



TEKNOLOGISK  
INSTITUT

Center for Energieffektivisering og Ventilation

---

# Databaseret energioptimering i industrien

ELFORSK projekt 353-005

August 2023

---

## Forord

Lige siden energiselskaberne og andre aktører startede indsatsen for at effektivisere trykluftssystemer har det været normalt at måle effektoptaget for kompressorinstallationerne og med baggrund heri analysere mulighederne for at reducere energiforbruget gennem f.eks. lavere lækage-tab, bedre styring eller lavere trykniveau.

Indsatsen har generelt ført til en betydelig energieffektivisering af trykluftssystemer, men denne tilgang til effektivisering har ingen eller meget lille fokus på de reelle trykluftbehov og dynamikken i trykluftssystemerne.

Dette udredningsarbejde har til gengæld dokumenteret, at der er betragtelige og endnu ikke udnyttede effektiviseringsmuligheder, der kan identificeres gennem en systematisk tilgang til trykluftssystemer og efterfølgende energioptimalt design af systemerne. Den systematiske tilgang understøttes gennem dette projekt af et beregningsværktøj, der giver muligheden for at kunne foretage beregninger af forskellige konfigurationer af trykluftsystemers evne til at møde det faktiske og til enhver tid værende trykluftbehov energieffektivt. Desuden understøttes design af nye og retrofit af eksisterende trykluftinstallationer af den udviklede designguide for trykluftssystemer.

Erfaringer viser, at der kan opnås yderligere energibesparelser i størrelsesordenen 20% af energiforbruget til generering af trykluft i en velfungerende trykluftinstallation ved at fokusere på hele systemet fra kompressor til slutbruger. Ud over en væsentlig energibesparelse kan det ovenikøbet resultere i en trykluftforsyning, som skaber færre produktionsmæssige problemer, herunder mindre produktionsspild og forøget "oppetid".

Metoden til at afdække mulige potentialer er først at kortlægge, hvor tryklften anvendes i virksomheden (slutanvendelse), til hvad den anvendes (proces), i hvilken kvalitet den bør leveres og efterfølgende gennemgå designet, dvs. om udstyret ved visse kritiske slutbrugere er korrekt designet/dimensioneret. Herefter undersøges systemet baglæns, dvs. fra distributionen af trykluft (rørsystem), og til genereringen af trykluft (kompressorer, køletørrere, styring m.v.).

## Projektinformation

<b>Projekttitle</b>	<b>Databaseret energioptimering i industrien</b>
<b>Journalnummer</b>	<b>353-005</b>
<b>Projektansvarlig organisation</b>	<b>Teknologisk Institut</b>
<b>Projektpartnere</b>	<b>Maskinmesterskolen København &amp; Haldor Topsøe A/S</b>
<b>Projektets slutdato</b>	<b>31.08.2023</b>

## Indholdsfortegnelse

Forord .....	1
Projektinformation.....	1
1 Projektresumé .....	3
2 Summary .....	4
3 Konklusion og perspektivering .....	4
4 Projektformål.....	5
5 Projektgennemførelse .....	5
6 Projektresultater .....	5
7 Anvendelse af projektresultater .....	6
8 Projektets relevans .....	7
9 Energiforbrug til trykluft .....	8
9.1 Energiforbrug.....	8
9.2 Besparelspotentialer ved optimering af trykluftsystemer.....	9
10 Demonstrationsvirksomhed.....	9
11 Beregnings- og designværktøjer for trykluftsystemer.....	17
11.1 Trykluftapplikation .....	17
11.2 Motor Systems Tool .....	18
11.3 Andre værktøjer .....	18
12 Formidling af resultater .....	20
12.1 Artikler m.m. ....	20
12.2 Indlæg på temadage .....	20
13 Referencer .....	21

# 1 Projektresume

Det har været projektets primære formål at udvikle et beregningsværktøj for trykluftsystemer, som sætter brugeren i stand til hurtigt og nemt at foretage beregninger af forskellige konfigurationer af trykluftkompressorer med varierende kapacitetsstyring. Beregningsprogrammet er ledsaget af en brugervejledning, der illustrerer brugen af beregningsværktøjet.

I tilknytning til ovennævnte beregningsværktøj inklusiv vejledning, er der udviklet en guide i design af energieffektive trykluftsystemer da erfaringen er, at samspillet mellem kapaciteten af kompressorer, luftbehandlingsanlæg, trykluftbeholdere samt styringen af installationerne i forhold til de faktiske behov er langt fra optimal.

Desuden er der udviklet en guide i, hvilke målinger der bør foretages på trykluftsystemer og hvordan målingerne bør foretages.

Endelig er det tilstræbt at informere branchens aktører, dvs. energiselskabernes rådgivere, rådgivende ingeniører samt trykluftbranchen, om mulighederne ved fortsat energieffektivisering af trykluftsystemer samt hvordan dette kan foretages.

Projektet har omfattet følgende arbejdsopgaver (WP):

- WP 1. Behovsafdækning
- WP 2. Funktionskrav til beregningsværktøj
- WP 3. Udvikling af metoder og værktøj
- WP 4. Guide i energimåling
- WP 5. Videnformidling og rapportering

Udviklingen af beregningsværktøjet er sket i tæt samarbejde med en leverandør af trykluftsystemer, en uddannelsesinstitution samt en industrivirksomhed repræsenteret ved:

- Kaeser Kompressorer A/S Danmark – Phillip Zierau
- Maskinmesterskolen København – John Hoffmann Frederiksen, Arne Jakobsen og Mattias Straub
- Haldor Topsøe A/S – Jan Ove Jensen

Arbejdet har været udført i perioden august 2021 – august 2023.

Arbejdet er hovedsageligt finansieret af ELFORSK. Den resterende finansiering er kommet ved hjælp af egenfinansiering fra projektparterne.

Projektresultaterne er blevet præsenteret i forskellige fora, som f.eks. ELFORSK Nyt, og LinkedIn.

## 2 Summery

It has been the primary purpose of the project to develop a calculation tool for compressed air systems, which enables the user to quickly and easily make calculations of different configurations of compressed air compressors with varying capacity control. The calculation program is explained thoroughly in a user guide that illustrates the use of the calculation tool.

In connection with the above-mentioned calculation tool, a guide has been developed in the design of energy efficient compressed air systems, as the experience is that the interaction between the capacity of compressors, air treatment plants, compressed air containers and the control of the installations in relation to the actual needs is far from optimal.

In addition, a guide has been developed in which measurements should be made on compressed air systems and how the measurements should be made.

Finally, the aim is to inform the industry's players, i.e. the energy companies' advisors, consulting engineers and the compressed air industry, about the possibilities of continued energy efficiency of compressed air systems and how this can be done.

The project has included the following work packages (WP):

- WP 1. Need assessment
- WP 2. Requirements for the calculation tool
- WP 3. Development of methods and tools
- WP 4. Guide in energy measurement
- WP 5. Knowledge dissemination and reporting

The development of the calculation tool has taken place in close collaboration with a supplier of compressed air systems, an educational institution and an industrial company represented by:

- Kaeser Kompressorer A/S Denmark – Phillip Zierau
- The Mechanical Engineering School Copenhagen – John Hoffmann Frederiksen, Arne Jakobsen and Mattias Straub
- Haldor Topsøe A/S – Jan Ove Jensen

The work has been carried out in the period August 2021 – August 2023.

The work is mainly financed by ELFORSK. The remaining financing has come with the help of self-financing from the project partners. The project results have been presented in various forums, such as ELFORSK Nyt, and LinkedIn.

## 3 Konklusion og perspektivering

Det konkluderes, at de forventede projektræsultater er opnået og at projektforsløbet har været tilfredsstillende. Der har været stor velvilje og godt samarbejde mellem projektets partnere og projektet er afviklet i et jævnt forløb i projektperioden.

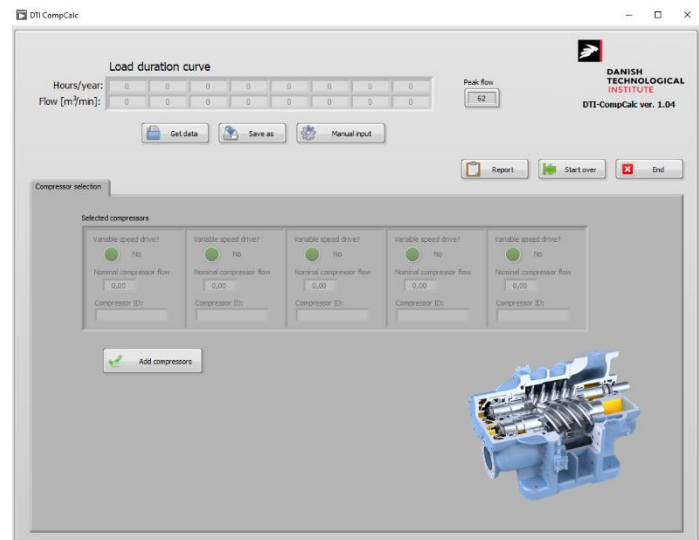
Beregningsprogrammet er gjort tilgængeligt på Teknologisk Institut's hjemmeside inklusiv den tilhørende brugervejledning samt øvrigt projektmateriale. Beregningsprogrammet og en engelsk version af brugervejledningen vil ligeledes blive lagt op på EMSA's hjemmeside sammen med andre tilsvarende programmer (<https://www.iea-4e.org/emsa/our-work/emsa-tools/>).

Efter projektets afslutning (andet halvår af 2023) vil Teknologisk Institut afholde et gå-hjem-møde, hvor beregningsprogrammet præsenteres. Der inviteres bredt ud blandt drifts- og energi-ansvarlige i virksomheder, kompressorleverandører, energisynskonsulenter, tekniske eksperter, energirådgivere, energiselskaber og andre med behov for ny viden om energieffektivisering af trykluftsystemer. Ligeledes vil Teknologisk Institut bidrage med et indlæg på temadagen for Energisynskonsulenter i november 2023, således at energisynskonsulenterne er bekendt med beregningsprogrammet og dets muligheder.

## 4 Projektformål

Formålet med projektet har været at udvikle et beregningsværktøj (metoder og beregningsroutiner) for komplekse kompressorstationer i relation til bestyknings, udskiftning af en eller flere kompressorer, beholdere, rørsystem samt styring.

Projektets mål er at få virksomhedernes energiansvarlige og energisynskonsulenterne til at undersøge et større antal mulige energibesparelsesmuligheder ved at stille et lettilgængeligt og forholdsvis enkelt beregningsværktøj til rådighed. Desuden ansøres især de energiansvarlige på virksomhederne til at undersøge kompressor-anlæg med langt større frekvens end det er tilfældet i dag, fordi det er let og hurtigt at regne på nye driftssituationer.



Værktøjet er dokumenteret i en brugervejledning, der beskriver hvordan programmet skal anvendes, - illustreret med et konkret eksempel. Der er ligeledes vist eksempler i nærværende rapport.

Endelig er der udarbejdet en guide med koncept for, hvordan forskellige kompressorinstallationer skal udrustes med on-line energimålere, for at kunne opsamle data til at kunne foretage løbende energioptimering og registrering, så det sikres at effekten af gennemførte energieffektiviserings-tiltag fastholdes, og så der genereres grundlag for fremtidig energioptimering.

## 5 Projektgennemførelse

Projektet har fulgt tidsplanen og der er ikke opstået uforudsete problemer undervejs. Der har været et rigtig godt samarbejde mellem projektets partnere samt stor velvilje fra Kaeser Kompressorer, der har stillet data for kompressorer til rådighed for projektet.

## 6 Projektresultater

Projektet har opnået de forventede projektmål, idet der er udviklet en metode med tilhørende beregningsværktøj til optimering af energiforbrug og identifikation af energisparepotentialer i større trykluftinstallationer.

Værktøjet, der er udviklet i projektet, baseres på beregningsrutiner for gængse kompressorteknologier inklusiv kompressorstyring og -regulering. Beregningsværktøjet er opbygget i Labview,

så beregningsværktøjet fremstår professionelt og fordi beregningsværktøjet kommer til at indgå i en samling af tilsvarende beregningsprogrammer i Labview, der bl.a. omfatter elmotorer, vakuumsystemer og hydraulik.

Værktøjet er dokumenteret i en brugervejledning, der beskriver hvordan programmet skal anvendes illustreret med et konkret eksempel.

Desuden er der udviklet en guide i, hvordan energieffektive trykluftsystemer opbygges og bestykses med kompressorer, beholdere, tørreanlæg m.v..

Endelig er der udarbejdet en guide med koncept for, hvordan komplekse kompressorinstallationer skal udrustes med online energimålere, for at kunne opsamle data til at kunne foretage løbende energioptimering og registrering, så det sikres at effekten af gennemførte energieffektiviserings tiltag fastholdes.

Beregningsværktøjet og de to guides er relevante for alle der arbejder med energioptimering af trykluftanlæg, men er især målrettet erhvervs virksomheder. Det er ofte vanskeligt for virksomhederne at bruge rådgivningstimer på at afdække mulige energieffektiviseringsforslag, og derfor må de ofte løfte opgaven selv. I langt de fleste tilfælde sker det ikke, da der mangler både tid, penge og viden om mulighederne. Projektet er derfor ét af de afgørende midler til at opnå energibesparelser i industrien og det øvrige erhvervsliv. Projektmateriale er dog også stillet til rådighed for registrerede energisynskonsulenter, da det kan hentes på Registreringsordningen for Energisynskonsulenter's hjemmeside.

Projektresultaterne er blevet præsenteret i forskellige fagblade, som f.eks. ELFORSK Nyt, HVAC magasinet og Maskinmesteren samt på LinkedIn.

## 7 Anvendelse af projektresultater

Accelereringen af den grønne omstilling kræver, at alle tænkelige initiativer og aktører bringes i spil. Selvom industrien og erhvervslivet i øvrigt har været i fokus i en lang årrække i forbindelse med energispareindsatsen er der stadig et stort, realiserbart potentiale hos især mindre virksomheder. Det skyldes, at virksomheder, - især i SMV-segmentet, overser eller fejlbedømmer mulige energioptimeringstiltag, fordi virksomhederne enten ikke har de nødvendige værktøjer til at estimere energibesparelser eller den fornødne viden. Erfaringer viser desuden at mindre virksomheder ikke benytter energikonsulenter til at identificere mulighederne, da konsulenternes honorar ikke står mål med den økonomiske værdi af det mulige energibesparelspotentiale.

I den forbindelse vil et energioptimeringsværktøj, som det der er udviklet, sætte virksomhederne i stand til let, hurtigt og præcist at identificere energibesparelspotentialer, der kan bidrage væsentligt til at reducere energiforbruget. Energikonsulenter og andre der arbejder med energieffektivisering vil ligeledes have stor glæde af værktøjet, idet projektet vil sikre en betydelig styrkelse af konsulenternes muligheder for at kunne yde bedre og mere veldokumenteret rådgivning, hvilket i sig selv er befordrende for realiseringen af energibesparelsesprojekter.

Det udviklede beregningsprogram bliver en del af en række programmer, der er internationalt tilgængelige, se <https://www.iea-4e.org/emsas/our-work/emsas-tools/>. Disse programmer er tidligere udviklet under ELFORSK-programmet.

Projektet adresserer energiforbruget til trykluftinstallationer i erhvervslivet, og det er opgjort, at det årlige elforbrug til trykluft er i alt ca. 781 GWh<sup>1</sup>, svarende til ca. 11% af det samlede elforbrug til motordrevne maskinsystemer.

Det antages, at der som minimum stadig vil kunne realiseres et effektiviseringspotentiale på ca. 20% i erhvervslivet til trods for at der gennem de seneste år er ydet en stor indsats for energieffektivisering af trykluftanlæg. Der forventes således et effektiviseringspotentiale på op til ca. 160 GWh. Det antages, at 10% af dette potentiale forventes realiseret indenfor 3 år efter projektets afslutning, og at yderligere 30% af potentialet forventes realiseret inden 2030.

## 8 Projektets relevans

Projektet relaterer sig til ELFORSK's indsatsområde: Industriens processer: 7.b Rådgivnings- og effektiviseringskoncepter, og understøtter målsætningen om at Danmarks udledning af drivhusgasser skal reduceres med mindst 70% inden 2030 i forhold til 1990 niveauet, og at Danmark opnår at være et klimaneutralt samfund senest i 2050.

Anvendelse af trykluft er én af de væsentligste energianvendelsesområder i industrien og til trods for at der allerede er sket en betydelig effektivisering af trykluftsystemerne, er der stadig et stort uudnyttet potentiale. Derfor er der behov for en helt ny tilgang til effektivisering af denne type anlæg, således det fulde potentiale realiseres.

Der har i årtier været fokus på at gennemføre energibesparelser på trykluftanlæg i den danske industri. Erfaringer viser imidlertid, at der kan opnås yderligere energibesparelser i størrelsesordenen 20% af energiforbruget til generering af trykluft ved at fokusere på hele systemet fra kompressor til slutbruger. Endvidere kan dette ovenikøbet resultere i en trykluftforsyning, som skaber færre produktionsmæssige problemer, herunder mindre produktionsspild og forøget "opetid".

Trykluft er den absolut dyreste energiform at anvende i en virksomhed, og trykluft skal derfor kun anvendes der, hvor der ikke findes andre alternativer. Metoden til at afdække mulige potentialer er således først at kortlægge, hvor tryklften anvendes i virksomheden (slutbrugere), til hvad den anvendes (proces), ved hvilken kvalitet den bør leveres osv., og efterfølgende gennemgå designet, samt opstille en forbrugsprofil med udgangspunkt i kombinationen af nødvendigt trykluftflow og tryk. Registreringerne giver også mulighed for at opdage et utal af "sandheder" om hele systemet, hvis man vel at mærke har erfaringen i at tolke registreringerne, og hvis denne viden omsættes til konkrete handlingsplaner.

Projektets resultater vil styrke virksomhedernes og deres rådgiveres kompetencer og muligheder betydeligt, idet resultaterne vil øge mulighederne for at identificere effektiviseringspotentialer i trykluftsystemer. Virksomheders egen driftstekniske stab samt rådgivere, projekterende, leverandører af trykluftanlæg vil med fordel kunne drage nytte af det nye værktøj og de metoder, der er beskrevet i de tilhørende guides.

---

<sup>1</sup> Energistyrelsen - Kortlægning af energiforbrug og opgørelse af energisparepotentialer i produktionserhvervene, august 2022



## 9 Energiforbrug til trykluft

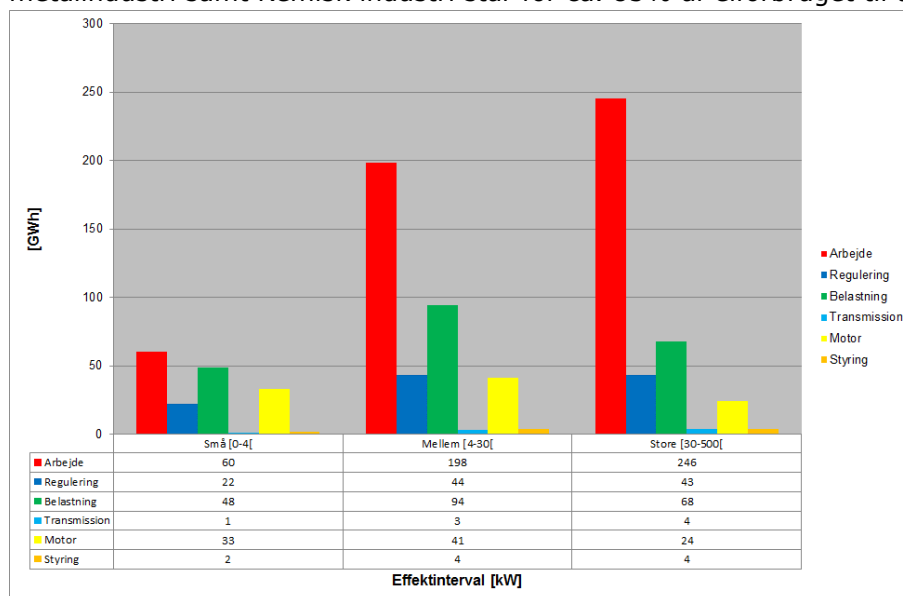
### 9.1 Energiforbrug

I nedenstående tabel er elforbruget til trykluft, - samt til øvrige anvendelser, vist fordelt på brancher.

Slutanvendelse	Landbrug		Fremstilling		Bygge- og anlæg		Samlet	
	TJ/år	%	TJ/år	%	TJ/år	%	TJ/år	%
Konverterings- og nettab	3	0,1	58	0,2	-	-	61	0,2
Opvarmning/kogning	671	10,2	282	1,0	-	-	954	2,6
Tørring	112	1,7	775	2,7	27	2,0	914	2,5
Inddampning	-	-	97	0,3	-	-	97	0,3
Destillation	-	-	77	0,3	-	-	77	0,2
Brænding/sintring	-	-	-	-	-	-	-	-
Smeltning/støbning	-	-	1.814	6,3	-	-	1.814	4,9
Anden procesvarme	387	5,9	477	1,7	-	-	864	2,4
Arbejdskørsel	-	-	-	-	27	2,0	27	0,1
Rumvarme	13	0,2	545	1,9	48	3,5	606	1,7
Rumkøling	-	-	270	0,9	27	2,0	298	0,8
Belysning	1.246	18,9	1.976	6,9	204	15,0	3.425	9,3
Pumpning	1.344	20,4	2.083	7,2	14	1,0	3.441	9,4
Køl/frys (ekskl. rumkøling)	561	8,5	2.353	8,2	-	-	2.914	7,9
Rumventilation	739	11,2	2.351	8,2	88	6,5	3.178	8,6
Blæsere	375	5,7	2.695	9,4	-	-	3.070	8,4
Trykluft	336	5,1	2.395	8,3	82	6,0	2.812	7,7
Hydraulik	56	0,9	714	2,5	-	-	770	2,1
Øvrige elmotorer	456	6,9	7.319	25,4	231	17,0	8.006	21,8
IT og anden elektronik	245	3,7	735	2,6	136	10,0	1.116	3,0
Anden elanvendelse	33	0,5	1.792	6,2	476	35,0	2.301	6,3
Samlet	6.575	100,0	28.809	100,0	1.360	100,0	36.744	100,0

Tabel 9.1.1 Fordeling af årlige elforbrug i forskellige sektorer.

Af tabel 9.1.1 fremgår, at der i alt anvendes ca. 781 GWh<sub>el</sub> til industrielle trykluftformål. Det svarer til ca. 11% af elforbruget til elmotordrevne maskinsystemer i industrien. Størstedelen bruges af trykluftanlæg i størrelsen 4-30 kW og 30-500 kW vurderet ud fra tidligere detaljerede motorstudier. Fra tidligere studier vides, at brancherne Nærings- og nydelsesmiddelindustri, Jern- & metalindustri samt Kemisk industri står for ca. 85% af elforbruget til trykluftsystemer.

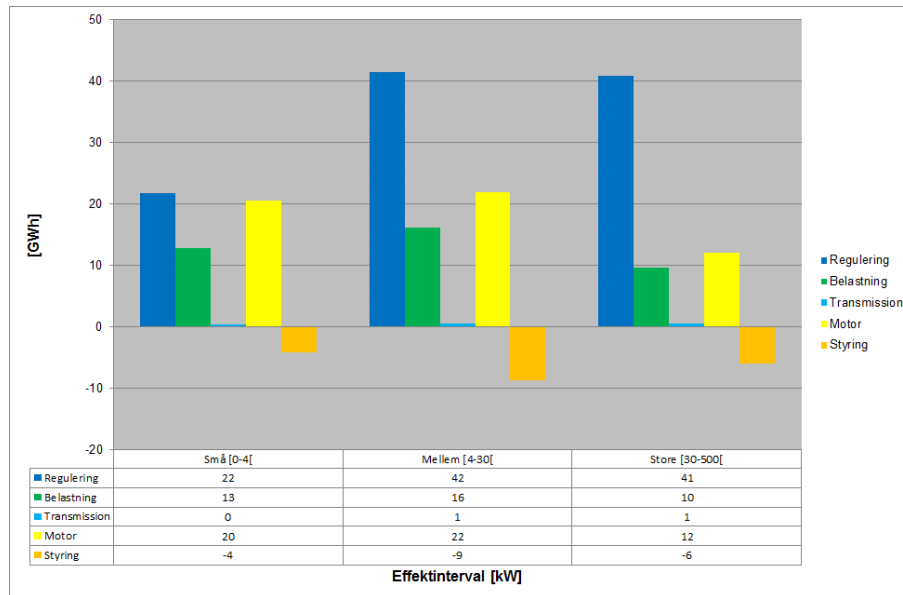


Figur 9.1.1 Nyttigt arbejde samt tab i forskellige systemkomponenter for små, mellem og store trykluftanlæg.

Figur 9.1.1 viser at de største tab findes omkring elmotoren og kompressoren, men at en relativ stor energiandel tilføres luften i form af øget tryk og temperaturstigning. Temperaturstigningen er normalt ikke til nogen gavn.

## 9.2 Besparelspotentialer ved optimering af trykluftsystemer

I figur 9.2.1 ses besparelspotentialerne ved optimering af trykluftsystemer.



Figur 9.2.1 Besparelspotentialer ved optimering af trykluftsystemer.

Som nævnt i kapitel 9.1 findes de største tab i trykluftsystemer omkring elmotoren og kompressoren, og det er også her der findes store besparelspotentialer. Det største besparelspotentiale kan dog opnås ved at ændre reguleringsformen fra typisk last/aflast regulering til energiefektiv regulering af luftproduktionen via omdrejningstalsregulering eller on-off drift (med måling af temperaturen i motorviklingerne). Derudover findes der et stort besparelspotentiale ved:

- Substituering af trykluft med direkte eldrev
- Tilpasning af tryklufttrykket til forbrugsstedernes behov ved generelt at sænke produktionstrykket
- Vedligehold (indeholder almindelig service på kompressorer og køletørrere, rensning af filtre, udskiftning af slidte luftmotorer samt lækagesøgning og -udbedring)

I rapporten "Kortlægning af energiforbrug og opgørelse af energi- sparepotentialer i produktions- erhvervene, Potentialer rapport – August 2022" udarbejdet for Energistyrelsen i 2022 vurderes besparelspotentialet ved ovenstående tiltag at udgøre 30% af elforbruget til trykluft (effektiviseringsprojekter med op til 10 års simpel tilbagebetalingstid).

## 10 Demonstrationsvirksomhed

Der blev gennemført undersøgelser af mulighederne for optimering af trykluftsystemerne hos Haldor Topsøe Frederikssund med det formål at opnå praktiske erfaringer, der kunne nyttiggøres

i projektets efterfølgende faser samt for at illustrere mulighederne for at realisere et betydeligt energieffektiviseringspotentiale ved anvendelse af de metoder og værktøjer, der er udviklet i projektet.

Virksomheden og dens trykluftssystemer er beskrevet i det følgende.



Figur 10.1 Haldor Topsøe Frederikssund A/S

Haldor Topsøe A/S er er førende inden for proces teknologi og heterogen katalyse til olieraffinerier, fremstilling af kemiske produkter og miljørigtige energiprocesser. Virksomheden har i alt ca. 2.100 medarbejdere verden over, heraf ca. 650 medarbejdere på fabrikken i Frederikssund som har deltaget i projektet. Hovedkontoret og forskningslaboratorier ligger i Lyngby. mens der er produktion i Frederikssund og i Houston, USA. I Frederikssund findes i dag otte produktionsenheder, råvarelagre, færdigvarelagre, support til produktionen, administration og faciliteter til medarbejderne.

Haldor Topsøe har fem kompressorcentraler med i alt ni kompressorer i forskellige størrelse. Kompressorerne er koblet sammen med en "ringledning", der består af et nedgravet rør der ligger nord-syd på fabriksarealet, dvs. fra øvre højre hjørne til nedre venstre hjørne på figur 10.1. Kompressorernes kapacitet etc. er vist i tabel 10.1.

Bygning [-]	Nominel luft- ydelse [Nm <sup>3</sup> /min.]	Kompressor- effekt [kW]
K1	16,8	90
K1	16,8 <sup>2</sup>	90
P2	2,9 – 18,4	90
P2	24,0	135
P3	12,3	75
P3	12,3	75
P3	12,3	75
P6	16,2	90
E	12,3	75

<sup>2</sup> Det er kun muligt at køre med én af de to kompressorer i K2 ad gangen.

Kapacitet, i alt	124,6	795
------------------	-------	-----

Tabel 10.1 Haldor Topsøe A/S – data for kompressorinstallationen.

I forbindelse med projektet er der foretaget målinger af trykluftforbruget med fast installerede målere over en to ugers periode. Målingerne, som ikke fordeler trykluftforbruget fuldstændig korrekt på produktionsafdelinger, viser nedenstående fordeling.

Bygning [-]	Trykluftforbrug [Nm <sup>3</sup> /min.]	Omtrentlig tryk- luftkapacitet [Nm <sup>3</sup> /min.]
P1	8,3	0,0
P2	28,6	42,4
P3	-	36,9
P4	6,8	0,0
P6	5,3	16,2
F (E)	4,4	12,3
K1/K1.25	3,6 / 0,8	0,0
K2	8,6	16,8
M <sup>3</sup>	1,7	-
I alt	66,4	124,6

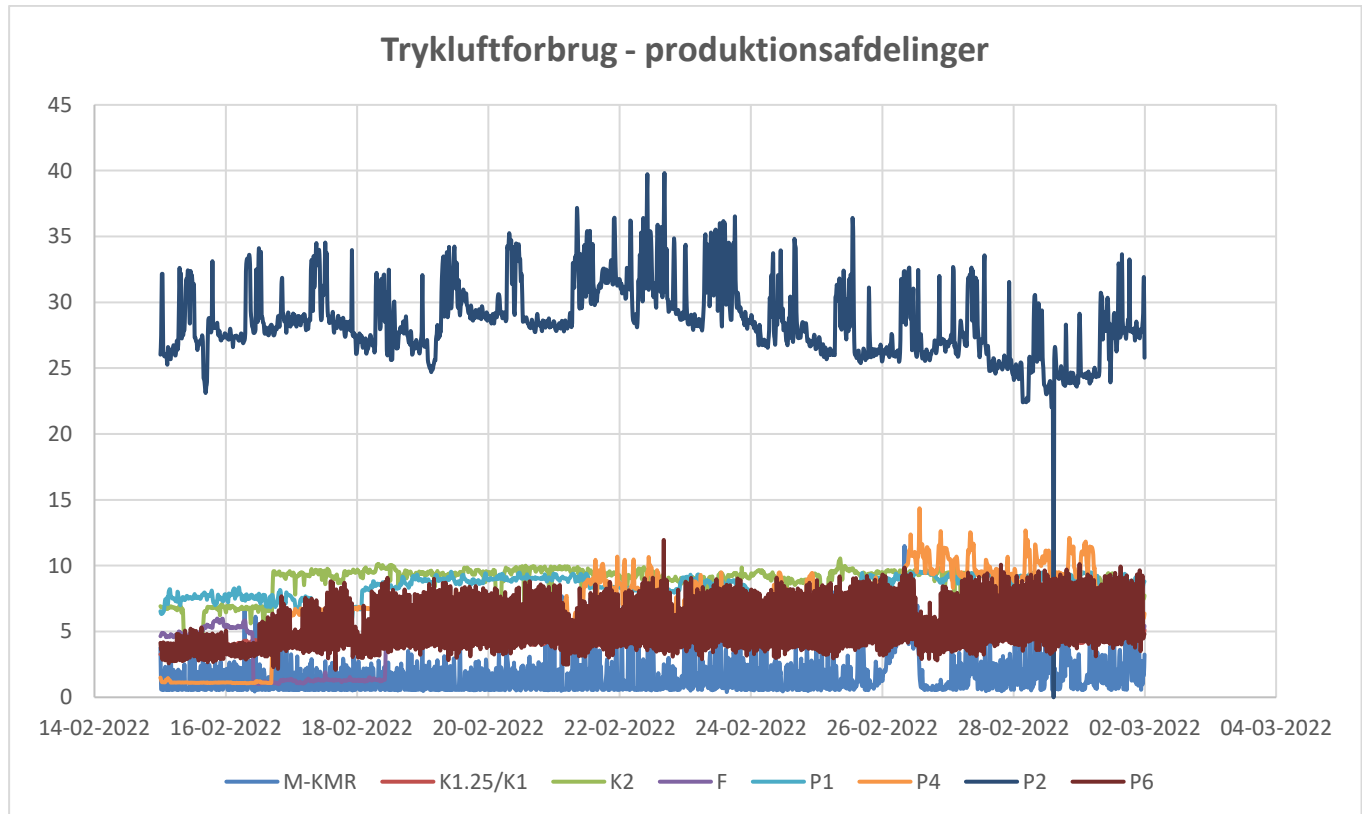
Tabel 10.2 Målte trykluftforbrug i 2022.

Ikke overraskende ses af tabel 10.2, at afdeling P2 anvender hovedparten af tryklufften på fabrikken. Det har ikke været muligt at skaffe en måling af trykluftforbruget afdeling P3, da denne afdeling blev solgt fra i december 2017. Tryklufftanlægget i P3 tilhører og driftes dog stadig af Haldor Topsøe, og tryklufftproduktionen tilføres virksomhedens ringledning. Tryklufftforbruget til P3 er dog meget lavt, da afdelingen er taget ud af drift.

Det ses, at tryklufftproduktionen i de enkelte afdelinger passer med forbruget, undtagen for afdelingerne K1/K1.25, P1 og P4, der nettoaftager af tryklufft, da der ikke er installeret tryklufftanlæg i disse afdelinger.

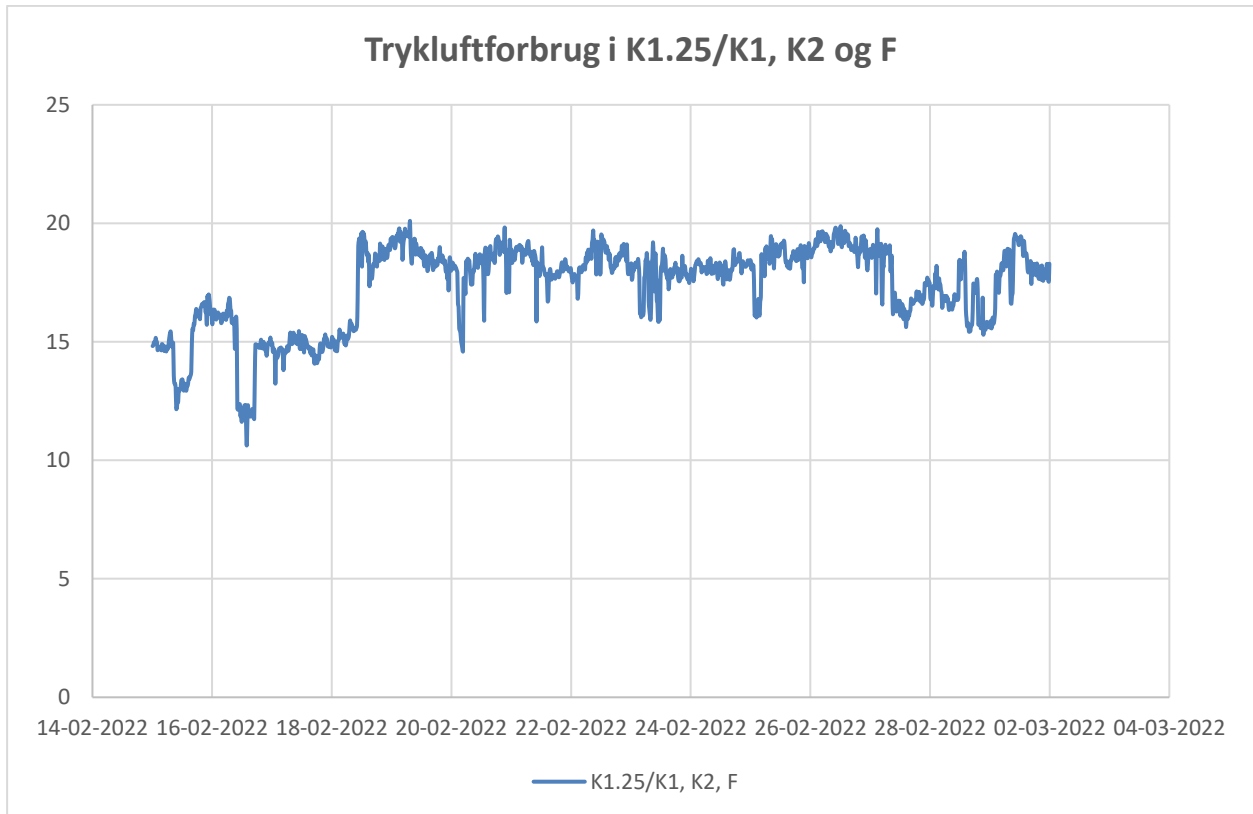
På baggrund af måledata fra de enkelte målere kan der opstilles nedenstående kurver over tryklufftforbruget i de enkelte produktionsafdelinger.

<sup>3</sup> Medregnes ikke da forbruget da denne produktionsafdeling forsynes af eget tryklufftanlæg, der ikke er koblet på fabrikkens ringledning



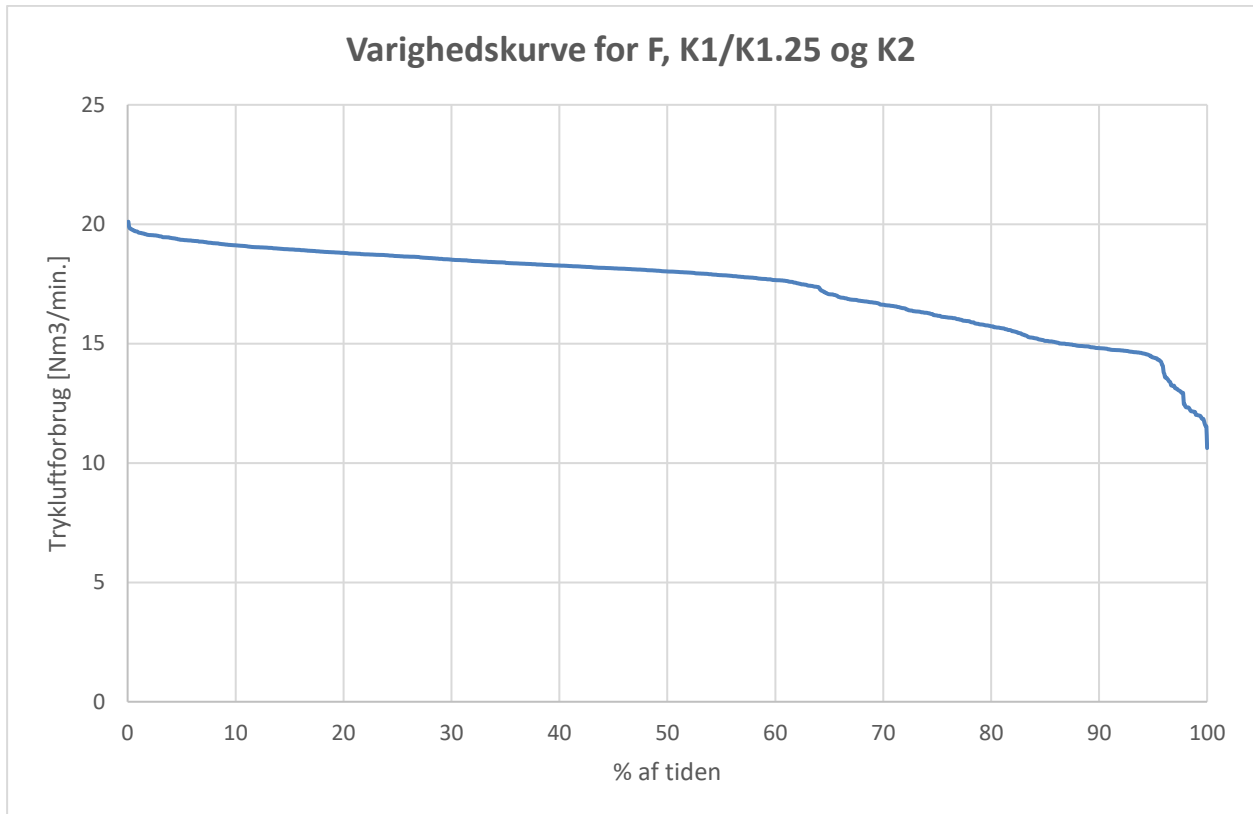
Figur 10.2 Trykluftforbrug i produktionsafdelingerne.

Den nedgravede ringledning har begrænset dimension, og er ikke beregnet til at forsyne fabrikens produktionsafdelinger med trykluft fra de trykluftanlæg der er i drift. Derfor er strategien, at de trykluftanlæg der er placeret nord for Linderupvej skal kunne forsyne de afdelinger, der er placeret i fabrikkens nordlige ende, ligesom de trykluftanlæg der er placeret syd for Linderupvej skal kunne forsyne afdelingerne mod syd. De nedenstående kurver viser de totale trykluftforbrug henholdsvis nord og syd for Linderupvej.



Figur 10.3 Trykluftforbruget nord for Linderupvej.

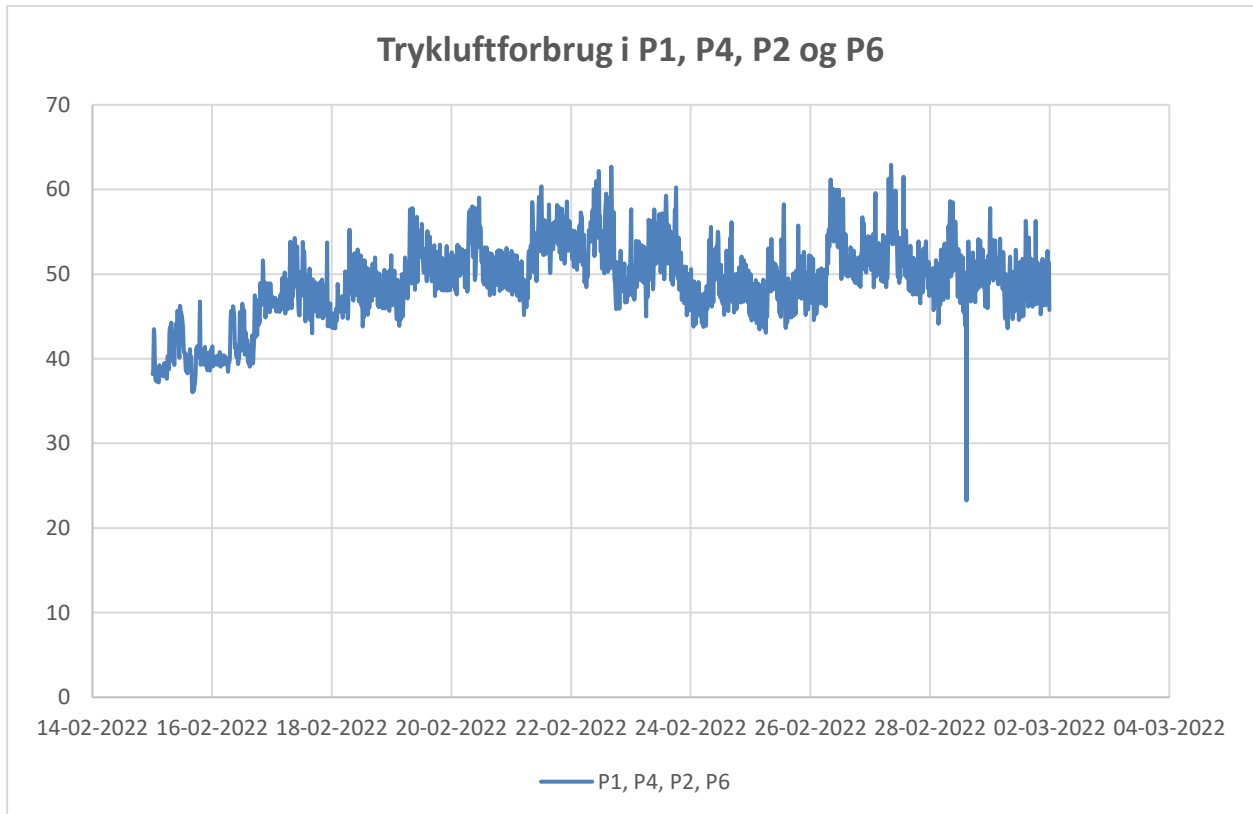
Det ses, at trykluftforbruget varierer mellem 15-20 Nm<sup>3</sup>/min. i det meste af perioden. Den samlede kompressorkapacitet i området nord for Linderupvej er ca. 29,1 Nm<sup>3</sup>/min., idet er taget hensyn til at kun den ene af de to kompressorer i K2 er i drift. Der er således rigelig kapacitet til at forsyne området. Nedenstående figur viser varighedskurven over trykluftforbruget.



Figur 10.4 Varighedskurve for trykluftforbruget nord for Linderupvej.

Det ses, at trykluftforbruget er over 15 Nm<sup>3</sup>/min. i ca. 90% af tiden. Trykluftforbruget dækkes med en Atlas Copco GA75+ med en kapacitet på 12,3 Nm<sup>3</sup>/min. (placeret i bygning E) og en Kaeser DSD205SFC med en kapacitet på 16,8 Nm<sup>3</sup>/min. (placeret i K1). Den frekvensregulerbare kompressor (Kaeser DSD205SFC) anvendes som den primære kompressor, som desuden dækker behovsvariationerne. Tryksetpunktet for kompressoren er 7,4 bar. Hvis denne kompressor ikke kan holde trykket og det daler til under 6,7 bar starter den fast indkoblede kompressor (Atlas Copco GA75+). Hvis trykket stiger til over 7,6 bar aflaster kompressoren og stopper, hvis ikke trykket er faldet til 6,7 bar inden aflasttidens udløb.

Den nedenstående figur viser tilsvarende trykluftforbruget i afdelingerne syd for Linderupvej.

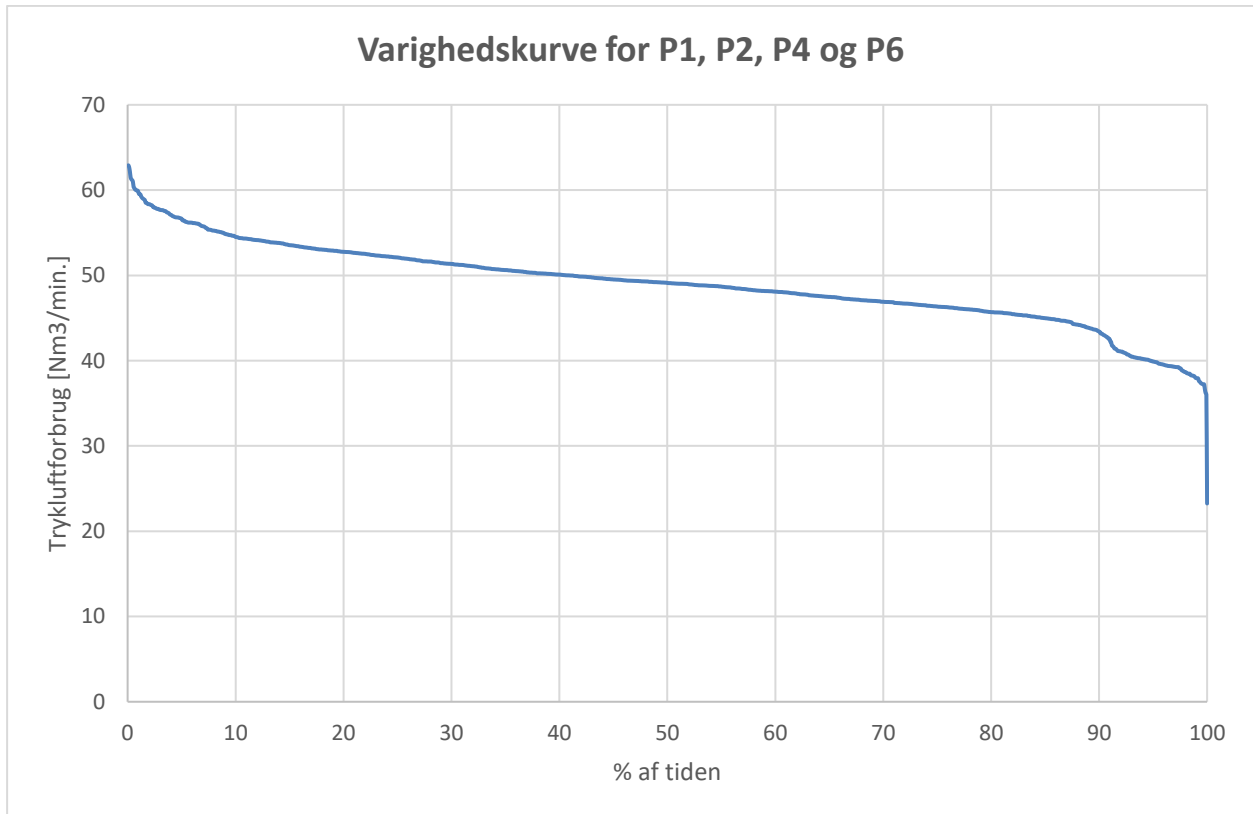


Figur 10.5 Trykluftforbrug syd for Linderupvej.

Det ses, at trykluftforbruget er langt højere end i produktionsafdelingerne mod nord. Forbruget varierer mellem 45-55 Nm<sup>3</sup>/min. i det meste af perioden. Den samlede kompressorkapacitet i området syd for Linderupvej er ca. 95,5 Nm<sup>3</sup>/min., så der er også rigelig kapacitet til at forsyne denne del af fabriksområdet.

Nedenstående figur viser varighedskurven over trykluftforbruget i området syd for Linderupvej.





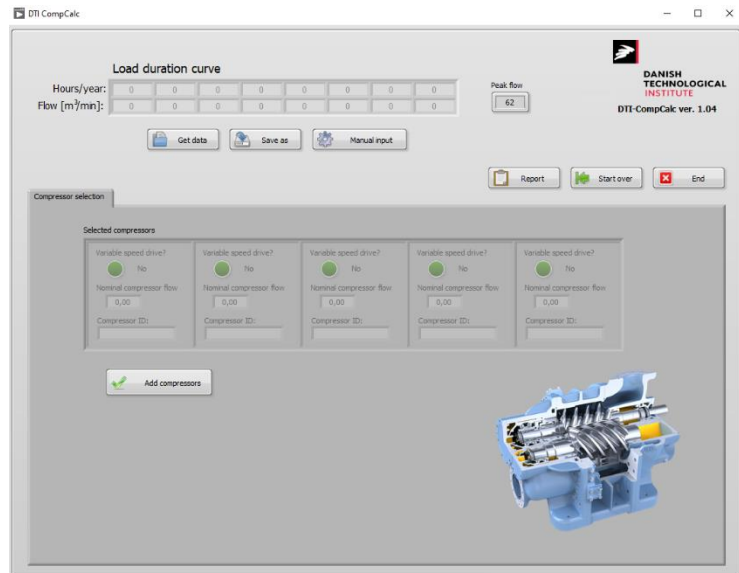
Figur 10.6 Varighedskurve for trykluftforbruget syd for Linderupvej.

Det ses, at trykluftforbruget er over 43 Nm<sup>3</sup>/min. i ca. 90% af tiden. Trykluftforbruget dækkes med Atlas Copco GA75 med en kapacitet på 12,3 Nm<sup>3</sup>/min. (placeret i bygning P3), en Kaeser DSD241 med en kapacitet på 24,0 Nm<sup>3</sup>/min. (placeret i bygning P2) og en Atlas Copco GA90 VSD en kapacitet på 18,4 Nm<sup>3</sup>/min. (placeret i P2) samt en Kaeser CSDX165SFC med en kapacitet på 16,2 Nm<sup>3</sup>/min. (placeret i P6). Den frekvensregulerbare kompressor (Kaeser DSD205SFC) anvendes som den primære kompressor, som desuden dækker behovsvariationerne. Tryksetpunktet for kompressoren er 7,4 bar. Hvis denne kompressor ikke kan holde trykket og det daler til under 6,7 bar starter den fast indkoblede kompressor (Atlas Copco GA75+). Hvis trykket stiger til over 7,6 bar aflaster kompressoren og stopper hvis ikke trykket er faldet til 6,7 bar inden aflasttidens udløb.

## 11 Beregnings- og designværktøjer for trykluftsystemer

### 11.1 Trykluftapplikation

Der er udviklet et nyt værktøj til behovsoptimering af trykluftsystemer som en del af projektet. Udgangspunktet for beregningerne med applikationen er en tabel over flow og tryk som funktion af tiden. Applikationen tager udgangspunkt i systemer, der kan have fra én til i alt fem kompressorer af varierende størrelse og med forskellig type kapacitetsregulering, som on/off, last/aflast og omdrejningsregulering. Grundlæggende set skal der altid foretages en overordnet vurdering af opbygningen af trykluftsystemet. Hvis der er store variationer i samtidige trykbehov vil det jo altid være det højeste tryk, der bestemmer driften og vil være begrænsende for den opnåelige energiøkonomi. I sådanne tilfælde bør overvejes flere separate trykluftsystemer. Hvis det udviklede beregningsværktøj skal anvendes i sådanne tilfælde kan beregningerne gentages med processerne opdelt på systemer med forskelligt tryk.



I værktøjet skal der indtastes sammenhørende værdier for flow og tid (en varighedskurve), der opstilles på baggrund af en detaljeret gennemgang af de processer anlægget betjener. Varighedskurven danner grundlag for beregningen af energiforbruget for den kompressorkonfiguration, der efterfølgende indtastes. Ved udviklingen af værktøjet er der opstillet matematiske udtryk for trykluftssystemets komponenter på baggrund af data fra datablade og ydelseskurver. Der er udviklet en avanceret energiberegnerdel, der kan håndtere de forskellige reguleringsformer, der normalt benyttes i industrien.

Værktøjet kan anvendes både til analyse af eksisterende anlæg og ved planlægning af nyanlæg. Trykluftapplikationen er baseret på Kaeser's produktprogram. Værktøjet kan downloades sammen med det øvrige projektmateriale, og der er udarbejdet en brugervejledning hertil. Værktøjet er udført i National Instruments programsprog Labview, der installeres med den Installer der kan hentes sammen med det øvrige projektmateriale.

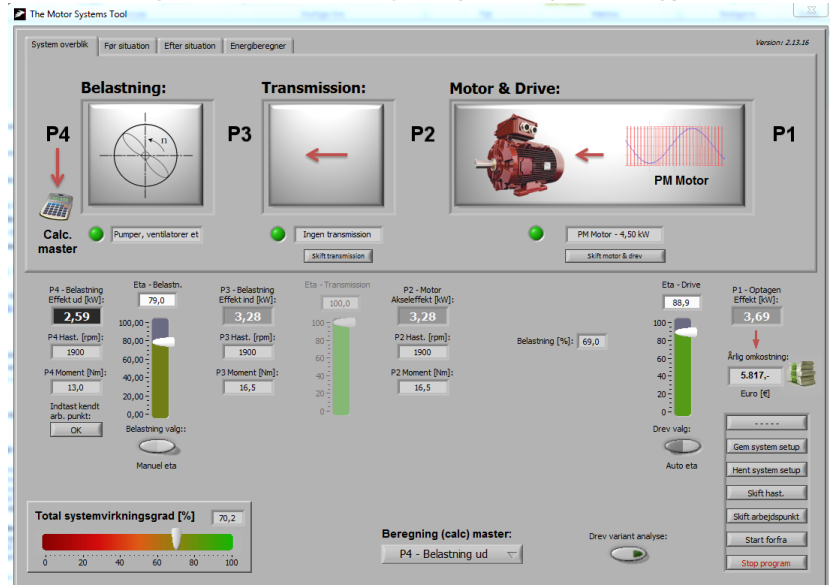
## 11.2 Motor Systems Tool

Motor Systems Tool er et beregningsværktøj til systemoptimering, der er udviklet under EL-FORSK programmet (projekt nr. 344-008 – 2. generationsværktøj til systemoptimering). I Motor Systems Tool er det muligt at

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

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

Det er f.eks. ikke muligt at indtaste specifikke forbrugsprofiler, således som det er tilfældet i det beregningsværktøj der er udviklet i dette projekt.



## 11.3 Andre værktøjer

Der findes en række andre værktøjer der kan anvendes ved design af trykluftsystemer. Heriblandt kan der henvises til Atlas Copco og Kaeser Kompressorer, der har egne designprogrammer.

Trykluftanlæggets drift kan analyseres ved at måle eller aflæse afgangstrykket på kompressoren samt tid i belastet og aflastet tilstand (hvis det er kompressorens driftsform) eller omdrejningstallet for omdrejningstalsregulerbare kompressorer. Ud fra disse målinger er det muligt at beregne flowet indirekte, når der samtidig er læst data for sammenhængen mellem tryk og flow for de pågældende kompressorer ind i analyseværktøjet.

Kaeser Kompressorerers udstyr til analyse af trykluftanlæg hedder ADA (Air Demand Analysis). Foruden flowet måles trykket efter beholderen (systemtrykket) samt effektoptag for kompressorerne. Data fra analyseværktøjet kan overføres til et andet analyseværktøj der hedder KESS (Kaeser Energy Saving System), hvor besparelser ved anvendelse af andre kompressorkonfigurationer kan beregnes. Nedenstående eksempel hentet fra en undersøgelse hos den grafiske virksomhed Stibo Graphic A/S, hvor der er anvendt Kaeser's analyseværktøj.

**Beregning af energibesparelse ved udskiftning af kompressorer****Nuværende system:**

Det nuværende system består af tre stk. parallelkoblede skruekompressorer. Data for kompressorerne ses i figur 4.1. Det årlige elforbrug er ca. 1.400.000 kWh.

type:	FAD:	Effektforbrug (last):	Effektforbrug (tomg.):
01: GA 75 P FF API 1612898 luftkølet	12.28 m <sup>3</sup> /min	82.30 kW	17.00 kW
02: GA 55 FF All 483070 luftkølet	8.71 m <sup>3</sup> /min	64.20 kW	16.20 kW
03: GA 75 VSD (2005-2009) \ FC luftkølet	2.22 - 13.43 m <sup>3</sup> /min	89.50 kW	
<b>total:</b>	<b>34.42 m<sup>3</sup>/min</b>	<b>236.00 kW</b>	

Figur 4.1 Nuværende trykluftsystem.

**De tre nye mulige løsninger er:**

1) System 1 bestående af et stk. frekvensreguleret kompressor og to stk. last/aflast kompressorer, – meget lig den nuværende løsning på Stibo Graphic A/S.

type:	FAD:	Effektforbrug (last):	Effektforbrug (tomg.):
01: DSD 172 (400V) \ FC luftkølet	3.59 - 15.90 m <sup>3</sup> /min	102.05 kW	
02: CSD 105 luftkølet	10.13 m <sup>3</sup> /min	63.60 kW	14.80 kW
03: CSD 105 luftkølet	10.13 m <sup>3</sup> /min	63.60 kW	14.80 kW
<b>total:</b>	<b>36.16 m<sup>3</sup>/min</b>	<b>229.25 kW</b>	

Figur 4.2 System 1 - et stk. frekvensreguleret kompressor og to stk. last/aflast kompressorer.

2) System 2 bestående af et stk. frekvensreguleret kompressor og et stk. last/aflast kompressor, hvor kompressorerne er større end nu for at nå den nødvendige kapacitet.

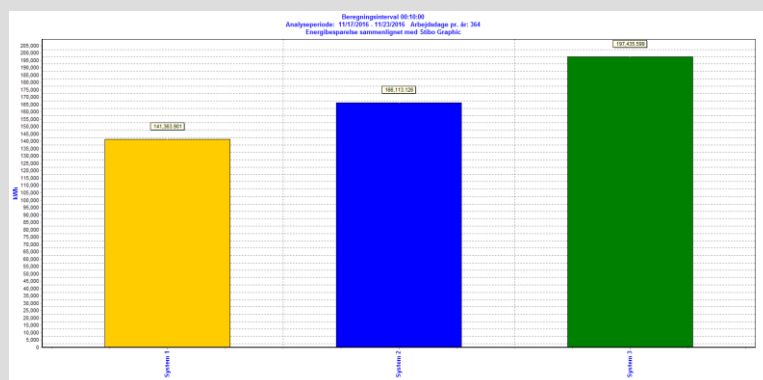
type:	FAD:	Effektforbrug (last):	Effektforbrug (tomg.):
01: DSD 238 (400V) \ FC luftkølet	5.90 - 22.00 m <sup>3</sup> /min	141.74 kW	
02: CSDX 140 luftkølet	13.72 m <sup>3</sup> /min	86.10 kW	20.80 kW
<b>total:</b>	<b>35.72 m<sup>3</sup>/min</b>	<b>227.84 kW</b>	

Figur 4.3 System 2 - et stk. frekvensreguleret kompressor og et stk. last/aflast kompressor.

3) System 3 bestående af tre stk. last/aflast kompressorer; to mindre og en større.

type:	FAD:	Effektforbrug (last):	Effektforbrug (tomg.):
01: CSD 105 luftkølet	10.13 m <sup>3</sup> /min	62.90 kW	14.70 kW
02: CSD 105 luftkølet	10.13 m <sup>3</sup> /min	62.90 kW	14.70 kW
03: DSD 175 luftkølet	16.86 m <sup>3</sup> /min	97.30 kW	21.20 kW
<b>total:</b>	<b>37.12 m<sup>3</sup>/min</b>	<b>223.10 kW</b>	

Figur 4.4 System 3 - tre stk. last/aflast kompressorer; to mindre og en større.



Besparelsen ligger på 141.000 kWh for system 1, 166.000 kWh for system 2 og 197.000 kWh for system 3. Den største energibesparelse på ca. 16% opnås ved tre stk. last/aflast kompressorer.

## 12 Formidling af resultater

### 12.1 Artikler m.m.

Projektets resultater er formidlet gennem artikler i f.eks. ELFORSK Nyt, HVAC Magasinet og Maskinmesteren samt på LinkedIn og Teknologisk Institut's hjemmeside ved projektet afslutning.

Alt det udviklede materiale er gjort tilgængeligt for alle via Teknologisk Instituts hjemmeside og på Registreringsordningen for Energisynskonsulenter's hjemmeside.

### 12.2 Indlæg på temadage

Der blev præsenteret en beta-version af beregningsprogrammet i forbindelse med temadagen for Energisynskonsulenter i november 2022, hvor projektet og dets formål ligeledes blev omtalt.

Efter projektets afslutning (andet halvår af 2023) vil Teknologisk Institut afholde et gå-hjem-møde, hvor beregningsprogrammet præsenteres. Der inviteres bredt ud blandt drifts- og energi-ansvarlige i virksomheder, kompressorleverandører, energisynskonsulenter, tekniske eksperter, energirådgivere, energiselskaber og andre med behov for ny viden om energieffektivisering af trykluftsystemer.

Ligeledes vil Teknologisk Institut bidrage med et indlæg på temadagen for Energisynskonsulenter i november 2023, således at energisynskonsulenterne er bekendt med beregningsprogrammet og dets muligheder.

## 13 Referencer

### Håndbøger

- /1/ Den store blå om Systemoptimering, 1. udgave, Dansk Energi, 2015, Claus M. Hvengaard (Teknologisk Institut), Sandie Brændgaard Nielsen (Teknologisk Institut) og Jørn Borup Jensen (Dansk Energi). ISBN 978-87-91326-11-0
- /2/ Håndbog i Energirådgivning - Trykluft, DEFU, 1999, Kim Falck Grony (Energirådgivning Fyn) og Jan Christiansen (DEFU)

### Rapporter, kataloger, vejledninger, pjecer og standarder

- /3/ Kortlægning af motorbestanden i jern- og metalindustrien, Teknisk rapport 397, DEFU, 1998, Hans Henrik Hansen (DEFU)
- /4/ Kortlægning af motorbestanden i nærings- og nydelsesmiddelindustrien, Teknisk rapport 411, DEFU, 1998, Hans Henrik Hansen (DEFU)
- /5/ Energoptimering ved elmotordrift, Teknisk rapport 322, DEFU, 1991, Anders Rebsdorf (DEFU), Hans Andersen (DEFU), Jørn Borup Jensen (DEFU), Mogens Johansson (Dansk Energi Analyse a/s), Torben Laubst (DIA-E) og Henrik Ørskov Peder sen (DIA-E).
- /6/ Elbesparelser ved trykluftanvendelse. Teknisk kortlægning, Teknisk rapport 367, DEFU, 1996, Hans Andersen (DEFU), Kim Falck Grony (Elforsyningens Energirådgivning), Jørgen Hvid (Dansk Energi Analyse), Johnny Iversen (dk-Teknik), Jørn Borup Jensen (DEFU), Inger Anette Rasmussen (Dansk Energi Analyse) og Mogens West (NESAs)
- /7/ Elbesparelser ved trykluftanvendelse. Edb-model, Teknisk rapport 368, DEFU, 1996, Hans Andersen (DEFU), Kim Falck Grony (Elforsyningens Energirådgivning), Jørgen Hvid (Dansk Energi Analyse), Johnny Iversen (dk-Teknik), Jørn Borup Jensen (DEFU), Inger Anette Rasmussen (Dansk Energi Analyse) og Mogens West (NESAs)
- /8/ Elbesparelser ved trykluftanvendelse. Substitution og effektivisering, Teknisk rapport 369, DEFU, 1996, Hans Andersen (DEFU), Kim Falck Grony (Elforsyningens Energirådgivning), Jørgen Hvid (Dansk Energi Analyse), Johnny Iversen (dk-Teknik), Jørn Borup Jensen (DEFU), Inger Anette Rasmussen (Dansk Energi Analyse) og Mogens West (NESAs)
- /9/ Energy Optimal Control of Induction Motor Drives, Aalborg Universitet – Institute of Energy Technology, 2000, Flemming Abrahamsen, ISBN: 87-89179-26-9

- /10/ Systemoptimering af elmotordrevne maskinsystemer, PSO-projekt nr. 338-009, Teknologisk Institut 2008. Claus M. Hvenegaard (Teknologisk Institut), Hans Andersen (Teknologisk Institut), Sandie Brændgaard Nielsen (Teknologisk Institut) og Mads Peter Rudolph Hansen (Teknologisk Institut)
- /11/ Reduktion af elforbrug til motordrift ved anvendelse af PM motorer, PSO-projekt nr. 340-028, Teknologisk Institut 2009. Claus M. Hvenegaard (Teknologisk Institut), Sandie B. Nielsen (Teknologisk Institut), Mads Peter Rudolph Hansen (Teknologisk Institut), Christian Grønborg Nikolaisen (Teknologisk Institut), Ewen Ritchie (Aalborg Universitet) og Krisztina Leban (Aalborg Universitet)
- /12/ Værktøj til brug ved systemoptimering, PSO-projekt nr. 341-014, Teknologisk Institut 2010. Sandie Brændgaard Nielsen (Teknologisk Institut), Per Tage Jespersen (Teknologisk Institut) og Claus M. Hvenegaard (Teknologisk Institut)
- /13/ 2. generationsværktøj til systemoptimering, PSO-projekt nr. 342-008, Teknologisk Institut 2013. Sandie Brændgaard Nielsen (Teknologisk Institut), Per Tage Jespersen (Teknologisk Institut) og Claus M. Hvenegaard (Teknologisk Institut)
- /14/ Energibesparelser ved trykluft. Pjece udarbejdet for Energistyrelsen af Dansk Energi Analyse A/S. Udgivelsesår 2002
- /15/ Trykluffteknik - Grundlæggende principper og praktiske tips. Kaeser Kompressorer
- /16/ Compressed Air Manual. Atlas Copco. 8th edition. ISBN: 9789081535809
- /17/ Pocket guide. Air tools installation. Atlas Copco
- /18/ Den lille blå om trykluft. Dansk Energi, 2019
- /19/ Kortlægning af energiforbruget i erhvervslivet, august 2022. Peter M. Petersen, Viegand & Maagøe ApS, Søren Draborg, Teknologisk Institut m.fl.

## Hjemmesider

Dansk Energi  
[www.danskenergi.dk](http://www.danskenergi.dk)

ELFORSK  
[www.elforsk.dk](http://www.elforsk.dk)

Energistyrelsen  
[www.ens.dk](http://www.ens.dk)

Teknologisk Institut  
[www.teknologisk.dk](http://www.teknologisk.dk)