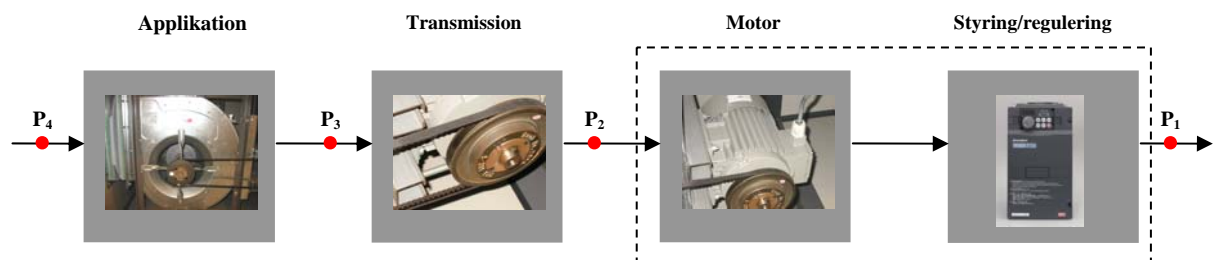


Systemoptimering af elmotordrevne maskinsystemer

PSO-projekt nr. 338-009

Projektrapport



Systemoptimering af elmotordrevne maskinsystemer

Forfattere: Claus M. Hvenegaard (Teknologisk Institut), Hans Andersen (Teknologisk Institut), Sandie B. Nielsen (Teknologisk Institut) og Mads Peter Rudolph Hansen (Teknologisk Institut)

Forord

Denne rapport er den faglige rapportering/dokumentation til forskningsprojektet bevilget under PSO 2006 administreret af Dansk Energi Net:

338-009 – Systemoptimering af elmotordrevne maskinsystemer

Rapporten beskriver videreudviklingen af et katalog med virkningsgrader som funktion af belastningsgrader for de komponenter der indgår i et elmotordrevent maskinsystem.

Rapporten går endvidere i dybden med teknologiområdet ”Anden motordrift”, som står for en væsentlig andel (ca. 36 %) af industriens elforbrug.

Rapporten indeholder et detaljeret eksempel på systemoptimering i praksis.

Endelig indeholder rapporten resultaterne af en markedsundersøgelse vedr. små motorer (< 1,1 kW).

Udviklingen af kataloget samt de detaljerede undersøgelser er sket i tæt samarbejde med leverandører af komponenter (gearmotorer og frekvensomformere), et elforsyningselskab samt to industrivirksomheder repræsenteret ved:

Danfoss – Jørgen Hansen

Lemvigh-Müller – Henrik Lykke Lilleholt

Lokal Energi – Michael Olsen

A-Vent – Hans Langhoff Nielsen

Arla – Lars Hermann

Arbejdet har været udført i perioden april 2006 – december 2007. Ovennævnte personer har deltaget i kvartalsvise styregruppemøder.

Rapporten er primært udført af Teknologisk Institut i form af:

Hans Andersen, Industri & Energi

Claus Martin Hvenegaard, Industri & Energi

Sandie B. Nielsen, Industri & Energi

Mads Peter Rudolph Hansen, Industri & Energi

Arbejdet er hovedsagligt finansieret af ELFOR. Den resterende finansiering er kommet ved hjælp af egenfinansiering fra henholdsvis leverandører og industrivirksomheder.

Arbejdet har været suppleret med en række foredrag. Erfa-træf 2007 for energirådgivere (november 2007) og EEMODS 2007 i Beijing (juni 2007) er to eksempler på udadvendt aktivitet fra projektgruppens side.

Projektet er endvidere præsenteret i fagbladene Ingeniøren og Drift Vedligehold & Økonomi.

Hans Andersen

Teknologisk Institut

September 2008

Indholdsfortegnelse – univers 14 fed

Side

1	Indledning	6
1.1	Opbygning af rapport.....	6
2	Gear	8
2.1	Markedsundersøgelse	8
2.1.1	Renold	8
2.1.2	SEW Eurodrive	10
2.1.3	Bonfiglioli	12
2.2	Test af gear	15
2.3	Data for gear	16
2.4	Målinger.....	16
2.5	Snekkegear	17
2.6	Keglehjulsgear	19
2.7	Tandhjulsgear	22
2.8	Konklusion	24
3	Frekvensomformere	26
3.1	Markedsundersøgelse	26
3.2	Test af Danfoss frekvensomformere	27
3.2.1	Test af 4 kW motor og frekvensomformer	27
3.2.2	Test af 55 kW motor og frekvensomformer	34
3.3	Test af frekvensomformer på Aalborg Universitet.....	39
3.3.1	Test af 22 kW motor og frekvensomformer	39
3.3.2	Test af 90 kW motor og frekvensomformer	41
4	Opdateret katalog.....	45
4.1	Belastning	45
4.1.1	Ventilatorer	45
4.1.2	Pumper	46
4.1.3	Trykluftkompressorer.....	48
4.1.4	Kølekompressorer.....	51
4.1.5	Hydraulikpumper	54
4.1.6	Anden motordrift.....	57
4.2	Transmission	58
4.2.1	Remtransmissioner	58
4.2.2	Geartransmissioner	60
4.3	Elmotor	63
4.3.1	Asynkronmotor	63
4.3.2	PM-motor	66
4.4	Styring og regulering	69
4.4.1	Softstarter.....	69
4.4.2	Frekvensomformer.....	71
5	Anden motordrift.....	74
5.1	Kortlægning af elforbrug til anden motordrift på Brabrand Mejeri	75
5.2	Reduktion af elforbrug til anden motordrift på Brabrand Mejeri.....	77
5.2.1	Homogenisatorer	77
5.2.2	Centrifuger	80
5.2.3	Fyldemaskiner.....	82
5.2.4	Omrørere.....	84
6	Systemoptimering i praksis - A-Vent	86
6.1	Anlægsopbygning.....	86

6.2	Styring af ventilationsanlægget	88
6.3	Målinger på ventilationsanlægget	89
6.4	Optimering af udsugningssystemet.....	93
6.4.1	Ventilatorer	93
6.4.2	Motor og transmission	94
6.4.3	Anbefaling.....	94
7	Små motorer	96
7.1	Markedsundersøgelse	96

1 Indledning

Denne projektrapport er tænkt som et lettilgængeligt opslagsværk for alle, der arbejder med at energieffektivisere elmotordrevne maskinsystemer, hvad enten det er maskinbyggeren, leverandøren af komponenterne til maskinsystemet, elselskabernes rådgivere, rådgivende ingeniører eller den energiansvarlige/indkøberen i virksomheden, hvor maskinsystemet installeres.

Et energieffektivt system, hvor enkeltkomponenterne hver især er energieffektive, og hvor de er tilpasset hinanden i forhold til behovet betyder besparelser på virksomhedens elregning og er med til at nedbringe CO₂ udslippet til gavn for miljøet. Meget ofte vil det optimale system reducere omkostningerne til drift og vedligehold.

Projektgruppen håber, at bogen vil være et nyttigt værktøj i dagligdagen, så det bliver lettere at bringe energieffektive maskinsystemer ind i danske virksomheder.

1.1 Opbygning af rapport

Bogen er opbygget i 5 sektioner:

- Kapitel 2-3, test af gear samt motorer og frekvensomformere
- Kapitel 4, opdateret katalog
- Kapitel 5, anden motordrift
- Kapitel 6, systemoptimering i praksis
- Kapitel 7, små motorer

Kapitel 2 viser resultaterne af tests på tre forskellige gear typer. De tre geartyper er snække-, keglehjuls- og tandhjulsgear. Der er benyttet gear med tre forskellige udvekslingsforhold. Disse udvekslingsforhold er nogenlunde ens for de tre geartyper. Resultaterne er præsenteret i kurver, der viser virkningsgrader som funktion af belastningsgrader.

Kapitel 3 viser resultaterne af tests på tre forskellige motorer og frekvensomformerer. Der er benyttet motorer og frekvensomformere i størrelserne 4 kW, 18,5 kW og 55 kW. Resultaterne er præsenteret i kurver, der viser virkningsgrader som funktion af belastningsgrader.

Kapitel 4 viser et opdateret katalog for de komponenter der typisk indgår i et elmotordrevet maskinsystem. Kataloget er en opdatering af det katalog der kan ses i Den store Blå om Systemoptimering /2/.

Kapitel 5 viser eksempler på systemoptimering af anden motordrift. Eksemplerne baserer sig på målinger af analyser af elmotordrevne maskinsystemer på Brabrand Mejeri.

Kapitel 6 viser et eksempel på systemoptimering af et behovsstyret mekanisk ventilationsanlæg på virksomheden A-Vent. Anlæggets formål er udsugning fra svejsesteder og almen udsugning samt indblæsning af friskluft i produktionshaller.

Kapitel 7 viser resultatet af en undersøgelse (telefonisk udført interview-runde) af hvorledes motorleverandører oplever indkøb af elmotorer, når markedet er ”småmotorer” med installeret effekt under 1,1 kW.

2 Gear

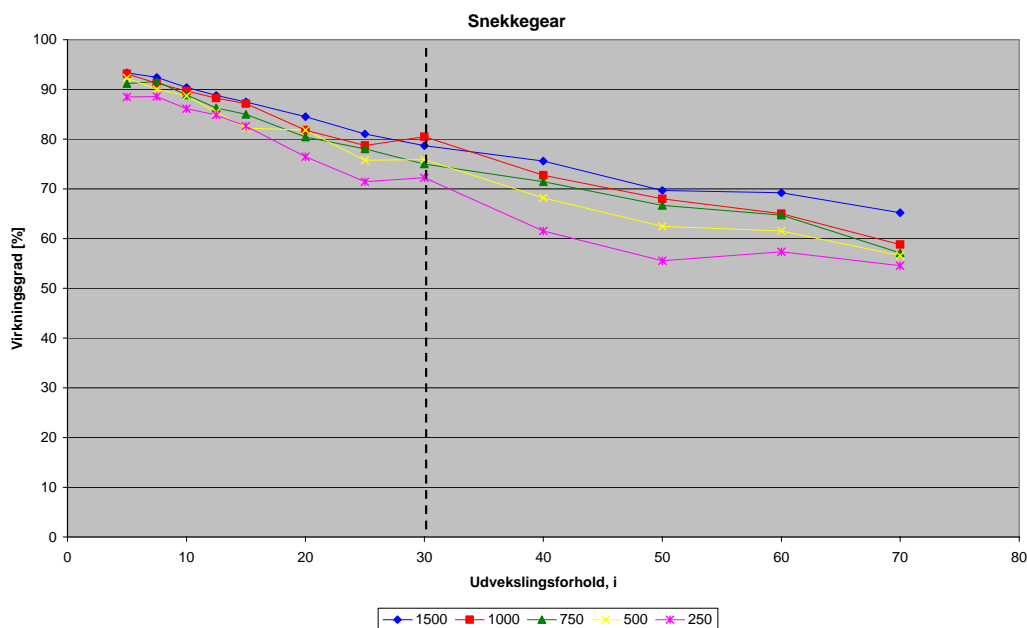
2.1 Markedsundersøgelse

2.1.1 Renold

I figur 1 ses virkningsgrader for et snækkegear. Virkningsgraderne er vist ved fem forskellige omdrejningstal (input), ved forskellige udvekslingsforhold og ved konstant moment.

På figuren ses en tydelig sammenhæng mellem virkningsgraden og udvekslingsforholdet. Jo højere udvekslingsforhold jo lavere virkningsgrad.

Der ses endvidere en tydelig sammenhæng mellem virkningsgraden og omdrejningstallet. Jo lavere omdrejningstal jo lavere virkningsgrad. Denne sammenhæng er mest udtalt ved store udvekslingsforhold.

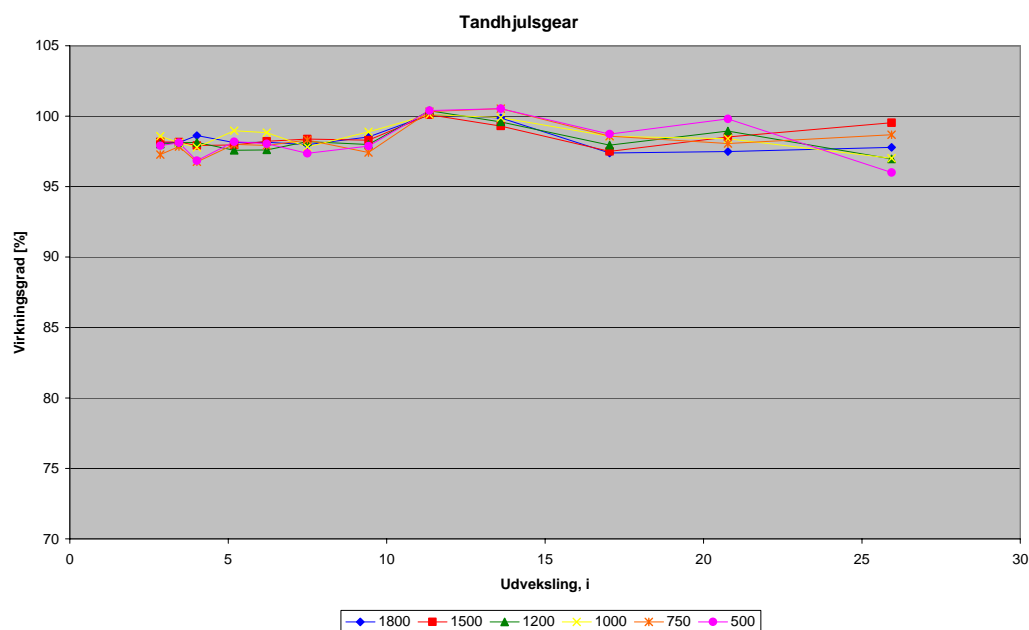


Figur 2.1. Virkningsgrad for snækkegear ved fem omdrejningstal (input) som funktion af udvekslingsforholdet

I figur 2.2 ses virkningsgrader for et tandhjulsgear. Virkningsgraderne er vist ved fem forskellige omdrejningstal (input), ved forskellige udvekslingsforhold og ved konstant moment.

På figuren ses at virkningsgraden stort set er uafhængig af udvekslingsforholdet.

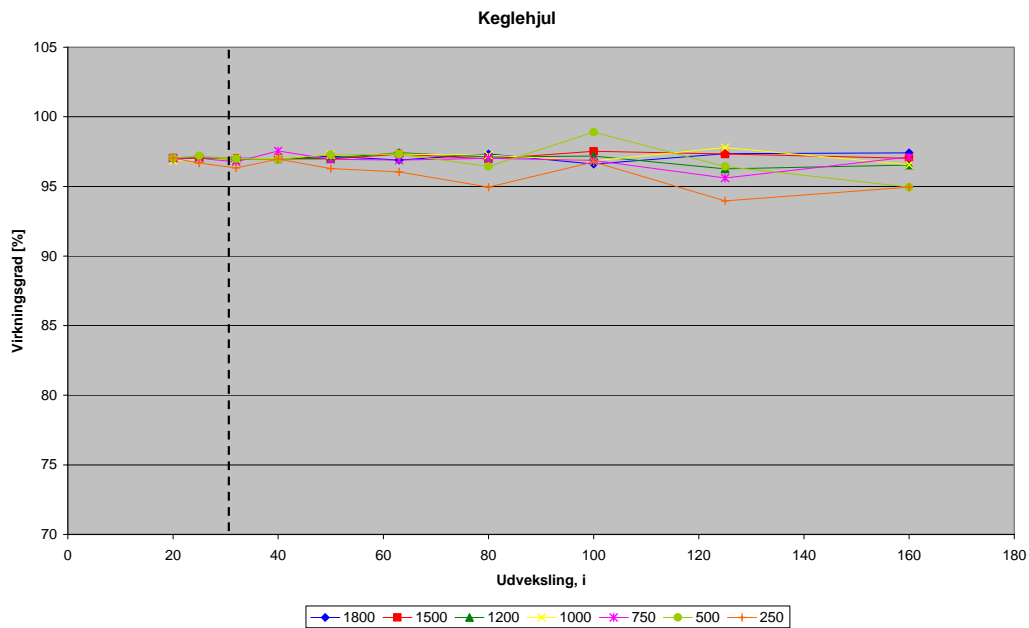
Der ses endvidere en tydelig sammenhæng mellem virkningsgraden og omdrejningstallet. Jo lavere omdrejningstal jo lavere virkningsgrad. Denne sammenhæng er mest udtalt ved store udvekslingsforhold.



Figur 2.2. Virkningsgrad for tandhjulsgear ved fem omdrejningstal (input) som funktion af udvekslingsforholdet

I figur 2.3 ses virkningsgrader for et keglehjulsgear. Virkningsgraderne er vist ved syv forskellige omdrejningstal (input), ved forskellige udvekslingsforhold og ved konstant moment.

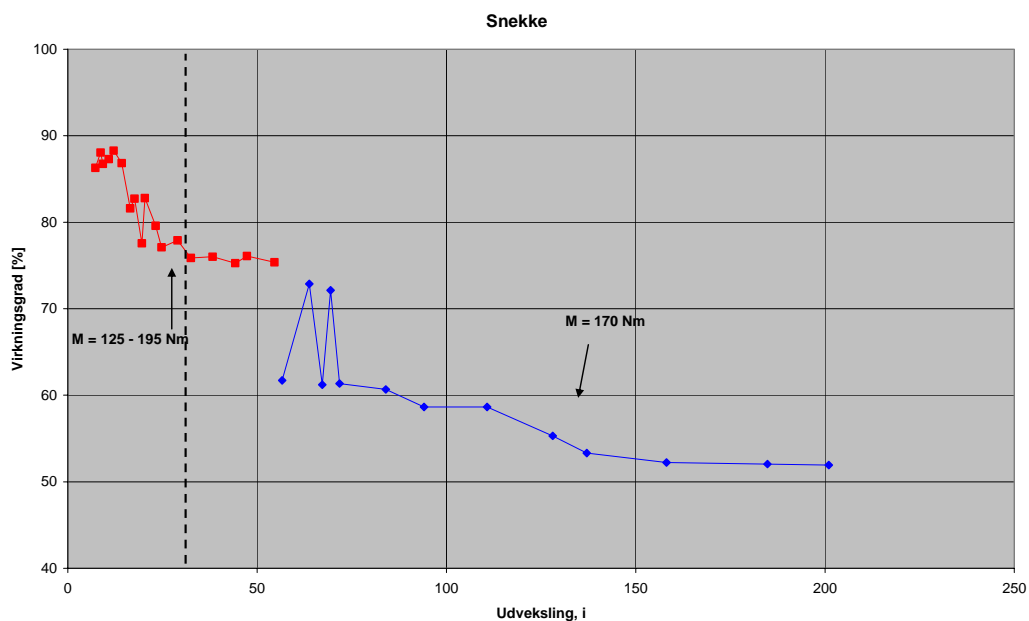
På figuren ses ikke den store sammenhæng mellem virkningsgraden og udvekslingsforholdet. Ved store udvekslingsforhold og lave omdrejningstal synes der dog at ske et fald i virkningsgraden.



Figur 2.3. Virkningsgrad for keglehjulsgear ved ét omdrejningstal (input) som funktion af udvekslingsforholdet

2.1.2 SEW Eurodrive

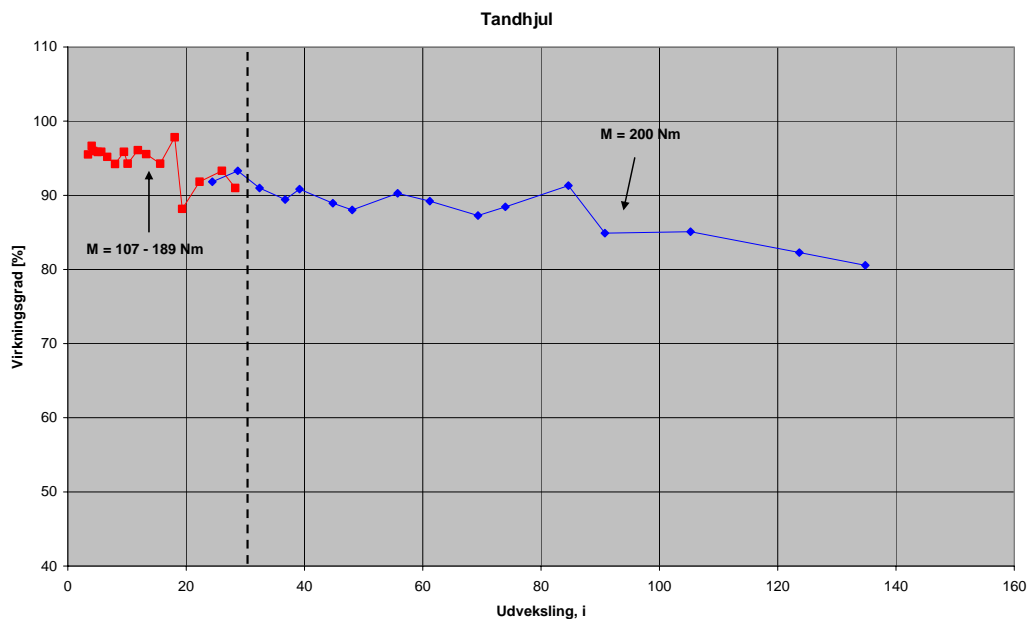
I figur 2.4 ses virkningsgrader for et snækkegear. Virkningsgraderne er vist ved ét omdrejningstal (input), ved forskellige udvekslingsforhold og ved næsten konstant moment. På figuren ses en tydelig sammenhæng mellem virkningsgraden og udvekslingsforholdet. Jo højere udvekslingsforhold jo lavere virkningsgrad.



Figur 2.4. Virkningsgrad for snækkegear ved ét omdrejningstal (input) som funktion af udvekslingsforholdet

I figur 2.5 ses virkningsgrader for et tandhjulsgear. Virkningsgraderne er vist ved ét omdrejningstal (input), ved forskellige udvekslingsforhold og ved næsten konstant moment. På figuren ses en tydelig sammenhæng mellem virkningsgraden og udvekslingsforholdet. Jo højere udvekslingsforhold jo lavere virkningsgrad. Denne sammenhæng er dog mest udtalt ved relativt store udvekslingsforhold.

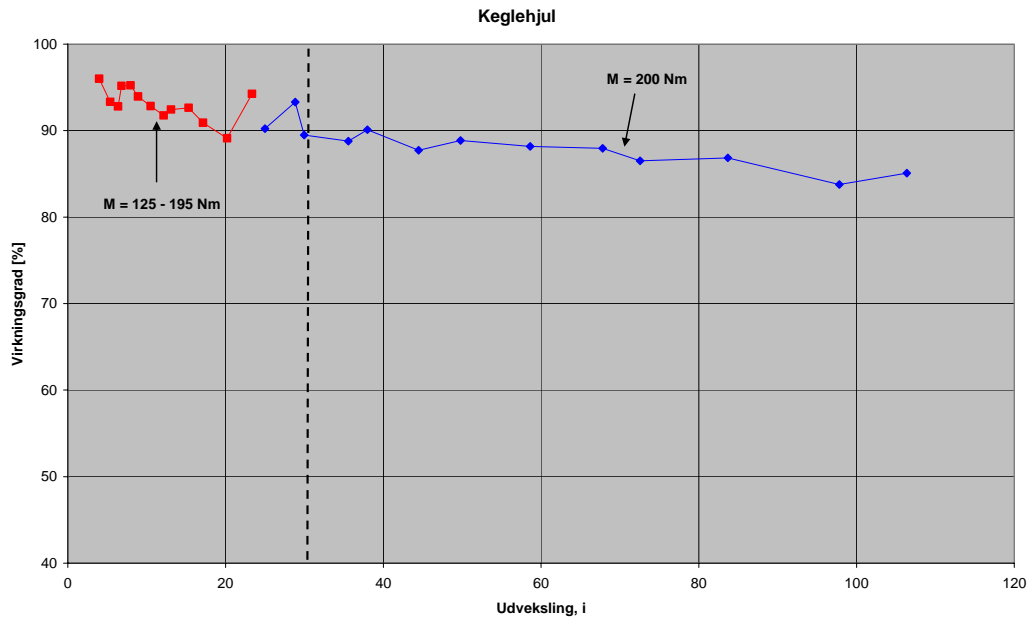
Ved udvekslingsforhold mellem 0 og 30 ligger virkningsgraden mellem 93 og 97 %.



Figur 2.5. Virkningsgrad for tandhjulsgear ved ét omdrejningstal (input) som funktion af udvekslingsforholdet

I figur 2.6 ses virkningsgrader for et keglehjulsgear. Virkningsgraderne er vist ved ét omdrejningstal (input), ved forskellige udvekslingsforhold og ved næsten konstant moment. På figuren ses en tydelig sammenhæng mellem virkningsgraden og udvekslingsforholdet. Jo højere udvekslingsforhold jo lavere virkningsgrad. Denne sammenhæng er dog mest udtalt ved relativt store udvekslingsforhold.

Ved udvekslingsforhold mellem 0 og 30 ligger virkningsgraden mellem 90 og 97 %.



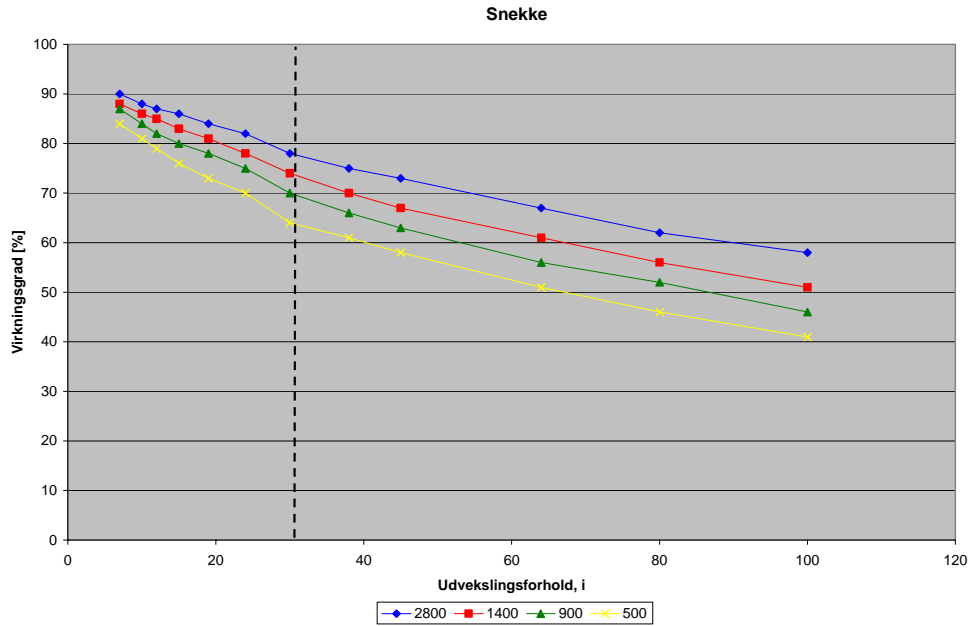
Figur 2.6. Virkningsgrad for keglehjulsgear ved ét omdrejningstal (input) som funktion af udvekslingsforholdet

2.1.3 Bonfiglioli

I figur 2.7 ses virkningsgrader for et snækkegear. Virkningsgraderne er vist ved fire forskellige omdrejningstal (input), ved forskellige udvekslingsforhold og ved konstant moment.

På figuren ses en tydelig sammenhæng mellem virkningsgraden og udvekslingsforholdet. Jo højere udvekslingsforhold jo lavere virkningsgrad.

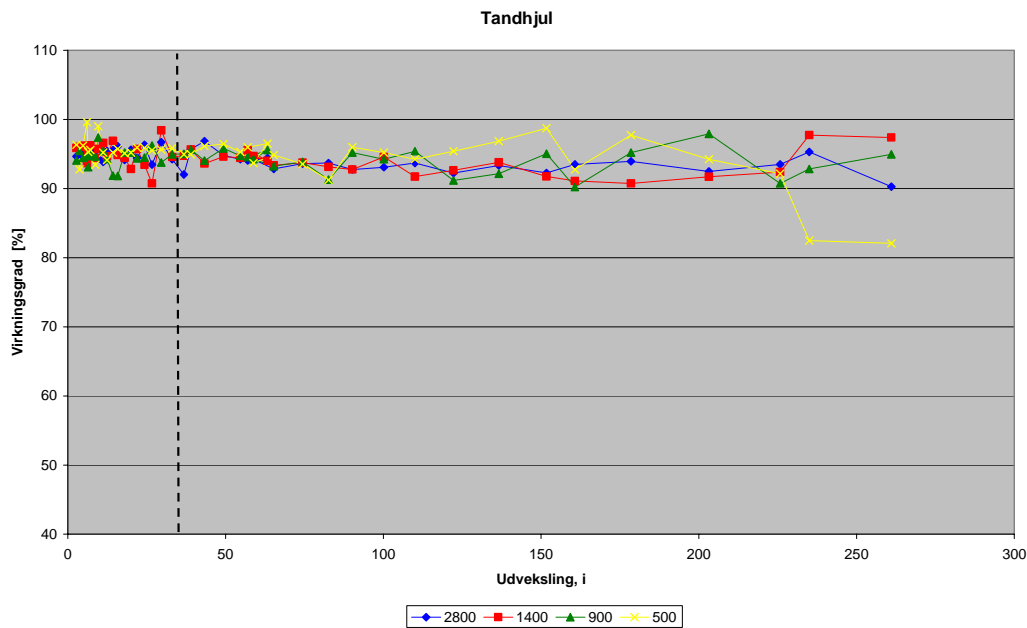
Der ses endvidere en tydelig sammenhæng mellem virkningsgraden og omdrejningstallet. Jo lavere omdrejningstal jo lavere virkningsgrad. Denne sammenhæng er mest udtalt ved store udvekslingsforhold.



Figur 2.7. Virkningsgrad for snækkegear ved fire omdrejningstal (input) som funktion af udvekslingsforholdet

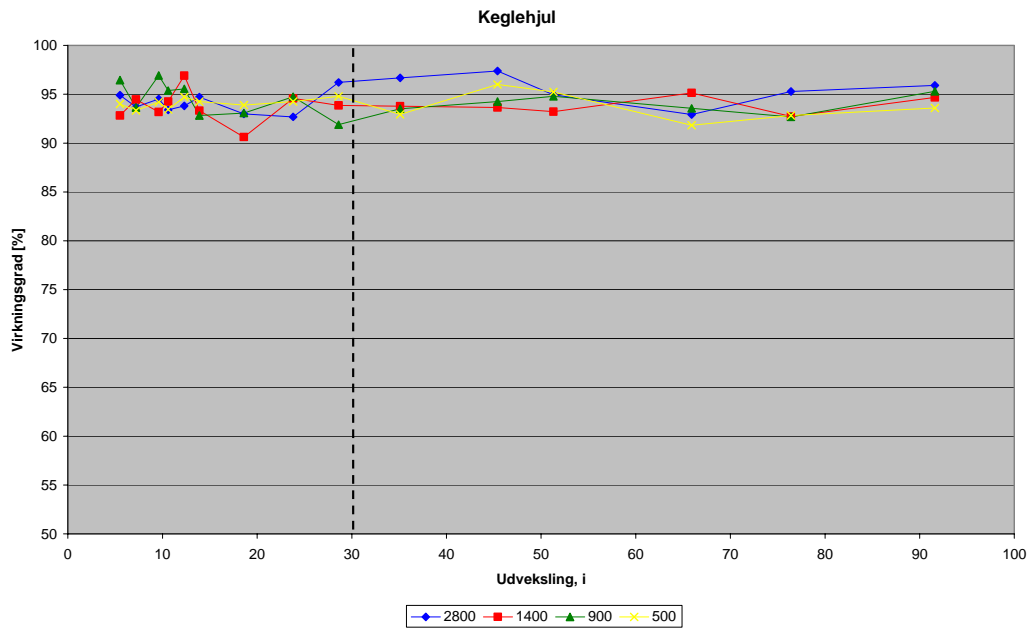
I figur 2.8 ses virkningsgrader for et tandhjulsgear. Virkningsgraderne er vist ved fire forskellige omdrejningstal (input), ved forskellige udvekslingsforhold og ved konstant moment.

På figuren ses at virkningsgraden stort set er uafhængig af udvekslingsforholdet. Der ses ikke nogen tydelig sammenhæng mellem virkningsgraden og omdrejningstallet. Kun ved relativt store udvekslingsforhold ses en sammenhæng.



Figur 2.8. Virkningsgrad for tandhjulsgear ved fire omdrejningstal (input) som funktion af udvekslingsforholdet

I figur 2.9 ses virkningsgrader for et keglehjulsgear. Virkningsgraderne er vist ved fire omdrejningstal (input), ved forskellige udvekslingsforhold og ved næsten konstant moment. På figuren ses ikke den store sammenhæng mellem virkningsgraden og udvekslingsforholdet. Virkningsgraden ligger, som det ses, mellem 90 og 97 %.



Figur 2.9. Virkningsgrad for keglehjulsgear ved fire omdrejningstal (input) som funktion af udvekslingsforholdet

2.2 Test af gear

På TI's momentbænk er der foretaget målinger på følgende gear(motor) typer:

- Tandhjulsgear
- Snekkegear
- Keglehjulsgear

Disse geartyper er, iflg. Danfoss, de mest anvendte/udbredte i Danmark.



Figur 2.10. Måleopstilling på momentbænk.

2.3 Data for gear

I tabel 2.1 til 2.3 ses data for de ni gearmotorer der er foretaget målinger på. Mærkeeffekten for alle ni gearmotorer er 1.500 W. Denne effekt svarer til motorens nominelle afgivne effekt.

Som det ses, er der for hver gearmotortype anvendt gear med tre forskellige udvekslingsforhold. Disse udvekslingsforhold er nogenlunde ens for de tre gearmotortyper.

Udvekslingsforholdene er valgt i samarbejde med Danfoss. Udvekslingsforholdene vurderes, at være nogenlunde de mest anvendte for gearmotorer med en mærkeeffekt på 1.500 W.

Snekkegear	BS 10	BS 20	BS 30
Udvekslingsforhold i	16,92	30,63	58,64
Nominelt omdrejningstal n_2	83	46	24
Nominelt moment T_2	138	220	455

Tabel 2.1. Data for snekkegear

Keglehjulsgear	BK 10	BK 20	BK 30
Udvekslingsforhold i	16,92	28,66	59,27
Nominelt omdrejningstal n_2	83	49	24
Nominelt moment T_2	155	260	520

Tabel 2.2. Data for keglehjulsgear

Tandhjulsgear	BG 20	BG 30	BG 50
Udvekslingsforhold i	14,67	29,83	59,42
Nominelt omdrejningstal n_2	96	47	24
Nominelt moment T_2	149	300	590

Tabel 2.3. Data for tandhjulsgear

2.4 Målinger

Der er foretaget målinger ved følgende reguleringsformer:

- Konstant moment og variabelt omdrejningstal (f.eks. transportbånd på bryggerier).
- Variabelt moment og konstant hastighed (f.eks. transportbånd i lufthavn til transport af bagage).

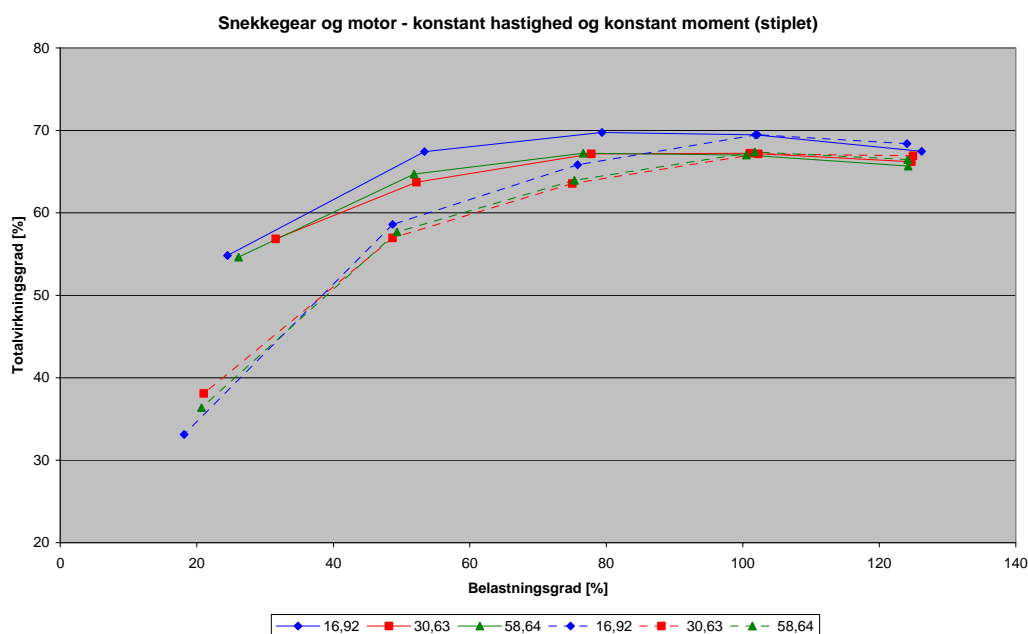
Målingerne er foretaget ved 25, 50, 75, 100 og 125 % belastningsgrad, hvor 100 % belastningsgrad er gearets afgivne nominelle effekt $P_N (= M_N \cdot \omega_N)$ ved nominelt moment M_N og nominelt omdrejningstal n_N ($\omega_N = (2 \cdot \pi \cdot n_N)/60$).

På baggrund af ovennævnte målinger, er der i figur 2.11, 2.14 og 2.17 udarbejdet diagrammer der viser de tre forskellige gearmotortypers virkningsgrader som funktion af belastningsgraderne. Disse diagrammer er udarbejdet ved de to forskellige reguleringsformer.

For at kunne beregne gearvirkningsgraderne (alene), er der i momentbænken foretaget målinger af motorens virkningsgrad ved de ovennævnte to reguleringsformer. På baggrund af målingerne, er der i figur 2.12, 2.15 og 2.18 udarbejdet diagrammer der viser de tre forskellige gears virkningsgrader som funktion af belastningsgraderne.

2.5 Snekkegear

I figur 2.11 ses tests af de tre snekkegear inkl. motorer. De fuldt optrukne kurver viser, for de tre udvekslingsforhold, virkningsgrader ved konstant hastighed og variabelt moment som funktion af belastningsgraden. De stiplede kurver viser virkningsgrader ved konstant moment og variabel hastighed som funktion af belastningsgraden.



Figur 2.11. Test af snekkegear og motor.

Ved konstant hastighed og variabelt moment ses, at gearmotorerne har deres maksimale virkningsgrader ved 75 % belastningsgrad. Ved 100 % og 125 % belastningsgrad er virkningsgraderne en smule lavere end den maksimale. Ved 50 % belastningsgrad er virkningsgraden også en smule lavere end den maksimale, mens den ved 25 % belastningsgrad er markant lavere.

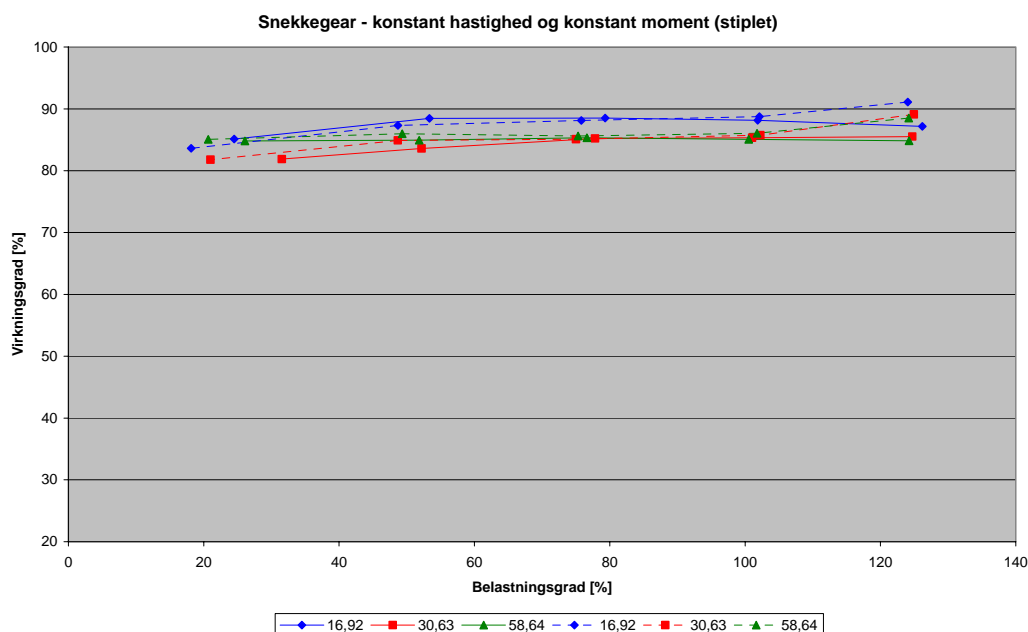
Som det ses i figur 2.11 har udvekslingsforholdet betydning for gearmotorens virkningsgrad. Ved det laveste udvekslingsforhold ($i = 16,92$) er virkningsgraden højest. Dette gælder for alle belastningsgrader.

Ved konstant moment og variabel hastighed ses, at gearmotorerne har deres maksimale virkningsgrader ved 100 % belastningsgrad. Ved 125 % belastningsgrad er virkningsgraden en smule lavere end den maksimale. Ved 75 % belastningsgrad er virkningsgraden også en smule lavere end den maksimale, mens den ved 50 % og 25 % belastningsgrad er markant lavere. Igen ses, i figur 2.11, at udvekslingsforholdet har betydning for gearmotorens virkningsgrad. Virkningsgraden er igen højest ved det laveste udvekslingsforhold.

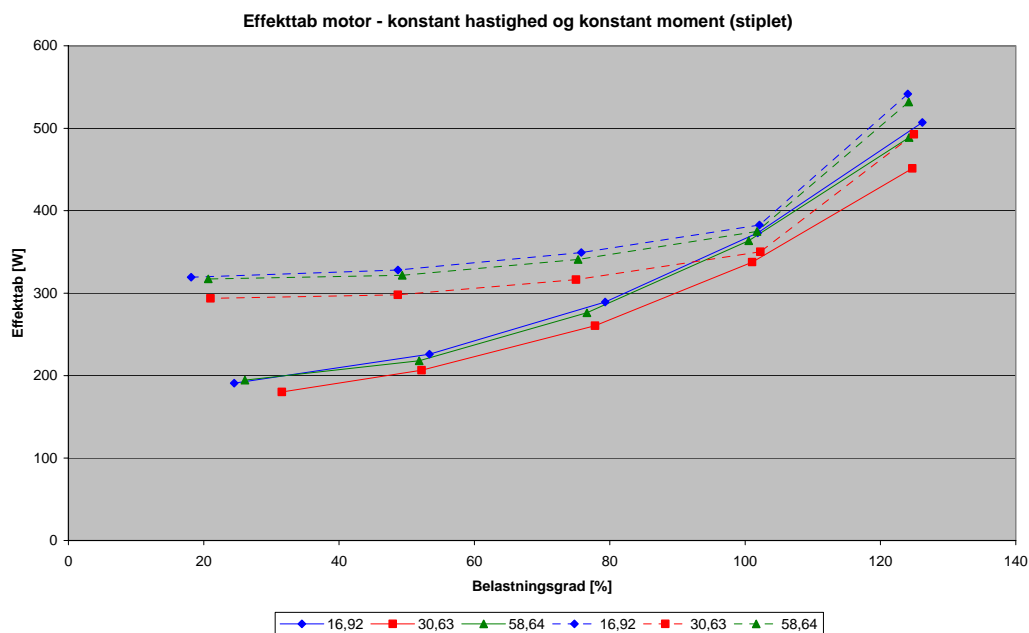
Som det ses i figur 2.11 kan gearmotoren, ved belastningsgrader på 75 % og derunder, opretholde de højeste virkningsgrader ved reguleringsformen konstant hastighed og variabelt moment.

I figur 2.12 ses, at dette ikke skyldes gearene. I figuren ses, at gearenes virkningsgrader stort set er konstante ved belastningsgrader mellem 50 % og 125 %. Ved 25 % belastningsgrad er virkningsgraderne en smule lavere.

I figur 2.12 ses endvidere, at udvekslingsforholdet har betydning for gearets virkningsgrad. Virkningsgraden er, som det ses, højest ved det laveste udvekslingsforhold.



Figur 2.12. Beregninger af virkningsgrader for snækkegear.



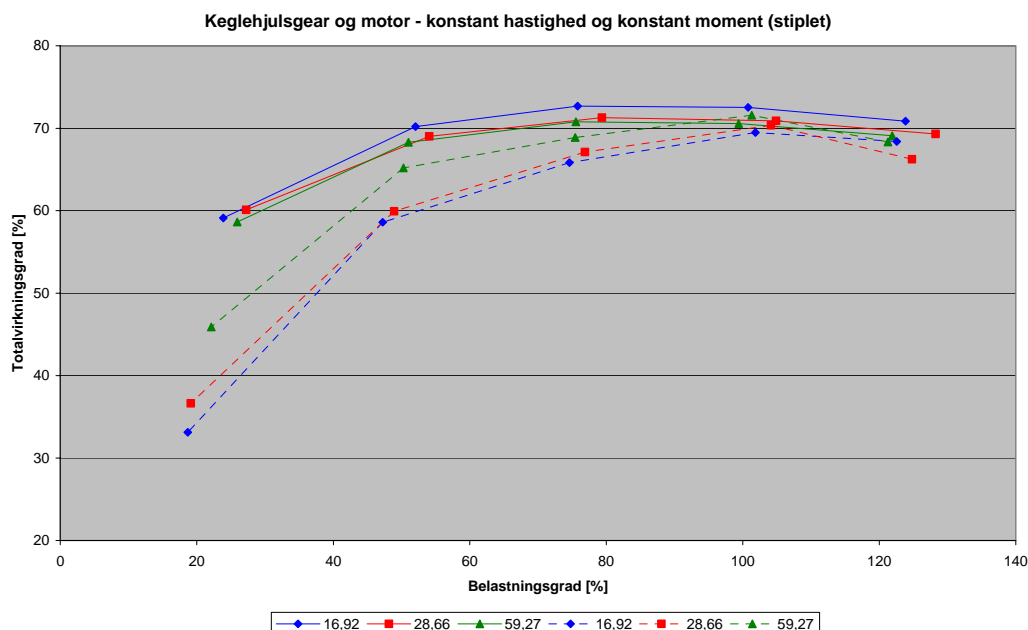
Figur 2.13. Beregninger af effekttab for motor.

I figur 2.13 ses grunden til, at gearmotoren, ved belastningsgrader på 75 % og derunder, kan opretholde de højeste virkningsgrader ved reguleringsformen konstant hastighed og variabelt moment.

I figuren ses motorens effekttab som funktion af belastningsgraden ved de to reguleringsformer. Ved belastningsgrader mindre end 100 %, er effekttabet størst ved reguleringsformen konstant moment og variabel hastighed.

2.6 Keglehjulsgear

I figur 2.14 ses tests af de tre keglehjulsgear inkl. motorer. De fuldt optrukne kurver viser, for de tre udvekslingsforhold, virkningsgrader ved konstant hastighed og variabelt moment som funktion af belastningsgraden. De stiplede kurver viser virkningsgrader ved konstant moment og variabel hastighed som funktion af belastningsgraden.



Figur 2.14. Test af keglehjulsgear og motor.

Ved konstant hastighed og variabelt moment ses, at gearmotorerne har deres maksimale virkningsgrader ved 75 % belastningsgrad. Ved 100 % og 125 % belastningsgrad er virkningsgraderne en smule lavere end den maksimale. Ved 50 % belastningsgrad er virkningsgraden også en smule lavere end den maksimale, mens den ved 25 % belastningsgrad er markant lavere.

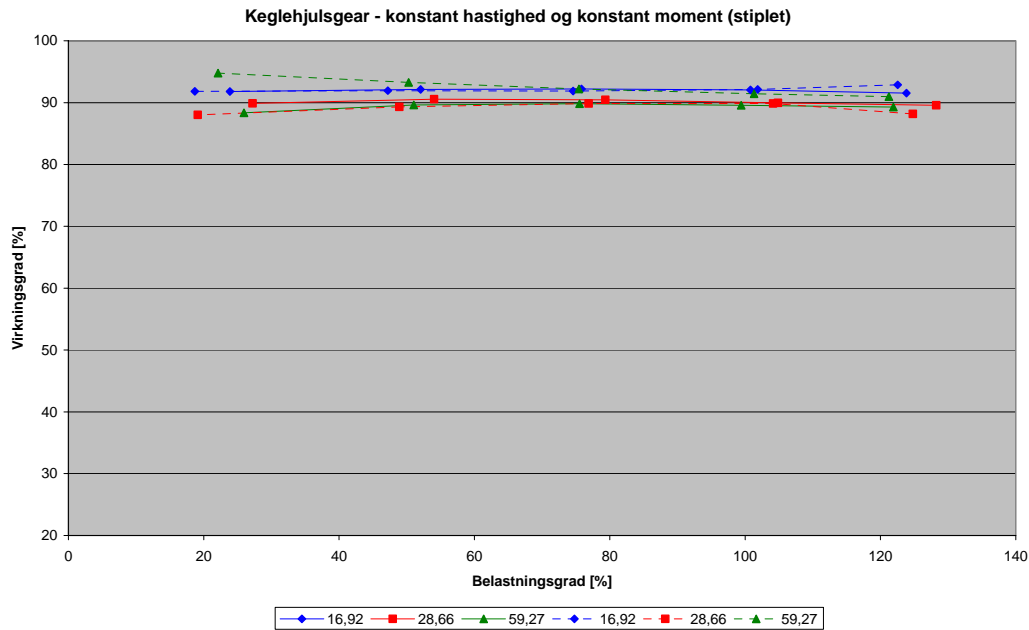
For denne type gear har udvekslingsforholdet også betydning for gearmotorens virkningsgrad. Ved det laveste udvekslingsforhold ($i = 16,92$) er virkningsgraden højest. Dette gælder for alle belastningsgrader.

Ved konstant moment og variabel hastighed ses, at gearmotorerne har deres maksimale virkningsgrader ved 100 % belastningsgrad. Ved 125 % belastningsgrad er virkningsgraden en smule lavere end den maksimale. Ved 75 % belastningsgrad er virkningsgraden også en smule lavere end den maksimale, mens den ved 50 % og 25 % belastningsgrad er markant lavere. Ved denne reguleringsform er virkningsgraden højest ved det høje udvekslingsforhold ($i = 59,27$). Dette forekommer bemærkelsesværdigt og det er ikke umiddelbart muligt at give en forklaring på det.

Som det ses i figur 2.14 kan gearmotoren, ved belastningsgrader på 75 % og derunder, opretholde de højeste virkningsgrader ved reguleringsformen konstant hastighed og variabelt moment.

I figur 2.15 ses, at dette ikke skyldes gearene. I figuren ses, at gearenes virkningsgrader stort set er konstante ved belastningsgrader mellem 25 % og 125 %.

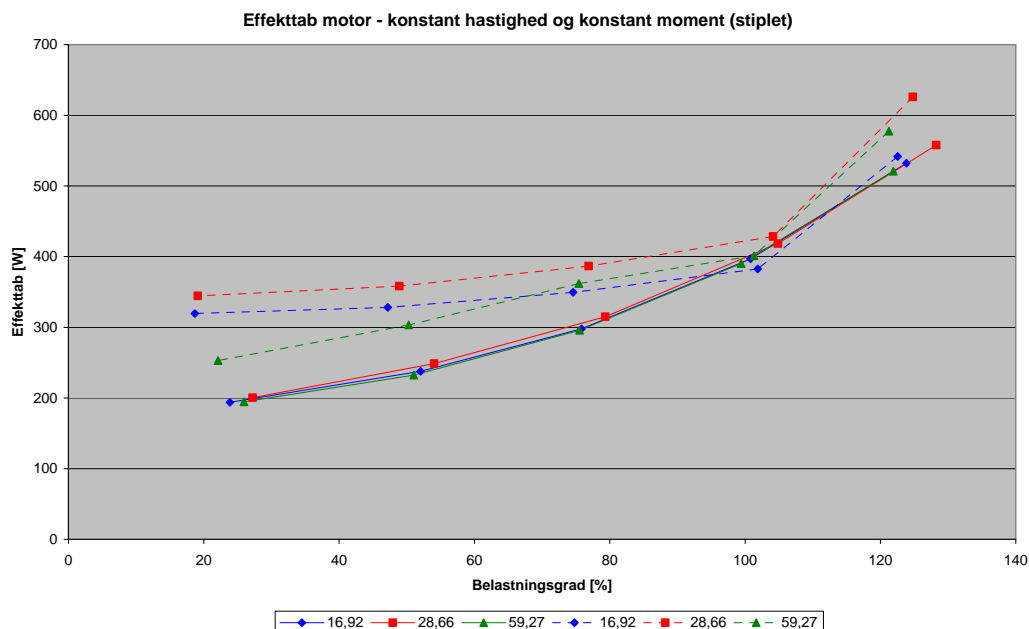
I figur 2.15 ses endvidere, at udvekslingsforholdet har betydning for gearets virkningsgrad. Virkningsgraden er, som det ses, højest ved det laveste udvekslingsforhold. Ved belastningsgrader mellem 25 % og 50 % er virkningsgraden for reguleringsmetoden konstant moment og variabel hastighed dog højest ved det høje udvekslingsforhold.



Figur 2.15. Beregninger af virkningsgrader for keglehjulsgear.

I figur 2.16 ses grunden til, at gearmotoren, ved belastningsgrader på 75 % og derunder, kan opretholde de højeste virkningsgrader ved reguleringsformen konstant hastighed og variabelt moment.

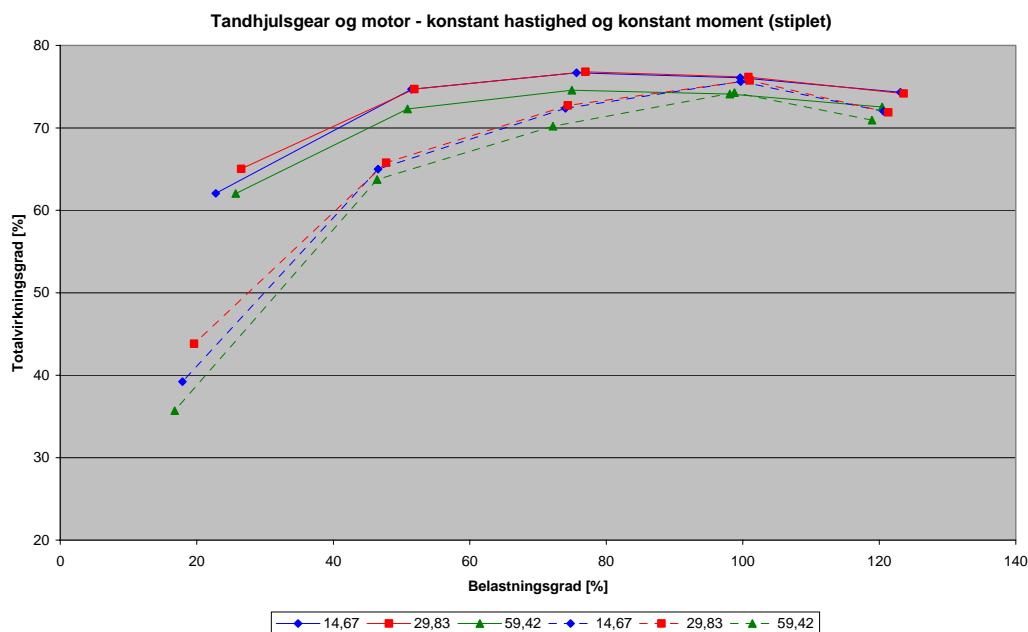
I figuren ses motorens effekttab som funktion af belastningsgraden ved de to reguleringsformer. Ved belastningsgrader mindre end 100 %, er effekttabet størst ved reguleringsformen konstant moment og variabel hastighed.



Figur 2.16. Beregninger af effekttab for motor.

2.7 Tandhjulsgear

I figur 2.17 ses tests af de tre tandhjulsgear inkl. motorer. De fuldt optrukne kurver viser, for de tre udvekslingsforhold, virkningsgrader ved konstant hastighed og variabelt moment som funktion af belastningsgraden. De stiplede kurver viser virkningsgrader ved konstant moment og variabel hastighed som funktion af belastningsgraden.



Figur 2.17. Test af tandhjulsgear og motor.

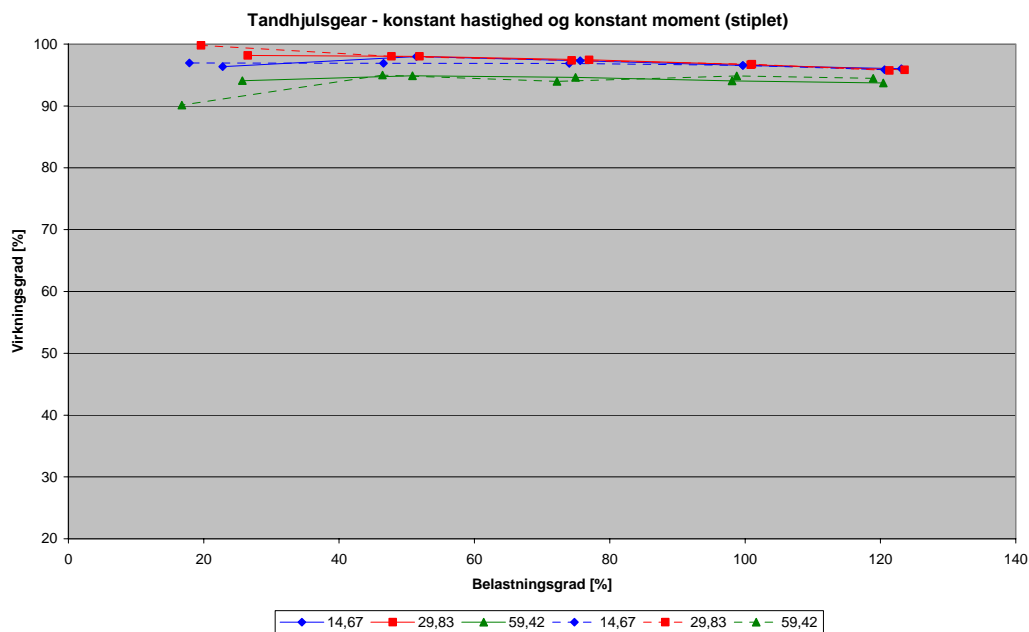
Ved konstant hastighed og variabelt moment ses, at gearmotorerne har deres maksimale virkningsgrader ved 75 % belastningsgrad. Ved 100 % og 125 % belastningsgrad er virkningsgraderne en smule lavere end den maksimale. Ved 50 % belastningsgrad er virkningsgraden også en smule lavere end den maksimale, mens den ved 25 % belastningsgrad er markant lavere.

For denne type gear har udvekslingsforholdet også betydning for gearmotorens virkningsgrad. Ved det laveste og det mellemste udvekslingsforhold er virkningsgraden højest. Ved 25 % belastningsgrad er virkningsgraden for det mellemste udvekslingsforhold dog en smule højere.

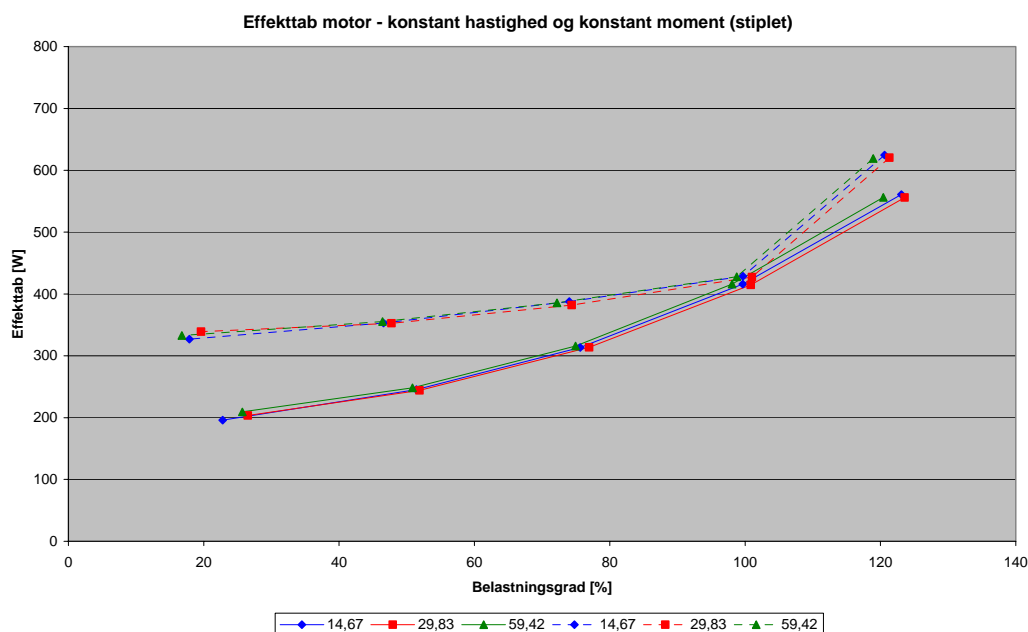
Ved konstant moment og variabel hastighed ses, at gearmotorerne har deres maksimale virkningsgrader ved 100 % belastningsgrad. Ved 125 % belastningsgrad er virkningsgraden en smule lavere end den maksimale. Ved 75 % belastningsgrad er virkningsgraden også en smule lavere end den maksimale, mens den ved 50 % og 25 % belastningsgrad er markant lavere. Ved denne reguleringsform er virkningsgraden højest ved det laveste og det mellemste udvekslingsforhold. Ved 25 % belastningsgrad er virkningsgraden for det mellemste udvekslingsforhold igen en smule højere.

Som det ses i figur 2.17 kan gearmotoren, ved belastningsgrader på 75 % og derunder, opretholde de højeste virkningsgrader ved reguleringsformen konstant hastighed og variabelt moment. I figur 2.18 ses, at dette ikke skyldes gearene. I figuren ses, at gearenes virkningsgrader stort set er konstante ved belastningsgrader mellem 25 % og 125 %.

I figur 2.18 ses endvidere, at udvekslingsforholdet har betydning for gearets virkningsgrad. Virkningsgraden er, som det ses, højest ved det laveste og mellemste udvekslingsforhold. Ved belastningsgrader mellem 25 % og 50 % er virkningsgraden dog højest ved det mellemste udvekslingsforhold.



Figur 2.18. Beregninger af virkningsgrader for tandhjulsgear.



Figur 2.19. Beregninger af effekttab for motor.

I figur 2.19 ses grunden til, at gearmotoren, ved belastningsgrader på 75 % og derunder, kan opretholde de højeste virkningsgrader ved reguleringsformen konstant hastighed og variabelt moment.

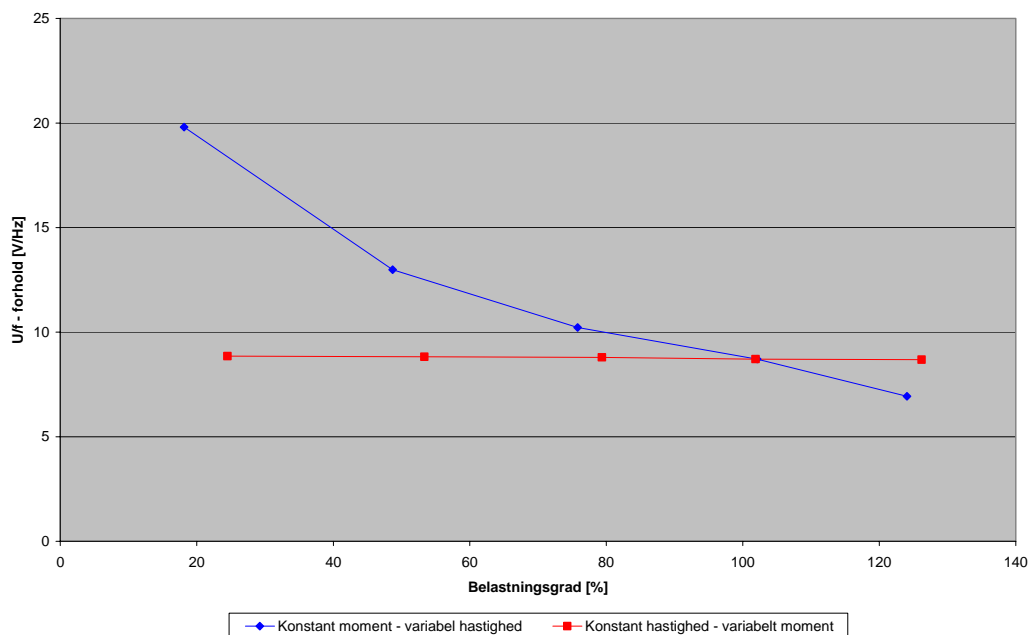
I figuren ses motorens effekttab som funktion af belastningsgraden ved de to reguleringsformer. Ved belastningsgrader mindre end 100 %, er effekttabet størst ved reguleringsformen konstant moment og variabel hastighed.

2.8 Konklusion

For alle tre geartyper ses det samme billede. Ved belastningsgrader mindre end 100 %, er motorens effekttab størst ved reguleringsformen konstant moment og variabel hastighed (se figur 2.13, 2.16 og 2.19).

I figur 2.20 ses hvad der sker, når motoren skal opretholde det konstante moment ved lave hastigheder (= lave frekvenser), som i dette tilfælde også er lig med lave belastningsgrader. For at kunne opretholde det konstante moment ved de lave hastigheder, kræves en større magnetisering af motoren. Magnetiseringen af motoren afhænger af forholdet mellem spændingen og frekvensen (U/f -forholdet) og da der kræves en større magnetisering må U/f -forholdet nødvendigvis forøges for at opretholde det konstante moment. Dette ses i figur 2.20. Overmagnetiseringen af motoren medfører større jern- og kobbertab og dermed ringere virkningsgrad for motoren.

I figur 2.13, 2.16 og 2.19 ses, betydningen af overmagnetisering af motoren. I figurerne ses, at effekttabet bliver betydeligt større ved lave belastningsgrader end effekttabet for motoren ved reguleringsformen konstant hastighed og variabelt moment.



Figur 2.20. Spændings/frekvens-forhold (U/f -forhold) som funktion af belastningsgraden for de to reguleringsformer.

I figur 2.20 ses endvidere hvad der sker, når motoren skal opretholde den konstante hastighed ved lave momenter, som i dette tilfælde også er lig med lave belastningsgrader. For at kunne opretholde den konstante hastighed ved de lave momenter, kræves stort set den samme magnetisering af motoren. I figur 2.13, 2.16 og 2.19 ses derfor, at effekttabet bliver betydeligt lavere ved lave belastningsgrader end effekttabet for motoren ved reguleringsformen konstant moment og variabel hastighed.

På baggrund af ovenstående kan man konkludere, at en benyttelse af reguleringsformen konstant moment og variabel hastighed resulterer i relative store effekttab. Dette er, som det ses i figur 2.13, 2.16 og 2.19, i særdeleshed tilfældet ved lave omdrejningstal, hvor frekvensen er mindre end 25 Hz og hvor belastningsgraden er mindre end 50 %.

Ved belastningsgrader mindre end 50 % er effekttabet mere end 50 % højere for denne reguleringsform sammenlignet med reguleringsformen konstant hastighed og variabelt moment.

I nogle tilfælde vil belastningsgraden ved at anvende konstant hastighed ikke komme under 75 %. Dette gælder f.eks. transportbånd, hvor båndets masse udgør omkring 50 % eller mere af den samlede transporterede masse (masse af bånd + masse af transporterede emner).

Målingerne viser "heldigvis" at tandhjulsgearet er snekkegearet overlegent – ca. 5-10 procentpoint ved nettilslutning af gearet. Drives gearene via frekvensomformer udlignes forskellene markant, hvilket kunne indikere at det i virkeligheden er elmotoren mere end selve gearet, der er akilleshælen for gearenhedens effektivitet.

Konklusionen er at man ved gearudskiftning selvfølgelig skal købe det dyrere tandhjulsgearet – **men man skal også ofre yderligere kroner på den bedre elmotor.**

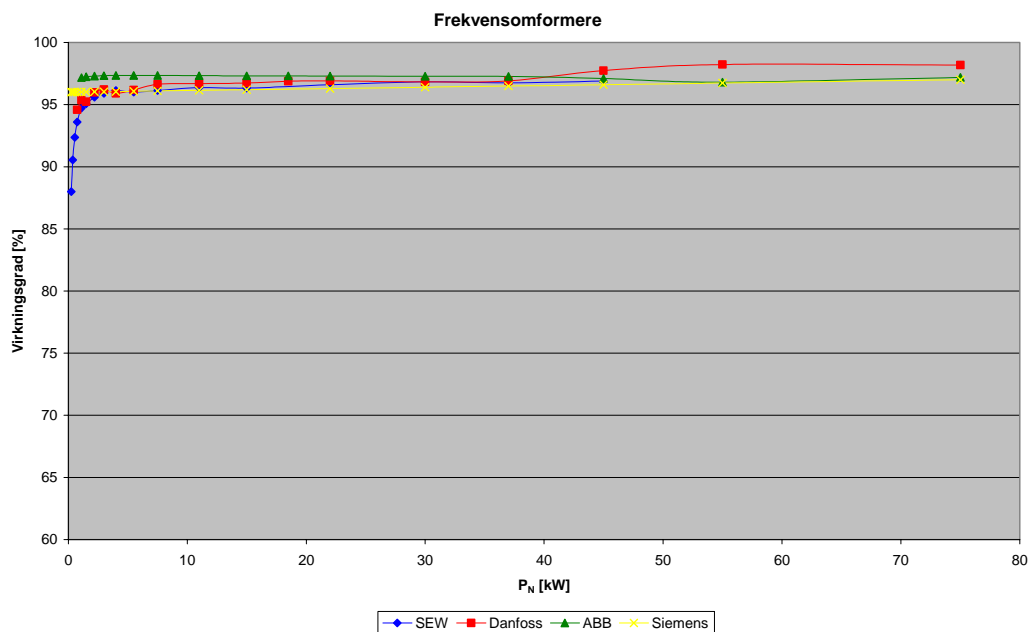
3 Frekvensomformere

3.1 Markedsundersøgelse

I figur 3.1 ses virkningsgrader for fire frekvensomformere som funktion af den nominelle effekt. De fire frekvensomformere er, som det ses, fra fire forskellige fabrikanter.

I figuren ses, at virkningsgraderne stort set er ens for de fire frekvensomformere. I området fra 2 kW til 75 kW ligger virkningsgraden mellem 96 og 97 %.

Dataene i figuren stammer fra fabrikanternes kataloger. Data for virkningsgraden som funktion af belastningsgraden er ikke tilgængelig i katalogerne.



Figur 3.1. Virkningsgrader for frekvensomformere som funktion af den nominelle effekt.

3.2 Test af Danfoss frekvensomformere

Der er foretaget en række tests på en 4 kW og en 55 kW frekvensomformer fra Danfoss. Frekvensomformerne kan indstilles til belastninger med enten konstant eller variabel momentkarakteristik. Nedenfor ses de fire indstillingsmuligheder.

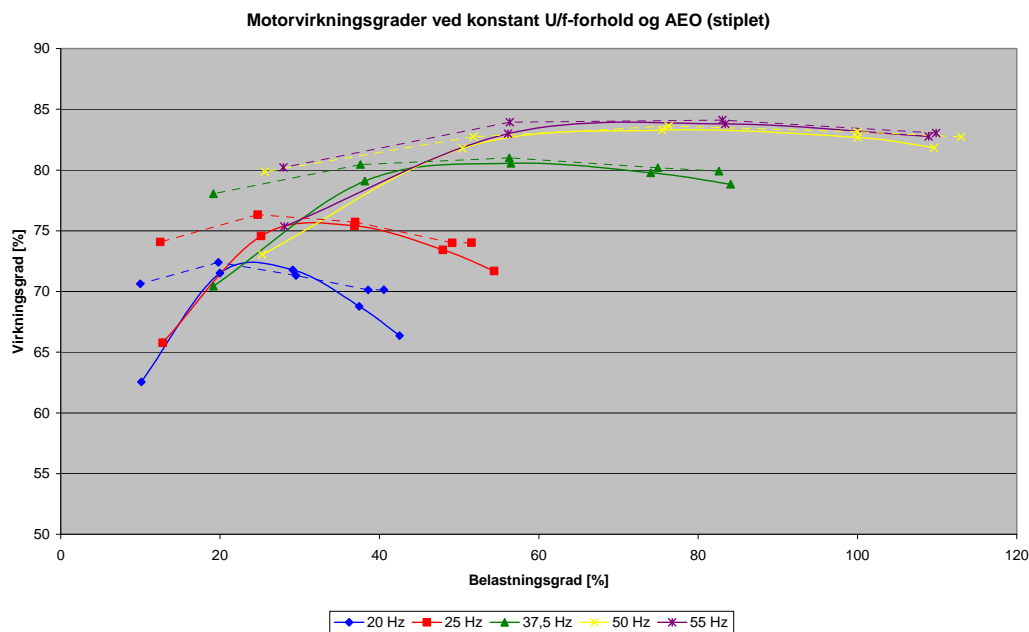
- Konstant momentkarakteristik (kompressor)
- Konstant momentkarakteristik (kompressor) energioptimal
- Variabel momentkarakteristik (VT)
- Konstant momentkarakteristik (VT) energioptimal

3.2.1 Test af 4 kW motor og frekvensomformer

I figur 3.2 ses virkningsgrader for motoren som funktion af belastningsgraden ved konstant U/f-forhold og AEO.

En belastningsgrad på 100 % er motorens afgivne nominelle effekt $P_N (= M_N \cdot \omega_N)$ ved nominelt moment M_N og nominelt omdrejningstal n_N ($\omega_N = (2 \cdot \pi \cdot n_N)/60$). For denne motor er belastningsgraden således 100 % ved en afgiven effekt på 4 kW.

Frekvensomformerer er indstillet til henholdsvis konstant momentkarakteristik og konstant momentkarakteristik energioptimal.



Figur 3.2. Motorvirkningsgrader funktion af belastningsgrad ved konstant U/f-forhold og AEO.

Som det ses afhænger virkningsgraden både af belastningsgraden og frekvensen (motorens omløbstal) samt reguleringsformen (konstant U/f-forhold eller Automatisk Energi Optimering – AEO).

I figur 3.2 ses, at virkningsgraden for motoren falder når omløbstallet reduceres (og momentet holdes konstant). Som det ses reduceres virkningsgraden betydeligt, når frekvensen reduceres til 20 Hz (535 o/min). Dette er tilfældet uanset hvilken reguleringsform der benyttes.

Ved 50 Hz (nominelt omløbstal, 1.440 o/min) ses det, at virkningsgraden stort set er konstant ved belastningsgrader mellem 40 og 100 %, når reguleringsformen AEO benyttes. Ved belastningsgrader lavere end 40 % sker der fald i virkningsgraden. Belastningsgraden skal dog under 20 %, før virkningsgraden for alvor begynder at falde. Når reguleringsformen konstant U/f-forhold benyttes ses, at virkningsgraden stort set er konstant ved belastningsgrader mellem 60 og 100 %. Ved belastningsgrader lavere end de 60 % sker der et betydeligt fald i virkningsgraden

Ved 37,5 Hz ses det, at virkningsgraden stort set er konstant ved belastningsgrader mellem 30 og 85 %, når reguleringsformen AEO benyttes. Ved belastningsgrader lavere end de 30 % sker der fald i virkningsgraden. Belastningsgraden skal dog under 20 %, før virkningsgraden for alvor begynder at falde.

Når reguleringsformen konstant U/f-forhold benyttes ses, at virkningsgraden stort set er konstant ved belastningsgrader mellem 50 og 85 %. Ved belastningsgrader lavere end de 50 % sker der et betydeligt fald i virkningsgraden

Ved 20 og 25 Hz ses nogenlunde det samme billede. Grænserne for hvornår virkningsgraderne begynder at falde er, som det ses i figuren, nogle andre.

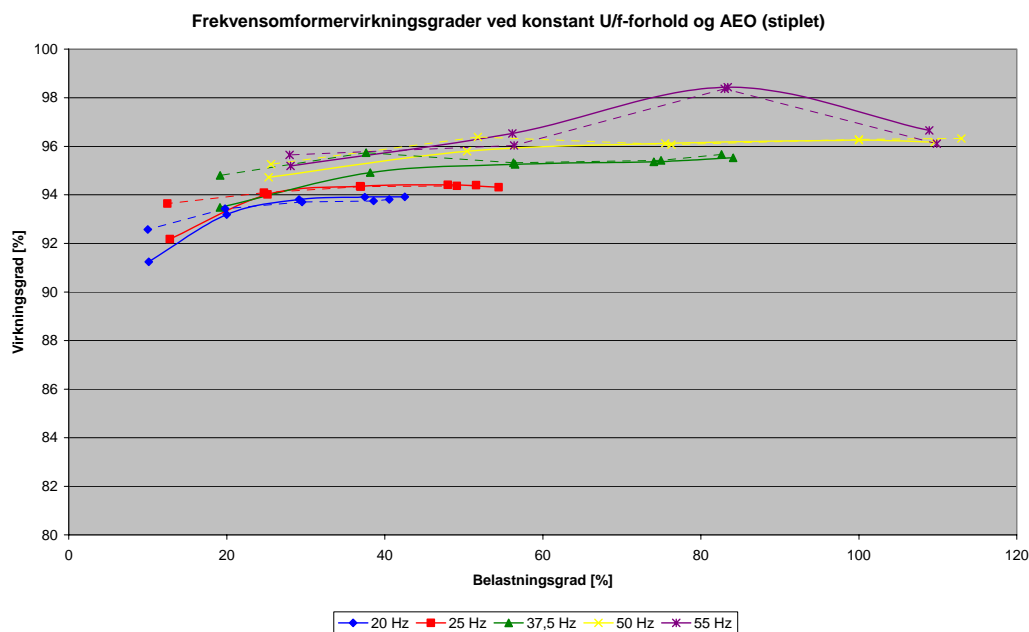
På figurene ses, at hvis belastningsgraden kommer under halvdelen af den maksimale (ved de forskellige frekvenser), kan der opnås en fordel ved at anvende en styrestrategi med Automatisk Energi Optimering.

Dette gælder både når motoren kører med konstant omløbstal og varierende belastningsgrad samt når den kører med variabelt omløbstal og varierende belastningsgrad.

Det sidstnævnte gælder f.eks. for ventilatorer og pumper, hvor belastningen (momentbehovet) falder kvadratisk med omløbstallet. For ventilatorer og pumper vil en stor reduktion af omløbstallet derfor medføre en endnu større reduktion af belastningen, hvorfor der kan opnås en betydelig forbedring af virkningsgraden for motor og frekvensomformer ved at anvende en styrestrategi med Automatisk Energi Optimering.

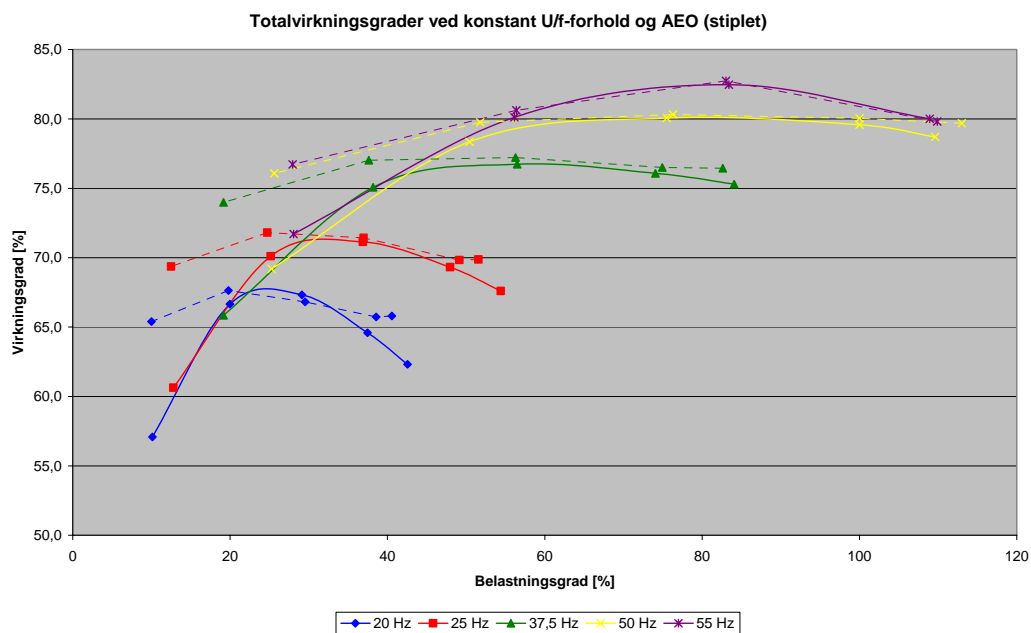
I figur 3.3 ses virkningsgrader for frekvensomformereren som funktion af belastningsgraden ved konstant U/f-forhold og AEO.

Som det ses afhænger virkningsgraden både af belastningsgraden og frekvensen (motorens omløbstal) samt reguleringsformen (konstant U/f-forhold eller Automatisk Energi Optimering – AEO). Jo højere belastningsgraden er des højere bliver virkningsgraden. Når reguleringsformen AEO benyttes, opnås en højere virkningsgrad når belastningsgraden kommer under halvdelen af den maksimale (ved de forskellige frekvenser).



Figur 3.3. Frekvensomformervirkningsgrader funktion af belastningsgrad ved konstant U/f-forhold og AEO.

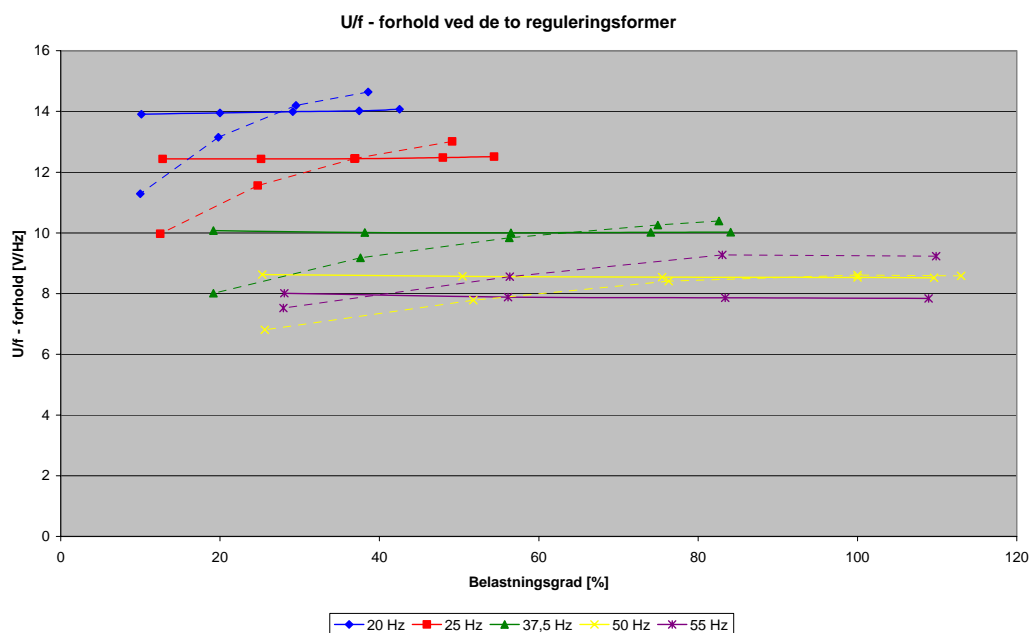
I figur 3.2 ses virkningsgrader for motor og frekvensomformerer som funktion af belastningsgraden ved konstant U/f-forhold og AEO. Som det ses afhænger virkningsgraden både af belastningsgraden og frekvensen (motorens omløbstal) samt reguleringsformen (konstant U/f-forhold eller Automatisk Energi Optimering – AEO). Billedet er stort set det samme som for motoren (se figur 3.2).



Figur 3.4. Totalvirkningsgrader funktion af belastningsgrad ved konstant U/f-forhold og AEO.

I figur 3.2 ses U/f-forhold som funktion af belastningsgraden ved konstant U/f-forhold og AEO.

Ved konstant U/f-forhold er U/f-forholdet naturligt konstant. Ved AEO ses, at U/f-forholdet reduceres, når belastningsgraden falder.



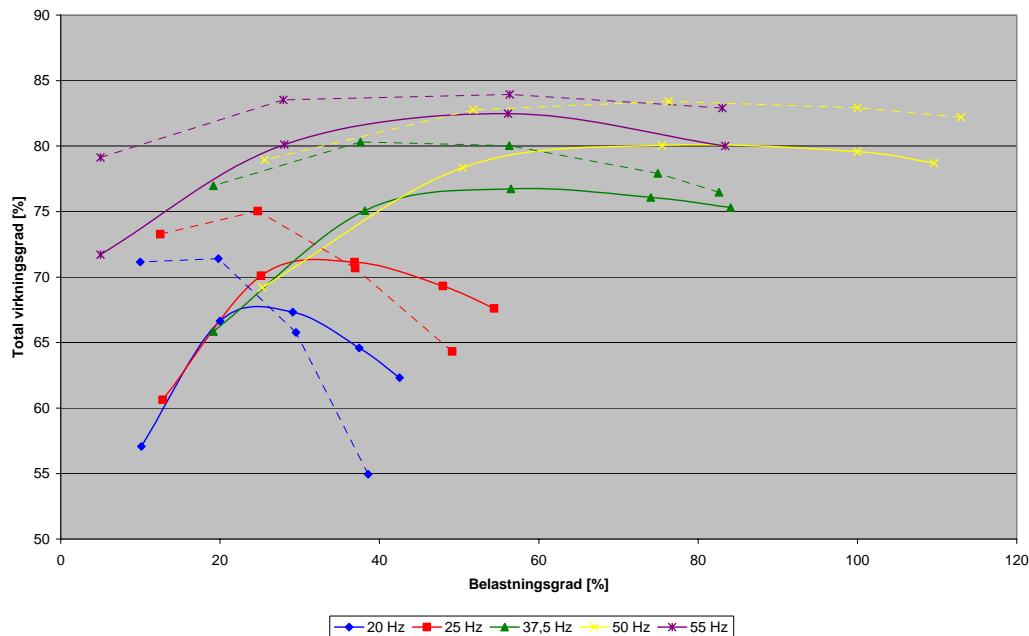
Figur 3.5. U/f-forhold som funktion af belastningsgrad ved de to reguleringsformer.

Kurverne ovenfor viser, hvorledes virkningsgradsforkellen for drevet (motor & frekvensomformer) nemt kan blive op til 5-10 procentpoint så snart der reguleres med maskinen.

Dette skal jo sættes i forhold til at man som bruger rent faktisk allerede har investeret i frekvensomformer for at opnå energieffektivitet – **man bør derfor lige foretage et check på om man får det maksimale ud af sin frekvensomformer.**

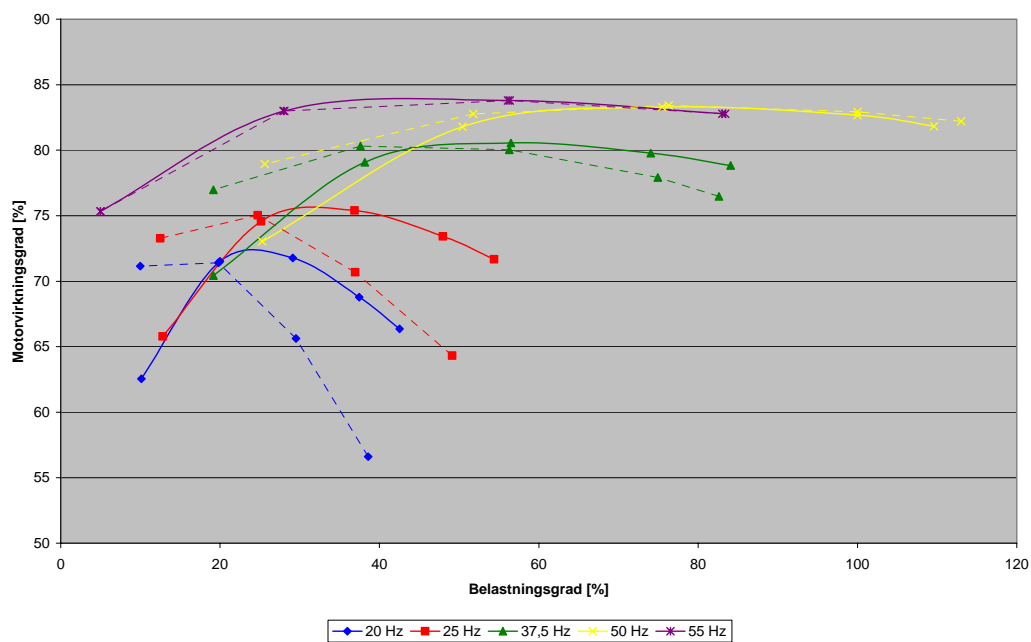
Forkert indstilling af frekvensomformer

I figur 3.7 ses virkningsgrader for motor og frekvensomformer som funktion af belastningsgraden ved konstant U/f -forhold og AEO. Frekvensomformerer er indstillet til henholdsvis konstant momentkarakteristik og variabel momentkarakteristik energioptimal.



Figur 3.7. Totalvirkningsgrader som funktion af belastningsgraden ved konstant U/f -forhold og AEO.

Som det ses på figuren er virkningsgraderne ved de lave frekvenser ringest når reguleringsformen AEO (variabel momentkarakteristik energioptimal) benyttes. Dette skyldes, at reguleringsformen AEO ikke er anvendelig, når der anvendes lave omdrejningstal og høje momenter. Ved variabel momentkarakteristik energioptimal forventer frekvensomformerer både lave omdrejningstal og lave momenter.

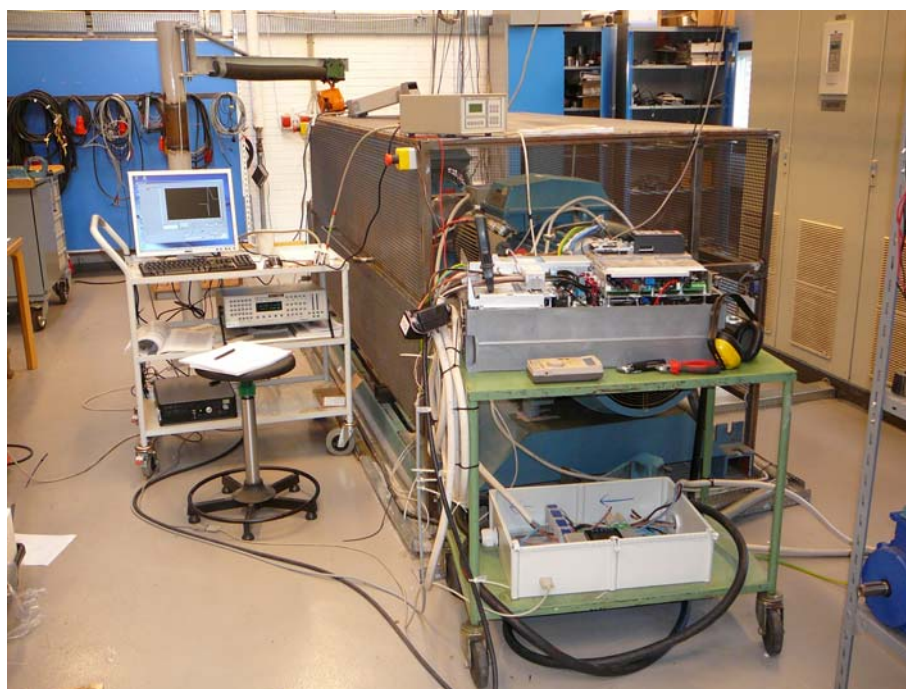


Figur 3.8. Motorvirkningsgrader som funktion af belastningsgraden ved konstant U/f -forhold og AEO.

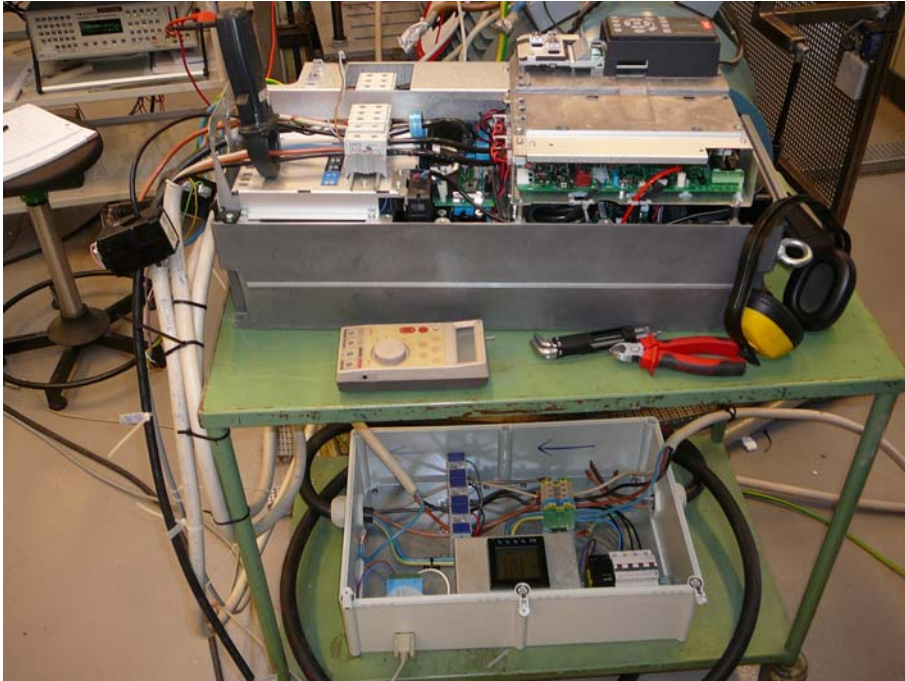
Det samme billede gør sig gældende, når man ser på motoren alene. Virkningsgraderne ved de lave frekvenser er ringest når reguleringsformen AEO (variabel momentkarakteristik energioptimal) benyttes.

3.2.2 Test af 55 kW motor og frekvensomformer

I figur 3.9 og 3.10 ses måleopstillingen ved test af en 55 kW motor og frekvensomformer. Motorens akseeffekt ”måles” via måling af motorens afgivne moment og omdrejningstallet. Den tilførte effekt til motoren måles med et wattmeter på frekvensomformerens afgang. Den tilførte effekt til frekvensomformereren måles med to wattmetre. Det ene wattmeter måler effektoptaget fra nettet, mens det andet måler effekten på frekvensomformerens DC mellemkreds. Det er den effekt der føres tilbage fra belastningsmotoren, som derfor virker som generator.



Figur 3.9. Måleopstilling.

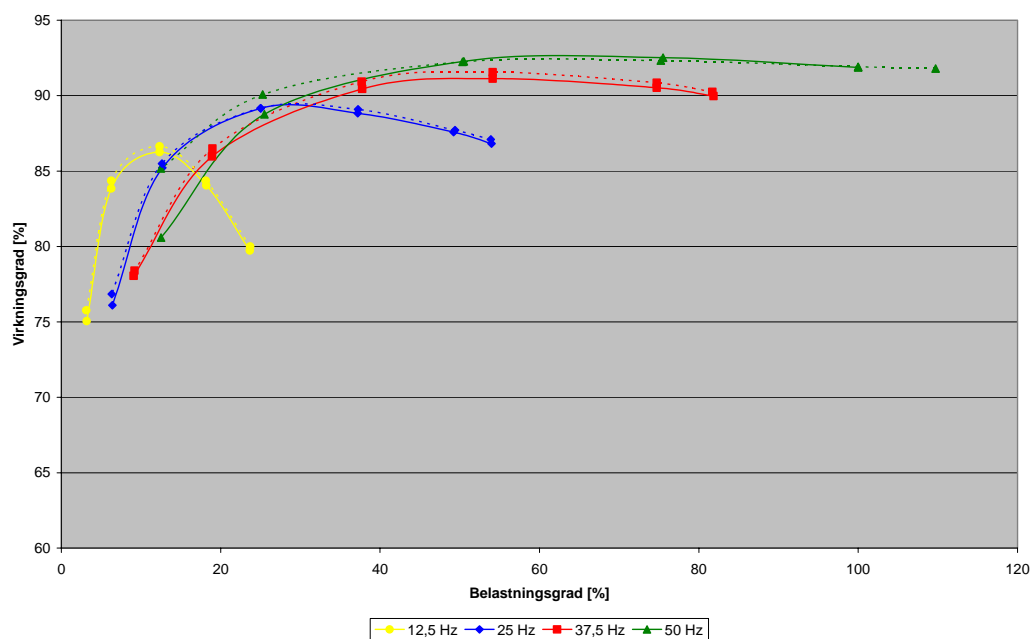


Figur 3.10. 55 kW frekvensomformer.

I figur 3.11 ses virkningsgrader for motoren som funktion af belastningsgraden ved konstant U/f-forhold og AEO.

Som det ses afhænger virkningsgraden både af belastningsgraden og frekvensen (motorens omløbstal) samt i nogen grad reguleringsformen (konstant U/f-forhold eller Automatisk Energi Optimering – AEO).

I figur ses, at virkningsgraden for motoren falder når omløbstallet reduceres (og momentet holdes konstant). Som det ses reduceres virkningsgraden, når frekvensen reduceres til 12,5 Hz (360 o/min). Dette er tilfældet uanset hvilken reguleringsform der benyttes.



Figur 3.11. Motorvirkningsgrader funktion af belastningsgrad ved konstant U/f-forhold og AEO.

Ved 50 Hz (nominelt omløbstal, 1.480 o/min) ses det, at virkningsgraden stort set er konstant ved belastningsgrader mellem 50 og 110 %, når reguleringsformen AEO benyttes. Ved belastningsgrader lavere end 40 % sker der fald i virkningsgraden. Belastningsgraden skal dog under 20 %, før virkningsgraden for alvor begynder at falde.

Når reguleringsformen konstant U/f-forhold benyttes ses, at virkningsgraden stort set er konstant ved belastningsgrader mellem 50 og 100 %. Ved belastningsgrader lavere end 30 % sker der et betydeligt fald i virkningsgraden.

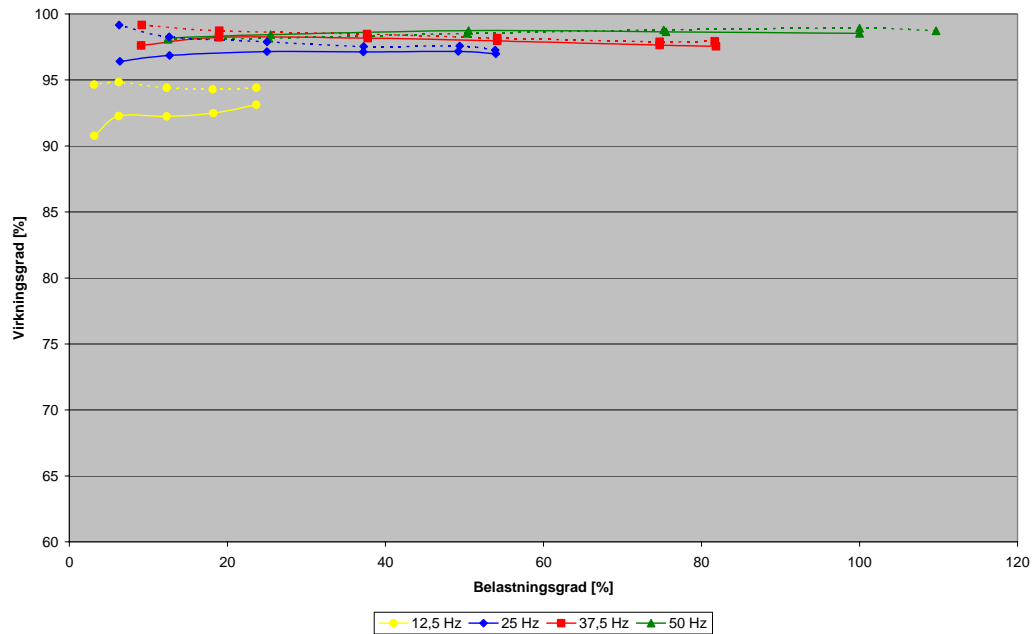
Der ses en lille forskellen mellem virkningsgraderne ved de to reguleringsformer.

Ved 12,5, 25 og 37,5 Hz ses nogenlunde det samme billede. Grænserne for hvornår virkningsgraderne begynder at falde er, som det ses i figuren, nogle andre.

Forskellen mellem virkningsgraderne ved de to reguleringsformer er endvidere meget lille.

I figur 3.12 ses virkningsgrader for frekvensomformeren som funktion af belastningsgraden ved konstant U/f-forhold og AEO.

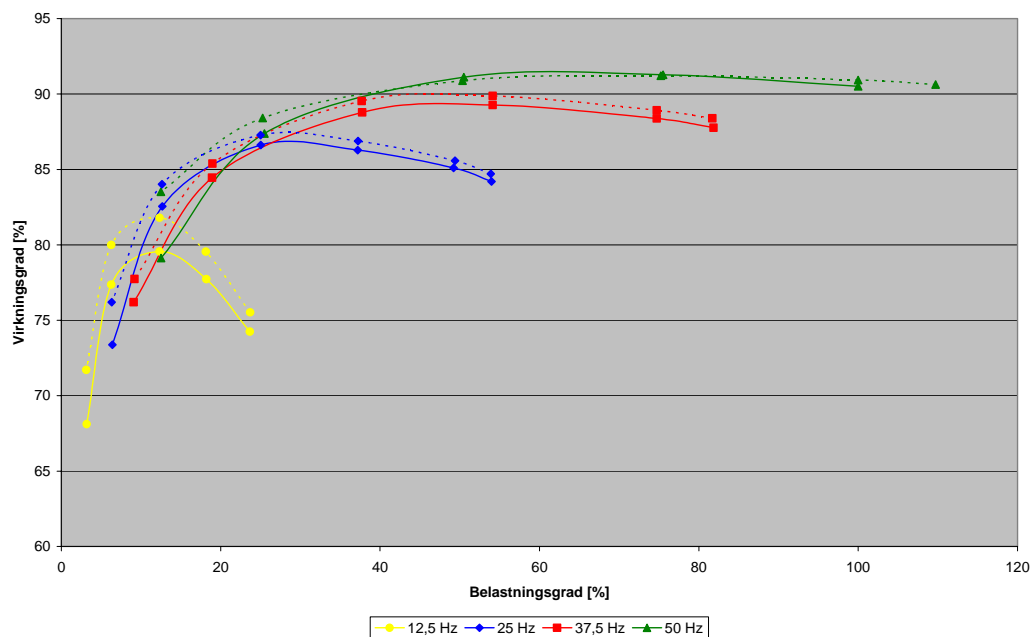
Som det ses afhænger virkningsgraden både af belastningsgraden og frekvensen (motorens omløbstal) samt reguleringsformen (konstant U/f-forhold eller Automatisk Energi Optimering – AEO). Jo højere belastningsgraden er des højere bliver virkningsgraden. Når reguleringsformen AEO benyttes, opnås en højere virkningsgrad ved alle frekvenser.



Figur 3.12. Frekvensomformervirkningsgrader funktion af belastningsgrad ved konstant U/f-forhold og AEO.

I figur 3.13 ses virkningsgrader for motor og frekvensomformer som funktion af belastningsgraden ved konstant U/f-forhold og AEO. Som det ses afhænger virkningsgraden både af belastningsgraden og frekvensen (motorens omløbstal) samt reguleringsformen (konstant U/f-forhold eller Automatisk Energi Optimering – AEO).

I figuren ses, at der ved de forskellige frekvenser opnås højere virkningsgrader, når reguleringsformen AEO benyttes. Dog er forskellene betydeligt mindre end for 4 kW motoren.



Figur 3.13. Totalvirkningsgrader funktion af belastningsgrad ved konstant U/f-forhold og AEO.

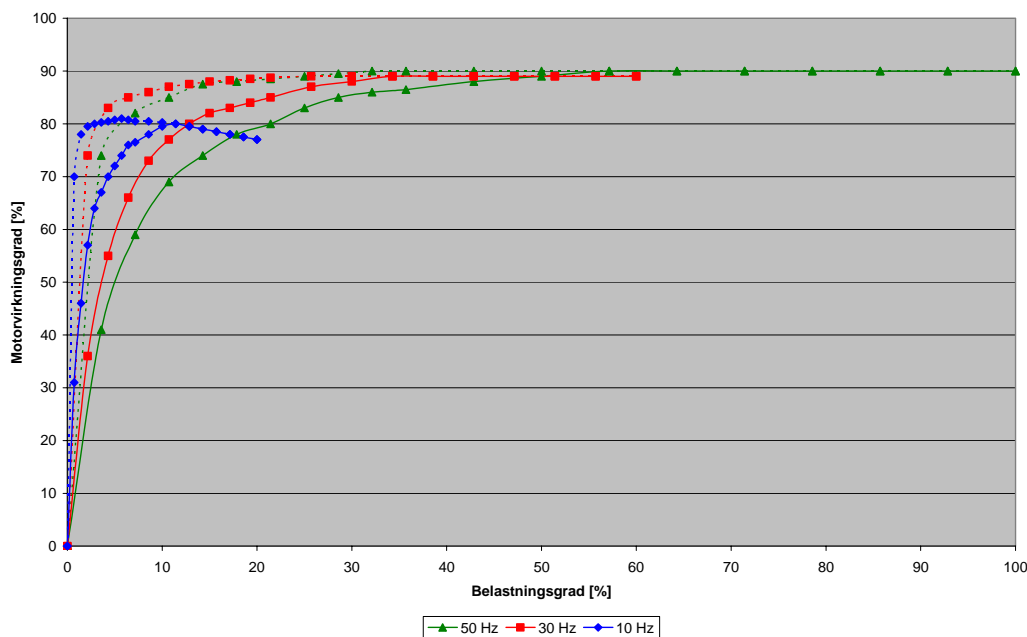
3.3 Test af frekvensomformer på Aalborg Universitet

3.3.1 Test af 22 kW motor og frekvensomformer

I figur 3.14 ses virkningsgrader for motoren som funktion af belastningsgraden ved konstant U/f-forhold og AEO.

Som det ses afhænger virkningsgraden både af belastningsgraden og frekvensen (motorens omløbstal) samt reguleringsformen (konstant U/f-forhold eller Automatisk Energi Optimering – AEO).

I figur 3.14 ses, at virkningsgraden for motoren falder når omløbstallet reduceres (og momentet holdes konstant). Som det ses reduceres virkningsgraden, når frekvensen reduceres til 10 Hz (300 o/min). Dette er tilfældet uanset hvilken reguleringsform der benyttes.



Figur 3.14. Motorvirkningsgrader som funktion af belastningsgrad ved konstant U/f-forhold og AEO.

Ved 50 Hz (nominelt omløbstal, 1.400 o/min) ses det, at virkningsgraden stort set er konstant ved belastningsgrader mellem 30 og 100 %, når reguleringsformen AEO benyttes. Ved belastningsgrader lavere end 30 % sker der fald i virkningsgraden. Belastningsgraden skal dog under 10 %, før virkningsgraden for alvor begynder at falde.

Når reguleringsformen konstant U/f-forhold benyttes ses, at virkningsgraden stort set er konstant ved belastningsgrader mellem 60 og 100 %. Ved belastningsgrader lavere end de 60 % sker der et betydeligt fald i virkningsgraden.

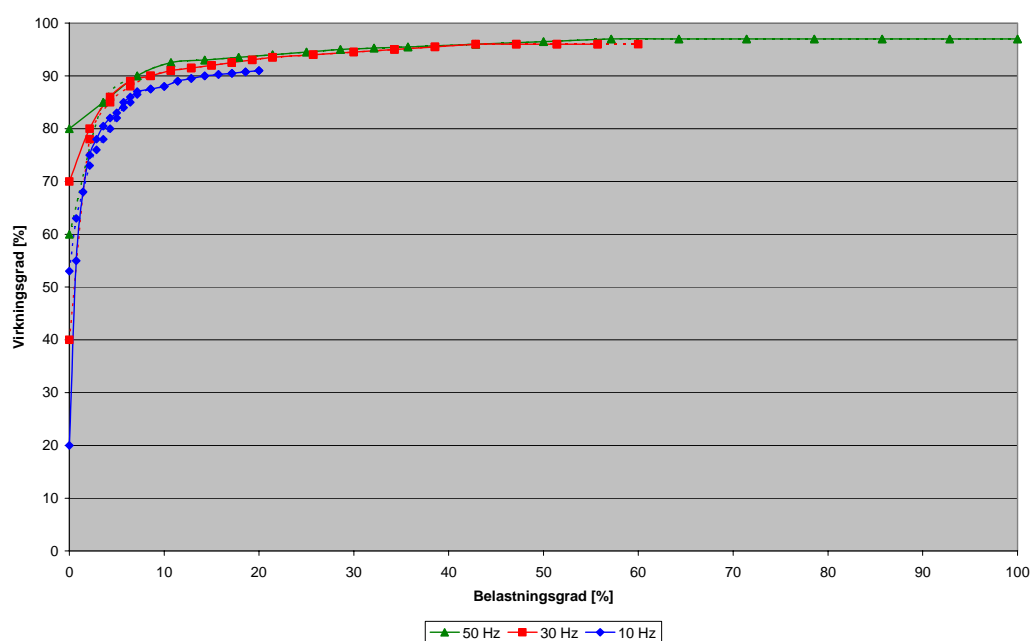
Ved 10 og 30 Hz ses nogenlunde det samme billede. Grænserne for hvornår virkningsgraderne begynder at falde er, som det ses i figuren, nogle andre.

På figurerne ses, at hvis belastningsgraden kommer under halvdelen af den maksimale (ved de forskellige frekvenser), kan der opnås en fordel ved at anvende en styrestrategi med Automatisk Energi Optimering.

Dette gælder både når motoren kører med konstant omløbstal og varierende belastningsgrad samt når den kører med variabelt omløbstal og varierende belastningsgrad.

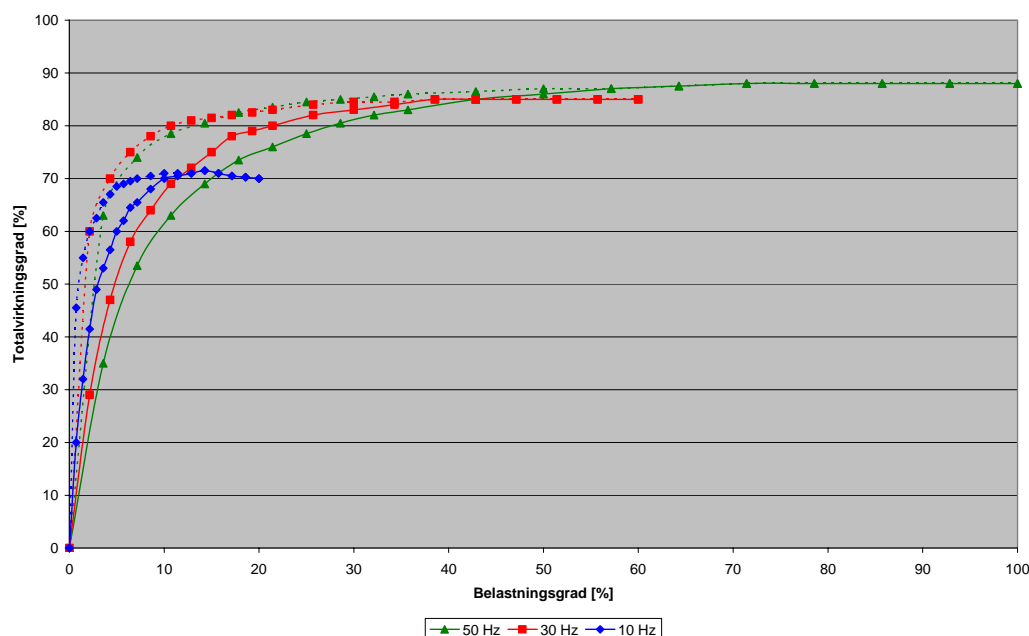
I figur 3.15 ses virkningsgrader for frekvensomformereren som funktion af belastningsgraden ved konstant U/f -forhold og AEO.

Som det ses afhænger virkningsgraden både af belastningsgraden og frekvensen (motorens omløbstal). Jo højere belastningsgraden er des højere bliver virkningsgraden



Figur 3.14. Frekvensomformervirkningsgrader som funktion af belastningsgrad ved konstant U/f -forhold og AEO.

I figur 3.15 ses virkningsgrader for motor og frekvensomformer som funktion af belastningsgraden ved konstant U/f-forhold og AEO. Som det ses afhænger virkningsgraden både af belastningsgraden og frekvensen (motorens omløbstal) samt reguleringsformen (konstant U/f-forhold eller Automatisk Energi Optimering – AEO). Billedet er stort set det samme som for motoren (se figur 3.14).



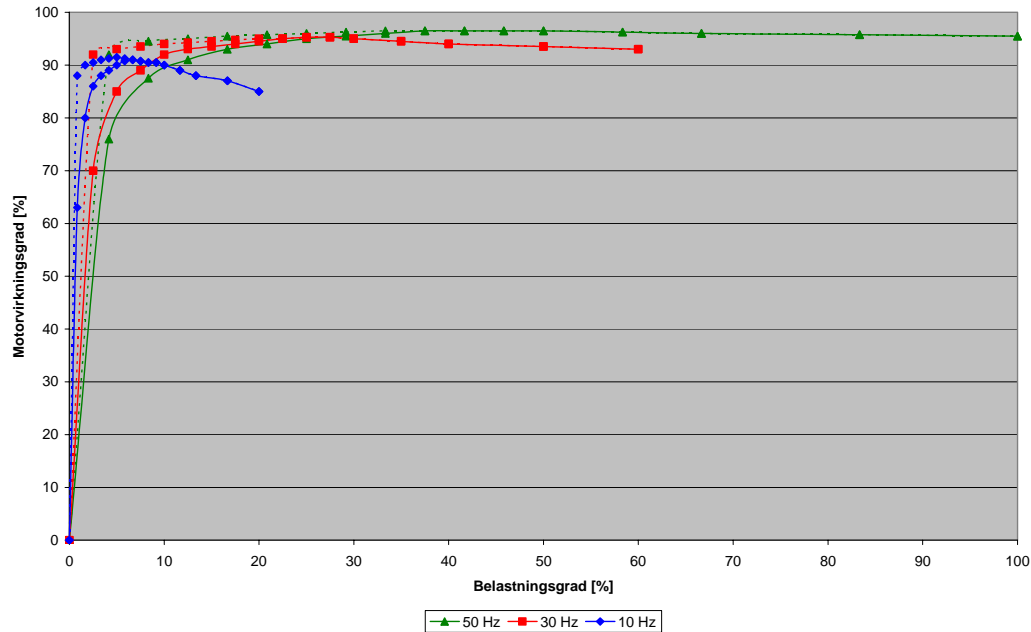
Figur 3.16. Totalvirkningsgrader som funktion af belastningsgrad ved konstant U/f-forhold og AEO.

3.3.2 Test af 90 kW motor og frekvensomformer

I figur 3.17 ses virkningsgrader for motoren som funktion af belastningsgraden ved konstant U/f-forhold og AEO.

Som det ses afhænger virkningsgraden både af belastningsgraden og frekvensen (motorens omløbstal) samt reguleringsformen (konstant U/f-forhold eller Automatisk Energi Optimering – AEO).

I figur 3.17 ses, at virkningsgraden for motoren falder når omløbstallet reduceres (og momentet holdes konstant). Som det ses reduceres virkningsgraden, når frekvensen reduceres til 10 Hz (300 o/min). Dette er tilfældet uanset hvilken reguleringsform der benyttes.



Figur 3.17. Motorvirkningsgrader som funktion af belastningsgrad ved konstant U/f -forhold og AEO.

Ved 50 Hz (nominelt omløbstal, 1.400 o/min) ses det, at virkningsgraden stort set er konstant ved belastningsgrader mellem 30 og 100 %, når reguleringsformen AEO benyttes. Ved belastningsgrader lavere end 30 % sker der fald i virkningsgraden. Belastningsgraden skal dog under 10 %, før virkningsgraden for alvor begynder at falde.

Når reguleringsformen konstant U/f -forhold benyttes ses, at virkningsgraden stort set er konstant ved belastningsgrader mellem 60 og 100 %. Ved belastningsgrader lavere end 60 % sker der et betydeligt fald i virkningsgraden.

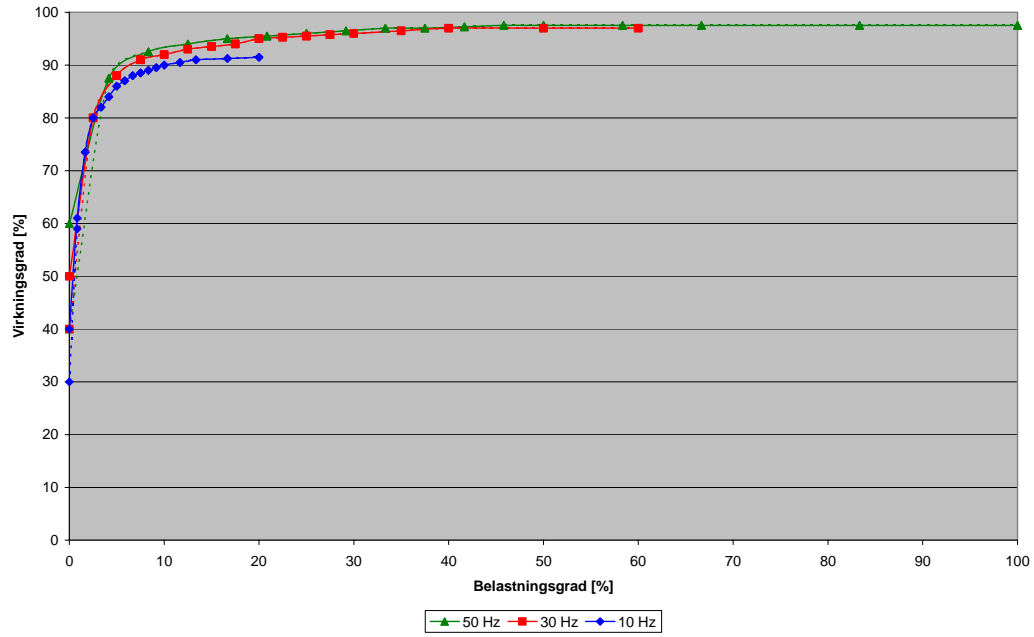
Ved 10 og 30 Hz ses nogenlunde det samme billede. Grænserne for hvornår virkningsgraderne begynder at falde er, som det ses i figuren, nogle andre.

På figurene ses, at hvis belastningsgraden kommer under halvdelen af den maksimale (ved de forskellige frekvenser), kan der opnås en fordel ved at anvende en styrestrategi med Automatisk Energi Optimering.

Dette gælder både når motoren kører med konstant omløbstal og varierende belastningsgrad samt når den kører med variabelt omløbstal og varierende belastningsgrad.

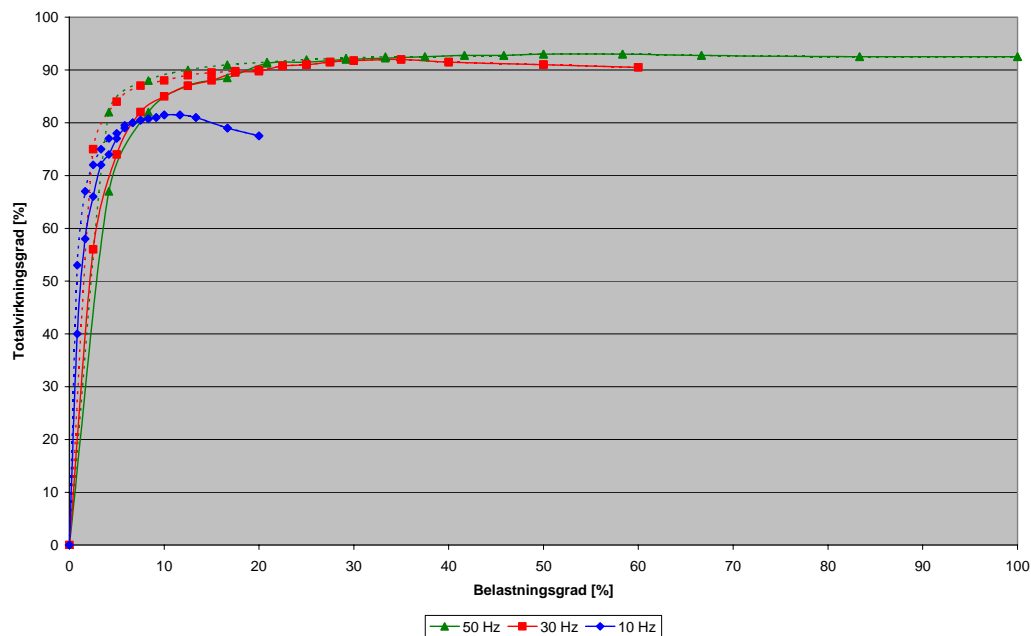
I figur 3.18 ses virkningsgrader for frekvensomformereren som funktion af belastningsgraden ved konstant U/f -forhold og AEO.

Som det ses afhænger virkningsgraden både af belastningsgraden og frekvensen (motorens omløbstal). Jo højere belastningsgraden er des højere bliver virkningsgraden



Figur 3.18. Frekvensomformervirkningsgrader som funktion af belastningsgrad ved konstant U/f -forhold og AEO.

I figur 3.19 ses virkningsgrader for motor og frekvensomformer som funktion af belastningsgraden ved konstant U/f-forhold og AEO. Som det ses afhænger virkningsgraden både af belastningsgraden og frekvensen (motorens omløbstal) samt reguleringsformen (konstant U/f-forhold eller Automatisk Energi Optimering – AEO). Billedet er stort set det samme som for motoren (se figur 3.17).



Figur 3.19. Totalvirkningsgrader som funktion af belastningsgrad ved konstant U/f-forhold og AEO.

4 Opdateret katalog

4.1 Belastning

4.1.1 Ventilatorer

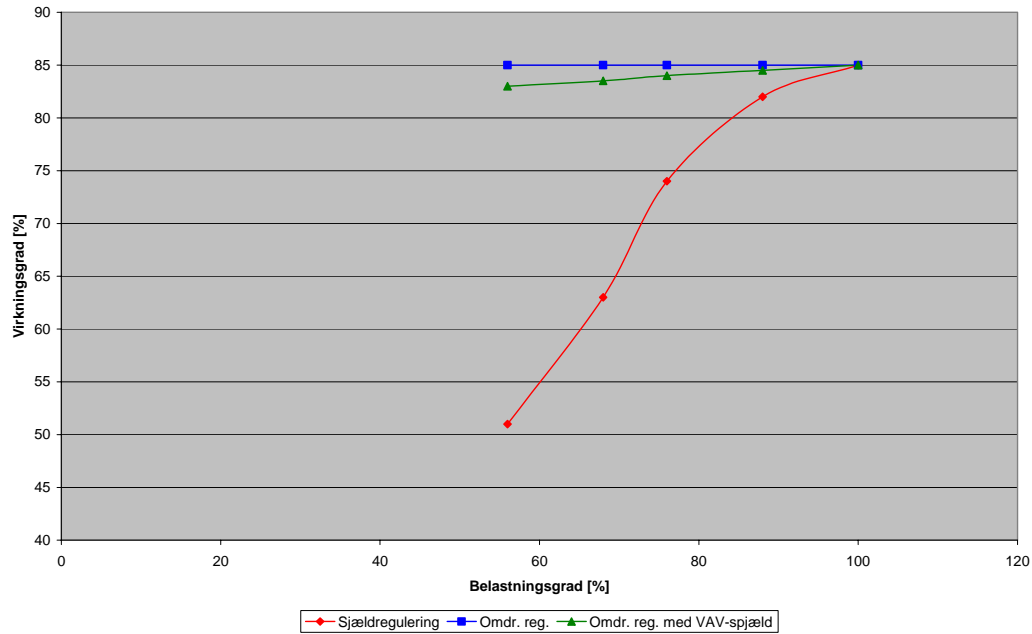


Virkningsgraden for en ventilator afhænger, som det ses i figur 4.1, i høj grad af den benyttede reguleringsform.

Belastningsgraden defineres som forholdet mellem den effekt der skal tilføres ventilatoren i et aktuelt driftspunkt og den effekt der skal tilføres ventilatoren i det nominelle driftspunkt (ved max. volumenstrøm).

Belastningsgraden i et givet driftspunkt kan skrives således:

$$\text{Belastningsgrad} = \frac{q_v \cdot \Delta p_t}{P_{v,N} \cdot \eta_v}$$



Figur 4.1. Eksempler på virkningsgrader for en ventilator med B-hjul som funktion af belastningsgrad og reguleringsform. Ventilatoren yder i det nominelle driftspunkt en volumenstrøm på 44.000 m³/h og en total trykstigning på 1.750 Pa. Den tilførte effekt til ventilatoren er 25 kW.

4.1.2 Pumper

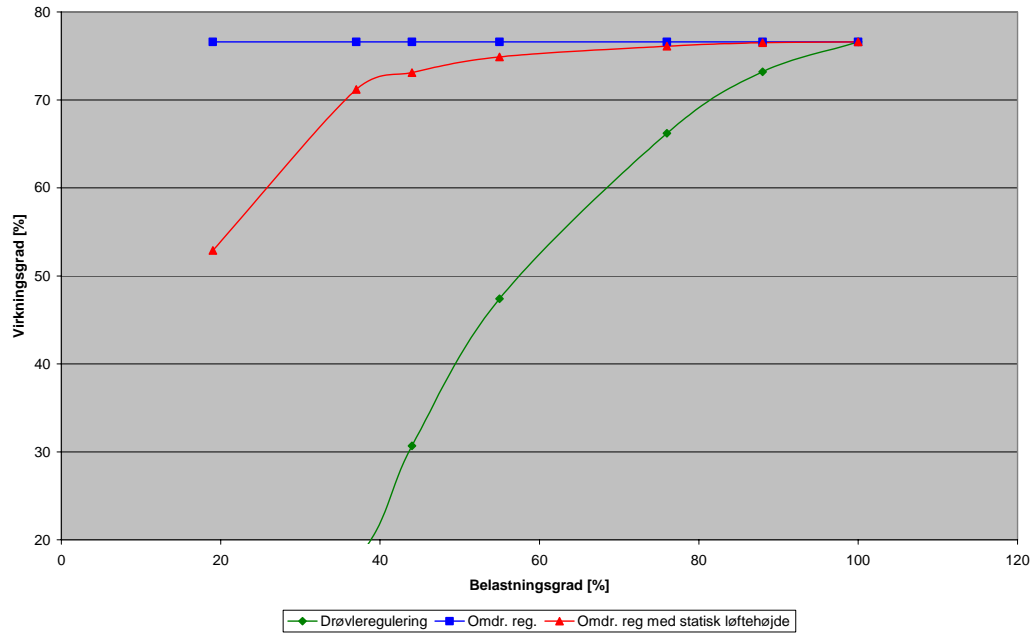


Virkningsgraden afhænger, som det ses i figur 4.2, i høj grad af den benyttede reguleringsform.

Belastningsgraden defineres som forholdet mellem den effekt der skal tilføres pumpen i et aktuelt driftspunkt og den effekt der skal tilføres pumpen i det nominelle driftspunkt (ved max. flow).

Belastningsgraden i et givet driftspunkt kan skrives således:

$$\text{Belastningsgrad} = \frac{Q \cdot \Delta p}{P_{p,N} \cdot \eta_p}$$



Figur 4.2. Eksempler på virkningsgrader for en centrifugalpumpe som funktion af belastningsgrad og reguleringsform. Pumpen yder i det nominelle driftspunkt et flow på $104 \text{ m}^3/\text{h}$ og en løftehøjde på 41 m . Den tilførte effekt til pumpen er 15 kW . For den røde kurve gælder, at den statiske løftehøjde er sat til 20 m .

4.1.3 Trykluftkompressor



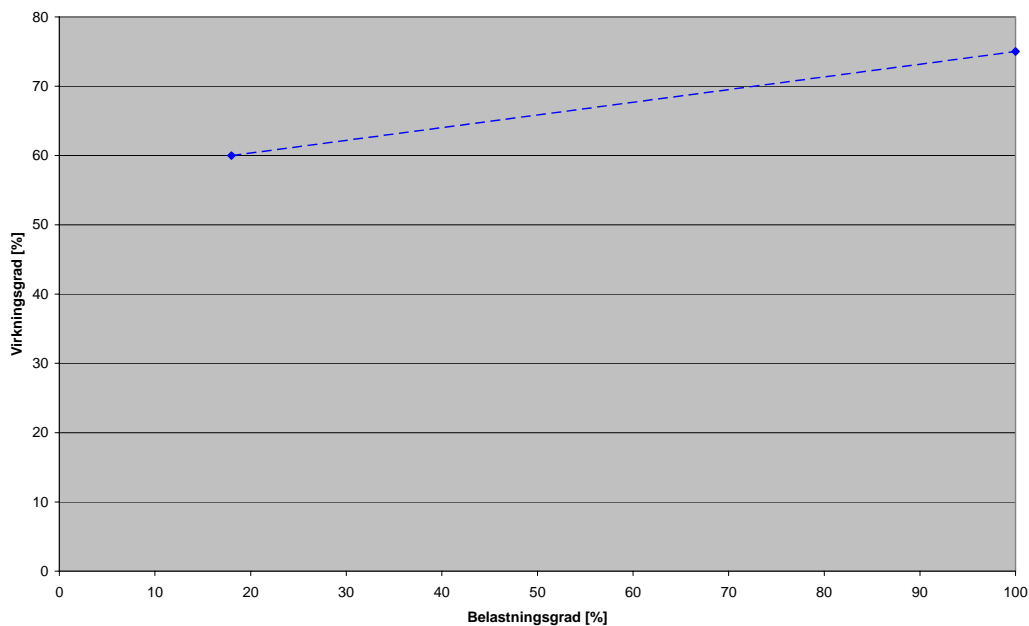
Virkningsgraden for en trykluftkompressor (skruekompressor) afhænger, som det ses i figur 4.3 og 4.4, af den benyttede reguleringsform.

Belastningsgraden defineres som forholdet mellem den effekt der skal tilføres kompressoren i et aktuelt driftspunkt og den effekt der skal tilføres kompressoren i det nominelle driftspunkt (ved max. flow).

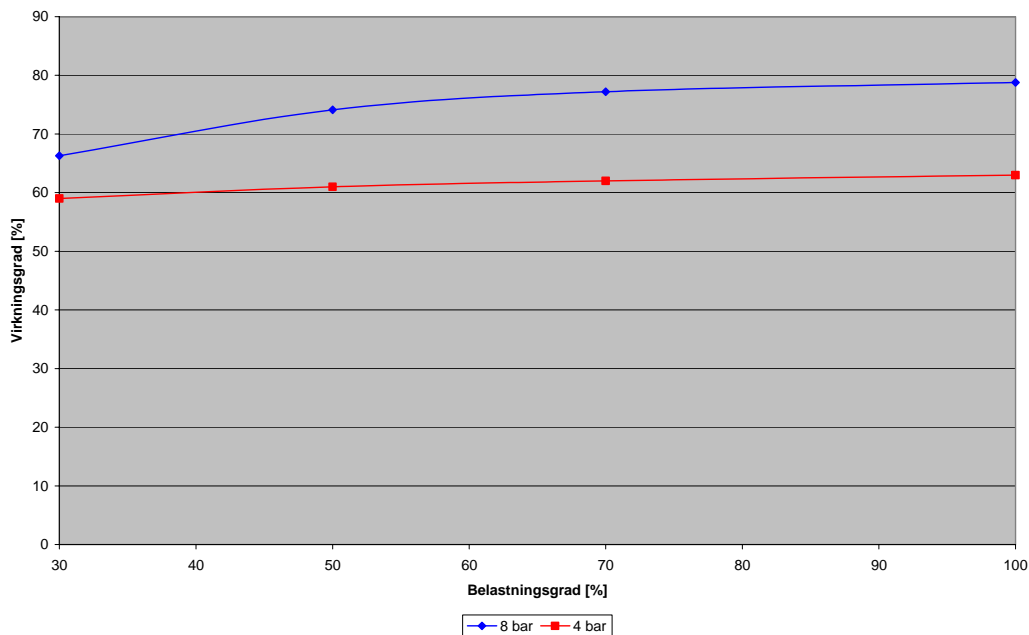
Belastningsgraden i et givet driftspunkt kan skrives således:

$$\text{Belastningsgrad} = \frac{p_1 \cdot v_1 \cdot k \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} - 1 \right]}{P_{k,N} \cdot \eta_k}$$

De mest benyttede reguleringsformer er fuldlast/aflast drift og omdrejningstal regulering.



Figur 4.3. Virkningsgrader for skruekompressorer ved fuldlast/aflast drift og som funktion af belastningsgraden ved 8 bars tryk. Kompressoren yder i det nominelle driftspunkt et flow på $0,166 \text{ m}^3/\text{s}$. Den tilførte effekt til kompressoren er 63 kW.



Figur 4.4. Virkningsgrader for omdrejningstal reguleret skruekompressorer som funktion af belastningsgraden ved 8 og 4 bars tryk. Kompressoren yder, både ved 8 og 4 bar, et flow på $0,166 \text{ m}^3/\text{s}$ i de nominelle driftspunkter. De tilførte effekter til kompressoren er henholdsvis 63 kW og 45 kW.

4.1.4 Kølekompressorer



Den isentropiske virkningsgrad afhænger dels af kompressortype og –størrelse dels af anlæggets fordampnings- og kondenseringstemperatur samt belastningsgraden.

På større køleanlæg er der installeret kapacitetsregulering, der regulerer kapaciteten (kuldeydelsen) efter behovet. Hvilken kapacitetsregulering der benyttes afhænger af kompressortypen.

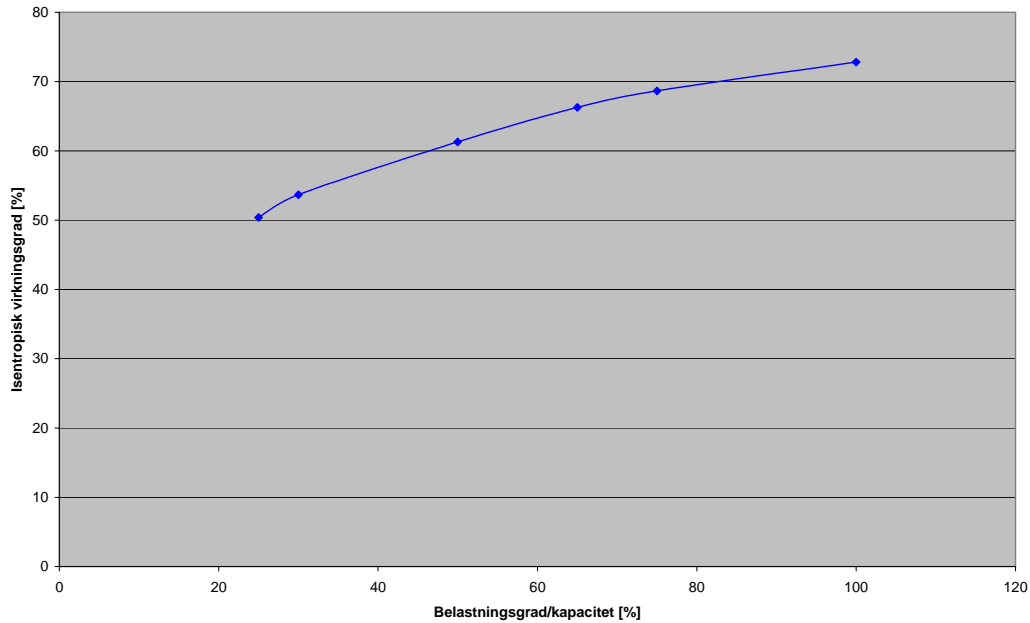
For stempelkompressorer er cylinderudkobling en hyppigt anvendt metode til kapacitetsregulering.

Belastningsgraden defineres som forholdet mellem den effekt der skal tilføres kompressoren i et aktuelt driftspunkt og den effekt der skal tilføres kompressoren i det nominelle driftspunkt (ved max. kapacitet).

Belastningsgraden i et givet driftspunkt kan skrives således:

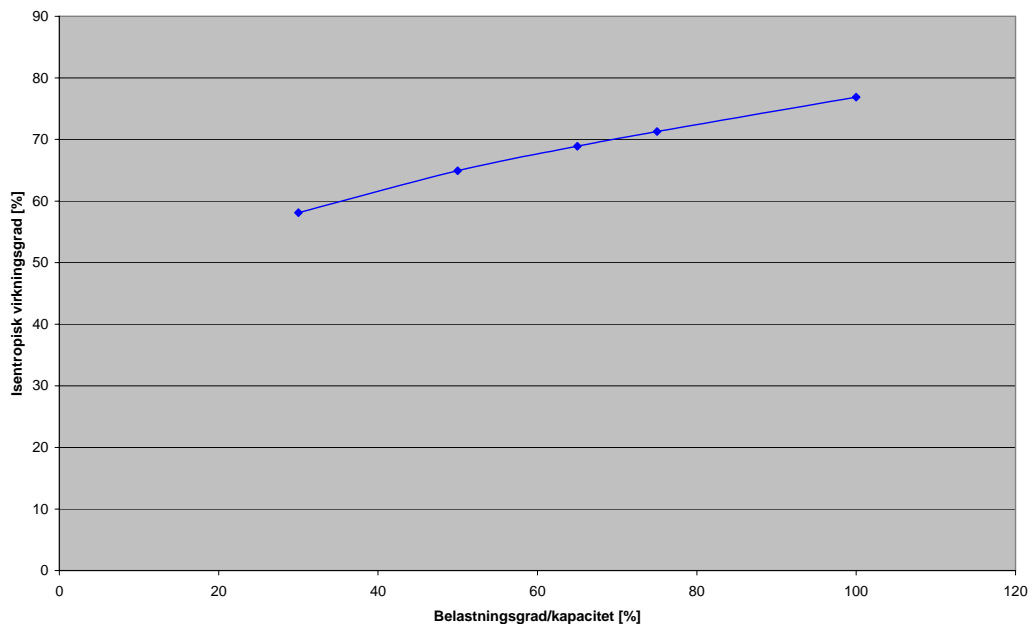
$$\text{Belastningsgrad} = \frac{\dot{m} \cdot (h_{2, \text{is}} - h_1)}{P_{k,N} \cdot \eta_{\text{is}}}$$

I figur 4.5 ses isentropiske virkningsgrader for en stempelkompressor der kapacitetsreguleres vha. cylinderudkobling. Fordampningstemperaturen er 0°C og kondenseringstemperaturen er 30°C. Disse temperaturer fastholdes ved de forskellige belastningsgrader.



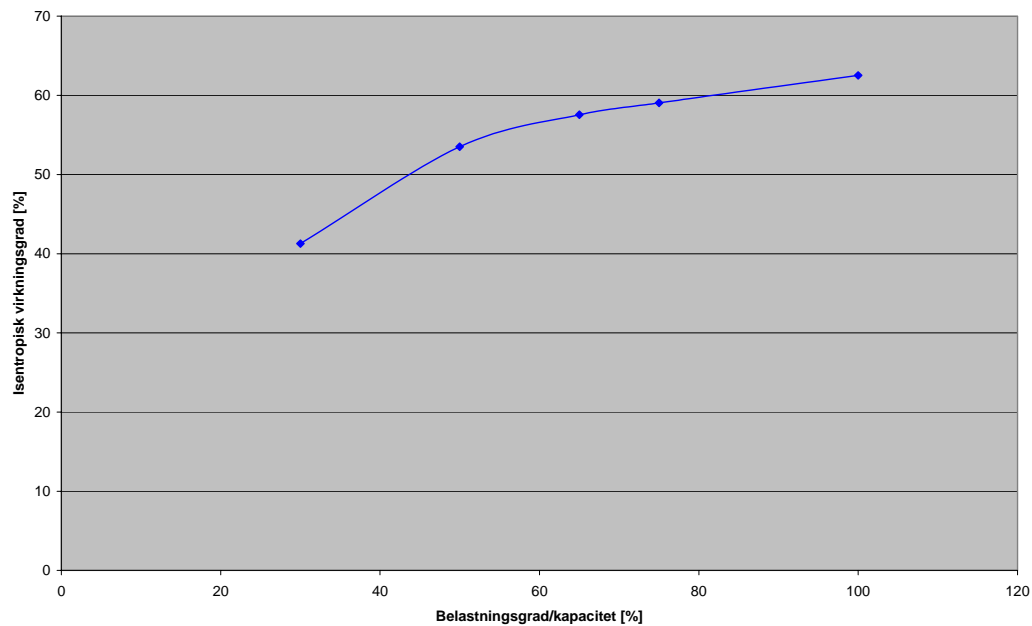
Figur 4.5. Isentropisk virkningsgrad for stempel-kompressor som funktion af belastningsgraden.

I figur 4.6 ses isentropiske virkningsgrader for en skruekompressor der kapacitetsreguleres vha. omdrejningstallet. Fordampningstemperaturen er 0°C og kondenseringstemperaturen er 30°C. Disse temperaturer fastholdes ved de forskellige belastningsgrader.



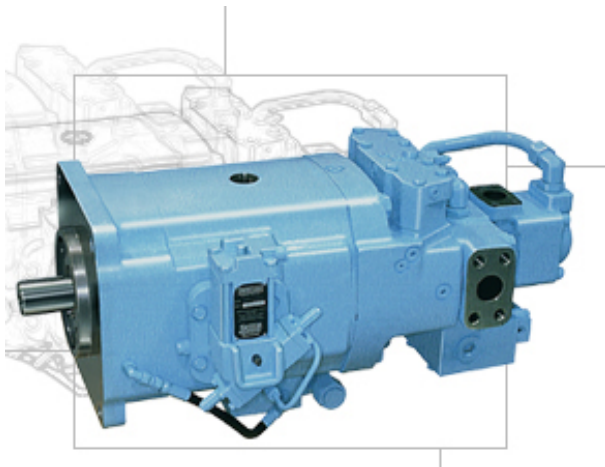
Figur 4.6. Isentropisk virkningsgrad for skrue-kompressor som funktion af belastningsgraden.

I figur 4.7 ses isentropiske virkningsgrader for en skruekompressor der kapacitetsreguleres vha. en glider. Fordampningstemperaturen er 0°C og kondenseringstemperaturen er 30°C. Disse temperaturer fastholdes ved de forskellige belastningsgrader



Figur 4.7. Isentropisk virkningsgrad for skrue-kompressor som funktion af belastningsgraden.

4.1.5 Hydraulikpumper



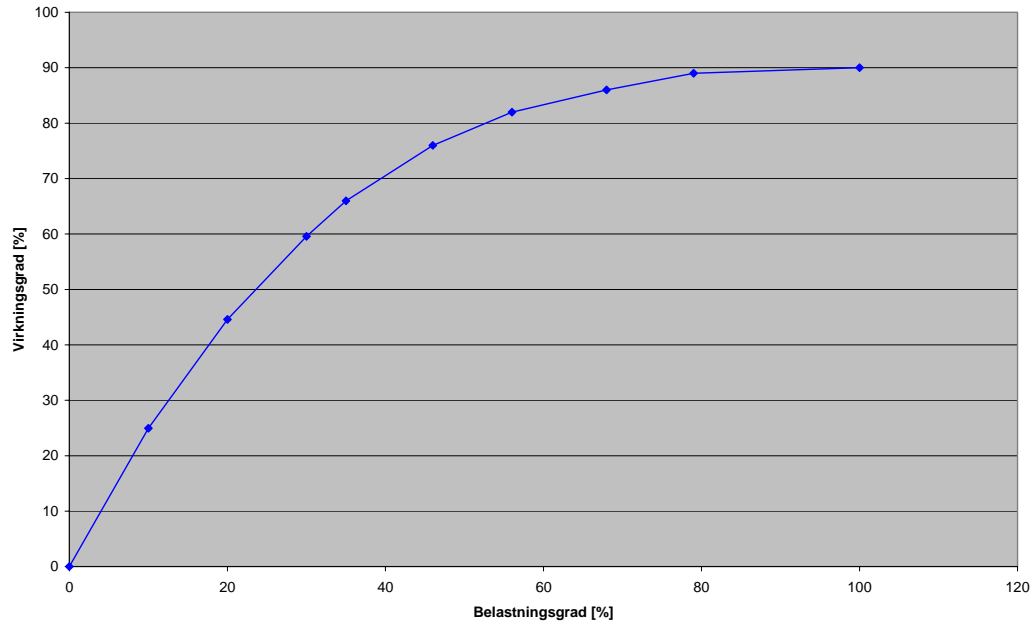
En hydraulikpumpes virkningsgrad er produktet af den volumetriske virkningsgrad η_v og den hydraulisk/mekaniske virkningsgrad η_{hm} .

Belastningsgraden defineres som forholdet mellem den effekt der skal tilføres pumpen i et aktuelt driftspunkt og den effekt der skal tilføres pumpen i det nominelle driftspunkt (ved max. flow).

Belastningsgraden i et givet driftspunkt kan skrives således:

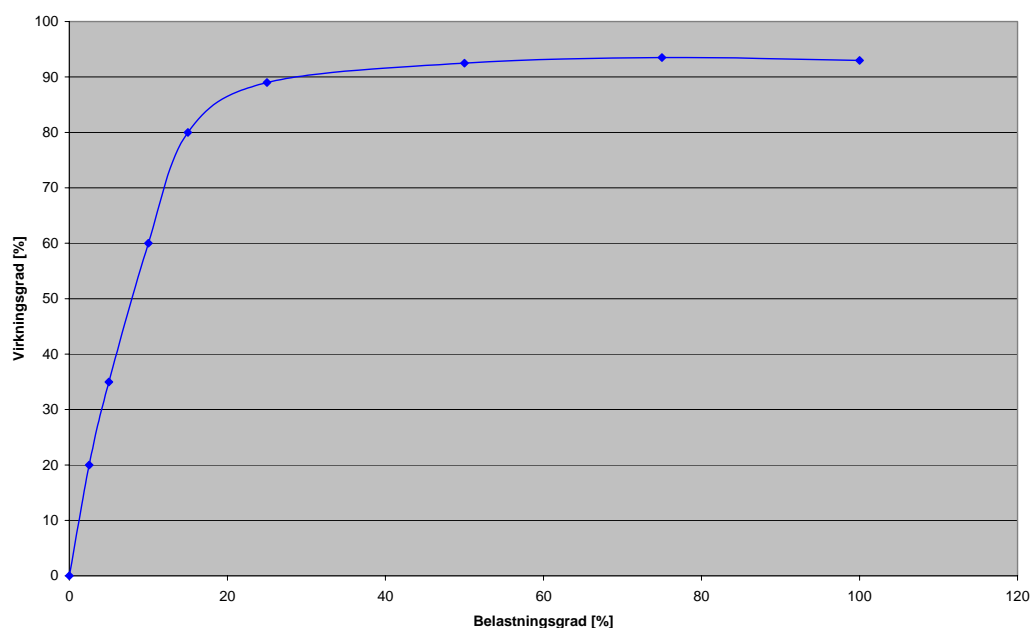
$$\text{Belastningsgrad} = \frac{Q \cdot \Delta p}{P_{p,N} \cdot 600 \cdot \eta_p}$$

I figur 4.8 ses virkningsgraden som funktion af belastningsgraden for en pumpe med variabel fortrængning. Pumpens tryk holdes konstant på 210 bar og flowet varieres ved at ændre fortrængningen



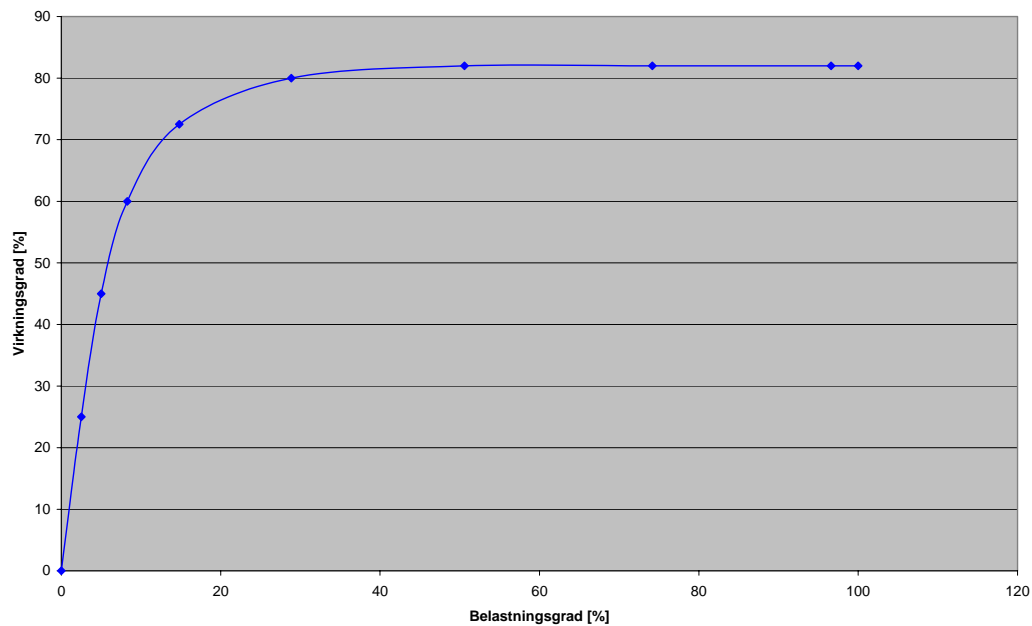
*Figur 4.8. Virkningsgrad for pumpe med variabel fortrængning som funktion af belastningsgraden.
Pumpen yder i det nominelle driftspunkt et flow på 61 l/min og et tryk på 210 bar. Den tilførte effekt til pumpen er 31 kW.*

I figur 4.9 ses virkningsgraden som funktion af belastningsgraden for den samme pumpe. Pumpens fortrængning og tryk holdes konstant (210 bar), men flowet varieres vha. omdrejningstal regulering.



Figur 4.9. Virkningsgrad for pumpe med variabel fortrængning som funktion af belastningsgraden. Pumpens fortrængning og tryk holdes konstant (210 bar), men flowet varieres vha. omdrejningstal regulering. Pumpen yder i det nominelle driftspunkt et flow på 61 l/min og et tryk på 210 bar. Den tilførte effekt til pumpen er 31 kW.

I figur 4.10 ses virkningsgraden som funktion af belastningsgraden for en pumpe med fast fortrængning. Da fortrængningen er fast, vil flowet stort set være konstant uanset systemtrykket.



Figur 4.10. Virkningsgrad for pumpe med fast fortrængning som funktion af belastningsgraden. Pumpen yder i det nominelle driftspunkt et flow på 114 l/min og et tryk på 415 bar. Den tilførte effekt til pumpen er 98 kW. Pumpens omdrejningstal er 1.800 o/min.

4.1.6 Anden motordrift

Anden motordrift behandles detaljeret i kapitel 5.

4.2 Transmission

4.2.1 Remtransmissioner



Virkningsgraden for en remtransmission afhænger meget af belastningsgraden.

Belastningsgraden for en rem defineres således:

$$\text{Belastningsgrad} = \frac{P_r}{P_{r,N}}$$

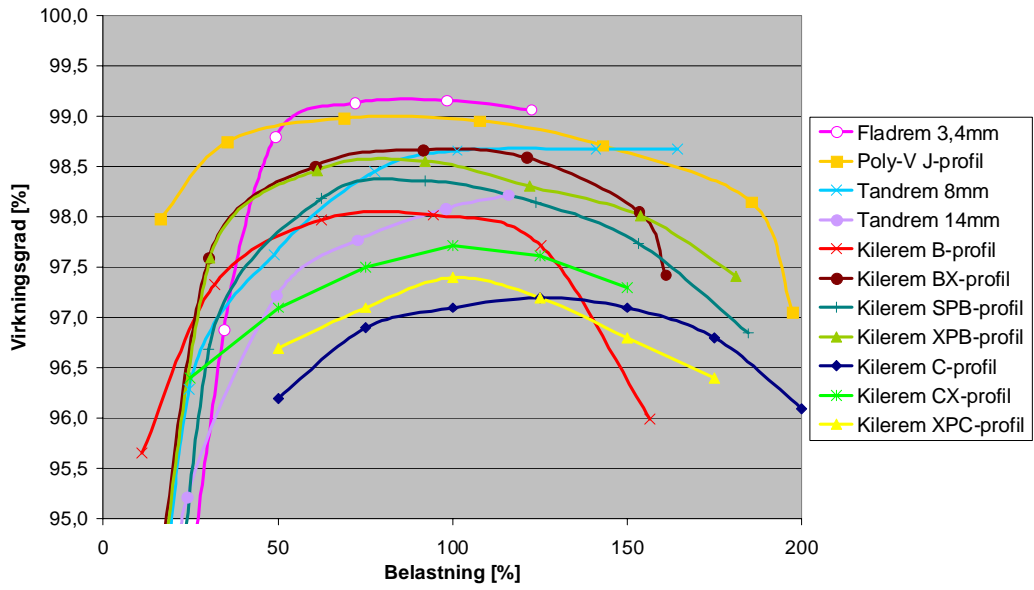
hvor

P_r er den aktuelle remeffekt [kW]

$P_{r,N}$ er den nominelle remeffekt [kW]

Den nominelle remeffekt er en katalogværdi, der udtrykker den effekt remmen er i stand til at overføre ved et givent omdrejningstal og udvekslingsforhold.

I figur 4.11 ses virkningsgrader som funktion af belastningsgraden for forskellige remtyper.



Figur 4.11. Virkningsgrader som funktion af belastningsgraden for remtyperne fladrem, Poly-V rem, tandrem og kilerem

4.2.2 Geartransmissioner



Virkningsgraden for et gear afhænger også af belastningsgraden samt driftsformen.

Belastningsgraden for et gear defineres således:

$$\text{Belastningsgrad} = \frac{P_g}{P_{g,N}}$$

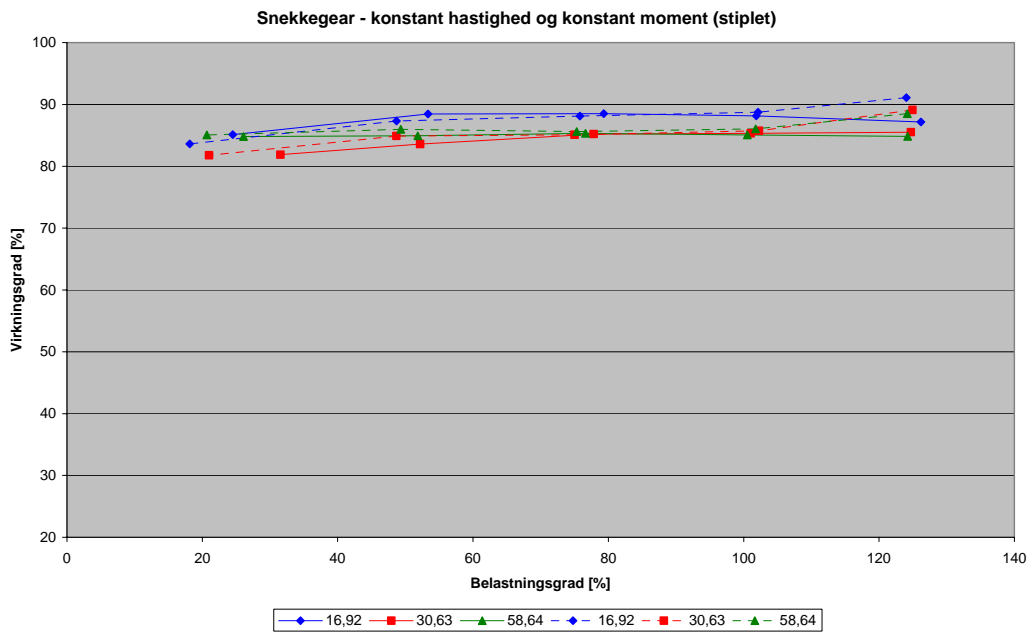
hvor

P_g er den aktuelle geareffekt [kW]

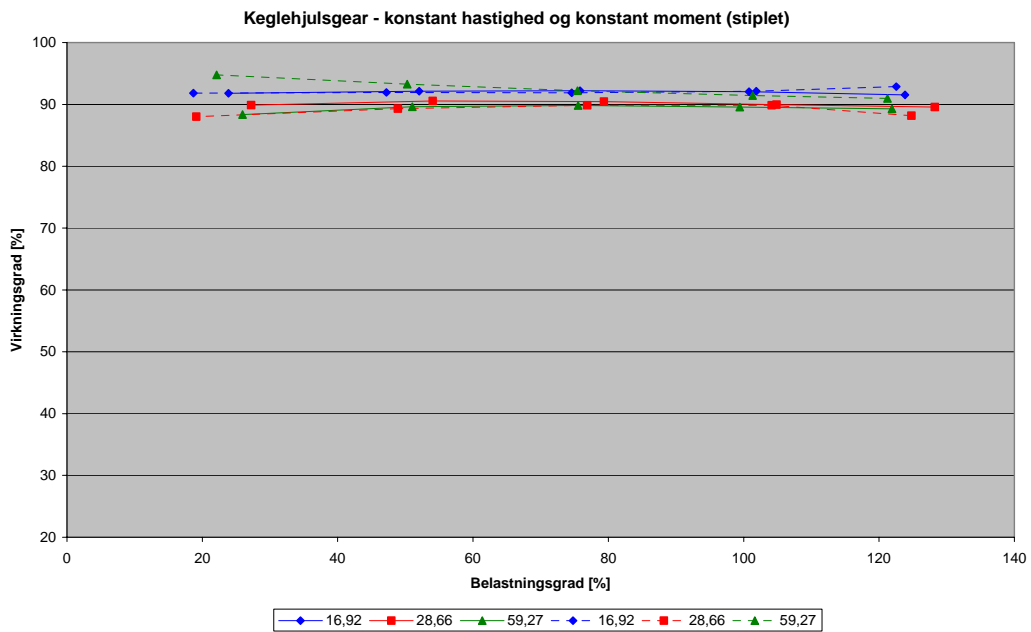
$P_{g,N}$ er den nominelle geareffekt [kW]

Den nominelle geareffekt er en katalogværdi, der udtrykker den effekt gearret er i stand til at overføre ved et givent omdrejningstal og udvekslingsforhold.

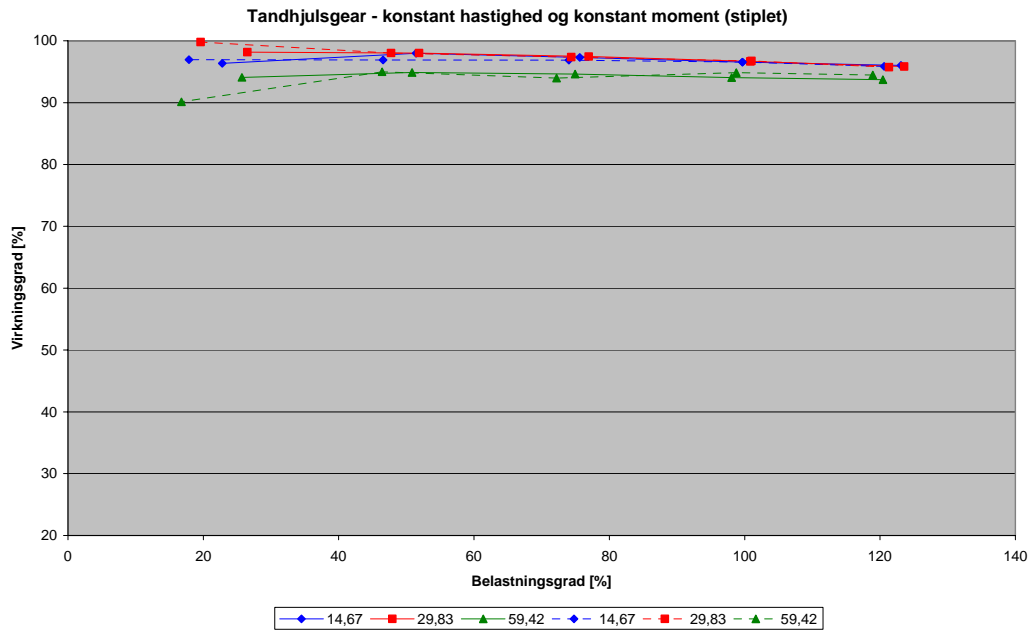
I figurene 4.12 til 4.14 ses virkningsgrader for snækkegear, keglehjulsgear og tandhjulsgear som funktion af belastningsgraden. Virkningsgraderne ses ved tre forskellige udvekslingsforhold.



Figur 4.12. Beregninger af virkningsgrader for snækkegear



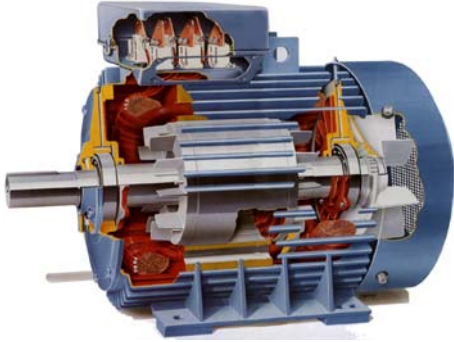
Figur 4.13. Beregninger af virkningsgrader for keglehjulsgear



Figur 4.14. Beregninger af virkningsgrader for tandhjulsgear.

4.3 Elmotor

4.3.1 Asynkronmotor



Virkningsgraden for en elmotor afhænger af størrelsen (den nominelle akseffekt) og af belastningsgraden. Belastningsgraden for elmotoren defineres således:

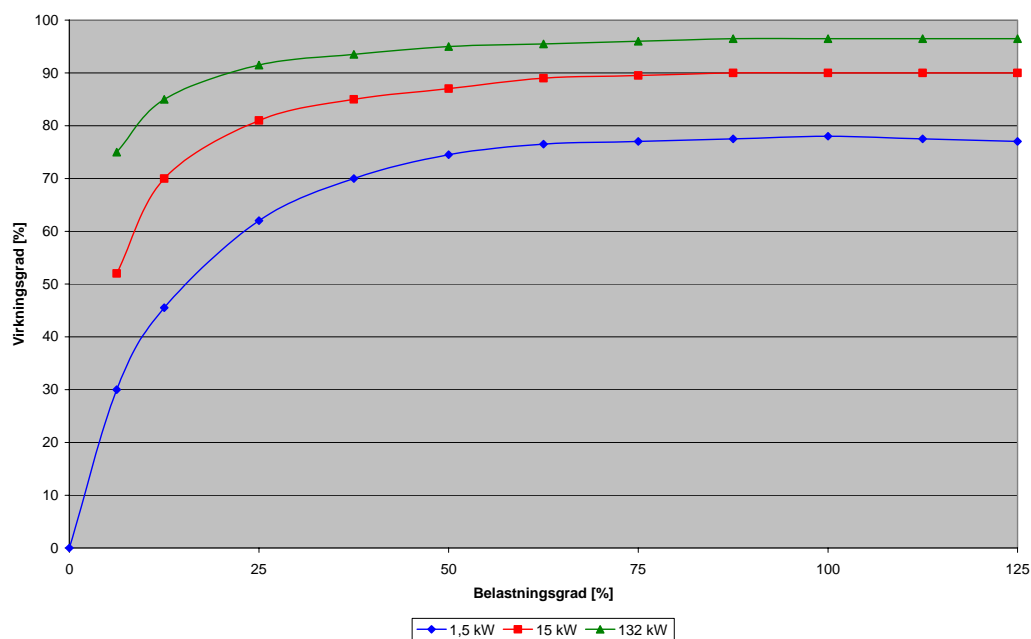
$$\text{Belastningsgrad} = \frac{P_m}{P_{m,N}}$$

hvor

P_m er den aktuelle akseffekt [kW]

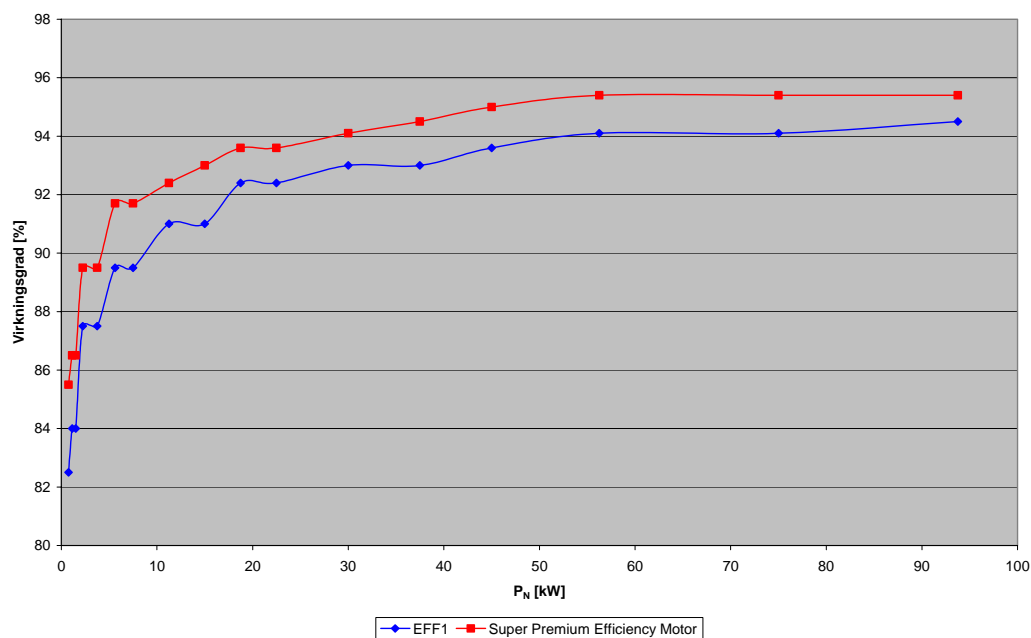
$P_{m,N}$ er den nominelle akseffekt [kW]

I figur 4.15 ses virkningsgrader for 4-polede standard asynkronmotorer som funktion af belastningsgraden

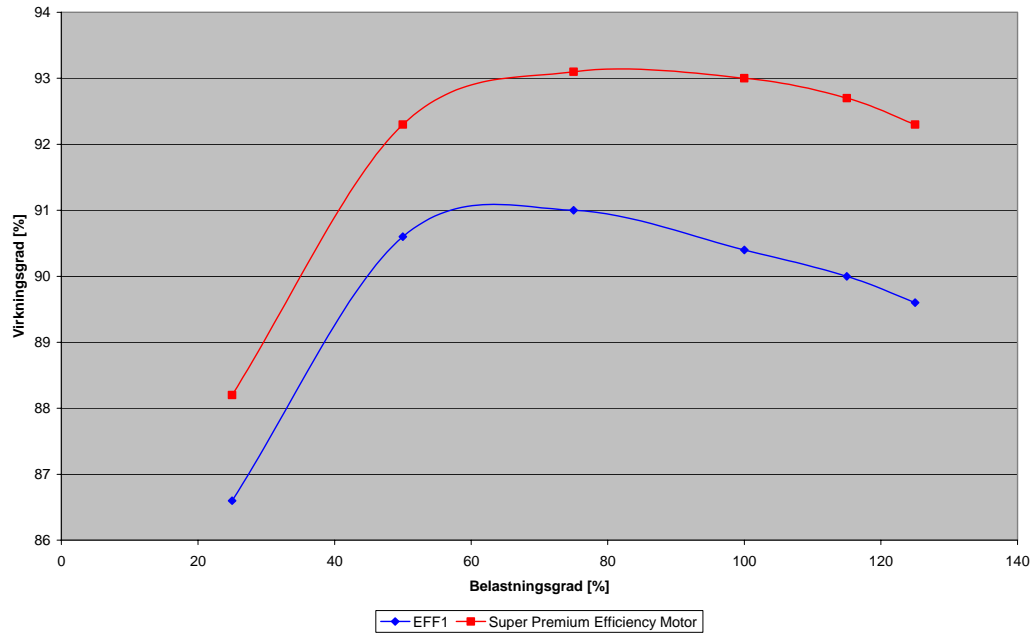


Figur 4.15. Virkningsgrader for standardmotorer

Super-Premium Efficiency motoren er designet med kobber rotor og forbedret stator design. Dette giver, som vist i figur 4.b væsentlige forbedringer af virkningsgraderne set i forhold til EFF1 motorer.

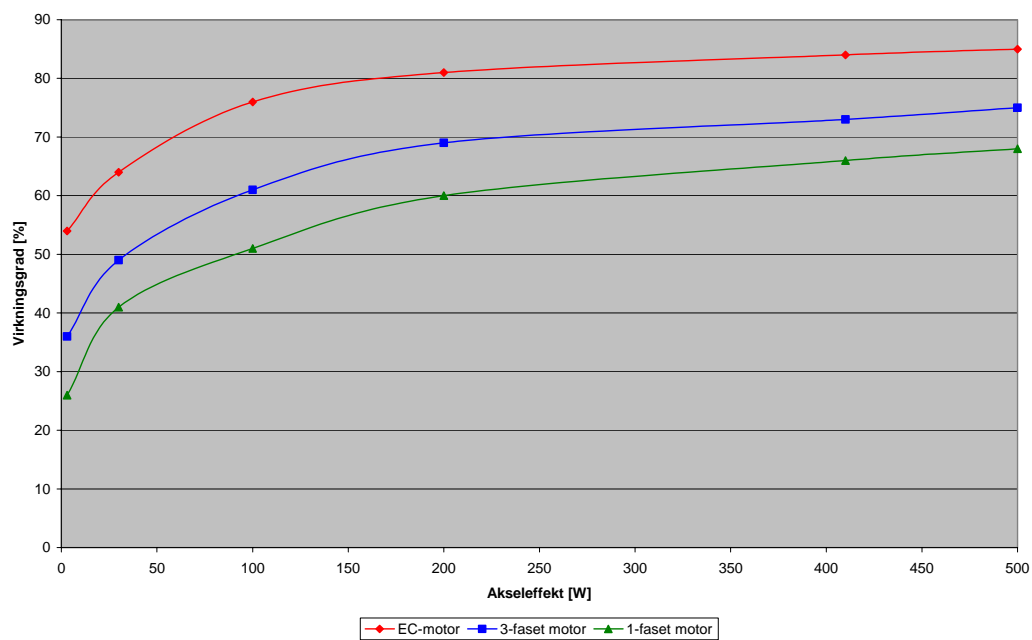
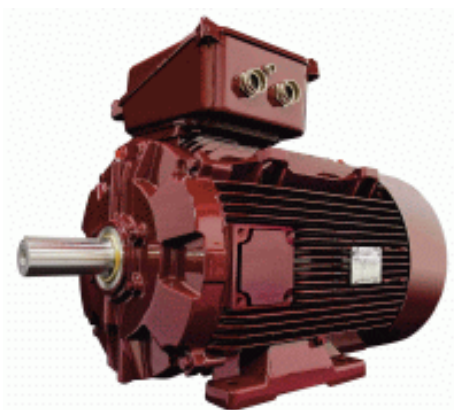


Figur 4.16. Virkningsgrader for Super Premium Efficiency motorer og 4 polede sparemotorer.

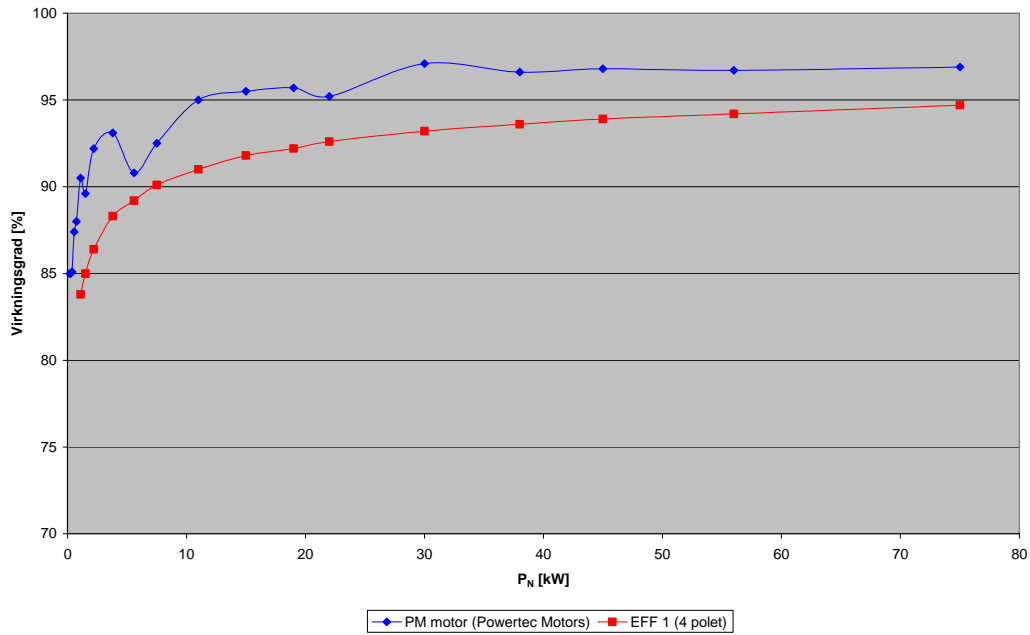


Figur 4.17. Virkningsgrad som funktion af belastningsgrad for en 11 kW (15 HP) Super Premium Efficiency motor og en gennemsnittet af 5 stk. 11 kW (15 HP) EFF1 motorer.

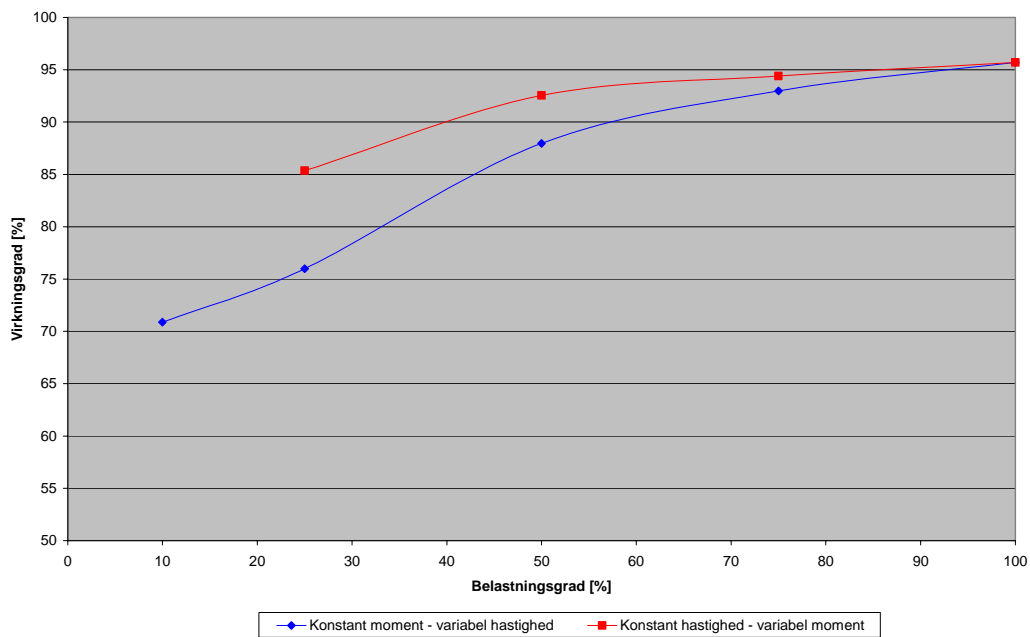
4.3.2 PM-motor



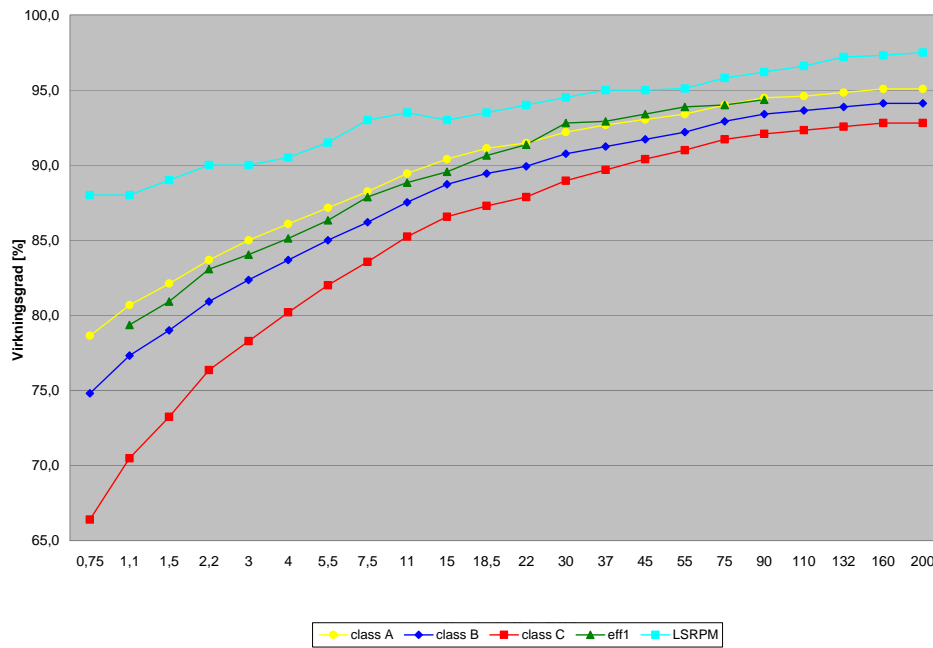
Figur 4.18. Virkningsgrader for EC-motorer samt 1- og 3-fasede asynkronmotorer. Omdrejningstallet for de tre motorer er 1.300 rpm.



Figur 4.19. Virkningsgrader for PM motorer og 4 poledede sparemotorer.



Figur 4.20. Virkningsgrad som funktion af belastningsgrad for en 19 kW (25 HP) PM motor ved to reguleringsformer. Data er leveret af den amerikanske motorfabrikant Powertec Motors.



Figur 4.21. Sammenligning af de foreslåede virkningsgrader fra EuP Lot 11 (Energy Using Products Directive), Eff1 motorer og PM-motor fra Leroy Somer. Virkningsgraderne ses som funktion af nominelle akseffekter. Virkningsgraderne er korrigeret for induceret tab fra inverteren. Data gælder for motorer med omdrejningstal på 3.000 o/min. Data er leveret af Leroy Somer.

4.4 Styling og regulering

4.4.1 Softstarter



I figur 4.21 ses virkningsgraden for en softstarter som funktion af belastningsgraden. Belastningsgraden for softstarteren defineres således:

$$\text{Belastningsgrad} = \frac{P_s}{P_{s,N}}$$

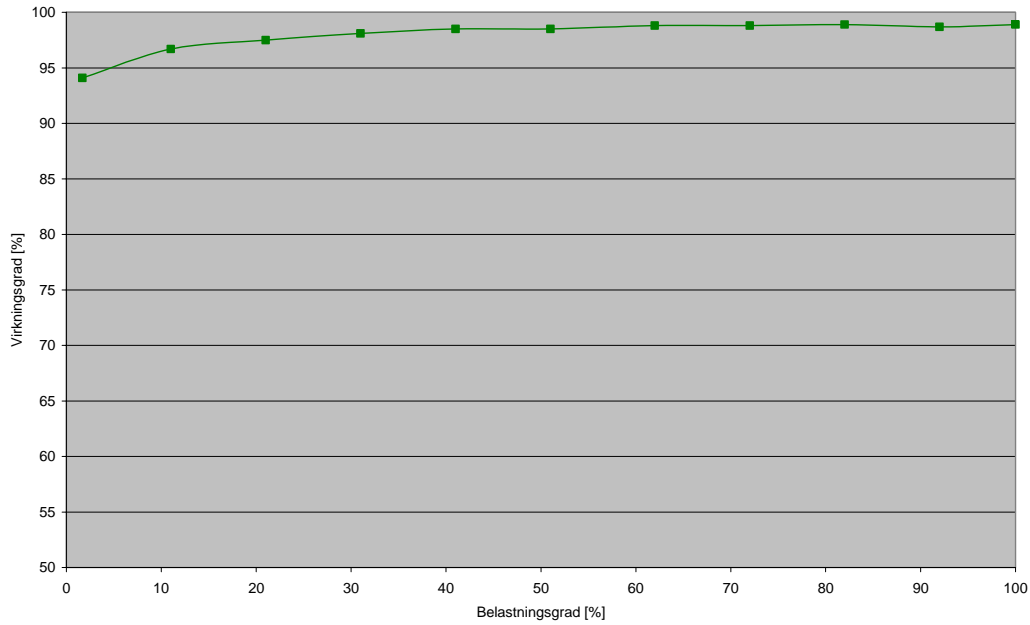
hvor

P_s er den aktuelle afgivne effekt til motoren [kW]

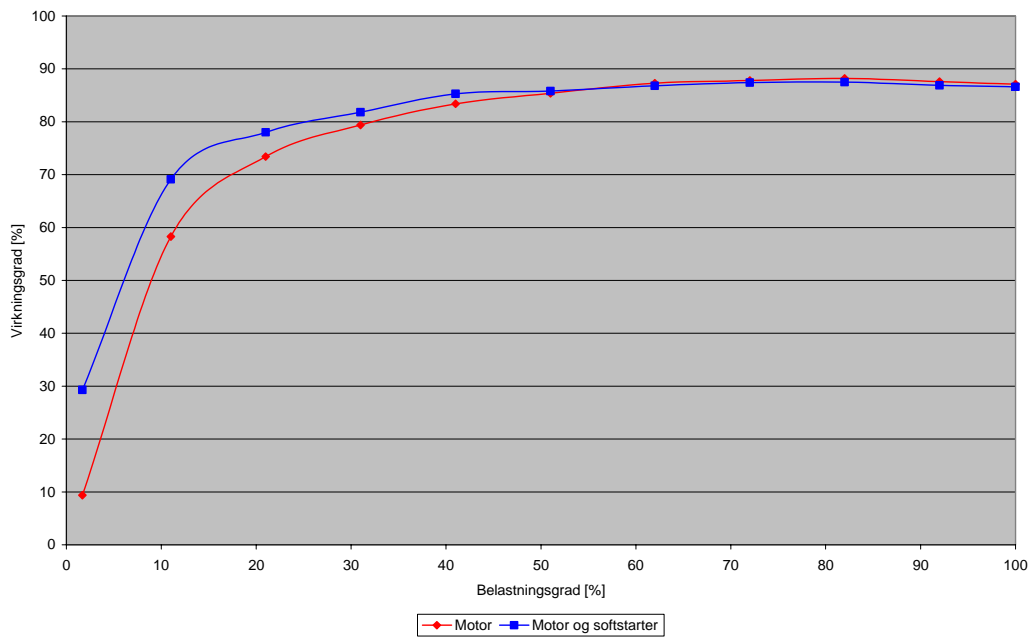
$P_{s,N}$ er den nominelle afgivne effekt til motoren [kW]

Softstarteren er beregnet til en motor med en nominel akseffekt på 7,5 kW.

Som det ses er virkningsgraden stort set konstant ved belastningsgrader mellem 30 og 100 %. Når belastningsgraden kommer under 30 % sker der et meget lille fald i virkningsgraden.



Figur 4.21. Virkningsgraden for en softstarter som funktion af belastningsgraden.



Figur 4.22. Virkningsgraden for en 7,5 kW standardmotor med og uden softstarter som funktion af belastningsgraden.

4.4.2 Frekvensomformer



I figur 4.23 ses virkningsgraden for en frekvensomformer som funktion af belastningsgraden.

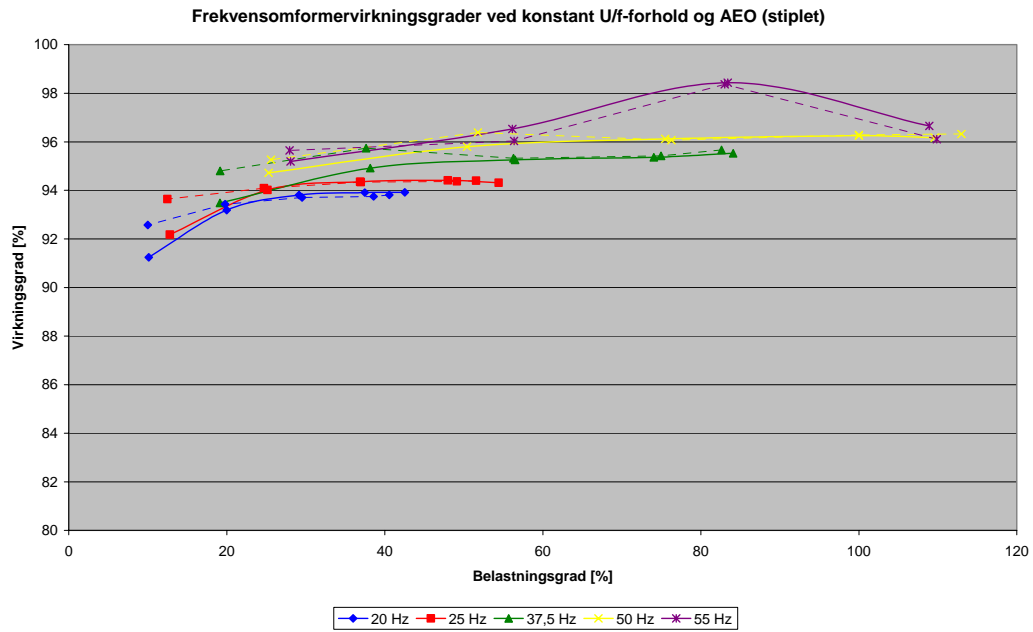
Belastningsgraden for frekvensomformereren defineres således:

$$\text{Belastningsgrad} = \frac{P_f}{P_{f,N}}$$

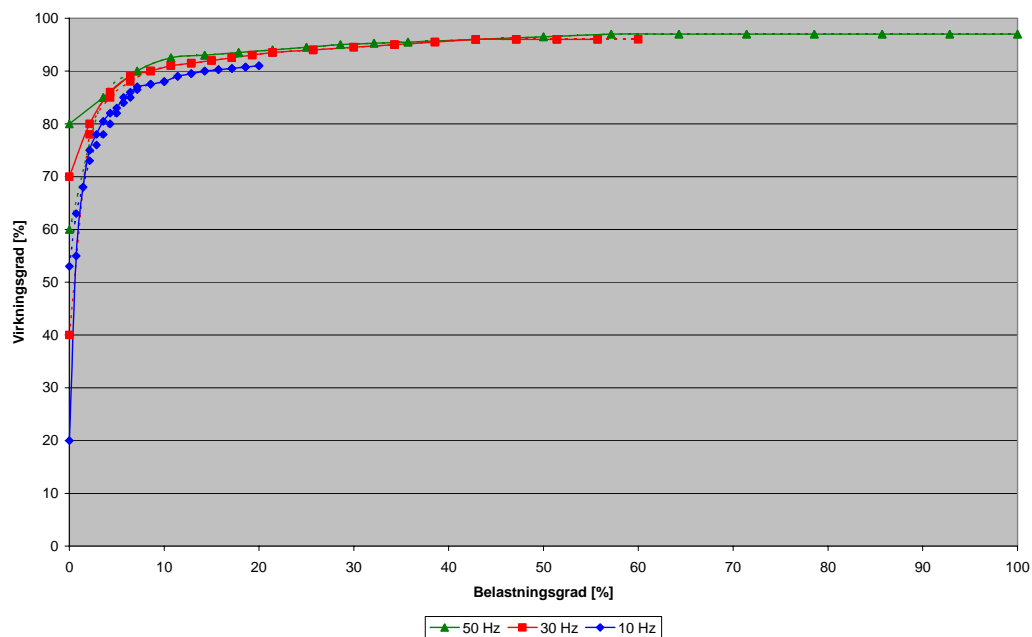
hvor

P_f er den aktuelle afgivne effekt til motoren [kW]

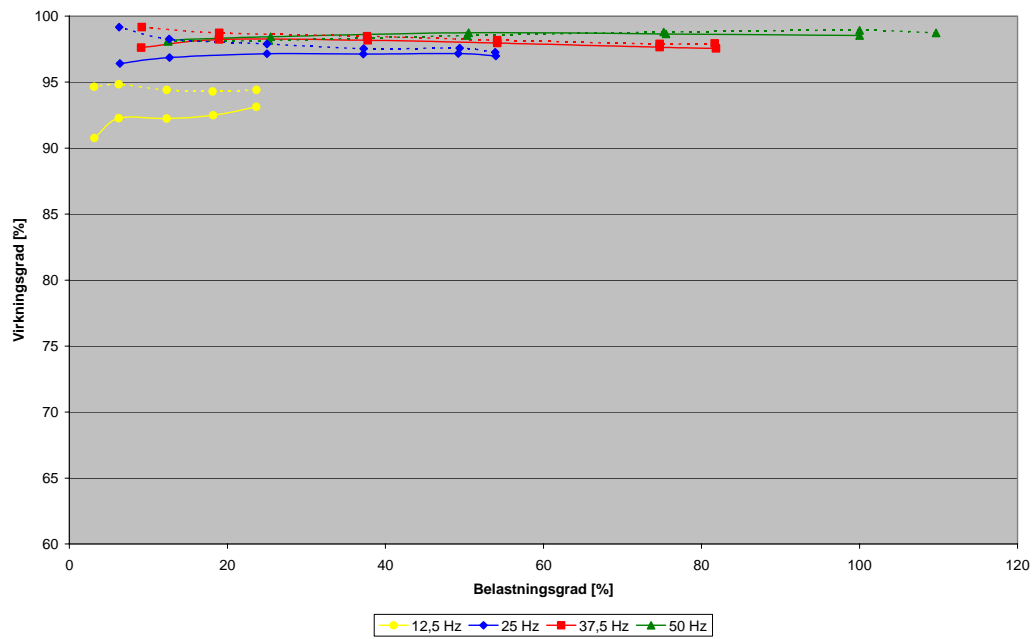
$P_{f,N}$ er den nominelle afgivne effekt til motoren (ved nominelt omløbstal)[kW]



Figur 4.23. Virkningsgrader for 4 kW frekvensomformer som funktion af belastningsgraden ved konstant U/f -forhold og AEO.



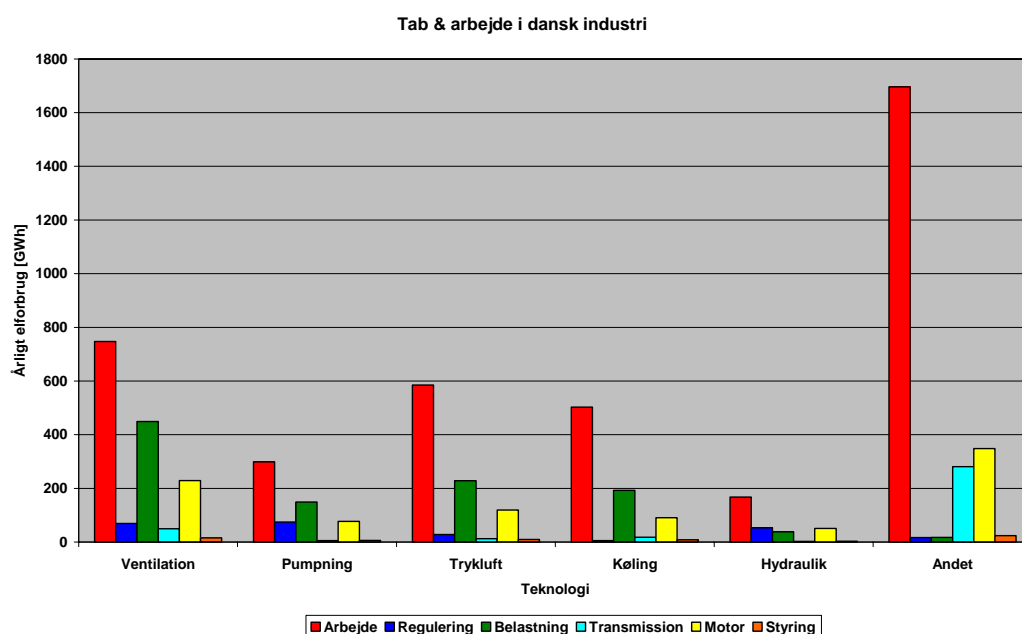
Figur 4.24. Virkningsgrader for 22 kW frekvensomformer som funktion af belastningsgraden ved konstant U/f -forhold og AEO.



Figur 4.25. Virkningsgrader for 55 kW frekvensomformer funktion af belastningsgrad ved konstant U/f -forhold og AEO.

5 Anden motordrift

I forbindelse med udviklingen af Den lille Blå om Systemoptimering er der lavet en kortlægning af elforbruget i de syv mest betydende brancher i industrien samt en fordeling over de typiske belastningskomponenter (vist i figur 5.1). Ydermere blev udfærdiget en analyse af sparepotentialet ved en total systemoptimering og det samlede potentiale på tværs af teknologier og brancher er opgjort til ca. 10 % - eller knapt 700 GWh. Alene teknologien ”Anden motordrift” tegner sig for ca. 150 GWh, og vidensniveauet er her meget lavt.



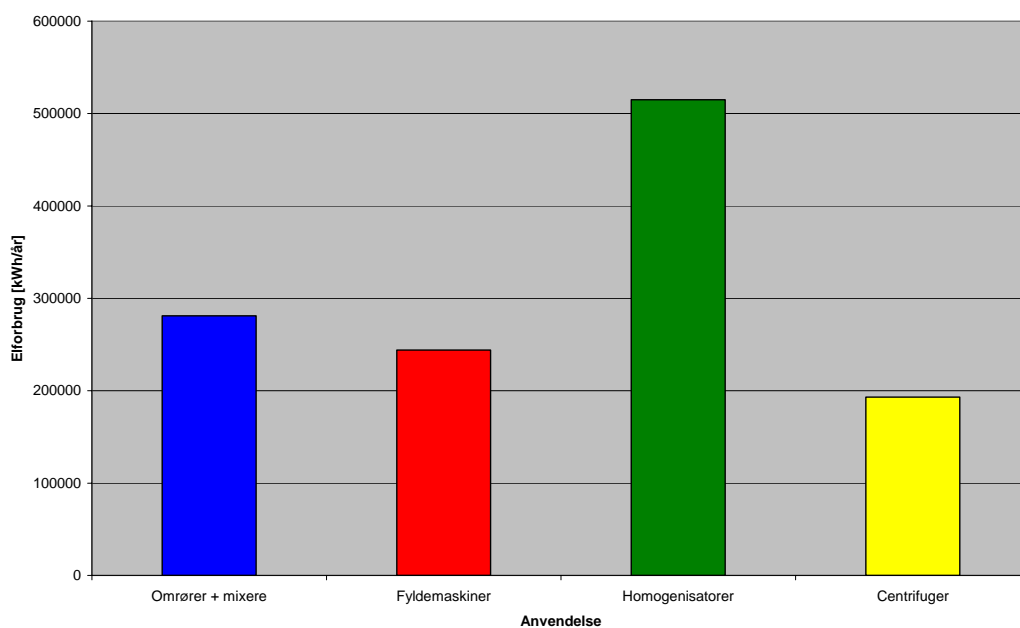
Figur 5.1. Kortlægning af elforbrug til anden motordrift.

Potentialet består primært i øget anvendelse af elektrisk regulering frem for mekanisk regulering samt bedre størrelsestilpasning af belastningskomponent, elmotor og i særdeleshed transmission.

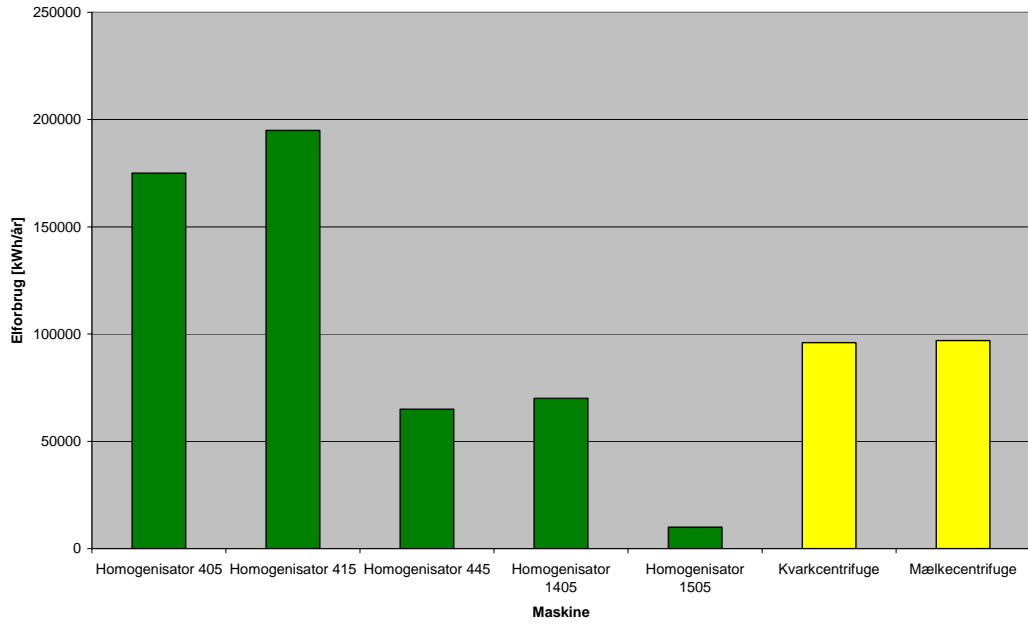
5.1 Kortlægning af elforbrug til anden motordrift på Brabrand Mejeri

På Brabrand Mejeri er der foretaget en kortlægning af elforbruget til anden motordrift. Kortlægningen viser, at elforbruget til anden motordrift udgør ca. 1.230.000 kWh. Det svarer til ca. 10 % af det samlede elforbrug på mejeriet.

I figur 5.2 ses hvorledes elforbruget til anden motordrift er fordelt. Den største del af elforbruget (ca. 42 %) anvendes til homogenisering. Resten af elforbruget er fordelt mellem omrøring/miksning (ca. 23 %), fyldning (ca. 20 %) og centrifugering (ca. 15 %).



Figur 5.2. Kortlægning af elforbrug til anden motordrift.



Figur 5.3. Fordeling af elforbrug til homogenisering og centrifugering.

5.2 Reduktion af elforbrug til anden motordrift på Brabrand Mejeri

På Brabrand Mejeri er installeret et stort antal motorer til anden motordrift. Disse motorer indgår i mejeriets forskellige maskiner til forarbejdning og tapning af mælkeprodukter.

5.2.1 Homogenisatorer

På mejeriet er installeret fire stk. homogenisatorer. Formålet med homogeniseringen er at undgå, at fedtet i mælken klumper sammen og flyder oven på mælken.

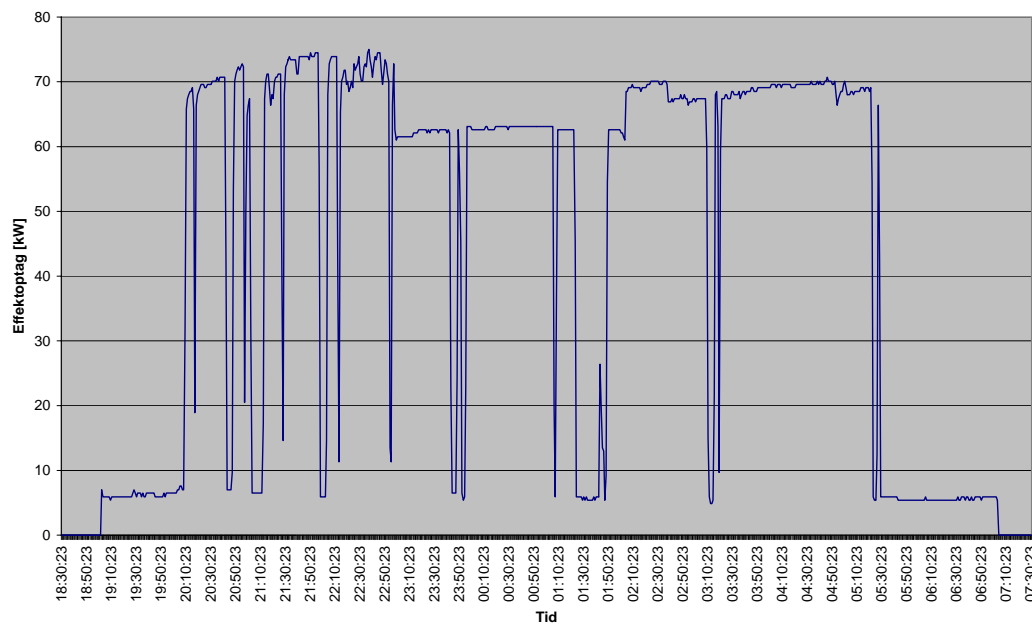
Homogeniseringen sker ved, at mælken under højt tryk (typisk ved 150 – 200 bar) via tre stempler presses gennem snævre dyser og sprækker (knusehoved).

I dette projekt er homogenisator 415 udvalgt til nærmere analyse. Homogenisatoren består i princippet af fem komponenter:

- Homogeneringsdel (knusehoved og stempler)
- Tandhjulsgear (udveksling 5,89)
- Remtransmission (fire stk. smalkileremme)
- Elmotor (132 kW)
- Softstarter

På homogenisatoren er endvidere monteret en hydraulisk enhed, som styrer hvilket tryk der køres med i homogeniseringsdelen (150 – 200 bar)

I figur 5.4 ses effektoptag for homogenisator 415.



Figur 5.4. Effektoptag for homogenisator 415.

Som det ses i figur 5.4 er det maksimale effektoptag 76 kW. Dette er effektoptaget, når trykket i homogeniseringsdelen er 200 bar. Ved lavere tryk i homogeniseringsdelen falder effektoptaget.

Idet mælken tilføres homogeniseringsdelen med et flow på 12 m³/h (konstant) og et tilgangstryk på 5 bar, kan den maksimale hydrauliske effekt beregnes:

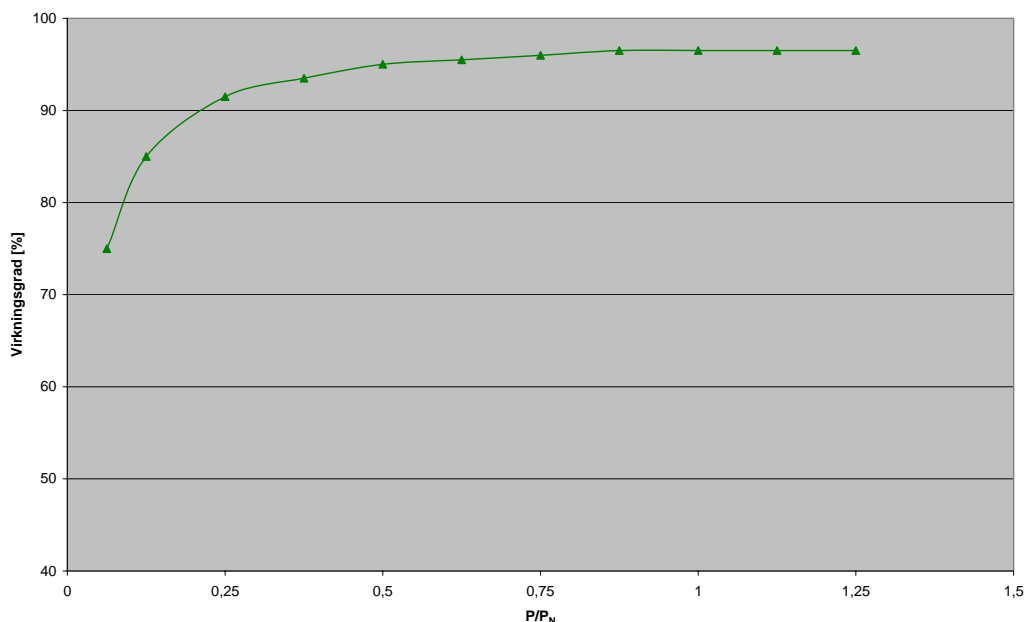
$$P_{\text{hydraulisk}} = ((200 - 5) \cdot 10^5 \text{ Pa}) \cdot (12 \text{ m}^3/\text{h} / 3600 \text{ s/h}) = 65 \text{ kW}$$

Homogenisatorens totalvirkningsgrad er således:

$$\eta_{\text{total}} = 65 \text{ kW} / 76 \text{ kW} = 85,5 \%$$

Dette er en relativ høj virkningsgrad, der indikerer at de enkelte komponenter hver især har høje virkningsgrader.

Motoren har en nominel virkningsgrad på 95,4 %. I figur 5.5 ses virkningsgraden som funktion af belastningsgraden for en 132 kW motor. På figuren ses, at motorens virkningsgrad kun falder ca. 1 %, når belastningsgraden reduceres fra 100 % til 50 %. Da den hydrauliske effekt er beregnet til 65 kW ses, at motorens belastningsgrad må være over 50 %, da motorens aksleeffekt er højere end den hydrauliske effekt pga. tab i homogeniseringsdelen, gearret og remtransmissionen. Virkningsgraden for motoren vurderes således at være ca. 95 % ved den maksimale hydrauliske effekt.



Figur 5.5. Virkningsgrad som funktion af belastningsgraden for 132 kW motor.

Gearets og remtransmissionens virkningsgrad kendes ikke. Ud fra beregningen af homogenisatorens totalvirkningsgrad og vurderingen af motorens virkningsgrad, er det tydeligt at virkningsgraderne for de to komponenter er høje og i samme størrelsesorden som motoren.

I figur 2.18 i kapitel 2.7 "Tandhjulsgear" ses at virkningsgraden for et tandhjulsgear er ca. 96 %.

Virkningsgraden for en remtransmission med smalkileremme ligger typisk over 96 % ved belastningsgrader mellem 50 og 100 %.

Totalvirkningsgraden for homogenisatoren kan skrives således:

$$\eta_{\text{total}} = \eta_{\text{motor}} \cdot \eta_{\text{gear}} \cdot \eta_{\text{remtransmission}} \cdot \eta_{\text{homogeniseringsdel}}$$

Anvendes ovennævnte virkningsgrader for de enkelte komponenter, kan virkningsgraden for homogeniseringsdelen således beregnes til 97,7 %.

Mulighederne for at foretage en systemoptimering er grundet de høje virkningsgrader for de enkelte komponenter begrænsede.

En mulighed er at fjerne gear og remtransmission samt udskifte motoren med en permanentmagnet motor med et omdrejningstal på ca. 200 o/min (stemplerne er monteret på en aksel der roter med et omdrejningstal på ca. 200 o/min).

Den nødvendige akseffekt for den nye motor kan beregnes til:

$$P_N = 65 \text{ kW} / 0,977 = 66,5 \text{ kW}$$

I et motorkatalog fra ABB ses en 75 kW permanent magnet motor med et omdrejningstal på 220 o/min. Denne motor har iflg. kataloget en virkningsgrad på 93,5 %. Permanentmagnet motoren skal drives af en frekvensomformer. Idet en frekvensomformer har en virkningsgrad på ca. 97 % bliver det samlede effektoptag:

$$P_{\text{motor}} = 66,5 \text{ kW} / (0,935 \cdot 0,97) = 73,3 \text{ kW}$$

Dette svarer til en reduktion af det maksimale effektoptag med 3,5 %.

Homogenisator 415 har et årligt elforbrug på 195.000 kWh. Antages det der kan opnås en besparelse på 3,5 % af dette forbrug svarer det til ca. 7.000 kWh/år. Dette svarer skønsmæssigt til en besparelse i kroner på 3.000.

Investeringen vil andrage over 100.000 kr., da tiltaget også vil kræve en ombygning af homogenisatoren for at få plads til motoren.

Ovenstående er et eksempel på et motordrevent maskinsystem, hvor virkningsgraderne for de enkelte komponenter er så høje, at det praktisk talt er umuligt at foretage nogle energibesparende tiltag, der er rentable. Eksempelvis ses det, at selvom motoren kun er ca. 50 % belastet, så er virkningsgraden kun en smule lavere end hvis den var 100 % belastet.

Det skal nævnes, at mejeriet i 2004 fik udskiftet knusehovedet på homogenisator 415 (samt de andre homogenisatorer). Årsagen hertil var, at de havde ændret udformningen af knusehovedet, hvilket skulle give en bedre produktkvalitet samtidig med at det ikke længere var nødvendigt at køre så højt op i tryk. Lokal Energi foretog dengang nogle målinger, som viste en reduktion i optaget effekt fra 96 kW til 76 kW.

En form for systemoptimering er således allerede udført på homogenisatoren.

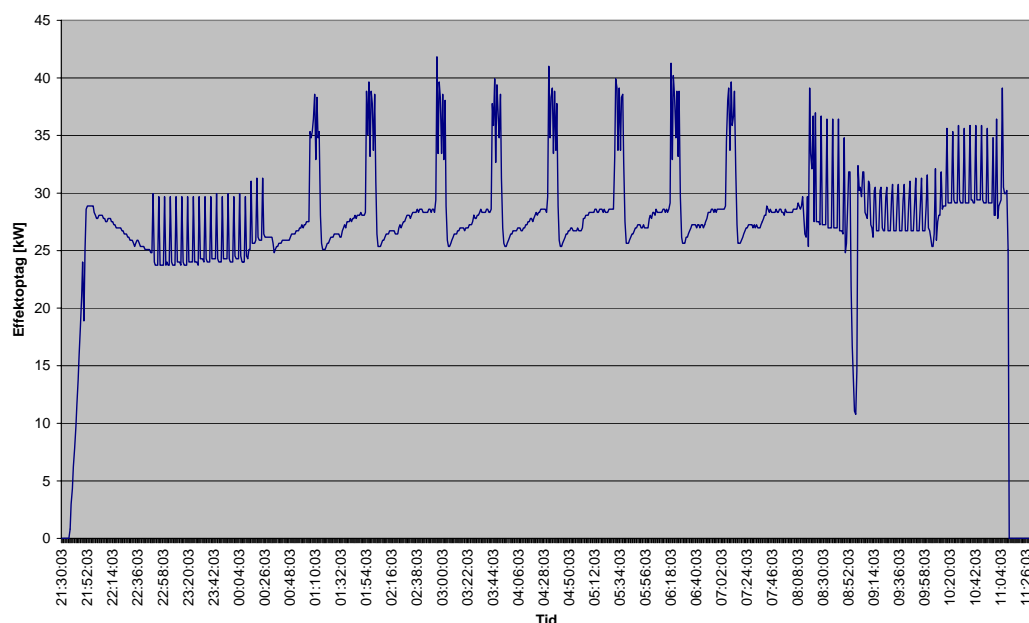
5.2.2 Centrifuger

På mejeriet er installeret en mælkecentrifuge og en kvarkcentrifuge. Formålet med mælkecentrifugen er at skille den rå mælk i fløde og skummetmælk. Formålet med kvarkcentrifugen er at skille syrnet letmælk i valle (anvendes til fremstilling af mælkepulver og kvark (anvendes i desserter).

I dette projekt er kvarkcentrifugen udvalgt til nærmere analyse. Centrifugen består i princippet af fire komponenter:

- Centrifugeringsdel (kugle/tromle)
- Snekkegear (udveksling 87:33)
- Elmotor (37 kW)
- Frekvensomformer

I figur 5.6 ses effektoptag for mejeriets kvarkcentrifuge i perioden 4. marts 2008 kl. 21.35 til 5. marts 2008 kl. 11.10. I denne periode ses effektoptag for motoren i forbindelse med et typisk procesforløb med både forudgående og efterfølgende CIP rengøring.



Figur 5.6. Effektoptag for kvarkcentrifuge.

Som det ses i figur 5.6 er det maksimale effektoptag ca. 42 kW. Dette er effektoptaget, når centrifugen renses for restprodukter umiddelbart efter en centrifugering.

Centrifugeringen tager ca. 40 – 50 min hvorefter den ovennævnte renseproces tager ca. 10 minutter. På figur 5.6 ses således 9 centrifugerings- og renseforløb.

Til venstre og højre for centrifugerings- og renseforløbene ses henholdsvis den forudgående og den efterfølgende CIP rengøring.

Den hydrauliske effekt kendes ikke, men ved et effektoptag på 42 kW vurderes motor og frekvensomformer at være tæt på 100 % belastet.

Virkningsgraden for motoren vurderes at være ca. 92 % ved 100 % belastning.

Virkningsgraden for frekvensomformeren vurderes at være ca. 96 % ved 100 % belastning.

Med et udvekslingsforhold på 2,64 (87:33) har et snækkegear typisk en virkningsgrad på 90 %.

Totalvirkningsgraden for kvarkcentrifugen kan skrives således:

$$\eta_{\text{total}} = \eta_{\text{frekvensomformer}} \cdot \eta_{\text{motor}} \cdot \eta_{\text{gear}} \cdot (\eta_{\text{centrifuge}})$$

Anvendes ovennævnte virkningsgrader for de enkelte komponenter, kan virkningsgraden for kvarkcentrifugen (hele maskinsystemet) beregnes til 79 %. Der vil endvidere være et mindre tab i centrifugen i størrelsesorden 1 – 2 %.

Mulighederne for at foretage en systemoptimering er grundet de høje virkningsgrader for de enkelte komponenter begrænsede.

En mulighed er at udskifte snækkegearet med et tandhjulsgear samt udskifte motoren med en permanentmagnet motor.

Den tilførte akseffekt til centrifugen kan skønmæssigt beregnes til:

$$P_N = 37 \text{ kW} \cdot 0,9 = 33,3 \text{ kW}$$

Det er forudsat, at motoren afgiver nominel effekt (37 kW) ved renseprocessen og at snækkegearets virkningsgrad er 90 %.

Hvis snækkegearet udskiftes til et tandhjulsgear med en virkningsgrad på 96 % vil motorens afgivne effekt blive:

$$P_2 = 33,3 \text{ kW} / 0,96 = 34,7 \text{ kW}.$$

Hvis motoren udskiftes til en 40 kW permanentmagnet motor med en virkningsgrad på 95,5 % (og 96 % for frekvensomformeren) vil motorens optagne effekt blive:

$$P_{\text{motor}} = 34,7 \text{ kW} / (0,955 \cdot 0,96) = 37,8 \text{ kW}$$

Motorens maksimale effektoptag kan således reduceres fra 42 kW til 37,8 kW. Dette svarer til en reduktion på 10 %. Det vurderes, at denne procentvise reduktion også opnås ved lavere belastninger.

Kvarkcentrifugens årlige elforbrug er 96.000 kWh. Antages det der kan opnås en besparelse på 10 % af dette forbrug svarer det til 9.600 kWh/år. Dette svarer skønmæssigt til en besparelse i kroner på ca. 4.100.

Investeringen vil andrage 100.000 - 150.000 kr., da tiltaget også vil kræve en ombygning af kvarkcentrifugen for at få plads til gearet.

Ovenstående er igen et eksempel på et motordrevent maskinsystem, hvor virkningsgraderne for de enkelte komponenter er så høje, at det praktisk talt er umuligt at foretage nogle energibesparende tiltag, der er rentable.

5.2.3 Fyldemaskiner

I tabel 5.1 ses nominelle akseffekter og effektoptag for motorerne i transportbåndene i Krone fyldemaskinen.

	Nominel akseffekt P_N [kW]	Optaget effekt P_1 [kW]
Conveyor motor B21-02A	1,5	0,35
Conveyor motor B21-06A	1,5	0,35
Conveyor motor B21-11A	1,5	0,35
Vertical conveyor B22-01A	1,1	0,35
Conveyor motor B22-02A	1,1	0,35
Conveyor motor B22-04A	1,1	0,35
Conveyor motor B23-09A	1,5	0,35
Conveyor motor B23-11A	1,5	0,35
Conveyor motor B23-13A	1,5	0,35
Conveyor motor B23-14A	1,5	0,26
Conveyor motor B23-16A	1,5	0,29
Conveyor motor B24-02B	1,1	0,19
Conveyor motor B25-01A	1,1	0,26
Conveyor motor B25-06A	1,5	0,35
Conveyor motor B25-08A	1,5	0,37
Conveyor motor B25-09A	1,5	0,59
Conveyor motor B25-13A	1,5	0,55
Conveyor motor B25-15A	1,5	0,38
Conveyor motor B25-18A	1,1	0,32

Tabel 5.1. Nominelle akseffekter og effektoptag for motorerne i transportbåndene i Krone fyldemaskinen.

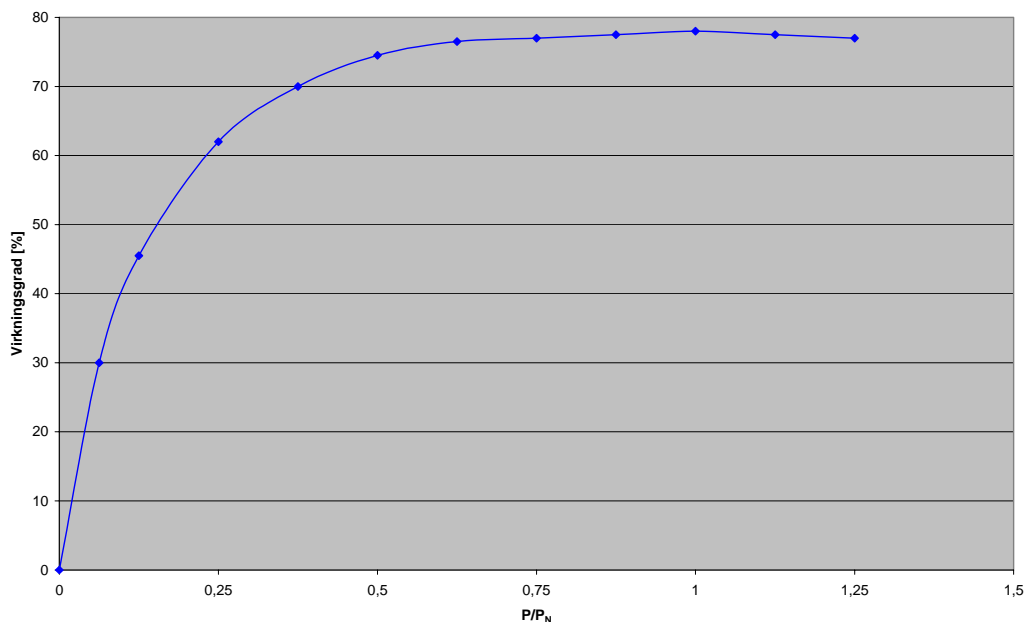
Som det ses i tabel 5.1 er motorerne i transportbåndene meget lavt belastede.

Transportbåndene består i princippet af fire komponenter:

- Bånd (inkl. ruller)
- Snekkegear (typisk udveksling 1.410/43 og 1.410/12)
- Elmotor (1,1 og 1,5 kW EFF2 motorer)
- Frekvensomformer

Ud fra målingerne af effektoptagene for motorerne, vurderes motorerne at være 15 – 20 % belastede. Ved hjælp af figur 6.7, som viser virkningsgrader som funktion af belastningsgraden for en 1,5 kW motor, vurderes motorenes virkningsgrader skønsmæssigt at være ca. 50 % (både 1,1 og 1,5 kW motorerne).

Frekvensomformerne vurderes, vha. figur 3.3, at have virkningsgrader på ca. 90 %. Snekkegearenes virkningsgrader vurderes at være ca. 85 %.



Figur 5.7. Virkningsgrad som funktion af belastningsgraden for 1,5 kW motor.

Transportbåndenes totalvirkningsgrader er således:

$$\eta_{\text{total}} = \eta_{\text{frekvensomformer}} \cdot \eta_{\text{motor}} \cdot \eta_{\text{gear}} \Rightarrow$$

$$\eta_{\text{total}} = 0,9 \cdot 0,5 \cdot 0,85 = 0,38 \sim 38 \%$$

Hvis motorerne udskiftes til sparemotorer (EFF1 motorer) som vil have en virkningsgrad der er 5 % højere end den nuværende og gearene udskiftes til tandhjulsgear med virkningsgrader på 96 %, bliver totalvirkningsgraden:

$$\eta_{\text{total}} = 0,9 \cdot 0,55 \cdot 0,96 = 0,48 \sim 48 \%$$

Der kan således opnås en forbedring af totalvirkningsgraden på 10 %.

Elforbrug til transportbåndene i fyldemaskinen udgør 32.500 kWh/år. Antages det der kan opnås en besparelse på 10 % af dette forbrug svarer det til ca. 3.300 kWh/år. Dette svarer skønsmæssigt til en besparelse i kroner på ca. 1.400.

Investeringen i 19 stk. sparemotorer og 19 stk. tandhjulsgeare vil skønsmæssigt andrage 100.000 kr. En udskiftning til de ovennævnte komponenter er således ikke rentabel.

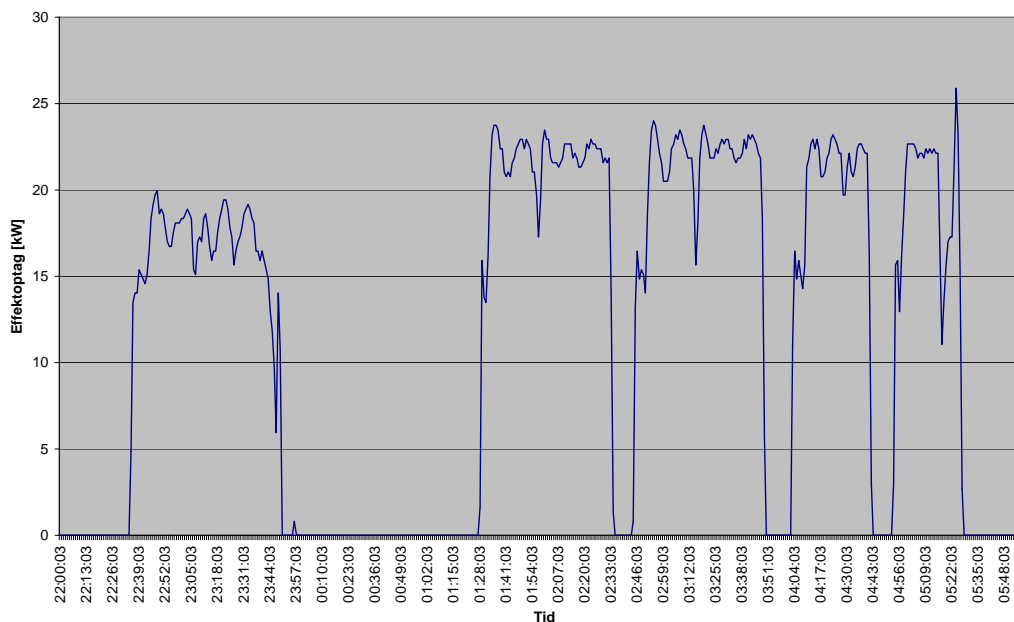
5.2.4 Omrørere

På mejeriet er installeret en sukkermixer. Formålet med sukkermixeren er at blande sukker, frugt og syrnede mælk.

Mixeren består i princippet af fire komponenter:

- Mixerdel
- Remtransmission
- Elmotor (30 kW)
- Frekvensomformer

I figur 5.8 ses effektoptag for sukkermixeren i perioden 4. marts 2008 kl. 21.35 til 5. marts 2008 kl. 11.10.



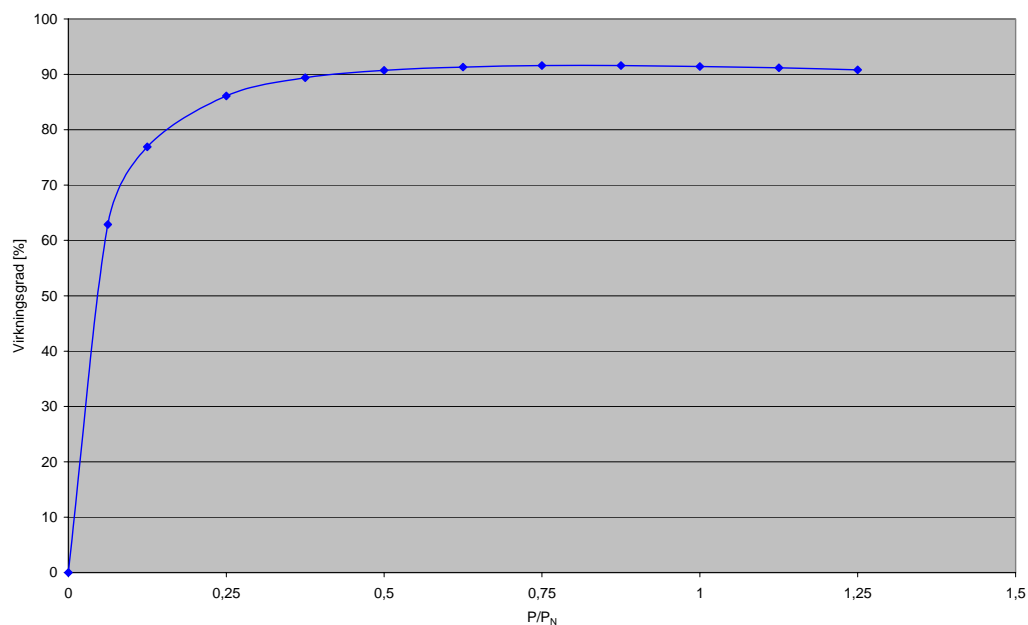
Figur 5.8. Effektoptag for sukkermixer.

Som det ses i figur 5.8 er det maksimale effektoptag ca. 26 kW.

Den hydrauliske effekt kendes ikke, men ved et effektoptag på 26 kW vurderes motor og frekvensomformer at være 75 - 80 % belastet.

Virkningsgraden for motoren vurderes, som det ses i figur 6.9, at være ca. 91 % ved 80 % belastning.

Virkningsgraden for frekvensomformereren vurderes at være ca. 96 % ved 80 % belastning..



Figur 5.9. Virkningsgrad som funktion af belastningsgraden for 30 kW motor.

Hvis motoren udskiftes til en 25 kW permanentmagnet motor med en virkningsgrad på 94 % (og 96 % for frekvensomformereren) vil motorens optagne effekt blive:

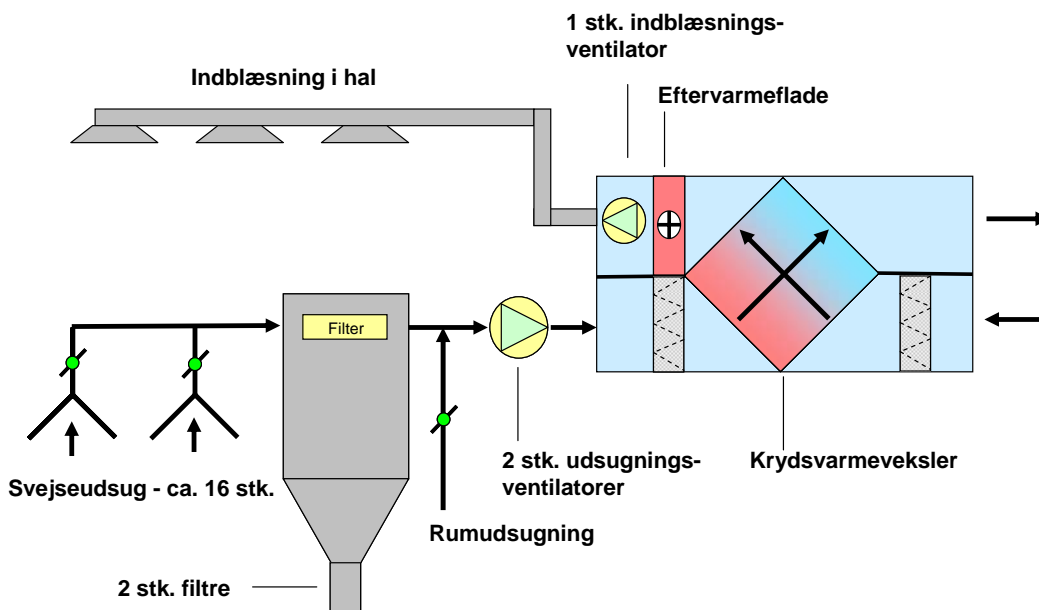
$$P_{\text{motor}} = 22,7 \text{ kW} / (0,94 \cdot 0,96) = 25,2 \text{ kW}$$

6 Systemoptimering i praksis - A-Vent

På A-Vent er installeret et behovsstyret mekanisk ventilations med indblæsning, udsugning, varmegenvinding og eftervarme. Anlæggets formål er udsugning fra 16 stk. svejsesteder og almen udsugning samt indblæsning af friskluft i produktionshaller.

6.1 Anlægsopbygning

Indblæsningen af friskluft sker via indblæsningsarmaturer placeret ved gulvet (fortrængningsventilation). Udsugningen sker via punktudsug placeret forskellige steder i hallen. Se figur 6.4. Endvidere foretages rumudsugning (almen udsugning) i produktionshallerne. Som det ses i figur 6.1, består anlægget i hovedtræk af 1 stk. indblæsningsventilator, 2 stk. JK-50 MT R udsugningsventilatorer, 2 stk. cyklonfiltre, en krydsvarmeveksler og en eftervarmeblade. Indblæsningsventilatoren, krydsvarmeveksleren og eftervarmebladen er placeret i et aggregat, mens udsugningsventilatorerne er placeret eksternt (se figur 6.2 og 6.3).



Figur 6.1. Principskitse af ventilationsanlægget på A-Vent.



Figur 6.2. Aggregat med indblæsningsventilator, krydsvarmeveksler og eftervarmevlade.



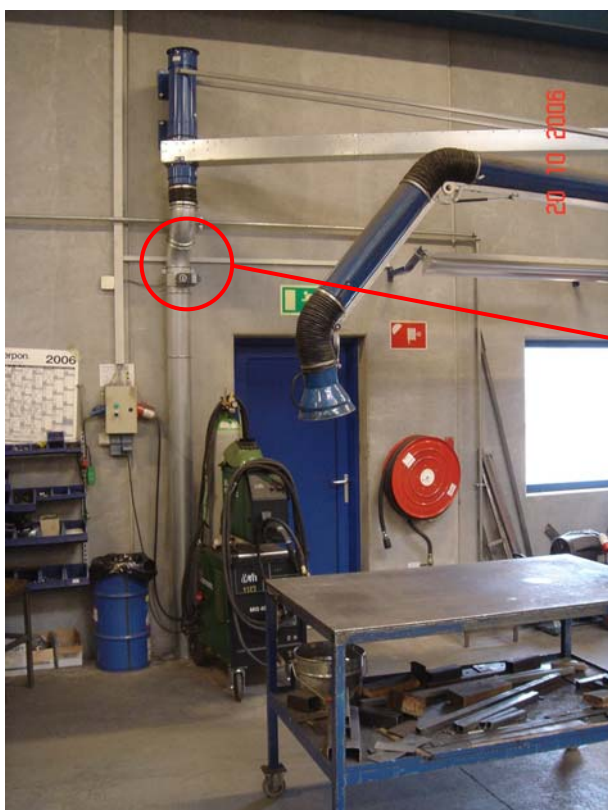
Figur 6.3. På billedet ses de to udsugningsventilatorer (røde cirkler) og de to cyklonfiltre.

Indblæsningsventilatoren er forsynet med en 18,5 kW motor, mens udsugningsventilatorerne er forsynet med to stk. 22 kW motorer. Ventilatorerne drives af motorene via 3 stk. kileremme. Alle tre motorer er forsynet med frekvensomformere, som sørger for at varierer omdrejningstallene på motorene og dermed ventilatorernes volumenstrømme efter belastningen i svejsehallen, dvs. efter hvor mange punktudsug der er i brug.

6.2 Styring af ventilationsanlægget

Ventilationsanlægget på A-vent er, som tidligere beskrevet, behovsstyret. Ved hver punktudsug er der i kanalen monteret et afspærringsspjæld (se figur 6.5), som åbnes og lukkes automatisk, dvs. spjældene åbnes når der svejses. Jo flere spjæld der er åbne jo hurtigere er omdrejningstallene på motorerne og dermed den samlede udsugede volumenstrøm.

Omdrejningstallene på motorerne ændres af de førnævnte frekvensomformere. Disse frekvensomformere modtager signaler fra en tryktransducer placeret i det ene cyklonfilter. Frekvensomformerne sørger således for at regulere volumenstrømmene, således at der opretholdes et konstant tryk ved filteret. Sætpunktet for trykket er 1.900 Pa.



Figur 6.4. Punktudsug i svejsehal



Figur 6.5. Afspærringsspjæld ved punktudsug

Når alle spjældene i punktudsugene er åbne, indstilles spjældet i rumudsugnings kanalen automatisk til 15 % åben, det betyder at der udsuges $2 \cdot 5.000 \text{ m}^3/\text{h}$ fra rummene. Dette reguleres ved en justerbar modstand.

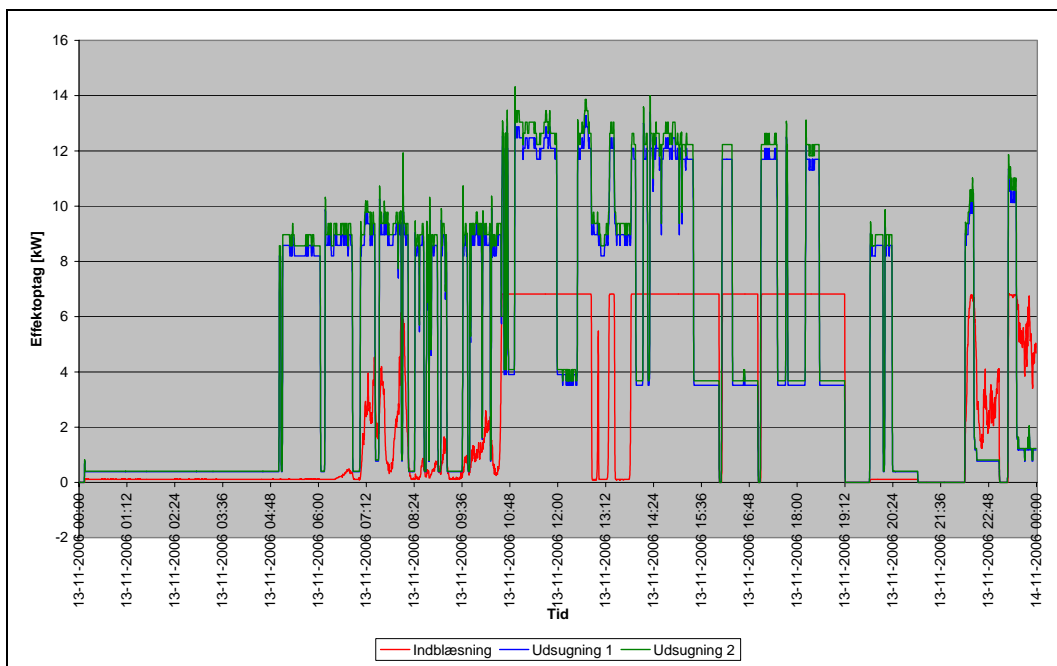
Når spjældene i punktudsugene lukker i, lukker spjældet i rumudsugnings kanalen mere op. Det vil sige, at når der ikke svejses, foretages der udelukkende rumudsugning. I dette tilfælde sker reguleringen af anlægget ved at frekvensen til udsugningsventilatorernes motorer ændres fra 38 Hz (maks.) til 10 Hz (min), samtidig med at spjældet i rumudsugnings kanalen automatisk indstilles til ca. 80 % åben.

Indblæsningsventilatoren styres af en trykdifferenstransmitter, der søger at holde en trykdifferens mellem det statiske tryk i hallerne og det statiske tryk ude, lig med nul.

6.3 Målinger på ventilationsanlægget

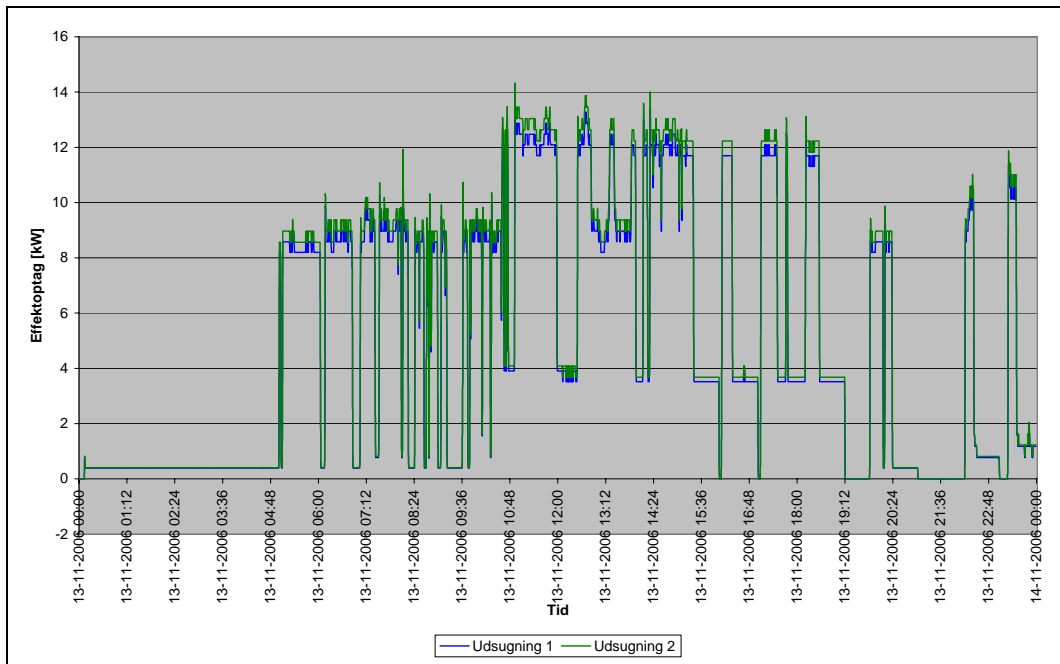
I perioden 8. til 22. november 2006 blev der foretaget belastningsregistreringer (målinger af effektoptag) på indblæsningsventilatoren og de to udsugningsventilatorer. Tidsopløsningen var 30 sekunder.

I figur 6.6 ses effektoptag for de tre ventilatorer den 13. november 2006. På denne dato var belastningen den højeste i hele måleperioden.



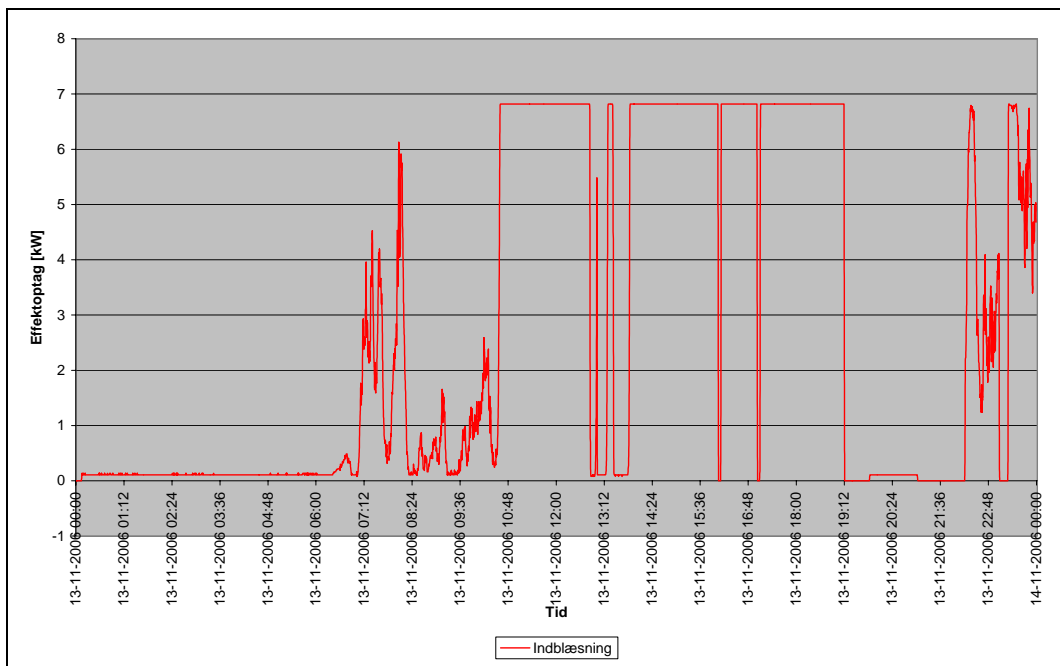
Figur 6.6. Effektoptag for indblæsnings- og udsugningsventilatorer

I figur 6.7 ses effektoptag for de to udsugningsventilatorer den 13. november 2006. Som det ses på figuren er driftsmønstrene for de to ventilatorer helt ens. Udsugningsventilator 2 er dog ca. 5 % mere belastet end udsugningsventilator 1.



Figur 6.7. Effektoptag for udsugningsventilatorer

I figur 6.8 ses effektoptag for indblæsningsventilatoren den 13. november 2006. Som det ses på figuren er der en tydelig sammenhæng mellem belastningen på indblæsningsventilatoren og de to udsugningsventilatorer (se figur 6.7). Når der er stor belastning på punktudsugene (mange svejsere i arbejde) stiger belastningen på indblæsningsventilatoren for at udjævne undertrykket i hallen som følge af større udsuget volumenstrøm.



Figur 6.8. Effektoptag for indblæsningsventilator

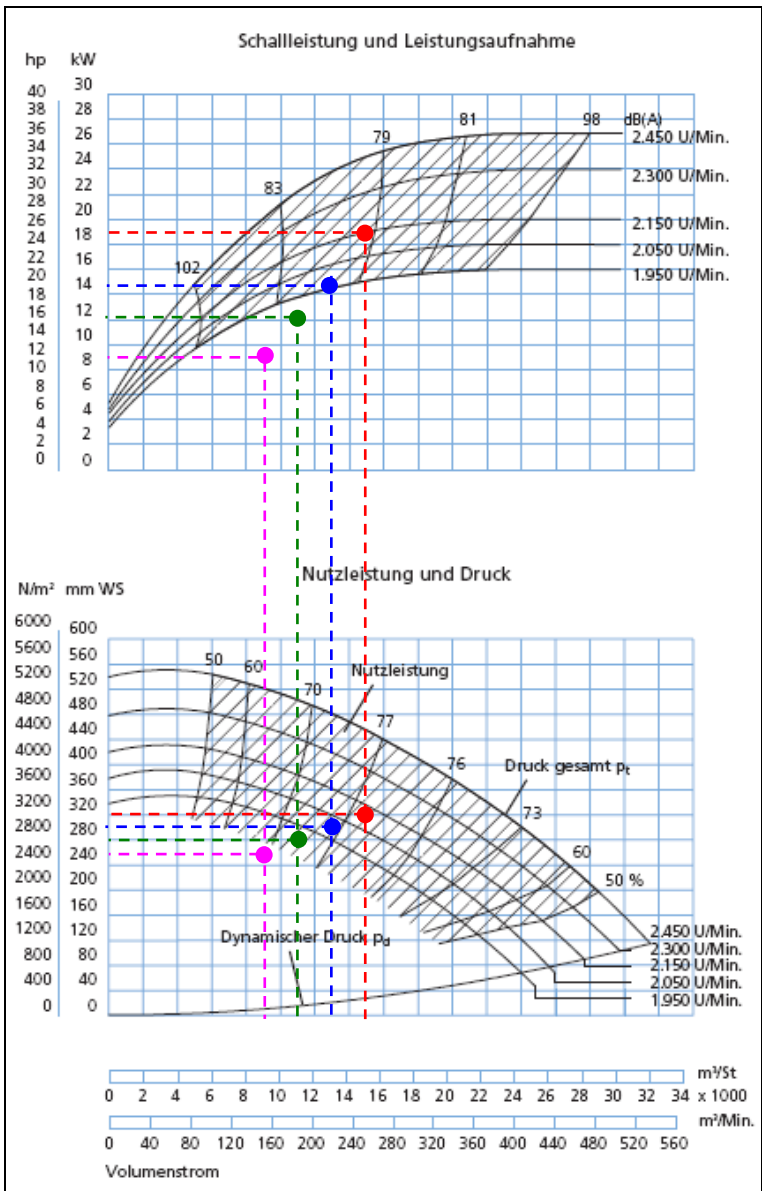
I figur 6.9 ses en ventilatorkurve for de to udsugningsventilatorer. I ventilatorkurven er indtegnet de dimensionerende driftspunkter (markeret med rød) for de to udsugningsventilatorer (15.000 m³/h og 3.200 Pa).

I de dimensionerende driftspunkter er ventilatorens virkningsgrad ca. 77 % og akseffekterne for udsugningsventilatorerne er 19 kW.

Virkningsgraden for en 22 kW motor og en 22 kW frekvensomformer er ca. 88 %.

Remtransmissionens virkningsgrad er skønmæssigt 95 %.

De optagne effekter for udsugningsventilatorerne vil derfor være 22,7 kW ved dimensionerende driftstilstand.



Figur 6.9. Ventilatorcurve for ventilator type JK – 50 MT

Tabel 6.1 ses spotmålinger på udsugningsventilatorerne i to driftstilstande. Den ene driftstilstand med alle svejseudsug i drift og den anden med halvdelen af svejseudsugene i drift. I figur 6.9 er disse driftstilstande indtegnet (markeret med blå og grøn).

Belastning	Volumenstrøm [m ³ /h]	Total trykstigning [Pa]	Effektforbrug [kW]
Alle svejseudsugene i drift	13.000	3.000	16,0
Halvdelen af svejseudsugene i drift	11.500	2.800	13,7

Tabel 6.1. Målinger på udsugningsventilatorer.

Som det ses på figur 6.7, var de maksimale belastninger for udsugningsventilator 1 og 2 ca. 14 kW. Dette svarer til at driftstilstanden med halvdelen af svejseudsugene i drift, er den driftstilstand hvor udsugningsventilatorerne er maksimalt belastet. Det vil sige, at de to udsugningsventilatorers dimensionerende driftspunkt kunne have været 11.500 m³/h og 2.800 Pa.

Som det ses på figur 6.9 har ventilatorerne i dette driftspunkt en virkningsgrad på ca. 74 %.

Når alle svejseudsugene er ude af drift vil ventilatorernes driftspunkter, som vist i figur 6.9 (markeret med pink), være 9.000 m³/h og 2.600 Pa. Som det ses på figur 6.9 har ventilatorerne i dette driftspunkt en virkningsgrad på ca. 70 %.

For ventilatorer med bagudkrummede skovle er virkningsgrader på henholdsvis 74 og 70 % ikke specielt høje. For at optimere udsugningssystemet vil der derfor i afsnit 6.4 blive fokuseret på en forbedring af ventilatorvirkningsgraden.

Endvidere vil der blive fokuseret på drevet, som på det eksisterende system består af remtransmissioner med tre stk. kileremme og standardmotorer.

6.4 Optimering af udsugningssystemet

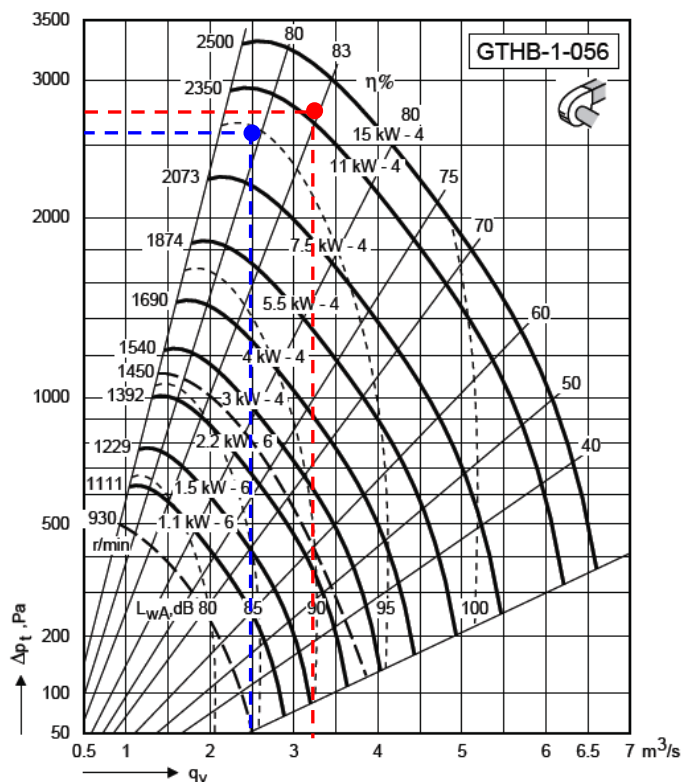
6.4.1 Ventilatorer

For at optimere udsugningssystemet skal der findes ventilatorer med højere virkningsgrader end de eksisterende.

I figur 6.10 ses en ventilatorkurve for en ventilator med bagudkrummede skovle. Ventilatoren har en maksimal virkningsgrad på 83 %. Denne virkningsgrad findes i driftspunkt 11.500 m³/h og 2.800 Pa, som kunne have været udsugningsventilatorernes dimensionerende driftspunkter.

I driftspunktet 9.000 m³/h og 2.600 Pa (når alle svejseudsugene er ude af drift) har ventilatoren en virkningsgrad på ca. 80 %.

I realiteten burde ventilatorerne, jf. driftsmønsteret, have den højeste virkningsgrad i driftspunktet 9.000 m³/h og 2.600 Pa, da der er flest driftstimer i dette driftspunkt. Det har dog ikke været muligt at finde en ventilator der kan opfylde dette ønske/krav.



Figur 6.10. Ventilatorcurve for direkte drevet ventilator med bagudkrummede skovle.

6.4.2 Motor og transmission

Som tidligere nævnt, drives de eksisterende ventilatorer af motorerne via en remtransmission bestående af tre stk. kileremme. Virkningsgraden for remtransmissionen vurderes at være 93 - 95 %.

Da ventilatoren i figur 6.10 er direkte drevet, kan tabet i remtransmissionen elimineres.

Motorerne i udsugningssystemet er 22 kW standardmotorer. Virkningsgraderne for disse motorer er 90 %.

Ovenstående ventilator kan forsynes med en 15 kW sparemotor med en virkningsgrad på 91,3 %.

En anden mulighed kan være at vælge en 15 kW permanentmagnet motor med en virkningsgrad på 95,5 %.

6.4.3 Anbefaling

Det anbefales, at der vælges en løsning med mere effektive ventilatorer og permanentmagnet motorer. Dette vil resultere i at effektoptagene i de to driftspunkter (figur 6.10) vil blive henholdsvis 11,5 kW og 8,7 kW.

Dette skal ses i forhold til de nuværende 14 kW og 10 kW.

$$\text{Elbesparelse} = 2 \cdot (((14 \text{ kW} - 11,5 \text{ kW}) \cdot 340 \text{ h/år}) + ((10 \text{ kW} - 8,7 \text{ kW}) \cdot 2.500 \text{ h/år})) = 8.200 \text{ kWh/år.}$$

Dette svarer til en reduktion på 14 % af udsugningssystemets nuværende elforbrug.

Elbesparelsen i kroner udgør ca. 5.000 kr.

Investeringen vil udgøre 60 – 70.000 kr.

7 Små motorer

7.1 Markedsundersøgelse

Nedenstående tabel viser, hvorledes motorleverandører oplever indkøb af elmotorer, når markedet er ”småmotorer” med installeret effekt under 1.100 Watt.

Præcis i dette effektområde er der meget store forskelle imellem motorernes energimæssige ydeevne – alt efter valgt motortype, kvalitet af produktet samt korrekt sizing af motoren. Desværre sælges størstedelen af motorerne som indmad i en procesmaskine (tappemaskine, pakkemaskine m.v.) og der er derfor ikke særligt fokus på dette område.

Såfremt man som indkøber beder leverandør argumentere for motorvalg i form af:

- Motortyper (DC, AC +/- permanente magnet osv.)
- Motorfabrikater (prisleje i markedet)
- Motorstørrelser (anslået relativ overkapacitet)

Er man nået et stykke af vejen, i og med man sikrer at motorvalgene bliver ofret en anelse mere opmærksomhed end tilfældet er i dag. Leverandøren antager – hvis andet ikke er nævnt – at de alt dominerende faktorer er driftssikkerhed og pris, hvilket tabellen jo også klart viser.

	Lev 1	Lev 2	Lev 3	Lev 4	Lev 5	Lev 6	Lev 7	OEM
Hvilke typer sælges mest i størrelsen < 1,1 kW	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
Hvor stor en rolle spiller prisen	Stor	75 % + lager	75 % + kval	Stor	70 %	Kunde + kval	Lille + kval	Lille + kval
Hvilket grundlag dimensioneres på	TF + margin	50 % TF	Dialog kunden	kunden	kunde	kunde	Kunde	Trad.
Hvor ofte bliver der anvendt styringer	85 %	25 %	< 10 %	?	10 %	70 %	< 15 %	99 %
Hvilken form for regulering bliver brugt – mek./elektrisk	FO	FO & SS	FO	FO	FO	FO	FO	Alt
Har I indflydelse på valget	Nej	Web	Ja	Ja	Ja	Måske	Nej	Altid
Øvrige kommentarer	PM fremtid	Mere Eff.	—	Mere styring	—	—	—	Hel- heden

Tabel 7.1. Markedsundersøgelse

Tabellen viser resultatet af en telefonisk udført interview-runde, og der er nogle klare interessante observationer fra disse små maskiner:

- AC-motoren / asynkron-motoren / er den dominerende, hvilket i sig selv er interessant i og med der i disse motorstørrelser findes flere som er den klart overlegen hvad angår effektivitet.
- Kunden spiller ifølge leverandøren en stor rolle ved dimensioneringen. Gad vide om kunderne er klar over, at det faktisk er dem selv som må gøre deres indflydelse gældende?
- Der bliver i høj grad anvendt tommelfingerregler – TF
- Prisen er stadigvæk en meget dominerende faktor, hvilket jo også er grunden til at asynkronmotoren kan holde markedsandelen.
- For fremtiden vurderes PM – Permanente Magneter – at vinde indpas fordi energieffektivitet vil betyde mere og mere. En PM-motor er i sin natur udstyret med en elektrisk styring, hvilket også er helt i tråd med forventningen til fremtiden

Andre kilder

Andre hjælpeværktøjer - links - kilder

Håndbøger

- /1/ Den lille Blå om systemoptimering. ELFOR. Jørn Borup Jensen (ELFOR), Henrik Lykke Lilleholt (Louis Poulsen Industri & Automation), Claus M. Hvenegaard (Teknologisk Institut) og Hans Andersen (Teknologisk Institut). 2005
ISBN 87-88245-53-5
- /2/ Den store Blå om systemoptimering. ELFOR. Jørn Borup Jensen (ELFOR), Henrik Lykke Lilleholt (Louis Poulsen Industri & Automation), Claus M. Hvenegaard (Teknologisk Institut) og Hans Andersen (Teknologisk Institut). 2005
- /3/ Håndbog i Energirådgivning – Elmotorer, motorstyringer og transmissioner, DEFU, 2000, Hans Henrik Hansen (DEFU), Lars Bjerre (DEFU) og Jens Erik Pedersen (TRE-FOR)

Rapporter, kataloger, vejledninger og standarder

- /4/ Energy Optimal Control of Induction Motor Drives, Aalborg Universitet – Institute of Energy Technology, 2000, Flemming Abrahamsen,
ISBN: 87-89179-26-9
- /5/ Energioptimering ved elmotordrift, Teknisk rapport 322, DEFU, 1991, Anders Rebsdorf (DEFU), Hans Andersen (DEFU), Jørn Borup Jensen (DEFU), Mogen Johansson (Dansk Energi Analyse a/s), Torben Laubst (DIA-E) og Henrik Ørskov Pedersen (DIA-E).
- /6/ Energioptimering ved elmotordrift. Drevanalyse i praksis, Teknisk rapport 380, DEFU, 1997, Hans Andersen (DEFU) og Hans Henrik Hansen (DEFU).
- /7/ Afprøvning af trefasede softstartere og enfasede energispareenheder, Rapport 94.5A, Aalborg Universitet – Institut for Energiteknik, 1995
Frede Blåbjerg, John K. Pedersen og Hans-Henrik Hansen
- /8/ Opslagsværk over remtransmissioners karakteristika og energieffektivitet, TR 430, DEFU 1999. Lars Bjerre (DEFU) og Thomas Perch Nielsen (Teknologisk Institut)

Hjemmesider

ELFORSK

www.elforsk.dk

Dansk Energi

www.danskenergi.dk

Teknologisk Institut

www.teknologisk.dk

Lokal Energi

www.lokalenergi.dk

Danfoss

www.danfoss.dk

Lemvigh-Müller

www.lemu.dk

A-Vent

www.a-vent.dk

Arla

www.arla.dk