

Het potentieel van variabele regelstrategieën op een thermische installatie toegepast in een bestaande woning

Warre LEYNEN

Promotor: Prof. A. Arteconi

Co-promotor: T. Vercammen

Masterproef ingediend tot het behalen van de
graad van master of Science in de industriële
wetenschappen: *energie*

Academiejaar 2023-2024

© Copyright KU Leuven

Zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van zowel de promotor(en) als de auteur(s) is overnemen, kopiëren, gebruiken of realiseren van deze uitgave of gedeelten ervan verboden. Voor aanvragen i.v.m. het overnemen en/of gebruik en/of realisatie van gedeelten uit deze publicatie, kan u zich richten tot KU Leuven Campus Geel, Kleinhoefstraat 4, B-2440 Geel, +32 14 72 13 00 of via e-mail iiw.geel@kuleuven.be.

Voorafgaande schriftelijke toestemming van de promotor(en) is eveneens vereist voor het aanwenden van de in deze masterproef beschreven (originele) methoden, producten, schakelingen en programma's voor industrieel of commercieel nut en voor de inzending van deze publicatie ter deelname aan wetenschappelijke prijzen of wedstrijden.

Voorwoord

Graag zou ik mijn promotor Prof. Alessia Arteconi willen bedanken voor haar begeleiding tijdens het uitvoeren van deze masterproef. Ook wil ik de medewerkers van het Expertisecentrum Energie in Geel, en in het bijzonder mijn copromotor Tom Vercammen, bedanken om mij de mogelijkheid te bieden om dit onderzoek te realiseren binnen hun bedrijf. Voorts wil ik mijn vriendin bedanken voor haar onvoorwaardelijke steun. Tot slot wil ik mijn ouders bedanken voor de kans die ze mij hebben geboden om deze studie te verwezenlijken, waardoor ik een toekomst tegemoet ga met een job die ik met passie kan uitvoeren.

Het uitvoeren van deze masterproef was voor mij een persoonlijke verrijking en is het resultaat van een semester vol onderzoek, ontwikkeling en schrijfwerk, wat ik nu graag met jullie wil delen.

Samenvatting

De studie omvat het potentieel van variabele regelstrategieën op een thermische installatie in een bestaande woning te Hasselt. Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van het Expertisecentrum Energie gevestigd in Geel. Het centrum is betrokken bij een project genaamd Thermi-var, waarin men onderzoek verricht naar het flexibel aansturen van elektrisch aangedreven thermische installaties voor sanitair warm water, verwarming en koeling. Het doel van dit project is om de kennis over flexibele aansturingen te vergroten, drempels voor het toepassen en aanbieden van deze sturingen te verlagen, de mogelijkheden van een gebouw met bijbehorende installatie te evalueren voor optimale efficiëntie en comfort, en tot slot, economische voordelen voor de gebruiker in te schatten bij het toepassen van flexibele thermische installaties.

Meer concreet ligt de focus van deze thesis op het onderzoeken van variabele regelstrategieën binnen één specifieke woning met behulp van de software Hysopt, met als doel na te gaan welke mogelijkheden de software te bieden heeft en of deze een meerwaarde kan betekenen voor het project Thermi-var.

In dit proefschrift wordt de uiteenzetting van het project stap voor stap uitgelegd. Allereerst licht ik beknopt toe hoe ik mezelf de software eigen heb gemaakt. De tweede stap van deze thesis bestaat uit het analyseren van de huidige regelstrategie die is toegepast op de installatie in de woning. Hierna wordt er dieper ingegaan op de specifieke componenten van de installatie en hoe deze er in Hysopt uitzien. Vervolgens wordt de huidige situatie van de woning gemodelleerd en door middel van een simulatie worden de initiële problemen in kaart gebracht en opgelost. Tevens worden er diverse regelstrategieën omschreven, gemodelleerd en gesimuleerd in de Hysopt-software, om zo een overkoepelend antwoord te formuleren op de verschillende onderzoeksvragen namelijk 'Wat is de impact van de verschillende regelstrategieën o.a. het buffervolume op het comfort in de woning en de prestaties van de warmtepomp?'. Ten slotte worden de resultaten van deze strategieën geanalyseerd en met elkaar vergeleken om zo te besluiten welke een meerwaarde bieden voor desbetreffende installatie.

Sleutelwoorden: regelstrategieën, thermische installaties, Thermi-var, Hysopt, warmtepomp

Abstract

The study covers the potential of variable control strategies on a thermal installation in an existing house in Hasselt. This study was commissioned by the Expertise Centre Energy based in Geel. The centre is involved in a project called Thermi-var, in which research is carried out on the flexible control of electrically driven thermal installations for domestic hot water, heating and cooling. The aim of this project is to increase knowledge of flexible controls, lower thresholds for applying and offering these controls, evaluate the potential of a building and its installation for optimal efficiency and comfort, and finally, estimate economic benefits for the user when applying flexible thermal installations.

More specifically, the focus of this thesis is on investigating variable control strategies within one specific dwelling using the software Hysopt, with the aim of finding out what possibilities the software has to offer and whether it can add value to the Thermi-var project.

In this thesis, the exposition of the project is explained step by step. First, I briefly explain how I made myself familiar with the software. The second step of this thesis consists of analysing the current control strategy applied to the installation in the house. This is followed by a closer look at the specific components of the installation and how they look in Hysopt. Next, the current situation of the house is modelled and, through simulation, the initial problems are identified and solved. Also, various control strategies are described, modelled and simulated in the Hysopt software, in order to formulate an overarching answer to the various research questions namely 'What is the impact of the various control strategies a.o. buffer volume on the comfort in the house and the performance of the heat pump?' Finally, the results of these strategies are analysed and compared with each other in order to decide which ones offer added value for the respective installation.

Keywords: control strategies, thermal plants, Thermi-var, Hysopt, heat pump

INHOUD

| | |
|--|------------|
| Voorwoord | i |
| Samenvatting | ii |
| Abstract | iii |
| Lijst met afkortingen | vi |
| 1 Inleiding | 1 |
| 1.1 <i>Probleemstelling</i> | 1 |
| 1.2 <i>Werkwijze</i> | 1 |
| 1.3 <i>Hysopt</i> | 2 |
| 1.4 <i>Onderzoeksvragen</i> | 2 |
| 2 Literatuurstudie | 3 |
| 2.1 <i>Comfort</i> | 3 |
| 2.2 <i>Legionella</i> | 5 |
| 2.2.1 <i>Problematiek</i> | 5 |
| 3 Wat zijn de mogelijkheden met Hysopt | 6 |
| 3.1 <i>Online onderzoek</i> | 6 |
| 3.1.1 <i>Berekening en simulatie</i> | 6 |
| 3.2 <i>Contact met Hysopt</i> | 8 |
| 4 De huidige woning | 10 |
| 4.1 <i>Overzicht van de installatie</i> | 10 |
| 4.1.1 <i>Onderdelen in de installatie</i> | 11 |
| 4.2 <i>Overzicht van noodzakelijke extra componenten in Hysopt</i> | 16 |
| 4.3 <i>Ontwerp van de installatie met zijn oorspronkelijke regelstrategie</i> ... | 19 |
| 4.4 <i>Simulatie van de installatie met zijn oorspronkelijke regelstrategie</i> .. | 24 |
| 4.4.1 <i>Resultaten</i> | 26 |
| 4.4.2 <i>Problemen</i> | 29 |
| 5 Nieuwe regelstrategieën | 30 |
| 5.1 <i>Overzicht</i> | 30 |
| 5.2 <i>Regelstrategie met legionellapreventie</i> | 30 |
| 5.2.1 <i>Resultaten</i> | 33 |
| 5.2.2 <i>Problemen</i> | 35 |
| 5.3 <i>Regeling met een kloksturing op het boilervat</i> | 35 |

| | |
|---|-----------|
| 5.3.1 Resultaten..... | 36 |
| 5.4 <i>Regeling met kloksturing op het boiler- en buffervat met verkleining van het buffervolume</i> | 38 |
| 5.4.1 Resultaat..... | 39 |
| 5.4.2 Problemen..... | 39 |
| 5.5 <i>Regeling met kloksturing op het boiler- en buffervat en stooklijnverschuiving op het buffervat</i> | 40 |
| 5.5.1 Resultaten..... | 42 |
| 5.5.2 Probleem..... | 42 |
| 5.6 <i>Regeling met kloksturing op het boiler- en buffervat</i> | 43 |
| 5.6.1 Resultaat..... | 44 |
| 5.6.2 Problemen..... | 45 |
| 5.7 <i>Regeling rekening houdend met de opbrengsten van de PV-panelen</i> | 46 |
| 5.7.1 Resultaat..... | 47 |
| 6 Resultaten..... | 52 |
| 6.1 <i>Resultaat huidige woning</i> | 52 |
| 6.2 <i>Resultaten van de nieuwe regelstrategieën</i> | 52 |
| 6.3 <i>Analyse</i> | 53 |
| 6.3.1 <i>Kostenanalyse</i> | 54 |
| 7 Conclusie..... | 55 |
| 8 Referenties..... | 56 |

Lijst met afkortingen

| | |
|-------------|---|
| HVAC | Heating, Ventilation and Air Conditioning |
| COP | Coëfficiënt of Performance |
| SCOP | Seasonal Coëfficiënt of Performance |
| PI-regelaar | Proportionele-integrerende regelaar |
| SWW | Sanitair warm water |
| BC | Basic Calculator |
| BCM | Basic Circuit Methodology |
| PWM | Pulse Width Modulation |
| Cv | Centrale verwarming |
| kW | kilo Watt |
| kWh | kilo Watt uur |
| EV | Elektrisch verbruik |
| PV | Photovoltaïsche |

1 INLEIDING

1.1 Probleemstelling

Thermi-var, een project dat onderzoek doet naar het potentieel en de toepasbaarheid van variabel gestuurde thermische installaties, kwam tot inzicht dat er binnen de HVAC-sector in de toekomst nood is aan een dieper inzicht in de mogelijkheden en beperkingen van elektrisch aangestuurde thermische installaties, zoals warmtepompen en warmwaterboilers. Hierbij dienen randvoorwaarden zoals comfort- en systeemeisen en gebouwtypologie in overweging genomen te worden. Het doel is om de kennis omtrent het flexibel aansturen van elektrisch aangedreven thermische installaties voor verwarming en sanitair warm water te vergroten binnen de doelgroep (Vercammen, 2022):

- installateurs sanitair/CV en elektro/domotica;
- aanbieders van flexibele sturingssystemen;
- fabrikanten van elektrisch aangedreven thermische systemen en
- ontwerpers en gebruikers van deze systemen.

Ten tweede bestaat er onzekerheid over de mate waarin de regelstrategieën kunnen toepassen met behulp van de Hysopt-software. De reden waarom we voor deze software kiezen is omdat Hysopt meewerkt aan het Thermi-var project. Binnen dat project onderzoekt men verschillende cases, deze kunnen bestaan uit andere types van woningen met een ander warmteafgiftesysteem. Aan de hand van deze thesis willen we nagaan of de software gebruiksvriendelijk is om ook andere cases hiermee te onderzoeken.

Uiteindelijk wil men achterhalen of het toepassen van verschillende regelstrategieën op een thermische installatie kan zorgen voor een verlaging van de energiekost bij een optimaal comfort.

1.2 Werkwijze

Allereerst werd er een uitgebreide verkenning van de mogelijkheden in Hysopt uitgevoerd. Deze verkenning omvatte het raadplegen van de officiële website en het bekijken van beschikbare online demovideo's. Vervolgens werd er contact opgenomen met de vestiging, waarbij initiële oefeningen werden verstrekt om de kennis van de software te vergroten. Daarna vond er een bezoek aan het bedrijf plaats om het onderzoek nader toe te lichten.

Daaropvolgend werd de focus gelegd op het bestuderen van de desbetreffende woning. De aanpak begon met het onderzoeken van beschikbare gegevens over de woning, gevolgd door een grondige analyse van de installatie. Gedurende dit proces werden specifieke gegevens verzameld over de verschillende onderdelen van de installatie, en er vond overleg plaats met de eigenaar om inzicht te krijgen in diens verwachtingen ten aanzien van de installatie.

Vervolgens vond de modulatie van de bestaande installatie, inclusief de huidige regelstrategie, in Hysopt plaats. Het proces verliep vlot en efficiënt dankzij effectieve communicatie met de medewerkers van Hysopt.

Voorts werden diverse regelstrategieën getest op de installatie met als doel het comfort in de woning te verbeteren en de efficiëntie van de warmtepomp te optimaliseren, aangezien de installatie niet naar behoren functioneerde.

Uiteindelijk werden de verschillende regelstrategieën gesimuleerd en de resultaten grondig geanalyseerd, met als doel een geïnformeerd inzicht te verkrijgen in de meest effectieve aanpassingen voor het verbeteren van de installatieprestaties.

Ten slotte werd er een kostenanalyse uitgevoerd om na te gaan of het toepassen van de verschillende regelstrategieën kan leiden tot een kostenbesparing op de elektrische energie die de warmtepomp verbruikt.

De hierboven vermelde werkwijze is eveneens de leidraad van de verschillende hoofdstukken in deze thesis.

1.3 Hysopt

Hysopt is een softwareprogramma dat wordt gebruikt voor het ontwerpen, analyseren en optimaliseren van HVAC-installaties (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) binnen gebouwen. Het is ontworpen om ingenieurs, ontwerpers en energie-experts te ondersteunen bij het efficiënt ontwerpen en optimaliseren van hydronische systemen, zoals verwarmings- en koelinstallaties. Hier zijn enkele kernpunten over het programma (Van Riet et al., 2019):

- **Modellering van Installaties:** Hysopt stelt gebruikers in staat om hydronische installaties te modelleren, inclusief componenten zoals leidingen, pompen, kleppen en radiatoren.
- **Simulatie en Analyse:** Het programma maakt simulaties mogelijk om het gedrag van de installatie te voorspellen en te analyseren. Gebruikers kunnen verschillende scenario's testen en de prestaties van de installatie optimaliseren.
- **Variabele Regelstrategieën:** Hysopt ondersteunt het implementeren en testen van verschillende regelstrategieën, waaronder variabele regelstrategieën die rekening houden met veranderende omstandigheden.
- **Energie-efficiëntie:** Het programma richt zich op het verbeteren van de energie-efficiëntie van HVAC-systemen, waardoor gebruikers duurzamere oplossingen kunnen ontwerpen.

1.4 Onderzoeksvragen

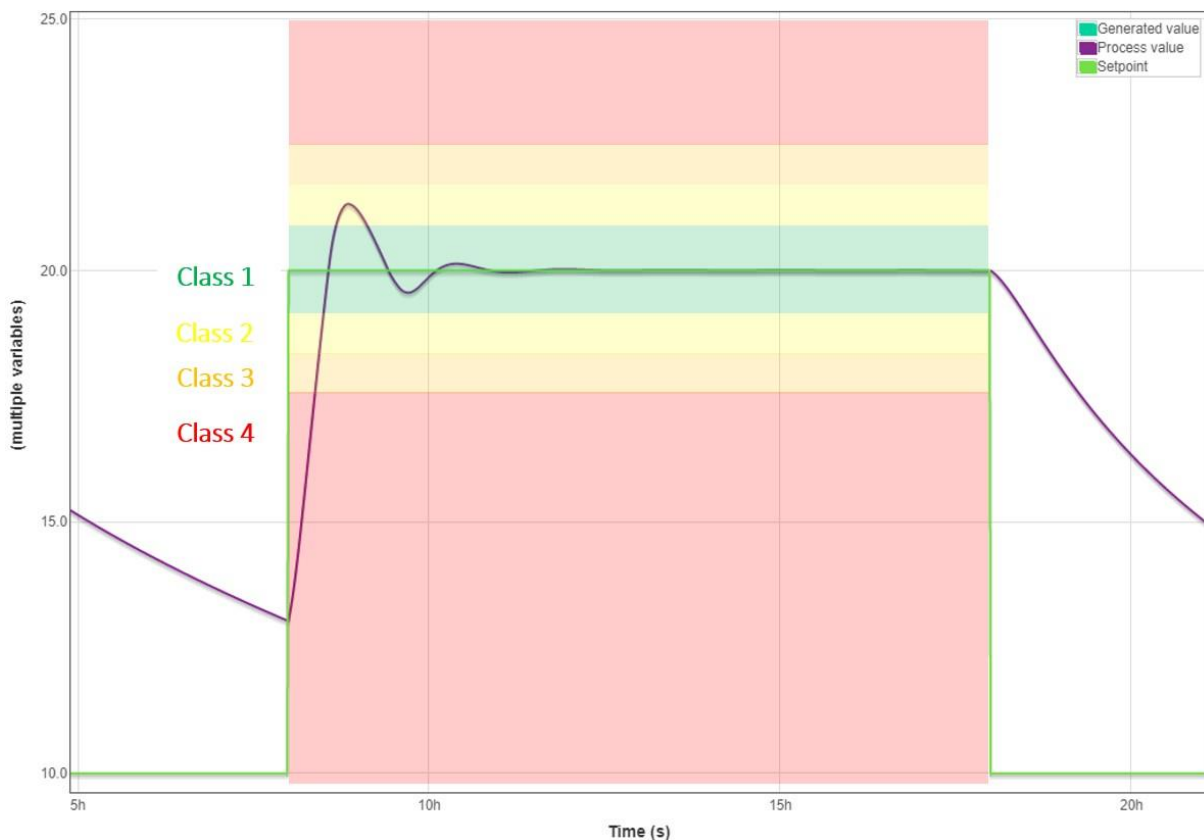
- Wat zijn de mogelijkheden van de software Hysopt voor het project Thermi-var?
- Wat is het effect van het buffervolume op de prestaties en comfort?
- Wat gebeurt er met het comfort afhankelijk van de gekozen regelstrategie?
- Wat is het economische effect van de verschillende regelingen?

2 LITERATUURSTUDIE

In de literatuurstudie wordt er enerzijds onderzoek verricht naar de comfortbepaling gebruikt door Hysopt. Anderzijds wordt er onderzoek uitgevoerd naar legionellavorming in sanitaire systemen aangezien dit in de huidige installatie niet wordt toegepast.

2.1 Comfort

Met als doel het comfort te kwantificeren, wordt een klassensysteem geïntroduceerd dat gebaseerd is op de 'Fanger Theorie', die wordt toegepast om comfort in een gebouw te definiëren. In Figuur 2-1, die hierbij is toegevoegd, wordt de kamertemperatuur gepresenteerd als een paarse lijn, terwijl het instelpunt wordt gemarkeerd door een groene lijn. Verschillende comfortklassen worden visueel weergegeven door de gekleurde balken in de grafiek.



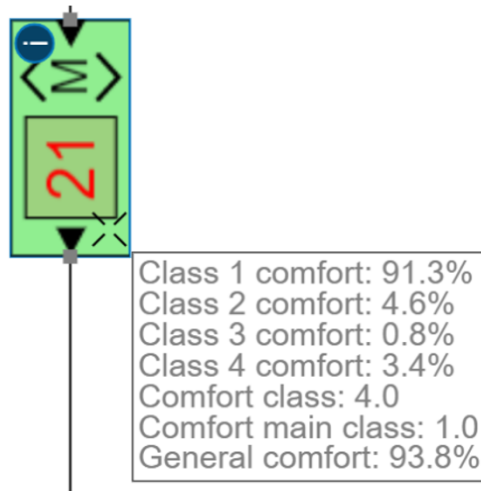
Figuur 2-1 Klassensysteem om het comfort in de woning te bepalen

Het temperatuurverschil tussen het ingestelde punt en de werkelijke temperatuur wordt nauwlettend gevolgd, en de mate van afwijking wordt verdeeld in vier klassen. In deze specifieke situatie is het instelpunt vastgesteld op 20°C, wat leidt tot de volgende grenzen voor elke klasse:

- Klasse 1 = [19, 21]
- Klasse 2 = [18, 19] en [21, 22]
- Klasse 3 = [17, 18] en [22, 23]
- Klasse 4 = [-oneindig, 17] en [23, oneindig].

De grenswaarden variëren consequent met een verschil van 1°C ten opzichte van het instelpunt, en elke wijziging in het instelpunt resulteert in overeenkomstige aanpassingen aan deze limieten.

Op elke ruimteregelaar wordt de tijdsduur, uitgedrukt in procentiën, gegeven voor elk van de vier klassen, evenals de algemene comfortklasse, de hoofd comfortklasse en het algemene comfort. De algemene comfortklasse wordt bepaald als de slechtste klasse met een percentiel hoger dan 1, terwijl de hoofd comfortklasse de klasse is met het hoogste percentiel. Onderstaande Figuur 2-2 toont aan dat ongeveer 93,8% van alle individuen tevreden is met de heersende kamertemperatuur.



Figuur 2-2 Comfortclassificatie bij een ruimteregelaar

De berekening van het algemene comfort volgt de Fanger-theorie voor comfort, waarbij de klassenpercentages worden vermenigvuldigd met de respectieve tevredenheidspercentages. Dit resulteert in een gewogen gemiddelde, wat het algemene comfortniveau bepaalt. De tevredenheidspercentages per klasse zijn als volgt:

- Klasse 1: 95%
- Klasse 2: 90%
- Klasse 3: 80%
- Klasse 4: 65%.

Bijvoorbeeld, als gedurende 100% van de tijd de temperatuur als klasse 3 wordt geclassificeerd, bedraagt het tevredenheidspercentage voor alle individuen in de zone 80% (De Beuckeleer, 2022g).

2.2 Legionella

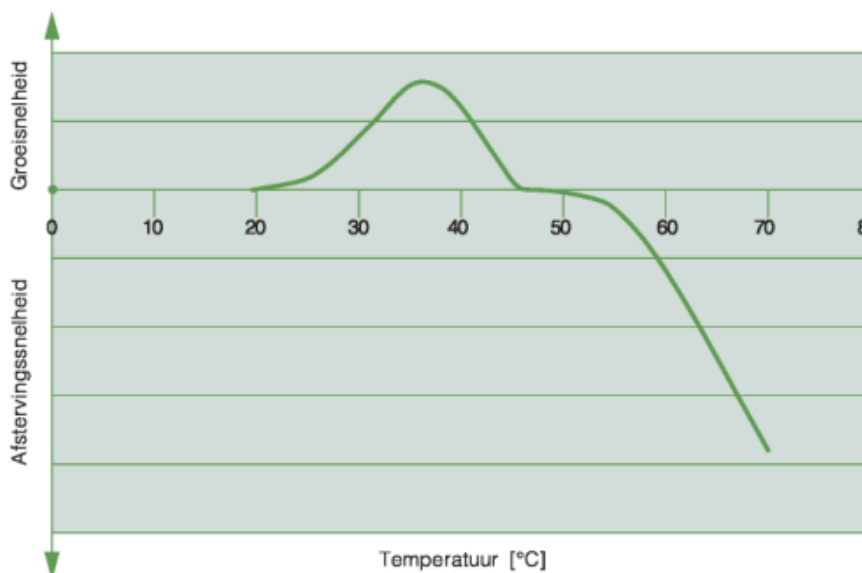
2.2.1 Problematiek

Legionella is een langwerpige bacterie met een lengte van 2 tot 6 μm . Het is de algemene benaming voor een bacteriënfamilie met ongeveer veertig verschillende soorten. De inademing van Legionella-besmette waterdruppels kan leiden tot twee ziekten: enerzijds de veteranenziekte en anderzijds Pontiac-koorts.

De veteranenziekte is te herkennen aan snel opkomende symptomen zoals: spierpijn, hoofdpijn en later longontsteking met koorts. Bij Pontiac-koorts vertoont men griepachtige symptomen die vanzelf verdwijnen na een tweetal dagen.

Legionella wordt vaak aangetroffen in natuurlijke waterreservoirs zoals rivieren en meren, maar ook in kunstmatige omgevingen zoals waterleidingen, bubbelbaden, koeltorens, of fontein in en rondom gebouwen. De bacterie leeft in symbiose met waterbacteriën, protozoën, algen en amoeben. Legionella kan deze organismen als gastheren gebruiken om zich te vermenigvuldigen. Als het gastorganisme te veel legionellabacteriën bevat, barst het open en komen deze vrij in het water.

De bacterie kan overleven bij temperaturen tussen 0°C en 63°C , maar vermeerdert zich vooral bij temperaturen tussen 25°C en 45°C , met een maximale groeisnelheid tussen 30°C en 40°C . Bij 50°C is er een stagnatie van het aantal kiemen, waarbij de groei- en afstervingsnelheden ongeveer gelijk zijn. Bij temperaturen boven de 60°C is de afstervingsnelheid significant hoger dan de groeisnelheid, en dit proces versnelt bij nog hogere temperaturen. Figuur 2-3 illustreert dit.



Figuur 2-3 Ontwikkeling van Legionellabacteriën onder invloed van de temperatuur (Van den Abeele et al., 2017)

3 WAT ZIJN DE MOGELIJKHEDEN MET HYSOPT

In dit hoofdstuk wordt uiteengezet hoe het onderzoek naar de werking van de Hysopt verliep. Het softwarepakket van Hysopt was mij voorafgaand aan dit onderzoek onbekend, ook het Expertisecentrum Energie te Geel, werkte tot voorheen nog niet met deze software. Mits de samenwerking tussen de twee binnen het project Thermi-var, werd er voorgesteld om met de software aan de slag te gaan.

3.1 Online onderzoek

In eerste instantie heb ik het internet geraadpleegd om informatie te vergaren over Hysopt.

De modellering van hydronische systemen in de Hysopt-software volgt de 'Basic Circuit Methodology' (BCM). Dit unieke modelleringsconcept hanteert een ontwerpaanpak waarbij systemen worden samengesteld als een modulaire configuratie van elementaire basiscircuits (BC's), in plaats van afzonderlijke elementaire componenten zoals pompen, leidingen en kleppen. Deze methodologie maakt een aanzienlijk snellere modellering van systemen mogelijk en biedt de mogelijkheid om intelligentie in het model te integreren, aangezien de software op de hoogte is van de werkelijke samenstelling van het systeem.

Gedurende het modelleren genereert de software aan de achterzijde een volledig hydraulisch en thermisch rekenmodel. Dit stelt de ontwerper in staat om het ontwerpproces te automatiseren en de systeemprestaties grondig te optimaliseren.

Vervolgens heb ik onderzocht welke projecten uitvoerbaar zijn met de Hysopt-software, en of mijn specifieke project geschikt is voor deze software. Het softwarepakket biedt de mogelijkheid om twee verschillende soorten projecten uit te voeren (De Beuckeleer, 2022h):

- Conceptuele studie: Deze studie wordt toegepast voor hoog-niveau simulaties bij veranderingen aan energiecentrales, zoals de implementatie van een warmtepomp. Via Hysopt kan de installatie op een efficiëntere wijze worden uitgetekend om de simulatietijd te verminderen.
- Gedetailleerde studie: Deze studie kan worden toegepast om een volledig gebouw zo nauwkeurig mogelijk in te tekenen. Met behulp van plattegronden of ontwerptekeningen van de installatie kan het gebouw nauwkeurig worden gereproduceerd zoals het in werkelijkheid wordt aangetroffen.

Tijdens mijn onderzoek zal ik gebruikmaken van een gedetailleerde studie, aangezien ik verschillende regelstrategieën op de huidige installatie zal toepassen.

3.1.1 Berekening en simulatie

Voorafgaand aan het uitvoeren van berekeningen ondergaat de software een grondige verificatieprocedure om de consistentie van het model te waarborgen voordat er verdere berekeningen worden gestart. In gevallen waarin informatie ontbreekt of onregelmatigheden in de gegevensconsistentie optreden, wordt het model niet gevalideerd, en de software signaleert de gedetecteerde inconsistentie of fout. Deze modelinconsistenties en fouten kunnen betrekking hebben op zowel knooppunten als basiscircuits.

In situaties waarbij een modelinconsistentie wordt vastgesteld op een knooppunt, wordt het relevante knooppunt gemarkeerd met een oranje cirkel. Bij het signaleren van een modelfout op een basiscircuit zijn er twee typen indicatoren. Een rode indicator geeft aan dat er sprake is van een fout, terwijl een gele indicator duidt op een waarschuwing. Door de muiscursor over het desbetreffende knooppunt of basiscircuit te bewegen, verschijnt er een gedetailleerde verklaring van de geconstateerde inconsistentie, fout of waarschuwing. Deze handeling maakt deel uit van de systemcheck (De Beuckeleer, 2022i).

Na de voltooiing van de systemcheck initieert het programma de berekening van ontwerpstromen. Deze berekening is gebaseerd op het stroom- en temperatuurregime van de eindunits. Zodra deze ontwerpstromen zijn berekend, bestaat de mogelijkheid om het leidingmateriaal en de diameter aan te passen. Omdat ik werk met een bestaande installatie, zal ik de leidingmaterialen en de diameters overnemen van de installatie en toevoegen in mijn model.

Hoewel de software ook in staat is om deze aanpassingen autonoom te berekenen, hanteer ik in mijn werk met een bestaande woning de benadering om de leidingmaterialen en diameters te reproduceren zoals deze reeds geïnstalleerd zijn in de bestaande installatie (De Beuckeleer, 2022a).

Ter ondersteuning van deze berekeningen vertrouwt Hysopt op de expertise van WTCB/Buildwise, die een gedetailleerd rapport hebben opgesteld met betrekking tot het ontwerp en de dimensionering van centrale-verwarmingsinstallaties met warm water. Dit rapport biedt waardevolle inzichten en richtlijnen die bijdragen aan een geoptimaliseerde en nauwkeurige dimensionering van de installatie.

Na het bepalen van de ontwerpdebieten en het dimensioneren van de leidingen, schakelen we over naar de optimalisatiefase voor pompen en kleppen. In deze fase hanteert de software een benadering waarbij de ontwerpresultaten (debiet, temperatuurregime, leidingdimensionering) en ontwerpparameters (leidingkarakteristiek, minimale klepbevoegdheid, enz.) in aanmerking worden genomen. De optimalisatie omvat in eerste instantie de selectie van de KVS-waarden voor de regelklep, gevolgd door het vaststellen van de opvoerhoogte van de pomp. Ten slotte wordt het systeem gebalanceerd met behulp van de beschikbare balanskleppen. In het geval van bestaande installaties biedt de software de mogelijkheid om handmatig de KVS-waarden, klepbevoegdheden, pompcurven en andere relevante parameters in te voeren en vast te zetten. Op deze manier worden deze waarden niet automatisch overschreven door het programma, waardoor een nauwkeurige representatie van de bestaande installatie wordt behouden (De Beuckeleer, 2022f).

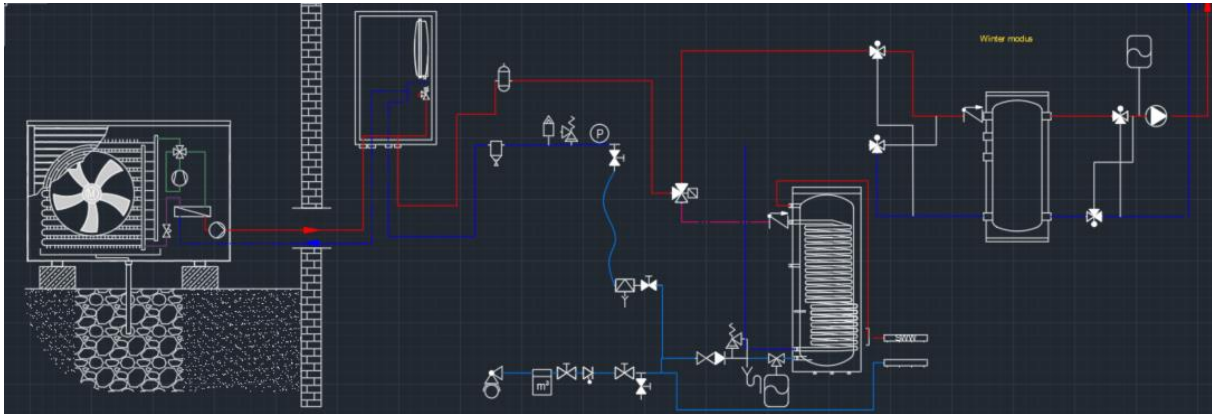
Na deze stappen kan de woning worden gesimuleerd door op de simulatieknop te drukken. Hierbij verschijnt een scherm met de startdatum, de simulatieduur en het weerprofiel. De gebruiker heeft de mogelijkheid om de startdatum te selecteren en simulaties uit te voeren met een duur variërend van enkele uren tot twintig jaar (De Beuckeleer, 2022c)

3.2 Contact met Hysopt

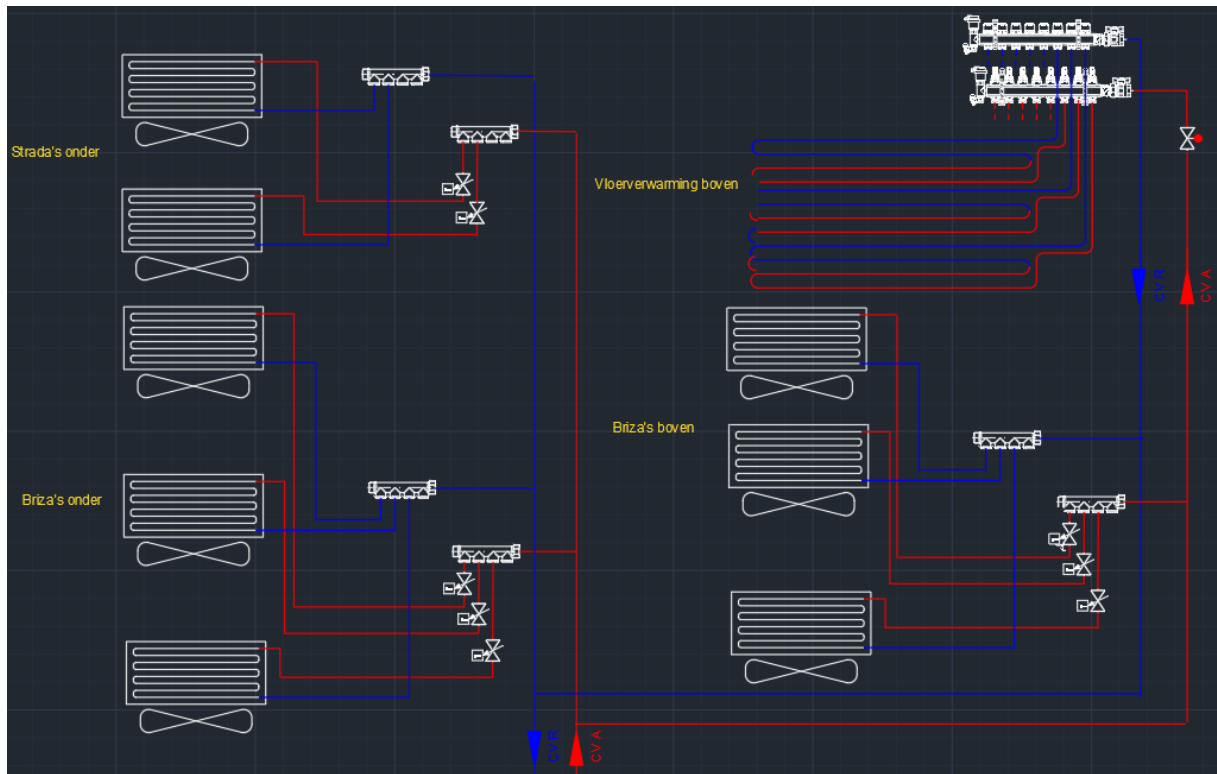
Om de geschiktheid van het softwareprogramma voor mijn onderzoek te verifiëren, nam ik contact op met Hysopt. Vrijwel onmiddellijk ontving ik een respons met een enthousiaste reactie op mijn voornemen om gebruik te maken van hun software. Zij nodigden mij vriendelijk uit om het project in gezelschap van een van hun collega's te bespreken, zodat gezamenlijk de mogelijkheden konden worden geëvalueerd.

Met het oog op een goed voorbereide bespreking had ik de installatie van de woning uitgetekend in AutoCAD, zoals geïllustreerd in Figuur 3-1 en Figuur 3-2. Tijdens de bijeenkomst heb ik aan de hand van een PowerPointpresentatie alle aspecten van mijn onderzoek zo helder mogelijk toegelicht aan de medewerkers van Hysopt.

Na de presentatie werd de doelstelling van het project duidelijk begrepen, en bevestigden zij dat de diverse onderzoeksvragen effectief beantwoord kunnen worden door gebruik te maken van hun software. Bovendien werd er een collega voorgesteld die gedurende het project beschikbaar zou zijn om eventuele vragen te beantwoorden en ondersteuning te bieden.



Figuur 3-1 CAD-tekening van de warmtegeneratie en het distributiesysteem



Figuur 3-2 CAD-tekning van de afgiftesystemen

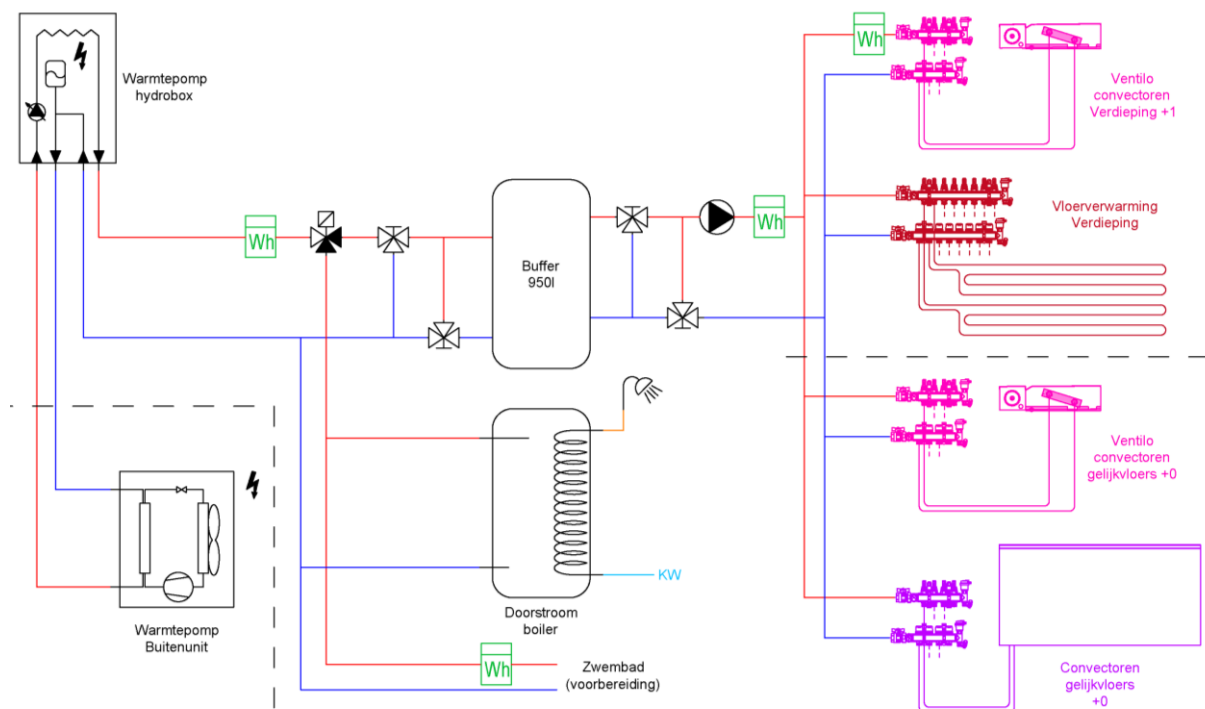
4 DE HUIDIGE WONING

Dit hoofdstuk concretiseert de installatie van de huidige woning. Eerst toont Figuur 4-1 een beknopt overzicht van de installatie. Vervolgens worden de verschillende onderdelen van de installatie toegelicht en wordt er weergegeven hoe deze componenten zich vertalen in Hysopt. In hoofdstuk 4.2 vindt u een overzicht terug met daarin de verschillende generatoren, regelaars, operatoren en booleaanse operatoren die noodzakelijk zijn om in de software de oorspronkelijke regelstrategie na te bootsen en de verschillende nieuwe regelstrategieën tot stand te brengen. Ten slotte wordt er meer uitleg gegeven over de modellering van de oorspronkelijke regelstrategie in Hysopt.

4.1 Overzicht van de installatie

Voorafgaand aan het aanvangen van het ontwerpproces in Hysopt heb ik de installatie van naderbij beschouwd. Middels contact met de eigenaar van de woning heb ik een afspraak geregeld om de installatie persoonlijk te bekijken. Deze bezichtiging bood de mogelijkheid om in detail te observeren hoe alle componenten met elkaar zijn verbonden en welke specifieke onderdelen aanwezig zijn in de installatie.

Onderstaande Figuur 4-1 toont beknopt de belangrijkste onderdelen van de installatie.



Figuur 4-1 Beknopt overzicht van de installatie (eigen communicatie)

4.1.1 Onderdelen in de installatie

Dit hoofdstuk omvat de technische eigenschappen en werking van deze onderdelen en tevens de vertaling ervan in de Hysopt-software.

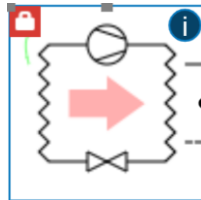
4.1.1.1 Warmtepomp

Voor de warmteopwekking wordt er gebruik gemaakt van een monoblok lucht-water warmtepomp van het merk Mitsubishi.

Type: PUHZ-W85VAA

Figuur 4-2 toont de weergave in Hysopt. De gegevens die ingevuld dienen te worden in de software, om de warmtepomp in de installatie na te bootsen, in het simulatiemodel zijn:

- Het thermische ontwerpvermogen bij specifieke referentie verdamper- en condensatortemperatuur.
- Een COP tabel waarbij de warmtepomp een bepaalde COP genereert bij een specifieke verdamper- en compressortemperatuur
- Een vermogenstabel waarbij de warmtepomp een bepaald vermogen genereert bij een specifieke verdamper- en compressortemperatuur



Figuur 4-2 Warmtepomp in Hysopt

4.1.1.2 Hydrobox

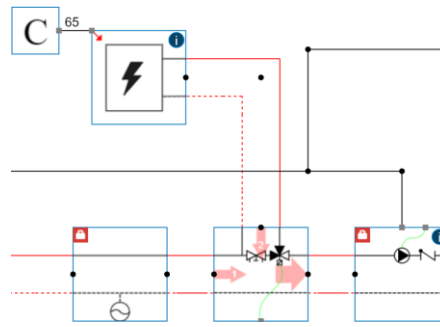
De hydrobox of booster module zorgt ervoor dat we de geleverde watertemperatuur van de warmtepomp kunnen opdrijven naar een hogere temperatuur. Dit is belangrijk om legionella te weren uit het SWW. Deze hydrobox bestaat uit een circulatiepomp, expansievat en elektrisch verwarmingselement.

In de installatie staat een hydrobox van het merk Mitsubishi.

Type: ERPX-VM2D

Figuur 4-3 toont de weergave in Hysopt. De gegevens die ingevuld dienen te worden in de software om de hydrobox in de installatie na te bootsen, in het simulatiemodel zijn:

- het maximale vermogen van het elektrisch verwarmingselement;
- het ontwerpvolume van het expansievat;
- de voordruk van het expansievat;
- de pompcurve van de circulatiepomp en
- Kvs-waarde van de drieweg klep.



Figuur 4-3 Hydrobox in Hysopt

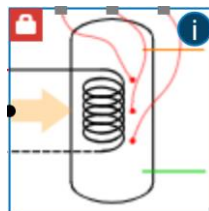
4.1.1.3 Boilervat

In de installatie is een boilervat van 300 liter geïnstalleerd om het SWW op te warmen. Dit boilervat bevat inwendig een spiraal waar het warme water opgewekt door de warmtepomp doorstroomt en zo de inhoud van dit vat opwarmt.

Type: ECO_00300R

Figuur 4-4 toont de weergave in Hysopt. De gegevens die ingevuld dienen te worden in de software om het boilervat in de installatie na te bootsen, in het simulatiemodel zijn:

- temperatuur van het koude tapwater;
- het ontwerpvolume;
- de ontwerp warmtestroom en
- de aanvoer- en retourtemperatuur.



Figuur 4-4 Boilervat in Hysopt

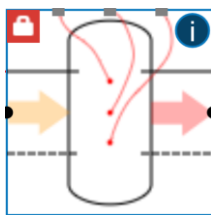
4.1.1.4 Buffervat

In de installatie wordt gebruikgemaakt van een buffervat met een inhoud van 950 liter. Deze inhoud wordt opgewarmd door de warmtepomp. Het buffervat wordt opgewarmd wanneer het boilervat op temperatuur is.

Type: AFC 01000R

Figuur 4-5 toont de weergave in Hysopt. De gegevens die ingevuld dienen te worden in de software, om het buffervat in de installatie na te bootsen, in het simulatiemodel zijn:

- het ontwerpvolume;
- de ontwerp warmtestroom en
- de aanvoer- en retourtemperatuur.



Figuur 4-5 Buffervat in Hysopt

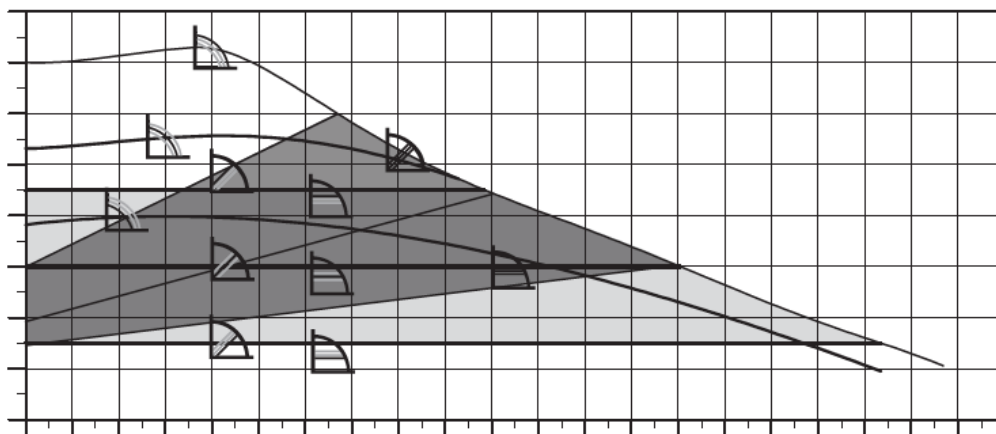
4.1.1.5 Circulatiepomp

De circulatiepomp wordt geregeld door een PWM-sigitaal en kan op verschillende manieren ingesteld worden, zoals: proportionele druk, proportionele druk automatisch adaptief, constante druk en constante druk automatisch adaptief.

De pomp draait op een constante toerental afhankelijk van de huidige PWM-waarde. De snelheid neemt af als het PWM-sigitaal toeneemt. Dus als het PWM-sigitaal gelijk is aan 0 draait de pomp op maximum toerental.

- Proportionele druk: De opvoerhoogte neemt af bij dalende warmtevraag en verhoogt bij stijgende warmtevraag. Het bedrijfspunt van de pomp gaat omhoog of omlaag op de geselecteerde proportionele-drukcurve, afhankelijk van de warmtevraag in de installatie.
- Constante druk: De opvoerhoogte wordt constant gehouden, ongeacht de warmtevraag. Het bedrijfspunt van de pomp schuift uit of in op de geselecteerde constante-drukcurve, afhankelijk van de warmtevraag in het systeem

Automatisch adaptief: Met de $AUTO_{ADAPT}$ -functie kan de pomp de pompprestaties automatisch regelen binnen een bepaald prestatiebereik. De pompprestaties kan je aanpassen aan de grootte van het systeem of aan variaties in de belasting in de loop van de tijd (*Grundfos UPM Hybrid 32-70 datasheet.pdf*, z.d.). Dit toont Figuur 4-6

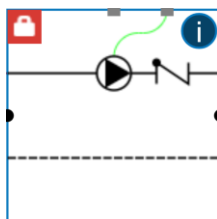


Figuur 4-6 Pompcurves UPM3 Hybrid 32-70

Type: Grundfos UPM3 Hybrid 32-70

Figuur 4-7 toont de weergave in Hysopt. De gegevens die ingevuld dienen te worden in de software, om de circulatiepomp in de installatie na te bootsen, in het simulatiemodel zijn:

- de pompcurve en
- zijn werkmodus (proportionele opvoerhoogte ingegeven).



Figuur 4-7 Circulatiepomp in Hysopt

4.1.1.6 Vloerverwarming

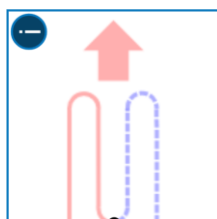
Er zijn verschillende installatiemogelijkheden voor vloerverwarming zoals:

- nat systeem;
- droogsysteem en
- infrezen.

In de betreffende woning wordt het nat systeem gebruikt waarbij de leidingen op de isolatie in de chape zitten. Het is een traag systeem dat gebruikmaakt van de thermische massa van de vloeropbouw (*infogids_afgiftesystemen.pdf*, z.d.).

Figuur 4-8 toont de weergave in Hysopt. De gegevens die ingevuld dienen te worden in de software, om de vloerverwarming in de installatie na te bootsen, in het simulatiemodel zijn:

- de aanvoer-, retour- en omgevingstemperatuur en
- de ontwerp warmtestroom.



Figuur 4-8 Vloerverwarming in Hysopt

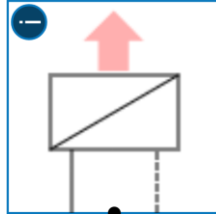
4.1.1.7 Convectoren

Een convector is een afgiftesysteem dat bestaat uit een warmtewisselaar gemaakt van lamellen. Om convectiewarmte te produceren, wordt de convector verwarmd door warm water in de lamellen te laten stromen. Vervolgens treedt er een circulatie van lucht in werking, ook wel convectie genoemd. De warme lucht stijgt op, koelt weer af waardoor deze daalt en opnieuw door de convector gaat (*infogids_afgiftesystemen.pdf*, z.d.) .

Type: Strada hybrid 35x100 T16

Figuur 4-9 toont de weergave in Hysopt. De gegevens die ingevuld dienen te worden in de software, om de convectoren in de installatie na te bootsen, in het simulatiemodel zijn:

- aanvoer-, retour- en omgevingstemperatuur en
- de ontwerp warmtestroom.



Figuur 4-9 Convector in Hysopt

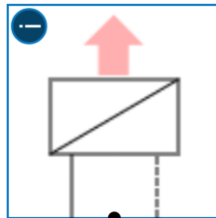
4.1.1.8 Ventilo-convectoren

Een ventilo-convector is een afgiftesysteem dat bestaat uit een warmtewisselaar die uitgerust is met lamellen en ventilatoren. Hierbij wordt de lucht onderaan aangezogen door ventilatoren. Deze lucht is op kamertemperatuur. De aangezogen lucht bereikt de warmtewisselaar die gevoed wordt door warm water. Deze warmtewisselaar neemt de koude lucht op en geeft deze af aan het warme water. Omdat in dit afgiftesysteem ventilatoren worden gebruikt, wordt dit gedwongen convectie genoemd (*infogids_afgiftesystemen.pdf*, z.d.) .

Type: Briza 12 52x102 & Briza 12 52x72

Figuur 4-10 toont de weergave in Hysopt. De gegevens die ingevuld dienen te worden in de software, om de ventilo-convector in de installatie na te bootsen, in het simulatiemodel zijn:

- aanvoer-, retour- en omgevingstemperatuur en
- de ontwerp warmtestroom.








Figuur 4-10 Ventilo-convector in Hysopt



4.2 Overzicht van noodzakelijke extra componenten in Hysopt

Tabel 1 geeft een overzicht van alle generatoren die in gebruik worden genomen voor het ontwerpen van mijn regelstrategieën in Hysopt. Tabel 2 geeft een overzicht van de twee controllers die in gebruik worden genomen voor het ontwerpen van mijn regelstrategieën. Ten slotte geeft Tabel 3 geeft een overzicht van operatoren die in gebruik worden genomen voor het ontwerpen van mijn regelstrategieën in Hysopt.


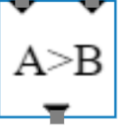

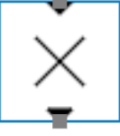


Tabel 1 Generatoren in Hysopt (De Beuckeleer, 2022d)

| Generatoren | |
|--|--|
| Symbol | Naam & werking |
|  <p>Figuur 4-11 Constante</p> | <p>Constante:</p> <p>De constante wordt gebruikt door de benodigde waarde in te vullen in de parameterinstelling. Deze waarde kan elke gewenste waarde zijn. Figuur 4-11 toont het symbool van de constante generator in Hysopt.</p> |
|  <p>Figuur 4-12 Buitentemperatuur</p> | <p>Buitentemperatuur:</p> <p>Er is geen parametrisering nodig voor deze blok. De blok geeft de externe temperatuur aan tijdens de bijhorende simulatietijdstep, afhankelijk van de specifieke regio. Figuur 4-12 toont het symbool van de buitentemperatuur in Hysopt.</p> |
|  <p>Figuur 4-13 Stooklijn</p> | <p>Stooklijn:</p> <p>Deze wordt opgesteld via punten die u zelf kunt ingeven. De punten worden gedefinieerd in een standaard X/Y-asopstelling. Op de X-as staat de buitenluchttemperatuur en op de Y-as de watertemperatuur. Figuur 4-13 toont het symbool van de stooklijn in Hysopt.</p> |
|  <p>Figuur 4-14 Setpunt generator</p> | <p>Setpunt generator:</p> <p>Er wordt gebruikgemaakt van een setpunt generator om een blokgolf te creëren, volledig afhankelijk van de gekozen parameters. Figuur 4-14 toont het symbool van de setpunt generator in Hysopt.</p> |
|  <p>Figuur 4-15 Gegevensbestand</p> | <p>Gegevensbestand:</p> <p>In deze blok kan een bestand worden ingevoegd dat de waarden in de kolom weergeeft. Figuur 4-15 toont het symbool van een gegevensbestand in Hysopt.</p> |

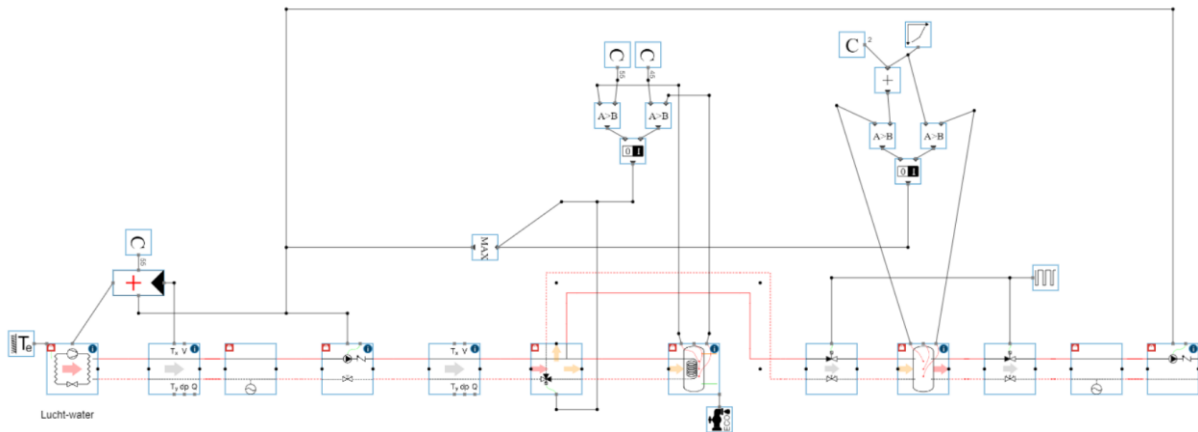
Tabel 2 Controllers in Hysopt (De Beuckeleer, 2022b)

| Controllers | |
|--|---|
| Symbool | Naam & werking |
|  <p data-bbox="212 504 402 564">Figuur 4-16 PI-regelaar</p> | <p data-bbox="453 365 655 396">De PI-regelaar:</p> <p data-bbox="453 414 1082 445">Er zijn vier beschikbare aansluitingen aanwezig:</p> <ol data-bbox="502 463 1374 831" style="list-style-type: none"> <li data-bbox="502 463 1374 593">1. Aan de rechterzijde wordt de invoer aangeduid door middel van een pijl. Hier kan elk signaal dat u wilt monitoren, meten of berekenen worden ingevoerd. <li data-bbox="502 598 1374 696">2. Aan de linkerzijde bevindt zich de uitvoer, waarbij klepinstellingen, pompproductie en dergelijke worden weergegeven. <li data-bbox="502 701 1374 763">3. Aan de bovenzijde bevindt zich het instelpunt, hier zal de controller naartoe berekenen. <li data-bbox="502 768 1374 831">4. Onderaan bevindt zich de activeringsaansluiting, die wordt gebruikt om de controller te activeren of deactiveren. <p data-bbox="453 848 1254 880">Figuur 4-16 toont het symbool van een PI-regelaar in Hysopt.</p> |
|  <p data-bbox="199 1043 414 1131">Figuur 4-17 Thermostatische ruimteregeelaar</p> | <p data-bbox="453 902 879 934">Thermostatische ruimteregeelaar:</p> <p data-bbox="453 952 1374 1050">Deze regelaar regelt een kraan afhankelijk van de ingestelde setpunt temperatuur die men wil bereiken in een ruimte. Figuur 4-17 toont het symbool van een thermostatische ruimteregeelaar in Hysopt.</p> |

Tabel 3 Operatoren in Hysopt (De Beuckeleer, 2022e)

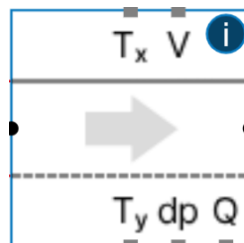
| Operatoren | |
|--|--|
| Symbol | Naam & werking |
|  <p>Figuur 4-18 Activator</p> | <p>Activator:</p> <p>Deze BC creëert een 1 of 0 op basis van het betreffendeingangssignaal. Figuur 4-18 toont het symbool van en activator in Hysopt.</p> |
|  <p>Figuur 4-19 Vergelijking</p> | <p>Vergelijking:</p> <p>Deze BC creëert een 1 als de invoer in A groter is dan B en een 0 als B groter is dan A. Figuur 4-19 toont het symbool van vergelijkingoperator in Hysopt.</p> |
|  <p>Figuur 4-20 Maximum</p> | <p>Maximum:</p> <p>Deze BC geeft het maximum van alle signalen die op de ingang zijn aangesloten. Figuur 4-20 toont het symbool van een maximumoperator in Hysopt.</p> |
|  <p>Figuur 4-21 Vermenigvuldiging</p> | <p>Vermenigvuldiging:</p> <p>Deze BC vermenigvuldigt alle aangesloten ingangssignalen. Figuur 4-21 toont het symbool van een vermenigvuldigingoperator in Hysopt.</p> |
|  <p>Figuur 4-22 Som</p> | <p>Som:</p> <p>Deze BC telt alle ingangen bij elkaar op. Figuur 4-22 toont het symbool van een somoperator in Hysopt.</p> |
|  <p>Figuur 4-23 OF-poort</p> | <p>OF-poort:</p> <p>Waar als ten minste één invoer waar is. Figuur 4-23 toont het symbool van OF-poort in Hysopt.</p> |

4.3 Ontwerp van de installatie met zijn oorspronkelijke regelstrategie



Figuur 4-24 Warmteopwkker en distributiesysteem

Tijdens het ontwerpproces van de installatie heb ik verschillende componenten geïntegreerd in mijn simulatiemodel. In Figuur 4-24 wordt de lucht-water warmtepomp weergegeven, waarbij de buitentemperatuur is gekoppeld. Daarnaast is een sensor toegevoegd voor het meten van de temperatuur in de aanvoerleiding en retourleiding, Figuur 4-25 toont een sensor in Hysopt. Vervolgens is er een expansievat geïnstalleerd voor de circulatiepomp, Figuur 4-26 toont een expansievat in Hysopt. De PI-regelaar is verbonden met de warmtepomp, temperatuursensor en circulatiepomp. De setpoint temperatuur van de PI-regelaar is ingesteld via een constante generator op 55°C. Deze regelaar ontvangt de temperatuur T_x in de aanvoerleiding. Bij een temperatuur lager dan 55°C regelt de PI-regelaar modulerend de warmtepomp, afhankelijk van het temperatuurverschil in de aanvoerleiding. De PI-regelaar wordt onderaan geactiveerd. Dit kan ofwel door een te lage temperatuur in het boiler vat of in het buffervat, gebeuren. De driewegklep, toont Figuur 4-27, tussen de circulatiepomp en het boiler vat gaat het boiler vat voorrang geven op het buffervat. Het boiler vat wordt dus eerst opgewarmd. Wanneer deze op temperatuur is gaat de driewegklep schakelen en het buffervat opwarmen. Het boiler vat heeft een tapprofiel dat maximaal zes liter per minuut kan afgeven voor het SWW.



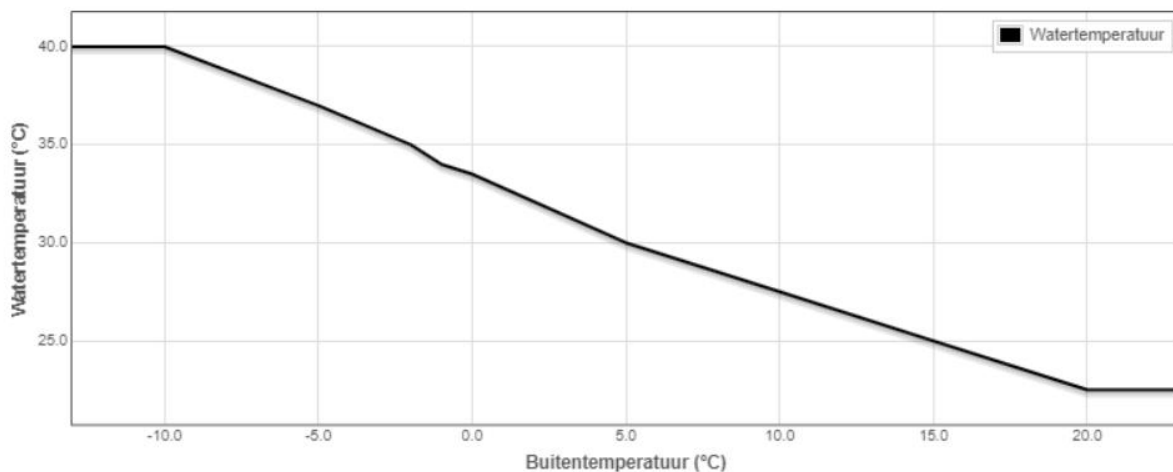
Figuur 4-25 Sensor in Hysopt

De temperatuur regeling van dit boiler vat werkt als volgt:

- Als de temperatuur onderaan in het boiler vat lager is dan 45°C, stuurt de activator een 1-sigitaal naar zowel de MAX-operator als naar de driewegklep, zodat zowel de PI-regelaar als de driewegklep geschakeld blijven.
- Als de temperatuur bovenaan in het boiler vat hoger is dan 55°C, stuurt de activator een 0-sigitaal naar zowel de MAX-operator als naar de driewegklep, zodat deze driewegklep omschakelt en het buffervat gaat opwarmen. Als het buffervat op dat moment al op temperatuur is, stuurt de MAX-operator een 0-sigitaal naar de PI-regelaar en de circulatiepompen met als gevolg dat deze uit werking treden.

Voor het buffervat is een tweewegkraan geplaatst, waarmee de cv-installatie kan worden afgesloten wanneer er geen centrale verwarming nodig is, bijvoorbeeld in de zomer. Het buffervat achter de tweewegkraan wordt opgewarmd volgens een stooklijn. Figuur 4-29 toont de stooklijn die aangesloten is op het buffervat. Deze stooklijn is overgenomen van de oorspronkelijke regelstrategie zodat het buffervat op dezelfde wijze wordt opgewarmd. De stooklijn werkt als volgt:

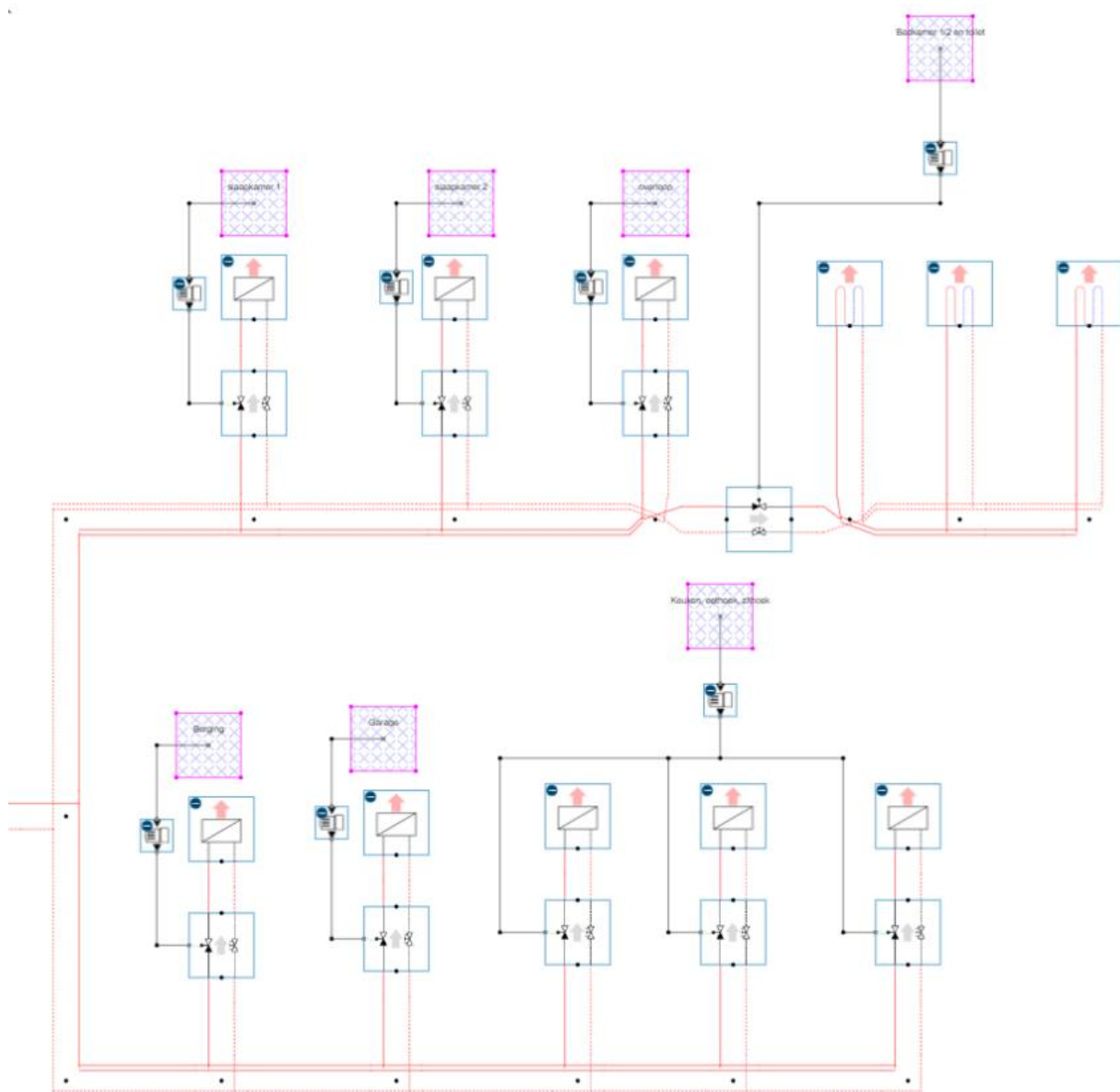
Bij een buitentemperatuur van -10°C wordt het water in het vat opgewarmd tot 40°C. De curve is omgekeerd lineair, waardoor de watertemperatuur daalt naarmate de buitentemperatuur stijgt.



Figuur 4-29 Stooklijn van het buffervat

De regeling van het buffervat werkt als volgt:

1. Wanneer het onderaan het buffervat kouder is dan de temperatuur die gevraagd wordt door de stooklijn, dan gaat de activator een 1-sigitaal doorgeven aan de MAX-operator.
2. Wanneer het bovenaan het buffervat 2°C warmer is dan de temperatuur die de stooklijn aangeeft, dan gaat de activator een 0-sigitaal doorgeven aan de MAX-operator.



Figuur 4-30 Warmteafgiftesysteem in de woning

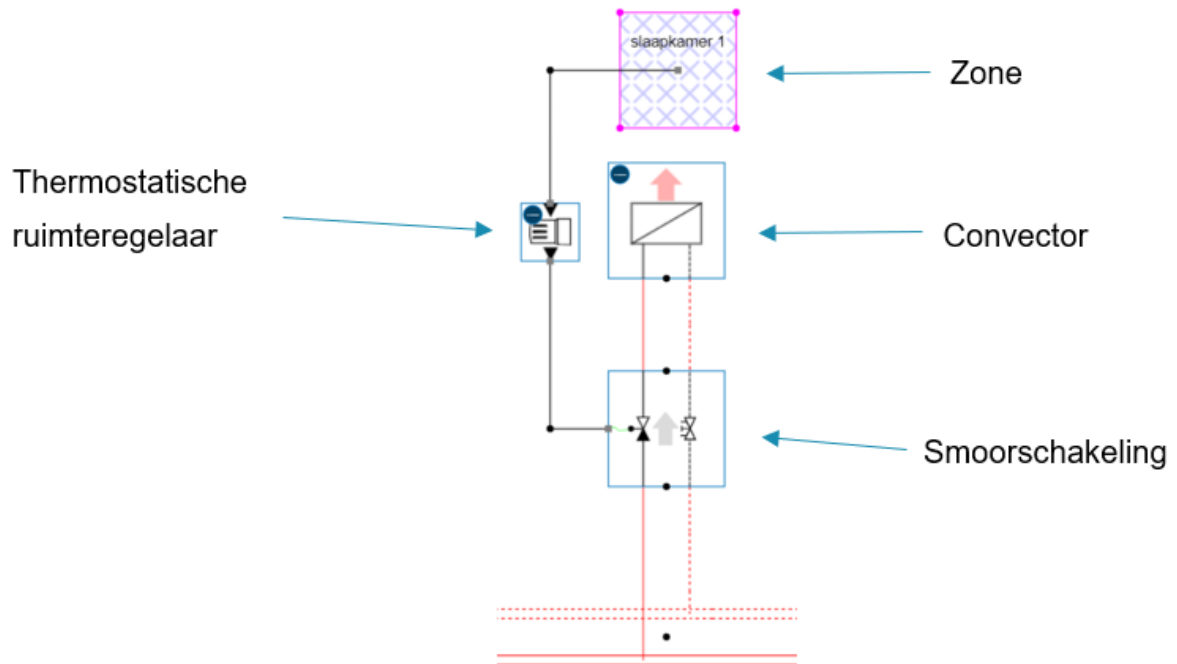
Achter de circulatiepomp bevindt zich het warmteafgiftesysteem, zoals u kunt zien op Figuur 4-30. In dit warmteafgiftesysteem worden de verschillende zones in de woning gedefinieerd. Aan deze zones wordt de geïnstalleerde afgifte-unit gekoppeld.

Wanneer we nu een zone van dichtbij gaan bekijken, bijvoorbeeld de eerste slaapkamer, kunnen we in die zone verschillende parameters invullen zoals: het volume, de gebouwstructuur, het gewenste binnenklimaat in de winter en het aantal buitenmuren. Ook het raamoppervlak, de raamoriëntatie en de U-waarde van het raam kan u hierin invullen. Tijdens de eerste simulatie waren de parameters ingesteld zoals hierboven omschreven, maar tijdens het evalueren van het ontwerp met de medewerkers van Hysopt hebben ze deze parameters verwijderd omdat de software hierop nog niet optimaal reageerde.

Om de zones op een gebruiksvriendelijke manier te definiëren, werkt de software met gebouwstructuren waarbij een lichte tot zware gebouwstructuur kan gekoppeld worden aan de zone. Het verschil hierin ligt bij het soort materiaal dat in de woning wordt gebruikt. Door

met deze gebouwstructuren te werken, is het niet nodig om een volledige warmteverliesberekening te maken van de woning. Zo kan u als ontwerper tijd besparen en maakt dit de software minder complex.

De zone wordt opgewarmd door een warmteafgifte-unit, in dit geval een convector. De convector is verbonden met een smoorschakeling. Deze smoorschakeling wordt geregeld door de thermostatische ruimteregelaar. Afhankelijk van de warmtevraag in de woning, gaat de thermostatische ruimteregelaar de smoorschakeling regelen, hierdoor kan het debiet door de convector verlaagd of verhoogd worden. Figuur 4-31 toont de opbouw van het warmteafgiftesysteem voor de eerste slaapkamer.



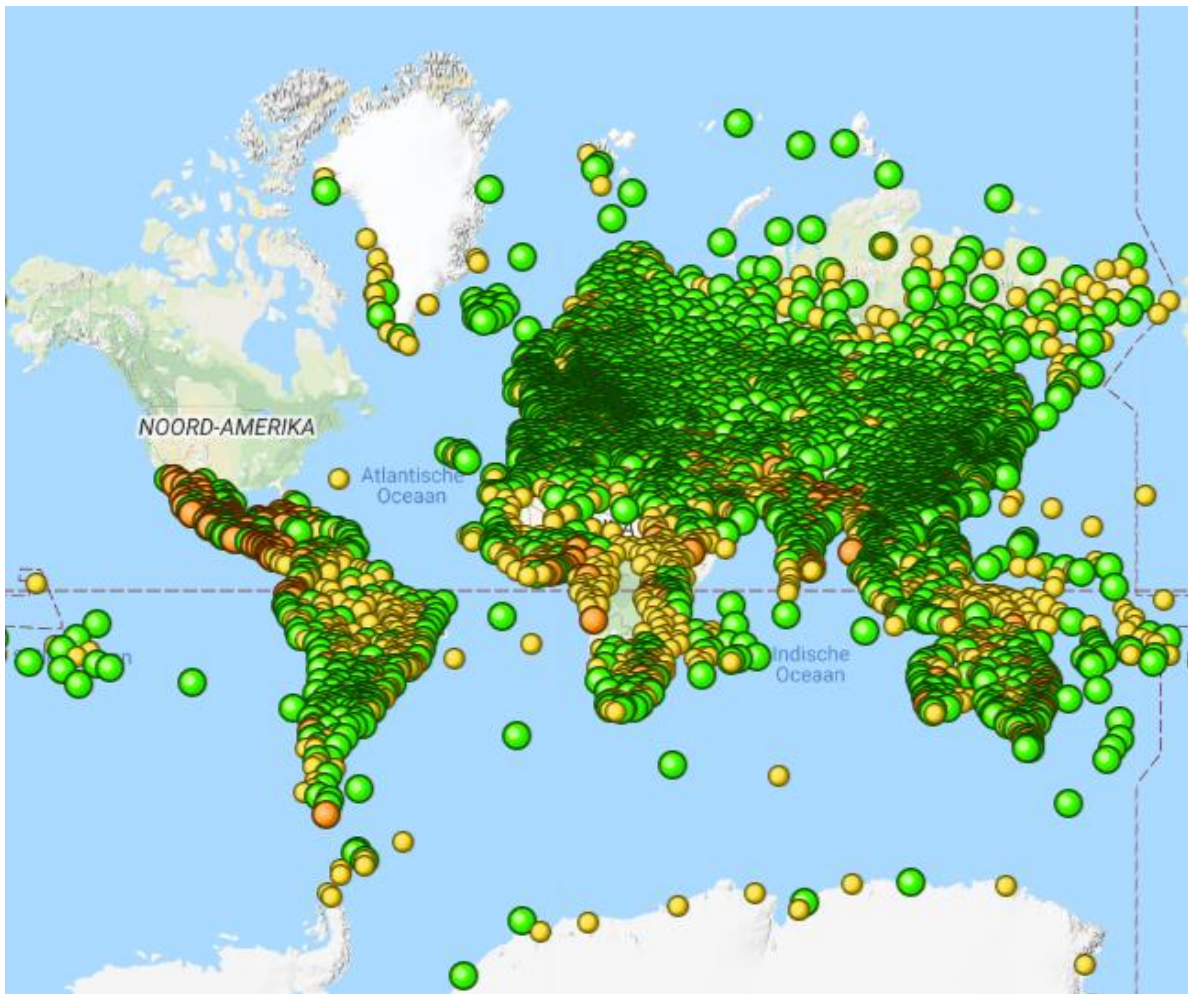
Figuur 4-31 Warmteafgiftesysteem slaapkamer 1

In Figuur 4-30 kan u zien dat de badkamers en het toilet verwarmd worden met vloerverwarming. Om de vloerverwarming te definiëren kan u dezelfde parameters ingeven als bij de convector. Rechts onderaan in Figuur 4-30 ziet u dat de keuken, de eethoek en de zithoek gedefinieerd worden als een enkele ruimte. Dit komt doordat het een open ruimte is waarin drie ventilo-convectoren zijn geïnstalleerd.

4.4 Simulatie van de installatie met zijn oorspronkelijke regelstrategie

Wanneer de volledige woning ontworpen is, kunnen we beginnen met simuleren. Maar voor we overgaan naar de simulatie moeten er eerst nog een aantal zaken gecontroleerd worden. Dit doen we door een systeemcontrole toe te passen. De systeemcontrole gaat na of elke leiding en component in het model juist verbonden is. Als deze systeemcontrole in orde is, kunnen we de ontwerpdebieten gaan berekenen, dit doet het programma volledig zelfstandig op basis van het stroom- en temperatuurregime van de eindunit. Vervolgens kan u een leidingselectie toepassen waarbij het programma de ingegeven leidingtypes en diameters opsomt. Hierna kunt u op de knop 'optimaliseer systeemcomponenten' drukken, waarbij het programma de pomp opvoerhoogtes en klepeigenschappen berekend. Omdat ik met een bestaande installatie werk kan ik pompcurves en KV-waardes van de betreffende pompen en kleppen vergrendelen in de software zodat mijn simulaties dichter aanleunen naar de realiteit.

Wanneer dit alles is doorlopen, kan een simulatie uitgevoerd worden. U kan zelf de startperiode en simulatieperiode kiezen. Vervolgens kan u een weerprofiel toevoegen aan uw simulatie. Deze weergegevens zijn gebaseerd op de 'International Weather for Energy Calculations (IWEC) versie 2.0'. Hysopt ondersteunt 3.012 weerprofielen op zes continenten en 160 landen, geleverd door ASHRAE (De Beuckeleer, 2022c). Figuur 4-32 toont alle locaties waarvan er weerdata beschikbaar is.



Figuur 4-32 Kaart met beschikbare weerprofielen

Voor mijn simulaties gebruik ik de weergegevens van Kleine-Brogel, gelegen te Peer (België), om zo overeenkomstige weergegevens te verkrijgen met deze van de locatie waar de woning gevestigd is namelijk te Hasselt.

De simulaties zijn uitgevoerd tijdens de maanden januari, februari, maart en april van 2023. Van deze maanden was er reeds verzamelde data aanwezig, waardoor het elektrisch verbruik van de warmtepomp afgestemd kon worden op het elektrisch verbruik van de warmtepomp tijdens de simulaties. Dit wordt ook wel load matching genoemd.

Load matching wordt op de volgende manier toegepast: Wanneer u een specifieke zone aanklikt, verschijnen diverse parameters, waarvan 'Ontwerpbelasting' de voornaamste is. Hier kunt u een absolute of relatieve belasting invoeren ten opzichte van het ontwerp. Door een relatief negatief percentage toe te passen, vermindert Hysopt de benodigde warmte voor de ruimte in vergelijking met het ontwerp. Door meerdere simulaties met verschillende percentages uit te voeren, kan een waarde worden geïdentificeerd die leidt tot hetzelfde totale elektriciteitsverbruik. In de zones van mijn model wordt er een ontwerpbelasting van min 25% toegepast.

4.4.1 Resultaten

Tijdens het bespreken van de resultaten worden de maanden januari en maart met elkaar vergeleken. Meer concreet vergelijk ik: het SCOP, het elektrisch verbruik, het aantal start/stops, het aantal draaiuren en het comfort. De software berekend de COP van de warmtepomp tijdens de periode dat deze in werking is. De SCOP is het gemiddelde COP van de betreffende periode. In dit geval is dit in de maand januari. Tabel 4 en Tabel 5 toont u de resultaten van de simulaties.

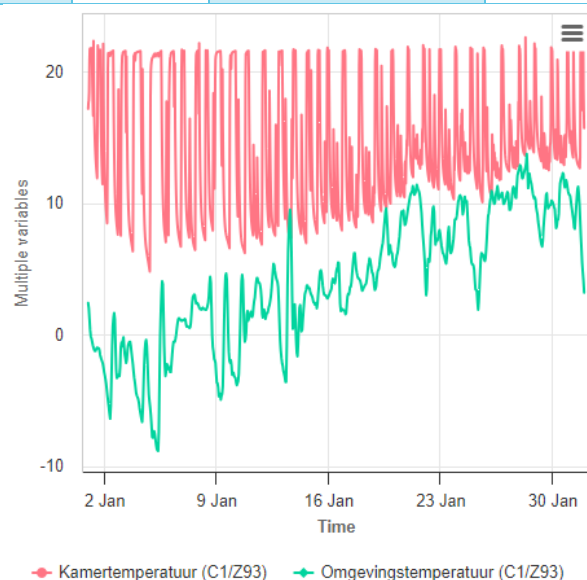
In Figuur 4-33 kunt u de gemeten kamertemperatuur vinden, samen met de buitentemperatuur tijdens de maand januari. De gewenste kamertemperatuur is 22°C. Deze temperatuur wordt wel bereikt maar niet voldoende lang aangehouden. Dat is tevens zichtbaar aan het comfort dat slechts 76% haalt.

Als we dan gaan kijken naar de SCOP in de maand januari, dan bedraagt deze gemiddeld 2,6. Deze lage waarde wordt veroorzaakt door de koude buitentemperatuur. In Figuur 4-34 kan u de performantiecoëfficiënt terugvinden van de maand januari. De SCOP wordt op de volgende manier berekend (*infogids_opwekkingssystemen_lettertype_10.pdf*, z.d.):

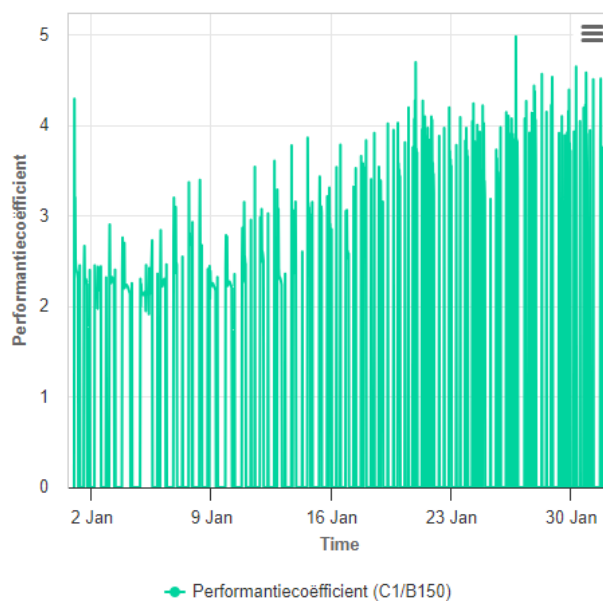
$$SCOP = \frac{\text{Geleverde warmte per periode [kWh]}}{\text{Elektriciteitsverbruik verwarming per periode [kWh]}}$$

Tabel 4 Resultaat oorspronkelijke regeling in januari

| januari | | SCOP | Elektrisch verbruik (in kWh) | Start/stops | Draaiuren | Comfort |
|------------------------|------------|------|------------------------------|-------------|-----------|---------|
| Huidige regelstrategie | Regeling 1 | 2.6 | 581.1kWh | 132 | 189 | 76% |



Figuur 4-33 Kamertemperatuur en buitentemperatuur in januari



Figuur 4-34 COP in januari

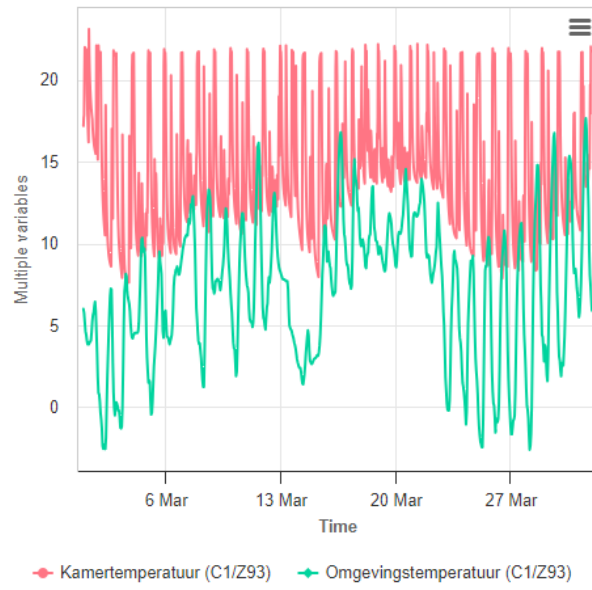
Als we de maand januari vergelijken met de maand maart zien we dat de SCOP in deze maand gestegen is naar 3. Dit komt doordat de maand maart gemiddeld een warmer is dan de maand januari. De warmtepomp kan hierdoor gebruikmaken van meer warmere buitenlucht die ervoor zorgt dat de SCOP toeneemt. Het elektrische verbruik daalt omdat het buffervat nu sneller op temperatuur geraakt, denk aan de stooklijn die met het buffervat gelinkt wordt. Ook zal de kamertemperatuur minder snel afnemen waardoor het elektrisch verbruik lager ligt. Dit is ook zichtbaar aan het aantal draaiuren van de warmtepomp. Het comfort in deze maand blijft laag en zakt zelfs van 76% naar 74%.

De oorzaak hiervan leg ik jullie graag uit tijdens het hoofdstuk 4.4.2 Problemen.

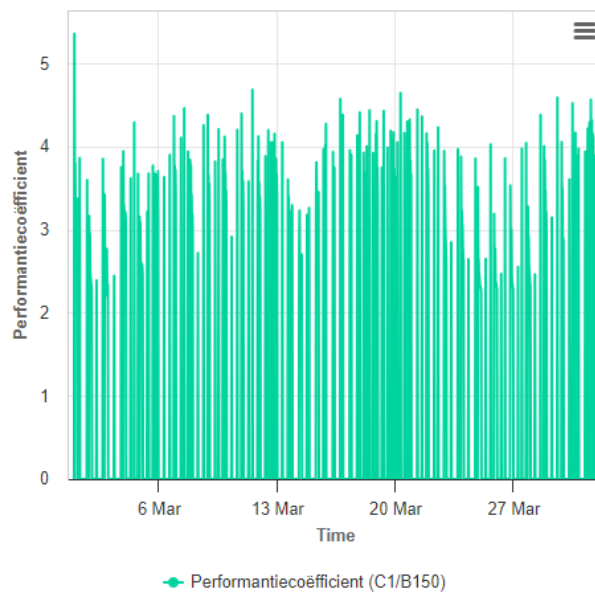
In Figuur 4-35 en Figuur 4-36 kunt u de kamertemperatuur, buitentemperatuur en performantiecoëfficiënt terugvinden.

Tabel 5 Resultaat huidige regeling in maart

| maart | | | | | | |
|---------------------------|------------|------|---------------------------------|-------------|-----------|---------|
| | | SCOP | Elektrisch verbruik (in kWh) | Start/stops | Draaiuren | Comfort |
| Huidige regelstrategie | Regeling 1 | 3 | 358.6kWh | 135 | 125.9 | 74% |



Figuur 4-35 Kamertemperatuur en buitentemperatuur in januari



Figuur 4-36 COP in maart

Wanneer we nu een simulatie van januari tot en met april uitvoeren, krijgen we het volgende resultaat. Tabel 6 toont het resultaat van de oorspronkelijke regelstrategie tijdens de periode van januari tot en met april.

De software berekent de COP van de warmtepomp tijdens de periode dat deze in werking is. De SCOP is het gemiddelde COP van de betreffende periode. In dit geval is dit vanaf januari tot en met april. Wanneer we het SCOP bekijken van januari tot en met april, zien we dat dit gemiddeld hoger ligt dan in januari. Dit komt doordat de maanden februari, maart en april gemiddeld warmer zijn. Het elektrisch verbruik tijdens deze simulatie is 2058,40kW. Wanneer we de PV-opbrengsten aftrekken van het elektrisch verbruik in de periodes dat er PV-opbrengsten aanwezig zijn en de warmtepomp in werking is, krijgen we een elektrisch verbruik van 1982,38kW.

Tabel 6 Resultaat van de oorspronkelijke regeling gesimuleerd van januari tot en met april

| januari-april | | | | | | | | |
|---------------|------|---------------------------|----------|------------------------|--------------|-------------|-----------|---------|
| | SCOP | Elektrisch verbruik (kWh) | (in kWh) | EV - opbrengsten (kWh) | PV- (in kWh) | start/stops | draaiuren | comfort |
| Regeling 1 | 2.9 | 2058.40 | | 1982.38 | | 606 | 577.9 | 74.8% |

4.4.2 Problemen

Het probleem bij de oorspronkelijke regeling is dat het comfort niet behaald wordt. Hier had de eigenaar van de woning dan ook een probleem mee. Tijdens het ontwerpen van de oorspronkelijke regelstrategie die de warmtepomp aanstuurt, viel mij op dat de circulatiepompen enkel in werking treden als de warmtepomp in werking is, en dus wanneer de twee vaten niet op temperatuur zijn. Wanneer er warmtevraag is in de zones van de woning en het boiler vat en buffervat zijn op temperatuur, dan gaan de circulatiepompen niet aangestuurd worden. Dit kunt u ook zien in Figuur 4-24.

Een bijkomend probleem in deze regelstrategie is dat er geen rekening wordt gehouden met legionellapreventie.

De oplossingen voor deze problemen worden weergegeven en uitgelegd in het volgende hoofdstuk.

5 NIEUWE REGELSTRATEGIEËN

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de nieuwe regelstrategieën die worden toegepast op de installatie. Daarnaast wordt uitgelegd welke aanpassingen worden doorgevoerd in het simulatiemodel om deze regelstrategieën tot stand te brengen. Ten slotte worden onder elke regelstrategie de resultaten getoond en kort besproken.

5.1 Overzicht

De nieuwe regelstrategieën die worden toegepast op de installatie van de woning zijn de volgende:

- Regeling 2: Regeling met legionellapreventie
- Regeling 3: Regeling met een kloksturing op het boilervat
- Regeling 4: Regeling met kloksturing op het boilervat met verkleining van het buffervolume
- Regeling 5: Regeling met kloksturing op het boilervat en stooklijnverschuiving op het buffervat
- Regeling 6: Regeling met kloksturing op het boiler- en buffervat
- Regeling 7: Regeling rekening houdend met de opbrengst van PV-panelen
 - 7.1: Opstart bij meer dan 2kW PV-opbrengsten
 - 7.2: Opstart bij meer dan 1kW PV-opbrengsten
 - 7.3: Opstart bij meer dan 0.5kW PV-opbrengsten

Bovenstaande regelstrategieën werden geselecteerd om het comfort in de woning te verbeteren. Regeling 4 en 5 worden toegepast gezien dit expliciet werd gevraagd door het onderzoeksteam dat meewerkt aan het Thermi-var project. Het is de bedoeling om via deze regelstrategieën een beter inzicht te krijgen op het verbruik van de warmtepomp en wat dit teweegbrengt voor het comfort in de woning.

5.2 Regelstrategie met legionellapreventie

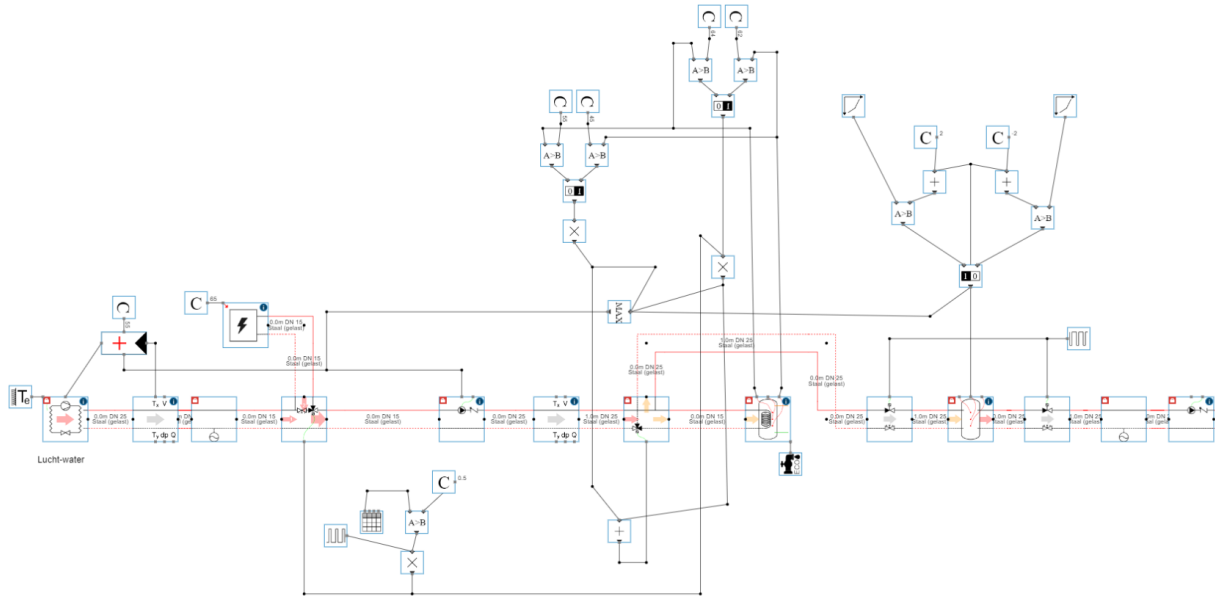
Deze regeling wordt zo aangepast dat de tweede circulatiepomp aangestuurd wordt op basis van de warmtevraag in de zones en dus niet meer enkel wanneer de warmtepomp in werking is.

Ook wordt er in de oorspronkelijke regelstrategie geen rekening gehouden met legionellapreventie. In de installatie is een hydrobox, ook wel boostermodule genoemd, geïnstalleerd. Deze hydrobox bestaat uit een expansievat, driewegklep, circulatiepomp en een elektrisch verwarmingselement. In de oorspronkelijke regelstrategie is dit elektrisch verwarmingselement niet aangesloten waardoor er niet aan legionellapreventie voldaan kan worden.

In deze nieuwe regelstrategie gaan we dit elektrisch verwarmingselement wel aansluiten. Hierdoor kan de temperatuur in het boilervat opgedreven worden en kunnen we de bacterie weren uit de installatie. De hydrobox moet enkel het boilervat opwarmen tot een waarde boven de 60°C. Deze waarde moet een bepaalde periode aangehouden worden, zodat de legionellabacterie afgebroken kan worden. De reden waarom enkel het boilervat om een

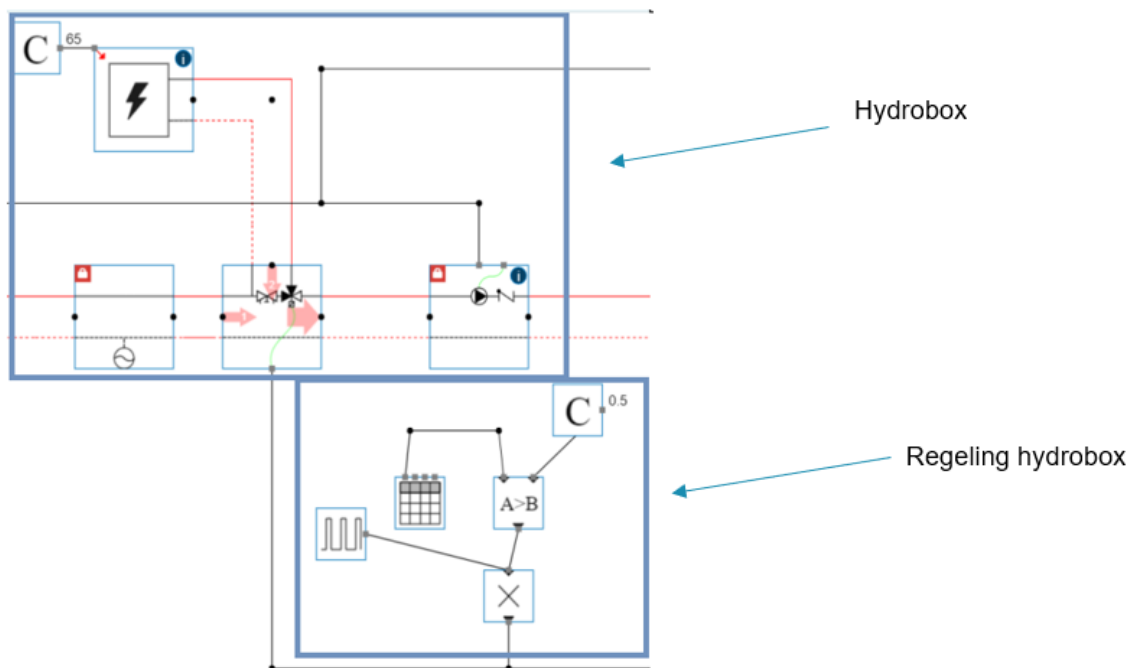
bepaalde tijd op een hogere temperatuur wordt gebracht, is omdat enkel hier tapwater gebruikt wordt dat in contact kan komen met mensen.

Figuur 5-1 toont de wijzigingen aan, die ik heb doorgevoerd in het ontwerpmodel. Deze wijzigingen blijven van toepassing in de daaropvolgende regelstrategieën, die hieronder worden besproken.



Figuur 5-1 Nieuwe regelstrategie met booster

De regeling werkt als volgt: In Excel heb ik een gegevensbestand aangemaakt waarbij ik om de twee weken een 1-sigitaal doorgeef aan een vergelijkingsoperator. Wanneer het signaal groter is dan de constante waarde 0.5, gaat dit een 1-sigitaal doorgeven aan de vermenigvuldigingsoperator. Deze vermenigvuldigingsoperator gaat de doorgegeven waarde vermenigvuldigen met een setpunt generator. De setpunt generator is zo ingesteld dat deze een 1-sigitaal gaat doorgeven elke dag vanaf 8.00 tot 8.15 u. Het resulterende uitgangssigitaal wordt door de vermenigvuldigingsoperator een 1-sigitaal om de twee weken vanaf 8.00 tot 8.15 u. Dit zorgt ervoor dat het verwarmingselement in de hydrobox om de twee weken een kwartier in werking treedt en er een temperatuur van 65°C naar het boiler vat wordt gestuurd. Figuur 5-2 toont de hydrobox ontworpen in Hysopt, met daarbij de regeling die om de twee weken een kwartier een 1-sigitaal doorgeeft aan de driewegklep die zorgt voor een seriële warmteproductie op de aanvoerleiding.

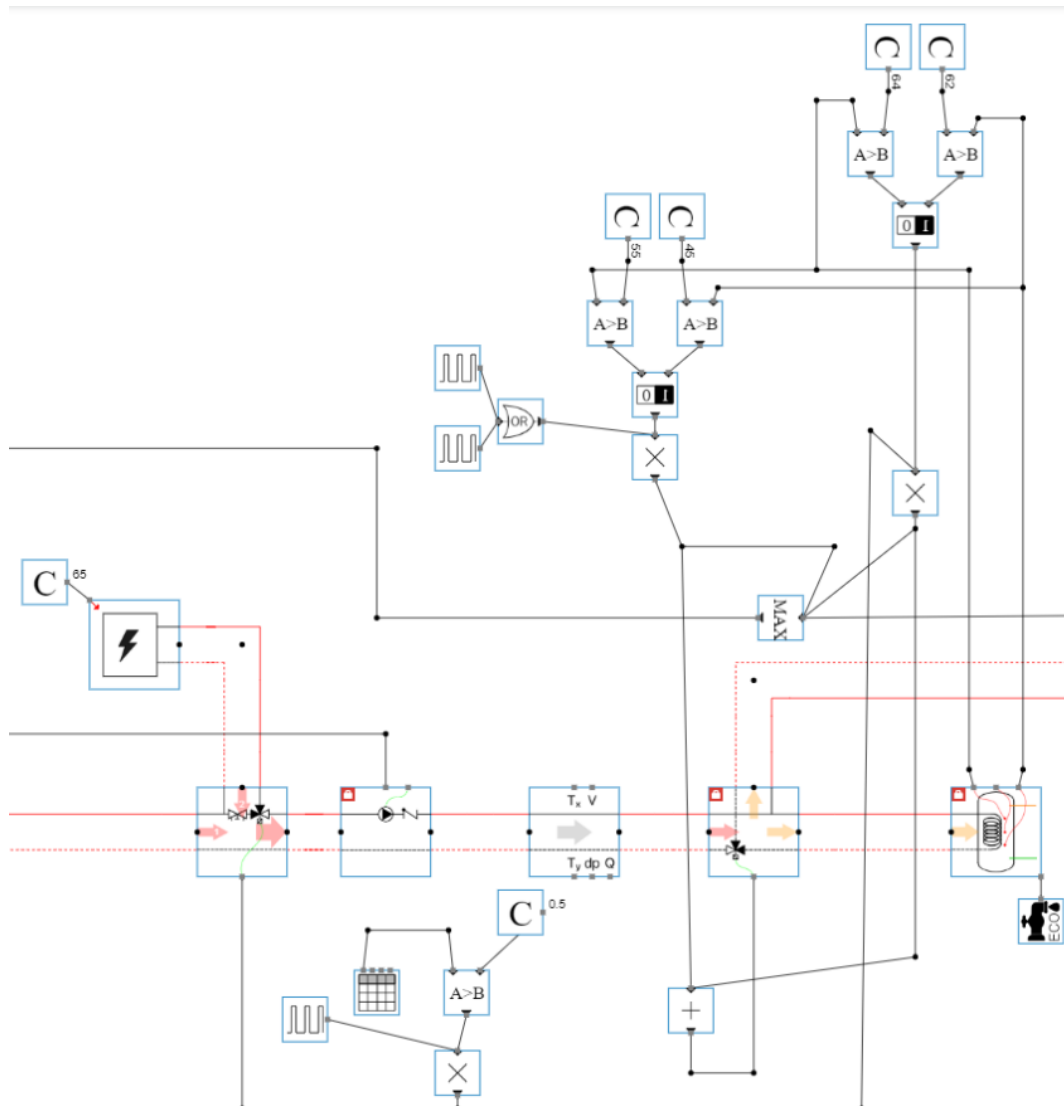


Figuur 5-2 Hydrobox met extra regeling

Zoals in de oorspronkelijke regelstrategie geeft het boiler vat ook hier een 1-signaal door totdat de 55°C bovenaan in het boiler vat bereikt wordt. Als het deze temperatuur heeft bereikt schakelt de driewegklep om daarna het buffervat op te warmen. Dit is identiek aan de oorspronkelijke regelstrategie.

In de nieuwe regelstrategie willen we om de twee weken het boiler vat opwarmen tot 65°C. Hiervoor is een extra voorwaarde toevoegt aan de regeling van dit boiler vat want de driewegklep mag tijdens deze extra opwarming niet omschakelen om het buffervat op te warmen. Deze extra regeling werkt als volgt:

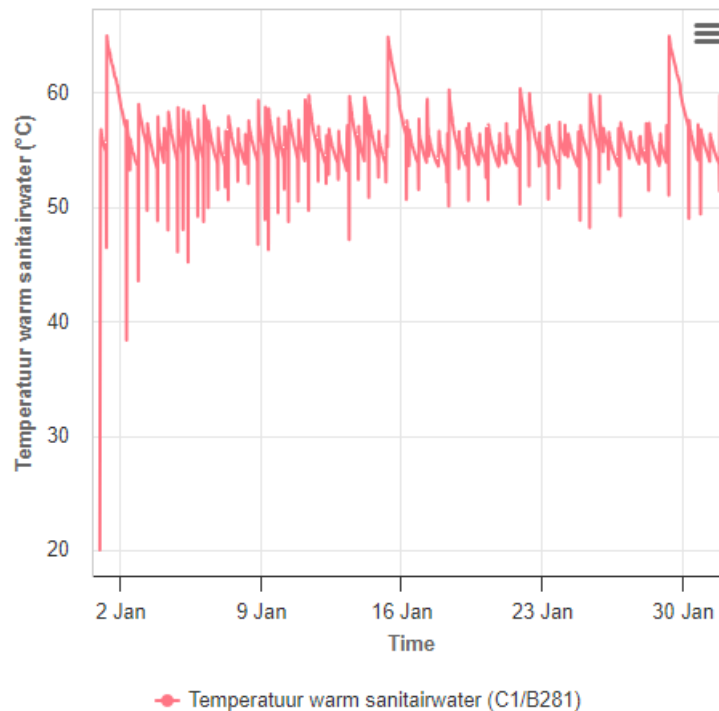
Wanneer de booster module in werking treedt, mag het boiler vat opgewarmd worden tot maximum 64°C bovenaan het boiler vat en minimaal 62°C onderaan het boiler vat. Wanneer de temperatuur onderaan het boiler vat kleiner is dan 62°C, dan gaat de activator een 1-signaal doorgeven aan vermenigvuldigingsoperator. Wanneer de temperatuur bovenaan het boiler vat groter is dan 64°C, dan gaat de activator een 0-signaal doorgeven aan de vermenigvuldigingsoperator. Deze vermenigvuldigingsoperator gaat het regelsignaal van de booster module en het boiler vat vermenigvuldigen. Wanneer beide signalen '1' zijn gaat deze een 1-signaal doorgeven aan de som-operator. De driewegklep gaat nu zo geschakeld blijven zodat het boiler vat blijft opwarmen tot de booster module een 0-signaal doorgeeft. Figuur 5-3 toont de extra regeling op het boiler vat.



Figuur 5-3 Regeling met legionellapreventie en extra temperatuurregeling op het boilervat

5.2.1 Resultaten

Wanneer deze regelstrategie gesimuleerd wordt, kunt u zien dat het water in het boilervat nu om de twee weken wordt opgewarmd tot 65°C. Figuur 5-4 toont het temperatuurverloop in het boilervat tijdens de maand januari.

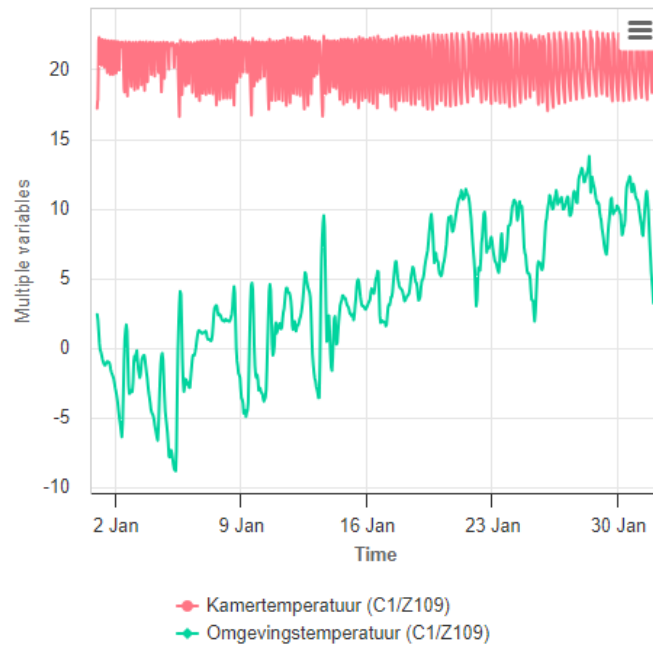


Figuur 5-4 Verloop temperatuur in het boilervat in januari

We zien dat het elektrisch verbruik ten opzichte van de oorspronkelijke regelstrategie is gestegen maar ook de SCOP en het comfort stijgen. De oorzaak hiervan is het beter aansturen van de circulatiepomp. Doordat de circulatiepomp nu altijd in werking treedt wanneer er warmtevraag is in de woning, gaat het buffervolume beter benut worden en gaat er meer volume van het buffervat naar de eindunits in de zones van de woning. Het elektrisch verbruik ligt hoger omdat het buffervat vaker wordt opgewarmd. Tabel 7 toont de resultaten van de nieuwe regelstrategie van de maanden januari tot en met april. Figuur 5-5 toont het temperatuurverloop in de woning en de omgevingstemperatuur tijdens de maand januari. Zoals u kunt zien zakt de minimale temperatuur niet meer onder de 17°C. Ook tijdens de daaropvolgende maanden zal de temperatuur niet meer onder de 17°C dalen, aangezien dit warmere maanden zijn.

Tabel 7 Resultaat nieuwe regelstrategie inclusief legionellapreventie vanaf januari tot april

| januari-april | | | | | | |
|---------------|------|------------------------------|------------------------------|-------------|-----------|---------|
| | SCOP | Elektrisch verbruik (in kWh) | EV - PV-opbrengsten (in kWh) | start/stops | draaiuren | comfort |
| Regeling 2 | 3.2 | 2963.56 | 2762.65 | 954 | 835.8 | 87.1% |



Figuur 5-5 Kamer- en omgevingstemperatuur bij de nieuwe regelstrategie in januari

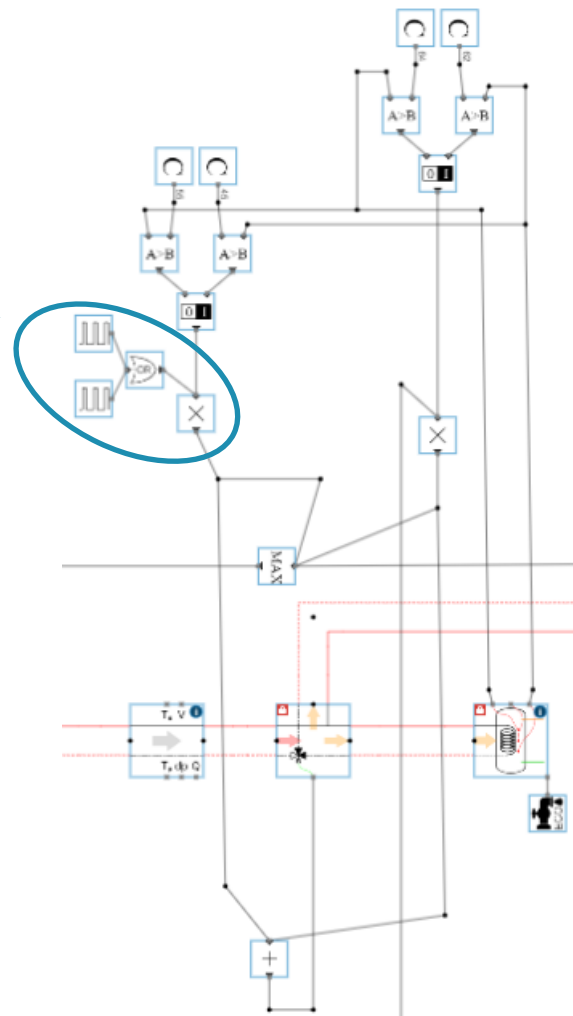
5.2.2 Problemen

De temperatuur in de verschillende ruimtes zakt overdag nog te vaak naar 17°C, wat niet gewenst is voor de eigenaar van de woning. In de volgende regelingen wordt onderzocht hoe dit verbeterd kan worden.

5.3 Regeling met een kloksturing op het boilervat

In de vorige twee regelstrategieën werd het boilervat continu aangestuurd wanneer de temperatuur bovenaan in het boilervat niet hoger was dan 55°C en onderaan niet lager was dan 45°C. In deze nieuwe derde regelstrategie wordt een kloksturing toegepast op het boilervat zodat deze een aantal periodes per dag de kans krijgt om zich op te warmen. Deze kloksturing wordt voldoende lang ingesteld zodat er voldoende warm tapwater te verkrijgen is doorheen de dag. Ik pas deze kloksturing toe zodat de warmtepomp enkele periodes per dag het boilervat kan opwarmen en zich voor de rest van de tijd kan bezighouden met het op temperatuur houden van het buffervat. Onderstaande Figuur 5-6 hieronder toont de extra toevoeging aan het simulatiemodel om een kloksturing op het boilervat te verwezenlijken.

Toevoeging aan de vorige regelstrategie om een kloksturing op het boiler vat toe te passen



Figuur 5-6 Toevoeging van een kloksturing op het boiler vat

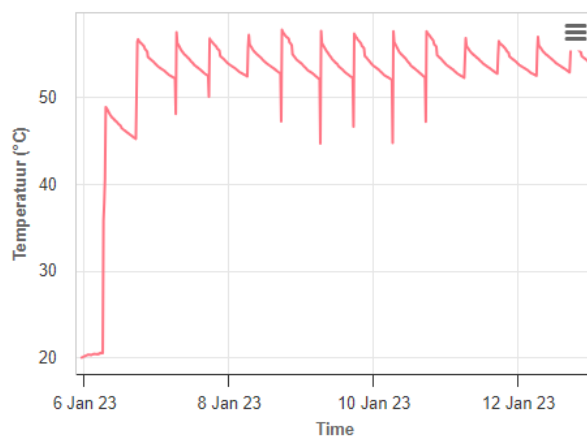
Hierbij maak ik gebruik van twee setpuntgeneratoren waarvan één ervan een 1-signaal gaat doorgeven tussen 7.00 en 8.00 u 's morgens en de andere tussen 18.00 en 19.00u 's avonds. Deze uren zijn zo gekozen zodat 's morgens en 's avond het boiler vat altijd op temperatuur is en zodat overdag de temperatuur van het SWW niet daalt onder toelaatbare waarden.

5.3.1 Resultaten

Wanneer we deze regelstrategie simuleren, verkrijgen we volgende resultaten: Figuur 5-7 toont het temperatuurverloop zonder kloksturing op het boiler vat in een tijdsperiode van één week. Figuur 5-8 toont het temperatuurverloop met kloksturing op het boiler vat in een periode van één week.



Figuur 5-7 Temperatuurverloop in het boiler vat zonder kloksturing



Figuur 5-8 Temperatuurverloop in het boiler vat met kloksturing

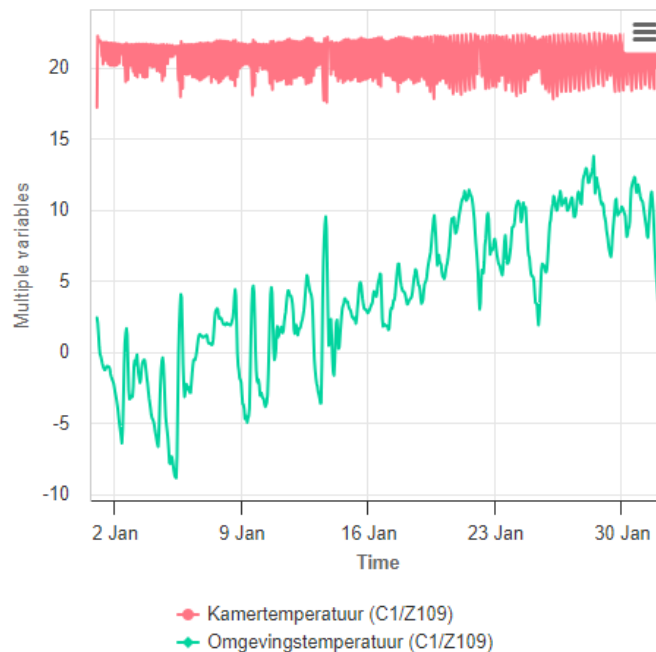
Als we goed kijken zien we dat het boiler vat gedurende een week minder wordt aangestuurd waardoor het buffervat vaker de kans krijgt om zich op temperatuur te brengen. Tabel 8 toont de resultaten van de regelstrategie met kloksturing gedurende de maanden januari tot en met april. Wat opvalt als we deze resultaten vergelijken met de tweede regeling, is dat het aantal start/stops tijdens deze simulatieperiode is toegenomen maar dat ook het comfort toeneemt wat positief is. Het elektrisch verbruik van de warmtepomp blijft ongeveer gelijk.

De toename van het aantal start/stops kan een negatieve invloed hebben op de levensduur van de warmtepomp (eigen communicatie).

Figuur 5-9 toont het temperatuursverloop in de kamer met de omgevingstemperatuur van de maand januari.

Tabel 8 Resultaten van regeling met kloksturing op het boiler vat vanaf januari tot april

| januari-april | | | | | | |
|---------------|------|------------------------------|------------------------------|-------------|-----------|---------|
| | SCOP | Elektrisch verbruik (in kWh) | EV - PV-opbrengsten (in kWh) | start/stops | draaiuren | comfort |
| Regeling 3 | 3.2 | 2967.82 | 2785.85 | 1046 | 834 | 90.3% |



Figuur 5-9 Kamer- en omgevingstemperatuur bij regeling met kloksturing op het boiler vat in januari

Ook nu zien we dat de temperatuur nog steeds te vaak onder de 19°C duikt. Vervolgens is het elektrisch verbruik licht gestegen en neemt het aantal start/stops toe. De achterliggende reden van deze toename komt door de grootte van het buffervolume. De warmtepomp gaat nu vaker het buffervolume kunnen opwarmen, maar door de grootte van dit volume zal hier meer elektriciteit voor nodig zijn. Ook zal dit volume sneller afkoelen waardoor het aantal start/stops zal toenemen.

5.4 Regeling met kloksturing op het boiler vat met verkleining van het buffervolume

Deze regelstrategie geeft een antwoord op één van mijn onderzoeksvragen. Namelijk: 'Wat is het effect van het buffervolume op de prestaties en comfort?' .

In de installatie is een buffervat van 950 liter aanwezig, wat een groot volume is voor een gezinswoning. Vanuit het Expertisecentrum Energie werd daarom gevraagd wat een verkleining van het buffervat teweeg zou brengen op de prestaties van de warmtepomp en het comfort in de woning. In Hysopt heb ik het buffervat verkleind naar een volume van 500 liter. Het model ziet er identiek uit aan de vorige regelingen enkel het buffervolume wordt gewijzigd in de instelparameters van het buffervat in Hysopt.

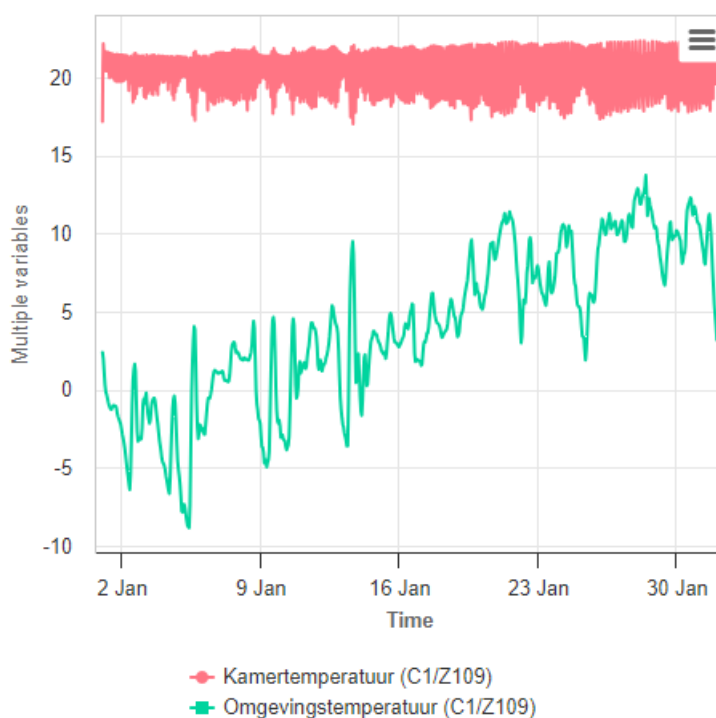
5.4.1 Resultaat

Tabel 9 toont de resultaten van de regeling over een simulatieperiode van januari tot en met april. Wat opvalt is dat het elektrisch verbruik tijdens deze simulatie licht is afgenomen. Dit komt doordat het buffervat een kleiner volume bezit ten opzichte van de voorgaande regelstrategieën. Doordat het volume kleiner is, zal het buffervat sneller leeg raken, waardoor de warmtepomp vaker zal worden opgestart. Ook zal het buffervolume sneller leeg raken waardoor de warmtepomp dit kleinere volume vaker zal moeten opwarmen en de daling van het elektrische verbruik minder laag is dan in mijn verwachting.

Figuur 5-10 toont het temperatuurverloop in de kamer met de omgevingstemperatuur tijdens de maand januari.

Tabel 9 Resultaten van de regeling met buffervat verkleining van januari tot en met april

| januari-april | | | | | | |
|---------------|-------|------------------------------|------------------------------|-------------|-----------|---------|
| | SCO P | Elektrisch verbruik (in kWh) | EV - PV-opbrengsten (in kWh) | start/stops | draaiuren | comfort |
| Regeling 4 | 3.2 | 2882.32 | 2692.64 | 1307 | 828.9 | 86.3% |



Figuur 5-10 Kamer- en omgevingstemperatuur bij een verkleining van het buffervat in januari

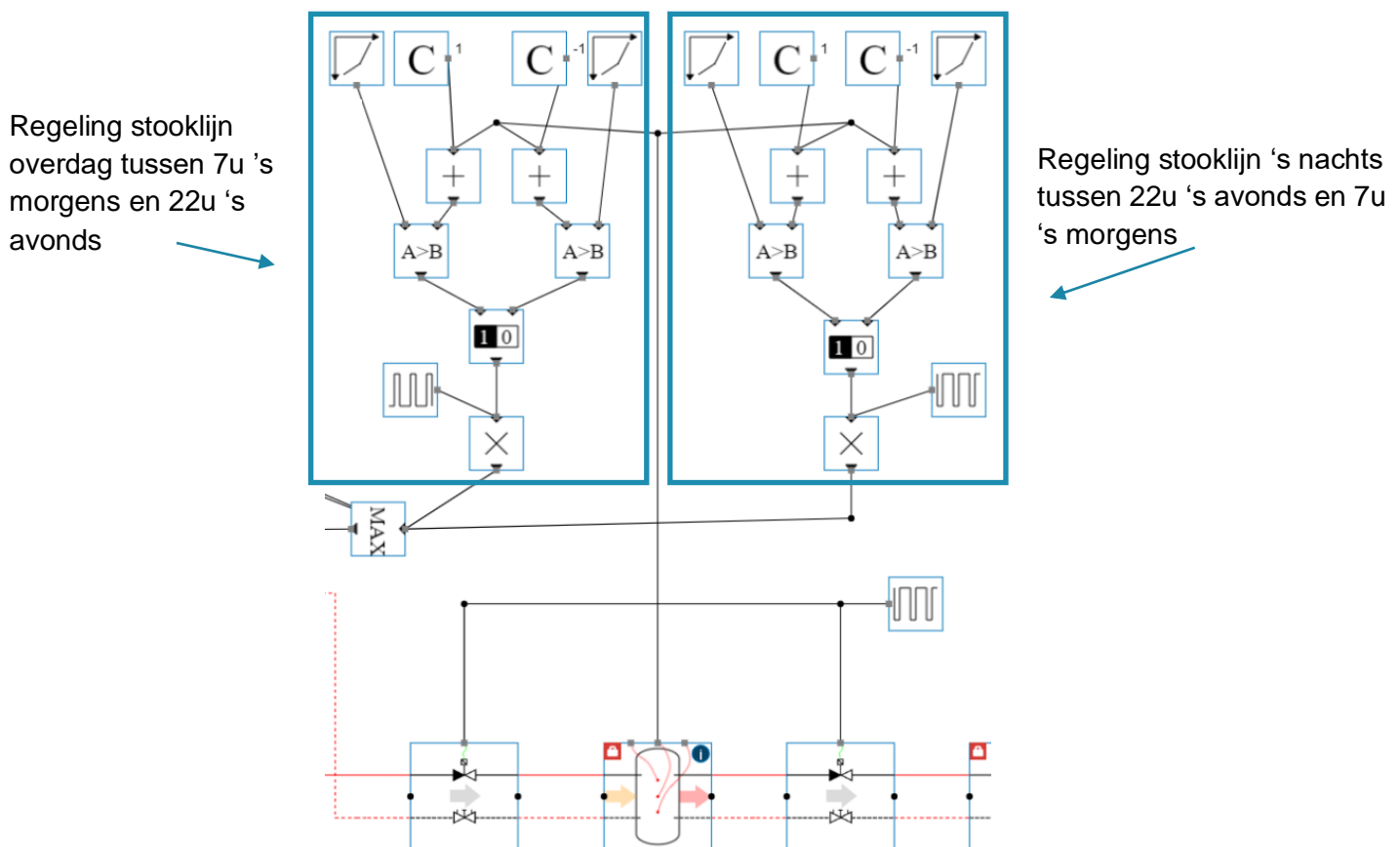
5.4.2 Problemen

De stijging van het aantal start/stops tijdens deze simulatie is duidelijk zichtbaar en kan een negatieve invloed hebben op de levensduur van de warmtepomp. Ten slotte blijft het aantal draaiuren ongeveer gelijk aan het aantal uren bij de vorige regelingen. Het comfort daalt wel gering omdat er minder warm water kan gebufferd worden wanneer het buffervat niet wordt opgewarmd door de warmtepomp.

5.5 Regeling met kloksturing op het boilervat en stooklijnverschuiving op het buffervat

Tijdens deze regelstrategie wordt de stooklijn die zorgt voor de opwarming van het buffervat 's nachts verlaagd. Hierbij is de kloksturing op het boilervat behouden, identiek aan die van de vorige regelstrategie.

De stooklijnverlaging op het buffervat ziet er als volgt uit in de Hysopt software, Figuur 5-11.



Figuur 5-11 Regeling met stooklijnverschuiving

De temperatuur wordt in het midden van het buffervat gemeten. Door een constante waarde van 1 en -1 naar de sommatie-operator te sturen gaan we een dode band van 2°C creëren. Dit zorgt ervoor dat de PI-regelaar die vervolgens de warmtepomp aanstuurt minder snel op- of afspringt.

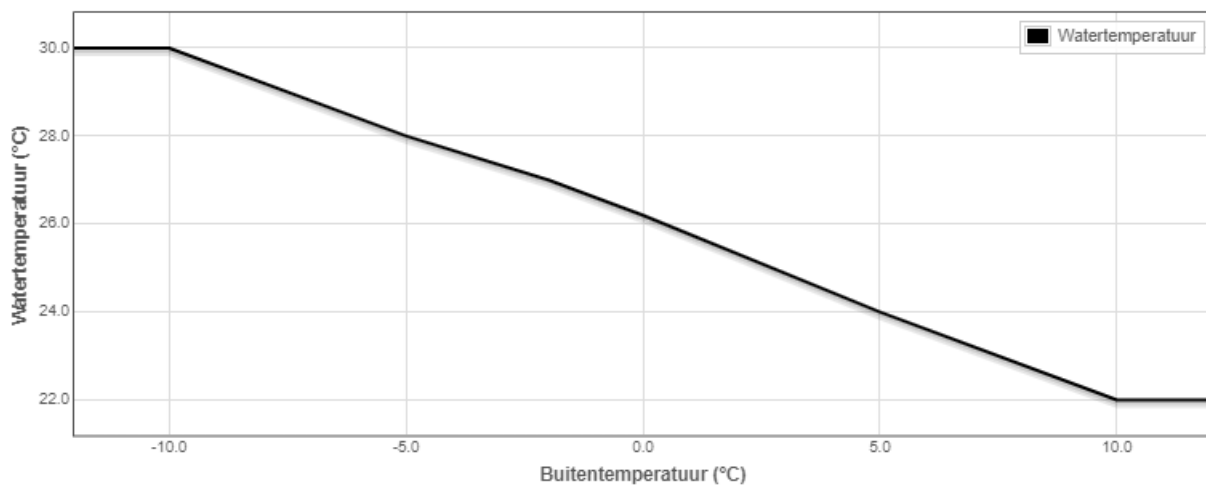
Bijvoorbeeld: Stel het is buiten -5°C, dan gaat de stooklijn ervoor zorgen dat het buffervat wordt opgewarmd tot 28°C, zie Figuur 5-12. Als er geen dode band wordt toegepast bij deze regeling en het buiten 1°C warmer zou worden, dan zal de warmtepomp stoppen met werken omdat het buffervat nu maar tot 27.5°C opgewarmd moet worden. Hierdoor zal het aantal start/stops van de warmtepomp aanzienlijk toenemen, wat slecht is voor de levensduur van de warmtepomp. Door een dode band te gebruiken gaat de warmtepomp bij -5°C het buffervat opwarmen tot maximum 29°C en minimum 27°C, als de buitentemperatuur nu afneemt met 1°C gaat dit de warmtepomp niet aansturen.

Dit principe wordt zowel 's nachts als overdag toegepast.

De vermenigvuldigingsoperatoren gaan het signaal van de activatoren vermenigvuldigen met de setpunt generatoren. De activator geeft een 1-signaal door wanneer het water in het buffervat een lagere temperatuur bezit dan de temperatuur die gevraagd wordt door de stooklijn rekening houdend met de dode band. De setpunt generator die de stooklijn overdag aanhoudt geeft een 1-signaal door tussen 7.00u 's morgens en 22.00u 's avonds. De setpunt generator die de stooklijn van 's nachts aanhoudt, geeft een 1-signaal door tussen 22.00u 's avonds en 7.00u 's morgens. Vervolgens wordt dit signaal doorgegeven aan de MAX-operator die het hoogste signaal gaat doorgeven naar het schakelsignaal van de PI-regelaar.

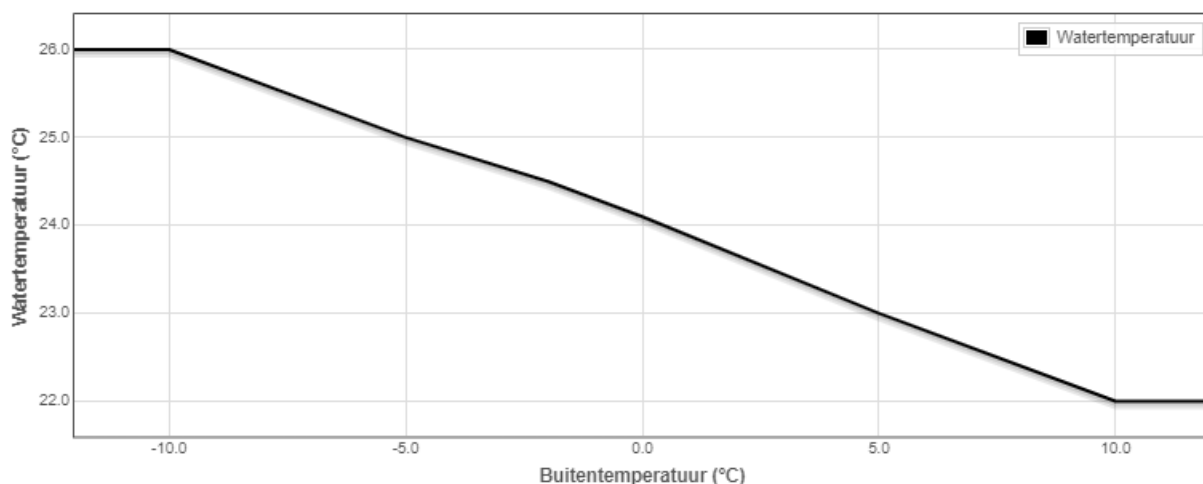
In Figuur 5-12 en Figuur 5-13 hieronder, ziet u bovenaan de stooklijn zien die overdag wordt toegepast en onderaan de stooklijn die 's nachts wordt toegepast.

Stooklijn



Figuur 5-12 Stooklijn overdag

Stooklijn



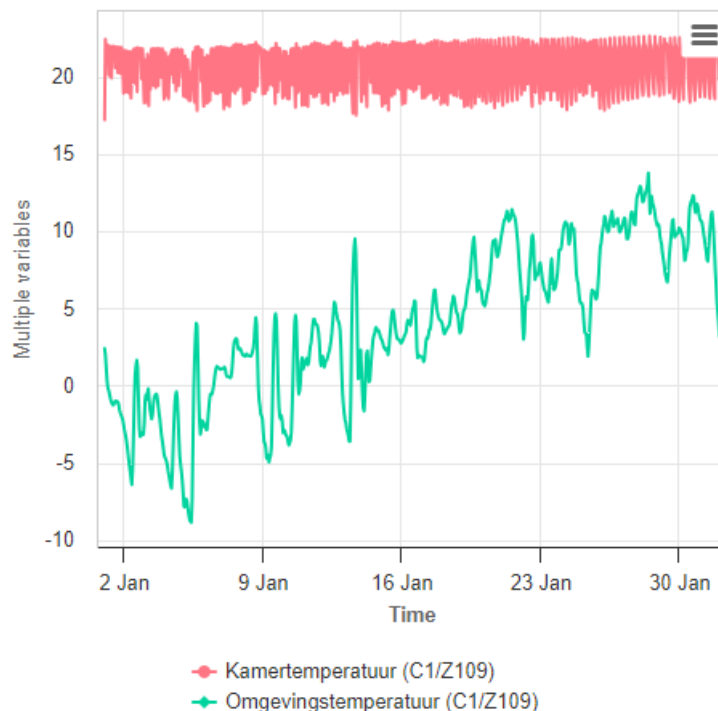
Figuur 5-13 Stooklijn 's nachts

5.5.1 Resultaten

Wanneer we de resultaten van de vijfde regelstrategie bekijken zien we dat het elektrisch verbruik lager ligt ten opzichte van de regeling zonder stooklijnverschuiving (regeling 3). Ook het aantal start/stops neemt af, de reden hierachter is dat het buffervat langer deze lagere temperatuur kan vasthouden waardoor het minder snel terug opgewarmd moet worden. De lichte verlaging van de stooklijn 's nachts heeft wel nadelige invloed op het comfort in de woning ten opzichte van de derde regelstrategie. Dit resultaat is te verwachten omdat er weinig aangepast wordt aan deze regelstrategie buiten de stooklijnverlaging 's nachts. Tabel 10 toont de resultaten wanneer we de stooklijn 's nachts verlagen van januari tot en met april. Figuur 5-14 toont het temperatuurverloop in de kamer en de omgevingstemperatuur tijdens de regeling met stooklijnverlaging in januari.

Tabel 10 Resultaten van de regeling met een stooklijnverlaging in januari

| januari-april | | | | | | |
|---------------|------|------------------------------|------------------------------|-------------|-----------|---------|
| | SCOP | Elektrisch verbruik (in kWh) | EV - PV-opbrengsten (in kWh) | start/stops | draaiuren | comfort |
| Regeling 5 | 3.2 | 2763.41 | 2595.74 | 814 | 822.3 | 87.8% |



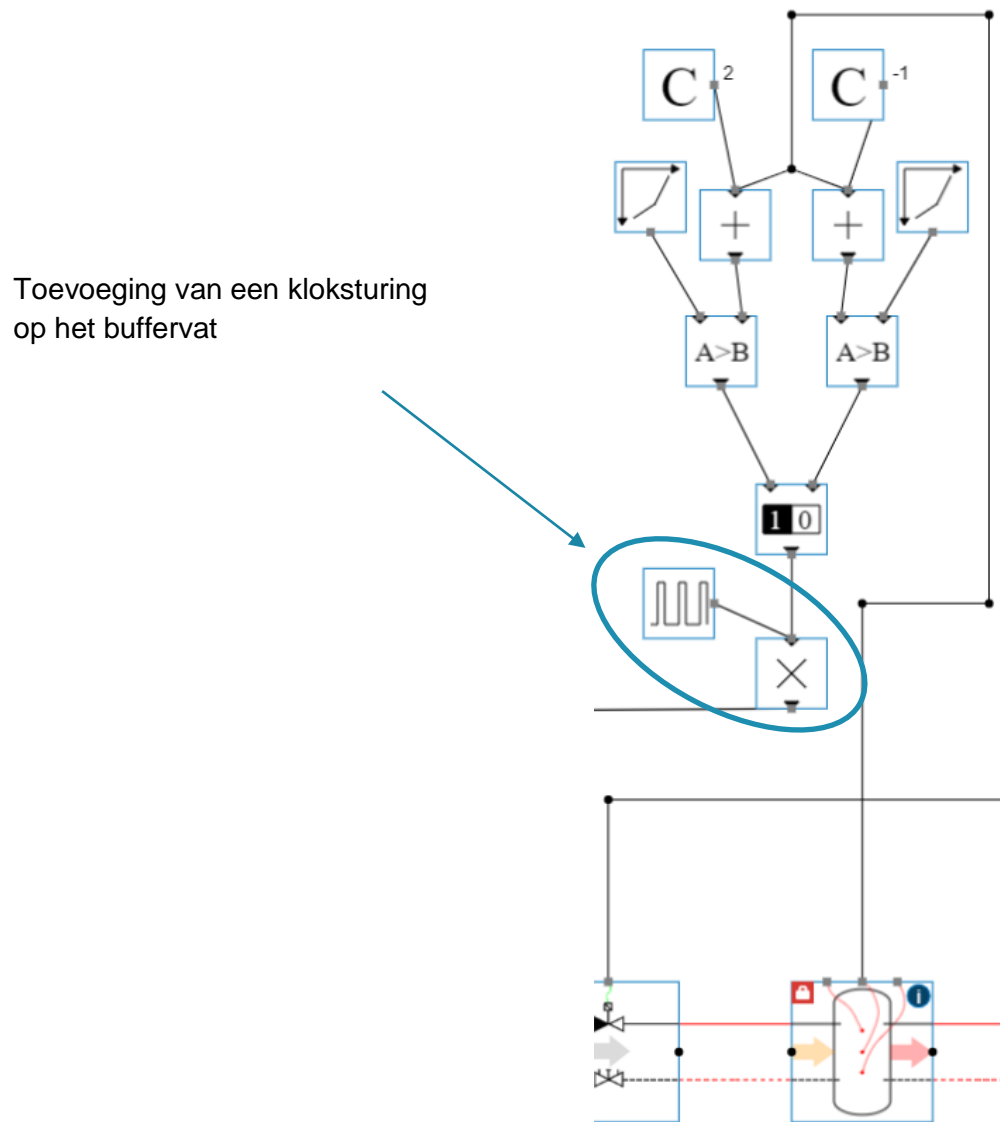
Figuur 5-14 Kamer- en omgevingstemperatuur bij de regeling met stooklijnverlaging in januari

5.5.2 Probleem

De temperatuur in deze woning zakt overdag nog steeds onder de 19°C wat niet aanvaardbaar is voor de eigenaar van de woning.

5.6 Regeling met kloksturing op het boiler- en buffervat

Bij deze regelstrategie wordt de kloksturing op het boilervat behouden en wordt er een extra kloksturing toegevoegd op het buffervat. De stooklijn op het buffervat wordt verhoogd ten opzichte van de vorige regelingen zodat het buffervat 's nachts nog een bepaalde tijd warm water aan de eindunits kan geven. De kloksturing op het buffervat wordt ingesteld van 7u 's morgens tot 24u 's avonds. In de Hysopt software ziet de kloksturing op het buffervat er als volgt uit, Figuur 5-15 toont de extra klokregeling op het buffervat.



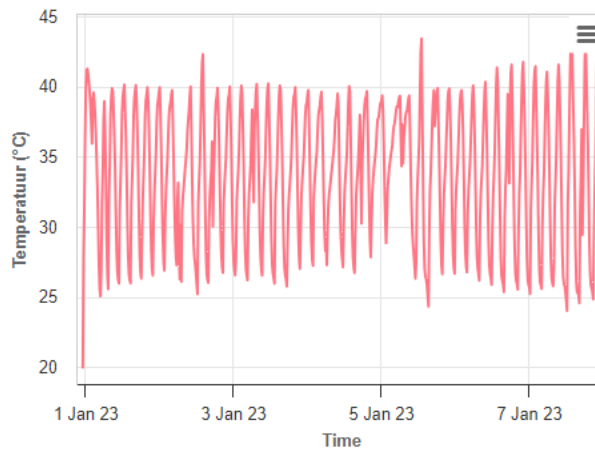
Figuur 5-15 Toevoeging Klokregeling voor het buffervat

Hierbij wordt gebruikgemaakt van een setpunt generator die een 1-sigitaal doorgeeft tussen 7.00u 's morgens en 24.00u 's avonds. Dit signaal wordt dan door de vermenigvuldigungsoperator vermenigvuldigd met het signaal afkomstig van de stooklijn, die het buffervat op temperatuur brengt.

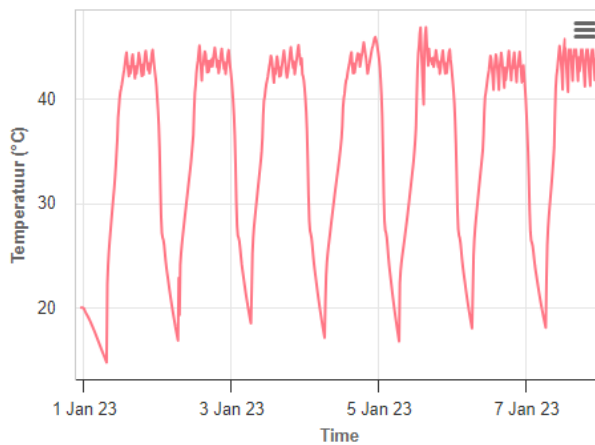
5.6.1 Resultaat

Wanneer we het temperatuurverloop in het buffervat van de voorgaande regelstrategieën gaan bekijken, zien we dat het water in het buffervat binnen een bepaalde periode voortdurend schommelt tussen de 25°C en 40°C. dit komt omdat het boiler vat tussen bepaalde uren voorrang krijgt op het buffervat en omdat de stooklijn zorgt voor een andere buffertemperatuur bij wijziging van de buitentemperatuur. Figuur 5-16 toont het temperatuursverloop in het buffervat zonder kloksturing.

Wanneer we nu naar het temperatuurverloop kijken tijdens de regeling met kloksturing op het buffervat, blijft de temperatuur overdag rond de 43°C. Enkel 's nachts neemt de temperatuur af wanneer de kloksturing de temperatuurvraag van het buffervat uitschakelt. Figuur 5-17 toont het temperatuurverloop in het buffervat met kloksturing.



Figuur 5-16 Regeling zonder kloksturing op het buffervat



Figuur 5-17 Regeling met kloksturing op het buffervat

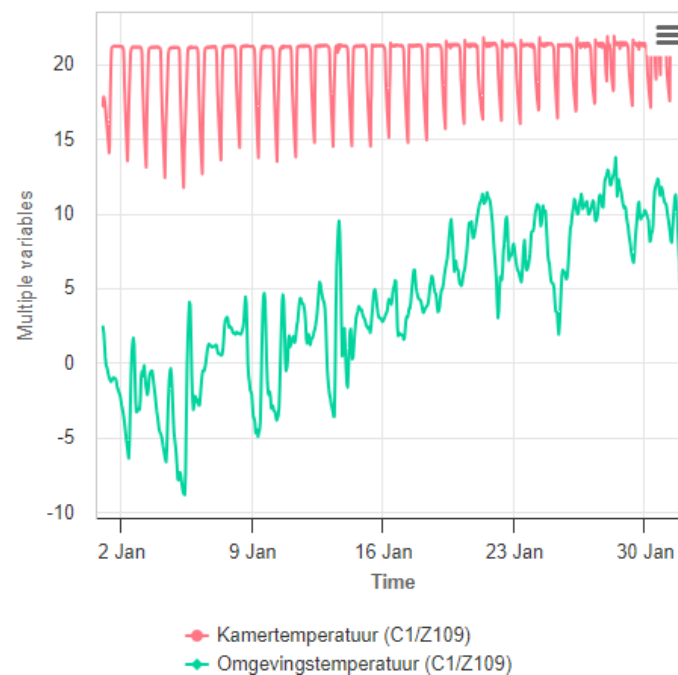
Wanneer we de resultaten van deze regeling gaan bekijken zien we dat het elektrisch verbruik van de warmtepomp gemiddeld gelijk blijft ten opzichte van de vorige regelingen, al is het verschil klein. Opvallend is wel dat het comfort 87.5% blijft. We zouden verwachten dat het comfort afneemt omdat er 's nachts geen warmte meer aan het buffervat geleverd wordt. De reden waarom het comfort vrijwel gelijk blijft aan de voorgaande regelstrategieën is omdat de temperatuur in de woning overdag bijna continu 22°C blijft, maar tijdens de nacht tussen 24.00 u 's nachts en 7.00u 's ochtends, daalt de temperatuur in de kamer wel. Dit wordt aanvaardbaar aangezien omdat we tijdens deze uren normaal gezien slapen. Wat

verder opvalt is dat het elektrische verbruik, afgetrokken door de PV-opbrengsten tijdens deze regelstrategie, lager is dan bij regeling drie, waar dat enkel een kloksturing op het boilervat wordt toegepast. De reden hiervoor is omdat de warmtepomp enkel overdag in werking treedt en dus 's nachts vanaf 24.00 tot 7.00u niet wordt aangestuurd.

Tabel 11 toont de resultaten wanneer we een kloksturing toepassen op het buffer- en boilervat van januari tot en met april. **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** toont het temperatuurverloop in de kamer en de omgevingstemperatuur tijdens de regeling met kloksturing op het boiler- en buffervat in januari.

Tabel 11 Resultaten van regeling met kloksturing op het boiler- en buffervat van januari tot en met april

| januari-april | | | | | | |
|---------------|------|------------------------------|------------------------------|-------------|-----------|---------|
| | SCOP | Elektrisch verbruik (in kWh) | EV - PV-opbrengsten (in kWh) | start/stops | draaiuren | comfort |
| Regeling 6 | 3.3 | 2903.56 | 2700.81 | 1003 | 803.5 | 87.5% |



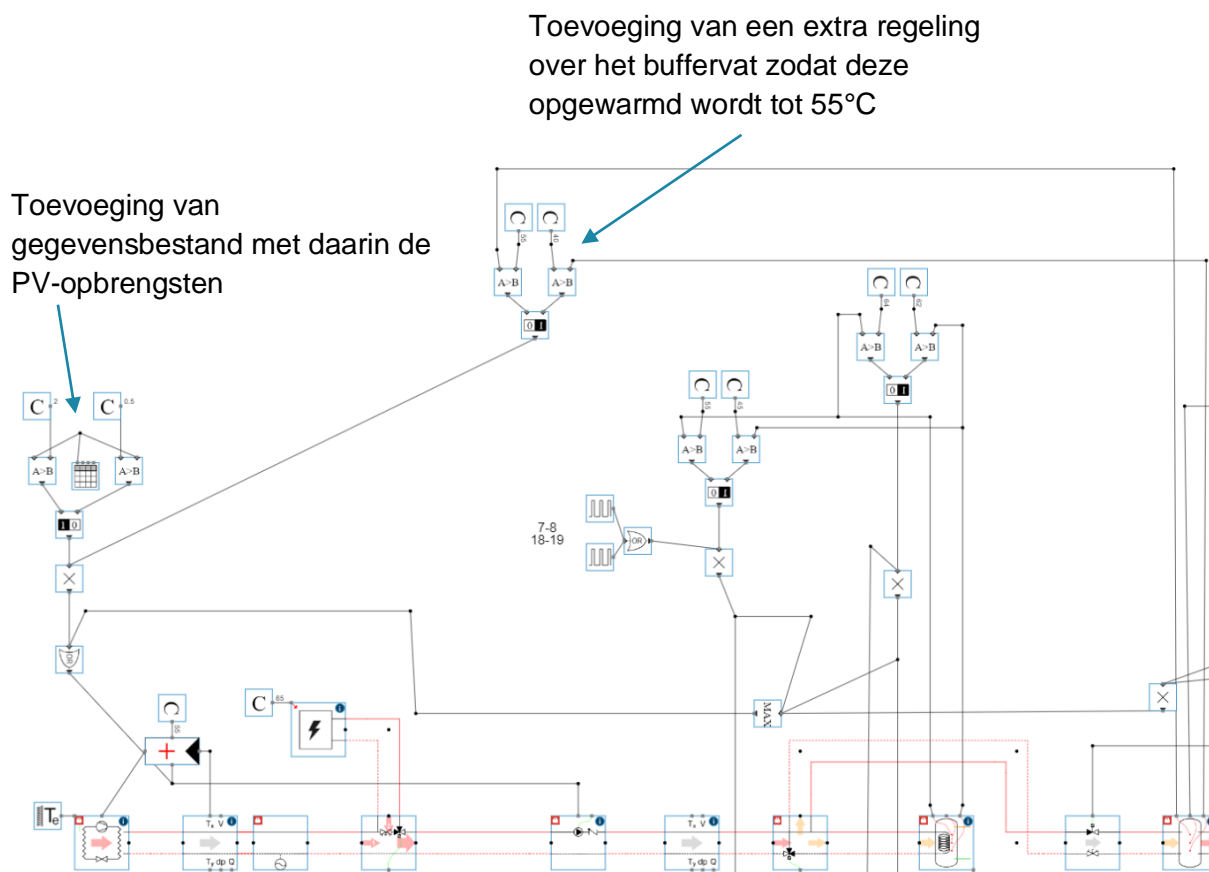
Figuur 5-18 Kamer- en omgevingstemperatuur bij een kloksturing op het buffer- en boilervat in januari

5.6.2 Problemen

Het gegenereerde temperatuurverloop is aanvaardbaar voor de eigenaar van de woning maar, tijdens de voorgaande regelstrategieën zien we dat de warmtepomp maar enkele kilowatts van de PV-opbrengsten gebruikt. De vraag is of we de warmtepomp op een duurzamere manier kunnen aansturen door meer gebruik te maken van de PV-opbrengsten, met behoud van het comfort.

5.7 Regeling rekening houdend met de opbrengsten van de PV-panels

Tijdens deze regelstrategie wordt de warmtepomp aangestuurd wanneer er een bepaalde hoeveelheid PV-opbrengsten zijn. Wanneer er geen PV-opbrengsten aanwezig zijn zal de regeling werken volgens regelstrategie zes. Op deze manier kan de warmtepomp via groene energie worden aangestuurd en zal er minder energie uit het net worden getrokken. Wel blijft de kloksturingen op het buffer- en boiler vat behouden. Er wordt een extra regeling toegevoegd aan het buffervat waarbij het buffervat mag worden opgewarmd tot 55°C wanneer er PV-opbrengsten aanwezig zijn. Zo kan deze gratis energie gebufferd worden in het buffervat (Sourbron et al., 2014). Figuur 5-19 toont hoe deze regelstrategie eruitziet in de Hysopt software.



Figuur 5-19 Regeling met implementatie van PV-opbrengsten

Deze regelstrategie heb ik als volgt aangepakt: Als eerst heb ik de data van de slimme energiemeter van de eigenaar opgevraagd. Uit deze data ben ik de PV-opbrengsten gaan groeperen en samenvoegen in een gegevensbestand dat kan worden ingelezen door de Hysopt software. Dit gegevensbestand ziet u links op bovenstaande Figuur 5-19.

De aansturing van de warmtepomp werkt als volgt: wanneer er meer dan 2kW PV-opbrengsten zijn, gaat de activator een 1-sigitaal doorgeven aan de vermenigvuldigungsoperator. Wanneer er minder dan 0.5kW PV-opbrengsten zijn gaat de activator een 0-sigitaal doorgeven aan de vermenigvuldigungsoperator. Wanneer de

temperatuur bovenaan in het buffervat kleiner is dan 40°C gaat de activator die bovenaan in bovenstaande Figuur 5-19 is toegevoegd een 1-sigitaal doorgeven aan de vermenigvuldigingsoperator, als de temperatuur bovenaan het buffervat groter is dan 55°C dan gaat de activator een 0-sigitaal doorgeven aan de vermenigvuldigingsoperator. Wanneer de vermenigvuldigingsoperator van beide activators een 1-sigitaal verkrijgt gaat deze een 1-sigitaal doorgeven aan een OF-poort. Deze OF-poort gaat een sigitaal doorgeven aan het schakelsigitaal van de PI-regelaar wanneer er PV-opbrengsten aanwezig zijn of als er warmtevraag is in het boiler- of buffervat wanneer er geen PV-opbrengsten zijn.

Bij deze regelstrategie heb ik drie verschillende scenario's getest:

1. De activator geeft een 1-sigitaal door wanneer er meer dan 2kW PV-opbrengsten zijn en een 0-sigitaal wanneer er minder dan 0,5kW PV-opbrengsten zijn.
2. De activator geeft een 1-sigitaal door wanneer er meer dan 1kW PV-opbrengsten zijn en een 0-sigitaal wanneer er minder dan 0,5kW PV-opbrengsten zijn.
3. De activator geeft een 1-sigitaal door wanneer er meer dan 0,5kW PV-opbrengsten zijn en een 0-sigitaal wanneer er minder dan 0,05kW PV-opbrengsten zijn.

5.7.1 Resultaat

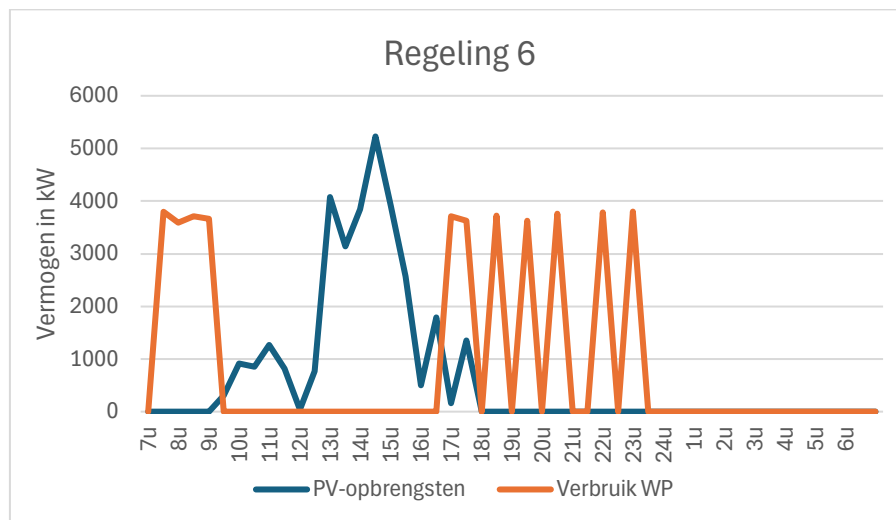
In de Tabel 12 zien we dat de SCOP van deze regeling gelijk blijft aan de SCOP van de zesde regelstrategie. Dit komt omdat er ook nu gebruik wordt gemaakt van een kloksturing op zowel het boiler- als het buffervat. Het elektrisch verbruik van de warmtepomp blijft in vergelijking met de andere regelstrategieën ongeveer gelijk. Wanneer we nu de PV-opbrengsten aftrekken van het elektrisch verbruik, zien we een opmerkelijke daling van het verbruik. Wat nog opvalt is de daling van het aantal start/stops tijdens deze simulatieperiode. Dit komt omdat het buffervat bij een bepaalde PV-opbrengst warmte gaat stockeren tot 55°C. Wanneer de PV-opbrengsten wegvallen gaat de temperatuur van het buffervat dalen tot aan de gewenste stooklijntemperatuur die op dat moment van toepassing is. Door de stockage van het warm water in het buffervat op 55°C gaat het comfort in de woning toenemen.

Tabel 12 Resultaten van de zevende regelstrategie vanaf januari tot en met april

| januari-april | | | | | | |
|---------------|------|------------------------------|------------------------------|-------------|-----------|---------|
| | SCOP | Elektrisch verbruik (in kWh) | EV - PV-opbrengsten (in kWh) | start/stops | draaiuren | comfort |
| Regeling 7.1 | 3.3 | 2856.56 | 2360.63 | 787 | 838.7 | 89.5% |
| Regeling 7.2 | 3.3 | 2871.48 | 2343.54 | 767 | 849.2 | 89.5% |
| Regeling 7.3 | 3.3 | 2850.27 | 2353.40 | 689 | 872.9 | 89.8% |

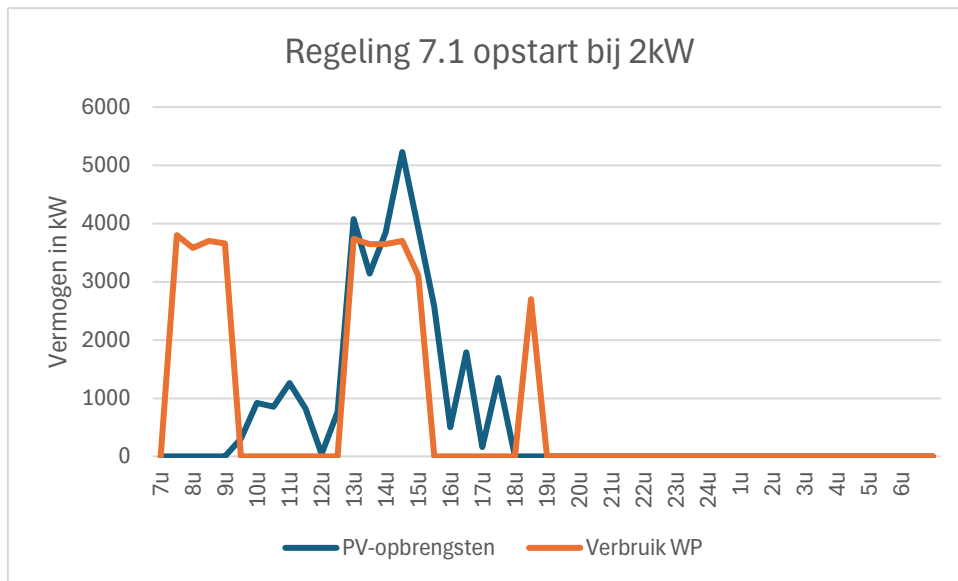
Wanneer we naar het elektrisch verbruik van de warmtepomp kijken over een periode van één dag, toont Figuur 5-20 zien we dat de warmtepomp in werking treedt om 7u 's morgen en dat het boiler- en buffervat rond 9.30u beide zijn opgewarmd. Om 16.30u zien we dat de warmtepomp opnieuw opspringt omdat de temperatuur in het buffervat is afgenomen en dus onder de stooklijntemperatuur ligt. Vervolgens weten we dat om 18.00u het boiler- of buffervat opnieuw wordt opgewarmd door middel van de kloksturing. De overige verbruikspieken ontstaan doordat de buitentemperatuur 's avonds afneemt, waardoor het buffervat via zijn stooklijn herhaaldelijk een hogere temperatuur eist.

Opvallend is dat de warmtepomp op deze dag zijn verbruik niet haalt uit de PV-opbrengsten. Dit geldt trouwens niet alleen voor de zesde regelstrategie maar ook voor de voorgaande regelstrategieën.

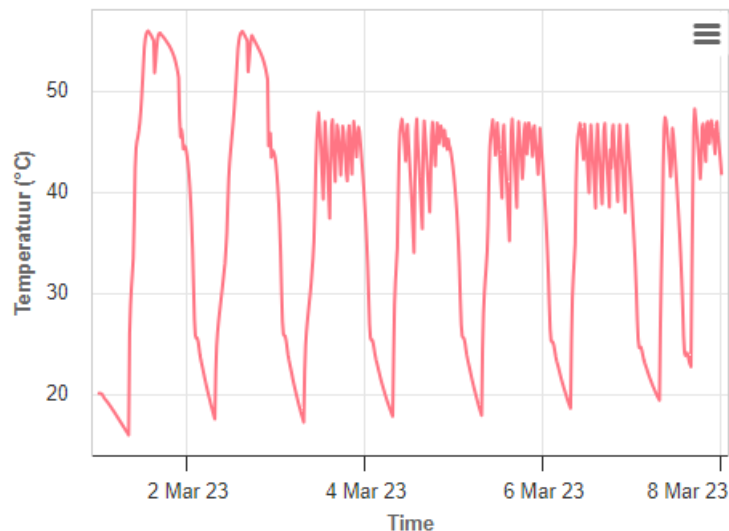


Figuur 5-20 Dag weergave van PV-opbrengsten en het elektrisch verbruik van de warmtepomp van de zesde regeling

Wanneer we nu naar Figuur 5-21 kijken, zien we dat de warmtepomp zowel 's morgens als 's avonds het boiler vat weer op temperatuur brengt (ingesteld door de kloksturing). Rond 12.30u zien we dat de warmtepomp weer in werking gaat. Dit komt omdat er nu meer de 2 kW PV-opbrengsten zijn van de zonnepanelen geïnstalleerd op het dak van de woning. Door een extra regelstrategie toe te voegen aan het buffervat, waarbij het buffervat opgewarmd kan worden tot 55°C, kan de warmtepomp via zonne-energie warmte stockeren in het buffervat. Onderstaande Figuur 5-22 toont het temperatuurverloop in het buffervat tijdens de eerste week van maart.

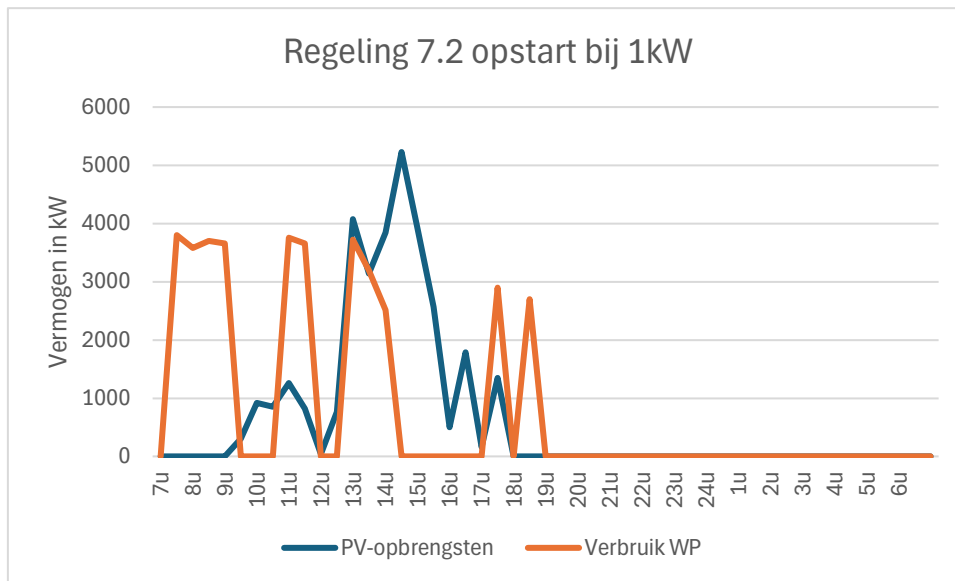


Figuur 5-21 Dag weergave van PV-opbrengsten en het elektrisch verbruik van de warmtepomp van de zevende regeling bij opstart van 2kW

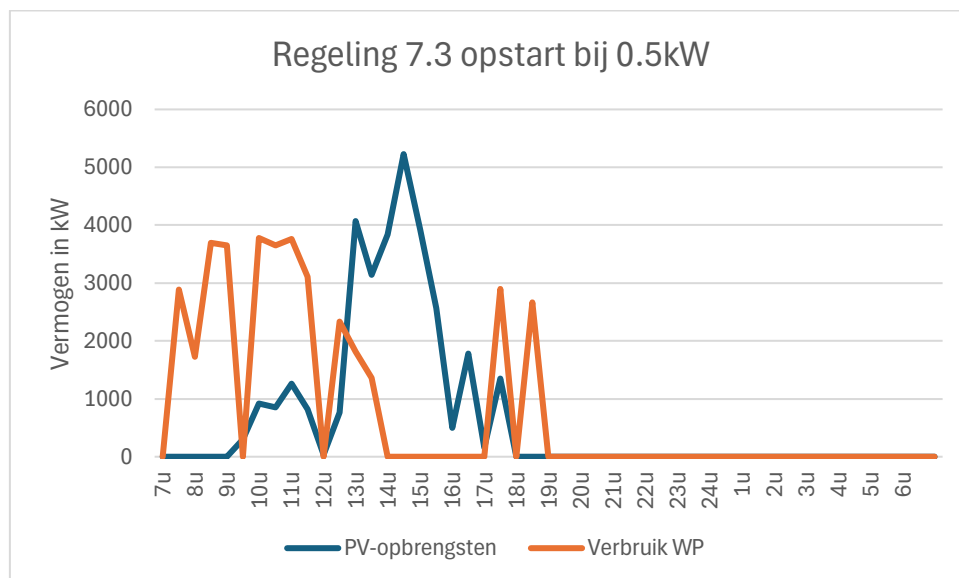


Figuur 5-22 Temperatuursverloop van het buffervat tijdens de eerste week van maart

Als we nu naar het verbruik van de warmtepomp tijdens regeling 7.2 gaan kijken, toont Figuur 5-23. Dan zien we dat de warmtepomp om 10.30u ook opspringt. Dit komt omdat er nu is ingesteld dat de warmtepomp mag opstarten als er meer dan 1 kW PV-opbrengsten zijn. Het nadeel aan deze regeling is dat tijdens de middag, wanneer er de meeste PV-opbrengsten zijn, het buffervat sneller aan de 55°C komt omdat het om 10.30u al eens opgewarmd wordt. Hetzelfde geldt voor regeling 7.3 waarbij de warmtepomp al mag opstarten bij 0.5 kW PV-opbrengsten. Dit toont Figuur 5-24, waarbij rond 9.30u de kaap van 0.5 kW PV-opbrengsten al overschreden wordt (D'Herdt, 2023).



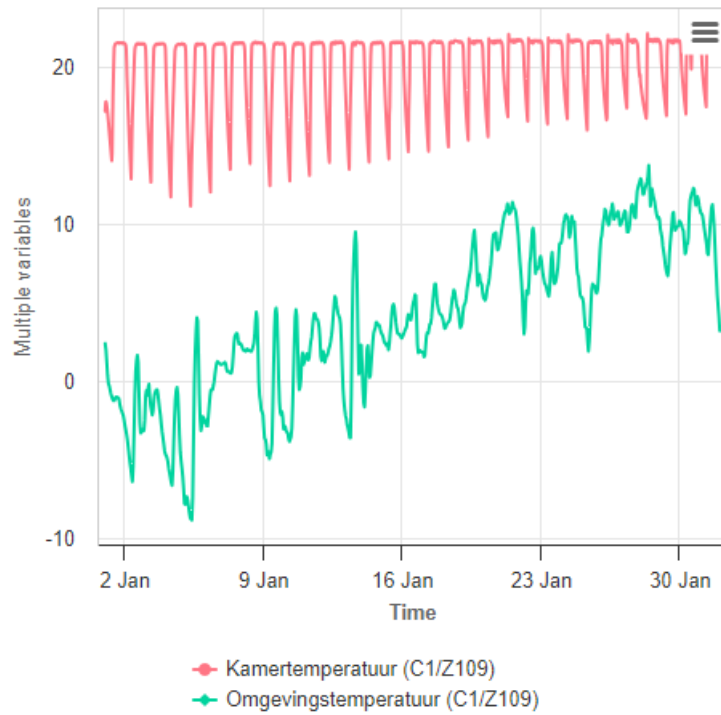
Figuur 5-23 Dag weergave van PV-opbrengsten en het elektrisch verbruik van de warmtepomp van de zevende regeling bij opstart van 1kW



Figuur 5-24 Dag weergave van PV-opbrengsten en het elektrisch verbruik van de warmtepomp van de zevende regeling bij opstart van 0.5kW

Belangrijk aan dit voorbeeld is dat hier een dag in maart wordt gebruikt waarbij er gedurende de dag veel PV-opbrengsten zijn. Wanneer er een voorbeeld werd gegeven tijdens een wisselvallige dag of een dag eerder op het jaar, zullen deze resultaten niet identiek zijn aan het voorbeeld hierboven. Bij wisselvallige dagen en dagen waarbij er minder PV-opbrengsten worden gewonnen, zullen regeling 7.2 & 7.3 beter van toepassing zijn dan regeling 7.1. Dit komt omdat bij deze regelstrategieën de warmtepomp bij een lager hoeveelheid PV-opbrengsten als in werking treedt, en er dus niet minimaal 2 kW PV-opbrengsten aanwezig moeten zijn voordat de warmtepomp in werking treedt.

Onderstaande Figuur 5-25 toont het temperatuurverloop in de kamer met daarbij de omgevingstemperatuur in de maand januari.



Figuur 5-25 Kamer- en omgevingstemperatuur van regeling 7.1 in januari

6 RESULTATEN

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de nieuwe regelstrategieën besproken. Deze resultaten worden vervolgens vergeleken met het resultaat van de huidige woning. Door een onderlinge vergelijking van de nieuwe regelstrategieën kan ik besluiten welke regelstrategie het best bruikbaar is voor de installatie in de betreffende woning. Al deze resultaten werden gesimuleerd over een periode van vier maanden.

6.1 Resultaat huidige woning

Wanneer we de oorspronkelijke regelstrategie nog eens gaan bekijken verkregen we de volgende resultaten, weergegeven in Tabel 13.

Tabel 13 Resultaat van de oorspronkelijke regelstrategie

| januari-april | | | | | | |
|---------------|------|---------------------------------|-------------------------------------|-------------|-----------|---------|
| | SCOP | Elektrisch verbruik (in kWh) | EV - PV- opbrengsten (in kWh) | start/stops | draaiuren | comfort |
| Regeling 1 | 2.9 | 2058.41 | 1982.38 | 606 | 577.9 | 74.8% |

6.2 Resultaten van de nieuwe regelstrategieën

Tabel 14 toont een overzicht van alle resultaten die we gesimuleerd worden op de oorspronkelijke installatie met zijn bijhorende nieuwe regelstrategie.

Opsomming van de regelstrategieën:

- Regeling 2: Regelstrategie met legionellapreventie
- Regeling 3: Regelstrategie met een kloksturing op het boilervat
- Regeling 4: Regelstrategie met kloksturing op het boilervat met verkleining van het buffervolume
- Regeling 5: Regelstrategie met kloksturing op het boilervat en stooklijnverschuiving op het buffervat
- Regeling 6: Regelstrategie met kloksturing op het boiler- en buffervat
- Regeling 7: Regelstrategie rekening houdend met de opbrengst van PV-panelen
 - 7.1: Opstart bij meer dan 2 kW PV-opbrengsten
 - 7.2: Opstart bij meer dan 1 kW PV-opbrengsten
 - 7.3: Opstart bij meer dan 0.5 kW PV-opbrengsten

Tabel 14 Overzicht van de resultaten van de nieuwe regelstrategieën

| januari-april | | | | | | |
|---------------|------|------------------------------|------------------------------|-------------|-----------|---------|
| | SCOP | Elektrisch verbruik (in kWh) | EV - PV-opbrengsten (in kWh) | start/stops | draaiuren | comfort |
| Regeling 2 | 3.2 | 2963.56 | 2762.65 | 954 | 835.8 | 87.1% |
| Regeling 3 | 3.2 | 2967.82 | 2785.85 | 1046 | 834 | 90.3% |
| Regeling 4 | 3.2 | 2882.32 | 2692.64 | 1307 | 828.9 | 86.3% |
| Regeling 5 | 3.2 | 2763.41 | 2595.74 | 814 | 822.3 | 87.8% |
| Regeling 6 | 3.3 | 2903.56 | 2700.81 | 1003 | 803.5 | 87.5% |
| Regeling 7.1 | 3.3 | 2856.56 | 2360.63 | 787 | 838.7 | 89.5% |
| Regeling 7.2 | 3.3 | 2871.48 | 2343.54 | 767 | 849.2 | 89.5% |
| Regeling 7.3 | 3.3 | 2850.27 | 2353.40 | 689 | 872.9 | 89.8% |

6.3 Analyse

Wanneer we de oorspronkelijke regelstrategie vergelijken met de nieuwe regelstrategieën kunnen we concluderen dat er een stijging van het elektrisch verbruik plaatsvindt. Ook het aantal start/stops en het aantal draaiuren stijgt mee. Dit ten voordelen van het comfort in de woning. De reden hierachter is het anders aansturen van de tweede circulatiepomp zoals uitgelegd in hoofdstuk 5.2.

Wanneer we regeling twee tot en met zes met elkaar gaan vergelijken zien we over het algemeen weinig verandering in het elektriciteitsverbruik, het aantal start/stops, het aantal draaiuren en het comfort in de woning. Enkel bij regeling vier en vijf, waar we het buffervat verkleinen en de stooklijn 's nachts verlagen, zien we een lichte daling van het elektriciteitsverbruik maar ook het comfort neemt hier gering af wat negatief ondervonden wordt door de eigenaar. Een ander nadelig punt van de vierde regeling is de stijging van het aantal start/stops. Het mogelijk om met een buffervat van 500 liter te werken, maar uit de resultaten van de simulaties blijkt dit negatief te zijn voor de levensduur van de warmtepomp. Het enige grote verschil tussen de eerste zes regelstrategieën is dat het comfort bij de zesde regelstrategie vanaf 7.00 s' morgens tot 24.00u 's nachts mooi rond de 22°C blijft. Dit is bij de voorgaande regelstrategieën niet het geval want bij deze gaat de temperatuur doorheen de dag voortdurend schommelen tussen de 22°C en 17°C.

Wanneer we de zevende regelstrategie gaan vergelijken met de rest, zien we de het elektriciteitsverbruik van de warmtepomp ook hier ongeveer gelijk blijft aan de vorige regelstrategieën. Wat opvalt, is dat het elektrische verbruik aanzienlijk daalt wanneer we de PV-opbrengsten die tijdens de werking van de warmtepomp worden gegenereerd, aftrekken van het elektrische verbruik van de warmtepomp. Door de warmtepomp te linken aan de PV-opbrengsten kan er bespaart worden op de energiefactuur. Wat nog opvalt bij deze regelstrategie is de afname van het aantal start/stops. Deze afname komt tot stand doordat er extra energie kan gebufferd worden in het buffervat. Door deze extra energie, gewonnen uit de PV-opbrengsten, op te slaan in het buffervat gaat het comfort in de woning licht toenemen.

6.3.1 Kostenanalyse

De energieprijzen bij de leverancier van de eigenaar tijdens de maanden januari tot en met april van 2023 is gemiddeld €0,56114 per kWh (Fluvius, 2023).

Wanneer we deze prijs vermenigvuldigen met het elektrisch verbruik afgetrokken door de PV-opbrengsten dan verkrijgen we de gemiddelde elektriciteitsprijs die voor deze vier maanden betaald moet worden. Dit toont Tabel 15.

Als we deze kostenanalyse en het comfort uit Tabel 13 & Tabel 14 bekijken, dan kunnen we concluderen dat de zevende regeling het beste scoort op basis van het geleverde comfort en de elektriciteitskost.

Tabel 15 Overzicht van de elektriciteitskosten vanaf januari tot en met april

| Prijs per kWh (in €/kWh) | Regelstrategie | Verbruik - PV-opwekking (in kWh) | Prijs (in €) |
|--------------------------|----------------|----------------------------------|--------------|
| 0.56114 | 1 | 1982.38 | 1112.39 |
| | 2 | 2762.65 | 1550.23 |
| | 3 | 2785.85 | 1563.25 |
| | 4 | 2692.64 | 1510.95 |
| | 5 | 2595.74 | 1456.57 |
| | 6 | 2700.81 | 1515.53 |
| | 7.1 | 2360.63 | 1324.64 |
| | 7.2 | 2343.54 | 1315.05 |
| | 7.3 | 2353.4 | 1320.59 |

7 CONCLUSIE

Het doel van deze masterproef bestond uit drie delen. Het eerste deel omvatte het nagaan of de software Hysopt een meerwaarde kon bieden voor het toepassen van variabele regelstrategieën op de betreffende thermische installatie en of deze software ook bruikbaar is in andere cases onder het Thermi-var project. Het tweede deel focuste zich op het ontwerpen van nieuwe regelstrategieën, en het analyseren van het effect van deze regelstrategieën op de prestaties van de warmtepomp en het comfort in de ruimtes wanneer we o.a. het buffervat verkleinen. Het laatste deel bestond uit het onderzoeken van het economische effect van de verschillende regelstrategieën.

In alle drie de delen kwam een uitgebreid onderzoek aan bod. Door een duidelijke expertise van de oorspronkelijke regelstrategie en een goede communicatie met Hysopt kwam al snel het oordeel dat Hysopt wel degelijk geschikt is voor het toepassen van variabele regelstrategieën op de betreffende thermische installatie.

Door de regelstrategieën te ontwerpen en de modellen te simuleren, ontstond een helder overzicht. In dit overzicht werden de prestaties van de warmtepomp en het comfort in de woning duidelijk uiteengezet.

We konden concluderen dat de regelstrategieën zonder kloksturing op het buffervat leiden tot een te grote temperatuurvariatie doorheen de dag. Vervolgens konden we vaststellen dat het verkleinen van het buffervat eerder negatief is voor het comfort in de woning en de levensduur van de warmtepomp. Wanneer we een kloksturing toepaste op het buffervat, vanaf regeling zes, zagen we dat het comfort vanaf 7.00 tot 24.00u gehandhaafd bleef zonder dat het drastisch afnam. Bij regeling zeven, waar de PV-opbrengsten werden gekoppeld aan de warmtepomp, blijkt uit een kostenanalyse duidelijk dat deze regeling zorgt voor de laagste elektriciteitskosten met daarbij een aanvaardbaar comfort.

8 REFERENTIES

- De Beuckeleer. (2022a). *Compute design flows—HYSOPT wiki—Confluence*. <https://hysopt.atlassian.net/wiki/spaces/HRM/pages/3089367213/Compute+design+flows>
- De Beuckeleer. (2022b). *Controller—HYSOPT wiki—Confluence*. <https://hysopt.atlassian.net/wiki/spaces/HRM/pages/3089368323/Controller>
- De Beuckeleer. (2022c). *Dynamic simulation—HYSOPT wiki—Confluence*. <https://hysopt.atlassian.net/wiki/spaces/HRM/pages/3089367697/Dynamic+simulation>
- De Beuckeleer. (2022d). *Generator—HYSOPT wiki—Confluence*. <https://hysopt.atlassian.net/wiki/spaces/HRM/pages/3089368006/Generator>
- De Beuckeleer. (2022e). *Operators—HYSOPT wiki—Confluence*. <https://hysopt.atlassian.net/wiki/spaces/HRM/pages/3089368192/Operators>
- De Beuckeleer. (2022f). *Optimise components—HYSOPT wiki—Confluence*. <https://hysopt.atlassian.net/wiki/spaces/HRM/pages/3089367389/Optimise+components>
- De Beuckeleer. (2022g). *Pareto analysis: Calculations—HYSOPT wiki—Confluence*. <https://hysopt.atlassian.net/wiki/spaces/HRM/pages/3089206518/Pareto+analysis+calculations>
- De Beuckeleer. (2022h). *Projects from start to finish—HYSOPT wiki—Confluence*. <https://hysopt.atlassian.net/wiki/spaces/HRM/pages/3088351236/Projects+from+start+to+finish>
- De Beuckeleer. (2022i). *System Check—HYSOPT wiki—Confluence*. <https://hysopt.atlassian.net/wiki/spaces/HRM/pages/3089203395/System+Check>
- D’Herdt, P. (2023). *SLIMME REGELING EN WARMTEPOMPEN: EEN MATCH MET HEEL WAT POTENTIEEL*.
- Fluvius. (2023). *Elektriciteitsprijzen sociale leverancier—Digitale meter*.
- Grundfos UPM Hybrid 32-70 datasheet.pdf*. (z.d.).
- Infogids_afgiftesystemen.pdf*. (z.d.). Geraadpleegd 5 januari 2024, van https://www.duurzamekoeling.be/uploads/1/0/2/1/102130926/infogids_afgiftesystemen.pdf
- Infogids_opwekkingssystemen_lettertype_10.pdf*. (z.d.). Geraadpleegd 5 januari 2024, van https://www.duurzamekoeling.be/uploads/1/0/2/1/102130926/infogids_opwekkingssystemen_lettertype_10.pdf
- Sourbron, M., Goovaerts, L., Van Aken, D., Verheyen, J., & Veeken, J. (2014). *IWT-TETRA 110183: Zongekoppelde Warmtepompsystemen ZON-WARM (nov. 2011- jul. 2014) - Eindverslag*. <https://lirias.kuleuven.be/1672815>
- Van den Abeele, L., Dinne, K., De Cuyper, K., & Bleys, B. (2017). Best Beschikbare Technieken (BBT) voor Legionellabeheersing in Nieuwe Sanitaire Systemen. *WTCB & VITO*.
- Van Riet, F., Vandenbulcke, R., Cleiren, J., & Verhaert, I. (2019). *Hydronic Optimization Of Hybrid Heating Systems: A Methodology Based On Base Circuits*. 3038-3045. <https://doi.org/10.26868/25222708.2019.211127>

Vercammen, T. (2022). *Thermi-var*. Expertisecentrum Energie.
<https://kce.thomasmore.be/thermi-var.html>

Warmtepomp en zonnepanelen: De ideale combinatie? | NIBE. (z.d.). Geraadpleegd 9 januari 2024, van <https://warmtepomp.nibe.eu/nl-be/werking/combineren-warmtepomp-en-zonnepanelen>

FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN
CAMPUS GEEL
Kleinhoefstraat 4
2440 GEEL, België
tel. + 32 14 72 13 00
iiw.geel@kuleuven.be
www.iw.kuleuven.be

