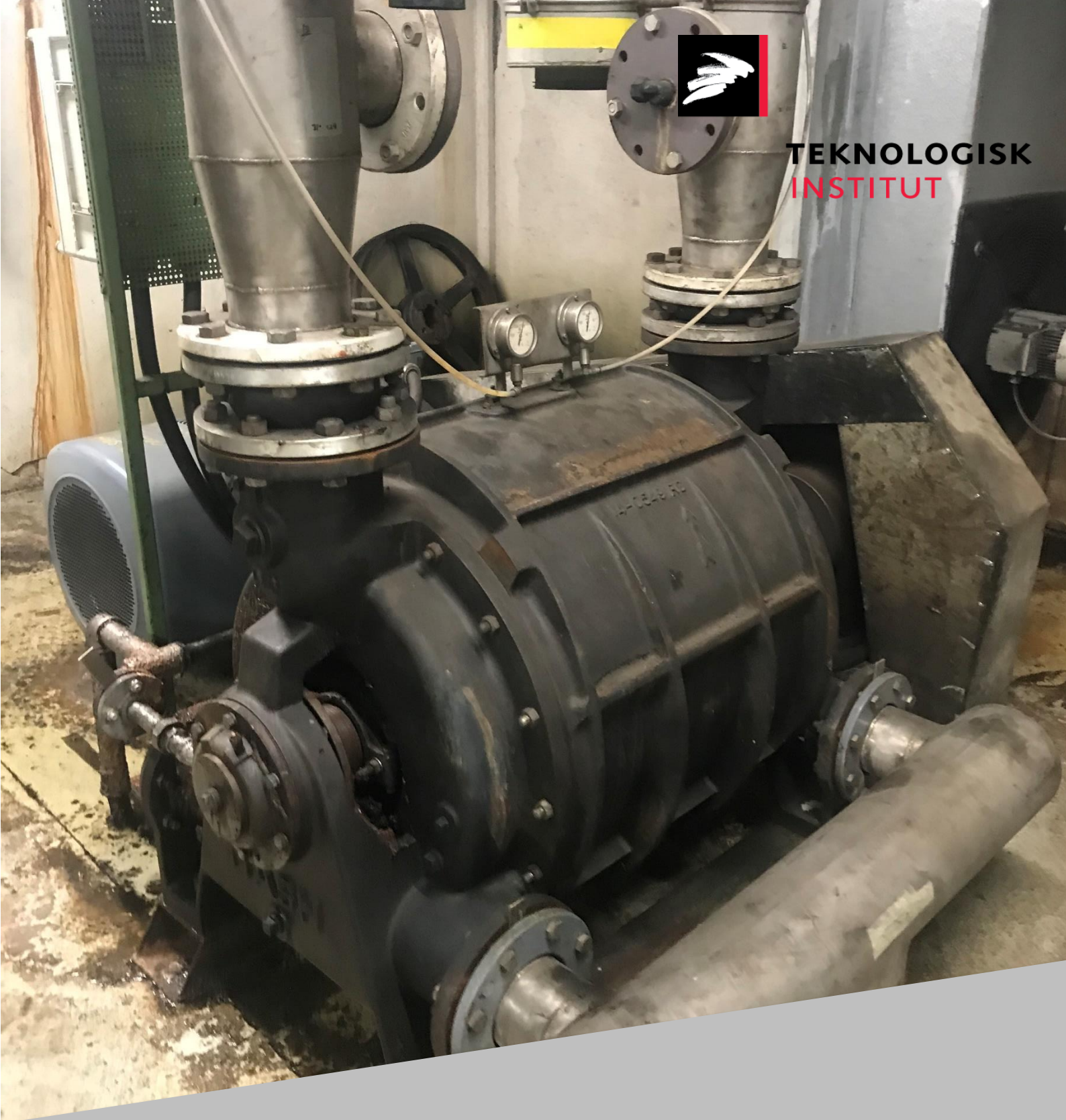


**TEKNOLOGISK
INSTITUT**



OPTIMERING AF VAKUUM- OG OVERTRYKSSY- STEMER

Designvejledning

December 2022

Indholdsfortegnelse

	Side
1 Indledning	3
2 Grundlæggende design (behovsanalyse)	3
3 Design	4
3.1 Systemopbygning	4
3.1.1 Valg af systemkoncept	4
3.1.2 Centrale vakuumsystemer og individuelle vakuumsystemer	4
3.1.3 Vakuumsystemer til transport/evakuering af luft eller gasser og vakuumsystemer til materialetransport	6
3.2 Pumpebestykning	8
3.2.1 Pumpetyper	8
3.2.2 Energiforbrug og virkningsgrader	8
3.2.3 Pumpetyper	11
3.3 Motorer	18
3.4 Rørsystem	24
3.4.1 Transportlængde og antallet af rørbøjninger	25
3.4.2 Rørføring	25
3.4.3 Bøjningsradius	25
3.4.4 Sammensatte bøjninger	25
3.4.5 Sammenføringer	25
3.4.6 Ekspansionsstykker og understøtninger	25
3.4.7 Vakuumrøret	25
3.4.8 Ventiler	26
3.4.9 Rørkvaliteter og valg af disse	26
3.4.10 Flexslanger	27
4 Designprogrammer	28
4.1 Beregningsværktøj	28
4.2 Motor Systems Tool	31
5 Energioptimering	33
5.1 Pumperegulering	33
5.1.1 "Falsk luft" styring	33
5.1.2 Drøvleregulering	33
5.1.3 On-off regulering/kaskadestyring	33
5.1.4 Avanceret kaskadestyring	34

5.1.5 Omdrejningstalsregulering (en eller flere pumper)	34
6 Eksisterende installationer	40
6.1 Dataindsamling	40
6.2 Målinger	40
6.2.1 Spotmåling	40
6.2.2 Kontinuerte målinger	40
6.3 Besparestiltag	42
6.3.1 Udskiftning af vakuumpumpe	42
6.3.2 Etablering af frekvensregulering på vandringpumpe	44
6.3.3 Substitution af trykluft med overtrykssystem (kapselblæserdrift)	45

1 Indledning

Formålet med denne vejledning er at guide læseren gennem det typiske forløb ved design af et nyt vakuum- eller overtrykssystem samt at give læseren ideer til, hvordan eksisterende vakuum- og overtrykssystemer kan ændres, så der opnås en energieffektivisering.

Vejledningen understøttes af et designværktøj, der er udviklet som en applikation til beregning af energiforbrug til typiske systemkonfigurationer for vakuum- og overtrykssystemer.

I vejledningen tages der udgangspunkt i hvordan virksomhedernes behov for en driftssikker og energioptimal vakuumforsyning tilgodeses. Designvejledningen giver retningslinjer for valg af pumper, motorer, rørsystemer, regulering etc..

Desuden beskrives hvordan eksisterende vakuumsystemer undersøges med det formål at tilvejebringe data til designværktøjet, så det er muligt at anvende værktøjet til estimering af energibesparelsen ved energioptimering.

I vejledningen er der en kort beskrivelse af de enkelte faser i designforløbet og af de informationer der skal tilvejebringes samt hvordan de typisk fremskaffes og behandles.

2 Grundlæggende design (behovsanalyse)

I den indledende fase ved design af et nyt vakuum- og overtrykssystem skal der skabes grundlæggende viden om funktionen af det fremtidige system. Det betyder f.eks. at der sammen med maskinleverandører, der skal levere maskiner eller transportsystemer der anvender vakuum skal drøfte følgende:

- Formålet med maskinen eller transportsystemet der kræver vakuum eller overtryk
- Anvendelsen af maskinen eller transportsystemet
- Maskinens eller transportsystemets virkemåde
- Maskinens eller transportsystemets styring / regulering

Disse informationer skal i udgangspunktet leveres af maskinleverandøren, da denne er den eneste der reelt ved præcis hvordan den pågældende maskine tænkes anvendt. Den projekterende og/eller virksomheden bør dog indgå i en dialog omkring maskinens/systemets behov, da det/de krævende tryk og flowmængder har stor betydning for det fremtidige energiforbrug.

Uanset størrelsen af et vakuum- eller overtrykssystem er det vigtigt at skabe det bedst mulige grundlag for at kunne bestemme opbygningen af det fremtidige system, så det bliver så driftssikkert og energioptimalt som muligt.

Det grundlæggende design af vakuum- eller overtrykssystemet opstilles ud fra de krav der opstilles sammen med maskinleverandøren. En meget vigtig del af denne dialog er at opstille et funktionsdiagram for det vakuum- eller overtrykssystem, der skal forsyne maskinen. Funktionsdiagrammet viser lastprofilen og bevægelsesmønstret for vakuum- eller overtryksprocessen. I det følgende er der en beskrivelse af funktionsdiagrammet og hvordan det anvendes.

I de tilfælde hvor det pågældende maskineri med de processer/funktioner der skal forsynes allerede er i drift andetsteds, findes der eksisterende viden om behov for tryk og flow samt variationer i disse parametre.

Hvis der ikke findes viden om behov for flow og tryk samt variationer heri fra et eksisterende, tilsvarende system, er det nødvendigt at bestemme dette sammen med leverandøren af det

maskineri der skal forsynes. I den forbindelse er det essentielt at udarbejde et funktionsdiagram for processerne.

3 Design

Når et nyt vakuum- og overtrykssystem skal designes, skal der foretages en række valg i forhold til, hvordan det kommende system skal opbygges og hvilke komponenter der skal anvendes. I hovedtræk skal der i forhold til de energimæssige tages stilling til:

- Systemopbygning
- Pumpebestykning
- Pumperegulering
- Regulering og styring af komponenter

Disse valg er i vid udstrækning baseret på det funktionsdiagram, der er opstillet for den/de processer, som vakuum- eller overtrykssystemet skal betjene.

3.1 Systemopbygning

3.1.1 Valg af systemkoncept

Nedenfor ses en oversigt over forholdene ved forskellige løsninger til opdeling i og anvendelse af vakuumsystemer.

3.1.2 Centrale vakuumsystemer og individuelle vakuumsystemer

System	Typisk anvendelse	Bemærkninger
Centralt vakuumsystem	<p>Centrale vakuumsystemer er systemer, der forsyner flere forbrugssteder fra en fælles pumpeinstallation.</p> <p>Forbrugsstederne kan være forsynet fra rør, der er ført som en ringledning, men kan også blot være forsynet fra et fælles rørsystem der ikke udgør en ringledning.</p> <p>Centrale vakuumsystemer er velegnede i virksomheder med mange forbrugssteder, - gerne placeret tæt sammen i form af et stort maskinanlæg, der har nogenlunde samme behov for tryk.</p> <p>Systemer hvor alle modtagere arbejder med materiale med en vis ensartethed i partikeldensitet og partikeloverflade.</p>	<p>Fordelen ved centrale vakuumsystemer er høj driftssikkerhed, da pumpestationen ofte er forsynet med flere pumper i parallel, hvoraf én pumpe ofte er i reserve. Der kan være specielle krav med hensyn til forsyningsikkerheden fra virksomhedens side der gør at det er ønskeligt.</p> <p>Til gengæld bliver alle forbrugssteder i udgangspunktet forsynet med samme tryk, der alt andet lige bestemmes at forbrugsstedet med det højeste trykbehov.</p> <p>Gode muligheder for energiefektiv regulering af flere vakuumpumper og konstant arbejdsstryk.</p> <p>Lave vedligeholdelsesomkostninger.</p>

<p>Individuelle vakuumsystemer (en vakuumpumpe pr. sugsted)</p>	<p>Ved et enkeltssystem forstås, at der etableres en separat vakuum- eller overtrykspumpe for hver enkelt maskine / anvendelse.</p> <p>Denne type systemer ses ofte i virksomheder, hvor der kun er få maskiner, eller hvor vakuum- eller overtrykspumpen er leveret sammen med den tilhørende maskine som en integreret del af leverancen. I disse tilfælde er det ofte ikke muligt at foretage et valg.</p> <p>Systemer hvor der optræder forskellige krav til tryk eller hastighed som følge af forskellige materialer.</p> <p>Systemer hvor enkelt(e) modtagere ligger væsentligt længere væk end middelfstanden til de resterende modtagere.</p>	<p>Fordelen ved enkeltssystemer er at pumpe, regulering etc. kan tilpasses individuelt til hver maskine. Til gengæld medfører havari af pumpen af den pågældende maskine er ude af funktion. I centrale vakuumsystemer er der ofte en standby pumpe i tilfælde af havari.</p> <p>Arbejdstrykket kan variere meget ved momentane forbrug på grund af ringe akkumulerings-eвне.</p> <p>Høj forsyningsikkerhed (en transportlinje pr. pumpe.</p> <p>Høje omkostninger ved støjisolering og vedligeholdelsesomkostninger i forhold til centrale anlæg.</p>
---	---	--

Tabel 3.1 Centrale vakuumsystemer og individuelle vakuumsystemer



Figur 3.1 Centralt vakuumsystem



Figur 3.2 Individuelle vakuumsystemer

3.1.3 Vakuumsystemer til transport/evakuering af luft eller gasser og vakuumsystemer til materialetransport

System	Typisk anvendelse	Bemærkninger
Vakuumsystemer til transport/evakuering af luft eller gasser med eller uden væske	<p>Fastholdelse Vakuumpakning Opsamling/løftning og placering af emner Formning og termoformning Destillering Beluftning</p>	<p>Vakuumsystemer til transport/evakuering af luft eller gasser med eller uden væske har stor udbredelse i industrien.</p> <p>F.eks. vakuumpakning, som er en pakkeproces, hvor luften udtrækkes fra pakningen, før den forsegles.</p> <p>Desuden anvendes vakuum i vid udstrækning til formning, presning og laminering i flere forskellige brancher.</p> <p>For mange af processerne er hastigheden hvorved processen sker afgørende. Flowet er derfor også afgørende, da hastighed flow hænger sammen. Sluttrykket er naturligvis en lige så vigtig parameter for de fleste processer.</p> <p>Hvis der er væske i luften der skal transporteres/evakueres kan der kun benyttes skruevakuumpumper og vandringspumper.</p>
Vakuumsystemer til materialetransport	<p>Der findes generelt fire hovedtyper af pneumatiske transportprincipper.</p> <p>Valget afhænger af blandt andet karakteristika ved det specifikke materiale, som skal transporteres samt produktionstekniske krav.</p> <p>Dilute-phase og dense-phase er betegnelsen for de to yderpunkter i pneumatisk transport</p>	<p>Dilute-phase systemer har stor udbredelse i industrien.</p> <p>De er kendetegnet ved at materialet holdes svævende i rørene ved at iblande bæreluft ved sugestedet.</p> <p>Luftmængden er høj og trykdifferensen lav.</p> <p>Der kan maksimalt transporteres 15 kg materiale pr. m³ luft.</p> <p>Investeringen og vedligeholdelsesomkostningerne er lave,</p>

		<p>men energiforbruget er højere end for dense-phase systemer.</p> <p>Systemet er alsidigt og fleksibelt og er typisk beregnet til forskellige typer granulat og pulver.</p> <p>Dense-phase systemer har ringe udbredelse i industrien.</p> <p>De er kendetegnet ved at materialet transporteres som prop-portioner gennem rørstrengene. Luftmængden er lav og trykdifferensen høj. Der kan transporteres mere end 15 kg materiale pr. m³ luft.</p> <p>Investeringen og vedligeholdelsesomkostningerne er høje, men energiforbruget er lavere end for dilute-phase systemer. Systemet er anvendes hovedsageligt skal transportere færdigblandede materialer med forskellig vægtfylde for at undgå en separering af materialet og/eller hvor materialet kræver en skånsom transport.</p>
--	--	--

Tabel 3.2 Vakuumsystemer til transport/evakuering af luft eller gasser og vakuumsystemer til materialetransport



Figur 3.3 Vakuumsystemer til transport/evakuering af luft eller gasser (papirmaskine)



Figur 3.4 Vakuumsystemer til materialetransport (plastgranulat)

3.2 Pumpebestykning

Når det er valgt om vakuum- eller overtrykssystemet skal opbygges som enkeltssystemer eller som et ringledningssystem, skal der foretages valg af pumpetype og den form for regulering, der skal styre tryk og flow og dermed pumperne.

Pumpevalget foretages ud fra kravene fra vakuum- eller overtrykssystemets forbrugssteder til tryk og flow, idet visse pumper er velegnede til lave tryk og andre til høje tryk, og nogle pumper er velegnede til små flow og andre til høje flow. Desuden skal der tages stilling til hvilken styring der skal anvendes for at regulere pumpeydelsen.

Der er nedenstående oversigt over pumpetyper med deres karakteristika.

3.2.1 Pumpetyper

Vakuumpumper og overtrykspumper findes som skruevakuumpumper, vandringspumper, klovakuumpumper, lamelvakuumpumper og kapselblæsere.

Nedenstående er der en oversigt over pumpetyper og deres karakteristika.

Pumpetype	Maksimalt tryk (abs.) [mbar]	Normalt anvendelsestryk (abs.) [mbar]	Flow [l/min.]	Virkningsgrad η_v [%]	Anvendelse [-]
Skruevakuumpumpe	1.000	0,001 – 1.000	0 - 900	40 - 45	Større vakuumpakkemaskiner. Kemiske procesteknologi
Vandringspumpe	3.000	40 – 3.000	50 - 900	35 - 40	Papirfremstilling. Kemisk industri. Plastikindustri. Levnedsmiddelteknologi.
Klovakuumpumpe	3.000	20 – 3.000	10 - 500	45 - 50	Industrielle applikationer, hvor konstant vakuum eller overtryk samt oliefri drift er afgørende
Lamelvakuumpumpe	1.000	0,05 – 1.000	10 - 1.600	35 - 40	Vakuumpakkeprocesser
Kapselblæser	2.000	800 – 2.000	150 – 4.000	60 - 70	Vandbehandling (beluftning af vand og rensning af filtrationsfaser)
Sidekanalblæser	1.700	800 – 1.700	50 - 210		Applikationer, som kræver en høj pumpehastighed kombineret med et lavt vakuumniveau

Tabel 3.3 Vakuumpumper

Foruden de pumpetyper der er vist i tabel 3.3 findes en række andre pumpetyper, som f.eks. scroll-vakuumpumper, turbovakuumpumper og diffusionsvakuumpumper. Disse er dog ikke særlig udbredte i industrien.

3.2.2 Energiforbrug og virkningsgrader

Uanset hvilken vakuumpumpe der er tale om så gælder der, at belastningen P_p (den effekt i kW der skal tilføres for at komprimere luften) kan skrives ved hjælp af udtrykket:

$$P_p = \frac{0,0278 \cdot p_1 \cdot q_v \cdot \ln \frac{p_2}{p_1}}{\eta_p}$$

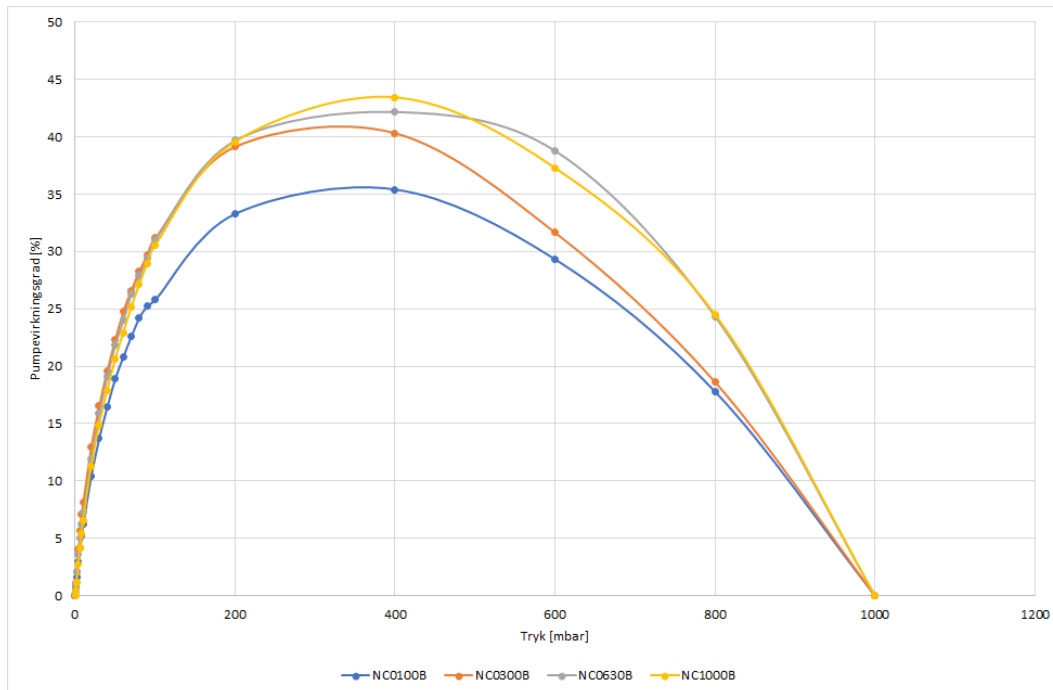
hvor:

- P_p er den tilførte effekt [kW]
- p_1 er trykket på vakuumpumpens lavtryksside [bar]

- p_2 er trykket på vakuumpumpens højtryksside [bar]
- q_v er pumpens flow [m^3/h]
- η_p er pumpens virkningsgrad [%]

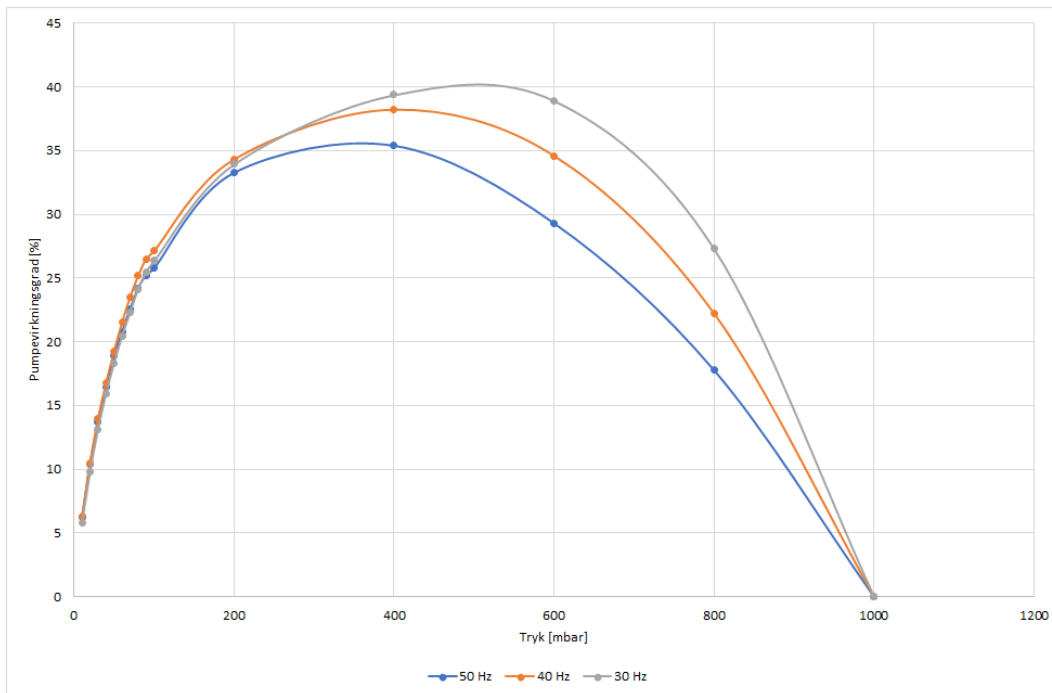
Virkningsgraden η_p for vakuumpumpen produktet af den isentropiske virkningsgrad η_{is} og den mekaniske virkningsgrad η_{mek} .

I figur 3.5 ses virkningsgraden for fire forskellige skruevakuumpumper i forskellige størrelser. Pumpernes nominelle flow er henholdsvis 110, 320, 580 og 840 m^3/h . Virkningsgraden er som det ses højest for den pumpe der har et nominelt flow på 840 m^3/h (NC1000B).



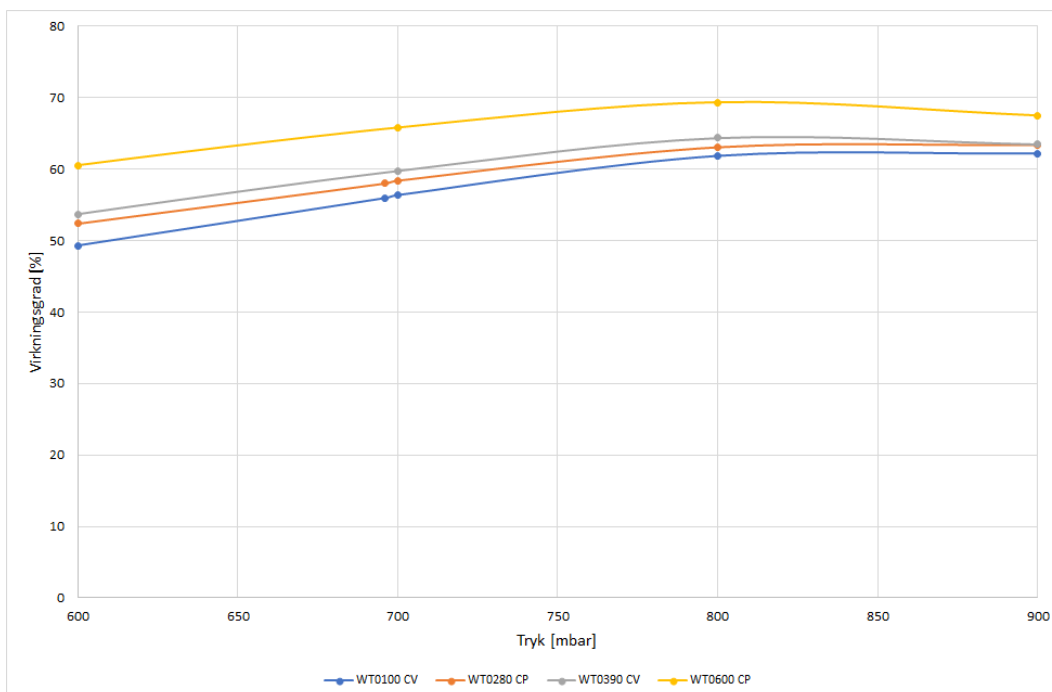
Figur 3.5 Virkningsgrader for skruevakuumpumper i forskellige størrelser

I figur 3.6 ses virkningsgraderne for den ene skruevakuumpumpe (NC1000B) ved forskellige hastigheder. Pumpens nominelle flow er 110 m^3/h ved 50 Hz, svarende til ca. 1.450 omdr./min.. Virkningsgraden er som det ses højest når pumpe hastighed er reduceret til 30 Hz, svarende til ca. 870 omdr./min..



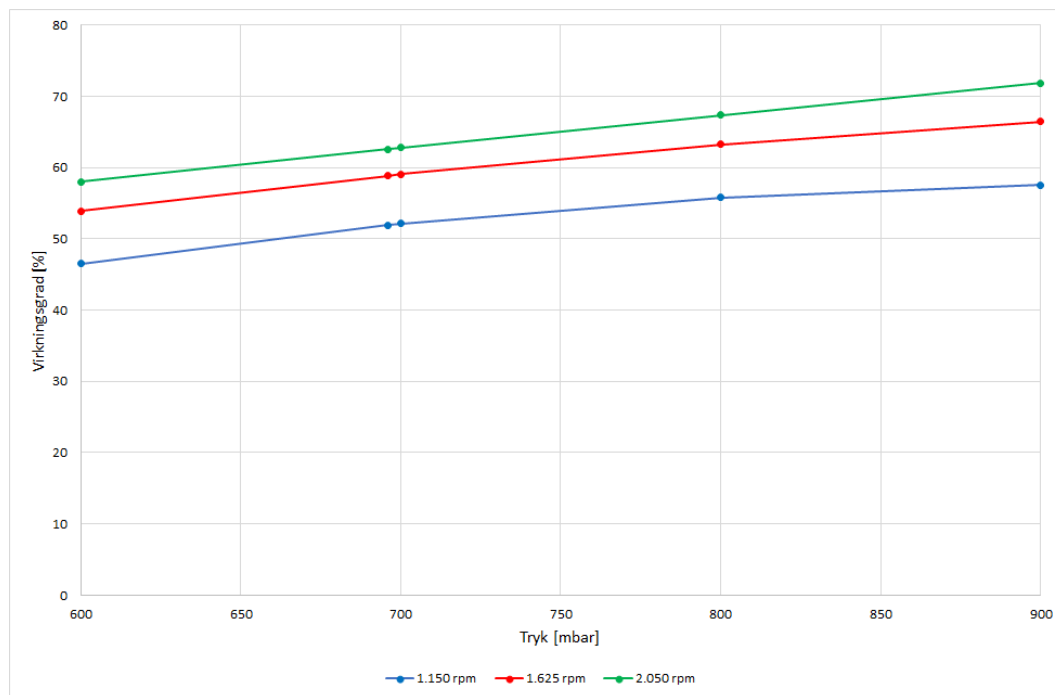
Figur 3.6 Virkningsgrader for en skruevakuumpumpe ved tre forskellige hastigheder

I figur 3.7 ses virkningsgrader for fire stk. kapselblæsere i forskellige størrelser. Blæsernes maksimale flow er henholdsvis 535, 1.355, 1.793 og 2.935 m³/h. Virkningsgraden er som det ses højest for den pumpe, der har et maksimalt flow på 2.935 m³/h (WT0600 CP).



Figur 3.7 Virkningsgrader for fire kapselblæsere i forskellige størrelser

I figur 3.8 ses virkningsgraderne for den ene af kapselblæsere. Virkningsgraden øges som det ses ved at øge blæserens hastighed.



Figur 3.8 Virkningsgrader for kapselblæser ved tre forskellige hastigheder

3.2.3 Pumpetyper

I det følgende er der en kort beskrivelse af de væsentligste pumpetyper, deres konstruktion og deres typiske trykområde.

Skruevakuumpumper

I en skruevakuumpumpe roterer to skrueformede rotor i modsatte retninger. Det pumpede medium er fanget mellem cylinderen og skruekamrene, hvor det komprimeres og transporteres til gasudløbet. Under kompressionsprocessen kommer skruerotorerne ikke i kontakt med hinanden eller cylinderen.

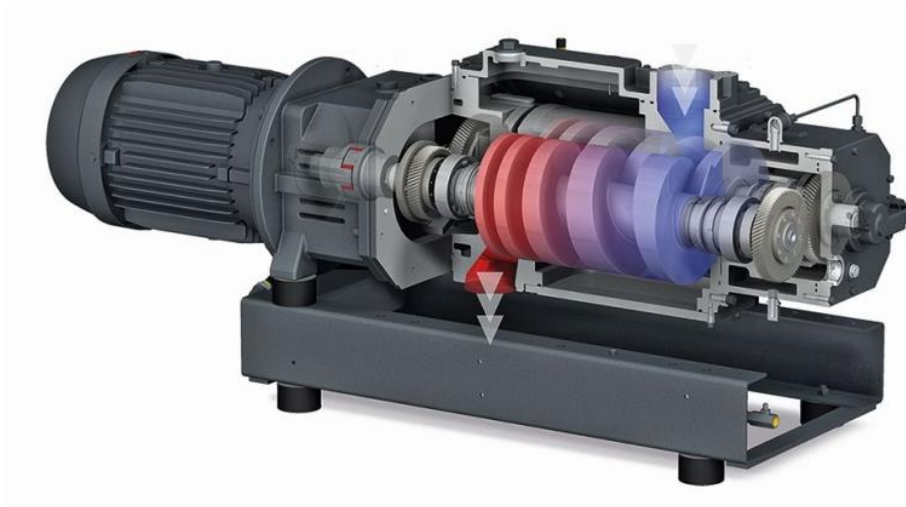
Gennem en præcis fremstilling og minimal afstand mellem de bevægelige dele muliggør dette driftsprincip et lavt ultimativt tryk på $<0,1$ mbar. Skruevakuumpumpen er derfor velegnet, når der er behov for meget lave tryk.

Skruevakuumpumper arbejder ved hjælp af vandkøling, som sikrer jævn temperaturfordeling i pumpehuset og dermed termisk stabilitet i hele processen.

Tørtløbende skruevakuumteknologi anvendes ofte i kemiske og farmaceutiske industrier. Pumpene kan konstrueres til næsten alle procesgasser takket være materialevalg og temperaturregulering.

Ulemper ved tørtløbende skruevakuumpumper er at de er følsomme over for partikler, der kommer ind i systemet og at de ikke kan anvendes med procesgasser, der er reaktive ved høje temperaturer.

Teknologien er relativt ny sammenlignet med væskeringsteknologien (se afsnit vedr. væskeringspumper).



Figur 3.9 Skruevakuumpumpe

Væskeringspumper

Princippet bag væskeringsvakuumpumpen (vandringspumpen) blev allerede udviklet i 1890. På grund af deres funktionelle og stærke konstruktion passer væskeringsvakuumpumper til vakuumgenerering i anvendelser, hvor gasser eller dampe skal fjernes, og hvor der er risiko for, at der opstår kondens i vakuumpumpen under kompressionsprocessen. De passer derfor ideelt til fugtige processer i kemisk industri samt inden for plastikindustrien, til papirproduktion, inden for levnedsmiddelteknologien og mange andre industrimæssige formål.

Væskeringsvakuumpumper anvender vand eller en væske, der er kompatibel med den gas eller damp der skal fjernes. Der anvendes i langt de fleste tilfælde vand, men det ses også at der anvendes ethylenglycol, mineralsk olie eller organiske opløsningsmidler, hvis disse allerede er indeholdt i afkastet.

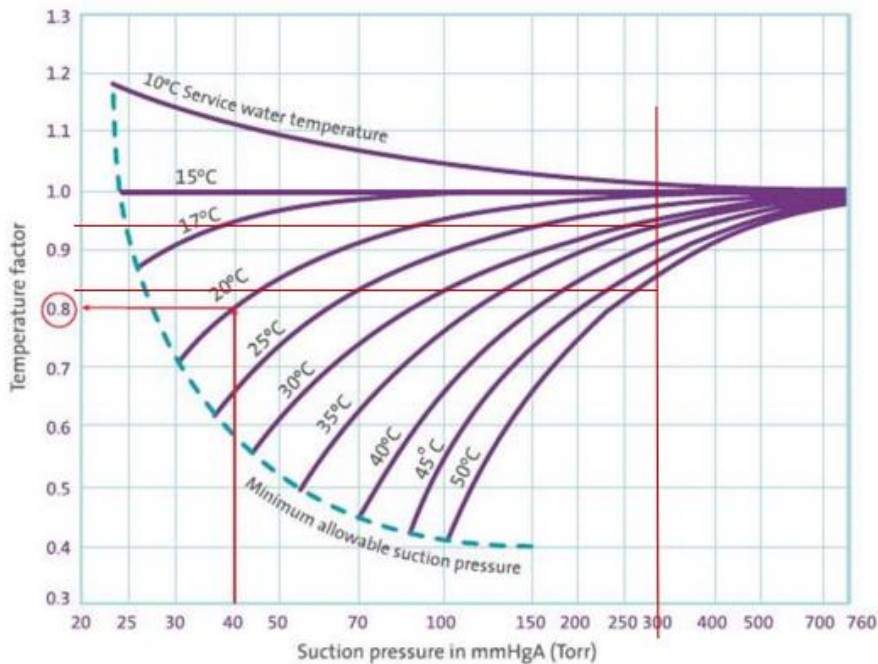
Det grundlæggende princip er det samme i alle størrelser og versioner. En excentrisk placeret rotor roterer inden i et cylindrisk kabinet. Dette kabinet er fyldt med driftsvæske i en sådan grad, at rotorens vinger er nedsænket i væske. Rotorvingens rotation og den deraf følgende centrifugalkraft får væsken i kabinettet til at danne den såkaldte væskering. Det pumpede medie transporteres i rummene mellem de enkelte vinger og væskeringen. Rotorens excentriske placering gør, at volumenet i de enkelte mellemrum mellem rotorvingerne og kabinettet er forskelligt, og det medfører at gas suges ind, komprimeres og udstødes. Væskeringen tætnes de individuelle rum mellem vinger og kabinet. Derfor kaldes væsken nogle gange for tætningsvæske i stedet for driftsvæske.



Figur 3.10 Væskeringspumpe

Det opnåelige vakuumniveau afhænger af væskens damptryk. Dermed kan væskeringsvakuumpumpen være i drift under relativt lave temperaturer, og derudover holdes mediets temperaturstigning på et minimum under kompressionsprocessen. Derfor passer væskeringsvakuumpumper perfekt til at pumpe damp og gasser med et højt fugtindhold. De lave temperaturer i vakuumpumpen er fordelagtige ved kondensering af procesdampe. I en vis grad betyder dette, at vakuumpumpen også fungerer som kondensator, og fordi kondenseringen sker, når blandingen kommer ind i vakuumpumpen, reduceres volumen dramatisk.

Hvis væsken i vakuumpumpen fordamper ved den temperatur og det tryk der er i pumpens indløbsdel, vil en del af væsken fordampe og den damp vil reducere vakuumpumpens ydelse, da denne damp skal fjernes sammen med damp/gas fra den proces vakuumpumpen betjener. I nedenstående diagram ses, hvor meget vakuumpumpens ydelse forringes i afhængighed af temperaturen på væsken og sugetrykket fra processen. Kurverne gælder for vand.



Figur 3.11 Temperatur/tryk kurver for korrektion af pumpeydelse

Driftsvæsken absorberer kompressionsvarmen, og da væskeringsvakuumpumper praktisk talt er isoterme, er de fordelagtige, når der pumpes med temperaturfølsomme.

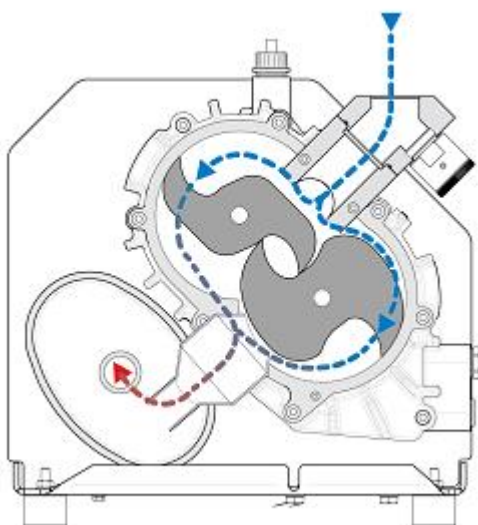
En væsentlig fordel ved væskeringsvakuumpumper er, at driftsvæsken og de materialer, der anvendes til komponenterne, kan tilpasses, så de passer til det pumpede medie. Det gør det også muligt at pumpe korroderende eller eksplosive gasser og dampe. Som følge af lave driftstemperaturer kan det betragtes som langt mindre problematisk at pumpe eksplosive materialer, end det er tilfældet for andre mekaniske vakuumpumper.

Vandringspumpen kan yde en trykstigning op til 2 bar (overtryk) og har en vakuumgrænse ned til 40 mbar (absolut).

Klovakuumpumper

En klovakuumpumpe består af et statorhus med to kløer, som roterer i hver sin retning med samme hastighed. Den transporterede gas løber ind i det kammer, som fremkommer mellem statoren og kløerne. Klovakuumpumpens volumetriske ydelse er konstant. Den indsugede gas komprimeres for hver hele omdrejning af drivakslen. Et konstant tryk og en øget blæserhastighed vil øge udstødningsstrømmen proportionalt. Da kløerne ikke rør hinanden er smøring unødvendig, hvilket betyder kompressionen er oliefri.

Klovakuumpumper kan yde en trykstigning op til 2 bar (overtryk) og har en vakuumgrænse ned til 20 mbar (absolut).



Figur 3.12 Klovakuumpumpe

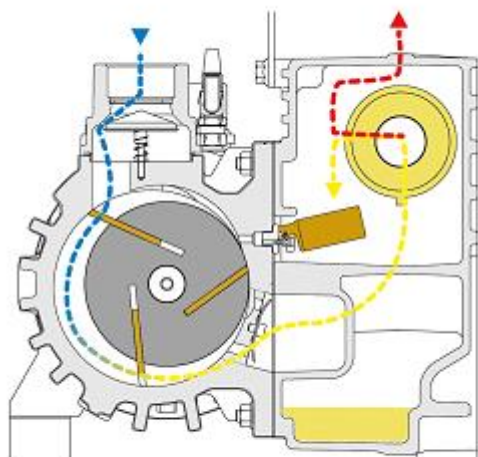
Lamelvakuumpumper

Lamelvakuumpumper er roterende forskydningspumper. Lamellerne er anbragt i sprækkerne i rotoren, som roterer excentrisk i et cylindrisk hus. På grund af den centrifugalkraft, der opstår ved rotorens roterende bevægelse glider lamellerne ud af sprækkerne, og de kommer i kontakt med cylindervæggen. Det skaber mellemrum med forskellige volumener, som igen skaber sugnings- og komprimeringseffekten. For at reducere friktionen og forbedre tætningen sendes olie kontinuerligt ind i kompressionskammeret.

Fordelene ved oliesmurt lamelvakuumpumper er et højt vakuumniveau. Endvidere er pumperne meget robuste og pålidelig og nemme at servicere.

Pumperne er velegnede til transport af syredampe og monomerer eller produkter, der fører til polymerisering, når andre vakuumteknologier anvendes.

Volumenstrøm fra 2 m³/h og op til 3.500 m³/h. Vakuumgrænse op til 0,01 mbar (absolut).



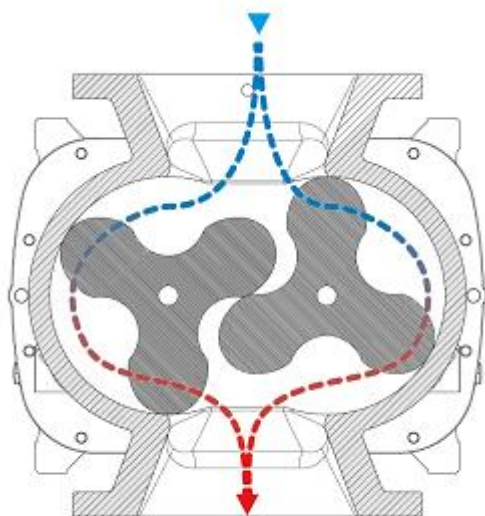
Figur 3.13 Lamelvakuumpumpe

Kapselblæser

En kapselblæser består af et statorhus med to symmetriske stempler med to eller tre tandede gearhjul, som roterer i hver sin retning med samme hastighed. Den transporterede gas løber ind i det kammer, som fremkommer mellem statoren og stemplerne. Det heraf opståede tryk afhænger af friktionsglidningen i gasrørene samt processens tryk (system back pressure).

Kapselblæsernes volumetriske ydelse er konstant, hvilket tillader drift under vekslende trykforhold. Den indsugede gas komprimeres for hver hele omdrejning af drivakslen. Et konstant tryk og en øget blæserhastighed vil øge udstødningsstrømmen proportionalt. Da stemplerne ikke rør hinanden er smøring i kompressionskamrene overflødig, hvilket betyder kompressionen er oliefri. Dette er én af de største fordele ved kapselblæsere og er en yderst vigtig egenskab med hensyn til kemiske processer og anvendelsesområder, der kræver et meget lavt forureningsniveau.

Kapselblæsere kan yde en trykstigning op til 2 bar (absolut) og har en vakuumgrænse ned til 800 mbar.



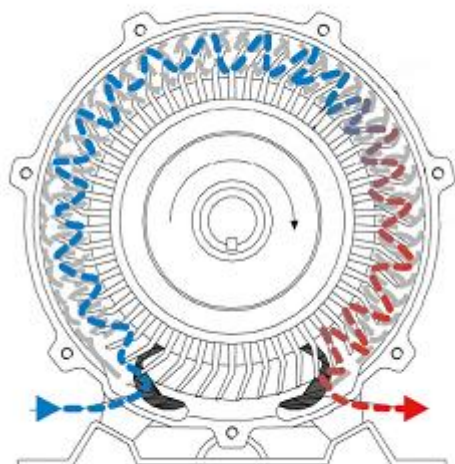
Figur 3.14 Kapselblæser

Sidekanalblæser

Sidekanalblæsernes (også kaldte sidekanalblæser, ringkammerblæser eller turboblæser) konstruktion er baseret på princippet om vandrette kanaler. Et særligt designet blæserhjul tvinger indløbsluftstrømmen til at følge en spiralkanal. Luftstrømmen underkastes derved gentagne accelerationer, der resulterer i opnåelse af et højt differenstryk eller vakuum, alt afhængig af sidekanalblæserens anvendelse.

Blæserhjulet monteres direkte på motorakslen, og de roterende dele afbalanceres dynamisk for at sikre en næsten helt vibrationsfri drift. Både blæserhus og -hjul er udført i matricestøbt aluminium med henblik på maksimal robusthed og let håndtering.

Sidekanalblæseren kræver ikke smøring eftersom der ikke er nogle kontaktpunkter mellem statiske og roterende dele. Sidekanalblæsere kan yde en trykstigning op til 0,75 bar (overtryk) og har en vakuumgrænse op til 450 mbar (absolut).



Figur 3.15 Sidekanalblæser

Alle de nævnte vakuumteknologier har fordele og ulemper. Der er ingen enkelt ideel løsning til alle applikationer. Det er derfor vigtigt at søge konsultation fra en vakuumekspert og tage højde for alle vigtige parametre i processen.

Det begynder med procesbetingelser, procesgasser og integration i processtyring gennem økonomisk effektivitet, sikkerhed og pålidelighed af fremtidig vakuumgenerering. I de fleste tilfælde fører overvejselsen af disse faktorer til et tilpasset vakuumsystem, der er direkte skræddersyet til kravene.

3.3 Motorer

Der benyttes tre typer motorer, som beskrives nedenfor.

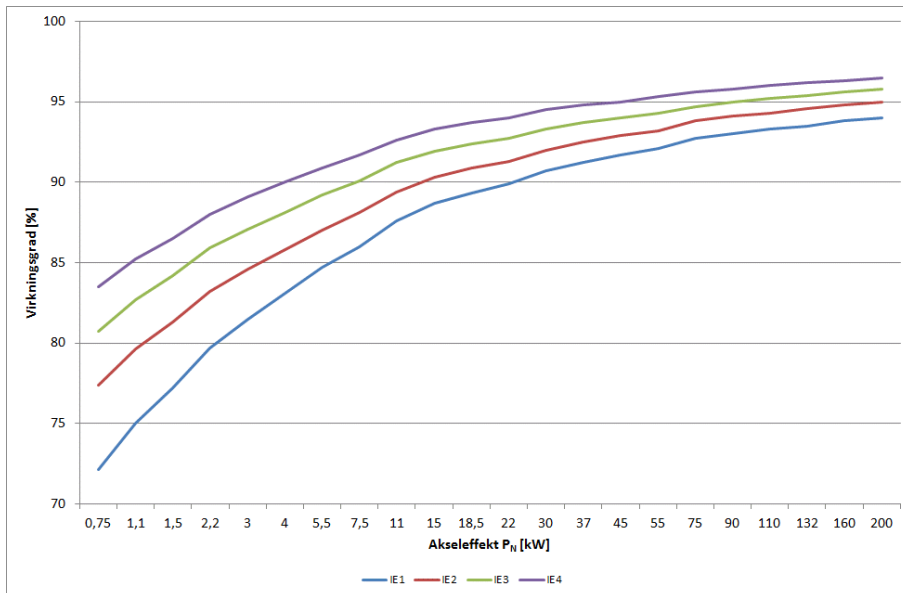
Asynkronmotorer

I 2008 blev der med vedtagelsen af den internationale standard IEC 60034-30:2008 indført nye effektivitetsklasser IE1, IE2 og IE3, se tabel 3.4. I IEC 60034-31-1:2012 "Technical specification" defineres effektivitetsklassen IE4 "Super premium efficiency", gældende for asynkron- og synkronmotorer.

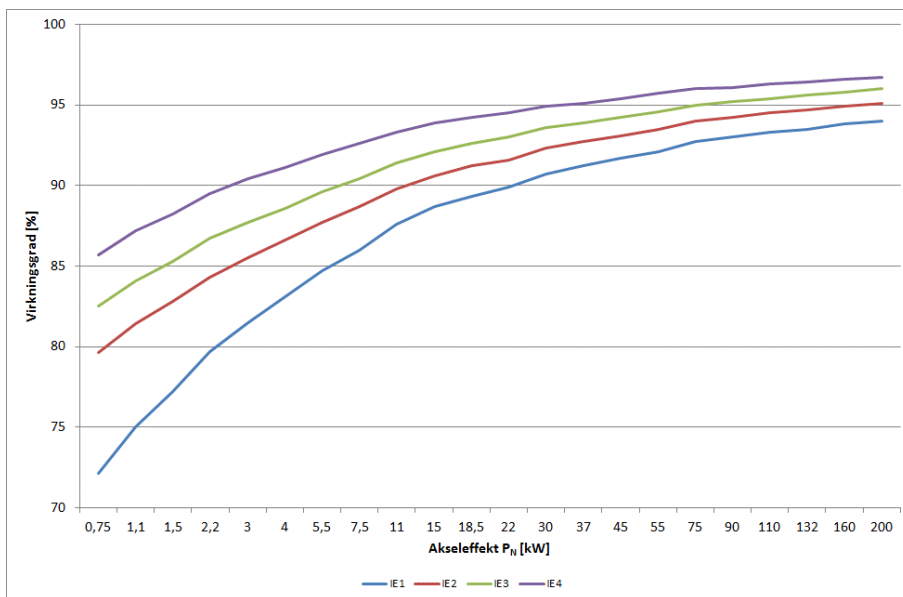
Klasse	Beskrivelse af motorens effektivitet	Betegnelse
1	Super premium efficiency	IE4
2	Premium efficiency	IE3
3	High efficiency	IE2
4	Standard efficiency	IE1

Tabel 3.4 Inddeling af motorer i effektivitetsklasser

Figur 3.16 og 3.17 viser, at der ved projektering af motordrevne maskinsystemer altid bør vælges IE3 eller IE4 motorer.



Figur 3.16 Virkningsgrader for 2-polede motorer i henhold til IEC 60034-30:2008 og IEC 60034-31:2010



Figur 3.17 Virkningsgrader for 4-polede motorer i henhold til IEC 60034-30:2008 og IEC 60034-31:2010

I juni 2011 blev der i EU indført krav om miljøvenligt design (ECO-design) af elmotorer. Ecodesign er krav om produktudformning, der tilgodeser eksempelvis energieffektivitet. Kravene gælder almindelige trefasede elmotorer med én hastighed i størrelsen 0,75 kW til 500 kW. Kravene

gælder også, hvis motoren er indbygget i et produkt, så længe det er muligt uden større besvær at måle motorens energieffektivitet særskilt.

Fra 1. januar 2017 er kravet, at alle motorer på over 0,75 kW skal være i mindst energieffektivitetsklasse IE3, eller være mindst IE2 hvis motoren er tilsluttet en frekvensomformer.

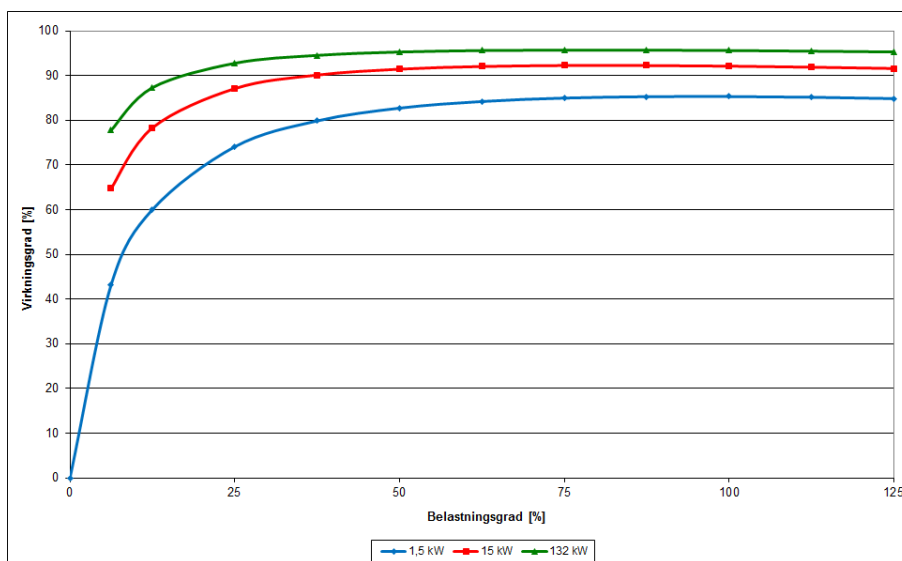
Effektiviteten eller virkningsgraden for en elmotor afhænger udover størrelsen P_m også af belastningsgraden. Belastningsgraden for elmotoren defineres således:

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

hvor:

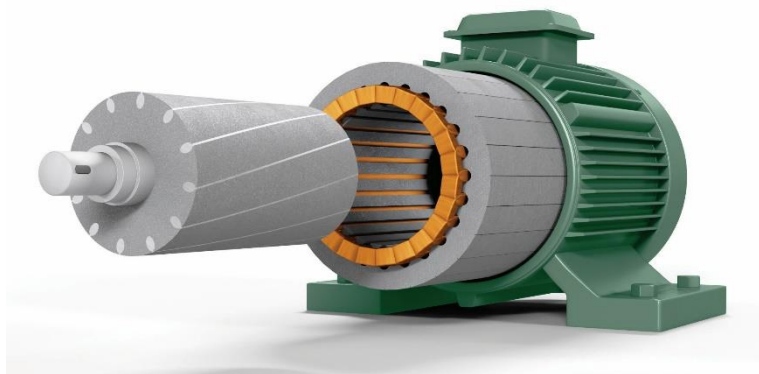
- P_m er den aktuelle akseffekt [kW]
- $P_{m,N}$ er den nominelle akseffekt [kW]

I figur 3.18 ses virkningsgraderne for tre 4-polede IE3 asynkronmotorer som funktion af belastningsgraden. For alle tre motorer ses, at virkningsgraden er nogenlunde konstant ved belastningsgrader mellem 75% og 125%. Når belastningsgraden går fra 50% til 25%, sker der en betydelig forringelse af virkningsgraderne for de tre motorer. Den største forringelse ses for den lille motor. Når belastningsgraden kommer under 25% sker der markante fald i virkningsgraderne for alle tre motorer.



Figur 3.18 Virkningsgrader for 4-polede standard asynkronmotorer som funktion af belastningsgraden (P/P_N)

Figur 3.18 viser, at motorstørrelsen så vidt muligt altid bør vælges således, at belastningsgraden ligger mellem 75% og 100%. Herved opnås altid den højest mulige virkningsgrad.

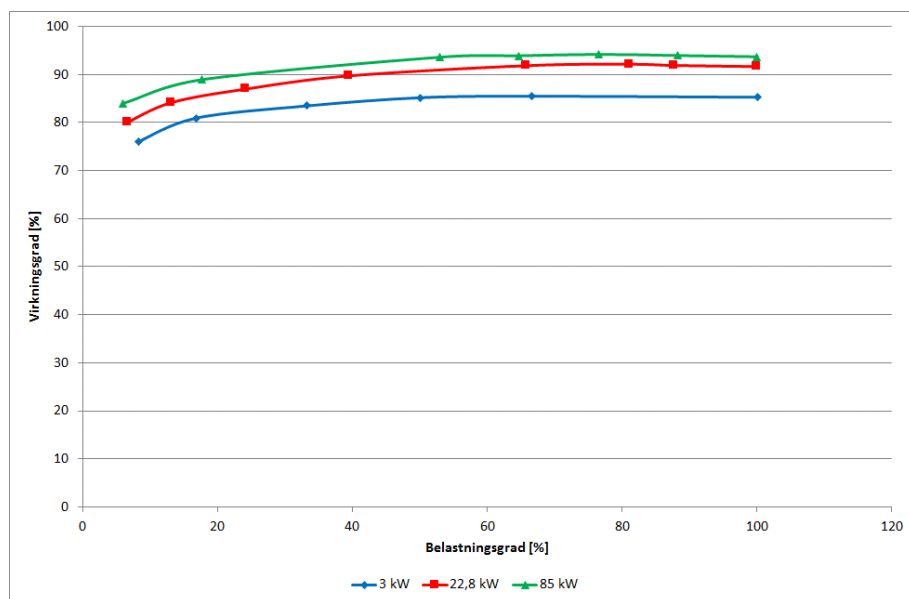


Figur 3.19 Asynkronmotor

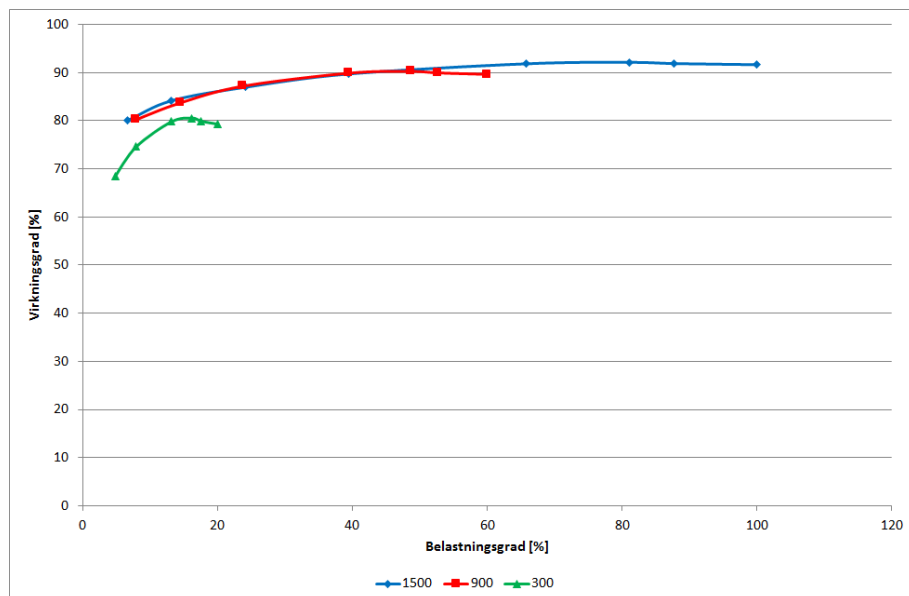
PM-motorer (Permanent Magnet motorer)

I figur 3.20 ses virkningsgraderne for tre 4-polede PM-motorer inkl. frekvensomformerne som funktion af belastningsgraden. For alle tre drev (motor og frekvensomformer) er virkningsgraden nogenlunde konstant ved belastningsgrader mellem 50% og 125%.

Selv ved belastningsgrader ned til 20% sker der kun beskedne reduktioner i virkningsgraderne for de tre drev. Belastningsgraden skal under 10% før der for alvor sker en reduktion i virkningsgraderne.

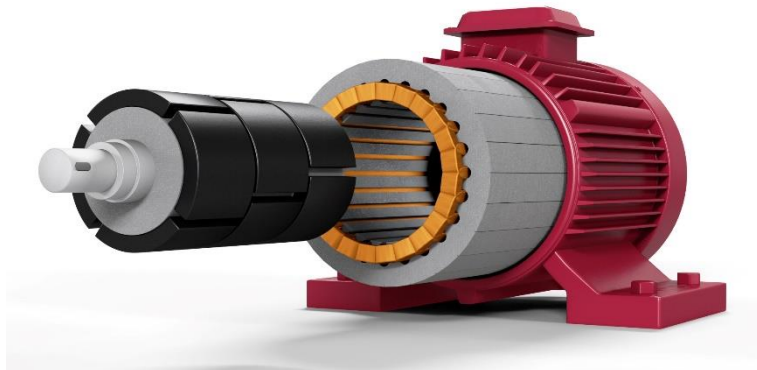


Figur 3.20 Virkningsgrad for 4-polede PM-motorer inkl. frekvensomformere som funktion af belastningsgraden (P/P_N)



Figur 3.21 Virkningsgrad for en 4-polet 22,8 kW PM-motor inkl. frekvensomformere ved tre forskellige hastigheder som funktion af belastningsgraden (P/P_N)

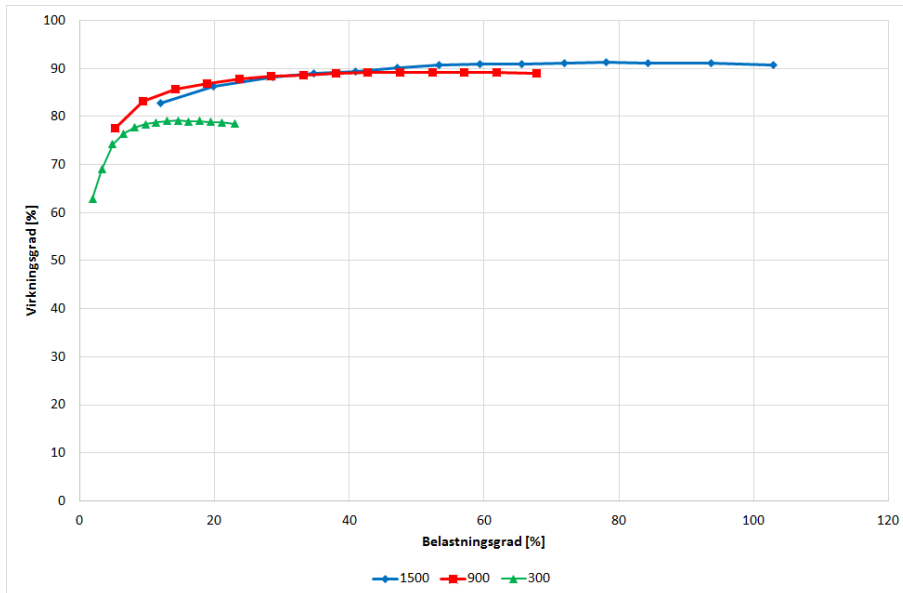
Det ses, at både belastningen og hastigheden af en PM-motor skal reduceres betragteligt før der sker en stor reduktion i virkningsgraden.



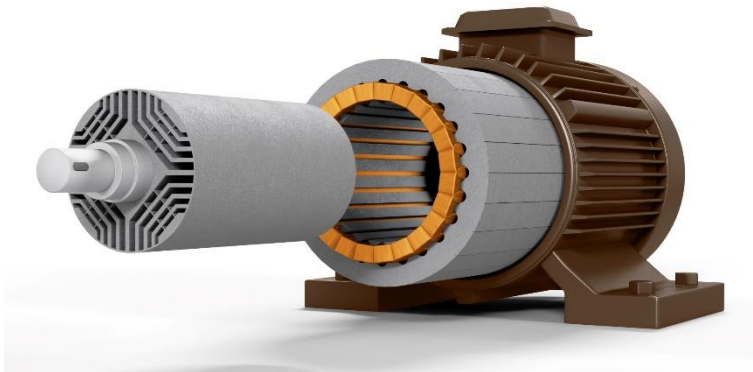
Figur 3.22 Permanentmagnetmotor

Synkronreluktansmotorer

I figur 3.23 ses virkningsgrader for en 15 kW 4-polet synkron reluktansmotor inkl. frekvensomformer ved tre forskellige omdrejningstal som funktion af belastningsgraden. Ved alle tre hastigheder er virkningsgraden nogenlunde konstant i store dele af belastningsgradsområderne.



Figur 3.23 Virkningsgrad for en 15 kW synkron reluktansmotor inkl. frekvensomformere ved tre forskellige hastigheder som funktion af belastningsgraden (P/P_N)

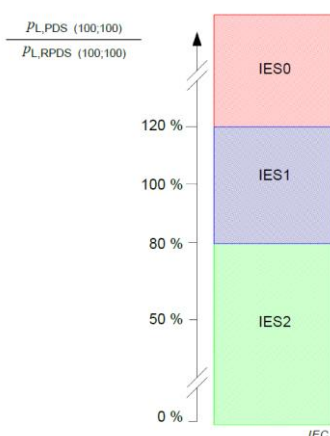


Figur 3.24 Synkronreluktansmotor

Både permanentmagnet motorer og synkronreluktans motorer skal forsynes fra frekvensomformere, da de ikke kan nettilsluttes. Der er ikke indført energikrav for disse typer motorer, som på engelsk ofte betegnes converter motors eller "VSD-Motors" (VSD = Variable Speed Drive).

I den internationale standard IEC 61800-9-2 "Eco-design for power drive systems, motor starters, power electronics and their drive applications – Energy efficiency indicators for power drive systems and motor starters", ses effektivitetsklasser for power drive systems. Permanentmagnet motorer og synkronreluktans motorer som forsynes fra frekvensomformere, er netop power drive systems.

Power drive systems kan klassificeres som enten et IES0-, IES1- eller IES2-system, hvor IES2-systemet er det mest effektive. IES-værdien beregnes som systemets tab (motor + frekvensomformer) divideret med tabet for et referencesystem ved 100% moment og 100% omdrejningstal. I figur 3.25 ses IES-klassificeringen.



Figur 3.25 IES-klassificering

Der skal altid stilles krav til leverandørerne om at vakuumpumperne skal være forsynede med de mest energieffektive motorer. De mest energieffektive motorer på markedet i dag er klassificeret IE4 og IE5.

3.4 Rørsystem

Allerede ved udformningen af vakuum-/overtrykssystemet anbefales at påbegynde indledende diskussioner om rørsystemet. Det er i denne fase endog særdeles vigtigt at leverandøren bliver informeret om vigtigheden i at begrænse tryktabet og at stille krav til rørarbejdet med hensyn til samlemetoder m.m.. At begrænse tryktabet i et rørsystem indebærer udover rørdimensioneringen, at man vurderer tryktabet i hver enkelt del af rørsystemet og vælger energirigtigt med hensyn til:

- Rørbøjninger
- Sugestutse
- Samlinger
- Ventiler
- Afgreninger

3.4.1 Transportlængde og antallet af rørbøjninger

Det er normalt sådan, at man gerne vil have en pæn rørføring, der ligger langs væggene og følger disse. En sådan rørføring tager sig pænt ud, men man skal være opmærksom på, at den kan være dyr i drift, hvis den ikke er absolut nødvendig, da den kan give en meget længere transportstrækning.

Med hensyn til bøjninger er det meget vigtigt hele tiden at holde sig for øje, at hver gang man sætter en bøjning ind, koster det tryktab hvorved energiforbruget øges.

3.4.2 Rørføring

For materialetransportsystemer gælder, at når man planlægger ad hvilken rute transportrøret skal føres, er det meget vigtigt at følge den regel, der siger, at røret skal føres enten vandret eller lodret. Røret skal aldrig være skråt stigende, da det øger materialets friktion imod rørets væg og bremser det.

3.4.3 Bøjningsradius

I rørbøjninger til pneumatisk transport opnås det mindste trykfald under transporten, hvis bøjningens radius er mindst 5 – 6 gange rørets diameter. Jo større bøjningsradius der benyttes, jo mindre bliver sliddet på bøjningens væg. Ved transportslidende materialer skal man sørge for at slidbeskytte bøjningerne.

3.4.4 Sammensatte bøjninger

Undgå sammensatte bøjninger, da de giver et højere modstandstal end jævne bøjninger.

3.4.5 Sammenføringer

Hvis et transportrør føres ind i et andet rør bør det finde sted enten i en blød bøjning eller i en vinkel der ikke overstiger 30°. På denne måde minimeres tryktabet.

3.4.6 Ekspansionsstykker og understøtninger

I transportrøret vil der ofte være en del aksial bevægelse hidrørende fra transporten eller fra temperaturudvidelse, hvis røret enten føres i det fri eller hvis materialet er varmt.

Man bør derfor overveje at indbygge ekspansionsstykker og disse kan som regel med fordel placeres foran bøjninger.

Når man vælger ekspansionsstykker, er det vigtigt at tage hensyn til den modstand der vil være ved materialets gennemstrømning og det vil derfor ved vakuumtransport være hensigtsmæssigt at vælge ekspansionsstykker med glat inderrør.

Hvis det er nødvendigt med ekspansionsstykker, vil det også være nødvendigt at sørge for at fastgørelsen af transportrøret sker rigtigt. Det vil sige med en fast understøtning og derefter med et antal bevægelige understøtninger indtil et ekspansionsstykke og derefter gentager det sig.

3.4.7 Vakuurrøret

For materialetransportsystemer bør røret fra materialeudløb til filter og derefter til vakuumpumpen være så kort som muligt. Hvis der er flere rør der føres sammen bør samlingerne ske med maks. 30° indføring eller med en bøjning.

Røret skal dimensioneres med hensyn til trykfaldet og hastigheden og det vil sige at rørdiameteren være stigende jo nærmere man kommer vakuumpumpen.

Der bør monteres koniske overgangsstykker med alle dimensionsspring.

3.4.8 Ventiler

De oftest anvendte ventiltyper til vakuumsystemer er:

- Spjældventiler
- Kugleventiler
- Skydeventiler
- Slangeventiler

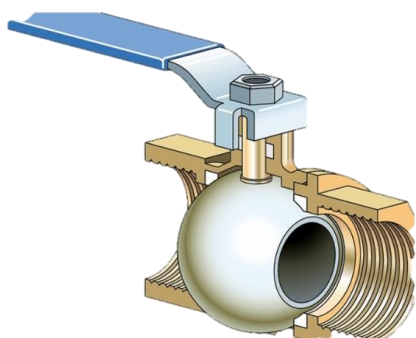
Der skal ved detailprojekteringen tages højde for at det skal være muligt at reparere og vedligeholde komponenterne i vakuumsystemet, herunder vakuumpumperne. Det skal være muligt at afspærre dele af systemet for reparation. Det tilstræbes at kunne udføre vedligeholdelsesarbejder under drift for at optimere forsyningssikkerheden. Derfor indsættes ventiler.

Når man vælger ventiltyper, bør man skelne mellem "luftsiden" og "materialesiden". Materialesiden er relevant når man snakker om vakuumsystemer til materialetransport.

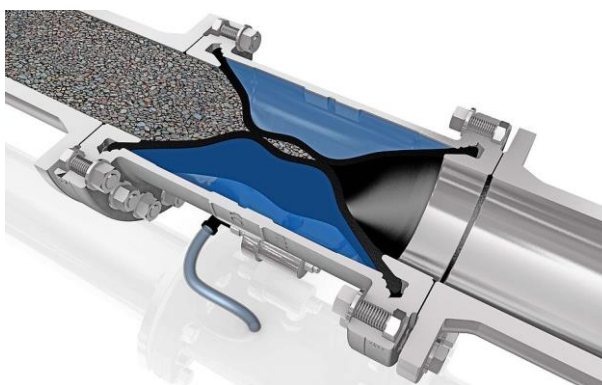
På luftsiden kan man vælge kugleventiler med fuld gennemstrømning. Herved sikres minimalt tryktab i rørstrengen. Disse ventiler er forholdsvis dyre i anskaffelse, når man kommer over 2". Over 2" kan butterflyventiler med fordel vælges, da denne type ventil ligeledes har et lavt tryktab, når det drejer sig om luft.

På de rørstrækninger der transporterer materiale, kan man anvende skydeventiler med fuld gennemstrømning eller slangeventiler, hvor der inde i ventilhuset er en gummislange der lukkes ved hjælp af trykluft.

Butterflyventiler kan også vælges, men de medfører et højere tryktab end de førnævnte typer, hvilket forøger energiforbruget.



Figur 3.26 Kuglehane



Figur 3.27 Slangeventil

3.4.9 Rørkvaliteter og valg af disse

På luftsiden kan man anvende almindelige stålrør eller glatte plastrør, hvis temperaturen tillader det. Principielt kan alle typer rør anvendes, men der anvendes ofte stålrør.

På materialesiden er den rørkvalitet der vælges af stor betydning. Der er stor forskel på de forskellige typer rør og der er stor forskel på, hvor glatte de er indvendig og dermed på tryktabet.

Til materialetransport anvendes typisk tyndvæggede rør med en vægtykkelse på 2 – 3 mm.

Det er vigtigt at vurdere de krav transportmaterialet stiller. Det betyder f.eks., at man ved transport af fødevarerpulvere eller andet der ikke må forurenes anvender enten rustfri stålør eller aluminiumsrør.

3.4.10 Flexslanger

Anvendelse af flexslanger er svært at undgå, men bør begrænses. Ved anvendelse af flexslanger bør de ikke være unødigt lange, så de ligger i store sløjfer på underlaget. Det vil give unødigt tryktag i systemet. Man bør ligeledes anvende en flexslange med glat indvendig overflade.



Figur 3.28 Flexslange på sugekopper

4 Designprogrammer

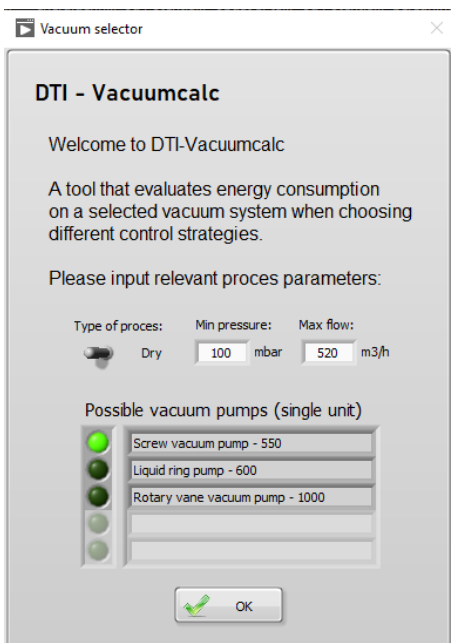
4.1 Beregningsværktøj

Der er udviklet et selvstændigt værktøj til behovsoptimering af vakuum- og overtrykssystemer som en del af projektet. Udgangspunktet for beregningerne med værktøjet er en tabel over flow og tryk som funktion af tiden.

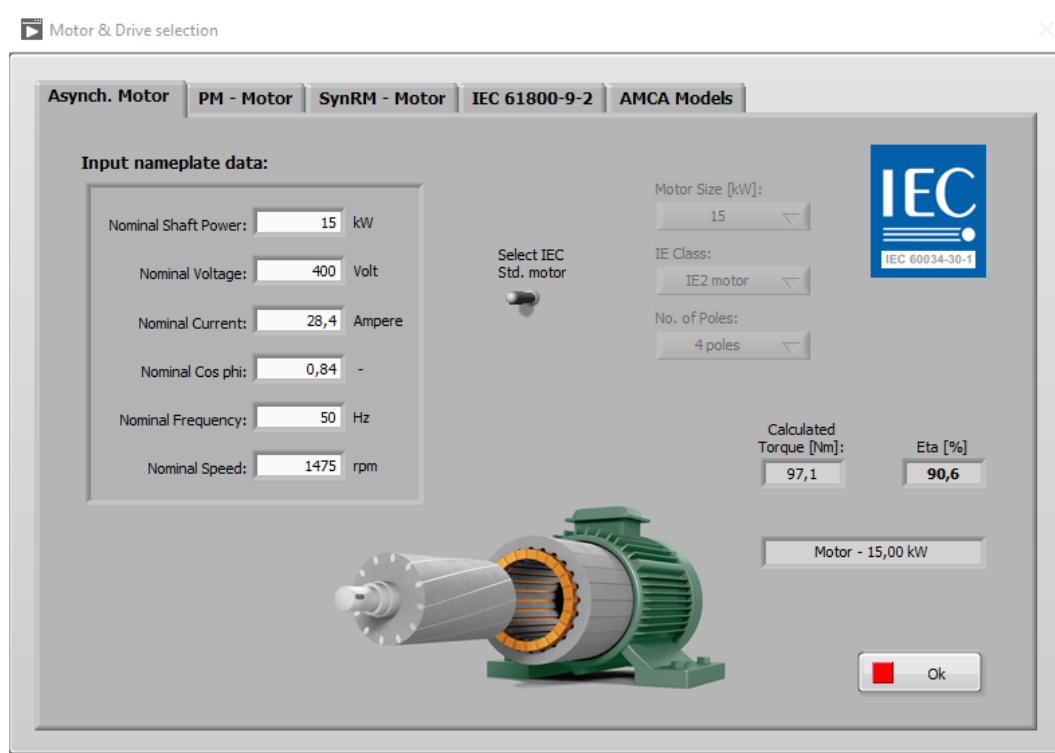
Med værktøjet er det muligt at foretage beregninger af, om en bestemt pumpetype er særligt velegnet til det estimerede behov for tryk og flow, om det er fordelagtigt at anvende én (eller få store) pumper eller det er mere energieffektivt at anvende flere mindre pumper samt bestemme hvilken reguleringsform der er mest energioptimal.

Værktøjet tager udgangspunkt i systemer med én pumpe og systemer med flere ens pumper.

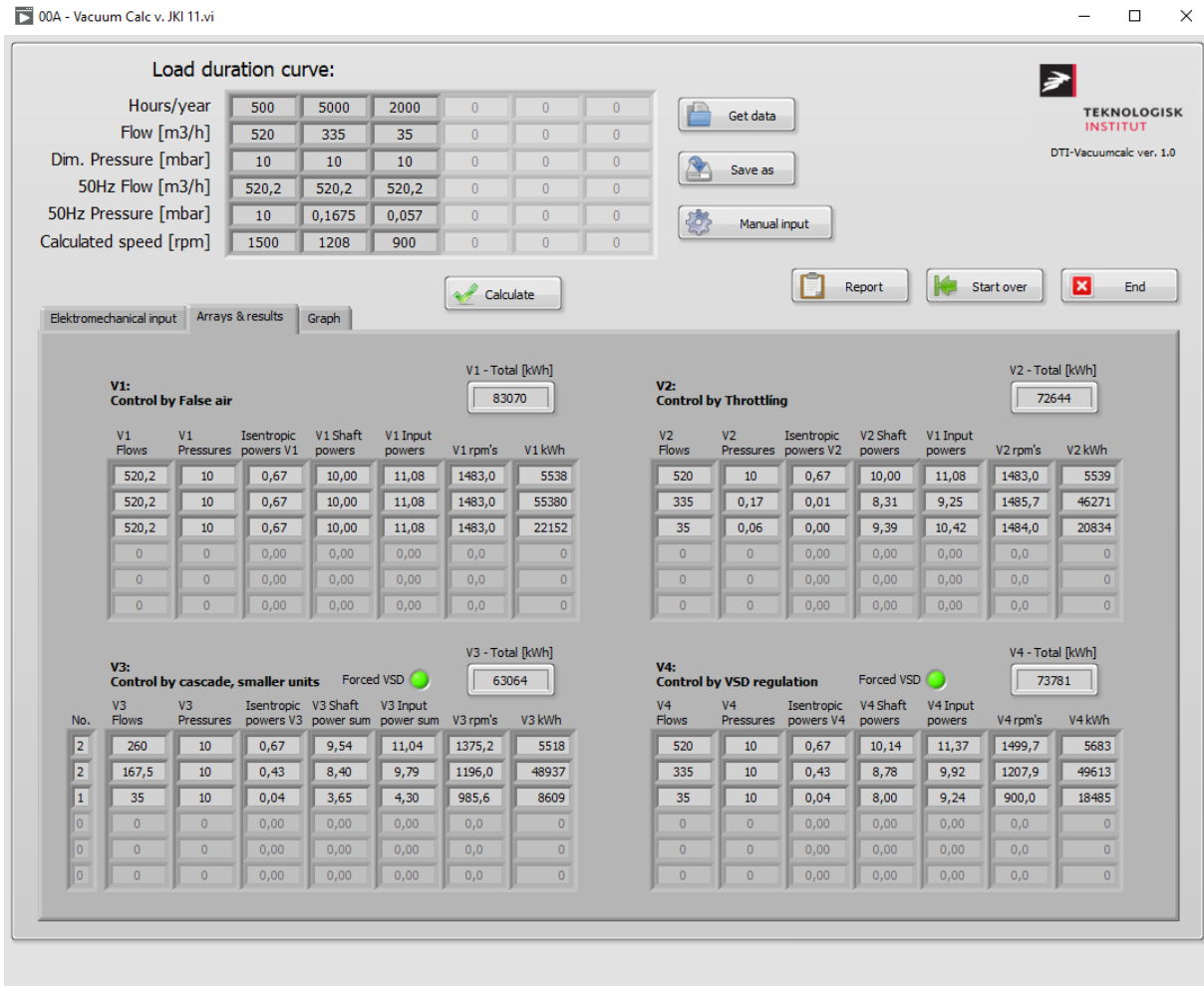
Grundlæggende set skal der altid foretages en overordnet vurdering af opbygningen.



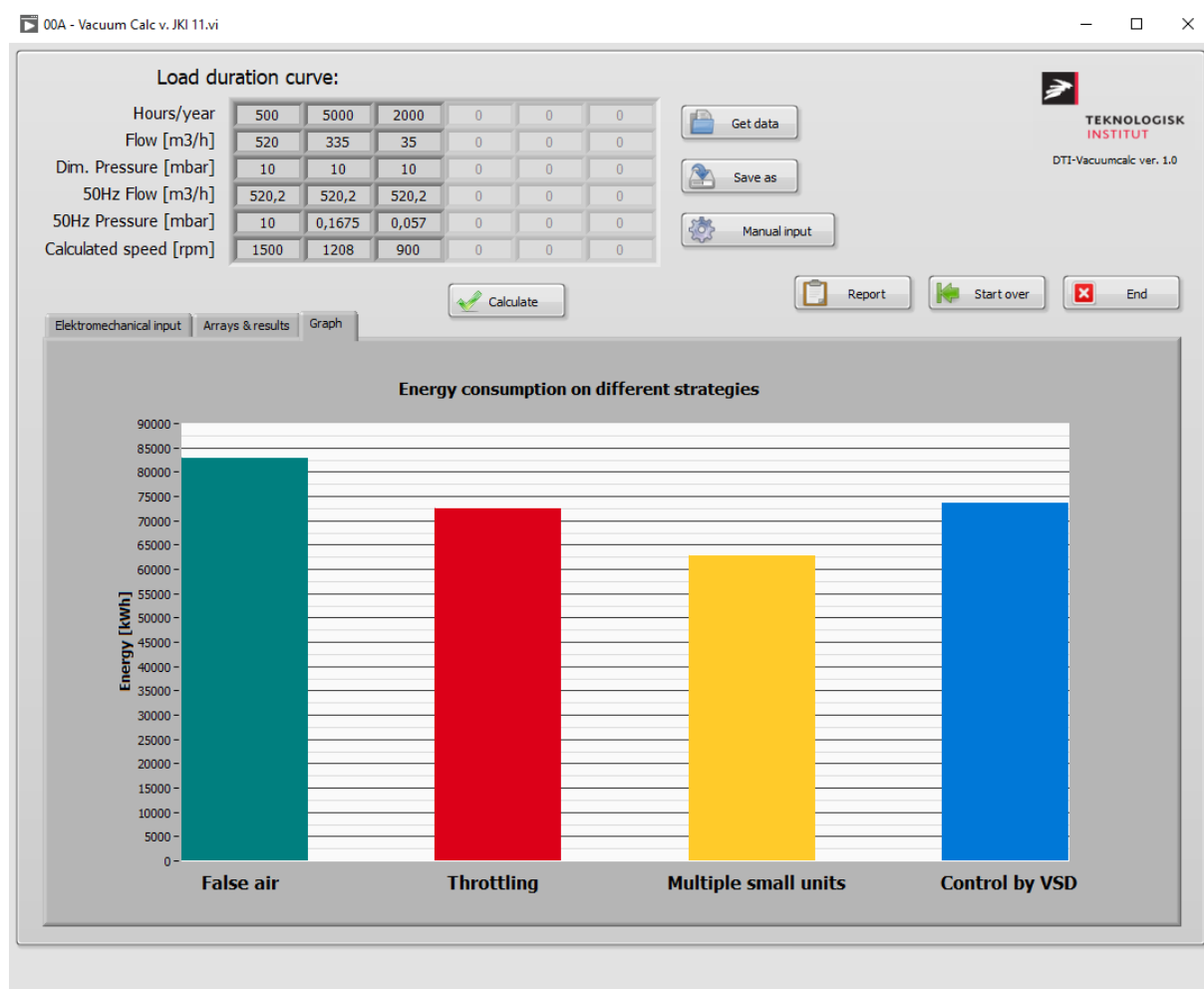
Figur 4.1 Valg af pumpe



Figur 4.2 Valg af motor



Figur 4.3



Figur 4.4 Værktøj til behovsoptimering af vakuum- og overtrykssystemer

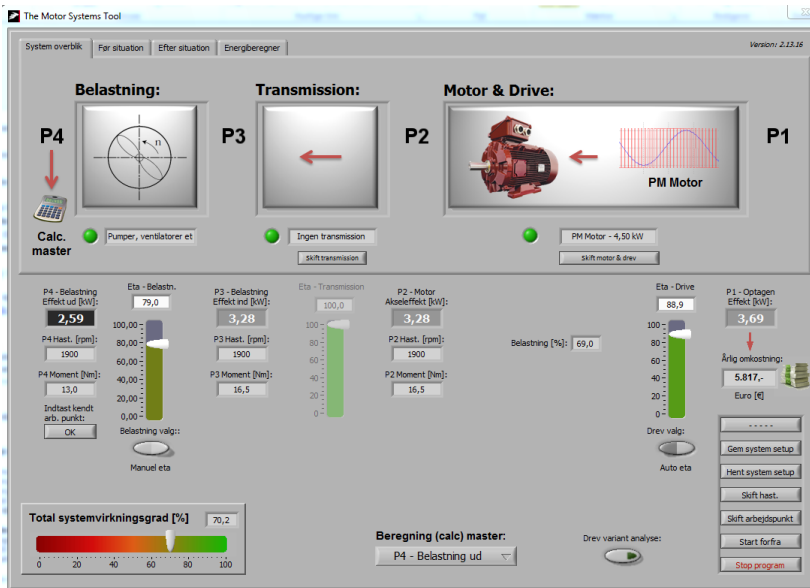
Der er udarbejdet en særskilt brugervejledning til værktøjet, hvori det er beskrevet hvordan værktøjet bringes i anvendelse og hvordan der kan bruges til anlægsoptimering.

4.2 Motor Systems Tool

Motor Systems Tool er et beregningsværktøj til systemoptimering, der er udviklet under ELFORSK programmet (projekt nr. 344-008 – 2. generationsværktøj til systemoptimering).

I Motor Systems Tool er det muligt at designe et energieffektivt system og regne på de enkelte delkomponenter hver for sig. Desuden er det muligt at designe komponenternes kapacitet på en sådan måde, at deres størrelse er tilpasset hinanden, så det samlede system bliver energieffektivt.

Motor Systems Tool opererer med data for motorer, transmissioner og belastninger (ventilatorer, pumper og trykluft etc.), der giver mulighed for at beregne energiforbrug, virkningsgrader m.m. på et overordnet niveau.



Figur 4.5 Motor Systems Tool

5 Energioptimering

De to helt afgørende faktorer for energiforbruget i et vakuum- eller overtryksanlæg er det tryk og flow, som anlægget skal præsentere. Derfor findes energibesparelspotentialer for vakuum- eller overtryksanlæg i at optimere (tilpasse) anlæggenes tryk- og flowforhold til de aktuelle forhold, - uanset om der er tale om eksisterende eller nye anlæg.

Som oftest ønskes det at trykket i et vakuumsystem er konstant. Der anvendes sjældent forskellige tryk i det samme system. Luftmængden vil derimod variere og det kan ske ved forskellige reguleringsformer som beskrives nedenfor.

5.1 Pumperegulering

5.1.1 "Falsk luft" styring

"Falsk luft" styring benyttes ofte i mindre vakuumsystemer som reguleringsform. Reguleringen foregår med en ventil, som er placeret på sugesiden af vakuumpumpen. Ventilen åbner med et forudbestemt tryk til atmosfæren. Reguleringen sikrer, at trykkes holdes konstant uanset behovet for vakuum.

Ved denne form for regulering er flowet og trykket over pumpen konstant. Derimod varierer flowet ved forbrugsstederne.

Ved "Falsk luft" styring kører pumpen og motorens nettilsluttet og omdrejningstallet for pumpe og motor er konstant.

Reguleringsformen ses typisk på ældre systemer og kan energimæssigt ikke anbefales.

5.1.2 Drøvleregulering

Ved drøvleregulering holdes et konstant tryk ved forbrugsstederne uanset variationerne i flowet. Dette sker ved hjælp af en drøvleventil mellem forbrugsstederne og pumpen, der holder trykket konstant uanset behovet for vakuum.

Ved drøvleregulering kører pumpen og motorens nettilsluttet og omdrejningstallet for pumpe og motor er konstant.

Reguleringsformen ses typisk på ældre systemer og kan energimæssigt ikke anbefales.

5.1.3 On-off regulering/kaskadestyring

Denne reguleringsform kan anvendes ved mindre anlæg, hvor vakuumbehov kun er nødvendigt få gange i løbet af produktionstiden. En pressostat styrer start/stop funktionen. Hvis der er flere vakuumpumper tilsluttet samme net, udføres on/off reguleringen typisk som kaskadestyring.

On/off regulering kræver en god buffer i anlægget eller en buffertank. Ved for lille buffervirkning kan man risikere for mange start-stop sekvenser med fare for at elmotoren overophedes. Derfor monteres ofte en timerfunktion som sikrer et vist efterløb med lukket vakuumventil. Derved kan elmotoren indkobles igen uden opstartssekvens.

En on/off regulering baseret på mekaniske pressostater skal have en vis forskel i ind- og udkoblingstryk for at kunne arbejde tilfredsstillende. Dette giver derfor også en trykvariation i rørstrengen. Med denne reguleringsform kan der derfor ikke holdes et konstant tryk ved forbrugsstederne. Hvis dette er et krav kan denne reguleringsform ikke anbefales.

Energimæssigt opnås gode besparelser idet driftstiden på vakuumpumpen reduceres. Nogle vakuumpumper skal dog have en efterløbstid/(tomgang) for at sikre køling af pumpen.

5.1.4 Avanceret kaskadestyring

Den avancerede styring er en udbygning af kaskadestyringen og kan anvendes i større vakuumentraler, hvor pumperne er af forskellige kapaciteter. Pumpekapacitet og effekt programmeres i styringsautomatikken. Styringen kan sikre at de enkelte pumper indkobles i prioritetsrækkefølge og at den mest energieffektive pumpe indkobles i forhold til den aktuelle belastning.

Energimæssigt opnås ikke blot en reduktion af driftstiden, men også at den pumpe, som passer bedst til den aktuelle belastning, er indkoblet, hvilket giver yderligere energibesparelse.

Med denne reguleringsform kan der heller ikke holdes et konstant tryk ved forbrugsstederne, hvilket som hovedregel er ønskeligt. Det kan der derimod hvis pumperne er omdrejningstalsregulerede, hvilket beskrives nedenfor. Denne reguleringsform anvendes ofte i dag.

5.1.5 Omdrejningstalsregulering (en eller flere pumper)

Ved at behovsstyre vakuumpumperne med omdrejningstalsregulering opnås et konstant tryk i vakuumentregene, samt blød opstart af pumpen. Endvidere opnås den fordel, at man i nogle tilfælde kan køre oversynkront (60 – 100 Hz). Det skal altid undersøges hos leverandøren af vakuumpumpen om den givne pumpe kan holde til at køre oversynkront.

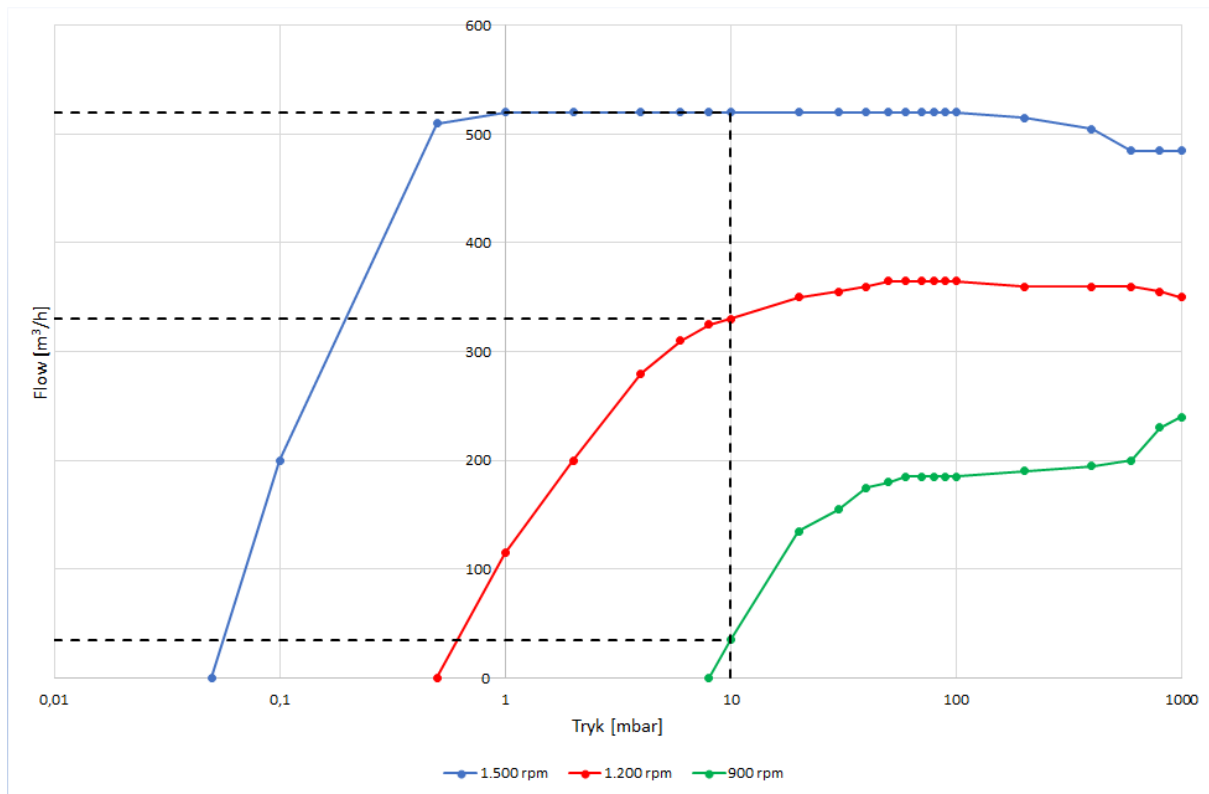
Kapselblæsere har en karakteristik, hvor ydelsen stort set er ligefrem proportional med omdrejningstallet. Denne pumpetype er derfor særdeles velegnet til omdrejningstalsregulering.

Energimæssigt kan der opnås væsentlige besparelser ved anvendelse af omdrejningstalsregulering.

Denne reguleringsform kan både anvendes med en eller flere pumper i systemet.

I figur 5.1 ses kurver for en skruevakuumpumpe ved forskellige omdrejningstal. Som det ses, kan pumpen yde maks. 520 m³/h ved 1.500 omdr., mens den kan yde maks. 235 m³/h ved 900 omdr..

Pumpen vil som det ses yde forskellige flow ved et tryk på 10 mbar og ved forskellige omdrejningstal.



Figur 5.1 Kurver (flow og tryk) for en skruvakuumpumpe ved forskellige omdrejningstal

Ved "Falsk luft" styring vil pumpen altid ligge i dette sammen driftspunkt (520 m³/h og 10 mbar).

Ved drøvleregulering vil pumpen ligge i forskellige driftspunkter på den blå kurve. Foruden driftspunkt (520 m³/h og 10 mbar) kunne det være (335 m³/h og 0,25 mbar) og (35 m³/h og 0,07 mbar) som vist på figur 5.1.

Ved omdrejningstalsregulering vil pumpen ligge i forskellige driftspunkter på den røde og grønne kurve. Foruden driftspunkt (520 m³/h og 10 mbar) vil det være (335 m³/h og 10 mbar) og (35 m³/h og 10 mbar) som vist på figur 5.1.

I figur 5.2 ses akseffekter for skruvakuumpumpen ved forskellige omdrejningstal.

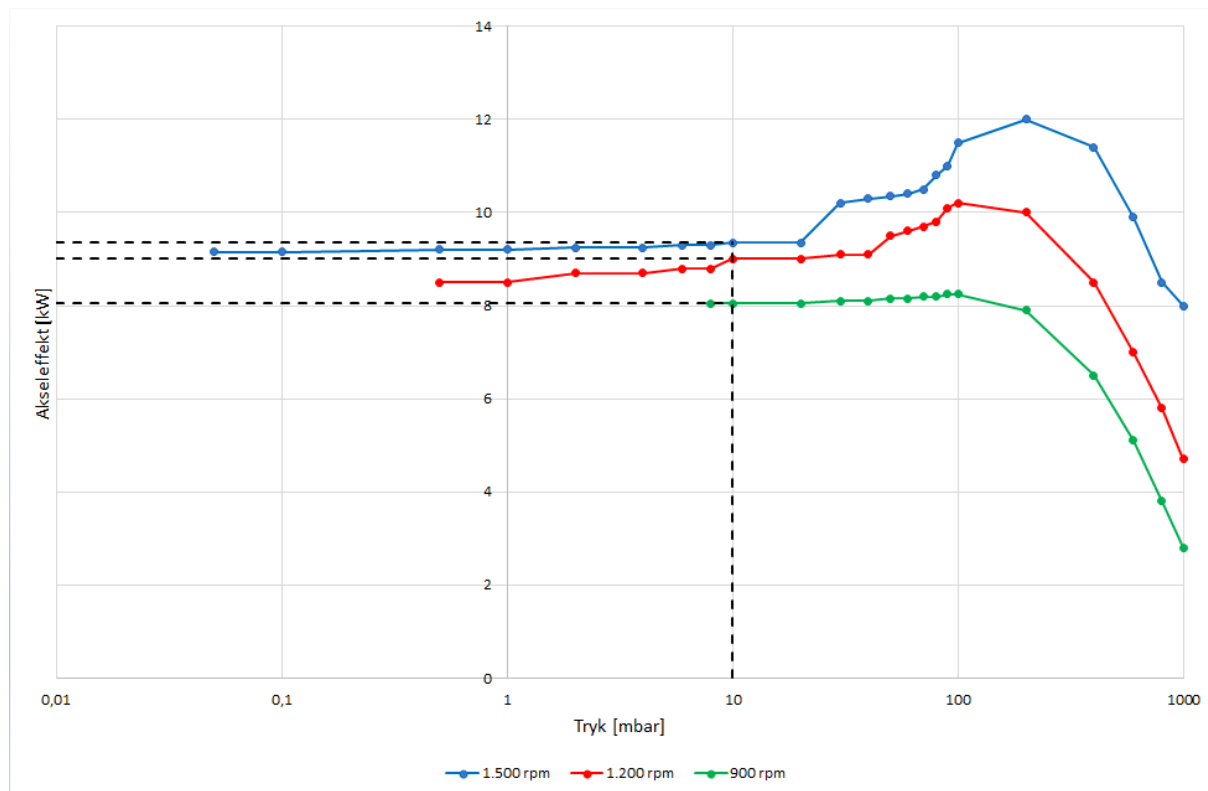
Ved "Falsk luft" styring vil pumpen altid ligge i dette sammen driftspunkt akseffekten vil være ca. 9,5 kW.

Ved drøvleregulering vil pumpen ligge i forskellige driftspunkter på den blå kurve. Foruden driftspunktet ved 10 mbar vil det være ved 0,25 mbar og 0,07 mbar som vist på figur 5.2.

Akseffekten vil være ca. 9,0 kW.

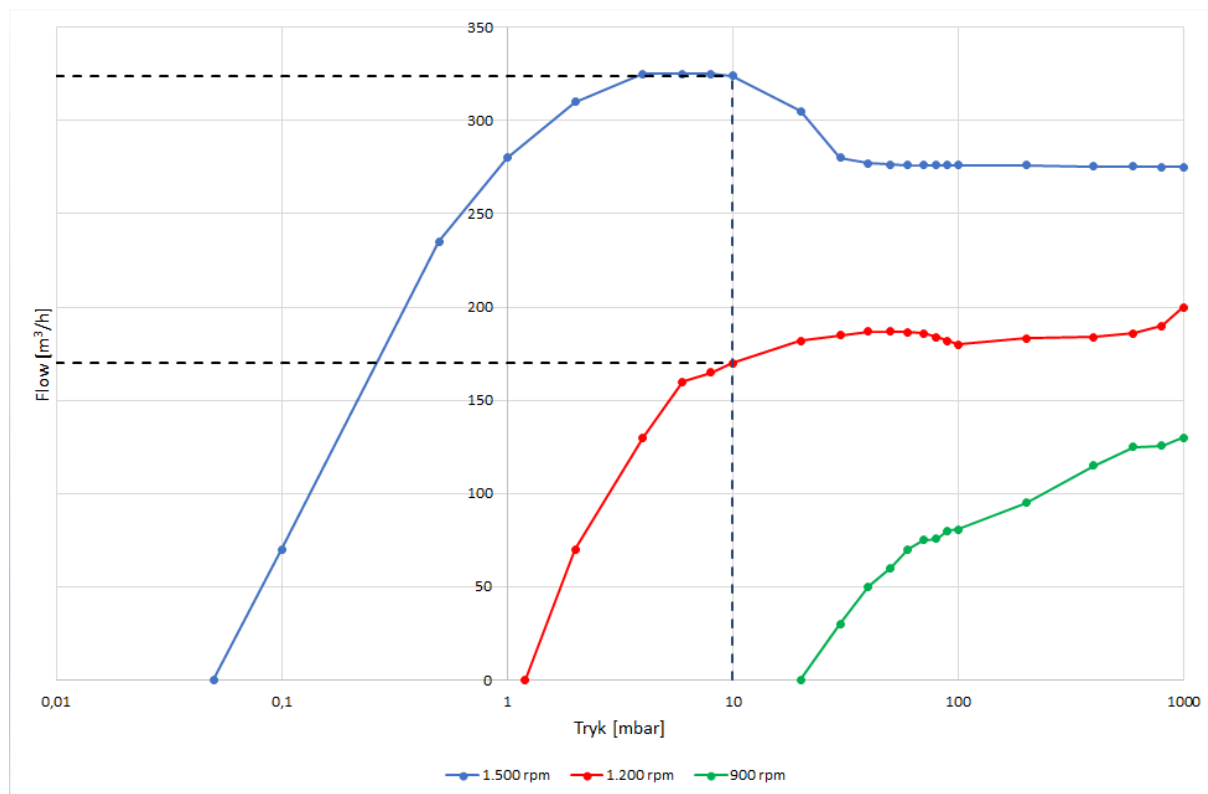
Ved omdrejningstalsregulering vil pumpen ligge i forskellige driftspunkter på den røde og grønne kurve.

Akseleffekten vil være ca. 8,7 kW (rød kurve) og ca. 8,0 kW (grøn kurve).



Figur 5.2 Akseleffekter for en skruevakuumpumpe ved forskellige omdrejningstal

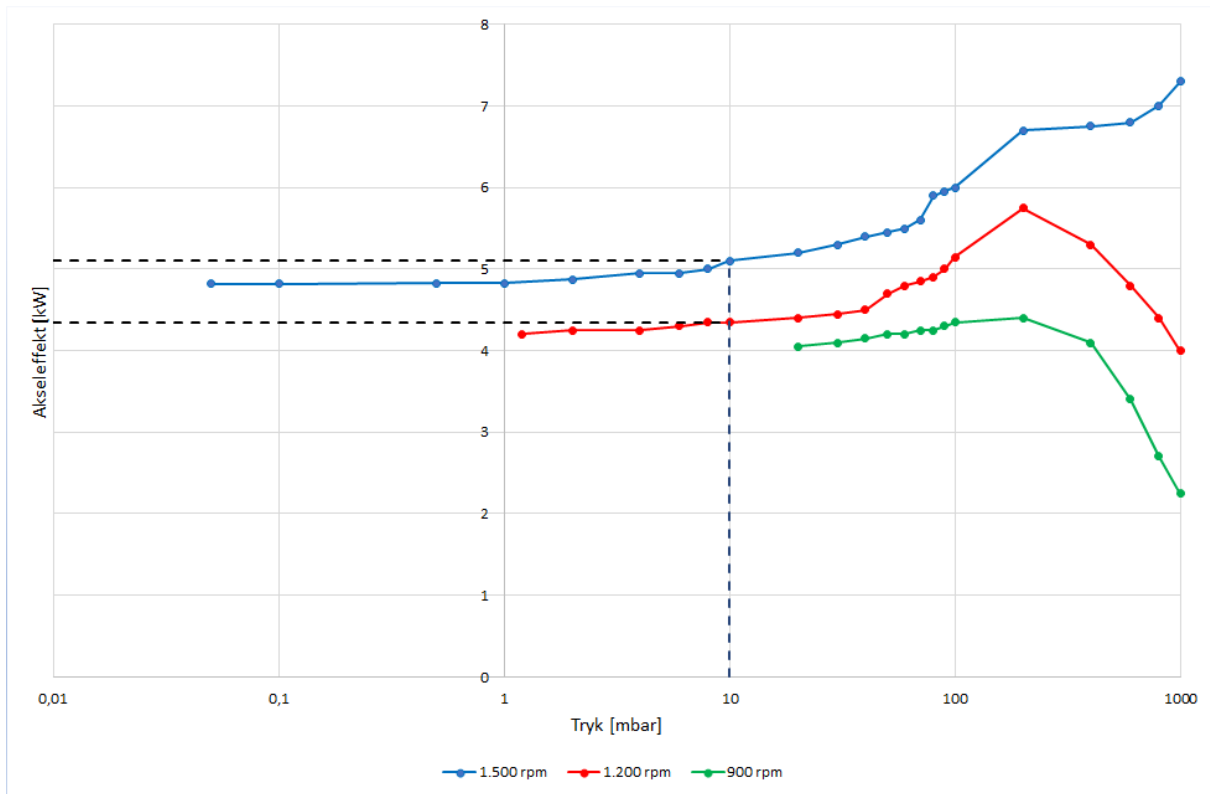
Det vil også være muligt at parallelkoble to mindre pumper. De to pumper vil hver skulle yde 260 m³/h ved 10 mbar.



Figur 5.3. Kurver (flow og tryk) for en skruvakuumpumpe ved forskellige omdrejningstal

I figur 5.4 ses, at akseleffekten for hver pumpe vil være ca. 4,5 kW. Til sammen er det 9,0 kW, hvilket er 0,5 kW lavere end hvis der benyttes en stor pumpe.

Det er som det ses ikke en stor forskel, men det kunne være værd at overveje denne løsning.



Figur 5.4 Akseleffekter for en skruevakuumpumpe ved forskellige omdrejningstal



Figur 5.5 Omdrejningstalsregulerbare vakuumpumper



Figur 5.6 Omdrejningstalsregulerbare blæsere

6 Eksisterende installationer

6.1 Dataindsamling

Når et vakuumanlæg skal undersøges for mulige energibesparende tiltag, er det nødvendigt først at skabe et overblik over selve vakuumanlægget samt de komponenter det forsyner. Hvis det er muligt, skal der fremskaffes et diagram over systemet inklusiv en komponentfortegnelse. Dette materiale giver umiddelbart et komplet overblik over systemet, og kan danne grundlag for ideer til hvilke tiltag der muligvis kunne realiseres for at nedbringe vakuumanlæggets energiforbrug. I de tilfælde hvor der ikke findes et diagram og/eller en komponentfortegnelse, er det nødvendigt at tilvejebringe den nødvendige information ved registreringer på stedet. Ved den indledende besigtigelse bør bl.a. følgende data registreres:

- Vakuumpumpens(-ernes) fabrikat og type
- Vakuumtryk og variationerne heri under drift
- Vakuumpumpens styring (frekvensregulering, overløbsventil, on/off etc.)
- Driftscyklussen længde, dvs. last- og aflasttid

Ud fra ovenstående data og registreringer

6.2 Målinger

6.2.1 Spotmåling

Der kan indledningsvis foretages en spotmåling af vakuumanlæggets effektoptag for på den måde om muligt at se vakuumpumpens effekt- og lastprofil, dvs. se i hvor stor en del af den samlede cykeltid pumpen er henholdsvis lastet og aflastet, og måle eleffekten under last og aflast.

Spotmålinger kræver ikke indgriben i vakuumsystemet, eller specielt udstyr udover effektmåleudstyr. Spotmålinger kan give en første indikation af, om der i givet fald kan realiseres energibesparelser.

6.2.2 Kontinuerte målinger

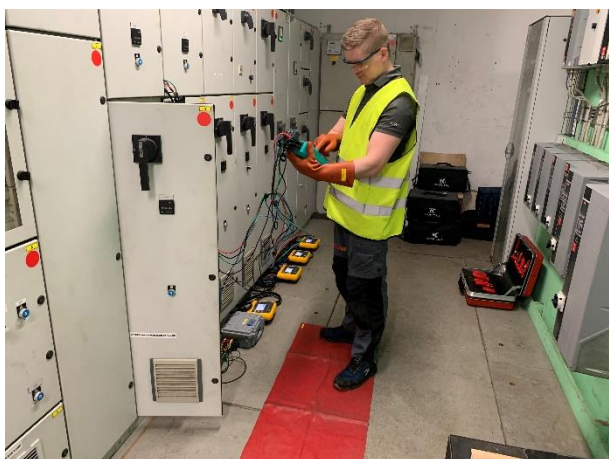
Hvis de indledende registreringer og eventuelle spotmålinger viser, at der kan være mulighed for at effektivisere vakuumanlægget, bør der foretages kontinuerte målinger af anlægget. Målingerne skal foretages med et effektmeter med datalogger, således det er muligt at databehandle målingerne efterfølgende. Måleperioden skal være tilstrækkelig lang til, at det er muligt at se hvordan anlægget arbejder.

De kontinuerte elmålinger bør kombineres med registreringer af pumpetrykket. Dette kan ske ved manuelt at registrere trykket på det manometer der er placeret ved pumpen. Denne løsning er dog behæftet med betydelig usikkerhed, idet det ikke er sikkert at manometret viser rigtigt. Men denne enkle tilgang kan give en indikation af hvordan anlægget driftes og af mulighederne for effektivisering, - f.eks. i forbindelse med standby perioder.

For større vakuum- eller overtryksanlæg, hvor der f.eks. er flere pumper der betjener vakuum- eller overtrykssystemet i parallel anbefales det, at der udføres effektmålinger af samtlige pumper.

Der burde ligeledes udføres målinger af flowet i vakuumsystemet, og helst fra hver pumpe. Flowmålinger kræver i sagens natur at vakuumanlægget standses og at der er udstyr til rådighed

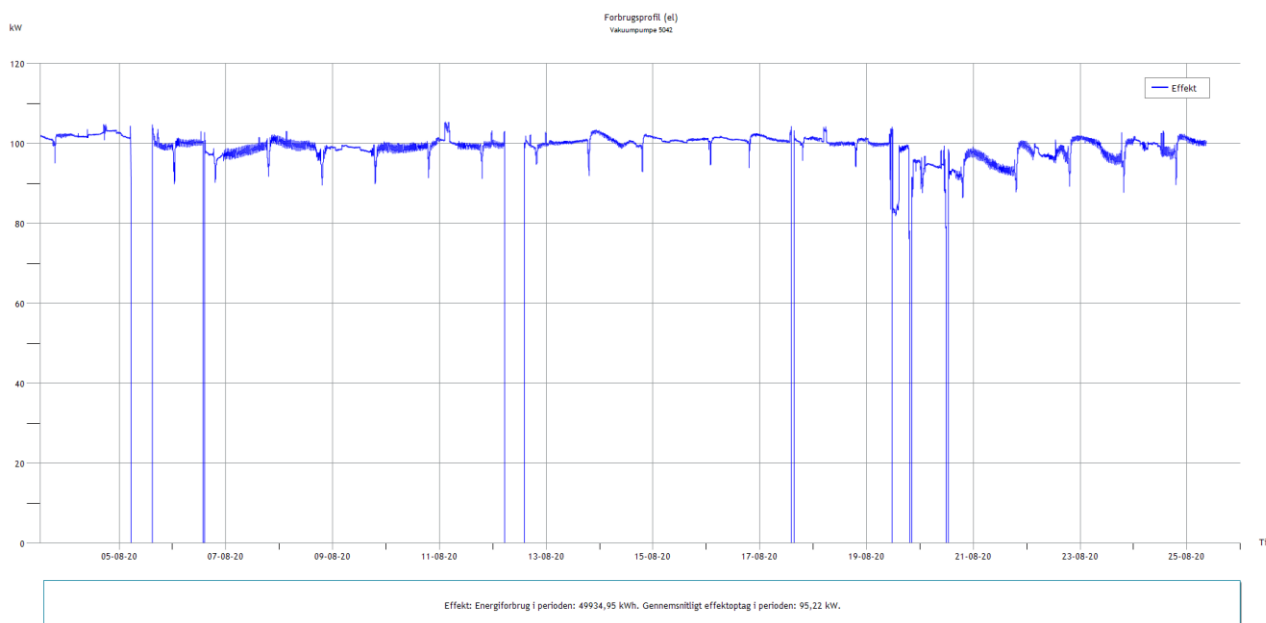
til at måle flow. Da det er både dyrt og besværligt udelades flowmålinger som oftest, og der anvendes i stedet fabrikantens data for vakuumpumperne til at beregne flowene. Flowmålinger er som regel ikke essentielle for at identificere og kvantificere de fleste normalt forekommende mulige effektiviserings tiltag.



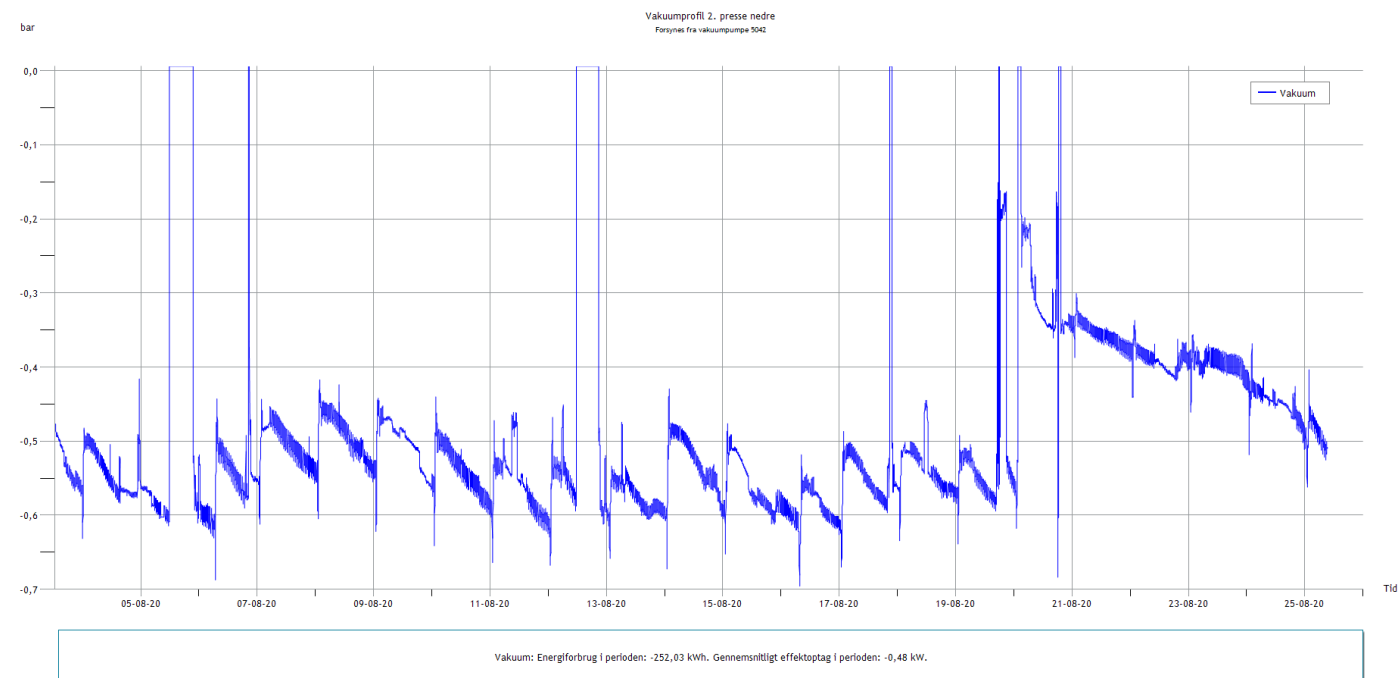
Figur 6.1 Opsætning af måleudstyr til måling af effektoptag



Figur 6.2 Måleudstyr til måling af effektoptag



Figur 6.3 Elmåling på vakuumpumpe



Figur 6.4 Trykmåling i vakuumsystem

6.3 Besparesestiltag

I det følgende er der kort skitseret nogle af de mest almindeligt forekommende muligheder for effektivisering af vakuum- eller overtryksanlæg, idet der tages udgangspunkt i selve vakuum- eller overtryksanlægget. Der kan ligeledes være muligheder ude i vakuumsystemet ved forbrugsstederne såsom f.eks. reduktion af tryktab i systemet ved at justere reguleringsventiler.

6.3.1 Udskiftning af vakuumpumpe

På en papirfabrik blev det undersøgt om det var muligt at finde alternative løsninger til vanddringspumperne, som forsyner nedenstående papirmaskine.



Figur 6.5 Papirmaskine der forsynes med vakuum fra vandringspumper

I figur 6.6 ses en måling af trykket på en af de vandringspumper, der forsyner maskinen. Trykket ligger som det ses på ca. 2.000 mmVs undertryk (0,2 bar undertryk), svarende til et absolut tryk på ca. 0,80 bar.

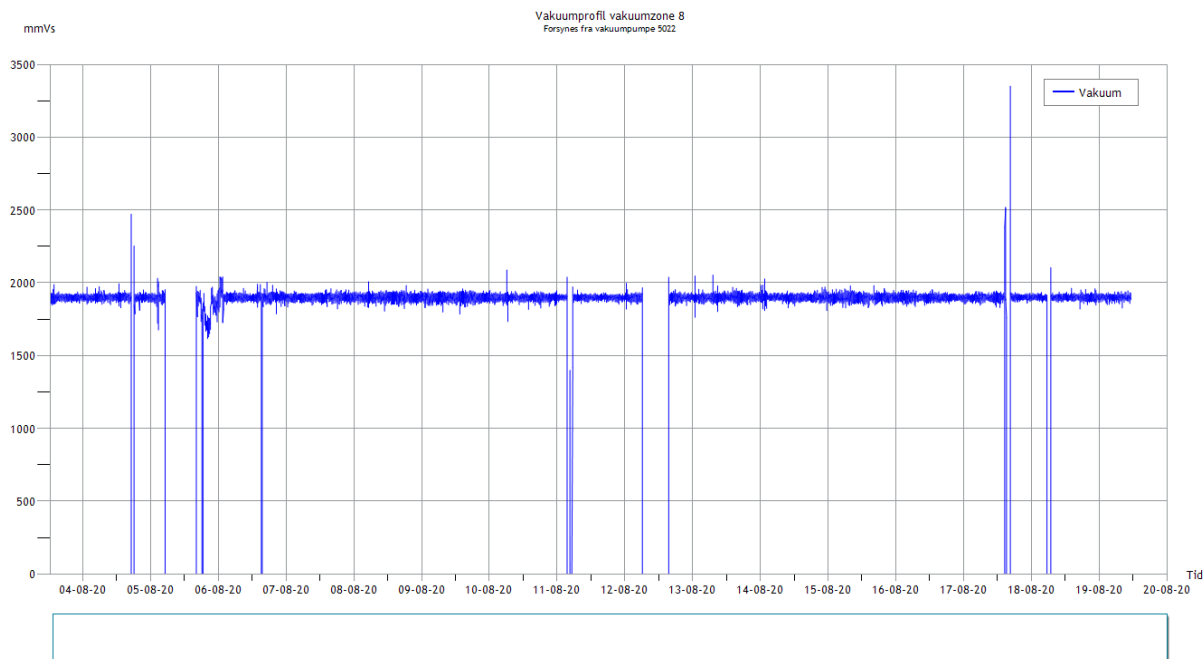
Pumpens flow var 4.200 m³/h og effektoptaget for pumpens motor var 94 kW. Det årlige elforbrug udgjorde ca. 658.000 kWh.

Ifølge en leverandør af vakuumpumper ville det være muligt at udskifte pumpen med en kapselblæser. Effektoptaget ville ifølge leverandøren være ca. 60 kW. Det årlige elforbrug ville herefter udgøre ca. 420.000 kWh.

Den årlige elbesparelse på ca. 238.000 kWh svarer til en besparelse på ca. 36%, og vil udløse en økonomisk besparelse på ca. 150.000 kr. årligt.

Investeringen vil skønsmæssigt andrage 250.000 – 300.000 kr.

Kapselblæsere er mere følsomme overfor dråber i pumpemediet. Det skulle derfor undersøges nærmere, om det er muligt at sikre kapselblæserne tilstrækkeligt mod dråber før det var muligt at afgøre, om en kapselblæser er en mulig løsning. Leverandøren mente, at tiltaget var teknisk muligt.



Figur 6.6. Målinger af tryk på vandringspumpe

6.3.2 Etablering af frekvensregulering på vandringspumpe

Vandringspumper er følsomme overfor omdrejningstalsregulering, idet væskeringen kollapser ved for lave omdrejninger på pumpen. Tidligere undersøgelser har dog vist, at det kan lade sig gøre i begrænset omfang.



Figur 6.7 Vandringspumpe

På papirmaskinen fra kapitel 6.3.1 reguleres vakuumpåvirkningen i en zone på maskinen (gausk'valsen) ved hjælp af ventil, og her kunne det være relevant at regulere med frekvensomformer i stedet.

De varierende behov er illustreret af et skærmpoint, som viser at ventiler til gausk'valse ikke er fuldt åbne og at der er variation i hvor meget de står åbent.

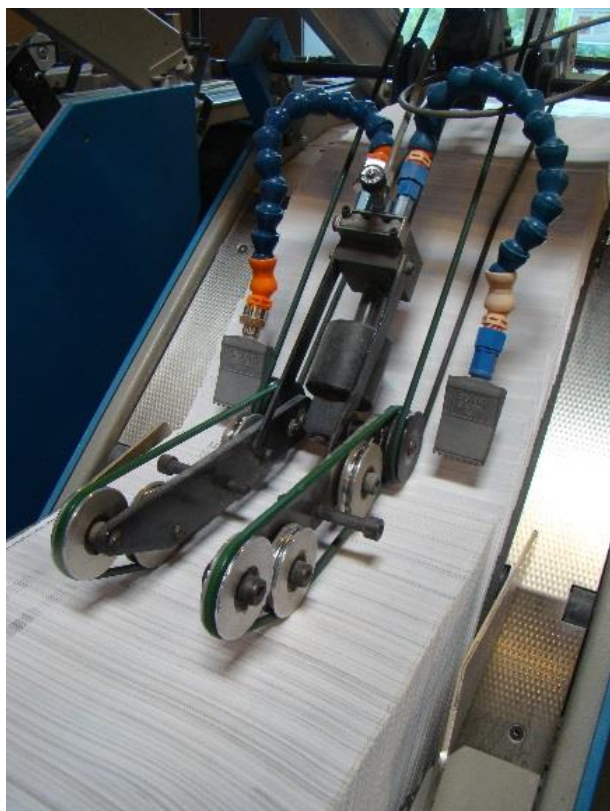
Det er ifølge oplysninger fra leverandøren muligt at regulere væskeringspumpen til gausk'valse ned til ca. 450 omdrejninger pr. minut. Derunder er der for stor risiko for, at væskeringen kolliderer. Der er ikke et klart billede af, hvor mange driftstimer det vil være muligt at køre pumpen ved laveste omdrejninger. I forbindelse med en tidligere undersøgelse er det ikke konstateret at ventilerne har været fuldt åbne til gausk'valse på noget tidspunkt. På den baggrund er det skønnet, at det vil være muligt at køre ved 450 omdrejninger pr. minut i ca. 5.000 timer årligt, og at pumperne i den resterende tid kører ved det nuværende omdrejningstal på ca. 520 omdrejninger pr. minut.

Den årlige elbesparelse vil udgøre ca. 65.000 kWh, svarende til en besparelse på ca. 19%. Det svarer til en økonomisk besparelse på ca. 41.000 kr..

Investeringen vil skønsmæssigt andrage ca. 100.000 kr..

6.3.3 Substitution af trykluft med overtrykssystem (kapselblæserdrift)

I figur 6.8 ses et eksempel på en trykluftanvendelse, som vil kunne ændres til overtrykssystem (kapselblæserdrift).



Figur 6.8. Trykluft til adskillelse af tryksager i forbindelse med produktionen/pakning

I en produktion af tryksager anvendes trykluftknive med det formål at adskille tryksagerne inden pakning.

Maskinerne (18 stk. med 2 stk. trykluftknive pr. maskine) forsynes med trykluft på ca. 8 bar, men trykket reduceres ved hjælp af manuelle trykreduktionsventiler. Det vides ikke, hvad trykket reduceres til, da der ikke er noget manometer på trykreduktionsventilen, men det vurderes at der ikke er behov for mere end 1 – 2 bar.

I et datablad fra producenten af trykluftdyserne ses det, at flowet gennem en dyse er 12 m³/h (0,2 m³/min) ved 2 bar, mens det er 25 m³/h (0,42 m³/min) ved 4 bar. Det formodes dog at trykket ligger tæt på de 2 bar, så det antages at flowet pr. maskine er ca. 0,5 m³/min..

Ved et besøg på virksomheden blev det observeret, at alle 18 maskiner var i drift samtidig. Det vil sige at flowet var ca. 9 m³/min. Anlæggets driftstid skønnes at være ca. 3.000 timer pr. år. Det betyder, at det årlige forbrug af trykluft er ca. 1.620.000 m³. Da det specifikke elforbrug til trykluft ved 8 bar er ca. 0,124 kWh/m³ udgør det årlige elforbrug til forsyning af maskinerne med trykluft ca. 200.000 kWh.

Det er uhensigtsmæssigt at maskinerne forsynes med trykluft på ca. 8 bar, når processen formentlig/sandsynligvis kræver et væsentligt lavere tryk. Det vil derfor være oplagt at undersøge, om der findes alternative metoder til adskillelse af tryksagerne. En alternativ metode kunne være anvendelse af en kapselblæser (højtryksblæser). Dette vil dog kræve en væsentlig ændring af hele systemet til adskillelse af tryksagerne. Det drejer sig ikke mindst om rørsystemet.

En kapselblæser vil kunne levere det nødvendige flow ved et tryk på ca. 2,0 bar.

Elforbruget til kapselblæseren vil overslagsmæssigt udgøre ca. 40.000 kWh/år.

Den årlige elbesparelse vil således udgøre 160.000 kWh, svarende til en besparelse på ca. 80%, hvilket svarer til en økonomisk besparelse på ca. 128.000 kr..

Investeringen vil skønsmæssigt andrage 150.000 – 200.000 kr..

Før en eventuel ændring skal det undersøges, hvor stort flow og tryk processen reelt kræver. Det kræver, at der monteres en flow- og trykmåler på en af maskinerne. På baggrund af dette kan det vurderes hvor stort elforbrug processen benytter. Dette kan så sammenholdes med elforbruget til en alternativ proces.