



TEKNOLOGISK
INSTITUT

PSO – F&U

Kompakt system til ventilation, opvarmning og brugsvandsforsyning til energirenoverede enfamiliehuse og lavenergibyggeri

Luftvarmesystem med varmepumpe



Titel:

Kompakt system til ventilation, opvarmning og brugsvandsforsyning til energireoverede enfamiliehuse og lavenergibyggeri – luftvarmesystem med varmepumpe

Udarbejdet af:

Teknologisk Institut
Gregersensvej
2630 Taastrup
Energieffektivisering & Ventilation

Januar 2017

Forfatter: Amalie Gunner, Mikkel Prüser, Erik Hvirgel Hansen, Lars Hansen, Morten Sandholm, Xu Guan

Forord

Denne rapport er udarbejdet som afslutning på PSO projektet *Kompakt system til ventilation, opvarmning og brugsvandforsyning til energirenoverede enfamiliehus og lavenergi-byggeri – luftvarmesystem med varmepumpe*.

Projektet har haft til formål at bryde med gængs vanetænkning omkring opvarmning og dokumentere at luftvarme kan anvendes som eneste varmekilde i et enfamiliehus. Projektets resultater viser, at et luftvarmesystem kan dække behovet for ventilation og opvarmning. Dette opnås ved en kombination af et varmegenvindingsaggregat til levering af friskluft og et nyudviklet luftvarmeaggregat til opvarmning af blandet friskluft og recirkuleret luft. Det samlede luftvarmeanlæg regulerer luftmængden efter behovet, og giver mulighed for regulering af indblæsningstemperaturen på rumniveau.

Hvis anlægget udføres med individuel styring i hvert rum, kan luftvarme udgøre eneste opvarmningskilde. Dette er hverken udviklet i forhold til systemopbygning af ventilationsanlæg eller softwaremæssigt endnu - hvilket er et af formålene med dette projekt.

Rapporten beskriver udarbejdelsen og demonstration af luftvarmesystemet til opvarmning og ventilation af et enfamiliehus.

Formål

Projektet udvikler et enkelt, prisbilligt, installations- og servicevenligt energieffektivt luftvarmeanlæg der dækker behovet for ventilation, opvarmning og varmt brugsvand, ved kombination af ventilation med varmegenvinding og varmepumpe, der leverer friskluft m/u opvarmning reguleret på rumniveau.

Lavenergi-byggeri kl. 1 el. 2 er 10–20 % dyrere end BR 10 byggeri. Dette skyldes markedets ønske om traditionel udformning med nye konstruktioner, og ofte komplekse installationer herunder varmepumper og VE anlæg. Det lave energiforbrug gør anvendelse af luftbåren rumopvarmning til et prisbilligt attraktivt alternativ til traditionelle systemer, da ventilationsanlægget kan udbygges med varmeanlæggets funktion, så dette overflødiggøres.

Den nødvendige omfattende (energi-)renovering af eksisterende enfamiliehus omfatter væsentlige forbedringer af klimaskærmen, herunder isolering og effektiv tætning, ændring af varmforsyning, delvis eller hel udskiftning af det varmfordelende system og etablering af mekanisk ventilation med varmegenvinding. I denne sammenhæng kan en udbygning af den mekaniske ventilation bidrage til en bedre og mere prisbillig totalløsning.

Luftvarme er ikke nyt i Danmark og er blandt andet udbredt i forbindelse med passivhaus. Flere aspekter har vist sig problematiske som manglende opvarmning pga. dimensionering på husniveau og ikke på rumniveau, samt manglende individuel rumregulering.

Projektets resultater er et nyt koncept med systemløsninger, produktsortiment og dimensioneringsværktøj. Kompaktsystemet skal sikre temperatur og mængderegulering til hvert enkelt rum. Det sker gennem udvikling af aggregat med uopvarmet og varm luftstrøm og integreret blandingsmanifold, der sikrer den ønskede temperatur til det enkelte rum, samt modulerede indblæsningsarmatur der sikrer den ønskede luftmængde og optimal energi-effektiv komfort.

Nomenklaturliste

a:	højde
b:	bredde
BR10:	Bygningsreglementet fra 2010
BR15:	Bygningsreglementet for 2015
BR20:	Bygningsreglementet for 2020
c_p :	specifik varmekapacitet [J/kgK]
COP:	effektfaktor (coefficient of performance)
D_h :	hydraulisk diameter
m:	masse [kg]
PV:	proces value
Q:	varmemængde [J]
\dot{Q} :	varmeeffekt [W]
SP:	setpunkt
SCOP:	sæsonbestemt effektfaktor (seasonal coefficient of performance)
ΔT :	temperaturdifferens [°C]
\dot{V} :	volumenstrøm [m ³ /s]
VAV:	variabel luftmængde (variable air volume)

Indholdsfortegnelse

1. Indledning	9
2. Opvarmning med luft	11
3. Konklusion og diskussion	12
4. Udvikling af luftvarmeanlæg	15
4.1. Energiberegninger	16
4.2. Design og dimensionering af luftvarmeaggregat	17
4.3. Konstruktion af prototype	30
5. Varmtvandsproduktion	33
6. Styring	36
6.1. Styringsstrategi	36
7. Placering af luftvarmesystem	53
7.1. Placering af aggregat	53
7.2. Placering af kanaler	54
8. Forsøg i Energy Flex House	57
8.1. Beskrivelse af testfacilitet	57
8.2. Vurdering af luftvarmesystem	57
8.3. Fleksibelt elforbrug	73
9. Energiforbrug	79
9.1. Varmetab	79
9.2. Analyse af termografi billeder	79
9.3. Installation og drift	81
9.4. Fremløbstemperatur	82
10. Beregningsværktøj	83
10.1. Dimensioneringsprocedure	83
10.2. Beregningsprocedure/manual	86
11. Bilag	91
11.1. Bilag 1	92
11.2. Bilag 2	95
11.3. Bilag 3	98
11.4. Bilag 4	103
11.5. Bilag 5	104
11.6. Bilag 6	105

Figur 3-1: Fordele og ulemper ved forskellige opvarmningsformer	14
Figur 4-1: Blokdigrammer over de tre koncept versioner. Fuld størrelse kan ses i Bilag 1.	15
Figur 4-2: Diagram for det valgte luftvarmekoncept.....	17
Figur 4-3: Radical K3G220-RC05-03	17
Figur 4-4: Forsøgsopstilling med varmeplade.....	18
Figur 4-5: Varmeplade med påsat hulplade til simulering af øget tryktab	19
Figur 4-6: Dimensioner af det udviklede spjæld.....	19
Figur 4-7: Illustration af blandespjæld med spjældarm til regulering af friskluft indtag ..	20
Figur 4-8: Illustration af spjældarmens bevægelse	21
Figur 4-9: Løsningsforslag til bevægelse af spjældarmen	21
Figur 4-10: Prototype med løsning 3	22
Figur 4-11: Illustration af manifold med temperaturregulerende spjæld	23
Figur 4-12: Ventilator dimensioner	23
Figur 4-13: CFD simuleringer af roterende luft efter ventilatoren	24
Figur 4-14: Til venstre ses ventilatoren i en Ø355-nippel og luften kastes roterende ud langs den indre periferi (ud af billedet) og fortsætter, via muffen i overgangen til højre, ind i manifolden.	25
Figur 4-15: Prototype med plads til 9 indblæsningskanaler	26
Figur 4-16: Prototype til et typehus med 5 rum.....	26
Figur 4-17: Illustration af dimensionering af overgangsstykker.....	27
Figur 4-18: Illustration af slubreventil	28
Figur 4-19: Slubreventil uden monterede kanaler.	29
Figur 4-20: Til højre ses en Ø160 mm kanal med en overgang til Ø200 mm ILRU. til venstre ses en Ø125 mm kanal.....	29
Figur 4-21: Slubreventil i opstilling med gitter endebund i Ø250 mm.	29
Figur 4-22: Prototype manifold set fra ventilatorsiden.....	30
Figur 4-23: Prototype manifold set fra varmepladesiden.....	30
Figur 4-24: Klemprofil med stålindlæg fra Aalborg gummivarefabrik.	31
Figur 4-25: På billedet kigges ind på manifold fra ventilatorovergangen.	31
Figur 4-26: Overgang til NilAirflex slanger med klemprofil og hulplader til trykudligning.	31
Figur 4-27: Færdig samlet prototype.....	32
Figur 4-28: På billedet ses hulpladerne i bypasskanalerne.	32
Figur 5-1: Principskitse for varmepumpe med varmeveksler	33
Figur 5-2: Tkon er temperaturen på kondensatoren, Tsh og Tsh SGHX er den beregnede overhedningstemperatur for hhv. uden og med varmeveksler.	34
Figur 5-3: Overhedningseffekt leveret til vandet ved 55 °C	34
Figur 5-4: Varmepumpeeffekt samt andel af overhedningsvarme	34
Figur 6-1: Illustration af de tre intervaller som bruges til styring af ventilatoren.	39
Figur 6-2: Sigmoid funktion med Erail sat til 0,1.....	40
Figur 6-3: Anvendt sigmoid funktion til styring af varmepladens setpunkt. Af y-aksen ses varmepladens sigmoid korrigerede setpunkt i celcius som funktion af E_{avg}	41
Figur 6-4: Hardware til implementering af styringssoftwaren	43
Figur 6-5: Printplade og seriel port	43
Figur 6-6: ovenstående diagram indeholder de herunder listede subVIs.....	44
Figur 7-1: Mekanisk ventilation med luftvarme og recirkulation med decentrale blandebokse	53

Figur 7-2: Simuleringsmodel	54
Figur 8-1: Plantegning af Energy Flex House	58
Figur 8-2: Forsøgsopstilling. Til venstre ses varmegenvindingsaggregatet, i midten ses slubventilen og til højre ses luftvarmeaggregatet.	58
Figur 8-3: Fotografi af opstilling fra enden af gangen.	59
Figur 8-4: Kanalføring og indblæsningsarmatur.	59
Figur 8-5: Temperaturplot i rum 1, 2 og 3 samt udendørs	60
Figur 8-6: Plot af ventilator effekt og varmebladens effekt. Bemærk at skalaen for varmeeffekten er logaritmisk	60
Figur 8-7: Signalspændinger for spjæld, recirkuleringsventilator og varmeblade	61
Figur 8-8: Dør på klem ind til rum 2.....	62
Figur 8-9: Vandindholdet i de fire testrum og gangarealet	63
Figur 8-10: Temperaturen i de fire testrum og gangarealet.....	64
Figur 8-11: Den tilførte varmeeffekt til de tre rum	64
Figur 8-12: Spændingssignal fra varmebladen (gul) og ventilatoren (blå).....	65
Figur 8-13: Trykket efter varmegenvindingsaggregatet	65
Figur 8-14: Temperatur i rum 1-3 samt udendørs.....	66
Figur 8-15: 0-10 V spænding fra de 3 indblæsningskanaler, ventilatoren og varmebladen	66
Figur 8-16: Temperatur i rum 1-4 samt udendørs.....	67
Figur 8-17: 0-10 V spænding fra de 3 indblæsningskanaler, ventilatoren og varmebladen	68
Figur 8-18: Temperatur i de tre rum med indblæsning samt udetemperaturen	69
Figur 8-19: Fejlen E_{avg} , E_{rail} og $-E_{rail}$	70
Figur 8-20: Signalspændinger for de tre rum med indblæsning, recirkuleringsventilatoren samt varmebladen.....	71
Figur 8-21: Setpunkt (sort) samt temperatur (rød) for varmebladen.....	71
Figur 8-22: Effekt for recirkuleringsventilator (sort) og varmeblade (rød).....	72
Figur 8-23: Opladningsforsøg i EnergyFLexHouse.	74
Figur 8-24: Mulig temperatur døgnprofil.	75
Figur 8-25: Temperatur døgnprofil ved en tilført effekt på hhv. 6 og 19 kW.	76
Figur 8-26: Effektilførsel pr. måned over året afhængig af udetemperaturen.....	77
Figur 10-1: Dimensionerende temperaturer for luftvarmeanlægget på årets koldeste dag	84
Figur 10-2: Makroer til bestemmelse af energibegov til opvarmning med og uden luftvarmesystem	88

1. Indledning

Luftvarmeanlæg havde en vis udbredelse i selvbyggerhuse i 1960erne og har nu fået en udbredelse i højt isolerede tyske passivhuse. Det forventes at dette projekt vil føre til udvikling af nye komponenter, så luftvarmeanlæg vil få en vis udbredelse i nybyggede velisolerede danske huse.

Bygningsreglementerne BR 10, BR 15 og BR 20 indeholder stigende krav til bygningernes energieffektivitet, primært til nybyggeriet som i en række sammenhænge bliver sigtepunkt for forbedring af eksisterende bygninger. Et lavt energiforbrug i byggeriet er en nødvendighed, imidlertid viser erfaringer fra nye lavenergihuse, at det faktiske energiforbrug er væsentligt større end det beregnede. Det skyldes typisk uhensigtsmæssig bygningsudformning, utilstrækkelige beregningsværktøjer, uhensigtsmæssigt valg af systemløsning, forkert dimensionering og ineffektiv styring i samspil med en brug der afviger fra de simple beregningsforudsætninger.

Lavenergiudfordringen betyder ændringer i bygningskultur og byggeprocessen, i de anvendte konstruktioner og kompleksiteten af installationerne, decentral udnyttelse af vedvarende energi og øget fokus på drift og vedligehold og bæredygtighed i byggeriet. En del af udfordringen for byggeindustrien er at fastholde kvaliteten i byggeriet, og sikre et lavt energiforbrug og kvaliteten af energiydelserne til markedspris. Dette er ikke lykkedes endnu.

En kompakt bygningskrop, velisolerede og lufttætte konstruktioner, vinduer med optimal placering og lav U-værdi samt effektiv varmegenvindingsanlæg sikrer tilsammen at passiv solvarme og interne varmetilskud fra personer og apparater i boligen, kan opretholde den ønskede rumtemperatur det meste af året.

Aalborg Universitets evaluering af fire af de såkaldte Komforthuse, der er opført i Skibet vest for Vejle, viser effekten af store sydvendte glasarealer. Evalueringen viser problemer med overophedning i alle husene. I nogle huse når temperaturen op på 30 grader, da de ikke har sol afskærmning. I et enkelt hus er komforttemperaturen overskredet en tredjedel af tiden i sommerperioden. Samtidigt med problemerne i de varme sommermåneder opstår der i husene problemer med utilstrækkelig opvarmning i vinterperioden, hvor rumtemperaturen falder til omkring 16 grader på grund af manglende kapacitet og korrekt fordeling i anlægget.

I passivhuse og lavenergihuse er der behov for enkle og let regulerbare varmesystemer, i denne sammenhæng flyttes fokus fra vandbåren til luftbåren varme. Erfaringerne til nu peger imidlertid på et uacceptabelt højt energiforbrug, og på urimelige indeklimaproblemer i både sommer og vinterhalvår.

En af grundene til dette er uigennemtænkte, komplekse og fejldimensionerede systemer. Ofte er fx COP'en for varmepumper urimeligt lav i samspil med gulvvarmeanlæg og mekanisk ventilation.

Én udfordring for luftvarmeanlæg er kravet i BR10 til individuel rumtemperaturregulering. Hvordan dækkes friskluftsbehovet i et enkelt rum uden opvarmningsbehov, når der i resten af huset er behov for opvarmning? – Dette er ikke løst endnu - alle hidtidige anlæg er installeret med dispensation fra Bygningsreglementet.

I forbindelse med definition af bygningsklasse 2020 har konklusionen været at luftvarmeanlæg i boliger skal suppleres med anden opvarmning, for at sikre det termiske indeklima i særligt kolde perioder.

Flere aspekter har vist sig at være udfordringer i energirenoveret og lavenergibyggeri, f.eks. er elforbruget til varmedistribution ved gulvvarme væsentligt, ligesom SFP og COP-faktor i samlede systemer ofte er væsentligt ringere end laboratorieværdierne. Der er derfor behov for systemudvikling i sammenhæng med bygningens øvrige komponenter og klimaskærm, og med forståelse for slutbrugerens krav til energiydelserne - krav der ændres med familien og som ofte afviger fra standard forudsætningerne.

En tvingende nødvendighed for at sikre systemets succes er kendskab til boligens *enkelte* rums varmebehov i henhold til orientering, brug og isolans for korrekt dimensionering og kapacitet. Dette kan på husniveau simuleres med en B-SIM beregning, men dette er ofte for komplekst og omkostningstungt hvorfor der er udviklet et simulerings- og beslutningsstøtte værktøj "TI_SIM" som kan anvendes for beregning og vurdering af varme og kølebehov samt tilhørende indeklima og de enkelte komponenters samt styringens indflydelse på bygningens udformning og brug.

Et andet aspekt er ønsket om at lavenergibyggeri skal billiggøres. Det kan bl.a. ske gennem udvikling af standardløsninger for kombinerede varme- og ventilationsanlæg.

I projektet er der udviklet et samlet luftvarmeanlæg. Frisklufttilførsel leveres via et traditionelt varmegenvindingsaggregat. Den friske luft leveres til det udviklede luftvarmeaggregat, hvor de to luftmængder samles i en nyudviklet manifold, der blander luften til hver enkelt rums behov.

Luftvarmeanlægget består af et *varmegenvindingsaggregat* der rummer varmeveksler, to ventilatorer og bypass samt et *luftvarmeaggregat* der rummer recirkuleringsventilator, spjæld til opblanding af friskluft og varm recirkuleret luft, varmepumpeforsynet varmeplade og styringsautomatik. Systemet styres efter temperaturen i de enkelte rum og giver dermed større komfort i hele huset.

Projektet fokuserer på markedet for et luftvarmebaseret samlet system til lavenergibyggeri, der sikrer gode energiydelser med et lavt energiforbrug, gennem udvikling og demonstration af nyt koncept med tilhørende systemløsninger og nyudviklede komponenter.

I udviklingen af prototypen er der taget hånd om udviklingen af styringen samt mulighed for regulering på rumniveau. Gennem projektet er der udarbejdet en manifold med spjæld der kan regulere indblæsningstemperaturen i samarbejde med ventilator og varmeplade. Varmepumpen er ikke udviklet og produktudviklingen er ikke tilendebragt. Denne del kan et videre studie tage hånd om.

2. Opvarmning med luft

Grundtanken er, at ventilationen skal installeres under alle omstændigheder og så kan den lige så godt udgøre husets varmekilde, hvorved det vandbårne anlæg kan spares væk. Derfor har en lang række producenter, primært nordiske, det seneste årti udviklet samlede løsninger som udgør husets varmekilde, ventilationsanlæg samt brugsvandsopvarmning, ved sammenbygning af ventilationsanlæg og varmepumper.

Dette er interessant, da andelen af "gratisvarme" er stigende i velisolerede huse. Dette skal forstås på den måde at luftvarmeanlægget er recirkulerende med tilskud af frisk udeluft, der har passeret en varmegenvinder. Fra rum med uønsket høj temperatur som følge af solbelastning og rum med varmebelastning fra personer, TV, PC, spilkonsoller etc. overføres varme til de kølige rum. Dette vil give en netto energibesparelse frem for, at brugerne i de varme rum undlader at fjerne overskudsvarme i disse rum ved at åbne vinduerne. Luftvarmeanlæg er også hurtigt reagerende.

Endvidere er et luftvarmeanlæg forudsætning for, at "termisk lagring" kan anvendes i boliger med mere end ét lokale, altså i praksis alle boliger.

Luftvarmeanlæg har stadig en række udfordringer som blandt andet søges løst igennem dette projekt, blandt andet tilstrækkelig varmekapacitet samt muligheden for individuel rumopvarmning. Årsagen hertil er, at det generelt vurderes, at fremtidens opvarmningsanlæg i nybyg er baseret på luftvarme, hvilket også ses af det massive antal installationer i passivhuse som i høj grad anvender luftvarme.

3. Konklusion og diskussion

I takt med at moderne huse bliver bedre isoleret, bliver luftvarme mere interessant som alternativ til konventionelle centralvarmesystemer, da der er behov en mindre luftstrøm for at varme huset op, og luftvarmeanlægget kan dermed bygges billigere og mere kompakt. Luftvarmeanlæg bliver brugt i tyske passivhuse men i Danmark er det et krav i BR10 at der skal være individuel rumtemperaturregulering. I dette projekt er der udviklet et luftvarmeaggregat med individuel rumtemperaturregulering, så kravet til bygningsreglementet overholdes.

Med dette projekts udvikling af et kompakt og billigt alternativ til vandbaserede centralvarmesystemer, er vejen banet for, at luftvarme kan få den samme store udbredelse i Danmark som det har haft i f.eks. Tyskland og USA.

I projektet er der udviklet og testet en samlet ventilation- og opvarmningsløsning til enfamiliehuse. Løsningen er udviklet med en dertilhørende styring. Styringen sørger for at der opretholdes et tilfredsstillende indeklima ud fra de givne parametre temperatur og fugt.

Der er anvendt et allerede eksisterende varmegenvindingsaggregat *Nilan Comfort ECO 300*, der sørger for frisklufttilførslen, fugtregulering samt køling via bypass-spjæld. Varmegenvindingsaggregatet er koblet sammen med det udviklede luftvarmeaggregat, der sørger for at varmen er tilfredsstillende i alle zoner i huset.

Der er udviklet tre forskellige konceptversioner for et fungerende luftvarmeanlæg med forskellig ambitionsniveauer: Avanceret, udvidet og simpelt. Det er producenternes ønske og markedets behov at den samlede anlægspris holdes nede, hvis luftvarme skal erstatte konventionelle opvarmningsmetoder. Denne filosofi ligger til grund for beslutning om at basere prototypen på den simple model.

Luftvarmeaggregatet er designet ud fra en idé om en standard spjældkanal som er simpel og let at masseproducere. Spjældarmen er designet med flad ende for at reducere længden af spjældkanalen og produceret i stærkt polystyren, da dette materiale er både let og billigt. Som aktuator er der brugt den billigste der kunne anskaffes, hvilket er en servomotor fra Parallax med en drejevinkel på 0-180 grader. En enkelt stor ventilator står for al lufttransporten i luftvarmeaggregatet og mængden af recirkuleret luft selvreguleres i en såkaldt slubreventil. Aggregatet kan valgfrit tilsluttes ventilationskanaler af spirovalsede rør, hvilket giver det laveste tryktab eller til fleksible plastkanaler, hvilket er en fordel i anlægsarbejdet og mht. varmetabet. Det kan være en fordel at udvikle nye standardstørrelser på fleksible ventilationskanaler af plast for at minimere tryktabet.

Den producerede prototype er en simpel og billig løsning, men langt fra den mest holdbare og elegante. F.eks. kan en bedre aktuator gøre spjældene mere solide og elegante. Bøsninger og spraybelægning af polystyrenen, kan øge spjældarmenes levetid.

Små pladsoptimeringer kan laves for at gøre aggregatet endnu mere kompakt. F.eks. kan størrelsen af bypass-kanalerne reduceres i budget-versionen i stedet for at trykudligne med hulplader. Det viste sig at luftrotation ikke er et problem. For at gøre aggregatet endnu mere kompakt kan ventilatoren rykkes tættere på manifolden. Det er også en mulighed at gøre manifolden kortere ved at gøre spjældarmene kortere og derved tykkere i enden, dette dog på bekostning af øget tryktab.

Der er endvidere udviklet en styringsstrategi som sikrer et hurtigt reagerende system som ved hjælp af en intelligent styring kan løse alle kravene til systemet. Et hurtigt reagerende system kan opnås ved styringsmæssigt at parallelkoble ventilatoren og de temperaturregulerende spjæld, så de reagerer samtidigt på eventuelle temperaturændringer.

Der er i LabVIEW udviklet et program til styring af hele luftvarmeanlægget der indeholder prioriteringer som gør systemet mere "intelligent". Bl.a. bestemmes ventilatorens input ud fra boligens behov for varme, køling og varmetransport. Derudover bestemmes varmekildens setpunkt løbende ud fra udetemperaturen og har mulighed for selv at korrigere setpunktet hvis det skulle vise sig at være utilstrækkeligt.

Gennem fuldskala forsøg i et enfamiliehus (Energy Flex House på Teknologisk Institut) er styringsstrategien og det samlede luftvarmesystem blevet testet. Luftvarmesystemet fungerer efter hensigten og kan holde en konstant temperatur i boligen når der er påført forskellige belastninger af varme, kulde og fugt.

Forsøg med varmebelastning viser, at når temperaturen stiger i et rum øges recirkuleringsventilatorens omdrejninger for at transportere den ekstra varme til de øvrige rum. Dette bevirker, som ønsket, at temperaturen i rummet med varmebelastning daler. Temperaturen i rum med indblæsning, hvor der ikke er varmebelastning, falder lidt på grund af at varmepladens temperatur sænkes for at spare energi. Dette kan muligvis reduceres ved at implementere luftstrømsregulering af spjældene, således at luftstrømmen kan øges til det rum hvor der er stor varmebelastning.

Ved at påføre en kuldebelastning, i form af et åbent vindue i et af rummene, blev det testet om luftvarmesystemet kan opretholde en tilfredsstillende indetemperatur i alle rum. Af forsøget kan det ses at når temperaturen daler kører ventilatoren op i omdrejninger og effekten af varmepladen øges. Samtidig åbnes spjældet til rummet med kuldebelastning og den opvarmede luftstrøm øges. På grund af samspillet mellem ventilator og varmeplade falder temperaturen i rummet ikke til under 22°C. For at undgå unødigt energiforbrug, skal der påføres en sensor, der kan informere luftvarmeaggregatet om, at der ikke skal leveres varme eller køling til et rum med åbent vindue.

Luftvarmesystemet er undersøgt i forhold til overføring af fugt gennem recirkulationen. Forsøgene indikerer at der ikke overføres fugt mellem rum med indblæsning. Fugten ledes fra rum med indblæsning til gangarealet og videre til rum med udsugning. På trods af at fugtigt luft blev ledt fra fugtigt rum til gangen hvor recirkuleringsluften opsamles, blev der ikke observeret øget fugt niveau i de øvrige rum med varmetilførsel.

For at opnå en energibesparelse ved brug af luftvarmesystem i forhold til traditionel opvarmning er det nødvendigt at COP faktoren for varmepladen er så høj som muligt. Dette kan være svært at møde om vinteren når forskellen mellem kondensator- og fordampertemperaturen er relativt stor. For at opnå en høj energibesparelse er der udviklet en funktion der sætter kondensatortemperaturen lavest muligt for at opnå relativ høj COP.

Ekspansionsventil, varmepumpe og ventilator styres primært, i den aktuelle brugssituation (personer til stede etc.), efter at holde lavest mulig kondenseringstemperatur således at det dårligst forsynede rum med bypass lukket (maksimal varme) netop kan opvarmes.

Styringsstrategien kan vurderes ved hjælp af programmet TI-SIM-Bolig_varmepumpe. De indledende gennemregninger viser, at med en effektiv ventilator synes det at være bedst at køre med høj luftstrøm i dele af eller hele varmesæsonen. Dette vil også forbedre varmemeflytningseffekten der flytter varme til fælles systemet. For boligen i det gennemregnede eksempel er der ifølge Bygningsreglementet en fugtbetinget luftstrøm på 198 m³/h. Ved anvendelse luftvarmesystem med fugtfølere og fugtregulering af udsugningen kan dette reduceres til 151 m³/h. Dette vil reducere varmebehovet yderligere.

For en bolig med luftvarmesystem med recirkulation vil det være således at varmetilskud i et rum returneres til slubreventilen og kan komme køligere rum til gode. Dette giver en ekstra energibesparelse, denne værdi er dog svær at estimere. I dette projekt estimeres værdien til 5%. En almindelig dansk familie bruger i gennemsnit omtrent 4000 kWh om året. En del af denne varme går tabt gennem emhætten, men den resterende varme er boligen til gode. Systemet er det første på markedet der er i stand til at bruge gratis varme via varmemeflytning og kontinuerligt regulere efter optimal COP.

Ud over energieffektivitet og økonomi er der også andre faktorer der spiller ind, når valget af varmeanlæg skal træffes, ikke mindst komfort og indeklima. Eftersom komfort og indeklima ikke er det primære formål med denne rapport, er dette berørt med et kort oprids af fordele og ulemper.

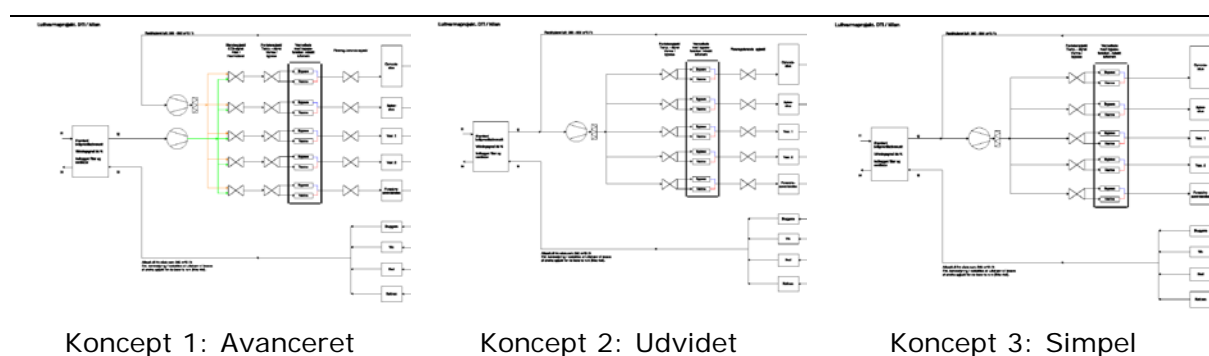
Gulvvarme	Radiatorvarme	Luftvarme
<p>Fordele:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gulvvarme giver en jævn opvarmning i hele huset, hvilket giver et godt indeklima. • Føles behageligt for fødderne <p>Ulemper:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gulvvarme er meget langsomt reagerende og kan være længe om at indstille sig til en pludselig temperaturændring, f.eks. en tændt ovn eller åbent vindue 	<p>Fordele:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kan reducere træk fra vinduer <p>Ulemper:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ujævn varmefordeling • Fylder i rummet • Kan samle støv og skal males en gang imellem • Der kan opstå luftlommer og skal derfor udluftes en gang imellem 	<p>Fordele:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reagerer hurtigt på temperaturændringer • Giver stor omrøring af luften, hvilket reducerer ophobning af CO₂ og fugt • Giver en jævn temperaturfordeling • Kan reducere energiforbruget ved varmemeflytning fra varme rum til fælles system <p>Ulemper:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kan muligvis støje mere end almindelig ventilation • Kan muligvis give anledning til indirekte træk • Recirkuleringen af luften kan give tilsmudsning af kanal/filter

Figur 3-1: Fordele og ulemper ved forskellige opvarmningsformer

4. Udvikling af luftvarmeanlæg

Der stilles krav til at luftvarmeanlægget skal kunne styre rumtemperaturerne individuelt samt at der skal være tilstrækkelig frisklufttilførsel. Et sådan anlæg kan konstrueres på flere forskellige måder med tilhørende fordele og ulemper.

Nedenstående er vist de i projektet tre mest relevante udviklede koncepter.



Figur 4-1 Blokdiagrammer over de tre koncept versioner. Fuld størrelse kan ses i Bilag 1.

Avanceret

I denne model bliver der ikke gået på kompromis med hverken ydelsen eller omkostningerne.

I anlægget indgår:

- Varmegenvindingsaggregat med varmeveksler, bypass og indbyggede ventilatorer
- 2 ventilatorer, en til friskluft og en til recirkuleret luft.
- CO₂ styret friskluft/recirkuleret fordeler-spjæld til regulering af frisklufttilførsel.
- Varmeflade/bypass fordeler-spjæld til regulering af indblæsningstemperatur.
- Reguleringspjæld til regulering af indblæsningsmængder.

Fordelen ved denne model er, at der udover individuel rumtemperaturstyring også er mulighed for rumstyret frisklufttilførsel og indblæsningsmængde. Dette betyder at der kan køres behovstyret ventilation til alle rummene. En ulempe er, at det bliver et stort og kompliceret anlæg så pladsforbrug og anlægspris bliver ikke ubetydelig.

Udvidet

I denne model reguleres frisklufttilførslen på husniveau, hvilket betyder at der spares et fordeler-spjæld for hvert rum. Dette betyder også at friskluftsventilatoren kan erstattes med en "slubreventil", hvilket reducerer kompleksiteten i styringen og giver en god prisbesparelse. De luftstrøms-regulerende spjæld beholdes så ventilatoren kun yder det, der er behov for.

Ulempen er, at der ikke leveres behovstyret friskluft på rumniveau. Der vil på grund af den recirkulerede luft, være stor omrøring, hvilket leder til, at der med stor overbevisning, ikke vil være problemer med indeklimaet.

Simpel

Denne model holder alle komponenterne på et absolut minimum og sigter at opfylde de opsatte krav på den simpleste og billigste måde. De luftstrøms-regulerende spjæld spares væk og i stedet sættes en hulplade i bypass kanalerne for at opnå samme tryktab som i varmeblæsen. Dette er en nødvendighed da største delen af luften ellers ville ledes igennem bypass kanalerne til rum der ikke har brug for varme i stedet for igennem varmeblæsen til rum der har. Således reduceres kompleksiteten af anlægget og den efterfølgende udvikling til et aggregat med en enkelt recirkuleringsventilator og en manifold af temperaturregulerende spjæld.

Ulempen er en øget transportenergi i perioder hvor der ikke er brug for varme, dog bliver det kun til en marginal stigning i det samlede årlige energiforbrug.

Valg af model til prototype forsøg

Det er producenternes ønske og markedets behov, at den samlede anlægspris er af afgørende betydning, hvis luftvarme skal erstatte konventionelle opvarmningsmetoder. Denne filosofi ligger bl.a. til grund for beslutning om at basere prototype til de efterfølgende test på den **Simple** model.

I og med at denne model også er den simpleste af de tre, er en fungerende prototype også et naturligt trinbræt på vej mod en af de mere komplicerede modeller.

4.1. Energiberegninger

Der er foretaget energiberegninger på et en-familie typehus (140m²) for at bestemme hvor stor en recirkuleringsventilator og varmeblæse der er behov for.

Der er i dette eksempel beregnet et varmeeffekttab på 3700 W på den koldeste dag på året (-12°C). Af hensyn til varmepumpens COP værdi og for at undgå for stor opdrift af den indblæste luft sættes den maksimale indblæsnings temperatur til 40°C, hvilket ved en rumtemperatur på 23°C giver en ΔT på 17°C.

$$Q = c_p m \Delta T \Rightarrow \dot{Q} = c_p \rho \dot{V} \Delta T \Rightarrow \dot{V} = \frac{\dot{Q}}{c_p \rho \Delta T}$$

$$= \frac{3700}{1005 \cdot 1,2 \cdot 17} = 0,18 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 649,7 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

For at levere de 3700 W er der brug for en luftstrøm på 650 m³/h ved en indblæsnings-temperatur på 40°C, som er dimensioneringsgrundlaget for recirkuleringsventilatoren. Luftstrømmen er langt højere en normal boligventilation og sætter derfor store krav til både kanalsystemet og ventilatoren.

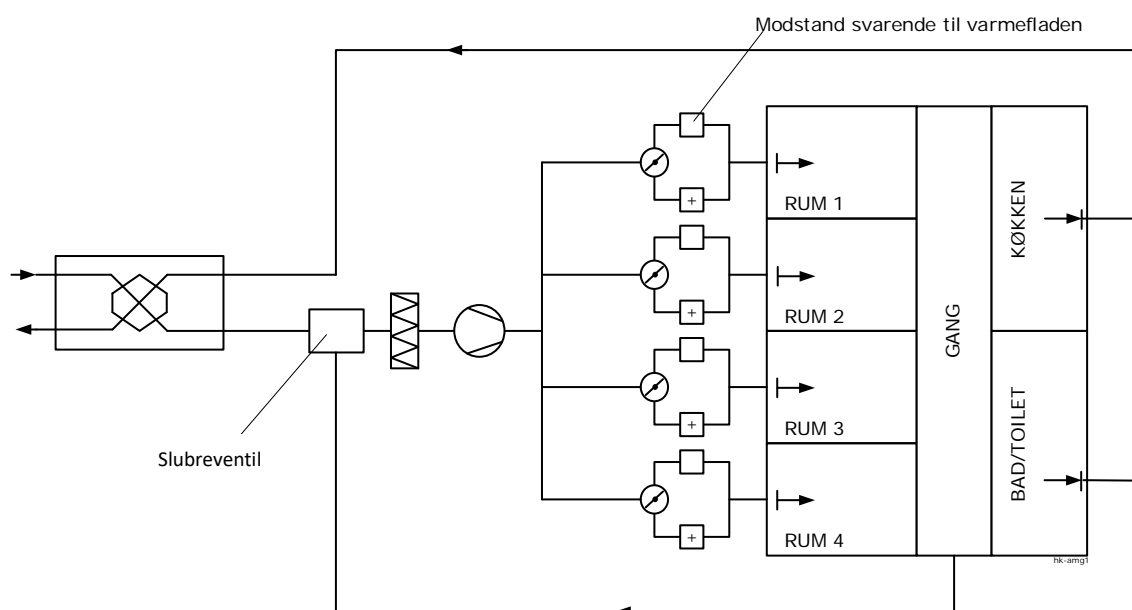
Dimensioneringen af varmeblæsen og ventilator bygger på et varmeeffekttab på 3700 W. Dette kan reduceres yderligere, hvis der dimensioneres efter et BR2020 hus. Derved kan Luftvarmeaggregatet størrelse reduceres.

4.2. Design og dimensionering af luftvarmeaggregat

I figur 4-2 ses diagrammet for det valgte luftvarmekoncept. Det ses at der er behov for design og dimensionering af følgende:

- En ventilator til recirkulering af luften.
- En varmeplade til opvarmning af luften.
- Et spjæld der kan fordele luften mellem varmepladen og bypass-kanalen.
- En manifold som vil bestå af en samling af de ovennævnte spjæld.
- En overgang fra ventilatoren til manifolden.
- Overgange fra manifolden til de respektive ventilationskanaler.

En "slubreventil" til indtaget af recirkuleret luft



Figur 4-2: Diagram for det valgte luftvarmekoncept

Valg af recirkuleringsventilator

Ud fra energiberegningerne er der valgt en EBMpapst EC Radical K3G220-RC05-03 samt en Nilan varmeplade inkl. en 9kW elkedel til simulering af varmekilden.



Figur 4-3: Radical K3G220-RC05-03

Ventilatoren er en bagud krummet centrifugal ventilator med en permanent magnet motor med høj virkningsgrad. Ventilatoren kan levere en luftstrøm på knap 700 m³/h ved 200 Pa med et energiforbrug på 85 W. Yderligere specifikationer kan ses i Bilag 2.

Valg af varmevlade

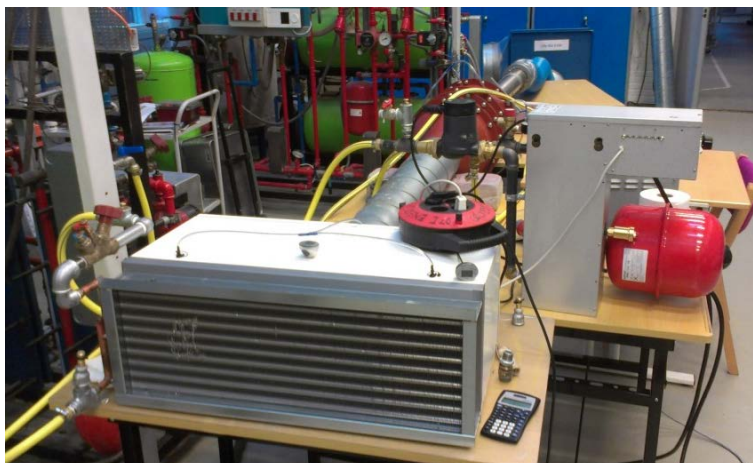
Den anvendte varmevlade blev dimensioneret efter et krav om en afleveret effekt på 4800 W ved en lufttemperaturdifferens på 20°C og en luftstrøm på ca. 700 m³/h. Efter forsøg udført på varmevladen blev det konstateret, at den ikke kunne leve op til de anførte krav.

Der blev målt en temperatur effektivitet på ca. 62% ved et flow på 650 m³/h, hvilket er acceptabelt hvis der er tale om fjernvarme/naturgas som varmekilde, men langt fra de 85% som er ønsket til varmepumpe brug.

For at opnå de ønskede 85%, er der brug for en varmevlade med ca. dobbelt så stort areal. Varmevladden som skal bruges med varmepumpe som varmekilde, vil derfor være dobbelt så stor som den i forsøget anvendte.

Det skal dog holdes in mente at de 650 m³/h er den maksimale luftstrøm og at ventilatoren langt det meste af tiden vil ligge i omegnen af 470 m³/h, hvor den målte effektivitet er ca. 70%.

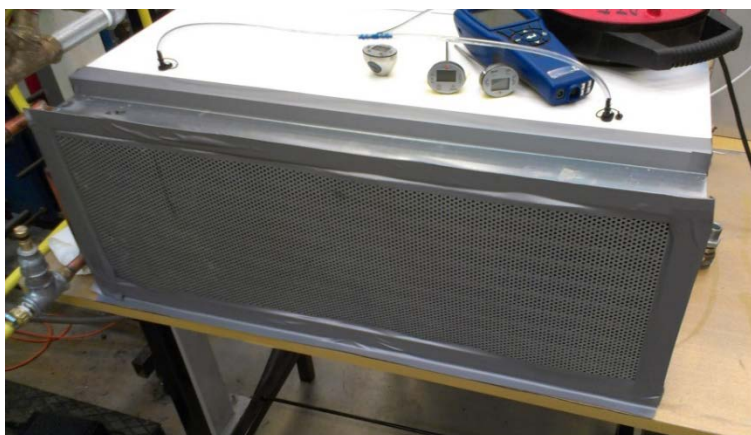
Det vil derfor være nærlæggende at have to versioner af luftvarmeaggregatet med forskellig varmevlade størrelse, en til fjernvarme og en til varmepumpe. Forsøgsjournalen til ovennævnte forsøg kan ses i Bilag 3.



Figur 4-4: Forsøgsopstilling med varmevlade

Det blev besluttet at anvende den undersøgte varmevlade, da der i forsøgene blev gjort brug af en elkedel og varmevladeeffektiviteten derfor var uden betydning.

For at tage højde for det ekstra tryktab, der er i en større varmevlade, blev der foran varmevladen placeret en hulplade med omtrent samme tryktab som varmevladen selv. Dette simulerer en varmevlade med dobbelt størrelse. Tryktabsmålinger for varmevladen kan ses i Bilag 4.

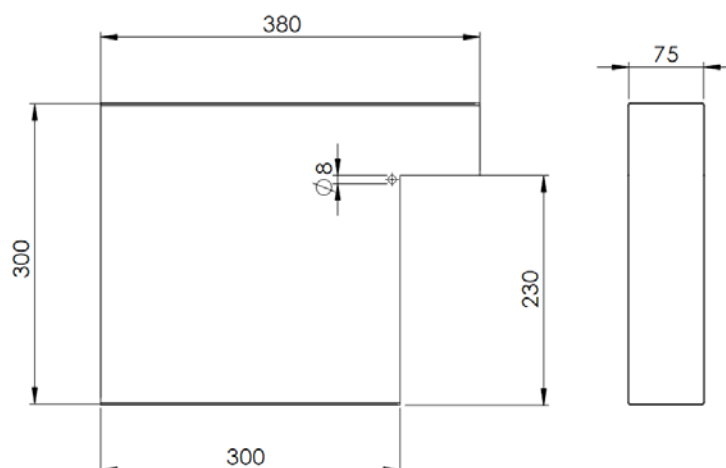


Figur 4-5: Varmeflade med påsat hulplade til simulering af øget tryktab

Temperaturregulerende spjæld

For at holde aggregatet kompakt er det ikke muligt af bruge standard komponenter, da de vil optage for megen plads og størrelsen af aggregatet er af afgørende betydning for udbredelse på markedet. For at få et kompakt anlæg er det nødvendigt, at konstruere rektangulære spjæld, som kan placeres parallelt i hele varmemfladens længde. Det har derfor været nødvendigt at designe et nyt og kompakt motoriseret spjæld.

Der tages udgangspunkt i et dansk en-familie typehus, hvor der er brug for opvarmet luft til fem rum. Luften skal fordeles mellem to små værelser, et stort værelse, en spisestue og en opholdsstue. Af hensyn til enkelthed og fleksibilitet dimensioneres varmfordelingsboksen ud fra en standard kanalstørrelse. Denne standard kanalstørrelse er defineret ud fra varmebehovet til de små værelser. Til de store rum, hvor der er brug for mere varme, parallelkobles to eller flere kanaler direkte fra udgangen af varmfordelingsboksen. På denne måde kan den samme varmfordelingsboks anvendes til mange forskellige huse og da der kun produceres en slags kanal, kan produktionsomkostninger holdes nede.

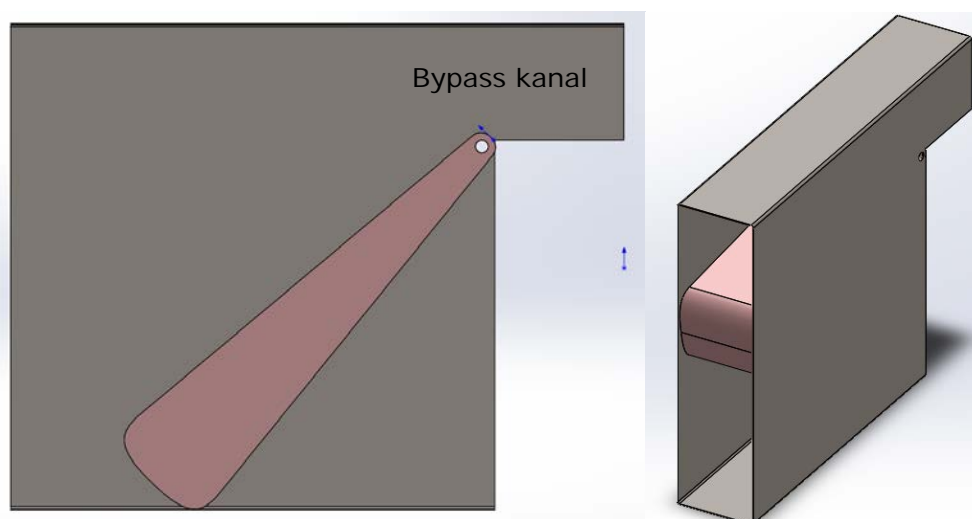


Figur 4-6: Dimensioner af det udviklede spjæld

Der er valgt at etablere to kanaler i både det store værelse og spisestuen samt tre kanaler i opholdsstuen. Sammen med en kanal til hver af de to værelser giver dette i alt 9 kanaler. Varmefladens dimensioner er 230x680x80 mm. Med 9 kanaler, skal hver af spjældene til

de tilhørende kanaler således have en bredde på ca. 75 mm. Derved kan den nødvendige luftstrøm leveres med tilfredsstillende lavt tryktab.

Da varmepladen er 230 mm høj er der valgt en kanalhøjde (aggregathøjde) på 300 mm, se figur 4-6. Dette giver 70 mm til bypass, hvilket vurderes at være et godt kompromis mellem tryktab og aggregat størrelse. En bypass kanal af denne størrelse vil have et væsentligt lavere tryktab end selve varmepladen, hvilket er en fordel i sommerhalvåret hvor der ikke er brug for opvarmning.



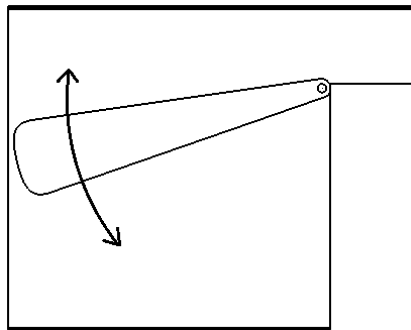
Figur 4-7: Illustration af blandespjæld med spjældarm til regulering af friskluft indtag

Det lave tryktab i bypass-kanalen er dog et problem i "simpel-udgaven", da størstedelen af luften vil blive ledt igennem bypass-kanalerne til rum der ikke har brug for varme i stedet for igennem varmepladen til rum der har. For at løse dette problem, er der i prototypen indsat en hulplade med samme tryktab som varmepladen.

En kommerciel version af "simpel udgaven" kan med fordel reducere størrelsen på bypass-kanalen så tryktabet svarer til varmepladens, da dette både reducerer pris og aggregat størrelse. Der er i prototypen valgt hulplade løsningen frem for den reducerede bypass-kanal størrelse, da dette giver mulighed for senere at opgradere anlægget til en mere avanceret model ved blot at pille hulpladen ud igen.

Plads er en vigtig faktor. Spjældarmen er derfor designet med en flad ende, hvilket reducerer længden af spjældkanalen. Der er her valgt en længde på 300 mm, men det er også en mulighed at gøre spjældkanalen endnu kortere, ved at gøre spjældarmen kortere i længden og tykkere i enden. Dette ville dog betyde et øget tryktab. Spjældarmene til prototypen er produceret i stærkt polystyren. Den meget lave vægt af dette materiale er en stor fordel, da der anvendes en relativ lille servomotor som aktuator.

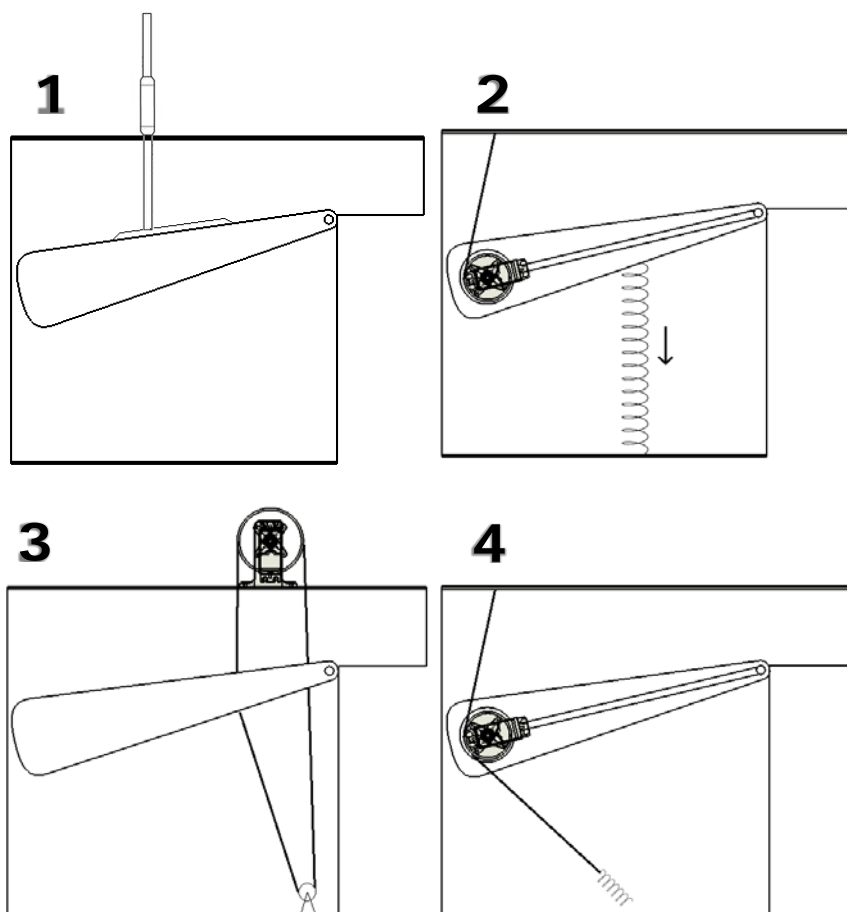
Dette er umiddelbart det spjælddesign som fylder mindst med minimal kompleksitet. Mere kompakte design kan udtænkes, men kan medføre øget kompleksitet og dermed øgede omkostninger. Trods det simple design er motoriseret bevægelse af spjældarmen ikke helt så simpelt. På grund af den cirkulære bevægelse er det problematisk at anvende lineære aktuatorer.



Figur 4-8: Illustration af spjældarmens bevægelse

Aktuator

Til at regulere luftstrømmen gennem spjældet der udtænkt fire forskellige løsninger. På figurerne nedenfor ses fire eksempler:



Figur 4-9: Løsningsforslag til bevægelse af spjældarmen

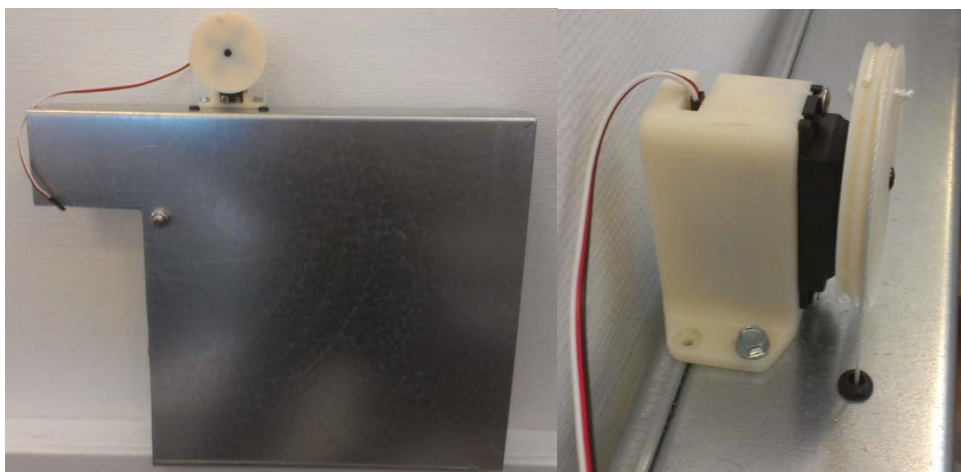
1. Lineær aktuator eller spindelmotor
2. Enkelt snoretræk med spolehjul inde i spjældarmen med modvægt eller fjeder
3. Dobbelt snoretræk med spolehjul inde i kanalen
4. Dobbelt snoretræk med spolehjul uden på kanalen

Løsning 1 med en lineær aktuator var den første der blev overvejet, men blev forkastet hovedsageligt pga. den høje pris sammenlignet med en servomotor.

Løsning 2 med en modvægt i stedet for en fjeder, er umiddelbart den mest elegante, da servomotoren er gemt inde i spjældarmen og ledningerne kan trækkes ud gennem en hul aksel. Et problem ved denne løsning er at servomotoren konstant skal arbejde for at holde positionen, hvilket bruger en del strøm og frembringer en brummelyd. En servomotor med større gearing kan muligvis løse dette problem.

I løsning 3 skal servomotoren kun holde sin egenvægt og bruger derfor næsten ingen strøm, men for at kunne modvirke trykket fra luftstrømmen når spjældarmen skal køre ned, er der nu en ekstra snor. Dette introducerer dog et nyt problem, da den cirkulære bevægelse betyder at snoren ikke er spændt lige meget i alle positioner. En fjeder kan bruges til at spænde snoren op, men fjederen kan give sig og dette betyder reelt at positionen af spjældarmen ikke kendes 100%. Hvor stort et problem dette er, er svært at vurdere og bør testes i praksis.

Fordel i løsning 4 er, at med spolehjulet placeret uden på spjældkanalen er der nu mulighed for at parallelkoble to eller flere spjæld med en aksel og der kan dermed spares på antallet af servomotorer. Dog er de anvendte servomotorer så billige at der næppe er meget at spare, da der skal bruges en aksel og et kugleleje i stedet og dertil er der lidt tvivl om, om de anvendte servomotorer rent faktisk er stærke nok til at holde tre spjæld på samme tid. Hvis der bruges servomotorer af en højere kvalitet er besparelses potentialet dog ikke uvæsentligt. I prototypen er der gjort brug af løsning 3, se figur 4-10.



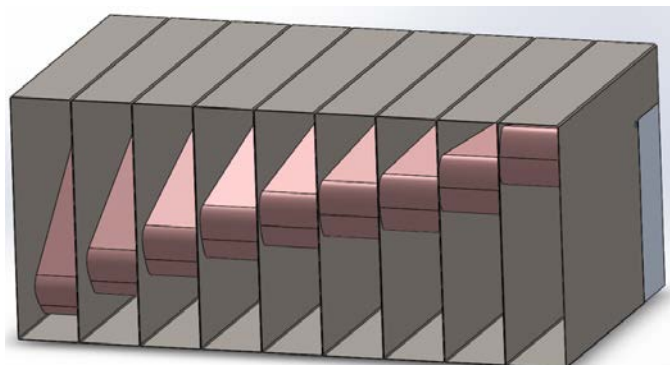
Figur 4-10: Prototype med løsning 3

Den simpleste og mest elegante måde at dreje spjældarmen er ved at have servomotorens aksel fastmonteret til kanalen og lade kroppen af servomotoren være placeret i enden af spjældarmen. Da akslen er fastmonteret, vil det altså være hele servokroppen, og dermed spjældarmen, der roterer om akslen. Der er dog to årsager til at denne løsning ikke er blevet brugt. Dels er momentet på servomotoren i denne konfiguration meget stort, og dels vil spjældarmen være tykkest hvor servomotoren sidder og vil dermed "skygge" for enten varmekanalen eller bypass-kanalen, hvilket betyder at man ville være nødt til at øge aggregatets højde svarende til spjældarmens tykkelse.

I en kommerciel version, er det muligt at dette vil være den bedste løsning trods en lidt øget aggregatstørrelse.

Manifold

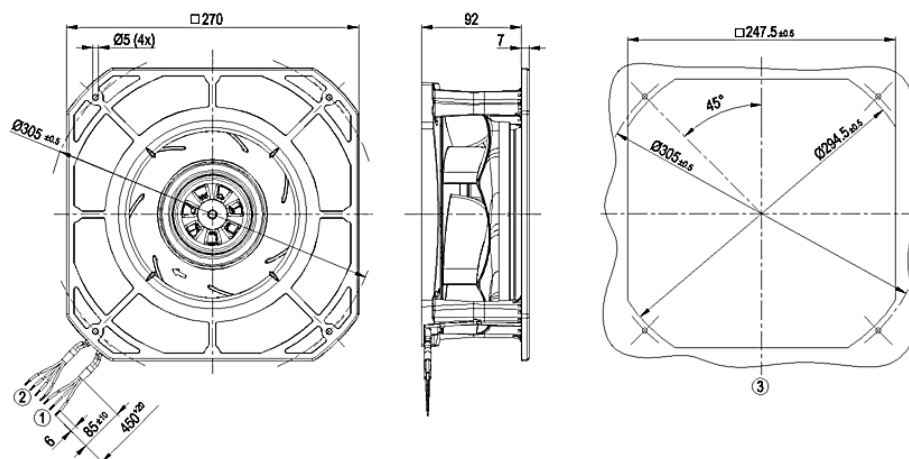
De temperaturregulerende spjæld placeres parallelt med hinanden og danner til sammen manifolden. Den designede manifold kan ses på nedenstående billede.



Figur 4-11: Illustration af manifold med temperaturregulerende spjæld

Ventilatorovergang

Den anvendte ventilator er en kammerventilator, hvilket betyder at den er lavet til at kaste luften ud i et åbent kammer og har derfor ikke noget spiralhus. Dette gør den mindre effektiv, da størstedelen af det dynamiske tryk går tabt, men det betyder også at den fylder væsentligt mindre.



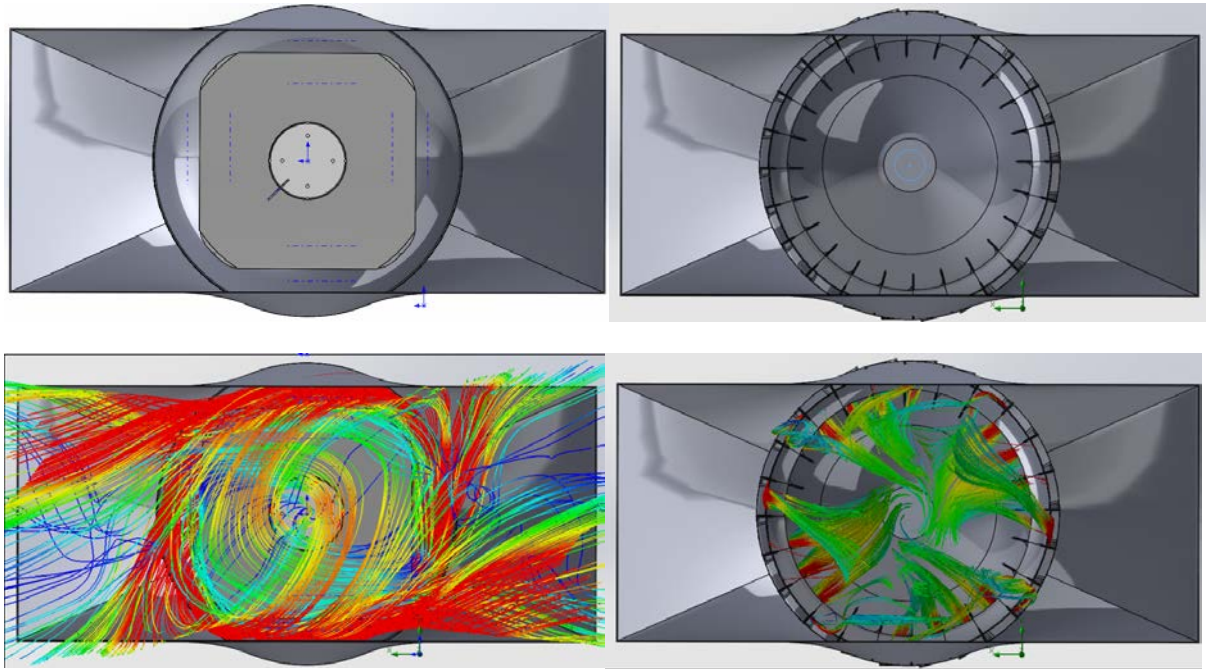
Figur 4-12: Ventilatordimensioner

Kammerventilatorer skal helst have rigeligt med luft på afkastsiden for bedst effektivitet, men da aggregatet ønskes så kompakt som muligt, er det svært at retfærdiggøre ekstra plads omkring ventilatoren.

Roterende luft

En udfordring ved brug af kammerventilatorer er at de producerer roterende luft, hvilket betyder at al luften vil blive kastet ud til de yderste spjæld.

Indledende CFD-simuleringer bekræftede dette og der blev forsøgt udviklet en slags aerospike (stator) der skulle stoppe rotationen og lede luften ind til de midterste spjæld, hvilket samtidig genvinder noget af det dynamiske tryk. Selvom det i CFD-simuleringerne lykkedes at stoppe rotationen og lede luften ind mod midten, var resultatet ikke overbevisende, da der simpelthen ikke er nok plads til at luftstrømmen kan udjævne sig. Ledeplader blev også overvejet, men med samme resultat.



Figur 4-13: CFD simuleringer af roterende luft efter ventilatoren

Prototypen blev designet uden antirotation med den argumentation, at det relativt høje tryktab i det samlede system medvirker til at udjævne flowet i kanalerne.

Hvis roterende luft viser sig at være et problem, kan aerospiken evt. testes ellers kan det blive nødvendigt med spjæld til indregulering. Det er også en mulighed at anvende to mindre ventilatorer i stedet for en stor. Dette vil fylde mindre men formentlig koste mere.

Prototype design

I prototypen blev ventilatoren fæstnet i en Lindab Ø355 mm ILRU, da dette er den mindste standard diameter med plads til at luften kan komme ud. Dette fylder mindst, dog går det dynamiske tryk til spilde ved den skarpe retningsændring.



Figur 4-14 Til venstre ses ventilatoren i en Ø355-nippel og luften kastes roterende ud langs den indre periferi (ud af billedet) og fortsætter, via muffen i overgangen til højre, ind i manifolden.

En overgang fra Ø355 til manifolden med en 45 graders vinkel blev produceret i blik. Hvis luftrotation ikke er et problem, kan ventilatoren rykkes tættere på spjældene og dermed kan aggregatets størrelse reduceres.

Dimensionering af overgangsstykker

Designkriterier

- Kompakt
- Mulighed for parallelkobling af flere kanaler
- Ens tryktab pr. meter i afgangskanalerne
- Så lavt tryktab som muligt

For at minimere tryktabet i overgangsstykket, ønskes ideelt et konstant tværsnitsareal. Den hydrauliske diameter for en rektangulær kanal kan beregnes ud fra følgende ligning:

$$D_h = \frac{2ab}{a+b}$$

Hvor a og b er højde og bredde af den rektangulære kanal.

1 kanal:

$$D_h = \frac{2ab}{a+b} = \frac{2 \cdot 0,075 \cdot 0,3}{0,075 + 0,3} = 0,12 \text{ m} = 120 \text{ mm}$$

2 kanaler:

$$D_h = \frac{2ab}{a+b} = \frac{2 \cdot 0,15 \cdot 0,3}{0,15 + 0,3} = 0,20 \text{ m} = 200 \text{ mm}$$

3 kanaler:

$$D_h = \frac{2ab}{a+b} = \frac{2 \cdot 0,225 \cdot 0,3}{0,225 + 0,3} = 0,257 \text{ m} = 257 \text{ mm}$$

Vi ønsker ca. samme tryktab alle i kanalerne, uanset hvilket overgangsstykke der sidder på. Desværre er der ikke plads til at der kan sidde så store cirkulære kanaler side om side så vi bliver nødt til at gå et par standard diametre ned.

Kanaldiameter på overgangsstykker

1 kanal = 80(100) mm

2 Kanaler = 125 mm

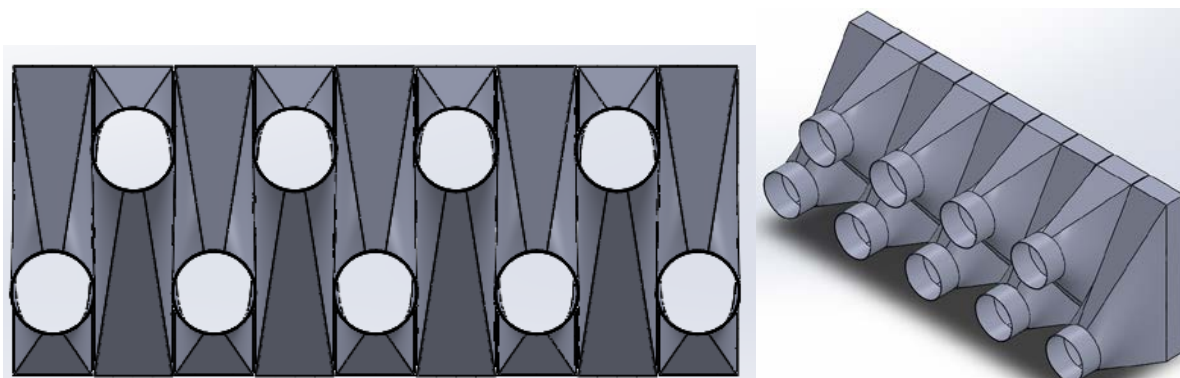
3 kanaler = 150/160 mm

Disse tre kanaler vil have tilnærmelsesvis lige meget tryktab pr. meter. Nærmere kommer vi ikke hvis vi ønsker at bruge standard kanaler. Pga. pladsmangel bruges 80 mm i stedet for 100 mm kanal på den smalleste overgang, dette giver et højere tryktab pr. meter end de andre, så over lange strækninger kan det være nødvendigt at gå op til 100 mm eller endda 125 mm med et overgangsstykke. Alternativt kan to 80 mm kanaler bruges.

Tryktabet ved maksimalt flow er for disse luftkanaler ca. 1-2 Pa/m i lige rørstrækninger.

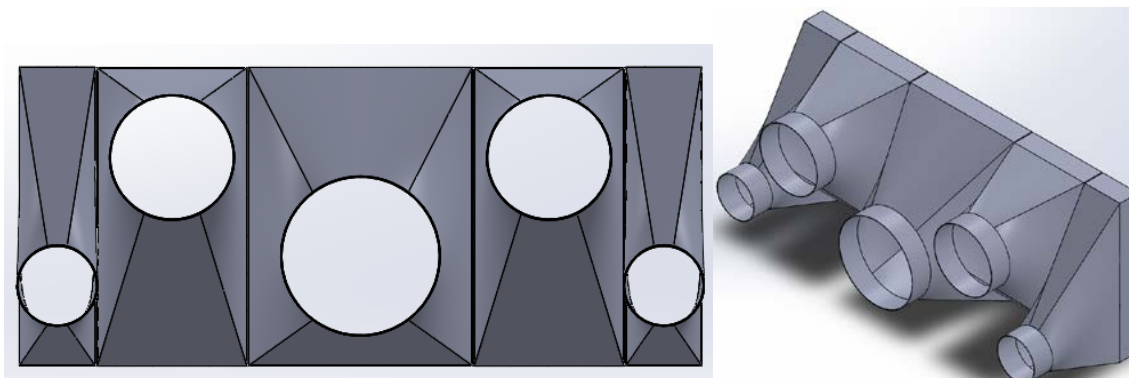
Udformning

Da diameteren på den cirkulære afgang er større end bredden på den rektangulære kanal, forskydes afgangene til den ene ende, så overgangene kan sidde ved siden af hinanden (se figur).



Figur 4-15: Prototype med plads til 9 indblæsningskanaler

Prototypen bliver bygget efter et typehus med fem rum. En passende konfiguration til dette hus kan ses på figuren nedenfor.



Figur 4-16: Prototype til et typehus med 5 rum

Plastkanaler

Ventilationssystemer til nybyggede private boliger bliver i stadig stigende grad bygget med plastkanaler. Deres klare fordel er at de er fleksible så de kan rulles direkte ud hvor der er brug for dem og der er dermed ikke brug for nogen bøjninger undervejs. Dette gør VVS-arbejderens arbejde en del nemmere og der kan dermed spares tid og penge på byggeprojektet.

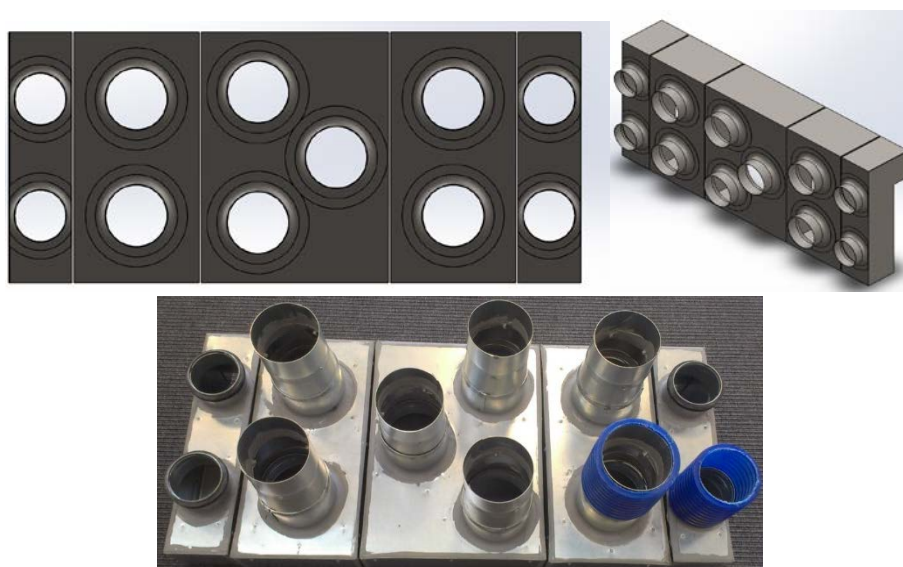
En anden stor fordel med plast rør er, at de kan støbes ned i gulv eller loft og dermed integreres direkte ind i boligen, hvilket sparer plads og er æstetisk pænere. Af disse årsager ville det være en fordel hvis luftvarmeanlægget kunne laves med flexrør. Dette er imidlertid ikke så simpelt som det lyder, da de eneste to standard størrelser som i skrivende stund er udbredt på markedet er $\text{Ø}63$ mm og $\text{Ø}75$ mm.

Overgangstykker til plastkanaler

Som nævnt er standard størrelserne på plast kanaler $\text{Ø}63$ og $\text{Ø}75$, hvilket er fint nok til boligventilation som flytter relativt små luftstrømme, men luftvarmeanlægget er dimensioneret til at kunne levere op til ca. tre gange så stor en luftstrøm som der er brug for i friskluft tilførsel. Dette betyder at tryktabet, der som tommelfingerregel er proportionalt med lufthastigheden i anden potens, vil blive ni gange større.

Tryktabet kan reduceres ved at tilføje flere kanaler parallelt, så luftstrømmen i den enkelte kanal reduceres. Dette øger prisen og begrænses i sidste ende af pladsen.

Overgangstykkerne som blev produceret til prototypen er dimensioneret som vist på figur 4-17. I dette design er der placeret så mange kanaler som muligt. Denne opbygning giver et tryktab på 4-5 Pa/m i lige rørstrækninger ved maksimalt flow, hvilket anses som acceptabelt ud fra den betragtning at maksimalt flow kun er nødvendig på de koldeste vinterdage.



Figur 4-17: Illustration af dimensionering af overgangstykker

Med de standard størrelser der er markedet, er der er to designmuligheder for overgangstykkerne. Enten overgang til spirorør med større kanalstørrelser end $\text{Ø}63$ eller

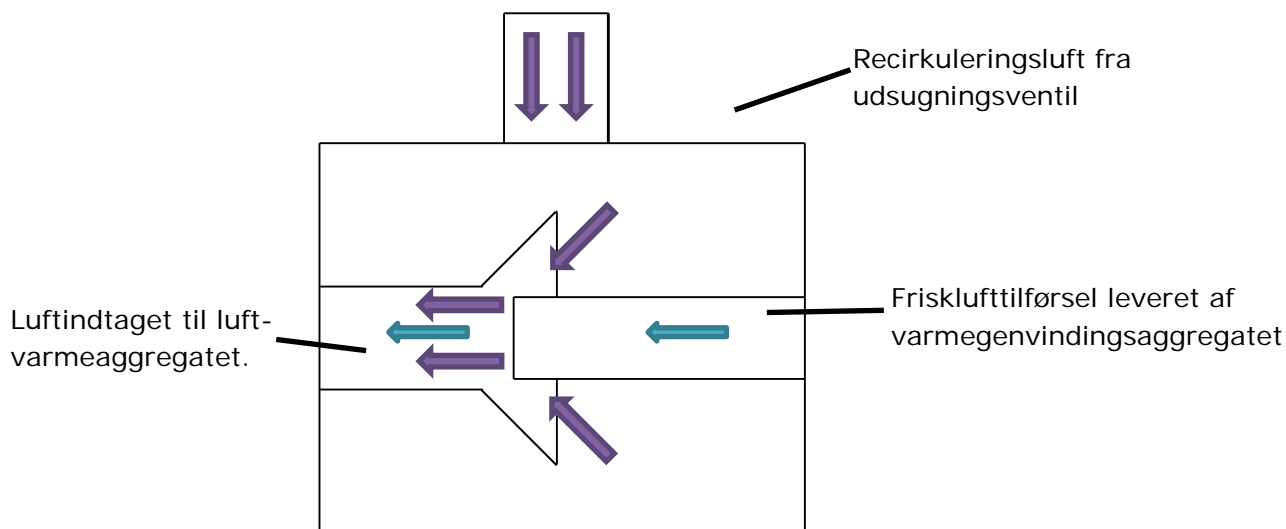
Ø75, hvilket giver laveste tryktab, eller overgang til plastkanaler med Ø63 eller Ø75 der giver den nemmeste montering.

Med en udbredelse af luftvarmeanlæg i fremtiden, kan det være fordel at producere nye standard størrelser til plastkanaler, så der kan opnås lavere tryktab og dermed lavere energiforbrug og støjniveau.

Konstruktion af slubreventil

For at kunne levere nok effekt til at opvarme huset, er der brug for at cirkulere op til ca. tre gange så megen luft som varmegenvindingsanlægget leverer af friskluft. En måde at gøre dette på er ved at bruge en slubreventil.

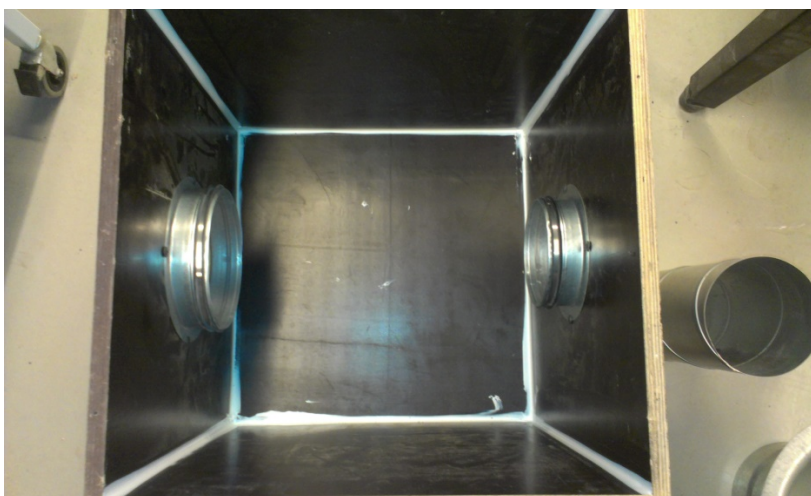
Princippet er at varmegenvindingsaggregatet blæser den nødvendige friskluftstrøm ind i recirkuleringsindtaget gennem en åben tragt. Recirkuleringsventilatoren er styret efter varmebehovet og i tilfælde af en krævet luftstrøm som overstiger frisklufttilførslen, vil den yderligere luftstrøm blive suget ind gennem den åbne tragt, heraf navnet slubreventil. For at have kontrol over hvor recirkuleringsluften bliver suget fra, bygges slubreventilen ind i en kasse med en afgrening til en ventilationskanal som kan føres hen til udsugningsarmaturet.



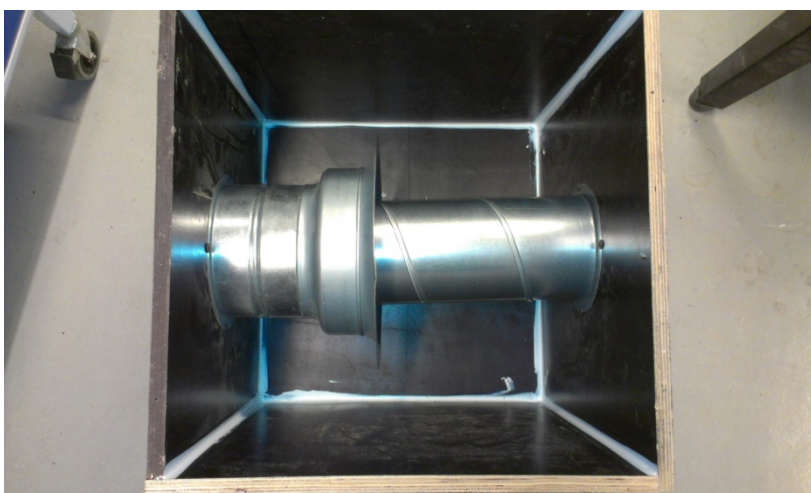
Figur 4-18: Illustration af slubreventil

Slubreventilen til forsøgsopstillingen blev bygget af 16 mm krydsfiner med udvendige mål på 48x48x48 cm. Der blev brugt en kanaldimension på Ø160 mm på sugesiden, mens der blev brugt Ø125 mm til afkast fra varmegenvindingsaggregatet. Luftindtaget til slubreventilen blev lavet i dimensionen Ø250 mm.

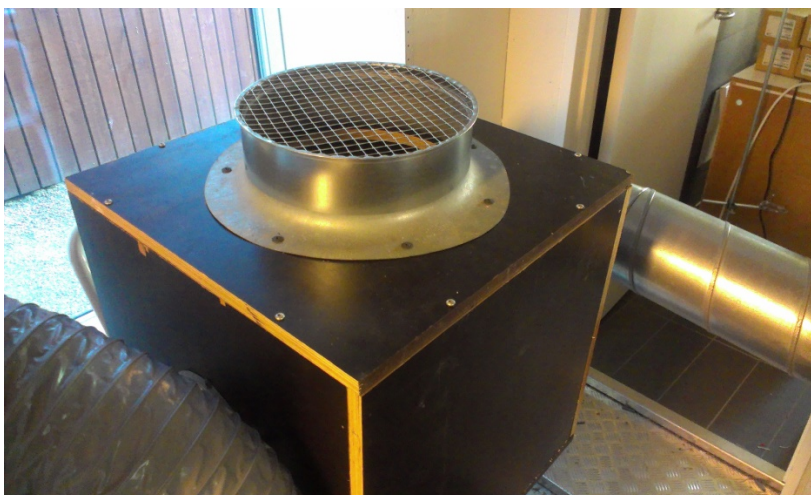
For at reducere tryktab og støj i det endelige produkt, bør der bruges Ø250-320 mm på sugesiden, Ø160 mm frisklufttilførsel samt Ø250 mm til luftindtaget.



Figur 4-19: Slubventil uden monterede kanaler.



Figur 4-20: Til højre ses en $\text{\O}160$ mm kanal med en overgang til $\text{\O}200$ mm ILRU, til venstre ses en $\text{\O}125$ mm kanal.



Figur 4-21: Slubventil i opstilling med gitter endebund i $\text{\O}250$ mm.

4.3. Konstruktion af prototype

De rektangulære kanaler blev håndlavet på et smedeværksted. For at holde dem på plads, blev de placeret i en træramme af krydsfiner. Til forsøg i Energy Flex House er der kun behov for fire indblæsningskanaler. De resterende 5 spjæld blev blændet af under forsøgene.



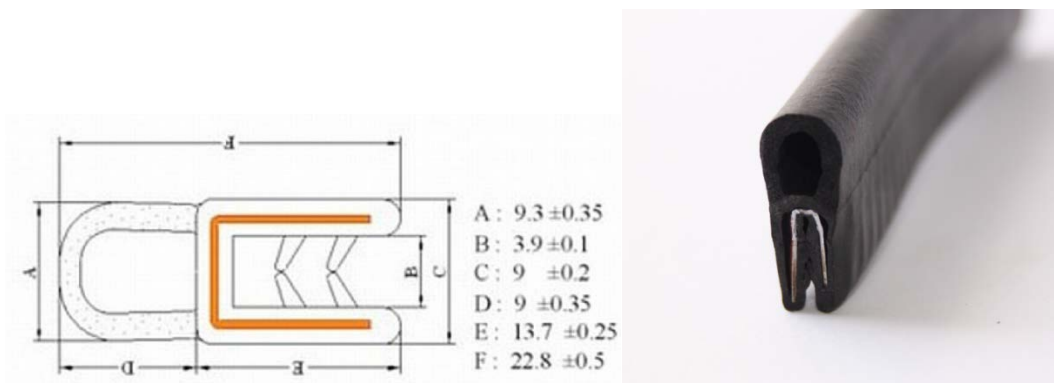
Figur 4-22: Prototype manifold set fra ventilatorsiden.

Til tætning af ventilatorovergangen blev der brugt almindelig vindues tætningsliste, som kan ses på figur 1.

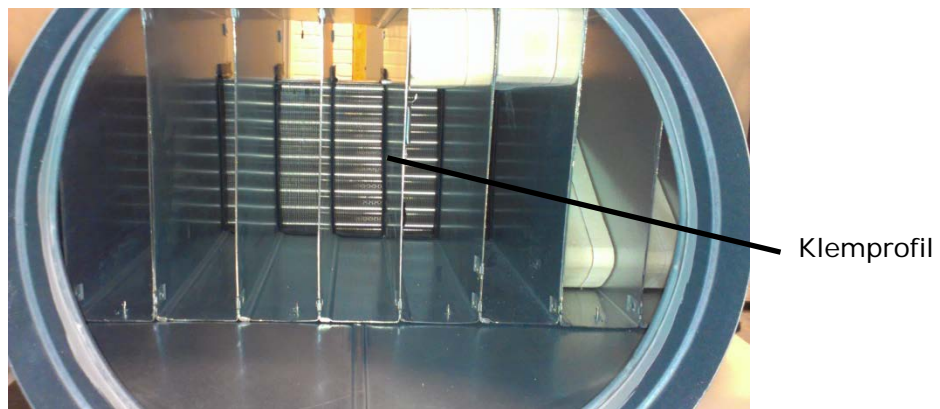


Figur 4-23: Prototype manifold set fra varmepladesiden.

Til tætning af kontaktflader til varmepladen, blev en kantliste med stålindlæg og gummi-læbe anvendt.



Figur 4-24: Klemprofil med stålindlæg fra Aalborg gummivarefabrik.



Figur 4-25: På billedet kigges ind på manifold fra ventilatorovergangen.

På ovenstående billede ses hvordan manifolden sluttet tæt til varmebladen med klemprofilerne.

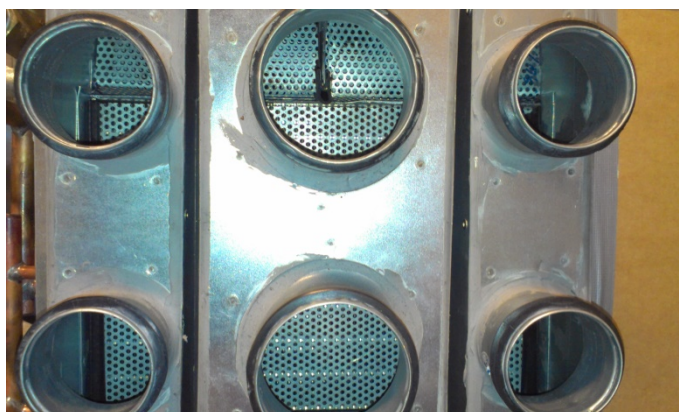


Figur 4-26: Overgang til NilAirflex slanger med klemprofil og hulplader til trykudligning.



Figur 4-27: Færdig samlet prototype.

Prototypen blev ikke tætnet med gummifuger, da aggregatet skulle kunne skilles ad igen. I stedet blev lækager tætnet med gaffa-tape til forsøgsopstillingen.



Figur 4-28: På billedet ses hulpladerne i bypasskanalerne.

5. Varmtvandsproduktion

Den nemmeste, billigste og mest effektive måde at producere varmt vand med den samme varmepumpe er at gøre brug af overhedningsvarmen fra kompressoren. Ulempen er dog at man ikke har 100% kontrol over hvor meget effekt der bliver leveret til vandet.

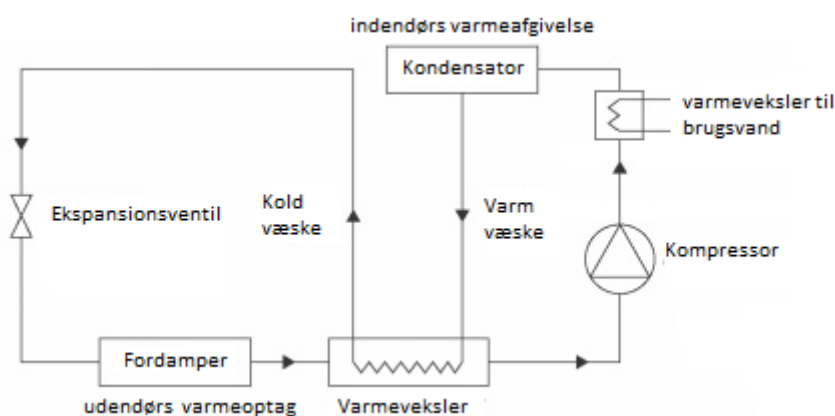
Ifølge DS 439 skal en vandvarmer have muligheden for at kunne varme vandet op til 60°C og generelt opbevare vandet ved 55°C for at undgå bakterievækst.

Mængden af brugbar overhedningsvarme afhænger i stor grad af hvilken kølevæske der bliver brugt. En let kølevæske som f.eks. R717 eller R410A har høje overhedningstemperaturer, mens tunge kølevæsker som f.eks. R134A har lave overhedningstemperaturer. Da kondenseringstemperaturen på kølevæsken (varmebladens temperatur) kun kommer til at ligge imellem ca. 30°C og 48°C og for at kunne opvarme vandet til 55°C, er der altså brug for relativt høje overhedningstemperaturer.

R717 (Ammoniak) har klart den største overhedningstemperatur af alle anvendte kølemidler og er det mest effektive kølemiddel vi kender til (størst COP). R717 er ofte brugt til store industrikøleanlæg, f.eks. i mejerier.

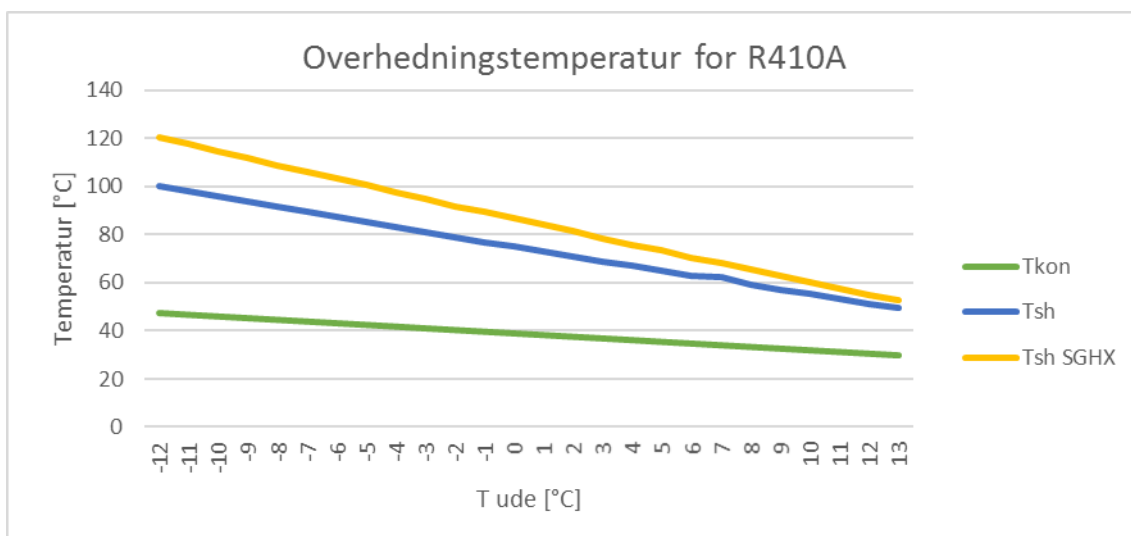
R410A er et blandingskølemiddel som ofte bliver brugt i varmepumper og har den næststørste overhedningstemperatur af de kendte R-numre.

En måde at øge overhedningstemperaturen er ved at sætte en varmeveksler ind mellem kompressorens suge side og kondensatorens afløb (Suction gas heat exchanger - SGHX). Dette øger temperaturen på gassen inden den løber ind i kompressoren og temperaturen efter kompressoren vil derfor være tilsvarende højere. Dette har ingen effekt på COP for R410A.

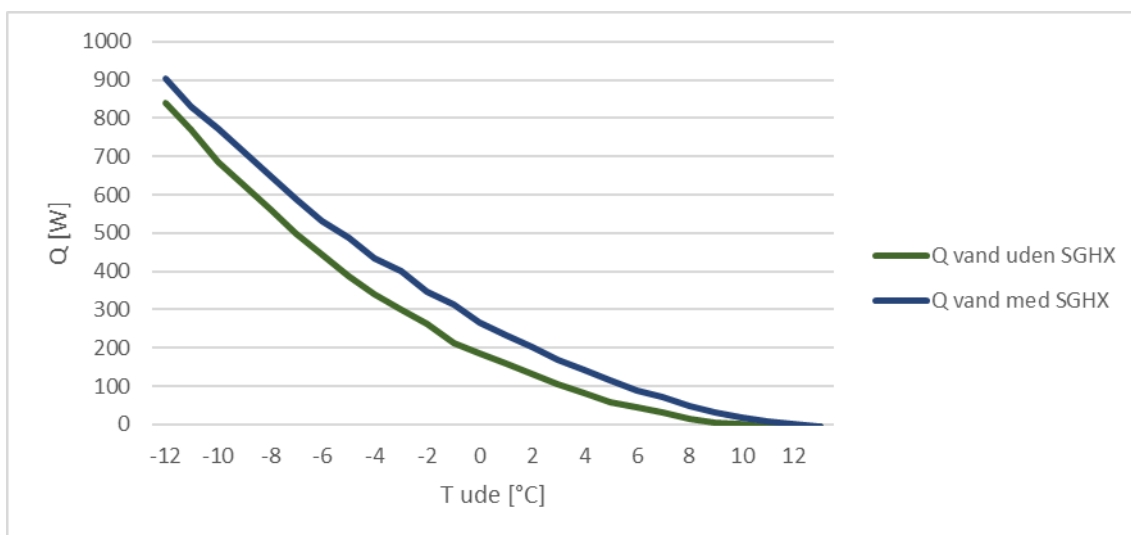


Figur 5-1: Principskitse for varmepumpe med varmeveksler

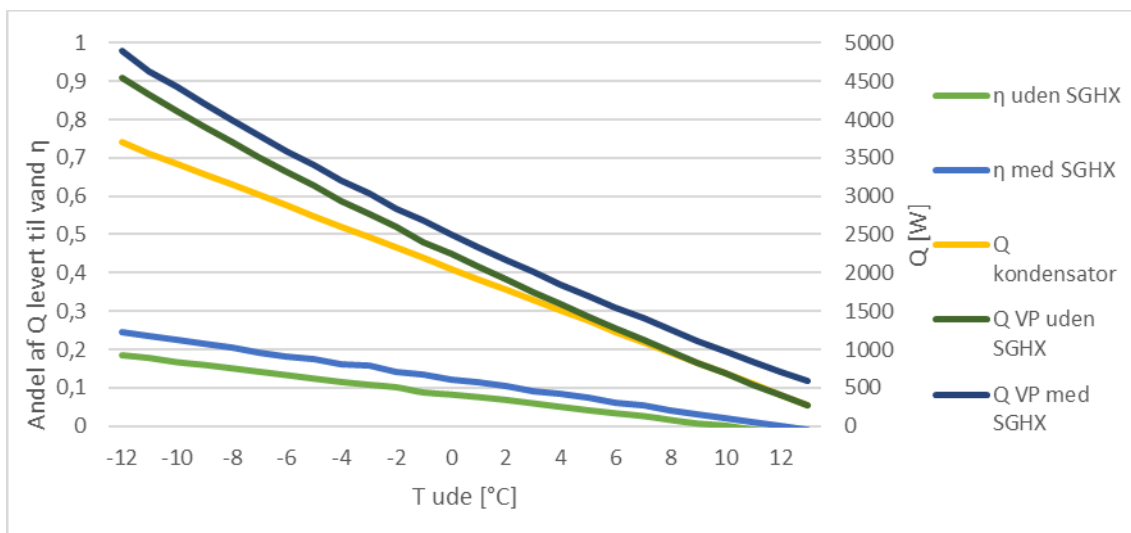
Der er beregnet overhedningstemperatur for R410A ved varierende varmepumpe belastning. Varmevækslerens effektivitet (SGHX effektivitet) er sat til 0,33.



Figur 5-2: Tkon er temperaturen på kondensatoren, Tsh og Tsh SGHX er den beregnede overhedningstemperatur for hhv. uden og med varmeveksler.



Figur 5-3: Overhedningseffekt leveret til vandet ved 55 °C



Figur 5-4: Varmepumpeeffekt samt andel af overhedningsvarme

Ved brug af en varmeveksler før kompressoren kommer overhedningstemperaturen for R410A over 100 grader og der skal derfor tages foranstaltninger mod kogning, se Figur 5-2.

Alternativt kan et andet kølemiddel bruges. For eksempel har R134a en overhedningstemperatur på 98,2°C ved en kondensator temperatur på 47,5°C og en fordamper temperatur på -12°C.

Alle effektberegningerne er lavet ved en vandtemperatur på 55°C for at se om der nok overhedningsenergi i kølemidlet til at nå netop de ønskede 55°C. Det er klart at når der er et varmtvandsforbrug, vil temperaturen på vandet i varmtvandsbeholderen falde som følge af tilførsel af koldt vand og effekten leveret til vandet vil derfor stige (svarende til en parallelforskydning af kurverne i Figur 5-2 op ad y-aksen).

Som kan ses på Figur 5-3 leverer varmepumpen meget lidt effekt til vandet ved høje udetemperaturer når kondensatortemperaturen er lav. Derfor vil der være brug for supplerende fra andre varmekilder. Normalt bruges et simpelt elvarmelegeme for at opnå den nødvendige vandtemperatur i de timer varmepumpen ikke kan levere nok varme eller er ude af drift. Dog er dette ikke særligt hensigtsmæssigt af hensyn til energiforbruget, især fordi en stadig større andel af det samlede energiforbrug går til opvarmning af brugsvand.

Solvarme vil være et særdeles godt supplement til varmtvandsproduktionen, da varmtvandsproduktionen er størst i sommerhalvåret, hvor der ikke er brug for opvarmning fra varmepumpen. Denne løsning er dog dyrere i anskaffelse end alternativerne.

Den nemmeste/billigste måde at producere varmt vand i sommerhalvåret, er blot at skrue op for varmepumpens setpunkt. Hvis der ikke er brug for opvarmning vil de temperaturregulerende spjæld køre over i bypass position og varmefladen vil derfor ikke blive afkølet, hvilket betyder at kølemidlet i stedet kondenseres i vandvarmeren og effekten leveres dermed til vandet.

Vigtige punkter til design og dimensionering af vandvarmeren er:

- Lette kølemidler har en større overhedningstemperatur og kan derfor levere en større effekt til vandet
- En SGHX øger overhedningstemperaturen uden at påvirke COP (R410A)
- Overhedningsenergien er ikke nok som eneste varmekilde til varmtvandsproduktion.
- Solvarme vil være et glimrende supplement men er dyrere i anskaffelse.

6. Styring

Styring af spjældene er programmeret i LabVIEW. Dette på baggrund af, at programmets hardware support og grafiske platform er en fordel i forskningsprojekter, hvor softwaren er under konstant udvikling.

I sidste ende skal softwaren køre på et embedded device, der er placeret sammen med resten af elektronikken. LabVIEW koden kan enten køres direkte på x86 baserede systemer, eller koden kan omskrives til f.eks. C som kan køres på stort set alle computersystemer.

Det er også en mulighed at installere koden på en microcontroller og have et speciallavet PCB med al elektronikken, da dette vil have et minimalt strømforbrug. Det er meningen at rumtemperaturerne skal kunne sættes og monitoreres via. en speciallavet applikation til smartphones og tablets, og til dette formål vil der være brug for en relativ kraftig chip.

En ideel løsning ville være noget i stil med Intel Edison, som har en 500 MHz dual Atom processor og en indbygget MCU (Microcontroller unit). MCU kunne køre styringssoftwaren med minimalt strømforbrug, mens Atom processoren kunne være vært for en lokal hjemmeside med applikations support.

6.1. Styringsstrategi

Luftvarmesystemet er opdelt i en friskluftforsyning med varmeveksler og en varmforsyning. Varmeforsyningen består af en manifold med spjæld, der kan blande luftmængden af friskluft fra ventilationsaggregatet med opvarmet luft gennem tilhørende varmevlade.

Krav til styringen:

- Temperaturregulering på rum-niveau
- Ingen rum må mangle varme
- Nok frisklufttilførsel på husplan
- Hurtig reagerende (pludselige temperaturudsving kan reduceres)
- Mulighed for frikøling
- Transport af gratis varme (f.eks. solindfald)

Luftvarmeanlægget er tiltænkt som et supplement til et evt. allerede eksisterende varmegenvindingsanlæg. Derfor er friskluftregulering og luftvarmereguleringen afskilt fra hinanden.

Frisklufttilførsel

Ventilationsaggregatet med varmegenvinding regulerer friskluftstilførslen efter fugtniveauet. To følere måler koncentrationen ude og inde for at negligere evt. drift i de normalt lidt billigere anvendte følere. Indersidens følere er placeret i udsugningskanalen lige før aggregatet. Udesidens følere (referencen) er placeret i indtagskanalen.

Aggregatets modulerende bypass overstyres hvis der ikke er varmebehov i nogle af husets zoner (rum), hvor der fra varmedelen er placeret temperaturtransmittere. Er alle husets

zoner uden varmebehov sættes den samlede styring i køletilstand (udelukkende med friskluft) og aggregatets bypass åbnes i forhold til den af de lokale spjæld (zoner) der har den højeste temperatur. For at undgå kondens må der dog ikke indblæses med under 15°C.

Varmlufttilførsel

Komponenter i anlægget som skal reguleres:

- Temperaturregulerende spjæld
- Ventilator
- Varmeflade temperatur
- Evt. flow af kølevæske

Varmetilførslen leveres ved at recirkuleringsventilatoren leverer luft til manifolden hvor spjældene styrer hvor stor en andel af luften som ledes igennem eller uden om varmefladen. Spjældene bestemmer på den måde fremløbstemperaturen og de styres ud fra decentralt placerede følere i hvert rum. Hvis hver komponent blev individuelt styret af en PID-controller og de bare blev sat i serie af hinanden, ville man få et system som ville være umådeligt langsomt og svært at indregulere.

For at gøre systemet hurtigt reagerende styres ventilatoren efter samme setpunkt (ønsket temperatur) og målt temperatur, som det temperaturregulerende spjæld i det rum som har det største varmebehov. Dette betyder at hvis et rum har et større varmebehov end de andre rum, vil både det temperaturregulerende spjæld og ventilatoren køre op samtidigt. Da de andre rum nu også får leveret en større luft mængde, vil deres temperaturregulerende spjæld køre lidt ned for at holde temperaturen.

Eftersom varmefladen har en relativ stor varmekapacitet vil temperaturudsvingene være forholdsvis små ved varierende luftstrømme, og derfor temperaturreguleres varmefladen med en PI-controller uafhængigt af resten af systemet. Hvis det alligevel viser sig at være et problem med svingninger i systemet, kan en mulig løsning være at lade forstærkningen på PI-controlleren være afhængig af ventilatorens styresignal. På den måde vil kompressoren/varmeregulerende ventil begynde at reagere samtidig med ventilatoren.

Til regulering af varmefordelingsspjæld og ventilator, er der i første omgang brugt P (proportional) regulatorer og til temperaturreguleringen af varmefladen er der brugt en PI regulator. Valget af rene P-regulatorer sker på baggrund af flere overvejelser: for det første reagerer de med det samme, hvilket er en fordel da der ønskes et hurtigt reagerende system. For det andet virker de uafhængigt af rum størrelse og skal derfor ikke indreguleres, hvilket ellers ville være tilfældet hvis der blev brugt PI-regulatorer. For det tredje kendes spjældenes og ventilatorens relative positioner altid, hvilket er en fordel når den intelligente styring skal programmeres. Den klare ulempe ved P-regulatorer er dog at de aldrig kommer op på det ønskede setpunkt. Jo højere en forstærkning, jo tættere kommer man på det ønskede setpunkt, men hvis forstærkningerne bliver for store kan støj fra temperaturtransmitterne blive et problem. Den ønskede temperatur kan dog opnås ved blot at sætte setpunktet lidt højere, enten manuelt eller ved software kompensering.

Med ovenstående strategi løses de fleste af kravene nævnt i starten af afsnit 6.1, men for at møde alle kravene er der udviklet en intelligent styring som er beskrevet i følgende:

Intelligent styring

Ud over P-controllere for varmfordelingsspjæld og ventilator samt PI-controller for varmekladden, er der programmeret yderligere funktioner ind i styringssoftwaren, hvilket giver mulighed for en mere "intelligent" styring. Disse funktioner nævnes på listen nedenfor.

1. Når der på husplan er brug for varme, styres ventilatoren efter rummet med den største fejl (varmebehov). Dette betyder at der altid vil kunne leveres nok varme til alle rum
2. Hvis der på husplan ikke er brug for varme, reduceres varmekladdens setpunkt for at spare energi
3. Når der på husplan er for varmt, åbnes bypass-spjældet i varmegenvindingsaggregatet
4. Når der på husplan ikke er brug for varme, inverteres inputtet til ventilatorens P-controller og indblæsningsluften bruges nu som køling
5. Når der er brug for køling på husplan, skiftes ventilatorens styrings-input til gennemsnitstemperaturen for alle rum frem for det rum med den største temperaturfejl. Dette forhindrer at ventilatoren kører op i maks. hvis der f.eks. er solindfald på et af værelserne eller ovnen er tændt i køkkenet
6. Hvis temperaturfejlen på husplan er tæt på nul (inden for valgte grænser), ændres ventilator inputtet til en funktion af standard afvigelsen for rumtemperaturerne. Dette betyder, at hvis der på husplan lige nøjagtig ikke er behov for hverken varme eller køling, men der er for varmt i to rum (f.eks. pga. solindfald), mens der er for koldt i de andre rum, vil ventilatoren skrue op for at øge recirkulationen og dermed udjævne temperaturen i huset
7. Temperatur-setpunktet på varmekladden sættes som udgangspunkt efter udetemperaturen
8. Hvis det prioriterede rums varmfordelingsspjæld er på 100% (al luften ledes gennem varmekladden) og ventilatoren kører i høje omdrejninger (f.eks. 80% eller 90%), kan det indikere at varmekladden ikke kan levere varme nok og setpunktet skrues langsomt op
9. Hvis der er behov for varme på husplan, men ventilatoren kører i lave omdrejninger, kan det indikere for høj varmekladdetemperatur og setpunktet skrues langsomt ned
10. Hvis vinduet i et rum er åbent, lukkes varmetilførslen til det rum (100% bypass)
11. På en varm sommerdag kan udetemperaturen godt være over rumtemperaturen og i dette tilfælde skrues ventilatoren ned på min. for ikke at opvarme huset

Ventilatorprioritet

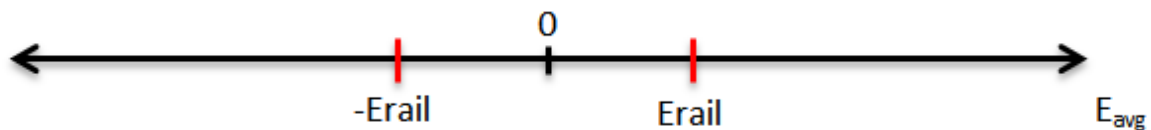
En stor del af den intelligente styring går ud på at bestemme ventilatorens prioritet.

Hver gang der bliver samlet bliver temperaturerne og setpunkterne gemt i hver deres array i samme rækkefølge. Herefter beregnes **fejlen E**, som er forskellen mellem setpunktet og den målte temperatur. E-værdien for alle rummene bliver ligeledes gemt i et array. I et for-loop summeres alle E-værdierne og der divideres til sidst med antallet, for at få gennemsnitsværdien. Den midlede E (E_{avg}) er vigtig fordi den fortæller om der på husplan er brug for varme eller køling.

Der er nu tre muligheder:

1. Hvis E_{avg} er positiv, er der behov for varme på husplan og ud fra en politik om at ingen rum må mangle varme, styres ventilatoren efter det rum med det største behov (størst E).
2. Hvis E_{avg} er negativ, er der på husplan brug for køling. Varmefluden slukkes og hvis udetemperaturen er under rumtemperaturen, inverteres inputtet til ventilatoren (negativ E bliver positiv).
3. Hvis E_{avg} er nul eller tæt på nul (inden for definerede grænser), er der på husplan hverken brug for varme eller køling, men det betyder ikke at det termiske indeklima er i orden. Hvis der f.eks. er for varmt i to værelser pga. solindfald, mens der er for koldt i resten af huset, kan den E_{avg} godt ligge på 0. For at forbedre indeklimaet og samtidig udnytte solindfaldet, sættes ventilatorinputtet til en funktion af standardafvigelsen. På den måde vil ventilatoren køre i lave omdrejninger hvis der er perfekt temperatur i alle rum, mens den vil køre i høje omdrejninger hvis der er stor forskel på rumtemperaturene.

En overordnet if-sætning bestemmer hvilke værdier (PV og SP) der sendes videre til ventilatoren ud fra de tre tilfælde. En variabel ved navn "Erail" bestemmer hvor grænsen går til tilfælde nummer tre.



Figur 6-1: Illustration af de tre intervaller som bruges til styring af ventilatoren.

$E_{avg} > E_{rail}$	Ventilatoren styres efter den største fejl E
$-E_{rail} < E_{avg} < E_{rail}$	Ventilatoren styres efter standard afvigelsen
$E_{avg} < -E_{rail}$	Ventilatoren styres efter E_{avg}

Implementering

$E_{avg} > E_{rail}$: Funktionen "Array Max & Min" bliver brugt på E arrayet til at bestemme på hvilken plads den største fejl er placeret. Den returnerede værdi bruges med funktionen "Index Array" til at returnere PV (målt temperatur) og SP (ønsket temperatur) for det rum med den største fejl E. De returnerede værdier PV og SP er altså fra det rum der har mest brug for varme og de bruges til at styre ventilatoren i det tilfælde, at der er brug for varme i huset.

$E_{avg} < -E_{rail}$: Gennemsnittet af hhv. PV- og SP værdierne beregnes i et for loop, på samme måde som med E, og sendes videre til ventilatoren. Frikøling af huset sker altså på baggrund af gennemsnitsværdier for at undgå unødigt strømforbrug og støjniveau fra ventilatoren i sommerhalvåret.

$-E_{rail} < E_{avg} < E_{rail}$: Funktionen "Standard deviation" bruges på E-arrayet for at få standardafvigelsen. En variabel k bruges som skaleringsfaktor for standardafvigelsen. Forskellen mellem PV og SP som sendes videre til ventilatorens P-controller sættes til at være standardafvigelsen gange k .

Varmetransport styring

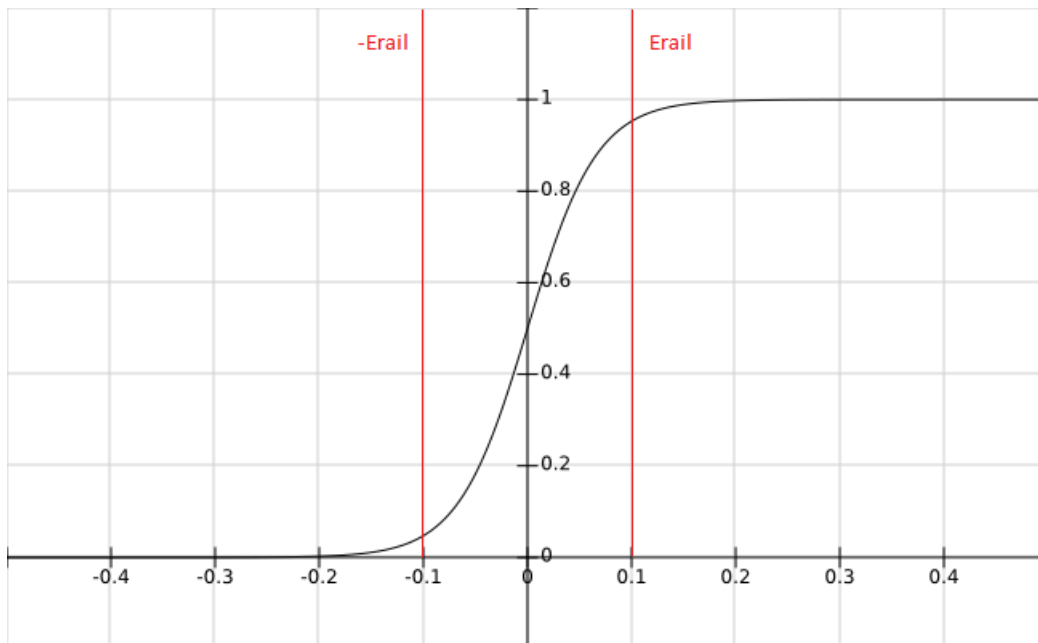
Styringen er implementeret som en funktion der skal forsøge at udjævne temperaturforskelle mellem rum, hvis der på husplan ikke er behov for varme. Den måde det i første omgang blev implementeret på, var ved at varmefladen blev slukket og recirkuleringsventilatoren blev styret efter temperaturforskelle mellem rum hvis gennemsnitsfejlen (E_{avg}) kom under en sat grænse (E_{rail}). Dette medførte dog at temperaturstyringen på varmefladen blev ustabil når E var tæt på E_{rail} da varmefladen konstant ville tænde og slukke.

For at løse dette problem, blev en sigmoid funktion anvendt for at få en glidende analog overgang i stedet for en digital on/off løsning.

Sigmoid funktionen som blev anvendt:

$$S(t) = \frac{1}{1 + e^{-at}}$$

Hvor konstanten a bruges til at bestemme hældningen. I styringssoftwaren er a sat til $3/E_{rail}$ hvilket tilpasser funktionens start på hældningen til ca. $\pm E_{rail}$.



Figur 6-2: Sigmoid funktion med E_{rail} sat til 0,1.

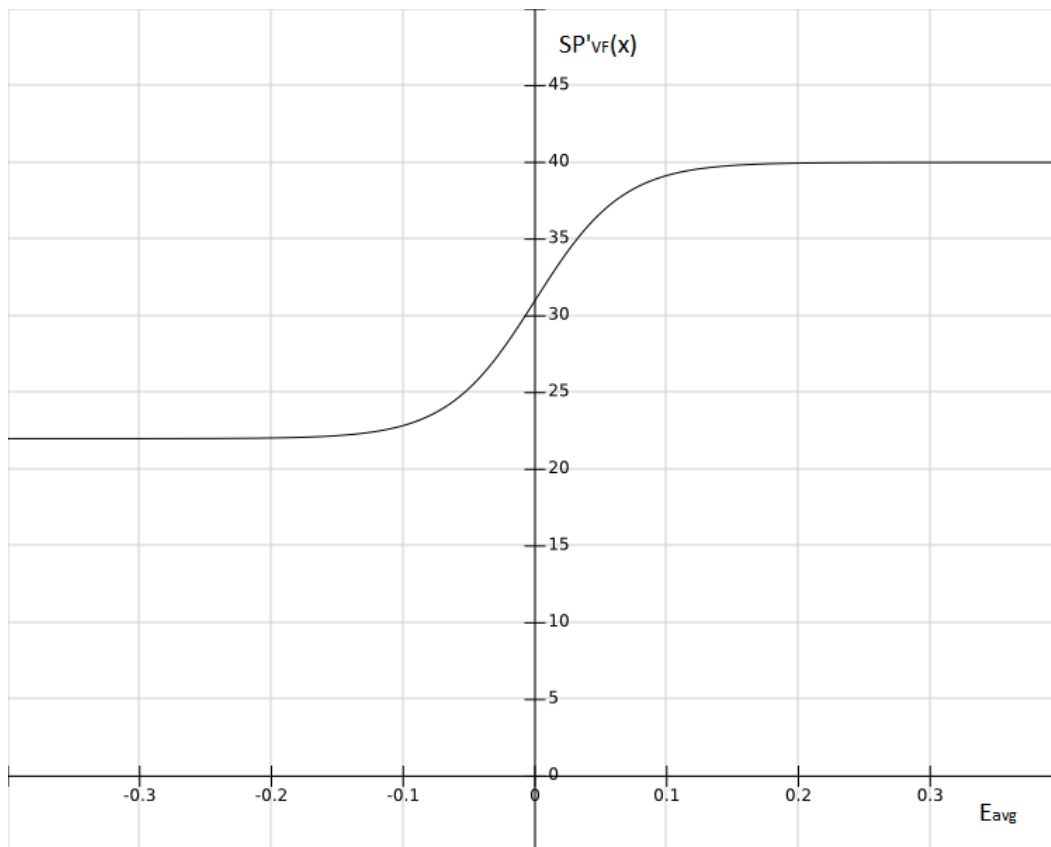
Sigmoid funktionen går asymptotisk fra 1 til 0 og bliver i softwaren brugt til at styre setpunktet på varmefladen. Ved 1 er setpunktet uændret mens den ved 0 sættes til gennemsnitstemperaturen i huset, hvilket reelt slukker for varmefladen.

Det nye setpunkt til varmefladen beregnes ud fra følgende formel:

$$SP'_{VF} = T_{avg} + \frac{SP_{VF} - T_{avg}}{1 + e^{-\left(\frac{3}{E_{rail}}\right) \cdot t}}$$

Hvor SP_{VF} er det beregnede setpunkt på varmepladen uden sigmoid funktionen, SP'_{VF} er setpunktet til varmepladen korrigeret med sigmoid funktionen, og T_{avg} er gennemsnitstemperaturen i huset.

Ovenstående funktion er nedenfor plottet med $E_{rail}=0,1$, $T_{avg}=22$ og $SP_{VF}=40$.



Figur 6-3: Anvendt sigmoid funktion til styring af varmepladens setpunkt. Af y-aksen ses varmepladens sigmoid korrigerede setpunkt i celcius som funktion af E_{avg}

Flydende setpunkt på varmeplade

En varmepumpes COP værdi er stærkt afhængig af kondensatorens temperatur, så når der ikke er brug for så meget varme, er det energimæssigt fordelagtigt at skrue ned for kondensatortemperaturen. Af denne grund gøres der brug af et "flydende" setpunkt for varmepumpens kondensator temperatur.

Som udgangspunkt bestemmes setpunktet for varmepladen ud fra udetemperaturen. Varmeeffekttabet i bygningen er ligefrem proportionalt med temperaturdifferensen mellem inde- og udetemperaturen. På samme måde er luftvarmeanlæggets effektafgivelse ligefremproportional med temperaturdifferensen mellem varmepladen og recirkuleringsluft (rumtemperatur). En simpel måde at lave flydende setpunkt på varmepladen er derfor at sætte setpunktet til at være proportional med temperaturdifferensen mellem inde- og udetemperaturen. Sagt på en anden måde: når udetemperaturen falder med X grader, stiger temperaturen på varmepladen med Y grader.

Temperaturen på varmefladen skal helst ikke overstige 50 grader. For at bestemme proportionalitetsfaktoren til beregning af varmefladens setpunkt, er det nødvendigt at kende kondensatortemperaturen på den koldeste dag. Den koldeste dag på året antages at være -12 °C. Ved hjælp af beregningsværktøjet TI_SIM, se afsnit 10, er der beregnet en krævet kondensatortemperatur på 46 °C. Med en indendørs temperatur sat til 22 °C, giver dette en proportionalitetsfaktor på:

$$\frac{\Delta T_{\text{varmeflade}}}{\Delta T_{\text{ude}}} = \frac{46 - 22}{22 - (-12)} \approx 0,7$$

Dette giver os en formel til at beregne setpunktet på varmefladen som funktion af ude-temperaturen:

$$SP_{\text{varmeflade}} = 0,7 \cdot (T_{\text{inde}} - T_{\text{ude}}) + T_{\text{inde}} = 0,7 \cdot \Delta T + T_{\text{inde}}$$

I praksis kan det i perioder være nødvendigt at afvige fra det beregnede setpunkt. For at løse dette problem, er der implementeret en intelligent løsning der automatisk korrigerer setpunktet ved at integrere fejlen over en længere periode og lægge det til SP fra ovenstående formel, så kan systemet selv korrigere varmefladetemperaturer hvis ovenstående udregning viser sig at give u hensigtsmæssige driftsforhold.

Der er udviklet følgende funktioner:

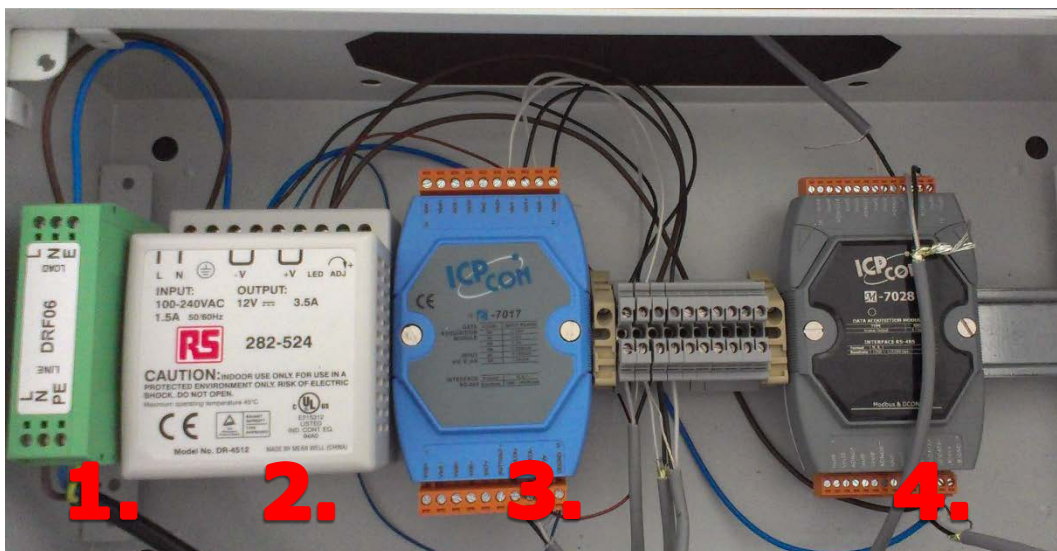
1. Hvis det prioriterede rums temperaturregulerende spjæld er på 100% (al luften ledes gennem varmefladen) og ventilatoren kører i høje omdrejninger (f.eks. 80% eller 90%), kan det indikere at varmefladen ikke kan levere varme nok og setpunktet skrues langsomt op.
2. Hvis der er behov for varme på husplan, men ventilatoren kører i lave omdrejninger (f.eks. 30%), kan det indikere for høj varmefladetemperatur og setpunktet skrues langsomt ned.

Der indføres begreberne 'top rail' og 'bot rail', som repræsenterer værdier for ventilatoren der aktiverer integratoren. 'Top rail' definerer grænsen på ventilatorens signalspænding, der aktiverer situation 1. 'Bot rail' er grænsen der ligeledes aktiverer situation 2.

Integratorens værdi lægges til varmefladens beregnede setpunkt og korrigerer på den måde varmefladens temperatur. F.eks. hvis ventilatorinputtet overstiger top rail og et temperaturregulerende spjæld er på 100%, aktiveres integratoren som i dette tilfælde blot er en PI-regulator med lavt P-værdi og stor I-værdi. Hvis ventilatoren falder under top rail igen, benyttes integratorens sidst kendte værdi som korrektion, indtil den igen aktiveres.

Hardware

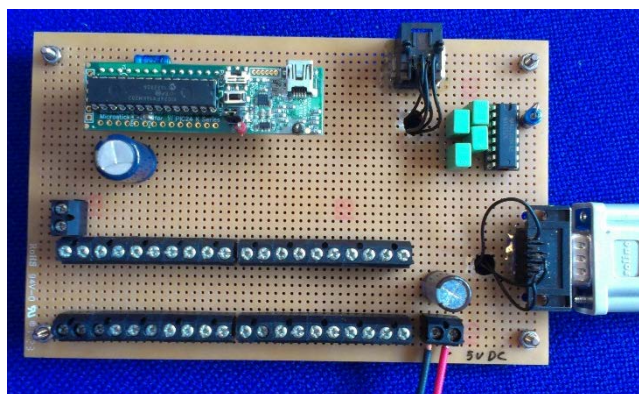
På billedet nedenfor ses den hardware der er brugt til at implementere styringssoftwaren.



Figur 6-4: Hardware til implementering af styringssoftwaren

1. ROXBURGH DRF06: Et filter til at fjerne støjen fra fasen for at beskytte den følsomme elektronik.
2. RS 282-524: 12v switchmode strømforsyning til al elektronikken.
3. ICPdas I-7017: 8 kanals ADC (Analog to digital converter) til måling af spænding fra temperatursensorne.
4. ICPdas M-7028: 8 kanals DAC (Digital to analog converter). Bruges til at give 0-10V styringssignal til bla. ventilator og "faseklipperen".

Styringssignalet til servomotorerne er et PWM-signal med en pulsbredde på 1,3-1,7 ms efterfulgt af en pause på 20 ms, hvor pulsbreden bestemmer positionen på servomoteren mellem 0 og 180 grader. Til at levere PWM signalet er der brugt en microcontroller med op til 10 signal output. Kommunikationen mellem microcontrolleren og styringssoftwaren på PC'en foregår over seriel porten som kan ses til højre på billedet.



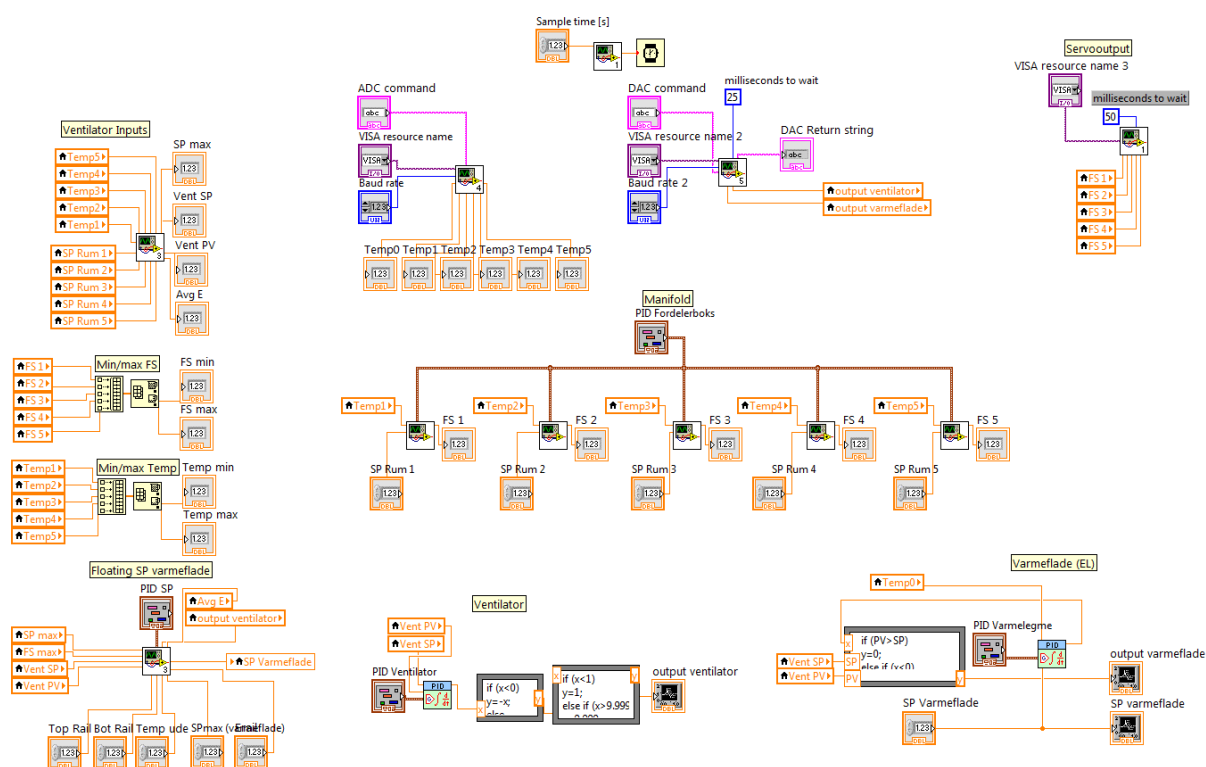
Figur 6-5: Printplade og seriel port

Valget af temperatursensor faldt på Texas Instruments' LM35. Denne temperaturtransmitter er fabrikskalibreret direkte i celcius og har en linær respons på 10mV/°C.

Til at regulere temperaturen på varmebladen er der gjort brug af en 3-faset effektregulator. Effektregulatoren tager et 0-10V styringssignal for 0-100% effekt. Den virker ved at tænde/slukke når fasespændingen går i nul og "klipper" på den måde sinuskurver ud af de tre AC-faser med minimalt energiforbrug og varmeudvikling. F.eks. vil et 5V input klippe halvdelen af sinuskurverne ud af faserne og effekten leveret til varmelegemet vil derfor også være halveret.

Software

For at holde overblikket over det relativt komplekse styringssoftware, blev programmet i vid udstrækning opbygget af subVIs (virtual interface), hvilket også gør tilføjelsen af nye funktioner relativ simpel.



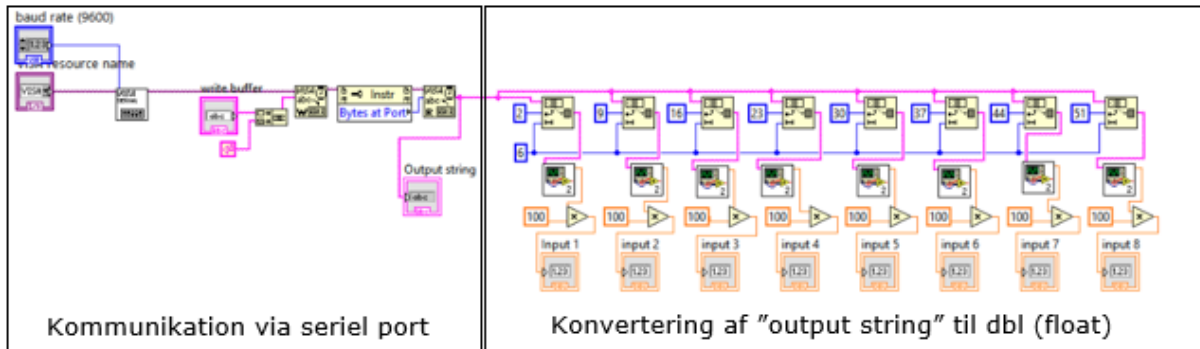
Figur 6-6 ovenstående diagram indeholder de herunder listede subVIs

1. **ADC:** når dette subVI køres returneres de op til 8 målte temperaturer fra LM35 sensorerne monteret på ICPdas I-7017's analoge inputs.
2. **DAC:** dette subVI's 8 inputs (0-10V) skrives til ICPdas M-7028's 8 analoge outputs.
3. **Servooutput:** konverterer og sender PID outputtene fra spjældene til microcontrolleren som styrer servomotorerne.
4. **Ventilatorinputs:** I dette subVI beregnes hvilke værdier der skal bruges som input til ventilatoren.
5. **Min/max FS:** returnerer minimum- og maksimumværdierne af de 5 fordeler-spjæld.
6. **Min/max Temp:** returnerer minimum og maksimum af de målte temperaturer.
7. **Manifold:** returnerer outputtet fra de 5 fordeler-spjæld's PID-controllere.
8. **Ventilator:** returnerer styresignalet til ventilatoren (0-10V).
9. **Floating SP varmeblade:** I dette subVI beregnes setpunktet til varmebladen.

10. **Varmeflade (EL)**: returnerer styresignalet til varmekraften.

På de følgende sider er vist indholdet af samtlige subVI.

ADC

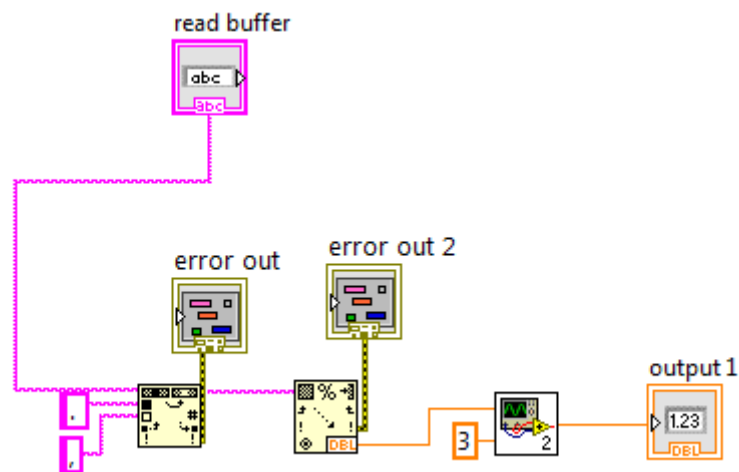


VI'et ADC indeholder koden til analog-til-digital konverteren (AD-konverter). Når subVI'et køres, aflæses AD-konverterens 8 kanaler og returneres som dbl-værdier, som bruges i resten af styringssoftwaren.

Den venstre del står for kommunikationen over seriel porten. En aflæsnings-kommando sendes til AD-konverteren, som i dette tilfælde er en ICPdas I-7017 og der returneres en streng med de aflæste spændinger fra alle 8 kanaler.

I den højre del af subVI'et splittes den returnerede streng fra AD-konverteren op i 8 mindre strenge, hver indeholdende en aflæst værdi på tekstform. I SubVI'et "String to double" som er beskrevet nedenfor, konverteres de 8 strenge, indholdene de aflæste værdier, til dbl format. Da der er brugt LM-35 termofølere, som giver et signal på 10 mV/°C, ganges der til sidst med 100 for at få de aflæste temperaturer i celsius.

SubVI – String to dbl

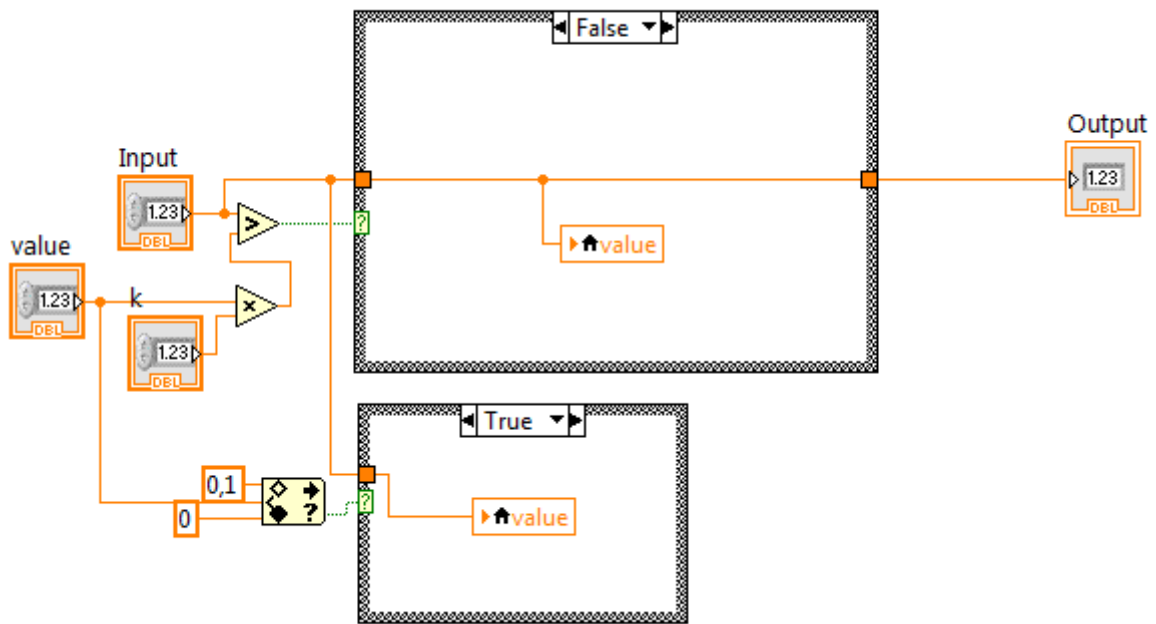


I dette VI konverteres et tal på tekstform (string) til et kommatall (dbl). Dette VI indeholder også subVI'et "Noise Blanker" som fjerner evt. støjspidser fra det målte signal.

AD-konverteren bruger "." som kommaseparator, mens labVIEW bruger ",", som kommaseparator. LabVIEW-funktionen "Search and Replace String" bruges derfor til at

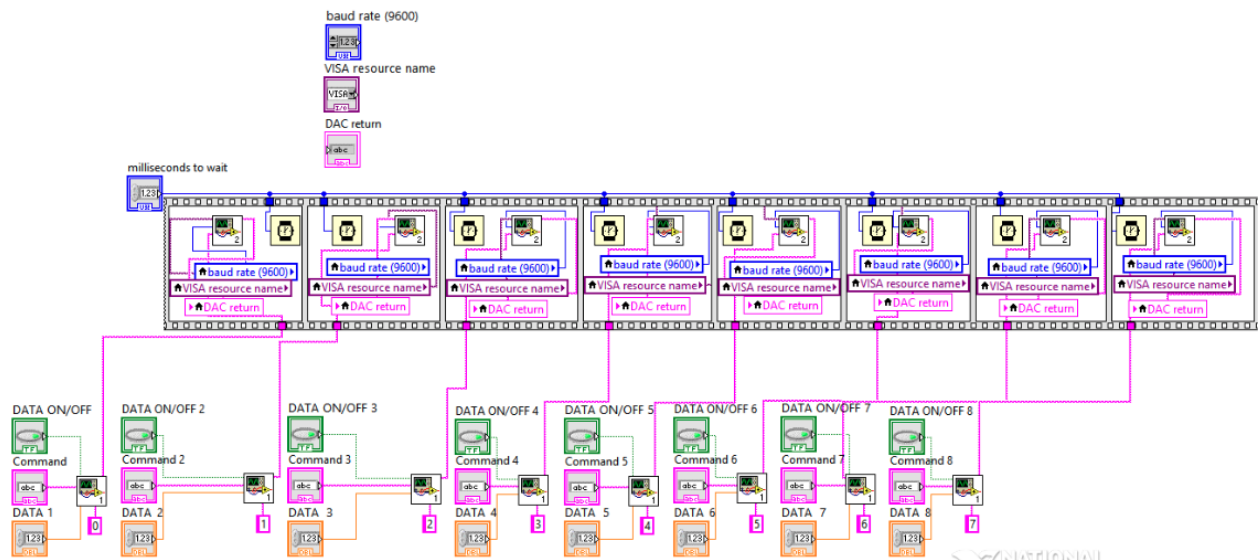
erstatte alle "." med ",", hvorefter LabVIEW-funktionen "Scan From String" bruges til at konvertere strengen til dbl. Til sidst køres den konverterede dbl-værdi igennem subVI'et "Noise Blanker", som er beskrevet nedenfor, for at eliminere eventuelle støjsspider som kan opstå på det målte signal.

SubVI – Noise blanker



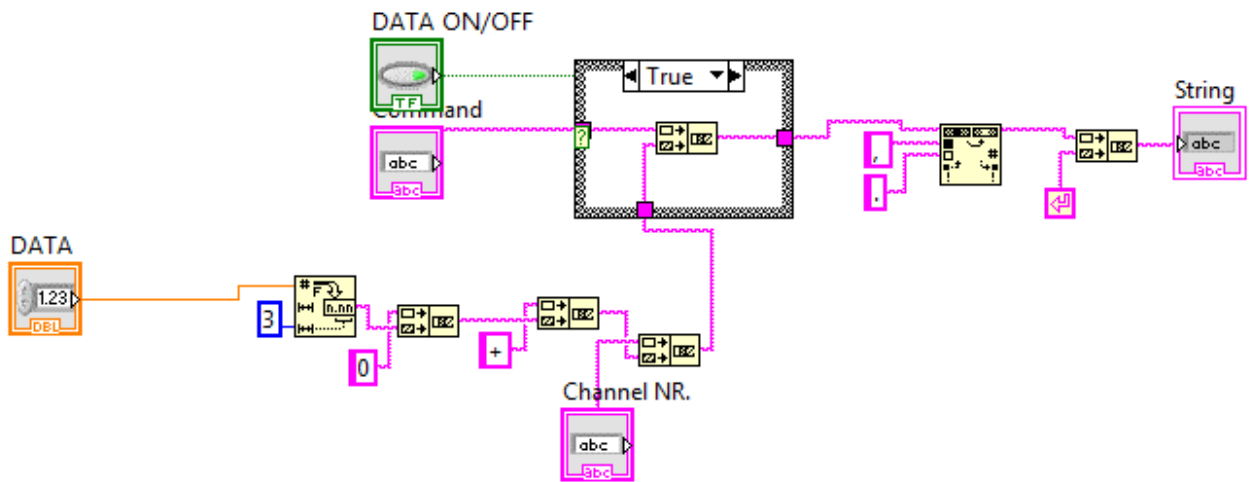
I VI'et "Noise Blanker" sammenlignes den nye målte værdi med den sidste målte værdi og hvis nye målte værdi er mere end k gange større end den gamle værdi, er det støj og den gamle værdi sendes i stedet videre. Hvis den nye værdi er lavere end k gange den gamle værdi, sendes den nye værdi videre og overtager den gamle værdis plads ved næste sample.

DAC



Dette VI indeholder koden til digital-til-analog konverteren (DA-konverter). Når VI'et køres skrives op til 8 kommatall (dbl) til DA-konverterens 8 kanaler. Den anvendte DA-konverter ICPdas M-7028 kan kun skrive til én kanal ad gangen og der er derfor gjort brug af "flat sequence structure" så der sekventielt kan skrives til kanal 0-7 med valgt ventetid imellem. I subVI'et "DAC kanal" konverteres den beregnede dbl-værdi til et strengformat DA-konverteren kan tolke.

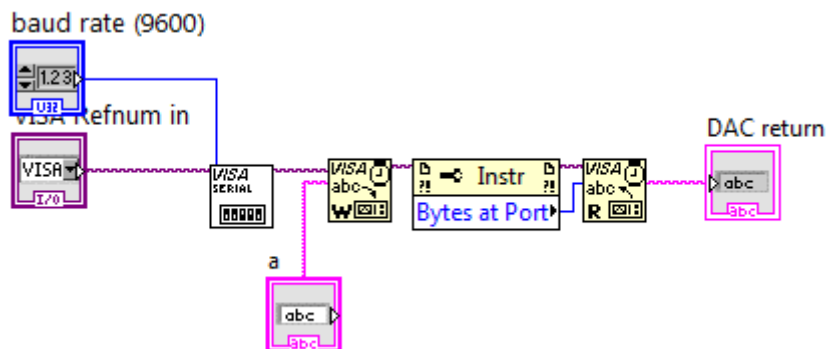
SubVI - DAC kanal



DA-konverteren er indstillet til at bruge DCON protokol og skal derfor have kommandoen #AAN(DATA) for skrive til en kanal. # er afgrænsningstegnet, AA er adressen til DA-konverteren (f.eks. 00) og N er kanal nummeret startende fra 0. Data formatet er sat til Engineering units og skal derfor skrives som +XX.XXX f.eks skal tallet 6,5431 skal skrives som +06.534.

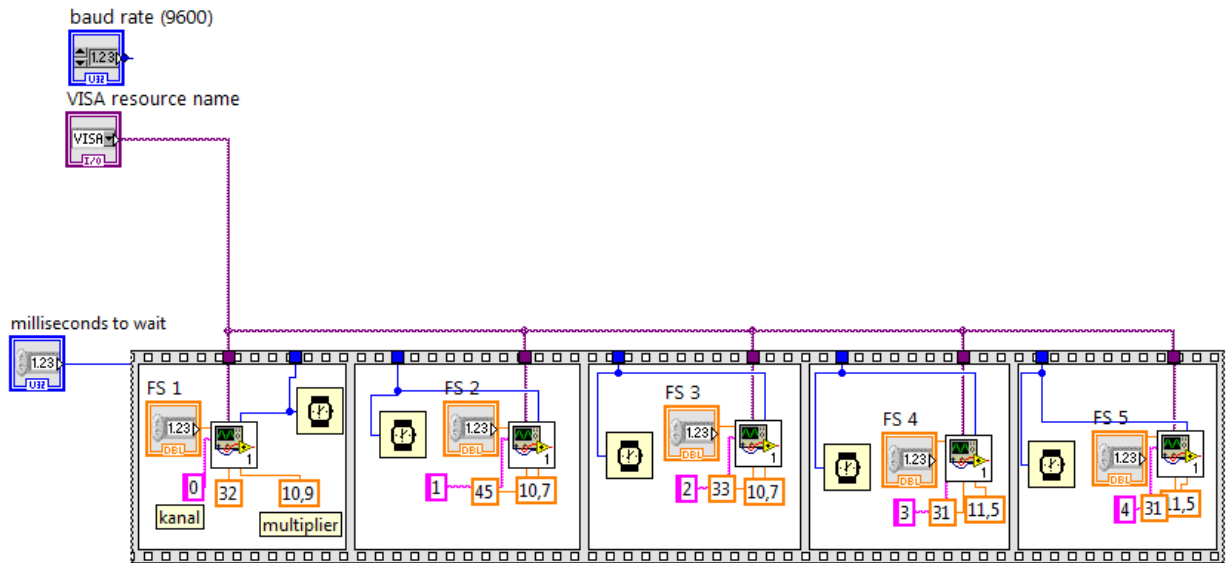
Labview-funktionen "Number To Fractional String" konverterer DATA som er en dbl-værdi til en streng og afrunder til nærmeste 3 decimaler. Der tilføres et 0 og herefter et + forrest i strengen og tallet DATA er nu konverteret til det korrekte format (dog med forkert kommaseparator). Kanal nummeret N og derefter kommandoen (#AA) tilføjes nu til strengen. Til sidst erstattes "," med "." for korrekt kommaseparator og det hele sendes afsted med en "Carriage Return" til sidst. En on/off funktion er lagt ind til hvis der ikke ønskes at skrive et en kanal.

SubVI – COM



Da der skrives til DA-konverteren 8 gange når DAC-VI'et køres, er kommunikationen over COM porten lavet til et subVI. LabVIEW-funktionen "VISA Configure Serial Port" bruges til at vælge COM port og baud rate. Strengen "a" sendes med LabVIEW-funktionen "VISA Write" og den returnerende streng læses med "VISA Read".

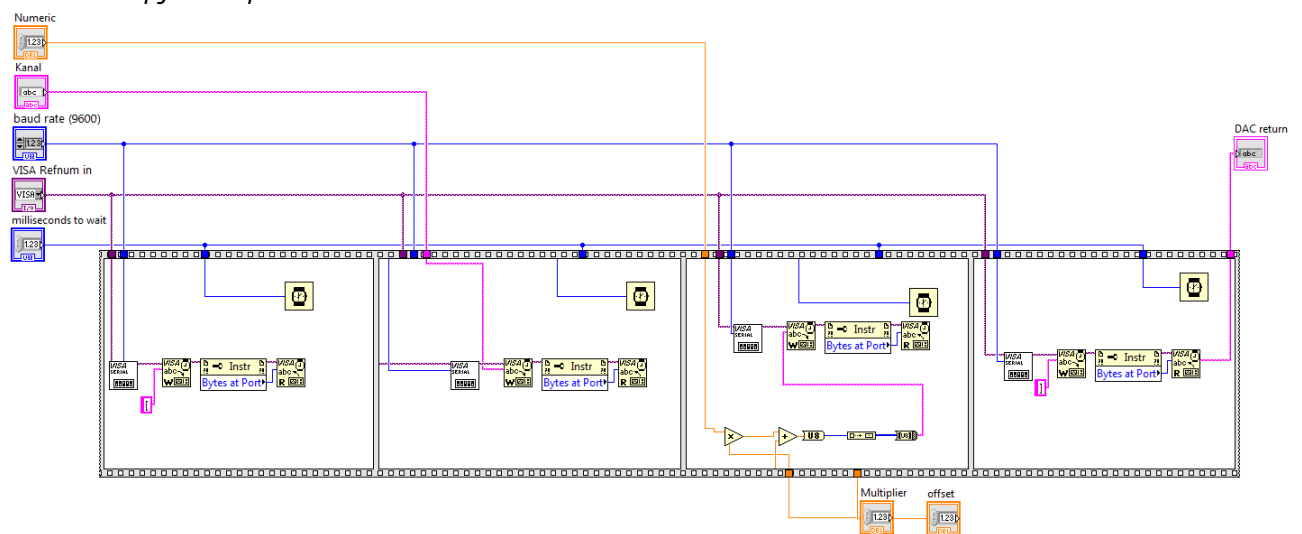
Servooutput



I dette VI skrives styresignalerne til de fem servomotorer til det dertil designede print. Som med DA-konverteren skrives der til en kanal ad gangen.

VI'et består af en "Flat Sequence Structure" som eksekverer subVI'et "SpjældInput" for kanal 0-4 med ventetid imellem.

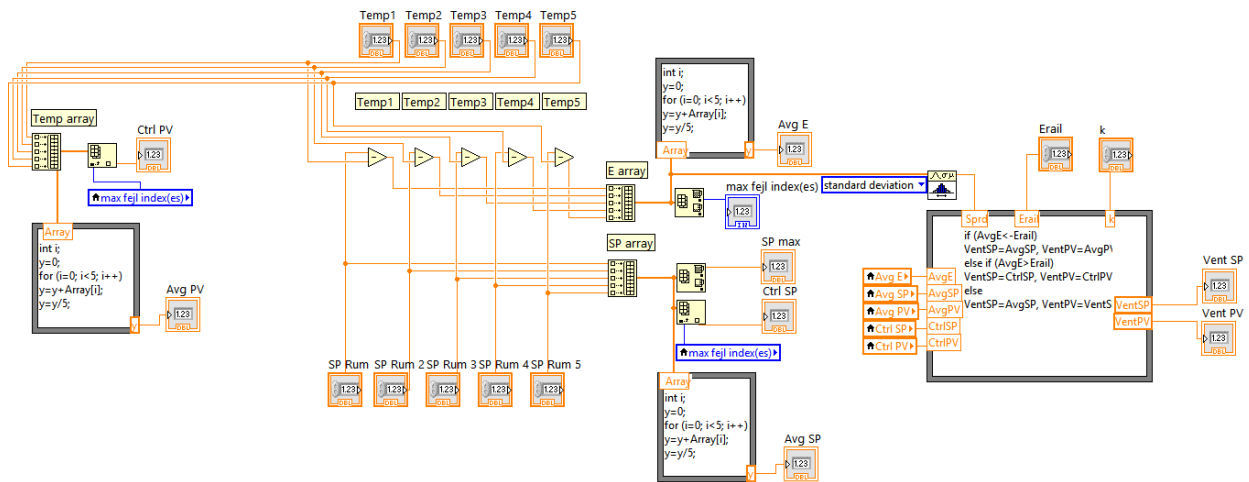
SubVI – SpjældInput



Controlleren til styring af servomotorene bruger en special fremstillet protokol. For at skrive til en kanal sendes "[NA]. N er kanalnummeret startende fra 0 og A er en byte integer i intervallet [30; 162], hvor 30 er en vinkel på 0 grader og 162 er en vinkel på 180 grader. Den anvendte controller er ikke særlig hurtig, så der blev introduceret en pause efter hvert sendt tegn med en "flat Sequence Structure". Til konvertering af et 0-

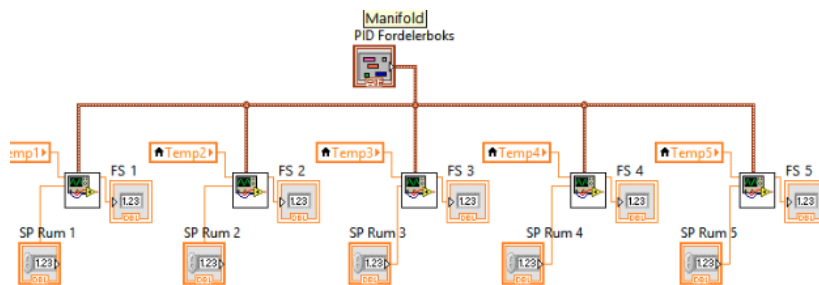
10 signal (dbl) til en integer bliver dbl-værdien ganget med en multiplier, hvorefter der bliver tillagt et offset. Hvad multiplieren og offsettet er, afhænger af det fysiske spjæld pga. variationer i produktionen (det hele er håndlavet). I VI'et "Servooutput" ses hvad multiplier og offset er for de kalibrerede kanal i prototypen. LabVIEW-funktionen "To Unsigned Byte Integer" bruges til konvertere dbl-værdien, som nu ligger inden for intervallet [30;162], til et afrundet 8-bit heltal (byte integer). Til sidst konverteres heltallet til en streng som sendes til controlleren.

Ventilatorinputs



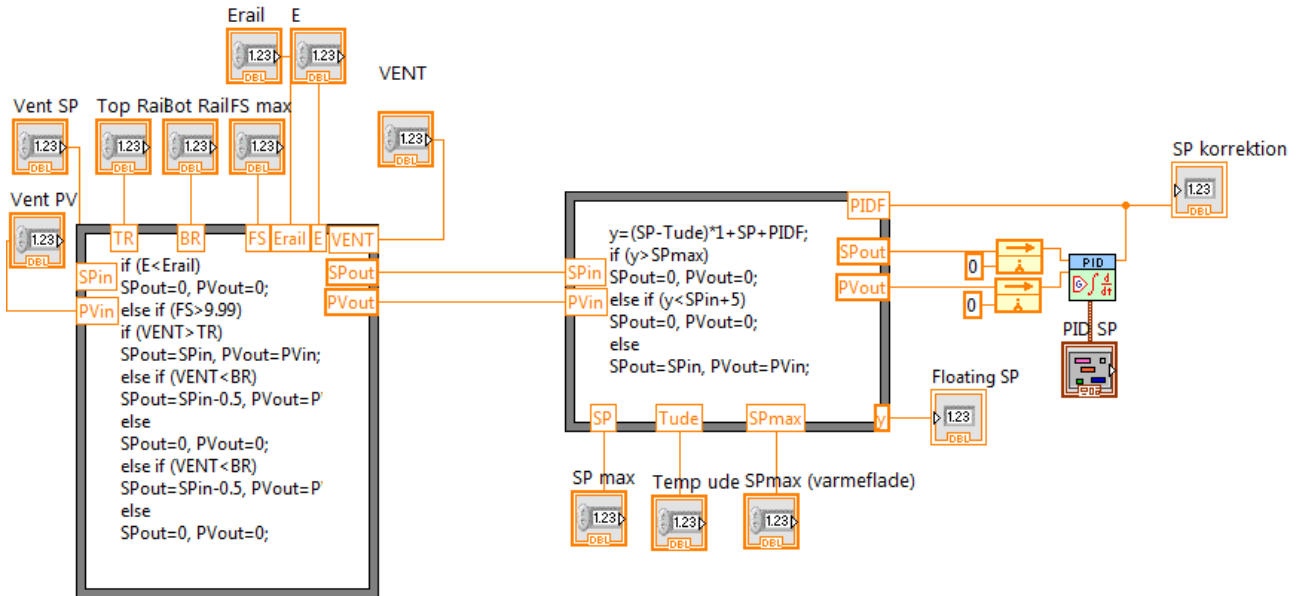
En beskrivelse af dette VI kan ses kapitel 6.1 under afsnit ventilatorprioritet.

Manifold



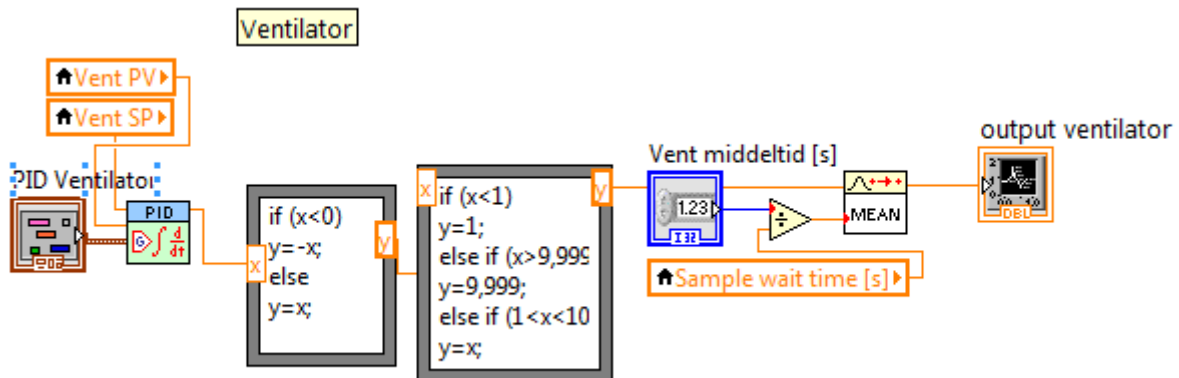
Her ses hvordan de samme PID controller parametre bliver ført ud til i alle spjældkanalernes SubVI's.

Flydende setpunkt (varmeblade)



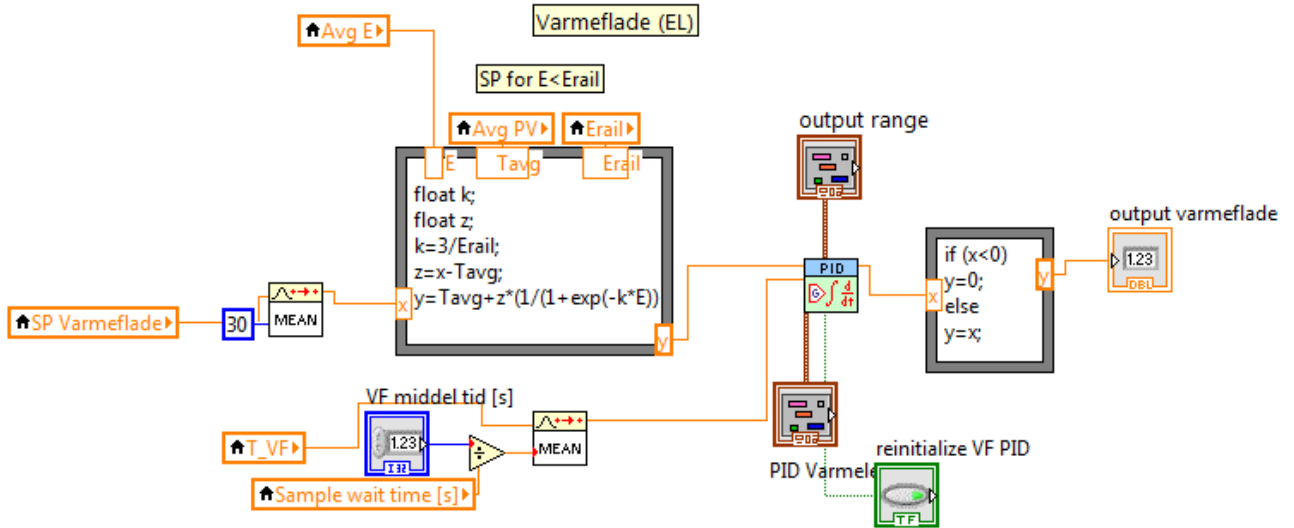
Dette VI beregner det flydende setpunkt til varmebladen. Styringsstrategien er beskrevet i kapitel 6.1 under afsnittet flydende setpunkt på varmeblade.

Ventilator



Her ses PID controlleren for ventilatoren. I den venstre "formular node" inverteres outputtet fra PID controlleren hvis denne er under 0 for at ventilatoren skal kunne bruges frikøling. I den anden formular node begrænses ventilator-outputtet. Ventilator signalspændingen er her sat til min. 1 V, men bør reelt sættes således at ventilatoren kan transportere den tilførte friskluft (typisk i omegnen af 200 m³/h). Til sidst er der indsat et "mean filter" så ventilatoren kører mere roligt.

Varmeflade



I formularfeltet (formular node) er sigmoid-funktionen indtastet til korrektion af varmekildens setpunkt. Der er et "mean filter" på både det beregnede SP (før sigmoid) og den målte varmekildetemperatur for at holde temperaturreguleringen mere stabil.

7. Placering af luftvarmesystem

7.1. Placering af aggregat

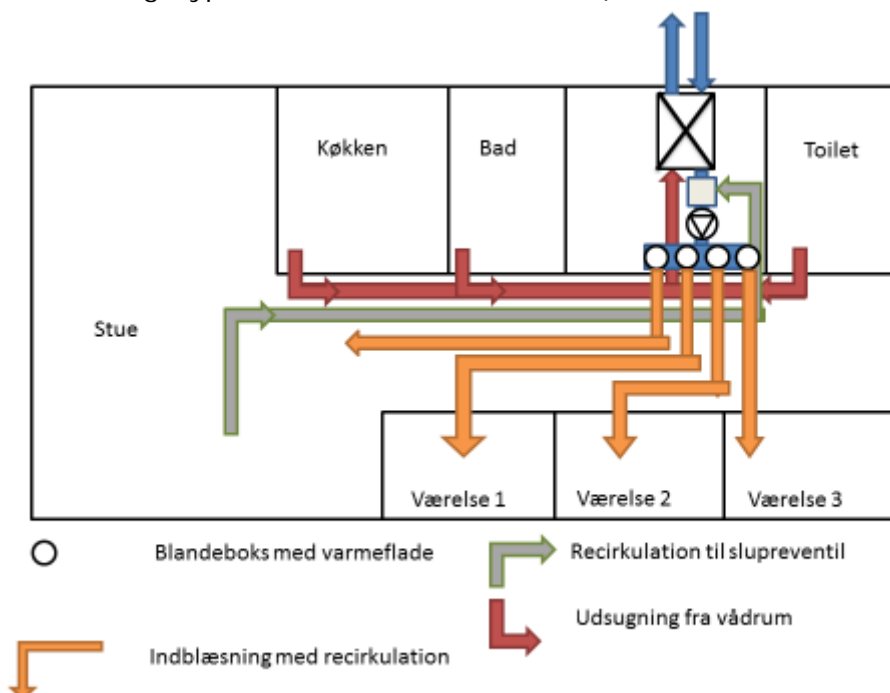
Grundet Bygningsreglementets krav til lavt energiforbrug er næsten al nybyggeri for enfamiliehuse i dag med mekanisk ventilation med varmegenvinding. Den mekaniske ventilation udføres dog ofte med et relativt fast luftskifte pga. restriktionerne i Bygningsreglementet. For et hus med det udviklede luftvarmesystem, er luftskiftet i de opvarmede rum styret udelukkende efter varmebehovet, mens frisklufttilførslen kan behovstyes ud fra fugt og CO₂.

Princippet for det samlede luftvarmeanlæg er, at varmegenvindingsaggregatet med varmeveksler opsættes på normal vis og tilsluttes det nyudviklede luftvarmeaggregat via slubreventilen.

Fra luftvarmeaggregatet forsynes boligens enkelte rum med kanaler på normal vis. Kanalerne vil dog være en eller to dimensioner større grundet den store luftmængde der er nødvendig for at dække varmebehovet.

Fra gang som typisk betjener størstedelen af boligens rum (eksisterende byggeri) eller alternativt centralt beliggende større opholdsrum, hvis gang ikke haves (nyere byggeri) udsuges recirkulerings luftmængde som tvangstyes (slave) iht. indblæsningen (master).

På Figur 7-1 ses princippet for kanalopbygningen med blandeboks (manifold). Princippet er lavet for et tilfældigt typehus i Danmark anno 2014 (med decentrale blandebokse).



Figur 7-1: Mekanisk ventilation med luftvarme og recirkulation med decentrale blandebokse

7.2. Placering af kanaler

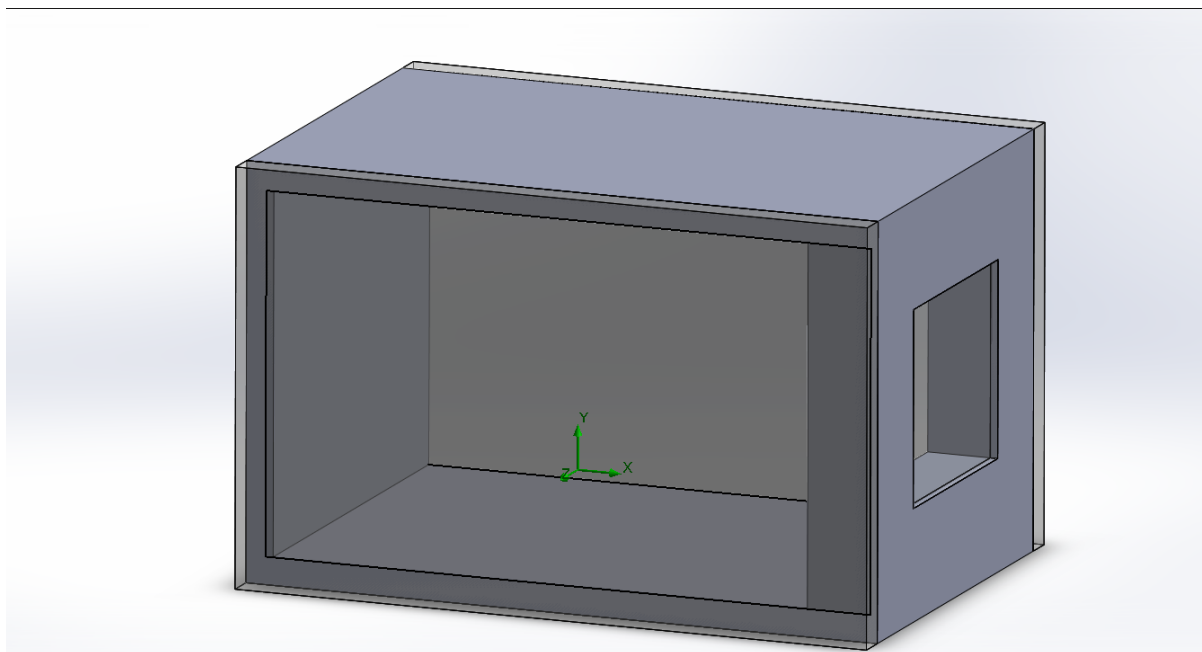
I Danmark placeres radiatorer ofte under vinduer for at kompensere for kuldnefald samt den kølige ydervæg.

Energiforbruget er stærkt afhængigt af opholdstemperaturen. Det er velkendt at kulde ved fødder og ankler medfører at brugeren skruer op for varmen. Ved at placere varmekilden ved den kølige ydervæg kan kuldnefald reduceres og komforten i opholdszonen øges – derved kan energiforbruget mindskes.

CFD simulering af indblæsning

Til bestemmelse af optimal placering af indblæsningsarmatur er der lavet CFD beregninger til visualisering af temperaturfordeling og luftstrøm i et rum.

Simuleringen er lavet i et enkelt rum med et vindue, se figur 7-2.



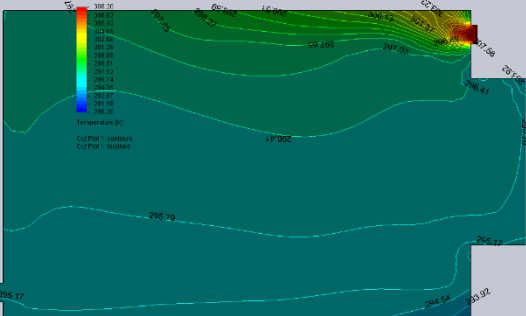
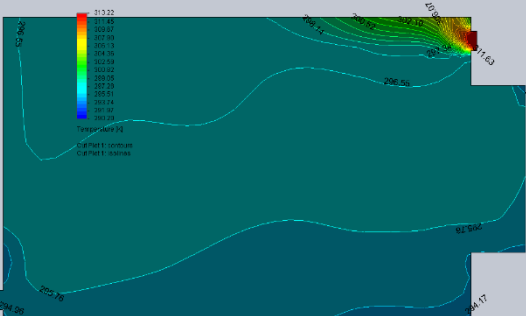
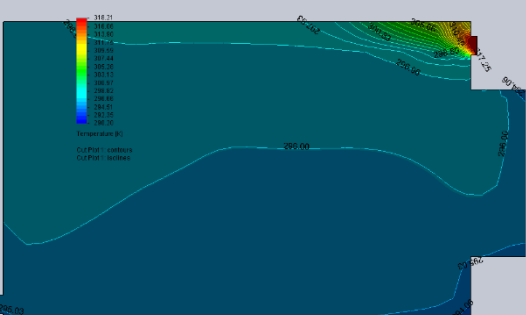
Figur 7-2: Simuleringsmodel

Til simulering af ventilationen er anvendt følgende parametre:

Kanal størrelse	Ø100
Kanal placering ift. gulv loft	± 100 mm
Indblæsningstemperatur hhv.	35, 40 & 45°C
Indblæsning hhv.	10, 8 & 6 l/s
Tryk ved udsugning	atmosfærisk tryk
Væg temperatur	20°C
Karm temperatur	Gennemsnit af væg og vindue
Vinduestemperatur	17°C

Indblæsning over vindue

Simuleringen er foretaget med indblæsning over vindue og udsugning i modsatte side.

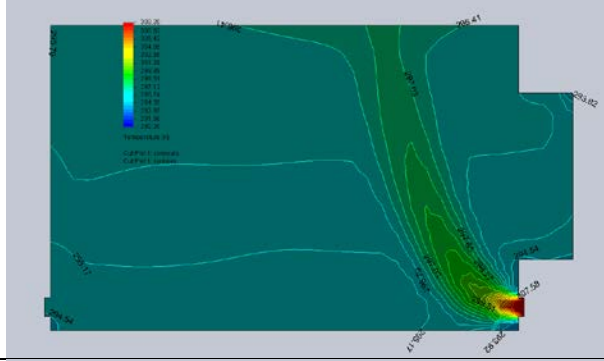
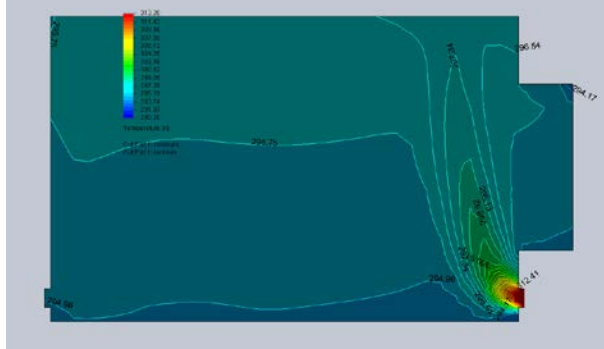
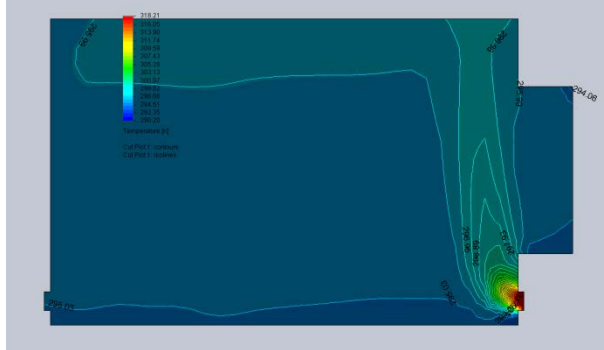
	T_{ind} [°C]	Luftstrøm [l/s]	$T_{opholdszone}$ [°C]
	35	10	22
	40	8	22
	45	6	22

Ved indblæsning over vindue er der risiko for at varmen danner en varmepude under loftet. Ved høje temperaturer under loft øges lagdelingen og det kan være svært at få varmen ned i opholdszone.

Det vil derfor anbefales at blæse varm luft ind ved gulv niveau med placering af armatur i ydervæg under vindue.

Indblæsning under vindue

Simuleringen er lavet med indblæsning under vindue og udsugning i modsatte side – dette kan f.eks. være en spalte under døren.

	T_{ind} [°C]	Luftstrøm [l/s]	$T_{opholdszone}$ [°C]
	35	10	22
	40	8	22
	45	6	22

Som det umiddelbart ses er temperaturfordelingen for indblæsning under vindue bedre end med indblæsning over vindue.

8. Forsøg i Energy Flex House

8.1. Beskrivelse af testfacilitet

På Teknologisk Institut er etableret en testfacilitet i form af et lavenergihus kaldet Energy Flex House. Huset er indrettet som et testhus, hvor forskellige nye systemløsninger eller koncepter kan integreres og undersøges.

Huset er endvidere udstyret med en række indeklimatefølere som sammen med et komplekst dataopsamlingsystem sørger for at logge, gemme og analysere udvalgte data.

Energy Flex House er et 216 m² lavenergihus fra 2009, og det dimensionerende varmetab inklusiv ventilation er beregnet til 3,7 kW svarende til 17,2 W/m² opvarmet bruttoareal, ved 20 °C inde og -12 °C ude. Huset er et middellet hus (80 Wh/K m²), hvorfor varmekapaciteten i netop dette tilfælde vil være større end for eksempel et ekstra let hus (40 Wh/K m²) og mindre end et middeltungt (120 Wh/K m²) og tungt hus (160 Wh/K m²). Dette har stor betydning for tidskonstanten i forbindelse med lagring og afladning.

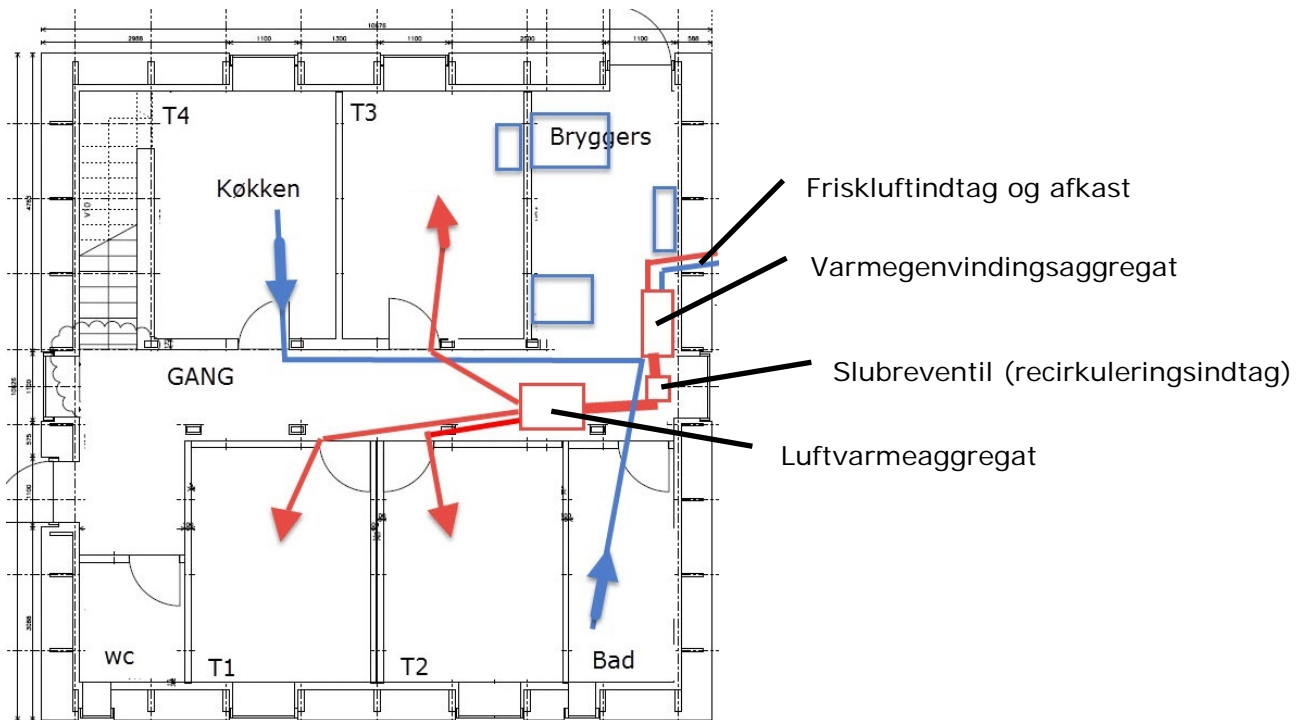
8.2. Vurdering af luftvarmesystem

Til at dokumentere om luftvarmesystemet virker optimalt, er der lavet forsøg i Energy Flex House med forskellige belastninger af varme, kulde og fugt.

Det samlede luftvarmeanlæg er testet i underetagen af huset. Underetagen består af fire side-by-side rum, et bryggers, en gang, et bad og et WC. Under forsøgene har døren til WC'et været aflukket. Rum 1-3 opvarmes af luftvarmeanlægget, mens der suges fra rum 4 (køkken) og bad.

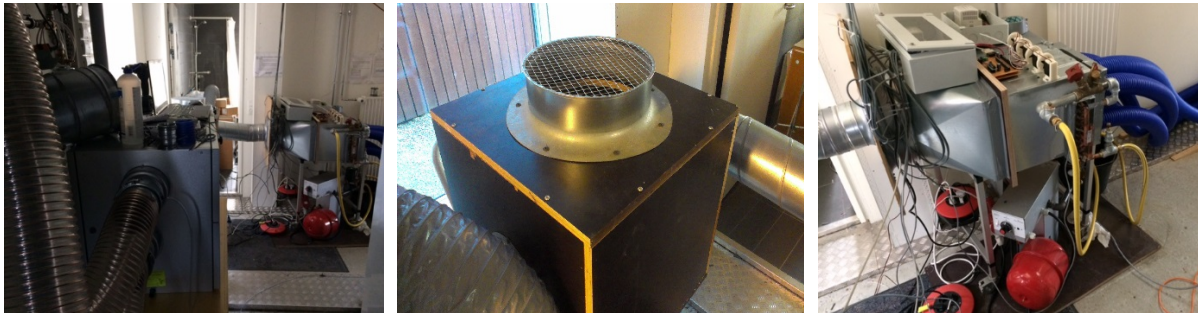
Det samlede ventilations- og luftvarmeanlæg består af tre hovedkomponenter.

1. Varmegenvindingsaggregat – Nilan Comfort Eco 300
2. Slubreventil (recirkuleringsindtag) – prototype
3. Luftvarmeaggregat - prototype



Figur 8-1: Plantegning af Energy Flex House

Rum 1, 2 og 3 er værelser med indblæsning. Rum 4 er køkken med udsugning. Luftvarmeanlægget er placeret i gangen.



Figur 8-2: Forsøgsopstilling. Til venstre ses varmegenvindingsaggregatet, i midten ses slubventilen og til højre ses luftvarmeaggregatet.

Manometre anvendt til tryk-
målingerne



Figur 8-3: Fotografi af opstilling fra enden af gangen.



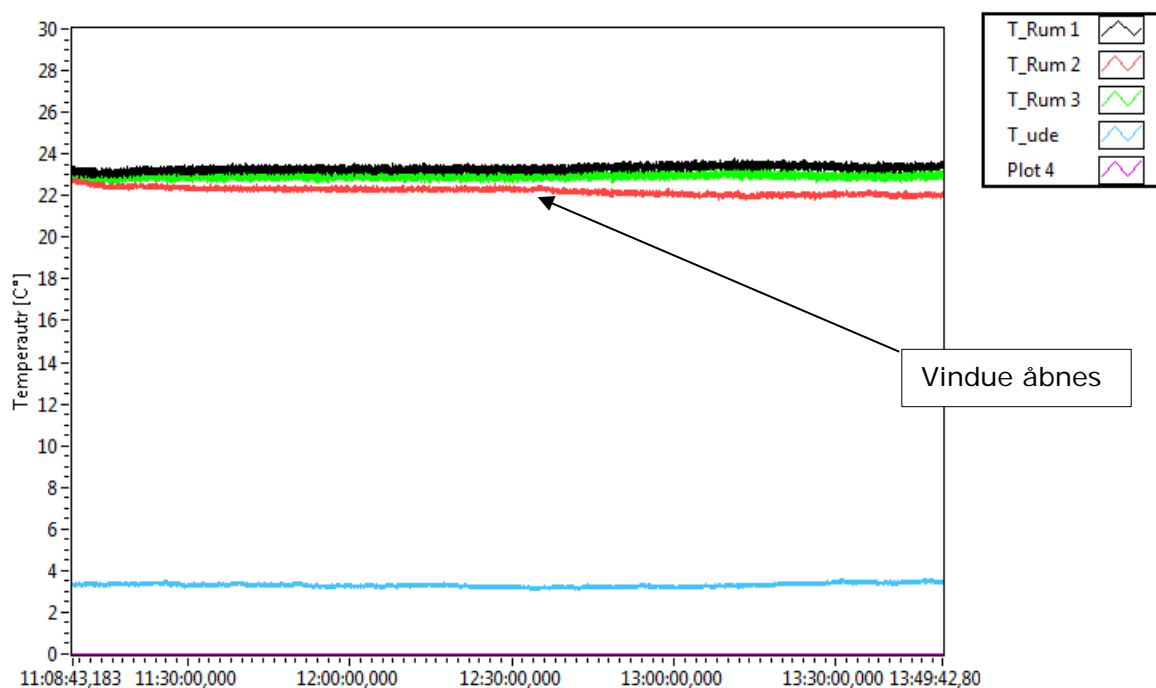
Figur 8-4: Kanalføring og indblæsningsarmatur.

NilAIR flexslangerne blev til forsøget trukket over gulvet og blev koblet til NilAIR indblæsningsarmaturer. Indblæsningsarmaturerne blev placeret 20 cm foran vinduerne for at modvirke konvektive nedfald, se Figur 8-4.

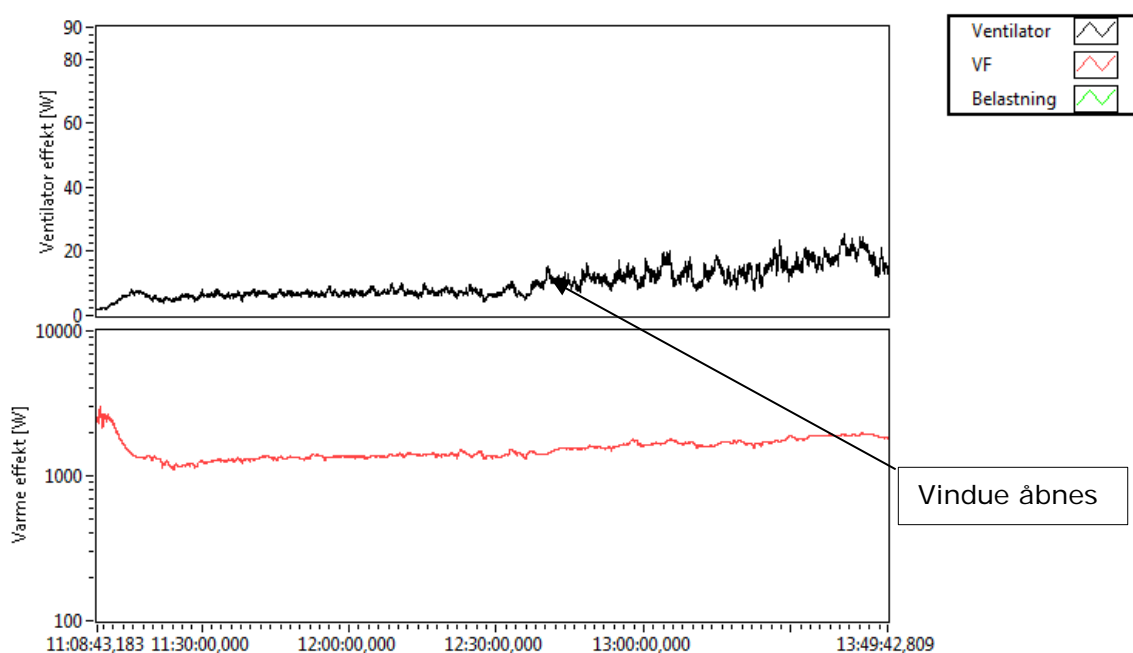
Flowmålinger og ventilatoreffekt kan ses i Bilag 6.

Test af pludselig kuldeindfald

For at se hvordan systemet reagerer, hvis der i et rum er brug for ekstra varme, er der udført et forsøg hvor der introduceres et ekstra varmebehov. Dette gøres ved at åbne vinduet i rum 2 og afskærme med tyndt plast for at undgå at kold udeluft trænger ind. Anlægget køres længe nok til at der er opnået stationær tilstand hvorefter vinduet åbnes. Forsøget køres indtil der er igen er opnået stationær tilstand.

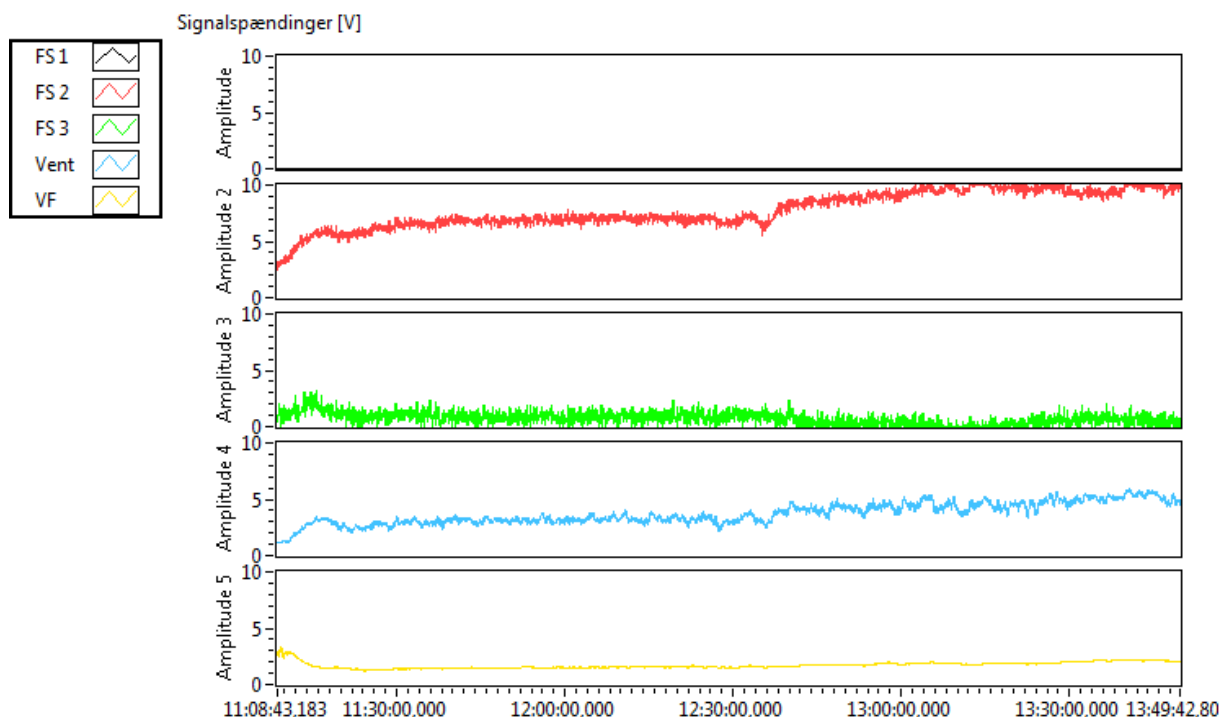


Figur 8-5: Temperaturplot i rum 1, 2 og 3 samt udendørs



Figur 8-6: Plot af ventilator effekt og varmepladens effekt. Bemærk at skalaen for varmeeffekten er logaritmisk

Når vinduet åbnes ses det at temperaturen i rum 2 daler (rød), samtidig kører ventilatoren op i omdrejninger og effekten af varmebladen øges.



Figur 8-7: Signalspændinger for spjæld, recirkuleringsventilator og varmeblade

Af figur 8-7 kan det ses at spjældet til rum 2 (rød) leder en større andel luft gennem varmebladen og fremløbstemperaturen øges. På grund af samspillet mellem ventilator og varmeblade falder temperaturen i rum 2 ikke til under 22°C.

For at undgå unødigt energiforbrug, skal der påføres en vinduessensor, der kan informere luftvarmeaggregatet om, at der ikke skal leveres varme eller køling til et rum med åbent vindue.

Test af fugtbelastning

Fugt i rum med udsugning

For at teste om luftvarmeaggregatets recirkulering af luften påvirker varmegenvindingsaggregatets evne til at fjerne fugt, blev der lavet et forsøg med fugtbelastning i Rum 4 (køkken). En gryde med vand blev sat på en el kogeplade i Rum 4. Kogepladen blev koblet til samme effektregulator, som også blev brugt i forsøg 1, for at fugtbelastningen skulle kunne times i LabVIEW-programmet.

Ventilatorerne i det anvendte varmegenvindingsaggregat har 4 hastighedstrin og kører normalt på trin 2. Varmegenvindingsaggregatet har en fugt-funktion, hvor der er mulighed for at køre med højere og/eller lavere ventilationstrin ved høj/lav luftfugtighed.

Lavt ventilationstrin aktiveres kun i vinterdrift og ved luftfugtighed under 30%, mens højt ventilationstrin aktiveres, når luftfugtigheden stiger 10% eller mere i forhold til det sidste døgnns gennemsnitlige luftfugtighed. Højt ventilationstrin deaktiveres, når luftfugtigheden falder til 3% eller mindre i forhold til døgn-gennemsnittet.

Til forsøget er højt trin indstillet til ventilatortrin 4, mens lavt trin er sat til 2.

Ved normal drift blev udsugningsluftstømmen målt til 143 m³/h, mens den ved højt trin blev målt til 258 m³/h. Forsøget blev udført med døren på klem.



Figur 8-8: Dør på klem ind til rum 2

Fugt i opvarmet rum

For at se hvilken indvirkning recirkuleringsventilatoren har på fugttransport mellem de opvarmede rum, blev der lavet et forsøg med fugtbelastning i rum 1 efter samme fremgangsmåde som i foregående forsøg, dog med lukket dør ud til gangarealet.

Udførelse

Der blev placeret en Testo 174H fugt- og temperaturmåler i alle rum, mens et IC-meter er placeret i gangarealet.

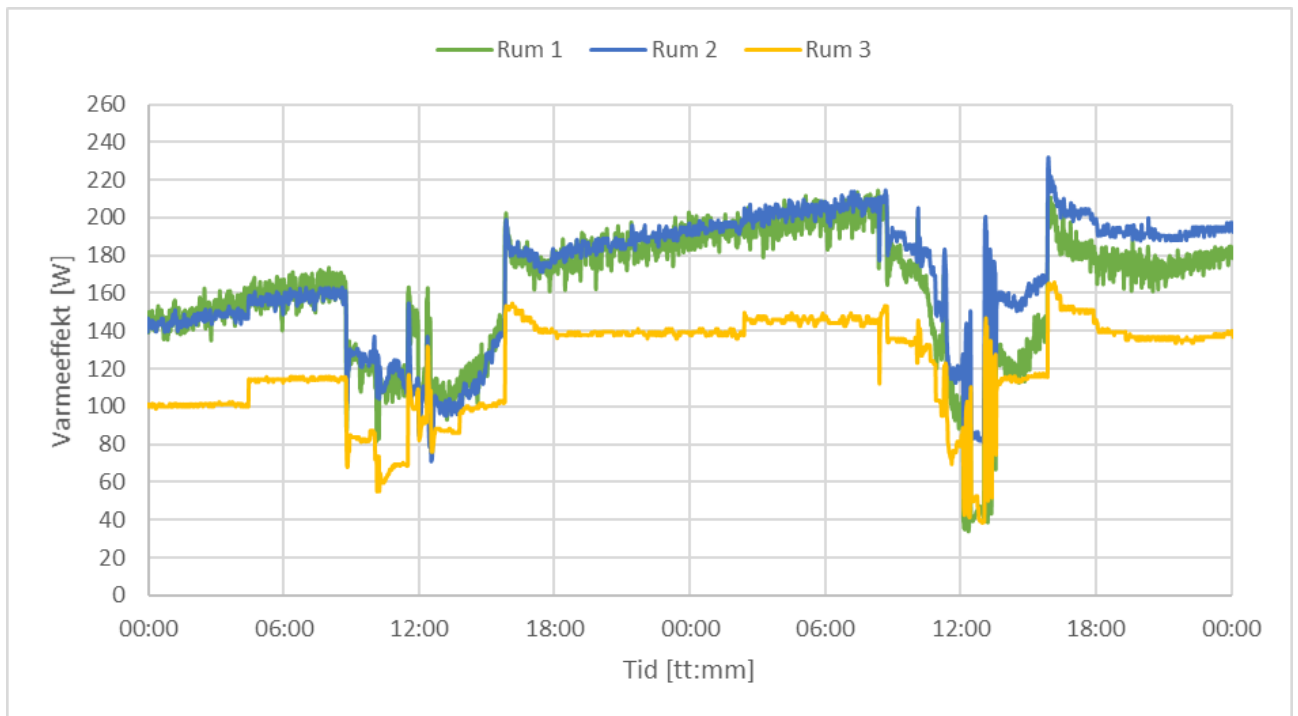
Datalogningen blev startet dagen inden fugt-forsøgene begyndte for at have et indledende kurveforløb. Kogepladen blev tændt i RUM 4 torsdag kl. 10:30 og slukket 1½ time senere. Fredag kl. 11.18 blev kogepladen tændt i rum 1 og ligeledes slukket 1½ time senere.

I de udførte fugt-forsøg blev temperatur og relativ fugtighed målt. Da temperaturen i rummene ikke er ens, kan den målte relative fugtighed ikke bruges til direkte sammenligning mellem rummene og af denne årsag bruges vandindholdet x , se Bilag 5 for beregning.

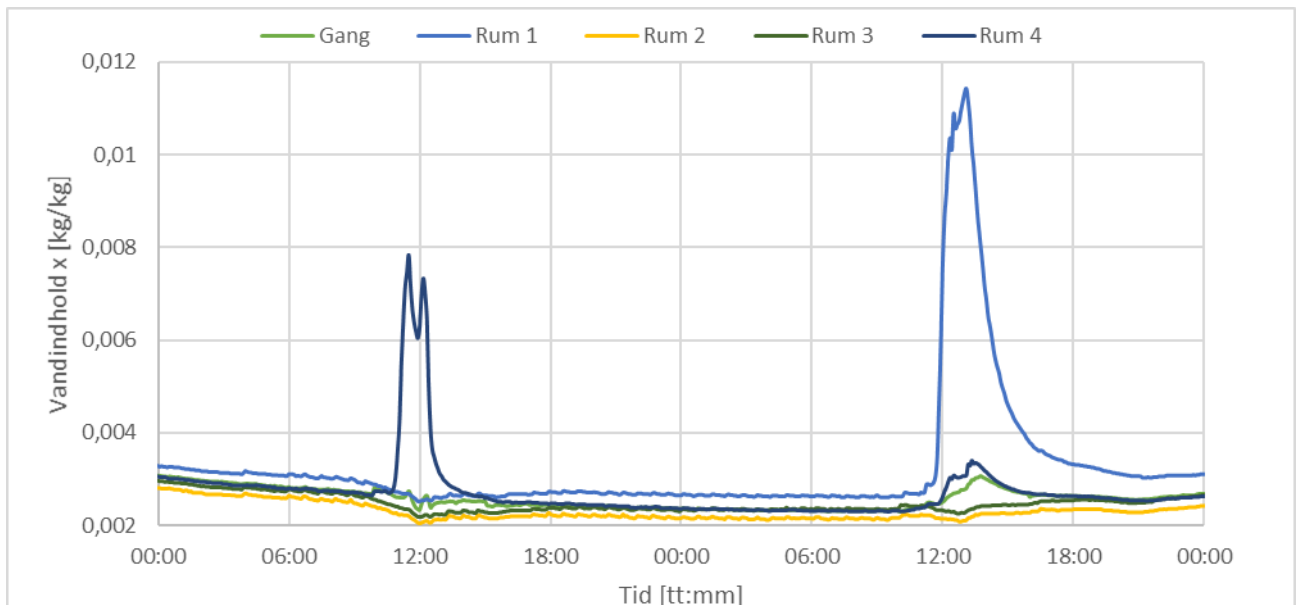
Resultater

Forsøgene viser, at når fugten øges i køkkenet med udsugning (Rum 4) øges fugten i rum med indblæsning (rum 1, 2, og 3) ikke, se Figur 8-9. Luftvarmeaggregatet og slubreven-tilen overfører derfor ikke fugt gennem recirkulering og rum med indblæsning er ikke påvirket af fugt fra køkkenet.

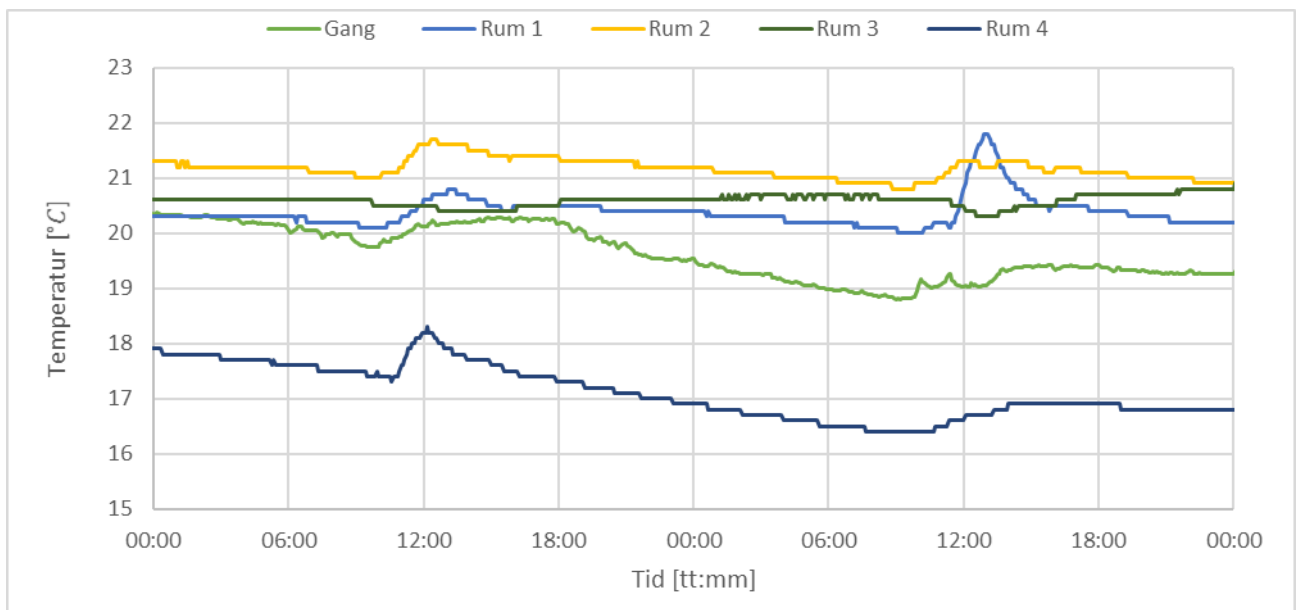
Temperaturen stiger i rummet med fugtpåvirkningen på grund af effektilskuddet fra varmepladen. I de tilstødende rum (rum 1, 2 og 3) øges temperaturen også. Temperaturen øges med under 1°C og kommer i ingen af rummene over 24°C, se



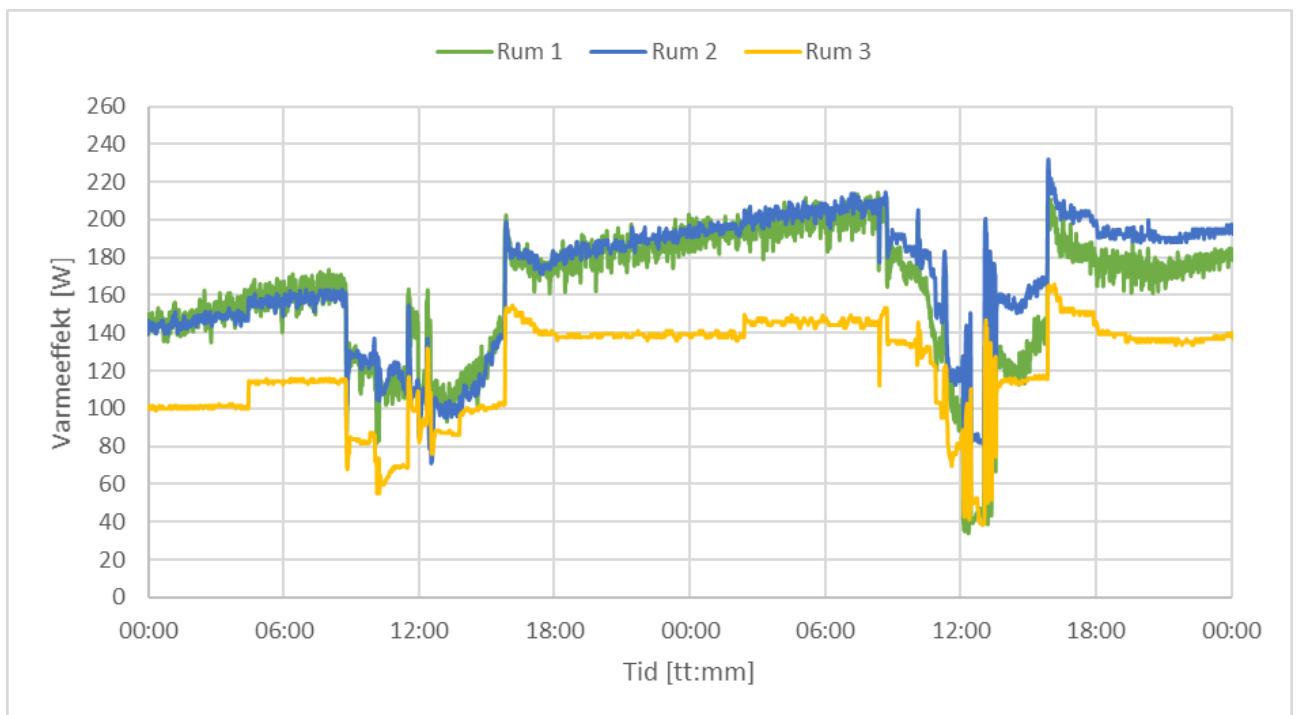
Når fugten øges i rum 1 (værelse uden udsugning) ses det, at vandindholdet stiger i gangen samt rum 4. Dette skyldes at fugten transporteres gennem udsugningsprækken under døren fra rum 1 ud til gangen samt at fugten transporteres til køkkenet (rum 4) grundet udsugningen. Vandindholdet stiger ikke i rum 2 og 3, hvilket igen indikerer at luftvarmeaggregatet ikke overfører fugt fra recirkuleringen til indblæsning i rummene.



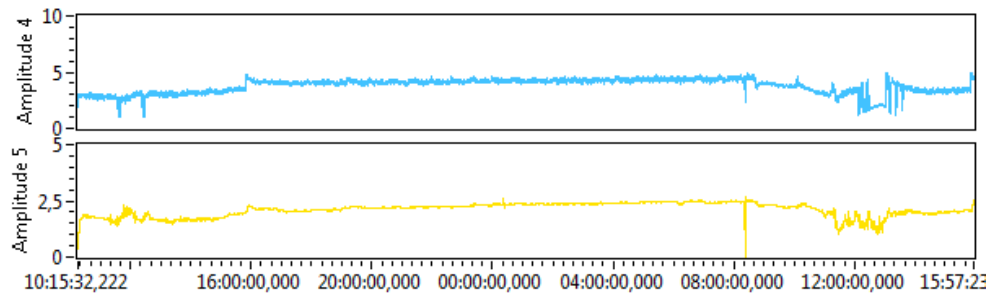
Figur 8-9: Vandindholdet i de fire testrum og gangarealet



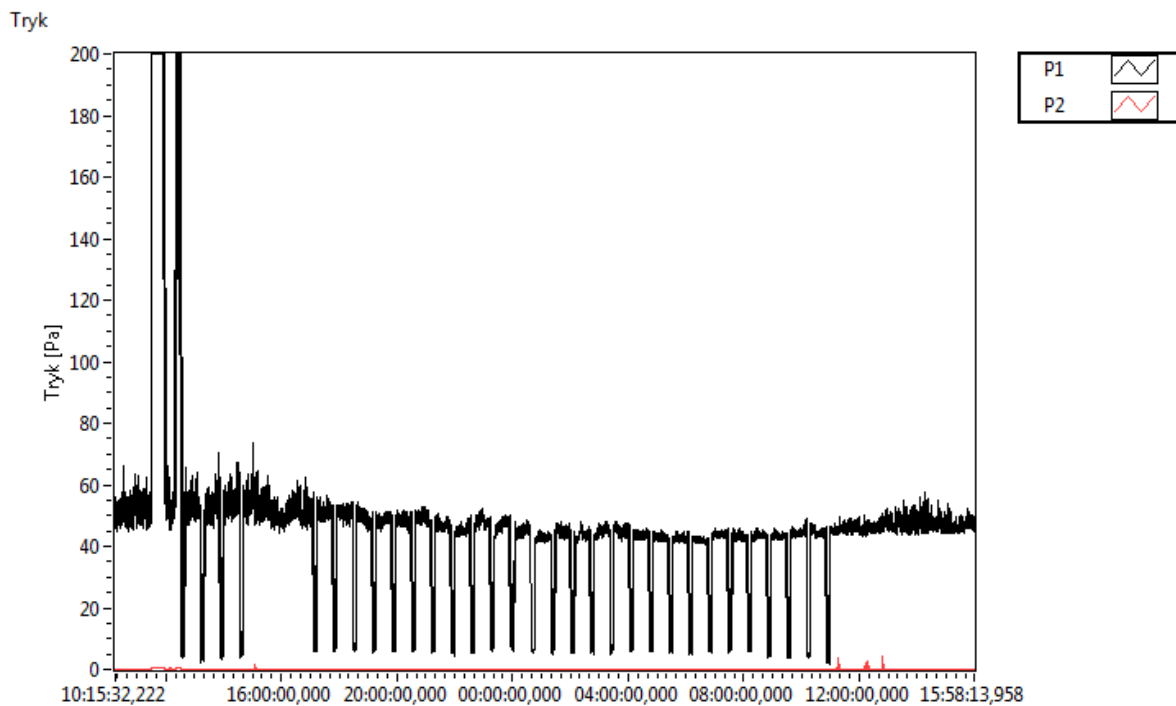
Figur 8-10: Temperaturen i de fire testrum og gangarealet



Figur 8-11: Den tilførte varmeeffekt til de tre rum



Figur 8-12: Spændingssignal fra varmepladen (gul) og ventilatoren (blå)

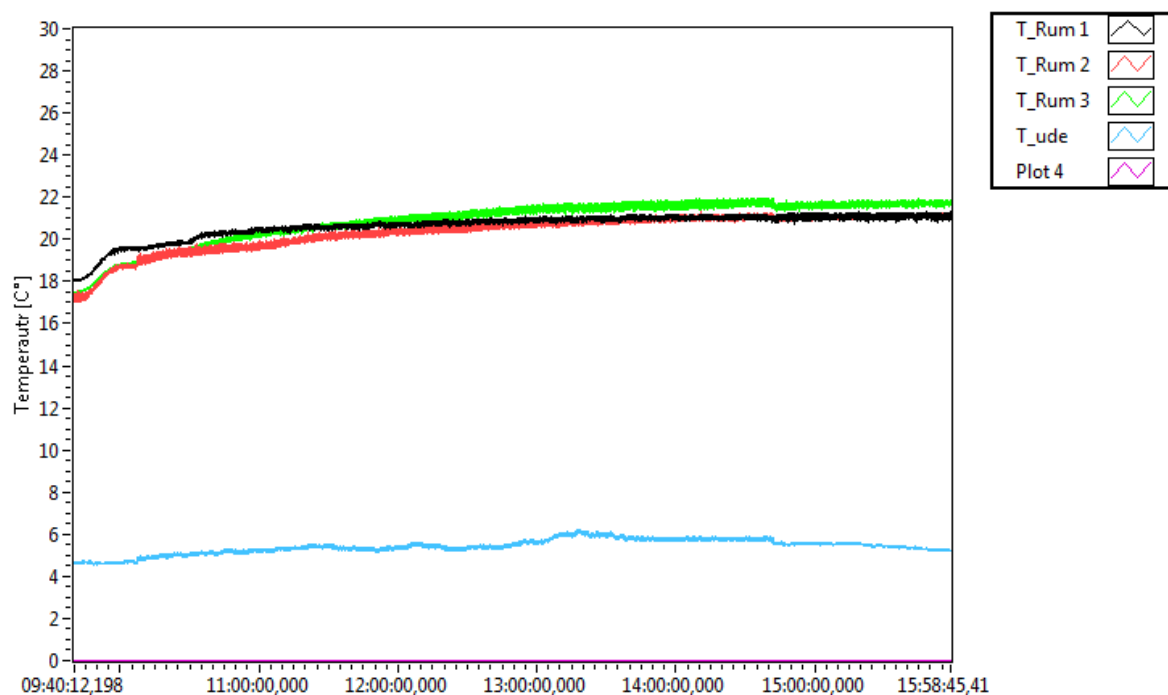


Figur 8-13: Trykket efter varmegenvindingsaggregatet

Af figur 8-13 kan trykket efter varmegenvindingsaggregatet aflæses. Når fugten stiger i rum 4, kører varmegenvindingsaggregatet op i omdrejninger og trykket stiger. Når fugten stiger i rum 1, bliver varmegenvindingsaggregatet ikke påvirket, da fugtniveauet i rum 4 med udsugning ikke stiger nok til, at fugtstyringen i aggregatet aktiveres.

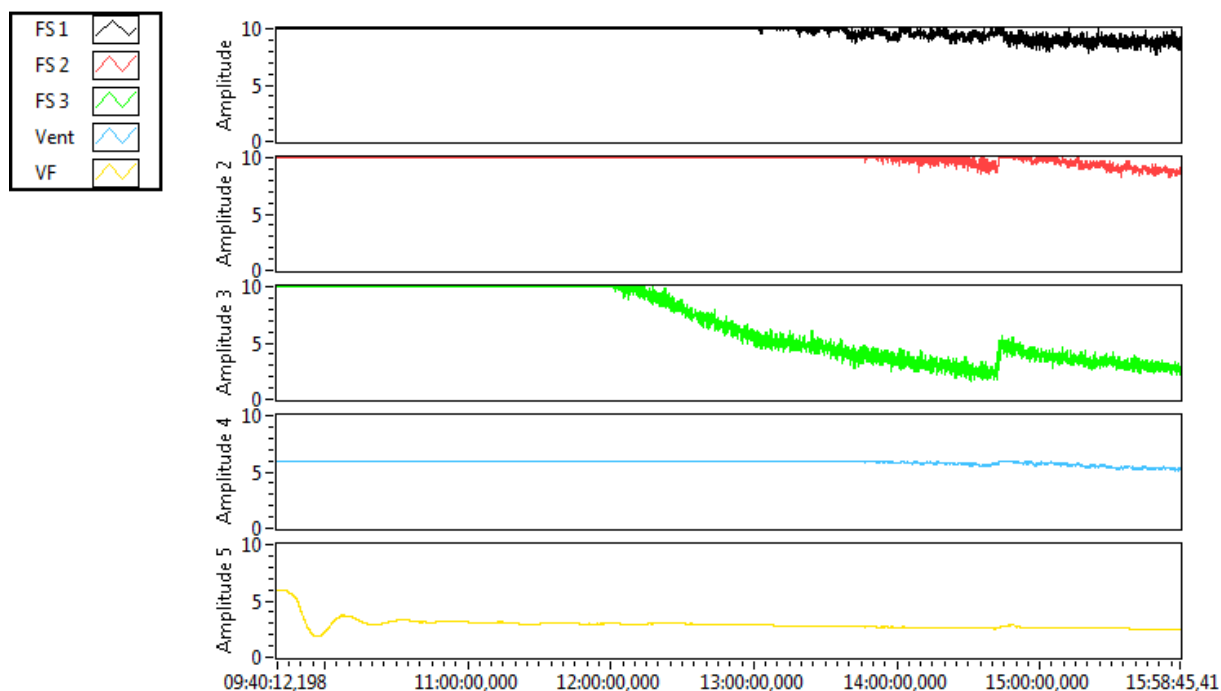
Koldstarts-test

Efter en weekend uden varme blev anlægget tændt for at se hvordan dynamikken er i systemet.



Figur 8-14: Temperatur i rum 1-3 samt udendørs

Ved opstart af anlægget er der en rumtemperatur på ca. 17°C. Den ønskede temperatur i rummene er sat til 23°C.



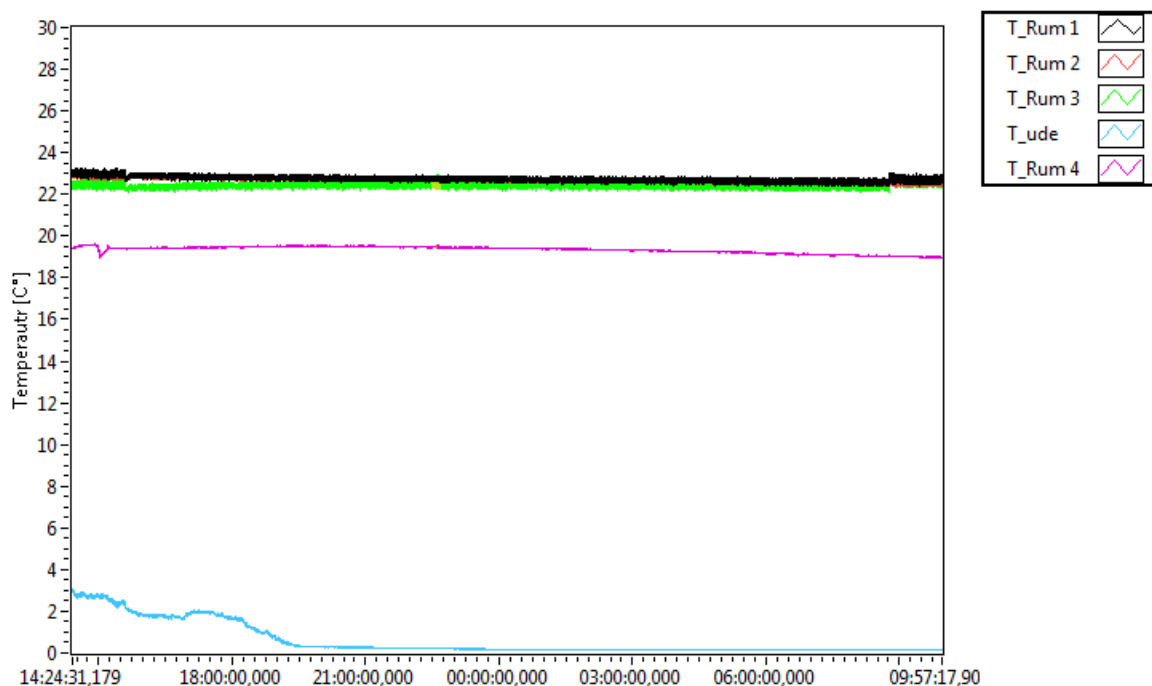
Figur 8-15: 0-10 V spænding fra de 3 indblæsningskanaler, ventilatoren og varmefladen

Af ovenstående figur kan det ses at de tre indblæsningsspjæld åbner fuldt op (de tre øverste plots). Når temperaturen i rummene begynder at nærme sig setpunktet på 22°C drosler spjældene ned samtidig med at ventilatoren (den blå kurve) kører ned i omdrejninger. Den gule kurve viser effekten af varmebladen, der starter med at påføre en stor mængde varme for derefter at stabilisere sig omkring 3 kW svarende til en signalspænding på ca. 3.

Under forsøgene sker der en forskydning af alle kurver. Denne forskydning skyldes ikke påvirkninger fra varme eller kulde. Der er ustabiliteter for logningen af signalspændingerne, der kan skyldes kapacitiv afladning i systemet.

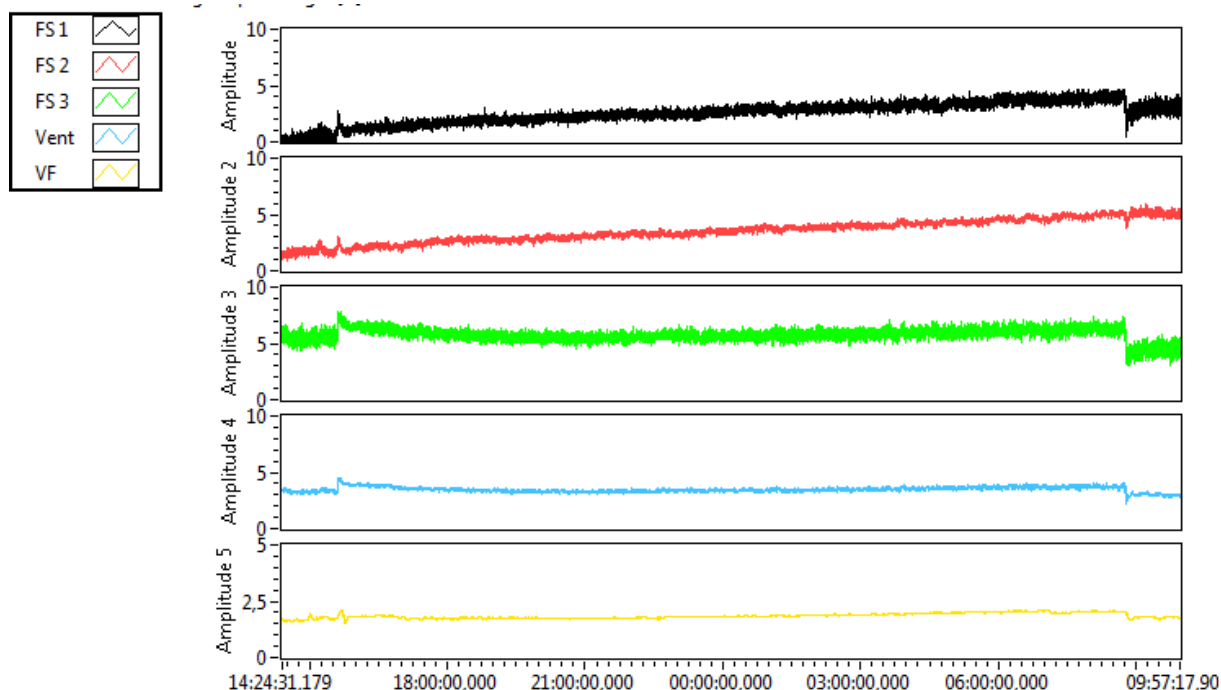
Stationære forhold

Formålet med dette forsøg er at se hvor godt anlægget kan holde de ønskede temperaturer uden kunstigt fremprovokerede belastninger. Setpunkt i alle rum blev sat til 23°C.



Figur 8-16: Temperatur i rum 1-4 samt udendørs

Uden påvirkninger af intern varme eller kulde kan det af Figur 8-16 ses, at temperaturen i rum 1-3 med indblæsning er stabil på $23 \pm 0,5^\circ\text{C}$. Selvom udetemperaturen varierer mellem 0°C og 3°C påvirker dette ikke temperaturen indendørs.



Figur 8-17: 0-10 V spænding fra de 3 indblæsningskanaler, ventilatoren og varmepladen

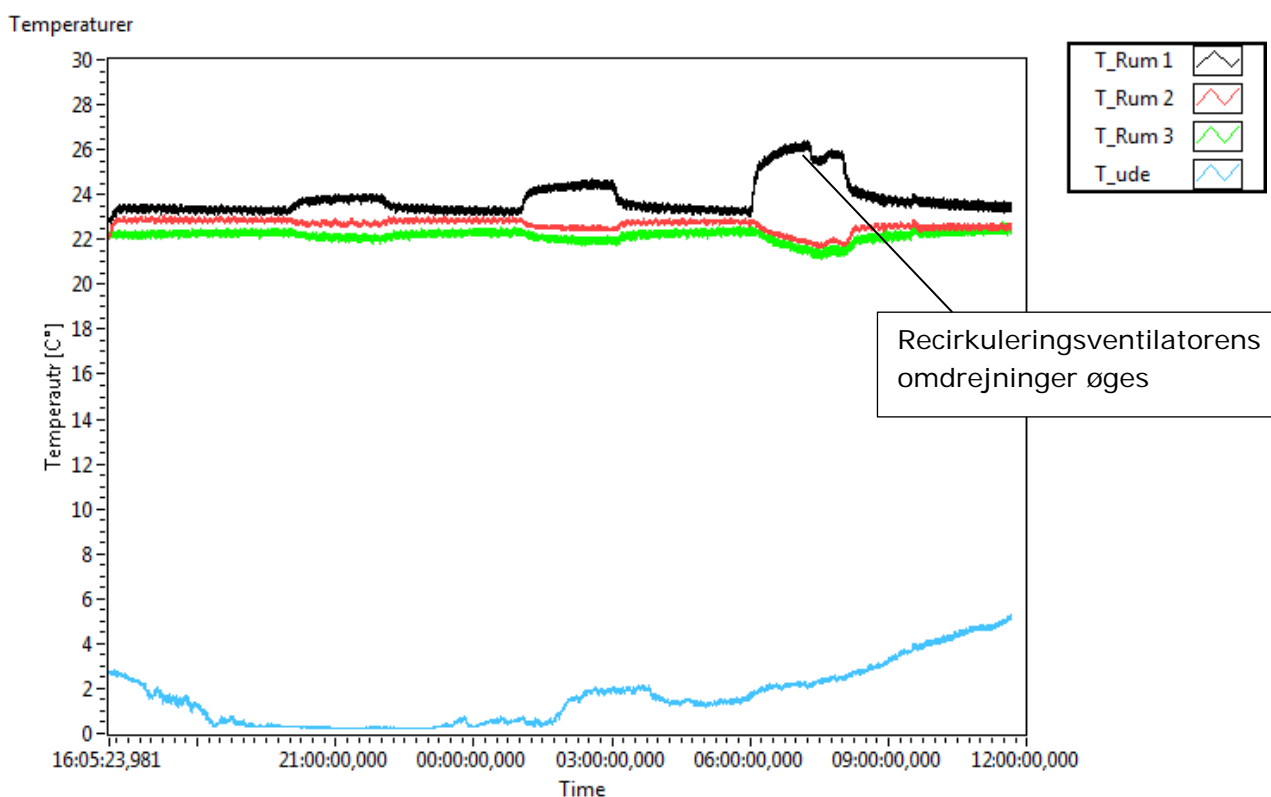
Af Figur 8-17 kan det ses, at når udetemperaturen falder fra 3 til 0°C åbner de module-rende spjæld i rum 1-3 op, for at blæse en større mængde varm luft ind. Dette bevirker at temperaturen i rummene ikke falder på trods af den dalende udetemperatur.

Test af pludselig varmebelastning

I dette forsøg er det undersøgt hvordan systemet reagerer hvis et rum belastes med en varmeeffekt.

Der er i rum 2 opstillet en elektrisk radiator, der er koblet til en Tyristor-effektregulator. Effektregulatoren tager et styre signal på 0-10 V for hhv. 0-100%. Radiatorens effekt blev med et Spar-O-meter målt til 728 W (100%).

Effektregulatorens styresignal bliver leveret fra samme 8-kanals DAC som også leverer ventilatorens og varmepladens styresignal. Dette betyder radiatoreffekten kan styres fra samme LabVIEW-program som styrer luftvarmeaggregatet.



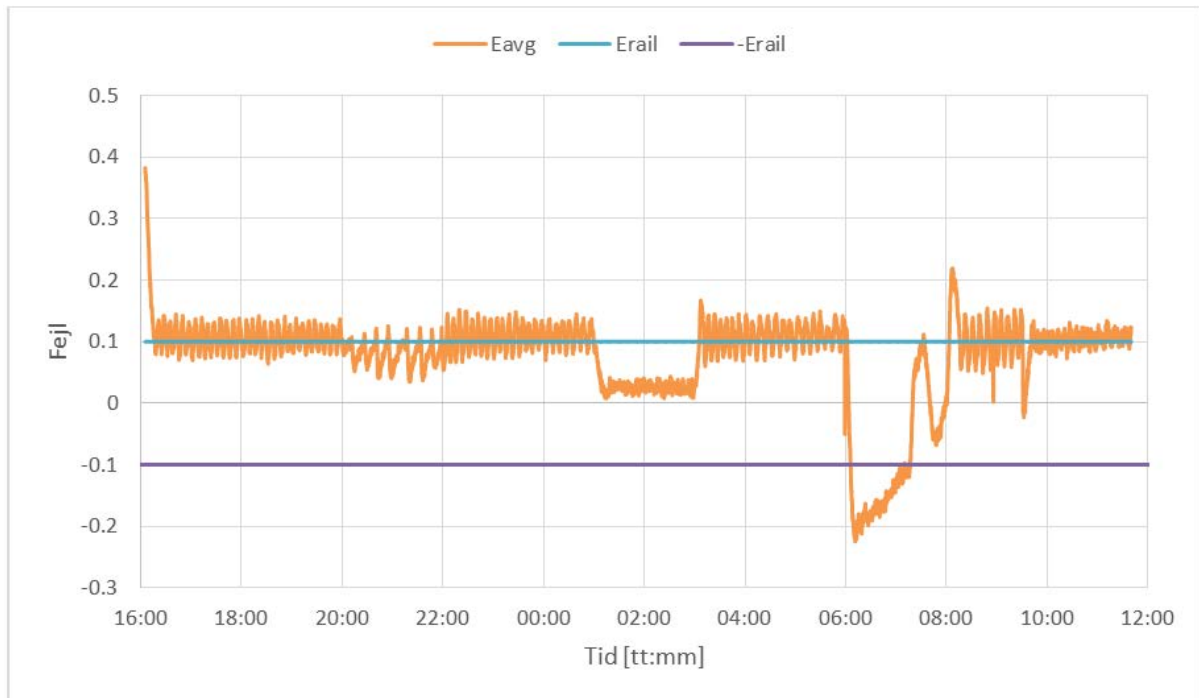
Figur 8-18: Temperatur i de tre rum med indblæsning samt udetemperaturen

Der er i LabVIEW-programmet programmeret en timer til styring af radiatoren. Efter en periode på ca. 5 timer tændes radiatoren i rum 1 med en effekt på 150 W som skal simulere varmebelastningen fra en person samt lettere elektrisk udstyr (f.eks. bærbar computer og/eller belysning). Efter 2 timer slukkes radiatoren igen og der køres uden belastning. Efter 3 timer uden belastning tændes radiatoren på 300 W, hvilket skal simulere varmebelastningen fra en person og elektrisk udstyr (f.eks. stationær computer eller tv). Der testes igen i 2 timer med efterfølgende 3 timers pause. Til sidst tændes radiatoren i 2 timer på 100% (728 W) som skal simulere en yderligere belastning i form af solindfald.

Varmebelastningens effekt på rum temperaturerne kan ses i Figur 8-18. Af figuren fremgår det at temperaturen i RUM 1 forventeligt stiger i de tre perioder radiatoren er tændt. Det ses også at temperaturerne i de to andre rum falder i samme periode. Årsagen til dette er, at temperaturen på varmepladen falder som følge af at E_{avg} falder under E_{rail} , se Figur 8-19.

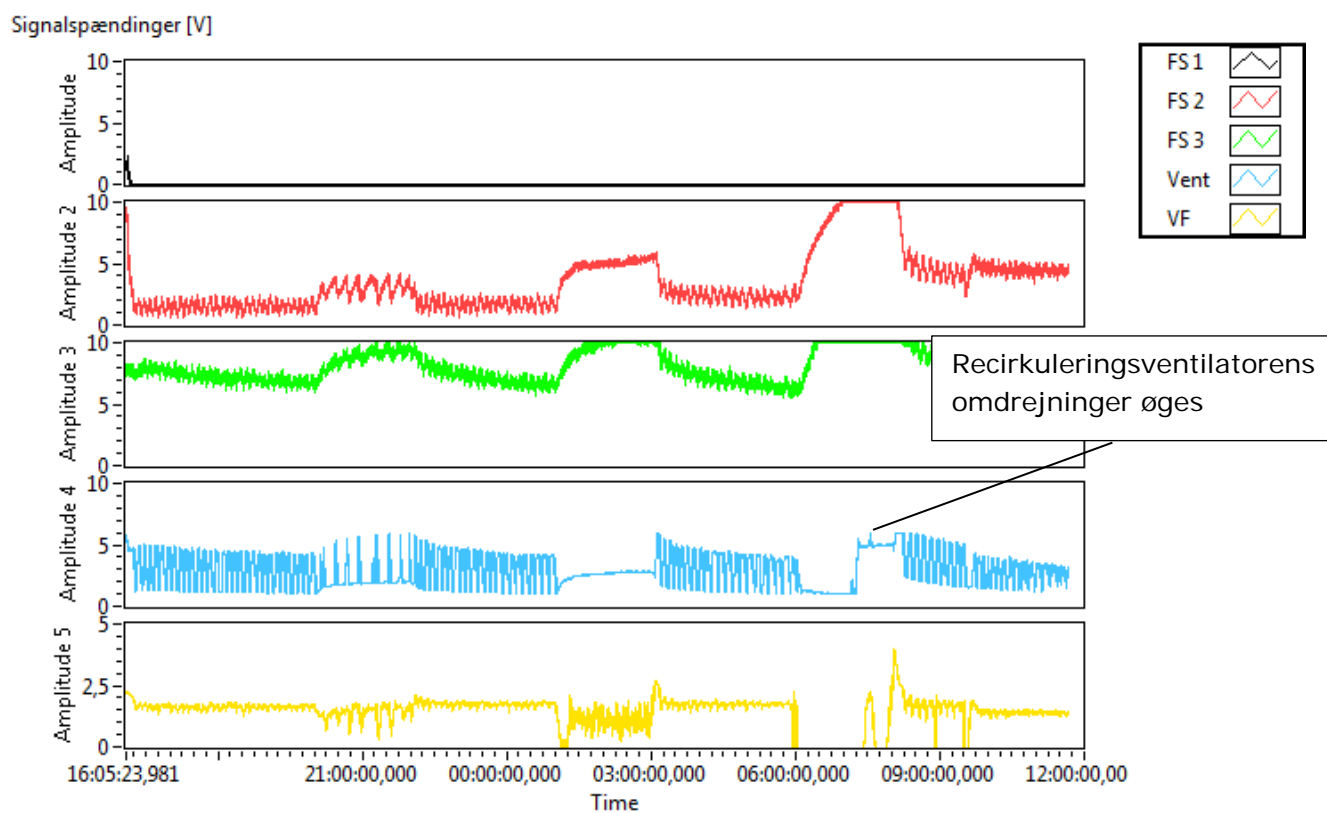
I tredje periode blev rummet belastet så hårdt, at styringen forsøgte at køle ($E_{avg} < -E_{rail}$), men bypass-spjældet i varmegenvindingsaggregatet var endnu ikke integreret i styringen. Årsagen til "bumpet" i temperaturkurven for RUM 1 ved tredje periode er, at E_{avg} nåede

over $-E_{rail}$ og ventilatoren kørte derfor op i omdrejninger for at udjævne temperaturforskellene. Dette viser med tydelighed effekten af at benytte recirkuleringsventilatoren til varmetransport.

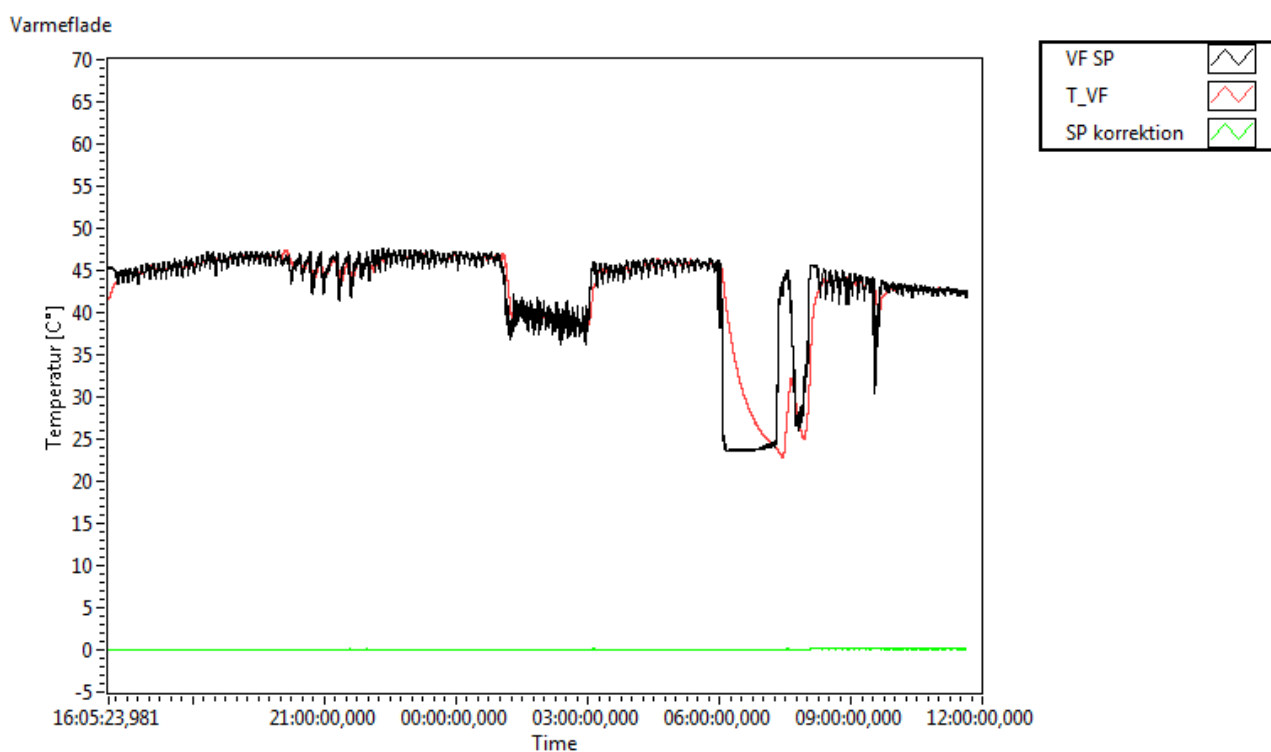


Figur 8-19: Fejlen E_{avg} , E_{rail} og $-E_{rail}$

Grundet varmebelastningen i rum 1 er spjældet 100% åbent i bypass og der tilføres ingen varme, se den øverste graf (sort) i Figur 8-20 .

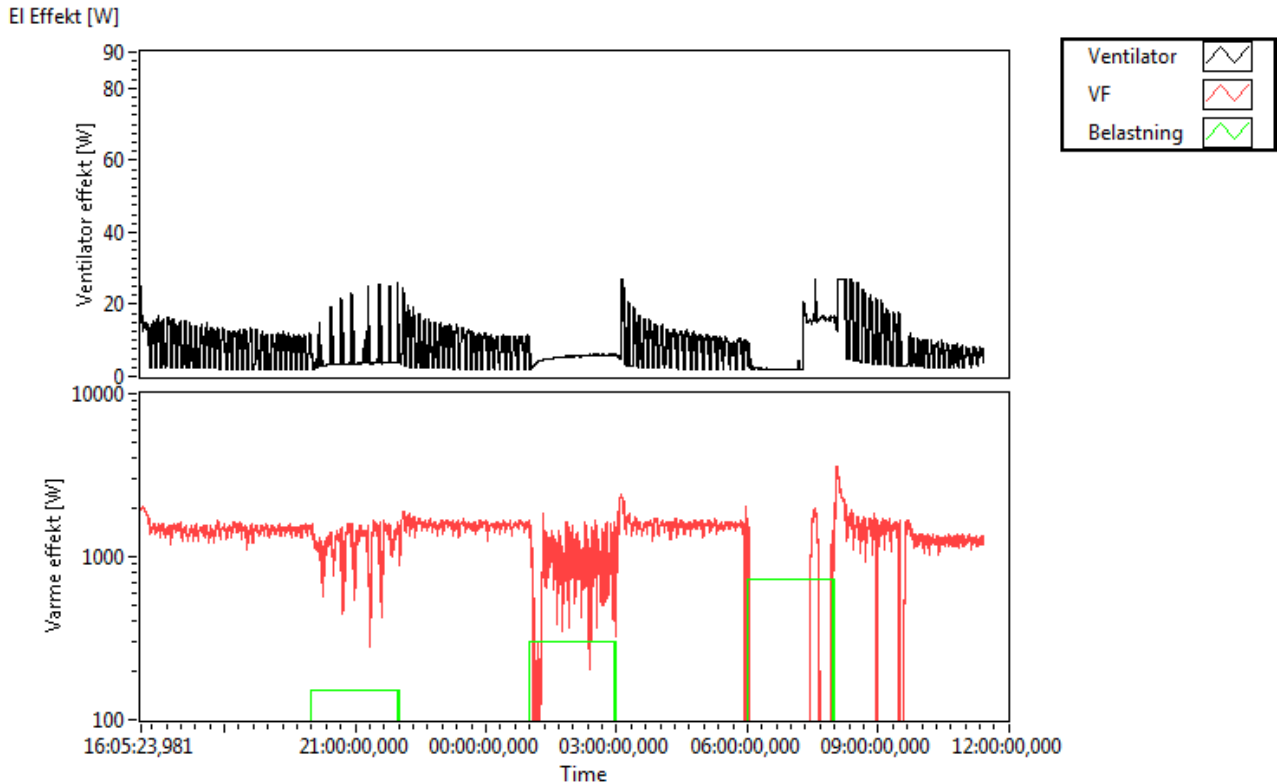


Figur 8-20: Signalspændinger for de tre rum med indblæsning, recirkuleringsventilatoren samt varmefladen



Figur 8-21: Setpunkt (sort) samt temperatur (rød) for varmefladen

Det ses at setpunktet på varmefladen reduceres i takt med øget belastning i rum 1. Det kan ses af grafen at der er en forsinkelse på temperaturen for varmefladen.



Figur 8-22: Effekt for recirkuleringsventilator (sort) og varmeflade (rød)

Det ses, at når rum 1 belastes (grøn) med varme reduceres elforbruget til varmefladen (rød). Det er også tydeligt at ventilatoren reagerer efter hensigten (sort), selvom systemparametrene ikke er sat optimalt. Ved at justere E_{rail} og $-E_{rail}$ til at have et større spænd forhindres det at anlægget går over i køletilstand, når der er en stor varmebelastning i et rum. Ved at sætte skaleringsfaktoren k til en højere værdi kan varmetransporten øges gennem recirkulering, *Implementering* under afsnit 6.1.

8.3. Fleksibelt elforbrug

Luftvarmeanlægget har en tillægsfordel da det også virker som et varmflytningsanlæg. Dette er interessant, da andelen af "gratis varme" er stigende i velisolerede huse. Dette skal forstås på den måde at luftvarmeanlægget er recirkulerende med tilskud af frisk udeluft, der har passeret en varmegenvinder. Fra rum med uønsket høj temperatur fra solbelastning og varmebelastning fra personer, TV, PC, spilkonsoller etc. overføres varme til de kølige rum. Dette vil give en netto energibesparelse frem for at brugerne i de varme rum undlader at fjerne overskudsvarme i disse rum ved at åbne vinduerne. Luftvarmeanlæg er også hurtigt reagerende.

Akkumuleringsevne i Energy Flex House

Det undersøges hvilke muligheder som er tilgængelige for at varmelagre. Dels med henblik på, at beboerne skal benytte mere miljøvenlig energi og dels at opnå en synergi til Smart-Grid, hvor store og fluktuerende el-produktioner baseret på VE-kilder i stigende grad giver udfordringer til hele EI-nettet. Ved brug af varmelagre øges energiforbruget for en bolig, men den anvendte energi omlægges til CO₂ reduceret energi. Ved brug af varmepumper kan der dog, navnlig i forbindelse med vindmøllestrøm opnås en netto energibesparelse.

Her vurderes den generelle mulighed for afbrydelighed i forbindelse med luftvarmeanlæg med varmepumpe samt udnyttelse af husets termiske masse til lagring (ikke lagringstanke).

Der er lavet forsøg med bygningen som termisk lager. Forsøget har til formål at klarlægge de tekniske, termiske og komfortmæssige udfordringer. Løsningen vurderes, at være en simpel løsning, hvor der indsættes en elvarmekilde i et luftvarmeanlæg med recirkulering som dog tillige kan anvendes i et vandbåret anlæg (gulvvarme eller radiator). Løsningen forudses at give udfordringer med hensyn til svingende temperaturer over døgnet i bygningen, hvorfor dette skal accepteres af brugerne.

Disse temperaturekstremer forsøges lagt i et tidsrum, hvor bygningen ikke er i brug eller være i en grad der er acceptabelt i brugstiden.

Til forsøgene er Energy Flex House (EFH) anvendt. For at øge fleksibiliteten af husets henholdsvis lagring og afladning tillades et temperaturbånd i huset i stedet for at fastholde en konstant komforttemperatur. Med et temperaturbånd menes det at lade temperaturen variere over døgnet.

Forsøg

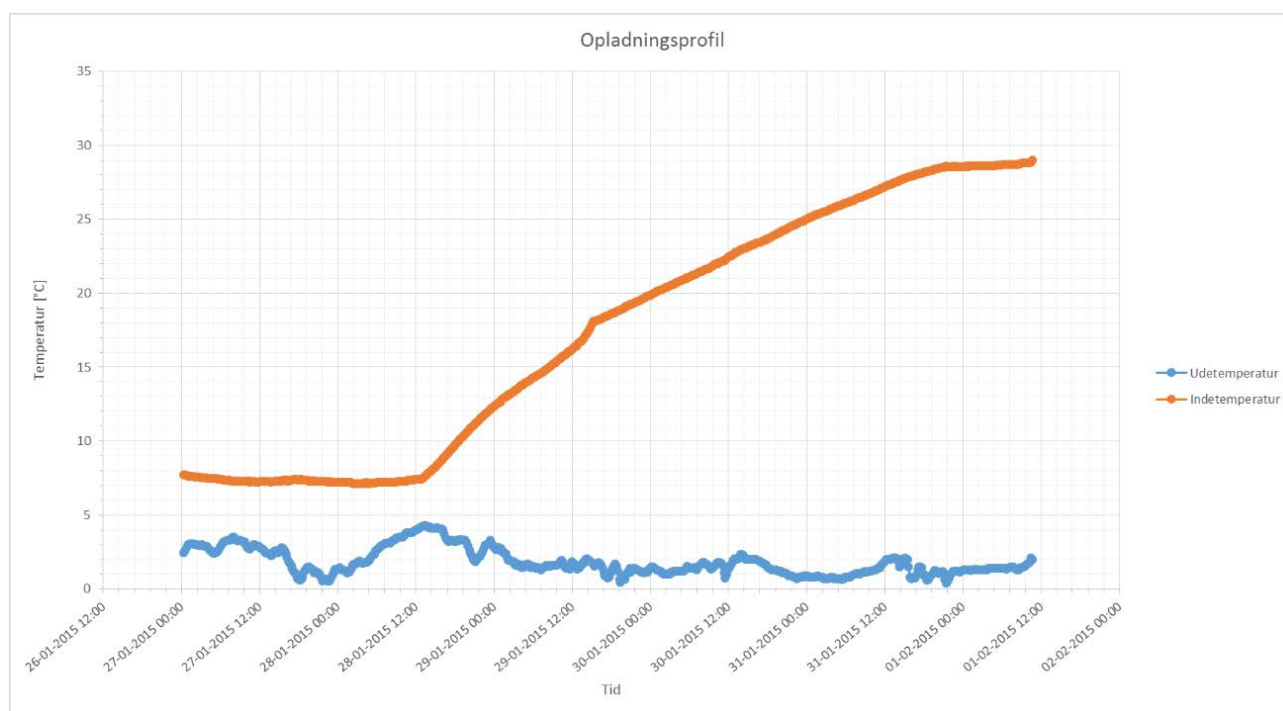
I forsøget er bygningens henholdsvis opladnings- og afladningsevne blevet undersøgt. Inden forsøgene påbegyndtes blev det mekanisk balancerede ventilationsanlæg omdannet til et recirkuleringsanlæg for således at sikre ens temperaturfordeling i alle rummene. Alle aftrækskanaler og andre udluftningsmuligheder blev afdækket, således at dette tab blev elimineret. Varmetabet for bygningen er det eneste tab, som indgår automatisk i forsøgene. Derved kunne tidskonstanten for huset bestemmes.

Først afkøledes bygningen indtil rumtemperaturen stagnerede eller tilnærmelsesvis blev den samme som udetemperaturen, hvorefter luftvarmen blev tændt. Der blev indsat et system som kunne levere 7,2 kW til opvarmningsforsøget, som forblev tændt indtil temperaturen igen stagnerede. Derefter kunne bearbejdningen af resultaterne påbegyndes.

Temperaturen blev logget kontinuerligt i alle rummene i huset i hele måleperioden. Såfremt at temperaturfordelingen i huset var fornuftig anvendes én kurve for huset i stedet for én kurve for hvert rum.

Resultater

Målingerne er foretaget i januar og februar måned. I måleperioden har udetemperaturen været forholdsvis konstant mellem 0 og 3 grader. Temperaturudviklingen for rumtemperaturen er plottet i Figur 8-23.



Figur 8-23: Opladningsforsøg i EnergyFLexHouse.

Ud fra figuren ses det, at temperaturen stagnerer efter 79 timer (3,3 dage). I perioden stiger temperaturen fra ca. 7 grader til 29 grader. Det vil sige en temperaturstigning på 22 grader. Dette giver en temperaturstigning pr. time på 0,28 grader/time, såfremt det antages at temperaturstigningen sker tilnærmelsesvis lineært. Dette er dog ikke korrekt idet, at temperaturen øges mest ved starten af forsøget og senere flader ud. Det forudsættes dog, at der er en lineær sammenhæng mellem tiden og temperaturen.

Forsøget er udført ved tilførsel af en varmeeffekt på 7.2 kW. Dette er valgt for at speede processen op. Luftvarmesystemet kan på baggrund af en række begrænsninger for maksimal temperatur på 35 grader og maksimal luftmængde maksimalt tilføre bygningen 4 kW.

Størrelsen på varmeeffekten har ingen indflydelse på tidskonstanten, men derimod kun på den maksimale opnåelige temperatur. Det vil sige, at temperaturstigningen stadigvæk sker over 79 timer inden temperaturen stagnerer.

Ud fra en forholdsvis betragtning af den tilførte varmeeffekt kan temperaturstigningen pr. time beregnes til 0,16 grader/time ved tilførsel af 4 kW, som luftvarmeanlægget kan levere. Samtidigt vil den totale temperaturstigning i perioden være ca. 12 grader.

Flydende temperaturbånd

Ved at tillade at temperaturen over døgnet varierer kan huset benyttes til at lagre og aflade energi.

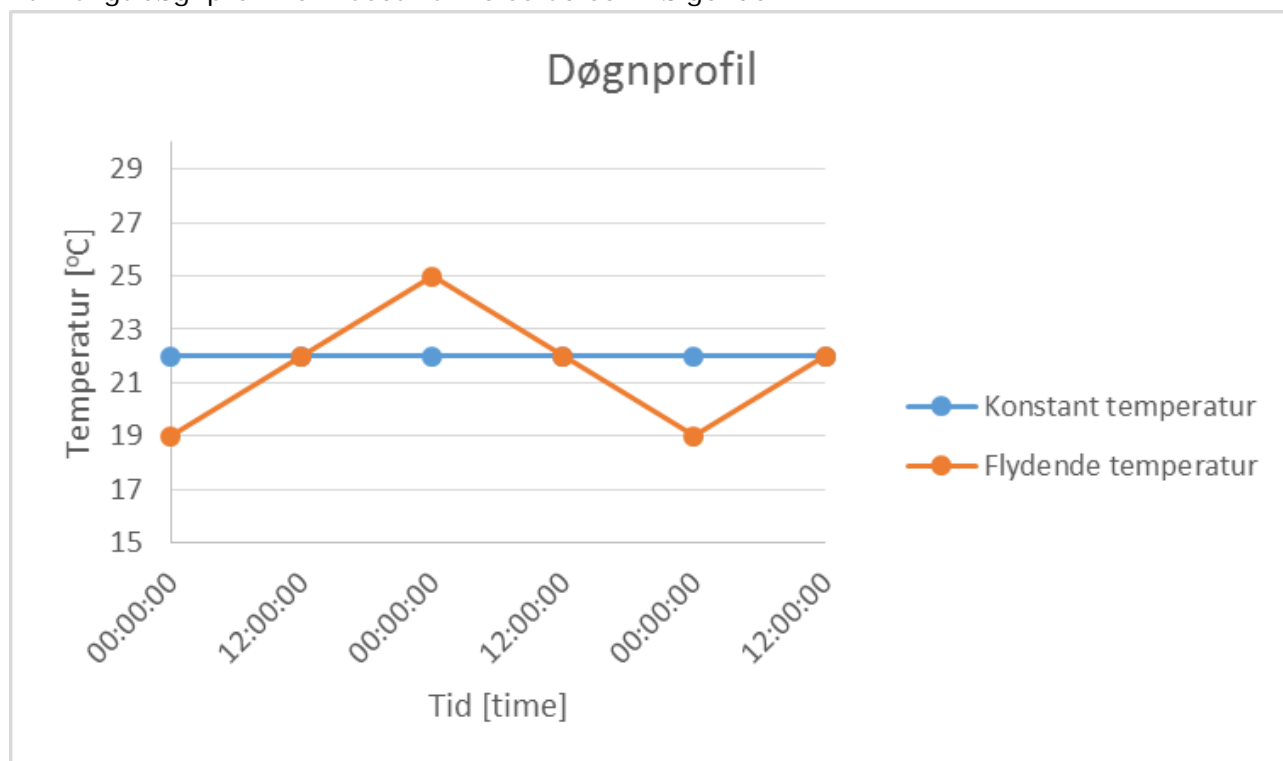
Iht. DS 1752 er følgende værdier for minimal og maksimal temperatur i fyringssæsonen angivet for tre indeklimakategorier:

Kategori	Temperatur [°C]
A	22±1,0
B	22±2,0
C	22±3,0

Tabel 1: Projekteringskriterier for lokaler i forskellige typer bygninger.

Indeklimakategori A er den kategori, hvor færrest personer vil være utilfredse med indeklimaet og så fremdeles. Det vælges at tage udgangspunkt i kategori C velvidende, at procent utilfredse er større end i de andre kategorier. Dette vælges for, at temperaturbåndet er så stort som muligt for at øge husets fleksibilitet til varmelagring.

Et muligt døgnprofil for huset kunne se ud som følgende:



Figur 8-24: Mulig temperatur døgnprofil.

Ved fastholdelse af temperaturen skal der tilføres en konstant varmeeffekt, såfremt at den menneskelige påvirkning på temperaturen ikke medtages. Ved at lade temperaturer variere fås et temperaturbånd i dette tilfælde på 6 grader.

Huset kan således lagre følgende:

$$Effekt [kWh] = \frac{dage \cdot timer \cdot effekt}{maks. opnåelig temperaturstigning}$$

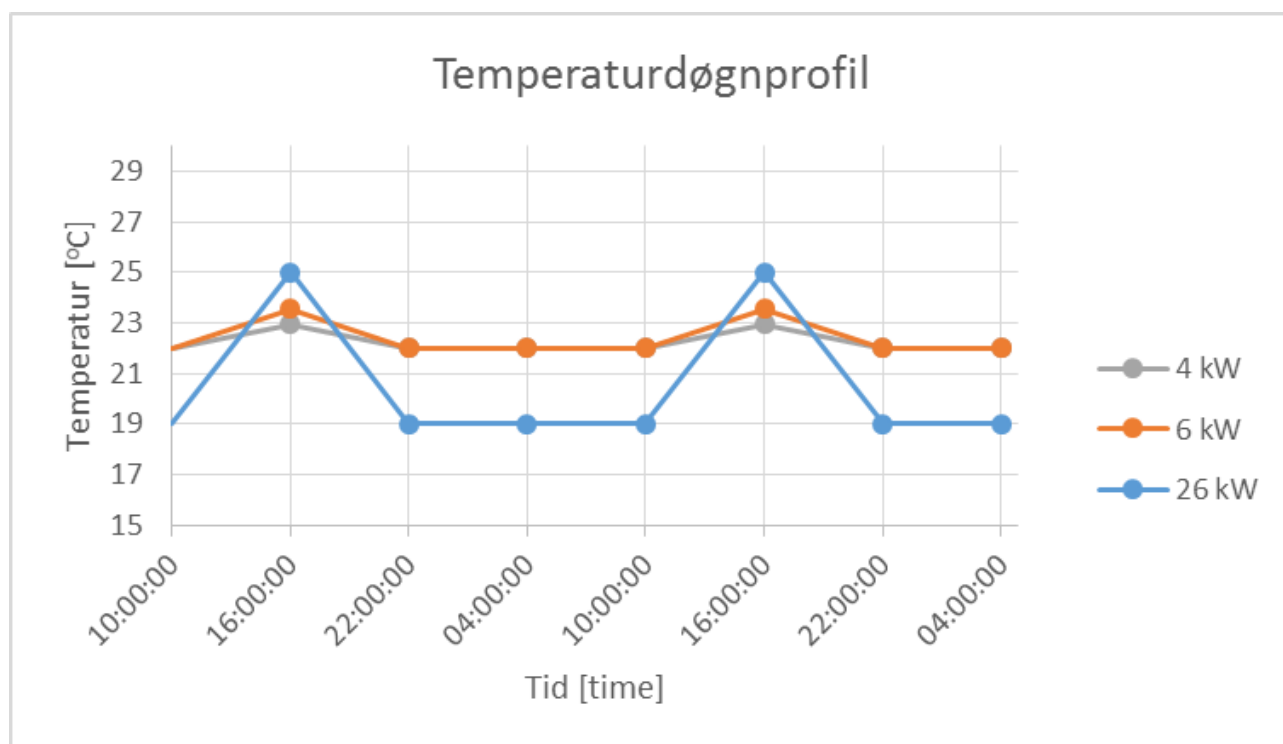
$$\frac{3,3\text{dage} \cdot 24\text{timer} \cdot 4\text{kW}}{12\text{ }^{\circ}\text{C}} = 26,4\text{ kWh/grad}$$

Dette giver en samlet varmelagringskapacitet på 159 kWh, når 6 grader anvendes som temperaturbånd. I så fald, at luftvarmeanlægget skal benytte hele temperaturbåndet på 6 grader vil det tage ca. 37,5 time for hhv. opladning og afladning.

Dette betyder, at fra huset er opladet til 25 grader kan der gå 37,5 timer før huset igen behøver at få tilført strøm (varmeeffekt). Dette gør huset utroligt fleksibelt i forhold til Smart-Grid.

Eksempler på temperaturprofiler

Der vises i det følgende tre temperaturprofiler varierende ift. den tilførte varmeeffekt. Luftvarmeanlægget kan som sagt levere 4 kW. Alternativt kunne anvendes et solcelleanlæg. Et solcelleanlæg til et enfamiliehus må maksimalt levere 6 kW. Normalt anvendes solcellestrøm dog ikke til opvarmning. Nedenstående figur viser eventuelle temperaturprofiler over døgnet.



Figur 8-25: Temperatur døgnprofil ved en tilført effekt på hhv. 6 og 19 kW.

Det antages, at både luftvarme- og solcelleanlægget producerer/leverer strøm i 6 timer over døgnet fra kl.: 10:00 til 16:00. Dette er en antagelse og såfremt en mere detaljeret beregning ønskes skal der tages udgangspunkt i Dry (Design Reference Year). Som det kan ses ud fra Figur 8-25, så udnyttes varmelagringspotentialen ikke tilnærmelsesvis ved at tilføre hverken 4 eller 6 kW. Kun en fjerdedel til en sjettedel af potentialen udnyttes. For at udnytte hele temperaturbåndet på de 6 grader, skal der tilføres en varmeeffekt på 26 kW med udgangspunkt i, at effekten stadigvæk leveres i 6 timer i døgnet. Denne kurve er ligeledes indtegnet i Figur 8-25.

Temperaturkurven er lavet på baggrund af den antagelse, at effekttilførslen kun vil ske i 6 timer af døgnet. Kurven vil i virkeligheden se meget anderledes ud end det viste, hvorfor figuren kun er et eksempel.

Effekttilførsel per måned

Forsøgene i nærværende notat er som sagt udført i januar og februar måned. Disse måneder er meget identiske med hensyn til middel udetemperaturen. Effekttilførslen på 159 kWh er kun gældende for disse måneder og vil variere i takt med, at udetemperaturen ændrer sig.

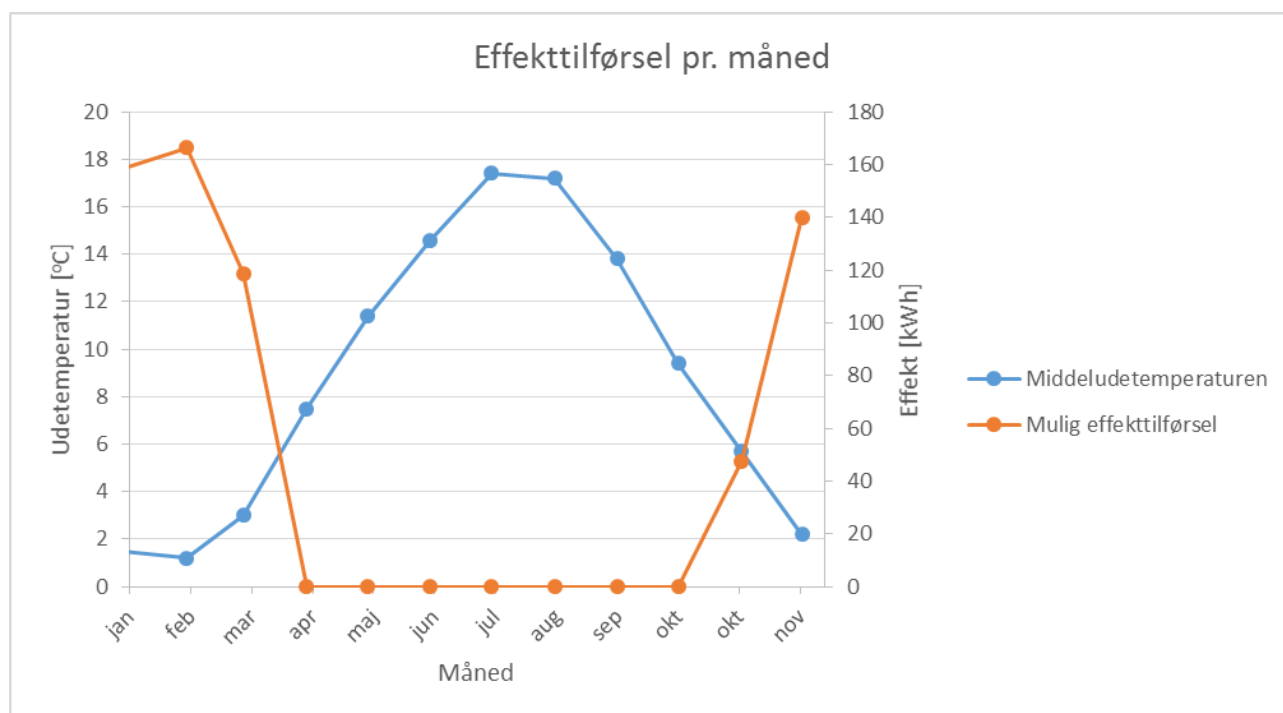
Hvis der tages udgangspunkt i DMI vejrnormaler mellem 2001-2010 fås følgende værdier:

Måned	Middeltemperatur [°C]	Måned	Middeltemperatur [°C]
Januar	1,5	Juli	17,4
Februar	1,2	August	17,2
Marts	3	September	13,8
April	7,5	Oktober	9,4
Maj	11,4	November	5,7
Juni	14,6	December	2,2

Tabel 2: 10 års vejrnormal for middeludetemperaturen for hele landet fra DMI.

Luftvarmeanlægget tiltænkes at stå for basisopvarmningen over hele året. Der tages derfor udgangspunkt i de 4 kW som luftvarmeanlægget kan levere. Dermed vil samme tidskonstant for huset på 0,16 grader/time være gældende.

Dette giver følgende effektvariation over året.



Figur 8-26: Effekttilførsel pr. måned over året afhængig af udetemperaturen.

I perioder med en udetemperatur på ca. 1,5 grader vil en effekttilførsel på 4 kW kunne opvarme huset til 19 grader. Dette er selvfølgelig med antagelse omkring, at yderligere

varmetab (infiltrationstab, ventilationstab mm.) og effekttilførsler (personer, elektroniske apparater mm.) udligner hinanden.

Som det ses ud fra Figur 8-26 kan der om muligt tilføres en mereeffekt end de 4 kW. Dette er afbilledet ved den orange kurve. Fra april til oktober måned medvirker udetemperaturen til, at luftvarmeanlægget på 4 kW kan opvarme huset op til 25 grader, som er sat til den maksimale tilladelige rumtemperatur. Derfor er der ikke brug en yderligere effekttilførsel i denne periode.

Vurdering

Forsøgene har vist, at henholdsvis opladning og afladning på 6 grader af et middel let hus med en varmekapacitet på ca. 80 Wh/K m² ved en middel udetemperatur på 1,5 grader tager ca. 37,5 time. Op- og afladningshastigheden er afhængig af udetemperaturen og varierer derfor over året. Nedenfor er op- og afladningstiderne angivet for de relevante måneder.

Måned	Op- og afladningstid [timer]
Januar	37,5
Februar	37,0
Marts	40,0
November	45,5
December	38,5

Tabel 3: Op- og afladningstid pr. måned.

Alle forsøg og beregninger er behæftet med en vis usikkerhed, eftersom der er foretaget en række antagelser, såsom at se bort fra andre tab end transmissionstabet og anden intern varmeeffekt i form af personbelastning etc.

9. Energiforbrug

9.1. Varmetab

I ventilationsanlæg med varmegenvinding, men uden varmefunktion, er det kun de varme kanaler der fører gennem uopvarmede områder og kolde kanaler der fører gennem opvarmede områder, der skal være isolerede.

Når luftvarme er inkluderet kan temperaturforskellen mellem indblæsning og omgivelserne af kanalen være så høj som 30 K. Temperaturfaldet fra varmegenvindingsaggregatet gennem luftvarmeaggregatet og indblæsningskanaler til indblæsningsarmaturet er derfor ikke længere negligerbar.

En uisoleret kanal leverer omkring en tredjedel af varmen langs kanalen og kun to tredjedele af varmen er tilgængelig i slutningen af kanalen. Hvis der anvendes en kanal med 1 cm isolering bliver den leverede varme langs kanalen halveret og i den sidste ende kommer der dobbelt så meget varme ud af kanalen.¹

For at undgå unødigt varmetab skal rørene isoleres iht. isoleringsklasse 1 med minimum 50 mm som anført i BR. En bedre løsning er fremføring af kanaler (metal spiro kanaler eller slanger) i eller under husets isolering på loft med Build up eller i det kapillarbrydende isoleringslag under gulv ved anvendelse af fremføring med slanger under gulv. Begge er kendte teknikker som producenterne har som lagervare i dag.

Isolering kan reduceres eller udelades så længe kanalerne holdes inden for klimaskærmen, da et eventuelt varmetab vil være boligen til gode. Dog kan det være en fordel at isolere for at undgå store ukontrollerede varmeflader.

9.2. Analyse af termografi billeder

For at få en ide om hvor stort et varmetab der er i kanalerne, er der taget termografi billeder af hele opstillingen med et Testo 890 termokamera.

¹ Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of Passive House concept. Wolfgang Feist et al. Energy and Buildings 37 (2005) 1186-1203.

Som kan ses på billedet ovenfor, bliver langt størstedelen af den varme luft leveret fra den ene indblæsningskanal, hvilket resulterer i et større varmetab. Dette er hovedsageligt et problem hvis indblæsningskanalerne ligger frit på loftet, da det vil kræve ekstra isolering for at undgå unødigt varmetab. Det anbefales derfor at gå over til en enkelt kanal og gå et par standardkanaldiametre op hvis indblæsningskanalerne trækkes på loftet.

Hvis der er tale om nybyg kan flexslangerne lægges i det isolerende lag i væg, gulv eller loft. Det er her vigtigt at slangerne placeres inden for klimaskærmen så der ikke opstår et unødigt varmetab. Det er også vigtigt at slangerne placeres således at temperaturreguleringen i de individuelle rum ikke kompromitteres. Det betyder f.eks. at slangerne skal være tilstrækkeligt isoleret på vej ud til de individuelle rum så man er sikker på at hvert rum får den tiltænkte varmeeffekt. Det betyder også at der bør isoleres mellem slanger til forskellige rum, da de ellers ville påvirke hinanden.



9.3. Installation og drift

Med en maksimal luftstrøm fra recirkuleringsventilatoren på 700 m³/h giver dette 78 m³/h pr. kanal (9 kanaler) og en ønsket indblæsnings temperatur på maks. 40 grader giver dette en maksimal leveret effekt på 470 W pr. kanal ved en rum temperatur på 22 °C når der ses bort fra utætheder og varmetab undervejs.

$$\dot{Q} = c_p \rho \dot{V} \Delta T = 1005 \cdot 1,2 \cdot \frac{78}{3600} \cdot (40 - 22) = 470 \text{ W}$$

hvis et rum bliver opvarmet af en enkelt kanal men varmebehovet overstiger de 470 W, vil varmebladens temperatur automatisk øges mod et defineret maksimum. Hvis der f.eks. er sat en maks. varmebladetemperatur på 55 °C, vil der med en varmebladeeffektivitet på 85% være en fremløbstemperatur på 55*0,85 = 46,75 °C og den maksimalt leverede effekt er da:

$$\dot{Q} = c_p \rho \dot{V} \Delta T = 1005 \cdot 1,2 \cdot \frac{78}{3600} \cdot (46,75 - 22) = 647 \text{ W}$$

Det bør undgås at varmebladens temperatur forøges da varmepumpens COP-værdi reduceres når forskellen mellem kondensator temperaturen og fordamper temperaturen øges.

Hvis man på forhånd ved at et rums maksimale varmebehov bliver over 470 W, bør man derfor parallelkoble to spjæld.

9.4. Fremløbstemperatur

Det kan være en fordel at overveje hvilken fremløbstemperatur der er nødvendig. Effektiviteten (COP) for varmepumpen øges når temperaturforskellen mellem kondensator- og fordamper temperaturen mindskes. Det kan derfor være en fordel at have en lav fremløbstemperatur. For at opnå den nødvendige varmeeffekt fra luftstrømmen er det derfor nødvendigt med en høj luftstrøm, hvilket vil øge elforbruget til ventilatoren men mindske varmetabet gennem kanalerne og varmen er derfor lettere at kontrollere.

Lav fremløbstemperatur

- Øget COP
- Høj luftstrøm
- Øget elforbrug af ventilator *
- Mindre varmetab

Høj fremløbstemperatur

- Lavere COP
- Lav luftstrøm
- Lavt elforbrug af ventilator *
- Øget varmetab

Selvom uisolerede kanaler holdes inden for klimaskærmen, vil det være en fordel at isolere dem, så der ikke opstår for store ukontrollerede varmeflader i huset.

Ved brug af data fra målingerne af effekt og temperatur i Energy Flex Office har det været muligt at lave en energioptimeringsberegning på fremløbstemperaturen. Denne beregning er implementeret i det udviklede beregningsprogram TI-SIM_luftvarme til dimensionering af luftvarmeanlæg til nybyggeri.

*) Recirkuleringsventilatorens elforbrug er kun 83W i det gennemregnede eksempel for et hus på 140 m². Der er her tale om en højeffektiv ventilator med PM motor.

10. Beregningsværktøj

Ved valg af luftvarme til opvarmning og ventilation i boliger er der visse ting man skal være opmærksom på. For at sikre optimal projektering er der udviklet et beregningsværktøj, *TI-SIM_bolig_VP_version01*.

En tvingende nødvendighed for at sikre systemets succes er kendskab til boligens enkeltes rums varmebehov iht. orientering, brug og isolans, for korrekt dimensionering og kapacitet. BE 10 kan ikke anvendes da dette regner på husniveau. Varmebehovet kan simuleres med en BSIM beregning, men da dette ofte er komplekst og omkostningstungt er der udviklet et simulerings- og beslutningsstøtte værktøj som kan anvendes til dimensionering af et luftvarmeanlæg til opvarmning og ventilation.

Der er udviklet et excel-baseret simulerings- og beslutningsstøtte værktøj til fastlæggelse af den optimale driftsstrategi. Værktøjet belyser forskellige strategiers indflydelse på energiforbrug og indeklima og giver brugeren input ifm. valg af den optimale årstidsvarierende luftfordeling, styrings- og indeklimastrategi med udgangspunkt i det eksisterende anlæg. Det sker ud fra input som:

- Orientering af rum/bygning
- Vindues og væg areal, rum størrelse
- Intern belastning (antal personer, udstyr, belysning mv.)
- Ekstern belastning (sol mv.)
- Solafskærmningseffektivitet
- Luftsifte

Værktøjet arbejder på rumniveau og kan summere op til 5 individuelle rum. Programmet kan eksempelvis anvendes i forbindelse med bygningsrenovering, hvor behovet for ventilation, opvarmning og køling er ændret markant, og hvor den optimale styringsstrategi skal fastlægges.

10.1. Dimensioneringsprocedure

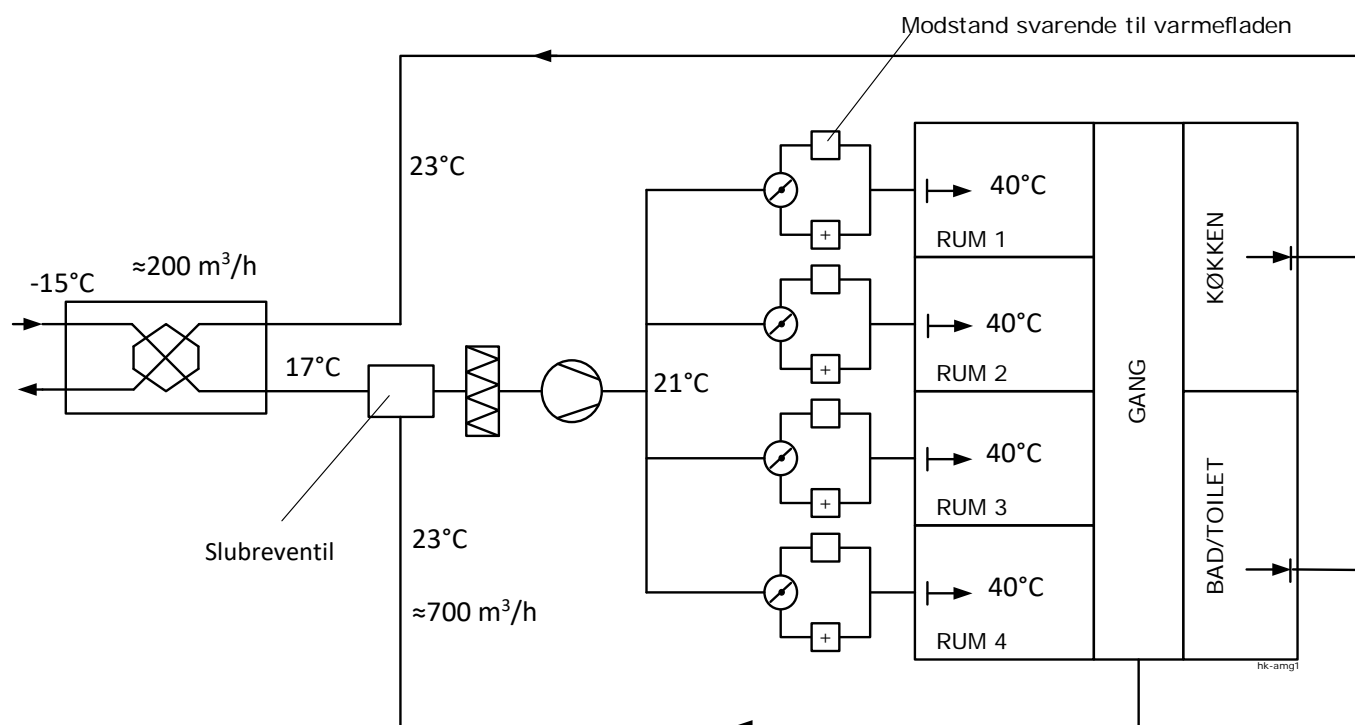
Varmepumpen og recirkuleringsventilatoren dimensioneres ud fra den pågældende bolig, hvor der intet *internt varmetilskud* fra sol, personer, belysning etc. er til stede. Der er kun varmetilskud fra den recirkulerende ventilator samt standby varme fra elapparater. Luftvarmeanlægget dimensioneres efter at kunne opvarme huset til 23°C på årets koldeste dag. Boligventilationsanlægget belaster bygningen med et varmetab da virkningsgraden for varmeveksleren ikke er 100%. For det i projektet anvendte varmegenvindingsaggregat er virkningsgraden 85%.

Varmepumpen dimensioneres til at kunne yde det nødvendige varmetilskud på den koldeste dag på året med lavest mulig (gratis) varme fra husets brug. Der regnes ikke med ekstra kapacitet til genopvarmning af bygningen, da der dimensioneres efter årets koldeste dag. Resten af året vil der være overkapacitet til stede.

Programmet foretager ved hjælp af de indtastede brugerdata en traditionel simplificeret varmetabsberegning

Varmetabet er beregnet som tab gennem ydervægge, gulv, loft og vinduer samt infiltration/naturlig ventilation på 0,1 h-1.

Ved det givne varmebehov er luftvarmeanlæggets mulige varmeeffekt bestemt af den øjeblikkelige luftstrøm og temperaturdifferensen mellem indblæsningsluften fra luftvarmeaggregatet ($T_{\text{luft_ud}} \approx 40^{\circ}\text{C}$) og indblæsningstemperaturen til luftvarmeaggregatet ($T_{\text{luft_ind}} \approx 21^{\circ}\text{C}$) idet rumtemperaturen er regnet til 23°C .



Figur 10-1: Dimensionerende temperaturer for luftvarmeanlægget på årets koldeste dag

For at opnå højest mulig COP værdi (bedst mulig effektivitet af varmepumpen) forudsættes det at varmepumpens hovedventil kan styres således at kondensator temperatur bliver lavest mulig, så varmepumpens ydelse er eksakt lig med varmebehovet for huset.

Varmepumpens driftsmuligheder dimensioneres svarende til det største varmebehov for bygningen. Det faktiske varmebehov bliver (for det meste af døgnet) mindre grundet tilskudsvarme fra personer, sol, edb, etc. Varmepumpen skal over varmesæsonen styres til at holde lavest mulige kondensator temperatur for at opnå højest mulig COP værdi. Af driftsmæssige årsager bør temperaturforskellen mellem fordamper og kondensator ikke være over 60°C eller under 20°C . Af hensyn til normale tab i varmepumpen er den beregningsmæssige COP værdi begrænset til maksimalt 8.

I velisolerede bygninger vil der ved normal brug først opstå et varmebehov ved relativt lave udetemperaturer, fx 10°C . Dette bevirker at varmepumpen oftest arbejder i timer på året hvor differensen mellem kondensator temperaturen og udløbstemperaturen er relativ høj svarende til lave værdier af COP.

For en bolig med luftvarmesystem med recirkulation vil det være således at varmetilskud i et rum returneres til slubreventilen og kan komme køligere rum til gode. Dette giver en

ekstra energibesparelse, denne værdi er dog svær at estimere. I dette projekt estimeres værdien til 5%. En almindelig dansk familie bruger i gennemsnit omtrent 4000 kWh om året. En lille del af denne varme går tabt gennem emhætten, men den resterende varme kommer boligen til gode. Systemet er det første på markedet der er i stand til at bruge gratis varme via varmekyldning og kontinuerligt regulere efter optimal COP.

Eksempel:

For et hus på 140 m² og 2,5 meter rumhøjde er husets indre volumen ca. 350 m³, ved et luftskifte på 0,1 h⁻¹ vil luftstrømmen være 350 * 0,1 m³/h. Hvilket ved en udetemperatur på -12°C og en indetemperatur på 22°C vil give et varmetab på $(35 \cdot 0,34 \cdot (22 - (-12)))$ 405W. Selvom bygningen muligvis er tættere formodes det at bygningen over tid vil ældes og tætheden dermed forringes. Generelt kan alle værdier ændres i programmets indtastningsfelter.

For boligen i dette eksempel er der ifølge Bygningsreglementet en fugtbetinget luftstrøm på 198 m³/h. Ved anvendelse af fugtfølere og fugtregulering af udsugningen kan dette forventes reduceret til 151 m³/h, de fleste af døgnets timer. Dette vil reducere varmebehovet yderligere.

Demoeksempler:

Programmet indeholder to demoeksempler med indtastede default værdier. Et eksempel uden solvarme, persontilskud og belysning og et eksempel hvor tilskudsvarmen er medregnet.

Recirkuleringsluftstrøm (m³/h) er med demoeksemplet beregnet til 709 m³/h. Dette dækker behovet for opvarmning på årets koldeste dag og ingen varmetilskud. I projektrapporten er styringen af hovedluftstrømmen omtalt. De sidste gennemregninger med TI-sim programmet har dog vist at det af hensyn til opretholdelse af en høj COP værdi har været fordelagtigt at køre med en høj luftstrøm i fyringssæsonen. Idet den til dækning af varmebehovet nødvendige opvarmningstemperatur og dermed kondensatortemperatur på varmepumpen kan holdes på den lavest mulige værdi med højst mulig COP time for time.

Gennemregning af luftstrøm leveret til opvarmning

Der er lavet gennemregning af energibehovet til opvarmning med luftvarme hvor den maksimale luftstrøm (700 m³/h) blev reduceret lineært fra den laveste udetemperatur (-15°C) til den udetemperatur hvor der ikke er brug for opvarmning (18°C). I denne situation er bygningen tom. Luftstrømmen er herefter sat til 2 gange boligventilationsaggregatets ydelse (400 m³/h) -ved udetemperaturer over 18°C.

I en anden gennemregning af energibehovet er der foretaget en kørsel med maksimal luftstrøm fra laveste udetemperatur til en udetemperatur på 5°C. Gennemregningen bibeholder her den høje luftstrøm indtil en udetemperatur på 5°C. Hvorefter luftstrømmen reduceres lineært med udetemperaturen til en udetemperatur på 18°C. Derefter er luftstrømmen sat til 2*boligventilationsaggregatets ydelse.

Energiforbrugene i de to tilfælde er stort set ens, men COP værdien har i overgangsperioden fra 5°C til 18°C været lidt større ved den høje luftstrøm til gengæld er elforbruget til ventilatoren større. Af hensyn til muligheden for varmekyldning må det vurderes at den

høje luftstrøm i hele opvarmningssæsonen er fordelagtig da varmeoverskuddet fra navnlig de mindre rum hvor der let sker en temperaturstigning ud over det ønskede vil bevirke at beboeren åbner vinduet.

Den store luftstrøm i hele varmesæsonen giver den tillægsfordel at temperaturen af luften i kanalerne er lavest mulig. Således at effekten af 'ureguleret varmeplade' er reduceret.

I version 2 af dette program vil der være mulighed for at optimere luftstrømmen ud fra yderligere simuleringer. Hertil kommer at et fugtstyret anlæg vil have et mindre tab til opvarmning af udeluften idet luftstrømmen kan reduceres i de ikke fugtbelastede timer. Ved anvendelse af et fugtstyret boligventilationsanlæg hvor der køres med højt sug i 3 ud af 24 timer vil luftstrømmen i det aktuelle demoeksempel reduceres fra 198 m³/h til 151 m³/h i 21 af døgnets timer. Dette giver et gennemsnitligt flow på 157 m³/h over døgnet. I dette tilfælde vil gennemsnitsflowet være 80% og give en el-besparelse.

Forudsætning for energibesparelse er en effektiv og intelligent styring af varmepumpen. Hvor kondensatortemperaturen er så lav som mulig til den lige netop kan dække varmebehovet. Den styres kontinuerligt over hele opvarmningsperioden.

Hvis dette luftvarmeanlæg skal anvendes til større boliger end 140m² vil hovedcirkulationsluftstrømmen øges. Ventilatoren skal vælges som en højeffektiv styret PM motor med en høj virkningsgrad på minimum 0.47 ved det ønskede flow og en trykdifferens mellem tryksiden og sugesiden på ventilatoren på 200 Pa.

10.2. Beregningsprocedure/manual

Dette program henvender sig til leverandører af luftvarmeanlæg som har kendskab til Excel og styring af varmepumper.

I tilfælde af uoverensstemmelser mellem program og rapport anbefales det at der primært lægges vægt på denne programbeskrivelse (15.02.17).

Formålet med programmet er at dimensionere luftvarmeanlægget til det specifikke hus.

Aktiver ark: Betjening

Herfra kan du hoppe rundt i programmets indtastningsfelter i indtastningsarket.

Normal rækkefølge er betjeningsfelt 1-5

Fra hvert betjeningsfelt er der en returknop til udgangspunktet

Betjeningsfelt 1¹: Inddatafelt for bygning og brug

Betjeningsfelt 2²: Persontimeskema

Betjeningsfelt 3²: Indtastning af boligventilationsaggregatet

Betjeningsfelt 4⁴: Andel af vinduesareal samt forhold mellem længde og bredde af huset

Betjeningsfelt 5⁵: Aktiveringsknapper til beregninger

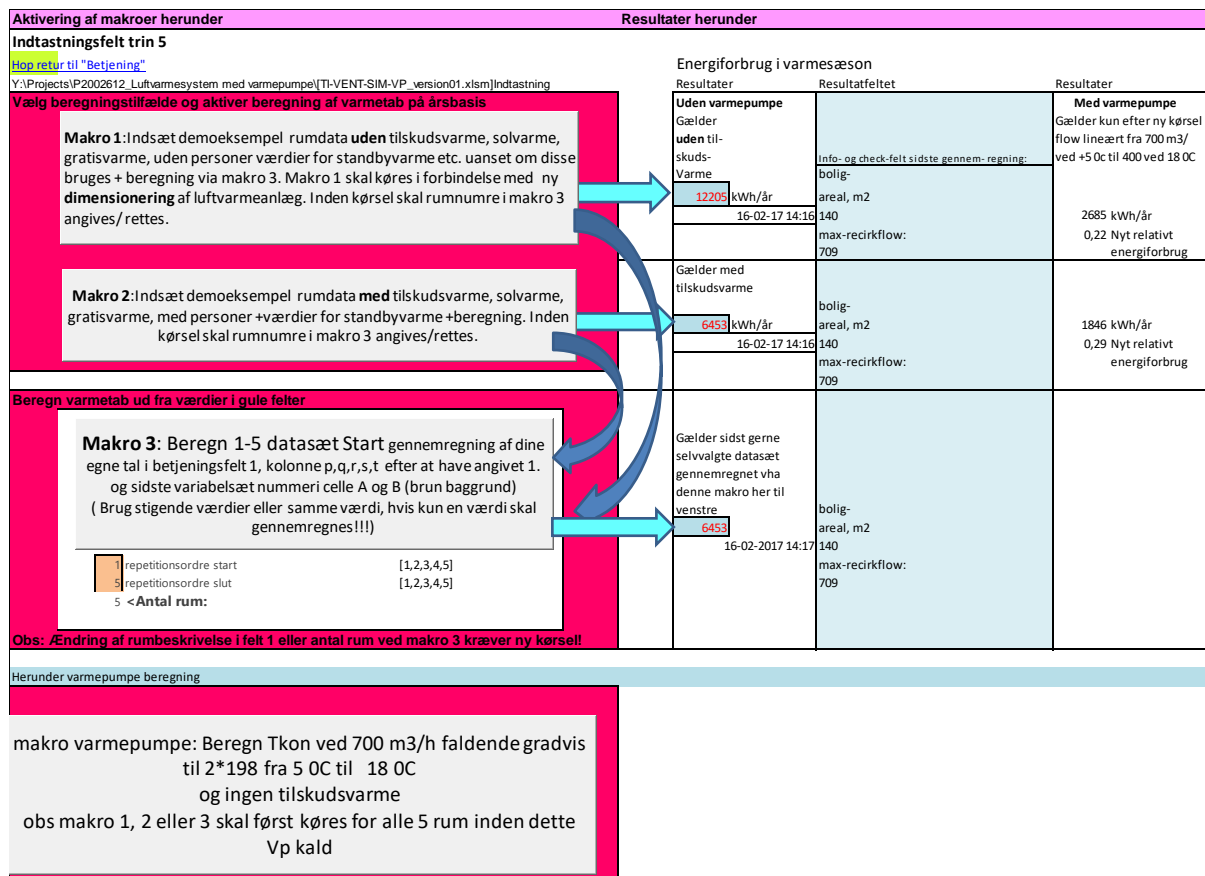
Makro 1: Dimensionerende luftstrøm for recirkuleringsventilatoren og årets energiforbrug uden brug af varmepumpe og uden varmetilskud

Makro 2: Årets energiforbrug med varmetilskud og 4 personer

Makro 3: Årets energiforbrug med egne indtastede tal

Makro varmepumpe⁶: Årets energiforbrug ved brug af varmepumpe

- 1) Indtastning af værdier for bygningens isoleringsevne samt personbelastning
120 W svarer til en voksen person.
G-værdi på 0,63 svarer til normale højisolerede ruder. Værdien svarer til at 63% af den solvarme der rammer ruden og transporteres indendørs og bidrager til opvarmning af huset. G-værdi på 0 bruges i det dimensionerende tilfælde når Makro 1 køres.
- 2) Indtastning af timer med personbelastning. Feltet er udfyldt med normale værdier.
- 3) Udfyldes ud fra fabrikantens beskrivelse. Beregning af arealbetinget luftstrøm tager i denne programversion udgangspunkt i BR. Det faktiske anlæg vil bruge mindre energi hvis der er mulighed for fugtstyring.
Idet boligventilationsaggregatets virkningsgrad er mindre end 1 (BR15 krav = 0,8) er der et varmetab til det fri, dette indgår også i beregningen.
- 4) Vinduesareal i andel af bygningens areal. Der regnes som default med et rektangulært hus.
- 5) Makro 1: Gennemregning af det tomme hus' energiforbrug i varmesæsonen uden varmetilskud fra personer, belysning og sol
Makro 2: Gennemregning af husets årlige energiforbrug med de i skema 1 angivne personantal, belysning samt solindfald
Makro 3: Hvis det ønskes at lave en beregning ud fra egne tal skal makro 3 anvendes. Disse udfyldes i kolonne 1-5 i betjeningsfelt 1 (i Excel kolonne P,Q,R,S,T).
Hvis man ønsker at gemme sine egne tal skal man manuelt kopiere felterne p58 til t73 til parkeringsfeltet til højre for indtastningsfeltet.
Makro varmepumpe: Kører på tomt hus. Aktivering af makroen gennemregner husets årlige energiforbrug til opvarmning med varmepumpe (el-opvarmet *2,5). Denne beregning tager omkring 1 time og aktiveres til sidst.
- 6) Elforbrug til varmepumpe, recirkuleringsventilator og varmegenvindingsaggregat.



Figur 10-2: Makroer til bestemmelse af energibegov til opvarmning med og uden luftvarmesystem

Luftstrømme og kanalstørrelser

Der er højest 200 Pa til rådighed mellem tryk- og sugeside af ventilatoren. Hvilket skal dække bidrag til tryktab fra indløbsfilter, tryktab gennem varmereguleringsventiler, varmefluden og navnlig kanaler samt returløb gennem overstrømningsventiler fra rum med indblæsning til luftførende gangarealer til slupreventil og retur. Dette kræver at der foretages beregning af tryktab i kanaler og at kanalføringen planlægges og at der fra dimensioneringen må regnes med flere kanaler til rum med størst varmetab. En central placering af luftvarmeanlægget må regnes fordelagtigt for at undgå unødvendige tryktab til kanalføring.

Hvis et BR 15 hus på den koldeste dag i året (-12°C) skal opvarmes med et luftvarmeanlæg med en valgt indblæsningstemperatur på 40°C og en rumtemperatur på 23°C skal luftstrømmen hertil være ca. 700 m³/h.

Dette svarer til en cirkulær hovedkanaldiameter med indvendig dimension på:

Lufthastighed	Antal kanaler				
i kanal	1 kanal fører hele luftstrømmen	2 kanaler fører hver halvdelen af luftstrømmen	1 kanal fører 1/8 af luftstrømmen	1 kanal fører 1/10 af luftstrømmen	Pd ([Pa])

2,5 m/s	315 mm	200 mm	110mm	100 mm	3,75
3,5 m/s	250 mm	160 mm	90mm	80 mm	7,35

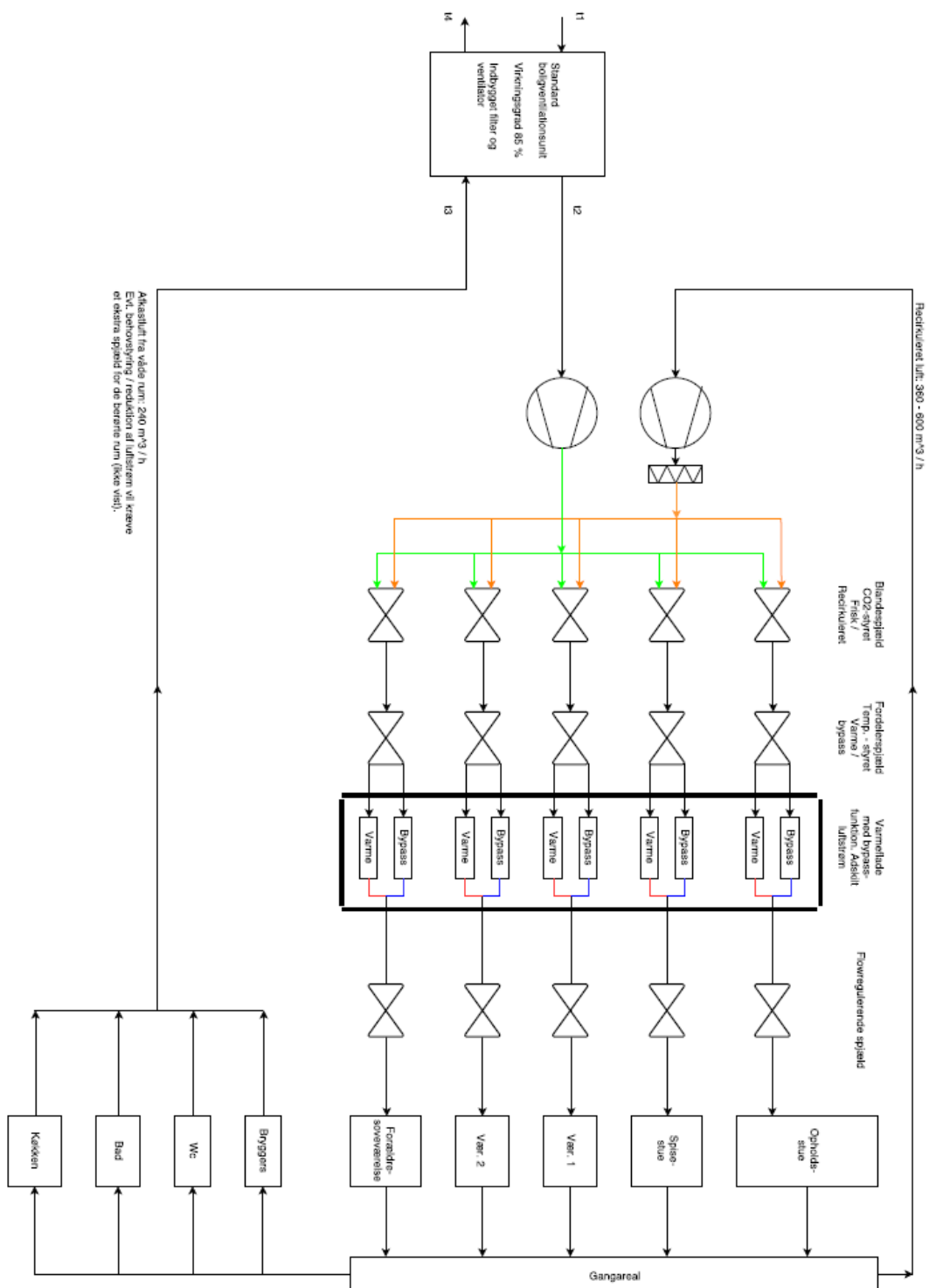
Bygningsreglementets krav med hensyn til transportenergi (SEL på maksimalt 1000 W per m³/s) må fraviges, da beregningen refererer til den indsugede luftstrøm, og SEL kan derfor ventes overskredet med en faktor 2-3 i timer på højeste driftstrin. Anlægget skal i denne henseende betragtes som et varmeanlæg.

Der skal installeres lyddæpende overstrømningsventiler fra rum med indblæsning til gangareal eller stort opholdsrum. I visse tilfælde kan en diskret lyddæmper med net placeres på ind- og udløb.

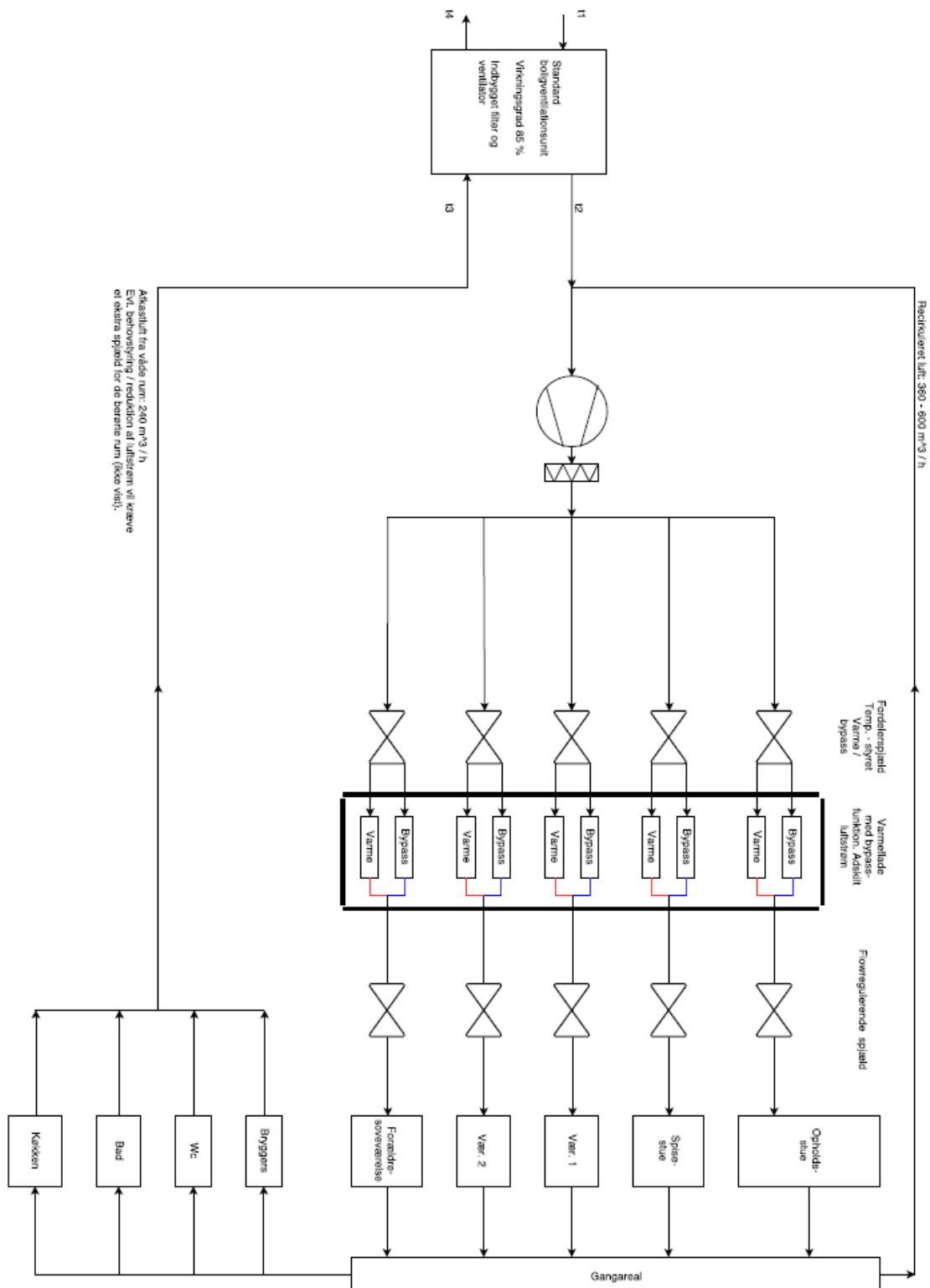
11. Bilag

11.1. Bilag 1

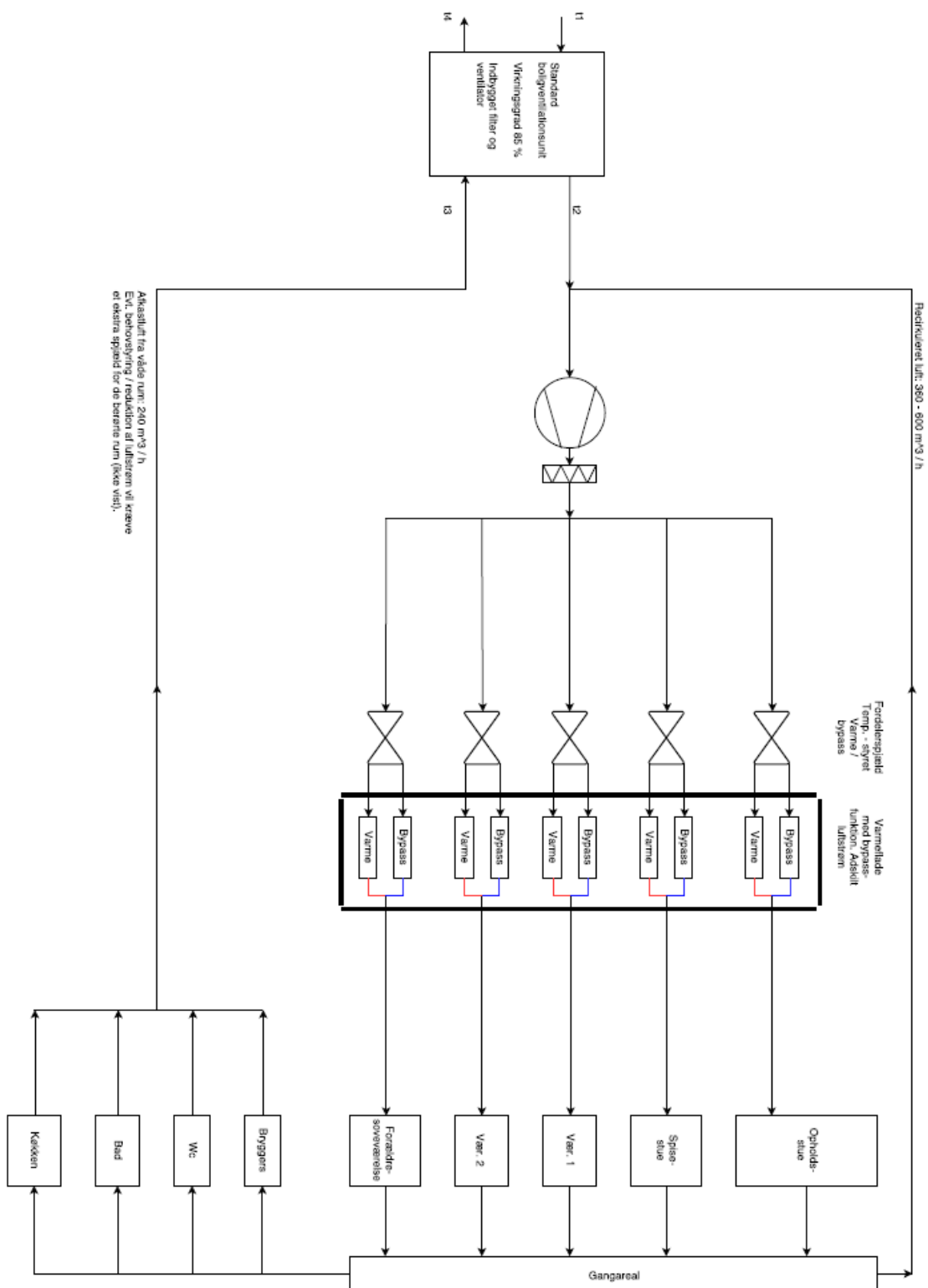
Koncept 1: Avanceret



Koncept 2: Udvidet



Koncept 3: Simplet



11.2. Bilag 2

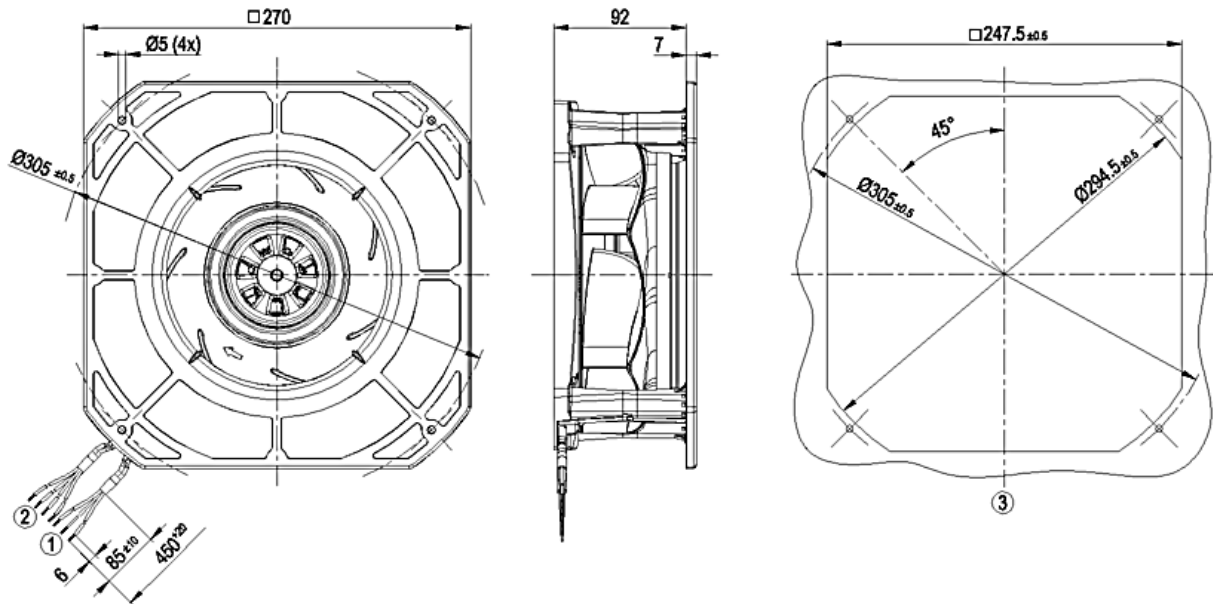
K3G220-RC05-03

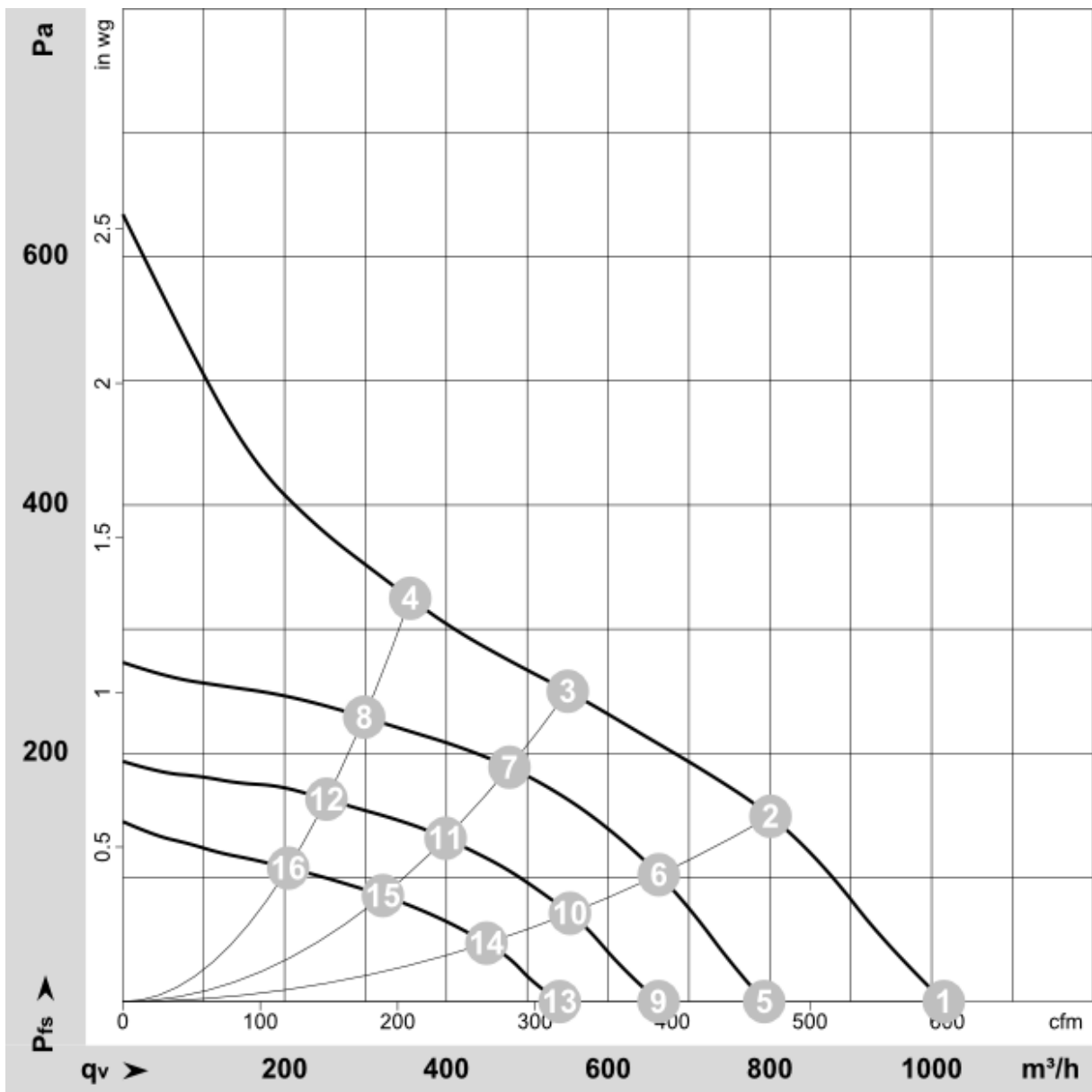
EC centrifugal module - RadiCal

Motor: M3G055-BI



Technical description	
Weight	1.8 kg
Fan size	220 mm
Rotor surface	Thick-film passivated
Electronics housing material	Die-cast aluminum
Impeller material	PA plastic
Housing material	PA plastic
Number of blades	7
Direction of rotation	Clockwise, viewed toward rotor
Degree of protection	IP54
Insulation class	"B"
Max. permitted ambient temp. for motor (transport/storage)	+ 80 °C
Min. permitted ambient temp. for motor (transport/storage)	- 40 °C
Installation position	Any
Condensation drainage holes	None, open rotor
Mode	S1
Motor bearing	Ball bearing
Technical features	- Output 10 VDC, max. 1.1 mA - Tach output - Power limiter - Motor current limitation - Soft start - Control input 0-10 VDC / PWM - Control interface with SELV potential safely disconnected from the mains - Overvoltage detection - Thermal overload protection for electronics/motor - Line undervoltage detection
EMC immunity to interference	According to EN 61000-6-2 (industrial environment)
EMC circuit feedback	According to EN 61000-3-2/3
EMC interference emission	According to EN 55022 (class B, household environment), the application may require ferritic damping in the cable due to the conditions of installation.
Touch current according to IEC 60990 (measuring circuit Fig. 4, TN system)	<= 3,5 mA
Motor protection	Locked-rotor protection
with cable	Variable
Protection class	I (with customer connection of protective earth)
Conformity with standards	EN 60335-1 / CE
Approval	CCC / UL 1004-7 + 60730 / C22.2 No.77 + CAN/CSA-E60730-1





Measured values

n	P _e	I	LpA _{in}
in min ⁻¹	in W	in A	in dB(A)
2816	85	0,7	63
2661	85	0,7	59
2580	85	0,7	57
2619	85	0,7	60

11.3. Bilag 3

Effektivitet af varmeblade

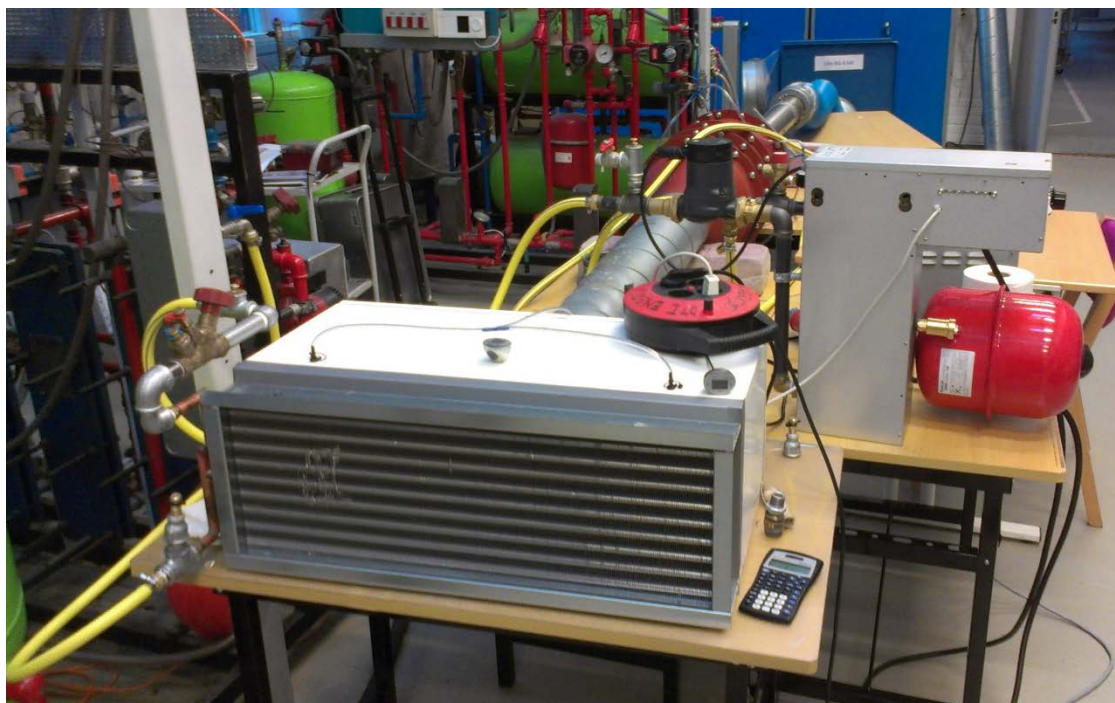
Til design af luftvarmeanlægget er det vigtigt at kende varmebladens effektivitet, da denne vil have direkte indvirkning på kondensator temperatur og dermed COP-faktoren for varmepumpen.

Forsøg

Der er blevet konstrueret en forsøgsopstilling til måling af flow gennem varmeblade. Varmebladen er tilsluttet en elkedel og påfyldt vand. Til cirkulation af vandet bruges en Grundfos pumpe på sin maks. flow indstilling. Varmelegemet er tilsluttet gennem en 3-faset faseklipper og tilhørende strømforsyning til styresignal. Den indbyggede termostat i elkedlen går kun op til 40 °C, så for at undgå at varmelegemet slår fra udføres alle målinger med en vandindløbstemperatur på ca. 36 °C hvilket opnås ved at justere inputs-effekten med faseklipperen. Fire Testo termometre bruges til måle temperatur på hhv. ind- og udløbstemperaturen på både vand og luft gennem varmebladen.

Fremgangsmåde

Alle fire temperaturer måles ved forskellige flow og effektiviteten for varmeveksleren kan dermed beregnes. UA kan beregnes ud fra designligningen og dermed kan NTU bestemmes for den givne varmeveksler. Når NTU er kendt kan vi beregne effektiviteten for varmebladen hvis den bliver anvendt som kondensator i en varmepumpe.

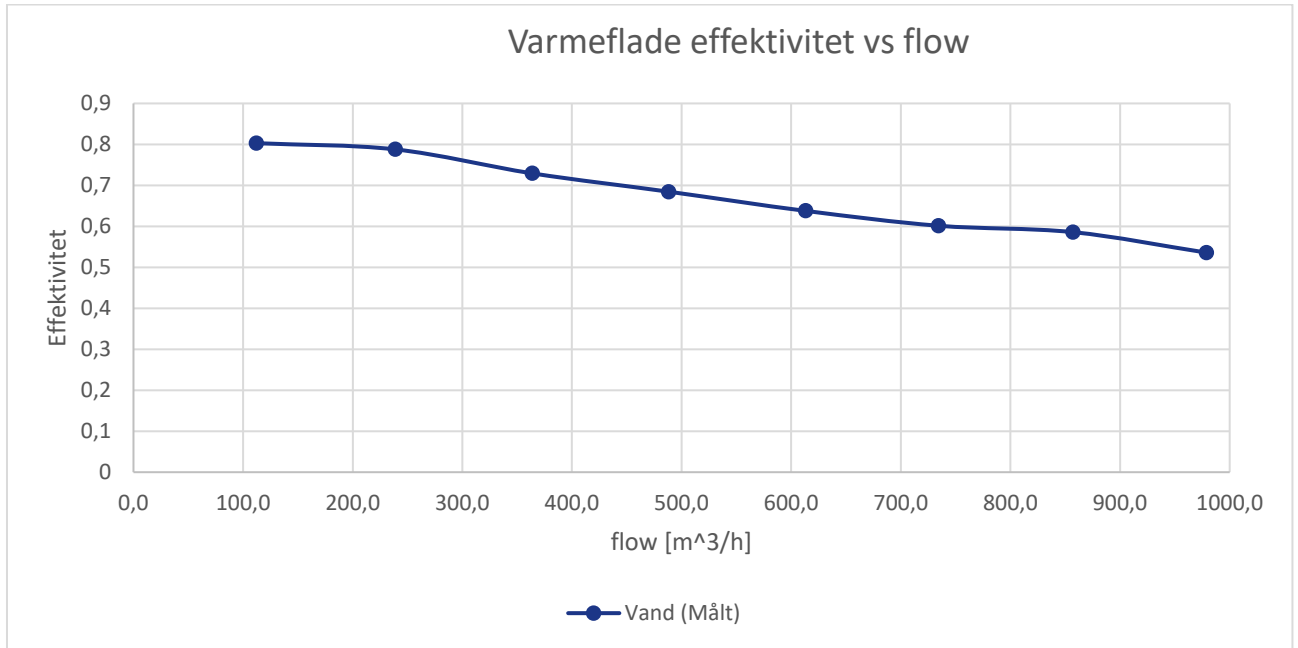


Apparatur:

- TSI trykmåler
- DPM trykmåler (flow)
- 4x Testo termometer
- 9kw el-kedel
- Faseklipper til justering af el-effekt

- Grundfos Alpha2 cirkulationspumpe
- Venturi flowmåler

Resultater:

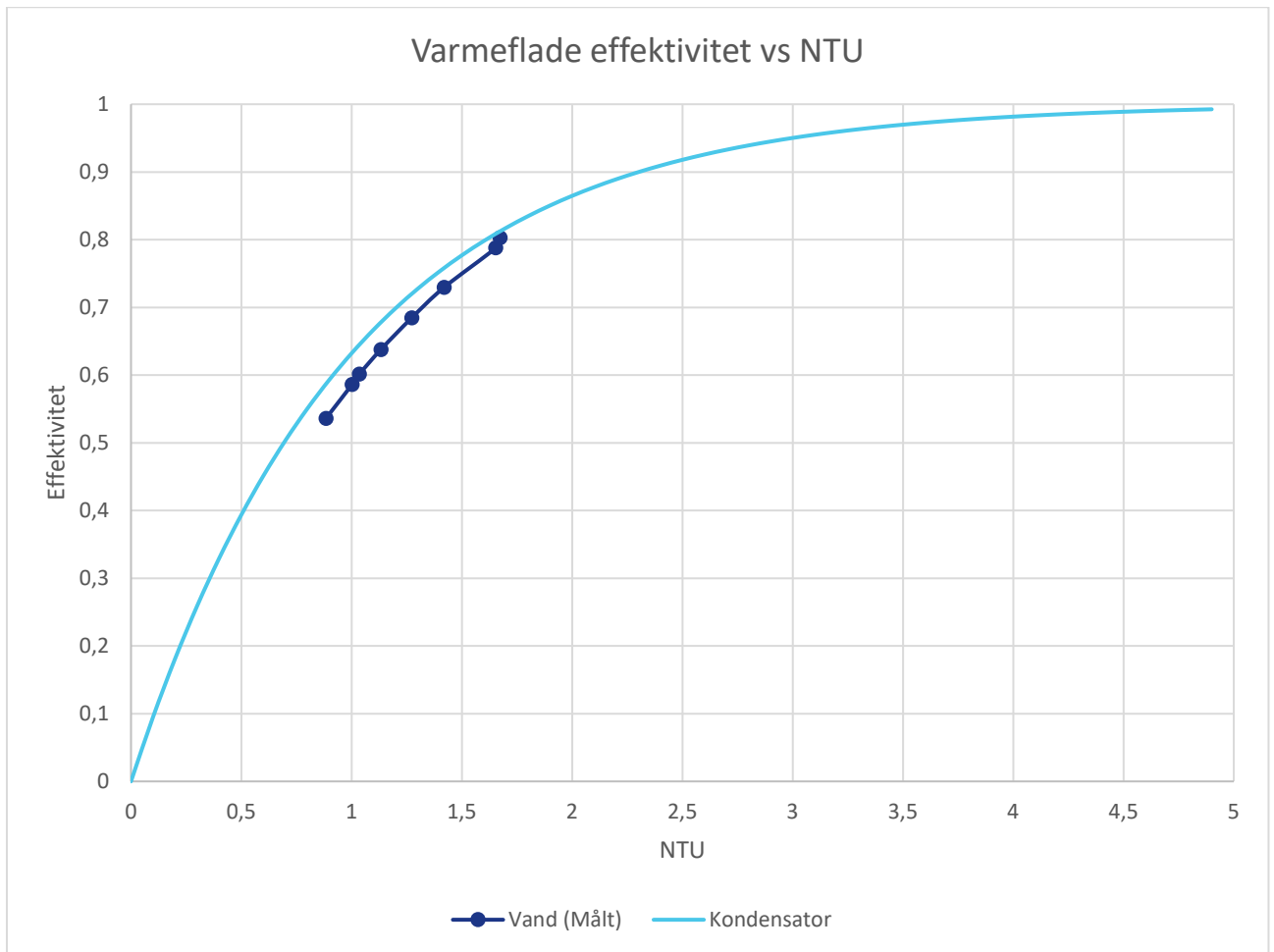


Vi kan se på grafen at ved vores ønskede flow på 650 m³/h har vores varmevlade kun en effektivitet på ca. 62%. Dette er vel og mærke ved en overført effekt på knap 2 kW, så ved de ønskede 3700 kW er effektiviteten endnu lavere hvis flowet på vandet forbliver det samme.

Da vi i forsøget har anvendt vand som kølevæske er der en temperaturforskel på ind- og udløbet i modsætning til en kondensator som har konstant temperatur over hele varmevladen. Dette betyder at den målte effektivitet er lavere end den ville være hvis det var en varmepumpe som afgav effekten. For at korrigere for dette beregnes NTU. Effektiviteten for varmevladen, opererende som kondensator i en varmepumpe, beregnes ud fra følgende ligning.

$$E = 1 - e^{-NTU}$$

Vi plotter nu effektiviteten som funktion af NTU for hhv. vand og kondensator.



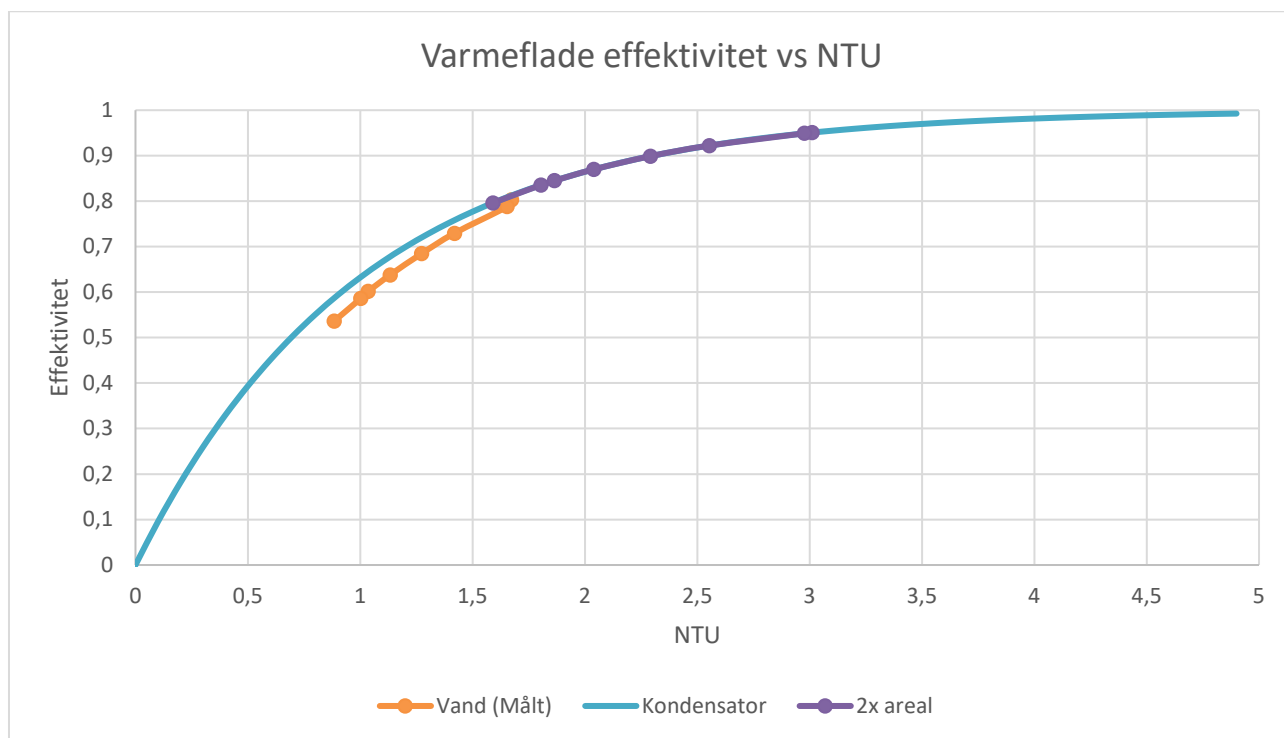
Af hensyn til COP-faktoren for varmepumpen ønsker vi en lav kondensatortemperatur hvilket betyder at vi ikke kan tillade en varmevekslereffektivitet på under 85% ved maksimal belastning (650 m³/h).

Med vand som kølemiddel målte vi en effektivitet på varmefladen på ca. 62% ved et luft flow på 650 m³/h. Dette svarer til en NTU på ca. 1-1,1 og som man kan se på ovenstående diagram skal vi op på en NTU på ca. 2 for at komme over 85% med en kondensator.

Hvis vi skal op på en NTU på 2 ved det samme flow (650 m³/h), kan vi ud fra definitionen på NTU se, at eftersom U og C_{min} afhænger af flowet, er den eneste parameter vi kan ændre arealet A.

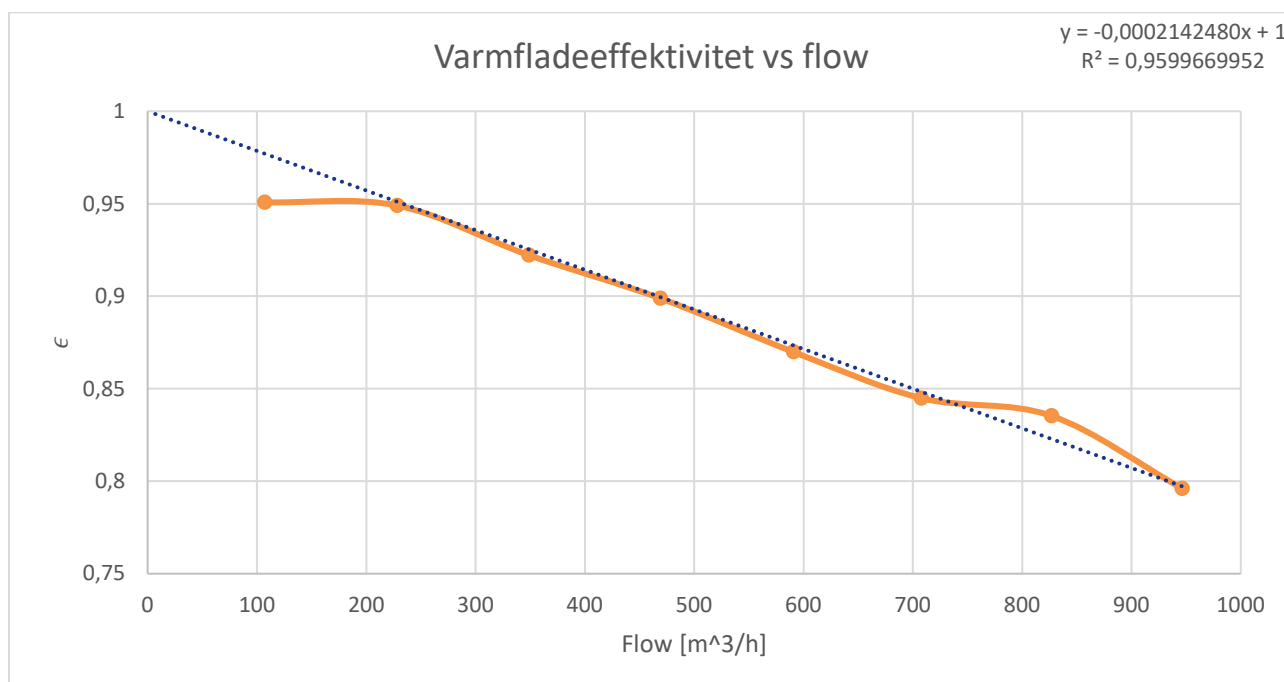
$$NTU = \frac{UA}{C_{min}}$$

Vi har altså brug for en varmeflade som har et dobbelt så stort areal som den vi har målt på.



For en kondensator med dobbelt areal af den målte, vil varmemeflade effektiviteten ligge på mellem 0,85 og 0,95 ved 700-100 m³/h respektivt.

Der lavet en regression på disse tal til brug i energiberegningerne.



Punkterne følger tilnærmelsesvis en lineær tendens og vi ved at effektiviteten må være 1 ved et flow på 0 m³/h.

Dette giver en regression med følgende udtryk.

$$\epsilon(\dot{V}) = 1 - 0,0002066512 * \dot{V}$$

Hvor \dot{V} er flowet i m³/h.

Design Ligning for Varmevekslere

$$Q_H = UA \frac{(\Delta T_2 - \Delta T_1)}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} = UA \Delta T_{lm}$$

NTU (Number of Transfer Units) er defineret som:

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}}$$

Effektiviteten E og forholdet mellem varmekapaciteterne C_R er defineret som hhv.

$$E = \frac{Q_H}{Q_{max}}$$

$$C_R = \frac{C_{min}}{C_{max}}$$

Hvis $C_R = 0$ f.eks I fordampere eller kondensator gælder følgende:

$$E = 1 - e^{-NTU}$$

C_{min} og C_{max} beregnes ud fra følgende ligninger:

$$C_{min} = \dot{m}_{luft} \cdot c_{p,luft}$$

$$C_{max} = \dot{m}_{vand} \cdot c_{p,vand}$$

Q_H og Q_{max} kan beregnes som:

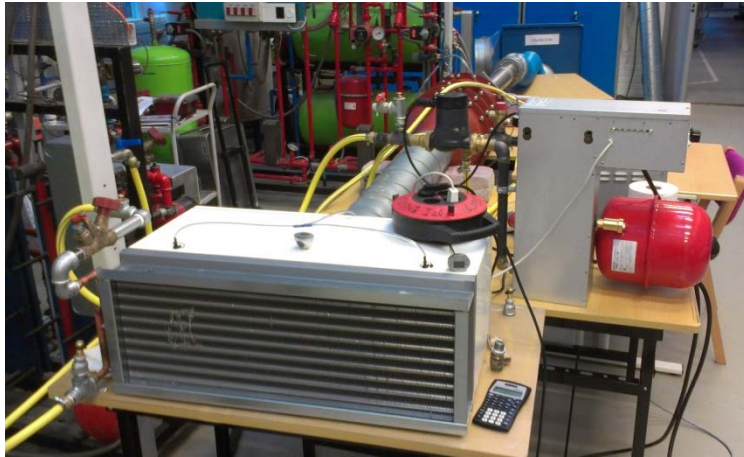
$$Q_H = \dot{m}_{luft} \cdot c_{p,luft} \cdot \Delta T_{luft}$$

$$Q_{max} = \dot{m}_{luft} \cdot c_{p,luft} \cdot (T_{vand,ind} - T_{luft,ind})$$

11.4. Bilag 4

Tryktab over varmeblade

Til at suge igennem varmebladen er der blevet bygget en kasse som passer uden på varmebladen. På indersiden af kassen er fastmonteret en ILRU som sikrer jævnt flow.

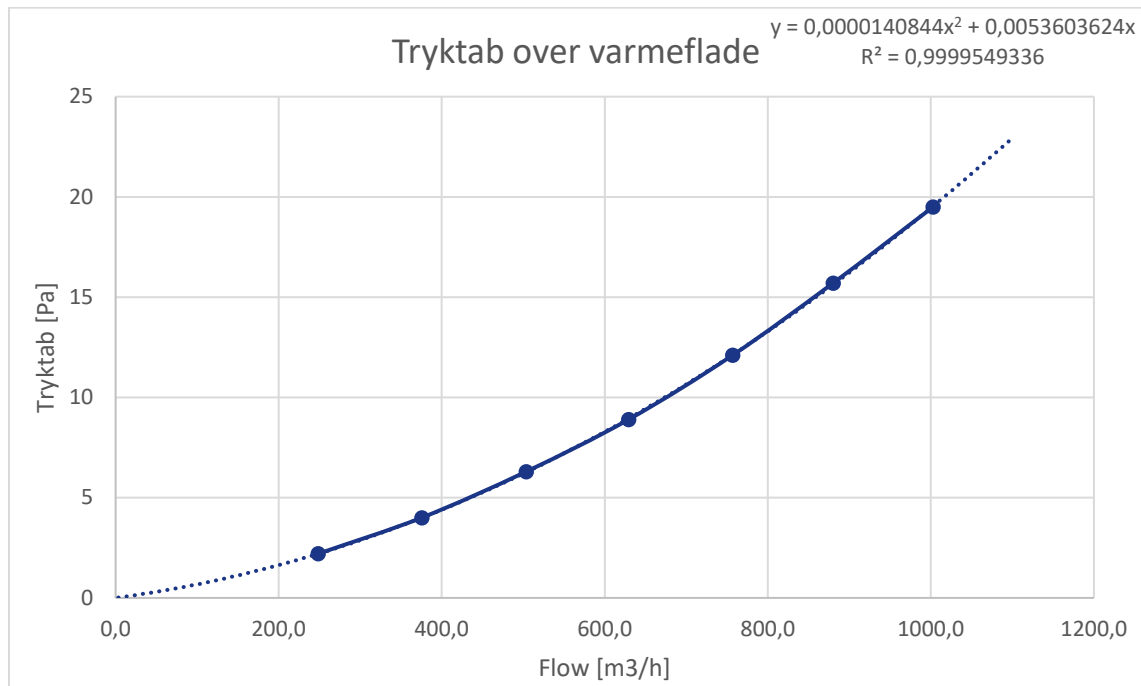


Der er boret huller til at måle statisk tryk for at sikre at der er samme tryk i begge ender af kassen. Til måling af flow anvendes venturi dysen med den store rørdiameter.

Apparatur

- DPM trykmåler
- 2x TSI trykmålere
- Lille blå ventilator

Resultater



11.5. Bilag 5

Beregning af vandindhold

I de udførte fugt-forsøg blev både temperatur og relativ fugtighed målt. Da temperaturerne i rummene ikke nødvendigvis er ens, kan den målte relative fugtighed ikke bruges til direkte sammenligning mellem rummene og af denne årsag beregnes vandindholdet x .²

x er forholdet mellem massen af vand og massen af luft og er derfor et enhedsløst tal.

$$x = \frac{m_v}{m_l}$$

$$\varphi = \frac{p_d}{p_{dm}}$$

x kan beregnes ud fra følgende formel.

$$x = 0,62198 \cdot \frac{\varphi \cdot p_{dm}}{p - \varphi \cdot p_{dm}}$$

Til beregning af p_{dm} kan følgende formel bruges i temperaturintervallet $0^\circ\text{C} \leq T \leq 80^\circ\text{C}$ med bedre end 0,15 % nøjagtighed.

$$p_{dm} = e^{23,5771 - \frac{4042,9}{T - 37,58}}$$

For $-50^\circ\text{C} \leq T \leq 250^\circ\text{C}$ er der brug for en lidt mere kompliceret formel.

$$p_{dm} = 101325 \cdot 10^A$$

$$A = A_0 - \frac{A_1}{T} - A_2 \cdot \log T - A_3 \cdot 10^{-\frac{T}{A_4}} + A_5 \cdot 10^{-\frac{A_6}{T}}$$

$$A_0 = 20,82648355 \quad A_1 = 2948,997118 \quad A_2 = 5,02808 \quad A_4 = 32,923061$$

$$A_5 = 25,21934913 \quad A_6 = 1302,8503$$

Nøjagtighed:

Bedre end 2,2 % for $-50^\circ\text{C} \leq T \leq 0^\circ\text{C}$

Bedre end 0,03 % for $0^\circ\text{C} \leq T \leq 80^\circ\text{C}$

Bedre end 0,5 % for $80^\circ\text{C} \leq T \leq 200^\circ\text{C}$

Bedre end 0,03 % for $200^\circ\text{C} \leq T \leq 250^\circ\text{C}$

Symboler:

x : Vandindhold [–]

φ : Relativ fugtighed [–]

p : Totaltryk (barometrisk) [Pa]

p_{dm} : mættet vanddamptryk [Pa]

² Reference: Danvak Grundbog

11.6. Bilag 6

Flow Målinger

En simpel måde at måle luftstrøm på er at måle tryktabet i kanalen og kalibrere tryktabet til en flow måling.

Tryktabet i fremløbsslangerne er forskellen mellem tryk i og uden for slangen ved dennes indløb. Det statiske overtryk er målt med en trykstuds, relativt tæt på anlægget for at få høje værdier og dermed mindre aflæsningsusikkerhed.

Flowet er målt med Pitot-rør og et manometer af samme type som anvendt til tryktabsmålingerne og med Pitot-røret placeret på en lang lige strækning med mindst 6 rørdiameter til nærmeste bøjning.

For at sikre at de anvendte manometre måler rigtigt blev alle manometrene kalibreret med reference udstyr som har gyldigt kalibrerings certifikat.

Kalibrering af flow målinger

For at opnå så god en kalibrering som muligt og samtidigt spare manuelle arbejdstimer, er der skrevet et LabVIEW program til automatisk kalibrering af flowmålingerne.

Programmet sætter trinvist ventilatorspændingen fra 0 til 10 V med det ønskede antal trin. Efter hvert trin ventes en periode for at ventilatoren kan nå op i omdrejninger. Efter ventetiden måles gennemsnitsværdierne fra de to manometre (en til tryktab i slangen og en til dynamisk tryk med pitot-rør) over et ønsket antal samples. Når gennemsnitsværdierne er beregnet, gemmes de i en tabel og ventilatorspændingen sættes et trin op. Dette gentages indtil ventilatorspændingen når 10 V, hvorefter tabellen gemmes i en datafil.

De fem flowkalibreringer er udført med følgende parametre:

Samplefrekvens: 1 Hz

Antal ventilator trin: 50

Ventetid efter ventilatortrin: 15 s (15 samples ved 1 Hz)

Antal samples pr. måling: 25

Resultatet er en kalibreringstabel med 50 punkter som kan bruges til at beregne en kalibreringsfaktor eller til direkte tabelopslag. I denne rapport er der typisk brugt regressioner med 5. ordens polynomier.

Ventilatoreffekt

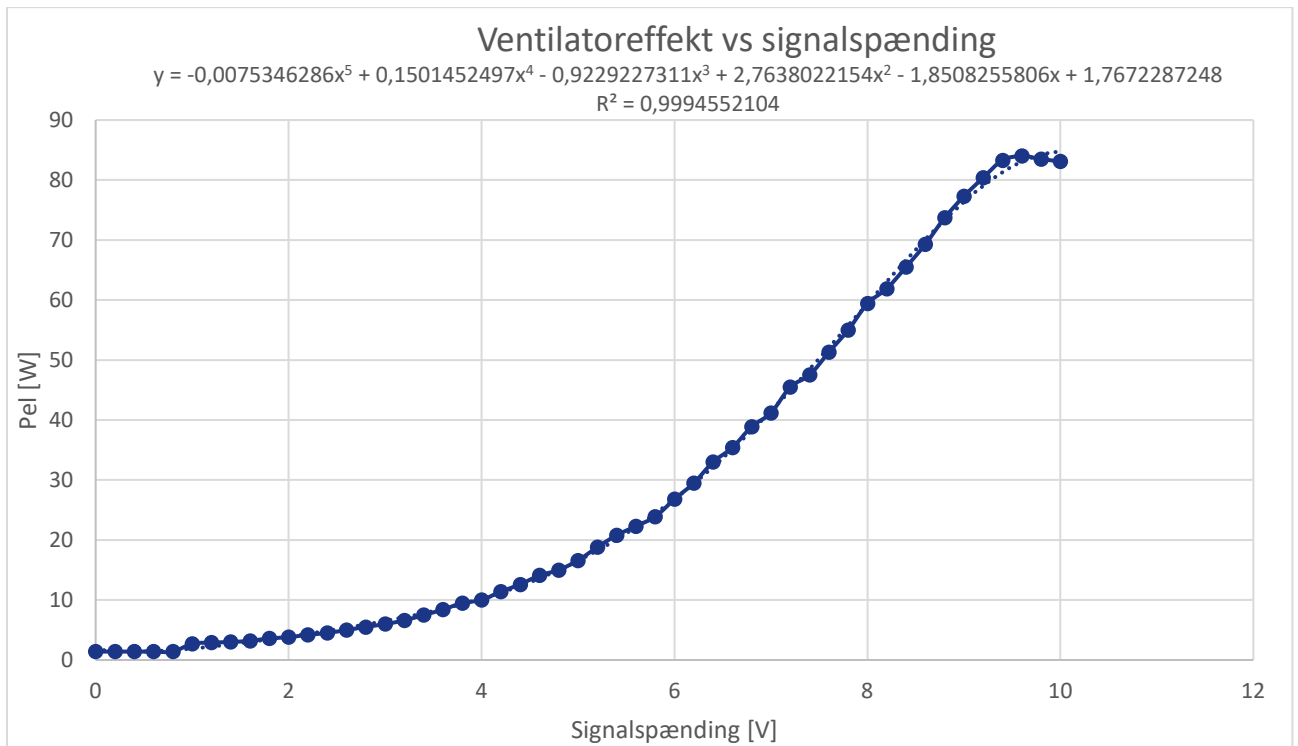
Effektmålinger på ventilatoren logges ikke direkte i styreprogrammet, men det gør styresignalet til ventilatoren af åbenlyse årsager. Ved test af systemet ønskes ventilatoreffekten kendt, for at energiovervejelser i samspillet mellem ventilator og varmekilde kan vurderes.

For at beregne ventilatoreffekten ud fra styresignalet er der blevet opmålt en effektkurve som funktion af styresignalet (0-10 V). Til indstilling af ventilatoren er der gjort brug af samme LabVIEW program som blev brugt til flowkalibreringerne, mens effektmålingerne blev aflæst manuelt på et Spar-O-Meter efter ventilatoren var kommet op i omdrejninger.

Programparametre:

Antal ventilator trin: 50

Ventetid efter ventilatortrin: 15 s (15 samples ved 1 Hz)



Af plotte kan det ses at ventilatoren først begynder at rotere ved 1 V. Effektforbruget under 1 V er elektronikkens standby-forbrug, målt til 1,4 W, hvilket er egenforbruget for ventilatorens automatik. Tilsyneladende falder effektforbruget ved signalspændingen fra 9-10 volt. Årsagen til dette er ikke undersøgt nærmere da men skyldes muligvis ventilator stall. Da der i forsøget i EFH kun blæses opvarmet luft til tre rum i stedet for fem, er den maksimale signalspænding til ventilatoren begrænset til 6 V.