

Elbesparende kuglelejer

Rapport fra
Elforsk-projekt nr. 342-032



Maj 2013

Elbesparende kuglelejer

**Rapport fra
Elforsk-projekt nr. 342-032**

Forfattere: Bøje Schaumann Kjær, CeramicSpeed Bearings A/S
Mogens Johansson, Dansk Energi Analyse A/S
Forsidefoto: Nils Rosenvold

Maj 2013
Figur 5.10 rettet juli 2013

CeramicSpeed Bearings A/S
Dansk Energi Analyse A/S

Indhold

Sammenfatning	2
1. Indledning	2
2. Beskrivelse af CeramicSpeed	3
3. Lidt teori om tabene i kuglelejer	4
4. Måleopstillingerne	5
5. Målinger af kuglelejernes energieffektivitet	6
5.1 Indledende målinger af lejetemperatur og nedkøringstid	6
5.2 Målinger af tabene i 6318 lejer	11
5.3 Målinger af tabene i 6205 lejer	15
5.4 Måling af lejetab via nedkøringstid for elmotorer	16
6. Økonomien i elbesparende kuglelejer	19
6.1 Lejetab i beregningerne	19
6.2 Økonomimodel	20
6.3 CS lejer i stedet for standardlejer	20
6.4 Konklusion vedrørende økonomien	24
7. Referencer	25
Bilag 1. Projektgruppe og følgegruppe	26

Sammenfatning

Elforsk bevilgede i 2010 projektet Elbesparende kuglelejer, som er udført i 2010-13 af CeramicSpeed Bearings A/S og Dansk Energi Analyse A/S. CeramicSpeed udvikler og producerer kuglelejer med keramiske kugler (CS lejer) og har specialiseret sig i anvendelse af disse inden for sporten og i industrien.

Projektets formål har været at udvikle kuglelejer til elmotorer og maskiner, som er væsentligt mere energieffektive end almindelige kuglelejer og som – i det mindste på længere sigt – også er økonomisk attraktive. Det har desuden været formålet at dokumentere energiforholdene og de øvrige driftsforhold.

I projektet er der udviklet to prøvestande for lejestørrelserne 6205 og 6318. Prøvestandene er benyttet til at måle tab i lejer af forskellig type og fabrikat, herunder standardlejer og forskellige varianter af CS lejer. Desuden er den store prøvestand samt en særlig måleopstilling med to ens Grundfos motorer blevet brugt til at måle nedkøringstiden for lejer, der frigives ved en bestemt hastighed. Nedkøringstiden er med tilnærmelse omvendt proportional med lejefriktionen.

Målingerne har givet indblik i hvordan, de enkelte komponenter og samspillet i lejet påvirker friktioner, og hvad der er de optimale kombinationer, når der skal optimeres på lavest muligt energitab.

Målingerne viser, at CS lejer har væsentligt lavere tab, omkring 70% lavere, end standardlejer, og at de også har lavere tab end E2-lejet, som er SKF's særligt energieffektive leje. Lejer med frikterende tætninger har omkring 7-8 gange større tab end standardlejer og omkring 25 gange større tab end CS lejet, som er mere hårdfør overfor forurening, og derfor ofte kan erstatte et leje med frikterende tætninger.

Hvor CS lejer kan erstatte lejer med med frikterende tætninger, vil tilbagebetalingstiden kunne blive ned til 1 år, hvis der betales elafgift, og ellers ned til 2 år. Sammenlignes med ikke-frikterende standardlejer bliver tilbagebetalingstiden for merinvesteringen i de energieffektive CS lejer meget høj, 14 år eller mere. Dette gælder ved beregninger ud fra tabsbesparelsen alene. Indregnes også omkostningerne ved lejeskift, reduceres tilbagebetalingstiden betydeligt.

Projektet viser således, at lejer med keramiske kugler skal billiggøres, hvis de skal finde bred anvendelse i elmotorer og maskiner. Med dagens lejepriser er CS lejerne især interessante som alternativ til lejer med frikterende tætninger og ved anvendelser, hvor produktionen er meget følsom over for nedbrud og/eller hvor konventionelle lejer har kort levetid på grund af et varmt eller forurennet miljø. Andre anvendelser kan være i motorer, hvor tabene skal reduceres for at opfylde krav om høj virkningsgrad (IE3 eller den kommende IE4), samt i højhastighedsmotorer, hvor lejetabene udgør en langt større del af motoreffekten end i almindelige motorer.

1. Indledning

Virksomheden CeramicSpeed A/S i Holstebro udvikler og producerer kuglelejer med keramiske kugler (de betegnes i det følgende CS lejer (CeramicSpeed lejer), idet den ofte benyttede betegnelse hybridkuglelejer er lidt upræcis), som har væsentligt lavere energitab end konventionelle kuglelejer. CeramicSpeed startede i 2004 med at levere kuglelejer til brug i sporten, og halvdelen af Tour de France cykelholdene bruger i dag lejer fra CeramicSpeed. I

2004 kom de første industrikunder og i 2009 udvidede firmaet med en selvstændig industri afdeling. Lang levetid i starten var den vigtigste slagsparameter for lejerne, men dokumenterede lave energitab vil åbne for et meget stort marked.

Kuglelejernes lave energitab ses bl. a. af, at cykelryttere kan køre hurtigere på cykler med CeramicSpeed kuglelejer end på cykler med konventionelle kuglelejer. For at dokumentere og sætte tal på de lave energitab samt for at videreudvikle kuglelejerne til brug i elmotorer og roterende maskiner søgte CeramicSpeed og Dansk Energi Analyse i 2009 Elforsk om tilskud til projekt Elbesparende kuglelejer. Tilskuddet blev bevilget i 2010, og projektet er gennemført i 2010-13 af den i bilag 1 viste projektgruppe i samarbejde med følgegruppen.

Kugleleje-tabene i de danske elmotorer er omkring 220 GWh årligt, og der er mindst lige så store tab i pumper, ventilatorer, rullebaner osv. Kan disse tab reduceres med en trediedel eller halvdelen ved brug af lejer med keramiske kugler, er der således et betydeligt potentiale for elbesparelser.

2. Beskrivelse af CeramicSpeed

CeramicSpeeds kuglelejer skaber store driftsøkonomiske fordele for brugerne i industrien. Personerne bag selskabet har siden 1997 arbejdet med de muligheder, der ligger i at forbedre lejernes ydeevne med anvendelse af højteknologiske komponenter og CeramicSpeed er i dag førende i verden inden for deres felt.

Alle lejer bliver håndlavet i Danmark med komponenter fra de bedste leverandører i verden, herunder keramiske kugler af en unik kvalitet samt andre specialudviklede komponenter. CeramicSpeed lejer har således helt unikke egenskaber, som løser udfordringer, hvor almindelige stållejer ikke slår til. Derudover har CeramicSpeed lejer en levetid, der er 4-8 gange længere end stållejers, således at brugerne har mulighed for forbedret vedligehold og en langt bedre opetid i produktionen.

Virksomheden har specialiseret sig inden for to områder: lejer til sport og til industri, og har mange års erfaring med at udvikle unikke hybridløsninger. I dag kan CeramicSpeed produkter til sportsanvendelse fås i mere end 20 lande. Virksomheden er den eneste lejeproducent, der sponsorerer tre World Tour Teams: Saxo-Tinkoff, Astana og OmegaPharma Quick-Step. Firmaet sponsorerer desuden en lang række andre atleter inden for triatlon og MTB.

Lejer der holder – er de billigste!

Lejer udgør ofte en lille andel af de samlede omkostninger i det udstyr, som de indgår i – både i nye anlæg samt i drifts- og vedligeholdelsesfasen. Modsat kan omkostningerne til servicering af lejer være mange gange højere end lejets pris. Det giver et stort forbedringspotentiale med CeramicSpeed lejer, der holder markant længere.

Grundlæggeren

Jacob Csizmadia, som har grundlagt CeramicSpeed, introducerede som den første i verden keramiske lejer til professionel cykling tilbage i 2000. Han giver personlig rådgivning i opgradering af cykler til professionelle hold og individuelle atleter med henblik på at opnå den bedste holdbarhed og ydeevne.

Jacob har to gange (i maj-juli 1997 og i oktober 1998 til november 1999) haft verdensrekorden i 24 timers in-line skating og var den første til at bryde barrieren på 500 km. Den primære årsag til, at han i 1998 kunne slå verdensrekorden på 470 km og løbe 505 km på 24 timer, var udskiftningen af stållejer med keramiske lejer.

3. Lidt teori om tabene i kuglelejer

Friktionen og dermed energitabene i kuglelejer opstår i lejerne selv og i tætningerne. Projektet har fokuseret på tabene i selve kuglelejet, idet lejer med keramiske kugler er væsentligt mere robuste end lejer med stålkugler og derfor normalt monteres med let eller ikke-frikterende tætninger, når de monteres i elmotorer (med keramiske kugler monteres højst én frikterende tætning, såfremt miljøet er ekstremt forurennet). I projektet er der dog også målt på enkelte lejer med frikterende tætninger, så besparelsen ved at erstatte dem med de mere robuste CS lejer har kunnet vurderes.

Friktionen i selve kuglelejet består af en konstant del og af hydrodynamisk del, som afhænger af lejetemperaturen og af hastigheden (diametere og omdrejningstallet). SKF beregner i "den nye SKF model for beregning af friktionsmomentet" (ref. 1) kuglelejets friktionsmomentet M_f som sammensat af fire del-friktionsmomenter:

$$M_f = M_{rr} + M_{sl} + M_{seal} + M_{drag}$$

hvor M_{rr} er rulle-friktionsmomentet, der afhænger af lejetype, lejets middeldiameter, radialkraften, aksialkraften, omdrejningstallet samt smøremidlet
 M_{sl} er glide-friktionsmomentet, der afhænger af lejetype, lejets middeldiameter, radialkraften, aksialkraften og glide-friktionskoefficienten, som igen afhænger af, om lejet er smurt og af det benyttede smøremiddel
 M_{seal} er friktionsmomentet fra tætninger, som er afhængigt af lejetype og tætningstype
 M_{drag} er friktionsmomentet fra et eventuelt oliebad. Momentet afhænger af lejetyper, middeldiameteren, omdrejningstallet samt af oliestanden over lejets yderring

I det følgende ses på lejer uden oliebad, dvs. uden M_{drag} . Desuden ses der bort fra M_{sl} og M_{seal} , idet de er meget mindre end M_{rr} (dette ses af eksemplet i ref. 1).

Dermed er M_{rr} eneste friktionsmoment. Ifølge ref. 1 er

$$M_{rr} = G_{rr} \cdot (\nu \cdot n)^{0,6}$$

hvor G_{rr} afhænger af lejetyper (udtrykt ved den geometriske konstant R_1), middeldiameteren d_m , radialkraften F_r og aksialkraften. ν er smøremidlets viskositet og n er omdrejningstallet (omdr./min.).

For et sporkugleleje er

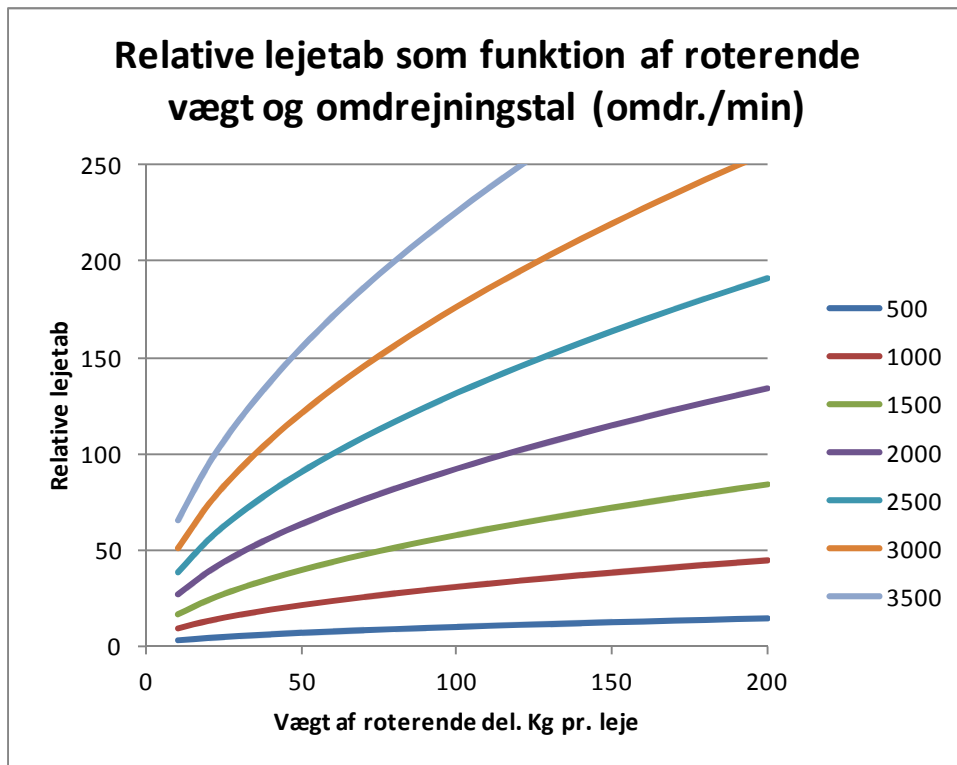
$$G_{rr} = R_1 \cdot d_m^{1,96} \cdot F_r^{0,54}$$

idet det her forudsættes, at aksialkraften er 0.

Lejetabet bliver (idet $\omega = 2\pi \cdot n/60$)

$$P = M_{rr} \cdot \omega = R_1 \cdot d_m^{1,96} \cdot F_r^{0,54} \cdot \nu^{0,6} \cdot n^{1,6} \cdot 2\pi / 60$$

Figur 3.1 viser lejetabet som funktion af den roterende vægt og omdrejningstallet. Lejetabene er opgjort relativt, idet tabene er sat til 100 for en roterende vægt pr. leje på 35 kg og et omdrejningstal på 3000 o/min.



Figur 3.1. Lejetab som funktion af vægten og omdrejningstallet. Lejetabet er sat til 100 for en vægt pr. leje på 35 kg og 3000 o/min. Viskositeten regnes uændret, dvs. lejetemperaturen regnes at være den samme under alle de viste forhold

Eksempel på beregning af lejetab

For et 6318 kugleleje er $d_m = 0,5 \cdot (90 + 190) = 140$ mm og $d_m^{1,96} = 16100$. R_1 findes af ref. 1 tabel 3a til $3,7 \cdot 10^{-7}$. ν er for SKF LGMT 3 $120-130$ mm²/s ved 40 °C og 12 mm²/s ved 100 °C. Antages lejetemperaturen at være 50 °C og antages viskositeten at afhænge lineært af temperaturen bliver ν ca. 105 mm²/s og $\nu^{0,6}$ bliver 16.

Momentet i Nmm bliver

$$M_{Tr} = 0,095 \cdot F_r^{0,54} \cdot n^{0,6}$$

Det absolutte lejetab ved en vægt på 35 kg pr. leje og ved 3000 o/min. beregnes til

$$P = 9,9 \cdot 10^{-6} \cdot 343^{0,54} \cdot 3000^{1,6} = 84 \text{ W}$$

For to lejer altså 168 W.

Målingerne med CeramicSpeeds teststande og med Grundfos motorerne er udført med ret lave belastninger på lejerne. Som det fremgår af formlen for lejetab kan der imidlertid let omregnes fra en belastning (radialkraft) til en anden, og den relative forskelle mellem to lejer må forventes at være uændret, uanset belastningen.

4. Måleopstillingerne

I det følgende gives en oversigt over måleopstillingerne og de udførte målinger.

I. Teststand for 6318 lejer

a. Grov udvælgende ved nedkøringstider

En lang række lejevarianter er blevet testet for at få afklaring på, hvilke komponenter der er mest optimale i forhold til energiforbrug.

- b. Selektion på temperaturforskelle
Lejets varmeudvikling er en følge af den friktion og dermed det energitab, der er i lejet, så varmeudviklingen (temperaturstigningen) anvendes som en af parametrene for udvælgelse, sammen med nedløbstiderne.
- c. Watt målinger
Efter udvælgelsen af de mest optimale lejeløsninger ombygges teststanden, hvor der monteres en watt måler der måler og logger tabet i lejerne.
En momentmåler monteres, drejningsmomentet måles, logges og det tabte skyldes friktion fra lejerne. Ud fra drejningsmomentet udregnes watt/watttab.

II. Teststand for 6205 lejer

- a. Test på udvalgte lejetyper
De optimale lejeløsninger testes og måles op mod standardlejer ved forskellige vægtbelastninger. Der testes op til 5000 omdr/min.
- b. Momentmålinger/Watt målinger
Der måles og logges konstant på det watt forbrug der er på at trække lejerne rundt.
- c. Temperaturforskelle
Igen konstateres, at de mest energieffektive lejer (lavest friktion) også har de laveste drifttemperaturer.

III. Teststand for 3,0 kW Grundfos motorer

To ens motorer testes, og den bedste målt på nedkøringstid udvælges som basis. Den anden motor monteres med forskellige lejetyper. Nedkøringstid og omdr/min logges fra 3000 til 0 omdr/min.

- a. Parallel test
 - i. Test komplet motor
 - ii. Test med ventilator og 5 kg vægtskive
 - iii. Test med motor rippet for andre væsentlige tabsfaktorer
Denne test, hvor tab fra stort set alt andet en lejer er fjernet, bruges ved de endelige målinger. (Tætninger/pakninger i motoren – begge ender er fjernet, ventilatoren er fjernet).

5. Målinger af kuglelejernes energieffektivitet

I projekter er der som nævnt ovenfor foretaget direkte målinger af lejerne effekttab på to prøvestande - den ene for store lejer størrelse 6318 og den anden for mindre lejer størrelse 6205 - samt indirekte målinger af tabene ved at måle lejetemperaturen efter en hvis driftstid samt måle den tid, det tager for lejerne at løbe fra en bestemt omdrejningshastighed ned til stop.

5.1 Indledende målinger af lejetemperatur og nedkøringstid

Inden prøvestanden for 6318 lejer var færdigudviklet og udstyret med friktionsmåler, blev der foretaget nogle indledende målinger, hvor energitabet i en række lejer blev sammenlignet ud fra temperaturstigningen efter en hvis driftstid og ud fra nedkøringstiden. Nedkøringstiden er den tid, det tager for lejerne at køre ned fra motorens driftshastighed til stilstand.

5.1.1 Undersøgte kuglelejer

De indledende målinger er udført i perioden november 2010 – januar 2011 i et uopvarmet lokale, hvor temperaturen har været fra -2°C til 7°C . Der er målt på nye lejer, i alt 14 sæt, fordelt med otte med ikke-frikerende tætninger og seks med en eller to frikerende tætninger pr. leje. (Frikerende tætninger tætnes lejet og beskytter det mod udefra kommende snavs og partikler). Af de 14 sæt var fire fra SKF, to fra FAG, to fra IBU og seks fra CeramicSpeed (CS), se tabel 5.1. CS lejerne har alle keramiske kugler, mens de øvrige lejer er med stålkugler. Belastningen på lejerne udgøres af akslen inkl. elmotorens rotor og to 20 kg tunge svinghjul.

Betegnelse	Leje	Kugler	Fabrikat af hus	Tætning	Kugleholder	Fedt	Omdr/min
CS 2RZ	6318 HC5	Keramiske	SKF	2RZ	Stål	30% Q72	3000
CS 2RZ_C3-POM	6318 HC5/C3	Keramiske	SKF	2RZ	POM 8-ball	30% Q72	3000
CS 2RZ_C3	6318 HC5/C3	Keramiske	SKF	2RZ	Stål	30% Q72	3000
CS 2RZ-POM	6318 HC5	Keramiske	SKF	2RZ	POM 8-ball	30% Q72	3000
FAG 2ZR_C3	6318 C3	Stål	FAG	2ZR	Stål	Standard	3000
IBU 2ZZ_C3	6318 C3	Stål	IBU	ZZ	Stål	Standard	3000
SKF 2Z_C3	6318 C3	Stål	SKF	2Z	Stål	Standard	3000
SKF 2RZ_C3	6318 C3	Stål	SKF	2RZ	Stål	Standard	3000
CS RS-RZ	6318 HC5	Keramiske	SKF	RS/RZ	Stål	30% Q72	2400
CS 2RS1	6318 HC5	Keramiske	SKF	2RS1	Stål	30% Q72	2400
FAG 2RSR_C3	6318 C3	Stål	FAG	2RSR	Stål	Standard	2400
IBU 2RS_C3	6318 C3	Stål	IBU	2RS	Stål	Standard	2400
SKF RS-RZ_C3	6318 C3	Stål	SKF	RZ/RS1	Stål	NB52 30%	2400
SKF 2RS1_C3	6318 C3	Stål	SKF	2RS1	Stål	Standard	2400

Tabel 5.1. Oversigt over de testede kuglelejer. Lejerne med frikerende tætninger er testet ved 2400 o/min, da deres maksimale omdrejningstal er under 3000 o/min.



Figur 5.1. Måling af lejetemperatur

5.1.2 Lejetemperaturer

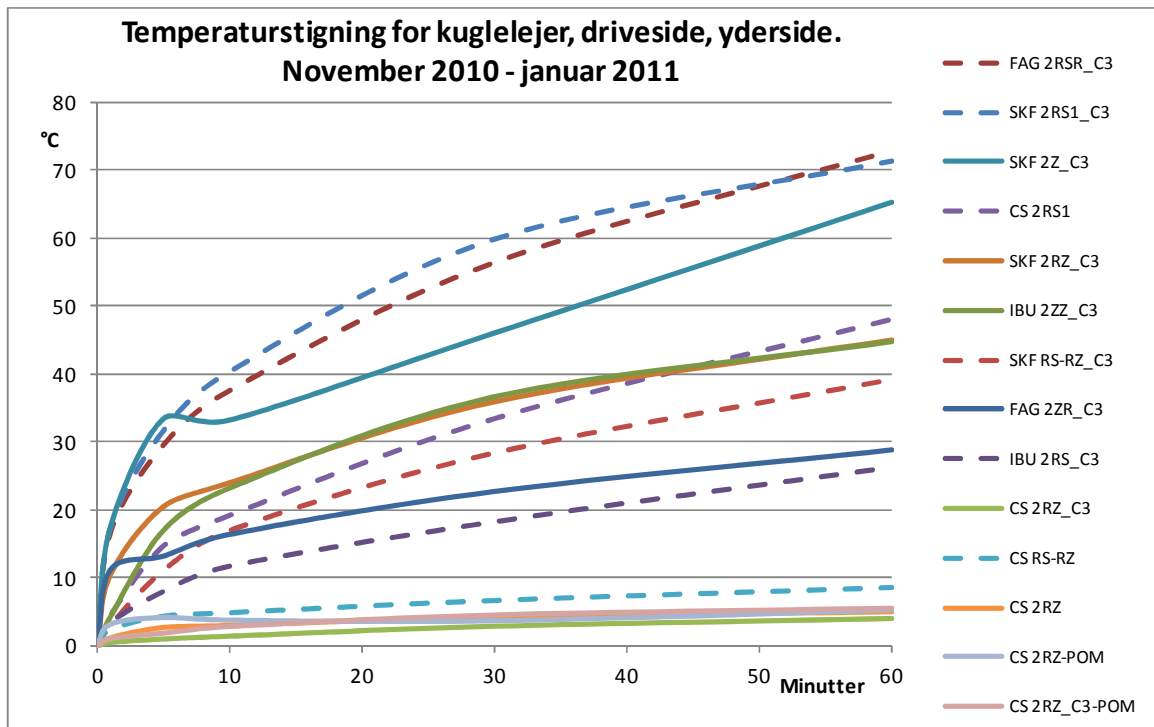
Temperaturen af de to lejer i prøvestanden er målt på yderringen af lejet efter 0, 1, 5, 10, 30 og 60 minutters drift ved enten 3000 o/min. eller 2400 o/min., se figur 5.1. Tabel 5.2 og figur 5.2 samt 5.3 viser lejetemperaturen efter 0 til 60 minutters drift. Temperaturstigningen er opgjort i forhold til temperaturen ved starten af de pågældende leje-målinger.

For lejerne med ikke-frikterende tætninger er der en markant forskel i temperaturstigning mellem lejer med stålkugler og lejer med keramiske kugler. For CS lejerne måles typisk 15-50 grader lavere driftstemperatur end for tilsvarende standardlejer med stålkugler. Temperaturstigningen efter 60 minutters drift er omkring 10 gange større for stålkugle-lejerne som for lejerne med keramiske kugler. Testen er udført ved en rumtemperatur på 0 grader.

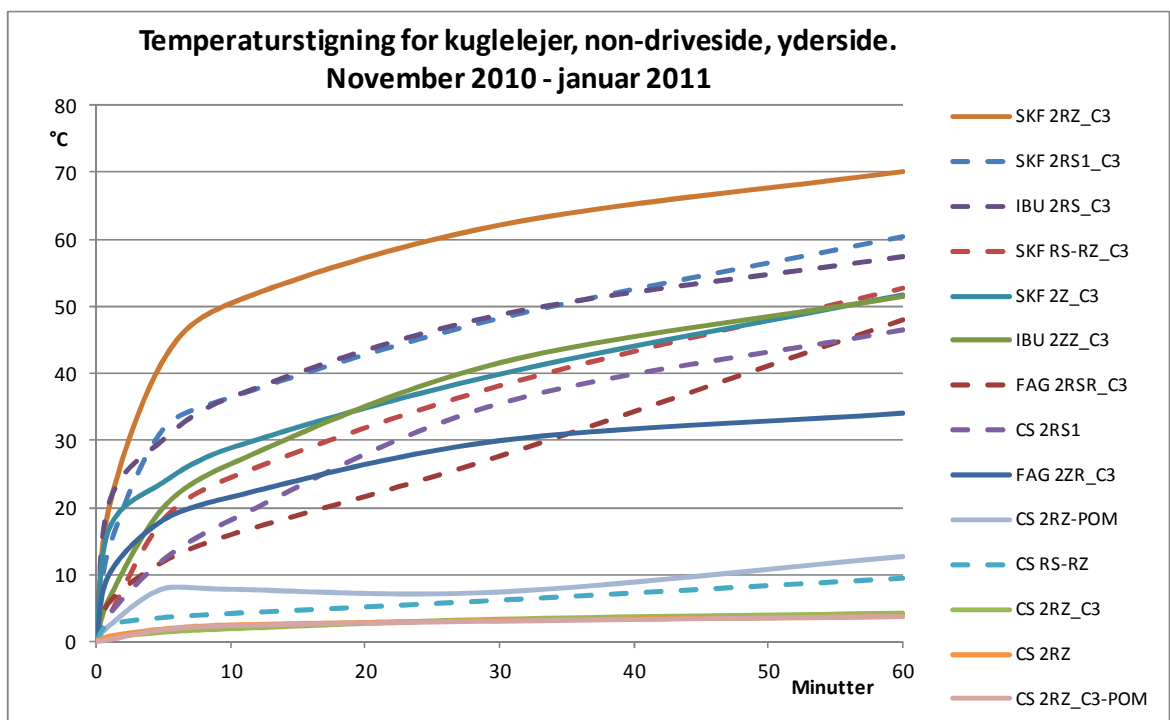
For lejerne med to frikterende tætninger er der ingen signifikant forskel på stålkuglelejernes og keramikkuglelejernes temperaturstigninger, idet de frikterende tætninger udvikler meget mere varme end kuglerne gør. To af lejerne (CS RS-RZ og SKF RS-RZ_C3) har kun én frikterende tætning, hvorfor temperaturstigningen bliver lidt lavere for stålkuglelejet og markant lavere for lejet med keramiske kugler.

Betegnelse	Temp.stigning driveside efter minutter						Temp.stigning non-driveside efter minutter					
	0	1	5	10	30	60	0	1	5	10	30	60
CS 2RZ	0	1,2	2,7	3,0	4,2	5,0	0	0,8	1,9	2,5	3,2	3,8
CS 2RZ_C3-POM	0	1,1	1,9		4,6	5,6	0	0,3	1,8		3,1	3,8
CS 2RZ_C3	0	0,5	1,0	1,4	2,8	3,9	0	0,6	1,4	1,9	3,3	4,2
CS 2RZ-POM	0	3,2	4,2	3,8	3,7	5,3	0	2,4	7,9	7,8	7,4	12,7
FAG 2ZR_C3	0	11,2	13,2	16,4	22,7	28,8	0	10,1	18,1	21,5	29,9	34,0
IBU 2ZZ_C3	0	4,3	17,0	23,2	36,6	44,7	0	6,5	20,0	26,5	41,6	51,5
SKF 2Z_C3	0	17,5	33,4	33,2	46,0	65,2	0	16,9	23,7	28,8	39,8	51,6
SKF 2RZ_C3	0	10,5	20,5	24,0	35,9	45,0	0	20,3	42,0	50,5	62,2	70,2
CS RS-RZ	0	2,4	4,4	4,9	6,7	8,6	0	2,5	3,6	4,2	6,2	9,5
CS 2RS1	0	4,5	14,7	19,2	33,4	48,0	0	4,1	12,2	18,1	35,5	46,5
FAG 2RSR_C3	0	16,7	29,5	37,5	56,3	72,7	0	5,9	11,9	15,9	27,6	47,9
IBU 2RS_C3	0	3,4	8,0	11,7	18,2	26,2	0	20,9	30,1	36,4	48,7	57,4
SKF RS-RZ_C3	0	3,1	11,1	17,0	28,4	39,2	0	3,9	18,2	24,5	38,2	52,8
SKF 2RS1_C3	0	17,4	31,7	40,4	59,9	71,4	0	14,1	31,7	36,4	48,2	60,4

Tabel 5.2. Temperaturstigning, målt på lejets yderring efter det anførte antal minutters drift. Lejer anført med kursiv er testet ved 2400 o/min.



Figur 5.2. Temperaturstigning for kuglelejerne i prøvestandens motorside som funktion af driftstiden. Stiplede kurver er lejer med frikterende tætninger



Figur 5.3. Temperaturstigning for kuglelejerne i prøvestandens anden side som funktion af driftstiden. Stiplede kurver er lejer med frikterende tætninger

Tabel 5.3 viser forholdet mellem temperaturstigningen for lejet i motorsiden (driveside) og stigningen for lejet i den anden side. Der er meget store forskelle i temperaturerne, men de ligger dog inden for leverandørernes normer. Der er ikke nogen systematik i de målte forskelle, idet det i nogle tilfælde er den ene side og i andre den anden side, der bliver varmest. Forskellen skyldes lejerne, og ikke deres placering, idet der ved ombytning konstateredes samme temperaturforskel.

Betegnelse	Temp.stigning
	driveside i % af non-driveside
CS 2RZ	132
CS 2RZ_C3-POM	147
CS 2RZ_C3	93
CS 2RZ-POM	42
FAG 2ZR_C3	85
IBU 2ZZ_C3	87
SKF 2Z_C3	126
SKF 2RZ_C3	64
CS RS-RZ	91
CS 2RS1	103
FAG 2RSR_C3	152
IBU 2RS_C3	46
SKF RS-RZ_C3	74
SKF 2RS1_C3	118

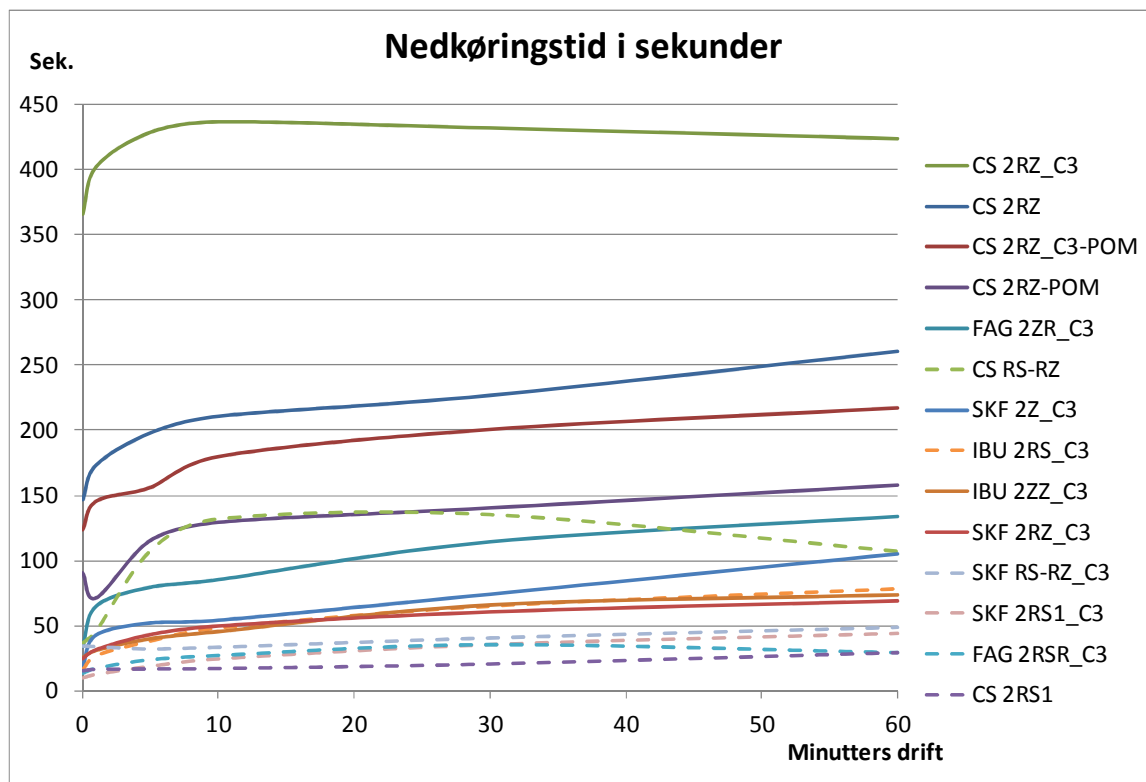
Tabel 5.3. Temperaturstigningen efter 60 minutter i drivesidens leje i forhold til i den anden sides leje

5.1.3 Nedkøringstid

Tabel 5.4 og figur 5.4 viser nedkøringstiden for prøvestanden. Nedkøringstiden afhænger i nogen grad af driftstiden og dermed af lejetemperaturen. (Højere lejetemperatur betyder lavere viskositet for smøremidlet og dermed lavere friktion. For lejer med frikterende tætninger er tætningernes friktion imidlertid dominerende). Nedkøringstiden afhænger meget af lejetypen, idet den er særlig lang for lejer med keramiske kugler. Generelt er nedkøringstiden væsentlig kortere for lejer med frikterende tætninger. Eneste undtagelse er IBU-lejerne, hvor nedkøringstiden for de ikke-frikterende lejer fra 3000 o/min. og for lejerne med frikterende tætninger fra 2400 o/min. er næsten ens. (Årsagen er, at IBU 2RS_C3's tætninger ligger tæt ind til inderringen, men er uden labyrinter og således er en blanding mellem let frikterende og frikterende tætninger. Tætningerne giver således ikke samme beskyttelse som f. eks. SKF RS1 tætninger).

Betegnelse	Nedkøringstid efter drift i flg. minutter					
	0	1	5	10	30	60
CS 2RZ	147	173	198	211	227	261
CS 2RZ_C3-POM	124	146	156	180	201	217
CS 2RZ_C3	366	402	429	437	432	424
CS 2RZ-POM	91	72	116	129	140	158
FAG 2ZR_C3	34	65	80	85	114	134
IBU 2ZZ_C3	26	31	40	45	65	73
SKF 2Z_C3	20	43	52	54	74	105
SKF 2RZ_C3	24	31	43	50	61	69
CS RS-RZ	36	46	107	132	135	107
CS 2RS1	16	17	17	17	21	29
FAG 2RSR_C3	13	17	24	27	36	29
IBU 2RS_C3	16	27	38	48	65	78
SKF RS-RZ_C3	34	34	32	33	40	49
SKF 2RS1_C3	9	12	19	24	36	44

Tabel 5.4. Nedkøringstid i sekunder efter den anførte driftstid



Figur 5.4. Nedkøringstid i sekunder som funktion af driftstiden. Stiplede kurver er lejer med frikterende tætninger

5.1.4 Erfaringer fra de indledende målinger

Erfaringerne med de indledende målinger førte til følgende konklusion vedr. de kommende målinger:

- ved den kvantitative test benyttes nye lejer, men inden målingerne starter, bør de have kørt nogle timer
- ved målingerne bør lejetemperaturen måles længe nok til, at temperaturen stabiliserer sig.

Målingerne viser desuden, at lejerne med keramiske kugler klarer sig markant bedre (lavere drifttemperaturer, længere nedkøringstid) end lejerne med stålkugler. Kun for lejerne med frikterende tætninger på begge sider har CS lejerne ikke længere nedkøringstid, hvilket skyldes at drifttemperaturen er markant lavere i CS lejerne end i stållejerne.

De fleste 6318 lejer er testet med stål-kugleholder med undtagelse af to sæt lejer – med efterbetegnelsen POM. Holderen i disse lejer er fremstillet efter samme princip som de kunststofholderer, der findes på mindre lejer. Den kortere nedløbstid viser, at der er mere friktion i denne type holder end den traditionelle stålholder.

5.2 Målinger af tabene i 6318 lejer

Prøvestanden for 6318 kuglelejer blev videreudviklet i 2011 og 2012 i forbindelse med en række prøvemålinger, og i april 2012 blev de "endelige" målinger udført på den optimerede prøvestand, figur 5.5. Målingerne blev udført af CeramicSpeed i samarbejde med Grene Industri-Service, som bl. a. overvågede vibrationer.



Figur 5.5. Kim B. Knudsen måler nedkøringstid på 6318 prøvestanden

Der er målt på to typer SKF lejer og to typer CeramicSpeed (CS) lejer, hvoraf den ene type af hver fabrikat er med frikterende tætninger, og den anden er med ikke-frikterende tætninger. De målte lejer er to og to ens, bortset fra fedt og kugler. Fedtet til SKF er SKF LGMT 3 med en viskositet på 120-130 mm²/s ved 40 °C, mens CS benytter Klüberquiet BQ 72-72 med viskositeten 72 mm²/s ved 40 °C. Kuglerne er henholdsvis stål kugler (SKF) og keramiske kugler (CS). Lejerne med frikterende tætninger har et maksimalt omdrejningstal på 2400 o/min.

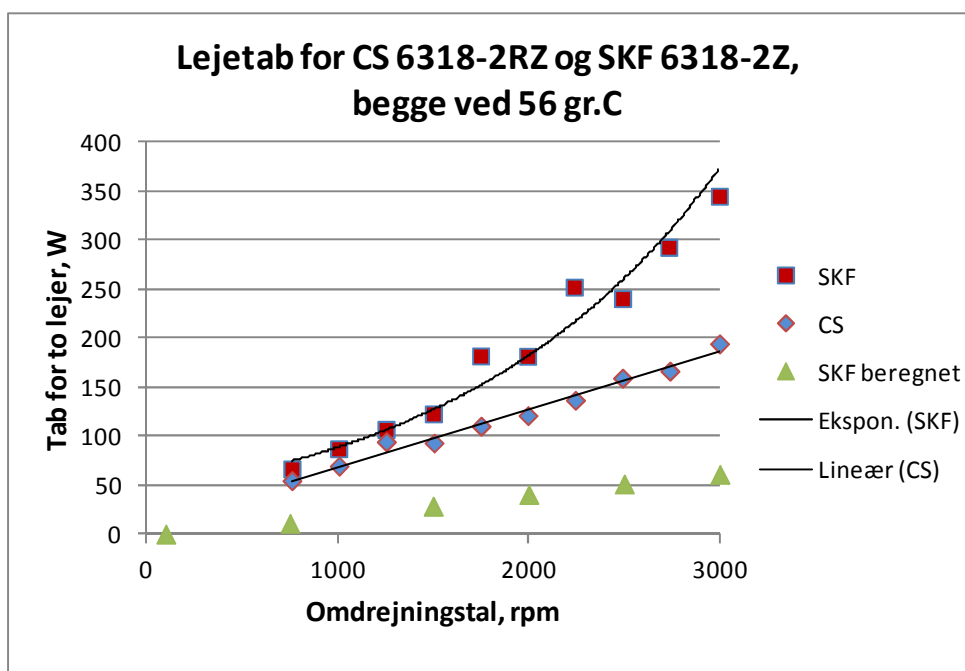
5.2.1 Målinger april 2012

Målingerne blev udført ved samme temperatur for alle lejer. Ved hjælp af en termokasse over prøvestanden (og tilført varme ved nogle af lejetyperne) blev lejetemperaturen holdt på 56 °C, som var den højeste af de lejetemperaturer, der målte i denne måleserie. Målingerne startede ved den højeste hastighed, og tabene aflæstes, når de var stabile. Målingerne tog 6-11 min. pr. leje. Hovedresultaterne er vist i tabel 5.5.

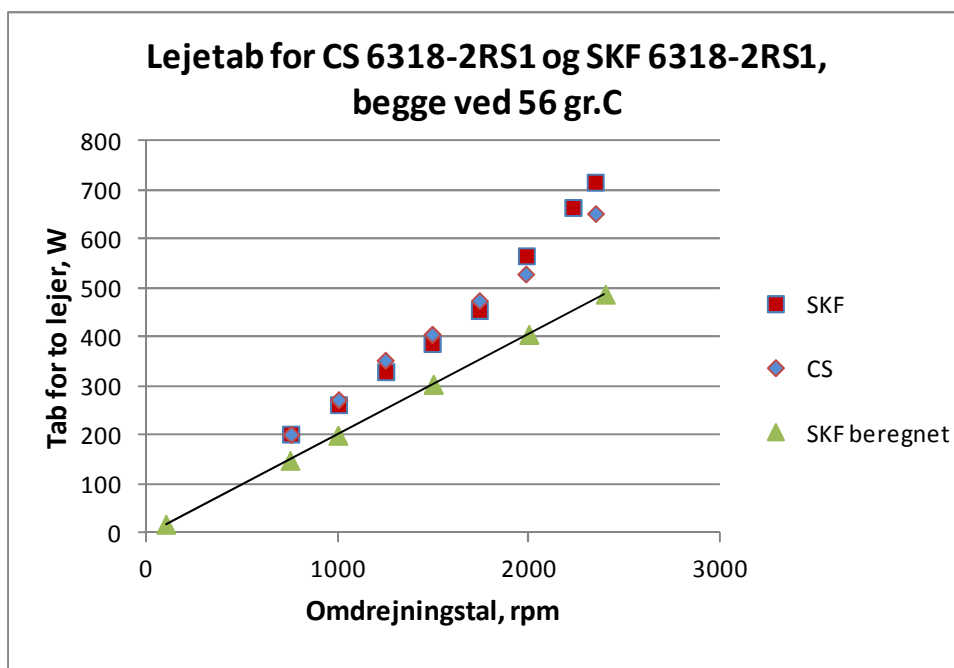
Dato	Lejer	Temperatur °C	Hastighed o/min.	Målte tab, 2 lejer W
26-4	SKF 6318-2Z.C3	56	760-2997	67-345
27-4	CS 6318-2RZ/HC5	56	760-2998	55-195
30-4	SKF 6318-2RS1.C3 2400	56	753-2348	203-716
25-4	CS 6318-2RS1-HC5 2400	56	755-2349	202-652

Tabel 5.5. Hovedresultater for de målte 6318 lejer, april 2012

Resultatet af målingerne er vist i figur 5.6 for lejerne uden frikterende tætninger og i figur 5.7 for lejerne med frikterende tætninger. For SKF-lejet med ikke-frikterende tætninger er målt markant højere tab, end der beregnes, se figur 5.6. Af figur 5.7 ses, at de målte tab for SKF-lejet er noget større end de tab, der beregnes med SKF's program (ved 2400 o/min. er de ca. 50% større). De målte tab synes at afhænge eksponentielt af omdrejningstallet for SKF-lejernes vedkommende (jævnfør afsnit 3, hvor SKF regner tabene proportionale med omdrejningstallet i potensen 1,6), mens tabene i CS lejet snarere synes at være proportionale med omdrejningstallet.



Figur 5.6. Målte og beregnede lejetab for lejer med ikke-frikterende tætninger



Figur 5.7. Målte og beregnede lejetab for lejer med frikterende tætninger

5.2.2 Vurdering af måleresultaterne

De målte tab er højere end de tab, som beregnes for SKF lejerne med SKF's beregningsprogram. Det må skyldes tab fra luftmodstand, vibrationer, skæv belastning af lejerne mm. Derfor er det især de absolutte forskelle og ikke de relative, som kan anvendes fra disse målinger.

Målingerne på lejerne med ikke-frikterende tætninger viser, at der er målt væsentligt lavere tab for lejet med keramiske kugler end for SKF-lejet med stålkugler. I absolutte tal er forskellen i lejetab for ét leje omkring 75 W ved 3000 o/min., 40 W ved 2400 o/min. og 15 W ved 1500 o/min. For et leje med frikterende tætninger er den målte forskel ca. 30 W ved 2400 o/min., mens forskellen er meget lille ved omdrejningstal på 1500 o/min. og derunder. Da der benyttes samme type og fabrikat af frikterende tætninger til SKF- og CS lejerne, må der forventes at være den samme tabsforskel mellem de to lejer, uanset tætning, og forskellene ved 2400 o/min. er da også målt til hhv. 30 W (frikterende lejer) og 40 W, dvs. næsten samme forskel. De anførte lejetab gælder alle ved en lejetemperatur (målt på yderringen) på 56 °C.

Målingerne viser i øvrigt en næsten lineær sammenhæng mellem lejetab og omdrejningstal for de to lejer med frikterende tætninger (hvor tætningen dominerer tabene) og for CS lejet med ikke-frikterende tætning, mens lejetabene for SKF-lejet med ikke-frikterende tætning ser ud til at stige eksponentielt med omdrejningstallet.

5.2.3 Konklusion vedr. 6318 lejerne

6318 lejet er et stort leje, beregnet til belastninger, som er mindst 10 gange større end de 35 kg. som hvert leje er belastet med i prøvestanden. Målingerne skal derfor tages med forbehold hvad angår de absolutte værdier af lejetabene, mens de målte størrelsesordener formentlig er mere troværdige. Målingerne viser uanset de forbehold, der må tages pga. ovennævnte usikkerhed, at under ens forhold vedrørende belastning og lejetemperatur har 6318 CS lejet væsentligt lavere tab end SKF-lejet. Ud fra nedkøringstiderne kan der konkluderes, at CS lejerne har mindst 50% mindre tab end tilsvarende standardlejer med stålkugler.

Lejetabene falder lidt, jo varmere smøremidlet er. Ved en given omgivelsestemperatur vil et keramisk leje (CS) have lavere arbejdstemperatur end et SKF-leje, fordi tabene er lavere og der benyttes et smøremiddel med lavere viskositet. Dermed bliver forskellen i tabene lidt mindre, end de vil være ved én og samme lejetemperatur for de to lejer. Hvor meget forskellen øges, afhænger af omgivelsestemperaturen og tabene (som afhænger af belastningen og omdrejningstallet mv.).

5.3 Målinger af tabene i 6205 lejer

Prøvestanden for mindre lejer blev konstrueret for at implementere de erfaringer, som var opnået med den store prøvestand, samt for at lette udskiftningen af lejer, idet afmontering og montering af de store lejer og vægtene tog meget lang tid. Prøvestanden er vist i figur 5.8.



Figur 5.8. Jacob Csizmadia ved prøvestanden for 6205 lejer, monteret med 200 kg roterende vægt. Prøvestanden kunne også udstyres med en vægt på 9,2 kg

5.3.1 Målinger foråret 2013

Der er målt på fem forskellige lejetyper i foråret 2013. Lejetyperne er SKF E2 lejet og E2 lejet, hvor stålkuglerne er udskiftet med keramiske kugler fra CeramicSpeed, det er SKF standardlejet og standardlejet med keramiske kugler samt et standard leje med frikterende tætninger. Den eneste forskel mellem de to lejer af hver lejetype er således kuglerne. Der er målt på to lejesæt på hver to lejer af de fire første lejer og ét lejesæt med frikterende tætninger. Målingerne er udført efter 16, 17, 18 og 19 timers drift, hvor lejerne har kørt med konstant omdrejningstal på 3000 o/min. og har været belastet med de ca. 15 kg. Ved målingerne har rumtemperaturen været ca. 32 °C

Måleresultaterne er vist i tabel 5.6. De viste friktionstab er gennemsnittet af 24 målinger (to lejesæt, fire driftstider, tre målinger af 3 minutters varighed pr. driftstid) for E2 og standardlejet og 12 målinger for lejet med frikterende tætninger.

Lejetype	Kugleleje	Kugler	Målte friktionstab for 2 lejer W
E2	SKF E2.6205-2Z.C3	Stål	25,1
	CS E2.6205-2Z.C3	Keramiske	22,7
Standard	SKF 6205-2RZ.C3	Stål	30,9
	CS 6205-2RZ/HC5.C3	Keramiske	21,4
Standard RSH (frikterende tætninger)	SKF 6205-2RSH.C3	Stål	74,8

Tabel 5.6. Hovedresultater for de målte 6205 lejer marts – april 2013. Målingerne er udført med en 9,2 kg aksel mellem lejerne

Målingerne viser, at CS lejerne har lavere tab end SKF-lejerne. Dette gælder både standardlejer og E2-lejer. En nærmere sammenligning kan baseres på, at tabene fra SKF-standardlejet ved 3000 o/min og 35 °C (den aktuelle temperatur) med SKF's program beregnes til 4,5 W pr. leje eller 9,0 W for to lejer. Tabene for to SKF E2-lejer er ifølge målingerne 5,8 W lavere eller 62% lavere end de beregnede tab for standardlejet (SKF oplyser i ref. 2, at tabene er godt 30% lavere). Tabene for CS lejerne er 8-9 W lavere (dvs. nærmest 0 W, hvilket ikke er realistisk).

5.3.2 Konklusion vedr. 6205 lejerne

Ud fra målingerne med 6205 prøvestanden kan der konkluderes, at CS lejerne med keramiske kugler har lavere tab end SKF's lejer med stålkugler. Mere usikkert – og baseret på beregninger med SKF's program - kan der siges, at tabet pr. 6205 leje ved 3000 o/min og 35 °C er omkring 1-2 W for CS lejerne mod måske 2-3 W for SKF's E2-leje og 4,5 W for standardlejet.

Standardlejet med frikterende tætninger har væsentligt højere tab, omkring 30-35 W pr. leje eller omkring 7-8 gange tabene i et standardleje med ikke-frikterende tætninger.

5.4 Måling af lejetab via nedkøringstid for elmotorer

Der er gennemført en række målinger af nedkøringstiden for Grundfos motorer med forskellige lejer. Der er målt på to ens Grundfos normmotorer på 3 kW, type MG100LC. Motorene har et NSK 6205-2Z.C3 leje i ikke-drivenden og et NSK 6306-2Z.C3 leje i drivenden. I den ene motor er de to lejer erstattet med to andre. Der har været afprøvet SKF standardlejer og CS standardlejer samt SKF E2.2Z.C3 lejer og CS E2.2Z.HC5.C3 lejer (SKF E2 lejer, hvor stålkuglerne er udskiftet med keramiske kugler). Måleopstillingen er vist i figur 5.9.



Figur 5.9. Måleopstilling med to ens motorer med forskellige lejetyper

5.4.1 Måling af nedkøringstid

Målingerne er udført ved at køre motorerne ved 3000 o/min (styret af en frekvensomformer) og koble motorerne fra nettet, hvorefter nedkøringstiden til motorerne står helt stille måles. De første målinger af nedkøringstiden udførtes med en pakkåse på akslen, med da pakkåsen ikke kunne monteres ens efter hvert lejeskift, er den fjernet fra begge motorer ved de endelige målinger. Ved nogle af målingerne var motorerne belastet med en 5 kg remskive, som øger inertimomentet og nedkøringstiden. Motorventilatoren blev fjernet fra begge motorer ved de sidste målinger, således at nedkøringstiden kun afspejlede lejefriktionen og tabene i luftgabet mellem motorens stator og rotor.

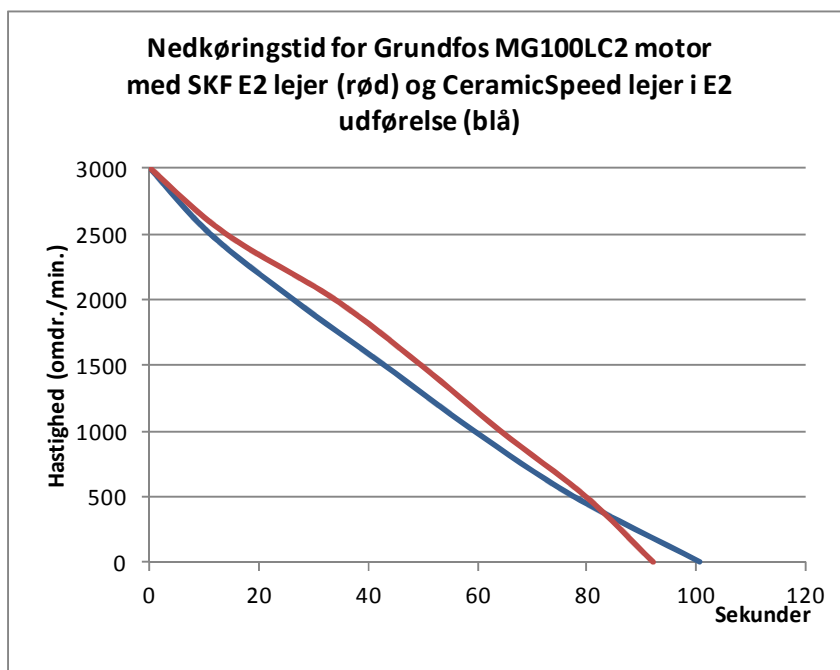
Serie	Måle- dato	Motors køretid Timer	Fabrikat	Leje- type	Kugler	Antal målin- ger	Genn. nedkøringstid		Ventila- tor og rem- skive
							Sek.	% pr. serie	
1	3-4	16	SKF	E2	Stål	8	295	167	Med
	4-4	19	CS	E2	Keramiske	8	329	186	
	3-4	64	NSK	Standard	Stål	8	177	100	
	4-4	80	NSK	Standard	Stål	8	181	102	
2	7-5		SKF	E2	Stål	7	91,9	100	Uden
	6-5		CS	E2	Keramiske	7	100,7	110	
3	6-5		NSK	Standard	Stål	7	32,5	100	Uden
	8-5		SKF	Standard	Stål	7	33,9	104	
	15-5		CS	Standard	Keramiske	7	98,6	303	

Tabel 5.7. Nedkøringstider for Grundfos motorer med forskellige lejeløsninger

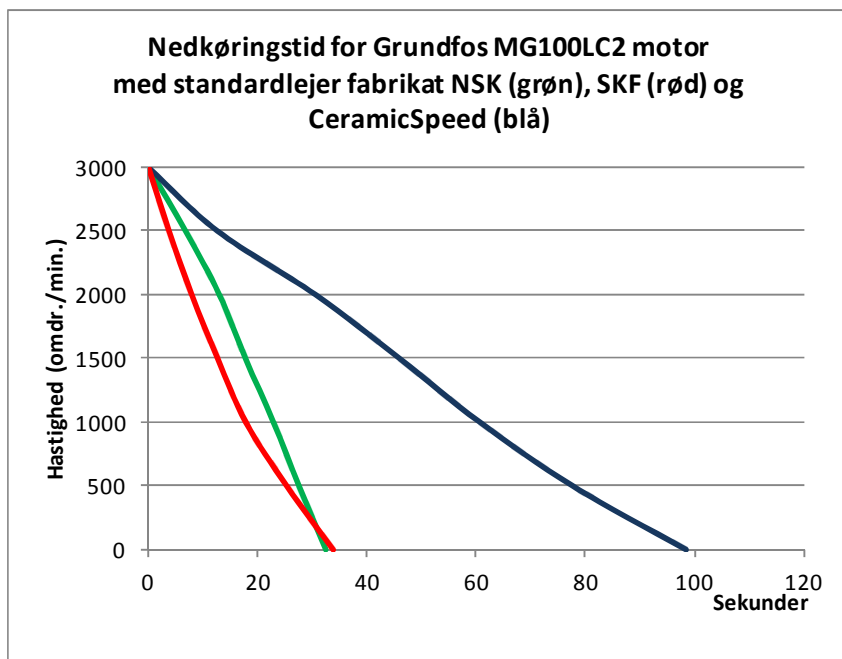
Tabel 5.7 viser de målinger, der er udført i april og maj 2013. I serie 1 er nedkøringstiderne 65% længere for SKF E2 lejerne og 84% længere for CS lejerne end for gennemsnittet af

NSK standardlejerne. Målingerne i serie 2 og 3 er udført uden remskive og efter af motorenes ventilatorer er afmonteret, således at friktionen kun stammer fra de to lejer plus fra luftgabet mellem stator og rotor. I måleserie 2 med lejer af type E2 er nedkørings tiden 10% længere for CS lejet med keramiske kugler end for SKF lejet med stålkugler. I måleserie 3 med standard lejetypen kører CS lejet tre gange så længe som NSK og SKF lejerne. Resultaterne bekræfter således den tendens, som blev set ved de indledende målinger, se tabel 5.4.

Ved måleserie 2 og 3 i tabel 5.7 blev tiden målt for hver 500 o/min, som motorhastigheden faldt med. Resultater af disse målinger er vist i figur 5.10 og figur 5.11. Forskellen i nedkørings tid mellem SKF lejet og CS lejet er større i starten af nedkøringen (ved høje motorhastigheder) end senere, hvilket kunne tyde på, at fordelene ved keramiske kugler i stedet for stålkugler er størst ved høje hastigheder.



Figur 5.10. Nedkørings tider for Grundfos motoren med lejetype E2 og enten stålkugler (SKF) eller keramiske kugler (CS)



Figur 5.11. Nedkøringstider for to ens motorer med lejetype standard, den ene motor med stålkugler (NSK), den anden med enten stålkugler (SKF) eller keramiske kugler (CS)

5.4.2 Konklusion vedr. nedkøringstider

Under nedkøringen bremses motoren af friktionen i lejerne, i luftgabet mellem stator og rotor og mellem remskive og luften samt af tabet i ventilatoren. I måleserie 2 og 3 var ventilatoren og remskiven fjernet, hvorfor nedkøringstiden kun afhænger af lejefriktionen og friktionen i luftgabet. Sidstnævnte friktion er væsentlig mindre end lejefriktionen.

Forholdet mellem nedkøringstid for lejerne af standardtypen er målt til ca. 3 i serie 3. På denne baggrund kan der konkluderes, at CS lejet har mindst 60% og nok også mindst 70% (1:3 = 0,33, dvs. at tabene i lejer plus luftgab er 67% lavere) lavere tab end NSK og SKF standardlejet. Måleserie 2 med lejetype E2 viser, at keramiske kugler i denne lejetype kun giver marginalt lavere friktion end stålkuglerne, idet CS lejets tab ved nedkøring fra 3000 o/min. er omkring 9% (91,9:100,7= 0,91) lavere end SKF E2-lejets.

6. Økonomien i elbesparende kuglelejer

Afsnittet belyser økonomien i lejer med keramiske kugler (i det følgende betegnet CS lejer) til elmotorer ud fra dagens lejepriser m.m. Der tages udgangspunkt i to typiske motorstørrelser på 11 kW og 90 kW.

6.1 Lejetab i beregningerne

Lejerne i motorer på 11 kW og 90 kW er henholdsvis størrelse 6209 og 6316, dvs. andre størrelser end der er målt på i projektet. Derfor benyttes lejetab, beregnet med SKF's program, og baseret på projektets målinger antages, at CS lejerne vil spare mindst 50% af de for standardlejerne beregnede tab, se tabel 6.1. For lejer med frikterende tætninger (XXXX-2RS) regnes tabene til syv gange tabene i et tilsvarende standardleje, jævnfør af snit 5.3.2.

Leje- og friktionstabene i industriens motorer opgøres typisk til ca. 7% af de samlede motortab for mindre elmotorer og ca. 14% for større elmotorer (ref. 1). Det svarer til rundt regnet 0,8% af mærkeeffekten. Forudsætningerne i tabel 6.1 for økonomiberegningen er lejetab på 0,4% for 11 kW motoren og 0,2% for 90 kW motoren. Dermed er de forudsatte tab og tabsbesparelsen meget lave i forhold til, hvad der kan forventes under praktisk drift.

Lejetabene og besparelsen i lejetab er uafhængige af den elektriske belastning på motoren.

Motorstørrelse	Lejestørrelse	Beregnete typiske tab i SKF standardlejer	Tab i CS lejer	Tab i standardlejer med frikterende tætninger
kW		W	W	W
11	6209	50	25	350
90	6316	200	100	1400

Tabel 6.1. Beregningsforudsætninger vedr. tab i to standardlejer (XXXX-2Z), i to CS lejer og i to lejer med frikterende tætninger ved 3000 omdr./min.

6.2 Økonomimodel

Økonomien ved brug af energieffektive lejer opgøres i det følgende som tilbagebetalingstiden for merinvesteringen. Tilbagebetalingstiden beregnes som

$$TBT = MI : (LT \cdot P \cdot D \cdot E)$$

hvor

- D er motorens driftstid (h/år)
- E er elprisen (kr./kWh)
- LT er besparelsen i lejetab (i kW)
- MI er merinvesteringen (kr.)
- TBT er tilbagebetalingstid (år)

For elprisen regnes med 0,70 kr./kWh som typisk for større industrier og 1,40 kr./kWh som typisk for forbrugere i det offentlige. Merinvesteringen i CS lejer opgøres som prisforskellen mellem to CS lejer og to konventionelle lejer.

6.3 CS lejer i stedet for standardlejer

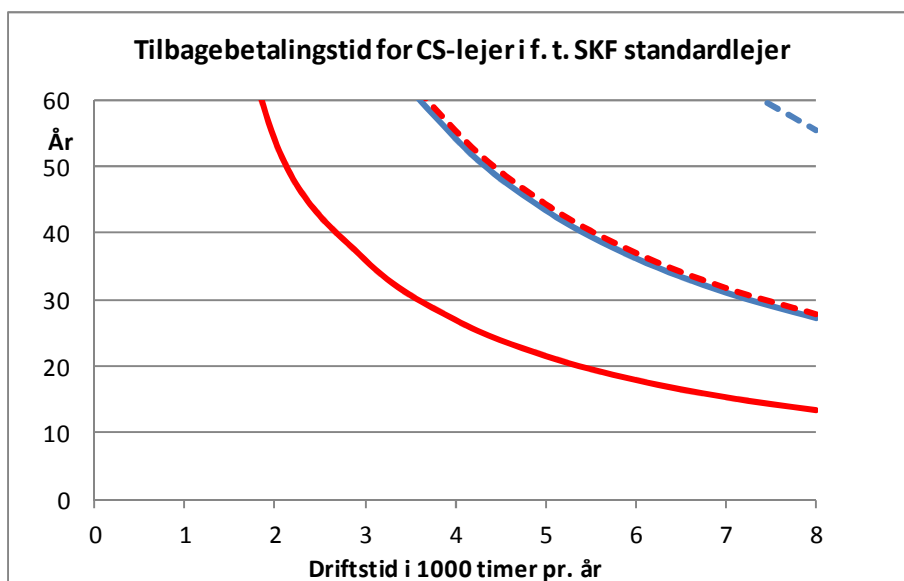
6.3.1 Standardlejer uden frikterende tætninger

Omkring 90% af alle lejer i elmotorer er standardlejer uden frikterende tætninger.

Forudsætningen for beregningerne er vist i tabel 6.2, og den beregnede tilbagebetalingstid for CS lejer i stedet for SKF standardlejer er vist i figur 6.1.

Motormærkeeffekt	Lejestørrelse	Nettopris for 1 leje i kr.			Lejetab, 2 standardlejer	Besparelse i lejetab med 2 CS lejer
		Standardleje	CS leje	Merpris		
kW					W	W
11	6209	200	2.100	1.900	50	25
90	6316	1.000	16.500	15.500	200	100

Tabel 6.2. Forudsætninger for økonomiberegning af CeramicSpeed lejer contra SKF standardlejer. Nettopriserne er dagens listepreiser med sædvanlige rabatter



Figur 6.1. Tilbagebetalingstid for merprisen for CS lejer i forhold til SKF standardlejer. Gælder elmotor ved 3000 rpm og 50% besparelse. Fuldt optrukne kurver: 11 kW, stiplede kurver: 90 kW. Blå: elpris 0,70 kr./kWh. Rød: 1,40 kr./kWh.

Ved 8000 årlige driftstimer ligger tilbagebetalingstiden for merudgiften til CS lejer fra 14 år for 11 kW motoren op til 55 år for 90 kW motoren.

Levetiden for CS lejer er væsentligt længere end for standardlejer, hvilket der ikke er krediteret for i figur 6.1. I de tilfælde, hvor det ellers ville blive nødvendigt at skifte lejer i motorens levetid, spares der med CS lejer udgifter til et eller flere lejeskift, og tilbagebetalingstiden bliver kortere end vist i figur 6.1.

Udgiften til skift af to lejer på en 11 kW motor regnes til 2300 kr. mod 6000 kr. for en 90 kW motor. Priserne er eksklusive selve lejerne og er baseret på hhv. Grundfos' servicepriser og typiske udgifter hos Cheminova.

For CS lejer til en 11 kW motor reduceres tilbagebetalingstiden til det dobbelte af standardlejets levetid, idet merprisen for to CS lejer på 3.800 kr. tjenes hjem, anden gang, der skal skiftes standardlejer. For 90 kW motorens lejer gælder, at tilbagebetalingstiden svarer til fem gange standardlejets levetid (skift af to standardlejer koster 6.000 kr. mod merprisen for to CS lejer på 31.000 kr.).

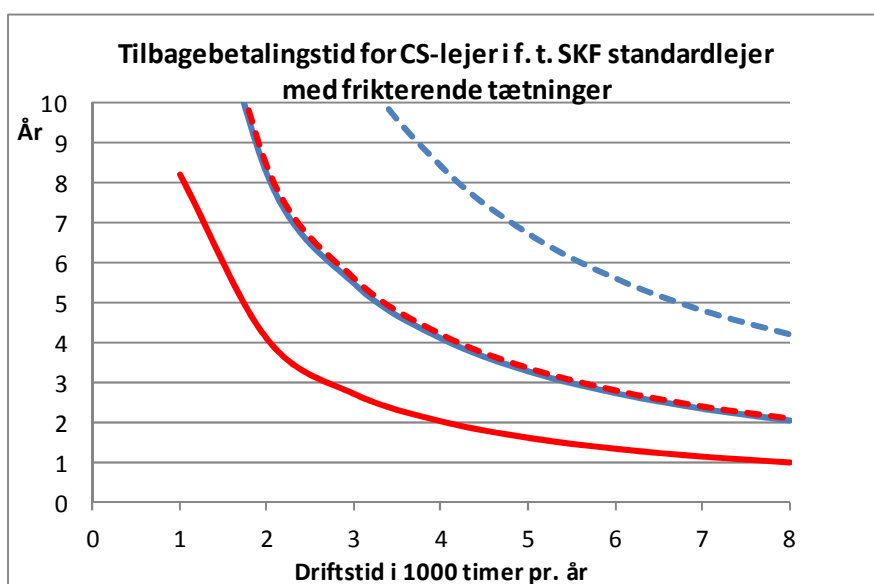
6.3.2 Standardleje med frikterende tætning

CS lejer kan tåle mere forurening end standardlejer og vil i mange tilfælde kunne benyttes i stedet for lejer med frikterende tætninger. Frikterende tætninger er især benyttet i elmotorer over 55 kW, hvor lejerne ellers er åbne, men kan også benyttes i mindre elmotorer, hvis de lukkede, levetidssmurte lejer (f. eks. 2Z) ikke er tætte nok.

Beregningsforudsætningerne er vist i tabel 6.3, og den beregnede tilbagebetalingstid for CS lejer i stedet for SKF standardlejer er vist i figur 6.2.

Motor- mærke- effekt	Leje- størrelse	Nettopriser for 1 leje i kr.			Lejetab, to 2RS lejer	Lejetab, to CS lejer
		Standard-leje med 2RS	CS leje	Merpris		
kW					W	W
11	6209	230	2.100	1.870	350	25
90	6316	1.200	16.500	15.300	1.400	100

Tabel 6.3. Forudsætninger for økonomiberegning af CS lejer contra SKF standardlejer med frikterende tætninger (XXXX-2RS). Nettopriserne er dagens listepreiser med sædvanlige rabatter



Figur 6.2. Tilbagebetalingstid for merprisen for CS lejer i forhold til standardlejer med frikterende tætninger. Gælder elmotor ved 3000 rpm. Fuldt optrukne kurver: 11 kW, stiplede kurver: 90 kW. Blå: elpris 0,70 kr./kWh. Rød: 1,40 kr./kWh

Ved 8000 årlige driftstimer er tilbagebetalingstiden for merprisen for CS lejer i stedet for standardlejer med frikterende tætninger fra 1,2 år op til 4,8 år.

6.3.3 CS lejer i stedet for coatede lejer

CS lejer og keramisk coatede lejer er begge elektrisk isolerende. Isolerende lejer anvendes i stigende grad til motorer, der forsynes fra frekvensomformere. ABB angiver således (ref. 5):

" God isolering er nødvendig for at eliminere muligheden for cirkulerende lejestrømme, som kan induceres af akselspændinger. Isoleringen af lejet i ikke-drivenden afbryder lejets strømbane og eliminerer derved risikoen for skader på lejerne som følge af lejestrømme. Begge akselenderne bør ikke være isoleret fra rammen, eftersom en aksel uden jording kan have et ukendt elektrisk potentiale i forhold til omgivelserne og derfor kan udgøre en potentiel kilde til beskadigelse. For at gøre det nemmere at teste ikke-drivendens lejisolering, er drivendens leje imidlertid også ofte isoleret. Denne isolering kortslettes ved hjælp af et jordkabel under normal drift."

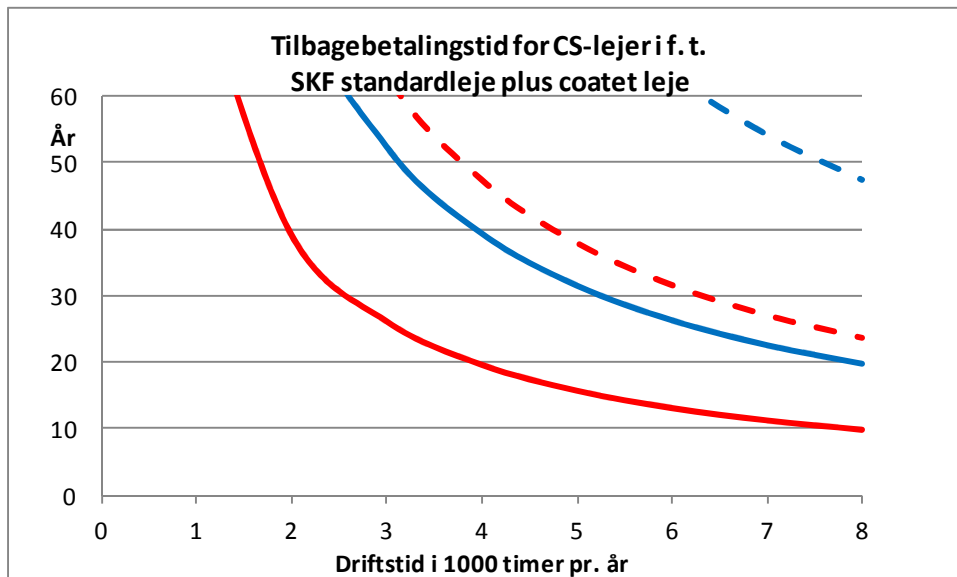
I det følgende beregnes økonomien for CS lejer både i det tilfælde, at der benyttes ét isolerende leje og i tilfælde af, at begge lejer vælges isolerende.

6.3.3.1 Standardleje plus coatet leje, begge uden frikterende tætninger

Tabel 6.4 viser de økonomiske forudsætninger samt de forudsatte lejetab. Lejetabene regnes ens for standardlejer og keramisk coatede lejer. Den beregnede tilbagebetalingstid for CS lejer i stedet for et SKF standardleje plus et SKF coatet leje er vist i figur 6.3.

Motor- mærke- effekt kW	Leje- størrelse	Nettopris for 1 leje i kr.			Merpris, 2 CS lejer kr.	Lejetab, 2 lejer W	Besparelse i lejetab med 2 CS lejer W
		Standard -leje	Coatet leje	CS leje			
11	6209	200	1.250	2.100	2.750	50	25
90	6316	1.000	5.400	16.500	26.600	200	100

Tabel 6.4. Forudsætninger for økonomiberegning af CeramicSpeed lejer contra SKF standardleje plus coatet leje. Nettopriserne er dagens listepriiser med sædvanlige rabatter



Figur 6.3. Tilbagebetalingstid for merprisen for CS lejer i forhold til SKF standardleje plus coatet leje. Gælder elmotor ved 3000 rpm og 50% besparelse. Fuldt optrukne kurver: 11 kW, stiplede kurver: 90 kW. Blå: elpris 0,70 kr./kWh. Rød: 1,40 kr./kWh.

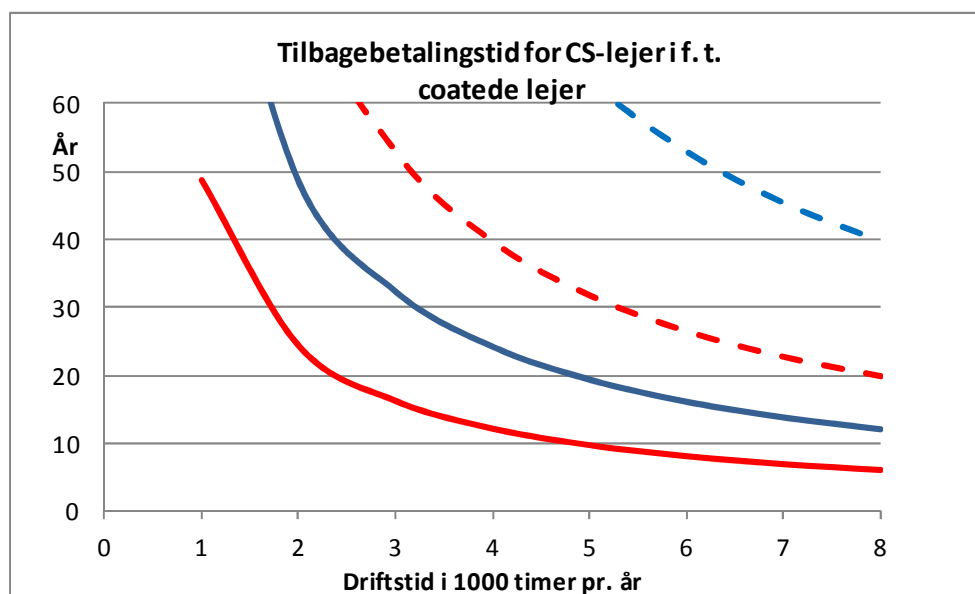
Ved 8000 årlige driftstimer er tilbagebetalingstiden for merprisen for to CS lejer i stedet for et standardleje plus et coatet leje fra 10 år op til 48 år.

6.3.3.2 To coatede lejer uden frikterende tætninger

Tabel 6.5 viser de økonomiske forudsætninger samt de forudsatte lejetab, og figur 6.4 viser den beregnede tilbagebetalingstid.

Motor- mærke- effekt	Leje- størrelse	Nettopris for 1 leje i kr.			Lejetab, 2 lejer	Besparelse i lejetab med 2 CS lejer
		Coated leje	CS leje	Merpris		
kW					W	W
11	6209	1.250	2.100	850	50	25
90	6316	5.400	16.500	11.100	200	100

Tabel 6.5. Forudsætninger for økonomiberegning af CS lejer contra SKF coatede lejer. Nettopriserne er dagens listepreiser med sædvanlige rabatter



Figur 6.4. Tilbagebetalingstid for merprisen for CS lejer i forhold til coatede lejer. Gælder elmotor ved 3000 rpm og 50% besparelse. Fuldt optrukne kurver: 11 kW, stiplede kurver: 90 kW. Blå: elpris 0,70 kr./kWh. Rød: 1,40 kr./kWh.

Ved 8000 årlige driftstimer er tilbagebetalingstiden for merprisen for to CS lejer i stedet for coatede lejer fra 6 år op til 40 år.

6.4 Konklusion vedrørende økonomien

Stilles der krav om en tilbagebetalingstid på højst 2 til 4 år, er CS lejerne kun konkurrencedygtige over for lejer med frikterende tætninger, mens tilbagebetalingstiden i andre tilfælde bliver over 9 år.

Omkring en fjerdedel af alle asynkronmotorer er 2-polede (3000 o/min.), mens resten har 4 eller flere poler og dermed kører langsommere og med lavere lejetab. For disse vil merinvesteringen i CS lejer have længere tilbagebetalingstid end beskrevet foran for de 2-polede motorer.

Inddrages lejernes levetid i vurderingen, vil tilbagebetalingstiden for CS lejer typisk svare til nogle få gange de konventionelle lejers levetid, idet udgifterne til skift af lejer er af samme størrelsesorden som CS lejernes merpris. Inddrages også omkostningerne ved produktionsstop i forbindelse med lejeudskiftning og lejevare, bliver tilbagebetalingstiden for CS lejerne lig de konventionelle lejers levetid.

Vurderingerne viser således, at det er nødvendigt at reducere CS lejrernes pris, hvis de vurderet alene ud fra tabene skal blive konkurrencedygtige i forhold til ikke-frikterende lejer. Overslagsmæssigt er omkring 90% af alle lejer i elmotorer ikke-frikterende.

Ud over besparelserne på det reducerede energiforbrug, får man med CeramicSpeed lejrerne samtidig fordelene og besparelserne ved de 4-8 gange længere levetid, samt garanti for at der ikke sker strømskader i lejerne.

7. Referencer

1. Afsnittet "Friction" i SKF General Catalogue SKF 06-10-02.
2. SKF Energy Efficient bearings. SKF brochure.
3. A new SKF contribution to electric motor energy efficiency. SKF brochure.
4. Energy Efficient Electric Motor Selection Handbook. DOE. January 1993
5. Manual til asynkronmotorer og generatorer. ABB

Bilag 1. Projektgruppe og følgegruppe

Projektgruppe:

Jacob Csizmadia, CeramicSpeed A/S

Bøje Kjær, CeramicSpeed A/S

Kim B. Knudsen, CeramicSpeed A/S

Mogens Johansson, Dansk Energi Analyse A/S (projektleder)

I projektarbejdet har endvidere medvirket:

Denis Sørensen, Grene Industri

Michael Rasmussen, Grundfos

Peter Ørsted, Grundfos

Følgegruppe:

Torben Andersen, Danish Crown

Svend Erik Bjerg, Cheminova

Jesper Bjergaard, Grundfos

Christian B. Espersen, Nordvestjysk erhvervsråd

Jørn Borup Jensen, Elforsk

Erik Jeppesen, DONG Maabjergværket

Bjarne Nielsen, Arla Foods Hoco

Hans Pedersen, NOE

Nikolaj M. Telling, Danish Crown

Henry Vesterboe, Grene Industri