www.kaeser.com

KAESER KOMPRESSORER

Tryklufteknik

Grundlæggende principper og praktiske tips

Indhold

Grundlæggende principper

Kapitel 1 Grundbegreber inden for trykluftproduktion 4
Kapitel 2 Rentabel behandling af trykluft 6
Kapitel 3 Hvorfor skal trykluften tørres? 8
Kapitel 4 Automatisk bortledning af kondensat 10
Kapitel 5 Billig og sikker behandling af kondensat 12
Kapitel 6 Effektiv kompressorstyring 14
Kapitel 7 Optimal forbrugsorienteret tilpasning af kompressorer 18
Kapitel 8 Energibesparelse med varmegenvinding 20
Kapitel 9 Planlægning af nyt trykluftnet 22
Kapitel 10 Sanering af trykluftnet 24
Kapitel 11 Trykluft-behovsanalyse (ADA) - konstatering af den faktiske situation 26
Kapitel 12 Beregning af det mest rentable koncept 30
Kapitel 13 Effektiv køling af trykluftstationen 32
Kapitel 14 Driftssikkerhed og omkostningsoptimering - også på lang sigt 34

Praktiske tips

Tip 1 Besparelser med optimalt tryk 40
Tip 2 Korrekt tryk ved lufttilslutningen 42
Tip 3 Effektiv fordeling af trykluften 44
Tip 4 Rørledninger i trykluftstationen 46
Tip 5 Korrekt opstilling af kompressorer 48
Tip 6 Påluftning af trykluftstationer 49
Tip 7 Afluftning af trykluftstationer 50

Bilag

Bilag 1 Nomogram – beregning af den indvendige rørdiameter 50
Bilag 2 Spørgeskema-eksempler vedrørende energi-spare-system-service 52

Forord

Diplomingeniør
Thomas Kaeser

Diplomingeniør
Tina-Maria Vlantoussi-Kaeser

Kære læser

Allerede for mere end totusind år siden formulerede den berømte græske filosof Sokrates det kort og præcist: "Der er kun ét gode, viden, og ét onde, uvidenhed".

Denne visdom, udtalt af en af aftenlandets åndelige forfædre, er i dag mere aktuel end nogensinde, da intet ser ud til at være mere stabilt end forandring. Forandringernes stadig stigende omfang og tempo i takt med den tekniske udvikling og den økonomiske globalisering kræver nye svar og nye løsningsstrategier.

Mere end nogensinde før bør udfordringer ses og udnyttes som muligheder for at opnå endnu større succes i fremtiden. Stadig større kompleksitet og indbyrdes forbundethed er på vej til at gøre viden til fremtidens vigtigste råstof. Den vokser eksponentielt, og det kræver stort engagement i uddannelse og efteruddannelse for den enkelte for at få adgang til denne viden.

Inden for tryklufteknikken har det længe været sådan, at det slet ikke er nok blot at vide, hvordan man bygger, installerer og driver effektive kompressorer.

Hvis man vil udnytte energibæreren trykluft på en tidssvarende måde, det vil sige så effektivt som muligt, er man nødt til at betragte trykluftsystemet som helhed. Derudover skal man kende de utallige indbyrdes relationer og vekselvirkninger inden for dette system samt dets integration i hele virksomhedsmiljøet.

KAESER KOMPRESSOREN gør derfor en ekstra indsats for at videreuddanne kunderne. Det foregår på mange forskellige måder. Eksempelvis besøger kvalificerede og erfarne eksperter fra KAESER diverse kongresser, forelæsninger og seminarer i hele verden og hele året rundt for at informere om effektiv produktion og udnyttelse af trykluft. Dertil kommer et stort antal faglige publiceringer i mange forskellige medier.

Dette hæfte indeholder en sammenfatning af denne omfattende ekspertviden. Ud over en velfunderet og let læselig indføring i det tryklufttekniske fagområde giver hæftet også en række praksisorienterede tips til driftsledere og trykluftbrugere. Heraf fremgår, at der ofte blot skal små forandringer af systemet "trykluft" til for at opnå mærkbare forbedringer af denne energibærers effektivitet og forsyningssikkerhed.

Kapitel 1

Grundbegreber inden for trykluftproduktion

Det forholder sig med trykluft som med så meget andet her i livet: Det er detaljerne, der gør forskellen, og selv små årsager kan medføre store virkninger – i både positiv og negativ retning. Og mange ting ser ofte anderledes ud ved nærmere øjesyn end ved det første blik. På den måde kan trykluft være dyr under ugunstige betingelser, mens de rigtige rammer derimod kan gøre trykluft til en meget rentabel løsning. Første kapitel handler om en afklaring af fire begreber inden for tryklufteknik, og hvad du skal være opmærksom på i den forbindelse.

1. Kapacitet

En kompressors kapacitet er den luftmængde, som kompressoren sender komprimeret ind i trykluftledningsnettet. Standarderne DIN 1945, del 1, **bilag F** og **ISO 1217**, **bilag C** fastlægger den korrekte måling af denne mængde. For at måle kapaciteten skal man gå frem som vist i **fig. 1**: Først måles temperatur, atmosfærisk lufttryk og luftfugtighed ved det samlede anlægs luftindtag. Herefter følger målingen af det maksimale driftstryk, tryklufttemperaturen og den transporterede luftvolumen ved kompressoranlæggets trykluftudgang. Til slut bliver den volumen V_2, der er målt ved trykluftudgangen, regnet tilbage til indsugningsbetingelserne ved hjælp af gasligningen **(se formlen)**. Resultatet af denne beregning er kompressoranlæggets kapacitet. Dette resultat må ikke forveksles med kompressorblokkens kapacitet (blokkapacitet).

$$V_1 = \frac{V_2 \times P_2 \times T_1}{[p_1 - (p_D \times F_{rel})] \times T_2}$$

Bemærk:
DIN 1945 og ISO 1217 alene angiver blot blokkapaciteten.

2. Motorens udgangseffekt

Motorens udgangseffekt er den effekt, som kompressorens drivmotor afgiver mekanisk ved motorakslen. Den optimale værdi for motorens udgangseffekt er det punkt, hvor man uden at overbelaste motoren udnytter den elektriske virkningsgrad og effektfaktoren cos φ optimalt. Denne værdi ligger inden for motorens nominelle effekt. Den fremgår af elektromotorens typeskilt.
OBS! **Hvis motorens udgangseffekt afviger for meget fra motorens nominelle effekt, arbejder kompressoren uøkonomisk og/eller med øget slitage.**

3. Elektrisk indgangseffekt

Den elektriske indgangseffekt er den effekt, som kompressorens drivmotor optager fra lysnettet ved en bestemt, mekanisk belastning af motorakslen (motorens udgangseffekt). Den elektriske indgangseffekt har en værdi bestående af motorens udgangseffekt plus motortabene. Dertil hører elektriske og mekaniske tab som følge af motorophæng og -påluftning. Den elektriske indgangseffekt i det nominelle punkt beregnes ved hjælp af formlen:
U_n, I_n, og $\cos \varphi_n$ står på elektromotorens typeskilt.

$$P = U_n \times I_n \times \sqrt{3} \times \cos \varphi_n$$

4. Specifik effekt

Forholdet mellem den tilførte elektriske indgangseffekt og den afgivne luftmængde ved tilsvarende driftstryk kaldes specifik effekt **(fig. 2)**. Den elektriske indgangseffekt, der tilføres kompressoren, er summen af den elektriske indgangseffekt for alle drevene i kompressoren som f.eks. hovedmotor, blæsermotor, oliepumpemotor, stilstandsvarmeaggregat osv.

Hvis den specifikke effekt skal bruges til rentabilitetsberegningen, bør den ses i relation til hele kompressoranlægget ved maksimalt driftstryk. I den forbindelse skal værdien for den samlede elektriske indgangseffekt ved maksimalt tryk divideres med værdien for anlæggets kapacitet ved maksimalt tryk:

$$P_{spec} = \frac{\text{Elektr. indgangseffekt}}{\text{effekt}}$$

5. IE – den nye formel for energibesparende drev

I 1997 begyndte man i USA med Energy Policy Act (EPACT) at klassificere de trefasede asynkronmotorers energieffektivitet. Senere blev der også indført en effektivitetsklassificering i Europa. Siden 2010 har den internationale IEC-standard været gældende for elektromotorer. Klassificeringer og lovbestemmelser har betydet, at energieffektiviteten for elektromotorer i premiumklasserne er blevet langt bedre. Disse mere effektive motorer har væsentlige fordele:

a) Lavere driftstemperaturer
Interne tab af virkningsgrad (friktion, opvarmning) kan for små motorers vedkommende udgøre op til 20 % af indgangseffekten, mens de ved motorer fra 160 kW udgør 4 til 5 %. IE3/IE4-motorer klarer sig med langt mindre opvarmning og dermed mindre tab **(fig. 3)**:
Mens stigningen i driftstemperaturen i en konventionel motor ved normal belastning er ca. 80 K med en temperaturreserve på 20 K set i forhold til isolationsklasse F, er IE-motorens temperaturstigning under de samme betingelser kun på ca. 65 K med en temperaturreserve på 40 K.

b) Længere levetid
Lavere driftstemperaturer betyder mindre termisk belastning af motor, lejer og klemkasse. Det betyder endnu en fordel i form af længere levetid.

c) 6 % mere trykluft med mindre energi
Mindre varmetab indebærer øget rentabilitet. Ved hjælp af en omhyggelig tilpasning af kompressorerne til de mere effektive motorer har KAESER været i stand til at øge kapaciteten med op til 6 % og forbedre den specifikke effekt med op til 5 %. Det betyder: Forbedret ydelse, kortere kompressordriftstider og lavere energiforbrug pr. kubikmeter produceret trykluft.

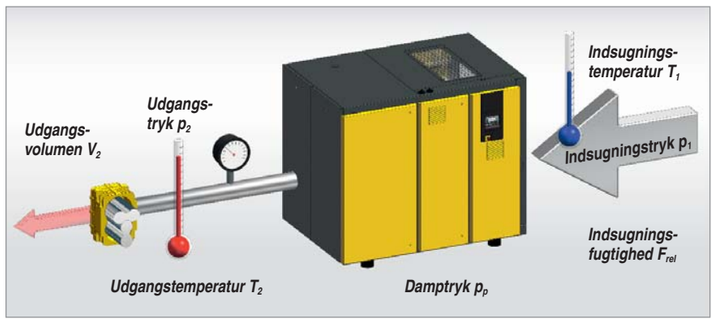


Fig. 1: Måling af kapaciteten iht. ISO 1217, bilag C (DIN 1945, bilag F)

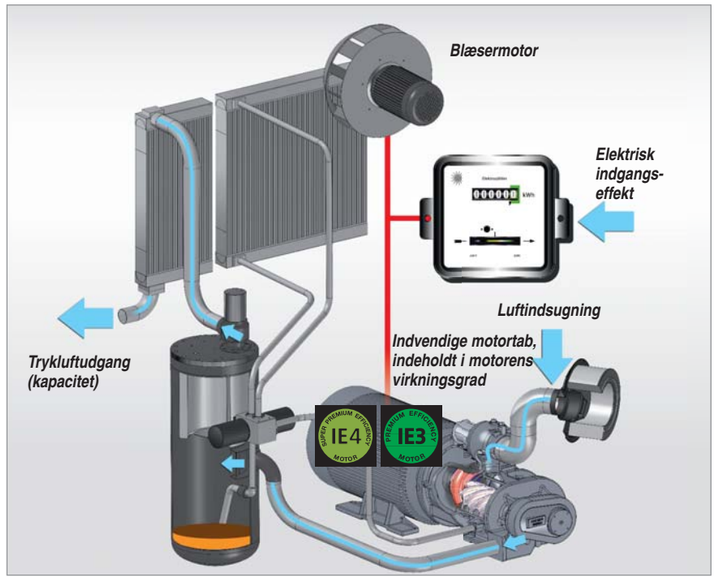


Fig. 2: En skruekompressors principielle opbygning, beregning af den specifikke effekt

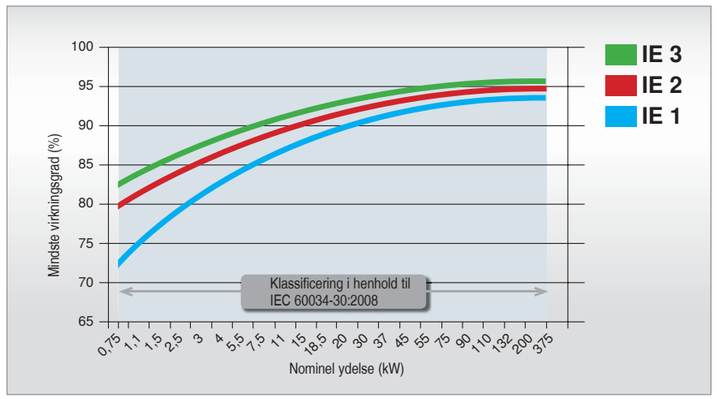


Fig. 3: IEC-standarden – den nye effektivitets-klassificering for elektromotorer.
Fra den 01.01.2015 er IE3-motorer påbudt i EU. Nu findes der imidlertid en yderligere forbedret motor-virkningsgradklasse IE4

Kapitel 2

Rentabel behandling af trykluft

Når det drejer sig om, hvilket kompressorsystem der er bedst til at producere oliefri trykluft, kan man i dag konstatere følgende (uafhængigt af enkelte producenters udtalelser): Man kan opnå en førsteklasses, oliefri trykluftkvalitet både ved hjælp af oliefrit (tørt) komprimerende og olie- eller væskekølede kompressorer. Ved valg af system bør det derfor være rentabiliteten, der er afgørende.

1. Hvad er "oliefri trykluft"?

Ifølge ISO-standard 8573-1 kan trykluft betegnes som oliefri, når olieindholdet (inklusive oliedamp) ligger under 0,01 mg/m³. Det er ca. fire hundrededele af, hvad den atmosfæriske luft indeholder. Denne mængde er så forsvindende lille, at den dårligt kan påvises. Men hvad så med kvaliteten af den luft, der indsuges i kompressoren?

Den afhænger i høj grad af de omgivende betingelser. Selv i normalt forurenede zoner kan luftens kulbrinteindhold ligge mellem 4 og 14 mg/m³ på grund af emissioner fra industri og trafik. I industriområder, hvor der anvendes olie som smøre-, køle- og procesmedium, kan mineralolieindholdet alene ligge langt over 10 mg/m³.
Hertil kommer yderligere forurening som f.eks. kulbrinte, svovldioxid, sod, metal og støv.

2. Hvorfor behandle trykluften?

Hver enkelt kompressor fungerer som en stor støvsuger, der optager forurening, som koncentreres ved komprimeringen af luften, og som ved manglende behandling videregives til trykluftnettet.

a) "Oliefrie" kompressorer

Dette gælder især for tørt komprimerende kompressorer. På grund af den forurening, der er nævnt i afsnit 1., er det ikke muligt at producere oliefri trykluft med en kompressor, som kun har et 3-mikron støvfilter. Tørt komprimerende kompressorer har ingen yderligere behandlingskomponenter ud over disse støvfiltre.

b) Væske- eller oliekølede kompressorer

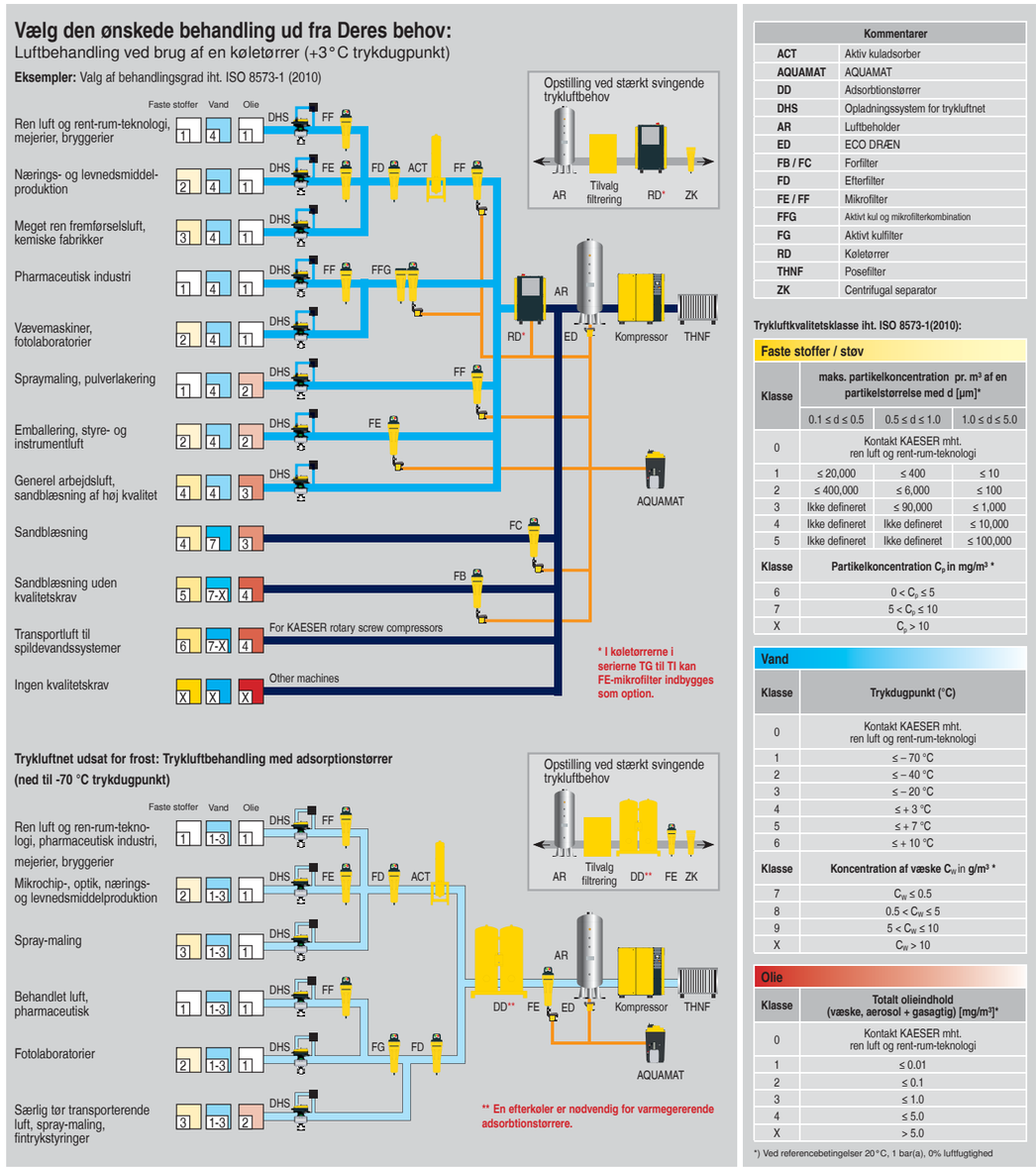
I de olie- og væskekølede kompressorer derimod bliver aggressive stoffer neutraliseret i kølevæsken (olien), og faste partikler udvaskes delvist med kølemidlet.

3. Uden behandling ingen defineret trykluftkvalitet

Selvom den producerede trykluft har en højere renhedsgrad, gælder det dog også her, at en eller anden form for behandling er nødvendig. Med tør og oliekølet komprimering alene er det under de sædvanlige indsugningsbetingelser og den dermed forbundne luftforurening ikke muligt at nå en defineret oliefri trykluftkvalitet i henhold til ISO 8573-1.
Hvor rentabel trykluftproduktionen er, afhænger af tryk- og kapacitetsområdet, hvilket på den anden side afhænger af den nødvendige kompressortype. Tilstrækkelig tørring af trykluften er grundlaget for enhver anvendelsestilpasset trykluftbehandling. Oftest er det den energibesparende køletørring, som er den mest rentable metode **(se også kapitel 3, s. 9)**.

4. Behandling med renluftsystemet fra KAESER

Moderne væske- eller oliekølede skruekompressorer har en virkningsgrad, der er ca. 10 % højere end de tørtløbende kompressorer. KAESER har udviklet et renluftsystem til væske- eller oliekølede samt tørtløbende kompressorer, som giver mulighed for yderligere besparelser på op til 30 %. Restolieindholdet ligger under 0,003 mg/m³, altså langt under den grænseværdi, som er fastlagt i ISO-standarden for kvalitetsklasse 1 (i forhold til restolieindhold). Systemet omfatter alle behandlingskomponenter til produktion af den krævede trykluftkvalitet. Alt efter anvendelsesformål bruges køle- eller adsorptionstørrere **(se også kapitel 3, s. 9)** og forskellige filterkombinationer. På denne måde kan der driftssikkert og med ringe omkostninger produceres alt fra tør over partikelfri til teknisk oliefri og steril trykluft i henhold til ISO-standardens fastlagte trykluft-kvalitetsklasser **(fig. 1)**.



Kommentarer	
ACT	Aktiv kuladsorber
AQUAMAT	AQUAMAT
DD	Adsorbtionstørrer
DHS	Opladningssystem for trykluftnet
AR	Luftbeholder
ED	ECO DRÆN
FB / FC	Forfilter
FD	Efterfilter
FE / FF	Mikrofilter
FFG	Aktivt kul og mikrofilterkombination
FG	Aktivt kulfilter
RD	Køletørrer
THNF	Posefilter
ZK	Centrifugal separator

Trykluftkvalitetsklasse iht. ISO 8573-1(2010):

Faste stoffer / støv

Klasse	maks. partikelkoncentration pr. m³ af en partikelstørrelse med d [µm]*		
	0.1 ≤ d ≤ 0.5	0.5 ≤ d ≤ 1.0	1.0 ≤ d ≤ 5.0
0	Kontakt KAESER mht. ren luft og rent-rum-teknologi		
1	≤ 20,000	≤ 400	≤ 10
2	≤ 400,000	≤ 6,000	≤ 100
3	Ikke defineret	≤ 90,000	≤ 1,000
4	Ikke defineret	Ikke defineret	≤ 10,000
5	Ikke defineret	Ikke defineret	≤ 100,000
Klasse	**Partikelkoncentration C_p in mg/m³ ***		
6	$0 < C_p \leq 5$		
7	$5 < C_p \leq 10$		
X	$C_p > 10$		

Vand

Klasse	Trykdugpunkt (°C)
0	Kontakt KAESER mht. ren luft og rent-rum-teknologi
1	≤ – 70 °C
2	≤ – 40 °C
3	≤ – 20 °C
4	≤ + 3 °C
5	≤ + 7 °C
6	≤ + 10 °C
Klasse	**Koncentration af væske C_W in g/m³ ***
7	$C_W \leq 0.5$
8	$0.5 < C_W \leq 5$
9	$5 < C_W \leq 10$
X	$C_W > 10$

Olie

Klasse	Totalt olieindhold (væske, aerosol + gasagtig) [mg/m³]*
0	Kontakt KAESER mht. ren luft og rent-rum-teknologi
1	≤ 0.01
2	≤ 0.1
3	≤ 1.0
4	≤ 5.0
X	> 5.0

*) Ved referencebetingelser 20 °C, 1 bar(a), 0% luftfugtighed

Fig. 1: ***Som en hjælp finder brugeren dette skema på alle nye skruekompressorbrochurer fra KAESER. Alt efter anvendelsesformål kan man lynhurtigt få et overblik over den rigtige udstyrskombination.***

Kapitel 3

Hvorfor skal trykluften tørres?

Problemet ligger i luften – i ordets bogstaveligste forstand: Når atmosfærisk luft afkøles, som det er tilfældet efter komprimeringen i kompressoren, udskilles der vanddamp. Således "producerer" en kompressor med en kapacitet på 5 m³/min (ved +20 °C omgivende temperatur, 70 % relativ fugtighed og 1 bar_{abs}) omtrent 30 liter vand i løbet af en ottetimers arbejdsdag. Dette vand skal fjernes fra trykluftsystemet for at forebygge driftsforstyrrelser og skader. Dermed er billig og miljøvenlig trykluftørring en vigtig bestanddel af den anvendelsestilpassede behandling.

1. Et praktisk eksempel

Hvis en væskekølet skruekompressor ved 20 °C under omgivelsestryk suger 10 m³ luft med 60 % relativ fugtighed pr. minut, så indeholder denne luft ca. 100 g vanddamp. Komprimeres luften i kompressionsforholdet 1:10 til et absoluttryk på 10 bar, får man 1 driftskubikmeter. Ved en temperatur på 80 °C efter komprimeringen kan luften nu optage 290 g vand pr. kubikmeter. Da der imidlertid kun forefindes ca. 100 g vand, er luften med en relativ fugtighed på ca. 35% ret tør, og der udskilles ikke kondensat. Kompressorens efterkøler reducerer trykluftemperaturen fra 80 °C til ca. 30 °C.

Derefter kan en kubikmeter luft nu kun optage ca. 30 g vand. Vandoverskuddet på ca. 70 g/min kondenserer og udskilles. I løbet af en arbejdsdag på 8 timer udskilles således ca. 35 liter kondensat. Der udskilles yderligere 6 liter om dagen, når der anvendes efterkoblede køletørrere. Her afkøles trykluften i første omgang til +3 °C, hvorefter den efterfølgende varmes op til den omgivende temperatur igen. Det fører til en fugt-undermætning på ca. 20 % og dermed til en bedre, relativ tør trykluftkvalitet **(fig. 1)**.

2. Årsagen til luftfugtighed

Den luft, der omgiver os, er mere eller mindre våd, da den altid indeholder en vis mængde vand. Denne fugtighed afhænger af den aktuelle temperatur. Således binder for eksempel 100 % vanddampmættet luft ved +25 °C næsten 23 g vand pr. kubikmeter.

3. Kondensatdannelse

Kondensat opstår, når luftvolumen reduceres, og lufttemperaturen samtidig sænkes. Herved forringes luftens evne til at optage vand. Det er netop dette, der sker efter komprimeringen i kompressorens kompressorblok og efterkøler.

4. Vigtige begreber – kort forklaret

a) Absolut luftfugtighed

Den absolutte luftfugtighed angiver indholdet af vanddamp i luften i g/m³.

b) Relativ luftfugtighed (F_{rel})

Den relative luftfugtighed angiver mætningsgraden, dvs. forholdet mellem det faktiske vanddampindhold og det pågældende mætningspunkt (100 % F_{rel}). Den relative luftfugtighed afhænger af temperaturen: Varm luft kan optage mere vanddamp end kold luft.

c) Atmosfærisk dugpunkt

Det atmosfæriske dugpunkt er den temperatur, ved hvilken luften ved atmosfærisk tryk (omgivende betingelser) har nået en fugt-mætningsgrad (F_{rel}) på 100 %.

d) Trykdugpunkt

Trykdugpunktet er den temperatur, hvorved trykluften ved sit absolutte tryk når sit fugtmætningspunkt (100 % F_{rel}). For ovennævnte eksempler betyder det: Den luft, der har et tryk på 10 bar(a), har ved et trykdugpunkt på +3 °C en absolut luftfugtighed på 6 g pr. driftskubikmeter. Reducerer man trykket i den i eksemplet nævnte driftskubikmeter på 10 bar(a) til atmosfærisk tryk, øges dens volumen igen med det tidobbelte. Vanddampandelen på 6 g forbliver uændret og fordeler sig blot på det tidobbelte volumen. Dermed indeholder hver kubikmeter trykformindsket luft kun 0,6 g vanddamp. Det svarer til et atmosfærisk dugpunkt på -24 °C.

Fig. 1: Ved produktion, lagring og behandling af trykluft dannes kondensat (oplysningerne gælder for 10 m³/min, 10 bar_{abs}, 8 h, 60 % F_{rel} og 20 °C)

5. Rentabel og miljøvenlig trykluftørring med køle- eller adsorptionstørrer?

De nye miljøregler for kølemidler ændrer ikke ved den kendsgerning, at adsorptionstørrere hverken i økonomisk eller miljømæssig henseende udgør et alternativ til køletørrerne. Køletørrerne behøver nemlig kun 3 % af den energi, som kompressoren anvender til trykluftproduktionen, hvorimod adsorptionstørrere anvender 10 til 25 % eller mere. Derfor bør der almindeligvis anvendes køletørrere.

Det er kun hensigtsmæssigt at bruge adsorptionstørrere, når der kræves ekstremt tørre trykluftkvaliteter med dugpunkter ned til -20, -40 eller -70 °C **(fig. 2)**. I løbet af en arbejdsdag er trykluftsystemer ofte udsat for store udsving i forbruget. Dette gælder især set over hele året, hvor også store temperaturudsving gør sig gældende. Derfor skal trykluftørrere dimensioneres til de dårligst tænkelige betingelser: det laveste tryk, det højeste trykluftforbrug samt den højeste omgivelses- og trykluft-indgangstemperatur. Tidligere løste man denne opgave ved at lade tørreren køre i vedvarende drift, hvilket især ved dellastdrift indebar et stort energispild. Moderne køletørrere med effektiv intervalstyring tilpasser derimod energiforbruget til de skiftende betingelser, samtidig med at der sikres en konstant god trykluftkvalitet **(fig. 3)**. På den måde kan du spare mere end 50 % energi i snit i løbet af et år.

Tørre-metode	Trykdug-punkt °C	Typisk speci-fik effekt-forbrug kW / m³/min **)
Køletørrer	+ 3	0,1
HYBRITEC	**+ 3 / – 40 *) – 40**	**0,2 0,3**
Varmregenererende adsorptionstørrer	**– 40**	**0,5 – 0,6**
Koldregenererende adsorptionstørrer	– 20 – 70	1,4 – 1,6

Fig. 2: Alt efter krævet trykdugpunkt kan der anvendes forskellige tørringsmetoder

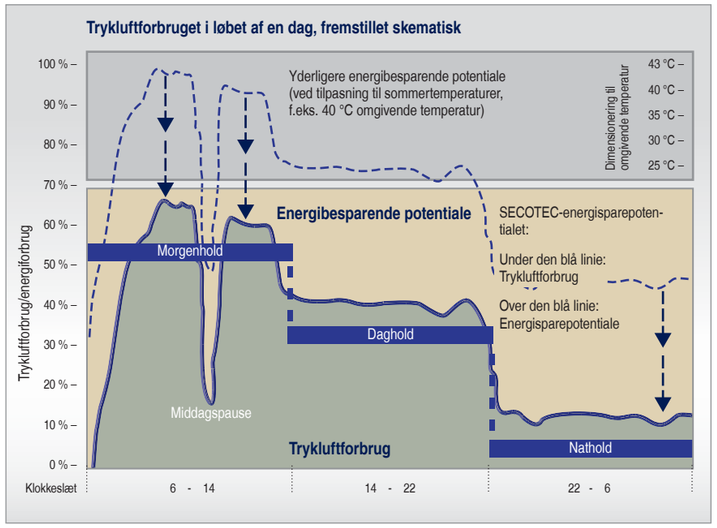


Fig. 3: Energisparepotentiale ved køletørrere med intervalstyring

Det er især vigtigt at anvende energieffektiv teknik, når det gælder om at nå trykdugpunkter i minusområdet, da de adsorptionstørrere, der bruges til formålet, har et meget stort energiforbrug. Ved hjælp af en lige så prisbillig som energieffektiv kombinationsmetode, HYBRITEC-systemet, er det lykkedes at reducere energiforbruget mærkbart: Systemet består af en køletørrer og en adsorptionstørrer. Først tørrer køletørreren den indstrømmende trykluft på energibesparende vis til et trykdugpunkt på +3 °C. Den således fortørrede trykluft føres ind i adsorptionstørreren, som nu skal bruge langt mindre energi til den videre affugtning af luften til et trykdugpunkt på -40 °C.

Kapitel 4

Automatisk bortledning af kondensat

Kondensat er et uundgåeligt biprodukt ved trykluft. Således producerer allerede en 30-kW-kompressor med en kapacitet på 5 m³/min under gennemsnitlige driftsbetingelser ca. 20 liter kondensat pr. skiftehold. Det skal fjernes fra trykluftsystemet for at undgå fejl og korrosionsskader. I dette kapitel kan du læse om, hvordan du korrekt leder kondensatet bort og samtidig reducerer omkostningerne mærkbart.

Fig. 1: I alle trykluftsystemer dannes kondensat bestemte steder

1. Kondensatafledning

I ethvert trykluftsystem opstår der bestemte steder kondensat med diverse urenheder **(fig. 1)**. Sikker kondensatafledning er en absolut nødvendighed. Kondensatafledningen har en afgørende indflydelse på trykluftens kvalitet og trykluftanlæggets driftssikkerhed og rentabilitet.

a) Kondensatindsamlings- og afledningssteder

I første omgang anvendes mekaniske elementer i trykluftsystemet til opsamling og afledning af kondensatet. Her opsamles 70 til 80% af alt kondensat - forudsat at kompressoren har en god efterkøling.

Cyklonudskiller:
Denne mekaniske udskiller separerer kondensatet fra luften ved hjælp af centrifugalkraft **(fig. 2)**. For at kunne arbejde optimalt skal den konstant være forbundet med et trykluftaggregat.

Mellemkøler:
Ved totrins-kompressorer med mellemkølere dannes også kondensat ved mellemkølerens udskiller.

Trykluftbeholder:
Ud over sin hovedfunktion som beholder separerer trykbeholderen kondensatet fra luften ved hjælp af tyngdekraft **(fig. 1).** Hvis den er tilstrækkelig dimensioneret (kompressorydelse/min : 3 = min. beholderstørrelse i m³) er den lige så effektiv som en cyklonudskiller.
Til forskel fra cyklonudskilleren kan trykluftbeholderen anvendes i kompressorstationens centrale trykluftledning, hvis luftindtaget er i bunden og -udgangen er i toppen. Takket være sin store køleflade afkøles trykluften yderligere af beholderen, hvorved kondensatudskillelsen forbedres.

Vandlomme i trykluftledningen:
For at undgå udefinerede kondensatstrømme skal trykluftledningen i det våde område udføres således, at alle ind- og udgange er tilsluttet enten oppefra eller fra siden.

Definerede kondensatudgange nedad, såkaldte vandlommer, fører kondensatet ud af hovedledningen. Ved en luftstrømningshastighed på 2 til 3 m/s og korrekt dimensionering udskiller en vandlomme (fig. 3) i trykluftsystemets våde område kondensatet lige så effektivt som en trykluftbeholder **(fig. 1)**.

b) Tryklufttørrer

Inden for tryklufttørring findes der også andre kondensatindsamlings- og afledningssteder end dem, der allerede er nævnt.

Køletørrer:
Ved afkøling og den dermed forbundne tørring af trykluft dannes yderligere kondensat i køletørreren.

Adsorptionstørrer:
Afkølingen i trykluftledningen bevirker, at der allerede dannes kondensat på adsorptionstørrerens forfilter. I selve adsorptionstørreren optræder vand som følge af de herskende partialtrykforhold kun som damp.

c) Decentral udskiller

Uden central tryklufttørring vil der ved de vandudskillere, der er installeret

Fig. 2: Cyklonudskiller med kondensatafleder

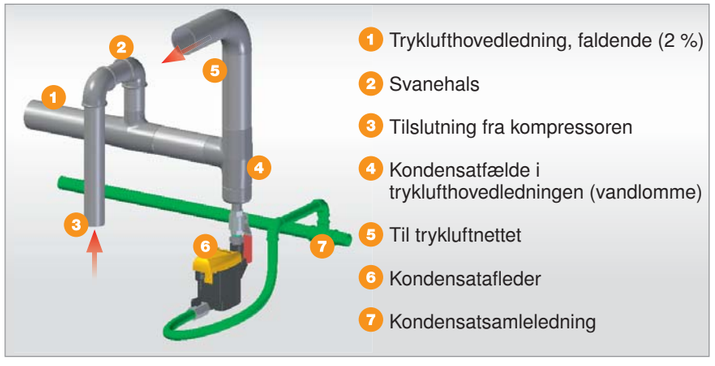


Fig. 3: Vandlomme med kondensatafleder i trykluftsystemets våde område

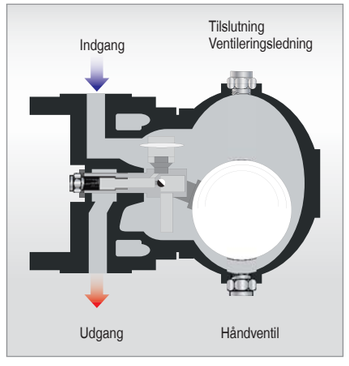


Fig. 4: Svømmerstyret dræn til trykluftkondensat

umiddelbart før trykluftforbrugerne; opstå store mængder kondensat, inklusive et enormt vedligeholdelsesbehov.

2. Afledersystemer

For øjeblikket anvendes primært tre systemer:

a) Svømmerstyrede dræn

Svømmerstyrede dræn hører til de ældste afledningssystemer og afløste den totalt urentable og usikre manuelle afledning. Men også kondensatafledningen ud fra svømmerprincippet **(fig. 4)** er som følge af urenhederne i trykluften særdeles vedligeholdelsesintensiv og en ikke særlig driftssikker løsning.

b) Magnetventil

Magnetventiler med tidsstyring er ganske vist mere driftssikre end svømmerstyrede dræn, men de skal alligevel regelmæssigt kontrolleres for urenheder. Forkert justerede ventilåbningstider forårsager desuden tryktab og resulterer dermed i et øget energiforbrug.

c) Kondensatafleder med niveaustyring

Nu om dage anvendes primært afledere med intelligent niveaustyring **(fig. 5)**. Her erstattes den ustabile svømmerfunktion af en elektronisk afleder: Dermed undgås driftsforstyrrelser som følge af tilsmudsning eller mekanisk slitage. Derudover betyder præcist beregnede og tilpassede ventilåbningstider, at tryktab undgås. Andre fordele er den automatiske selvovervågning og muligheden for videregivelse af signal til en central styring.

d) Korrekt installation

Mellem kondensatudskillelsessystemet og kondensatafledere bør der altid installeres et kort stykke rørledning med kuglehane **(fig. 2 og 3)**.
På den måde kan afledere spærres af, når der udføres vedligeholdelsesarbejder, og driften af trykluftanlægget kan fortsætte uden at blive forstyrret.

Fig. 5: Kondensatafleder med elektronisk niveaustyring (type ECO-DRAIN)

Kapitel 5

Billig og sikker behandling af kondensat

Det kondensat, der dannes automatisk under trykluftproduktionen, indeholder ikke blot kondenseret vanddamp. En kompressor virker som en overdimensioneret støvsuger: Sammen med kontamineret omgivende luft suger den urenheder til sig og afgiver disse i koncentreret form via den endnu ubehandlede trykluft videre til kondensatet.

1. Hvorfor skal kondensat behandles?

Trykluftbrugere, som blot leder kondensatet ud i kloaksystemet, risikerer betydelige bøder. Årsagen hertil er, at det kondensat, der dannes ved trykluftproduktionen, er en højeksplosiv blanding. På grund af den eksisterende miljøbelastning indeholder kondensatet ud over støvpartikler også kulbrinte, svovldioxid, kobber, bly, jern og meget mere. I Tyskland er bortskaffelsen af kondensat fra trykluftanlæg reguleret af det tyske vandregulativ "Wasserhaushaltsgesetz (WHG)". Heri hedder det, at forurenet vand skal behandles i henhold til de "alment anerkendte tekniske regler“ (§ 7a WHG). Dette gælder for alle former for trykluftkondensat – også det fra oliefrie kompressorer.

Der findes lovbestemte grænseværdier for alle skadelige stoffer og for pH-værdien. I Tyskland varierer de alt efter branche og delstat. Eksempelvis for kulbrinte er den højst tilladte værdi 20 mg/l; og pH-værdien for kondensat, der må ledes ud i kloaksystemet, skal ligge mellem 6 og 9.

2. Kondensatets beskaffenhed (fig. 1)

a) Dispersion

Trykluftkondensat kan have forskellig beskaffenhed. Dispersioner forekommer i reglen ved væskekølede skruekompressorer, som drives med syntetiske kølemidler som f.eks. "Sigma Fluid S460". Dette kondensat har normalt en pH-værdi mellem 6 og 9 og kan dermed anses for at være pH-neutral. Urenheder, der kommer ind med den atmosfæriske luft, lægger sig ved dette kondensat som et flydende olielag, der er let at skille fra vandet.

b) Emulsion

Et synligt tegn på, at der forefindes en emulsion, er en mælkeagtig væske, som efter flere dage stadig ikke deler sig i to faser**.** Denne kondensatbeskaffenhed optræder hyppigt ved de konventionelle oliedrevne stempel-, skrue- og lamelkompressorer. Også her er der bundet skadelige stoffer til oliebestanddelene.

Som følge af den kraftige og stabile sammenblanding kan olie og vand samt indsugede urenheder som f.eks. støv og tungmetaller ikke separeres ved hjælp af tyngdekraft. Hvis den eksisterende olie indeholder esterandele, kan kondensatet desuden være aggressivt og skal neutraliseres. Sådanne kondensater kan kun behandles med emulsionsspaltningsanlæg.

3. Ekstern bortskaffelse

Det er naturligvis muligt at samle kondensatet og få et specialfirma til at bortskaffe det. Men alt efter kondensatets beskaffenhed ligger omkostningerne til bortskaffelse mellem ca. 300 og 1.125 kr./m³. Set i forhold til de faktiske kondensatmængder bør behandlingen internt på virksomheden således kunne betale sig. Det har den fordel, at der af de oprindelige kondensatmængder kun bliver omtrent 0,25 % tilovers, som skal bortskaffes på miljømæssig forsvarlig vis.

4. Behandlingsmetoder

a) Til dispersioner

Til behandling af denne type kondensat er det for det meste nok med en trekammer-separeringsenhed med to forudskillelseskamre og et aktivkulfilterkammer **(fig. 2)**. Den faktiske separation sker ved hjælp af tyngdekraft. Det olielag, der flyder på væskeoverfladen i enhedens separeringskammer, føres til en opsamlingsbeholder og bortskaffes som spildolie.

Det resterende vand filtreres dernæst i to trin og kan derefter ledes ud i kloaksystemet. I forhold til at få et specialfirma til at stå for bortskaffelsen kan der med gravitationsseparator opnås en omkostningsbesparelse på ca. 95 %. Enhederne tilbydes for øjeblikket med en kapacitet på op til 105 m³/min kompressorydelse. Ved større behov er det naturligvis muligt at installere flere enheder parallelt.

Fig. 1: Alle kompressorer suger vanddamp og urenheder til sig sammen med den atmosfæriske luft. Det trykluftkondensat, der opstår, (fig. 1,1) skal derfor frigøres fra olie og andre skadelige stoffer (fig. 1, 2), inden det kan ledes ud i kloaksystemet som rent vand (fig. 1, 3)

Fig. 2: Kondensatsepareringssystem til tryklufteknik ud fra gravitationsprincippet (funktionsbillede)

b) Til emulsioner

Til behandling af stabile emulsioner anvendes nu om dage primært to apparattyper:

Membranseparationssystemer arbejder ud fra princippet om ultrafiltrering med den såkaldte crossflow-metode. Her overstrømmes membranerne af forfiltreret kondensat.

En del af væsken trænger igennem membranerne og forlader apparatet som rent vand, der kan ledes ud i kloaksystemet. Den anden apparattype arbejder med et pulveriseret separeringsmiddel. Det indkapsler oliepartikler og danner derefter let filtrerbare makroflager. Filtre med defineret porestørrelse holder disse flager sikkert tilbage. Det udstrømmende vand kan ledes ud i kloaksystemet.

Kapitel 6

Effektiv kompressorstyring

Det er kun, når kompressorernes kapacitet er korrekt tilpasset det svingende trykluftbehov, at energikrævende og dermed dyre delastfaser i stort omfang kan undgås. Den rigtige kompressorstyring spiller en nøglerolle, når det gælder energieffektivitet.

Hvis kompressorer har en udnyttelsesgrad på under 50 %, er der dømt højeste alarmberedskab i forhold til energispild. Det er der rigtig mange kompressorbrugere, der ikke ved, da deres kompressorer kun har driftstimetæller og ingen fuldlasttimetæller. Godt afstemte styresystemer hjælper: Ved at øge udnyttelsesgraden til 90 % eller mere, kan de bevirke en energibesparelse på 20 % eller mere.

1. Intern styring

a) Fuldlast/tomgangsregulering

I de fleste kompressorer arbejder der trefasede asynkronmotorer som drivenheder. Disse motorers koblingshyppighed aftager i takt med stigende ydelse. Den svarer ikke til den koblingshyppighed, der kræves for at tænde og slukke for kompressorer med lille koblingsdifference i overensstemmelse med det faktiske trykluftforbrug. Disse koblingsprocesser aflaster kun kompressorens trykførende områder. Motorer har stadig lidt efterløb **(fig.1)**. Den energi, der kræves hertil, må betragtes som et tab. Energibehovet hos disse kompressorer ligger i tomgangsfasen stadig på 20 % af fuldlastydelsen.

Moderne computeroptimerede reguleringssystemer som f.eks. quadroregulering med automatisk valg af den optimale driftsart **(fig. 2)**, dynamikregulering med tomgangstider afhængigt af drivmotorens temperatur **(fig. 3)** og varioregulering med variabelt beregnede tomgangstider **(fig. 4)** bidrager til at undgå dyr tomgang – med fuld motorbeskyttelse.

Proportionalreguleringer via drosselventiler på indsugningssiden kan ikke anbefales, for dermed kræver kompressoren ved 50% ydelse stadig 90% af den energi, den kræver ved en ydelse på 100 %.

b) Frekvensomformning

Kompressorer, hvis omdrejningstal er reguleret via frekvensomformer **(fig. 5)** har ingen konstant virkningsgrad i deres reguleringsområde. I området mellem 30 og 100 % og ved en 90-kW-motor reduceres den eksempelvis fra 94 til 86 %. Hertil kommer tab i frekvensomformeren og kompressorernes ikke-lineære ydelsesreaktioner. Frekvensomformerregulerede kompressorer bør køre i reguleringsområdet mellem 40-70%: Her er de mest rentable.

Disse komponenter bør være dimensioneret til 100% belastning. Forkert anvendt kan frekvensomformersystemer således blive til energifrådsere, uden at brugeren opdager det. Frekvensomformning er ikke noget universalmiddel, der kan sikre en energibesparende kompressordrift.

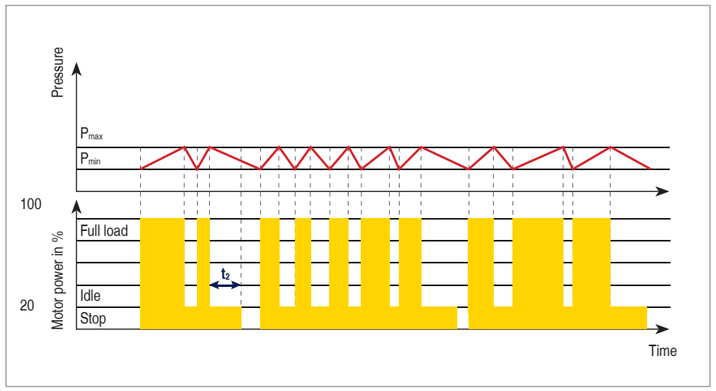


Fig. 1: Fuldlast-tomgangs-intervalregulering med fast indstillede tomgangstider, såkaldt dualregulering

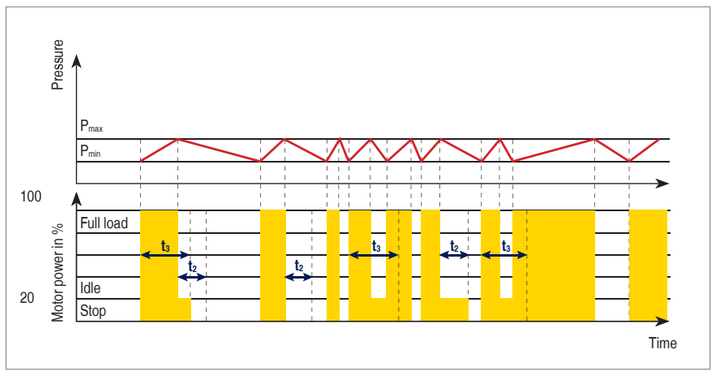


Fig. 2: Fuldlast-tomgangs-intervalregulering med automatisk valg af optimal driftsart, såkaldt quadroregulering

2. Klassificering af trykluftbehovet

I reglen kan kompressorer klassificeres alt efter deres funktion som grundlast-, mellemlast-, spidslast- eller standby-anlæg.

a) Grundlastbehov

Med grundlastbehov menes den til produktionen nødvendige trykluftmængde, som en virksomhed konstant har brug for.

b) Spidslastbehov

Spidslastbehovet er den trykluftmængde, der kræves på tidspunkter med spidsbelastning. På grund af de forskellige forbrugeres krav er spidslastbehovet skiftende.

For at kunne opfylde de forskellige lastfunktioner så godt som muligt skal kompressorerne udstyres med forskellige styringer.

Disse styringer skal være i stand til at opretholde kompressordriften og dermed trykluftforsyningen, hvis et overordnet styresystem svigter.

3. Overordnet maskinstyring

Moderne overordnede maskinstyringer med webbaseret software er ikke blot i stand til at koordinere kompressorernes drift i en trykluftstation med optimal energieffektivitet. De er også i stand til at registrere rentabilitetsoplysninger og dokumentere trykluftforsyningens effektivitet.

a) Anlægs-splitting

Splitting er opdeling af kompressorer med samme eller forskellig kapacitet og styringstype, alt efter virksomhedens trykluftbehov ved grund- og spidslast **(fig. 6)**.

b) Overordnede maskinstyringers opgaver

Koordineringen af kompressordriften er en krævende og omfattende opgave. Overordnede maskinstyringer skal

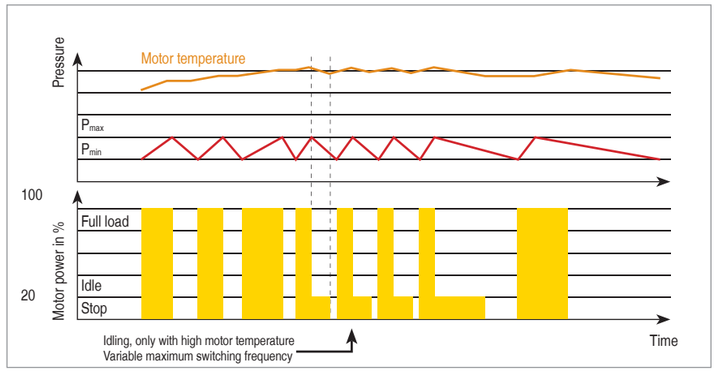


Fig. 3: Dynamikregulering baseret på motortemperatur med tomgangspiskatafhængigt af drivmotorens temperatur

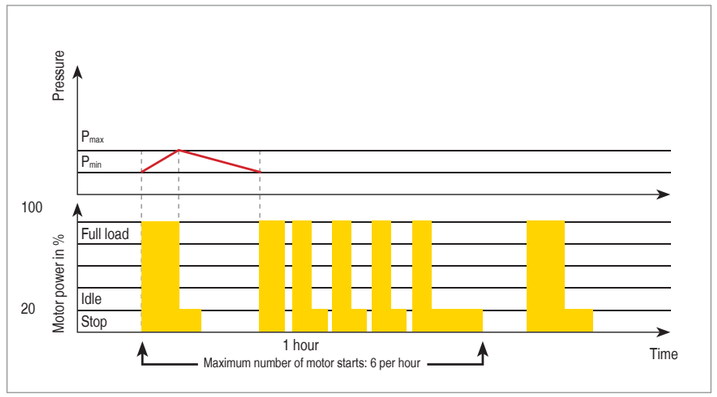


Fig. 4: Varioregulering med variabelt beregnede tomgangstider

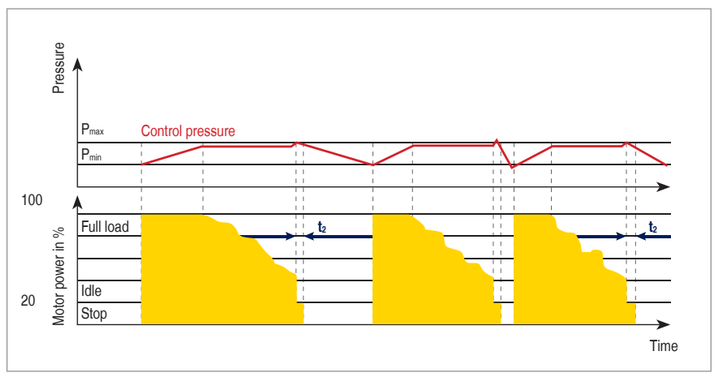


Fig. 5: Kontinuerlig delpanetsregulering med variabel speed (frekvensomformning)

Kapitel 6

Effektiv kompressorstyring

således ikke blot være i stand til at aktivere forskellige typer og størrelser kompressorer på det rigtige tidspunkt.
De står også for den servicetekniske overvågning af anlæggene, de skal tilpasse kompressorernes driftstider og registrere fejlfunktioner for således at reducere trykluftstationens serviceomkostninger og øge driftssikkerheden.

c) Korrekt trindeling
En vigtig forudsætning for en effektiv – det vil sige energibesparende – overordnet maskinstyring er en komplet og ubrudt trindeling af kompressorerne.
Summen af spidslastanlæggenes kapacitet skal derfor være større end summen af det efterfølgende grundlastanlægs kapacitet. Når der anvendes et omdrejningstalreguleret spidslastanlæg, skal reguleringsområdet være tilsvarende større end kapaciteten hos den efterfølgende kompressor. Ellers er det ikke muligt at sikre trykluftforsyningens rentabilitet.

d) Sikker dataoverførsel
En anden vigtig forudsætning for en fejlfrit fungerende og effektiv overordnet maskinstyring er en sikker dataoverførsel.
I den forbindelse skal det sikres, at der ikke blot overføres meddelelser internt i de enkelte kompressoranlæg, men også mellem kompressorerne og det overordnede styresystem. Derudover skal signalets vej også overvåges, så eventuelle fejl som f.eks. brud på et forbindelseskabel opdages omgående.

De sædvanlige overførselsveje er:
1. Potentialfrie kontakter
2. Analogsignaler 4 – 20 mA
3. Elektroniske grænseflader, f.eks. RS 232, RS 485, Profibus DP eller Ethernet.

Den mest moderne overførselsteknik leveres af profibussen. På den måde kan store mængder data uden problemer lynhurtigt sendes over store afstande.
Kombineret med Ethernet og moderne telefonteknik giver det mulighed for integration i standardiserede computer- og overvågningssystemer. Det betyder også, at overordnede styresystemer ikke nødvendigvis skal placeres i trykluftstationen **(fig. 7)**.

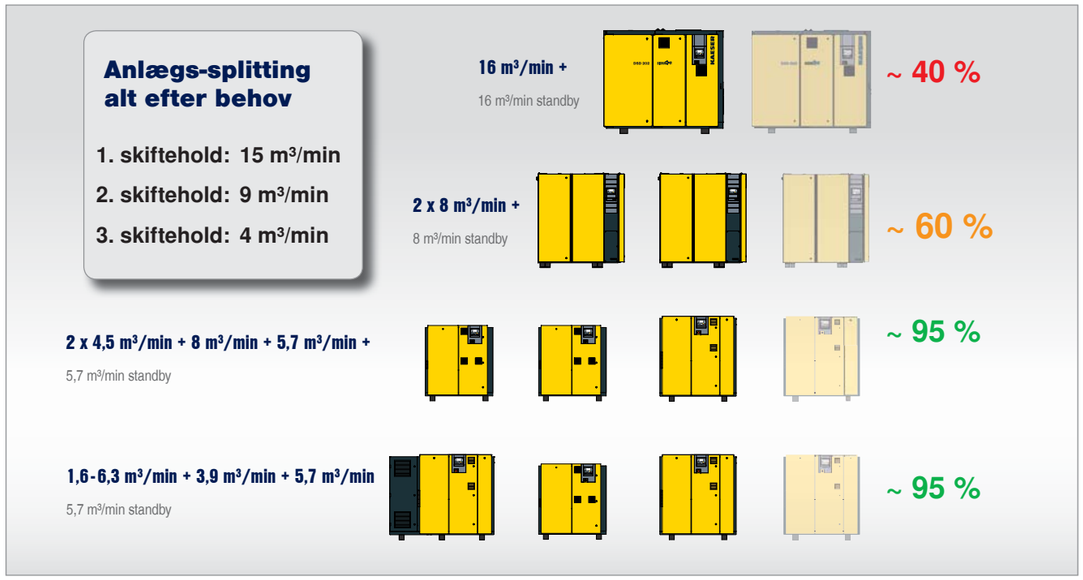


Fig. 6: Behovsafhængig lastfordeling på kompressorer med forskellig kapacitet

Fig. 7: Omfattende muligheder for tilslutning af en overordnet styring bidrager til effektiv drift af en trykluftstation

Kapitel 7

Optimal forbrugsorienteret tilpasning af kompressorer

Trykluftstationer består oftest af flere kompressorer med samme eller forskellig størrelse. For at kunne koordinere disse enkeltmaskiner er der brug for en overordnet maskinstyring: Trykluftproduktionen skal tilpasses optimalt til virksomhedens behov, og samtidig er det vigtigt at nå den højest mulige energieffektivitet.

De systemer, der generelt betegnes som kompressorstyringer, kan reguleringsteknisk set betragtes som reguleringer. De kan inddeles i fire grupper:

1. Kaskadereguleringen
Den klassiske form for reguleringsteknisk forbindelse af kompressorerne er kaskadereguleringen. Her får hver kompressor tildelt et nedre og et øvre aktiveringspunkt. Hvis der er flere kompressorer, der skal koordineres, resulterer det i et trappe- eller kaskadelignende reguleringssystem. Mens der ved lille luftbehov kun aktiveres én kompressor, og trykket for denne kompressor svinger i det øverste område mellem minimal- (p_{min}) og maksimaltryk (p_{max}), vil trykket falde ved øget luftbehov og aktivering af flere kompressorer **(fig. 1, kolonne 1)**.

Det resulterer i en relativt ugunstig konstellation: Ved lavt luftforbrug hersker maksimalt tryk i systemet, og risikoen for energitab som følge af lækager øges. Ved et højt forbrug derimod falder trykket, og trykreserven i systemet reduceres.
Alt efter, om der bruges almindelige membrantrykafbrydere, kontaktmanometre eller elektroniske trykfølere som transducer, er reguleringssystemets trykspredning meget stor, da kompressorerne hver især er knyttet til et bestemt trykområde. Jo flere kompressorer der anvendes, desto større bliver trykområderne som helhed. Det resulterer i ineffektive reguleringer med de allerede nævnte forhøjede tryk, lækager og energitab. Ved en kombination bestående af mere end to kompressorer bør kaskadereguleringer derfor skiftes ud med en anden reguleringsmetode.

2. Trykbåndregulering
I modsætning til kaskadereguleringen giver trykbåndreguleringen **(fig. 1, kolonne 2)** mulighed for at koordinere driften af flere kompressorer i et bestemt trykområde. Dermed kan det trykområde, som hele trykluftstationen reguleres inden for, begrænses relativt meget.

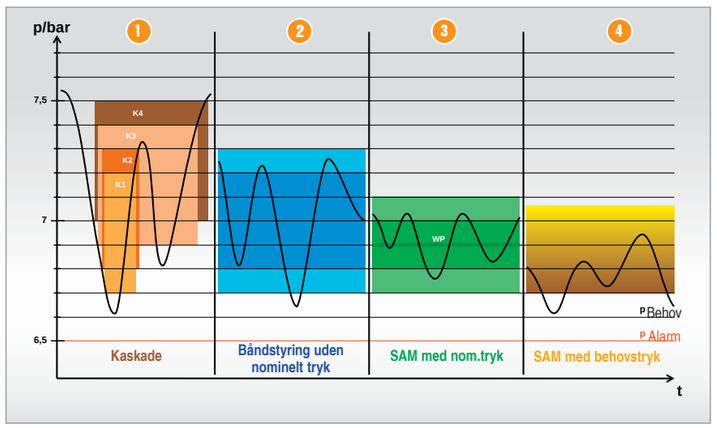
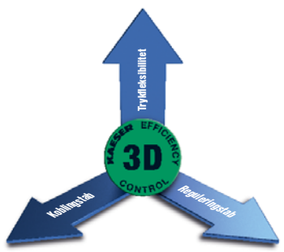


Fig. 1: Forskellige varianter af overordnet kompressorregulering

2. a) Enkel trykbåndregulering
Enkle former for trykbåndregulering er dog ikke i stand til at koordinere driften af forskellige størrelser af kompressorer; og de kan derfor ikke leve op til kravene til spidslastdækning i trykluftnet, som skal opfylde konstant skiftende behovssituationer.
Derfor blev denne metode suppleret med et system, som orienterer sig i forhold til trykfald- og trykstigningstider og på den måde prøver at aktivere de dertil passende kompressorer og dermed dække spidslastbehovet for trykluft. Men denne reguleringskarakteristik kræver en relativt stor spredning af trykbåndet **(fig. 2)**. Samtidig bliver der her, lige som ved kaskadereguleringen, ikke taget højde for kompressorernes og trykluftnettets reaktioner, hvorved man kan komme under det minimalt mulige trykpunkt. Det er derfor nødvendigt at overholde en sikkerhedsafstand mellem det nødvendige mindstetryk og reguleringens nederste aktiveringstryk.

2. b) Trykbåndregulering i relation til det nominelle tryk
Den trykbåndregulering, som orienterede sig i forhold til det nominelle tryk, indeholdt en afgørende forbedring **(fig. 1, kolonne 3)**. Denne regulering stræber efter at overholde et bestemt forudindstillet nominelt tryk og kan alt efter trykluftforbrug aktivere kompressorer i forskellige størrelser. Den særlige fordel ved denne reguleringsvariant består i muligheden for at sænke trykluftsystemets gennemsnitlige driftstryk mærkbart og på den måde opnå betydelige energi- og omkostningsbesparelser.

3. Behovstrykregulering
Behovstrykreguleringen **(fig. 1, kolonne 4)** er for nuværende den reguleringsteknisk set mest optimale løsning. Ved denne variant defineres ikke længere minimale og maksimale trykgrænser, men kun det lavest mulige driftstryk, som ikke må underskrides ved trykfølerens målepunkt **(fig. 3)**. Reguleringen tager højde for alle mulige tab forårsaget af trykøgning, opstarts-, reaktions- og tomgangstider samt af enkelte anlægs omdrejningstalregulering og beregner herudfra den mest optimale løsning for aktivering og valg af kompressorer. Takket være en viden om de enkelte reaktionstider er systemet i stand til at forhindre, at det minimalt mulige behovstryk underskrides **(fig. 4)**.
Ved hjælp af denne nye metode adaptiv 3D^{advance}-regulering, som anvendes i den overordnede styring SIGMA AIR MANAGER 2 (SAM 2), er det muligt at reducere energibehovet yderligere i forhold til den trykbåndregulering, der orienterer sig i forhold til den nominelle værdi. Samtidig undgås det, at systemet kommer ned under det definerede trykniveau. Det er imponerende, hvor let det er for brugeren selv at indstille behovstrykreguleringen.



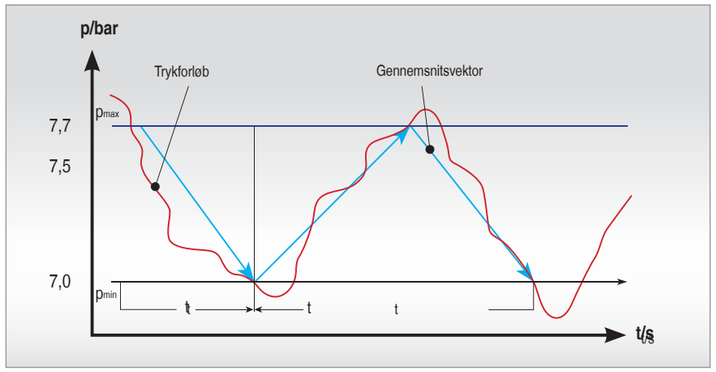


Fig. 2: Det optimale tryk indstilles ved at tage højde for alle reguleringstekniske tab

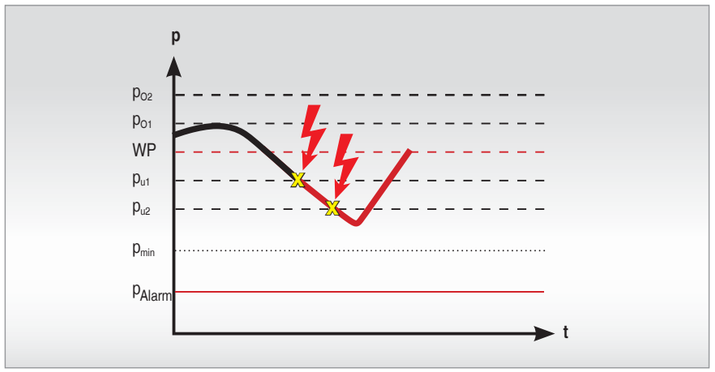


Fig. 3: Ved behovstrykreguleringen defineres ikke længere minimale og maksimale trykgrænser

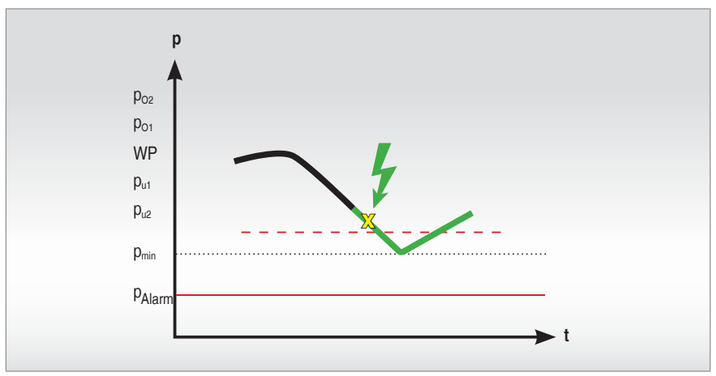


Fig. 4: Systemet forhindrer, at det definerede mindste behovstryk underskrides

Kapitel 8

Energibesparelse med varmegenvinding

Set i lyset af de stadig stigende energipriser er en sparsommelig omgang med energiressourcerne ikke kun en økologisk, men i stadig højere grad også en økonomisk nødvendighed. Kompressorproducenterne tilbyder mange forskellige muligheder til formålet, som f.eks. varmegenvinding ved skruekompressorer.

1. Kompressorer producerer først og fremmest varme

Det er en kendsgerning, at 100 % af den energi, der tilføres en kompressor, omdannes til varme. Under kompressionen bliver luften i kompressoren ladet op med et energipotentiale **(fig. 1)**. Den tilsvarende mængde energi kan udnyttes gennem trykformindskelse til omgivende tryk, afkøling og varmeoptagelse fra omgivelserne.

2. Muligheder for varmegenvinding

Hvis man er interesseret i en endnu mere rentabel udnyttelse af trykluften, kan der vælges mellem forskellige varianter af varmegenvinding:

a) Varmluftopvarmning

Den mest enkle form for varmegenvinding ved luft- og olie- eller væskekølede skruekompressorer er den direkte udnyttelse af den køleluft, der varmes op af kompressoren. Herved ledes overskudsvarmen via et luftkanalsystem over i de rum, der skal varmes op. Den varme luft kan naturligvis også anvendes til andre formål som f.eks. tørringsprocesser, til lufttæppeanlæg eller til forvarmning af brænderluft. Hvis der ikke er brug for varme, ledes returluftstrømmen ud i det fri ved at regulere en drejeklap eller et jalousispjæld. Termostatreguleret styring af jalousispjældet giver mulighed for at dosere den varme luft så præcist, at der kan opnås konstante temperaturer. Med denne variant er det muligt at udnytte op til 96 % af en skruekompressors elektriske indgangseffekt. Denne løsning betaler sig også ved små anlæg, da overskudsvarmen fra en 7,5-kW-kompressor uden problemer kan varme et helt parcelhus op.

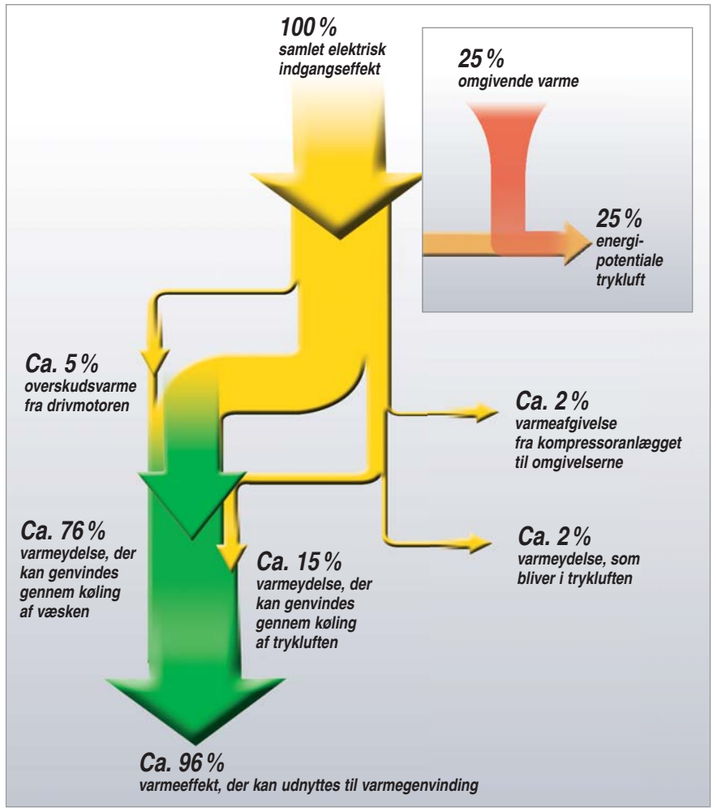


Fig. 1: Varmeflowdiagram

b) Opvarmning af varmt vand

Installationen af en varmeveksler i væskekredsløbet gør det muligt både ved hjælp af luft- og vandkølede skruekompressorer at producere varmt vand til forskellige formål. Dertil anvendes pladevarmevekslere eller sikkerhedsvarmevekslere – alt efter om det varme vand skal bruges til opvarmning, som bruse- og badevand eller til produktions- og rengøringsprocesser. Med disse varmevekslere er det muligt at nå op på vandtemperaturer på 70 °C. Det ekstra udstyr til denne varmegenvindingsvariant vil ved kompressoranlæg fra 7,5 kW drivkraft erfaringsmæssigt tjene sig ind i løbet af to år. Dette forudsætter ganske vist en korrekt planlægning.

Fig. 3: Forskriftsmæssig integration af kompressorer til et varmegenvindingssystem

3. Vær opmærksom på sikkerheden

Normalt bør kompressorens primære kølesystem aldrig anvendes som varmegenvindingssystem samtidig. Skulle varmegenvindingen svigte, ville det nemlig betyde, at også kompressorkølingen og dermed trykluftproduktionen er truet. Derfor skal der til varmegenvinding derudover også altid installeres særlige varmevekslere i kompressoranlægget. Så vil kompressoren nemlig i tilfælde af fejl selv sørge for sin egen sikkerhed: Hvis der ikke ledes varme bort via varmegenvindingssystemets væske-vand-varmeveksler, skifter kompressoren internt om til det primære luft- eller vandkølingssystem. Det betyder, at trykluftforsyningen fortsat er sikret **(fig. 2 og 3)**.

4. Op til 96 % anvendelig energi

Den største del af den anvendte energi, der kan udnyttes som varme, nemlig 76 %, finder man ved kompressorer med olie- eller væskeindsprøjtningskøling i kølemediet, 15 % i trykluften og op til 5 % i eldrivmotorens varmetab. Ved helkapslede olie- eller væskekølede skruekompressorer kan selv elmotorens energitab med målrettet køling genvindes som varmeenergi. I alt er der således mulighed for en termisk udnyttelse af op til 96 % af den energi, der anvendes til kompressoren.

Blot 2 % går tabt som følge af varmeudstråling, og 2 % varme forbliver i trykluften **(fig. 1).**

5. Konklusion

Varmegenvinding er en mulighed, som afgjort er værd at overveje, hvis man ønsker at øge trykluftanlæggets rentabilitet og samtidig ønsker at aflaste miljøet. De nødvendige investeringer er relativt små. Investeringernes størrelse afhænger af de lokale forhold i brugerens virksomhed, anvendelsesformålet samt den valgte varmegenvindingsmetode **(fig. 4)**.

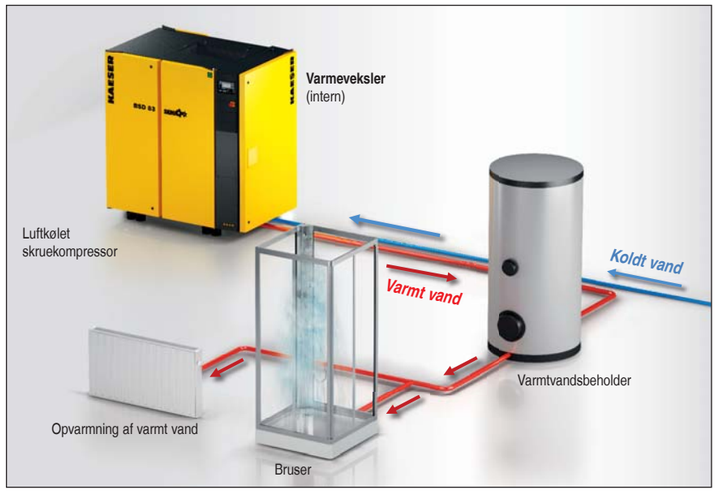


Fig. 3: Skema over varmegenvinding

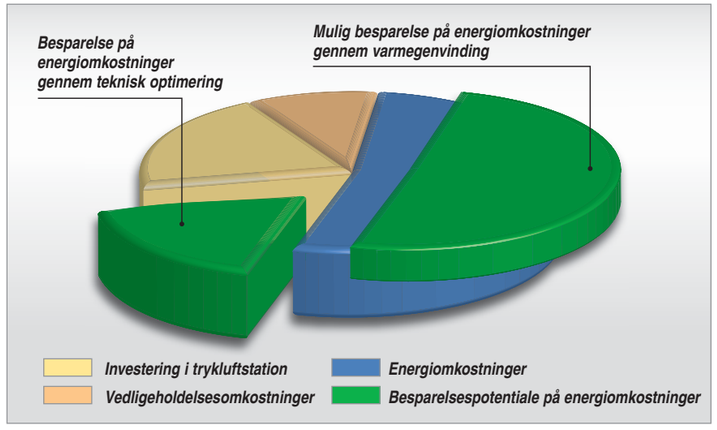


Fig. 4: Varmegenvinding har et stort ekstra besparelsespotentiale i forhold til energiomkostningerne

Kapitel 9

Planlægning af nyt trykluftnet

Trykluft er især en rentabel energibærer, når produktionen, behandlingen og fordelingen af trykluften er så optimalt afstemt som muligt. Dertil hører ud over korrekt planlægning og udførelse af selve trykluftstationen også en tilpasset dimensionering og installation af trykluftnettet.

1. Rentabel trykluftproduktion

Når der tages højde for alle udgifter til energi, kølemiddel, vedligeholdelse og afskrivning koster en kubikmeter trykluft alt efter kompressorens størrelse, udnyttelse, vedligeholdelsestilstand og konstruktion mellem ca. (ca. 4-19 ører). Mange virksomheder lægger derfor stor vægt på en rentabel trykluftproduktion. Det er også årsagen til de olie- og væskekølede skruekompressorers store succes: Dermed kan man spare op til 20 % af omkostningerne til produktion af trykluft.

2. Behandlingen påvirker trykluftnettet

Den behovstilpassede trykluftbehandling får derimod mindre opmærksomhed. Det er beklageligt, da kun godt behandlet trykluft kan holde vedligeholdelsesomkostningerne til trykluftforbrugere og rørledningsnet nede. De steder, hvor rørledninger transporterer fugtholdig trykluft, der endnu ikke er tørret, skal der under alle omstændigheder anvendes rørledningsmateriale med korrosionsbeskyttelse. Ellers er det vigtigt at sørge for, at fejlbehæftede rørledninger ikke påny forurener den trykluftkvalitet, der en gang er opnået ved hjælp af behandlingssystemet.

a) Køletørrere reducerer behovet for vedligeholdelse

I ca. 80 % af alle anvendelsestilfælde er køletørrere tilstrækkelige til trykluftbehandlingen. På den måde kan du slippe for filtre i rørledningsnettet, som ofte er forbundet med tryktab, og bruger kun ca. 3 % af de energiomkostninger, som kompressoren forårsager ved produktionen af en tilsvarende mængde trykluft. Hertil kommer, at omkostningsbesparelsen som følge af lave vedligeholdelses- og reparationsudgifter på rørledninger og trykluftforbrugere rækker ti gange så langt som de midler, der anvendes til køletørring.

b) Pladsbesparende kombinationsenheder

Til mindre virksomheder eller decentral forsyning tilbydes også pladsbesparende kombinationer af skruekompressor, køletørrer og trykluftbeholder **(fig. 1)** på markedet.

3. Planlægning og installation af et nyt trykluftnet

Først skal det afklares, om trykluftforsyningen skal være centralt eller decentralt opbygget. Til små og mellemstore virksomheder er en central forsyning oftest den bedst egnede. Her opstår normalt ikke de samme problemer, som kan forekomme ved et vidtstrakt centralt trykluftnet: store installationsinvesteringer, risiko for, at utilstrækkeligt isolerede luftledninger fryser om vinteren, samt øget trykfald som følge af lange rørledninger.

Fig. 1: Moderne trykluft-kompaktstation AIRCENTER til pladsbesparende produktion, behandling og lagring af trykluft

a) Korrekt dimensionering af nettet

Dimensioneringen af et ledningsnet bør under alle omstændigheder være forbundet med en beregning. Grundlaget for beregningen er et maksimalt trykfald på 1 bar mellem kompressor og trykluftforbruger inklusive kompressorens koblingsdifference og sædvanlig standard-trykluftbehandling (køletørring).

Mere præcist regner man med følgende tryktab **(fig. 2)**:

1 Hovedledning	0,03 bar
2 Fordelingsledning	0,03 bar
3 Tilslutningsledning	0,04 bar
4 Tørrer	0,20 bar
5 Serviceenhed og slange	0,50 bar
I alt maks.	**0,80 bar**

Denne opstilling viser, hvor vigtigt det er at beregne tryktabene i de enkelte ledningsafsnit. Her er det også vigtigt at tage højde for formdele og afspærringsenheder. Det er ikke nok blot at sætte de lige meter rør ind i en beregningsformel eller -tabel. Det er snarere rørledningernes strømningstekniske længde, der skal beregnes. Når planlægningen starter, har man dog ofte endnu ingen overblik over alle formdele og afspærringsenheder. Derfor beregner man de strømningstekniske rørlængder ved at gange de planlagte meter lige rør med faktor 1,6. Rørledningsdiametrene kan derefter helt enkelt beregnes ved hjælp af gængse formler **(fig. 3)** eller dimensioneringsdiagrammer **(bilag 1, s. 54)**.

Dimensioneringen kan også udføres ved hjælp af KAESER-Toolbox (www.kaeser.de/online-services/toolbox).

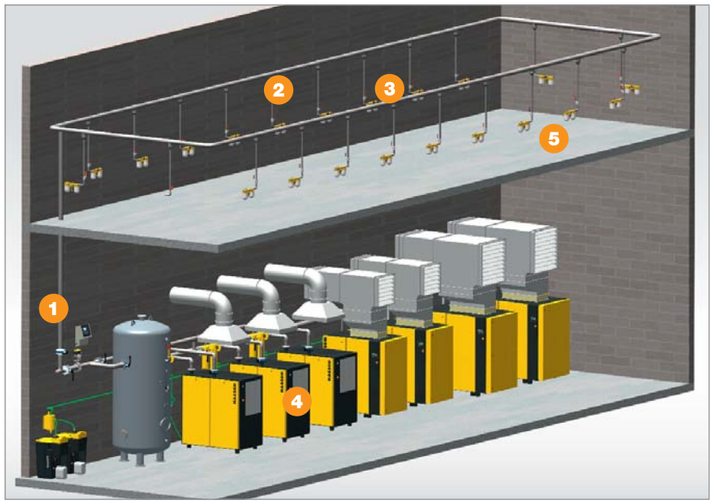


Fig. 2: Hovedbestanddelene i et trykluft-fordelingssystem: Hovedledning (1), fordelerledning (2), tilslutningsledning (3), tørrer (4), serviceenhed/slange (5)

b) Energibesparende føring af rørledninger

For at spare energi er det vigtigt at føre rørledningssystemet så lige som muligt. Bøjninger, eksempelvis rundt om støttepiller, kan undgås ved at føre rørledningen i en lige linje forbi forhindringen. Skarpe 90-graders hjørner, som forårsager store tryktab, kan ligeledes let erstattes med stort dimensionerede 90-graders bøjninger. I stedet for de hyppigt anvendte vandafspærringsenheder bør der i stedet anvendes kuglehaner eller klapventiler med fuldt gennemløb.

Tilnærmet formel:

$$d_i = \sqrt[5]{\frac{1{,}6 \times 10^3 \times V^{1{,}85} \times L}{\Delta p \times p_s}}$$

d_i = rørets indvendige diameter (m)
p_s = systemtryk (absolut i Pa)
L = nominel længde (m)
V = volumenstrøm (m^3/s)
Δp = tryktab (Pa)

Fig. 3: Tilnærmet formel til beregning af rørledningsdiametre

I det våde rørledningsområde - ved en moderne trykluftstation altså kun i kompressorrummet - skal ind- og udgangene fra hovedledningen føres opad eller som minimum til siden. Hovedrørledningen bør have et fald på to promille. Ved det laveste punkt i denne ledning skal der være en mulighed for at udskille kondensat. I det tørre område må ledningerne derimod gerne føres vandret, og rørledningsudgangene må føres direkte nedad.

c) Hvilket rørledningsmateriale er det rigtige?

Med henblik på materialeegenskaberne kan der her ikke gives bestemte anbefalinger, undtagen når det handler om kompressoren, så bør der på grund af den høje termiske belastning altid anvendes metalrør. Anskaffelsespriserne kan heller ikke bruges som eneste rettesnor i forhold til, hvilket materiale der skal vælges: Galvaniserede rør, kobber- og kunststofrør ligger på nogenlunde samme prisniveau, når materiale- og installationsomkostningerne lægges sammen. Priserne for rørledninger i rustfrit stål ligger rundt regnet 20 % højere. Mere effektive bearbejdningsmetoder har dog også her givet mulighed for lavere priser.

Der er efterhånden indtil flere producenter, som tilbyder tabeller, der viser de optimale betingelser for hvert enkelt rørmateriale. Inden der tages endelig stilling til investeringerne er det derfor en god ide at granske disse tabeller nøje, at tage højde for belastningerne i den fremtidige drift og derefter udarbejde en liste over krav til rørledningerne. Kun på den måde kan man træffe et virkelig godt valg.

d) Vigtigt: den rigtige forbindelsesteknik

Rørledningsdele bør forbindes indbyrdes enten ved svejsning eller klæbning eller ved skruning og klæbning. Selvom det gør det vanskeligere at løsne forbindelserne igen, sikrer man til gengæld, at sådanne forbindelser reducerer eventuelle lækager til et minimum.

Kapitel 10

Sanering af trykluftnet

I mange virksomheder forsvinder der hvert år tusindvis af euro bogstavelig talt op i den blå luft. Årsagen er et forældet og/eller mangelfuldt vedligeholdt rørledningsnet, som får trykluftsystemets energibehov til at stige voldsomt. Hvis man ønsker at komme denne mangel til livs, skal man gå velovervejet til værks. Her får du nogle tips til korrekt sanering af trykluftrørledningsnet.

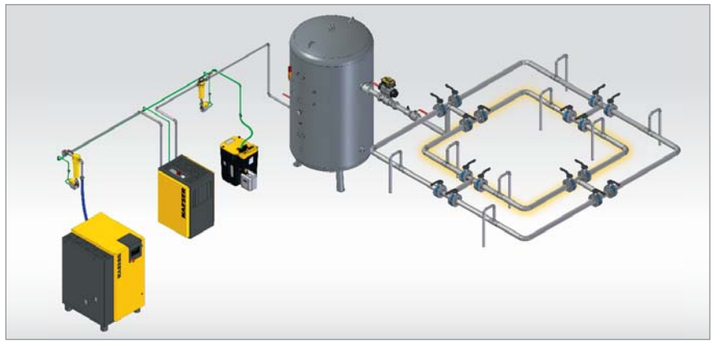


Fig. 1: Sanering af en trykluftrørledning gennem installation af en ekstra ledningsring

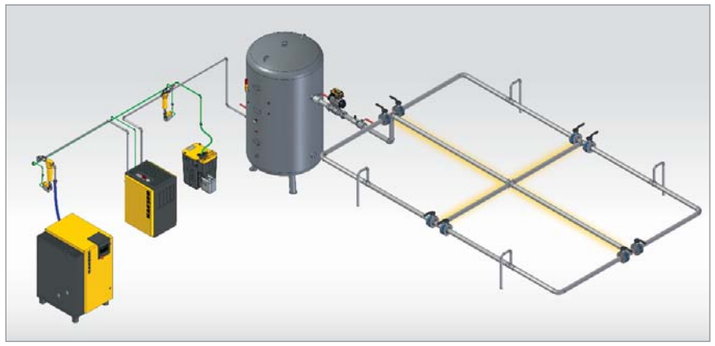


Fig. 2: Udvidelse af ledningskapaciteten med krydsende rør

1. Grundlæggende forudsætning: tør trykluft

Under planlægningen af et nyt trykluftnet kan man på forhånd undgå mange fejl og dermed forbundne efterfølgende problemer. Saneringen af et gammelt rørledningsnet er derimod ofte forbundet med vanskeligheder. Det vil især være et håbløst projekt, hvis der fortsat ledes fugtig trykluft ind i nettet. Inden saneringen påbegyndes, bør der således under alle omstændigheder være en central tørreenhed til rådighed.

2. Hvad hjælper ved for stort trykfald i nettet?

Hvis trykfaldet i ledningsnettet er meget stort, også efter at der er installeret en passende behandlingsenhed, skyldes det aflejringer i rørene. Disse aflejringer dannes som følge af urenheder, der føres med af trykluften, og som har reduceret strømningstværsnittet til et minimum.

a) Udskiftning eller udblæsning

Hvis disse aflejringer allerede har dannet skorpe, vil problemet i de fleste tilfælde kun kunne afhjælpes ved at skifte de pågældende rørledninger ud.

Hvis aflejringerne endnu ikke har forårsaget større indsnævringer, vil det ofte være muligt at forstørre strømningstværsnittet ved at blæse rørene igennem og derefter tørre dem.

b) Installation af supplerende rør

En rigtig god løsning til udvidelse af stikledninger, der er blevet for snævre, er at trække en parallelledning, som er forbundet med stikledningen. Ved ringledninger, der er blevet for snævre, kan det ligeledes være hensigtsmæssigt at trække en ekstra ring **(fig.1)**.

Hvis et sådant dobbeltstik- eller dobbeltringledningssystem er dimensioneret korrekt, kan man ud over den tilsigtede hovedeffekt – mærkbar reduktion af tryktab – samtidig opnå fordelen ved en endnu mere driftssikker trykluftfordeling.

En anden saneringsmulighed for ringledninger består i at udvide systemet med krydsende rør **(fig. 2)**.

3. Konstatering og afhjælpning af lækager

Saneringsforanstaltninger fører naturligvis kun til det optimale resultat, hvis lækager i trykluftnettet så vidt muligt afhjælpes.

a) Konstatering af den samlede lækagemængde

Inden man begynder at søge efter enkelte utætte steder i rørledningssystemet, skal den samlede lækagemængde først bestemmes. Dertil findes en enkelt metode: Først slukkes for alle trykluftforbrugere, hvorefter kompressorens indkoblingstider måles i et bestemt tidsrum **(fig. 3).** Ud fra denne måling kan lækagemængden beregnes ud fra følgende formel: Signaturforklaring:

$$VL = \frac{VK \times \sum t_x}{T}$$

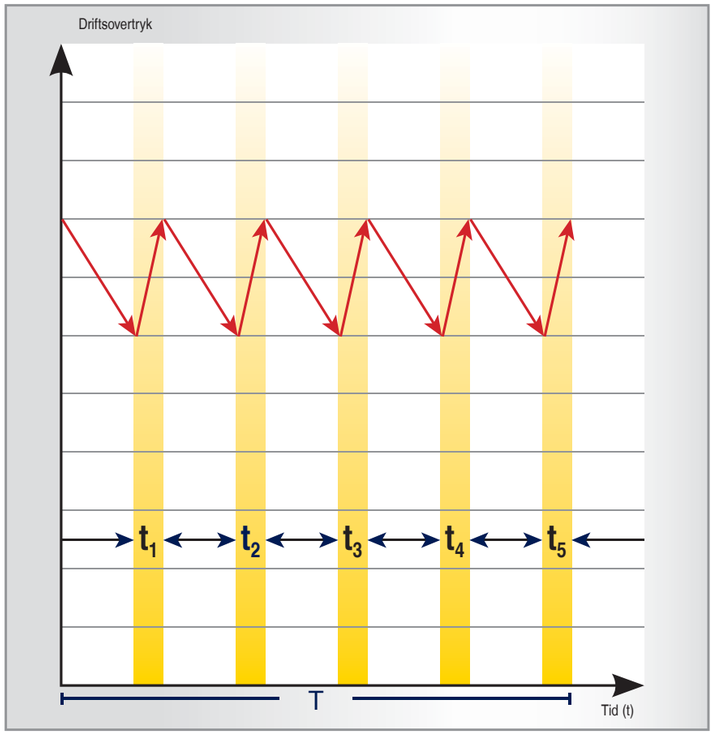


Fig. 3: Beregning af lækager gennem måling af kompressorens indkoblingstider ved frakoblede trykluftforbrugere

VL = lækagemængde (m³/min)
VK = kompressorens volumenstrøm (m³/min)
$\sum t_x = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5$
den tid, hvori kompressoren har kørt med belastning (min)
T = samlet tidsrum (min)

b) Beregning af lækagerne ved forbrugerne

For at beregne lækagerne på decentrale trykluftforbrugere tilslutter man først alle pneumatiske værktøjer, maskiner og apparater og måler summen af alle lækager **(fig. 4)**. Derefter lukker man afspærringsventilerne foran forbrugernes tilslutninger og måler lækagerne i rørledningsnettet **(fig. 5)**.

Forskellen mellem samlet lækage og netlækage giver således tabene ved luftforbrugerne, deres armaturer og fittings.

4. Hvor findes de fleste lækager?

Erfaringsmæssigt findes omtrent 70 % af lækagerne i de sidste meter, det vil sige ved trykluftnettets luftaftapningssteder. Disse lækager ved luftaftapningsstederne kan lokaliseres præcist ved hjælp af sæbevand eller specialspray. Hovedrørledninger har normalt kun mange og store lækager, hvis eksempelvis et oprindeligt fugtigt net, som er udstyret med gamle hamptætninger, kører med tør trykluft, og disse tætninger efter et stykke tid tørrer ud. Til præcis lokalisering af lækager i hovedrørledningsnettet anbefales at anvende ultralydsudstyr. Når lækagerne til slut er konstateret og afhjulpet, og rørledningstværsnittene er tilpasset det aktuelle trykluftbehov, er det gamle net (igen) blevet et rentabelt trykluftfordelingssystem.

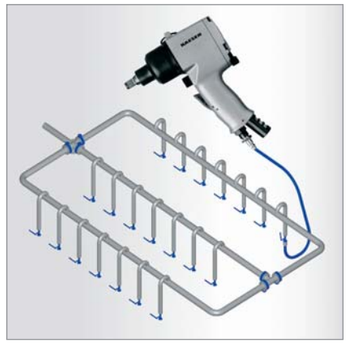


Fig. 4: Lækagemåling af trykluftforbruger + rørledningsnet

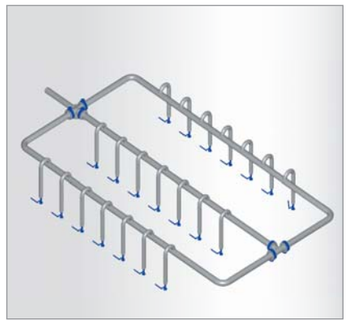


Fig. 5: Lækagemåling af rørledningsnettet

Kapitel 11

Trykluft-behovsanalyse (ADA): Konstatering af den FAKTISKE situation

Moderne trykluftstationer er oftest komplekse systemer. Det skal der tages højde for ved nyplanlægning, udvidelse og modernisering af trykluftstationen, hvis den skal kunne køre virkelig rentabelt. Dertil tilbyder KAESER et omfattende servicekoncept. Det forener velkendte elementer som f.eks. trykluftkomponenter, brugerrådgivning og -service med nye informationsteknologiske muligheder inden for tryklufteknik.

Spektret af trykluftbrugere spænder meget vidt. En afgørende forudsætning for effektiv trykluftanvendelse inden for de mange forskellige områder er en sikker og pålidelig produktions- og behandlingsteknik. Den skal levere billig trykluft i en præcist defineret mængde og kvalitet.

1. Rådgivning bestemmer over rentabilitet

Et trykluftsystem, som opfylder disse krav, skal være præcist tilpasset formålet samt opstillingsforholdene og de omgivende betingelser. Det betyder, at det skal være udstyret med korrekt dimensionerede kompressorer, behandlingsudstyr og rørledninger samt en effektiv styring, passende udluftningsteknik og kondensatbehandling. Derudover bør det så vidt muligt også inddrage muligheden for varmegenvinding. Alt dette kan "KAESER-energi-spare-system" (KESS) leve op til. Det omfatter trykluftbehovsanalyse, planlægning **(fig. 1),** realisering, videreuddannelse og kundeservice.

Det afgørende er her kvaliteten af rådgivningen og valget af den rigtige teknik: Det største sparepotentiale finder man nemlig inden for energibehov og vedligeholdelse og ikke inden for anskaffelse.

2. Trykluft-behovsanalyse

Udgangspunktet for enhver KESS-konsultation er en analyse af det nuværende og eventuelt fremtidige trykluftbehov. Denne undersøgelse, der hos KAESER går under navnet ADA (analyse af trykluftudnyttelsen), tager højde for forskellige rammebetingelser alt efter behov:

a) Planlægning af en ny trykluftforsyning

Til planlægning af en ny trykluftstation modtager den fremtidige ejer et specielt dimensioneringsspørgeskema **(fig. 2)**. Ved hjælp af dette spørgeskema er det muligt sammen med en erfaren trykluftrådgiver fra KAESER at beregne det forventede trykluftbehov og det dertil nødvendige udstyr. Spørgsmålene dækker alle vigtige aspekter i forhold til en rentabel og miljøvenlig trykluftforsyning.

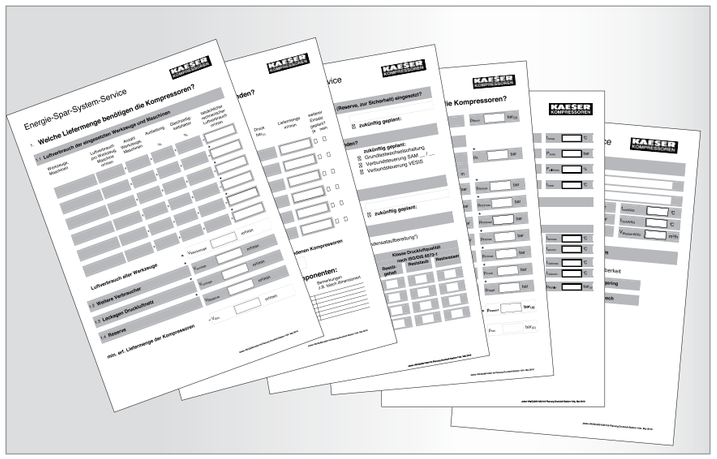


Fig. 2: Spørgeskema "Trykluftstation" til registrering af nye og gamle anlæg (se også bilag, side 56 f.)

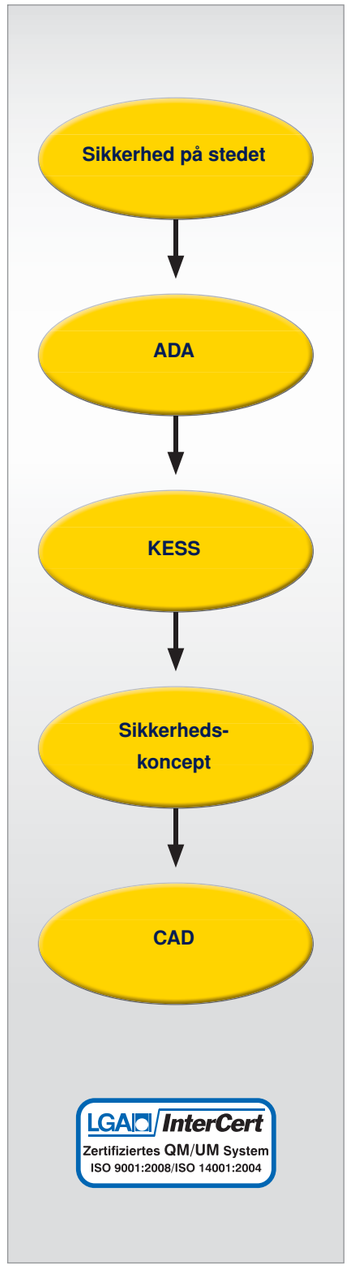


Fig. 1: Systemet til trykluftanalyse fra KAESER Kompressoren

b) Udvidelse og modernisering

Anderledes end ved nye projekter indeholder udvidelsesprojekter allerede tilstrækkelige oplysninger til en behovstilpasset dimensionering. KAESER stiller forskellige målemetoder og -udstyr til rådighed for brugeren, så trykluftbehovet i de pågældende dele af virksomheden kan måles præcist på forskellige tidspunkter. Her er det vigtigt ikke kun at finde frem til gennemsnitsværdier, men til præcise maks.- og min.-værdier **(fig. 8, side 29)**.

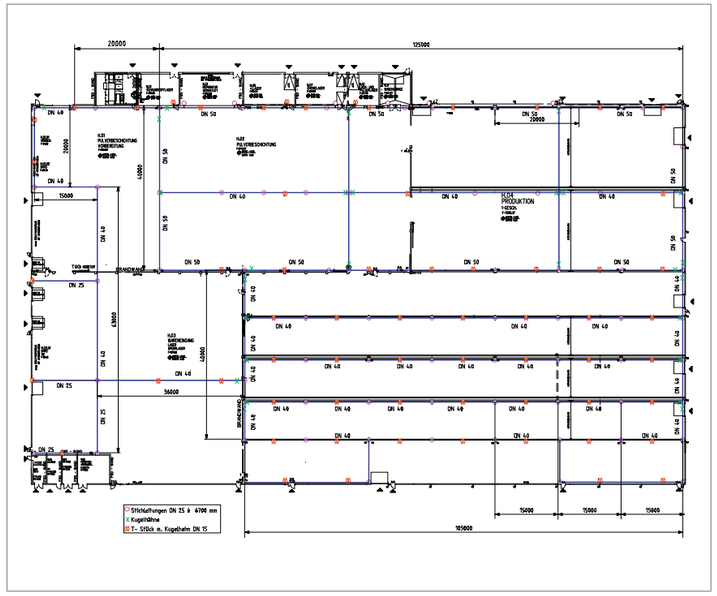


Fig. 3: En virksomheds grundplan med trykluft-rørledningssystem

c) Kontrol af effektiviteten hos eksisterende stationer

Også ved eksisterende stationer anbefaler vi, at man med jævne mellemrum ved hjælp af et computerunderstøttet analysesystem undersøger, om kompressorerne (stadig) belastes korrekt, hvorvidt de overordnede maskinstyringer ikke (længere) er programmeret korrekt, og om lækageraten stadig bevæger sig inden for toleranceområdet. ADA bør også anvendes, når gamle kompressorer skiftes ud med nye. Det giver mulighed for at skifte evt. fejlbehæftede dele ud med fejlfrie dele, at forbedre kompressorernes driftsreaktioner (dellastområde!) og integrere en optimeret overordnet maskinstyring.

d) Ændrede trykluft-anvendelsesbetingelser

Også ved ændringer i anvendelsesbetingelserne bør man spørge en fagmand til råds. I mange tilfælde vil man nemlig ved hjælp af tilpasset behandlingsteknik eller tryktilpasning kunne opnå store omkostningsbesparelser.

3. Oplysninger fra ejeren

a) Grundplan

Til generel orientering skal ejeren stille en grundplan til rådighed **(fig. 3)** .
Her bør hovedtrykluftledningen, forbindelsesledningerne og trykluftstationens indfødningspunkter være tegnet ind.
Derudover kræves oplysninger om rørledningens dimensionering og materialer samt om stederne med hovedtrykluftforbrug samt aftapning af luft med særligt tryk og særlig kvalitet.

b) Trykluftens anvendelsesformål

Da trykluft er et særdeles alsidigt medium, er detaljerne vedrørende anvendelsesformålene absolut nødvendige: Anvendes trykluften f.eks. som styreluft, i forbindelse med overfladecoating, til roterende værktøjer, til rengøringsformål, som procesluft osv.?

c) Installerede kompressorer

Ud over kompressortyper og -udførelser er det også vigtigt at oplyse kompressorernes tekniske data som f.eks. driftstryk, kapacitet, indgangseffekt, køletype og evt. varmegenvinding.

d) Trykluftbehandling

Ved trykluftbehandlingen er det vigtigt, om behandlingen sker centralt og/eller decentralt, og hvilke kvalitetsklasser der kræves. Komponenternes tekniske data skal naturligvis også oplyses. Et flowdiagram giver et godt overblik **(fig. 4, side 28)**.

e) Anlægsstyring/-overvågning

Da det ud over de enkelte kompressorers egenskaber især er deres samspil, der har afgørende betydning for en stations rentabilitet, må en beskrivelse af styrings- overvågningsteknikken ikke mangle.

Trykluft-behovsanalyse (ADA): Konstatering af den FAKTISKE situation

4. Samtale ejer/ trykluftekspert
Når alle oplysninger er på plads, bør trykluftesperten i en forudgående samtale i første omgang blive introduceret til alle dokumenter og få forklaret, hvilke trykluftproblemer der foreligger. Det kunne f.eks. være et for lavt eller svingende trykniveau, mangelfuld luftkvalitet, dårlig udnyttelse af kompressorerne eller problemer med kølingen.

5. Inspektion af trykluftsystemet
Det mest informative er i reglen en inspektion af trykluftsystemet direkte på stedet. Her anbefaler vi at starte i den kritiske zone, hvor der eksempelvis kan forventes kraftige trykfald eller dårlig trykluftkvalitet **(fig. 5)**. Erfaringsmæssigt er det oftest ved luftaftapningsstederne.

a) Tilslutningsslanger, trykreduktionsventil, vandudskiller
Det er især slangeforbindelserne til luftforbrugerne, som ofte er ramt af lækager. De skal derfor kontrolleres for skader og utætheder. Hvis der er installeret trykreduktionsventiler, skal deres indstilling (tryk før og efter) ligeledes kontrolleres med belastning **(fig. 6)**.

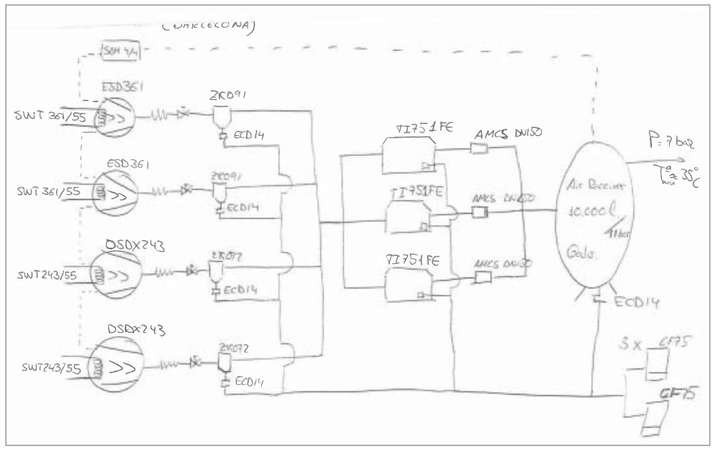


Fig. 4: Håndtegnet flowdiagram af en trykluftstation

Vandudskillere, der er installeret før trykreduktionsventilerne, skal kontrolleres for eventuelle væsker og urenheder. Det samme gælder for afgangsledninger, der fører lodret nedad **(fig. 7)**.

b) Afspærringsanordninger
Tilstanden hos de forbindelsesledninger, der forgrener sig fra hovednettet, har en stor indflydelse på systemets effektivitet. Afspærringsanordningerne hører til blandt forbindelsesledningernes særligt sårbare punkter. Det skal derfor kontrolleres, om der er tale om eksempelvis strømningsgunstige kuglehaner med fuldt gennemløb eller drosselspjæld, eller om strømningsugunstige vandafspærringsarmaturer eller hjørneventiler.

c) Hovedrørledningsnet
Ved hovedrørledningsnettet drejer det sig først og fremmest om at finde frem til indsnævringer, der kan være skyld i trykfald.

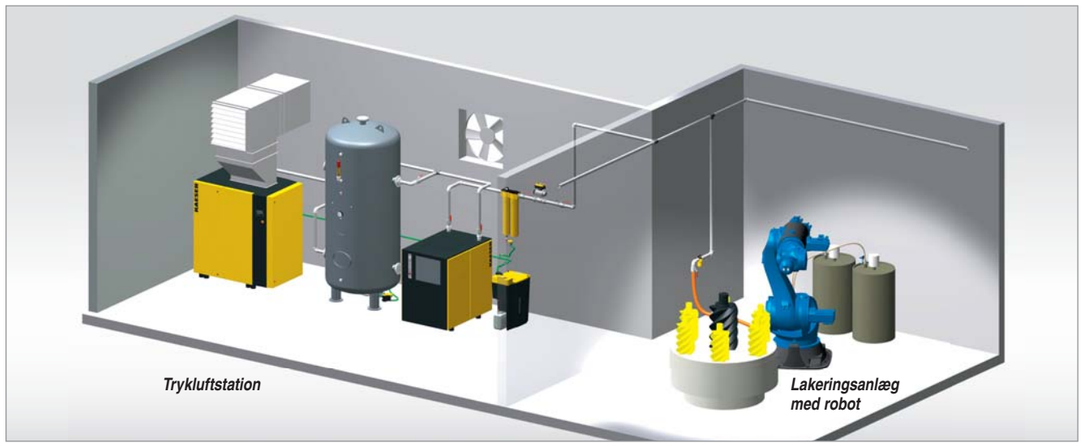


Fig. 5: Informativt: Inspektion af trykluftsystemet

Fig. 6: Serviceenhed med trykreduktionsventil

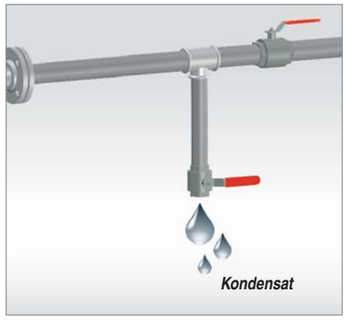


Fig. 7: Fugtighedskontrol af en trykluftafgangsledning

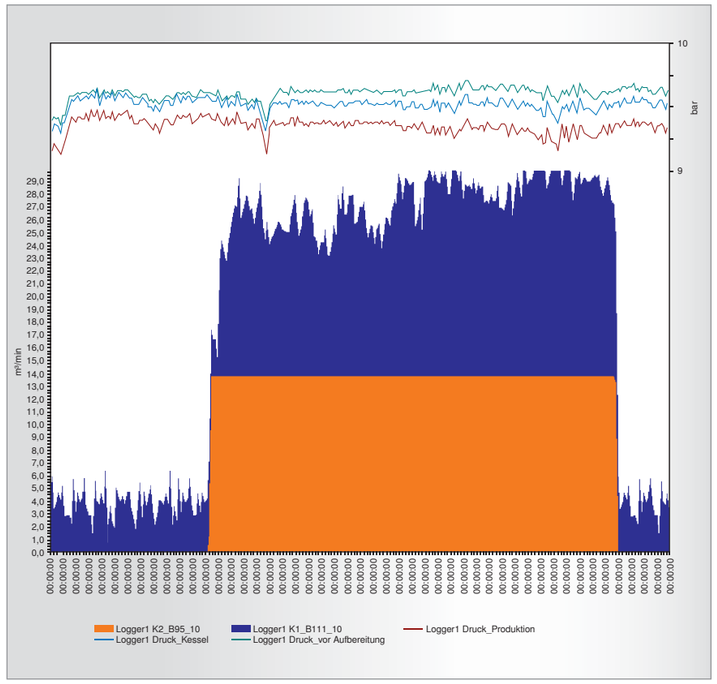


Fig. 8: En industrivirksomheds tryk- og trykluftforbrugsstruktur målt med ADA

d) Trykluftbehandlingssystem
Her er de vigtigste kontrolkriterier: det opnåede trykdugpunkt (tørhedsgraden) og det respektive forårsagede differencetryk. Alt efter anvendelsesformål kan det være nødvendigt med yderligere kvalitetskontroller.

e) Trykluftstation
Selve trykluftstationen kan naturligvis også være ramt af væsentlige mangler. Mere præcist skal opstillingen af maskinerne, udluftningssystemet og rørføringen kontrolleres. Derudover er det vigtigt at finde frem til kompressorernes samlede koblingstrykdifference, trykluftakkumulatorens størrelse og det målepunkt, hvorfra kompressorerne styres.

f) Fastlæggelse af målepunkterne
Efter inspektionen fastlægger trykluftesperten sammen med ejeren målepunkterne for forbrugsanalysen. Der skal som minimum foretages en trykmåling før og efter behandlingen samt ved trykluftnettets udgang.

6. Tryk- og luftforbrugsmåling (ADA)
Ved målingen af tryk og luftforbrug analyseres driften af trykluftstationen og hele systemet i mindst 10 dage ved hjælp af moderne dataloggerteknik. Dataloggeren registrerer de relevante måleværdier og overfører dem til en computer, der opretter et detaljeret forbrugsdiagram. Her kan man se trykfald, udsving i tryk og forbrug, tomgangsreaktioner, kompressorernes arbejds- og stilstandstider samt de enkelte kompressorers andel af det respektive trykluftforbrug. For at fuldende billedet er det vigtigt også at konstatere lækagerne under målingen. Dette gøres som beskrevet i **kapitel 10, (s. 24 f.)** og kræver blandt andet en målrettet afspærring af bestemte områder af trykluftnettet i løbet af weekenden.

Kapitel 12

Beregning af det mest rentable koncept

Med en konsekvent optimering af trykluftsystemerne ville der kunne spares mere end 30 % af de gennemsnitlige trykluftomkostninger i de europæiske industrivirksomheder. Den største omkostning udgøres af energibehovet med en andel på ca. 70 til 90 %. Set i forhold til prisudviklingen bliver det stadig vigtigere for brugerne at finde frem til det mest effektive trykluftkoncept.

Ved hjælp af optimeringsberegningen i KAESER-energi-spare-system (KESS) kan man ud fra flere trykluftforsyningsvarianter hurtigt finde frem til den model, der egner sig bedst for den pågældende virksomhed. Ved planlægningen af et nyt anlæg bygger beregningerne på det udfyldte dimensioneringsspørgeskema. Ved eksisterende kompressorstationer bruges analysen af trykluftudnyttelsen (ADA) for en typisk dag som beregningsgrundlag **(se s. 29, fig. 8)**.

1. Computerunderstøttet beregning
Til optimering af en station indtastes de tekniske data for de installerede kompressorer og mulige nye varianter i computeren. KESS beregner derefter den optimale variant og mulighederne for at reducere omkostningerne. Her beregnes ikke blot det punktuelle energiforbrug ved et bestemt trykluftbehov inklusive tabseffekt.

Det er rent faktisk muligt at få et præcist billede af kompressorstationens specifikke ydelsesreaktioner i hele driftstiden **(fig. 1)**. På den måde kan man allerede på forhånd konstatere og afhjælpe svage steder i dellastområdet. Som samlet resultat får man et klart og entydigt udsagn om den mulige omkostningsbesparelse og amortiseringen.

2. Det handler om blandingen
Det er ofte en præcist tilpasset konfiguration af kompressorer med forskellig kapacitet, der viser sig at være den bedste løsning. Den består i reglen af store grundlast- og standby-maskiner, kombineret med mindre spidslastmaskiner.
Det er den overordnede maskinstyrings opgave at sørge for et så afbalanceret specifikt effektbehov som muligt. Dertil skal den automatisk kunne vælge den til enhver tid gunstigste kombination af grund- og spidslastkompressorer – for op til 16 kompressorer i et trykudsvingsområde på blot 0,2 bar. Dette krav opfyldes af intelligente styresystemer som SIGMA AIR MANAGER. Denne styring kan via et bussystem udveksle data med kompressorer og andre komponenter som f.eks. kondensatafledere, tørrere osv. Derudover kan den sluttes til et centralt styringsanlæg og overføre alle driftsoplysninger til dette centrale styreanlæg.

3. Byggeteknisk optimering
Både ved modernisering og planlægning af en ny kompressorstation bør de rumlige forhold udnyttes optimalt. Moderne planlægningssystemer, som dem KAESER bruger, giver her værdifuld hjælp og støtte. De inddrager ikke blot grundplantegninger og flowskemaer men også computergenerede 3-D-fremstillinger og -animationer i planlægningsprocessen. Således er det f.eks ofte muligt at anvende rentabel luftkøling på trods af snævre rumforhold. På den måde kan der spares ca. 30 til 40 % af omkostningerne i forhold til vandkøling. **(Fig. 2a til c)**.

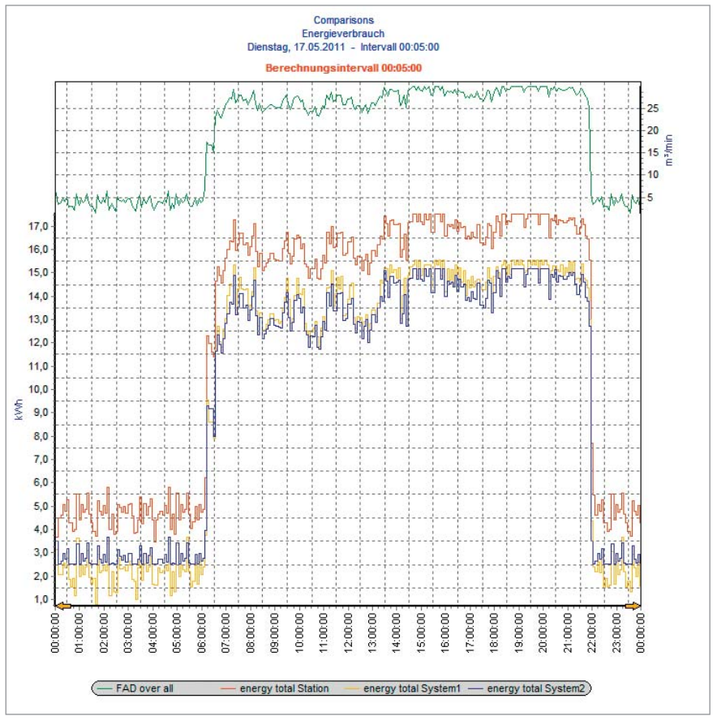


Fig. 1: Sammenligning mellem energiforbruget for en eksisterende trykluftstation og nye anlægsvarianter i løbet af en dag afhængigt af trykluftbehovet

4. Driftsoptimering og controlling
For at sikre trykluftforsyningens rentabilitet på lang sigt kræves ikke blot et optimeret cost-benefit-forhold, men også tilstrækkelig gennemsigtighed til at kunne gennemføre en effektiv controlling. Grundlaget herfor er kompressorreguleringen SIGMA CONTROL, en industri-pc med fem programmerede styringsarter og mulighed for at indsamle data og give dem videre til et datanet. På det overordnede reguleringsniveau svarer det til endnu en industri-pc, den allerede nævnte SIGMA AIR MANAGER **(side 18)**. Ud over optimeret regulering og overvågning af stationen har den også til opgave at indsamle alle relevante data og give dem videre til et computernet (Ethernet). Det kan ske via internettet eller via styreteknik-softwaren SIGMA CONTROL CENTER. SIGMA AIR MANAGER tilbyder ved hjælp af visualiseringssystemet SIGMA AIR CONTROL en oversigt over alle stationens kompressorer og deres vigtigste driftsoplysninger. Denne oversigt kan vises på en pc. På den måde kan man hurtigt finde ud af, om stationen arbejder fejlfrit, om der foreligger serviceanvisninger eller fejlhenvisninger, og hvor højt driftstrykket er.

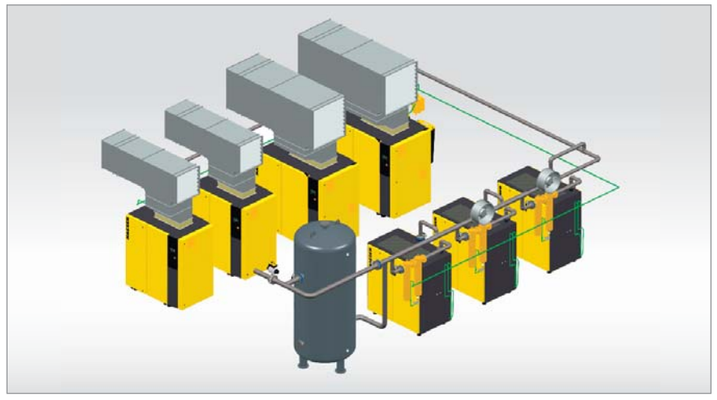


Fig. 2a: CAD-optimeret 3-D-planlægning af en trykluftstation

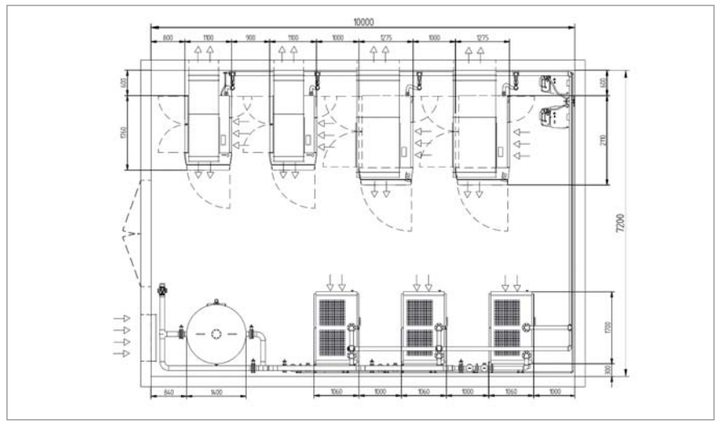


Fig. 2b: Grundplan af en trykluftstation

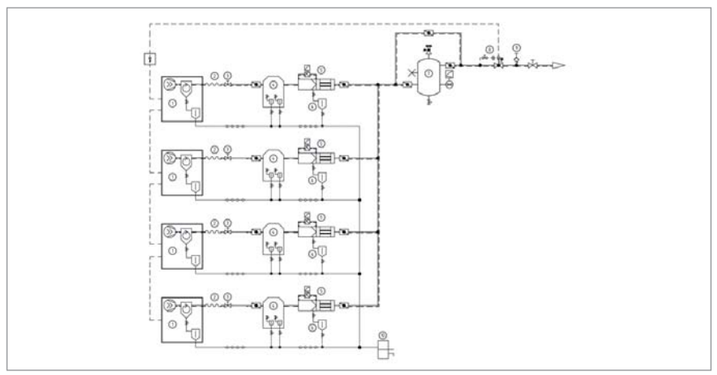


Fig. 2c: Flowskema for en trykluftstation

Kapitel 13

Effektiv køling af trykluftstationen

Kompressorer omdanner 100 % af den elektriske energi, de får tilført, til varme. Allerede en relativt lille 18,5-kW-kompressor leverer som biprodukt så meget varme, at den kan opvarme et helt parcelhus. Effektiv køling er derfor en absolut nødvendighed for, at en trykluftstation kan arbejde fejlfrit.

Den overskudsvarme, der produceres af kompressorerne, kan udmærket bruges til energibesparelser. Ved hjælp af varmegenvindingssystemer kan der genvindes op til 96 % af den anvendte energi, hvorved omkostningerne til trykluftproduktion kan reduceres betydeligt **(se kapitel 8, s. 20 f.)**.

Men også trykluftanlæg med varmegenvinding kræver et fuldgyldigt kølesystem, hvormed der ligeledes kan spares mange penge. Således kan omkostningerne til luftkøling være op til 30 % lavere end omkostningerne til vandkøling. Derfor er luftkøling så vidt muligt at foretrække.

1. Kompressorernes omgivelser

1.1 Rent og køligt er bedst

I de tyske ulykkesforebyggende forskrifter VBG 16 ("13.4 Kompressor", § 12, afsnit 1) står der følgende: "Kompressorer skal opstilles på en sådan måde, at de er tilstrækkelig let tilgængelige, og at den nødvendige køling af sikret." Gennemførelsesbestemmelserne henviser til, at de omgivende temperaturer ved luft- og oliekølede anlæg ikke bør overskride +40 °C.

Derudover indeholder § 15 følgende anvisning: "... der må ikke frisættes farlige tilsætningsstoffer i kompressorernes indsugningsområde." Dette er minimumskrav med det formål at reducere ulykkesrisikoen så meget som muligt. Til en rentabel og vedligeholdelsesvenlig kompressordrift hører dog langt mere end det.

Eksempel på en trykluftstation med afgangsluftsystem og termostatstyret ekstra ventilation for køletørrerne

1.2 Kompressorrummet er ikke et pulterkammer

Et kompressorrum er ikke et pulterkammer. Det skal holdes frit for uvedkommende apparater, støv og andre urenheder. Gulvet bør så vidt muligt være slidstærkt. Der må under ingen omstændigheder indsuges køleluft – eller luft, der er beregnet til komprimering – fra omgivelser, der er forurenet med støv, sod eller lignende uden intensiv filtrering. Selv under normale driftsbetingelser skal kompressorernes indsugnings- og køleluft renses med filtre.

1.3 Veltempereret klima

Temperaturforholdene har også en betydelig indflydelse på kompressorers driftssikkerhed og vedligeholdelsesbehov: Indsugnings- og køleluften må hverken være for kold (<+3 °C) eller for varm (>+40 °C)*. Selv i områder med et relativt mildt klima kan der om sommeren, når solen står direkte ind på syd- og undertiden også på vestsiden af fabriksbygninger, midlertidigt ske en kraftig luftopvarming med temperaturer over 40 °C. Vi anbefaler derfor ikke at placere åbninger til indsugnings- og køleluft på steder, hvor de kan være udsat for kraftigt sollys. Åbningernes størrelse afhænger af kompressorernes kapacitet og af ventilationsformen.

2. Ventilation af kompressorrummet

Både de luft- og de vandkølede kompressorer har brug for tilstrækkelig ventilation i kompressorrummet. Under alle omstændigheder er det vigtigt, at strålingsvarmen i kompressoranlægget og overskudsvarmen fra den elektriske drivmotor ledes bort – i alt ca. 10 % af kompressorens drivkraft.

3. Forskellige ventilationsformer

3.1 Naturlig ventilation

Køleluften suges ind af kompressoren, hvorefter den varmes op, stiger op og på grund af undertrykket forlader rummet via en afgangsåbning foroven **(fig. 1)**. Så enkelt er det dog kun sjældent og kun ved kompressorydelser under 5,5 kW. For blot direkte sollys eller vind, der blæser ind mod afgangsåbningen, kan sætte en stopper for denne naturlige ventilation.

3.2 Kunstig ventilation

Denne metode arbejder med ført køleluftstrøm. En termostatstyring forhindrer, at temperaturen falder til under +3 °C i den kolde årstid. For lave temperaturer ville påvirke kompressorernes funktionsevne samt kondensatafledningen og -behandlingen. Styringen via termostater er nødvendig, da der ved kunstig ventilation i kompressorrummet hersker et vist undertryk, som forhindrer, at opvarmet luft strømmer tilbage i rummet. Der findes to muligheder:

3.2.1 Ventilation med ekstern ventilator

En ekstern ventilator, der er installeret i kompressorrummets afgangsluftåbning, og som er udstyret med termostatstyring, **(fig. 2)** suger den opvarmede luft væk. Her er det vigtigt, at indsugningsåbningen ikke bliver dimensioneret for lille (nederst til højre), da der ellers ville opstå et for højt undertryk ledsaget af en kraftig og støjende luftstrøm. Derudover ville kølingen af stationen blive truet. Ventilationen skal være dimensioneret således, at temperaturstigningen som følge af kompressorens overskudsvarme ikke overstiger 7 K. Ellers er der risiko for en varmekortslutning, og for at kompressorerne svigter.

3.2.2 Ventilation med afgangsluftkanal

Helkapslede skruekompressorer giver mulighed for en næsten ideel ventilationsvariant via afgangsluftkanal: Kompressoren suger indgangsluften ind via en åbning og afgiver opvarmet afgangsluft til kanalen, som fører den direkte ud af kompressorrummet **(fig. 3)**. Fordelen er, at køleluftstrømmen kan varmes kraftigere op - til ca. 20 K. Derved reduceres den nødvendige mængde køleluft. Normalt er de ventilatorer, der er monteret som standard i kompressorerne, tilstrækkelige til at kunne transportere afgangsluften bort. I modsætning til ventilation med ekstern ventilator kræves således ikke ekstra energi. Dette gælder dog kun, når ventilatorernes resttryk ikke overskrides. Derudover skal afgangsluftkanalen være udstyret med et termostatstyret cirkulationsspjæld **(fig. 4)** for at forhindre, at kompressorrummet køles for meget ned om vinteren. Hvis der også er opstillet luftkølede tørrere, skal der ligeledes tages højde for det: Kompressor og tørrer må ventilationsteknisk set ikke påvirke hinanden indbyrdes. Ved temperaturer over + 25 °C anbefaler vi desuden at øge køleluftgennemstrømningen ved hjælp af et termostatstyret afgangsluftsystem for køletørreren.

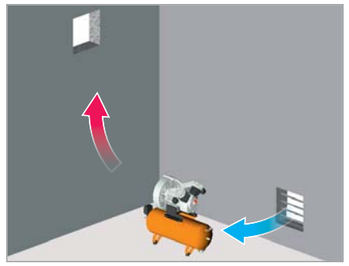


Fig. 1: Naturlig ventilation for anlæg op til 5,5 kW

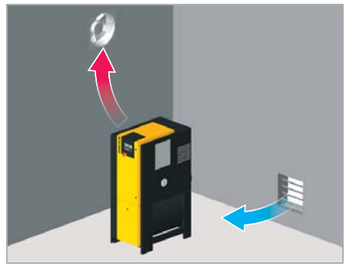


Fig. 2: Kunstig ventilation med ventilator for anlæg fra 5,5 til 11 kW

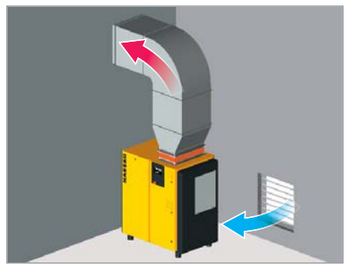


Fig. 3: Kunstig ventilation med afgangsluftkanal – til anlæg fra 11 kW

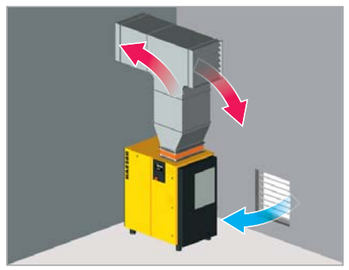


Fig. 4: Et termostatstyret cirkulationsspjæld sørger for temperaturudligning

Kapitel 14

Driftssikkerhed og omkostningsoptimering - også på lang sigt

På side 22 til 33 kan du læse, hvad du skal være opmærksom på ved installationen af nye og saneringen af eksisterende trykluftnet, og hvordan planlægningen af en effektiv kompressorstation bør se ud. Energi- og omkostningsbevidst planlægning og udførelse er dog langt fra nok. Hvis man vil sikre rentabiliteten af sin trykluftforsyning på lang sigt, skal man først og fremmest sørge for en effektiv drift af trykluftsystemet.

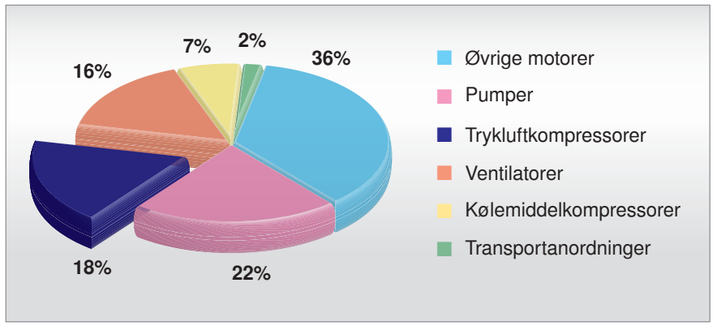


Fig. 1: Trykluftkompressorernes andel af energiforbruget fra industrielt anvendte elektriske drev i EU (kilde: SAVE II (2000))

En stor trykluftеffektivitet er en gevinst for brugeren på hele tre måder: Forsyningssikkerheden er større, og trykluftomkostningerne og energiforbruget er betydeligt lavere. Effektivitetspotentialet er højt: I henhold til EU-studiet "SAVE II" forbrugte de europæiske trykluftkompressorer 80 milliarder kWh i år 2000. Heraf ville mindst 30 % kunne spares væk **(fig. 1)**.

1. Hvad betyder optimal rentabilitet?

Et trykluftsystems rentabilitet genspejles i dets omkostningsstruktur. Hvad, der er det bedst opnåelige resultat, er forskelligt alt efter virksomhed og produktion. Afgørende faktorer er kompressorernes driftstider, trykniveauet samt andre kommercielle parametre. Her er et eksempel på et optimeret system med luftkølet trykluftstation: Driftstid 5 år, strømpris 8 cent/kWh, rentesats 6 %, 7 bar driftsovertryk, trykluftkvalitet iht. ISO 8573-1: Restolie klasse 1, reststøv klasse 1, restvand klasse 4. Eksemplet viser: Også under optimale betingelser udgør energiforbruget med rundt regnet 70 % den største del af de samlede trykluftomkostninger **(fig. 2)**.

FH Coburg udarbejdede i 2003 et studie vedrørende iøjnefaldende forhold ved trykluftstationer installeret i Tyskland (fig. 3, s. 35).

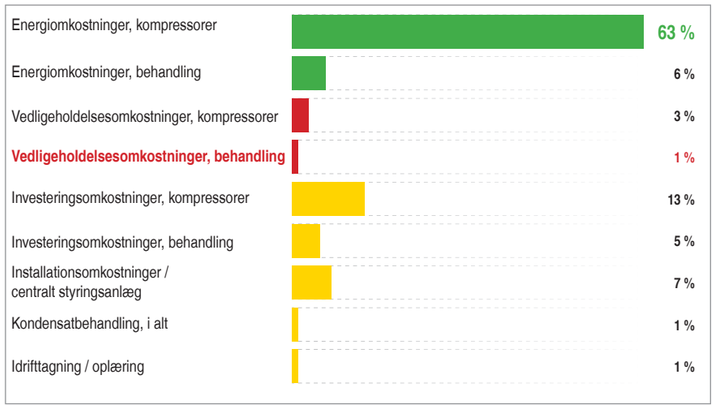


Fig. 2: Omkostningsstruktur for et optimeret trykluftsystem

2. Bevarelse af rentabiliteten

Hvis man ønsker en trykluftforsyning, der også er rentabel på lang sigt, er der nogle vigtige punkter, man bør være opmærksom på:

2.1 Behovsorienteret vedligeholdelse

Interne kompressorstyringer som "SIGMA CONTROL" og trykluftstyringssystemer som "SIGMA AIR MANAGER 2" på industri-pc-basis giver præcise oplysninger om vedligeholdelsesintervallerne for komponenterne i en trykluftstation. På den måde er det muligt at udføre vedligeholdelsesarbejderne behovsstyret og forebyggende. Resultatet er lavere vedligeholdelsesomkostninger, bedre rentabilitet og sikkerhed i trykluftforsyningen og dermed også i virksomhedens produktion.

2.2 Anvendelse af passende forbrugere

Det er ikke kun på producent- men også på forbrugersiden, at man kan spare de forkerte steder: Ved f.eks. at købe produktionsmaskiner, der ganske vist er billige i anskaffelse, men som har brug for et højere driftstryk. Den dermed nødvendige trykøgning og/eller udvidelse af trykluftsystemet vil hurtigt overgå meromkostningerne til anskaffelse af en maskine, som kan klare sig med et lavere driftstryk på f.eks. 6 bar. Derfor bør der udstikkes retningslinjer for køb af produktionsmaskiner, som ikke blot tager højde for spændingsforsyningen men også inddrager trykluftforsyningen.

2.3 Ændrede produktionsbetingede krav

2.3.1 Trykluftforbrug

a) Ændring af produktionen

Forbrugsudsving er et tema mange steder. Det får dog ofte alt for lidt opmærksomhed. Og efter en ændring af produktionen kan det derfor ske, at kompressorerne i det ene skiftehold pludselig kører langt under belastning, mens der i et andet skiftehold er så stort et trykluftbehov, at også sikkerhedsreserverne bliver brugt op. Trykluftforsyningen skal derfor altid tilpasses de ændrede produktionsstrukturer.

b) Udvidelse af produktionen

I dette tilfælde er det ikke blot kompressorydelserne, men også rørledningerne og trykluftbehandlingen, som skal tilpasses de ændrede betingelser. Hvis produktionskapaciteten skal øges ved et etablere endnu et anlæg, svarende til et man har i forvejen, anbefaler vi at udføre en måleteknisk registrering af trykluftforbruget i det eksisterende anlæg for at få så detaljerede oplysninger som muligt og dermed kunne tilpasse forsyningen optimalt.

2.3.2 Forsyningssikkerhed

Ved trykluftstationer er det helt normalt, at man har en standby-kompressor. I trykluftbehandlingen giver man derimod ofte afkald på sikkerhedsreserver. Hvis forbruget stiger, starter standby-kompressoren ganske vist, men som følge af manglende behandlingskapacitet vil trykluftkvaliteten bliver forringet. Derfor

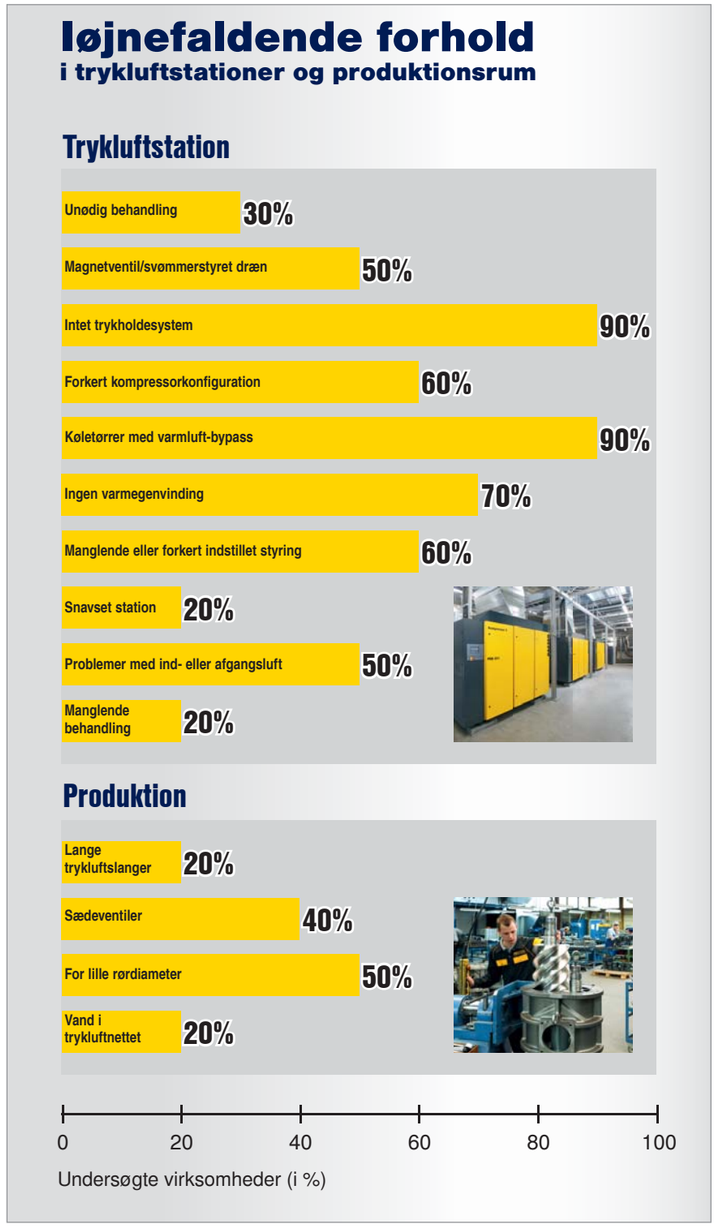


Fig. 3: Original - se resultatanalysen for de af KAESER KOMPRESSOREN udførte Air-auditeringer for kampagnen "Trykluftеffektiv". Kandidatafhandling Anja Seitz, Fachhochschule Coburg, Fachbereich Maschinenbau (2003)

Driftssikkerhed og omkostningsoptimering - også på lang sigt

bør der for hver standby-kompressor også installeres en behandlingsenhed (tørrer/filter).

2.3.3 Ændring af trykluftkvaliteten

Hvis der bliver brug for en højere trykluftkvalitet, er det vigtigt at skelne, om dette vedrører hele produktionen eller blot et delområde. I førstnævnte tilfælde er det ikke tilstrækkeligt blot at udvide den centrale trykluftbehandling. De rørledninger, der hidtil har transporteret trykluft i en ringere kvalitet, skal rengøres eller skiftes ud. I sidstnævnte tilfælde anbefales en separat behandling, som leverer den krævede trykluftkvalitet. For at sikre denne kvalitet skal der installeres en flowbegrænser.

Ellers ville behandlingen kunne blive "kørt over" af en for stor trykluftmængde, da behandlingsenheden naturligvis ikke er dimensioneret til kompressorens maksimalt mulige kapacitet.

Fig. 4: Lokalisering af lækager med ultralyd

2.4 Overvågning af lækager

Man kan støde på lækager i alle trykluftnet - uanset hvor godt de er vedligeholdt. Disse lækager kan undertiden resultere i betydelige energitab. Hovedårsagen er slitage på værktøj, skruesamlinger og maskinkomponenter **(fig. 4)**.

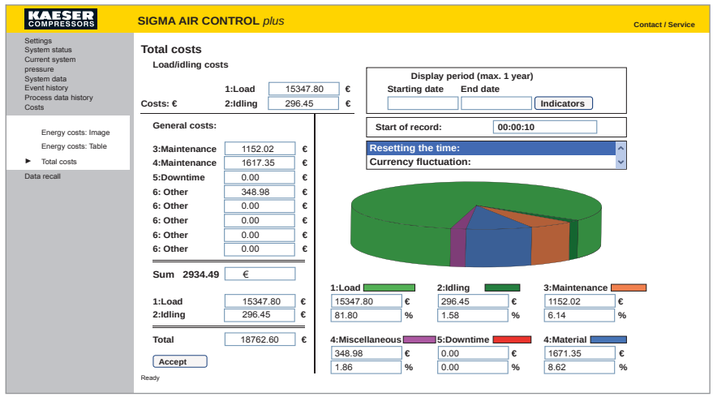


Fig. 5a: Managementsystem: Trykluftomkostningsanalyse (webbaseret)

Derfor er det vigtigt at være opmærksom på sådanne mangler og sørge for at afhjælpe fejlene. Derudover er det en god ide med jævne mellemrum at finde frem til de samlede lækager f.eks. ved hjælp af SIGMA AIR MANAGER. Hvis der konstateres en øgning, skal lækagestederne findes og afhjælpes.

3. Omkostningsstyring sikrer rentabilitet

De oplysninger, der i forbindelse med planlægningen er fremkommet gennem analyse er - i opdateret form - også interessant for den senere drift. Der kræves nu ingen særskilt analyse for at indhente disse oplysninger. Denne opgave bliver overtaget af systemer som f.eks. "SIGMA AIR MANAGER". Det skaber grundlaget for trykluftauditeringer og effektiv trykluftomkostningsstyring **(fig. 5a til e)**. Jo flere brugere, der bringer gennemskuelighed ind i deres trykluftregnskab, finder energisparepotentiale og ved anskaffelsen af trykluftkomponenter sætter energieffektivitet i højsædet, desto tættere kommer alle medvirkende målet om at reducere energiforbruget inden for trykluftproduktion med 30 % eller mere – til gavn for både virksomhedsregnskaberne og miljøet.

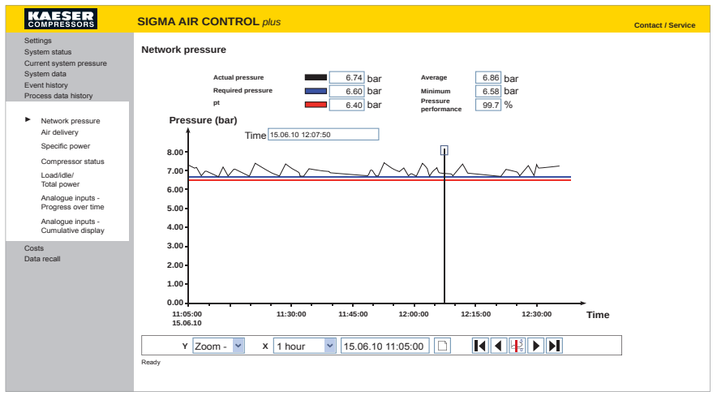


Fig. 5b: Trykforløb

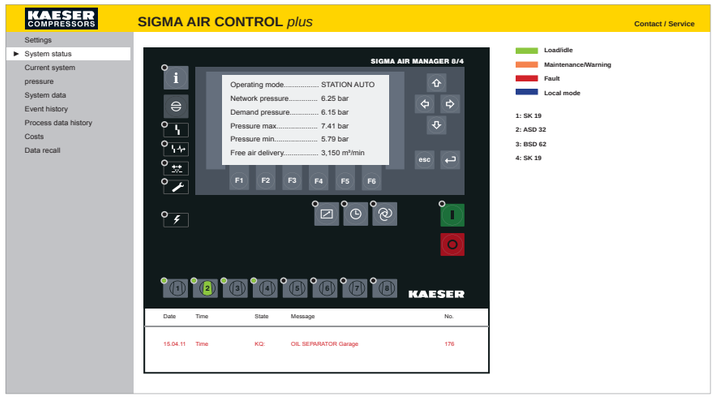


Fig. 5c: Oversigt: Styring og managementsystem

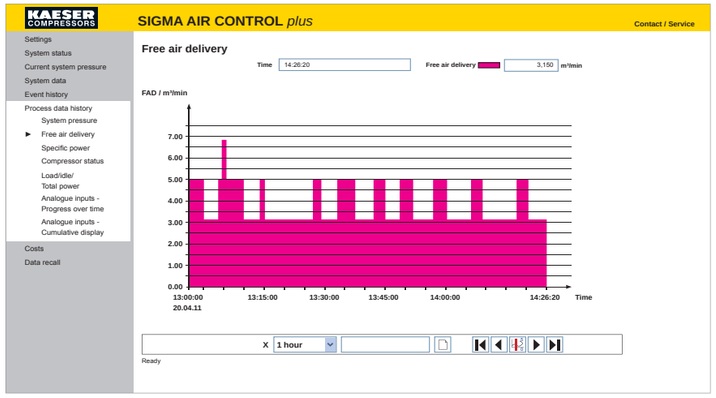


Fig. 5d: Trykluftforbrug

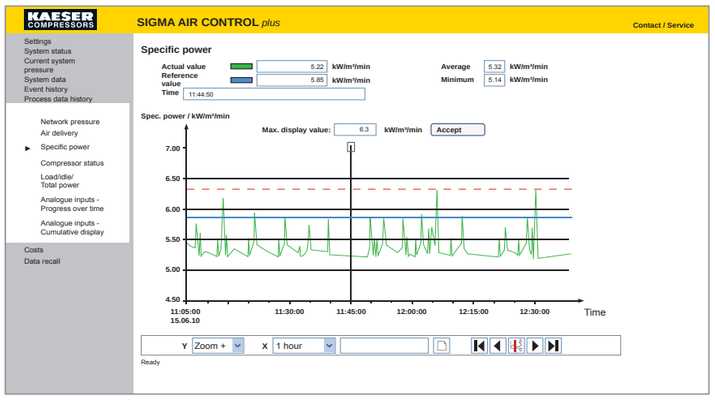


Fig. 5e: Specifikt effektbehov

Praktiske tips

Tip 1 - 7

40-51

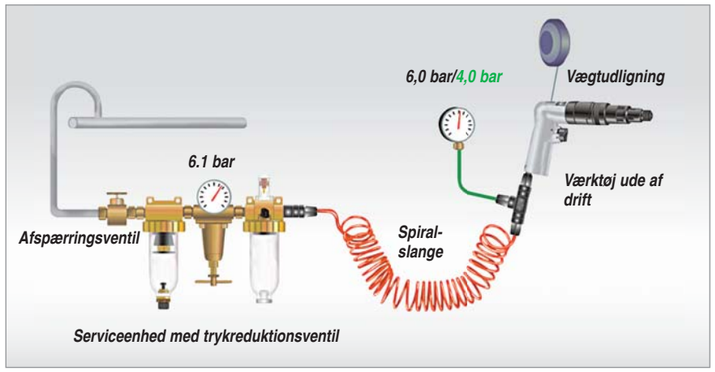
KAESER KOMPRESSORER

Tip 1

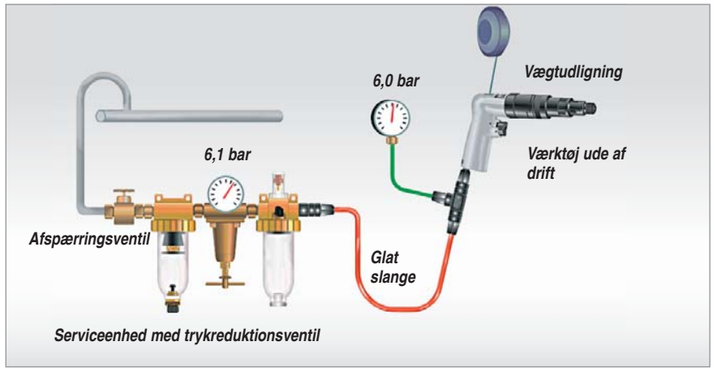
Besparelser med optimalt tryk

Et trykluftsystems rentabilitet afhænger ikke mindst af det rigtige driftsovertryk. Selv små foranstaltninger har her ofte en stor virkning.

Ofte ser integrationen af trykluftværktøjerne ud på følgende måde: Når arbejdet hviler, er der ved serviceenheden et tryk på 6,1 bar og 6,0 bar ved værktøjet. Dette tryk er dog ikke lig med trykket ved trykluftforbrug.



Værktøjstilslutning med spiralslange – tryk 6,0 bar ved et trykluftforbrug på nul.
4,0 bar ved arbejdende værktøj = 2 bar trykfald ved arbejdende værktøj: resterer en ydelse på kun 54 %!



Vandudskillere og spiralslanger er energifrådsere: Tør i stedet trykluften centralt, og brug glatte slanger

Trykfald ved værktøjet – hvad kan der gøres?

Trykmålingen vil ved arbejdende værktøj ofte vise et betydeligt trykfald. I dette eksempel er trykket 2 bar; det vil sige, at værktøjet kun leverer 54 % af dets mulige ydelse.
Årsagerne er ofte lette at afhjælpe:

a) For lille tilslutningstværsnit: Brug en lynkobling med større gennemstrømning.

b) Forkert indstillet trykreduktionsventil: Åbn mere.

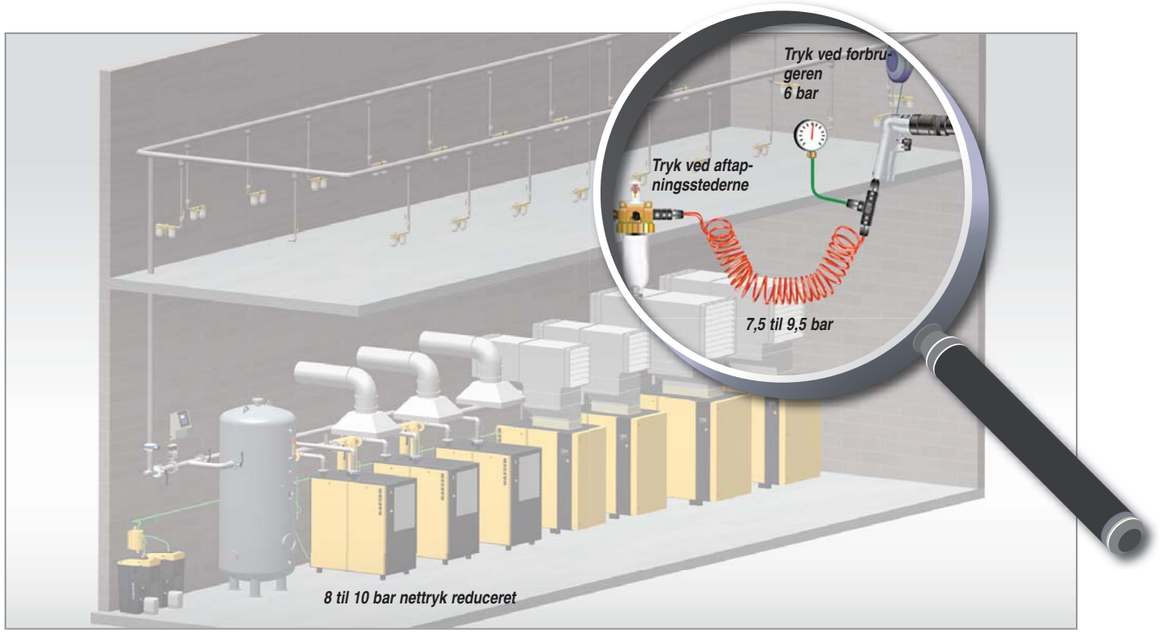
c) For lavt systemtryk: Øg trykket i hovednettet, eller installer rørledninger med større tværsnit.

d) For lille spiralslange: Brug en større spiralslange eller – endnu bedre – en glat slange.

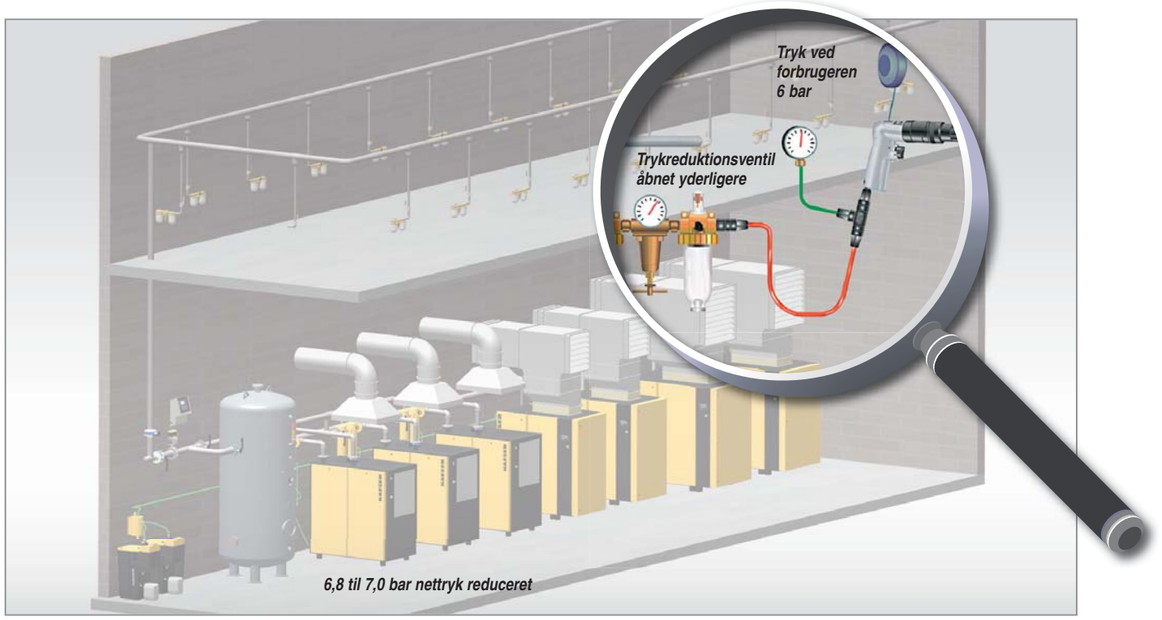
e) Trykfald i den decentrale vandudskiller: Tør trykluften centralt (udskiller overflødig).
Med disse foranstaltninger er det muligt at nå det optimale tryk ved værktøjet (her 6 bar). Værktøjet vil så kunne yde 100 %.

Spar energi – med den rigtige indstilling

Trykreduktionsventiler påvirker trykluftefficiteten langt mere end det ofte antages. I dette eksempel har trykluftsystemet et tryk på 8 til 10 bar. Trykket på 7,5 til 9,5 bar ved aftapningsstederne reduceres til 6 bar ved hjælp af trykreduktionsventiler. For at spare energi reduceres systemtrykket til 6,8 til 7 bar. Der vil således være et tryk på 6,1 bar ved netaftapningsstederne og kun 4 bar ved værktøjerne. Konsekvenserne er længere arbejdsvarighed, fejlbehæftede arbejdsresultater som følge af for lavt tryk ved værktøjet og længere kompressorfunktionstider. Den tilstræbte besparelse kan dog uden problemer nås, hvis man ikke blot reducerer systemtrykket, men samtidig anvender glatte slanger, fjerner overflødige vandudskillere og åbner trykreduktionsventilerne ved forbrugerne yderligere.



Rent energispild: Komprimere for kraftigt og derefter reducere trykket ved forbrugeren ...



... i stedet: Sænk systemtrykket, og åbn trykreduktionsventilen yderligere

Tip 2

Korrekt tryk ved lufttilslutningen

Trykket i kompressorstationen er egentlig korrekt, men der når alligevel for lidt tryk frem til luftforbrugerne. Hvad skyldes det?

Det er ikke sjældent, at det er slanger, lynkoblinger eller trykreduktionsventiler, der er "synderne". Men ofte er trykket allerede for lavt ved aftapningsstedet fra nettet. Af oprindelige 6,8 til 7 bar kan der således måske kun være sølle 5 bar tilbage til forbrugerne.

Modgiften er ofte hurtigt fundet: "Så indstiller vi bare trykket i stationen 1 bar højere, det er lige meget!" Men det er lige her, det begynder at blive kritisk, for hver bar højere tryk øger ikke blot kompressorstationens energibehov med 6 %, men øger også lækageraten betydeligt.
Derfor er det langt mere hensigtsmæssigt at finde frem til årsagerne og i stedet afhjælpe disse.

Fejlkilde rørledningsnet
Hvis trykket umiddelbart efter kompressoren er korrekt, og de efterkoblede behandlingskomponenter ikke reducerer trykket ret meget, kan fejlen kun ligge i rørledningsnettet. Det er inddelt i tre afsnit: Hovedledning, fordelerledning og tilslutningsledning **(fig.1)**. I et optimeret trykluftsystem er følgende trykfald økonomisk forsvarlige:

Hovedledning (1):	0,03 bar
Fordelerledning (2):	0,03 bar
Tilslutningsledning (3):	0,04 bar
Hertil kommer:	
Tørrer (4):	0,2 bar
Serviceenhed/slange (5):	0,5 bar
I alt:	**0,8 bar**

Fjernelse af "flaskehalse"
Ved nærmere eftersyn viser det sig ofte, at hoved- og fordelerledningerne ganske vist er tilstrækkeligt dimensioneret, men at tilslutningsledningerne er for snævre. Rørdiameteren bør ikke være mindre end DN 25 (1“).
På sin hjemmeside tilbyder KAESER KOMPRESSOREN et værktøj til præcis måling af tværsnittet:

www.kaeser.dk/Online-service/Toolbox/Pressure drop
Derudover kan man også gøre brug af et specielt **nomogram**. Det finder du i **bilag 1, s. 54 f**.

Sørg for korrekt tilslutning
For at undgå driftsforstyrrelser og skader som følge af fugtdannelse bør forbindelsen mellem fordelings- og tilslutningsledning være udført som strømningsgunstig "svanehals" **(fig. 2)**: Kun når det er 100 % sikkert, at der ikke forekommer kondensvand i rørledningen, kan der også vælges en direkte rørafgang nedad **(fig. 3).**
Den optimerede tilslutning med et trykfald på maks. 1 bar mellem kompressorens trykluftudgang og luftforbrugeren vil så se ud som vist på **side 40.**

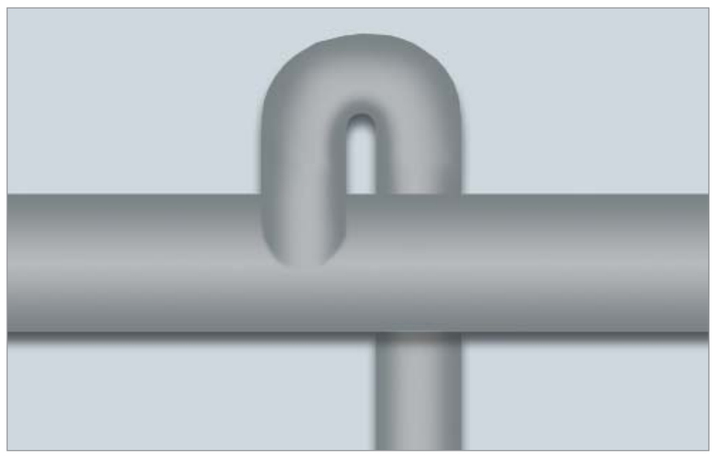


Fig. 2: Svanehals

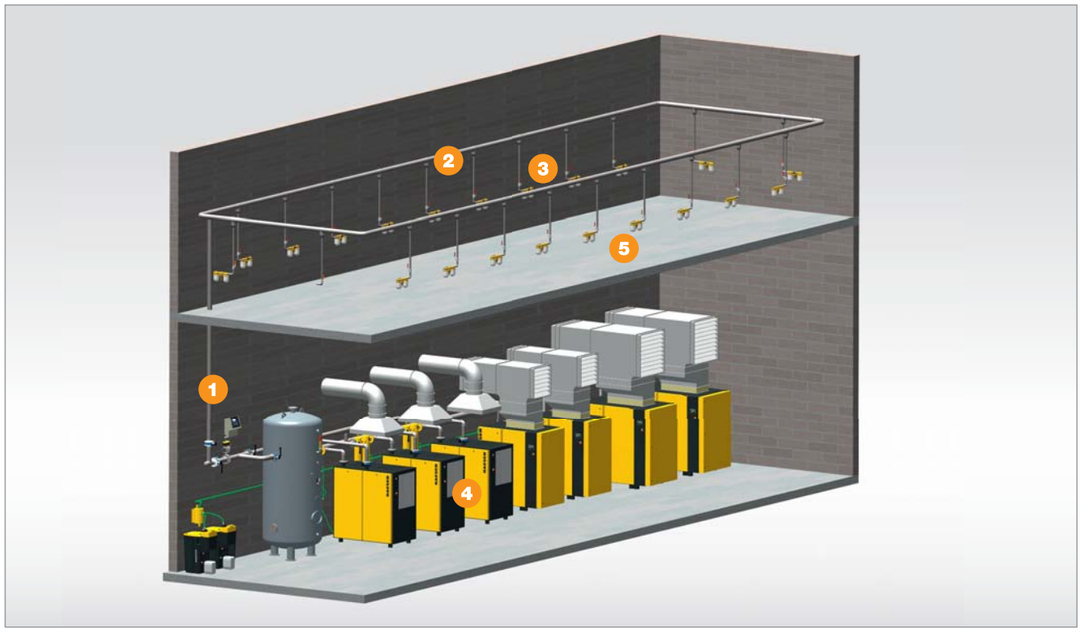


Fig. 1: Hovedbestanddelene i et trykluft-fordelingssystem: Hovedledning (1), fordelerledning (2), tilslutningsledning (3), tørrer (4), serviceenhed/slange (5)

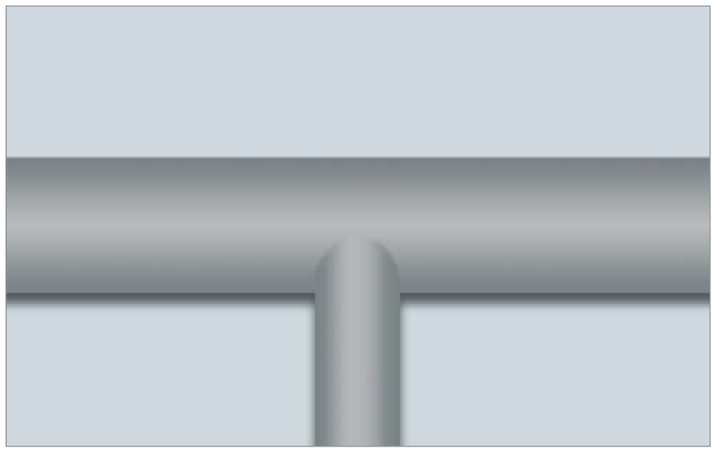


Fig. 3: Direkte rørafgang

Tip 3

Effektiv fordeling af trykluften

Hvilken af de tre former for fordeling af trykluften i virksomheden – stikledning, ringledning, netværk – som er den bedste, afhænger af de faktiske forhold på virksomheden. Hvis man ønsker en rentabel udnyttelse af trykluften, skal man ikke blot sørge for energibesparende produktion af trykluften, men også for en så effektiv fordeling i virksomheden som muligt. Hvordan du gør det, kan du få at vide her.

Stikledning

Installation af en stikledning med afgange til de enkelte trykluftforbrugere **(fig. 1)** er relativt let. Den rørlængde, der skal føres, er ganske vist relativt kort, men den har brug for tilstrækkelig transportkapacitet til hele luftforbruget. Det betyder, at rørenes tværsnit skal være langt større sammenlignet med ringledning eller netværk. Tilslutningsledningerne til forbrugerne er også længere som følge af de større afstande og skal derfor også dimensioneres større. Da der desuden ikke er mulighed for, at blokere dele af rørledningssystemet i forbindelse med udvidelses- eller saneringsarbejder, er stikledningssystemer oftest kun anvendelige i små virksomheder.

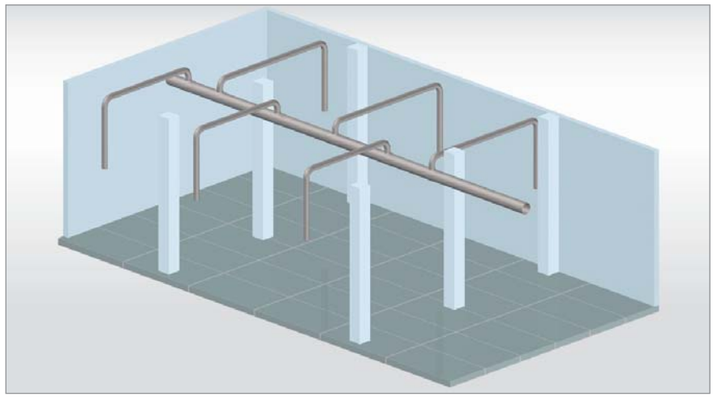


Fig. 1: Trykluft-stikledning

Ringledning

Ringledninger **(fig. 2)** har på trods af større installationsomkostninger en afgørende fordel set i forhold til stikledninger: Hvis der hele vejen igennem er tale om forbrugere med lige stort trykluftbehov, kan rørledningslængder og -volumener dimensioneres halvt så store. Derfor er det tilstrækkeligt med mindre rørtværsnit til samme transportkapacitet. De korte tilslutningsledninger dimensioneres sjældent til mere end DN 25. Et tilstrækkeligt antal afspærringsenheder gør det muligt at lukke for enkelte ledningsafsnit, så der kan udføres sanerings- og udvidelsesarbejder, uden at skulle slukke for hele trykluftsystemet.

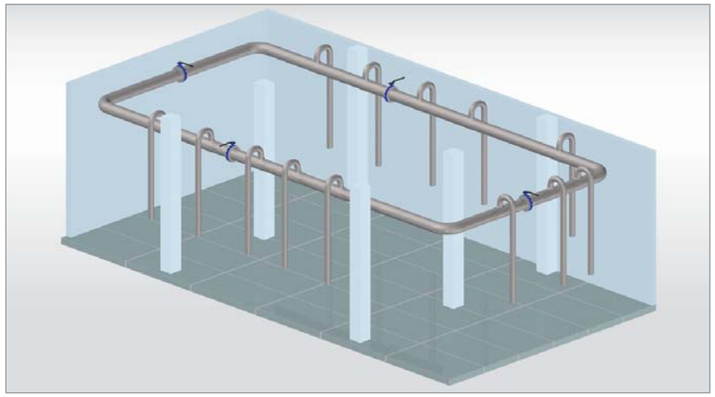


Fig. 2: Trykluft-ringledning

Netværk

Til virksomheder, der strækker sig over et relativt stort areal, anbefaler vi et rørledningsnet - dvs. en ringledning, der er udvidet til en netstruktur med forbindelser på langs og på tværs (krydsende rør) **(fig. 3)**. Denne metode indebærer ganske vist de største installationsinvesteringer, med det opvejes af fordelene: Takket være netstrukturen kan store fabrikshaller sikkert og energieffektivt forsynes med trykluft, uden at rørledningernes dimensioner udarter. Tværtimod: På grund af netstrukturen kan man her – ligesom med ringledningen i de små og mellemstore virksomheder – holde dimensionerne nede i relativt små størrelser. Dette system kan også lukkes delvist af ved hjælp af afspærringsenheder, såfremt det skulle være nødvendigt.

Dimensionering af hovedledning(er)

Trykluftsystemets hovedledning forbinder fordelerledningerne i de enkelte driftsområder (bygning) med trykluftstationen (produktion).
Det er de anvendte kompressorers samlede kapacitet, der er afgørende for dimensioneringen af tryklufthovedledningen. Den er bestemmende for ledningens mål og kapacitet. Tryktabet bør ikke komme op over 0,03 bar.

Forsyning med én station

Hvis en trykluftstation forsyner flere driftsområder (produktionshaller), skal de tilsvarende hovedledninger for de enkelte områder dimensioneres til det enkelte områdes maksimale trykluftbehov (tryktab < 0,03 bar). Rørledninger, der i trykluftstationen er samlet i en rørledningssamler, har den fordel at kunne lukke for trykluftforsyningen til hele driftsområder, såfremt der skulle være behov for det. Ved hjælp af indbyggede volumenstrøm-måleapparater er det desuden let at finde frem til luftforbruget i de enkelte områder **(fig. 4)**.

Forsyning med flere stationer

Hvis to eller flere trykluftstationer forsyner et stort hovedledningssystem, skal dette systems rørledninger dimensioneres på en sådan måde, at den største stations maks. kapacitet kan nå frem til alle driftsområder. Tryktabet mellem de enkelte stationer bør ikke være højere end 0,03 bar. Ellers ville det være nødvendigt med dyre reguleringssystemer
(fig. 5).

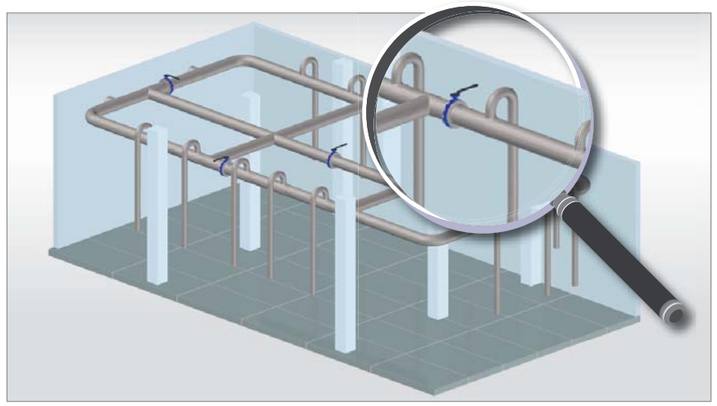


Fig. 3: Trykluft-ledningsnet med krydsende rør

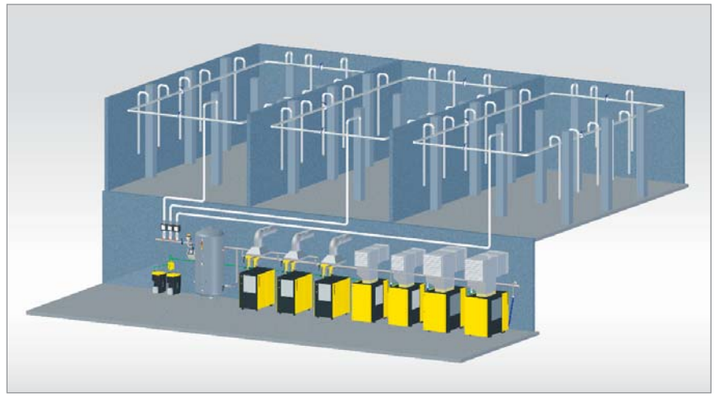


Fig. 4: Trykluftforsyning med en central trykluftstation til flere produktionsområder

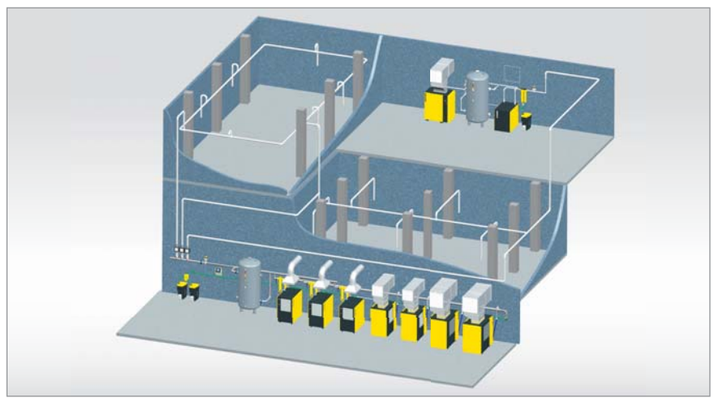


Fig. 5: Trykluftforsyning med to stationer og central regulering til flere produktionsområder

Tip 4

Rørledninger i trykluftstationen

Ud over at fordele trykluften rundt i virksomheden har rørledningerne også til opgave at integrere kompressorerne og trykluftstationens øvrige komponenter i det samlede system. For også her at opnå maksimal driftssikkerhed og effektivitet er der i forbindelse med installationen nogle vigtige punkter, der skal overholdes.

Generelt bør rørledningerne i trykluftstationen være dimensioneret på en sådan måde, at det trykfald, de forårsager, ved fuld effekt ligger under 0,01 bar. Derudover er det hensigtsmæssigt som følge af den ikke definerbare varmebelastning kun at anvende metalrør.

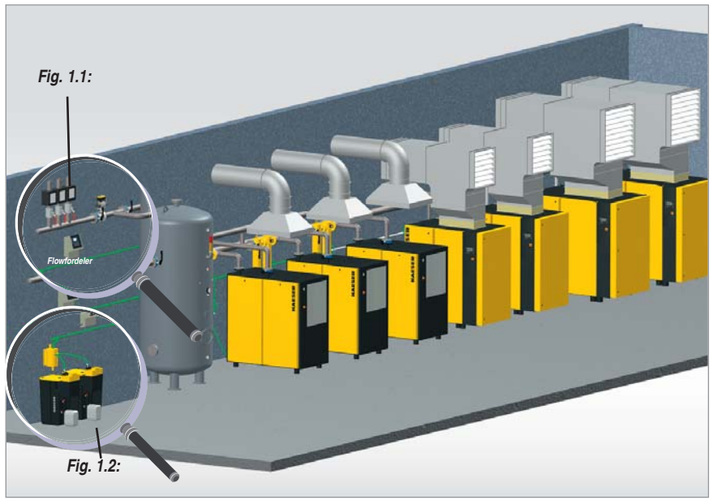


Fig. 1: Trykluftstation med rørledningssamler

Tilslutning af trykluft-fordelingsledninger
Til tilslutningen af rørledningerne i stationen til trykluftnettet anbefales et samlerør, hvor alle fordelingsledninger udgår fra **(fig. 1.1)**. Så vil man kunne spærre for forsyningen til bestemte driftsområder, såfremt det skulle være nødvendigt.

Installation i det våde område
I området med våd trykluft, det vil sige i rørafsnittene efter kompressorerne og før tørrerne, bør der så vidt muligt ikke installeres en vandlomme. Ellers skal rørledningen have et fald hen mod vandlommen og denne skal målrettet drænes via en kondensatafleder **(fig. 2)**.

Korrekt tilslutning af komponenter
I trykluftstationen skal de enkelte komponenter (kompressorer, tørrere osv.) altid forbindes med hovedledningen oppefra. Fra rørdiameter DN 100 kan de også sluttes til fra siden **(fig. 3 a/b)**.

Tilslutning af kompressorerne
For at undgå at overføre vibrationer, skal kompressorerne være elastisk forbundet med rørledningsnettet. Til rørdiametre < DN 100 kan der bruges slangeforbindelser **(fig. 4)**. Mellem slange og første rørbøjning placeres en fastgørelse, som optager kræfterne og dermed forhindrer, at de føres videre til røret **(fig. 4.1)**. Til rørdiametre > DN 100 skal der i stedet for en slange bruges aksialkompensatorer **(fig. 3b)** til den elastiske tilslutning af kompressoren til rørledningsnettet.

Sikker fjernelse af kondensat
Sikker fjernelse af det kondensat, der dannes, er en grundlæggende forudsætning for trykluftstationens optimerede drifts- og forsyningssikkerhed. Her handler det om at undgå fejl, især ved føringen af kondensatledningerne.

Trods moderne afledningsteknik føres tilslutningsledningerne til kondensatbehandlingssystemet ofte forkert. Hvis man derimod overholder **følgende tips**, vil man ikke begå disse fejl, men være på den sikre side:

Afspærring af kondensatafleder
Kondensatafledere bør kunne spærres af i begge ender ved hjælp af en kuglehane, så de i forbindelse med vedligeholdelse uden problemer kan fjernes fra systemet **(fig. 2.1)**.

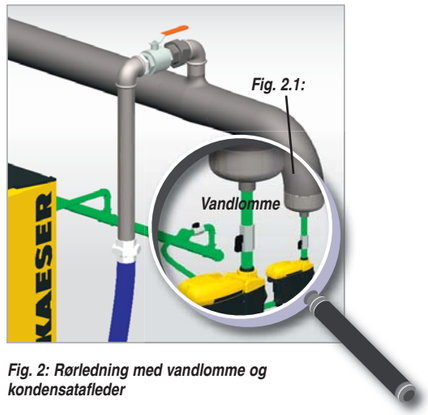


Fig. 2: Rørledning med vandlomme og kondensatafleder

Korrekt tilslutningsstørrelse
Tilslutningen til samlerøret skal være mindst 0,5 tommer. Kun på den måde kan man undgå unødvendigt dynamisk tryk.

Tilslutning oppefra
Kondensatledningerne bør sluttes til samlerøret oppefra, så afledningssteder ikke kan påvirke hinanden gensidigt **(fig. 3a (1))**.

Ledning uden tryk – med fald
Kondensatsamleledningen skal under alle omstændigheder føres med frit fald. Den bør derudover være uden tryk. Det er kun i en sådan ledning, at kondensatafledere fra forskellige systemkomponenter (cyklonudskiller, trykluftbeholder, køletørrer, trykluftfilter) med forskelligt trykniveau må udlede kondensat. Hvis det ikke er muligt, skal der anvendes forskellige tilslutningssteder på kondensatbehandlingsenheden ("Aquamat").

Flere behandlingsenheder
Hvis det på grund af de mængder kondensat, der dannes, er nødvendigt med flere behandlingsenheder, skal hovedkondensatledningen sluttes til via en flowfordeler **(fig. 1.2)**.

Systemtryk over 15 bar
Ved systemer med et trykniveau over 15 bar skal der installeres et separat højtryksaflastningskammer inden udledningen af kondensatet i behandlingsenheden.

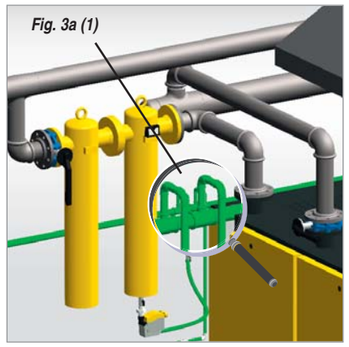


Fig. 3a: Tilslutning af køletørrer og kondensatafleder (oppefra)

Fig. 3b: Elastisk kompressortilslutning med aksialkompensatorer

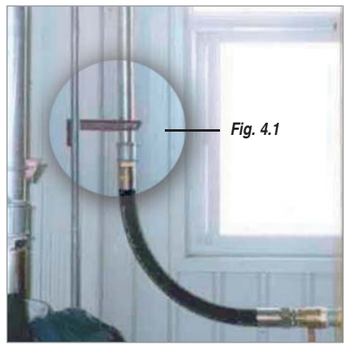


Fig. 4: Elastisk kompressortilslutning med en slange

Tip 5

Korrekt opstilling af kompressorer

Opstillings- og omgivelsesbetingelser påvirker trykluftproduktionens rentabilitet og driftssikkerhed. Her handler det først og fremmest om at overholde tre bud.

1. Hold stationen ren
Mange trykluftstationers renhed og vedligeholdelsestilstand har alt for store mangler, også selvom det ikke er alle steder, det ser lige så slemt ud som vist i **fig. 1**. At holde stationen ren betyder først og fremmest at beskytte anlægget

Fig. 1: Forsømt trykluftstation

mod støv. Ellers vil kompressorernes indsugningsluftfiltre hurtigt blive stoppet til, hvilket resulterer i større vedligeholdelsesbehov, dårligere ydelse og nedsat luftkøling. Andre konsekvenser kunne være driftsforstyrrelser i kompressoren som følge af overophedning, nedsat tørrerydelse, dermed øget kondensatdannelse med risiko for skader på forbrugere samt dårligere produktkvalitet. Hvis man ikke kan undgå støvbelastningen ved at vælge en anden placering, er det en god ide at bruge stofposeluftfiltre til rensning af indsugningsluften **(fig. 2a, 2b)**.

2. Moderate temperaturer
I den kolde årstid skal trykluftstationen holdes frostfri: For det første produceres og transporteres fugtig trykluft inden behandlingen. Rørledninger, som på grund af frostgrader er frosset til, vil resultere i komplicerede driftsforstyrrelser. For det andet har kompressorernes olie- og lejefedt ved temperaturer under +5 °C en begrænset

Fig. 2a: Stofpose-luftfilter (indsugningsside)

smøreevne, hvilket ligeledes ville forårsage driftsforstyrrelser. Om sommeren skal man derimod udlede så meget overskydende kompressorvarme, at rumtemperaturen så vidt muligt ikke ligger over de udendørs temperaturer. Ellers kan motorerne og de elektriske komponenter blive overophedet, og tørrerne bliver overbelastet som følge af for ringe returkøling af trykluften. Kondensatdannelse og driftsforstyrrelser ved forbrugerne ville være konsekvensen. I værste fald fører en varmeophobning som følge af utilstrækkelig på- og udluftning til, at kompressorer og tørrere standser helt og dermed til et totalt svigt i trykluftforsyningen.
Dette forebygges af kølesystemer, som regulerer trykluftstationens varmebalance automatisk via termostatisk styret indgangs-, afgangs- og cirkulationsluftføring **(fig. 3)**.

Fig. 2b: Stofpose-luftfilter (kompressorside)

3. Servicevenlig station
Moderne kompressorer og behandlingsudstyr kræver meget lidt vedligeholdelse - men helt uden går det desværre alligevel ikke. De bør være placeret således, at der er let adgang til alle vedligeholdelsessteder. Maksimal rentabilitet og driftssikkerhed i trykluftproduktionen er kun mulig, når der tages passende højde for alle disse tre kriterier, vi har behandlet her.

Fig. 3: Trykluftstation med termostatstyret luftføring

Tip 6

Påluftning af trykluftstationer

Den rigtige påluftning af en trykluftstation kan have stor betydning for forsyningssikkerheden og minimeringen af vedligeholdelsesomkostningerne.

1. Korrekt placering af indgangsluftåbninger
Til påluftning af trykluftstationen er indgangsluftåbningernes placering meget vigtigt. Af hensyn til drifts- og forsyningssikkerheden bør luft, der tilføres udefra, være så lidt påvirket af vejrliget som muligt. Det anbefales derfor at placere indgangsåbningerne vejrbeskyttet i den nederste halvdel af stationens ydervæg i den side, der vender bort fra solen.

2. Undgåelse af snavs og skadelige stoffer
Det skal sikres, at der suges så lidt støv og skadelige stoffer ind som muligt. Dertil hører aggressive og brændbare stoffer som f.eks. udstødningsgas fra forbrændingsmotorer. Lastbiltrafik i trykluftstationens luftindsugningszone bør forbydes. Hvis det ikke er muligt at undgå kraftigt støv og smuds i stationens omgivelser, skal der under alle omstændigheder træffes egnede beskyttelsesforanstaltninger. Ved moderat forurening hjælper køleluftfiltre, i ekstreme tilfælde anvendes såkaldte støvfælder.

3. Korrekt dimensionering og udrustning af indgangsluftåbninger
Indgangsluftåbningernes størrelse afhænger af de installerede luftkølede kompressorers kapacitet. For hver kilowatt installeret nominel effekt bør der beregnes 0,02 til 0,03 m^2 til indgangsluftåbningernes tværsnit. Det svarer til en køleluftmængde på 130 til 230 m^3/t.

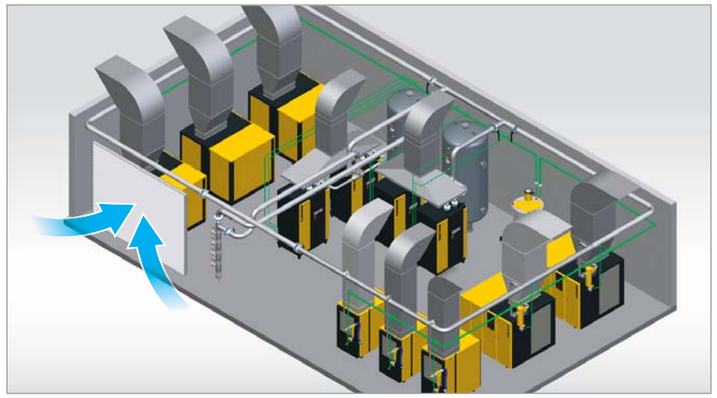


Fig. 2: Trykluftstation med indgangsluftsystemer

Her er det vigtigt at være opmærksom på begrebet "frit tværsnit". Vejrbeskyttelsesgitre, jalousispjæld samt de filtre, der er nødvendige ved ugunstige indsugningsbetingelser, reducerer dette tværsnit betydeligt: Alt efter ventileringssystem udgør reduktionen op til 30 til 60%. Det lønner sig at vælge så strømningsgunstige ventilationssystemer som muligt. Indsnævringer af tværsnittet som følge af beskyttelses- og reguleringsanordninger skal under alle omstændigheder udlignes.
Normalt består et indgangsluftsystem **(fig. 1)** af et fuglebeskyttelsesgitter, et

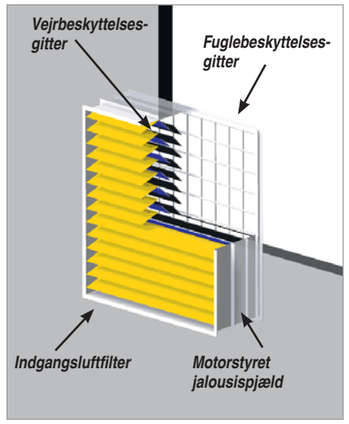


Fig. 1: Indgangsluftsystem (opbygning)

vejrbeskyttelsesgitter, et motorstyret jalousispjæld og evt. indgangsluftfilter. Ved stationer med flere kompressorer er det hensigtsmæssigt at styre indgangsluftsystemerne via termostater og inddele åbningerne ud fra de enkelte anlægs placering og kapacitet **(fig. 2)**.

4. Påluftning af vandkølede kompressorer
Kompressorer med vandkøling drives i reglen også af luftkølede motorer og afgiver strålevarme - og kræver derfor også tilstrækkelig påluftning. Ca. 20 % af en vandkølet kompressors installerede ydelse skal ledes bort med køleluft som overskudsvarme. Derfor skal der også her installeres passende dimensionerede indgangsluftåbninger.

Tip 7

Afluftning af trykluftstationer

Hvis man vil sikre trykluftforsyningen og holde vedligeholdelsesomkostningerne nede, skal man sørge for ordentlig afluftning af trykluftstationen. Hvis udetemperaturen falder ned under +5 °C, skal stationens driftsrum varmes op med cirkulationsluft.

1. Enkel føring af afgangsluften
Afgangsluftkanaler opfylder en vigtig opgave i trykluftstationen: De fjerner den opvarmede køleluft og sammen med den også overskydende motorvarme og strålevarme fra kompressorerne **(fig.1)**. Ved moderne maskiner forlader overskudsvarmen, som stammer fra forskellige kilder, anlægget via en eneste afgangsluftåbning **(fig. 1, lup)**. Den skal forbindes fleksibelt med afgangsluftkanalen via en sejldugsstuds **(fig. 2,)**. Ved udetemperaturer over +10 °C fjernes således hele den via luften udledte varmemængde fra kompressorernes driftsrum. Ældre kompressorer har ofte stadig separate afgangsluftåbninger. Her skal der eventuelt installeres enkeltkanaler.

Fig. 2: Kompressorens ventilationstilslutning med sejldugsstuds

2. Installation af samlekanal
Hvis det byggeteknisk ikke er muligt med enkeltstående afgangsluftkanaler, er løsningen en samlekanal til afgangsluften **(fig. 3)**. Til en korrekt tilslutning af kompressorerne kræves kontrajalousispjæld. I lukket tilstand, og når kompressoren står stille, forhindrer de, at der strømmer varm luft tilbage i stationen. Motorstyrede jalousispjæld reducerer tryktabet og kan aktiveres med signalet "Motoren arbejder". Styreplader i samlekanalen forhindrer tryktab.

3. Temperering med cirkulationsluft
Ved udetemperaturer under +5 °C skal der være installeret cirkulationsluftspjældsystemer, som bliver aktive fra +10 °C, dvs. at de åbner sig mere eller mindre alt efter temperaturen **(fig. 1)**. Ved periodisk helt standsede trykluftstationer skal et ekstra varmeaggregat holde temperaturen i driftsrummet over +5 °C.

4. Afluftning af køletørrer
Køletørrere producerer en varmemængde, der svarer til omtrent det firedobbelte af den elektriske energi, de får tilført. Derfor kræver de et selvstændigt afgangsluftsystem med termostatstyret ventilator **(fig. 1 og 3)**. Hvis der er flere køletørrere i stationen, skal ventilatoren være udstyret med en trinstyring, der aktiveres fra +20 °C. Da dette afgangsluftsystem ikke arbejder konstant, må afgangsluftkanalen ikke sidde direkte på tørreren.

5. Korrekt dimensionering og aktivering af afgangsluftsystemer
Alle afgangsluftsystemer skal dimensioneres på en sådan måde, at de ikke forårsager større tryktab end det resttryk, der leveres af den mindste maskine (se producentens oplysninger). Ellers ville afgangsluften strømme fra anlægget og tilbage i driftsrummet. Hvis resttrykket ikke er tilstrækkeligt, kræves ekstra ventilatorer. Spjældene bør aktiveres automatisk via rumtermostater og kompressorer. For hurtigt at kunne registrere evt. fejlfunktion på spjældene og lede dem videre til det centrale styringsanlæg anbefales overvågning ved hjælp af en overordnet maskinstyring (f.eks. "SIGMA AIR MANAGER").

6. Særtilfælde: vandkøling
Da også vandkølede kompressorer afgiver ca. 20% af den installerede ydelse som strålevarme, skal der også her ske en passende afluftning.

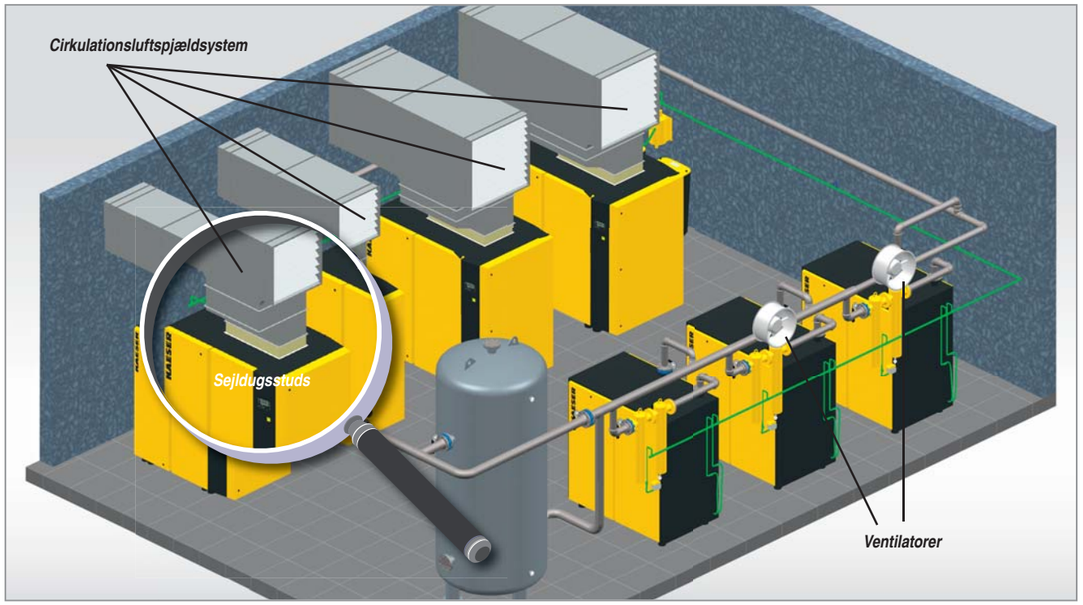


Fig. 1: Afgangsluftsystem med enkeltkanal for hver kompressor

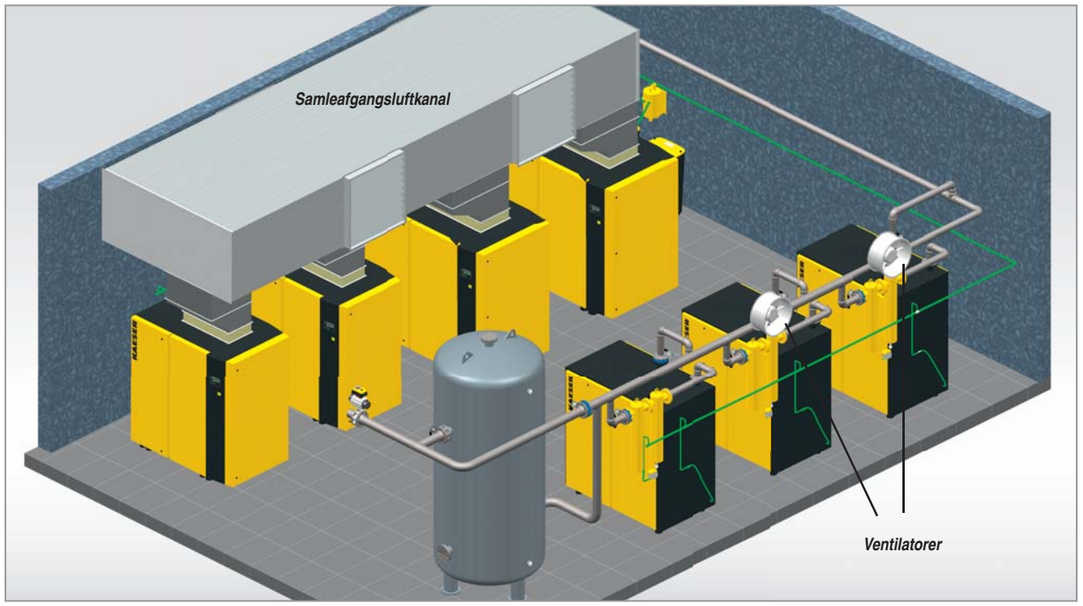


Fig. 3: Afgangsluftsystem med samleafgangsluftkanal til alle kompressorer

Bilag

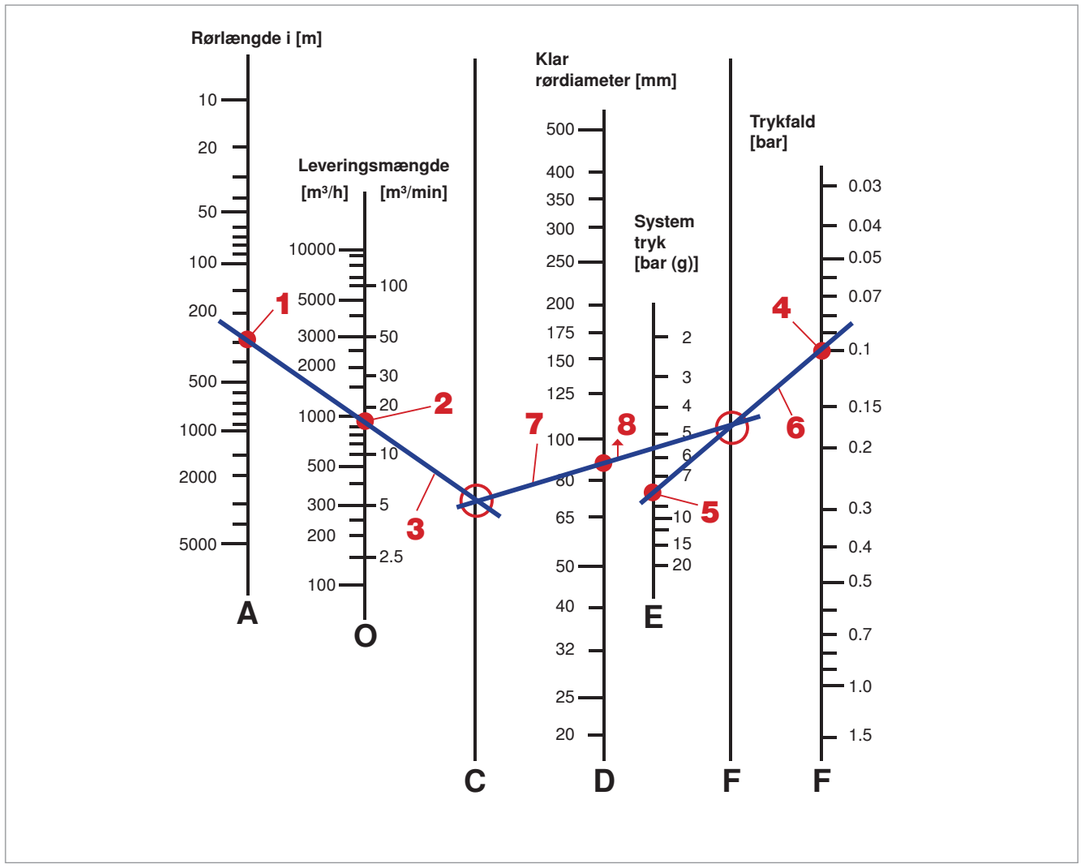
Bilag 1 - 2

54-57

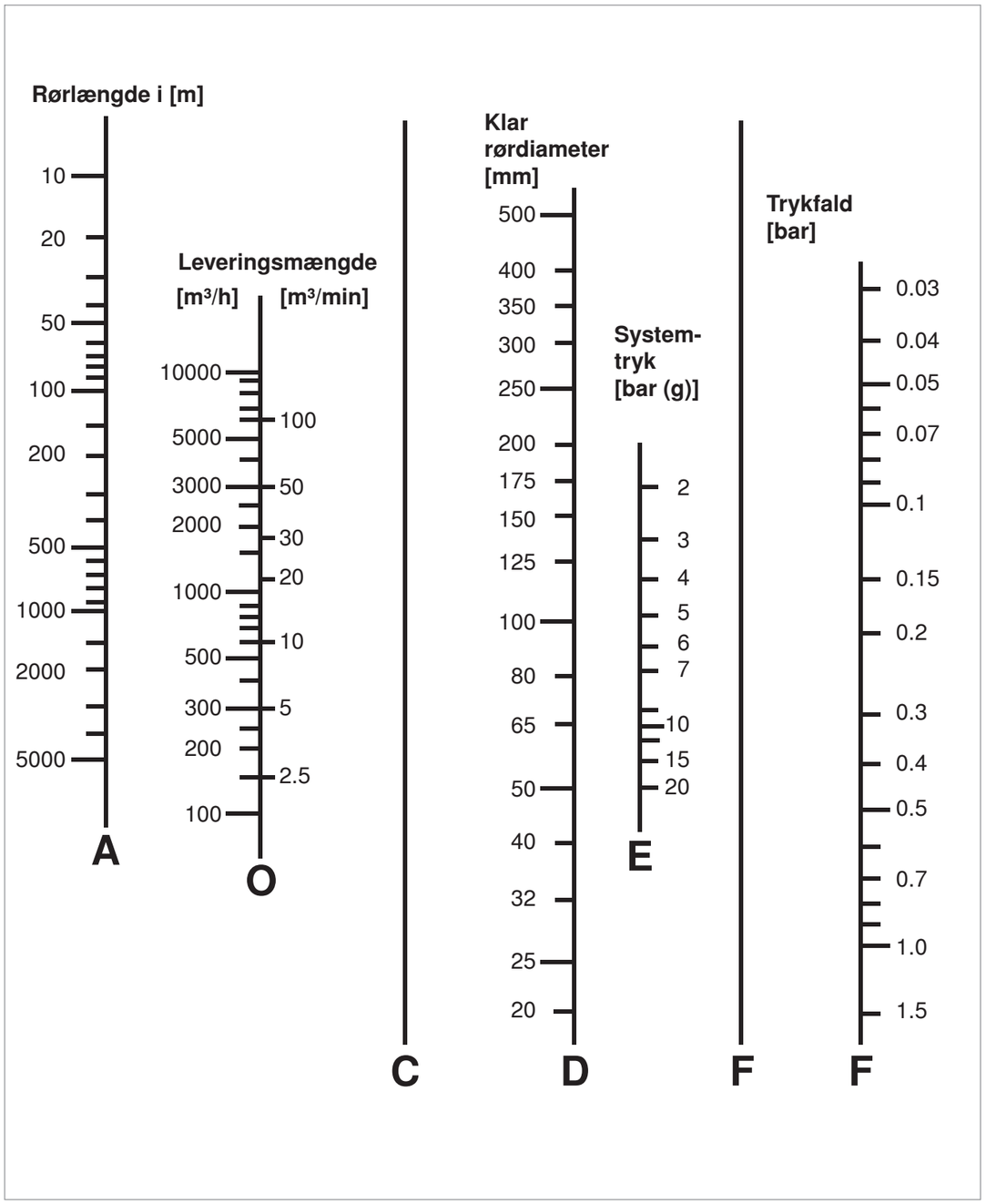
KAESER KOMPRESSORER

Bilag 1

Nomogram til beregning af den nødvendige indvendige rørdiameter



Trykluftledningers indvendige rørdiameter kan beregnes ved hjælp af dette nomogram på følgende måde: Markér i første omgang akserne A og B i henhold til rørlængde og kapacitet. Forbind begge punkter med en lige linje, hvis forlængelse skærer igennem akse C. Markér derefter det mindste systemtryk og det ønskede maksimale tryktab på akserne E og G. Den lige linje mellem disse to punkter skærer igennem aksen F. Den lige linje gennem de to skæringspunkter på akserne C og F skærer igennem aksen D i det punkt, hvor man kan aflæse den nødvendige rørdiameter.



Bilag 2

Spørgeskema-eksempler vedrørende energispare-system-service

Energispare-system-service

1. Hvor stor leveringsmængde skal kompressorerne kunne yde?

1.1 Anvendt trykluftforbrug for værktøj og maskiner

Værktøj, maskiner	Luftforbrug pr. stk. værktøj, maskine m³/min		Styk værktøj, maskiner		Belastning / drifts-periode %		Samtidig-heds-faktor %		Faktisk beregnet luftforbrug m³/min
		x		x		x		=	
		x		x		x		=	+
		x		x		x		=	+
		x		x		x		=	+
		x		x		x		=	+
		x		x		x		=	+
		x		x		x		=	+

Trykluftforbrug for alt værktøj = $V_{Værktøj}$ ☐ m³/min

+

1.2 Andre aftagere V_{Andre} ☐ m³/min

+

1.3 Trykluftnetværkslækager $V_{Lækage}$ ☐ m³/min

+

1.4 Reserve $V_{Reserve}$ ☐ m³/min

Min. krav til leveringsmængde for kompressorer = V_{Total} ☐ m³/min

Jeske-VKI/QUMV-030118-Compressed air station planning-1\04. Mai 2010

Energispare-system-service

2. Er kompressorerne allerede i brug?

☐ **Nej**

☐ **Ja**

Brugerens betegnelse	Fremstiller	Model	Tryk bar(g)	Leverings-mængde m³/min	Fortsat planlagt brug? Ja	Nej
					☐	☐
					☐	☐
					☐	☐
					☐	☐
					☐	☐
					☐	☐

Total leveringsmængde fra eksisterende kompressorer, som fortsat vil blive anvendt

= $V_{Eksisterende}$ ☐ m³/min

Eksisterende trykluftbehandlingskomponenter

Type/model (tørrer, filter, dræn etc.)	Producent	Fremstillet til m³/min	bar(g)	Bemærkninger f.eks. forkert størrelse

Jeske-VKI/QUMV-030118--Compressed air station planning-1\04.May 2010

www.kaeser.com

KAESER KOMPRESSORER

KAESER – over hele verden

Som en af verden største kompressorproducenter er KAESER KOMPRESSORER repræsenteret over hele verden gennem et tæt netværk af filialer, datterselskaber og autoriserede partnere i over 100 lande.

Med fornyede produkter og service hjælper KAESER KOMPRESSORER's erfarne medarbejdere kunderne til at forbedre deres konkurrenceevne ved sammen med kunden at udvikle progressive systemkoncepter, som hele tiden presser grænserne for ydeevne og effektivitet. KAESER's globale computernetværk har gjort den samlede knowhow tilgængelig for alle kunder i hele verden.

Disse fordele, tillige med KAESER's verdensomspændende serviceorganisation, sikrer, at alle produkter konstant yder mest muligt.

LGA InterCert
Certified QM/EM System
ISO 9001:2008 / ISO 14001:2004

KAESER KOMPRESSORER A/S
Skruegangen 7 – 2690 Karlslunde
Tlf.: 70 15 43 34 – Fax: 70 15 43 35 – E-mail: info.denmark@kaeser.com – www.kaeser.com

P-2010DK.1/15 Ret til tekniske ændringer forbeholdes!