

Radarweg 60
1043 NT Amsterdam

www.tno.nl

T +31 88 866 50 10

TNO-rapport

TNO 2019 P10600 | Eindrapport

Bevindingen haalbaarheidsonderzoek VeniVidiFlexi. Onderzoek naar energiebesparing bij huishoudens door slim verwarmen tijdens afwezigheid

Datum	18 april 2019
Auteur(s)	Renee Kooger, Henri ter Hofte*, Lieke Dreijerink, Casper Tigchelaar, Robert de Smidt, Arjan Peddemors* (*Drebb)
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	51(incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	2
Opdrachtgever	TKI Urban Energy
Projectnaam	VeniVidiFlexi
Projectnummer	060.35160

Alle rechten voorbehouden.

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

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2019 TNO

Management samenvatting

S.1 Aanleiding haalbaarheidsonderzoek

Er wordt nog veel aardgas verspild door huishoudens op momenten dat verwarmen van de woning niet nodig is, omdat de bewoners afwezig zijn of slapen. Het bedrijf Drebbel biedt diensten en algoritmes aan zoals de Thermopilot, waarmee deze verspilling beperkt kan worden, doordat de verwarmingsvraag automatisch vermindert door te anticiperen op mobiliteitspatronen van bewoners.

Om deze en andere producten effectiever te maken is een beter begrip van het stookgedrag van huishoudens noodzakelijk. Helaas is het beperkte onderzoek dat hierover beschikbaar is, zoals het WoON onderzoek (Tigchelaar & Leidelmeijer, 2013), vaak gebaseerd op vragenlijsten, met een beperkt detailniveau en betrouwbaarheid. Empirische metingen in een representatieve groep woningen kunnen helpen om de relatie tussen energiegebruik en gedrag van huishoudens beter in kaart te brengen.

De diensten die Drebbel ontwikkeld worden op dit moment gekoppeld aan bestaande slimme thermostaten. Om het besparingspotentieel te vergroten moet onderzocht worden op welke manier Drebbel haar diensten kan aanpassen, zodat het een breder bereik krijgt. Het meten en analyseren van stookgedrag van huishoudens is technisch ingewikkeld en kan ook privacygevoelig zijn. Ook is niet duidelijk wat de business case is voor diensten en producten die dit gedrag zuiniger kunnen maken. Om het onderzoek op een efficiënte wijze op te zetten en goed aan te laten sluiten bij een productontwikkelingstraject, is er voor gekozen eerst een haalbaarheidsonderzoek uit te voeren.

In dit haalbaarheidsonderzoek is daarom bekeken of het haalbaar is om met een alternatieve methodes betrouwbare data te verkrijgen over stookgedrag. Er zijn twee methoden onderzocht om stookgedrag in kaart te brengen; 1. Doormiddel van metingen gecombineerd met simulatiemodellen, 2. Doormiddel van gedetailleerdere vragenlijsten. Daarnaast is de technische en commerciële haalbaarheid van nieuwe producten en diensten voor Drebbel onderzocht. Het onderzoek heeft geresulteerd in een concrete projectopzet die gebruikt kan worden in een vervolgtraject.

Dit haalbaarheidsonderzoek is gefinancierd door de Rijksdienst Voor Ondernemend Nederland (RVO) als onderdeel van de Topsector Energie.

S.2 Haalbaarheid van meten en modelleren vs. vragenlijsten om het stookgedrag van huishoudens in kaart te brengen

Uit het haalbaarheidsonderzoek blijkt dat het mogelijk is om het stookgedrag te monitoren door het verzamelen van slimme thermostaatdata gecombineerd met aan- en afwezigheidsdata met behulp van specifieke apps geïnstalleerd in woningen (zie ook Hoofdstuk 2). Op basis van proefopstellingen in 4 woningen blijkt dat het goed mogelijk is om met beperkte extra informatie over de woning in simulatiemodellen betrouwbare stookpatronen van huishoudens te construeren die goed overeenkomen met werkelijke patronen. Doordat we in staat zijn het

werkelijke stookgedrag na te bootsen, is het ook mogelijk om in het model elementen van dit gedrag te variëren. Door 'setpoints' in het model te wijzigen kan '(niet) stoken bij afwezigheid' of 's nachts' worden nagebootst en vergeleken met de werkelijke gemeten situatie. Uit het verschil tussen beide analyses kan het besparingspotentieel worden afgeleid (zie paragraaf 2.1.3). Uit gevoeligheidsanalyses blijkt verder dat aanvullende dataverzameling over woningkenmerken bijvoorbeeld door labelopnames in de woning, niet leidt tot fundamenteel andere resultaten. Dit betekent dat de dataverzameling relatief beperkt kan blijven.

Er zijn twee verschillende simulatiemodellen getest om stookgedrag te reconstrueren. Eén model is van ECN part of TNO en is bedoeld om warmtevraagprofielen te maken om bijvoorbeeld de noodzaak voor netverzwaringen te analyseren. Een ander model is van Drebbl en wordt gebruikt om de fysische eigenschappen van de woning te kunnen meenemen in de Drebbl apps. Hoewel de aanpak per model enigszins verschilt, blijken beide modellen geschikt om op betrouwbare wijze het stookgedrag na te bootsen. In een eventueel vervolgproject kunnen in beide modellen nog verbeteringen worden doorgevoerd om een nog betere 'fit' te krijgen met werkelijk gedrag.

Uit de literatuur blijkt dat stookgedrag in huishoudens door allerlei factoren wordt beïnvloed en dat het meten van stookgedrag en de potentiële besparing daardoor niet zo gemakkelijk is. Menkveld e.a. (2017) bevelen aan om een monitoringsprogramma op te zetten waarin de werkelijke besparingen worden gemeten en waarin kan worden geleerd wat werkt. Uit dit haalbaarheidsonderzoek blijkt dat dergelijke rechtstreekse monitoring haalbaar is. Wel is het aan te bevelen om aanvullend vragenlijsten te gebruiken voor het verzamelen van relevante aanvullende informatie zoals bijvoorbeeld inzicht in waarom huishoudens bepaald stookgedrag vertonen.

S.3 Dataverzameling en vertrouwelijkheid

Het is te verwachten dat het gedetailleerd meten van stookgedrag meer weerstand oproept bij deelnemers dan het invullen van een vragenlijst, omdat dit mogelijk als meer privacygevoelig wordt gezien. Bij het uitvoeren van het onderzoek moet dus veel aandacht besteed worden aan garanties rond privacy bewaking. Toch moet rekening gehouden worden met een lagere 'response rate'. Om een significant besparingseffect te kunnen bepalen, is een steekprofgrootte van bijna 2000 respondenten nodig.

Er is onderzocht of aangesloten kon worden bij het reeds uitgevoerde WoON 2018 onderzoek, waarbij respondenten die eerder meededen aan dit onderzoek, gevraagd zouden kunnen worden om te participeren in metingen. Uit gesprekken met het ministerie van Binnenlandse Zaken (BZK) en het Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS) is gebleken dat dit moeilijk is in te passen binnen de bestaande afspraken met de respondenten. Ook is het moeilijk om binnen de wettelijke eisen die CBS heeft rond vertrouwelijkheid, eerder verzamelde data te koppelen aan nieuwe data van Drebbl en/ of ECN part of TNO. Een nieuw eigen onderzoek lijkt een beter haalbaar alternatief.

S.4 Inzicht in de technische & commerciële haalbaarheid van producten en/of diensten van Drebbel

Uit de gesprekken die gevoerd zijn komt naar voren dat het huidige marktmodel, waaronder Drebbel diensten aanbiedt, niet of slechts heel beperkt aansluit bij de wensen van potentiële afnemers. In dit haalbaarheidsonderzoek zijn diverse alternatieve producten en diensten onderzocht (zie Hoofdstuk 4). De business case voor deze producten en diensten is echter alleen haalbaar bij grootschalige toepassing, met veel eindgebruikers. Dit vereist aanzienlijke investeringen, voor het aanpassen van de technologie, maar ook voor het verwerven van voldoende klanten. Het is op dit moment onzeker of deze investeringen kunnen worden terugverdiend en of ze zullen leiden tot een positief bedrijfsresultaat.

We concluderen hieruit dat er op dit moment geen zicht is op een succesvol marktmodel. Zonder zo'n marktmodel is verdere verbetering van de besparende app van Drebbel niet zinvol. Verdere onderbouwing van het stookgedrag en daaraan verbonden besparingspotentieel is dus niet relevant meer voor de productontwikkeling van Drebbel. Dat betekent niet dat onderzoek naar stookgedrag niet zinvol is. In de onderstaande vervolgstappen gaan we in op andere routes om zinvol onderzoek naar stookgedrag uit te voeren.

S.5 Vervolgstappen en mogelijk te verwachten effecten

S.5.1 De vervolgstappen die het samenwerkingsverband gaat zetten na afloop van het project om tot uitvoering en implementatie in de markt van wat onderzocht is te komen

Zoals in paragraaf S.3 beschreven is er op dit moment geen zicht op een succesvol businessmodel voor de besparende app van Drebbel. Dit maakt een vervolgstudie binnen de TKI Urban Energy, gericht op productontwikkeling, minder kansrijk.

Er blijkt echter bij onder andere het ministerie van BZK en het CBS veel belangstelling voor dataverzameling over stookgedrag bij huishoudens. Een vervolgproject gericht op beleidsrelevante wetenschappelijke inzichten is daarom mogelijk wel haalbaar. In paragraaf 5.1.2 is een projectopzet gemaakt waarbij geen gebruik gemaakt wordt van het bestaande WoON-onderzoek. Drebbel zou hierbij kunnen fungeren als technologieleverancier en dataverwerker. De kosten voor een dergelijk onderzoek worden geschat op iets minder dan 300 duizend euro. Het samenwerkingsverband gaat op zoek naar potentiële financiers voor een dergelijk onderzoek.

S.5.2 De verwachte CO₂-reductie die zou ontstaan bij uitvoering en implementatie

Er is waarschijnlijk nu geen markt voor de besparende producten van Drebbel en dus nu ook geen aanleiding om bijbehorende potentiële CO₂-reductie te berekenen. Het mogelijke besparingspotentieel van veranderend stookgedrag door slimme apps wordt echter geschat op 5,1% en 6,1% (Menkveld, Rietkerk, Mastop, Tigchelaar, & Straver, 2017). Dit gaat om een reductiepotentieel van circa 0,6 Mton CO₂. Hierbij moet worden opgemerkt dat deze schattingen grotendeels gebaseerd zijn op

vragenlijstonderzoek. Een betere inschatting kan worden gemaakt door meer kwantitatief te meten.

Met betere kennis over het stookgedrag van huishoudens bestaat de mogelijkheid om beter beleid en/of betere producten te ontwikkelen die (een deel van) dit potentieel kan benutten.

S.5.3 De financiële en economische kansen, inclusief een of meer mogelijke verdienmodellen die noodzakelijk zijn om het concept of de technologie succesvol toe te kunnen passen.

Naast producten om stookgedrag efficiënter te maken, is beter begrip van stookgedrag nuttig om piekbelasting van netten te voorkomen. Wanneer overgestapt wordt van aardgas naar all-electric verwarming of warmtelevering, dan vraagt dit uitbreiding van de capaciteit van elektriciteit- of warmtenetten. Gasnetten zijn gedimensioneerd om ene piek in vraag op een koude dag op te vangen. Elektriciteitsnetten zijn hier niet op berekend. De gezamenlijke piekvraag die kan ontstaan als woningen massaal worden verwarmd met warmtepompen, is bepalend voor de benodigde capaciteit van en daarmee de investeringen in deze netten. Beter begrip kan helpen om te anticiperen op stookgedrag van huishoudens. Hierdoor kan de anders gelijk optredende vraag beter worden uitgesmeerd over een langer periode. Zo kan de hoogte van de piekvraag worden beïnvloed en daarmee kan de noodzakelijke investering in elektriciteitsnetten worden beperkt.

S.5.4 De niet-technologische factoren die een rol kunnen spelen bij de toepassing van het concept of de technologie in de markt en de wijze waarop daarmee wordt opgedaan.

Behalve door de kenmerken van de installatie wordt stookgedrag bepaald door de combinatie van thermostaatinstellingen en gedrag. In hoeverre stookgedrag beïnvloed kan worden door beleid, of techniek die automatisch temperatuur in huis bepaalt, is onzeker. Soms kunnen bewoners persoonlijke redenen hebben voor bepaald stookgedrag. In een vervolgstudie moeten deze beweegredenen onderzocht worden om een goed idee te hebben hoe bespaard kan worden op energieverbruik voor ruimteverwarming via beleid of zelfregulerende techniek.

Inhoudsopgave

	Management samenvatting	2
S.1	Aanleiding haalbaarheidsonderzoek	2
S.2	Haalbaarheid van meten en modelleren vs. vragenlijsten om het stookgedrag van huishoudens in kaart te brengen	2
S.3	Dataverzameling en vertrouwelijkheid.....	3
S.4	Inzicht in de technische & commerciële haalbaarheid van producten en/of diensten van Drebbl	4
S.5	Vervolgstappen en mogelijk te verwachten effecten	4
1	Inleiding	8
1.1	Aanleiding	8
1.2	Doel van onderzoek naar stookgedrag.....	8
1.3	Onderdelen en leeswijzer haalbaarheidsonderzoek	9
2	Analyseren stookgedrag en besparingspotentieel met metingen en simulatiemodellen	10
2.1	Dataverzameling voor bepalen stookgedrag en besparingspotentieel	10
2.2	Het gebruik van simulatiemodellen voor het berekenen van besparingspotentieel	16
2.3	Twee besparingspotentiëlen.....	19
2.4	Conclusies over de toepassing van simulatiemodellen.....	21
3	Analyse stookgedrag met vragenlijstonderzoek.....	22
3.1	Stookgedrag in Woon Onderzoek Nederland (WoON)	22
3.2	Verklarende factoren stookgedrag	22
3.3	Conclusies over toepassen vragenlijstonderzoek	26
4	Markt voor producten en diensten gericht op het veranderen van stookgedrag	27
4.1	Alternatief business model 1: White-label service leverancier	27
4.2	Alternatief business model 2: White-label technologieleverancier	28
4.3	Conclusies over marktmodel Drebbl.....	28
5	Projectopzet vervolgstudie naar stookgedrag	30
5.1	In kaart brengen maximale besparingspotentieel per huishouden.....	30
5.2	Bepalen energiebesparing van technologie die automatisch slim verwarmt.....	34
5.3	Conclusies over onderzoekopzet vervolgstudie	37
6	Referenties	39
Bijlage A.	Fysische modellen voor energiebesparing bij stookonderbrekingen	42
a.	Opgeslagen warmte.....	42
b.	Warmteverlies.....	42
c.	Warmtewinst.....	44
d.	Warmtebalans.....	44
e.	Thermische traagheid en de snelheid van warmteverlies en temperatuurdaling	45
f.	Thermische traagheid en energiebesparing door stookonderbrekingen	47
g.	De rol van thermische traagheid in rekenmethoden voor o.a. het energielabel.....	50
h.	Thermische traagheid van woningen in Nederland	51

i.	Gevoeligheidsanalyse.....	52
----	---------------------------	----

Bijlage B.	Interviews
.....	54

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Nederlandse huishoudens verspillen aardgas als bewoners hun woning verwarmen terwijl zij afwezig zijn of slapen. Zo wordt elk jaar voor ongeveer 600 miljoen m³ aan aardgas verstookt om lege woningen te verwarmen waar niemand thuis is, en binnenkort ook niemand thuis komt (Tigchelaar & Leidelmeijer, 2013; Ministerie van VROM, 2010). Dit verlies heeft vooral te maken met gedrag (mensen vergeten de verwarming lager te zetten), en minder met de technische staat van de woning zoals bijvoorbeeld de isolatiegraad.

Het bedrijf Drebbel biedt diensten en algoritmes aan, waaronder de 'Thermopilot', waarmee deze verspilling beperkt kan worden. De diensten van Drebbel zijn gekoppeld aan bestaande slimme thermostaten, namelijk de 'Toon'¹ van Eneco, en de 'Thermosmart'². Door te anticiperen op aan- en afwezigheidspatronen van bewoners vermindert de verwarmingsvraag automatisch.

Om deze en andere producten en diensten nog effectiever te maken is een beter begrip van het verwarmingsgedrag van huishoudens noodzakelijk, met name daar waar het gaat om het verwarmen tijdens afwezigheid. Het onderzoek dat over dit onderwerp beschikbaar is, zoals het WoON onderzoek (Tigchelaar & Leidelmeijer, 2013), is vaak gebaseerd op vragenlijsten, met een beperkt detailniveau en een beperkte betrouwbaarheid vanwege zelfrapportage door bewoners. Door metingen uit te voeren in woningen, kan de relatie tussen energiegebruik en gedrag van huishoudens beter in kaart worden gebracht.

Door deze inzichten zouden de diensten niet alleen effectiever kunnen worden. Ook wordt zo betrouwbaarder bepaald wat het potentieel is voor besparing en potentiële diensten zoals demand side management, zowel voor individuele huishoudens als voor alle huishoudens in Nederland bij elkaar opgeteld.

1.2 Doel van onderzoek naar stookgedrag

Onderzoek naar stookgedrag kan bijdragen aan het breder beschikbaar maken van diensten en algoritmes om onzuinig stookgedrag te beperken en aan het ontwikkelen van diensten die op middellange termijn grootschalig flexibiliteitspotentieel realiseren door in goed geïsoleerde huizen met een warmtepomp slim (voor) te verwarmen.

Het meten en analyseren van stookgedrag van huishoudens is technisch ingewikkeld en kan ook privacygevoelig zijn. Ook is niet duidelijk wat de business case is voor diensten en producten die dit gedrag zuiniger kunnen maken. Om het onderzoek op een efficiënte wijze op te zetten en goed aan te laten sluiten bij een productontwikkelingstraject, is er voor gekozen eerst een haalbaarheidsonderzoek uit te voeren.

¹ <https://www.eneco.nl/klantenservice/producten-diensten/toon/>

² <https://www.thermosmart.nl/>

1.3 Onderdelen en leeswijzer haalbaarheidsonderzoek

Dit haalbaarheidsonderzoek bestaat uit de volgende onderdelen:

- 1 Inzicht in haalbaarheid van het fysisch modelleren van en meten van factoren die van belang zijn voor het besparingspotentieel van slim verwarmen tijdens afwezigheid. Dit wordt besproken in Hoofdstuk 2, waarbij de focus ligt op effect meting bij individuele situaties.
- 2 Inzicht in beperkingen en mogelijkheden van het onderzoeken van verwarmingsgedrag door middel van vragenlijstonderzoek gecombineerd met interviews en woningobservaties. Dit wordt besproken in Hoofdstuk 3 waarbij de focus ligt op effecten op nationaal niveau.
- 3 Inzicht in de technische & commerciële haalbaarheid van producten en/of diensten van Drebbel die niet als third-party add-on maar geïntegreerd aangeboden worden met diensten van andere partijen, zoals fabrikanten van slimme thermostaten en energieleveranciers. Een belangrijke vraag hierbij is bijvoorbeeld: zijn andere partijen genegen om besparingsdiensten en flexibiliteitsdiensten op te nemen in hun businessmodellen? Dit wordt besproken in Hoofdstuk 4.
- 4 Een uitgewerkt opzet van een vervolgstudie naar het stookgedrag van huishoudens in Hoofdstuk 5.

2 Analyseren stookgedrag en besparingspotentieel met metingen en simulatiemodellen

In dit hoofdstuk beschrijven we hoe we het besparingspotentieel van slim verwarmen kunnen berekenen aan de hand van monitoringdata en met behulp van een simulatiemodel. Belangrijke componenten voor het bepalen van het stookgedrag en het besparingspotentieel zijn:

- Het aardgasgebruik op uurbasis voor ruimteverwarming (die we meten zoals beschreven in paragraaf 2.1.1)
- De patronen van aanwezigheid en afwezigheid van bewoners thuis (die we meten zoals beschreven in paragraaf 2.1.2).
- Het thermostaatprogramma en handmatige aanpassingen van het setpoint (die we meten zoals beschreven in paragraaf 2.1.3).
- Voor het bepalen van de effectieve stooklast blijken we naast het setpoint en het buitenklimaat ook drie andere eigenschappen van de woning nodig te hebben, namelijk τ , de thermische traagheid van de woning, H , het specifieke warmteverlies van de woning en A_{dakraam} , die de warmtewinst door zonnestraling aan de woning bepaald. Deze drie grootheden blijken we ook uit de monitoringdata te kunnen afleiden, zoals beschreven in respectievelijk paragraaf 2.1.4 (τ), paragraaf 2.1.5 (H) en paragraaf 2.1.5.5 (A_{dakraam}).

We onderscheiden twee soorten besparingspotentieel: een maximaal besparingspotentieel (zie paragraaf 2.2.1), dat alleen bereikt kan worden met een denkbeeldige technologie die perfect kan voorspellen, en een praktisch besparingspotentieel (zie paragraaf 2.3.2), waarbij het besparingspotentieel wordt bepaald van een interventie die in de praktijk bestaat.

Bij slim verwarmen beperken we ons tot stookonderbrekingen: tijdelijk niet verwarmen en pas na een tijdje weer verwarmen tot de oorspronkelijke temperatuur. Dergelijke stookonderbrekingen kunnen leiden tot energiebesparing. De achtergrond hiervan verklaren we aan de hand van fysische modellen in Bijlage A.

We bestuderen stookonderbrekingen primair via het effect dat dit heeft op de effectieve stooklast gedurende een stookseizoen. De effectieve stooklast is een maat voor het warmteverlies dat gedurende een periode optreedt. De effectieve stooklast S_{eff} is recht evenredig met enerzijds het temperatuurverschil tussen binnentemperatuur en effectieve buitentemperatuur en anderzijds met de periode waarover dit temperatuurverschil optreedt. Een nadere uitleg van het begrip effectieve stooklast is te vinden in bijlage A.1b. Een reductie in effectieve stooklast reduceert het warmteverlies gedurende die periode, en dat reduceert de energie die nodig is voor de ruimteverwarming.

2.1 Dataverzameling voor bepalen stookgedrag en besparingspotentieel

2.1.1 Het aardgasgebruik per tijdseenheid

‘Slimme thermostaten’ zijn thermostaten die op afstand bestuurbaar zijn, bijvoorbeeld met een app op een smartphone. Slimme thermostaten kunnen het stookpatroon van een huishouden monitoren en vervolgens feedback geven hoe

een woning efficiënter verwarmd kan worden. Bewoners moeten dan zelf maatregelen nemen. Uit de slimme thermostaatdata is per tijdseenheid, bijvoorbeeld per uur, te bepalen wat het energiegebruik is in een woning.

2.1.2 Aanwezigheid en afwezigheid van bewoners

Aanwezigheid en afwezigheid van bewoners kan eenvoudig gemeten worden door bewoners te vragen om een app op hun smartphone te installeren gedurende het onderzoek, bijvoorbeeld een variant van de Drebbel thermopilot app die alleen maar meet en niet ingrijpt in de thermostaat-instellingen. Elke bewoner die in het stookseizoen wel eens zelfstandig thuis is, zal dan gevraagd moeten worden om een dergelijke app te installeren. Voor gezinnen met kleine kinderen, of ouderen zonder smartphone, kan dit betekenen dat ze niet onderdeel uit kunnen maken van de steekproef. De app van elke proefpersoon weet niet alleen waar de (smartphone van de) bewoner is, maar ook waar de woning zich bevindt (bijvoorbeeld omdat één bewoner dat aangeeft eenmalig in de app). Daarna kan de app volledig automatisch met behulp van de locatie-services van het besturingssysteem van de smartphone, vanzelf bijhouden wanneer de bewoner thuis arriveert en vertrekt en die metingen regelmatig uploaden naar een onderzoeksdatabase.

2.1.3 Thermostaatprogramma en handmatige wijzigingen van het thermostaat-setpoint

Diverse aanbieders van slimme thermostaten bieden tegenwoordig een Application Programming Interface (API) aan. Via de API van zulke slimme thermostaten zijn — als de gebruiker van de thermostaat hiervoor aan de third party toestemming heeft gegeven — eenvoudig gegevens te downloaden, zowel over het huidige thermostaatprogramma, de (sporadische) wijzigingen in zo'n programma, als over handmatige aanpassingen van het setpoint.

Drebbel maakt momenteel gebruik van de APIs van de Toon van Quby (onderdeel van Eneco) en die van de ThermoSmart thermostaat van het gelijknamige bedrijf. Drebbel maakt van deze APIs gebruik om de thermopilot als third-party service voor gebruikers van een dergelijke thermostaat aan te bieden.

2.1.4 Thermische traagheid van de woning

De thermische traagheid van de woning kan worden afgeleid uit de gemonitorde binnentemperaturen door de thermostaat. Het beste kan de thermische traagheid worden afgeleid uit nachtelijke temperatuurreksen in de winter, wanneer het setpoint omlaag is gezet en er geen zonnestraling is die een bijdrage levert aan de warmtebalans van de woning. De formule die daarbij gebruik kan worden (zie ook Bijlage A), is

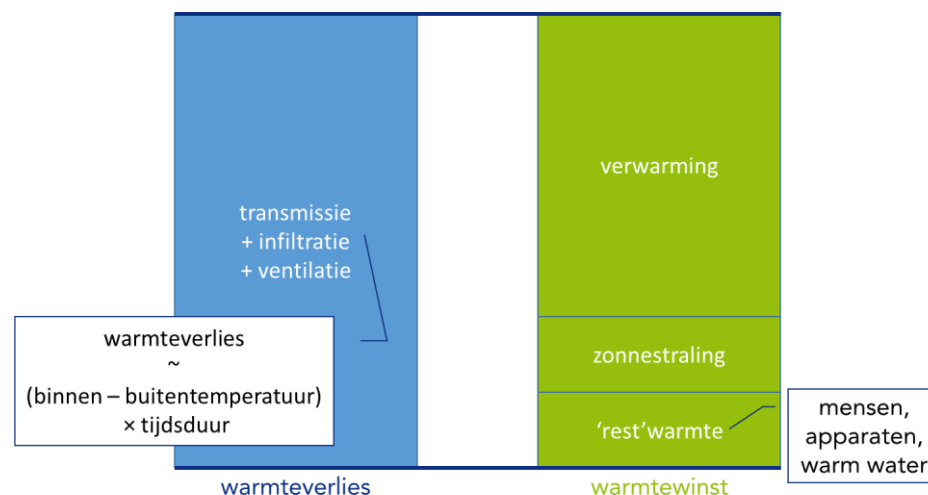
$$\tau = \frac{t_{\text{endcool}} - t_{\text{startcool}}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{\text{out;eff}}(t_{\text{startcool}})}{\Delta T_{\text{out;eff}}(t_{\text{endcool}})}\right)}$$

Voor het berekenen van de effectieve buitentemperatuur gebruiken we een gewogen gemiddelde per huis van 3 hemelsbreed dichtstbijzijnde KNMI-meetstations, waarbij we de weegfactor omgekeerd evenredig is aan de afstand tussen de woning en het KNMI-meetstation.

Verder is $t_{\text{startcool}}$ het tijdstip waarop we voor het eerst een verlaging van de binnentemperatuur observeren nadat het setpoint verlaagd is, en t_{endcool} het laatste moment.

2.1.5 Het specifieke warmteverlies van een woning, H [W/K]

Het specifieke warmteverlies van een woning geeft aan met welk vermogen warmte naar buiten lekt, afhankelijk van het temperatuurverschil tussen binnen- en buitentemperatuur. Deze grootheid kunnen we niet direct meten, maar wel berekenen uit een langere periode van enkele weken in het stookseizoen, waarbij we ervoor moeten zorgen dat de binnentemperatuur aan het eind van de periode hetzelfde is al de begintemperatuur. Zo'n periode noemen we een 'stabiele meetperiode'. Over zo'n lange periode geldt namelijk dat de warmtebalans van de woning in evenwicht moet zijn, waarbij evenveel warmte de woning is 'uitgelekt' dan eraan is toegevoegd, zoals geïllustreerd in Figuur 1.



Figuur 1 Een eenvoudige weergave van een warmtebalans van een woning.

Het specifieke warmteverlies van een woning kan berekend worden door het totale warmteverlies over gedurende de stabiele meetperiode te delen door de effectieve stooklast, als volgt:

$$H = \frac{Q_{loss}}{S_{eff}} \text{ (inclusief eenheden } H [W/K] = \frac{Q_{loss} [J]}{S_{eff} [Ks]}), \text{ waarbij}$$

Het totale warmteverlies in een stabiele meetperiode is per definitie hetzelfde als de totale warmtewinst, die bestaat uit warmtewinst uit de restwarmte van elektrische apparaten, mensen, koken en warm tapwater, uit zonnestraling en uit de warmte die de verwarmingsinstallatie afgeeft aan de woning:

$$Q_{loss} [J] = Q_{rest,e} [J] + Q_{rest,pp} [J] + Q_{rest;koken+ww} [J] + Q_{sol} [J] + Q_H [J]$$

In onderstaande paragrafen beschrijven we hoe we deze grootheden meten of berekenen uit de metingen.

2.1.5.1 Warmtewinst uit restwarmte van elektriciteit ($Q_{rest,e}$)

De nuttige restwarmte uit elektriciteitsverbruik $Q_{rest,e}$ tijdens de stabiele meetperiode leiden we af uit de intervalstanden van de slimme meter. Hierbij tellen we de geschatte opbrengst van thuis opgewekte zonnestroom gedurende de stabiele

meetperiode op³. Vervolgens trekken we de ‘teruggeleverde’ elektriciteit af (dus de elektriciteit die volgens intervalstanden van de slimme meterstanden ‘aan het net is geleverd’ c.q. thuis is opgewekt en niet thuis verbruikt, maar geleverd aan en verbruikt door anderen via het elektriciteitsnet). Elektriciteit voor het laden van een elektrische auto trekken we ook af⁴. Van het resterende elektriciteitsverbruik nemen we aan dat 100% eindigt als restwarmte in de woning.⁵

2.1.5.2 Warmtewinst uit restwarmte van personen ($Q_{rest,pp}$)

Voor het bepalen van de nuttige restwarmte van personen, $Q_{rest,pp}$, gebruiken we een daggemiddelde waarde van 5,29 MJ per dag (gemiddeld 61 W op per bewoner). Hierbij hebben we een gemiddelde verondersteld van 8,6 uur per dag slapen met restwarmtevermogen van 77 W, 7,7 uur per dag aanwezigheid met gemiddeld restwarmtevermogen van 105 W en 7,7 uur per dag afwezigheid, met een gemiddeld restwarmtevermogen van 0 W.

De wattages per vierkante meter huidoppervlak uit Tabel B.3 van (ISO, 2004) en het huidoppervlak met de formule van (DuBois & DuBois, 1916), geciteerd in (Nicol, Humphreys, & Roaf, 2012):

$$\text{huidoppervlak } [m^2] = 0,202 \times \text{gewicht } [kg]^{0,425} \times \text{lengte } [m]^{0,725}$$

Hierbij hebben we voor het gemiddelde gewicht 77,5 kg gebruikt en voor de gemiddelde lengte van 1,741 m, overeenkomstig de gemiddelde waarden van inwoners van Nederland van 20 jaar (Centraal Bureau voor de Statistiek, 2019).

De gemiddelde tijdsduren voor slapen, aanwezigheid en afwezigheid hebben we daarbij niet afgeleid van de data van de Drebbl app, maar van (Sociaal en Cultureel Planbureau, 2019). De berekening van de energiebesparing door beter aan te sluiten op aanwezigheidspatronen is niet erg gevoelig voor de restwarmte die aanwezige personen opleveren.

Zoals we in paragraaf 2.1.2 beschrijven, gebruiken we de specifieke aanwezigheidspatronen in een woning natuurlijk wél in de berekening van (het verschil in) de effectieve stooklast tussen de bestaande situatie en een situatie waarbij de ruimteverwarming optimaal wordt gestuurd op de aanwezigheidspatronen.

³ Tijdens het haalbaarheidsonderzoek hebben we bij twee huishoudens met zonnepanelen gevraagd naar de capaciteit van zonnepanelen [kWp], en de oriëntatie. Aan de hand van standaardopbrengstgegevens op de locatie van het huis (http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#PVP), hebben we de verhouding bepaald tussen de horizontale instraling en de stroomopbrengst voor die locatie. Dit hebben we vervolgens gecombineerd met de cumulatieve horizontale instralingsgegevens van het KNMI over stabiele meetperiode om de stroomopbrengst in de meetperiode te schatten.

⁴ Tijdens het haalbaarheidsonderzoek hebben we bij twee huishoudens met een elektrische auto een periodeverbruik opgevraagd en daaruit een gemiddeld dagverbruik voor de elektrische auto afgeleid dat we elke dag aftrekken van het stroomverbruik. Voor een vervolgstudie raden we aan om te onderzoeken of verbruikspatronen in deze component beter geschat moeten en kunnen worden.

⁵ Een klein deel van het elektriciteitsverbruik zal ook als licht of via warm afvalwater uit de wasmachine of vaatwasser het huis verlaten. Dit betekent dat 100% een lichte overschatting is.

2.1.5.3 Warmtewinst uit restwarmte door koken en warm water ($Q_{rest;koken+ww}$)

Gasverbruik leidt via verschillende wegen tot warmtewinst. Het totale gasverbruik tijdens de stabiele meetperiode kunnen we afleiden uit de intervalstanden van de gasmeter. Dit totale gasverbruik is een optelsom van G_H , het gasverbruik voor verwarming, en $G_{koken+ww}$, het gasverbruik voor koken en warm tapwaterbereiding:

$$G_{totaal} = G_H + G_{koken+ww}$$

Het gasverbruik voor koken en warm tapwaterbereiding, $G_{koken+ww}$, is niet af te lezen uit de intervalstanden van de slimme meter, daaruit kan alleen het totale gasverbruik worden afgeleid. We leiden $G_{dag;koken+ww}$, het gemiddelde dagverbruik voor koken en warm tapwater, af uit het verbruik buiten het stookseizoen, waarbij we de dagen en het verbruik tijdens de dagen dat er niemand afwezig is (bijvoorbeeld tijdens een zomervakantie), uitsluiten van de berekening.

Elke toepassing van aardgas heeft daarbij een eigen efficiëntie voor het opwekken van warmte. Uit onze gevoeligheidsanalyse (zie ook A.1i) bleek dat de *relatieve* besparing op ruimteverwarming door stookonderbrekingen niet bijzonder gevoelig is voor de efficiëntie waarmee gas wordt omgezet in warmte (dit in tegenstelling tot de gevoeligheid van het *absolute* energiegebruik, dat natuurlijk wel gevoelig is voor de efficiëntie waarmee gas wordt omgezet in warmte!). Daarom volstaan we in de berekeningen van de nuttige restwarmte die gasverbruik voor koken en warm tapwater met een landelijk gemiddelde voor het nuttig rendement van restwarmte uit koken en warm tapwater, namelijk 34 %, zoals berekend in Tabel 1.

Tabel 1 Berekening van landelijk gemiddelde voor finale warmteopbrengst per m³ gas

Symbool	Toepassing	Gemiddeld verbruik NL [m ³]	Rendement op bovenwaarde [%]	Aandeel nuttige restwarmte	Nuttig rendement restwarmte [%]
$Q_{rest;koken}$	Koken	39	44,4 %	46%	20,4 %
$Q_{rest;ww}$	Warm tapwater	300	71,6 %	50%	35,8 %
$Q_{rest;koken+ww}$	Koken en warm tapwater	339			34,0 %

We kunnen $Q_{rest;koken+ww}$ nu als volgt berekenen:

$$Q_{rest;koken+ww} [J] = \frac{\Delta t_{meet}}{24 \times 60 \times 60} \times G_{dag;koken+ww} [m^3] \times 34,0 \% \times 35,710.000 [J/m^3]$$

waarbij

Δt_{meet} = de lengte van de stabiele meetperiode [s]

2.1.5.4 Warmtewinst uit ruimteverwarming (Q_H)

Voor het berekenen van de warmtewinst van de ruimteverwarming, Q_H , leiden we eerst het gasverbruik voor ruimteverwarming af uit het totale gasverbruik, het gemiddelde dagelijkse gasverbruik voor koken en warm tapwater en de duur van de stabiele meetperiode:

$$G_H = G_{\text{totaal}} - G_{\text{dag;koken+ww}} \times \frac{\Delta t_{\text{meet}}}{24 \times 60 \times 60}$$

Het totale gasverbruik over de stabiele meetperiode, G_H , kunnen we afleiden uit de intervalstanden van de slimme meter.

Ook bij de berekeningen van de warmte-opbrengst van ruimteverwarming volstaan we met een landelijk gemiddelde, namelijk 94,6 %, het gewogen gemiddelde rendement op bovenwaarde voor ruimteverwarming, berekend aan de hand van de rendementen uit ISSO 82.3 (ISSO, 2011) gewogen naar aandeel van de ruimteverwarming op basis van het WoON 2012 onderzoek (Tigchelaar & Leidelmeijer, 2013).

We berekenen nu Q_H als volgt:

$$Q_H [J] = G_H [m^3] \times 94,6 \% \times 35.710.000 [J/m^3]$$

2.1.5.5 Oppervlakte van denkbeeldig horizontaal transparant dakraam (A_{dakraam}) en de warmtewinst uit zonnestraling (Q_{sol})

De bijdrage van de zonnestraling aan de warmtewinst van een bepaalde woning schatten we met behulp van curve-fitting.

Als curve-fitting parameter gebruiken we $A_{\text{dakraam}} [m^2]$, de oppervlakte van een denkbeeldig horizontaal volledig transparant dakraam waardoor alle bijdragen van de zonnestraling aan de warmtewinst in de woning gerealiseerd worden.

Met behulp van de curve-fitting procedure manipuleren we de curve-fitting parameter $A_{\text{dakraam}} [m^2]$ zodanig dat de Root Mean Squared Error (RMSE) geminimaliseerd wordt van de gesimuleerde binnentemperaturen ten opzichte van de gemeten binnentemperaturen.

Voor het berekenen van de gesimuleerde binnentemperaturen gebruiken we een eerste orde warmtemodel van de woning. De begintemperatuur is daarbij gelijk aan de eerste gemeten temperatuur van de periode. Voor elk nieuw uur berekenen we de nieuwe binnentemperatuur aan het eind van de periode met behulp van de van de eerder bepaalde parameters, de gevraagde temperatuur door de thermostaat (het setpoint) en gewogen gemiddelde van de uurgegevens van drie dichtstbijzijnde KNMI-weerstations voor de effectieve buitentemperatuur en de globale straling op een horizontaal vlak. Daarbij rekenen we eerst de KNMI waarde voor een bepaald uur-interval Δt , uitgedrukt in $[J/(cm^2 \cdot h)]$ om in $I_{\text{sol};\Delta t}$, de gemiddelde globale straling op een horizontaal vlak in dat uur, uitgedrukt in $[W/m^2]$. Voor elk uur rekenen we de bijdrage van de zonnestraling aan de warmtewinst van het huis uit door de curve-fitting parameter A_{dakraam} te vermenigvuldigen met de uurwaarde $I_{\text{sol};\Delta t} [W/m^2]$ en de tijdsduur (3600 seconden per uur).

$$Q_{sol;\Delta t}[J] = A_{dakraam} [m^2] \times I_{sol;\Delta t} [W/m^2] \times 3600 [s/h]$$

De bijdrage aan de warmtewinst door de cv-ketel wordt berekenen we nu, afhankelijk van de situatie in het uur-interval, als volgt:

- *Gewenste daling*
(setpoint is meer dan 0,1 K lager dan de gesimuleerde binnentemperatuur):
De cv-ketel levert gedurende dit uur-interval geen warmtewinst voor ruimteverwarming.
- *Stabiele situatie*
(setpoint wijkt 0,1 K of minder af van de gesimuleerde binnentemperatuur):
De cv-ketel levert gedurende dit uur-interval uur precies zoveel warmtewinst als nodig om het warmteverlies naar buiten te compenseren, waarbij al rekening gehouden wordt met de warmtewinst gedurende dit uur uit: uit restwarmte van elektriciteit ($Q_{rest;e;\Delta t}$), personen ($Q_{rest;pp;\Delta t}$), koken en warm water ($Q_{rest;koken+ww;\Delta t}$), en de berekende warmtewinst uit zonnestraling ($Q_{sol;\Delta t}$).
- *Gewenste stijging*
(c.q. setpoint is meer dan 0,1 K hoger dan de gesimuleerde binnentemperatuur):
De cv-ketel levert het maximale vermogen dat nodig is om aan het eind van het uur het gewenste setpoint zo goed mogelijk te benaderen, waarbij al rekening gehouden wordt met de warmtewinst gedurende dat uur uit: uit restwarmte van elektriciteit ($Q_{rest;e;\Delta t}$), personen ($Q_{rest;pp;\Delta t}$), koken en warm water ($Q_{rest;koken+ww;\Delta t}$), en de berekende warmtewinst uit zonnestraling ($Q_{sol;\Delta t}$).

In alle gevallen maximeren we het geleverde vermogen op het product van het nominale vermogen van de cv-ketel⁶ op bovenwaarde, vermenigvuldigd 94,6%, landelijk gemiddelde seizoensrendement op bovenwaarde van cv-ketels voor ruimteverwarming (zie 2.1.5.4).

We kunnen nu eenvoudige de netto warmtebijdrage van de zonnestraling aan de warmtebalans van het huis t tijdens de meetperiode berekenen door de intervalbijdragen te sommeren over de gehele meetperiode:

$$Q_{sol}[J] = \sum_{\Delta t_{meet}} Q_{sol;\Delta t} [J]$$

2.2 Het gebruik van simulatiemodellen voor het berekenen van besparingspotentieel

Het besparingspotentieel van (al of niet met technische hulpmiddelen) verandering van stookgedrag, kan worden bepaald door gebruik te maken van simulatiemodellen. Met deze modellen moet dan het gemeten stookgedrag worden nagebootst. Daarna kunnen elementen van het gedrag, zoals stoken bij afwezigheid of 's nachts stoken kunnen worden aangepast in het model. Op deze wijze kan het verschil in energiegebruik worden bepaald ten opzichte van de uitgangssituatie, waarmee de gerealiseerde besparing worden bepaald.

⁶ In deze haalbaarheidsstudie hebben we dit nog bepaald aan de hand van merk en type van de cv-ketel, aan de hand van antwoord van de bewoner van de woning. We vermoeden dat dit maximale effectieve vermogen van de verwarmingsinstallatie ook kan worden afgeleid uit de temperatuurstijgingen in de binnentemperatuurdatabasis, in combinatie met de effectieve buitentemperatuurdatabasis en de geleerde specifieke warmtecapaciteit. De tijd ontbrak echter om deze analyse te voltooien.

In dit haalbaarheidsonderzoek hebben we gekeken naar twee potentiële simulatiemodellen voor dergelijke analyses. Een model van Drebbel en een model van ECN.

In dit haalbaarheidsonderzoek is voor vier woningen data verzameld over het stookgedrag en de aan- en afwezigheid met hulp van slimme thermostaatdata en info uit de Thermopilot app van Drebbel. Daarnaast zijn er in deze vier woningen door Energie Prestatue Advies adviseurs audits gedaan naar de technische energetische eigenschappen van de woning. Dit laatste is gedaan om te checken of de simulatiemodellen betere resultaten geven als algemene inschattingen voor woningen worden verbeterd met op maat verzamelde informatie.

Met deze data zijn de modellen en de eerder in paragraaf 2.1 besproken fysische parameters gevalideerd. In de volgende paragraaf worden de resultaten van deze validatie besproken.

2.2.1 Validatie fysische parameters modellen

Om te valideren of we de fysische parameters goed hebben geschat hebben we twee verschillende Root Mean Squared Error (RMSE) analyses uitgevoerd voor 4 huishoudens elk in een eengezinswoning, waarbij we de binnentemperatuur hebben vergeleken met een gesimuleerde binnentemperatuur:

- A. In Analyse A hebben we hetzelfde eerste-orde warmtebalansmodel gebruikt als bij de curve-fitting procedure voor de parameter $A_{dakraam}$ (zie paragraaf 2.1.5.5).
- B. In Analyse B hebben we een eerste-orde warmtebalansmodel gebruikt dat ECN in eerdere projecten heeft gebruikt voor het bepalen van stookprofielen.

In Tabel 2 hebben we enkele kenmerken opgenomen van de 4 huishoudens waarbij we data hebben verzameld ten behoeve van de validatie.

Tabel 2 Enkele kenmerken van de 4 woningen betrokken in de validatie

Parameter	Parameternaam	Eenheid	Testwoning			
			1	2	3	4
pp	Aantal personen	#pp	4	4	1,5	5
$G_{koken;ww}$	Gemiddeld gasverbruik koken + warm tapwater tijdens aanwezigheid	m ³ /d	0,80	0,80	0,60	0,84
	Gemiddeld dagverbruik EV meetperiode	kWh/d	4,08	8,12	0,00	0,00
	Capaciteit Zonnepanelen	Wp	2040	5985	0	0
Hd	Globale horizontale instraling, standaardjaar	kWh/(d·m ²)	3,33	3,35		
Ed	Specifieke opbrengst, standaardjaar	kWh/(d·kWp)	2,68	2,70		
P_{rated}	Nominaal vermogen (bovenwaarde)	kW	24,5	22,6	35,0	28,0

Met behulp van Analyse A kwamen we tot de parameters en de RMSE-waarden zoals getoond in Tabel 3 des te kleiner de RMSE-waarde, des te beter zijn de parameterschattingen):

Tabel 3 Parameterschattingen en RMSE-waarden conform analyse A voor de 4 validatiewoningen

Parameter	Parameternaam	Eenheid	Testwoning			
			1	2	3	4
T_H	Thermische traagheid	h	60	68	80	58
G_K	Gasverbruik ruimteverwarming per graaddag	m ³ /Kd	1,9 4	0,9 0	0,8 4	0,7 1
H	Specifiek warmteverlies	W/K	23 1	26 1	19 5	16 4
$A_{dakraam}$	Effectieve oppervlak denkbeeldig horizontaal transparant dakraam	m ²	26, 6	24, 6	12, 2	5,4
RMSE_A	Root of the Mean Squared Error	K	1,1 3	0,8 1	0,6 7	0,9 9

De RMSE-analyses conform methode B hebben we ter bevestiging voor twee woningen uitgevoerd.

Tabel 4 parameterschattingen en RMSE-waarden conform analyse B voor 2 validatiewoningen

RMSE _B	Fysische parameterwaarden gebruikt uit	Eenheid	Testwoning			
			1	2	3	4
RVO	Dichtstbijzijnde RVO referentiewoning	K				4,0 7
EPA/EI	Conform opnamegegevens EPA/EI woningopname	K			1,7 8	1,4 8
monitoring	Conform parameters uit analyse monitoringdata	K			0,6 9	1,4 2

Zoals we in Tabel 4 kunnen zien en na vergelijking met Tabel 3 blijkt:

Uitgewonder Woning 3 en 120 zijn ca 100 m van elkaar verwijderd en hebben hetzelfde bouwjaar en (vrijwel) dezelfde geometrie. Uit de regressieanalyse tussen effectieve stooklast per dag en het gasverbruik per dag kwam bij woning 3 echter een zeer lage waarde ($R^2 = 0,20$) en bij woning 120 een zeer grote waarde ($R^2 = 0,96$). We vermoeden dat de oorzaak van de matige correlatie bij woning 3 veroorzaakt wordt door het gebruik van een cv-ketel met een tweede verwarmingscircuit dat gebruikt werd voor het verwarmen van een werkkamer, aangestuurd door een aparte thermostaat waarvan door ons geen metingen zijn verzameld en dus de effectieve stooklast niet is meegerekend.

- Afgezien van woning 3 hebben alle woningen bij analysemethode A een RMSE-waarde kleiner dan 1,0 K.
- De RMSE-waarden bij analysemethode A zijn kleiner dan van analysemethode B, zelfs als we analysemethode B loslaten op dezelfde parameters als methode A (de fysische parameters voor de woning uit Tabel 8).
- Als we analysemethode B loslaten op de parameters die uit de woningopname zijn af te leiden, dan vinden voor de twee onderzochte woningen (woning 120 en 161) een duidelijk hogere RMSE-waarde. Dit betekent dat de parameterschattingen afgeleid uit monitoringdata zeer waarschijnlijk de

werkelijke waarden in de praktijk beter benaderen dan de waarden die kunnen worden afgeleid uit een EPA-woningopname.

- Voor woning 120 is specifiek gekeken naar het effect van verschillende parameters: de RMSE-waarde verbeterde het meest door de schatting van thermische traagheid (τ) geleerd uit de monitoring data over te nemen. Dit is in lijn met onze bevinding dat de besparingsberekening zeer gevoelig is voor de thermische traagheid (bijlage A.1i) en dat de rol van thermische traagheid in de EPA-woningopname zeer beperkt is (bijlage A.1g)

2.3 Twee besparingspotentiëlen

Op basis van de in paragraaf 2.1 beschreven te verzamelen data, kunnen we besparingspotentiëlen bepalen. Dit kan door met behulp van simulatiemodellen verschillend stookgedrag na te bootsen en het effect op het energiegebruik te bepalen. De toepassing van modellen hiervoor beschrijven we in paragraaf 2.2. We onderscheiden twee soorten besparingspotentieel: een maximaal besparingspotentieel (zie paragraaf 2.2.1), dat alleen bereikt kan worden met een denkbeeldige technologie die perfect kan voorspellen en een praktisch besparingspotentieel (zie paragraaf 2.3.2), waarbij het besparingspotentieel wordt bepaald van een interventie die in de praktijk bestaat.

2.3.1 Maximaal besparingspotentieel

Het maximaal besparingspotentieel per woning en huishouden kan berekend worden zonder interventie en door alleen maar te monitoren. Aan de hand van de monitoringdata is het mogelijk om twee keer een effectieve stooklast te berekenen in een simulatie:

- $S_{eff;huidig;refklima}$ [Ks], de effectieve stooklast waarbij setpoints het huidige, ongewijzigde thermostaatprogramma volgen. Dit is de basissituatie.
- $S_{eff;optimaal;refklima}$ [Ks], de effectieve stooklast waarbij het setpoint wordt bestuurd door een denkbeeldige perfecte technologie altijd de thermostaat omlaag zou zetten zodra er niemand meer thuis is en precies op tijd omhoog om de eerste persoon warm thuis te ontvangen.

In beide berekeningen gebruiken verder dezelfde condities:

- wekelijks aan- en afwezigheidspatroon van bewoners zoals geleerd;
- effectieve buitentemperatuur en zonnestralingsdata gedurende een geheel stookseizoen (september tot en met april) conform referentieklimaatgegevens (Koninklijk Nederlands Normalisatie-instituut, 2018);
- binnentemperaturen worden berekend aan de hand van een simulatie op basis van een eerste warmtebalansmodel met thermische traagheid τ voor de woning zoals berekend met de analyse zoals beschreven in paragraaf 2.1.4, het specifiek warmteverlies H voor de woning, zoals berekend met de analyse zoals beschreven in paragraaf 2.1.5 en $A_{dakraam}$, de oppervlakte van een denkbeeldig horizontaal transparant dakraam, waardoor alle warmte winst door zonnestraling aan de woning gerealiseerd wordt, zoals berekend met de analyse zoals beschreven in paragraaf 2.1.5.5.

De relatieve besparing op de effectieve stooklast kan nu eenvoudig als volgt worden berekend:

$$B_{S_{eff};max}[\%] = \frac{S_{eff;huidig;refklima} [Ks] - S_{eff;optimaal;refklima} [Ks]}{S_{eff;huidig;refklima} [Ks]}$$

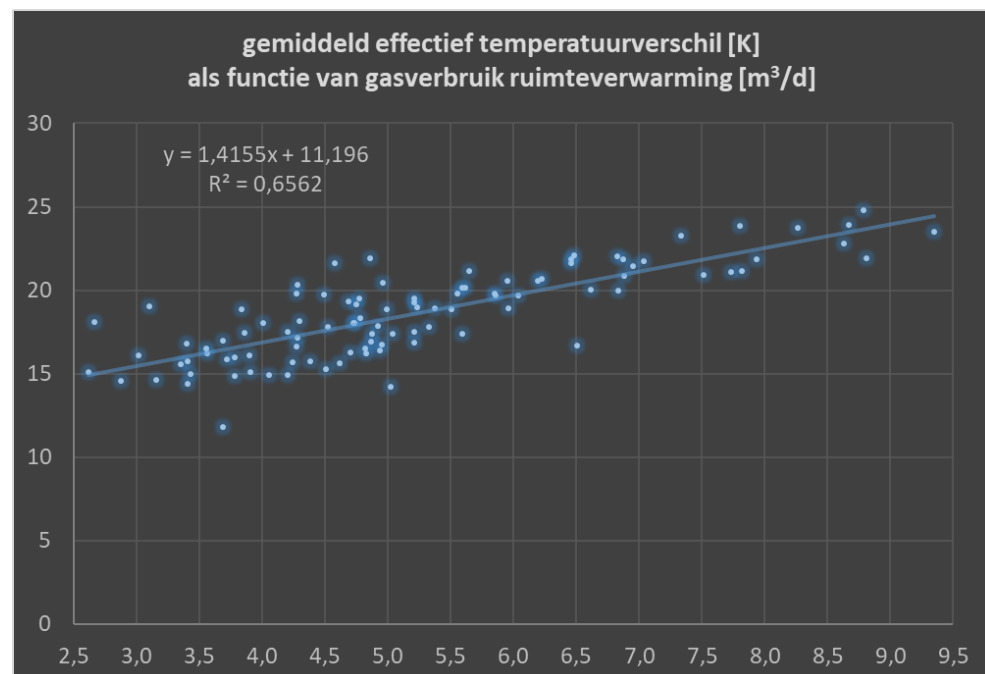
De absolute besparing in m³ gas kan als volgt worden berekend:

$$B_{max}[m^3] = S_{eff;huidig;refklima} [Ks] \times B_{S_{eff};max} [\%] \times \frac{G_K[m^3/Kd]}{24 \times 60 \times 60 [s/d]}$$

waarbij

G_K = het extra gasverbruik per extra graaddag [m³/Kd]

Deze laatste grootheid berekenen we met een lineaire regressieanalyse uit de monitoringdata, waarbij voor een groot aantal dagen gedurende het stookseizoen, de effectieve stooklast S_{eff} per dag is uitgezet tegen het gasverbruik voor ruimteverwarming van diezelfde dag⁷. De effectieve stooklast drukken we daarbij uit in graaddagen per dag, oftewel graden, oftewel het gemiddelde effectieve temperatuurverschil tussen binnentemperatuur en de effectieve buitentemperatuur. Een voorbeeld hiervan is te vinden in Figuur 2.



Figuur 2 Correlatie gemiddeld effectief temperatuurverschil tussen binnen- en buitentemperatuur en het gasverbruik voor ruimteverwarming.

In Figuur 2 is een duidelijke positieve correlatie te zien tussen het totale gasverbruik per dag en het effectieve temperatuurverschil over dezelfde dag. Uit de vergelijking van deze trendlijn aflezen dat we mogen verwachten dat wanneer het gemiddelde temperatuurverschil tussen binnentemperatuur en effectieve buitentemperatuur 1,4155 graad extra bedraagt, totale gasverbruik per dag met 1 [m³] toeneemt. Als inverse hiervan kunnen we het extra gasverbruik per extra graaddag berekenen, $G_K = (1 [m^3/d] / 1,4155 [K]) = 0,71 [m^3/Kd]$.

⁷ We analyseren hierbij stabiele perioden van ongeveer een dag, waarbij de begin- en eindtemperatuur hetzelfde zijn. De gevonden waarden komen vrijwel altijd overeen met ongeveer een 24 uur en rekenen we lineair terug naar exact 24 uur.

2.3.2 Praktisch besparingspotentieel

Het verminderen van verwarmen tijdens afwezigheid kan in grote lijnen via drie soorten interventies: via (algemene) voorlichting, via feedback op het verwarmingsgedrag per huishouden, en door het inzetten van (zelflerende) systemen. De verschillen tussen deze drie soorten interventies hebben we in Tabel 5 weergegeven.

Tabel 5 Drie typen interventies om verwarmen tijdens afwezigheid te reduceren (✓ = heeft invloed, ✗ = heeft geen invloed)

Interventie voor besparen verwarmen tijdens afwezigheid	Detectie/inschatting besparing	Hulp bij besparen
Voorlichting	✗	✗
Feedback (bijv. via slimme meter, slimme thermostaat)	✓	✗
Slim verwarmen (bijv. geo-fencing, Drebbel thermopilot)	✓	✓

Het praktische besparingspotentieel per woning en huishouden kan berekend worden te monitoren tijdens het stookseizoen terwijl de interventie actief is. Aan de hand van de monitoringdata is het mogelijk om twee keer een effectieve stooklast te berekenen in een simulatie. Dit berekening is vervolgens hetzelfde als beschreven in paragraaf 2.2.1.

2.4 Conclusies over de toepassing van simulatiemodellen

Op basis van proefopstellingen in 4 woningen blijkt dat het goed mogelijk is om met beperkte extra informatie over de woning in simulatiemodellen betrouwbare stookpatronen van huishoudens te construeren die goed overeenkomen met werkelijke patronen. Doordat we in staat zijn het werkelijke stookgedrag na te bootsen, is het ook mogelijk om in het model elementen van dit gedrag te variëren. Door 'setpoints' in het model te wijzigen kan '(niet) stoken bij afwezigheid' of 's nachts' worden nagebootst en vergeleken met de werkelijke gemeten situatie. Uit het verschil tussen beide analyses kan het besparingspotentieel worden afgeleid (zie paragraaf 2.1.3). Uit gevoeligheidsanalyses blijkt verder dat aanvullende dataverzameling over woningkenmerken bijvoorbeeld door labelopnames in de woning, niet leidt tot fundamenteel andere resultaten. Dit betekent dat de dataverzameling relatief beperkt kan blijven.

Er zijn twee verschillende simulatiemodellen getest om stookgedrag te reconstrueren. Eén model is van ECN part of TNO en is bedoeld om warmtevraagprofielen te maken om bijvoorbeeld de noodzaak voor netverzwaringen te analyseren. Een ander model is van Drebbel en wordt gebruikt om de fysische eigenschappen van de woning te kunnen meenemen in de Drebbel apps. Hoewel de aanpak per model enigszins verschilt, blijken beide modellen geschikt om op betrouwbare wijze het stookgedrag na te bootsen. In een eventueel vervolgproject kunnen in beide modellen nog verbeteringen worden doorgevoerd om een nog betere 'fit' te krijgen met werkelijk gedrag.

3 Analyse stookgedrag met vragenlijstonderzoek

In dit hoofdstuk beschrijven we hoe het verwarmingsgedrag in woningen in combinatie met aan- en afwezigheidspatronen, persoonlijke factoren en fysieke kenmerken van de woning eerder met behulp van vragenlijsten en woningopnames is onderzocht. We beschrijven daarnaast in het bijzonder het onderzoek naar de effecten van slimme thermostaten en bijbehorende apps.

3.1 Stookgedrag in Woon Onderzoek Nederland (WoON)

De Rijksoverheid doet om de drie jaar onderzoek naar hoe mensen wonen en willen wonen. Het WoON is met circa 65.000 enquêtes een van de omvangrijkste steekproefonderzoeken in Nederland. Het bestaat uit een basisonderzoek, de Woningmarktmodule, en vervolgmodes over verschillende thema's. In 2012 is de module Energie gebruikt. Bij 4.800 respondenten is een woningopname gemaakt door een bouwkundig inspecteur. Bij deze groep bewoners is daarnaast een aanvullende vragenlijst afgenomen. In deze enquête zijn vragen gesteld over onder meer verwarming, ventilatie, energiemaatregelen, en energiezuinig gedrag.

De meest recente enquêteperiode van het WoON was eind april 2018. De resultaten zijn beschreven in de rapportage Ruimte voor wonen (Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties, 2019). Het veldwerk van de Module Energie is in 2018 gestart. Dit bestaat net als in 2012 uit een onderzoek in 5.000 woningen en een enquête onder de bewoners. Deze gegevens zijn nog niet beschikbaar voor onderzoek.

Hoewel er vragen zijn gesteld naar stookgedrag en aan- en afwezigheid, is de strekking beperkt. Zo is in de Energiemodule van het WoON aan respondenten gevraagd voor een doordeweeks etmaal voor zes dagdelen te beschrijven wat de temperatuurinstellingen zijn bij aanwezigheid. En hoewel er in de Energiemodule woningopnames hebben plaatsgevonden, zijn er geen daadwerkelijke metingen van de temperatuur in de woning gedurende een wat langere periode gedaan. Dit zou naast de wat gedetailleerdere zelf gerapporteerde aan- en afwezigheid, een betrouwbaarder beeld geven van de temperatuur in de woning.

3.2 Verklarende factoren stookgedrag

De wetenschap is al enige tijd op zoek naar een verklaring voor het weerbarstige gat tussen het theoretische en het werkelijke gasverbruik van huishoudens. Het theoretische verbruik is vooral gebaseerd op gegevens over de fysieke en energetische kwaliteit van de woning en demografische data. Om een beeld te krijgen welke factoren een rol spelen bij verwarmen van woningen hebben we een beknopte literatuurreview uitgevoerd. Het energieverbruik voor woningverwarming wordt beïnvloed door verschillende factoren, die vaak worden onderverdeeld in kenmerken van het huishouden, het gedrag van de bewoners, en kenmerken van de woning en verwarmingsinstallaties. De literatuurreview leidde tot de volgende factoren die van invloed.

3.2.1 Kenmerken van het huishouden (demografie)

- *Leeftijd.* Ouderen stoken vaak meer uren op een dag en op hogere temperatuur. Ook verwarmen zij vaker de badkamer (Tigchelaar & Leidelmeijer, 2013).
- *Omvang en samenstelling van het huishouden.* Huishoudens met kinderen zijn geneigd de woning in de ochtend op een hogere temperatuur te verwarmen dan huishoudens zonder kinderen. Ook verwarmen zij vaker extra kamers, zoals een extra slaapkamer of de badkamer (Tigchelaar & Leidelmeijer, 2013).
- *Inkomen.* Mensen met een hoger inkomen zijn meer geneigd om extra ruimtes te verwarmen in hun woning (Tigchelaar & Leidelmeijer, 2013). Mensen met lage inkomens verwarmen vaak juist veel minder (Santin, 2011). Dit is ook gerelateerd aan eigendom (koop of huur).

3.2.2 Gedrag van de bewoners

- *Temperatuurinstellingen bij aan- of afwezigheid.* Sommige mensen zetten hun verwarming lager als ze weg gaan of als ze gaan slapen, terwijl anderen dat niet doen (o.a. (Lindén, Carlsson-Kanyama, & Eriksson, 2006)). Dit heeft ook te maken met het type thermostaat en hoe mensen deze gebruiken. De thermostaat wordt door bijvoorbeeld door veel mensen niet geprogrammeerd, en bereikt daarom vaak niet de energiebesparing die het in potentie heeft (Peffer, Pritoni, Meier, Aragon, & Perry, 2011). Sommige studies laten zien dat erg geen verschil in verbruik is met handmatige thermostaten, of laten zelfs een negatief effect zien (hogere temperaturen, of de temperatuur 's nachts niet lager zetten). De thermostaat beter laten aansluiten bij gebruikers of slimmer maken zou tot besparing kunnen leiden.
- *Aantal verwarmde kamers.* Ongeveer de helft van de mensen verwarmt naast de woonkamer ook de extra slaapkamer of werkkamer, terwijl de andere helft deze extra ruimtes alleen verwarmt als er iemand aanwezig is (Tigchelaar & Leidelmeijer, 2013).
- *Comfort.* Gevoelens van comfort zijn erg persoonlijk en worden bepaald door temperatuur van de lucht, stralingswarmte, tocht, vocht, maar ook door psychologische en fysiologische factoren (Peffer, Pritoni, Meier, Aragon, & Perry, 2011; Santin, 2011; Nicol, Humphreys, & Roaf, 2012). Comfort bleek bij stookgedrag een van de belangrijkste attitudes (Van Raaij & Verhallen, 1983).
- *Ventilatiegedrag.* In de helft van de huishoudens wordt in het stookseizoen op natuurlijke manier geventileerd terwijl de verwarming aanstaat (Tigchelaar & Leidelmeijer, 2013). Bij woningen met mechanische ventilatie is dit nog wat meer aan de orde. Ventilatiegedrag blijkt daarnaast samen te hangen met de het verwarmen van meerdere ruimtes en de leeftijd van de bewoners.

3.2.3 Kenmerken van de woning

Stookgedrag wordt beïnvloed door een aantal kenmerken van de woning. Deze zijn beschreven in paragraaf 3.1.

3.2.4 Meting van verklarende factoren in WoON

Van de hierboven beschreven factoren zijn de meeste gemeten in WoON, zie Tabel 6)

Tabel 6 Factoren gemeten in WoON 2018

	FACTOR	GEMETEN IN WOON 2018
KENMERKEN HUISHOUDEN	Leeftijd	Geboortedatum en leeftijd
	Omvang huishouden	Uit hoeveel personen bestaat uw huishouden (u zelf meegerekend)?
	Samenstelling huishouden	In basisvragenlijst
	Inkomen	In basisvragenlijst
GEDRAG BEWONER	Eigendom woning (koop/huur)	Woont u in een koop- of in een huurwoning?
	Temperatuurinstellingen bij Aan- afwezigheid	Op welke momenten (\$1: bent u doordeweeks (van maandag t/m vrijdag) meestal thuis \$2: is er doordeweeks (van maandag t/m vrijdag) meestal iemand thuis)? Het begin van de ochtend / moment van opstaan (ong. van 6.00 – 9.00) De late ochtend (ong. van 9.00 – 12.00) De voormiddag (ong. van 12.00 – 15.00) De namiddag (ong. van 15.00 – 18.00) 's Avonds (ong. van 18.00 – 23.00) 's Nachts (ong. van 23.00 – 6.00) Progr. Thermostaat: (\$3: Wordt elke doordeweekse dag dezelfde temperatuur ingesteld, of wisselt dit per dag? \$4: Is voor elke doordeweekse dag hetzelfde programma ingesteld, of wisselt dit per dag?) Hoe hoog staat de temperatuur dan ingesteld op doordeweekse dagen? Begin van de ochtend / moment van opstaan (ong. van 6.00 - 9.00) Late ochtend (ong. van 9.00 - 12.00) Voormiddag (ong. van 12.00 - 15.00) Namiddag (ong. van 15.00 - 18.00) 's Avonds (ong. van 18.00 - 23.00) 's Nachts (ong. van 23.00 - 6.00)
	Aantal verwarmde kamers	Als in het stookseizoen de verwarming aanstaat in de woonkamer, wordt dan ook één of meer van de volgende ruimtes verwarmd? Keuken; Badkamer; SlaapHoofd; SlaapAnd; Werk
	Thermostaat gebruik	Hoe wordt bij u thuis de temperatuur in de <u>woonkamer</u> geregeld? Een handmatige thermostaat (u moet altijd zelf de temperatuur hoger of lager zetten) / Een programmeerbare, klok- of slimme thermostaat (u kunt per dag een programma instellen zodat de temperatuur automatisch geregeld wordt of dit gebeurt automatisch) / Knoppen op de radiator / verwarming / Knoppen op de gaskachel / Op een andere manier
	Comfort gevoel	Energiemodule: Met welke factoren houdt (\$1: u \$2: uw huishouden) rekening bij het instellen van de temperatuur in de andere ruimtes?- 3. Comfort, de temperatuur moet aangenaam zijn
	Wijze van verwarming woning	normale cv-ketel/ houtgestookte cv-ketel, houtkachel, houthaard of inzethaard / pellet cv-ketel of pelletkachel / gaskachel of gashaard / warmtepomp / blok- of wijkverwarming / standsverwarming / anders
	Wijze van verwarming water	normale" combi cv-ketel / combi CV-ketel met zonneboiler / gasgeiser / elektrische boiler / warmtepomp / blok- of wijkverwarming / stadsverwarming / andere manier / niet van toepassing
	Zonnepanelen	ja / nee; indien ja: schatting aantal m ² of aantal)
	Type woning	In wat voor type woning woont u? Flat, appartement, etagewoning, boven- of benedenwoning / Rijtjeshuis, tussenwoning, hoekwoning / Half-vrijstaande woning / Vrijstaande woning / Boerderij, woning met tuindersbedrijf / Woning met aparte winkel, kantoor-, praktijk- of bedrijfsruimte / Wooneenheid met gezamenlijk gebruik van keuken of toilet / Ander soort woning
	Bouwjaar	Via koppeling Basisregistratie Adressen en gebouwen (BAGplus)

	FACTOR	GEMETEN IN WOON 2018
ENERGIE VERBRUIK	Gebruiksoppervlak	Via koppeling Basisregistratie Adressen en gebouwen (BAGplus)
	Energie-index	Via woning opname bepaald worden
	Standaardjaarverbruik gas	Via CBS
	Standaardjaarverbruik elektriciteit	Via CBS

3.2.5 Besparingspotentieel door slimme thermostaten en apps

‘Slimme thermostaten’ zijn thermostaten die op afstand bestuurbaar zijn, bijvoorbeeld met een app op een smartphone. De rol van slimme thermostaten bij het terugdringen van verwarmen tijdens afwezigheid kan tweeledig zijn, zoals ook blijkt uit de onderste twee rijen uit Tabel 5:

- Slimme thermostaten kunnen het stookpatroon van een huishouden monitoren en vervolgens feedback geven hoe een woning efficiënter verwarmd kan worden. Bewoners moeten dan zelf maatregelen nemen.
- Daarnaast kunnen sommige slimme thermostaten zelf slim verwarmen, op basis van bewegingsmelders en/of locatietracking automatisch helpen om niet te verwarmen als er niemand thuis is. Diverse slimme thermostaten gebruiken daarbij geo-fencing: zodra een bewoner een denkbeeldige cirkel om de woning betreedt, zet de thermostaat het setpoint omhoog. Zodra de slimme thermostaat detecteert dat niemand meer thuis is, zet de thermostaat de temperatuur omlaag. De thermopilot dienst van Drebbl doet iets vergelijkbaars, maar leert bovendien mobiliteitspatronen van bewoners. Hierdoor kunnen mensen die relatief dicht bij hun werk wonen (bijvoorbeeld minder dan een uur reizen) meer energie besparen zonder comfortverlies (Drebbl, 2017).

Milieu Centraal noemt voor de besparing van een slimme thermostaat een range van 3 tot 22% (Menkveld, Rietkerk, Mastop, Tigchelaar, & Straver, 2017). Zij baseren dit op het idee dat een dergelijke thermostaat ‘zuinig stookgedrag’ automatiseert. Menkveld e.a. (2017) hebben de besparingscijfers van Milieu Centraal (3-22%) gekoppeld aan de data uit het laatste WoON onderzoek. Het maximum van 22% zou gehaald moeten worden bij huishoudens die nu onzuinig stoken. Voor bewoners die zelf al zuinig met verwarming omgaan of een goed geïsoleerde woning hebben, zal een slimme thermostaat weinig extra besparing opleveren bovenop een gewone klokthermostaat. Op basis van het WoON onderzoek schatten Menkveld e.a. (2017) in dat ongeveer de helft van de huishoudens onzuinig stookt (zoals de verwarming niet lager zetten als er niemand thuis is). Uitgaande van de cijfers van Milieu Centraal zal een slimme thermostaat in theorie dus gemiddeld ongeveer 10% op het totale gasverbruik moeten kunnen besparen. Uit onderzoek naar het besparingseffect van de Toon (Ramondt, 2015) blijkt echter dat het gemeten besparingseffect tussen de 5,1% en 6,1% op het gasverbruik is. Menkveld e.a. (2017) concluderen daarom dat het realistischer is dit percentage aan te houden.

Recent heeft het Behavioural Insights Team (BIT) in het Verenigd Koninkrijk onderzocht wat er gebeurt als je het voor mensen gemakkelijk maakt om te besparen met zelflerende thermostaten. Het blijkt dat besparingen op verwarmen

van 6 á 7% mogelijk te zijn, zonder verlies van comfort (Park, 2017)⁸. Het BIT pleit daarom voor meer nadruk op onderzoek naar energiebesparing in de praktijk.

3.3 Conclusies over toepassen vragenlijstonderzoek

Uit de literatuur blijkt dat stookgedrag in huishoudens door allerlei factoren wordt beïnvloed en dat het meten van stookgedrag en de potentiële besparing daardoor niet zo gemakkelijk is. Het werkelijke besparingseffect van maatregelen is vaak onzeker (Menkveld, Rietkerk, Mastop, Tigchelaar, & Straver, 2017). Park (2017) stelt voor om meer veldonderzoek te doen, waarbij aandacht is voor het gebruik van de woning en gebruikte technologieën in een woning. Menkveld e.a. (2017) bevelen aan om een monitoringsprogramma op te zetten waarin de werkelijke besparingen worden gemeten en waarin kan worden geleerd wat werkt: welke functionaliteiten, vormgeving en aanpak zijn effectief en dragen bij aan een zo groot mogelijke besparing bij een zo groot mogelijke doelgroep?

⁸ Ten opzichte van de 'full modern suite of heating controls', in het VK bestaande uit 'programmable timers, room thermostats and thermostatic radiator valves' (Park, 2017, p. 1).

4 Markt voor producten en diensten gericht op het veranderen van stookgedrag

In dit haalbaarheidsonderzoek hebben we een scan uitgevoerd bij verschillende marktpartijen, om inzicht te krijgen in hun genegenheid om besparingsdiensten (zoals de Drebbel thermopilot) op te nemen in hun eigen producten en diensten. We hebben daarbij in kaart gebracht welke commerciële en technische mogelijkheden deze partijen zien voor de integratie met Drebbel, op een andere manier dan in de huidige, third-party add-on, vorm: gekoppeld aan een slimme thermostaat van een derde partij. Deze scan moet Drebbel helpen bij het vinden van levensvatbare, alternatieve, businessmodellen.

De aanpak voor het uitvoeren van de scan is als volgt geweest. Ter voorbereiding op het benaderen van partijen, is er een lijst gemaakt met verschillende soorten kandidaat gesprekspartners, te weten: thermostaatfabrikanten, ketelfabrikanten, installateurs, energieleveranciers, netbeheerders en woningcorporaties. Uit deze lijst hebben we een selectie gemaakt om mee in contact te treden. Vóór de eerste gesprekken is er een korte lijst met gesprekspunten opgesteld, om tijdens de gesprekken een richtlijn te hebben

Uiteindelijk hebben we een zestal gesprekken gevoerd (zie bijlage B), met verschillende typen bedrijven en organisaties. Hierbij zitten thermostaat- en ketelfabrikanten, een domotica leverancier, een energievoorzijver en een overheidsinstantie.

Tijdens de gesprekken zijn een aantal alternatieve businessmodellen, als meest voor de hand liggend en meest 'passend', naar voren gekomen. In de volgende paragrafen bespreken we deze in meer detail. Het huidige businessmodel, een add-on dienst direct gericht op de consument, valt hier niet onder. Individuele gebruikers betalen voor het gebruik van de app op hun mobiele telefoon. Alle commerciële partijen geven aan dat de huidige variant niet de voorkeur heeft, vanwege de complexiteit en mogelijke verwarring voor de eindgebruiker, maar met name vanwege branding. De bedrijven willen dat, bij inzet van de Drebbel technologie, deze valt onder het eigen merk.

4.1 Alternatief business model 1: White-label service leverancier

Bij dit model treedt Drebbel op als een toeleverancier op service niveau, zonder directe interface richting de gebruiker, en zonder zichtbaarheid van Drebbel als merk. De klant is dan niet langer de eindgebruiker, maar de klant is de partij die de Drebbel service integreert met zijn eigen product of dienst (b.v. een ketelfabrikant die ook thermostaten levert). De Drebbel app en website zullen in dit model niet meer worden aangeboden aan de eindgebruiker, maar de Drebbel backend service die verantwoordelijk is voor het monitoren van (thuis) aanwezigheid en het aansturen van de thermostaat, zal wel blijven draaien. Tevens zal er dan een component of software library moeten worden aangeboden om te integreren met de app van de afnemer. In dit model zal Drebbel verantwoordelijk zijn voor operationeel houden van de Drebbel backend service.

Gegeven de aard van deze configuratie ligt het voor de hand om voor het gebruik van Drebbel te laten betalen op basis van een (maandelijks) abonnement, waarbij de hoogte afhankelijk is van het aantal gebruikers. Hier zit gelijk ook een zwak punt, omdat verschillende partijen hebben aangegeven dat de kosten per gebruiker, bij inzet van de Drebbel service, slechts in geringe mate mogen stijgen. De verwachting is dat dit model alleen interessant is bij een (zeer) groot aantal eindgebruikers. Een groot aantal eindgebruikers is te bereiken via één of enkele klanten met veel eindgebruikers, of via veel meer klanten met een kleinere groep eindgebruikers. De echte grote (internationale) thermostaatplatformen (Nest, Tado, ...) bieden al functionaliteit die overeenkomt met de Drebbel functionaliteit, en vallen daardoor af. Dit model kan daardoor alleen werken als Drebbel kan verkopen aan een grotere groep kleine klanten. Aangezien er per klant geïntegreerd dient te worden, kunnen de integratiekosten aanzienlijk zijn.

4.2 Alternatief business model 2: White-label technologieleverancier

Bij inzet van Drebbel als technologieleverancier heeft Drebbel geen eigen server infrastructuur meer, maar integreert de afnemer één of meerdere Drebbel componenten volledig met zijn bestaande product. Dit kunnen componenten zijn voor in de mobiele app, maar ook componenten op de server van de afnemer, b.v. voor het voorspellen van het moment waarop bewoners thuiskomen. Een aantal gesprekspartners gaf aan dat dit model de voorkeur heeft. Daarbij werd ook interesse getoond voor afname van een enkel onderdeel, zoals aanwezigheidsdetectie.

Qua beprijzen leent dit model zich meer voor een eenmalige aanschafprijs, eventueel aangevuld met een onderhoudscontract, of consultancy. Dezelfde overwegingen als bij het vorige model gelden echter ook hier: de kosten per eindgebruiker mogen slechts beperkt stijgen. De kosten zullen dan ook over een groot aantal eindgebruikers uitgesmeerd moeten worden. Sommige componenten, zoals aanwezigheidsdetectie, hebben die potentie wel, omdat deze ook kunnen worden aangeboden aan partijen buiten het 'energiedomein'. Bij dit model komt, uiteraard, de focus veel meer te liggen op de technologie en veel minder op (energie)domein-specifieke kennis. Als Drebbel kiest voor dit pad, dan zal de aard van het bedrijf dus heel anders worden. Op termijn zou Drebbel hierdoor helemaal niet meer actief kunnen zijn in de energie- of verwarmingssector.

Om de Drebbel technologie als componenten te kunnen aanbieden, dient deze in veel striktere zin opgesplitst te worden dan nu het geval is, en dienen de afzonderlijk componenten elk voor zich in de markt te worden gezet. Dat betekent een aanzienlijke investering, waarvan de vraag is of deze terugverdiend kan worden.

4.3 Conclusies over marktmodel Drebbel

Uit de gesprekken die gevoerd zijn komt naar voren dat het huidige marktmodel, waaronder Drebbel diensten aanbiedt, niet of slechts heel beperkt aansluit bij de wensen van potentiële afnemers. De alternatieve modellen, zoals hierboven geschetst, doen dat wel in meerdere mate. De kostenstructuur voor beide modellen, is echter zodanig, dat opereren op schaal (met veel eindgebruikers) noodzakelijk is.

Dit vereist voor beide modellen aanzienlijke investeringen, voor het aanpassen van de technologie, maar ook voor het verwerven van voldoende klanten. Het is op dit moment onzeker of deze investeringen kunnen worden terugverdiend, en of ze zullen leiden tot een positief bedrijfsresultaat.

5 Projectopzet vervolgstudie naar stookgedrag

Zoals beschreven in Hoofdstuk 1 is er onvoldoende inzicht in het stookgedrag van huishoudens in relatie tot aan- en afwezigheidspatronen. Uit het haalbaarheidsonderzoek beschreven in Hoofdstuk 3 en 4 blijkt dat het wel mogelijk is dit om dit inzicht te verkrijgen. In een vervolgstudie willen we daarom meer gedetailleerde en betrouwbaardere data verzamelen over het stookgedrag van huishoudens. De studie richt zich op de volgende twee onderzoeksvragen:

- 1) Wat is het maximale besparingspotentieel bij slim verwarmen tijdens afwezigheid?
 - a. In welke mate is er bij huishoudens sprake van verwarmen tijdens afwezigheid?
 - b. Wat is per huishouden en nationaal het maximale besparingspotentieel?

Bij het bepalen van het maximale besparingspotentieel (zie ook paragraaf 2.2.1) veronderstellen we dat er een technologie bestaat die altijd op tijd en perfect de aanwezigheid en afwezigheid van bewoners voorspelt. Deze kan dus meteen stoppen met verwarmen als niemand meer thuis is, en precies op tijd beginnen met verwarmen zodat de eerste persoon thuis bij de gewenste temperatuur binnenkomt.

- 2) Wat is het praktische besparingspotentieel van technologie die slim verwarmt tijdens afwezigheid?

Bij het bepalen van het praktische besparingspotentieel (zie ook paragraaf 2.3.2) veronderstellen we geen perfecte technologie, maar gebruiken we een bestaande technologie (zoals de Drebbel thermopilot of een slimme thermostaat met een eenvoudiger geofencing algoritme) die weliswaar slimmer verwarmt, maar niet altijd op tijd en/of niet altijd perfect de aanwezigheid en afwezigheid van bewoners voorspelt, waardoor hetzij de besparing niet maximaal is en/of het comfort niet optimaal is.

5.1 In kaart brengen maximale besparingspotentieel per huishouden

5.1.1 Onderzoeksopzet 1A – aanhaken bij WoON

Zoals beschreven werd in 2012 en in 2018 aan het WoON de module Energie toegevoegd. Er zijn woningopnames uitgevoerd en respondenten hebben extra vragen beantwoord over onder andere stookgedrag gedurende een dag.

Uit gesprekken bij het Ministerie van BZK (21-01-2019) en bij het CBS (20-02-2019) blijkt dat er interesse en behoefte is om stookgedrag beter in kaart te brengen. BZK en CBS onderzoeken bovendien hoe zij in de nabije toekomst meer gebruik van registerdata kunnen maken, zodat zij mogelijk een WoON kunnen uitvoeren zonder een vragenlijst te verspreiden.

In de vervolgstudie zou er mogelijk extra meetdata aan het al bestaande WoON databestand kunnen worden toegevoegd. Als we het data- en respondentenbestand van het WoON kunnen gebruiken dan is al veel bekend van de te onderzoeken groep respondenten. Uit de gesprekken met BZK en het CBS kwam echter naar voren dat dit niet zomaar kan in verband met privacy wetgeving: Wanneer wij

metingen zouden doen in woningen en deze metingen door het CBS worden gekoppeld aan al verzamelde CBS data dan kunnen wij achterhalen wie deze mensen zijn. Dat gaat tegen hun privacyregels in.

In de volgende alinea beschrijven we een mogelijke onderzoeksopzet waarbij we gebruik maken van het WoON bestand. We hebben deze optie onderzocht, maar is waarschijnlijk niet haalbaar vanwege privacy beperkingen.

5.1.1.1 Steekproef

Van de circa 5.000 respondenten van de Energiemodule stookt naar schatting de helft onzuinig (Menkveld, Rietkerk, Mastop, Tigchelaar, & Straver, 2017). Zij zetten bijvoorbeeld de verwarming niet lager als er niemand thuis is. Deze schatting is gebaseerd op vragenlijstonderzoek. In deze vervolgstudie willen we metingen doen in de woningen. In ons onderzoek focussen we zowel op de zuinige en onzuinige stokers om een volledig beeld te kunnen krijgen van het stookgedrag en de relatie met aan- en afwezigheid van mensen in huis.

We benaderen een steekproef uit de groep van 5.000 respondenten die heeft meegedaan aan de Energiemodule van WoON 2018. We betrekken alleen huishoudens met een slimme thermostaat, vragen hen toestemming om gedurende enkele weken geautomatiseerd monitoringdata te mogen verzamelen bij hen thuis en stellen hen een beperkt aantal aanvullende vragen. Mochten er niet voldoende respondenten binnen de Energiemodule beschikken over een slimme thermostaat, worden er buiten de module aanvullende respondenten geworven.

Deze mensen hebben eerder aan het CBS aangegeven dat zij willen deelnemen aan verdiepende onderzoeken. Het is van belang een representatieve steekproef te trekken op basis van de factoren waarvan we in paragraaf 3.1 al hebben beschreven dat ze van bepalend belang zijn voor het besparingspotentieel van slim verwarmen, namelijk:

- De mate waarin huishoudens nu verwarmen tijdens afwezigheid;
- Fysische eigenschappen van woningen en installaties, namelijk
 - τ , de thermische traagheid van de woning,
 - H , het specifieke warmteverlies van de woning en
 - A_{dakraam} , de oppervlakte van een denkbeeldig horizontaal transparant dakraam waardoor alle warmtewinst door zonnestraling aan de woning gerealiseerd wordt.

Met behulp van het programma G*power (versie 3.1.9.2) hebben we het aantal respondenten bepaald voor het toetsen van een model met acht onafhankelijke variabelen. De power-analyse laat zien dat het benodigde aantal deelnemers aan het onderzoek minstens 759 respondenten groot moet zijn (zie Tabel 7). Indien er minder verklarende factoren worden meegenomen dan zal de steekproef omvang kleiner kunnen worden.

Tabel 7 Benodigd aantal respondenten onderzoek naar maximale besparing door slim verwarmen

F tests - Linear multiple regression: Fixed model, R ² deviation from zero		
Analysis:	A priori: Compute required sample size	
Input:	Effect size f ²	= 0.02
	α err prob	= 0.05
	Power (1-β err prob)	= 0.80
	Number of predictors	= 8
Output:	Noncentrality parameter λ	= 15.1800000
	Critical F	= 1.9507311
	Numerator df	= 8
	Denominator df	= 750
	Total sample size	= 759
	Actual power	= 0.8000680

Aangezien het niet bekend is hoe Nederlandse huishoudens precies hun thermostaat instellen bij afwezigheid, is het ook lastig te voorspellen welke variatie daarin te verwachten is. Bovendien is onbekend wat de variantie van de thermische traagheid bij de Nederlandse huishoudens is (zie ook paragraaf A.8). Om die reden zou een vooronderzoek aan te bevelen zijn. In dit vooronderzoek zou een beredeneerde schatting gemaakt kunnen worden op basis van eerder internationaal onderzoek, of er zou naar een kleine steekproef nader onderzoek gedaan kunnen worden. Een andere optie zou zijn om een ruimere steekproef te trekken.

5.1.1.2 Verzamelen van monitoring data

We vragen de huishoudens of we, gedurende een paar weken buiten het stookseizoen en een paar weken in het stookseizoen, geautomatiseerde monitoringdata mogen verzamelen.

- Bestaande patronen van aanwezigheid en afwezigheid van bewoners thuis, meten we door bewoners te vragen een app te installeren, zoals beschreven in paragraaf 2.1.1;
- Bestaande verwarmingspatronen, namelijk het thermostaatprogramma en handmatige aanpassingen van het setpoint, meten we met een systeem dat gekoppeld wordt via de API van de slimme thermostaat, zoals beschreven in paragraaf 2.1.3;

5.1.1.3 Vragenlijst

Aangezien in de Energiemodule al veel vragen zijn gesteld, is het mogelijk om de eerder gegeven antwoorden te vergelijken met de resultaten die we krijgen uit metingen. Toch is het nodig om een beknopte vragenlijst aan mensen voor te leggen. Het WoON werkt met drie verschillende afname manieren (online, telefonisch en face-to-face), om een zo breed mogelijke groep te betrekken. Afhankelijk van hoe mensen in het WoON zijn benaderd, wordt hier voor eenzelfde benadering gekozen. Het heeft echter onze voorkeur een online vragenlijst te verspreiden. De vragenlijst zal bestaan uit enkele vragen die we (nog) niet uit monitoringdata kunnen afleiden en enkele aanvullende vragen over aan- en afwezigheid en stookgedrag en comfort:

- Vragen die inzicht geven in gegevens die we nog niet uit monitoringdata kunnen afleiden, zoals het (gemiddelde) dagelijkse verbruik van elektriciteit voor het laden van een elektrische auto thuis;
- Vragen die inzicht geven in gegevens die nodig zijn, maar waarvan de detailgegevens mogelijk niet beschikbaar zijn in de eerder verzamelde data, bijvoorbeeld de aanwezigheid, capaciteit en oriëntatie van eventuele zonnepanelen en zonnecollectoren;

- Vragen die inzicht geven in omstandigheden waar onze algoritmen (nog) niet goed mee kunnen omgaan, zoals cv-ketels met een tweede verwarmingscircuit dat bestuurd wordt door een tweede thermostaat waarvoor geen compatibele API beschikbaar is.
- Vragen die helpen om te achterhalen waarom bewoners (voor zover ze dat doen) de temperatuur tijdens afwezigheid hoger instellen dan de temperatuur die nodig is om bevroeringsgevaar en condensvorming te voorkomen.
- Tot slot is het waardevol om de monitoringdata te vergelijken met de eigen inschatting van de dagelijkse aan- en afwezigheid van alle leden van een huishouden.

5.1.1.4 Analyse

De analyse per woning en huishouden vindt plaats in drie stappen:

1. Eerst berekenen we de drie bepalende fysische parameters van de woning (τ , H , $A_{dakraam}$) uit de monitoringdata van de thermostaat, in combinatie met intervalstanden van de slimme meter van de woning en met actuele weergegevens van het KNMI gedurende de monitoringperiode, zoals beschreven in respectievelijk paragraaf 2.1.4, paragraaf 2.1.5 en paragraaf 2.1.5.5.
2. Vervolgens voeren we een Root Mean Squared Error (RMSE) analyse uit waarbij we de binnentemperatuur vergelijken met de gesimuleerde binnentemperatuur op basis van de geleerde parameters in de vorige stap. Woningen met een te grote fout zullen we moeten excluseren van de verdere analyse. De criteria hiervoor en de redenen waarom de fout te groot is, zullen we in de vervolgstudie moeten onderzoeken.
3. Vervolgens berekenen we het maximale besparingspotentieel per woning en huishouden conform de berekeningswijze zoals beschreven in paragraaf 2.2.1.

5.1.1.5 Kosten

In Tabel 8 is voor de verschillende posten van het onderzoek bij benadering een begroting opgesteld, op basis van ervaringen in recente onderzoeksprojecten.

Tabel 8 Kosten van onderzoek naar maximale besparing door slim verwarmen, bij koppeling met data van de WoON 2018 energiemodule

Post	Bedrag (€)
Vragenlijst opstellen	2.000
Uitvoering vragenlijstonderzoek - werving en uitzetten vragenlijst (post, mail, telefonisch) via door CBS ingehuurd marktonderzoeksbureau	10.000
Implementatie monitoring app voor aanwezigheidsmonitoring, monitoring van 2 slimme thermostaat APIs en cloud-based datalogging	50.000
Meetperiode met app en toegang tot thermostaat API -verzenden + ondersteuning bij vragen	10.000
Omzetting analyse algoritmen uit haalbaarheidsonderzoek (Excel) naar big data analytics straat	50.000
Analyse en rapportage	15.000
TOTAAL	137.000

5.1.2 Onderzoeksopzet 1B – onderzoek zonder WoON

Zoals beschreven in paragraaf 6.1.1 is het mogelijk lastig om vanwege privacyregels gebruik te maken van de WoON datasets van het CBS. Wanneer we geen WoON

respondenten kunnen betrekken, moeten we alsnog de woningopnames laten uitvoeren bij de nieuwe respondenten, tenminste, als we — net als bij variant A — uitspraken willen kunnen doen over de verschillen en overeenkomsten tussen de gemeten verwarmingspatronen en de zelf gerapporteerde verwarmingspatronen. De onderzoeksvragen 1a en 1b blijven gelijk.

Omdat het CBS geïnteresseerd is in het onderwerp en in dit type onderzoek met metingen in woningen, zouden we in samenwerking met CBS respondenten kunnen werven voor het onderzoek. Een alternatief zou zijn om respondenten te werven via een ander marktonderzoeksbureau dan diegene die het CBS inhuurt. Het voordeel van aansluiten bij WoON, waardoor al veel van respondenten bekend is, valt in deze situatie weg. Er zou in dit geval daarom een langere vragenlijst verspreid moeten worden waarin ook vragen uit de energiemodule uit het WoON 2018 opgenomen worden. Ook zouden fysieke woningopnames moeten worden uitgevoerd door bouwkundig inspecteurs.

5.1.2.1 Kosten

In Tabel 9 is voor de verschillende posten van het onderzoek bij benadering een begroting opgesteld, op basis van ervaringen in recente onderzoeksprojecten.

Tabel 9 Kosten van onderzoek naar maximale besparing door slim verwarmen, zonder koppeling met data van de WoON 2018 energiemodule

Post	Bedrag (€)
Vragenlijst opstellen	5.000
Uitvoering vragenlijstonderzoek - werving en uitzetten vragenlijst via marktonderzoeksbureau	12.000
Implementatie monitoring app voor aanwezigheidsmonitoring, monitoring van 2 slimme thermostaat APIs en cloud-based datalogging	50.000
Meetperiode met app en toegang tot thermostaat API - verzenden + ondersteuning bij vragen	10.000
Woningopnames conform WoON variant van ISO 82.1, inclusief beschikbaar stellen opnamegegevens	150.000
Omzetting analyse algoritmen uit haalbaarheidsonderzoek (Excel) naar big data analytics straat	50.000
Analyse en rapportage	20.000
TOTAAL	287.000

5.2 Bepalen energiebesparing van technologie die automatisch slim verwarmt

Uit de literatuur blijkt dat programmeerbare thermostaten door bewoners vaak niet geprogrammeerd worden en daarom vaak niet de besparing leveren die ervan verwacht wordt. Dit zou mogelijk verbeterd kunnen worden door de thermostaten gebruikersvriendelijker of slimmer te maken. Een slimme thermostaat in combinatie met een app zou, zoals beschreven, tot ongeveer 5% tot 6% gasbesparing kunnen leiden. Het soort technologie is daarbij van belang: sommige slimme thermostaten met apps bieden alleen inzicht door te meten en feedback te geven, terwijl andere slimme thermostaten met apps ook automatisch slim kunnen verwarmen (bijvoorbeeld door te detecteren wanneer er niemand thuis is via locatietracking en zelflerende algoritmen). De Drebbel thermopilot valt in deze laatste categorie.

Zoals beschreven in paragraaf 4, is de toekomst van de Drebbel thermopilot als dienst voor consumenten onzeker. Drebbel gaat een fase in waarin gezocht wordt naar een kandidaat die de technologie wil overnemen.

Het onderzoeken van het effect van slimme thermostaten met apps die automatisch slim verwarmen en daarbij beter aansluiten bij aan- en afwezigheidspatronen blijft echter een belangrijk onderwerp. In de onderstaande sub paragraaf omschrijven we daarom kort wat een geschikte onderzoekaankpak zou zijn, zonder concrete slimme technologie of aanbieder in gedachten. Dit onderzoek zal uiteraard wel in samenwerking met een of meerdere aanbieders van dergelijke technologie verder moeten worden afgestemd.

5.2.1 *Onderzoeksopzet 2: praktische besparingspotentieel door technologie*

Om dit onderzoek uit te kunnen voeren hebben we twee groepen nodig: een experimentele groep die gebruikt maakt van de technologie (zoals slimme thermostaat en een app), en een controlegroep die de technologie niet gebruikt (alleen slimme thermostaat). Op andere variabelen moeten deze groepen verder zo vergelijkbaar mogelijk zijn. Omdat we gebruik willen maken van energieverbruik data is een samenwerking met het CBS (voor slimme meter data) of met een of meer energieleveranciers voor de hand liggend. Het is echter niet per se nodig: als respondenten toestemming verlenen kunnen hun energiedata bij leveranciers worden opgevraagd.

We volgen het verbruik van respondenten in de experimentele en de controlegroep gedurende een langere periode (10 maanden) tijdens en voor en na het stookseizoen. Op deze manier kunnen we naar mogelijke effecten over de tijd kijken (na 1 maand, na 2 maanden etc.). Dit wordt ook wel een herhaalde meting genoemd. Daarnaast verzamelen we data over hun gasverbruik van het jaar ervoor; daarmee kunnen we een gemiddeld verbruik vaststellen. We doen bovendien een voor- en nameting van hun stookgedrag en bijbehorende factoren met behulp van een vragenlijst (o.a. temperatuurinstellingen bij aan- en afwezigheid, maatregelen aan de woning, vakanties).

5.2.1.1 *Steekproef*

Vanuit beleidsoogpunt zouden we een effect van 2% willen kunnen meten. Voor een onderzoek waarbij dergelijke kleine effecten gemeten worden is het essentieel dat de steekproef groot genoeg is.

Met behulp van het programma G*power (versie 3.1.9.2) hebben we het aantal deelnemers voor de effectmeting van een app berekend om een effect van 2% aan te kunnen tonen. De power-analyse laat zien dat het benodigde aantal deelnemers minstens 979 huishoudens groot moet zijn bij tien herhaalde metingen per groep(zie

Tabel 10).

Tabel 10 Benodigd aantal respondenten onderzoek naar praktische besparing door slim verwarmen

F tests - ANOVA: Repeated measures, within-between interaction			
Analysis:	A priori: Compute required sample size		
Input:	Effect size f	=	0.02
	α err prob	=	0.05
	Power (1- β err prob)	=	0.80
	Number of groups	=	2
	Number of measurements	=	10
	Corr among rep measures	=	0.5
	Nonsphericity correction ϵ	=	1
Output:	Noncentrality parameter λ	=	15.6640000
	Critical F	=	1.8804161
	Numerator df	=	9.0000000
	Denominator df	=	17604
	Total sample size	=	1958
	Actual power	=	0.8002069

5.2.1.2 Vragenlijst en analyse

We verspreiden voor en na de interventiefase (waarin de thermostaat automatisch slim verwarmt) een vragenlijst waarin we vragen stellen over het gebruik van de (slimme) thermostaat. In de analysefase letten we specifiek op het verschil in het gebruik van handmatige aanpassing van het setpoint: hoe vaak verzetten de bewoners de thermostaat nog met de hand (via de thermostaat of met een app) en wordt dit minder als in fase 2 de thermostaat automatisch slim verwarmt? We willen daarnaast weten hoe mensen de app gebruiken. Als mogelijk dan maken we gebruik van clickdata: hoe vaak openen mensen de app en waar kijken ze naar?

Zoals beschreven maken we gebruik van de statistische herhaalde meting techniek. Deze techniek vergelijkt patronen in energieverbruik van paren huishoudens en houdt bovendien rekening met het feit dat het verbruiksverloop in de tijd voor beide huishoudens overeenkomsten vertoont. Zo zal elk huishouden in de winter meer gas verbruiken dan in de zomer. Gebruik van deze techniek is aan te raden aangezien dat het benodigde aantal deelnemers per groep aanzienlijk kan verlagen, maar het vraagt wel om een stabiele dataverzameling.

5.2.1.3 Kosten

In Tabel 11 hebben we additionele kosten opgenomen van het onderzoek naar het praktische besparingspotentieel, ten opzichte van alleen een onderzoek naar het maximale besparingspotentieel.

Tabel 11 Additionele kosten praktische besparing door slim verwarmen, in aanvulling op onderzoek naar maximale besparing

Post	Bedrag (€)
Extra lange meetperiode met app en toegang tot thermostaat API - ondersteuning bij vragen	10.000
Extra analyse en rapportage	10.000
TOTAAL	20.000

5.3 Conclusies over onderzoeksopzet vervolgstudie

Een vernieuwend en sterk aspect van deze onderzoeksopzet is dat we gebruik maken van monitoringdata die verkregen wordt over langere tijd bij proefpersonen in huishoudens via geautomatiseerde digitale meetapparatuur. In eerdere

onderzoeken is veel gebruik gemaakt van kostbare woningopnames en vragenlijsten. Door deze nieuwe onderzoeksopzet verwachten we een omslag te kunnen gaan maken naar een nieuwe manier van onderzoek waarbij de kosten van grootschalig representatief onderzoek en de belasting per respondent te kunnen reduceren. Daarnaast verwachten we ook de betrouwbaarheid van verwarmings- en aanwezigheidspatronen te kunnen verhogen doordat we gedrag niet met zelfrapportage maar met thermostaatdata meten.

We beantwoorden daarmee aan de oproep in de conclusie van een recent proefschrift van de TU Delft: *“In the future both survey and sociodemographic data could be combined to maximise results, large samples should be used to ensure statistical significance and certain variables should probably be monitored in order to avoid survey bias. These include variables such as occupant presence at home, indoor temperature, and ventilation practices, since it seems that respondents might not be adequately aware of their own patterns.”* (Majcen, 2016, pp. 209-210).

We verwachten dat de komende jaren steeds meer diensten op de markt zullen komen gericht op energiebesparing in woningen. Wij achten het van belang om de effectiviteit van dergelijke diensten te evalueren. Onze onderzoeksopzet kan daarbij als inspiratie dienen.

6 Referenties

- BZK en CBS (2019). Ruimte voor wonen. Rapportage opgehaald van <https://www.woononderzoek.nl/nieuws/Ruimte-voor-wonen--de-resultaten-van-het-Woononderzoek-Nederland-2018/83>
- Centraal Bureau voor de Statistiek. (2019, 3 20). *Lengte en gewicht van personen, ondergewicht en overgewicht; vanaf 1981*. Opgehaald van StatLine: <https://statline.cbs.nl/Statweb/publication/?DM=SLNL&PA=81565NED&D1=5-6&D2=0&D3=5&D4=0&D5=I&HDR=G1,T&STB=G2,G3,G4&VW=T>
- Department of Energy & Climate Change. (2014). *Advice on how to use heating controls: Evaluation of a trial in Newcastle*. Behavioural Insights Team, London, UK. Opgehaald van <https://www.gov.uk/government/publications/advice-on-how-to-use-heating-controls-evaluation-of-a-trial-in-newcastle>
- Drebbel. (2017). *Waarom Drebbel beter werkt dan geo-fencing*. Opgehaald van Drebbel: <https://drebbel.com/geo-fencing/>
- Dubbeld, M. (1983). *Nachtverlagingen in woningen*. Delft: Instituut voor milieuhygiëne en gezondheidstechniek TNO. Opgehaald van <https://repository.tudelft.nl/view/tno/uuid:c310d148-e8f0-4302-a6ef-a44dd4a1acd3>
- DuBois, D., & DuBois, E. (1916). A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. *Arch Intern Medicine*, 17, 863-871.
- Environmental Protection Agency. (2009, MaY 4). *Programmable Thermostat specification suspension Memo*. Opgehaald van Energy Star: https://www.energystar.gov/ia/partners/prod_development/revisions/downloads/thermostats/Spec_Suspension_Memo_May2009.pdf
- Environmental Protection Agency. (2017). *Connected Thermostats Specification V1.0*. Opgehaald van ENERGY STAR: https://www.energystar.gov/products/connected_thermostats/partners
- ISO. (2004). *Ergonomics of the thermal environment - Determination of metabolic rate (ISO 8996:2004)*. ISO.
- ISSO. (2011). *ISSO-publicatie 82.3: Formulestructuur EI en maatwerkadvies woningbouw*. Rotterdam: Kennisinstituut bouw- en installatietechniek. Opgehaald van <https://kennisbank.isso.nl/publicatie/isso-publicatie-82-3-formulestructuur-ei-en-maatwerkadvies-woningbouw/2011>
- ISSO. (2015). *ISSO publicatie 82.1: Energieprestatie woningen: Energie-Index-Rapport (methode 2014)*. Rotterdam: ISSO. Opgehaald van http://www.isso.nl/fileadmin/user_upload/downloads_epa-w/definitief%20hoofdstuk%206%200%20methode%202014%20v1.1.pdf
- Kemna, R. (2014). *Average EU building heat load for HVAC Equipment*. Delft, NL: Van Holsteijn en Kemna B.V. Opgehaald van https://duckduckgo.com/?kh=1&uddg=https%3A%2F%2Fec.europa.eu%2Fenergy%2Fsites%2Fener%2Ffiles%2Fdocuments%2F2014_final_report_eu_building_heat_demand.pdf
- Koninklijk Nederlands Normalisatie-instituut. (2012). *NEN7120+C2 (nl) Energieprestatie van gebouwen - Bepalingsmethode*. Delft: Koninklijk Nederlands Normalisatie-instituut. Opgehaald van <https://www.nen.nl/NEN-Shop/Energieprestatie.htm>
- Koninklijk Nederlands Normalisatie-instituut. (2019). *Nederlandse technische afspraak NTA 8800 (nl): Energieprestatie van gebouwen -*

- Bepalingsmethode*. Delft: Koninklijk Nederlands Normalisatie-instituut. Opgehaald van <https://www.nen.nl/NEN-Shop/Norm/NTA-88002019-nl.htm>
- Koninklijk Nederlands Normalisatie-instituut. (2018). *NEN 5060 (nl) Hygrothermische eigenschappen van gebouwen - Referentieklimaatgegevens*. Delft: Koninklijk Nederlands Normalisatie-instituut.
- Leidelmeijer, K., & Van Grieken, R. (2005). *Wonen en Energie - Stook- en ventilatiegedrag van huishoudens*. Amsterdam: RIGO Research en Advies BV. Opgehaald van <https://docplayer.nl/11599762-Wonen-en-energie-stook-en-ventilatiegedrag-van-huishoudens.html>
- Lindén, A.-L., Carlsson-Kanyama, A., & Eriksson, B. (2006). Efficient and inefficient aspects of residential energy behaviour: What are the policy instruments for change? *Energy Policy*, 34(14), 1918-1927. Opgehaald van <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.01.015>
- Majcen, D. (2016). *Predicting energy consumption and savings in the housing stock*. Delft: TU Delft. Opgehaald van <https://journals.open.tudelft.nl/index.php/abe/article/download/majcen/1297/>
- Menkveld, M., Rietkerk, M., Mastop, E., Tigchelaar, C., & Straver, K. (2017). *Besparingseffecten van slimme meters met feedbacksystemen en slimme thermostaten*. Petten: ECN. Opgehaald van <https://www.ecn.nl/publications/ECN-N--17-017>
- Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties. (2019). *Remte voor wonen: De resultaten van het WoonOnderzoek Nederland 2018*. Den Haag: Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties. Opgehaald van <https://www.woononderzoek.nl/nieuws/Ruimte-voor-wonen--de-resultaten-van-het-Woononderzoek-Nederland-2018/83>
- Ministerie van VROM. (2010). *Energiegedrag in de woning - Aanknopingspunten voor de vermindering van het energieverbruik*. Den Haag: Ministerie van VROM. Opgehaald van <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2010/03/11/energiegedrag-in-de-woning>
- Nicol, F., Humphreys, M., & Roaf, S. (2012). *Adaptive thermal comfort : principles and practice*. London: Routledge.
- Park, T. (2017). *Evaluating the Nest Learning Thermostat*. London, UK: The Behavioural Insights Team. Opgehaald van <https://www.bi.team/wp-content/uploads/2017/11/311013-Evaluating-Nest-BIT-Exec-Tech-Summaries.pdf>
- Peffer, T., Pritoni, M., Meier, A., Aragon, C., & Perry, D. (2011). How people use thermostats in homes: A review. *Building and Environment*, 46(12), 2529-2541. Opgehaald van <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.06.002>
- Ramondt, D. (2015). *Energy savings from smart thermostats with energy displays*. Amsterdam: Vrije Universiteit Amsterdam. Opgehaald van https://duckduckgo.com/?kh=1&uddg=https%3A%2F%2Fpapers.ssrn.com%2Fsol3%2FDelivery.cfm%2FSSRN_ID2745144_code2522008.pdf%3Fabstractid%3D2745144%26mirid%3D1
- Santin, O. G. (2011, October). Behavioural Patterns and User Profiles related to energy consumption for heating. *Energy and Buildings*, 43(10), 2662-2672. Opgehaald van <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.024>
- Schmitz, A. (2001). Het economisch optimaliseren van nacht- en weekendverlagingen. *TVVL magazine*, 3, pp. 36-44.

- Sociaal en Cultureel Planbureau. (2019). *Tijdsbestedingsonderzoek (TBO)*. Opgehaald van https://www.scp.nl/Onderzoek/Bronnen/Beknopte_onderzoeksbeschrijvingen/Tijdsbestedingsonderzoek_TBO
- Tigchelaar, C., & Leidelmeijer, K. (2013). *Energiebesparing en samenspel van woning en bewoner - Analyse van de module Energie WoON 2012*. Petten: ECN. Opgehaald van <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2013/12/02/energiebesparing-een-samenspel-van-woning-en-bewoner-analyse-van-de-module-energie-woon-2012>
- Van den Ham, E., & Van der Vliet, J. (2013). *Energiebesparing door selectief stoken bij woningen*. Faculteit Bouwkunde. Delft: TU Delft.
- Van Raaij, W., & Verhallen, T. (1983). A Behavioural Model of Residential Energy Use. *Journal of Economic Psychology*, 3, 39-63. Opgehaald van https://www.researchgate.net/publication/4850450_A_behavioral_model_of_residential_energy_use
- Vosmer, T. (2018). *The impact of adjusted thermostat practices in the residential sector*. Delft: TU Delft. Opgehaald van <http://resolver.tudelft.nl/uuid:f0d4bad6-4513-4367-969e-23b82b791d20>
- Wever, N. (2018). *Effectieve temperatuur en graaddagen - Klimatologie en klimaatscenario's*. De Blit: KNMI. Opgehaald van <http://bibliotheek.knmi.nl/knmipubmetnummer/knmipub219.pdf>

Bijlage A. Fysische modellen voor energiebesparing bij stookonderbrekingen

Aan de hand van natuurkundige modellen verklaren we in deze bijlage waarom stookonderbrekingen kunnen leiden tot energiebesparing en welke factoren daarbij een dominante rol in spelen. Leidend hierbij is een eenvoudig 'eerste orde' model van de warmtebalans van een woning.

a. Opgeslagen warmte

Warmte is energie die in een woning zit 'opgeslagen' in lucht, meubels en bouwmasa (denk aan muren, vloeren, en daken). De hoeveelheid warmte geven we aan met het symbool Q ; de eenheid is Joule [J]. Het warmteverlies van een woning en de warmtewinst van een woning is ook recht evenredig met de temperatuurdaling respectievelijk -stijging van dat huis:

$$\Delta Q = C \cdot \Delta T \text{ met eenheden erbij: } \Delta Q [J] = C [J/K] \cdot \Delta T [K]$$

Anders geformuleerd:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \text{ met eenheden erbij: } C [J/K] = \frac{\Delta Q [J]}{\Delta T [K]}$$

De warmtecapaciteit $C [J/K]$ is dus de hoeveelheid warmte aan een woning moet worden toegevoegd om de woning met één graad Celsius (of één Kelvin) te laten stijgen. De warmtecapaciteit van een woning hangt vooral af van de grootte van de woning: des te groter de woning, des te meer lucht, meubels en/of bouwmasa, des te groter de warmtecapaciteit. De warmtecapaciteit hangt ook af van het soort (bouw)materialen dat gebruikt is: zo heeft hout een kleinere warmtecapaciteit dan beton. In een groter huis van dezelfde materialen zit bij dezelfde temperatuur dus meer warmte opgeslagen. Ook geldt dus dat in een woning van beton bij dezelfde temperatuur meer warmte zit opgeslagen dan in een even groot huis van hout.

b. Warmteverlies⁹

Newton's wet van afkoelen stelt dat de snelheid waarmee een voorwerp afkoelt evenredig is het met verschil in temperatuur en zijn omgeving. Voor een heel huis kan de formule als volgt worden opgesteld:

$$\frac{dQ_{loss}}{dt} = H \cdot (T_{in} - T_{out}) \text{ met eenheden erbij: } \frac{dQ [J]}{dt [s]} = H [W/K] \cdot (T_{in} - T_{out}) [K]$$

De snelheid waarmee warmte-energie naar buiten 'lekt' in de winter is enerzijds recht evenredig met een factor die we aanduiden als $H [W/K]$, het specifieke

⁹ De wet van behoud van energie stelt dat natuurkundig gezien, warmte-energie niet 'verloren' gaan. De begrippen 'warmteverlies' en 'warmtewinst' moeten worden gezien met betrekking tot de woning.

warmteverlies van een woning. Dit is een constante¹⁰ factor, een fysische eigenschap van een woning. Het specifieke warmteverlies van een woning is groter naarmate er meer warmte wordt verloren via transmissie, infiltratie en/of ventilatie. Het specifieke warmteverlies van een woning is kleiner naarmate bijvoorbeeld het (verlies)oppervlak van een woning kleiner is, de woning beter geïsoleerd is of de kierdichting van de woning beter is.

De snelheid waarmee warmte-energie naar buiten 'lekt' in de winter, is ook recht evenredig met het temperatuurverschil tussen binnen- en buitentemperatuur ($T_{in} - T_{out}$). Kortom: des te groter het temperatuurverschil, des te sneller het warmteverlies naar buiten. Verder is het warmteverlies van een woning ook afhankelijk van de windsnelheid. Om het effect van de windsnelheid mee te nemen, maken we gebruik van de 'effectieve buitentemperatuur', een overeenkomende temperatuur bij windstilte waarbij evenveel warmteverlies zou zijn opgetreden, zoals gedefinieerd door het KNMI (Wever, 2018):

$$T_{out;eff} = T_{out} - \frac{2}{3} \cdot u_{gem}$$

Waarbij:

- $T_{out;eff}$ de effectieve buitentemperatuur is [°C];
- T_{out} de gemeten buitentemperatuur is [°C]
- u_{gem} de windsnelheid is [m/s].

We definiëren ook een verkorte schrijfwijze voor het verschil tussen de binnentemperatuur op tijdstip t en de effectieve buitentemperatuur op tijdstip t :

$$\Delta T_{out;eff}(t) = T_{in}(t) - T_{out;eff}(t)$$

Voor het totale warmteverlies over een periode geldt: naarmate het verschil tussen binnen- en buitentemperatuur langer in stand wordt gehouden, des te groter het warmteverlies.

Hiervoor definiëren we nog een begrip: de effectieve stooklast die is opgetreden in een bepaalde periode, S_{eff} , met als eenheid kelvin-seconde [Ks]¹¹. De effectieve stooklast kunnen we berekenen als het product van het verschil tussen binnentemperatuur en de effectieve buitentemperatuur, vermenigvuldigd met de tijdsduur waarover dit verschil optrad, voor alle intervallen Δt :

$$S_{eff} [Ks] = \sum_{t=t_{start}}^{t=t_{end}} (\Delta T_{out;eff}(t) \cdot \Delta t)$$

Met de effectieve stooklast kan het warmteverlies over een bepaalde periode eenvoudig berekend worden:

$$\Delta Q_{loss} = H \cdot S_{eff} \text{ met eenheden erbij: } \Delta Q_{loss} [J] = H [W/K] \cdot S_{eff} [Ks]$$

¹⁰ In dit rapport modelleren we ventilatieverliezen ook als onderdeel van het specifieke warmteverlies. Theoretisch gezien is dit niet constant, omdat het ook afhangt van het ventilatiegedrag van de bewoners. Toch beschouwen we dit in de context van dit rapport als een constante factor.

¹¹ De effectieve stooklast van een heel stookseizoen wordt doorgaans uitgedrukt in Kelvin-dagen [Kd], beter bekend als 'graaddagen'. In deze laatste eenheid wordt de effectieve stooklast vaak gebruikt om het verschil in warmteverlies (en benodigde warmte en energie om dat te compenseren) te verklaren voor verschillende jaren.

c. Warmtewinst

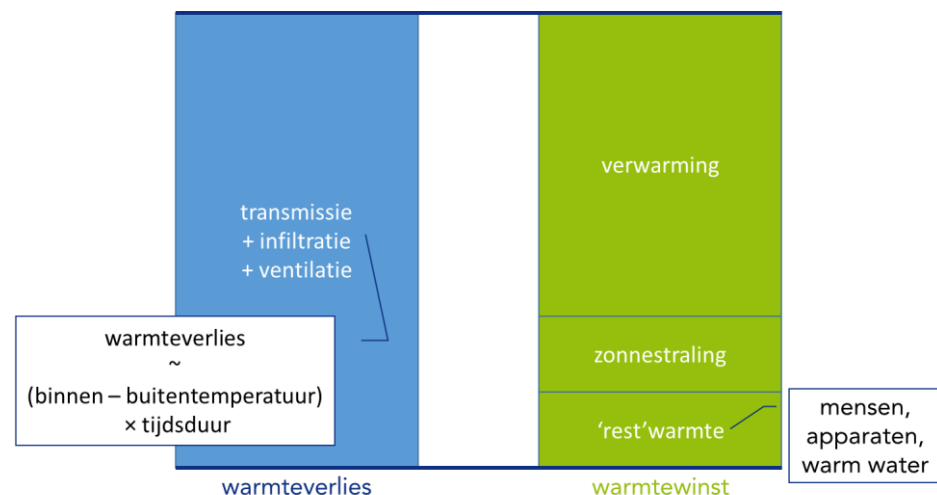
De grootste drie bronnen van warmtewinst in een woning in de winter zijn doorgaans:

- Warmtewinst uit verwarmingsinstallatie (Q_H).
- Restwarmte (Q_{rest}), (ook wel 'interne warmtewinst' genoemd) van:
 - o mensen die thuis zijn ($Q_{rest;pp}$);
 - o elektrische apparaten ($Q_{rest;e}$);
 - o kookwarmte, voor zover het niet weglekt via de afzuigkap ($Q_{rest;koken}$);
 - o warm tapwater, voor zover het niet direct weglekt via het riool ($Q_{rest;ww}$);
- Warmtewinst uit zonnestraling (Q_{sol}), voornamelijk door zonnestraling die via ramen invalt.

Om een indicatie te geven; het gemiddelde aandeel van de warmtewinst in woningen in de EU is $Q_H : Q_{rest} : Q_{sol} = 67\% : 22\% : 11\%$, zo valt af te leiden uit (Kemna, 2014). Het gemiddelde aandeel in Nederland is ons niet bekend.

d. Warmtebalans

Als na enige tijd (bijvoorbeeld 24 uur) de temperatuur in huis weer hetzelfde is, is de totale hoeveelheid warmte-energie in de woning hetzelfde. Dan moet de warmtewinst over die periode gelijk zijn aan het warmteverlies over die periode. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 3.

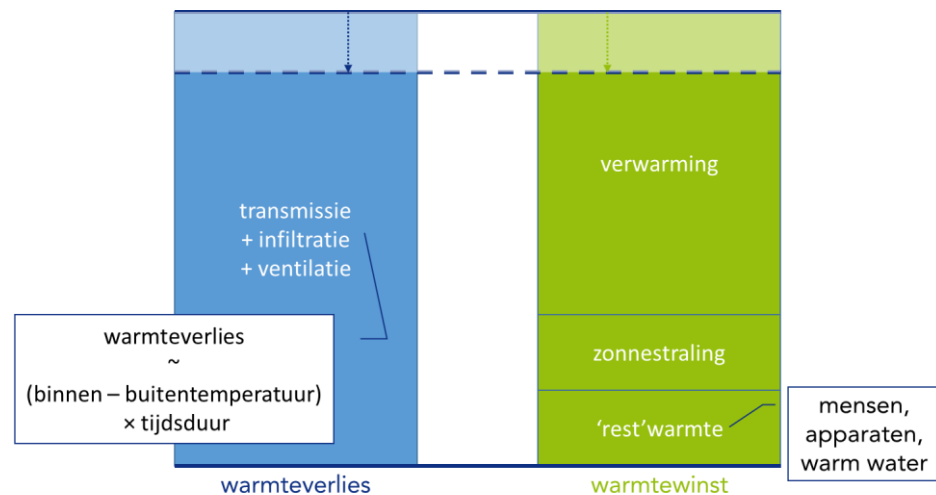


Figuur 3 Een eenvoudige weergave van een warmtebalans van een woning.

De manier waarop slim verwarmen tijdens afwezigheid, helpt in zo'n periode om de warmte nodig voor verwarming te reduceren is als volgt:

- Het warmteverlies in die periode is recht evenredig met de effectieve stooklast, dus zowel recht evenredig met het temperatuurverschil tussen binnen- en buitentemperatuur (des te hoger, des te meer warmte er naar buiten lekt) als recht evenredig met de tijdsduur waarover dit verschil optreedt (des te langer, des te meer warmte er naar buiten lekt). Hier gaat een analogie op met een emmer met gaatjes in een regelmatig patroon in de wand met water erin: des te hoger het waterniveau in de emmer, des te sneller lekt het water naar buiten. Als je het waterniveau constant houdt door bij te vullen (~verwarmen) dan blijft de snelheid waarmee het water naar buiten lekt ook constant. Ook geldt: des te langer het duurt, des te meer water er naar buiten lekt.

- Door de binnentemperatuur tijdens zo'n periode zo ver (en zo lang) mogelijk te laten zakken als er niemand thuis is (en pas laat weer op te warmen naar de oorspronkelijke temperatuur), wordt de effectieve stooklast gereduceerd: er lekt minder warmte uit de woning. Ook hierbij gaat de analogie met de lekke emmer weer op. Door een tijdje het waterniveau niet aan te vullen en constant te houden, lekt het water steeds minder snel naar buiten. Je moet weliswaar weer (op tijd beginnen) met water bijvullen om het oorspronkelijke niveau te halen. Bij het bijvullen aan het eind moet je evenveel water toevoegen als er in de periode naar buiten is gelekt. Door het waterniveau tijdelijk te laten zakken is er minder water naar buiten gelekt dan als je was blijven bijvullen, dus hoeft je in totaal over de periode minder water bij te vullen.
- Daarbij verandert de hoeveelheid zonnestraling en 'restwarmte' niet.
- Kortom: alle energie die (in absolute zin) niet verloren gaat uit huis, hoeft (in absolute zin) niet door de verwarmingsinstallatie aan de woning toegevoegd te worden.
- Absoluut gezien is de besparing op warmtewinst nodig van de verwarming even groot als de besparing op het warmteverlies. Relatief gezien is de besparing op warmtewinst voor verwarming groter dan de besparing op warmteverlies: het lichtgroene deel in Figuur 4 beslaat een relatief groter aandeel van het oorspronkelijke groene vlak "verwarming", groter dan het aandeel dat het lichtblauwe vlakje beslaat ten opzicht van het oorspronkelijke blauwe vlak "transmissie+infiltratie+ventilatie".



Figuur 4 Hoe reductie van warmteverlies leidt tot een reductie van de warmtewinst die geleverd moet worden door de verwarming om het warmteverlies te compenseren.

e. Thermische traagheid en de snelheid van warmteverlies en temperatuurdaling

In de voorgaande paragraaf beschouwden we de warmtebalans over een langere periode, bijvoorbeeld een dag of een week. In deze paragraaf kijken we naar de dynamische effecten op korte termijn en met name naar de rol die de thermische traagheid van een woning speelt bij de besparing op warmteverlies door stookonderbrekingen.

Naarmate er meer warmte naar buiten lekt, wordt het verschil tussen binnen- en buitentemperatuur kleiner, waardoor de warmte minder snel naar buiten lekt, waardoor de binnentemperatuur uiteindelijk de buitentemperatuur zal benaderen.

De thermische traagheid τ , definiëren we als volgt:

$$\tau = \frac{C}{H} \text{ met eenheden erbij: } \tau [s] = \frac{C [J/K]}{H [W/K]}$$

The thermische traagheid van een woning, aangeduid met het symbool τ , wordt gekenmerkt door tijd die het zou duren om de buitentemperatuur te bereiken *als* de temperatuurdaling zou doorgaan met de initiële snelheid. In werkelijkheid gaat de temperatuurdaling steeds trager. Toch geldt op elk moment tijdens de temperatuurdaling steeds: als de temperatuur met de snelheid van dat moment zou blijven dalen, wordt in tijdsduur τ de buitentemperatuur bereikt. Deze tijdsduur is daarmee een karakteristieke eigenschap van de woning.

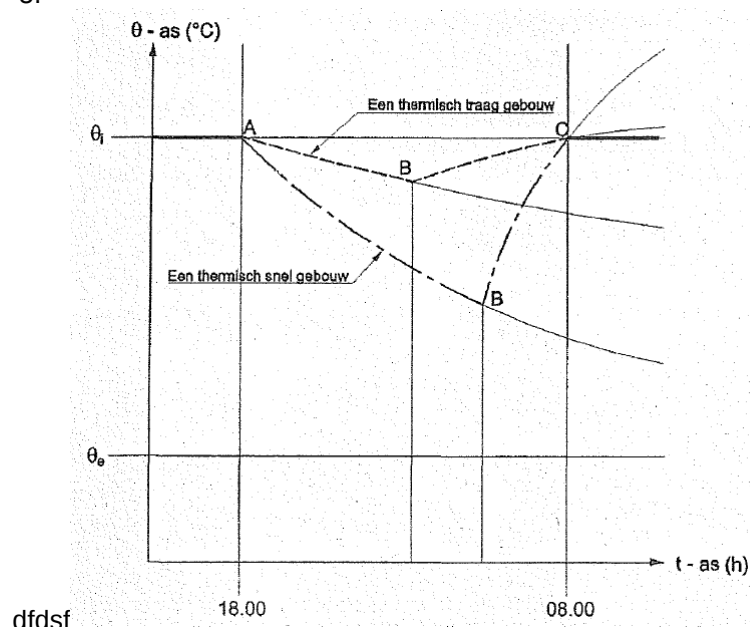
Doorgaans wordt τ niet uitgedrukt in seconden, maar uitgedrukt in uren [h]. Aangezien 1 h overeenkomt met 3600 s en dus 1 Wh overeenkomt 3600 Js en dus met 3600 J, kan de thermische traagheid in uren [h] als volgt met deze gegevens berekend worden:

$$\tau [h] = \frac{C [J/K] \times 3600}{H [W/K]} = \frac{C [Wh/K]}{H [W/K]}$$

Zoals ook uit voorgaande formule is af te leiden, zijn er verschillende redenen waarom een woning een grote thermische traagheid kan hebben:

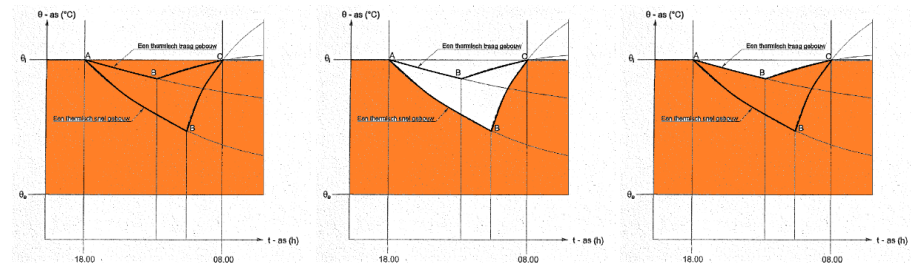
- De warmtecapaciteit, C, van de woning is hoog, en/of
- Het specifieke warmteverlies, H, van de woning is laag.

Het verschil in temperatuurverloop bij een stookonderbreking tussen een thermisch traag gebouw (met een relatief grote thermische traagheid) en een thermisch snel gebouw (met een relatief trage thermische traagheid), wordt weergegeven in Figuur 5.



Figuur 5 Temperatuurverloop in een thermisch traag gebouw versus een thermisch snel gebouw (Schmitz, 2001), geciteerd in (Van den Ham & Van der Vliet, 2013). Hierbij is θ_i de binnentemperatuur en θ_e de buitentemperatuur. Bij A gaat de verwarming uit, en bij B gaat de verwarming weer aan om op tijdstip C de oorspronkelijke binnentemperatuur bereikt te hebben.

In een thermisch snel gebouw heeft het relatief meer zin om de temperatuur tijdens afwezigheid te laten zakken dan in een thermisch traag gebouw. In Figuur 6 illustreren we het verschil door drie keer de effectieve stooklast in te kleuren: geen stookonderbreking (links), een stookonderbreking in een thermisch snel huis (midden), en een stookonderbreking in een thermisch traag huis (rechts).



Figuur 6 Indicatie van het verschil in de effectieve stooklast tussen geen stookonderbreking (links), een stookonderbreking in een thermisch snel gebouw (midden), en in een thermisch traag gebouw (rechts); bewerking van (Schmitz, 2001), geciteerd in (Van den Ham & Van der Vliet, 2013)

Des te meer wit in Figuur 6, des te meer besparing op de effectieve stooklast. Preciezer geformuleerd: de verhouding tussen de oppervlakten midden:links geeft de relatieve vermindering aan van de stooklast van een stookonderbreking in het thermisch snelle gebouw. De verhouding tussen de oppervlakten rechts:links geeft de relatieve vermindering aan van de stooklast van een stookonderbreking in het thermisch trage gebouw.

Een prettige eigenschap van de thermische traagheid voor praktijkonderzoek in bestaande woningen door monitoring is dat deze kan worden afgeleid uit nachtelijke temperatuurreksen in de winter, wanneer het setpoint omlaag is gezet en er geen zonnestraling is die een bijdrage levert aan de warmtebalans van de woning. De formule om de thermische traagheid te berekenen, die we gebruiken in paragraaf 2.1.4, is:

$$\tau = \frac{t_{endcool} - t_{startcool}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{out,eff}(t_{startcool})}{\Delta T_{out,eff}(t_{endcool})}\right)}$$

f. Thermische traagheid en energiebesparing door stookonderbrekingen

In het onderzoek van de TU Delft gebruiken (Van den Ham & Van der Vliet, 2013) de volgende formule om het besparingseffect van stookonderbrekingen te berekenen:

$$B_v = \frac{t_v}{24} \left(1 - \frac{\eta_0}{\eta_1} \frac{\tau}{t_v} \left(1 - e^{-\frac{t_v}{\tau}} \right) \right) \times 100\%$$

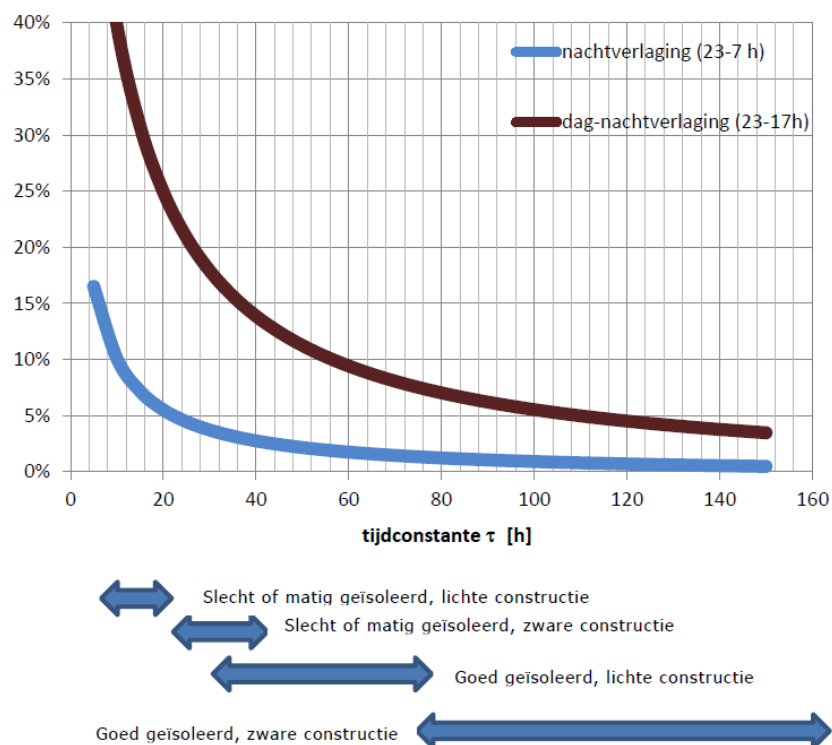
waarbij:

B_v = relatieve besparing op het energieverbruik voor ruimteverwarming [%];
 t_v = de lengte van de dagelijkse periode van stookonderbreking [h];
 τ = de thermische traagheid van de woning [h];
 η_0 = het verwarmingsrendement tijdens continubedrijf [%];
 η_1 = het verwarmingsrendement tijdens aanwarmen [%].

Uit bovenstaande formule kan worden afgeleid dat een stookonderbreking altijd energie bespaart. In een klein deel van de huizen met een waterzijdig goed ingeregelde cv-installatie en een grote thermische traagheid, zou het kunnen voorkomen dat het opwarmen minder efficiënt gaat. Desalniettemin wijst het onderzoek van TU Delft uit: *“Bij een stookonderbreking van 8 uur of meer wordt bij alle woningtypes [die verwarmen op gas, red] een besparing bereikt. Bij kortdurende stookonderbrekingen bij woningen met een grote tijdconstante kan de besparing in theorie licht negatief worden. De maximale toename van het energiegebruik is echter klein, maximaal 0,1%.”* (Van den Ham & Van der Vliet, 2013, p. 13)

In Figuur 6 is de relatieve invloed van de thermische traagheid zichtbaar, bij twee verschillende stookonderbrekingen, op de besparing. Opvallend zijn woningen met een thermische traagheid onder de 40 uur; hierbij loopt het besparingspercentage sterk op.

Besparingspercentage bij stookonderbreking



Figuur 7 Besparingspercentage bij stookonderbreking; impact tijdconstante bij nachtverlaging (23-7u) en dag-nachtverlaging (23-17u); uit (Van den Ham & Van der Vliet, 2013)

Wat ook duidelijk zichtbaar is in Figuur 7 is dat een langere stookonderbreking (van 23:00 tot 17:00 de volgende dag) een veel groter besparingspercentage oplevert dan een kortere stookonderbreking (van 23:00 tot 7:00 de volgende dag): het temperatuurverschil met buiten blijft langer laag, daardoor lekt er over deze periode minder warmte naar buiten en wordt de effectieve stooklast lager.

Wat niet direct zichtbaar is in de figuren, maar wel afgeleid kan worden uit de besparingsformule is dat een aaneengesloten stookonderbreking van 1×16 uur duidelijk groter is dan twee afzonderlijke stookonderbrekingen van elk 8 uur, waarbij tussen de stookonderbrekingen weer wordt opgewarmd naar de oorspronkelijke temperatuur. Dit komt doordat de binnentemperatuur langer laag blijft (met name aan

het begin van de tweede helft van de stookonderbreking, waardoor er minder warmte naar buiten lekt. Ook blijkt dat de besparing die wordt gerealiseerd door een stookonderbreking met een uur te verlengen, veel groter is dan een situatie waarbij na een tussen-opwarming een tweede stookonderbreking van een uur wordt toegevoegd.

TU Delft onderzocht voor Milieu Centraal ook het maximale besparingspotentieel (zie ook paragraaf 2.2.1) door voor 16 referentiewoningen (4 soorten woningen in 4 bouwjaarklassen) door te rekenen wat vijf maatregelen (c.q. het toepassen van een specifieke vorm van selectief stoken) zouden kunnen opleveren. De besparing is daarbij uitgedrukt als het aantal m³ gas dat minder nodig is voor ruimteverwarming. Als referentiescenario is het gasverbruik genomen van een woning waarin nog geen enkele maatregel wordt toegepast (Van den Ham & Van der Vliet, 2013).

Voor elk van deze vijf maatregelen hebben wij vervolgens in Tabel 12 het gewogen gemiddelde besparingspotentieel uitgerekend, van alle soorten woningen samen, en de bouwjaarklassen geaggregeerd tot 2 klassen: huizen met een bouwjaar van voor 1989 en huizen met bouwjaar van 1989 of later. Slim stoken tijdens afwezigheid overdag lijkt over de gehele woningvoorraad het grootste besparingspotentieel te hebben: 2,7% minder gasverbruik voor verwarming. Hierbij valt het besparingspotentieel van 11% op in woningen gebouwd voor 1989, bij huishoudens die deze maatregel nog niet toepassen.

Tabel 12 Besparingspotentieel van selectief stoken, in % van het gasverbruik voor verwarming

Maatregel	Toelichting	Gemiddelde besparing (in woningen waarin maatregel niet toegepast)			% woningen dat nu maatregel al toepast			Gemiddelde besparing woningvoorraad		
		<1989	≥1989	alle	<1989	≥1989	alle	<1989	≥1989	alle
Nacht-verlaging	8 uren per nacht (23-7u), 15 °C.	6,8%	2,1%	5,3%	82%	75%	80%	1,2%	0,5%	1,0%
Laag bij afwezigheid	Thermostaat ook overdag omlaag (van 7-17u)	11,0%	6,7%	9,6%	75%	60%	71%	2,7%	2,7%	2,7%
Ongebruikte ruimtes niet of matig verwarmen.	Ongebruikte ruimtes 12 °C, deuren dicht	14,4%	7,9%	11,5%	82%	75%	80%	2,6%	2,0%	2,2%
Thermostaat 1 °C lager	Thermostaat 1 °C lager	6,0%	6,0%	6,0%	36%	36%	36%	3,8%	3,8%	3,8%
Eerder omlaag	Thermostaat 1 uur eerder omlaag voor slapen gaan en voor vertrek	1,3%	0,6%	1,1%	48%	48%	48%	0,7%	0,3%	0,6%

Volgens het onderzoek zet 75% van de huishoudens in een woning gebouwd voor 1989 hun thermostaat overdag dus lager als ze afwezig zijn en doet 25% dat niet. Van de huishoudens in een woning met een later bouwjaar zou 60% hun thermostaat overdag bij afwezigheid lager zetten, en 40% dus niet. Op basis van het WoON onderzoek van 2012 schatten Menkveld e.a. (2017) in dat ongeveer 50% van

de huishoudens de verwarming niet lager zet als er niemand thuis is. Dat is dus een groter aandeel dan de 25% (bouwjaar < 1989) en 40% (bouwjaar ≥ 1989) verondersteld in de studie van Van den Ham en Van der Viet (2013).

g. De rol van thermische traagheid in rekenmethoden voor o.a. het energielabel

In Nederland worden voor de bepaling van het (vereenvoudigde) energielabel van een (koop)woning, voor de energie-index van een (huur)woning en voor een maatwerk energieprestatieadvies voor woningen (EPA-W), gebruik gemaakt van de rekenmodellen en rekenmethode die zijn afgeleid van de NEN 7210 norm (Koninklijk Nederlands Normalisatie-instituut, 2012). Per 1 januari 2020 geldt een nieuwe bepalingmethode met bijbehorende rekenmodel: de NTA 8800 (Koninklijk Nederlands Normalisatie-instituut, 2019).

In beide modellen wordt uitgegaan van gestandaardiseerd gebruikersgedrag en gestandaardiseerde klimaatgegevens, waardoor de effectieve stooklast feitelijk ook wordt gestandaardiseerd:

- Er wordt een setpointtemperatuur van 20 °C aangehouden, waarbij elke weekdag gedurende 10 aaneengesloten uren een lagere setpointtemperatuur 16 °C wordt aangehouden. De invloed van wijzigingen in het gebruikersgedrag worden hiermee buiten het model gehouden;
- Voor de buitentemperatuur worden in gestandaardiseerde buitentemperaturen ('referentieklimaatgegevens') aangehouden. De invloed van jaar-op-jaar variaties in het weer worden hiermee buiten het model gehouden.

Een belangrijk (tussen)doel bij bovenstaande rekenmethoden is het inschatten van het totale energieverbruik in een woning, onder gestandaardiseerde condities. Daarbij wordt volstaan met een inschatting van de thermische traagheid aan de hand van het gebruiksoppervlak en een tabel met vier verschillende waarden voor vier verschillende bouwtypen:

- De thermische traagheid van de woning wordt in deze rekenmethoden bepaald per 'rekenzone' van een gebouw en aangeduid als de 'tijdconstante' van die rekenzone.
- De thermische traagheid wordt bepaald door het gebruiksoppervlak van de rekenzone te vermenigvuldigen met een forfaitaire waarde uit een tabel (zie Figuur 8), hieruit resulteert de effectieve interne warmtecapaciteit, C . Door deze waarde te delen door het specifieke warmteverlies kan de thermische traagheid van een woning berekend worden.

NTA 8800 Tabel 7.10				$D_{m,jnt,eff,21}$ [kJ/(m ² ·K)]	
Specificatie van de bouwwijze	Voor woningen betreft dit met name...	van bouwjaar	tot bouwjaar	Gesloten of verlaagd plafond	Geen of open plafond
Houtskeletbouw (hsb) met hsb of sfb vloeren Staalframebouw (sfb) met hsb of sfb vloeren Staal skeletbouw met hsb of sfb vloeren	HSB of SFB		0	55	80
Houtskeletbouw, staalframebouw of staalskeletbouw met staalbeton of niet-massieve betonnen vloeren. Dragend metselwerk met houten vloeren	vooorlogse woningbouw	0	1940	110	180
Betonnen kolom-ligger skeletbouw met niet-massieve betonnen vloeren Dragend metselwerk met nietmassieve betonnen vloeren	woningbouw uit de wederopbouwperiode	1940	1995	180	360
Betonnen wand-vloer skeletbouw met massieve en niet-massieve betonnen vloeren Dragend metselwerk met massieve betonnen vloeren	woningbouw uit de Vinexperiode	1995		250	450

Figuur 8 Forfaitaire waarden uit NTA 8800 gebruikt voor berekening van interne effectieve warmtecapaciteit en daarmee indirect de thermische traagheid van een woning.

De NEN 7210 standaard (Koninklijk Nederlands Normalisatie-instituut, 2012) bevat een formule waarmee een dimensieloze reductiefactor a_{red} kan worden berekend waarmee wordt aangegeven in welke mate stookonderbrekingen het energieverbruik reduceren.

Bij stookonderbrekingen geldt:

$$ALS \ t_{low} \leq \frac{10}{3} \cdot \tau \quad DAN \ a_{red} = \frac{(24 - t_{low}) + t_{low} \times \left\{ 1 - \frac{t_{low}}{2 \times \tau} + 0,075 \times \left(\frac{t_{low}}{\tau} \right)^2 \right\}}{24}$$

en:

$$ALS \ t_{low} > \frac{10}{3} \cdot \tau \quad DAN \ a_{red} = \frac{(24 - t_{low}) + \frac{t_{low}}{6}}{24}$$

h. Thermische traagheid van woningen in Nederland

In de literatuur konden we slechts weinig (praktijk)onderzoek vinden naar waarden van de thermische traagheid van woningen in Nederland. De waarden die we vonden lopen behoorlijk uiteen.

Volgens de oudste studie die we konden vinden naar dit onderwerp hebben Nederlandse woningen een tijdconstante van "ca. 50 tot 100 uur" (Dubbeld, 1983, p. 14).

In een recentere studie van de TU Delft voor Milieu Centraal gebruiken (Van den Ham & Van der Vliet, 2013, p. 21) de volgende gemiddelde waarden voor de thermische traagheid van diverse bouwjaarklassen en woningtypen:

	<1976	1976-1988	1989-2000	>=2001
appartement	15	30	60	90
tussenwoning	15	30	50	80
hoek/2-1 kap	15	30	50	80
vrijstaand	10	20	35	70

Figuur 9 Gemiddelde thermische traagheid, τ [h], van diverse bouwjaarklassen en woningtypen in Nederland, volgens (Van den Ham & Van der Vliet, 2013)

De enige verklaring voor deze waarden die we konden vinden in deze studie zijn de volgende richtwaarden (Van den Ham & Van der Vliet, 2013, p. 7):

van [h]	tot [h]	geïsoleerd	constructie
5	20	slecht of matig	licht
20	40	slecht of matig	zwaar
30	70	goed	licht
70	160	goed	zwaar

Figuur 10 Richtwaarden voor thermische traagheid van diverse soorten woningen in Nederland
Bron: (Van den Ham & Van der Vliet, 2013); zie ook Figuur 7

We hebben slechts één studie kunnen vinden waarin de thermische traagheid van Nederlandse woningen is berekend aan de hand van een analyse van monitoringdata; een afstudeerscriptie van de TU Delft (Vosmer, 2018) waarin gebruik is gemaakt van monitoringdata van 1319 woningen met een Toon slimme thermostaat geworven uit de 'Toon innovators' gebruiker community. De berekende gemiddelde thermische traagheden in deze studie variëren van 40 h tot 71 h (tweede kolom in onderstaande tabel), wat met name bij oudere woningen flink scheelt met de getallen die Milieu Centraal hanteert op basis van (Van den Ham & Van der Vliet, 2013):

Tabel 13 Thermische traagheid berekend uit monitoringdata van 1319 woningen met een Toon thermostaat (Vosmer, 2018)

Bouwjaarklasse	(gewogen) gemiddelde thermische traagheid [h] volgens <i>Milieu Centraal</i>	Gemiddelde thermische traagheid [h] volgens (Vosmer, 2018)
Vóór 1976	14	40
1976 -1988	28	50
1989 - 2000	49	57
2000 of later	80	71

i. Gevoeligheidsanalyse

We hebben een eenvoudige gevoeligheidsanalyse gedaan om te kijken bij welke wijziging van factoren de uitkomst van de besparingsberekening meer dan 1%-punt wijzigt.

De gevoeligheidsanalyse hebben we uitgevoerd aan de hand van een voorbeeldwoning en voorbeeldscenario met de volgende kenmerken:

- Bouwjaar: 1999;
- Gebruiksoppervlak: 211 m²;
- Gasjaarverbruik: 1493 m³;
- Specifiek warmteverlies: 246 W;
- Thermische traagheid¹²: 91 h;
- Stookonderbreking: 10 uur.

Met de formule voor de reductiefactor uit NEN 7120 (zie paragraaf g) levert dit een reductiefactor van 0,981 op, oftewel een besparing van $(1-0,981=)$ 1,9% op de effectieve stooklast. Tijdens het stookseizoen is het aandeel dat de cv-ketel moet leveren aan de warmtewinst in dit huis 68%. Dit betekent dat de besparing op het gasverbruik in het voorbeeldscenario $(1,9\%/68\%=)$ 2,8% is.

Vervolgens hebben we de absolute en de relatieve wijzigingen berekend in diverse factoren die nodig zouden zijn om met alleen die waarde 1%-punt meer of 1%-punt minder gas voor ruimteverwarming te besparen met een stookonderbreking.

We bespreken hieronder de factoren in volgorde van afnemende relatieve gevoeligheid.

De gevoeligheidsgrens van 1%-punt / 1%-punt minder gasbesparing *is het eerst bereikt* bij onderstaande factoren; van al deze factoren lijkt het van groot belang om ze met een nauwkeurigheid (ruim) binnen de onderstaande grenzen in te schatten voor een woning. Dit betekent waarschijnlijk dat we hiervoor metingen moeten verrichten.

- Een dagelijkse stookonderbreking die 1,5 h langer / 1,6 h korter is dan de basiswaarde van 10 u (+15% resp. -16%);
- Een thermische traagheid die 21 h korter / 31 h langer is dan de basiswaarde van 91 h (-23% / +42%);
- Een gasverbruik dat 922 m³ groter / 1052 m³ kleiner is dan de basiswaarde van 1493 m³ (+62% / -70%).

¹² De gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd voor een woning (met code 3) en met een eenvoudige versie van de methode uit paragraaf 2.1.4 en 2.1.5. In de definitieve methode zijn de waarden iets anders geleerd, maar we hebben de gevoeligheidsanalyse niet opnieuw gedaan.

Bijlage B. Interviews

Remeha, 19-10-2018
Athom, 02-11-2019
Zutphen Energy, 09-11-2018
Quby, 21-12-2018
ATAG, 18-01-2019
BZK, 21-01-2019