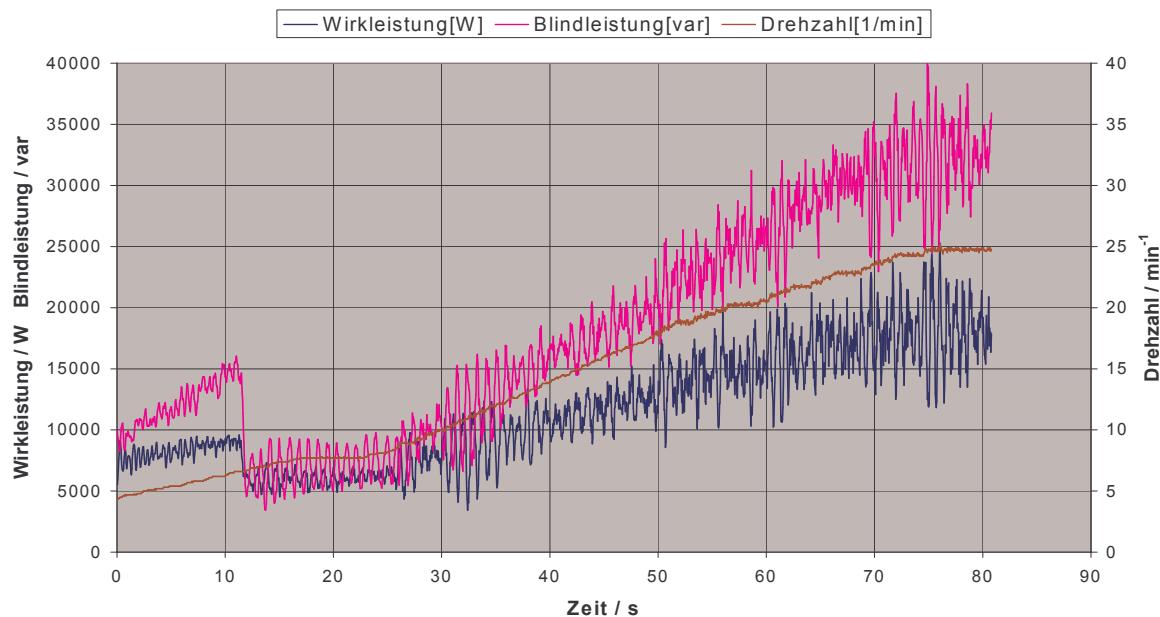


Abb. 6: Wirkleistung, Blindleistung und Drehzahl über der Zeit beim Hochlauf mit beiden Wicklungssystemen

Titel: Prüfung des Windkraftgenerators WGP 1500 M56 Permanentmagnet		 Sensoplan
Kunde: Otto Bartholdi AG	Projektnr.: 307071Mai	07.08.2003

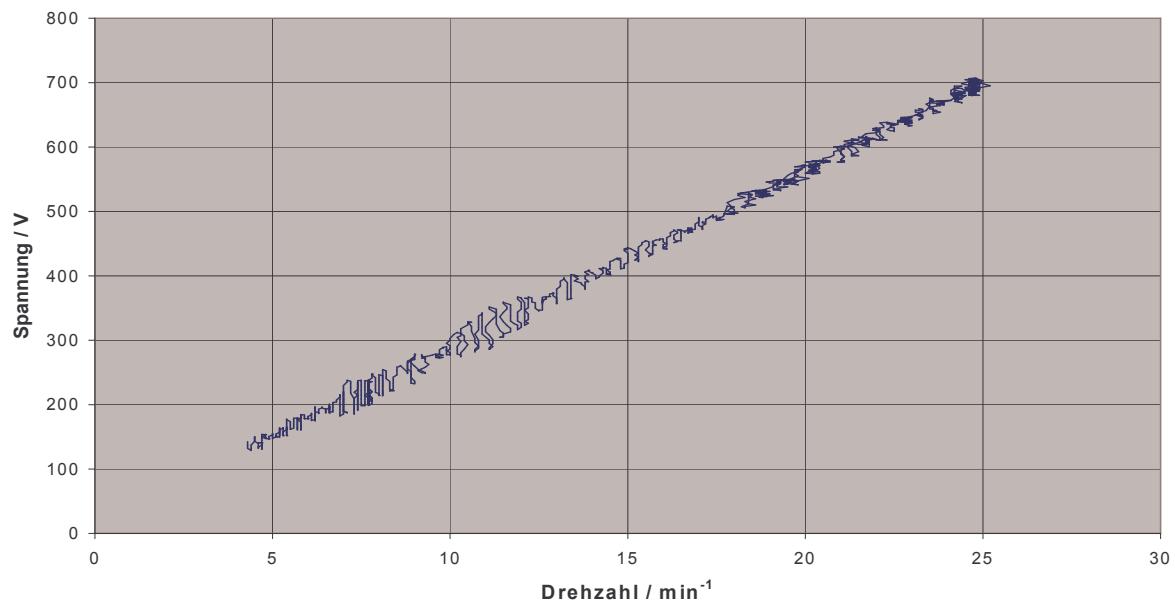


Abb. 7: Spannung über der Drehzahl beim Hochlauf mit beiden Wicklungssystemen

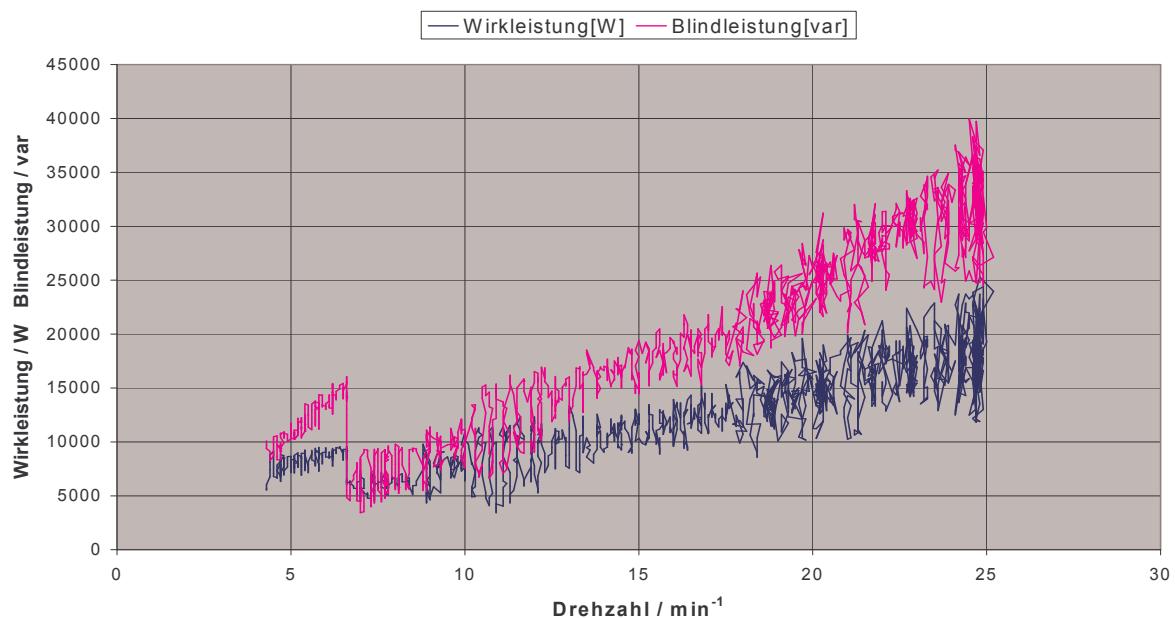


Abb. 8: Wirkleistung und Blindleistung über der Drehzahl beim Hochlauf mit beiden Wicklungssystemen

Abb. 9 und Abb. 10 zeigen den Hochlauf mit zwei Wicklungssystemen und 20 A + 0,5 A pro Umdrehung im Vergleich zum Hochlauf mit einem Wicklungssystem und 40 A + 1 A pro Umdrehung. Da beim Hochlauf mit beiden Wicklungssystemen tatsächlich nur auf einem System gemessen wurde, wurden die Leistungswerte aus dieser Messung für Abb. 10 mit 2 multipliziert (vgl. Abschnitt 4.3). Man sieht, dass die

Titel: Prüfung des Windkraftgenerators WGP 1500 M56 Permanentmagnet		 Sensoplan
Kunde: Otto Bartholdi AG	Projektnr.: 307071Mai	07.08.2003

einzelnen Werte über den gesamten Drehzahlbereich im Mittel nur wenig voneinander abweichen. Daraus lässt sich schließen, dass die Maschine nur geringe elektrische Verluste aufweist.

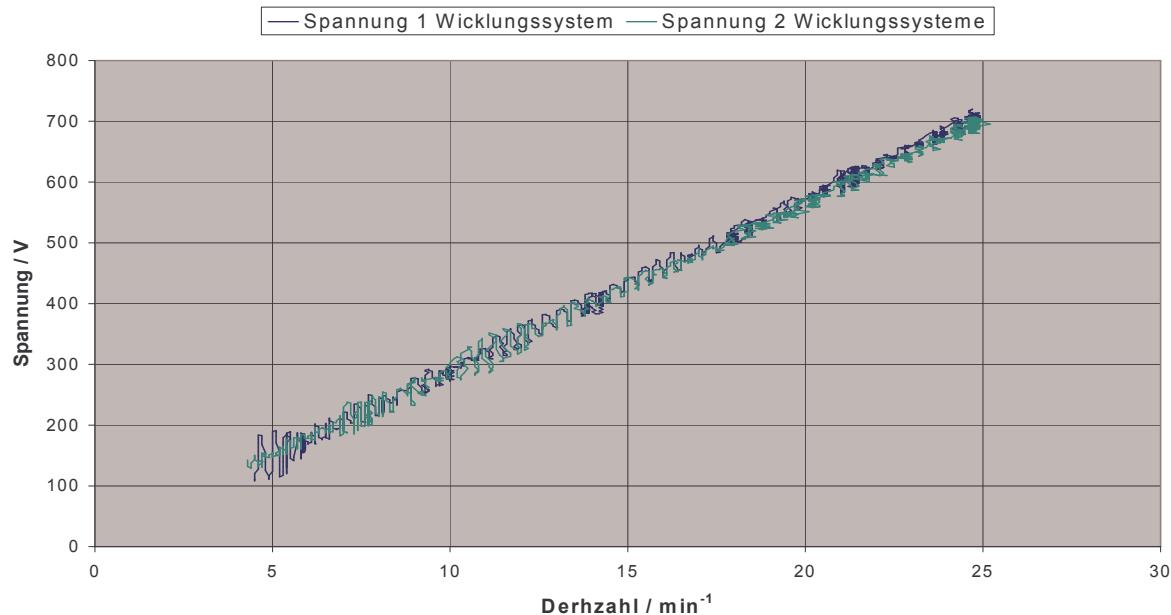


Abb. 9: Vergleich der Spannungen über der Drehzahl beim Hochlauf mit einem und mit beiden Wicklungssystemen

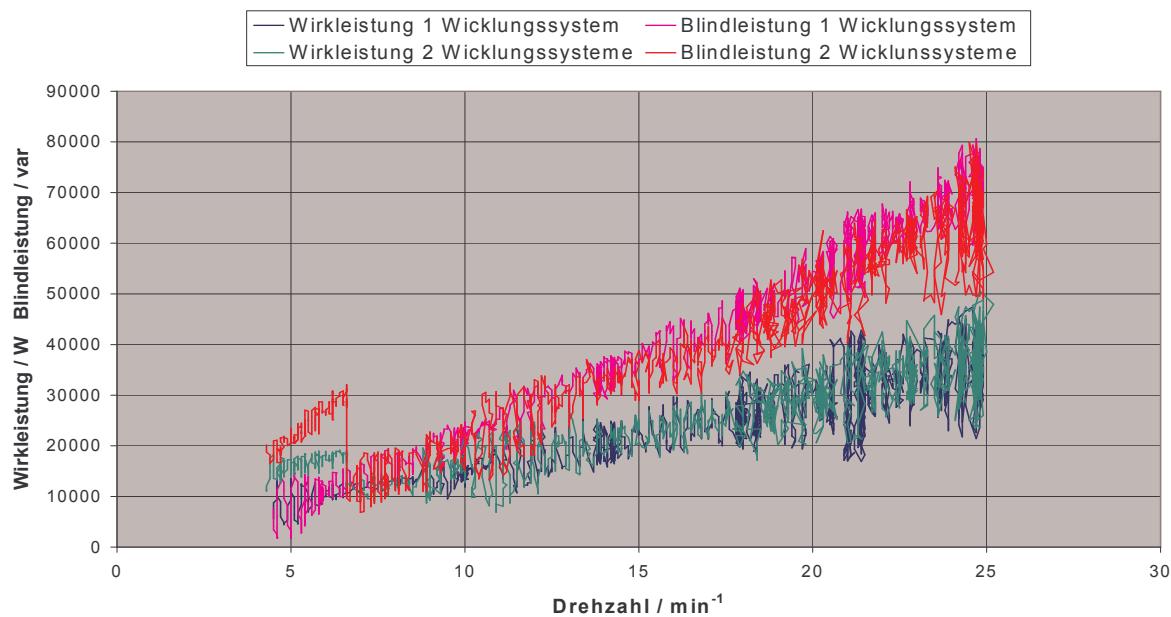


Abb. 10: Vergleich der Wirk- und Blindleistungen über der Drehzahl beim Hochlauf mit einem und mit beiden Wicklungssystemen

Titel: Prüfung des Windkraftgenerators WGP 1500 M56 Permanentmagnet		 Sensoplan
Kunde: Otto Bartholdi AG	Projektnr.: 307071Mai	07.08.2003

## 4.5 Auslauf

Abb. 11, Abb. 12, Abb. 13 und Abb. 14 zeigen einen Auslauf aus ca.  $25 \text{ min}^{-1}$  beim Betrieb mit einem Wicklungssystem. Abb. 11 und Abb. 12 zeigen die Spannung bzw. die Wirk- und Blindleistung jeweils zusammen mit der Drehzahl dargestellt über der Zeit. Abb. 13 und Abb. 14 zeigen nur den Ausschnitt von 0.562 s bis 1.81 s der Spannung bzw. der Wirk- und Blindleistung dargestellt über der Drehzahl.

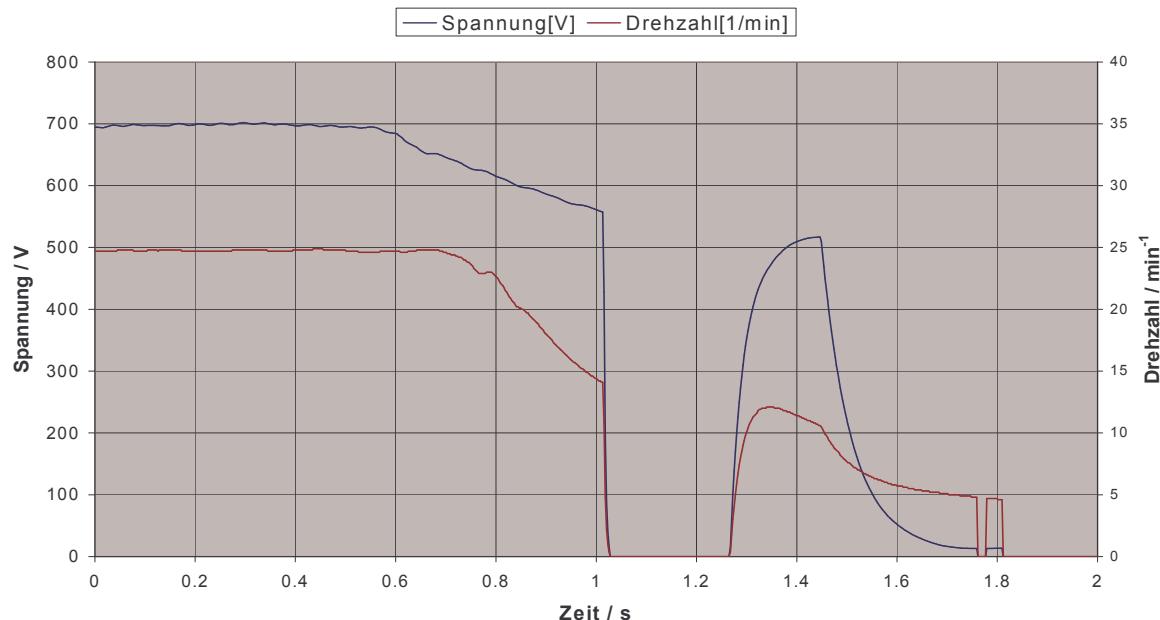


Abb. 11: Spannung und Drehzahl über der Zeit beim Auslauf



Abb. 12: Wirkleistung, Blindleistung und Drehzahl über der Zeit beim Auslauf

Titel: Prüfung des Windkraftgenerators WGP 1500 M56 Permanentmagnet		 Sensoplan
Kunde: Otto Bartholdi AG	Projektnr.: 307071Mai	07.08.2003

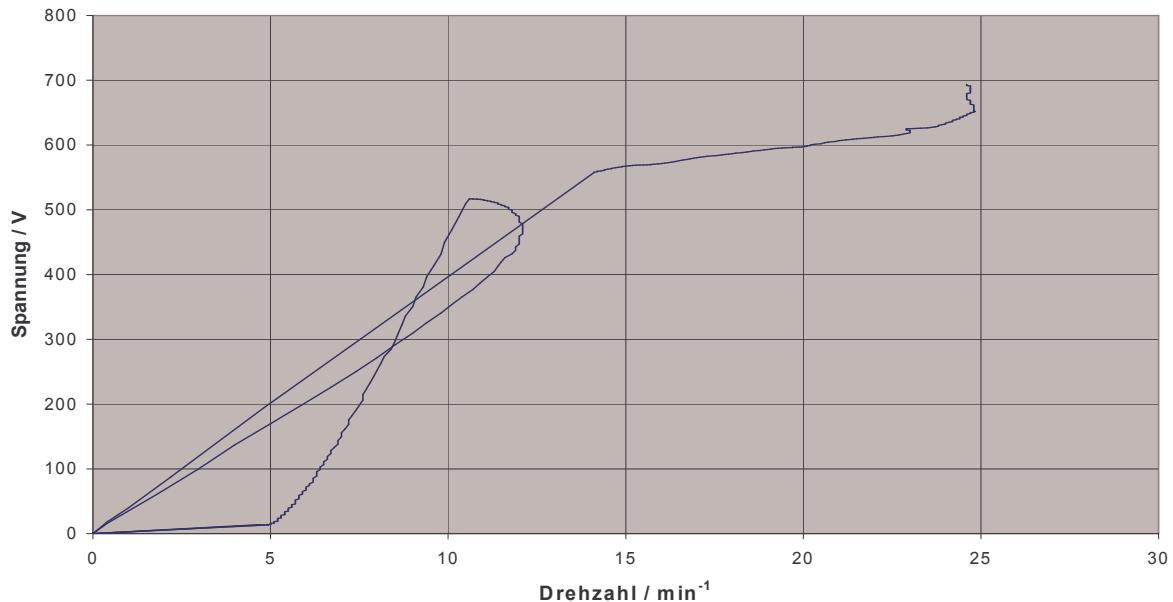


Abb. 13: Spannung über der Drehzahl beim Auslauf

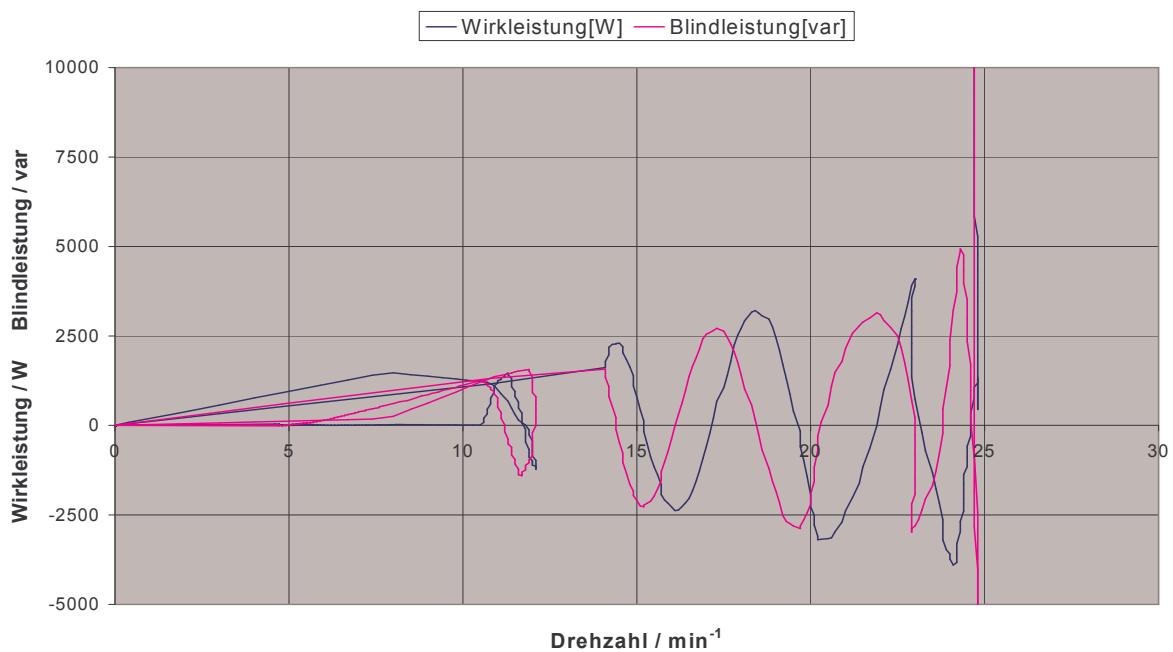


Abb. 14: Wirkleistung und Blindleistung über der Drehzahl beim Auslauf

Die Leistungen fallen sofort nach dem Ausschalten steil ab, schwingen dann um die Nulllinie und laufen ab ca.  $14 \text{ min}^{-1}$  proportional zur Drehzahl gegen null. Die Spannung sinkt zunächst langsam und läuft dann auch ab ca.  $14 \text{ min}^{-1}$  proportional zur Drehzahl gegen null.

Titel: Prüfung des Windkraftgenerators WGP 1500 M56 Permanentmagnet		 Sensoplan
Kunde: Otto Bartholdi AG	Projektnr.: 307071Mai	07.08.2003

#### 4.6 Belastung eines Wicklungssystems (Generatorbetrieb)

Bei diesem Versuch wurde die Maschine über ein Wicklungssystem angetrieben (Motorbetrieb) und über das zweite Wicklungssystem belastet (Generatorbetrieb). Die Sensotorq® - Messung wurde auf dem generatorisch betriebenen Wicklungssystem durchgeführt. Die negativen Drehmoment- und Leistungsmesswerte des Sensotorq® zeigen an, dass sich das gemessene Wicklungssystem im Generatorbetrieb befindet.

Messgröße	Messwert	Einheit
Drehzahl	16,2	min <sup>-1</sup>
Drehmoment	-58,8	kNm
Mech. Leistung	-100	kW
Strom	209	A
Spannung	316	V
Frequenz	7,58	Hz
Leistungsfaktor	0,865	
Wirkleistung	-98,6	kW
Blindleistung	-55,7	kvar

Tabelle 4: Messwerte an einem Wicklungssystem im Generatorbetrieb

Auch bei dieser Messung waren deutliche Schwingungen in Drehmoment, Strom, Spannung und den Leistungen zu sehen. Abb. 15, Abb. 16 und Abb. 17 zeigen das Drehmoment-, Strom- und Spannungssignal im Frequenzbereich. Bei ca. 15,2 Hz (doppelte Betriebsfrequenz) ist in allen Spektren ein sehr deutlicher Peak vorhanden. Daneben gibt es jeweils einige weitere Frequenzanteile.

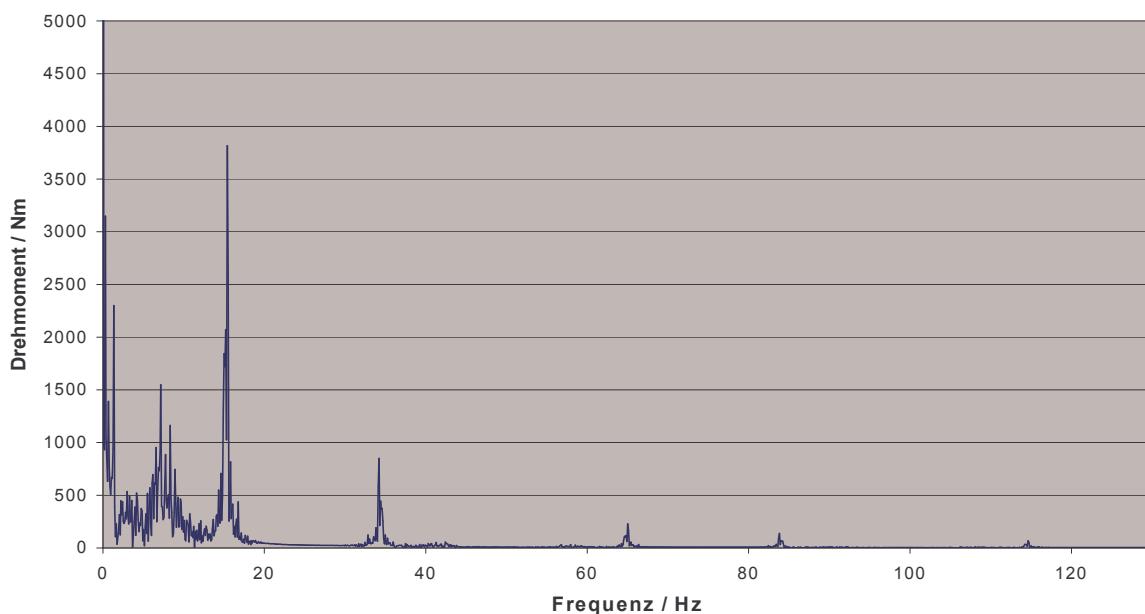


Abb. 15: Drehmoment im Generatorbetrieb (Frequenzbereich)

Titel: Prüfung des Windkraftgenerators WGP 1500 M56 Permanentmagnet		 Sensoplan
Kunde: Otto Bartholdi AG	Projektnr.: 307071Mai	07.08.2003

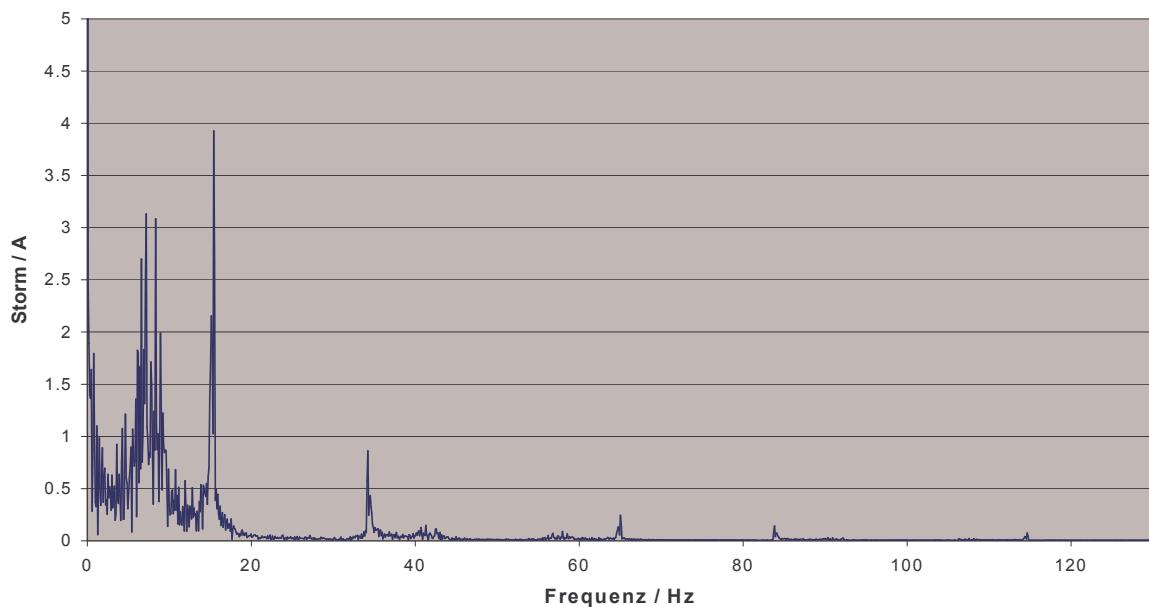


Abb. 16: Strom im Generatorbetrieb (Frequenzbereich)

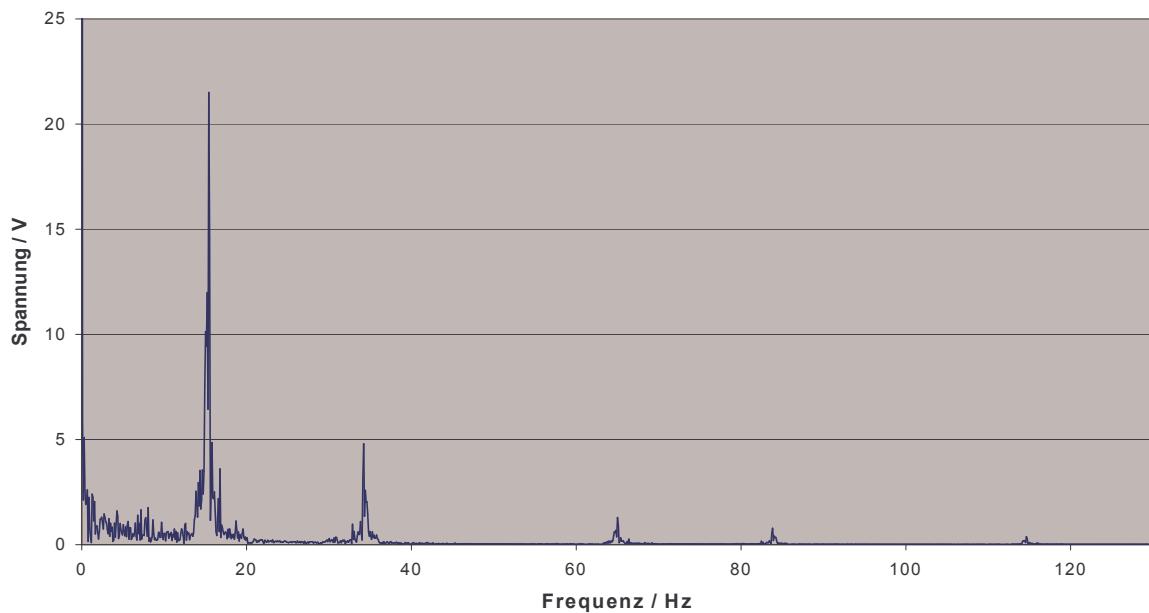


Abb. 17: Spannung im Generatorbetrieb (Frequenzbereich)

Titel: Prüfung des Windkraftgenerators WGP 1500 M56 Permanentmagnet	 Sensoplan	
Kunde: Otto Bartholdi AG	Projektnr.: 307071Mai	07.08.2003

## 4.7 Statorzustand und Spannungsunsymmetrie

Die Werte für den Statorzustand und für die Spannungsunsymmetrie wurden aus folgenden drei Hochlaufversuchen ermittelt:

- 1 Wicklungssystem 40 A Anfahrstrom + 1 A pro Umdrehung
- 2 Wicklungssysteme 40 A Anfahrstrom + 1 A pro Umdrehung
- 2 Wicklungssysteme 20 A Anfahrstrom + 0,5 A pro Umdrehung

Tabelle 5 zeigt jeweils den minimalen und den maximalen Wert des Statorzustands und der Spannungsunsymmetrie aus diesen Versuchen. Der Statorzustand bleibt immer weit im normalen Bereich, d.h. es sind keine Windungsschlüsse, Isolationsverlust oder ähnliches vorhanden. Die Spannungsunsymmetrie ist nur jeweils unmittelbar nach dem Beginn der Messungen erhöht, was durch das Einschalten bedingt ist. Sonst bleibt sie während der Messungen weitgehend unterhalb von 1 %, was im normalen Bereich liegt.

Statorzustand <sup>1</sup>	0 .. 6
Spannungsunsymmetrie <sup>2</sup>	0,1 % .. 3,8 %

Tabelle 5: Statorzustand und Spannungsunsymmetrie

<sup>1</sup> Die folgenden Einstufungen werden für die Zustandsbewertung verwendet:

- |                     |  |
|---------------------|--|
| Weniger als 20:     | Normaler Betrieb   |
| Zwischen 20 und 80: | Auffälliger Betrieb, das Überwachungsintervall verkürzen   |
| Über 80:            | Kritischer Betrieb, das Überwachungsintervall nochmals verkürzen und Korrekturschritte vorbereiten |
| Anzeige 9999:       | Die Spannungsunsymmetrie ist zu groß, der Statorwicklungszustand kann nicht ausgewertet werden     |

<sup>2</sup> Spannungsunsymmetrie nach folgender Definition: Maximale Strangspannung – Minimale Strangspannung bezogen auf den Mittelwert der Strangspannungen

Titel: Prüfung des Windkraftgenerators WGP 1500 M56 Permanentmagnet		 Sensoplan
Kunde: Otto Bartholdi AG	Projektnr.: 307071Mai	07.08.2003

## 5 Schlussfolgerungen

Die Ursache der teilweise in verschiedenen Versuchen und Messsignalen auftretenden Schwingungen bei doppelter Betriebsfrequenz, im Bereich von 1,1 Hz bis 1,6 Hz und bei unterschiedlichen weiteren Frequenzen konnte nicht geklärt werden. Sie könnte sowohl im Frequenzumrichter bzw. in der Steuerung/Regelung als auch in der Maschine selbst liegen.

Titel: Prüfung des Windkraftgenerators WGP 1500 M56 Permanentmagnet		 Sensoplan
Kunde: Otto Bartholdi AG	Projektnr.: 307071Mai	07.08.2003

## 6 Motordaten und Geräteeinstellungen

Maschinename WGP1500M56  
 Nennspannung 660.000000 V  
 Nennstrom 547.000000 A  
 Nennmoment 288700.000000 Nm  
 Leerlaufmoment 0.000000 Nm  
 Leerlaufabgleich Manuell  
 Nennfrequenz 10.000000 Hz  
 Nenndrehzahl 21.500000 rpm  
 Statorwiderstand 0.014300 Ohm  
 Schaltungsart Stern  
 Betriebsart Frequenzumrichter U~f  
 Frequenzbereich 2..66 Hz  
 Polpaarzahl 28

Analogausgang\_1\_Messgroesse Drehmoment  
 AA1 Oberer Messbereichsendwert 16.000000  
 AA1 Unterer Messbereichsendwert 0.000000  
 Analogausgang\_2\_Messgroesse Drehmoment  
 AA2 Oberer Messbereichsendwert 16.000000  
 AA2 Unterer Messbereichsendwert 0.000000

Spannungswandlertyp intern 1000V-Version  
 Primaerwandler Uebersetzungsfaktor 1.000000 V/V  
 Spannungswandler Uebersetzungsfaktor 40000.000000  
 Spannungswandler Shuntwiderstand 100.000000 Ohm  
 Stromwandlertyp LEM-flex RR3030 300A  
 Windungszahl 2  
 Stromwandler Uebersetzungsfaktor 100.000000  
 Stromwandler Shuntwiderstand 20.000000 Ohm  
 Strom Messeingang Spannung 3Veff

Mittelungszeit Drehmoment 0.5 Perioden  
 Mittelungszeit Drehzahl (mechn.) 0.5 Perioden  
 Mittelungszeit Frequenz (el.) 0.5 Perioden  
 Mittelungszeit el. Wirkleistung 0.5 Perioden  
 Mittelungszeit el. Scheinleistung 0.5 Perioden  
 Mittelungszeit el. Blindleistung 0.5 Perioden  
 Mittelungszeit cos phi 0.5 Perioden  
 Mittelungszeit mech. Leistung 0.5 Perioden  
 Mittelungszeit Wirkungsgrad 0.5 Perioden  
 Mittelungszeit Strom 0.5 Perioden  
 Mittelungszeit Spannung 0.5 Perioden

Verhaeltnis der Leerlaufmomente 0.5  
 Relaiskontakt1 Messgroesse Strom  
 Relaiskontakt1 oberer Messbereichsendwert 1.000000  
 Relaiskontakt1 Referenzwert 20.000000  
 Relaiskontakt1 unterer Messbereichsendwert 1.000000  
 Relaiskontakt2 Messgroesse Strom  
 Relaiskontakt2 oberer Messbereichsendwert 2.000000  
 Relaiskontakt2 Referenzwert 20.000000  
 Relaiskontakt2 unterer Messbereichsendwert 2.000000  
 Relaiskontakt3 Messgroesse Strom  
 Relaiskontakt3 oberer Messbereichsendwert 3.000000  
 Relaiskontakt3 Referenzwert 20.000000  
 Relaiskontakt3 unterer Messbereichsendwert 3.000000

Getriebe Uebersetzungsfaktor 1.000000  
 Getriebe Wirkungsgrad 100.000000  
 Abhaengigkeit des Wirkungsgrads 100

C:\Dokumente und Einstellungen\gsc.SENSOPLANHQ\Lokale Einstellungen\Temporary Internet Files\OLK4\307071Mai.doc	Seite 20/20
Eigenamt der Bartholdi AG – Inhalt unterliegt Geheimhaltung.	

Name: John ECKERLE  
Tel: +41-61-333 06 23

Dokument-Nummer:  
Anzahl Seiten: 1

Projekt: BFE-Förderung Datum: 03.12.04

---

## **Einleitung**

Es sind verschiedene Testversuche durchgeführt worden.

- Motor-Nennstrom-Test
- Motor-Generator-Test
- Kurzschluss-Test
- Dauerkurzschluss-Test
- Erwärmungslauf

### **Motornennstrom-Test**

Der Umrichter ist in Koblenz bei der Firma Bartholdi mit dem originalen Generator für das Projekt 1.2 MW Windkraftanlage für Leitner zusammengeschalten worden. Der Motor wurde motorisch angetrieben bis zu Nenndrehzahl und mit dem Nennstrom als Blindstrom.

### **Motor-Generator-Test**

In einem weiteren Versuch wird der Generator am System 1 motorisch angetrieben und mit dem System 2 generatorisch gebremst. Damit lässt sich der Gesamtwirkungsgrad der Prüfanlage ermitteln. Dieser Versuch ist bis 520kW (90% der Nennleistung) realisiert.

### **Kurzschluss-Test**

Bei diesem Test wird extern der Generator an den Klemmen kurzgeschlossen.

### **Dauerkurzschluss-Test**

Das System 2 wurde kurzgeschlossen. Das System 1 wurde soweit angetrieben bis System 2 den Nennstrom erreicht hat.

Anm. Streu-Induktivität lässt sich nicht bestimmen, weil die Frequenz zu tief ist.

### **Erwärmungslauf**

Der Motor wurde über eine längere Zeit (ca. 1 Std) mit Nennstrom und Nenndrehzahl gedreht (gemäss Motor-Nennstrom-Test). Dabei wurden die Temperaturen des Motors aufgezeichnet. (nicht in diesem Bericht)

## TUCSview-Aufzeichnungen

Bei den Versuchen werden die Aufzeichnungen vom Controller TUCS ausgewertet. In diesen Aufzeichnungen sind die Grundwellen ohne Oberwellen dargestellt.

Die TUCSview-Aufzeichnungen haben eine Abtastzeit von 800  $\mu$ s.

Legende:

I_M_Wirk	:	Effektivwert des Motorstromes
I_M_R	:	zeitlicher Ist-Wert des Motorstromes von der Phase R
I_M_S	:	zeitlicher Ist-Wert des Motorstromes von der Phase S
I_M_T	:	zeitlicher Ist-Wert des Motorstromes von der Phase T
I_N_Wirk	:	Effektivwert des Netzstromes
I_N_R	:	zeitlicher Ist-Wert des Netzstromes von der Phase R
I_N_S	:	zeitlicher Ist-Wert des Netzstromes von der Phase S
I_N_T	:	zeitlicher Ist-Wert des Netzstromes von der Phase T

## Testergebnisse Prüfstand bei der Firma Bartholdi AG in Koblenz

### Motor-Nennstrom-Test

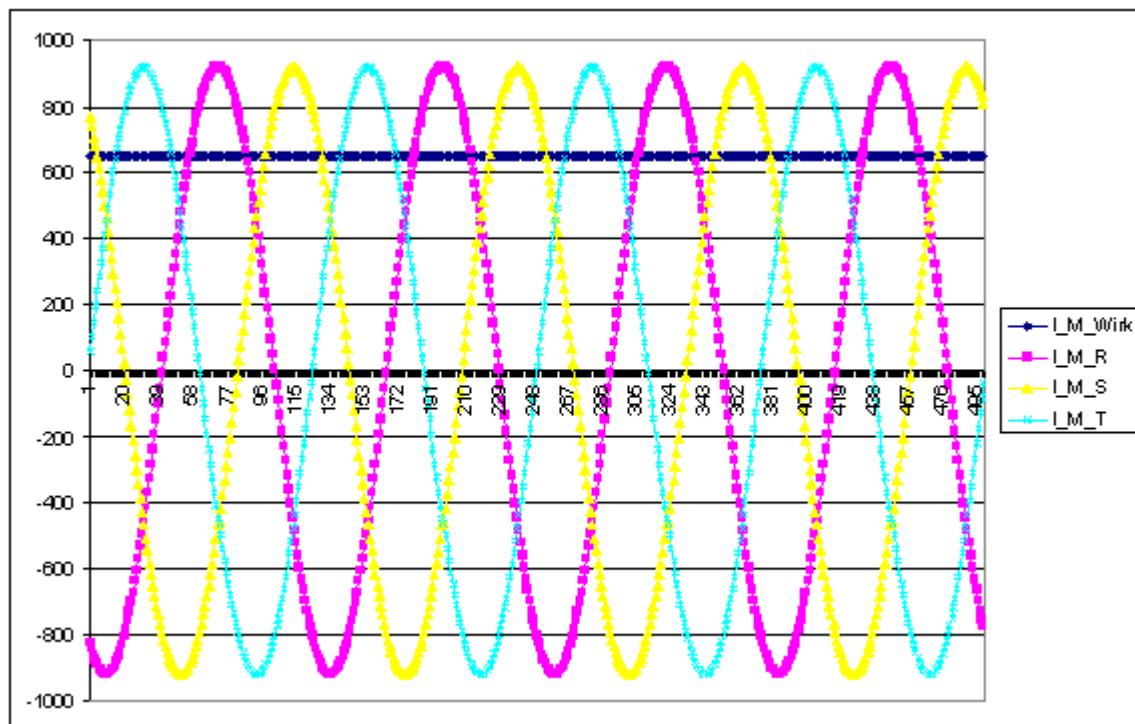
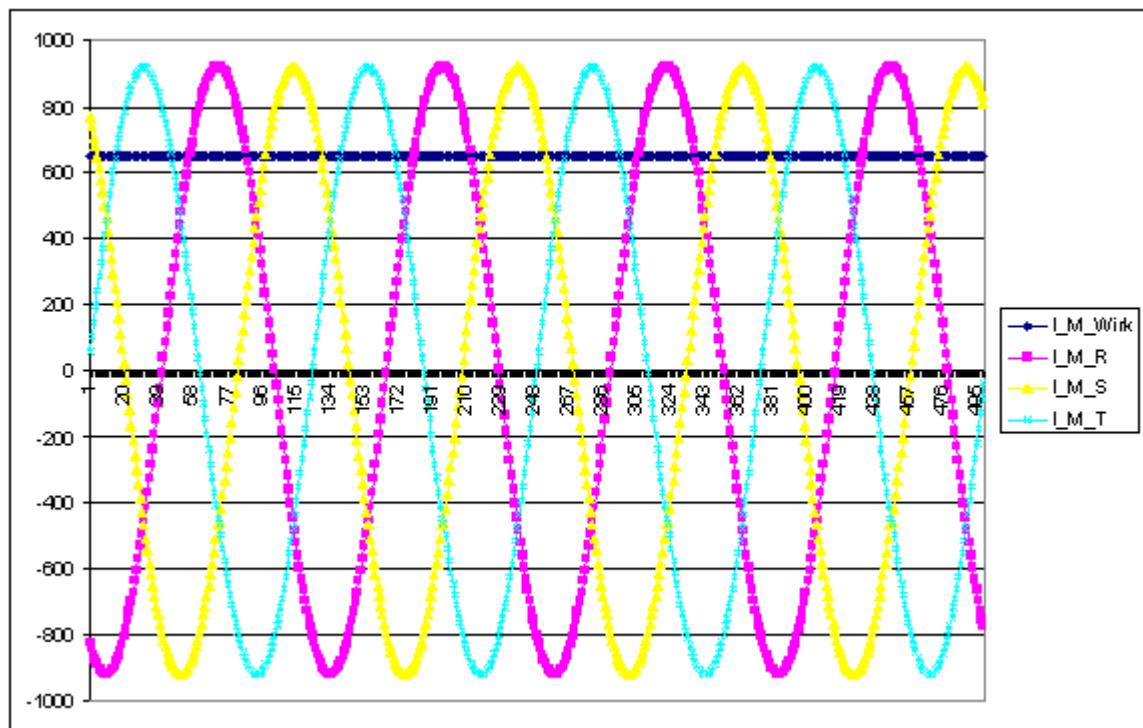


Bild 1 Motorströme [A] vom System 1



**Bild 2 Motorströme [A] vom System 2**

Temperaturen der IGBT-Kühlkörper auf der Motorseite

	System 1	System 2
Phase U	55 °C	55 °C
Phase V	60 °C	55 °C
Phase W	55 °C	55 °C

Luftgeschwindigkeit durch die IGBT-Kühlkörper

	System 1 [m/s]	System 2 [m/s]
Phase U (Maschine)	7.2	7.3
Phase V (Maschine)	7.1	7.7
Phase W (Maschine)	7.0	7.1
Phase R (Netz)		7.7
Phase S (Netz)		6.8
Phase T (Netz)		6.9

Die Umgebungstemperatur beträgt 23 °C

Der delta T Hub ist somit 32 °C

Die Versorgungsleistung beträgt:

System 1: -31kW

System 2: -14kW

Gesamtleistung: -45 kW

## Motor-Generator-Test

TEST 1:

- Drehzahl: 10 rpm
- $I_M\text{Wirk}_1$ : 650 A (motorisch)
- $I_M\text{Wirk}_2$ : 580 A (generatorisch)

Leistungsbilanz auf der Netzseite während 1.6 s ergeben folgende Werte:

System1: 284 kW  
System2: 283 kW

Gesamtwirkung ist 0.99

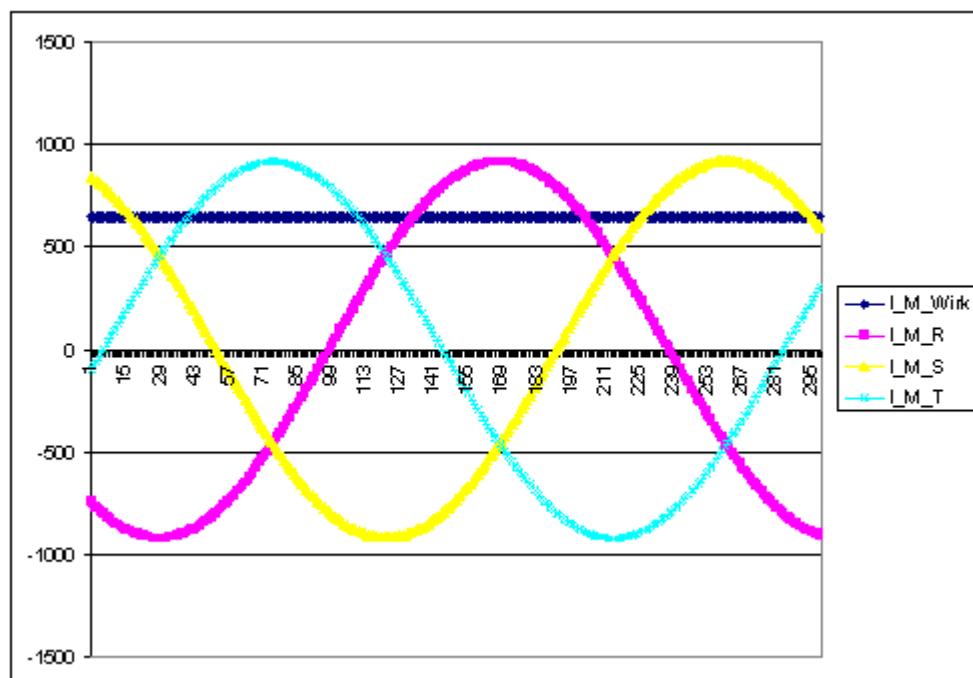


Bild 3 Motorströme [A] vom System 1

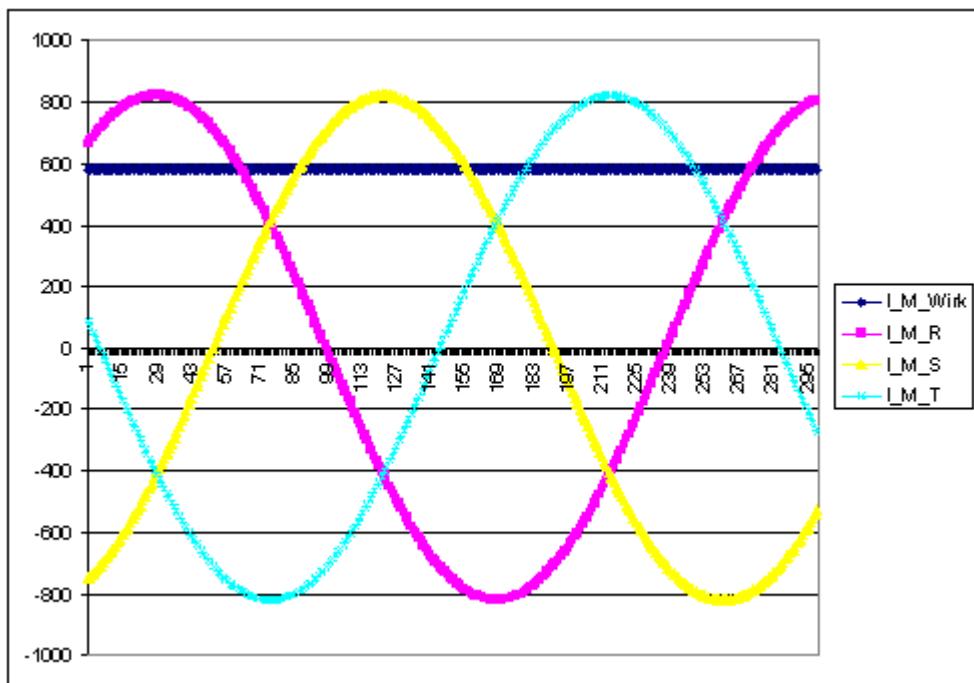


Bild 4 Motorströme [A] vom System 2

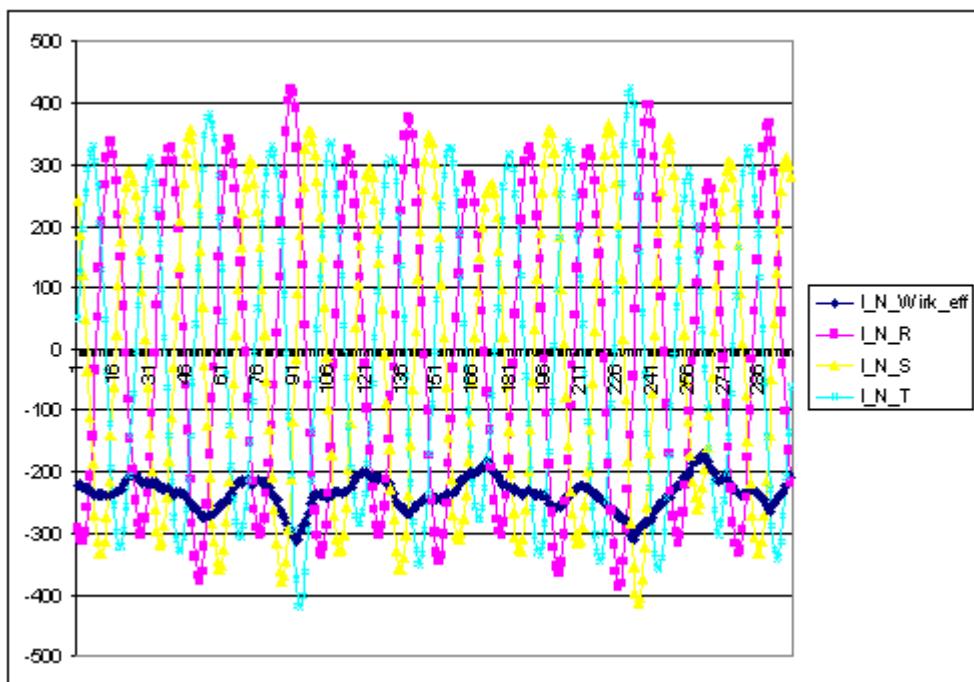
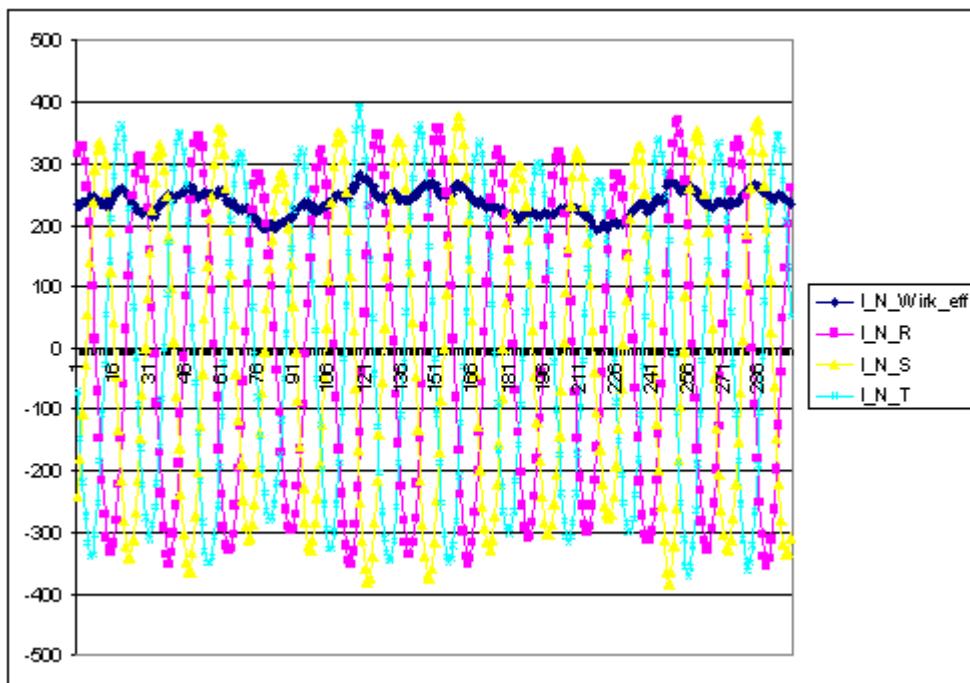


Bild 5 Netzströme vom System 1



**Bild 6 Netzströme vom System 2**

TEST2:

- Drehzahl: 16 rpm
- $I_M$  Wirk\_1: 560 A (motorisch)
- $I_M$  Wirk\_2: 490 A (generatorisch)

Leistungsbilanz auf der Netzseite während 1.6 s ergeben folgende Werte:

System1: -411.5 kW  
 System2: +401.5 kW

Gesamtwirkung ist 0.976

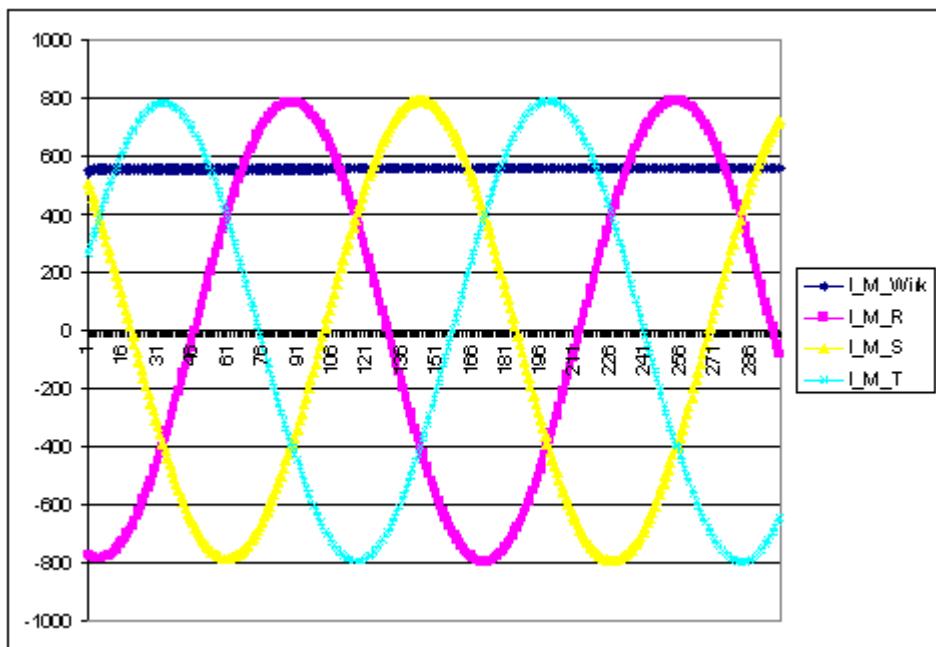


Bild 7 Motorströme [A] vom System 1

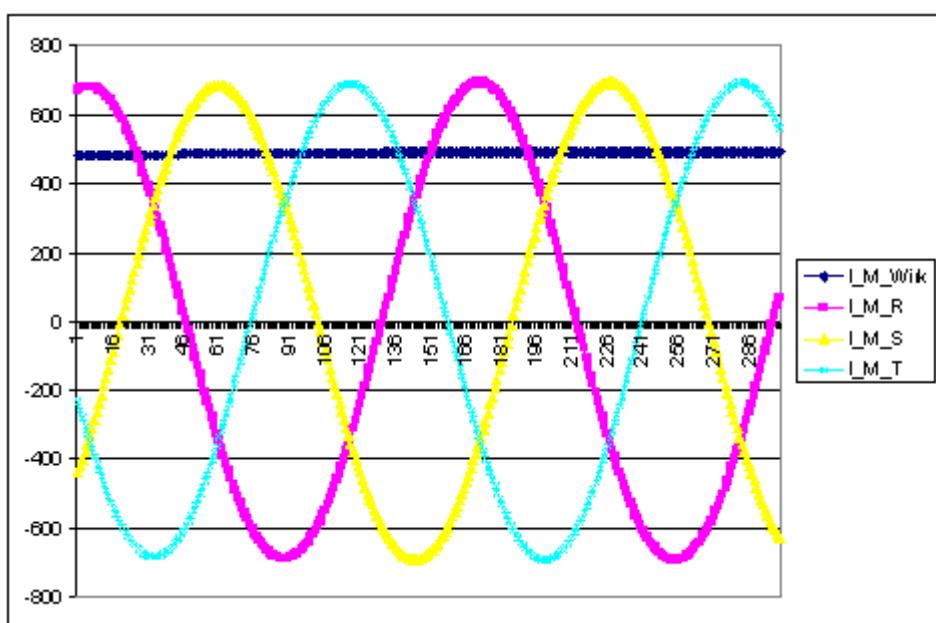


Bild 8 Motorströme im System2

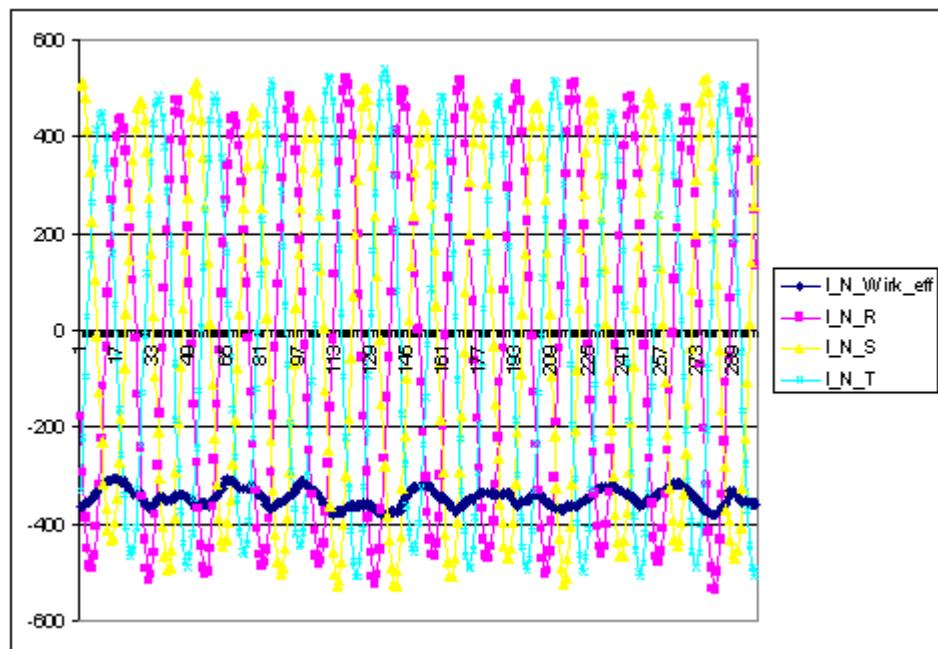


Bild 9 Netzströme vom System 1

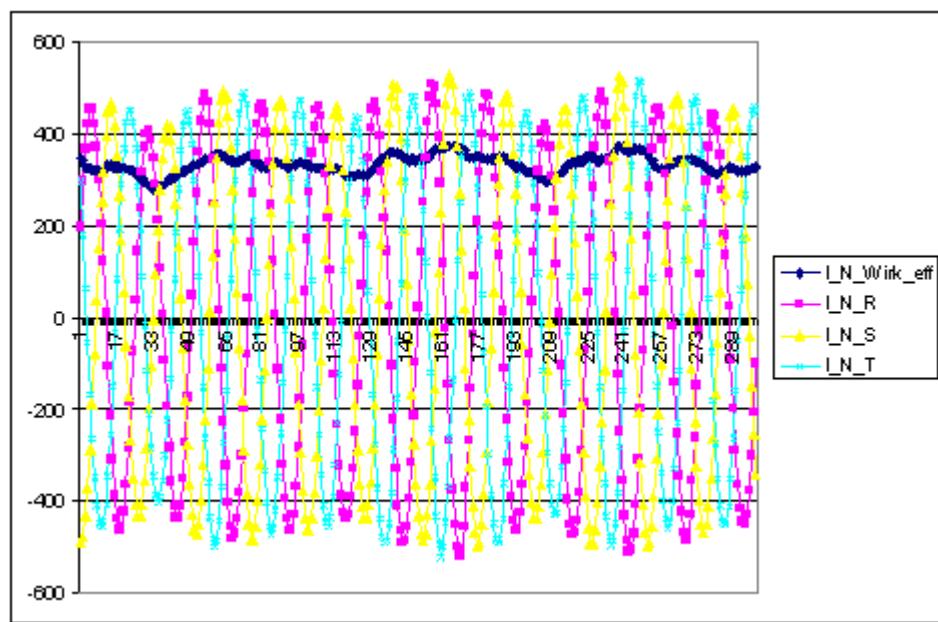


Bild 10 Netzströme vom System 2

### TEST 3:

- Drehzahl: 25 rpm
- $I_M\text{ Wirk}_1$ : 465 A (motorisch)
- $I_M\text{ Wirk}_2$ : 400 A (generatorisch)

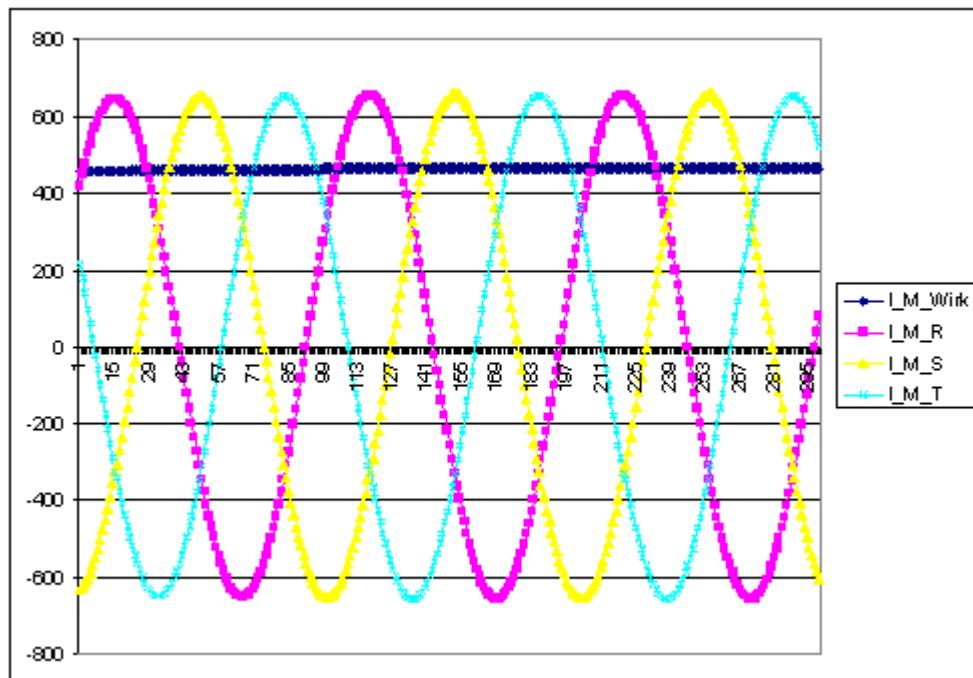


Bild 11 Motorströme [A] vom System 1

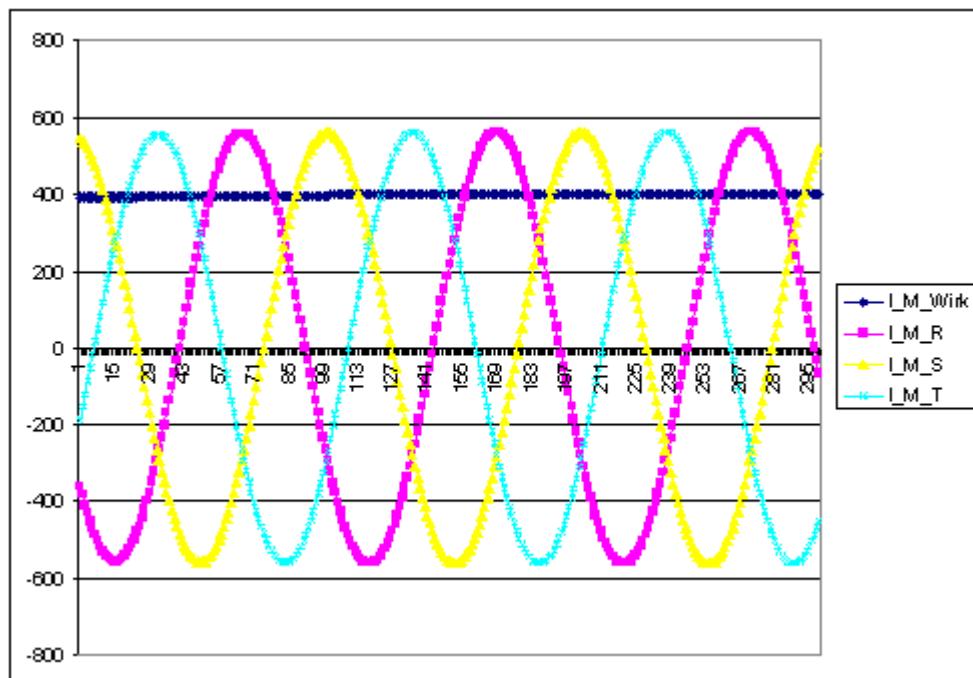
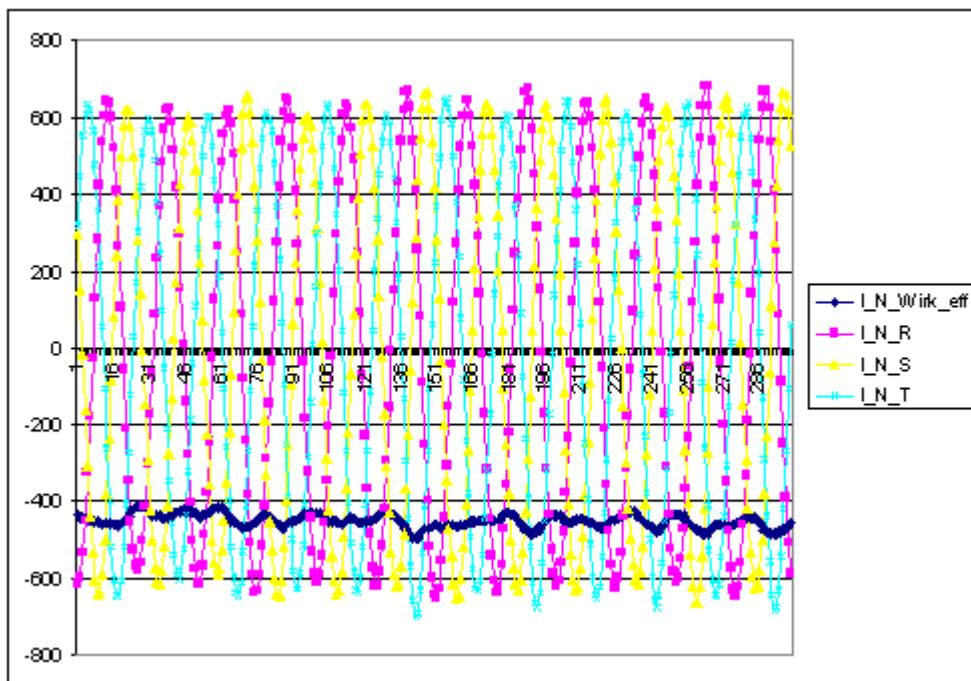
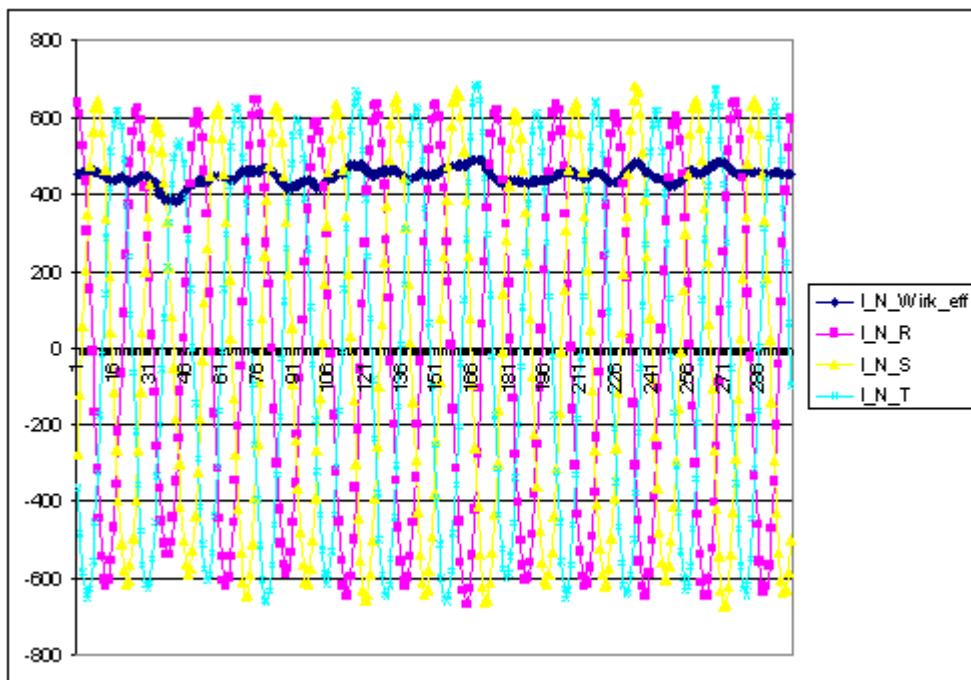


Bild 12 Motorströme [A] vom System 2



**Bild 13** Netzströme vom System 1



**Bild 14** Netzströme vom System 2

Leistungsbilanz auf der Netzseite während 1.6 s ergeben folgende Werte:

System1: -543 kW  
 System2: +548 kW

## Kurzschluss-Test

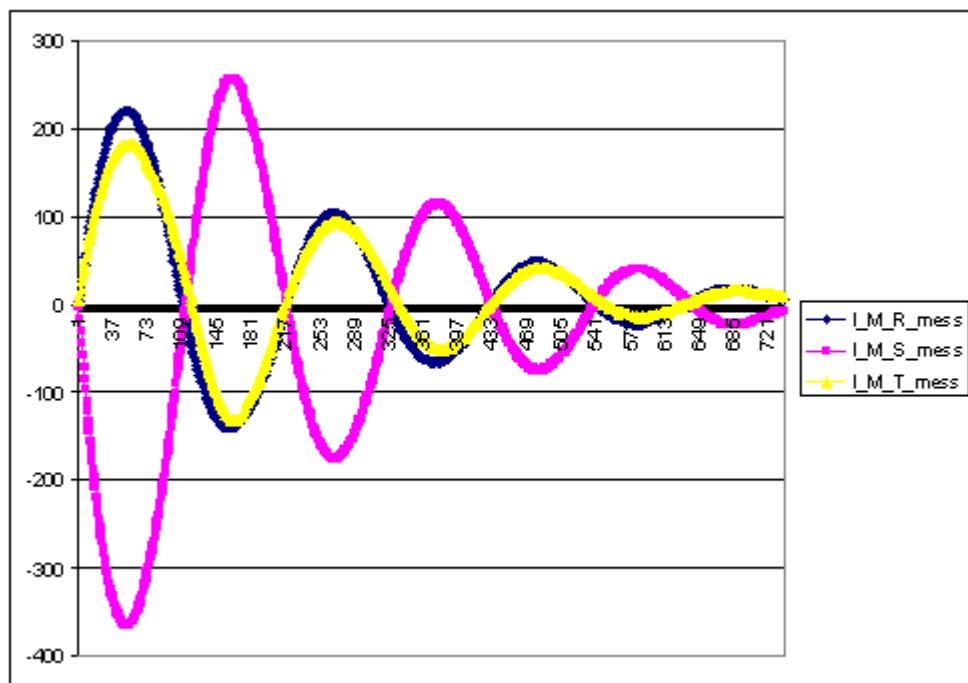


Bild 15 Externer Kurzschluss bei 5 rpm

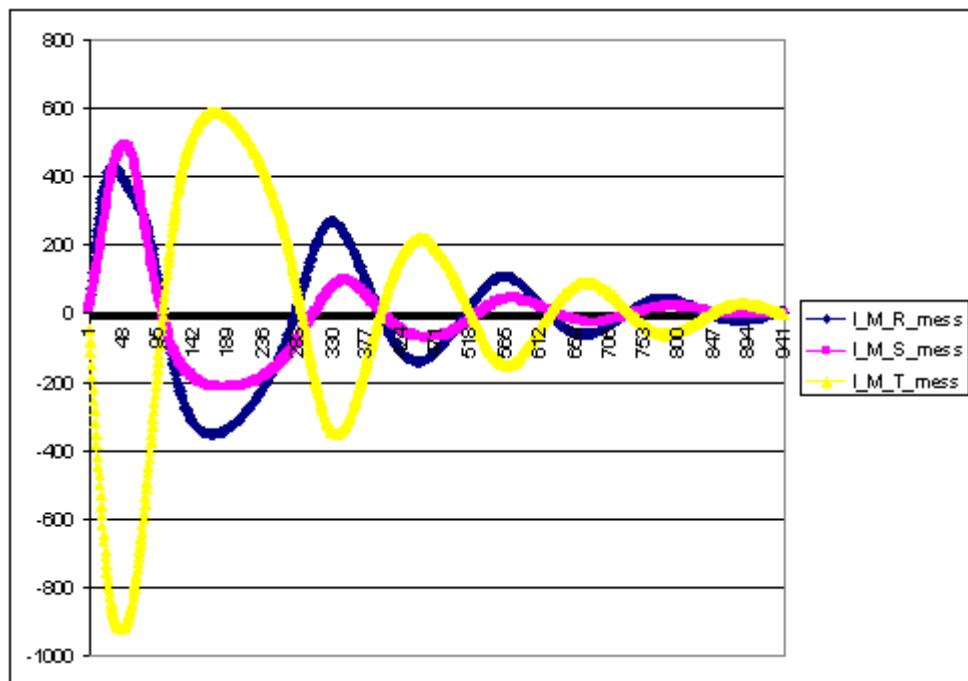


Bild 16 Externer Kurzschluss bei 10 rpm

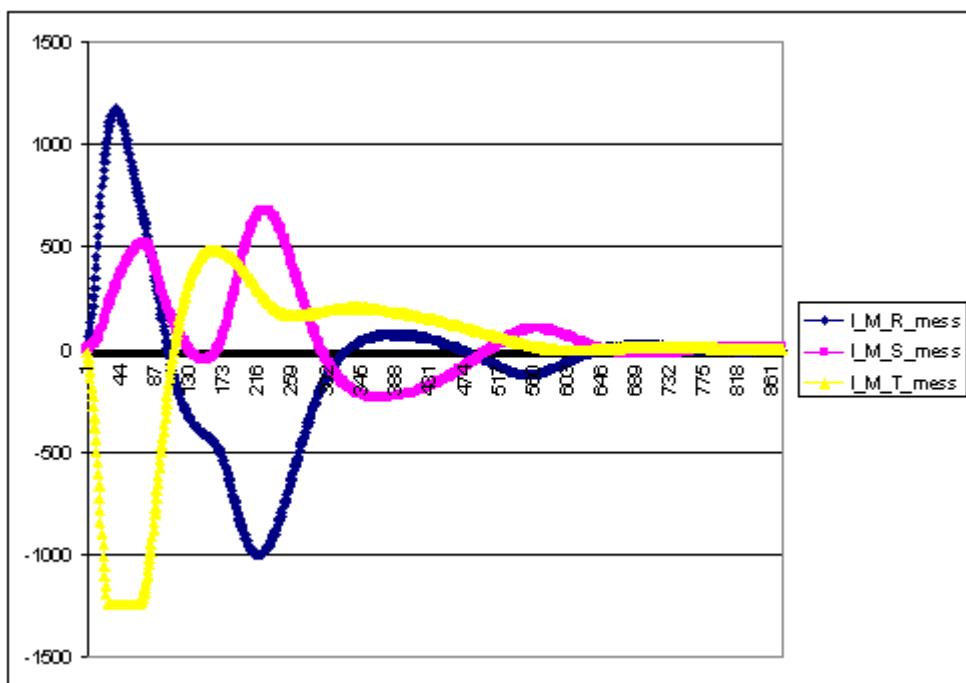


Bild 17 Externer Kurzschluss bei 15 rpm

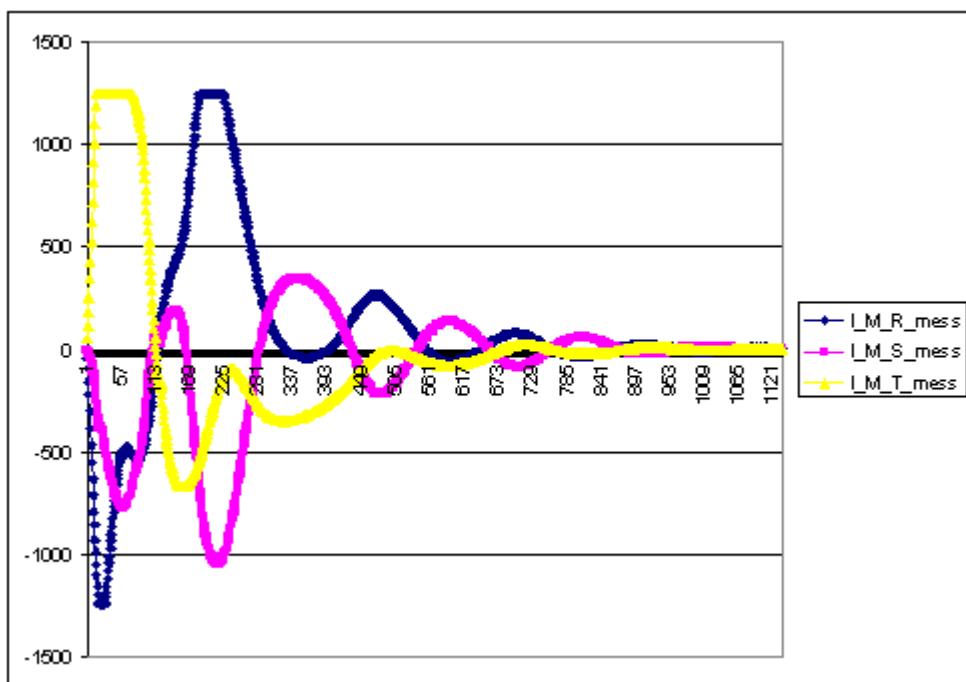


Bild 18 Externer Kurzschluss bei 21.5 rpm (Nenndrehzahl)