

VAN HAARD TOT HIGHTECH-HEATING

Een essay over de ontwikkeling van de kosten van warmte-oplossingen vanuit het perspectief van de Nederlandse maakindustrie.

Peter Cool - December 2020



WOORD VOORAF

Als bestuurder van de Nederlandse Verwarmingsindustrie en technisch directeur van Intergas, houd ik mij dag in dag uit bezig met de warmtetransitie van de gebouwde omgeving. Ik merk dat de verduurzaming van onze warmtesystemen veel discussies losmaakt. De aankondiging van energiebedrijven om de cv-ketel in de ban te doen, de steeds weer oploeiende discussies over biomassa en de problemen met de elektriciteitsnetten, zorgen voor veel maatschappelijke onrust.

Niet alleen huiseigenaren maken zich zorgen. De Verwarmingsindustrie krijgt ook veel vragen over duurzaam verwarmen van installateurs, beleidsmedewerkers en (lokale) politici, terwijl dit juist de partijen zijn die lokaal de warmtetransitie vorm moeten geven.

Daarom heb ik dit essay geschreven, waarin de kosten van warmte-oplossingen vanuit historisch en technologisch perspectief worden beschouwd. Met specifieke aandacht voor de drie warmtestrategieën die centraal staan in het Klimaatakkoord: warmtenetten, all-electric en hybride verwarmingssystemen.

De snelle lezer vindt op de volgende pagina een korte samenvatting.

Peter Cool
Bestuur NVI



SAMENVATTING

Geschiedenis HR-ketel

- De focus op energiebesparing na de oliecrisis van de zeventiger jaren heeft geleid tot halvering van het gasgebruik. Van 3100 m³ per huishouden in 1982 tot 1400 m³ in 2015.
- De besparing is gerealiseerd door betere nieuwbouw, isolatie en de introductie van de HR-ketel. De HR-ketel heeft bijna de helft van deze besparing gerealiseerd (750 m³).
- Hoewel de eerste HR-ketels al in de jaren '80 werden geïntroduceerd, kwam de markt pas op gang door subsidieregelingen in de jaren '90.
- De massafabricage-leercurve heeft geleid tot product- en prijsoptimalisaties, zoals gebruikelijk bij mechatronische producten (wasmachines, koelkasten, etc.), resulterend in meer dan halvering van de prijs.
- Door de grootschalige toepassing van HR-ketels beschikt Nederland vandaag de dag over een van de meest hoogwaardige verwarmingsindustrieën ter wereld. Een unieke exportmarkt voor landen die juist kiezen voor aardgas als transitiebrandstof. Niet voor niets zijn de Nederlandse fabrikanten zelf uitgegroeid tot een multinational (BDR-Remeha) of nemen deze een leidende positie in een internationale groep in (Nefit, Intergas, ATAG).

HR-hybride

- De HR-hybride is een recente innovatie van deze unieke maakindustrie en maakt zowel gebruik van een warmtepomp als een HR-ketel. De warmtepomp verwarmt het huis bijna het gehele jaar. De HR-ketel verwarmt het huis in de paar weken dat het echt koud is, verzorgt warm tapwater en doet dienst als back-up als het stroomnet overbelast raakt.
- De HR-hybride kan 60 tot 80 procent gas besparen. Bij grootschalige introductie van de HR-hybride, bijvoorbeeld op het vervangingsmoment van de HR-ketel, wordt het klimaatdoel voor 2030 relatief gemakkelijk gehaald. De restvraag naar gas kan na 2030 met duurzaam gas of in combinatie met batterij- en opslagtechniek ingevuld worden.
- Het klimaatdoel 2030 kan gehaald worden met de installatie van 1,7 miljoen HR-hybriden
- Een blik op het verleden laat zien dat alleen de HR-hybride een soortgelijk potentieel heeft als de HR-ketel in de jaren '90. Ook de HR-hybride is een mechatronisch product dat bij massafabricage flink in prijs zal dalen, zodat na het volgroeien van de markt, zonder subsidie, de HR-hybride verhoudingsgewijs net zo betaalbaar wordt als een HR-ketel. Met de HR-hybride blijven alle opties open, van all-electric tot waterstof.

Warmtenetten

- Warmtenetten bestaan uit erg veel materiaal om de warmte te transporteren van de bron naar de woningen (buizen, isolatie, bijverwarming tussenstations, pompen). De aanlegkosten zijn hierdoor hoog.
- De businesscase van warmtenetten kan uit als er sprake is van een warmtebron met goedkope, duurzame warmte of als het net aangesloten kan worden op een bestaande blokverwarming vanwege de lagere aanlegkosten.

All-electric warmtepompen

- Volledig elektrische warmtepompen zijn praktisch alleen toepasbaar bij zeer recent gebouwde woningen vanwege de hoge isolatievereisten. Het 200-300 liter tapwater vat voor douchewater neemt veel ruimte in beslag en maakt de installatie kostbaar.
- Bovendien is het bestaande elektriciteitsnet voorlopig niet gereed voor grootschalige installatie van elektrische warmtepompen.
- De volledig elektrische warmtepompen met voorraadvat hebben nauwelijks potentieel tot prijsdaling.

HRe-hybride

- De HR-hybride zou op termijn opgevolgd kunnen worden door de HRe-hybride. Dit is een vorm van de hybride waarbij de warmtepomp in combinatie met batterijtechniek en opslag- en terugwintechniek de benodigde warmte voor de woning opwekt. Er is dan geen gas als brandstof meer nodig.

Isolatie middels data

- Tot op heden zijn inzichten in de isolatie van woningen gebaseerd op aannamen en rekenmodellen. De praktijk wijkt nogal eens af. Door Intergas is een cloud oplossing gebouwd die real time inzicht geeft in de isolatie van 70.000 woningen middels meting. Dit kan door data van het verwarmingstoestel, de weersomstandigheden en het kadaster te combineren. Hiermee kan de bewoner inzicht krijgen in de isolatie van zijn woning en kunnen anderen op buurt- en wijkniveau inzicht krijgen. Middels dit inzicht kan ook snel geleerd worden wat wel en niet effectief is qua isolatie en kan ook vastgesteld worden of de isolatie goed is aangebracht.

Conclusie

- Met isoleren op basis van data en de HR-hybride is een betaalbare warmtetransitie mogelijk. Op de HR-hybride kan verdere elektrificering volgen in de vorm van een HRe-hybride of kan de restvraag naar gas kan worden opgelost middels groen gas, waterstof of een combinatie daarvan.

VAN HAARD TOT HIGHTECH-HEATING

Energie besparen, het beste voor klimaat en portemonnee

In de jaren die volgden op de wereldwijde oliecrises van 1973 kwam het energiedenken op gang. Energieprijzen waren omhooggeschoten. De aan de olieprijs gekoppelde prijs van aardgas ging richting de 1 gulden per m³. Vertaald naar nu zou dit ruim 1 euro zijn, 30% hoger dan de actuele prijs. Om de energiekosten te beteugelen en onze aardgasvoorraad ook voor de komende generaties veilig te stellen, is jarenlang beleid gevoerd op energiebesparing. Met de toegenomen milieu- en klimaatbewustheid verschoof de focus van het Nederlandse energiebeleid naar het verminderen van CO₂-uitstoot. Energiebesparing blijft echter de mooiste oplossing omdat het zowel de kosten als de uitstoot reduceert. Tegenover besparing staat echter materiaalgebruik. Isoleren en het winnen van energie kan alleen met materiaal. Het gaat er dus om oplossingen te verzinnen die met weinig materiaal en daarmee een beperkte investering een groot effect sorteren.

Het gebruik van aardgas is ruimschoots gehalveerd

Dit energiebesparingsbeleid is met betrekking tot aardgas enorm succesvol geweest. Zo is in de periode van 1982 tot 2015 het gasgebruik per woning meer dan gehalveerd van 3100 m³ tot 1400 m³ per jaar [1,2, bijlage 1]. Naast een miniem gebruik van gas voor koken, van ongeveer 5%, wordt het grootste deel gebruikt voor verwarming en warm water. Door betere nieuwbouw, isolatie (dubbel glas) van de bestaande bouw en de introductie van de HR – hoog rendement – ketel is deze ruime halvering van het gasgebruik gerealiseerd. In vergelijking met de huidige discussies over de transitie van de gebouwde omgeving is deze besparing geruisloos verlopen. Terwijl destijds veel woningen nog voorzien waren van een gashaard of gasketel met open verbranding en de komst van de HR-ketel een kleine verbouwing met zich bracht. Dit komt omdat er geen grote financiële offers gevraagd werden. Sterker nog, als nu het gemiddelde huishouden het bovengenoemde gasgebruik uit 1982 zou hebben, zou het gasaandeel van ongeveer 1000 euro in de energierekening verdubbelen. Als dit wordt afgezet tegen de, hieronder toegelichte 1500 euro voor de aanschaf en installatie van een HR-ketel, dan wordt duidelijk welk voordeel er ongemerkt in de tijd is ontstaan.

De vraag is of de geruisloze besparing van aardgas zoals die de afgelopen dertig jaar heeft plaatsgevonden, de komende decennia met hetzelfde tempo kan plaatsvinden. Dan komen we uit op nul. Het navolgende laat zien dat, met een aanpak overeenkomstig het verleden, het antwoord hierop 'Ja' is.

Het gebruik van elektriciteit is gelijk gebleven

Het gebruik van elektriciteit is de afgelopen dertig jaar globaal hetzelfde gebleven; rond de 3000 kWh per woning per jaar [2, 5]. Veel elektrische apparaten zijn wel minder energie gaan gebruiken maar het aantal apparaten is enorm toegenomen. Een trend die nog lang niet ten einde is.

De ongeveer 1400 m³ gas [bijlage 1], die een gemiddeld huishouden momenteel verbruikt, staat gelijk aan 14000 kWh aan elektriciteit, terwijl een gemiddeld huishouden 3000 kWh verbruikt. De benodigde energie voor verwarming en warm water is dus ruim viermaal zoveel als voor alle overige elektrische apparaten bij elkaar.

Het elektrisch verwarmen van huizen heeft hiermee een enorme impact op onze elektriciteitsnetten, nog afgezien van de vraag naar meer elektriciteit voor bijvoorbeeld elektrisch rijden. Verder is het grootste deel van het energiegebruik voor verwarming geconcentreerd in enkele maanden. Het verschil in de benodigde capaciteit tussen het gas- en elektriciteitsnet is dus nog veel groter dan de het viervoudige verschil in hoeveelheid. Elektrisch verwarmen gaat gepaard met een, op korte termijn, onmogelijke opgave voor de netbeheerders.

Energiebesparingsdenken en de Nederlandse maakindustrie

Na de oliecrisis werkten de industrie en verschillende instanties samen om het rendement van verwarmingstoestellen te verhogen. Het door de overheid gestimuleerde energiebesparingsonderzoek, dat onder meer bij de Gasunie en het Gasinstituut (nu Kiwa) plaatsvond, droeg bij aan de marktintroductie van de hoog rendement verwarmingsketels rond 1980.

Omdat in de jaren die volgden de gas- en olieprijsen weer daalden werden de HR-ketels in het begin niet goed verkocht. De hogere prijs van de toestellen woog niet op tegen het betere rendement. Pas na het instellen van subsidieregelingen kwam de markt rond 1990 op gang. De prijs van een HR-ketel lag toen rond de 3000 gulden bij een gewicht van ongeveer 70 kg. Met een inflatiecorrectie van 2% komt dit overeen met ongeveer 2500 euro nu. De afgelopen dertig jaar zijn de HR-ketels, zowel in prijs als prestatie, enorm verbeterd. Door ontwerp optimalisatie, de toepassing van digitale elektronica en nieuwe productietechnieken is integratie en gewichtsvermindering gerealiseerd. Anno 2020 weegt een toestel ongeveer 30 kg en is de consumentenprijs rond de 1000 euro (exclusief installatiekosten). De meeste fabrikanten maken inmiddels hun derde of vierde generatie toestellen.

Het Nederlandse energiebesparingsdenken en de conversie van de markt, als eerste ter wereld, naar HR-ketels hebben de Nederlandse maakindustrie geen windeieren gelegd. Een aantal van de bedrijven die destijds meer het karakter hadden van een gieterij of smederij, hebben zich ontwikkeld tot technisch hoogwaardige maakbedrijven die een groot deel van hun productie exporteren. De bedrijven zijn zelf uitgegroeid tot een multinational (BDR Thermea, Remeha) of hebben een leidende positie in een internationale groep (Nefit, Intergas en ATAG).

Leercurve massafabricage en productprijs

Een door buitenstaanders niet waargenomen of sterk onderschat fenomeen is de leercurve van de massa fabricage. De prijs van een nieuw product kan, na succesvolle introductie op de markt, met toenemende aantallen sterk naar beneden worden gebracht.

Bij in massa gefabriceerde producten zijn de materiaalkosten en de kosten van de bewerkingen dominant. Dit zijn de kosten die voor ieder exemplaar gemaakt worden. Alle andere kosten, zoals bijvoorbeeld de kosten voor onderzoek en ontwikkeling, worden gedeeld door het grote aantal van de producten. Productoptimalisatie waarbij het materiaalgebruik wordt teruggebracht en de bewerkingen worden vereenvoudigd of geautomatiseerd kan bij grote aantallen veel voordeel opleveren.

Daarnaast vallen in een vrije markt met stijgende aantallen de minder efficiënte fabrikanten af, waardoor het potentieel voor kostenbesparingen voor de overblijvende fabrikanten toeneemt. Het motto van product en fabricage optimalisatie voor grote aantallen is dan ook: massa is kassa (zowel voor de consument als de fabrikant).

De HR-ketel is een typisch voorbeeld van een in massa geproduceerd mechatronisch product. Dit is een samenstelling van metalen, kunststoffen, elektronica en software. Producten met een groot aandeel metaal en kunststof hebben, na het doorlopen van de massafabricage leercurve, een consumentenprijsratio van 10 tot 30 euro per kg. Bij het doorlopen van de leercurve wordt het ontwerp afgeslankt, waar mogelijk geïntegreerd en afgestemd op massafabricage. Vanuit bedrijfseconomisch- en kwaliteits-perspectief is het beter pas te investeren in de massafabricage als de markt groeit naar grote aantallen. Het gebruik en de prestatie in de praktijk zijn altijd anders dan vooraf gedacht. De eerste marktervaring kan worden meegenomen bij de ontwerpverbeteringen. De latere generaties van het massafabricage product hebben, als de leercurve goed doorlopen wordt, zowel een betere prijs als een betere prestatie (twee aspecten waarvan doorgaans gedacht wordt dat ze tegengesteld zijn).

In onderstaande tabel zijn voorbeelden van in massa geproduceerde producten opgenomen, met het gewicht, de consumentenprijs en de prijsratio. Het zijn globale getallen betrokken op het product zelf en niet op de eventuele installatiekosten.

| Product | Gewicht [kg] | Consumenten-prijs [Euro] | Prijsratio [Euro/kg] | Opmerking |
|-------------------------|--------------|--------------------------|----------------------|------------------------------|
| Fiets | 20 | 200 – 400 | 10 – 20 | A en B merken |
| Wasmachine | 80 | 800 | 10 | Gangbaar A merk |
| Koelvries Combinatie | 80 | 800 | 10 | Gangbaar A merk |
| Zonnepaneel op frame | 22 | 275 | 12,5 | Gewicht en prijs per m2 |
| Volkswagen Golf | 1250 | 25.000 | 20 | Incl Ass. Excl. BPM |
| HR-ketel | 33 | 1000 | 30 | |
| Fiets Elektrisch | 25 | 2000 | 80 | Begin fabrikageleercurve |
| Porsche 911 | 1600 | 120.000 | 75 | Luxe en Extreme Spec. |
| Volkswagen ID3 | 1950 | 45.900 | 24 | Elektrisch 77 kWh, incl Ass |
| HR-ketel 1990 | 70 | 2470 | 35 | Begin fabrikageleercurve |
| Warmtepomp met Watervat | 200 | 8.000 | 40 | Niet verkleinbaar |
| HR-hybride | 85 | 4.000 | 47 | Incl. ketel, begin leercurve |

Bij het beoordelen van het ontwikkelingsstadium van een massafabricage product is het zaak te kijken naar het gewicht, de potentie tot afname daarvan en de prijsratio.

De cijfers in de tabel van de Volkswagen ID3 in vergelijking met de Golf laat de opgave van de elektrische auto zien: de fabricage is wel efficiënt maar de batterijen zijn eigenlijk nog te zwaar. Batterijen volgen de wet van Moore (hieronder). De verwachting is dat rond 2030 dezelfde capaciteit uit het halve gewicht wordt gehaald, waarmee de prijs dan ook halveert. De prijs van een elektrische auto zal tegen die tijd gelijk zijn aan die van een brandstofauto.

Uit de tabel blijkt dat met de HR-ketel al iets soortgelijks is gebeurd. De prijsratio is verbeterd maar de grote winst was de afname in gewicht met als gevolg een aanzienlijke (kost)prijzdaling.

De enorme aantallen van witgoed producten en de homogene open markt laten zien tot welke waarde de prijsratio, zelfs voor een luxe A merk (Miele), kan dalen. Een enorme prestatie omdat de ruwe onbewerkte basismaterialen in de prijsrange 0,6 tot 6 euro/kg zitten.

Een hoge prijsratio kan naast niet geoptimaliseerde fabricage wijzen op een gesloten en exclusieve markt. In dergelijke situaties kunnen winstmarges hooggehouden worden en blijven inefficiënte distributie en fabricage in stand.

Door het grote gewichtsaandeel van elektronische hardware is de prijsratio van mobiele telefoons en computerapparatuur een andere dan die van de producten in tabel.

Wat betekent voorgaand inzicht voor de verschillende oplossingen in het kader van de energietransitie?

HR-hybride

De HR-hybride is een HR-ketel in combinatie met een kleine warmtepomp. De warmtepomp verzorgt het grootste deel van het jaar de verwarming. De ketel maakt het warme tapwater en neemt de warmtevoorziening over op die paar dagen dat de temperatuur vlak boven, of onder het vriespunt zit. Daarnaast kan de ketel de warmtevoorziening overnemen als de elektriciteit niet beschikbaar of erg duur is. Een verschijnsel waar we, door de toenemende fluctuaties en belasting van het elektriciteitsnet, de komende jaren mee geconfronteerd gaan worden.

Net als bij de HR-ketel van destijds is er nog een groot potentieel tot productoptimalisatie: het integreren van onderdelen zodat het product lichter wordt. Aan het einde van de massafabricage leercurve zal het gewicht naar verwachting uitkomen op 65 kg. Met een prijsratio van 30 euro/kg komt de marktprijs dan op 1950 euro. Noodzakelijke voorwaarde is dat de massa markt voor de hybride ook echt ontstaat. De betrekkelijk eenvoudige installatie van de hybride laat zich vergelijken met de overgang naar de HR-ketel van destijds. De overgang naar de HR-ketel ging gepaard met het aanpassen van de rookgasafvoer en installeren van een condensafvoer. In het geval van de HR-hybride systeem komt er een buitenunit bij, die bijvoorbeeld tegen de muur, bij de berging of dakkapel geplaatst kan worden. Het warmtepompdeel kan ook middels grote buizen met de buitenlucht worden verbonden. In vergelijking met een volledig elektrische oplossing is slechts een minimale aanpassing aan de woning vereist. Afhankelijk van de situatie kan met de HR-hybride 60 tot 80% gas bespaard worden [bijlage 1].

Zoals uitgewerkt in de bijlage 1 kan het klimaatdoel 2030, voor de particuliere huishoudens, met de installatie van 1,7 miljoen HR-hybriden gehaald worden (op een totaal van tegen die tijd 8,5 miljoen huishoudens, extrapolatie tabel bijlage).

Met de huidige digitale techniek kan de energie-efficiency van woningen en wijken real-time worden gevolgd, zodat het succes van besparingsmaatregelen direct inzichtelijk is. Een installatie met een HR-hybride heeft ook regeltechnische mogelijkheden om de energiegebruikskosten te optimaliseren door slim in te spelen op de variatie van de buitentemperatuur en energieprijzen. Net als in de automobieltchniek zullen voor service, onderhoud en instelling van de hybride online diensten beschikbaar komen.

Hieronder wordt toegelicht dat de hybride met de te verwachten vooruitgang op het gebied van batterij- en warmte opslagtechnieken doorontwikkeld kan worden tot een volledig elektrisch toestel. Het grote voorraadvat voor warm water, dat nu nog nodig is voor een volledig elektrische oplossing, wordt dan overbodig. De restvraag naar gas van de hybride kan ook met groen gas of waterstof worden ingevuld. Met de hybride blijven alle opties naar de toekomst open.

De hybride route is eenvoudig in vergelijking met andere warmte-oplossingen. Er is weinig materiaal nodig. De installatiekosten zijn beperkt omdat alleen het toestel geplaatst hoeft te worden en er geen verdere aanpassing van de woning nodig is. De hybride leent zich uitstekend voor massafabricage en er is nog een groot potentieel aan gewichtsvermindering en daarmee (kost)prijisverbetering.

Warmtepomp met voorraadvat

Middels een warmtepomp met een groot voorraadvat voor warm water kan een woning volledig elektrisch verwarmd worden. Een warmtepomp onttrekt warmte aan de buitenlucht of aan de bodem. Hier is wel energie in de vorm van elektriciteit (of gas) voor nodig. Als alle elektriciteit groen wordt opgewekt is de warmtepomp voor het klimaat een goede oplossing. Omdat het relatief moeilijk is om warmte aan de lucht of de bodem te onttrekken is er veel oppervlak en daarmee veel materiaal nodig. Zoals blijkt uit de tabel is een all electric warmtepomp voor een woning veel zwaarder dan een cv-ketel. Daar komt de veel lagere capaciteit nog eens bovenop. Een warmtepomp met eenzelfde vermogen als een cv-ketel zou echt veel te groot en te zwaar worden. Het, ondanks het hoge gewicht, beperkte vermogen heeft gevolgen voor de woningisolatie en de warmwatervoorziening.

Om een warmtepomp in een bestaande woning te kunnen installeren zal de kwaliteit van de isolatie op het niveau van een nieuwbouwwoning gebracht moeten worden. Een zeer kostbare en tijdrovende operatie die meestal gepaard zal gaan met volledige ontruiming. Zeker voor woningbouwverenigingen een zeer kostbare operatie omdat de bewoners tussentijds elders gehuisvest moeten worden. Andere problemen van de all-electric oplossing zijn de plaatsing van een groot 200-300 liter warmwatervat voor het douchewater en het benodigd elektrisch aansluitvermogen. Massale toepassing van all-electric warmtepompen is voor het elektriciteitsnet en de elektriciteitsopwekking niet haalbaar (zie voornoemd verschil tussen hoeveelheden energie voor verwarming en elektriciteit). In veel woningen zal plaatsing van een 200-300 liter warmwatervat niet goed mogelijk zijn. Tenslotte is het potentieel aan vermindering van het gewicht van de warmtepomp met het grote voorraadvat voor het warme water vrijwel nul. Bij de fabricage in grotere hoeveelheden en onder druk van competitie zal de prijsratio volgens de tabel wel naar beneden kunnen tot 30 euro, maar het product zal omvangrijk en zwaar blijven waardoor de uiteindelijke prijs hoog blijft. Verder zijn de installatie- en servicekosten van een groot en zwaar product natuurlijk ook veel hoger.

Batterij- en warmteopslagtechniek

De basis van misschien wel alle technische vooruitgang is dat de mensheid in staat is om materialen tot op steeds kleinere afmetingen te beheersen. Met de stoommachine was vliegen niet mogelijk maar met de compactere verbrandingsmotor kon dit wel. Met de elektronenbuis en later de transistor konden de radio en televisie gerealiseerd worden maar de PC, internet en mobiele telefonie werden pas mogelijk door de chip, die bestaat uit de integratie van transistoren op silicium. Steeds kleiner en efficiënter is de basis van vooruitgang. Het adagium voor de technische vooruitgang is dan ook: less is more. Het Nederlandse ASML is de wereldleider in deze verkleiningsrace: 80% van alle chips wordt momenteel geproduceerd op een machine van ASML. De afmetingen van de transistoren op de chip zijn inmiddels afgenomen tot op 7 nanometer (= 7 miljoenste millimeter). Dit wil dus zeggen dat de chip-productiemachine met deze nauwkeurigheid moet werken. Machinebouw met een alles overstijgende prestatie.

Het verband tussen de alsmaar betere machines waarmee materiaal tot op steeds kleinere afmetingen kan worden beheerst is in 1965 opgemerkt door Gordon Moore. De naar hem vernoemde wet – de wet van Moore – zegt dat door technologische vooruitgang er steeds na twee jaar twee keer zoveel rekenkracht in een computerchip met gelijke afmeting gerealiseerd kan worden en daardoor voor dezelfde prijs [3]. Voor computerchips geldt deze wetmatigheid al sinds 1958.

Voor aan de chiptechnologie gerelateerde componenten die in massa worden gemaakt geldt doorgaans een variant op de wet van Moore. De kosten dalen dan met een ander tempo. Voorbeelden in het kader van de energietransitie zijn zonnecellen en Li-ion batterijen. Zo zullen de productiekosten van de Li-ion batterijen, als de trendlijn zich doorzet, dalen tot globaal 50 euro per kWh in 2030 en dan is het einde nog niet in zicht. In plaats van een groot en zwaar warmwatervat van 200 liter kan er dan ook uitgegaan worden van een veel compacter batterijpakket. Een pakket met 15 kWh en daarmee een 2030 fabricage kostprijs van 750 euro en globaal 1500 euro aanschafprijs voor de consument, zou het warmwatervat kunnen vervangen. Het batterijpakket geeft nog andere mogelijkheden. De huidige salderingsregeling wordt vanaf 2023 afgebouwd. Verder zullen door toenemend stroomgebruik en het gebruik van zonnepanelen en windmolens zowel de belasting van als de fluctuaties op het elektriciteitsnet enorm toenemen. Iedere woning een batterijpakket zou enorm helpen om de belasting op het net uit te smeren over de tijd en in te spelen op de te verwachten variabele stroomprijs. Naast onderzoek en ontwikkeling naar nieuwe batterij oplossingen vindt er momenteel veel onderzoek plaats naar compacte warmte-opslag. Hierin kan overtollige warmte voor later gebruik worden opgeslagen. Daarmee kan dan bijvoorbeeld de hybride efficiënter ingezet worden door deze zoveel mogelijk bij hogere buitentemperaturen te laten opereren. De HR-hybride kan op termijn opgevolgd worden door de HRe-hybride. Dit is een vorm van de hybride waarbij de warmtepomp in combinatie met batterijtechniek, warmte-opslag en terugwinning de benodigde warmte voor de woning opwekt.

De restvraag naar gas van de HR-hybride zal bestaan uit de vraag verbonden aan het maken van warmwater, aan de periode dat het buiten koud is en aan de momenten dat elektriciteit niet beschikbaar of erg duur is. Zoals hiervoor aangegeven kan de te verwachten ontwikkeling van de batterijtechniek deze restvraag oplossen. Andere mogelijkheden zijn groen gas of waterstof (of combinaties daarvan). Het unieke van gas is dat het naast energie ook kan dienen als opslag. Het kan in een tank of zoutcaverne gemakkelijk een lange periode bewaard worden. In het noorden van het land vindt dit al decennialang plaats om vraag en aanbod van aardgas of waterstof voor de industrie te balanceren [4, p11]. In kostenbeschouwingen wordt dit batterij-aspect van groen gas of waterstof doorgaans over het hoofd gezien. De extra waarde boven de energetische waarde van groen gas of waterstof is dat het goedkoop bewaart en ingezet kan worden op die momenten dat er geen elektriciteit is.

Op het gebied van energieopslag, isolatie (vacuümglas) en warmte(terug)winning is nog veel mogelijk. De beste aanpak is nu te kiezen voor transitie-oplossingen met minimale kosten en lage investeringen.

Warmtenetten

Een warmtenet is een stelsel van geïsoleerde waterleidingen en elektrische pompen waarmee warm water naar woningen wordt getransporteerd. Omdat er, in vergelijking met de stroom door een elektriciteitsleiding of de gasmoleculen door een gasbuis, veel water nodig is bestaat het warmtenet uit dikke buizen met veel isolatiemateriaal. De grote hoeveelheid materiaal die nodig is, in combinatie met de grote hoeveelheid bodem die verplaatst moet worden, zorgen ervoor dat de aanlegkosten hoog zijn.

In tegenstelling tot de andere oplossingen wordt in het geval van een warmtenet het materiaal ingezet om energie te transporteren in plaats van het eigenlijke doel: energie besparen of opslaan. Vanuit het perspectief van de maakindustrie en circulariteit is dit een minder efficiënte inzet van arbeid en materiaal.

Toch kan de businesscase van een warmtenet uit, als er sprake is van een blijvend goedkope en duurzame warmtebron. De meeste warmtenetten die nu in gebruik zijn, zijn afhankelijk van industriële restwarmte, warmte van afvalverbrandingsinstallaties, biomassa-centrales of ketelhuizen die gebruik maken van aardgas. Over de kosten en bodemeffecten van nieuwe duurzame warmtebronnen, als geothermie is nog veel onduidelijk. Uit pilots en proefprojecten zal blijken welke rol geothermie zal spelen bij het verduurzamen van de gebouwde omgeving.

Een bijzondere klasse zijn de zogenaamde lage temperatuur warmtenetten. Een dergelijk net laat zich vergelijken met een stromende bron voor een warmtepomp (warmtepompen worden ook wel aangesloten op sloten en rivieren). Het voordeel hiervan is dat de warmtepomp relatief licht geconstrueerd kan worden omdat de warmte veel makkelijker aan stromend water dan aan lucht onttrokken kan worden. Bovendien heeft een lage temperatuur warmtenet het voordeel van de optie tot koeling.

De hoge investering (en materiaalgebruik) van de aanleg en beheer van het net zal moeten opwegen tegen de lagere kosten van de warmte.

Installatiekosten

In de voorgaande tabel zijn globale consumentenprijzen en gewichten opgenomen. In het geval van de HR-ketel, de hybride en de warmtepomp komen daar nog installatiekosten bij. Voor het installeren van zwaardere en grotere apparaten zijn meer arbeidsuren nodig.

De product-leercurve is ook van invloed op de installatietijden. Apparaten van een tweede of volgende generatie waarin ervaring van installateurs is verwerkt zijn sneller te installeren. Momenteel worden de volgende getallen genoemd voor installatiewerk in de bestaande bouw: vervanging HR-ketel 6 manuur, installatie hybride 24 manuur en voor de installatie van een all-electric warmtepomp met voorraadvat 56 manuur. Bij deze laatste spelen met name de afmetingen en de wijziging van de bestaande installatie een grote rol in het aantal uren. Voor de hybride en de warmtepomp met voorraadvat kan in het geval van een moeilijke situatie daar nog een behoorlijk aantal uren bijkomen. Het installatie-uurtarief ligt momenteel rond de 70 euro (incl BTW). Naast arbeidskosten zijn er materiaalkosten die momenteel in het geval van een hybride een 500 euro bedragen en in het geval van een all-electric nog veel hoger uitvallen.

Meten is weten; de datagedreven energietransitie

De in het voorgaande beschreven vooruitgang van de chiptechnologie is de drijvende kracht achter de verschuiving naar data. Tot op heden zijn inzichten in de isolatie en energieprestatie van woningen, door gebrek aan meetmogelijkheden, gebaseerd op aannamen en rekenmodellen. Hiermee gemaakte berekeningen worden gebruikt bij de bouwaanvraag van een woning of voor het maken van het energielabel. De ervaring leert echter dat de praktijk nogal eens afwijkt.

Door Intergas is een cloud gebouwd waarop momenteel 70-duizend verwarmingstoestellen zijn aangesloten die iedere 15 seconden energie en andere data doorgeven. De cloud is de centrale verbinding van een systeem bestaande uit toestel, thermostaat en app waarmee de bewoner zijn toestel op afstand kan bedienen. Door de data van het verwarmingstoestel, de weersomstandigheden en het kadaster te combineren kan de bewoner inzicht krijgen in de isolatie van zijn woning en kunnen anderen op buurt en wijkniveau inzicht krijgen. Middels dit inzicht kan ook snel geleerd worden wat wel en niet effectief is qua isolatie en kan ook vastgesteld worden of de isolatie goed is aangebracht.

Dat er veel mogelijk is met betaalbare vormen van isolatie laat het voorbeeld in bijlage 2 zien. Een dertiger jaren twee-onder-een-kapwoning is voor een bedrag van 1100 euro voorzien van spouwmuurisolatie. Uit de meetdata bleek dat dit 30% gasbesparing oplevert. Als dit voor een aantal woningen is gedaan dan kan er met zekerheid aangegeven worden wat de uitkomst moet zijn (controle van de aannemer en bevestiging voor de bewoner). Dit voorbeeld laat de enorme potentie van isolatie zien. Spouwmuur isolatie is makkelijk en kosteneffectief omdat de woning niet ontruimd hoeft te worden. Er zijn meerdere vormen van kosteneffectieve isolatie. Denk aan kruipruimtefolie, afwerking kozijnen, deurposten, zolder/dak isolatie en nieuwe vormen van glas.

Het voorgaande voorbeeld laat ook de ongekende mogelijkheden van data zien. Data die in dit geval meekomt met de aansluiting van een thermostaat met een app. Voor een minimum aan kosten wordt de energieprestatie van de woning bepaald en kan er van verbeteringen snel worden geleerd.

Het middels meetdata snel bepalen wat wel en wat niet werkt is een wijsheid uit de productontwikkeling die bekend staat als: fail fast and learn fast. Op zijn Hollands is het: meten is weten.

De volgende stap is het doorontwikkelen van de cloud naar een algemeen energieprestatie-instrument voor de gebouwde omgeving. Dit geldt ook voor de gekoppelde energiekartaar, die live-streaming op buurt- en wijkniveau de energieprestatie zichtbaar maakt.

Overweging en Conclusie

De consumentenprijs voor een nieuwe HR ketel is momenteel ongeveer 1000 euro, samen met 500 euro voor klein materiaal en arbeid, komt de vervanging van een toestel op totaal 1500 euro.

Van de hiervoor geschetste oplossingen heeft alleen de HR-hybride een soortgelijk potentieel als de HR-ketel destijds. Door de massafabricage-leercurve, competitie en de eenvoudige plaatsing zal de prijs voor de consument, na een overgangperiode, net als destijds bij de HR-ketel, nog aanzienlijk kunnen dalen.

Uitgaande van gewichtsverbetering en de prijsratio zal deze prijsdaling een traject doorlopen van een 4000 euro nu tot uiteindelijk een 2000 euro in een ontwikkelde massamarkt. Daar komen dan de installatiekosten bovenop. Deze kosten zijn nu bij individuele installatie ongeveer 2000 euro maar kunnen door productverbetering en een leereffect bij de installatie nog wel dalen naar 1200 euro. Bij projecten zal dit nog verder naar beneden kunnen. De totaalprijs van de HR-hybride inclusief installatie komt, als de leercurve is doorlopen en de markt is volgroeid, uit rond de 3200 euro. Dit is ongeveer 1700 euro meer dan bij de vervanging van een HR-ketel en dit is een bedrag dat naar verwachting wel in een redelijke termijn, die in combinatie met verlaging van de aanvoertemperatuur 6 jaar is, kan worden terugverdiend [bijlage 1]. Uiteindelijk zal dan hetzelfde effect optreden als bij de HR ketel: terug in de tijd kijkend is het een logische en rendabele oplossing.

De HR-ketel heeft 25% aardgasbesparing opgeleverd. Met de HR-hybride kan 60 tot 80% gas bespaard worden. Als er de komende 10 jaar 1,7 miljoen HR-hybriden geplaatst worden kan de klimaatafspraak 2030 voor de particuliere huishoudens, als onderdeel van de gebouwde omgeving, relatief eenvoudig en met lage kosten gehaald worden.

Vooruitgang wordt gekenmerkt door een almaar effectiever materiaalgebruik. Oplossingen met een laag gewicht en een hoge prestatie overwinnen. De evolutie van de techniek is gebaseerd op less is more. Zowel de leercurve massafabrikage als de ontwikkeling van de chiptechnologie zijn hierop gebaseerd. Effectief materiaalgebruik leidt tot de HR-hybride als de beste oplossing voor de energietransitie van de particuliere huishoudens. Batterijtechniek en zonnecellen volgen de kosten- en prestatieverbetering van de chiptechniek. In combinatie met de hybride kan, verder in de tijd, met nieuwe batterijproducten een all-electric HRe-hybride volgen. De restvraag naar gas kan echter ook met groen gas of waterstof worden opgelost. Met de hybride zijn de investeringen laag en blijven alle opties naar de toekomst open.

De beste energie is de energie die bespaard wordt. Door gebruik te maken van bigdata-techniek in combinatie met het verwarmingstoestel en de thermostaat is een cloudoplossing gebouwd die energiegebruik van de woning combineert met weersomstandigheden en kadastragegevens. Hiermee kan de bewoner inzicht krijgen in de isolatie van zijn woning en kunnen anderen op buurt- en wijkniveau inzicht krijgen. Hiermee kan snel geleerd worden wat wel en niet effectief is qua isolatie en kan ook vastgesteld worden of de isolatie goed is aangebracht.

Met isoleren op basis van data en de HR-hybride is een voor de particuliere huishoudens betaalbare warmtetransitie mogelijk. Op de HR-hybride kan verdere elektrificering volgen in de vorm van een HRe-hybride of kan de restvraag naar gas worden opgelost middels groen gas, waterstof of een combinatie daarvan.

Literatuur

- 1 De bediening van het centrale verwarmingssysteem in huishoudens.
Heijs, W. J. M., & Midden, C. J. H. (1995). Technische Universiteit Eindhoven.
- 2 Energietrends 2016, uitgave van ECN, Energie-Nederland en Netbeheer Nederland.
- 3 The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies,
by Erik Brynjolfsson and Andrew McAfee, W. W. Norton & Company, 2016
- 4 Waterstof – de sleutel voor de energietransitie, Ad van Wijk, Chris Hellinga, TU Delft, 2018
- 5 Nationale Energieverkenning 2017, Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN), Amsterdam/Petten 2017
- 6 Bouwstenen voor een betaalbare warmtetransitie in de gebouwde omgeving,
Discussiepaper, Stedin, Henri Bontenbal, Juli 2020
- 7 Kiwa Verklaring, Opwekkingsrendement verwarming en hulpenergie t.b.v. de NEN 7120,
Remeha Elga Ace 4kW, Rapportnummer 190701899, 31-01-2020
- 8 Het Klimaatakkoord: Effecten en Aandachtspunten, Policy Brief, PBL, 1 november 2019
- 9 Klimaatakkoord, Den Haag, 28 juni 2019 (www.klimaatakkoord.nl)
- 10 Energie besparen in de woningvoorraad: inzichten uit de Energiemodule WoON, abf research, 2018
- 11 Kiwa Verklaring, Opwekkingsrendement verwarming en hulpenergie t.b.v. de NEN 7120,
Daikin 4kW monobloc hybride EJHA04(A)V3, Rapportnummer 180301921, 23/12/2018

BIJLAGEN

Bijlage 1 - Berekening besparingen middels HR-hybriden.

Bij de berekeningen in deze bijlage wordt ervan uitgegaan dat 1 m3 Nederlands aardgas bij verbranding 9,8 kWh energie en 1,8 kg CO2 uitstoot geeft (<https://nl.wikipedia.org/wiki/Aardgas>). Berekeningen in de deze bijlage zijn overgenomen uit een python editor met decimale punt.

De onderstaande tabel geeft het gas-, elektriciteitsgebruik en het aantal huishoudens [2].

| Kerncijfers huishoudens (Bron: RVO) | 2000 | 2015 | Eenheid | Verandering 2015 / 2000 |
|---|------------|------------|------------------------------|-------------------------|
| Aantal inwoners per 1 januari | 15.863.950 | 16.900.726 | | 6,5% |
| Aantal huishoudens per 1 januari | 6.801.000 | 7.665.000 | | 12,7% |
| Aantal personen per huishouden | 2.3 | 2.2 | | -5,5% |
| Verbruik aardgas per huishouden | 1900 | 1432 | m ³ | -24,6% |
| Verbruik elektriciteit per huishouden | 3103 | 2966 | kWh | -4,4% |
| Verbruik motorbrandstoffen per huishouden | 1067 | 964 | liter benzine / diesel / LPG | -9,7% |

Het gasgebruik voor verwarming is momenteel 1100 m3 per jaar en dat voor tapwater ongeveer 300 m3, samen 1400 m3 per jaar (tabel en bijlage 2). De 1100 m3 gas voor verwarming komt overeen met een warmtelast van ongeveer 40 GJ ($1100 \cdot 9,8 \cdot 3,6 / 1000 = 39$).

Uit de Kiwa certificaten voor de hybriden van Remeha en Intergas [7, 11] zijn bij een ontwerp cv aanvoertemperatuur van 75 graden Celcius en de 40 GJ jaarlijkse warmtelast de volgende, nagenoeg gelijke, getallen te halen:

Energiefractie = 0,74 en COP = 3,6

De energiefractie is het deel van de jaarlijkse warmtelast dat geleverd wordt door de warmtepomp. De COP is het gemiddelde opwekkingsrendement van de warmtepomp. Van oudsher zijn in de bestaande bouw ontwerp cv-aanvoertemperaturen in de orde van 75 graden gehanteerd. Een aandeel van 74% in de warmteopwekking is volgens de energiefractie haalbaar voor het geval er niets aan de woning wordt veranderd. De gasbesparing is in dit geval:

$0,74 \cdot 1100 = 814$ m3 gas, op een totaal van 1400 m3 geeft dit bijna 60% besparing

Stel dat deze hybride gebaseerd op 75 graden aanvoertemperatuur en 814 m3 gas besparing geplaatst wordt in 2,3 miljoen woningen dan volgt:

$2,3e6 \cdot 1,8 \cdot 814 \cdot 1e-9 = 3,4$ Mton CO2

Met de plaatsing van 2,3 miljoen hybriden in woningen kan dus de totale extra besparing van 3,4 Mton CO₂ die voor de gebouwde omgeving in het klimaatakkoord is afgesproken worden gerealiseerd [9 p16]. Deze extra besparing komt bovenop het zogenaamde referentiescenario, dit is de reeds lopende vermindering van gasgebruik over de jaren zoals ook blijkt uit de tabel (ondanks de stijging van het aantal huishoudens). Deze vermindering van het gasgebruik door de betere nieuwbouw die deels oudbouw vervangt, de renovatie van bestaande bouw en de betere HR toestellen (derde generatie) neemt de komende jaren naar verwachting zelfs toe (door de gasloze nieuwbouw).

De gebouwde omgeving bestaat uit woningen (huishoudens) en andere gebouwen (ook wel diensten genoemd). Volgens het klimaatakkoord is het aandeel van de andere gebouwen 1 Mton [8 p14, 9 p16], waarmee de te behalen besparing voor de woningen op 2,4 Mton komt.

Als er 1,7 miljoen hybriden geplaatst worden dan wordt het aandeel van de woningen in het klimaatakkoord gerealiseerd:

$$1.7e6 * 1.8 * 814 * 1e-9 = 2,49 \text{ Mton CO}_2$$

Wat betekent dit nu voor de jaarlijkse rekening van de bewoner met een actuele gasprijs van 80 eurocent en 22 eurocent voor een kWh elektriciteit?

De jaarlijkse kosten voor 1400 m³ gas met een prijs van 80 cent zijn 1120 euro.

De jaarlijkse kosten voor de hybride met een 74% aandeel van de warmtepomp en met 75 graden ontwerp cv_aanvoer zijn:

$$(1100 * (1 - 0.74) + 300) * 0.8 + 1100 * 0.74 * 9.8 / 3.6 * 0.22 = 956 \text{ euro}$$

Als er niet aan isolatie en aanvoertemperatuurvermindering wordt gedaan is de financiële winst beperkt (1120-956=164 euro per jaar). Waarbij dan wel wordt aangetekend dat het op termijn onvermijdelijk is dat de kosten van gas sneller gaan stijgen dan die van elektriciteit. Dit komt doordat de elektriciteitskosten gerelateerd waren aan het rendement van de centrale en de verliezen van het transportnetwerk. In de nieuwe wereld zal groen gas of waterstof een hogere waarde en dus ook relatief een hogere prijs krijgen omdat het grotendeels opgeslagen elektriciteit is (met waterstof wordt ook de groen gas fabricage verhoogd). Daarnaast zal er op de fossiele gasvariant een alsmaar hogere fiscale heffing komen. Met dit als achtergrond is, samen met de aangegeven prijsontwikkeling hybride, te verwachten, dat zelfs met deze beperkte financiële winst, de HR-hybride op termijn rendabel wordt.

Stel nu dat er maatregelen in de woningen worden genomen waardoor de ontwerp cv-aanvoertemperatuur zakt naar 55 graden. Dan geven de certificaten [7, 11] de volgende getallen:

energiefractie = 0,746 en COP = 4.926 Intergas-Daikin 4 kW Monobloc

energiefractie = 0,909 en COP = 4.513 Remeha Elga Ace 4 kW

Tegenover de hogere benuttingsfactor staat een lagere gemiddelde COP.

Voor de jaarlijkse bewonersrekening betekent dit:

$$(1100*(1-0.746)+300)*0.8+1100*0.746*9.8/4.926*0.22 = 823 \text{ euro}$$

$$(1100*(1-0.909)+300)*0.8+1100*0.931*9.8/4.513*0.22 = 809 \text{ euro}$$

In dit voorbeeld zijn er alleen maatregelen genomen om de cv-aanvoertemperatuur te verlagen, bijvoorbeeld door radiator aanpassing woonkamer. De warmtelast is nog steeds 1100 m3 gas. De besparing is ongeveer 300 euro per jaar. Afgezien van de radiator aanpassing, die een lange levensduur en daarmee lage afschrijving heeft, is de hybride nu in 7 jaar terug te verdienen.

Als de ontwerp cv-aanvoertemperatuur wordt verlaagd naar 50 graden Celcius en de warmtelast van deze hypothetische gemiddelde woning wordt door isolatie gehalveerd tot 20 GJ dan volgt:

energiefractie = 0,966 en COP = 4,650 tabel 2.5 [7]

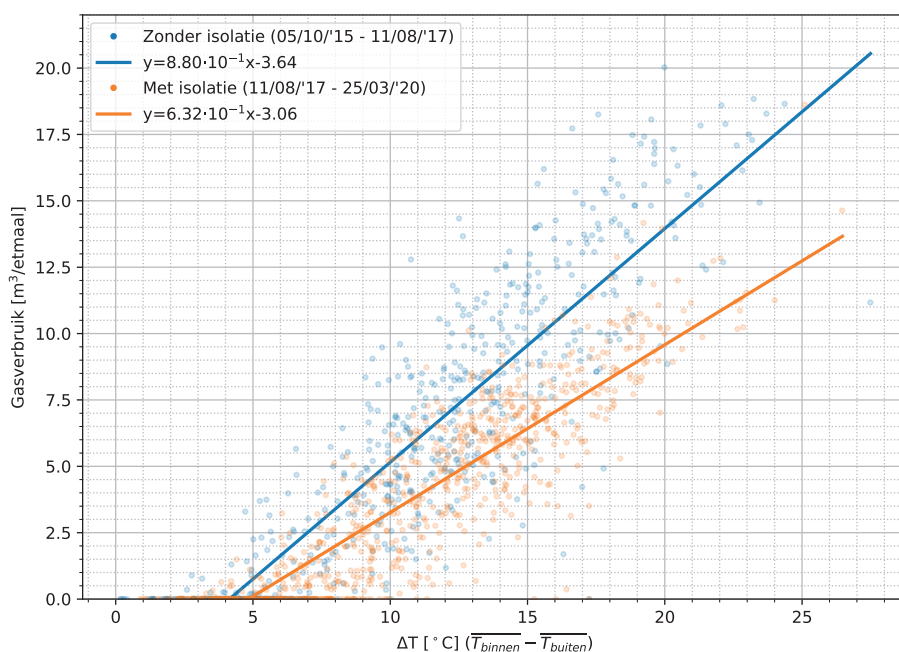
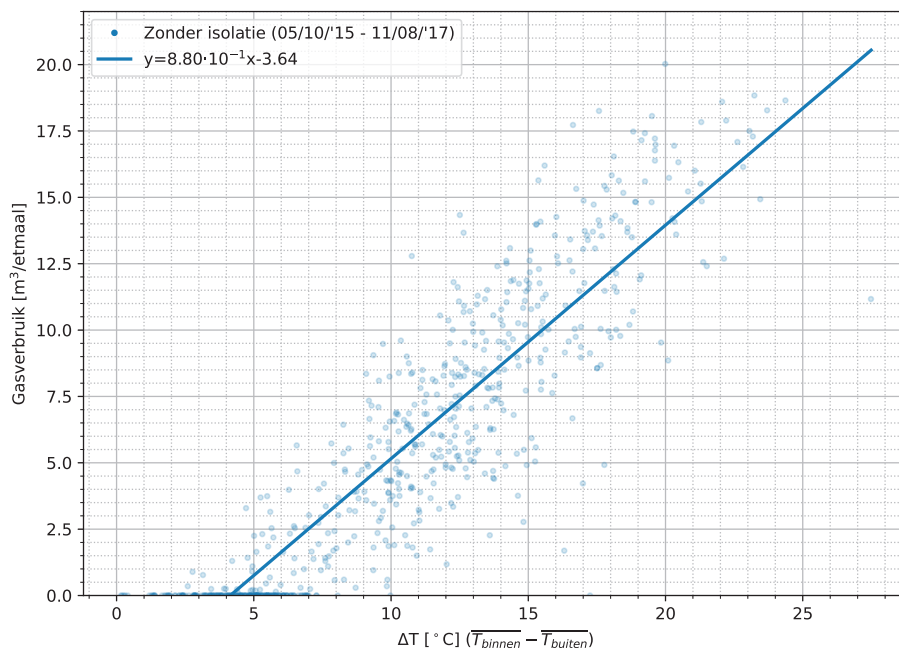
$$0.966*1100 = 1063 \text{ m3 gas, op een totaal van 1400 m3 geeft dit bijna 76% besparing}$$

Rondom bijvoorbeeld het tapwatergebruik maar ook de COP zijn nog oplossingen denkbaar waarmee de gasbesparing van de hybride nog verder toe kan nemen. Bovenstaande getallen laten, uitgaande van de huidige gemiddelde 1400 m3, een gasbesparing in de orde van 60 tot 80% zien.

Bijlage 2 – Kosteneffectieve isolatie van een woning door gebruik van clouddata

Onderstaande 2 figuren laten, voor het winterseizoen van 1 woning uit de cloud, het gasgebruik voor verwarming over 24 uur zien in relatie tot het gemiddelde verschil van de binnen- en buitentemperatuur. Dit zijn de blauwe stippen. Middels kleinste kwadraten is de beste rechte door de stippen bepaald. Deze lijn geeft dus de energiegebruiksverwachting aan bij een verschil tussen de binnen- en buitentemperatuur. Bij minder dan vier graden verschil tussen binnen en buiten is het gasgebruik nul en bij 20 graden is het 14 m³ (ongeveer 10 euro met gasprijs 70 cent). De spreiding van de meetpunten laat zien dat er naast temperatuurverschil tussen binnen en buiten ook andere effecten het gasgebruik beïnvloeden (zon, wind en regen).

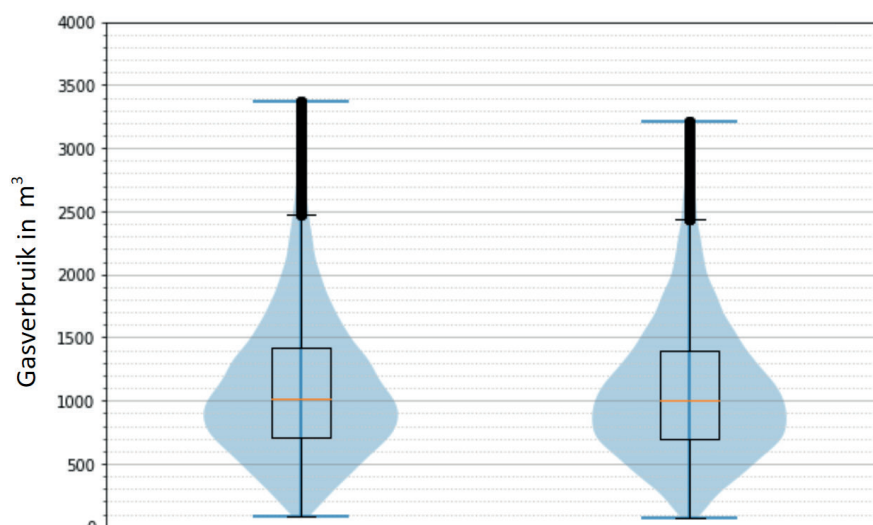
De spouwmuur is geïsoleerd voor een bedrag van 1100 euro. Het resultaat zijn de oranje stippen met bijbehorende rechte die een behoorlijke besparing van ongeveer 30% laat zien.



Onderstaande afbeelding geeft het gemiddeld gasgebruik voor verwarming voor een aselechte steekproef van de Intergas cloud. Het gemiddeld gasgebruik voor verwarming voor beide winters is ongeveer 1100 m³. Middels de clouddata is ook bepaald dat het gemiddeld gasgebruik voor warm water ongeveer 0,8 m³ per dag is. Samen met een 37 m³ gas per jaar voor koken wordt het totale gemiddelde jaarlijkse gebruik voor woningen: $1100 + 0,8 * 365 + 37 = 1429$ m³.

Spreiding totale gasverbruik voor het verwarmen van de woning in de winters van 2018-2019 en 2019-2020

Onderste en bovenste 1% van de data is eruit gefilterd. Alleen huizen met meetdata op 1 september en op 31 mei zijn meegenomen.



| | Winter 2018-2019 | Winter 2019-2020 |
|--------------------------------------|------------------|------------------|
| Aantal huizen | 14747 | 22772 |
| Gemiddeld verbruik (m ³) | 1114.1 | 1092.3 |
| Standaardafwijking (m ³) | 572.5 | 558.8 |
| Min (m ³) | 87 | 67 |
| 25% (m ³) | 712 | 693 |
| 50% (Mediaan) (m ³) | 1021 | 1005 |
| 75% (m ³) | 1418 | 1392 |
| Max (m ³) | 3368 | 3208 |

VAN HAARD TOT HIGHTECH-HEATING



Bezoekadres: Zilverstraat 69, 2718 RP Zoetermeer

Postadres: Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer

Tel: 088 - 400 85 09

e-mail: contact@verwarmingsindustrie.nl

© NVI 2021