

Inkopplingsprinciper för gasdrivna kolvmotorer i kraftvärmeapplikationer

Naturgas

Utveckling & Miljö

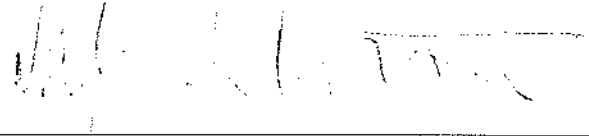
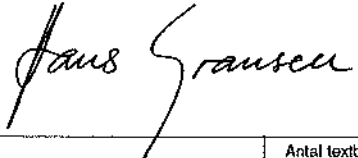
FUD

FORSKNING • UTVECKLING • DEMONSTRATION

Vattenfall

Inkopplingsprinciper för gasdrivna kolvmotorer i kraftvärmeapplikationer

Naturgas

Från BES	Löpnnummer U (G) 1990/7	Datum 1989-12-08	Kl.nr
Författare Tove Ekeborg John Danelius (kap 4)		Teknikområde Naturgas	
Rapport kan lånas från Biblioteket 162 87 VÄLLINGBY		Rapporter kan rekvideras från Statens Vattenfallsverk Älvkarlebylaboratoriet Dokumentationscentralen 810 71 ÄLVKARLEBY Tel: 026/881 00	Projektnummer 98432
Vid utlärare 		Godkänd 	
Sökord Naturgas, kolvmotorer, kraftvärme, inkoppling, värmesystem, elsystem			Antal textblad 42
			Antal bilageblad 15
☒ Only summary in English	☐ Whole report in English	☐ It exists a brochure in Swedish/English	☐ Other

Rubrik

Inkopplingsprinciper för gasdrivna kolvmotorer i kraftvärmeapplikationer

Sammanfattning

Denna rapport behandlar anpassning och inkoppling av värme- och elsystem för gasdrivna kolvmotorer i kraftvärmeanläggningar. Följande aspekter tas upp:

- Val av motortyp (otto eller diesel) och effektstorlek för bästa anpassning till energiunderlaget.

Här ses en grov gräns vid 1 MW_v. Gasdieselmotorer väljs företrädesvis vid anläggningar större än 1 MW_v, och motorer som arbetar enligt ottoprincipen väljs vid mindre anläggningar. Lämplig effektstorlek fås genom tumregeln att anläggningens utnyttjningstid bör vara 4000- 4500 timmar. Detta motsvarar oftast ungefär 40% av maximala värmeeffekten i varaktighetskurvan.

- Motorns värmeåtervinningssystem inklusive laddluftkylning vid olika gaskvaliteter.

Värme återvinns i kraftvärmemotorer i laddluftkylare, smörjoljekylare, motormantelkylare, samt ur avgasvärmeväxlare. Laddluften håller en förhållandevis låg temperatur och den värmen kan inte alltid utnyttjas. Vid sämre gaskvaliteter är dock laddluftkylning nödvändigt för att undvika materialangrepp och för att erhålla hög effekt. Någon form av reservkylning används då.

- Lämplig inkoppling av motorer, pannor, reservkylare och ackumulator.

Om pannan skall användas som topplast- eller reservaggregat bör den parallellkopplas med motorn. En spetslastpanna, som värmer framledningsvattnet ytterligare efter motorn eller producerar ånga, skall däremot seriekopplas.

I de flesta fall styrs kraftvärmeanläggningen efter värmebehov, men elbehov- och gastillgångsstyrning förekommer. Då behövs ackumulator, som parallellkopplas, och reservkylare, som seriekopplas strax före motorn. En ackumulator kan även vara ekonomisk vid värmestyrda anläggningar.

- Anslutning till elnätet.

Beroende på avgiven effekt anslutes generatorn till högspännings- eller lågspänningsnät. Vid effekter över 0.5 MW_e sker anslutningen i regel till högspänningsnät.

En anpassning av motorn och dess inkoppling till befintliga system ligger till grund för att erhålla en väl fungerande anläggning med god driftsekonomi.

SUMMARY

Principles of system connection for gasfueled piston engines in cogenerating applications.

This report describes the adeptment and connection of heat and electricity system for gasfueled piston engines in combined power and heating plants (cogeneration). The following aspects are presented:

- The selection of engine type (otto or diesel) and power rating for optimum adeptment to energy demand.

The lower limit for gasdiesel engines is approximately 1 MW heat. For a smaller plant otto engines are recommended. Regarding power rating, the engines utilization time should be 4000- 4500 hours. This mostly correspond to about 40% of maximum heat requirement.

- The heat recovery system of the engine including cooling of the gas-airmixture with varying gasqualities.

Heat is recovered from the intercooler, the lubricating oil cooler, the cylinder and engine cooler, and from the exhaust gas heat exchanger. The gas-airmixture has a relatively low temperature and the heat cannot always be used. However, when the gasquality is low the cooling of the gas-airmixture is necessary in order to avoid material damage and to receive a high power output. Some sort of reserve cooler is then used.

- Fitting connection of engines, boilers, reserve cooler, and accumulator.

If the boiler will be used as a reserve or peak load unit, it should be connected parallel to the engine. A boiler that heats the water additionally after the engine or produces steam, should instead be connected in serie. In most cases the plant is controlled by heat requirement, but plants controlled by electricity requirement and gas supply are also found. In the latter case an accumulator and a reserve cooler are needed. The accumulator can also be economical in heat requirement controlled plants.

- Connection to electricity network.

Depending on power output the electric generator is connected to a transmission system or to a low tension system. When the power output exceeds 0.5 MW is it usually connected to a transmission system.

An adeptment of the engine and its connections to existing systems is a prerequisite of a well working plant with good operating economy.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Sammanfattning
Summary in english
Innehållsförteckning

1 . Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Målsättning	3
2 . Dimensionering och val av motor	4
2.1 Effektdimensionering	4
2.2 Motortyp	6
2.2.1 Ottomotorn	6
2.2.2 Dieselmotorn	8
2.2.3 Val av motortyp	11
3 . Inkoppling av värmesystem	13
3.1 Motorns värmeåtervinningssystem	13
3.1.1 Allmänt	13
3.1.2 Laddluftkylare	14
3.1.3 Inkoppling av mindre motor	15
3.1.4 Inkoppling av större motor	16
3.2 Pannor	17
3.2.1 Allmänt	17
3.2.2 Inkoppling	17
3.3 Ackumulator	18
3.3.1 Allmänt	18
3.3.2 Inkoppling	19
3.4 Reservkylare	20
3.4.1 Allmänt	20
3.4.2 Inkoppling	21
3.5 Generella inkopplingar av värmesystem	21
3.5.1 Värmebehovsstyrda anläggningar	21
3.5.2 Elbehovsstyrda anläggningar	24
3.5.3 Gastillgångstyrda anläggningar	25
4 . Elsystem	26
4.1 Anslutning till elnätet	26
4.1.1 Allmänt	26
4.1.2 Anslutning till lågspänningsnät	26
4.1.3 Anslutning till högspänningsnät	28
4.1.4 Mätutrustning	29
4.1.5 Vakter	29
4.2 Styrning och övervakning	30

5 . Anläggningsexempel	33
5.1 SYSAV, Trelleborg	33
5.2 Nykvarn, Linköping	35
5.3 Nykøbing Mors Fjärrvärmeverk	37
5.4 Snedsted Fjärrvärmeverk	39
6 . Referenser	41
Bilaga 1: Beräkningsexempel för optimering av kraftvärmeanläggning	43

1 INLEDNING

1.1 Bakgrund

Kraftvärme och industriellt mottryck står i dag för en mycket liten del av den svenska elproduktionen. Kraftvärmeanläggningar, dvs anläggningar där både el och värme produceras, är ur energiteknisk synpunkt intressant, eftersom totalverkningsgraden är betydligt högre än i kondenskraftverk beroende på att även lågvärdig energi tas tillvara. Då vi nu står inför avveckling av kärnkraften (som producerar hälften av Sveriges elenergi) och därtill hörande elprishöjningar, kommer kraftvärmens betydelse med stor sannolikhet att öka avsevärt.

Småskalig kraftvärme kan lämpa sig för värme- och elförsörjning av t ex ett sjukhus, ett villaområde eller för kommunala fjärrvärmenät. Även industriella applikationer är intressanta. I de flesta fall är det värmeunderlaget som styr motoreffekten, och elenergiproduktionens storlek beror sålunda på värmebehovet. Överskott av el levereras ut på det externa nätet, medan omvänd strömriktning uppstår då elproduktionen är mindre än behovet. Extra elenergi köps alltså då från nätet.

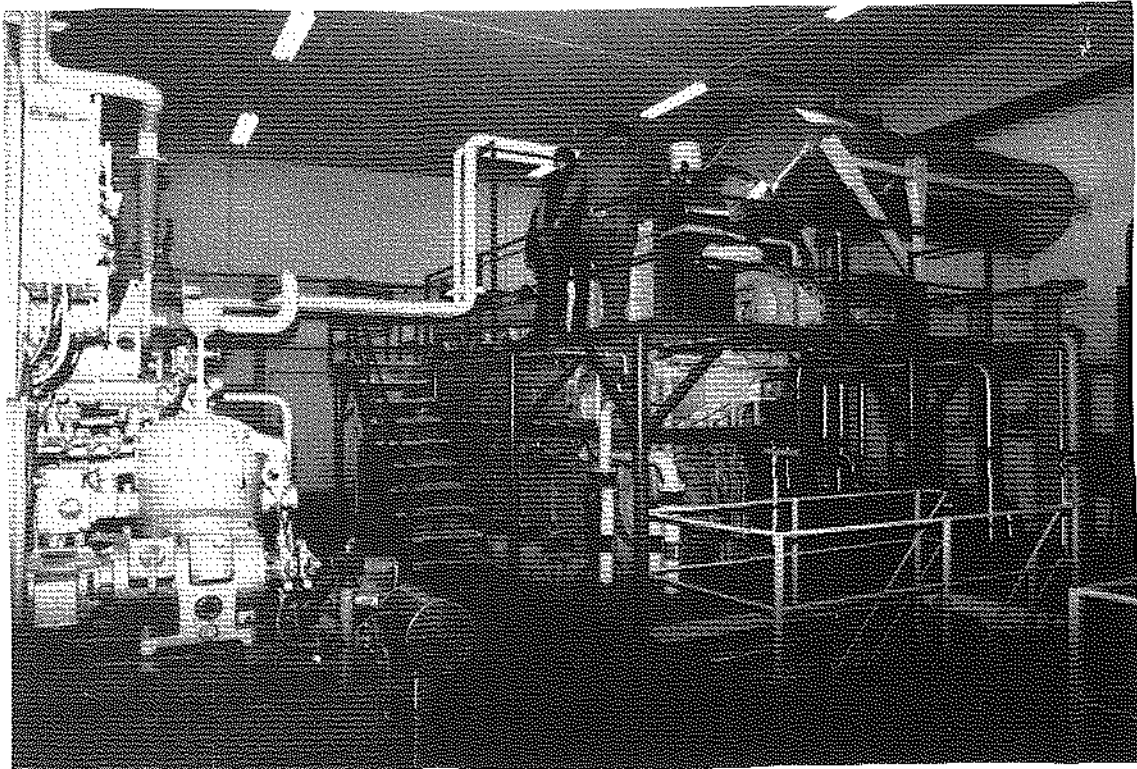
Det för närvarande mest aktuella bränslet för ersättning av kärnkraften är naturgas. Naturgas är, jämfört med kol och olja, ett rent bränsle, både vad beträffar hantering och emissioner. I Sverige kommer i dag all naturgas från Danmark och levereras till Skåne och vidare upp till Göteborg. En fortsatt utbyggnad pågår och naturgasen beräknas nå Stockholm 1994-95. Det är ur försörjningssäkerhetssynpunkt önskvärt att gasen levereras från flera länder, och förhandlingar med Norge och Sovjetunionen pågår.

Rötgas kan också användas som bränsle i kraftvärmeanläggningar. Gasen utvinns ur avloppsreningsverk genom rötning av slam i speciella rötkammare. Rötgasen innehåller förutom metan (60-70%) även en betydande andel CO_2 (23-35%), vilket ger ett lägre värmevärde än naturgas. Deponigas, som utvinns ur soptippar, har ytterligare något högre CO_2 -halt och lägre värmevärde. Både rötgas och deponigas produceras i flera kommunala reningsverk i landet och utnyttjas för någon form av energiproduktion.

Ett antal olika kraftvärmesystem för naturgasanvändning finns. De i dag ekonomiskt och tekniskt viktigaste kan sägas vara:

- Mottrycksångturbinanläggning
- Gasturbinanläggning
- Anläggning med kombicykel
- Kolvmotoranläggning

I denna rapport behandlas enbart kolvmotoranläggningar.



Figur 1.1 Kolvmotoranläggning i Nykøbing, Danmark.

Kolvmotorer med naturgas som bränsle arbetar efter två olika principer, diesel- eller ottoprocess. Dieselmotorerna, som använder dieselolja som tändbränsle, utmärker sig genom sitt höga alfavärde och sina goda dellastegenskaper. Ottomotorerna utnyttjas främst i mindre anläggningar och finns på marknaden som kompletta kraftvärmemoduler, innehållande motor, värmeväxlare, generator samt styrutrustning.

Vid installation av naturgasdrivna kolvmotorer för kraftvärmeapplikation finns ett antal viktiga punkter att beakta angående anpassning till befintliga system. Dimensionering av effektstorlek i förhållande till maximalt värmebehov, inkoppling på värme- och elsystem, och samkörning med pannor är några aspekter som noga måste analyseras för att erhålla en väl fungerande anläggning med god driftekonomi.

1.2 Målsättning

Rapportens målsättning är att utifrån generella förutsättningar klarställa hur inkoppling och anpassning av en gasdriven kolvmotor till värme- och elsystem bör göras för att ge bästa möjliga funktion och ekonomi för varje anläggning. Syftet är att erbjuda en systemfilosofi för dimensionering och inkoppling, så att projektplanering och projektering av kolvmotoranläggningar underlättas.

2 DIMENSIONERING OCH VAL AV MOTOR

Vid projektering av en kraftvärmeanläggning med gasdriven kolvmotor skall motortyp och effektstorlek väljas. I de flesta fall utgår man från värmelasten, som kan beskrivas med ett varaktighetsdiagram. Maximala effektbehovet är en viktig parameter.

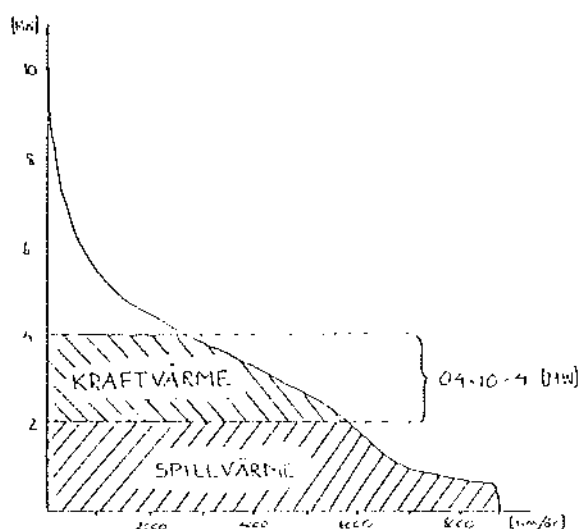
2.1 Effektdimensionering

Som tumregel gäller här att, för att lönsamhet skall uppnås bör en kraftvärmeanläggnings utnyttjningstid vara 4000 - 4500 timmar per år.

Denna utnyttjningstid ger normalt att lämplig motoreffekt är ca 40% av maximala värmeeffektbehovet, men detta kan naturligtvis variera beroende på varaktighetskurvans utseende, motortyp, bränslekostnader mm. Om en baslast, t ex spillvärme, redan täcker en del av effektbehovet, dras baslasteffekten från 40%-effekten för att indikera lämplig motoreffekt.

Exempel: Maximalt värmeeffektbehov: 10 MW
 Spillvärme: 2 MW

Lämplig motoreffekt: $(0.40 \times 10) - 2 = 2 \text{ MW}$



Figur 2.1 Varaktighetskurva och ungefärlig lämplig aggregatstorlek.

Om lämplig effekt nu direkt avgör motortyp (se avsnitt 2.2), kan marknadsutbudet undersökas i den effektklassen för att finna en motor med effekt så nära den uppskattade lämpliga som möjligt. Erbjuds endast en effektstorlek inom området, kan den direkt sägas vara den bästa, och väljs sålunda till kraftvärmeanläggningen.

Om det däremot finns flera effektstorlekar inom det lämpliga området, bör nu en noggrannare effektdimensionering utföras, utgående från den uppskattade lämpliga effektstorleken och varaktighetskurvan. Följande arbetsordning kan tillämpas:

- Den på marknaden befintliga effektstorlek som ligger närmast den uppskattade lämpliga storleken väljs som nominell effekt.
- Bränsleförbrukning och elproduktion som funktion av värmeeffekt för den nominella storleken tas fram. Ur detta kan alfavärde och verkningsgrad som funktion av värmeeffekt beräknas. En minlast definieras och tillgängligheten uppskattas.
- Välj några lämpliga effektstorlekar i närheten av den nominella effekten. Prestandan för den nominella motorn skalas proportionellt till de andra storlekarna. Tillgängligheten antas konstant.
- Med hjälp av varaktighetskurvan beräknas nu årsproduktion av värme och el, årsverkningsgrad samt årsalfavärde för de olika storlekarna.
- Kostnader för investering, personal och drift- och underhåll tas fram för motorn med nominell storlek, och dessa skalas sedan på lämpligt sätt till övriga effekter. Bränslekostnad fås ur årsbränsleförbrukningen.
- Årsintäkterna beräknas för varje storlek med hjälp av årsproduktionen av el och värme.
- Årlig vinst fås nu som intäkter minus kostnader. Den effektstorlek som ger störst vinst är optimal.
- Marknadsutbudet studeras för att hitta en motorstorlek så nära den optimala som möjligt.

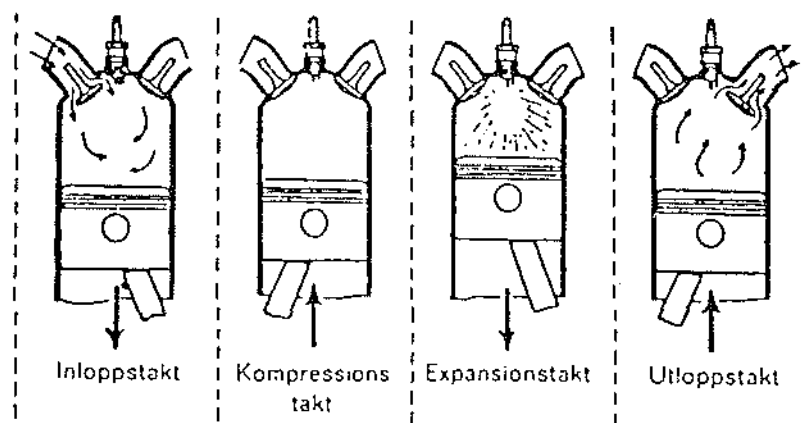
I bilaga 1 genomgås mer ingående denna metodik för att hitta den ur kostnadssynpunkt lämpligaste aggragatstorleken, och detta optimeringsarbete görs för två exempel på varaktighetskurvor. Flera olika typer av motoranläggningar undersöks, så resultaten indikerar både lämplig effektstorlek och motortyp.

2.2 Motortyp

Gasdrivna kolvmotorer kan indelas i två olika typer efter huvudprincipen för förbränningsprocessen, nämligen ottomotorer eller dieselmotorer. I följande två avsnitt beskrivs dessa typer var för sig, och i avsnittet därpå behandlas val av lämplig typ.

2.2.1 Ottomotorn

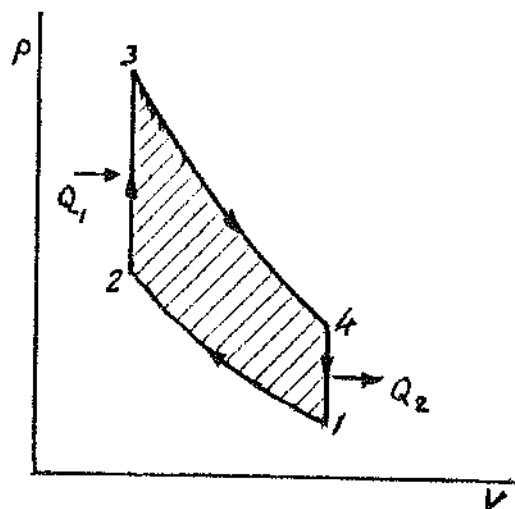
I en fyrtakts ottomotor börjar arbetscykeln med insugningstakten. Kolven går då nedåt i cylindern och bränsle-luftblandningen sugs in. Sedan följer kompressionstakten, där blandningen komprimeras genom kolvens uppåtgående rörelse. Efter detta antänds bränsle-luftblandningen av tändstiftet, och expansionstakten inleds. Det är nu som själva arbetet uträttas, genom att bränsle-luftblandningens volym expanderar kraftigt vid förbränning. Den fjärde och sista arbetstakten kallas utblåsning och innebär att kolven genom en uppåtgående rörelse pressar avgaserna ut ur cylinderrummet.



Figur 2.2 Arbetsprincipen för en fyrtakts ottomotor. <6>

Ottomotorn finns även i tvåtaktsutförande, men detta är inte särskilt vanligt i kraftvärme-sammanhang eftersom bränsleförbrukningen och emissionsbildningen blir högre.

Vid en ideal ottocykeln sker energitillförseln momentant när kolven efter kompressionstakten befinner sig i övre vändpunkten. Volymen är då konstant. I PV-diagrammet på nästa sida motsvarar detta linjen 2-3. Att volymen är konstant utgör en skillnad från dieselprocessen, där energitillförseln istället sker vid konstant tryck.



- 1-2 Kompression
- 2-3 Värmetillförsel
- 3-4 Expansion
- 4-1 Värmebortförsel

Diagram 2.1 PV-diagram för ottocykeln. <6>

En ottomotor lämpar sig väl för gasdrift. Ett problem med naturgas som bränsle är antändningssvårigheter. En kraftigare tändgnista krävs sålunda vid gasdrift. Trots att gasen är svår att antända, kan naturgas sägas vara ett naturligt ottomotorbränsle pga sitt höga oktantal (ca 130). Detta medger möjligheter att öka kompressionsförhållandet, för att på så sätt erhålla högre verkningsgrad. Tyvärr ökar då också NO_x -emissionerna. Tre olika principer för att minska på NO_x -utsläppen (och andra utsläpp som CO och HC) från gasdrivna ottomotorer finns: leanburn, stökiometrisk förbränning med trevägskatalysator, och SCR.

Leanburn innebär att motorn arbetar med mager gasblandning (λ runt 1.6 - 1.7). Förbränningstemperaturen sänks och därmed minskar NO_x -bildningen.

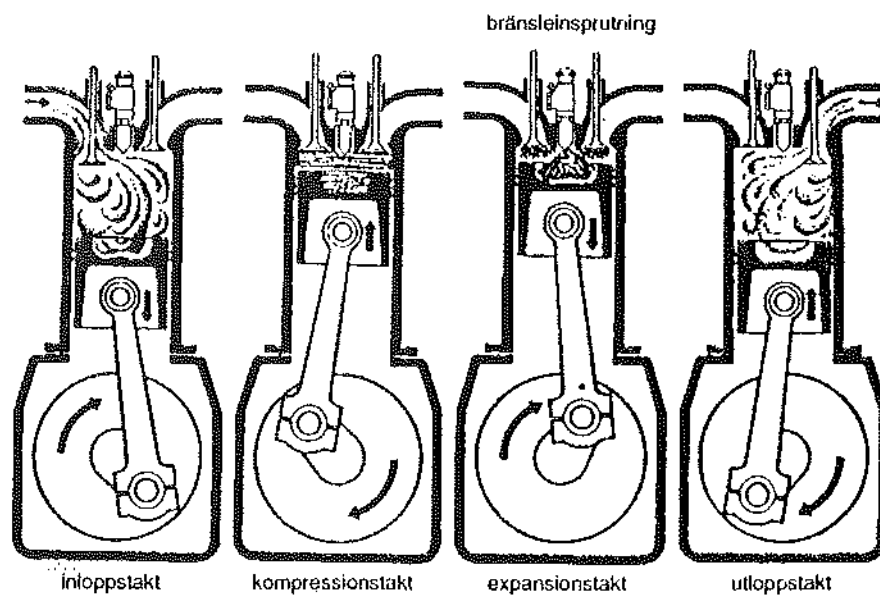
Vid *stökiometrisk förbränning* krävs ett sofistikerat reglersystem som hela tiden håller gas-luftblandningen inom ett litet intervall, det s k lambda-fönstret, strax under $\lambda=1$. Inom detta intervall kan katalysatorn påverka inte bara CO och HC utan även NO_x .

SCR (Selective Catalytic Reduction) kan användas på både otto- och dieselmotorer. Metoden bygger på att ammoniak tillsätts avgaserna före de passerar en katalysator, där en reduktion av NO_x till fritt kväve och vatten äger rum. Temperaturen på avgaserna i katalysatorn, som består av keramiska block, skall vara 300-400°C, och det är viktigt att gasströmmen är jämnt fördelad. I dagsläget kan en 85-90 procentig NO_x -reduktion uppnås. SCR är dyrt och lämpar sig bäst för större motorer.

Gasmotorer enligt ottoprocessen finns i effektklasser upp till 2 MW_v. Elverkningsgraden vid gasdrift ligger mellan 30 och 35% beroende på storleken. Vid dellast försämras elverkningsgraden markant, och vid 50% last är en minskning med 5-10%-enheter inte ovanlig. Därför installeras ofta två eller flera motorer parallellt, vilket ger bättre dellastprestanda. Totalverkningsgraden vid kraftvärmeanvändning ligger runt 85%, medan alfavärdet, dvs kvoten eleffekt/värmeeffekt, brukar vara ca 0.6.

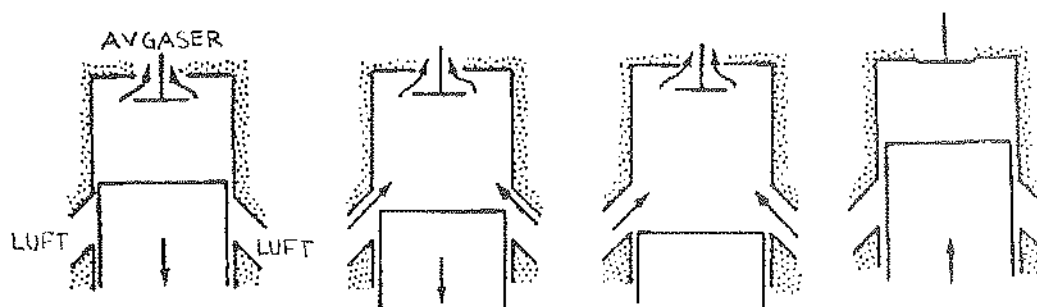
2.2.2 Dieselmotorn

Dieselmotorer kan vara av fyrtakts- eller tvåtakstyp. De olika takterna för en fyrtaktsmotor visas i figur 2.3. Under insugningstakten sugas enbart luft in i cylindern (vilket skiljer sig från ottoprocessen där både luft och bränsle sugas in). Luften komprimeras sedan och när kolven är i sitt översta läge sprutas bränslet in. Det värme som bildas under kompressionen möjliggör nu bränslets självantändning. För detta krävs ett betydligt högre kompressionsförhållande än det som används i ottomotor. Efter antändning följer expansionstakt och utblåsning.



Figur 2.3 Arbetsprincipen för en fyrtakts dieselmotor. <6>

I en tvåtaktsmotor utträttas arbete vid varje nedåtgående kolvrörelse, dvs motorn utför en arbetstakt per motorvarv. Principen visas i figur 2.4 på nästa sida. När kolven rör sig mot nedre vändpunkten öppnas avgasportar och spolportar, spolluft strömmar in och trycker ut avgaserna. Sedan stängs portarna när kolven börjar röra sig uppåt och luften komprimeras. Bränslet sprutas in och självantänder när kolven befinner sig i sitt översta läge.



Figur 2.4 Arbetsprincipen för en längdopolad tvåtakts dieselmotor. <6>

Tvåtaktsmotorer har i allmänhet högre investeringskostnad, men också högre verkningsgrad och längre livslängd än fyrtaktsmotorer, och dessutom är tvåtaktsprincipen oftast sämre ur miljösynpunkt. I kraftvärmesammanhang används tvåtaktsmotorer främst i de största effektklasserna.

I en ideal dieselcykel sker bränsletillförseln vid övre vändpunkten och under en del av expansionstakten så att trycket hela tiden är konstant. (Jämför ottoprocessen, där volymen är konstant under energitillförseln.)

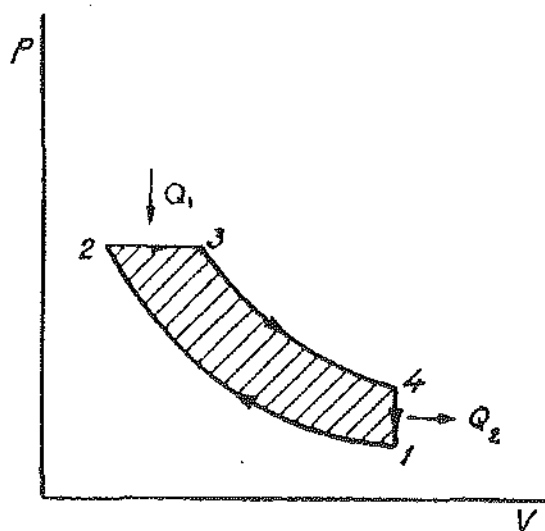


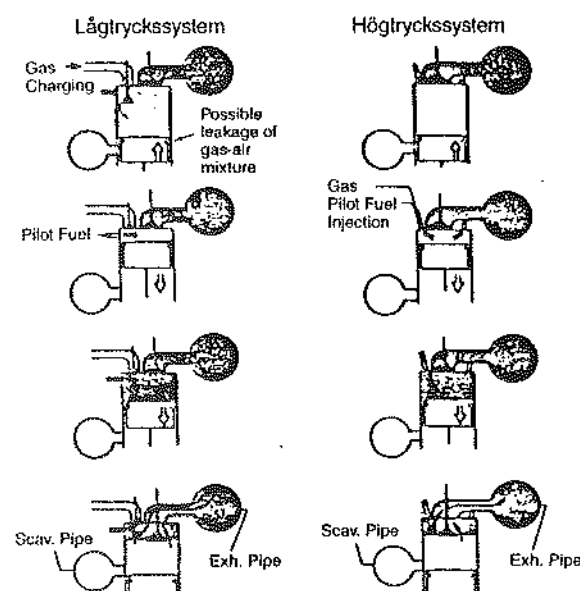
Diagram 2.2 PV-diagram för dieselcykeln. <6>

Då naturgas är svårt att antända, har det inga naturliga förutsättningar som dieselmotorbränsle. Någon form av hjälptändsystem krävs, t ex pilotbränsle. Gasmotorer enligt dieselprocessen delas in dels efter varvtal och dels efter gastillförseltryck. Följande tre varvtalsområden urskiljs:

- *Högvarvsdiesel*, varvtal > 1500 rpm. 4-taktstyp. Finns i effektstorlekar upp till ca 2 MW. Lågtrycksinsprutning.
- *Medelvarvsdiesel*, varvtal 500 - 1200 rpm. 4-taktstyp. Mellanstorlekar 1 - 20 MW. Låg- eller högtrycksinsprutning.
- *Lågvarvsdiesel*, varvtal > 200 rpm. 2-taktstyp. Stora motorer med effekter 1 - 45 MW. Låg- eller högtrycksinsprutning.

Lågtrycksinsprutning, som idag är vanligast förekommande, innebär att gasen tillförs cylindern före kompressionen. Ett eventuellt pilotbränsle sprutas in som vanligt när kolven är i övre vändpunkten. Motorn arbetar sålunda enligt en blandning av otto- och dieselpincipen. Lågtrycksinsprutning lämpar sig speciellt för lågvärdesgas.

Vid *högtrycksinsprutning* sprutas gas och pilotbränsle direkt in i cylindern nära övre dödpunkt. Gasen måste då först komprimeras upp till ca 250 bar. Motorn arbetar här helt enligt dieselprocessen. Insprutningen av pilotbränslet sker i ett separat munstycke ett par vevvinkelgrader före gasinsprutningen. Fördelar med högtrycksinsprutning är att verkningsgraden höjs (ca 48% jämfört med ca 42%), att knackningsproblem undviks, och att behovet av effektreducering vid konvertering från olja till gas försvinner. Högtrycksinsprutning kommer som följd av detta att bli ett allt mer intressant system. I de lägre effektklasserna kan det dock bli för dyrt, och likaså lämpar det sig inte så bra med högtrycksinsprutning vid deponi-, röt- eller gengasdrift.



Figur 2.5 Låg- och högtrycksinsprutningssystem. <6>

Som en följd av de höga cylindertrycken i gasdieselmotorer bildas mycket NO_x , men med SCR (se sid 7) kan en 90%-ig reduktion fås. De andra två reningsmetoderna, leanburn och stökiometrisk blandning, fungerar ej.

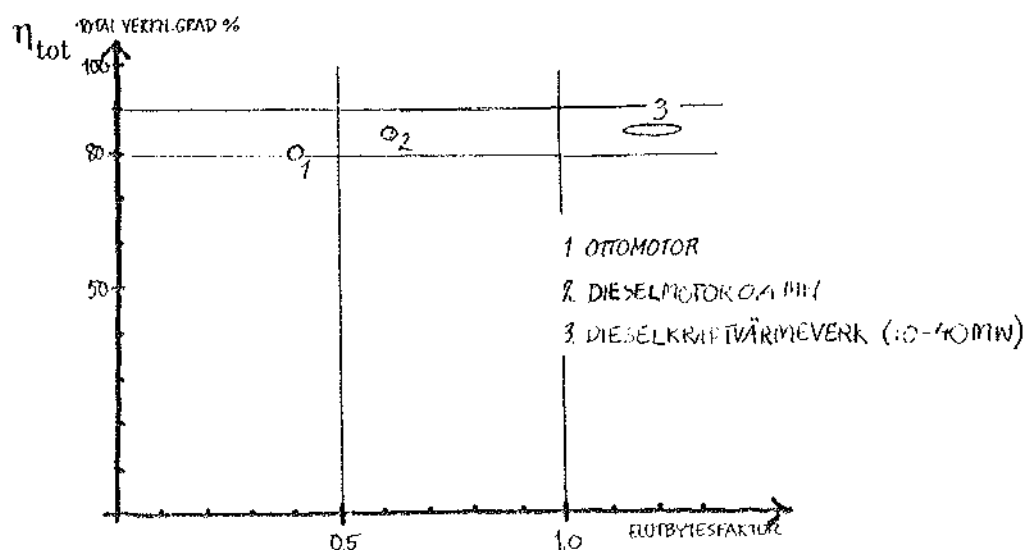
Elverkningsgraden är 40-45% för små diesलगasmotorer, och 45-50% för större. I kraftvärmeanläggningar blir totalverkningsgraden under gynnsamma förutsättningar 85-90%, och alfavärdet uppgår till 1-1.5. Dellastegenskaperna är bra, och vid 50% last sjunker verkningsgraden bara några enstaka procentenheter. Den höga termiska verkningsgraden och de goda dellastegenskaperna medför att dieselmotorn täcker ett större effektområde än ottomotorn.

Gasdieselmotorer finns i effektklasser från ca 1 MW_v och uppåt.

2.2.3 Val av motortyp

Generellt sett väljs diesलगasmotorer till anläggningar över 1 MW_v, och tändstiftsförsedda motorer som arbetar enligt ottoprincipen till mindre effektbehov. (En förklaring till att ottomotorer inte görs i större storlekar är att förbränningen inte blir fullständig vid för stora cylinderdiameter. Det är tänddieseloljan, som ger en mer utbredd antändningszon, som möjliggör en fullständig förbränning även i mycket stora cylindrar.) I området 1-2 MW_v kan båda motortyperna vara intressanta och då kan följande aspekter som beskrivs nedan avgöra valet.

En gasmotor enligt ottoprincipen har en lägre specifik investeringskostnad än motsvarande gasdieselmotor. I gengäld har ottomotorn också lägre alfavärde.



Figur 2.6 Verkningsgrad och alfavärde för otto och dieselmotor. <4>

Ur figur 2.6 kan olika slutsatser dras. Tror man t ex att elpriserna kommer att stiga blir ett högt alfavärde viktigt, och man bör därmed välja en dieselmotor. Om man istället anser att investeringen är osäker, kan en ottomotor vara ett bättre alternativ.

Dieselmotorn har betydligt bättre dellastegenskaper än ottomotorn, vilket är speciellt viktigt om värmebehovets natur kräver kraftig effektregering. Genom att använda flera parallella ottomotorer kan man minska problemet med sänkt verkningsgrad vid dellast.

Gasdieselmotorn har en fördel i att dieselolja kan användas som ersättningsbränsle. Man blir därmed mer oberoende ur bränsleförsörjningssynpunkt.

I bilaga 1 görs en ekonomisk optimering av val av motortyp och effektstorlek. Man uppskattar där ett antal parametrar för att sedan, utgående från det aktuella varaktighetsdiagrammet, kunna beräkna årlig vinst för de olika typerna. Den motorteknik med högsta vinsten är alltså ekonomiskt sett bäst. Optimeringsmetodiken i bilaga 1 kan också användas för att välja rätt antal motorer. Två eller flera motorer innebär en ökad investering, samtidigt som årsverkningsgrad och tillgänglighet ökar.

Ur miljösynpunkt måste ottomotorn anses lämpligast. Den arbetar med lägre trycknivåer och därmed mindre NO_x -bildning. Man slipper också tyngre kolväten, svavel, partiklar och sot som kommer från pilotdieseloljan. Det går dessutom att påverka emissionsbildningen i en ottomotor på ett enklare och billigare sätt än vad som är möjligt med dieselmotorn. I diagram 2.3 visas inom vilka effektområden de tre olika reningsmetoderna är användbara. I det översta diagrammet ses även att NO_x -emissionsnivåerna ligger under Västtysklands (TA-Luft) krav för alla metoderna.

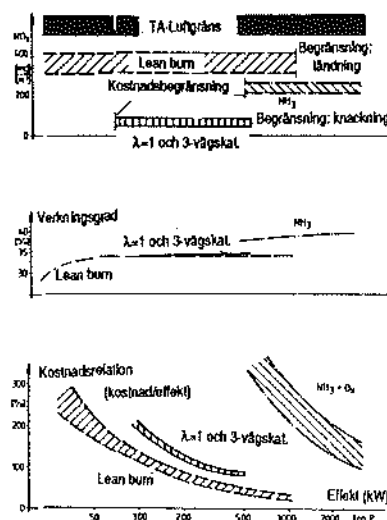


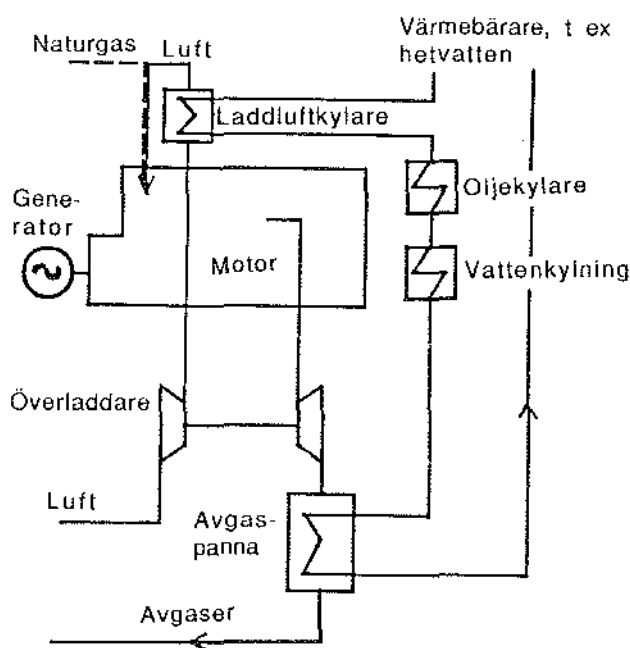
Diagram 2.3 Avgasreningsmetoder för gasmotorer i olika effektstorlekar. <6>

3 INKOPPLING AV VÄRMESYSTEM

3.1 Motorns värmeåtervinningssystem

3.1.1 Allmänt

Motorer i drift utvecklar som bekant värme. Denna värme innebär i t ex fordonsapplikationer en förlust, men i kraftvärmeanläggningar utnyttjas värmen och totalverkningsgraden höjs avsevärt. Ett antal olika kylsystem, ur vilka värme kan utvinnas från motorn, urskiljer sig. Dessa är laddluftkylning, smörjoljekylning, samt motormantelkylning. Via en avgasvärmeväxlare kan sedan ytterligare värme erhållas ur avgaserna. I figur 3.1 nedan visas en principiell skiss över en motor och dess olika kylsystem.



Figur 3.1 Kolvmotor och dess kylare. <4>

Smörjolje- och motormantelkylningssystemen kräver att värme kyles bort kontinuerligt för att motorn skall fungera. Om värmebehovet sjunker, måste motoreffekten minskas så att värmeproduktionen anpassas till behovet, annars ökar returtemperaturen i värmenätet.

Värmeutvinningssystemen kan indelas i tre nivåer efter temperatur enligt tabell 3.1 på nästa sida. Den lägsta nivån kan inte alltid utnyttjas, eftersom temperaturen här ibland är lägre än returtemperaturen från t ex fjärrvärmenätet.

Lågtemperatursystem 40-55°C	- Laddluftkylare - Smörjoljekylare - Kylare för gaskompressor vid högtrycksinsprutning
Mellantemperatursystem 80-90°C	- Motormantelkylning - Del av laddluftkylningen (större anläggningar)
Avgasvärme, temperaturen beror av motortyp: Högvarvsmotorer (< 2 MW) 500-600°C Medelvarvsmotorer (4-takt) 350-370°C Lågvarvsmotorer (2-takt) 250-270°C Avgaserna kyla ner till ca 100°C	

Tabell 3.1 Temperaturnivåer i värmeåtervinningssystem <6>

Vid större anläggningar har vissa temperaturnivåer speciella kylkretsar, vilket beskrivs närmare i avsnitt 3.1.4. Mindre aggregat har oftast en enklare inkoppling enligt avsnitt 3.1.3.

Den höga avgastemperaturen erbjuder möjlighet att producera ånga i avgasvärmeväxlaren. I allmänhet hålls dock maximal framledningstemperatur vid 90-95°C, och maximal returtemperatur brukar vara 70°C. Minskar värmebehovet så mycket att returtemperaturen stiger över 70°C, sänks motoreffekten.

Laddluften håller en låg temperatur, och värmen är därför svårt att utvinna. Nedan behandlas laddluftkylsystemet speciellt.

3.1.2 Laddluftkylare

Kylning av gas-luftblandningen, efter temperaturhöjningen som orsakas av kompressionen, innebär att en större bränslemängd ryms i cylindern, vilket i sin tur medför ökad motoreffekt. Vid mindre motorer håller dock gasblandningen en så låg

temperatur efter kompressorn, att returvattnet inte alltid förmår kyla den. Resultatet blir en minskad totalverkningsgrad pga utebliven värmeåtervinning, samt lägre avgiven effekt genom att motorns fyllnadsgrad minskar. Finns obegränsad tillgång till kylvatten (t ex från närbelägen sjö) bör en effekttökning vid laddluftkylning utan tillvaratagande av värme jämföras med energiåtgången för kylvattenpumpen. Normalt sett används sådan kallvattenkylning inte vid naturgasdrift, utom om speciellt hög effekt är önskvärd.

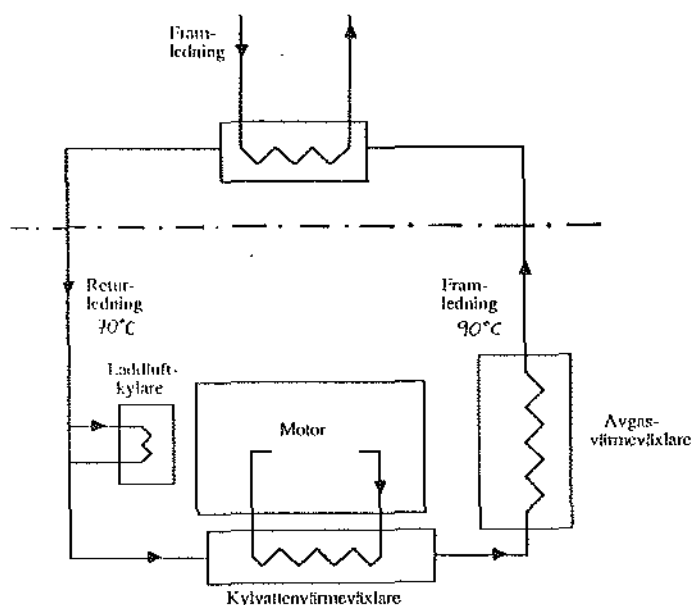
Om bränslet i stället är röt- eller deponigas, är kallvattenkylning nära nog nödvändig för att undvika att den aggressiva rötgasen skadar tändstift, ventiler, cylinderrum och kolvar. Gasens aggressivitet minskar nämligen vid lägre temperatur. Dessutom har röt- och deponigas lägre värmevärde än naturgas, och en bättre kylning av rötgas-luftblandningen behövs för att tillräcklig motoreffekt skall erhållas.



Figur 3.2 Angrepp på kolv av röt- och deponigasblandning vid Trelleborgs reningsverk.

3.1.3 Inkoppling av mindre motor ($< 1 \text{ MW}_v$)

Mindre motorer, oftast av ottotyp, erbjuds idag på marknaden som kompletta anläggningar inklusive värmeväxlare och generator. Inkopplingen av värmeåtervinnings-systemet kännetecknas av enkelhet, vilket kan ses i figur 3.3 på nästa sida. En del av returvattnet förvärms i laddluftkylaren innan det går vidare till motorkylaren, som kyler både smörjolja och själva motorn. I avgasvärmeväxlaren kan sedan maximal framledningstemperatur (som ofta är ca 90°C i standardutförande) uppnås.

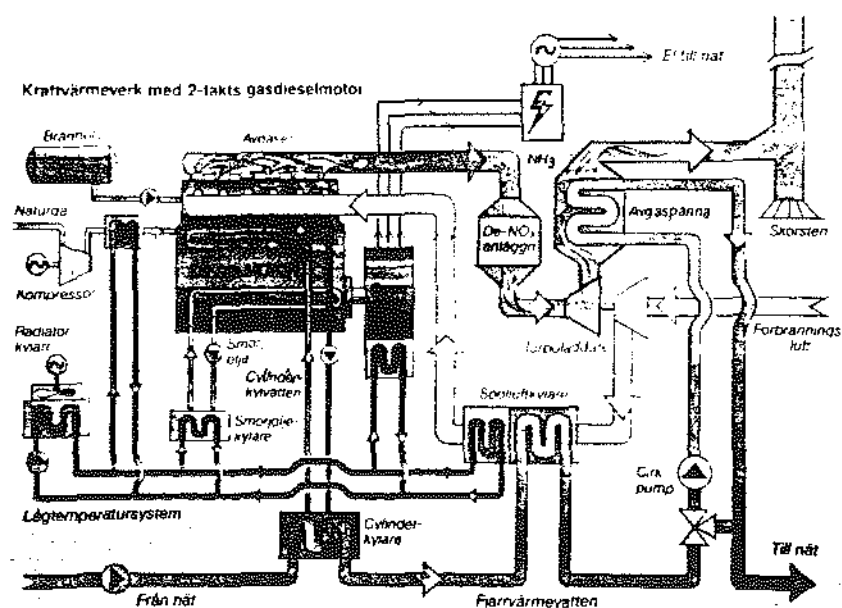


Figur 3.3 Lämplig inkoppling av värmeåtervinningssystemet för en mindre kolvmotor.

Värmeväxlaren ovan punktlinjen i figuren ger systemet ökad säkerhet, eftersom fjärrvärmevattnet inte passerar motorrummet.

3.1.4 Inkoppling av större motor (>1 MW_v)

Vid större motoranläggningar blir inkopplingen av värmeåtervinningssystemet i allmänhet mer komplicerad. De olika temperaturnivåerna, se tabell 3.1, har ibland separata kylkretsar som via värmeväxlare är kopplade till t ex fjärrvärmenätet. Figur 3.4 nedan visar värmeåtervinningssystemet för en 2-takts gasdieselmotor, i utförande enligt Götaverken Motor.



Figur 3.4 Värmeåtervinningssystem för 2-takts gasdieselmotor. <Götaverken Motor>

Kraftvärmeanläggningen i Nykøbing Mors i Danmark, som beskrivs i kapitel 5.3, utgör ytterligare ett exempel på inkopplingen vid större anläggningar .

3.2 Pannor

3.2.1 Allmänt

I en kraftvärmeanläggning med kolvmotor finns i de flesta fall en eller flera pannor, som företrädesvis eldas med samma bränsle som motorn. Pannorna kan delas in i två användningsområden efter vilken del av varaktighetsdiagrammet de täcker:

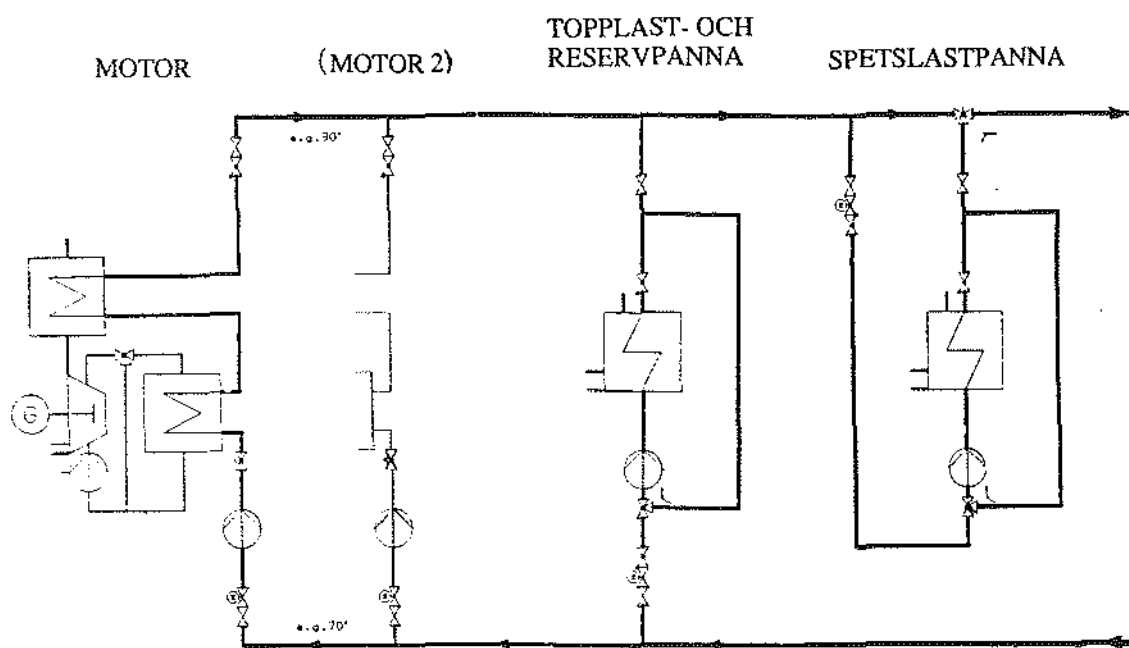
- Topplastaggregat, för att klara värmeproduktionen när behovet är stort.
- Reservaggregat, för värmeproduktion vid motorstopp.

I bägge fallen täcker pannans värmeproduktion differensen mellan behov och av motor producerad värme. Ytterligare ett användningsområde för pannor urskiljer sig, om i motorn genererad värme inte håller tillräcklig hög temperatur (vilket kan vara fallet i fjärrvärmenät under kalla vinterdagar och i industriapplikationer):

- Spetslastaggregat, för att höja framledningstemperaturen.

3.2.2 Inkoppling

Pannor med topplast- eller reservfunktion bör parallellkopplas med motorn, men för att undvika problem med frekventa starter och stopp, kopplas spetslastpannor i serie med motorn. Figur 3.5 på nästa sida visar lämplig inkoppling. I många fall skall samma panna användas som både topplast- och spetslastaggregat, och då kopplas pannan i allmänhet parallellt. En mer avancerad styrutrustning krävs, eftersom rätt framledningstemperatur fås genom blandning av varmvatten från motorn och hetare pannvatten (i de fall då framledningstemperaturen skall vara högre än vad motorn kan erbjuda). I stället för avancerad styrutrustningen till blandningen, kan en motor som klarar att leverera framledningstvatten med den högsta temperatur som krävs vara ett alternativ.



Figur 3.6 Inkoppling av topplast- och reservpanna samt spetslastpanna i kraftvärme anläggning. <7>

3.3 Ackumulator

3.3.1 Allmänt

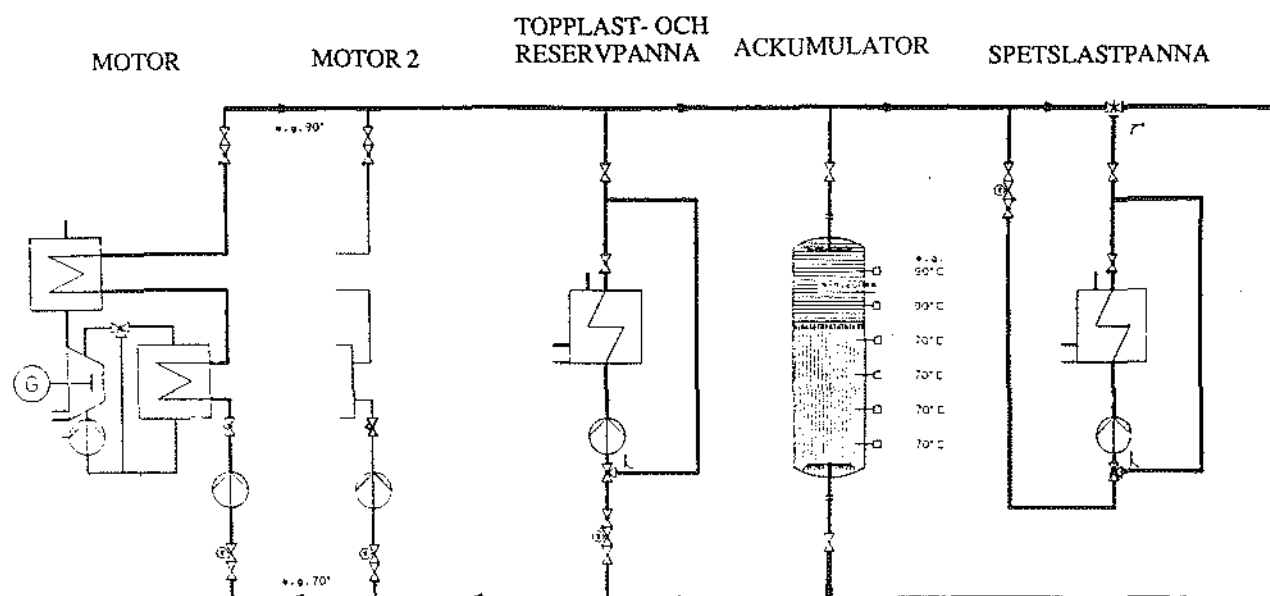
För att minska påverkan av värmelastens dygnsvariationer kan kraftvärmeanläggningen förses med en ackumulator. Denna utgörs (oftast) av en välisolerad ståltank som alltid är fylld med vatten. Det kallare returvattnet leds till tankens nedre del, och varmare framledningsvatten har sitt in- och utlopp högst upp i tanken. Mellan det varma och det kalla vattnet finns ett skikt som bör vara så litet som möjligt. När ackumulatören är fulladdad befinner sig temperaturskiktet nere vid tankens botten, och då ackumulatören är urladdad finns skiktet sålunda i toppen av tanken. Att vattnet inte blandas beror helt enkelt på densitetsskillnaden mellan varmt och kallt vatten. Vattnets låga termiska konduktivitet medför sedan att mycket lite värme överförs från det varmare vattnet till det kallare. En förutsättning är dock att inga inre strömmar finns i ackumulatören, vilket ställer stora krav på in- och utloppsmunstyckenas utformning. Den värmeövergång som ändå sker genom skiktet påverkar inte ackumulatorns värmeförluster, utan innebär endast en sänkning av värmekvaliteten. (Värmeförlusterna, dvs värme som förloras till omgivningen genom tankens väggar, varierar från 0.5 till 2% beroende på tankstorleken). Överst i tanken finns en ångkudde för att undvika syresättning av vattnet.

En ackumulator kan förbättra ekonomin för en kraftvärmeanläggning på ett flertal sätt:

- Minskar behovet av topplastaggregat, genom att värme kan lagras då värmebehovet är mindre än motorns produktion för att sedan användas då behovet i stället överstiger motorns kapacitet.
- Kan täcka vissa korta toppar i värmelasten, så att uppstartning av en panna undviks.
- Erbjuder möjlighet att endast använda kraftvärmeaggregatet vid de tider då elenergin ger bäst betalt, om dygnstaxa för el förekommer. Under tider då elenergin betalas dåligt (nattetid) klaras värmebehovet med i ackumulatören lagrat värme, medan motorn stoppas.
- Vid styrning av motoreffekten efter ellast eller gastillgång, är ackumulatören nödvändig om värmebehovet skall täckas vid alla tidpunkter.

3.3.2 Inkoppling

Ackumulatören kopplas parallellt med motorn. Om spetslastpanna finns, inkopplas ackumulatören före densamma, enligt figur 3.6.



Figur 3.6 Inkoppling av ackumulator i kraftvärmeanläggning. <7>

3.4 Reservkylare

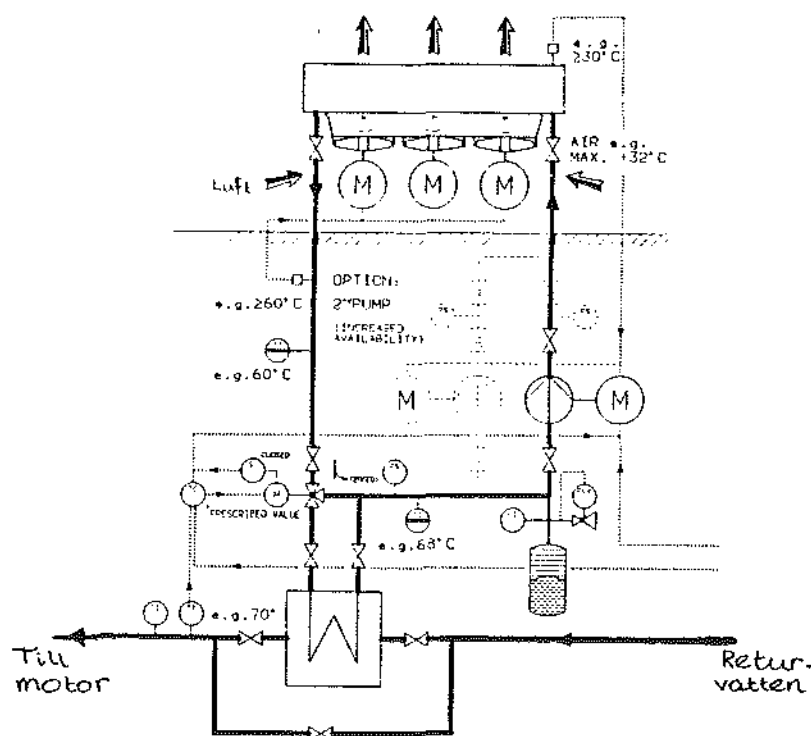
3.4.1 Allmänt

En kraftvärmeanläggning styrs oftast efter värmelasten, och det interna elbehovets eventuella avvikelser från producerad el utjämnas genom leverans till eller inköp från det externa elnätet.

Vissa kraftvärmeanläggningar styrs dock efter ellasten, och därmed kan värmeöverskott uppstå. Detta kan till viss del avhjälpas med en ackumulator, men då den är fulladdad måste värmen kylas bort på annat sätt. Elstyrda anläggningar har sålunda reservkylare.

Samma sak gäller för kraftvärmeanläggningar som styrs efter gastillgång. I en sådan anläggning körs motorn på fullast hela tiden som bränslebehovet täcks, och om värmen inte kan avsättas hos förbrukaren, måste returvattnet kylas med reservkylaren.

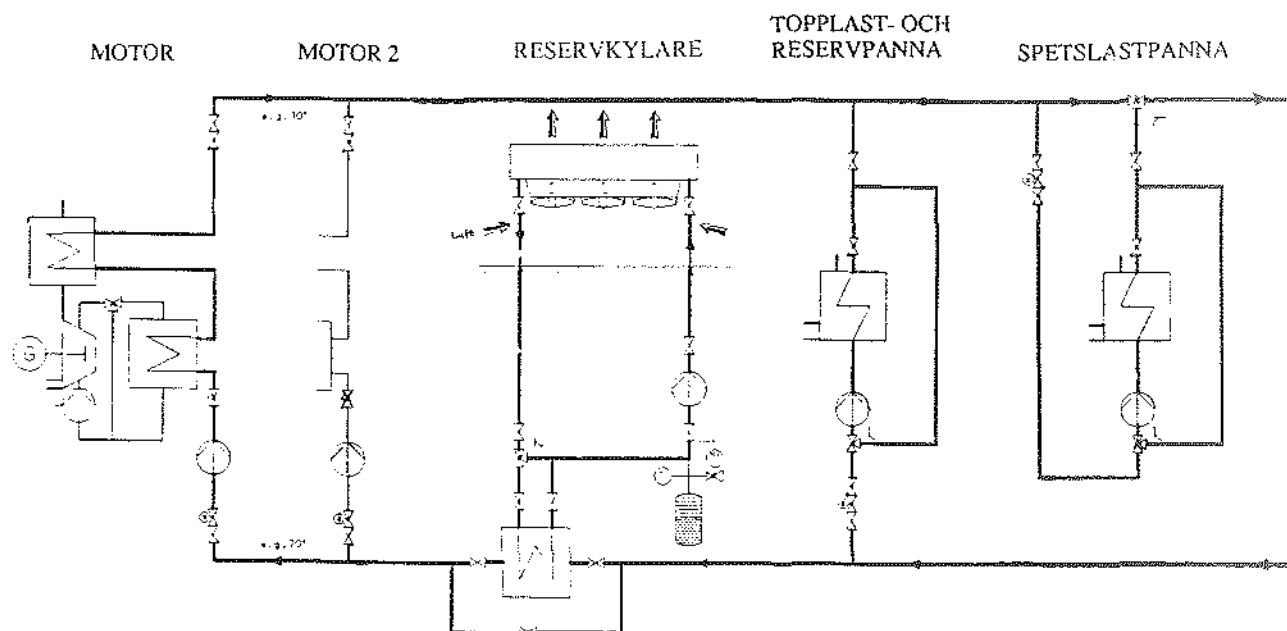
Kylaren kan vara enkelt uppbyggd där kallvatten (t ex sjövattnet eller grundvattnet) via en värmeväxlare koler returvattnet för motorn. Det förekommer också mer avancerade reservkylare, vilket visas i figur 3.7 nedan. Kylsystemet är fyllt av köldmedium som upptar värme från returvattnet och avlämnar det till omgivningsluften utanför.



Figur 3.7 Reservkylare. <7>

3.4.2 Inkoppling

Reservkylaren seriekopplas före motorn. Finns ackumulator skall den placeras före reservkylaren, enligt figur 3.8 nedan.



Figur 3.8 Inkoppling av reservkylare i kraftvärmeanläggning. <7>

3.5 Generella inkopplingar av värmesystem

Lämpliga inkopplingar för olika driftsvillkor redovisas nedan. Lösningarna, som har hämtats från referens <7>, är principiella och bör inte betraktas som optimala för alla anläggningar.

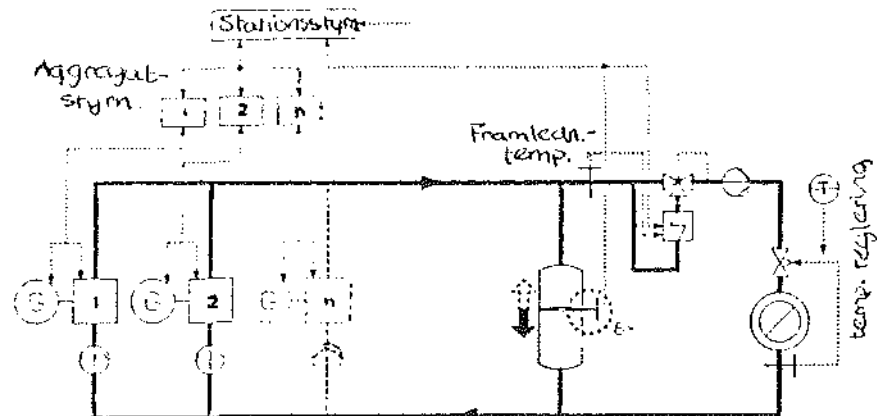
3.5.1 Värmebehovsstyrda anläggningar

Den vanligaste principen för styrning av motorns effekt är värmelaststyrning.

Anläggningarna kan utformas med eller utan ackumulator, och styrningen kan göras med avseende på framledningstemperatur, returtemperatur, ackumulators skiljeskiktssnivå etc. I skisserna nedan är spetslastpanna utritad i alla fall, medan reserv- och topplastpanna inte finns med. För behov och placering av pannor hänvisas till avsnitt 3.3 ovan.

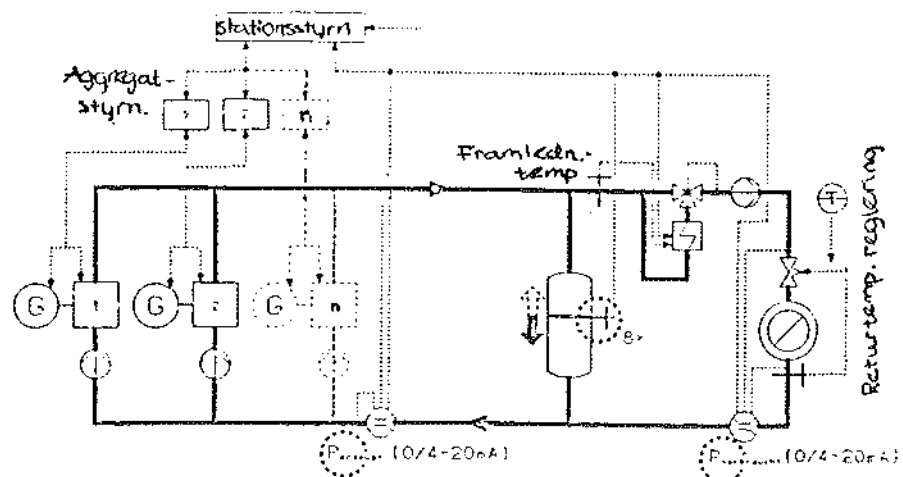
Med ackumulator

Fall 1: Styrning efter ackumulatorns skiljeskiktsläge, strömningsriktning och strömningshastighet.



Figur 3.9 Inkoppling av värmesystem med ackumulator, fall 1. <7>

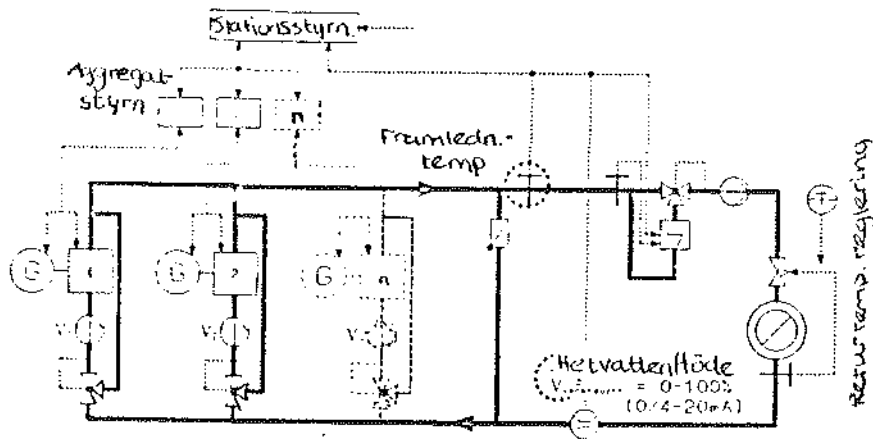
Fall 2: Styrning efter ackumulatorns skiljeskiktsläge och värmemängds-differensen.



Figur 3.10 Inkoppling av värmesystem med ackumulator, fall 2. <7>

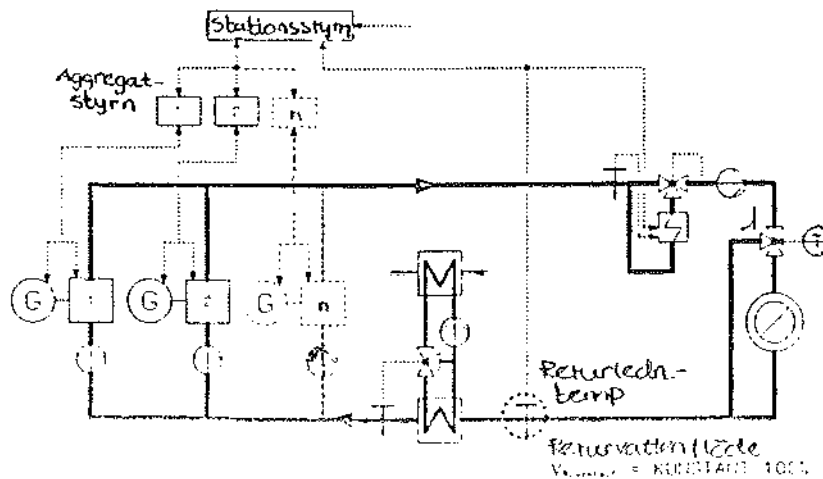
Utan accumulator

Fall 1: Styrning efter framledningstemperatur.



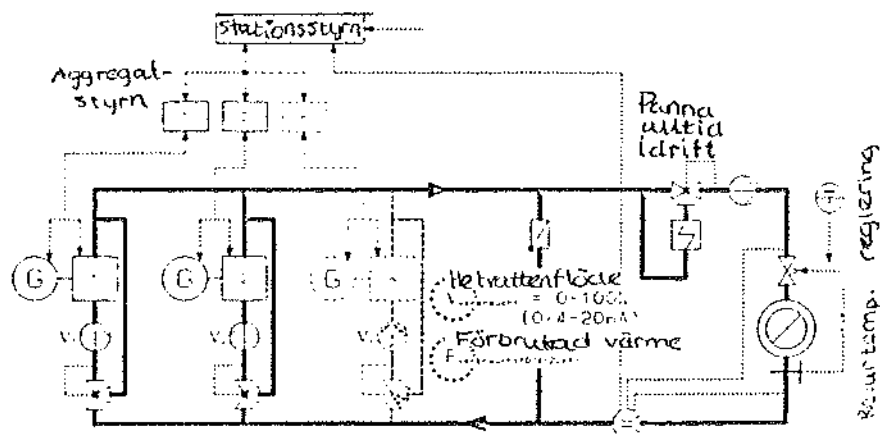
Figur 3.11 Inkoppling av värmesystem utan ackumulator, fall 1. <7>

Fall 2: Styrning efter returtemperatur.



Figur 3.12 Inkoppling av värmesystem utan ackumulator, fall 2. <7>

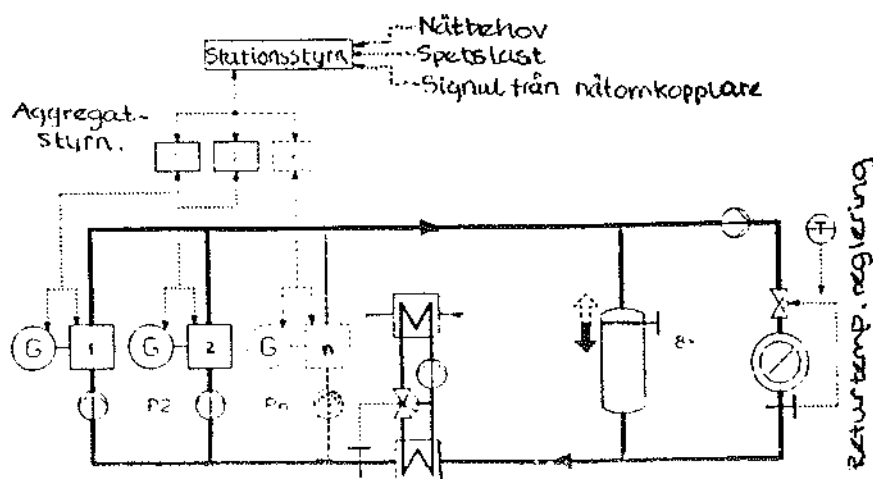
Fall 3: Styrning efter förbrukad värmemängd.



Figur 3.13 Inkoppling av värmesystem utan ackumulator, fall 3. <7>

3.5.2 Elbehovsstyrda anläggningar

Ackumulator och reservkylare används vid elstyrda anläggningar, medan pannor i de flesta fall inte behövs eftersom värmen inte prioriteras.



Figur 3.14 Inkoppling av värmesystem. <7>

3.5.3 Gastillgångstyrda anläggningar

Värmesystemet för kraftvärmeanläggningar som styrs efter gasbehov utformas på samma sätt som då anläggningen styrs efter elbehov, se figur 3.14 på föregående sida.

4 ELSYSTEM

4.1 Anslutning till elnätet

4.1.1 Allmänt

Beroende på avgiven effekt anslutes generatorm till ett högspännings- eller lågspänningsnät. Vid effekter $\geq 0,5$ MW sker anslutning som regel till högspänningsnät, för lägre effekter gäller anslutning till lågspänningsnät. Om tillgång finnes till ett lättillgängligt högspänningsnät kan det vara aktuellt med anslutning till detta för generatoreffekter ned till ca 250 kW.

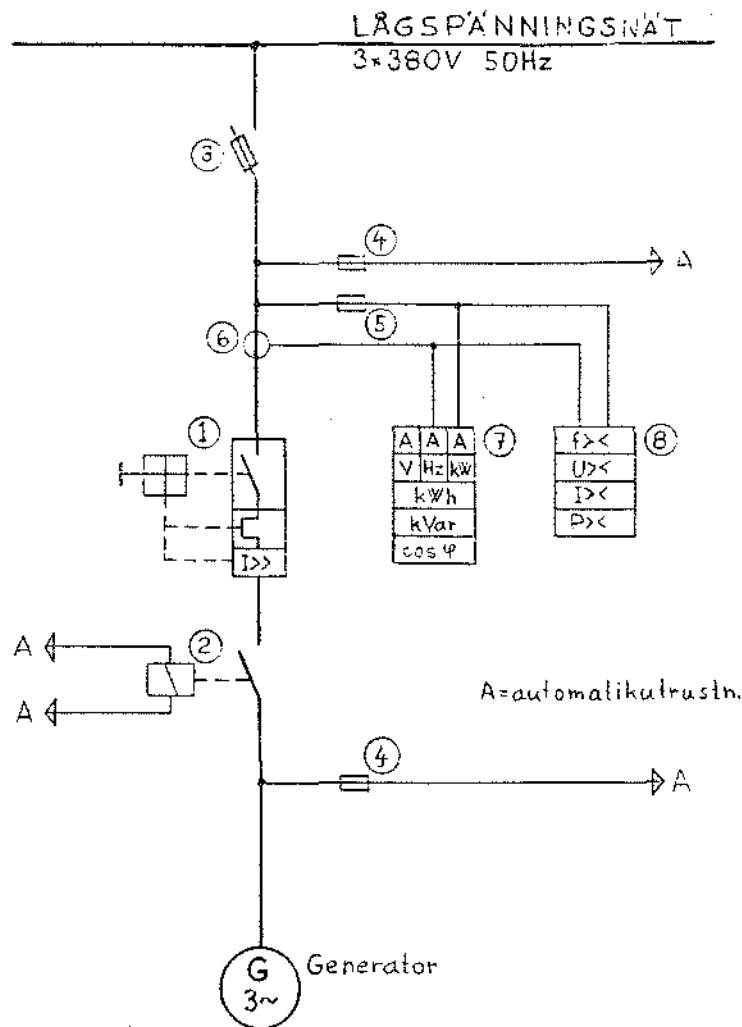
Generatorm anslutes till nätet via en effektbrytare med såväl överlast- som kortslutningslösning d.v.s en maximalbrytare. Om maximalbrytaren utföres med handmanövrer tillkommer en kontaktbrytare (elmanövrerad effektbrytare). Detta utförande användes dock som regel endast vid anslutning till lågspänningsnät.

Förutom brytare tillkommer utrustning för övervakning och skydd av generator och övrig elutrustning.

Brytare och säkringar monteras i ett apparatskåp (lågspänning) respektive i ställverksfack (högspänning).

4.1.2 Anslutning till lågspänningsnät

På nästa sida visas ett typexempel på generatorns anslutning till ett lågspänningsnät.



Figur 4.1 Typexempel på anslutning av generatorn till ett lågspänningsnät.

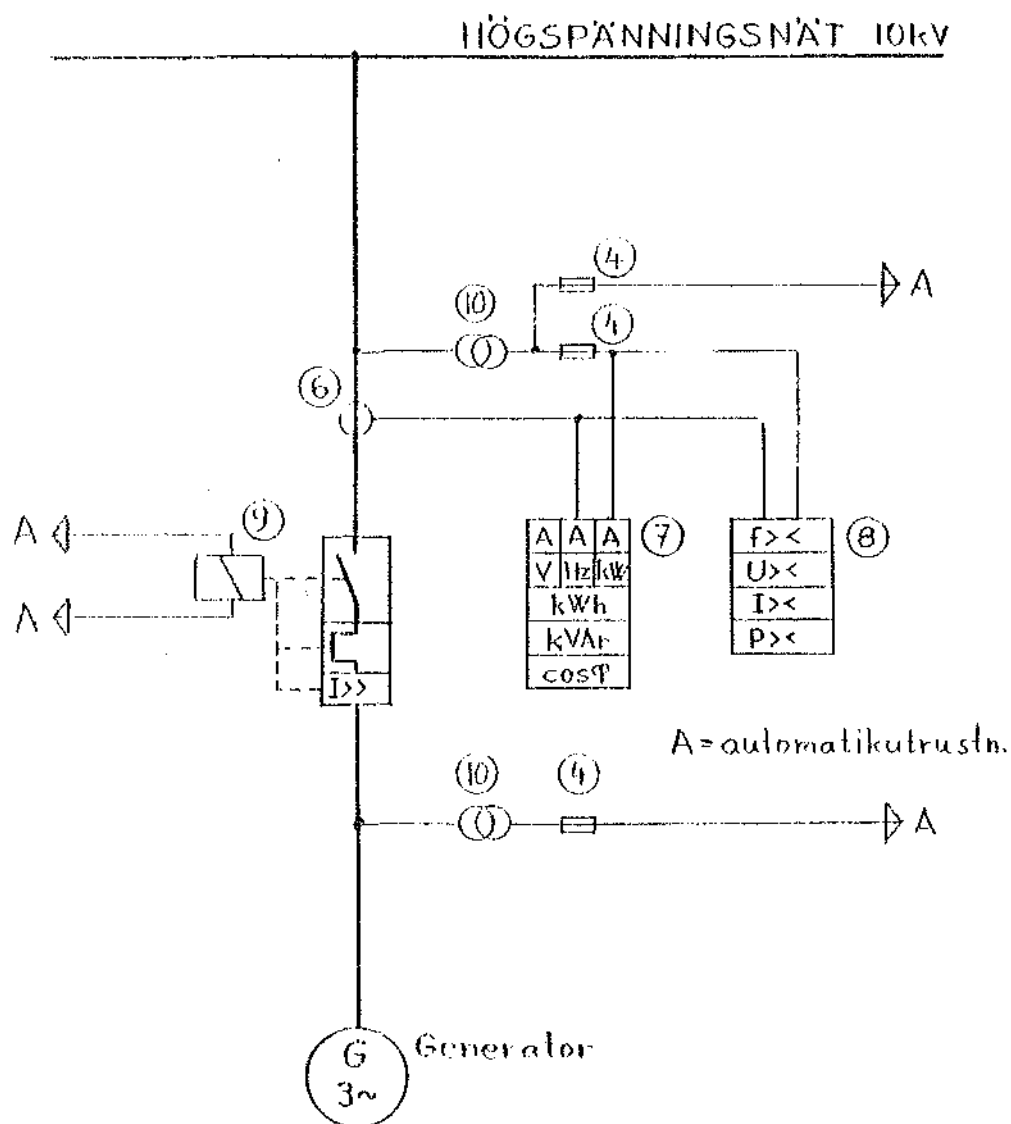
Komponent- och funktionsbeskrivning:

1. Handmanövrerad maximalbrytare som normalt är tillslagen.
2. Kontaktorbrytare som inkopplar generatorn mot nät efter motorstart och infasning. Kontaktorn styrs från automatikutrustningen.
3. Säkringslastfrånskiljare (med knivsäkringar).
4. Smältsäkringar för manöverspänning till automatikutrustning.
5. Smältsäkringar för manöverspänning till den elektriska skydds- och mätutrustningen.

6. Strömtransformatorer för mätvärden till skydds- och mätutrustning.
7. Mätutrustning se avsnitt 4.1.4.
8. Vakter som automatiskt stoppar aggregatet om inställda gränsvärden överskrids, se avsnitt 4.1.5.

Vid högre generatoreffekter är det mest kostnadseffektivt att dra två eller flera parallella kablar mellan generator, ställverksfack och nät.

4.1.3 Anslutning till högspänningsnät



Figur 4.2 Typexempel på anslutning till högspänningsnät.

Komponent och funktionsbeskrivning:

9. Motormanövrerad maximalbrytare som inkopplar generatorm till nät efter motorstart och infasning. Motorn styrs från automatikutrustningen. (Jämför pos 1 och 2 vid anslutning till lågspänningsnät)
10. Spänningstransformator för manöverspänning till automatik-, skydds- och mätutrustning.

Övriga pos.nummer framgår av komponent- och funktionsbeskrivningen avseende anslutning till lågspänningsnät.

4.1.4 Mätutrustning

Mätutrustningen, pos 7 i figur 4.1 och 4.2, består som regel av följande komponenter:

A	3 st amperemätare för respektive fas
V	1 st voltmätare med omkopplare för respektive fas
H2	Frekvensmätare
kW	Effektmätare, aktiv effekt
kWh	Energimätare, levererad energi
kVar	Effektmätare, reaktiv effekt
cos	Frekvensmätare

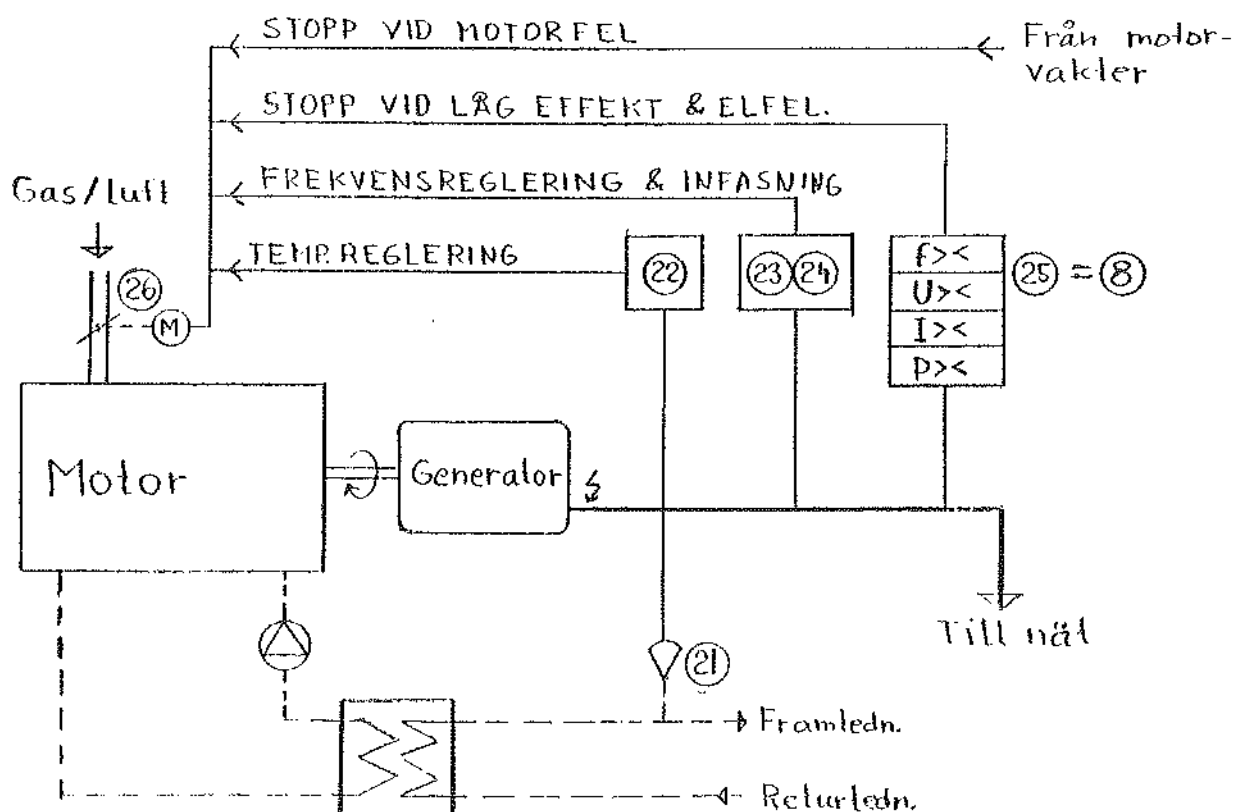
4.1.5 Vakter

Pos 8 i figur 4.1 och 4.2 är ett antal vakter som erfordras för övervakning av generator och övrig elutrustning. På vakterna inställes maximalt tillåtna gränsvärden för de elektriska mätvärden som övervakas. Om något gränsvärde över- eller understiges stannar motorn automatiskt. Denna "stoppfunktion" gäller ej under start- och stoppsekvenser då funktionen kortvarigt bortkopplas.

Komponentbeskrivning:

f><	Frekvensskydd (hög resp. låg frekvens)
U><	Spänningsskydd (hög resp. låg spänning)
I><	Över- och underströmsskydd
P><	Överlast-, kortslutnings- och bakeffektsskydd

4.2 Styrning och övervakning



Figur 4.3 Principschema över viktigare anläggningsdelar för styrning och övervakning.

Komponentförteckning:

21. Temperaturgivare för framledningstemperatur
22. Reglercentral för temperaturreglering
23. Generator controller (frekvensreglering)
24. Synkronskåp för infasning
25. Vakter = pos 8 i figur 4.1 och 4.2
26. Ställdon, "gaspådrag".

Normalt körs aggregatet med temperaturstyrning vilket innebär att motorn alltid går på fullast när framledningstemperaturen är under inställt börvärde. Om egen elförbrukning understiger producerad levereras eleffekt ut på nätet. Vid litet värmebehov minskar givetvis elproduktionen och när producerad el understiger ca 30% av aggregatets märkeffekt stannar aggregatet.

Vid start mot befintligt nät kopplas vissa stoppfunktioner från pos 25 kortvarigt bort. Gaspådraget styrs då av generatorkontrollenheten pos 23 som ställer in motorvarvtalet så att generatorfrekvensen något överstiger nätfrekvensen. Synkronskåpet pos 24 känner av skillnaden i fasvinkel och vid tillräcklig liten skillnad ansluter en kontaktorbrytare (pos 2 figur 4.1) eller en motormanövrerad maximalbrytare (pos 9 figur 4.2) motorn till nätet.

Eftersom synkrongeneratorer så gott som undantagslöst användes är därefter motorvarvtalet helt låst till generatorns synkronvarvtal. Startsekvensen avslutas med att samtliga funktioner från pos 25 inkopplas.

Förutom vakter för elfel är aggregatet försett med ett antal vakter som omedelbart stannar motorn vid ett eventuellt fel.

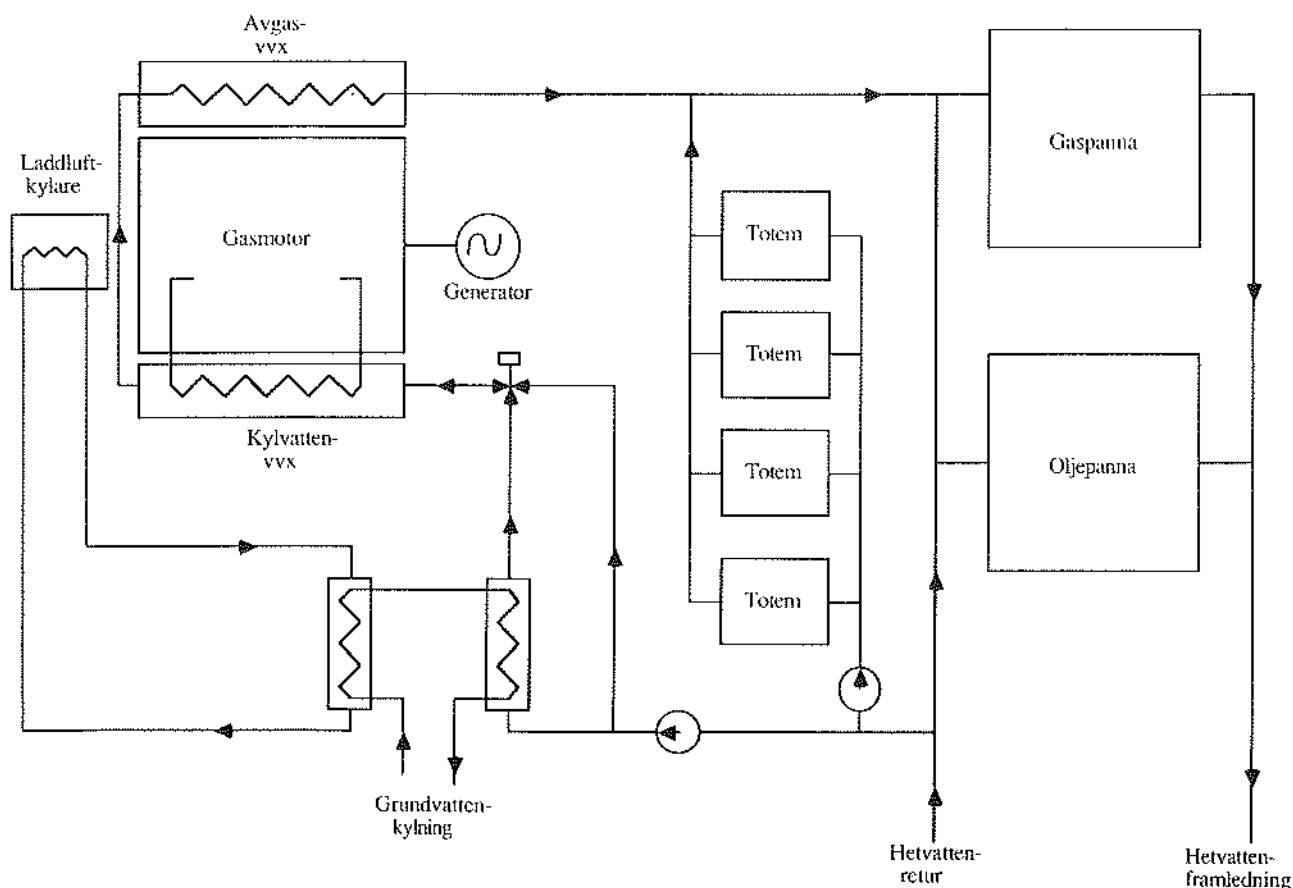
Exempel på dylika vakter är följande:

- lågt oljetryck
- låg oljenivå
- hög kylvattentemperatur
- låg kylvattentemperatur
- lågt kylvattentryck
- låg kylvattenivå
- övervarv
- hög temperatur generatorlindring

5 ANLÄGGNINGSEXEMPEL

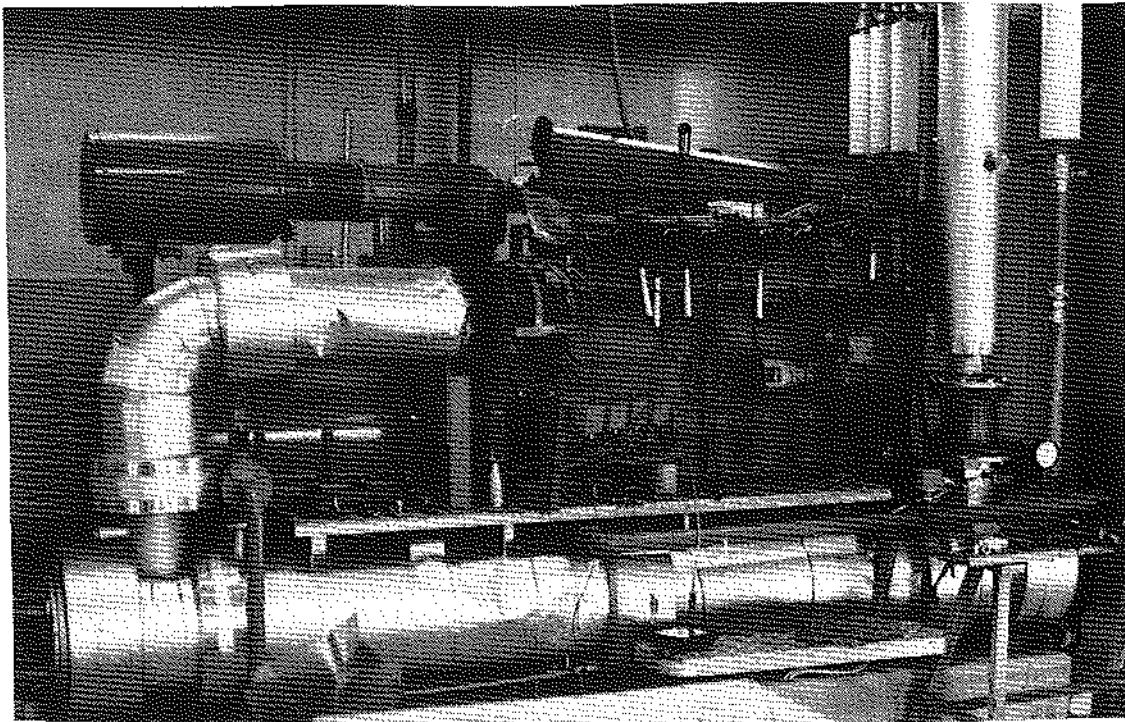
5.1 SYSAV, Trelleborg

Från reningsverket och Albäcksippen i Trelleborg utvinns rötgas och deponigas som används i en kraftvärmeanläggning. Denna anläggning består av en gasmotor, fyra Totemaggregat och två pannor.



Figur 5.1 Kraftvärmeanläggningen vid reningsverket i Trelleborg.

Motorn är en Jenbacher JW 120 SgGO i LEANOX-utförande. LEANOX innebär att motorn går på en mager gas-luftblandning, λ strax under 1.7. Motorn arbetar enligt Ottoprincipen och har sålunda tändstiftsantändning av gasen. Vid fullast produceras 170 kW_e och 250 kW_v.



Figur 5.2 Gasmotorn vid reningsverket i Trelleborg. Effekt: 170 kW_e och 250 kW_v.

De fyra Totemaggregaten genererar totalt 50 kW_e och 120 kW_v. Pannorna, en gaseldad och en oljeeldad, används för topplast vintertid och som reservenheter vid motorfel.

Den i anläggningen producerade elenergin används huvudsakligen inom reningsverket. Under sommaren kan ett visst elöverskott uppstå, som då levereras ut på nätet. Även värmeenergin förbrukas internt. Överskott som uppkommer sommartid kan inte tas tillvara, utan kyla bort med grundvatten. Att motorn körs under denna tid, trots överproduktion av både el och värme, beror på att bränslet är gratis så att lönsamhet ändå uppnås.

Som synes i figur 5.1 ovan går allt hetvatten genom pannorna, även då dessa är avstängda, vilket kan tyckas onödigt. En fördel finns dock i att pannorna på detta sätt kan startas upp snabbt. Laddluften till motorn kyla med grundvatten, och det värmets tas inte tillvara. Anledningen att man använder grundvatten istället för returvattnet är att grundvattnet håller lägre temperatur och därmed kyler bättre. Detta krävs eftersom kvaliteten på röt- och deponigas är låg, och hög fyllnadsgrad därför är nödvändigt för att uppnå erforderlig effekt. Gasen blir också mindre aggressiv på tändstift, ventiler och kolvar vid lägre temperatur. Det är dock onödigt att grundvattnet alltid passerar reservkylningsvärmesväxlaren, som används för motorkylning sommartid. Vattnet borde by-passas då värmesväxlaren inte används.

I byggnaden där motorn är placerad finns plats och till och med färdigt fundament för ytterligare en motor.

5.2 Nykvarn, Linköping

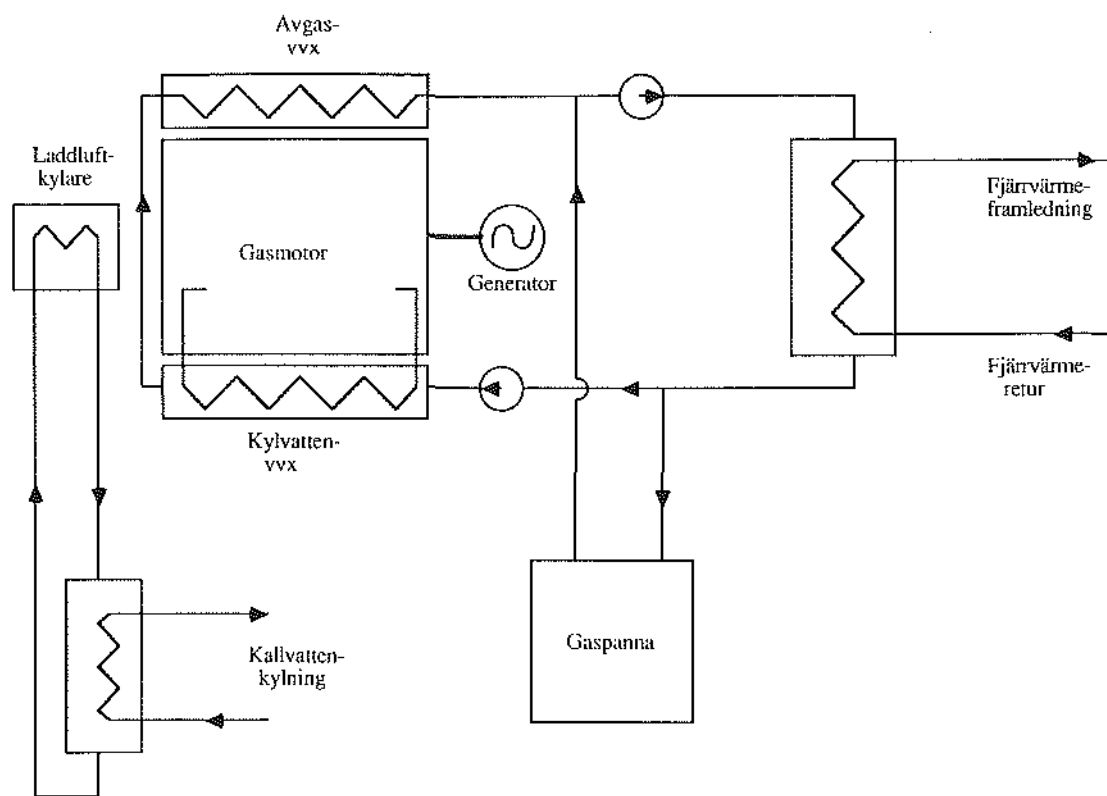
I maj 1989 startades en kraftvärmeanläggning vid Linköpings reningsverk upp. Rötgas, som produceras i rötkammare, driver en 16-cylindrig Jenbacher JW 320-SgGOe i LEANOX-utförande. Motorn genererar 480 kW_e och 740 kW_v. Ytterligare data ses i tabell 5.1 nedan.

Verkningsgrad: 0.85
Tillgänglighet: 90%
Minsta last: 50%
Motorns temperaturnivåer: 65/95°C
Avgastemperatur före/efter kylare: 445/180°C
Gasförbrukning: 220Nm ³ /h
Synkrogenerator: 1500 rpm

Tabell 5.1 Data för gasmotorn vid Linköpings reningsverk.

Figur 5.3 nedan visar anläggningen, inklusive en parallellkopplad gaspanna för spetslastproduktion. I figuren ses att laddluften inte kyls av returvatten, utan av ett eget kallvatten-system. Anledningen är, liksom i Trelleborgsanläggningen, att rötgasen har så låg kvalitet att en kraftig kylning av gasblandningen är nödvändig för att öka effekten och minska skador på material i bränslesystemet.

Speciella platinatändstift används, och första bytet gjordes efter 2600 drifttimmar. Stiften var då helt utslitna. Motorn är försedd med ett kontrollsystem som indikerar när någon cylinder misständer, och på detta sätt är det enklare att avgöra när tändstiften behöver bytas.



Figur 5.3 Kraftvärmeanläggningen vid reningsverket i Linköping.

Både motor- och panneffekt styrs efter gastillgång. Om tillräckligt med gas levereras från rötammarna körs anläggningen på maximal last.

Producerad värme förvärmer fjärrvärmevattnet före detta når Linköpings stora värmeverk. Fjärrvärmevattnets framledningstemperatur ut från reningsverkets anläggning hålls på 80°C oavsett årstid, och inget behov av högre temperaturer finns. Parallellkopplingen av gaspannan och motorn lämpar sig då speciellt bra.

Vid reningsverket finns ytterligare några pannor som används till det interna värmebehovet.

5.3 Nykøbing Mors Fjärrvärmeverk

I Nykøbing på Jylland i Danmark togs en ny kraftvärmeanläggning i drift under hösten 1988. Anläggningen, som använder naturgas som bränsle, består av en gasmotor, en värmepump och två pannor. Anläggningen är komplicerad, bl a med inkopplingen av värmepumpen, och systemritningen i figur 5.4 på nästa sida är förenklad.

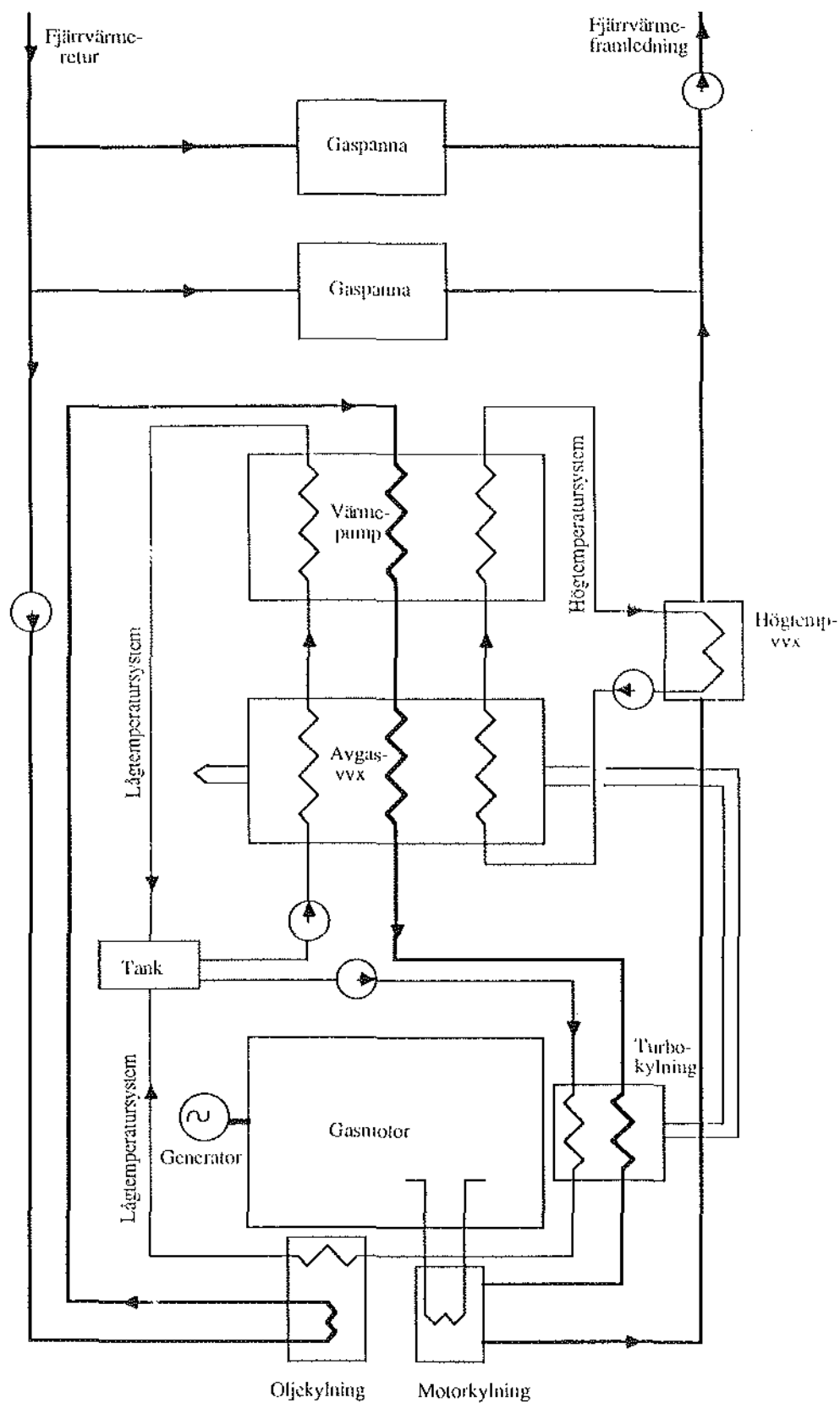
Motorn är en Wärtsilä SEMT Pielstick 6-cylindrig PC2.5-LVC/DF-C, och den genererar 2.5 MW_e och 2.8 MW_v. Typen är 4-takts dual-fuel gasmotor med lågtrycksinsprutning, vilket innebär att gas tillförs cylindern före kompressionen. Däremot dieseloljan (ca 5% av bränsleförbrukningen) sprutas direkt in i cylinderrummet vid högt tryck för att antända gasblandningen. Motorn kan köras enbart på olja, vilket är en fördel ur bränsleförsörjningssynpunkt.

Pannorna har s k kombinationsbrännare, och kan sålunda eldas med både gas och olja. Gas används dock företrädesvis. Panneffekterna är 7.1 resp 10.6 MW_v.

Värmepumpen ger ett nyttigt värmetillskott på 0.5 MW_v. Anläggningens totala verkningsgrad blir med värmepump högre än 90%.

Inkopplingen av kylsystemen är betydligt mer komplicerat än i de tidigare beskrivna anläggningarna i Trelleborg och Linköping. Det beror dels på värmepumpen, dels på att den här anläggningen är större med större krav på hög verkningsgrad. Den höga verkningsgraden väger upp ökade investeringskostnader. Returvattnet från fjärrvärmenätet håller en temperatur på 50°C, och kyler i tur och ordning smörjolja, varma avgaser, laddluft, motor och heta avgaser. Kylningen görs direkt eller via en speciell kylvattenkrets. Ett lågtemperatursystem överför den sista avgasvärmen till värmepumpen innan avgaserna går till skorstenen. Kylvattensystemen visas förenklat i figur 5.4.

I Danmark indelas elpriset i tre kategorier beroende på tidpunkt på dygnet. Kraftproducenterna får alltså inte alltid lika mycket betalt för elenergin. Priserna i dansk valuta i oktober 1989 visas i tabell 5.2 på sidan 39.



Figur 5.4 Kraftvärmeanläggningen i Nykøbing Mors, Danmark.

- Spetslast	kl 07 - 12	57 öre/kWh
- Höglast	kl 12 - 21	30 öre/kWh
- Låglast	kl 21 - 07 och helger	15 öre/kWh

Tabell 5.2 Elpriser i Danmark okt 89 i dansk valuta.

Motorn i Nykøbing körs som en följd av detta alltid på fullast på dagtid, och eventuellt överskottsvärme förloras då avgaser by-passas förbi avgasvärmväxlaren. Under natten och helger styr istället värmebehovet motorpådraget. Om behovet är lågt går motorn på dellast, eller stängs av helt och ersätts med en panna.

Totalt kan motor och värmepump ge 3.7 MW_v, och om behovet överstiger denna effekt startar en panna upp automatiskt. Denna uppstartning anses ske tillräckligt snabbt för att varmhållning av avstängda pannor med returvatten inte skall vara nödvändigt.

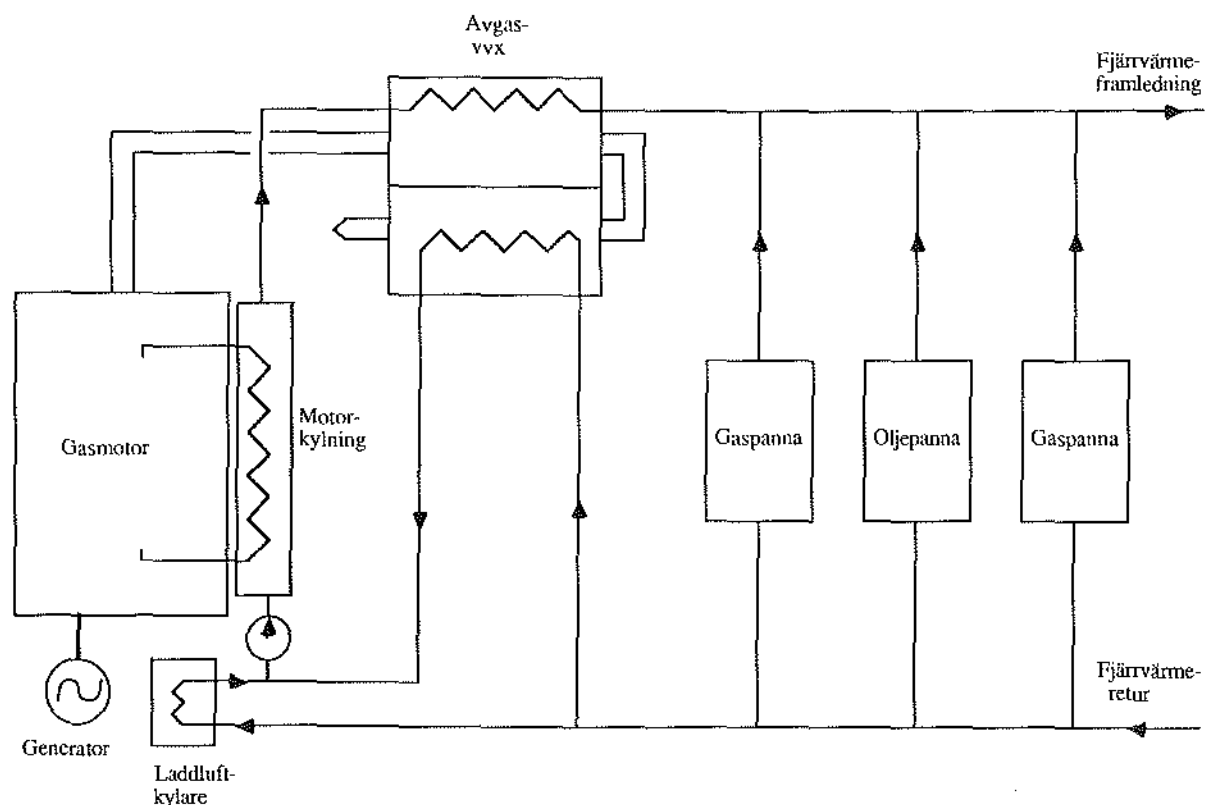
Inköp av ytterligare en gasmotor är planerat, och plats finns för denna i motorbyggnaden. Någon extra värmepump blir dock inte aktuellt, då den befintliga inte har funnits lönsam.

5.4 Snedsted Fjärrvärmeverk

Snedsteds fjärrvärmeverk på Jylland i Danmark har en kraftvärmeanläggning för naturgas som levererar värme till fjärrvärmenätet, och el för intärnt och extärnt användning.

Anläggningen består av en motor och tre pannor. Motorn är en 12-cylindrig Caterpillar 3512/JR4 som vid fullast genererar 470 kW_c och 825 kW_v. Förbränningen sker enligt ottoprincipen vid mager gasblandning ($\lambda \approx 1.6$).

Tändstiften är platinabelagda, och erfarenheter från en liknande anläggning i Viborg tyder på att stiften har en livslängd runt 8000 drifttimmar. (Jämför med rötgasdrift för gasmotorn i Linköping, där stiften bara klarar ca 2500 timmar. Detta visar hur mycket skonsammare naturgas är än rötgas vad beträffar materialangrepp.)



Figur 5.5 Kraftvärmeanläggningen i Snedsted, Danmark.

Inkoppling av kylsystem och pannor visas i figur 5.5 ovan. Returvattentemperaturen är ovanligt låg, och brukar vara 40°C. En del av returvattnet från fjärrvärmenätet kyler först laddluften innan det förvärms av varma avgaser. Vattnet går sedan vidare till motor-kylningsvärmeväxlaren, för att slutligen nå sin topptemperatur genom värmning av heta avgaser i avgasvärmeväxlaren. Tre stycken pannor är parallellkopplade med motorn. Två pannor är gaseldade topplastaggregat, medan den tredje, som eldas med olja, endast skall behövas som reservenhet.

Motorn körs efter värmelast dygnet runt, och någon styrning efter eltaxa görs sålunda inte. Man har dock planer på att komplettera anläggningen med en 200 m³ ackumulator, för att på detta sätt spara drifttimmar genom avstängning av motorn vid låglasttaxa. (Danmarks eltaxa visas i tabell 5.2 på föregående sida)

6 REFERENSER

Litteratur

- 1 "El- och värmeproduktion med naturgas", STEV 1987:R5
- 2 "Energy Conservation through Energy Storage", IEA workshop 29-30 januari 1987 i Utrecht, Holland.
- 3 "Kraftvärme", ett samarbetsprojekt mellan Vattenfall, Tekniska Verken Eskilstuna, ABB Stal och Götaverken/Generator, Vattenfall U (S) 1989/33
- 4 "Kraftvärmeproduktion med naturgas", av B Svensson, Vattenfall FUD U (G) 1988/10
- 5 "Naturgasdrivna fordon - internationell bevakning 1988", av M Ekelund, Vattenfall FUD U (G) 1989/3
- 6 "Naturgas som kolvmotorbränsle", av M Ekelund, R Egnell och R Gabrielsson, STU, nr 751, 1989
- 7 Ritningar nr E 9684 sid 1 och 2, och nr E 9809, från Jenbacher Werke AG

Studiebesök

Trelleborgs Reningsverk, Trelleborg

Linköpings Reningsverk, Linköping

Nykøbing Mors Fjärrvärmeverk, Nykøbing, Danmark

Snedsted Fjärrvärmeverk, Snedsted, Danmark

Jaco AB, Hargshamn

Megacon Instrument AB, Järfälla

6 REFERENSER

Litteratur

- 1 "El- och värmeproduktion med naturgas", STEV 1987:R5
- 2 "Energy Conservation through Energy Storage", IEA workshop 29-30 januari 1987 i Utrecht, Holland.
- 3 "Kraftvärme", ett samarbetsprojekt mellan Vattenfall, Tekniska Verken Eskilstuna, ABB Stal och Götaverken/Generator, Vattenfall U (S) 1989/33
- 4 "Kraftvärmeproduktion med naturgas", av B Svensson, Vattenfall FUD U (G) 1988/10
- 5 "Naturgasdrivna fordon - internationell bevakning 1988", av M Ekelund, Vattenfall FUD U (G) 1989/3
- 6 "Naturgas som kolvmotorbränsle", av M Ekelund, R Egnell och R Gabrielsson, STU, nr 751, 1989
- 7 Ritningar nr E 9684 sid 1 och 2, och nr E 9809, från Jenbacher Werke AG

Studiebesök

Trelleborgs Reningsverk, Trelleborg

Linköpings Reningsverk, Linköping

Nykøbing Mors Fjärrvärmeverk, Nykøbing, Danmark

Snedsted Fjärrvärmeverk, Snedsted, Danmark

Jaco AB, Hargshamn

Megacon Instrument AB, Järfälla

Datorprogram

Program för optimering av kraftvärmeanläggningar, från "Kraftvärme"-utredningen ovan (ref nr 3).

BILAGA 1: BERÄKNINGSEXEMPEL FÖR OPTIMERING AV KRAFTVÄRMEANLÄGGNING

Här visas exempel på hur en ekonomisk optimering av motortyp och motorstorlek kan utföras. Optimeringsarbetet indelas i fem steg:

1. Definition av värmelast.
2. Aggregatprestanda.
3. Energidata.
4. Ekonomisk analys.
5. Optimering.

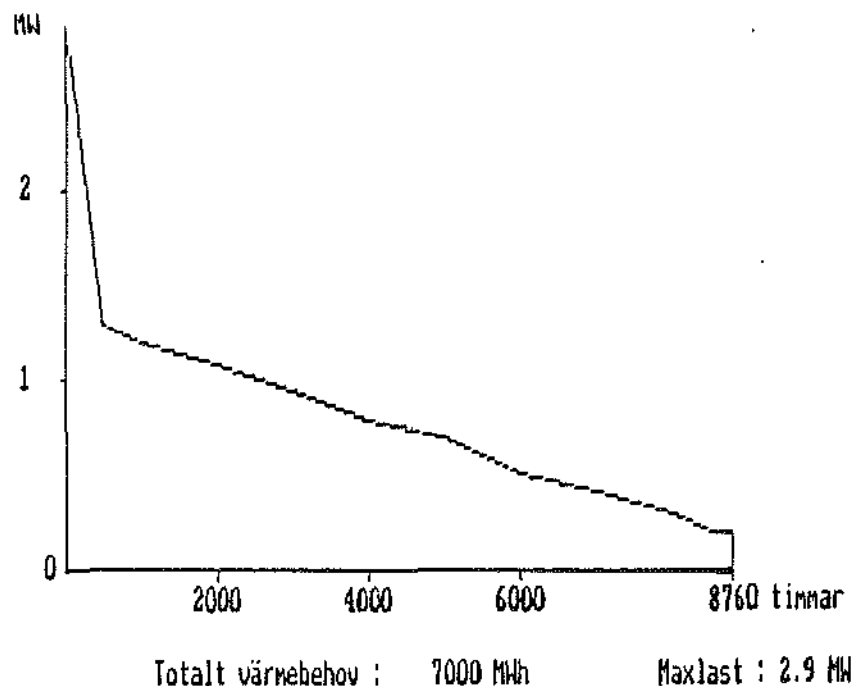
Metoden har utvecklats och används för en kraftvärmestudie i Eskilstuna <3>. Aggregatkostnader, prestanda och värmelaster har direkt hämtats från denna studie, och samma datorprogram för beräkningsarbetet har använts.

Optimeringsberäkningarna utförs för två olika värmelaster, en med maximalt effektbehov på 2,3 MW_v (lastfall A) och en med effektbehov 8,9 MW_v (lastfall B).

Lastfall A

Steg 1. Definition av värmelast

Varaktighetsdiagrammet ges utseende enligt figur B1 på nästa sida, och representerar värmelasten i ett fjärrvärmenät. Maximala värmelasten är 2.9 MW och årsvärmebehovet är 7000 MWh. Ingen baslast av t ex spillvärme antas finnas.



Figur B1 Varaktighetsdiagram, fall A.

Steg 2. Aggregatprestanda

Optimal aggregatstorlek blir enligt erfarenheter ungefär 40% av maximala effektbehovet, vilket i detta fall är runt 1 MW_v. I denna storleksklass kan följande tre tekniker vara intressanta att undersöka:

- 4T-DIESEL1, dvs 4-takts dieselmotor med nominell storlek 1 MW_v.
- 2stOTTO1, dvs två stycken ottomotorer på tillsammans 1 MW_v.
- 3stOTTO1.5, dvs tre stycken ottomotorer med nominell storlek på 1.5 MW_v tillsammans.

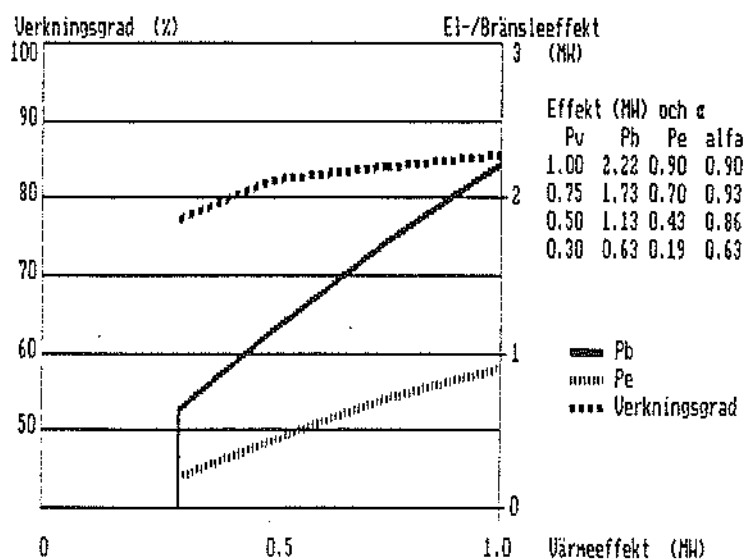
Med nominell storlek menas den effektstorlek, för vilken kostnader och prestanda tas fram ur datablad och information från tillverkare. Sedan skalas dessa uppgifter till övriga effekter. Anledningen att 3stOTTO1.5 har 1.5 MW_v som nominell storlek, i stället för 1 MW_v, är att värdena är direkt hämtade ur ref <3>, som valde denna nominella effekt.

Som intressanta aggregateffekter för storleksoptimering väljs 0.6, 0.8, 1.0 och 1.2 MW_v för samtliga tekniker. Prestanda för 0.6, 0.8 och 1.2 MW_v skalas sålunda proportionellt ur prestanda för 1.0 MW_v.

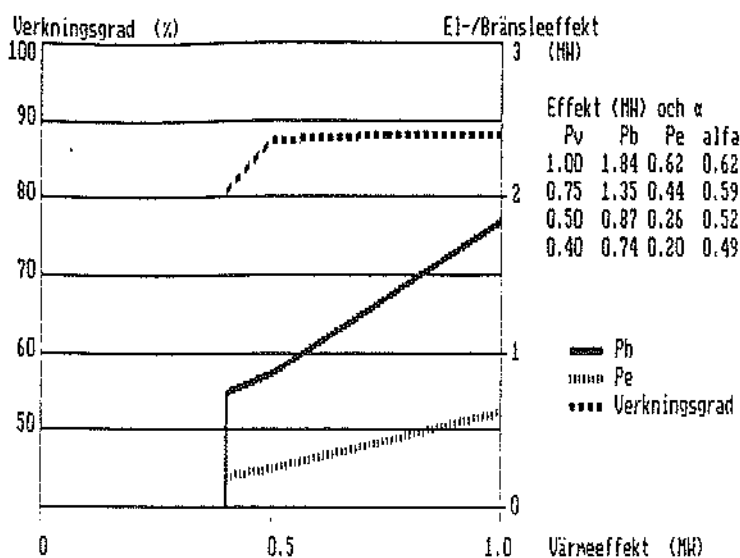
Som bränsle väljs naturgas.

Tvåtakts dieselmotorer är inte intressanta i denna storleksklass, då de har en relativt hög investeringskostnad och sålunda passar bättre för större anläggningar.

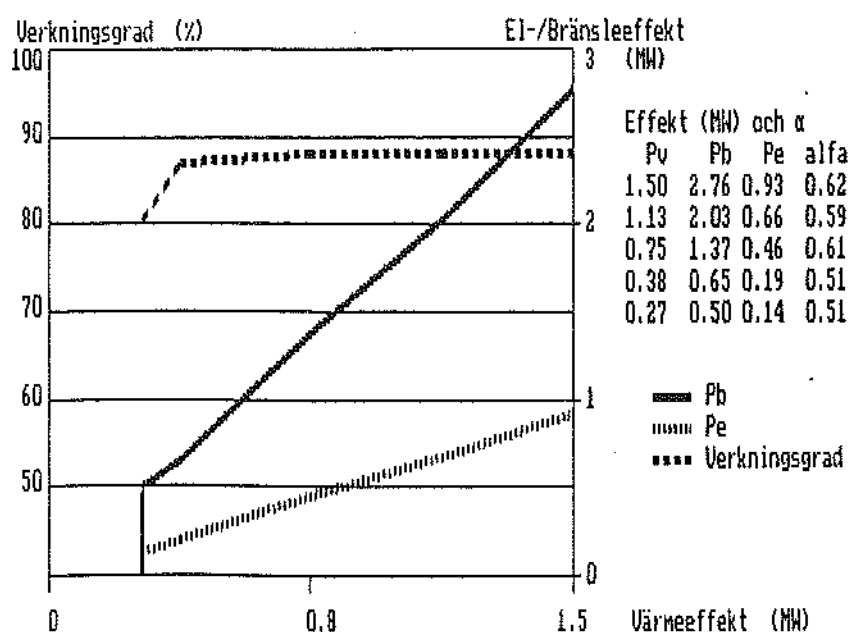
I figur B2 - B4 visas prestanda för de tre teknikerna med nominell storlek. Eleffekt och bränsleeffekt som funktion av värmeeffekt är primära data, medan verkningsgrad och alfavärde har framräknats ur dessa. Minsta last definieras, och motorn används inte för lägre last än detta värde utan då stänger man i stället av motorn.



Figur B2 Prestanda för 4T-DIESEL1.0.



Figur B3 Prestanda för 2stOTTO1.0.



Figur B4 Prestanda för 3stOTTO1.5.

Steg 3. Energidata

Då prestandakurvorna för varje aggregattyp och effektstorlek nu är kända, kan genererad värme- och elenergi samt bränsleförbrukning beräknas för varje timme i varaktighetsdiagrammet. Aggregaten antas inte utnyttjas mer än maximalt 6000 timmar om året, eftersom elpriset är lågt och värmebehovet litet sommartid. Motorn är alltså avstängd under denna tid. Tillgängligheten innebär ytterligare begränsningar i energiproduktionen. Den beräknas här vara 95% för samtliga tekniker.

Producerad värme- och elenergi samt förbrukat bränsleenergi under ett år för de olika motorerna med maxeffekt på 1.0 MW_v redovisas nedan.

	4T-DIESEL1.0	2stOTTO1.0	3stOTTO1.0
El:	4470 MWh	2980 MWh	3010 MWh
Värme:	4940 MWh	4940 MWh	4940 MWh
Bränsle:	11070 MWh	9000 MWh	9030 MWh
Årsalfavärde:	0.91	0.60	0.61
Årsverkningsgrad:	0.85	0.88	0.88

Tabell B1 Årsenergidata för kraftvärmeaggregaten.

Steg 4. Ekonomisk analys

Utgående från energidatan kan nu en kostnads- och intäktsanalys göras för varje kraftvärmeslag och storlek.

Aggregatens kostnader indelas i kapitalkostnad, personalkostnad, fast och rörlig drift- och underhållskostnad, samt bränslekostnad.

Kapitalkostnaden är investeringskostnad multiplicerat med annuitetsfaktorn. Investeringen uppskattas för den nominella storleken av varje teknik, och skalas sedan med en exponent på 0.8 till investeringskostnad för övriga storlekar. Om exempelvis en dieselmotor med nominell effekt 1.0 MW_v kostar 6.5 Mkr fås investeringskostnaden för en diesel på 1.2 MW_v enligt följande:

$$\text{Inv} / 6.5 = (1.2/1.0)^{0.8} \Rightarrow \text{Inv} = 7.5 \text{ Mkr}$$

Avskrivningstiden har satts till 20 år och kalkylräntan antas vara 6%, vilket ger en annuitetsfaktor på 0.0872.

Personalkostnaden antas fast för de olika storlekarna inom skalningsgränserna. För de tre teknikerna som undersöks i detta lastfall, uppskattats kostnaden för personal till 0.5 manår per år.

Den fasta drift- och underhållskostnaden har tagits fram som en procentsats av investeringskostnaden. Här används 2% för samtliga tekniker. Rörlig drift- och underhållskostnad, som t ex kan vara tillsatsmaterial, anges i kr per förbrukad bränsleenergi och uppskattas till 10 kr/MWh_b för alla motorerna.

Bränslekostnaden, i detta fall naturgaskostnaden, beror av flera faktorer. Naturgaspriset varierar än så länge i Sverige beroende på geografiskt läge, förbrukning, kostnader för alternativa bränslen mm. Här används genomgående 131 kr/MWh_b. Beskattningen av bränslet varierar också. Bränsle som används för elproduktion beläggs inte med någon skatt, medan bränsle för värmegenerering beskattas. I ett kraftvärmeverk är andelen bränsle som beskattas resp inte beskattas direkt proportionellt mot värme- resp elproduktionen i anläggningen. För naturgas är skatten idag (1989) 29kr/MWh_b, vilket ger ett totalt gaspris på 160kr/MWh_b för "värmeandelen" i detta exempel.

I dieselmotorn, som arbetar enligt dual-fuelprincipen, används ca 5% dieselolja som tändbränsle. Ingen hänsyn till skillnader i bränslekostnader har tagits vid beräkningarna här.

Total årskostnad för en kraftvärmeanläggning är summan av kapitalkostnad, personalkostnad, drift- och underhållskostnad och bränslekostnad. Denna årskostnad beräknas för varje storlek för de olika teknikerna. Här visas kostnaderna för 4T-DIESEL1.0.

Kapital:	$a \times \text{inv} = 0.0872 \times 6\,500\,000 =$	566 800 kr
Fast D&U:	$\% \times \text{inv} = 0.02 \times 6\,500\,000 =$	130 000 kr
Rörlig D&U:	$\text{kr} \times Q_b = 10 \times 11070 =$	110 700 kr
Personal:	$0.5 \text{ manår} =$	115 000 kr
Bränsle:	$\{\text{gaspris} \times Q_b(\text{för elprod}) + \text{gaspris inkl skatt} \times Q_b(\text{för värmeprod})\} =$ $\{131 \times 5260 + 160 \times 5810\} =$	1 618 700 kr
Totalt:		2 541 200 kr

Tabell B2 Årskostnader för 4T-DIESEL1.0.

Anläggningens intäkter kommer från värme- och elproduktion.

Producerad värme värderas till den genomsnittliga värmeproduktionskostnaden i fjärrvärmenätet före kraftvärmeanläggning byggs. Här har 190 kr/MWh_v använts. Elenergin ges samma värde som kolkondensenergi, närmare bestämt kostnaden att producera el i ett kolkondenskraftverk. Värdet uppskattas i detta exempel till 305 kr/MWh_e.

Intäkterna summeras sedan för alla kraftvärmeslag och storlekar, och i tabell B3 nedan visas årsintäkter för 4T-DIESEL1.0 som exempel.

El:	$\text{elpris} \times Q_e = 305 \times 4470 =$	938 600 kr
Värme:	$\text{värmepris} \times Q_v = 190 \times 4940 =$	1 363 350 kr
Totalt:		2 301 950 kr

Tabell B3 Årsintäkterna för 4T-DIESEL1.0.

Vinsten fås nu som intäkter minus kostnader, och blir för 4T-DIESEL1.0 mindre än noll ($2\,301\,950 - 2\,541\,200 = -239\,250$ kr), vilket innebär en förlust. Denna anläggning är sålunda inte lönsam.

Steg 5. Optimering

Resultaten för 4T-DIESEL, 2stOTTO och 3stOTTO med effekter 0.6, 0.8, 1.0, och 1.2 MW_v visas i diagram B1 på nästa sida. Optimeringsarbetet innebär att man jämför vinsterna för de olika storlekarna, för att få fram bästa effekt för varje motortyp. Sedan jämförs teknikerna och den typ som genererar största vinsten väljs.

De ovan beskrivna förutsättningarna vad beträffar bränslepriser kallas BASKONST. För att kunna se hur en skatteändring till att allt bränsle beskattas lika påverkar val av motor, jämförs basfallet med LIKASKATT. Då stiger kolpriset, vilket ger högre elpris, samt gaspriset för elproduktion. Resultaten kan ses i diagram B2 på nästa sida.

Ett annat intressant alternativ är BASHÖG, där värme värderas till 250 kr/MWh istället för 190 kr/MWh, vilket visas i diagram B3 på sid 51.

Resultaten av en tredje variant av basfallet, BASDIFF, redovisas i diagram B4 på sid Här värderas elenergin efter en dygns- och årstidstaxa. Taxan innehåller totalt sex olika elpris på mellan 366 och 205 kr/MWh. Dataprogrammet beräknar sedan intäkterna från producerad el utgående från varaktighetsdiagrammet.

Slutsatser och kommentarer

Kraftvärme är med dagens energipriser och skatter inte lönsam i detta effektstorleksområde, vilket ses i diagram B1 och B4. I LIKASKATT- och BASHÖG-fallet ger bägge aggregattyper med ottomotorer vinst, och beträffande effektstorlek är 1.0 MW optimal för dessa tekniker. Gasdieselmotorer är mindre lönsamma.

Resultaten från 3stOTTO är inte direkt jämförbara med de övriga, eftersom nominell effektstorlek 1.5 MW för 3stOTTO har använts istället för 1.0 MW.

Miljön värderas ej i denna optimering, utan får bedömas utanför beräkningen. Enligt tidigare resonemang i kapitel 2, anses ottomotorer vara bäst ur miljösynpunkt.

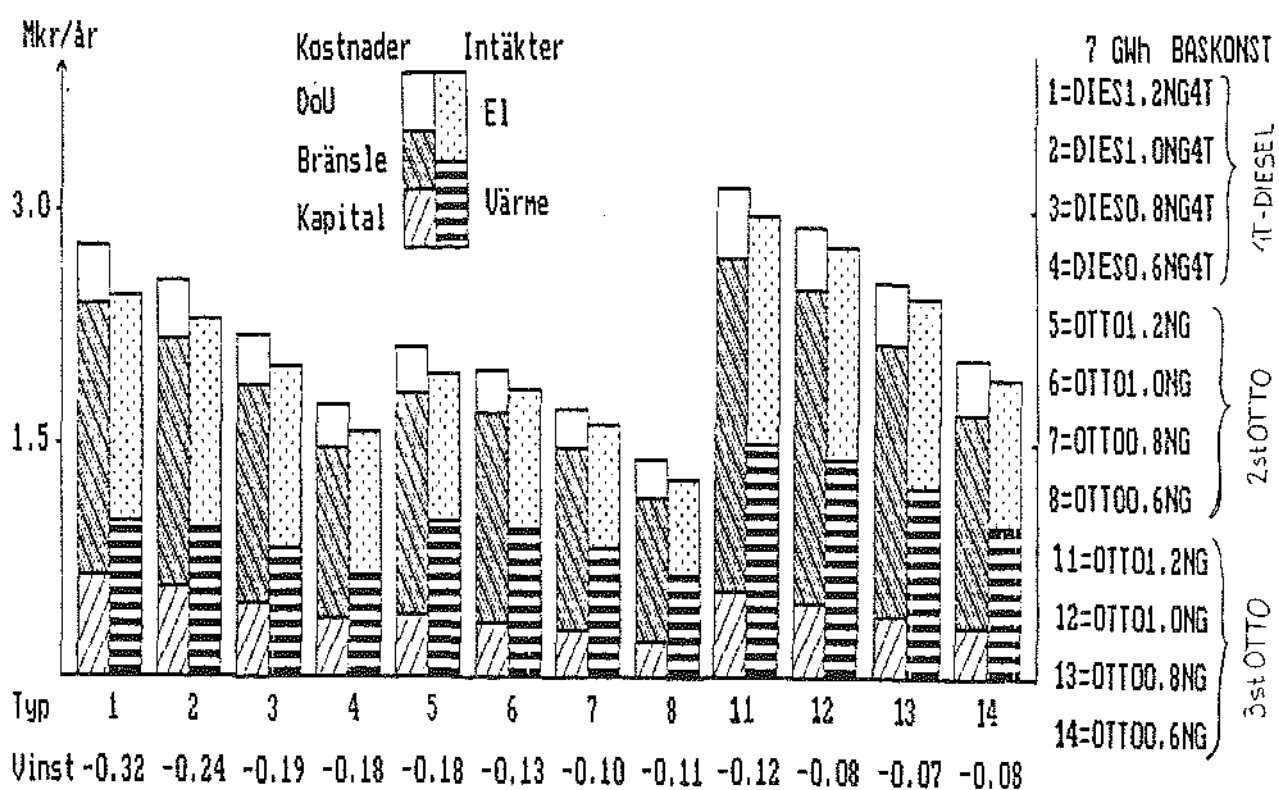


Diagram B1 BASKONST, vinster för olika motortyper och storlekar.

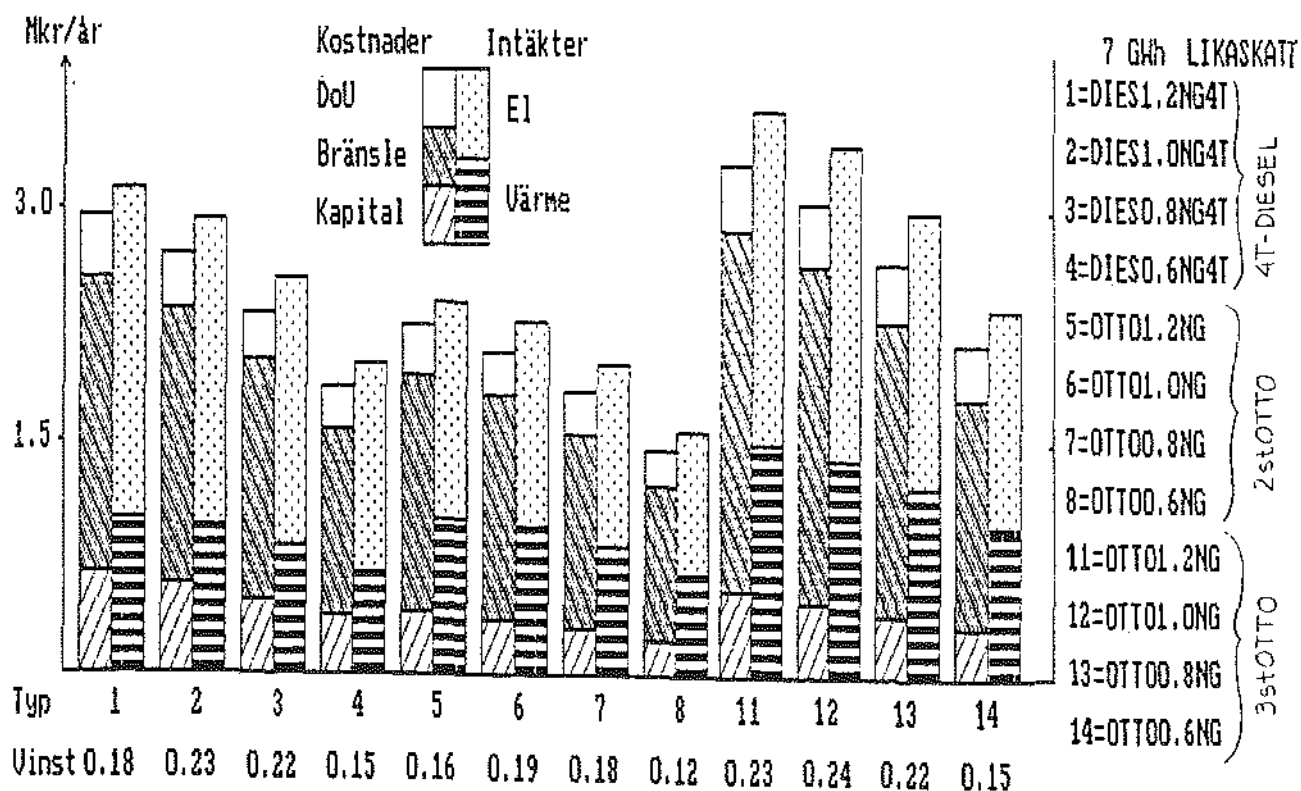


Diagram B2 LIKASKATT, vinster för olika motortyper och storlekar.

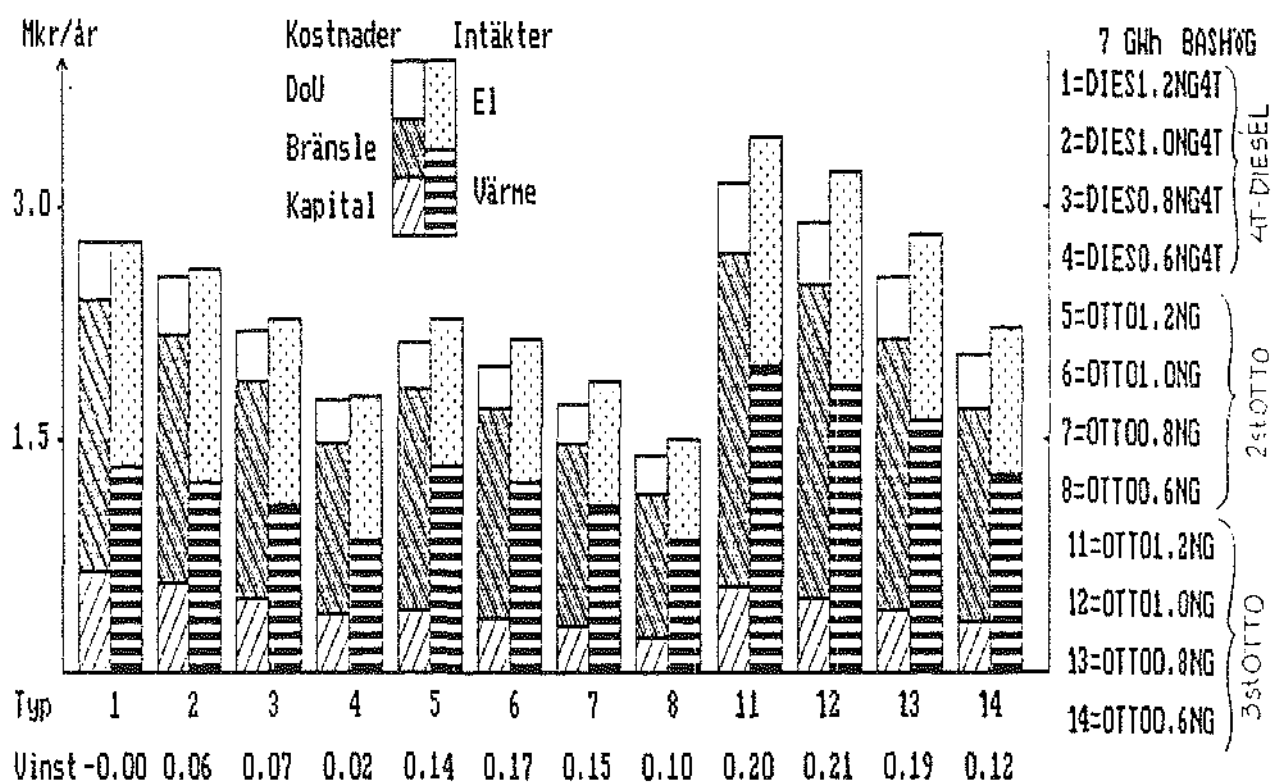


Diagram B3 BASHÖG, vinster för olika motortyper och storlekar.

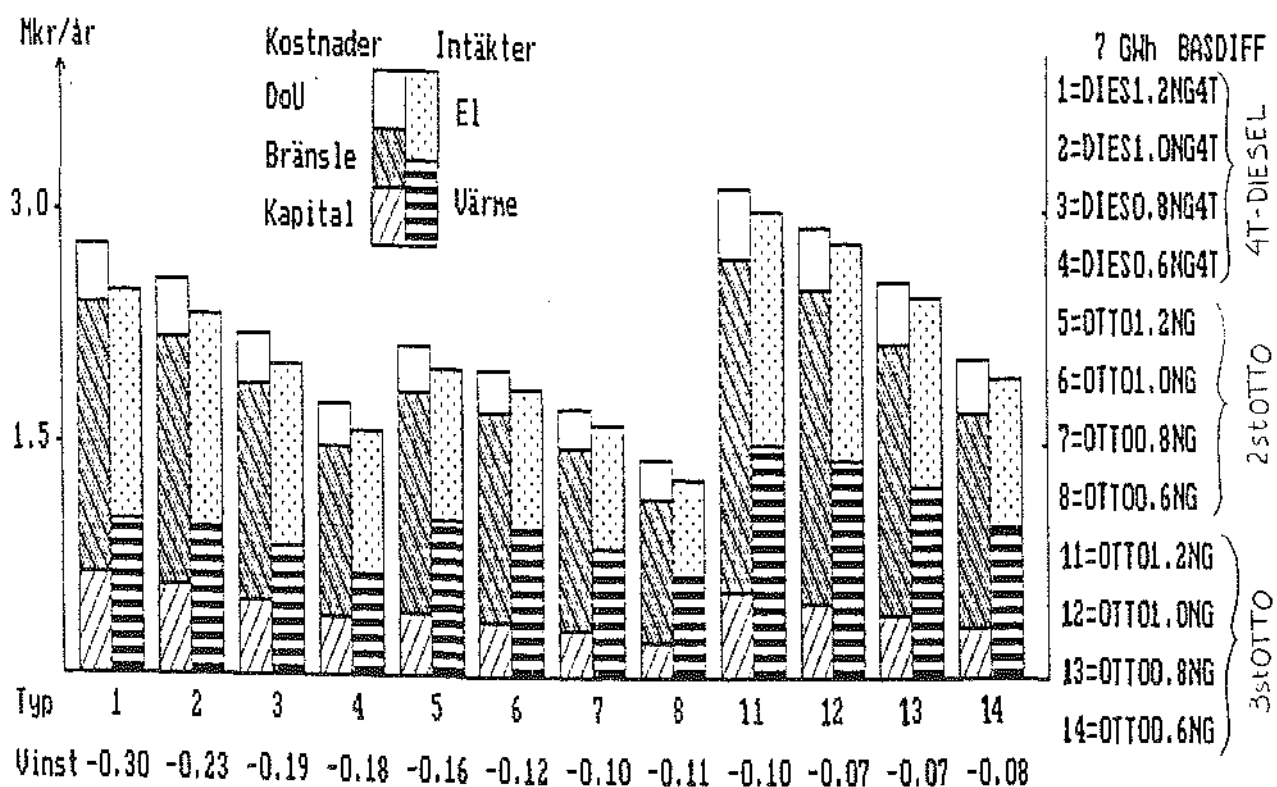
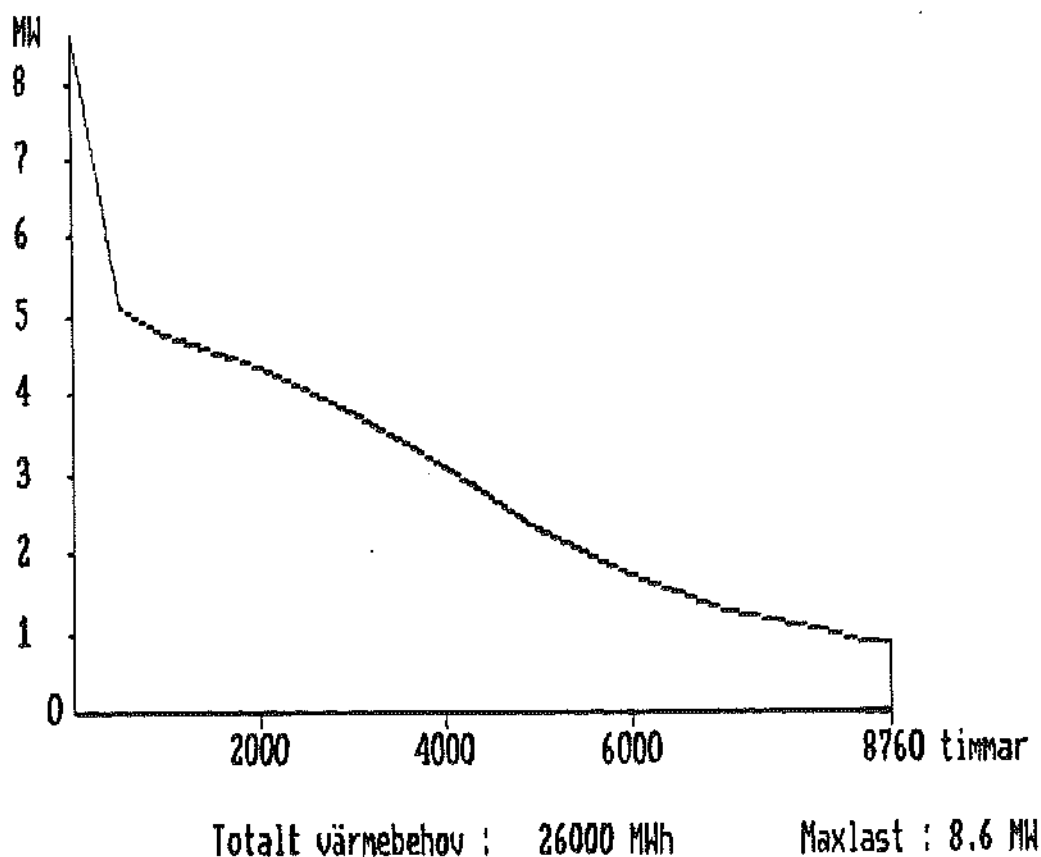


Diagram B4 BASDIFF, vinster för olika motortyper och storlekar.

Lastfall B

Steg 1. Definition av värmelast

Värmeunderlaget är betydligt större i fall B än i fall A. Totalt värmebehov är 26 000 MWh_v med maximalt effektbehov på 8.6 MW_v. Inte heller i detta fall förutsätts någon baslast.



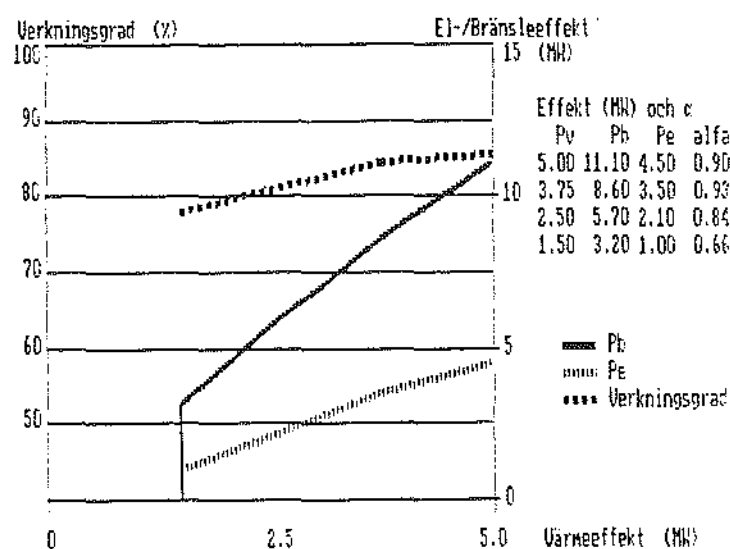
Figur B5 Varaktighetsdiagram, fall B.

Steg 2. Aggregatprestanda

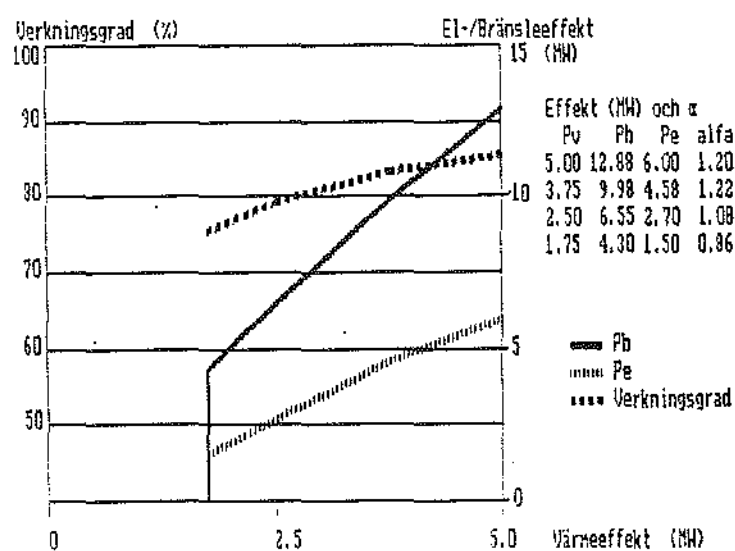
Nominell storlek är här 5 MW_v. Lämpliga tekniker är 2-takts och 4-takts gasdieselmotorer:

- 4T-DIESEL5
- 2T-DIESEL5

Storlekarna 3, 4, 5 och 6 MW_v väljs för effektstorleksoptimering. Prestanda för motorerna vid nominell storlek visas nedan. För övriga tre storlekar skalas prestandan proportionellt. Bränslet är genomgående naturgas.



Figur B6 Prestanda för 4T-DIESEL5.



Figur B7 Prestanda för 2T-DIESEL5.

Steg 3. Energidata

Maximal drifttid och tillgänglighet sätt som i lastfall A till 6000 timmar per år resp 95%. Genererad el- och värmeenergi och bränsleförbrukning under ett år, årsverkningsgrad, och årsalfavärde för de två motortyperna vid nominell storlek visas på nästa sida. Dessa data beräknas sedan för övriga storlekar.

	4T-DIESEL5	2T-DIESEL5
El:	18 430 MWh	24 130 MWh
Värme:	20 640 MWh	20 610 MWh
Bränsle:	46 540 MWh	53 760 MWh
Årsalfavärde:	1.17	0.89
Årsverkningsgrad:	0.84	0.83

Tabell B4 Årsenergidata för kraftvärmeaggregaten.

Steg 4. Ekonomisk analys

Kostnads- och intäktsberäkning görs för alla storlekarna för de två kraftvärmeaggregaten på samma sätt som i lastfall A. Som exempel visas beräkningar för 2T-DIESEL5.

Kapital:	$0.0872 \times 52\,000\,000 =$	4 534 400 kr
Fast D&U:	$0.01 \times 52\,000\,000 =$	520 000 kr
Rörlig D&U:	$10 \times 53\,760 =$	537 600 kr
Personal:		115 000 kr
Bränsle:	$160 \times 24774 + 131 \times 28986 =$	7 761 000 kr
Totalt:		13 468 000 kr

Tabell B5 Årskostnader för 2T-DIESEL5.

El:	$305 \times 24\,130 =$	7 359 700 kr
Värme:	$190 \times 20\,610 =$	3 915 900 kr
Totalt:		11 275 600 kr

Tabell B6 Årsintäkter för 2T-DIESEL5.

Vinsten, dvs intäkter minus kostnader, blir även i detta fall negativ (-2 192 400 kr), vilket innebär att anläggningen går med förlust.

Steg 5. Optimering

Kostnader, intäkter och vinster för 2T-DIESEL och 4T-DIESEL i olika storlekar visas nedan. De fyra olika varianterna på bränsleskatt och bränslepriser förklaras i lastfall A på sid 49.

Slutsatser och kommentarer

Det är även för detta lastfall svårt att uppnå lönsamhet med dagens skatter och energipriser (diagram B5 och B8). Om allt bränsle beskattas lika (diagram B6) ger 4T-DIESEL vinst i alla storlekar, med 4.0 MW som optimal effekt. 2T-DIESEL ger högre vinst ju lägre effektstorlek man väljer inom skalningsgränserna. Vinsten är dock högre för fyratakt-dieseln.

Beträffande emissioner är en fyratakt gasdiesel i de flesta fall att föredra framför en tvåtaktare.

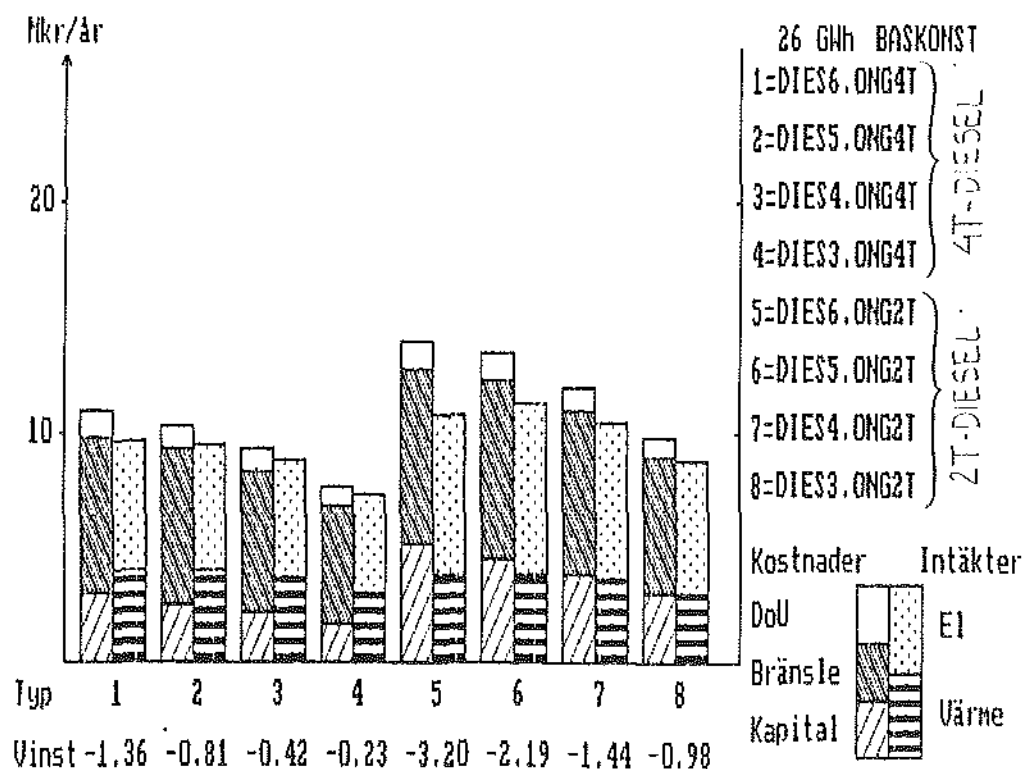


Diagram B5 BASKONST, vinster för olika motortyper och storlekar.

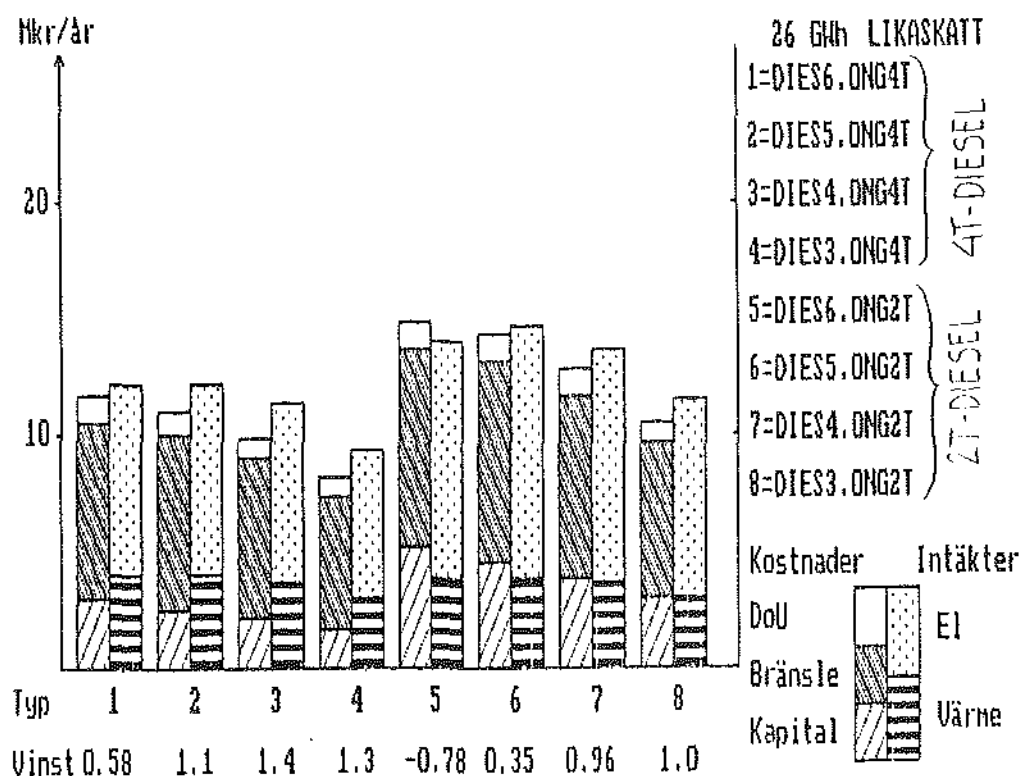


Diagram B6 LIKASKATT, vinster för olika motortyper och storlekar.

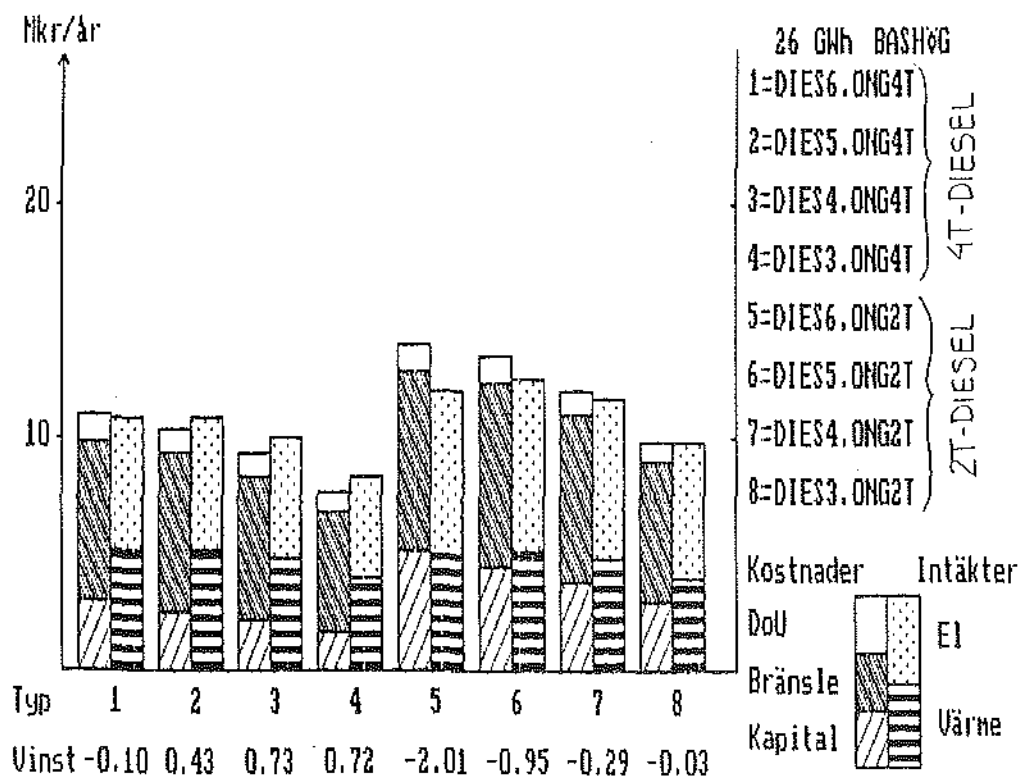


Diagram B7 BASHÖG, vinster för olika motortyper och storlekar.

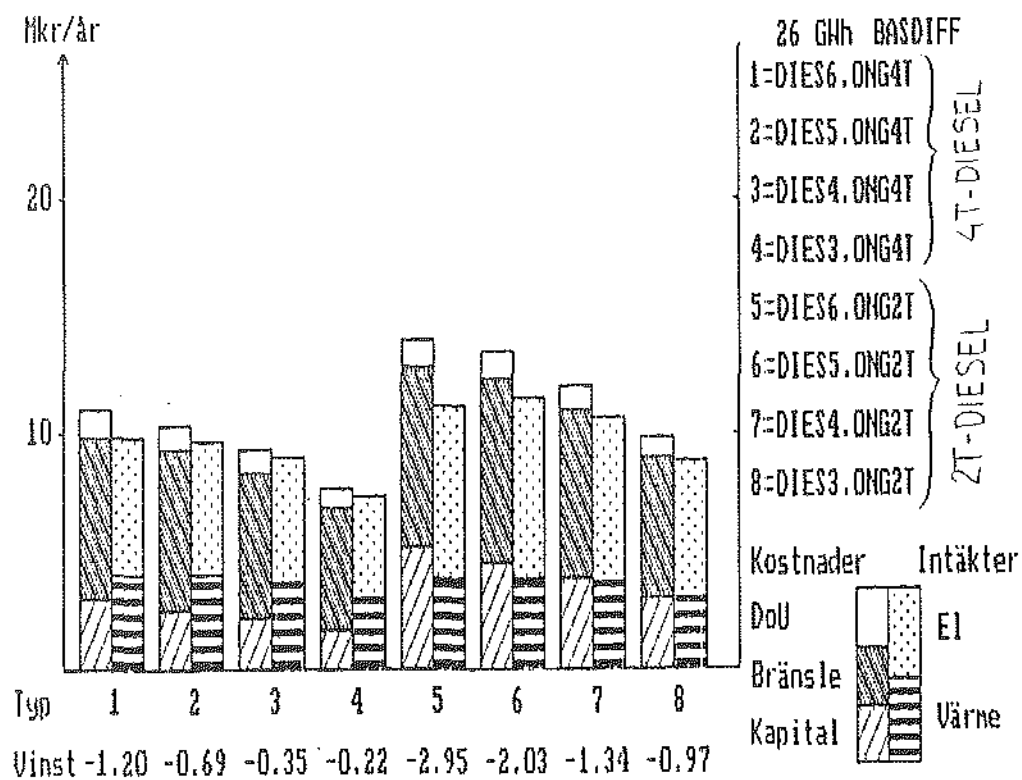


Diagram B8 BASDIFF, vinster för olika motortyper och storlekar.