

Schlussbericht **April 2004**

Prototyp Energiesparmotor

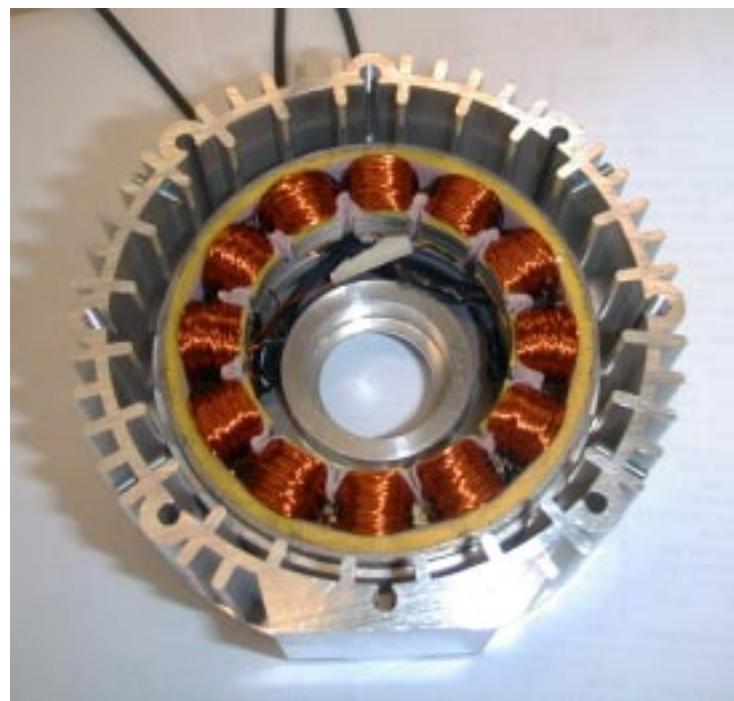
ausgearbeitet durch

Jörg Weingartner
El. Ing. FH
Bächli AG
Rainacherstrasse 12
6010 Kriens-Obernau

und

Markus Lindegger
dipl.El.Ing.HTL
CIRCLE MOTOR AG
Brüggliweg 18
3073 Gümligen

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.



Weitere Informationen über das Programm „Elektrizität“ des Bundesamts für Energie stehen auf folgender Web-Seite zur Verfügung:

www.electricity-research.ch

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
Zusammenfassung (deutsch)	2
Résumé (français)	3
Abstract (english)	4
1. Ausgangslage, Vorgehen	5
1.1 Wicklung	5
1.2 Rotor	8
2. Datenblätter	9
3. Simulation	10
3.1 Flussverlauf in der Stabkernwicklung	10
3.2 Flussverlauf in der Spulenwicklung	11
3.3 Flussverlauf in der Ringspulenwicklung	12
4. Prototypen	13
5. Messungen	14
5.1 Messbericht der Stabkernwicklung	16
5.2 Messbericht der Ringwicklung mit einem Pulverkern	18
5.3 Messbericht der Ringwicklung mit geblechtem Kern	20
5.4 Messbericht der Spulenwicklung	22
5.5 Messbericht des Normmotors	23
6. Auswertung	24
7. Ausblick	26
8. Quellenverzeichnis	28

Zusammenfassung (deutsch)

Die Hälfte der elektrischen Energie wird in der Industrie in Elektromotoren verbraucht. Asynchronmotoren im Leistungsbereich unter 1kW, die im Teillastbereich an einem Steuergerät betrieben werden, arbeiten mit einem schlechten Wirkungsgrad. CIRCLE MOTOR AG produziert spezielle elektrische Motoren mit einem Permanentmagnet-Rotor. Diese Motoren erreichen im Teillastbereich einen hohen Wirkungsgrad.

Der erste Auftrag „Energiesparmor“ erteilt vom BFE an CIRCLE MOTOR AG war die Prüfung der technischen Machbarkeit und der Marktfähigkeit. Auf Grund dieses Projektberichts folgt nun die Fortsetzung.

Ziel des Auftrags Prototyp Energiesparmor ist das Wicklungsverfahren und die Statorkonstruktion zu optimieren in Bezug auf den Wirkungsgrad. Drei verschiedene 230 Volt Wicklungsarten (die Ringspulenwicklung, die Stabkernwicklung und die Spulenwicklung) wurden geprüft und in Prototypen hergestellt. Die Auswertung erfolgt zu einem in einer Simulation (FEMM) und zum andern auf dem Prüfstand der HTA Luzern. Die Energiesparmor mit den optimierten Statoren werden mit Asynchronmotoren hoher Effizienzklasse bezüglich dem Wirkungsgrad verglichen.

Der Motor mit der Ringwicklung und dem geblechtem Kern hat den besten Wirkungsgrad. Im Teillastbereich weisen alle Energiesparmor deutlich den höheren Wirkungsgrad auf als der Normmotor.

Auf der anderen Seite hat kein Energiesparmor die 250W Wellenleistung erreicht. Mit einigen Anpassungen sollte aber dies kein Problem sein.

Auf Grund der positiven Messwerte soll in einem Projekt die Steuerung des Energiespormotors optimiert werden.

Résumé (français)

Dans l'industrie la moitié de l'énergie électrique est utilisée par les moteurs électriques. Les moteurs asynchrones fonctionnent à des puissances inférieures à 1 kW, qui ne sont pas chargés totalement et qui sont régulés, fonctionnent avec des mauvais rendements. CIRCLE Motor AG produit des moteurs électriques spéciaux dotés d'un rotor à aimant permanent. Ces moteurs obtiennent suivant la charge un haut rendement.

La première demande de moteur à économie d'énergie passée de BFE à CIRCLE MOTOR AG était d'examiner les faisabilités techniques et les possibilités du marché.

Selon cette base, nous pouvons vous informer de ce qui suit:

Le but du projet « moteur à économie d'énergie » est d'optimiser la fabrication des bobines et celle du stator pour trouver un meilleur rendement.

Pour ce faire, nous examinons trois différentes techniques de bobinage 230V; (bobine à tores, bobine à noyau et bobine à anneaux). Nous construisons des prototypes que nous testons d'une part par simulations (FEMM), d'autre part sur un banc d'essai de l'école HTL à Lucerne.

On compare en suite les résultats de ce moteur à économie d'énergie à ceux du moteur asynchrone, mettant en évidence le meilleur rendement de notre moteur.

Le moteur à bobine à tores et à noyau en tôle est plus efficace.

Comparé aux moteurs asynchrones, le moteur à économie d'énergie a un rendement plus élevé quand il travaille à faible régime.

Mais aucun moteur à économie d'énergie n'a atteint les 250 W, on devrait y arriver avec quelques adaptations.

Ce projet devrait être poursuivi en tenant compte de ces résultats positifs. Le système de contrôle du moteur sera amélioré et optimisé.

Ce projet devrait être poursuivi en tenant compte de ces résultats positifs. Le système de contrôle du moteur sera amélioré et optimisé.

Abstract (english)

Electro motors consume half of the industrial energy. Asynchronous motors in the power range below 1kW have a bad efficiency, if used with a controller device and low load. CIRCLE MOTOR Ltd. produces advanced electrical motors with permanent magnet rotors. Those motors are high efficient also in the low load range.

The target of the first project „Eco Motor“ was the technical feasibility and market potential. Because of that project report follows now the continuation.

The target of this project „prototyp Eco Motor“ is the winding technique and the construction of the stator to optimize.

The winding techniques (toroid winding, core winding, coil winding) are examined and realisation of prototypes Eco Motor for the nominal voltage of 230V.

The evaluation follows in a simulation (FEMM) and on the other hand on the test bench of the Lucerne School of Engineering and Architecture.

The measured data sets of the Eco Motor have been compared with an asynchronous motor. The asynchronous motor has a high efficiency class.

The Eco Motor with the toroid winding has the best efficiency. All prototypes of Eco Motors have the higher efficiency with low load than the asynchronous motor. On the other hand any Eco Motor has not reached the nominal power of 250W. But with few adjustments this is no problem.

Due to these positive measuring data is to be continue this project. The next Step is to study the controller of the Eco Motor.

1. Ausgangslage, Vorgehen

Die meisten in der Industrie eingesetzten Motoren sind Asynchronmotoren. Die Wicklung ist als Drehstromwicklung ausgebildet – der Rotor besteht aus einem Kurzschlussläufer. Der Rotor setzt sich in Bewegung, wenn eine Differenz zwischen der Drehzahl des magnetischen Drehfeldes und der Rotordrehzahl vorhanden ist. Der Strom fliesst einerseits durch die Wicklung des Stators und anderseits auch durch Induktion des Kurzschlussläufers im Rotor. Somit entstehen im Stator, wie auch im Rotor Wärmeverluste.

Der Energiesparmor ist ein „brushless DC“ Motor. Dieser Permanentmagnet-Motor benötigt für den Aufbau des Magnetfeldes im Motor keine zusätzliche Energie. Durch diese Eigenschaft werden im Leerlauf geringere Leerlaufverluste erzielt und dadurch wird auch im Teillastbetrieb ein höherer Wirkungsgrad erreicht.

Auf Grund des ersten Projekt Energiesparmor über die Marktfähigkeit und einer Besprechung mit einem namhaften Industriebetrieb, kann sich der Energiesparmor im Markt durchsetzen.

Für diese Forschungs- und Entwicklungsabteilung ist dieser Energiesparmor dank seiner kompakten Bauweise und seinem starken Anlaufmoment interessant.

Es wurden drei Prototypen hergestellt, mit je einer andern Wicklung (Stabkern-, Spulen- und Ringspulenwicklung). Diese drei Motoren werden dann auf einem Prüfstand ausgemessen und mit einem Normmotor verglichen.

1.1 Wicklung

Die Wicklung ist das Kernelement der Motoren - deshalb ist die Evaluation der optimalen Wicklung von grösster Bedeutung.

Folgende Wicklungsarten wurden unter die Lupe genommen:

Die Stabkernwicklung

Diese Niedervoltwicklung wurde von einem bestehenden Motor ausgebaut und neu gewickelt.
Der Stator besteht aus 12 Spulen, welche auf einem geblechtem Eisenpaket liegen.
Die Wicklung ist in Stern geschaltet.



Auf dem Eisenpaket wurden auf jeden Steg mit einem $\varnothing 0.5\text{mm}$ Kupferdraht 125 Windungen aufgewickelt:

Diese handgefertigte Wicklung ist für eine Spannung von 230V und einem Strom von 1.5A ausgelegt. Der Wicklungssinn der gleich durchflossenen Spulenpaare wechselt jedes Mal. Somit gibt es zwei Spulenpaare pro Phase – ins Gesamt vier Spulen pro Phase.

Stabkern- oder Zahnwicklung weisen eine hohe Leistungsdichte auf und können mit Nadelwickelmaschinen automatisch hergestellt werden.

Uns interessiert die Effizienz einer solchen Wicklung und damit die Eignung für einen Energiesparmotor.

Die Spulenwicklung

Diese Wicklung wurde von einer bestehenden Asynchronmaschine ausgebaut und mit einem neuen Permanentmagnet-Rotor ausgerüstet.



Neu wird dieselbe ASM Wicklung anders bestromt. Mit Hilfe einer Servosteuerung wird ein Gleichstrom alternierend auf zwei Phasen geschaltet. Somit ist aus dem ehemaligen Asynchronmotor ein bürstenloser Gleichstrommotor geworden.

Uns interessiert, ob ein käuflicher Normmotor mit Spulenwicklung durch tauschen des Rotors in einen Energiesparmotor umgebaut werden kann. Der neue Rotor ist mit Permanentmagneten bestückt.

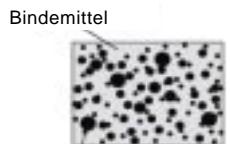
Die Ringspulenwicklung

Die Circle Motoren sind mit einer solchen Ringwicklung ausgestattet. 24 Spulen wurden auf einen Pulverkern gewickelt. Die Wicklungen sind in Stern geschaltet



24 Spulen mit je 100 Windungen wurden mit einem Ø0.4mm Kupferdraht gewickelt. Die Spulenreihenfolge ist RSTRST... die abwechslungsweise den Wickelsinn ändern. Daraus entstehen 8 Spulensysteme (RST). Die Wicklung wurde im Gehäuse vergossen.

Der Kern wurde nicht wie bisher mit Blechen geschachtelt, sondern mit einem Pulverkern ersetzt. Pulverkerne haben einen verteilten Luftspalt, bedingt durch den Abstand der einzelnen Eisenteilchen im Kernmaterial.



Ferromagnetische Körner

Pulverkern

Da der Pulverkern schneller als der geblechte Kern in die Sättigung kommt, ist der Durchmesser des Pulverkerns grösser.

Der Pulverkern ist aus Blechpulver und nicht aus Ferritpulver hergestellt. Mit diesem Blechpulver ist der Kern nicht spröde und somit gut mechanisch verarbeitbar.



Uns interessierte, ob durch den Einsatz eines Eisenpulverkerns, anstelle eines gebleachten Kerns, die Eisenverluste verringert werden. Gemäss Datenblatt sind die Eisenverluste kleiner als bei Blechen, wobei die maximale Induktion bei akzeptablen 1.2 T liegt.

Steckkern

Für die industrielle Fertigung wäre ein Ringkern als Steckkern interessant, da bei einem vollen Ring die Wickelarbeit aufwendig ist.

Die beiden Ringhälften mit den einzelnen Spulen werden wie ein Schnittbandkern zusammen geklebt. Die Spulenenden könnten mit einer Printplatte funktionsgemäß geschaltet werden.

Ein solcher Schnittbandkern ab Lager ist meistens aus kornorientierten Blechen. Diese sind aber für einen Motor unbrauchbar, da der magnetische Fluss in kornorientierten Blechen sonst nur in einer Richtungen fliessen kann. Der Kern muss aus nicht kornorientierten Blechen aufgebaut sein - was eine Sonderanfertigung wäre.

Der Pulverkern kann auch als Steckkern gefertigt werden.

1.2 Rotor

Der Rotor der Energiesparmotoren besteht aus starken Permanentmagneten (Remanenz=1.2T). Die verwendeten Neodym-Magnete (NdFeB) gehören zu den Seltenerd-Magneten. Diese weisen gegenüber Alnico- und Ferritmagneten eine bis zu zehn mal höhere Energiedichte auf.

Den Rotor mit einem Magnetring aufzubauen ist zur Zeit nicht möglich, da diese Magnete noch zu schwach sind. In Zukunft werden diese noch viel stärker - sind aber für den Energiespamotor nicht ideal, da sich die Feldlinien im Luftspalt gerade wieder schliessen.

Zwischen dem Rotor und dem Flansch ist ein Blech angebracht, das den magnetischen Streufluss abschirmt und so zur Minderung der Wirbelströme im Gehäuse beitragen.

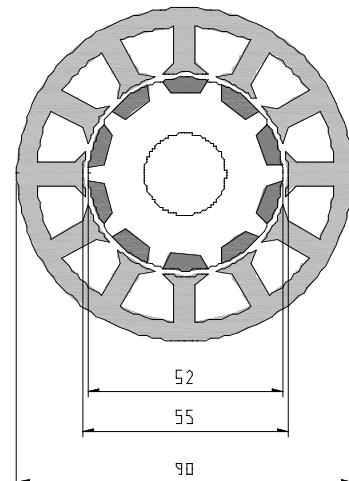
	<p>Der Rotor der Stabkernwicklung besteht aus 10 Permanentmagneten. Die Wicklung ist 12 polig – der Motor wie der Rotor jedoch 10 polig.</p>
	<p>Der Rotor der Spulenwicklung wird mit zwei Permanentmagneten ausgeführt.</p>
	<p>Der Rotor der Ringspulenwicklung ist mit 8 Permanentmagneten bestückt.</p>

2. Datenblätter

Motor mit der Stabkernwicklung

Leistung	200 W
Drehzahl	3000 min ⁻¹
Spannung	230 V
Phasenstrom	1.5 A

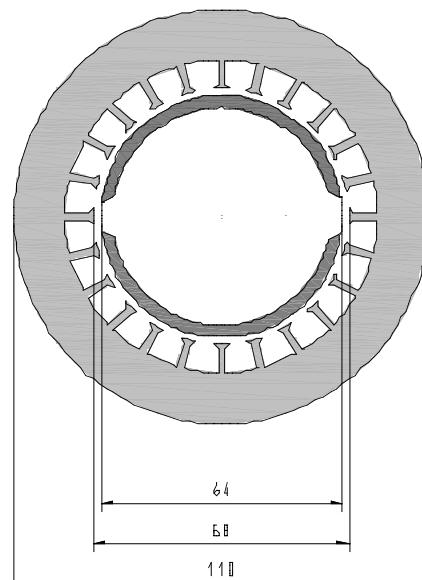
Anzahl Magente	10
Luftspalt	1.5 mm
Mittlere Flussdichte	0.6 T
Anzahl Nuten	12
Windungen pro Spule	125
Drahtquerschnitt	0.2 mm ²



Motor mit der Spulenwicklung

Leistung	250 W
Drehzahl	2800 min ⁻¹
Spannung	230 V
Phasenstrom	1.1 A

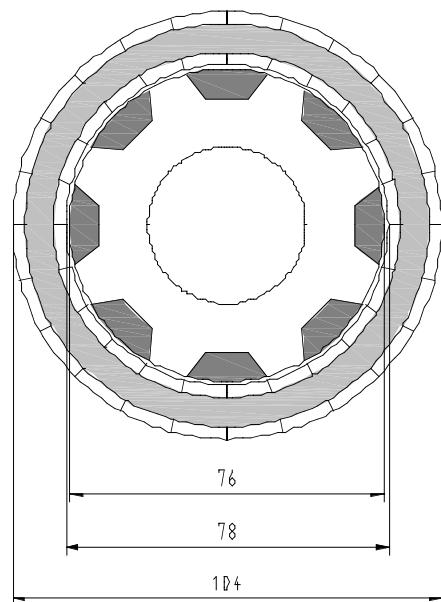
Anzahl Magente	2
Luftspalt	2 mm
Mittlere Flussdichte	0.55 T
Anzahl Nuten	24



Motor mit der Ringspulenwicklung

Leistung	230 W
Drehzahl	3000 min ⁻¹
Spannung	230 V
Phasenstrom	1.7 A

Anzahl Magente	8
Luftspalt	1mm
Mittlere Flussdichte	0.5 T
Anzahl Spulen	24
Windungen pro Spule	100
Drahtquerschnitt	0.16 mm ²

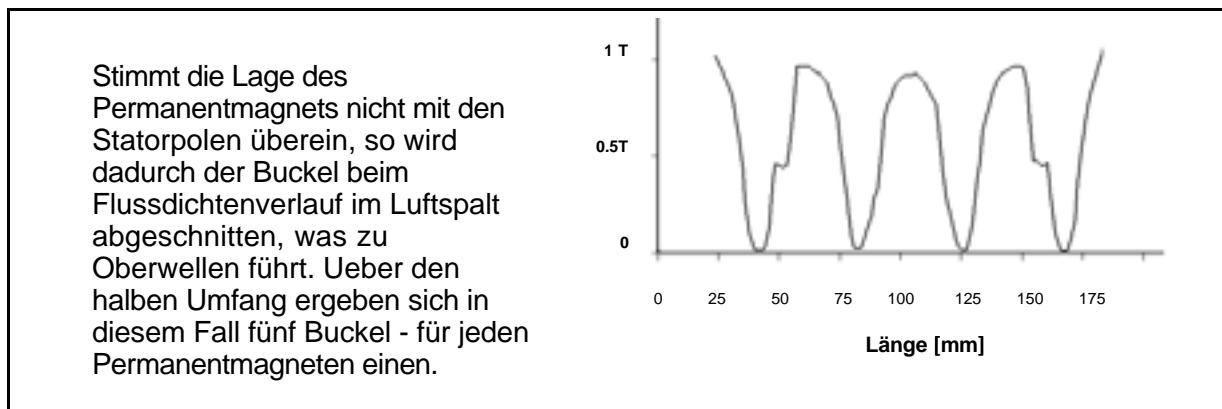


3. Simulation

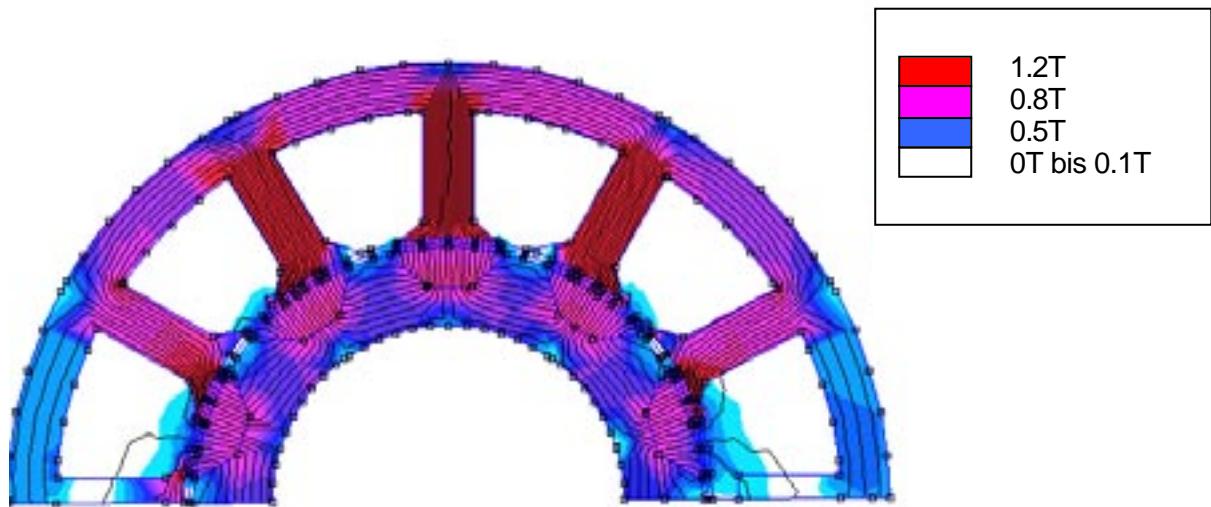
Die Simulationen wurden mit dem FEMM durchgeführt. FEMM basiert auf der Finit-Element-Methode. Die Simulation wurde ohne Speisung der Wicklung durchgeführt.

3.1 Flussverlauf in der Stabkernwicklung

Die Stabkernwicklung hat durch ihre ausgeprägten Pole ein Rastmoment. Das Rastmoment tritt dann auf, wenn man einen unbestromten Elektromotor mit Permanentmagnet-Rotor an der Welle anfasst und dreht. Das Rastmoment ist jenes Moment, welches benötigt wird den Rotor zu drehen. Deshalb hat der Motor mit der Stabkernwicklung, um dieses Moment möglichst klein zu halten, nicht die gleiche Polzahl wie der Rotor.



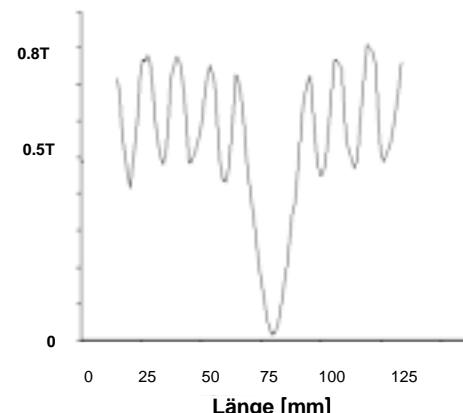
Die magnetische Flussdichte in den Statorstegen ist je nachdem wo sich der Permanentmagnet befindet ziemlich hoch.



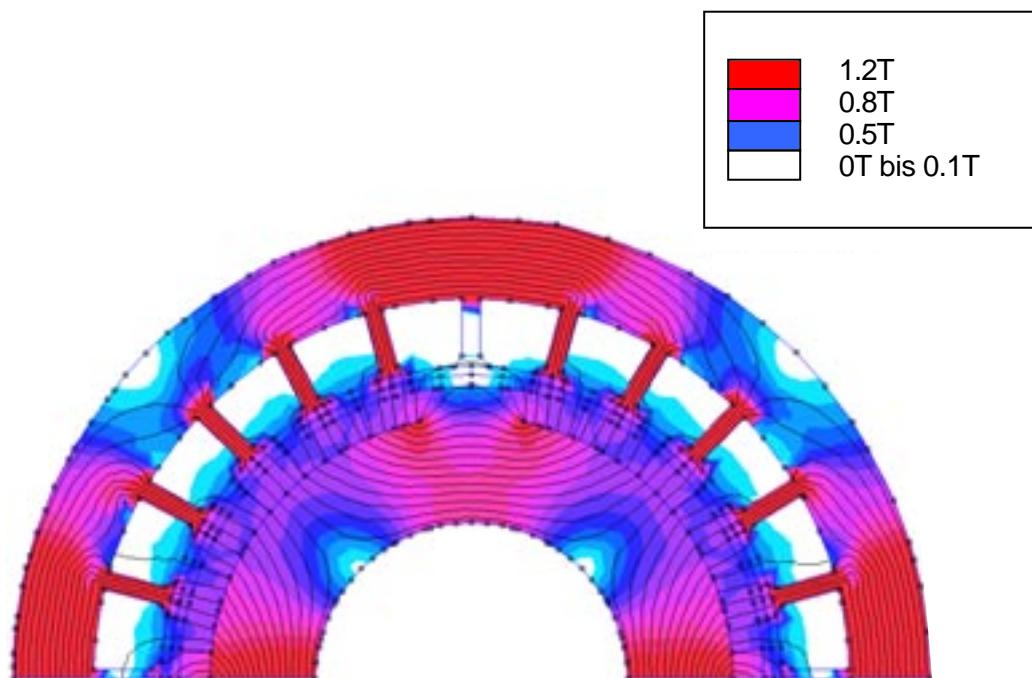
3.2 Flussverlauf in der Spulenwicklung

Um auf die Drehzahlen zu kommen muss die Asynchronmaschine zweipolig sein. Deshalb ist der Rotor nur mit zwei Polen ausgestattet. Die Permanentmagnete sind auf die Oberfläche des Rotors geklebt. Die eine Hälfte des Rotors mit Südpolen, die andere mit Nordpolen. Der Abdeckungsfaktor mit Magnetmaterial auf der Rotoroberfläche beträgt 85%. Ist dieser Faktor grösser, so verbraucht es unnötigerweise teures Magnetmaterial.

Durch die Stege in der Spulenwicklung fliesst der magnetische Fluss. Bei jedem Steg gibt es deshalb auch ein Ausschlag der Flussdichte im Luftspalt, was zu Oberwellen führt. Ueber den ganzen Umfang des Motors gibt es zwei grosse Buckel – da es auch nur zwei Permanentmagnete im Rotor sind.



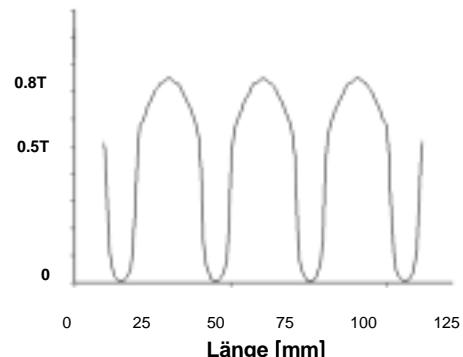
Die 24 Stege im Stator sind durch die Flussdichte immer gleich belastet. Nur bei der Polteilung ist jeweils die Flussdichte vernachlässigbar klein.



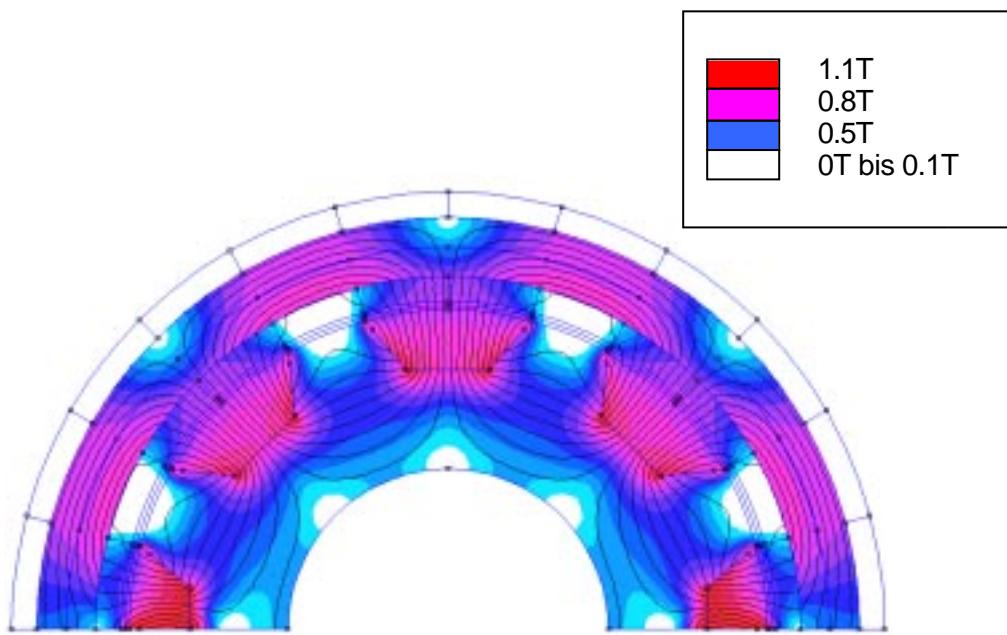
3.3 Flussverlauf in der Ringspulenwicklung

Der magnetische Fluss der Wicklung ändert in jedem Spulensystem seine Richtung. Der Fluss von den Dauermagneten im Rotor schliesst sich über die Statorspulen. Daraus folgt eine magnetische Kopplung zwischen Stator und Rotor.

Die Ringspulenwicklung ist ohne ausgeprägten Pole erstellt. Dadurch verlaufen die 8 Buckeln auch schön gleichmäßig. Dieser Motor ist frei von einem Rastmoment.

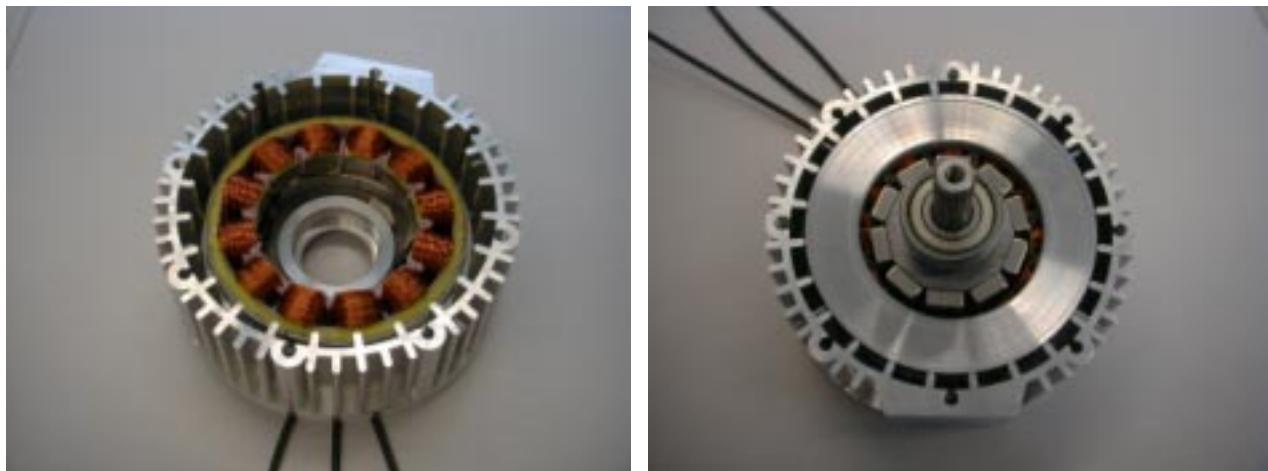


Die Flussdichte ist sehr gleichmäßig über den ganzen Motor verteilt.

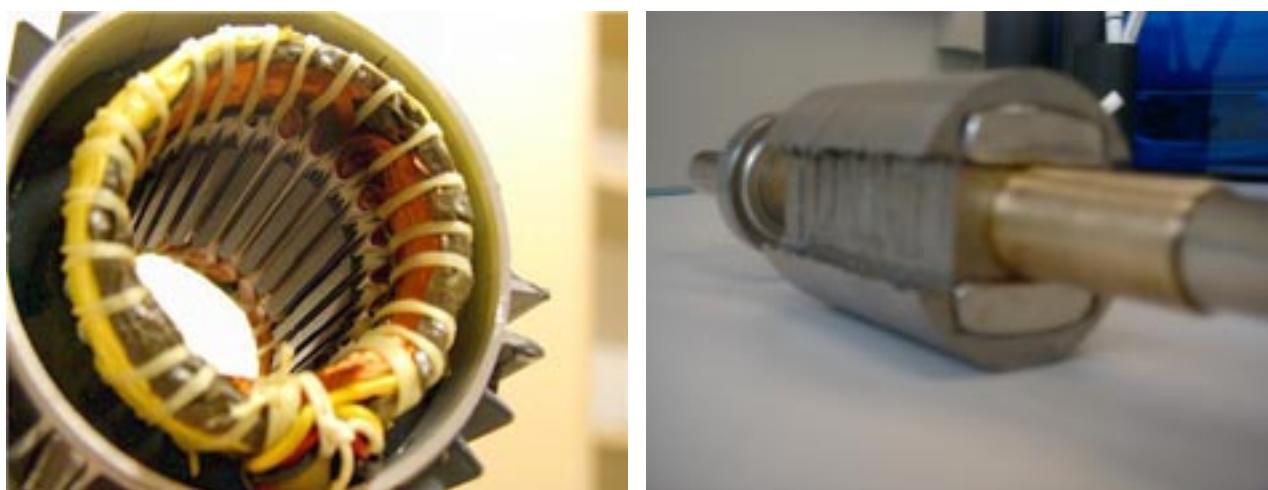


4. Prototypen

Motor mit der Stabkernwicklung



Motor mit der Spulenwicklung

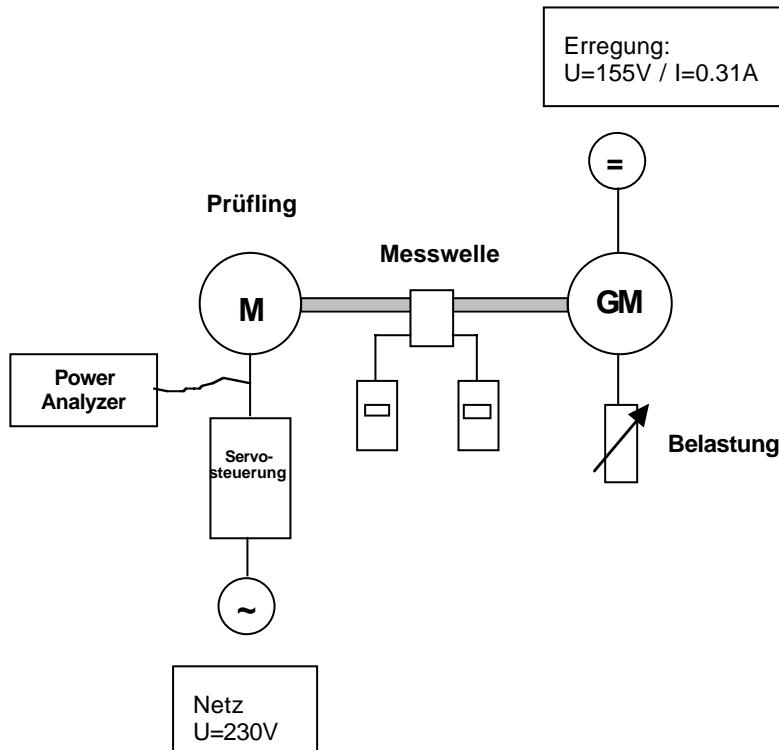


Motor mit der Ringwicklung



5. Messungen

Prüfstand an der HTA Luzern



Auf dem Prüfstand werden die drei Motoren ausgemessen. Zum Vergleich dient ein Asynchron Normmotor, der auf dieselbe weise geprüft wird.
 Aus dem letzten Schlussbericht „Energiesparmotor“ werden jene Messwerte von einem Motor mit Ringwicklung entnommen und in die Auswertung einbezogen. Dieser Energiesparmotor hat im Gegensatz zu dem Prototyp mit einem Pulverkern einen gebleichten Kern.

Als Messinstrumente dient zum einen für die mechanischen Größen die Messwelle und für die elektrischen Werte ein Power Analyzer.
 Der Power Analyzer wird nach der Servosteuerung eingeschlaufen, damit die Verluste der Steuerung die Messung nicht verfälscht. Die Leistung wird direkt an einer Motorenphase gemessen und sogleich mit drei multipliziert um auf die Gesamtleistung des Motors zu kommen.

Messwelle

Die Hauptkomponente des Prüfstands ist die Messwelle T20WN der Firma HP. Mit zwei Messmodulen können die Drehzahl und das Drehmoment aufgenommen werden.

**Last**

Als Belastung dient eine Gleichstrommaschine, die im Generatorbetrieb geschaltet ist. Mit Schiebewiderständen wird die Last eingestellt.

**Power Analyzer**

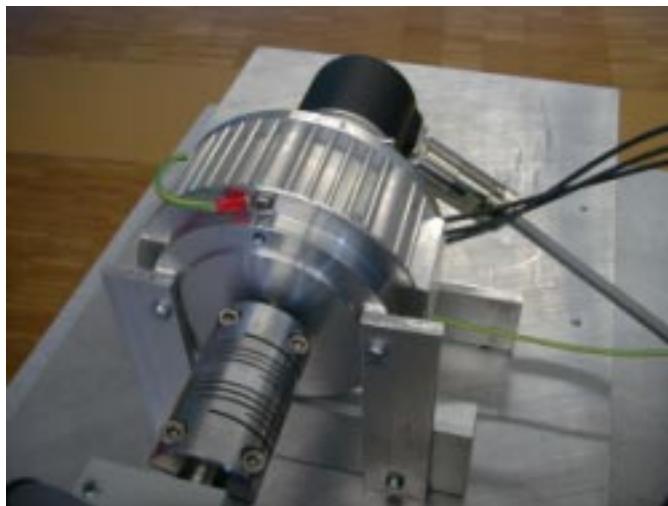
Das PM3000A ist für Einphasen- und Dreiphasenmessungen, sowie auch für Gleichspannungsmessungen geeignet und misst den 'True RMS'. Somit können die Werte der Asynchron- und Gleichstrommaschine mit demselben Messgerät aufgenommen werden.

**Servosteuerung**

Die Energiesparmotoren werden mit einer Gleichspannung versorgt. Auf die drei Phasen wird alternierend die Speisung aufgeschaltet (Pulsweitenmodulation). Mit einem Encoder wird die Umschaltzeit so bestimmt, dass die Drehzahl symmetrisch mit dem Drehfeld läuft. Die Signale des Encoders werden der Servosteuerung rückgeführt. Beim Start wird zuerst der Motor wenige Grade gedreht und die Wicklung bestromt, um die Lage der Pole ausfindig zu machen. Die Steuerung benötigt 24V Gleichspannung zur Versorgung. Die Servosteuerung wurde für diese Messungen ausgeliehen. Die Steuerung wird im nächsten Projekt unter die Lupe genommen.

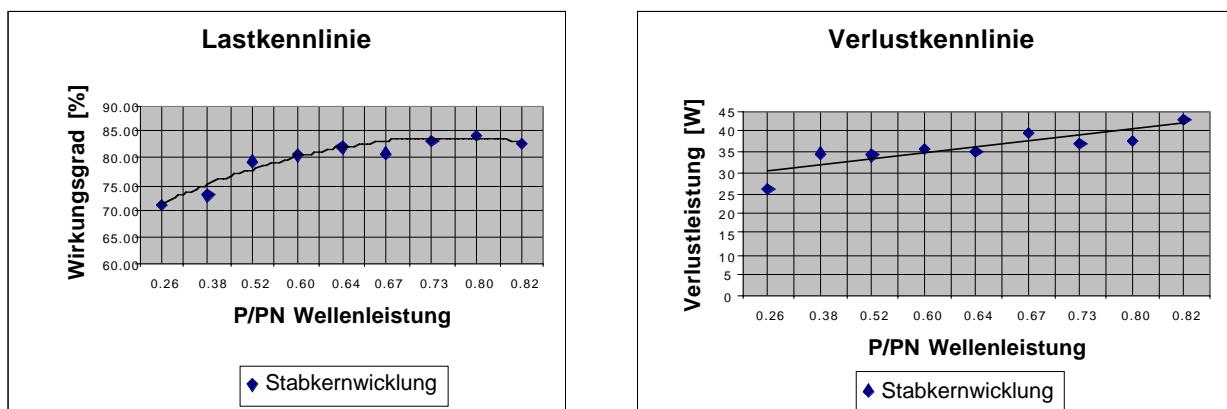


5.1 Messbericht der Stabkernwicklung



Unter Last:

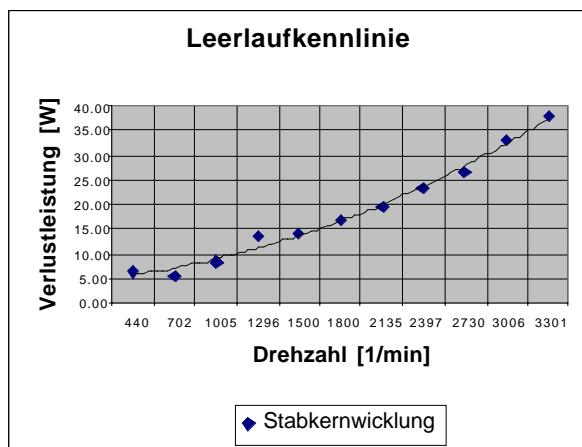
U [V]	I _{Phase} [A]	P _{Ein} [W]	M [Nm]	n [1/min]	P _{Welle} [W]	η [%]
105.0	0.70	90	0.20	3050	64	70.9
104.5	0.83	129	0.30	3050	94	73.0
104.5	1.00	165	0.41	3050	131	79.4
104.2	1.20	186	0.47	3050	150	80.7
104.0	1.26	195	0.50	3050	160	81.9
104.0	1.30	207	0.52	3050	168	80.9
104.0	1.42	220	0.53	3048	183	83.2
104.0	1.50	237	0.63	3048	199	84.2
103.4	1.60	249	0.66	2984	206	82.8



Die Wellenleistung ist auf 250W bezogen. Bei P/PN gleich 0.6 steht eine Wellenleistung von 150W zur Verfügung.

Im Leerlauf:

U [V]	I _{Phase} [A]	P _{Ein} [W]	M [Nm]	n [1/min]	P _{Welle} [W]
77.5	0.39	12	0.13	440	6
80.0	0.34	15	0.13	700	10
83.5	0.40	23	0.13	1000	14
87.0	0.44	32	0.14	1290	18
89.0	0.46	36	0.14	1500	22
93.0	0.47	45	0.15	1800	28
96.0	0.49	55	0.16	2130	36
98.0	0.56	66	0.17	2400	43
102.0	0.60	78	0.18	2730	51
104.0	0.70	93	0.19	3000	60
106.0	0.80	114	0.22	3300	76



Der Motor mit der Stabkernwicklung dreht rund über die ganze Drehzahlspanne.

Die Verluste im Leerlauf nehmen mit der Drehzahl stärker zu.

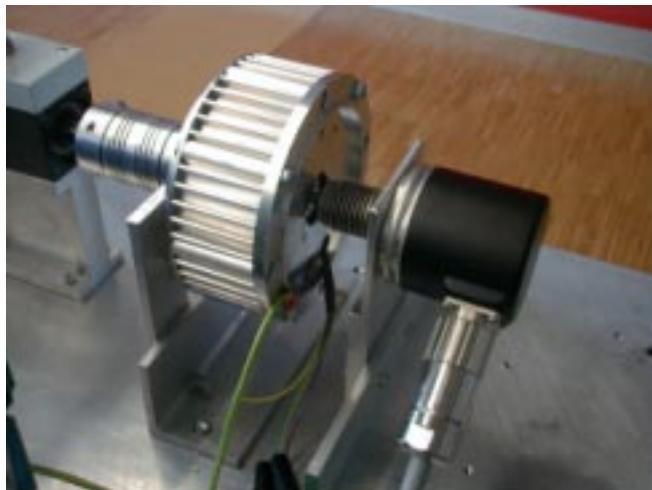
Die Verluste unter Last nehmen linear mit der Wellenleistung zu.

Ab der Wellenleistung von 150W liegt der Wirkungsgrad über 80%.

Dieser Motor kommt nicht auf die 250W Wellenleistung. Er gibt etwas mehr als 200W ab. Bei dieser Leistung fliesst ein Strom von 1.6A – die Steuerung kommt bei einem höheren Stromwert an den Anschlag.

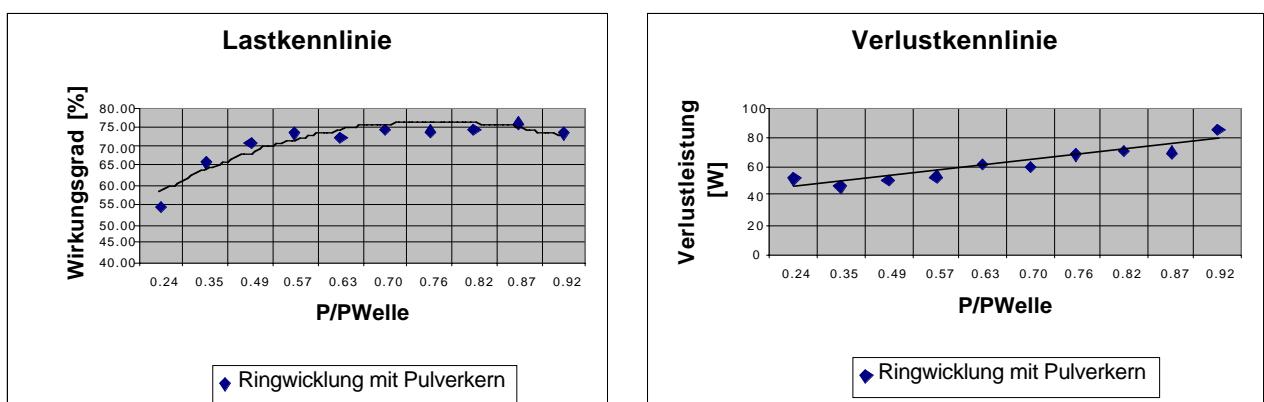
Wird die Windungszahl der Wicklung erhöht, könnte die Wellenleistung erhöht werden.

5.2 Messbericht der Ringwicklung mit einem Pulverkern



Unter Last:

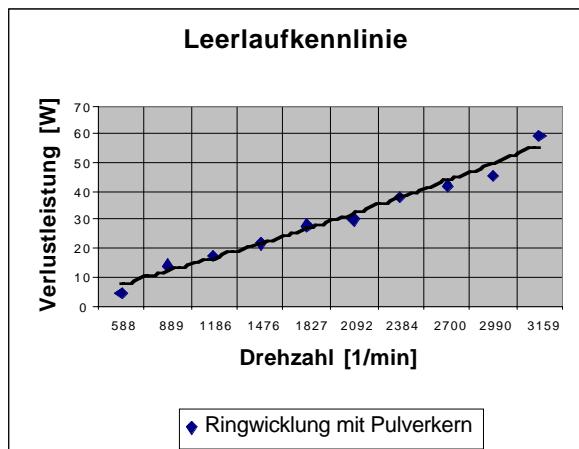
U [V]	I _{Phase} [A]	P _{Ein} [W]	M [Nm]	n [1/min]	P _{Welle} [W]	η [%]
110	0.65	111	0.19	3020	60	54.2
110	0.80	135	0.28	3020	89	65.7
109	1.00	174	0.39	3020	124	71.0
110	1.15	195	0.45	3020	143	73.1
109	1.24	219	0.50	3020	158	72.3
109	1.30	234	0.55	3020	174	74.4
109	1.43	258	0.60	3020	190	73.6
109	1.55	276	0.65	3020	206	74.6
109	1.63	288	0.69	3020	218	75.8
109	1.70	315	0.73	3010	230	73.1



Die Wellenleistung ist auf 250W bezogen. Bei P/PN gleich 0.49 steht eine Wellenleistung von 120W zur Verfügung.

Im Leerlauf:

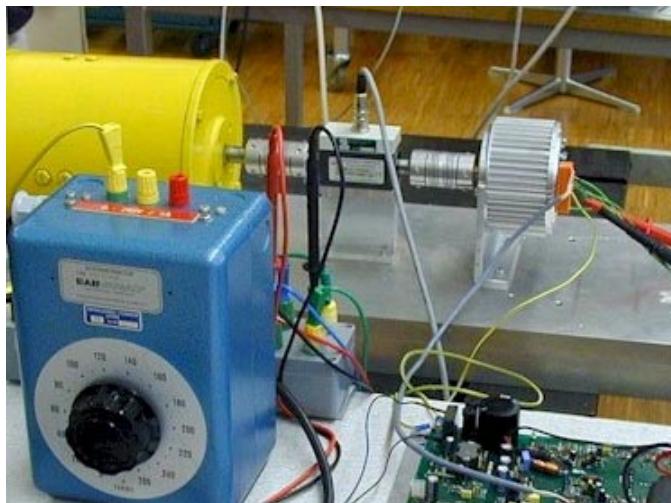
U [V]	I _{Phase} [A]	P _{Ein} [W]	M [Nm]	n [1/min]	P _{Welle} [W]
80	0.30	12	0.12	590	8
85	1.40	26	0.13	890	12
90	0.40	33	0.13	1190	16
93	0.45	42	0.13	1480	20
97	0.49	56	0.14	1830	28
100	0.50	63	0.15	2090	33
104	0.56	78	0.16	2380	40
107	0.58	90	0.17	2700	48
110	0.63	105	0.19	2990	59
113	0.80	132	0.22	3160	73



Der Motor mit der Ringwicklung und dem Pulverkern dreht konstant über die ganze Drehzahlspanne rund. Die Verluste im Leerlauf nehmen mit der Drehzahl linear zu. Die Verluste unter Last nehmen ebenfalls linear mit der Wellenleistung zu. Ab der Wellenleistung von 120W liegt der Wirkungsgrad über 70%.

Dieser Motor kam nicht auf die 250W Wellenleistung. Er gab etwas mehr als 230W ab. Bei dieser Leistung fliesst ein Strom von 1.7A.

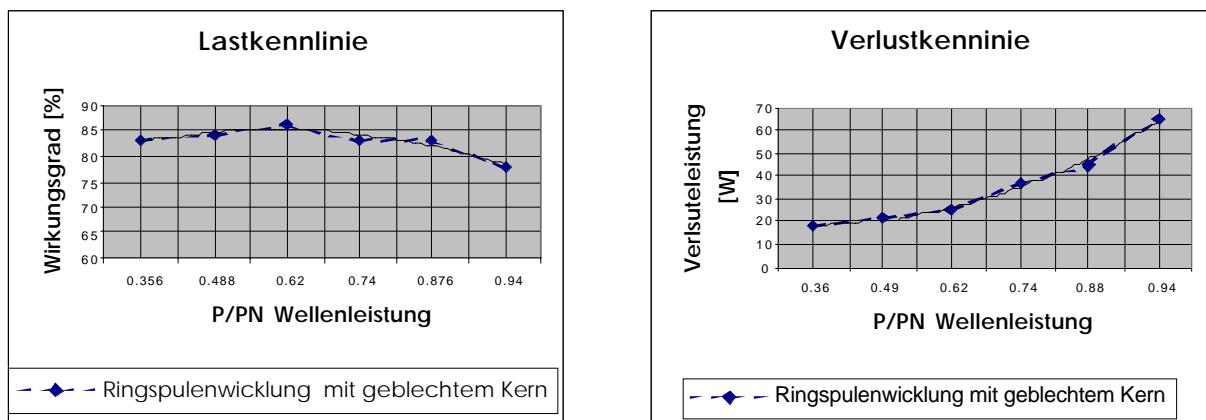
5.3 Messbericht der Ringwicklung mit geblechtem Kern



Diese folgenden Messwerte wurden vom Schlussbericht „Energiesparmotor“ entnommen.

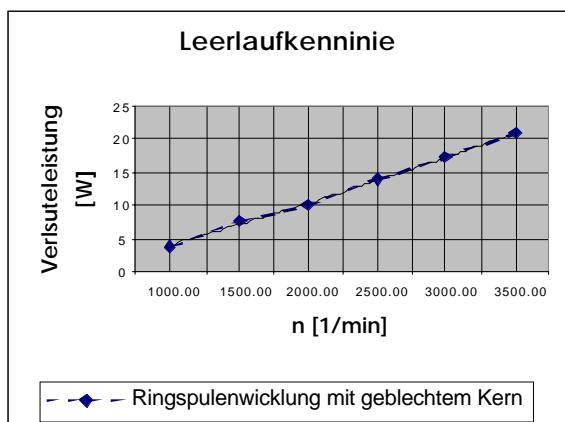
Unter Last:

U _{Strang} [V]	I _{Phase} [A]	P _{Ein} [W]	M [Nm]	n [1/min]	P _{Welle} [W]	η [%]
94	0.40	107	0.29	2929	89	83
95	0.55	144	0.4	2904	122	84
95	0.68	180	0.51	2904	155	86
98	0.86	222	0.61	2901	185	83
99	1.04	264	0.72	2900	219	83
93	1.14	300	0.79	2840	235	78



Im Leerlauf:

n [1/min]	P _{Verlust} [W]
1000	3.8
1500	7.5
2000	10
2500	14
3000	17.5
3500	21



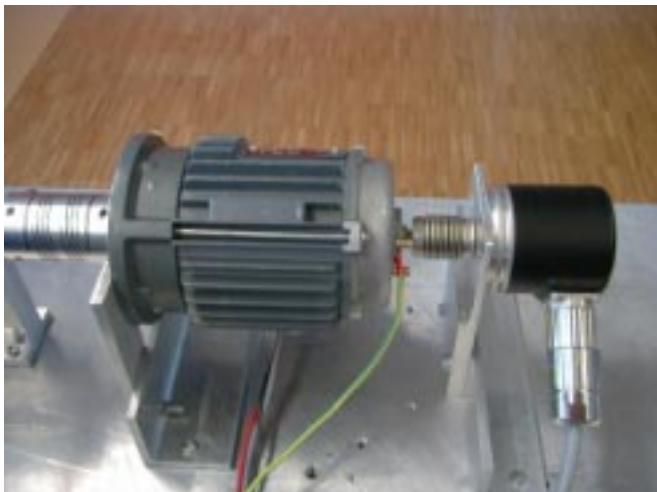
Die Verluste im Leerlauf nehmen mit der Drehzahl linear zu.

Die Verluste unter Last nehmen stark mit der Wellenleistung zu.

Bis zur Wellenleistung von 225W liegt der Wirkungsgrad über 80%.

Die Messwerte des Motors mit der Ringwicklung und dem geblechtem Kern wurde aus dem letzten BFE Bericht entnommen. Dieser Motor wurde blockkommutiert betrieben und erreicht im Gegensatz zum PWM Betrieb einen höheren Wirkungsgrad.

5.4 Messbericht der Spulenwicklung



Der Motor mit der Spulenwicklung dreht instabil. Bei einer Drehzahl von ca. 2'000 1/min dreht der Motor ruhig. Weicht die Drehzahl von diesen 2'000 1/min ab, so schwingt der Motor erheblich.

Die Temperatur ist ziemlich hoch, obwohl der Motor im Leerlauf dreht und der Eingangsstrom gering ist.

Die Servosteuerung kann die Kommutierung mit „shake and wake“ nicht vollziehen. In diesem Fall wird die Kommutierung manuell vorgenommen. Die Servosteuerung meldet Probleme mit einer Motorenphase.

Die Wicklung wurde ausgemessen. Die drei Wicklungsstränge weisen alle den gleichen Widerstand auf.

Bei diesem Motor ist eine andere Rotorkonstruktion gewählt worden. Die Magnete sind in lasergeschnittene Öffnungen eingeschoben und weisen deshalb weichmagnetische Polkappen auf. Diese Konstruktion wurde gewählt um die Magnete optimal gegen Fliehkräfte zu sichern. Diese weichmagnetischen Polkappen besitzen aber keine magnetische Vorzugsrichtung, wie Permanentmagnete. (Die Längs- und Quermagnetisierung im Luftspalt ist etwa gleich gross). Wir vermuten in dieser Tatsache den Grund für den unrunden Lauf

5.5 Messbericht des Normmotors

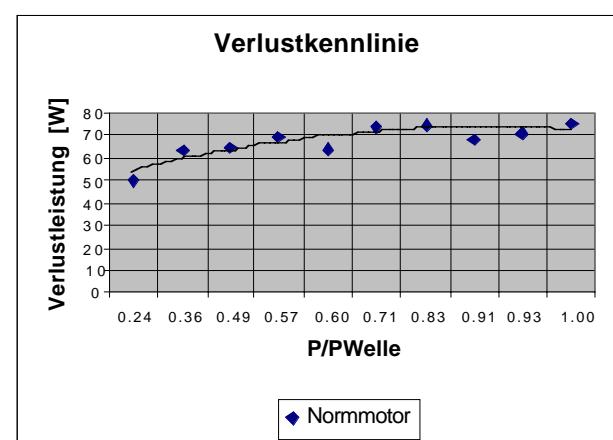
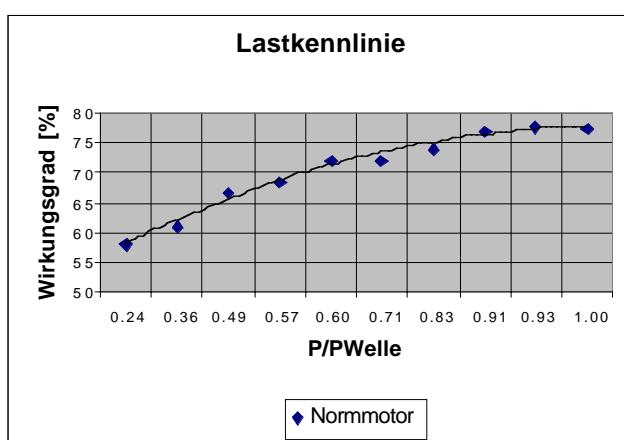


Die Drehstromasynchronmotoren wurden in drei sogenannte Effizienzklassen eingeteilt: EFF3 bis EFF1. EFF1 steht für hocheffiziente Motoren.

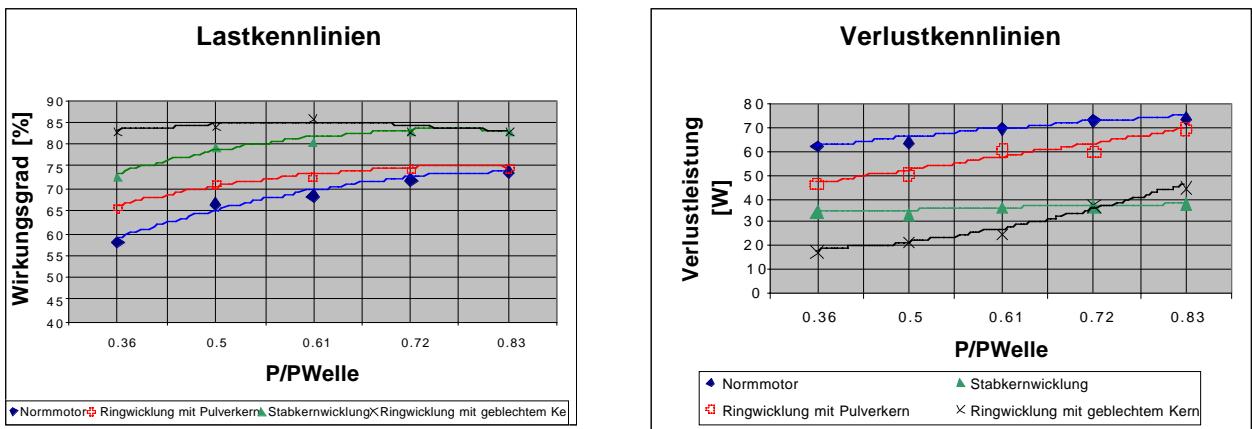
Die Energiesparmotoren sollte deshalb mit einem EFF1 Motor verglichen werden. Nur gilt diese Einteilung erst ab einer Leistung von 1.1kW.

Somit wurde auf einen möglichst guten Wirkungsgrad bei der Vergleichs-Asynchronmaschine geachtet.

U _{Strang} [V]	I _{Phase} [A]	P _{Ein} [W]	M [Nm]	n [1/min]	P _{Welle} [W]	η [%]
225	0.59	117	0.22	2950	68	57.9
225	0.60	161	0.32	2925	98	60.9
224	0.61	193	0.43	2900	129	66.7
226	0.64	219	0.50	2890	149	68.2
227	0.66	229	0.55	2875	166	72.1
226	0.70	264	0.64	2850	200	72.2
227	0.72	285	0.71	2840	211	73.9
226	0.75	298	0.78	2820	230	77.0
226	0.78	316	0.84	2800	246	77.7
226	0.80	332	0.88	2790	257	77.2



6. Auswertung



Der Motor mit der Ringwicklung und dem geblechten Kern hat den besten Wirkungsgrad. Im Teillastbereich weisen alle Energiesparmotoren deutlich den besseren Wirkungsgrad auf als der Normmotor.

Kein Energiesparmotor hat 250W Wellenleistung erreicht. Mit folgenden Massnahmen wird dies jedoch erreicht:

	Stabkernwicklung	Ringwicklung mit einem Pulverkern
Baulänge vergrössern	um 1.7mm	um 2.0mm
Durchmesser vergrossern	um 10.6mm	um 4.4mm

Stabkernwicklung

Beim Prototyp mit der Stabkernwicklung nehmen die Leerlaufverluste mit der Drehzahl stark zu. Dies begründet sich in der hohen Zahninduktion und der Nutpulsation des magnetischen Feldes, das auch in den Permanentmagneten Wirbelströme erzeugt. Die Simulation mit FEMM zeigt die magnetische Flusskurve die zum Teil abgeschnitten ist, was höhere Oberwellen zur Folge hat.

Ringwicklung mit einem Pulverkern

Pulverkerne haben einen verteilten Luftspalt. Der Luftspalt nimmt zusätzlich, zu dem optische Luftspalt zwischen dem Stator und dem Rotor, um dem im Pulverkern zu. Ein grosser Luftspalt hat zur Folge, dass die Magnetisierungskennlinie linearisiert werden kann. Die Leerlaufverluste nehmen daher linear mit der Drehzahl zu.

Der magnetische Fluss, ersichtlich aus der Simulation mit FEMM, verläuft gleichmässig und erzeugt somit auch keine hohen Oberwellen

Der Eisenpulverkern wurde am Innendurchmesser mechanisch bearbeitet. Dadurch ist auf der Oberfläche des Innendurchmessers eine elektrische leitende Schicht, durch zusammenpressen der Eisenpulverteile, entstanden. In dieser Schicht breiten sich, durch den drehenden Rotor, Wirbelströme aus. Diese reduzieren den Wirkungsgrad gegenüber einem geblechten Kern.

Ringwicklung mit einem gebleichten Kern

Der Motor mit der Ringkernwicklung mit gebleichtem Kern, zeigte den höchsten Wirkungsgrad. Diese Daten sind im ersten Auftrag Energiesparmor motor gemessen worden. Bei der Interpretation der Effizienz muss berücksichtigt werden, dass der Motor mit der Ringkernwicklung mit gebleichtem Kern an einer Steuerung mit Blockkommutierung betrieben wurde. Die Motoren im aktuellen Auftrag liefern an einer Steuerung mit Pulsweitenmodulation (PWM). Ebenfalls sind verschiedene Messgeräte mit unterschiedlichen Genauigkeiten für die Leistungsmessung, zwischen dem ersten und zweiten Auftrag BFE, verwendet worden. Die Motoren mit Ringkernwicklung und Stabkernwicklung können deshalb bezüglich Effizienz als etwa gleichwertig angesehen werden.

Gewichtseinsparung / „graue Energie“

Jene „Energiesparmor motoren“ auf dem Markt, die nach dem Induktionsverfahren (Asynchronmaschine) funktionieren, erzielen diesen höheren Wirkungsgrad durch einen höheren Materialaufwand. In diesen Maschinen wird mehr Kupfer und Eisen eingesetzt. Somit verfügt eine solche Maschine auch über mehr „graue Energie“- Herstellungsenergie beim Schmelzen von Eisen, Kupfer und Aluminium.

Die Projekt-Energiesparmor motoren funktionieren als brushless DC Motoren. Für den hohen Wirkungsgrad sind die Permanentmagnete im Rotor verantwortlich. Die Energiesparmor motoren sind im Gegensatz zu Normmotoren wesentlich leichter. Ein solcher Energiesparmor motor benötigt somit weniger Rohstoffe und verbraucht weniger „graue Energie“.

	Normmotor	Energiesparmor mit der Stabkernwicklung	Energiesparmor mit der Ringwicklung
Kupfer	0.20kg	0.13kg	0.13kg
Eisen	1.80kg	0.77kg	0.87kg
Total	2.0kg	0.9kg	1.0kg

Die von einem Energiesparmor eingesparte „graue Energie“ beim Einschmelzen von Eisen und Kupfer beträgt ca. 200Wh.

7. Ausblick

Der zweite Auftrag Energiespasmotor zeigt, dass die Stabkern- und Ringkernwicklung für einen Energiespasmotor mit permanentmagnetischem Rotor, bevorzugt werden. Die Spulenwicklung kann, begründet durch die Wahl einer speziellen Rotorkonstruktion, nicht abschliessend beurteilt werden. Spulenwicklungen haben aber den Nachteil von auskragenden Spulenköpfen, was den Platzbedarf und somit die Grösse und das Gewicht des Motors ungünstig beeinflusst.

Die mechanische Bearbeitung von Eisenpulverkernen, lässt die Verluste in diesen Kernen stark ansteigen. Deshalb sind für den Energiespasmotor geblechte Kerne aus Materialien mit möglichst geringen Verlusten zu verwenden.

Unterschiedlich zwischen der Stabkern- und Ringkernwicklung ist die aktive Masse, also die Masse des Stators und des Rotors. Diese beträgt nur die Hälfte bei der Stabkernwicklung, im Vergleich zur Ringkernwicklung.

In der Serie kann der Energiespasmotor mit Stabkernwicklung in geringerer Baulänge realisiert werden. Dadurch reduziert sich nochmals die „graue Energie“.

Die „graue Energie“ ist diejenige Energie, die bei der Herstellung eines Produktes verbraucht wird.

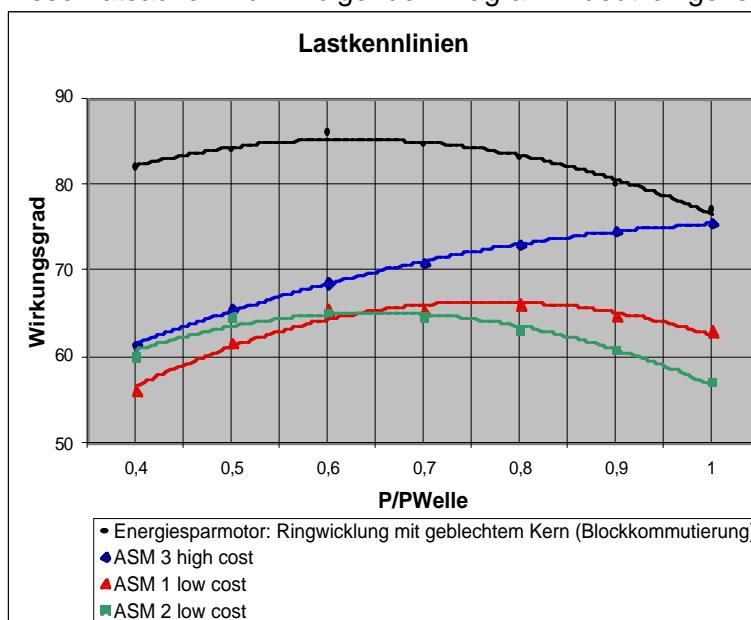
Vorteilhaft beim Motor mit der Ringkernwicklung ist das Fehlen eines magnetischen Rastmomentes. Als magnetisches Rastmoment werden die merkbaren Sprünge beim Drehen der Welle von Hand bezeichnet. Die Ankerrückwirkung, also die vektorielle Addition der Magnetfelder des Rotors und des Stators, ist beim Motor mit Ringkernwicklung am geringsten. Diese beiden Argumente sprechen eher für die Wahl der Ringkernwicklung, wenn eine kompakte, im Motor integrierten Elektronik angestrebt werden soll.

Drehzahlverstellbare Motoren werden vorzugsweise nach dem Prinzip der Pulsweitenmodulation elektronisch gesteuert. Starr am Netz laufende Motoren können effizienter mit Blockkommunikation betrieben werden.

Für die Wahl einer Wicklungsart muss ebenfalls die Anwendung einbezogen werden. Beispielsweise muss der Rotor eines Energiespasmotors für die Anwendung in automatischen Türen ein geringes Massenträgheitsmoment aufweisen, was für die Stabkernwicklung spricht.

Wesentlich ist aber der markante Unterschied der Effizienz, der von uns vorgeschlagenen Energiespasmotoren mit permanentmagnetischen Rotoren, zu den heute eingesetzten Normmotoren im angesprochenen Leistungsbereich von 100W bis 1KW.

Diese Tatsache wird im folgenden Diagramm deutlich gezeigt:



Ein Energiesppermotor mit permanentmagnetischem Rotor weist nur etwa die Hälfte des Volumens auf als ein Normmotor gleicher Leistung und Nenndrehzahl. Ebenfalls zeigen Untersuchungen [2], dass Energiesppermotoren gebaut nach dem Prinzip der Normmotoren, nicht die gewünschten Energieeinsparung erzielten, da bei Normmotoren die Erhöhung des Wirkungsgrades durch eine Erhöhung des Gewichtes erreicht wird. Somit ist verständlich, dass auch die graue Energie (Herstellungsenergie) in die Energiebilanz einfließen muss.

Aspekte der Wirtschaftlichkeit und des Umweltschutzes

Für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen und Aspekte des Umweltschutzes, folgt an dieser Stelle eine kurze Zusammenfassung des Final Projekt Reports „ Energiesppermotors“ des Institute of Technology Illinois [3].
Es sei bemerkt, dass unser Projekt Energiesppermotor, vor dem amerikanischen Projekt gestartet wurde.

Etwa die Hälfte der el. Energie in den Industriestaaten wird in Elektromotoren verbraucht. 700 Millionen Elektromotoren sind weltweit in Betrieb und 50 Millionen werden jährlich weltweit neu produziert. Im Jahr 2000 wurde unsere Atmosphäre mit 23.3 Milliarden Tonnen CO2 für die Elektrizitätserzeugung aus fossilen Brennstoffen belastet. Beispielsweise liegt der Anteil der fossilen Energieträger für die Elektrizitätserzeugung in den USA bei 75%. Etwa 11 Milliarden Tonnen CO2 beträgt der weltweite Anteil, der den Elektromotoren zugesprochen wird. Im Vergleich dazu absorbiert der Amazonas Regenwald 2 Milliarden Tonnen CO2 jährlich. Ungefähr 1/4 des Elektrizitätsverbrauches benötigen Motoren im Leistungsbereich bis 1kW. Der bedeutende Teil dieser Motoren werden in Lüftungs- und Klimageräten, Pumpen, Kühl- Gefrierschränken und Waschmaschinen eingesetzt. Ungefähr 445 Milliarden kWh werden für den Antrieb von Motoren bis 1 kW Leistung in den USA jährlich benötigt.

Aus dem Final Projekt Report „ Energiesppermotor“ des Institute of Technology Illinois und unserem ersten Auftrag „ Energiesppermotor“ lässt sich das globale CO2 Entlastungspotential in der Atmosphäre durch Energiesppermotoren, mit Leistungen bis 1 kW, berechnen.

Einem Normmotor mit einer Wellenleistung von 550 Watt muss eine elektrische Eingangsleistung von 780 Watt zugeführt werden. Ein Energiesppermotor gleicher Wellenleistung wird 100 Watt elektrische Eingangsleistung weniger verbrauchen. Der Einsatz, der von uns vorgeschlagenen Energiesppermotoren würde somit unsere Atmosphäre mit

$$11 * 10^9 \text{ Tonnen} / 4 / 780 * 100 = 300 \text{ Millionen Tonnen CO2 jährlich entlasten.}$$

Sparpotential der elektrischen Energie in den USA und der Schweiz

Ungefähr 445 Milliarden kWh werden für den Antrieb von Motoren bis 1 kW Leistung in den USA jährlich benötigt. Die eingesparte Energie, beim Einsatz der von uns vorgeschlagenen Energiesppermotoren, würde in den USA

$$445 * 10^9 \text{ kWh} / 780 * 100 = 57 * \text{Milliarden kWh mit einem Wert von ca. 8 Milliarden CHF, jährlich, bei einem kWh Preis von 15 Rappen, betragen.}$$

Das entspricht der Produktion von 15 Atomkraftwerken der Gösse von Mühleberg. [4]

Der erste Auftrag Energiespasmotor [1] des Bundesamtes für Energie, ergab für Normmotoren, gesteuert an Umformern, ein Energieeinsparpotential in der Schweiz von 75 Millionen kWh. Diese Energiemenge entspricht einem mittleren Flusskraftwerk mit einer Generatorleistung von 8MW.

Die eingesparten Energiekosten würden 11 Millionen CHF betragen.

Kalkulation des Energiespasmotors und Ausblick der Elektronik

Die Kalkulation eines 250W Energiespasmotors mit integrierter brushless Steuerung ergab einen Verkaufspreis von etwa 350 Fr. bei einem Fertigungslos von 1000 Stk. Die Kosten eines Frequenzumformers betriebsbereit, mit angeschlossenem 250W low-cost Normmotor, liegen bei etwa 300 Fr.-.

Die Halbleiterindustrie bietet hochintegrierte Leistungsbausteine für den Antrieb von Motoren an, die für den Einsatz in Klimaanlagen, Waschmaschinen und Kühlschränke entwickelt wurden. Wir gehen deshalb davon aus, dass in naher Zukunft auch Normmotoren, die heute starr am Netz laufen, durch die von uns vorgeschlagenen Energiespasmotoren, konkurrenzfähig ersetztbar sind.

Bemerkung / Ziel

Uns ist kein Projekt dieser Größenordnung bekannt, welches Ökonomie und Ökologie in sinnvoller Weise verbindet und Arbeitsplätze schaffen wird.

Unser Ziel ist es einen Integralmotor, also einen Energiespasmotor mit eingebauter, kompakter elektrischer Steuerung zu entwickeln. Um unseren Vorsprung zu halten bzw. auszubauen, beantragen wir in einem dritten Auftrag die Entwicklung der vorgeschlagenen Elektronik und suchen Industriepartner für den Einsatz dieser Energiespasmotoren.

8. Quellenverzeichnis

- [1] Erster Auftrag Energiespasmotor vom Bundesamt für Energie BFE
<http://www.electricity-research.ch/pages/berichte/sb02-energiespasmotor-d.pdf>
<http://www.circlemotor.com>
- [2] Hochschule Harz in Wernigerode
<http://www.regiona.net/projekte/projektoekobilanz.html>
- [3] Final Projekt Reports „ Energiespasmotors“ des Institute of Technology Illinois
<http://www.energychallenge.org/IIT-Final-Report.pdf>
- [4] BKW Informationen zum Atomkraftwerk Mühleberg.
www.bkw-fmb.ch/pubweb/page/bkw-fmb/company/energiequellen/energiequellen__D.html