



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

ENERGIESPARMÖGLICHKEITEN MIT INTELLI-GENTEN STERN-DREIECK- SCHALTERN

Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

Rolf Gloor, Gloor Engineering

7434 Sufers, gloor@energie.ch, www.energie.ch

Impressum

Datum: 31. August 2006

Im Auftrag des Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Elektrizität

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

www.bfe.admin.ch

BFE-Projektbegleiter: Roland Brüniger roland.brueniger@r-brueniger-ag.ch

Projekt- / Vertragsnummer: 101399 / 151655

Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch

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

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Resumée.....	1
Abstract.....	1
1. Ausgangslage	2
2. Ziel der Arbeit	2
3. Lösungsweg.....	2
3.1 Theoretische Überlegungen.....	2
3.2 Praktische Messungen.....	3
4. Ergebnisse	3
4.1 Hydraulikpumpe	3
4.2 Dynamischer Umformer	4
4.3 Normmotor	5
4.4 Holzhacker	5
4.5 Vibrorinnen.....	6
4.6 Steinbrecher	6
4.7 Besäumer	7
5. Diskussion	8
5.1 Zusammenfassung der Resultate	8
5.2 Wirtschaftlichkeit	8
5.3 Anwendungen von intelligenten Stern-Dreieck-Schaltern	9
5.4 Risiko von intelligenten Stern-Dreieck-Schaltern.....	9
6. Schlussfolgerungen	9

Zusammenfassung

Intelligente Stern-Dreieck-Schalter schalten einen Asynchronmotor bei geringer Last automatisch in die Sternschaltung und bei hoher Last wieder in die Dreieckschaltung. Dadurch kann die Leistungsaufnahme im Teillastbereich zwischen 20% und 65% reduziert werden. Bei Anwendungen mit einer Teillastzeit von 1000 Stunden pro Jahr ergeben sich Stromkosteneinsparungen von 5 Franken pro Jahr und kW Nennleistung. Für den einzelnen Anwender und hochgerechnet auf die möglichen Anwendungen in der Schweiz ein zu kleiner Effekt, um weiterverfolgt zu werden.

Resumée

Des commutateurs de triangle d'étoile intelligents enclenchent automatiquement un moteur asynchrone avec le faible fret dans l'enclenchement d'étoile et avec le fret élevé à nouveau dans l'enclenchement de triangle. De cette manière la capacité dans la zone de charge partielle entre 20% et 65% peut être réduite. Avec un temps de charge partielle de 1000 heures par an économies de coût de l'électricité de 5 francs par année et kW puissance nominale. Pour l'utilisateur et projeté sur les applications possibles en Suisse un effet trop petit pour examiner plus profondément.

Abstract

Intelligent star-delta-switches switch an induction motor with small load automatically into the star connection and with high load again into the delta connection. The consum of electricity in the partial load will be reduced between 20% and 65%. In the case of applications with a partial load of 1000 hours per year, the saving of electricity is about 5 Swiss francs per year and per kW of rated power. For the individual user and projected on possible applications in Switzerland a too small effect to be further examined.

1. Ausgangslage

Asynchronmotoren beanspruchen etwa 20% des Elektrizitätsverbrauchs der Schweiz von 56 Milliarden kWh pro Jahr. Die thermischen Verluste in den Motoren betragen je nach Motorgrösse und Belastung 5% bis 70% dieses Stromverbrauchs, im Durchschnitt etwa 15%. Durch Sternbetrieb oder mit Phasenanschnitttechnik wird die Motorspannung im Teillastbetrieb abgesenkt, was die Motorenverluste (Kupferverluste im Stator und Eisenverluste) reduziert. Anwendungen mit langer Teillastbetriebszeit finden sich bei Hydraulikantrieben (Spritzgussmaschinen, Pressen ...), Holzbearbeitungsmaschinen, Steinbrecher, Rolltreppen usw.

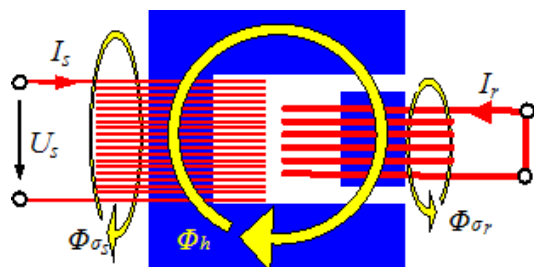
2. Ziel der Arbeit

Das Ziel ist die Messung der Energieeinsparung durch den Betrieb von schwach belasteten Asynchronmotoren in der Sternschaltung. Mit der Abschätzung der Dauer dieser Teillastphasen über die Betriebszeit dieser Maschinen kann der Einspareffekt in Kilowattstunden und Franken pro Maschine bestimmt werden. Auf dieser Basis kann der mögliche Preisbereich eines intelligenten Stern-Dreieck-Schalters abgeschätzt werden. Über die Anwendungen und deren Verbreitung in der Schweiz kann auch das Marktpotential abgeschätzt werden.

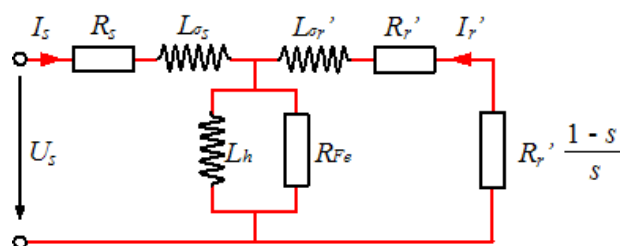
3. Lösungsweg

3.1 THEORETISCHE ÜBERLEGUNGEN

Asynchronmotoren sind ähnlich wie Transformatoren zu verstehen, sie haben eine Primär- und eine Sekundärwicklung (siehe Fig. 1). In der Ersatzschaltung (siehe Fig. 2) wird für die Belastung ein schlupfabhängiger Rotorwiderstand eingesetzt. Im Teillastbereich ist der Schlupf (Formelzeichen s) sehr gering, was einen geringen Rotorstrom verursacht, so dass die Verluste im Rotor vernachlässigt werden können.



Figur 1: Vergleich Asynchronmotor mit Transformator (Quelle <http://www.energie.ch/at/asm>)

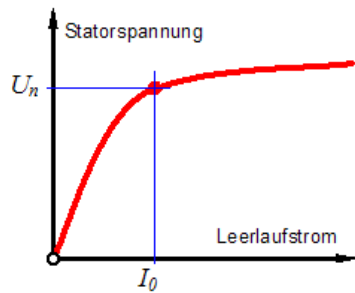


Figur 2: Einphasiges Ersatzschaltbild eines Asynchronmotors (Quelle <http://www.energie.ch/at/asm>)

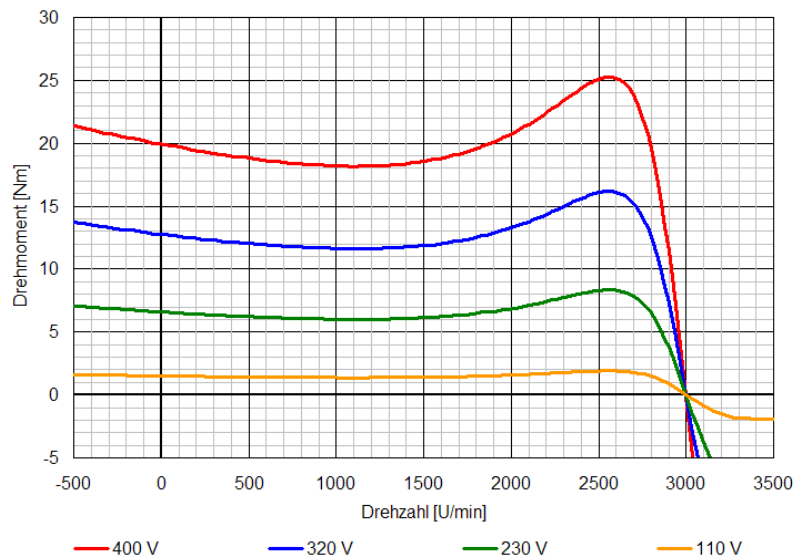
Trotz dieser geringen Belastung fliesst im Stator noch ein grosser Strom, denn für die Magnetisierung des Motors muss der erforderliche Blindstrom geliefert werden, welcher etwa die Hälfte des Nennstromes ist. Zusätzlich wirken belastungsunabhängig die Eisenverluste, welche etwa quadratisch von der Magnetisierung abhängen.

Durch eine Spannungsabsenkung von 400 V (Dreieckschaltung) auf 230 V (Sternschaltung) reduziert sich der Magnetisierungsstrom (Blindstrom) je nach Sättigung (siehe Fig. 3) um den Faktor 1,73 bis 2,5. Die entsprechenden Wärmeverluste in den Statorwindungen reduzieren sich quadratisch zum Statorstrom, der aber noch einen belastungs- und verlustleistungsabhängigen Wirkanteil hat.

Alles zusammengerechnet reduziert sich die Verlustleistung bei reinem Leerlauf (ohne Belastung) etwa um den Faktor 3 oder 66%. Je höher die Belastung ist, desto geringer wird die Einsparung durch den Sternbetrieb. Wenn vom Antrieb viel Drehmoment angefordert wird, so muss die Magnetisierung wieder erhöht werden (Dreieckschaltung), damit genug Reserve zum Kippmoment vorhanden ist und die Rotorverlustleistung nicht zu hoch wird (siehe Fig. 4). Dieser Umschaltunkt liegt etwa bei dem halben Nennmoment.



Figur 3: Sättigungskennlinie eines üblichen Asynchronmotors (Quelle <http://www.energie.ch/at/asm>)



Figur 4: Drehmoment-Drehzahl-Kennlinien eines 2-poligen 3 kW Asynchronmotors. Das Drehmoment nimmt mit der Spannung quadratisch zu. (Quelle <http://www.energie.ch/at/asm>)

3.2 PRAKTISCHE MESSUNGEN

Die vorangehenden theoretischen Überlegungen konnten mit einer Leistungsmessung an Asynchronmotoren im Teillastbetrieb in der Stern- und in der Dreieckschaltung überprüft werden. Dazu wurde der einphasige Power Quality Analyzer *Fluke 43B* mit der Strommesszange *Fluke 80i-500s* mit einem Messbereich von 1 bis 500 A verwendet.

4. Ergebnisse

4.1 HYDRAULIKPUMPE

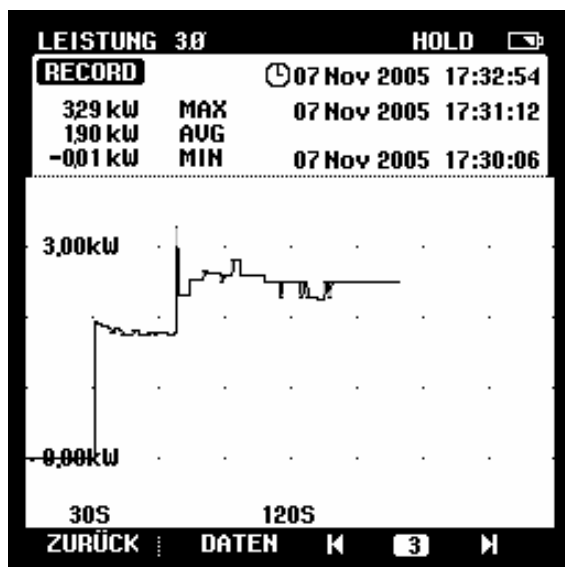
Im Labor für Antriebstechnik an der Fachhochschule für Technik, Wirtschaft und soziale Arbeit in St.Gallen wurde die Hydraulikpumpe (siehe Fig. 5) im Schaltschrank (siehe Fig. 6) des Hydraulikprüfstandes gemessen.



Figur 5: Hydraulikpumpe für Prüfstand mit 22 kW Asynchronmotor (blaue Farbe)



Figur 6: Schaltschrank für den Hydraulikprüfstand mit Leistungsmessgerät (gelbe Farbe)



Figur 7: Leistungsmessung des 22 kW Asynchronmotors mit der unbelasteten Hydraulikpumpe. In den 30 Sekunden Sternschaltung (für die Messung verlängert) ist die Leistungsaufnahme 1,9 kW, in der folgenden Dreieckschaltung 2,5 kW.

Motorhersteller	Unitec	
Typ	4 AZ 180 L 4 B5	
Zusatzdaten	F, IP55, S1	
Nennleistung	22	kW
Nennzahl	1460	U/min
Nennspannung	400	V
Nennstrom	41,5	A
cos phi	0,84	
Nennverluste	2,15	kW
Messung		
Spannung	386	V
Dreieck Wirkleistung	2,50	kW
Dreieck Scheinleistung	9,40	kVA
Stern Wirkleistung	1,90	kW
Stern Scheinleistung	2,90	kVA
Einsparung	0,60	kW

Tabelle 1: Nenndaten des Motors und Messwerte. Da der Motor im Leerlauf mehr Leistung aufnimmt als seine Nennverluste betragen, wird der Leerlauf der Hydraulikpumpe ein Lastmoment von vielleicht 7% des Nennmomentes erfordern.

Die Messung (siehe Fig. 7) zeigt im Leerlauf eine durchschnittliche Leistungsaufnahme von 1,9 kW in der Sternschaltung und 2,5 kW in der Dreieckschaltung. Die Einsparung beträgt 0,6 kW, was rund 25% von den 2,5 kW ausmacht. Anhand der Nenndaten des Motors (siehe Tab. 1) liegen die Nennverluste (bei Nennlast) über der gemessenen Leistungsaufnahme in der Dreieckschaltung, was auf ein kleines Lastmoment hinweist. Wenn für die Leistungsabgabe 1,5 kW angenommen wird, macht die Einsparung von 0,6 kW rund 60% von 1 kW Wirkleistungsaufnahme im theoretischen Leerlauf aus.

4.2 DYNAMISCHER UMFORMER

Im Labor für Antriebstechnik an der Fachhochschule für Technik und Wirtschaft in Chur wurde ein dynamischer 11 kW Wechselstrom-Gleichstromumformer (siehe Fig. 8) gemessen.



Figur 8: Dynamischer Umformer mit 11 kW Asynchronmotor (rechts)

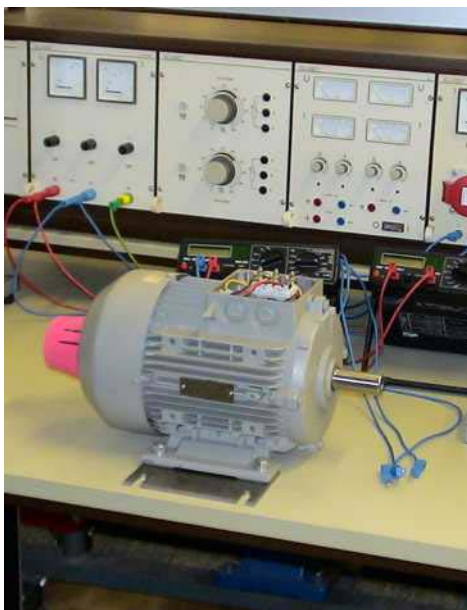
Hersteller, Typ	Bartholdi, kG 160 M4, F, IP 54	Messung	
Nennleistung	11 kW	Spannung	400 V
Nennzahl	1455 U/min	Dreieck Wirkleistung	1,10 kW
Nennspannung	380 V	Dreieck Scheinleistung	8,00 kVA
Nennstrom	23 A	Stern Wirkleistung	0,40 kW
cos phi	0,85	Stern Scheinleistung	1,70 kVA
Nennverluste	1,87 kW	Einsparung	0,70 kW

Tabelle 2: Nenndaten und Messwerte beim Umformer

Die Messung (siehe Tab. 2) zeigt, dass der Motor im Leerlauf nur wenig Leistung aufnimmt und dass er in der Sternschaltung 0,7 kW oder 65% weniger Leistung aufnimmt als in der Dreieckschaltung.

4.3 NORMMOTOR

Im Labor für Antriebstechnik an der Fachhochschule für Technik und Wirtschaft in Chur wurde ein Normmotor mit 4 kW Nennleistung (siehe Fig. 9) gemessen.



Figur 9: Messungen am 4 kW Asynchronmotor im Leerlauf. Auf der linken Motorseite ist ein Inkrementalgeber angebracht, welcher kein relevantes Lastmoment verursacht.

Motorhersteller	Siemens	
Typ	112 M	
Zusatzdaten	F, IP 55	
Nennleistung	4	kW
Nennzahl	1440	U/min
Nennspannung	400	V
Nennstrom	8,3	A
cos phi	0,83	
Nennverlustleistung	0,77	kW
Messung		
Spannung	395	V
Dreieck Wirkleistung	0,56	kW
Dreieck Scheinleistung	2,85	kVA
Stern Wirkleistung	0,18	kW
Stern Scheinleistung	0,69	kVA
Einsparung	0,38	kW

Tabelle 3: Nenndaten des Motors und Messwerte. Die Verluste im Leerlauf betragen rund 75% der Verluste im Nennbetrieb. Die Sternschaltung spart im Leerlauf 0,38 kW oder 68% der Leerlaufleistung.

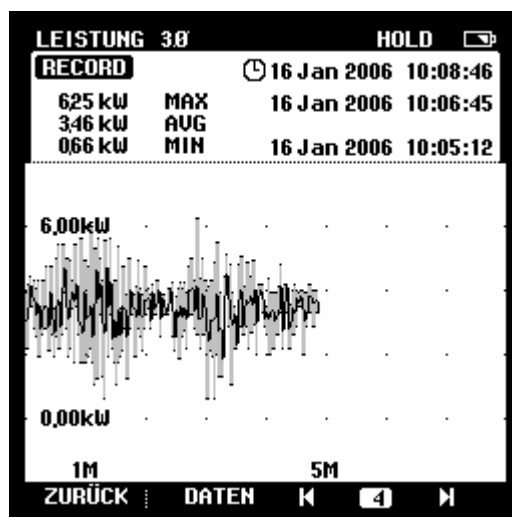
Die Messung (siehe Tab. 3) zeigt, dass der Motor im Leerlauf schon eine hohe Verlustleistung bezogen auf die Nennverluste hat und in der Sternschaltung 0,38 kW oder 68% weniger Leistung aufnimmt als in der Dreieckschaltung.

4.4 HOLZHACKER

Im Sägewerk Franz Welte in A-6832 Sulz wurde der 45 kW Hauptantrieb eines Hackers (siehe Fig. 10) der Firma MATEC system + technik GmbH aus Eriswil gemessen.



Figur 10: Hacker mit 45 kW Asynchronmotor (nicht auf dem Foto zu sehen)



Figur 11: Leistungsaufnahme des Hackers in der Dreieckschaltung, im Durchschnitt 3,5 kW.

Der Hackermotor Typ DKV 225N, 45 kW, 85 A, 1470 U/min durfte nicht in der Sternschaltung betrieben werden, weil die entsprechende Steuerung mit den vor- und nachgelagerten Fördereinrichtungen verriegelt ist. Der Hackermotor hat Nennverluste von 5,6 kW und läuft die meiste Zeit im Leerlauf mit einer Leistungsaufnahme von etwa 3,5 kW (siehe Fig. 11). In der Sternschaltung würde er wahrscheinlich etwa 2 kW weniger Leistung aufnehmen.

4.5 VIBRORINNEN

Im Sägewerk Franz Welte in A-6832 Sulz sind 6 Vibrorinnen (siehe Fig. 12) von der Firma *MATEC system + technik GmbH* aus Eriswil mit 3 kW Asynchronmotoren installiert.



Figur 12: Vibrorinne mit 3 kW Asynchronmotor (türkischer Motor unter der Rinne)



Figur 13: Leistungsaufnahme der Vibrorinne in der Dreieckschaltung, im Durchschnitt 0,3 kW.

Der 3 kW Antriebsmotor durfte nicht in der Sternschaltung betrieben werden, weil die entsprechende Steuerung mit den vor- und nachgelagerten Fördereinrichtungen verriegelt ist. Der Vibrorinnenmotor hat Nennverluste von etwa 0,6 kW und läuft die meiste Zeit im Leerlauf mit einer Leistungsaufnahme von etwa 0,3 kW (siehe Fig. 13). In der Sternschaltung würde er wahrscheinlich etwa 0,15 kW weniger Leistung aufnehmen.

4.6 STEINBRECHER

Im Kies und Betonwerk Kalt in Kleindöttingen wurde ein Steinbrecher (siehe Fig. 14) mit einem 75 kW EFF2 Asynchronmotor (siehe Fig. 15) mit einem Powersaver (siehe Fig. 16) gemessen.



Figur 14: Steinbrecher

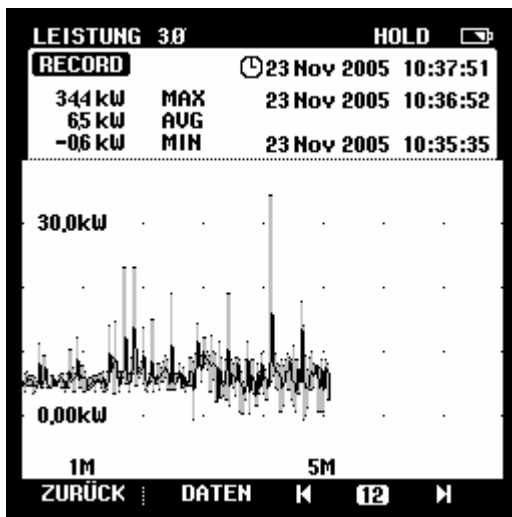


Figur 15: 75 kW Antriebsmotor

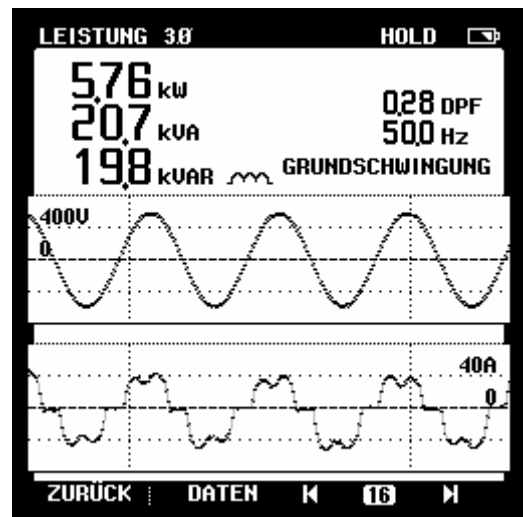


Figur 16: Powersaver

Der 75 kW Antriebsmotor M2QA 280 04A EFF2 mit 1480 U/min, 133 A und einem cos phi von 0,87 hat eine Nennverlustleistung von 5,1 kW und wird über einen Powersaver (Phasenanschnittgerät zur Spannungsabsenkung im Teillastbereich) betrieben. Durch die starke Variation der Leistungsaufnahme konnte mit ein- und ausgeschaltetem Powersaver kein grosser Unterschied in der Wirkleistungsaufnahme gemessen werden. Die durchschnittliche Leistungsaufnahme lag zwischen 5 kW und 7 kW, (siehe Fig. 17 und 18) auch wenn keine Steine durch die Anlage liefen.



Figur 17: Die Leistungsaufnahme des Steinbrechers variiert sehr stark, liegt aber weit unter der Nennleistungsaufnahme von 80 kW.



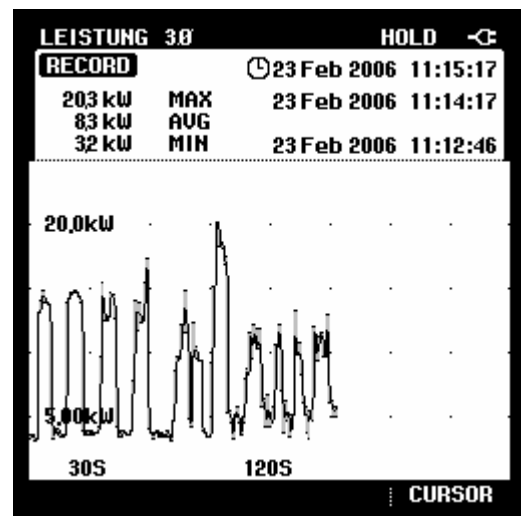
Figur 18: Spannung und Stromverlauf am Eingang zum Powersaver. Die Stromform ist typisch für eine Phasenanschnittsteuerung.

4.7 BESÄUMER

In der Sägerei Gebrüder Lerch in Grünenmatt wurde ein Besäumer (Kreissäge für Längsschnitt in Brettern, siehe Fig. 19) mit einem 45 kW Asynchronmotor und einem Schaltschrank mit extra Umschalter für Stern/Dreieck (siehe Fig. 19 unten rechts) gemessen.



Figur 19: Besäumer aus der Sicht des Maschinenführers und Ausschnitt vom Schaltschrank mit aussen installiertem Stern/Dreieck-Umschalter.



Figur 20: Die Leistungsaufnahme des Besäumers variiert stark. Die ersten 80 Sekunden ist der Motor in der Sternschaltung, den Rest in der Dreieckschaltung.

Der 45 kW Asynchronmotor hat eine Nennverlustleistung von etwa 4 kW. In der Dreieckschaltung liegt die Leerlaufleistung um die 5 kW, in der Sternschaltung um 4 kW, was eine durchschnittliche Einsparung von etwa 1 kW durch die Sternschaltung ergibt.

5. Diskussion

5.1 ZUSAMMENFASSUNG DER RESULTATE

Wie theoretisch erwartet, hat bei allen Anwendungen im Teillastbereich der Betrieb in der Sternschaltung eine geringere Aufnahmeleistung ergeben (siehe Tab. 4), als in der Dreieckschaltung. Die Leistungseinsparung liegt zwischen 20% und 65% bezogen auf die Leistungsaufnahme in der Dreieckschaltung und gerundet zwischen 2% und 10% bezogen auf die Nennleistung.

Kapitel	Anwendung	Nennleistung	Nennspannung	Nennstrom	cos phi	Nennverluste	Leistungsaufnahme in Dreieckschaltung	Leistungsaufnahme in Sternschaltung	Leistungs-einsparung	Einsparung zu Leistungsaufnahme	Einsparung zu Nennleistung
	Einheit	kW	V	A		kW	kW	kW	kW		
4.1	Hydraulikpumpe	22	400	41,5	0,84	2,15	2,50	1,90	0,6	24%	2,7%
4.2	Umformer	11	380	23,0	0,85	1,87	1,10	0,40	0,7	64%	6,4%
4.3	Normmotor	4	400	8,3	0,83	0,77	0,56	0,18	0,4	68%	9,5%
4.4	Hacker	45	400	85,0	0,86	5,64	3,50	1,50	2,0	57%	4,4%
4.5	Vibrorinne	3	400	6,5	0,80	0,60	0,30	0,15	0,2	50%	5,0%
4.6	Steinbrecher	75	400	133,0	0,87	5,16	7,00	5,00	2,0	29%	2,7%
4.7	Besäumer	45	400	81,0	0,87	4,10	5,00	4,00	1,0	20%	2,2%

Tabelle 4: Zusammenstellung der untersuchten Anwendungen und Messresultate. Die kursiven Werte sind Schätzungen.

Die Unterschiede bei der prozentualen Leistungseinsparung hängen von folgenden Faktoren ab:

- von der Grösse der Motoren. Grosse Motoren haben einen besseren Wirkungsgrad und somit einen kleineren Anteil Verlustleistung zum einsparen.
- der Qualität der Motoren. Die Leerlaufverluste der Motoren sind für die Einsparung in der Sternschaltung relevant. Die Leerlaufverluste können nicht aus den Daten auf dem Typenschild oder den technischen Datenblätter errechnet werden.
- der Belastung durch die Anwendung. Je höher die Belastung ist, desto geringer wird die Leistungseinsparung durch die Sternschaltung. Ab etwa dem halben Nennmoment kann die Leistungsaufnahme in der Sternschaltung grösser als in der Dreieckschaltung werden.

Bei den industriellen Anwendungen wurden die Messungen durch relativ grosse Änderungen der Leistungsaufnahme erschwert, da die durchschnittliche Belastung des Motors während den beiden Messungen im Stern- und Dreieckbetrieb wahrscheinlich nicht gleich war.

5.2 WIRTSCHAFTLICHKEIT

Wenn wir von einer durchschnittlichen Einsparung von 4% der Nennleistung über 1000 Betriebsstunden pro Jahr (50% der Arbeitszeit in einem Einschichtbetrieb) ausgehen, so ergibt sich pro kW Nennleistung eine Energieeinsparung von 40 kWh/a. Bei einem Strompreis von 12 Rappen pro kWh spart man rund 5 Franken pro Jahr und kW Nennleistung. Über eine Lebensdauer von 10 Jahren hat ein 4 kW Motor, welcher 400 Franken kostet und jedes Jahr 1000 Stunden im tiefen Teillastbereich in der Sternschaltung anstelle der Dreieckschaltung betrieben wird, für rund 200 Franken Stromkosten eingespart. Die Kosten für einen intelligenten Stern-Dreieck-Schalter werden installiert etwa zwischen 100 und 200 Franken liegen.

Die Sternschaltung reduziert in viel höheren Mass die Blindleistung als die Wirkleistung. Da bei Belastung wieder die volle Blindleistung benötigt wird und praktisch alle Gewerbe- und Industriebetriebe entsprechend dimensionierte Blindstromkompensationsanlagen haben, sind die Blindenergiekosten kein Thema.

5.3 ANWENDUNGEN VON INTELLIGENTEN STERN-DREIECK-SCHALTERN

In Frage kommen Anwendungen mit einer hohen Betriebsstundenzahl im Teillastbereich:

- Transporteinrichtungen wie Rolltreppen, Förderbänder, Kettenförderer, Vibrorinnen ...
- Hydraulikpumpen für die unterschiedlichsten Anwendungen
- Bearbeitungsmaschinen mit viel Leerlauf wie Hacker, Steinbrecher, Kreissägen ...
- Arbeitsantriebe mit Brems-Kupplungskombinationen wie Stanzen, Webmaschinen
- Maschinen und Anlagen mit massiv überdimensionierten Motoren (hier drängt sich aber auch eine permanente Sternschaltung auf)

Für intelligente Stern-Dreieck-Schalter kommen kaum in Frage:

- Anwendungen mit einer geringen Betriebszeit
- Kleinmotoren ohne Stern-Dreieck-Schalter
- Förderpumpen, Umwälzpumpen
- Kompressoren und Vakuumpumpen
- Gebläse und Ventilatoren

Grob geschätzt (Unsicherheitsfaktor 2) kommen etwa 10% der Anwendungen mit Asynchronmotoren in Frage für intelligente Stern-Dreieck-Schalter. Da diese Anwendungen aber oft im Teillastbereich betrieben werden, machen sie nur einen geringen Anteil des Stromverbrauchs durch Asynchronmotoren aus. Gemessen am Gesamtstromverbrauch der Schweiz vielleicht 1%. Der Teillastbereich beansprucht von diesem Anteil etwa 20% des Stromverbrauchs und davon könnten 4% mit intelligenten Stern-Dreieck-Schaltern eingespart werden. Das ergibt $0,01 \text{ mal } 0,2 \text{ mal } 0,04 \text{ mal } 57 \text{ TWh/a}$ gleich ein theoretisches Potential von 4,6 GWh/a oder etwa 550'000 Franken Stromkosteneinsparung pro Jahr.

In vielen Fällen ergeben sich auch bessere Lösungen mit einer Abschaltung im Leerlauf oder einer Drehzahlabsenkung im Teillastbereich (Stichwort Frequenzumrichter).

5.4 RISIKO VON INTELLIGENTEN STERN-DREIECK-SCHALTERN

Die Umschaltung von der Stern- in die Dreieckschaltung und wieder zurück müsste manuell oder automatisch über die Analyse der Stromaufnahme erfolgen. Je nach Anwendung, Produktion und Motor müssten die Einstellwerte angepasst oder die Umschaltung deaktiviert werden, was eine einfache Umsetzung erschwert.

Zusätzlich verursacht jede Umschaltung teilweise erhebliche Schläge (transiente Vorgänge) und Lastspiele auf der elektrischen Seite (Netz, Schütze, Motor) und der mechanischen Seite (Motor, Getriebe, Anwendung). Durch eine zusätzliche Automatisierung des optimalen Umschaltzeitpunktes könnte aus diesem Nachteil ein Vorteil für Antriebe mit häufigem Start-Stop Betrieb entstehen.

Jedes zusätzliche Gerät in der Kette zwischen Stromversorgung und Anwendung erhöht das Risiko eines Ausfalls.

6. Schlussfolgerungen

Intelligente Stern-Dreieck-Schalter sparen Energie. Der Einsatz ist aber nicht problemlos und die Rentabilität ist eher gering. Eine Weiterverfolgung dieser Energiesparmassnahme erscheint unter Einbezug von Risikoüberlegungen weder aus volkswirtschaftlicher Sicht (BFE) noch aus betriebswirtschaftlicher Sicht (ein möglicher Hersteller) sinnvoll.