

Fa. MK-Regler GmbH
in Kooperation mit der
HTW Berlin, Herrn Prof. Dr.-Ing. Norbert Klaes

**Entwicklung eines
adaptiven Reglers für asynchrone Elektromotoren**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 26662-21/0 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Prof. Dr.-Ing. Norbert Klaes, Bernd Nitz,
Jürgen Lampe & Martin Staudacher

Berlin, August 2009

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az.	26662	Referat	21/0	Fördersumme	125.000,00 €
-----	--------------	---------	-------------	-------------	---------------------

Antragstitel **Entwicklung eines adaptiven Reglers für asynchrone Elektromotoren**

Stichworte Verfahren
Energie

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
13 Monate	07/2008	07/2009	8

Bewilligungsempfänger	MK - Regler GmbH, Gesellschaft zur Forschung, Entwicklung, industriellen Fertigung und Vertrieb von elektronischen und elektromechanischen Baugruppen Blohmstr. 37 - 61 12307 Berlin	Tel	030/26079814
		Fax	030/26079816
		Projektleitung	Bernd Nitz, Jürgen Lampe
		Bearbeiter	Martin Staudacher

Kooperationspartner Fachhochschule für Technik und Wirtschaft
Fachbereich Ingenieurwissenschaften, 10318 Berlin

Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt	1
Inhaltsverzeichnis.....	2
Abbildungsverzeichnis.....	3
Abkürzungsverzeichnis.....	4
1. Zusammenfassung.....	6
2. Einleitung.....	7
3. Entwicklungsergebnisse und Vorhabensdurchführung.....	9
3.1 Entwicklungsergebnisse.....	9
3.2 Umsetzung des Entwicklungsprojektes	12
3.2.1 Projektbeteiligte und Verantwortlichkeiten	12
3.2.2 Chronologie der Umsetzung	12
3.3 Problemstellungen und Lösungen.....	13
3.3.1 Status Quo.....	13
3.3.2 CPU.....	14
3.3.3 Stromwandler	14
3.3.5 Schwingungskompensation.....	15
3.3.6 Thyristorzündung	15
3.3.7 Schutzbeschaltungen.....	16
3.3.8 Lückbetrieb	16
3.4 Messauswertungen	16
3.5 Bewertung der Vorhabensergebnisse.....	24
3.6 Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse.....	28
4. Zusammenfassung der Ergebnisse und zukünftig notwendige Arbeiten	32
Quellenverzeichnis.....	33

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Netzbetrieb Leerlauf	S.17
Abb. 2: MotorKontrollerbetrieb Leerlauf	S.17
Abb. 3: Netzbetrieb 40% Last	S.17
Abb. 4: MotorKontrollerbetrieb 40% Last	S.17
Abb. 5: Netzbetrieb 60% Last	S.18
Abb. 6: MotorKontrollerbetrieb 60% Last	S.18
Abb. 7: Netzbetrieb 90% Last	S.18
Abb. 8: MotorKontrollerbetrieb 90% Last	S.18
Abb. 9: Messergebnisse	S.19
Abb. 10: Energieeinsparung	S.20
Abb. 11: Vergleich Powerfactor	S.20
Abb. 12: Schaltplan Sperrfensterauswertung	S.22
Abb. 13: Oberwellenmessung	S.23
Abb. 14: Energieeinsparung durch den MK-Regler	S.26

Abkürzungsverzeichnis

α	Zündwinkel
A	Ampere
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CPU	Central Processing Unit
DOL	DirectOnLine
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
EE	Energieeinsparung
Eff	Efficiency-Class
EN	Europäische Norm
EA	Energieagentur
etc.	et cetera
f	Frequenz
FHTW	Fachhochschule für Technik und Wirtschaft - Berlin
GCP	Global Carbon Project
Gt	Giga Tonne
HTW	Hochschule für Technik und Wirtschaft - Berlin
Hz	Hertz
I	Stromstärke
i.d.R.	in der Regel
kg	Kilogramm
kVA	Kilovoltampere
kvar	Kilovar
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde

KSL	Kick-Start-Level (Losbrechmoment)
L	Stromflusslänge
LCD	Liquid Crystal Display
MHz	Megahertz
Mrd.	Milliarde
ms	Millisekunde
µs	Mikrosekunde
OEM	Original Equipment Manufacturer
P	Leistung
P _{el}	Wirkleistung
PF	Powerfactor
PLL	Phase Locked Loop
Ppm	parts per million = 10 ⁻⁶ (1 Millionstel)
PR	Public Relations
Q	Blindleistung
rpm	revolutions per minute
s	Sekunde
S	Scheinleistung
SFA	Sperrfensterauswertschaltung
U	elektrische Spannung
u.a.	unter anderem
usw.	und so weiter
V	Spannung
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik e.V.
vgl.	vergleiche
W	Arbeit (engl.: Work)
z.B.	zum Beispiel
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.

1. Zusammenfassung

Unser Projekt zur Entwicklung eines adaptiven Reglers für asynchrone Elektromotoren verfolgt das Ziel, die Effizienz und damit den Energieverbrauch asynchroner Elektromotoren zu verbessern und damit den Einsatz von Primärenergie und den CO₂-Ausstoß zu reduzieren. Durch ein neues Verfahren zur Optimierung des Wirkungsgrades von Asynchronmotoren wird der neue Regler im Vergleich zu bisherigen Energiesparlösungen leistungsfähiger bzw. er unterliegt nicht deren Beschränkungen hinsichtlich der Einsetzbarkeit.

Zunächst wurden die notwendigen Schaltungen entworfen und manuell gefertigt und die Software entwickelt. Erste Tests wurden an einem Labormotor bei Lastbeaufschlagung durch eine Gleichstrombremse durchgeführt. Nach den ersten erfolgreichen Tests wurde die Schaltungskombination in einen Koffer integriert um sie in Feldversuchen auf ihre Praxistauglichkeit hin zu untersuchen.

Die gesteckten Ziele wurden vollständig erreicht. Die von uns entwickelte adaptive Regelung ermöglicht es, Asynchronmotoren beim Betrieb im Teillastbereich stets im oder nahe am energetisch optimalen Punkt zu betreiben. Dadurch kann eine Energieersparnis in Stelltransformatorqualität realisiert werden.

Im nächsten Schritt ist das Gerät dahingehend weiter zu entwickeln, dass es im Bypassbetrieb netzmessfähig ist, um bei entsprechender Lastbeaufschlagung auf Netzbetrieb zu schalten bzw. bei Erkennung eines möglichen Einsparpotentials automatisch wieder auf Controllerbetrieb zu schalten. Außerdem ist es mit Display und Tastatur zur kundenseitigen Eingabe von Motordaten auszustatten. Diese Maßnahmen sollen im Nachfolgeprojekt Nr. 27349 umgesetzt werden.

Das Entwicklungsprojekt wurde von der MK-Regler GmbH in Kooperation mit der HTW-Berlin durchgeführt und von der Deutsche Bundesstiftung Umwelt gefördert (Az: 26662-21/0).

2. Einleitung

Die Wachstumsaussichten der deutschen Wirtschaft werden nach Einschätzung der Bundesregierung erheblich durch die Verknappung und Verteuerung von Rohstoffen und insbesondere der Primärenergieträger Kohle, Öl und Gas geschmälert. Hinzu kommen die Umweltbelastungen, die sich aus der Nutzung fossiler Energieträger ergeben. Das Global Carbon Project (GCP), eine internationale Wissenschaftlervereinigung, legte am 26.9.08 die Studie „Carbon budget and trends 2007“ [Glo08] vor. Schlüssel-Ergebnisse der Studie sind:

- Der weltweite CO₂-Ausstoß ist gegenüber 2006 um 2,8% auf nun 36,5 Gt gestiegen;
- Die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre stieg 2007 um 2,2 ppm auf 383 ppm und liegt damit um 37% über dem vorindustriellem Niveau (280 ppm im Bezugsjahr 1750) und ist die höchste seit mindestens 650.000 Jahren;
- Durch die Klimaerwärmung und ihre Folgen sinkt die Fähigkeit von CO₂-Senkern (Wälder, Meere, Böden, Biomasse) CO₂ aus der Atmosphäre zu binden, was den Treibhauseffekt noch verstärkt;
- 80% des CO₂-Ausstoßes entstehen durch das Verbrennen fossiler Energieträger.

Neben dem intensiven Bemühen klassische Energieträger durch regenerative Energiequellen zu ersetzen, müssen besonders auch effiziente Verfahren und Gerätschaften entwickelt werden, die den Einsatz von Primärenergie reduzieren. Nach Einschätzung des Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI) beträgt alleine in Deutschland das Einsparpotential im Bereich der elektrischen Antriebe 27,5 Mrd. kWh jährlich [ZVE06]. Unser Projekt zur Entwicklung eines adaptiven Reglers für asynchrone Elektromotoren verfolgt das Ziel, die Effizienz und damit den Energieverbrauch asynchroner Elektromotoren zu verbessern und damit den Einsatz von Primärenergie und den CO₂-Ausstoß zu reduzieren.

Asynchrone Elektromotoren sind die in der industriellen Fertigung am weitesten verbreiteten Motoren zum Antrieb von Anlagen und Maschinen. Dabei sind sie üblicherweise auf das Spitzenlastmoment der anzutreibenden Anlage ausgelegt. Da die Anlagen jedoch i.d.R. nicht permanent diese volle Leistung benötigen, laufen die meisten asynchronen Elektromotoren im Teillastbereich. Dabei weisen sie einen schlechten Wirkungsgrad auf und verbrauchen unnötig viel Strom, da sie erst bei Annäherung an den Volllastbereich den optimalen Wirkungsgrad erreichen.

Die gegenwärtig im Markt angebotenen Lösungen zur Optimierung der Energieeffizienz von asynchronen Elektromotoren sind Sanftstarter und Frequenzumrichter. Diese stellen jedoch nur Teillösungen dar bzw. sind nur bedingt einsetzbar:

- Sanftstarter optimieren die Leistungsaufnahme nur in der Startphase, jedoch nicht im laufenden Betrieb;
- Frequenzumrichter sind bei vielen Motoren nicht einsetzbar, da ihr Betrieb mit einer Absenkung von Drehzahl und Drehmoment und starken Frequenz- und Spannungsänderungen verbunden ist und zudem häufig einer aufwendigen Funkentstörung bedarf.

Die Zielsetzung unseres Entwicklungsprojekts ist die Entwicklung und Markteinführung eines adaptiven Reglers für asynchrone Elektromotoren, welcher eine leistungsfähigere Energiesparlösung als die gegenwärtig im Markt angebotenen Lösungen zur Optimierung der Energieeffizienz dieser Motoren ist. Wesentliche Eigenschaften, die dieser Regler erfüllen soll, sind:

- Optimierung des gesamten Betriebszyklus, also sowohl des Anlaufverhaltens in der Startphase (Sanftstart-Funktion) als auch des laufenden Betriebs;
- Optimierung der Energieeffizienz im laufenden Betrieb, indem der Wirkungsgrad im Teillastbereich durch Spannungsabsenkung mittels Thyristorsteller gegenüber dem Netzbetrieb (400 V) wesentlich früher verbessert wird;
- Automatische Lasterkennung, um den Motor stets im, oder bei Berücksichtigung stoßartiger Belastungen nahe am Verlustminimum zu betreiben.

Der Regler ist eine umfassendere und damit leistungsfähigere Energiesparlösung als Sanftstarter und er unterliegt nicht den Beschränkungen von Frequenzumrichtern hinsichtlich der Einsetzbarkeit. Je nach verwendetem Motor und Belastung können Energieeinsparungen im Bereich von 2% (Volllast) bis 50% (Leerlauf) erzielt werden. Es sind mehrere Geräte in Planung und Entwicklung, um am Markt die Leistungsbereiche von 11kW bis 500kW abdecken zu können.

Die Aufgabenstellung zur Realisierung der festgelegten Ziele umfasste:

- Die Prüfung, Bewertung und Verbesserung eines bereits existierenden Musteraufbaus;
- Untersuchung und Weiterentwicklung verschiedener Energieoptimierungsparameter;
- Erstellung eines serienreifen Prototypen durch Verbesserung der Hardware sowie Test und Validation der Regelungssoftware;
- Feldversuche, Sicherheitsprüfungen, normengerechter Aufbau gemäß VDE / EN.

Die dem Fördermittelantrag der DBU zu Grunde liegende Phase der notwendigen Weiterführung unseres Entwicklungsvorhabens begann mit Gründung des Unternehmens im Juli 2008 und wurde am 31.07.2009 abgeschlossen. Die Aufgabenstellung für die federführende MK-Regler GmbH, zusammen mit dem Kooperationspartner FHTW Berlin (seit April 2009 HTW Berlin), erstreckte sich von der Erarbeitung des Pflichtenheftes, über die Entwicklungsarbeiten im Hardware- sowie Softwarebereich, bis hin zu einer erfolgreichen Teamkommunikation, -kontrolle und -zusammenarbeit. Die hierzu geplanten, erforderlichen Arbeitsleistungen waren zu Beginn in insgesamt acht, bzw. mit Unterpunkten, in neunzehn Arbeitspaketen detailliert.

3. Entwicklungsergebnisse und Vorhabensdurchführung

3.1 Entwicklungsergebnisse

Im Rahmen der Fördermaßnahme der DBU vom 18.07.2008 bis 31.07.2009 wurde ein elektrisches Regelgerät für Drehstrom-Asynchronmotoren entwickelt und bis zur Marktreife geführt.

Das Gerät, nachfolgend MotorKontroller genannt, besteht aus einem Drehstromsteller mit Thyristoren, der Elektronik mit Reglereinheit, Bauteilen und Schaltungen zur erforderlichen Messwertaufnahme und der Spannungsversorgung. Zur Integration in einen bestehenden Industrieprozess und dem damit verbundenen Signalverkehr (Start, Stopp, Störung etc.) ist eine entsprechende Anzahl von Ein- und Ausgängen berücksichtigt und programmiert worden.

Hauptaufgabe des MotorKontrollers ist der energiesparende Betrieb von elektrischen Asynchronmotoren im Teillastbereich. Werden Asynchronmotoren im Teillastbetrieb betrieben, arbeiten sie unter voller Spannung (400 V) nicht in ihrem energetisch optimalen Punkt. Die nicht benötigte Energie wird in erhöhte Wirk- und Blindleistung umgesetzt. Der MotorKontroller regelt adaptiv abhängig von der Lastbeaufschlagung die Spannungszufuhr, was zu Einsparungen bei Schein- Blind- und Wirkleistungen im Teillastbetrieb führt. Mit sinkender Lastbeaufschlagung sinkt auch die dem Motor zugeführte Spannung und damit der Energieverbrauch.

Die adaptive Spannungsregelung erfolgt mittels Phasenanschnitt durch Thyristoren. Durch die Verstellung des Zündwinkels α wird die jeweils erforderliche Spannung in Abhängigkeit von der Lastbeaufschlagung eingestellt. Die Erfassung der Lastbeaufschlagung erfolgt durch Aufnahme der erforderlichen Messwerte (Strom, Spannung, Sperrzeit Thyristoren). Anhand dieser Prozesssignale berechnet die Software die anliegende Last und regelt die Spannungszufuhr.

Zusätzlich wird das Gerät folgenden Funktionen gerecht:

1. Sanftanlauf:

Zur Vermeidung von Stromspitzen beim Anlauf wird die Spannung am Motor sukzessive bis zur Betriebsspannung (400V) erhöht. Die Zeit und somit der Spannungshub pro Intervall (Rampe) kann im Bereich von 0 bis 30s eingestellt werden (Standardeinstellung; für Schwerstanläufer kann, je nach Applikation, eine wesentlich größere Zeit vorprogrammiert werden).

Beim Sanftanlauf gibt es zwei Besonderheiten:

1. Der Prozessor erkennt eigenständig das Losbrechmoment (Kick-Start-Level) des Motors. Um die Dauer dieser unvermeidbaren Strombelastung für die Motorwicklungen möglichst gering zu halten, wird die Spannung bis zum KSL sehr schnell erhöht, erst dann kommt die Rampe zum Tragen und die Spannung wird intervallweise, gemäß der voreingestellten Zeit, erhöht. Bei Rampenstellung 0s wird der Motor sofort mit 400V versorgt (DOL, DirectOnLine-Verfahren).
2. Die eingestellte Rampenzeit trifft keine Aussage über das Erreichen der Nenndrehzahl des Motors. Diese wird lastbedingt innerhalb der eingestellten Rampe erreicht. Ein Motor im Leerlauf oder mit geringer Lastbeaufschlagung erreicht, trotz Rampeneinstellung von 30s, seine Nenndrehzahl wesentlich früher. Sollte im umgekehrten Verlauf die Nenndrehzahl durch zu hohe Lastbeaufschlagung in 30s nicht erreicht werden, erkennt der Mikroprozessor dies anhand des Stromverlaufes (Nenndrehzahl nicht erreicht = Schlupf = Stromerhöhung über Nennstrom). In diesem Fall ist in der Software eine zusätzliche Zeit integriert, in der die Überstromüberwachung deaktiviert ist. Sollte nach Ablauf dieser Zeit (10s) der Strom nicht mindestens auf den Nennstrom abgesenkt werden können, ist von einem Fehler auszugehen und der MotorKontroller schaltet mit der entsprechenden Fehlermeldung ab. Diese Non-Safety-Time wird automatisch zum eingestellten Rampenwert addiert.

2. Sanftstopp:

Diese Funktion bietet dem Nutzer die Möglichkeit, den Motor innerhalb einer eingestellten Zeit zu entlasten. Unabhängig von der Lastbeaufschlagung fährt der MotorKontroller den energetisch optimalen Punkt der Spannungszufuhr an. Jede weitere Spannungsreduktion führt im ersten Schritt zur Verschlechterung der Energiewerte und in den nächsten Schritten zum "kontrollierten" Kippen des Motors. Der MotorKontroller reduziert die Spannung und schaltet nach Erkennung des Kippmoments den Motor sofort spannungsfrei.

3. Überstromauslösung / Phasenausfallüberwachung:

Durch die integrierte Elektronik und der damit verbundenen Erfassungsmöglichkeit der Effektivwerte von Spannung und Strom ist der MotorKontroller in der Lage, den jeweiligen Fehlerfall zu erkennen und schaltet unter Auslösung der entsprechenden Alarmmeldung (Fehlerkontaktklemme) ab. Für Überstrom erfolgt die Abschaltung normgerecht bei 1,1-facher Überschreitung für die Dauer von 500ms. Ebenfalls berücksichtigt ist die maximal zulässige Differenz zwischen den Phasenströmen, deren Überschreitung ebenfalls zur Fehlerauslösung führt. Der Überstromüberwachung wurde hardwaremäßig (Erhöhung des eigentlich für die Stromstärke notwendigen Leiterquerschnitts um Ordnungszahl 1 der Normreihe) Rechnung getragen.

Ein Phasenausfall kann vom Mikroprozessor sofort detektiert werden und führt nicht, wie bei einer industriell üblichen Überstromüberwachung, durch Stromanstieg in den verbleibenden Phasen zur Fehlerauslösung.

4. Bypassfunktion:

Durch entsprechende Verschaltung des Bypasskontaktes (drahtbruchsicher) ist gewährleistet, dass der MotorKontroller bei Gerätestörung und Steuerspannungsausfall eine Fehlermeldung und einen Bypasskontakt (via Klemmen) generiert. Dem Kunden werden zwei Optionen angeboten:

1. Einbau eines zusätzlichen Hauptleistungsschützes, welches den MotorKontroller bei Ausfall überbrückt (geringer Verdrahtungsaufwand) oder
2. Integration der bestehenden Stern-Dreieckschaltung derart, dass bei Ausfall des Gerätes ein Rücksprung auf die Schaltung möglich ist (hoher Verdrahtungsaufwand).

Bisher auf dem Markt bestehende Geräte bieten lediglich den Bypasskontakt als Klemmenausgang. Die Hardware des MotorKontrollers bietet durch das Angebot der Leistungsklemmen (Erhöhung von 6 auf 9) die volle Bypassmöglichkeit in Eigenregie des Gerätes.

5. Temperaturüberwachung:

Der von uns gezielt gewählte Einsatz von temperaturabhängigen Widerständen bietet im Gegensatz zu einem reinen Thermokontakt die Möglichkeit zur Generierung eines Voralarms. Während ein Thermokontakt nach Überschreitung einer bestimmten Temperatur zur sofortigen Abschaltung des Gerätes führt, kann hier vorab eine Warnung ausgegeben werden, dass bei weiterem steigenden Temperaturverlauf, der MotorKontroller abschalten wird. Diese bietet dem Kunden die Möglichkeit, entsprechende Maßnahmen zu treffen, ohne dass der Motorbetrieb gefährdet ist.

3.2 Umsetzung des Entwicklungsprojektes

3.2.1 Projektbeteiligte und Verantwortlichkeiten

Herr Prof. Dr.-Ing. Norbert Klaes

Wissenschaftliche Leitung; Erstellung der Regelungssoftware; Entwurf der Schaltungen.

Herr Bernd Nitz

Organisatorische Leitung; Festlegung Leistungsklassen MotorKontroller.

Herr Jürgen Lampe

Technische Leitung; Erstellung der Schaltungen.

Herr Martin Staudacher

Programmierung Software; Erstellung der Schaltungen.

Für die Entwicklung standen Räumlichkeiten und Laboreinrichtungen der HTW Berlin zur Verfügung.

3.2.2 Chronologie der Umsetzung

Die mit Herrn Professor Klaes entworfenen Schaltungen wurden manuell angefertigt und verlötet. Die Schutz- und Filterbeschaltungen für den Mikroprozessor wurden von der Firma Spectrum Digital zur Verfügung gestellt und übernommen.

Nach Zusammenführung der einzelnen Schaltungen wurden erste Tests an einem Labormotor der HTW durchgeführt. Dieser Motor (4 kW) erwies sich aufgrund seiner Beschaffenheit (ständiger Rotorwechsel durch Studenten, großer Schlupf) als nicht repräsentativ und wurde durch einen neuen Motor der Firma Menzel Elektromotoren ersetzt (Motordaten siehe Abschnitt 3.4 Messauswertungen).

Für die Lastbeaufschlagung stand eine Gleichstrombremse zur Verfügung. Durch mathematische Berechnung des Ankerstromes der Bremse konnte die Lastbeaufschlagung ermittelt werden (Bremsdaten siehe Abschnitt 3.4 Messauswertungen). Bedingt durch die Dimensionierung der Bremse konnte der Prüfmotor mit maximal 92% belastet werden.

Nach ersten erfolgreichen Tests wurde die bestehende Schaltungskombination in einen Koffer integriert. Die Schaltung war nun transportabel und konnte für Feldversuche eingesetzt werden.

Die Software wurde mit folgendem Ablauf erstellt:

- Erstellung der PLL (Phase Locked Loop) zur Synchronisation;
- Programmierung der Messdatenerfassung;
- Implementierung eines reinen Zündwinkelreglers;
- Implementierung eines Leistungsreglers;
- Implementierung eines Sperrfensterreglers;
- Programmierung der Ein/Ausgänge.

3.3 Problemstellungen und Lösungen

3.3.1 Status Quo

Industriell eingesetzte Drehstrom-Asynchronmotoren sind in der Regel sowohl konstruktionell als auch anwenderseitig für die jeweilige Anwendung überdimensioniert (Normmotoren). Bei der eingesetzten Thyristortechnik steht als einzige physikalische Regelgröße die Spannung (V) zur Verfügung. Anwenderseitig ist primär eine Absenkung der Wirkleistung (P elektrisch) interessant. Bisher am Markt eingesetzte Lösungsansätze erhöhen entweder den Cosinus Phi oder vermindern die Blindleistung (Q). Beide Ansätze führen unter Zugrundelegung der Formel $P_{el} = U_x I_x \cos \Phi$ nicht zwangsläufig zur Verminderung der Wirkleistung. Daher muss der Ansatz nicht in der Regelung einer einzelnen physikalischen Größe liegen, vielmehr führt die regelungstechnische Kombination von mehreren physikalischen Größen zum energetisch optimalen Punkt.

Lösungsansatz:

Mehrere Normmotoren wurden eingehend in verschiedenen Betriebs- und Lastzuständen messtechnisch ausgewertet. Je nach Betriebszustand (Motorbetrieb / Generatorbetrieb /

Lastzunahme / Lastabnahme) konnten mathematisch / physikalische Gesetzmäßigkeiten identifiziert und messtechnisch erfasst / ausgewertet werden. Die Schwingungsneigung des Motors wurde softwaremäßig kompensiert.

Ergebnis:

Die von uns entwickelte adaptive Regelung gewährleistet das präzise, stetige Anfahren des energetisch optimalen Punktes. Selbst die für plötzlich auftretende Lastsprünge vorgehaltene Spannungsreserve steht dieser Aussage nicht entgegen, da die Spannungsreserve unter gleichzeitiger Betrachtung der Stromkurve einen maximal energetischen Mehrverbrauch im Hundertstelprozentbereich konstituiert. Zusammenfassend können wir feststellen, dass unsere Regelung unter Vernachlässigung der konstruktionell bedingten Oberwellen (vgl. Abschnitt 3.4 Messauswertungen) eine Energieersparnis in Stelltransformatorqualität erreicht wird. Somit können wir festhalten, dass der Anwender unserer Technik, unabhängig von der absoluten Energieeinsparung, sicher sein kann, dass eine weitere Optimierung des Motorbetriebes derzeit auf dem Markt nicht verfügbar ist (mögliche Ausnahmen: Frequenzumrichter-geeignete Anwendungen).

3.3.2 CPU

Die von uns nunmehr gewählte CPU TI TMS320 F2812 wird den Anforderungen hinsichtlich Speicherkapazität / Taktfrequenz für die sich ergebenden Anforderungen aus dem laufenden Projekt gerecht. Die intern mögliche Taktfrequenz von 150MHz ermöglicht die Erfassung aller physikalischen Größen in der benötigten Geschwindigkeit und Präzision (Messdatenfassung alle 100µs). Die hohe Abtastrate ist notwendig, um eine plötzlich auftretende Lastbeaufschlagung sofort zu detektieren und darauf zu reagieren.

3.3.3 Stromwandler

Die im ersten Ansatz eingesetzten Hallsensoren wurden durch Präzisionswandler der Firma Vacuumschmelze ersetzt. Diese rauscharme Sensorik ermöglicht die präzise Leistungsregelung auch im unteren Messbereich (bei kleinen Strömen). Für die Stromnulldurchgangskennung werden die Wandler nicht herangezogen. Hier wurde eigens eine Schaltung entwickelt, die die notwendige Genauigkeit garantiert.

3.3.4 Stromnulldurchgangskennung

Zur exakten Berechnung von Schein-, Wirk- und Blindleistung muss die Phasenverschiebung (Φ) zwischen Spannung und Strom ermittelt werden. Die entwickelte Sperrfensterauswertungsschaltung, nachfolgend SFA (vgl. Abschnitt 3.4 Messauswertungen) genannt, ermittelt den Spannungsabfall über den gesperrten Thyristoren (BlockingTime). Dieses digitalisierte Signal erwies sich als optimal für die Nulldurchgangskennung des Stromes. Ausgewertet werden die Spannungsflanken, die entstehen, wenn der Thyristor in den Sperrzustand geht.

3.3.5 Schwingungskompensation

In vielen Versuchen wurde bei Drehstrom-Asynchronmotoren bei bestimmten Betriebsarten eine Schwingungsneigung festgestellt. Diese ist nicht hörbar aber auf dem Oszilloskop in Form von unterschiedlichen Stromflusslängen sichtbar.

Schwingungsprobleme traten auf im absoluten Leerlauf (freilaufende Welle), erklärbar durch sehr hohen Blindanteil und fehlende Dämpfung durch die Last. Aber auch bei schlagartigem Lastwechsel von hoher auf niedrige Last, erklärbar dadurch, dass sich die Stromflusslängen innerhalb einer Periode schlagartig ändern.

Hier erwies sich die SFA als Optimallösung für die Schwingungskompensation. Durch Auswertung beider Spannungsflanken über dem jeweiligen Thyristor können alle sechs Stromflusslängen (L1-, L1+, L2-, L2+, L3-, L3+) ermittelt und dem Prozessor zugeführt werden. Stellt dieser unterschiedliche Längen (Toleranz 3°) fest, wird der Leistungsregler deaktiviert. Übergeordnet greift der Sperrfensterregler ein und regelt alle Stromflusslängen exakt gleich ein, was zur erfolgreichen Kompensation führt. Nach Einregelung der Sperrfenster regelt der Leistungsregler wieder auf das energetische Optimum.

3.3.6 Thyristorzündung

Die im ersten Ansatz eingesetzten Zündtransformatoren erwiesen sich als nachteilig. Hoher Energiebedarf bei der Zündung und, bedingt durch induktives Verhalten der Spulen, Probleme mit der Aufrechterhaltung des Zündsignals in erforderlicher Länge machten eine Alternativlösung erforderlich. Hier wurde mit dem Einsatz von Opto-Triacs die optimale Wahl in puncto Energiebedarf getroffen. Weitere Vorteile sind die mögliche Zündspannung von 5V (lediglich eine Spannungserzeugung notwendig) und die Generation der Zündenergie aus dem Lastkreis (400V), was den Leistungsbedarf der eigenen Spannungsversorgung erheblich reduziert. Jetziger Leistungsbedarf ca. 8W.

3.3.7 Schutzbeschaltungen

Die in früheren Zeiten aufgetretene Störanfälligkeit (Fremdsignale brachten den zuvor eingesetzten Prozessor zum Stillstand) wurde mit der kompletten Übernahme des Interfaces von Spectrum Digital beseitigt. Die entsprechenden Filterbeschaltungen wurden übernommen. Bis heute wurde kein Störungsproblem festgestellt.

3.3.8 Lückbetrieb

Theoretisch und praktisch ist das Betreiben eines Motors im Lückbetrieb möglich. Hierbei erfolgt durch zu große Spannungsabsenkung ein Stromabriss in allen sechs Stromflusslängen. Dies führt einerseits zu unregelmäßigem Motorbetrieb und ist energetisch nicht sinnvoll, die mögliche Einsparung ist vernachlässigbar. Durch die Detektion über die SFA ist der Prozessor in der Lage, eine Annäherung an den Lückbetrieb zu erkennen. Zur Vermeidung wird die entsprechende Spannungsreserve wieder eingeregelt.

3.4 Messauswertungen

Für die Messung wurden folgende Komponenten verwendet:

1. Motor: MEBKA 132SB-4 IP55 S1

$$\text{rpm} = 1440$$

$$U = 380\text{-}420\text{V } \Delta$$

$$f = 50\text{Hz}$$

$$\cos \phi = 0,83$$

$$P = 5,5\text{kW}$$

$$I = 11,2\text{A}$$

2. Bremse: Siemens Gleichstrom-Universalmaschine

GUM 2550A-4B3 JP21

$$U = 220/440$$

$$I = 22,3 (29)$$

U Erregung [V]	I Erregung [A]	P [kW]	n [U/min]
110/220/440	1,2/0,6/0,3	4/8	1450/2900
110/220/440	0,3/0,15/0,08	4/2,7	1450-3100

3. Messgerät: Fluke Leistungsmessgerät 435 Power Quality Analyzer

Messergebnisse:

Power & Energy				
FUND		0:02:59		
L1	L2	L3	Total	
kW			0.58	
kVA			4.36	
kVAR			4.33	
PF			0.13	
Cos ϕ				
A rms	6.0	6.3	6.4	
L12	L23	L31		
U rms	403.57	405.92	403.08	
06/17/09 09:33:04 398V 50Hz 3 ϕ DELTA EN50160				
VOLTAGE	ENERGY	TREND	HOLD RUN	

Abb. 1: Netzbetrieb Leerlauf

Power & Energy				
FUND		0:04:34		
L1	L2	L3	Total	
kW			0.27	
kVA			0.82	
kVAR			0.77	
PF			0.29	
Cos ϕ				
A rms	2.4	2.6	2.7	
L12	L23	L31		
U rms	219.80	223.03	220.66	
06/17/09 09:34:39 398V 50Hz 3 ϕ DELTA EN50160				
VOLTAGE	ENERGY	TREND	HOLD RUN	

Abb. 2: MotorKontrollerbetrieb Leerlauf

Power & Energy				
FUND		0:29:10		
L1	L2	L3	Total	
kW			2.66	
kVA			4.96	
kVAR			4.19	
PF			0.54	
Cos ϕ				
A rms	6.9	7.3	7.2	
L12	L23	L31		
U rms	402.36	404.46	401.57	
07/03/09 07:51:26 398V 50Hz 3 ϕ DELTA EN50160				
VOLTAGE	ENERGY	TREND	HOLD RUN	

Abb. 3: Netzbetrieb 40% Last

Power & Energy				
FUND		0:23:58		
L1	L2	L3	Total	
kW			2.47	
kVA			2.95	
kVAR			1.60	
PF			0.77	
Cos ϕ				
A rms	6.5	6.6	6.6	
L12	L23	L31		
U rms	287.52	288.06	287.54	
07/06/09 13:21:53 398V 50Hz 3 ϕ DELTA EN50160				
VOLTAGE	ENERGY	TREND	HOLD RUN	

Abb. 4: MotorKontrollerbetrieb 40% Last

Power & Energy				
FUND	0:30:21			
L1	L2	L3	Total	
kW				3.58
kVA				5.52
kVAR				4.20
PF				0.65
Cos ϕ				
A rms	7.7	8.1	7.9	
L12	L23	L31		
U rms	401.68	403.35	400.57	
07/03/09 07:52:37 398V 50Hz 3Ø DELTA EN50160				
VOLTAGE	ENERGY	TREND	HOLD RUN	

Abb. 5: Netzbetrieb 60% Last

Power & Energy				
FUND	0:24:47			
L1	L2	L3	Total	
kW				3.47
kVA				4.10
kVAR				2.18
PF				0.79
Cos ϕ				
A rms	8.0	8.2	8.2	
L12	L23	L31		
U rms	316.05	317.09	316.08	
07/06/09 13:22:43 398V 50Hz 3Ø DELTA EN50160				
VOLTAGE	ENERGY	TREND	HOLD RUN	

Abb. 6: MotorKontrollerbetrieb 60% Last

Power & Energy				
FUND	0:31:56			
L1	L2	L3	Total	
kW				5.07
kVA				6.69
kVAR				4.37
PF				0.76
Cos ϕ				
A rms	9.5	9.9	9.6	
L12	L23	L31		
U rms	400.68	402.09	398.79	
07/03/09 07:54:12 398V 50Hz 3Ø DELTA EN50160				
VOLTAGE	ENERGY	TREND	HOLD RUN	

Abb. 7: Netzbetrieb 90% Last

Power & Energy				
FUND	0:26:28			
L1	L2	L3	Total	
kW				5.02
kVA				5.82
kVAR				2.93
PF				0.82
Cos ϕ				
A rms	10.4	10.7	10.6	
L12	L23	L31		
U rms	337.57	338.62	337.23	
07/06/09 13:24:24 398V 50Hz 3Ø DELTA EN50160				
VOLTAGE	ENERGY	TREND	HOLD RUN	

Abb. 8: MotorKontrollerbetrieb 90% Last

Last [%]	Netzbetrieb 400V						MotorKontrollerbetrieb						Eigenverluste [kW]	EE [kW]	EE [%]
	U [V]	I [A]	P [kW]	Q [kvar]	S [kVA]	PF	U [V]	I [A]	P [kW]	Q [kvar]	S [kVA]	PF			
0	404	6,2	0,58	4,33	4,36	0,13	220	2,6	0,27	0,77	0,82	0,29	0,0174	0,2926	50,448
10	403	6,2	1,23	4,25	4,42	0,28	242	3,6	0,94	0,95	1,33	0,52	0,021	0,269	21,87
20	403	6,5	1,67	4,26	4,58	0,36	263	4,6	1,41	1,17	1,84	0,69	0,0246	0,2354	14,098
30	403	6,6	2,17	4,22	4,75	0,46	272	5,6	1,93	1,34	2,35	0,74	0,0282	0,2118	9,7622
40	402	7,1	2,66	4,19	4,96	0,54	287	6,6	2,47	1,6	2,95	0,77	0,0318	0,1582	5,9489
50	403	7,5	3,13	4,24	5,27	0,59	291	7,7	2,99	1,78	3,48	0,78	0,0357	0,1043	3,3316
60	401	7,9	3,58	4,2	5,52	0,65	316	8,1	3,47	2,18	4,1	0,79	0,0372	0,0728	2,0346
70	401	8,5	4,1	4,21	5,88	0,7	334	8,7	3,97	2,54	4,72	0,8	0,0393	0,0907	2,2117
80	399	9	4,59	4,24	6,25	0,73	334	9,7	4,52	2,71	5,28	0,81	0,0429	0,0271	0,59
90	400	9,7	5,07	4,73	6,69	0,76	337	10,6	5,02	2,93	5,82	0,82	0,0462	0,0038	0,0757
23,5 A	399	9,9	5,25	4,37	6,82	0,77	338	11	5,2	3,01	6,01	0,82	0,0476	0,0024	0,0457

Abb. 9: Messergebnisse

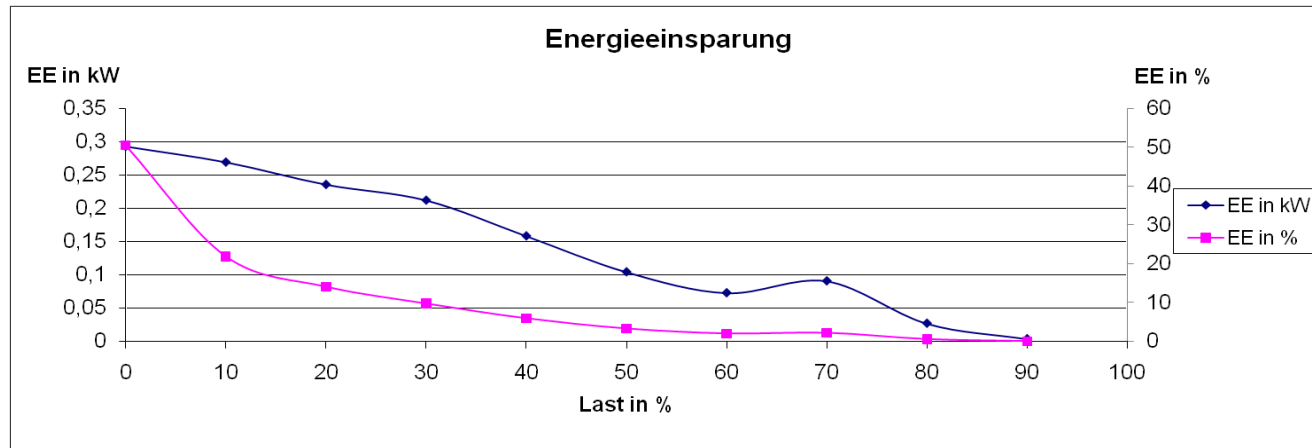


Abb. 10: Energieeinsparung

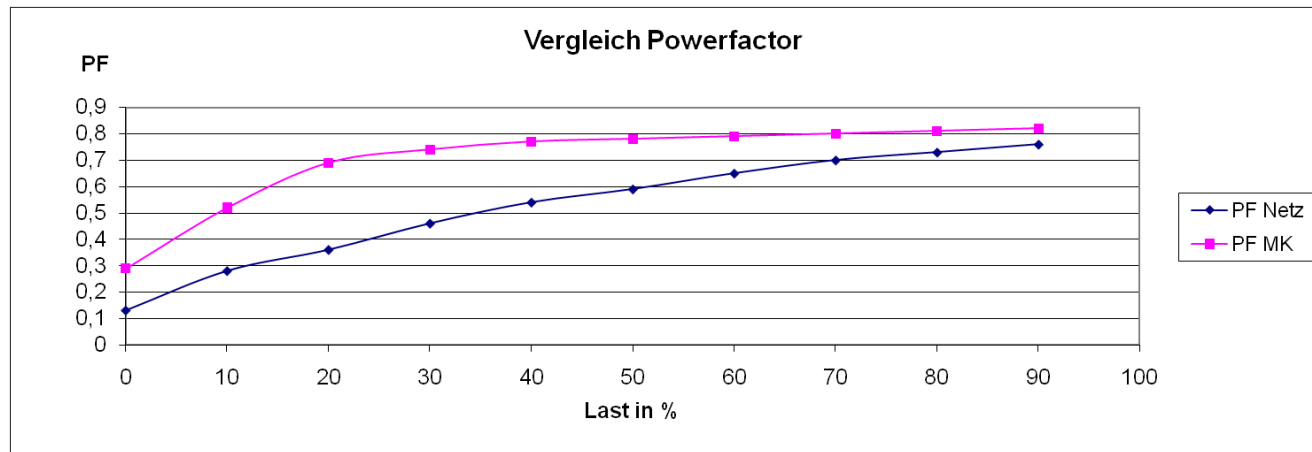


Abb. 11: Vergleich Powerfactor

Auswertung der Messergebnisse:

Die unter Eigenverluste angegebenen Werte wurden rechnerisch (Angaben des Herstellers) bzw. messtechnisch ermittelt. Sie setzen sich wie folgt zusammen:

1. Elektronikverluste = 8Watt
2. Thyristorverluste = $1,2 \cdot I^2 \cdot 3$ (Phasenströme) in Watt

In die Berechnung der Energieeinsparung und die damit generierte Kurve sind die Verluste mit eingeflossen.

Es ist zu erkennen, dass im Teillastbereich Wirkleistungseinsparungen von bis zu 50% möglich sind.

Der Powerfactor wird in allen Lastbereichen wesentlich verbessert, was zu einer deutlichen Reduzierung der Blind- und Scheinleistung führt.

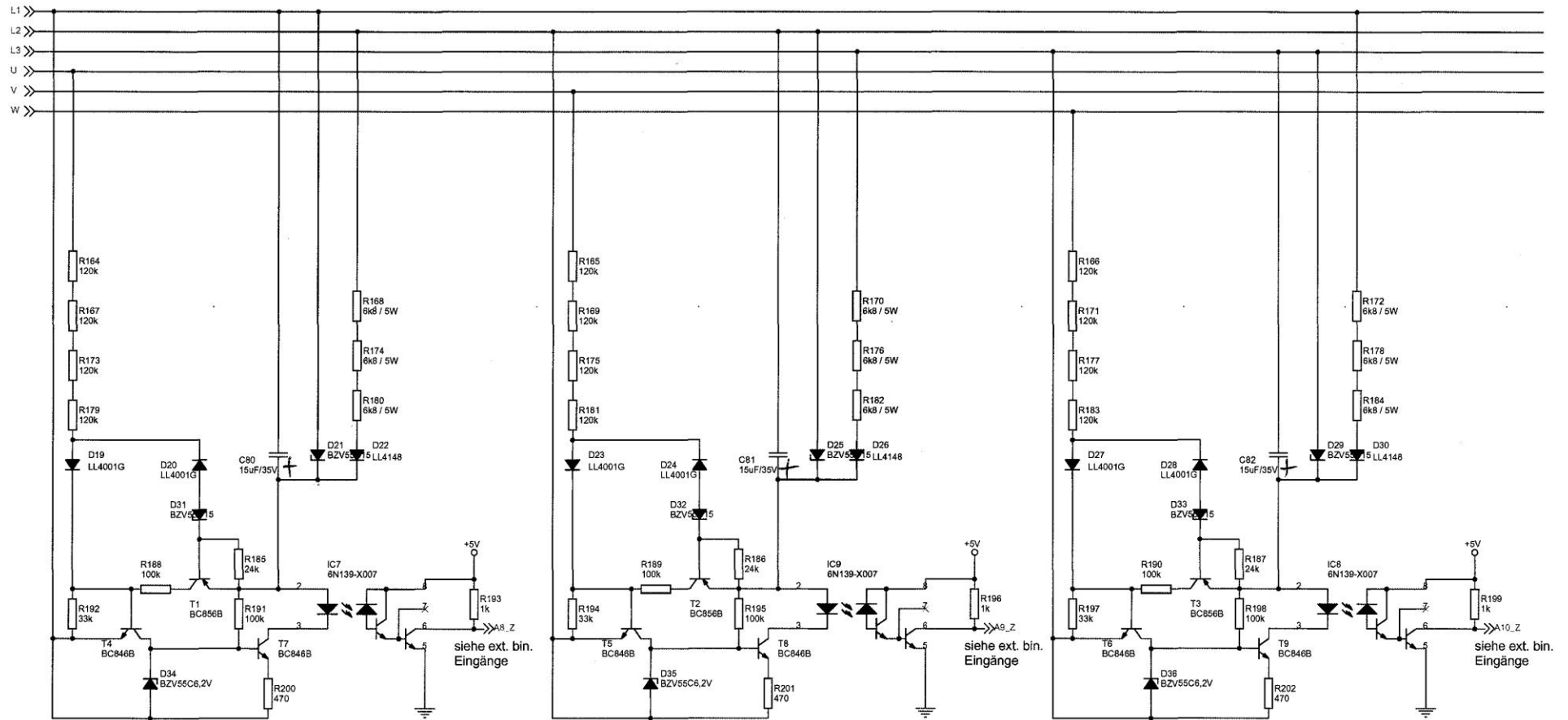


Abb. 12: Schaltplan Sperrfensterauswertung

Welle Nr.	U1	I1	U2	I2	U3	I3
00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
01	231,6500	5,9075	231,6000	6,3142	231,1300	4,7630
02	0,0156	0,0199	0,2206	0,0558	0,0847	0,0768
03	0,1791	0,1378	0,1055	0,1507	0,3172	0,1301
04	0,0171	0,0238	0,1196	0,0246	0,0037	0,0297
05	5,7839	1,3972	5,8076	1,5399	6,0430	1,2384
06	0,0281	0,0120	0,0508	0,0153	0,0151	0,0351
07	0,5414	0,3063	0,5433	0,2894	0,7375	0,3203
08	0,0074	0,0092	0,0337	0,0128	0,0284	0,0235
09	0,4183	0,0045	0,5119	0,0060	0,4554	0,0174
10	0,0481	0,0022	0,0478	0,0133	0,0119	0,0128
11	1,0140	0,1023	0,9588	0,0995	0,9752	0,1323
12	0,0653	0,0023	0,0303	0,0142	0,0159	0,0112
13	0,7933	0,0740	0,6083	0,1037	0,4808	0,1738
14	0,0507	0,0028	0,0539	0,0057	0,0211	0,0077
15	0,2788	0,0083	0,1270	0,0051	0,2924	0,0093
16	0,0210	0,0055	0,0105	0,0064	0,0215	0,0112
17	0,2135	0,0712	0,2467	0,0596	0,1599	0,0454
18	0,0161	0,0067	0,0172	0,0056	0,0138	0,0066
19	0,0070	0,0234	0,1131	0,0244	0,0875	0,0296
20	0,0029	0,0039	0,0077	0,0084	0,0115	0,0056
21	0,0515	0,0029	0,0093	0,0083	0,0592	0,0061
22	0,0061	0,0048	0,0113	0,0071	0,0081	0,0077
23	0,0529	0,0117	0,0523	0,0220	0,0380	0,0535
24	0,0109	0,0041	0,0311	0,0009	0,0149	0,0112
25	0,0380	0,0185	0,0364	0,0247	0,0461	0,0084
26	0,0182	0,0077	0,0191	0,0044	0,0207	0,0057
27	0,0936	0,0106	0,0858	0,0032	0,0677	0,0114
28	0,0304	0,0107	0,0392	0,0037	0,0160	0,0057
29	0,0257	0,0203	0,0230	0,0132	0,0387	0,0290
30	0,0379	0,0025	0,0047	0,0010	0,0334	0,0047
31	0,0737	0,0093	0,0241	0,0018	0,0632	0,0270
32	0,0444	0,0030	0,0070	0,0037	0,0429	0,0038
33	0,0450	0,0042	0,0234	0,0075	0,0391	0,0049
34	0,0380	0,0028	0,0090	0,0039	0,0564	0,0051
35	0,0595	0,0157	0,0092	0,0120	0,0490	0,0167
36	0,0365	0,0021	0,0230	0,0019	0,0393	0,0027
37	0,0336	0,0108	0,0255	0,0096	0,0470	0,0164
38	0,0342	0,0053	0,0051	0,0033	0,0250	0,0036
39	0,0164	0,0006	0,0139	0,0016	0,0354	0,0043
40	0,0093	0,0028	0,0103	0,0035	0,0157	0,0047
41	0,0108	0,0153	0,0147	0,0046	0,0168	0,0112
42	0,0111	0,0019	0,0229	0,0037	0,0070	0,0051
43	0,0072	0,0038	0,0252	0,0099	0,0160	0,0081
44	0,0091	0,0021	0,0204	0,0011	0,0240	0,0055
45	0,0117	0,0044	0,0074	0,0025	0,0328	0,0029
46	0,0379	0,0008	0,0077	0,0011	0,0217	0,0054
47	0,0061	0,0113	0,0355	0,0053	0,0352	0,0177

Abb. 13: Oberwellenmessung (Messgerät Zimmer LMG500)

3.5 Bewertung der Vorhabensergebnisse

Unternehmensziele umfassen heute u.a. Zielgrößen wie Kostenminimierung, Umweltbewusstsein, Imagepflege und Innovation auf die viele Unternehmen ihr Handeln ausrichten. Eine umweltbewusste und emissionsarme Produktion fängt unmittelbar mit dem Energieverbrauch an. Hier lassen sich nicht nur Ersparnisse durch Reduzierung der Energiekosten realisieren, zusätzlich können auch die Kosten im Rahmen des Emissionshandels reduziert werden. Darüber hinaus werden Maßnahmen zur Reduzierung von Verbrauch und Emissionen im Rahmen eines umweltbewussten Unternehmensauftritts zu einer externen wie internen Imageverbesserung beitragen.

Wie in der Einleitung ausgeführt gibt es mit Sanftstartern und Frequenzumrichtern bereits zwei Energiesparlösungen auf den Nachrüstmarkt für asynchrone Elektromotoren. Diese stellen den Stand der Technik dar, mit dem der in diesem Entwicklungsprojekt entwickelte MotorKontroller hinsichtlich technologischer Funktionalität, Einsatzmöglichkeiten, Wirtschaftlichkeit und ökologischer Relevanz verglichen werden muss.

Die einzige Funktion von Sanftstartern ist die graduelle Erhöhung der Spannung über eine Zeitachse, bis zum Erreichen der Nenndrehzahl. Hintergrund ist die Vermeidung von Stromspitzen und von mechanischen Schlägen auf die Lager im Anlauf. Einsparungen im laufenden Betrieb sind konstruktionell nicht realisierbar, daher wird nach Erreichen der Nenndrehzahl der Sanftstarter gebrückt, um Eigenverluste zu vermeiden. Grundsätzlich kann ein Sanftstarter mit allen Antrieben, welche auf Netzfrequenz mit Nenndrehzahl laufen, eingesetzt werden. Der derzeitige Marktanteil liegt bei ca. 3%.

Frequenzumrichter variieren Netzfrequenz und Netzspannung. Mit diesem Verfahren können unterschiedliche Drehzahlen/Leistungen generiert werden. Drehzahl und Drehmoment (an Welle abgegebene mechanische Leistung) stehen in direktem Zusammenhang. Eine Absenkung der Drehzahl führt somit zu einer Verringerung des Drehmomentes. Vereinfachtes Beispiel: Bei Anwendungen, die verminderte Drehzahlen erfordern, wird somit auch nur verminderte Leistung eingesetzt. Lediglich voll rückspeisefähige Frequenzumrichter können Energie einsparen, werden aber von den Anschaffungskosten her erheblich über den Kosten eines MotorKontrollers liegen. Weiterhin sind Frequenzumrichter aufgrund von steilen Flankenanstiegen der Spannungen und Ströme (keine Sinusform sondern rechtwinkliger Anstieg zur Nullachse durch Pulsweitenmodulation) für Motoren älter als 5 Jahre nicht geeignet, da die Isolation den steile

Flankenanstiegen nicht standhält. Durch die konstruktionsbedingten Oberwellen werden sehr aufwendige Entstörungsmaßnahmen notwendig und der Eigenverbrauch des Frequenzumrichters steigt an. Frequenzumrichter werden mit Motoren neuerer / neuester Bauart, deren Einsatz eine Veränderung von Drehzahl / Drehmoment möglich / notwendig macht, eingesetzt. Der derzeitige Marktanteil liegt bei ca. 10%.

Der MotorKontroller unterscheidet sich als neuartige industrielle Anwendung hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit und Einsatzmöglichkeiten erheblich von diesen bisherigen Energiesparlösungen. Er erfasst die Leistungsmerkmale des Motors mit einer hohen Abtastgeschwindigkeit und regelt mittels einer adaptiven Regelungssoftware, abhängig vom jeweiligen Lastpunkt, über Thyristorsteller die Spannung auf den energetisch optimalen Punkt. Das Drehmoment wird nur minimal verringert. Anfallende Oberwellen bewegen sich innerhalb aller relevanten Normen und machen keine zusätzlichen Entstörungsmaßnahmen notwendig. Kurzfristig wird dem Anwender eine vor Ort Parametrierung mittels Eingabetaster und LCD-Anzeige angeboten werden. Weiterhin sind in den MotorKontroller folgende Features integriert: Sanftanlauf, Überstromüberwachung, Phasenüberwachung und Sanftstop. Der MotorKontroller kann mit allen Drehstrom/Asynchronmotoren, welche mit Netzfrequenz betrieben werden, eingesetzt werden.

Fest steht, dass unser Entwicklungsprojekt MotorKontroller kein "Me Too"-Produkt ist, sondern gegenüber bisherigen Standardlösungen einen klaren Mehrwert für unsere potentiellen Kunden bietet:

- Der MotorKontroller ist leistungsfähiger als Sanftstarter, da er neben der ebenfalls enthaltenen Sanftstart-Funktion auch die Leistungsaufnahme im laufenden Betrieb optimiert;
- Der MotorKontroller kann aufgrund seiner technischen Eigenschaften bei Asynchronmotoren eingesetzt werden, für die Frequenzumrichter technisch bedingt nicht einsetzbar sind.

Das hier dargestellte Energieeinsparpotential bezieht sich auf Versuche die während der Projektphase an der HTW-Berlin durchgeführt wurden:

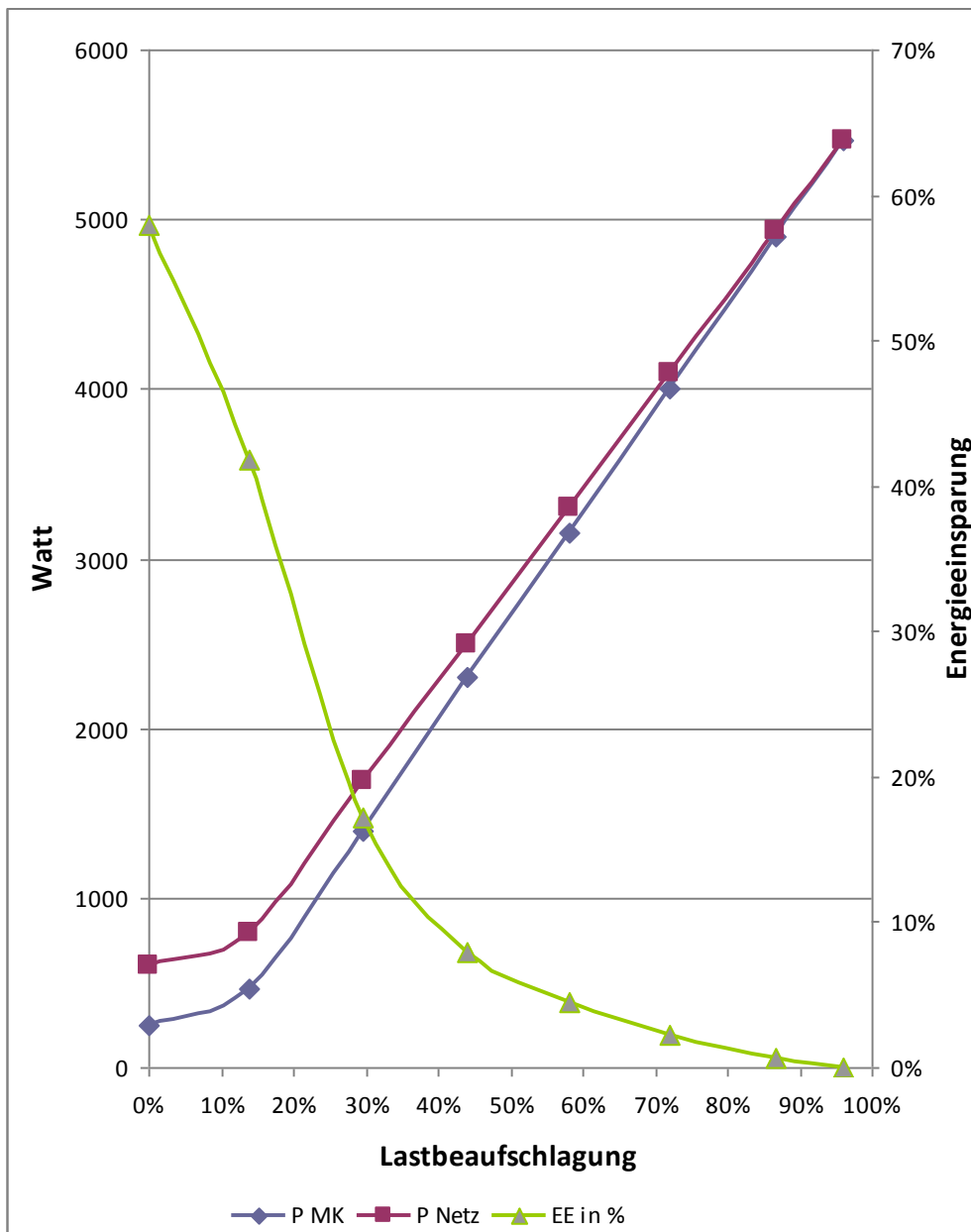


Abb. 14: Energieeinsparung durch den MK-Regler

Technologisch sind wir noch nicht bei unserer "endgültigen Leistungsversion" angelangt. Diese sollen mit einer automatischen Bypass-Regelung ausgestattet werden und über Display und Tastatur für den Kunden parametrierbar sein. Außerdem ist für die zukünftigen verschiedenen Leistungsversionen die Integration der notwendigen Bauteile vorzunehmen.

Das Produkt MotorKontroller muss in Bezug auf Software, Größe, Leistung einer permanenten Weiterentwicklung unterzogen werden. Kurzfristig sind die vorliegenden Vorhabensergebnisse jedoch schon ausreichend, um eine erfolgsversprechende Marktvorbereitung und Markteinführung in Angriff zu nehmen.

Welches wirtschaftliche bzw. Umweltentlastungspotential könnte nun mit dem MotorKontroller realisiert werden? Betrachten wir hierzu den Stromverbrauch in Deutschland. Insgesamt nahm der Bruttostromverbrauch in Deutschland 2007 auf 617,5 Mrd. kWh zu. Wenn wir den Stromverbrauch der Bereiche Industrie und Gewerbe auf 45% des Endenergieverbrauchs ansetzen und weiterhin annehmen, dass elektrische Antriebe für etwa 65% des Stromverbrauchs verantwortlich sind, dann ergibt sich daraus ein Verbrauch von ca. 180 Mrd. kWh pro anno.

Als Zielmarkt für unseren MotorKontroller gehen wir von ca. 15 Millionen installierter elektrischer Asynchronmotoren in den Größenklassen 11kW - 500kW aus, dies entspricht ca. 40% der gesamten installierten Asynchronmotoren in Deutschland. Sicherlich kann die aufgenommene elektrische Energie der gesamten Motoren nicht genau entlang einer 40/60 Teilung zugeordnet werden. Zur Illustration des CO₂-Einsparpotentials begnügen wir uns jedoch erst einmal mit dieser Annahme. Weiterhin gehen wir davon aus, dass 90% dieser Motoren bisher nicht über eine Energieoptimierung verfügen. Daraus ergibt im für uns relevanten Zielmarkt ein Verbrauch von ca. 65 Mrd. kWh pro anno.

Wenn durch den Einsatz des MotorKontrollers Industrie und Gewerbe in unserem Zielmarkt nur 5% Energie einsparen, bedeutet dies eine Verbrauchsreduzierung von ca. 3,25 Mrd. kWh pro anno. Ausgehend von der Annahme, dass pro produzierter kWh Strom 1,042 kg CO₂ freigesetzt werden, bedeutet dies eine CO₂-Reduzierung in Höhe von ca. 3,385 Mio. Tonnen pro anno.

Wie viel Energie im Mittel ein Unternehmen durch Einsatz unseres MotorKontrollers einsparen kann hängt von verschiedenen Faktoren, wie der Motordimensionierung, dem Wirkungsgrad, der Lastbeaufschlagung / den Lastwechselphasen und den Betriebsstunden ab.

Zur ökonomischen Betrachtung müssen wir dann auch noch die Thematik der zukünftigen Preisgestaltung unseres Produkts mit einbeziehen. Wir haben in unseren laufenden Kalkulationen mit zwei "Preisebenen" gearbeitet, abgeleitet von der bisherigen Annahme, dass wir bei unserer Stücklistenkalkulation von nur zwei "Kostenebenen" ausgehen können. Das kann aber gewiss nicht dem Anspruch einer für uns passenden Preisstrategie genügen. Unsere gegenwärtigen Gedanken zur Entwicklung einer passenden Preisfindungsstrategie: Produkte sind nicht einfach nur pauschal alle gleich zu kalkulieren, sondern mit dem Blick auf den Nutzen, der für den Kunden generiert wird. Das verlangt Produktpositionierung und nicht nur Zuschlagsätze. Vielleicht ist manche Lösung sogar zu billig verkauft, weil man nur eigene Kosten addiert hat, der erzeugte Nutzen aber viel höher liegt und man eine überhöhte Nachfrage gar nicht abarbeiten kann. Zwei Schritte werden von uns bewusst zu gehen sein:

1. Strategische Ausrichtung darauf, Kundenwert zu generieren und eine Kalkulation, die jene Produktversionen verteuert, die das bieten.
2. Die so kalkulierten Werte sind dann operativ dem Kunden zu verkaufen (Steuer und Belohnung, mit oder ohne Prämie).

Das bisher bevorzugte klassische Kosten plus Modell, die Stücklistenpreise mit Zuschlägen für Lohn / Gehalt usw. "aufzuschichten" wird den Gegebenheiten unserer Marktsituation wohl nicht gerecht. Aufmerksamkeit muss auf den Wert, den unser MotorKontroller für den Kunden bringen wird, gelegt werden und dementsprechend muss ein Preis bestimmt werden. Also müssen wir einerseits den Wert für den Kunden finden und bepreisen, den Abstand zum Mitbewerber im Auge behalten (auch wenn wir grundsätzlich Sanftstarter und Frequenzumrichter nicht als "echten Konkurrenzprodukte" betrachten, so befassen sie sich doch mit der Thematik Energieverschwendung) oder eine absolut neue Strategie entwickeln und umsetzen. Der Wert für unsere Kunden ergibt sich offensichtlich aus den Einsparmöglichkeiten je kW-Gruppe. Das heißt für uns, dass wir eventuell für alle abgestuften Leistungsbereiche individuelle Preisstufen einbauen werden.

Es lässt sich somit auch keine allgemeinverbindliche Aussage zur theoretischen Amortisationszeit einer Investition in den MotorKontroller tätigen. Wir werden bei zukünftigen Investitionsrechnungen immer darauf hinweisen müssen, dass die Amortisationszeit als einfaches Maß für die Beurteilung des Investitionsrisikos dient, eine willkürliche, subjektive Größe ist und weder über Ertragskraft und Rendite, noch über Energieeinsparung etwas aussagt. Wirtschaftlich sinnvoll ist eine Investition immer dann, wenn die Amortisationszeit kürzer ist als die Nutzungsdauer und der interne Zinssatz höher ist als die Verzinsung einer vergleichbaren Finanzanlage am Kapitalmarkt.

3.6 Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Die Eigenschaft der dynamischen Lastanpassung ist die von uns propagierte Innovation und stellt den entscheidenden technischen Wettbewerbsvorteil dar. Die durch den Einsatz des MotorKontrollers zu erzielenden Senkungen der Energiekosten sowie die gleichzeitige Verbesserung der Ökobilanz eines Unternehmens sind unser zentrales Nutzenversprechen. Zudem ergibt sich weiteres Einsparpotential aufgrund einer längeren Lebensdauer der Elektromotoren. Diese wird durch eine optimierte und weichere Motorensteuerung realisiert. Die Motoren arbeiten während der gesamten Betriebszeit in einem schwingungsarmen Zustand.

Primär haben wir es auf die „Nachrüstung“ installierter Motoren (Retrofit-Markt) abgesehen. Wir sehen aber dennoch Ansatzpunkte, um auch im OEM Geschäft Fuß fassen zu können. Ein weiterer Betrachtungspunkt ist das Thema Hocheffizienzmotoren. In der EU besteht zurzeit nur eine Empfehlung, bei Neuanschaffung von Motoren auf einen Hocheffizienzmotor „umzusteigen“. Eigentlich sollte die deutlich bessere Kostenrechnung über den gesamten Lebenszyklus von energieeffizienten Elektromotoren Kaufargument genug sein. Dem ist bis heute nicht so. In Europa gehören heute 85% der verkauften Motoren der Efficiency-Class 2 (76,2 – 93,6%) an und nur 12% der Efficiency-Class 1. Hinzu kommt, dass allein in Deutschland von den ca. 30 Millionen installierten Motoren ca. 10 Millionen als aus Energie-Effizienz-Sicht modernisierungsbedürftig angesehen werden [Gro08].

Zentrales Thema der parallel zur technischen Weiterentwicklung verlaufenden Marktvorbereitung und Markteinführung ist für uns die Gewinnung und der Aufbau von Geschäftsbeziehungen mit kompetenten Marktpartnern in Deutschland, sowie im europäischen Ausland und später weltweit. Der gemeinsame Aufbau von Referenzkunden als Multiplikator unserer Marktpräsenz und unseres Bekanntheitsgrades ist absolut kritisch dabei.

Vor dem Hintergrund ständig steigender Energiepreise und zunehmendem betrieblichen Energiebewusstsein werden wir dem Enduser mit einer universell einsetzbaren Lösung helfen, seine Energiesparpotentiale zu erschließen - konkreter Kundennutzen durch Energiekosteneinsparung.

Das Angebot einer lohnenden Investition, die kurzfristig nicht nur eine Minimierung von Betriebskosten, sondern auch einen höheren Nutzen für die Umwelt durch Einsparung von Primärenergie und Minderung des Kohlendioxidausstoßes und des Treibhauseffektes erbringen kann, sollte aber auch für OEMs von Interesse sein. Der erhöhte Kundennutzen durch den Einsatz von unserem Produkt kann von diesen als Wettbewerbsvorteil genutzt werden. Umweltbewusstsein kann verstärkt bei unternehmerischer Entscheidung für ein Energieeinsparprodukt mit angesprochen werden.

Expertenmeinungen zufolge gibt es keine Branche, in welcher nicht eine Vervierfachung der Energieproduktivität erreichbar wäre. Es erscheint ein Rätsel, dass Unternehmen nicht systematischer die brachliegenden Effizienzreserven aufspüren. Die energiekostenverantwortlichen Personen in der Industrie müssten eigentlich selbst erkennen, wie vorteilhaft es wäre wenn Ihre eingesetzten Produktionsmittel energieeffizienter arbeiten würden (Stichwort: Energieeinsparpotential = mögliche Reduzierung der Betriebskosten). Dafür, dass sinnvolle

betriebswirtschaftliche Maßnahmen nicht automatisch umgesetzt werden, sind unter anderen folgende Barrieren verantwortlich:

- Vielen Firmen fehlt "das nötige Know-how zur rechten Zeit";
- Die Wichtigkeit im Bewusstsein der Industrie, gerade bei vielen Industrieekäufern, ist noch nicht ausreichend gewachsen;
- Die innerbetriebliche Verantwortung für Energiebelange ist verteilt auf mehrere Abteilungen (Produktion, Wartung, Einkauf, Finanzen);
- Das Top-Management weiß zu wenig über die Rentabilität von energieeffizienten Motorsystemen;
- Unternehmen haben oft andere Sorgen als die Einsparung von Energie.

Unsere Herausforderung ist es nun mit gezielter Produktwerbung, PR und Marktkommunikation eine entsprechende "Vertriebsplattform" zu schaffen. Eine gegenwärtige Situationsanalyse ergibt für unser Unternehmen folgendes Bild:

- Eine Internetpräsenz fehlt;
- Ein passendes, einprägsames Logo fehlt;
- Ein aussagekräftiger Slogan fehlt;
- Werbemappe und Kataloge fehlen;
- Schlagkräftige Referenzen fehlen.

Bisher haben wir das Entwicklungsprojekt im akademischen Bereich (Präsentation im Nov. 2008 und Jun. 2009), sowie einem ausgewählten Kreis möglicher Marktpartner (Präsentation im Feb. 2009) vorgestellt. Schwerpunktmäßig sind jetzt folgende Aktivitäten angedacht und liegen zur Detailausplanung und Umsetzung vor:

- Kooperation mit dem akademischen Bereich: Entwicklung eines umfassenden Kommunikationskonzeptes im Rahmen einer Diplomarbeit (Entwicklung Kommunikationsziele, Zielgruppenplanung, Entwicklung zielgruppenspezifischer Kommunikationsbotschaften, Auswahl geeigneter Kommunikationsmittel);
- Aufbau einer Unternehmenswebseite;
- Online-Werbung: Banner auf Fachportalen, Google Adwords;

- Vertriebsgerichtete Verkaufsförderungsmaßnahmen: Produktschulung, Salesfolder, Vertriebswettbewerb, Prämiensystem;
- Kundengerichtete Verkaufsförderungsmaßnahmen: Leihgeräte auf Zeit, Messkoffer, Prospekt / Flyer / Handbuch, Endkunden-Beratung hinsichtlich Energieeinsparungspotential;
- Direct Marketing: Mail Informationen;
- PR: Volltext-Artikel für Fachzeitschriften;
- Printwerbung in Fachzeitschriften inkl. Reponse-Element;
- Messen;
- Seminare zur Energieoptimierung (in Kooperation mit Energie-Berater(n), Kooperationspartner(n), Marktpartner(n));
- Tag der offenen Tür.

Einen wichtigen Ansatz sehen wir in der Aktivierung von Gatekeepern und Verbänden, z.B. den Energieagenturen in den jeweiligen Bundesländern. Wir hatten in der Vergangenheit bereits die Möglichkeit unser Produktkonzept der Energieagentur Nordrhein-Westfalen (EA-NRW) vorzustellen. Eine Powerpoint-Präsentation und die daran anschließende Diskussion waren ein voller Erfolg. Subsummiert gelangte man zu der Erkenntnis, dass der MotorKontroller, wenn funktionsfähige Geräte verfügbar sind, durch die Ingenieure der EA-NRW bei Firmen in ihrem Verwaltungsbezirk vorgestellt werden sollen. Die EA, deren Hauptaufgabe darin besteht, Betriebe über Produkte zu informieren, welche ressourcenschonende Produktion ermöglichen, ist in allen Bundesländern vertreten und es gibt keinen Grund anzunehmen, dass die Einschätzung der EA-NRW nicht von ihren Kollegen in den anderen Bundesländern geteilt werden wird. Der universelle Nutzen des MotorKontrollers wurde sofort erkannt. Der Fakt, dass der MotorKontroller in diesem Falle von "neutraler" Stelle propagiert werden wird, sollte Markteintrittshemmnisse minimieren.

4. Zusammenfassung der Ergebnisse und zukünftig notwendige Arbeiten

Unter der DBU-Förderung Nr. 26662-21 konnten die gesteckten Ziele gänzlich erreicht werden. Es wurde ein Energiespargerät für Drehstrom-Asynchronmotoren entwickelt, welches in der Lage ist, im Teillastbetrieb des Motors wirtschaftlich Energie (Schein-, Blind- und Wirkleistung) einzusparen.

Die während der Entwicklung aufgetretene Problematik der Schwingungsneigung des Motors konnte mit Entwicklung einer Schaltung (Sperrfensterauswertschaltung) und der softwaremäßigen Auswertung dieser Schaltung gelöst werden.

Die Oberwellenproblematik konnte mit einer Messung (Zimmer LMG500, 4 Oberwellen) als vernachlässigbar eingestuft werden.

Im Laufe der Entwicklung wurde deutlich, dass der Einsatz eines Displays mit Tastatureingabe zur Kundenseitigen Eingabe von Motordaten notwendig ist. Weiterhin wurde das Gerät so konzipiert, dass es im Bypassbetrieb netzmessfähig ist. Neuheit ist hier, dass der MotorKontroller zukünftig in der Lage ist, bei entsprechender Lastbeaufschlagung auf Netzbetrieb zu schalten. Bei Kennung eines möglichen Einsparpotentials wird automatisch wieder auf Kontrollerbetrieb geschaltet. Diese Maßnahmen sollen im Nachfolgeprojekt Nr. 27349 umgesetzt werden.

Quellenverzeichnis

- [Glo08] Global Carbon Project: Carbon budget and trends 2007; 26.09.2008;
<http://www.globalcarbonproject.org>
- [ZVE06] ZVEI-Broschüre: "Energiesparen mit elektrischen Antrieben - Einsparpotentiale in Milliardenhöhe"; 01.04.2006.
- [Gro08] Großes Sparpotenzial; 18. April 2008.
<http://www.allaboutsourcing.de/de/elektrische-Antriebssysteme/>