

Centrum för solenergiforskning Solar Energy Research Center

Modellering och simulering av tappvattenautomater i solvärmesystem

Tomas Persson

SERC

Högskolan Dalarna
SE 781 88 Borlänge

Tel: +46 23 778700
Fax: +46 23 778701

Besöksadress/Street address:
Forskargatan 6



HÖGSKOLAN
Dalarna

ISSN 1401 - 7555
ISRN DU-SERC--74--SE
Februari 2002

**Modellering och simulering av tappvattenautomater
i solvärmesystem**

Tomas Persson

ISSN 1401 - 7555
ISRN DU-SERC--74--SE
Februari 2002

SAMMANFATTNING

Tidigare forskning har visat att tappvattenautomater för tappvattenberedning i villasolvärmsystem minskar energiförbrukningen, genom att de erbjuder förbättrad skiktning och möjliggör sänkt tanktemperatur. I en tappvattenautomat värms tappvatten i genomströmning i en plattvärmeväxlare. I denna rapport modelleras och simuleras fyra olika tappvattenautomater i ett solvärmsystem och resultaten jämförs med ett referenssystem, där varmvattenberedning sker med kamflänsrör.

De olika tappvattenautomater som undersökts kommer från Solvis, Sonnenkraft och Cetherm. Dessutom undersöks en tappvattenautomat där en nyutvecklad och patenterad turbinpump används för att driva och styra flödet. En turbinpump är en pump som drivs av en vattenturbin, och pumpen kan användas där man önskar styra ett vattenflöde i en krets beroende på vattenflödet i en annan krets. Pumpen har ännu inte kommit i serieproduktion, men ett flertal prototyper har hittills byggts.

Tappvattenautomaten från Sonnenkraft har uppmätts i SERC:s test-lab och datormodellens parametrar har identifierats. Därefter har modellen validerats mot nya mätningar för att få en uppskattning av modellens fel. Solvis tappvattenautomat har tidigare modellerats på liknande sätt. Turbinpumpen har modellerats utan validering, då det inte varit möjligt att få en prototyp att mäta på.

Datormodellerna har integrerats i ett solvärmsystem som skapats inom IEA SHC Task 26 arbetet. Årssimuleringar har därefter genomförts för de olika tappvattenautomaterna och resultaten har jämförts med en tank med samma volym med integrerade kamflänsrör för varmvattenberedning.

Resultaten visar att en tappvattenautomat med måttlig värmeväxlarstorlek kan spara nästan 400 kWh/år jämfört med traditionella kamflänsrör för tappvattenberedning. Med en större plattvärmeväxlare och högre tankflöde blir besparingen ännu större. Studierna visar också att tappvattenautomatens reglerprincip är helt avgörande för energibesparingen. En tappvattenautomat utan reglerventil ger nästan ingen energibesparing jämfört med referenssystemet. En annan viktig orsak till energibesparingen är att termostatinställningen för pannan/elpatronen för dessa tappvattenautomater kan vara lägre än för referenssystemet med kamflänsrör.

Turbinpumpens reglerkaraktistik är mycket lovande för tappvattenautomater, men det bör poängteras att ingen prototyp med den antagna karakteristiken har byggts än. Genom optimering av den antagna karakteristiken så att förhållandet mellan varmvattenflödet och tankflödet blir linjärt kan tappvattenautomaten förbättras ytterligare. Det gäller alltså att finna en god balans mellan tappvattenflöde och tankflöde.

Genom tidigare mätningar har det konstaterats att själv-cirkulation av tankvatten genom tappvattenautomaten kan förekomma. En förenklad simulering av fenomenet visar att själv-cirkulation i kombination med värmeförluster från tappvattenautomaten kraftigt påverkar energiförbrukningen. Det är alltså mycket viktigt att åtgärder vidtas för att undvika själv-cirkulation genom en tappvattenautomat. Det enklaste sättet är att använda en fjäderbelastad backventil som monteras i tankkretsen, något som redan finns hos Sonnenkrafts enhet.

ABSTRACT

Previous research has shown that external DHW units can increase energy savings for solar combisystems due to good stratification and reduced thermostat setting for auxiliary heated volume in the store. In an external DHW unit the hot water is prepared with a flat plate heat exchanger and the flow on the store side is regulated in some way. In this report four different DHW units have been modelled and simulated. The results have been compared to those of a reference system, which uses immersed heat exchangers for preparation of DHW.

The DHW units that have been studied come from: Solvis, Sonnenkraft, Cetetherm and a non-commercial product, using a turbine pump, that is still in the prototype stage. This turbine pump uses a small turbine in the hot water flow and a magnetic coupling to pump water on the store side.

Both the Solvis and Sonnekraft units have been tested in the thermal laboratory at SERC and parameter values have been identified and validated for the models. The turbine pump has been modelled theoretically based on simple measurement data of an early prototype from Vattenfall Utveckling AB, but the model has not been validated. Not prototype was available for SERC to test.

The DHW units have been modelled so that they could be simulated integrated into a completed solar combisystem, in this case one created for the work of IEA SHW Task 26. Annual simulations have been carried out for the different DHW units and the results have been compared with those for the reference system with immersed heat exchangers.

The results show that a DHW unit with moderate heat exchanger size can give increased savings of nearly 400 kWh/yr compared to the reference system. With a larger heat exchanger and higher maximum possible flow on the store side, the savings can be even higher. The study also shows that the control method has a strong influence on the energy savings. A DHW unit with a normal pump and without control valves gives no better results than the reference system. A large factor for the good results for the better DHW units is a lower possible set temperature for the auxiliary heated volume of the store.

The turbine pump's control function is shown to be very promising although it should be noted that the characteristic used in the study is theoretical and has not been measured in practise. It is probable that the results can be further improved by slight changes to the characteristic of the pump.

Previous measurements have shown that natural convection can cause a flow of the store water through the DHW unit. A simplified simulation of this phenomenon showed that this flow together with heat losses from the DHW units reduced the energy savings significantly. It is therefore important to stop this natural convection flow. The simplest method is to introduce a non-return valve into the store side circuit, something already in place in the Sonnekraft unit.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

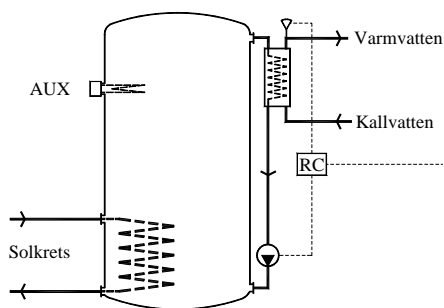
1	INLEDNING	5
1.1	Bakgrund	5
1.2	Syfte.....	5
1.3	Metod.....	6
2	DATORMODELL AV TAPPVATTENAUTOMAT FRÅN SONNENKRAFT	7
2.1	Funktion.....	7
2.2	Mätningar	7
2.3	Modellbygge.....	7
2.4	Mätresultat.....	9
2.5	Identifiering av parametrar	10
2.6	Validering.....	11
2.7	Jämförelse av reglerkaraktistiken med tidigare uppmätt tappvattenautomat	11
3	DATORMODELL AV TURBINPUMPEN.....	13
3.1	Funktion.....	13
3.2	Mätningar	13
3.3	Modellbygge.....	14
4	ÅRSSIMULERINGAR	16
4.1	Simulerade konfigurationer	16
4.2	Simuleringsförutsättningar	17
5	SIMULERINGSRESULTAT OCH SLUTSATSER	19
6	REFERENSER.....	22

1 INLEDNING

1.1 Bakgrund

Tappvattenautomater för produktion av varmvatten har tidigare använts för att ersätta träsiga varmvattenberedare i befintliga värmepannor och för varmvattenberedning i fjärrvärmesystem. På senare tid har det även dykt upp tappvattenautomater som är anpassade för villasolvärmesystem.

En tappvattenautomat bereder varmvatten i genomströmning i en plattvärmväxlare. Varmvattentemperaturen regleras normalt genom att flödet justeras på tanksidan (primärsidan). Figur 1.1 nedan visar principen för en tappvattenautomat som är inkopplad till en ackumulatortank.



Figur 1.1. Innkoppling av en tappvattenautomat till en ackumulatortank. I detta fall regleras varmvattentemperaturen genom att värmeflödet (tankflödet) regleras genom varvtalsstyrning av pumpen.

Tidigare forskning visar att tappvattenautomater med en bra reglerprincip kan öka solvärmeutbytet i solvärmesystem jämfört med traditionella kamflänsrör för tappvattenberedning (Persson et al. 1996, Lorenz et al. 1997, Lorenz et al. 1998 och Lorenz 2001). Orsaken är dels att tankens skiktning förbättras avsevärt genom att tappvattenautomaten alltid tillför så kallt vatten som möjligt till tankens botten, dels att tanktemperaturen, temperaturen av den volym som värms av pannan eller elpatronen kan sänkas.

1.2 Syfte

I denna rapport modelleras och simuleras fyra olika tappvattenautomater i ett solvärmesystem och resultaten jämförs med ett referenssystem, där varmvattenberedning sker med kamflänsrör.

Syftet med projektet är att studera funktionen för olika tappvattenautomater. Bland annat studeras tappvattenautomaten från Sonnenkraft och en tappvattenautomat med turbinpump. Årsmuleringar genomförs för att undersöka funktionen i ett solvärmesystem och för att se hur de olika konstruktionerna påverkar solvärmeutbytet.

1.3 Metod

Tappvattenautomat från Sonnenkraft

För att modellera tappvattenautomaten måste mätningar göras som ger information om tappvattenautomatens reglerprincip och värmeväxlarens UA-värde (värmeöverföringskapacitet). Metodiken för att skapa en validerad modell av tappvattenautomaten från Sonnenkraft är följande:

1. **Mätning på tappvattenautomaten i SERC:s testlab.** -En rad mätningar utförs för att få information om tappvattenautomatens funktion och karakteristik. Bales (2000) beskriver hur detta går till i SERC:s test lab.
2. **En teoretisk modell av tappvattenautomaten byggs upp.** -Genom att studera mätresultaten skapas en modell med ekvationer och komponenter som beskriver tappvattenautomatens funktion. Simuleringsprogrammet TRNSYS används för detta ändamål (Klein et al. 1996).
3. **Identifiering av parametrar.** -Modellen har många parametrar som måste identifieras för att modellen skall överensstämja med mätdata. Standardiserade metoder för att göra parameteridentifieringar för ackumulatortankar har utvecklats under senare år. Parametrarna identifieras genom att använda datorprogram som ”testar fram” de parametrar som ger bästa överensstämmelse med mätdata. Proceduren beskrivs av Bales (2001). De datorprogram som används är DF (Spirkl 1999) och FITTRN (Huber 1998).
4. **Validering av modellen.** -Nya mätningar under verklighetstroga förhållanden genomförs och samma sekvens simuleras. Avvikelsen mellan simuleringar och mätningar är ett mått på modellens noggrannhet.
5. **Årssimuleringar genomförs.** -Ett komplett solvärmesystem simuleras under ett helt år med olika typer av varmvattenberedningsprinciper, däribland Sonnenkrafts tappvattenautomat. För att undersöka hur energiförbrukningen påverkas av olika varmvattenberedningsprinciper. Systemet som användes har byggts upp inom IEA, Task 26 och förutsättningarna beskrivs av Streicher (2000).

Turbinpumpen

Turbinpumpen har modellerats på ett förenklat sätt utan detaljerade mätningar. De äldre mätresultat som finns har inte täckt in de flödesområden som vi avser att jobba med. Och ingen prototyp har funnits tillhands. Genom brist på mätdata simuleras i denna rapport enbart en teoretisk funktion för turbinpumpen som har tagits fram tillsammans med uppfinnaren. Simuleringarna visar därför enbart potentialen för turbinpumpen om den kommer att fungera så som antagits.

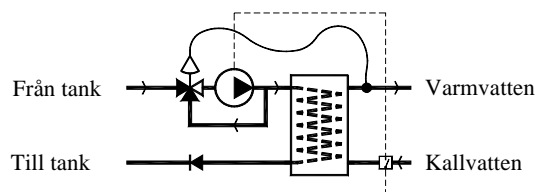
Övriga komponenter

Solvis tappvattenautomat har modellerats och validerats tidigare vid SERC (Lorenz et al. 1997). Från Cetetherm undersöks två varianter, en prototyp med tvåvägsventil som testades tidigare och en version utan flödesstyrning. Varianten med tvåvägsventil har modellerats tidigare (Lorenz et al. 1997), men har inte simuleras i detta arbete därför att den visade sig ha samma reglerkaraktistik som tappvattenautomaten från Sonnenkraft. Varianten utan reglering har simuleras i detta arbete, men har ingen komplicerad styrning och har därför inte krävt någon separat identifiering.

2 DATORMODELL AV TAPPVATTENAUTOMAT FRÅN SONNENKRAFT

2.1 Funktion

Nedanstående figur visar den principiella uppbyggnaden av tappvattenautomaten från Sonnenkraft. En flödesvakt i kallvattenledningen startar pumpen vid en tappning. Varmvattentemperaturen regleras genom att den självverkande ventilen styr tankvattenflödet. I en självverkande ventil förflyttas ventilkägla mekaniskt genom att temperaturändringen leder till materialutvidgning vid känselkroppen. I detta fall är känselkroppen (bulben) placerad en bit från ventilen och kraften överförs i ett kapillärrör. För en självverkande ventil får man alltid en viss temperaturavvikelse som beror på ventilens P-band. Det krävs en temperaturavvikelse för att ventilkägla skall förflytta sig. Med ett högt P-band blir temperaturavvikelsen stor och om P-bandet görs för litet kommer ventilen lätt i svängning.



Figur 2.1. Principschema över den testade tappvattenautomaten från Sonnenkraft. Reglerutrustningen består av en flödesvakt som startar pumpen vid en varmvattentappning och en reglerventil som styr tankvattenflödet beroende på varmvattentemperaturen. Backventilen förhindrar själv-cirkulation på tanksidan, då ingen tappning förekommer.

2.2 Mätningar

Mätningarna utfördes genom att ladda en tank till olika temperaturer och därefter göra varmvattentappningar med olika flöden. Mätningar gjordes vid följande tanktemperaturer: 40, 50, 60 70, 80 och 90°C och vid varje temperatur gjordes varmvattentappningar med flöden på ca 4, 9, 13, 18, 20 och 25 l/min. Vid mätningarna loggades kall- och varmvattentemperatur, kallvattenflöde, fram- och returledningstemperatur samt värmeflöde och även rumstemperaturen. Mätningarna efterbehandlades genom att ta fram områden med relativt stationära förhållanden och att medelvärdesbilda över dessa mätpunkter. Mätningarna utfördes med ventilinställning 4,75 och 5,5 (trevägsventilen som reglerar varmvattentemperaturen var förinställd och spärrad på 4,75 från fabrik, men detta gav en alltför låg varmvattentemperatur).

2.3 Modellbygge

Simuleringsprogrammet TRNSYS tillsammans med PRESIM används för att modellera och simulera systemen. TRNSYS är mycket flexibelt och användbart för att simulera olika system under drift (Klein et al. 1996). PRESIM används för att skapa den fil som beskriver systemet och som krävs för simuleringen (Lindberg 1998). Det finns ett stort antal färdigutvecklade komponentmodeller som kan användas för dessa simuleringar, som tex pumpar, rörledningar ackumulatortankar och radiatorer. Dessutom kan man relativt enkelt skapa egna komponentmodeller, vilket ger en mycket stor flexibilitet.

Problem med TRNSYS

Vid modelleringen av tappvattenautomaten utan dynamik och värmekapacitet uppstod problem med att få TRNSYS att iterera fram lösningar med den gamla "solvern". Vid användande av den nya "solvern" fungerade detta utmärkt, men istället uppstod problem med att använda en tankmodell TYPE 140 i samma system. Utan tankmodell går det naturligtvis inte att simulera solvärmesystemet i sin helhet. Problemet med TYPE 140 och nya "solvern" kunde inte lösas, vilket gjorde att den gamla "solvern" måste användas. Enda sättet att då lösa iterationsproblemen var att skapa en dynamisk modell av tappvattenautomaten. Eftersom systemets tidskonstant är mycket liten, måste också simuleringens tidssteg vara litet. Nackdelen med små tidssteg är att simuleringstiderna blir längre.

Värmeväxlare

Plattvärmeväxlaren i tappvattenautomaten modelleras med en tankmodell TRNSYS Type 140 (Drück et al. 1996). Värmeväxlarens UA-värde är flödesberoende och ibland även temperaturberoende. UA-värdet samt de exponenter som beskriver flödes- och temperaturberoendet måste identifieras. Dessutom skall värden på volym, totalhöjd, värmeförlust och värmeledning i höjddled anges. Dessa värden har mindre inverkan på resultatet och kan bestämmas relativt enkelt genom beräkning och uppskattning. Värmeväxlarens värmekapacitet beräknas motsvara 5,1 kg vatten. Värmeledningen i höjddled antogs vara 2,3 kJ/hmK och värmeväxlarens höjd uppmättes till 0,34 m. Dessutom beslutades att dela in värmeväxlaren i 10 noder, vilket innebär att värmeväxlaren delas upp i 10 delar. Vattentemperaturen i varje del medelvärdesbildas och används för att beräkna värmeöverföringen för varje delsegment (nod).

Reglerutrustning

Trevägsventilen styr flödet i värmekretsen beroende på varmvattentemperaturen. Reglerutrustningen bestående av flödesvakt, pump och ventil modelleras med ekvationer. För att undvika iterationsproblem i modellen antas att känselkroppen har en dödtid på 1 tidssteg = 0,15 min (tidssteget för simuleringen) och en tidskonstant på 0,3 minuter. Dödtiden för en ventil beror främst på värmekapaciteten hos känselkroppen och värmeledningen mellan känselkroppen och vattnet. Tidskonstanten är den tid det tar för ventilen att ändra flödet till 63 % av den totala flödesändringen vid en stegändring av varmvattentemperaturen.

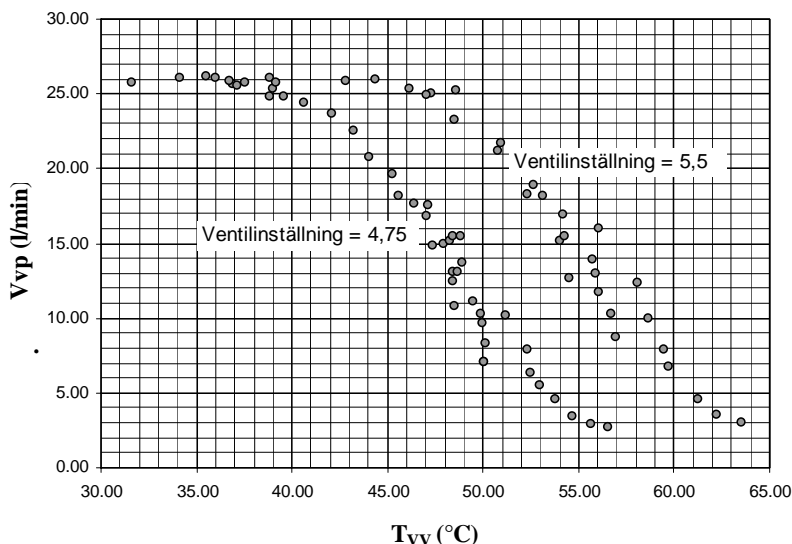
Dödtiden modelleras genom att använda varmvattentemperaturen från föregående tidssteg som input till flödesberäkningen. På så sätt undviks cirkelreferenser vid simuleringen av reglerfunktionen. Fördröjningen av temperaturändringen på känselkroppen modelleras med följande ekvation (Thomas 1992):

$$T_{tk} = \left(1 - e^{-t_{step}/t_k}\right) \cdot T_{v(t-1)} + \left(e^{-t_{step}/t_k}\right) \cdot T_{tk(t-1)} \quad (\text{ekv 2.1})$$

där T_{tk} är temperaturen på känselkroppen korrigerad för tidskonstanten, t_{step} är tidssteget för simuleringen, t_k är känselkroppens tidskonstant = 0,3 min, $T_{v(t-1)}$ är varmvattentemperaturen föregående tidssteg och $T_{tk(t-1)}$ är den beräknade temperaturen på känselkroppen för föregående tidssteg.

2.4 Mätresultat

Ventilen styr tankflödet beroende på varmvattentemperaturen och detta samband beskriver därför tappvattenautomatens reglerprincip. I figur 2.2 nedan har tankflödet som funktion av varmvattentemperaturen plottats för samtliga mätningar. Mätpunkterna bildar ett klart samband, men en del brus tycks också förekomma.



Figur 2.2. Flödet på tanksidan till tappvattenautomaten som funktion av varmvattentemperaturen för två olika ventilinställningar för Sonnenkrafts tappvattenautomat.

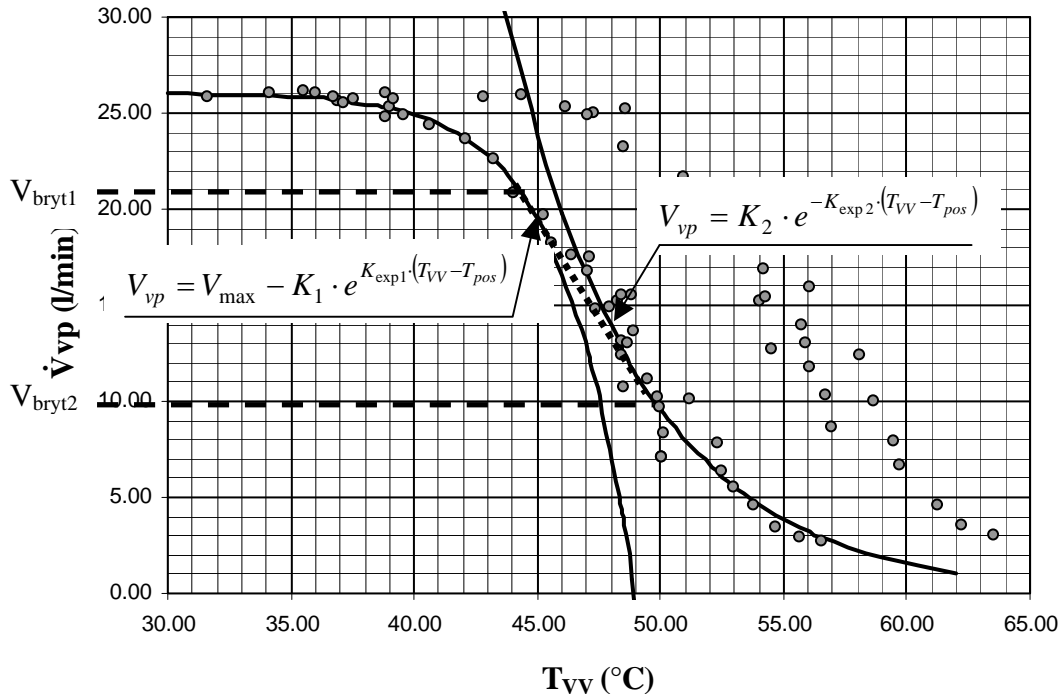
Punkter som inte följer kurvan har inte kunnat förklaras med dåliga mätningar eller icke-stationärt tillstånd. En orsak till bruset kan vara tröghet och glapp i den självverkande ventilen. En annan förklaring kan vara att det kan ha kommit luft i pumpen vid några mätningar.

Vid en närmare analys av data kan man även finna ett visst temperaturberoende. Det verkar som om högre framledningstemperatur ger ett något lägre tankflöde vid i övrigt oförändrade villkor. Detta kan förklaras med att vattnets viskositet och densitet påverkas av temperaturen, vilket i sin tur påverkar pumptrycket och tryckfallet i ledningar och värmeväxlare. Men dessa är sekundära effekter, som troligen kan försummas.

En viktig iakttagelse är att olika ventilinställningar tycks parallellförskjuta flödeskurvan. Det kan alltså gå relativt bra att ändra ventilinställning i simuleringen endast genom att ändra en enda parameter. Andra slutsatser som direkt kan dras är att det maximala flödet är drygt 26 l/min och att ventilen inte ger fullt flöde på tanksidan förrän varmvattentemperaturen är så låg som 37°C med fabriksinställningen. Den andra mätserien har gjorts med en högre ventilinställning så att maximalt flöde erhålls vid en varmvattentemperatur under 45°C.

Kurvans utseende beror på ventilkarakteristiken, pumpkarakteristiken och av tryckfallet i rör och värmeväxlare. Dessa faktorer skulle kunna brytas ut och modelleras var för sig, men förloppet kan på ett enkelt sätt modelleras med en "black-box-modellering" som direkt beskriver tankflödet som funktion av varmvattentemperaturen.

För att modellera som "black box" krävs endast att man finner en ekvation som följer kurvan väl. Det visar sig vara svårt att använda sig av ett polynom, men en exponentialfunktion följer kurvans avböjning väl. I det mellersta flödesområdet kan man använda en linjär funktion. Fig. 2.3 nedan visar en kurvanpassning med exponentialfunktioner.



Figur 2.3. Anpassning av reglerkaraktistiken med exponentiella funktioner. Mellan V_{bryt1} och V_{bryt2} interpoleras värdena så att en linjär funktion erhålls.

2.5 Identifiering av parametrar

Värdena på parametrarna i ekvationerna som beskriver reglerfunktionen har identifierats i Excell och följande värden ger en god passning (kurvan visas i figur 2.3 ovan):

- $V_{max} = 26,1$ l/min
- $T_{pos} = 35^{\circ}\text{C}$ (för ventilinställning = 4,75)
- $T_{pos} = 42,0^{\circ}\text{C}$ (för ventilinställning = 5,50)
- $K_1 = 0,20$
- $K_{exp1} = 0.35$
- $K_2 = 146$
- $K_{exp2} = 0.1817$
- $V_{bryt1} = 21,0$ l/min
- $V_{bryt2} = 10,0$ l/min

Värmeväxlarens UA-värde och exponenter identifierades sedan med identifieringsprogrammet FITTRN till:

- $UA = 22390$ kJ/hK
- $UA_{expVber} = 0,6020$
- $UA_{expTber} = 0,2343$

2.6 Validering

För att få uppgift om modellens noggrannhet görs en sk validering. Detta innebär att nya mätningar under verklighetstrogen drift genomförs och att samma sekvens därefter simuleras med datormodellen. Uppmätta värden på kallvattentemperatur, tappflöde och framledningstemperatur används som input i simuleringen och modellen beräknar varmvattentemperatur, flödet på tanksidan och returtemperaturen till tanken. Avvikelserna i beräknade flöden och temperatur jämförs sedan med de uppmätta värdena. Tabell 1.1 nedan visar resultatet från identifieringen.

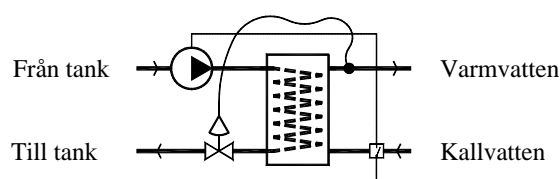
Tabell 2.1. Överensstämmelse mellan uppmätta och simulerade data för Sonnenkrafts tappvattenautomat under en testsekvens med en rad tappningar vid olika tappflöden och tanktemperaturer. Skillnaden mellan beräknade och uppmätta värden för total överförd energi- och vattenmängd under hela testsekvensen redovisas.

	$\sum W_{beräknad}$	$\sum W_{uppmätt}$	$ \sum W_{beräknad} - \sum W_{uppmätt} $	$\sum W_{beräknad} - W_{uppmätt} $		
Överförd energimängd under hela testsekvensen	2949 kWh	2879 kWh	70 kWh	2,4 %	144 kWh	5,0 %
	$\sum m_{beräknad}$	$\sum m_{uppmätt}$	$ \sum m_{beräknad} - \sum m_{uppmätt} $	$\sum m_{beräknad} - m_{uppmätt} $		
Total vattenmängd under hela tappningen	44370 kg	43430 kg	936 kg	2,2 %	2666 kg	6,1 %

Tabell 2.1 visar på en hygglig överensstämmelse mellan datormodell och mätningar. Felet för enskilda tidssteg är visserligen i medel 5 % för energi och 6,1 % för flödet. I detta fel ingår också mätfel pga ickestationära mätvärden. Ser man däremot felet över hela sekvensen är felet mellan 2 och 3 %, vilket är helt acceptabelt. Dessutom är både beräknat flöde och överförd effekt något för stort, vilket troligen kan kompenseras genom att justera ventilställningen något (justering av parameter T_{pos} i datormodellen).

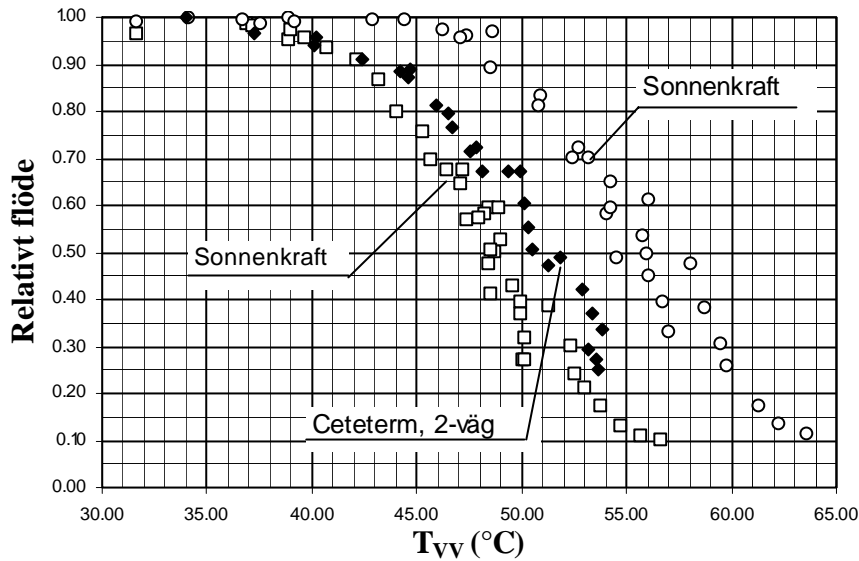
2.7 Jämförelse av reglerkaraktistiken med tidigare uppmätt tappvattenautomat

Inom ett tidigare projekt uppmättes en tappvattenautomat med tvåvägsventil som visade sig ha en liknande reglerfunktion. Figur 2.4 nedan visar kopplingsschemat för denna tappvattenautomat. Denna konstruktion var ett prototypförslag som lämnades av Cetetherm och som visade goda prestanda för solvärmesystem (dvs låg returtemperatur till tanken).



Figur 2.4. Kopplingsschema för Cetetherm tappvattenautomat med tvåvägsventil.

Genom att ventilen styr tankflödet som funktion av varmvattentemperaturen kan reglerprincipen åskådliggöras genom att plotta dessa variabler. Fig. 2.5 nedan visar en jämförelse mellan reglerprincipen för tappvattenautomaterna från Sonnenkraft och Cetetherm. Det maximala identifierade flödet är lägre för Cetetherms än för Sonnenkrafts tappvattenautomat. För att göra värdena jämförbara har maximalt flöde satts lika med ett. Av figur 2.5 kan vi konstatera att reglerkaraktäristiken för de båda tappvattenautomaterna är mycket lik varandra.



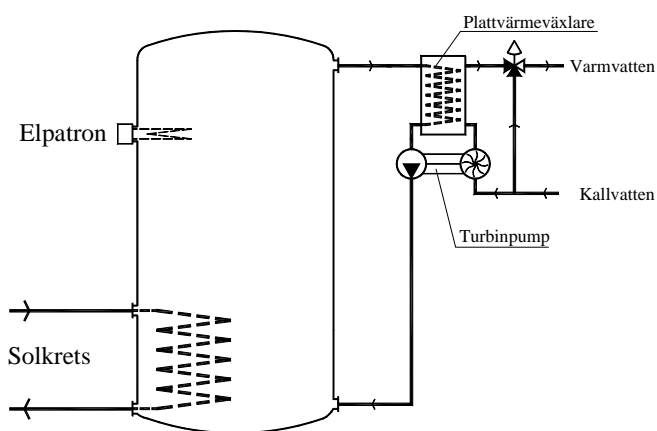
Figur 2.5. Jämförelse av reglerkaraktäristiken för Cetetherms och Sonnenkrafts tappvattenautomater. För Sonnenkraft redovisas värden för två olika ventilinställningar.

3 DATORMODELL AV TURBINPUMPEN

3.1 Funktion

Turbinpumpen är en pump som drivs av en vattenturbin, dvs pumpen kan användas där man önskar styra ett vattenflöde i en krets beroende på vattenflödet i en annan krets. Ett lämpligt användningsområde är därför tappvattenberedning med plattvärmväxlare, där tappvattenflödet då driver flödet i tankkretsen.

Turbinpumpen har utvecklats vid Lartec och några olika prototyper har hittills byggts (Helgesson et al. 1998). Nedanstående figur visar systemuppbyggnaden när turbinpumpen används för tappvattenberedning.



Figur 3.1. Principschema över tappvattenberedning med turbinpumpen i ett solvärmesystem med ackumulatortank

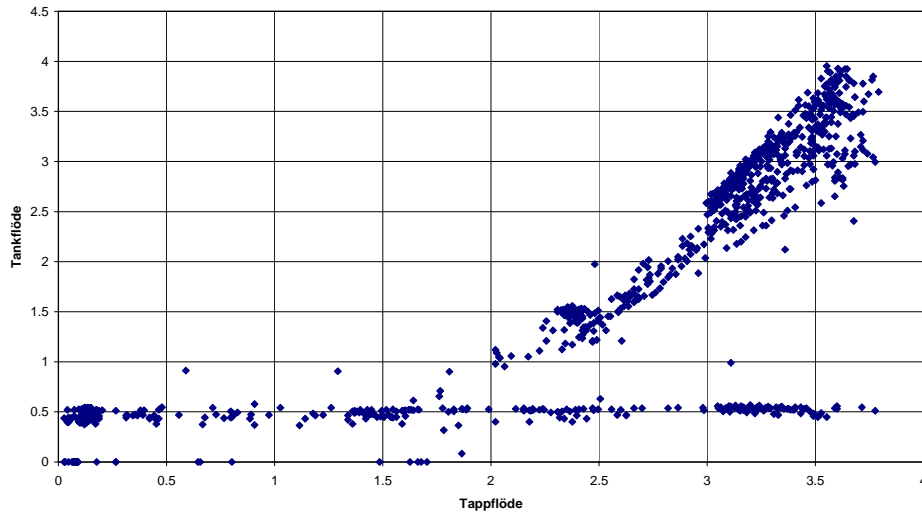
3.2 Mätningar

Mätningar på några olika prototyper av turbinpumpen har genomförts. Några av dessa mätningar redovisas i figur 3.2. Denna prototyp var dimensionerad för betydligt lägre flöden än vad som skall användas i dessa simuleringar.

Karakteristiskt för turbinpumpen är att det krävs ett visst minimiflöde i tappvattenkretsen för att pumpen skall starta. Detta startflöde beror på pumpens konstruktion och tenderar att öka när pumpen dimensioneras för högre flöden.

Själv-cirkulation

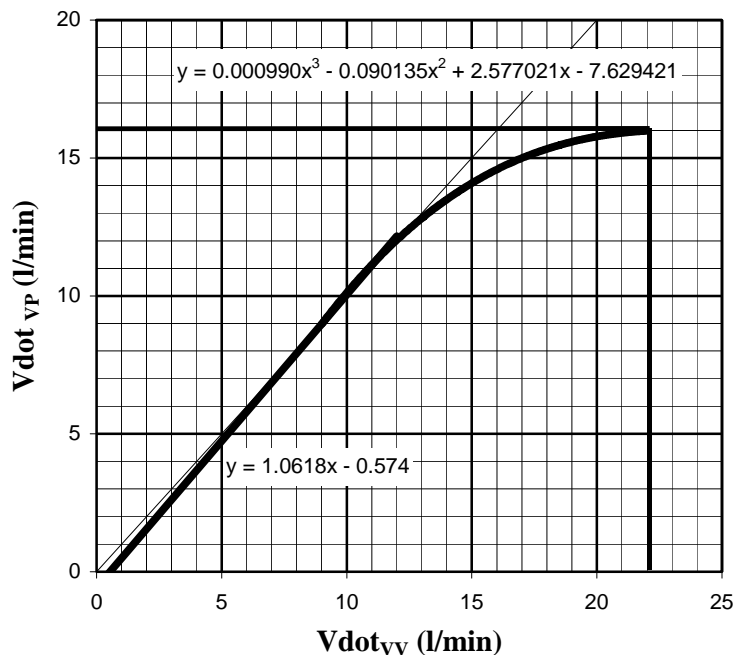
Ett intressant resultat från mätningarna är att man kunde konstatera ett själv-cirkulationsflöde på värmesidan på ca 0,5 l/min. Ett sådant cirkulationsflöde kan uppkomma om värmväxlaren placeras utanför tankens isolering. Ett sådant flöde är inte önskvärt, eftersom det ger upphov till värmeförluster och att tanken blandas om under perioder då inga tappningar förekommer. I de jämförande simuleringarna förutsätts att inget själv-cirkulationsflöde förekommer.



Figur 3.2. Mätningar på en prototyp av turbinpumpen. Flödet på tanksidan som funktion av tappvattenflödet (l/min).

3.3 Modellbygge

Turbinpumpen har modellerats med simuleringsprogrammet TRNSYS. Modellen bygger på mätresultat från en prototyp som vi fått ta del av. Då mätningarna inte kunde användas fullt ut för att skapa en modell har uppfinnaren Stefan Larsson tillfrågats om karakteristiken för turbinpumpen. En prototyp i fullskala som skulle byggas av ett tyskt företag har inte blivit byggd, eftersom företaget dragit sig ur projektet pga tidsbrist. De tillgängliga mätresultaten är dock alltför bristfälliga för att en realistisk datormodell skall kunna skapas med hjälp av parameteridentifiering. Denna modell måste därför ses som en teoretisk modell vars karakteristik enbart bygger på erfarenheter från tidigare mätningar. Den föreslagna modellen för reglerkaraktistiken redovisas i figur 3.3 nedan.



Figur 3.3. Tankflödet som funktion av varmvattentemperaturen.

Tre olika ekvationer för olika intervall beskriver turbinpumpens funktion. För tappflöden upp till 0,8 l/min antas värmeflödet vara lika med noll (ingen själv-cirkulation). Mellan 0,8 och 9 l/min antas ett linjärt samband och för tappflöden över 9 l/min antas sambandet följa ett tredjegrads-polynom (se fig. 3.4).

Blandningsventiler

En självverkande blandningsventil används för att konstanthålla temperaturen efter ventilen. Ventilen blandar varmt vatten med kallare vatten till inställd temperatur. För att modellera blandningsventilers funktion används TRNSYS type 11. Ventilen antas arbeta idealt, dvs att den alltid reglerar in rätt temperatur. I detta fall bedöms det ha försumbar inverkan på simuleringsresultatet

Värmeväxlare

Plattvärmeväxlaren i tappvattenautomaten modelleras med en tankmodell TRNSYS Type 140. Vid dessa simuleringar används en värmeväxlare som identifierats för en tappvattenautomat från Solvis. UA-värdet var 56556 kJ/hK och den flödesberoende exponenten $b_1 = 0,675$.

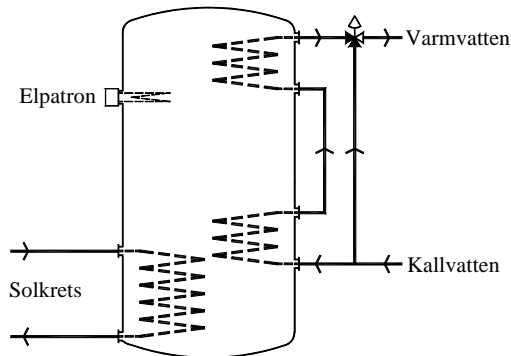
Värmeväxlarens värmekapacitet beräknades motsvara ca 2,5 kg vatten. Värmeledningen i höjddled antogs vara 2,3 kJ/hmK, värmeväxlarens höjd antogs vara 0,34 m och antal noder sattes till 10 st.

4 ÅRSSIMULERINGAR

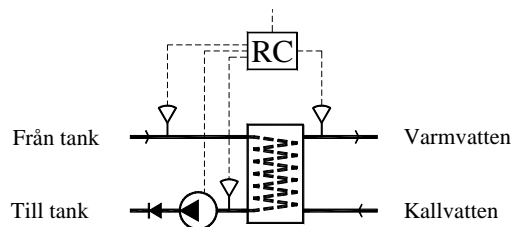
Tappvattenautomaterna utvärderas i förhållande till varandra och i förhållande till konventionell teknik genom årssimuleringar. Ett antal olika konfigurationer simuleras under samma last och väderdata och energiförbrukningen jämförs.

4.1 Simulerade konfigurationer

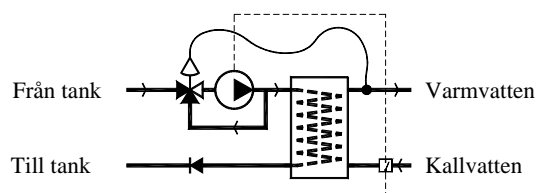
De olika konfigurationer som simulerats redovisas i fig. 4.1 tom 4.6 nedan.



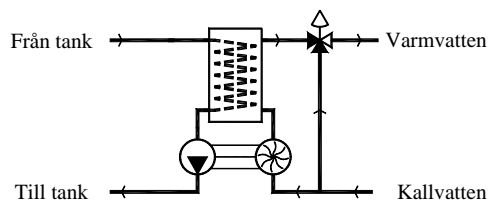
Figur 4.1. Tappvarmvattenberedning med dubbla kamflänsrör (Referenssystem). Vid en varmvattentappning förvärms kallvattnet i det undre kamflänsröret och eftervärms i det övre. Varmvattentemperaturen regleras av en självverkande blandningsventil som blandar varmvatten och kallvatten till önskad temperatur.



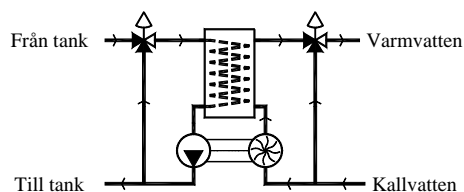
Figur 4.2. Solvis tappvattenautomat (Konfiguration 1). Vid en varmvattentappning uppstår en plötslig temperatursänkning av varmvattentemperaturen, vilket startar pumpen. Varmvattentemperaturen regleras in till önskad temperatur genom varvtalsstyrning av pumpen. För att undvika onödigt höga flöden på tanksidan vid låga tappflöden finns en funktion som begränsar tankflödet då temperaturskillnaden blir mindre än ca 7 °C mellan tank och varmvatten. När tappningen upphör stängs pumpen av när returtemperaturen till tanken börjar stiga.



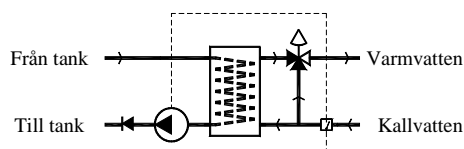
Figur 4.3. Solkraft tappvattenautomat (Konfiguration 2). Reglerutrustningen består av en flödesvakt som startar pumpen vid en varmvattentappning och en reglerventil som styr tankflödet beroende på varmvattentemperaturen. Backventilen förhindrar själv-cirkulation på tanksidan, då ingen tappning förekommer.



Figur 4.4. Tappvattenautomat med turbinpump och blandningsventil på varmvattensidan (Konfiguration 3A).



Figur 4.5. Tappvattenautomat med turbinpump och blandningsventil i värmekretsen och på varmvattensidan (Konfiguration 3B). Blandningsventilen på varmvattensidan bör dock kunna uteslutas, eftersom blandningsventilen på framledningen förhindrar alltför höga varmvattentemperaturer.



Figur 4.6. Principkoppling för Cetetherm tappvattenväxlare utan reglering. (Konfiguration 4)

4.2 Simuleringsförutsättningar

Systemmodell från Task 26

Simuleringsmodellen för att göra årssimuleringar innehåller bl.a. ackumulatortank, solvärmesystem, väderdata, värmelast och tappvattenlast. I detta arbete användes en systemmodell som har utvecklats inom IEA task 26 arbetet, vars randvillkor beskrivs av Streicher (2000).

Förhållanden är för Stockholms klimat, varmvattenförbrukningen 200 l/dag (c:a 3120 kWh/år) och värmelasten 12190 kWh/år. Systemet har 10 m² enkelglasad solfångare med selektiv absorbatör vänd mot söder med en lutning av 45°C. Varmvattenlasten har väldigt varierande profiler dag för dag och har dessutom mycket höga flöden (>20 l/min) vid flera tillfällen för att motsvara en badkarstappning. Dessa höga flöden förorsakar höga termostatinställningar för att säkerställa varmvattenkomforten. Ackumulatortanken är en 750-liters tank med elpatronen monterad en tredjedel från tankens topp. Solvärme laddas in i tanken genom ett kamflänsrör placerad i tankens nedre del. I referenssystemet finns dessutom två seriekopplade kamflänsrör för tappvattenberedning (figur 4.1). I systemen med tappvattenautomater ansluts dessa till tankens topp och botten och de båda kamflänsrören tas bort. För övrigt är systemen identiska med referenssystemet.

Likvärdig varmvattenkomfort

Solvärmeutbytet i en anläggning och därmed solvärmesystemets energibesparing beror på den varmvattenkomfort som man önskar från anläggningen. För att resultaten från simuleringarna skall vara jämförbara och visa på skillnader i prestanda, bör samtliga system erbjuda samma tappvarmvattenkomfort. Tanktemperaturen i samtliga system måste därför justeras så att likvärdig varmvattenkomfort uppnås oberoende av varmvattenberedningsprincipen.

Likvärdig varmvattenkomfort har erhållits genom att tankens temperatur justerats tills en tappning av 1332 kg/h under 6 minuter klaras utan att varmvattentemperaturen understiger 45°C. Kravet skall uppfyllas precis innan pannan startar under en period utan sol och med ett värmeuttag till radiatorkretsen på 5 kW vid en radiatorreturtemperatur på 35°C. Detta motsvarar en "worst case" situation för den varmvattenlast som användes.

Förenklningar

De viktigaste förenklningar som gjorts är att tappvattenautomaten inte antas öka värmeförlusterna från tanken. Detta betyder att tappvattenautomaten förutsätts vara monterad under tankens isolering och att självirkulation i kretsen inte förekommer. Dessutom har rören mellan tank och värmeväxlare försumrats för samtliga tappvattenautomater. Även elförbrukningen för samtliga pumpar har försumrats.

För Solvis tappvattenautomat finns dessutom en förenklning i reglerprincipen. I modellen antas att pumpen endast är i drift då en tappning pågår. I verkligheten är pumpen i drift en stund efter att tappningen upphört, eftersom det tar en stund tills returtemperaturen börjar stiga. Detta får till följd att värmeväxlaren fylls med varmt vatten efter varje tappning. Detta kan ha en viss inverkan på resultatet om det förekommer många små tappningar.

Bearbetning av simuleringsresultatet

En årssimulering ger uppgift om förbrukad elenergimängd nyttiggjord solenergimängd, tappvattenlast, och värmelast mm. För att göra simuleringsresultatet lättåskådligt simuleras de olika konfigurationerna under likvärdiga villkor och den elförbrukning som uppnås jämförs med referenssystemets elförbrukning. Simuleringsresultatet för respektive konfiguration redovisas som elbesparingen Q_{elbesp} jämfört med referenssystemet (konfiguration 1) och beräknas enligt:

$$Q_{elbesp} = Q_{elref} - Q_{elkorr} \quad (ekv 4.1)$$

där Q_{elref} är referenssystemets elförbrukning i kWh/år och Q_{elkorr} är det aktuella systemets elförbrukning korrigerat för om värme- och varmvattenlasten inte är exakt lika för de båda simuleringarna. Simulerad elförbrukning Q_{el} korrigeras enligt följande ekvation:

$$Q_{elkorr} = Q_{el} - (Q_{last} - Q_{lastref}) \cdot \frac{Q_{el}}{Q_{el} + Q_{sol}} \quad (ekv 4.2)$$

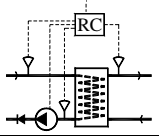
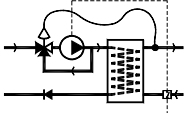
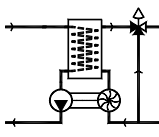
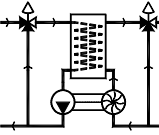
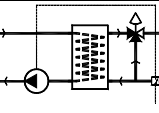
där Q_{last} = simulerad varmvattenlast och värmelast, Q_{sol} är simulerat solvärmetillskott och $Q_{lastref}$ är simulerad varmvattenlast och värmelast för referenssystemet.

5 SIMULERINGSRESULTAT OCH SLUTSATSER

Jämförelse av inverkan pga reglerkaraktärstiken

I den första jämförelsen undersöks hur energiförbrukningen varierar med reglerkaraktärstiken för de olika tappvattenautomaterna. Detta innebär att samtliga tappvattenautomater simuleras med samma värmeväxlare och samma tankflöde vid dimensionerande tappvattenlast. Värmeväxlaren som används identifierades för Solvis tappvattenautomat. Inställd termostatterperatur för elpatronen är också densamma för alla tappvattenautomater (70°C) men lägre än för referenssystemet (80°C).

Tabell 5.1. Simuleringsresultat för de olika konfigurationer som simulerats.

Simulerad tappvattenautomat	Energibesparing jämfört med referenssystemet
 Konfiguration 1 (Solvis)	389 kWh/år
 Konfiguration 2 (Sonnenkraft)	315 kWh/år
 Konfiguration 3A (Turbinpump)	339 kWh/år
 Konfiguration 3B (Turbinpump)	345 kWh/år
 Konfiguration 4 (enbart VVX)	8 kWh/år

Referenssystemet förbrukar 13720 kWh el per år och solvärmestillskottet är 2859 kWh/år. I Tabell 5.1 ovan redovisas den minskade elförbrukningen jämfört med referenssystemet (figur 4.1) för resp tappvattenautomat. Besparingen beräknas enligt ekvation 4.1. Årssimuleringarna visar att en tappvattenautomat med måttlig värmeväxlarstorlek kan spara mellan 300 och 400 kWh/år. Med en större plattvärmeväxlare och högre tankflöde blir besparingen ännu större. Det finns möjlighet att ytterligare optimera driften och sänka energiförbrukningen genom att optimera elpatronens placering, och maximala flödet på tanksidan i förhållande till det dimensionerande tappvattenflödet.

Reglerkaraktärstiken är avgörande

Av resultaten framgår att det är en anmärkningsvärt stor skillnad mellan de olika tappvattenautomaterna, trots att de har samma värmeväxlare och tankflöde vid dimensionerande tappvattenlast. Konfiguration 1 ger en besparing på 389 kWh/år, medan konfiguration 4 ger en besparing på enbart 8 kWh/år. Förklaringen ligger i tappvattenautomatens reglerstrategi. Reglerstrategin bör vara sådan att lägsta möjliga returtemperatur till tanken tillförs i alla driftsfall.

Tappvattenautomat från Solvis

Solvis tappvattenautomat (konfiguration 1) ger en energibesparing av 389 kWh/år, vilket är den högsta energibesparingen av de varianter som här simulerats. Reglerprincipen är i det närmaste ideal och det är inte troligt att den kan förbättras ytterligare. Inställd varmvattentemperatur produceras med lägsta möjliga tankflöde. Solvis tappvattenautomat är inställd för att ge en konstant varmvattentemperatur av 45°C, men inställningen kan ändras av användaren. En temperatur på 55°C är mer realistisk och en simulering med denna temperatur under i övrigt oförändrade förhållanden gör att energibesparingen sjunker till 359 kWh/år. Vid en varmvattentemperatur på 60°C blir energibesparingen 335 kWh/år.

Tappvattenautomat från Sonnenkraft

Konfiguration 2 (Sonnenkraft) ger en energibesparing på 315 kWh/år. Detta är något mindre än för konfiguration 1 och 3. Skillnaden mellan reglerkaraktistiken för konfiguration 1 och 2 är att varmvattentemperaturen inte hålls konstant i konfiguration 2. Den självverkande ventilen gör att varmvattentemperaturen varierar mellan 45°C vid höga tappflöden upp till 65°C vid låga tappflöden. Detta gör att lägsta möjliga returtemperatur inte uppnås för låga tappflöden. Konfiguration 1 har en närmast optimal reglering, där en konstant varmvattentemperatur erhålls, medan varmvattentemperaturen från konfiguration 2 varierar, eftersom ventilen är självverkande. Detta är orsaken till att energibesparingen är något högre för konfiguration 1 än för konfiguration 2.

Konfiguration 2 (Sonnenkraft) har i originalutförande större värmeväxlare och högre tankflöde. Denna variant ger en energibesparing på hela 460 kWh/år. Det är framförallt det ökade tankflödet, men även den större värmeväxlaren som gör att energibesparingen ökar, eftersom detta kraftigt sänker erforderlig tanktemperatur.

Turbinpumpen

Tappvattenautomaterna med turbinpump ger en energibesparing på 339 kWh/år (konfiguration 3). Detta är ett något sämre utbyte än konfiguration 1, men bättre utbyte än konfiguration 2. Turbinpumpens reglerstrategi får därför anses vara mycket lovande. Den kan dock förbättras ytterligare bl.a. genom att ändra karaktistiken så att förhållandet mellan varmvattenflödet och tankflödet blir linjärt mellan origo och maximala flödet. En simulering av konfiguration 3A med en linjär reglerkaraktistisk, men med samma maximala flöde visar att energibesparingen ökar till 368 kWh/år.

Resultaten visar också att skillnaden mellan konfiguration 3A och 3B är mycket liten. Blandningsventilen på tanksidan är inställd på samma temperatur som elpatronen. Det betyder att ventilen endast har en funktion under perioder med överskott på solvärme, då hela tanken värms över elpatronens inställning. Troligen bör man undvika att använda blandningsventiler på tanksidan tillsammans med turbinpumpen, eftersom energivinsterna tycks vara mycket små. En extra ventil ökar risken för felfunktion i anläggningen och ökar komplexiteten. Ventilen kan dock ha större inverkan i solvärmesystem med skiktad inladdning av solvärmekretsen och om elpatronen ställas på en lägre temperaturnivå.

Modellen för att simulera turbinpumpen som använts i detta arbete har inte validerats mot en riktig prototyp, varför dessa resultat endast visar på potentialen för denna teknik. För att bekräfta dessa resultat, måste modellen valideras mot mätningar på en riktig prototyp. Därefter bör prototypen optimeras för drift i solvärmesystem

Plattvärmväxlare utan reglering

Plattvärmväxlare utan reglering (Konfiguration 4) är inte mycket bättre än referenssystemet. Orsaken är att returtemperaturen till tanken blir mycket hög vid tappningar med låga varmvattenflöden. Detta visar att reglerprincipen är helt avgörande för simuleringsresultatet.

Inverkan från själv-cirkulation och värmeförluster

Vid ovanstående jämförelser har det antagits att samtliga system har samma värmeförlustkoefficient för tanken och att plattvärmväxlaren inte har några värmeförluster. Dessutom antas att ingen själv-cirkulation förekommer på tanksidan genom tappvattenautomaten.

Genom att densiteten ökar med sjunkande temperatur hos vattnet kan dock vatten börja strömma från tankens topp, genom värmväxlaren och tillbaka in i tanken om det finns värmeförluster i värmväxlare och rör. En sådan själv-cirkulation kan uppkomma om inte en backventil med tillräcklig fjäderkraft monteras i tankkretsen. Själv-cirkulation konstateras i mätningarna (se figur 3.2) och påtalas också av Persson et al. (1996) Solvis föreskriver att en backventil monteras i ledningen och i tappvattenautomaten från Sonnenkraft är backventilen inkluderad.

En mycket förenklad simulering visar hur själv-cirkulationen skulle kunna påverka energiförbrukningen för turbinpumpen. Det har antagits att själv-cirkulationsflödet är proportionellt mot medeltemperaturen i tanken (3,6l/h vid en tanktemperatur av 60°C). Under antagande att själv-cirkulation förekommer kontinuerligt med detta flöde och att värmväxlarens värmeförlustkoefficient är 0.2 W/K (ca 10W vid en temperatur av 70°C i värmväxlaren), minskar energibesparingen jämfört med referenssystemet från 339 kWh/år till 171 kWh/år. Om värmeförlusten i stället antas vara 1W/K ger tappvattenautomaten istället en ökad energiförbrukning jämfört med referenssystemet med 10 kWh/år.

Ovanstående beräkningar visar att energiförbrukningen kan öka kraftigt om det förekommer kontinuerlig själv-cirkulation och värmeförluster från värmväxlaren. Tappvattenautomatens fördelar kan lätt ätas upp av ökade värmeförluster från systemet. Det är alltså mycket viktigt att åtgärder vidtas för att undvika själv-cirkulation genom tappvattenautomaten

6 REFERENSER

- Bales, C (2000). *Combiteest-Program Manual*. SERC, 781 88 Borlänge, Högskolan Dalarna.
- Bales, C (2001). *Parameter Identification Manual for Trnsys Models at SERC*. SERC, 781 88 Borlänge, Högskolan Dalarna.
- Drück H., Pauschinger T. (1996). *Trnsys Type 140, Multiport Store Model*. Stuttgart, Germany. ITW, University Stuttgart
- Helgesson, A., Larsson, S. (1998) *Utveckling av tappvattenpump för villasystem*. UR 98:10, Vattenfall Utveckling AB, Älvkarleby.
- Huber C. (1998). *Fittrn / DF - TRNSYS Parameter identification with DF for Windows 95/NT*. Rapperswil, Switzerland. SPF-HSR, Rapperswil, Switzerland
- Klein S. et al. (1996). *Trnsys 14.2 Transient Simulation Program*. Madison WI, USA. SEL, University of Wisconsin Madison
- Lindberg E. (1998). *Presim*. SERC, 781 88 Borlänge, Högskolan Dalarna
- Lorenz, K. (2001) *Kombisolvärmsystem, Utvärdering av möjliga systemförbättringar*. Institutionen för Installationsteknik, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.
- Lorenz K., Persson T., Bales C. (1997). Comparison of External DHW Load Side Heat Exchange Units for the Production of Domestic Hot Water. *North Sun '97*(Eds),pp161-168, Espoo, Finland.
- Lorenz K., Persson T., Tepe R., Bales C. (1998). Variation of System Performance with Design and Climate for Combisystems in Sweden. *Eurosun '98* (Eds),ppIV.2.1.7, Portoroz, Slovenia.
- Persson, T., Lorenz, K. och Bales, C. (1996). *Provning av tappvattenautomater kopplade till ackumulatortankar*. SERC, Högskolan Dalarna, Borlänge.
- Spirkl W. (1999). *DF - Dynamic Systems Testing*. Germering, Germany. In-Situ Scientific Software
- Streicher W. (2000). *Subtask C Milestone Report C 0.2 - Reference Conditions*. Gleisdorf, Austria. IEA-SHC Task 26 Solar Combisystems
- Thomas, B. (1992) *Modern Reglerteknik*. Tredje upplagan Liber AB. Stockholm: ISBN 91-47-05085-3.