

Smart heat store

TNO 2023 R11300 – 10 april 2024

Smart heat store

Auteurs	Andries van Wijhe
Rubricering rapport	TNO Publiek
Titel	TNO Publiek
Rapporttekst	TNO Publiek
Aantal pagina's	11 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	0
Opdrachtgever	TKI Urban Energy
Programmanummer	1921404
Projectnaam	Smart heat store
Projectnummer	060.46724

Alle rechten voorbehouden

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

© 2024 TNO

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave	3
1 Openbare samenvatting	4
Ondertekening.....	11

1 Openbare samenvatting

Achtergrond

Voor het verwarmen van een woning met een lucht-water warmtepomp is elektriciteit nodig. De hoeveelheid elektriciteit die nodig is, hangt naast het benodigde verwarmingsvermogen af van de buitentemperatuur en de temperatuur in het afgiftesysteem.

Om verschillende redenen is de vraag en het aanbod op het elektriciteitsnetwerk wisselend, met als gevolg een continue variërende economische waarde van een kWh elektriciteit. De combinatie van een wisselende elektriciteitsprijs, warmtevraag en systeemrendement van een woning met warmtepomp, zorgt voor een grote variatie in de prijs om een kWh warmte te maken.

Als het mogelijk is om deze warmte op te slaan in een warm watervat, kan een economisch voordeel behaald worden. Dit kan door de warmte 'op te wekken' met de warmtepomp als de elektriciteitsprijs laag is, en de warmte weer te benutten als de elektriciteitsprijs hoog is. Echter heeft het opslaan van warmte in een watervat een aantal negatieve uitwerkingen op het systeemrendement van een woning met warmtepomp, deze zijn:

- Thermische energiestromen gaan altijd van hoge naar lage temperatuur, dus de temperatuur van de buffer moet altijd hoger zijn dan de temperatuur waarop de warmte gebruikt kan worden. Naarmate er meer warmte opgeslagen wordt, stijgt de temperatuur. Het rendement van een warmtepomp neemt af bij het hoger worden van de afgiftetemperatuur;
- Warmwaterbuffers hebben altijd een warmteverlies naar de omgeving;
- Een warmtepomp draaiend op een hoog vermogen heeft een lager rendement. Maar om gebruik te maken van een tijdelijk laag energietarief, is het noodzakelijk om op een hoger vermogen te draaien.

Belangrijk is dus om een afweging te maken of en wanneer het beter is het buffervat te verwarmen of wanneer het beter is om direct het huis te verwarmen met een warmtepomp. Deze keuze is niet evident, omdat het een (energie/kosten/uitstoot) optimalisatie betreft met veel parameters die elkaar beïnvloeden. Deze keuze kan dan ook alleen gemaakt worden op basis van een evaluatie van het hele systeem.

Systeem

In dit project is een model gebruikt van een warmtebuffer van Borg Energy; een ondergronds druk loos vat met een waterinhoud van ongeveer 4m³. In deze versie van het product wordt de warmte naar het vat overgedragen via warmtewisselspiralen in het vat. De warmte wordt opgewekt door middel van een lucht-water warmtepomp.

Methode

In dit project is een algoritme uitgewerkt dat bepaalt hoe de woning wordt verwarmd op basis van een versimpeld model (Model gestuurde regeling). Er wordt een aantal uur vooruit gerekend met behulp van weersverwachtingen en de komende elektriciteitsprijs. Het systeem kan in 3 modi draaien:

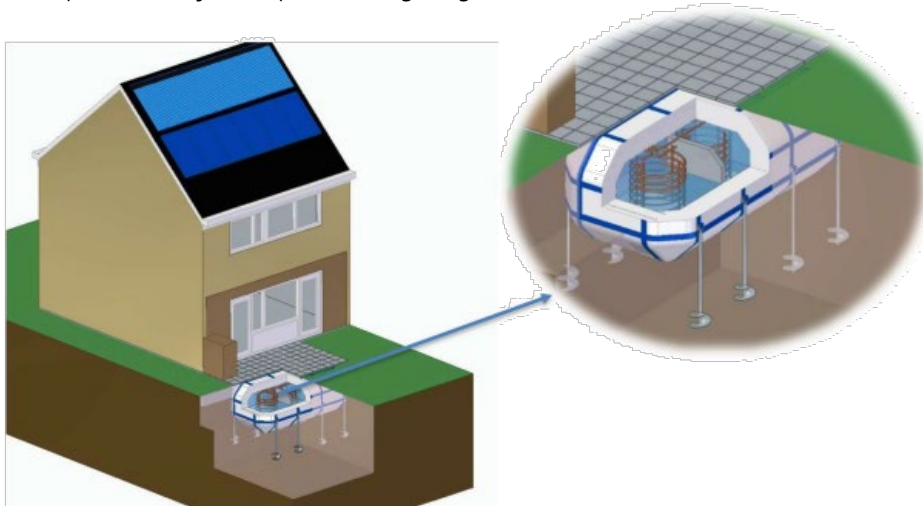
1. Warmtepomp verwarmt het huis zonder het gebruik van een buffer. Dit is tevens de referentie;
2. Warmtepomp verwarmt het huis op een groter vermogen. Hierdoor is de warmtepomp minder tijd kwijt aan het voldoen aan de warmtevraag. De rest van de tijd verwarmt de warmtepomp de buffer;
3. De warmtepomp staat uit en het huis wordt verwarmd met warmte uit de buffer.

Het algoritme 'test' vervolgens alle combinaties van de modi en beoordeelt deze op een vooraf bepaalde *kostenfunctie*. Deze functie beschrijft het doel van de regeling zoals bijvoorbeeld energiebesparing, kostenbesparing of CO₂ uitstoot.

In dit project is het niet mogelijk om de regeling te testen op een bestaande installatie. In plaats daarvan is de regeling getest op een uitgebreid dynamisch model van de woning, het afgiftesysteem en de buffer. Dit is vergelijkbaar met een digital twin. Dit heeft als voordeel dat een baseline gemaakt kan worden en het effect van invloeden getoetst kan worden aan de hand van een parametrische studie.

In het uitgebreide model zijn een aantal aspecten meegenomen die niet in het versimpeld model zitten, zoals thermische massa, thermostaatschakelingen en de thermische gelaagdheid van het warmtebuffer. Dit model is gebaseerd op een pilotproject in de Green Village (Summerhybrid)

Een manier om de regeling te evalueren, is door een (fysisch) versimpeld systeem te optimaliseren, waarbij de beste uitkomst ook analytisch bepaald kan worden. Er wordt direct inzichtelijk gemaakt in hoeverre de beoogde prestatie (bijv. energiebesparing) verwijderd is van de prestatie bij een optimale regeling of wel van wat maximaal haalbaar is.



Figuur 1: Summerhybrid system, ondergronds warm waterbuffer voor warmteopslag

Resultaten

De resultaten van dit werk zijn niet bedoeld om het concept van de warmteopslag te beoordelen op het besparingspotentieel. De gebruikte modellen zijn hiervoor niet generiek genoeg. Echter kunnen de resultaten wel gebruikt worden om te zien wat de effecten (kwalitatief) zijn van bijvoorbeeld een verandering in de kostfunctie. Er is ook gekeken naar de effecten van de lengte van de tijdhorizon bij het voorspellen van de verwarmingskosten en het tijdsinterval van de rekenstappen.

Vergelijking met versimpeld model

In eerste instantie is de regelaar getest op een versimpeld systeem, waarbij het warmteverlies van de buffer verwaarloosd is en het opwekkingsrendement van de warmtepomp onafhankelijk is van de afgiftetemperatuur en buitenluchttemperatuur. Deze (onterechte) aannames hebben als gevolg dat de prestaties van het systeem onafhankelijk zijn van de temperatuur van de buffer zelf en wanneer de warmte gegenereerd wordt.

Dit heeft als rekenkundig voordeel dat de voordeligste oplossing analytisch bepaald kan worden op basis van de elektriciteitsprijs alleen, omdat het opslaan van warmte energetisch geen verlies (of winst) kan opleveren. De ideale oplossing kan dan als volgt worden omschreven:

“Verwarm de buffer op nominaal vermogen als de elektriciteitsprijs lager is dan een richtwaarde, verwarm anders de woning met warmte uit de buffer.”

Door deze richtwaarde te variëren zal het buffer netto laden of ontladen. De richtwaarde wordt zo gekozen dat de eindtemperatuur van de buffer gelijk is aan de begintemperatuur. Voor deze regeling is perfecte voorkennis nodig van de elektriciteitsprijs en warmtevraag over de hele evaluatieperiode. In het algoritme zal deze prijs beschikbaar zijn voor de komende 24 uur. De voorspelling door de regelaar met model is gedaan in 7 discrete tijdstappen. De kostfunctie is gedefinieerd als de totale kosten, gedeeld door de totale opgebrachte warmte in de komende 24 uur. Om te zorgen dat het buffer niet te ver leeg raakt, is er een malus toegevoegd als de buffer ontladen wordt.

Een simulatie is gedaan om te evalueren hoe goed de regelaar in staat is een optimalisering uit te voeren voor een periode van 3, 8 en 31 dagen. Een perfect werkende regelaar zal het energiegebruik van de oplossing met voorkennis kunnen benaderen. In Tabel 1 is dit vergelijk gegeven waarbij de regelaar een 10-21% hogere energiekosten heeft dan mogelijk op basis van een optimalisatie met voorkennis.

Tabel 1: Test van het algoritme op een zodanig versimpeld model, dat een beste oplossing analytisch bepaald kan worden met behulp van voorkennis. *Ideale oplossing met voorkennis is in de praktijk niet mogelijk, omdat er meer buffercapaciteit nodig is, aangezien het “voorkennis algoritme” geen rekening houdt met hoeveel warmte in de buffer zit.

	3 dagen	8 dagen	31 dagen
Gemiddelde elektriciteitsprijs	€0.286/kWh	€0.352/kWh	€0.348/kWh
Energiekosten algoritme ten opzichte van ideale oplossing met voorkennis	+10%	+21%	+11%*

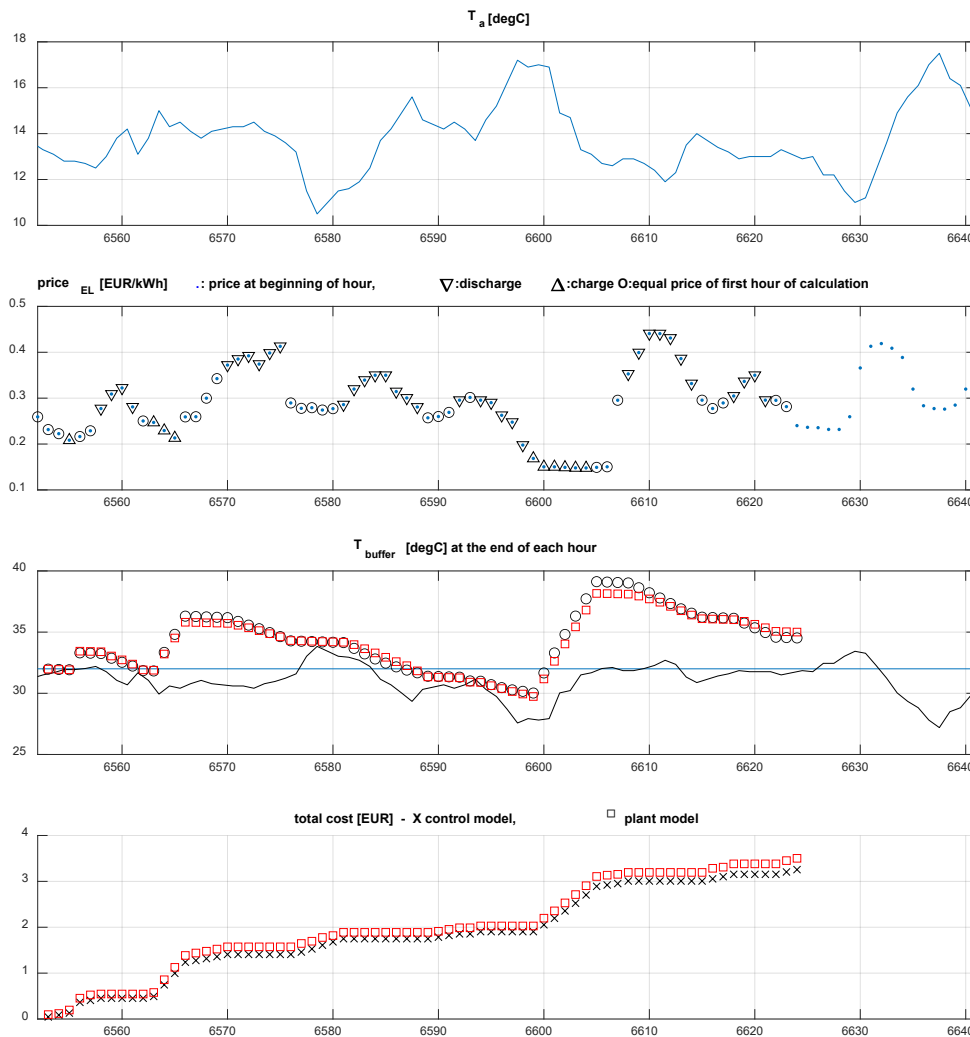
Voor een werkende regelaar zijn tenminste drie dingen nodig:

- Een werkend algoritme;
- Een versimpeld model, waarmee een accurate voorspellingen van het energieverbruik mogelijk is;
- Voorspellingen van het weer en de energieprij.

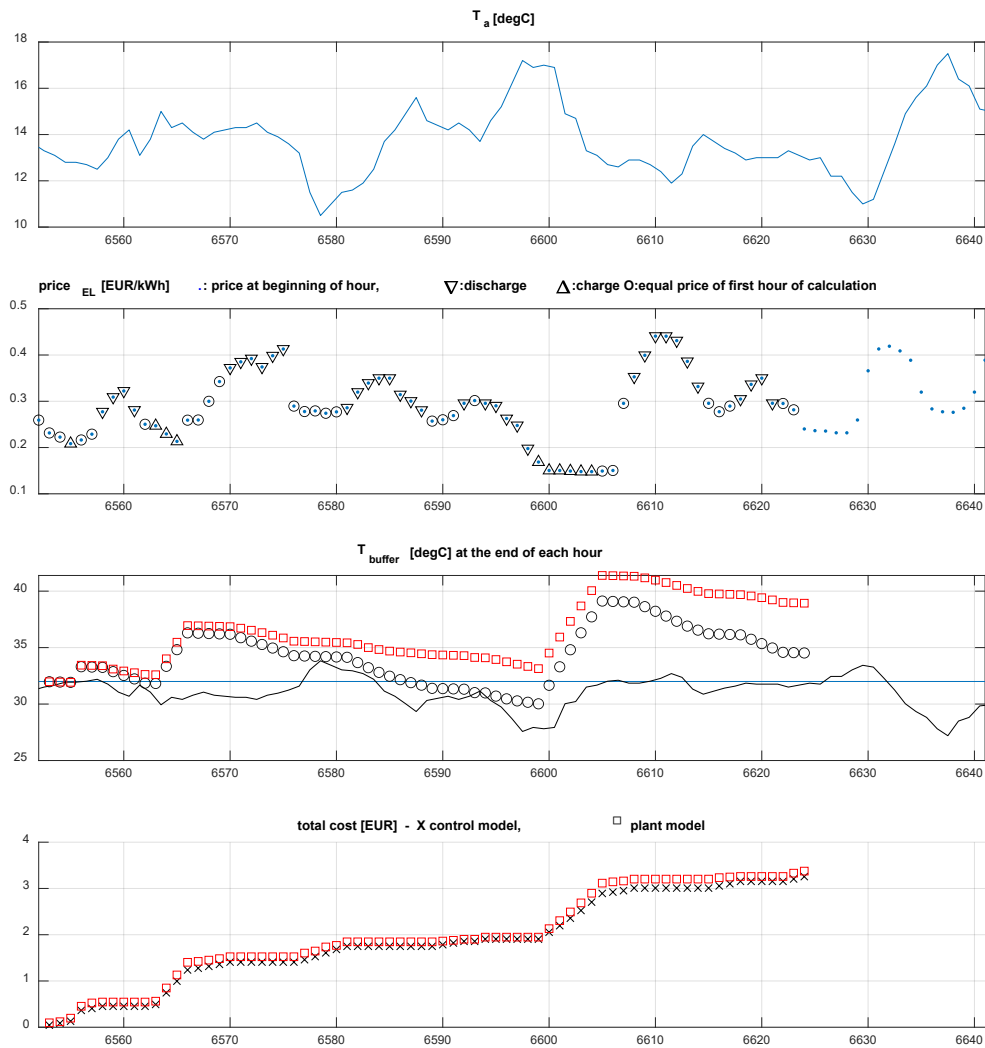
In dit project is niet gekeken naar de kwaliteit van voorspellingen. De aanname is gedaan dat de elektriciteitsprijs en de buitentemperatuur exact voorspeld kunnen worden. De elektriciteitsprijs is minimaal 24 uur vooraf bekend.

Vergelijking met uitgebreide dynamische model

Het versimpelde model, dat in de regeling gebruikt wordt, is vervolgens vergeleken met het uitgebreide dynamische model. Op deze manier kan geëvalueerd worden of dit model in staat is om een goede representatie te geven van de werkelijkheid. Uit Figuur 2 blijkt dat de warmtevraag, warmtelevering- en onttrekking aan de buffer en de stookkosten goed voorspeld worden. Echter zit in het versimpelde model geen effect van zoninstraling in de woning. Zodra de zoninstraling ‘aangezet’ wordt in het uitgebreide dynamische model, ontstaat er een verschil tussen de resultaten van beide modellen (derde grafiek in Figuur 3).



Figuur 2: Vergelijk van twee modellen die dezelfde beginconditie hebben en waarbij dezelfde beslissingen genomen worden. Bovenste grafiek: Buitentemperatuur. Tweede grafiek: Prijs per kWh met daarin weergegeven of de buffer laadt (^), ontlad (v) of de warmtepomp direct gebruikt wordt (.), Derde grafiek: buffer temperatuur, Rood volgens versimpeld model, zwart volgens uitgebreid model. Onderste grafiek: cumulatieve energiekosten verwarming, rood volgens versimpeld model, zwart uitgebreid model.



Figuur 3: Zelfde situatie en parameters als Figuur 2, echter nu met zoninstraling in het uitgebreide model.

Discussie

Het aansturen van een thermische buffer in combinatie met een warmtepomp is om een aantal redenen een complex optimalisatievraagstuk. Het rendement van een lucht-water warmtepomp is onder meer afhankelijk van de temperatuur van de buffer en van de buitenlucht. Het verlies van een buffer is afhankelijk van de temperatuur van de buffer. Bovendien is de warmtevraag en minimum temperatuur voor warmteafgifte weer afhankelijk van de buitentemperatuur en zoninstraling.

In dit project is een model gestuurde regeling gebouwd welke op basis van voorspellingen van de buitenluchttemperatuur en de elektriciteitsprijs een laad/ontlaadstrategie uitrekent. Dit gebeurt doormiddel van een gesimplificeerd model van het verwarming/buffer systeem. Het regelalgoritme deelt de horizon op in een aantal vooraf gedefinieerde segmenten en rekent alle combinaties door. Alle combinaties worden vervolgens voorzien van een score op basis van een kostenfunctie. De regelaar geeft vervolgens de oplossing die het beste scoort terug.

Er is gebleken dat de keuze van de kostenfunctie cruciaal is voor het goed werken van de regelaar. Bijvoorbeeld de oplossing: “Alle warmte uit het vat gebruiken en de warmtepomp niet gebruiken.” geeft geen oplossing voor de efficiëntie van de warmtepomp en kan daardoor moeilijk beoordeeld worden.

De gebruikte modellen en algoritmes zijn in een proof-of-conceptfase. Hierdoor zijn deze niet numeriek efficiënt en is de rekenhorizon niet verder gekomen dan 24 uur. Dit is gezien de energie-inhoud van het buffer vrij kort. Voor dit type berekeningen is een uur een geschikte tijdstap, vooral omdat de elektriciteitsprijs per uur bepaald is. Door een aantal uren samen te voegen tot 1 tijdstap, kan er aanzienlijk bespaart worden in rekentijd. Echter is dit gelimiteerd tot maximaal ~3 uur. Bij het langer laden van het buffer stijgt de temperatuur te hard, waardoor het rendement van de warmtepomp relatief ver daalt.

Om goed gebruik te kunnen maken van lage energieprijzen, moet het vermogen van de warmtepomp hoger zijn dan de warmtevraag. De meeste lucht-water warmtepompen hebben bij hogere buitentemperaturen meer capaciteit dan nominaal is opgegeven door de fabrikant. Uit de simulaties is gebleken dat het in vollast draaien van de warmtepomp tijdens het laden van het buffer aan te raden is, simpelweg omdat er dan meer gebruik gemaakt kan worden van lage elektriciteitsstarieven. Er is niet onderzocht of het rendeert een warmtepomp met een grotere capaciteit te gebruiken dan nodig is voor de woning.

Omdat de regelaar niet is getest op een echt systeem, is een uitgebreid dynamisch model gebruikt van een woning met warmtepomp en buffer. Het versimpelde model van de regelaar heeft een beginconditie nodig om de simulaties te kunnen starten. In een echt systeem zal deze bepaald moeten worden aan de hand van metingen. In dit project zijn de waardes virtueel gemeten in het uitgebreide model.

Tot slot is nog een belangrijke voorwaarde geïdentificeerd voor een goed rendement van dit systeem. De belasting op een kWh elektriciteit voor een Nederlands huishouden is relatief hoog ten opzichte van de kostprijs, ook is dit een vast bedrag per eenheid. Dit heeft als gevolg dat zelfs bij een fluctuerende kostprijs van elektriciteit, de uiteindelijke consumentenprijs fluctuaties gedempt zijn. Omdat het opslaan van warmte minder efficiënt is, moet het prijsvoordeel van de elektriciteit groot genoeg zijn.

Conclusies

In dit werk is een model gestuurde regeling voor een warmtebuffer ontworpen, deze regeling gebruikt een rekenkundig versimpeld model om de verschillende regelstrategieën te evalueren op basis van een kostenfunctie. De best scorende strategie wordt dan in de praktijk toegepast. Omdat er geen praktisch systeem beschikbaar is om de regeling te testen, is de regeling getest op een tweetal ‘virtuele systemen’, te weten een fysisch versimpeld model en een uitgebreid dynamische model van een woning met watervat.

De MPC-regeling is in staat om bij het fysisch versimpeld model de analytisch berekende minimale energiekosten +10-20% te realiseren (Zie: tabel 1). De analytische berekening maakt hierbij gebruik van voorkennis. Bij het uitgebreide model, waarbij ook warmteverlies en opwekkingsrendement als functie van de buffertemperatuur meegenomen is, is de minimale energiekosten niet analytisch te bepalen en kan de regelaar niet op deze manier beoordeeld worden.

Wel is aangetoond dat op korte termijn het voorspellend model een goede representatie geeft voor het uitgebreide dynamische model als het gaat om warmtebehoefte en buffertemperatuur. Aanbevolen wordt om zinstraling in het voorspellend model mee te nemen.

Ondertekening

TNO) Mobility & Built Environment) Delft, 10 april 2024

Regien Kroeze
Research Manager

Andries van Wijhe
Auteur

Mobility & Built Environment

Molengraaffsingel 8
2629 JD Delft
www.tno.nl