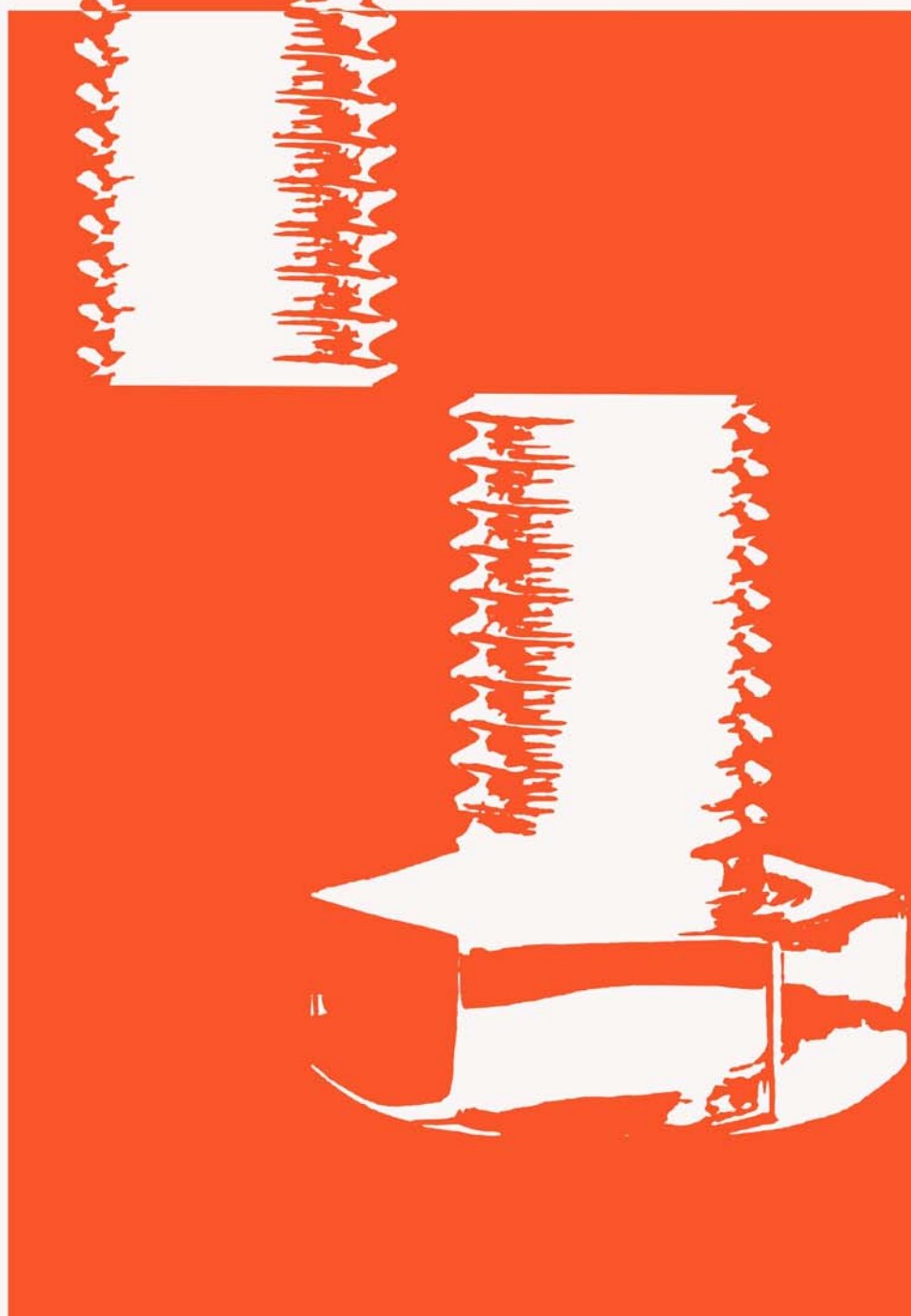


Maskinmesterprojekt

Energioptimering på Viborg Kraftvarmeværk







Forord

De studerende ved Århus Maskinmester Skole skal udarbejde et afgangprojekt der forløber over 14 uger. De studerende har inden for disse 14 uger, fået 194 skematimer disponeret, til udarbejdelse af dette projekt. Formålet med afgangprojektet er, at videreudvikle de studerendes evner til løsning af opgaver, der er relevante for maskinmestre, vedrørende projektering, drift samt vedligehold af tekniske anlæg og installationer.

Projektet skal som minimum indeholde maskin-, el- og automationsteknik. Der udover er der mulighed for at inddrage andre fagområder efter ønske. Der er for strukturering og styring af projektet udarbejdet en tid tidsplan¹. Tidsplanen er udarbejdet således, at det er muligt at have en overordnet styring med de enkelte delopgaver.

I projektførelsen har vi været i tæt samarbejde med personalet på Viborg Kraftvarmeværk som har fungeret som sparringspartnere under projektførelsen. Vi takker for samarbejdet til hele personalet på værket, med en særlig tak til Maskinmester Bent Taasti, Maskinmester Jan Korsager og elektriker Morten Møller. Ligeledes takker vi Scandinavian Energy Group, for udførlig viden deling og svar på tekniske spørgsmål.

Århus Maskinmesterskole 23. april 2004



Jonas Munch Nielsen



Søren Kvist



Thomas Henriksen

¹ Bilag 1 - Tidsplan





Indholdsfortegnelse

1. INDLEDNING	9
2. ANLÆGSBESKRIVELSE	11
2.1 DRIFTSFORHOLD	13
3. PROBLEMANALYSE	15
4. PROBLEMAFGRÆNSNING	17
5. PROBLEMFOMULERING	17
6. LØSNINGSFORSLAG	19
6.1 AFGRÆNSNING AF LØSNINGSFORSLAG	19
6.2 INDLEDNING TIL LØSNINGSFORSLAG	19
6.3 FORUDSÆTNINGER FOR BEREGNINGER	19
6.3.1 Fjernvarmepris uden varmepumpe	21
6.4 LØSNINGSFORSLAG 1 (ABSORPTIONSVARMEPUMPE)	25
6.4.1 Fjernvarmepris med absorptionsvarmepumpe	29
6.5 LØSNINGSFORSLAG 2 (KOMPRESSIONSVARMEPUMPE)	33
6.5.1 Fjernvarmepris med kompressionsvarmepumpe	37
6.6 VALG AF LØSNING	41
7. ØKONOMI	43
7.1 TILBAGEBETALING AF VARMEPUMPEN	43
7.2 USIKKERHEDSVURDERING	45
7.2.1 Forventninger til fremtidens elpriser	47
7.3 KOMMENTAR TIL ØKONOMI	49
8. OPGAVER AFGRÆNSNING TIL TEKNISKE DELEMNER	51
9. MASKINTEKNIK	53
9.1 VARMEPUMPENS PLACERING I DET EKSISTERENDE ANLÆG	55
9.1.1 Fjernvarmesystemet	57
9.1.1.1 Placering før fjernvarmeeconomiser	59
9.1.1.2 Placeret mellem LT- og HT-kondensatoren	66
9.1.1.3 Placeret i strengen til fjernvarmeeconomiser	78
9.1.1.4 Kommentarer til varmepumpens placering i fjernvarmestrengen	80
9.1.2 Dampsystemet	82
9.1.2.1 Udregning af mistet el-effekt pga. damp til generatoren	82
9.1.2.2 Kommentarer til varmepumpens placering i dampstrengen	84
9.1.3 Kølevandssystemet	86
9.2 VARMEPUMPENS OPBYGNING	88
9.2.1 Gennemgang af varmepumpen og dens komponenter	90
9.2.2 Generator	90
9.2.3 Kondensator	92
9.2.4 Fordamper	92
9.2.5 Absorberer	92
9.2.6 Purgpumpe	92
9.3 KREDSPROCESSEN FOR VARMEPUMPEN	94
9.4 GEOGRAFISK PLACERING AF VARMEPUMPEN	96





10. AUTOMATION	102
10.1 STYRESYSTEM PÅ VIBORG KRAFTVARMEVÆRK	104
10.2 KRAV TIL REGULERING AF VARMEPUMPEN OG TILHØRENDE KOMPONENTER	106
10.3 KRAV TIL OVERVÅGNING AF VARMEPUMPEN	108
10.4 EKSTERNE KOMPONENTER	110
10.4.1 Komponentkølesystem.....	112
10.4.2 Fjernvarmesystem.....	114
10.4.3 Dampsystem.....	116
10.5 INTERNE KOMPONENTER.....	118
10.5.1 Komponentliste	120
10.6 KOMMUNIKATION MELLEM PLC OG SRO-ANLÆG	122
10.7 START/STOP PROCEDURE	124
10.8 OVERVÅGNING AF VARMEPUMPEN	126
10.9 KOMMENTARER TIL AUTOMATION	128
11. INSTALLATION	130
11.1 PLACERING I DEN EKSISTERENDE INSTALLATION	132
11.2 PRAKTISK OPBYGNING AF EL-FORSYNING	134
11.3 BELASTNING AF TAVLE BFF	135
11.3 BELASTNING AF TAVLE BFF	136
11.5 DIMENSIONERING AF GRUPPELEDERE SAMT BESKYTTELSE	144
11.6 SELEKTIVITET MELLEM BESKYTTELSESKOMPONENTER	154
11.7 ABSORPTIONSPUMPENS KRAV TIL EL-FORSYNINGEN	156
11.8 EFTERLEVELSE AF ANBEFALET SPÆNDINGSFALD	158
11.9 RISIKOVURDERING	160
11.9.1 Beskyttelse mod direkte berøring (BDB).....	162
11.9.2 Beskyttelse mod indirekte berøring (BIB).....	164
11.9.3 Kortslutningsbeskyttelse.....	166
11.10 KOMMENTAR TIL INSTALLATION	168
12. KONKLUSION	170
13. LITTERATURLISTE	172
14. KILDEKRITIK	174
15. BILAGSOVERSIGT	176





1. Indledning

Dette projekt er udarbejdet i samarbejde med Viborg Kraftvarmeværk, der har ytret ønske om energioptimering på deres spildvarme. Energoptimeringen må ikke resultere i en væsentlig forringelse af den nuværende el-produktion.

Viborg Kraftvarmeværk stod færdigt i 1996 og ejes af Viborg kommune. Værket er naturgasfyret. Der produceres både el og varme hvilket bevirker en høj virkningsgrad, til gavn for både økonomi og miljø. Den daglige drift, foretages af de 11 personer, der er ansat på værket - heraf 4 driftsmestre samt en elektriker.

Varmen der produceres, sælges til Energi Viborg som er et distributionselskab. Selskabet sørger for at varmen bliver distribueret ud til forbrugerne, samt den endelige afregning med disse.

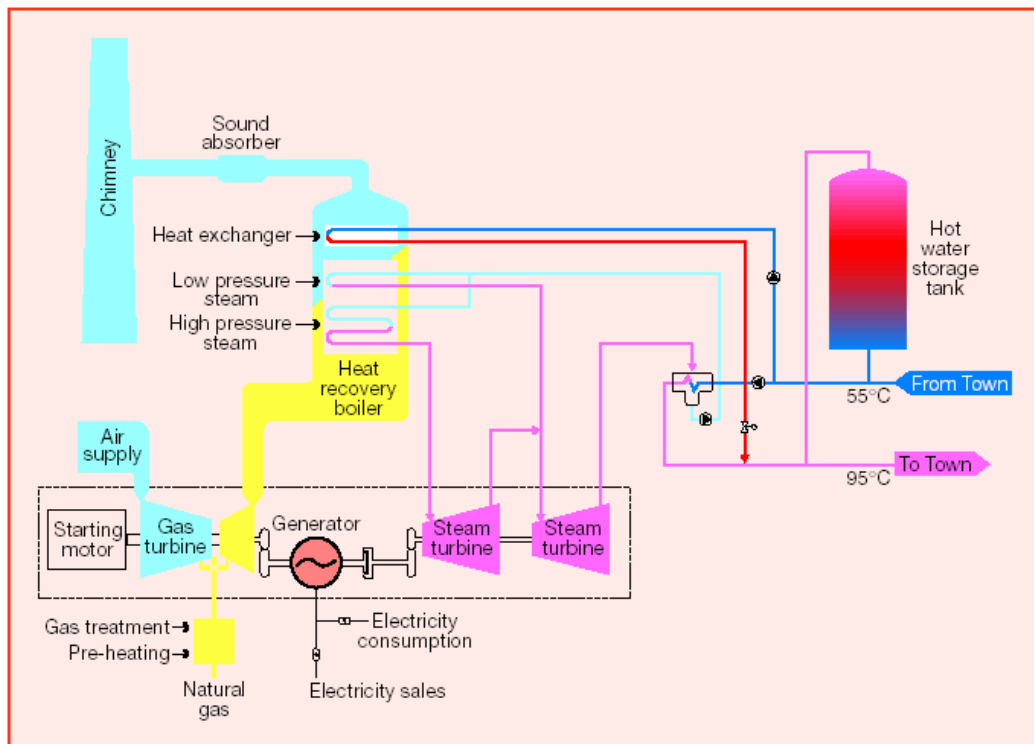
Den el der produceres på kraftvarmeværket, afsættes gennem det eksisterende el-net.

De seneste ændringer i markedssituationen, der har åbnet dørene for det frie el-marked, og den stigende opmærksomhed på grønne værdier, øger presset på alle landes udbydere af el og varme. Dette har bevirket at værker som Viborg Kraftvarmeværk, har rettet mere fokus på intern optimering for at kunne være konkurrencedygtige.

På grund af værkets målsætning om større konkurrencedygtighed, ønsker man at rette fokus på procesanlæggets virkningsgrad. Fra ledelsen og driftspersonalets side, ønsker man en minimering af spildvarmen fra anlægget. Gennemførelse af en sådan minimering vil medvirke til en forbedret virkningsgrad.

På nuværende tidspunkt ligger værkets totalvirkningsgrad på 88 %². En optimering af spildvarmen, vil kunne medføre en forbedring af værkets totalvirkningsgrad. Et indgreb vil i nogle tilfælde kunne resultere i forringelse af andre processer. Derfor vil en, kræve en samlet vurdering og beregning af indgrebets virkning på det resterende procesanlæg.

² Bilag 3 - varmebalance



Figur 1 - Oversigt over Viborg kraftvarmeværk



2. Anlægsbeskrivelse

Viborg Kraftvarmeværk er opbygget omkring en naturgasfyret 42 MW gasturbine, af mærket General Electric. Gasturbinen trækker, via et gear, en generator som producerer el-effekt. På figur 1 ses en oversigt over værket. Røggassen har en temperatur på ca. 540 °C når det forlader gasturbinen, og ledes herfra til en udstødskegel, der producerer damp til en 15 MW dampturbine. Denne trækker ligeledes, via et gear, samme generator som gasturbinen.

Naturgassen forvarmes med ventilationsluft fra turbinehuset (billerhuset) via en varmeveksler. Dette sikrer, at der ikke er kondensat i naturgassen, når det indfyres i gasturbinen. Ventilationsluften fra billerhuset har en temperatur på ca. 95 grader. Om vinteren bruges en del af denne luft til et anti-isningssystem. Dette system hindrer isdannelse på luftindtaget. Det er dog ikke ret mange dage om året dette system anvendes. Når anti-isningssystemet ikke anvendes ledes luften ud i det fri.

Dampturbinen er opbygget omkring en højtryksdel og en lavtryksdel. Dampturbinen forsynes med damp fra udstødskegel, der producerer højtryksdamp med en temperatur på ca. 510 °C ved 65 bar, og lavtryksdamp med en temperatur på ca. 218°C ved 3,1 bar. Når dampen forlader højtryksturbinen har den en temperatur på ca. 98 °C ved 1,1 bar, og når dampen forlader lavtryksturbinen har den en temperatur på ca. 73 °C ved 0,7 bar. Dampene ledes til 2 kondensatorer, der er kølet med fjernvarmevand med en temperatur på ca. 45 °C. Her kondenseres først dampen fra lavtryksturbinen hvorved fjernvarmevandet opvarmes til 70 °C, dernæst kondenseres dampen fra højtryksturbinen og fjernvarmevandet opvarmes hermed til 98 °C.

Fjernvarmevandet ledes til en række mindre fordelerstationer der er opbygget med rene naturgas fyrede kedler. Disse stationer kan indkobles i spidsbelastnings- og nødsituationer (primært om vinteren), stationerne leverer fjernvarme til Viborg By og omegn. Byen kan ikke modtage hele produktionen af fjernvarme, hvorfra overskudsvarmen lagres i en akkumuleringstank på 19.000 m³. Der trækkes fra denne tank når værket ikke er i drift.

Der er efter udstødskeglen, som producerer damp til dampturbinen, indsat en fjernvarmeeconomiser (heat exchanger) der nedsætter røggastemperaturen fra ca. 120 °C til ca. 70 °C. For målet med denne er at sikre en højere virkningsgrad for værket.

Smøreolie, stativer, pakkåser m.m. køles af et lukket vandfyldt komponentkølesystem. Vandet afkøles på taget i store luftkølede kondensatorer. Afkølingsgraden bestemmes ved hjælp af en række blæsere der automatisk startes og stoppes efter behov. Vandet afkøles med 6-8 °C. Setpunktet for det afkølede vand varierer efter årstiden. Om vinteren ligger setpunktet på 23 °C og om sommeren på ca. 30 °C. Der er et konstant flow i kølesystemet, hvilket vil sige, at der er konstant tryk i systemet. Dette sikrer, at de forskellige komponentkølere altid har et konstant flow.





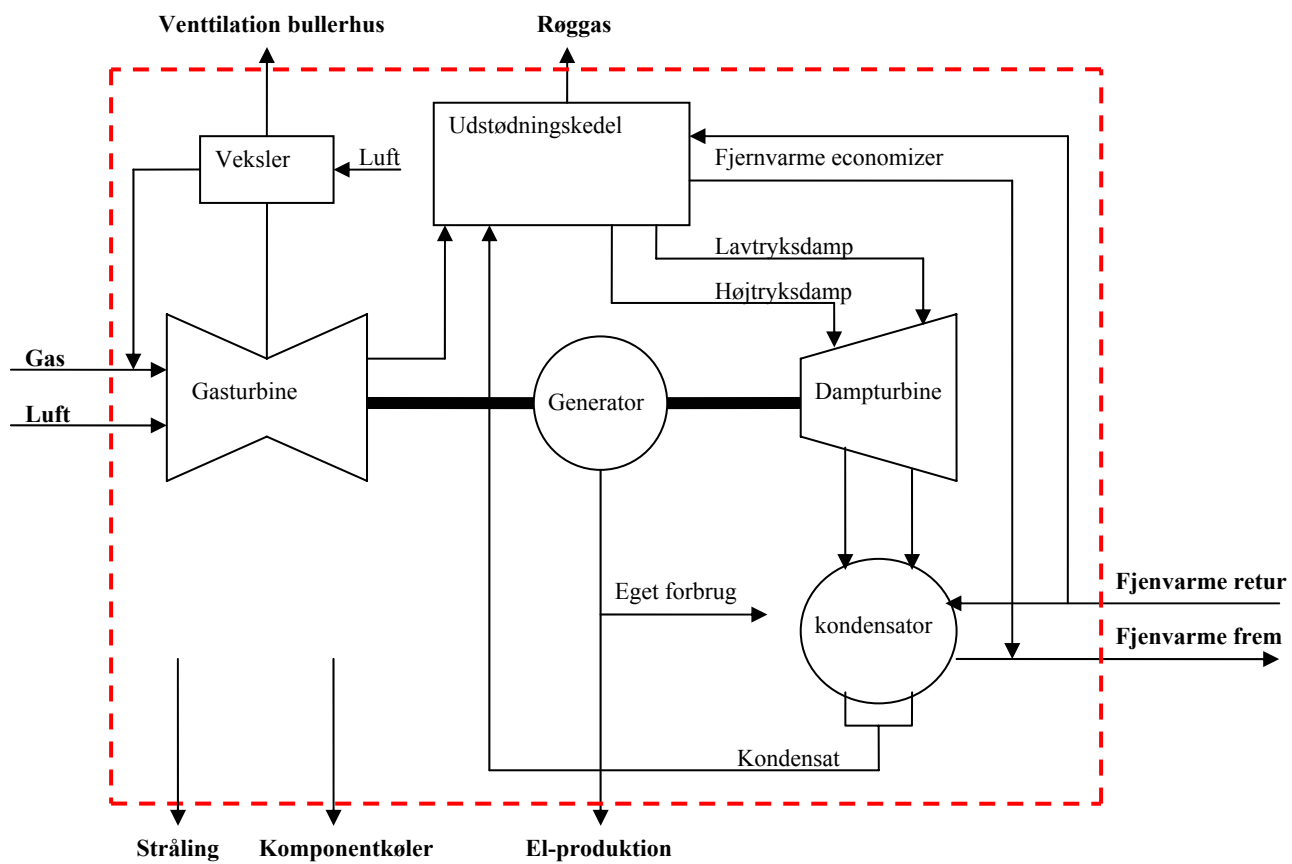
2.1 Driftsforhold

Grundet værkets opbygning og dimensionering kan det, på denne type anlæg, kun lade sig gøre at producere el og fjernvarme samtidig. Man er derfor tvunget til, at kunne afsætte sin kondensationsvarme i kondensatoren for, at kunne producere el. Anlægget kører under drift, om det er i kortere eller længere perioder, ubetinget på 100 % belastning.

På Viborg Kraftvarmeværk tilrettelægges man driften ud fra at producere så billig en fjernvarme som muligt, da man på værket ikke skal skabe et overskud, men levere billig fjernvarme til forbrugerne.

Dette betyder, at Kraftvarmeværket fylder sin fjernvarmebuffertank på de mest hensigtsmæssige tidspunkter for salg af el. Eksempelvis vil man en varm sommerdag, lægge den relative korte driftsperiode, der skal til for at fylde buffertanken til det ønskede niveau, på det tidspunkt, hvor efterspørgslen af el er størst. Og som modstykke kan man i vinterhalvåret komme ud for døgn drift, for at kunne levere nok fjernvarme til forbrugerne.

Fordi man i vinterperioden skal bruge forholdsvis længere tid på at sikre tilstrækkelig med varme til forbrugerne, ligger der en forskydning af årets 5000 driftstimer i den koldere periode af året. Derfor har vi, i de efterfølgende beregninger, taget udgangspunkt i en driftssituation, der på årsbasis giver et så realistisk og brugbart resultat som muligt.



Figur 2 – Skitse taget fra varmebalance bilag 3



3. Problemanalyse

Der er 4 steder på den udregnede varmebalance³, hvor der er tab af betydning, som vi har valgt at se nærmere på.

- Stråling 3,5MW
- Komponentkølere 2MW
- Røggastab 9,5MW
- Ventilationsluft fra turbinen 0,9MW

Strålingstabet er meget svært at gøre noget ved, idet diverse rør og anlægskomponenter er godt isoleret. Det er derfor ikke let at foretage en optimering her.

Komponentkølesystemet afkøler vandet med 6-8 °C. Da setpunktet for det afkølede vand varierer efter årstiden. Om vinteren ligger setpunktet på ca. 23 °C og om sommeren på ca. 30 °C. Det er ikke umiddelbart muligt, at anvende denne energimængde ved pågældende temperatur. Energimængden der afsættes i kondensatorerne er i midlertidig konstant sommer og vinter ca. 2 MW, fordi det er den samme mængde energi der skal fjernes.

Røggastabet er stort, hvilket skyldes den store røggasmængde. For at mindske tabet skal temperaturen eller mængden sænkes. Luftmængden kan ikke ændres idet turbinen er dimensioneret til denne mængde. Temperaturen på røggassen, når den forlader fjernvarmeeconomiseren, er ca. 70 grader. Hvis der køles yderligere på røgen har det indflydelse på skorstenstrækket og man vil ikke risikere at vanddampen fortættes i skorstenen, idet det kan forårsage tæring, og der ikke er noget muligheder for at bortlede den fortættede vanddamp. I dag er temperaturen på røggasen allerede så lav, at der lokalt dannes vand visse steder, hvilket har forårsaget tæring, da anlægget er dimensioneret til en røggas med en afgangstemperatur på 120 °C. Det er derfor ikke umiddelbart muligt at sænke temperaturen på røggassen.

Ventilationsluften fra huset omkring turbinen har en temperatur på ca. 100 °C. Om vinteren bruges en del af denne luft til anti-icing-systemet, dette system hindrer isdannelse på luftindtaget. Det er dog ikke ret mange dage om året dette system bruges. En del af ventilationsluften bruges også til opvarmning af naturgassen, og resten afblæses på taget (ca. 0,9 MW). Der er ikke nogen mulighed for at sænke ventilationsmængden fra bullerhuset, idet den energi der skal bortledes er konstant. Sænkes ventilationsmængden vil det medføre en temperaturstigning i huset, som ikke er acceptabel. Hvis der skal optimeres på denne energimængde skal den derfor anvendes andet steds. En mulighed er, at placere en veksler i ventilationsluften og overføre en del af energien til f.eks. returjernvarmevandet, kølevandet eller kondensatforvarmning.

³ Bilag 3 – varmebalance





4. Problemafgrænsning

Ud fra de fire omtalte tab i problemanalysen er der 2 steder, hvor der umiddelbart kan sættes ind med hensyn af minimering af tabene, nemlig komponentkølerne og ventilationsluften fra bullerhuset.

Vi vælger kun at koncentrere os om tabet fra komponentkølerne på de ca. 2 MW, da dette tab er langt det største af de 2 mulige optimeringsmuligheder. Varmen fra komponentkølerne bruges på nuværende tidspunkt ikke i den eksisterende proces, i modsætning til ventilationsluften fra bullerhuset, der nogle gange bruges til anti-icing-systemet. Viborg Kraftvarmeværk har desuden et ønske om, at det er her vi koncentrerer vores indsats.

5. Problemformulering

Problemet er at finde en teknisk mulig metode til optimering/anvendelse af spildvarmen fra komponentkølerne. Metoden må ikke resultere i en højere afregningspris på fjernvarmen.





6. Løsningsforslag

6.1 Afgrænsning af løsningsforslag

Løsningsforslagene vil kun perifert belyse virkemåde, installation, samt indvirkning på det resterende procesanlæg.

Der vil under de økonomiske beregninger blive taget højde for hjælpekomponenternes elforbrug samt manglende el-produktion, som installation af varmepumpen vil medføre.

Hvorvidt den valgte løsning vil være rentabel, for Viborg Kraftvarmeværk, vil ikke have indflydelse på den resterende del af projektet.

6.2 Indledning til løsningsforslag

Vi har valgt at udarbejde forskellige løsningsforslag, til genindvinding af spildvarmen fra komponentkølerne. Forslagene vil tage udgangspunkt i en stationær driftstilstand⁴, valgt af driftspersonalet på Viborg Kraftvarmeværk. Dette skyldes, at der ikke var tilstrækkelig med dokumentation, således at der kunne udregnes en gennemsnits driftstilstand for værket.

For at opfylde kravene til gennemførelse af afslutningsprojektet, skal der foretages et valg af en løsning, som vil blive benyttet i den resterende del af projektet. Valget af løsning, vil være det løsningsforslag, som giver den billigste fjernvarmepris set i forhold til den pris fjernvarmen kan produceres til i dag. Derfor er der i de nedenstående udregninger beregnet hvilken pris fjernvarmen kan produceres til i dag.

6.3 Forudsætninger for beregninger

Beregningerne er baseret på de variable omkostninger, som er gaspris, elpris og fjernvarmepris. De faste udgifter til drift og afskrivning af værket er ikke medtaget. Der er i alle udregninger, taget udgangspunkt i varmebalancen bilag 3, den stationære driftssituation på bilag 2 og 8.

Beregningerne for gas afgift foretages med udgangspunkt i el-virkningsgradsmetoden⁵, der benyttes på Viborg Kraftvarmeværk.

Bestemmelsen indebærer, at der betales afgift af hele brændselsforbruget reduceret med en brændselsmængde, der svarer til den fremstillede mængde el delt med 0,65.

Værker, der anvender denne metode, skal beregne afgift fritagelsen som en brøk, hvor tælleren består af energiindholdet i den solgte el-effekt divideret med 0,65, og hvor nævneren består af det totale energiindhold i det indfyrede brændsel.

⁴ Bilag 2 – stationær driftssituation

⁵ Bilag 5 og 6 - beregningsmetode til gas afgift – pris oplyst af Viborg Kraftvarmeværk





I beregningerne er der taget udgangspunkt i følgende priser:

- 1 MWh el koster i gennemsnit ca. 250kr.⁶
- Gas uden afgift inkl. lager og transport koster ca. 1,39 (kr./Nm³)⁷
- Gas med afgift inkl. lager og transport koster ca. 3,61 (kr./Nm³)⁷

6.3.1 Fjernvarmepris uden varmepumpe

Der er taget udgangspunkt i de beregninger der er lavet over varmebalancen for Viborg Kraftvarmeværk⁸.

I det efterfølgende vil vi beregne hvad det koster at lave 1 MWh fjernvarme ved driften i dag:

$$\dot{v}_{gas} = 3,13 \text{ Nm}^3/\text{s}$$

$$P_{\text{Indfyret}} \text{ effekt: } 123,9 \text{ MW}$$

$$P_{el} = 52,5 \text{ MW}$$

$$P_{\text{fjernvarme}} = 57,6 \text{ MW}$$

$$P_{\text{egetforbrug til elværket}} = 0,62 \text{ MW}$$

Først udregnes virkningsgraderne:

$$\text{El virkningsgrad} = \frac{P_{el} - P_{\text{egetforbrug til elværket}}}{P_{\text{indfyret}}} = \frac{51,88 \text{ MW}}{123,9 \text{ MW}} = 0,419$$

$$\text{Fjernvarmevirkningsgrad} = \frac{P_{\text{fjernvarme}}}{P_{\text{indfyret}}} = \frac{57,6 \text{ MW}}{123,9 \text{ MW}} = 0,465$$

Herefter udregnes den pris, der skal betales for gassen i den aktuelle driftssituation:

$$\text{Pris for gas: } \dot{v}_{gas} \cdot \text{gas pris uden afgift} = 3,13 \text{ Nm}^3 / \text{s} \cdot 1,39 \text{ kr./Nm}^3 = 4,35 \text{ kr./s}$$

Gasafgiften:

$$1 - \frac{El \text{ virkningsgrad}}{0,65} \cdot \dot{v}_{gas} \cdot \text{gas afgift} = 1 - \frac{0,419}{0,65} \cdot 3,13 \text{ Nm}^3 / \text{s} \cdot 2,22 \text{ kr./Nm}^3 = 2,47 \text{ kr./s}$$

$$\text{Pris inkl. afgift for gas: } 4,35 + 2,47 = 6,82 \text{ kr./s}$$

⁶ Bilag 2 samt vedlagte Cd-rom – oversigt fra gennemsnitspriser fra Nord Pool

⁷ Bilag 6 – priser oplyst af Viborg Kraftvarmeværk

⁸ Bilag 3 - varmebalance





Indtægt for salg af el til en pris af 250 kr./MWh:

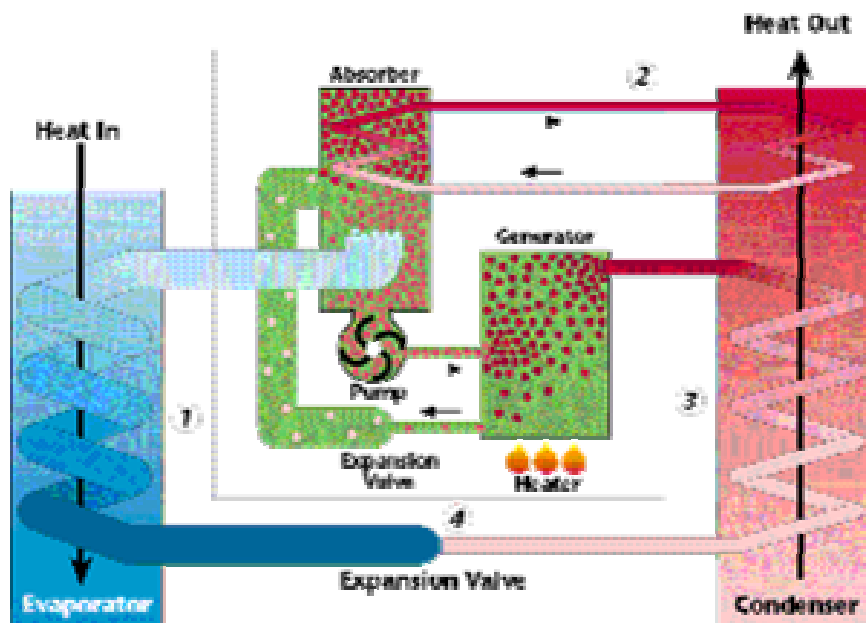
$$\text{El-intægt: } P_{\text{el}} \cdot \text{el pris} = \frac{51,88 \text{ MW}}{3600 \text{ s}} \cdot 250 \text{ kr./MWh} = 3,60 \text{ kr./s}$$

$$\text{Pris for fjernvarme: Pris for gas - el indtægt} = 6,82 - 3,60 = 3,21 \text{ kr./s}$$

Pris for 1 MWh fjernvarme:

$$\frac{1 \text{ MWh} \cdot 3600 \text{ s}}{P_{\text{fjernvarme}}} \cdot \text{pris for fjernvarme} = \frac{3600 \text{ MJ}}{57,6 \text{ MJ}} \cdot 3,21 \text{ kr} = \underline{\underline{200,88 \text{ kr}}}$$

Denne pris vil være sammenligningsgrundlag for de priser vi udregner i løsningsforslagene.



Figur 3 - Absorptionsvarmepumpe



6.4 Løsningsforslag 1 (Absorptionsvarmepumpe)

Absorptionsvarmepumpen (figur 3) er termisk drevet, hvilket betyder at varme bliver tilført for at drive denne. Varmen kan komme fra flere energikilder her kan bl.a. nævnes gasbrænder, dampanlæg eller varmt procesvand. Absorptionsanlægget virker ved, at en væske absorberer dampen af det drivmiddel, som anvendes. Som drivmiddel anvendes der typisk vand eller ammoniak. Som absorbent kan der for eksempel anvendes litiumbromid eller vand alt efter drivmiddelstypen.

Anlægget er opbygget af flere forskellige komponenter, herunder generator, kondensator, fordamper og absorber. Virkemåden for anlægget er at drivmidlet (vand eller ammoniak) overrisles kølevandet. Dette sker i en vakuumbeholder, hvorved drivmidlet fordamper. Denne damp bliver absorberet af absorbenten (litiumbromid eller vand), hvorved der sker en mætning af absorbenten. For at denne igen kan opnå evnen til at absorbere, skal den absorberede væske udskilles. Dette sker i generatoren, hvor man ved hjælp af varme udskiller drivmidlet fra absorbenten. Drivmidlet fordamper og man kan på denne måde lede dette til kondensatoren, hvor det kan bringes på væskeform igen. Absorbenten bliver tilbage i generatoren hvorefter man leder det koncentrerede stof tilbage til absorbereren.

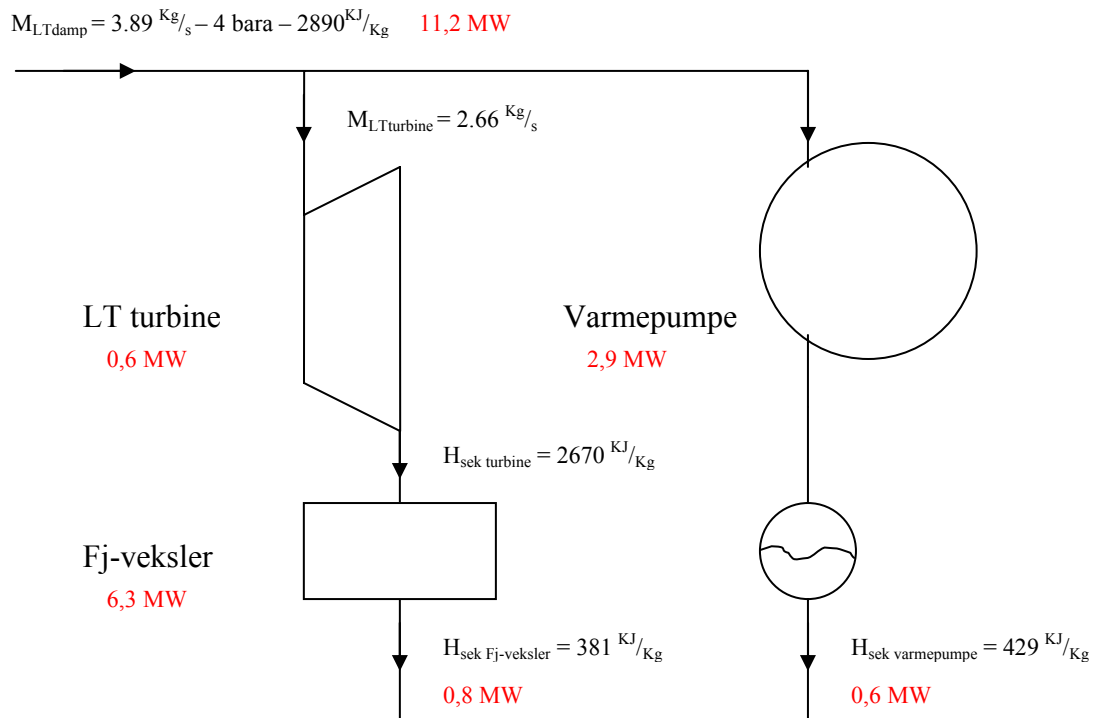
I dette løsningsforslag vil vi kigge nærmere på driften af absorptionsvarmepumpen, drevet ved hjælp af lavtryksdamp. Muligheden for at benytte lavtryksdamp til drift af generatoren, er tilstede, idet der bliver genereret damp til driften af dampturbinen.

På nuværende tidspunkt har vi kontakt med YORK, der producerer varmepumper. Vi har taget kontakt til YORK, der til løsning af problemet leverer en ”Single effect steam driven absorption chiller” model nummer YIA-D02⁹, som har en køleeffekt på 2170 KW. Valget af YIA-D02 frem for en af de andre modeller, ligger til grunde i den varmebalance¹⁰ som vi lavede. Her blev følgende klarlagt:

1. Varmebalancens udregninger viste, at der blev fjernet 2000 kW fra komponentkølerne. En køleeffekt på 2170 KW passer til den mængde energi der skal bortledes fra komponentkølevandet.
2. Det eksisterende anlæg vil efter installering af varmepumpen stadig være anvendelig, således at det er muligt ved driftnedbrud/vedligehold at bruge dette. Det vil muliggøre køling af komponentvandet, uanset om belastningen bliver mindre eller højere end den beregnede effekt.

⁹ Se vedlagt Cd-rom - YORK Datablad

¹⁰ Bilag 3 - varmebalance



Figur 4 - Skitse over flow og effekter ved installering af varmepumpe



Dampen forlader kedlen med et tryk på ca. 3 bar overtryk og ca. 215 °C, hvorfra det ledes til lavtryksturbinen¹¹. Lavtryksturbinen producerer en relativt lille mængde el i forhold til højtryksturbinen, og man mener ikke fra Viborg Kraftvarmeværks side, at der skulle være nogle komplikationer ved at benytte damp til driften af absorptionsvarmepumpens generator.

Lavtryksdampen ledes gennem absorptionsvarmepumpens generator, som overfører effekten, der skal bruges til at drive varmepumpen. Som nævnt i afsnit 9.1.2.1 er den tilførte effekt større end køleeffekten, dette skyldes varmepumpen lave COP.

¹¹ Bilag 8 – stationær driftssituation (se udskrift af skærbillede 1)





6.4.1 Fjernvarmepris med absorptionsvarmepumpe

Dampen til at drive generatoren med tages fra udstødsledens lavtryksdel, hvilket vil betyde at denne mængde damp ikke bliver ledt til LT-turbinen, hvilket i sidste ende vil betyde, at den producerede el-effekt vil blive lavere.

Den samlede producerede el-effekt vil falde pga. mistet damp, lavere kondensatortryk og forbrug til cirkulationspumper, det er listet nedenunder:

$P_{\text{varmepumpe}}$ udregnet i varmebalance bilag 3

P_{el} den producerede el effekt i dag: 52,8 MW fra bilag 3

$P_{\text{mistet el}}$ mistet el pga. mindre damp til turbinen: 256 KW fra afsnit 9.1.2.1

$P_{\text{højeretryk}}$ i turbine = 72 kW fra afsnit 9.1.1.1

P_{pumpe} cirkulationspumpe har en effekt på: 10,5 KW fra bilag 24

$P_{\text{egetforbrug}}$ varmepumpen har et egetforbrug på: 18 kW¹²

$P_{\text{blæsere}}$ sparet effekt på 4 blæsere på taget: 4x3=12 kW¹³

$P_{\text{egetforbrug til elværket}} = 0,62 \text{ MW}$

$$P_{\text{elny1}} = P_{\text{el}} - P_{\text{mistet el}} - P_{\text{højeretryk}} - P_{\text{pumpe}} - P_{\text{egetforbrug}} - P_{\text{egetforbrug til elværket}} + P_{\text{blæsere}}$$
$$P_{\text{elny1}} = 52,8 - 0,256 - 0,072 - 0,0105 - 0,018 - 0,62 + 0,012 = 51,54 \text{ MW}$$

Produceret fjernvarmemængde stiger pga. varmepumpen:

$$P_{\text{fjernvarmeny1}} = P_{\text{fjernvarme}} + P_{\text{varmepumpe}} = 57,6 + 2 = 59,6 \text{ MW}$$

Først udregnes virkningsgraderne:

$$\text{El virkningsgrad} = \frac{P_{\text{elny1}}}{P_{\text{indfyret}}} = \frac{51,54 \text{ MW}}{123,9 \text{ MW}} = 0,416$$

$$\text{Fjernvarmevirkningsgrad} = \frac{P_{\text{fjernvarme}}}{P_{\text{indfyret}}} = \frac{59,6 \text{ MW}}{123,9 \text{ MW}} = 0,481$$

¹² Se vedlagt Cd-rom – YORK datablad

¹³ Bilag 3 – varmebalance





Herefter udregnes den pris der skal betales for gassen:

$$\text{Pris for gas: } \dot{V}_{\text{gas}} \cdot \text{gas pris uden afgift} = 3,13 \text{ Nm}^3/\text{s} \cdot 1,39 \text{ kr./Nm}^3 = 4,35 \text{ kr./s}$$

Gasafgiften:

$$1 - \frac{E_{\text{virkningsgrad}}}{0,65} \cdot \text{gasmængde} \cdot \text{afgift} = 1 - \frac{0,416}{0,65} \cdot 3,13 \text{ Nm}^3/\text{s} \cdot 2,22 \text{ kr./Nm}^3 = 2,50 \text{ kr./s}$$

$$\text{Pris inkl. afgift for gas: } 4,35 \text{ kr./s} + 2,50 \text{ kr./s} = 6,85 \text{ kr./s}$$

Indtægt for salg af el til en pris på 250 kr./MWh:

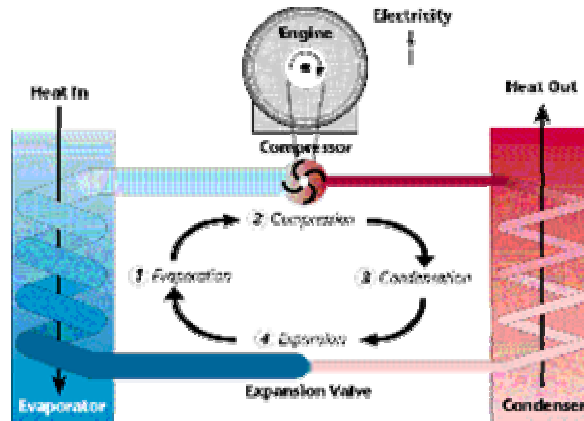
$$\text{El-intægt: } MWh \cdot \text{el pris pr. MWh} = \frac{51,36 MW}{3600s} \cdot 250 \text{ kr./MWh} = 3,58 \text{ kr./s}$$

Prisen for 1 MWh fjernvarme kan nu udregnes:

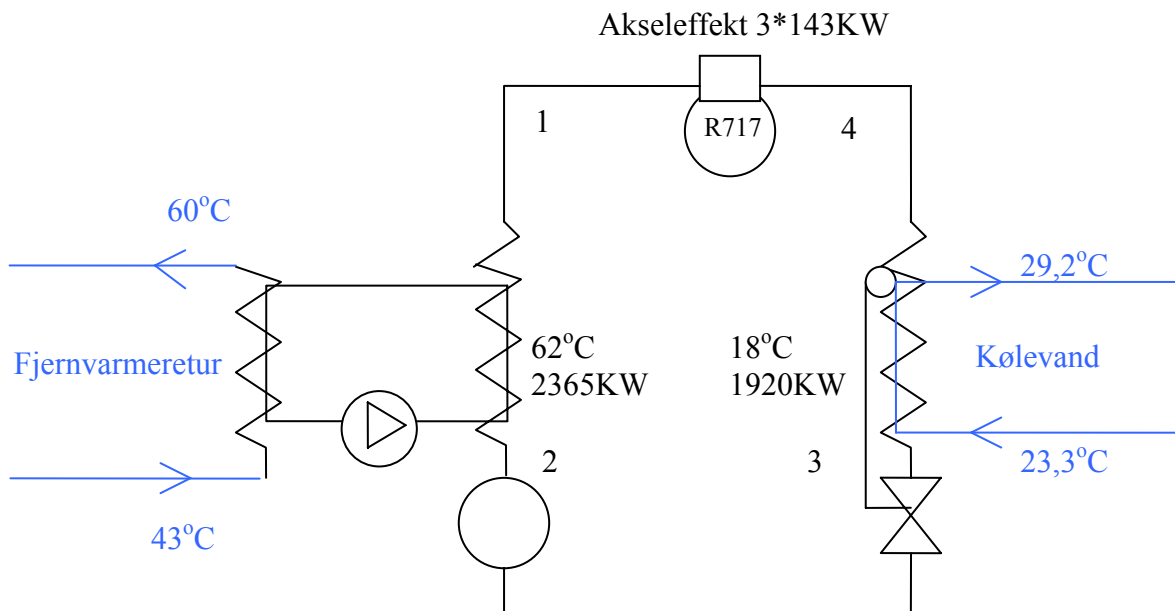
$$\text{Pris for fjernvarme: } \text{Pris for gas} - \text{el indtægt} = 6,85 \text{ kr./s} - 3,58 \text{ kr./s} = 3,27 \text{ kr./s}$$

Pris for 1 MWh fjernvarme:

$$\frac{1MWh \cdot 3600s}{P_{\text{fjernvarmenyl}}} \cdot \text{pris for fjernvarme} = \frac{3600 \text{ MJ}}{59,6 \text{ MJ}} \cdot 3,27 \text{ kr./s} = \underline{\underline{197,37 \text{ kr}}}$$



Figur 5 - Varmepumpe



Figur 6 - Skitse over effekter og temperaturer ved installering af varmepumpe



6.5 Løsningsforslag 2 (Kompressionsvarmepumpe)

Denne type varmepumpe er opbygget omkring en kompressor, en ekspansionsventil, og to varmevekslere (kondensator og fordamper) og disse komponenter er forbundet ved hjælp af et lukket rørsystem (se figur 5 og 6). I dette rørsystem cirkulerer der et kølemiddel. I fordamperen er temperaturen på kølemidlet (væske) lavere end den temperatur varmekilden har. Dette bevirker, at der sker en varmeveksling fra den højværdige varme til kølemidlet, som herved fordamper. Derefter bliver kølemiddeldampene komprimeret ved hjælp af kompressoren, og kølemidlet får derved et højere tryk og en højere temperatur. Derefter bliver den varme damp ledt til kondensatoren, hvorved dampen kondenserer og frigiver varme til omgivelserne. Til sidst ekspanderer dampen, gennem en ekspansionsventil, og bliver til væske i fordamperen, hvorved processen kan begynde igen.

Kompressoren i et sådant arrangement drives af forskellige maskiner, det kan f.eks. være en elmotor, en gasmotor eller en dieselmotor.

Vi har fået Flemming Schultz fra YORK køleteknik til at udarbejde et løsningsforslag med en varmepumpe, der er drevet ved hjælp af stempelkompressorer. Løsningsforslaget skal kun betragtes som et overslag og de effekter, temperaturer og priser der er opgivet er cirka størrelser¹⁴.

Virkemåde.

Anlægget består af 3 stk. 8 cylindret stempelkompressorer en fordamper og en kondensator. Anlæggets kølemiddel er ammoniak.

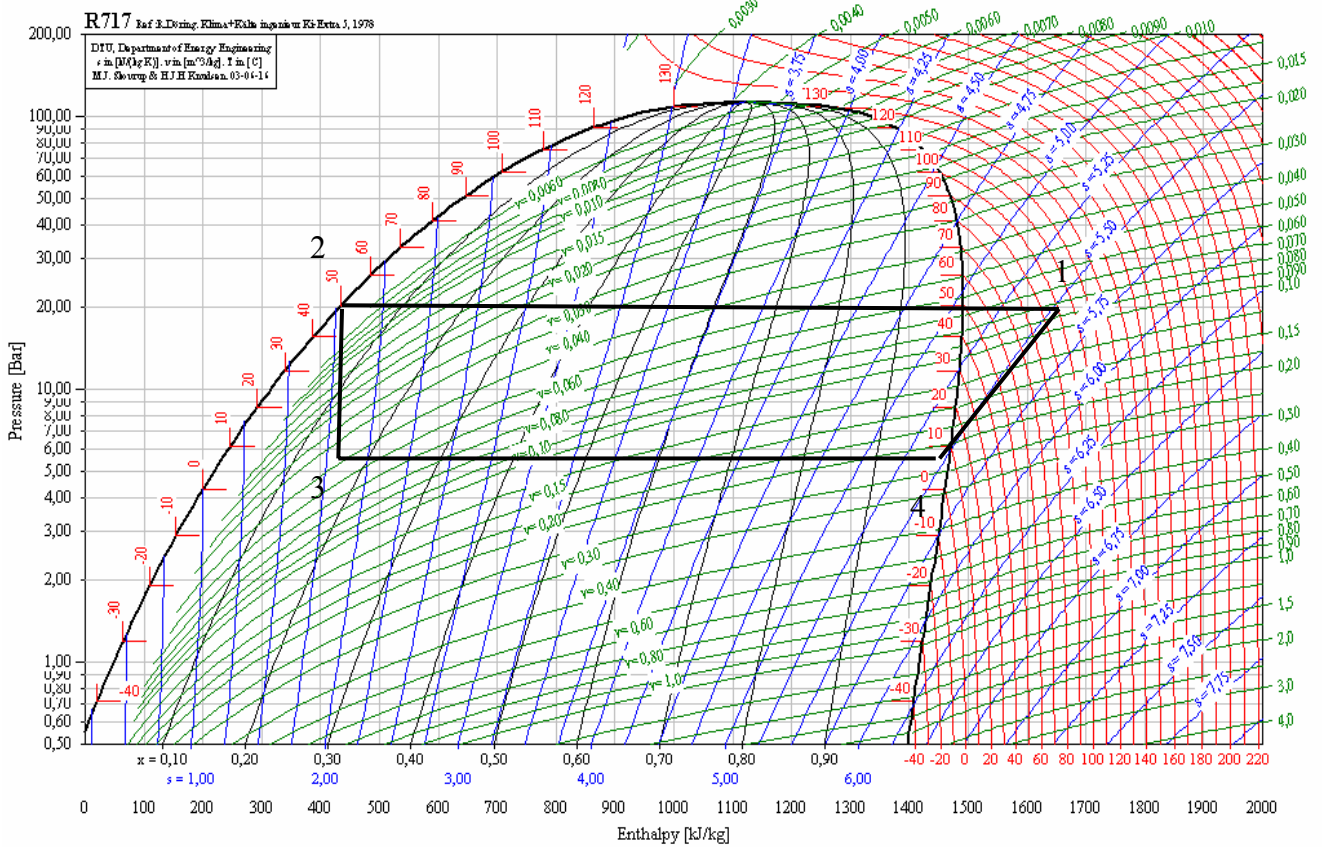
Kompressorerne komprimerer gassen fra fordamperen til et højere tryk, hermed stiger temperaturen i dampen. Dampen afkøles i en kondensator som er kølet med fjernvarmevand. For at sikre, at der ikke kommer ammoniak over i fjernvarmevandet, er der indsat en ekstra veksler. Effekten fra fordamperen og en del af effekten fra kompressorerne bliver hermed overført til fjernvarmereturvandet. Kølemidlet fordamper i fordamperen, hvorved kølemidlet optager en energimængde, som den får fra kølevandet.

Anlægget er dimensioneret så fordampningstemperaturen ligger lavere end den temperatur kølevandet ønskes nedkølet til. Kondenseringstemperaturen skal ligge højere end temperaturen på returjernvarmevandet for at kondenseringseffekten kan overflyttes til fjernvarmereturvandet.

Kompressorerne er vandkølet med et separat system med behandlet vand. Den effekt der fjernes her genbruges ikke, men den er heller ikke ret stor set i forhold til den samlede effekt på størrelsen af anlægget.

Elmotorernes samlede effektoptag vil blive $3 \cdot 160 \text{KW} = 480 \text{KW}$. Vedligeholdelseskostninger er opgivet fra YORK's side til at være ca. 60.000 kr. om året.

¹⁴ Bilag 4 – tilbud fra YORK



Figur 7 - Kredsprocessen indtegnert i log-ph diagram



Forløbet i et log ph-diagram er indtegnet på figur 7, det giver et billede af hvilke temperaturer og tryk anlægget kommer til at arbejde under. Det er kun en skitse og der er ikke taget højde for underkøling, overhedning, volumetrisk virkningsgrad osv.





6.5.1 Fjernvarmepris med kompressionsvarmepumpe

I dette løsningsforslag skal der bruges elektricitet til at drive de 3 kompressorer. Følgende data der brug ved udregningerne.

P_{el} den producerede el effekt i dag: 52,8 MW fra bilag 3

P_{mistet} el til kompressoren = 0,480 fra bilag 4

P_{pumpe} cirkulationspumpe har en effekt på: 10,5 KW fra bilag 24

$P_{blæsere}$ sparet effekt på 4 blæserne på taget: $4 \times 3 = 12 \text{ kW}^{15}$

$P_{højeretryk}$ i turbine = Denne ses der bort fra, da vi i forrige afsnit så at den kun udgjorde 72 kW og nu kun vil udgøre væsentlig mindre pga. den væsentlige mindre tilførte effekt til fjernvarmevandet før kondensatorerne.

$P_{køleanlæg}$ findes på bilag 4

$P_{agetforbrug}$ til elværket = 0,62 MW

Den samlede producerede el-mængde vil falde pga. forbrug til kompressorer og cirkulationspumper:

$$P_{elny2} = P_{el} - P_{mistet} - P_{pumpe} - P_{agetforbrug \text{ til elvær}} + P_{blæsere}$$

$$P_{elny2} = 52,5 - 0,480 - 0,0105 - 0,62 + 0,012 = 51,40 \text{ MW}$$

$$P_{fjernvarmeny2} = P_{fjernvarme} + P_{køleanlæg} = 57,6 \text{ MW} + 2,3 \text{ MW} = 59,6 \text{ MW}$$

Først udregnes virkningsgraderne:

$$EL \text{ virkningsgrad} = \frac{P_{elny2}}{P_{indfyret}} = \frac{51,41 \text{ MW}}{123,9 \text{ MW}} = 0,415$$

$$Fjernvarme \text{ virkningsgrad} = \frac{P_{fjernvarmeny2}}{P_{indfyret}} = \frac{59,6 \text{ MW}}{123,9 \text{ MW}} = 0,481$$

Herefter udregnes den pris der skal betales for gassen:

$$\text{Pris for gas: indfyret mængde} \cdot \text{gas pris uden afgift} = 3,13 \text{ Nm}^3 / \text{s} \cdot 1,39 \text{ kr./Nm}^3 = 4,35 \text{ kr./s}$$

Pris for gas afgift:

$$1 - \frac{EL \text{ virkningsgrad}}{0,65} \cdot \dot{v}_{gas} \cdot \text{afgift} = 1 - \frac{0,415}{0,65} \cdot 3,13 \text{ Nm}^3 / \text{s} \cdot 2,22 \text{ kr./Nm}^3 = 2,51 \text{ kr./s}$$

$$\text{Pris inkl. afgift for gas: } 4,35 + 2,51 = 6,86 \text{ kr./s}$$

¹⁵ Bilag 3 - varmebalancen





Indtægt for salg af el til en pris af 250kr/MWh:

$$\text{El-intægt: Produceret el} \cdot \text{el pris} = \frac{51,40 \text{ MW}}{3600 \text{ s}} \cdot 250 \text{ kr} = 3,57 \text{ kr./s}$$

Prisen for 1000KWh fjernvarme kan nu udregnes:

$$\text{Pris for fjernvarme: Pris for gas} - \text{el indtægt} = 6,79 - 3,57 = 3,29 \text{ kr./s}$$

Pris for 1 MWh fjernvarme:

$$\frac{1 \text{ MWh} \cdot 3600 \text{ s}}{\text{produceret mængde}} \cdot \text{pris for fjernvarme} = \frac{3600 \text{ MJ}}{59,6 \text{ MJ}} \cdot 3,29 \text{ kr./s} = \underline{\underline{198,63}}$$





6.6 Valg af løsning

Med udgangspunkt i de valgte forudsætninger i afsnit 6.2 kan følgende konkluderes således et valg kan træffes.

Besparelse ved at bruge absorptionsvarmepumpen:

Pris for 1MWh uden varmepumpe - Pris for 1MWh med absorptionsvarmepumpen

Besparelse = 200,87 kr. – 197,37 kr. = 3,50 kr./MWh

Besparelse ved at bruge kompressionsvarmepumpen:

Pris for 1MWh uden varmepumpe - Pris for 1MWh med kompressionsvarmepumpen

Besparelse = 200,87 kr. – 198,63 kr. = 2,24 kr./MWh

Disse 2 parametre kan ikke alene ligge til grund for valget af løsningen. Vi har undersøgt priserne for de 2 varmepumper begge koster implementeret ca. 2,7 millioner kr^{16 17}. Hertil skal lægges en pris for implementering med det eksisterende anlæg, det vil efter vores vurdering næsten være det samme for begge løsninger. Vedligeholdsmkostninger er den sidste parameter vi vil medtage i vores valg af løsning. Vi kan ikke få oplyst hvad vedligeholdsmkostningerne til en absorptionsvarme ligger på, men da der ikke er nogen bevægelige dele udover cirkulationspumperne, vil vedligeholdsmkostningerne være lave¹⁸. Løsningsforslaget med kompressorerne er sat til 60.000 kr./år. I alt vil det tale for løsningsforslaget med absorptionsvarmepumpen.

Vores løsningsvalg bliver derfor løsningsforslag 1 med absorptionsvarmepumpen drevet ved hjælp af damp, da besparelsen for denne er størst.

¹⁶ Bilag 4 – tilbud fra YORK

¹⁷ Prisen for absorptionsvarmepumpen er oplyst fra YORK til at ligge omkring 1250 kr./kW. Denne pris er eks. montering. Vi har også fået et tilbud fra SEG som findes i bilag 27, dette tilbud er inkl. montering og her er prisen 1450 kr./kW.

¹⁸ Se vedlagt Cd-rom - Vedligehold





7. Økonomi

7.1 Tilbagebetaling af varmepumpen

Viborg Kraftvarmeværk har en kalkulations tilbagebetalingstid på 12 år for nyinvesteringer. Vi vil undersøge om varmepumpen kan tilbagebetales inden for denne tidsramme.

Den årlige producerede fjernvarmeeffekt er oplyst fra Viborg Kraftvarme til 288.000 MWh. Denne mængde vil ligge til grundlag for beregninger omkring tilbagebetalingstiden.

Besparelsen ved løsningsforslaget er 3,50 kr./MWh

Besparelsen på årsbasis kan derfor udregnes: $288.000 \text{ MWh} \cdot 3,50 \text{ kr./MWh} = \underline{\underline{1008297 \text{ kr.}}}$

Fra denne pris skal trækkes vedligeholdelseskostningerne, men da vi ikke kender disse og de efter vores mening er minimale har vi tilladt os at se bort fra disse.

Det kan udregnes hvor lang tid der vil tage et tilbage investeringen for varmepumpen, varmepumpen koster implementeret (kr./MW * MW) $1250 \cdot 2000 = 2.500.000 \text{ kr.}$

Hertil skal tillægges en pris på 500.000 kr. for implementering på Viborg Kraftvarmeværk, denne pris er en anslået pris.

Kalkulationsrenten sættes til 4 %.

År	Betalingsstrøm	Diskuteret (4%)	Nutidsværdi	Total
0	kr. 3.000.000,00	0	- kr. 3.000.000,00	- kr. 3.000.000,00
1	kr. 1.008.297,00	0,962	kr. 969.981,71	- kr. 2.030.018,29
2	kr. 1.008.297,00	0,925	kr. 932.674,73	- kr. 1.097.343,56
3	kr. 1.008.297,00	0,889	kr. 896.376,03	- kr. 200.967,53
4	kr. 1.008.297,00	0,855	kr. 862.093,94	kr. 661.126,41

Af skemaet ses det at, det vil tage 4 år at tilbagebetale investeringen af en varmepumpe. Herefter og resten af værkets levetid vil investeringen give et overskud.





7.2 Usikkerhedsvurdering

Ved genindvinding af komponentkølevandet, vil den producerede fjernvarmeeffekt stige under den samme driftssituation. Dette vil medføre en bedre totalvirkningsgrad for anlægget (dermed skal kunderne ikke betale så meget for fjernvarmen), idet den tidligere ikke udnyttede spildvarme nu ledes ind i processen.

I forudsætninger for beregningerne antog vi den producerer fjernvarmemængde på årsbasis til at være konstant. I de koldeste perioder af året kan Viborg Kraftvarmeværk ikke producere den mængde fjernvarme der er behov for, derfor spædes der op med varme fra mindre gasfyret stationer. Hvis varmepumpen implementeres vil den større producerede varmemængde betyde en besparelse af driften på de små varmeværker. Dette indgår ikke i vores beregninger, men vil påvirke dem i en positiv retning.

Som kalkulationsrente har vi valgt 4%. Denne er opgivet fra Viborg Kraftvarme. Ændrer denne sig kan det have indflydelse på tilbagebetalingstiden.

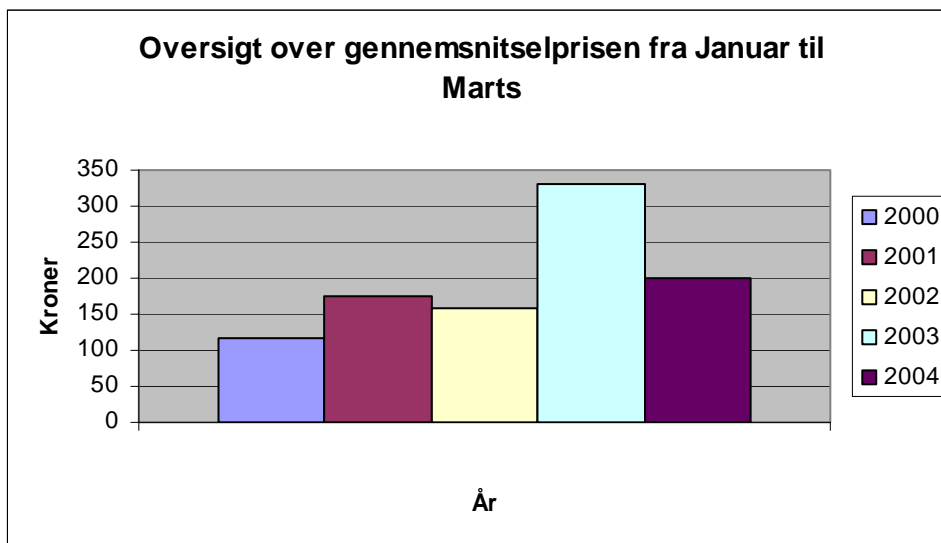
Der er en vis usikkerhed omkring fremtidens elpriser, når det frie el-marked bliver en realitet. Dette indgår ikke i vores beregninger. Falder el-prisen er det muligt afgiften på naturgassen falder tilsvarende, ellers er fjernvarmebrugeren nødt til at betale en højere pris for fjernvarmen. Alt dette er undersøgt i afsnittet 7.2.1 omkring fremtidens elpriser.

Som omtalt ovenfor er der mange ting der har indflydelse på økonomien. I beregningerne har vi valgt at holde de fleste parametre konstante for at kunne få nogle beregninger der kan sammenlignes. Vi er kommet frem til en tilbagebetalingstid på ca. 4 år.

Vores beregninger af den mistede el-effekt er teoretiske udregnet. Om de vil passe i virkeligheden er svært for os at vurdere. Den mest usikre beregning er den el-effekt der mangler pga. af den manglende damp til LT-turbinen. Den har vi udregnet til 256 kW. Det er muligt at undersøge om denne effekt passer ved et praktisk forsøg. LT-turbinen modtager i dag ca. 4 kg damp pr./s. Det er muligt at bypasse denne mængde damp uden om LT-turbinen og direkte i kondensatoren. Dette vil give en mindre produceret el mængde. Sammenlignes denne med den producerede mængde før dampen bliver smidt i kondensatoren, har man en klar indikation af hvor meget el de 4 kg lavtryksdamp producerer. Ud fra dette kan man lave forholdsregning og udregne for meget den producerede el-effekt vil falde pga. de 1,21 kg/s damp der udtages til varmepumpen.

På bilag 25 har vi udregnet hvad forskellige elpriser og ændring af den mistede el-effekt betyder for den pris der kan produceres fjernvarme til på Viborg Kraftvarmeværk. Hvis den mistede el-effekt stiger med 50 % i forhold til vores beregninger vil det være tvivlsomt om den kan betale sig at investere i varmepumpen. Falder den mistede el-effekt derimod mindre end vi har beregnet, vil investeringen i en varmepumpe blive endnu mere fordelagtig.

Fremtidens elpriser har stor indflydelse på varmepumps rentabilitet, falder el-prisen vil det bedre kunne betale sig, at producere mere fjernvarme på bekostning af en mindre el-produktion. Stiger el-prisen derimod vil det på et tidspunkt ikke længere være rentabelt at bruge varmepumpen.



Figur 8 – Gennemsnitspriser fra Nord Pool



7.2.1 Forventninger til fremtidens elpriser

Efter at økonomi- og erhvervsminister Bendt Bendtsen har indgået en aftale med V, K, S, DF, SF, RV og KD om at staten overtager det fremtidige ejerskab af det overordnede elnet i Danmark¹⁹, og opførelsen af to nye vindmølleparker²⁰ i Danmark samt at al elektricitet sælges til markedsvilkår²¹. Har vi været nødt til at undersøge, hvilke betydning dette vil få, for Viborg kraftvarmeværk, med hensyn til den fremtidige elpris. For at se om det stadig vil være rentabelt at anskaffe en ny varmepumpe.

På nuværende tidspunkt bliver Viborg Kraftvarmeværk betalt for at levere el til Eltra som aftager den aftagepligtige produktion efter § 57 i elforsyningsloven, dette sker efter en tretarif ordning. Denne ordning betyder at elpriserne er inddelt i lavlast, højlast og spidslast. Ved lavlast er beregningsprisen lav og højest ved spidslast. Med den nye aftale betyder det at denne tarifordning bortfalder ved udgangen af 2004 og Viborg kraftvarmeværk vil herefter blive betalt efter den aktuelle markedspris som findes på Nord Pool²².

Med hensyn til elprisen på Nord Pool, er denne dels styret af vejret (nedbør). Grunden til dette er at der i Norge, Sverige og Finland produceres el ved hjælp af vandkraft, dette vil betyde at et år med lidt nedbør ikke vil fylde de vand søer som findes i de pågældende lande, resultatet af dette vil være at elprisen på Nord Pool vil stige. Dette var der tydelige eksempler på i januar, februar og marts 2003, da elprisen på Nord Pool var ca. dobbelt så høj som normalt som det fremgår af søjlediagrammet²³.

Umiddelbart er forventningerne til den fremtidige elpris at der kommer flere udbydere på markedet, og dette vil få den gennemsnitlige elpris til at falde²⁴.

¹⁹ Bilag 18 – aftalen af 29. marts 2004 om fremtidssikring af energinfrastrukturen.

²⁰ Bilag 19 – aftalen af 29. marts 2004 vedr. vindenergi og decentral kraftvarme mv.

²¹ Bilag 20 – aftalen af 29. marts 2004 med Elfor om kapitalforhold i elsektoren og sikring af uafhængighed i den overordnede infrastruktur på elområdet.

²² Den nordiske el-børs. (www.nordpool.dk)

²³ Bilag 23 – oversigt over gennemsnitspriser

²⁴ Bilag 21 – de økonomiske virkninger af energiaftalerne.





7.3 Kommentar til økonomi

Der er mange faktorer der spiller ind på rentabiliteten ved investering i en varmepumpe. I usikkerhedsvurderingen er indflydelsen af elprisen og usikkerheden på vores beregninger belyst. Stiger elpriserne i fremtiden, påvirker det rentabiliteten i negativ retning.

Vores udregninger beror på ren teori, hvorvidt dette giver et helt realistisk billede af den mistede el-effekt er usikkert, teorien tager ikke hensyn til alle faktorer. Derfor vil det være en god ide, at udføre et forsøg hvor LT-dampen ledes udenom turbinen, og på denne måde kan det ses, hvor meget el-effekt LT-dampen genererer. Stiger den mistede el-effekt mere end beregnet, påvirker det rentabiliteten negativt.

Med de udgangspunkter der er taget i beregningerne, vil investeringen i en varmepumpe kunne tilbagebetales i løbet af 4 år. Dette vil ændre sig, hvis der rykkes ved de ovenstående parameter, og kan betyde det ikke er muligt, at tilbagebetale investeringen i løbet af 12 år.





8. Opgave afgrænsning til tekniske delemner

Efter valget af løsningsforslag 1 (absorptionsvarmepumpen), ønsker vi, at belyse flere af de tekniske delemner, som vedrører løsningen af en fysisk installation. Forskellige delemner under maskinteknik, automation samt installation, vil efter udvælgelse blive nærmere belyst. Det vil på grund af tidsfaktoren for projektet, ikke være muligt at gennemgå alle problemstillinger detaljeret. Derfor er udvælgelsen foretaget med udgangspunkt, i den overordnede forståelse af projektets omfang. Emnerne vil begrænse sig til følgende.

Maskinteknik

Der vil i dette afsnit blive behandlet forskellige løsningsmodeller med hensyn til valg af placering i det eksisterende anlæg. Desuden vil den specifikke virkemåde for den valgte varmepumpe blive beskrevet, herunder flow, temperaturer, tryk og effekter. Herefter vælges yderligere hjælpekomponenter, som er nødvendige for at en implementering er mulig.

Automation

Det eksisterende styresystem på Viborg Kraftvarmeværk vil blive belyst. Vi vil i automationsdelen af dette projekt, fortrinsvis beskæftige os med de nye reguleringskomponenter der skal til for, at varmepumpen kan implementeres i det eksisterende system. Varmepumpen leveres med en PLC, det vil blive belyst hvilke komponenter den skal styre. Da denne PLC skal kommunikere med det eksisterende system, vil der blive givet forslag til hvordan dette kan lade sig gøre.

Installation

I afsnittet installation vil vi tage udgangspunkt i en specifik varmepumpe, og dimensionere den nødvendige installation til denne og dens hjælpekomponenter. Dette vil medføre undersøgelse af hvor vidt der er mulighed for yderlig belastning på den eksisterende tavle, samt af den praktiske opbygning af udvidelsen. Installationen vil blive udført efter gældende IEC regler fra Stærkstrømsbekendtgørelsen afsnit 6.





9. Maskinteknik

I afsnittet omhandlende maskinteknik, vil der blive taget udgangspunkt i opgaveafgrænsningen for projektet. Under løsningsforslaget er der kort blevet gennemgået, virkemåde for to forskellige typer varmepumper.

I denne del af maskinafsnittet ønsker vi, at gå yderligere i dybden med en række emner som vi finder fyldestgørende til at give et sigende indblik i installeringen af en varmepumpe.

- Varmepumpens placering i systemet
- Dampsystemet
- Fjernevarmesystemet
- Kølevandssystemet
- Varmepumpens opbygning og virkemåde
- Varmepumpens fysiske placering

Der vil i beskrivelse af varmepumpen samt i udregningerne blive taget udgangspunkt i en aktuel varmepumpe fra YORK af typen 7D2²⁵.

Værdier der vil blive udregnet under dette afsnit vil ligge til grund for beregninger foretaget i afsnit 7 omhandlende økonomi.

²⁵ Se vedlagt Cd-rom – YORK datablad





9.1 Varmepumpens placering i det eksisterende anlæg

I dette afsnit ønsker vi klarlagt, hvor placeringen af varmepumpen er mest hensigtsmæssig. Disse betragtninger er taget med udgangspunkt i den mest optimale driftssituation, som giver bedst driftsøkonomi og som er fysisk mulig.

Den effekt der tilføres varmepumpen fra komponentkølerne og generatoren skal overføres til fjernvarmesystemet. Det vil bevirke andre flow og temperaturer end dem der er i dag. Det vil muligvis bevirke en reduktion af el-produktionen. I afsnit 9.1.1 fjernvarmesystemet vil dette blive belyst.

Der skal en dampmængde til generatoren for at drive varmepumpen. Denne damp kommer fra LT dampsystemet, dermed vil LT turbinen modtage en mindre mængde damp. Hvor meget dette bevirker for el produktionen undersøges i afsnit 9.1.2 dampsystemet.

Kølevandet skal køre gennem varmepumpen for, at det er muligt at køle på det. Det vil påvirke det eksisterende system, hvilket er undersøgt i afsnit 9.1.3 kølevandssystemet.

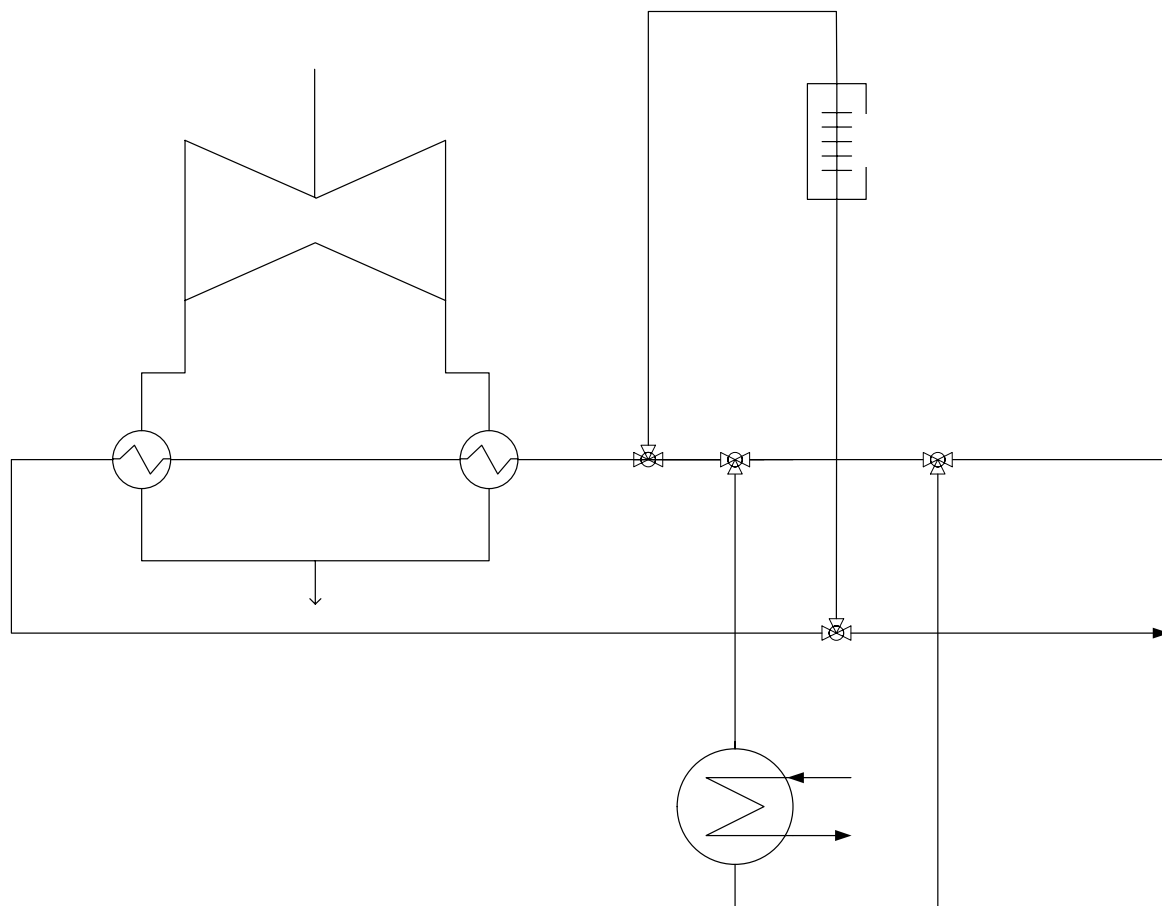




9.1.1 Fjernvarmesystemet

Den maksimale temperatur returjernvarmevandet kan opvarmes til i varmepumpen er ifølge YORK 65 °C. Denne temperatur kan blive lavere, ved at øge mængden gennem varmepumpen.

Det er pga. den maksimale temperatur på 65 °C ikke muligt direkte at tilsætte det opvarmede fjernvarmevand til fjernvarmevandets fremløb, da det skal have en temperatur på 98°C. Derfor er der i det efterfølgende overvejet forskellige placeringer af varmepumpen, og hvilken indflydelse det vil have på driften af det eksisterende anlæg. Her er det specielt indflydelsen på produktionen af el vi har lagt vægt på.



Figur 9 - Skitse over varmepumpens placering på Viborg Kraftvarmeværk



9.1.1.1 Placering for fjernvarmeeconomiser

En mulig løsning på placering af varmepumpen kan ses på figur 9. Her er varmepumpen indsat som en forvarmer/economiser, før fjernvarmevandet ledes til fjernvarmeeconomiser og LT kondensator.

Her er mulighed for, at bestemme hvor stor en del af returjernvarmevandet, der skal køre gennem varmepumpen. Den eneste begrænsning er, at mængden ikke må blive mindre end at der kan opretholdes en temperatur på max. 65 °C når fjernvarmevandet forlader varmepumpen. Temperaturen i punkt 8 vil ende på samme temperatur ligegyldig hvor meget der cirkuleres gennem varmepumpen, idet det er den samme energimængde der tilsættes vandet.

Reduceret el-effekt pga. ændring af fjernvarme flow.

I de efterfølgende beregninger er nye flow og den reducerede el-effekt udregnet pga. varmepumpen ændring af flow og temperaturer på fjernvarmevandet.

Den større effekt til fjernvarmevandet end i dag pga. varmepumpen der tilfører yderligere 2 MW. Det nye flow kan udregnes, idet der tages udgangspunkt i de eksisterende temperaturer på fremløb (98 °C) og retur (45 °C).

Flow gennem alle hedeblader (kondensatorer + economiser + varmepumpe) punkt 10.

$$P_{\text{fjernvarme}} + P_{\text{komponentkølevand}} = \dot{m}_{\text{vny1}} \cdot c_v \cdot \Delta t_v$$

$$57600 \text{ kW} + 2000 \text{ kW} = \dot{m}_{\text{vny1}} \cdot 4,19 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} \cdot (98^\circ\text{C} - 45^\circ\text{C}) \Rightarrow \dot{m}_{\text{vny1}} = 268,4 \text{ kg/s}$$

I dag er flowet 260 kg/s.

Temperaturstigning på returjernvarmevandet ved at benytte varmepumpen som economiser. Varmepumpens afgivne effekt kan ses i afsnit 9.1.2.1

$$P_{\text{varmepumpe+generator}} = c_v \cdot \dot{m}_{\text{vny1}} \cdot \Delta t_{\text{varmepumpe}}$$

$$4985 \text{ kW} = 4,19 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} \cdot 268,4 \text{ kg/s} \cdot \Delta t_v \Rightarrow \Delta t_v = 4,39^\circ\text{C}$$

Temperaturen på fjernvarmevandet vil derfor blive ved tilgangen til kondensatorerne punkt 6.

$$t_{\text{punkt6}} = t_{\text{punkt10}} + \Delta t_{\text{varmepumpe}} = 45^\circ\text{C} + 4,39^\circ\text{C} = 49,39^\circ\text{C}$$

Mængden af dampen der skal kondenseres i kondensatorerne mindskes, fordi der udtages 1,21 kg/s²⁶ damp til varmepumpens generator. Dampmængden er i dag 20,83 kg/s²⁷ den sænkes til (20,83 kg/s - 1,21 kg/s) 19,6 kg/s, hvilket er en reduktion på 5,9 %. Den afsatte effekt i kondensatorerne bliver derfor 5,9% mindre, da denne mængde ikke skal kondenseres. De nuværende effekter er udregnet på bilag 8.

Effekter efter reduktion er:

$$P_{\text{LTkondensatorny}} = \text{reduktion} \cdot P_{\text{LT}} = 0,941 \cdot 23794 \text{ kW} = 22390 \text{ kW}$$

$$P_{\text{HTkondensatorny}} = \text{reduktion} \cdot P_{\text{LT}} = 0,941 \cdot 25955 \text{ kW} = 24423 \text{ kW}$$

²⁶ Udregnet i afsnit 9.1.2

²⁷ Bilag 8 – stationær driftssituation

I dette er der ikke taget hensyn til den lidt højere entalpi dampen forlader turbinen med pga. det højere kondensatortryk, da den er lille set i forhold til fordampningsvarmen.

Mængden af cirkuleret vand gennem røggas fjernvarmeeconomiser²⁸

$$\begin{aligned}P_{\text{fjveco}} &= \dot{m}_{\text{fjveco1}} \cdot c_v \cdot \Delta t_{\text{v fjveco}} \\7843 \text{ kW} &= \dot{m}_{\text{fjveco1}} \cdot 4,19 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C} \cdot (97,1^\circ\text{C} - 49,39^\circ\text{C}) \\ \dot{m}_{\text{fjveco1}} &= 39,2 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

Denne udregning indebærer, at vi bibeholder de samme overgangstal som i dag. Dette anser vi for at være realistisk, idet fjernvarmemængden ikke skal øges ret meget. I dag er mængden 36 kg/s (se bilag 8 – skærmbillede 6), så det er begrænset hvor meget mere cirkulationspumperne skal levere.

Mængden af fjernvarmevande gennem fjernvarmeeconomiseren cirkulerer ikke gennem fjernvarmevekslerne derfor bliver mængden gennem kondensatorerne

$$\dot{m}_{\text{v kond1}} = \dot{m}_{\text{vny1}} - \dot{m}_{\text{fjveco1}} = 268,4 - 39,2 = 229,2 \text{ kg/s.}$$

Dette vil give en øget mængde af fjernvarmevand gennem kondensatorerne set i forhold til i dag, men det er en relativ lille forøgelse og cirkulationspumperne kan godt klare dette.

Den nye temperaturforskel over LT-kondensator kan udregnes:

$$\begin{aligned}P_{\text{LTkondensatorny}} &= \dot{m}_{\text{v kond1}} \cdot c_v \cdot \Delta t_{\text{vLT}} \\22390 \text{ kW} &= 229,2 \text{ kg/s} \cdot 4,19 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C} \cdot \Delta t_{\text{vLT1}} \\ \Delta t_{\text{vLT1}} &= 23,3^\circ\text{C}\end{aligned}$$

Den nye temperatur efter lavtrykskondensator er derfor:

$$\begin{aligned}t_{\text{punkt5}} &= \Delta t_{\text{vLT}} + t_{\text{punkt6}} \\t_{\text{punkt5}} &= 23,3^\circ\text{C} + 49,39^\circ\text{C} = 72,7^\circ\text{C}\end{aligned}$$

Den nye temperaturforskel over højtrykskondensatoren:

$$\begin{aligned}P_{\text{HTkondensatorny}} &= \dot{m}_{\text{v kond1}} \cdot c_v \cdot \Delta t_{\text{vHT}} \\24461 \text{ kW} &= 229,2 \text{ kg/s} \cdot 4,19 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C} \cdot \Delta t_{\text{vHT}} \\ \Delta t_{\text{vHT}} &= 25,4^\circ\text{C}\end{aligned}$$

Den nye temperatur efter højtrykskondensator er derfor:

$$\begin{aligned}t_{\text{punkt4}} &= \Delta t_{\text{vHT}} + t_{\text{punkt5}} \\t_{\text{punkt4}} &= 25,4^\circ\text{C} + 72,7^\circ\text{C} = 98,1^\circ\text{C}\end{aligned}$$

De nye temperaturer i kondensatorerne er lidt højere end de temperaturer der er i dag. Temperaturstigningen vil resultere i et højere kondensatortryk. Entalpien af den damp der forlader turbinen vil stige og dermed afsættes der mindre effekt i turbinen med en mindre el-produktion til følge. Denne effekt udregnes i det efterfølgende.

²⁸ Bilag 8 – stationær driftssituation

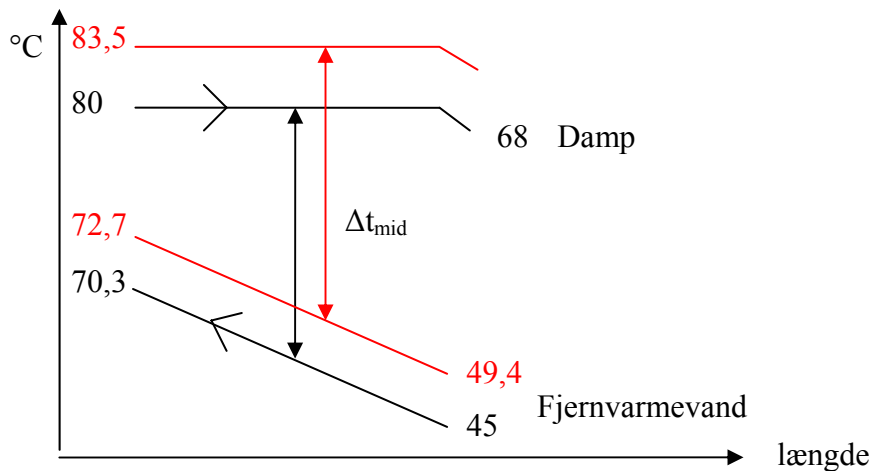


Lavtryksturbine.

t_{vandud} og t_{vandind} stammer fra bilag 8.

$$\text{I dag er } \Delta t_{\text{mid}} = t_{\text{damp}} - \frac{t_{\text{vandud LT}} + t_{\text{vandind}}}{2} = 80^{\circ}\text{C} - \frac{70,3^{\circ}\text{C} + 45^{\circ}\text{C}}{2} = 22,4^{\circ}\text{C}.$$

Der er ikke taget hensyn til underkølingen af kondensatet, det vil have en mindre indflydelse på Δt_{mid} . Se den sorte kurve på figur 10.



Figur 10 – Middeltemperatur i lavtrykskondensatoren

Vi regner med den samme Δt_{mid} ved de nye temperaturer, da mængden af cirkuleret fjernvarmevand ikke ændrer sig ret meget. (260 kg/s til 268 kg/s)

Temperaturen i kondensatoren bliver derfor:

$$t_{\text{LT kondensator}} = \frac{t_{\text{punkt5}} + t_{\text{punkt6}}}{2} + \Delta t_{\text{mid}} = \frac{72,7^{\circ}\text{C} + 49,4^{\circ}\text{C}}{2} + 22,4^{\circ}\text{C} = 83,5^{\circ}\text{C}$$

Se den røde kurve på figur 10.

Dette vil resultere i en trykstigning i kondensatoren og dermed en større entalpi i dampen, der forlader turbinen. Den nye entalpi er ifølge tabel opslag²⁹ steget ca. 5,8 kJ/kg.

Den nye mængde damp til LT-kondensatoren skal udregnes.

I dag er mængden 9,96 kg/s se bilag 8

Varmepumpen skal bruge 1,21 kg/s se afsnit 9.1.2.1

Reduktionen i flowet er 5,9 % som vist i afsnit 9.1.1.1

Der bliver den nye mængde = $9,96 \cdot (1 - 0,059) = 9,38$ kg/s

Dette medfører en mindre effekt på: $P_{\text{LT turbine nedsat}} = \Delta h \cdot m = 5,8 \text{ kJ/kg} \cdot 9,38 \text{ kg/s} = \underline{54 \text{ kW}}$

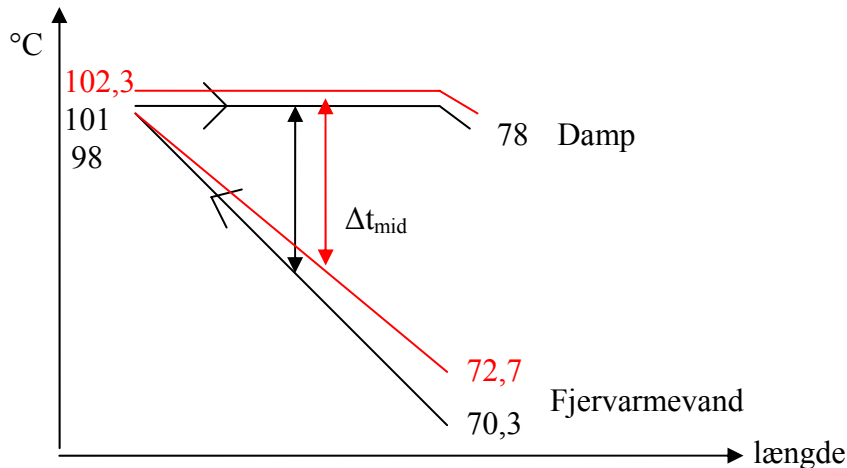
²⁹ Damptabel, termodynamik bog. Alle tabel opslag fremover i dette afsnit er taget fra denne bog.



Højtryksturbine.

$$\text{I dag er } \Delta t_{\text{mid}} := t_{\text{damp}} - \frac{t_{\text{vand ud HT}} + t_{\text{vand ud LT}}}{2} = 101 - \frac{98 + 70,3}{2} = 16,9^\circ \text{C}$$

Der er ikke taget hensyn til underkølingen af kondensatet, det vil have en mindre indflydelse på Δt_{mid} . Se den sorte kurve på figur 11.



Figur 11 - Middeltemperatur i højtrykskondensatoren

Vi regner med den samme Δt_{mid} ved de nye temperaturer, da mængden af cirkuleret fjernvarmevand ikke ændrer sig ret meget. (260 kg/s til 268 kg/s).

Temperaturen i kondensatoren bliver derfor:

$$t_{\text{HTkondensator}} = \frac{t_{\text{punkt4}} + t_{\text{punkt5}}}{2} = \frac{98,1^\circ \text{C} + 72,7^\circ \text{C}}{2} + 16,9^\circ \text{C} = 102,3^\circ \text{C}$$

Se den røde kurve på figur 11.

Det vil ligeledes resultere i en trykstigning i kondensatoren og dermed en større entalpi i dampen der forlader turbinen den nye entalpi er ifølge tabel opslag steget ca. 2kJ/kg.

Den nye mængde damp til HT-kondensatoren skal udregnes.

I dag er mængden 10,86 kg/s se bilag 8

Varmepumpen skal bruge 1,21 kg/s se afsnit 9.1.2.1

Reduktionen i flowet er 5,9 % som vist i afsnit 9.1.2

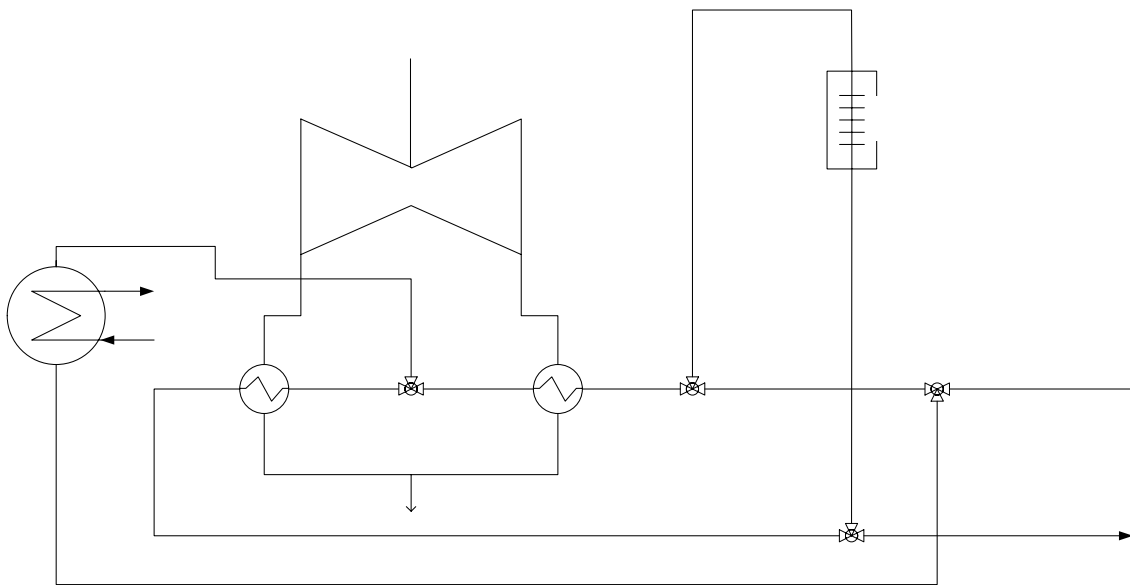
Der bliver den nye mængde = $10,86 \cdot (1 - 0,059) = 10,22 \text{ kg/s}$

Dette medfører en mindre effekt på er: $P_{\text{HT turbine nedsat}} = \Delta h \cdot m = 2 \text{ kJ/kg} \cdot 10,22 \text{ kg/s} = \underline{21 \text{ kW}}$

Totalt vil det højere kondensator tryk resultere i en mindre el-afregningspris på:

$$(P_{\text{lav}} + P_{\text{høj}}) \cdot \eta_{\text{gear}} \cdot \eta_{\text{generator}} = (54 + 21) \cdot 0,98 \cdot 0,98 = \underline{\underline{72 \text{ kW}}}$$

Generator, gear kender vi ikke virkningsgraden for, men begge sættes til 0,98. Som vi finder realistisk.



Figur 12 a - Skitse over varmepumpen placering

9.1.1.2 Placeret mellem LT- og HT-kondensatoren

Ved denne placering er varmepumpen indsat parallel med LT kondensatoren. Se figur 12. Dette vil bevirke følgende ændringer:

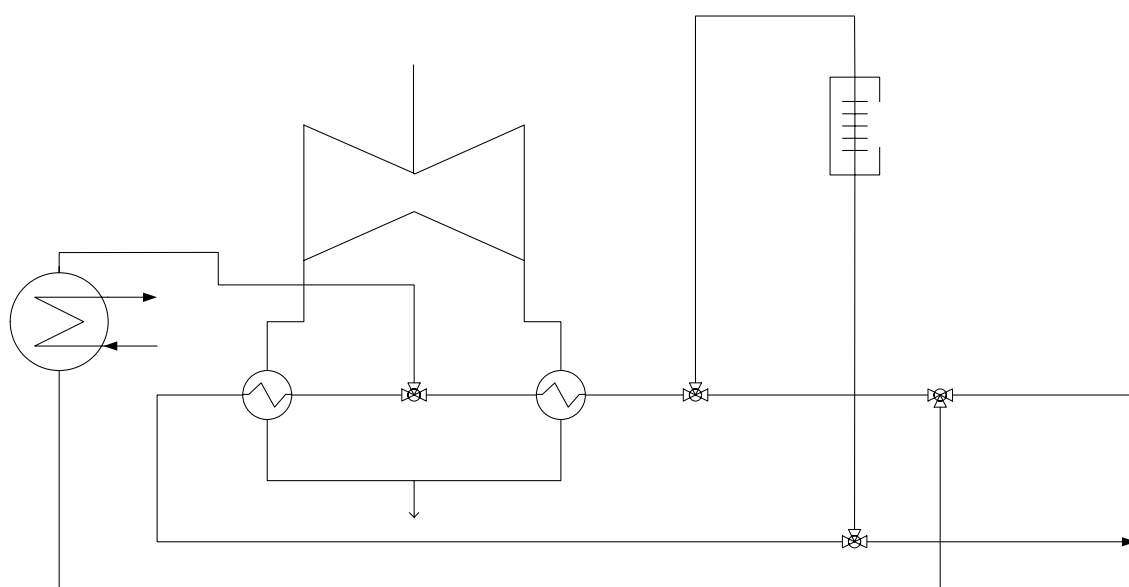
- Fjernvarmemængden gennem LT kondensatoren vil blive reduceret med 33 % af den nuværende mængde.
- Effekten der skal fjernes fra LT kondensatoren bliver reduceret med 5,9 %, dog ikke nok til at modvirke manglen af fjernvarmevand.
- Trykket vil stige, på grund af manglende køling til at kondensere dampen fra LT turbinen, og forsage højere mætningstemperatur. Dette vil igen give større behov for køling og mærkbart reduceret el-produktion.
- Afgangstemperaturen på fjernvarmevandet fra LT kondensatoren (punkt 6) vil med den reducerede mængde ligge på 75,8 grader, dog vil det højere mætningstryk i kondensatoren bevirke, at dampen igen vil antage en højere temperatur (punkt 3).

I de efterfølgende beregninger er nye flow og den reducerede el-effekt udregnet.

Flow gennem alle hedeblader (kondensatorer + economiser + varmepumpe) punkt 10.

$$P_{\text{fjernvarme}} + P_{\text{komponentkølevand}} = \dot{m}_{\text{vny2}} \cdot c_v \cdot \Delta t_v$$

$$57600\text{kW} + 2000\text{kW} = \dot{m}_{\text{vny2}} \cdot 4,19\text{kJ/kg C}^\circ \cdot (98\text{C}^\circ - 45\text{C}^\circ) \Rightarrow \dot{m}_{\text{vny2}} = 268,4\text{kg/s}$$



Figur 12 b - Skitse over varmepumpen placering

Mængden af damp der skal kondenseres i kondensatorerne mindskes, fordi der udtages 1,21kg/s damp til varmepumpens generator. Dampmængden er i dag 20,85kg/s, den sænkes til 20,85-1,21=19,6kg/s, hvilket er en reduktion på 5,9 %. Den afsatte effekt i kondensatorerne bliver derfor 5,9 % mindre. De nuværende effekter er udregnet på bilag 8.

$$P_{LTkondensatorny} = \text{reduktion} \cdot P_{LT} = 0,941 \cdot 23794 \text{KW} = 22390 \text{KW}$$

$$P_{HTkondensatorny} = \text{reduktion} \cdot P_{LT} = 0,941 \cdot 25955 \text{KW} = 24423 \text{KW}$$

Der er ikke taget hensyn til den lidt højere entalpi dampen forlader turbinen med pga. det højere kondensatortryk, da den er lille set i forhold til fordampningsvarmen.

Her regnes med en temperatur fra varmepumpen på max. 65°C.

Mængden af cirkuleret vand gennem varmepumpen:

$$P_{\text{varmepumpe} + \text{generator}} = \dot{m}_{\text{fjv varmepumpe}} \cdot c_v \cdot \Delta t_v$$

$$4985 = \dot{m}_{\text{fjv varmepumpe}} \cdot 4,19 \text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} \cdot (65^\circ\text{C} - 45^\circ\text{C})$$

$$\dot{m}_{\text{fjv varmepumpe}} = 59,0 \text{kg/s}$$

Mængden af cirkuleret vand gennem røggas fjernvarmeeconomiser³⁰

$$P_{\text{fjveco}} = \dot{m}_{\text{fjveco2}} \cdot c_v \cdot \Delta t_v$$

$$7843 = \dot{m}_{\text{fjveco2}} \cdot 4,19 \text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} \cdot (97,1^\circ\text{C} - 45^\circ\text{C})$$

$$\dot{m}_{\text{fjveco2}} = 35,9 \text{kg/s}$$

Mængden gennem LT kondensatoren bliver derfor reduceret til 268,4-59-35,9=173,5 kg/s. Den reducerede mængde vil bevirke en højere temperatur efter LT kondensatoren, som betyder et højere kondensatortryk og dermed større modtryk til turbinen. Den nye temperatur efter kondensatorerne kan nu udregnes.

Den nye temperaturforskel over LT-kondensatoren kan udregnes:

$$P_{LTkondensatorny} = \dot{m}_{v\text{kond}2} \cdot c_v \cdot \Delta t_{vLT}$$

$$22390 \text{kW} = 173,5 \text{kg/s} \cdot 4,19 \text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} \cdot \Delta t_{vLT2}$$

$$\Delta t_{vLT2} = 30,8^\circ\text{C}$$

Den nye temperatur efter lavtrykskondensator er derfor:

$$t_{\text{punkt6}} = \Delta t_{vLT2} + t_{\text{punkt7}}$$

$$t_{\text{punkt6}} = 30,8^\circ\text{C} + 45^\circ\text{C} = 75,8^\circ\text{C}$$

³⁰ Bilag 8 – stationær driftssituation



Temperatur i blandingspunkt mellem LT- og HT kondensator punkt 5 figur 12.

$$P_{\text{tilført}} = P_{\text{afgivet}}$$

$$\dot{m}_{\text{LT}} \cdot c_v \cdot t_{\text{punkt6}} + \dot{m}_{\text{fjv varmepumpe}} \cdot c_v \cdot t_{\text{varmepumpe ud}} = (\dot{m}_{\text{LT}} + \dot{m}_{\text{varmepumpe ud}}) \cdot c_v \cdot t_{\text{punkt 5}}$$
$$173,5 \cdot 4,19 \cdot 75,8 + 59 \cdot 4,19 \cdot 65 = (173,5 + 59) \cdot 4,19 \cdot t_{\text{punkt 5}} \Rightarrow t_{\text{punkt 5}} = 73,1^\circ\text{C}$$

Den nye temperaturforskel over HT-kondensatoren kan udregnes:

$$P_{\text{HT kondensatorny}} = (m_{\text{vny2}} + m_{\text{fjveco2}}) \cdot c_v \cdot \Delta t_{\text{vHT}}$$

$$24461\text{kW} = 232,5\text{kg/s} \cdot 4,19 \cdot \Delta t_{\text{vHT}}$$

$$\Delta t_{\text{vHT}} = 25,1^\circ\text{C}$$

Den nye temperatur efter højtrykskondensator er derfor:

$$t_{\text{punkt4}} = \Delta t_{\text{vHT}} + t_{\text{punkt5}}$$

$$t_{\text{punkt4}} = 25,1 + 73,1 = 98,2^\circ\text{C}.$$

De nye temperaturer i kondensatorerne er lidt højere end de temperaturer der er i dag. Temperatur stigningen vil resultere i et højere kondensatortryk. Entalpien af den damp der forlader turbinen vil stige og dermed afsættes der mindre effekt i turbinen med en mindre el-produktion til følge. Denne effekt udregnes i det efterfølgende.

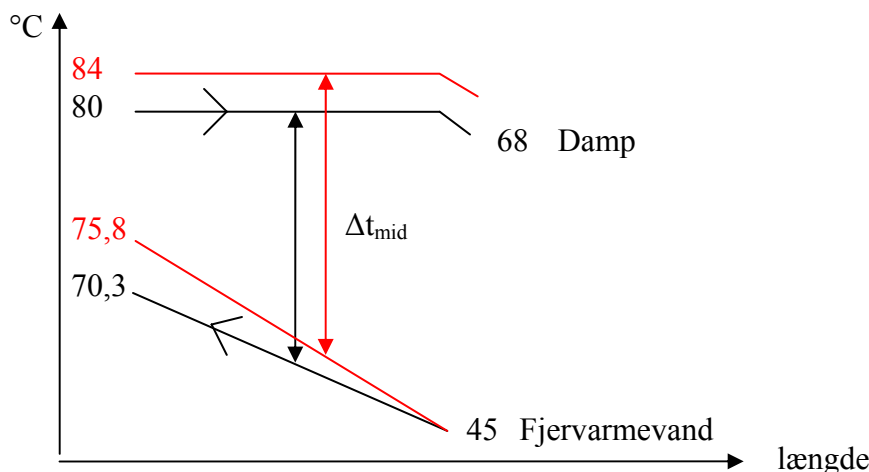


Lavtryksturbine.

t_{vandud} og t_{vandind} stammer fra bilag 8.

$$\text{I dag er } \Delta t_{\text{mid}} = t_{\text{damp}} - \frac{t_{\text{vandud LT}} + t_{\text{vandind}}}{2} = 80^{\circ}\text{C} - \frac{70,3^{\circ}\text{C} + 45^{\circ}\text{C}}{2} = 22,4^{\circ}\text{C}.$$

Der er ikke taget hensyn til underkølingen af kondensatet, det vil have en mindre indflydelse på Δt_{mid} . Se den sorte kurve på figur 10.



Figur 13 - Middeltemperatur i lavtrykskondensatoren

I dag er flowet gennem kondensatorerne 224,1 kg/s

Med varmepumpen implementeret er flowet gennem LT- kondensatoren 173,5 kg/s

Det vil betyde at flowet gennem LT-kondensatoren er faldet med $\frac{224,1 - 173,5}{224,1} \cdot 100\% = 22,6\%$

Dette vil efter vores mening betyde, at varmeovergangstallet også vil falde pga. det mindre flow. Et realistisk skøn vil fra vores side være et fald på 10 %.

Overgangstallet U kan beregnes ud fra de driftsværdier vi kender i dag³¹. Arealet sættes til 1.

$$P_{\text{LT}} = A \cdot U_{\text{idag}} \cdot \Delta t_{\text{mid}}$$
$$23794 = 1 \cdot U \cdot 22,4 \Rightarrow U_{\text{idag}} = 1062 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}$$

Nu kan den nye Δt_{mid} beregnes:

$$P_{\text{LT kondensatorny}} = A \cdot U_{\text{idag}} \cdot 0,9 \cdot \Delta t_{\text{mid}}$$
$$22390 = 1 \cdot 1062 \cdot 0,9 \cdot \Delta t_{\text{mid}} \Rightarrow \Delta t_{\text{mid}} = 23,4^{\circ}\text{C}$$

³¹ Bilag 8 – stationær driftssituation



Temperaturen i LT kondensatoren udregnes:

$$t_{\text{LTkondensator}} = \frac{t_{\text{punkt6}} + t_{\text{punkt7}}}{2} = \frac{75,8 + 45}{2} + 23,4 = 84,0^\circ \text{C}.$$

Se den røde kurve på figur 13.

Dette vil resultere i en trykstigning i kondensatoren og dermed en større entalpi i dampen der forlader turbinen. Den nye entalpi er ifølge tabel opslag steget ca. 12,4kJ/kg. Mængden af damp blev beregnet i afsnit 9.1.1.1.

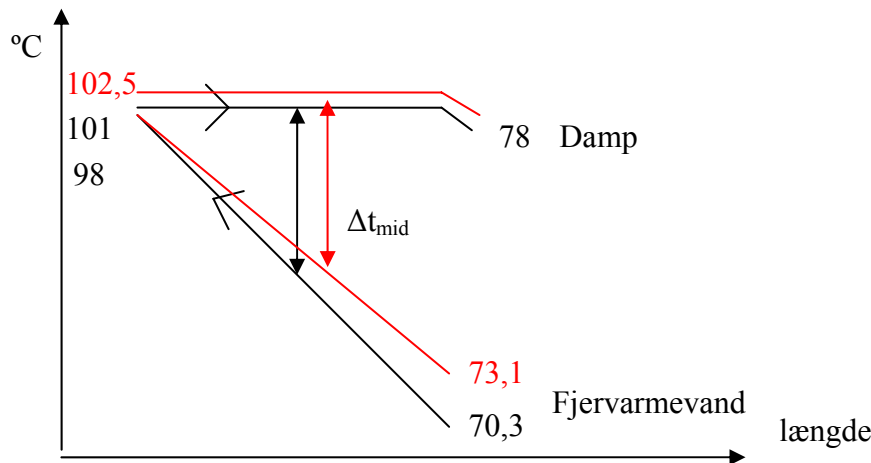
Dette medfører en mindre effekt på: $P_{\text{LT turbine nedsat}} = \Delta h \cdot m = 6,6 \text{ kJ/kg} \cdot 9,38 \text{ kg/s} = \underline{62 \text{ KW}}$



Højtryksturbine.

$$\text{I dag er } \Delta t_{\text{mid}} := t_{\text{damp}} - \frac{t_{\text{vand ud HT}} + t_{\text{vand ud LT}}}{2} = 101 - \frac{98 + 70,3}{2} = 16,9^\circ \text{C}$$

Der er ikke taget hensyn til underkølingen af kondensatet, det vil have en mindre indflydelse på Δt_{mid} . Se den sorte kurve på figur 14.



Figur 14 Middeltemperatur i højtrykskondensatoren

Vi regner med den samme Δt_{mid} ved de nye temperaturer, da mængden af cirkuleret fjernvarmevand ikke ændrer sig ret meget.

Temperaturen i kondensatoren bliver derfor:

$$t_{\text{HT kondensator}} = \frac{t_{\text{punkt4}}}{t_{\text{punkt5}}} \frac{98,2 + 73,1}{2} + 16,9 = 102,5^\circ \text{C}$$

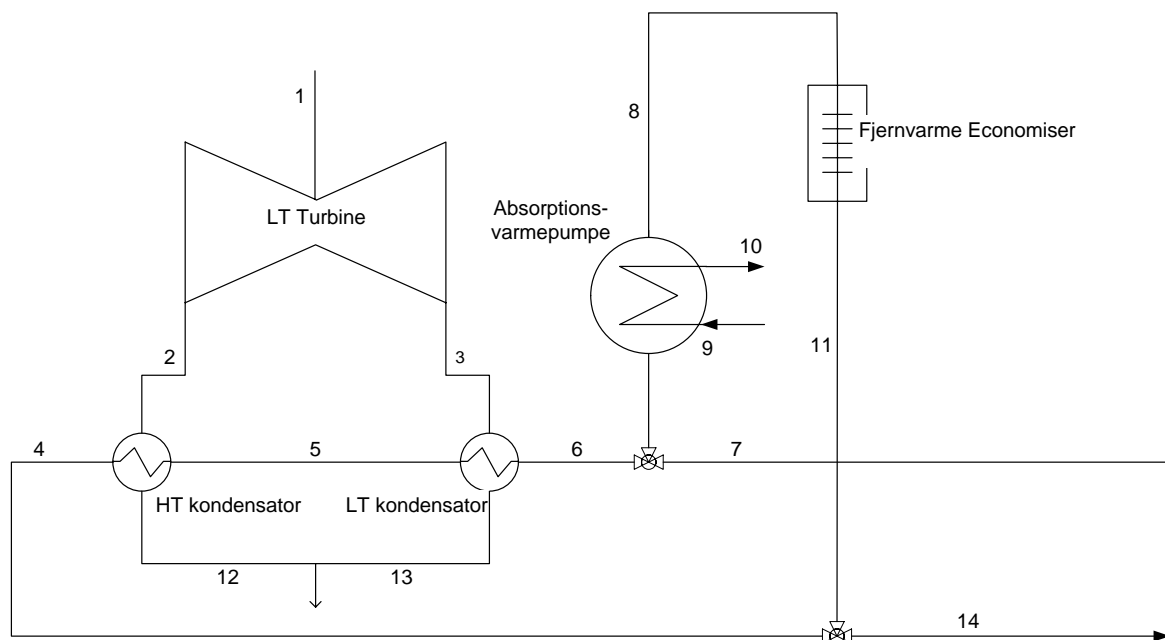
Dette vil resultere i en trykstigning i kondensatoren og dermed en større entalpi i dampen, der forlader turbine. Den nye entalpi er ifølge tabel opslag steget ca. 2,35kJ/kg.

Dette medfører en mindre effekt som er:

$$P_{\text{HT turbine nedsat}} = \Delta h \cdot \dot{m} = 2,35 \text{ kJ/kg} \cdot 10,22 \text{ kg/s} = \underline{24 \text{ kW}}$$

Totalt vil det højere kondensator tryk resultere i en mindre el-afregningspris på:

$$(P_{\text{lav}} + P_{\text{høj}}) \cdot \eta_{\text{gear}} \cdot \eta_{\text{generator}} = (62 + 24) \cdot 0,98 \cdot 0,98 = \underline{\underline{83 \text{ kW}}}$$



Figur 15 - Skitse over varmepumpens placering

9.1.1.3 Placeret i strengen til fjernvarmeeconomiser

Som alternativ til den valgte placering, har vi undersøgt muligheden for en installation af varmepumpen før fjernvarmeeconomiseren figur 15. Hvis denne løsning realiseres, vil det have minimal indflydelse på kondensator trykket og dermed el-produktionen. Dog vil placeringen have indflydelse på driften af fjernvarmeeconomiseren, hvilket er listet op underneden.

- Fremløbet til economiseren punkt 8 vil stige fra 45,2 °C til 65 °C, hvis man øger flowet til de 60 Kg/s, som vi ønsker at benytte til at fjerne effekten fra varmepumpen.
- Den øgede temperatur på tilgangen til economiseren vil give en mindre ΔT over selve hedefladerne i skorstenen, dog vil en øget fjernvarmemængde kunne medvirke til opretholdelse af den overførte effekt. Fra producentens side fraråder man at øge mængden gennem fjernvarmeeconomiseren med mere end 50 til 70 %³², hvilket er væsentligt mindre end de 108 % forøgelse af fjernvarmemængden vi skønner³³, der minimum skal bruges. Såfremt dette kan lade sig gøre, vil det sænke temperaturen på fjernvarmen, der ledes ind i fjernvarme fremløbet.

Kommentar

Der er flere parametre der forhindrer en installation af varmepumpen før fjernvarme economiseren. For det første vil den væsentligt reducerede ΔT_{mid} ikke kunne blive opvejet af den øgede stigning i flowet gennem economiseren. Og for det andet vil den fysiske dimensionering af fjernvarmeeconomiser, ikke tillade flow i den størrelsesorden, der ville være nødvendig for at kunne overføre den samme mængde effekt fra udstødsrøgen.

Ligeledes vil den store forøgelse af fjernvarmemængden, resultere i en lavere temperatur inden den ledes tilbage til fjernvarmefremløbet, hvilket ikke vil være i værket's interesse under nuværende driftsforhold.

Denne løsning ville kunne være en mulighed, hvis man kunne bruge den større mængde fjernvarme ved den lavere temperatur til at sænke fremløbstemperaturen permanent. Denne forudsætning ligger ikke til grund for udarbejdelsen af projektet, hvilket eliminerer denne løsning.

³² Bilag 7 - uddrag fra referat fra samtale med Torben Brahe, dimensionerings ingeniør fra BWE

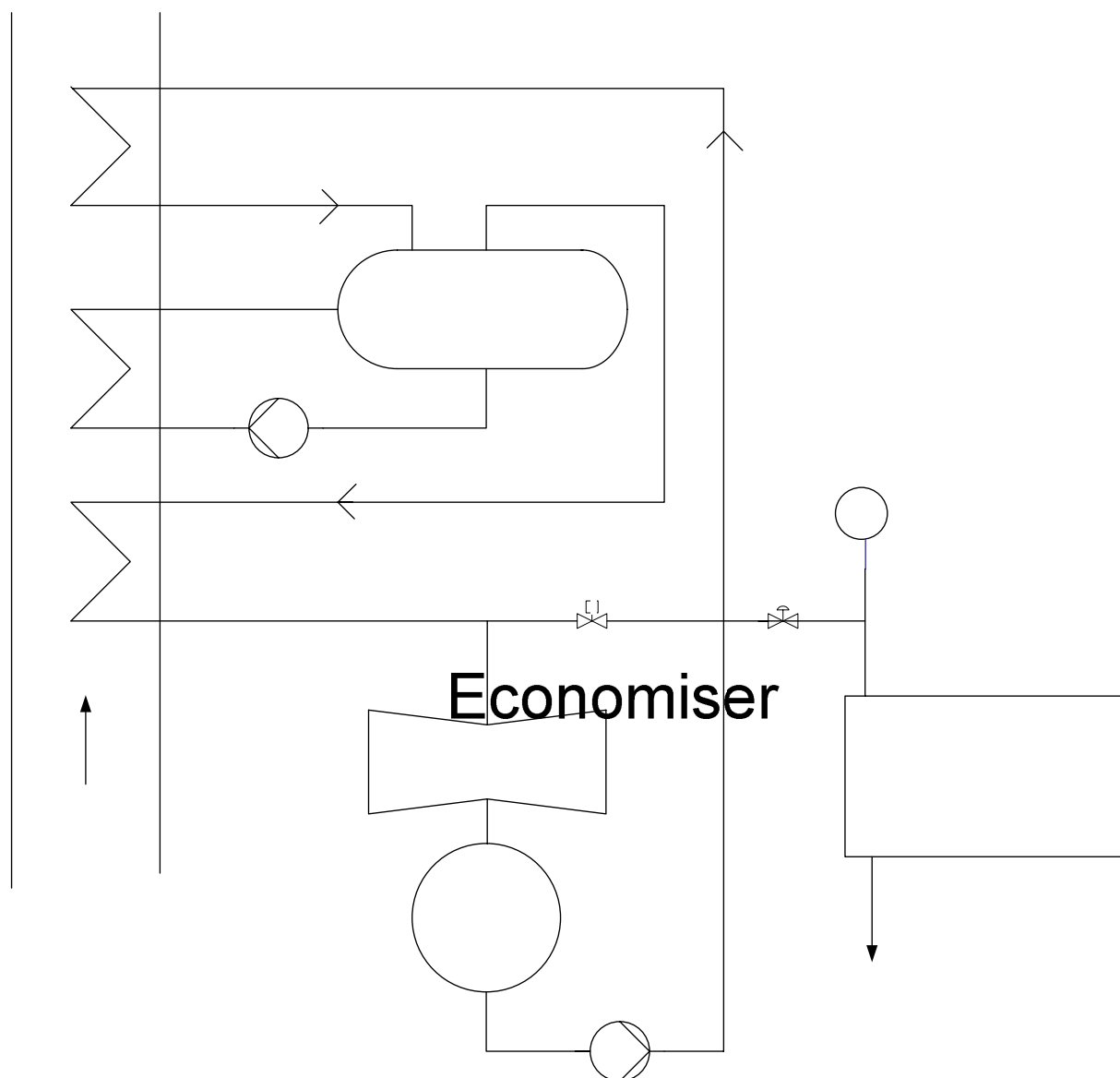
³³ Vores skøn er fortaget ud fra middeltemperatur og varmebalanceberegninger, fortaget på economiseren



9.1.1.4 Kommentarer til varmepumpens placering i fjernvarmestrengen

Lige gyldig hvilken placering af varmepumpen vi vælger, vil det have indflydelse på trykket i kondensatorerne. Det kan være svært at vurdere hvor meget, det vil have indflydelse på driften og specielt den producerede el-mængde. Vi har regnet den forventede mindre el-mængde ud, men der er en vis usikkerhed omkring dette. Der er 2 parametre der ændre sig i kondensatorerne samtidig, mængden af damp, der skal kondenseres bliver mindre og mængden af cirkuleret fjernvarmevand bliver mindre. Disse 2 parametre vil til dels opveje hinanden.

Valget bliver derfor en placering af varmepumpen før HT, LT kondensatorerne samt fjernvarmeeconomiser. Dette giver det mindste fald i el produktionen, som tidligere dokumenteret i afsnit 9.1.1.1 og 9.1.1.2.



Figur 16 – Skitse af dampsystemet

Fordamper

9.1.2 Dampsystemet

Dampen forlader kedlen med et tryk på 3,1 bar overtryk og 215 °C (bilag 8), hvorfra det ledes til lavtryksturbinen. Lavtryksturbinen producerer en relativ lille mængde el i forhold til højtryksturbinen³⁴, og man mener ikke fra Viborg kraftvarmeverks side, at der skulle være nogle komplikationer ved at benytte denne til driften af absorptionsvarmepumpens generator. Lavtryksdampen ledes gennem absorptionsvarmepumpens generator, og på denne måde overføres den effekt, der skal bruges til at drive varmepumpen. Kondensatet der forlader varmepumpen vil have en temperatur lidt under 100 °C, hvorfor det ikke kan tilsættes lavtrykskondensatoren, da trykket er for lavt (ca. 0,5bar). I stedet kan det tilsættes højtrykskondensatoren, hvor der er et tryk på ca. 1,1bar). Kondensatet kan selv løbe ned i højtrykskondensatoren pga. trykforskellen.

9.1.2.1 Udregning af mistet el-effekt pga. damp til generatoren

Varmepumpens generator skal bruge en effekt for at fjerne 2 MW fra kølesystemet. Denne effekt kan udregnes på baggrund af COP faktoren som er opgivet fra YORK til ca. 0,67³⁵ for denne type varmepumpe.

Det vil give en generatoreffekt på:

$$P_{\text{generator}} = \frac{P_{\text{køl}}}{\text{COP}} = \frac{2000\text{kW}}{0,67} = 2985\text{kW}$$

Denne effekt skal tilføres generatoren ved hjælp af damp, hvor kondenseringsvarmen afsættes i generatoren.

Mængden af damp er:

$$\dot{m}_{\text{dampGenerator}} = \frac{P_{\text{generator}}}{h_{\text{damp}} - h_{\text{kondensat}}} = \frac{2985\text{kW}}{2890\text{kJ/kg} - 429\text{kJ/kg}} = 1,21\text{kg/s}$$

Entalpierne af h_{damp} er taget fra bilag 8 skærmudskrift 8, og kondensatet er en tabelværdi for h' ved 1,1 bar der er i højtrykskondensatoren.

Denne mængde damp producerer ikke el i turbinen, der ganges med virkningsgraderne for generatoren og gearet.

³⁴ Se bilag 8 – stationær driftssituation (skærbillede 1)

³⁵ Se vedlagt Cd-rom – YORK datablad



Manglende el-effekt kan beregnes:

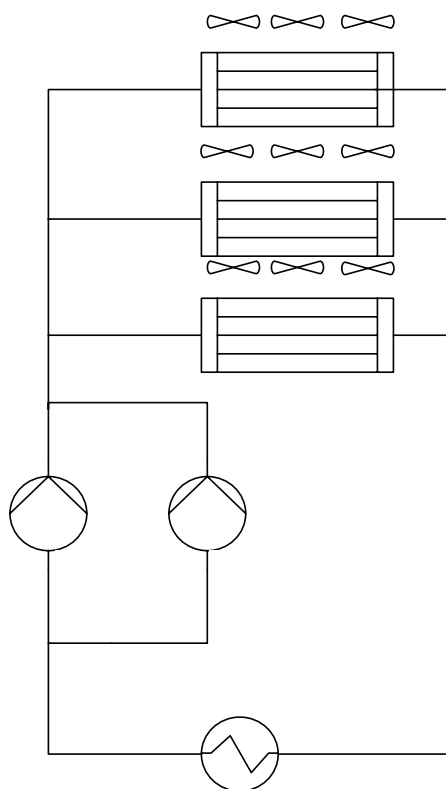
$$P_{elmangel} = \dot{m}_{generator} (h_{Damp} - h_{lavtrykskondensator}) \cdot \eta_{generator} \cdot \eta_{gear} =$$
$$1,21 \text{ kg / s} \cdot (2890 \text{ KJ / kg} - 2670 \text{ KJ / kg}) \cdot 0,98 \cdot 0,98 = \underline{256 \text{ KW}}$$

Entalpierne af h_{damp} og $h_{lavtrykskondensat}$ er taget fra bilag 8.

9.1.2.2 Kommentarer til varmepumpens placering i dampstrengen

Turbinen vil pga. den mindre dampmængde producere mindre el, men det er foldholdvis lidt set i forhold til det samlede energiindhold i dampen. Der er en vis usikkerhed omkring disse beregninger, da vi ikke med sikkerhed kan sige, om de forskellige entalpier passer med virkeligheden.

En undersøgelse om det udregnede tabte af el-effekt er i overensstemmelse med virkeligheden, kan foretages ved bypass af lavtryksdampen fra LT-kedlen.



Figur 17- Skitse over komponentkøle system

9.1.3 Kølevandssystemet

På Viborg Kraftvarmeværk er der flere komponenter i kredsplassen, som har behov for køling, for at kunne opretholde en pålidelig drift. Til dette formål kan komponentkølesystemet flytte den effekt, i form af varme, der er behov for.

Selve kølesystemet er et lukket kredssystem der benytter vand til at flytte effekten. Til at drive vandet rundt i det lukkede system benytter man en normal cirkulationspumpe, monteret med en 55kW el-motor. Man har på værket udført pumperne i dupleks, for driftssikkerhedens skyld, se figur 17. Flowet af kølevand gennem systemet bliver bestemt af modtrykket kølevandsstrengen og ligger på ca. 80 kg/s³⁶.

Til afkøling af vandet har man, på taget af værket, placeret 3 kondensatorer med hver 3 blæsere. Blæserne bliver startet af en regulering, antallet af blæsere bestemte ud fra det ønskede setpunkt.

På figur 17, er komponentkølerne skitseret som en enkeltveksler, men i virkeligheden er der tale om en lang række komponenter, der alle bliver gennemløbet af kølevandet, enten direkte eller i veksler mellem olie og vand. Underneven ses et mindre udsnit af komponenter, der bliver kølet på denne måde.

- Dampturbinens smøreliesystem
- Fødevandspumper til HT og LT
- LT cirkulationspumper

Den energimængde der skal fjernes fra komponenterne er ved fuldlast af værket konstant, det kan ikke lade sig gøre at sænke denne mængde yderligere end det er på nuværende tidspunkt. Derfor er genindvinding af denne energimængde, en indlysende mulighed for optimering.

Den energi, som nu bliver afsat i komponentkølerne, i form af vand der afkøles fra ca. 30 °C til ca. 23 °C, udgør i alt 2 MW³⁷. Denne effekt ønskes så vidt mulig flyttet over i fjernvarmen, i og med dette er det eneste sted på værket, der kan aftage effekter af denne størrelse. Som tidligere nævnt, er det ikke muligt at flytte denne effekt over i fjernvarmen ved hjælp en varmeveksler, da returtemperaturen på fjernvarmen er 45 °C. Det er derfor nødvendigt at hæve temperaturen på komponentkølevandet for, at kunne udnytte effekten.

Drift af komponentkølevandet sammen med varmepumpen

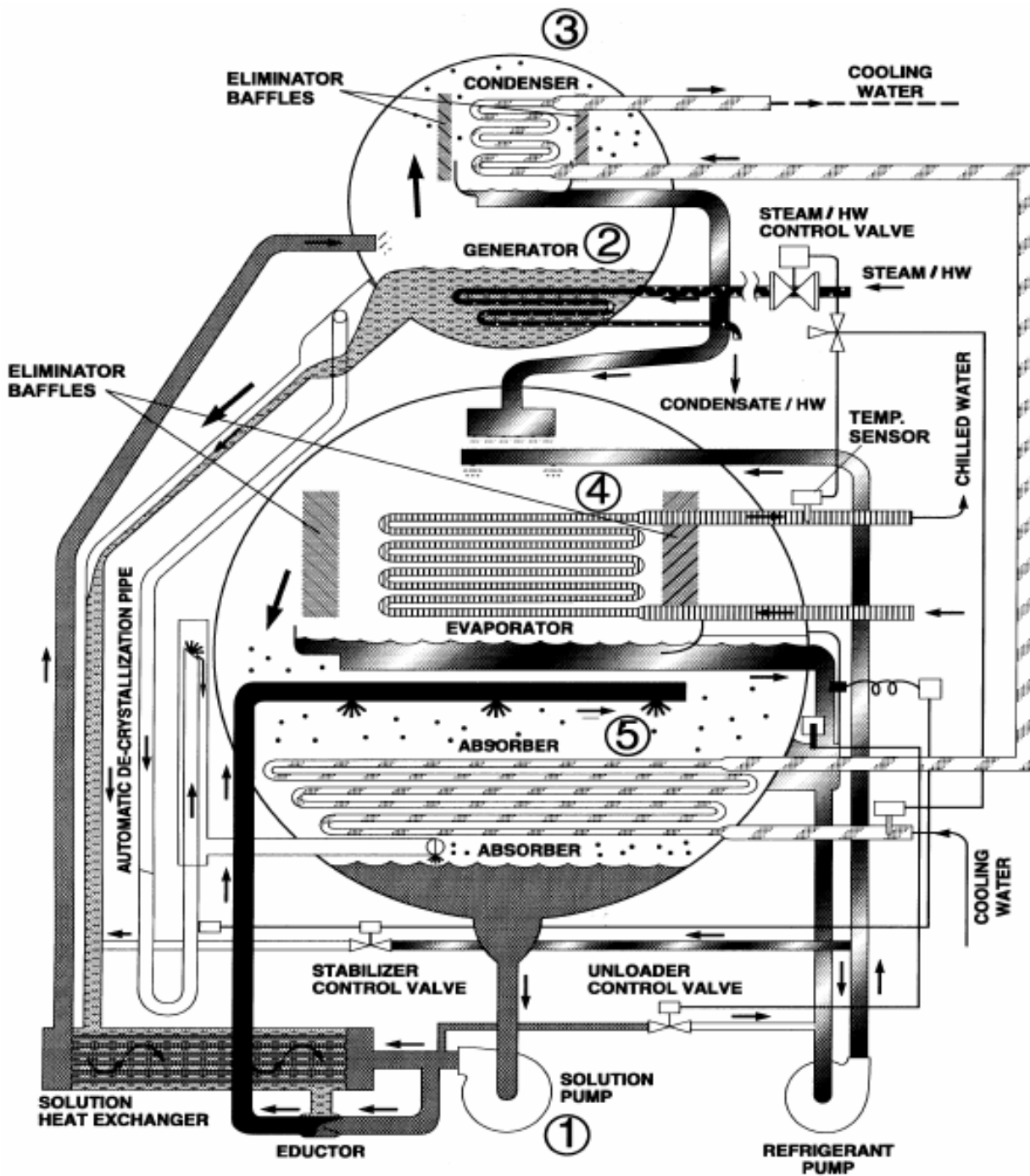
Som beskrevet skal komponentkølevandet føres igennem varmepumpen for, at man kan drage nytte af de 2 MW spildvarme, der på nuværende tidspunkt bliver afsat i kondensatorerne på værkets tag.

Ved denne manøvre kan værket gøre brug af de eksisterende pumper, som bruges til at lede kølevandet gennem kondensatorerne. Trykfaldet i varmepumpen er på 63 kPa³⁸, som der bliver modregnet i det trykfald der er i køletårnene (se bilag 3), da de bliver by-passet under drift med varmepumpen. Dette vil i alt betyde at modtrykket i systemet ikke vil ændres ret meget, og man kan derfor bibeholde det flow som findes i dag

³⁶ Bilag 3 – varmebalance

³⁷ Bilag 3 – varmebalance

³⁸ Se vedlagt Cd-rom – YORK datablad



Figur 18 – Oversigtstegning over varmepumpe.

9.2 Varmepumpens opbygning

Varmepumpen bliver leveret, som en samlet løsning fra leverandøren³⁹. I denne løsning er alle temperatur- og tryktransmittere også inkluderet. Desuden er der fra leverandørs side også sørget for, at dampkontrolventilen, som skal sørge for, at der bliver lukket den rette mængde damp ind i varmpumpen, også er inkluderet leveret med. Normalt ville en sådan komponent være en, som kunden selv skulle sørge for, men dette sørger leverandøren imidlertid for.

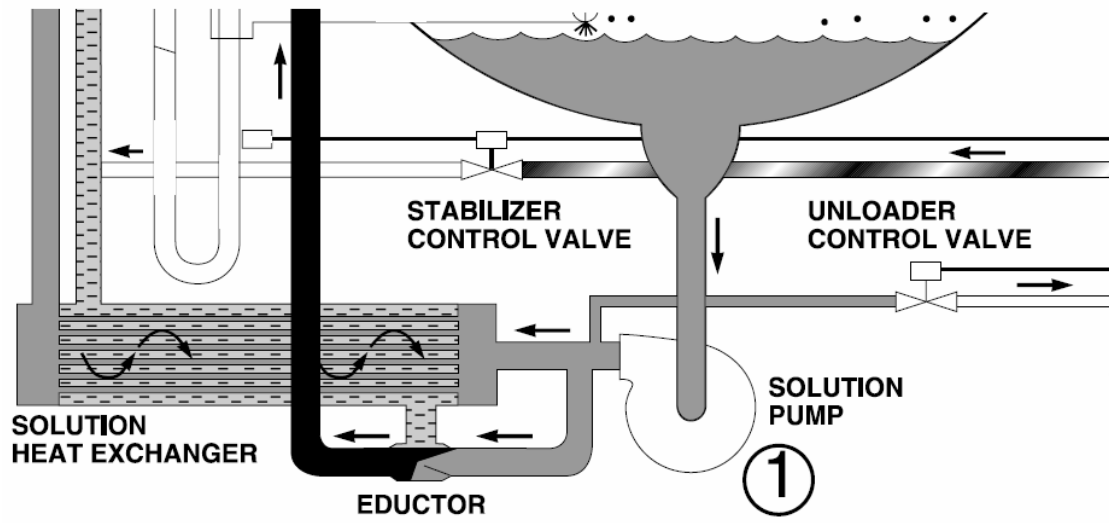
Varmepumpen består af flere forskellige dele. Herunder skaller (øvre og nedre). Disse skaller er fremstillet af carbon. Skallerne er dobbelte, hvilket gør at man reducerer risikoen for at få atmosfærisk luft ind i varmpumpen.

Den nedre skal består af fordamper og absorber. Disse to er adskilt fra hinanden ved hjælp af preplader, som bevirker at det kun er vanddampen der kan passere. De rør som er brugt til fordamperen og absorberen er fremstillet af ¾" kobber. Dyserne i absorberen er fremstillet af rustfrit stål, mens dyserne i fordamperen er fremstillet i messing.

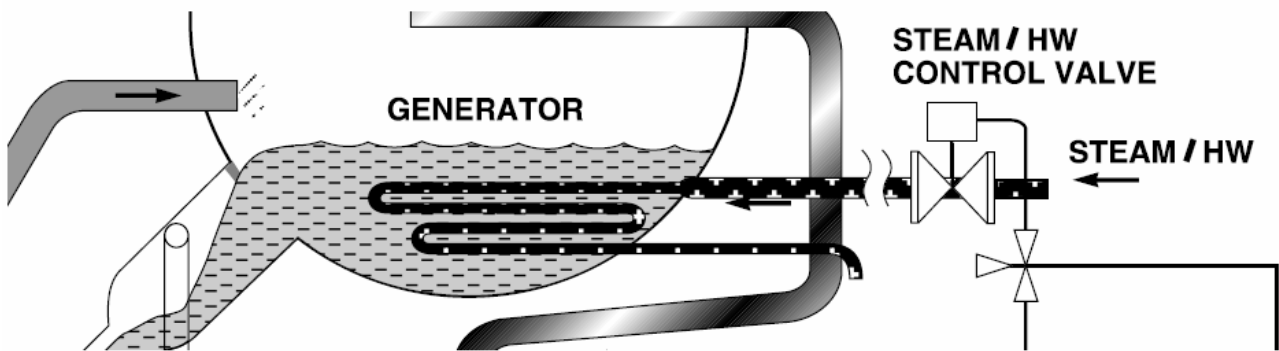
Den øvre skal indeholder generator og kondensator, som også er adskilt fra hinanden ved hjælp af finneadskillelse. Rørene i generatoren er fremstillet af kobbernikkel mens kondensatorens rør er fremstillet af kobber. Fælles for rørene er, at de er ¾".

Cirkulationspumpen til litiumbromid/vandopløsningen er hermetisk lukket, og begge tilslutningsstudser er svejset direkte på rørene, således at risikoen for luftindtrængning minimeres. Desuden er der monteret specielle ventiler som gør, at pumpen kan afmonteres hurtigt uden, at der kommer luft ind i varmpumpen.

³⁹ Se vedlagt Cd-rom – YORK datablad



Figur 19 - Solution pump



Figur 20 - Generator

9.2.1 Gennemgang af varmepumpen og dens komponenter

I bunden af varmepumpen sidder der en cirkulationspumpe (1) se figur 19, som skal sørge for at pumpe opløsningen af litiumbromid og vand, fra varmepumpens absorbertank til generatoren. Før opløsningen bliver pumpet ind i generatoren, strømmer den igennem en varmeveksler, som skal sørge for at opvarme opløsningen af litiumbromid og vand og nedkøle det koncentrerede litiumbromid.

Som det ses på figuren, er der en stabiliseringsventil som åbner, hvis der er tendens til krystallisering i varmeveksleren⁴⁰. Funktionen af stabiliseringsventilen vil blive beskrevet senere. Desuden er der en ventil (unloader control valve) som har til opgave, at regulere varmepumpens nedre arbejdstemperatur (men denne ventil er ikke nødvendig på den aktuelle varmepumpe, da den ikke skal arbejde med temperaturer som kommer ned omkring 7 °C).

9.2.2 Generator

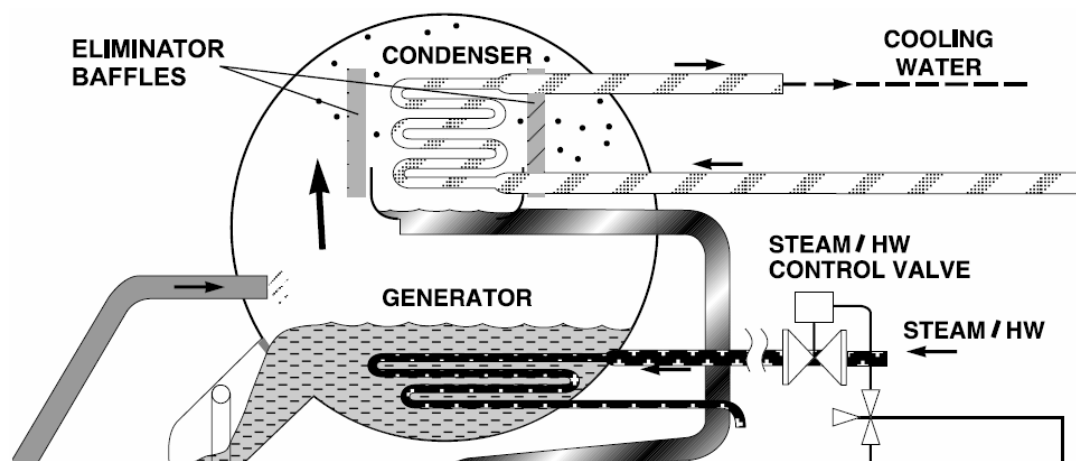
Når opløsningen af litiumbromid og vand har forladt varmeveksleren, fortsætter det op til den øverste skal. Her bliver opløsningen ledt ind i varmepumpens generator, se figur 20. Generatoren sørger for at regenerere litiumbromiden således, at denne kan ledes tilbage til varmeveksleren og senere ind i absorberer. Måden hvorpå litiumbromiden bliver regenereret på, er følgende:

Der er i den nederste del af skallen monteret rør hvori dampen transporteres. Dampen varmer blandingen af litiumbromid og vand op, og da vand har et lavere kogepunkt end litiumbromid vil der ske en fordampning af vandet. Det fordampede vand vil stige op i den øverste del af skallen, hvor kondensatoren befinder sig. Tilbage bliver det koncentrerede litiumbromid, som bliver ledt ned til varmeveksleren. I varmeveksleren udveksles der varme med den litiumbromid/vand opløsning som er på vej op til generatoren. Da litiumbromiden bliver afkølet⁴¹, er der før varmeveksleren monteret en stabiliseringsventil, således at det er muligt at tilsætte vand så man derved undgår krystallisering.

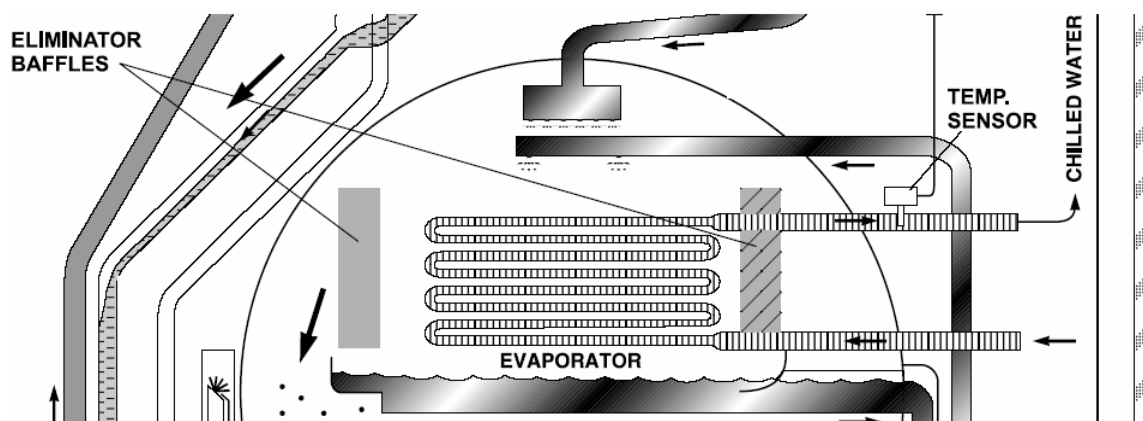
Opløsningen af litiumbromid og vand bliver drevet gennem varmeveksleren ved hjælp af en eductorpumpe. Denne får tilført sin drivvæske fra solution-pumpen.

⁴⁰ Se afsnit 9.3

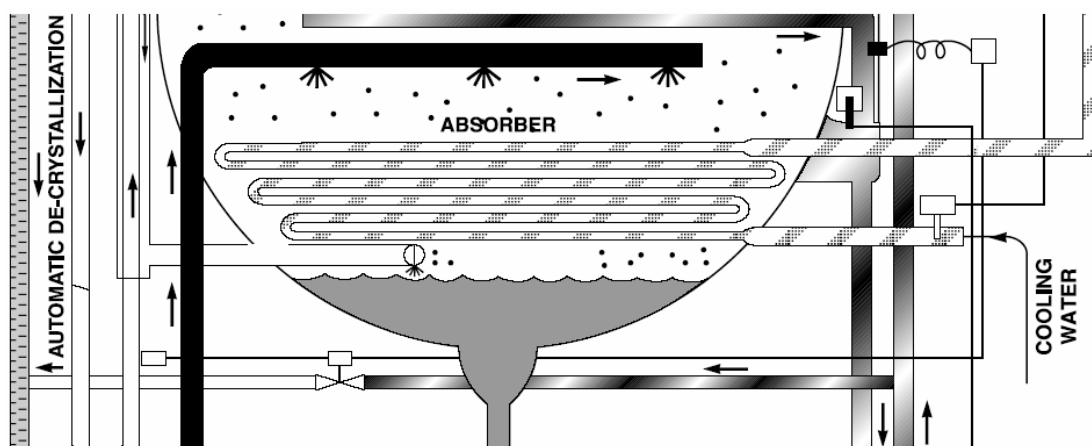
⁴¹ Se afsnit 9.3



Figur 21 - Kondensator



Figur 22 - Fordamper



Figur 23 - Absorber

9.2.3 Kondensator

Det vand som fordampede i generatoren, blev ledt op til kondensatoren, se figur 21. På vej ind i kondensatoren skal dampen gennem finnepladerne. Således undgår man at få litiumbromid med ind i kondensatoren, ved hård belastning af denne. Inde i kondensatoren som er opbygget af rør, sker der en kondensering af den varme damp, idet dampen bliver kølet ned af det kølevand som løber inde i rørene. Det kølevand som løber inde i disse rør er fjernvarmevandet, som kommer ned fra absorbereren. Den kondenserede damp bliver samlet i bunden af kondensatoren, hvor der er en rørforbindelse ned til den nederste skal.

9.2.4 Fordamper

Vandet som kommer til fordamperen (se figur 22) bliver sprayet ud over rørene, hvorved der sker en fordampning. Det vand som ikke fordamper, bliver opsamlet i bunden af fordamperen, og ved hjælp af kølevandspumpen bliver det igen sprayet ud over fordamperrørene. Til at styre den mængde af damp som tildeles i generatoren, sidder der dels en temperatursensor og føler på komponentkølevandets temperaturafgang. Desuden sidder der en temperaturføler på fjernvarmevandets tilgangstemperatur i absorbereren.

For at der ikke skal komme vand til absorbereren, sidder der i afgangen af denne preplader. Det fordampede vand bliver ledt til absorbereren ved hjælp af litiumbromidens hygroskopiske evne.

9.2.5 Absorbereren

I absorbereren (se figur 23) sker der en stor varmeudvikling⁴² idet litiumbromiden absorberer vandet, samtidig med at der bliver dannet vakuum. For at man kan opretholde vakuemet og bibeholde litiumbromidens hygroskopiske evne, bliver man nødt til at køle i absorbereren. Dette foregår ved at der i absorbereren findes rør, hvori fjernvarmevandet cirkulerer.

Litiumbromiden bliver tilført i absorbereren ved hjælp af solution-pumpen, og den eductor pumpe som tidligere er blevet nævnt under afsnittet ”solution pump”.

9.2.6 Purgepumpe

I forbindelse med varmepumpen nedre skal er der monteret en vakuumpumpe kaldet purgepumpen. Denne pumpe skal opereres manuelt. Den skal typisk køre en gang om ugen for at fjerne ikke kondenserbare gasser (normalt luft og brint dannet ved reaktion mellem vand og stål).

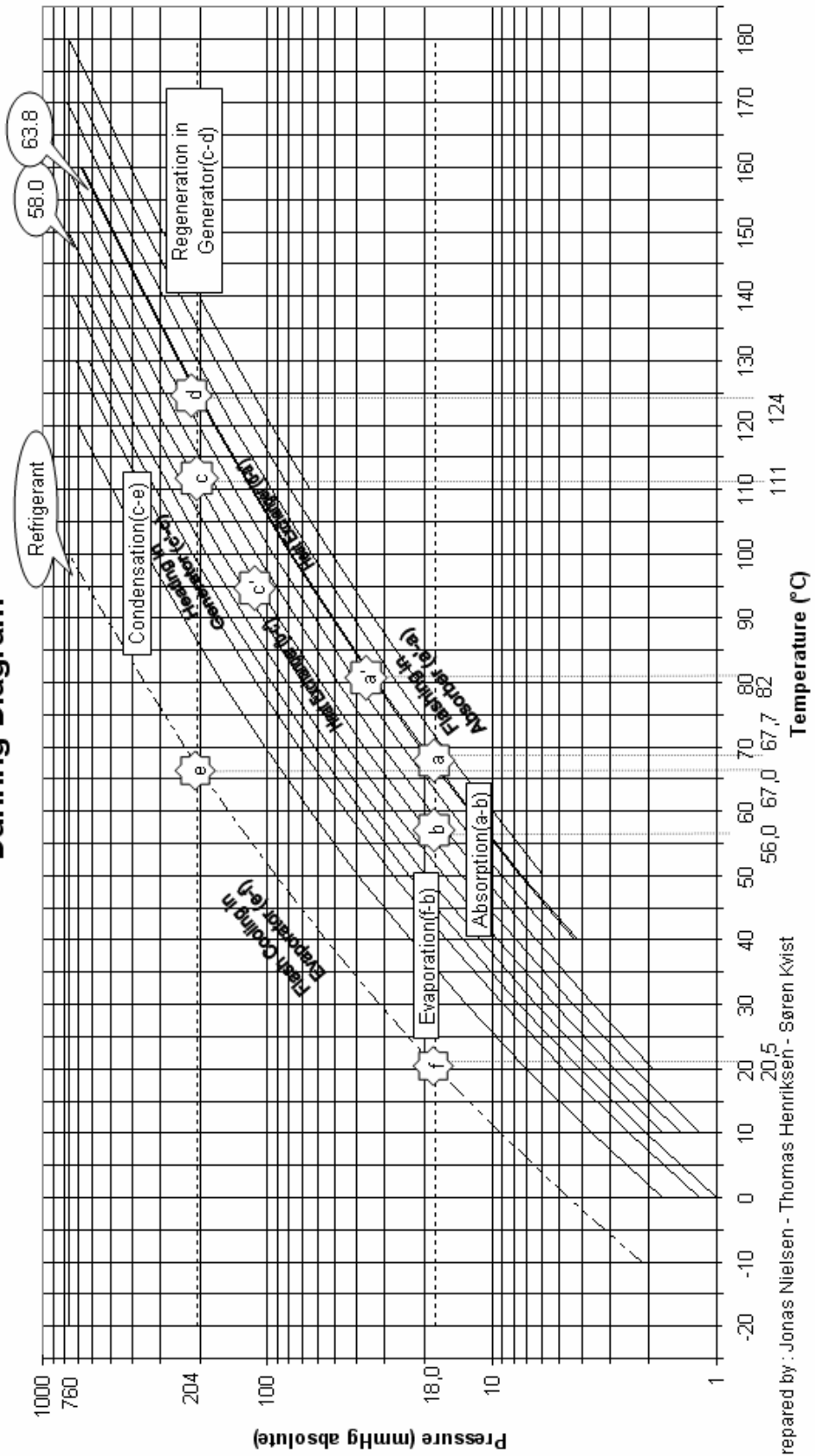
⁴² <http://www.lgarde.com/people/papers/heatpump.html>



Viborg Kraftvarmeværk
Dato : 10 - April - 2004

SEG, Thisted
Denmark

Duhring Diagram



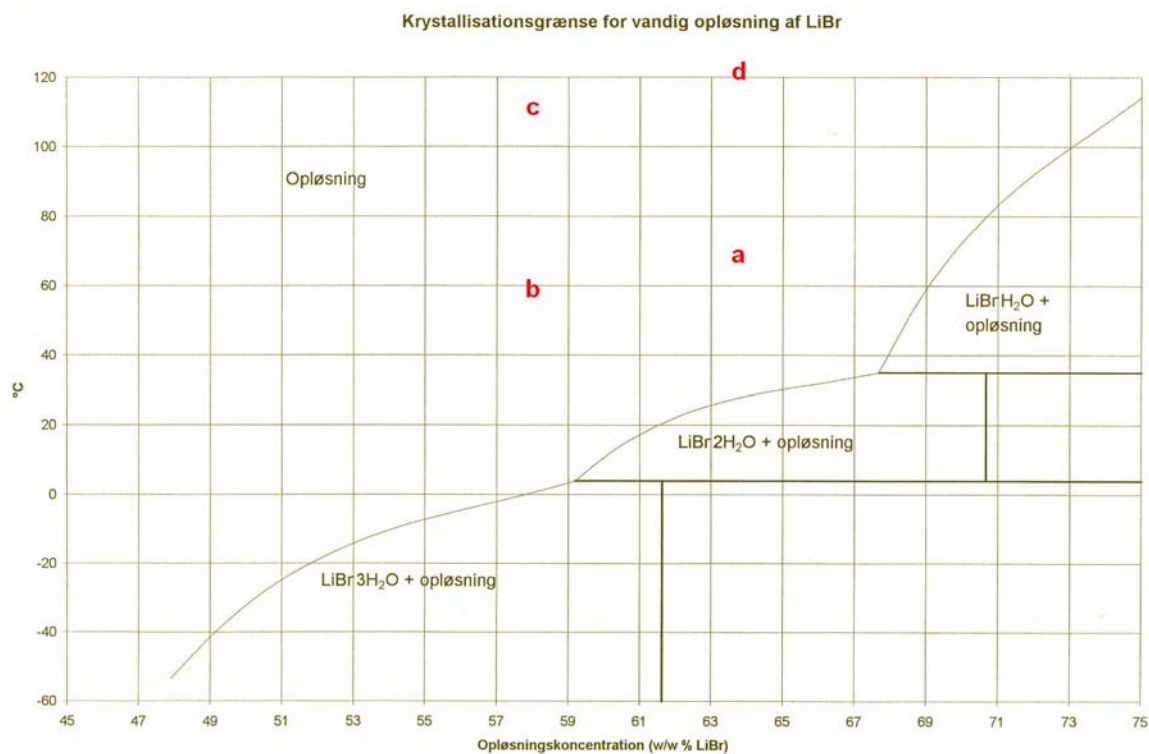
Prepared by : Jonas Nielsen - Thomas Henriksen - Søren Kvist

Figur 24 - Kredsproces

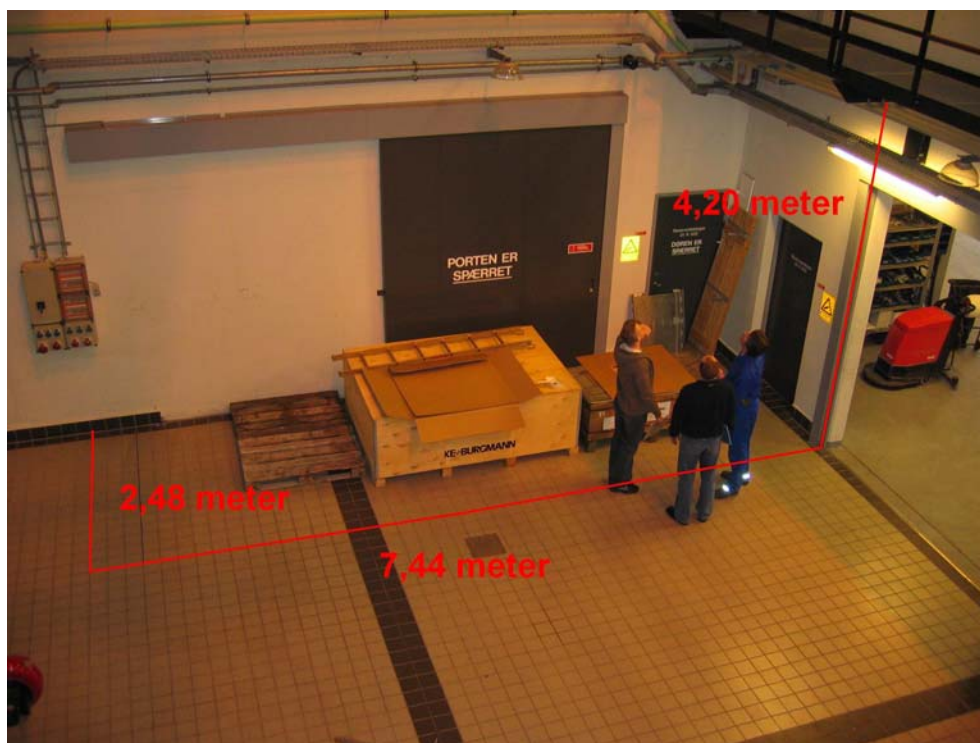
9.3 Kredsprocessen for varmepumpen

For varmepumpen på Viborg Kraftvarmeværk, er de temperaturer som blev målt da varmebalancen skulle laves, også de driftskonditioner som varmepumpen er blevet konstrueret til at skulle arbejde efter. Dette betyder, at det er muligt ved hjælp af et koncentrationsdiagram for vand og litiumbromid at indtegne kredsprocessen for varmepumpen. Vi har med hjælp fra SEG, fået konstrueret et sådan diagram (se figur 24), således at det er muligt at få et overblik over hvad det er der sker i varmepumpen. Diagrammet er lavet ud fra en eksisterende varmepumpe som findes i Sverige. På bilag 26 ses PI-diagrammet for denne varmepumpe, de flow mængder som står på diagrammet er ikke gældende for den varmepumpe som er dimensioneret til Viborg Kraftvarmeværk, men temperaturerne er næsten de samme.

På figur 25 ses krystallisationsgrænsen for vandig opløsning af litiumbromid. Ved at indsætte de temperaturer og koncentrationer fra kredsprocesdiagrammet, i diagrammet for krystallisering kan man se at alle tilstandene i varmepumpen holder sig udenfor krystalliseringsgrænsen. Dette betyder at der ikke sker en krystallisering af litiumbromiden, men som tidligere nævnt kan der i varmeveksleren ske en krystallisering ved overbelastning af varmepumpen. Dette sker når opløsningen af litiumbromid fra generatoren bliver for koncentreret og passerer gennem varmeveksleren, hvor litiumbromiden bliver nedkølet for meget i forhold til koncentrationen.



Figur 25 - Krystalliseringsgrænse



Figur 26 – Område hvor varmepumpe kan placeres.



Figur 27 – Kølerør til komponentkølere samt fjernvarme rør

9.4 Geografisk placering af varmepumpen

I samarbejde med Viborg Kraftvarmeværk har vi undersøgt mulighederne for en hensigtsmæssig og fornuftig placering af varmepumpen. Placeringen blev valgt ud fra følgende krav:

- Varmepumpen skulle placeres tæt på de rør, som transporterer komponentkølevandet.
- Der skulle ikke være for lang afstand til damptilslutningen.
- Den skulle ikke være til gene for de normale arbejdsrutiner, som er på kraftværket.
- Den skulle placeres således at pumperne til komponentkølevandet kunne drive vandet igennem den.

På oversigtstegningen over Viborg kraftvarmeværk figur 29 kan man se, hvor cirkulationspumperne til fjernvarmevandet er placeret. Det fremgår desuden af tegningen, hvor rørene til komponentkølevandet befinder sig.

Det vil umiddelbart være hensigtsmæssigst at placere varmepumpen i denne del af værket som er omkranset af den grønne ellipse.

På figur 26 ses det område, hvor varmepumpen skal placeres. Da både porten i baggrunden og de to døre er spærret, bliver der ikke nogle problemer i forhold til de daglige arbejdsrutiner på værket.

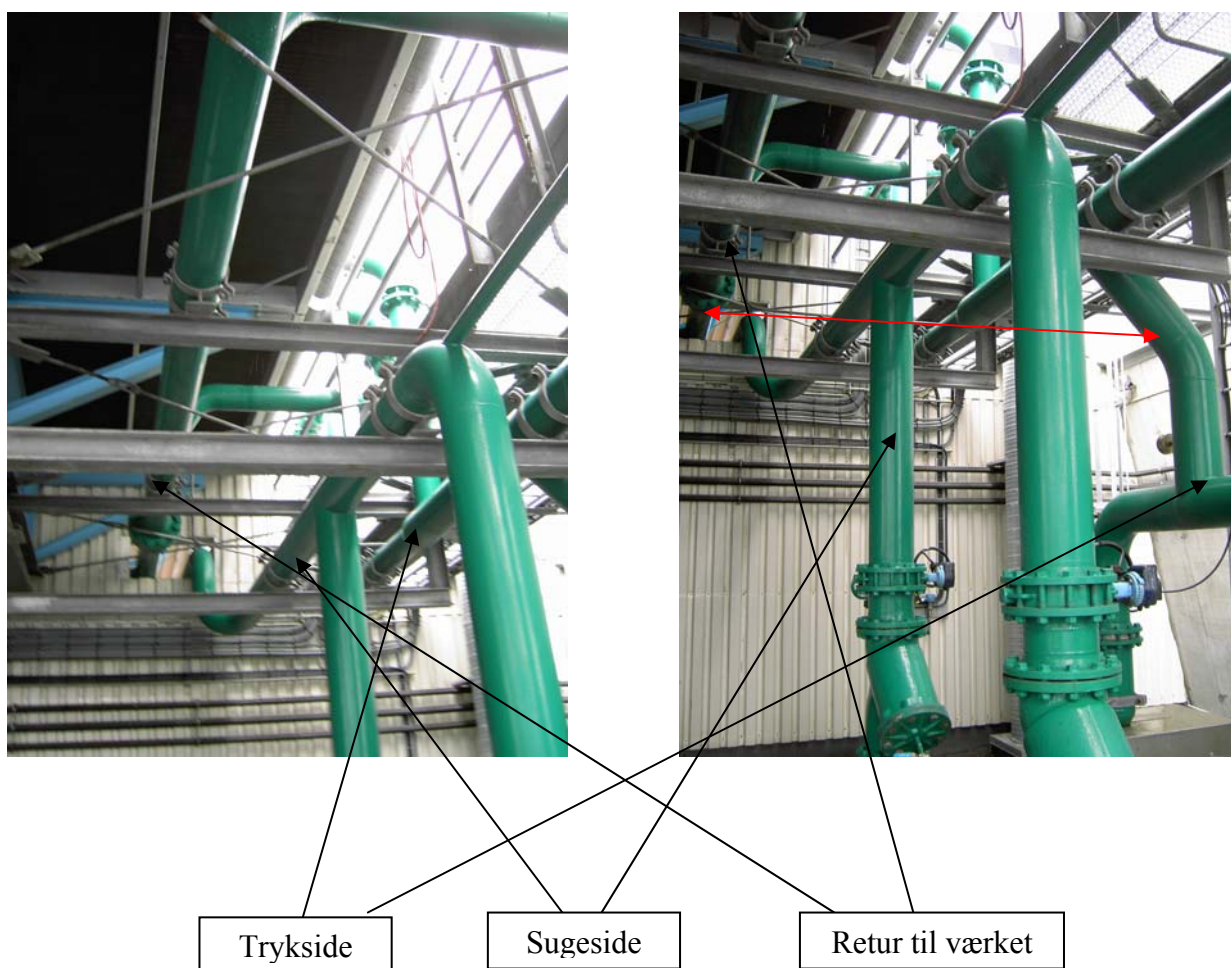
Varmepumpens dimensioner er følgende⁴³:

Længde	= 6,79 meter
Bredde	= 1,99 meter
Højde	= 3,56 meter

Ud fra målene, ses det at der er plads til at placere varmepumpen på den valgte plads. Der skal foruden varmepumpen være plads til en, fjernvarmecirkulationspumpe⁴⁴, som kan cirkulere fjernvarmevandet gennem varmepumpen.

⁴³ Se vedlagt Cd-rom – YORK datablad

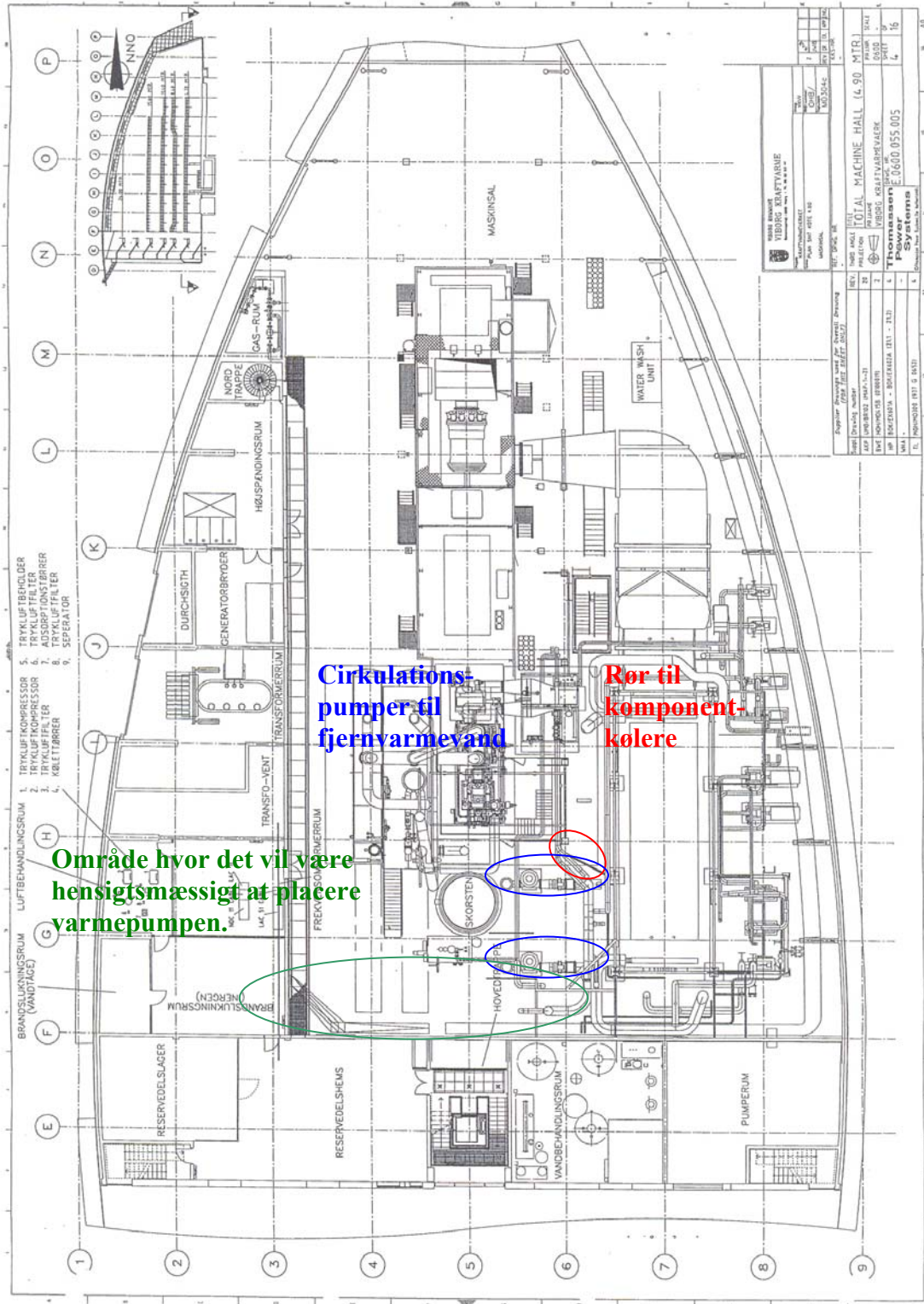
⁴⁴ Bilag 24 – valg af fjernvarmecirkulationspumpe



Figur 28 – Udvendig rørføring af komponentkølerør

På figur 28 ses komponentkølevandets forbindelse (grønne rør), som går fra varmevekslerne i bunden af værket til taget og tilbage igen. Vi har valgt at koble den ind, således, at det er komponentkølevandet på vej op mod taget, der bliver ledt til varmepumpen, før det bliver ledt videre op på taget og retur i det modsatte rør. Grunden til at vandet sendes op på taget i stedet for at flytte pumperne ned i hallen er, at denne installation på nuværende tidspunkt fungerer udmærket, og det ved eventuelle nedbrud/service af varmepumpen stadig skal være muligt at benytte køleventilatorerne på taget.

For at det stadig kan lade sig gøre at cirkulere komponentkølevandet uden om køleventilatorerne, efter at varmepumpen er indkoblet, skal der laves en bypass efter cirkulationspumperne til komponentkølevandet. Pumperne er placeret oppe på taget, umiddelbart før køleventilatorerne. Vi har undersøgt muligheden, for om det kan lade sig gøre, og fundet ud af, at det er muligt hvis denne bypass (markeret med rød pil) placeres umiddelbart efter pumperne og efter køleventilatorerne før vandet bliver ledt tilbage.

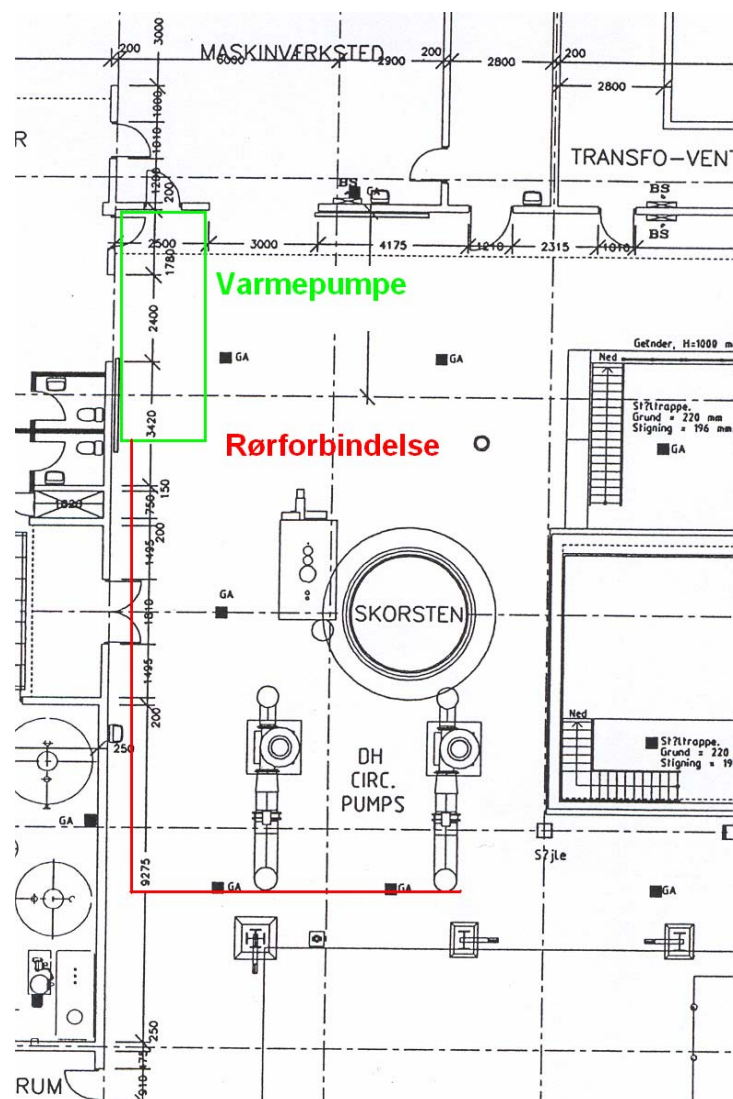


Figur 29 -

Fjernvarmerørene som skal tilsluttes til varmepumpen ses også på billedet til højre (tykt rør nederst i billedet). Da der i varmepumpen og forbindelsesrørene er et trykfald, bliver det derfor nødvendigt at installere en ekstra pumpe, som kan kompensere for dette trykfald, således at det er muligt at lede fjernvarmevandet tilbage til systemet. For at det senere ved valg af cirkulationspumpe er muligt at finde dette trykfald⁴⁵ har vi beregnet længden af rørene.

$$((1780 + 2400 + 3420 + 150 + 750 + 200 + 1495 + 1810 + 1495 + 200 + 4000 + 9000) \cdot 2) + (4500 \cdot 2) = 62400\text{mm} \approx 62 \text{ meter}$$

Den samlede længde rør er beregnet ud fra de mål som ses på figur 30. Der er i beregningen taget højde for at det skal være muligt at tilkoble varmepumpen helt nede ved den fjerneste ende af tilslutningsstedet.



Figur 30 -

⁴⁵ Bilag 24 – Valg af fjernvarmecirkulationspumpe

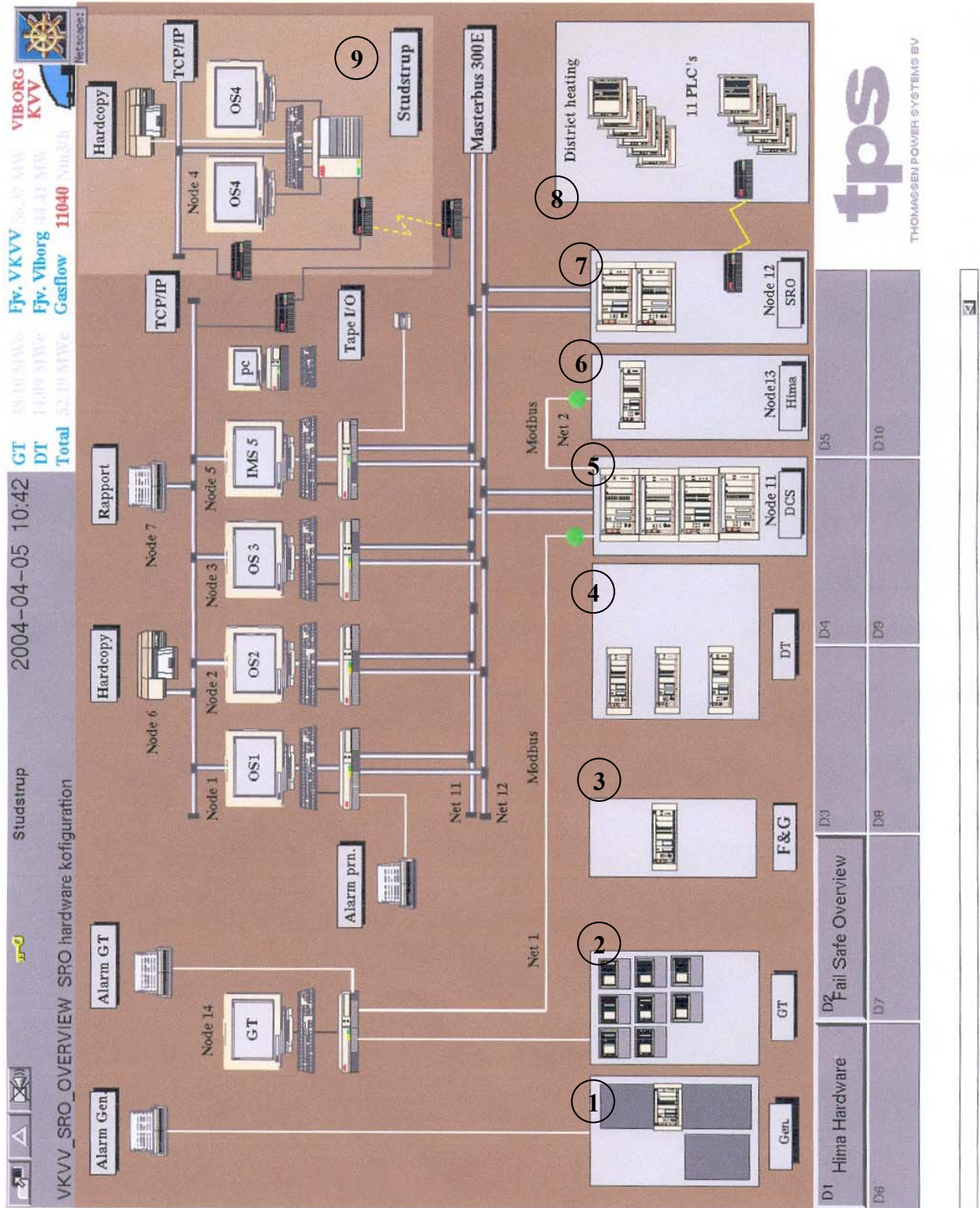


10. Automation

I automationsdelen vil det eksisterende styresystem på Viborg Kraftvarmeværk blive gennemgået. Der vil blive givet forslag til, hvilke komponenter der skal bruges for at implementere varmepumpen i det eksisterende system.

Da varmepumpen leveres med en PLC, vil vi give et forslag til programmering af ind og udgange samt konstruere et sekvensskema til start og stop af varmepumpen.

- Gennemgå Viborgs Styresystem
- Implementering af varmepumpen på det eksisterende system
- Komponenter
- Ind og udgange
- Sekvensstyring af start/stop af varmepumpen



Figur 31 - Opbygning af Viborg Kraftvarmeværks styresystem

10.1 Styresystem på Viborg Kraftvarmeværk

På fig. 31 bus-systemer og netværk vist. Alt hvad der er hårdtfortrådet⁴⁶ er ikke vist.

Generelt er styresystemet opbygget omkring en række PLC'er og et overordnet styresystem fra ABB. Oven på dette er bygget et SRO-anlæg med 3 computere (OS1-OS3), som er placeret i kontrolrummet. Computerne er internt forbundet via et TCP/IP netværk. IM5 computeren logger data, og gemmer på tapebackup.

Masterbus'en er dobbelt fortrådet for sikkerhedens skyld. Dette betyder at, man ved defekt på et kabel har muligt for at styre hele anlægget.

I det efterfølgende er de enkelte komponenter forklaret.

1. Dette er **Generator** beskyttelsen som kører standalone. Denne enhed er leveret sammen med generatoren og overvåger vigtige parametre. Hvis en af disse parametre giver anledning til shutdown, sendes der et signal til sikkerheds PLC'en (6), som giver signal til turbinen om shutdown. Alle signaler til sikkerheds PLC'en er hårdtfortrådet. Der er ikke noget bussystem, hvilket skyldes at man betragter hardware signaler som mere sikre end bussystemet. Diverse alarmer bliver udskrevet på en printer.
2. **GasTurbinen** er leveret som et samlet styre- og overvågningssystem. Det har sin egen skærm i kontrolrummet. Systemet er via et bussystem koblet sammen med **Data Control Systemet** (5), her spejles diverse værdier over i SRO-systemet. Alle vigtige signaler på gasturbinen måles 3 steder. Hvis det ene signal viser ”forkert” gribes der ikke ind, hvorimod der gribes ind hvis der er 2 der forkerte signaler.
3. **Fire & Gas** beskyttelsessystemet er hårdtfortrådet til sikkerhedssystemet. Her sidder en PLC der overvåger og styrer disse funktioner.
4. **DampTurbinen** er hårdtfortrådet til DCS'en. Der er ingen PLC men kun enkelte reguleringer. Hele styringen ligger i DCS systemet.
5. **Data Control Systemet** er et ABB system. Her er en controller der styrer en række ind- og udgangskort. Her er langt de fleste hårdtfortrådede signaler forbundet. SRO-anlægget kommunikerer desuden med dette system.
6. Hima er en sikkerheds PLC'er med dobbelt CPU for ekstra sikkerhed. Alt til denne er hårdtfortrådet. Den snakker sammen med DCS'en via et bussystem.
7. SRO-system.
8. Der er i alt 11 vekslerstationer rundt omkring i Viborg. På vekslerstationerne er der en PLC der styrer og overvåger disse stationer. Ude på selve værkerne er der ingen mulighed for betjening af PLC'en, alt foregår via et telefonmodem til SRO-anlægget. Falder dette modem ud, kan stationerne køre videre og indgreb kan kun ske ved koble en bærbar PC direkte til PLC'en.
9. På Studstrupværket kan hele SRO-systemet overvåges og styres via et modem. Studstrupværket har altid vagten.

⁴⁶ Separat ledning ud til hver komponent



10.2 Krav til regulering af varmepumpen og tilhørende komponenter

Varmepumpen kan leveres med en valgfri PLC, som hovedsageligt tager sig af regulering og overvågning af selve varmepumpen og dertilhørende komponenter. Hertil skal der være en række eksterne ventiler og reguleringsløjfer for, at det er muligt at anvende varmepumpen som komponentkøler. Disse komponenter ønskes også styret fra varmepumpens PLC.

Vi ønsker så vidt muligt at anvende de cirkulationspumper m.v. der eksisterer i dag, så ombygningen bliver så minimal som mulig.

Viborg Kraftvarmeværk ønsker at bibeholde det kølesystem man har i dag. Her bliver kølevandet nedkølet i luftkølede kondensatorer til en temperatur der afhænger af udetemperaturen. Setpunktet kan derfor ændres valgfrit (Typisk 23 – 30°C). Varmepumpen skal kunne overtage denne nedkøling med valgfri setpunkt. Det skal være muligt til enhver tid at skifte fra den ene til den anden køleform. Sker der en fejl på varmepumpen skal der automatisk skiftes til køling med de eksisterende kondensatorer.

Purgepumpen skal opereres manuelt. Den skal typisk køre en gang om ugen for at fjerne ikke kondenserbare gasser (normalt luft og brint dannet ved reaktion mellem vand og stål). Den skal derfor kunne startes manuelt og køre i det tidsrum, der er erfaringsmæssig bestemt.

Varmepumpens generator skal drives med LT-damp fra udstødskedlens produktion af LT-damp. Dampmængden skal kunne reguleres alt efter kølebehovet.

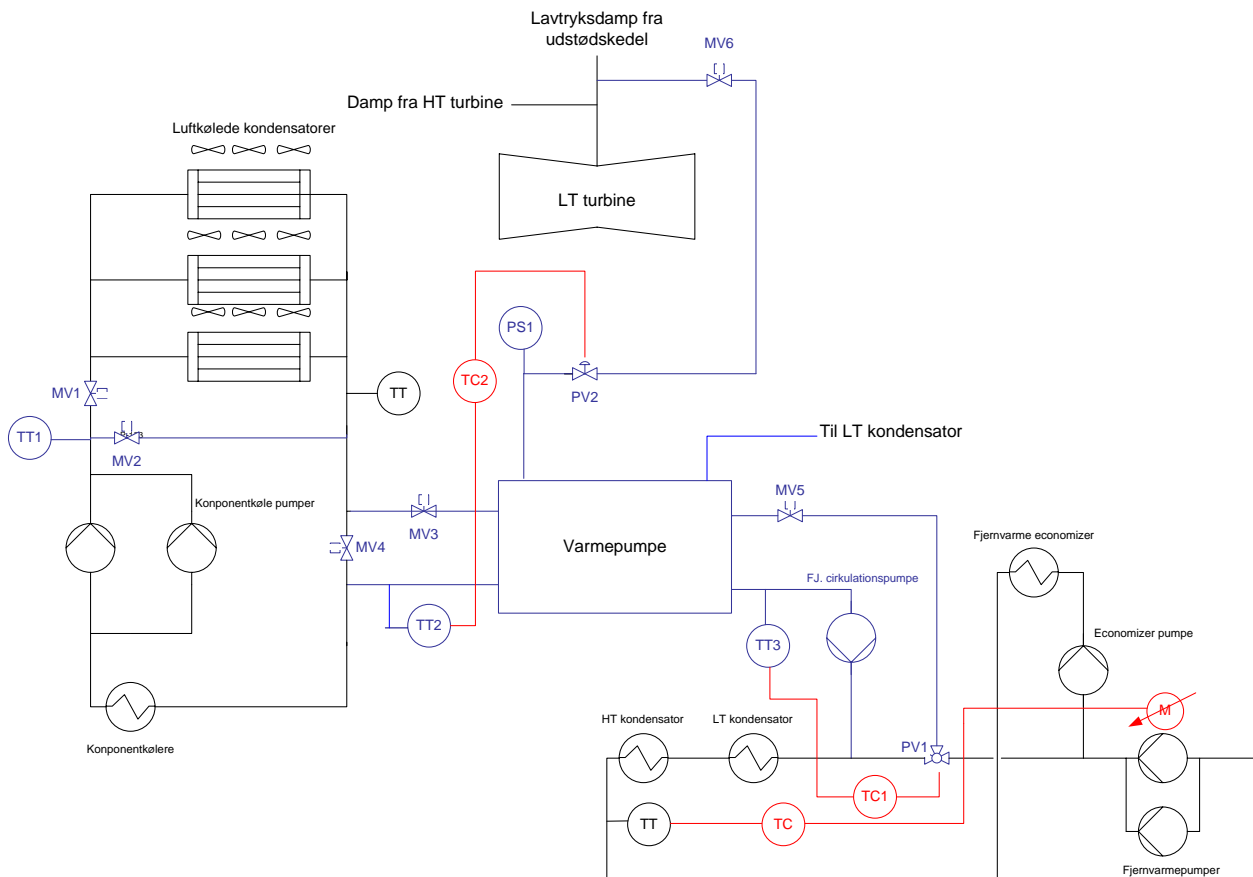
Varmepumpens absorber og kondensator skal køles med fjernvarmereturvand.



10.3 Krav til overvågning af varmepumpen.

Der er en række parametre der skal overvåges for at sikre en problemfri drift af varmepumpen. Hvis en af følgende parametre fejler, skal varmepumpen stoppe og kølevandet automatisk afkøles på taget.

1. Fejl på absorberpumpen
2. Fejl på kølepumpen
3. Fejl på purgepumpen
4. Fejl på fjernvarmecirkulationspumpen
5. Manglende flow på kølevandet
6. Manglende flow på fjernvarmevandet
7. Lav køletemperatur/frost termostaten
8. For højt tryk/temperatur i generatoren
9. For højt niveau i fordamperen
10. Power fejl
11. For højt damptryk/temperatur på dampstrengen



Figur 32 - Placering af eksterne komponenter

10.4 Eksterne komponenter

De komponenter der skal monteres, uden for varmepumpen, er her samlet på en oversigtstegning på fig. 32. De sorte streger repræsenterer det eksisterende anlæg. De blå streger er varmepumpen samt de eksterne komponenter, der skal til for at den kan implementeres. De røde streger er reguleringsstrækninger. Reguleringen af fjernvarmepumperne bliver i dag udført af SRO-anlægget og det skal de blive ved med. De 2 andre reguleringer (TC1 og TC2) skal foretages med varmepumpens PLC.

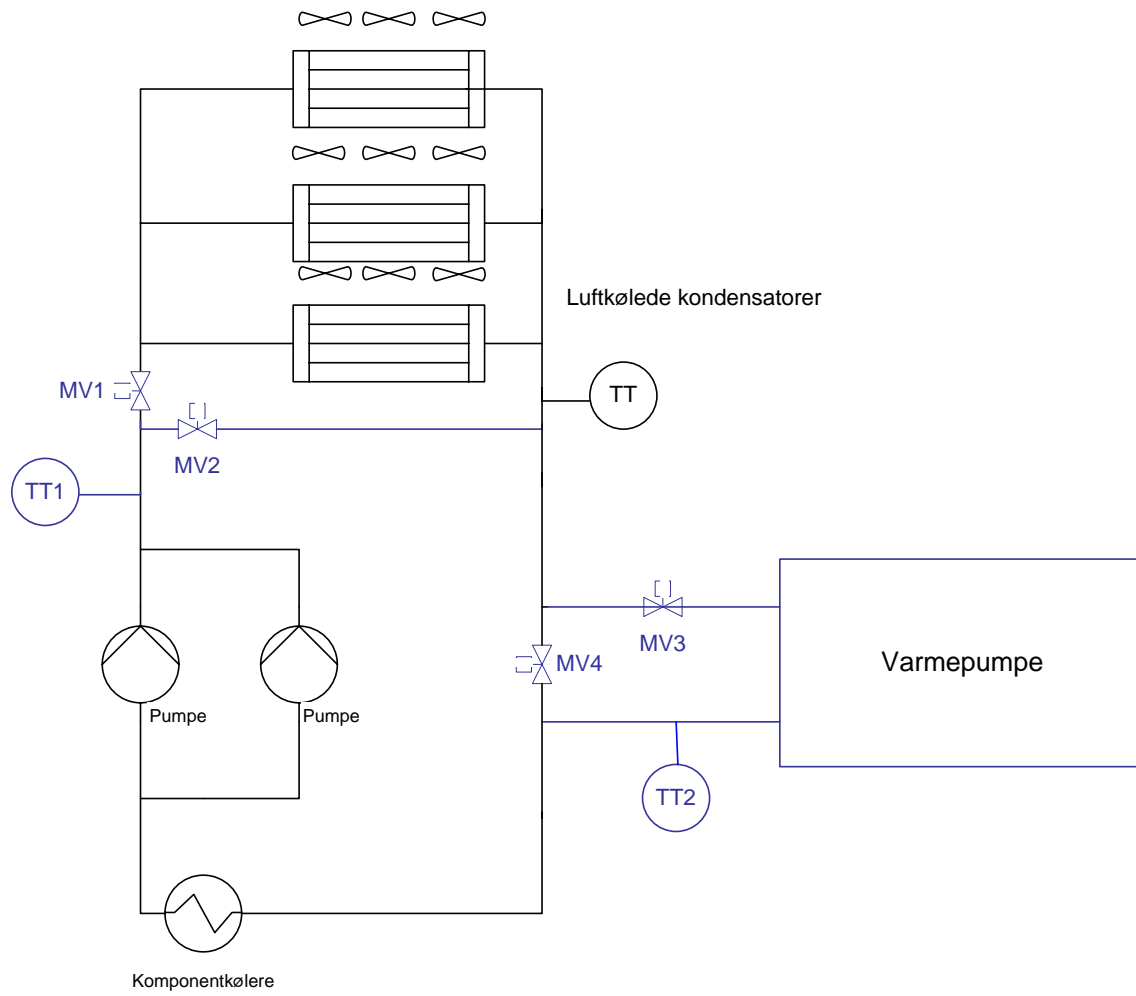
For at opfylde kravet om valgfri kølevandstemperatur mellem 23 og 30 °C, er der indsat en PID regulering (TC2) med valgfrit setpunkt. Procesværdien bestemmes af TT2 og reguleringen udføres af PV2, der bestemmer dampmængden til generatoren.

For at sikre, at flowet gennem varmepumpen ikke reduceres så meget, at temperaturen kommer over 65 °C, er der indsat en PID regulering (TC1) med valgfri setpunkt.

Procesværdien bestemmes af TT3 og reguleringen udføres af PV1, der er en 3-vejs ventil.

Hvis temperaturen (TT2) på afgangen af kølevandet ikke overholder setpunktet, skal der skiftes over til køling med det eksisterende køleanlæg. Det klares ved hjælp af en række magnetventiler. MV1 og MV4 åbnes og MV2 og MV3 lukkes. PV1 stilles så der er lukket til varmepumpen.

På de efterfølgende sider vil komponentkølesystemet, fjernvarmesystemet og dampsystemet blive gennemgået nærmere.



Figur 33 - Komponentkølesystem med varmepumpe

10.4.1 Komponentkølesystem

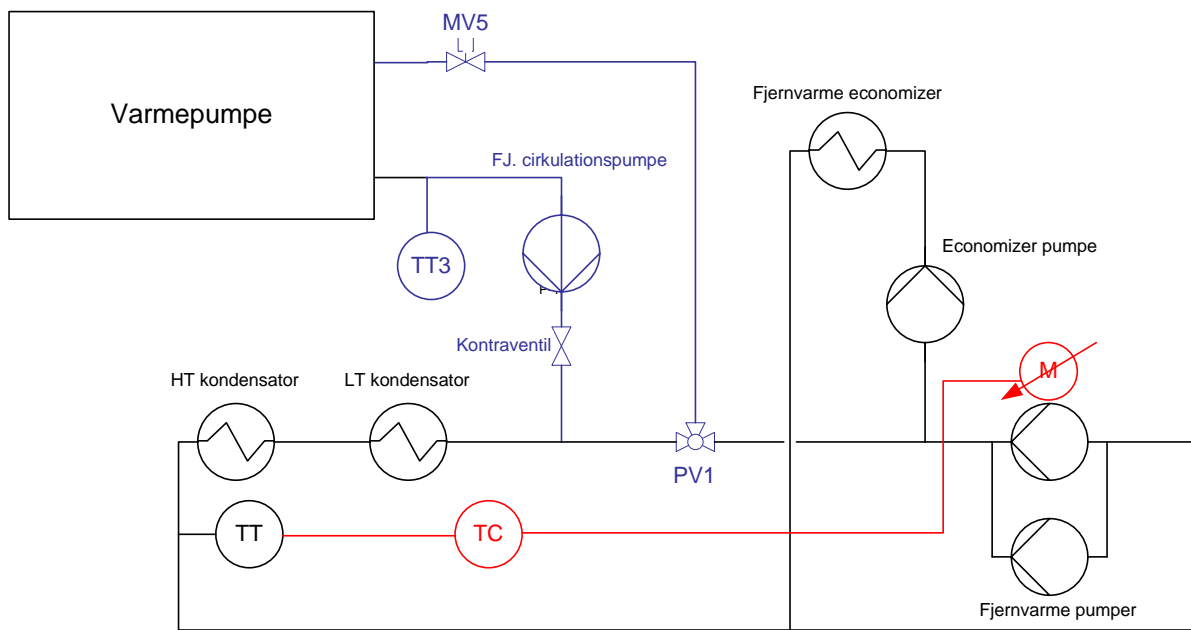
De sorte komponenter/streger er det eksisterende kølesystem, som det tager sig ud i dag, se figur 33. Reguleringen af temperaturen foregår ved at anvende op til 9 blæsere. På hver kondensator er der 3 blæsere der kan startes efter behov⁴⁷. Der reguleres efter temperaturføler TT. Om vinteren kører man typisk med et setpunkt på omkring 23 °C. Om sommeren vil det ikke være muligt at opnå så lav en temperatur på kølevandet, hvor setpunktet hæves til 30°C. Der er en hysteresi i reguleringsløjfen på ca. 2 °C, hvilket sikrer, at der ikke er en eller flere af blæserne, som starter og stopper kontinuerligt.

De blå komponenter/streger er den udbygning af anlægget, der skal til for at kunne anvende varmepumpen som køler. Der skal laves et bypass af kondensatorerne på taget, dette gøres med MV1 og MV2. Varmepumpen skal indsættes på kølevandsstrengens fremløb. Der skal være en magnetventil der kan åbne for cirkulation for varmepumpen (MV3). Der skal indsættes en magnetventil (MV4), som kan bypasse varmepumpen, når den ikke bruges. 2 temperaturfølere (TT1 og TT2) skal indsættes i rørene for at måle temperaturen før og efter varmepumpen.

Cirkulationspumperne er udlagt til 100 % og dermed uden regulering. Der opereres kun med en pumpe af gangen.

I dag er der et konstant flow i kølesystemet, som kun er begrænset af modstanden i systemet. Hvis vi går ind og bygger om på rørsystemet vil modstanden ændre sig. Hvis modstanden stiger vil den cirkulerede mængde kølevand falde, hvilket vil resultere i en højere afgangstemperatur hvor kølevandet forlader komponentkølerne. Falder modstanden derimod vil den cirkulerede mængde kølevand stige og afgangstemperaturen fra komponentkølerne vil falde. Da komponentkølerne ikke er kritiske med den temperatur kølevandet har, idet der er op til 10 °C forskel på sommer og vinter, vil der efter vores mening ikke være problemer forbundet med at flowet ændrer sig en smule.

⁴⁷ Bilag 8 – stationær driftssituation (skærmbillede 2)



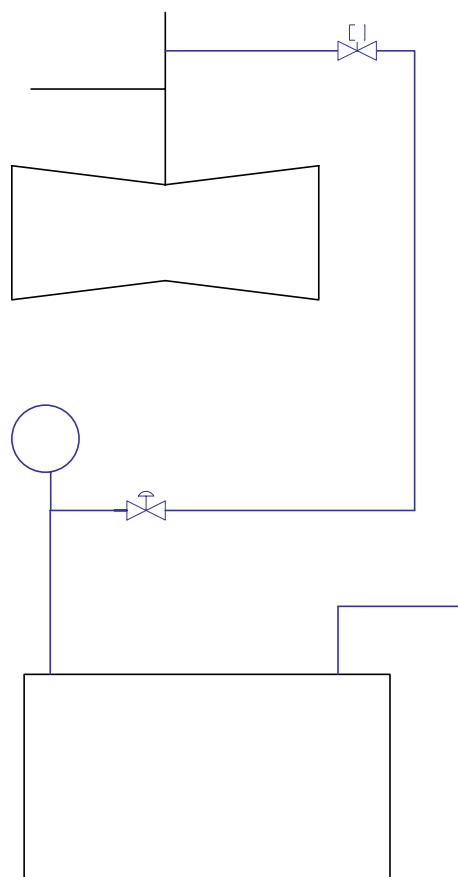
Figur 34 - Fjernvarmesystem med varmpumpe

10.4.2 Fjernvarmesystem

De sorte streger/komponenter er anlægget som det ser ud i dag. Mængden af cirkuleret fjernvarmevand reguleres af fjernvarmepumper, der er monteret med en frekvensomformer (de røde streger). Flowet reguleres ved hjælp af afgangstemperaturen (TT) på HT kondensatoren, som skal være 98 °C.

De blå streger/komponenter er den udbygning af anlægget, der skal til for at kunne benytte varmepumpen til opvarmning af returfjernvarmevandet. Hvorvidt hele mængden af fjernvarmevand eller kun en delstrøm skal gennem varmepumpen bestemmes af 3-vejsreguleringsventilen (PV1). Flowet gennem varmepumpen må ikke komme under et flow, der resulterer i en afgangstemperatur på mere end 65 °C. Vi har tidligere beregnet⁴⁸, at den øgede energitilførsel til fjernvarmevandet pga. varmepumpen, betyder et øget flow af fjernvarmevand på ca. 8 kg/s. Fjernvarmepumperne kører langt fra fuldt lastet i dag og kan sagtes levere 8 kg/s mere. Tidlige i værkes historie har returfjernvarmevandet haft en temperatur på 60 °C, hvilket har, måtte indebære et langt større flow end i dag. Det giver derfor ingen problemer, at flowet øges.

⁴⁸ Se afsnit 9.1.1



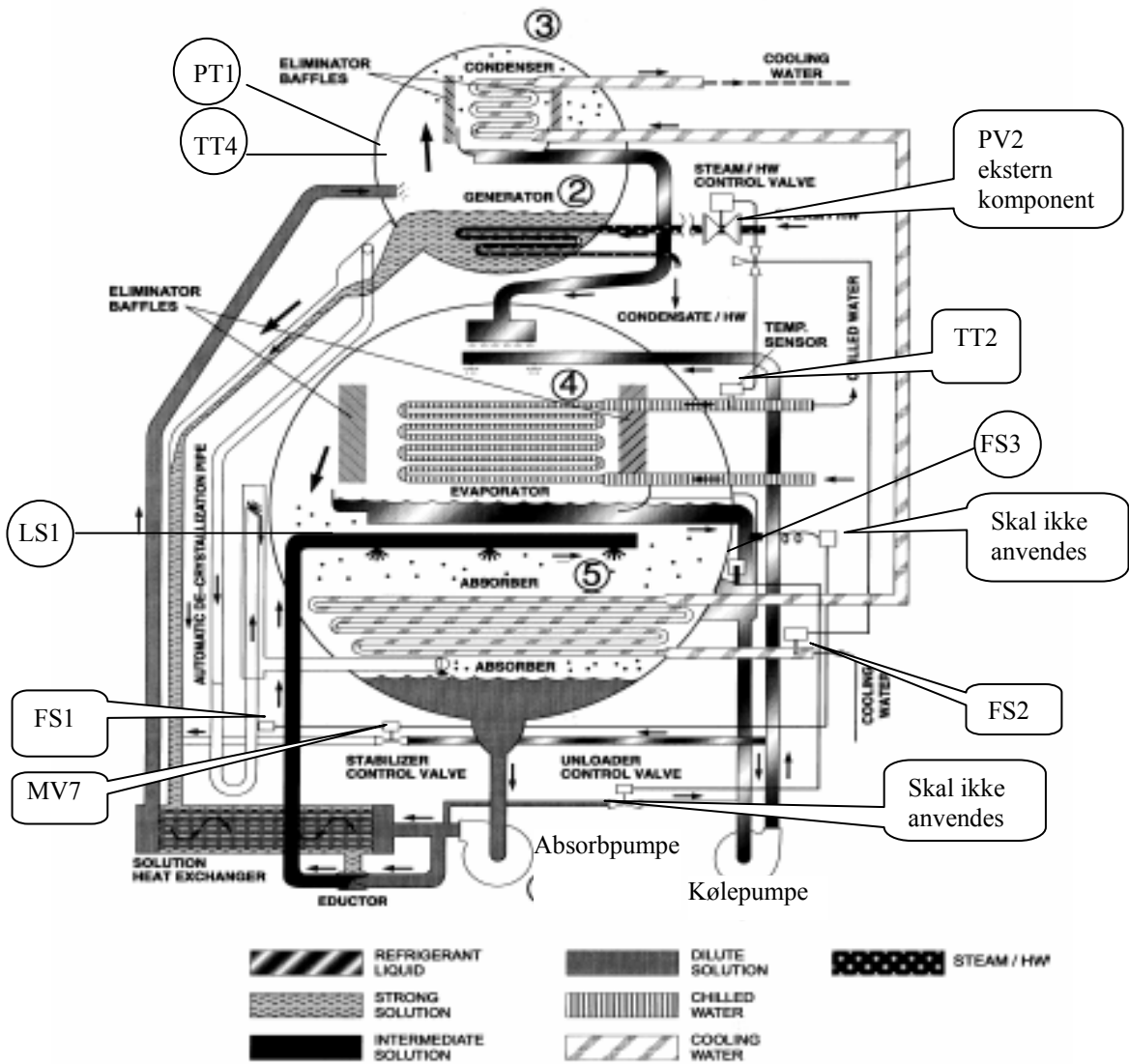
Figur 35 - Dampsystem med varmepumpe

Damp fra HT turbine

10.4.3 Dampsystem

De sorte komponenter/streger (fig. 35) er anlægget som det ses ud i dag. Al damp fra HT-turbinen og lavtryksdampen fra udstødskedlen ledes til LT-turbinen. Her ekspanderer dampen gennem turbinen, hvorved turbinen kan trække en generator der laver el. Dampen fra turbinen ledes til en kondensator hvor dampen kondenseres og kondensatet løber selv ned i HT-kondensatoren.

De blå streger/komponenter er udbygningen med varmepumpen implementeret. Varmepumpen skal bruge en dampmængde til generatoren, den tages fra LT-dampen inden den ledes til turbinen. Mængden af dampen til varmepumpen styres af en reguleringsventil (PV2). Den er styret af temperaturen (TT2 på fig. 35) på afgangens af kølevandet. Dampen forlader varmepumpen som kondensat, som ledes til HT-turbinen, hvor der er et tryk på ca. 1,1 bar absolut, derfor kan kondensatet selv løbe ned i kondensatoren.



Figur 36 Interne komponenter

10.5 Interne komponenter

For at kunne foretage regulering og overvågning af varmepumpen, skal der være en række komponenter til dette formål. Der er fra YORK's side givet forslag til en del af disse komponenter, som kan ses på fig. 36. Varmepumpens regulering skal altid tilpasses den konkrete driftssituation, som den skal arbejde under. Vi har derfor ændret og tilføjet komponenterne så det passer til Viborg Kraftvarmeanlæg.

Unloader Control Valve skal ikke bruges i vores driftssituation, da den kun skal anvendes ved meget lave temperaturer. Dampreguleringsventilen (PV2) som regulerer afgangstemperaturen på kølevandet (TT2) kan valgfrit leveres sammen med varmepumpen. Det er vigtigt at vide temperatur og tryk i generatoren (PT1 og TT4). Stiger disse kan det tyde på, at varmeveksleren er tilstoppet og damptilførslen skal derfor stoppes. Når varmepumpen er i drift er det vigtigt, der er flow på kølevand og fjernvarmevand (FS2 og FS3). Denne type varmepumper er udstyret med et automatisk anti-krystalliseringsystem. Når flowswits (FS1) mærker, at der er flow i røret kan det skyldes at varmeveksleren er tilstoppet. For at opløse krystalliseringen tilsættes rent vand for at sænke koncentrationen af LiBr, hvilket anti-krystalliseringsventilen (MV7) sørger for.



Komponent	Beskrivelse	Placering	IN/OUT	Placering
MV1	Magnetventil	Kølevandssystem	OUT	DCS
MV2	Magnetventil	Kølevandssystem	OUT	DCS
MV3	Magnetventil	Kølevandssystem	OUT	DCS
MV4	Magnetventil	Kølevandssystem	OUT	DCS
MV5	Magnetventil	Fjernvarmesystem	OUT	DCS
MV6	Magnetventil	Dampsystem	OUT	DCS
MV7	Magnetventil	Anti-krystalliseringsventil	OUT	PLC
PV1	Reguleringsventil	Fjernvarmesystem	OUT	PLC
PV2	Reguleringsventil	Dampsystem	OUT	PLC
TT1	Temperaturtransmitter	Kølevandssystem	IN	PLC
TT2	Temperaturtransmitter	Kølevandssystem	IN	PLC
TT3	Temperaturtransmitter	Fjernvarmesystem	IN	PLC
TT4	Temperaturtransmitter	Generator	IN	PLC
FS1	Flowswits	Anti-krystalliseringsrøret	IN	PLC
FS2	Flowswits	Fjernvarmecirkulationen	IN	PLC
FS3	Flowswits	Kølevandet	IN	PLC
PT1	Tryktransmitter	Generator	IN	PLC
LS1	Niveau swits	Høj niveau fordamper	IN	PLC
Kondensatpumpe	Kondensatpumpe	Dampsystem	OUT	PLC
Fj. Cirkulationspumpe	Fj. Cirkulationspumpe	Fjernvarmesystem	OUT	PLC
Absorberpumpe	Absorberpumpe		OUT	PLC
Kølepumpe	Kølepumpe		OUT	PLC
Purgepumpe	Purgepumpe		OUT	PLC
Fj. Cirkulationpumpe	Termofejl		IN	PLC
Absorberpumpe	Termofejl		IN	PLC
Kølepumpe	Termofejl		IN	PLC
Purgepumpe	Termofejl		IN	PLC

10.5.1 Komponentliste

Da det skal være muligt at operere med det eksisterende kølesystem helt uden om varmepumpen er der en række ventiler der skal kunne opereres uden, at der er strøm på varmepumpen (MV1-MV6). Disse ventiler er derfor opkoblet direkte til DCS'en, de resterende er tilsluttet varmepumpens PLC.

Hvorvidt der ønskes at bruge motorstyrede eller luftstyrede ventiler er der ikke taget hensyn til. Alle on/off ventiler er benævnt magnetventiler.

Alle temperaturfølere er af typen PT100 med transmitterindlæg 4-20mA.

Reguleringsventiler reguleres ved hjælp af et strømsignal mellem 4-20mA.

Flowsvits indeholder et kontaktsæt.



10.6 Kommunikation mellem PLC og SRO-anlæg

Det er tiltænkt at PLC'en på varmpumpen skal kommunikere med SRO-anlægget via DCS'en hvor signalerne overføres med hårdtfortrådet signaler, dette betyder at, der ikke er noget bussystem mellem varmpumpens PLC og DCS'en. Denne løsning er valgt, fordi det er simpelt og fordi alt styring af varmpumpen ligger ovre i PLC'en. Der skal derfor kun overføres signaler til overvågning.

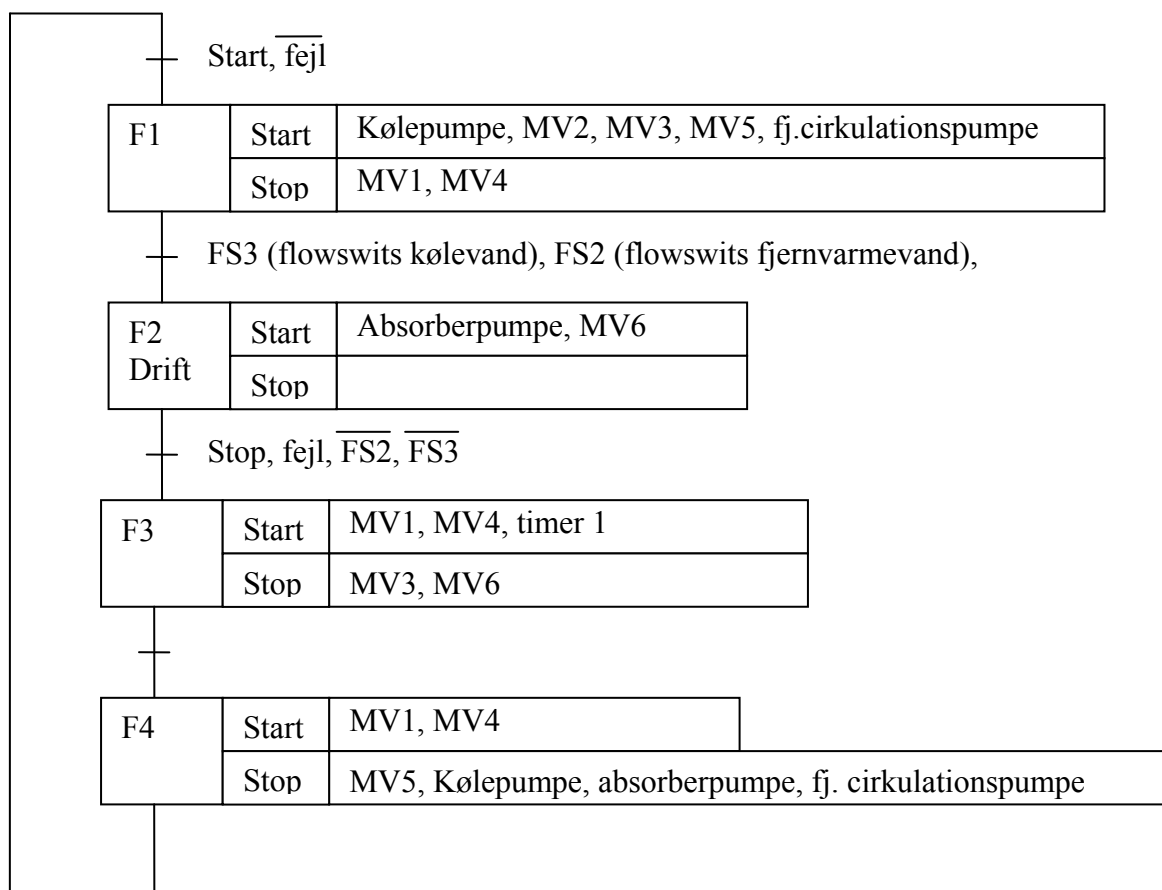
På SRO-anlægget skal der opbygges et eller flere skærbilleder af varmpumpen, hvor de vigtigste temperaturer, tryk, pumper osv. vises.

MV1-MV6 er rent fysisk opkoblet direkte på DCS'en. Disse signaler skal ikke spejles over i SRO'en, men varmpumpen skal kunne operere med signalerne fra ventilerne når den er i drift. Når den ikke er i drift varetages kontrollen med disse ventiler af DCS'en.

Liste over signaler der skal spejles over i SRO-anlægget.

Komponent	Beskrivelse	IN/OUT på PLC
MV7	Magnetventil	Digital OUT
PV1	Reguleringsventil	Analog OUT
PV2	Reguleringsventil	Analog OUT
TT1	Temperaturtransmitter	Analog OUT
TT2	Temperaturtransmitter	Analog OUT
TT3	Temperaturtransmitter	Analog OUT
TT4	Temperaturtransmitter	Analog OUT
FS1	Flowswits	Digital OUT
FS2	Flowswits	Digital OUT
FS3	Flowswits	Digital OUT
PT1	Tryktransmitter	Analog OUT
LS1	Niveau swits	Digital OUT
Kondensatpumpe	Kondensatpumpe	Digital OUT
Fj. Cirkulation pumpe	Fj. Cirkulation pumpe	Digital OUT
Absorberpumpe	Absorberpumpe	Digital OUT
Kølepumpe	Kølepumpe	Digital OUT
Purgepumpe	Purgepumpe	Digital OUT
Fejl		Digital OUT
Start/Stop		Digital IN
MV1	Magnetventil	Digital OUT
MV2	Magnetventil	Digital OUT
MV3	Magnetventil	Digital OUT
MV4	Magnetventil	Digital OUT
MV5	Magnetventil	Digital OUT
MV6	Magnetventil	Digital OUT

Disse signaler skal, af leverandøren af varmpumpen, ledes til en klemrække, så de kan fortrådes til DCS'en. Der skal endvidere være 6 udgange til MV1-MV6, så varmpumpen kan operere med disse når den er i drift.



Figur 37 Sekvensstyring for start/stop af varmepumpe

10.7 Start/stop procedure

Ved opstart af varmepumpen skal sekvensstyring anvendes figur 37. Det sikrer, at der ikke bliver lukket damp på systemet før varmepumpen er klar til drift.

1. Det er tiltænkt at varmepumpen startes fra SRO-anlægget, hvorfra der skal komme et startsignal, når den er klar til, at varmepumpen skal startes. Der må ikke være nogen registreret fejl på varmepumpen inden den opstartes, dog er flow switch for kølevand og fjernvarmevand ikke aktiveret. Herefter kan der skiftes om, så kølevandet strømmer gennem varmepumpen. Kølepumpen startes også.
2. Når der er flow på kølevand og fjernvarmevand kan absorberpumpen startes og der kan åbnes for damp til varmepumpen.

Varmepumpen er nu i drift og regulerer dampmængden efter kølevandsbehovet. For at lukke ned for varmepumpen, skal sekvensen egentligt bare køres i omvendt rækkefølge.

3. Dampventilen lukkes, ventiler til kølevand stilles så kølingen foretages på det eksisterende køleanlæg.
4. Timer 1 er indsat for at sikre køling af varmepumpen en tid efter at dampen er lukket. Efter timer 1 er udløbet kan fjernvarmecirkulationen lukkes og de resterende pumper slukkes.



10.8 Overvågning af varmepumpen

Som angivet i kravene til varmepumpen, er der en del overvågning, der skal sikre, at varmepumpen kun kører, når den er driftsklar. Derfor skal der i PLC'en laves et kredsløb, der overvåger alle sikkerhedsfunktioner og lukker varmepumpen ned, hvis der opstår fejl. De paramenter der overvåges er følgende.

- Fejl på absorberpumpen
- Fejl på kølepumpen
- Fejl på purgepumpen
- Manglende flow på kølevand
- Manglende flow på fjernvarmevand
- For lav køletemperatur
- For højt tryk/temperatur i generatoren
- Højt niveau fordamper
- Power fejl
- Højt damptryk/temperatur

Hvis en af disse fejl forekommer trækkes der et internt relæ kaldet fejl. I frekvensstyringen er dette parameter indsat, så der ikke kan startes hvis det er aktiveret, og kommer der fejl under drift lukkes varmepumpen ned og kølingen af vandet foretages af de eksisterende kondensatorer.



10.9 Kommentarer til automation

Dette skal ses som et forslag til en mulig implementering og styring af varmepumpen. Det er klart, at styringen kan gøres meget mere avanceret, med mange flere overvågningsmuligheder.

Purgepumpen opereres manuelt, men der er flere steder bl.a. Thisted Kraftvarmeværk hvor der er lavet et automatisk system, hvor purgepumpen kører automatisk en tid hver dag. Tiden beror på erfaring. Vi vil anbefale, at man får lavet et tilsvarende system på Viborg Kraftvarmeværk, når der er indsamlet tilstrækkeligt med driftserfaringer.

En anden mulighed er at få varmepumpens PLC leveret med et kommunikationskort, der kan kommunikere med det eksisterende ABB-system på Viborg Kraftvarme. I så fald vil det være muligt, at placere mere styring i SRO-anlægget.

Det kan lade sig gøre, at få leveret varmepumpen helt uden en PLC og forbinde alle reguleringskomponenter, på og omkring varmepumpen, direkte til DCS. Dette vil forenkle systemerne, da der ikke vil være endnu en PLC, man er nødt til at sætte sig ind i. Og det vil heller ikke være nødvendigt at tilkalde en tekniker for at foretage ændring i styringen.

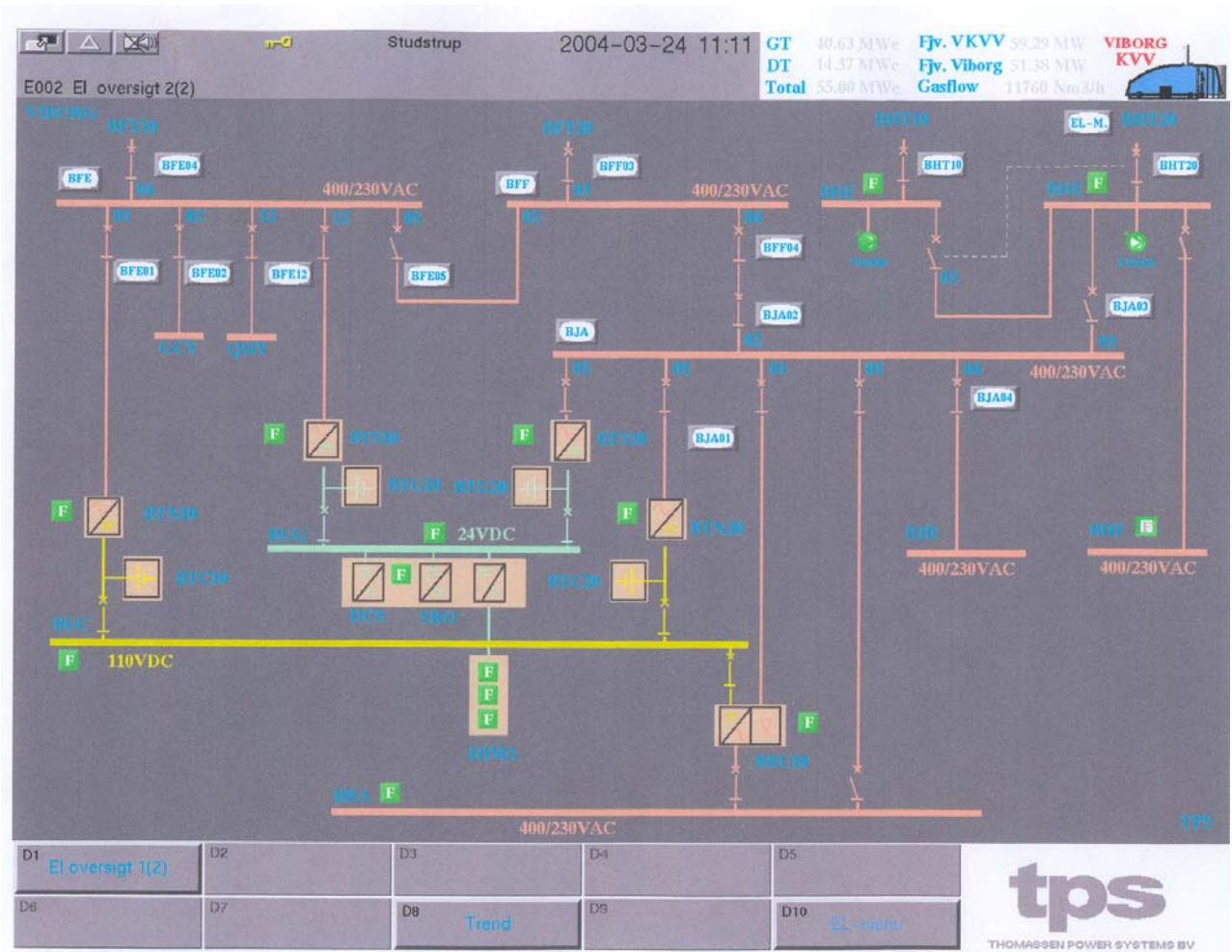


11. Installation

Som beskrevet under opgaveafgrænsningen, ønsker vi med dette afsnit at give en så sigende indsigt i løsningsforslagets el-installation, som rammerne for projektet muliggør. Derfor har vi valgt følgende punkter til nærmere gennemgang.

- Placering af varmepumpen samt hjælpekomponenter i den eksisterende installation
- Praktisk opbygning af el-forsyning til varmepumpen samt hjælpe komponenter
- Belastning af tavle BFF
- Dimensionering af hovedleder samt beskyttelse
- Dimensionering af gruppeledere samt beskyttelse
- Selektivitet mellem beskyttelses komponenter
- Absorptionspumpens krav til el-forsyningen
- Efterlevelse af anbefalet spændingsfald
- Risikovurdering (BIB, BDB og KB)

Hjælpekomponenterne som der tages højde for, under beskrivelse og dimensionering vil begrænse sig til fjernvarmecirkulationspumpen.



Figur 38 - Tavle oversigt

11.1 Placering i den eksisterende installation

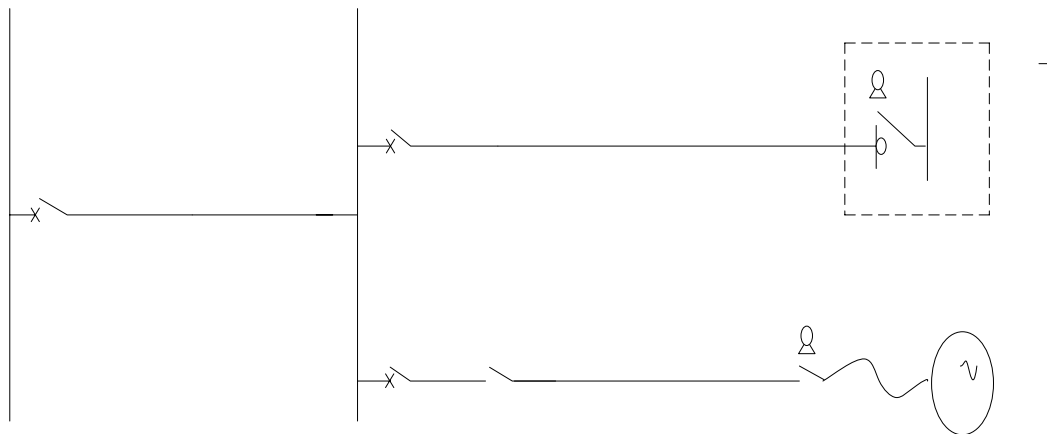
Placeringen af varmepumpen samt hjælpekomponenter, i den eksisterende installation, er foretaget i samarbejde med Viborg Kraftvarmeværks installatør.

Belastningen af værkets tavler og fysisk installation, var den væsentlige faktor for valg af en konkret tavle til udbygning. Værket ønsker en placering der opretholdt høj driftssikkerhed, samt muligheden for afprøvning af de enkelte komponenter under eftersyn.

Med disse overvejelser in mente, vil vores fortsatte beskrivelse af anlægget blive foretaget ved installation på tavle BFF der ses på figur 38. Denne tavle er kun svagt belastet, og derfor tillader den fysiske installation af varmepumpen. Varmepumpens el-forsyning vil ikke blive udført i dupleks, da kun få vitale komponenter på det eksisterende anlæg er udført således. Og desuden vil en installation af varmepumpen blive koblet parallelt med det eksisterende komponentkølesystem, hvilket ikke nødvendiggør varmepumpens funktionalitet under drift.

Tavle BFF bliver forsynet fra transformer BTF20, der er en af tre transformere der hver levere 400V til værkets egetforbrug.

Ved at placere udbygningen på tavle BFF imødekommes værkets installatørs ønske om at kunne afprøve varmepumpen under eftersyn, idet tavle BFF kan forsynes med 400V fra en stikledning, der ikke kommer fra huset. Dette ses på figur38, her forsynes den ene tavle BHE fra forsyningen BHT20. Denne forsyning muliggør, at tavle BJA og BFF kan kobles ind ved at slutte afbryder BJA03. Hertil skal der siges, at der ikke er tale om drift under disse forhold, men udelukkende afprøvning af materiel, mens det resterende anlæg er ude af drift.



Figur 39 - Kredsskema over den nye installation

11.2 Praktisk opbygning af el-forsyning

Den praktiske opbygning af el-forsyningen til varmepumpen og dens hjælpekomponenter, har vi på samme måde som placeringen af udbygningen, foretaget i samarbejde med Viborg Kraftvarmeværks installatør. Dette skyldes, at vi ønsker at opbygge forsyningen til varmepumpen, på samme måde som den nuværende el-installation, hvilket vil simplificere installationen og gøre fejlfinding lettere for værkets driftspersonel.

På figur 39, er der skitseret et 1-stregs kredsskema, der lever op til installatørens krav om praktisk anvendelig installation og muliggør sig inden for IEC regler. Underne vil vi kort gennemgå opbygningen, af elforsyningen.

Maksimalafbryder i tavle BFF

Til beskyttelse af hovedlederen til tavle BFV benytter vi en maksimalafbryder. Denne skal stå for overbelastningsbeskyttelsen samt kortslutningsbeskyttelsen af hovedlederen. Ligeledes er en praktisk udførsel på denne måde, i overensstemmelse med de nuværende installationer, der lever op til krav om fjernkontrol og overvågning.

Tavle BFV

Dette er en ny tavle der skal placeres i nærheden af varmepumpen. BFV skal ikke alene forsyne varmepumpen men også de tilhørende hjælpekomponenter, hvilket i dette tilfælde begrænser sig til fjernvarmecirkulationspumpen. Tavlen skal beskyttes ud fra de krav som belastning og kortslutningsniveauer stiller, dette er op til leverandøren af tavlen.

Motorværn i tavle BFV

Til overbelastningsbeskyttelse og kortslutningsbeskyttelse af fjernvarmecirkulationspumpen benytter vi et motorværn.

Kontaktor i tavle BFV

Da fjernvarmecirkulationspumpen skal kunne klare jævnlige driftsstart og -stop, benytter vi en kontaktor til indkobling og udkobling.

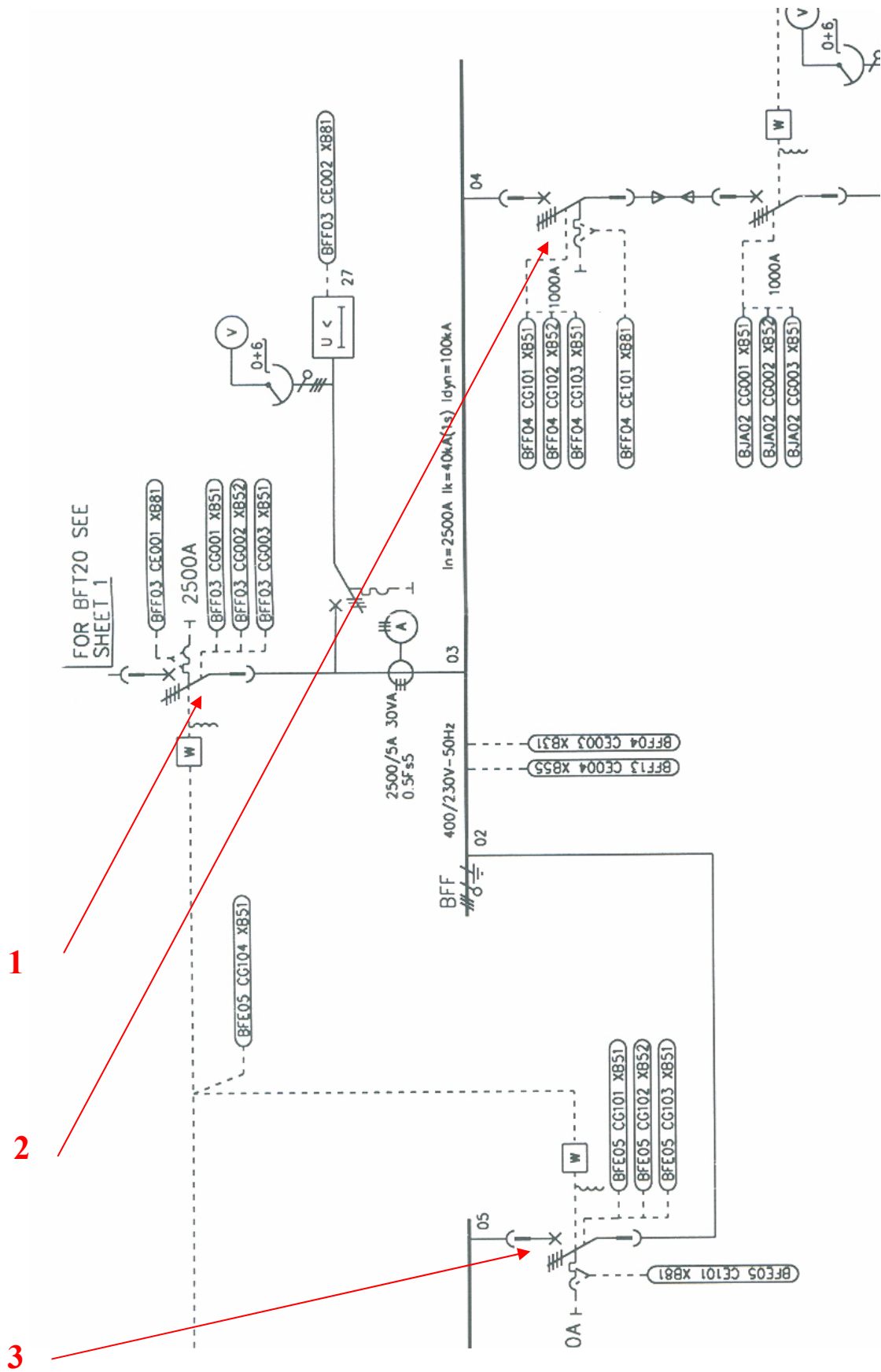
Automatsikringer i tavle BFV

Når varmepumpen kommer fra leverandøren, skal der kun tilkobles en forsyningsleder til forsyningsklemmerne i styretavlen. Denne forsyningsleder er en installation, som skal beskyttes efter kravene i Stærkstrømsbekendtgørelsen afsnit 6. I vores tilfælde har vi valgt at foretage denne beskyttelse med en automatsikring, som både tager sig af OB og KB.

Varmepumpens styretavle

I denne styretavle er der indbygget det beskyttelsesudstyr, der er lovkrav i maskindirektivet afsnit 204-1. Der sidder i indgangen til styretavle på varmepumpen der en forsyningsafbryder⁴⁹ som afbryder forsyningen til varmepumpen. Der vil ikke blive taget stilling til afbrydelsen af styrespændingen fra SRO anlægget, som skal afbryde samtidig med forsyningsafbryderen.

⁴⁹ Maskindirektiv afsnit 204-1 punkt 5.3



Figur 40 - Enkelt stregs diagram over tavle BFF til og afgang

11.3 Belastning af tavle BFF

Inden installationen af varmepumpen og de dertil hørende hjælpekomponenter skal det dokumenteres hvorvidt tavle BFF, kan klare den yderlige belastning.

Dokumentationen af hvorvidt tavle BFF kan holde til den yderlige belastning, vil ske ud fra værket's tavle oversigter, der viser den maksimale belastning af tavle BFF på nuværende tidspunkt.

På figur 40 ses oversigten over til- og afgang på tavle BFF. De følgende beskrivelser er taget med udgangspunkt i skitsen.

1. forsyningsledningens maksimalafbryder BFF03 til tavle BFF har en mærke strøm på 2500A. Denne er på nuværende tidspunkt indstillet med en In på 2250A⁵⁰
2. maksimalafbryder BFF04 til forsyningsledningen til tavle BJA. Denne har en mærke strøm på 1000A.
3. maksimalafbryder BFE05 forbinder tavle BFF, der er forsynet af transformere BFT20, med tavle BFE, der er forsynet af transformere BFT10. Forbindelsen mellem de to tavler er under normal drift ikke koblet ind, og benyttes kun i nødstilfælde ved transformere havari, samt afprøvning under eftersyn.

Vi kan ud fra disse oplysninger konkludere, at tavle BFF kun er belastet med 1000 A, hvilket er væsentligt under tavlen overbelastningsbeskyttelse på 2250 A. Dette vil muliggøre installation af varmepumpen og dens hjælpekomponenter på tavle BFF.

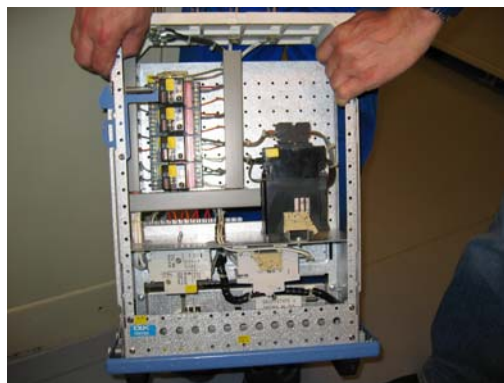
Det vil således være muligt at koble varmepumpen samt hjælpekomponenter ind på tavle BFF, da den kun optager en strøm på $46,6A \angle 28,1^\circ$ ⁵¹, uden at der skal justeres ved indstillingen på maksimalafbryder BFF03.

I praksis vil man muligvis foretage en ny indstilling af maksimalafbryder BFF03, for at opretholde den samme driftssikkerhed i installationen som er gældende nu.

Der vil ikke blive foretaget yderlige klarlægning, af hvorvidt tavle BFF kan klare den yderlige belastning, men det er overvejende sandsynligt.

⁵⁰ Bilag 13 – justerings oversigt for forsynings maksimalafbryder i tavle BFF

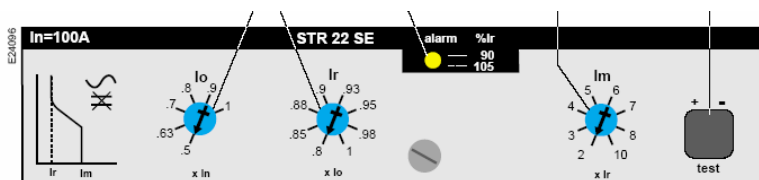
⁵¹ Bilag 9 – belastning af varmepumpen samt hjælpekomponenter



Figur 41 - Skuffe



Figur 42 skuffearrangement i tavle BFF



Figur 43 Indstillingspanel for STR22 SE

11.4 Dimensionering af hovedleder samt beskyttelse

Inden dimensioneringen af hovedleder og andre komponenter i el-forsyningen til varmepumpen og dens hjælpekomponenter, skal belastningen for disse fastligges⁵². De følgende dimensioneringer bliver foretaget med udgangspunkt i IEC regler i Stærkstrømsbekendtgørelsen afsnit 6.

Tavle BFF er fabrikeret af Dansk Lavspændings Konstruktion A/S. Effektfordelingstavlen som de har leveret er opbygget af et skuffesystem, der således indeholder den eller de funktioner man ønsker til den enkelte hoved/gruppeleder, hvilket i vores tilfælde skal være en maksimalafbryder der beskytter hovedlederen til tavle BFV samt hjælperelæer og overvågningsudstyr der sidder i skuffearrangement, på figur 41 og 42.

Overbelastningsbeskyttelse af Hovedleder

$$I_{nob} \geq I_B \quad \Rightarrow \quad I_{nob} \geq 46,6 A$$

Valg til beskyttelse:

Compact NS100 H circuit breaker kombineret med en STR22 SE electronic trip unit

Indstilling af trip unit der ses på figur 43

$$I_o = I_n \cdot I_{o\text{Indstilling}} \Rightarrow 100 \cdot 0,5 = 50 A$$

$$I_{r\text{Indstilling}} = \frac{I_{nob}}{I_o} \Rightarrow \frac{46,6}{50} = 0,93$$

Dimensionering af hovedleder til BFV

Krav ud SBEi afsnit 6 fra punkt 433 side 71

$$I_z \geq \frac{I_{nob}}{K_s \cdot K_t}$$

Ud fra temperaturmålinger foretaget i de respektive områder på Viborg Kraftvarmeværk, vil temperaturen ikke overstige 40 grader celsius. Til installation benyttes PEX-cu kabel. Dette medføre at korrektion for temperaturen bliver som følgende ud fra tabel 52-f1 side 169 SBEi afsnit 6.

$$K_t = 0,91$$

⁵² Bilag 9 - udregning af belastning for varmepumpen samt hjælpekomponenter



Figur 44 - gennemføring til kabelrum gennem gulv



Figur 46 - Kabelrum under tavlerum



Figur 45 - Skitse over kortslutnings steder

Lederen til tavle BFV skal føres fra skuffen i tavle BFF, gennem gulvet figur 44, og ned på en kabelstige, der hænger frit i kabelrummet figur 45. Installatøren fra værket vil lade den nye leder ligge på den nederste kabelstige, hvor der er mest plads og luft omkring kablet. Ved korrektionen for samlet fremføring ud fra SBEi afsnit 6 tabel 52-G1 side 171, tager vi udgangspunkt i gennemføringen fra tavlerummet til kabelrummet, sammen med 4 andre kabler, række 1 kolonne 5.

$$K_s = 0,60$$

Herefter kan vi beregne mindste mærkeværdi for kablet.

$$I_{ZNØD} = \frac{46,6}{0,60 \cdot 0,91} = 85,3A$$

Valg af kabel tabel 52-E11 kolonne 3 side 167.

5G16 PEX-cu med en mærkestrøm på 100A

Indstilling af kortslutningsbeskyttelse samt kontrol af kortslutningsniveauer

For at påvise om maksimalafbryderen kan holde til den maksimale kortslutningsstrøm der vil optræde SBEi afsnit 6 punkt 434, og samtidig være i stand til at koble ud på den mindste skal I_{k3fmax} og I_{kfNmin} udregnes på følgende steder se figur 46. Der skal her siges, at det er et TN-C system vi har at gøre med, hvilket ikke vil ændre på I_{kfNmin} og $I_{kfPEmin}$, så længe ledertværsnittene til kortslutningspunktet er ens. Impedanser før tavle BFF er udregnet på bilag 10.

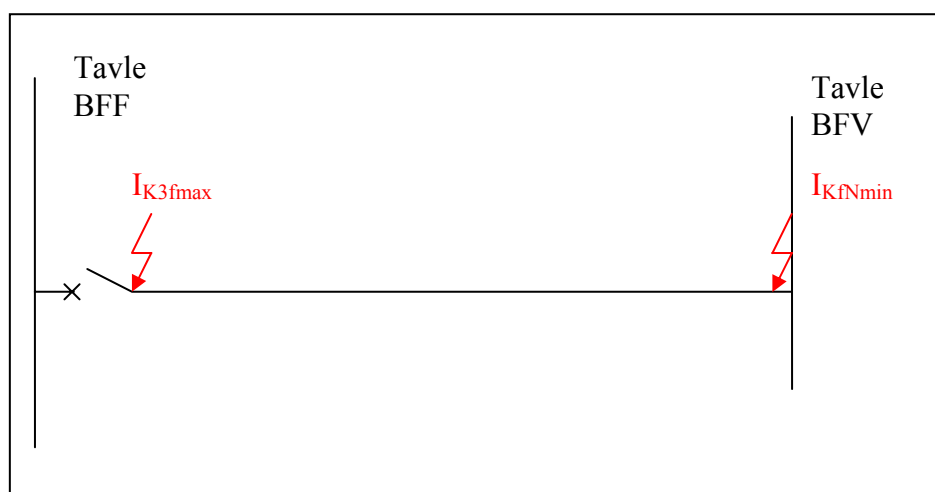
Udregning af hovedlederens 5G16 PEX-cu impedans ud fra værdier Elektroteknik bog 6 s. 122 og s. 128.

$$R_{HLBFV} = \frac{R_{L/km} \cdot l}{1000} \Rightarrow \frac{1,15 \cdot 48}{1000} = 55,2m\Omega$$

$$X_{HLBFV} = \frac{X_{L/km} \cdot l}{1000} \Rightarrow \frac{0,107 \cdot 48}{1000} = 5,1m\Omega$$

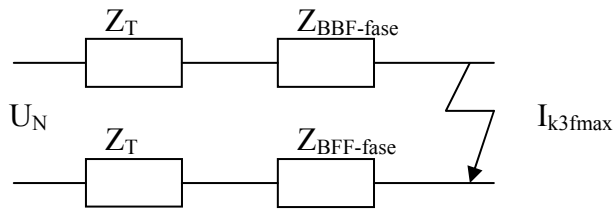
$$Z_{HLBFV} = \sqrt{R_{HLBFV}^2 + X_{HLBFV}^2} \Rightarrow \sqrt{55,2^2 + 5,1^2} = 55,4m\Omega$$

$$\varphi_{HLBFV} = \frac{R_{HLBFV}}{Z_{HLBFV}} a \cos \Rightarrow \frac{55,2}{55,4} a \cos = 5,3 \text{ grader}$$



Figur 47 - Skitse over kortslutnings steder i HLBFV

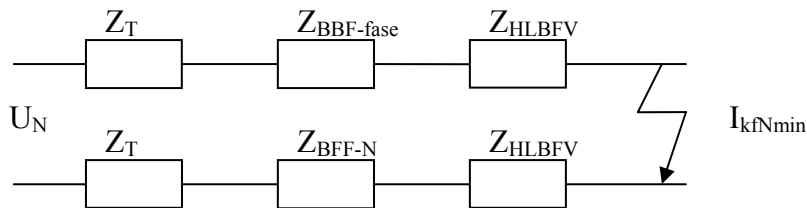
Udregning af største kortslutningsstrøm i tavle BFF



$$I_{K3f \max} = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot (Z_T + Z_{BFF-fase})} \Rightarrow \frac{400}{\sqrt{3} \cdot (6,65 + 1) \cdot 10^{-3}} = 30,2 \text{ kA}$$

I NS100 H datablad er den maksimale kortslutningsstrøm opgivet til 70kA, hvilket er væsentligt højere end den maksimale kortslutningsstrøm der kan forekomme i tavle BFF.

Udregning af den mindste kortslutningsstrøm

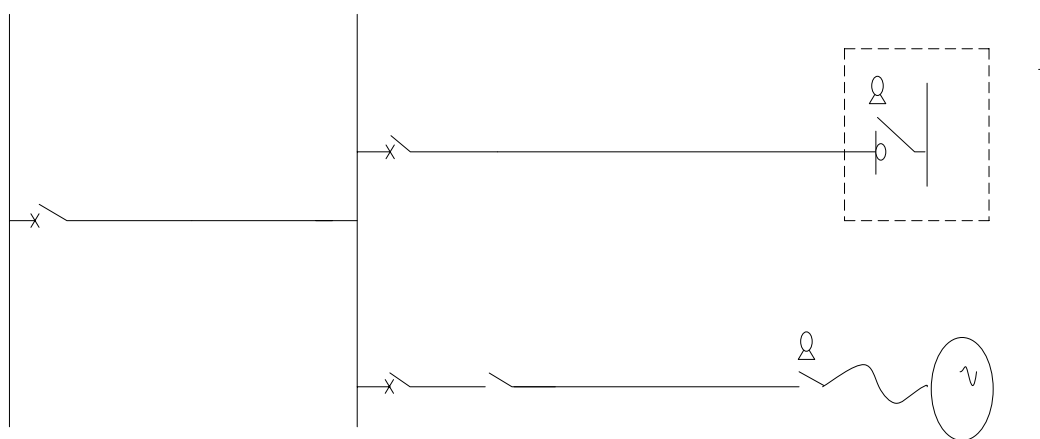


$$I_{KfN \min} = \frac{U_N}{(2 \cdot Z_T + Z_{BFF-fase} + Z_{BFF-N} + 2 \cdot Z_{HLBFV})} \Rightarrow \frac{400}{(2 \cdot 6,65 + 1 + 2 + 2 \cdot 55,4) \cdot 10^{-3}} = 3,2 \text{ kA}$$

I databladet for STR22 SE trip unit aflæses, at den mindste kortslutningsstrøm der skal forårsage udkobling, kan indstilles således: $I_m = I_r \cdot \text{en skalaværdi fra 2 til 10}$. Dette medfører, at selv den højeste indstilling på 865A ikke er højere end den mindste kortslutningsstrøm på 3,2 kA.

Indstilling af I_m skalaværdi = 10

Det er dog ikke et krav, at påvise kortslutningsbeskyttelsen af hovedlederen, ifølge SBEi afsnit 6 punkt 435.1, idet samme komponent står for såvel overbelastning som kortslutningsbeskyttelse.



Figur 48 - kredsskema over den nye installation

Tavle BFF

11.5 Dimensionering af gruppeledere samt beskyttelse

Til beskyttelse af varmepumpen har vi som tidligere nævnt, kun ansvar for beskyttelsen af gruppelederen der forsyner varmepumpen. Desuden ønsker vi, at opretholde selektivitet i vores installation.

Overbelastnings og kortslutningsbeskyttelse af gruppeleder BFVVP

Krav punkt 433 side 70

- $I_E \geq I_B \Rightarrow I_E \geq 28,9A$
- $I_{nKB} \leq I_{K \min}$
- $I_{ncu} \geq I_{K \max}$

Valg af automatsikring Producent Merlin Gerin
C60L Z-kurve 3P+N
Mærkestrøm 32A

Kontrol af krav til automatsikring

- 32 A \geq 28,9 A krav OK
- 128 A se figur 52 \leq 1700 A
- 6 kA \geq 3,7 kA

Dimensionering af gruppeleder til BFVVP

Krav ud fra punkt 433 side 71

$$I_Z \geq \frac{I_{nOB}}{K_s \cdot K_t}$$

Ud fra temperaturmålinger foretaget i de respektive områder på Viborg Kraftvarmeværk, vil temperaturen ikke overstige 40 grader celsius. I denne del af installationen benyttes PEX-cu kabel. Dette medføre, at korrektion for temperaturen bliver som følgende, ud fra tabel 52-f1 side 169.

$$K_t = 0,91$$

Gruppelederen til varmepumpen skal føres fra tavlen BFV, til varmepumpens tilgangsklemmer der er placeret i varmepumpens styretavle. Den konkrete føringsvej kendes ikke før maskinen bliver leveret. Ved korrektionen for samlet fremføring, ud fra tabel 52-G1 side 171, tager vi derfor udgangspunkt i fremføring på kabelstige med en anden strømkreds(lys installation).

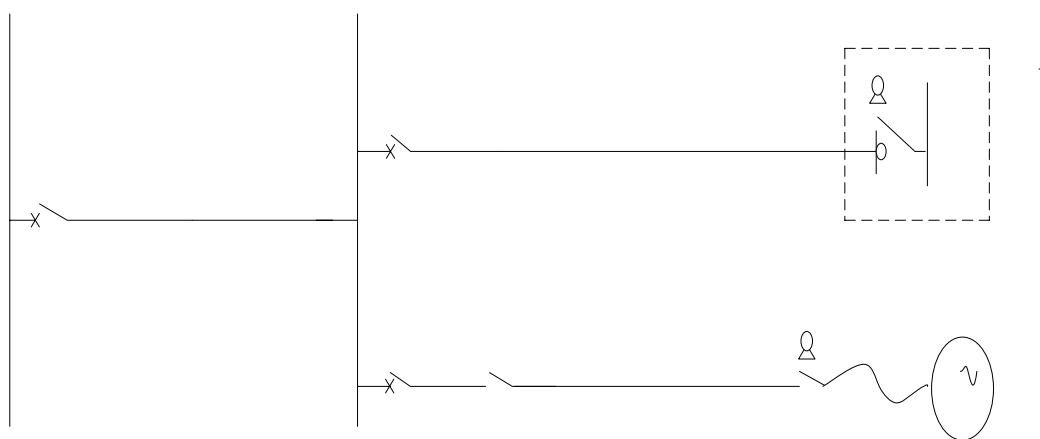
$$K_s = 0,87$$

Herefter kan vi beregne mindste mærkeværdi for kablet.

$$I_{ZNØD} = \frac{32}{0,87 \cdot 0,91} = 40,4A$$

Valg af kabel tabel 52-E11 kolonne 3 side 167.

5G6 PEX-cu med en mærkestrøm på 42A



Figur 49 - kredsskema over den nye installation

Tavle BFF

Til beskyttelse af gruppelederen BFVCP benytter vi som tidligere nævnt, et motorværn. Dertil kommer at vi samtidig skal overbelastningsbeskytte og kortslutningsbeskytte cirkulationspumpen, og dimensionere en kontaktor, til driften af cirkulationspumpen.

Overbelastning beskyttelse af gruppeleder BFVCP

Krav punkt 433 side 70

$$I_E \geq I_B \Rightarrow I_E \geq 17,8A$$

$$I_{nKB} \leq I_{K \min}$$

$$I_{ncu} \geq I_{K \max}$$

Valg til beskyttelse: Motorværn
GV2-ME21
 $I_q = 15 \text{ kA}$

Indstilling af termoudløser max 17,8 A:

Kontrol af krav til motorværn

1. $21 \text{ A} \geq 17,8 \text{ A}$ krav OK
2. I_{nKB} er $I_n \cdot 20 = 402 \leq 522 \text{ A}$ OK

$$I_{Kjpe \min} = \frac{U_N}{\left(Z_T + Z_{BFF-fase} + 2 \cdot Z_{HLBFV} + 2 \cdot R_{GLBFVCP} \right)} \Rightarrow \frac{400}{(6,65 + 1 + 2 \cdot 55,4 + 2 \cdot 303) \cdot 10^{-3}} = 522 \text{ A}$$

3. Kontrolberegning for om GV2-ME21 må monteres i tavle BFV af hensyn til I_{kmax} .

$$I_{K3f \max} = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot (Z_T + Z_{BFF-fase} + Z_{HLBFV})} \Rightarrow \frac{400}{\sqrt{3} \cdot (6,65 + 1 + 55,4) \cdot 10^{-3}} = 3,7 \text{ kA}$$

Kontrol OK

$$I_q \geq I_{k3f \max}$$

$$15 \text{ kA} \geq 3,7 \text{ kA}$$



Dimensionering af gruppeleder til BFVVP

Krav ud fra punkt 433 side 71

$$I_z \geq \frac{I_{nob}}{K_s \cdot K_t}$$

Ud fra temperaturmålinger foretaget i de respektive områder på Viborg Kraftvarmeværk, vil temperaturen ikke overstige 40 grader celsius. I denne del af installationen benyttes PEX-cu kabel. Dette medfører, at korrektion for temperaturen bliver som følgende ud fra tabel 52-f1 side 169.

$$K_t = 0,91$$

Gruppelederen til cirkulationspumpen skal føres fra tavlen BFV, til cirkulationspumpens tilgangsklemmer, der er placeret oven på el-motoren. Føringen vil blive udført på samme måde som ved andre cirkulationspumper på værket. Derfor ved korrektionen for den samlede fremføring, ud fra tabel 52-G1 side 171, tager vi derfor udgangspunkt i fremføring på kabelstige.

$$K_s = 1$$

Herefter kan vi beregne mindste mærkeværdi for kablet.

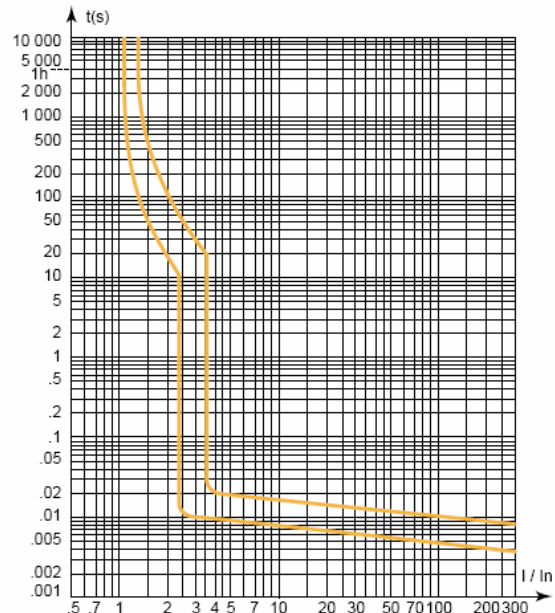
$$I_{ZNØD} = \frac{17,8}{0,91 \cdot 1} = 19,6A$$

Valg af kabel tabel 52-E11 kolonne 3 side 167.

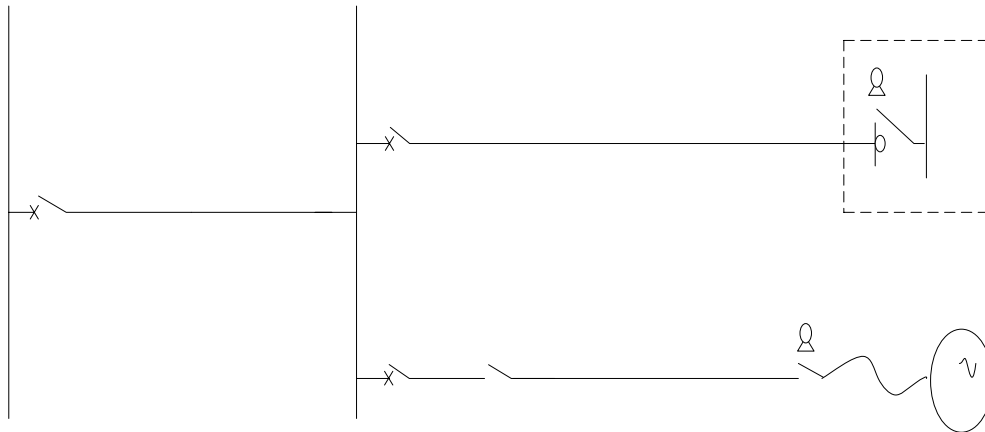
4G1,5 PEX-cu med en mærkestrøm på 23A



C60L Z-kurve



Figur 51 - Udløserkurve for automatsikring C60L



Figur 50 - kredsskema over den nye installation

Dimensionering af kontakter

Da fjernvarmecirkulationspumpen skal kunne kobles ind og ud i takt med driften af varmepumpen, er det nødvendigt at placere en kontaktor i forsyningslederen til el-motoren.

Krav	$I_E \geq I_B$
Valg af kontaktor	LC1-D25 $I_e = 25A$ krav OK

Kortslutningsbeskyttelse af Gruppeledere

Det er ifølge SBEi afnit 6 punkt 435.1, ikke et krav at påvise kortslutningsbeskyttelsen, i det den samme komponent står for såvel overbelastning som kortslutningsbeskyttelse. Dog finder vi det passende at gennemregne et eksempel, der påviser efterlevelsen af kortslutningsbeskyttelsen.

Krav for kortslutningsbeskyttelse punkt 434.3.2

$$S^2 \cdot K^2 \geq I_{k3f \max}^2 \cdot t$$

Vi tager her udgangspunkt i gruppeleder BFVVP, der er kortslutningsbeskyttet med en automatsikring. Fordi der er tale om en automatsikring, vil det være den maksimale kortslutningsstrøm der skal beskyttes mod ved kortslutning.

$$I_{K3f \max} = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot (Z_T + Z_{BFF-fase} + Z_{HLBFV})} \Rightarrow \frac{400}{\sqrt{3} \cdot (6,65 + 1 + 55,4) \cdot 10^{-3}} = 3,7kA$$

$$I_{Kfpe \min} = \frac{U_N}{(Z_T + Z_{BFF-fase} + 2 \cdot Z_{HLBFV} + 2 \cdot R_{GLBFVVP})} \Rightarrow \frac{400}{(6,65 + 1 + 2 \cdot 35,3 + 2 \cdot 77) \cdot 10^{-3}} = 1,7kA$$

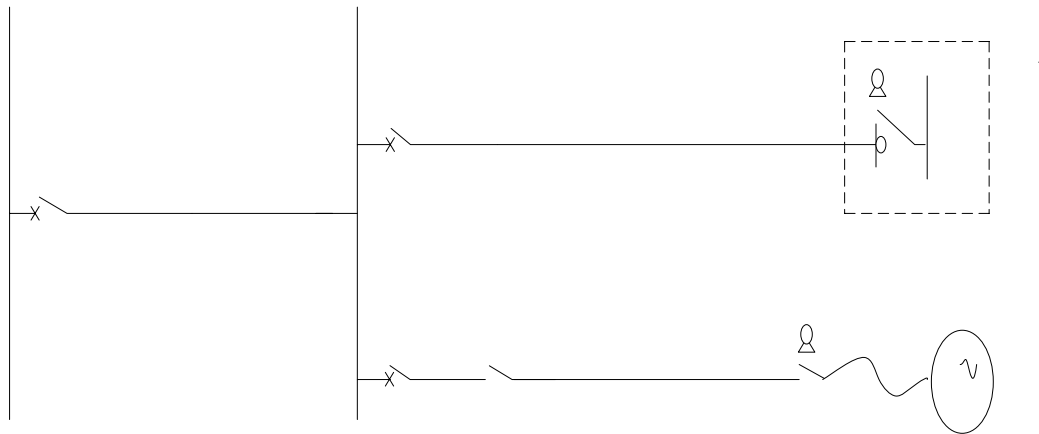
Udløsertiden aflæses i udløserkurven til ca. 10mS.

K værdien er en konstant for det enkelte kabel, og findes i tabel 43 B til 143.

$$6^2 \cdot 143^2 \geq 3662^2 \cdot 0,01$$

$$0,74 \cdot 10^6 \geq 0,13 \cdot 10^6$$

Dette påviser hermed at kortslutningsbeskyttelsen af gruppeleder BFVVP er korrekt dimensioneret.



Figur 52 - kredsskema over den nye installation

Dimensionering af til-leder BFVVP

Krav ud fra punkt 433 side 71

$$I_z \geq \frac{I_{nob}}{K_s \cdot K_t}$$

Til-lederen bliver udført som gummikabel H07RN-F. Derfor bliver korrektionen for temperaturen udført fra tabel A.4 side 26 KB. Temperatur = 40 grader.

$$K_t = 0,82$$

Til-lederen vil ikke blive ført sammen med andre strømkredse.

$$K_s = 1$$

Herefter kan vi beregne mindste mærkeværdi for kablet.

$$I_{ZNØD} = \frac{17,8}{0,82 \cdot 1} = 21,7A$$

Valg af kabel ud fra NKT

4G4 H07RN-F med en mærkestrøm på 28A

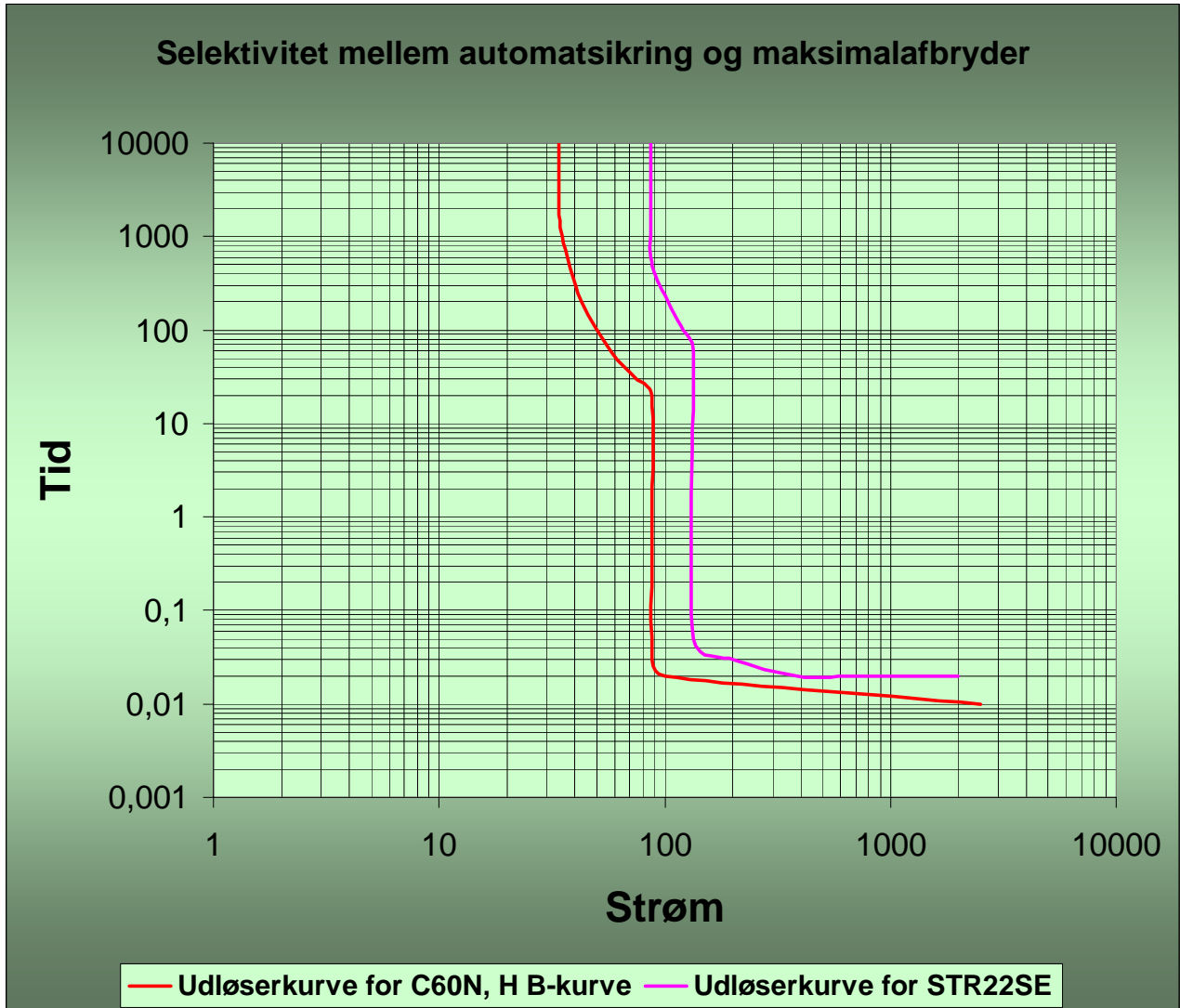
Da GV2-ME21 udløser på under 10 mS kan det minimale tværsnit beregnes som følgende. Udregning af Gruppelederen BFVCP er foretaget på bilag 14. Tiden sættes til 10 mS som værste tilfælde.

$$S \geq \sqrt{\frac{I_{k3f \max}^2 \cdot t}{K^2}}$$
$$S \geq \sqrt{\frac{\left(\frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot (Z_T + Z_{BFF-fase} + Z_{HLBFV} + R_{GLBFVCP})} \right)^2 \cdot t}{K^2}}$$
$$S \geq \sqrt{\frac{\left(\frac{400}{\sqrt{3} \cdot (6,65 + 1 + 35,3 + 303) \cdot 10^{-3}} \right)^2 \cdot 0,1}{141^2}} = 0,22 \text{ kvadrat}$$

Hermed er det påvist at dimensioneringen er korrekt

Dimensionering af kontaktor for mekanisk vedligehold

Valg af afbryder ABB BWS 325M/TPN Mærkestrøm 25A



Figur 53 - Diagram med udløser kurver

11.6 Selektivitet mellem beskyttelseskomponenter

Til at opretholde den optimale driftsikkerhed i installationen skal der være selektivitet mellem beskyttelseskomponenterne, både dem som vedrører forsyningen til tavle BFV og beskyttelseskomponenterne til varmepumpen samt fjernvarmecirkulationspumpen, men også mellem eksisterende beskyttelseskomponenter og den nye installation.

For at give et eksempel på, at dimensioneringerne er foretaget korrekt, eftervises selektiviteten mellem maksimalafbryder i forsyningslederen til tavle BFV, og automatsikringen til varmepumpen.

Med udgangspunkt i udløserkurverne for følgende komponenter er der på bilag 15, udarbejdet to tabeller der viser udløsertiden som funktion af strømmen.

- STR22 SE electronic trip unit
- Automatsikring C60L Z-kurve 3P+N

Ud fra tabellerne kan vi udarbejde et diagram figur 54, der giver et overblik over selektiviteten mellem de to komponenter. Den skitserede udløserkurve for automatsikringen, er den øvre kurve på udløserkarakteristikken⁵³, fordi der vil kunne finde en udkobling sted inden for de to kurver, skal den der ligger tættest på maksimalafbryderens kurve benyttes.

Kommentar til selektivitet

Ud fra figur 54, hvor det tydeligt ses at de to kurve ikke skærer hinanden, kan vi konstatere at der er ubetinget selektivitet.

⁵³ Bilag 17 – Udløserkarakteristik for C60L Z-kurve



11.7 Absorptionspumpens krav til el-forsyningen

Trods producentens krav til maskinens el-forsyning, kan der på flere områder være steder, hvor den danske Stærkstrømsbekendtgørelser stiller højere krav. I disse tilfælde er det vores ansvar at kravene bliver opfyldt efter de respektive bekendtgørelser, frem for producentens anbefalinger. Fra producenten York har man oplyst følgende data på en *singel effect steam driven absorption chiller* af typen YIA 7D2.

- Optaget effekt 20 kVA
- Spændingsforsyning 415 V(plus/minus 10%) 3 faser + N
- Frekvens 50 Hz (plus/minus 3%)

Spændingen

I dette tilfælde vil det betyde at spændingen vil kunne falde til 360V uden at det har indflydelse på driften af absorptionspumpen ifølge producentens anbefalinger. Stærkstrømsbekendtgørelsen afsnit 6 punkt 525 siger imidlertid, at spændingen maksimalt må falde med 4 % af den nominelle spænding. Dette resulterer i at den tilladte spænding er minimum 384 Volt, hvilket også er gældende under start af absorptionspumpens interne pumper. Og da kravet fra stærkstrømsbekendtgørelsen er strengere end producentens, skal dette følges. I det efterfølgende afsnit vil efterlevelsen af dette blive nærmere belyst.

Frekvensen

Installationen for egetforbrug på Viborg Kraftvarmeværk er forsynet fra klemmerne af hovedtransformeren. Dette betyder at frekvensen kan antages at være for stiv, hvilket dermed ikke giver nogle problemer for driften af absorptionspumpen.



11.8 Efterlevelse af anbefalet spændingsfald

I SBEi afsnit 6 punkt 525 anbefales at følgende skal tages til overvejelse, under forudsætning at der ikke skal tages højde for andre ting.

Spændingsfald i forhold til nominel spænding maks 4%

Med dette som udgangspunkt påvises efterlevelsen af det nominelle spændingsfald ud til varmepumpen. Udregning af Gruppelederen BFVVP er foretaget på bilag 14. Der vil ikke blive taget højde for spændingsfaldet i forsyningslederen til tavle BFV og transformere BTF20

Ved udregningen benyttes belastningsstrømmen der er udregnet på bilag 9. I formlen bliver R værdien ganget med 1,5 for at korrigere for dårlige forbindelser og temperaturstigning.

Først udregnes delta spændingsfald i hovedlederen BFV

$$\begin{aligned}\Delta U_{f-HLBFV} &= I_{B-HLBFV} \cdot (R_{HLBFV} \cdot 1,5 \cdot \cos \varphi_{B-HLBFV} + X_{HLBFV} \cdot \sin \varphi_{B-HLBFV}) \\ \Delta U_{f-HLBFV} &= 46,6 \cdot (0,0349 \cdot 1,5 \cdot \cos 28,1 + 0,0051 \cdot \sin 28,1) = 2,261V\end{aligned}$$

Der efter delta spændingsfaldet i gruppelederen BFVVP

$$\begin{aligned}\Delta U_{f-GLBFVVP} &= I_{B-GLBFVVP} \cdot (R_{GL-BFVVP} \cdot 1,5 \cdot \cos \varphi_{B-GLBFVVP} + X_{GL-BFVVP} \cdot \sin \varphi_{B-GLBFVVP}) \\ \Delta U_{f-GLBFVVP} &= 28,9 \cdot (0,077 \cdot 1,5 \cdot \cos 25,8) = 3,00V\end{aligned}$$

Til sidst kan de enkelte spændingsfald lægges sammen, og netspændingsfaldet findes

$$\begin{aligned}\Sigma \Delta U_f &= \Delta U_{f-HLBFV} + \Delta U_{f-GLBFVVP} \Rightarrow 2,26 + 3,00 = 5,26V \\ \Sigma \Delta U_N &= \Sigma \Delta U_f \cdot \sqrt{3} \Rightarrow 5,75 \cdot \sqrt{3} = 9,96V \\ \%_{\Delta UN} &= \frac{9,11 \cdot 100}{400} = 2,28\%\end{aligned}$$

Hermed kan vi konstatere, at den nye installation lever op til anbefalingerne i SBEi.



11.9 Risikovurdering

Til udarbejdelse af risikovurdering tager vi udgangspunkt i følgende komponent

- Motor til cirkulationspumpe. Cirkulationspumpen bliver forsynet af gruppeleder BFVCP 5G1,5 PEX-cu, der er OB og KB af et styk motorværn GV2-ME21.

Vurderingen vil koncentrere sig om emnerne, beskyttelse mod direkte berøring, beskyttelse mod indirekte berøring samt kortslutningsbeskyttelse.

Risikovurderingen følger gældende krav i stærkstrømsbekendtgørelsen afsnit 6 samt maskindirektivet afsnit 204-1. Udarbejdelsen af afsnittet er foretaget med udgangspunkt i vejledning til risikovurdering⁵⁴, produceret af Arbejdstilsynet. Den modificerede fremgangsmåde er som følgende.

1. Identifikation af farekilder
2. Definerings af farlige situationer
3. Konsekvens ved ulykke
4. Risikoanalyse
5. Vurdering

Det skal for god ordens skyld nævnes at vejledningen, som vores risikovurdering tager udgangspunkt i, kan bruges til et utal af fagområder, og ikke begrænser sig til lige netop denne installation.

⁵⁴ Se vedlagt Cd-rom - vejledning til risikovurdering



11.9.1 Beskyttelse mod direkte berøring (BDB)

1 Identifikation af farekilder

BDB skal beskytte personer mod de farer, der kan opstå ved berøring af spændingsførende dele i installationen⁵⁵. Med andre ord skal beskyttelsen mod direkte berøring forhindre, at personer bliver gennemløbet af en strøm ved berøring med materiellet, hvilket kan være farligt.

2 Definerings af farlige situationer

Der vil ikke være udpræget aktivitet omkring motoren. Personer der vil befinde sig i nærheden af den pågældende motoren på cirkulationspumpen, vil begrænse sig til driftspersonalet på værket, samt eventuelle eksterne reparatører. Det er ikke muligt at komme nær spændingsførende dele uden værktøj til at afmontere dækslet på klemkassen. I og med at der kun vil være spænding i klemkassen på motoren under drift, bliver risikoen under eftersyn og vedligehold minimeret. Denne risiko bliver yderlig reduceret ved at der på forsyningslederen er monteret en sikkerhedsafbryder for mekanisk vedligehold. Afbryderen kan låses så der ikke kan opstå utilsigtet start af motoren. Klemkassen er udført med kapslingsklasse IP54⁵⁶.

3 Konsekvens ved ulykke

Hvis driftspersonalet eller andre personer skulle blive udsat for berøring af spændingsførende dele i klemkassen, vil dette i værste fald kunne medføre døden.

4 Risikoanalyse

Fordi der i forsyningslederen til klemkassen er monteret en sikkerhedsafbryder, reducere det væsentligt risikoen for berøring af spændingsførende dele under eftersyn og vedligehold af motoren uden for drift. Dog kan dette ikke forhindre, den mindre eftertænksomme person i, at fjerne dækslet til klemkassen under drift, og på den måde udsætte sig for en væsentligt større risiko. Så længe at materiellet, der yder en fysisk beskyttelse af spændingsførende dele, kan holde til varigt at modstå de mekaniske, kemiske og termiske påvirkninger, som disse kan blive udsat for, og øvrigt lever op til kravene, finder vi ikke risikoen værende overhængende.

5 Vurdering

Risikoen for direkte berøring af spændingsførende dele, vil med almindelig eftertænksomhed ikke være af en størrelse, der giver anledning til bekymring. Derfor mener vi at installationen er udført tilstrækkeligt forsvarligt til at kunne beskytte personer der arbejder med anlægget.

⁵⁵ SBEi afsnit 6 punkt 412.1

⁵⁶ SBEi afsnit 6 punkt 803.2



11.9.2 Beskyttelse mod indirekte berøring (BIB)

1 Identifikation af farekilder

Formålet med beskyttelse mod indirekte berøring er at forebygge farlige situationer, i tilfælde af isolationssvigt mellem spændingsførende dele og udsatte ledende dele.

2 Definerer af farlige situationer

Personer der vil befinde sig i nærheden af den pågældende cirkulationspumpe, vil ligesom ved direkte berøring, begrænse sig til driftspersonalet på værket, samt eventuelle eksterne reparatører. Hyppigheden af ophold ved og omkring motoren er begrænset. Der vil kunne opstå farlige situationer ved indirekte berøring både under drift og ved eftersyn eller vedligehold. Dette fordi isoleringssvigt ikke sker på forudsigelige tidspunkter, men kan forekomme under alle tænkelige forhold, også selvom at motoren ikke er i drift.

3 Konsekvens ved ulykke

Ved manglende beskyttelse mod indirekte berøring, vil der være tale om livsfare. Men ved korrekt beskyttelse vil der være tale om mindre risiko for varige fysiologiske skader.

4 Risikoanalyse

Til beskyttelse benytter man en beskyttelsesleder (PE), som i klemkassen er monteret til motorens ramme. Dette betyder at alle ledende dele på motoren og klemkassen er forbundet til installationens driftsjord. Skulle der så opstå forbindelse mellem en spændingsførende del og motoren der er forbundet til klem PE lederen, vil der løbe en strøm stor nok til at afbryde forsyningen til klemkassen. Tiden for en afbrydelse må ifølge⁵⁷, ikke overstige 5 sekunder.

5 Vurdering

I afsnit⁵⁸ er det påvist at motorværnet, ved den mindste kortslutning der kan forekomme, vil afbryde inden for 10 mS sekunder. Hvilket er væsentligt mindre end kravet på 5 sekunder. Derfor ser vi beskyttelsen mod indirekte berøring som værende acceptabel.

⁵⁷ SBEi afsnit 6 punkt 413.1.3.5

⁵⁸ Afsnit 1.5 Kontrol af korrekt beskyttelses komponent til gruppeleder BFVCP



11.9.3 Kortslutningsbeskyttelse

1 Identifikation af farekilder

Kortslutningsbeskyttelse har til formål at afbryde kortslutningsstrømmen, der vil kunne medføre mekaniske og termiske skader på materiellet. Komponenten som skal opfylde dette formål, skal både beskytte ved største og mindste kortslutningsstrøm.

2 Definerings af farlige situationer

Farlige situationer vil kunne opstå ved isolationsfejl eller reparation/eftersyn på motoren. Isolationsfejl vil kunne optræde under alle forhold, men kun være farlig når der er spænding i klemkassen. Kortslutning ved mekanisk slutning af en eller flere ledere i klemkassen vil kun være muligt for driftspersonalet eller sagkyndige reparatører, der har gøremål på eller omkring motoren. Hvis denne situation opstår, vil flere foranstaltninger være brudt, så som indkobling af motoren under eftersyn, og utilsigtet aktivering af sikkerhedsafbryderen.

3 Konsekvens ved ulykke

Ved berøring af installationerne eller andre ledende dele under kortslutningen, vil kunne medføre døden. En kortslutning vil kunne havarere materiellet omkring kortslutningen samt forsyningslederne. I værste fald kan en brand opstå.

4 Risikoanalyse

Til beskyttelse mod utilsigtet kortslutning i klemkassen på cirkulationspumpen, er der i forsyningslederen monteret en motorværn, der både varetager kortslutninger og overbelastning. Det vil kun være sagkyndigt personel som vil arbejde på motoren, hvilket minimerer muligheden for direkte kortslutning forårsaget af fysisk forbindelse mellem lederne eller andre dele under spænding. Materiellet i klemkassen er udført, i overensstemmelse med dets fysiske egenskaber, der giver ringe risiko for utilsigtet kortslutning.

5 Vurdering

I og med at kortslutningsbeskyttelsen er udført efter gældende krav, ser vi ikke nogen væsentlig risiko forbundet med kortslutningsbeskyttelsen da maksimalafbryderen afbryder forsyningen hurtigt. Derfor anser vi risikoniveauet for værende acceptabelt.



11.10 Kommentar til installation

Det er i afsnittet installation påvist at Viborg Kraftvarmeværk, uden problemer kan bære den ekstra belastning som varmepumpen og dens hjælpekomponenter resulterer i, på den eksisterende installation. Vi har udarbejdet et forslag til en praktisk opbygning af kabler og komponenter der er nødvendige for installation af varmepumpen. I risikovurderingen fandt vi ikke nogen risiko for personfare, idet udvidelsen er dimensioneret efter gældende IEC regler.



12. Konklusion

Grundlaget for dette projekt er, at forbedre virkningsgraden på Viborg Kraftvarmeværk. Dette har vi gjort gennem anvendelse af komponentspildvarmen, som i dag ikke bliver benyttet. Energien i komponentspildvarmen genindvindes i en absorptionsvarmepumpe, som er kølet med fjernvarmereturvand. Dermed bliver effekten fra komponentkølerne overført til returjernvarmevandet.

Absorptionsvarmepumpen er drevet med damp, som bliver taget fra udstødskedlens produktion af LT-damp. Dette bevirker, at LT-turbinen modtager en mindre mængde damp, hvilket resulterer i en reduceret el-produktion, men en højere fjernvarmeproduktion til følge.

Hvorvidt der skal implementeres en varmepumpe på Viborg Kraftvarmeværk beror på økonomiske overvejelser. Varmeværkets målsætning er, at producere så billig fjernvarme til forbrugerne så muligt. Derfor er udgangspunktet for de økonomiske beregninger, taget i den pris værket kan producere fjernvarme til i dag. Ved en implementering af varmepumpen vil prisen for 1 MW/h producerede fjernvarme, blive reduceret med 3,5 kr. Tilbagebetalingstiden for investeringen bliver ved denne besparelse på 4 år. Dette ligger inden for den 12 års periode, opgivet af Viborg Kraftvarmeværk, som den maksimale tilbagebetalingstid.

Der er mange faktorer der spiller ind i vores beregninger, den væsentligste er el-prisen. Når Viborg Kraftvarmeværk, inden for kort tid, skal afsætte deres el-produktion til markedsvilkårene på det frie el-marked. Udregningerne viste, at en stigning på 25 % på el-prisen, resulterede i at overskudgraden ville falde til en tredjedel. Men til gengæld vil et fald på 25 % resultere i en forøget overskudgrad på 60 %.

En anden væsentlig faktor, er vores teoretiske beregninger af den mistede el-produktion. Hvorvidt disse beregninger er realistiske er svært at vurdere. Den største usikkerhed ligger i, hvor meget mindre el-effekt LT-turbinen producerer ved den mindre mængde LT-damp. Der kan relativt let udføres et praktisk forsøg på værket, hvor dette kan afklares.

Hvad angår den praktiske installation i det eksisterende system, er der ingen problemer. Der er fundet en aktuel placering til varmepumpen, hvor det er muligt, at lave rør tilslutninger til det eksisterende system. Varmepumpen har et lille elforbrug, hvilket bevirker, der ikke er problemer med, at forsyne denne fra den eksisterende installation. Varmepumpen leveres fra producentens side med en komplet styring. Ønskes nogle parametre flyttet over i Viborg Kraftvarmeværks SRO-anlæg, er der ingen problemer i dette.

Under de forudsætninger der er gjort i rapporten, vil en installation af varmepumpen være rentabel, og dermed nedsætte prisen for fjernvarmeproduktionen. Dog mener vi, at Viborg Kraftvarmeværk, skal drage nogle erfaringer, med hensyn til el-prisen, under driften på det frie el-marked, inden man beslutter sig for endelig indkøb og installation.



13. Litteraturliste

1. Bogen om varmepumper
H. Vendelbo Holm & Ole
Willumsen
ISBN: 87-11-04047-5
År: 1982
3. Termodynamik
Aage Bredahl Eriksen
Søren Gundtoft
Aage Birckjær Lauritsen
ISBN: 87-571-2221-0
År: 2000
4. Elektroteknik 5

Forsyningsnet og
transformerstationer

Carsten Dahl Petersen

3. udgave
ISBN 87-7463-262-0
5. Stærkstrømsbekendtgørelsen afsnit
6
Elektricitetsrådet
1. udgave

ISBN 87-90260-30-3
6. Elektroteknik 6
Eltekniske beregninger
Niels WindelKringelum &
Carsten Dahl Petersen
3. udgave 2000
SBN 87-7463-261-2
7. Kogebogen
Niels Clausen
Århus Maskinmesterskole
8. Stærkstrømsbekendtgørelsen
afsnit 204-1 2. udgave
Maskinsikkerhed
Elektrisk materiel på maskiner
Elektricitetsrådet
ISBN 87-90360-21-4
9. Praktisk regulering og
instrumentering
Thomas Heilmann
4. udgave
ISBN 87-90603-06-0
10. Logisk styring med PLC
Thomas Heilmann
3. udgave
ISBN 87-90603-07-9
11. Termodynamik
Aage Bredahl/Søren Gundtoft/Aage
Birckjær Lauritsen
1. udgave
ISBN 87-571-2221-0
12. Varmelæring ved hjælp af en
kemisk varmepumpe med vandig
saltopløsning som
absorptionsmiddel
Otte Dyrnum
1. udgave
Nov 1984
13. www.
[http://www.york.com/products/esg/
YorkEngDocs/776.pdf](http://www.york.com/products/esg/YorkEngDocs/776.pdf)



14. Kildekritik

I forbindelse med dette projekt, har vi har anvendt bøger og undervisningsmateriale, som benyttes på Århus Maskinmesterskole. Disse remedier betragter vi som værende troværdige.

Oplysninger om Viborg kraftvarmeværk er rekvireret hos driftspersonalet, en del er fundet i den oprindelige dokumentation for værket. Aktuelle driftsforhold er taget med udgangspunkt i de erfaringer driftspersonalet har gjort gennem den daglige omgang på systemerne. Samtlige oplysninger anses for at være korrekte.

Vi har været i kontakt med flere forskellige personer på York og SEG. De informationer og udsagn vi har fået her må betragtes som værende troværdige, da de beskæftiger sig med varmepumper på et højt teknisk niveau til daglig.



15. Bilagsoversigt