
Rapport SGC 080

**MIKROKROKRAFTVÄRMEVERK
MED STIRLINGMOTOR**

**Tomas Nilsson
Lunds Tekniska Högskola**

Januari 1997



Rapport SGC 080
ISSN 1102-7371
ISRN SGC-R--80--SE

Rapport SGC 080

MIKROKRAFTVÄRMEVERK MED STIRLINGMOTOR

Tomas Nilsson
Lunds Tekniska Högskola

Januari 1997

SGC:s FÖRORD

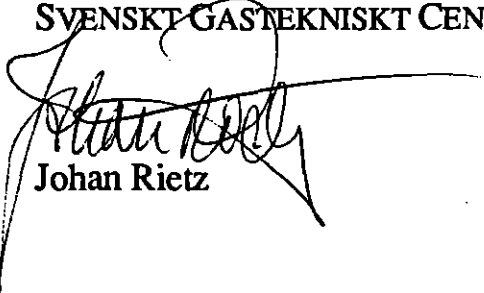
FUD-projekt inom Svenskt Gastekniskt Center AB avrapporteras normalt i rapporter som är fritt tillgängliga för envar intresserad.

SGC svarar för utgivningen av rapporterna medan uppdragstagarna för respektive projekt eller rapportförfattarna svarar för rapporternas innehåll. Den som utnyttjar eventuella beskrivningar, resultat eller i rapporterna gör detta helt på eget ansvar. Delar av rapport får återges med angivande av källan.

En förteckning över hittills utgivna SGC-rapporter finns i slutet på denna rapport.

Svenskt Gastekniskt Center AB (SGC) är ett samarbetsorgan för företag verksamma inom energigasområdet. Dess främsta uppgift är att samordna och effektivisera intressenternas insatser inom områdena forskning, utveckling och demonstration (FUD). SGC har följande delägare: Svenska Gasföreningen, Sydgas AB, Sydkraft AB, Göteborg Energi AB, Malmö Energi AB, Lunds Energi AB och Helsingborg Energi AB.

SVENSKT GASTEKNISKT CENTER AB



Johan Rietz

0. Sammanfattning.

Ett mikrokraftverk är ett mycket litet kraftvärmeverk, avsett för att försörja ett enfamiljshus med värme och el. Ett komplett mikrokraftverk finns ej på marknaden idag vilket medför att inköpspriset och det exakta tekniska utseendet inte är känt. I rapporten ges flera förslag på hur ett mikrokraftverk kan se ut. Beroende på flera olika parametrar passar stirlingmotorn som kraftkälla till mikrokraftverket. Denna måste dock kompletteras med någon form av reglermöjlighet för värmeeffekten.

Ett mikrokraftverk kan ersätta värmepannan i småhus. Förutom värme genererar mikrokraftverket även el. Överskottselen säljs ut på nätet varvid en viss förtjänst görs. Elräkningen för småhusägaren minskar till följd av att han delvis använder egentillverkad el. Förtjänsten från dessa två faktorer blir ett täckningsbidrag för ökade kapital- och underhållskostnader för mikrokraftverket jämfört med värmepannan. Med dagens elpriser skulle täckningsbidraget bli 1300 kr per år till en husägare i södra Sverige. I norra Sverige skulle summan bli ca. 2000 kr.

Lönsamheten är i dag för liten med Sveriges låga elpriser. I ett framtida perspektiv med stigande elpriser kan mikrokraftverket bli ett intressant alternativ till den vanliga värmepannan.

Innehåll.

Sida :

0. Sammanfattning.....	1
1. Inledning.....	5
1.1 Syfte.....	5
1.2 Kort beskrivning av ett mikrokraftverk.....	5
1.3 Bakgrund.....	5
1.4 Målet med rapporten.....	5
2. Stirlingmotorn.....	6
2.1 Historia.....	6
2.1.1 Robert Stirling.....	6
2.1.2 De automotiva tillämpningarna.....	6
2.1.3 Nutida användningsområden och utvecklingslinjer.....	7
2.2 Stirlingcykeln.....	7
2.2.1 Den ideala stirlingcykeln.....	8
2.2.2 Sammanfattning.....	10
2.3 Realisering av stirlingcykeln.....	10
2.3.1 Värmare och kylare.....	10
2.3.2 Alfa och beta design.....	11
2.3.3 Vevmekanismen.....	12
2.3.4 Arbetsmediet.....	13
2.3.5 Trycknivå och tätningar.....	13
2.3.6 Reglersystem.....	14
2.4 Verkningsgraden för den verkliga stirlingcykeln.....	14
2.5 Emissioner.....	17
2.6 Tillverkningskostnader.....	17
2.7 Övriga egenskaper hos stirlingmotorn.....	18
3. Stirlingmotorn i kraftvärmeproduktion.....	19
3.1 Värmeproduktionen.....	19
3.2 Elproduktionen.....	20
3.3 Övriga aspekter.....	21
3.4 Sammanfattning.....	22

7.3 Större mikrokraftverk.....	53
Referenser.....	54
Bilagor.....	55

1. Inledning.

1.1 Syfte.

Syftet med examensarbetet är att redogöra för stirlingmotorns för- och nackdelar i mikrokraftvärmeapplikationen. Här ingår även att ge förslag på hur ett litet mikrokraftvärmeverk kan se ut. Slutligen har jag också försökt kartlägga vad som har gjorts och görs inom detta område på högskolor och företag.

1.2 Kort beskrivning av ett mikrokraftvärmeverk.

Ett mikrokraftvärmeverk är ett mycket litet kraftvärmeverk med en eleffekt på 2 - 10 kW. Tanken är att det skall kunna försörja en villa eller ett mindre flerfamiljshus med elström och värme. Mikrokraftvärmeverket skall placeras i fastigheten ungefär på samma sätt som en värmepanna idag är installerad.

Idag finns det inga mikrokraftvärmeverk på marknaden som går att köpa. Däremot finns det en del förprojekteringar som alla bygger på stirlingmotorn som kraftkälla. Det pågår flera olika projekt med mikrokraft i Sverige, Danmark, Tyskland och England.

1.3 Bakgrund.

Sedan den 1:e januari 1996 har Sverige en avreglerad elmarknad. Det betyder att det är fritt att handla med elkraft. Som privatperson har man förutom rätten att välja elleverantör också möjlighet att själv sälja elkraft till nätet. Tanken är att det skall finnas en "elbörs" där det sker handel med elkraft. Förändringen till en väl fungerande elmarknad kommer att ta lång tid och ingen vet just nu hur det kommer att se ut om tio år. Troligtvis kommer elpriset att stiga till europeisk nivå.

Det faktum att det går att sälja el som privatperson gör att nya möjligheter öppnar sig. Ett mikrokraftvärmeverk som producerar både el och värme ger husägaren möjlighet att sälja ett elöverskott och därmed finansiera sin investering.

1.4 Målet med rapporten.

Målet är att göra en introduktion till ämnet "Mikrokraftvärmeverk med stirlingmotorn som kraftkälla", beskriva stirlingcykeln så grundligt att läsaren får en känsla för hur maskinen fungerar, påvisa för och nackdelar med stirlingmotorn som kraftkälla, göra en tankestudie på hur ett mikrokraftvärmeverk kan se ut samt beskriva de olika projekten som pågår i Europa.

2. Stirlingmotorn.

2.1 Historik.

2.1.1 Robert Stirling.

Under första hälften av 1800-talet uppfanns det vid sidan av ångmaskinen en rad olika sk. varmluftmotorer. Skillnaden mellan dessa två motortyper var att arbetsmediet (luften) i varmluftmaskinerna inte genomgick en fasändring vilket var fallet hos ångmaskinen. En av de mest kända varmluftkonstruktionerna var de som patenterades av Robert Stirling. Varmluftmotorerna kunde inte konkurrera ut ångmaskiner och senare otto- och dieselmotorer i automotiva tillämpningar. Mot slutet av 1800-talet var de däremot vanliga som stationära pump- och fläktmotorer. Senare blev de även här utkonkurrerade, nu av elmotorer då elnätet byggdes ut.

Det skulle dröja ända till 1940-talet innan någon såg ett nytt användningsområde för stirlingtekniken. Det var Philips i Holland som ville ha ett tyst generatoraggregat för att driva radioutrustning i icke elektrifierade områden. Man fastnade för Robert Stirlings patent på sin varmluftmotor och myntade uttrycket "Stirlingmotor". Philips lade ner stor möda på att utveckla en stirlingmotor för sitt användningsområde och presenterade år 1952 ett generatoraggregat med beteckningen 102 C som var färdigt för massproduktion. Olyckligtvis uppfanns transistorn i USA av Bell Company i slutet av 1940-talet vilket drastiskt minskade strömförbrukningen i radioutrustningar. Detta faktum ledde till att tillverkningen av 102 C fick läggas ned år 1954.

Philips som hade satsat pengar i stirlingtekniken försökte hitta nya användningsområden. För andra företag som ville använda sig av stirlingtekniken var Philips med sitt know how en given samarbetspartner.

2.1.2 De automotiva tillämpningarna.

General Motors var det första företaget som intresserade sig för det nyvunna teknikområdet. 1958 slöts ett licensavtal mellan Philips och GM som skulle utmynna i en ersättare till ottomotorn. Framförallt var det stirlingmotorns ringa miljöpåverkan som lockade GM. Fordonsprogrammet fortsatte fram till 1970 då all stirlingverksamhet lades ned. Under denna tid byggde GM en personbil med el-stirlinghybriddrift men kostnaderna visades sig var alltför höga för att kunna konkurrera med traditionell teknik.

1972 inledde Ford ett stirlingsamarbete med Philips för utveckling av såväl personbilsmotorer som motorer för tyngre applikationer. Programmet varade fram till 1978 då alla aktiviteter plötsligt avbröts.

Philips tecknade även 1967 licensavtal med MAN och MWM som skulle använda stirlingmotorer som drivkälla i ubåtar.

Det svenska företaget United Stirling tecknade också 1968 ett licensavtal med Philips. Då ägdes United Stirling av Kockums Mekaniska Verkstad och Förenade Fabriksverken.

Både GM och Ford försökte ersätta ottomotorn med stirlingmotorn som drivkälla i personbilar. Det gjordes även utprovningar med stirlingmotorn i bussar och lastbilar. Erfarenheterna har visat att stirlingmotorn inte varit tillräckligt mycket bättre än motsvarande konventionella motorer med avseende på bränsleförbrukning, emissioner, prestanda och tillverkningskostnader. Idag kan man säga att stirlingmotorn är död inom direktdrivna automotiva tillämpningar.

2.1.3 Nutida användningsområden och utvecklingslinjer.

Det enda område där stirlingmotorn har slagit igenom kommersiellt är som framdrivningssystem för ubåtar. Det är Kockums/United Stirling som har utvecklat en stirlingmotor som en luftoberoende energikälla i ubåtar. Stirlingmotorn är kopplad till en generator som med hjälp av batterierna ombord förser ubåten med energi för bl.a. framdrivning i undervattensläge. Svenska marinen har idag flera ubåtar i tjänst med stirlingaggregat. Detta är teknisk en mycket raffinerad produkt där stirlingmotorns speciella egenskaper utnyttjas. Den mycket tysta gången gör att ubåten blir svårupptäckt. Det är också möjligt att ha flytande syre i stället för luft i förbränningen med diesellojjan. Eftersom flytande syre är kompakt kan man ta med sig stora förråd vilket ökar tiden i undervattensläge.

Förutom den speciella ubåtsapplikationen utvecklas nu framförallt små stirlingmotorer för stationär kraftgenerering.

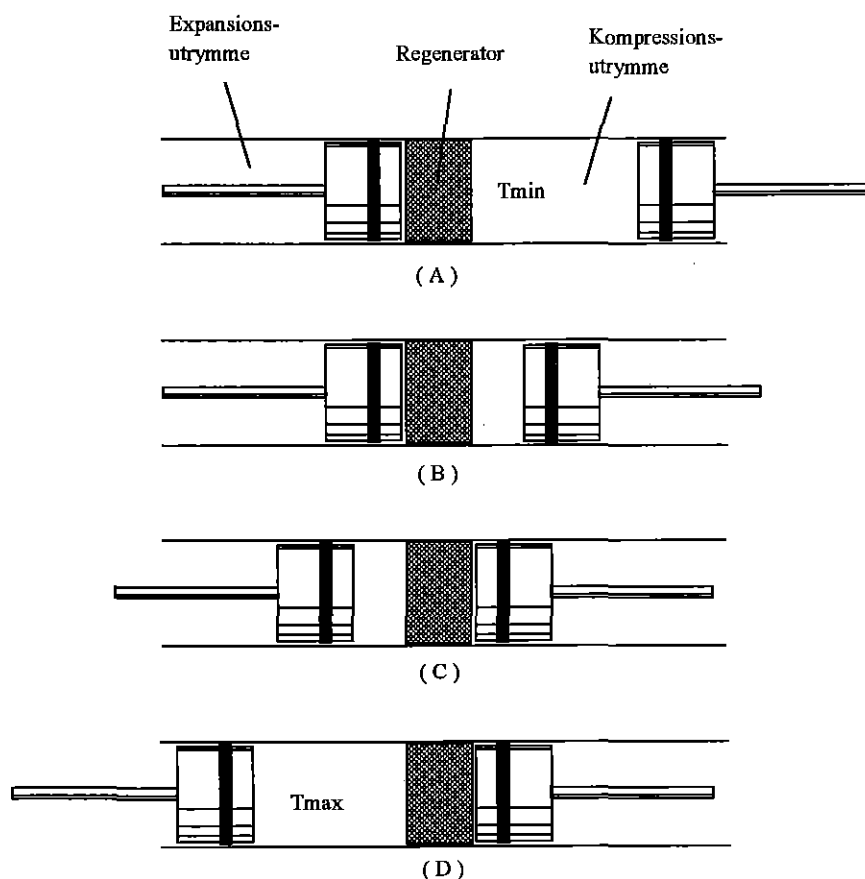
2.2 Stirlingcykeln

För att kunna inse för- och nackdelar med stirlingmotorn i kraftvärme - applikationen är det nödvändigt att förstå hur den arbetar. Vissa frågor är speciellt viktiga. Vilka faktorer påverkar stirlingmotorns verkningsgrad och vilken nivå ligger den på ? Först beskrivs den ideala termodynamiska stirlingcykeln. Med den som grund visas sedan hur man försöker realisera den till en verklig motor.

2.2.1 Den ideala stirlingcykeln.

Föreställ dig två stycken motliggande cylindrar med en regenerator mitt emellan enligt figur 2.1. Regeneratoren består av en tvättsvampsliknande massa i metall som effektivt kan lagra och avge värme. Det är alltså möjligt för ett gasformigt ämne att passera genom regeneratoren och samtidigt avge eller motta värmeenergi.

Utrymmet mellan de båda kolvarna är fyllt med ett gasformigt ämne som i den ideala stirlingcykeln följer den allmänna gaslagen. Den högra delen av cylindern kallas för kompressionsutrymmet och håller alltid en låg temperatur. Det innebär att arbetsgasen alltid håller samma låga temperatur som cylinderväggen när den befinner sig i kompressionsutrymmet. Den vänstra delen av cylindern kallas expansionsutrymmet och håller en hög temperatur. På samma sätt är arbetsgasen här också alltid i termisk jämvikt med cylinderväggen.



FIGUR 2.1 Illustration av stirlingcykeln.

Låt oss nu gå igenom hela stirlingcykeln i kolvmodellen. Vi börjar med att all arbetsgas befinner sig i kompressionsutrymmet. Den högra kolven befinner sig i sitt nedre dödläge och den vänstra i sitt övre dödläge enligt figur 2.1. När arbetsgasen är kall rör sig den högra kolven uppåt och komprimerar gasen isotermt medan den vänstra kolven står stilla i sitt övre dödläge. För att kunna hålla konstant

temperatur på arbetsgasen måste värme bortföras från processen. (figur 2.1A till figur 2.1B). Innan den högra kolven når sitt övre dödläge börjar den vänstra kolven röra sig nedåt. Detta medför att båda kolvarna rör sig åt vänster med samma hastighet ända tills den högra kolven når sitt övre dödläge. Härvid genomgår arbetsgasen en isokor temperaturhöjning. Den värme som tillförs arbetsgasen är regenererad, d.v.s. ingen värme tillförs processen i detta ögonblick (figur 2.1B till figur 2.1C). Nu fortsätter den vänstra kolven att röra sig nedåt varefter arbetsgasen genomgår en isoterm expansion. Under denna tiden är den högra kolven stillastående i sitt övre dödläge. Här tillförs värme till processen (figur 2.1C till figur 2.1D). När den vänstra kolven har nått sitt undre dödläge rör sig båda kolvarna åt höger med samma hastighet. Detta medför att arbetsgasen genomgår en isokor temperatursänkning. Arbetsgasen värmer nu upp regeneratoren, d.v.s. ingen värme lämnar processen (figur 2.1D till figur 2.1A). Nu är vi tillbaka igen till figur 2.1A.

Processen är inritad i ett p-V och T-S diagram, se nedan.

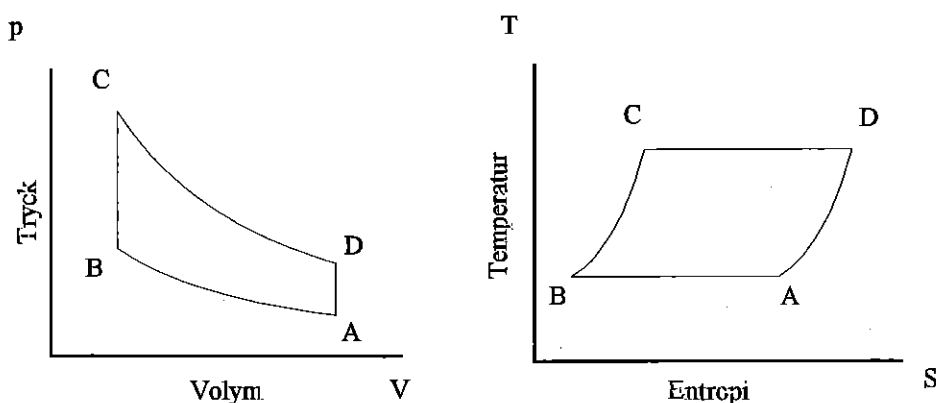


DIAGRAM 2.1 Stirlingcykeln i p-V och T-S diagram.

I p-V diagrammet representerar den omkringslutna ytan ett arbete som processen har utfört. Värme tillförs processen mellan C och D. Värme bortförs från processen mellan A och B. Som framgår av diagrammet går det att öka ytan i p-V diagrammet på flera olika sätt. Genom att öka kompressionen d.v.s. förhållandet mellan största och minsta volym i processen kommer det uttagna arbetet att bli större. Om kompressionen påbörjas vid ett högre tryck kommer diagramytan att bli större. Även en ökning av volymen arbetsgas ger en ökning av arbetet. Observera att tryckförhållandet styrs av dels kompressionsförhållandet, dels av temperaturnivåerna.

Ur T-S diagrammet utläses den termiska verkningsgraden. I Walker (1980) ges en härledning av den teoretiska cykelverkningsgraden hos stirlingmotorn:

$$\eta_{\text{cykel}} = (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) / T_{\text{max}}$$

T_{max} refererar till den övre av de två isothermerna i T-S diagrammet och T_{min} till den undre isothermen. Stirlingcykelns verkningsgrad överensstämmer med carnotcykelns, som också tillför och bortför värme till processen vid konstant temperatur.

2.2.2 Sammanfattning.

För att påverka det uttagna arbetet i den ideala stirlingcykeln kan man ändra på följande parametrar. Alla ger en ökning av arbetet.

- Öka förhållandet mellan största och minsta volym.
- Öka volymen arbetsgas.
- Höja medeltrycknivån i processen.

För att öka den termiska verkningsgraden kan man ändra på följande parametrar.

- Höja temperaturnivån i expansionsutrymmet.
- Sänka temperaturnivån i kompressionsutrymmet.

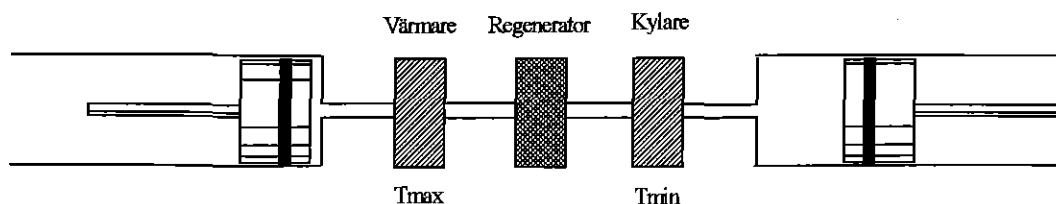
2.3 Realisering av stirlingcykeln.

En realisering av stirlingcykeln innebär att man med hjälp av något mekaniskt arrangemang försöker tvinga en arbetsgas att genomgå alla olika termodynamiska tillstånd. Förutom kolvrörelserna skall kompressionsutrymmet och expansionsutrymmet hållas vid sina givna temperaturer.

2.3.1 Värmare och kylare.

När en gas expanderar adiabatiskt kommer temperaturen att sjunka. För att hålla konstant temperatur på arbetsgasen under expansionen måste processen tillföras värme. Det är svårt att med hjälp av varma cylinderytor hålla en konstant temperatur på arbetsgasen. Värmeöverföringen är för dålig och "hinner inte med" under den korta tid som gasen befinner sig i expansionsutrymmet. Därför installeras en värmare mellan regenerator och expansionsutrymmet som består av ett flertal små rör där arbetsgasen pressas igenom. Runt rörens yttersida strömmar heta förbränningsgaser. Samma problem uppstår även i kompressionsutrymmet som skall hållas kallt. Här installeras en kylare mellan regenerator och

kompressionsutrymmet. Se figur 2.2. Det ställs höga krav på både värmaren och kylaren. De måste ha en mycket effektiv värmeöverföring kombinerat med ett lågt strömningsmotstånd. Detta gäller också regeneratoren.



FIGUR 2.2 En stirlingmotor med värmare och kylare.

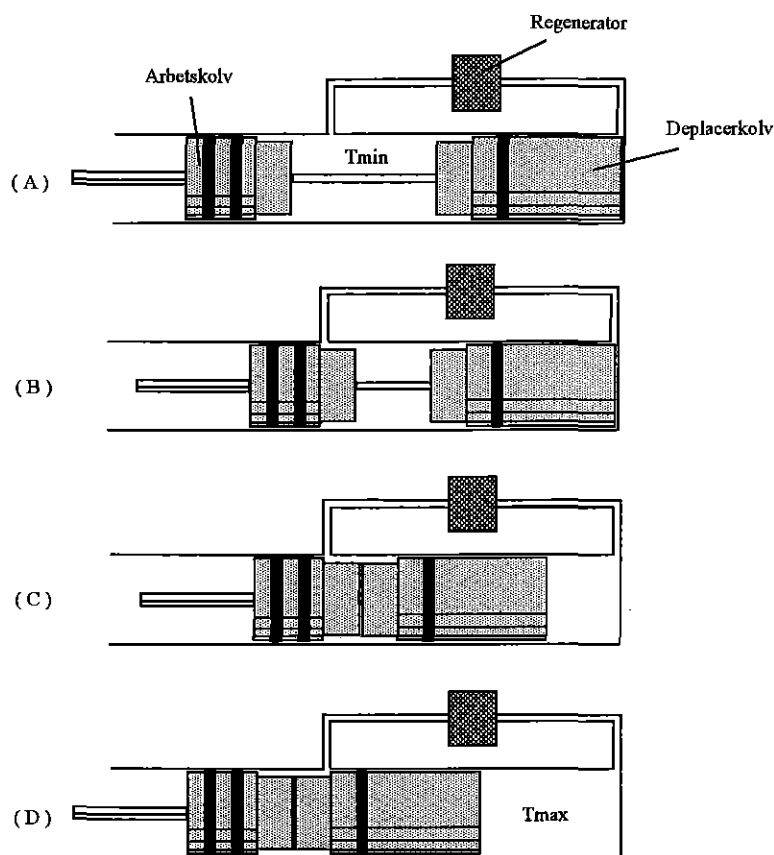
2.3.2 Alfa och Beta design

Det finns många olika cylinderarrangemang inom stirlingmotorvärlden. Vilket arrangemang som väljs beror bl.a. på storlek, applikation och motorbyggarfilosofi. Det kan jämföras med att vissa personbilstillverkare bygger t.ex. wankelmotorer. De bygger på samma termodynamiska som ottomotorn grundtanke men har ett annat sätt att realisera tanken till verklighet. Kolvmotellen som beskrivs i kapitel 2.2.1 är av alfa-typ. Det innebär att det finns en kompressionskolv och en expansionskolv med kylare, regenerator och värmare emellan. En stirlingmotor av beta-typ har en arbetskolv som utför både kompression och expansion samt en deplacerkolv som flyttar arbetsgas från kallt tillstånd till varmt tillstånd och vice versa, se figur 2.3 på sida 12.

Vi börjar med att deplacerkolven befinner sig i sitt övre dödläge och arbetskolven i sitt nedre. Det innebär att arbetsgasen är kall. Nu rör sig arbetskolven uppåt medan deplacerkolven fortfarande står alldeles stilla i sitt övre dödläge. Detta innebär att arbetsgasen genomgår en isotermisk kompression (figur 2.3A till figur 2.3B). När arbetskolven har nått sitt övre dödläge börjar deplacerkolven att röra sig nedåt. Nu kommer arbetsgasen att genomgå en isokor uppvärmning (figur 2.3B till figur 2.3C). Observera att det alltid råder lika tryck i kompressionsutrymmet och expansionsutrymmet oavsett var deplacerkolven befinner sig. När all arbetsgas har flyttats till den varma delen börjar både arbetskolv och deplacerkolv att röra sig nedåt med samma hastighet. Nu har arbetsgasen expanderat isotermiskt och utfört ett arbete (figur 2.3C till figur 2.3D). När kolvarna har nått nedre dödläget stannar arbetskolven kvar men deplacerkolven fortsätter uppåt för att flytta arbetsgasen från varmt utrymme till kallt. Detta innebär att arbetsgasen genomgår en isokor nedkylning (figur 2.3D till figur 2.3A). Nu är vi tillbaka till utgångspunkten igen.

Det är viktigt att förstå att inget arbete uträttas med deplacerkolven. Eftersom tryckfallet enligt teorin är noll i värmare, regenerator och kylare är trycket på deplacerkolvens ovansida alltid lika med det på undersidan. Detta leder till att

vevmekanismen för deplacerkolven kan vara betydligt klenare än den för arbetskolvens.



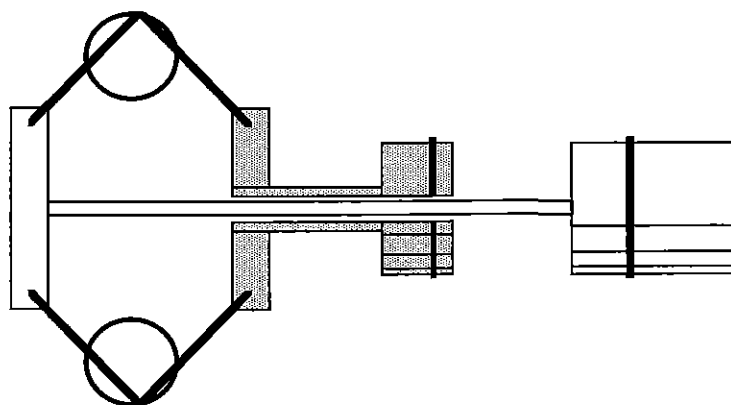
FIGUR 2.3 Stirlingmotor av beta-typ.

En stirlingmotor av beta-typ är nog den som man känner igen som den "äkta" stirlingmotorn. Det är dock betydligt svårare att förstå hur en sådan fungerar jämfört med en av alfa-typ, särskilt om den presenteras som en modell där kolvarna rör sig som hos en riktig motor. Detta är två olika sätt att arrangera kolvar, regeneratorer och värmeväxlare. Det finns andra mer eller mindre bra sätt som har provats men i applikationen mikrokraftvärmeverk är dessa två vanligast.

2.3.3 Vevmekanismen.

Det är orealistiskt att tillverka en stirlingmotor med de kolvrörelser som den ideala cykeln föreskriver. I både alfa och beta fallet skall kolvarna stå absolut stilla under vissa tidsperioder. Här uppkommer direkt ett dilemma som blir en kompromiss vid verkligt konstruktionsarbete. Den enklaste och kanske vanligaste lösningen är att fasförskjuta två vanliga vevrörelser. Många tillverkare har utvecklat egna, oftast komplicerade, vevmekanismer där rörelserna skall bli mer gynnsamma. En av de mest kända är den rombiska vevmekanismen utvecklad av Philips för en motor av

beta-typ vilken visas i figur 2.4. Den består av två vevaxlar som är sammanbundna med en växel för att motrotera synkront. Motorer av alfa-typ har oftast cylindrarna i V-form med vevstakarna på en gemensam vevaxel. Då uppnås fasförskjutningen genom vinkeln som bildas mellan cylinderbankarna. Fasvinkeln blir en viktig konstruktionsparameter med avseende på verkningsgraden och uttagna axeleffekten.



FIGUR 2.4 Philips rombiska vevmekanism.

2.3.4 Arbetsmediet.

Det finns inget perfekt arbetsmedium för stirlingmotorn. Hade det funnits en gas med oändligt hög värmekonduktivitet hade det räckt med cylinderväggarna som värmeöverförande yta. Om gasens viskositet hade varit noll skulle friktionsförlusterna varit noll.

Vätgas ligger närmast idealet och ger en väldigt hög specifik effekt. Tyvärr är den svårtätad och brandfarlig. Helium ger en hög specifik effekt och är ofarlig. Luft går alldeles utmärkt att använda men ger en väldigt låg specifik effekt. Andra fördelar är tillgängligheten vilket gör att en tätningsförlust kan accepteras. Helium är en god medelväg och används nästan uteslutande.

2.3.5 Trycknivå och tätningar.

För att stirlingmotorn skall ha en relativt hög specifik effekt bör medeltrycket vara uppåt ca. 80 bar. Vissa motorer kan ha ännu högre tryck. Tryckförhållandet mellan högsta och lägsta tryck beror på kompressionsförhållandet. I en stirlingmotor är det svårt att komma över ett värde på $V_{\max} / V_{\min} = 2,5$. En ökning leder till att volymen i värmare, kylare och regenerator blir för liten. En liten volym medför en liten värmeöverförande yta eller stora tryckfall i komponenterna vilket inverkar negativt på verkningsgraden. Beroende på begränsningarna i kompressionsförhållandet blir tryckförhållandet runt $P_{\max} / P_{\min} = 2$.

Tryckvariationerna i en stirlingmotor är närmast sinusformiga vilket medför att alla lager i vevmekanismen inte behöver dimensioneras så grovt som i en förbränningsmotor. Det är till och med möjligt att använda rullager i stället för glidlager i små stirlingmotorer. Då behövs dessutom inget smörjsystem med oljesump. Det räcker med att permanent smörja rullagerna med fett. Glidytorna mellan cylinderväggar och kolvar arbetar alltid torrt, det vill säga utan smörjning, eftersom arbetsgasen måste vara absolut ren från föroreningar. Den minsta delen fett eller olja som kommer in i cykeln får ödesdigra konsekvenser. Oljan kommer att koka i regeneratoren vilket leder till att den blir igensatt och förlorar sin funktion.

Allmänt sett är tätningsproblematiken stor hos stirlingmotorer. Kolvtätningen består av teflon och ska dels hålla för tryckskillnader, dels hindra föroreningar från att tränga upp i arbetsmediet. I just kraftvärmeapplikationen går det att komma runt problemet genom en genial konstruktion. Genom att trycksätta hela vevhuset, som dessutom innehåller generatoren i en hermetisk tillslutning, får man inga tätningar runt glidande ytor mot atmosfären. Kraftuttaget blir elektriskt. Trycket i vevhuset sätts lämpligen till medeltrycket i cykeln och sedan pendlar trycket i processen upp och ner. Då behöver kolvtätningarna bara dimensioneras för tryckdifferensen mot medeltrycket i cykeln. I en automobil applikation hade det varit nödvändigt med ett mekaniskt kraftuttag vilket hade ställt mycket större krav på tätningarna. Dessutom är den specifika effekten inte lika viktig i kraftverk som hos bilar, vilket motiverar en något lägre trycknivå i kraftverksapplikationen. För att göra tätningen så bra som möjligt är det viktigt att ha små sidokrafter på kolven. Detta blir en parameter att ta hänsyn till när vevmekanismen konstrueras.

2.3.6 Reglersystem.

Effektregleringen på en stirlingmotor sker genom att ändra trycket i processen då verkningsgraden enligt teorin inte sjunker. Vanligtvis är en kompressor förbunden med vevaxeln som vid behov pumpar in mer helium i processen. En annan möjlighet hade varit att sänka värmartemperaturen vilket, förutom en sänkning av verkningsgraden, hade inneburit en trög reglering. Förutom effektregleringen måste en stirlingmotor ha ett reglersystem för brännaren som håller värmartemperaturen vid den givna nivån.

2.4 Verkningsgraden för den verkliga stirlingmotorn.

Den ideala stirlingcykeln kan få en imponerande hög cykelverkningsgrad. Temperaturgränsen uppåt sätts av materialen i värmaren. All värme som tillförs cykeln passerar genom materialet i dessa små rör som värmaren består av. Det

betyder att materialet i hela värmaren måste tåla en temperatur som är något högre än arbetsgasens. Låt oss anta att arbetsgasen har en temperatur på 900 K som motsvarar ca 625°C. Det betyder att materialet i värmaren bör tåla minst 700°C.

Kylvattentemperaturen bestäms av tillgången och temperaturen på kylvatten. Ett rimligt antagande är 300 K vilket motsvarar ca 25°C. En ideal stirlingcykel med dessa temperaturnivåer kommer att ha en cykelverkningsgrad på:

$$1 - (300/900) = 2/3 \approx 66 \%$$

Detta gäller endast för en verklig motor om det går att realisera stirlingcykeln till 100 %. Enligt Walker (1980) hamnar verkningsgraden för en god konstruktion alltid på mellan 40-50 % av den ideala stirlingcykelns verkningsgrad. Det betyder att ovanstående exempel med sina temperaturnivåer maximalt kommer att hamna på ca. 33 % axelverkningsgrad. Det är väldigt svårt att realisera stirlingcykeln i verkligheten. Det finns flera faktorer som försämrar verkningsgraden ganska radikalt. Här är några.

- Det faktum att arbetsgasen inte har oändligt stor värmeöverföringskoefficient med cylinderväggen gör att tillståndsändringen i expansionsutrymmet inte blir en isotherm. Snarare liknar det mer en adiabatisk tillståndsförändring. Det betyder att temperaturen i arbetsgasen höjs under kompressionen och sjunker under expansionen i stället för att vara konstanta. Den höga medeltemperaturen (tillförd värme till processen) kommer att bli lägre och den låga medeltemperaturen (bortförd värme från processen) kommer att bli högre. Båda dessa faktorer inverkar negativt på verkningsgraden. Här spelar varvtalet en viss roll, ju högre varvtal, desto svårare blir det att uppfylla en isothermisk tillståndsförändring.
- Vevmekanismens kontinuerliga rörelsemönster gör att arbetsgasen inte kommer att följa de förutbestämda linjerna i p -V diagrammet.
- Den nödvändiga konstruktionen med värmare medför att gasen inte värms upp under expansionen, utan före. Dessutom värms arbetsgasen upp när den flyttas från varmt utrymme till kallt vilket inte är gynnsamt. Det finns konstruktioner med ventiler som reglerar just detta fenomen men de blir komplicerade. Samma problem uppstår med kylaren
- Värmare, kylare och regenerator innehåller alltid en viss mängd arbetsgas som inte aktivt deltar i cykeln, en s.k. dödvolymer.

- Det förekommer strömningsförluster i värmare, kylare och regenerator som inverkar negativt på verkningsgraden.

Detta är de huvudsakliga skälen till varför den teoretiska verkningsgraden minskas med minst 50% i den riktiga motorn. Det går inte att isolera problemen var för sig utan de hänger mer eller mindre ihop med varandra.

När en gasturbin läggs ut räknar man på braytoncykeln. Värden på gaskonstanter och verkningsgrader på kompressor och turbin antas osv. Det är inga större problem att få en cykelverkningsgrad på 33 % för en viss gasturbin med rimliga antaganden. Å andra sidan är det orealistiskt att få en med 66 %. Däremot går det att realisera gasturbinen till nästan 100 % vilket medför att det går att konstruera en verklig gasturbin med 33 % axelverkningsgrad. Gasturbinen är som maskin mer fulländad än stirlingmotorn men bygger i sin tur på en sämre cykel.

Temperaturen vid vilken värme tillförs till processen ($T_{\text{tillförd}}$) är av central betydelse för verkningsgraden i alla termiska maskiner. Det samma gäller temperaturen då värme bortförs ($T_{\text{bortförd}}$).

I en vanlig förbränningsmotor är förbränningstemperaturen och $T_{\text{tillförd}}$ uppåt 2500°C. Den höga temperaturen möjliggörs av att förbränningen är diskontinuerlig. Cylinderväggarna kyls ned varje gång ottomotorn suger in ny bränsle/luft blandning. Detta leder till att materialtemperaturen i motorn kan hållas vid en förhållandevis låg nivå.

Gasturbinen har i likhet med stirlingmotorn en kontinuerlig förbränning. Här kommer förbränningstemperaturen och $T_{\text{tillförd}}$ upp till 1200°C vilket hade varit svårt i stirlingmotorn. I gasturbinen är förbränningsgaserna arbetsmedium. I brännkammaren kan förbränningsgaserna hålla en hög temperatur medan brännkammurväggarna kan kylas till en rimlig temperatur. Detta är inte möjligt i en stirlingmotor där det sker värmeledning genom skiljeväggen mellan förbränningsgas och arbetsmedium. Detta leder till att $T_{\text{tillförd}}$ alltid lägre än förbränningstemperaturen i en stirlingmotor. Potentialen att höja temperaturen för tillförd värme i en stirlingmotor beror på hur materialutvecklingen går. I en gasturbin går det dessutom med olika tekniker kyla brännkammare och skovlar effektivare för att öka verkningsgraden vilket inte är möjligt i stirlingmotorn. I detta avseende är stirlingmotorn väldigt lik en ångcykel. Här motsvarar värmaren ångpannan och kylaren kondensorn. I en ångcykel finner vi en begränsning på 500°C-600°C som högsta $T_{\text{tillförd}}$.

2.5 Emissioner.

Det faktum att stirlingmotorn har en kontinuerlig förbränning gör att emissionerna går att kontrollera bättre än hos diesel- och ottomotorer. Vanligtvis används en brännare av diffusionstyp med kraftig avgasrecirkulation för att sänka flamttemperaturen. Förbränningen sker i atmosfärstryck och ibland behövs fläktar för att suga in tillräckligt med förbränningsluft.

I en diffusionsbrännare sker blandningen mellan bränslet och luften i förbränningszonen. Det leder till att det bildas lokala zoner med fetare blandning och vissa zoner med magrare blandning. Förbränningen blir mycket stabil men potentialen att sänka emissionerna blir begränsade, speciellt när det gäller NO_x . För att styra bränsle/luft blandningen mer exakt kan blandningen ske innan brännkammaren, en sk. Lean Premix Prevaporization brännare. För att LPP brännaren ska få låga utsläpp måste dock ett stort luftöverskott användas. För stirlingmotorn innebär ett stort luftöverskott att insugningsfläktarna måste vara större vilket sänker totalverkningsgraden. Det finns ytterligare några brännarkoncept som går att tillämpa på stirlingmotorn t.ex. laminärbrännkammare och katalytisk förbränning. Katalytisk avgasrening är möjlig men innebär också en sänkning av verkningsgraden just på grund av tryckfallet över katalysatorn.

Tabell 2.1 presenteras utsläpp som gäller för diffusiv förbränning med EGR. Som jämförelse ges även värdena för en gasturbin med en LPP brännare. Värdena är från referens [2]. Den framtida potentialen för laminärbrännare i stirlingmotorn enligt Volvo Aero Turbine presenteras i tabell 2.2 (referens [2]).

	NO_x	CO	HC
Stirling	0.5 - 3	2 - 3	0.1 - 0.2
Gasturbin	1.5	2	0.1

TABELL 2.1 Stirlingmotorns utsläpp med diffusiv brännare. $\frac{\text{g}}{\text{kg bränsle}}$.

	NO_x	CO	HC
Stirling	0.25	0.25	< 0.1

TABELL 2.2 Stirlingmotorns utsläppspotential med laminärbrännare. $\frac{\text{g}}{\text{kg bränsle}}$.

2.6 Tillverkningskostnader.

Enligt Walker (1980) är produktionskostnaden för en stirlingmotor ca. dubbelt så hög som för en dieselmotor. Den dyraste delen är värmaren som består av den varma delen av cylindern samt ett antal tunna flänsade rör. Dessa komponenter

skall tåla kontinuerligt höga tryck och temperaturer. Materialkostnaden är mycket hög och metoden att löda fast rören i cylindertoppen kostsam. Stirlingmotorer som inte konstrueras för väldigt höga verkningsgrader blir naturligtvis billigare. Här kan en lägre temperatur användas i värmaren med mindre kostsamma material som följd. För övrigt kräver en stirlingmotor inte speciellt mycket maskinbearbetning av motordetaljer i jämförelse med en otto- eller dieselmotor som bl.a. har ventilanordningar.

2.7 Övriga egenskaper.

Övriga utmärkande egenskaper hos stirlingmotorn är:

- Ljudnivån är väldigt låg. Tack vare den kontinuerliga förbränningen utan plötsliga tryckvariationer kan buller- och vibrationsnivå hållas nere. Det är nästan en överklig känsla att stå bredvid en stirlingmotor som är i drift. Det enda som hörs från själva motorn är ett lågt mekaniskt slammer. Oftast är surret från brännaren och insugningsfläkten de dominerande ljudkällorna.
- Bränsleflexibiliteten är mycket stor. En stirlingmotorn ställer inga stora krav på bränslet. Värmarens värmeväxlarytor skall hållas vid en viss temperatur. Om det uppnås med hjälp av förbränningsgaser från naturgas, olja, biobränsle, sågspån eller sopor har ingen betydelse för själva stirlingcykeln. Endast värmaren måste konstrueras för bränslet i fråga. Det går även att ha solfångare som värmer värmaren med hjälp av solstrålning.

3. Stirlingmotorn i kraftvärmeproduktion.

Lämpar sig stirlingmotorn för kraftvärmeproduktion? Vilka för och nackdelar har stirlingtekniken? Elkraften är den mest eftertraktade energin, värme är relativt enkelt att producera med hög verkningsgrad. Därför är elverkningsgraden den centrala parametern. Spillvärmerna måste även ha en viss temperatur för att vara intressant att tillvarata. Ett kondenskraftverk har en stor värmeeffekt som avges av kondensorn. Problemet ligger i att ingen har någon nytta av 25 gradigt vatten hur mycket som än produceras.

3.1 Värmeproduktionen.

En stirlingmotor avger en stor del av sitt värme genom kylvattnet. En mindre del avges i form av varma rökgaser från brännaren. Diagram 3.1 visar skillnaderna i förhållande till dieselmotorn. Det är bekvämt att värmen finns så lättillgänglig och i

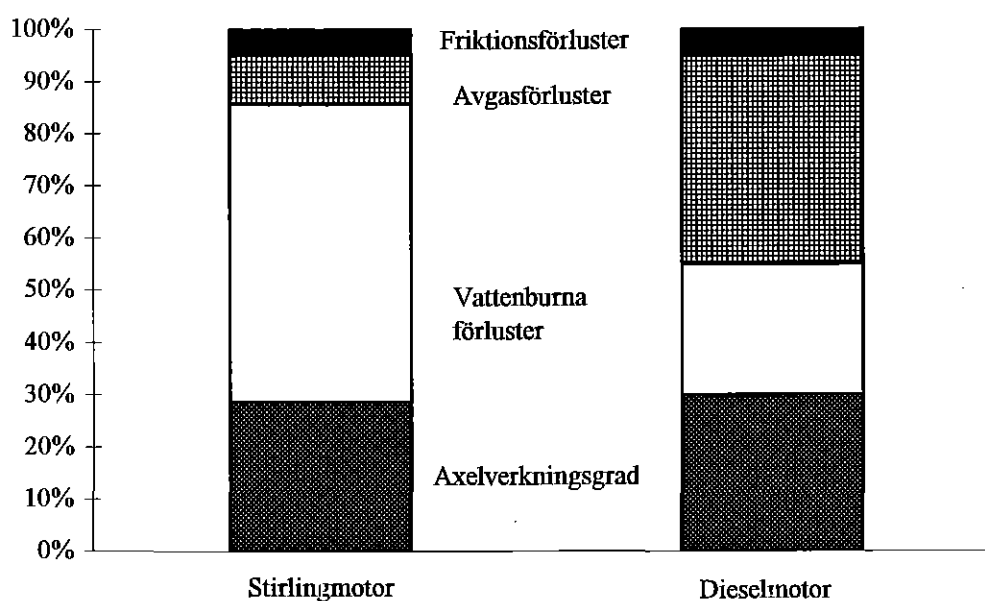


DIAGRAM 3.1 Stirlingmotorn och dieselmotorns förlustdistribution.

vattenburen form. Det är dock inte lämpligt att leda kylvattnet direkt in i stirlingmotorns kylare utan det går genom en vanlig värmeväxlare som är kopplad till stirlingmotorns kylkrets. Det är viktigt att veta att stirlingmotorn alltid behöver kylning precis som en förbränningsmotor. Om kylsystemet inte fungerar tillfredsställande får det förödande konsekvenser för stirlingmotorn.

En stirlingmotor får bättre axelverkningsgrad ju lägre kylvattentemperaturen är. För att kunna producera nyttig värme måste kylvattentemperaturen hålla en viss nivå, kanske 50°C-70°C. Det betyder att elverkningsgraden blir lidande om temperaturen på kylvattnet höjs. Genom ett enkelt räkneexempel finner man att skillnaderna blir små.

Låg kylvattentemperatur	: 300 K , motsvarar 27°C
Hög kylvattentemperatur	: 350 K , motsvarar 77°C
Temperatur i expansionsutrymmet	: 900 K
Verkningsgrad för låg kylvattentemperatur	: $\eta_{\text{lågt}} = 1 - (300 / 900) \approx 66 \%$
Verkningsgrad för hög kylvattentemperatur	: $\eta_{\text{høgt}} = 1 - (350 / 900) \approx 61 \%$

Cykelverkningsgraden minskar från 66% till 61% om kylvattentemperaturen höjs från 27°C till 77°C . Räkneexemplet ovan skall tas med en nypa salt. En verklig stirlingmotor är svår att beräkna och exemplet ovan visar egentligen bara att sänkningen av axelverkningsgraden ligger närmare 1 procentenhet än 10 procentenheter. Provresultat för den danska stirlingmotorn i referens [7] visar en sänkning av verkningsgraden på mellan 1 och 2 procentenheter.

Det är inte bara verkningsgraden som påverkas av att kylvattentemperaturen höjs. Motorns konstruktion måste anpassas till den höga temperaturen. Det kan vara kolvens spel i cylindern som måste ökas eller att kolvtätningen inte tål temperaturen.

3.2 Elproduktionen.

Axeln hos stirlingmotorn kopplas till en generator som genererar elström. I fallet med mikrokraftverk finner man att generatorerna blir så små att generatorverkningsgraden blir låg. Ett alternativ är att köra en asynkronmotor som elgenerator. Med ca. 3 kW eleffekt hamnar verkningsgraden på mellan 75 - 78 % i de danska provresultaten enligt referens [7]. En del motortillverkare har utvecklat egna små generatorer.

De generatorer som tillverkas kommersiellt i detta effektområde är för små mobila bensindrivna elverk. Här prioriteras inte hög elverkningsgrad utan tillförlitlighet, livslängd och lätthanterlighet som första säljargument. Dessa generatorer har ett varvtal på 3000 rpm och en verkningsgrad på 80%.

Stirlingmotorn trivs inte på höga varvtal. Många motorer har sitt optimala varvtal runt 800 rpm där verkningsgraden är som högst. Ett varvtal på 3000 rpm är önskvärt med tanke på frekvensen i nätet. Lösningen blir att använda sig av flerpoliga generatorer som har ett lägre arbetsvarvtal. En lagom kompromiss är en

fyrpolig generator och ett varvtal på ca. 1500 rpm. En nackdel är dock att ju fler poler generatorerna har desto sämre verkningsgrad får de.

En stor generator har en verkningsgrad på 99.5 % vilket i princip är en försumbar förlust. I fallet med mikrokraft är det nödvändigt alltid räkna med förlusten i generatorm. Pondera att det finns en stirlingmotor med en axelverkningsgrad på 30 %. Den kommer att få en elverkningsgrad på ca 24 % vilket är en stor förlust.

3.3 Övriga aspekter.

Just i fallet med mikrokraftverk där motorerna är väldigt små har stirlingmotorerna en fördel jämfört mot otto- eller dieselmotorer. För mycket små otto- och dieselmotorer sjunker verkningsgraden dramatiskt vilket inte gäller för stirlingmotorn. Det beror på att förbränningen är diskontinuerlig i otto- och dieselcykeln. När förbränningen sker är cylinderytorna förhållandevis kalla och det medför att värme transporteras ut till omgivningen. Ju mindre cylindervolym motorn har ju större är cylinderytan i förhållande till volymen. Detta illustreras bäst med ett exempel.

Volym (kub)	Yta på kub	
1 cm^3	6 cm^2	$= 6 \text{ cm}^2$
2 cm^3	$6 \times 2^{1/3} \text{ cm} \times 2^{1/3} \text{ cm}$	$\approx 9.5 \text{ cm}^2$

Detta visar att en fördubbling av volymen medför att ytan ökar med en faktor på ca. 1,6. Alltså har små motorer ett mindre gynnsamt förhållande mellan yta och volym vilket leder till att verkningsgraden blir sämre än för större motorer. För stirlingmotorn gäller inte detta resonemang därför att cylinderytorna håller konstant temperatur. Det betyder att stirlingmotorn i princip behåller sin verkningsgrad när motorstorleken minskas.

En stirlingmotor innehåller få rörliga delar. Den har inget tändsystem och inga ventiler. Detta skapar en möjlighet till att få långa serviceintervall och hög driftssäkerhet vilket är en förutsättning för att få ekonomi i småskalig kraftgenerering.

Miljömässigt går det alltid att motivera stirlingmotorn framför diesel och ottomotorn. Stirlingmotorn är trots allt en motor som bygger på en förbränning och miljömässigt ligger den närmare diesel- och ottomotorn än t.ex. vind och solkraft som är de riktiga miljöalternativen. De största satsningarna på stirlingmotorn i historien har gjorts av bilfabrikanter som ville ersätta den vanliga bilmotorn. Det finns mycket material från olika amerikanska utvecklingsprojekt där

man fann att stirlingmotorn kunde ge en 10-17 % lägre bränsleförbrukning och att emissionerna var jämförbara. Detta var på 1970-talet. Nu går det visserligen inte direkt att jämföra en automotiv applikation med en kraftverksapplikation. Att stirlingmotorn ofta framställs som en utpräglad miljömotor beror till en viss del på den låga ljudnivån.

Mikrokraftverket befinner sig i människors närhet, kanske i källaren i en villa. En dieselmotor ger ifrån sig mycket buller och svårdämpade vibrationer. Det är inte lämpligt att ha ständiga vibrationer i ett bostadshus. Därför passar stirlingmotorns mjuka och tysta gång perfekt i ett mikrokraftverk.

3.4 Sammanfattning.

Slutsatsen blir att Stirlingmotorn är lämpad att användas till mikrokraftverk p.g.a. sin höga verkningsgrad. Det bör också noteras att verkningsgraden i sig inte är speciellt hög om man jämför med vanliga värden på normala kraftverk. Däremot är den mycket hög jämfört med vad man skulle kunna uppnå med en diesel eller ottomotor i samma storlek. Möjligheterna till långa serviceintervall ger förutsättningar för låga driftskostnader. Andra tilltalande egenskaper är den låga ljud- och vibrationsnivån, bränsleflexibiliteten och att emissionerna är lägre än för motsvarande diesel och ottomotor.

4. Dagens status för små stirlingmotorer.

4.1 Inledning.

I dag utvecklas det, oberoende av varandra, ett flertal olika stirlingmotorer i den lägre effektklassen. De flesta har en axeleffekt på ca. 3 kW och någon på ca. 10 kW. Gemensamt för dessa utvecklingsprojekt är målsättningen att kunna hålla en låg tillverkningskostnad vid en eventuell serieproduktion. Målen har varit små, billiga och driftsäkra stirlingmotorer med en hyfsad prestanda. En del motorer har inte utvecklats för en speciell applikation utan mer som en stirlingmotor som ett självändamål. Vissa säger att deras motor kan användas till uppvärmning av husvagnar, gräsklippare (?) och samtidig kraft- och värmegenerering. Andra har haft en klar linje att utveckla en stirlingmotor enbart för t.ex. kraftvärmegenerering.

Det är viktigt att inse skillnaden på dessa motorer och Kockums stirlingmotor för ubåtar. Kockums motor, en high-tech maskin på 75 kW_{el}, som drivs med flytande syre och dieselolja är fjärran ifrån en stirlingmotor för "hemmabruk".

4.2 V-160 motorn.

V-160 motorn utvecklades först av United Stirling på 70-talet. Den är av alfatyp med cylindrarna i V-form. Effekten är på 10 kW_{axel} och den har oljesmorda glidlager. Axelverkningsgraden är minst 30% och den är naturgaseldad. Detta är en välbeprövad design och åtskilliga motorer har tillverkats och använts till olika applikationer. Till skillnad från de övriga stirlingmotorerna är detta en motor som går att köpa "över disk" även idag. I dags datum sker tillverkning och utveckling på licens i Tyskland hos SOLO Kleinmotoren i Sindelfingen utanför Stuttgart. De har vidareutvecklat motorn och döpt om den till V-161.

Dåvarande Televerket hade i början på 80-talet en mobil kraftstation med just V-160 motorn som drivkälla. Projektet var sponsrat av United Stirling i Linköping men aggregatet användes under dagliga underhållsarbeten i flera år.

Olika projekt med solkraft har gjorts och görs fortfarande med V-160 motorn. Solstrålarna har samlats med hjälp av en parabol och värmt upp en värmare på stirlingmotorn som sedan har levererat elkraft. I Spanien har några solaggregat varit i drift.

SOLO Kleinmotoren har utvecklat V-160 motorn för småskalig kraftvärmegenerering. Sommaren 1996 påbörjades ett fältprov med 20 st motorer kopplade till husuppvärmning. Företaget avser att redogöra för resultatet då testet har utvärderats.

4.3 TEM projektet- Silent Clean Power 75.

TEM (Teknik Ekonomi Miljö) är en stiftelse knuten till Lunds Universitet men med stirlingverksamheten förlagd till Malmö. På 80-talet började de utveckla en liten naturgaseldad stirlingmotor. Den bygger på beta-principen och har ett trycksatt vevhus. Motorn har ett lite annorlunda genoratorarrangemang med två stycken motroterande likströmsgeneratorer. Detta ger en välbalanserad motor. Varvtalet är förvånansvärt högt - 3000 rpm. Motorn är utvecklad bl.a. för hybridfordon och kraftvärmegenerering. Två versioner finns, en på 1 kW_{el} och en på 3 kW_{el}.

Det finns mycket lite material om SCP 75 och inga uppgifter på verkningsgrader eller provkörningar är presenterade.

Det finns några företag som är knutna till TEM. EA-Technology i England skall i ett EU-projekt utveckla en CHP-unit (Combined Heat and Power) för hemmabruk med TEM motorn som kraftkälla.

Ett annat företag som arbetar med applikationer med TEM motorn är Hermann AG i Tyskland.

4.4 De danska stirlingmotorprojekten.

Den danska stirlingmotorn har inget namn men är nyligen utvecklad på Dansk Teknisk Högskola i Lyngby Köpenhamn. Detta projekt är egentligen ett av två olika projekt på DTH med stirlingmotorer i kraftvärmegenerering. Det ena projektet bestod i att utveckla och provköra en liten naturgaseldad stirlingmotor avsedd för småskalig kraftvärmegenerering. Denna motor är på ca. 3 kW_{axel}. Det andra projektet består i att utveckla en stirlingmotor där bränslet kan vara sågspån, sopor eller något annat brännbart. Denna motor är fyrcylindrig med en effekt på ca. 37 kW_{el}.

4.4.1 3 kW motorn.

Motorn är strikt utvecklad för kraftvärmegenerering där till och med prov har körts med hög kylvattentemperatur. Den är av beta-typ och har ett trycksatt vevhus med fettsmorda rullager. Vevmekanismen är egenutvecklad och generatoren är en vanlig trefas fyrpolig asynkronmotor. Varvtalet ligger alltså strax över 1500 rpm. Bränslet är naturgas och en luftförvärmare förvärmer insugningsluften med hjälp av varma rökgaser.

Bilaga [2] visar dels ett tvärsnitt av motorn, dels uppmätta prestanda på den danska 3 kW:s motorn. Värmeutvinningen är effektiv. Kylvattnet passerar inte bara själva kylaren i stirlingmotorn. Först passerar kylvattnet generatorm som omgives helt av en vattenmantel. Därefter går vattnet in i kylaren på stirlingmotorn. Till sist passerar kylvattnet ytterligare en vattenmantel som omsluter hela den varma delen på stirlingmotorn. Här sker också en sista nedkylning av rökgaserna. Värmeförlusterna från motorn blir i princip endast i form av varma rökgaser. Enligt Henrik Carlsen på DTH är det till och med möjligt att kondensera rökgaserna om en låg kylvatten temperatur används.

Den högsta elverkningsgraden är 23.12% (bilaga [2]). Detta är dock vid en låg kylvattentemperatur. I kapitel 5 och 6 där den danska motorn används som utgångspunkt för beräkningar antas en elverkningsgrad på 22% eftersom en kylvattentemperatur på 80°C är aktuell. Värmeförlusterna antas vara 5% av total brännareffekt. Detta ger en ekvation enligt följande:

$$P_{\text{värme}} = P_{\text{brännare}} - P_{\text{el}} - 0.05 \cdot P_{\text{brännare}}$$

$$\begin{aligned} P_{\text{värme}} &: \text{Stirlingmotorns värmeeffekt} \\ P_{\text{brännare}} &: \text{Stirlingmotorns brännareffekt} \\ P_{\text{el}} &: \text{Stirlingmotorns eleffekt} \end{aligned}$$

definition: $P_{\text{brännare}} = P_{\text{el}} / \eta_{\text{el}}$

vilket ger: $P_{\text{värme}} = P_{\text{el}} / \eta_{\text{el}} - P_{\text{el}} - 0.05 \cdot P_{\text{el}} / \eta_{\text{el}}$

Detta leder fram till ekvation 4.1:

$P_{\text{värme}} = P_{\text{el}} \cdot (1 - \eta_{\text{el}} - 0.05) / \eta_{\text{el}}$	
$P_{\text{värme}}$	: Stirlingmotorns värmeeffekt
P_{el}	: Stirlingmotorns eleffekt
η_{el}	: elverkningsgrad

EKVATION 4.1 Ger förhållandet mellan $P_{\text{värme}}$ och P_{el} om värmeförlusterna är 5%. η_{el} känd.

Ekvation 4.1 ger det approximativa förhållandet mellan värmeeffekt och eleffekt om elverkningsgraden är känd för den danska stirlingmotorn och kommer användas flitigt i kapitel 5 och 6.

4.5 Övriga projekt.

I Japan har ett antal stora företag satsat mycket pengar i utveckling av små stirlingmotorer. Många har varit laboratoriemotorer där extremt höga verkningsgrader har uppnåtts. I de flesta fall har avsikten med stirlingmotorn varit att koppla den till kompressorer i luftkonditionerings-aggregat. Globalt sett är värmen ett större problem än kylan vilket gör att satsningen sker på att ersätta elmotorerna i luftkonditioneringsaggregaten. Detta gör att motorerna oftast inte har en effektiv återvinning av värmen.

De enklare japanska stirlingmotorerna har axelverkningsgrader runt 31-35% vilket är jämförbart med den danska stirlingmotorn. Det bör också påpekas att i deras applikation med kompressordrift har varvtalet ingen stor betydelse. Många motorer har dessa axelverkningsgrader vid 800 rpm vilket är olämpligt vid kraftgenerering. Bland de företag som har utvecklat motorer finns bl.a. Mitsubishi och Toshiba.

4.6 Sammanfattning.

I dag finns det fungerande stirlingmotorer som skulle kunna passa in i ett mikrokraftverk. Den Danska 3 kW:s motorn är redan optimerad för kraftvärme-generering. I resonemangen i kapitel 5 och 6 antas för stirlingmotorn:

- Elverkningsgrad på 22%
- Ekvation 4.1 gäller
- Bränsle: naturgas

Dessa tre punkter överensstämmer med den danska stirlingmotorn vilket gör det till rimliga antaganden.

Adresser:

SOLO Kleinmotoren GmbH
Stuttgarter Str. 41
D-71069 Sindelfingen
Tyskland

Tel. ++ 49 (0)7031 / 301 210
Fax. ++ 49 (0)7031 / 301 202

TEM Malmö Forskningscentrum
Agnesfridsv. 220
215 79 Malmö

Tel. 040 / 343401
Fax. 040 / 948960

Henrik Carlsen
Dansk Teknisk Högskola
DK-2800 Lyngby

Tel. ++ 45 (0)45 / 254171
Fax. ++ 45 (0)45 / 930663

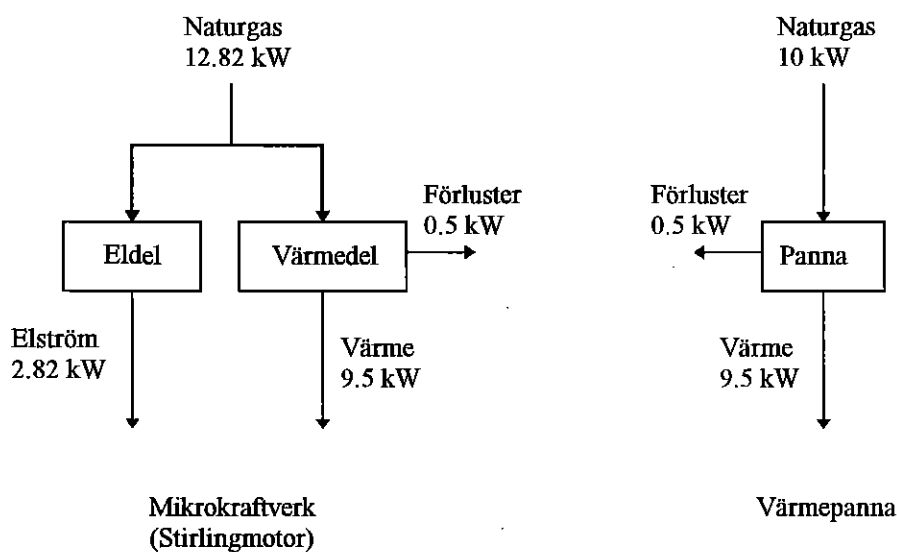
5. Mikrokraftvärmeverket.

5.1 Inledning.

Definition 5.1:

Mikrokraftverket är "den anordning som värmer upp vatten med en samtidig elgenerering", sedan kan mikrokraftverket innehålla flera olika enheter.

Mikrokraftverket fungerar som en värmepanna som förutom värme också genererar el. För att underlätta införs några nya termer. Den del i mikrokraftverket som producerar värmen kallas i fortsättningen för mikrokraftverkets värmedel. På liknande sätt kallas den elgenererande delen för eldelen. Alla termiska förluster läggs på värmedelen. Detta medför att eldelen får en verkningsgrad på 100 %. Enligt Henrik Carlsen på DTH är det möjligt att åstadkomma en verkningsgrad i värmedelen som är jämförbar med pannans verkningsgrad. Det leder till att värmedelen motsvaras av pannan i sin funktion. Detta tankesätt illustreras i fig. 5.1.



FIGUR 5.1 Illustration av värmedel och eldel i mikrokraftverket. Elverkningsgraden för mikrokraftverket är 22 %.

Här jämförs två olika uppvärmningsalternativ, en vanlig gaseldad värmepanna och ett gaseldat mikrokraftverk. I figur 5.1 består mikrokraftverket av en stirlingmotor. Värmeeffekterna i de båda systemen är lika, 9.5 kW. Här ser vi att för samma värmeeffekt på 9.5 kW förbrukar stirlingmotorn 2.82 kW mer naturgas än värmepannan. Dessa 2.82 kW extra gas som stirlingmotorn förbrukar kommer i slutändan ut som elkraft.

Idén med mikrokraftverket är att husägaren skall få sina behov av elström och värme tillgodosedda till en lägre kostnad jämfört med nuvarande system med värmepanna. Skillnaden mellan de två systemen i figur 5.1 är att mikrokraftverket (i detta fall en stirlingmotor) konverterar kWh i naturgas till kWh i elström medan pannan inte har denna förmåga. Om priset per kWh el är högre än priset per kWh naturgas går elförsäljningen med vinst.

Prisskillnaden mellan gas och el kan variera ganska mycket. Priset på gas är konstant i tiden, d.v.s. det ändrar sig normalt inte från sommar till vinter eller från dag till natt. Värdet på elen kan däremot variera kraftigt. Det finns också olika tariffer för det pris som kraftbolagen betalar för el. I Danmark används en tregradig skala där det är betydligt mer fördelaktigt att sälja el på dagen jämfört med nattförsäljning. Om den egenproducerade elen används för eget behov blir värdet oftast ännu högre.

Idag får hushållen i Sverige betala ca. 70 öre/kWh för elen som köps från kraftbolaget. Däremot får villaägaren bara ca. 34 öre/kWh när han säljer till kraftbolaget. Med dagens gaspris på ca. 30 öre/kWh ger det följande vinster vid två olika driftfall:

- Producerad el som används för eget bruk ger en vinst på:
 $70 \text{ öre/kWh} - 30 \text{ öre/kWh} = 40 \text{ öre/kWh}$
- Producerad el som säljs till kraftbolag ger en vinst på:
 $34 \text{ öre/kWh} - 30 \text{ öre/kWh} = 4 \text{ öre/kWh}$

Det är det en skillnad på faktor 10 ! Detta exempel illustrerar vad som är viktigt att tänka på vid designen av mikrokraftverket.

Slutsats 5.1:

Det är elgenereringen som ger ekonomiska fördelar med mikrokraftverket jämfört med vanlig uppvärmning med panna. Producerad el som används för eget bruk har ett mycket större värde än den el som säljs till kraftbolaget. Detta är viktigt att veta för att förstå fortsatt resonemang.

5.2 Behovet hos en normalvilla.

För att kunna bedöma olika driftsstrategier är det nödvändigt att först identifiera en villas energibehov. I diagram 5.1 presenteras ett varaktighetsdiagram för värmeförbrukningen och elförbrukningen i en typisk Malmövilla. Diagram 5.1 är

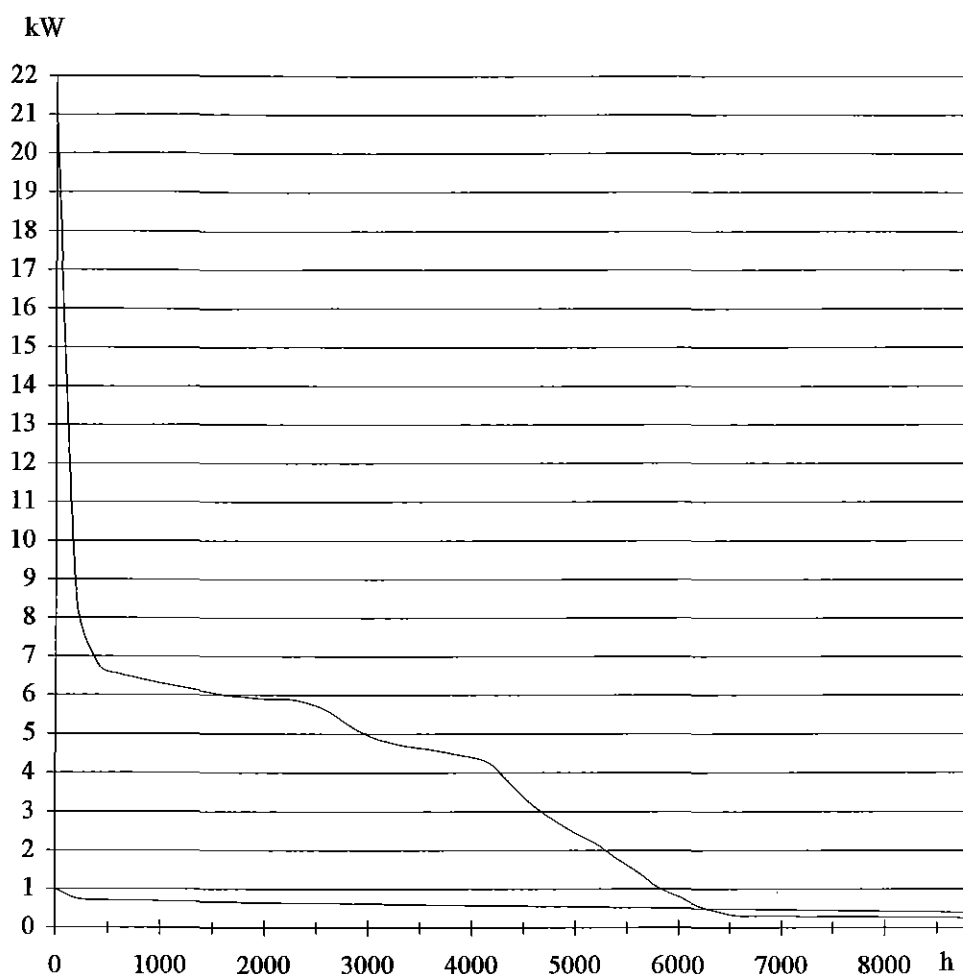


DIAGRAM 5.1 Varaktighetsdiagram för villa i Malmö. Den övre kurvan är värmeförbrukning och den undre elförbrukning.

taget direkt från bilaga [1]. Toppeffekten på värmeanläggningen skall vara på ca. 22 kW. Det är dock relativt sällan som värmebehovet överstiger 7 kW. Elbehovet är mycket jämnare fördelat över tiden. Under nästan hela året pendlar eleffektbehovet mellan 0.4 kW till 0.7 kW. Under en mycket kort tidsperiod behövs dock toppeffekter på ungefär 19 kW (syns inte i diagrammet).

Förutom värme och el finns det även ett behov av tappvarmvatten. För att täcka det behovet används en varmvattenberedare. I de ekonomiska analyserna är det inte nödvändigt att ta hänsyn till förbrukningen av tappvarmvatten eftersom mikrokraftverket alltid jämförs med en vanlig värmepanna. Kostnaderna för tappvarmvatten kommer att vara lika stora i båda fallen. Däremot är det viktigt för den tekniska analysen att veta att tappvarmvattenbehovet även finns på sommaren då värmebehovet i villan är mycket litet, kanske noll. Det antas att temperaturen i VVB måste vara 60°C.

5.3 Val av driftsstrategi.

Resonemanget i kapitel 5.3 utgår från följande riktlinjer:

- Mikrokraftverket designas efter behoven i diagram 5.1.
- Stirlingmotorn i mikrokraftverken är den danska enligt avsnitt 4.6.
- Elprisförhållandet antas vara som i Sverige idag. Det är inte själva prisnivån som avses utan förhållandet mellan priserna. Det betyder att man får väsentligt mycket mer betalt för egenproducerad el jämfört med försäljning till kraftbolag.
- Ingen dumpning av värme sker. Om elpriset stiger tillräckligt mycket och gaspriset är konstant kan det löna sig att köra mikrokraftverket även om kanske halva värmeeffekten dumpas bort.
- I de ekonomiska beräkningarna jämförs mikrokraftverket alltid med en värmepanna. Kostnaderna för mikrokraftverkets värmedel kommer alltid vara lika med kostnaderna för värmepannan. Det räcker med att endast beräkna vinsten för eldelen.
- Eftersom lönsamheten ligger i elgenereringen är målet med utläggningen att maximera värdet på elenergiproduktionen över hela året.

Fyra olika mikrokraftverk (A,B,C och D) kommer att värderas med avseende på :

1. De tekniska möjligheterna att uppfylla behoven i diagram 5.1.
2. Om 1. är uppfylld görs en bedömning på *möjligheterna* att optimera elgenereringen.

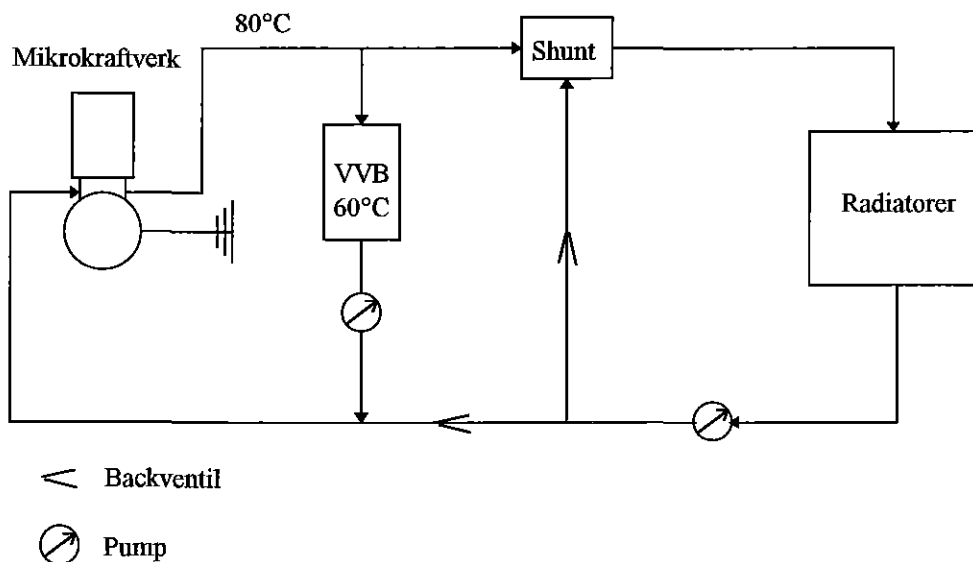
Utifrån dessa två bedömningskriterium skall den bästa lösningen lönsamhets-optimeras i kapitel 6.

5.3.1 Mikrokraftverk A: Stirlingmotor som dimensioneras för topplast.

I detta fallet består mikrokraftverket av en stirlingmotor. Stirlingmotorn tillser värmebehovet vid varje tidpunkt och regleras efter detta. I princip fungerar värmedelen som en vanlig värmepanna som täcker hela behovet. Elgenereringen blir vad den blir och hänger med i värmeproduktionens svängningar. Detta är en bra lösning med avseende på elproduktionen som vid varje tillfälle blir så hög som det är möjligt utan att dumpning av värme sker. När eldelen genererar mer elström

än egenbehovet för tillfället kräver sker en försäljning till kraftbolaget. Då elgenereringen inte täcker behovet köps el från kraftbolaget. Allt detta sker helt automatiskt med hjälp av elmätare.

Ett system som arbetar enligt denna principen skulle kunna se ut som i figur 5.2.



FIGUR 5.2 Mikrokraftverk A i ett värmesystem.

Det består av en slinga runt shunt-radiatorer-pump-shunt. Denna cirkulationspump håller ett konstant vattenflöde genom radiatorerna. Shunten är en ventil som släpper in 80 gradigt vatten i radiatorkretsen. På detta sättet regleras temperaturen i radiatorerna från att vara 80°C som mest till att kanske bara vara 40°C vid låglast. Samma mängd vatten som shuntens släpper in i kretsen går ur kretsen vid delningen efter cirkulationspumpen. För att höja temperaturen i huset höjs temperaturen i radiatorerna. Det innebär att mängden 80 gradigt vatten måste öka. Då öppnar shuntens och vattenflödet genom mikrokraftverket kommer att öka. För att temperaturen efter mikrokraftverket inte skall sjunka måste värmeeffekten i mikrokraftverket ökas. När som helst kan VVB-pumpen starta när temperaturen i VVB sjunker under 60°C. På sommaren är cirkulationspumpen avstängd och mikrokraftverket går endast igång för att värma VVB när det behövs.

Detta system har en enkel utläggning. Det finns dock några problem som måste lösas:

1. En stirlingmotor får sämre axelverkningsgrad vid dellast. Om mikrokraftverket i figur 5.2 dimensioneras för toppeffekten 22 kW kommer stirlingmotorn större delen av tiden gå på kraftig dellast för att passa behovet enligt diagram 5.1.

2. Enligt Henrik Carlsen på Dansk Teknisk Högskola blir det mycket komplicerat att reglera en stirlingmotor steglöst efter värmeeffekten. Det går relativt enkelt att ha fasta steg på trycknivån i stirlingcykeln vilket ger fasta steg på värmeeffekten.

5.3.1.1 Elverkningsgraden vid dellast.

Här skall egenskaperna för stirlingmotorn vid dellast undersökas. Tre stycken olika driftslägen för den danska stirlingmotorn är presenterade i tabell 5.1. Värmeeffekten har räknats ut enligt ekv. 4.1.

Rad nr:	Brännareffekt $P_{\text{brännare}}$	Värmeeffekt $P_{\text{värme}}$	Eleffekt P_{el}	Elverkningsgrad η_{el}
35	10.25 kW	7.486 kW	2.37 kW	23.12%
13	7.1 kW	5.345 kW	1.4 kW	19.73%
7	5.7 kW	4.585 kW	0.83 kW	16.50%

TABELL 5.1 Tre olika driftslägen för den danska stirlingmotorn. Från bilaga [2].

Med hjälp av dessa tre värden kan diagram 5.2 tas fram som visar hur elverkningsgraden sjunker som funktion av värmeeffekten. Under 60% -70% av fullast börjar elverkningsgraden sjunka dramatiskt. Värdena från 60% och nedåt är

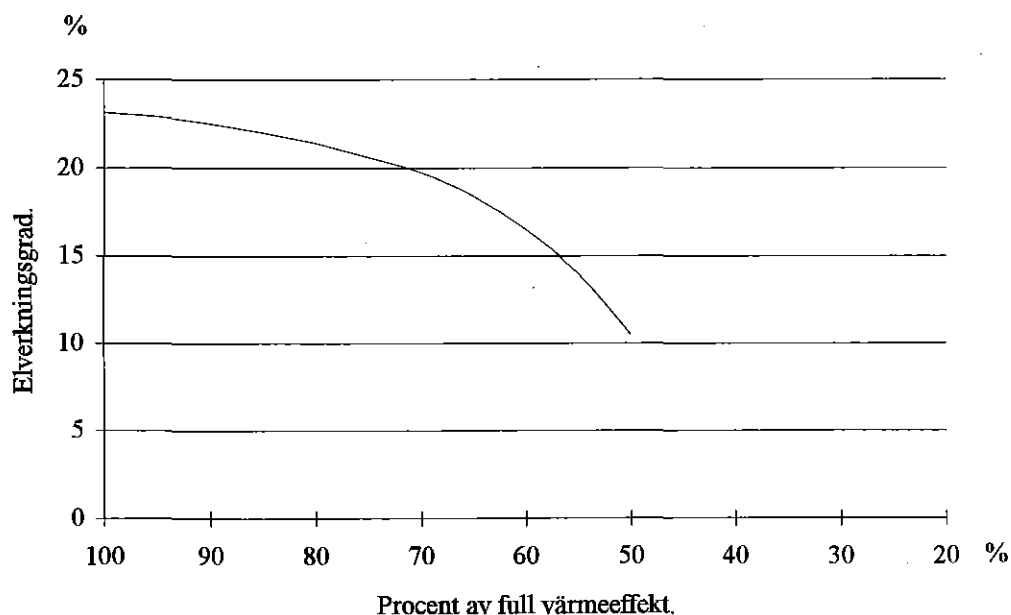


DIAGRAM 5.2 Elverkningsgraden som funktion av värmeeffekten för den danska stirlingmotorn.

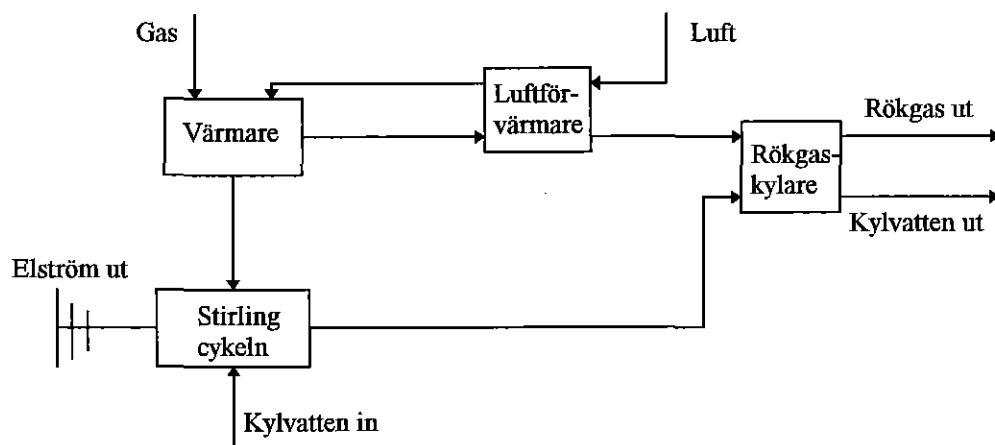
approximerade. Observera även det fenomen att när värmeeffektdellasten är 60% är eleffektdellasten ca. 33%. Detta beror på att elverkningsgraden sjunker och värmeverkningsgraden ökar vid dellast. Detta visar att det är olämpligt att dimensionera mikrokraftverket för 22 kW och sedan köra på dellast med kanske 3 kW i värmeeffekt. Att köra stirlingmotorn med en värmedellast på under 50% är olämpligt med tanke på hur låg elverkningsgraden blir.

Slutsats 5.2:

Mikrokraftverk A där en stirlingmotor skall regleras efter värmebehovet i villan är inte en lämplig lösning på grund av stirlingmotorns dellastegenskaper enligt diagram 5.2. Dessutom blir det komplicerat att reglera en stirlingmotor steglöst efter värmebehovet i villan.

5.3.2 Mikrokraftverk B: Stirlingmotor med urkoppling av luftförvärmare.

Detta är en utveckling av Mikrokraftverk A. Det enda som skiljer är en modifiering av luftförvärmningen på stirlingmotorn. Idén är att kunna koppla bort luftförvärmaren och istället för att rökgaserna värmer upp insugningsluft skall de värma kylvattnet ytterligare (se figur 5.3). Detta skulle innebära att man med en mekanisk anordning skulle kunna reglera värmeeffekten steglöst genom att successivt koppla ur och in luftförvärmningen under drift. Detta skulle även ge ett värmeeffektillskott vilket skulle reducera stirlingmotorns behov att gå på kraftig dellast. Frågan är hur stort effekttillskott i värme denna omställning ger.



FIGUR 5.3 Den danska stirlingmotorn återges schematiskt.

Som grund för dessa beräkningar används den danska stirlingmotorn som beräkningsobjekt. I figur 5.3 återges motorn i bilaga [2] schematiskt. Pilen som går mellan värmaren och stirlingcykeln representerar överförd värmeeffekt till arbetsgasen från värmerytorna.

För att starta beräkningarna behövs några antaganden:

- Den överförda effekten till stirlingcykeln är 10 kW. Eftersom två driftsfall skall undersökas kunde vilket tal som helst användas bara det är samma tal i de båda fallen.
- Temperaturen på rökgaserna är 700°C efter de lämnar värmerytorna. Det talet är taget från provkörningarna med motorn.
- Insugningsluften och gasen håller 0°C vilket ger enklare räkningar.
- Pinch point i luftförvärmaren är 50°C. Det innebär att luften håller 650°C efter luftförvärmaren

Exemplet räknas med följande storheter på gasen:

- Dansk naturgas som har ett värmevärde på $H_u = 39000 \text{ kJ/Nm}^3$.
- Luftfaktor 1,2.
- C_p för luften är $1.35 \text{ kJ/Nm}^3 \text{ K}$
- Enligt referens [4] kräver stökiometrisk förbränning av 1 m^3 naturgas 10 m^3 luft. Detta leder till följande relationer mellan volymflödena:

$$\begin{aligned}V_{\text{gas}} &= V \\V_{\text{luft}} &= 12V \\V_{\text{rökgas}} &= 13V\end{aligned}$$

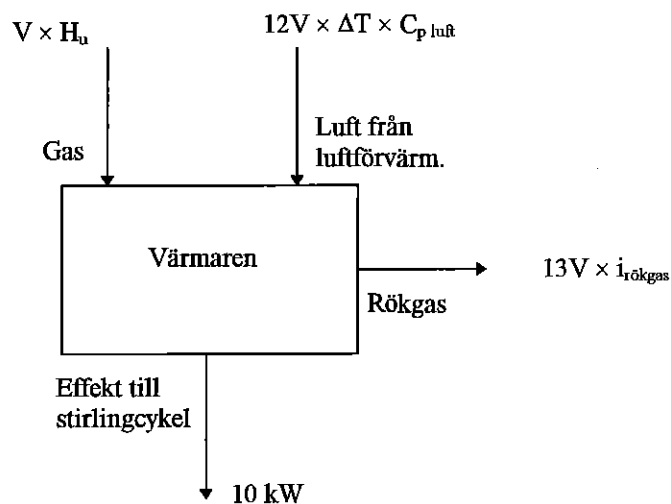
- Enligt referens [3] är entalpin för rökgaserna vid luftfaktor 1,2 enligt tabell 5.1.

Temp	Entalpi
100°C	130 kJ/Nm ³
200°C	275 kJ/Nm ³
300°C	425 kJ/Nm ³
400°C	575 kJ/Nm ³
500°C	730 kJ/Nm ³
600°C	890 kJ/Nm ³
700°C	1055 kJ/Nm ³

TABELL 5.1 Rökgasentalpi vid luftfaktor 1,2.

5.3.2.1 Driftsfall med inkopplad luftförvärmare

Först räknas fallet med inkopplad luftförvärmare som är det normala driftsfallet för stirlingmotorn. En effektbilans över värmaren ger då en bild enligt figur 5.4.



H_u : Undre värmevärde (kJ/Nm^3).

V : Volymflöde (Nm^3/s).

i : Entalpi (kJ/Nm^3).

C_p : Specifika värmekapaciteten ($\text{kJ/Nm}^3\text{K}$).

FIGUR 5.4 Effektbilans över värmaren med inkopplad luftförvärmare.

Med insatta värden på storheterna ger det följande ekvation:

$$V \cdot 39000 + 12V \cdot 650 \cdot 1.35 = 10 + 1050 \cdot 13V$$

vilket medför:

$$V = 0.000278 \text{ Nm}^3/\text{s}$$

$$V_{\text{luft}} = 12 \cdot 0.000278 = 0.00334 \text{ Nm}^3/\text{s}$$

$$V_{\text{rökgas}} = 13 \cdot 0.000278 = 0.00362 \text{ Nm}^3/\text{s}$$

Den överförda effekten i luftförvärmaren blir då:

$$P_{\text{luftförv.}} = V_{\text{luft}} \cdot \Delta T \cdot C_{p\text{luft}} = 0.00334 \cdot 650 \cdot 1.35 = 2.98 \text{ kW}$$

Entalpi differensen på rökgaserna genom luftförvärmaren blir då:

$$\Delta i_{\text{rökgas}} = P_{\text{luftförv.}} / V_{\text{rökgas}} = 2.98 / 0.00362 = 824 \text{ kJ/Nm}^3$$

Entalpin på rökgaserna efter luftförvärmaren blir då:

$$i_{\text{rökgas}} = 1050 - 824 = 226 \text{ kJ/Nm}^3$$

Interpolation i tabell 5.1 ger en temperatur på:

$$t_{\text{rökgas}} = 166^{\circ}\text{C}$$

Temperaturen på kylvattnet ut från rökgaskylaren skall vara 80°C . Det leder till att rökgaserna kommer att hålla ungefär 100°C vilket ger en entalpi på 130 kJ/Nm^3 . Rökgaskylaren har visat sig vara mycket effektiv vid provkörningarna och har till och med kondenserat rökgaserna då en låg kylvatten temperatur har använts. Den överförda effekten i rökgaskylaren blir:

$$P_{\text{rökgaskyl}} = V_{\text{rökgas}} \cdot \Delta i_{\text{rökgas}} = 0.00362 \cdot (226 - 130) = 0.348 \text{ kW}$$

Brännareffekten blir:

$$P_{\text{brännare}} = V \cdot H_u = 0.000278 \cdot 39000 = 10.842 \text{ kW}$$

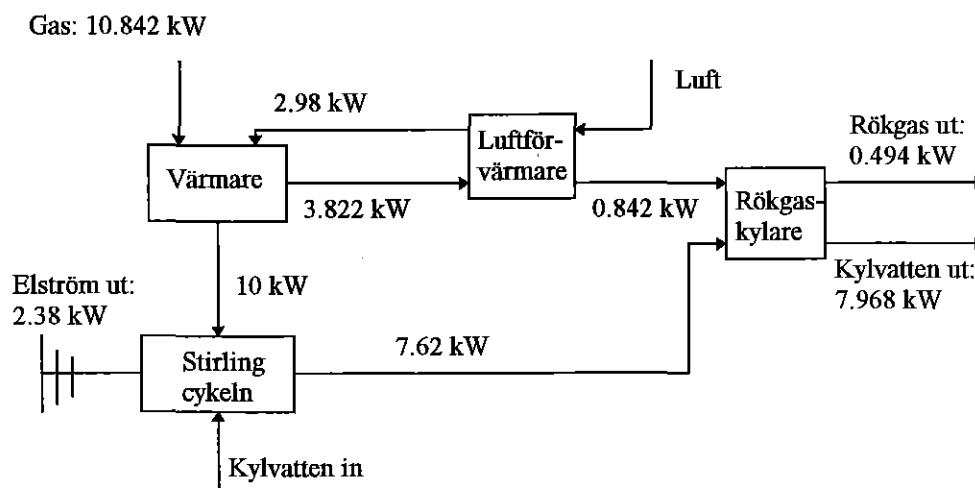
Eleffekten blir då med $\eta_{\text{el}} = 22 \%$:

$$P_{\text{el}} = 10.842 \cdot 0.22 = 2.38 \text{ kW}$$

Totalverkningsgraden blir då:

$$(2.38 \text{ kW}_{\text{el}} + 7.968 \text{ kW}_{\text{värme}}) / 10.842 \text{ kW}_{\text{gas}} \approx 95.4 \%$$

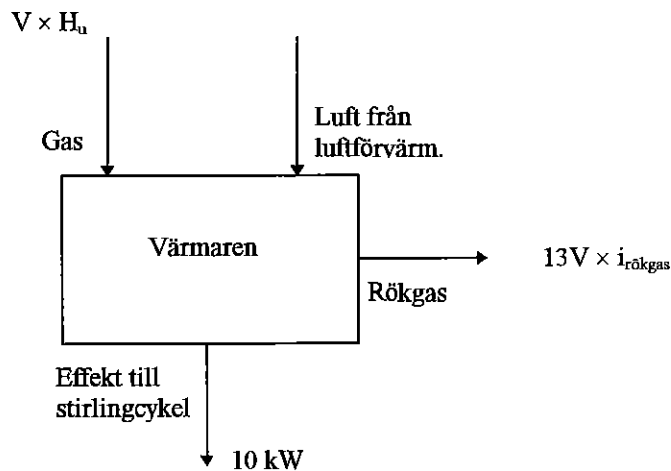
Figur 5.5 illustrerar driftfallet med luftförvärmaren inkopplad.



FIGUR 5.5 Effektfördelningen vid driftfallet med inkopplad luftförvärmare.

5.3.2.2 Driftsfall med urkopplad luftförvärmare

Då luftförvärmaren kopplas ur kommer den överförda effekten i luftförvärmaren vara noll. Detta ger en bild enligt figur 5.6. Det enda som skiljer från figur 5.4 är att luften inte tillför någon effekt till förbränningen. Temperaturen på rökgaserna är fortfarande 700°C efter värmaren. Förbränningstemperaturen kommer givetvis att sjunka eftersom insugningsluften nu håller 0°C. Det är dock möjligt, enligt Henrik Carlsen på DTH, att fortfarande hålla 700°C på rökgaserna. Detta beror på att värmeöverföringen kommer att ske med en mindre del strålning och en större del konvektion.



H_u : Undre värmevärde (kJ/Nm³).

V : Volymflöde (Nm³/s).

i : Entalpi (kJ/Nm³).

C_p : Specifika värmekapaciteten (kJ/Nm³K).

FIGUR 5.6 Effektbalans över värmaren med urkopplad luftförvärmare.

Figur 5.6 ger följande ekvation:

$$39000 \cdot V = 10 + 1050 \cdot 13V$$

Vilket ger:

$$V = 0.000394 \text{ Nm}^3/\text{s}$$

$$V_{\text{luft}} = 12 \cdot 0.000394 = 0.00473 \text{ Nm}^3/\text{s}$$

$$V_{\text{rökgas}} = 13 \cdot 0.000394 = 0.00512 \text{ Nm}^3/\text{s}$$

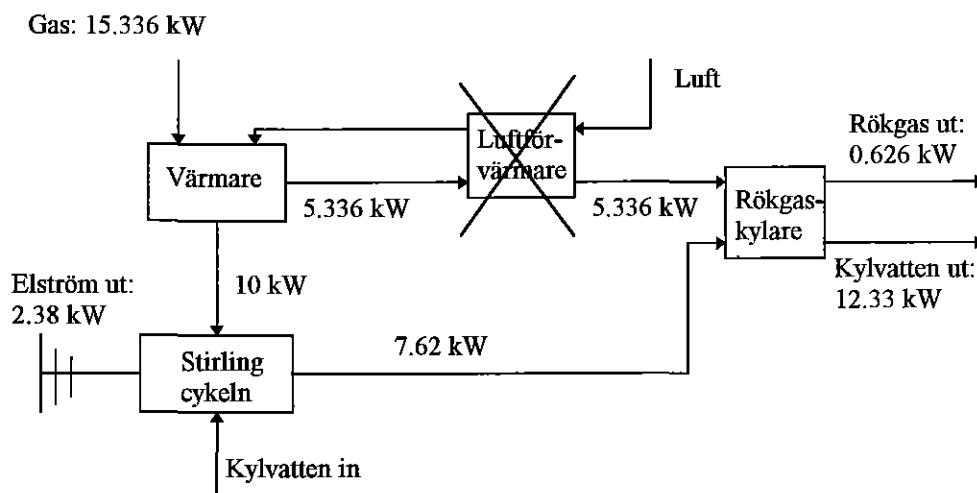
Den överförda effekten i rökgaskylaren blir nu:

$$P_{\text{rökgaskyl}} = V_{\text{rökgas}} \cdot \Delta i_{\text{rökgas}} = 0.00512 \cdot (1050 - 130) = 4.71 \text{ kW}$$

Brännareffekten blir nu:

$$P_{\text{brännare}} = V \cdot H_u = 0.000394 \cdot 39000 = 15.336 \text{ kW}$$

I figur 5.7 illustreras detta driftsfall.



FIGUR 5.7 Illustration av driftsfall med urkopplad luftförvärmare.

I figur 5.7 är elverkningsgraden:

$$2.38 \text{ kW} / 15.336 \text{ kW} \approx 15.5 \%$$

Totalverkningsgraden är i figur 5.7:

$$(2.38 \text{ kW}_{\text{el}} + 12.33 \text{ kW}_{\text{värme}}) / 15.336 \text{ kW}_{\text{gas}} \approx 95.9 \%$$

Förhållandet mellan värmeeffekterna med och utan luftförvärmare blir:

$$12.33 \text{ kW} / 7.968 \text{ kW} \approx 1.55$$

Detta betyder att en motor som är dimensionerad för $14 \text{ kW}_{\text{värme}}$ klarar :

$$14 \text{ kW} \cdot 1.55 = 21.7 \text{ kW}_{\text{värme}}$$

i topp-effekt om luftförvärmaren kopplas ur.

5.3.2.3 Sammanfattning

För att kunna bygga Mikrokraftverk B måste modifieringar göras på stirlingmotorn. Med en steglös urkoppling av luftförvärmaren är det möjligt att på ett enkelt sätt reglera värmeeffekten. Dessutom kan mikrokraftverket avge ca. 50% mer värme när urkopplingen sker. Observera att eleffekten är oförändrad även om luftförvärmaren kopplas ur. Trots denna förbättring måste Mikrokraftverk B vara dimensionerat för ca. $14 \text{ kW}_{\text{värme}}$. Med urkopplad luftförvärmare kan då en topplast på ca. $22 \text{ kW}_{\text{värme}}$ klaras av. Problemet blir att kunna täcka förbrukningar på $3 \text{ kW}_{\text{värme}}$, och kanske $2 \text{ kW}_{\text{värme}}$. Dellastpotentialen är ca. 60% vilket ger:

$$14 \text{ kW}_{\text{värme}} \cdot 0.6 = 8.4 \text{ kW}_{\text{värme}}$$

som lägsta värmeeffekt vilket är alldeles för högt för villans behov vid låglast.

Slutsats 5.3:

Mikrokraftverk B klarar av att reglera värmeeffekten från 60% värme till 150% värme. Om Mikrokraftverk B skall klara topplasten på $22 \text{ kW}_{\text{värme}}$ blir dess lägsta möjliga värmeeffekt $8.4 \text{ kW}_{\text{värme}}$ vilket inte klarar låga behov på t.ex. $2 \text{ kW}_{\text{värme}}$ utan att dumpa värme.

5.3.3 Mikrokraftverk C: Stirlingmotor med accumulatortank.

Om Mikrokraftverk B kompletteras med en accumulatortank som kan lagra värmeenergi går det att köra mikrokraftverket intermittent. Om värmebehovet är $4 \text{ kW}_{\text{värme}}$ går det att köra on-off reglering med $8 \text{ kW}_{\text{värme}}$ där drifttiden är 50%. Med detta arrangemang är även låga värmebehov tillgodosedda i villan. Stirlingmotorn i Mikrokraftverk C är identisk med den i mikrokraftverk B.

En stor nackdel är att drifttiden för stirlingmotorn i Mikrokraftverk C blir onödigt kort. Stirlingmotorn skall vara i drift så stor del av året som möjligt för att ge stor lönsamhet. För att åskådliggöra detta fenomen räknas ett enkelt exempel:

Villans elbehov	:	$0.7 \text{ kW}_{\text{el}}$
Villans värmebehov	:	$4 \text{ kW}_{\text{värme}}$
Gaspris	:	30 öre/kWh
Pris på köpt el	:	70 öre/kWh
Pris på såld el	:	34 öre/kWh
Elverkningsgrad	:	22% (ekvation 4.1 gäller)

Driftfall 1 : Kör on-off reglering med 8 kW_{värme} fullast vilket medför 50% drifttid. Under drift betyder det 2.2 kW_{el}.

Driftfall 2 : Kör kontinuerligt med 4 kW_{värme} fullast. Detta ger 1.1 kW_{el}.

Detta är två olika stirlingmotorer med olika toppeffekt. Låt oss se vad vinsten i kronor räknat blir under ett dygn, 24 h, för elgenereringen. De första 0.7 kW_{el} ger en vinst på 0.4 kr/kWh och de övriga 0.04 kr/kWh.

	Driftfall 1	Driftfall 2
Totaltid i drift	12 h	24 h
kWh över 0.7 kW _{el}	$12 \cdot (2.2 - 0.7) = 18 \text{ kWh}_{el}$	$24 \cdot (1.1 - 0.7) = 9.6 \text{ kWh}_{el}$
kWh under 0.7 kW _{el}	$12 \cdot 0.7 = 8.4 \text{ kWh}_{el}$	$24 \cdot 0.7 = 16.8 \text{ kWh}_{el}$
Totalt antal kWh	$18 + 8.4 = 26.4 \text{ kWh}_{el}$	$9.6 + 16.8 = 26.4 \text{ kWh}_{el}$
Vinst på säljel	$0.04 \cdot 18 = 0.72 \text{ kr}$	$0.04 \cdot 9.6 = 0.384 \text{ kr}$
Vinst på egenprod. el	$0.4 \cdot 8.4 = 3.36 \text{ kr}$	$0.4 \cdot 16.8 = 6.72 \text{ kr}$
Total vinst på elförs.	$3.36 + 0.72 = \mathbf{4.08 \text{ kr}}$	$6.72 + 0.384 = \mathbf{7.104 \text{ kr}}$

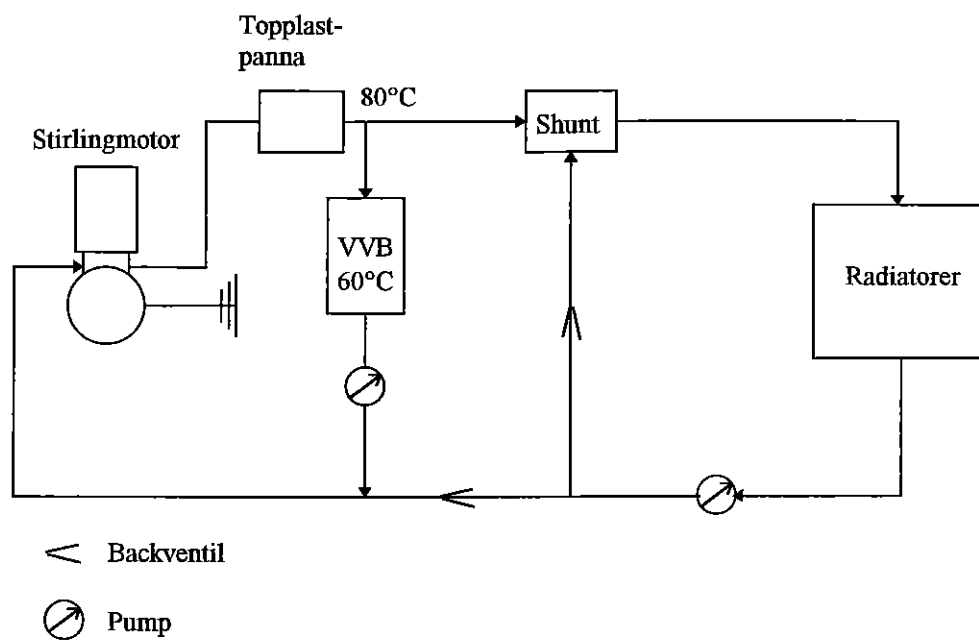
Vinsten blir nästan dubbelt så stor om mikrokraftverket körs kontinuerligt. Allting beror på förhållandet mellan elpriserna sälj och köp. Hade köppris och säljpris varit lika skulle det inte vara någon skillnad mellan driftfall 1 och 2. I mikrokraftverk C används accumulator tanken för att täcka låga värmebehov i villan. Det är möjligt att dimensionera en något lägre värmeeffekt på stirlingmotorn och låta accumulator tanken täcka topplasterna också. Detta förändrar dock inte det faktum att stirlingmotorn behöver gå intermittent ibland.

Slutsats 5.4:

Mikrokraftverk C skulle fungera men ger ingen driftsoptimering för elgenereringen. Det är inte fördelaktigt att köra stirlingmotorn intermittent med avseende på elförsäljningen med dagens elpriser. Kontinuerlig drift av stirlingmotorn är att föredra. Dessutom är en accumulator tank utrymmeskrävande och fördyrar även anläggningen.

5.3.4 Mikrokraftverk D: Stirlingmotor med en topplastpanna.

Mikrokraftverk D består av en stirlingmotor med rökgaskylning och en topplastpanna. I figur 5.8 presenteras en lösning med en topplastpanna. Denna panna regleras så att den alltid håller 80°C på vattnet som flödar till radiatorerna.



FIGUR 5.8 Stirlingmotor med topplastpanna som Mikrokraftverk D i ett system.

Mikrokraftverket ligger som bottenlast medan topplastpannan sköter den steglösa regleringen av värmen med alla topplaster. I övrigt fungerar systemet som i beskrivningen för figur 5.2. Hela systemet fungerar även om stirlingmotorn står stilla. Då flödar vattnet bara igenom motorn utan att värmas upp.

I Mikrokraftverk D är det möjligt att använda en stirlingmotor med en förhållandevis låg värmeeffekt. Stirlingmotorn behöver inte heller kunna koppla ur luftförvärmningen. Nu kan drifttiden bli relativt lång utan att stirlingmotorns värmeeffekt överskrider värmebehovet i villan. Frågan är hur värmeeffekten på stirlingmotorn skall dimensioneras. Genom att studera varaktighetsdiagrammet 5.1 finner man att flera olika alternativ är möjliga:

1. Köra konstant $5 \text{ kW}_{\text{värme}}$ och $1.37 \text{ kW}_{\text{el}}$ i 3000 h per år. Detta ger $4110 \text{ kWh}_{\text{el}}$ per år
2. Köra konstant $4 \text{ kW}_{\text{värme}}$ och $1.1 \text{ kW}_{\text{el}}$ i 4300 h per år. Detta ger $4730 \text{ kWh}_{\text{el}}$ per år.
3. Köra konstant $2.5 \text{ kW}_{\text{värme}}$ och $0.68 \text{ kW}_{\text{el}}$ i 5000 h per år. Detta ger $3400 \text{ kWh}_{\text{el}}$ per år.
4. Köra fullast med $5 \text{ kW}_{\text{värme}}$ och $1.37 \text{ kW}_{\text{el}}$ i 3000 h och dellast $3 \text{ kW}_{\text{värme}}$ och $0.61 \text{ kW}_{\text{el}}$ i 1500 h. Det ger totalt $4110 \text{ kWh} + 915 \text{ kWh} = 5025 \text{ kWh}_{\text{el}}$ per år.

Detta är fyra olika motorer som alla går på fullast med $\eta_{el} = 22\%$. I alternativ 4 går motorn på 60% värmedellast och $\eta_{el} = 16\%$. Inget av dessa alternativen behöver dumpa värme. I princip går det att konstruera oändligt många kombinationer men dessa fyra täcker in bilden ganska bra. I kapitel 6 görs en ekonomisk analys på dessa fyra olika driftsalternativ.

Slutsats 5.4:

Mikrokraftverk D klarar alla värmebehov i villan. Stirlingmotorn ligger som en bottenlast vilket ger långa drifttider över året - en förutsättning för hög lönsamhet. En stor fördel är även säkerheten mot driftstopp för stirlingmotorn.

5.4 Sammanfattning.

Fyra stycken olika mikrokraftverk har värderats. Två stycken klarar inte rent tekniskt att tillgodose villans värmebehov. Ett mikrokraftverk klarar behoven men ger en dålig driftsoptimering för elgenereringen.

Mikrokraftverk D består av en stirlingmotor och en värmepanna i ett samspel som klarar värmebehoven och ger möjligheter till en god driftsoptimering av elgenereringen. I fortsättningen antas mikrokraftverket se ut som Mikrokraftverk D. Exakt hur stirlingmotorn skall dimensioneras i Mikrokraftverk D beror på lönsamheten för elförsäljningen. Denna analys görs i kapitel 6.

6. Lönsamheten för mikrokraftverket.

6.1 Inledning.

Tidigare har det framgått att flera yttre parametrar har stor betydelse för lönsamheten. Gaspris och elpriser är de faktorer som har störst inverkan. I detta kapitel görs en lönsamhetskalkyl för mikrokraftverket. Det är väldigt svårt att uppskatta priset på ett komplett fungerande mikrokraftverk. Däremot kan driftskostnaderna för mikrokraftverket jämföras med värmepannans. Om driftskostnaderna är lägre för mikrokraftverket går villaägaren med vinst varje år vilket finansierar ett högre inköpspris och högre underhållskostnader. Detta kallas för ett täckningsbidrag. Det är alltså täckningsbidraget som skall räknas fram.

6.2 Täckningsbidraget för Mikrokraftverk D.

Eftersom räkningarna alltid jämförs med en vanlig värmepanna är det intressant att som referens se hur stora de totala kostnaderna för värme och el är då en värmepanna används. En uppskattning utifrån varaktighetsdiagrammet 5.1 ger:

Total elförbrukning	: $0.6 \text{ kW} \cdot 8760 \text{ h} = 5256 \text{ kWh}_{\text{el}}$
Total värmeförbrukning	: $(7000 \text{ h} \cdot 8 \text{ kW}) / 2 = 28000 \text{ kWh}_{\text{värme}}$
Årsmedelverkningsgrad för panna	: 0.75 (antagande)
Elkostnad per år	: $5256 \text{ kWh} \cdot 0.7 \text{ kr/kWh} = 3679 \text{ kr}$
Värmekostnad per år	: $28000 \text{ kWh} / 0.75 \cdot 0.3 \text{ kr/kWh} = 11200 \text{ kr}$
Total kostnad per år	: $3679 \text{ kr} + 11200 \text{ kr} = \mathbf{14879 \text{ kr}}$

Frågan är vilket av de fyra olika driftsalternativen för Mikrokraftverk D som skall användas. Det är möjligt att det alternativ som är bäst idag inte är bäst efter en ändring av elpriserna. Därför kommer uträkningarna göras så att vissa parametrar kan ändras. Precis som i kapitel 5 är det tillräckligt att beräkna vinsten för eldelen. Till en början används dagens el- och gaspriser:

Gaspris	: 30 öre / kWh
Elpris _{köp}	: 70 öre / kWh
Elpris _{sälj}	: 34 öre / kWh

De olika driftsalternativen är följande:

Alternativ 1:

- Köra konstant $5 \text{ kW}_{\text{värme}}$ och $1.37 \text{ kW}_{\text{el}}$ i 3000 h per år. Detta ger $4110 \text{ kWh}_{\text{el}}$ per år

Alternativ 2:

- Köra konstant 4 kW_{värme} och 1.1 kW_{el} i 4300 h per år. Detta ger 4730 kWh_{el} per år.

Alternativ 3:

- Köra konstant 2.5 kW_{värme} och 0.68 kW_{el} i 5000 h per år. Detta ger 3400 kWh_{el} per år.

Alternativ 4:

- Köra fullast med 5 kW_{värme} och 1.37 kW_{el} i 3000 h och dellast 3 kW_{värme} och 0.61 kW_{el} i 1500 h. Det ger totalt 4110 kWh + 915 kWh = 5025 kWh_{el} per år.

Täckningsbidraget för alternativ 1.

Medelelbehov under dessa 3000 h	: 0.65 kW _{el}
Andel av eleffekten 1.37kW _{el}	: $0.65 / 1.37 = 0.474$
Elenergi < 0.65 kW _{el}	: $0.474 \cdot 4110 \text{ kWh}_{el} = 1948 \text{ kWh}_{el}$
Elenergi > 0.65 kW _{el}	: $(1 - 0.474) \cdot 4110 \text{ kWh}_{el} = 2162 \text{ kWh}_{el}$
Vinst < 0.65 kW _{el}	: $0.4 \text{ kr/kWh} \cdot 1948 \text{ kWh} = 779.20 \text{ kr}$
Vinst > 0.65 kW _{el}	: $0.04 \text{ kr/kWh} \cdot 2162 \text{ kWh} = 86.48 \text{ kr}$
Täckningsbidrag per år	: $86.48 \text{ kr} + 779.20 \text{ kr} = \mathbf{865.7 \text{ kr}}$

”Medelelbehov...” är en uppskattning ur diagram 5.1. Identiska beräkningar görs för de övriga alternativen vilket ger tabell 6.1. Tabell 6.1 visar hur värdefulla de första 0.6 kW:en är. Alternativ 3 har minst kWh_{el} men ger högst täckningsbidrag. Skillnaden är trots all inte så stor mellan de tre sista alternativen.

	Täckningsbidrag per år :	
Alt 1	866	kr
Alt 2	1149	kr
Alt 3	1270	kr
Alt 4	1208	kr

TABELL 6.1 Täckningsbidrag för fyra olika driftsalternativ i Malmö med dagens ca. priser på el och gas.

Detta gäller en villa belägen i södra Sverige. Längre norrut erhålles ett annat varaktighetsdiagram. Här finns visserligen ingen naturgas tillgänglig men analysen

blir intressant. I bilaga [1] finns en varaktighetskurva för Kiruna. De olika driftsalternativen i Kiruna skulle kunna se ut som följer:

Alternativ 1 (Kiruna):

- Köra konstant 6 kW_{värme} och 1.64 kW_{el} i 5400 h per år. Detta ger 8856 kWh_{el} per år.

Alternativ 2 (Kiruna):

- Köra konstant 3 kW_{värme} och 0.82 kW_{el} i 7000 h per år. Detta ger 5740 kWh_{el} per år.

Alternativ 3 (Kiruna):

- Köra fullast med 9 kW_{värme} och 2.47 kW_{el} i 4000 h per år och dellast 5.4 kW_{värme} och 1.09 kW_{el} i 2000 h per år. Det ger totalt 9880 kWh + 2180 kWh = 12060 kWh_{el} per år.

Alternativ 4 (Kiruna):

- Köra fullast med 5 kW_{värme} och 1.37 kW_{el} i 6200 h per år och dellast 3 kW_{värme} och 0.61 kW_{el} i 800 h per år. Det ger totalt 8494 kWh + 488 kWh = 8982 kWh_{el} per år.

I alternativen gäller för 60% värmedellast $\eta_{el} = 16\%$. Fullast $\eta_{el} = 22\%$.

Täckningsbidraget räknas ut med dagens priser på el och gas. Resultatet återfinns i tabell 6.2 där även Malmös värden är presenterade.

	Täckningsbidrag per år :			
	Kiruna		Malmö	
Alt 1	1657	kr	866	kr
Alt 2	1868	kr	1149	kr
Alt 3	1907	kr	1270	kr
Alt 4	1985	kr	1232	kr

TABELL 6.2 Täckningsbidrag för fyra olika driftsalternativ i Kiruna och Malmö med dagens ca. priser på el och gas.

I Kiruna är det möjligt att få ett täckningsbidrag på ca. 2000 kr per år. Kiruna ger ett högre täckningsbidrag än Malmö men har samtidigt en högre installerad effekt vilket ger ett lite dyrare aggregat. Täckningsbidraget skall täcka kostnader för:

- Ökade underhållskostnader för mikrokraftverket. Stirlingmotorn är mer komplicerad än en värmepanna. Dessutom måste helium fyllas på ibland.
- Kapitalkostnaden för mikrokraftverket som har ett högre inköpspris jämfört med värmepannan.

I mikrokraftverket ingår i princip en värmepanna plus en stirlingmotor med reglerutrustning. Med ett täckningsbidrag i Malmö på 1300 kr per år och en återbetalning på 5 år får en stirlingmotor på 1.4 kW_{el} med reglersystem kosta 5000 kr om underhållet är 300 kr per år. Merkostnaden för ett mikrokraftverk jämfört med motsvarande panna får endast vara 5000 kr med 5 års återbetalningstid.

Med dagens priser på el och gas visar mikrokraftverket en alldeles för dålig lönsamhet. Speciellt i de delar av landet där värmeförbrukningen är förhållandevis låg. Även om mikrokraftverket skulle ha en elverkningsgrad på 40 % skulle lönsamheten bli låg. Haken ligger i att förtjänsten bara är 4 öre/kWh vid försäljning av el. I alternativ 3 i Kiruna produceras det ca. 8000 kWh över 0.7 kW_{el}. Om förtjänsten på dessa kWh ökar från 4 öre till 10 öre får det en stor genomslagskraft på täckningsbidraget. Har man användning för elöverskottet själv kan en stor förtjänst göras. Alternativ kostnaden är idag 36 öre/kWh. Det skulle i Kiruna innebära nästan 3000 kr *utöver* täckningsbidraget på 2000 kr !

6.3 Framtida elprishöjningar.

Låt oss ändra säljpriset för el och ha det som en fri parameter. Gaspris och elpris_{köp} är oförändrade. I diagram 6.1 är detta gjort för Malmö och i diagram 6.2 för

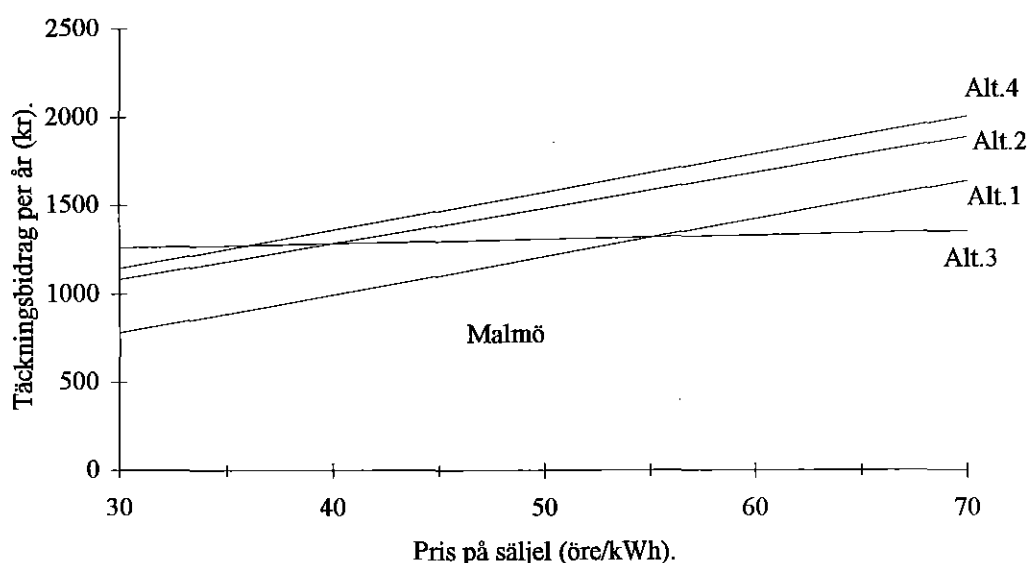


DIAGRAM 6.1 Täckningsbidraget per år för olika driftsalternativ i Malmö.

Kiruna. En prishöjning på säljelen har nästan ingen påverkan på alt. 3 i Malmö och alt.2 i Kiruna medan de andra visar ett ökat täckningsbidrag. Observera att elbehovet är lika stort i Kiruna och Malmö. I dagens läge ger Kiruna ca. 50% högre täckningsbidrag. Om $\text{elpris}_{\text{sälj}}$ är 70 öre/kWh ger Kiruna i alt.3 över dubbelt så högt täckningsbidrag som alt.4 i Malmö.

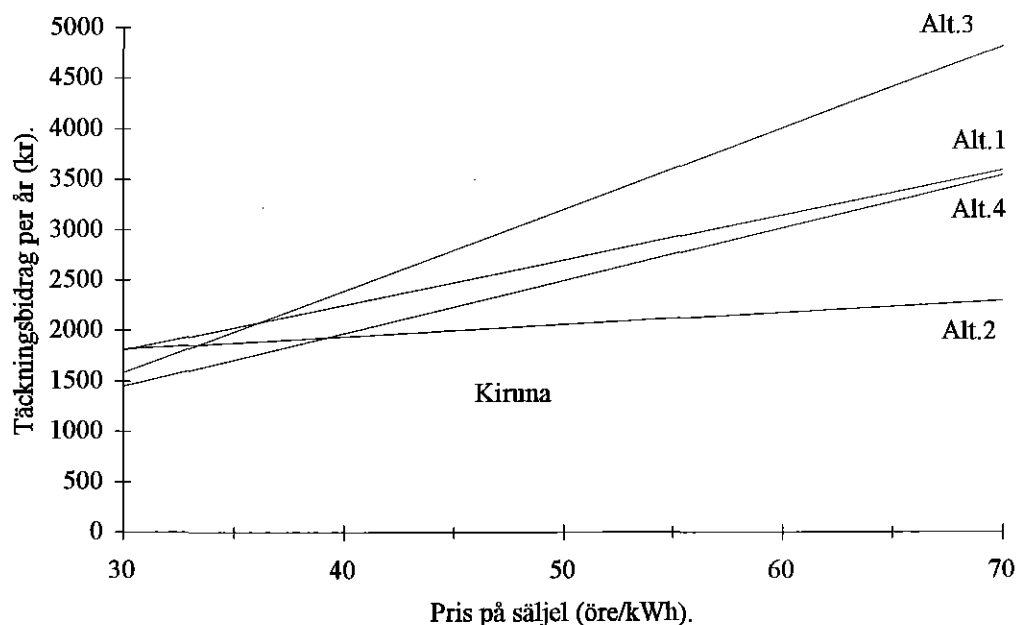


DIAGRAM 6.2 Täckningsbidraget per år för olika driftsalternativ i Kiruna.

Om de båda elpriserna är lika blir täckningsbidraget proportionellt mot elverkningsgraden på stirlingmotorn. Idag med stor skillnad mellan priserna har inte elverkningsgraden så stor betydelse för lönsamheten. Med $\eta_{\text{el}} = 22\%$ hamnar eleffekten på stirlingmotorn nästan alltid över villans elförbrukning.

En ännu friare modell med alla tre parametrarna ser ut som formel 6.1.

$$\text{Täckningsbidrag i Malmö (kr)} = 27.98 E_k + 22.27 E_s - 50.25 G$$

$$\text{Täckningsbidrag i Kiruna (kr)} = 39.59 E_k + 81.01 E_s - 120.6 G$$

E_k : Elpris_{köp} (öre/kWh)

E_s : Elpris_{sälj} (öre/kWh)

G : Gaspris (öre/kWh)

FORMEL 6.1 Täckningsbidraget i Malmö och Kiruna som funktion av gaspris och elpriser.

Beräkningarna är gjorda för alternativ 4 i Malmö och alternativ 3 i Kiruna. Modellen fungerar även som en känslighetsanalys för täckningsbidraget. Täckningsbidraget i Kiruna är fyra gånger så känsligt för ändringar på elpris_{sälj} jämfört med Malmös täckningsbidrag.

Ett framtida scenario med:

E_k	: 100 öre/kWh
E_s	: 70 öre/kWh
G	: 25 öre/kWh

Skulle enligt formel 6.1 ge ett täckningsbidrag på 3100 kr per år i Malmö och 6615 kr per år i Kiruna.

6.4 Sammanfattning.

Eftersom inköpspriset på mikrokraftverket är mycket svårbedömt är det svårt att göra en heltäckande lönsamhetskalkyl. Däremot går det att räkna fram vinsten på elförsäljningen som blir ett täckningsbidrag för ökade underhålls- och kapitalkostnader. Här jämförs mikrokraftverket med en vanlig värmepanna. Täckningsbidragets storlek beror naturligtvis på gas- och elpriser men även på värme- och elbehovet i villan samt på olika driftsstrategier.

Med dagens elpriser skulle driftsalternativ 3 vara mest lönsamt i Malmö och alternativ 4 i Kiruna. Då skulle täckningsbidraget i en Malmövilla bli på ca. 1300 kr och i Kiruna ca. 2000 kr per år.

I Malmö skulle mikrokraftverket bestå av :

- En stirlingmotor med $\eta_{el} = 22\%$ och max. 5% värmeförluster. Maximal värmeeffekt på 5 kW_{värme} vilket då ger en eleffekt på 1.37 kW_{el}. Ett dellastläge på 60% av maximal värmeeffekt. Det ger 3 kW_{värme} och 0.61 kW_{el}. Stirlingmotorn kör på maximal effekt så länge det går utan att värme behöver dumpas. Detta blir ca. 3000 h per år. Dellastläget kommer att utnyttjas under ca 1500 h per år. Detta ger en total drifttid på ca. 4500 h per år.
- En värmepanna som klarar ca. 17 kW_{värme} i topp effekt.

Dessa två enheter är sammanbyggda till *en* väl fungerande enhet enligt avsnitt 5.3.4.

Med höjda elpriser och/eller sänkta gaspriser ökar täckningsbidraget vilket skulle göra mikrokraftverket ännu mer intressant i framtiden. I ett framtida perspektiv beror det på gas- och elpriser på vilket driftsalternativ som ger högst täckningsbidrag i respektive del av landet.

Avsikten har varit att visa vilka parametrar som påverkar täckningsbidraget. De nivåerna på dagens elpriser som har används är approximativa. Det går att göra en betydligt noggrannare analys på hur t.ex. dag- och nattaxa påverkar slutresultatet. I denna rapporten har ingen hänsyn tagits till hur olika skatter på bränslet påverkar täckningsbidraget. I Sverige är naturgasen skattebefriad om den används för elgenerering. Skulle mikrokraftverksägaren få slippa skatt på den delen av gasförbrukningen som används till eldelen?

7. Övriga aspekter på mikrokraft.

7.1 För vem är mikrokraftverket intressant?

Hur stor är marknaden i Sverige om det går att bygga ett mikrokraftverk till ett konkurrenskraftigt pris?

- Mikrokraftverket drivs med naturgas. I princip skulle det kunna gå att utveckla en stirlingmotor med oljebrännare eller som en vedpanna. Naturgas är dock det mest lämpade bränslet och alla dagens små stirlingmotorer använder naturgas som bränsle. Detta leder till att den potentiella mikrokraftverksköparen är den som har tillgång till naturgas eller gasol.
- För att mikrokraft överhuvudtaget skall vara intressant måste det finnas ett värmebehov. Finns inget värmebehov blir den producerade elen plötsligt mycket dyr. Med den förhållandevis låga elverkningsgraden på 22% och inga specialavtal på naturgas hamnar kostnaden för 1 kWh el på nästan 140 öre om inte värmen är värdefull för innehavaren. Dessutom är det inte energieffektivt att producera enbart el med mikrokraftverk när ett större kraftverk kan ha 55% elverkningsgrad.
- Fastigheten i fråga måste ha ett vattenburet värmesystem.

Med dessa tre inskränkningar går det att ringa in ett område från Göteborg och söderut längs västkusten ner till Skåne som har tillgång till naturgas. Fastigheter med fjärrvärme är inte aktuella ty de har redan värme till en väldigt låg kostnad. Dessutom är det sällan som naturgasen är framdragen i områden med fjärrvärme.

Slutsats 7.1:

Marknaden idag för mikrokraftverk skulle i princip bli lika stor som marknaden för naturgaspannor.

7.2 Oljeeldade mikrokraftverk.

Enligt Henrik Carlsen på DTH skulle det vara tämligen enkelt att anpassa en befintlig gasdriven stirlingmotor till oljedrift. Det är dock ingen som har gjort det. Många stirlingmotortillverkare har en miljöprofil som gynnas när ordet naturgas nämns. Olja har som bekant ingen positiv miljöprofil. Om värmen från mikrokraftverket tillvaratas har elgenereringen en konverteringsverkningsgrad på 100% vilket gör även ett oljedrivet mikrokraftverk till ett effektivt elkraftverk. Samma mängd el genererat av ett kondenskraftverk ($\eta_{el} = 40\%$) kräver 2.5 gånger

så mycket oljeförbrukning jämfört med vad ett mikrokraftverk förbrukar. Ett oljeeldat mikrokraftverk skulle vara lika "miljövänligt" som en oljepanna. Alla oljeeldade värmepannor skulle kunna bytas ut mot mikrokraftverk. Marknaden skulle bli mycket större där även kalla Norrland med stor lönsamhetspotential skulle kunna ingå.

I tabell 7.1 är Sveriges småhusbestånd presenterat. Siffrorna är avrundade i jämna tusental. Här ingår ej hyresfastigheter.

Enfamiljs	:	1 243 000 stycken
Tvåfamiljs	:	48 000 stycken
Radhus	:	249 000 stycken
Totalt antal	:	1 540 000 stycken

TABELL 7.1 Antal småhus i Sverige 1994. Siffror avrundade. Källa SCB.

Dessa småhus har en fördelning mellan uppvärmningsslag enligt tabell 7.2.

Olja	:	13%
El	:	38%
Olja, El	:	6%
Olja, Ved	:	6%
Olja, Ved, El	:	3%
Ved	:	4%
El, Ved	:	18%
Annat	:	12%

TABELL 7.2 Fördelning mellan uppvärmningsslag bland småhus i Sverige. Källa SCB.

I princip har alla hus med olje- eller veduppvärmning ett vattenburet system vilket gör dem till en potentiell mikrokraftverks köpare. Det skulle innebära 50% av småhusbeståndet. Låt oss nöjas med alla oljeuppvärmda hus vilket skulle betyda 13% av småhusbeståndet. Detta ger :

$$0.13 \cdot 1540\,000 \approx 200\,000 \text{ st}$$

småhus. Om medelförbrukningen bland dessa hus är enligt diagram 5.1 och alla 200 000 st hus installerar ett mikrokraftverk med eleffekt på 1.4 kW enligt avsnitt 6.4 betyder det en total eleffekt vintertid på :

$$200\,000 \cdot 1.4 \text{ kW} = 280 \text{ MW}_{el}$$

Det är inte rimligt att alla oljepannor byts ut mot mikrokraftverk men räkningen visar vilken potential det finns om bara antalet mikrokraftverk är stort. Ett antal oljeeldade kraftverk på tillsammans 280 MW med kanske 40% elverkningsgrad skulle kunna ersättas med 200 000 st mikrokraftverk.

Det finns förutom ett lönsamhetsintresse för husägaren också ett energibesparings incitament med mikrokraftverk. Detta under förutsättning att det finns oljeeldade kraftverk att ersätta.

7.3 Större mikrokraftverk.

Det finns ingenting som hindrar att gå upp i storlek på mikrokraftverket så att även flerfamiljshus eller till och med hyresfastigheter kan ingå.

Linjen mellan mikrokraft och småskalig kraftvärme måste definieras på något sätt. Här är ett förslag på en definition på mikrokraftverk kontra småskalig kraftgenerering:

- Ett mikrokraftverk kan installeras på samma sätt som motsvarande värmepanna, i källaren på fastigheten. Värmepannan skall strikt kunna bytas ut mot ett mikrokraftverk utan att några större modifieringar av fastigheten behöver göras.
- Ett mikrokraftverk är inte anslutet till någon form av värmedistributionsnät till andra fastigheter.

I denna definition kan alla fastigheter med värmepannor ingå, även större sådana. Med en ökad storlek på mikrokraftverket skulle verkningsgraden på generatorn kunna ökas markant. Detta skulle innebära att elverkningsgraden på mikrokraftverket kanske kunde närma sig 30% , vilket är en stor förbättring.

Referenser.

- [1] Walker, Graham. "Stirling engines" Clarendon Press Oxford, 1980.
- [2] Egnell, R och Gabrielsson, R. "Alternativa motorer" NUTEK, 1991.
- [3] Alvarez, H. "Energiteknik" Studentlitteratur, 1990.
- [4] Näslund, M. "Energigasteknik" Institutionen för Värme och Kraftteknik, 1993.
- [5] Besök hos TEM i Malmö, April 1996.
- [6] Besök hos Laboratoriet för Energiteknik, Dansk Teknisk Högskola, Juli 1996.
- [7] Carlsen, H. "3 kW Stirlingmotor til individuelt kraftværme-anlæg" DTH, 1996.

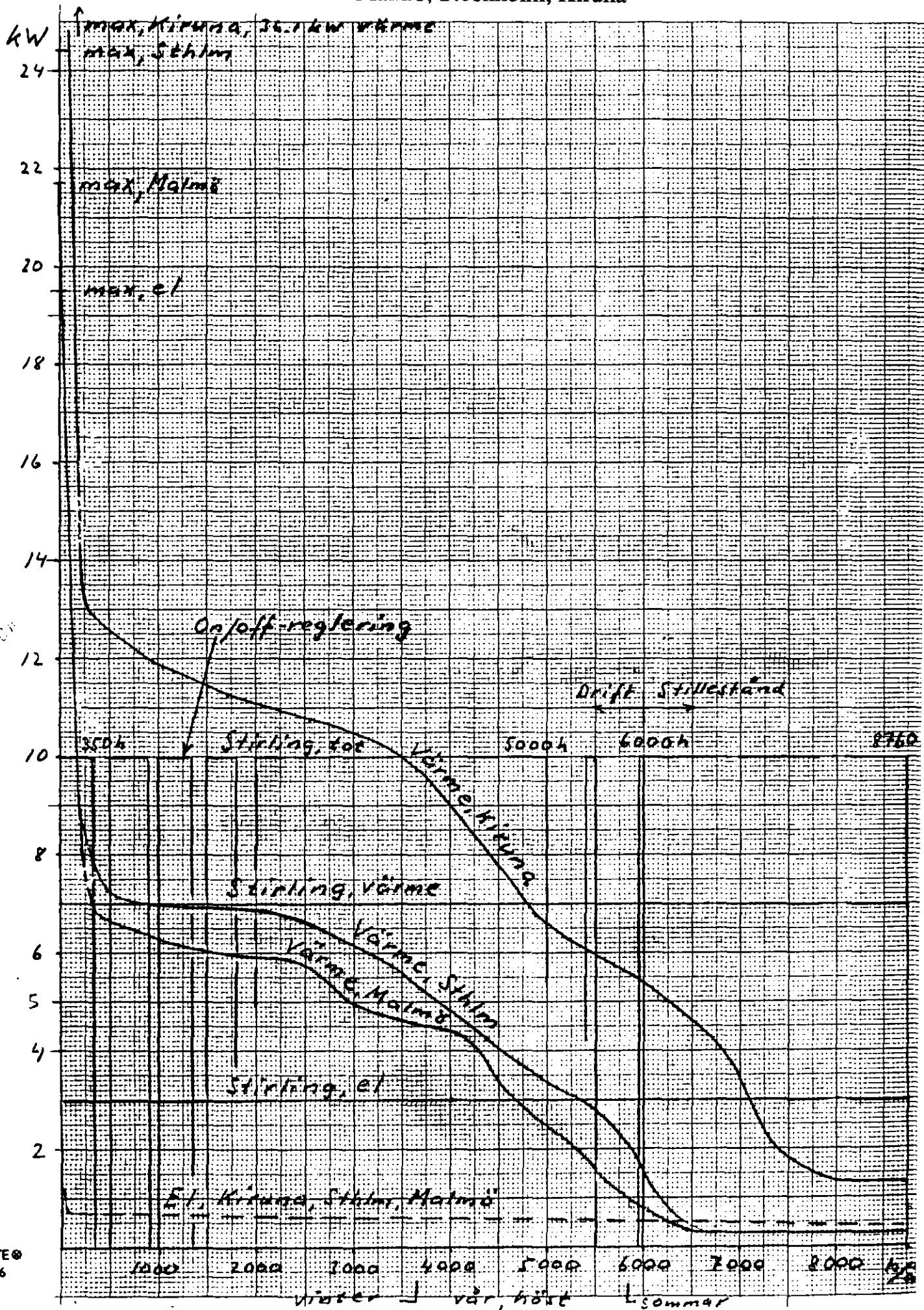
Bilagor.

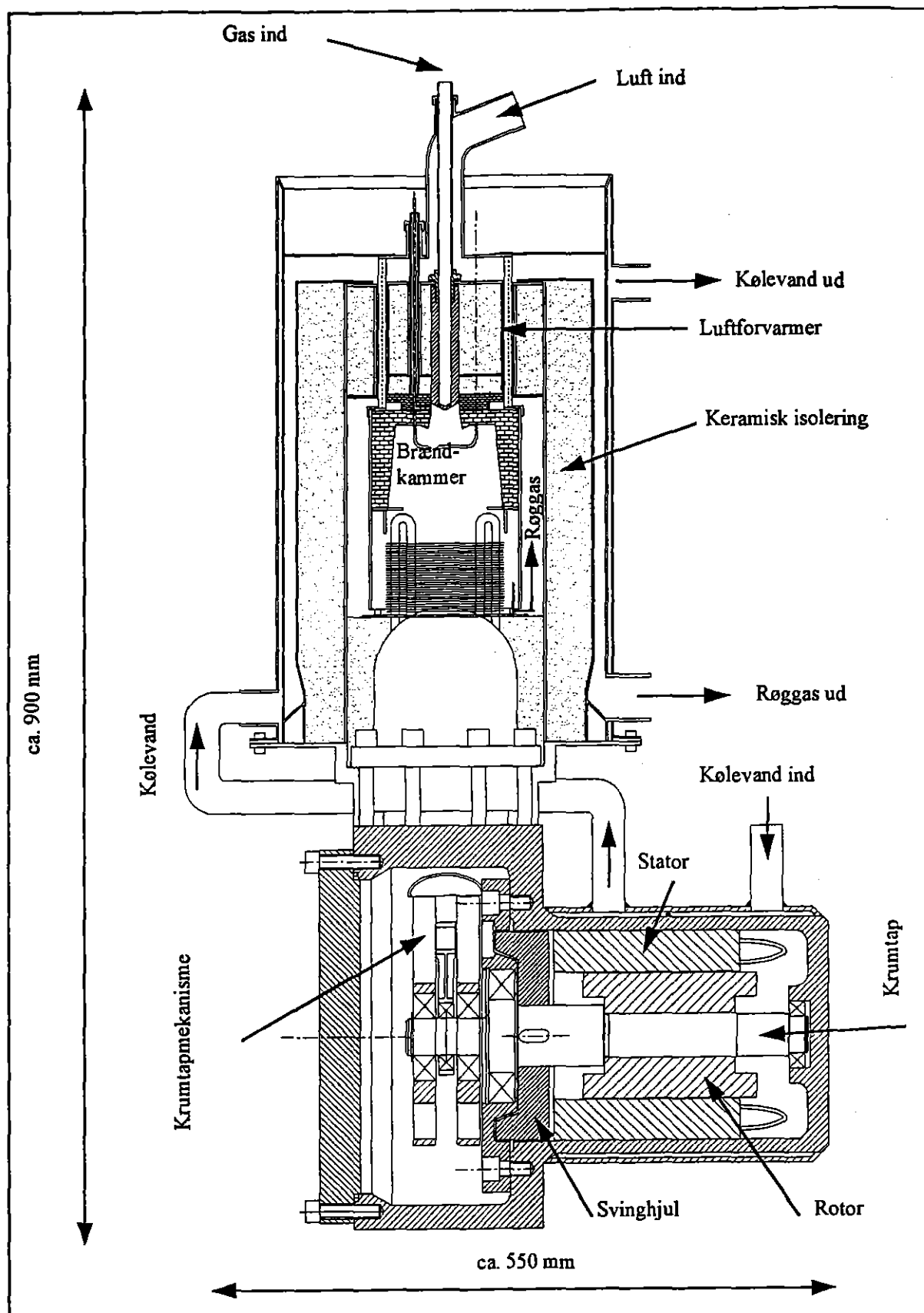
[1] Varaktighetsdiagram för värme och el i Malmö, Stockholm och Kiruna.

[2] Dansk stirlingmotor, 3kW.

Stirling, 3 kW_{el}
 Varaktighetsdiagram, värme och el
 Malmö, Stockholm, Kiruna

Bilaga 1





Samlingstegning af 3 kW Stirlingmotor. Her ses generatoren og brænderen med luftforvarmer.

97-03-13

RAPPORTFÖRTECKNING

SGC Nr	Rapportnamn	Rapport datum	Författare	Pris kr
001	Systemoptimering vad avser ledningstryck	Apr 91	Stefan Grudén TUMAB	100
002	Mikrokraftvärmeverk för växthus. Utvärdering	Apr 91	Roy Ericsson Kjessler & Mannerstråle AB	100
004	Krav på material vid kringfyllnad av PE-gasledningar	Apr 91	Jan Molin VBB VIAK	50
005	Teknikstatus och marknadsläge för gasbaserad minikraftvärme	Apr 91	Per-Arne Persson SGC	150
006	Keramisk fiberbrännare - Utvärdering av en demo-anläggning	Jan 93	R Brodin, P Carlsson Sydkraft Konsult AB	100
007	Gas-IR teknik inom industrin. Användnings- områden, översiktlig marknadsanalys	Aug 91	Thomas Ehrstedt Sydkraft Konsult AB	100
009	Läcksökning av gasledningar. Metoder och instrument	Dec 91	Charlotte Rehn Sydkraft Konsult AB	100
010	Konvertering av aluminiumsmältugnar. Förstudie	Sep 91	Ola Hall, Charlotte Rehn Sydkraft Konsult AB	100
011	Integrerad naturgasanvändning i tvätterier. Konvertering av torktumlare	Sep 91	Ola Hall Sydkraft Konsult AB	100
012	Odöranter och gasolkondensats påverkan på gasrörssystem av polyeten	Okt 91	Stefan Grudén, F. Varmedal TUMAB	100
013	Spektralfördelning och verkningsgrad för gaseldade IR-strålare	Okt 91	Michael Johansson Driftekniska Instit. vid LTH	150
014	Modern gasteknik i galvaniseringsindustri	Nov 91	John Danelius Vattenfall Energisystem AB	100
015	Naturgasdrivna truckar	Dec 91	Åsa Marbe Sydkraft Konsult AB	100
016	Mätning av energiförbrukning och emissioner före o efter övergång till naturgas	Mar 92	Kjell Wanselius KW Energiprodukter AB	50
017	Analys och förslag till handlingsprogram för området industriell vätskevärmning	Dec 91	Rolf Christensen ÅF-Energikonsult Syd AB	100
018	Skärning med acetylen och naturgas. En jämförelse.	Apr 92	Åsa Marbe Sydkraft Konsult AB	100

97-03-13

RAPPORTFÖRTECKNING

SGC Nr	Rapportnamn	Rapport datum	Författare	Pris kr
019	Läggning av gasledning med plöjteknik vid Glostorp, Malmö. Uppföljningsprojekt	Maj 92	Fallsvik J, Haglund H m fl SGI och Malmö Energi AB	100
020	Emissionsdestruktion. Analys och förslag till handlingsprogram	Jun 92	Thomas Ehrstedt Sydkraft Konsult AB	150
021	Ny läggningsteknik för PE-ledningar. Förstudie	Jun 92	Ove Ribberström Ove Ribberström Projekt. AB	150
022	Katalog över gastekniska FUD-projekt i Sverige. Utgåva 4	Aug 92	Svenskt Gastekniskt Center	150
023	Läggning av gasledning med plöjteknik vid Lillhagen, Göteborg. Uppföljningsproj.	Aug 92	Nils Granstrand m fl Göteborg Energi AB	150
024	Stumsvetsning och elektromuffsvetsning av PE-ledningar. Kostnadsaspekter.	Aug 92	Stefan Grudén TUMAB	150
025	Papperstorkning med gas-IR. Sammanfattning av ett antal FUD-projekt	Sep 92	Per-Arne Persson Svenskt Gastekniskt Center	100
026	Koldioxidgödsling i växthus med hjälp av naturgas. Handbok och tillämpn.exempel	Aug 92	Stig Arne Molén m fl	150
027	Decentraliserad användning av gas för vätskevärmning. Två praktikfall	Okt 92	Rolf Christensen AF-Energikonsult	150
028	Stora gasledningar av PE. Teknisk och ekonomisk studie.	Okt 92	Lars-Erik Andersson, Åke Carlsson, Sydkraft Konsult	150
029	Catalogue of Gas Techn Research and Development Projects in Sweden (På engelska)	Sep 92	Swedish Gas Technology Center	150
030	Pulsationspanna. Utvärdering av en demo-anläggning	Nov 92	Per Carlsson, Åsa Marbe Sydkraft Konsult AB	150
031	Detektion av dräneringsrör. Testmätning med magnetisk gradiometri	Nov 92	Carl-Axel Triumf Triumf Geophysics AB	100
032	Systemverkn.grad efter konvertering av vattenburen elvärme t gasvärme i småhus	Jan 93	Jonas Forsman Vattenfall Energisystem AB	150
033	Energiuppföljning av gaseldad panncentral i kvarteret Malörten, Trelleborg	Jan 93	Theodor Blom Sydkraft AB	150
034	Utvärdering av propanexponerade PEM-rör	Maj 93	Hans Leijström Studsvik AB	150

97-03-13

RAPPORTFÖRTECKNING

SGC Nr	Rapportnamn	Rapport datum	Författare	Pris kr
035	Hemmatankning av naturgasdriven personbil. Demonstrationsprojekt	Jun 93	Tove Ekeborg Vattenfall Energisystem	150
036	Gaseldade genomströmningsberedare för tappvarmvatten i småhus. Litteraturstudie	Jun 93	Jonas Forsman Vattenfall Energisystem	150
037	Verifiering av dimensioneringsmetoder för distributionsledningar. Litt studie.	Jun 93	Thomas Ehrstedt Sydkraft Konsult AB	150
038	NOx-reduktion genom reburning med naturgas. Fullskaleförsök vid SYSAV i Malmö	Aug 93	Jan Bergström Miljökonsulterna	150
039	Pulserande förbränning för torkändamål	Sep 93	Sten Hermodsson Lunds Tekniska Högskola	150
040	Organisationer med koppling till gasteknisk utvecklingsverksamhet	Feb 94	Jörgen Thunell SGC	150
041	Fältsortering av fyllnadsmassor vid läggning av PE-rör med lägningsbox.	Nov 93	Göran Lustig Elektro Sandberg Kraft AB	150
042	Deponigasens påverkan på polyetenrör.	Nov 93	Thomas Ehrstedt Sydkraft Konsult AB	150
043	Gasanvändning inom plastindustrin, handlingsplan	Nov 93	Thomas Ehrstedt Sydkraft Konsult AB	150
044	PA 11 som material ledningar för gasdistribution.	Dec 93	Thomas Ehrstedt Sydkraft Konsult AB	150
045	Metoder att höja verkningsgraden vid avgaskondensering	Dec 93	Kjell Wanselius KW Energiprodukter AB	150
046	Gasanvändning i målerier	Dec 93	Charlotte Rehn et al Sydkraft Konsult AB	150
047	Rekuperativ aluminiumsmältugn. Utvärdering av degelugn på Värnamo Pressgjuteri.	Okt 93	Ola Hall Sydkraft Konsult AB	150
048	Konvertering av dieseldrivna reservkraftverk till gasdrift och kraftvärmeprod	Jan 94	Gunnar Sandström Sydkraft Konsult AB	150
049	Utvecklad teknik för gasinstallationer i småhus	Feb 94	P Kastensson, S Ivarsson Sydgas AB	150
050	Korrosion i flexibla rostfria insatsrör (Finns även i engelsk upplaga)	Dec 93	Ulf Nilsson m fl LTH	150

97-03-13

RAPPORTFÖRTECKNING

SGC Nr	Rapportnamn	Rapport datum	Författare	Pris kr
051	Nordiska Degelugnsprojektet. Pilot- och fältförsök med gasanvändning.	Nov 93	Eva-Maria Svensson Glafo	150
052	Nordic Gas Technology R&D Workshop. April 20, 1994. Proceedings. (På engelska)	Jun 94	Jörgen Thunell, Editor Swedish Gas Center	150
053	Tryckhöjande utrustning för gas vid metallbearbetning -- En förstudie av GT-PAK	Apr 94	Mårten Wärnö MGT Teknik AB	150
054	NOx-reduktion genom injicering av naturgas i kombination med ureainsprutning	Sep 94	Bent Karll, DGC P Å Gustafsson, Miljökons.	100
055	Trevägs-katalysatorer för stationära gasmotorer.	Okt 94	Torbjörn Karlelid m fl Sydkraft Konsult AB	150
056	Utvärdering av en industriell gaseldad IR-strålare	Nov 94	Johansson, M m fl Lunds Tekniska Högskola	150
057	Läckagedetekteringssystem i storskaliga gasinstallationer	Dec 94	Fredrik A Silversand	150
058	Demonstration av låg-NOx-brännare i växthus	Feb 95	B Karll, B T Nielsen Dansk Gasteknisk Center	150
059	Marknadspotential naturgaseldade industriella IR-strålare	Apr 95	Rolf Christensen Enerkon RC	150
060	Rekommendationer vid val av flexibla insatsrör av rostfritt i villaskorstenar	Maj 95	L Hedeén, G Björklund Sydgas AB	50
061	Polyamidrör för distribution av gasol i gasfas. Kunskapssammanställning	Jul 95	Tomas Tränkner Studsvik Material AB	150
062	PE-rörs tålighet mot yttre påverkan. Sammanställning av utförda praktiska försök	Aug 95	Tomas Tränkner Studsvik Material AB	150
063	Naturgas på hjul. Förutsättningar för en storskalig satsning på NGV i Sverige	Aug 95	Naturgasbolagens NGV- grupp	150
064	Energieffektivisering av större gaseldade pannanläggningar. Handbok	Aug 95	Lars Frederiksen Dansk Gasteknisk Center	200
065	Förbättra miljön med gasdrivna fordon	Aug 95	Göteborg Energi m fl	150
066	Konvertering av oljeeldade panncentraler till naturgas. Handbok.	Nov 95	Bo Cederholm Sydkraft Konsult AB	150

97-03-13

RAPPORTFÖRTECKNING

SGC Nr	Rapportnamn	Rapport datum	Författare	Pris kr
067	Naturgasmodellen. Manual för SMHI:s program för beräkn av skorstenshöjder	Dec 95	Tingnert B, SKKB Thunell J, SGC	150
068	Energigas och oxyfuelteknik	Dec 95	Ingemar Gunnarsson Energi-Analys AB	150
069	CO ₂ -gödsling med avgaser från gasmotor med katalysator	Dec 95	Bent Karll Dansk Gasteknisk Center	150
070	Utvärdering av naturgasförbränning i porösa bäddar	Mar 96	Henric Larsson Lunds Tekniska Högskola	150
071	Utvärdering av naturgasdrivna IR-boostar i ugn för pulverlackering	Nov 95	Ole H Madsen Asger N Myken	150
072	Sammanställning av emissionsdata från naturgas-, biogas- o motorgasdrivna fordon	Jun 96	Hans-Åke Maltesson Svenskt Gastekniskt Center AB	150
073	Livslängdsbestämning för PE-rör för gasdistribution (EVOPE-projektet)	Jul 96	Tomas Tränkner Studsvik Material AB	100
074	Gasblandningar för fordonsdrift. Idéstudie.	Aug 96	Ola Hall Sydkraft Konsult AB	150
075	Gasbranschens miljöhandbok	Sep 96	Jörgen Thunell Svenskt Gastekniskt Center	500
076	Låg-NO _x -teknik för gasdrivna processer - dagsläge	Okt 96	Mikael Näslund, LTH	150
077	Karakterisering av emissioner från naturgasdrivna lastbilar inom LB 50-projektet	Dec 96	K-E Egeback Roger Westerholm	150
078	Uppvärmning med gas i svenska småhus - erfarenheter och framtida teknikval	Nov 96	Mikael Näslund, LTH	150
079	Handledn. för inst av gaseldade IR-värmare. Rådgivning, analys och genomförande	Jan 97	Pär Dalin, DITAB	150
080	Mikrokraftvärmeverk med Stirlingmotor	Jan 97	Tomas Nilsson Lunds Tekniska Högskola	150
081	Naturgasbaserad småskalig kraftvärme inom uppvärmningssektorn	Feb 97	Mats Nilsson LTH/MALMÖ	150
A01	Fordonstankstation Naturgas. Parallellkoppling av 4 st Fuel Makers	Feb 95	Per Carlsson Göteborg Energi	50

97-03-13

RAPPORTFÖRTECKNING

SGC Nr	Rapportnamn	Rapport datum	Författare	Pris kr
A02	Uppföljning av gaseldade luftvärmare vid Arlövs Sockerraffinaderi	Jul 95	Rolf Christensen Enercon RC	50
A03	Gasanvändning för färjedrift. Förstudie (Endast för internt bruk)	Jul 95	Gunnar Sandström Sydkraft Konsult	0
A04	Bussbuller. Förslag till mätprogram	Jun 95	Ingemar Carlsson Ecotrans Teknik AB	50
A05	Värmning av vätskor med naturgas - Bakgrund till faktablad	Okt 95	Rolf Christensen Enercon RC	50
A06	Isbildning i naturgasbussar och CNG-system (Endast för internt bruk)	Nov 95	Volvo Aero Turbines Sydgas, SGC	0
A07	Större keramisk fiberbrännare. Förstudie	Jan 96	Per Carlsson Sydkraft Konsult	50
A08	Reduktion av dioxin, furan- och klorfenoler vid avfallsförbränning	Maj 96	H Palmén, M Lampinen et al Helsingfors Tekniska Högskola	50
A09	Naturgas/mikrovågsteknik för sintring av keramer	Maj 96	Anders Röstin, KTH	50
A10	NOx-reduktion genom naturgasinjektion o reburning. Demoprojekt på Knudmoseverket	Apr 96	Jan Flensted Poulsen Völund R & D Center	50
A11	Direktorkning av socker med naturgas (Endast för internt bruk)	Jul 96	Rolf Christensen Enercon RC	0
A12	Uppföljning, installation av gaspanna med avgaskondensor, kv Hornblåsaren 6, Råå	Sep 96	Bo Cederholm Sydkraft Konsult AB	50



Svenskt Gastekniskt Center AB

S-205 09 MALMÖ
Telefon: 040-24 43 10
Telefax: 040-24 43 14

KFS AB, LUND