



**TEKNOLOGISK
INSTITUT**

ANVENDELSE AF ENERGIEFFEKTIVE LEJELØSNINGER I INDUSTRIEN



September 2016

**Anders Thormann
Britta Johansen
Eskild Herskind
Søren Draborg
Sandie Brændgaard Nielsen
Nanna Ravnsborg
Jørn B. Jensen**

CeramicSpeed A/S

Teknologisk Institut

**Aura Rådgivning
Dansk Energi**

Indholdsfortegnelse

	Side
1 Resumé	4
2 Sammenfatning	4
3 Baggrund	6
3.1 Virksomheden	6
4 Målgruppen	6
5 Teoretiske modeller for lejetab	7
5.1 SKF model	7
6 Forundersøgelse	9
6.1 Overordnet kortlægning af elforbruget	9
6.2 Detaljeret kortlægning af elforbruget i industrien	10
6.2.1 Forbrug og tab inddelt efter systemstørrelser	12
6.2.2 Forbrug og tab inddelt efter teknologier	13
6.2.3 Samlet overblik over tab	15
6.2.4 Virkningsgrader - inddelt efter teknologier og systemstørrelser	15
6.2.5 Anden motor drift	16
6.3 Delkonklusion	18
7 Kortlægning af potentialet for keramiske lejer	19
7.1 Ren energibesparelse	19
7.1.1 Case 1: Motorer	20
7.1.2 Case 2: Motor med remtræk til ventilator	21
7.2 Frekvensomformere og strømskader	22
7.3 Længere levetid	23
7.4 Økonomien som følge af længere levetid	24
7.4.1 Case: Sav på et savværk	25
7.5 Delkonklusion	25
8 Udvælgelse af maskin- og lejetyper	27
8.1 Potentiale pga. energi	27
8.2 Potentiale pga. totaløkonomi	27
8.3 Projektafgrænsning	28
8.3.1 Ventilation	28
8.3.2 Pumper	28

8.3.3 Trykluft/køling	28
8.3.4 Transmission	28
8.3.5 Elmotorer	29
8.3.6 Simulering af lejetab	29
9 Tests af friktion i keramiske lejer	30
9.1 Testmetoder	30
9.1.1 Momentmålinger	30
9.1.2 Forbrugstesten	33
9.1.3 Nedløbsmålinger	34
9.1.4 Nedløbstest på gammel motor	39
9.1.5 Ventilator simulering	41
9.2 Konklusion på testresultater	41
9.2.1 6205-Teststand (Afsnit 9.1.1.1)	41
9.2.2 Momentmålinger på levetidstester (Afsnit 9.1.1.2)	42
9.2.3 Forbrugstest (Afsnit 9.1.2)	42
9.2.4 Nedløbsmålinger (Afsnit 9.1.3)	42
9.2.5 Nedløbsmåling på gammel motor (Afsnit 9.1.4)	42
9.2.6 Ventilator simuleringen (Afsnit 9.1.5)	42
10 Levetidsmålinger	43
10.1 Teorien	43
10.2 Test	43
Referencer	45
Bilag 1	47
Bilag 2	49
Bilag 3	54

1 Resumé

På baggrund af at ca. 60% af den elektriske energi i erhvervsvirksomheder og private husholdninger omsættes via elmotorer er energitabet i lejer alene i elmotorer beregnet til 263TJ i Danmark om året. For elektriske motorer er der i projektet dokumenteret en reduktion i lejetabet på 48% ved at udskifte premium standard stål lejer med keramiske lejer. Det teoretiske besparelspotentiale er herved 126TJ. Dette besparelspotentiale kan være større da kvaliteten blandt standardlejer varierer og det er vist at tabet i udvalgte discount lejer lå væsentligt over tabet i premium standard lejer. Her sås 58% besparelse, men med en test metode der har vist sig at underestimerer forskellen.

Ser man på hvad elmotorerne driver, er ventilation det område hvor der omsættes mest elektrisk energi. Med udgangspunkt i ex situ målinger på lejer er besparelspotentialet beregnet til 43% for selvbærende ventilatorer.

Det er undervejs i projektet blevet set situationer hvor lejetabet kan reduceres med op til 57% ved at benytte keramiske lejer i stedet for premium stål lejer.

2 Sammenfatning

Nærværende projekt har haft til formål at sikre resultaterne fra ELFORSK projektet (projekt nr. 342-032) "Elbesparende kuglelejer" i fuld og hurtig anvendelse i industrien gennem dokumentation af energibesparelsen ved keramiske lejer i forhold til traditionelle lejetyper. Målet med projektet er at accelerere anvendelsen af de mere energieffektive lejer dels via de direkte energibesparelser og dels via de ikke-energi-relaterede fordele som følge af de keramiske lejers længere levetid.

I det ovennævnte tidligere projekt blev det undersøgt, hvilken energibesparelse keramiske lejer har i elmotorer. I dette projekt er teknologien bag keramiske lejer taget videre og undersøgt i forhold til industrielle ventilatorer. Der er desuden udarbejdet et beregningsprogram der vil lette energiberegninger og give et bud på levetidsomkostningerne for de forskellige typer lejer

Samlet set forventes dokumentationen, der er resultatet af dette projektet, at kunne skabe bedre beslutningsgrundlag for industrien, så anvendelsen af keramiske lejer øges. Det antages, at projektet vil føre til at lejeløsningerne i højere grad standardiseres med prisreduktion til følge, så anvendelsen af keramiske lejer dermed øges markant.

Resultaterne fra projektet er løbende formidlet i forbindelse med afholdte temadage hos CeramicSpeed.

Projektet er finansieret af ELFORSK programmet med projektnr. 346-011, og er udført af følgende projektdeltagere i perioden 1. april 2014 til 1. Juni 2016:

Bøje S. Kjær		+45 40207617	CeramicSpeed A/S
Britta Johansen/ Eskild Herskind	Projektleder	+45 22347617	CeramicSpeed A/S
Anders Thormann		+45 25715484	CeramicSpeed A/S
Claus M. Hvenegaard		+45 72202525	Teknologisk Institut
Sandie B. Nielsen		+45 72201257	Teknologisk Institut
Søren Draborg		+45 72202028	Teknologisk Institut
Nanna Ravnsborg		+45 51176178	Aura

3 Baggrund

3.1 Virksomheden

CeramicSpeed A/S udvikler og producerer keramiske kuglelejer, der har et væsentligt lavere energitab end de konventionelle kuglelejer. Energitalet reduceres ved en kombination af højpræcisionsløbebaner og keramiske kugler (i siliciumnitrid) med meget glat overflade og stor hårdhed. Desuden arbejdes der med slør, smøring, tætninger m.m. for at opnå markedets mest energieffektive løsninger.

CeramicSpeed's kuglelejer bruges bl.a. i cykel- og motorsport samt af en række industrivirksomheder som Haldor Topsøe, Arovit, Grundfos, Arla, Hydro, NC Nielsen (Linde truck), Færch Plast m.fl.. Anvendelsen i industrien er primært med fokus på længere levetid og sekundært på lejernes energibesparende egenskaber. Grundfos Pumper har dog allerede fokus på de keramiske lejers muligheder i forbindelse deres udviklingsarbejde med energieffektive pumper og motorer.

4 Målgruppen

Målgruppen for projektet er primært producenter af industrielt roterende udstyr og industriens rådgivere. Desuden er virksomhedernes egne vedligeholdelsesafdelinger en væsentlig del af målgruppen.

5 Teoretiske modeller for lejetab

Der findes en række modeller til udregning af energitab i lejer. Det er dog en meget kompleks sag og ofte giver forskellige modeller forskellige resultater, hvilket er vist i [1]. Mange parametre er svære at estimere og er ikke konstante over tid. Overfladefinish i lejet kan ændres grundet slid, og smøremidlet kan blive forurenede af støv eller slitage, og nedbrydes kemisk.

I dette afsnit vil SKF's model blive gennemgået for at få et indblik i, hvilke driftsparametre, som er afgørende for energitabet i lejet. I bilaget ses et regneeksempel hvor et konkret leje bliver gennemgået.

Modellen kommer med et udtryk for kraftmomentet grundet lejefriktionen τ_{fric} . Ud fra kraftmomentet kan effekttabet P_{tab} udregnes som

$$P_{tab} = \tau_{fric} \cdot \omega = \tau_{fric} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot n \quad (1)$$

hvor ω er vinkelhastigheden af lejet målt i radianer per sekund og n er omdrejningshastigheden målt i omdrejninger pr. minut (RPM).

5.1 SKF model

SKF's model er beskrevet i deres generelle katalog [2]. En lidt mere dybdegående forklaring findes i [1]. Modellen tager udgangspunkt i de enkelte kilder til friktion i lejet. Det samlede kraftmoment kan derfor skrives som en sum af fire komponenter:

$$\tau_{fric} = \tau_{rr} + \tau_{sl} + \tau_{seal} + \tau_{drag}$$

De enkelte komponenter stammer fra:

- τ_{rr} : rullefriktion: Tab pga. fortrængning af oliefilm samt den periodiske deformation af kuglerne (hysterese).
- τ_{sl} : glidefriktion: Tab pga. kugler der glider. Når en kugle deformeres vil visse dele af kuglen glide i stedet for at rulle. Derudover kan kuglerne have en vis rotation omkring deres egen akse (spin og gyroskopisk præcession), hvilket også giver anledning til glidning.
- τ_{seal} : tætningsfriktion: Hvis tætningen, som er fastgjort på lejets yderring, er i kontakt med inderringen, opstår der friktion mellem inderring og tætning. Denne type tætning kaldes derfor frikterende.
- τ_{drag} : Oliefriktion: Hvis lejet smøres kontinuerligt vha. et oliebad, vil olien give anledning til friktion.

Rullefriktionen og glidefriktionen vil således altid være tilstede, mens tætningsfriktionen kun er tilstede, hvis lejet har frikterende tætninger. Ligeledes er oilefriktionen kun til stede, hvis der anvendes et oliebad. Dette vil sjældent være tilfældet for de lejer af interesse for dette projekt og oliefriktionen beskrives derfor ikke nærmere her.

De matematiske udtryk for de tre første led er givet ved:

$$\tau_{rr} = G_{rr} \cdot (\nu \cdot n)^{0,6} * \quad (2)$$

Hvor G_{rr} er en variabel som afhænger af load, lejetype og lejestørrelse, ν er viskositeten af smøremidlet i mm^2/s og n er omdrejningshastigheden af lejet i RPM (omdrejninger pr. min). ν er selvfølgelig bestemt af det anvendte smøremiddel, men vil generelt være meget temperaturafhængig, hvorfor τ_{rr} også vil være temperaturafhængig. * (senere udgaver har $\phi_{ish} \cdot \phi_{rs}$ ganget på G_{rr} , disse variabler beskriver hhv. opvarmningen af smøringen foran kuglen og begrænsningen på tilbageløbet af smøring)

$$\tau_{sl} = G_{sl} \cdot \mu_{sl} \quad (3)$$

hvor G_{sl} er variabel som afhænger af load, lejetype og lejestørrelse og μ_{sl} er glidefriktionskoefficienten, som afhænger af typen af smøremiddel anvendt. For mineralolier er μ_{sl} 0,05, mens den for syntetiske olier er 0,04.

$$\tau_{seal} = K_{S1} \cdot d_s^\beta + K_{S2} \quad (4)$$

hvor K_{S1} , K_{S2} og β er empiriske konstanter, der afhænger af leje- og tætninstype og d_s er diameteren af tætningsberøringsflade med lejeringen.

Ser vi på en deep groove ball bearing og indsætter udtrykkene for G_{rr} og G_{sl} i formel (2) og (3) fås:

$$\tau_{rr} = R_1 \cdot d_m^{1,96} \cdot \left(F_r + \frac{R_2}{\sin(\alpha_F)} \cdot F_a \right)^{0,54} \cdot (\nu \cdot n)^{0,6} \quad (5)$$

hvor R_1 og R_2 er empiriske geometriske konstanter, der afhænger af lejeserien, d_m er middeldiameteren af lejet i mm (diameter af cirkel gennem alle kuglecentre), F_r og F_a er hhv. det radiale og det aksiale load på lejet i newton og $\alpha_F = 24,6 \cdot (F_a/C_0)^{0,24}$, hvor C_0 er lejets statiske bæretal.

$$\tau_{sl} = S_1 \cdot d_m^{-0,145} \cdot \left(F_r^5 + \frac{S_2 \cdot d_m^{1,5}}{\sin(\alpha_F)} \cdot F_a^4 \right)^{1/3} \cdot \mu_{sl} \quad (6)$$

hvor S_1 og S_2 er empiriske konstanter, der afhænger af lejeserien. Det skal bemærkes, at såfremt $F_a = 0$, skal eksponenten til d_m ændres fra -0,145 til -0,26.

6 Forundersøgelse

Der anvendes kuglelejer i alle elmotorer samt i alt roterende maskineri. For at vurdere det energimæssige besparelespotentialer ved at udskifte standardlejer med energieffektive keramiske lejer laves en forundersøgelse, hvor energiforbruget i motorer og roterende udstyr kortlægges.

For industrien laves en mere detaljeret analyse, hvor energiforbruget inddrages efter systemstørrelser og anvendelser for at identificere, hvor besparelespotentialer er størst.

6.1 Overordnet kortlægning af elforbruget

I Energistyrelsens Energistatistik 2012 [3] er det danske elforbrug i 2012 opgjort til 112.011 TJ. Heraf blev 35.907 TJ anvendt i husholdninger. Hvordan de resterende 76.104 TJ blev fordelt på forskellige brancher er vist i Tabel 6.1. Her fremgår det også, hvor stor en del af den anvendte el, der blev omsat via en elmotor.

Branche	Elforbrug 2012	Omsat via elmotorer	Omsat via elmotorer
	[TJ]	[%]	[TJ]
Jernbanetransport	1.387	100*	1.387
Landbrug, skovbrug og gartneri	6.412	68	4.360
Fremstillingsvirksomhed	29.618	78	23.102
Bygge og anlægsvirksomhed	1.346	40*	538
Handel og privat-service	28.546	35	9991
Offentlig service	8.795	50*	4397
I alt	76.104	58	43.775

Tabel 6.1 Det danske elforbrug i forskellige brancher i 2012 (fra [3]) samt procentdelen som omsættes via en elmotor (fra [4]). *Skønnede værdier.

Procentsatserne er fundet ud fra en opgørelse over slutanvendelserne af el i 2006 [4], idet elmotorer antages at stå for energiomsætningen i anvendelserne pumpning, køl/frys, ventilation og blæsere, trykluft og procesluft, findeling, omrøring og "øvrige elmotorer". Det antages, at disse procentsatser også er repræsentative for forbruget i 2012.

Af Tabel 6.1 fremgår, at af det samlede elforbrug uden for husholdningerne i 2012 blev 58 % af energien omsat via elmotorer svarende til 43.775 TJ. Hvis vi ser på erhvervsvirksomhederne, som inkluderer landbrug, skovbrug, gartneri, fremstillingsvirksomheder, handel og privat service, var elforbruget her 64.576 TJ, hvoraf 37.453 TJ

blev omsat via en elmotor, svarende til 60 % af elforbruget i erhvervsvirksomhederne. Samlet set stod elmotorer i erhvervsvirksomhederne for 86 % af det samlede elmotorforbrug uden for husholdningerne.

I en brochure fra SKF oplyses det, at 0,6% af energiforbruget i en elmotor går til tab i lejerne [5]. Med det danske elforbrug i elmotorer på 43.775 TJ giver dette således et årligt lejetab på 263 TJ i elmotorerne alene. I erhvervslivet kan lejetabet i elmotorer udregnes til 225 TJ. Hertil kommer at elmotorer i erhvervslivet ofte har et remtræk eller gear som forbinder elmotoren til enheden, der drives. I denne transmission vil der også indgå lejer og dermed optræde lejetab. Det vurderes, at 60 % af energiydelsen (energiomsætning minus motortab) i elmotorer videreføres via transmission. Da motortabene skønnes at være 12 % af den el, der omsættes i erhvervsvirksomhedernes elmotorer [6] bliver energiydelsen i erhvervslivets elmotorer totalt set 32.959 TJ. Af dette videreføres 60 % svarende til 19.775 TJ via transmission. Antages lejetabet i transmission at være tilsvarende den i elmotoren (dvs. 0,6 %) bliver lejetabet i transmissionen således 119 TJ.

I Tabel 6.2 er lavet en oversigt over de netop diskuterede værdier for elforbrug og lejetab i de forskellige områder. Lejetabet i elmotorer uden for husholdningerne (kaldet bancher) er således 263 TJ. Lejetabet i transmissionen i erhvervsvirksomhederne er 119 TJ. Samlet set giver det et lejetab på 382 TJ. Antages et besparelspotentiale på 48 % ved brug af keramiske lejer, bliver det samlede besparelspotentiale for elmotorer og transmission 183 TJ svarende til 50 GWh.

Områder	Elforbrug	Omsat via elmotor	Lejetab i elmotor	Lejetab i transmission
	[TJ]	[TJ]	[TJ]	[TJ]
Hele Danmark	112.011			
- Brancher	76.104	43.775	263	
- Erhvervsvirksomheder	64.576	37.453	225	119

Tabel 6.2 Oversigt over elforbrug og tab opgjort for hele Danmark samt to undergrupper. I området "brancher" er elforbruget til husholdninger fratrukket mens for området "erhvervsvirksomheder" er endvidere jernbanetransport, bygge og -anlægsvirksomheder samt offentlig service fratrukket.

6.2 Detaljeret kortlægning af elforbruget i industrien

I foregående afsnit blev en meget bred analyse præsenteret. Dette afsnit vil indeholde en mere detaljeret kortlægning, men nu begrænset til industrien.

En opgørelse fra Danmarks statistik viser, at elforbruget i industrien i Danmark i 2012 var 28.074 TJ [7]. I 2011 stod motordrevne maskiner i industrien for 82 % af det samlede elforbrug [8]. Hvis det samme antages at gøre sig gældende i 2012 brugte de motordrevne maskiner i industrien i Danmark i 2012 23.021 TJ.

Hvordan elforbruget fordeler sig i forhold til teknologier, systemstørrelser samt industribrancher er analyseret i Den store blå om systemoptimering [8], som er baseret på tal fra 2011. Det følgende vil tage udgangspunkt i data fra [8].

Analysen bygger på tal fra syv hovedbrancher. Dette omfatter:

- Nærings- og nydelsesmiddelindustri
- Jern- og metalindustri
- Kemisk industri
- Sten- ler- og glasindustri
- Træindustri
- Grafisk industri
- Tekstilindustri

Elforbruget er opgjort for 3 systemstørrelser, hvor størrelsen henviser til effekten af elmotoren, der driver systemet (påstemplet mærkepladeeffekt på elmotoren). De 3 effektintervaller er:

- Små systemer: 0 - 4 kW
- Mellem systemer: 4 – 30 kW
- Store systemer: 30 – 500 kW

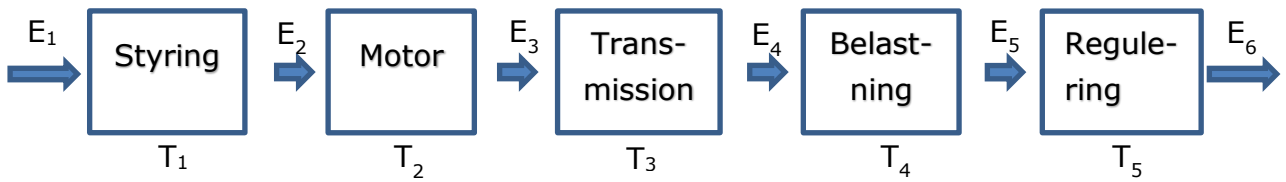
Endeligt er forbruget inddelt efter, hvilken type udstyr motoren driver. Dette betegnes i det følgende teknologier. Teknologierne omfatter:

- Ventilation
- Pumpning
- Trykluft
- Køling
- Hydraulik
- Anden motordrift

På Figur 6-1 ses en typisk opbygning af et motordrevet system. Systemet består af følgende komponenter.

- Styring (elektronisk styring, fx softstarter el. frekvensomformer)
- Motor (elmotor)
- Transmission (remtræk eller gear)
- Belastning (enheden der drives fx ventilator, pumpe el. kompressor)
- Regulering (mekanisk regulering fx spjæld el. drøvleventiler)

Hele systemet tilføres energien E_1 . Der vil ske et energitab i hver enkelt systemkomponent beskrevet ved T_1 til T_5 . Energien, som modtages og videregives af hver komponent, er beskrevet ved E_1 til E_6 , hvor E_6 er energien som går det til reelle arbejde i anlægget. Virkningsgraden af hele det motordrevne system er således E_6/E_1 .

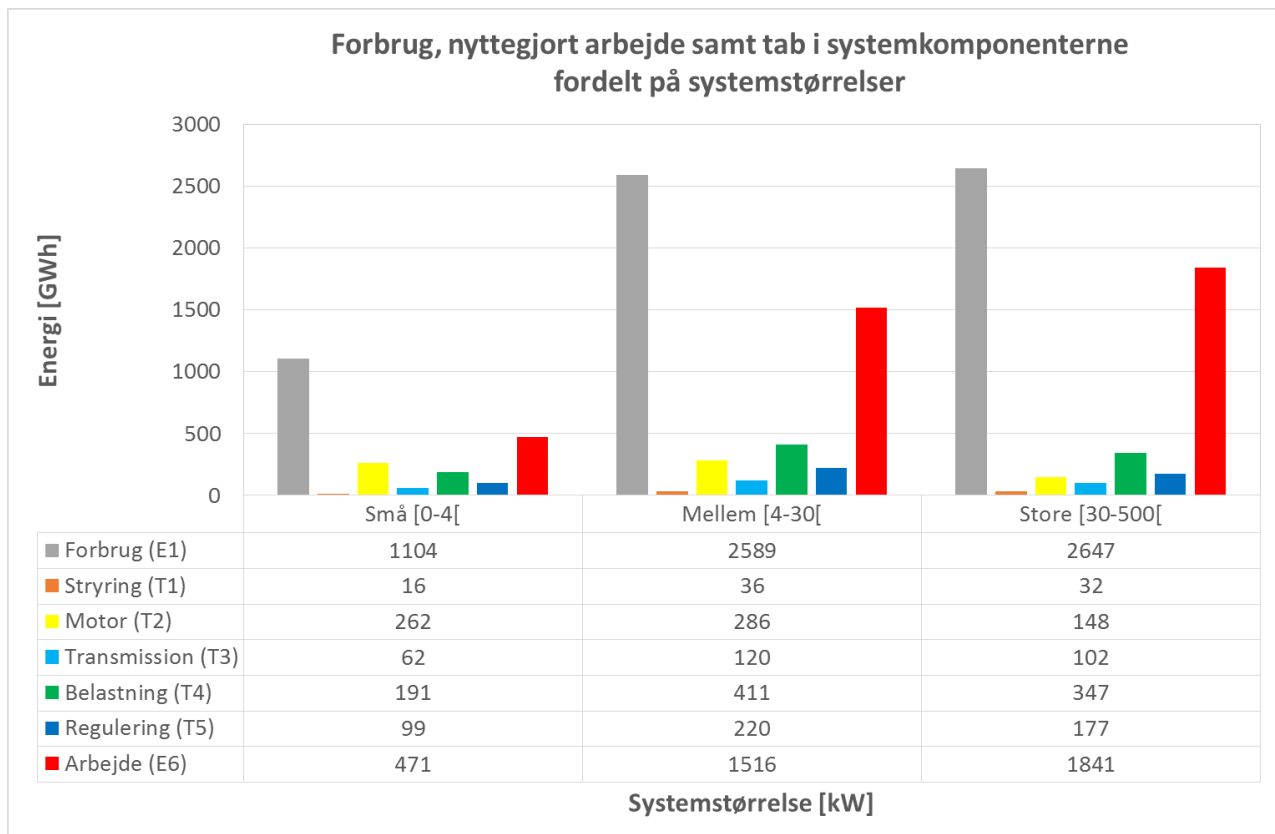


Figur 6-1 Skitseret opbygning af et motordrevet system. E_{1-6} er energien som modtages og videregives af de enkelte systemkomponenter. E_6 svarer til det nyttgjorte arbejde. T_{1-5} er tabet i hver systemkomponent.

De systemkomponenter, som indeholder lejer, er motoren, transmissionen og belastningen. Det er derfor tabet i disse systemkomponenter, som er interessante for denne analyse.

6.2.1 Forbrug og tab inddelt efter systemstørrelser

På Figur 6-2 ses, hvordan den tilførte energi E_1 inden for hver af de 3 systemstørrelser er fordelt mellem nyttgjort arbejde E_6 samt diverse tab i systemets komponenter T_1 til T_5 .



Figur 6-2 Forbrug, nyttgjort arbejde samt tab i de forskellige systemkomponenter som vist på Figur 6-1. Dette er opgjort for hhv. små, mellem og store systemer. Dataene er fra [8].

Figur 6-2 viser tydeligt, at andelen af nyttiggjort arbejde i forhold til tab er størst for de store og mellem systemer. Dette svarer til, at virkningsgraden er højere for de store og mellem systemer end for de små, hvilket ikke er overraskende. Virkningsgraden for hver systemstørrelse udregnes som arbejde/forbrug dvs. E_6/E_1 , herved findes følgende virkningsgrader;

- System virkningsgrad - Små: 43 %
- System virkningsgrad - Mellem: 59 %
- System virkningsgrad - Store: 70 %

Ser vi på virkningsgraden af motoren alene dvs. $E_3 / E_2 = (E_1 - T_1 - T_2) / (E_1 - T_1)$ fås for hver systemstørrelse;

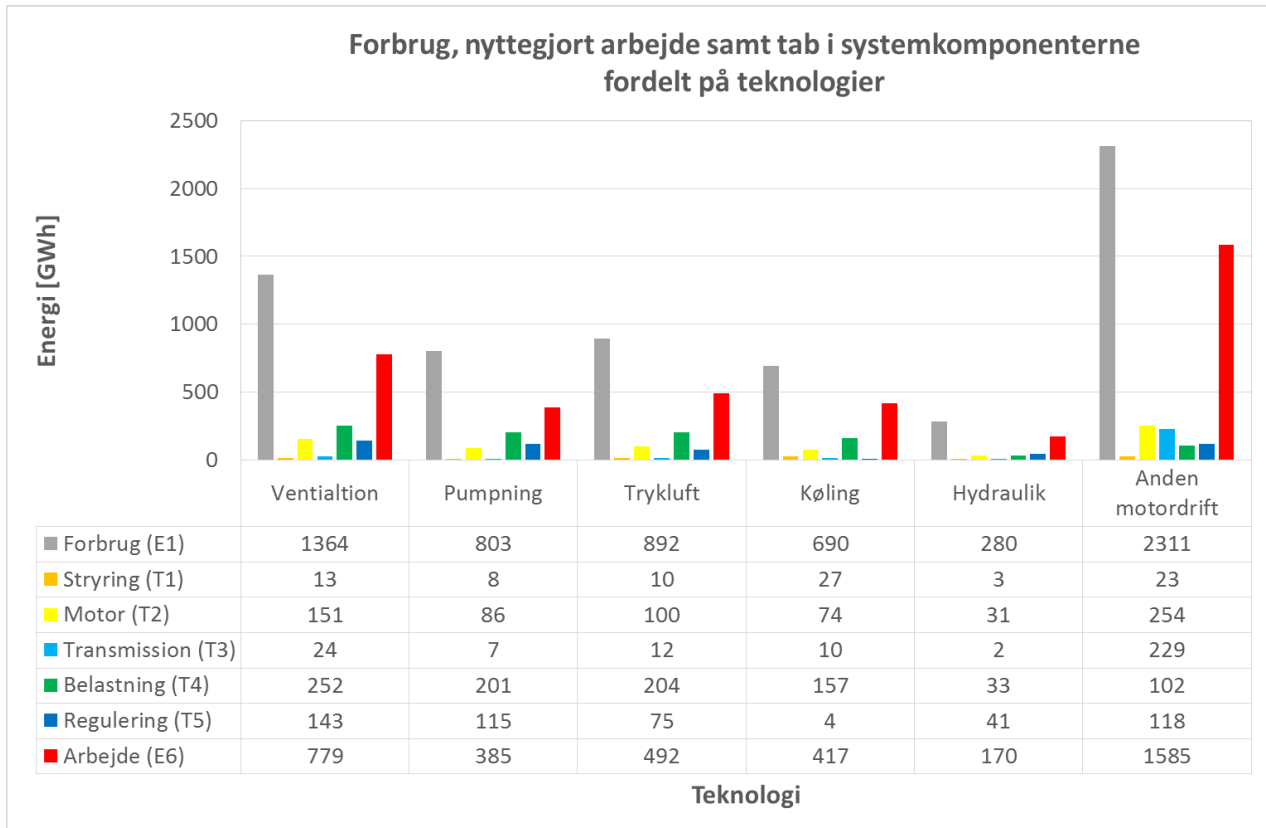
- Motor virkningsgrad - Små: 76 %
- Motor virkningsgrad - Mellem: 89 %
- Motor virkningsgrad - Store: 94 %

Af Figur 6-2 ses endvidere, at energiforbruget i store og mellem systemer er omtrent lige store. Dette fortæller samtidig, at der er væsentligt flere mellem systemer end der er store systemer. Forbruget hos mellem systemer er over dobbelt så stort som forbruget hos de små systemer, alligevel er der ingen tvivl om, at antallet af små systemer langt overstiger antallet af mellem systemer.

Ser vi på systemtabene er det tab i motor og belastning, som er dominerende for de små og mellem systemer. For de store systemer er det fortsat belastningstabets som er dominerende, mens reguleringstabet overgår motortabet en smule. Generelt set er det netop de komponenter, som indeholder lejer, der står for de største tab.

6.2.2 Forbrug og tab inddelt efter teknologier

Figur 6-3 viser energiforbruget fordelt på 5 teknologier samt anden motordrift. For hver teknologi er energiforbruget igen opdelt i forbrug, nyttiggjort arbejde samt tab i hver systemkomponent.



Figur 6-3 Forbrug, nyttegjort arbejde samt tab i de forskellige systemkomponenter som vist på Figur 6-1. Dette er opgjort for forskellige teknologier, dvs. forskellige typer af belastningskomponenten. Dataene er fra [8].

Det ses, at motortabet er størst i kategorierne anden motordrift (254 GWh) og ventilation (151 GWh). Transmissionstabet er tilnærmelsesvis kun eksisterende i kategorien anden motordrift (229 GWh). I denne kategori er transmissionstabet helt oppe at være på størrelse med motortabet. Belastningstabet er størst for ventilation (252 GWh), tæt efterfulgt af trykluft (204 GWh), pumpning (201 GWh) og køling (157 GWh).

6.2.3 Samlet overblik over tab

I Tabel 6.1 gives et samlet overblik over de tab, som indeholder lejetab, dvs. tab i motor, transmission og belastning. Tabene er delt ud på både systemstørrelser og teknologier.

Teknologi	Tab								
	Motor			Transmission			Belastning		
	[GWh]			[GWh]			[GWh]		
	Små	Ml.	Store	Små	Ml.	Store	Små	Ml.	Store
Ventilation	56	65	30	4	10	10	41	112	99
Pumpning	34	31	21	1	2	4	42	71	88
Trykluft	38	41	21	6	3	3	44	92	68
Køling	26	34	14	3	5	2	31	79	47
Hydraulik	13	11	7	0	1	1	8	13	12
Anden motordrift	95	104	55	48	99	82	25	44	33
Total	262	286	148	62	120	102	191	411	347
Total	696			284			949		

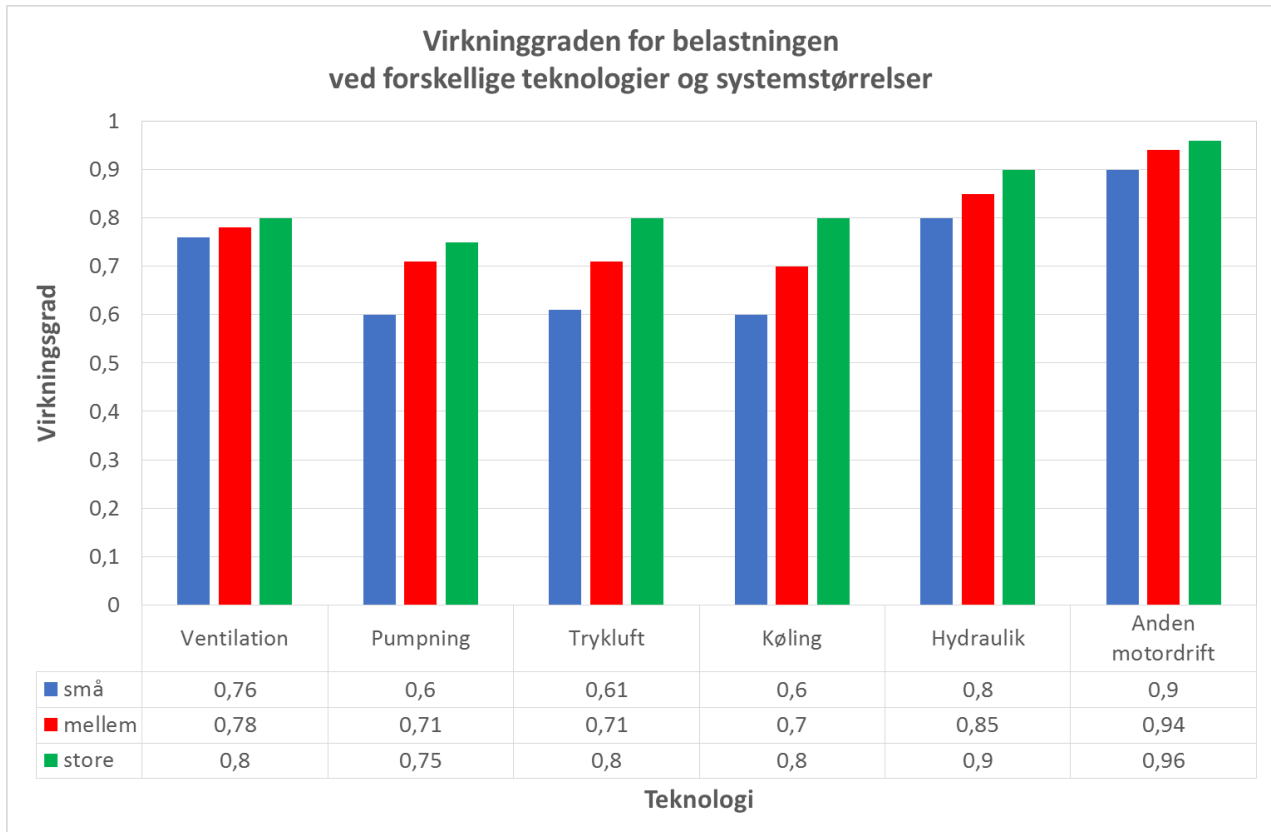
Tabel 6.3 Energitabet i GWh i 2011 fordelt på systemstørrelser for hhv. motor, transmission og belastningsdelen af systemet. Tabet er yderligere inddelt efter teknologierne, hvori komponenterne indgår. Små = 0-4kW, Ml. = 4-30kW og Store = 30-500kW. Tallene er fra [8].

Denne tabel giver et endnu bedre overblik over, hvor de største tab findes;

- Motorer anvendt til anden motordrift i små og mellem systemer
- Transmission anvendt til anden motordrift i mellem og store systemer
- Ventilationsanlæg i mellem og store systemer
- Tryklufsanlæg og kølingsanlæg i mellem systemer
- Pumpningsanlæg i store systemer

6.2.4 Virkningsgrader - inddelt efter teknologier og systemstørrelser

Virkningsgraden for elmotoren er den samme uanset teknologi og afhænger kun af motorstørrelsen/systemstørrelsen, som beskrevet i afsnit 6.2.1. Virkningsgraden for transmissionen ligger mellem 0,95 og 0,99 for de 5 teknologier, mens den ligger mellem 0,76 og 0,95 for anden motordrift. Virkningsgraden af belastningen varierer derimod mere mellem de forskellige teknologier og systemstørrelser. Dette er vist på Figur 6-4.

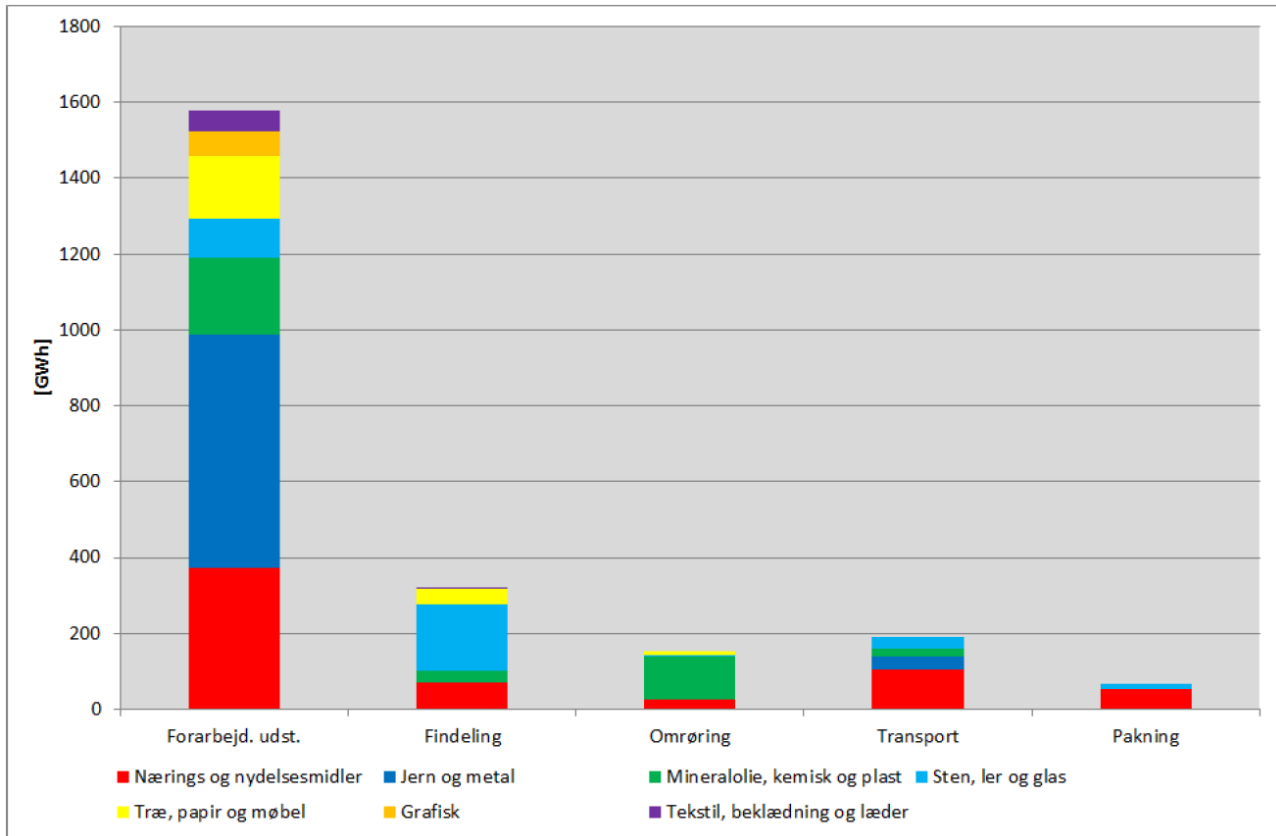


Figur 6-4 Virkningsgraden for belastningskomponenten ved forskellige teknologier og systemstørrelser. *Små* = 0-4kW, *Ml.* = 4-30kW og *Store* = 30-500kW. Dataene er fra [8].

Det ses, at virkningsgraderne er specielt lave ved de små systemer i kategorierne pumpning, trykluft og køling. Selvom virkningsgraderne er lavest for de små systemer betyder det ikke, at det overordnet set er her de største energitab findes. Dette fremgår tydeligt af Tabel 6.3, hvor de største tab i alle tilfælde ses ved mellem og store systemer. Årsagen er, at de store systemer bruger langt mere energi end de små systemer, og derfor vil selv et lille procentvis tab for et stort system svare til et stort absolut energitab.

6.2.5 Anden motor drift

På Figur 6-3 er det tydeligt, at kategorien "Anden motordrift" er meget dominerende når det gælder motor- og transmissionstab. Denne kategori er selvsagt meget bred, men da den er så dominerende er det alligevel interessant at se nærmere på, hvad den indeholder. På Figur 6-5 er energiforbruget til anden motordrift opdelt i 5 anvendelsesområder. For hver anvendelsesområde ses desuden, hvordan energiforbruget er fordelt blandt de forskellige brancher.



Figur 6-5 Elforbruget til anden motordrift opdelt efter anvendelser og brancher. Figuren er taget fra [8].

Det fremgår tydeligt af Figur 6-5, at udstyr til forarbejdning er langt den mest dominerende anvendelse. Udstyr til forarbejdning står for hele 68 % af det samlede elforbrug i kategorien anden motordrift. Forarbejdningsudstyr inkluderer eksempelvis maskiner til centrifugering, blanding, æltning, valsning samt værktøjsmaskiner og bukkesmaskiner.

Udstyr til findeling omfatter bl.a. møller, hakkere, knusere samt udstyr til homogenisering. Under transportkategorien indgår fx snegletransportører og transportbånd.

Det står hermed klart, at mange af anvendelsesområderne i anden motordrift bygger på roterende udstyr, dvs. udstyr hvor lejer er en vigtig del af systemet.

Forarbejdnings udstyr, som er den helt store kategori inden for anden motordrift, er yderst relevante for projektet. Maskinerne indeholdt i denne kategorier kører ofte ved høje omdrejninger og med store belastninger på lejerne, hvilket giver anledning til betydelige lejetab.

Som vist på Figur 6-3 er tabet i transmissionen tilnærmelsesvist kun eksisterende i teknologien anden motordrift. Transmissionstab er således indeholdt i forbindelse med anvendelserne vist på Figur 6-5. Et eksempel er kategorien transport. Her anvendes gear til at køre fra høje motoromdrejninger til lavere omdrejninger, som krævet til

drift af transportbånd. Et sådant system vil indeholde adskillige tandhjul med hver sit leje. Virkningsgraden af et sådant system vil typisk være lav og dette sammenholdt med de høje omdrejninger af de første tandhjul vil betyde, at der er betydelige lejetab i systemet.

6.3 Delkonklusion

Det overordnede besparelspotentiale ved udskiftning af lejer i elmotorer og transmission blev vurderet til 50 GWh. Hertil kommer yderligere et besparelspotentiale ved lejeskift i belastningskomponenten. Størrelsen af dette besparelspotentiale kunne ikke umiddelbart vurderes, da tabet i belastningskomponenten vil være meget afhængig af belastningstypen.

Da det ikke er realistisk at udskifte lejer i alt roterende udstyr, er det nødvendigt at identificere udstyret med det største besparelspotentiale. Dette blev gjort gennem en kortlægning af energitabene i industrien fordelt på teknologier, systemstørrelser og systemkomponenter. De relevante systemkomponenter i forhold til lejetab er motor, transmission og belastning. Tabene i disse komponenter blev kortlagt i Tabel 6.3, og som en opsummering af resultaterne herfra, er Tabel 6.4 lavet. I Tabel 6.4 er områderne med de største tab markeret (tab over 45 GWh).

	Motor			Transmission			Belastning		
	Små	Ml.	Store	Små	Ml.	Store	Små	Ml.	Store
Ventilation									
Pumpning									
Trykluft									
Køling									
Hydraulik									
Anden motordrift									

Tabel 6.4 Markering af systemerne med de største (tab over 45 GWh) på baggrund af tabstallene i Tabel 6.3. Små = 0-4kW, Ml. = 4-30kW og Store = 30-500kW.

Tabel 6.4 viser, at de største motortab findes i teknologierne anden motordrift og ventilation. For anden motordrift er tabet stort for alle systemstørrelser, mens for ventilation findes det store tab ved de små og mellem systemer.

Det største transmissionstab findes uden sammenligning i teknologien anden motordrift og er stort for alle systemstørrelser. I anden motordrift står bearbejdningsudstyr for 68 % af energiforbruget, hvorfor man må forvente også at finde en stor del af transmissionstabet i forbindelse med bearbejdningsudstyr.

For belastningskomponenten findes der store tab ved både ventilation, trykluft, pumpning og køling i mellem og store systemer. At tabene er store ved alle disse typer belastning viser, at der er et stort energibesparelspotentiale i andet roterende udstyr

end blot motorer, som var fokus for det første Elforsk projekt omkring energieffektive lejer [9].

Ud fra et energimæssigt synspunkt er det således de i Tabel 6.4 markerede områder, som er interessante at undersøge i projektet. Selv om et område har et stort energitab, skal det også være økonomisk attraktivt at lave lejeskiftet, for at energibesparelsen kan realiseres. Før den endelige udvælgelse af udstyr, som skal testes, er det derfor nødvendigt at foretage en potentialeanalyse.

Det bør bemærkes, at selvom et stykke udstyr har et stort energitab, er det endnu ikke kortlagt, hvor stor en procentdel af dette energitab, som stammer fra tab i lejerne. Besparelspotentialet i forhold til lejeskift behøver derfor ikke nødvendigvis at være størst de steder, hvor det samlede energitab er størst. Det procentvise lejetab er netop det, som skal kortlægges i dette projekt.

7 Kortlægning af potentialet for keramiske lejer

I forrige afsnit blev energitabene i industrien kortlagt. Tabene blev fordelt på systemstørrelser og systemkomponenter/anvendelser. Hermed blev områderne med de største energitab i industrien identificeret.

På baggrund af denne analyse vil vi i dette afsnit se på potentialet for implementering af keramiske lejer, idet det skal være økonomisk attraktivt for en virksomhed at udskifte standardlejer med keramiske lejer for at energibesparelsen kan realiseres i praksis.

Først undersøges potentialet for keramiske lejer ud fra et rent energimæssigt perspektiv dvs. hvor kun den økonomiske gevinst i form af sparet energi medtages i regnestykket.

Dernæst undersøges potentialet, når de ikke energimæssige fordele tages med i betragtning: Først i forhold til de keramiske kuglers isolerende effekt og derefter ud fra et totaløkonomisk perspektiv. I sidstnævnte medregnes lejernes længere levetid og deraf sparede udgifter til reparationer og mistet fortjeneste som følge af driftsstop.

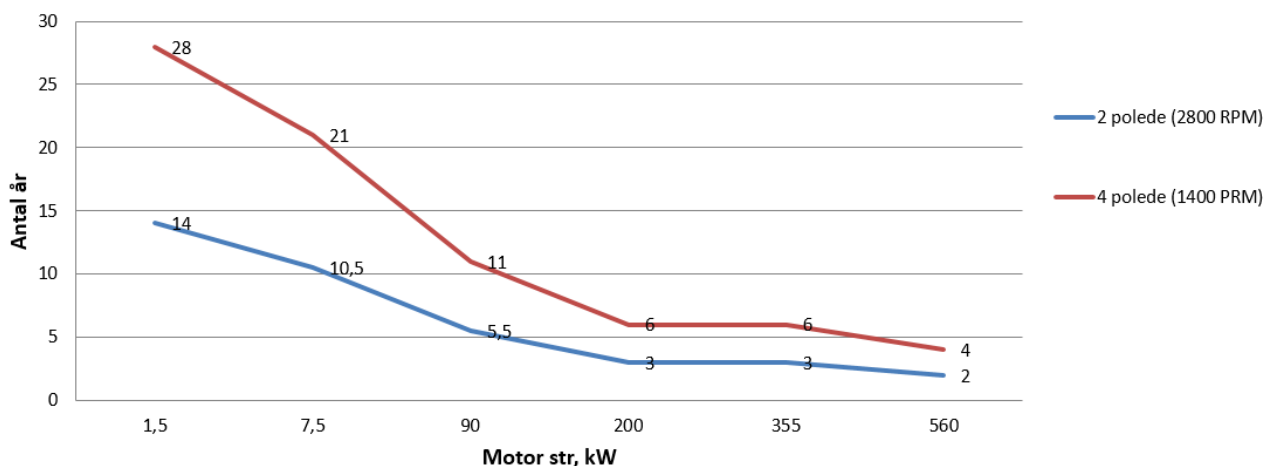
Denne analyse skal være med til at målrette projektets undersøgelser mod de anvendelser, hvor det vurderes økonomisk mest attraktivt (og dermed mest realistisk) at få implementeret keramiske lejer.

7.1 Ren energibesparelse

I denne analyse undersøges potentialet for udskiftning af standardlejer til keramiske lejer, når kun den energimæssige gevinst ved lejeskiftet medregnes.

På baggrund af resultaterne fra det tidligere Elforsk projekt [9] blev potentialet for keramiske lejer i elmotorer fundet. På Figur 7-1 ses tilbagebetalingstiderne for lejeskift i 2- og 4-polede motorer af forskellige størrelser. Det ses, at for de store motorer (over 200 kW) er merudgiften til de keramiske lejer betalt hjem i form af ren energibesparelse

efter blot 2-6 år. Beregningerne er foretaget uden energitilskud og med en elpris på 1kr/kWh.



Figur 7-1 Tilbagebetalingstid for udskiftning til keramiske lejer på baggrund af energibesparelsen. Vist for 2- og 4-polede motorer af forskellig størrelse. Figuren er fra [9].

På baggrund af resultaterne fra det tidligere projekt er en række aktuelle kundesager blevet gennemregnet i forhold til det energimæssige besparelspotentiale. Her viser det sig, at tilbagebetalingstiderne ligger fra 1-20 år og en slet ikke ubetydelig del ligger helt nede på 1-5 år. Det betyder, at i mange tilfælde er energibesparelsen i sig selv nok til at kunden vælger at skifte til keramiske lejer i forbindelse et lejeskift eller ved køb af en ny motor.

7.1.1 Case 1: Motorer

Et konkret kundef eksempel er Premier Is – Mejerigaarden A/S. Her blev en række motorer gennemgået i forhold til nuværende energiforbrug og forventet energibesparelse ved skift til keramiske lejer. Ved beregning af merprisen for de keramiske lejer i forhold til standardlejer blev tilbagebetalingstiderne for skift til keramiske lejer fundet for de enkelte motorer. Resultaterne ses i Tabel 7.1

Motorstørrelse	Hastighed	Nuværende årligt tab	Energi-besparelse	Tilbage-betalingstid
[kW]	[RPM]	[kWh]	[kWh]	[år]
37	1500	34.558	1.693	9,2
75	1500	50.142	3.009	11,6
110	1500	68.831	4.818	7,3
160	3000	102.440	10.756	3,0
250	3000	118.367	12.429	2,6
355	3000	130.370	9.126	1,1

Tabel 7.1 Beregning af energibesparelse og tilbagebetalingstid ved skift til keramiske lejer i udvalgte motorer hos Premier Is – Mejerigaarden A/S.

Det ses, at tilbagebetalingstiden for den største motor er helt nede på 1,1 år, mens tilbagebetalingstiderne for de to næststørste motorer er på hhv. 2,6 år og 3 år. Et skift til keramiske lejer i de 3 største motorer, er derfor være en yderst realistisk investering for virksomheden. Tabel 7.1 viser også, at de største energibesparelser findes hos de største motorer.

Da mange af motorerne på ismejeriet er gamle motorer med lave virkningsgrader, er der lavet en analyse af besparelspotentialet, hvis der skiftes til nye motorer med en større virkningsgrad (her IE3 motorer) og samtidig sættes keramiske lejer i de nye motorer. Ved udregningen af tilbagebetalingstiden er merudgiften til lejerne samt prisen for den nye motor medregnet. Resultaterne ses i Tabel 7.2.

Motorstørrelse	Hastighed	Nuværende årligt tab	Energi- besparelse	Tilbage- betalingstid
[kW]	[RPM]	[kWh]	[kWh]	[år]
37	1500	34.558	17.981	1,8
75	1500	50.142	24.891	2,4
110	1500	68.831	29.921	4,0
160	3000	102.440	56.307	2,1
250	3000	118.367	48.541	3,6
355	3000	130.370	42.560	6,5

Tabel 7.2 Beregning af energibesparelse og tilbagebetalingstid ved anskaffelse af nye IE3 motor med keramiske lejer. Beregningen er lavet for udvalgte motorer hos Premier Is – Mejeri-gaarden A/S.

Det ses, at tilbagebetalingstiderne overordnet set bliver kortere, hvis der også investeres i en ny motor. Dette kan virke overraskende, da udgiften til en ny motor er stor. Forklaringen er, at den store ekstraudgift opvejes af en markant energibesparelse. Ved sammenligning af energibesparelserne i Tabel 7.1 og Tabel 7.2 ses, at der er meget stor forskel på, hvor meget ekstra energi der spares ved et motorskiftet. Forklaring på dette findes i den store variation i virkningsgraderne af de oprindelige motorer og dermed optimeringspotentialet.

7.1.2 Case 2: Motor med remtræk til ventilator

Et andet konkret kundeeksempel er virksomheden H.J. Hansen. Her blev et system bestående af en ventilator drevet af en elmotor via et remtræk undersøgt mht. energioptimering. Det var i forvejen besluttet at ventilatoren skulle skiftes. Der blev regnet på energibesparelsen ved at skifte til en ny motor med keramiske lejer samt ved lade motoren trække ventilatoren direkte uden remtræk. Endvidere blev det beregnet, at motoren kunne nøjes med at køre ved 1000 RPM i stedet for 1400 RPM. Alt i alt ville disse forbedringer give en årlig energibesparelse på 43.817 kWh. Investeringen til den nye motor med keramiske lejer og den nye ventilator ville hermed få en tilbagebetalingstid på 8 år. Det energioptimerede system er nu i drift hos H.J. Hansen.

7.2 Frekvensomformere og strømskader

Ud over den energimæssige fordel ved keramiske lejer er en anden væsentlig fordel, at der ikke opstår strømskader på keramiske lejer. Strømskader opstår ved at en induceret strøm i systemet løber gennem kuglerne i kuglelejet. Strømmen giver anledning til en mikrosvejsning mellem kugle og løbebane. Idet kuglen og løbebanen adskilles igen, kan materiale løsrives fra overfladen af kuglen og løbebanen. På sigt bliver overfladerne meget ødelagte og smøremidlet bliver både forurenset og beskadiget af de høje temperaturer under mikrosvejsningerne. Er lejestrømmene tilstede kan de reducere levetiden af et leje fra flere år til få måneder [10]. Da kuglerne i et keramisk leje ikke er elektrisk ledende ligesom stålkuglerne i et standardleje, vil strømmen ikke kunne løbe gennem et keramisk leje, hvorfor der heller ikke kan opstå strømskader på keramiske lejer.

Strømskader på standardlejer ses ofte ved systemer drevet gennem en frekvensomformer. I takt med at frekvensomformere bliver mere og mere udbredte, som følge af det stigende fokus på energibesparelser, bliver strømskader på lejer et stigende problem. Omfanget af problemet er ikke kortlagt, men der er indikationer på at rigtig mange af de lejeskader, der opstår, skyldes strømskader. Samtidigt ses der også strømskader på insocoatede lejer, dette typisk på IE3 og IE4 motorer. Dette hænger mest sandsynligt sammen med at den kapacitive kobling mellem stator og rotor er betydeligt større ved de høj effektive motorer og samtidigt er en betydelig del af støjen fra frekvensomformere så højfrekvent at coatingen på de insocoatede lejer ikke mere er effektive.

Videre omkring strømskader i lejer er der på forskningsniveau defineret et begreb kaldet "None Pitting Currents". Dvs strømme der ikke indeholder tilstrækkelig energi til at skabe førnævnte mikrosvejsninger på løbebanerne, men som mistænkes for at kunne drive en elektrolytisk proces der frigør brintioner fra smøremidlet, hvilket igen sættes i forbindelse med brintskørhed i stålet og fejl-årsagen "white etching cracks" som koster store summer pga. lejeskader i flere industrier. Teorien er ung og ikke vel-dokumenteret endnu, men udstiller igen en usikkerhed der helt kan elimineres ved anvendelsen af ikke ledende rulningselementer i lejer.

Har man et system drevet gennem en frekvensomformer vil man ved skift til keramiske lejer således både få en økonomisk gevinst i form af energibesparelsen sammen med en formentlig endnu større økonomisk gevinst i form af stabil drift uden nedetid og omkostninger til lejeskift som følge af strømskader.

7.3 Længere levetid

En analyse af 1000 solgte lejer har vist, at for 99,4 % af lejerne er levetiden af de keramiske lejer 4-8 gange længere end for standardlejer.

Den længere levetid skyldes en række gode egenskaber ved det keramiske leje:

Lavere driftstemperatur: I det tidligere Elforsk projekt [9] blev det vist, at keramiske lejer har en driftstemperatur, som er 14-47 grader lavere end standardlejer. Dette skyldes den lavere friktion i lejet og dermed mindre energiudvikling. Den lavere driftstemperatur har stor betydning for levetiden af fedtet i lejet. Ved en temperaturreduktion på 15 grader fordobles levetiden af fedtet.

Mere hårdfør: Keramiske lejer kan klare mere forurening end standardlejer. Dette skyldes, at de hårde kugler knuser den forurening, der kommer ind i lejet. Kuglerne i sig selv får ikke skader, hvilket betyder, at der ikke overføres skader fra kuglerne til løbebanerne. Derudover har kuglerne en polerende effekt på løbebanerne og vil således polerer de små skader som løbende kan opstå på løbebanerne.

Færre rustskader: Da kuglerne er lavet af et keramisk materiale, kan de ikke ruste.

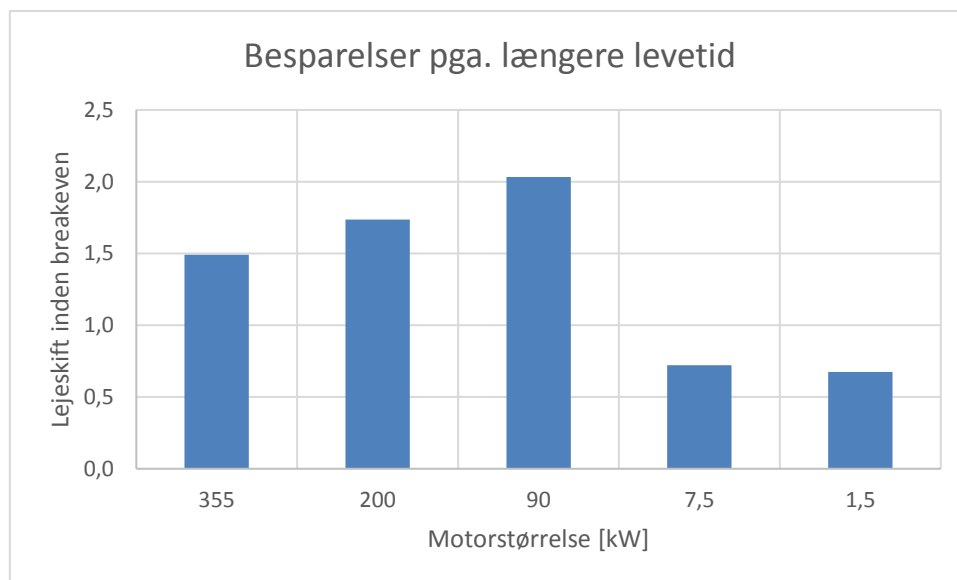
Færre vibrationer: De keramiske kugler fremstilles med meget større præcision end standard stålkugler. De keramiske kugler er derfor mere runde end stålkugler, og kuglediameteren på kuglerne i et leje varierer mindre fra kugle til kugle. De keramiske kuglers hårdhed gør, at kuglerne er i stand til at opretholde deres runde form under høje load, hvor en stålkugle vil deformeres og dermed miste sin rundhed. Alt i alt betyder det færre vibrationer i det keramiske leje.

Mindre smøringsfølsom: Grundet den lave friktion har keramiske lejer generelt et mindre behov for smøring. Keramiske lejer vil derfor ikke lide under manglende eller forkert smøring i nær så høj grad som et standardleje. På visse driftstidspunkter vil smøringen i lejet ikke være optimal f.eks. under opstarten af en motor. Når motoren køres op eller ned i omdrejninger. Et keramisk leje kan derfor langt bedre holde til mange start og stop samt hastighedsændringer end et standardleje. På skibe ses der tit skader på lejer der opstår pga. skibets bevægelser mens lejet står stille (kendt som falsk brinelling). Den type skader bør kunne reduceres kraftigt med keramiske lejer.

Det skal bemærkes at kvaliteten af de keramiske kugler er fuldstændigt afgørende for at ovenstående fordele kan træde frem. CeramicSpeed bruger kun den højeste kvalitet kugler, men ser jævnligt eksempler i markedet på billige keramiske kugler med meget ringe resistens overfor stødpåvirkninger eller med en ru overflade.

7.4 Økonomien som følge af længere levetid

Som regel er merprisen for et keramisk leje tilbagebetalt allerede efter 1. eller 2. sparede lejeskift, da udgifterne til at udskifte lejet i form af materialer og arbejds løn typisk er 2-10 gange større end lejets pris. Er der endvidere tabt fortjeneste som følge af nedetid på fx produktionsudstyr, vil lejet være tilbagebetalt allerede ved første sparede lejeskift og en betydelig økonomisk gevinst vil formentlig komme oven i.

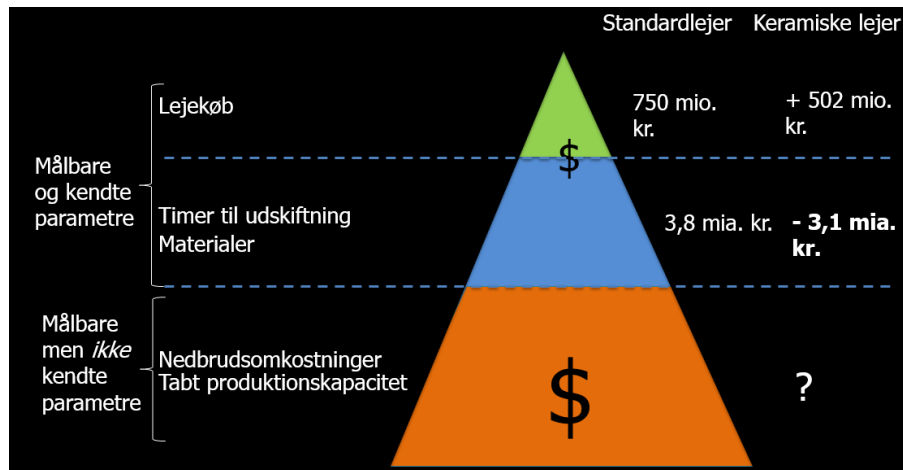


Figur 7-2 Beregninger på udvalgte motorer. Bygger på omkostningerne til skift af lejet i motoren. Beregningen er lavet på ABB motorer og vil variere med energiklasse/fabrikat. Ligesom omkostningerne forudsætter at motoren er god stand.

Det anslås, at industrien i Danmark årligt køber lejer for ½-1 mia. kr. i forbindelse med udskiftning af defekte lejer. Der laves nu en beregning over de samlede omkostninger forbundet med disse lejeskift. Dette ses i forhold til alternativet hvor det defekte leje udskiftes med et keramisk leje i stedet for et standardleje.

Figur 7-3 viser de samlede årlige omkostninger til servicering af standardlejer samt udgiftsændringen, hvis der i stedet blev anvendt keramiske lejer. Udgifterne til køb af standard lejer antages at være 750 mio. kr. Hvis man i stedet vælger at anvende keramiske lejer vil man få en merudgift til lejeindkøb på 502 mio. kr. At merudgiften ikke er større skyldes, at der skal købes væsentlig færre keramiske lejer, idet de ikke skal skiftes så ofte som standardlejer. Udgifterne til selve udskiftningen af lejerne i form af arbejds løn og materialer er for standardlejer 3,8 mia. kr. Anvender man keramiske lejer vil udgifterne til denne post reduceres med 3,1 mia. kr., da der vil være langt færre udskiftninger. Det betyder, at merudgiften til selve lejerne er tjent hjem 6 gange i sparede omkostninger til udskiftninger. Går man skridtet videre og ser på udgifterne i form af tabt produktionskapacitet som følge af lejeskift og dermed nedetid på produktionsudstyr, vil udgifterne her langt overstige både lejepris og pris for udskiftningen. Det egentlige tal for denne udgift kendes ikke.

Det er ud fra denne betragtning indlysende, at hvis man har noget udstyr, hvor lejerne går i stykker, så vil det kunne betale sig allerede ved første udskiftning at vælge keramiske lejer. Indgår udstyret som en del af en produktionslinje vil besparelspotentialet kun blive større.



Figur 7-3 Illustration af de årlige omkostninger ved servicering af lejer industrien i Danmark ved hhv. standardlejer og keramiske lejer.

7.4.1 Case: Sav på et savværk

Et konkret kundeeksempel på sparede omkostninger ved skift til keramiske lejer er en sag hos Rold Skov Savværk. Savværket havde en sav, hvis lejer skulle skiftes hver tredje måned. Hver udskiftning var forbundet med et produktionsstop, som kostede 20.000 kr. Da savværket skiftede lejerne i saven til keramiske lejer, oplevede de en besparelse på 110.000 kr. alene i de første 13 måneder efter udskiftningen. Bare på udgiften til nye lejer blev der i perioden sparet 20.000 kr. Rold Skov savværk har over 4 år erstattet mange af de lejer de udskifter til CeramicSpeed lejer, og har i dag kun 1/5 af de lejeskift, som de tidligere havde.

7.5 Delkonklusion

Ud fra energiberegningerne præsenteret i afsnit 7.1 blev det fundet, at en investering i keramiske lejer kan betales tilbage vha. ren energibesparelse inden for 1-5 år, når man ser på store motorer (over 100-200 kW). Det er derfor en realistisk investering for en virksomhed.

Ser man på de mindre motorer er tilbagebetalingstiden i visse tilfælde helt oppe på 20 år og det er derfor ikke realistisk, at en virksomhed vil foretage investeringen ud fra et rent energimæssigt perspektiv. For at få energibesparelserne i de mindre motorer realiseret, er man nødt til at tage de ikke-energimæssige fordele med i betragtning. Små

motorer, som drives vha. en frekvensomformer vil ofte have problemer med strømskader på lejerne. Her vil reducerede omkostninger til lejeskift samt undgåede produktionsstop være det, som får en virksomhed til at vælge keramiske lejer. I disse tilfælde vil energibesparelsen blot være en bonus for virksomheden.

Oplever en virksomhed produktionsstop som følge af defekte lejer, vil det formentlig altid kunne betale sig økonomisk at skifte til keramiske lejer.

Sammenholdes resultaterne fundet i foranalysen i form af Tabel 6.4 med observationerne i potentialeanalysen, kan det konkluderes, at potentialet for realiserbare energibesparelser er størst i udstyret markeret i Tabel 7.3. Til forskel fra Tabel 6.4 er små motorer og små transmissionssystemer fjernet, mens store motorer er tilføjet.

	Motor			Transmission			Belastning		
	Små	Ml.	Store	Små	Ml.	Store	Små	Ml.	Store
Ventilation									
Pumpning									
Trykluft									
Køling									
Hydraulik									
Anden motordrift									

Tabel 7.3 Markering af systemer med det største besparelspotentiale, som samtidig vil være realistisk at få realiseret. Små = 0-4kW, Ml. = 4-30kW og Store = 30-500kW.

8 Udvælgelse af maskin- og lejetyper

Forundersøgelsen og potentialeanalysen har givet et indblik i, hvor i industrien de største energibesparelser findes, og hvor det samtidigt er økonomisk realistisk at få realiseret. Dette afsnit vil med udgangspunkt i de to analyser finde frem til de maskiner og lejetyper, som skal undersøges nærmere i projektet vha. tests.

Først findes de systemkomponenter, for hvilke energibesparelsen i sig selv er nok til at gøre et skift til keramiske lejer økonomisk attraktivt. Dernæst findes de maskiner, for hvilke de ikke-energimæssige fordele må tages med i betragtningen for at gøre et lejeskift økonomisk attraktivt.

8.1 Potentiale pga. energi

Der ingen tvivl om, at det største potentiale ligger hos de mellem og store systemer. For de små systemer er energibesparelspotentialet pr. enhed for lille i forhold merprisen for lejet. Selvom der i afsnit 6.2.3 blev fundet et stort energitab hos de små motorer i anden motordrift, vil dette tab være delt ud på rigtig mange motorer. Det betyder, at et meget stort antal lejer skal skiftes for at realisere besparelspotentialet i denne kategori, hvilket økonomisk ikke vil være favorabelt. Dermed ikke sagt at det aldrig vil kunne betale sig at skifte lejer i en lille motor – her er det blot nødvendigt også at medregne de ikke-energimæssige fordele.

Ud fra denne betragtning må det konkluderes, at det ud fra et energimæssigt synspunkt er interessant, at undersøge motorer, ventilatorer, pumper og kompressorer (dækker både trykluft og køling) i mellem og store systemer.

8.2 Potentiale pga. totaløkonomi

I hårde miljøer, hvor levetiden af et standardleje er lav og lejerne derfor ofte skiftes, vil det være den længere levetid af det keramiske leje som primært gør investeringen økonomisk attraktiv. Et hårdt miljø kan f.eks. være drift under høje temperaturer, stor partikelforurening eller mange start og stop. Strømgennemgang vil også gøre levetiden af et standardleje meget kort. I systemer, hvor strømgennemgang er et problem, vil det ligeledes være økonomisk attraktivt at skifte til keramiske lejer, da der ikke kan ske strømgennemgang i disse. Ofte vil strømskader ske i systemer drevet af en frekvensomformer, men det kan også ske andre steder. Desuden vil det ofte være lejerne i motoren, der har størst risiko for at få strømskader.

Udstyr i hårde miljøer eller udstyr styret gennem en frekvensomformer er således interessante for projektet, da et lejeskift i disse vil resultere i energibesparelser, selvom energibesparelsen ikke er den primære motivation for investeringen i de energieffektive lejer.

8.3 Projektafgrænsning

Ved en analyse af teknologierne ventilation, pumpning, trykluft/køling og transmission i bilag 2, ses det at der ofte er mange parametre der bidrager til tabet ud over lejerne. Det kan samtidigt være vanskeligt at måle effektiviteten nøjagtigt nok til at se en reducere i lejetabet.

8.3.1 Ventilation

Virkningsgraden af en ventilator bestemmes ved at måle den totale trykstigning over ventilatoren, luftstrømmen gennem ventilatoren samt motorens effektoptag. Usikkerheden på virkningsgraden vil generelt være høj (omkring plus minus 3 %). Der vurderes derfor, at det ikke er muligt direkte at måle energibesparelsen ved et skift fra konventionelle lejer til keramiske lejer i en ventilator. Til gengæld er det muligt at lave en indirekte undersøgelse, se afsnitte Simulering af lejetab.

De fleste ventilator lejer sidder i relativt beskyttede miljøer da de er godt kølede og kun skal beskyttes mod støv og evt. dampe.

8.3.2 Pumper

Virkningsgraden af en pumpe bestemmes ved at måle trykstigningen over pumpen, volumenstrømmen gennem pumpen og motorens effektoptag.

Ligesom ved ventilatoren er usikkerheden på bestemmelsen af pumpens virkningsgrad stor. Forskellen i virkningsgraden mellem en pumpe med standardlejer og keramiske lejer vil derfor ikke kunne måles. Desuden er der ofte akseltætninger i pumpen, som ikke kan monteres helt ens fra gang til gang, og deres bidrag til friktionen vil langt overskygge friktionen i lejet.

Lejerne i pumper ser ofte forurening fra pumpemediet der lækker forbi akseltætningerne. Ikke sjældent er det medie der pumpes opvarmet.

8.3.3 Trykluft/køling

Virkningsgraden af en kompressor afhænger af en lang række parametre og usikkerheden på en evt. måling vil være større end besparelsen man kan forvente ved et lejeskift.

Kompressorer kører ofte i mange korte perioder, hvilket giver mange startstop for lejerne.

8.3.4 Transmission

Virkningsgraden for et gear kan bestemmes ved at måle effekten tilført indgangsakslen og effekten som kommer på udgangsakslen. Det kræver en særdeles specialiseret testopstilling at måle på gear.

Tit deler lejerne i et transmissions system smøring med de gear der indgår. Dette betyder at partikler slidt af gearene kommer ind i lejerne.

8.3.5 Elmotorer

Hovedparten af de elmotorer der anvendes i industrien er asynkrone AC motorer og det er den eneste type motor projektet beskæftiger sig med. Rotoren er typisk af squirrel cage typen, men med højere krav til virkningsgraden er rotorere med permanente magneter begyndt at komme frem.

Motorakslen går direkte gennem rotoren og er typisk monteret med et par sporkuglelejer. Det ene leje vil i det tilfælde være monteret med en stram pasning, mens det andet med en løsere pasning der tillader akslen at udvide sig som følge af opvarmning til drift temperatur. For at sikre en aksial forspænding, sidder der typisk en bølgefjeder på yderringen af lejet med løs pasning. For at undgå at støv og væsker trænger ind i motoren og lejerne, vil der ofte være et par frikterende tætninger på hver ende af akslen. Kølingen af motoren klares ved en ventilator der også er direkte drevet af akslen.

Lejer, tætninger og motorens egen ventilator bidrager alle til det mekaniske tab i motoren. Derudover er der et elektrisk og et magnetisk tab. Målingen af motorens effektivitet måles ved at måle den elektriske effekt og den leverede mekaniske effekt på akslen.

Lejemiljøet er selvfølgelig bestemt af miljøet hvor motoren er placeret og hvad den er tilkoblet, normalt er betingelserne gode, men det varierer voldsomt. Den største enkeltstående udfordring for lejer i elmotorer er lejestrøm.

Elmotorer er valgt som hovedfokus i projektet da det er muligt effektivt at isolere tabet i lejerne fra de resterende tab.

8.3.6 Simulering af lejetab

Selvom det ikke er vurderet muligt at lave direkte målinger af lejetabet på andet end elmotoren, er det stadig muligt at komme med et godt bud på hvad tabet er i nogen af de andre applikationer, hvis man kender belastningen af de pågældende lejer. Vi har derfor udsat nogle lejer for den belastning de ville se i en ventilator og målt lejetabet.

9 Tests af friktion i keramiske lejer

Forrige afsnit viste, at for en stor del af det roterende udstyr er måleusikkerheden på virkningsgraden for stor til at energibesparelsen ved et skift til keramiske lejer kan bestemmes ved en direkte måling på det roterende udstyr.

9.1 Testmetoder

9.1.1 Momentmålinger

Der udføres momentmålinger på to testopstillinger. Den ene er på en testbænk fra et tidligere projekt. Den anden er levetidstesteren indkøbt til dette projekt. For begge systemer hænger kvaliteten af målingerne sammen med selve momentmåleren. En lang opvarmningsperiode af selve momentmåleren er nødvendig da nulpunktet driver med temperaturen af udstyret. Ustabilitet i motor og frekvensomformer fremgår igen på målingerne.

9.1.1.1 Momentmåling på 6205 testbænken

Denne testbænk er tidligere designet til at simulere den mest almindelige lejeopsætning hvor to lejer er monteret på en roterende akse. Se mere om denne testopstilling i Bilag 3.

Af sikkerhedshensyn er der ikke kørt med vægte over 1500RPM. Derfor er de målinger der er medtaget her uden ekstra vægt og ved 3000RPM.

Under de viste test er belastningen af hvert af lejerne derfor 46N i radial retning og en ukendt aksial belastning. Lejerne køres ind i 40 timer inden de endelige målinger tages. Der tages 2 målinger med et par timers mellemrum og hver måling er et gennemsnit over 7 minutter.

Testede lejer	Lejetab
SKF Explorer	24,3 W
CS.LL12	18,6 W

CS lejerne ligger her 23% lavere end SKF lejerne.

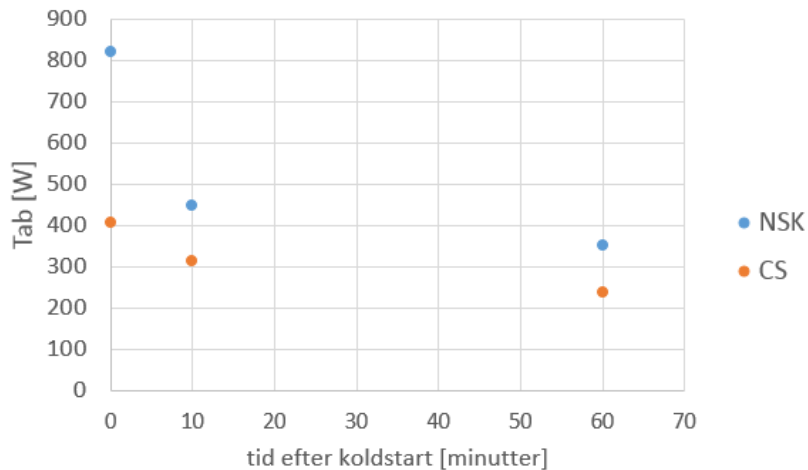
9.1.1.2 Momentmåling på EELPRAAX80 (levetidstesteren)

Ved målinger af lejetabet på levetidstesteren indsættes der en momentmåler imellem motor og lejeaksel. Levetidstesteren har flere fordele frem for de øvrige testmetoder. Belastningen af lejerne er velkendte, både i aksial og radial retning. Der kan laves målinger ved høj belastning af lejet, men ikke under 2kN radiale og 4kN aksiale. I modsætning til målingerne på 6205 teststanden, indføres der ikke parasitiske tab til luftmodstanden når lejet belastes. Omdrejningshastigheden kan kontrolleres fra 0 - 3500 RPM. Temperaturen kan kun kontrolleres ved at ændre den omgivende temperatur, men automatisk logning af yderringstemperaturen giver en nøjagtig historik over lejetemperaturene.

9.1.1.3 Måling på 4 lejer under radial belastning

Efter den første indkøring af lejerne til levetidstestene tages der momentmålinger. Målingerne giver friktionstabet af alle fire lejer. Der foretages levetidstest på NSK 6208-VVC3 lejer og CS lejer 6208-2RZ/CSB.C3.LL12 bygget med lejeringe fra NSK.

Hvert leje er belastet med en 2,8kN ren radial kraft og testen foretages ved 3000RPM.

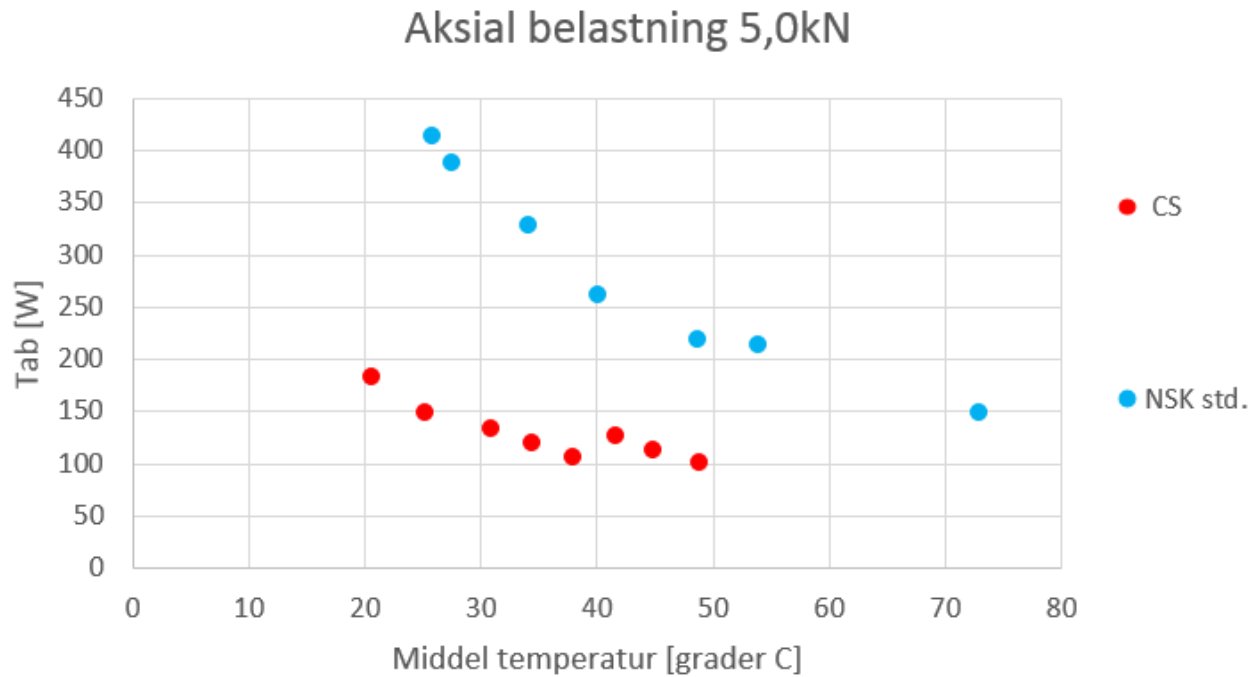


Figur 9-1

Efter en time er lejetabet med CS lejerne 33% lavere end med de tilsvarende NSK lejer. Det er dog værd at bemærke hvor stor forskellen er lige under start.

9.1.1.4 Måling på 2 lejer under aksial belastning

Når der måles på lejer der belastes i aksial retning køres der kun med to lejer og da de sidder symmetrisk ift. køling bliver deres indbyrdes temperaturforskelle minimal. Ved at køre ved forskellige hastigheder umiddelbart inden målingen foretages opnås der forskellige temperaturer lige under målingen. Alle målingerne der er vist er lavet ved 3000RPM.



Figur 9-2 Samlet tab for to lejer

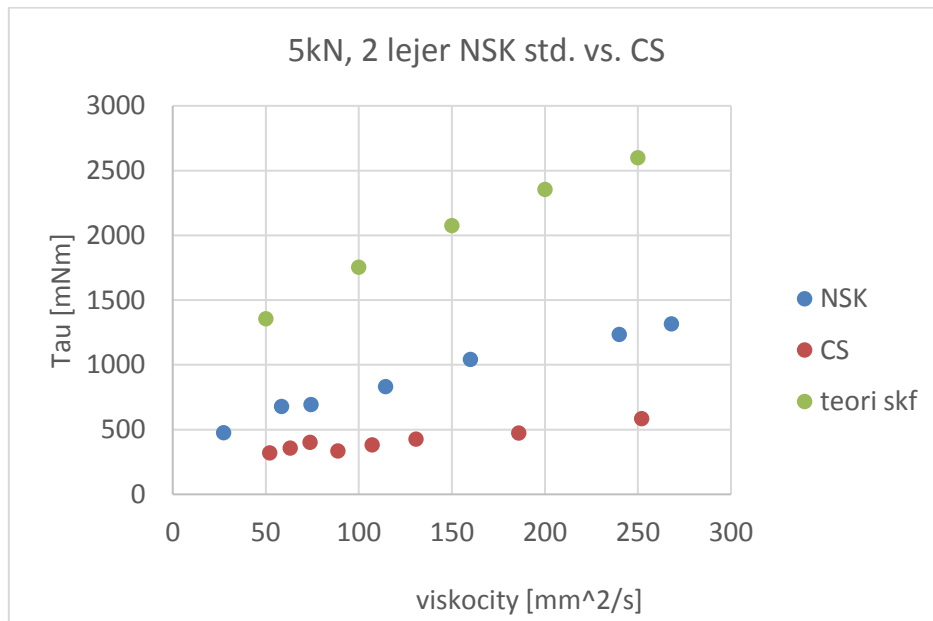
Man kan nu beregne besparelsen i lejetabet på to måder. Enten ved at se på forskellen mellem de to typer lejer ved samme temperatur, eller ved at se på hvilken forskel der er ved samme indkøringshastighed.

	Ved 40 grader	Ved samme belastning*
CS	115 W	101 W
NSK	271 W	213 W
Besparelse	57%	52%

* her er indkøringshastigheden også 3000RPM

Den højere drifttemperatur ved standardlejerne er altså med til at reducere forskellen. Forskellen i drifttemperatur mellem de to typer lejer er afhængig af kølingen, så jo bedre køling jo større besparelspotentiale vil man se.

Hvis man vil undersøge hvordan målingerne ligger i forhold til den teoretiske model skal man kende alle de parametre der indgår i beregningsformlerne, dette er tilfældet her og man kan derfor lave sammenligningen:



Figur 9-3

Umiddelbart ser teorien ud til at passe dårligt på begge typer lejer i det målte område.

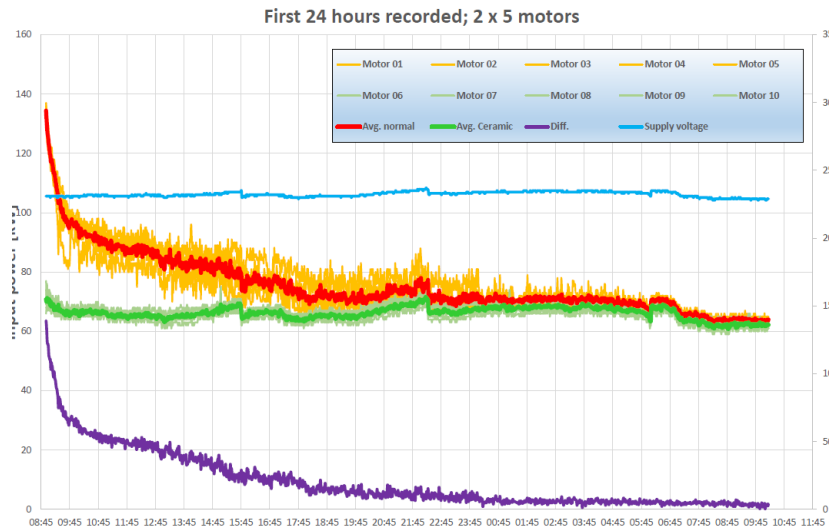
9.1.2 Forbrugstesten

Der er ved teknologisk institut foretaget målinger på en gruppe af 10 1,5kW IE4 "squirrel cage" motorer. De er delt op i to grupper på 5. Hver gruppe får en slags 6205 lejer monteret. De to grupper testes op mod hinanden for at få forskellen i forbrug. Motorerne er modificeret ved at køleblæser, samt akseltætninger er fjernet. Da motorerne kører uden anden belastning end de indbyggede tab, er det elektriske tab reduceret og drift temperaturen af motorerne ligger tæt på den en belastet motor med køleblæser vil have. Derudover er motorerne tilpasset så det er et 6205 leje der sidder i både DE og NDE. Alle motorer forsynes fra lysnettet gennem samme knudepunkt for at sikre samme spænding. Til hver motor er tilknyttet en husstandselmåler, der løbende måler motorens forbrug.

Testen er designet efter at lejerne kører under så ens forhold som muligt, derfor kører de to grupper samtidigt. Der er valgt at måle på flere motorer af gangen, for at tage højde for evt. variationer i motor- og lejetab inde for samme testgruppe. Testen giver udelukkende forskellen i lejetabet mellem to typer lejer, da det elektriske tab i motorerne også bliver målt. Det elektriske tab hænger tæt sammen med forsyningsspændingen, der varierer.

9.1.2.1 Resultater fra forbrugstesten

Der er lavet to test hvor henholdsvis FAG og SKF lejer testes op mod CS.LL12 lejer. Ved begge test ses en stor forskel i starten, der derefter langsomt reduceres til en mindre, men stabil forskel.



Figur 9-4 FAG vs. CS.LL12 på 1,5kW motorer

De små knæk der ses i grafen der viser gennemsnittet for de to grupper hænger sammen med spring i forsyningsspændingen. I grafen for forskellen (lilla graf) forsvinder disse udslag. Det ses at der i indkøringen er stor forskel på tabet mellem de forskellige motorer i gruppen af FAG motorer. Efterhånden som lejerne køres til reduceres forskellen mellem de forskellige motorer. På CS lejerne er forskellen mellem de forskellige motorer betydeligt mindre. Indkøringsperioden er også meget kortere.

Testen	Forskel per motor efter 4 timer	Forskel per motor efter 24 timer	Forskel per motor efter 75 timer
FAG vs. CS.LL12	20W	1,4W	2,3W
SKF Explorer vs. CS.LL12	4W	0,8W	-

9.1.3 Nedløbsmålinger

Der foretages to typer nedløbsmålinger på de elektriske motorer. Den første er en simpel ulogget måling af hvor lang tid det tager fra forsyningsspændingen afkobles til motoren står stille. Ved den anden monteres en omdrejningstæller på motoren sådan at omdrejningshastigheden kan logges under hele nedløbet.

Friktionstab i motorlejerne var givet ved formel 1, her skrevet på kort form:

$$P = \tau \omega \quad (7)$$

Hvor P er effekttabet, τ er friktionsmomentet, ω er igen vinkelhastigheden.

Når rotoren er i rotation indeholder den et impulsmoment. Friktionen fra lejer mm. bremser rotationen og denne nedbremsning kan bruges til at finde friktionsmomentet jf.:

$$\tau = I\alpha \quad (8)$$

I er rotorens inertimoment og α vinkel-accelerationen af rotoren. Vinkel accelerationen kan findes ved at aflede vinkelfrekvensen med hensyn til tiden:

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} \quad (9)$$

Sammenskriver man formel 10 , 11 og 12 får man altså:

$$P = I\omega \frac{d\omega}{dt} \quad (13)$$

Eller man kan nøjes med friktionsmomentet:

$$\tau = I \frac{d\omega}{dt} \quad (14)$$

Man kan ud fra en måleserie med omdrejningshastigheder under nedløb approksimerer den tidsafledte ved at se på forskellen i omdrejningshastigheden mellem to målepunkter:

$$\frac{d\omega}{dt} \approx \frac{\omega_1 - \omega_0}{\Delta t} \quad (15)$$

Her er Δt tiden mellem de to omdrejningsmålinger, ω_1 og ω_0 . Jo længere tid der er mellem to målinger jo mindre rigtig bliver formelen, men til gengæld bliver den procentvise støj på hver enkel måling lavere.

De loggede målinger tager hensyn til at friktionsmomentet afhænger af omdrejningstallet. Hvis man antager at friktionsmomentet er konstant over alle hastigheder kan man med de uloggede målinger estimere tabet i lejerne ud fra den totale nedløbstid. I det tilfælde er:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{-\omega_0}{t_{nedløb}} \quad (16)$$

9.1.3.1 Ulogget nedløbstest på alle motorer fra forbrugstesten

Testene foretages på WEG motorerne fra forbrugstesten. Ved første test er lejerne derfor allerede kørt ind. Det er igen 5 motorer med SKF Explorer 6205-2Z.C3 lejer vs. 5 motorer med 6205-2RZ/CSB.C3.LL12. Motorerne køres driftsvarme over en nat hvorefter strømme tages og motorerne filmes mens de spinder ned. Ved anden test bliver CS lejerne siddende i og SKF lejerne skiftes ud med nogle billige lejer, disse køres ind over et par dage og der laves endnu et filmet nedløb.

Resultatet af nedløbstiderne er vist herunder.

	Leje type	Minimum	Gennemsnit	Maksimum	Beregnet lejetab
Måling 1	SKF Explorer	43 s	51 s	64 s	3,9 W
	CS.LL12	74 s	86 s	104 s	2,3 W
Måling 2	CS.LL12	55 s	77 s	94 s	2,5 W
	Billige lejer	26 s	30 s	35 s	6,0 W

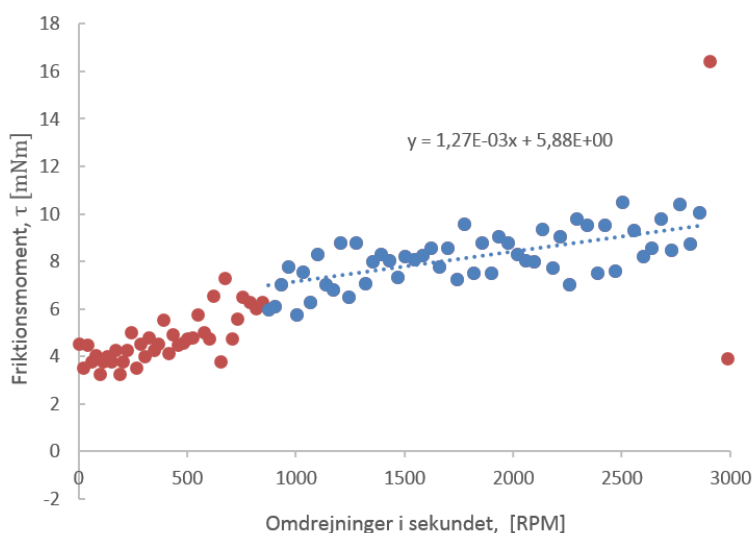
Gennemsnittet af de 5 nedløbstider bruges i formel(16 til at beregne den gennemsnitlige vinkelacceleration. Derefter giver formel 17 den gennemsnitlige effekt. Besparelsen på lejetabet bliver 41% ved CS lejer fremfor SKF. 58% når der testes mod discount lejerne.

9.1.3.2 Logget nedløbstest

For at tage hensyn til at friktionsmomentet er afhængigt af omdrejningerne udstyres en motor med en omdrejningsmåler med automatiseret datalogning. Det er kun muligt at måle på en motor af gangen. Motoren kører til stabil drift temperatur. Under nedløb logges omdrejningerne og lejetabet kan beregnes til alle omdrejningshastigheder da inertimomentet af rotoren er kendt.

9.1.3.3 Nedløbsmåling på motor CS.LL12

Der måles indledningsvis på CS-motoren med længst nedløbstid fra SKF vs. CS testen. Motoren køres driftsvarm over et par timer. Herunder ses det beregnede friktionsmoment under nedløbet.



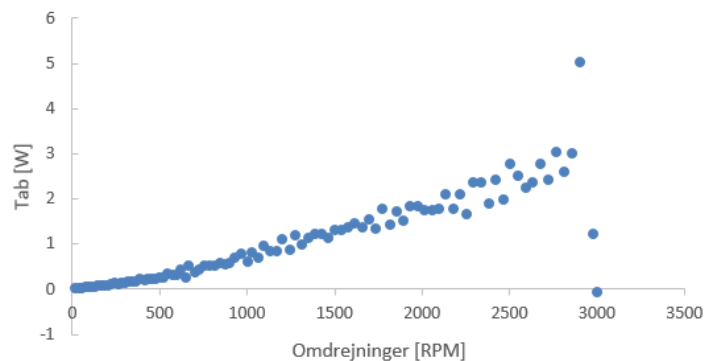
Figur 9-5

Friktionsmomentet er bestemt ved 3000RPM ud fra en tendenslinje over målepunkterne fra ca. 1000RPM til lige under 3000RPM (blå punkter). De første målepunkter lige efter at motoren slukkes er ikke taget med henholdsvis fordi målepunkterne er et gennemsnit over 1 sekund og fordi det tager et øjeblik før magnetiseringen i motoren

forsvinder, hvilket giver en øget nedbremsning. Det viser sig at grafen for friktionsmomentet ændre sig drastisk, hvis motoren startes op lige efter først måling og en ny nedløbsmåling tages umiddelbart efter. Det kan skyldes at noget af det fedt der ellers vil ligge uden for rækkevidden af kugler og kugleholder har mulighed for at glide ned i løbebanen, samt at temperaturen kan nå at falde i lejet.

Herunder ses lejetabet beregnet med formel 18 ud fra det beregnede friktionsmoment ved 3000RPM. Resultat sammenlignes med en estimering af lejetabet lavet ved at måle på de elektriske egenskaber af motoren og lejetabet estimeret ud fra den totale nedløbstid. Tallene er for 2 lejer.

Testet leje	Lejetab ved 3000RPM	Total nedløbstid	Beregning af lejetab ud fra $U^2 \cdot R$ - metoden	Lejetab ved 3000RPM estimeret ud fra total nedløbstid.
CS.LL12	3,0W**	92s	~3W	2,1W

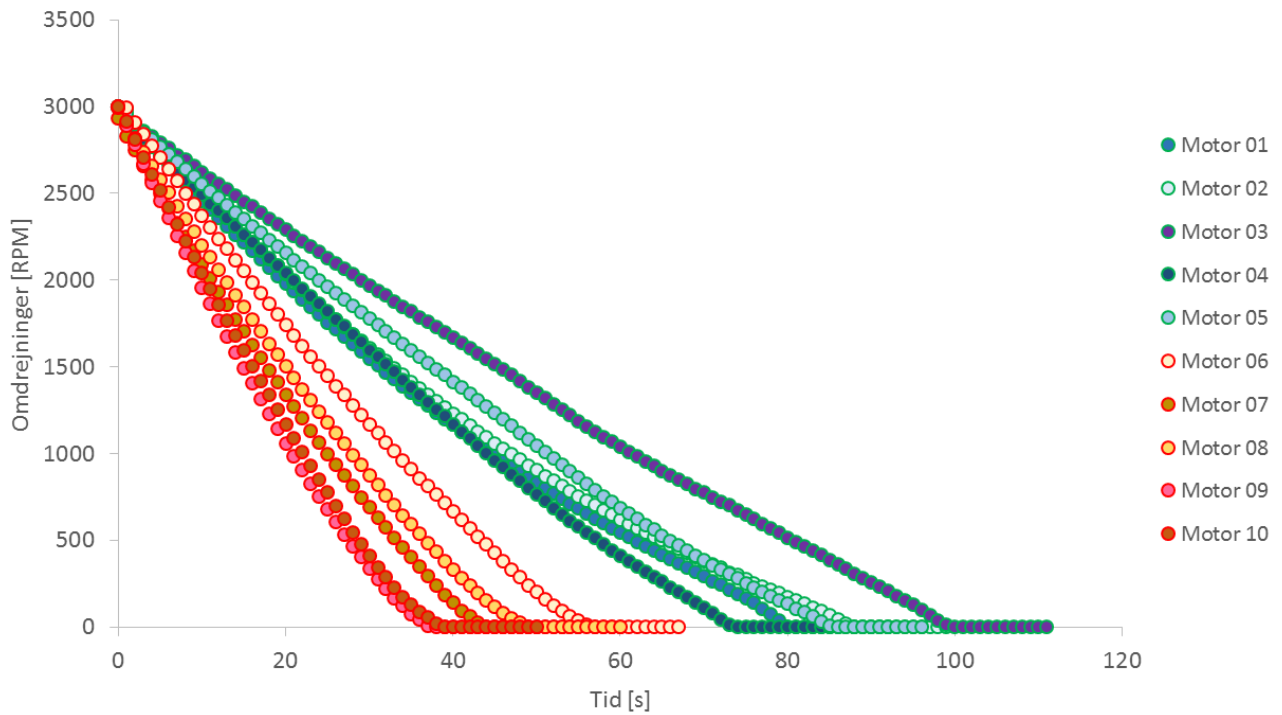


Figur 9-6

Det er værd at bemærke at det lejetab der kan estimeres ud fra den totale nedløbstid er noget under hvad den loggede måling giver og desuden hvad $U^2 \cdot R$ målingerne giver. Dette skyldes, som det også ses på Figur 9-5 at friktionsmomentet falder med omdrejningerne. Dette er helt i tråd med teorien.

9.1.3.4 Nedløbsmåling på alle motorer

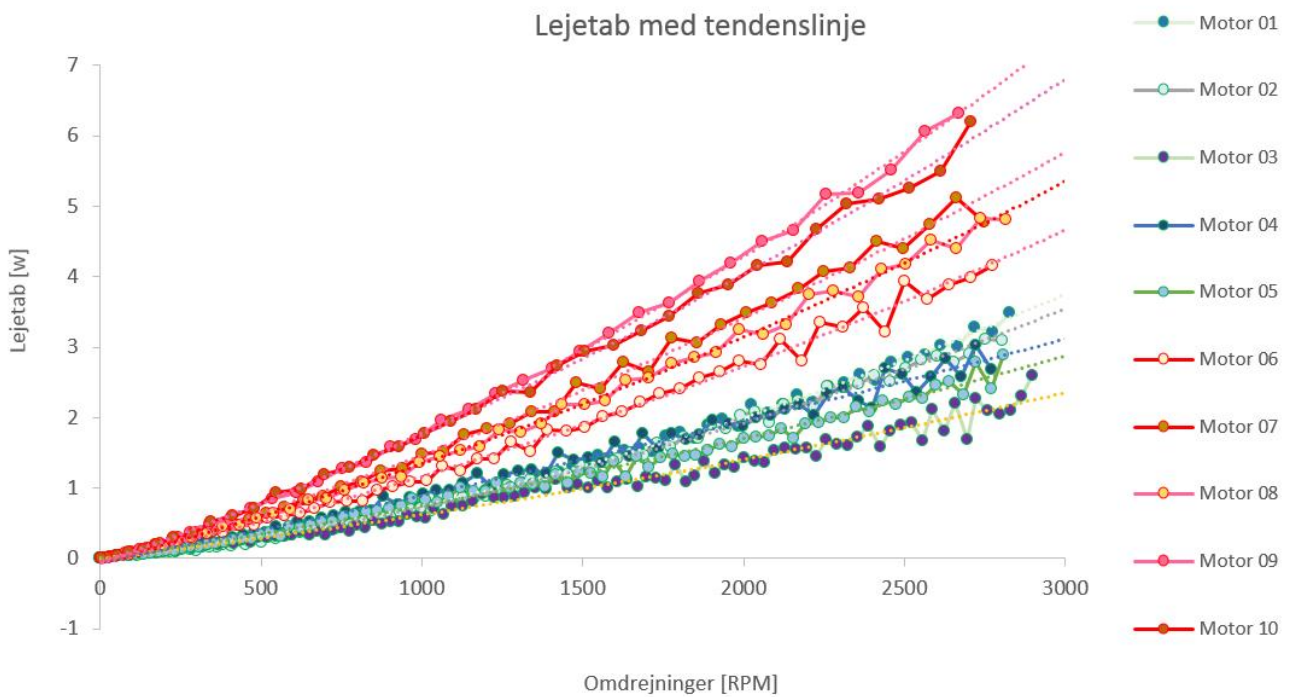
På baggrund af den variation der ses i friktionsmomentet over omdrejningsspektret som det ses ved den loggede nedløbsmålingen og den variation der ses på den totale nedløbstid der ses ved de uloggede målinger på alle motorer besluttes det at lave loggede nedløbsmålinger på samtlige motorer. Motorerne måles i serie, hver motor køres driftsvarm over en nat.



Figur 9-7 Motor 01-05 er motorer med CeramicSpeed lejer, Motor 06-10 er med SKF lejer. (modsat FAG testen)

Som det ses på de rå målinger i Figur 9-7 fordeler de to typer lejer sig i to grupper uden overlap.

Lejetabet for hver motor beregnes ud fra nedløbsmålingen.



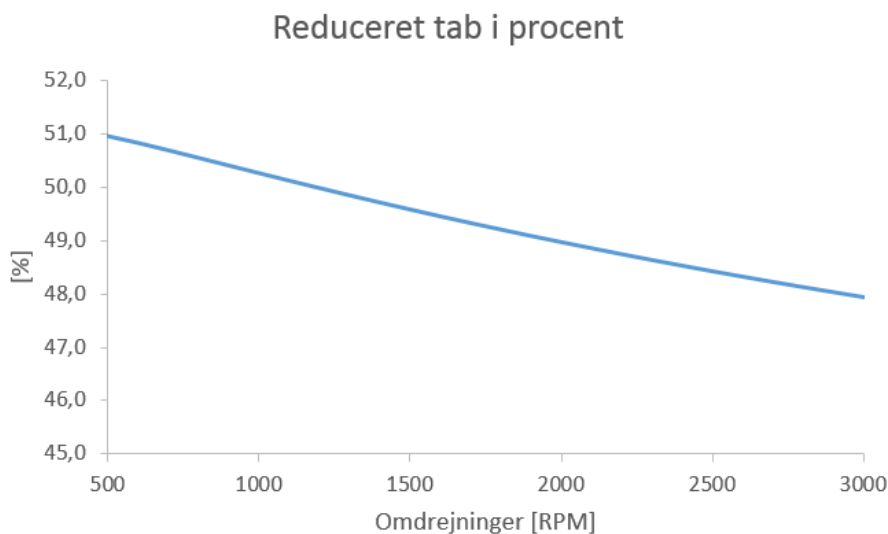
Et polynomium fittes til hver måleserie. Teorien foreslår et polynomium med et $\omega^{1,6}$ led, men af praktiske hensyn bruges et andengradspolynomium, da det matcher de målte data fint og giver tabet i hele området fra 0 til 3000 RPM.

Ekstrapoleret til 3000RPM ligger lejetabet for de 10 motorer:

Motor ID	Leje Tab ved 3000 RPM [Watt]	
1	3,7	
2	3,5	
3	2,4	
4	3,1	Gennemsnit CS
5	3,0	3,1W
6	4,7	
7	5,9	
8	5,4	
9	7,5	Gennemsnit SKF
10	6,9	6,1W

Hermed er er lejetabet ved 3000RPM i gennemsnit reduceret med 48%.

Da de loggede data giver os tabet over hele området 0-3000RPM kan reduktionen i tabet beregnes som funktion af omdrejningerne.



Figur 9-8

Det ses det at den procentvise reduktionen i tabet er rimeligt stabilt ned gennem omdrejningerne. Fra 48% ved 3000RPM til 51% ved 500RPM. Det er en forskel der umiddelbart ligger tæt på måleusikkerheden, så der er ikke belæg for at konkludere andet end at den procentvise besparelse er tilnærmelsesvis uafhængig af omdrejningstallet.

9.1.4 Nedløbstest på gammel motor

Der blev lavet en nedløbstest på en gammel ABB 11kW motor taget ind til service efter 25000 driftstimer. Kølevinger og pakninger blev fjernet og motoren blev kørt drift

varm, dvs. 60 grader. Først blev der lavet ulogget nedløbstest på de oprindelige lejer. NSK 6309-2Z-C3 og NSK 6209-2Z-C3. Derefter blev disse lejer taget ud og erstattet med tilsvarende CS lejer. Disse lejer blev kørt ind i løbet af mere end 48 timer og der blev igen lavet uloggede nedløbsmålinger.

Resultatet viste overraskende at nedløbstiden var kortere for CS lejerne. Ved en analyse af de gamle NSK lejer viser det sig at fedtet i 6309 lejet var blevet mørkt. Dette tyder på en fremskreden nedbrydning af fedtet. Fedtet i 6209 lejet er stadig beige.



Figur 9-9 Fedt på indersiden af tætningen på NSK 6309 lejet fra gammel motor. Den grønne pil angiver område med fedt der minder om original fedtet, den røde viser den tilstand det meste fedt er i.

Nedbrydning af fedtet kan modintuitivt have en fordelagtig indflydelse på friktionen, da det betyder at basisolieviskositeten falder. Hvilket til et punkt giver lavere friktion, indtil oliefilmen gennembrydes og friktionen igen stiger sammen med risikoen for skader.

9.1.5 Ventilator simulering

Der tages udgangspunkt i en ventilator beskrevet i [11]. Ventilatoren er monteret med overhæng i vandret retning. Hvilket gør at det ene leje ser en stor radial belastning og det andet en primært aksial belastning. I eksemplet er dette hhv. 8,5kN radialt og 5kN aksialt.

	Tab ved 5 kN aksial belastning	Tab ved 8,5 kN radial belastning	Samlet tab
Teoretisk beregnet tab konventionelt leje med NSK fedt	240W	181W	421W
Målt tab CS	58W	65W	123W
Målt tab NSK	139W	76W	215W

Det totale besparelspotentiale er altså 43% på lejetabet i ventilatoren.

9.2 Konklusion på testresultater

Projektet viser med tydelighed, at lejefriktion kan reduceres væsentligt (48% dokumenteret for elmotorer) ved anvendelse af de testede CeramicSpeed lejer og de her i anvendte materialer. Denne procentsats har vist sig at holde over det almindelige omdrejningsområde. Størst besparelspotentiale sås umiddelbart ved rent aksialt belastede lejer.

Videre konkluderes det gennem projektføreløbet, at målingen af sådanne lejetab er vanskelig idet mange parametre indgår i en elektrisk drivlinjes samlede energiforbrug, og at disse kan være vanskelige at isolere.

Lejerne fra CeramicSpeed variere mindre i friktion end de andre typer testede lejer. Ligeledes er indkøringsperioden mindre udtalt ved CeramicSpeeds lejer, i særdeleshed første gang lejerne benyttes.

Den teori for lejetab der er fremført i afsnit 5.1 ser ud til at være en faktor to fra de målte værdier på standardlejerne.

9.2.1 6205-Teststand (Afsnit 9.1.1.1)

Der er blevet foretaget et stort antal målinger på 6205 teststanden, men på grund af en dårlig repetérbarhed af målingerne og de mange usikkerheder ved denne målemetode er nøjagtigheden af resultatet ikke vurderet særlig god. Resultaterne fra nedløbstesten viser at der er en stor spredning mellem ellers identiske lejerpar og dette taler imod at konkludere på resultater fra et sæt lejer.

Forbrugstesten viser at denne forskel er særligt stor for standardlejer under indkøringen. CS lejerne starter ud med betydeligt mindre spredning.

9.2.2 Momentmålinger på levetidstester (Afsnit 9.1.1.2)

Momentmålingerne på levetidstesteren eliminere mange af fejlkilderne fra 6205 teststanden, men har ikke samme statistik som ved forbrugstesten. Følsomheden af momentmåleren overfor temperatur er igen vigtig at tage med og da lejerne her er den eneste kilde til varme bevirker det at lejer med forskellig friktion kommer til at kører ved meget forskellig temperatur. Da viskositeten af smøringen påvirkes kraftigt af temperaturen reducere dette forskellen mellem lejer med høj og lav friktion. Dette er der kompenseret for ved at måle ved forskellige temperaturer.

Alternativt kommer man stort set uden om dette problem ved at måle på lejerne i elmotorer, da temperaturen her hovedsageligt er bestemt af det elektriske tab.

9.2.3 Forbrugstest (Afsnit 9.1.2)

Lejerne i forbrugstesten har kørt ved temperaturer der ikke variere mere end et par grader mellem standardlejer og CS lejer. Forbrugstesten måler kun den relative forskel mellem de to grupper lejer og målenøjagtigheden ligger tæt på den forskel der skal måles.

9.2.4 Nedløbsmålinger (Afsnit 9.1.3)

Ved de uloggede nedløbsmålinger på motorerne fra forbrugstesten opnås den fordel at man kun måler det mekaniske tab i motoren og da køler og tætninger er fjernet er det næsten alene udgjort af lejerne. Man har stadig den stabile temperatur og statistikken fra 10 motorer, men mangler informationen om hvordan friktionen afhænger af omdrejningerne.

De loggede målinger er de mest nøjagtige målinger af det absolutte lejetab over hele omdrejningsspektret vi kan få, som samtidigt bygger på et statistisk datasæt og hvor lejerne belastes realistisk. Eneste minus er at belastningen ikke er 100% kendt.

9.2.5 Nedløbsmåling på gammel motor (Afsnit 9.1.4)

Forsøget viser med stærk tydelighed hvor vigtigt det er, at alle parametre er lige når der testes til sammenligning. Et vilkårligt leje med en minimal fedtfyldning og derved minimalt oliefriktion fra smøremidlet vil køre med lav friktion i forhold til et hvilket som helst nyt leje med intakt fedtfyldning og tilsvarende større oliefriktion fra smøremidlet. Et forhold som kan forklares teoretisk, men som ikke indgår i de almindeligt anvendte formler, når lejefriktion forsøges beregnet.

9.2.6 Ventilator simuleringen (Afsnit 9.1.5)

Besparelespotentialer på 43% på lejetabet ligger i tråd med resultaterne fra elmotorerne. Når det ikke er større skyldes det den lille forskel på det radialt belastede leje. Dette skyldes måske at belastningen er i overkanten af hvad lejet bør køre med. Ved tidligere målinger på identiske lejer i levetidstestere, men med lavere belastning, sås et bespareles potentialer på 33%. Havde denne procentsats holdt havde det samlede besparelespotentialer været 49%

10 Levetidsmålinger

Der er blevet foretaget levetidstest både hos det uafhængige testlaboratorie Elgeti-Engineering og hos CeramicSpeed på levetidstesteren EELPRAAX80.



Figur 10-1 EELPRAAX80

10.1 Teorien

Standarden for levetidsberegninger på stål-kuglelejer er L10 normen. For sporkuglelejer er formlen:

$$L_{10} = \left(\frac{P}{C}\right)^3 \quad (19)$$

Hvor C er det dynamiske bæretal for lejet, P er belastningen og L10 er antal millioner gange lejet kan roterer, hvor 90% af en population af lejer stadig kører fejlfrit. L10 normen er en empirisk formel. Den tager i denne form kun hensyn til belastningen af lejet og antager derfor perfekte smøreforhold. Der findes en korrektionsfaktor a_{ISO} som tager hensyn til forhold som olieviskositet, forureningsgrad og overfladeruhered.

$$L_{10} = a_{ISO} \left(\frac{P}{C}\right)^3 \quad (20)$$

Selv med disse modifikationer overestimerer den beregnede levetid ofte den reelle levetid. Som diskuteret i afsnit 7.3 er der mange faktorer der kan have betydning for levetiden. Ofte er det for eksempel levetiden af fedtet der er den begrænsende faktor for et levetidssmurt leje.

Når en traditionel levetidstest af lejer gennemføres, belastes lejet med en kraft der er betydeligt større end den typisk ville ses i virkeligheden. Dette gør man for at accelerere testforløbet. Da L10 levetiden afhænger voldsomt af belastningen af lejet kan testen ofte kortes ned til få hundrede timer. Problemet er igen at det som ofte ikke er L10 levetiden der er interessant at kende.

10.2 Test

Levetidstest er enormt tidskrævende da de kræver en betydelig mængde statistisk materiale. I dette projekt er der nået at blive gennemført test ved:

Leje	Belastning [kN]	Omdrejninger [RPM]	Tid [timer]
Std. NSK	17,05	1100	290
CS	17,05	1100	275
Std. NSK	8,0	3000	400
CS	8,0	3000	660

Under begge test sæt har forsøgene fortsat så længe at man har ramt udmattelsesgrænsen og dermed reelt været begrænset af L10 levetiden.

Referencer

- [1] J. C. a. S. Iqbal, »Literature Survey: bearing losses,« *ESTOMAD - Energy Software Tools for Sustainable Machine Design*, 2009.
- [2] SKF, General Catalogue, 2008.
- [3] Energistyrelsen, »Energistatistik 2012,« Februar 2014.
- [4] M. J. o. M. Rizzo, »Kortlægning af erhvervslivets energiforbrug 2008,« Dansk Energi Analyse og Viegand & Maagøe, 2008.
- [5] SKF, »SKF energy efficient bearings - because friction loss is energy lost,« 2007.
- [6] M. J. o. P. M. Petersen, »Energibesparelser i erhvervslivet,« Dansk Energi Analyse A/S og Viegand & Maagør ApS, 2010.
- [7] Danmarks Statistik, »statistikbanken.dk,« ENE2HA: Energiregnskab i fælles enheder (detaljeret) efter anvendelse og energitype, [Online]. Available: <http://www.statistikbanken.dk/statbank5a/default.asp?w=1366>.
- [8] T. Institut, »Den store blå - om systemoptimering,« Center for Energieffektivisering og Ventilation, 2014.
- [9] B. S. Kjær, »Elbesparende kuglelejer,« Elforsk-projekt nr. 342-032, 2013.
- [10] Shaft Grounding Systems, »Bearing damage due to electric discharge,« 2010.
- [11] P. E. L. H. K. W. Johannes Brändlein, *Ball and Roller Bearings*, West Sussex: Wiley, 1999.
- [12] C. M. Hvenegaard, »Den lille blå om Ventilation,« Dansk Energi, 2007.
- [13] C. M. H. o. O. Paulsen, »Den lille blå om sparepumper,« Elfor, 2004.
- [14] Grundfos, *Grundfos NB/NBG/NK/NKG (E) Ranges*.
- [15] NSK, »Bearings for pumps and compressores,« NSK, 2009.
- [16] S. Higashi, »Bearing Technology for Industrial Compressors,« *NSK Technical Journal*, nr. 22, 2011.
- [17] Grundfos, *Grundfos Motor Book*, GRUNDFOS Management A/S, 2004.

[18] J. B. Jensen, »Den lille blå om systemoptimering,« ELFOR, 2005.

Bilag 1

Beregningseksempel på teoretisk lejetab

For at få en bedre forståelse af formlerne samt en idé om det typiske watt tab i et kugleleje, gennemgås her et eksempel på en beregning af energitabet i et konkret leje.

6205-2RSH:

Operationsbetingelser for lejet: Radialt load $F_r=2000$ N, aksialt load $F_a=500$ N, hastighed $n=3000$ RPM, temperatur $T=40$ °C, smøremiddel LGMT 3 med viskositet 120-130 mm²/s v. 40 °C.

Konstanter for lejet fundet ud fra SKF tabeller: $d_m=38,5$ mm, $d_s=31,8$ mm, $R_1=3,9 \cdot 10^{-7}$, $R_2=1,7$, $S_1=3,23 \cdot 10^{-3}$, $S_2=36,5$, $C_0=7800$ N, $\mu_{sl}=0,04$, $K_{S1}=0,028$, $K_{S2}=2$ og $\beta=2,25$

Indsættes tallene i formel (5) findes rullefriktionsmomentet til

$$\tau_{rr} = 3,9 \cdot 10^{-7} \cdot 38,5^{1,96} \cdot \left(2000 + \frac{1,7}{\sin \left(24,6 \cdot \left(\frac{500}{7800} \right)^{0,24} \right)} \cdot 500 \right)^{0,54} \cdot (125 \cdot 3000)^{0,6}$$

$$\tau_{rr} = 120 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Ligeledes kan glidefriktionsmomentet findes ved at indsætte tal i formel (6)

$$\tau_{sl} = 3,23 \cdot 10^{-3} \cdot 38,5^{-0,145} \cdot \left(2000^5 + \frac{36,5 \cdot 38,5^{1,5}}{\sin \left(24,6 \cdot \left(\frac{500}{7800} \right)^{0,24} \right)} \cdot 500^4 \right)^{1/3} \cdot 0,04$$

$$\tau_{sl} = 25 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Tætningsfriktionsmomentet findes ved at indsætte i formel (4)

$$\tau_{seal} = 0,028 \cdot 31,8^{2,25} + 2$$

$$\tau_{seal} = 69 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Det totale friktionsmoment for lejet findes ved at lægge de enkelte bidrag sammen

$$\tau_{fric} = 120 + 25 + 69 = 242 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Effekttabet kan nu udregnes vha. formel (1) til

$$P_{loss} = 0,242 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot 3000 = 76 \text{ W}$$

Ud fra beregningerne ses, at ved de aktuelle driftsbetingelser er det rullefriktionen der dominerer med et tab på 46 W, efterfulgt af tab grundet tætninger på 22 W. Glidfriktionen giver anledning til det mindste tab på kun 8 W.

Friktionstabet grundet tætningen afhænger kun af rotationshastigheden, mens tabet grundet glide- og rullefriktion også er meget afhængig af load. Hvis både det radiale og aksiale load i eksemplet ovenfor reduceres med en faktor 10, vil watt tabet grundet rullefriktion gå fra 46 W til 21 W, tabet grundet glidfriktion vil gå fra 25 W til 0,3 W, mens tabet grundet tætninger forbliver 22 W. Tabet grundet tætninger og rullefriktion bliver derfor stort set lige store, mens tabet fra glidfriktion kan negligeres. Det samlede lejetab går således fra 76 W til 43 W.

Rullefriktionsmomentet er meget afhængig af temperaturen, idet viskositeten af smøremidlet indgår i formlen. Hvis temperaturen i det gennemgåede eksempel ændres fra 40 °C til 20 °C, vil viskositeten ændre sig fra 125 mm²/s til 435,5 mm²/s. Dette vil ændre effekttabet grundet rullefriktionen fra 46 W til 98 W. Hvis temperaturen i stedet øges til 60 °C bliver viskositeten 48,6 mm²/s og tabet grundet rullefriktionen falder til 26 W.

Bilag 2

Analyse af de forskellige teknologier og de måletekniske udfordringer de bringer.

Ventilatorer

De primære ventilatortyper er

- Radialventilatorer
- Aksialventilatorer
- Kammerventilatorer

I ventilationsanlæg til almindelig udluftning anvendes primært kammer- og aksialventilatorer, mens industrielle anlæg anvender radialventilatorer. Inden for radialventilatorer findes igen en række undergrupper bestemt af skovltypen. Disse omfatter bagudrettede skovle (B-hjul), plane bagudrettede skovle (P-hjul), fremadrettede skovle (F-hjul) og lige skovle (T-hjul). En nærmere beskrivelse kan findes i [11]. B-hjul er klart den mest anvendte type, mens F-hjul stort set ikke anvendes. P- og T-hjul anvendes ved meget forurenede luft som f.eks. i træindustrien.

I visse tilfælde vil ventilatoren være direkte trukket. Det betyder, at ventilatoren sidder direkte på motorens aksel, og ventilatoren selv har derfor ingen lejer. Disse ventilatorer er selvsagt ikke interessant for projektet. Når ventilatoren får en vis størrelse er man nødt til at anvende et remtræk eller en kobling, da lejerne i motoren ikke er dimensioneret til det load, som ventilatoren giver. I dette tilfælde vil ventilatoren have sin egen aksel og dermed egne lejer. I tilfælde, hvor lufttemperaturen omkring ventilatoren bliver meget høj, vil ventilatoren også være nødt til at have egne lejer.

Aksialventilatorer vil altid sidde direkte på akslen, mens kammerventilatorer godt kan have et remtræk. Da begge typer anvendes til ventilationsanlæg vil omdrejningshastigheden og anlægsstørrelsen generelt være i den lave ende (sjældent over 2000 RPM og 35 kW). Samtidig vil luften være ren og lufttemperaturen mellem 0 °C og 20 °C.

I industrielle anlæg er der ofte behov for at flytte store luftmængder, luften kan være forurenede og temperaturen høj. Det betyder, at anlæggene med radialventilatorer generelt vil være store og ikke være direkte trukket. Hastigheden kan her let være 4000-5000 RPM.

På baggrund af ovenstående må det konkluderes, at radialventilatorer, er de mest interessante i forhold til projektet. Radial ventilatorerne vil have deres egne lejer, da de ikke er direkte trukket. Lejerne vil køre ved høje omdrejninger, høje temperaturer og i et forurenede miljø. Dette giver et stort potentiale for både energibesparelser og øget levetid af de keramiske lejer sammenlignet med standardlejer.

Virkningsgraden af en ventilator bestemmes ved at måle den totale trykstigning over ventilatoren, luftstrømmen gennem ventilatoren samt motorens effektoptag. Usikkerheden på virkningsgraden vil generelt være høj (omkring plus minus 3 %). Der vurderes derfor, at det ikke er muligt direkte at måle energibesparelsen ved et skift fra standardlejer til keramiske lejer i en ventilator. I stedet må der måles på lejerne isoleret set, dvs. når lejerne tages ud af ventilatoren. Lejerne, der typisk sidder i en ventilator er:

- Toradede sfæriske kuglelejer i 12-serien og 22-serien med akseldiameter 30-100 mm
- Toradede sfæriske rullelejer i 222-serien med akseldiameter 50-100 mm

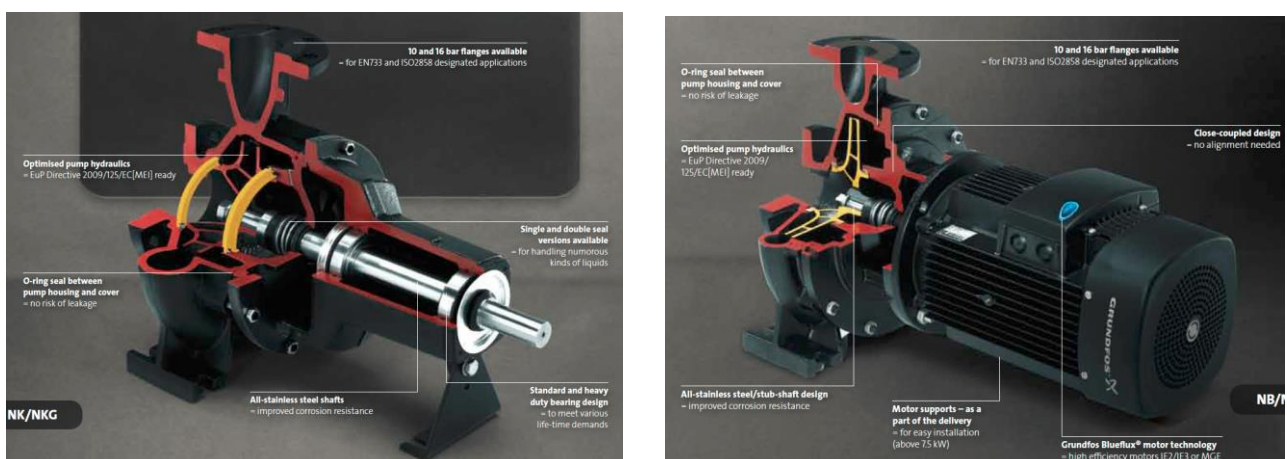
Pumper

De gængse pumpeteknologier omfatter

- Centrifugalpumper
- Fortrængningspumper
- Snekke pumper

Den mest anvendte pumpetype er centrifugalpumpen. I [12] vurderes det, at op mod 80 % af de pumper, der sælges i Danmark, er centrifugalpumper.

Centrifugalpumper virker ved, at et roterende løbehjul overfører mekanisk arbejde på en væske. Inden for centrifugalpumper findes igen en lang række undergrupper og kun nogle af disse indeholder lejer ud over lejerne, som sidder i motoren. På Figur 0-1 ses eksempler på to Grundfos pumper, hvor pumpen til venstre har egne lejer, idet motor og pumpe står et stykke fra hinanden, mens pumpen til højre ikke har egne lejer, idet motoren står meget tæt på løbehjulet i pumpen.



Figur 0-1 Eksempel på to NB-pumper fra Grundfos. Pumpen til venstre indeholder lejer, mens pumpen til højre ikke har lejer, ud over de som sidder i motoren. Billederne er fra [13].

Virkningsgraden af en pumpe bestemmes ved at måle trykstigningen over pumpen, volumenstrømmen gennem pumpen og motorens effektoptag.

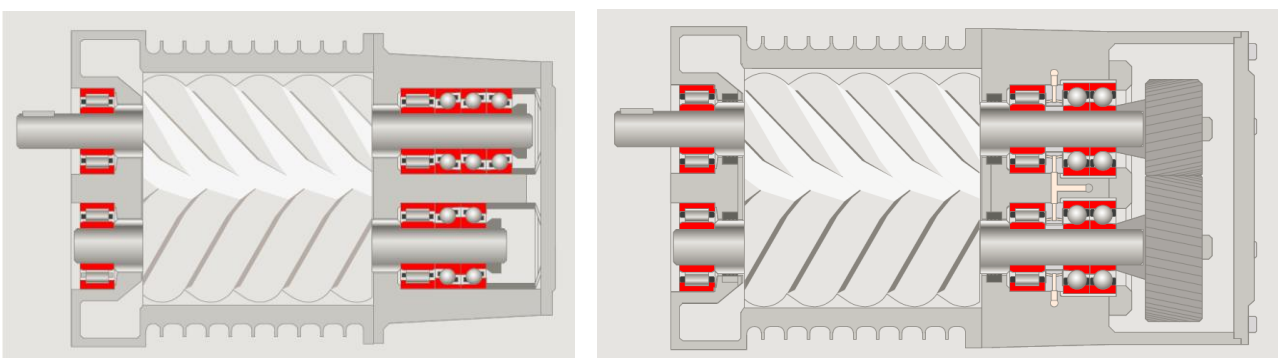
Ligesom ved ventilatoren er usikkerheden på bestemmelsen af pumpens virkningsgrad stor. Forskellen i virkningsgraden mellem en pumpe med standardlejer og keramiske lejer vil derfor ikke kunne måles. Desuden er der ofte akseltætninger i pumpen, som ikke kan monteres helt ens fra gang til gang, og deres bidrag til friktionen vil langt overskygge friktionen i lejet.

Trykluft/Køling

Inden for trykluft og køling findes bl.a. følgende kompressortyper

- Skruekompressor
- Stempelkompressor
- Lamelkompressor
- Centrifugalkompressor
- Kapselblæser
- Aksialkompressor

Den mest anvendte kompressortype er skruekompressoren og en illustration af denne ses på Figur 0-2. Den består af to skruer, der kører tæt sammen og komprimere den indkomne gas. Ved indgangssiden sidder to rullelejer, som bærer det radiale load. Ved udgangssiden sidder både rullelejer til at tage det radiale load samt vinkelkontaktlejer til at bære det aksiale load. Det aksiale load kommer fordi kompressionen skaber en trykforskel mellem de to ender. Ved systemopstart kan der være et negativt flow som skaber et aksialt load modsatrettet loadet ved drift. Af denne grund sidder der to vinkelkontaktlejer, som vender hver sin vej.



Figur 0-2 Illustration af to typer af skruekompressorer og lejerne i disse. Tv: Med olieindsprøjtning. Th: Uden olieindsprøjtning. De anvendte lejer er rullelejer og vinkelkontaktlejer. Figuren er fra [14].

Skruekompressor findes i to udgaver

- Skruekompressor med olieindsprøjtning – typisk for kølekompressor
- Skruekompressor uden olieindsprøjtning – typisk for trykluftkompressor

De to typer er illustreret på Figur 0-2. Typisk vil udgaven uden olie anvendes til luftkompression, mens udgaven med olie anvendes i køleanlæg.

Ved olieindsprøjtning er de to skrue i kontakt med hinanden og den ene skrue driver dermed den anden skrue med rundt. Der vil således kun sidde en motor på den ene aksel. Hastigheden af systemet vil ofte være 3000 RPM eller 3600 RPM og load på lejerne vil være højt (0,06 til 0,13 C_r , hvor C_r er det dynamiske bæretal af lejet [15]). I visse systemer med olieindsprøjtning vil rullelejerne være erstattet med glidelejer, idet olien kan lave en god smørefilm. Dette ses typisk ved de meget store anlæg, hvor rotoren vejer 600-800 kg.

I tilfældet uden olieindsprøjtning går de to skrue ikke i indgreb med hinanden, da det ville give alt for stor friktion og slid. Her er i stedet tilkoblet et gear system, så begge aksler drives. Gearingen betyder, at der her er muligt at køre ved meget højere hastigheder typisk 10.000 til 20.000 RPM. Til gengæld vil loadet på lejerne typisk være lavere (0,06 C_r eller mindre) [15].

Virkningsgraden af en kompressor afhænger af en lang række parametre og usikkerheden på en evt. måling vil være større end besparelsen man kan forvente ved et lejeskift. I dette tilfælde er det derfor igen nødvendigt at måle på lejerne isoleret set, dvs. når de ikke sidder i en kompressor.

Transmission

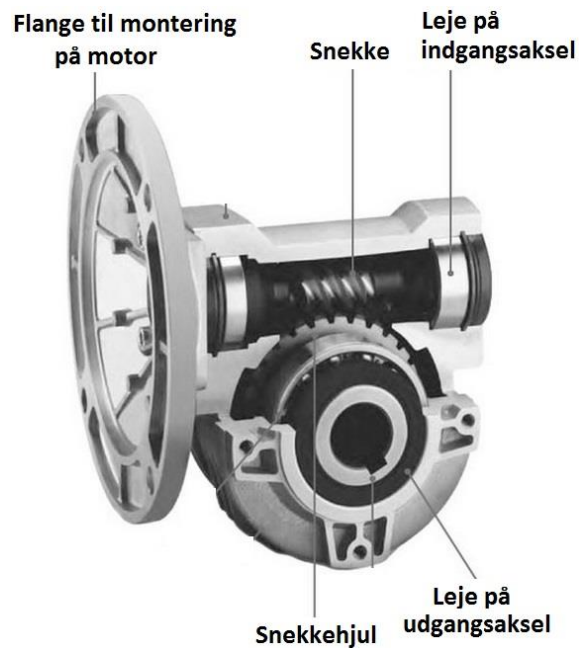
Inden for transmission findes der både remtræk og gear, som hver har en række undergrupper.

Inden for gear findes bl.a.

- Snekkegear: Store udvekslingsforhold (max 50:1), virkningsgrad 50-96 afhængig af udvekslingsforholdet, jo større udveksling jo lavere virkningsgrad.
- Keglehjulsgear: Små udvekslingsforhold (max 5:1), virkningsgrad 90-96.
- Tandhjulsgear: Små udvekslingsforhold (max 7:1), For konisk udgave (max 5:1), virkningsgrad 96-98.

Figur 0-3 viser et eksempel på et snekkegear. I gearet sidder der to lejer på indgangsakslen og to lejer på udgangsakslen. Lejerne på indgangsakslen vil have samme

hastighed som motoren dvs. typisk 1500 eller 3000 RPM, mens lejerne på udgangsakslen vil have en lavere hastighed afhængig af udvekslingen (20 til 500 RPM). Ofte vil lejerne være overdimensionerede for at kunne anvende en stor aksel diameter. Lejerne på indgangsakslen vil typisk være vinkelkontakt lejer, mens lejerne på udgangsakslen typisk er sporkuglelejer eller koniske rullelejer.



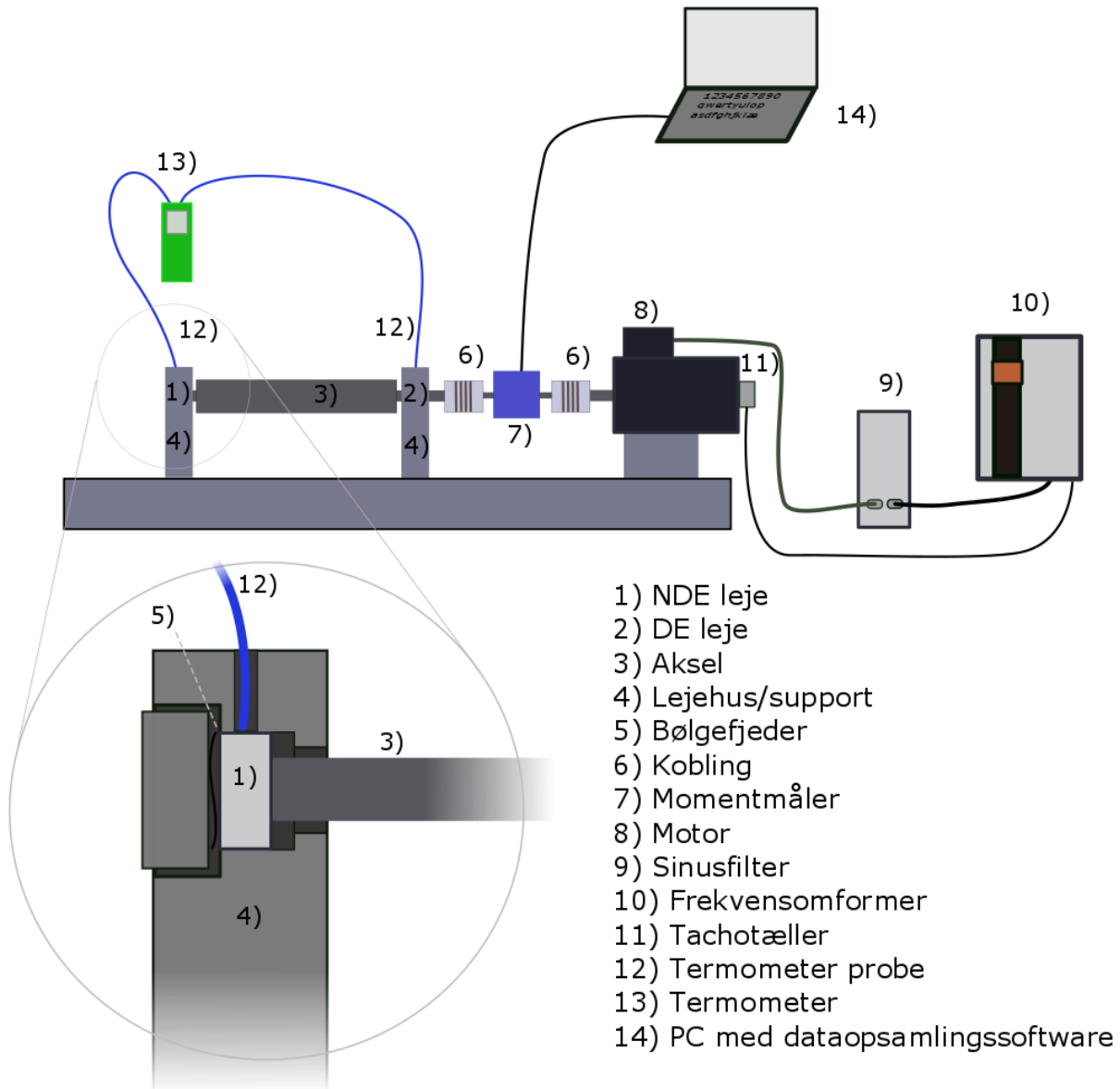
Figur 0-3 Eksempel på et snekkegear. Gearet indeholde 4 lejer, to på indgangsakslen og to på udgangsakslen. Billedet er fra BJ-gears hjemmeside.

Virkningsgraden for et gear kan bestemmes ved at måle effekten tilført indgangsakslen og effekten som kommer på udgangsakslen.

Bilag 3

6205 Momentmåleren - Testopstillingen

Testopstillingen skitseret herunder:



Figur 0-1

En motor styret af en frekvensomformer gennem et sinusfilter driver en akse hvor lejerne under test er monteret. Imellem motor og akse er der monteret en momentmåler med slørløse koblinger.

Det er muligt at variere hastigheden og den radiale belastning af lejerne. Belastningen ændres ved at montere vægtsklodser på akslen. Da vægtsklodserne roterer med rundt, og har en diameter på knap 30cm, giver de anledning til et friktionsbidrag fra luftmodstand. Dette vokser hurtigt med omdrejningstallet og proportionalt med antallet af vægte der monteres. Med alle vægte monteret og 1500RPM ligger det teoretiske tab til luftmodstanden på halvdelen af det teoretiske lejetab. Målingerne understøtter dette. Det betyder at det ikke er muligt at lave målinger af det absolutte lejetab, når der køres med vægtsklodser. Når der køres med vægtsklodser er inertien af den roterende masse stor. Da motorens omdrejninger måles og bruges som feedback parameter i frekvensomformerer betyder det at en lille korrektion i omdrejningerne betyder en betydeligt ændring i det målte kraftmoment.

Hvis der køres uden vægtsklodser, er friktionen til luftmodstanden ubetydelig da akslens diameter kun er 6cm. Køres der uden vægtsklodser ved 3000RPM er akslens egen vægt kun halvt så stor som lejerne minimums belastning, derfor er det nødvendigt at have en aksial forspænding. Den aksiale belastning stammer fra en bølgefjeder (se figuren punkt 19), der presser på yderringe af ND lejet. Det er praktisk umuligt at bestemme hvor stor den aksiale belastning er. Et kvalificeret bud er 100N. Lejerne monteres så ens så muligt, sådan at fjederen er komprimeret ens og derfor bør give anledning til ens belastning af lejerne, men det er ikke muligt at kontrollere om to forskellige sæt lejer, bliver udsat for samme aksiale belastning.