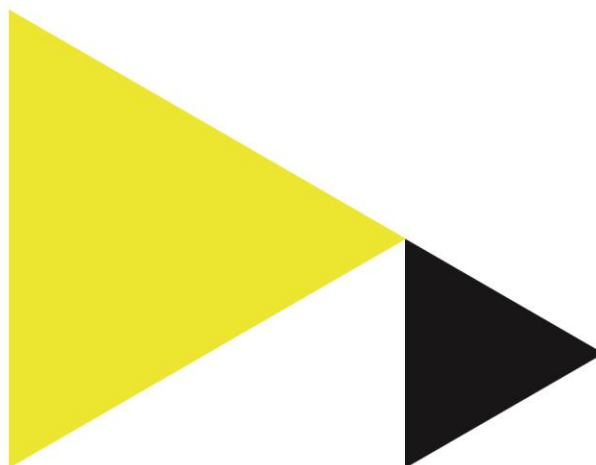


Uurmatching

Een onderzoek naar het potentieel van uurmatching in enkele onderwijsgebouwen van UvA en HvA

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek
2021 – 2023



Uurmatching

Een onderzoek naar het potentieel van uurmatching in enkele onderwijsgebouwen van UvA en HvA

Samenwerkingspartners in dit project zijn:

Vattenfall

Facility Services UvA/HvA

Auteur

Samuel de Vries

Peter Quaak

Renée Heller

afdeling

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek

Date

22-Dec-23

Project type

TKI onderzoeksproject

Version

1.1

Met dank aan de bijdragen van:

Corine Laan onderzoeker
Hamdi Elsayed student assistent
Arianna Barone student
Boriss Grahlovskis student

Contact:

Dit rapport is opgesteld door de projectpartners. Voor vragen over dit rapport kunt u contact opnemen met:

Peter Quaak p.quaak@hva.nl
Renée Heller e.m.b.heller@hva.nl

Subsidie:

Dit project is tot stand gekomen met een subsidie van het ministerie van Economische Zaken, Topsector Energie – programmaliijn Energie: Urban Energy, uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO), binnen de TKI toeslag regeling; PPS toeslag jaar 1921/2019.

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door print-outs, kopieën, of op welke manier dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de Hogeschool Amsterdam.

Samenvatting

Het aandeel elektriciteit uit zon of wind zal de komende jaren steeds verder toenemen, waardoor het steeds belangrijker wordt om het momentane energieverbruik op het momentane aanbod uit zon of wind af te stemmen: uurmatching. Dit onderzoek richt zich met verschillende studies op het flexibiliteitspotentieel van het UvA/HvA gebouwenbestand:

- studie 1: samenstelling ingekochte duurzame energie;
- studie 2: vraagsturing met een verzameling elektrische apparaten op gebouwclusterniveau;
- studie 3: vraagsturing met warmtepomp voor ruimteverwarming op gebouwclusterniveau;
- studie 4: vraagsturing met een groep apparaten van één type: elektrische boilers.

De studies zijn uitgevoerd aan de hand van simulaties, deels aangevuld met theoretische beschouwingen over wat maximaal mogelijk zou zijn. In studie 3 zijn ook praktijkmetingen uitgevoerd.

In studie 1 is nagegaan wat de optimale verhouding is tussen het aandeel windenergie en het aandeel zonenergie in de energiemix van ingekochte duurzame energie. Bij 70% wind blijkt de bijbehorende matching dan ongeveer 65 % te zijn voor het vraagprofiel van de onderzochte UvA/HvA gebouwen. Dit vormt het uitgangspunt voor wat betreft duurzaam aanbod en de matching met een vraag van een gebouw.

In studie 2 is de flexibele inzet van onder andere koel- en vrieskamers en -kasten, vaatwassers, ovens, droogkamers en ventilatoren onderzocht in een gebouwcluster op het Science Park. Deze groep apparaten heeft een totaal vermogen van 350 kW en kan maximaal 3 uur verschoven worden. Uit het theoretisch onderzoek volgt dat hiermee maximaal 3 tot 6 % van het totale verbruik flexibel ingezet kan worden. Met de gebruikte aansturingstrategie in de simulaties bleek dat de matching met 1,5 procentpunt verbeterd kan worden. Bij energie inkoop op de SPOTprijsmarkt is een kostenbesparing van 3,2% gevonden.

De business case voor de flexibiliteit van deze apparaatgroep is zeer ongunstig vanwege de hoge investeringskosten en de korte flexibiliteitsduur van de betreffende apparaten. Het gaat hier over een groot aantal apparaten waar per apparaat of -groep maatregelen genomen moeten worden terwijl deze afzonderlijk maar een kleine bijdrage leveren aan de flexibiliteit. Als slimme aansturingmogelijkheden al aanwezig zou zijn in elk apparaat, dan zou de businesscase mogelijk gunstiger zijn.

Gezien de korte tijdsduur van de flexibele inzetbaarheid zou handelen op de balansmarkten mogelijk gunstiger zijn. Om bij te dragen aan nationale netstabiliteit en te handelen op de balansmarkten zijn vermogens nodig die een factor 100 groter zijn dan de beschikbare flexibiliteit op Science Park. Door bundelen (pooling) van verschillende locaties als Science Park zou het mogelijk kunnen zijn dergelijke flexibiliteit in te zetten op de balansmarkt.

Het specifieke onderzoek naar het flexibel aansturen van een groot aantal elektrische boilers in studie 4 laat soortgelijke conclusies zien. Er is, met de gekozen inzetstrategie, 2 procentpunten verbetering in matching gevonden en 5% inkoopvoordeel op de SPOTprijsmarkt.

In studie 3 is gevonden dat door vraagsturing van een warmtepomp de matching met 5 procentpunten toe kan nemen; de totale kosten van de ingekochte energie op de spotmarkt wordt met 9% gereduceerd. Onder de recente marktomstandigheden van 2021 is de investering in vraagsturing met de warmtepomp alleen gunstig in het minimum kostenscenario met een TVT van 5 jaar heeft en een IRR 15%. Onder deze marktomstandigheden is een investering in een vraagsturende aansturing dus alleen aantrekkelijk

Uurmatching

als dit kan zonder verregaande commissionings-activiteiten, investering in nieuwe hardware en als het bestaande GBS relatief makkelijk uitgebreid kan worden met nieuwe functionaliteiten.

Bij een drie maal grotere spreiding in spotmarktprijzen kan de investering zeer rendabel zijn in zowel het minimale (TVT 2 jaar en IRR 68%) als het midden kosten scenario (TVT 4 jaar en IRR 19%). Dan is ook bij hoge investeringskosten de financiële uitkomst nog positief (TVT 7 jaar en IRR 7%).

Bij het flexibel inzetten van de warmtepomp wordt de warmteopslag in wanden van een gebouw benut. In het theoretisch onderzoek naar de benutting van de warmteopslag capaciteit van de wanden van een inpandige ruimte (alleen de gevel grenst aan buitenlucht) in een HvA gebouw kwam naar voren dat in een praktische situatie, zonder nachtverlaging, zo'n 25% van de warmteopslagcapaciteit van die wanden benut kan worden voor buffering ten behoeve van flexibiliteit. Maar als er ook nachtverlaging toegepast wordt, neemt deze waarde sterk af naar minder dan 8%. Toepassen van nachtverlaging reduceert het potentieel aan flexibiliteit met een warmtepomp. Geen nachtverlaging betekent wel hogere energiekosten. Hier ontstaat een conflicterende situatie; bij goed geïsoleerde gebouwen speelt dit conflict minder.

Verder zijn in studie 3 aanvullend meetsessies uitgevoerd aan gebouw MLH van de Amstelcampus van de HvA, een goed geïsoleerd gebouw met label A dat wordt geconditioneerd met lucht. De flexibiliteit is onderzocht aan de hand van stooklijn verlagingen tijdens aanvang werktijd, al of niet gecombineerd met opwarmen van het gebouw daaraan voorafgaand. De metingen laten zien dat door het uiteenlopende gebruik van afzonderlijke ruimtes voor het ontsluiten van maximale flexibiliteit zonder comfort verlies het gedrag van individuele ruimten meegenomen moet worden, hetgeen een geavanceerde "slimme" aansturing vergt. De metingen laten zien dat daadwerkelijk een verschuiving van warmtepompinzet mogelijk is. Ook is gevonden dat in het MLH gebouw een eventuele voorwarmperiode niet lang hoeft te duren.

Bij het MLH gebouw blijkt tevens verbeterpotentieel in de basisaansturing van de installaties te zitten ("good housekeeping"), wat het zicht op het specifieke vraagverschuivingspotentieel heeft bemoeilijkt. "Good house keeping", gericht op energie efficiënt aansturen van installaties, en flexibel aansturen van gebouwinstallaties (inclusief de warmtepomp) vragen beide "slimme" besturingssystemen die overweg kunnen met voorspellingen van bijvoorbeeld weer, ruimtegebruik, en bijvoorbeeld de SPOTmarktprijzen. Daarbij liggen de benodigde stuursignalen en regelacties in het gebouw in elkaars verlengde. Het ligt derhalve voor de hand om "good house keeping" en vraagverschuiving vanuit eenzelfde geavanceerd "slim" besturingssysteem aan te sturen.

Voor positieve business cases leidt dit onderzoek tot het volgende advies:

- Stimuleer/ verplicht externe communicatie- en aansturingsmogelijkheden voor elektrische apparaten als boilers, warmtepompen, vriezers, etc.
- Stimuleer/ verplicht communicatieprotocollen voor flexibiliteit tussen apparaten. Succesvolle voorbeelden: Opentherm voor thermostaten/gasketels, BACnet voor GBS.

Daarnaast kan handelen op (on)balansmarkten waar er sprake is van grotere prijsfluctuaties over kortere tijdsperioden aantrekkelijk zijn, maar dat kan alleen als projecten gebundeld worden tot grote vermogens, zodat toegang verkregen kan worden tot deze markten.

Inhoudsopgave

Samenvatting	4
Inhoudsopgave	6
1. Inleiding	9
2. Afbakening, definitie en werkwijze	11
2.1 Wat wordt in dit rapport verstaan onder uurmatching?	11
2.1.1 Uurmatching	11
2.1.2 Het doel van vraagsturing	12
2.2 Onderzoekopzet	14
2.3 Prestatie-indicatoren	17
2.3.1 Verschoven energievraag, omvang en tijdsduur.....	17
2.3.2 Maximaal vermogen	17
2.3.3 OCEF	17
2.3.4 Energiekosten	17
2.3.5 Bedrijfseconomische indicatoren	19
2.3.6 CO ₂ intensiteit van elektriciteitsproductie	19
2.4 Voorspellende en prestatie wegende aansturingconcepten	21
2.5 De vertaling van prestatie doelen naar strafsignalen voor aansturing van flexibele assets	22
3. Uurmatching, vraagverschuiving en potentieel schatting (studie 1)	24
3.1 Huidige status uurmatching van een tweetal gebouwen.....	24
3.2 Invloed van de mix van duurzame bronnen op uurmatching	27
3.3 Potentieel raming casus Science Park van inzet flexibele assets	27
3.4 Theoretische beschouwing van passieve thermische opslagcapaciteit.....	29
4. Simulatiestudie vraagsturing met verzameling van elektrische apparaten op gebouwcluster niveau (studie 2)	35
4.1 Introductie van de casestudie	35
4.2 Aanpak in de casestudie	35
4.3 Resultaten	35
4.3.1 De flexibiliteit van elektrische apparaten bij Science Park ABCD.....	35
4.3.2 Het 'distribute candy vraagsturing algoritme'	35
4.3.3 Simulatie van vraagsturing over een jaar.....	37
4.4 Discussie en conclusies betreft het technisch potentieel.....	42
4.5 Discussie en conclusies betreffende het economisch potentieel.....	42
4.5.1 Benadering en aannames betreft kosten en baten	42
4.5.2 Business case	43
5. Simulatiestudie vraagsturing Warmtepomp (studie 3.1)	46
5.1 Introductie van de casestudie	46
5.2 Aanpak in de casestudie	47
5.2.1 Het simulatiemodel.....	47

Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam

5.2.2	De onderwijsruimte, aannames en invoergegevens	47
5.2.3	Versoepeling van comforteisen en thermostaat setpoints	48
5.2.4	Prestatie aspecten en indicatoren	48
5.3	Simulatie resultaten	49
5.3.1	Benadering vraagsturing: simulatie van een enkel vraagsturingsevenement	49
5.3.2	Aansturingsconcept en penaltyfuncties.....	52
5.3.3	Simulatie van een typisch jaar in het heden	53
5.4	Discussie en conclusies betreft technisch potentieel	54
5.5	Conclusies betreft economisch potentieel.....	56
5.5.1	Benadering en aannames betreft kosten en baten	56
5.5.2	Business case	56
6.	Simulatiestudie MPC-concept voor vraagsturing van Warmtepomp (studie 3.2)	58
6.1	Introductie van de casestudie	58
6.2	Aanpak in de casestudie	59
6.2.1	Het simulatiemodel.....	59
6.2.2	Het LSTM Neuraal Netwerk gebouw model.....	60
6.2.3	Optimalisatie met een genetisch algoritme	60
6.2.4	De doelfunctie voor thermisch comfort en minimale spotprijskosten	63
6.3	Simulatie resultaten	64
6.3.1	Het voorbereiden van de trainingsdata	64
6.3.2	Trainen en testen van het LSTM-gebouw model	65
6.3.3	Optimalisatie van de warmtepomp aansturing met het genetisch algoritme	68
6.4	Discussie en conclusie	69
7.	Experimenten vraagsturing WP (studie 3.3).....	71
7.1	Het Muller Lulof huis (MLH)	71
7.2	Opzet	73
7.3	Eerste meetsessie: oktober & november 2022	74
7.4	Tweede meetsessie: Maart 2023	76
7.4.1	Centrale installaties	76
7.4.2	Beschouwing van twee ruimten	79
7.5	Conclusies.....	83
8.	Simulaties vraagsturing boilers (studie 4)	84
8.1	Introductie van de casestudie	84
8.2	Aanpak in deze casestudie	84
8.2.1	De onderzochte boilers	84
8.2.2	Het simulatiemodel en het aansturingsconcept	85
8.2.3	Prestatie aspecten en indicatoren	86
8.3	Simulatie resultaten	86
8.4	Discussie en conclusies betreffende het technisch potentieel.....	88
8.5	Conclusies betreffende het economisch potentieel	89
8.5.1	Benadering en aannames betreft kosten en baten	89
9.	Conclusies en vervolgonderzoek	91
9.1	Discussie en conclusies	91
9.2	Vervolgonderzoek	93

Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam

Literatuurlijst	95
Appendix A	97
A1 Verkenning business case voor een accu	97
A2 Potentieel raming flexibele inzet WP met grote warmteopslag	100
Appendix B	103

1. Inleiding

Het aandeel elektriciteit uit zon of wind zal de komende jaren steeds verder toenemen, waardoor het steeds belangrijker wordt om het momentane energieverbruik op het momentane aanbod uit zon of wind daarop af te stemmen. Het energielandschap is zodanig ingericht dat bij gebrek aan zonne- of windenergie er automatisch wordt bijgeschakeld door middel van fossiele opwekking om continue beschikbaarheid te waarborgen. Bedrijven of organisaties die groene energie afnemen van een specifiek wind- of zonnepark zullen daarom in de praktijk toch een substantieel deel van hun elektriciteit, opgewekt met fossiele brandstof, afnemen. Op termijn zullen steden klimaatneutraal en energiepositief moeten worden. Dit kan alleen als een verregaande integratie van duurzame energie in de gebouwde omgeving mogelijk is. De ontwikkeling van energiepositieve gebouwen en wijken is hiervoor een tussenstap. Deze integratie is alleen mogelijk als flexibiliteit van het energiesysteem de lokale balancerende van energievraag en -aanbod mogelijk maakt, zowel technisch als op economisch vlak (haalbare business case).

Eén van de uitdagingen in de energiemarkt is het vraagstuk rondom 'uurmatching'. Dit is de zoektocht naar een oplossing voor de mismatch per uur tussen enerzijds het verbruik van elektriciteit en anderzijds het aanbod van duurzaam opgewekte elektriciteit. Deze mismatch wordt veroorzaakt doordat duurzame bronnen niet altijd voldoende elektriciteit produceren of elektriciteit produceren op momenten dat er geen behoefte is.

Voor uurmatching is flexibiliteit nodig aan de kant van de energiegebruikers. Daarvoor kunnen technische maatregelen getroffen worden die leiden tot een betere match tussen het momentane behoefte en de momentane duurzame opwekking.

Uurmatching door flexibiliteit in het energiesysteem zou de verdere integratie van duurzame energie in de gebouwde omgeving kunnen ondersteunen en mogelijk het risico van over- en onderdimensionering van het energiesysteem in gebouwen verminderen. Vraagsturing in de gebouwde omgeving wordt veelal gezien als onderdeel van de oplossing voor dit probleem maar wordt echter nog niet op grote schaal toegepast. Gedeeltelijk is dit te wijten aan een gebrek aan inzicht in de wijze waarop vraagflexibiliteit vertaald kan worden naar meerwaarde voor de leverancier en eindgebruiker. Daarnaast is onduidelijk wat het potentieel van vraagverschuiving is en hoe dat eruit zou kunnen zien. Dit rapport beoogt daar inzicht in te geven.

Het project richt zich niet alleen op de puur technische verkenning, maar ook op de economische haalbaarheid en business cases onder verschillende omstandigheden en perspectieven. Daarnaast is de focus de zakelijke markt en de utiliteitsbouw (kantoren).

Het onderzoek is uitgevoerd in samenwerking met Facility Services van UvA/HvA en Vattenfall voor casuïstiek en inbreng van het marktperspectief van de gebouwbeheerder en energieleverancier.

Het onderzoek heeft plaatsgevonden van januari 2021 tot en met oktober 2023. Deze rapportage betreft het technisch-economisch potentieel van uurmatching bij utiliteitsgebouwen.

Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam

In het volgende hoofdstuk (2) wordt de onderzoeksopzet gepresenteerd en wordt de afbakening van de begrippen uurmatching en vraagverschuiving (of vraagsturing) toegelicht. Ook komen de prestatie-indicatoren op basis waarvan afwegingen kunnen worden gemaakt aan bod. Daarna volgen de verschillende studies waarin diverse vormen van vraagverschuiving worden onderzocht (hoofdstuk 3 t/m 8). Het rapport wordt afgerond met discussie en conclusies.

2. Afbakening, definitie en werkwijze

2.1 Wat wordt in dit rapport verstaan onder uurmatching?

2.1.1 Uurmatching

Onder uurmatching wordt in dit rapport verstaan: de vraag aan energie “matchen” met het aanbod van duurzame energie. Als de momentane vraag niet groter is dan het momentane aanbod, is er volledige matching.

De uurmatching kan gekwantificeerd worden door:

- per uur te bepalen welk aandeel van de energievraag geheel gedekt wordt door gelijktijdig duurzaam energie aanbod in dat uur;
- dit aandeel voor alle uren van het jaar bepalen en het totaal daarvan te delen door de totale jaarvraag van energie; dat geeft het percentage van de energievraag dat momentaan gedekt wordt door het duurzame energie aanbod.

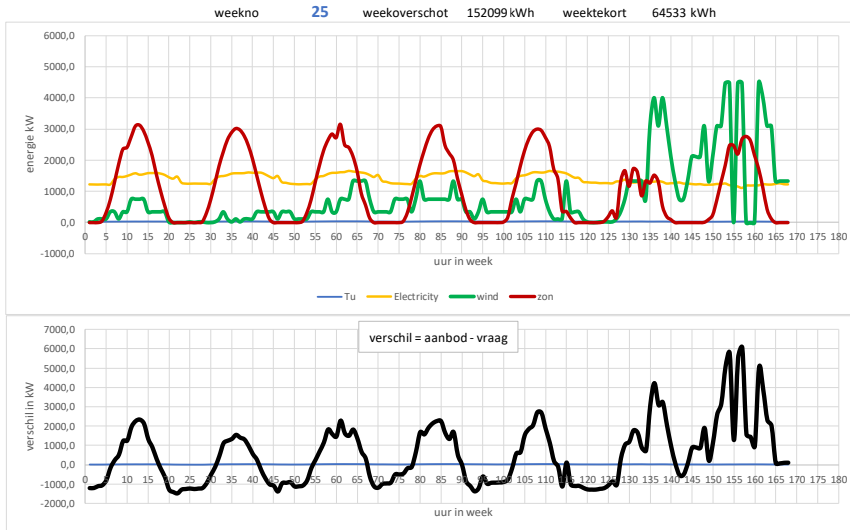
Om dit concept concreet te maken is er gekeken naar een duurzame energievoorziening bestaande uit een wind- en zonnepark, waarvan de jaarproductie gelijk is aan de jaarvraag van een gebruiker. De zo verkregen prestatie indicator wordt OCEF genoemd, verder toegelicht in paragraaf 2.3.3.

De gebruiker is in dit rapport een utilitair gebouw, typisch een kantoor of een onderwijsgebouw. Het gaat in dit rapport niet om woonhuizen of appartement gebouwen. In Figuur 2-1 wordt een voorbeeld gegeven van de mismatch tussen duurzaam aanbod en de vraag van een grote gebruiker: een groot gebouw met veel onderzoeksfaciliteiten op het Science Park van de UvA. In dit voorbeeld komen de jaarlijkse vraag en het jaarlijkse aanbod van duurzame energie overeen, maar op uurbasis is er duidelijk geen “match”. In de bovenste figuur zijn in rood en groen respectievelijk zon- en windenergie aanbod en in geel de vraag van de gebruiker van een willekeurige week weergegeven. In de onderste figuur is het verschil tussen aanbod en vraag weergegeven. Er is duidelijk te zien dat er momenten zijn van meer vraag dan aanbod en vice versa, een directe match is er zelden.

Daarnaast is er nog op een andere manier gekeken naar uurmatching, door te richten op de SPOT prijs van elektriciteit. De uurmatchingsopgave bestaat er dan uit om juist weinig elektriciteit te gebruiken als de elektriciteit duur is en vooral elektriciteit te gebruiken als het goedkoop is. Met deze benadering wordt aangesloten bij op te stellen businesscases. Maar deze benadering sluit ook aan bij het streven naar een zo hoog mogelijk gebruik van het duurzame energie aanbod op het net. Want als de elektriciteitsprijzen laag zijn, is het duurzaam energieaanbod op het net hoog. Dat wordt toegelicht in paragraaf 2.3.6.

De afstemmen van de momentane vraag en op het momentane aanbod kan op verschillende manieren, en wordt behandeld in de volgende paragraaf (2.1.2).

Uurmatching



Figuur 2-1 Voorbeeld van de mismatch tussen duurzaam aanbod en de vraag van de gebruiker

2.1.2 Het doel van vraagsturing

Het afstemmen van de elektriciteitsvraag om een nader te definiëren doel te bereiken, wordt ook wel vraagsturing genoemd. Hier kunnen verschillende doelen achter zitten, waaronder:

- A. Het maximaliseren van de benutting van hernieuwbare elektriciteit met een variërend aanbod
- B. Het reduceren van kosten voor de inkoop van energie
- C. Het reduceren van de CO₂-emissies geassocieerd met de afname van elektriciteit
- D. Het reduceren van de kosten voor nieuwe netaansluitingen
- E. Het voorkomen van netcongestie op lokale netten en het reduceren van de netbeheerkosten
- F. Het in balans houden van het (inter)nationale elektriciteitsnet

In Tabel 2-1 zijn deze doelen voor verschillende belanghebbenden uitgezet. Dit onderzoek richt zich voornamelijk op het perspectief van de afnemer van energie (HvA/UvA facility services) en de leverancier van energie (Vattenfall). De prestatie indicatoren in deze tabel worden toegelicht in paragraaf 2.3. Afhankelijk van het doel dat men wilt bereiken, het soort apparaat en de aansturingstrategie zijn er drie vormen van vraagsturing- vraagverschuiving, piekschering en valley filling-, en combinaties daarvan mogelijk (Figuur 2-2). Veel soorten elektrische apparaten bieden mogelijkheden om hun elektriciteitsvraag aan te passen door ze uit te zetten of hun verbruik te moduleren, verschuiven, vervroegen, of uit te stellen.

Bij vraagverschuiving gaat het om het vervroegen of uitstellen van de energievraag waardoor er energieverbruik over de tijd verschoven wordt. Vraagverschuiving is mogelijk door bijvoorbeeld een warmtepomp voor ruimteverwarming eerder een gebouw te laten aanwarmen.

Bij piekscheren gaat het om het uitzetten of omlaag moduleren van elektrische apparaten waarbij dit niet leidt tot een hogere elektriciteitsvraag op een ander moment. Een voorbeeld hiervan is het dimmen van verlichting.

Valley filling houdt in dat er op gunstige momenten een nieuwe elektriciteitsvraag wordt gecreëerd die gunstige effecten heeft buiten de elektriciteitsmarkt en die niet leidt tot een verlaging van de vraag op een ander tijdstip. Een voorbeeld hiervan is het inzetten van elektrische verwarming om het verbruik van aardgas te voorkomen.

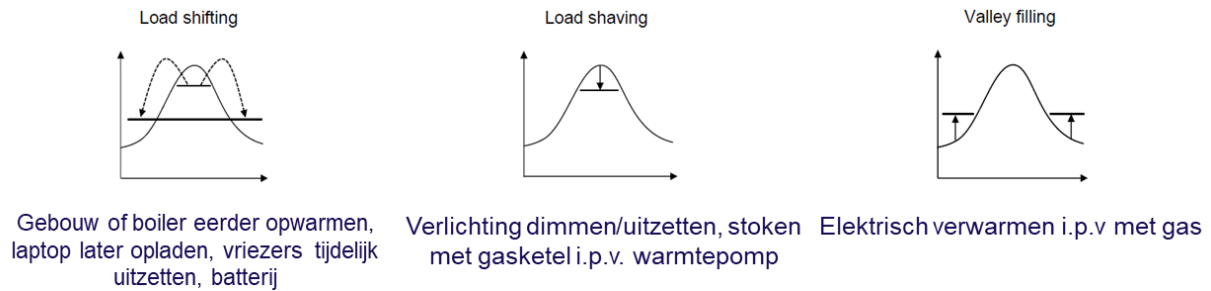
Uurmatching

Stakeholder:	Doel:	Prestatie aspect:	Prestatie indicator:
Afnemer van energie, Gebouw-gebruiker en eigenaar (HvA)	CO ₂ -uitstoot beperken	Uitstoot van energie verbruik	CO ₂ , PE _{fossil} , OEF
		Zelf-consumptie van ingekochte hernieuwbare bronnen maximaliseren	OEM, OEF
	Energiekosten beperken	Gecontracteerd vermogen beperken	P _{max}
		Verbruiksafhankelijke kosten beperken	E _{kosten; inkoop}
	Gezondheid, welzijn en productiviteit van werknemers maximaliseren	Een hoge binnenmilieukwaliteit	PPM CO ₂ , E _{horiz} , sDA, DGP(s), PMV(GTO)
Gebouw-eigenaar/ ontwikkelaar (HvA)	Ontwikkelingskosten beperken	Aansluitingskosten beperken	P _{max;extreme}
Leverancier/ Opwekker (Vattenfall)	Winst maximaliseren	Kosten van inkoop minimaliseren, Omzet van verkoop maximaliseren	€ _{inkoop} , € _{verkoop} ,
	CO ₂ -uitstoot van opgewekte en geleverde energie beperken	Uitstoot van geleverde energie verlagen Afname van geproduceerde hernieuwbare energie door klanten maximaliseren	CO ₂ , OEM, PE _{fossil}
Lokale netbeheerder (Liander)	Netbeheerkosten beperken, voorzien in de vraag naar elektra aansluitingen	Maximaal vermogen en gelijktijdigheid	P _{max} , f _{diversity}
(inter)nationale netbeheerder (Tennet)	Netbeheerkosten beperken, Het in balans houden van het net	Balans in vermogen van vraag en aanbod, netfrequentie en voltage	P _{delta} , f, V

Tabel 2-1 Het nut van vraagsturing voor verschillende stakeholders met bijbehorende prestatie-indicatoren. De doelen zijn gekoppeld aan prestatie indicatoren uit literatuur (Aduda et al., 2018; Konis & Selkowitz, 2017; Li et al., 2021; Mohammadi et al., 2020).

In dit onderzoek ligt de nadruk op twee vormen van vraagsturing uit het schema: vraagverschuiving en piekscheren.

Uurmatching



Figuur 2-2 Mogelijkheden van vraagsturing. Afbeeldingen uit: (Marszal et al., 2019; Satchwell, 2020)

2.2 Onderzoeksopzet

In Figuur 2-3 is schematisch weergegeven met welke middelen vraagsturing kan plaatsvinden.

Vraagsturing kan bij uitstek goed gerealiseerd worden door gebruik van een actieve buffer: een accu of een warmteopslag.

Uiteindelijk is het principe van elke vraagverschuiving gebaseerd op het gebruik van buffers. Die buffers kunnen echter ook "assets" zijn die een inherente bufferkarakteristiek hebben, zoals boilers, koelruimten, maar ook een gebouw als geheel. Dit zou passieve buffering genoemd kunnen worden. Passief, omdat er geen additionele actieve systemen nodig zijn in de vorm van een batterij of een warmteopslag tank.

Dit rapport is gericht op onderzoek naar de vraagsturing zonder gebruik van actieve systemen zoals batterijen of warmteopslagsystemen, omdat deze of te duur zijn, of veel ruimte innemen, zoals in Appendix A toegelicht is. Daar blijkt ook, dat als de ruimte voor een groot warmteopslagsysteem beschikbaar is, dit een aantrekkelijke optie kan zijn.

Refererend aan Figuur 2-3 gaat de aandacht dan uit naar warmtepompen en overige devices.

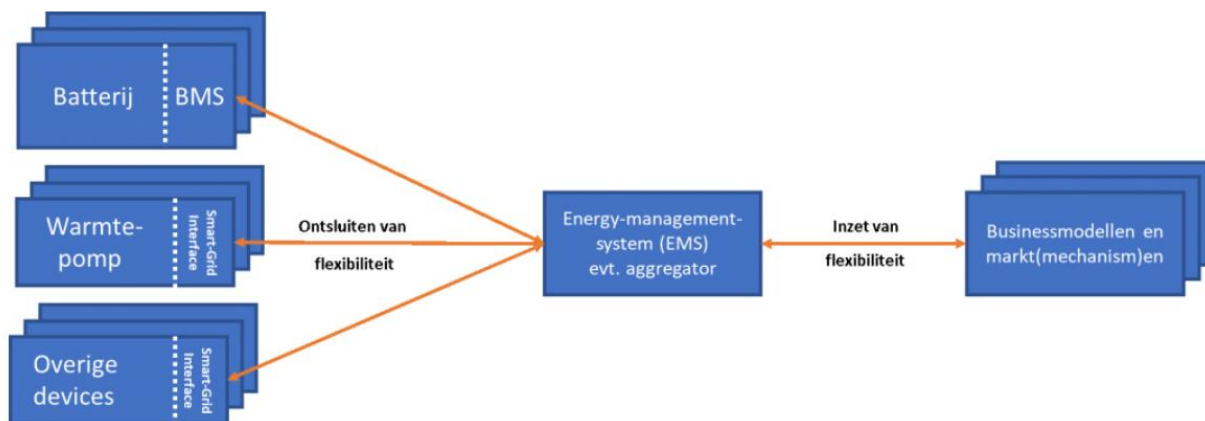
En daarbij gaat het om de doelen A en B uit het begin van hoofdstuk 2.1.2 :

- A. Het maximaliseren van de benutting van hernieuwbare elektriciteit met een variërend aanbod
- B. Het reduceren van kosten voor de inkoop van energie

De middelen die daarbij dan ingezet worden zijn vraagsturing en piekscheren.

De mismatch vindt op verschillende tijdschalen plaats: op uurniveau, op dag niveau, op het niveau van meerdere dagen en op seizoensniveau. In het project uurmatching wordt de aandacht gericht op een verbetering van de matching op uur tot maximaal dag niveau.

Om deze vraagsturing te realiseren zijn wel besturingssystemen nodig die een bepaalde strategie volgen om effectief flexibel aan te sturen, waarbij het de bedoeling is dat de vraag het aanbod enigszins volgt. Besturingssystemen hoeven niet veel ruimte in te nemen, maar moeten wel connectie kunnen maken met de bestuurd apparaten; en natuurlijk vragen deze systemen een investering om te implementeren.



Figuur 2-3 Uurmatching door flexibiliteit ontsluiting aan de vraagzijde: flexibel aansturen van “devices”, inclusief gebouwinstallaties, met speciale aandacht voor een warmtepomp en/of het toevoegen van een batterij of warmteopslag,

Voor het onderzoek naar flexibiliteit is het nog van belang om onderscheid te maken tussen de bufferwerking van systemen bij een gegeven energievraag, en het reduceren van energieverbruik door beter in te spelen op de energiebehoefte. Onder dat laatste valt bijvoorbeeld het afschakelen van verlichting op gangen en in ruimtes die op dat moment niet benut worden, op momenten dat het duurzaam energie aanbod laag is. De laatste categorie maatregelen wordt gezien als “good housekeeping”, en dat wordt in deze studie in principe niet meegenomen. In de praktijk zal dit onderscheid echter niet altijd zo scherp zijn.

Het onderzoek omvat verschillende studies, zoals weergegeven in Figuur 2-4.



Figuur 2-4 Overzicht van de verschillende studies waaruit het onderzoek is opgebouwd

In studie 1 is er gekeken naar een fictieve samenstelling van ingekochte energie, waarbij die energie volledig duurzaam is en afkomstig is uit een zon- en een windpark. Daarbij is de jaaropbrengst zo geschaald dat het overeen komt met het jaarverbruik. Er is onderzocht wat de gunstigste verhouding tussen zon en wind is om een zo goed mogelijke match tussen aanbod en vraag te verkrijgen, zonder dat er enige vorm van vraagsturing optreedt. Dit resulterende aanbodprofiel van zon en wind is vervolgens ook in de hieronder genoemde studies gebruikt voor het bepalen van de prestatie indicator OCEF (zie

Uurmatching

paragraaf 2.3.3. voor een toelichting op deze indicator). Voor vraagverschuiving is een buffer, of een bufferende werking nodig. Met een fictieve buffer wordt er in deze studie verkend wat de relatie is tussen de omvang van een buffer en OCEF.

Verder wordt in studie 1 een inventarisatie gedaan van apparaten die flexibel ingezet kunnen worden doordat ze inherent een bufferfunctie hebben of omdat ze verbonden zijn aan een gebouw asset, waarin buffering plaatsvindt. De focus ligt hier op een UvA campus met een hoog verbruik: het Sciencepark. Vervolgens wordt de flexibiliteit van deze groep apparaten binnen het Sciencepark bekeken en daarvan wordt het theoretisch maximum in vraagverschuiving vastgesteld door de flexibiliteit te benaderen met de functionaliteit van een elektrische accu.

Ook wordt het theoretisch maximum van vraagverschuiving bepaald van de warmtevraag in een typisch vertrek in een gebouw van de Amstelcampus van de HvA, door na te gaan hoeveel warmte er eigenlijk in een etmaalcyclus in de wanden van dat vertrek opgeslagen (en afgegeven) kan worden.

In studie 2 wordt een simulatie gedaan met de flexibele inzet van dezelfde groep apparaten van studie 1, waarbij specifiek ingegaan wordt op de toe te passen strategie van aansturing van deze apparaten. Naast de prestatie indicator OCEF wordt daarbij tevens gekeken naar de indicatoren energiekosten en piekafname als gevolg van de flexibele inzet en in hoeverre hier een businesscase van te maken valt.

In studie 3 ligt de nadruk op vraagsturing van een gebouw van de HvA campus met een warmtepomp. De studie bestaat uit meerder onderdelen: een simulatiestudie met een gebouwmodel in E-plus, en daarvan twee varianten. In studie 3.1 wordt er met een heuristische regelstrategie en een perfecte voorspelling van de toekomst (waaronder buitenklimaat) binnen de optimalisatie horizon van de regelaar gewerkt. In studie 3.2 wordt een meer realistische regelstrategie ontwikkeld, eentje die ook in een GBS geïmplementeerd zou kunnen worden. En studie 3.3 bestaat uit een experimenteel onderzoek, waarbij onderzocht is wat het effect van concrete sturingsacties in de praktijk kan zijn.

In studie 4 wordt specifiek ingegaan op de vraagsturing van een groep boilers in een gebouw. Boilers zijn kleine buffers, tamelijk universele apparaten en staan los van het gebouw klimaat. Mogelijk is het interessant om deze categorie apparaten apart aan te sturen.

In de studies 2,3 en 4 wordt ook de businesscase beschouwd. Een businesscase ontstaat als er een substantieel verschil is tussen kosten van elektriciteit uit fossiele bronnen en kosten van elektriciteit uit duurzame bronnen. Dit verschil in kostprijs van elektriciteit vormt de basis van de getoonde businesscases, deze verschillen in energiekosten worden toegelicht in paragraaf 2.3.4.

2.3 Prestatie-indicatoren

Voor de verschillende doelen van vraagsturing, benoemd in paragraaf 2.1.2, zijn vanuit het perspectief van de gebouwgebruiker/eigenaar en de energieleverancier vertaald naar prestatie indicatoren. Deze prestatie-indicatoren zullen in dit onderzoek worden gebruikt om de mate van uurmatching en de andere baten van vraagsturing te kwantificeren. Deze prestatie-indicatoren worden getoond in Tabel 2-1 en zijn afkomstig uit wetenschappelijke literatuur. In deze paragraaf zullen de gebruikte indicatoren worden toegelicht.

2.3.1 Verschoven energievraag, omvang en tijdsduur

Momenteel is het nog onduidelijk welke energiemarkt(en) het meest geschikt zijn om het potentieel van vraagsturing te ontsluiten. Ook zijn marktomstandigheden momenteel zeer veranderlijk, o.a. door gebrek aan aansluitmogelijkheden op het elektriciteitsnet (congestie), veel onzekerheid omtrent de hoogte van energieprijzen in de toekomst en de aard van de prijsopbouw. Daarom is het van belang het potentieel van vraagsturing ook uit een louter technisch perspectief te benaderen zodat de bevindingen later ook vanuit andere marktomstandigheden beoordeeld kunnen worden. In dit onderzoek zal dit technische potentieel beoordeeld worden door te kijken naar de energievraag (E_{demand}) en de verandering daarvan als gevolg van een flexibele aansturing. Ook zal hierbij worden gekeken naar de hoeveelheid energie die verschoven (E_{shift}) is door een bepaald regelconcept van een moment dat als onwenselijk gelabeld is, naar een moment dat als aantrekkelijker wordt aangemerkt.

2.3.2 Maximaal vermogen

In dit onderzoek zal in sommige studies ook gekeken worden naar het maximaal afgenomen vermogen P_{max} . Transportkosten aan de netbeheerder zijn afhankelijk van dit maximaal afgenomen vermogen. Ook geeft deze indicator een beeld van het effect van vraagsturing voor nieuwe netaansluitingen of in het oplossen van congestie.

2.3.3 OCEF

Om de mate van uurmatching tussen ingekochte hernieuwbare energie en energievraag te kwantificeren zal de On Contract Energy Fraction (OCEF) als indicator gebruikt worden. Dit is een alternatieve benaming voor de On-site Energy Fraction (OEF) indicator die ontwikkeld is door (Cao et al., 2013). OCEF is gedefinieerd als het aandeel van de afgenomen energievraag die wordt ingevuld met ingekochte hernieuwbare energie en wordt berekend middels vergelijking (1). De indicator is oorspronkelijk ontwikkeld om de benutting van hernieuwbare energie te bepalen die wordt opgewekt binnen het perceel. In dit onderzoek worden de begrenzings verschoven naar opwek elders op het net die administratief is toegekend aan de afnemer door de energieleverancier. In dit onderzoek zal niet gekeken worden naar de benutting van hernieuwbaar opgewekte energie binnen de UvA/HvA gebouwen omdat de UvA/HvA slechts beschikt over een relatief kleine hoeveelheid PV opwek capaciteit (de eigen opwek is beperkt ten opzichte van het eigen verbruik).

$$OCEF = \frac{\sum_{t=1}^n \min(E_{gen;(t)}, E_{dem;(t)})}{\sum_{t=1}^n E_{dem;(t)}} \quad (1)$$

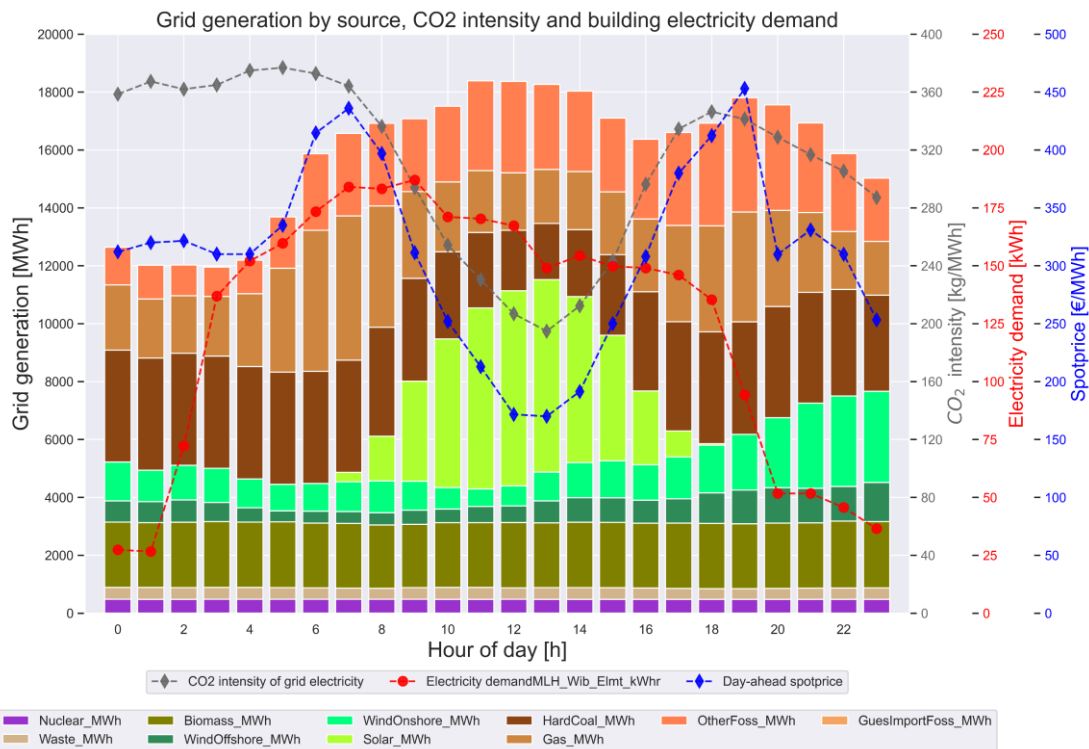
Waar: E_{gen} : aanbod aan hernieuwbare elektrische energie, E_{dem} : elektrische energievraag, t : tijdstap

2.3.4 Energiekosten

Er zijn vele markten voor energie en energiediensten waarop vraagsturing verzilverd zou kunnen worden. Omdat de nadruk in dit onderzoek ligt op uurmatching vanuit het perspectief van de

Uurmatching

gebouweigenaar/gebruiker en de energieleverancier zal dit onderzoek zich vooral richten op de markten waar deze traditioneel actief op zijn, zijnde de termijnmarkt en de spotmarkt. De termijnmarkt is een lange termijnmarkt en de spotmarkt is korte termijn, nl de day ahead markt. Prijzen op de termijnmarkt en intraday spotmarkt zijn zeer afhankelijk van de specifieke inkooppositie van de inkoopende partij en marktcondities. Inkoopende partijen kunnen er voor kiezen zeer lang vooruit energie in te kopen of juist korter. Doordat hiermee ook andere risicoprofielen gemoeid zijn geeft dit zeer verschillende energieprijzen bij doorlevering. Dit maakt het moeilijk om op basis van deze posities generieke uitspraken te doen. Wel geven prijzen op de termijnmarkt aan hoe marktpartijen gezamenlijk de markt op termijn inschatten. Dit betreft dan meer een schatting van een gemiddeld prijsniveau dan uurprijzen, of een inschatting van de volatiliteit wat voor uurmatching van belang is. Daarom zal dit onderzoek zich vooral richten op energiekosten bij inkoop tegen spotmarkt tarieven. Deze prijzen zullen gebruikt worden voor het doorrekenen van de business cases. Deze spotmarktprijzen (SPR) zijn opgehaald uit de ENTSO-T database (ENTSO-E, 2017; Hirth et al., 2018). Deze database bevat gegevens van netbeheerders uit heel Europa, waaronder spotmarktprijzen. In Figuur 2-5 is een voorbeeld gegeven van het aanbod van de gemiddelde elektriciteitsmix in Nederland op een bepaalde dag, de bijbehorende spotprijzen en CO₂ intensiteit (zie paragraaf 2.3.6) en de gebouwvraag (uit studie 2).



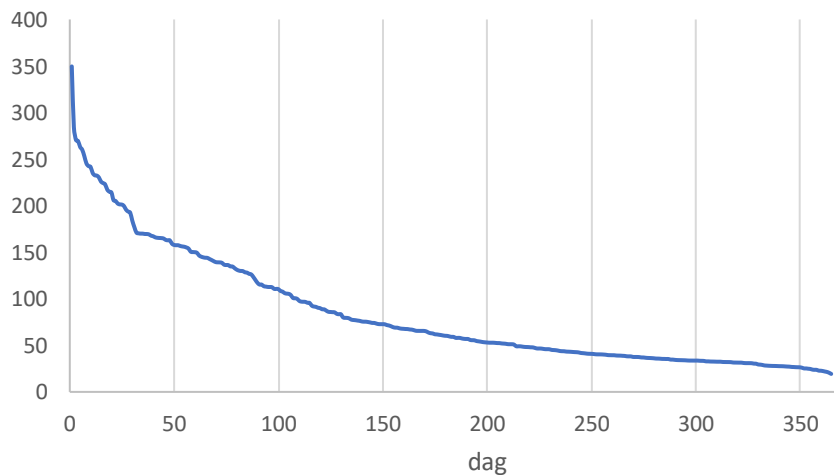
Figuur 2-5 gemiddelde elektriciteitsmix

Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam

SPOTmax-SPOTmin per dag 2021 gesorteerd



Figuur 2-6 Verschil in de maximale en de minimale SPOTprijs per dag in 2021, gesorteerd; gemiddeld 83 euro/MWh

Per dag is het verschil tussen de maximale en de minimale SPOTprijs bepaald en weergegeven in Figuur 2-6. Het gemiddelde verschil in 2021 was 83 euro/MWh. Hoe groter dit verschil hoe meer er te verdienen is met inkoop op goedkoop moment en verkoop op een duur moment, of met gebruik van energie op een goedkoop moment in plaats van op een duur moment.

2.3.5 Bedrijfseconomische indicatoren

Financiële markten en perspectieven zijn momenteel zeer veranderlijk. Inflatie en de kosten van kapitaal zijn in de jaren na de coronacrisis zeer snel gestegen, door nieuwe economische groei en onzekerheden door bv oorlogen. Ook zijn de perspectieven van alternatieve investeringen voor vastgoedbeheerders zeer divers en onzeker. Dit bemoeilijkt het kiezen van een specifieke discontovoet voor rentabiliteitsberekeningen. In dit onderzoek zullen meerdere investeringsindicatoren bekeken worden zodat de resultaten later ook vanuit een ander perspectief of andere financiële marktomstandigheden herzien kunnen worden. De volgende indicatoren zullen worden beschouwd: de eenvoudige terugverdiensijd (TVT), de interne rentevoet over 10 jaar (IRR10 jaar) en de netto contante waarde over 10 jaar bij een discontovoet van 4%. Grote bedrijven die momenteel verplicht zijn tot EED audits (Energy Efficiency Directive audits) zijn in principe verplicht om maatregelen met een TVT van korter dan 5 jaar uit te voeren. In dit onderzoek zullen een TVT van minder dan 5 jaar, een IRR van boven ~5% en een positieve NCW beschouwd worden als tekenen van een gunstige investering.

2.3.6 CO₂ intensiteit van elektriciteitsproductie

De CO₂ intensiteit van elektriciteit die wordt afgenomen van het net varieert afhankelijk van de beschikbaarheid van hernieuwbare energie en andere CO₂-arme opwek en de totale elektriciteitsvraag op het net. Door elektriciteitsvraag te verschuiven van momenten met een hoge CO₂ intensiteit naar een lage CO₂ intensiteit kan in theorie CO₂-emissies worden voorkomen. Echter moet meegenomen worden dat er op dit moment vaak geen overschot is dat anders weggegooid zou worden, maar een verschuiving. Dit betekent dat het kan zijn dat de energiemix van het moment waar dan minder vraag is anders wordt waardoor er ook een hogere CO₂-emissie zou kunnen zijn.

Uurmatching

Als er een de toekomst meer hernieuwbaar opwek vermogen op het net beschikbaar is kunnen er echter wel CO₂-emissies voorkomen worden op deze manier. Het is daarom nuttig om inzicht te krijgen in hoe vraagsturing hieraan kan bijdragen. Dit vereist inzicht in de momentane CO₂ intensiteit van elektriciteit op het net. Om een beeld te krijgen van de momentane CO₂ intensiteit van elektriciteit op het net is deze berekend gebruik makende van monitoringsdata Tennet uit de ENTSO-T database (ENTSO-E, 2017; Hirth et al., 2018). Deze dataset bevat historische netgegevens waaronder het ingezet opwekkingsvermogen naar type opwekker en de totale elektriciteitsvraag op het net voor ieder uur van het jaar. Aan de hand van deze gegevens en de CO₂ emissiefactoren voor ieder type opwekker in Tabel 2-2, is de CO₂ intensiteit berekend voor ieder uur van het jaar.

Energiebron	CO ₂ [kg/MWh]	Bron
Overig fossiel	396.00	(Afman & Wielders, 2014)
Afval	433.32	(Afman & Wielders, 2014)
Geïmporteerd fossiel	514.00	(Afman & Wielders, 2014)
Kernenergie	0.15	(St-Jacques et al., 2020)
Wind op zee	0.74	(St-Jacques et al., 2020)
Zon	6.15	(St-Jacques et al., 2020)
Biomassa	9.08	(Oschatz et al., 2016; St-Jacques et al., 2020)
Wind op land	0.74	(St-Jacques et al., 2020)
Kolen	798.00	(Afman & Wielders, 2014)
Gas	325.44	(Afman & Wielders, 2014)

Tabel 2-2 CO₂ intensiteit van elektriciteit opgewekt uit verschillende bronnen

Figuur 2-7 toont de berekende CO₂ intensiteit (y-as) voor ieder uur van 2020,2021 en 2022 in relatie tot de spotprijs (x-as) en de totale elektriciteitsvraag op het net (kleur) in Nederland. Te zien is dat de CO₂ intensiteit sterk varieert afhankelijk van de inzet van hernieuwbare energie en de totale vraag op het net. Ook is te zien dat er een verband is tussen de spotmarkt prijs en de gelijktijdige CO₂ intensiteit. Dit komt doordat zon en windenergie zowel zeer lage marginale kosten als een lage CO₂-emissie bieden. Op momenten dat de vraag op het net hoog is (>12000 MW) lijkt het verband tussen de spotmarktprijs en CO₂ intensiteit zelfs lineair.

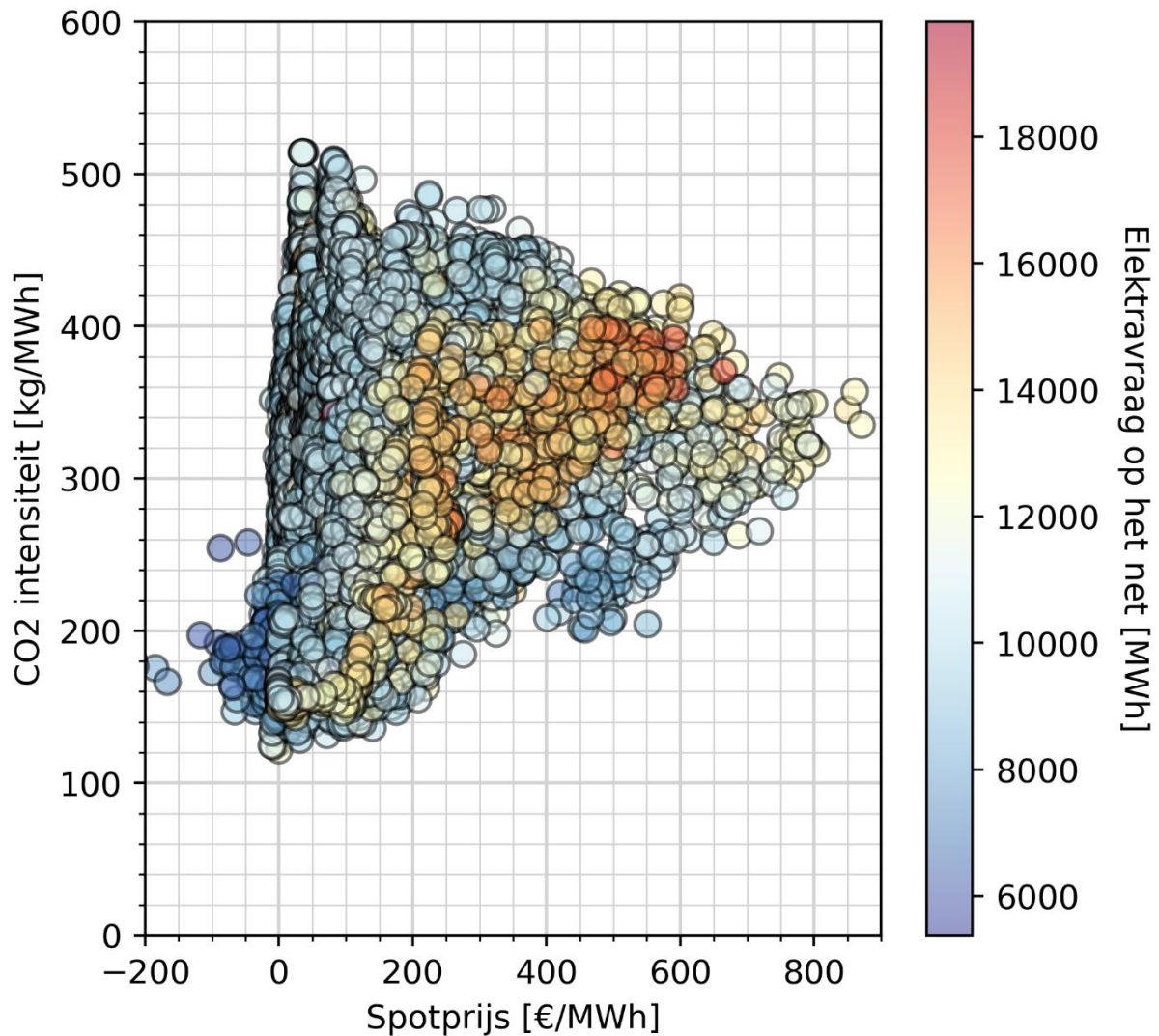
Vanwege verdere elektrificatie van de energievraag en de verwachte toename van zon en wind op het net is het te verwachten dat het verband tussen CO₂ intensiteit en de spotmarktprijs in de toekomst nog sterker wordt.

In dit onderzoek zal het potentieel van vraagsturing veelal uitgedrukt worden in termen van besparingen bij inkoop op de Day-Ahead spotmarkt. Uit deze analyse blijkt dat dergelijke besparingen in een toekomstig net met meer hernieuwbaar zich ook zullen vertalen naar reducties in CO₂-emissies. De omvang van deze reducties hangen echter zeer sterk af van de mate waarin verdringing optreedt. Vanwege de vele onzekerheden in het voorspellen daarvan zal dit onderzoek zich met name richten op besparingen op de kosten van energie ingekocht op de spotmarkt.

Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam



Figuur 2-7 CO2 intensiteit, spotprijs en totale elektravraag op het net. Gebaseerd op ENTSO-T data van 2020, 2021 en 2022

2.4 Voorspellende en prestatie wegende aansturingconcepten

Voor de aansturing van flexibele assets is het nodig om een beeld te hebben van wat er in de toekomst waarschijnlijk gaat gebeuren. Om een warmtepomp flexibel aan te sturen moet je een beeld hebben van de kosten in de nabije toekomst alsook de elektriciteitsvraag van het apparaat bij verschillende handelingen. Ook heeft de aansturing van flexibele assets gevolgen op meerdere conflicterende aspecten. Zo zal het omlaag moduleren van een warmtepomp de energiekosten verlagen maar mogelijk ook negatieve effecten hebben op het thermisch comfort van gebouwgebruikers. Ook moet de warmtepomp alleen omlaag moduleren in de mate waarop dat voordeel oplevert. Energieflexibiliteit vraagt dus om voorspellende en prestatie wegende aansturingstrategieën. In dit rapport worden verschillende van zulke aansturingstrategieën getest.

Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam

2.5 De vertaling van prestatie doelen naar strafsignalen voor aansturing van flexibele assets

Voor de aansturingstrategieën in deze studie zullen er strafsignalen worden ontwikkeld die verschillende prestatiedoelen omzetten naar een regelsignaal dat geminimaliseerd moet worden. Deze aanpak staat het dan toe dat dezelfde regeling wordt gebruikt om verschillende doelen te optimaliseren, en wordt gebruikt in de studies 2,3 en 4. Ook maakt deze aanpak het mogelijk om verschillende conflicterende doelen binnen één regeling met elkaar af te wegen, door één resulterend strafsignaal op te stellen. Bij een strafsignaal wordt datgene wat wij willen minimaliseren, zoals de mismatch tussen vraag en aanbod of de energieprijs, omgezet naar een met de tijd variërend signaal dat varieert tussen de 0 en de 1. Hoe hoger dit signaal hoe ongunstiger het is om op dat moment energie te consumeren.

(2) Het strafsignaal voor spotmarktprijzen:

$$p(t) = \frac{SPR(t) - \min (SPR_{(year)})}{\max (SPR_{(year)})}$$

SPR(t): spot price at t, **p(t)**: penalty function t, **p(t)**: penalty function t, **t**: timestep

(3) Het strafsignaal voor uurmatching tussen vraag en aanbod

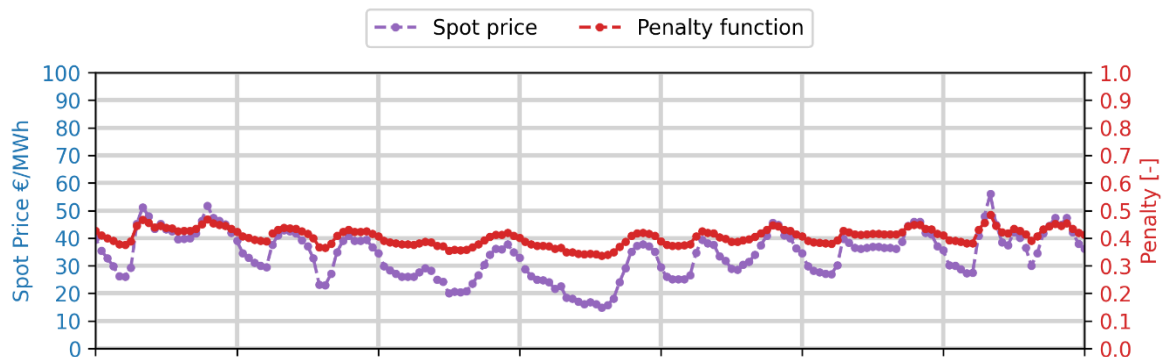
$$E_{nett(t)} = E_{gen(t)} - E_{dem(t)}$$

$$p(t) = 1 - \frac{E_{nett(t)} - \min (E_{nett(year)})}{\max (E_{nett(year)})}$$

Where:

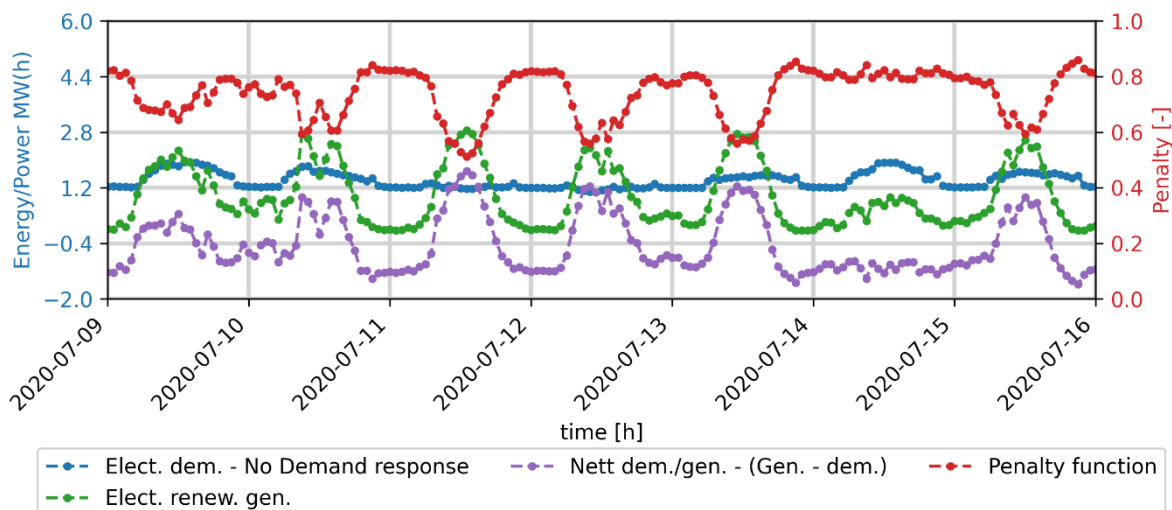
E_{gen(t)}: purchased renewable energy at t, **E_{dem(t)}**: energy demand at t, **E_{nett(t)}**: difference between purchased renewable and demand

A. Day-ahead spot price for electricity in the Netherlands 2020 and the resulting penalty signal



B. Mismatch between Science Park electricity demand and the available generation from purchased grid renewable sources in 2020 along with the resulting penalty signal

Uurmatching



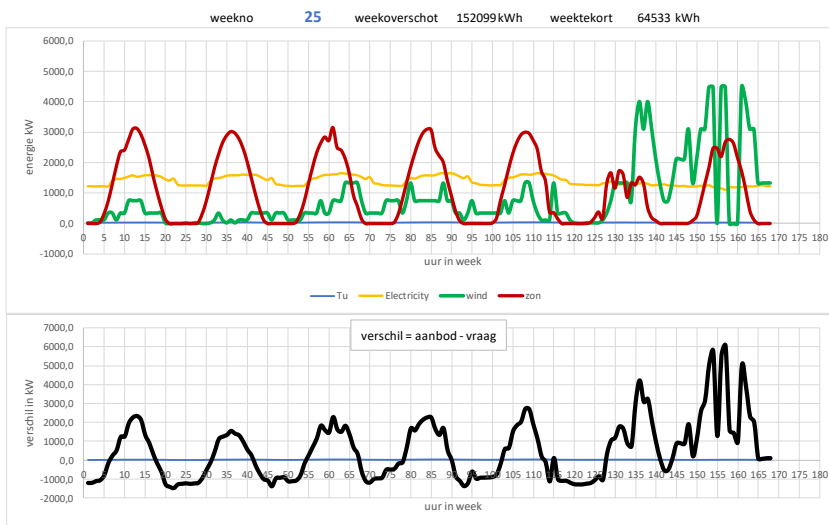
Figuur 2-8 Vertaling van day-ahead spotmarkt prijzen en de mismatch tussen vraag- en aanbod naar een strafsignaal dat in een regeling geminimaliseerd kan worden.

Vergelijking 2 is gebruikt om spotmarkt te vertalen naar het strafsignaal dat gebruikt wordt in de aansturing. Figuur 2-8 A toont dit strafsignaal en de spotmarktprijs in een grafiek. Te zien is dat het strafsignaal proportioneel meebeweegt met de spotprijs. Vergelijking 3 is gebruikt om de mismatch tussen vraag en aanbod te vertalen naar een strafsignaal. In Figuur 2-8 B is ook dit strafsignaal te zien in relatie tot de elektriciteitsvraag van een HvA gebouw (blauw), een hernieuwbaar aanbod profiel dat op jaarbasis evenveel produceert als de vraag (groen) en de mismatch over de tijd tussen het vraag en het aanbod (paars). De grafiek laat zien dat het resulterende strafsignaal omgekeerd evenredig is aan de mismatch waarbij het strafsignaal hoog is wanneer er een tekort is aan hernieuwbare energie en het strafsignaal laag is wanneer er een overschot is aan hernieuwbare energie. Deze straffuncties zullen in de komende studies worden ingezet binnen vraag sturende aansturingsconcepten.

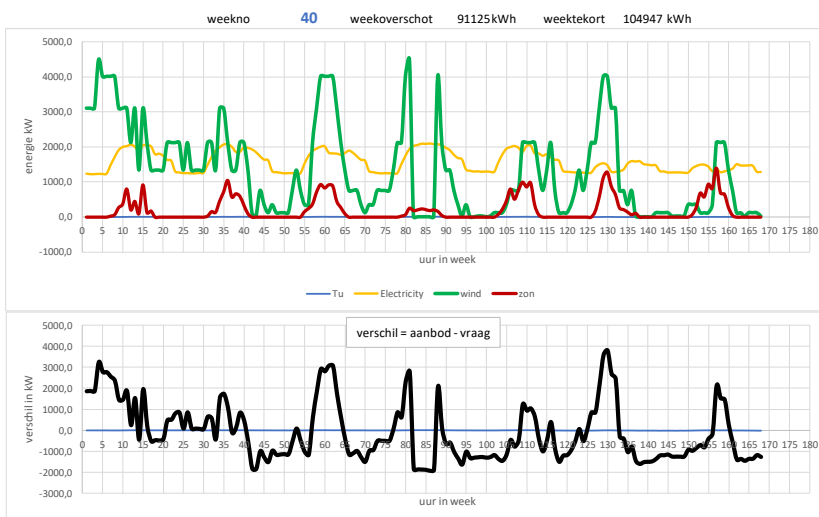
3. Uurmatching, vraagverschuiving en potentieel schatting (studie 1)

3.1 Huidige status uurmatching van een tweetal gebouwen

Om het potentieel te bepalen van uurmatching is er gekeken naar een casus van FS UvA/HvA. Uitgangspunt zijn de elektriciteitsverbruiken van de UvA gebouwen ABCD op het Science Park die geaggregeerd als één verbruik worden gemeten en de opbrengsten van een door Vattenfall geselecteerd zonneweide en een windpark in de omgeving van Amsterdam voor het jaar 2020. De opbrengst van de zonneweide en het windpark, in het vervolg zonwindpark genoemd, is zodanig geschaald dat de jaaropbrengst hiervan gelijk is aan de jaarvraag van het Sciencepark. Het jaarverbruik van 2020 is 13009 MWh.



Figuur 3-1. Voorbeeld van de mismatch in een typische zomerweek

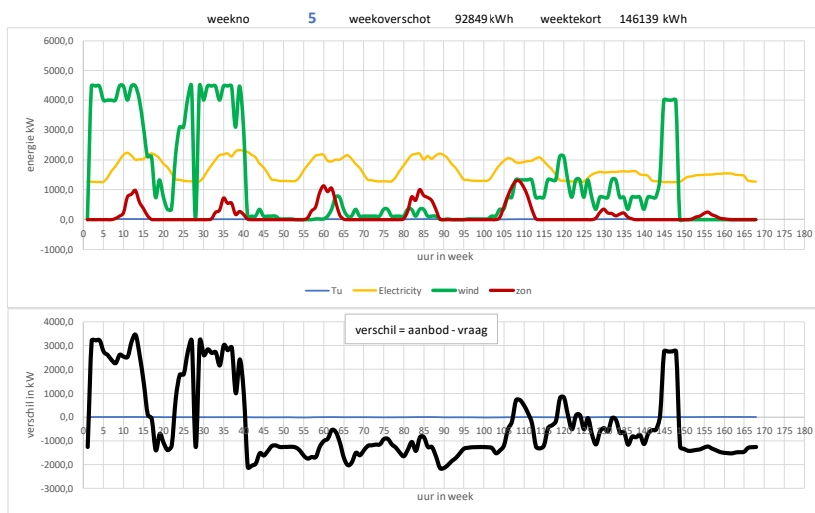


Figuur 3-2 Voorbeeld van de mismatch in een typische herfstweek. De bovenste grafiek geeft verbruik en opwek weer de onderste de mismatch.

Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam



Figuur 3-3 Voorbeeld van de Mismatch in een typische winterweek. Bovenste grafiek geeft verbruik en opwek weer de onderste de mismatch.

In Figuur 3-1 t/m Figuur 3-3 zijn voorbeelden van weken in verschillende seizoenen gegeven. In de zomer kan er een enigszins regelmatig aanbod zijn, met een duidelijk 24-uurs patroon. In het najaar is dat 24-uurs patroon minder sterk, maar toch nog wel aanwezig, te zien aan de correlatie tussen wind (groene lijn) en zonnepanelen (rode lijn) die op het zicht aanwezig is. Maar het verschil tussen vraag en aanbod laat een veel grilliger verloop zien. Met name in de winter kan er sprake zijn van een langdurig (meerdere dagen) tekort.

Het vraagpatroon van SciencePark ABCD (gele lijn) is behoorlijk regelmatig: met overdag een plateau rond de 2000 kW en 's nachts een dal rond de 1200 kW. In de zomer is het plateau behoorlijk verlaagd tot een maximum van ca. 1500 kW. In de weekenden liggen de maximale dagwaarden lager.

Wat verder opvalt in de grafieken: het aanbod van duurzame energie kan fors hoger liggen (max 4500 kW) dan de maximale vraag van het Science Park (2300 kW). Als dit aanbod volledig geabsorbeerd zou moeten worden op het Science Park, bijvoorbeeld door het toepassen van een zeer grote accu opslag, is er een fors hogere aansluiting nodig, met daarbij een forse verzwaring van het net.

De OCEF tussen aanbod en gebruik ligt zo rond de 65% voor 2020. Dat is substantieel hoger dan voor woongebouwen, waar de OCEF (bepaald op eenzelfde basis) eerder in de orde van 25-35 % ligt.

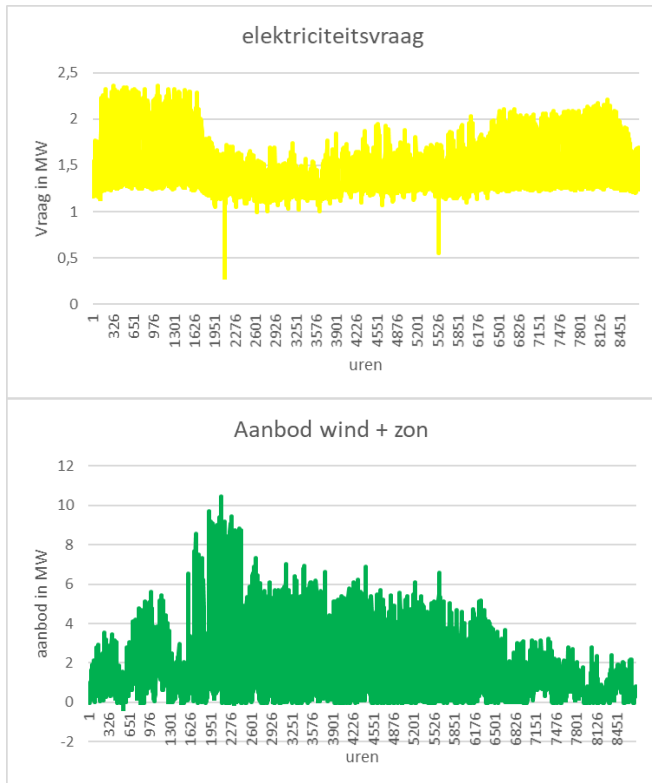
Doordat er zowel een seizoenspatroon is in vraag van het Sciencepark (zie Figuur 3-4 Jaarpatroon van vraag en aanbod van elektriciteit en in het aanbod van het zonwindpark is het duidelijk dat er voor 100 % matching een seizoensbuffer nodig is van een substantiële omvang.

In Figuur 3-5 is verkend hoe de benutting van het aanbod duurzame energie kan toenemen door een fictieve buffer (batterij) in te zetten. Bij elke batterij opslagcapaciteit (x-as) is ook een maximale laad/ontlaad vermogen vastgelegd (boven x-as). Deze buffer wordt geladen als het duurzaam aanbod groter is dan de vraag en de buffer levert als de vraag groter is dan het duurzaam aanbod. Hoe groter de buffer, hoe hoger de benutting. Maar duidelijk is ook dat er zeer grote buffers nodig zijn: om op bijvoorbeeld 80% benutting te komen is een buffer nodig van wel 25 MWh. Toepassen van een batterij met deze capaciteit wordt ruimtelijk en financieel niet realistisch geacht.

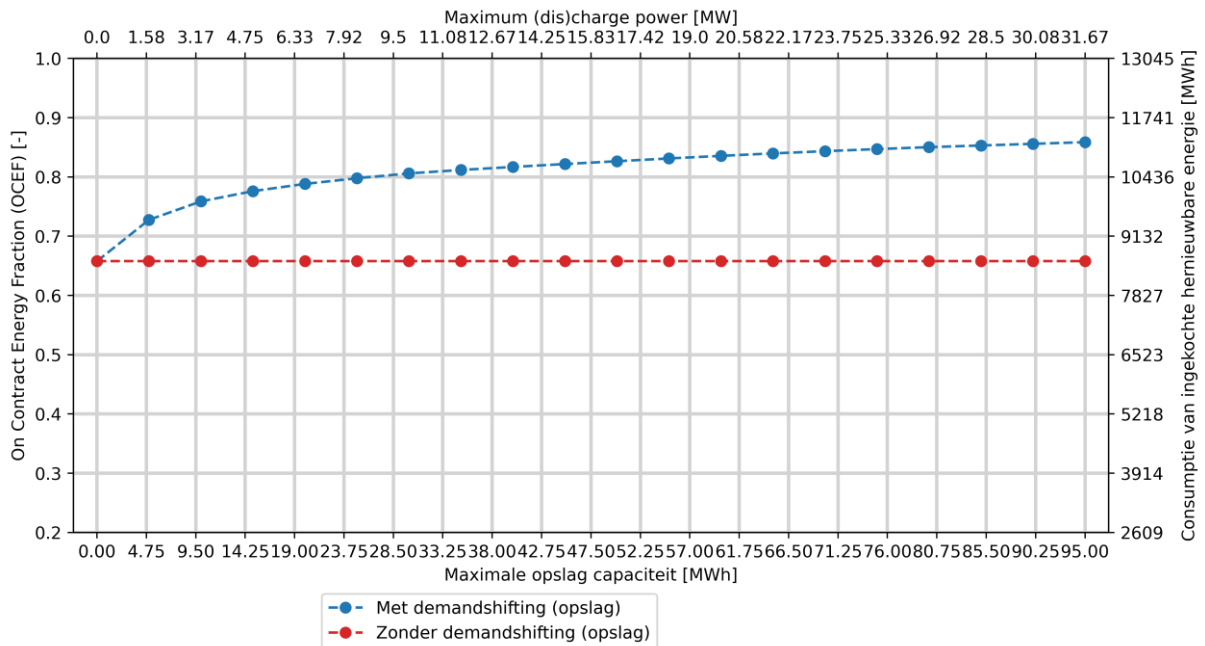
Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam



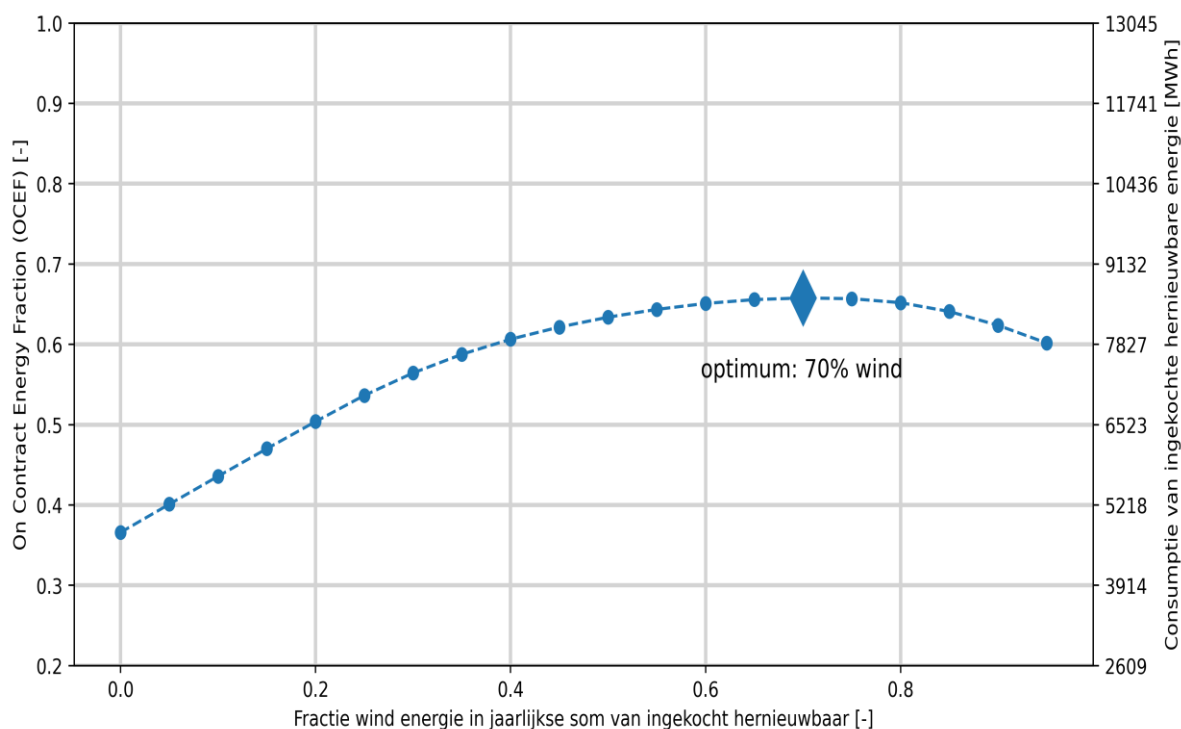
Figuur 3-4 Jaarpatroon van vraag en aanbod van elektriciteit



Figuur 3-5 Benutting van het duurzame energie aanbod afhankelijk van (fictieve) buffercapaciteit

Uurmatching

3.2 Invloed van de mix van duurzame bronnen op uurmatching



Figuur 3-6 Invloed van verhouding tussen zon- en windenergie op de “matching” tussen vraag en aanbod

In Figuur 3-6 is nagegaan wat de optimale verhouding is tussen het aandeel windenergie en het aandeel zonenergie in de energiemix van de duurzame energiebron. Dat blijkt rond de 70% wind te zijn. Deze verhouding is vastgehouden in de verschillende studies als het om de evaluatie van de OCEF gaat.

3.3 Potentieel raming casus Science Park van inzet flexibele assets

In deze potentieel raming zal het vraagsturingspotentieel van een verzameling apparaten op gebouwcluster niveau beoordeeld worden. Het gebouwcluster ABCD bij Amsterdam Science Park vormt het onderwerp van deze casestudie. Het ABCD-cluster is 56,518 m² Bruto Vloer Oppervlak groot en betreft vier onderling verbonden gebouwen en huisvest onderwijs-, kantoor-, en laboratoriumfaciliteiten. In deze raming zal het potentieel van vraagsturing met een grote verzameling aan apparaten verkend worden, waaronder: ventilatoren, pompen en vriezers. Centrale verwarming en ruimteteoeling gebeurt op Science Park vanuit een energiecentrale met WKO voor het gehele gebied. Deze energiecentrale wordt beheerd door een externe partij en zit niet aangesloten op dezelfde elektra aansluiting als de UvA/HvA gebouwen. Vraagsturing met deze warmtepomp is daarom in deze raming buiten beschouwing gelaten.

In deze studie is een inventarisatie gemaakt van alle de elektrische apparaten op Amsterdam Science Park die mogelijk flexibel aangestuurd kunnen worden zonder ernstige operationele problemen te veroorzaken (zie Tabel 3-1).

Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam

Voor iedere groep apparaten is een inschatting gemaakt van de vermogensbeperking die mogelijk is tijdens een vraagsturingsevent. Ook is er een inschatting van de maximale duur van de vermogensbeperking gemaakt. Deze inschatting is gedaan aan de hand van het literatuuronderzoek van (Aduda et al., 2018). Zo is voor iedere apparaat groep een inschatting verkregen van de mate waarin het maximaal vermogen verlaagd kan worden en de tijdsduur waarover dit mogelijk is. Te zien is dat het totale opgestelde vermogen van 1.66 MW mogelijk tot 0.37 MW verlaagd kan worden en dat dergelijke vermogensbeperkingen maximaal 3 uur mogelijk zijn.

	geinstall. capaciteit	schatting vollast uren	geschat jaarvb		maximale reductie	uren uit bedrijf		
						1	1,5	1,5-3
	kW	u/jr	MWh/jr		kW	kW	kW	
verlichting	497	5000	2485	10% reductie?	50	0	0	0
ventilatoren	330	6000	1980	25% reductie , behalve in labs				
				35% * 100 =	35	35	35	35
Server	160	8760	1402					
klimaatkamers	148	6000	888					
pompen	52	8760	456	35% reductie , behalve in labs	10	10	10	10
vriezers - 80 C	40	7000	280	0,5-1 uur uit bedrijf houden?	40	40		
vriescamers	30	7000	210	1-1,5 uur uit bedrijf houden?	30	30	30	
Koelkamers	15	5000	75	1-1,5 uur uit bedrijf houden?	15	15	15	
liften	90	800	72	halve snelheid	45	45	45	45
vriezers	19	3500	66	0,5-1 uur uit bedrijf houden?	19	19		
ovens	150	400	60					
split units (koeling)	40	1200	48	1-1,5 uur uit bedrijf houden?	40	40	40	
droogkasten	60	400	24	1-3 uur uitschakelen	60	60	60	60
vaatwassers	30	800	24	1-3 uur uitschakelen	30	30	30	30
Totalen	1661				374	324	265	180

Tabel 3-1 Installaties die mogelijk flexibel ingezet kunnen worden

Om een beeld te verkrijgen wat er met 350 kW flexibel vermogen bereikt kan worden voor een betere uurmatching, zijn er beschouwingen opgesteld voor vraagverschuiving met een batterijmodel, waarbij de maximale oplaad- en ontladcapaciteit 350 kW is; en de maximale duur daarvan gesteld is op 3 uur. In relatie tot tabel 3.1 is dit ruim gesteld, de beschouwde apparaten kunnen immers niet allemaal 3 uur uit bedrijf. Dat leidt voor het model tot een batterij met een capaciteit van $3 \times 350 = 1050$ kWh. Uit Figuur 3-5 blijkt dat een batterijcapaciteit met 1,05 MWh tot een beperkte toename van de benutting van het duurzaam aanbod leidt van slechts enkele procenten. Op basis van een aantal beschouwingen wordt het potentieel van een dergelijke batterij inzichtelijk gemaakt.

Allereerst wordt het maximaal ideaal gebruik van zo'n batterij bekeken. In het geval van ideaal maximaal gebruik van de batterij kent zo'n batterij slechts twee bedrijfsmodi:

- 1) Er wordt opgeladen met maximaal vermogen
- 2) Er wordt ontladen met maximaal vermogen

Als de rusttoestand daarbij niet optreedt, waarbij de batterij (gevuld met een bepaalde lading) niet op- of ontladen wordt, wordt de batterij maximaal gebruikt. Dat betekent:

- In het ideale maximale geval kan de buffer gedurende $8760/2 = 4380$ uur per jaar opgeladen en voor evenveel uur ontladen worden, beide met maximaal vermogen.
- Dat geeft maximaal $4380 \times 350 = 1533000$ kWh ofwel 1533 MWh (E_{shift}) aan vraagverschuivingsmogelijkheden, op een jaarverbruik van 13000 MWh; ofwel ongeveer 12 % van het jaarverbruik; als deze inzet zou kunnen leiden tot verbetering van de OCEF, zou deze maximaal met 12% kunnen toenemen.

Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam

Die 12 % wordt bij lange na niet gehaald. Dat zou alleen mogelijk zijn als de wisselingen van een tekort en daarna een overschot cyclustijden van maximaal 6 uur (3 uur opladen en 3 uur ontladen) hebben en daarbij moet het opladen en ontladen dan ook op vol vermogen plaatsvinden. Uit Figuur 3-1 t/m Figuur 3-3 volgt dat de cyclustijden doorgaans veel langer zijn.

Een andere insteek voor een beschouwing is: iedere dag wordt de batterij éénmaal helemaal opgeladen en éénmaal helemaal ontladen. Dit sluit aan bij een vraagverschuivings casus, waarbij bijvoorbeeld de ochtendpiek die ongeveer 3 uur breed is, afgetopt wordt door de batterij gedurende die drie uur in te zetten. Daarbij wordt de gunstige aanname gedaan dat gedurende die drie uur de batterij op maximaal vermogen ontleedt. Dat leidt tot $365 \cdot 1050 = 383000$ kWh/ jaar vraagverschuiving, ofwel 3% van de jaarvraag. Wanneer het lukt om twee pieken per dag af te toppen en te verschuiven (de ochtendpiek en de avondpiek), dan is 6% verschuiving haalbaar, waarbij het verbruik dan verschoven wordt van een hoog peiktarief naar een lager daltarief. Zo'n verschuiving zou ook een verschuiving van ingekochte elektriciteit met een hoge CO₂ intensiteit naar ingekochte elektriciteit met een lage CO₂ intensiteit kunnen betekenen (zie paragraaf 2.3.6).

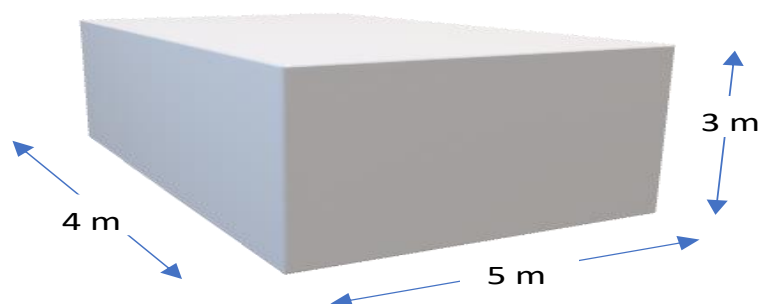
De conclusie van het voorgaande is derhalve: met de inzet van een batterij met een capaciteit van 1050 kWh kan maar een bescheiden hoeveelheid vraagsturing gerealiseerd worden: naar schatting circa 3 tot 6 % van de totale vraag.

Toegepast op de de inzet van de assets uit Tabel 3-1: zal het effect van de flexibele inzet van de assets uit Tabel 3-1 minder zijn dan wat de beschouwde fictieve batterij zou kunnen bieden, omdat de inzet per asset in een aantal gevallen minder dan 3 uur is.

3.4 Theoretische beschouwing van passieve thermische opslagcapaciteit

Voor een theoretische beschouwing van de thermische opslagcapaciteit van een gebouw, is er uitgegaan van een ruimte in een kantoorgebouw, die rondom omgeven is met gelijke ruimtes met een identieke conditionering. In Figuur 3-7 zijn de afmetingen van de beschouwde ruimte weergegeven en in Tabel 3-2 de eigenschappen van de beschouwde ruimte.

De totale warmtecapaciteit van deze wanden bedraagt 5524 Wh/K, vervolgens wordt ervan uitgegaan dat de helft daarvan, dat is 2762 Wh/K, beschikbaar is voor de beschouwde ruimte en de andere helft beschikbaar is voor de omliggende ruimtes. Er wordt uitgegaan van een comfort bandbreedte van 19 – 23 °C. Om het warmteopslag gedrag in kaart te brengen zijn er simulaties uitgevoerd van 24 uren cycli, waarbij de binnentemperatuur op verschillende niveaus vastgezet wordt en waarbij de warmteopslag of afgifte door de wanden aan de beschouwde ruimte is berekend. Het patroon herhaalt zich iedere dag op



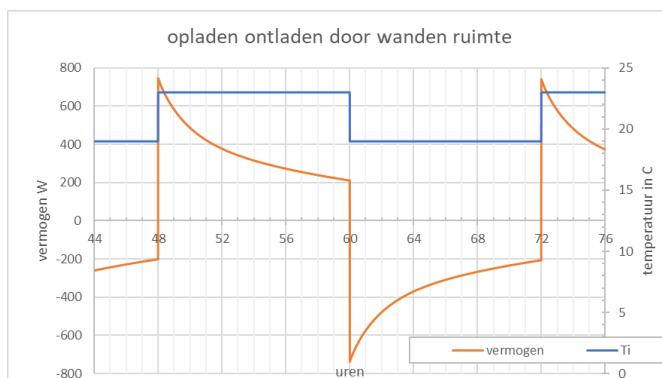
Figuur 3-7 afmetingen van de beschouwde ruimte

Uurmatching

Vloer/plafond	25 cm massief beton	Geen verlaagd plafond
Zijwanden en achterwand	Gipsplaten 2 cm dik aan beide buitenzijden	Tussen gipsplaten isolatie
gevel		Niet meegenomen in warmteopslag

Tabel 3-2 Kenmerken van de wanden in de beschouwde ruimte

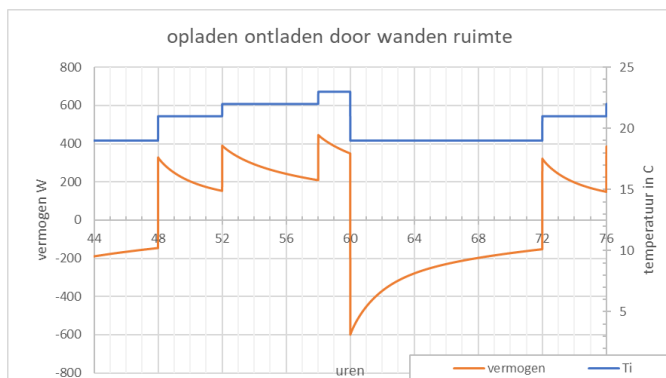
dezelfde manier, zoals in de bovenste grafiek van Figuur 3-8 is weergegeven. De maximale warmte opslag in wanden binnen een cyclus van een etmaal wordt dan bereikt door de binnentemperatuur 12 uur op 23°C te houden en vervolgens 12 uur op 19°C. Op de derde dag is het gebouw voldoende “ingeslingerd” om een representatief beeld te geven van oplaad- en ontladkarakteristiek. In Figuur 3-8 is deze simulatie weergegeven. De hoeveelheid warmte die opgeslagen respectievelijk afgegeven wordt bedraagt dan 4250 Wh. Indien in deze cyclus de wanden totaal door zouden warmen of afkoelen zou er $4 \text{ (K)} * 2762 \text{ (Wh/K)} = 11048 \text{ Wh}$ opgeslagen kunnen worden. Dat betekent dat feitelijk maximaal 38% van de totale warmteopslag capaciteit benut kan worden in deze cyclus.



Figuur 3-8 Maximale oplaad/ontladcyclus van de beschouwde ruimte (24 uren cyclus); buffering 4250 Wh

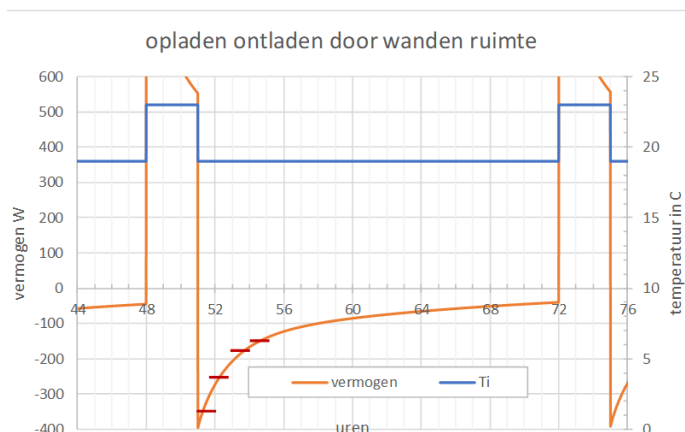
Om de hoge piek in het aanwarm vermogen te vermijden kan er gekozen worden voor een geleidelijker toename in de binnentemperatuur, zoals weergegeven in Figuur 3-9

Uurmatching



Figuur 3-9 afflakken van de opwarmpiek door een in stappen oplopend binnentemperatuurprofiel; buffering 3300 Wh

Een volgend patroon bestaat uit het opladen van de wanden gedurende drie uur, waarbij de binnentemperatuur op 23 °C gehouden wordt, gevolgd door het ontladen van de wanden in de periode daarna, zoals weergegeven in Figuur 3-10. Tijdens het opladen piekt het vermogen tot 870 W en neemt dan af tot 580 W.



Figuur 3-10 Cyclus met drie uur opladen en 21 uur ontladen; buffering 2075 Wh.

Tijdens ontladen is in Tabel 3-1 het gemiddeld vermogen per uur (gerekend vanaf de start van ontladen) weergegeven en de totale hoeveelheid energie die tot en met dat uur is afgegeven aan de ruimte. Het afgegeven vermogen neemt snel af. Met dit patroon wordt in totaal 2075 Wh (19% van het maximum potentieel) verschoven.

ontladen	energie	gemiddeld
uur	Wh	vermogen W in uur
1	326	326
2	563	237
3	749	186
4	902	153
5	1033	131

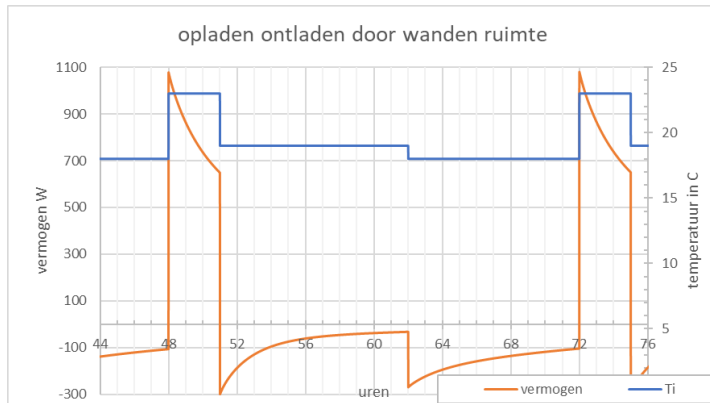
Tabel 3-3 Ontlaad karakteristiek bij Figuur 3-10

Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam

In de praktijk wordt in veel gebouwen nachtverlaging toegepast, waarbij gedurende de nacht een lager setpoint wordt ingesteld waarbij ook gebruik gemaakt wordt van de warmt bufferende werking van een gebouw. In Figuur 3-11 is zo'n patroon weergegeven.

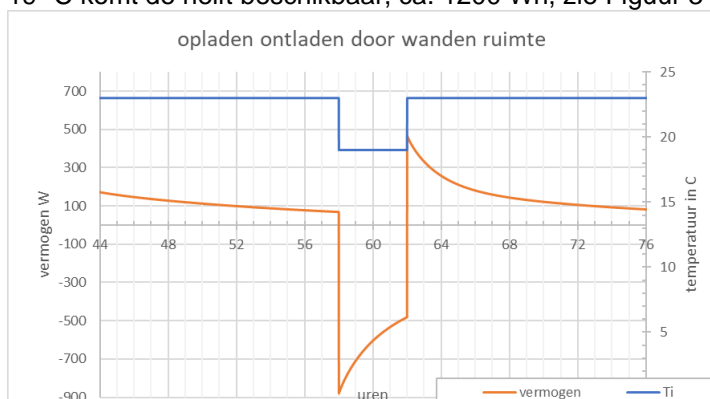


Figuur 3-11 Patroon met nachtverlaging; buffering 2450 Wh; afgifte overdag 844 Wh

Als er ook nachtverlaging toegepast wordt (in dit geval van 19 naar 18°C) dan moet de opgeslagen warmte verdeeld worden over de rest van de dag en de nacht, en blijft er veel minder energie over voor het dagdeel, zoals in Figuur 3-11 duidelijk zichtbaar is. Nachtverlaging, gericht op lagere verliezen in de nacht vanwege een lagere binnentemperatuur, is, zoals hier duidelijk wordt, ook een (onbedoelde) vorm van vraagverschuiving.

Tijdens het opladen wordt 2450 Wh (22% van het maximum potentieel) opgeslagen in de wanden, waarvan 844 Wh (8% van het maximum potentieel) beschikbaar komt voor het dagdeel, en 1556 Wh (14% van het maximum potentieel) beschikbaar is voor de nacht. Als de nachtverlaging nog lager ingesteld wordt, dan is er nog veel minder beschikbaar voor de dag en wordt alles in de nacht verbruikt.

Indien gekozen wordt voor een continue binnentemperatuur van 23 °C, en geen nachtverlaging wordt toegepast omdat er volledig op flexibiliteit wordt ingezet, waarbij er één ontladperiode van 4 uur optreedt met een binnentemperatuur van 19 °C, ontstaat het beeld van Figuur 3-12. Dan is er tijdens de ontladperiode van 4 uur in totaal ca. 2400 Wh beschikbaar. Bij een gelijkvormig patroon van 21 °C naar 19 °C komt de helft beschikbaar, ca. 1200 Wh, zie Figuur 3-13.

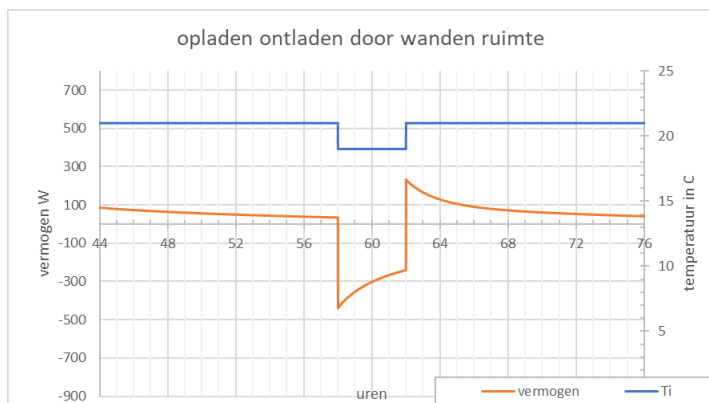


Figuur 3-12 Cyclus 20 uur laden/ 4 uur ontladen (23 naar 19 C); buffering 2400 Wh

Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam



Figuur 3-13 Cyclus 20 uur laden/ 4 uur ontladen(23 naar 21 C); buffering 1200 Wh

De verhoogde binnentemperatuur tijdens het opladen betekent een hoger verlies door de gevel (en door ventilatie) vanwege de hogere binnentemperatuur. Dit leidt tot een extra warmteverbruik in het gebouw.

Gevel			
opp	15 m ²		
k-waarde	1,5 W/m ² K		
transmissie	22,5 W/K		
personen	10 m ² /pp		
	2,0 persoon		
luchtvv	50 m ³ /pp		
WTW eff	0,6		
	13,3 W/K		
Totaal warmtebehoefte		bij Ti - Tu = 30 C	
	35,8 W/K		1075 W

Tabel 3-4 Warmteverlies door gevel en ventilatie

Uit Tabel 3-4 volgt dat een 4 K hogere binnentemperatuur leidt tot een extra vermogensvraag van $4 \cdot 35,8 = 142$ W. Als deze tijdelijke verhoging 3 uur duurt gaat het om 426 Wh. Het voorwarmen van een ruimte leidt zo wel tot een extra energieverbruik. In het voorbeeld van Figuur 3-11 zal de 10 uur nachtverlaging een besparing tot gevolg hebben van $10 \cdot 22,5 = 225$ Wh. Dat is minder dan geïnvesteerd moet worden in extra energietoevoer tijdens de piek. Maar die investering in energie dient niet alleen om nachtverlaging te faciliteren, maar ook om gedurende een deel van de dag een lagere vraag te hebben. Daarnaast is het zo dat het CO₂ gehalte van elektriciteit overdag substantieel lager kan zijn dan het CO₂ gehalte van elektriciteit gedurende de nacht.

Op basis van Tabel 3-4; bij een gemiddelde binnentemperatuur van 19 °C en een gemiddelde buitentemperatuur van 7 °C, en 150 dagen stookseizoen, komt het jaarlijks warmteverlies uit op 1550 kWh/j. Rekening houdend met een interne belasting zal de warmtebehoefte ca 1200 kWh/ zijn.

Uurmatching

Figuur	Patroon	buffering	% van maximale buffer capaciteit	gebufferd per jaar	Gebufferd in % warmtebehoefte
		Wh/dag		kWh/j	
Fig 3.8	12u 23 °C/12 u 19 °C	4250	38%	638	53%
Fig 3.9	19/ 21/ 22 /23/ 19 °C	3300	30%	495	41%
Fig 3.10	3u 23 °C / 21u 19 °C	2075	19%	311	26%
Fig 3.11	3u 23 °C/11 u 19°C/ 10 u 18 °C	844	8%	127	11%
Fig 3.12	20 u 23 °C/4u 19 °C	2400	22%	360	30%
Fig 3.13	20 u 23 °C/4u 21 °C	1200	11%	180	15%

Tabel 3-5 Opslag per gepresenteerde figuur

De conclusie die uit het voorgaande getrokken kan worden, wordt zichtbaar met behulp van Tabel 3-5. Uit Tabel 3-5 volgt dat de gerealiseerde opslag in de wanden varieert van 8% tot 38% van wat er maximaal in de wanden opgeslagen kan worden in een cyclus. Of, op basis van 150 etmalen per stookseizoen, waarbij elk etmaal de berekende warmteopslag wordt opgeslagen, gaat het om circa 11% tot 53% van de jaarlijkse warmtebehoefte.

Het patroon van 12 uur een hoge temperatuur gevolgd door 12 uur een lage temperatuur (van Figuur 3-8) geeft de maximale opslagmogelijkheid. Het opladen duurt dan even lang als het ontladen gedurende de maximaal mogelijke periode in een 24 uren cyclus: 12 uur op/ 12 uur af.

Door eerst 3 uur voorwarmen van de ruimte, om direct daarna minder vermogen te hoeven leveren (Figuur 3-10) kan zo'n 20% van de warmteopslagcapaciteit benut worden.

Als er ook nog nachtverlaging toegepast wordt, is de beschikbare warmte voor het dagdeel slechts 8% van de warmteopslagcapaciteit (Figuur 3-11). Bij een goed geïsoleerde gevel kan daarom overwogen worden om geen nachtverlaging toe te passen, maar alleen temperatuurwijzigingen door te voeren als er bijvoorbeeld pieken op het net (piekschering om congestie tegen te gaan) of als er pieken in de tarieven te verwachten zijn. Dan kan er 19% van de warmteopslag capaciteit, of, als dit iedere dag in het stookseizoen plaats vindt, 26% van de jaarlijkse warmtevraag, verschoven worden. Als er wel nachtverlaging wordt toegepast wordt halveert dit percentage ruwweg.

4. Simulatiestudie vraagsturing met verzameling van elektrische apparaten op gebouwcluster niveau (studie 2)

4.1 Introductie van de casestudie

In deze simulatiestudie zal het vraagsturingspotentieel van de geselecteerde apparaten (zie van het gebouwcluster ABCD op het Amsterdam Science Park) op basis van een concrete besturingsstrategie beoordeeld worden. Het onderwerp van deze casestudie is hetzelfde als die van paragraaf 3.3. Waar in paragraaf 3.3 alleen gekeken is naar een theoretisch maximum potentieel van OCEF, wordt in deze simulatiestudie het praktisch haalbare potentieel onderzocht, waarbij niet alleen naar de prestatie indicator OCEF wordt gekeken, maar ook naar de indicatoren “hoogte van de piek, piekmax” en de energiekosten (op basis spottarief).

4.2 Aanpak in de casestudie

Voor de aansturingsstrategie is er een optimalisatie algoritme ontwikkeld, genaamd het ‘*distribute candy*’ algoritme, waarmee het flexibele deel van de elektravraag optimaal over een tijdsperiode kan worden verdeeld om een bepaalde straffunctie te minimaliseren. Middels dit algoritme en het gemeten elektraverbruik van het gebouwcluster is het vraagsturingspotentieel gesimuleerd uitgaande van verschillende regelvarianten en straffuncties.

In deze studie zullen de effecten van vraagsturing verkend worden op de elektravraag, de zelfconsumptie van ingekochte hernieuwbare energie en de energiekosten bij inkoop op de spotmarkt. De zelfconsumptie van ingekochte hernieuwbare energie zal worden gekwantificeerd met de OCEF-indicator (Sectie 2.3). Hierbij is het profiel van de beschikbare hernieuwbare energie, uitgaande van de optimum mix van 70% wind en 30% zon (Sectie 3.2), geschaald om op jaarbasis netto in de elektravraag van het gebouwcluster te voorzien.

Als uitgangspunt voor het scenario zonder vraagsturing is een gemeten elektraverbruik over 2020 genomen. Deze elektradata met een tijdstap van een uur is opgenomen uit het energiemanagementprogramma E-Sight. Bij het gebouwcluster wordt geen submetering toegepast en alleen het totale verbruik was beschikbaar. Voor het bepalen van de energiekosten zijn de day-ahead spotprijzen van 2020 gebruikt afkomstig van het ENTSO-E Transparency platform (ENTSO-E, 2017).

4.3 Resultaten

4.3.1 De flexibiliteit van elektrische apparaten bij Science Park ABCD

De eerder gepresenteerde Tabel 3-1 toont het opgestelde vermogen voor alle elektrische apparaten die enige mate van flexibiliteit bieden. In de tabel is te zien is dat het totale opgestelde vermogen van 1.66 MW mogelijk tot 0.37 MW verlaagd kan worden en dat dergelijke vermogensbeperkingen maximaal 3 uur mogelijk zijn.

4.3.2 Het ‘distribute candy vraagsturingsalgoritme

Het ontwikkelde vraagsturingsalgoritme verdeelt het verschuifbare deel van het energievraagprofiel over een bepaalde tijdshorizon dusdanig dat de straffunctie geminimaliseerd wordt.

Uurmatching

Hiertoe wordt het te simuleren jaar opgedeeld in discrete perioden en het energievraagprofiel wordt geoptimaliseerd binnen iedere periode. Het algoritme optimaliseert daarbij de vorm van het vraagprofiel rekening houdend met de volgende begrenzings: (i) de energievraag kan alleen verschoven worden en de som van het energieverbruik over één periode blijft gelijk en (ii) er moet altijd worden voldaan aan een minimum vraagprofiel.

Het vraagsturingalgoritme wordt beschreven in vergelijkingen (4) t/m (6) en wordt grafisch geïllustreerd in Figuur 4-1. De figuur toont een fictieve dag met een energievraagprofiel met een piek midden op de dag (blauwe lijnen). In dit voorbeeld is de straffunctie (rood) ook maximaal midden op de dag en verbruik is op dat moment ongunstig. Het vraagprofiel zal nu worden aangepast om het totale aantal strafpunten (som van verbruik maal straffunctie op moment t) te minimaliseren. Voor deze methode zijn de volgende dingen nodig: (i) een referentievraagprofiel zonder vraagsturing, (ii) een vraagsturingstijdsperiode waarover de vraag herverdeeld zal worden, (iii) een maximaal toegestane reductie in het vermogen in relatie tot het referentievraagprofiel en (iv) een minimaal vermogen dat te allen tijde gerespecteerd moet worden tijdens de vraagsturingperiode. De nodige aannames zijn gebaseerd op de inventarisatie in Tabel 3-1. Gebruik makende van deze informatie wordt het minimale vraag vermogensprofiel bepaald met vergelijking (4). Dit profiel geeft het minimale vermogen op iedere tijdstap als alle apparaten naar hun minimaal toegestane vermogen zouden worden geschakeld (groene lijn in Figuur 4-1).

De potentiële verschuifbare hoeveelheid energie wordt dan berekend door het verschil te nemen tussen het energievraagprofiel zonder vraagsturing en het minimale energievraagprofiel (vergelijking (5) en de grijze stippellijn in Figuur 4-1). Deze verschuifbare hoeveelheid energie wordt vervolgens middels vergelijking (6) verdeeld over de individuele tijdstappen van de vraagsturingperiode proportioneel aan hoogte van de straffunctie op iedere tijdstap. In het resulterende verschoven vraagprofiel (paars) is energievraag verschoven van de piek waar de straffunctie hoog was, naar momenten met een lagere straffunctie met in achtneming van de gedefinieerde begrenzings.

Hetzelfde probleem kan ook numeriek opgelost worden volgens een ‘distribute candy’ aanpak. Deze aanpak is analoog aan het verdelen van een eindige hoeveelheid snoepjes over een groep mensen proportioneel aan het rapportcijfer van iedere persoon. Hierbij worden de snoepjes verdeeld door opeenvolgend gewogen handjes snoep aan iedere persoon te geven en dit proces te herhalen tot de snoepjes op zijn. In deze aanpak wordt de lijst met straffunctiewaarden gesorteerd naar orde van grootte en wordt de verschuifbare energie (snoepjes) opeenvolgend verdeeld over iedere tijdstap (persoon). Het uitdelen begint bij de tijdstap met de laagste straffunctiewaarde (hoogste rapportcijfer). Hierbij wordt de hoeveelheid energie (het handje snoep) dat wordt uitgedeeld aan die tijdstap gewogen met het rapportcijfer (1-straffunctie) van die tijdstap, en wordt deze gewogen hoeveelheid toegekend aan die tijdstap. Dit proces wordt herhaald totdat alle verschuifbare energie (snoepjes) is uitgedeeld.

$$P_{\min(t)} = \max(P_{\min;DR(t)}, (P_{NoDR(t)} - P_{\max;DR;red})) \quad (4)$$

$$E_{shift(t)} = E_{NoDR(t)} - E_{\min(t)} \quad (5)$$

with $E_{\min(t)} = P_{\min(t)} * ts$

$$E_{DR(t)} = E_{\min(t)} + \frac{1 - p(t)}{\sum_{i=s}^e 1 - p(i)} * \sum_{i=s}^e E_{shift(i)} \quad (6)$$

Waar:

P_{NoDR} : gemeten vermogen zonder vraagsturing,

$P_{max,DR,red}$: maximal toegestane vermogensreductie tijdens vraagsturingsevenement,

$P_{min,DR}$: minimale vermogen tijdens vraagsturingsevenement,

$E_{shift(t)}$: verschuifbare energievraag,

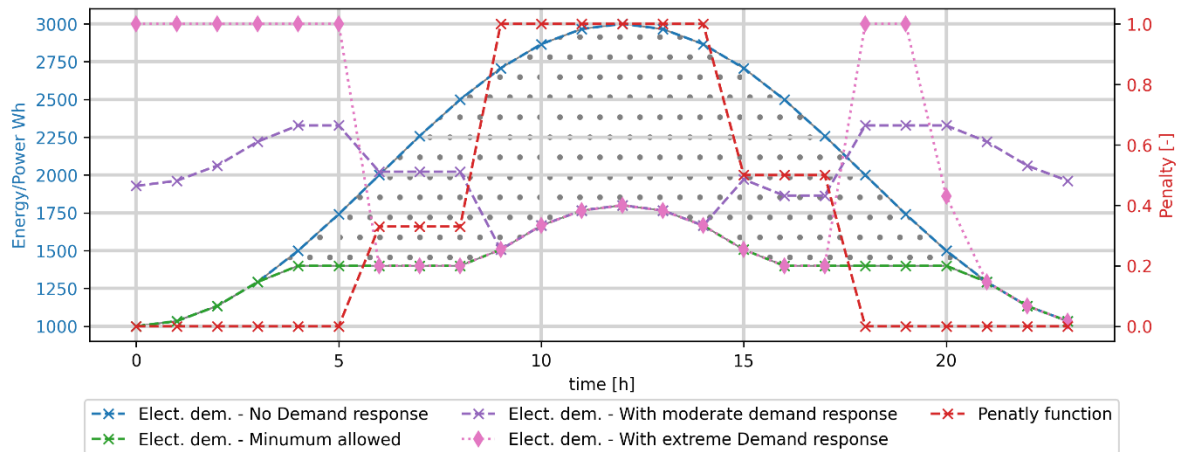
E_{NoDR} : gemeten electriciteitsverbruik zonder vraagsturing,

E_{min} : minimaal toegestane electriciteitsverbruik,

t : tijdstap, ts : duur van tijdstap in seconden,

$E_{DR(t)}$: energieverbruik inclusief vraagsturing,

p : straffunctie, s : start tijd van optimalisatie periode, e : eind tijd van optimalisatie horizon.



Figuur 4-1 Het gedrag van het 'distributed candy' vraagsturingsalgoritme. Simulatie van een fictieve dag.

Bij de numerieke 'distributed candy' benadering is de keuze van de omvang van de ongewogen portie medebepalend voor het eindresultaat. De ongewogen portie refereert hier naar de hoeveelheid energie per tijdstap voordat deze wordt gewogen met de straffunctie. Eén mogelijke benadering hiervoor is om de resterende hoeveelheid verschuifbare energie te nemen en deze te delen door het totale aantal tijdstappen. Deze aanpak geeft hetzelfde resultaat als de algebraïsche methode volgens vergelijking (6). Deze benadering leidt tot een relatief gelijkmatige vorm van vraagsturing waar geen snelle schommelingen van het flexibele vermogen voor nodig zijn. Deze benadering zal worden aangeduid als 'moderate demand response' (ModDR). Als alternatief kan een constante waarde aangenomen worden voor de ongewogen portie, zoals bijvoorbeeld het maximaal toegestane vermogen. Dit leidt tot andere resultaten (roze lijn in Figuur 4-1). Bij deze benadering wordt de verschuifbare energievraag onevenwichtiger verdeeld over de verschillende tijdstappen, waarbij er meer energie terecht komt bij tijdstappen met een lagere straffunctie. Bij deze benadering zal het algoritme namelijk abrupt stoppen wanneer de hoeveelheid verschuifbare energie (snoep) op is en omdat het algoritme start met uitdelen bij de tijdstappen met een lage straffunctie, zullen deze tijdstappen relatief meer energie ontvangen. In het voorbeeld in Figuur 4-1 gebeurt dit om 21:00 waar de resulterende energievraag na vraagsturing tot het minimum toegestane profiel terugvalt. Deze aanpak leidt tot een lagere algehele straffunctie maar ook tot grotere fluctuaties in het energievraagprofiel. In werkelijkheid zou voor deze aansturing dan ook zeer snelle opwaartse en neerwaartse sprongen in van het flexibele vermogen nodig zijn. Deze extremere vraagsturingsbenadering zal worden aangeduid als 'extreme demand response' (ExDR).

4.3.3 Simulatie van vraagsturing over een jaar

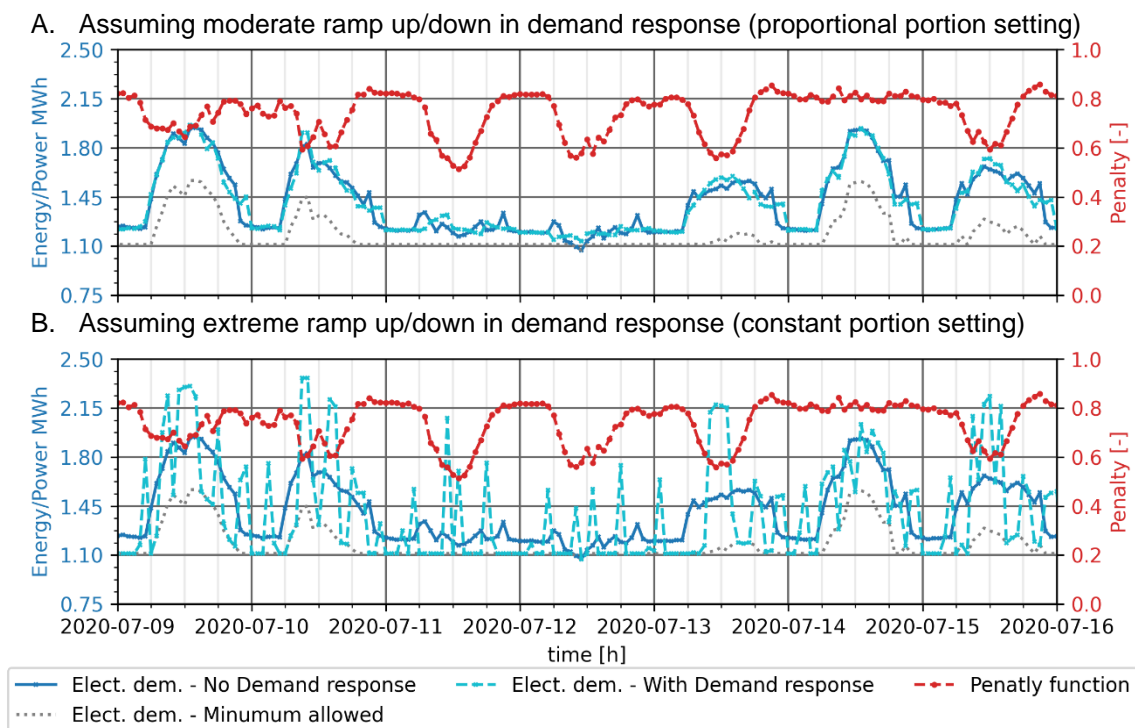
Figuur 4-2 toont het gedrag tijdens een typische zomerweek van twee de regelstrategieën wanneer ze worden ingezet om de afname van ingekochte hernieuwbare energie te vergroten. Hierbij is uitgegaan

Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam

van een maximale inzet van alle flexibele apparaten op het gebouwcluster met een maximale vermogensreductie van 374 kW en vraagsturingshorizon van 6 uur (~3 uur op verlaagd vermogen en ~3 uur op verhoogd vermogen). De mismatch tussen de elektravraag en het ingekochte hernieuwbare aanbod is gebruikt als straffunctie. Figuur 4-2 A toont het gedrag van de gematigde vraagsturingsvariant (ModDR) en Figuur 4-2 B toont de extreme variant (ExDR). In de grafiek geven de grijze verticale roosterlijnen de 6 uur durende vraagsturingsperioden weer. Te zien is dat, binnen iedere vraagsturingsperiode, het vraagsturing algoritme (licht blauw) de energievraag verlaagt ten opzichte van het referentiescenario (donkerblauw) op momenten dat de straffunctie (rood) hoog is. Deze energievraag wordt verschoven naar momenten met een lagere straffunctie. De ModDR strategie blijft hierbij dicht bij het referentievraagprofiel terwijl de ExDR strategie het minimaal toegestane vermogen (grijze stippellijn) opzoekt zodra de straffunctie hoog is. Te zien is dat de ExDR strategie gepaard gaat met snelle en grote vermogenssprongen in het vraagprofiel.



Figuur 4-2 Simulatieresultaten van het 'distributed candy' vraagsturingmodel voor een typische zomerweek. De mismatch tussen energievraag en ingekocht aanbod is hier gebruikt als straffunctie.

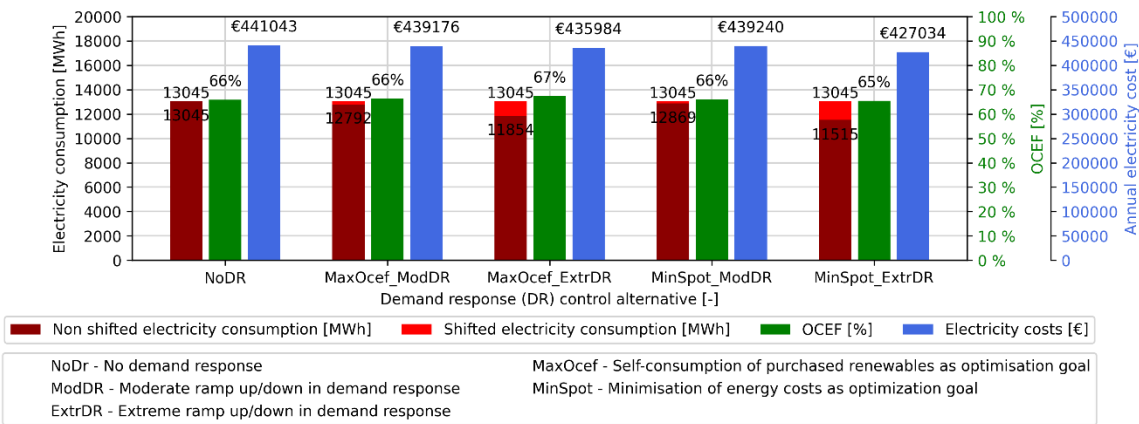
Figuur 4-3 toont de resultaten van simulaties over een geheel jaar en het effect van de verschillende vraagsturingstrategieën op de prestatie indicatoren. Hier worden vijf strategieën getoond:

- (i) Het referentie scenario zonder vraagsturing (NoDR)
- (ii) De gematigde vraagsturingstrategie gericht op verbeterde energiematching (MaxOcef_ModDR)
- (iii) De extreme vraagsturingstrategie gericht op verbeterde energiematching (MaxOcef_ExDR)
- (iv) De gematigde vraagsturingstrategie gericht op lagere spotmarktkosten (MinSpot_ModDR)
- (v) De extreme vraagsturingstrategie gericht op lagere spotmarktkosten (MinSpot_ExDR)

De verschillende vraagsturingstrategieën zijn in staat om 2-12% (253-1530 MWh of 4.5-27.1 kWh/m²) van de totale energievraag te verschuiven in de tijd. Vooral bij de extreme vraagsturingvarianten is het potentieel om de energievraag te verschuiven groot (12%). Deze mate van energieflexibiliteit vertaalt zich

Uurmatching

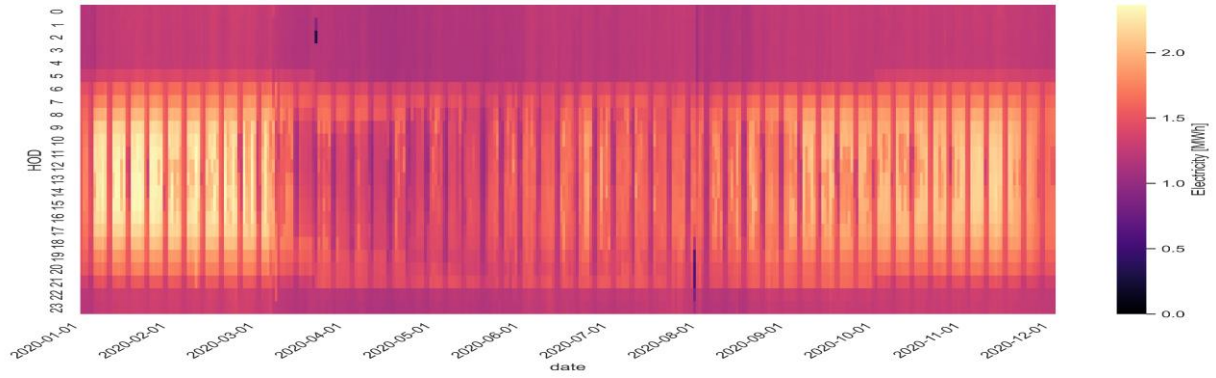
echter in veel kleinere mate tot een gunstiger verbruik van ingekochte hernieuwbare energie en leidt tot slechts een toename van 0.6-1.5% in OCEF. Ook de invloed op de totale energiekosten is klein en de vraagverschuiving leidt tot slechts 0.4-3.2% afname in de spotmarktkosten.



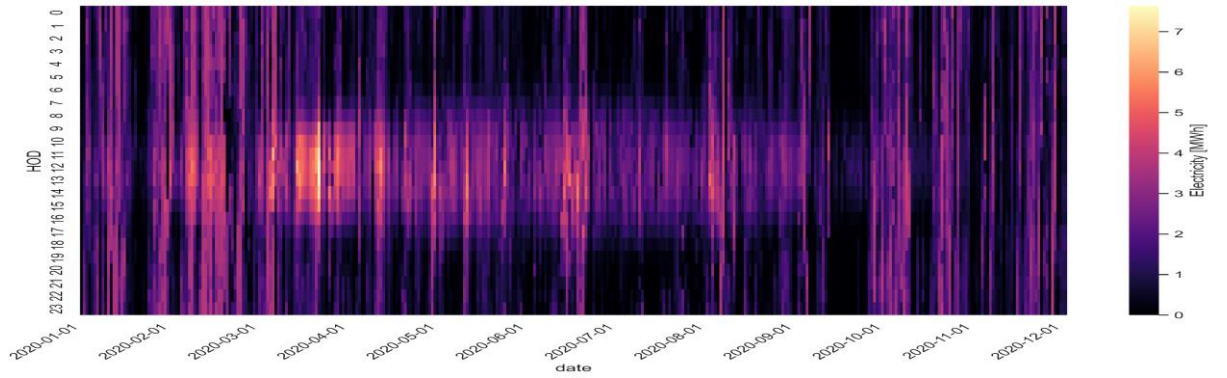
Figuur 4-3 Effect van verschillende aansturingvarianten voor vraagsturing op de energievraag, OCEF en energiekosten op de spotmarkt.

Figuur 4-4 geeft meer inzicht in waar de discrepantie vandaan komt tussen de grote omvang van de verschoven energievraag en de kleine omvang van de verbetering in OCEF. De figuur toont de energievraag op Science Park over het jaar heen (Figuur 4-4 A), de beschikbaarheid van ingekochte hernieuwbare energie (B) en de resulterende zelfconsumptie van ingekochte hernieuwbare energie zonder vraagsturing (C) en met vraagsturing (D). De verticale as geeft in deze grafieken het uur van de dag weer en de horizontale assen de dag van het jaar. De kleur van de grafiek geeft de hoogte van het verbruik of de opwek weer. Bij Science Park is de mate van energiematching in het referentiescenario (C) reeds hoog (OCEF: 66%) omdat de piek in het energievraagpatroon overdag grotendeels samenvalt met de piek in de productie van zonne-energie. Ook is er op Science Park een grote basislast van ~1.2 MW die altijd aanwezig is. De resterende mismatch op Science Park wordt vooral veroorzaakt door het samenvallen van deze basislast met nachten waarop er geen windenergie beschikbaar is (zwarte delen in B en C). Om deze mismatch te verbeteren is vraagverschuiving over een grotere tijdsduur van 12-24 uur nodig. Dit is langer dan mogelijk is met de flexibiliteit van de beschikbare apparaten (D). De beschikbare flexibiliteit leidt wel tot een kleine reductie van de spotmarktkosten omdat de tijdsduur waarover betekenisvolle prijsverschillen plaatsvinden beter aansluit bij de flexibiliteitsduur van de onderzochte apparaten.

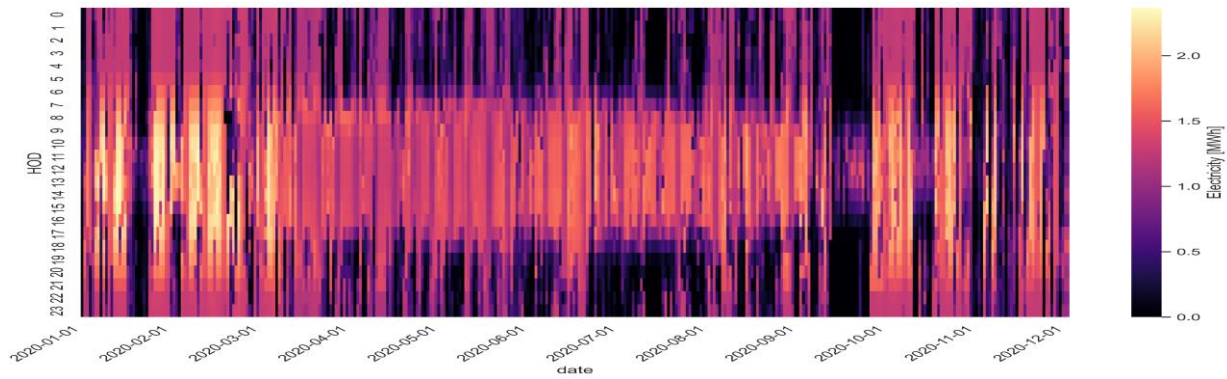
A.



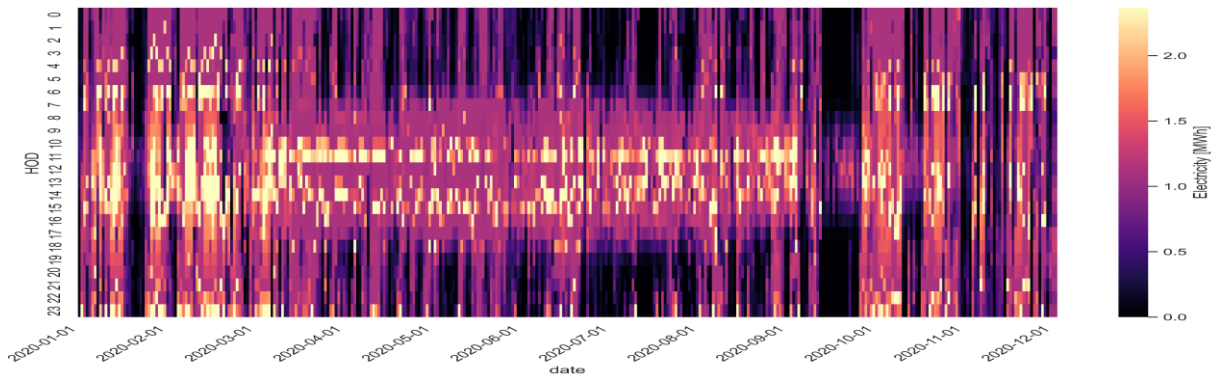
B.



C.



D.



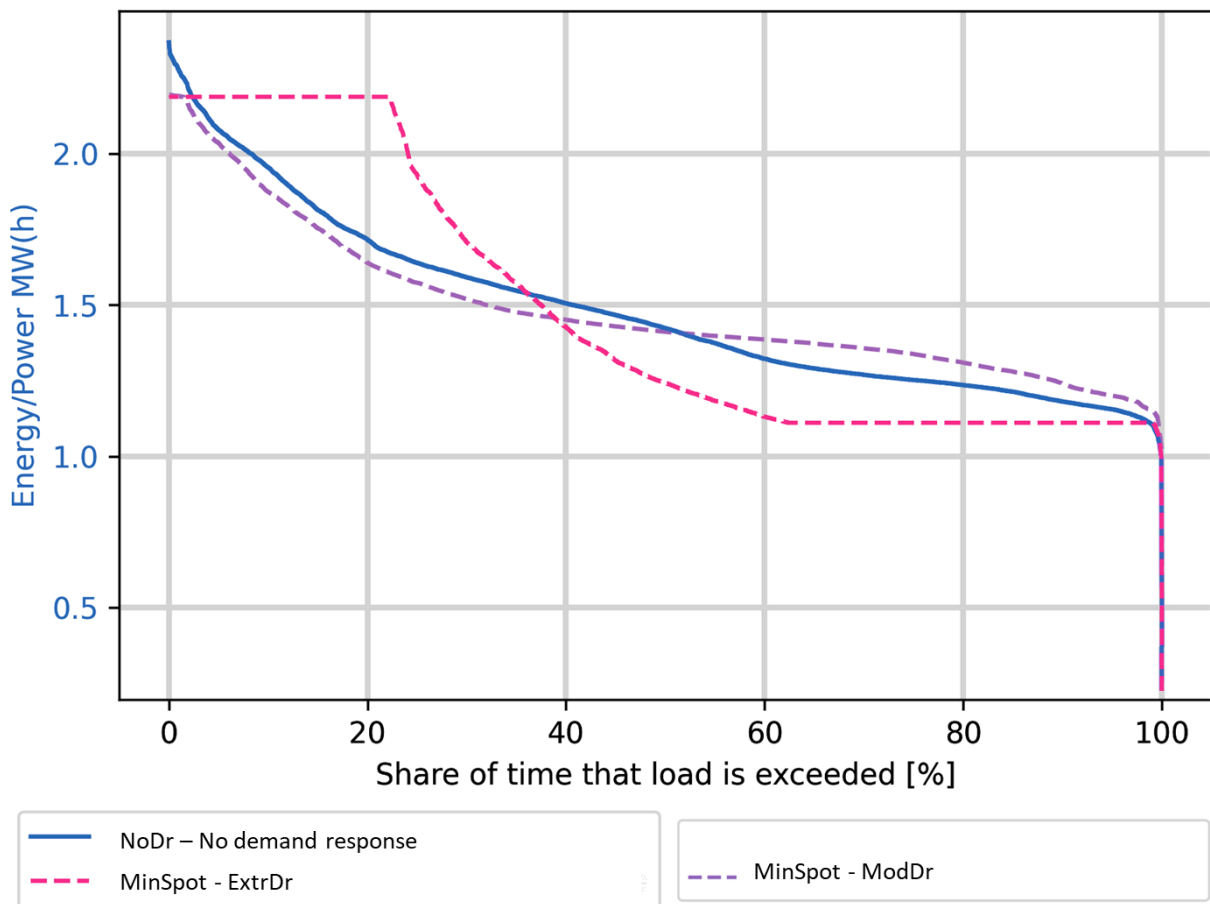
Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam

Figuur 4-4 A: Elektravraag over 2020 van Science Park. B: Hernieuwbare aanbod over 2020. C: Zelfconsumptie van ingekochte hernieuwbare energie. D: Zelfconsumptie van ingekochte hernieuwbare energie met vraagsturing.

De vraagsturing met de verzameling apparaten bij Science Park kan ook ingezet worden om het maximaal afgenomen vermogen te beïnvloeden. Figuur 4-5 toont het effect van de MinSpot regelstrategie op de belastingduurkromme voor Science Park. De grafiek toont het referentie scenario zonder vraagsturing (NoDr: blauw), de gematigde vorm van vraagsturing (ModDr: paars) en de extreme vorm van vraagsturing (ExDr: roze). Te zien is dat vraagsturing het afgenomen piekvermogen van 2.3 MW naar 2.1 MW verlaagd. Het piekvermogen is dus met 0.2 MW (9%) afgenomen. Verder is te zien dat de gematigde vorm van vraagsturing (ModDr: paars) leidt tot de meest gunstige vorm van de belastingduurkromme waarbij er een verschuiving is van hogere vermogens naar lagere vermogens. Alhoewel de extreme vorm van vraagsturing leidt tot een beperking van het piekvermogen is er wel flinke toename in de frequentie van de hoge vermogens direct onder vermogen dat maximaal wordt toegestaan door het algoritme.



Figuur 4-5 Belastingduurkrommen van de verschillende vraagsturingsvarianten. Toont het effect van vraagsturing op het maximaal afgenomen vermogen en de duur van de afname van hoge vermogens.

4.4 Discussie en conclusies betreft het technisch potentieel

Met de onderzochte verzameling apparaten op Science Park kan tot 12% van de totale jaarlijkse energievraag verschoven worden over tijdsperiode van ongeveer 3 uur, zoals ook uit paragraaf 3.3 bleek. Deze casestudie laat echter zien dat dit potentieel in de gesimuleerde praktijksituatie maar leidt tot zeer kleine verbeteringen (1.5%) in de mate van energiematching tussen de energievraag en het ingekochte aanbod. De reden hiervoor is dat de match tussen vraag en aanbod bij Science Park ook zonder vraagsturing reeds hoog is. De resterende mate van mismatch vindt plaats over een tijdspanne van 12-24 uur en dit is een langere periode dan de beschikbare tijdsduur van 3 uur waarover flexibiliteit kan worden ingezet met de onderzochte apparaten. Wel is een kleine verlaging van 3.2% van de spotmarktkosten mogelijk met deze apparaten.

Enkele beperkingen van deze studie moeten genoemd worden. Het vraagsturingsalgoritme gaat er vanuit dat elektravraag alleen verschoven kan worden. Voor sommige apparaten is dit een conservatieve aanname die leidt tot een lagere inschatting van de OCEF en kostenverbeteringen. Het algoritme kent ook de beperking dat het alleen optimaliseert binnen een de beschouwde tijdshorizon. Het jaar wordt hierbij opgedeeld in een discreet aantal optimalisatieperioden en deze benadering staat het niet toe dat energie wordt verschoven tussen twee perioden.

In deze studie is gebruik gemaakt van meetgegevens van 2020, het jaar van de COVID pandemie. Dit jaar was niet representatief qua het gebruik van de gebouwen en qua elektriciteitsprijzen. Deze studie is daarom herhaald voor 2021 maar dit leidde niet tot substantieel andere conclusies.

Deze studie laat ook een beperking van de OCEF-indicator zien en het kwantificeren van verbeteringen in uurmatching met ingekochte hernieuwbare energie over een bepaalde tijdsperiode. Figuur 4-4 B en °C laten zien dat wanneer het energieaanbod 0 is, de zelfconsumptie van hernieuwbare energie per definitie ook altijd 0 is. Dat wil zeggen dat wanneer de energievraag tijdens dit soort momenten verlaagd wordt dit geen effect zal hebben op de mate van zelfconsumptie en de OCEF-indicator. Vanuit het perspectief van de beschikbaarheid van hernieuwbare energie op het elektriciteitsnet als geheel kan het echter wel zinnig zijn om de energievraag tijdens dit soort momenten te verlagen maar dit wordt niet goed ondervangen binnen de definitie van 'uurmatching' of de OCEF-indicator.

4.5 Discussie en conclusies betreffende het economisch potentieel

4.5.1 Benadering en aannames betreft kosten en baten

In het beoordelen van het economisch potentieel zullen drie kostenscenario's en twee mogelijke marktscenario's worden gehanteerd. De kostenscenario's zijn gebaseerd op een raming van de eenmalige kosten voor de aanschaf en installatie van nieuwe hardware (Tabel 4-1) en de jaarlijkse servicekosten voor een beheerder van de flexdiensten (opgenomen in Tabel 4-2). Voor de hardware kosten in het midden scenario is per apparaat groep een inschatting gemaakt van de te nemen maatregelen en de bijbehorende kosten (Tabel 4-1). Het minimum kosten scenario is gelijk aan het middenkostenscenario maar gaat uit van een situatie waar ventilatoren in luchtbehandelingskasten, pompen en de verlichting reeds flexibel kunnen worden aangestuurd vanuit het GBS. Deze situatie is niet representatief voor Science Park en is er vooral opgenomen om inzicht te krijgen in de business case in een andere context. Het maximale kostenscenario gaat uit van kosten die 50% duurder uitvallen dan in het midden scenario. In het eerste marktscenario zal worden uitgegaan van de spotprijskosten van 2020 zoals in de simulatiestudie. In een tweede scenario is uitgegaan van een mogelijk toekomstig marktscenario waar de prijs spreiding over een dag 3 keer hoger is dan in 2020.

Voor het kwantificeren van de opbrengsten van vraagsturing zullen de besparingen op de spotmarktkosten uit de simulatiestudie gebruikt worden. Ook zullen de besparingen op de transportkosten aan de netbeheerder ten gevolge van het verlagen van het maximaal vermogen berekend worden. Hierbij

Uurmatching

is uitgegaan van een transportkosten tarief van 23,000 €/MW (Liander, transporttarieven 2023 voor grootverbruikers).

Apparaatgroep	Aantal		Prijs		Kosten	Toelichting
Verlichting	49700	m ²	2	€/m ²	€ 99,400	Aanbrengen additionele voorschakel apparatuur
Ventilatoren	10	stuks	500	€/stuk	€ 5,000	Aanbrengen externe regelaar op iedere LBK
Servers	200	stuks			€ 30,000	Ontwikkelen van ICT voor dynamische server allocatie
Klimaatkamers	10	stuks	500	€/stuk	€ 5,000	Aanbrengen additionele regelapparatuur
Pompen	52	stuks	800	€/stuk	€ 41,600	Aanbrengen frequentieregelaars en sturing
Vriezers	10	stuks	500	€/stuk	€ 5,000	Aanbrengen additionele regelapparatuur
(-80°C)		stuks				
Vrieskamers	30	stuks	500	€/stuk	€ 15,000	Aanbrengen additionele regelapparatuur
(-80°C)		stuks				
Koelkamers	15	stuks	200	€/stuk	€ 3,000	Aanbrengen additionele regelapparatuur
Liften	12	stuks	800	€/stuk	€ 9,600	Aanbrengen additionele regelapparatuur
Vriezers	38	stuks	50	€/stuk	€ 1,900	Aanbrengen slimme stekker
Ovens	75	stuks	50	€/stuk	€ 3,750	Aanbrengen slimme stekker
Split unit AC	12	stuks	200	€/stuk	€ 2,400	Aanbrengen additionele regelapparatuur
Droogkasten	40	stuks	50	€/stuk	€ 2,000	Aanbrengen slimme stekker
Vaatwassers	15	stuks	50	€/stuk	€ 750	Aanbrengen slimme stekker
Subtotaal					€ 224,400	
Algemene kosten 8%					€ 17,952	
Winst en risico 4%					€ 8,976	
Verzekeringen					€ 1,122	
Subtotaal					€ 252,450	
BTW					€ 53,015	
Totaal					€ 305,465	

Tabel 4-1 Schatting hardwarekosten in het midden scenario voor flexibiliteit op Science Park.

4.5.2 Business case

De financiële beschouwing (Tabel 4-2) laat zien dat onder de recente marktomstandigheden van 2020 vraagsturing met de verzameling apparaten bij Science Park een verlieslijdende investering is. Alle drie de kostenscenario's leiden tot een negatieve NCW en een terugverdientijd van 9-17 jaar. Alleen in het minimum kosten scenario is de IRR positief maar dusdanig laag (2%) dat de investering niet rendabel is.

Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam

In het mogelijke toekomstscenario waar de spotprijsspreiding 3 maal hoger is de investering onrendabel in het hoge kostenscenario (TVT van 12 jaar, -3% IRR en een negatieve NCW). In het midden kosten scenario is de investering winstgevend maar nog niet erg aantrekkelijk (TVT 8 jaar, IRR 5% en kleine positieve NCW). Alleen bij een toekomst met spotprijsspreiding en het lage kosten heeft de investering een positief resultaat met een positieve NCW van betekenis, een IRR van 9% en terugverdientijd van 6 jaar. Ook in dit scenario is de investering mogelijk niet voldoende aantrekkelijk in vergelijking tot mogelijke alternatieven en de maatregelen zouden niet in aanmerking komen voor verplichte uitvoering binnen de EED regelgeving. Ook wijst de financiële beschouwing erop dat het risico van de investering groot is, ook in het lage kostenscenario, omdat de rentabiliteit slechts gegarandeerd is als kosten niet hoger uitvallen en marktomstandigheden erg gunstig zijn.

A. Eenmalige kosten hardware				
Minimum scenario kosten				€ -244,371.60
Midden scenario kosten				€ -305,464.50
Maximum scenario kosten				€ -458,196.75
B. Jaarlijkse kosten zonder vraagsturing				
Energiekosten zonder vraagsturing				€ -441,043.00
Transport kosten zonder vraagsturing				€ -52,900.00
C. Jaarlijkse kosten incl. besparing met vraagsturing, huidige omstandigheden				
Aansturing license fee				€ -8,000.00
Energiekosten met vraagsturing				€ -427,034.00
Transport kosten met vraagsturing				€ -48,300.00
Netto besparing door vraagsturing				€ 26,609.00
D. Jaarlijkse kosten incl. besparing met vraagsturing, bij 3x grotere prijsspreiding in dag				
Aansturing license fee				€ -8,000.00
Energiekosten met vraagsturing bij 3x grotere prijsspreiding in dag				€ -399,016.00
Transport kosten met vraagsturing				€ -48,300.00
Besparing door vraagsturing en 3x grotere prijsspreiding in dag				€ 38,627.00
E. Rentabiliteit				
Rentabiliteit heden	TVT		IRR10 jaar	NCW10 jaar bij r: 4%
Minimum scenario kosten	9.2	Jaar	2%	€ -28,549
Midden scenario kosten	11.5	Jaar	-2%	€ -89,641.67
Maximum scenario kosten	17.2	Jaar	-9%	€ -242,373.92

Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam

Rentabiliteit bij 3x grotere prijs spreiding in dag	TVT		IRR10 jaar	NCW10 jaar bij r: 4%
Minimum scenario kosten	6.3	Jaar	9%	€ 68,927.97
Midden scenario kosten	7.9	Jaar	5%	€ 7,835.07
Maximum scenario kosten	11.9	Jaar	-3%	€ -144,897.18

Tabel 4-2 Doorrekening business case van vraagsturing met de verzameling elektrische apparaten bij het Science Park gebouwcluster.

De business case voor deze vorm van flexibiliteit is zeer ongunstig vanwege de hoge investeringskosten en de korte flexibiliteitsduur van de betreffende apparaten. De kosten van dit concept zijn zeer hoog omdat het hier gaat over een groot aantal apparaten waar per apparaat of apparaatgroep maatregelen genomen moeten worden maar waar ieder apparaat afzonderlijk slechts een klein flexibiliteitspotentieel heeft. De businesscase zou mogelijk gunstiger zijn in een toekomstscenario waar de mogelijkheid voor een slimme aansturing op afstand reeds in ieder elektrisch apparaat aanwezig was.

Gezien de korte tijdsduur van de flexibele inzetbaarheid van de betreffende apparaten zou de inzet van hun flexibiliteit op de balansmarkten mogelijk gunstiger zijn. Om bij te dragen aan nationale netstabiliteit en te handelen op de balansmarkten zijn vermogens nodig die een factor 100 groter zijn dan de beschikbare flexibiliteit op Science Park. Door pooling van verschillende locaties als Science Park zou het mogelijk kunnen zijn dergelijke flexibiliteit in te zetten op de balansmarkt.

5. Simulatiestudie vraagsturing Warmtepomp (studie 3.1)

5.1 Introductie van de casestudie

Het gebouwenbestand van de UvA/HvA bevat een groot aantal gebouwen die verwarmd worden middels een elektrische warmtepomp in eigen beheer. Tezamen komt dit neer op 10.5 MW aan opgesteld vermogen. De elektriciteitsvraag van deze warmtepompen kan verschoven en verlaagd worden door de thermische energieopslagcapaciteit van de gebouwmassa te benutten en door comforteisen en thermostaatsetpoints tijdelijk te versoepelen. De potentie van vraagsturing van elektriciteit voor ruimteverwarming zal in deze simulatie casestudie verkend worden. Aan de hand van een simulatiemodel van een onderwijsruimte, verwarmd door een warmtepomp, zullen verschillende varianten voor de aansturing van de warmtepomp worden getest.

De casestudie richt zich op de warmtepomp van het Wibauthuis (WBH) van de HvA aan de Amstelcampus. Het Wibauthuis is aangesloten op een WKO-bron die gedeeld wordt met het naastgelegen Muller-Lulofs huis (MLH) HvA gebouw. Beide gebouwen huisvesten onderwijs- en kantoorfaciliteiten van de HvA en beide gebouwen hebben een grotendeels identiek installatie concept en bouwfysische eigenschappen. In de casestudie wordt een enkele representatieve onderwijsruimte nader bekeken op de 8^e verdieping van het WBH (ruimte 8.22).



Figuur 5-1 Het Wibaut huis (WBH) case studie gebouw en de betreffende onderwijsruimte

Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam

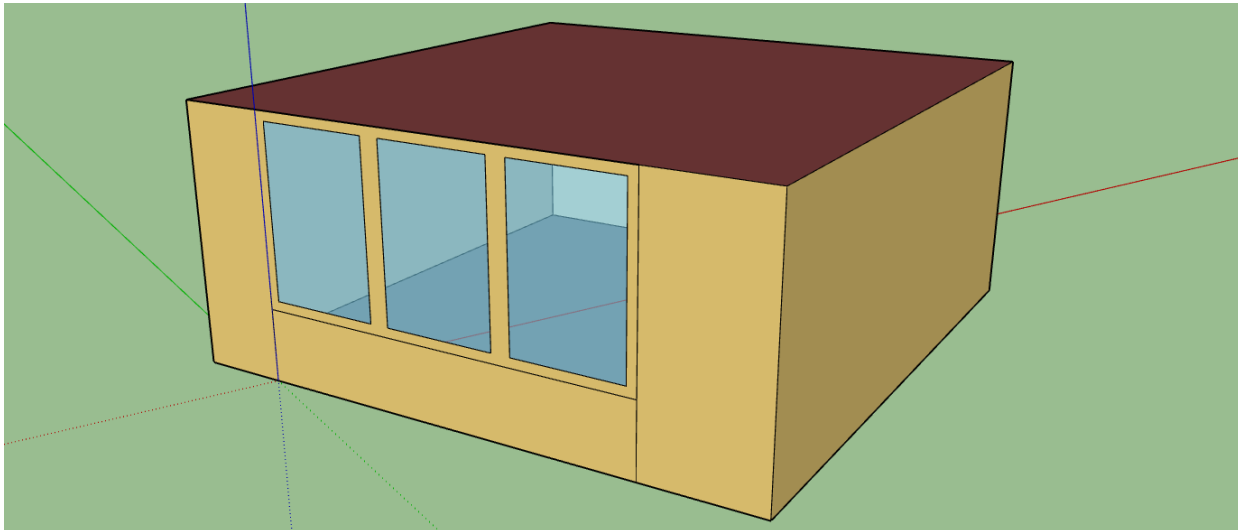
5.2 Aanpak in de casestudie

5.2.1 Het simulatiemodel

In deze simulatiestudie zal gebruik gemaakt worden van het gebouwsimulatieprogramma EnergyPlus (Crawley et al., 2001). EnergyPlus is een open-source programma voor gebouwsimulatie ontwikkeld door het Amerikaanse Department of Energy. Het programma heeft een modulaire structuur en bevat een veelvoud aan bouwfysische, installatietechnische en energiesysteem modellen. Het programma is veelvuldig gevalideerd voor bouwfysische toepassingen (Henninger & Witte, 2011, 2013). In deze studie is gebruik gemaakt van een model van een referentie kantoor dat eerder gevalideerd is binnen het IEA-SHC Task-56 project (D'Antoni et al., 2019; Magni et al., 2021). Hierbij zijn enkele aanpassingen gedaan aan het model om de gekozen onderwijsruimte beter te representeren.

5.2.2 De onderwijsruimte, aannames en invoergegevens

Figuur 5-2 toont de geometrische invoer in het simulatiemodel. Tabel 5-1 geeft een overzicht van de overige invoergegevens. In het model wordt gebruik gemaakt van gedetailleerde dynamische bouwfysische modellen en een eenvoudigere benadering van de installatietechniek (i.e.: een constante COP/EER en geen simulatie van installatie componenten).



Figuur 5-2 Geometrische invoer voor het EnergyPlus model

Geometry	Dimensions	width: 6.85m; depth: 7m; height: 3m (48 m ²)
	Facade orientation	South-West
	Window to wall ratio:	35%
Fenestration	Type:	Low-E (pos. 2) double glazing with argon cavity filling
	Glazing:	U _{gl} : 1.2 W/m ² K, U _{frame} : 1.5 W/m ² K, T _{vis} : 0.82, SHGC: 0.62, CEN Interior shading, R _{sol} : 60% on if I _{v,beam} >120W/m ²
Facade		R _c = 2.8 m ² K/W (U _{wall} = 0.353 W/m ² K)
Ceiling, walls, floor		Mixed: heavy weight floor/ceiling, lightweight interior walls
Internal gains	People:	33 (variable occupancy). 120 W/pers. 13.75 dm ³ /pers· h
	Occupancy:	Weekdays: 8:00-19:00 (2860 hours/year)
	Lighting:	10.9 W/m ² , on/off during occupancy
	Equipment:	7.0 W/m ²
HVAC and settings	Conduction model	Conduction transfer function
	Infiltration:	ACH: 0.5
	Ventilation:	Constant minimum flow during occupancy: 376 m ³ /h or 2.6 ACH Demand driven (CO ₂) variable flow with 900 ppm setpoint: max ~3.9 ACH
		Sensible heat recovery, efficiency: 65% (twin coil)
	Setpoints:	Cooling set point: 25°C, Cooling set back: 30°C Heating set point: 21°C (with 3 hour ramp), Heating set back: 18°C
	System efficiencies	COP _{heat} : 3.5 (Ground source heat pump)
P _{max;heat} : 2430 W (from VABI heat loss calculation)		
Weather		NEN 5060 Energie, Amsterdam, The Netherlands (Normalisatie-instituut, 2018)
		Day with winter conditions: 20 th January, T _{min} : -1 °C, T _{max} : 1.1 °C

Tabel 5-1 Aannames en invoergegevens

5.2.3 Versoepeling van comforteisen en thermostaat setpoints

Uit empirisch onderzoek door Loomans et al. (2018) blijkt dat gebruikers, voor korte perioden, temperatuurverschillen tussen de ruimten in een gebouw tot 2°C acceptabel vinden. Ook blijkt dat tijdens de ochtend, wanneer gebruikers nog gewend zijn aan de buitentemperatuur, het comfort van gebruikers gewaarborgd blijft wanneer de temperatuur voor 20 minuten met 1°C verlaagd wordt (Loomans et al., 2018; Papachristou et al., 2021). Voor verkeersruimten kan de temperatuur zelfs met 3°C verlaagd worden. In deze studie is aangenomen dat het setpoint in de ruimte met 1°C verlaagd worden voor 1-3 uur. Dit is dus een vrij lange duur in vergelijking tot de comfort literatuur en moet gezien worden als een indicatie van de bovenste limiet van het vraagverschuivingspotentieel.

5.2.4 Prestatie aspecten en indicatoren

In deze studie zal het effect van vraagsturing met de warmtepomp verkend worden op de energievraag, de zelfconsumptie van ingekochte hernieuwbare energie, energiekosten bij inkoop op de spotmarkt en het comfort van gebouwgebruikers. De energievraag zal gekwantificeerd worden in termen van het elektraverbruik van de warmtepomp waarbij ook gekeken wordt wanneer dit elektraverbruik optreedt en hoeveel energie er is verschoven naar de slimmere aansturing. De zelfconsumptie van ingekochte hernieuwbare energie zal worden gekwantificeerd met de OCEF-indicator (Sectie 2.3). Hierbij is het profiel van de beschikbare hernieuwbare energie, uitgaande van 70% wind en 30% zon, geschaald om op jaarbasis netto in de elektravraag van de warmtepomp te kunnen voorzien. Voor de effecten op de energiekosten zijn de uur spotprijzen uit 2021 gebruikt (ENTSO-E, 2017; Hirth et al., 2018). De effecten

Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

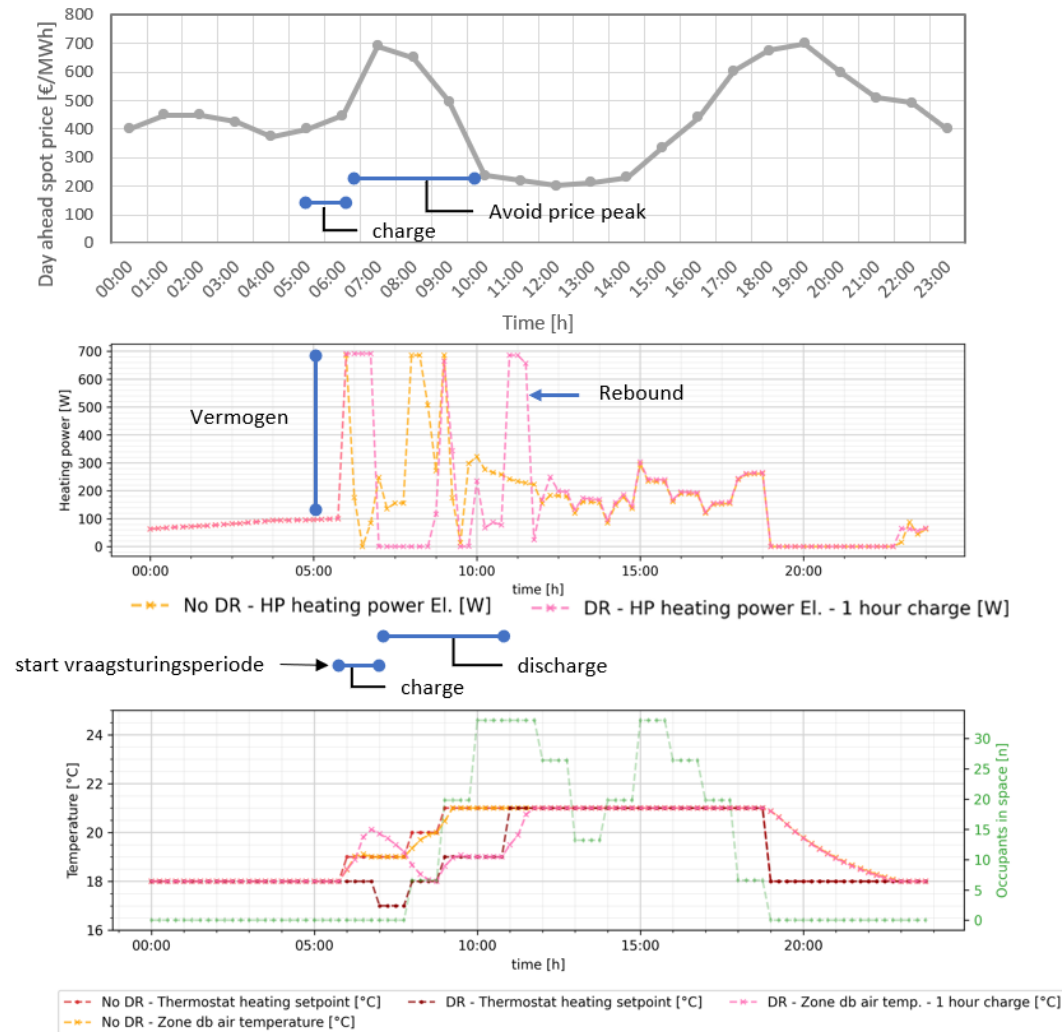
© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam

van de aansturing op het comfort van gebruikers zal gekwantificeerd worden middels het percentage van de bezette uren dat de binnentemperatuur in de ruimte lager dan 20.5°C is.

5.3 Simulatie resultaten

5.3.1 Benadering vraagsturing: simulatie van een enkel vraagsturingsevenement

Een vraagsturingsgebeurtenis wordt in deze studie benaderd volgens de aanpak die door Junker et al. (2018) ontwikkeld is binnen het IEA EBC Annex 67 project. Figuur 5-3 illustreert deze benadering voor één dag en één enkele vraagsturingsgebeurtenis aan de hand van de simulatieresultaten. Een vraagsturingscyclus bestaat uit een laad- en een ontladmoment. In aanvulling op de Annex 67 aanpak wordt in er deze studie voorafgaand aan de vraagverlaging thermische energie in de ruimte opgeslagen tijdens het laadmoment door ruimte voor te verwarmen. Tijdens het laad moment wordt het verwarmingsvermogen verhoogd en wordt er zo meer energie in de gebouwmassa opgeslagen. Vervolgens wordt tijdens het ontladingsmoment het thermostaat setpoint met 2°C verlaagd, wat zorgt voor een lagere verwarmingsvraag. Er wordt een penalty signaal (een straf signaal dat moet worden geminimaliseerd) gebruikt om te bepalen wanneer het laden en het ontladen moet worden gestart.



Figuur 5-3 Een vraagsturingscyclus. Het doel is om verbruik tijdens een prijspiek te vermijden door het gebouw eerder aan te warmen en het setpoint tijdens de piek te verlagen.

Boven: spotprijs elektriciteit als penalty signaal. **Midden:** elektriciteitsverbruik van de warmtepomp zonder- en met vraagsturing. **Onder:** Thermostaat setpoints, binnen luchttemperaturen en bezetting zonder- en met vraagsturing.

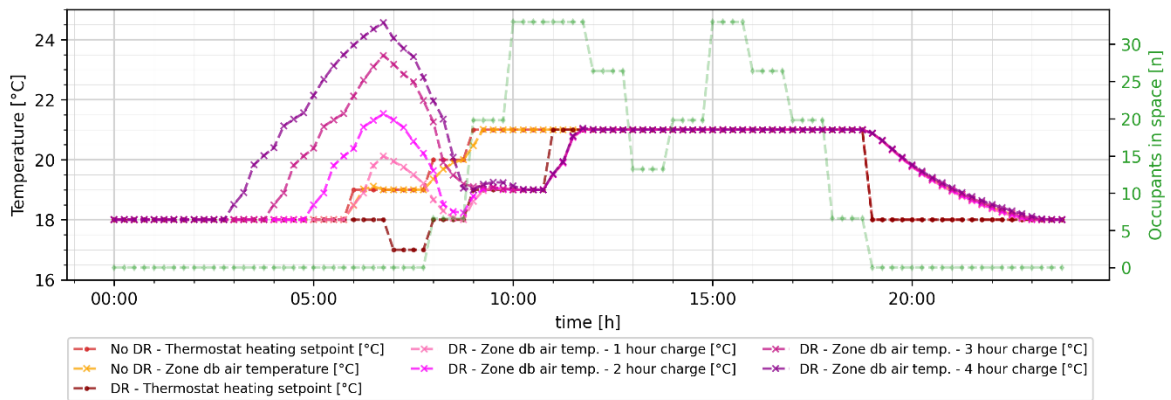
In het voorbeeld in Figuur 5-3 worden de day-ahead spotprijzen van 8-3-2022 gebruikt als penalty signaal. Het doel is om verbruik tijdens de ochtend piek (7:00 t/m 9:00) te vermijden door het gebouw eerder aan te warmen en het setpoint tijdens de piek te verlagen. Het voorbeeld toont een situatie zonder (geel) en een situatie met (roze) vraagsturing. In de vraagsturingvariant wordt er tijdens de opwarmperiode van het gebouw, wanneer de spotprijs laag is maar de ruimte nog onbezet is, al op vol vermogen aangewarmd. Vervolgens wordt vanaf 8:00 het ontlad moment ingezet waarbij het thermostaat setpoint verlaagd wordt tot 19°C. Het gevolg is dat de "heating power", dat is de elektravraag van de warmtepomp, tijdens het piek spotprijs moment tot nul wordt teruggebracht en er kosten worden vermeden. Wel is er na afloop van de vraagsturingscyclus ook een 'rebound' te zien met een verhoogd elektraverbruik later op de dag wanneer het thermostaatssetpoint weer wordt teruggezet op de oorspronkelijk waarde.

Uurmatching

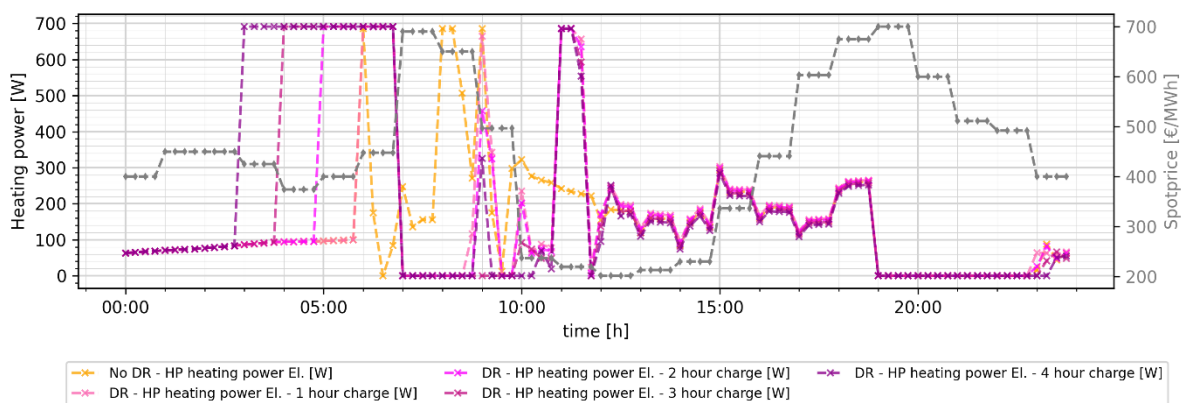
Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam

In het voorbeeld is te zien dat de vraagsturende regeling een gunstig effect heeft op de energiekosten. De mate van de besparing die optreedt hangt echter sterk af van de wijze waarop de aansturing tijdens de vraagsturingscyclus wordt ingevuld. Vooral het effect van het laadgedrag kan zowel gunstig als ongunstig uitpakken. Figuur 5-4 en Figuur 5-5 laten zien wat er gebeurt als de duur van het laden verlengd wordt naar 2, 3 of 4 uur. Te zien is dat een langere aanwarmtijd slechts in zeer beperkte mate leidt tot een verdere verlaging van de elektravraag tijdens het ontladingsmoment. Figuur 5-6 toont het effect van deze aansturingsvarianten op de totale energiekosten voor de betreffende dag. Alleen de varianten met 1 of 2 uur opladingstijd leiden tot een besparing op de energiekosten. De andere varianten met 3 tot 4 uur aanwarmtijd leiden zelfs tot hogere energiekosten. Deze resultaten laten zien dat een aansturingvraagstuk complex is. Het gunstigste moment en de mate waarin er moet worden opgeladen en ontladen is afhankelijk van de prijsprikkel, en binnen- en buitencondities en het thermische gedrag van de ruimte. Een optimale aansturing zal daarom voorspellende en prestatie wegende eigenschappen moeten hebben. Voor deze studie zijn daarom dergelijke aansturingconcepten ontwikkeld.

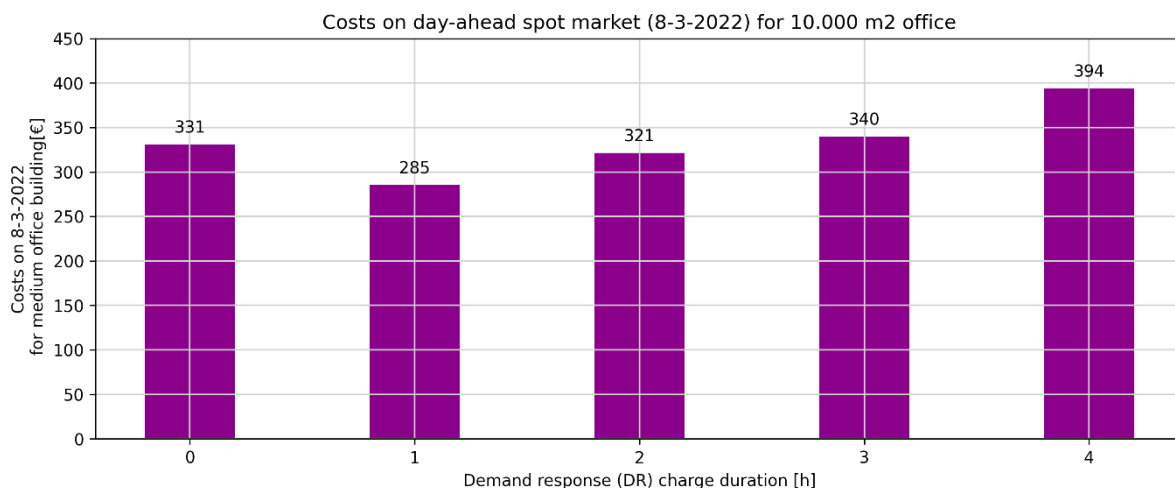


Figuur 5-4 Temperatuurverloop (geel, roze tot paars) voor verschillende vraagsturingsvarianten in relatie tot verwarmingssetpoint (oranje en donkerrood) en bezetting (groen). Vraagsturingsvarianten verschillen in termen van hoe lang de ‘oplaad’ periode duurt



Figuur 5-5 Elektriciteitsverbruik van de warmtepomp (geel, roze tot paars) voor verschillende vraagsturingsvarianten. De regeling van de vraagsturingsvarianten verschillen in termen van hoe lang de ‘laad’ periode duurt.

Uurmatching



Figuur 5-6 Boven: Totale elektriciteitskosten op de spotmarkt (8/3/2022) voor een kantoor van 10,000 m² afhankelijk van de duur van het laden in de vraagsturingscyclus. De variant met 0 uur laden betreft het referentiescenario zonder vraagsturing.

5.3.2 Aansturingsconcept en penaltyfuncties

In deze studie zullen twee voorspellende regelstrategieën getest worden: de MaxOCEF en de MinSpot regeling. Deze regelingen verschillen van elkaar in het prestatiedoel dat ze optimaliseren. De MaxOCEF is ontworpen om de mate van zelfconsumptie van beschikbare hernieuwbare energie te maximaliseren. De MinSpot regeling is ontworpen om de energiekosten op de spotmarkt te minimaliseren.

Voor beide strategieën is aangenomen dat deze een perfecte voorspelling kan maken van de toekomstige penaltysignalen en het toekomstige energieverbruik zonder vraagsturing. Deze informatie wordt gehaald uit een simulatie van het referentiescenario zonder vraagsturing. In iedere regelstrategie wordt een vraagsturingscyclus, bestaande uit een laad en een ontlad actie, ingezet zodra het penaltysignaal sterk toeneemt in de komende uren.

Anders, dan in het voorbeeld in de vorige paragraaf zal bij deze strategieën ook het maximaal vermogen dat wordt toegevoerd tijdens het laadmoment worden aangepast op wat er wenselijk is, rekening houdend met de warmtevraag en het penaltysignaal tijdens het aankomende ontladmoment. Ook wordt in deze studie het thermostaat setpoint slechts met 1°C verlaagd tijdens het ontladmoment.

De twee regelstrategieën volgen een vergelijkbare opzet maar verschillen in de logica die gehanteerd wordt om te bepalen wanneer de vraagsturingscyclus wordt ingezet en in hoeverre het maximaal vermogen moet worden beperkt tijdens het laden. Tabel toont de twee regelvarianten in pseudocode. In de MaxOCEF strategie, kijkt de regeling op ieder moment (tijdstip t) 3 uur in de toekomst ($t+f$) en wordt de vraagsturingscyclus alleen geactiveerd als de straffunctie op dat moment in de toekomst (p_{t+f}) meer dan 5 keer (f_p) hoger dan die in het heden, of als de absolute toename in de straffunctie groter is dan 0.7 (Δp_{\min}). Ook moet het energieverbruik in de toekomst in het referentiescenario (E_{t+f}) groter zijn dan 0. Wanneer de regeling besluit dat de vraagsturingscyclus geactiveerd wordt dan wordt het verwarmingsvermogen waarmee de warmtepomp gaat opladen bepaald. Hierbij wordt de deellast (part load of PL: fractie van het maximale verwarmingsvermogen) van de warmtepomp zo gekozen dat de verwarmingsenergie tijdens de oplaadperiode even groot is als de verwarmingsenergie die de regeling probeert te vermijden tijdens de ontladingsperiode in het scenario waar vraagsturing niet had plaatsgevonden.

De MinSpot strategie is grotendeels identiek aan de MaxOCEF strategie maar gebruikt de spotprijs als strafsignaal. Ook hanteert de MinSpot strategie een extra voorwaarde waaraan moet worden voldaan voordat vraagsturingscyclus ingezet wordt. Deze voorwaarde is dat de potentiële energiekosten tijdens de

Uurmatching

ontladingsperiode die de regeling tracht te vermijden lager zijn dan de kosten die worden opgelopen door het hogere elektraverbruik tijdens de mogelijke laadperiode.

Regelstrategie voor vraagsturing gericht op het maximaliseren van de zelfconsumptie van hernieuwbare energie (MaxOCEF)

if $[p_t * f_p < p_{t+f}]$ or $[(p_t - p_{t+f}) > \Delta p_{min}]$, and $[E_{t+f} > 0]$:

Start demand response event:

$$\text{Set } PL = \frac{\sum_{t+f+dch}^{t+f} E}{t_{ch;sec}} \div P_{max} \text{ for } t \text{ until } t_{ch}$$

$$\text{Set } TS_{DR} = TS - 1 \text{ for } t_{ch} \text{ until } t_{dch}$$

Waar: p_t : straffunctie op tijd t, f_p : relatieve straffunctie verschil factor (hier: 5), Δp_{min} : absolute straffunctie verschil factor (hier: 0.7),

$t+f$: tijd f uren in de toekomst van moment t (hier: 3 uur), t_{ch} : duur van het laad moment (hier: 3 uur), t_{dch} : duur van het ontlad moment (hier: 3 uur),

PL : part load factor van de warmtepomp, fractie van het maximal vermogen tijdens het laden, E : elektraverbruik van de warmtepomp in het scenario zonder vraagsturing, P_{max} : maximaal vermogen van de warmtepomp

Regelstrategie voor vraagsturing gericht op het minimaliseren van spotprijskosten (MinSpot)

if $[p_t * f_p < p_{t+f}]$ or $[(p_t - p_{t+f}) > \Delta p_{min}]$, and $[C_{t+f} > 0]$ and $[(PL * t_{ch;sec} * p_t) > C_{dch}]$:

Start demand response event:

$$\text{Set } PL = \frac{\sum_{t+f+dch}^{t+f} E}{t_{ch;sec}} \div P_{max} \text{ for } t \text{ until } t_{ch}$$

$$\text{Set } TS_{DR} = TS - 1 \text{ for } t_{ch} \text{ until } t_{dch}$$

Waar: p_t : prijs op tijd t, f_p : relatieve prijs verschil (hier: 5), Δp_{min} : absolute prijs verschil (hier: 100 €/MWh),

C_{t+f} : kosten ($p_{t+f} * E_{t+f}$) f uren in de toekomst zonder in het scenario zonder vraagsturing, C_{dch} : kosten zonder in het scenario zonder vraagsturing gedurende de potentiële ontladperiode

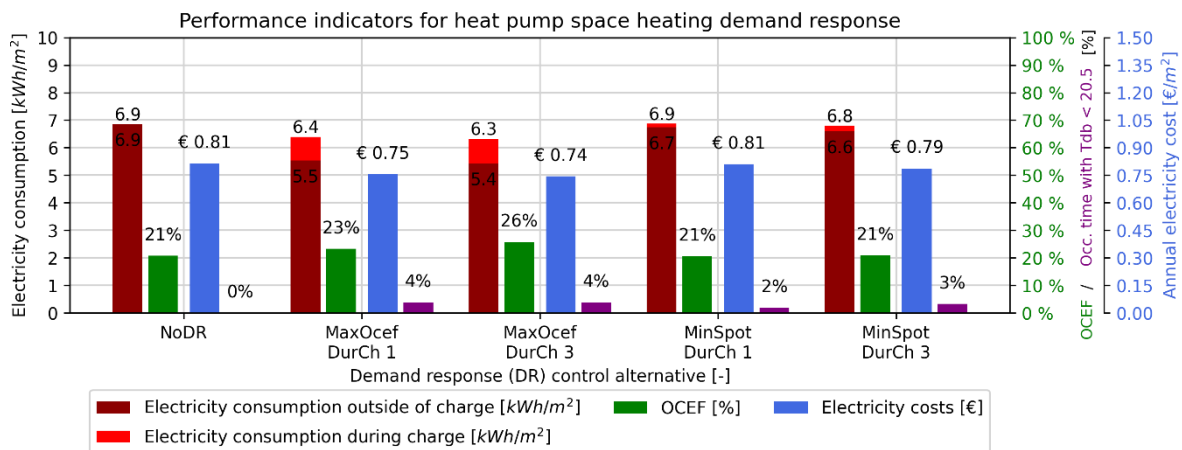
Tabel 5-2 De regelstrategieën voor vraagsturing met de warmtepomp uitgedrukt in semicode

5.3.3 Simulatie van een typisch jaar in het heden

Figuur 5-7 toont de simulatieresultaten van de verschillende warmtepomp strategieën in termen van hun effect op de prestatie indicatoren over een typisch jaar in het heden. Er zijn ook enkele variaties op de twee strategieën gesimuleerd. Het diagram toont vier regelvarianten: het referentiescenario zonder vraagsturing (NoDR), de strategie gericht op het vergroten van de uurmatching gebruikmakende van een laad periode van 1 uur (MaxOCEF DurCh 1) of een laadperiode van 3 uur (MaxOCEF DurCh 3), en uitgaande van de strategie gericht op het reduceren van spotprijskosten met dezelfde korte (MinSpot DurCh 1) en lange (MinSpot DurCh 3) laadperioden.

Het staafdiagram laat zien dat de vraagsturingstrategieën het totale elektraverbruik voor verwarmingsenergie met 0-0.6 kWh/m²y verlagen (som van alle donker en lichtrode staven). Deze 'load shedding' is een effect van het verlagen van het setpoint temperatuur tijdens de ontladingsperioden. Ook verschuiven deze strategieën 0.2-0.9 kWh/m²y aan elektraverbruik weg uit de ontladingsperioden door deze energie op te slaan in het gebouw en de binnenlucht tijdens de laadperioden (lichtrode staven). De MaxOCEF strategie leidt tot zowel meer load shedding als vraagverschuiving dan bij de MinSpot strategie. Dit komt doordat er in de MinSpot minder vaak een vraagsturingscyclus geactiveerd wordt vanwege de extra voorwaarden die in de regeling zijn opgenomen.

Uurmatching



Figuur 5-7 Effect van de verschillende vraagsturingvarianten op OCEF, energiekosten, het energieverbruik en het verschoven energieverbruik. De NoDR variant geeft de prestaties van referentiescenario zonder vraagsturing weer.

Van alle vraagsturingvarianten biedt de MaxOCEF DurChr 3 regeling de grootste verbeteringen in de benutting van ingekochte hernieuwbare energie (5% hogere OCEF) en in termen van de energiekosten voor ruimteverwarming (0.06 €/m² of 7% lagere kosten). Voor deze verbeteringen is wel een kleine afruil met comfort nodig en 4% van de bezette uren zal de binnenluchttemperatuur tussen de 20°C en 20.5°C zijn in plaats van 21°C vanwege deze vraagsturing. Alhoewel de MinSpot strategie ontworpen is om spotprijskosten te minimaliseren leidt juist de MaxOCEF strategie tot de grootste besparing op energiekosten. De verklaring hiervoor is dat marktcondities in 2021 gedurende het jaar zeer sterk veranderd zijn en de spotprijzen in de tweede helft van dit jaar veel hoger en volatieler waren dan aan het begin van 2021. De constante prijsgrenswaarden die in de MinSpot regeling worden gebruikt zijn niet erg geschikt voor het identificeren van de juiste momenten voor een vraagsturingscyclus onder dergelijke marktontwikkelingen. De MaxOCEF regeling presteert beter hierin omdat deze alleen reageert op de beschikbare hernieuwbare elektriciteit op het net. Doordat deze factor ook van invloed is op de spotprijzen maar niet van marktontwikkelingen presteert deze regeling beter in dit jaar.

5.4 Discussie en conclusies betreft technisch potentieel

Het technisch potentieel van vraagsturing met de warmtepomp is substantieel. In deze studie kon 9% van de totale warmtevraag vermeden worden tijdens ongunstige momenten en kon 13% van de warmtevraag verschoven worden naar een eerder tijdstip met gunstigere markt of net omstandigheden. In totaal kon dus 22% van het totale elektraverbruik voor ruimteverwarming tijdens ongunstige momenten vermeden worden voor slechts een kleine afruil met thermisch comfort vanwege iets lagere binnenluchttemperaturen (20°C i.p.v. 21°C). Dit potentieel om de vraag te beheersen vertaalt zich echter niet geheel in een grotere mate van uurmatching en de zelfconsumptie van ingekochte hernieuwbare energie nam slechts met 5% toe. De verklaring hiervoor is dat ook in deze casestudie een groot deel van de mismatch tussen de elektravraag en het hernieuwbare aanbod plaatsvindt op momenten waar met vraagsturing geen invloed op kan worden uitgeoefend. Zo is het niet mogelijk om met deze vorm van vraagsturing de verwarmingsvraag tijdens de nacht (Figuur 5-5) te beïnvloeden. Vraagsturing met de warmtepomp lijkt wel een substantieel verschil te kunnen maken in de totale kosten van de ingekochte energie op de spotmarkt en leidde in deze casestudie tot een besparing van 9%.

Uurmatching

In de interpretatie van deze conclusies moeten de beperkingen van deze studie overwogen worden. In deze studie is slechts gebruik gemaakt van een kleine verlaging van het thermostaat setpoint. De verwachting is dat het technisch potentieel groter is wanneer de comforteisen verder worden versoepeld. Hierbij moet echter ook het gedrag, de beleving en de productiviteit van gebruikers in overweging genomen worden. Onbekend is in welke mate gebruikers lokale setpoint temperaturen kunnen en zullen aanpassen. Ook zullen eventuele kostenbesparing snel te niet gedaan worden als vraagsturing leidt tot klachten of een lagere productiviteit van werknemers.

Deze studie betreft slechts een evaluatie van een enkele kantoorruimte in (a) een goed geïsoleerd gebouw, (b) een zware constructiemethode en met (c) lucht als afgifte medium. Bekend is dat deze bouwfysische en installatietechnische eigenschappen een grote invloed hebben op de mate van thermische energieopslag die mogelijk is in een gebouw. Een goede isolatie en zware constructiemethode zijn in dit geval gunstig voor het flexibiliteitspotentieel. Lucht als afgifte medium is echter ongunstig en de verwachting is dat systemen waar afgifte dicht op de gebouwmassa zit een groter flexibiliteitspotentieel hebben (bijvoorbeeld: vloerverwarming of betonkern activering).

Ook de beperkingen van de aansturingsstrategie zijn van invloed op de inschatting van het potentieel. De aanname dat toekomstige buitencondities perfect bekend zijn is optimistisch. De ontwikkelde regeling moet echter gezien worden als een heuristiek die gebruik maakt van vuistregels en aannames die blijkaar werken in deze casestudie maar niet generiek of optimaal zijn. In sectie 6 zal een aanzet gedaan worden om tot een gunstiger regelconcept te komen voor vervolgonderzoek.

Een laatste beperking van deze studie is dat de installaties zeer vereenvoudigd zijn benaderd. Zo is er een constante COP-voor verwarming aangenomen. In werkelijkheid is de COP medeafhankelijk van de aanvoertemperatuur en kan ook de thermische inertie die aanwezig is in de installaties benut worden.

Het potentieel om energie te kunnen verschuiven dat gevonden wordt in deze studie (1.4 kWh/m^2) is groter dan in de eerdere vergelijkbare studie (0.34 kWh/m^2) door (Papachristou et al., 2021). Een verschil is dat er in deze studie een heel jaar gesimuleerd is waar er in de eerdere studie gekeken is naar twee representatieve dagen. In de eerdere studie is echter weer gekeken naar een volledig kantoorgebouw, inclusief ruimten met een groter warmteverlies.

Om vraagsturing met een warmtepomp te realiseren zullen enkele technische en organisatorische maatregelen genomen moeten worden. De omvang van deze maatregelen hangen sterk af van de situatie in het betreffende gebouw. De minste maatregelen zullen nodig zijn als er:

- (i) Recent een commissieeringsproces is doorlopen waar de installaties zijn ingeregeld,
- (ii) Een gebouwbeheersysteem (GBS) aanwezig is dat mogelijkheden biedt om:
 - a. Externe signalen te ontvangen
 - b. Complexere aansturingconcepten in te programmeren of te ontvangen
 - c. De warmtepomp kan aansturen (bijv: start/stop, stooklijn, etc) op basis van een in te programmeren regelaar.
 - d. Lokale setpoints te overschrijven en het gedrag van eindapparaten te beheersen.
 - e. Sensoren te gebruiken in het regelconcept die lokale ruimtetemperaturen, condities van eindapparatuur en lokale buitencondities meten.
- (iii) Voldoende kennis en documentatie aanwezig is betreft de installaties en bouwfysische eigenschappen van het gebouw.

Bij gebouwen die niet aan het bovenstaande voldoen zullen er aanvullende technische maatregelen genomen moeten worden voordat een vraagsturende regeling geïmplementeerd zal kunnen worden. Ook zal het technisch potentieel dan mogelijk lager liggen dat gepresenteerd is in deze studie.

Uurmatching

5.5 Conclusies betreft economisch potentieel

5.5.1 Benadering en aannames betreft kosten en baten

Of het technisch potentieel van vraagsturing te vertalen is in een succesvolle business case voor de gebouwbeheerder hangt af van de kosten van deze maatregel en de toekomstige marktomstandigheden. In deze paragraaf zullen daarom verschillende scenario's worden doorgerekend (Tabel 5-3) voor een gebouw van de grote van ongeveer WBH vanuit het perspectief van een gebouwbeheerder die tevens gebouwgebruiker en eigenaar is en energie inkoop tegen spotmarkt tarieven. Omdat de kosten voor de implementatie van een vraagsturende aansturing sterk afhangen van de technische en organisatorische situatie zullen er in drie verschillende kosten scenario's worden gehanteerd (Zie A. in Tabel 5-3). Het laagste kosten scenario gaat uit van de situatie zoals omschreven in de vorige paragraaf. Het hoogste kosten scenario gaat uit van verregaande re-commissioning van de installatie en de installatie van nieuwe sensoren en communicatiemogelijkheden in het GBS. De kosten zijn gebaseerd op informatie uit internationale studies naar eerdere projecten en gesprekken met Nederlandse partijen die vergelijkbare systemen en diensten aanbieden of hebben aangeschaft (Crowe et al., 2020; Jean et al., 2008; Wilkinson, 2000). De jaarlijkse energiekosten zonder- (B) en met vraagsturing (C) komen uit de simulatiestudie. Onder de jaarlijkse kosten van vraagsturing worden ook de abonnementskosten ingeschat waar aspecten geleverde ICT-diensten voor het communiceren van prijsprikkels, weersvoorspellingen en slimme GBS-functionaliteiten onder vallen. Deze zijn gebaseerd op openbare informatie van een aanbieder van dergelijke diensten (Höning, 2023) uitgaande van een pilot schaal en uitgaande van dat er naast de warmtepomp meerdere van dergelijke flexibele assets worden aangestuurd door dezelfde organisatie.

De commissioningsactiviteiten die nodig zijn voor het realiseren van vraagsturing leiden in het algemeen ook tot een efficiënter werkende installaties en tot een energiebesparing die nu niet is meegenomen in de simulatiestudie. Voor de baten berekening is literatuur geraadpleegd betreft de verwachte omvang van deze besparing en zal worden aangenomen dat 10% extra besparing mogelijk is (Crowe et al., 2020; Jean et al., 2008; Wilkinson, 2000). Deze besparing strookt ook met de ervaringen van een geïnterviewde gebouwbeheerder die recentelijk een smart building GBS-product heeft afgenomen en de nodige commissioningsactiviteiten heeft laten uitvoeren.

In de simulatiestudie zijn spotprijzen uit 2021 gebruikt. In het recente heden zijn spotprijzen hoger geweest en is er sprake van een grotere spreiding van spotprijzen binnen een dag. Het is aannemelijk dat deze situatie ook representatief is voor de toekomst. Daarom wordt hier een extra scenario doorgerekend (D) waar wordt aangenomen dat de kostenbesparing voor ingekochte energie driemaal groter is als volgt uit simulatiestudie. Dit zou betekenen dat het gemiddelde prijsverschil tussen de 'laad' en de 'ontlaad' momenten meer dan drie keer groter moet zijn dan in 2021 het geval was en is representatief voor zeer volatiele prijsfluctuaties over een dag.

5.5.2 Business case

De financiële beschouwing (Tabel E) laat zien dat onder de recente marktomstandigheden van 2021 de investering in vraagsturing met de warmtepomp alleen gunstig is in het minimum kostenscenario waar investering een TVT van 5 jaar heeft en de IRR 15% is. Onder deze marktomstandigheden is een investering in een vraagsturende aansturing dus alleen aantrekkelijk als dit kan zonder verregaande commissioningsactiviteiten, investering in nieuwe hardware en als het bestaande GBS relatief makkelijk uitgebreid kan worden met nieuwe functionaliteiten. Als er niet aan deze voorwaarden wordt voldaan is de maatregelen financieel verlieslijdend gezien over 10 jaar (negatieve IRR en NCW).

De financiële beschouwing (Tabel E) onder energiemarktomstandigheden met een grotere spreiding in spotmarktprijzen geeft een andere uitkomst. Onder die omstandigheden is de investering zeer rendabel in zowel het minimale (TVT 2 jaar en IRR 68%) als het midden kosten scenario (TVT 4 jaar en IRR 19%).

Uurmatching

Ook bij hoge investeringskosten is de financiële uitkomst nog positief (TVT 7 jaar en IRR 7%) maar mogelijk niet aantrekkelijk genoeg in relatie tot alternatieve investeringsmogelijkheden.

A. Eenmalige kosten commissioning					
Minimum kosten scenario	48000	m ²	-0.50	€/m ²	€ 24,000.00 -
Midden kosten scenario	48000	m ²	-1.47	€/m ²	€ 70,537.95 -
Maximum kosten scenario	48000	m ²	-2.44	€/m ²	€ 117,075.90 -
B. Jaarlijkse kosten zonder vraagsturing					
Energiekosten zonder vraagsturing	48000	m ²	-0.81	€/m ²	€ 38,880.00 -
C. Jaarlijkse kosten incl. besparing met vraagsturing, huidige omstandigheden					
Aansturing license fee	48000	m ²	0.05	€/m ²	€ 2,400.00
Energiekosten met vraagsturing	48000	m ²	-0.74	€/m ²	
Besparing door commissioning excl. vraagsturing	10%		0.08	€/m ²	
Energiekosten met vraagsturing incl. besparing commissioning	48000	m ²	-0.66	€/m ²	€ 31,632.00 -
Netto besparing per vraagsturing en comissioning					€ 4,848.00
D. Jaarlijkse kosten incl. besparing met vraagsturing, bij 3x grotere prijs spreiding in dag					
Aansturing license fee	48000	m ²	0.05	€/m ²	€ 2,400.00
Energiekosten met vraagsturing bij 3x grotere prijs spreiding in dag	48000	m ²	-0.52	€/m ²	€ 24,912.00 -
Besparing per vraagsturing en comissioning bij 3x grotere prijs spreiding in dag					€ 16,368.00
E. Rentabiliteit					
Rentabiliteit heden	TVT		IRR10 jaar		NCW10 jaar bij r: 4%
Minimum kosten scenario	5.0	Jaar	15%		€ 15,322.00
Midden kosten scenario	14.5	Jaar	-6%		€ 31,216.33 -
Maximum kosten scenario	24.1	Jaar	-13%		€ 77,754.28 -
Rentabiliteit bij 3x grotere prijs spreiding in dag					
Rentabiliteit heden	TVT		IRR10 jaar		NCW10 jaar bij r: 4%
Minimum kosten scenario	1.5	Jaar	68%		€ 108,759.14
Midden kosten scenario	4.3	Jaar	19%		€ 62,221.19
Maximum kosten scenario	7.2	Jaar	7%		€ 15,683.24

Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

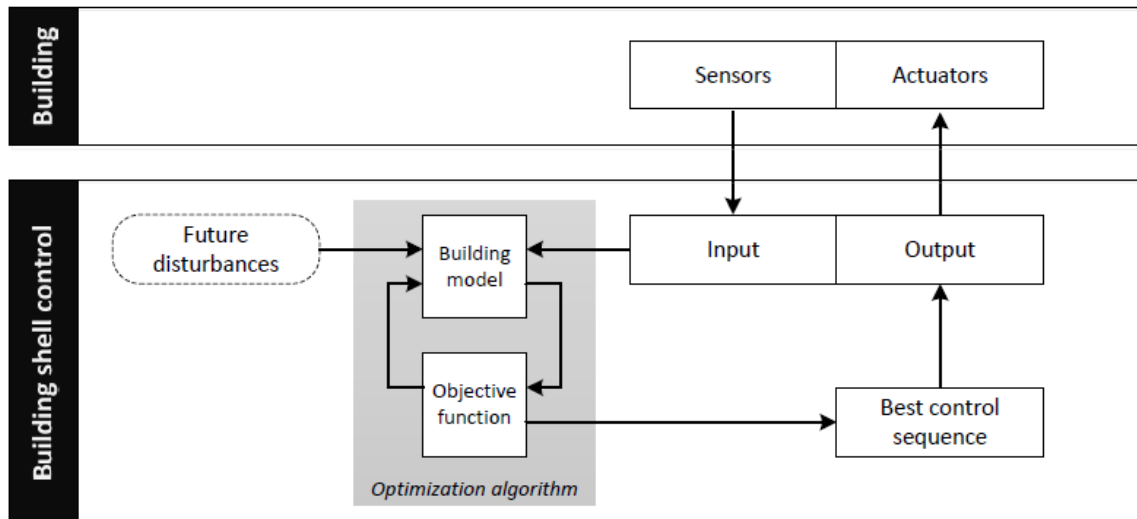
© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam

6. Simulatiestudie MPC-concept voor vraagsturing van Warmtepomp (studie 3.2)

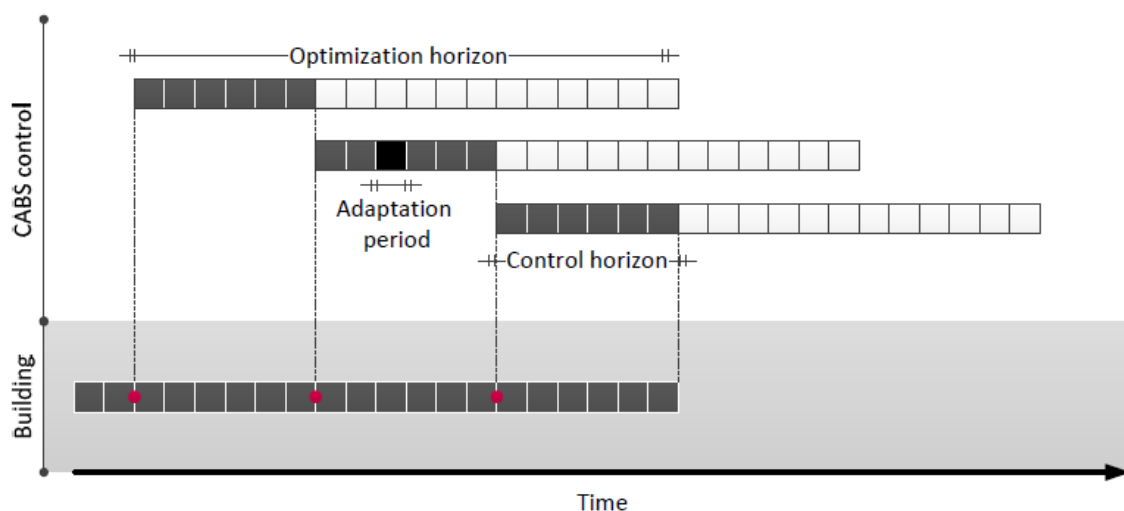
6.1 Introductie van de casestudie

De aansturingsstrategie die bij de warmtepomp studie in hoofdstuk 5 gebruikt werd was gebaseerd op een heuristiek die speciaal voor die casestudie en de betreffende ruimte bedacht was. Ook is bij die regelstrategie aangenomen dat deze een perfecte voorspelling kan maken van de toekomstige penaltysignalen en het toekomstige energieverbruik zonder vraagsturing. Deze informatie wordt daar gehaald uit een simulatie van het referentiescenario zonder vraagsturing.

In werkelijkheid is zulke informatie niet zonder meer beschikbaar binnen een GBS. Deze regeling kan dan ook niet makkelijk geïmplementeerd en opgeschaald worden in echte gebouwen. Ook onderschat de regeling mogelijk het potentieel van vraagsturing omdat het regelconcept niet perfect is. Een vraagsturende regeling zou in werkelijkheid mogelijk bereikt kunnen worden middels een modelgebaseerde regelaar, in de literatuur ook wel Model Predictive Control genoemd (Coffey, 2013; Loonen & Hensen, 2018; Oldewurtel et al., 2012). In dit hoofdstuk zal een eerste aanzet gedaan worden voor de ontwikkeling van een dergelijk MPC-concept voor de aansturing van een warmtepomp. Figuur 6-1 geeft een conceptuele weergave van een MPC in een praktijksituatie. Meetdata van sensoren in een echt gebouw worden gebruikt als invoer voor een model van het gebouw in de regelaar. Dit model voorspelt hoe het gebouw zich zou gedragen ten gevolge van een grote variatie aan mogelijk regelsequenties. Een slim algoritme roept dit model op met een reeks regelsequenties, weegt de prestaties van iedere variant en zoekt de meest gunstige sequentie. Die sequentie wordt vervolgens geïmplementeerd. Deze regelkring wordt periodiek herhaald met een verschuivende optimalisatie horizon Figuur 6-2 om zo de invloed van voorspellingsfouten zo klein mogelijk te houden. Daarbij wordt er bijvoorbeeld voor 2 dagen een voorspelling gemaakt en een optimale regeling geselecteerd. Slechts 1 dag van deze sequentie wordt echter geïmplementeerd en hetzelfde proces wordt aan het einde van dag 1 herhaald.



Figuur 6-1 Conceptuele weergave van een MPC. Sensoren in het echte gebouw meten data die gebruikt wordt als invoer voor een model in de regelaar. Een slim algoritme roept dit model op, weegt de prestaties van iedere variant en zoekt de meest gunstige regelsequentie. Afbeelding uit: (Loonen & Hensen, 2018)



Figuur 6-2 Verschuivende optimalisatie horizon van de MPC. Afbeelding uit: (Loonen & Hensen, 2018)

In deze studie zal de potentie van dit concept verkend worden voor de warmtepomp en de ruimte uit hoofdstuk 5. De afgelopen jaren zijn er onvoldoende gegevens gelogd uit het GBS van het Wibauthuis om gemeten data te gebruiken om de MPC te trainen. Daarom zal dit concept verkend worden een in een simulatiestudie. Daarbij worden simulatiemodellen gebruikt voor het zowel het gebouw ('Building' in Figuur 6-1) als voor het model van dit gebouw in de regelaar ('Building model' in Figuur 6-1).

6.2 Aanpak in de casestudie

6.2.1 Het simulatiemodel

Deze studie richt zich op dezelfde onderwijsruimte in het WBH als die onderzocht werd in hoofdstuk 5. Ook wordt er gebruikt gemaakt van hetzelfde EnergyPlus simulatiemodel. Dit model vertegenwoordigt het 'echte' gebouw ('Building' in Figuur 6-1). Dit EnergyPlus model betreft zeer gedetailleerd simulatiemodel dat gepaard gaat met lange simulatietijden. In de MPC-benadering zal het gebouw model binnen de

Uurmatching

regelaar ('Building model' in Figuur 6-1) zeer vaak aangeroepen moeten worden. Het is niet mogelijk om hiervoor het gedetailleerde EnergyPlus model te gebruiken.

6.2.2 Het LSTM Neuraal Netwerk gebouw model

Binnen de regelaar wordt een Long Short-term Memory (LSTM) neuraal netwerkmodel gebruikt dat een kortere simulatietijd biedt (Hochreiter & Schmidhuber, 1997). Een neuraal netwerk is een reeks met elkaar verbonden wiskundige functies (nodes) die tezamen een netwerk vormen analoog aan biologische neurale netwerken in de hersenen. Deze netwerken worden getraind op dataset en verbinden een reeks voorspellende invoervariabelen aan voorspelde uitvoervariabelen. Door een dergelijk model te trainen op simulatie-invoergegevens en simulatieresultaten kan een gebouwmodel verkregen worden waarmee binnluchttemperaturen en het elektraverbruik van een warmtepomp voorspelt kan worden. Het thermisch gedrag van een gebouw is zeer dynamisch, dat wil zeggen: de binnenluchttemperatuur en het elektraverbruik worden in sterke mate bepaald door de thermische geschiedenis van het gebouw. Om dit gedrag goed te kunnen voorspellen wordt gebruik gemaakt van een Long Short-term Memory Neuraal Netwerk. Dit type Neuraal Netwerk biedt de mogelijkheid om sequenties aan voorspellende variabelen te gebruiken alsook sequenties aan uitvoer data te voorspellen en daarbij gebruik te maken van de relatie tussen achtereenvolgende datapunten. Het LSTM-model zal dus steeds een sequentie aan voorspellende invoer datapunten gebruiken om een sequentie aan uitvoer datapunten te voorspellen. Het LSTM-gebouwmodel zal getraind worden op uitvoergegevens van EnergyPlus simulaties. Er zullen meerdere EnergyPlus simulaties uitgevoerd om een grote variatie aan regelacties, buitencondities en resulterende binnen condities te verkrijgen. Het LSTM-model zal getraind worden met de binnenluchttemperatuur en het elektraverbruik als de te voorspellen uitvoervariabelen en met de volgende verklarende invoervariabelen:

- temp_out : De buitenluchttemperatuur ieder kwartier in de komende 2 dagen [°C]
- temp_set : De thermostaatsetpoint temperatuur ieder kwartier in de komende 2 dagen [°C]
- occ : De bezetting van de ruimte ieder kwartier in de komende 2 dagen [aantal personen]
- irr : Globale verticale instraling op de gevel ieder kwartier in de komende 2 dagen [W/m²]
- FanEn : Elektraverbruik van aanvoer ventilator ieder kwartier in de komende 2 dagen [W]
- EquipEn : Elektraverbruik van elektrische apparaten ieder kwartier in de komende 2 dagen [W]
- temp_192 : De binnenluchttemperatuur ieder kwartier in de afgelopen 2 dagen [°C]
- temp_last : De laatste binnenluchttemperatuur voorafgaand aan de start van het voorspellingsraam [°C]. Deze waarde is gelijk voor iedere tijdstap in het voorspelingsraam.

In deze studie zullen deze verklarende variabelen afkomstig zijn uit de simulaties met het EnergyPlus model. In de toepassing van het LSTM-model in een werkelijke regelaar zouden deze variabelen gemeten en voorspeld moeten worden in het echte gebouw. Het LSTM-model wordt getraind met sets van datapunten bestaande uit data voor de aankomende 2 dagen. De variabelen temp_192 en temp_last betreffen data uit de afgelopen 2 dagen en geven informatie over de thermische geschiedenis van het gebouw.

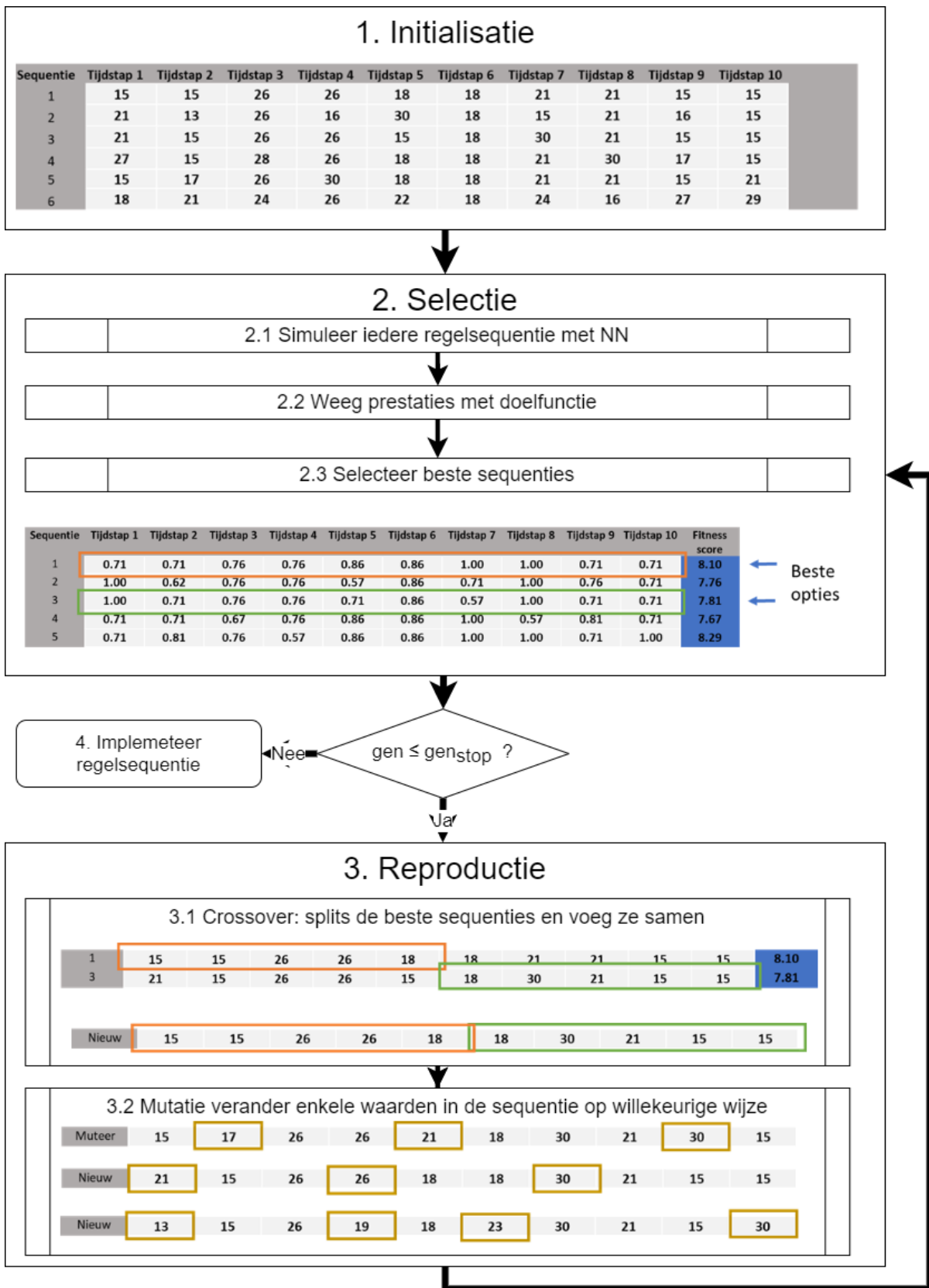
6.2.3 Optimalisatie met een genetisch algoritme

Als optimalisatie algoritme zal een genetisch algoritme (GA) gebruikt worden (O'Neill, 2009). Dit genetisch algoritme zal binnen de regelaar verschillende mogelijke regelsequenties genereren, deze evalueren met het gebouwmodel en de meest gunstige regelsequentie uitkiezen. In deze studie zal het genetisch algoritme iedere dag om 00:00 worden aangeroepen. Het algoritme zal dan voor de komende 48 uur het thermostaat setpoint van de ruimte optimaliseren. Hierbij zoekt het algoritme naar de meest gunstige sequentie van kwartierwaarden van het thermostaat setpoint voor de komende 48 uur in termen

Uurmatching

van thermisch comfort en kosten bij inkoop op de spotprijsmarkt. Hiertoe doorloopt het algoritme de volgende stappen (Figuur 6-3):

1. Initialisatie: Er wordt een reeks initiële regelsequenties van thermostaatsetpoints gegenereerd. Deze regelsequenties bestaan uit reeksen van thermostaatsetpoints voor ieder kwartier die willekeurig worden gekozen uit mogelijke setpoints tussen 15 en 30°C afgerond op hele graden.
2. Selectie: Voor iedere regelsequentie worden de binnenluchttemperatuur en het elektraverbruik van de warmtepomp gesimuleerd met het gebouwmodel. Met deze simulatieresultaten worden de energiekosten en de comfortprestaties van iedere variant berekend en met elkaar gewogen aan de hand van doelfuncties. Hieruit volgt een score voor ieder tijdstip die gesommeerd kan worden naar een enkele waarde die uitdrukt hoe goed de regelsequentie presteert. Vervolgens worden de beste sequenties geselecteerd.
3. Reproductie: Aan de hand van de beste regelsequenties worden nieuwe sequenties gedefinieerd middels reproductie en mutatie. Bij reproductie vindt er een 'crossover' plaats waarbij één deel van de ene sequentie wordt samengevoegd met het aanvullende deel van de andere sequentie. Vervolgens wordt deze sequentie 'gemuteerd' door willekeurig enkele waarden in de sequentie te wijzigen. Met deze nieuwe sequenties vormen een nieuwe generatie en het selectieproces wordt herhaald tot het maximaal ingestelde aantal generaties is bereikt. Dan wordt de op dat moment meest gunstige regelsequentie geïmplementeerd en de regelaar.



Figuur 6-3 Schematisch overzicht van het genetisch algoritme

Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam

6.2.4 De doelfunctie voor thermisch comfort en minimale spotprijskosten

In de optimalisatie wordt een doelfunctie gebruikt (vergelijking 7) die de comfortprestaties in termen van de binnenluchttemperatuur en de energieprestaties in termen van energiekosten met elkaar afweegt en omrekent naar één enkele waarde die gemaximaliseerd kan worden.

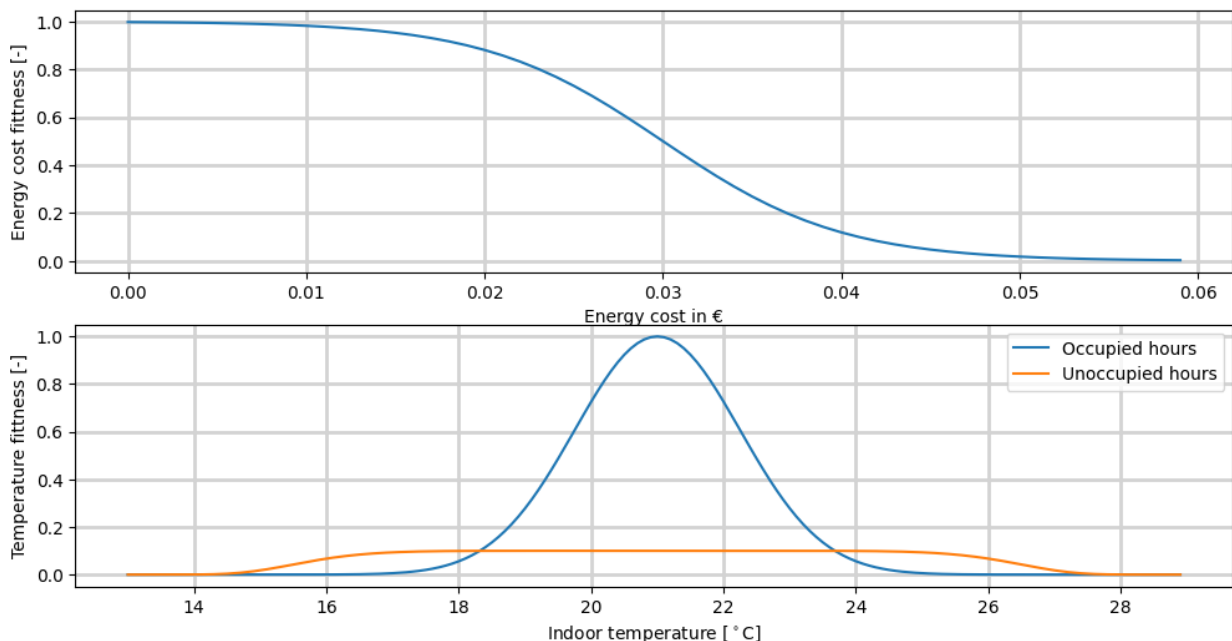
$$f(T, C) = w_T f(T) + w_C f(C) \quad (7)$$

Totale doelfunctie voor de weging van de binnenluchttemperatuur en energiekosten

Waar: $f(T)$ = doelfunctie voor de binnenluchttemperatuur, $f(C)$ = doelfunctie voor energiekosten.

$$W_T = 0.5, W_C = 0.5$$

Deze doelfunctie maakt gebruik van twee afzonderlijke doelfuncties en prestatiescores voor energiekosten en de binnenluchttemperatuur die getoond worden in Figuur 6-4. Vergelijking 8 en Figuur 6-4 tonen de doelfunctie die gebruikt wordt om de comfortprestaties in termen van de binnenluchttemperatuur te beoordelen. Deze doelfunctie zet de gesimuleerde binnenluchttemperatuur om in een signaal dat varieert tussen de 0 en de 1 waarbij een waarde van 1 de meest gunstige waarde vertegenwoordigt. De functie is maximaal bij een binnenluchttemperatuur van 21 °C en wordt lager wanneer het in de ruimte kouder of warmer is. Tijdens onbezette uren is thermisch comfort van een minder groot belang. Tijdens deze uren worden andere functieparameters gebruikt om een groter bereik aan acceptabele temperaturen te verkrijgen. Ook is functie zo geschaald dat de maximum score lager ligt (0.1) waardoor het beperken van energiekosten meer nadruk zal krijgen tijdens onbezette uren. Vergelijking 9 en Figuur 6-4 tonen de doelfunctie die gebruikt wordt om de energiekosten op een bepaalde tijdstap om te rekenen naar de betreffende prestatiescore. De functie is maximaal wanneer de energiekosten 0 zijn en daalt bij hogere energiekosten.



Figuur 6-4 Doelfuncties die gebruikt worden om comfort en energiekosten om te rekenen tot een enkele doelwaarde die gemaximaliseerd moet worden. Boven: doelfunctie voor energiekosten. Onder: doelfunctie voor de binnenluchttemperatuur tijdens bezette (blauw) en onbezette (oranje) uren.

Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam

$$f(T) = a \cdot e^{\frac{(T-b)^2}{2c^2}} \quad (8)$$

Doelfunctie voor weging van de binnenluchttemperatuur.

Waar: T: binnenluchttemperatuur [°C]

Tijdens bezette uren: a = 1, b = 21 [°C], c = 1.25

Tijdens onbezette uren: a = 0.1, b = 21 [°C], c = 700

$$f(C) = \frac{L}{1 + e^{-k(C-M)}} \quad (9)$$

Doelfunctie voor weging van de energiekosten.

Waar: C: energiekosten op één tijdstap [€]

L = 1, M = 0.03, k = -200

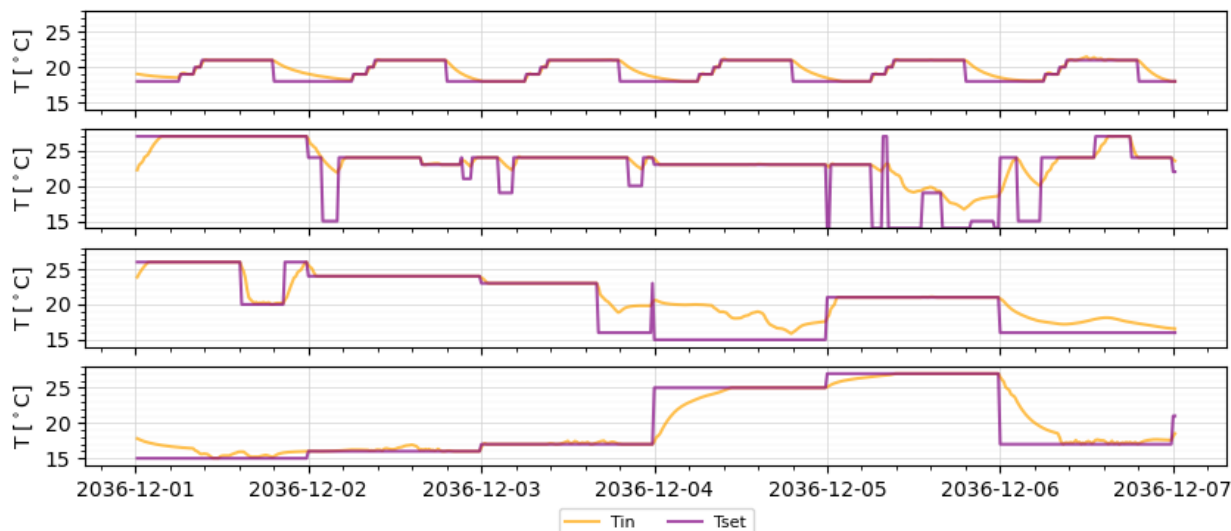
6.3 Simulatie resultaten

6.3.1 Het voorbereiden van de trainingsdata

In tegenstelling tot een fysisch model is een LSTM-model minder goed in staat om accurate voorspellingen te doen van condities die niet voorkwamen in de trainingsdata. Uit de eerdere warmtepomp studie werd duidelijk dat in een succesvolle vraagsturende regeling de ruimte eerder zal worden aangewarmd om vervolgens het setpoint te verlagen. Ook werd duidelijk dat de duur en het vermogen tijdens deze laad- en ontlad momenten van belang is. Het LSTM-model zal dus het effect van plotselinge sprongen naar verschillende thermostaat setpoint moeten kunnen voorspellen, alsook het effect van constante thermostaat setpoints van verschillende duur. Voor het trainen van de het model is daarom een dataset voorbereid met een grote variatie aan dat soort condities. In deze dataset kan het setpoint variëren tussen de 14 en 28°C in gehele getallen. De dataset wordt van boven naar onder geïllustreerd in Figuur 6-5 en bevat de volgende subgroepen:

- A. 1 jaar aan simulatieoutput van het referentiescenario (de bovenste grafiek in Figuur 6-5).
 - i. De eerste helft van dit jaar (januari t/m juni) zal worden gebruikt als test data en niet worden opgenomen in de trainingsdata
 - ii. De twee helft van dit jaar (januari t/m juni) zal wel worden gebruikt als trainingsdata en niet worden opgenomen in de testdata
- B. 5 jaar aan data met kortdurende sprongen. Voor iedere dag wordt een willekeurige basis setpoint gekozen uit de reeks tussen 14 en 28°C. Vervolgens wordt voor iedere dag een willekeurig aantal verstoringen op dit setpoint gekozen, variërend van 0 t/m 5 verstoringen. De duur van iedere verstoring wordt willekeurig gekozen tussen de 1 en de 30 tijdstappen (0.25-7.5 uur). Tot slot wordt de temperatuur willekeurig gekozen uit de toegestane variatie.
- C. 5 jaar aan data met langer durende sprongen. In deze variant worden 0-2 verstoringen per dag gekozen waarbij de duur van een verstoring tussen de 12 en 80 tijdstappen is (3-20 uur).
- D. 5 jaar aan data met constante dag temperaturen. De temperatuur wordt op iedere dag willekeurig gekozen maar veranderd niet binnen een dag.

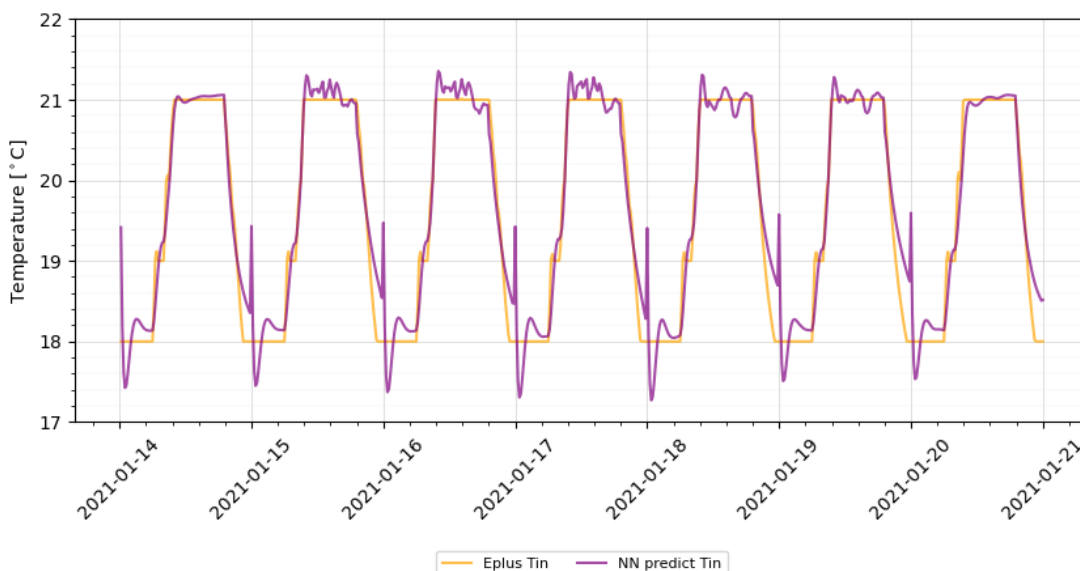
In het trainen van het LSTM-model is deze dataset opgedeeld in delen van twee achtereenvolgende dagen die het voorspellingsraam van het model vormen. Ook zijn bij het trainen alleen wintermaanden met een aanzienlijke warmtevraag en zonder actieve koeling meegenomen (november t/m maart voor deze ruimte).



Figuur 6-5 Het setpoint (paars) en de binnentemperatuur (oranje) over een week voor iedere subgroep in de trainingsdata.

6.3.2 Trainen en testen van het LSTM-gebouw model

Het LSTM-gebouwmodel is getraind op basis van de dataset omschreven onder A-II t/m D. De dataset beschreven onder A-I zal worden gebruikt om de kwaliteit van het LSTM-model te testen. Figuur 6-6 toont voorspellingen van de binnenluchttemperatuur met de testdataset met de aansturing zoals in het referentie scenario. De grafiek laat een grote overeenstemming tussen de twee modellen zien. Wel zijn er afwijkingen te zien tijdens de nacht wanneer het gebouw niet verwarmd wordt en het gebouw afkoelt naar het nachtsetpoint. Ook lijkt het model moeite te hebben met de het overgangsmoment tussen de aaneengesloten voorspellingsramen dat plaatsvindt om 00:00. Op de momenten vindt er een kortstondige temperatuursprong plaats die leidt tot een voorspellingsfout van ongeveer 1°C. Dit moment is echter maar van korte duur en is ook niet maatgevend voor de beoordeling van de comfortprestaties omdat er op dat moment geen gebruikers in de ruimte aanwezig zijn.



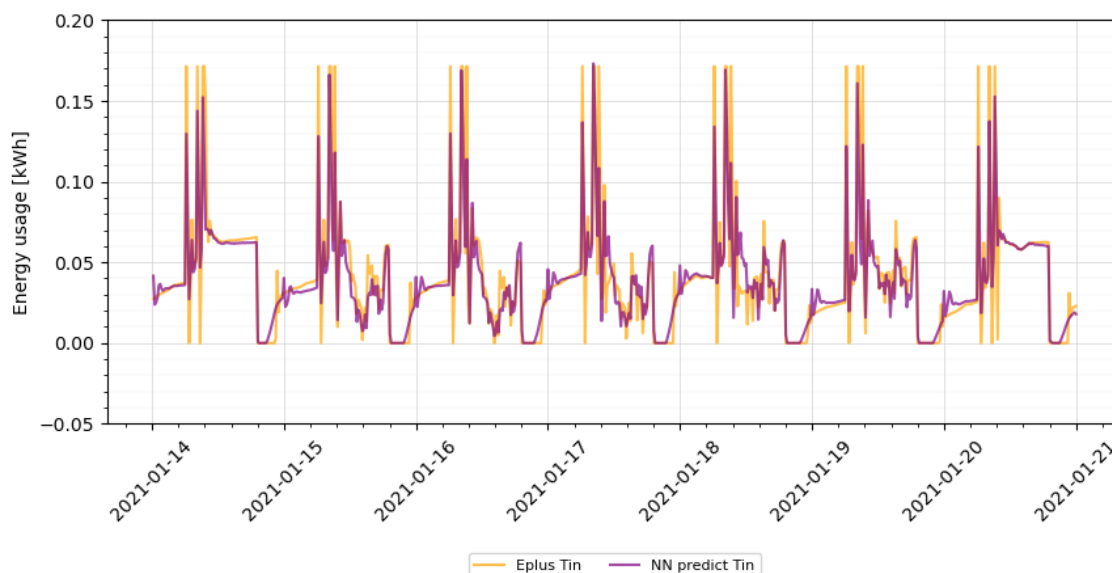
Figuur 6-6 Temperatuur voorspellingen van het LSTM neurale netwerkmodel (paars) en voorspellingen door het EnergyPlus model (geel).

Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam

Figuur 6-7 toont het energieverbruik van de warmtepomp over dezelfde week voorspelt door het LSTM en door EnergyPlus. Op de meeste momenten is er een goede overeenkomst tussen de twee modellen. De fout in de temperatuurvoorspelling is ook niet terug te zien in voorspelling van het elektraverbruik. Wel is te zien dat het LSTM model moeite heeft om de hoogte van de ochtendpieken in het elektraverbruik bij de overgang van het nachtsetpoint naar het dag setpoint te voorspellen. Deze voorspellingsfout in het model is ongunstig omdat het vooral deze pieken zijn die een vraagsturende regeling moet beïnvloeden.



Figuur 6-7 Voorspellingen van het energieverbruik van de warmtepomp door het LSTM neurale netwerk model (paars) en voorspellingen door het EnergyPlus model (geel).

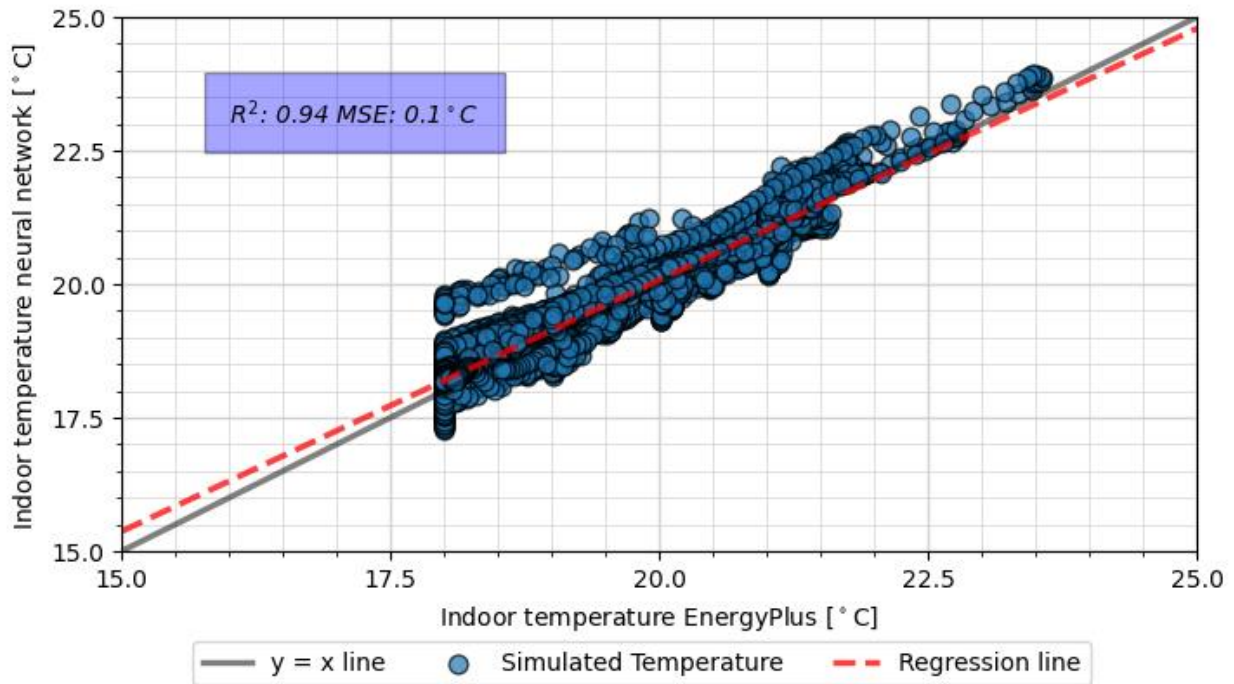
De kwaliteit van het model is getest op een half jaar aan voorspellingen met de referentie regeling (dataset A-II). Figuur 6-8 toont een spreidingsdiagram met de binnenluchttemperatuur voorspellingen van het EnergyPlus model en die van het LSTM-model. Te zien is dat de voorspellingen goed overeenkomen. Ten opzichte van het EnergyPlus model hebben de LSTM-voorspellingen een Mean Square Error (MSE) van slechts 0.1°C en een zeer hoge determinatiecoëfficiënt van 0.94 (Taylor, 1990).

Figuur 6-9 toont een spreidingsdiagram met de voorspelling van het elektraverbruik van beide modellen. Te zien is dat het LSTM-model het elektraverbruik minder goed voorspelt dan de binnenluchttemperatuur. Het LSTM-model leidt tot een determinatiecoëfficiënt van 0.87 en een MSE van 141 Wh. In een zeer gecontroleerde modelvergelijking als deze zou men een zeer hoge determinatiecoëfficiënt ($R^2 \geq 0.9$) verwachten (Taylor, 1990). Het model kan echter nog steeds geschikt zijn voor de toepassing als de modelfout niet leidt tot verkeerde beslissingen in de aansturing.

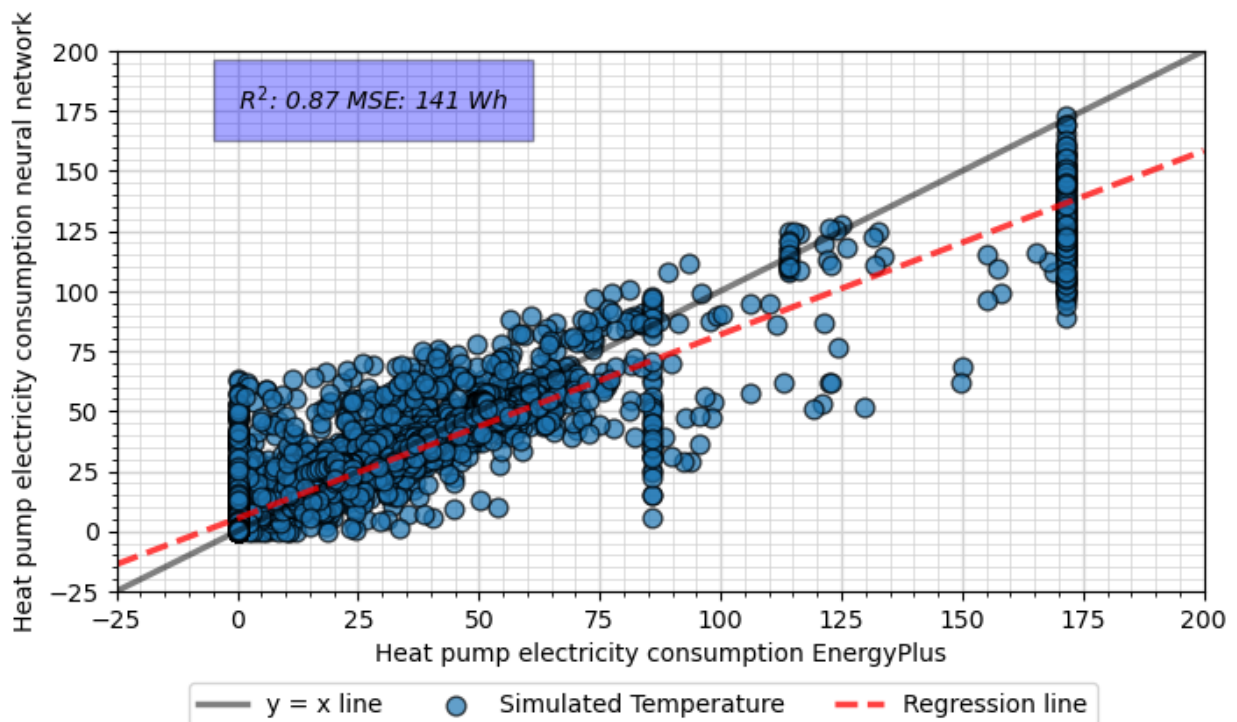
In de ontwikkeling van het gebouwmodel zijn ook verschillende andere alternatieven getest die tot minder goede voorspellingen leidde dan dit LSTM-model. Uit die eerdere tests kwamen de volgende bevindingen:

- Het gebruik van een neurale netwerk zonder 'geheugen' (zonder behoud van informatie betreft de volgorde van input en output) leidt tot een slechtere model kwaliteit.
- Het gebruik van zowel de 192 laatste binnenluchttemperaturen (temp_192) leidt tot betere voorspellingen dan wanneer alleen de laatste temperatuur (temp_last) gebruikt wordt.
- Het gebruik van zowel temp_192 als temp_last leidt tot de beste model prestaties.

Uurmatching



Figuur 6-8 Spreidingsdiagram met voorspellingen van de binnenluchttemperatuur door EnergyPlus (x-as) en door het LSTM neuraal netwerkmodel (y-as) en voorspellingen door het EnergyPlus model (geel).

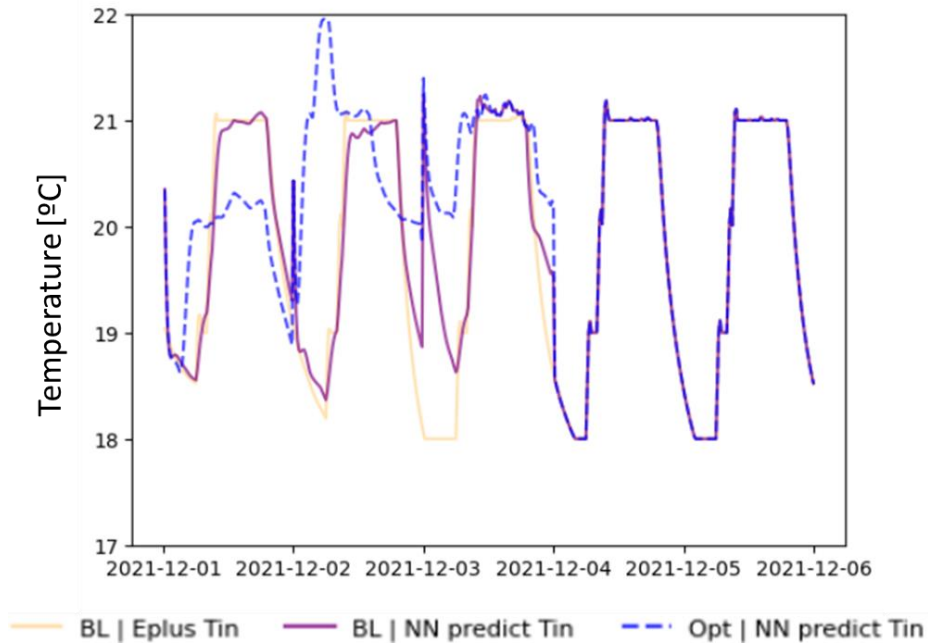


Figuur 6-9 Voorspellingen van het energieverbruik van de warmtepomp door het LSTM neuraal netwerkmodel (paars) en voorspellingen door het EnergyPlus model (geel).

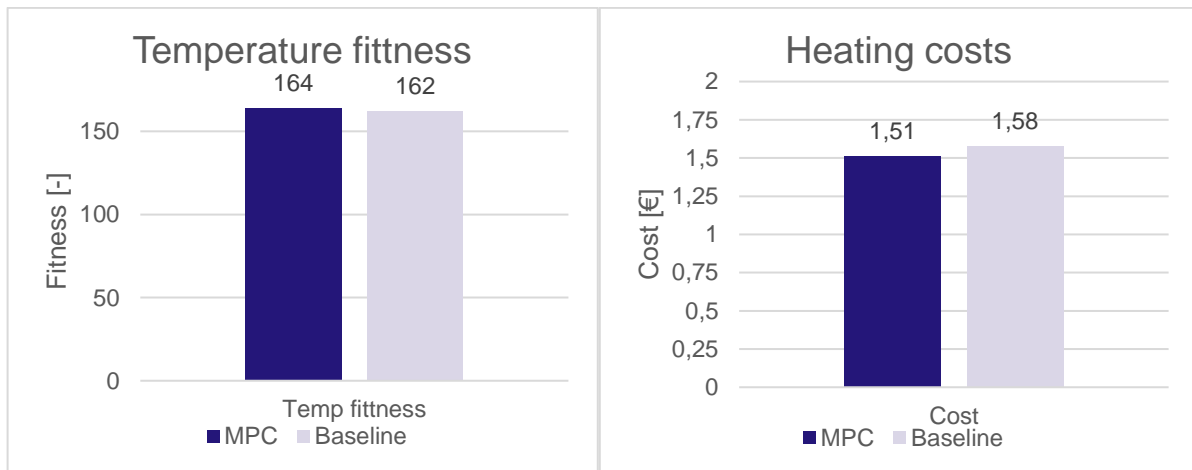
Uurmatching

6.3.3 Optimalisatie van de warmtepomp aansturing met het genetisch algoritme

Het GA en het LSTM-model zijn tezamen gebruikt om voor drie dagen de aansturing van de warmtepomp te optimaliseren. Ook met het LSTM-model is de benodigde simulatietijd van de ontwikkelde MPC-aanpak nog steeds hoog. Voor deze studie zijn daarom slechts drie dagen geoptimaliseerd. Figuur 6-10 toont het verloop van de binnenluchttemperatuur bij de referentieregeling (paars) en bij de geoptimaliseerde MPC-aansturing. De grafiek laat zien dat de MPC eerder begint met aanwarmen tijdens de nacht wanneer de spotprijzen laag zijn. Ook verlaagt de MPC het setpoint op sommige momenten tijdens de dag wanneer de spotprijs hoog is.



Figuur 6-10 Binnenluchttemperatuur voorspelt met het LSTM-model bij de geoptimaliseerde regeling (blauw) en bij de referentieregeling (paars). In geel de voorspelling van het referentiescenario door EnergyPlus.



Figuur 6-11 De prestaties van de MPC in relatie tot het referentiescenario (Baseline) in termen van de temperatuurscore (links) en de energiekosten over de gesimuleerde drie dagen (rechts).

Figuur 6-11 toont het effect van MPC op het thermisch comfort en op de totale energiekosten op de spotmarkt over de drie gesimuleerde dagen. Thermisch comfort wordt hier gekwantificeerd door de score

Uurmatching

van de temperatuurdoelfunctie te sommeren. De grafiek laat zien dat de MPC leidt tot een kleine verbetering in het thermisch comfort en een besparing van 4% (€0.07) op de energiekosten. In het ontwikkelen van het genetisch optimalisatie algoritme werd duidelijk dat de instellingen van het algoritme van groot belang waren. Tabel 6-1 toont de instellingen waarmee de gunstigste resultaten verkregen werden. Wat van specifiek belang bleek in het kiezen van de instellingen was het behoud van een gunstige regelsequentie over een duur van 3-6 uur in de reproductie fase van het algoritme. De instellingen bepalen onder meer hoe het genoom van twee ouders tot een enkel nieuw genoom wordt gecombineerd. Uit de studie in hoofdstuk 5 bleek reeds dat gunstige vraagsturende acties veelal bestaan uit cycli van 3-6 uur met een laad moment met een hoog setpoint, en een ontlad moment met een laag setpoint. In de instelling van het GA bleek het belangrijk dat bij de reproductie uit twee ouders daarom aaneengesloten stukken van ongeveer 3-6 uur behouden bleven. Bij GA instellingen waar de genoom sequenties bij reproductie te kort zijn wordt de gunstige laad/ontlaadt cyclus niet behouden. Bij GA instellingen waar de genoom sequentie bij reproductie te lang zijn, is de kans groter dat een gunstige laad/ontlaadt cyclus wordt gecombineerd met een andere ongunstigere sequentie die het voordeel teniet doet.

Algemene parameters							
n_epochs	3000						
pool_size	100						
Parameters ouders							
s:	1.5	n_parents	100	n_offsprings	50		
Paar parameters							
n_split	2	dim	192				
Mutatie parameters							
lower_bound	16	upper_bound	25	prob	0.01	dim	192
Initiele parameters							
lower_bound	16	upper_bound	25	dim	192	No warm start	

Tabel 6-1 Instellingen van het genetisch algoritme

6.4 Discussie en conclusie

In deze studie is een eerste aanzet gedaan voor de ontwikkeling van een MPC-aansturingconcept van een warmtepomp voor ruimteverwarming. De studie liet zien dat een vraagsturende regelaar mogelijk is middels een genetisch optimalisatie algoritme en LSTM neuraal netwerk als gebouwmodel binnen de regelaar. Dit regelconcept leidde tot 4% besparing op de spotprijskosten bij behoud van het thermisch comfort. Deze besparing is lager dan de besparing die gevonden werd in de studie in hoofdstuk 5 omdat er in deze studie maar naar drie dagen gekeken is en doordat er in hoofdstuk 5 meer op het thermisch comfort werd ingeleverd. Deze studie moet dan ook vooral als een verkenning en een proof-of-concept gezien worden.

Uit deze studie kunnen een aantal dingen geleerd worden voor de verdere ontwikkeling van MPC-concepten voor vraagsturing:

- I. Voor een data-gedreven model voor de aansturing van een warmtepomp is het van belang dat de thermische geschiedenis van het gebouw mee weegt in de voorspellende variabelen. Uit deze studie bleek dat een LMST een geschikte aanpak hiervoor is.

Uurmatching

- II. Voor een acceptabele voorspelling met het LMST was de temperatuurreeks van de afgelopen twee dagen nodig. Alleen de laatste temperatuur in de ruimte gaf onvoldoende informatie voor een goede voorspelling. De beste resultaten werden behaald toen zowel de laatste temperatuur als de volledige temperatuur sequentie als aparte voorspellende variabelen werden gebruikt.
- III. In de instellingen het GA bleken niet triviaal. In het kiezen van de instellingen van het GA is het van belang om te zorgen dat gunstige onlaadt/laad cycli behouden blijven tijdens de 'cross-over' in de reproductie fase. Dit houdt in dat de cross-over zo gekozen moet worden dat aaneengesloten sequenties van ongeveer 3-6 behouden blijven.

Deze studie en het ontwikkelde MPC-raamwerk kennen ook enkele beperkingen:

- I. Voor het trainen van het LMST-model bleek het nodig om een grote variatie aan regelgedrag in de trainingsdata op te nemen. Hierbij zijn ook regelsequenties met extreme temperatuur sprongen gebruikt (Figuur 6-5). Het is niet haalbaar om dergelijke data direct in een echt gebouw te verzamelen omdat dit soort regelgedrag tot comfortproblemen en hoge energiekosten zou leiden. Er moet nog onderzocht worden of de modelkwaliteit van een LMST ook voldoende is wanneer deze getraind wordt op gemeten data uit een echt gebouw met minder extreem regelgedrag in de trainingsdata. Mogelijk is het in een werkelijke toepassing nodig om eerst een fysisch model te maken en deze te fitten op de meetdata, dat model vervolgens te gebruiken om het effect van extreme regelacties te simuleren en daarop het LMST te trainen.
- II. De benodigde tijd om tot een optimalisatie van twee dagen te komen is met de huidige algoritme en modellen nog te lang voor een toepassingen in een praktijksituatie. Deze versie is echter een prototype. Dit code van prototype kan verbeterd worden door onder andere parallel processing toe te passen. Ook zou een dergelijk optimalisatie raamwerk op externe servers met veel grotere verwerkingscapaciteit gedraaid kunnen worden.
- III. In deze casestudie zijn enkele vereenvoudigingen gemaakt en aannames gedaan die in toekomstig onderzoek verder onderzocht moeten worden, zijnde:
 - Er is aangenomen dat er perfecte voorspellingen beschikbaar zijn van o.a. het weer, het elektraverbruik voor apparatuur en de bezetting. In werkelijkheid zijn dit soort voorspellingen niet perfect en dit heeft invloed op de hoogte van de te bereiken kostenbesparing.
 - Er is slechts één ruimte gesimuleerd. Een werkelijk gebouw bestaat uit velen ruimten met uiteenlopende functies. De geschiktheid van een LMST voor het simuleren van een geheel gebouw moet nog getest worden.
 - In deze studie is uitgegaan dat de warmtepomp een constante COP heeft. In werkelijkheid is de COP afhankelijk van de WKO-temperatuur en de cv-aanvoertemperatuur. Bij de 'laad' momenten van een vraagsturingscyclus zal een warmtepomp veelal dicht bij het maximaal vermogen komen en een hoge aanvoertemperatuur kiezen. Het effect hiervan op de COP moet in vervolgstudies onderzocht worden.

7. Experimenten vraagsturing WP (studie 3.3)

Binnen het project uurmatching is de warmtepomp als grote elektriciteitsverbruiker geïdentificeerd, waarvan de inzet ook verschoven kan worden. Naast theoretische studies is er ook gekeken naar een praktijksituatie op de HvA campus. Zoals vaak blijkt bij praktijkonderzoek: de praktijk is weerbarstig. Zo ook hier. Op de HvA campus zijn drie gebouwen met WKO en warmtepomp, uiteindelijk bleek er maar één geschikt voor dit onderzoek. Bij één gebouw was een warmtepomp langdurig in storing en bij een ander gebouw was de warmtepomp volledig defect geraakt. In het Muller Lulofhuis was de warmtepomp wel in bedrijf.

Een gebouw in normaal bedrijf is geen laboratoriumopstelling. Een modern Gebouw Beheers Systeem (GBS) verzorgt de aansturing en registraties, en bij de proeven is er vanuit gegaan dat vanuit dit systeem de benodigde metingen verzameld kunnen worden. De proeven hebben zich beperkt tot het opstarten van de installatie aan het begin van de dag, bij de overgang van nacht- naar dag bedrijf. Aan het begin van de dag is er doorgaans sprake van een piek op het net, omdat veel activiteiten starten en daarom een interessant casus om vraagverschuiving tie te passen, door juist vroeger of later, of een combinatie daarvan, de warmtepomp op te starten. Logischerwijs lag de focus hierbij op het stookseizoen. Koeling vraagt met een WKO weinig extra energie, immers de benodigde koude is in de winterperiode al gemaakt en er dus vooral directe koeling uit de WKO die geen inzet van de warmtepomp vraagt.

De proeven waren gericht op het vergaren van inzicht op de mogelijkheden van vraagverschuiving van warmtepompen. Twee vragen staan hierbij centraal:

1. Kan de warmtepomp later opgestart worden dan normaal het geval is? Zodat de ochtendpiek vermeden wordt?
2. Kan het gebouw “opgeladen worden” met warmte voorafgaand aan een periode waarop de WP uit of laag ingesteld wordt?

Idealiter worden zulke proeven uitgevoerd in een optimaal ingeregeld gebouw. In de praktijk verkeren gebouwen vrijwel nooit in een toestand van “optimale inregeling”. Dit onderzoek laat daarom ook zien hoe een bepaald gebouw in de praktijk functioneert. Het is weliswaar maar één casus, maar zeker niet uniek in de uitvoering en het functioneren van een GBS systeem.

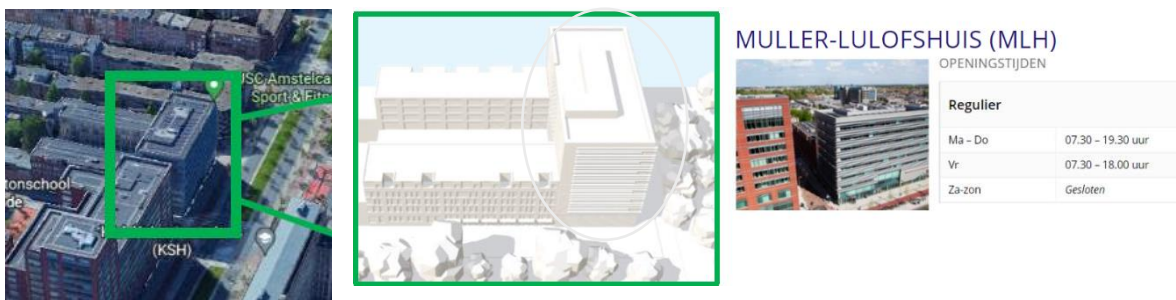
Er is gemeten in twee perioden: najaar 2022 en einde winter 2023. In het najaar van 2022 was het mogelijk om online alle registraties binnen te halen via het GBS totdat er een storing in het GBS optrad en deze procedure onmogelijk werd. Vanaf dat moment moest de gebouwbeheerder gevraagd worden om de gevraagde signalen binnen te halen, wat het aantal datapunten sterk heeft beperkt. Deze laatste situatie deed zich voor in de tweede meetperiode. De storing deed zich al aan het einde van de eerste meetperiode voor, en er was de verwachting dat deze begin 2023 wel opgelost zou kunnen worden. Om allerlei redenen is dat niet gelukt. In het najaar van 2022 was het mogelijk om een generiek beeld te geven van het functioneren van het GBS met de installaties, maar zijn er ook twee proefdagen geweest, terwijl een derde proefdag om bovengenoemde storing afgeblazen moest worden. In 2023 lag de focus op de proefdagen.

7.1 Het Muller Lulof huis (MLH)

De hoofdfunctie van het Muller Lulof huis (MLH) is onderwijs en fitness. In de hoogbouw zijn onderwijsruimten, vergaderzalen en kantoren beschikbaar, terwijl op de onderste verdiepingen sport en fitness faciliteiten aanwezig zijn voor studenten en ten behoeve van de aanwezige sportopleiding. In Figuur 7 1 zijn beelden opgenomen van het MLH. De focus in dit onderzoek ligt op het omcirkelde deel: de Hoogbouw. Daar zijn de onderwijsruimten en kantoren, en dit deel wordt ook voorzien van warmte

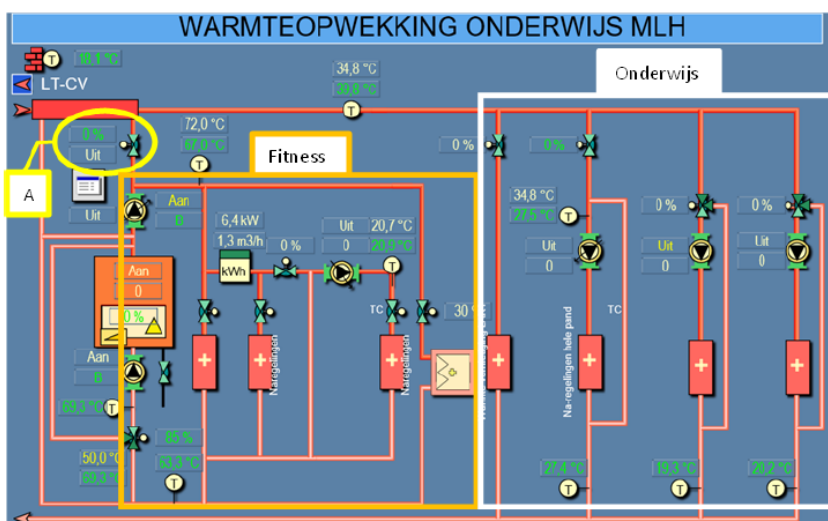
Uurmatching

door de warmtepomp. Het sport en fitness gedeelte ontvangt warmte vanuit een conventionele aardgasgestookte CV ketel. Als het heel koud is en de warmtepomp onvoldoende warmte kan leveren, springt de CV ketel bij. Het maximaal opgenomen elektrisch vermogen van de WP is 136 kW (volgens typeplaatje) en de maximale warmtelevering bedraagt 304 kW. Het gebouw is in 2015 gebouwd en voorzien van een moderne klimaatinstallatie. Het is een gebouw met energielabel A, buitenwanden hebben een warmteweerstand van 3,5 m²K/W en raampartijen 0,45 m²K/W (volgens de EPA-U scan 2017). Het wordt geheel met lucht geklimatiseerd. De hoogbouw van MLH wordt door een laagtemperatuurnet van warmte voorzien, dat aangesloten is op de WP/WKO installatie. De laagbouw, waarin de sport en fitness faciliteiten zijn ondergebracht, wordt met een CV net op hoge temperatuur geklimatiseerd, dat gevoed wordt door een CV ketel.



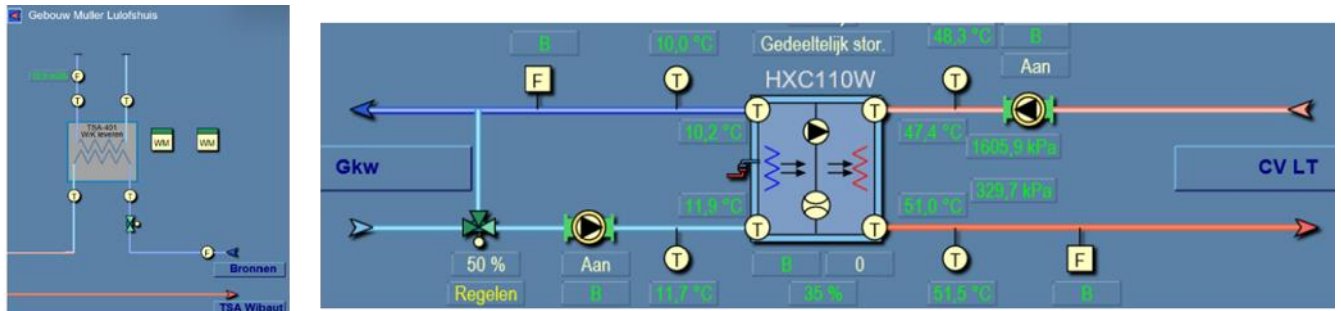
Figuur 7-1 Beelden van het Müller Lulof huis; de focus ligt op het omcirkelde deel: de hoogbouw.

In Figuur 7 2 is een schema gegeven van beide CV netten. Te zien is dat het laag temperatuur net ook gevoed kan worden door het hoog temperatuur net, indien er onvoldoende warmte beschikbaar is vanuit het WP systeem. Dit onderzoek is gericht op de hoogbouw. De klimaatinstallatie bestaat uit een centrale luchtbehandelingskast, van waaruit de lucht naar alle verdiepingen gedistribueerd wordt. Op de verdiepingen bevinden zich VAV kasten (Variable Air Volume), van waaruit de lucht naar de afzonderlijke ruimtes wordt gedistribueerd. In de ruimtes zijn CO₂ sensoren aanwezig die het benodigd luchtdebiet aansturen. In de VAV kasten kan de lucht zonodig bij verwarmd of bij gekoeld worden.



Figuur 7-2 Schema uit het GBS van het CV-water systeem; onderwijs is aangesloten op LT-CV

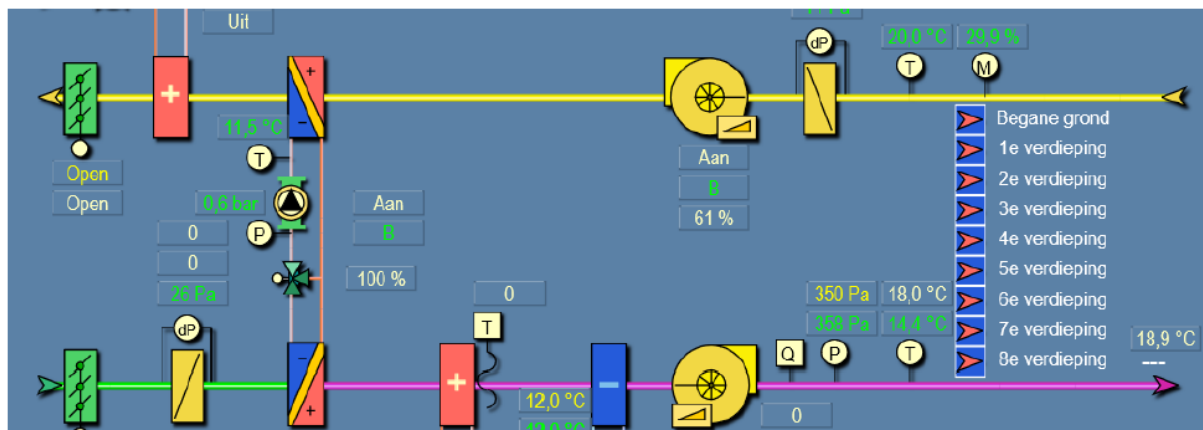
Uurmatching



Figuur 7-3 Warmtepomp, leverend aan CV LT (rechts) en de TSA met het WKO systeem (links)

Het MLH is met het Wibauthuis op één WKO aangesloten.

De luchtbehandelingskast voor het onderwijsdeel is weergegeven in Figuur 7-4. De lucht uit LBK1 wordt gedistribueerd over alle verdiepingen. Op de verdiepingen zijn in de ruimten VAV systemen en/of inductieunits in het plafond toegepast.

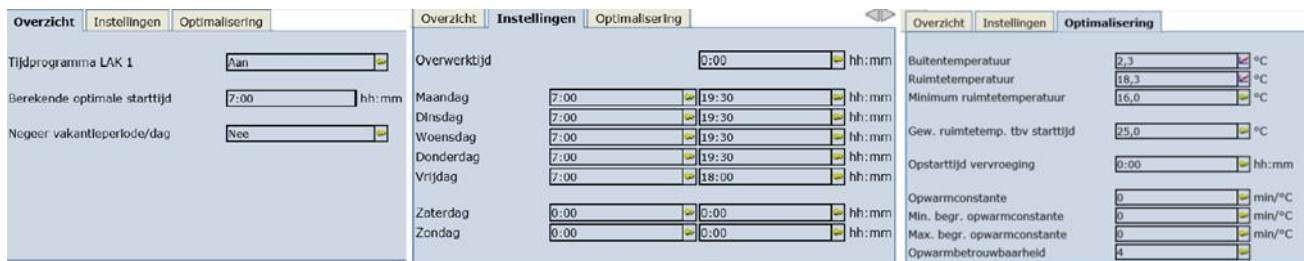


Figuur 7-4 De luchtbehandelingskast met twin-coil warmteterugwinning voor het onderwijsgedeelte (LBK1)

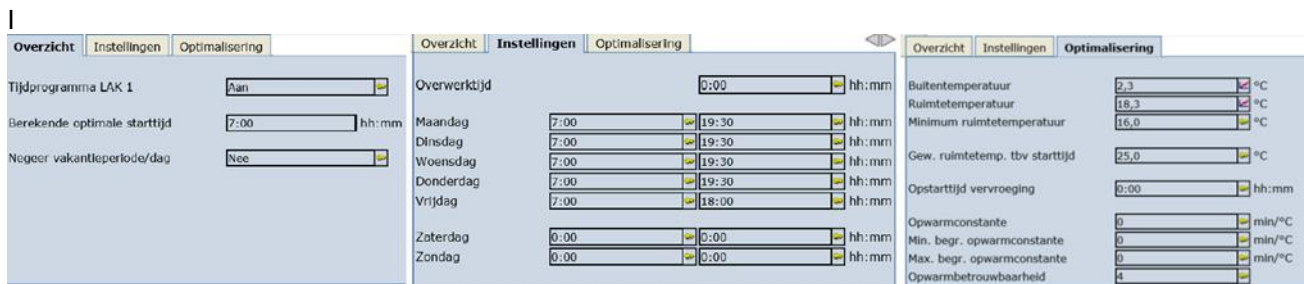
7.2 Opzet

De opzet van de metingen is om in een week één dag een verschoven starttijd in te stellen. De dag voor, de dag zelf en de dag erna worden de metingen bijgehouden. Het GBS bewaart standaard de meetwaarden gedurende 24 uur. Het is mogelijk om kanalen te selecteren waarvan de meetdata langer bewaard blijven, maar dat bleek toch enigszins gecompliceerd en in het begin was nog niet precies duidelijk welke signalen gelogd moesten worden. De eerste meetsessies vonden plaats in oktober en november 2022. Het was toen mogelijk om, als niet gebouwbeheerder, toegang tot alle gelogde data te krijgen, zodat iedere avond van een meetdag bekeken kon worden welke signalen relevant waren. Tijdens deze meetsessies is een algemene indruk gekregen van het functioneren van de installatie.

Uurmatching



Figuur 7-5 Standaardinstellingen voor start en stoptijden in het GBS



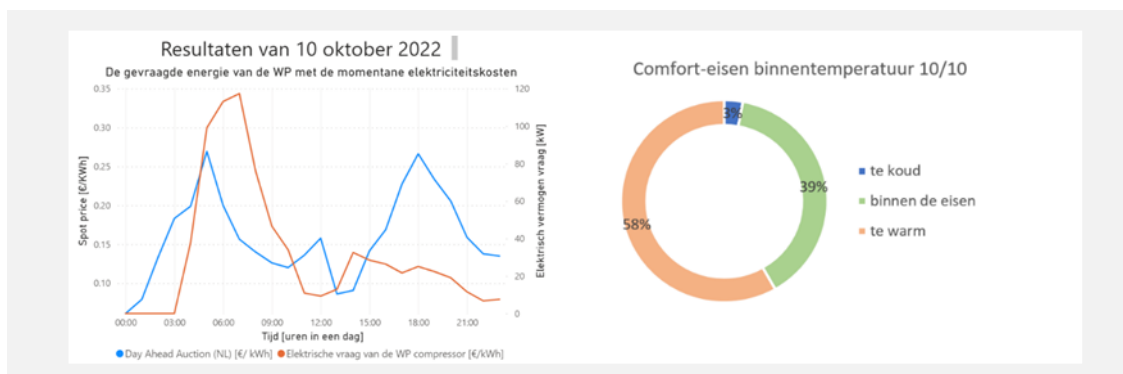
In Figuur 7-5 zijn de standaardinstellingen voor start en stoptijden weergegeven. Het systeem kent een berekening van de optimale start en stoptijd, maar dit systeem bleek maar beperkt actief. Bij slechts één van de meetdagen, een maandag na een koud weekend, was er een duidelijke verschuiving van de starttijd te zien.

In oktober was het nog relatief warm en ook zonnig, maar eind november al winters koud. Het verschuiven van starttijden lukte deze meetperiode nog niet zoals gewenst. En helaas werd eind november de toegang tot het GBS als niet gebouwbeheerder onmogelijk. Dat betekent dat de gebouwbeheerder gevraagd moest worden om specifieke meetdata binnen te halen. Daartoe was de gebouwbeheerder bereid, maar het was toch enigszins limiterend, omdat de totale werkwijze omslachtiger werd. De eerste meet sessie heeft vooral een generiek beeld van het functioneren van de gebouwinstallaties opgeleverd.

De tweede meet sessie vond plaats in februari en maart 2023, waarbij maart 2023 de meeste bruikbare data heeft opgeleverd.

7.3 Eerste meet sessie: oktober & november 2022

Op 10, 11 en 12 oktober (respectievelijk maandag, dinsdag, woensdag) zijn iedere dag metingen uitgevoerd. Op de dinsdag werd beoogd om de starttijd te verschuiven, maar dat bleek niet goed uitgevoerd te zijn.



Uurmatching

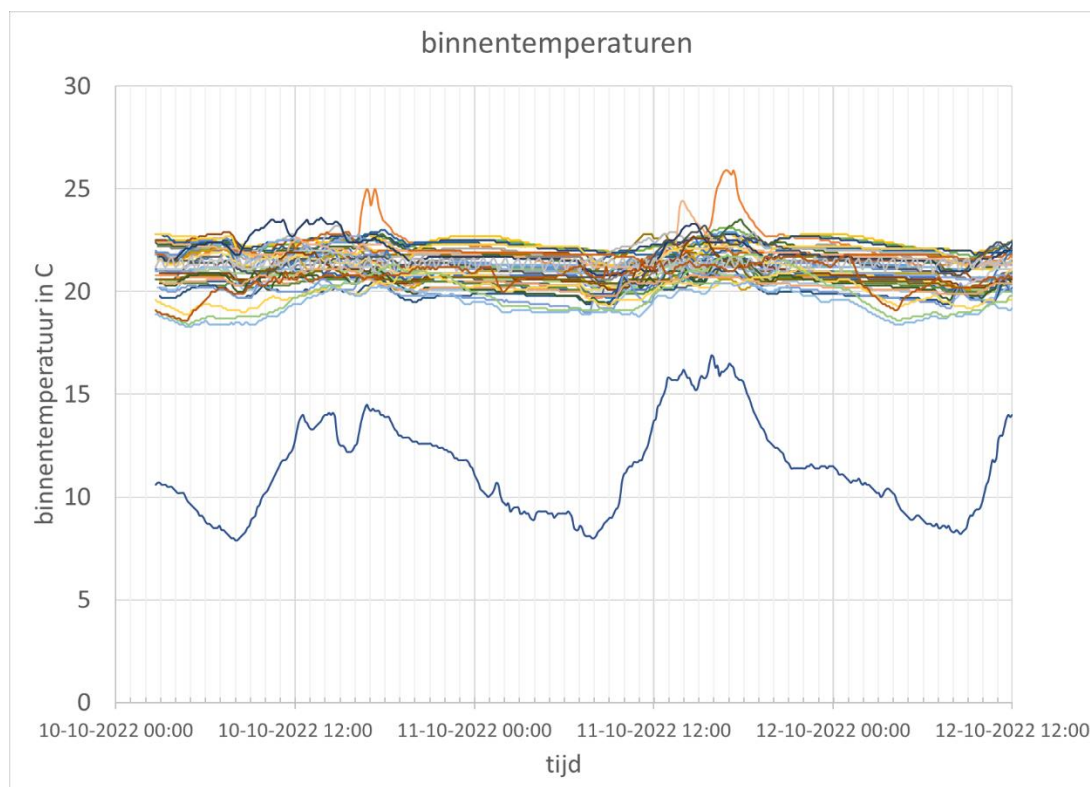
Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam

Figuur 7-6 Inzet WP en comfort op maandag 10 oktober

De optimalisatie functionaliteit was actief in de vroege ochtend van maandag 10 oktober en heeft de starttijd vervroegd naar 3 uur 's nachts. Van 6.00 uur tot circa 10 uur nam de WP capaciteit alweer geleidelijk af. In de grafiek is ook de SPOT prijs voor elektriciteit weergegeven voor die dag, en opmerkelijk genoeg lag de ochtendpiek van de SPOT prijs eveneens zeer vroeg in de ochtend, zodat piekverbruiken deels toch nog samenvielen met de piektarieven van de SPOTmarkt. Deze dag laat een stevig voorwarmen van het gebouw zien, ver voor begin bedrijfstijd van het gebouw. De rest van de dag was de warmtepompactiviteit laag. In de figuur is in een cirkeldiagram ook het comfort in de ruimten van MLH aangegeven. Het groene comfort gebied staat voor 19-21 °C, daaronder is het te koud en daarboven is het te warm. Op 10 oktober was het merendeel te warm.

In Figuur 7-7 zijn de binnentemperaturen in de ruimten van MLH weergegeven, evenals de buitentemperatuur (onderste lijn). De meeste binnentemperaturen liggen alle dagen boven de 20°C, behalve op de begane grond, waar de fitness gevestigd is. Op grond van deze ruimtetemperaturen is het onduidelijk waarom de WP zo vroeg gestart is op maandagochtend. Maar ook op de andere dagen blijven de temperaturen boven de 20°C en is er eigenlijk geen aanleiding voor veel warmtepompactiviteit in de ochtend.



Figuur 7-7 Binnentemperaturen en buitentemperatuur: vanaf ochtend van maandag 10 tot woensdag 12 oktober

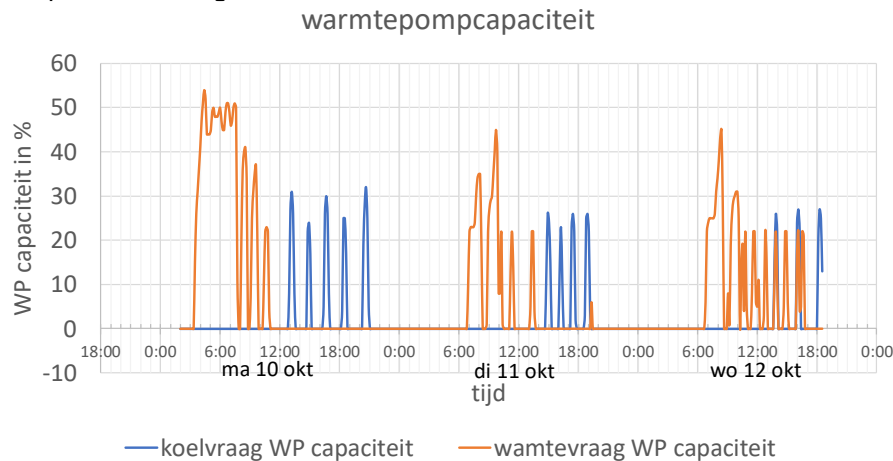
In Figuur 7-8 is de warmte- en koelvraag weergegeven over al de drie dagen. Dan is te zien dat op alle beschouwde dagen het overdag zo warm werd dat er 's middags gekoeld moest worden. Een mogelijke conclusie is dat het voorwarmen in de vroege ochtend van maandag 10 oktober toch wat heftig is geweest. Opvallend zijn de uitschieters van de temperatuur in de middag. Het is gebleken dat sommige

Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

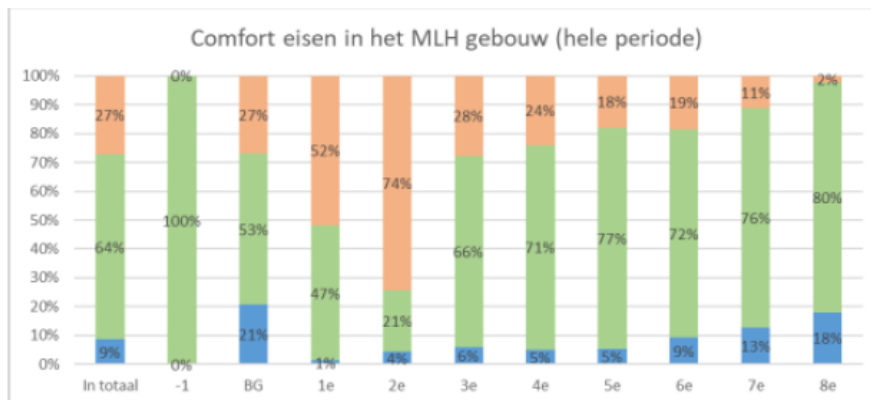
© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam

ruimtetemperatuur sensors aangestraald konden worden door de zon, waardoor uitschieters in de temperatuurmetingen ontstonden.



Figuur 7-8 Warmte- en koelvraag uitgedrukt in capaciteit van de warmtepomp

Voor de hele maand november is het comfort van het gebouw bijgehouden. Er zijn een paar verdiepingen structureel te warm, maar over het algemeen worden de comforteisen in deze maand goed gehaald.



Figuur 7-9 Comfortscore per verdieping over de gehele maand November, kleur als in Figuur 7-6

7.4 Tweede meet sessie: Maart 2023

In dit hoofdstuk worden de meetresultaten beschreven van de metingen die in maart 2023 plaatsvonden. Op 4 dagen in 4 opeenvolgende weken (elke week 1 dag), zijn er aanpassingen gedaan in het GBS met als doel om de inzet van de warmtepomp aan het begin van de dag te verschuiven. Om goed te zien wat er nu precies gebeurt, worden de meetresultaten per dag weergegeven. Eerst de relevante gegevens voor het gebouw als geheel, daarna voor enkele specifieke ruimtes. Doorgaans is de dag voor en/of de dag na ook gemeten, ter vergelijking en als referenties.

7.4.1 Centrale installaties

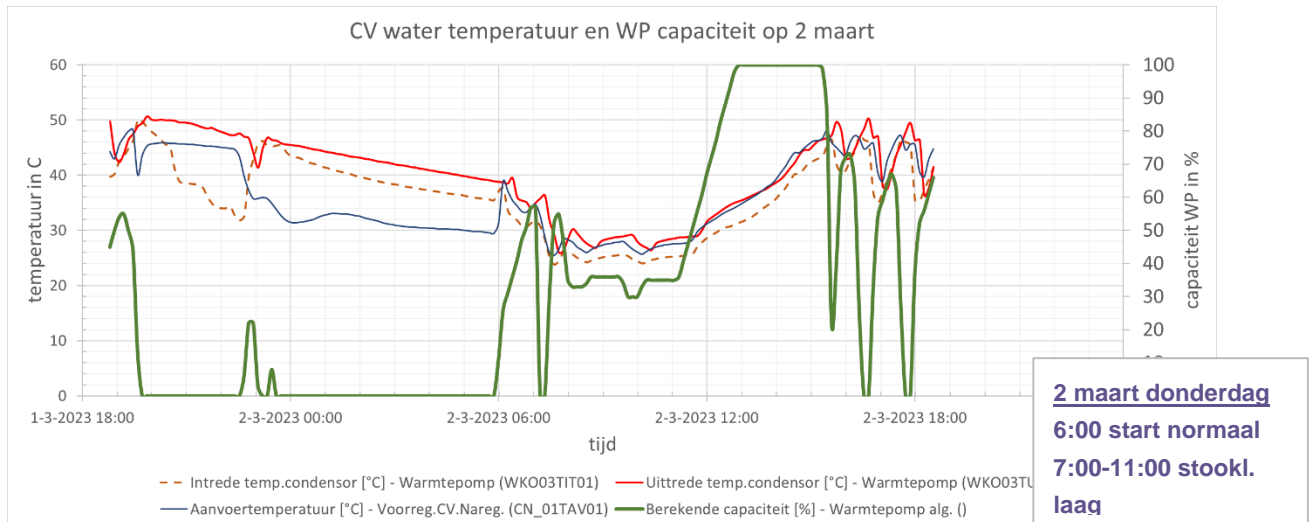
Van de centrale installaties zijn voor de dagen waarop gemeten is de ingezette capaciteit van de warmtepomp (in %), de retourtemperatuur van het CV water (intrede temperatuur condensor WP) en de

Uurmatching

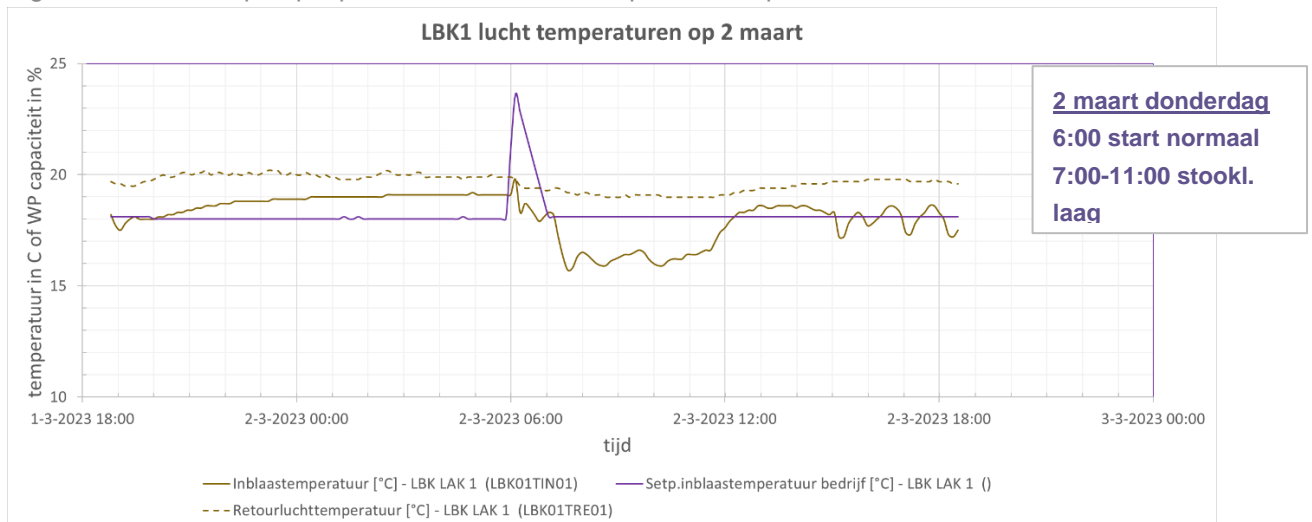
Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam

aanvoertemperatuur van het CV water naar het gebouw (uittrede temperatuur condensor) weergegeven. De weergegeven WP capaciteit is de berekend capaciteit van de warmtepomp (berekend door de WP besturingssoftware). Daarnaast ook nog de aanvoertemperatuur naar de naregelingsunits. Die moet in principe gelijk zijn aan de aanvoer CV water temperatuur, maar het lijkt erop dat deze sensor wat minder gedempt is en in rust (installaties uit) wat sterker afkoelt. Bij opstart van de installatie reageert dit signaal sterker dan de CV water aanvoertemperatuur.



Figuur 7-10 Warmtepompcapaciteit en CV water temperaturen op 2 maart

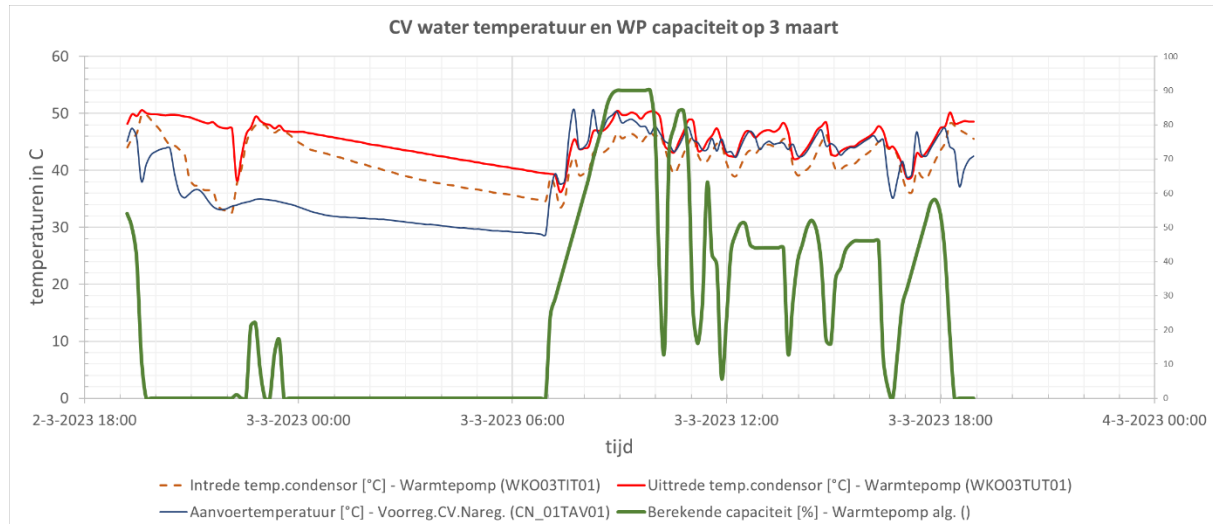


Figuur 7-11 Inblaas- en retourtemperatuur van LBK1 op 2 maart; inclusief setpoint inblaasttemperatuur

In Figuur 7-10 en Figuur 7-11 zijn de meetdata voor donderdag 2 maart weergegeven. Om 6.00 wordt de WP aangezet, tegelijk met LBK1. Bij de opstart wordt, ten behoeve van het opwarmen van de ruimten, door het GBS kortstondig het setpoint 24 of 25°C meegegeven. Dit is zo in het GBS geprogrammeerd om zo tijdens de opwarmfase de ruimten van warme lucht te voorzien. Vanwege de opgelegde stooklijn verlaging van 7-11 uur, duurt dit aanwarmen maar kort. De CV aanvoertemperatuur bereikt dan een temperatuur van 36 °C. Wanneer de lijnen in de grafiek voor het tijdstip 6.00 beschouwd worden, moet men bedenken dat de installatie uit staat en dat de lijnen stilstaand water of stilstaande lucht die afkoelt weergegeven. Het water naar de naregelingsunits koelt het snelst af, en die lijn geeft ook de zichtbaarste indicatie van het opwarmen van het water bij de start van de installatie. Tijdens de verlaagde

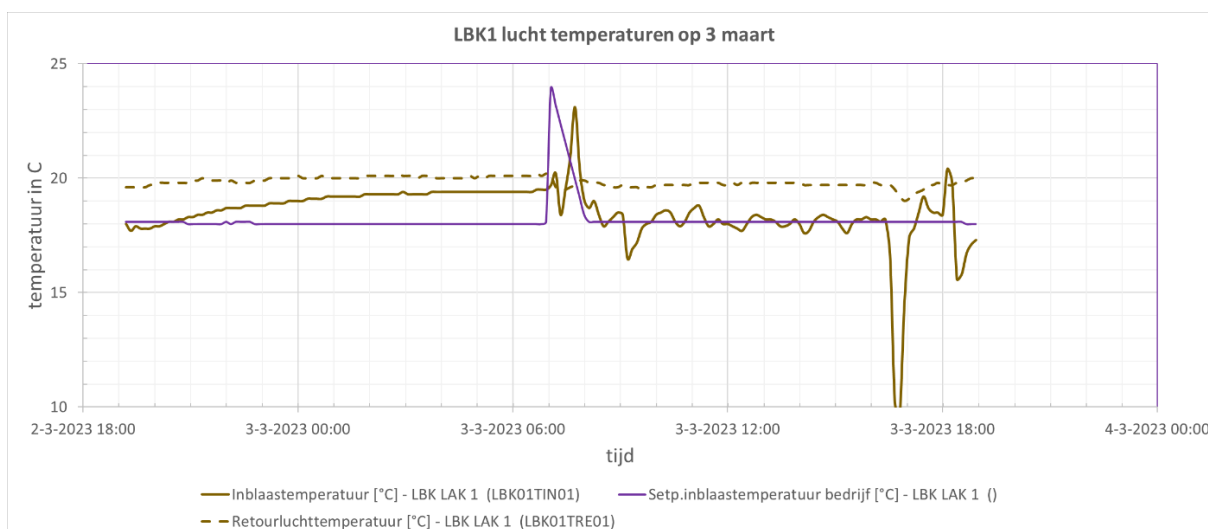
Uurmatching

stooklijnperiode is duidelijk dat de WP op een lage capaciteit draait van ca 30%. Zoals eerder vermeld is wordt het opgenomen vermogen van de WP niet apart gemeten, maar wordt er wel een berekende capaciteit gegeven, die ook in Figuur 7-10 is weergegeven (groene lijn). De CV water temperatuur zakt dan naar 30 °C. Vanaf 11 uur stijgt de WP capaciteit gedurende 2 uur naar 100% om op dat niveau te blijven, totdat de CV water temperatuur de gewenste waarde van 50 °C heeft bereikt. Daarna is het opvallend dat de WP niet op een lagere constante capaciteit in bedrijf blijft, maar een aan/uit regelgedrag laat zien. De regelaar is kennelijk te strak ingesteld om een constante tussencapaciteit te vinden voor de WP.



Figuur 7-12 Wärmepompcapaciteit en CV water temperaturen op 3 maart: normaal bedrijf

Tijdens de “stooklijn laag” periode is de inblaasttemperatuur rond de 16°C. Opvallend is dat de LBK inblaasttemperatuur na de “stooklijn laag” periode weer snel op de gewenste 18°C komt, als het CV water 40 °C is, is de inblaasstemperatuur alweer een tijd op 18 °C. Voor de LBK is de hoge CV water temperatuur van 50°C niet nodig. De retourtemperatuur van de lucht uit het gebouw (naar de LBK WTW) ligt in de periode van verlaagde stooklijn op 19°C. Deze retourtemperatuur geeft toch een soort gemiddelde ruimtetemperatuur weer van alle ruimten die door LBK1 van lucht worden voorzien. Hieruit kan afgeleid worden dat de temperaturen gedurende de verlaagde stooklijn toch binnen de comfortmarge van 19°C tot 21°C zijn gebleven.



Figuur 7-13 Inblaas- en retourtemperatuur van LBK1 op 3 maart; inclusief setpoint inblaastemperatuur

In Figuur 7-12 en in Figuur 7-13 zijn de metingen van 3 maart weergegeven, de dag na de proefdag. Het is duidelijk dat de WP tussen 6.00 u en 9.00.u een hoger vermogen vraagt dan op 2 maart, deze dag geen verlaagde stooklijn tussen 6 en 9 uur. Ook hier is weer de kortstondige setpoint verhoging zichtbaar van de inblaasluchttemperatuur, waarbij de inblaaslucht korte tijd 23 C bereikt om daarna terug geregeld te worden naar 18°C. En ook op deze dag vindt de warmtepomp geen stabiel werkpunt: het werkpunt beweegt in pieken op en neer. De retourtemperatuur bevindt zich op 19,5 °C tussen 6 en 18 uur. In Tijdens de “stooklijn laag” periode is de inblaastemperatuur rond de 16oC. Opvallend is dat de LBK inblaastemperatuur na de “stooklijn laag” periode weer snel op de gewenste 18oC komt, als het CV water 40 oC is, is de inblaasstemperatuur alweer een tijd op 18 oC. Voor de LBK is de hoge CV water temperatuur van 50oC niet nodig. De retourtemperatuur van de lucht uit het gebouw (naar de LBK WTW) ligt in de periode van verlaagde stooklijn op 19oC. Deze retourtemperatuur geeft toch een soort gemiddelde ruimtetemperatuur weer van alle ruimten die door LBK1 van lucht worden voorzien. Hieruit kan afgeleid worden dat de temperaturen gedurende de verlaagde stooklijn toch binnen de comfortmarge van 19oC tot 21oC zijn gebleven.

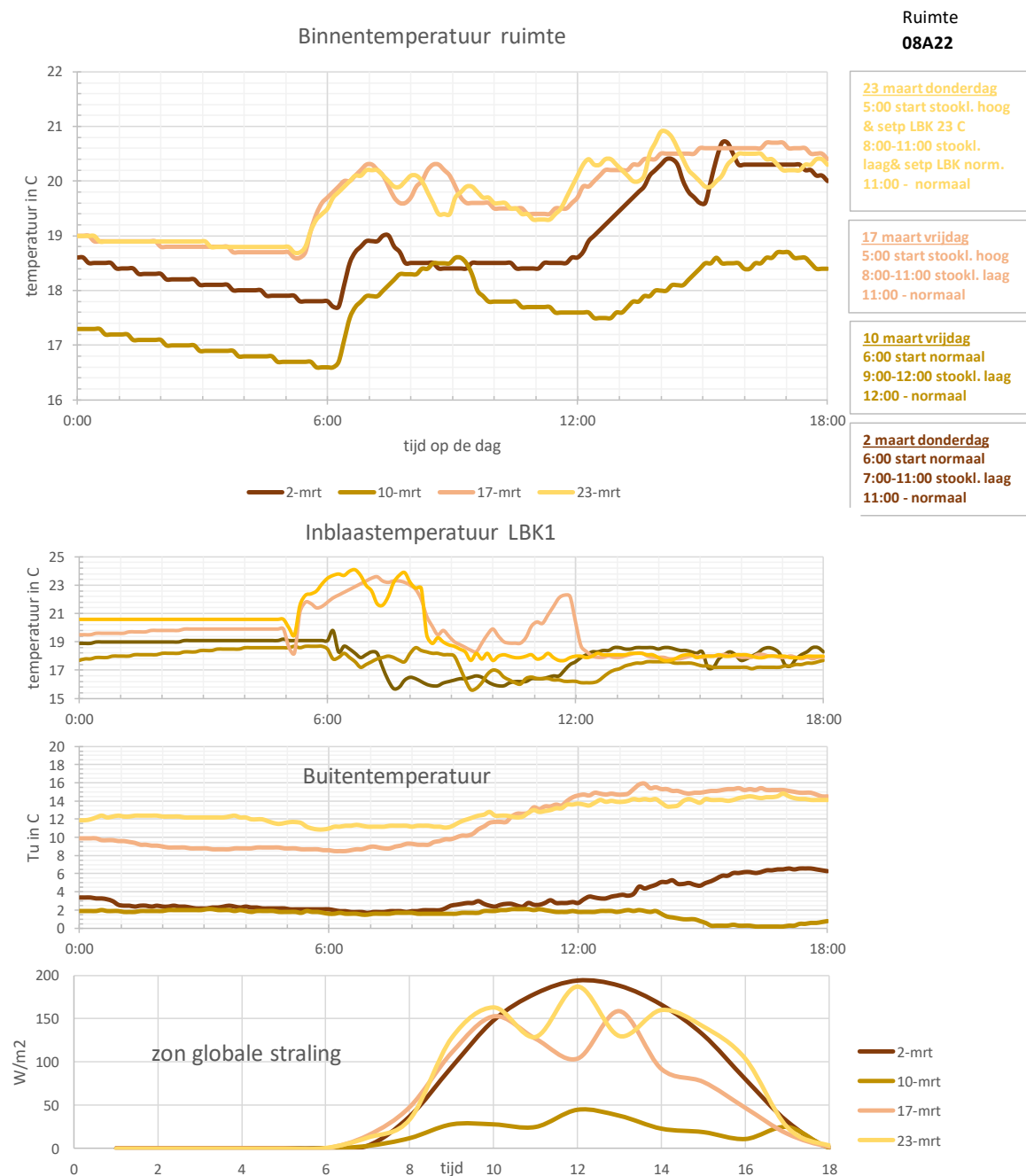
is ook te zien dat de aanvoertemperatuur naar de naregel units bij de pieken een hogere waarde aangeeft dan de CV-water temperatuur. Waarschijnlijk is voor dit signaal een snellere sensor gebruikt die de pieken in temperatuur beter volgt en niet zo gedempt is als de sensor die de uittrede temperatuur condensor aangeeft. Want fysiek kan de temperatuur van het water naar de inductie units natuurlijk niet hoger zijn dan de uittrede temperatuur van het CV water uit de condensor.

In Appendix B is het volledige meetrapport gegeven, waarin ook de metingen op de andere proefdagen worden gegeven.

7.4.2 Beschouwing van twee ruimten

De bovenste verdieping, verdieping 8, wordt als eerste beschouwd. Die ruimten onder het dak zijn het gevoeligst voor koude. Ruimte 8A22 op de zuidwest hoek, wordt als eerste beschouwd. Deze ruimte bleek uit een verkenning het vaakst te koud te zijn. In Figuur 7-14 is het verloop van de binnentemperatuur geschetst voor 4 meetdagen in Maart 2023. Naast de figuur zijn de proefcondities vermeld voor elke meetdag. In deelgrafieken onder de binnentemperaturen geven respectievelijk de inblaastemperatuur LBK1 weer op deze dagen. In de grafieken daaronder zijn de buitentemperatuur en de zonstraling weergegeven op elke dag.

Uurmatching



Figuur 7-14 Ruimte 8A22

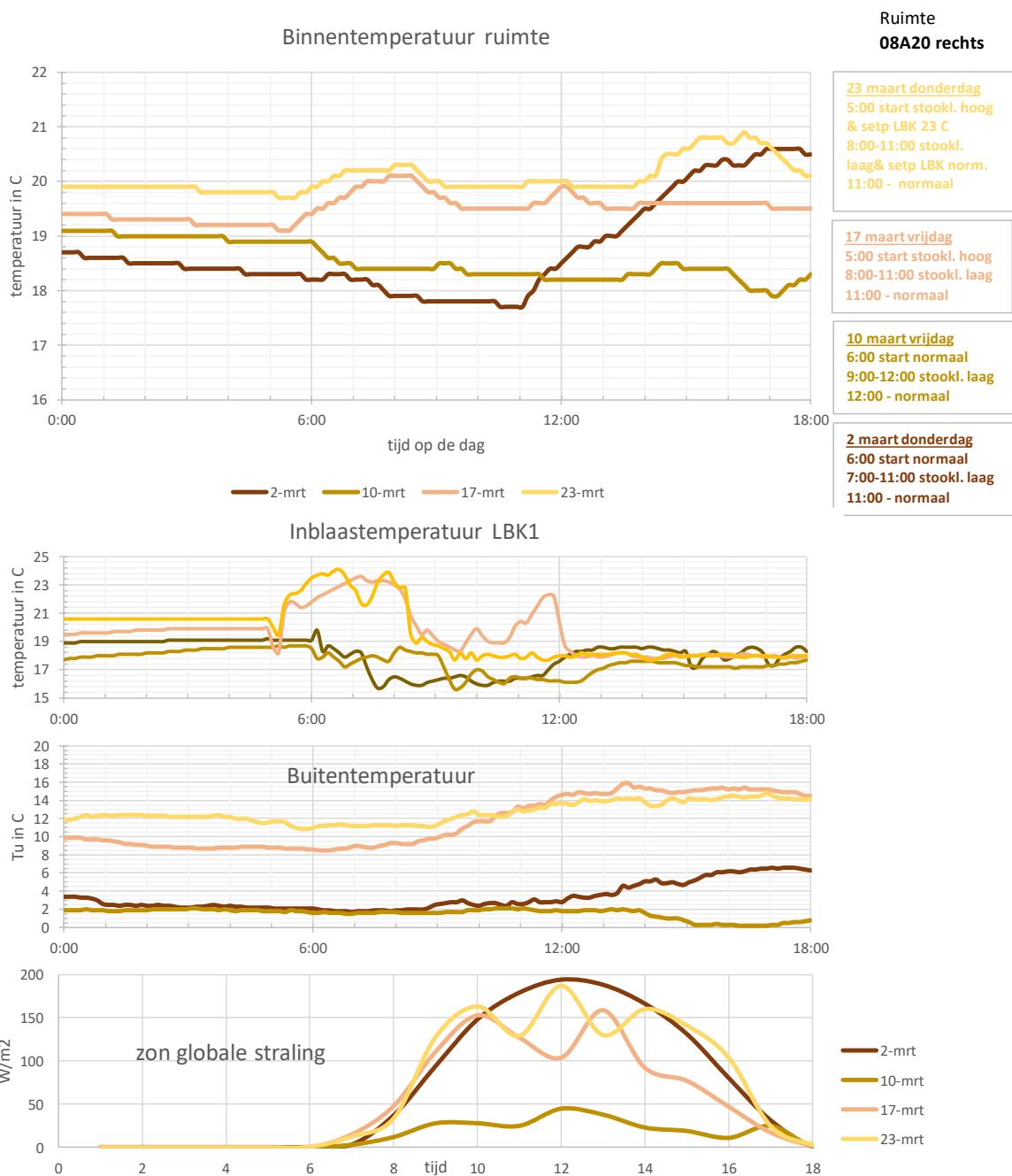
Wat opvalt bij de inblaastemperatuur van LBK1 is dat die op 2 en 10 maart na 6.00 (de starttijd op die dagen) vrijwel gelijk naar 18 °C geregeld wordt. Van een korte verhoging van de inblaastemperatuur tijdens opstart is geen sprake, zoals ook bij Figuur 7-11 toegelicht is. Toch stijgt de temperatuur in ruimte 8A22 wel naar uiteindelijk 18,5 °C, de aanwezige naverwarming heeft de capaciteit om de lucht verder op te warmen voor het de ruimte ingeblazen wordt. Tijdens “verlaagde stooklijn” blijft de binnentemperatuur op 2 maart op circa 18 °C, maar op 10 maart zakt de temperatuur naar 17,5 °C. Op 10 maart was de temperatuur gedurende de nacht ook ver gezakt, tot 16,5 C om 6.00 ’s ochtends, bij de opstart van de

Uurmatching

installaties. En bij opstart kon de warmtepomp de temperatuur niet hoger krijgen dan 36 °C, terwijl bij deze buitentemperatuur dan ca. 50 °C gewenst is.

Op 17 en 23 maart werkt het voorwarmen van de ruimte goed. De temperatuur komt niet onder de 19°C tijdens de periode met verlaagde stooklijn.

Tijdens het korte aanwarmen van 2 maart (1 uur) wordt de 19°C net gehaald, waarbij de inblaastemperatuur van LBK1 opmerkelijk genoeg maar ca 18°C was. De luchtverwarmer bij deze ruimte heeft hier kennelijk gezorgd voor voldoende extra warmtetoevoer. De stooklijnverlaging tussen 7 en 11 uur heeft eerst geleid tot een scherpe daling naar 18,5°C, om vervolgens ongeveer constant te blijven op die temperatuur. Het is een zonnige dag, mogelijk dat de zoninstraling heeft voorkomen dat de binnentemperatuur verder zou zakken tussen 7 en 11 uur. Om 11 uur is de overgang naar normale instellingen en de binnentemperatuur stijgt relatief snel naar 20°C, waarbij vervolgens een aantal slingeringen om die temperatuur optreden, mogelijk als gevolg van niet optimale regelaar instellingen. Bij het langere aanwarmen op 10 maart (3 uur) blijkt het aanwarmen onvoldoende te zijn om de 19 graden te halen. Net als op 2 maart waren de voorafgaande nachten wel koud. De daaropvolgende periode met verlaagde stooklijn wordt ingeleid met een scherpe daling (binnen een half uur) van de binnentemperatuur tot ca 17,8°C, gevolgd door een geleidelijker daling tot 17,4°C. In tegenstelling tot 2 maart is er op 10 maart weinig zon. Na de overgang naar normaalbedrijf wordt de binnentemperatuur maar geleidelijk hoger en komt niet hoger dan 18,6°C tot 18,8°C, tegen het einde van de middag. De buitentemperatuur is gedurende deze dag wat gezakt. De inblaastemperatuur van LBK1 bleef in de middag opmerkelijk laag: 17 tot 17,4 °C. Kennelijk was de naverwarmer nu ook niet in staat om een hogere binnentemperatuur te bereiken, waarschijnlijk als gevolg van de lage temperatuur van het CV water.



Figuur 7-15 Ruimte 8A20 rechts

In Figuur 7-15 zijn de temperatuurverlopen van ruimte 8A20 rechts weergegeven.

In ruimte 8A20 rechts is te zien dat de ruimtetemperatuur op 2 maart en 10 maart na het opstarten alleen maar afneemt. Kennelijk is tijdens de opwarmperiode hier de naverwarming op die dagen niet ingeschakeld, en/of staat de VAV klep op een lage stand. Op 2 maart, aan het einde van de periode met de verlaagde stooklijn, gaat de temperatuur van de ruimte wel omhoog. Kennelijk staat de naverwarming dan wel aan, of is de VAV klep weer open, of ontstaat er substantiële interne belasting door de aanwezigheid van mensen.

Op 17 en 23 maart is de situatie anders. Op deze dagen is de opwarmperiode ingesteld van 5.00 tot 8.00 uur, en de periode van verlaagde stooklijn van 8.00 tot 11.00 uur. Tijdens het opwarmen is een

Uurmatching

verhoogde stooklijn ingesteld, en een verhoogde inblaasttemperatuur van LBK 1. De buitentemperatuur varieert gedurende de nacht tussen de 8 en 12 °C en gedurende de dag tussen 12 en 16 °C. Op deze dagen blijft de binnentemperatuur ruim boven de 19°C graden. Van de beschouwde ruimtes koelt alleen ruimte 8A22 tot iets onder de 19°C af. Geconcludeerd kan worden dat voor deze dagen aanwarmen helemaal niet nodig is als uitgegaan wordt van een acceptabel comfortgebied van 19-21 °C.

7.5 Conclusies

Gebouw MLH is een goed geïsoleerd gebouw met label A en wordt geconditioneerd met lucht. Vanwege de ventilatie eisen, voorgeschreven door de richtlijn “Frisse scholen”, is er geen mogelijkheid voor luchtrecirculatie ingebouwd. Voor het aanwarmen is dat een enorm nadeel. Tijdens het aanwarmen in de periode dat er nog geen mensen in het gebouw aanwezig zijn, moet er altijd ook verse lucht aangezogen worden omdat de lucht zelf als warmtedrager fungeert voor de verwarming van het gebouw. Natuurlijk zijn er ook naverwarmingsunits en inductie units, waarbij water de warmtedrager is naar de units in de ruimten, maar de warmte moet afgestaan worden aan lucht die langs deze units stroomt, en daarvoor is altijd verse buitenlucht nodig. Weliswaar is er wel warmteterugwinning uit de afgevoerde ventilatielucht aanwezig, maar dat is op basis van een twin-coil unit; dit soort units hebben doorgaans een rendement van circa 60%.

Doordat het gebouw goed geïsoleerd is houdt het gedurende de nacht en weekend behoorlijk goed de warmte vast. Gedurende de nacht wordt de ventilatie geheel uitgeschakeld en de binnentemperaturen nemen dan helemaal niet sterk af. Toch wordt er 's ochtends altijd een aanwarmperiode toegepast, om er zeker van te zijn dat de temperatuur bij aanvang werktijd aangenaam is. In de meeste gevallen is dat tussen de 20 en 21 °C. De ondergrens van het comfort, zoals dat vanuit Facility Services is vastgelegd, ligt bij 19°C, en het zou daarom niet erg zijn als de binnentemperatuur bij aanvang werktijd op 19°C ligt. En dat pas in de loop van de dag de temperatuur naar 20 of 21 °C gaat.

Een gebouw als MLH kent uiteenlopende ruimtes met uiteenlopende functionaliteiten. Duidelijk blijkt uit de metingen dat deze ruimtes heel verschillend kunnen reageren op de perioden met stooklijnverlaging, zoals te zien is op de meetdagen in maart 2023. De naregeling van de binnentemperatuur komt pas op gang als er een persoon gedetecteerd is, tot die tijd blijft de luchtverversing minimaal en de naverwarming uitgeschakeld, tenzij de ruimtetemperatuur lager is dan de gewenste basistemperatuur.

De stooklijnverlaging tijdens proefdagen, gedurende bepaalde gekozen periodes bij de aanvang van de werkdag, leidt daadwerkelijk tot een afname van warmtepompinzet in die periode. En heeft niet tot dramatisch lage binnentemperaturen geleid. Als de ruimte niet in gebruik is, dalen de temperaturen maximaal met 2°C tijdens stooklijn periode laag. Maar als de ruimte gebruikt wordt is de naverwarming evengoed nog in staat om met de verlaagde CV water temperaturen de ruimte te verwarmen.

Voorwarmen van het gebouw helpt om te lage temperaturen tijdens daarop volgende stooklijnverlaging te voorkomen. Maar hoe lang dat voorwarmen moet duren, wordt uit de uitgevoerde experimenten nog niet duidelijk. Maar daarmee is wel aangetoond dat inzetverschuiving van de warmtepomp kan plaatsvinden. Uiteindelijk is het opvallend, dat ruimten waar een warmtevraag aanwezig is gedurende de periode van verlaagde stooklijn, met de naverwarming en de optredende interne belasting toch op temperatuur kwamen. Dit versterkt de indruk dat de voorwarmperiode niet lang hoeft te duren. En als met lage stooklijntemperatuur toch voldoende warmte toegevoerd kan worden (via de naverwarmers), dan rijst de vraag op waarom de verlaagde stooklijn toch tot minder warmtepompinzet heeft geleid gedurende die periode.

Uurmatching

Wat vooral uit deze proeven duidelijk wordt is dat naast inzetverschuiving voor het creëren van flexibiliteit ook “good housekeeping” van de installatie gedurende de dag van groot belang is. Waarbij bijvoorbeeld voorkomen wordt dat het gebouw 's ochtends te warm wordt opgestookt, waardoor er 's middags meer gekoeld moet worden. Zowel voor flexibiliteit als voor “good housekeeping” moeten, steeds afhankelijk van de huidige en de toekomstige situatie, optimale inzetpatronen bepaald worden. Voor het bepalen van deze optimale inzetpatronen is “intelligente” sturing nodig, die overweg kan met voorspellingen van het weer, of het gebruik van ruimten (rooster of ruimteplanning), maar ook van bijvoorbeeld de SPOT prijs, om warmtepompen en overige gebouwinstallaties energiezuinig aan te sturen, met behoud van comfort en rekening houdend met relevante externe factoren.

Voor zulke geavanceerde, mogelijk ook zelflerende besturingssystemen zijn in het gebouw betrouwbare sensoren nodig, waarvan de betrouwbaarheid bijgehouden wordt. Dat vraagt specifieke aandacht in het Meer Jaren Onderhouds Plan (MJOP) voor deze onderdelen van de installatie. Tijdens de proeven in MLH werd duidelijk dat temperatuursensoren soms aangestraald worden door de zon, waardoor ze een te hoge waarde aangeven. CO₂ sensoren, essentieel voor het bewaken van de binnenluchtkwaliteit en daarmee de mate van ventilatie, hebben een beperkte levensduur, in de orde van 7 jaar. Ze moeten gecontroleerd en tijdig vervangen worden. Sommige CO₂ sensoren bleken aan vervanging toe te zijn; ze gaven foutieve meetwaarden af.

En de gebouwinstallatie zelf moet voldoende fijn vertakt zijn om op ruimte niveau maatwerk te leveren qua binnentemperatuur en luchtverversing.

8. Simulaties vraagsturing boilers (studie 4)

8.1 Introductie van de casestudie

De UvA en HvA beschikken over een groot aantal kleine elektrische boilers. In totaal zijn er zo'n 600-700 kleine close-in boilers van verspreid over de hele campus. Deze boilers variëren in hun vermogen van 1.6 tot 3 kW en van 10 tot 30 liter in hun volume. In totaal beschikt FS dus over 0.9-2.1 MW aan opgesteld boiler vermogen dat mogelijk flexibel kan worden ingezet. De komende jaren zal het aantal apparaten flink worden uitgebreid. Science Park zullen er bijvoorbeeld binnenkort 200 nieuwe boilers worden aangeschaft. In deze casestudie zal het potentieel van vraagsturing met kleine elektrische boilers verkend worden door de business case voor de flexibele aansturing van de 200 nieuwe boilers bij Science Park te beschouwen. Het technisch potentieel zal worden verkend middels een simulatiestudie.

8.2 Aanpak in deze casestudie

8.2.1 De onderzochte boilers

In deze studie is uitgegaan van 200 Itho Daalderop Mono Plus 30 elektrische boilers. De eigenschappen van deze boiler zijn te vinden in Tabel 8-1. Er zal worden aangenomen dat de boilerwater temperatuur minimaal 60°C moet zijn om legionella te voorkomen en dat de temperatuur tot maximaal 70°C graden kan worden verhoogd.

Aantal	Volume	Vermogen	Maximale temp	Minimale temp
200	30 Liter	2500 W	70°C	60°C

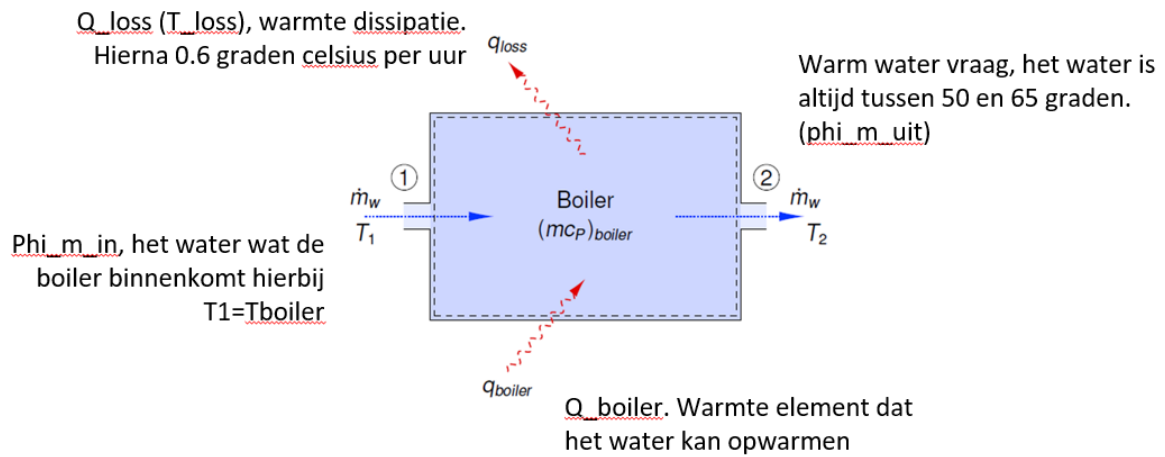
Uurmatching

Tabel 8-1 Eigenschappen van de onderzochte elektrische boilers.

8.2.2 Het simulatiemodel en het aansturingconcept

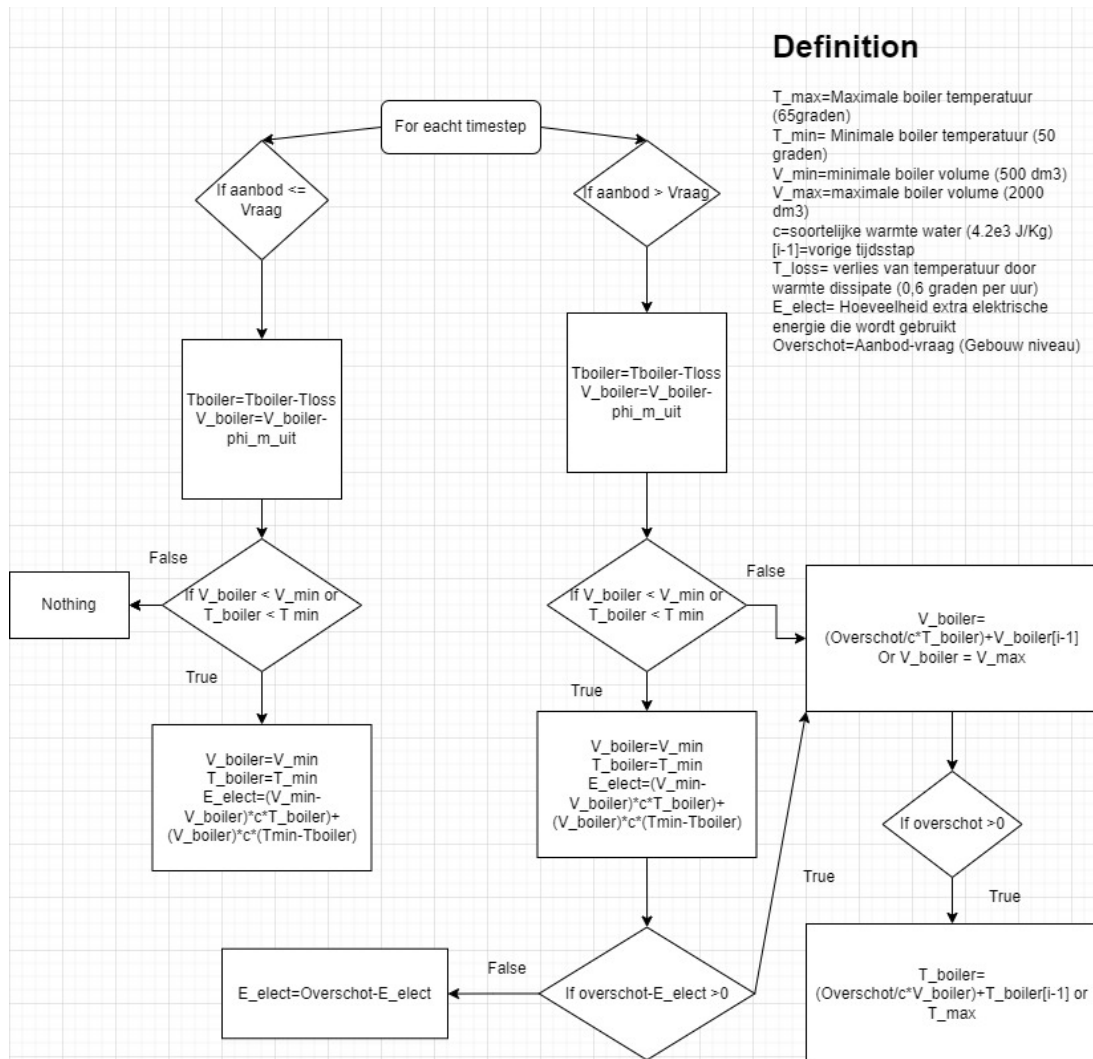
Voor deze studie is een boiler model ontwikkeld gebaseerd op een vereenvoudigde energiebalans van een boiler Figuur 8-1. Figuur 8-2 toont een grafische weergave van het geprogrammeerde model. De aansturing van de boiler volgt dezelfde aanpak als in de warmtepompstudie in sectie 5.3.2.

In deze studie wordt een warm tapwatervraagprofiel gebruikt dat afkomstig is van een grootkantoor gebouw uit de DOE Prototype Building Models database (Halverson et al., 2014).



Figuur 8-1 Energiebalans van een boiler. Gebaseerd op een afbeelding uit (Beausoleil-Morrison, 2020) .

Uurmatching



Figuur 8-2 Flowdiagram van het geprogrammeerde boiler model inclusief de geïmplementeerde vraagsturende regeling.

8.2.3 Prestatie aspecten en indicatoren

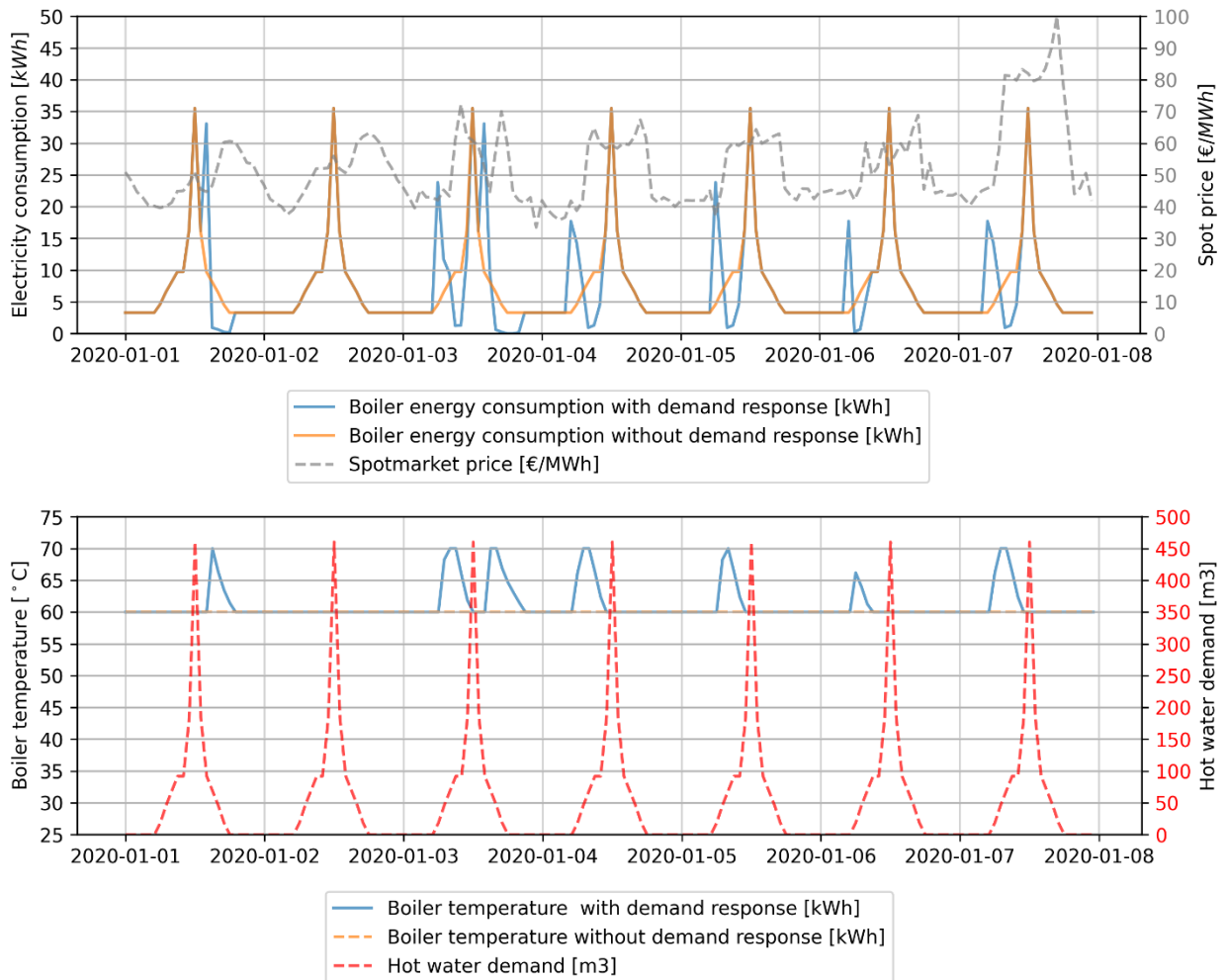
In deze studie zal het effect van vraagsturing met de boiler verkend worden op de energievraag, de zelfconsumptie van ingekochte hernieuwbare energie en de energiekosten bij inkoop op de spotmarkt. De zelfconsumptie van ingekochte hernieuwbare energie wordt gekwantificeerd met de OCEF-indicator (Sectie 2.3). Hierbij is het profiel van de beschikbare hernieuwbare energie, uitgaande van 70% wind en 30% zon, geschaald om op jaarbasis netto in de elektravraag van de boilers te kunnen voorzien. Voor de effecten op de energiekosten zijn de uur spotprijzen uit 2021 gebruikt (Hirth et al., 2018).

8.3 Simulatie resultaten

Figuur 8-3 toont de resultaten van een simulatie over een week waar de boiler wordt ingezet om energiekosten te minimaliseren. De grafiek toont het elektraverbruik en de boiler temperatuur voor een variant zonder vraagsturing (oranje) en een variant met vraagsturing (blauw). De grafiek laat zien dat het vraagsturingsalgoritme anticipeert op een stijging in de spotprijs (grijs) en de boiler aanwarmt wanneer de spotprijs nog laag is. Tijdens deze momenten loopt de temperatuur in de boiler op tot het maximum

Uurmatching

(blauwe pieken in onderste figuur van Figuur 8-3). Deze opgeslagen energie wordt vervolgens weer onttrokken wanneer er een tapwatervraag is tijdens de spotprijspiëk waardoor er elektraverbruik tijdens dit moment wordt vermeden. Deze momenten doen zich vooral voor tijdens de ochtend piek. De resultaten laten zien dat deze boilers de mogelijkheid bieden om elektriciteitsverbruik over een periode van zo'n 1-3 uur te verschuiven.



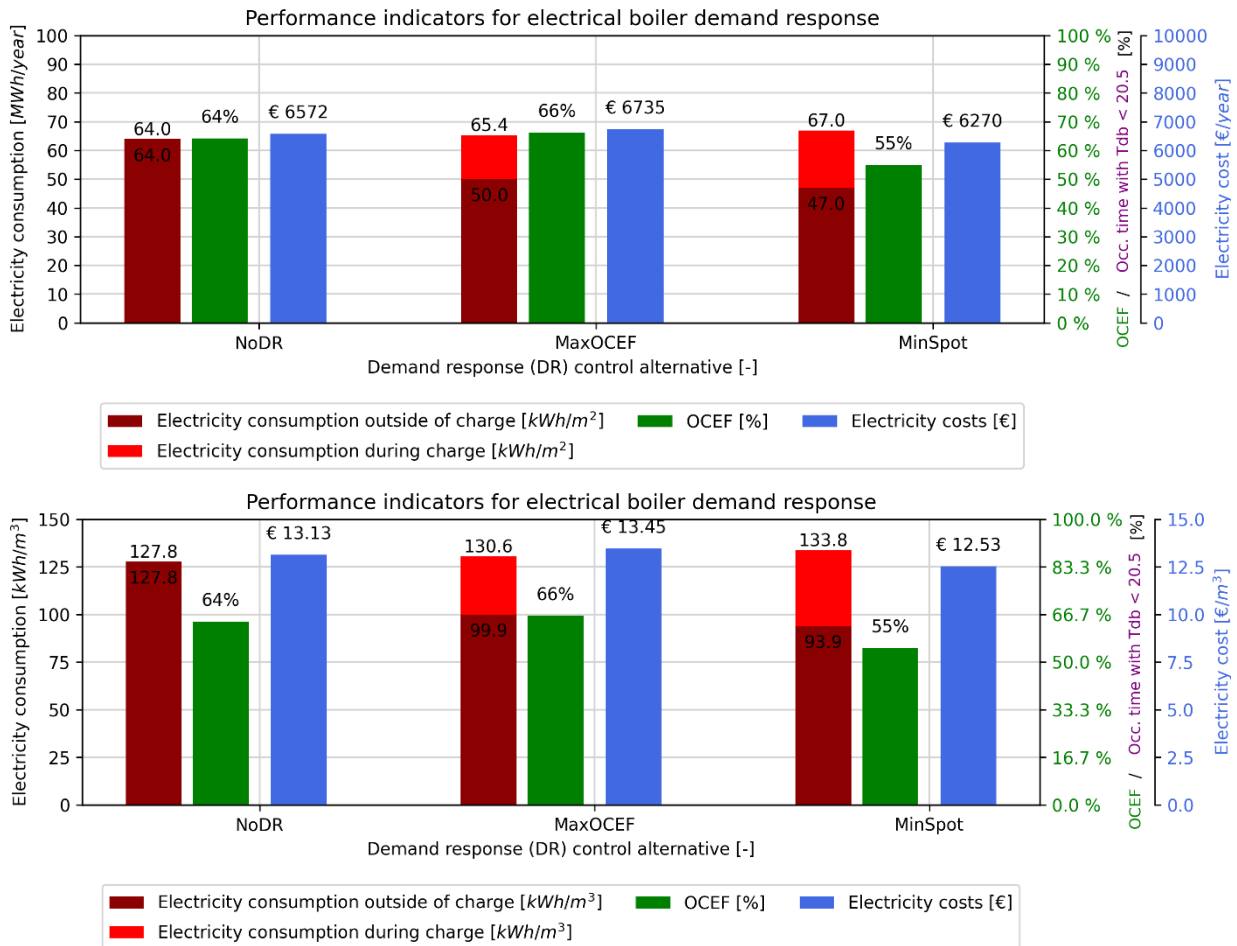
Figuur 8-3 Simulatieresultaten van een week met- (blauw) en zonder vraagsturing (oranje) met de boiler. Te zien is dat de vraagsturende regeling anticipeert op een stijging in de spotprijs en de boiler aanwarmt wanneer de spotprijs nog laag is. Dit leidt vervolgens tot een verlaging van het elektraverbruik tijdens de spotprijspiëk.

Figuur 8-4 toont het effect van vraagsturing met de boiler over een heel jaar voor de verzameling van 200 boilers (boven) en uitgedrukt per m³ warmtapwaterverbruik (onder). De grafiek toont drie varianten: (i) NoDR: de situatie zonder vraagsturing, (ii) MaxOCEF: een regelvariant waar de boiler wordt ingezet om de zelfconsumptie van ingekochte hernieuwbare energie te vergroten en (iii) MinSpot: een regelvariant waar de boiler wordt ingezet om energiekosten te minimaliseren.

Het staafdiagram laat zien dat de vraagsturingstrategieën leiden tot een kleine stijging van 1.4-3.0 MWh/y in het totale elektraverbruik voor warmtapwater. Dit komt omdat een deel van de energie die wordt gebruikt om de boiler op te laden verloren gaat door geleiding door het vat en de afkoeling van de

Uurmatching

boiler. Ook is te zien dat de vraagsturingsstrategieën in staat zijn om 15.4-20.0 MWh/y (of 24-31%) van de energievraag over de tijd te verschuiven (lichtrood). In het geval van de boiler en het watervraagprofiel is er afruil tussen het maximaliseren van de zelfconsumptie van hernieuwbare energie en het minimaliseren van spotprijskosten. De MaxOCEF strategie leidt tot een verbetering van 2% in OCEF maar ook tot een toename in de energiekosten van 2%. De MinSpot strategie daarentegen leidt tot een afname van 9% in OCEF en een besparing van 5% in de energie kosten (€302).



Figuur 8-4 Effect van de verschillende vraagsturingsvarianten op OCEF, energiekosten, het energieverbruik en het verschoven energieverbruik. De NoDR variant geeft de prestaties van referentiescenario zonder vraagsturing weer. Boven: resultaten voor 200 boilers. Onder: resultaten per m³ warmwaterverbruik.

8.4 Discussie en conclusies betreffende het technisch potentieel

Het technisch potentieel van vraagsturing met de kleine elektrische boilers is substantieel. In deze studie kon 24-31% van het elektraverbruik voor warmtapwater bereiding verschoven worden over de tijd. Deze mate van flexibiliteit is echter niet goed te vertalen naar een substantiële toename in de benutting van ingekochte hernieuwbare energie. Deze nam in deze studie slechts met 2% toe. Ook hier speelt een vergelijkbare uitdaging als bij de verzameling apparaten die onderzocht zijn in hoofdstuk 0. Het elektriciteitsvraag profiel zonder vraagsturing overlapt op een grotendeels gunstige manier met het aanbod van hernieuwbare energie. Het verbruik van warmwater vindt vooral overdag tijdens kantooruren plaats en heeft een piek midden op de dag. Dit patroon overlapt goed met het aanbod van ingekochte

Uurmatching

zonne-energie en leidt tot een hoge mate van zelfconsumptie (66%) in het referentiescenario die slechts moeilijk verder te verbeteren is. Er is een resterende warmtevraag die wordt veroorzaakt door de noodzaak om de boiler op de minimale temperatuur te houden en legionella vorming te voorkomen. Om deze vraag in te vullen met ingekochte hernieuwbare energie moet deze over een tijdsduur van zo'n 6-12 uur verschoven kunnen worden wat niet lukt met de beperkte opslagcapaciteit van de boiler die slechts flexibiliteit over een tijdsduur van 1-3 uur biedt.

De flexibiliteit van de boilers kan wel ingezet worden om een betekenisvolle besparing op de spotmarktkosten te realiseren. In deze studie kon er 5% bespaard worden op de totale kosten voor warmtapwater bereiding. De 3 uur waarover de energievraag verschoven kan worden met de boiler is voldoende om grote prijsverschillen op de spotmarkt te benutten Figuur 8-3.

Een beperking in deze studie is dat ervoor gekozen is om altijd de minimumtemperatuur van 60°C voor het voorkomen van legionella te hanteren. Het is echter bekend dat om legionellabacteriën te doden het slechts noodzakelijk is om kortstondig de boiler te verhitten en dat het langere tijd duurt voordat legionella concentraties problematisch hoog worden. Een recente studie (Van Kenhove et al., 2021) heeft laten zien dat het mogelijk is om een veilig situatie te bereiken met slimmere regelconcepten waarbij er gewerkt wordt met een temperatuur van 45°C die sporadisch wordt afgewisseld met een temperatuurschok waar de boiler voor korte duur op 70°C wordt gebracht. Deze benadering bespaart energie en zou ook het flexibiliteitspotentieel van boilers vergrootten.

8.5 Conclusies betreffende het economisch potentieel

8.5.1 Benadering en aannames betreft kosten en baten

Voor de evaluatie van de business case zullen verschillende scenario's voor de investering en voor toekomstige marktomstandigheden doorgerekend worden.

De kosten om vraagsturing met elektrische boilers mogelijk te maken hangen sterk af van de wijze waarop dit wordt vormgegeven. Er zullen drie kostenscenario's worden beschouwd (zie A. in Tabel 8-2). In de huidige situatie hebben close-in boilers geen mogelijkheden om ze extern aan te sturen. Om in deze situatie 200 analoge boilers die verspreid zullen staan over de Science Park campus flexibel aan te sturen zal op iedere boiler een eigen externe regelaar (~€ 150,- per stuk) aangesloten moeten worden die het verwarmingselement aanstuurt. Dit zou leiden tot zeer hoge kosten en deze situatie zal worden beschouwd als het maximum kosten scenario.

Het is goed mogelijk dat er in de komende jaren kleine boilers op de markt komen met meer functionaliteiten in hun connectiviteit en slimme aansturing. Als er in de regelgeving en door fabrikanten hier op wordt ingezet kan dit soort functionaliteit in de productie van kleine boilers worden meegenomen en kan door de schaalgrootte een veel lagere kostprijs gerealiseerd worden (hier zal € 20 per stuk worden aangenomen). Deze mogelijke toekomstige situatie zal als midden kosten scenario worden beschouwd.

De situatie met veel kleine elektrische boilers verspreid over de campus is kenmerkend voor Science Park en vergelijkbare onderwijs en kantoorlocaties. Warmtapwater kan echter ook verzorgd worden met een centrale voorziening. Bij een dergelijke situatie zal er gebruik gemaakt worden van een kleiner aantal grotere boilerkasten waarbij de totale kosten lager zullen zijn. De simulatiestudie geeft ook inzicht in het potentieel van vraagsturing in die situatie. Zo kan de beschouwde 2000 Liter opslagcapaciteit ook geïnterpreteerd worden als een situatie met 10 boilers van 200 Liter. Dit scenario wordt beschouwd als het laagste kosten scenario.

Voor de toekomstige marktsituatie zullen 2 scenario's worden beoordeeld. In de simulatiestudie zijn spotprijzen uit 2021 gebruikt. Deze zullen als representatief worden beschouwd voor het heden. Om ook een beeld te krijgen van de business case in een mogelijke toekomst met een grotere spreiding in

Uurmatching

spotprijzen zal ook hier gerekend worden met een aanvullend scenario waar is uitgegaan van een spotprijsspreiding over de dag die gemiddeld 3 keer hoger was dan in 2021.

Business case

Tabel 8-2 toont de financiële beschouwing van de business case. In de tabel is te zien dat een investering in het flexibel kunnen aansturen van de elektrische boilers onder de recente marktomstandigheden van 2021 verlieslijdend is. De netto contante waarde en de interne rentevoet zijn negatief in alle kostenscenario's. Alleen het minimum kosten scenario, dat uitgaat van een klein aantal grote boilers, komt in de buurt van een winstgevende situatie met een TVT van 9.9 jaar en een interne rentevoet van 0%. Mogelijk zou er in dit scenario wel business case kunnen ontstaan als er een grotere opbrengst zou zijn door gunstiger temperatuur regime (45-70°C) dat meer opslagcapaciteit biedt of het inzetten van de boilers op een andere energiemarkt.

In een mogelijk toekomstig scenario met een grotere prijs spreiding is er wel een positieve business case mogelijk in de midden- en minimum kosten scenario's. In die scenario's is de business case zelfs zeer gunstig met een lage terugverdiendtijd (resp. 3.8 en 1.4 jaar), een positieve NCW en een hoge interne rentevoet (resp. 23% en 70% jaar).

Uit deze beschouwing kan geconcludeerd worden dat er alleen een business case mogelijk is voor vraagsturing met kleine elektrische boilers als fabrikanten kleine slimme boilers op de markt zetten die een externe aansturing mogelijk maken voor zeer lage extra kosten.

A. Eenmalige kosten					
Maximum scenario kosten	200	stuks	-150.00	€/stuk	€ 30,000.00 -
Midden scenario kosten	200	stuks	-20.00	€/stuk	€ 4,000.00 -
Minimum scenario kosten	10	stuks	-150.00	€/stuk	€ 1,500.00 -
B. Jaarlijkse kosten zonder vraagsturing					
Energiekosten zonder vraagsturing					€ 6,572.00 -
C. Jaarlijkse kosten incl. besparing met vraagsturing, huidige omstandigheden					
Aansturing license fee					€ 150.00 -
Energiekosten met vraagsturing					€ 6,270.00 -
Netto besparing met vraagsturing					€ 152.00
D. Jaarlijkse kosten incl. besparing met vraagsturing, bij 3x grotere prijs spreiding in dag					
Aansturing license fee	1	asset	156.00	€/asset	€ 156.00 -
Energiekosten met vraagsturing					€ 5,666.00 -
Netto besparing met vraagsturing					€ 1,062.00

Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam

E. Rentabiliteit					
Rentabiliteit heden	TVT		IRR10 jaar		NCW10 jaar bij r: 4%
Maximum scenario kosten	197.4	Jaar	-35%		€ - 28,767
Midden scenario kosten	26.3	Jaar	-15%		€ - 2,767.14
Minimum scenario kosten	9.9	Jaar	0%		€ - 267.14
Rentabiliteit bij 3x grotere prijsspreiding	TVT		IRR10 jaar		NCW10 jaar bij r: 4%
Maximum scenario kosten	28.2	Jaar	-15%		€ - 21,386.23
Midden scenario kosten	3.8	Jaar	23%		€ 4,613.77
Minimum scenario kosten	1.4	Jaar	70%		€ 7,113.77

Tabel 8-2 Doorrekening business case van vraagsturing met elektrische boilers voor tapwaterverwarming onder verschillende scenario's

Ook is er een grotere spotmarktspreiding nodig dan in 2021 het geval was wat, gezien de marktsituatie in 2022 en 2023, een aannemelijk toekomstscenario is. Voor grotere boilers (~200 Liter) is er ook met bestaande producten een gunstige businesscase mogelijk bij marktomstandigheden met een grote spotprijsspreiding.

9. Conclusies en vervolgonderzoek

9.1 Discussie en conclusies

Het onderzoek kent verschillende onderdelen, die in de voorgaande hoofdstukken besproken zijn, en daar zijn ook conclusies weergegeven. In dit hoofdstuk worden de conclusies kernachtig samengevat.

Belangrijk is om op de beperkingen van dit onderzoek te wijzen. Er is alleen naar de SPOTprijsmarkt gekeken, en niet naar andere markten. Voor balansmarkten met grotere dynamische prijsvariëaties worden businesscases interessanter, maar individuele gebouwen hebben daarvoor een te kleine capaciteit. Ontwikkelingen in het bundelen ("poolen") van gebouwen zou hier verandering in kunnen brengen.

Bij het uitvoeren van de simulaties zijn maar enkele optimalisatie strategieën ingezet. Het is niet uit te sluiten dat er betere strategieën zijn dan de gebruikte, waardoor mogelijk gunstigere uitkomsten verkregen konden worden. Daarom is er ook theoretisch naar praktijksituaties gekeken, om maximaal potentieel van vraagverschuiving vanuit verschillende gezichtspunten vast te stellen (hfst 3).

De casestudy van de vraagverschuiving van apparaten is genomen in een onderzoeksgebouw met veel soorten apparaten, maar ook met een hoge basislast. De vermogensverhouding daartussen is mogelijk niet representatief. De gevonden percentages in OCEF (de indicator voor matching) zouden bij een ander gebouw met lagere basislast mogelijk wat gunstiger kunnen uitvallen.

Uurmatching

Conclusies in punten:

- De optimale inkoopverhouding tussen zon en wind is 70% wind en 30% zon. Bij deze verhouding is in de casestudy de maximale uurmatching (OCEF 65%) tussen aanbod duurzame elektriciteit en vraag verkregen.
- Met een groep apparaten in een onderzoeksgebouw, die ca 3 uur vraagverschuiving toelaten, is circa 3% tot maximaal 6% van het jaarlijks energieverbruik van het gebouw te verschuiven. Dat kan theoretisch tot evenveel procentpunten toename van de uurmatching (OCEF) leiden, maar in de praktijk zal dat minder zijn (hfst. 3).
- Voor dezelfde groep apparaten is in simulaties een maximale verbetering gevonden van 1,5% (procentpunt) in de OCEF (hfst. 4).
- In deze simulaties bleek daarbij een verlaging van 3.2% van de spotmarktkosten mogelijk.

- Voor een in pandig kantoorvertrek is theoretisch onderzocht wat de benutbare bufferwerking van de wanden is die ingezet zou kunnen worden voor vraagverschuiving. Voor praktische situaties blijkt dat maximaal circa 22% van de warmteopslagcapaciteit van de wanden te zijn, als er geen nachtverlaging plaatsvindt. Als er wel nachtverlaging plaatsvindt reduceert dit tot minder dan 8%. Gerelateerd aan de warmtebehoefte van het beschouwde vertrek wordt dit circa 30% en minder dan 11%.
- Nachtverlaging kan derhalve conflicterend zijn met het ontsluiten van maximale flexibiliteit.

- Simulaties van vraagverschuiving met een warmtepomp lieten een verbetering van de OCEF van 5% (procentpunten) zien.
- In deze simulaties met warmtepomp bleek een verlaging van 9% van de spotmarktkosten mogelijk.

- Een klimaatsysteem waarin lucht als een belangrijke warmtedrager fungeert, maar zonder dat er een luchtrecirculatie mogelijkheid is ingebouwd, gebruikt onnodige extra energie tijdens aanwarmen van het gebouw tijdens opstart, omdat er altijd verse buitenlucht nodig is voor de luchtdistributie in het gebouw.

- Met de praktijkproeven is aangetoond dat vraagverschuiving van de warmtepomp kan plaatsvinden; het bleek binnen de proefopzet niet mogelijk om dit te kwantificeren, onder meer omdat de warmtepomp niet voorzien is van een eigen verbruiksmeter.
- In de gebruikte praktijk case blijkt tevens verbeterpotentieel in de basisaansturing van de installaties te zitten (“good housekeeping”), wat het zicht op het specifieke vraagverschuivingspotentieel heeft bemoeilijkt.
- “Good house keeping” en flexibel aansturen van gebouwinstallaties (inclusief de warmtepomp) vragen beide “slimme” besturingssystemen die overweg kunnen met voorspellingen van bijvoorbeeld weer, ruimtegebruik, en bijvoorbeeld de SPOTprijzen. Daarbij liggen de benodigde stuursignalen en regelacties in het gebouw in elkaars verlengde. Het ligt derhalve voor de hand om “good house keeping” en vraagverschuiving vanuit eenzelfde “slim” besturingssysteem aan te sturen.
- “Slim” aansturen vereist wel betrouwbare sensoren in de gebouwen en installaties, en een voldoende fijn vertakt installatieontwerp dat (na)regeling op individuele ruimtes mogelijk maakt.

Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam

Bij de meetsessies bleken niet alle sensoren adequaat te functioneren, ook hiervoor is aandacht nodig in een Meer Jaren Onderhoud Plan (MJOP) en de afgesloten onderhoudscontracten.

- Uit de casestudies bleek dat er een positieve business case bestaat voor enkele soorten apparaten en in specifieke situaties. Dit bleek het geval voor apparaten met een groot vermogen per apparaat, een flexibiliteit in de elektravraag van 3-6 uur, zoals bij de warmtepomp voor ruimteverwarming en elektrische boilers met een grote inhoud (~200 Liter). Bij deze apparaten is een investering in vraagsturing ook in de huidige marktomstandigheden rendabel zolang de benodigde investering laag is. Een voorwaarde voor een positieve business case voor vraagsturing met deze apparaten is dat het apparaat reeds aan te sturen is vanuit een GBS dat de mogelijkheden biedt voor een koppeling met nieuwe aansturingssystemen.
- Bij apparaten met een laag vermogen die nog niet direct de mogelijkheid bieden om ze op afstand aan te sturen, zoals bij kleine close-in boilers, is er geen winstgevende businesscase vanwege de hoge kosten die gemaakt moeten worden per apparaat om een flexibele aansturing mogelijk te maken.
- Bij dergelijke apparaten is een gunstige business case wel mogelijk als fabrikanten externe aansturingmogelijkheden in het product opnemen waarbij de kosten hiervan per product lager zullen zijn vanwege schaalvoordelen.
- Advies:
 - Stimuleer/ verplicht externe communicatie- en aansturingmogelijkheden voor elektrische apparaten als boilers, warmtepompen, vriezers, etc.
 - Stimuleer/ verplicht communicatieprotocollen voor flexibiliteit tussen apparaten.
Succesvolle voorbeelden: Opentherm voor thermostaten/gasketels, BACnet voor GBS.
- Ook bij apparaten waar de duur van de flexibiliteit korter dan 3 uur was vonden wij geen business case voor vraagsturing bij inkoop op de day-ahead spotprijsmarkt (vriezers, koelkamers, etc.). Om de grootste verschillen in spotmarktprijzen te benutten was een langere tijdsduur van vraagsturing nodig. Mogelijk is het wel aantrekkelijk om de flexibiliteit van deze apparaten in te zetten op de (on)balansmarkten waar er sprake is van grotere prijsfluctuaties over kortere tijdsperiodes.

9.2 Vervolgonderzoek

Er is momenteel een stijgende interesse in “smart buildings” door:

- nadruk op duurzaamheid, gebruik van elektriciteit met een lage CO₂ intensiteit;
- hogere energieprijzen;
- netcongestie;
- GACS wet en regelgeving.

Dit zijn drijvende krachten die niet alleen op puur terugverdientijden gebaseerd zijn, maar ook de “license to operate” beïnvloeden. Smart buildings zijn gericht op zowel “good house keeping” als op flexibiliteit. De “smart building” technologie biedt integrale oplossingen, het ligt daarom niet voor de hand om aparte systemen voor het ontsluiten van flexibiliteit te installeren. Ook gebouwbeheerders hebben baat bij zoveel mogelijk integratie van systemen.

Vervolgonderzoek kan derhalve gaan over de functionaliteit van “smart building” systemen en de verschillende aansturingconcepten die daarin opgenomen zijn. Vragen zijn

- Hoe kunnen “smart building” systemen zo effectief mogelijk ingezet worden?
- Welke prestaties zijn te verwachten van “smart building” systemen?

Uurmatching

- Welke functionaliteiten in “smart building” systemen zijn essentieel om tot de gewenste prestaties te komen?
- Wat is er nodig om een bestaand GBS of Gebouw Automatiserings en Controle Systeem (GACS) om te zetten in een “smart” systeem

Daarnaast kan het business potentieel van het deelnemen aan andere markten verder onderzocht worden, gecombineerd met de mogelijkheden van pooling om aan deze markten deel te nemen.

Het theoretisch potentieel, zoals in hoofdstuk 3 uitgewerkt, kan uitgebreid worden met beschouwingen over verschillende gebouwtypen, gecombineerd met een verschillend aandeel flexibel in te zetten apparaten.

Literatuurlijst

- Aduda, K. O., Labeodan, T., & Zeiler, W. (2018). Towards critical performance considerations for using office buildings as a power flexibility resource—a survey. *Energy and Buildings*, 159, 164–178.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.096>
- Afman, M. R., & Wienders, L. M. L. (2014). Achtergrondgegevens stroometikettering 2013. *Publicatienummer*, 13, C86.
- Beausoleil-Morrison, I. (2020). *Fundamentals of building performance simulation*. Routledge.
- Bloomberg (2022). Lithium-ion Battery Pack Prices Rise for First Time to an Average of \$151/kWh
<https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-rise-for-first-time-to-an-average-of-151-kwh/>
- Cao, S., Hasan, A., & Sirén, K. (2013). On-site energy matching indices for buildings with energy conversion, storage and hybrid grid connections. *Energy and Buildings*, 64, 423–438.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.05.030>
- Coffey, B. (2013). Approximating model predictive control with existing building simulation tools and offline optimization. *Journal of Building Performance Simulation*, 6(3), 220–235.
- Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., Buhl, W. F., Huang, Y. J., Pedersen, C. O., Strand, R. K., Liesen, R. J., Fisher, D. E., Witte, M. J., & Glazer, J. (2001). EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33(4), 319–331.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00114-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00114-6)
- Crowe, E., Mills, E., Poeling, T., Curtin, C., Bjørnskov, D., Fischer, L., & Granderson, J. (2020). Building commissioning costs and savings across three decades and 1500 North American buildings. *Energy and Buildings*, 227, 110408. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110408>
- D'Antoni, M., Bonato, P., Geisler-Moroder, D., Loonen, R., & Ochs, F. (2019). *IEA SHC Task 56 - System Simulation Models, part C Office Buildings*. International Energy Agency.
- de Vries, S. B., Loonen, R. C. G. M., & Hensen, J. L. M. (2021). The influence of uncertainties in grid electricity primary energy conversion factors on multi-criteria trade-off solutions in façade design optimisation. In *Building Simulation*. IBPSA.
- ENTSO-E. (2017). *Transparency platform*.
- Halverson, M. A., Rosenberg, M. I., Hart, P. R., Richman, E. E., Athalye, R. A., & Winiarski, D. W. (2014). *ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2013 Determination of Energy Savings: Qualitative Analysis*. Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States).
- Henninger, R. H., & Witte, M. J. (2011). *EnergyPlus testing with ASHRAE 1052-RP Toolkit—Building fabric analytical tests*. Department of Energy.
- Henninger, R. H., & Witte, M. J. (2013). *EnergyPlus Testing with Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests from ANSI/ASHRAE Standard 140-2011*. Department of Energy.
- Hirth, L., Mühlenpfordt, J., & Bulkeley, M. (2018). The ENTSO-E Transparency Platform – A review of Europe's most ambitious electricity data platform. *Applied Energy*, 225, 1054–1067.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.048>
- Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long Short-Term Memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735–1780.
<https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>
- Höning, N. (2023, May 19). *Pricing for Seita SaaS services for energy flexibility at the pilot Scale*.
- Jean, G., Ringuette, S., Monarque, A., Reghem, P., Trépanier, A., Nolin, L., Duchesneau, K., Lavoie, M., Pierre, É., Paquin, Y., House, J., Corsi, M., Choinière, D., Hosatte, S., Jago, P., Guèvremont, P., Meredith, I., Miles, G., Corbin, D., ... Brian O'Donnell. (2008). *Recommissioning Guide For Building Owners and Managers*. www.canmetenergy.nrcan.gc.ca/glossary_Rcx.html

Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam

- Junker, R. G., Azar, A. G., Lopes, R. A., Lindberg, K. B., Reynders, G., Relan, R., & Madsen, H. (2018). Characterizing the energy flexibility of buildings and districts. *Applied Energy*, 225, 175–182. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.037>
- Konis, K., & Selkowitz, S. (2017). *Effective Daylighting with High-Performance Facades*. Springer.
- Li, H., Wang, Z., Hong, T., & Piette, M. A. (2021). Energy flexibility of residential buildings: A systematic review of characterization and quantification methods and applications. *Advances in Applied Energy*, 3, 100054. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100054>
- Liu, W., Lund, H., & Mathiesen, B. V. (2011). Large-scale integration of wind power into the existing Chinese energy system. *Energy*, 36(8), 4753–4760. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.05.007>
- Loomans, M. G. L. C., Mishra, A. K., Derks, M. T. H., Kraakman, J. J., & Kort, H. S. M. (2018). Occupant response to transitions across indoor thermal environments in two different workspaces. *Building and Environment*, 144, 402–411. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.049>
- Loonen, R. C. G. M., & Hensen, J. L. M. (2018). Approaches for computational performance optimization of innovative adaptive façade concepts. In *Department of the Built Environment: Vol. Doctoral thesis*.
- Magni, M., Ochs, F., de Vries, S., Maccarini, A., & Sigg, F. (2021). Detailed Cross Comparison of Building Energy Simulation Tools Results using a reference office building as a case study. *Energy and Buildings*, 111260. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111260>
- Marszal, A. J., Johra, H., Weiss, T., Knotzer, A., Østergaard Jensen, S., Kazmi, H., Vigna, I., Perneti, R., Le Dréau, J., Zhang, K., Grønborg Junker, R., Madsen, H., Amaral Lopes, R., Aelenei, D., Arendt, K., & Reynders, G. (2019). Characterization of Energy Flexibility in Buildings. In A. Knotzer, R. Perneti, & S. Østergaard Jensen (Eds.), *Annex 67 Energy Flexible Buildings*. IEA EBC.
- Mohammadi, Z., Hoes, P. J., & Hensen, J. L. M. (2020). Simulation-based design optimization of houses with low grid dependency. *Renewable Energy*, 157, 1185–1202. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.157>
- Normalisatie-instituut, N. (2018). *NEN 5060: Hygrothermische eigenschappen van gebouwen - Referentieklimaatgegevens + A1*. NEN.
- Oldewurtel, F., Parisio, A., Jones, C. N., Gyalistras, D., Gwerder, M., Stauch, V., Lehmann, B., & Morari, M. (2012). Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control. *Energy and Buildings*, 45, 15–27.
- O'Neill, M. (2009). *Riccardo Poli, William B. Langdon, Nicholas F. McPhee: A Field Guide to Genetic Programming: Lulu. com, 2008, 250 pp, ISBN 978-1-4092-0073-4*. Springer.
- Oschatz, B., Schüwer, D., & Pehnt, M. (2016). *Weiterentwicklung der Primärenergiefaktoren im neuen Energiesparrecht für Gebäude: Endbericht*. Dt. Verein des Gas- und Wasserfaches.
- Papachristou, C., Hoes, P.-J., Loomans, M. G. L. C., van Goch, T. A. J., & Hensen, J. L. M. (2021). Investigating the energy flexibility of Dutch office buildings on single building level and building cluster level. *Journal of Building Engineering*, 40, 102687. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102687>
- Satchwell, A. (2020). *GEB Technical Report Webinar Series: Integration – Building Equipment*.
- St-Jacques, M., Bucking, S., & O'Brien, W. (2020). Spatially and temporally sensitive consumption-based emission factors from mixed-use electrical grids for building electrical use. *Energy and Buildings*, 224, 110249. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110249>
- Taylor, R. (1990). Interpretation of the Correlation Coefficient: A Basic Review. *Journal of Diagnostic Medical Sonography*, 6(1), 35–39. <https://doi.org/10.1177/875647939000600106>
- Van Kenhove, E., De Backer, L., De Jonge, K., & Laverge, J. (2021, September 1). *Demonstration of operation of anti-Legionella controller in test setup*. <https://doi.org/10.26868/25222708.2021.31130>
- Wilkinson, R. J. (2000). Establishing commissioning fees. *ASHRAE Journal*, 42(2), 41.

Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam

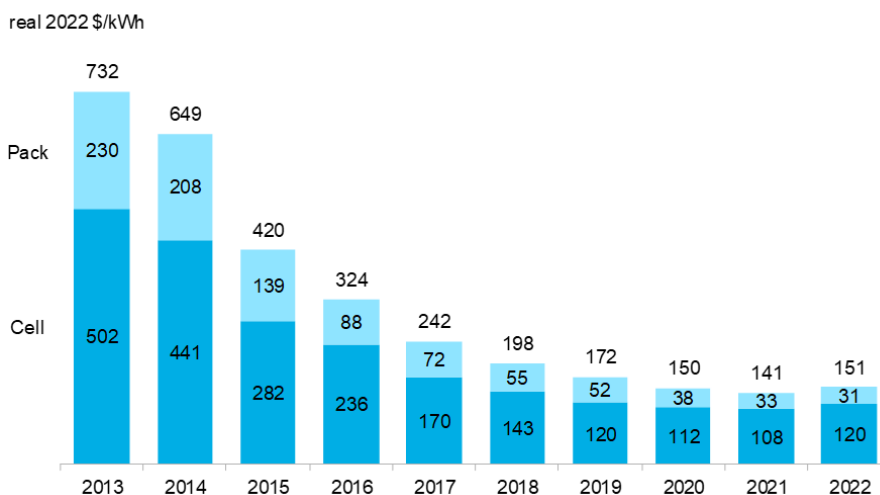
Appendix A: Actieve buffersystemen

A1 Verkenning business case voor een accu

In hoofdstuk 3.3 is het effect van vraagsturing van installaties vergeleken met het inpassen van een accu, waarbij de vergelijking gemaakt werd met een accu van 1050 kWh.

Op basis van een batterij van 1050 kWh opslagcapaciteit en één volledige oplaad/ontlaadcyclus per dag kan 383 MWh per jaar verschoven worden (zie paragraaf 3.3). Als hier een tariefvoordeel van minimaal 30 euro per verschoven MWh voor gerekend mag worden (verschuiving van een zone met hoogtarief naar een zone met laagtarief), dan levert dit 383×30 is ca. 11.500 euro per jaar op. Indien er uitgegaan wordt van 300 euro tariefverschil per MWh, dan wordt dit 115.000 euro per jaar.

Volume-weighted average lithium-ion battery pack and cell price split, 2013-2022

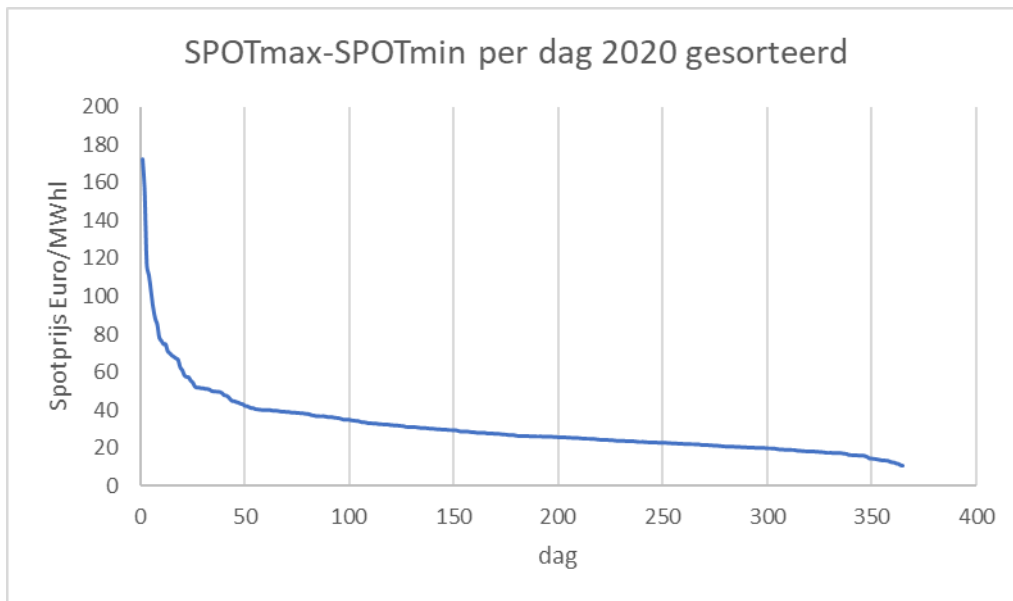


Source: BloombergNEF. All values in real 2022 dollars. Weighted average survey value includes 178 data points from passenger cars, buses, commercial vehicles and stationary storage.

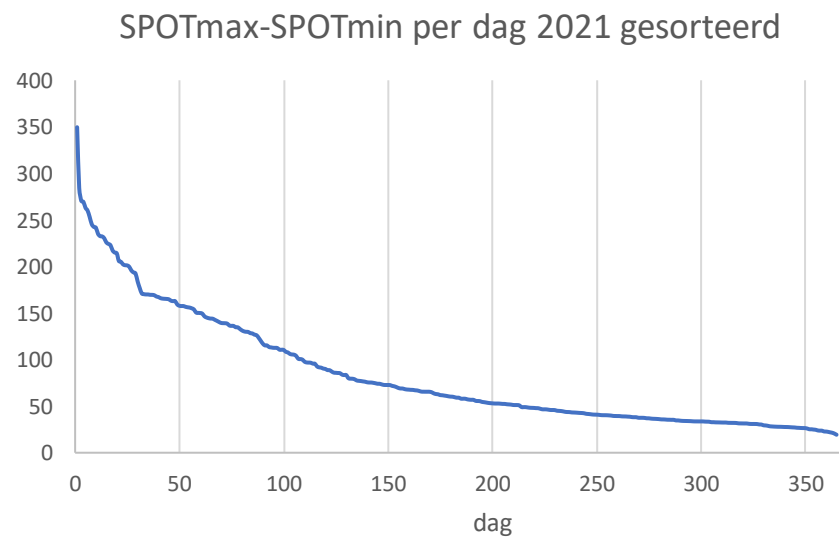
Figuur 9-1 Prijsontwikkeling batterijen volgens Bloomberg (2022).

In Figuur 9-1 is een overzicht gegeven van de ontwikkelingen van de batterijprijzen gedurende de afgelopen jaren. Zichtbaar is dat de prijzen weer stijgen sinds 2021. Prijzen in de Nederlandse markt variëren van 400 tot 900 euro. In Tabel 9-1 niet gevonden. is voor verschillende scenario's de terugverdiertijd bepaald. Vooralsnog zijn de huidige investeringskosten voor batterijen (inclusief installatie) rond de 600 euro/kWh. Maar nog zonder de kosten voor de hardware en software voor de aansturing van dit batterijsysteem. De investering zal in de praktijk snel hoger uitvallen. Over de levensduur loopt de informatie uiteen van 1000 – 4000 volledige oplaad/ontlaad cycli. Ofwel, bij een volledige oplaad/ontlaad cyclus per dag: 3 tot 12 jaar; en bij twee volledige oplaad/ontlaad cycli per dag: 1,5 tot 6 jaar. De levensduur is korter dan de hierboven berekende terugverdiertijden. Vanaf een tariefvoordeel van 60 euro per verschoven MWh en een levensduur van 4000 volledige oplaad/ontlaad cycli komen levensduur en terugverdiertijd bij elkaar.

Uurmatching

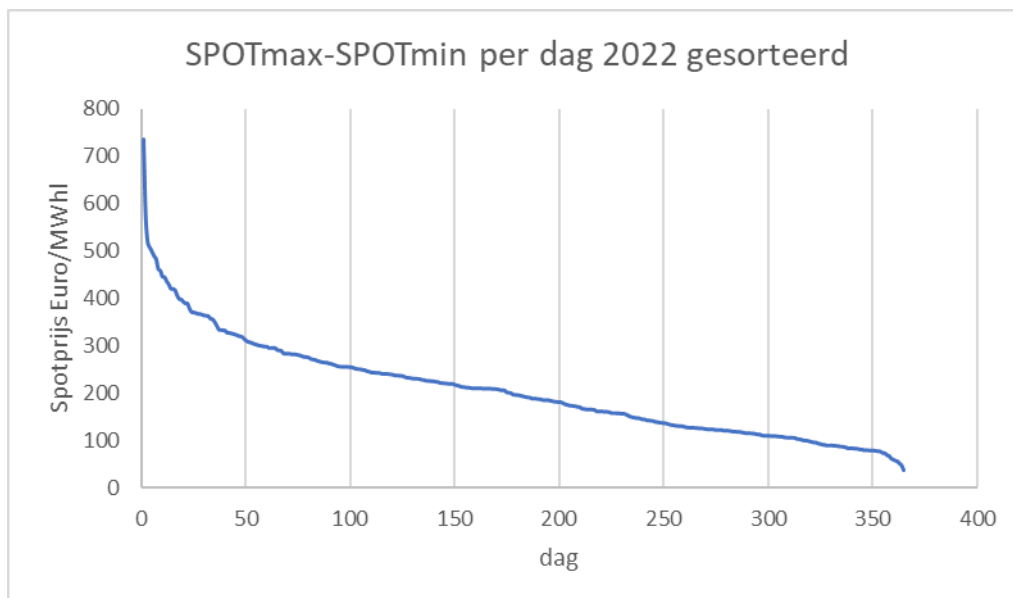


Figuur 9-2 Verschil in de maximale en de minimale SPOTprijs per dag in 2020, gesorteerd; gemiddeld 31 euro/MWh



Figuur 9-3 Verschil in de maximale en de minimale SPOTprijs per dag in 2021, gesorteerd; gemiddeld 83 euro/MWh

Uurmatching



Figuur 9-4 Verschil in de maximale en de minimale SPOTprijs per dag in 2022, gesorteerd; gemiddeld 205 euro/MWh

Per dag is het verschil tussen de maximale en de minimale SPOTprijs (deltaSPOT) bepaald en weergegeven in Figuur 9-2 niet gevonden voor 2020, Figuur 9-3 voor 2021 en Figuur 9-4 voor 2022. De laatste twee jaar is deltaSPOT sterk toegenomen. De hoge pieken in 2021 kwamen voor op het einde van dat jaar: november/december. In 2022 komen hoge pieken verspreid over het jaar voor. In het voorjaar van 2023 zijn de pieken weer wat gedaald. Een verschil in SPOTprijs tussen de maximale dagwaarde en de minimale dagwaarde (deltaSPOT) in de orde van 160 euro lijkt voor 2023 een reële schatting. Uit Tabel 9-1 volgt dan dat de terugverdientijd voor een batterij met een investering van 600 euro/kWh dan ca. 10 jaar bedraagt. Dat zit dicht tegen de levensduur van de batterij aan. Investeren in een batterij is dan nog niet zo aantrekkelijk. Daarvoor moeten de investeringskosten nog verder dalen of de deltaSPOT moet verder toenemen. Geconcludeerd wordt dat het nu financieel nog niet aantrekkelijk is om in batterijen te investeren. Tenzij er op een andere markt gehandeld kan worden dan op de SPOT markt.

A. Hoog/laag verschil SPOT laag			80 eur/MWh
investering	investering	opbrengst	TVT
euro/kWh	euro	euro/jr	jr
300	315000	30640	10,3
600	630000	30640	20,6
900	945000	30640	30,8

B. Hoog/laag verschil SPOT middel			160 eur/MWh
investering	investering	opbrengst	TVT
euro/kWh	euro	euro/jr	jr
300	315000	61280	5,1
600	630000	61280	10,3
900	945000	61280	15,4

C. Hoog/laag verschil SPOT groot			240 eur/MWh
investering	investering	opbrengst	TVT
euro/kWh	euro	euro/jr	jr
300	315000	91920	3,4
600	630000	91920	6,9
900	945000	91920	10,3

Tabel 9-1 Terugverdientijd (TVT) bij verschillende investeringsomvang en verschillende SPOTprijs Max-Min

A2 Potentieel raming flexibele inzet WP met grote warmteopslag

Een warmtepomp met warmtebuffer kan vergeleken worden met een elektrische accu. Immers, de warmtepomp gebruikt elektriciteit om een gebouw te verwarmen. De inzet van een warmtepomp kan verschoven worden door het gebruik van een warmtebuffer. In tabel 5.1 staat een overzicht van een warmtepomp met warmtebuffer. De case met een warmtepomp is zeer relevant, omdat de warmtepomp in de energietransitie bij de elektrificatie van de verwarming van gebouwen naar verwachting veel toegepast zal gaan worden.

Uurmatching

WP met warmtebuffer							
	WP 1	350 kWth		WP 2	585 kWth		
		100 kWel			167,1 kWel		
	COP	3,5		COP	3,5		
warmtebuffer							
	deltaT	15 K			15 K		
	cp_water	4,2 kJ/kgK			4,2 kJ/kgK		
	buffer inhoud	100000 kg			100000 kg		
	warmte inhoud	6300000 kJ/cyclus			6300000 kJ/cyclus		
	thermisch	1750 kWh/cyc			1750 kWh/cyc		
	elektrisch	500 kWh/cyc			500 kWh/cyc		2,991453
	investering	200 euro/ton water			200 euro/ton water		
	investering	20000 euro			20000 euro		
	spec investering	11,43 euro/kWhel			11,43 euro/kWhel		
	specifieke massa	200 kg water/kWhel			200 kg water/kWhel		

Tabel 9-2 Casus Warmtepomp en warmtebuffer

Uit Tabel 9-2 blijkt dat de warmtebuffer, in combinatie met een warmtepomp, beschouwd kan worden als een elektrische accu, echter met een veel lagere specifieke investering: 11,43 euro/kWh. De karakteristiek van deze “accu” (gebaseerd op de combinatie met WP1) is: capaciteit 500 kWh en maximaal vermogen 100 kW. Het vermogen van een dergelijke accu is behoorlijk begrensd. Maar een warmtebuffer neemt wel veel meer ruimte in beslag dan een echte elektrische accu. De in tabel 5.1 gekozen combinatie van warmtepomp en warmtebuffer kan 5 uur lang warmtepomp inzet verschuiven.

De businesscase wordt gelijkvormig opgezet met die van de batterij: 3 uur verschuiven van de piek. Hierbij wordt uitgegaan van alleen een ochtendpiek bij het aanwarmen van een gebouw.

Per dag wordt er dan $3 \cdot 100 = 300$ kWh verschoven, per jaar (stookseizoen aangenomen op een ½ jaar) is dat $365/2 \cdot 300 = 54750$ kWh of 54,8 MWh. Met een tariefvoordeel van 80 euro/MWh levert dit 4384 euro/jaar op. Afgezet tegen een investering van 20000 euro levert dit een TVT van 4,6 jaar op.

Stel dat de WP voor verwarming 2500 vollasturen draait, ofwel $2500 \cdot 100 = 250\,000$ kWh/jr of 250 MWh/j. Het aandeel verschuifbaar voor deze WP is dan $54,8/250$ is dan 22%.

Er kan ook een grotere warmtepomp ingezet worden bij de zelfde bufferomvang. Indien er gekozen wordt voor WP2, wordt een “accu” gecreëerd van eveneens 500 kWh, maar met een vermogen van ruim 167 kW. Deze kan dan 3 uur vraag verschuiven (WP1 kan 5 uur verschuiven).

Per dag wordt er dan $3 \cdot 167 = 500$ kWh verschoven, per jaar is dat $365/2 \cdot 500 = 91250$ kWh of 91,25 MWh. Met een tariefvoordeel van 80 euro/MWh levert dit 7300 euro/jaar op. Afgezet tegen een investering van 20000 euro levert dit een TVT van 2,6 jaar op.

Koude levering door de WP is in het bovenstaande niet meebeschoofd. Maar een WP met WKO heeft 's zomers “gratis” koude uit de opgeslagen koude in de bodem, zodat bij koude levering weinig potentieel voor uurmatching beschikbaar is omdat de WP dan niet in bedrijf hoeft te zijn.

De genoemde investering voor de buffer van 200 euro/m³ betreft een ruwe schatting. De buffer vraagt (veel) ruimte in het gebouw en die ruimte moet er wel zijn. Bovendien kan ruimte duur zijn in een stedelijke omgeving. Deze specifieke investering moet gezien worden als ondergrens, en zonder

Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam

installatie kosten. En zonder de kosten voor de hardware en software voor de aansturing van dit opslagsysteem. Het totaal benodigde investeringsbedrag kan in specifieke situaties een veelvoud zijn van de bovengenoemde waarde.

De conclusie van deze business case geldt voor de verhoudingen in warmtepompcapaciteit en warmtebuffer zoals getoond in tabel 5.1. In deze verhouding kan de optie geschaald worden.

In het bovenstaande is gerekend met een delta-T in de buffer van 15 K. Dat is vrij laag. Indien deze delta-T verdubbeld kan worden naar 30 K halveert de terugverdiëntijd. Dat kan alleen indien er een hoogtemperatuur warmtepomp is toegepast en de gebouwinstallaties met zo'n groot temperatuurverschil tussen aanvoer en retour kunnen werken.

Appendix B: Rapport metingen MLH

Inhoud

1	Inleiding.....	103
2	Het Muller Lulof huis.....	104
3	Opzet	106
4	Metingen oktober & november 2022	107
5	Metingen Maart 2023.....	111
5.1	Centrale installaties	111
5.2	Beschouwing diverse ruimten	118
6	Resultaten en conclusies	130
7	BIJLAGE 1 plattegronden verdiepingen MLH	132

1 Inleiding

Binnen het project uurmatching is de warmtepomp als grote elektriciteitsverbruiker geïdentificeerd, waarvan de inzet ook verschoven kan worden. Naast theoretische studies is er ook gekeken naar een praktijksituatie op de HvA campus. Zoals vaak blijkt bij praktijkonderzoek: de praktijk is weerbarstig. Zo ook hier. Op de HvA campus zijn drie gebouwen met WKO en warmtepomp, uiteindelijk bleek er maar één geschikt voor dit onderzoek. Bij één gebouw was een warmtepomp langdurig in storing en bij een ander gebouw was de warmtepomp volledig defect geraakt. In het Muller Lulofhuis was de warmtepomp wel in bedrijf.

Een gebouw in normaal bedrijf is geen laboratoriumopstelling. Een modern Gebouw Beheers Systeem (GBS) verzorgt de aansturing en registraties, en bij de proeven is er vanuit gegaan dat vanuit dit systeem de benodigde metingen verzameld kunnen worden. De proeven hebben zich beperkt tot het opstarten van de installatie aan het begin van de dag, bij de overgang van nacht- naar dag bedrijf. Aan het begin van de dag is er doorgaans sprake van een piek op het net, en daarom een interessant casus om vraagverschuiving tie te passen, door juist vroeger of later, of een combinatie daarvan, de warmtepomp op te starten. Logischerwijs lag de focus hierbij op het stookseizoen. Koeling vraagt met een WKO weinig extra energie, immers de benodigde koude is in de winterperiode al gemaakt.

De proeven waren gericht op het vergaren van inzicht op de mogelijkheden van vraagverschuiving van warmtepompen te verschuiven. Twee vragen staan hierbij centraal:

3. Kan de warmtepomp later opgestart worden dan normaal het geval is? Zodat de ochtendpiek vermeden wordt?

Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam

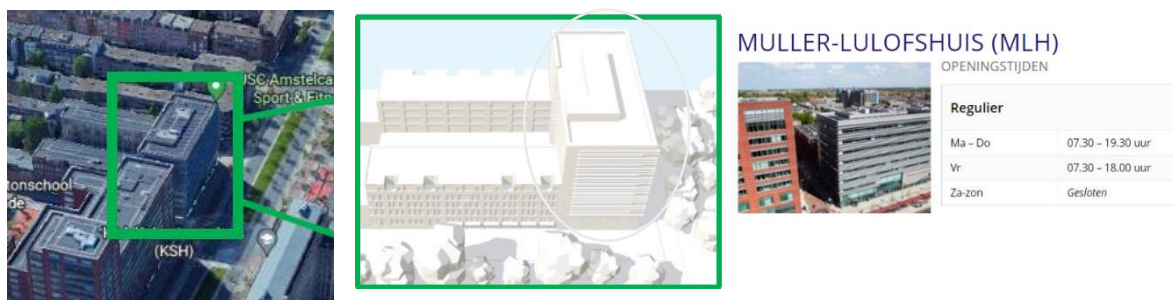
4. Kan het gebouw “opgeladen worden” met warmte voorafgaand aan een periode waarop de WP uit of laag ingesteld wordt?

Idealiter worden zulke proeven uitgevoerd in een optimaal ingeregeld gebouw. In de praktijk verkeren gebouwen vrijwel nooit in een toestand van “optimale inregeling”. Dit onderzoek laat daarom ook zien hoe een bepaald gebouw in de praktijk functioneert. Het is weliswaar maar één casus, maar zeker niet uniek in de uitvoering en het functioneren van een GBS systeem.

Er is gemeten in twee perioden: najaar 2022 en einde winter 2023. In het najaar van 2022 was het mogelijk om online alle registraties binnen te halen via het GBS. Totdat er een storing in het GBS optrad en deze procedure onmogelijk werd. Vanaf dat moment moest de gebouwbeheerder gevraagd worden om de gevraagde signalen binnen te halen, wat het aantal datapunten sterk heeft beperkt. Deze laatste situatie deed zich voor in de tweede meetperiode. De storing deed zich al aan het einde van de eerste meetperiode voor, en er was de verwachting dat deze begin 2023 wel opgelost zou kunnen worden. Om allerlei redenen is dat niet gelukt. In het najaar van 2022 was het mogelijk om een generiek beeld te geven van het functioneren van het GBS met de installaties, maar zijn er ook twee proefdagen geweest, terwijl de derde proefdag om de bovengenoemde storing afgeblazen moest worden. In 2023 lag de focus op de proefdagen.

2 Het Muller Lulof huis

De hoofdfunctie van het Muller Lulof huis (MLH) is onderwijs en fitness. In de hoogbouw zijn onderwijsruimten, vergaderzalen en kantoren beschikbaar, terwijl op de onderste verdiepingen sport en fitness faciliteiten aanwezig zijn voor studenten en ten behoeve van de aanwezige sportopleiding. In Figuur 7-1 zijn beelden opgenomen van het MLH. De focus in dit onderzoek ligt op het omcirkelde deel: de Hoogbouw. Daar zijn de onderwijsruimten en kantoren, en dit deel wordt ook voorzien van warmte door de warmtepomp. Het sport en fitness gedeelte ontvangt warmte vanuit een conventionele CV ketel. Als het heel koud is en de warmtepomp onvoldoende warmte kan leveren, springt de CV ketel bij. Het maximaal opgenomen elektrisch vermogen van de WP is 136 kW (volgens typeplaatje) en de maximale warmtelevering bedraagt 304 kW. Het gebouw is in 2015 gebouwd en voorzien van een moderne klimaatinstallatie. Het is een gebouw met energielabel A, buitenwanden hebben een warmteweerstand van 3,5 m²K/W en raampartijen 0,45 m²K/W (volgens de EPA-U scan 2017). Het wordt geheel met lucht geklimatiseerd. De hoogbouw van MLH wordt door een laagtemperatuurnet van warmte voorzien, dat aangesloten is op de WP/WKO installatie. De laagbouw, waarin de sport en fitness faciliteiten zijn ondergebracht, wordt met een CV net op hoge temperatuur geklimatiseerd, dat gevoed wordt door een CV ketel.



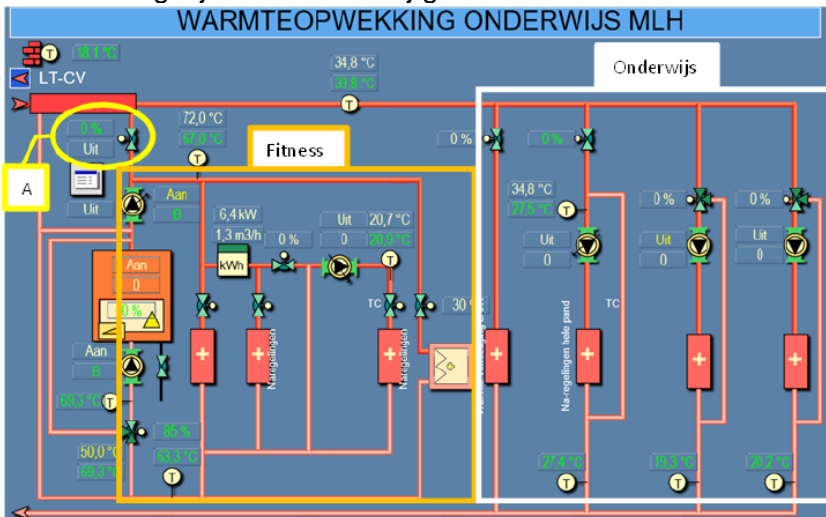
Figuur 2-1 Beelden van het Müller Lulof huis; de focus ligt op het omcirkelde deel: de hoogbouw.

Uurmatching

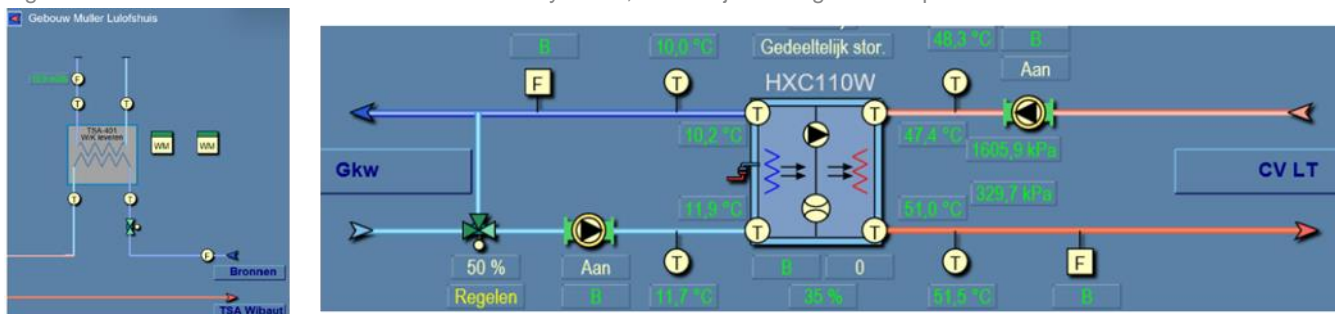
Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam

In Figuur 7-2 is een schema gegeven van beide CV netten. Te zien is dat het laag temperatuur net ook gevoed kan worden door het hoog temperatuur net, indien er onvoldoende warmte beschikbaar is vanuit het WP systeem. Dit onderzoek is gericht op de hoogbouw. De klimaatinstallatie bestaat uit een centrale luchtbehandelingskast, van waaruit de lucht naar alle verdiepingen gedistribueerd wordt. Op de verdiepingen bevinden zich VAV kasten (Variable Air Volume), van waaruit de lucht naar de afzonderlijke ruimtes wordt gedistribueerd. In de ruimtes zijn CO2 sensoren aanwezig die het benodigd luchtdebiet aansturen. In de VAV kasten kan de lucht zonodig bij verwarmd of bij gekoeld worden.



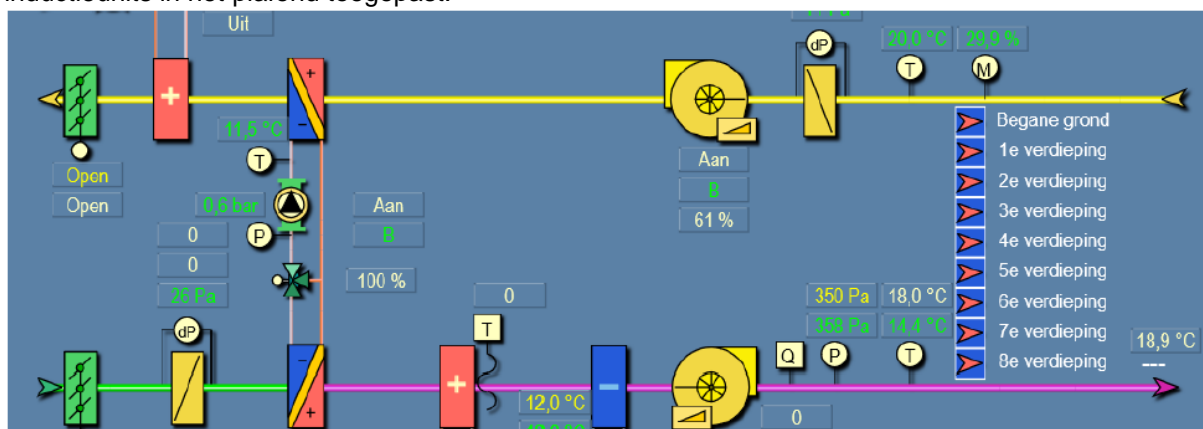
Figuur 2-2 Schema uit het GBS van het CV-water systeem; onderwijs is aangesloten op LT-CV



Figuur 2-3 Warmtepomp, leverend aan CV LT (rechts) en de TSA met het WKO systeem (links)

Het MLH is met het Wibauthuis op één WKO aangesloten.

De luchtbehandelingskast voor het onderwijsdeel is weergegeven in Figuur 7-4. De lucht uit LBK1 wordt gedistribueerd over alle verdiepingen. Op de verdiepingen zijn in de ruimten VAV systemen en/of inductieunits in het plafond toegepast.



Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam

Figuur 2-4 De luchtbehandelingskast met twin-coil warmteterugwinning voor het onderwijsgedeelte (LBK1)

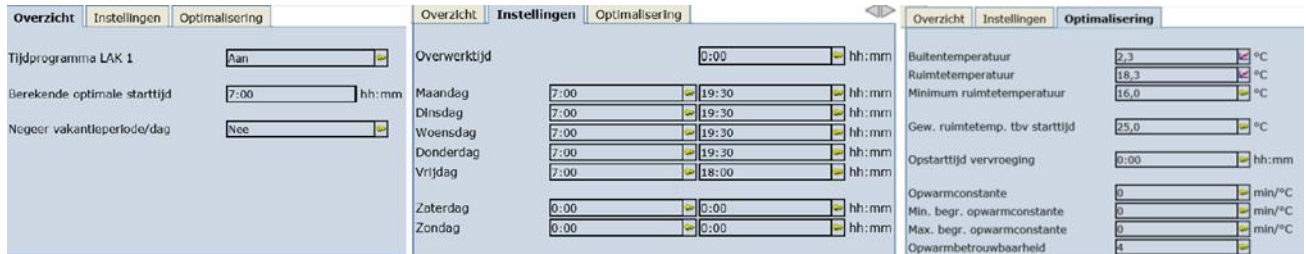
3 Opzet

De opzet van de metingen is om in een week een dag een verschoven starttijd in te stellen. De dag voor, de dag zelf en de dag na worden de metingen bijgehouden. Het GBS bewaart standaard de meetwaarden gedurende 24 uur. Het is mogelijk om kanalen te selecteren waarvan de meetdata langer bewaard blijven, maar dat bleek toch enigszins gecompliceerd en in het begin was nog niet precies duidelijk welke signalen gelogd moesten worden. De eerst meetsessies vonden plaats in oktober en november 2022. Het was toen mogelijk om, als niet gebouwbeheerder, toegang tot alle gelogde data te krijgen, zodat iedere avond van een meetdag bekeken kon worden welke signalen relevant waren. Tijdens deze meetsessies is een algemene indruk gekregen van het functioneren van de installatie.



Figuur 3-1 De standaardinstellingen van het GBS voor wat betreft start en stoptijden.

In



zijn de standaardinstellingen voor start en stoptijden weergegeven. Het systeem kent een berekening van de optimale start en stoptijd, maar dit systeem bleek maar beperkt actief. Bij slechts één van de meetdagen, een maandag na een koud weekend, was er een duidelijke verschuiving van de starttijd te zien.

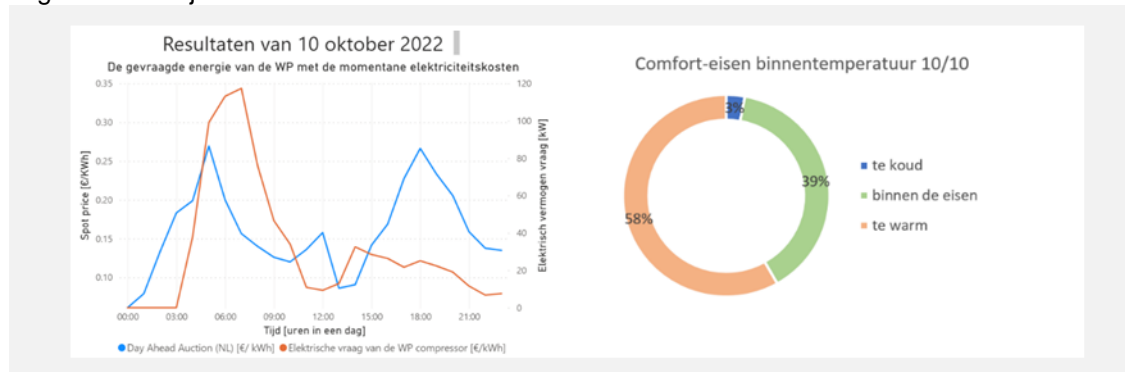
In oktober was het nog relatief warm en ook zonnig, maar eind november al winters koud. Het verschuiven van starttijden lukte deze meetperiode nog niet zoals gewenst. En helaas werd eind november de toegang tot het GBS als niet gebouwbeheerder onmogelijk. Dat betekent dat de gebouwbeheerder gevraagd moest worden om specifieke meetdata binnen te halen. Daartoe was de gebouwbeheerder bereid, maar het was toch enigszins limiterend, omdat de totale werkwijze omslachtiger werd. De eerste meetsessie heeft vooral een generiek beeld van het functioneren van de gebouwinstallaties opgeleverd.

Uurmatching

De tweede meetsessie vond plaats in februari en maart 2023, waarbij maart 2023 de meeste bruikbare data heeft opgeleverd.

4 Metingen oktober & november 2022

Op 10, 11 en 12 oktober (respectievelijk maandag, dinsdag, woensdag) zijn iedere dag metingen uitgevoerd. Op de dinsdag werd beoogd om de starttijd te verschuiven, maar dat bleek niet goed uitgevoerd te zijn.

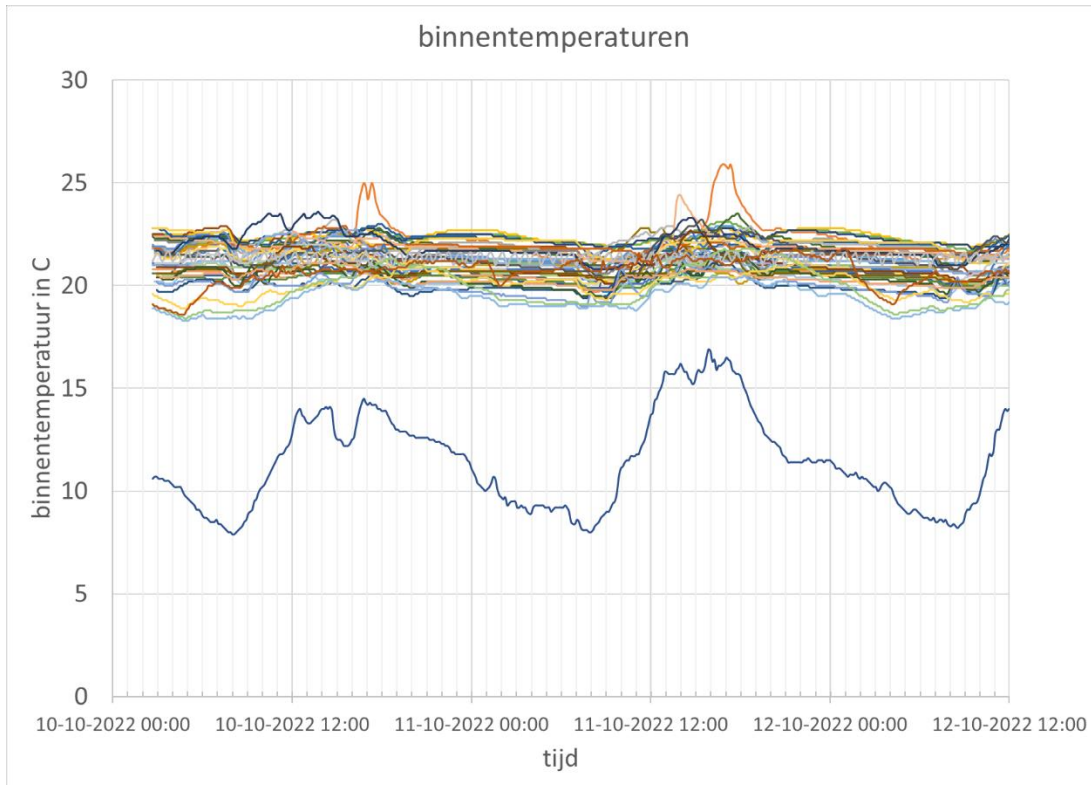


Figuur 4-1 Inzet WP en comfort op maandag 10 oktober

De optimalisatie functionaliteit was actief in de vroege ochtend van maandag 10 oktober en heeft de starttijd vervoegd naar 3 uur 's nachts. Van 6.00 uur tot circa 10 uur nam de WP capaciteit alweer geleidelijk af. In de grafiek is ook de SPOT prijs voor elektriciteit weergegeven voor die dag, en opmerkelijk genoeg lag de ochtendpiek van de SPOT prijs zeer vroeg in de ochtend, zodat piekverbruiken deels toch nog samenvielen met de piektarieven van de SPOTmarkt. Deze dag laat een stevig voorwarmen van het gebouw zien, ver voor begin bedrijfstijd van het gebouw. De rest van de dag was de warmtepompactiviteit laag. In de figuur is in een cirkeldiagram ook het comfort in de ruimten van MLH aangegeven. Het groene comfort gebied staat voor 19-21 °C, daaronder is het te koud en daarboven is het te warm. Op 10 oktober was het merendeel te warm.

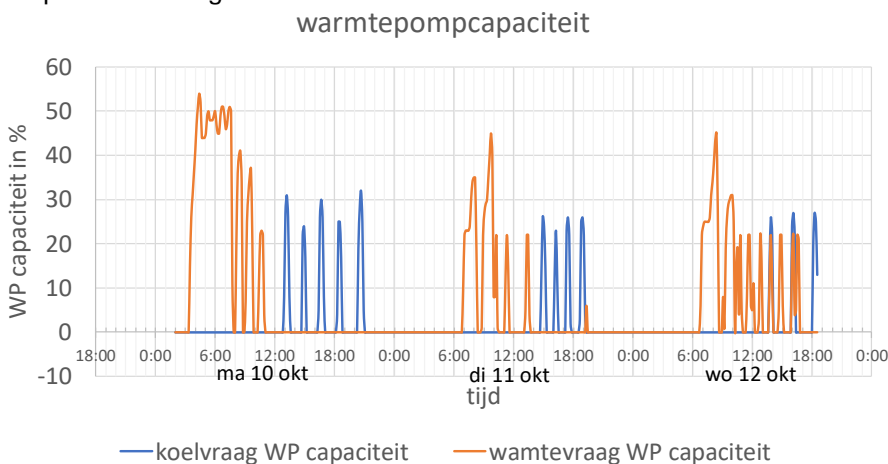
In Figuur 7-7 zijn de binnentemperaturen in de ruimten van MLH weergegeven, evenals de buitentemperatuur (onderste lijn). De meeste binnentemperaturen liggen alle dagen boven de 20 °C, behalve op de begane grond, waar de fitness gevestigd is. Op grond van deze ruimtetemperaturen is het onduidelijk waarom de WP zo vroeg gestart is op maandagochtend. Maar ook op de andere dagen blijven de temperaturen boven de 20 °C en is er eigenlijk geen aanleiding voor veel warmtepompactiviteit in de ochtend.

Uurmatching



Figuur 4-2 Binnentemperaturen en buitentemperatuur: vanaf ochtend van maandag 10 tot woensdag 12 oktober

In Figuur 7-8 is de warmte- en koelvraag weergegeven over al de drie dagen. Dan is te zien dat op alle beschouwde dagen het overdag zo warm werd dat er 's middags gekoeld moest worden. Een mogelijke conclusie is dat het voorwarmen in de vroege ochtend van maandag 10 oktober toch wat heftig is geweest. Opvallend zijn de uitschieters van de temperatuur in de middag. Het is gebleken dat sommige ruimtetemperatuur sensors aangestraald konden worden door de zon, waardoor uitschieters in de temperatuurmetingen ontstonden.



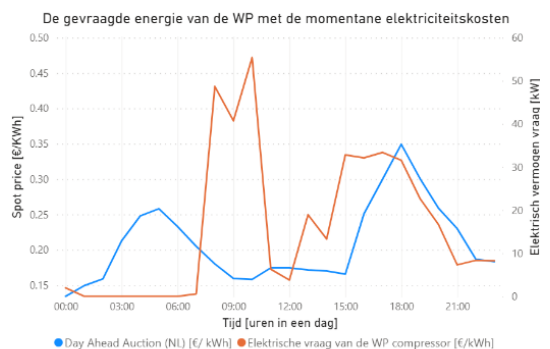
Figuur 4-3 Warmte- en koelvraag uitgedrukt in capaciteit van de warmtepomp

In Figuur 7-8 is de weergegeven capaciteit op 8 minuten metingen, terwijl in Figuur 7-6 de weergegeven warmtepompcapaciteit gebaseerd op uurwaarden van geleverde warmte, waaruit het elektriciteitsverbruik is berekend. Daarom zijn in Figuur 7-6 de pieken uit Figuur 7-8 niet te zien. Overigens duiden deze pieken erop dat de capaciteitsregeling te strak is ingesteld waardoor de uitsturing instabiel is en geen constante tussencapaciteit gevonden wordt.

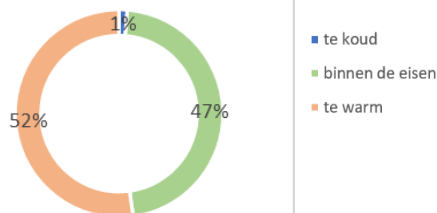
Uurmatching

Proef 1 met gewijzigde instellingen

Resultaten van 11 oktober 2022



Comfort-eisen binnentemperatuur 11/10

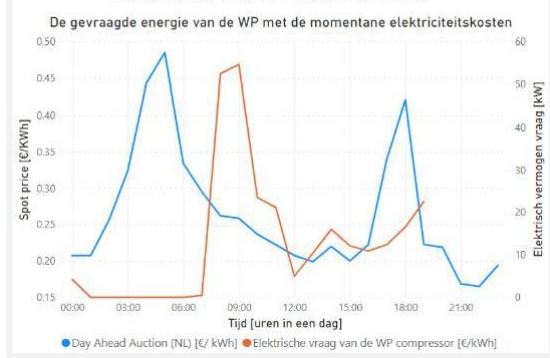


Figuur 4-4 WP inzet op 11

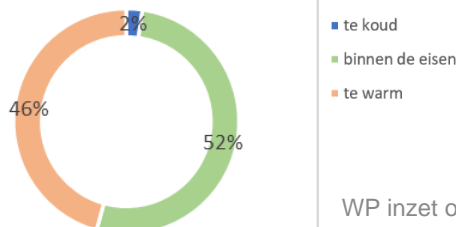
oktober

Referentie dag zonder vraagsturing

Resultaten van 12 oktober 2022



Comfort-eisen binnentemperatuur 12/10



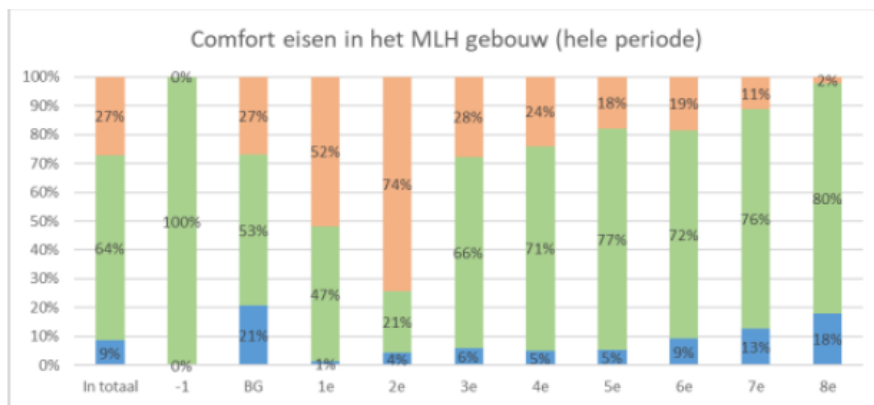
Figuur 4-5 WP inzet op 12 oktober

Figuur 4-4 is de warmtepompinzet op 11 oktober en in Figuur 4-5 die van 12 oktober weergegeven. Op beide dagen start de warmtepomp op de vaste tijd van 7.00 uur. In de periode tussen 7.00 en 12.00 uur is er weinig verschil in de warmtepompinzet. Zoals uit Figuur 7-8 blijkt, is er ook op deze dagen 's middags een koelvraag. Ook op deze dagen is het in een behoorlijk deel van het gebouw te warm geweest. Voor de hele maand november is het comfort van het gebouw bijgehouden. Er zijn een paar verdiepingen structureel te warm, maar over het algemeen worden de comforteisen in deze maand goed gehaald.

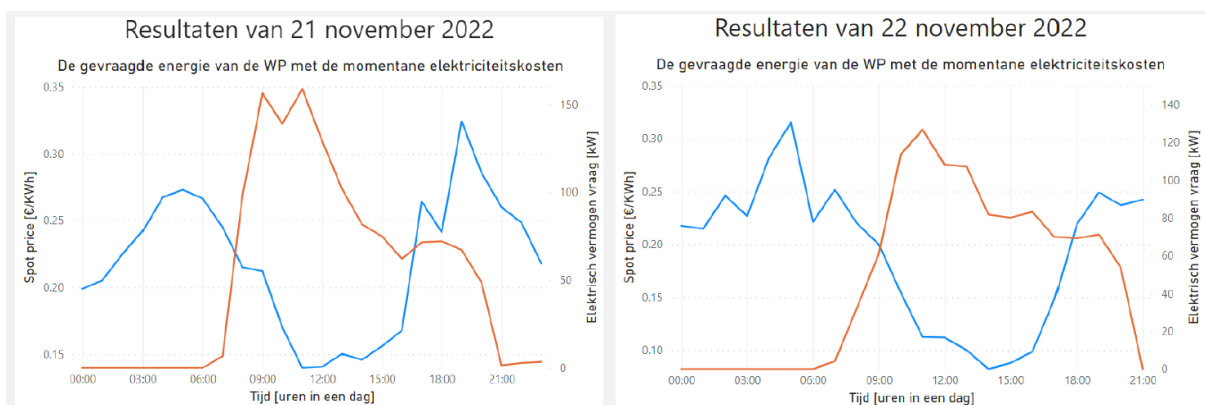
Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam



Figuur 4-6 Comfortscore per verdieping over de gehele maand November



Figuur 4-7 WP inzet op maandag 21 november en dinsdag 22 november

Op maandag 21 november en dinsdag 22 november heeft de tweede meetsessie plaatsgevonden. De gevraagde instellingen voor dinsdag 22 november waren:

- De luchtverversing om 7:00 uur 's ochtends starten (zoals standaard ingesteld);
- De warmtepomp blijft om 7:00 uur wel uit. Vanaf 8:00 uur 's ochtends pas de warmtepomp lvrij geven;
- Vanaf 8:00 uur de gewenste inblaasttemperatuur weer terugzetten op de standaard instellingen volgens het programma.

Op beide dagen start de warmtepomp weer om 7.00 uur. Het kennelijk niet gelukt om de warmtepomp op dinsdag pas om 8.00 vrij te geven. Maar er is wel iets gewijzigd in de instellingen waardoor de piek van de warmtepompinzet toch later ligt dan op maandag. Op maandag ligt de starttijd, ondanks dat het op zondag en in de nacht van zondag op maandag behoorlijk koud was, toch op 7.00 uur. Dat heeft er waarschijnlijk mee te maken dat op zondag de WP ook aan geweest is om te voorkomen dat de binnentemperatuur niet onder de 16 C komt. Op beide dagen is er een stevige warmtepompinzet vanaf

Uurmatching

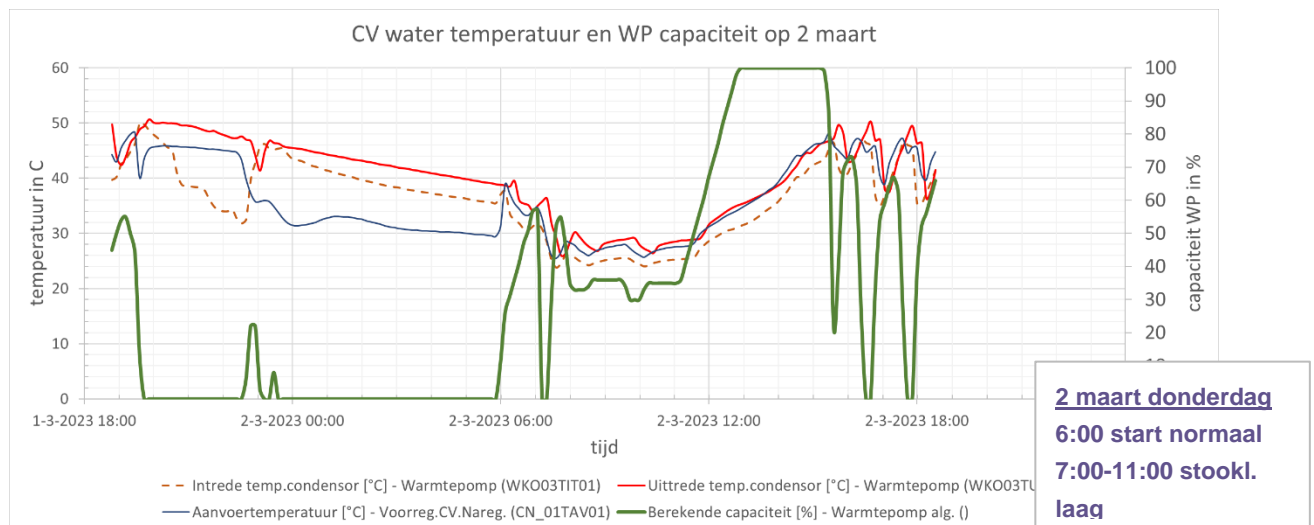
7.00 uur, maar op dinsdag ligt de piek van de warmtepompinzet in de tweede helft van de ochtend, terwijl de WP inzet op maandag eigenlijk de gehele ochtend hoog lag.

5 Metingen Maart 2023

In dit hoofdstuk worden de meetresultaten beschreven van de metingen die in maart 2023 plaatsvonden. Op 4 dagen in 4 opeenvolgende weken (elke week 1 dag), zijn er aanpassingen gedaan in het GBS met als doel om de inzet van de warmtepomp aan het begin van de dag te verschuiven. Om goed te zien wat er nu precies gebeurt, worden de meetresultaten per dag weergegeven. Eerst de relevante gegevens voor het gebouw als geheel, daarna voor enkele specifieke ruimtes. Doorgaans is de dag voor en/of de dag na ook gemeten, ter vergelijking en als referenties.

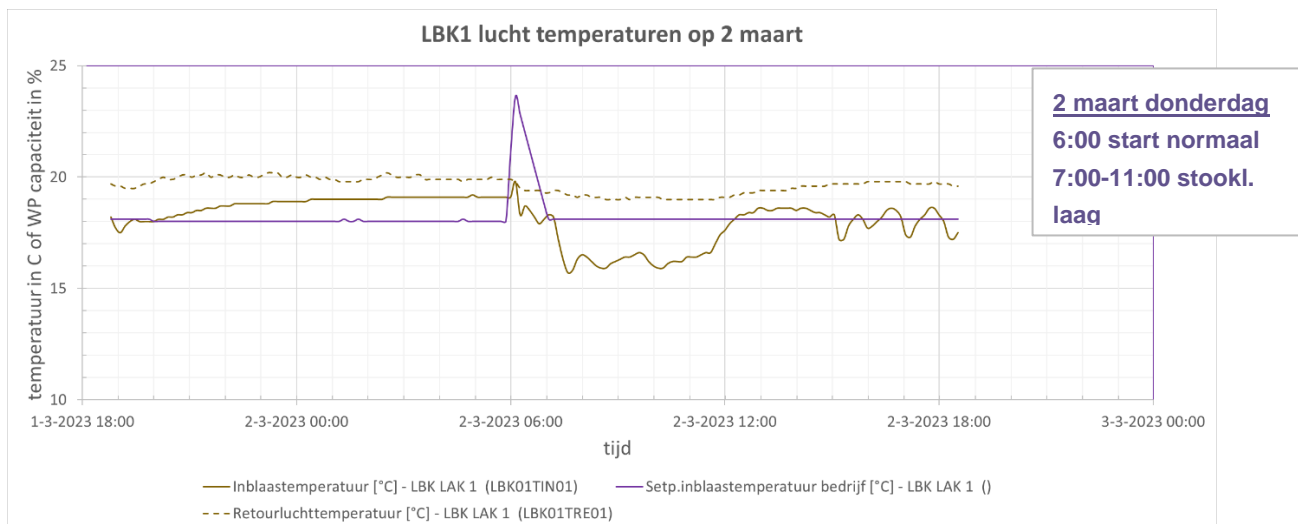
5.1 Centrale installaties

Van de centrale installaties zijn voor de dagen waarop gemeten is de ingezette capaciteit van de warmtepomp (in %), de retourtemperatuur van het CV water (intrede temperatuur condensor WP) en de aanvoertemperatuur van het CV water naar het gebouw (uittrede temperatuur condensor) weergegeven. De weergegeven WP capaciteit is de berekend capaciteit van de warmtepomp (berekend door de WP besturingssoftware). Daarnaast ook nog de aanvoertemperatuur naar de naregelingsunits. Die moet in principe gelijk zijn aan de aanvoer CV water temperatuur, maar het lijkt erop dat deze sensor wat minder gedempt is en in rust (installaties uit) wat sterker afkoelt. Bij opstart van de installatie reageert dit signaal sterker dan de CV water aanvoertemperatuur.



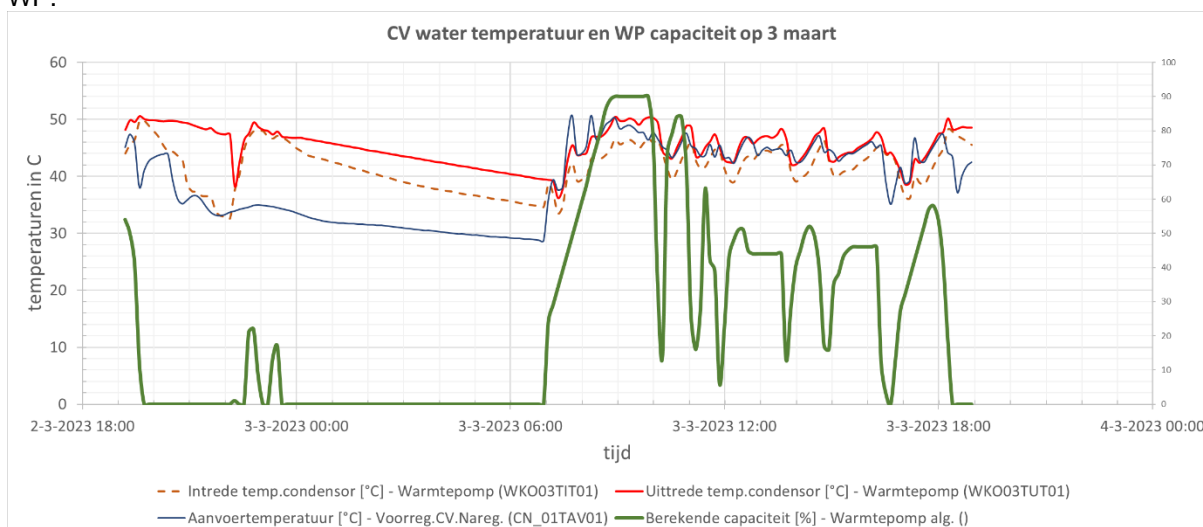
Figuur 5-1 Warmtepompcapaciteit en CV water temperaturen op 2 maart

Uurmatching



Figuur 5-2 Inblaas- en retourtemperatuur van LBK1 op 2 maart; inclusief setpoint inblaas temperatuur

In Figuur 7-10 en Figuur 7-11 zijn de meetdata voor donderdag 2 maart weergegeven. Om 6.00 wordt de WP aangezet, tegelijk met LBK1. Bij de opstart wordt, ten behoeve van het opwarmen van de ruimten, door het GBS kortstondig het setpoint 24 of 25 °C meegegeven. Dit is zo in het GBS geprogrammeerd om zo tijdens de opwarmfase de ruimten van warme lucht te voorzien. Vanwege de opgelegde stooklijn verlaging van 7-11 uur, duurt dit aanwarmen maar kort. De CV aanvoertemperatuur bereikt dan een temperatuur van 36 C. Wanneer de lijnen in de grafiek voor het tijdstip 6.00 beschouwd worden, moet men bedenken dat de installatie uit staat en dat de lijnen stilstaand water of stilstaande lucht die afkoelt weergeven. Het water naar de naregelingsunits koelt het snelst af, en die lijn geeft ook de zichtbaarste indicatie van het opwarmen van het water bij de start van de installatie. Tijdens de verlaagde stooklijnperiode is duidelijk dat de WP op een lage capaciteit draait van ca 30%. Zoals eerder vermeld is wordt het opgenomen vermogen van de WP niet apart gemeten, maar wordt er wel een berekende capaciteit gegeven, die ook in Figuur 7-10 is weergegeven (groene lijn). De CV water temperatuur zakt dan naar 30 C. Vanaf 11 uur stijgt de WP capaciteit gedurende 2 uur naar 100% om op dat niveau te blijven, totdat de CV water temperatuur de gewenste waarde van 50 C heeft bereikt. Daarna is het opvallend dat de WP niet op een lagere constante capaciteit in bedrijf blijft, maar een aan/uit regelgedrag laat zien. De regelaar is kennelijk te strak ingesteld om een constante tussencapaciteit te vinden voor de WP.



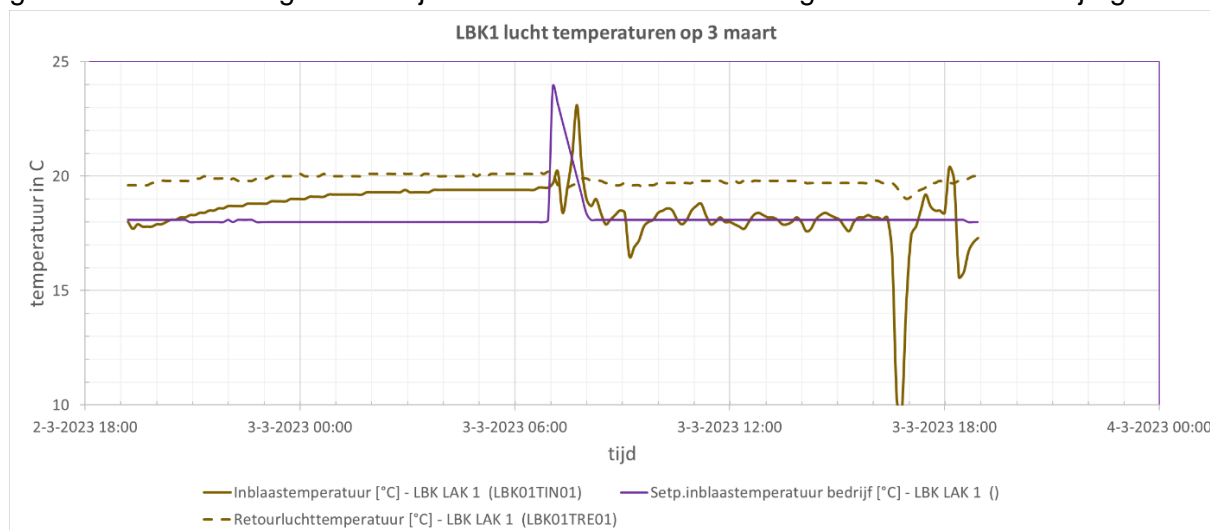
Figuur 5-3 Wärmtepomp capaciteit en CV water temperaturen op 3 maart: normaal bedrijf

Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam

Tijdens de “stooklijn laag” periode is de inblaas temperatuur rond de 16 °C. Opvallend is dat de LBK inblaas temperatuur na de “stooklijn laag” periode weer snel op de gewenste 18 °C komt, als het CV water 40 °C is, is de inblaas temperatuur alweer een tijd op 18 C. Voor de LBK is de hoge CV water temperatuur van 50 °C niet nodig. De retourtemperatuur van de lucht uit het gebouw (naar de LBK WTW) ligt in de periode van verlaagde stooklijn op 19 °C. Deze retourtemperatuur geeft toch een soort gemiddelde ruimtetemperatuur weer van alle ruimten die door LBK1 van lucht worden voorzien. Hieruit kan afgeleid worden dat de temperaturen gedurende de verlaagde stooklijn toch binnen de comfortmarge van 19 tot 21 °C zijn gebleven.

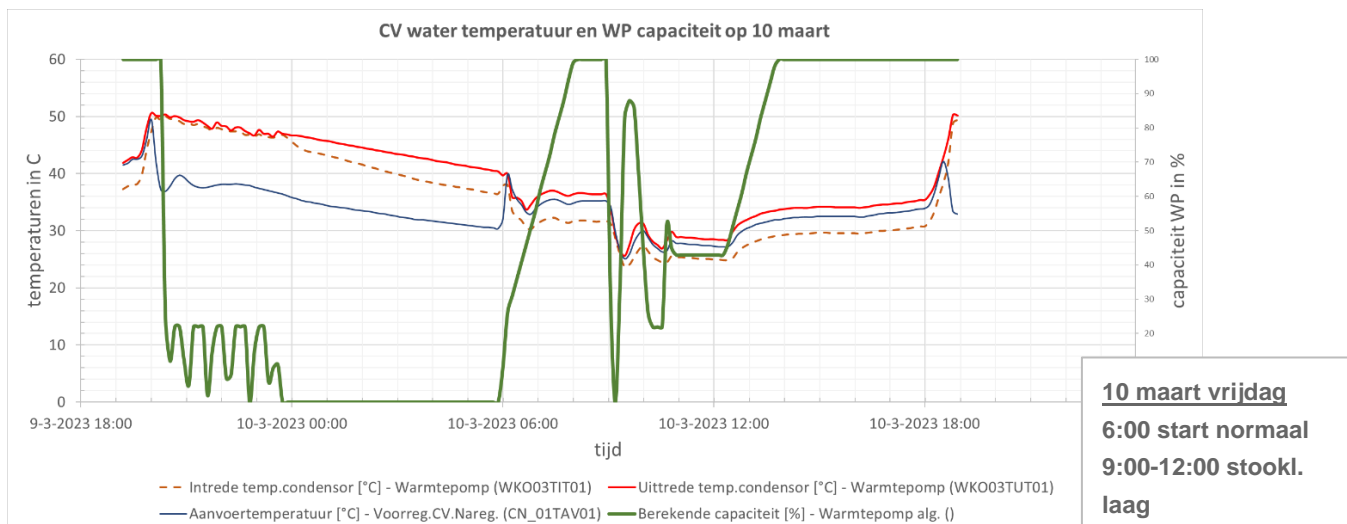


Figuur 5-4 Inblaas- en retourtemperatuur van LBK1 op 3 maart; inclusief setpoint inblaas temperatuur

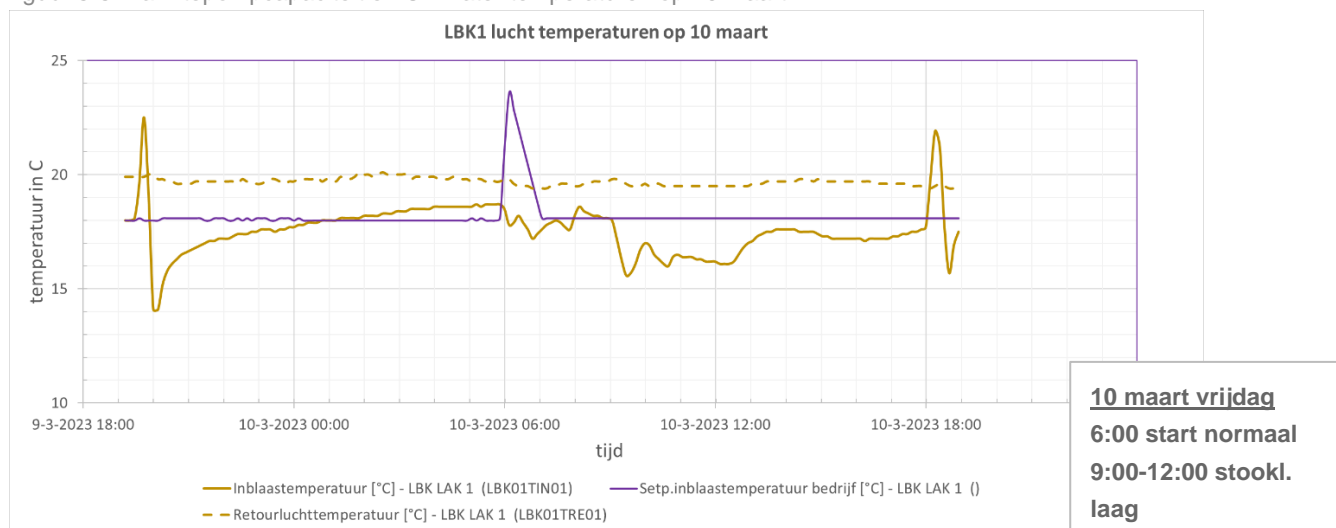
In Figuur 7-12 en in Figuur 7-13 zijn de metingen van 3 maart weergegeven, de dag na de proefdag. Het is duidelijk dat de WP tussen 6.00 u en 9.00.u een hoger vermogen vraagt dan op 2 maart, deze dag geen verlaagde stooklijn tussen 6 en 9 uur. Ook hier is weer de kortstondige setpoint verhoging zichtbaar van de inblaas luchttemperatuur, waarbij de inblaas lucht korte tijd 23 °C bereikt om daarna terug geregeld te worden naar 18 °C. En ook op deze dag vindt de warmtepomp geen stabiel werkpunt: het werkpunt beweegt in pieken op en neer. De retourtemperatuur bevindt zich op 19,5 °C tussen 6 en 18 uur. In Tijdens de “stooklijn laag” periode is de inblaas temperatuur rond de 16oC. Opvallend is dat de LBK inblaas temperatuur na de “stooklijn laag” periode weer snel op de gewenste 18oC komt, als het CV water 40 oC is, is de inblaas temperatuur alweer een tijd op 18 oC. Voor de LBK is de hoge CV water temperatuur van 50oC niet nodig. De retourtemperatuur van de lucht uit het gebouw (naar de LBK WTW) ligt in de periode van verlaagde stooklijn op 19oC. Deze retourtemperatuur geeft toch een soort gemiddelde ruimtetemperatuur weer van alle ruimten die door LBK1 van lucht worden voorzien. Hieruit kan afgeleid worden dat de temperaturen gedurende de verlaagde stooklijn toch binnen de comfortmarge van 19oC tot 21oC zijn gebleven.

is ook te zien dat de aanvoertemperatuur naar de naregel units bij de pieken een hogere waarde aangeeft dan de CV-water temperatuur. Waarschijnlijk is voor dit signaal een snellere sensor gebruikt die de pieken in temperatuur beter volgt en niet zo gedempt is als de sensor die de uittrede temperatuur condensor aangeeft. Want fysiek kan de temperatuur van het water naar de inductie units natuurlijk niet hoger zijn dan de uittrede temperatuur van het CV water uit de condensor.

Uurmatching



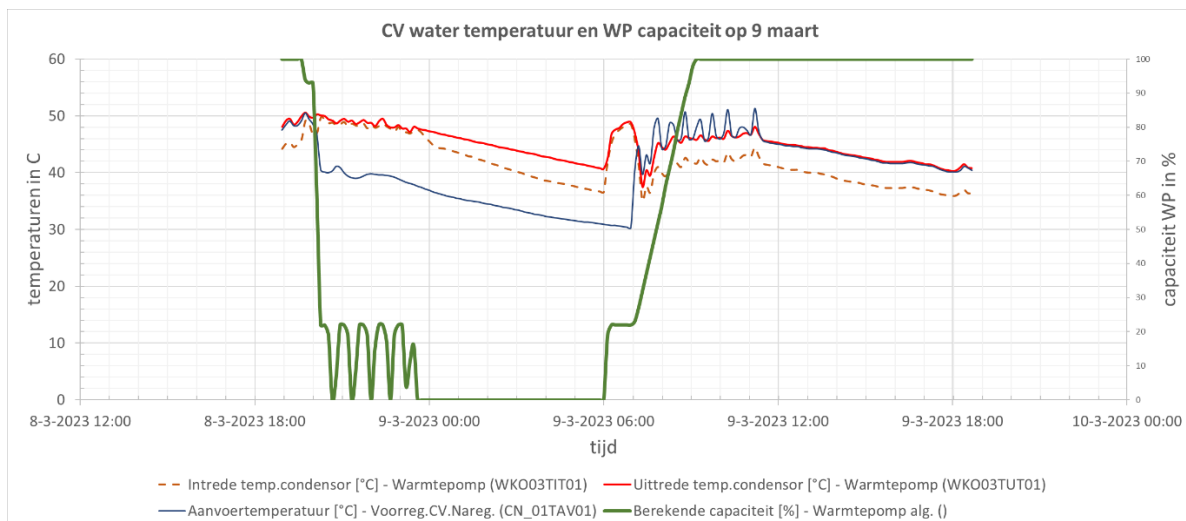
Figuur 5-5 Warmtepompcapaciteit en CV water temperaturen op 10 maart



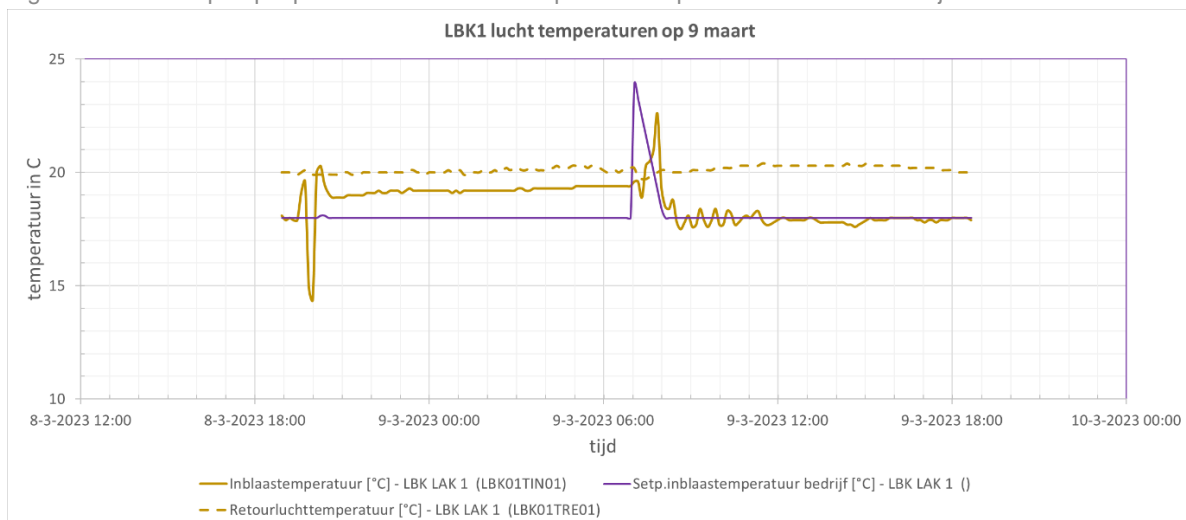
Figuur 5-6 Inblaas- en retourtemperatuur van LBK1 op 10 maart; inclusief setpoint inblaastemperatuur

Op de proefdag vrijdag 10 maart is er gekozen voor een langere opwarmperiode na opstart: van 6.00 – 9.00 uur. Het CV water komt op een stabiele temperatuur van 36 °C, maar eigenlijk zou volgens de stooklijn bij een buitentemperatuur van ca. 2 °C de temperatuur dan ca 50 °C moeten zijn. De inblaastemperatuur van de LBK bereikt vrij snel de waarde van 18 °C, de gewenste temperatuur. Gedurende de periode van verlaagde stooklijn is de inblaastemperatuur tussen 16 en 17 °C. De retourtemperatuur ligt de gehele dag tussen 19 en 20 °C, dat betekent dat het met de gemiddelde ruimte temperatuur in het gebouw wel goed zit. Tijdens de stooklijn laag periode maakt de warmtepomp vanwege de te strak afgestelde regelaar nog een paar slingeringen alvorens op circa 46% te stabiliseren. Na de proefperiode gaat de WP weer naar 100% en blijft daar stabiel op staan. Het CV water wordt in de middag naar 34 °C geregeld, opvallend, want het was op 10 maart kouder dan op 2 maart, met ook nog weinig zon. Kennelijk heeft de WP onvoldoende capaciteit om het CV water naar een hogere waarde te verwarmen. Dat lukt pas na 18.00 uur, kennelijk omdat de warmtevraag van het gebouw als geheel dan daalt en het dan wel lukt om het CV water naar de gewenste hogere temperatuur te brengen. Daardoor blijft de inblaastemperatuur van LBK1 ook onder de 18 °C. Mogelijk dat het setpoint van de stooklijn voor de periode na de proef niet goed is ingesteld. Na 18.00 stijgt de CV water temperatuur wel vrij snel naar 50 °C.

Uurmatching



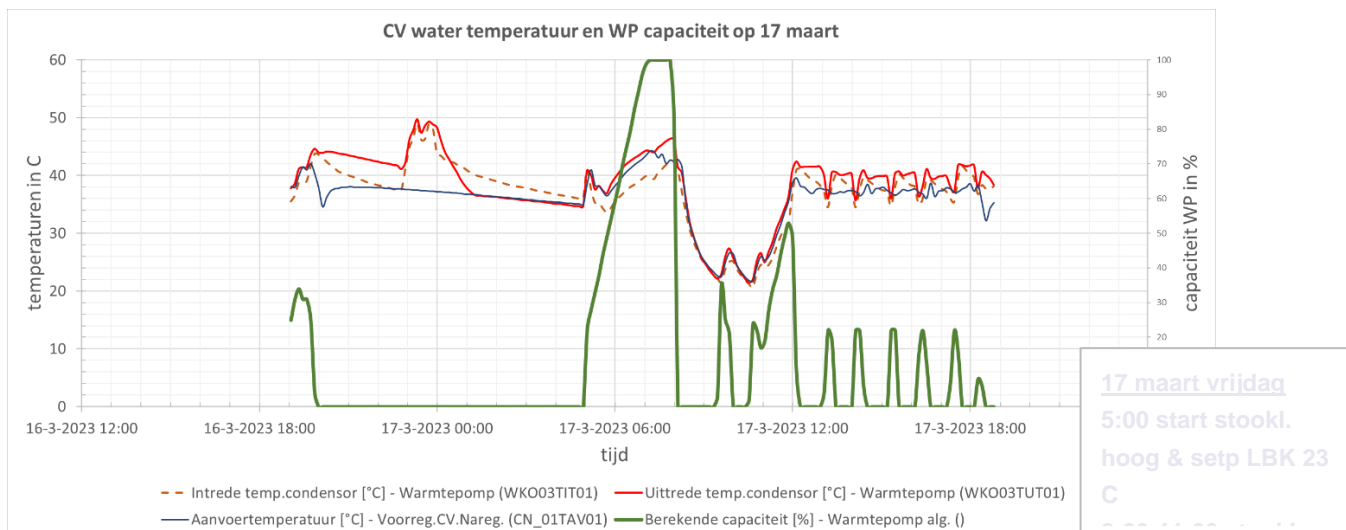
Figuur 5-7 Wärmtepompcapaciteit en CV water temperaturen op 9 maart: normaal bedrijf



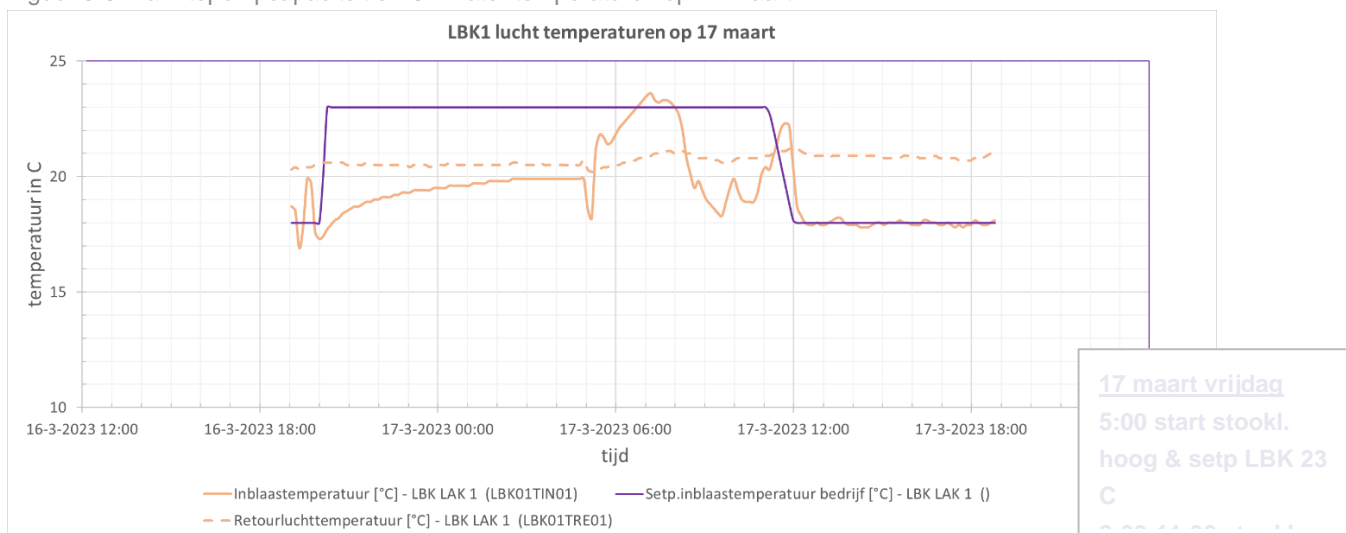
Figuur 5-8 Inblaas- en retourtemperatuur van LBK1 op 10 maart; inclusief setpoint inblaastemperatuur

Op 9 maart, normaal bedrijf, ligt de CV water temperatuur wel hoger dan op 10 maart, tussen de 40 en 46 °C. De inblaastemperatuur van LBK1 ligt vrij strak rond 18 C, de retourtemperatuur ligt iets boven de 20 °C. De wärmtepomp draait na de start constant op 100%. Het was een koude dag op 9 maart (net als op 10 maart).

Uurmatching



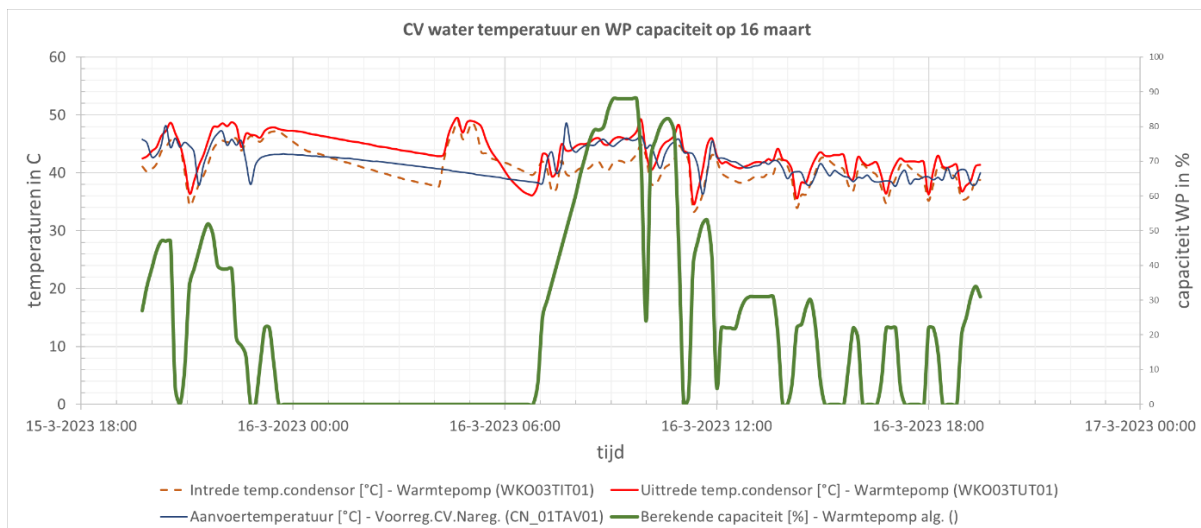
Figuur 5-9 Warmtepompcapaciteit en CV water temperaturen op 17 maart



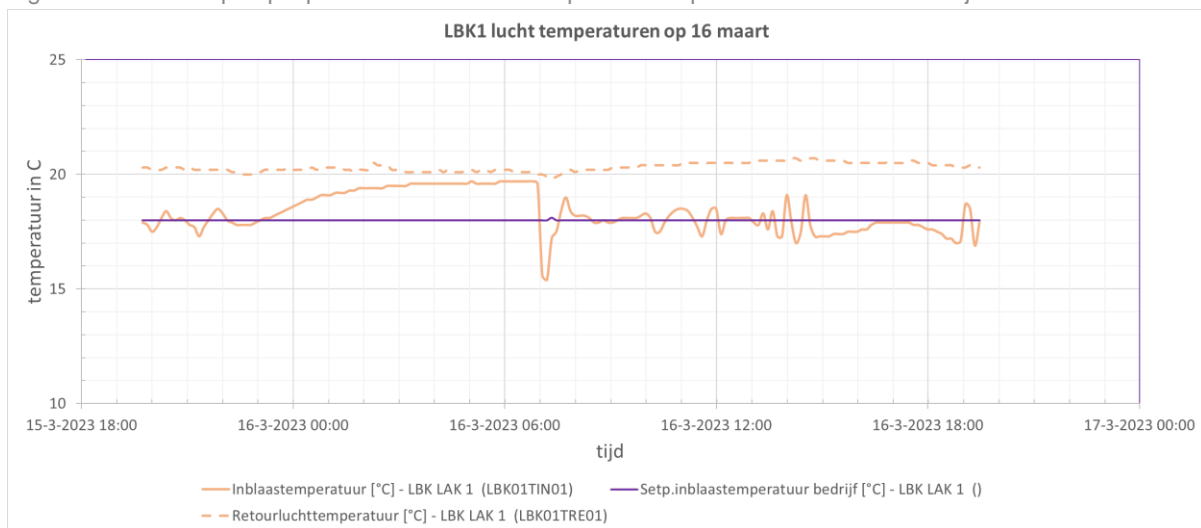
Figuur 5-10 Inblaas- en retourtemperatuur van LBK1 op 17 maart; inclusief setpoint inblaastemperatuur

Op 17 maart is het buiten een stuk warmer dan op 2 en 10 maart. De uitgebreide voorwarming van 5.00 tot 8.00 is misschien wel niet voor zo'n lange periode van 3 uur nodig. Overigens duurt het 1,5 uur voordat de ingestelde 23 C gehaald is. En dan blijft de binnentemperatuur ongeveer 1,5 uur op die waarde. Na deze voorwarming gaat de stooklijn omlaag. De CV water temperatuur komt daardoor behoorlijk laag uit. Het setpoint van de inblaaslucht staat nog wel op 23 °C, waardoor de inblaaslucht af en toe hoger is dan 18 °C, ondanks de lage CV water temperatuur. Dat betekent dat de warmteterugwinning uit de retourlucht effectief werkt. De retourlucht naar de LBK is circa 21 °C, en de buitentemperatuur is die ochtend rond de 10 °C of zelf iets hoger (zie Figuur 7-14). De warmteterugwinning kan dan de buitenlucht al tot ca 17 °C opwarmen. De warmtepompinzet vertoont in de stooklijn laag periode een korte piek, als gevolg van de eerder genoemde te strakke regelaarinstelling. Om 11.00 gaat de stooklijn terug naar normaal en het CV water gaat naar circa 40 °C. De inblaastemperatuur wordt vervolgens strak op 18 °C gehouden. Er is niet veel warmtevraag meer in de middag. Enkele korte pieken van de warmtepomp volstaan om de temperaturen te handhaven. Tijdens de proefperiode varieerde de buitentemperatuur tussen 12 en 14 °C. Het lijkt erop dat bij een dag waarbij de buitentemperatuur zo oploopt geen lange aanwarming nodig is.

Uurmatching



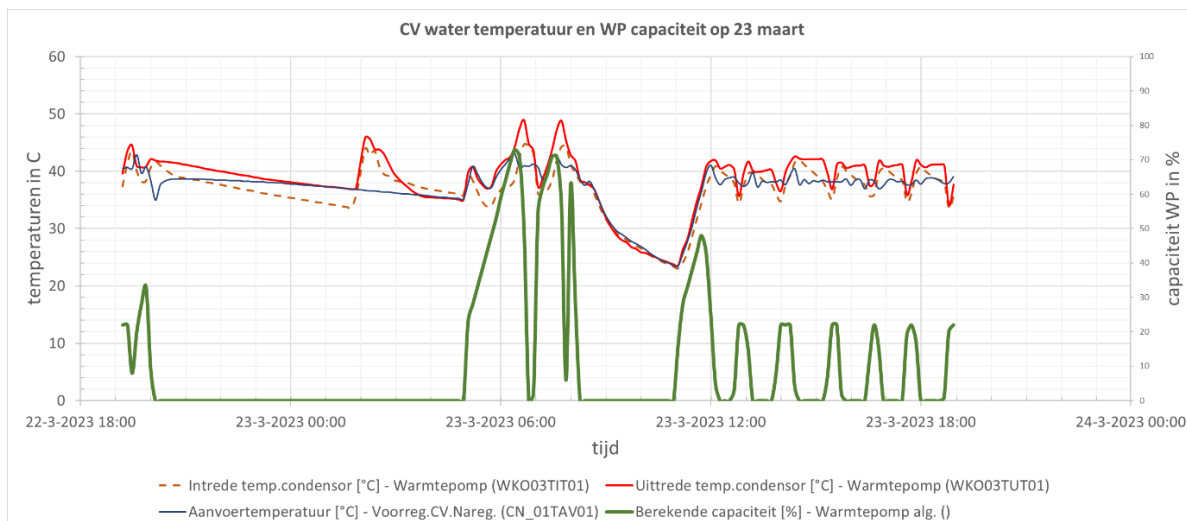
Figuur 5-11 Warmtepompcapaciteit en CV water temperaturen op 16 maart: normaal bedrijf



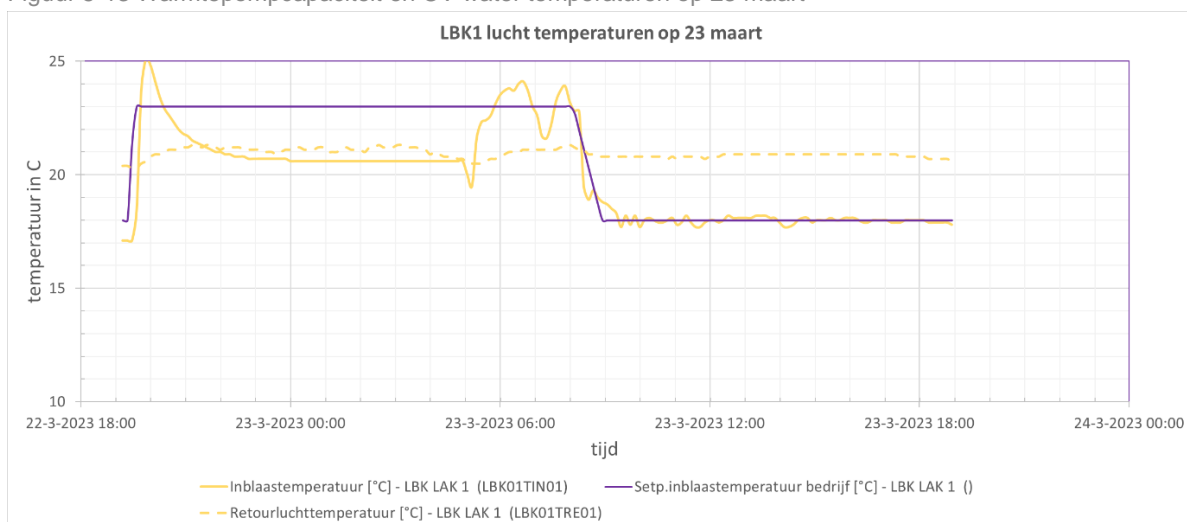
Figuur 5-12 Inblaas- en retourtemperatuur van LBK1 op 16 maart; inclusief setpoint inblaastemperatuur

Op de dag voorafgaand aan de proefdag wordt het CV water op zo'n 40 °C gehouden. De inzet van de WP is weinig stabiel, na de opstart. Tijdens de opstart is er geen extra verhoging van het setpoint van de inblaastemperatuur toegepast, omdat het buiten al warm genoeg is en het gebouw waarschijnlijk weinig is afgekoeld. Wel is de inzetcapaciteit van de WP tussen 8 en 11 uur duidelijk hoger dan op 17 maart. Hetgeen betekent dat de WP capaciteit op 17 maart succesvol verlaagd is gedurende dit tijdsinterval.

Uurmatching



Figuur 5-13 Warmtepompcapaciteit en CV water temperaturen op 23 maart



Figuur 5-14 Inblaas- en retourtemperatuur van LBK1 op 23 maart; inclusief setpoint inblaastemperatuur

Op 23 maart verloopt de stooklijnverlaging zonder dat er een merkbaar effect is op de binnentemperatuur. En de warmtepomp staat zelfs helemaal uit gedurende de periode van stooklijnverlaging. De buitentemperatuur is dan ook al 12 °C in de ochtend. Het voorwarmen heeft kennelijk goed gewerkt, al is het onder deze buitencondities ook goed denkbaar dat er helemaal niet zo'n lang aanwarmtraject nodig is.

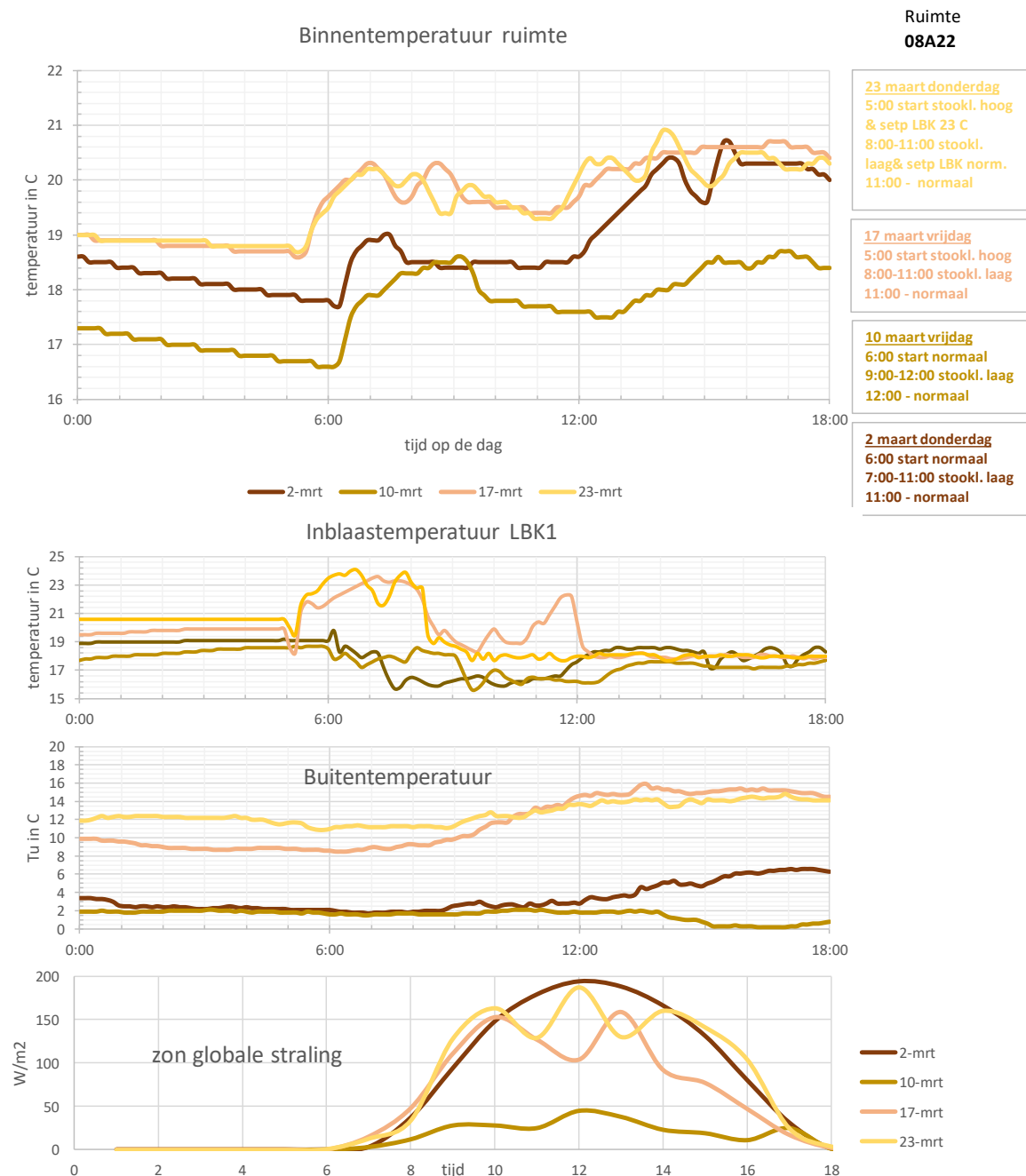
In het vervolg van deze paragrafen wordt aandacht besteed aan de condities in individuele ruimten in het gebouw. Daartoe eerst een aantal plattegronden van de verdiepingen van MLH, zodat duidelijk is waar de geselecteerde ruimten liggen.

5.2 Beschouwing diverse ruimten

De bovenste verdieping, verdieping 8, wordt als eerste beschouwd. Die ruimten onder het dak zijn het gevoeligst voor koude. Ruimte 8A22 op de zuidwest hoek, wordt als eerste beschouwd. Deze ruimte bleek uit een verkenning het vaakst te koud te zijn. In Figuur 7-14 is het verloop van de

Uurmatching

binnentemperatuur geschetst voor 4 meetdagen in Maart 2023. Naast de figuur zijn de proefcondities vermeld voor elke meetdag. In deelgrafieken onder de binnentemperaturen geven respectievelijk de inblaasttemperatuur LBK1 weer op deze dagen. In de grafieken daaronder zijn de buitentemperatuur en de zonstraling weergegeven op elke dag.



Figuur 5-15 Ruimte 8A22

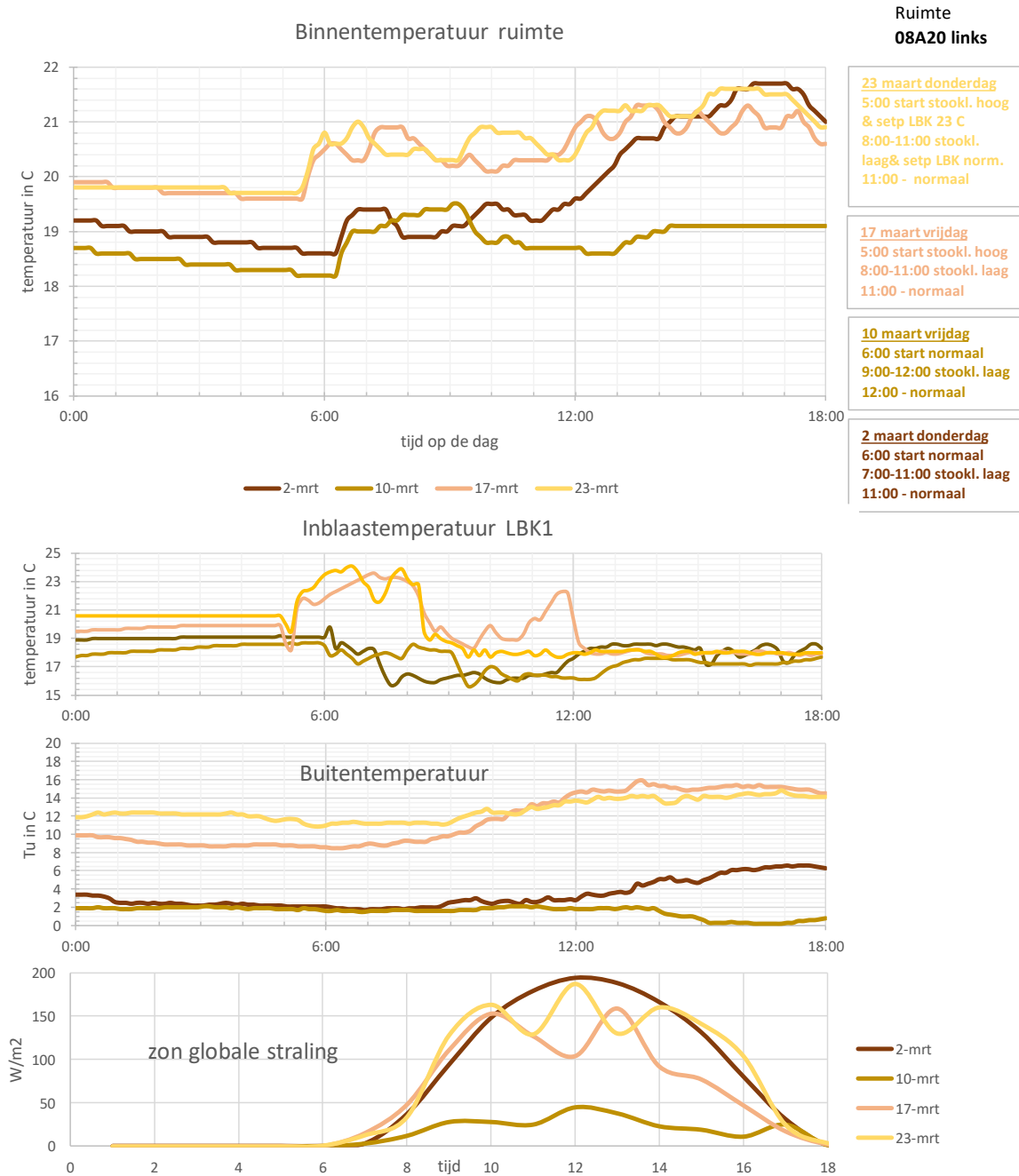
Wat opvalt bij de inblaasttemperatuur van LBK1 is dat die op 2 en 10 maart de inblaasttemperatuur na 6.00 (de starttijd op die dagen) vrijwel gelijk naar 18 °C geregeld wordt. Van een korte verhoging van de inblaasttemperatuur tijdens opstart is geen sprake, zoals ook bij Figuur 7-11 en Figuur 5-6 toegelicht is. Toch stijgt de temperatuur in ruimte 8A22 wel naar uiteindelijk 18,5 °C, de aanwezige naverwarming heeft de capaciteit om de lucht verder op te warmen voor het de ruimte ingeblazen wordt. Tijdens “verlaagde

Uurmatching

stooklijn" blijft de binnentemperatuur op 2 maart op circa 18 °C, maar op 10 maart zakt de temperatuur naar 17,5 °C. Op 10 maart was de temperatuur gedurende de nacht ook ver gezakt, tot 16,5 °C om 6.00 's ochtends, bij de opstart van de installaties. En bij opstart kon de warmtepomp de temperatuur niet hoger krijgen dan 36 °C, terwijl bij deze buitentemperatuur dan ca. 50 °C gewenst is.

Op 17 en 23 maart werkt het voorwarmen van de ruimte goed. De temperatuur komt niet onder de 19 °C tijdens de periode met verlaagde stooklijn.

Tijdens het korte aanwarmen van 2 maart (1 uur) wordt de 19 °C net gehaald, waarbij de inblaastemperatuur van LBK1 opmerkelijk genoeg maar ca 18 °C was. De luchtnaverwarmer bij deze ruimte heeft hier kennelijk gezorgd voor voldoende extra warmtetoevoer. De stooklijnverlaging tussen 7 en 11 uur heeft eerst geleid tot een scherpe daling naar 18,5 °C, om vervolgens ongeveer constant te blijven op die temperatuur. Het is een zonnige dag, mogelijk dat de zoninstraling heeft voorkomen dat de binnentemperatuur verder zou zakken tussen 7 en 11 uur. Om 11 uur is de overgang naar normale instellingen en de binnentemperatuur stijgt relatief snel naar 20 °C, waarbij vervolgens een aantal slingeringen om die temperatuur optreden, mogelijk als gevolg van niet optimale regelaar instellingen. Bij het langere aanwarmen op 10 maart (3 uur) blijkt het aanwarmen onvoldoende te zijn om de 19 graden te halen. Net als op 2 maart waren de voorafgaande nachten wel koud. De daaropvolgende periode met verlaagde stooklijn wordt ingeleid met een scherpe daling (binnen een half uur) van de binnentemperatuur tot ca 17,8 °C, gevolgd door een geleidelijker daling tot 17,4 °C. In tegenstelling tot 2 maart is er op 10 maart weinig zon. Na de overgang naar normaalbedrijf wordt de binnentemperatuur maar geleidelijk hoger en komt niet hoger dan 18,6 °C tot 18,8 °C, tegen het einde van de middag. De buitentemperatuur is gedurende deze dag wat gezakt. De inblaastemperatuur van LBK1 bleef in de middag opmerkelijk laag: 17 tot 17,4 °C. Kennelijk was de naverwarmer nu ook niet in staat om een hogere binnentemperatuur te bereiken, waarschijnlijk als gevolg van de lage temperatuur van het CV water.

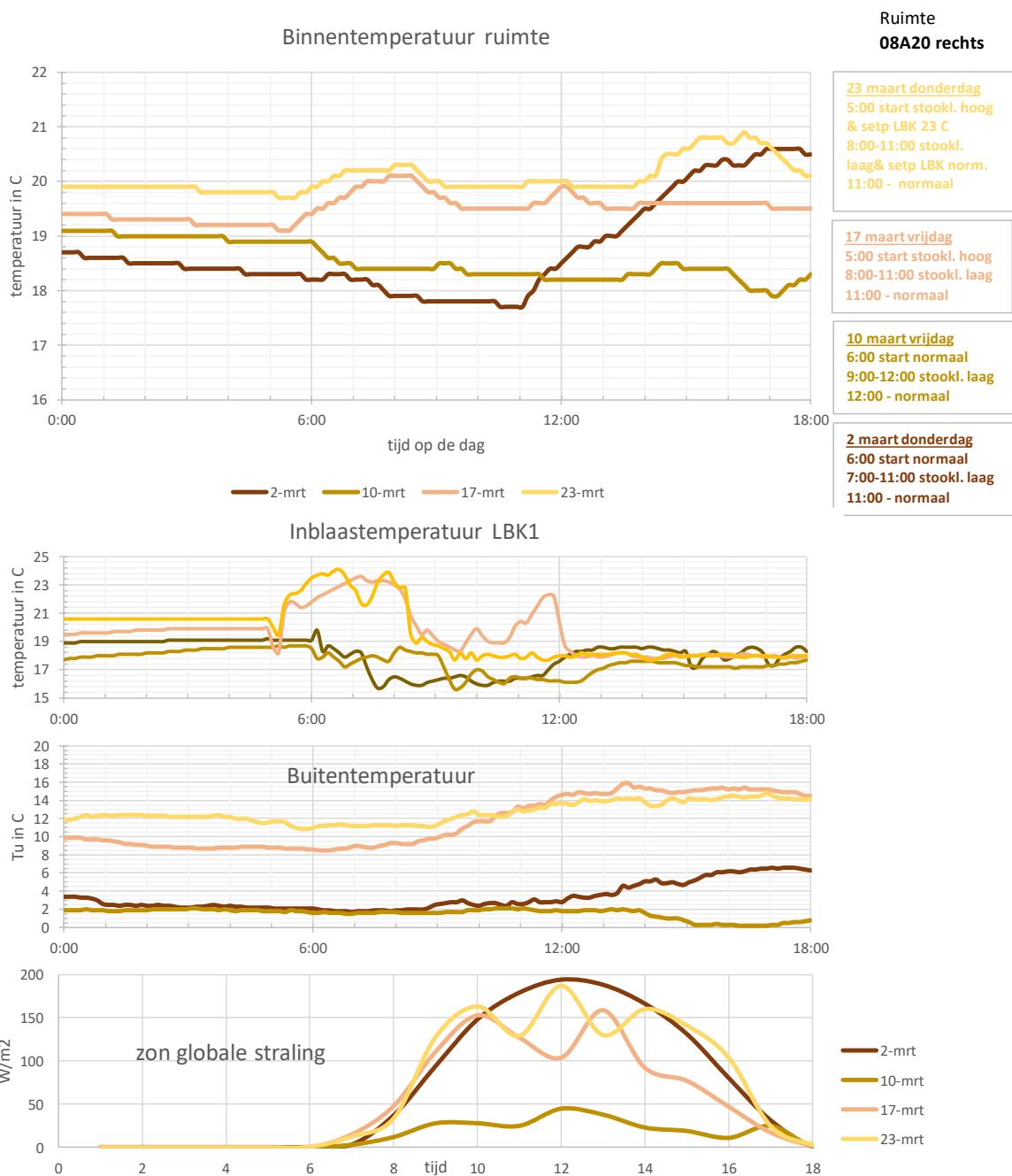


Figuur 5-16 Ruimte 8A20 links

In Figuur 5-16 wordt de temperatuur van ruimte 8A20 links weergegeven. Op 2 en 10 maart laat de temperatuur hier een vergelijkbaar patroon zien als in ruimte 8A22, maar liggen de temperaturen als geheel wat hoger. Tijdens “stooklijn laag” is de binnentemperatuur boven de 19 °C (2maart) of net eronder (10 maart). Opvallend is dat op 2 maart tijdens de periode met verlaagde stooklijn de temperatuur van de ruimte blijft stijgen. Dat kan eigenlijk alleen verklaard worden vanuit een interne belasting, die dan aanwezig moet zijn. Daar zijn geen gegevens van beschikbaar.

Op 17 en 23 maart beweegt de binnentemperatuur zich rond 20,6 °C, ook tijdens de “stooklijn laag” periode. Later in de middag stijgt de temperatuur in deze ruimte tot boven de 21 °C. Deze ruimte koelt minder af dan 8A22, omdat het niet op een hoek ligt. Daardoor zijn overdag de temperaturen, ook tijdens de proef, binnen de comfortzone van 19-21 °C.

Uurmatching



Figuur 5-17 Ruimte 8A20 rechts

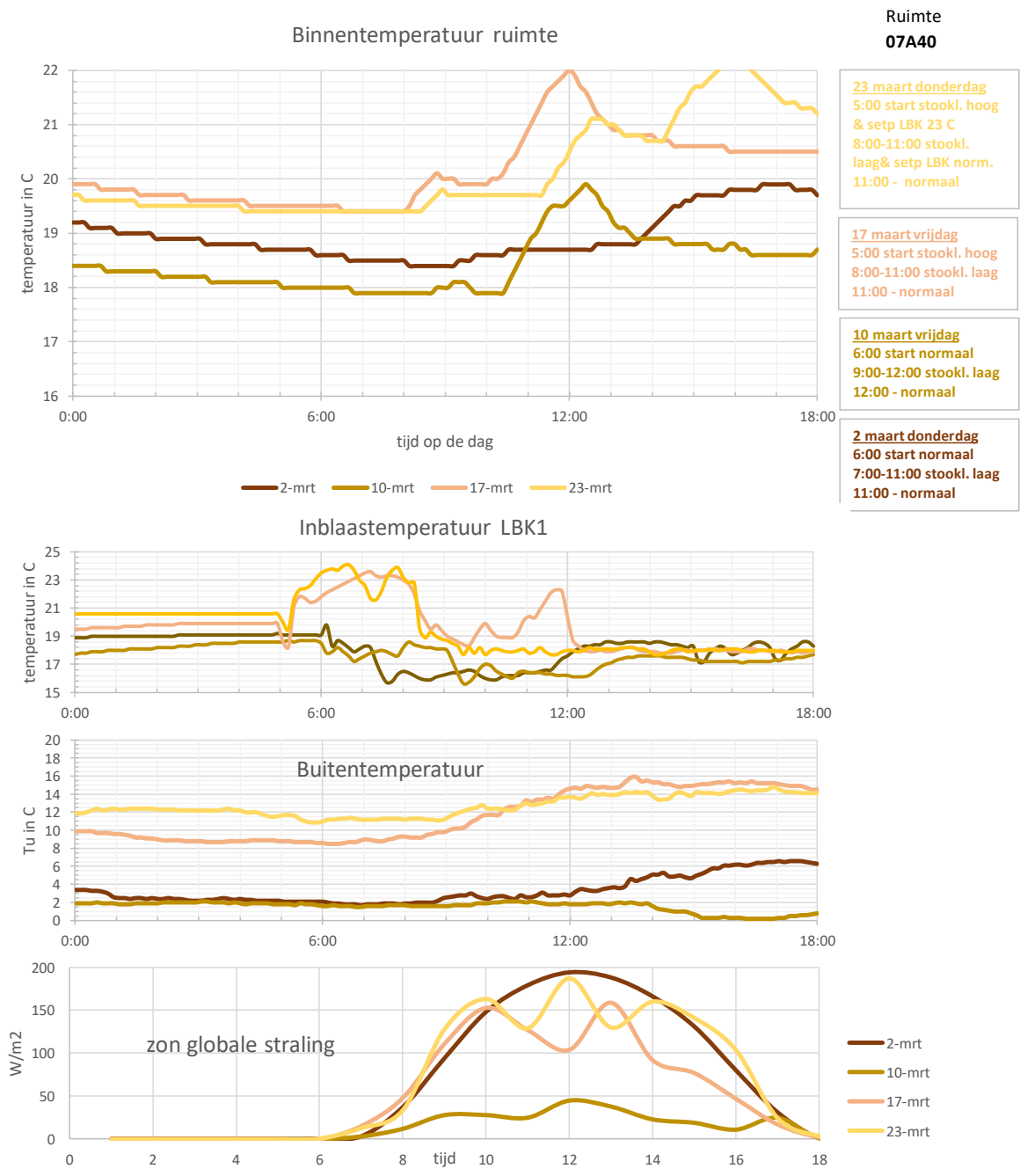
In Figuur 7-15 zijn de temperatuurverlopen van ruimte 8A20 rechts weergegeven.

In ruimte 8A20 rechts is te zien dat de ruimtetemperatuur op 2 maart en 10 maart na het opstarten alleen maar afneemt. Kennelijk is tijdens de opwarmperiode hier de naverwarming op die dagen niet ingeschakeld, en/of staat de VAV klep op een lage stand. Op 2 maart, aan het einde van de periode met de verlaagde stooklijn, gaat de temperatuur van de ruimte wel omhoog. Kennelijk staat de naverwarming dan wel aan, of is de VAV klep weer open, of ontstaat er substantiele interne belasting door de aanwezigheid van mensen.

Op 17 en 23 maart is de situatie anders. Op deze dagen is de opwarmperiode ingesteld van 5.00 tot 8.00 uur, en de periode van verlaagde stooklijn van 8.00 tot 11.00 uur. Tijdens het opwarmen is een verhoogde stooklijn ingesteld, en een verhoogde inblaastemperatuur van LBK 1. De buitentemperatuur

Uurmatching

varieert gedurende de nacht tussen de 8 en 12 °C en gedurende de dag tussen 12 en 16 C. Op deze dagen blijft de binnentemperatuur ruim boven de 19 °C graden. Van de beschouwde ruimtes koelt alleen ruimte 8A22 tot iets onder de 19 °C af. Geconcludeerd kan worden dat voor deze dagen aanwarmen helemaal niet nodig is als uitgegaan wordt van een acceptabel comfortgebied van 19-21 °C.



Figuur 5-18 Ruimte 7A40

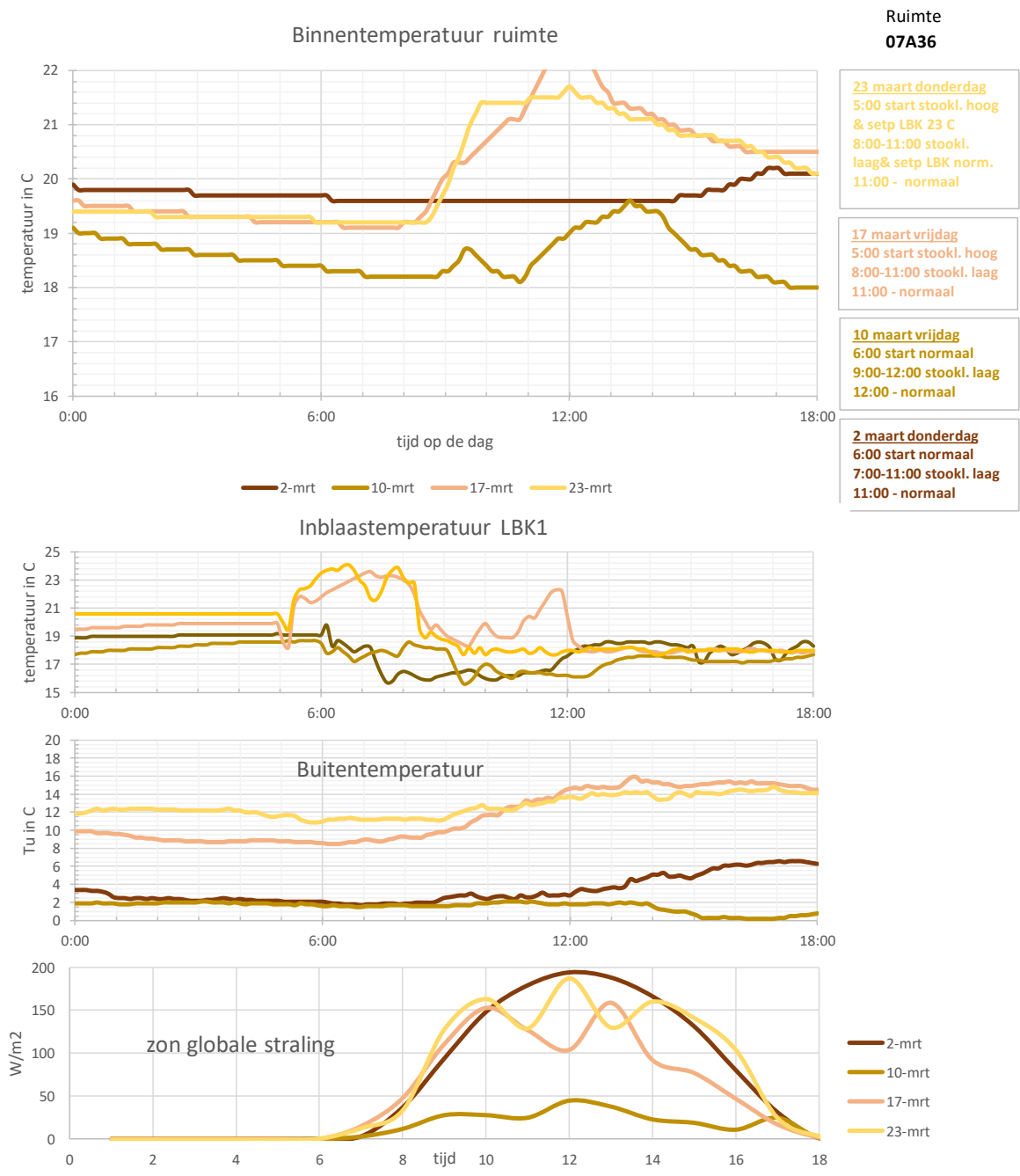
In Figuur 5-18 zijn de temperatuurverlopen van ruimte 7A40 weergegeven. Ruimte 7A40 ligt op de ZW hoek van het gebouw.

De reactie van deze ruimte op de proefinstellingen is merkwaardig. Op 2 en 10 maart reageert de ruimte temperatuur niet op het opstarten van de installatie. En ook niet op de “stooklijn laag” periode. Op 2 maart stijgt de binnentemperatuur wat vanaf 9.00 uur en op 10 maart een vrij sterke stijging vanaf 10 uur, beide momenten liggen in de “stooklijn laag” periode. Vermoedelijk start er op die momenten een vergadering,

Uurmatching

waardoor de naregeling in de ruimte geactiveerd wordt, maar ook interne belasting ontstaat in de ruimte. Op 17 maart vindt er een gelijkvormige stijging van de binnentemperatuur plaats, kennelijk start dan ook een zelfde soort vergadering als op 10 maart.

Op 17 en 23 maart stijgt de binnentemperatuur bij aanvang van de “stooklijn laag” periode. Het lijkt erop dat dan pas de verhoogde setpoint instelling (vanaf 6.00 tot 12.00) van de inblaastemperatuur doordringt. Alsof de VAV klep dan pas open gaat. Het vraagt meer detail kennis van de instellingen van het GBS om dit te verklaren.



Figuur 5-19 Ruimte 7A36

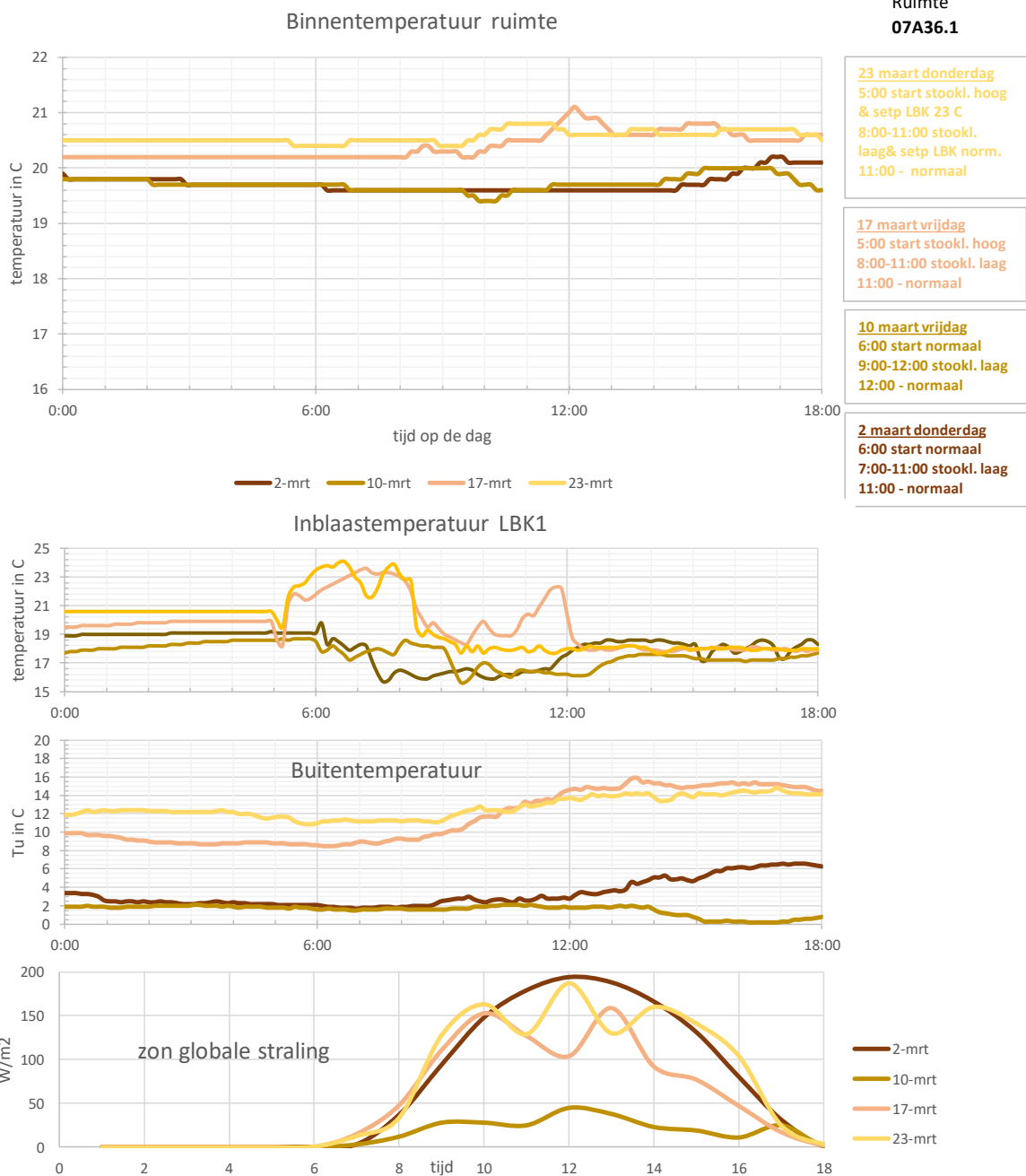
Kkk

Eigenzinnige ruimte, geen tijden terug te zien die iets met de proef te maken hebben. Lijkt zongevoelig, behalve dan op 2 maart

Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

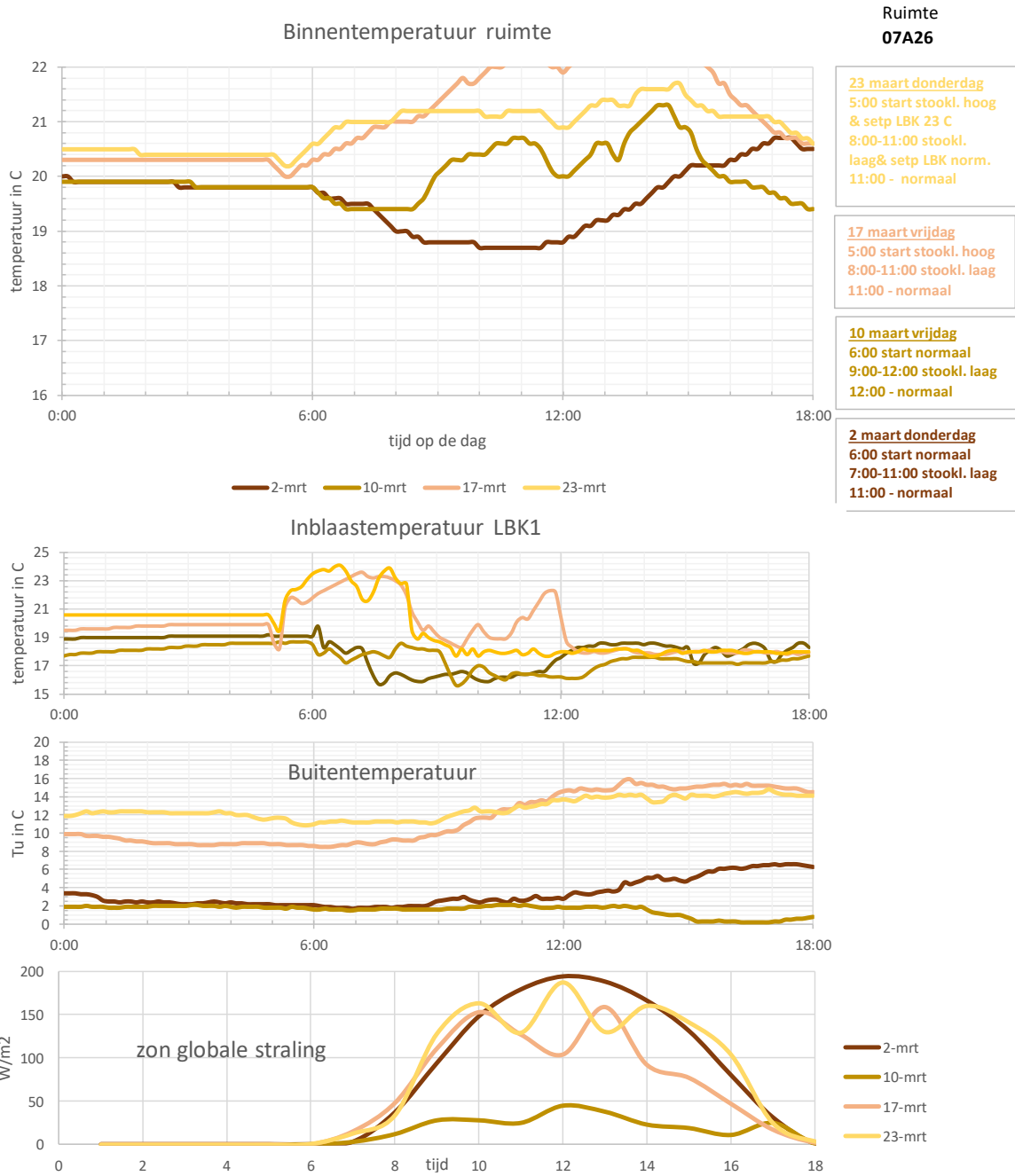
© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam



Figuur 5-20 Ruimte 07A36.1

Ruimte 7A36 is een kleine kantoorruimte. Wat opvalt is dat de binnenlucht temperatuur totaal niet reageert op hetgeen er bij de proefdagen is ingesteld. En deze temperatuur ligt boven de 19,5 °C op 2 en 10 maart, en boven de 20 C op 17 en 23 maart. Kleine ruimtes krijgen relatief weinig lucht, daardoor reageert de binnentemperatuur zelfs niet (of zeer gedempt) op de variaties in inblaastemperatuur.

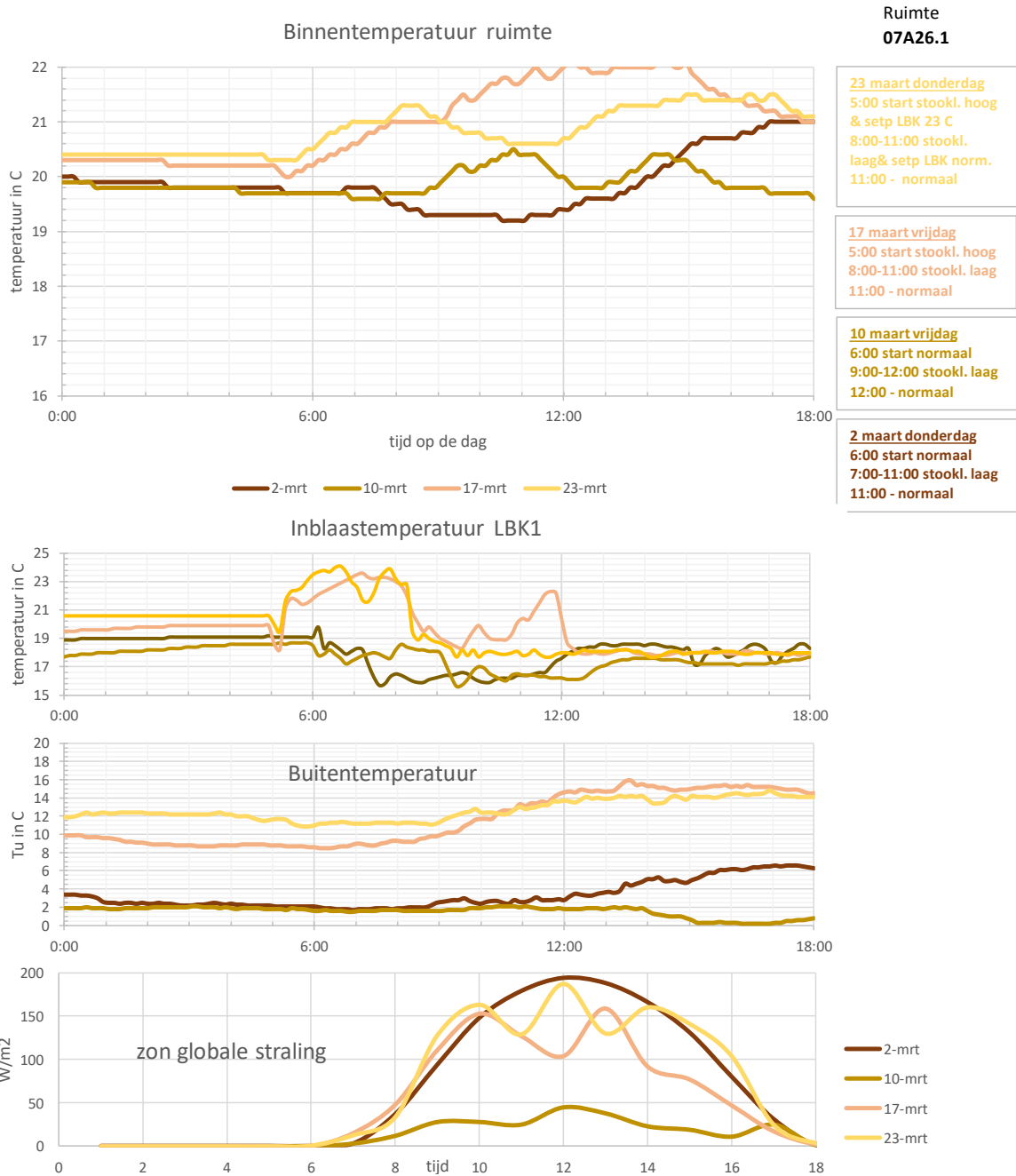
Uurmatching



Figuur 5-21 Ruimte 7A26

Hier wel invloed van de proef te zien op 2 en 10 maart. Opvallend dat de binnentemperatuur op 10 maart snel stijgt: interne belasting? Zowel op 2 en 10 maart weinig opwarmeffect te zien na de opstart.

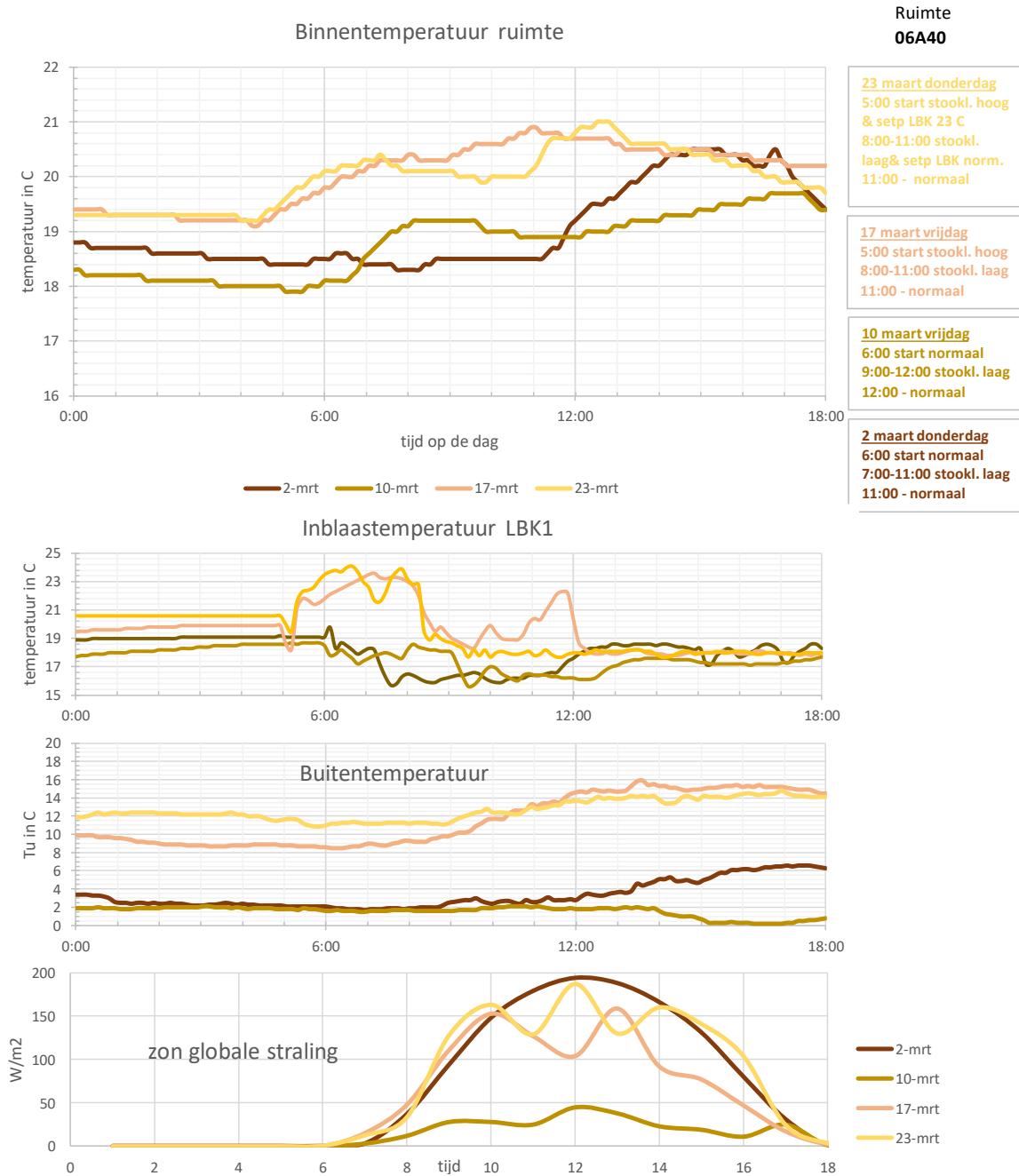
Uurmatching



Figuur 5-22 Ruimte 7A26.1

In Figuur 5-21 en Figuur 5-22 zijn de temperatuur verlopen in ruimten 7A26 en 7A26.1 weergegeven; ze zijn enigszins gelijkvormig aan elkaar en worden daarom te samen toegelicht. Dit zijn onderwijsruimten. Op 2 maart is de daling in binnentemperatuur te zien tijdens “stooklijn laag”, en op 10 maart is dat niet te zien en stijgt de temperatuur zelfs. Op 2 maart zijn de ruimtes niet in gebruik gedurende de beschouwde tijd, en op 10 maart wel. Op 17 en 23 maart reageert de binnentemperatuur op het verhoogde setpoint en daarmee de hogere inblaastemperatuur na opstarten om 5.00 in de morgen. Op 17 maart vinden er kennelijk vanaf circa 10.00 uur lessen plaats en stijgt de binnentemperatuur.

Uurmatching



Figuur 5-23 Ruimte 06A40

In Figuur 5-23 worden de temperatuur verlopen in ruimte 6A40 weergegeven. Ruimte 6A40 is een grote kantoorruimte en ligt op de zuidwesthoek van het gebouw. Gedurende de nacht beweegt de binnentemperatuur naar 18 °C. Tussen 2 en 10 maart is een opvallend verschil zichtbaar. Op 10 maart is de ruimte kennelijk vroeg in gebruik, waardoor naverwarming ingeschakeld wordt tijdens de opwarmfase tot 9.00 uur. Op 2 maart was de opwarmfase om 7.00 uur al afgelopen en bleef de temperatuur daardoor iets boven de 18 °C hangen. Onduidelijk is of er tijdens de stooklijn laag periode aanwezigheid was in de ruimte, en dan zou de naverwarming niet in staat zijn om deze ruimte op temperatuur te krijgen, of dat er niemand aanwezig was en de naverwarming niet in bedrijf was. Op 17 en 23 maart is er een duidelijk opwarmeffect van het verhoogde setpoint van de inblaastemperatuur en op 23 maart (ook een donderdag) blijft de binnentemperatuur ook vlak verlopen (net als op 2 maart) gedurende de “stooklijn

Uurmatching

laag” periode. Ook hier de vraag of er aanwezigheid was die donderdagochtend of niet. Op vrijdagochtend 17 maart was er duidelijk wel aanwezigheid.



Figuur 5-24 Ruimte 03A34

In Figuur 5-24 zijn de temperatuurverlopen voor ruimte 03A34 weergegeven. Ruimte 03A34 is een klein kantoor aan de zuidkant op de derde verdieping. Op 2 maart zijn er geen meetdata beschikbaar voor deze ruimte. Tijdens de opstart van 10 maart vertoont de binnentemperatuur een slingering iets boven de 19 °C tijdens het opstarten van de installatie. In de “stooklijn laag” periode stijgt de temperatuur weer, hetgeen duidt op een effectieve naverwarming en aanwezigheid. Op 17 en 23 maart is er een duidelijk effect van de verhoogde inblaasttemperatuur tijdens opstart, en op 17 maart is er ook een duidelijke stijging van de temperatuur in de “stooklijn laag” periode, wat duidt op aanwezigheid en effectieve

Uurmatching

naverwarming. Maar zo'n klein kantoor heeft mogelijk geen naverwarming, in de golfbeweging van 17 maart kan ook het directe effect van de inblaastemperatuur gezien worden.

6 Resultaten en conclusies

Gebouw MLH is een goed geïsoleerd gebouw met label A en wordt geconditioneerd met lucht. Vanwege de ventilatie eisen, voor geschreven door de richtlijn "Frisse scholen", is er geen mogelijkheid voor luchtrecirculatie ingebouwd. Voor het aanwarmen is dat een enorm nadeel. Tijdens het aanwarmen in de periode dat er nog geen mensen in het gebouw aanwezig zijn, moet er altijd ook verse lucht aangezogen worden omdat de lucht zelf als warmtedrager fungeert voor de verwarming van het gebouw. Natuurlijk zijn er ook naverwarmingsunits en inductie units, waarbij water de warmtedrager is naar de ruimten, maar de warmte moet afgestaan worden aan lucht die langs deze units stroomt, en daarvoor is altijd een deel verse buitenlucht nodig. Weliswaar is er wel warmteterugwinning uit de afgevoerde ventilatielucht aanwezig, maar dat is basis van een twin coil unit, dit soort units hebben doorgaans een rendement van maximaal 60%.

Doordat het gebouw goed geïsoleerd is houdt het gedurende de nacht en weekend behoorlijk goed de warmte vast. Gedurende de nacht wordt de ventilatie geheel uitgeschakeld en de binnentemperaturen nemen dan helemaal niet sterk af. Toch wordt er 's ochtends altijd een aanwarmperiode toegepast, om er zeker van te zijn dat de temperatuur bij aanvang werktijd aangenaam is. In de meeste gevallen is dat tussen de 20 en 21 °C. De ondergrens van het comfort ligt bij 19 °C, en het zou daarom niet erg zijn als de binnentemperatuur bij aanvang werktijd op 19 °C ligt. En dat pas in de loop van de dag de temperatuur naar 20 of 21 °C gaat.

Een gebouw als MLH kent uiteenlopende ruimtes met uiteenlopende functionaliteiten. Duidelijk blijkt uit de metingen dat deze ruimtes heel verschillend kunnen reageren op de perioden met stooklijnverlaging, zoals te zien is op de meetdagen in maart 2023. De naregeling van de binnentemperatuur komt pas op gang als er een persoon gedetecteerd is, tot die tijd blijft de luchtverversing minimaal en de naverwarming uitgeschakeld, tenzij de ruimtetemperatuur lager is dan de gewenste basistemperatuur. De stooklijnverlaging tijdens proefdagen, gedurende bepaalde gekozen periodes bij de aanvang van de werkdag, leidt daadwerkelijk tot een afname van warmtepompinzet in die periode. En heeft niet tot dramatisch lage binnentemperaturen geleid. Als de ruimte niet in gebruik is, dalen de temperaturen maximaal met 2 °C tijdens stooklijn periode laag. Maar als de ruimte gebruikt wordt is de naverwarming evengoed nog in staat om met de verlaagde CV water temperaturen de ruimte te verwarmen. Voorwarmen van het gebouw helpt om te lage temperaturen te voorkomen. Maar hoe lang dat voorwarmen moet duren, wordt uit de uitgevoerde experimenten nog niet duidelijk. Maar daarmee is wel aangetoond dat inzetverschuiving van de warmtepomp kan plaatsvinden.

Uiteindelijk is het opvallend, dat ruimten waar een warmtevraag nodig is gedurende de periode van verlaagde stooklijn, met de naverwarming en de optredende interne belasting toch op temperatuur kwamen. Dit versterkt de indruk dat de voorwarmperiode niet lang hoeft te duren. En als met lage stooklijntemperatuur toch voldoende warmte toegevoerd kan worden (via de naverwarmers), dan rijst de vraag op waarom de verlaagde stooklijn toch tot minder warmtepompinzet heeft geleid gedurende die periode.

Dit gebouw, dat met lucht geklimatiseerd wordt, heeft meer vermogen nodig voor alle ventilatoren dan voor de warmtepomp, zo blijkt uit de uitgevoerde EPA-U scan. Verschuiven van het energie gebruik van

Uurmatching

ventilatoren is maar zeer beperkt mogelijk, aangezien het CO₂ gehalte in bezette ruimtes snel oploopt als de ventilatie verlaagd wordt

Wat vooral uit deze proeven duidelijk wordt is dat naast inzetverschuiving voor het creëren van flexibiliteit ook een optimaal inzetpatroon van een warmtepomp gedurende de dag van groot belang is. Waarbij bijvoorbeeld voorkomen wordt dat het gebouw 's ochtends te warm wordt opgestookt, waardoor er 's middags meer gekoeld moet worden. Zowel voor flexibiliteit als het bepalen van optimale inzetpatronen is intelligente sturing, die overweg kan met voorspellingen van bijvoorbeeld de SPOT prijs, maar ook van het weer, en over het gebruik van ruimtes (rooster) om warmtepompen en overige gebouw installaties energiezuinig aan te sturen, met behoud van comfort.

Voor zulke geavanceerde, mogelijk ook zelflerende besturingssystemen zijn in het gebouw betrouwbare sensoren nodig, waarvan de betrouwbaarheid bijgehouden wordt. Tijdens de proeven in MLH werd duidelijk dat temperatuursensoren soms aangestraald worden door de zon, waardoor ze een te hoge waarde aangeven. CO₂ sensoren, essentieel voor het bewaken van de binnenluchtkwaliteit en daarmee de mate van ventilatie, hebben een beperkte levensduur, in de orde van 7 jaar. Ze moeten gecontroleerd en tijdig vervangen worden.

En de gebouwinstallatie zelf moet voldoende fijn vertakt zijn om op ruimte niveau maatwerk te leveren qua binnentemperatuur en luchtverversing.

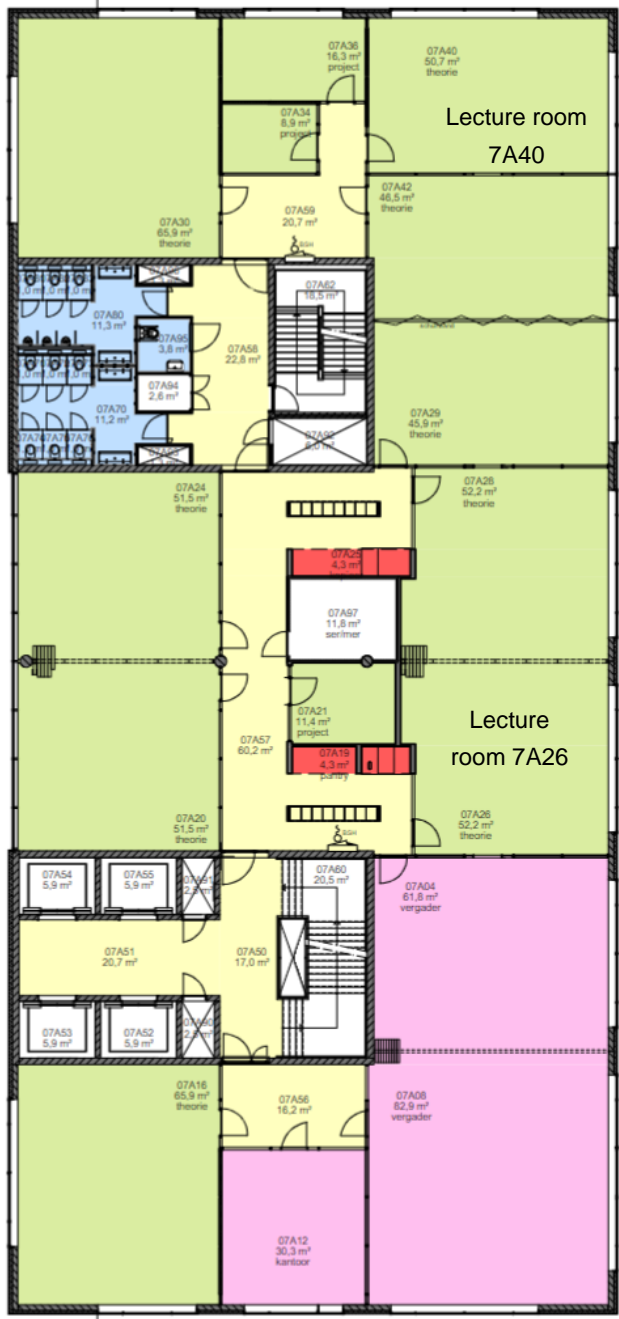
7 BIJLAGE 1 plattegronden verdiepingen MLH



Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam

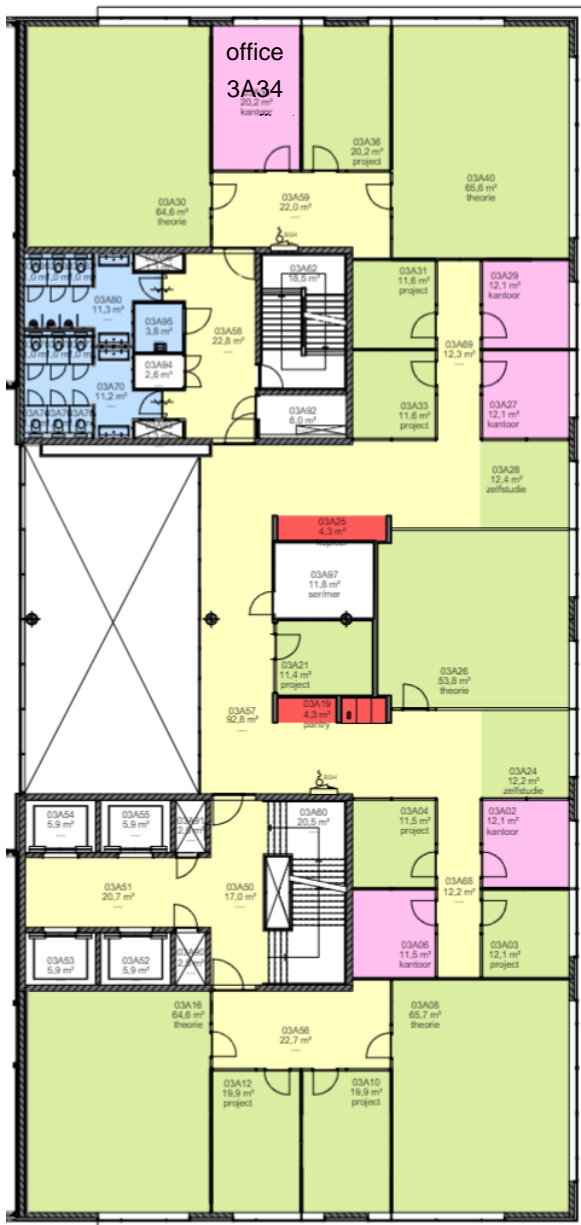


N.B. Ruimtematen in tekening zijn NVO

	facilitaire ruimten	9,3 m ²
	onderwijs-basis	528,3 m ²
	sanitaire ruimten	38,9 m ²
	verkeersruimten horizontaal	162,7 m ²
	werkomgeving	176,8 m ²
Totaal VVO		916,1 m²

Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1
 © 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam



Uurmatching

Lectoraat Energie en Innovatie / faculteit Techniek – version 1.1

© 2023 Copyright Hogeschool Amsterdam