

Zelflerende regeling voor hybride warmtepompen

Publiek Eindrapport



Datum	17 juli 2024
Auteur(s)	L. Wiersma (Intergas), F.G.H. Koene (TNO), L. Visser (Intergas), R. Kemp (TNO), Y. Bulut (TNO) Contact voor rapport of meer informatie: Europark Allee, 2, 7742 NA Coevorden 088 878 8500
Projectnummer	DEI721013
Projecttitel	Optimale en zelflerende regelingen voor hybride warmtepompen
Uitvoerders project	Intergas (penvoerder), TNO
Looptijd project	01-01-2022 t/m 30-6-2024

Disclaimer: Hoewel de resultaten zorgvuldig tot stand zijn gekomen, zijn Intergas en TNO niet verantwoordelijk voor eventuele schade ten gevolge van toepassing van de resultaten

Samenvatting

Het project "Optimale en zelflerende regelingen voor hybride warmtepompen" werd uitgevoerd door Intergas en TNO van januari 2022 tot juni 2024. Het doel was het ontwikkelen van een geavanceerde besturingsregeling voor hybride warmtepompen die de warmtepomp-inzet maximaliseert, gasverbruik minimaliseert, warmtepomp-prestaties optimaliseert en zich zelflerend aanpast aan woningkenmerken. De ontwikkelde regelaar bestaat uit vier hoofdonderdelen; De slimme thermostaat, de slimme hybride taakverdeler, het algoritme dat gebouweigenschappen leert en de warmteplanner

Het ontwikkelingsproces vond plaats in vier fasen, waarbij de regelaar stapsgewijs werd verbeterd en getest in een slimme praktijkopstelling (emulator) bij TNO. Er werden verschillende woningmodellen (Label E, B1, B2, A) en weerprofielen gebruikt om de prestaties te evalueren. De ontwikkelde slimme thermostaat regelt de ruimtetemperatuur op basis van geleerde gebouweigenschappen, terwijl de slimme hybride taakverdeler bepaalt welke warmtebron (warmtepomp, cv-ketel of beide) moet worden ingezet. Het leeralgoritme verzamelt data over de woning om het interne gebouwmodel te verbeteren, en de warmteplanner optimaliseert het regelgedrag tijdens periodes zonder warmtevraag. Na de ontwikkelingsfase werd een veldtest uitgevoerd van oktober 2023 tot juni 2024 in acht verschillende woningen. De test richtte zich op drie van de vier onderdelen van de regelaar (exclusief de warmteplanner) en had als doel de werking van de vertaalde programmacode te controleren, de algoritmes in de praktijk te testen en de gebruikerservaring te evalueren. De veldtest leverde waardevolle inzichten op:

- Het leren van gebouweigenschappen bleek uitdagend, vooral bij hogere buitentemperaturen en meer zoninstraling.
- Sommige eigenschappen (k_1 en k_2) konden goed worden bepaald, terwijl andere (C_r , C_m , k_4) moeilijker te bepalen bleven.
- De vermogensregelaar functioneerde over het algemeen naar verwachting, maar er waren enkele uitdagingen met trage woningen.

Hoewel de resultaten veelbelovend zijn, werden ook verbeterpunten geïdentificeerd. De invloed van zoninstraling en hogere buitentemperaturen op het leerproces moet verder worden onderzocht. Daarnaast is optimalisatie nodig voor verschillende woningtypes. Intergas is van plan de zelflerende regelaar te implementeren in nieuwe producten, maar er is nog doorontwikkeling nodig om de regelaar betrouwbaar en optimaal te laten functioneren. Dit project heeft een belangrijke stap gezet in de ontwikkeling van slimme regelingen voor hybride warmtepompen, wat zal bijdragen aan de transitie naar een aardgasvrije energievoorziening in de komende jaren.

Inhoudsopgave

Samenvatting	2
Inhoudsopgave	4
1 Gegevens project	5
2 Inhoudelijk eindrapport.....	6
2.1 Inleiding	6
2.2 Doelstelling.....	6
2.3 Werkwijze	7
2.3.1 Slimme praktijktest	7
2.3.2 Veldtest	9
2.4 Resultaten van het project.....	10
2.4.1 Slimme praktijktesten	10
2.4.2 Veldtest	12
2.5 Mogelijkheden voor spin off en vervolgactiviteiten.....	14
2.6 Conclusies.....	14

1 Gegevens project

Projectnummer	DEI721013
Projecttitel	Optimale en zelflerende regelingen voor hybride warmtepompen
Uitvoerders project	Intergas Verwarming B.V. (penvoerder), TNO
Looptijd project	01-01-2022 t/m 30-6-2024

Dit DEI+ project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat en het Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties.

2 Inhoudelijk eindrapport

2.1 Inleiding

In de komende jaren moeten 30.000 tot 50.000 bestaande woningen per jaar aardgasvrij gemaakt worden¹. In een transitie naar een aardgasvrije energievoorziening, kunnen hybride warmtepompen een belangrijke rol spelen. Een hybride warmtepomp is een combinatie van een lucht-water-warmtepomp en een gasketel, waarbij het grootste deel van de warmtevraag (de 'basislast') wordt geleverd door de warmtepomp, en het overige deel (de 'pieklast') wordt geleverd door de ketel.

De hybride warmtepomp dient ervoor te zorgen dat het aandeel warmtelevering door de warmtepomp zo groot mogelijk is, en het gasgebruik zo laag mogelijk. Echter, uit de ervaring die is opgedaan bij systemen in het veld blijkt dat de huidige regeltechniek voor hybride warmtepompen nog verre van optimaal is. Dit komt doordat de regelingen niet zijn afgestemd op de hybride warmtepomp en de woning waar deze is geïnstalleerd. Aangezien het gedrag van de optimale regelaar afhangt van het gebouw waarin de verwarmingsinstallatie is geplaatst, zal een optimale regelaar een aantal van de gebouweigenschappen moeten leren.

2.2 Doelstelling

Het centrale doel van dit project was de ontwikkeling en verfijning van een geavanceerde besturingsregeling voor hybride warmtepompen. De centrale doelstellingen van de regelaar zijn:

- Maximaliseren van warmtepomp-inzet
- Minimaliseren van gasverbruik
- Optimaliseren van warmtepomp-prestaties
- Zelflerende aanpassing aan woningkenmerken

Het plan van eisen staat omschreven in het document "D1.1 Plan van Eisen". Om de effectiviteit van de regeling te kunnen vaststellen, is een heldere definitie van 'goed functioneren'

¹ <https://www.rvo.nl/subsidie-en-financieringswijzer/demonstratie-energie-en-klimaatinnovatie-dei/dei-innovaties-aardgasloze-woningen-wijken-en-gebouwen-2021>

essentieel. Het plan definieert concrete eisen en wensen voor de regelaar, waaronder:

- Nauwkeurige temperatuurregulatie
- Snelle respons op temperatuurwijzigingen
- Minimale CO₂-uitstoot
- Lage gebruikskosten
- Beperkte geluidsproductie

Dit gestructureerde beoordelingskader vormt de basis voor verdere technische evaluatie en optimalisatie van de hybride warmtepomp-regeling.

Er zijn geen wijzigingen in de doelstellingen tijdens de uitvoering van het project geweest.

2.3 Werkwijze

2.3.1 Slimme praktijktest

In het document "D1.2 testplan" wordt een testplan beschreven voor het optimaliseren van regelingen voor hybride warmtepompen in het praktijklaboratorium van TNO. In het document "D1.3 Inbouw en ingebruikname van de hybride warmtepomp van Intergas" wordt de meetopstelling beschreven.



Figuur 1 - De slimme praktijkopstelling met de Intergas Xtend warmtepomp bij TNO

Er zijn vier verschillende woningmodellen getest:

1. Label E woning: Een jaren '70 rijtjeshuis van 108 m² zonder isolatie, met dubbelglas en radiators. Het warmteverlies bedraagt 9 kW bij -10 °C.
2. Label B1 woning: Een verbeterde versie van de Label E woning met spouwmuur-, dak- en vloerisolatie en verminderde luchtinfiltratie.
3. Label B2 woning: Identiek aan B1, maar met onverwarmde bovenverdieping.
4. Label A woning: Een moderne tussenwoning uit 1992-2012 van 125 m² met vloerverwarming op de begane grond en radiators op de verdieping. Het warmteverlies is 5 kW bij -10 °C.

Vijf verschillende weerprofielen werden gebruikt, gebaseerd op typische winterdagen:

Gemiddelde temperatuur	Min. temperatuur	Max. temperatuur	Zoninstraling
-1 °C	-3,1 °C	1,8 °C	Gemiddeld
2 °C	-0,3 °C	5,8 °C	Veel
4 °C	2,4 °C	5,4 °C	Weinig
7 °C	5,6 °C	9,1 °C	Gemiddeld
12 °C	9,6 °C	15 °C	Veel

De eindtest werd gedaan met een fysieke warmtepomp in een klimaatkamer, een waterzijdige gebouwsimulator en drie verschillende regelaars (1, 2 en 3+) over verschillende scenario's.

De testen werden uitgevoerd tussen augustus 2023 en februari 2024, met variaties in:

- Woningmodellen (B1, A, E)
- Weerprofielen (2 °C, 4 °C)
- Dag- en nachtverlaging (ja/nee/auto)

Het doel was om de prestaties van de verschillende regelaars te vergelijken en te optimaliseren voor verschillende woningtypen en weersomstandigheden.

2.3.2 Veldtest

De veldtest werd uitgevoerd in het winterseizoen 2023-2024. Deze staat omschreven in het document "D6.1 Veldtest".

Er werden verschillende onderdelen van een slimme regeling voor warmtepompen getest in acht verschillende woningen.

De test had drie hoofddoelen:

1. Controleren van de werking van de nieuwe programmacode
2. Testen van de objectieve werking van de algoritmes
3. Evalueren van de subjectieve ervaring van gebruikers

Er waren drie specifieke testonderdelen:

1. Softwarecontrole
 - Vertaling van Python-code naar C-code voor implementatie op de warmtepomp
 - Verificatie van de correcte werking van de vertaalde code
2. Objectieve werking
 - Testen of de algoritmes in de praktijk hetzelfde functioneren als in de emulator testfaciliteit
 - Onderzoeken hoe de algoritmes omgaan met echte, mogelijk onzuivere data uit het veld
 - Controleren of de regeling voldoet aan eerder gestelde eisen (temperatuur, opwarm snelheid, aantal schakelingen, etc.)
3. Subjectieve werking
 - Evalueren van de gebruikerservaring
 - Verzamelen van feedback over mogelijke verbeteringen

Van de vier onderdelen van de slimme zelflerende hybrideregelaar werden er drie getest:

1. Algoritme dat gebouweigenschappen leert
2. Slimme thermostaat

3. Slimme hybride taakverdeler

De warmteplanner (4e onderdeel) werd niet getest vanwege technische beperkingen en tijdgebrek.

De software werd getest in acht verschillende woningen, variërend in bouwjaar, woonoppervlak en verwarmingssysteem om een diverse testomgevingen te creëren.

2.4 Resultaten van het project

2.4.1 Slimme praktijktesten

De volledige resultaten van de slimme praktijktesten zijn omschreven in het document "D4.1 tussenrapport".

De regelaar bestaat uit vier hoofdonderdelen:

1. Slimme thermostaat
2. Slimme hybride taakverdeler
3. Algoritme dat gebouweigenschappen leert
4. Warmteplanner

De ontwikkeling vond plaats tussen maart 2022 en augustus 2023 in vier fasen:

Fase 1 (april 2022): Filterende thermostaat en taakverdeler

De eerste versie bestond uit een eenvoudige thermostaat met een slim filter voor de gemeten ruimtetemperatuur en een basale taakverdeler. Belangrijke aspecten waren:

- Gebruik van een watertemperatuur-thermostaat vanwege de complexiteit van vermogensbepalingen.
- Noodzaak van filtering van de kamertemperatuur om verstoringen te dempen en efficiëntie van de warmtepomp te verhogen.
- Implementatie van een observer om de ruimtetemperatuur te filteren en het storend vermogen te schatten.

Fase 2: Verbetering gebouwmodel

In deze fase werd het gebouwmodel verbeterd om nauwkeuriger temperatuurvoorspellingen te maken, vooral gedurende de nacht.

Fase 3: Uitbreiding gebouwmodel en implementatie warmteplanner

Deze fase omvatte:

- Uitbreiding van het gebouwmodel
- Omzetting van de thermostaat naar een vermogensthermostaat
- Implementatie van de warmteplanner voor efficiënte nacht- en dagverlaging

Fase 4: Diverse verbeteringen

In de laatste fase werden verschillende verbeteringen aangebracht aan de warmteplanner en observer.

De slimme thermostaat regelt de ruimtetemperatuur op basis van geleerde gebouweigenschappen. Het doel is om voor elke woning optimaal ingesteld te zijn, rekening houdend met factoren zoals thermische verliezen, thermische massa en type warmteafgiftesysteem.

De Slimme hybride taakverdeler bepaalt of de warmtepomp, cv-ketel of beide warmte moeten leveren. De keuze is gebaseerd op factoren zoals buitentemperatuur, watertemperatuur, energiekosten en CO₂-uitstoot.

Het algoritme voor het leren van gebouweigenschappen verzamelt data over de woning om het interne gebouwmodel van de thermostaat te verbeteren. Verschillende eigenschappen, zoals warmteverlies en warmtecapaciteit, worden geleerd door specifieke punten in de data te analyseren.

De warmteplanner is een unieke oplossing voor het nachtverlagingsvraagstuk. Het bepaalt het optimale regelgedrag tijdens periodes zonder warmtevraag (bijvoorbeeld 's nachts of bij afwezigheid) om CO₂-uitstoot of energiekosten te minimaliseren.

De regelaar werd ontwikkeld met behulp van de TNO emulator en getest in verschillende scenario's. Belangrijke aspecten van het ontwikkelingsproces waren:

- Stapsgewijze ontwikkeling en testen van de regelaar
- Gebruik van een intern gebouwmodel om de benodigde watertemperatuur of verwarmingsvermogen te bepalen
- Implementatie van verschillende gebouwmodellen met variërende aantallen parameters

- Iteratieve verbetering van het gebouwmodel en de thermostaat op basis van testresultaten

De ontwikkelde Intergas regelaar werd tijdens het ontwikkelproces regelmatig beproefd in de slimme praktijktest emulator van TNO. De prestaties werden beoordeeld voor vier typen woningen onder verschillende weersomstandigheden. Door de resultaten van deze testen te analyseren (zie document “D4.1 tussenrapport”), werd de regelaar in meerdere iteratieslagen geoptimaliseerd.

2.4.2 Veldtest

De veldtest is uitgevoerd door Intergas en vond plaats van oktober 2023 tot juni 2024 en had drie hoofddoelen:

1. Controleren of de vertaalde programmacode (van Python naar C) correct werkte op de warmtepomp.
2. Testen of de algoritmes in de praktijk hetzelfde functioneerden als in de emulator testfaciliteit.
3. Evalueren van de gebruikerservaring met de nieuwe regeling.

De veldtest werd uitgevoerd in acht verschillende woningen met de Intergas Xtend hybride warmtepomp, variërend in bouwjaar (1890-2014), woonoppervlak (80-505 m²), en verwarmingssysteem (radiators, vloerverwarming, luchtverwarming). De test richtte zich op drie van de vier onderdelen van de slimme zelflerende hybrideregelaar:

1. Algoritme voor het leren van gebouweigenschappen
2. Slimme thermostaat
3. Slimme hybride taakverdeler

De warmteplanner, het vierde onderdeel, werd niet getest vanwege technische beperkingen.

Het leren van gebouweigenschappen bleek in de praktijk uitdagend:

- Initiële bugs in de software werden ontdekt en opgelost.
- Sommige gebouweigenschappen (k1 en k2) konden goed worden bepaald, vooral in koude, donkere periodes.

- Andere eigenschappen (C_r , C_m , k_4) bleven moeilijk te bepalen, vooral bij hogere buitentemperaturen en meer zoninstraling.
- Een nieuw algoritme voor het bepalen van C_w (warmtecapaciteit van het warmteafgiftesysteem) werd ontwikkeld en leek goed te werken.

De werking van de slimme thermostaat en taakverdeler werd getest in april, mei en juni 2024:

- De vermogensregelaar functioneerde over het algemeen naar verwachting.
- Op één locatie werd een significante onderschrijding van de gewenste temperatuur geconstateerd, mogelijk door de 'traagheid' van de woning.
- Na het oplossen van enkele bugs werkte de verdeling tussen warmtepomp en cv-ketel naar wens.

Uitdagingen en Verbeterpunten

1. Zoninstraling: Naarmate het lente werd, bleek het moeilijker om gebouweigenschappen te leren door de toegenomen invloed van zoninstraling.
2. Hogere buitentemperaturen: Deze maakten het bepalen van sommige gebouweigenschappen minder betrouwbaar.
3. Variërende meetwaarden: Vooral voor C_r , C_m en k_4 werden grote variaties waargenomen, wat aangeeft dat de algoritmes verder verbeterd moeten worden.
4. Trage woningen: In sommige gevallen leidde de traagheid van een woning tot onderschrijding van de gewenste temperatuur, wat vraagt om verdere optimalisatie van de regelaar.

De veldtest heeft waardevolle inzichten opgeleverd in de werking van de zelflerende regelaar voor hybride warmtepompen. Hoewel sommige aspecten goed functioneerden, zoals het bepalen van bepaalde gebouweigenschappen en de algemene werking van de vermogensregelaar, werden ook verschillende uitdagingen geïdentificeerd. Deze bevindingen bieden een basis voor verdere verbetering en optimalisatie van het systeem, met name wat betreft het leren van gebouweigenschappen onder verschillende

weersomstandigheden en het finetunen van de regelaar voor verschillende woningtypes.

2.5 Mogelijkheden voor spin off en vervolgactiviteiten

Intergas is voornemens de zelflerende regelaar uit te ontwikkelen voor implementatie in nieuwe producten zoals warmtepompen, hybride warmtepompen en Cv-ketels. Gezien de eerste resultaten laten zien dat de regeling kan werken, maar er nog doorontwikkeling benodigd is om de regelaar betrouwbaar en optimaal te doen werken, zal Intergas de komende jaren enkele FTE hiervoor beschikbaar maken.

De praktijkimulator bij TNO heeft zich nuttig bewezen in het creëren van reproduceerbare omstandigheden waar dergelijke regelingen goed getest kunnen worden.

2.6 Conclusies

De slimme regelaar werkt goed in woningen met beperkt warmteverlies. In deze woningen kan de regelaar de ruimtetemperatuur nauwkeurig regelen en het aandeel van de warmtepomp maximaliseren. Dit leidt tot een lager gasverbruik en lagere CO₂-uitstoot.

Een betere inschatting van gebouweigenschappen kan de prestaties verder verbeteren. De regelaar leert de eigenschappen van het gebouw, maar dit proces kan nog worden geoptimaliseerd. Een nauwkeurigere inschatting van parameters zoals warmteverlies en thermische massa zou kunnen leiden tot een nog efficiëntere regeling.

De keuze voor testscenario's heeft een grote invloed op de resultaten. De prestaties van de regelaar zijn getest onder verschillende omstandigheden, maar de gekozen scenario's bepalen in hoge mate hoe goed de regelaar presteert. Dit onderstreept het belang van een zorgvuldige selectie van testomstandigheden voor toekomstige evaluaties.

Mogelijke toekomstige verbeteringen zijn:

- Verfijning van het algoritme dat gebouweigenschappen leert, om sneller en nauwkeuriger te kunnen inspelen op de specifieke kenmerken van een woning.

- Verbetering van de warmteplanner, zodat deze nog efficiënter kan omgaan met periodes van nachtverlaging of afwezigheid.
- Optimalisatie van de hybride taakverdelers, om de samenwerking tussen warmtepomp en cv-ketel verder te verbeteren.
- Integratie van weersvoorspellingen in de regelstrategie, om beter te kunnen anticiperen op toekomstige warmtebehoeften.

De ontwikkelde slimme regelaar is een veelbelovende stap in de richting van efficiëntere hybride warmtepompsystemen. De regelaar biedt met name een unieke oplossing voor het nachtverlagingsvraagstuk, waarbij de warmteplanner bepaalt of nachtverlaging energetisch of financieel voordelig is. Dit is een complexe afweging die voor de meeste gebruikers en installateurs moeilijk te maken is. Hoewel de resultaten positief zijn, erkennen wij dat er ruimte is voor verdere optimalisatie en dat aanvullend onderzoek en ontwikkeling nodig zijn om de prestaties van de regelaar in verschillende woningtypes en onder uiteenlopende omstandigheden te verbeteren.

De veldtest heeft waardevolle inzichten opgeleverd in de werking van de zelflerende regelaar voor hybride warmtepompen. Hoewel sommige aspecten goed functioneerden, zoals het bepalen van bepaalde gebouweigenschappen en de algemene werking van de vermogensregelaar, werden ook verschillende uitdagingen geïdentificeerd. Deze bevindingen bieden een basis voor verdere verbetering en optimalisatie van het systeem, met name wat betreft het leren van gebouweigenschappen onder verschillende weersomstandigheden en het finetunen van de regelaar voor verschillende woningtypes.