

## Woord vooraf

Om onze studie als master Energie, afstudeerrichting Elektrotechniek, met succes af te ronden, hebben wij deze masterproef uitgevoerd. De masterproef omvat een literatuurstudie over energieopslag, meer specifiek in thermische en elektrische vorm. Daarnaast wordt een praktische realisatie uitgevoerd om energieopslag in thermische vorm op woningniveau toe te passen. Dit onderzoek is mede mogelijk gemaakt door i-NET een onderzoeksgroep, gevestigd te Diepenbeek.

Dankzij de hulp van meerdere personen, hebben we deze masterproef succesvol kunnen afronden. Allereerst willen we graag het i-NET team bedanken. Zij hebben de mogelijkheid tot deze masterproef gegeven en zij hebben het project in goede banen geleid. Uit deze groep willen we graag de heer ing. B. Salmon bedanken voor zijn begeleiding met de elektronica. Daarnaast willen we de heer ing. T. Vanhove en de heer ing. J. Elsen bedanken voor samenwerking bij de opbouw en de testen van de praktische opstelling. Naast het i-NET team, willen wij ook de heer K. Naelaerts bedanken voor de hulp bij de microcontroller.

Last but not least, willen we graag onze dank uitdrukken voor de hulp en begeleiding die onze promotor de heer ir. B. Baeten gegeven heeft tijdens onze masterproef.

Januari 2014

Peeters Daan en Santermans Christophe



# Inhoudsopgave

Lijst met tabellen.....	5
Lijst met figuren .....	5
Abstract .....	9
Summary .....	11
Inleiding .....	13
1 Literatuurstudie .....	15
1.1 Thermische opslag.....	15
1.1.1 Voelbare thermische warmte .....	17
1.1.2 Latente thermische energieopslag .....	19
1.1.3 Warmtepomp met opslag.....	24
1.1.4 Koude opslag.....	29
1.2 Elektrische opslag.....	30
1.2.1 Oplaadbare batterijen.....	31
1.2.2 Second life batteries .....	39
1.2.3 Vehicle to grid (V2G).....	40
1.3 Gecombineerde opwekking van warmte en elektriciteit .....	45
1.3.1 Brandstofcel.....	45
1.3.2 Waterstofopslag.....	50
1.4 Conclusie .....	51
2 Sturing voor energieopslag.....	53
2.1 Stuuralgoritme .....	53
2.2 Ontwerp van de sturing .....	54
2.2.1 Algemeen schema.....	55
2.2.2 Transformatoren en kortsluitbeveiliging .....	55
2.2.3 24V voeding .....	56
2.2.4 5V voeding .....	57
2.2.5 Signaalverwerking voor frequentiemeting .....	57
2.2.6 Signaalverwerking voor spanningsmeting.....	59
2.2.7 Microcontroller met in- en uitgangen.....	59
2.2.8 JTAG-connectie.....	60
2.2.9 Overspanningsbeveiliging .....	61
2.2.10 Prijsberekening.....	61

2.3	Printplaatontwerp .....	61
2.3.1	Het hoofdbord.....	62
2.3.2	Printplaat voor de JTAG-connectie .....	63
2.4	Programmacode.....	64
2.4.1	Layer 1: Main .....	64
2.4.2	Layer 2: Measure.....	65
2.4.3	Layer 3: Control .....	65
2.4.4	Layer 3: Frequency.....	66
2.4.5	Layer 3: Voltage .....	67
2.4.6	Layer 3: Temperature .....	68
2.4.7	Layer 4: Timer.....	69
2.4.8	Layer 4: Analooq naar Digitaal Conversie (ADC).....	71
2.5	Power quality analyse van het net .....	72
2.5.1	Analyse van de PQube data.....	73
2.5.2	Analyse van de data met de Fluke 1750.....	75
2.6	Testen .....	76
2.6.1	Asynchrone motor met frequentiesturing .....	76
2.6.2	Invertor voor zonnepanelen belast met lampenbak .....	77
2.7	Conclusie.....	78
3	Praktische opstelling.....	79
3.1	Boiler.....	79
3.1.1	Boiler volume .....	79
3.1.2	Boiler opstelling .....	80
4	Integratie van de sturing met de boiler .....	83
4.1	Testen op het gewone elektriciteitsnet .....	85
4.2	Testen van de sturing in eilandbedrijf .....	88
4.3	Conclusie.....	91
	Algemeen besluit.....	93
	Literatuurlijst.....	95
	Bijlagen .....	99

## Lijst met tabellen

Tabel 1: Voor- en nadelen van PCM [12] .....	21
Tabel 2: Vergelijking COP's warmtepompen[42] .....	28
Tabel 3: Voordelen en beperkingen van NiCd [23] .....	33
Tabel 4: Voordelen en beperkingen van NiMH [23].....	34
Tabel 5: Overzicht gegevens van vee gebruikte oplaadbare batterijen[23].....	37
Tabel 6: Overzicht meest voorkomende fuel cells [35][36][37] .....	49

## Lijst met figuren

Figuur 1: Illustratie Smart-Grid [6] .....	15
Figuur 2: Overzicht thermische opslag [7] .....	16
Figuur 3: Opstelling voor een elektrische boiler met twee verwarmingselementen [8].....	17
Figuur 4: Verschillende opslagtanks [8].....	18
Figuur 5: Temperatuursverloop van een PCM met onderkoelingsverschijnsel [12] .....	20
Figuur 6: Handwarmer die gebruik maakt van PCM [13].....	20
Figuur 7: Chemische binding voor paraffine [12].....	21
Figuur 8: Chemische binding voor vetzuren .....	22
Figuur 9: Chemische binding voor suikeralcohol [12].....	22
Figuur 10: Kristalrooster van het zouthydraat $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ [12] .....	22
Figuur 11: Kristalrooster van het zout $MgCl_2$ [12].....	22
Figuur 12: Overzicht van materiaalgroepen die gebruikt kunnen worden als PCM [12].....	23
Figuur 13: Principe werking ATES[16] .....	24
Figuur 14: Principe werking BTES [8] .....	25
Figuur 15: Principeschema Energy pile .....	26
Figuur 16: Principeschema zonne-warmtepomp .....	27
Figuur 17: COP van grond-water warmtepomp in functie van schakeltijd [19] .....	28
Figuur 18: Tijdsverloop temperatuur en vermogen koudeopslag[17] .....	29
Figuur 19: Overzicht voor vermogen en ontladtijd van elektrische opslag methoden [22].....	30
Figuur 20: Vermogensdichtheid en energiedichtheid voor veel gebruikte batterijtypes [23] .....	31
Figuur 21: Opladfasen voor loodzuurbatterij [23].....	32
Figuur 22: Ionen stroom bij op- en ontladen voor lithium metaaloxide/ koolstof [23].....	35
Figuur 23: Opladfasen voor Li-ion batterijen [23] .....	36
Figuur 24: Dienstjaren accu [39].....	39
Figuur 25: Tijdstip autoritten [29].....	40
Figuur 26: Structuur MAS [29] .....	41
Figuur 27: Gemiddeld verbruiksprofiel huiswoning [31].....	42
Figuur 28: Impact controlestrategie huishouden [31].....	43
Figuur 29: Verbruiksprofiel 15 % PHEV [31] .....	44
Figuur 30: Verbruiksprofiel 45 % PHEV [31] .....	44
Figuur 31: Verbruiksprofiel 75 % PHEV [31] .....	44
Figuur 32: Verbruiksprofiel spanningsanalyse [31] .....	44
Figuur 33: Normoverschrijding Ongecontroleerd [31] .....	44
Figuur 34: Normoverschrijding V2G [31] .....	44

Figuur 35: Principe PEMFC[32] .....	45
Figuur 36: Beperkt overzicht types fuel cells [40] .....	45
Figuur 37: Principe PV-centrale Corsica.....	47
Figuur 38: Opslagnet Denemarken [34] .....	48
Figuur 39: Schakelalgoritme .....	54
Figuur 40: Ontwerp van de sturing in Eagle .....	55
Figuur 41: Transformatoren voor het verlagen van de netspanning en smeltzekeringen .....	56
Figuur 42: 24V voeding .....	56
Figuur 43: 5V voeding .....	57
Figuur 44: Het vormen van de blokgolf voor nuldoorgangsdetectie .....	57
Figuur 45: Nuldoorgangsdetectie met opamp .....	58
Figuur 46: Simulatieschema voor het testen van de nuldoorgangsdetectie .....	58
Figuur 47: Gelijkgericht signaal vormen voor de spanningsmeting.....	59
Figuur 48: Bruggelijkgericht signaal voor spanningsmeting .....	59
Figuur 49: Microcontroller en aansluitingen .....	60
Figuur 50: Verbindingen voor de JTAG-programmer .....	60
Figuur 51: Overspanningsbeveiliging .....	61
Figuur 52: Printplaat ontwerp.....	62
Figuur 53: Printplaat met componenten .....	63
Figuur 54: JTAG-printplaat.....	63
Figuur 55: Layers .....	64
Figuur 56: Layer 1- Main .....	64
Figuur 57: Layer 2- Measure.....	65
Figuur 58: Flowchart Control.....	66
Figuur 59: Flowchart frequentie.....	66
Figuur 60: Dataset .....	67
Figuur 61: Afgevlakte sinus .....	67
Figuur 62: Flowchart amplitude detectie.....	68
Figuur 63: Flowchart temperatuur.....	68
Figuur 64: Tijdsvertraging input capture.....	69
Figuur 65: Inhoud TCCR1A en TCCR1B.....	69
Figuur 66: Successieve Benaderings methode [44].....	71
Figuur 67: Werkingsprincipe 4-bit SAR[44].....	71
Figuur 68: ADMUX en ADCSRA .....	71
Figuur 69: Frequentieverloop in de KHLim op 1/11/2013.....	73
Figuur 70: Detail van hetfrequentieverloop over 1 uur .....	74
Figuur 71: Spanningsverloop in de KHLim op 1/11/2013 .....	74
Figuur 72: Spanning- en stroomverloop van de meetperiode 21/8/2013 tot 29/8/2013 en detail .....	75
Figuur 73: Frequentieverloop voor 24/4/2013 .....	76
Figuur 74: Testopstelling met asynchrone motor en synchrone generator.....	77
Figuur 75: Sunnyboy met lampenbak.....	77
Figuur 76: Zonne-instraling simulator.....	78
Figuur 77: Vectordiagram netimpedantie.....	78
Figuur 78: Selectie van boiler volume [45].....	80
Figuur 79: Praktische opstelling van de elektrische boiler.....	81
Figuur 80: Infrarood beeld van de boiler, verwarming en circulatiepomp.....	81

Figuur 81: Versterker voor het thermokoppel .....	82
Figuur 82: Mosfet voor aansturing van het aansturen van de vermogenkring .....	82
Figuur 83: Boilersturing .....	83
Figuur 84: Zoom van de netspanning, 50 $\mu$ s/vak, 50mV/vak .....	84
Figuur 85: Opstelling voor het testen van de sturing en gegevenslogging .....	84
Figuur 86: Regelbare zonne-instraling met behulp van PV-simulator en gelijkspanningsbron .....	85
Figuur 87: Opbouw voor de test op het schoolnet.....	86
Figuur 88: Spanningsverloop bij snelle verhoging van de zonne-instraling .....	86
Figuur 89: Invloed van de boilersturing op de spanning .....	87
Figuur 90: Inschakelen van de boiler op frequentieniveau.....	87
Figuur 91: Invloed op de spanning bij te hoge frequentie .....	88
Figuur 92: Sunny Islands in combinatie met loodzuur batterijen.....	89
Figuur 93: Schematische opbouw van de proefstand voor eilandwerking .....	89
Figuur 94: Irradiantie geleidelijk verhogen bij test in eilandbedrijf.....	90
Figuur 95: Frequentie- en spanningsverandering bij irradiantie verandering .....	90





## Abstract

Deze masterproef, die plaatsvindt bij i-NET, onderzoekt de mogelijkheid om de netstabiliteit te verbeteren met energieopslag. De netstabiliteit verslechtert namelijk door de toename van hernieuwbare energiebronnen. De masterproef omvat twee onderdelen: enerzijds wordt een literatuurstudie uitgevoerd over energieopslag in elektrische en thermische vorm op woningniveau en anderzijds wordt een systeem ontworpen om deze opslag toe te passen. De systemen die al op de markt zijn, zijn duur en complex. Er wordt gezocht naar een goedkopere en vereenvoudigde sturing die op de markt kan gebracht worden om een buffer, afhankelijk van de netspanning en –frequentie, te sturen.

Het systeem moet aan twee voorwaarden voldoen. Ten eerste moet deze het inschakelmoment bepalen door de netfrequentie en -spanning te meten. Deze metingen moeten een nauwkeurigheid hebben van respectievelijk 10 mHz en 1V. Ten tweede moet het systeem gerealiseerd worden binnen een budget van €200.

Om de nodige metingen uit te voeren, is er gebruik gemaakt van een microcontroller. Die beschikt over een *Input Capture Event* en een 10-bit *ADC*, hierdoor is het mogelijk om de doelstellingen te behalen. Bovendien is de sturing gerealiseerd met een bedrag van €37. Om de werking van de sturing te testen is er een elektrische boiler geplaatst waarin thermische energie wordt opgeslagen. Hieruit blijkt dat het net stabiel wordt na buffering.



## Summary

This master's thesis, located at i-NET, researches the possibilities to stabilise the electric grid by using energy storage. The grid stability is getting worse through the growth of renewable energy sources.

This thesis contains two parts: first, there is a study about energy storage for both electrical and thermal storage on residential level, second there is the design of a thermal storage control system. The systems currently on the market are expensive and complex. That is why there is searched for a cheaper and simplified system, that can be sold to household users. The developed system switches an existing device, depending on the grid frequency and voltage.

The system must meet two conditions. First, it has to determine the moment to switch-on by measuring the grid frequency and voltage. These measurements must happen with an accuracy of respectively 10 mHz and 1V. Second, the system must be achieved within a budget of €200.

In order to carry out the necessary measurements, a microcontroller was the best solution. This one has both an Input Capture Event and a 10-bit ADC feature, making it possible to achieve the objectives. Also, the system is achieved with a cost of €37. In order to test the operation of the system, an electrical boiler was placed, in which thermal energy can be stored. After the necessary experiments, the grid was more stable after buffering.



## Inleiding

Om de Europese 20/20/20 doelstelling te behalen, moet er voldaan worden aan drie sleutelpunten. Ten eerste moet er een reductie van 20% van de broeikasgasuitstoot gebeuren. Ten tweede moet een stijging van de energie-efficiëntie met 20% gerealiseerd worden. Ten derde moet het aandeel van hernieuwbare energie toenemen tot 20%. [1][2]

Het behalen van die derde voorwaarde zorgt voor een probleem in het elektriciteitsnet. Door de toename van geïnjecteerde hernieuwbare energie in het net, kan er een onevenwicht ontstaan. Dat onevenwicht leidt tot een instabiel net, wat in ernstige gevallen zelfs tot een *black-out* (een plotse langdurige stroomuitval over een groot gebied) kan leiden.[3]

Door het gebruik van hernieuwbare energiebronnen, zoals fotovoltaïsche installaties en windturbines, zorgen de *prosumenten* (producerende consumenten) voor vermogenstromen die in twee richtingen lopen. Enerzijds zijn er stromen van het net naar de gebruikers. Anderzijds ontstaan er stromen van de prosumenten naar het net. Ze komen van hernieuwbare bronnen en gaan gepaard met een aantal problemen. Ten eerste komt het verbruiksprofiel niet overeen met het tijdsprofiel van de opwekking door hernieuwbare energiebronnen. Daarnaast zijn de bronnen ook minder voorspelbaar door de weersomstandigheden.[4] Ook zorgen ze voor tijdelijke en regionale overproductie ten gevolge van gelijke lichtsterkte en windsnelheid.

Energieopslag bij lokale overproductie biedt een oplossing om de bidirectionele vermogenstromen te verminderen, en dus het elektriciteitsnet efficiënter te gebruiken. Om een energieoverschot te detecteren in het net is er een systeem nodig dat het net analyseert. Een overschot kan gemeten worden met behulp van de spanning en de frequentie. Dit meetprincipe wordt al langer toegepast door de netbeheerder, die de productie van energie op deze manier controleert. De spannings- en frequentieveranderingen zijn evenredig met het actief vermogen. De Droop controle is een primaire regeling die het actief vermogen van het openbaar laagspanningsnet aantoont en regelt aan de hand van de frequentie. Zo neemt de frequentie toe naarmate het actief geleverd vermogen groter is dan het verbruikte vermogen. Wanneer het geleverde vermogen lager is dan wat er verbruikt wordt zal de frequentie dalen.[4] In een microgrid, of bij decentrale energieproductie in een laagspanningsnet, overheerst het resistief karakter, waardoor de netspanning lokaal sterk kan variëren naargelang van de richting van de energiestromen. Hierdoor kan er gebruik gemaakt worden van een spannings-Droop controle om de variatie te beperken. Om deze reden worden zowel spanning als frequentie gemonitord.[5]

Om een totaalbeeld te schetsen van energieopslag zijn de meest voorkomende mogelijkheden besproken in hoofdstuk 1. Hierin wordt onderscheid gemaakt tussen thermische opslag (hoofdstuk 1.1) en elektrische opslag (hoofdstuk 1.2). Vervolgens wordt in hoofdstuk 1.3 de gecombineerde opwekking toegelicht, meer bepaald de *fuel cell*. In ieder van deze hoofdstukken worden verscheidene technologieën toegelicht.

Na de literatuurstudie volgt in hoofdstuk 2 de uitleg rond de ontworpen sturing. Om gestructureerd aan de slag te gaan, wordt eerst het stuur algoritme besproken. Hierin is duidelijk gesteld wat er verwacht wordt van de schakeling. Vervolgens wordt het ontwerp uitgelegd wat uiteindelijk tot de printplaat geleid heeft. Daarna geeft hoofdstuk 2.4 uitleg over hoe de programma code opgebouwd is.

Hoofdstuk 3 beschrijft gedetailleerd de praktische opstelling. Die beschrijving dient om een algemeen beeld te krijgen voor de integratie van de ontworpen sturing met een boiler. In hoofdstuk 4 worden het resultaten van de sturing op de netkwaliteit besproken aan de hand van testen. Als laatste volgt er een algemeen besluit dat uit deze thesis kan genomen worden.

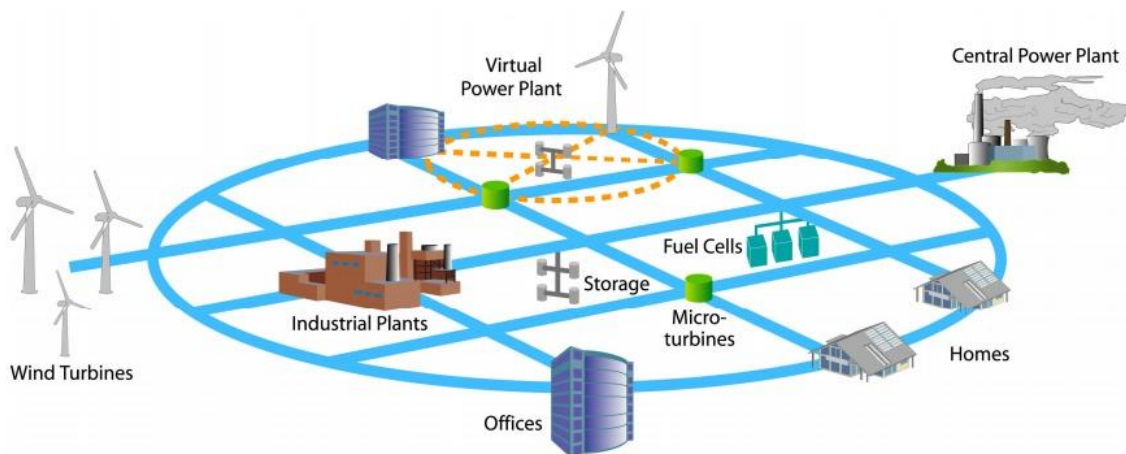
# 1 Literatuurstudie

Er worden steeds meer alternatieve energiebronnen in gebruik genomen. Deze bronnen zijn niet altijd even controleerbaar en zorgen ervoor dat de stromen tussen de consument en het elektrisch net bidirectioneel kunnen worden. De grootte en de richting van deze stromen zijn afhankelijk van het overschot of tekort aan productie op het elektrisch net. Deze grootte en richting van de stromen hebben een invloed op de instabiliteit van dat net.

Hernieuwbare bronnen, zoals de wind en de zon, zijn factoren die moeilijk te controleren zijn. Om toch meer stabiliteit op het net te garanderen, gebeurt er veel onderzoek naar een *Smart-Grid*. In een smart-grid streeft men naar een slimme communicatie tussen producent en consument, om zo controle op de vermogenstromen te creëren. In Figuur 1 wordt de structuur van een smart-grid weergegeven. Dit is onder te verdelen in vier deelnemers:

- centrale productie (kernenergie, steenkool,...);
- decentrale productie (WKK, PV, fuel cells,...);
- consumenten;
- buffer.

Deze literatuurstudie zal zich focussen op de buffermogelijkheden voor een elektrisch net. Door een buffer op te laden tijdens overproductie zal de bijdrage van de bron op de instabiliteit verkleinen of zelfs verdwijnen. Deze buffer kan uitgevoerd worden in elektrische vorm (batterijen) of thermische vorm (boiler, warmtepomp,...) of gecombineerde vorm zoals fuel cells.



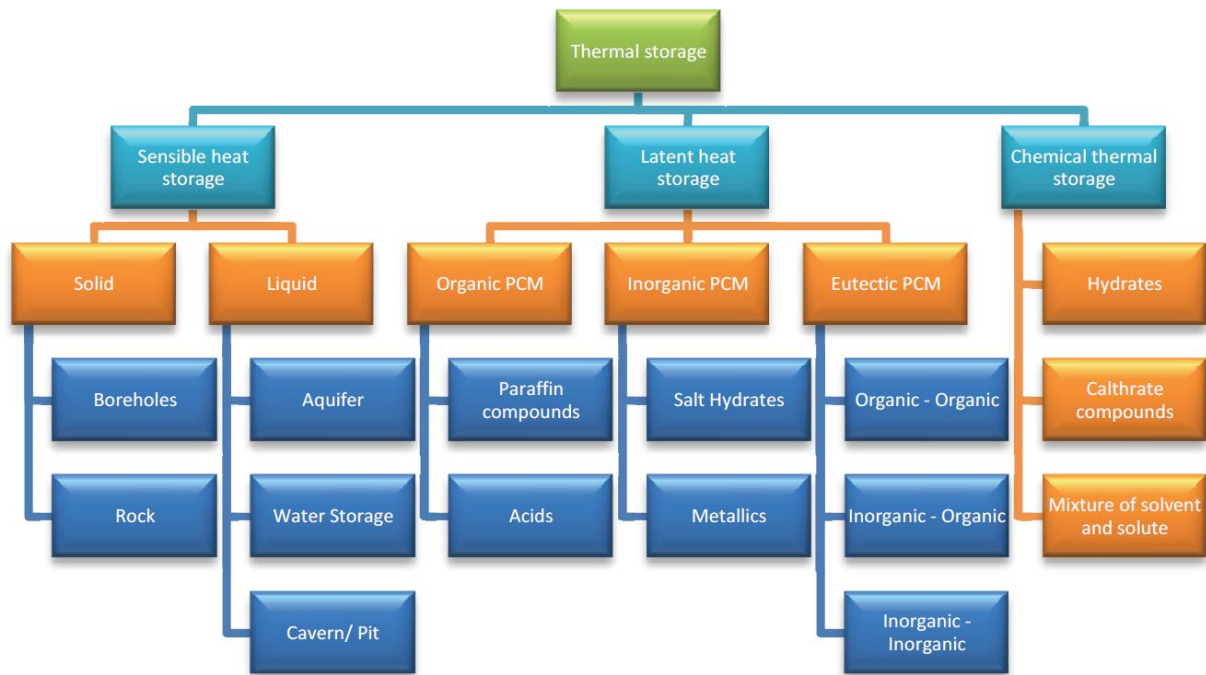
**Figuur 1: Illustratie Smart-Grid [6]**

## 1.1 Thermische opslag

Omdat er gestreefd wordt naar een duurzame toekomst, moet het energieverbruik dalen en moet er efficiënter omgesprongen worden met energie. Thermische energieopslag biedt voor een gedeelte een oplossing. Het opslaan van thermische energie kan onder andere zorgen voor het verschuiven van energieverbruik in de tijd, om zo opwekking en verbruik beter op elkaar af te stemmen. Toepassingen voor duurzame warmteopslag zijn te vinden bij onder andere zonnecollectoren en warmtekrachtkoppeling (WKK). Klassiek wordt hierbij gedacht aan opslaan van geproduceerde

warmte, o.a. in buffervaten. Eveneens kan koude opgeslagen worden door bijvoorbeeld overdag een diepvriezer dieper te koelen bij een energieoverschot. Wanneer er een tekort aan energie is, wordt het vriesproces uitgesteld. Een andere toepassing van koudeopslag is de koude uit de buitenlucht 's nachts opslaan om overdag het huis te koelen.

De warmteopslag kan gebeuren op drie manieren: in de vorm van voelbare warmte, latente warmte en via een endo- en exotherme chemische reactie. Deze laatste groep is minder van toepassing op woningniveau door de omvang van de installatie waardoor deze dus niet verder besproken zal worden. [8][7]



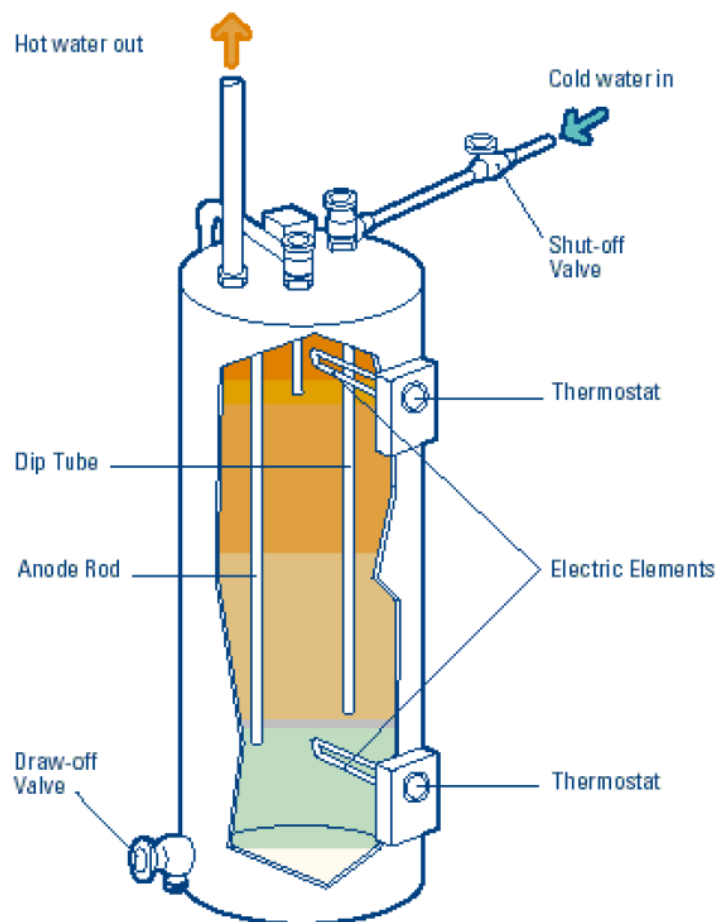
**Figuur 2: Overzicht thermische opslag [7]**



### 1.1.1 Voelbare thermische warmte

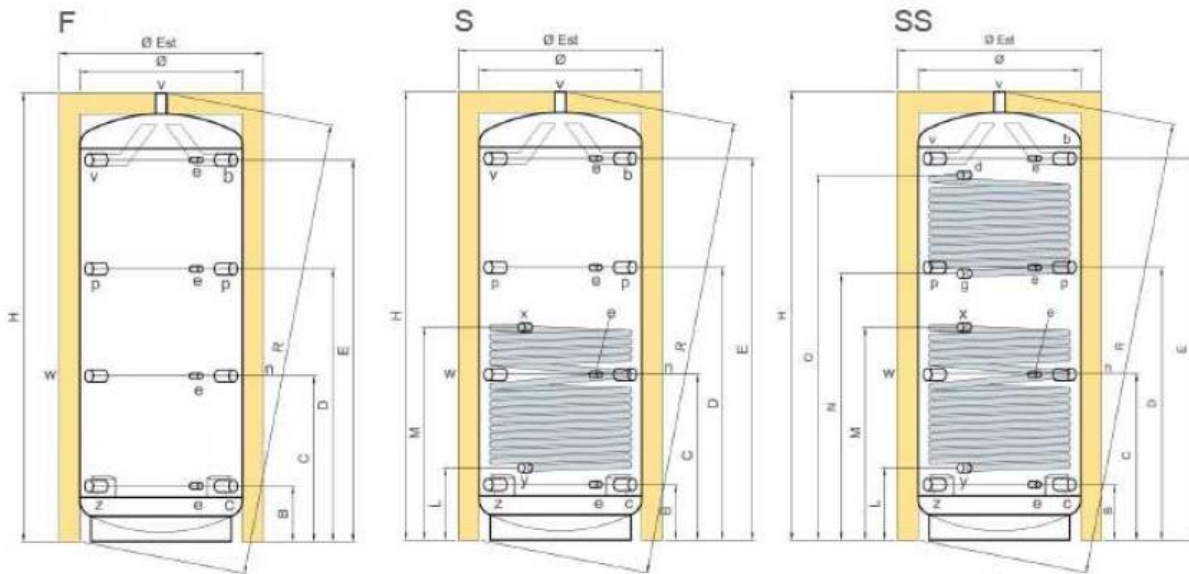
Een voor de hand liggende manier om voelbare warmte op te slaan is in de vorm van warm water. Hierbij gaat water opgewarmd en bewaard worden in een goed geïsoleerd vat. Des te beter de isolatie, des te minder energie er verloren kan gaan naar de omgeving. Het stilstandverlies en dus ook grotendeels het rendement van de opslag is hier dus onderhevig aan. De boilers voor huishoudelijke toepassingen worden gewoonlijk geïsoleerd met 5 tot 20 cm polyurethaan, minerale- of glaswol [8].

Boilers komen in verschillende vormen, volumes en types voor. De types zijn in rechtstreekse en onrechtstreekse verwarming onder te verdelen. Bij de rechtstreekse verwarming, bevindt het warmte-element zich rechtstreeks in het opslagvat zelf, dit zijn vaak elektrisch verwarmde boilers.



Figuur 3: Opstelling voor een elektrische boiler met twee verwarmingselementen [8]

Bij onrechtstreekse verwarming wordt het water opgewarmd buiten de boiler, dit kan gebeuren via elektrisch warmte-element, zonnecollectoren of door de verbranding van aardgas of -olie. Het opgewarmde water komt dan in de boiler terecht of wisselt zijn warmte uit in via een warmtewisselaar in het boiler vat. Zo een warmtewisselaar bestaat meestal uit windingen. Door gebruik te maken van een warmtewisselaar treedt er ook geen vervuiling op door de andere vloeistof. Bij zonnecollectoren is dit namelijk een waterglycol mengsel om bevriezing in de zonnecollectoren te voorkomen. De boiler kan eveneens gebruikt worden als opslagvat voor zowel het sanitair water als voor de centrale verwarming. Het verwarmingswater is niet geschikt als sanitair water en moet dus ook via een warmtewisselaar opgewarmd worden om vervuiling te voorkomen. Voorbeelden van de opbouw van de buffervaten zijn te zien in Figuur 4.



Figuur 4: Verschillende opslagtanks [8]

#### 1.1.1.1 Opgeslagen energiehoeveelheid

De hoeveelheid warmte die opgeslagen kan worden in een boiler kan berekend worden aan de hand van de volgende formule:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T = V \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta T$$

Met Q de warmte, m de massa, V het volume, c de soortelijke warmtecapaciteit (voor water 4186 J/(Kg.K),  $\rho$  de massadichtheid en  $\Delta T = T_{max} - T_{min}$ . Hieruit volgt de hoeveelheid opgeslagen warmte die opgeslagen kan worden in een medium rekening houdend met het temperatuurverschil.

De watertemperatuur onder atmosferische druk is beperkt tot 100°C om stoomvorming te voorkomen. Bij systemen die onder druk staan mag de watertemperatuur iets hoger liggen, zolang de temperatuur maar onder het kookpunt blijft [8].

#### 1.1.1.2 Boiler gebruiken als thermische batterij

Een boiler kan gebruikt worden als een thermische batterij waarvan we het opladen kunnen afstemmen op de condities van het elektrische net. Zo kan de boiler, wanneer er veel energie gebruik wordt in verhouding met de opwekking, afgeschakeld worden en op deze manier aan *load-shedding* doen. Op momenten dat er een lokale overproductie van elektriciteit optreedt, kan er meer energie in de boiler opgeslagen worden. Het onderzoek dat hier naar gedaan wordt gaat onder de naam van Grid-interactieve Elektrisch Thermische Storage (GETS). [9]

#### 1.1.1.3 Boilers als wijkbuffer voor gemeenschappelijk opslag

Wereldwijd worden boilers eveneens gebruikt als grote wijkbuffer en voorzien huizen en openbare gebouwen van warmwater. Voorbeelden hiervan zijn de wijkbuffer in La Rochelle te Frankrijk[10] en de boiler die momenteel gebouwd wordt in Nürnberg- Sandreuth te Duitsland met een hoogte van 70m, een diameter van 26 en een inhoud van 33 000 m<sup>3</sup>. [11]

### 1.1.2 Latente thermische energieopslag

In toepassingen waar er nood is aan een hoge energiedichtheid, kan er overgestapt worden op latente warmteopslag. Het opslaan van warmte in de latente vorm, gebeurt bij een faseovergang. Zo is dit mogelijk bij de faseovergang van: vast-vast, vast-vloeibaar, vloeibaar-gas of van vast-gas. Materialen die hiervoor in aanmerking komen, noemt men *phase change material* (PCM).

Afhankelijk van het temperatuursgebied waarbij de faseovergang optreedt, worden de PCM's gebruikt voor andere toepassingen. Zo zijn voor huishoudelijke toepassingen de volgende temperatuursgebieden bruikbaar:

- -20°C tot 20°C voor koelen;
- 20°C tot 30°C voor klimaatcontrole;
- 30°C tot 100°C voor verwarming.

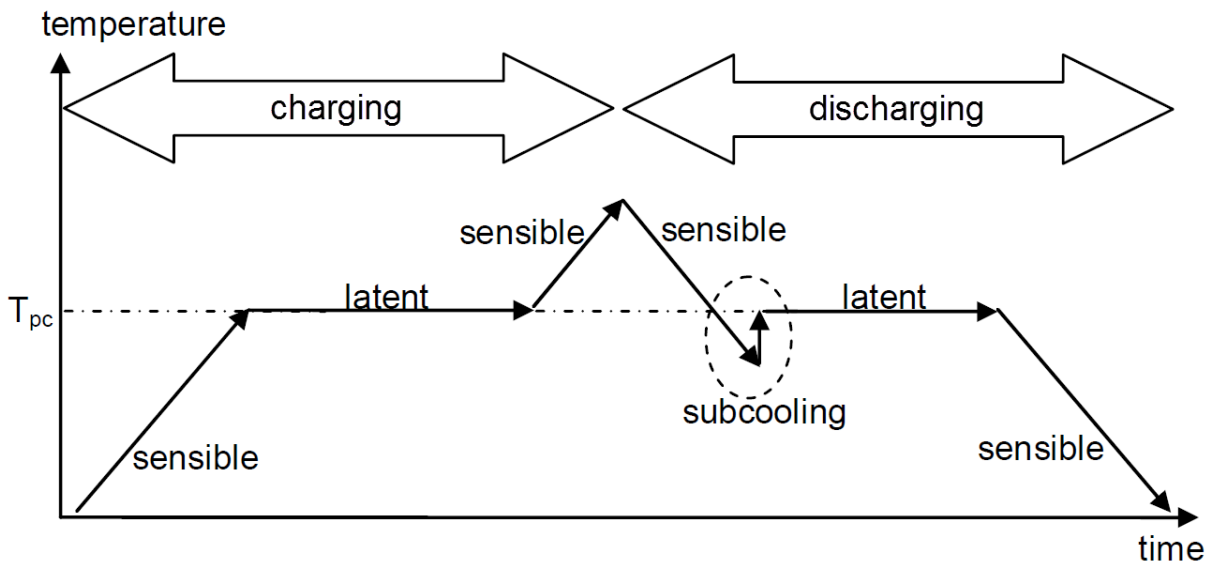
Voordelen van deze materialen zijn: een relatief constante temperatuur tijdens de energieopslag, een hoge energiedichtheid en bijgevolg een klein opslagvolume in verhouding met opslagsystemen van voelbare warmte. Wanneer er gekoeld wordt met ijs zal de opslag 8 keer minder plaats in beslag nemen dan wanneer dit gebeurt met water van 10°C. [7]

Om deze redenen is het gebruik van latente warmteopslag een prominente energietechniek. Er zijn echter ook nadelen aan verbonden, welke opgelost moeten worden vooraleer de techniek op grote schaal toepasbaar is. Zo moet vooral de geleidbaarheid van warmte toenemen, om eenvoudiger energie op te slaan en opnieuw eruit te halen. Verder zijn er PCM's, die bestaan uit niet-*eutectische* mengsels, en bijgevolg een smelttraject hebben en niet gewoon een smeltpunt. Hierdoor kan er scheiding van het mengsel optreden, wat nadelig is bij herhalend gebruik van het PCM. Daarnaast zijn de materialen die gebruikt worden soms corrosief, giftig of brandbaar en daardoor schadelijk voor de omgeving [7].

Een ander veel besproken nadeel is het onderkoelen van de vloeistof. Onderkoelen is het verlagen van de temperatuur onder de stoltemperatuur zonder dat de vloeistof stolt. De latente stolwarmte is dus niet beschikbaar tot wanneer de vloeistof de faseovergang start. Dat starten kan gebeuren op twee manieren. Een eerste manier is homogene *nucleatie*, hierbij start het stollen door het PCM zelf. Een tweede manier is heterogene *nucleatie*, hierbij start het stollen door een verontreiniging in het PCM.[12]

Homogene nucleatie kan optreden bij twee omstandigheden. Als eerste bij een temperatuur die laag genoeg is, die temperatuur verschilt sterk van de gebruikte PCM. Zo is bij sommige stoffen een onderkoeling van 2 K voldoende, terwijl voor andere een onderkoeling van 80 K noodzakelijk is. Een tweede manier is het toevoegen van een klein stuk vast PCM, waardoor de stolling onmiddellijk uitbreid [12].

Heterogene nucleatie zorgt voor het beperken van onderkoeling. Dit wordt gedaan door het toevoegen van verontreinigingen in het PCM, welke een hogere smeltemperatuur hebben. Hierdoor wordt de onderkoeling beperkt tot enkele K[12].



**Figuur 5: Temperatuursverloop van een PCM met onderkoelingsverschijnsel [12]**

Onderkoeling kan echter ook gebruikt worden als een positieve eigenschap, bij de stoffen die pas stollen bij een grotere onderkoeling. Zo blijft de latente warmte opgeslagen tot wanneer de stolling begint. Dat starten van de stolling kan gedurende lange tijd (maanden of jaren) uitgesteld worden doordat de condities voor het starten niet gehaald zijn. Wanneer het stolproces begint komt de latente warmte vrij waardoor de PCM opwarmt tot aan de stoltemperatuur (het opwarmen verbruikt een gedeelte van de latente opgeslagen warmte). Dit principe wordt al lang gebruikt bij handwarmers.



**Figuur 6: Handwarmer die gebruik maakt van PCM [13]**

### 1.1.2.1 Bruikbare chemische stoffen

De PCM's worden onderverdeeld in 3 klassen, namelijk:

- organische stoffen,
- anorganische stoffen,
- eutectische mengsels.

Een eutectische mengsel is een mengsel dat één smeltpunt heeft en dus geen smeltraject ondergaan. Het bestaat uit een mengsel van verschillende organische en/of anorganische stoffen.

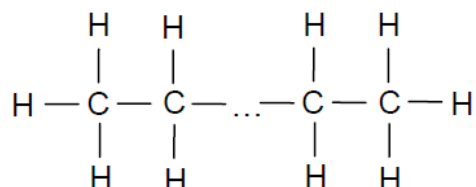
Deze klassen hebben elk hun voor- en nadelen. De voornaamste worden aangehaald in Tabel 1.

	Organic	Inorganic	Eutectic
Pros	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Low Cost (120Euro/kWh)(Ribberink, 2009)</li> <li>• Self nucleating</li> <li>• Chemically inert and stable</li> <li>• No phase segregation</li> <li>• Recyclable</li> <li>• Available in large temperature range</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Moderate cost (130 Euro/kWh) (Julin, 2008)(Ure, 2008)</li> <li>• High volumetric storage density (180-300 MJ/m<sup>3</sup>)</li> <li>• Higher thermal conductivity (0.6W/m-K)</li> <li>• Non flammable</li> <li>• Low volume change</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sharp melting point</li> <li>• High volumetric storage density</li> </ul>
Cons	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flammable</li> <li>• Low thermal conductivity (0.2W/m-K)</li> <li>• Low volumetric storage density (90-200 MJ/m<sup>3</sup>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Subcooling</li> <li>• Phase segregation</li> <li>• Corrosion of containment material</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limited availability</li> </ul>

Tabel 1: Voor- en nadelen van PCM [12]

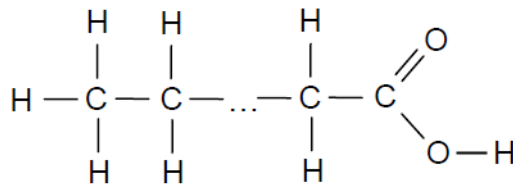
In de klassen van organische PCM's horen onder andere:

- paraffine (alkanen),



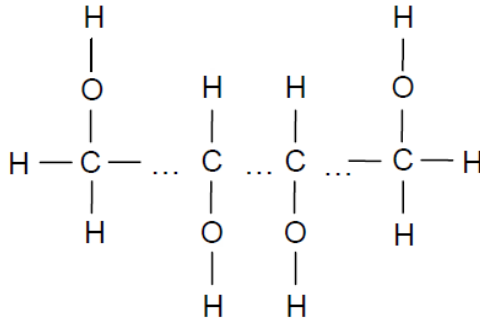
Figuur 7: Chemische binding voor paraffine [12]

- vetzuren (carbon- of alkaanzuren),



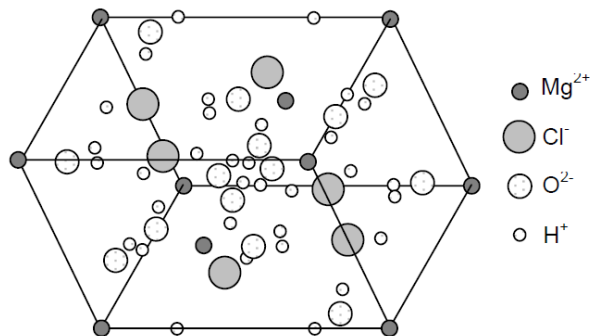
**Figuur 8: Chemische binding voor vetzuren**

- suikeralcoholen (polyolen).

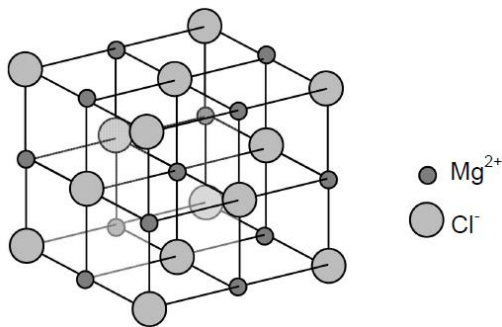


**Figuur 9: Chemische binding voor suikeralcohol [12]**

In de klassen van anorganische PCM's zijn zouthydraten het meest gebruikt voor lagere temperatuur toepassingen (lager dan 150°C) boven deze temperaturen worden zouten gebruikt.

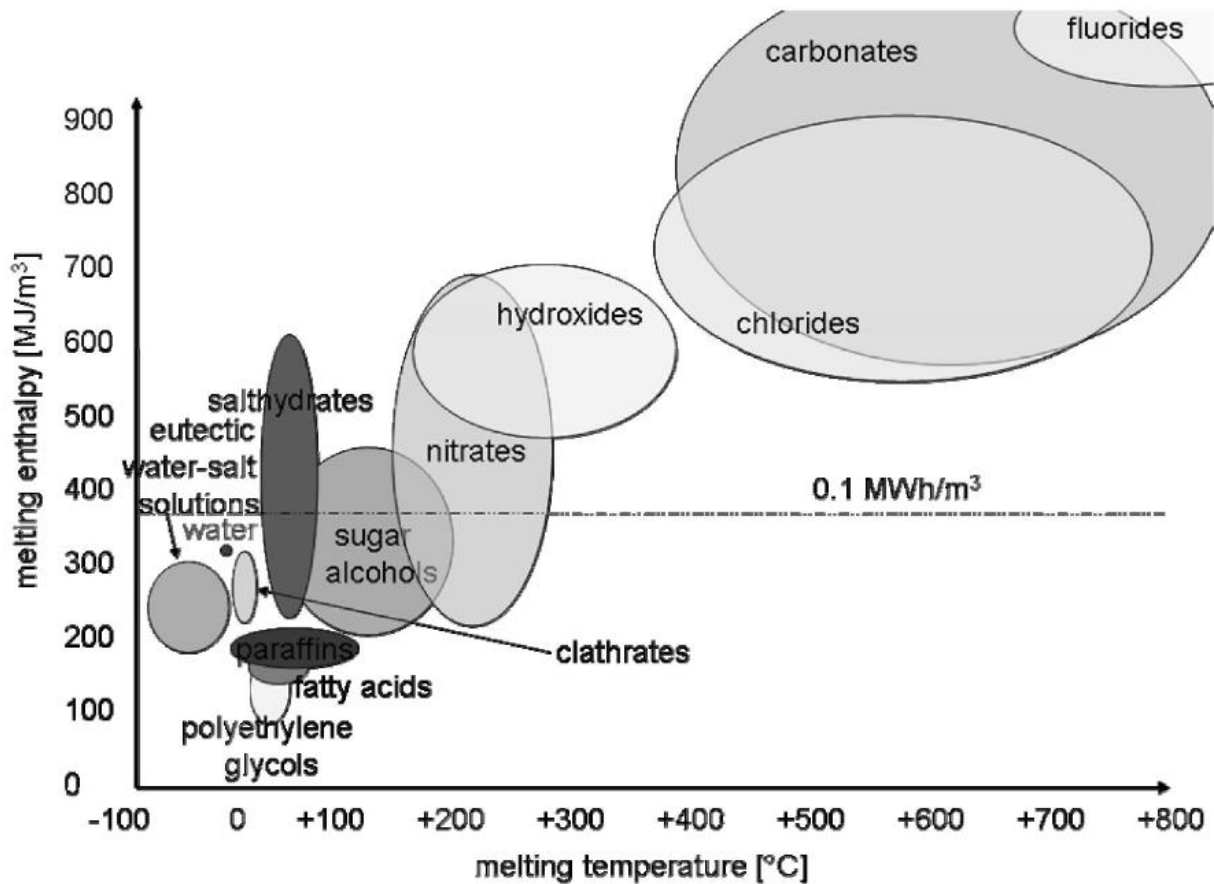


**Figuur 10: Kristalrooster van het zouthydraat  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  [12]**



**Figuur 11: Kristalrooster van het zout  $\text{MgCl}_2$  [12]**

De verschillende stoffen in een zelfde groep hebben vaak vergelijkbare smeltemperatures en hebben daarom meestal een vergelijkbare hoeveelheid enthalpie nodig voor het smelten. In Figuur 12 is dit verband per groep weergegeven.



Figuur 12: Overzicht van materiaalgroepen die gebruikt kunnen worden als PCM [12]

### 1.1.2.2 Toepassingen

De toepassingsgebieden zijn zeer uiteenlopend, zo kan een huis voorzien worden van PCM wanden en vloeren. In deze toepassing wordt het huis op een meer constante temperatuur gehouden bij bijvoorbeeld zonne-instraling. De PCM's zullen dan smelten en de zonnewarmte opnemen, wanneer de zonnewarmte afneemt, zal de bestralde oppervlakte nog gedurende een lange periode warmte vrijgeven door het opnieuw stollen van het PCM. Door gebruik te maken van PCM's zijn de bouwconstructies, die de warmte opslaan, minder zwaar. Mogelijke manieren om dit principe te integreren is het mengen van PCM's in beton of in gipsplaten[14].

Een andere toepassing is het behouden van de beste werkingstemperatuur voor Li-ion batterijen. Hiervoor kan het batterijpakket ingepakt worden met PCM[14]. Verder is er ook nog onderzoek uitgevoerd waarin PCM's gebruikt worden voor de opslag van koude. [7] Een grote opsomming van PCM's is terug te vinden in een studie van Harald Mehling, et al [12], hier zijn zowel de chemische samenstellingen als de fysische eigenschappen van de stoffen terug te vinden. Voor de fysische eigenschappen zijn de smeltemperatuur, de smeltenhamptie, thermische geleidbaarheid en de dichtheid weergegeven.

### 1.1.3 Warmtepomp met opslag

Warmtepompen hebben verschillende manieren van functioneren. Daarom wordt het onderscheid duidelijk gesteld door de benaming zoals “water-lucht”. Hierbij wordt er primair water gebruikt en secundair lucht. Aangezien het onderzoek zich beperkt tot energieopslag, wordt er alleen dieper gekeken naar onderzoek bij types waar opslag mogelijk is. Energieopslag met warmtepompen is mogelijk om te realiseren in het primaire circuit of in het secundaire. Primair wordt de opslag in boorgaten in de grond of in grondwater uitgevoerd. Secundair is de opslag in een opslagvat mogelijk.

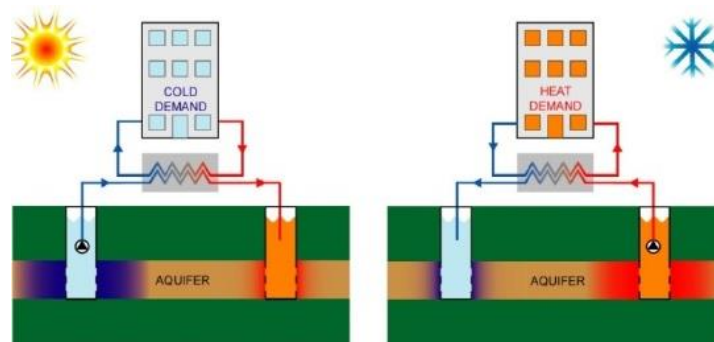
Bij opslag in een opslagvat is het secundaire medium van de warmtepomp water. De capaciteit van het opslagvat wordt grotendeels vastgelegd door de constructie van het vat, de berekening is terug te vinden in hoofdstuk 1.1.1.

#### 1.1.3.1 Aquifer thermal energy storage

De aarde werkt als een groot opslagvat voor zonne-energie. De zonne-instraling op het aardoppervlak zorgt voor een opwarming van de aarde, die gedeeltelijk onder de aardkorst terecht komt. De warmte van die zonne-instraling is voor een gedeelte terug te vinden in grondwaterstromen.[16]

Wanneer gedurende koude perioden de warmte uit dit warmtereservoir gepompt wordt en het afgekoelde medium naar het koude reservoir gepompt wordt, zal de temperatuur rond het reservoir afnemen, tot 5 – 10 °C. [16] Deze afname van temperatuur kan optimaal benut worden gedurende de zomer, wanneer de koude opgepompt wordt en de warmteopslag in het reservoir plaatsvindt. Dit proces zal het omgekeerde teweeg brengen en een warmte zone rond het reservoir creëren tussen 15-30°C. [16]

De Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) techniek biedt de mogelijkheid om energie in het primaire circuit op te slaan. Door secundair voor water te kiezen is het mogelijk om energie op te slaan in een opslagvat.



**Figuur 13: Principe werking ATES[16]**

Voordeel:

- hoge capaciteit ( 15 kWh<sub>TH</sub>/m<sup>3</sup>); [8]
- beperkt aantal boringen.

Nadeel:

- niet overal een (geschikte) grondwaterlaag beschikbaar;
- dure boringen;
- groot oppervlak nodig om koud en warm reservoir te scheiden (50 tot 250 m); [8]

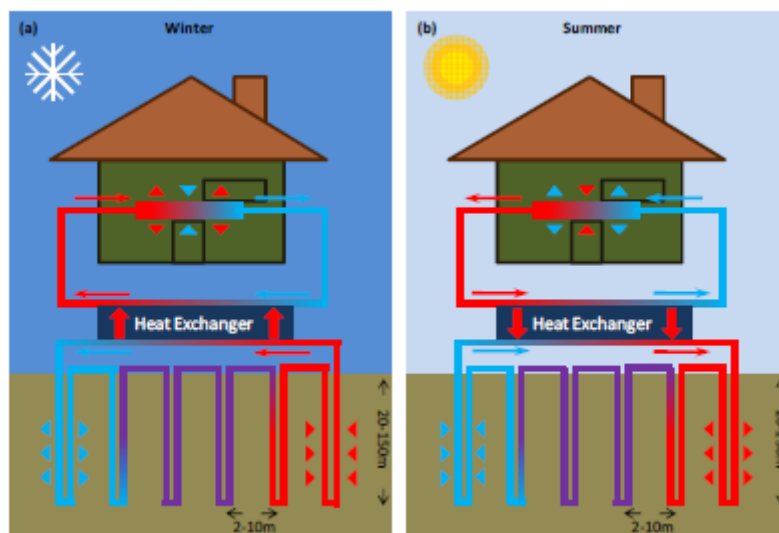


### 1.1.3.2 Borehole thermal energy storage

Borehole Thermal Energy Storage (BTES) is een techniek om thermische energie ondergronds op te slaan met behulp van verticale boringen in de grond. In deze boringen worden leidingen met een fluïdum geplaatst, waardoor de boringen als een warmtewisselaar kunnen functioneren. In tegenstelling tot ATES, werkt dit principe altijd met een gesloten circuit. [8]

Door meerdere warmtewisselaars te gebruiken, is het mogelijk om de opslagcapaciteit te vergroten. Aangezien de thesis zich beperkt tot huishoudelijk gebruik, zal er niet verder worden ingegaan op de hoge temperaturen.

In de verwarmingsperiodes maakt de grond-water of grond-lucht warmtepomp gebruik van de opgeslagen bodemwarmte. Via de boorgaten zal een fluïdum, warmte onttrekken van de grond en die warmte uitwisselen met het secundaire circuit. Door de warmte uitwisseling zakt de bodemtemperatuur. Wanneer dan in de zomer koeling gewenst is, kan dit uit de bodem gehaald worden. Bij het koelen van de woning neemt het fluïdum de warmte in het huis op en stockeert die in de bodem, waardoor de grondtemperatuur geleidelijk kan toenemen en de regeneratie van de bodemtemperatuur versneld wordt. Deze warmte kan in de volgende winter opnieuw gebruikt worden.[8]



Figuur 14: Principe werking BTES [8]

Voordelen:

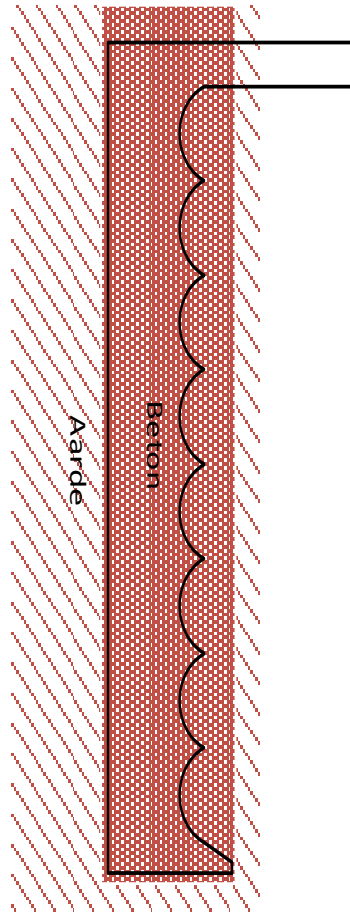
- beperkt oppervlak (verticaal captatienet);
- grote capaciteit 15-30 kWh/m<sup>3</sup>.

Nadelen:

- sterk afhankelijk van de soort ondergrond;
- meer boringen.

### 1.1.3.3 Energy pile

De *energy pile* is opgebouwd uit een aantal lussen van leidingen, gevestigd in een ondergrond (aarde, beton,...). Door deze buizen vloeit er water of een water-glycol mengsel om de energie uit de ondergrond op te nemen. Om de boringen bij woningen te beperken en zo oppervlakte uit te sparen, is er geëxperimenteerd om de leidingen in de funderingen van de woningen te plaatsen [8]



**Figuur 15: Principeschema Energy pile**

Voordelen:

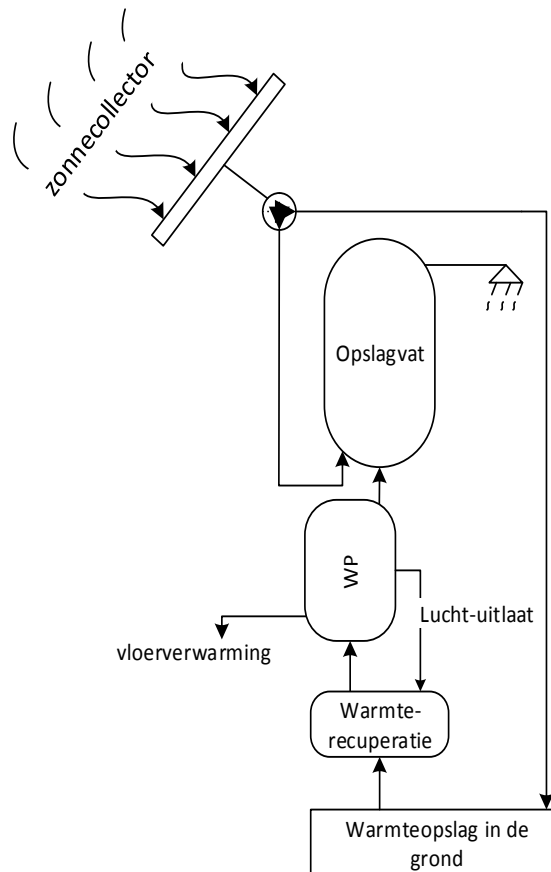
- zeer weinig oppervlak nodig.

Nadelen:

- aangepaste fundering nodig (Basalt beton [47]);
- specifieke warmte varieert sterk;
- warmte wordt onttrokken uit de woning.

#### 1.1.3.4 Zonnecollector gecombineerd met bodemopslag

De opstelling, die terug te vinden is in Figuur 16, wordt zo gestuurd dat er een optimale samenwerking is tussen zonne-energie en de warmtepomp. Met behulp van een temperatuursmeting wordt het verschil tussen het water in de boiler en de temperatuur van het opslagvat gemeten. Wanneer de temperatuur in het opslagvat een ingestelde waarde overschrijdt of groter is dan de collectortemperatuur, wordt de warmte van de zonnecollector ondergronds opgeslagen. [18]



**Figuur 16: Principeschema zonne-warmtepomp**

### 1.1.3.5 Geschiktheid van warmtepomp voor aan- uitschakelen

De energieopbrengst van een warmtepomp wordt uitgedrukt in COP. De COP is een getal dat de verhouding geeft tussen de bruikbare warmte en de energie die nodig is om de compressor (en randapparaten) te laten werken.

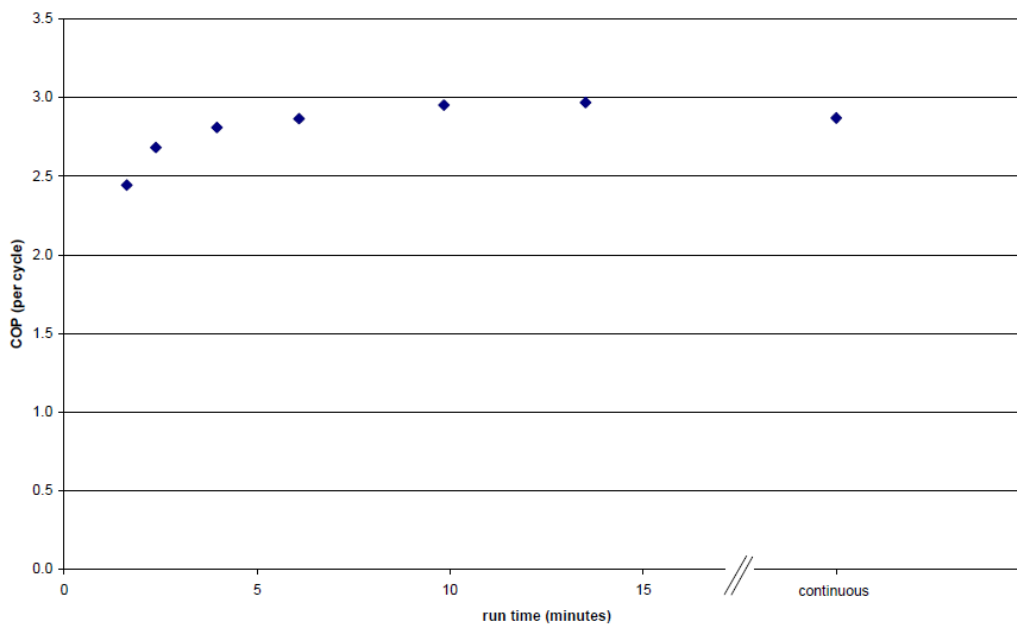
$$COP = \frac{\text{bruikbare warmte}}{\text{nodige energie}} = \frac{|Q|}{W}$$

	WP- buitenlucht	WP-bodem (horizontaal)	WP-bodem (verticaal)	WP- grondwater
COPwp (indicatief)	3,2(2-35°C)	4,5(0-35°C)	4,5(0-35°C)	5,6(10-35°C)

Tabel 2: Vergelijking COP's warmtepompen[42]

In bovenstaande tabel worden de COP's van verschillende warmtepompsystemen met elkaar vergeleken. De waarden zijn echter indicatief, aangezien deze afhankelijk zijn van de werkelijke praktijkwaarden (onder andere brontemperaturen). De waarden tussen haakjes achter de COP, zijn de toestandswaarden (temperatuur van de warmtebron en het waterafgifte) waarmee gerekend is.

Naar aanleiding van de ontworpen sturing werd de COP van een warmtepomp in vraag getrokken. Een Engelse studie van EA Technology onderzoekt de invloed van de schakeltijd op de COP van de installatie [19]. Met deze schakeltijd werd de warmtepomp een bepaald aantal minuten uitgeschakeld en even lang ingeschakeld. In Figuur 17 is de COP van een grond gekoppelde warmtepomp weergegeven in functie van de schakelduur. De laatste meting geeft een COP aan bij een continue werking. Deze studie toont aan dat een warmtepomp uitermate geschikt is om te gebruiken met een schakelduur van ongeveer 15 minuten.



Figuur 17: COP van grond-water warmtepomp in functie van schakeltijd [19]

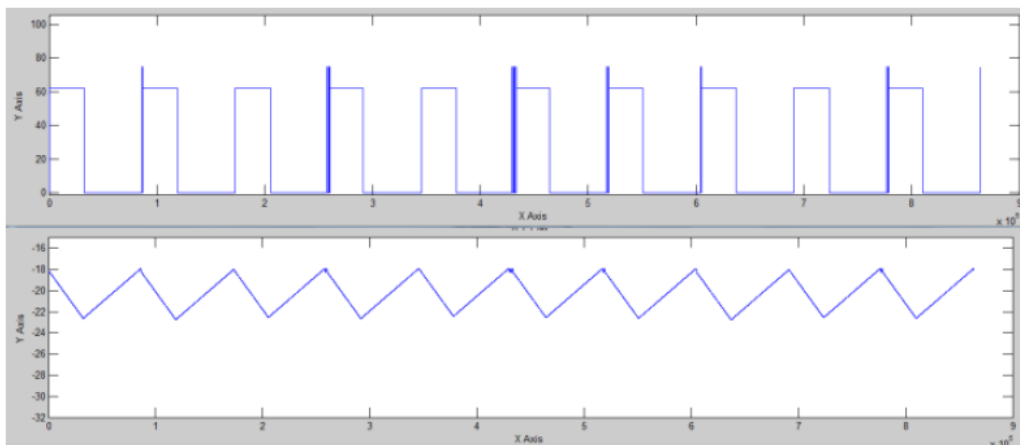
### 1.1.4 Koude opslag

Om aan energieopslag te doen is het niet steeds nodig om nieuwe technologieën te gebruiken. Het is ook mogelijk om de huidige apparaten op een nieuwe manier te gaan gebruiken. Met dit standpunt is onder meer aan de KHKempen onderzocht om energieopslag toe te passen in een diepvriezer[17]. De diepvriezer wordt beschouwd als een grote buffer, waar elektrische energie naar opgeslagen wordt.

De diepvriezer heeft een maximum temperatuur dat bepaald wordt op  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  [17]. Bij de meeste diepvriesmiddelen, maakt het niet uit op welke temperatuur het ingevroren wordt (onder het maximum van  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  [17]). Daardoor kan de vriesperiode gekozen worden zodat de opwarmcyclus in een periode valt waar het elektriciteitsstarief hoog is (of de netbelasting hoog).

Gedurende het onderzoek is een testcase ontwikkeld waarbij er geschakeld werd binnen de grenzen  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  en  $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ . In de daluren werd er gedurende 9 h (10pm tot 7am) ingeschakeld. Buiten dit bereik werd de diepvriezer klassiek gestuurd zodat het een minimum temperatuur van  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  had.

Uit de resultaten valt vast te stellen dat de diepvriezer in staat is om net geen volledige dag te overbruggen. Dit toont aan dat er in beperkte maten zeker een buffercapaciteit zit in de diepvriezers. Wanneer alle vriezers in België als buffer gebruikt worden, zou men naar schatting  $\pm 300\text{MW}$  aan balanceervermogen winnen. [17]



**Figuur 18: Tijdsverloop temperatuur en vermogen koudeopslag[17]**

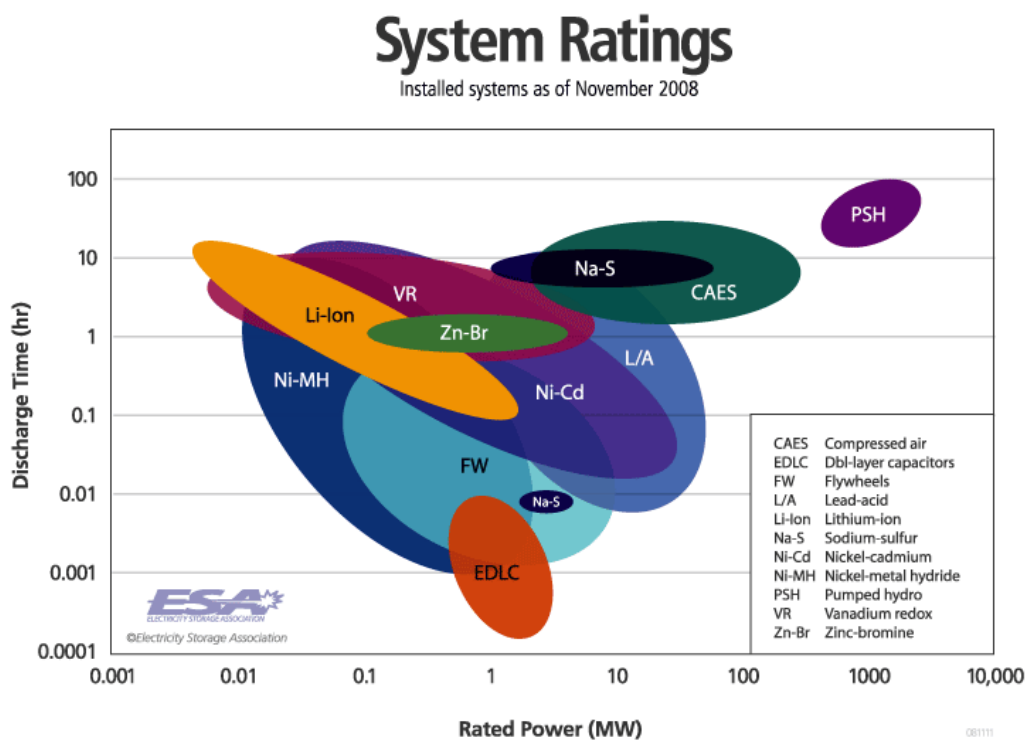
## 1.2 Elektrische opslag

Systemen die elektriciteit opwekken doen dit niet altijd controleerbaar, denkende aan windenergie en fotovoltaïsche panelen. Om lokaal overproductie van het elektriciteitsnet te voorkomen is het interessant om deze elektriciteit op te slaan op momenten dat er teveel energie opgewekt wordt.

Hannelore Claes en Kristof Leemans vermelden in hun masterproef het volgende: “Sinds 2009 is domestische opslag voor zelfconsumptie van PV energie aangemoedigd in Duitsland. Traditioneel verkrijgen Duitse bezitters van PV panelen een remuneratie van 0,43 €/kWh om hun elektriciteit in het net te injecteren. Om directe consumptie aan te moedigen, krijgen de eigenaars van PV panelen (tot 30 kW) ook een vergoeding van 0,25 €/kWh voor de direct geconsumeerde energie.. Als deze wetgeving ook naar België overwaait, kan dit een stijging van energieopslag bij PV-installaties betekenen.”[20] Dit toont aan dat energieopslag ook economisch interessant kan zijn.

De opslag van elektriciteit op woningniveau gebeurt meestal in chemische vorm, hier zijn twee manieren voor: enerzijds oplaadbare batterijen en anderzijds omvormen naar waterstofgas via elektrolyse van water. Dat waterstofgas kan dan gebruikt worden in een brandstofcel waardoor er elektriciteit en warmte vrijkomt. Een andere mogelijkheid voor het gebruik van waterstof, is deze omzetten naar aardgas of in kleine percentages mengen in het gasnet. [21]. Om omzettingsverliezen van elektriciteit naar warmte (voor warmteopslag) of waterstofgas te voorkomen, is het interessant om rechtstreeks de elektriciteit op te slaan in batterijen.

Andere manieren om elektriciteit op te slaan zijn: waterkrachtcentrales, gecomprimeerde lucht, capaciteiten en *redox flow* batterijen. Deze manieren zijn echter zeer groot en worden daarom niet toegepast op woningniveau.



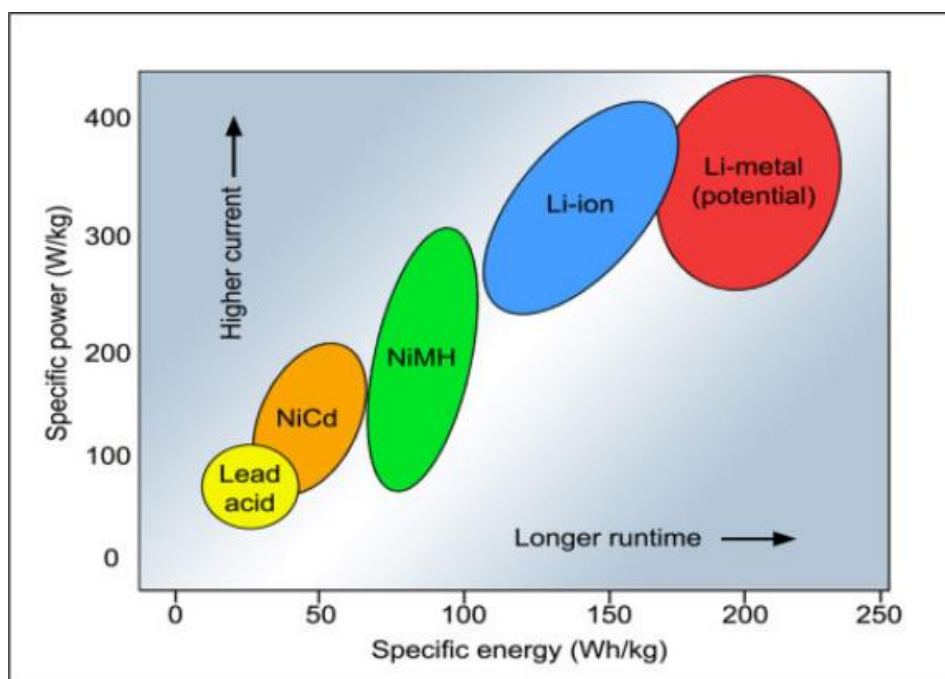
Figuur 19: Overzicht voor vermogen en onlaadtijd van elektrische opslag methoden [22]

### 1.2.1 Oplaadbare batterijen

Batterijen zijn elektrochemische cellen en gebruiken dus een chemisch proces om elektriciteit op te wekken. Als dit proces omkeerbaar is, spreekt men van oplaadbare batterijen. Er zijn verschillende soorten oplaadbare batterijen beschikbaar. Elke soort heeft zijn eigen voor- en nadelen en daardoor zijn eigen toepassingsgebied.

De batterij worden beoordeeld op de volgende eigenschappen:

- vermogensdichtheid,
- energiedichtheid,
- zelfontlading,
- levensduur.



Figuur 20: Vermogensdichtheid en energiedichtheid voor veel gebruikte batterijtypes [23]

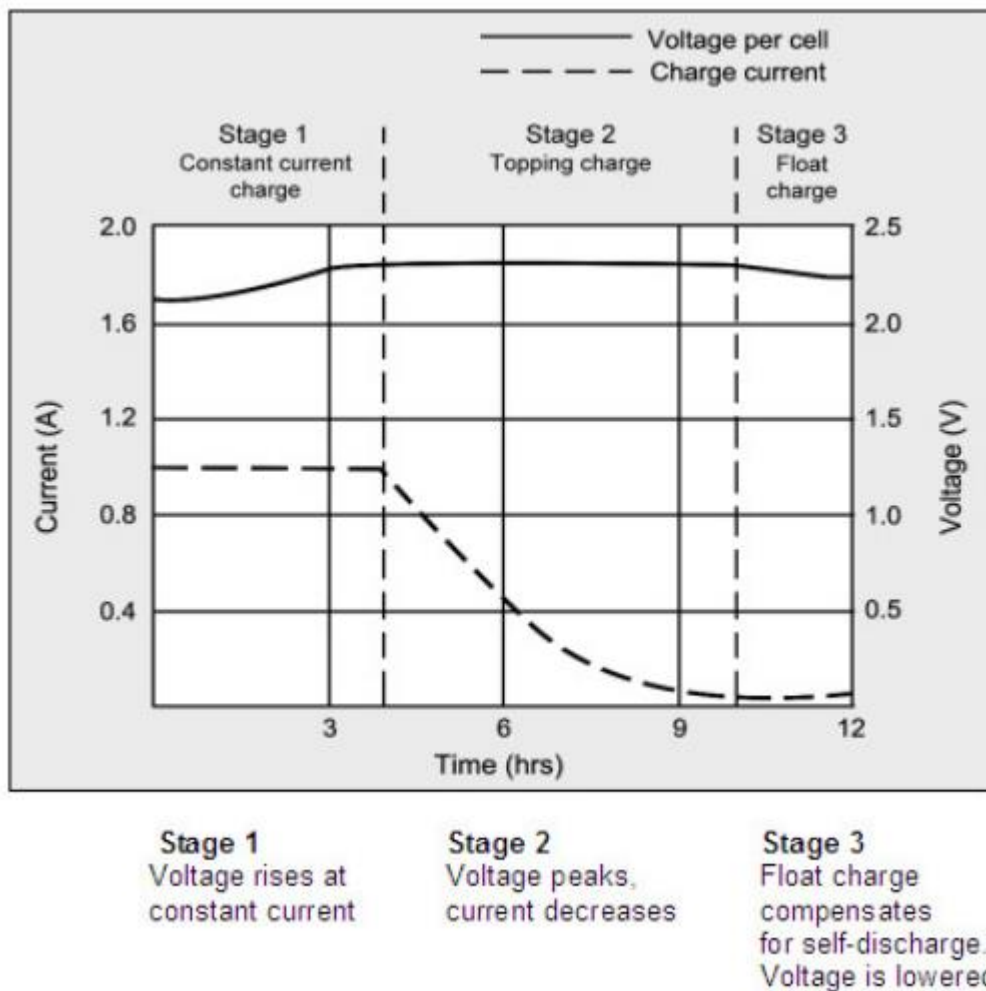
Batterijen worden verder nog onderverdeeld door de chemische samenstelling. Het elektrolyt en de elektrodes zijn hier kenmerkend voor.

#### 1.2.1.1 Loodzuurbatterij

Een van de oudste oplaadbare batterij types is de lood zwavelzuur batterij. Dit type is goedkoop maar heeft een lage energiedichtheid en een beperkte levensduur. De korte levensduur is echter niet van toepassing als de batterijen zelden tot nooit volledig ontladen worden. Loodzuur batterijen worden gebruikt voor golfkarren, start batterij in voertuigen, noodverlichting, *uninterruptible power supply* (UPS) en energiebuffering bij zonnepanelen en windmolens. [23]

De oplaadcyclus voor een loodzuur batterij verloopt, zoals te zien in Figuur 21, in drie fases. In de eerste fase gaat de spanning toenemen met een gelijke stroom, op dit moment laadt de batterij snel op. De tweede fase begint wanneer de loodzuurbatterij voor 70% is opgeladen, dan neemt de stroom

geleidelijk af waardoor het opladen vertraagt. De spanning is in deze fase het hoogste in de batterij. Gedurende de derde fase worden de zelfontladingsverliezen van de batterij gecompenseerd.



**Figuur 21: Opladfasen voor loodzuurbatterij [23]**

Er bestaat nog onderscheid binnen het type loodzuur batterijen, dit afhankelijk van de elektrolyten. Een eerste mogelijkheid is vloeibaar elektrolyt, dit kan stromend of afgesloten toegepast worden. De afgesloten systemen zijn onderhoudsvriendelijk maar zijn niet hermetisch afgesloten zoals de naam doet vermoeden. Wanneer de batterij snel opgeladen of ontladen wordt, ontsnappen dampen uit de vloeistof die moeten kunnen afgeblazen worden als de druk te hoog zou worden. Een tweede mogelijkheid is silicagel. Ten slotte is er ook nog de *absorbent glass mat* (AGM), waarbij het elektrolyt in een matrix zit van glasvezel. [20][23]



### 1.2.1.2 Nikkel-cadmium

Nikkel-Cadmium (NiCd) batterijen is ook een batterijtype dat al langer in gebruik is, en heeft een aantal positieve kenmerken. Het heeft een lange levensduur, levert een hoge stroom, kan tegen extreme temperaturen en is niet duur. Een nadeel is echter dat het milieu onvriendelijke cadmium gebruikt wordt, hierdoor is dit type vervangen door andere chemische samenstellingen. Nikkel-cadmium wordt gebruikt in gereedschap, radio's, vliegtuigen en UPS-systemen. [23]

<b>Advantages</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>Fast and simple charging even after prolonged storage</li><li>High number of charge/discharge cycles; provides over 1,000 charge/discharge cycles with proper maintenance</li><li>Good load performance; rugged and forgiving if abused</li><li>Long shelf life; can be stored in a discharged state</li><li>Simple storage and transportation; not subject to regulatory control</li><li>Good low-temperature performance</li><li>Economically priced; NiCd is the lowest in terms of cost per cycle</li><li>Available in a wide range of sizes and performance options</li></ul>
<b>Limitations</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>Relatively low specific energy compared with newer systems</li><li>Memory effect; needs periodic full discharges</li><li>Environmentally unfriendly; cadmium is a toxic metal and cannot be disposed of in landfills</li><li>High self-discharge; needs recharging after storage</li></ul>

Tabel 3: Voordelen en beperkingen van NiCd [23]

### 1.2.1.3 Nikkel-metaalhydride

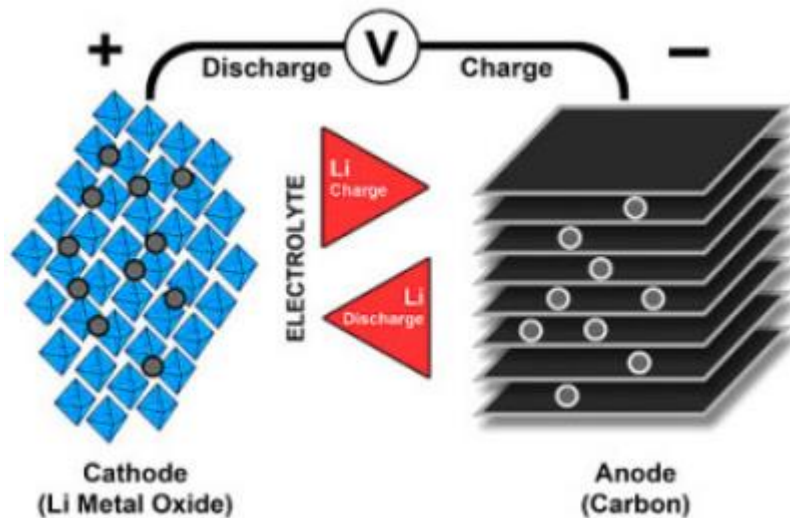
Nikkel-metaal hydride (NiMH) is een praktische vervanger voor NiCd, het heeft een hoge energiedichtheid en minder giftige metalen. Dit batterijtype wordt gebruikt voor medische instrumenten, hybride voertuigen en industriële toepassingen. NiMH is verkrijgbaar eveneens veel verkrijgbaar in AA en AAA cel formaat. [23]

<b>Advantages</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>30–40 percent higher capacity than a standard NiCd</li><li>Less prone to memory than NiCd</li><li>Simple storage and transportation; not subject to regulatory control</li><li>Environmentally friendly; contains only mild toxins</li><li>Nickel content makes recycling profitable</li></ul>
<b>Limitations</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>Limited service life; deep discharge reduces service life</li><li>Requires complex charge algorithm</li><li>Does not absorb overcharge well; trickle charge must be kept low</li><li>Generates heat during fast-charge and high-load discharge</li><li>High self-discharge; chemical additives reduce self-discharge at the expense of capacity</li><li>Performance degrades if stored at elevated temperatures; should be stored in a cool place at about 40 percent state-of-charge</li></ul>

**Tabel 4: Voordelen en beperkingen van NiMH [23]**

### 1.2.1.4 Lithium-ion batterij

Lithium is het lichtste element van de metalen en heeft ook het hoogste potentiaal voor gebruik als elektrochemische component met de grootste energiedichtheid. De lithium-ion batterij duidt niet op één specifiek elektrochemisch koppel, maar kan uitgevoerd worden in verschillende chemische samenstellingen. Iedere van deze samenstellingen heeft zijn voordelen. Het gemeenschappelijke aan de batterijen is de overdracht van lithium ionen tussen kathode en anode bij het op- en ontladen van de batterij. Zo worden onder andere lithium metaaloxides of fosfaten gebruikt in de positieve elektrode en koolstof of lithium titanaat in de negatieve elektrode.

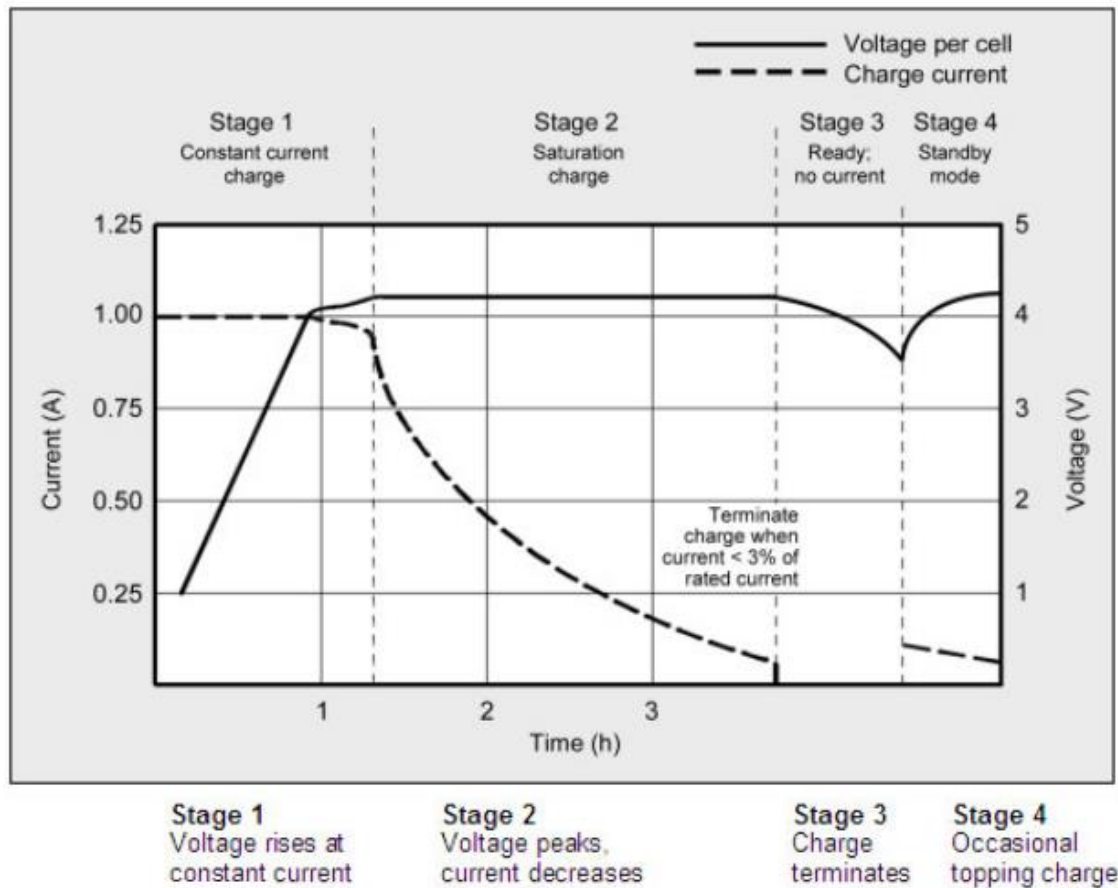


Figuur 22: Ionen stroom bij op- en ontladen voor lithium metaaloxide/ koolstof [23]

Batterijen waarvan de positieve elektrode bestaat uit lithium metaaloxides en een negatieve elektrode van koolstof, hebben een hoge celspanning (3,6V tot 3,7V) en dus bijhorend een hoge energiedichtheid. Nadeel van deze technologie is de grote spreiding op de levensduur en veiligheidsproblemen. Batterijen met een positieve elektrode van lithium ijzerfosfaat ( $\text{LiFePO}_4$ ) zijn veiliger in gebruik maar hebben een lagere energiedichtheid, een lagere celspanning van 3,2V en een hogere zelfontlading. [23] Een derde samenstelling bestaat uit lithium metaaloxide voor de positieve elektrode, de negatieve elektrode bestaat uit lithium titanaat. Die samenstelling geeft de laagste celspanning (2,5V) wat een lage energiedichtheid als resultaat heeft. De vermogensdichtheid, veiligheid en laadsnelheid zijn grote pluspunten. [23]

Twee veel voorkomende lithium metaaloxide batterijen zijn lithium kobaltoxide ( $\text{LiCoO}_2$ ) en lithiummangaanoxide ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ). Beide batterijen hebben een behoorlijke levensduur, maar de energiedichtheid verschilt.  $\text{LiCoO}_2$  heeft een hoge energiedichtheid en wordt gebruikt in gsm's, laptops, digitale camera's en andere draagbare producten.  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  heeft een lagere energiedichtheid maar kan hoge stromen verdragen bij het laden en ontladen. Hierdoor worden ze gebruikt in elektrisch gereedschap, medische apparatuur en elektrisch aangedreven voertuigen. [23]

Om een groter vermogen te verkrijgen, worden kleinere Li-ion cellen (cilindervormig of rechthoekig) met elkaar in serie en/of parallel geplaatst. Deze cellen worden dan samen gecontroleerd door een batterij managementsysteem. Dit systeem zorgt voor het juist laden van de batterij, zodat de batterij niet te diep ontlad en ook niet overladen wordt. [23]



**Figuur 23: Opladfasen voor Li-ion batterijen [23]**

De Li-ion batterij laadt sneller op dan de loodzuur batterij en stopt met opladen wanneer het batterij management systeem de ingestelde minimum stroom waarneemt. Er moet vooral opgelet worden met overladen en diepontladen van dit batterijtype vanwege veiligheidsproblemen die ontstaan wanneer dit wel gebeurt. Zo zal de batterij bij overladen  $\text{CO}_2$  produceren waardoor de druk toeneemt. Bij een te hoge druk zal de cel scheuren en kan de batterij vuur vatten. Diepontlading levert eveneens een groot veiligheidsrisico, hiervoor zijn eveneens veiligheidsvoorzieningen getroffen. [23]

Specifications	Lead Acid	NiCd	NiMH	Li-ion		
				Cobalt	Manganese	Phosphate
Specific energy density (Wh/kg)	30–50	45–80	60–120	150–190	100–135	90–120
Internal resistance <sup>1</sup> (mΩ)	<100 12V pack	100–200 6V pack	200–300 6V pack	150–300 7.2V	25–75 <sup>2</sup> per cell	25–50 <sup>2</sup> per cell
Cycle life <sup>4</sup> (80% discharge)	200–300	1000 <sup>3</sup>	300–500 <sup>3</sup>	500–1,000	500–1,000	1,000–2,000
Fast-charge time	8–16h	1h typical	2–4h	2–4h	1h or less	1h or less
Overcharge tolerance	High	Moderate	Low	Low. Cannot tolerate trickle charge		
Self-discharge/month (room temp)	5%	20% <sup>5</sup>	30% <sup>5</sup>	<10% <sup>6</sup>		
Cell voltage (nominal)	2V	1.2V <sup>7</sup>	1.2V <sup>7</sup>	3.6V <sup>8</sup>	3.8V <sup>8</sup>	3.3V
Charge cutoff voltage (V/cell)	2.40 Float 2.25	Full charge detection by voltage signature		4.20		3.60
Discharge cutoff voltage (V/cell, 1C)	1.75	1.00		2.50 – 3.00		2.80
Peak load current Best result	5C <sup>9</sup> 0.2C	20C 1C	5C 0.5C	>3C <1C	>30C <10C	>30C <10C
Charge temperature	–20 to 50°C	0 to 45°C		0 to 45°C <sup>10</sup>		
Discharge temperature	–20 to 50°C	–20 to 65°C		–20 to 60°C		
Maintenance requirement	3–6 months <sup>11</sup> (topping chg.)	30–60 days (discharge)	60–90 days (discharge)	Not required		
Safety requirements	Thermally stable	Thermally stable, fuse protection common		Protection circuit mandatory <sup>12</sup>		
In use since	Late 1800s	1950	1990	1991	1996	1999

Tabel 5: Overzicht gegevens van vee gebruikte oplaadbare batterijen[23]

#### 1.2.1.5 In ontwikkeling: Lithium-lucht

Li-lucht batterijen zijn gebaseerd op hetzelfde principe dat brandstofcellen ook gebruiken, namelijk lucht gebruiken als katalysator. Als elektrolyt wordt er een lithium anode gebruikt. Wetenschappers verwachten dat de energieopslag mogelijk 5 tot 10 keer groter is dan die van gewone Li-ion batterijen maar verwachten dat dit pas commercieel te realiseren is binnen 10-20 jaar. De celspanning is afhankelijk van de gebruikte materialen en bedraagt tussen 1,7 en 3,2 V per cel en zou een zeer hoge theoretische energiedichtheid hebben van 13 kWh/kg. Aluminium-lucht kan vergelijkbare hoeveelheden energie opslaan, met een theoretische energiedichtheid van 8kWh/kg. [23]

Vooraleer Li-lucht batterijen een commercieel product worden, moet er nog veel onderzoek verricht worden. De verschillende onderdelen die in dit type gebruikt worden vertonen nog veel onopgeloste problemen. Belangrijk is het ontwerpen van een optimale *mesoporeuze* structuur (materiaal waarvan de poriën een diameter hebben tussen 2 en 50 nm) voor de koolstof kathode en een membraan dat voorkomt dat CO<sub>2</sub> en vochtigheid de batterij kan binnendringen terwijl zuurstofgas (O<sub>2</sub>) door het membraan moet. Verder moet ook het op- en ontladen van de batterij beter bestudeerd worden en moet er een stabiele lithiummetaal anode geproduceerd worden om een langere levensduur te bekomen. Tot slot moet ook rekening gehouden worden met de veiligheidsproblemen.[24]

#### 1.2.1.6 In ontwikkeling: Lithium-metaal

De meeste batterijen, die lithium metaal gebruiken, zijn niet oplaadbaar. Door problemen met *thermal runaway* werden in 1989 de oplaadbare versies teruggeroepen. In 2010 werd opnieuw een proef gestart met een Li metaalpolymeer, deze had een energiedichtheid van 300Wh/kg en werd getest in een elektrisch voertuig. DBM Energy, de Duitse fabrikant, beweert dat de batterij een levensduur heeft van 2500 cyclussen, dat de batterij snel kan opladen en een competitieve prijs heeft bij massaproductie. De veiligheid blijft echter wel een probleem. [23]

#### 1.2.1.7 In ontwikkeling: Lithium-zwavel

De combinatie van lithium en zwavel resulteert in een lichte batterij, waardoor deze een zeer hoge energiedichtheid heeft van 550 Wh/kg. Dit is ongeveer het drievoud van de gemiddelde Li-ion batterij, en een specifieke vermogensdichtheid van 2,5 kW/kg. De batterij kan goed tegen koude temperaturen (-60°C) maar heeft een zeer beperkte levensduur van slechts 40 tot 50 laadcycli en kan tevens niet goed tegen hoge temperaturen. Sinds 2007 is er een onderzoek bezig naar nanobedruwing wat zeer beloftevol is voor deze batterij. De batterij is eveneens milieuvriendelijk doordat zwavel (het hoofdingrediënt van de batterij) als grondstof in overmaat aanwezig is. [23]

#### 1.2.1.8 Duurzame grondstoffen voor batterijen

Batterijen maken het mogelijk om duurzame energie op te slaan en te gebruiken op momenten dat dit gewenst is, maar hierdoor is een batterij nog niet energie – of milieuvriendelijk. De productie van de batterijen en vooral de ontginning van de grondstoffen is een milieuvriendelijk proces. “Zo vraagt de productie van elektrische auto’s twee keer zoveel energie (en CO<sub>2</sub> –uitstoot) als die van conventionele auto’s. de fabricage van de accu is goed voor 35 tot 41 procent van die uitstoot.”[25] Eveneens wordt in dit artikel vermeld dat de batterijen veel meer schaarse metalen gebruiken en wordt er een oplossing aangehaald, namelijk het gebruiken van plantaardige materialen in batterijen. Zo kan er gebruik gemaakt worden van *lignine*, dat het tweede meest voorkomend organische materiaal is, wat voorkomt in de celwand van planten en bomen [26]. Lignine heeft als eigenschap dat het een goede isolator is.

Voor een plantaardige geleider wordt er onderzoek gedaan naar het polymeer *polypyrrol* (PPy) en een stof die voorkomt in de wortels van de meekrapplant. Er zijn testen gebeurd met PPy als elektrode samen met zink, deze testen gaven positieve resultaten al zal er nog meer onderzocht moeten worden om de technologie op de markt te brengen [27].

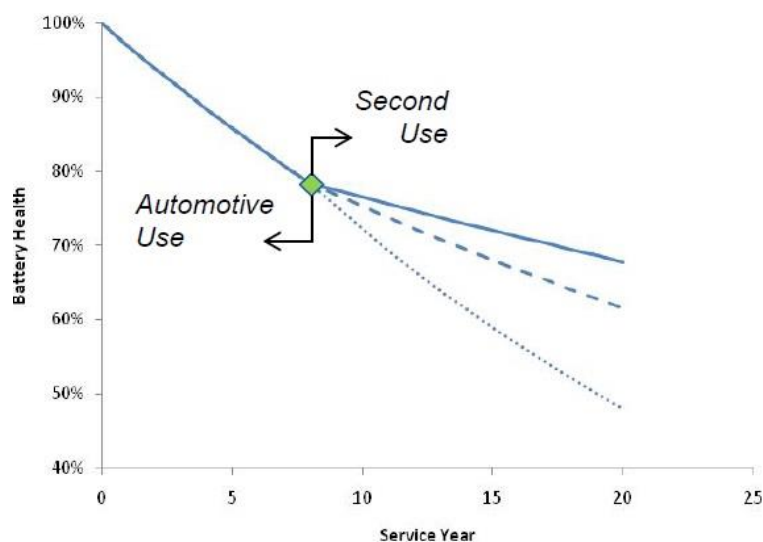
### 1.2.2 Second life batteries

Met de toenemende ontwikkeling van elektrische auto's, is het broodnodig om hun zwakke punten aan te pakken. Een groot minpunt van de auto's is de batterij. Zoals eerder vermeld zorgt deze voor een milieuvriendelijk beeld van de elektrische auto's. Toch worden er regelgevingen opgelegd waardoor de batterij relatief snel moeten vervangen worden, om de reikwijdte van een elektrische wagen te kunnen garanderen. De voorwaarden van de vervanging wordt vastgelegd door het *US Advanced Battery Consortium (USABC)*, deze legt volgende regels op om te vervangen[28]:

- wanneer de celcapaciteit zich onder 80 % bevindt;
- wanneer de huidige vermogendichtheid minder is dan 80 % van de oorspronkelijke waarde, bij een belasting van 80 %.

Hierdoor wordt de batterij een grote onkosten, die gedekt kan worden door deze als tweedehands batterijen te hergebruiken. De batterijen kunnen nog voor verscheidene toepassingen gebruikt worden zoals: load-scheduling, energieopslag, UPS-systeem, ...

Met onderstaande grafiek wordt aangetoond hoe de levensduur van de accu wordt verlengd. In het klassieke gebruik wordt de accu na ongeveer 7 jaar vervangen, dit is afhankelijk van het rijgedrag waardoor de accu al dan niet vaker herlaadt. Na deze termijn zou ze worden verwerkt door de autofabrikant, wat onkosten tot gevolg heeft. Door die accu een nieuwe functionaliteit te bieden (zoals energieopslag), kan de levensduur verlengd worden. Deze verlenging maakt een investering meer economisch rendabel en kan de kosten voor de autoconsument reduceren.

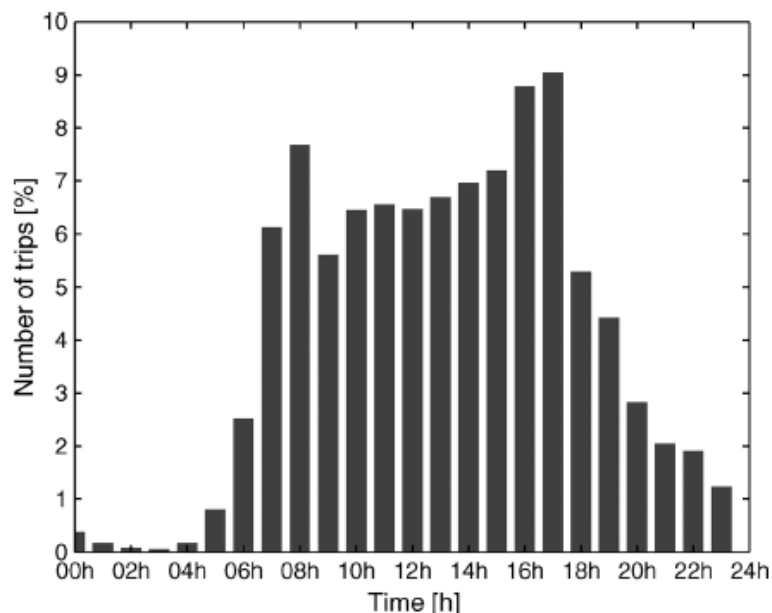


Figuur 24: Dienstjaren accu [39]

### 1.2.3 Vehicle to grid (V2G)

Piekverbruik is een welgekend probleem. Om deze piekverbruiken in de hand te houden, wordt er onderzoek gedaan naar verschillende technieken. Die technieken worden steeds belangrijker als er naar de evolutie van de auto-industrie wordt gekeken. In deze industrie is een verandering aan de gang waar meer en meer de focus verschuift naar elektrisch en/of hybride auto's.

In de onderzoekswereld wordt er gesproken over “Pluggable Hybrid Electric Vehicles” (PHEV) en “Electric Vehicles” (EV). De invloed van deze voertuigen op het elektriciteitsnet kan aanzienlijk groot worden als deze voertuigen “klassiek” worden gebruikt. In dat geval zal de gebruiker de auto opladen wanneer men thuis komt, met behulp van een stopcontact. Volgens onderstaande grafiek, komt het merendeel van de gebruikers thuis rond 18 h, na het werk. In het klassieke gebruik zal men dus een grote vermogenpiek krijgen, bovenop de standaard piek (kookvuren, verlichting, etc). Om deze piek te behandelen, zijn er verscheidene technieken ontwikkeld. [29]



Figuur 25: Tijdstip autoritten [29]

#### 1.2.3.1 Real-time organiseren van oplaadcurves

Om een real-time regeling van de netbelasting, afkomstig van de PHEV, te kunnen uitvoeren is er in een onderzoek van Boucké en Holvoet een MAS (multi-agent system) ontwikkeld. [30] Dit systeem maakt gebruik van drie agents, elke agent heeft zijn eigen verantwoordelijkheid:

- PHEV Agent: verantwoordelijk voor het opladen van de PHEV;
- Transformer Agent: voorkomen van overbelasting bij de distributietransformator;
- BRP (Balancing Responsible Party) Agent: kosten van de onbalans minimaliseren;
  - de positieve of negatieve afwijking van het real-time verbruik ten opzichte van het day-ahead profiel wordt als boete aangerekend.

De BRP Agent maakt een *intention graph* van alle PHEV's, die grafiek bevat informatie over de oplaadvoorkeuren inclusief hoeveel en de uiterste deadline. Om over deze gegevens te beschikken,

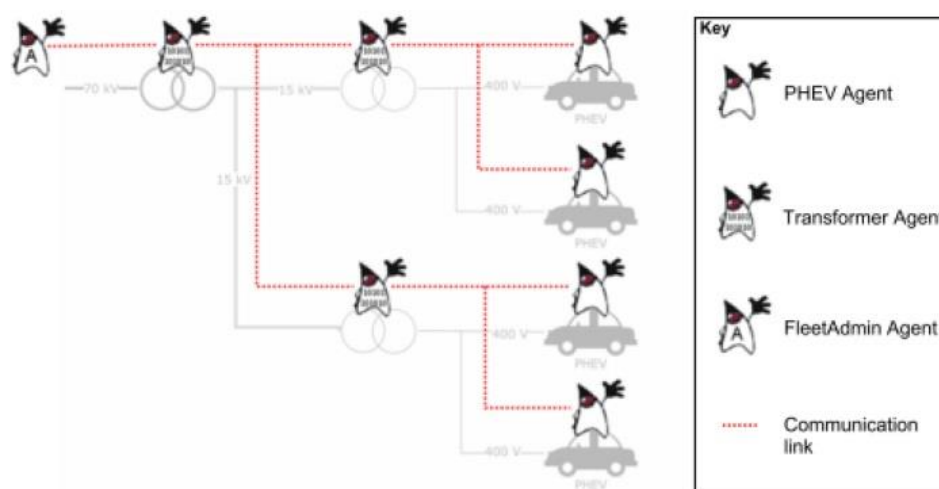


gaat de BRP agent moeten communiceren met de Transformer Agent. Nadat de grafiek opgesteld is, moet de BRP agent groen licht geven aan de agents die de volgende periode mag opladen.

Om aan een juiste vermogenafvlakking te doen, valt er de keuze te maken uit twee strategieën, reactief en proactief. In de reactieve strategie wordt een onbalans zo lang mogelijk uitgesteld. Daardoor zal het perfect mogelijk zijn om het profiel van de day-ahead markt vlot te volgen. Door de proactieve strategie te gebruiken, zal de BRP agent zijn intention graph gebruiken om zo dicht mogelijk tegen het day-ahead profiel te geraken. Hierdoor neemt de kans naar onbalansen af, maar de afhankelijkheid van nauwkeurige voorspellingen is groter.

Een uitbreiding van dit systeem is gemaakt in een studie van dhr. Vandael. Deze studie legt de focus op het gebruik van PHEV als primaire reserve voor het elektriciteitsnet. Met deze primaire reserve is het mogelijk de stabiliteit van het net te verbeteren zodat de frequentie continu blijft. In de uitbreiding worden de agents beperkt aangepast. Zo wordt de BRP agent aangepast naar een *FleetAdmin* agent, deze is verantwoordelijk om de PHEV agents te bedienen als primaire reserve.

1. PHEV agent geeft basisinformatie door aan de Transformator Agent (hoeveelheid van laden, deadline van het laden,..)
  - In deze uitbreiding berekent de PHEV zijn mogelijk aandeel als primaire reserve
2. Transformator Agent verzamelt de informatie van meerdere PHEV's
3. FleetAdmin bouwt een intentiongraph op en beslist over het inschakelen op basis van een voorgeselecteerde strategie
4. FleetAdmin geeft indien nodig een in- of uitschakel commando naar de nodige Agent



**Figuur 26: Structuur MAS [29]**

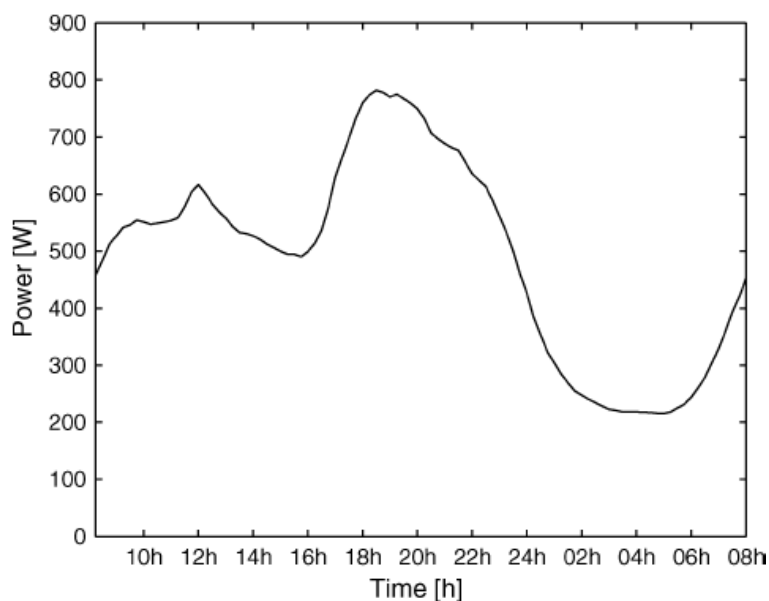
### 1.2.3.2 Optimaliseren van het verbruiksprofiel

In de Figuur 27 is een voorbeeld van het gemiddelde verbruiksprofiel van een gezinswoning terug te vinden. Hierin zijn twee piekverbruiken terug te vinden. De eerste is 's ochtends rond 8 h. Deze is te verklaren door het wakken van de bewoners. Als tweede is er tussen 18 h en 22 h een tweede piek te vinden, die te wijten is aan de verlichting, fornuis, ... .

Op het moment van de genoemde pieken, zijn extra buffers een mogelijk oplossing. Wanneer deze buffers leiden tot een ideaal verbruiksprofiel, zouden we een constante lijn verkrijgen. Door dit constant profiel is het mogelijk om het real-time verbruik exact te laten matchen met het day-ahead

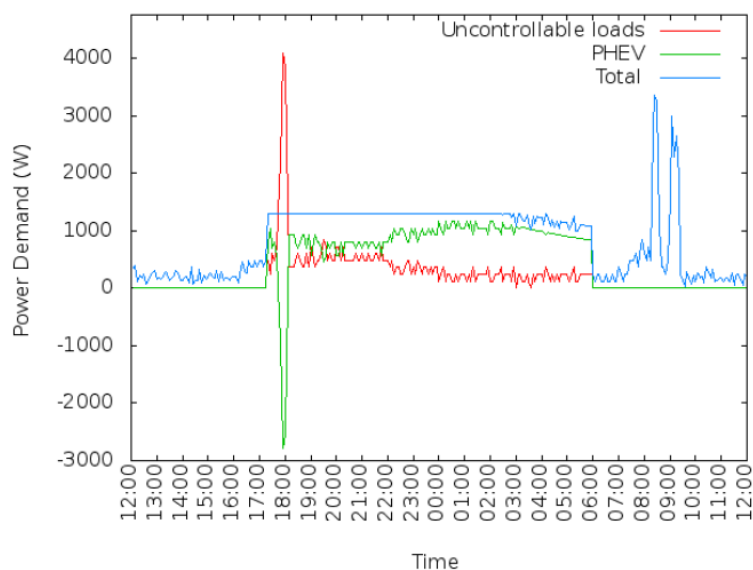
profiel. Het is mogelijk om er naartoe te streven door de buffer op te laden tijdens de dalverbruiken. En in geval van de pieken de energie op te nemen uit de buffers.

Om de capaciteiten van “vehicle to grid” in te schatten voor het continu maken van de profielen, zijn er studies aan UGent uitgevoerd. [31] Die studie omvatte 63 huishoudens, waarbij steeds de mogelijkheid was tussen een PHEV of een EV. Het verschil tussen deze twee zijn de vermogens, de PHEV-batterij heeft een lager vermogen van 15 kWh en de EV heeft een 25 kWh batterij. Beide kunnen worden opgeladen door twee verschillende opladers: 3,6 kW of 7,4 kW. Op deze manier kan de invloed onderzocht worden met vier verschillende verbruiksprofielen. Daarnaast zal ook de invloed onderzocht worden van de doorbraak van elektrische auto's (15 %, 45 % en 75 % van de woningen met een PHEV of EV). Om realistische profielen te verkrijgen zal het in- en uitschakelen van de voertuigen geselecteerd worden tussen 17 h 30 en 6 h 30 via een normale verdeling met een standaard afwijking van 45 minuten.



**Figuur 27: Gemiddeld verbruiksprofiel huiswoning [31]**

Het ontwikkelde regel-algoritme wordt toegelicht aan de hand van Figuur 28. Hierin wordt de invloed op één huishouden aangegeven. De oncontroleerbare belastingen zijn degene met hoge prioriteit (zoals een fornuis, verlichting, televisie, ...), die zijn niet mogelijk om in de tijd te verschuiven. De PHEV is een belasting die wel in de tijd te verschuiven is. De laadcurve van de PHEV wordt zo gekozen zodat de accu's zullen bijdragen in het opvangen van de oncontroleerbare lasten. Dit op een manier zodat het totaalverbruik constant blijft verlopen. In Figuur 28 is de PHEV aangekoppeld rond 17 h, kort hierna wordt een piekverbruik gedetecteerd om 18 h. Op het moment van deze piek, schakelt de accu om naar ontladen. Hierdoor wordt vermogen uit de accu's gebruikt om het piekvermogen lokaal te verbruiken, niet van het elektriciteitsnet. Na het piekvermogen, wordt de accu verder opgeladen met een opgenomen vermogen dat afhankelijk is van de oncontroleerbare lasten. Aangezien de laadcurve zo ingesteld is dat de accu opgeladen moet zijn tegen 6 h, wordt er vanaf ongeveer 3 h geen regeling meer uitgevoerd. Het tweede piekverbruik, tussen 8 h en 10 h wordt niet opgevangen omdat de PHEV ontkoppeld is.

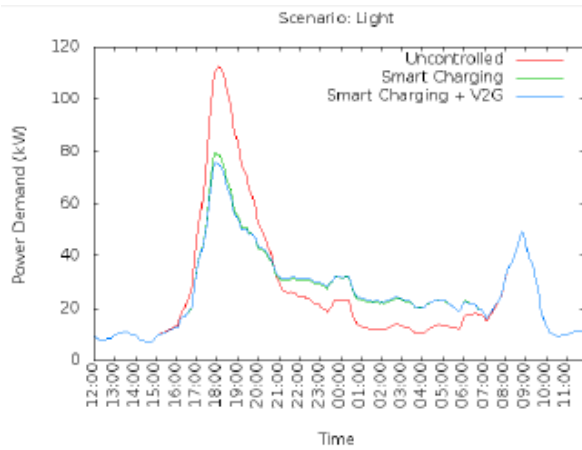


**Figuur 28: Impact controlestrategie huishouden [31]**

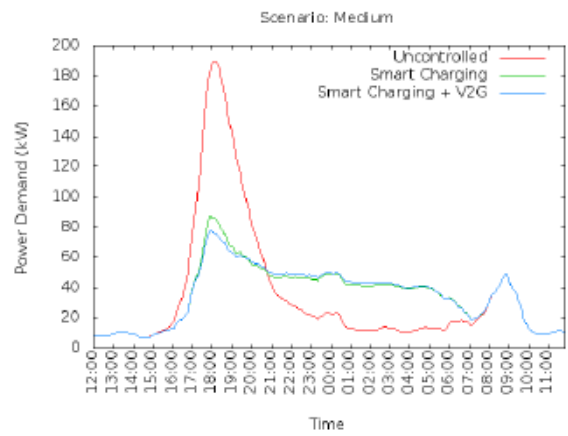
Om de invloed aan de transformator te analyseren, zijn er drie simulaties uitgevoerd. De eerste simulatie is zonder de regeling. De tweede is met een slimme oplaadcurve, hier wordt slechts het verbruiksprofiel van de accu over de tijd geschoven. De derde en laatste is slim opladen met V2G, hierbij wordt de accu ook ontladen om de piek op te vangen. Deze metingen worden uitgevoerd voor de drie penetratie graden van de PHEV.

Uit verdere resultaten (Figuur 29, Figuur 30, Figuur 31) stellen we vast dat er bij een toename van de aangesloten PHEV op het net het verbruiksprofiel aan de transformator steeds meer continue verloopt. Na detailanalyse resulteert dat het slim opladen van de accu's een afname van de peak-vraag van respectievelijk: 29 %, 53 % en 64 % behaalt. Bij een uitbreiding met V2G, komt er een extra besparing van 4 %, 10 % en 17 %. De continuïteit van het verbruiksprofiel wordt met V2G verbeterd met respectievelijk: 37 %, 57 % en 61 %.

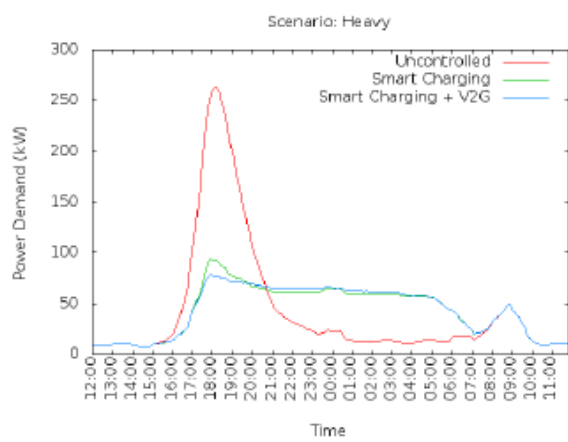
Netbelasting en spanningsfluctuaties gaan vaak gepaard met elkaar. Daarom is het ook een interessante analyse om de overschrijdingen van de EN50160 standaard te bekijken. Deze standaard zegt dat de effectieve waarde van de spanning maximaal  $230\text{ V} \pm 10\%$  mag behalen. In het onderzoek zijn de simulaties uitgevoerd bij een penetratie graad van 45 %. De gebruikte verbruiksprofielen zijn terug te vinden in Figuur 32. In Figuur 33 worden het aantal huizen met overschrijdingen van de norm visueel voorgesteld voor de drie fasen bij een ongecontroleerd verbruik. Daarnaast wordt in Figuur 34 duidelijk, hoe nuttig het gebruik van V2G is.



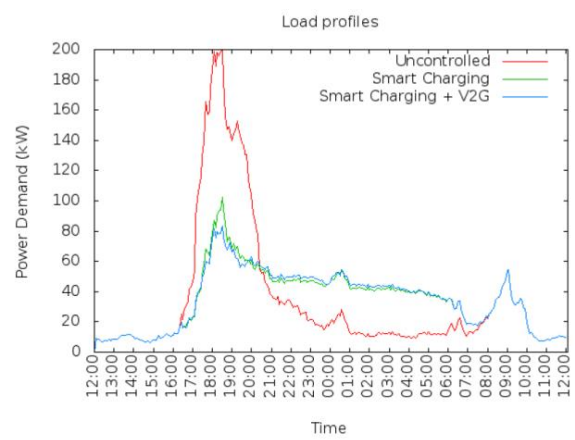
**Figuur 29: Verbruiksprofiel 15 % PHEV [31]**



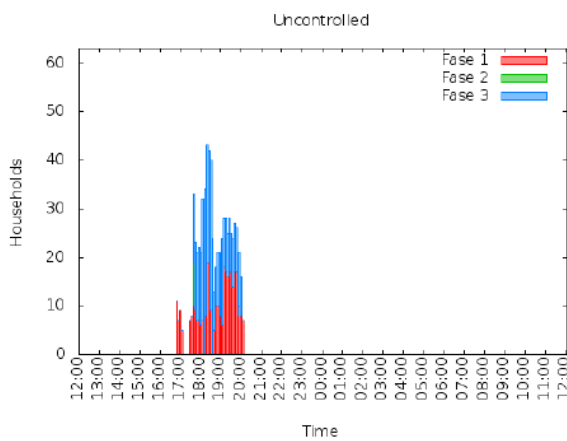
**Figuur 30: Verbruiksprofiel 45 % PHEV [31]**



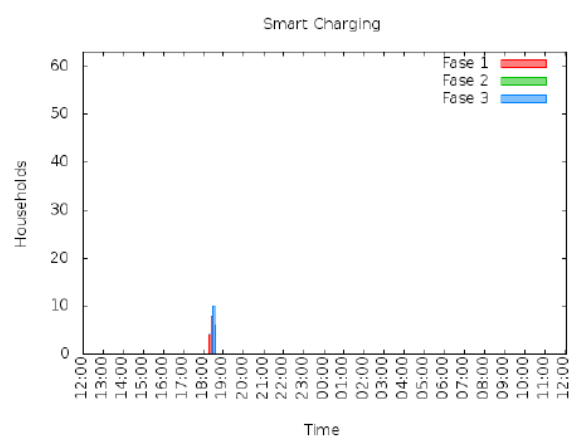
**Figuur 31: Verbruiksprofiel 75 % PHEV [31]**



**Figuur 32: Verbruiksprofiel spanningsanalyse [31]**



**Figuur 33: Normoverschrijding Ongecontroleerd [31]**



**Figuur 34: Normoverschrijding V2G [31]**

### 1.3 Gecombineerde opwekking van warmte en elektriciteit

Gecombineerde opwekking is een principe waarbij uit één toepassing zowel warmte als elektriciteit geproduceerd wordt. De meest gekende voorbeelden zijn warmtekrachtkoppeling (WKK) en brandstofcellen. Doordat de thesis zich beperkt tot energieopslag, wordt er alleen naar brandstofcellen gekeken, aangezien WKK deze optie niet ondersteund.

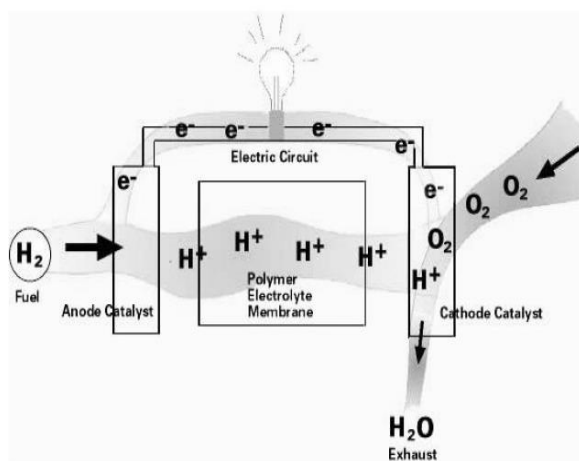
#### 1.3.1 Brandstofcel

Brandstofcellen, ook gekend als een fuel cell, is een productie-eenheid waar tegenwoordig enorm veel onderzoek in kruipt. Doordat er nog veel onderzoeken gebeuren, verschillen de data over de typische eigenschappen zoals temperaturen en rendementen tussen verscheidene bronnen.[32]

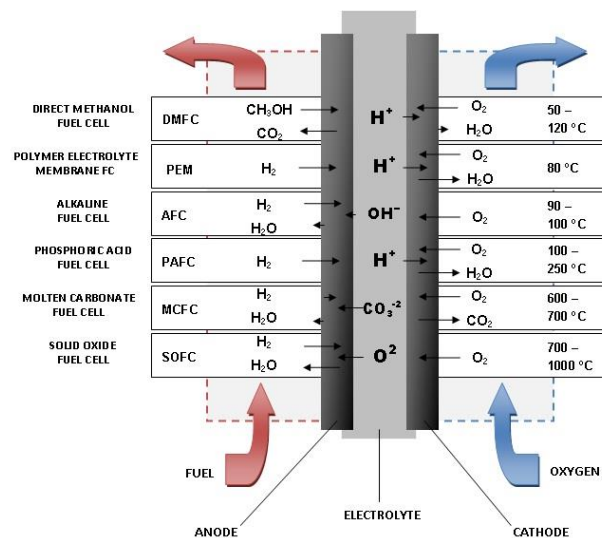
Een fuel cell is vergelijkbaar met een batterij die elektriciteit produceert door een elektrochemische reactie te ondergaan. Er zijn echter twee grote verschillen tussen een gangbare batterij en een fuel cell:

1. een fuel cell produceert naast elektriciteit ook warmte;
2. de fuel cell moet voorzien worden via externe toevoer van brandstof (meestal waterstof en zuurstof).

Een fuel cell is opgebouwd uit twee elektrodes die van elkaar gescheiden zijn door een elektrolyt in vaste of vloeibare vorm. Dat elektrolyt is elektrisch geleidend, dit maakt samen met de chemische reactie het mogelijk om een elektrische stroom te onttrekken uit de fuel cell. De chemische reactie, die plaatsvindt tussen de brandstof en het elektrolyt, is afhankelijk van de aard van elektrolyt. Daarom worden de types van fuel cell vaak benoemd naar de elektrolyt. In Figuur 36 is een kort overzicht terug te vinden van deze verschillende types. Een uitgebreide vergelijking is terug te vinden in Tabel 6, terug te vinden op pagina 49.



Figuur 35: Principe PEMFC[32]

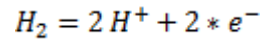


Figuur 36: Beperkt overzicht types fuel cells [40]

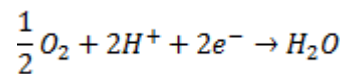
### 1.3.1.1 Werking fuel cell

De werking van de verschillende types fuel cell zijn vrij gelijkaardig, waardoor we slechts dieper ingaan op het meest gebruikte type, de *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC) ook wel PEM genoemd. [33]

Aan de anode-zijde, waar de elektronen de ‘batterij’ verlaten, wordt de waterstof opgesplitst in protonen en elektronen:



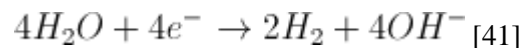
De vrijgekomen elektronen worden via het elektrisch circuit naar de kathode geleid. Aan de kathode reageert de zuurstof, uit de lucht, naar water:



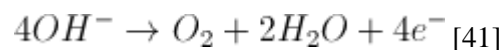
### 1.3.1.2 Werking elektrolyse

Om waterstof te bufferen met behulp van elektriciteit, is de meest klassieke manier een elektrolyse uit te voeren met gelijkspanning. Bij de elektrolyse wordt water ontbonden in waterstofgas  $H_2$  en zuurstofgas  $O_2$ . Dit kan op de eenvoudigste manier gebeuren door twee elektrodes in een vat met water te plaatsen.

Doordat er een stroom zal vloeien tussen de aangebrachte proben, zal aan de kathode waterstofgas ontstaan. Het waterstofgas ontstaat door het opnemen van elektronen uit de bron:



Aan de anode worden elektronen opgenomen uit het water, waardoor zuurstofgas ontstaat:

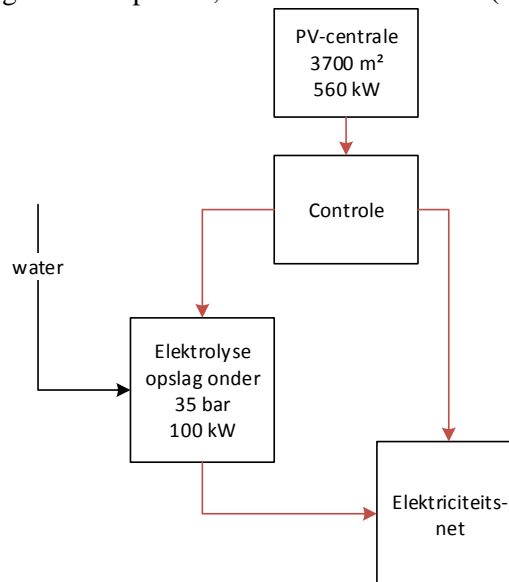


De snelheid van het ontwikkelen van waterstofgas is twee maal zo groot, als de snelheid voor het zuurstofgas te ontwikkelen. Dit is in bovenstaande formules te zien aan de factor voor  $e^-$ . Hierdoor is het ook mogelijk om de snelheid te regelen met behulp van een elektrische stroom regeling.[41]

### 1.3.1.3 Elektrische energie opgeslagen als waterstofgas

Er zijn veel projecten waar fuel cells het elektrische net ondersteunen. Onder meer in Corsica wordt een PV-centrale (centrale van 560 kW met een zonnepanelenveld van 3700 m<sup>2</sup>) bijgesprongen door fuel cells. [21] Wanneer de centrale een overschot aan elektriciteit opwekt, wordt de overtollige elektriciteit naar de elektrolyse gestuurd. Op dit moment kan zowel het net als de elektrolyse gevoed worden door de centrale.

Tijdens de elektrolyse wordt water opgesplitst in zuurstofgas en waterstofgas. Doordat beide gassen zeer vluchtig zijn en waterstofgas zeer explosief, moeten ze onder druk (35 bar) opgeslagen worden.



**Figuur 37: Principe PV-centrale Corsica**

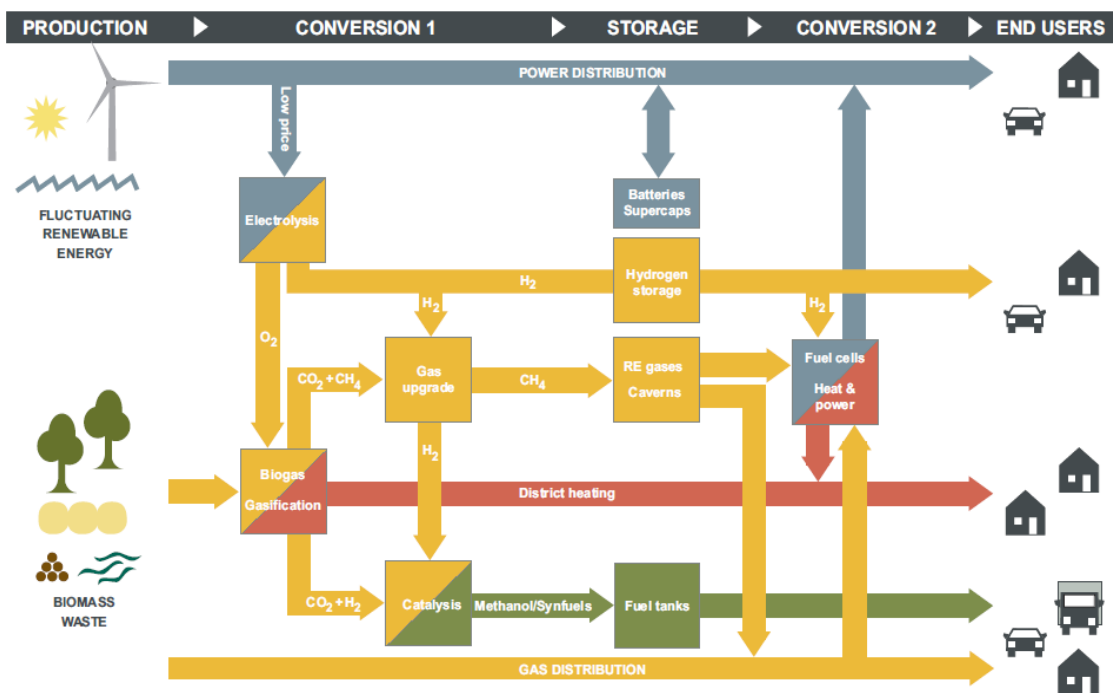
Vanaf het moment dat de centrale minder opwekt dan de afname van het net, wordt er beroep gedaan op de opgeslagen zuurstofgas en waterstofgas. Deze worden met behulp van de fuel cells omgevormd tot elektriciteit. De fuel cells kunnen voor zo'n 100 kW bijspringen.

Het elektrisch rendement van een fuel cell ligt een stuk lager dan dat van een traditionele batterij. Daarom wordt het opslagrendement verbeterd (tot 70 %) wanneer er "district heating" wordt toegepast. Tijdens dit principe zal de vrijgekomen warmte van de fuel cells ook benut worden om de warmtevraag van de bewoners te dekken.

Naast Frankrijk zijn er meerdere landen met grootschalige testcases. In Denemarken is een net ontwikkeld waar zowel zonne-, wind- en zee-energie op de elektrolyse kan gekoppeld worden. [34]

De productieketting wordt onderverdeeld in vier stappen:

- productie
  - wind-, zonne- en zee kracht worden op het net gekoppeld, dat ter beschikking staat voor huisgebruik en elektrische auto's;
  - biomassa wordt geïntroduceerd op het net.
- conversie 1
  - de elektriciteit die reeds gegenereerd werd, wordt gebruikt om water te ontbinden in zuurstofgas en waterstofgas,;
  - biomassa wordt geconverteerd in biogas, deze wordt verwerkt tot 'renewable gas' (RE gas) of biobrandstof.
- opslag
  - het RE gas kan opgeslagen worden in gasflessen of;
  - waterstofgas is moeilijker op te slaan, hier wordt later op terug gekomen;
  - de biobrandstof kan eenvoudig opgeslagen worden als de traditionele fossiele brandstof.
- conversie 2
  - waterstof en RE gas worden omgevormd tot elektriciteit met behulp van brandstofcellen of gasturbine;
  - warmteverliezen worden opgevangen voor district heating.



Figuur 38: Opslagnet Denemarken [34]



Naam	Elektrolyt	fuel	temperatuur	elektrisch rendement	Toepassingen	Vermogen-dichtheid [mW/cm <sup>2</sup> ]	voordelen	nadelen
PEMFC	polymeerzuur	waterstof	80 - 100 °C	60 %	- auto's - productie	350	snelle opstarttijd	weinig warmteopwekking
DMFC	polymeer	liquid methanol	60 - 130 °C	< 40 %	portable power	200	veiliger ten opzichte van waterstofgas	laag vermogen
PAFC	fosforzuur	waterstof	150 - 200 °C	40 %	bussen	200	meer immuun tegen onzuiverheden	slecht elektrisch rendement
AFC	alkalinezuur	puur waterstof	~ 70 °C	60 %	- ruimtevaart - voertuigen	100 - 200	elektrisch rendement	- grote afmetingen - gevoelig aan CO <sub>2</sub> aan de inlaat
SOFC	keramisch	koolwaterstoffen (methaan, propaan, ...)	800 - 1000 °C	50-60 %	- huizen - appartementen	240	hoge efficiëntie	lange opstarttijd
MCFC	gesmolten alkaline carbonaat	- koolwaterstoffen - koolstof	600 - 700 °C	60-65 %	- industrie	100	- ideaal warmtekoppeling	lage vermogensdichtheid

**Tabel 6: Overzicht meest voorkomende fuel cells**  
[35][36][37]

## 1.3.2 Waterstofopslag

Waterstof is het kleinste en lichtste element in de tabel van Mendeljev. Door deze eigenschappen is het ook zeer moeilijk om deze op een efficiënte manier op te slaan. Er zijn drie manieren om het op te slaan.

### 1.3.2.1 Gecomprimeerd gas

Waterstofgas kan gecomprimeerd worden om het in opslagtanks op te slaan. Deze tanks kunnen bestaan uit staal, aluminium, koper met fiberglas. Om veiligheidsredenen wordt deze opslagmethode vermeden. Bij een klein lek in de tank zal het waterstofgas, door de extreme druk ( $> 350$  bar), onmiddellijk ontsnappen en is er ontploffingsgevaar. [38]

### 1.3.2.2 Liquid Hydrogen

Waterstof kan bij atmosferische druk vloeibaar opgeslagen worden bij een temperatuur van  $-251,95$  °C. Eenmaal in vloeibare vorm, moet de vloeistof onder druk blijven en op deze temperatuur. Deze processen vergen enorm veel energie en leiden tot een verlies van 30 %. [38]

### 1.3.2.3 Opslag in vaste vorm

Waterstof opslaan in vaste vorm is om verscheiden redenen interessanter dan opslag in gas of vloeibare vorm. Ten eerste is gas of vloeibare vorm enorm energieverblindend om de druk en temperatuur te behalen en vast te behouden. Ten tweede is het mogelijk om meer te bewaren met eenzelfde volume. Zo heeft de gasvorm een dichtheid van 42 kg per kubieke meter, vloeibare vorm 70 kg per kubieke meter en de vaste vorm 106 kg per kubieke meter. Het is met andere woorden mogelijk om in vaste vorm 152 % meer op te slaan dan in gasvormig toestand. [21] McPhy Energy, een Frans bedrijf dat een octrooi verkregen heeft op een toepassing van deze opslag, heeft een genanostructureerde vorm van magnesiumhydride ontwikkeld, het McPhy composiet. Met deze composiet is het mogelijk om de voorgenoemde dichtheid te behalen én is de laadtijd korter dan bij een onbewerkt magnesiumhydride. Om de opslag te verwezenlijken wordt een (geoctrooieerde) opslagtank gebruikt, daarin zit een gepatenteerd materiaal zodat het als een warmtewisselaar fungeert. Om het rendement te verhogen, wordt de vrijgekomen warmte tijdens het opladen bijgehouden en weer verbruikt tijdens het ontladen. Hierdoor is het mogelijk om een rendement van 97 % te behalen.

## 1.4 Conclusie

Om thermische energie op te slaan zijn er verscheidene hedendaagse technologieën. De meest eenvoudige technologieën om te implementeren zijn deze waarbij een bestaand toestel (zoals boiler en diepvriezer) intelligenter worden gemaakt. Daardoor is thermische opslag een ideale manier om aan load-shedding te doen, waardoor de piekverbruiken opmerkelijk kunnen verminderen. Anderzijds zijn er geavanceerdere manieren zoals phase changing materials en warmtepompopslag, waar de oplossing dan weer wat duurder is.

Second life batterijen kunnen de interesse in batterijen vergroten, doordat deze de praktische levensduur van de autobatterijen verlengen door in andere toepassingen te gebruiken, waaronder energieopslag. De second life toepassingen zijn eerder geschikt voor productieafvlakking, door bijvoorbeeld de overproductie van zonnepanelen te detecteren en op te slaan. Om aan load-shedding te doen met batterijen is er de optie met vehicle to grid (V2G). Deze technologie zorgt ervoor dat de accu opgeladen wordt wanneer het net het minst belast is, maar kan ook de energie uit de accu halen.

In toepassingen waarin zowel thermisch als elektrische energie wordt benut, zijn fuel cells een goede oplossing. Via een elektrolyse uit te voeren met het overschot aan opgewekt energie kan er productieafvlakking gebeuren. Daarna wordt het resultaat van de elektrolyse gebruikt om warmte en elektriciteit op te wekken.



## 2 Sturing voor energieopslag

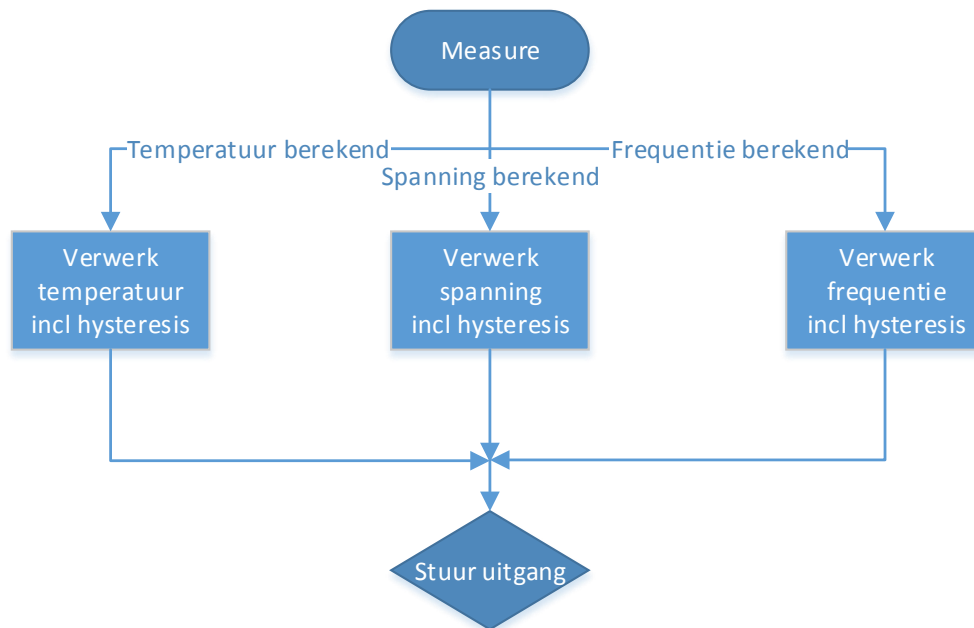
Om energieopslag te kunnen doen op momenten dat er een overschot is aan energie en in het bijzonder duurzame energie, moet er een sturing zijn die dit overschot kan detecteren. De sturingen die hiervoor op de markt zijn, zijn duur en complex.

In dit hoofdstuk wordt een goedkope sturing met een budget van maximum € 200 ontworpen, die energieoverschotten in het net kan meten. Een energieoverschot wordt gemeten aan de hand van de netspanning en –frequentie. Wanneer een overschot gemeten is, kan de sturing het opslagmechanisme aansturen om energie te bufferen. De buffering gebeurt bij de testen in een elektrische boiler, waar de energie wordt opgeslagen in de vorm van voelbare warmte.

### 2.1 Stuuralgoritme

Het stuursysteem dient de momenten te detecteren dat er een energieoverschot is in het elektriciteitsnet. Dat kan gebeuren door het meten van de netspanning en –frequentie. Dit meetprincipe wordt al langer toegepast door de netbeheerder, die de productie van energie op deze manier controleert. De spannings- en frequentieveranderingen zijn afhankelijk van het actief vermogen. De Droop controle is een primaire regeling die het actief vermogen van het openbaar laagspanningsnet aantoonst en regelt aan de hand van de frequentie. Zo neemt de frequentie toe naarmate het actief geleverd vermogen groter is dan het verbruikte vermogen. Wanneer het geleverde vermogen lager is dan wat er verbruikt wordt zal de frequentie dalen.[4] In een microgrid, of bij decentrale energieproductie in een laagspanningsnet, overheerst het resistief karakter, waardoor de netspanning lokaal sterk kan variëren naargelang van de richting van de energiestromen. Hierdoor kan er gebruik gemaakt worden van een spannings-Droop controle om de variatie te beperken [5].

Om dus in beide situaties een energieoverschot te detecteren is het nodig beide te monitoren. Wanneer één van de twee of beide metingen weergeven dat er een overschot is, moet de sturing een energiebuffer aansturen. Wanneer beide meten dat er een energie tekort is, moet de buffering stoppen. Afhankelijk van de toepassing waarvoor de sturing gebruikt wordt, zijn er nog meer meetsignalen. Als de sturing gebruikt wordt op bijvoorbeeld een boiler, moet ook het comfortniveau behouden blijven.



**Figuur 39: Schakelalgoritme**

Voor het aansturen van een thermische buffer zijn er dus metingen nodig van: de buffertemperatuur, de netspanning en de netfrequentie. Om deze meetwaarden te vergelijken met de ingestelde schakelvoorwaarden, wordt er gebruik gemaakt van een microcontroller.

Voor een correcte signaalverwerking is een hoge nauwkeurigheid nodig bij het meten van de frequentie en de spanning. Dit is omwille van de kleine schommelingen op het net. Zo bevindt de spanning, op woningniveau, zich tussen 207V en 253V [46]. De netfrequentie schommelt tussen 47,5 Hz en 51,5 Hz [46]. De nauwkeurigheid voor de spanningsmeting is vastgelegd op 1V, voor de frequentie bedraagt deze 0,01 Hz.

## 2.2 Ontwerp van de sturing

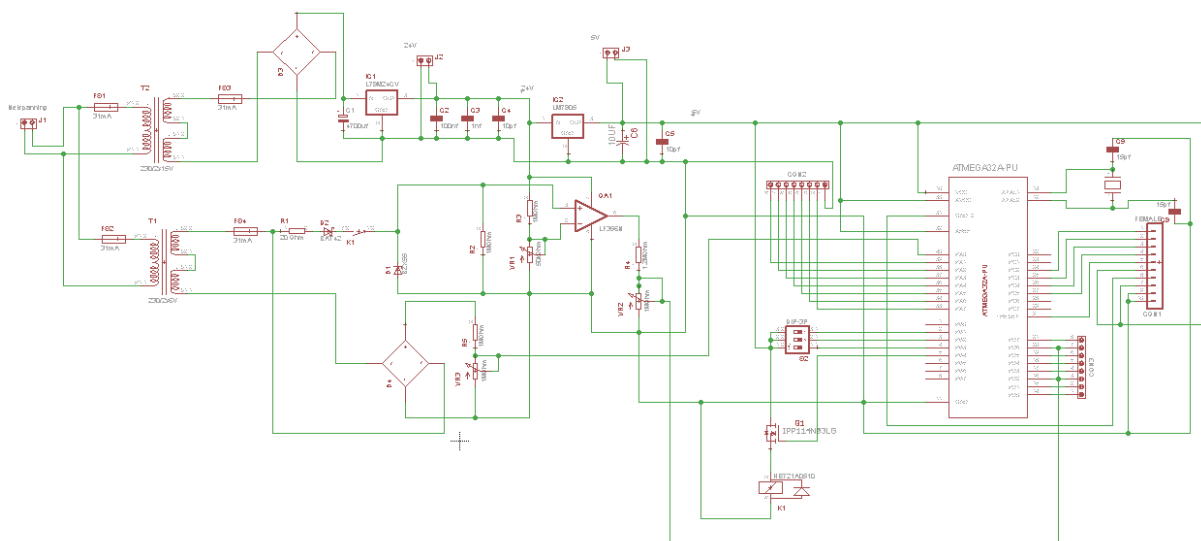
Het printplaatontwerp gebeurt in het programma *Eagle*. In dit programma moeten soms componenten aangemaakt worden in de symbolenbibliotheek. Om deze bibliotheek aan te maken moet er een *device* gemaakt worden, wat bestaat uit twee onderdelen, namelijk een symbool en een *package*.

Nadat een *device* is aangemaakt, kan het gebruikt worden in het algemene schema van de schakeling. Dit algemeen schema wordt op dezelfde manier opgebouwd als in *Multisim* en laat toe het uiteindelijke ontwerp van een printplaat te bewerken.

## 2.2.1 Algemeen schema

Het algemeen schema van de sturing is weergegeven in Figuur 40 en is op te splitsen in acht verschillende onderdelen namelijk:

- transformators en kortsluitbeveiliging;
- 24V voeding;
- 5V voeding;
- signaalverwerking voor frequentiemeting;
- signaalverwerking voor spanningsmeting;
- microcontroller met in- en uitgangen;
- JTAG connectie;
- overspanningbeveiliging.

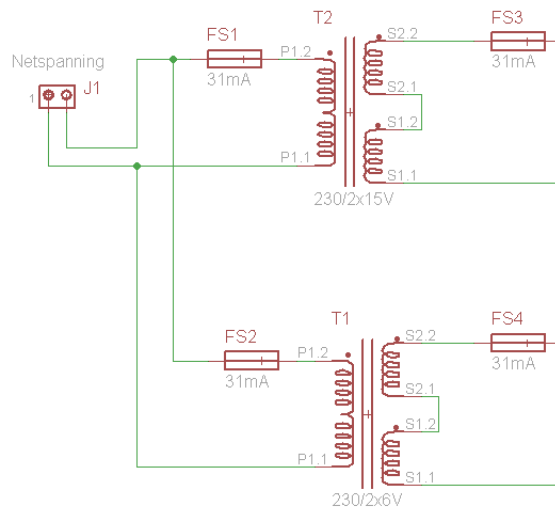


**Figuur 40: Ontwerp van de sturing in Eagle**

## 2.2.2 Transformators en kortsluitbeveiliging

De transformatoren vormen de netspanning van 230 V om naar een lagere spanning. Voor de voeding wordt een transfo gebruikt met een secundaire spanning van 30 V. Omdat het meetsignaal en de voeding galvanisch gescheiden moeten zijn, is er nood aan een tweede transformator. Deze is gekozen met een secundaire spanning van 12 V.

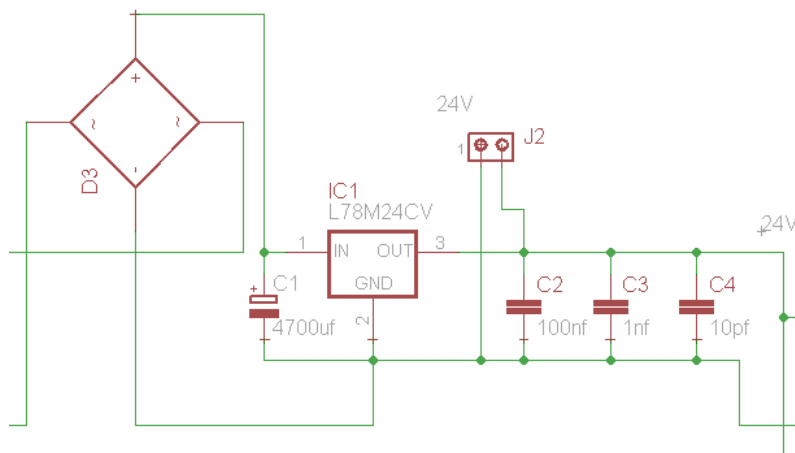
Om brand te voorkomen bij een kortsluiting of na een overstroom zijn er smeltzekeringen voorzien aan zowel de primaire als de secundaire kant van de transformator. De print bestaat volledig uit spanningsgestuurde componenten. Hierdoor is er gekozen voor een zeer kleine waarde van de zekeringen, namelijk 31 mA.



**Figuur 41: Transformatoren voor het verlagen van de netspanning en smeltzekeringen**

### 2.2.3 24V voeding

Om de voeding van de 24 V te bekomen, wordt een transformator gebruikt van 30 V. De wisselspanning na de transformator van 30 V moet eerst gelijkgericht worden met een bruggelijkrichter. Nadat het signaal gelijkgericht is, wordt dit signaal afgevlakt door gebruik te maken van een bulkcondensator van 4700  $\mu\text{F}$ . Hierna zorgt een spanningsstabilisator (LM7824) voor een constante 24 V gelijkspanning. Het voedingssignaal wordt verder nog ontstoord door gebruik te maken van drie condensatoren: 100 nF, 1 nF en 10 pF. De 24 V voeding wordt gebruikt voor de opamp en voor het relais dat het opslagsysteem aanstuurt.

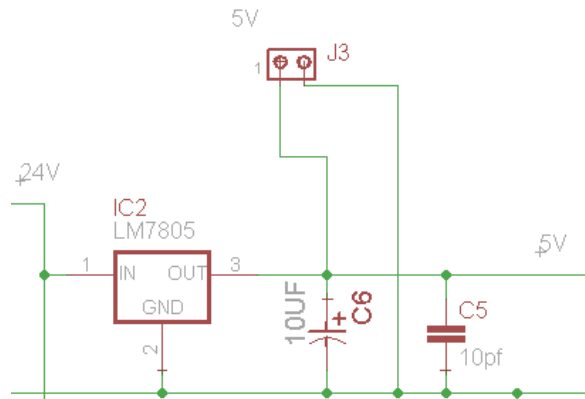


**Figuur 42: 24V voeding**



## 2.2.4 5V voeding

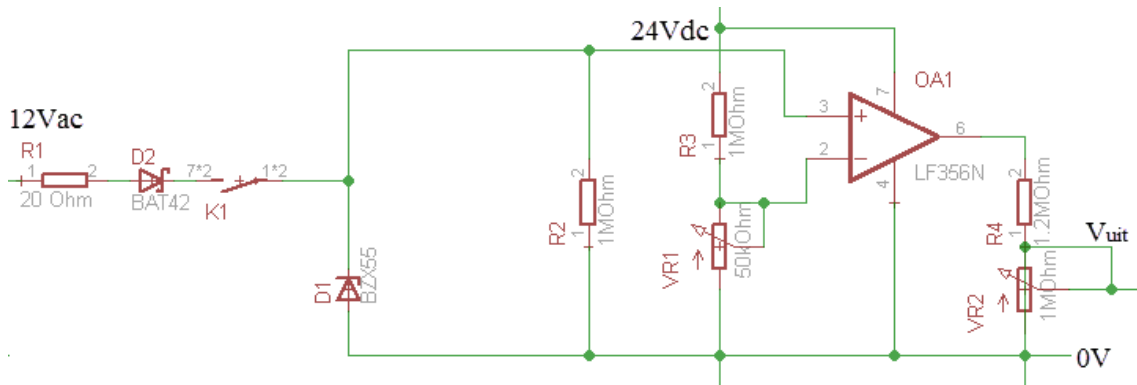
Verder zal de 24 V voeding verlaagd worden tot 5 V. De microcontroller heeft namelijk een voedingsspanning nodig van 5 V. Die spanning wordt op dezelfde manier gemaakt als de 24 V, dus met een spanningsstabilisator (LM7805) en ontstoorcondensatoren. Dit maal een van 10  $\mu\text{F}$  en 10 pF.



Figuur 43: 5V voeding

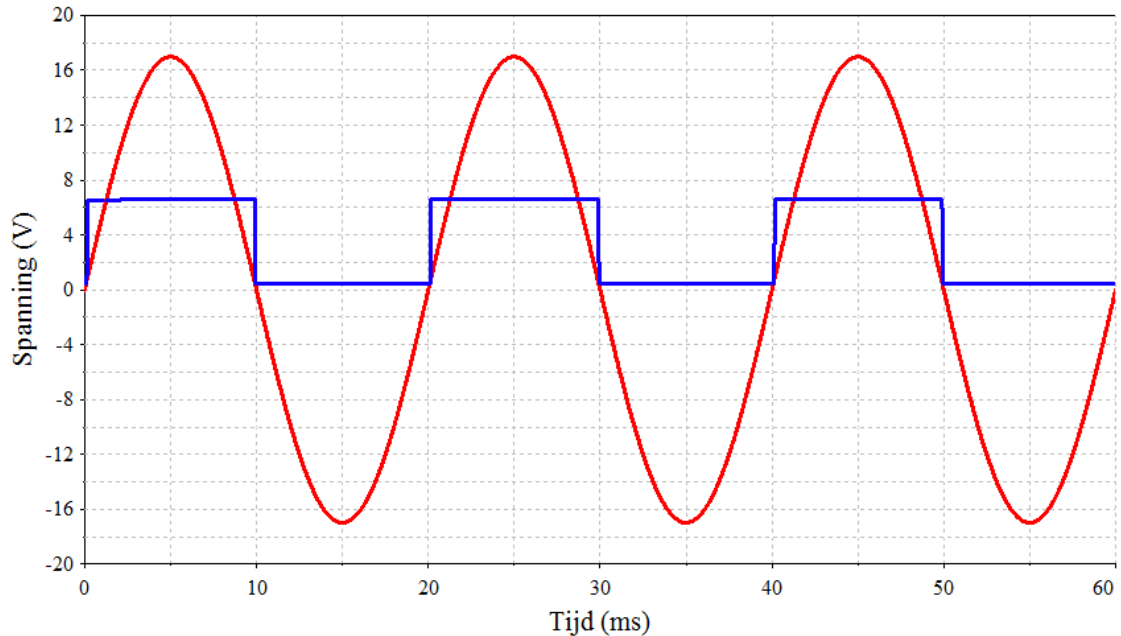
## 2.2.5 Signaalverwerking voor frequentiemeting

Het 12 V wisselspannings signaal afkomstig van de transformator voor meetsignalen, wordt enkelzijdig gelijkgericht door D2, een schottky diode. Er is gekozen voor een schottky omdat deze sneller schakelt in vergelijking met een diode. Om de schottky in geleiding te brengen is er een weerstand R2 voorzien van 1 M $\Omega$ . Om de opamp te laten uitschakelen moet het signaal aan de positieve ingang kleiner worden dan het referentiesignaal aan de negatieve ingang. Door het gebruik van diodes dient de referentiespanning verhoogd te worden tot 1,5 V. Als deze spanning niet gehaald wordt, zal de opamp een constant uitgangssignaal uitgeven. Om ervoor te zorgen dat dit niet voorkomt, is een spanningsdeler met potentiometer voorzien (R3 en VR1) zodat de referentiespanning regelbaar is. De microcontroller verwerkt signalen van 5 V, hierdoor is het nodig de uitgangsspanning van de opamp te verlagen, ook hier is een spanningsdeling voorzien (R4 en VR2).



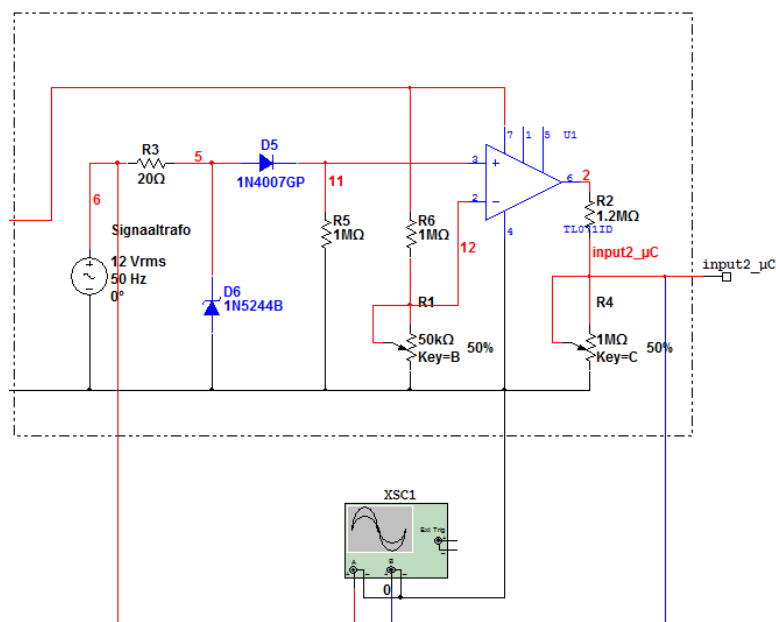
Figuur 44: Het vormen van de blokgolf voor nuldoorgangsdetectie

Voor het ontwerpen van het stuursysteem zijn simulaties uitgevoerd in *Multisim*, dit maakte het analyseren van de stuursignalen mogelijk. Voor de frequentiemeting is er gekozen voor een tijdsmeting die start en stopt bij de nuldoorgang van de netspanning. De nuldoorgang wordt gedetecteerd door gebruik te maken van bovenstaande schakeling. De opamp wordt gebruikt als schakelaar, dit wil zeggen dat de opamp gaat schakelen tussen zijn positieve en negatieve voeding.



**Figuur 45: Nuldoorgangsdetectie met opamp**

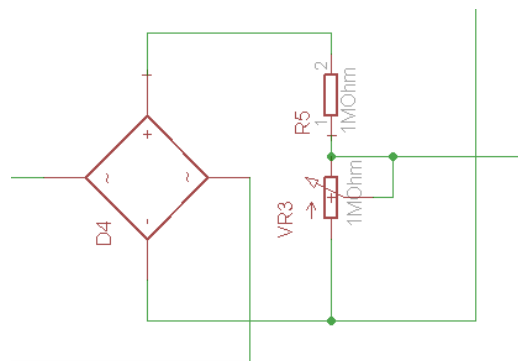
De opamp schakelt naar zijn voedingsspanning vanaf het moment dat de ingangsspanning boven de referentiewaarde komt. Deze referentiewaarde is afhankelijk van de spanningsval over weerstanden en diodes. Omwille van deze spanning moet de referentiespanning van de opamp zo gekozen worden dat er geschakeld wordt wanneer de ingangsspanning boven deze referentiewaarde ligt.



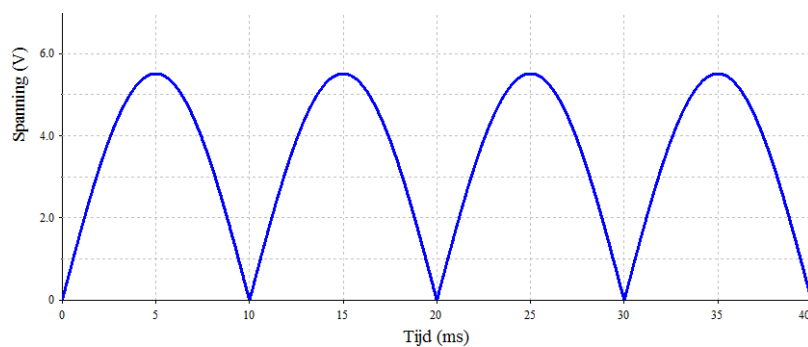
**Figuur 46: Simulatieschema voor het testen van de nuldoorgangsdetectie**

## 2.2.6 Signaalverwerking voor spanningsmeting

Om de spanning van het net te meten, wordt deze eerst omlaag getransformeerd tot 12 V. Hierna wordt die spanning dubbelzijdig gelijkgericht door een bruggelijkrichter. Om de gelijkgerichte spanning aan te leggen aan de microcontroller moet de spanning opnieuw verlaagd worden. De piekspanning wordt geregeld op 5 V bij 270 Vac of 4,25 V bij 230 V. Dit wordt afgeregeld via de spanningsdeler (R5 en VR3).



**Figuur 47: Gelijkgericht signaal vormen voor de spanningsmeting**



**Figuur 48: Bruggelijkgericht signaal voor spanningsmeting**

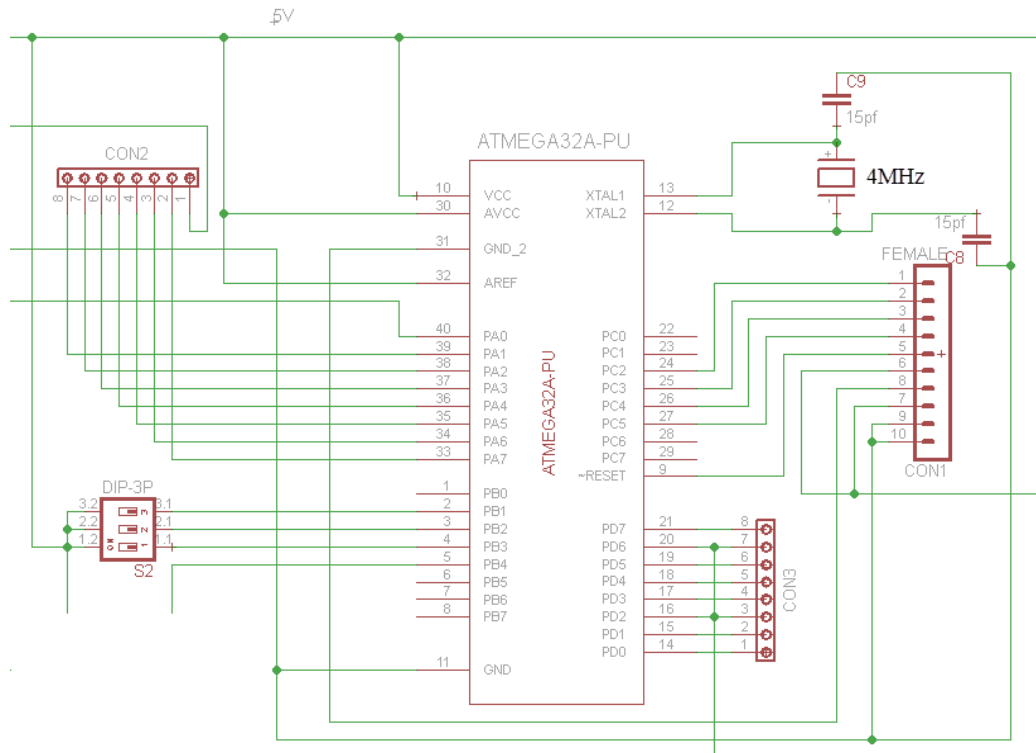
## 2.2.7 Microcontroller met in- en uitgangen

De microcontroller die in de sturing gebruikt wordt is een Atmega32. Er is voor deze microcontroller gekozen omdat dit type veel gebruikt wordt bij i-NET. De Atmega32 heeft 32 programmeerbare in- en uitgangen. De in- en uitgangen die op de printplaat niet onmiddellijk gebruikt worden, zijn aangesloten met een schroefconnector zodat ze gebruikt kunnen worden bij een uitbreiding.

Omdat er een nauwkeurige tijdsmeting moet plaatsvinden is een extern klokkristal van 4 MHz voorzien. De interne klok heeft namelijk een afwijking ten opzichte van de nominale frequentie van 3 % en bij optimalisatie 1 %. Een externe klok heeft een veel hogere nauwkeurigheid waarvan de afwijking maar 0,003 % is.

Daarnaast zorgen drie dipswitches ervoor dat, er bij een uitbreiding, een selectie gemaakt kan worden tussen verschillende programma's. Dit maakt integratie met demand side management mogelijk.

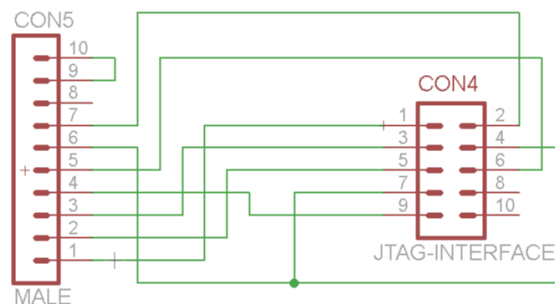
Als laatste is de microcontroller programmeerbaar via de JTAG-connectie. Dit gebeurt via een connector die verbinding maakt met een secundaire printplaat waar de JTAG-kabel aangekoppeld kan worden.



**Figuur 49: Microcontroller en aansluitingen**

## 2.2.8 JTAG-connectie

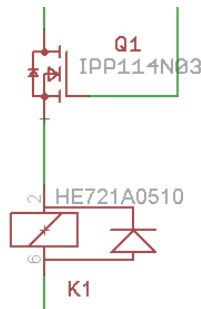
Joint Test Action Group (JTAG) is de gangbare naam voor de IEEE 1149 standaard. JTAG wordt gebruikt om de circuits in printplaten te controleren op fouten, te programmeren en debuggen van code. Het debuggen maakt het mogelijk het programma ergens te onderbreken en de waarden te analyseren op het moment dat het programma in pauze gaat. Zo kunnen fouten opgezocht en verbeterd worden in de code.[43] Om het aantal kruisingen te voorkomen in de hoofdprintplaat, is er gekozen voor een tweede kleine printplaat waar de JTAG aan verbonden kan worden.



**Figuur 50: Verbindingen voor de JTAG-programmer**

## 2.2.9 Overspanningsbeveiliging

Om de schakeling te beschermen wordt er gebruik gemaakt van smeltzekeringen. Dit is echter niet voldoende. Om ook te kunnen beschermen tegen te hoge spanningen is er gekozen voor een reed contact. Een reed contact heeft dezelfde werking als een relais. Een normaal open (NO) hulpcontact wordt aangestuurd via de microcontroller die de spanning meet. Wanneer die gemeten spanning lager dan 5 V bedraagt, wat overeenstemt met 270 V<sub>RMS</sub> schakelt het reed contact het NO hulpcontact dicht. Wanneer de gemeten spanning groter wordt dan 5 V gaat het hulpcontact open en beschermd hierdoor de microcontroller en de opamp voor overspanning.



Figuur 51: Overspanningsbeveiliging

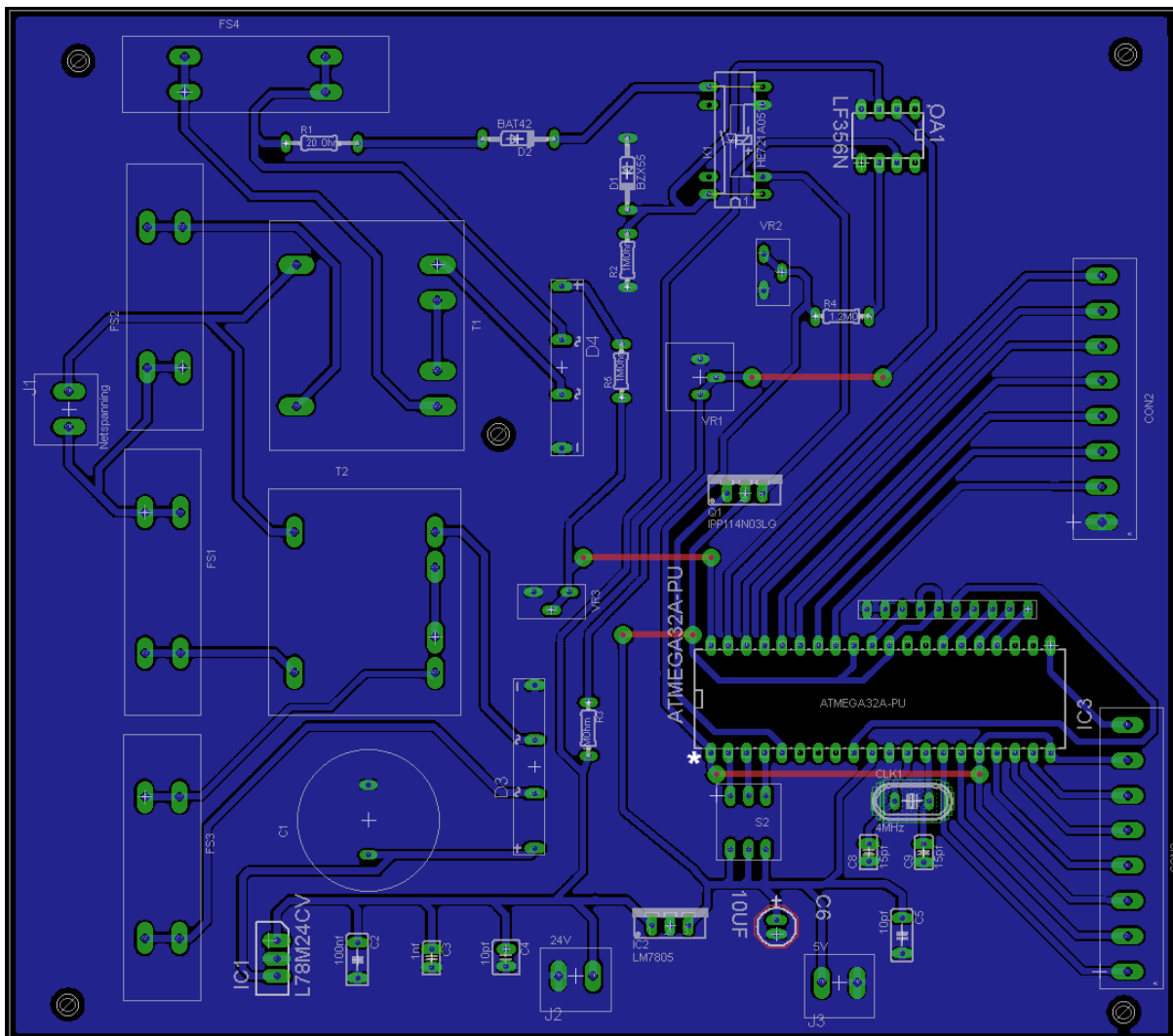
## 2.2.10 Prijsberekening

In bijlage A is de prijs van de sturing terug te vinden. Hier is een totale kostprijs van € 37,72 berekend. Deze kost kan afnemen door serieproductie toe te passen.

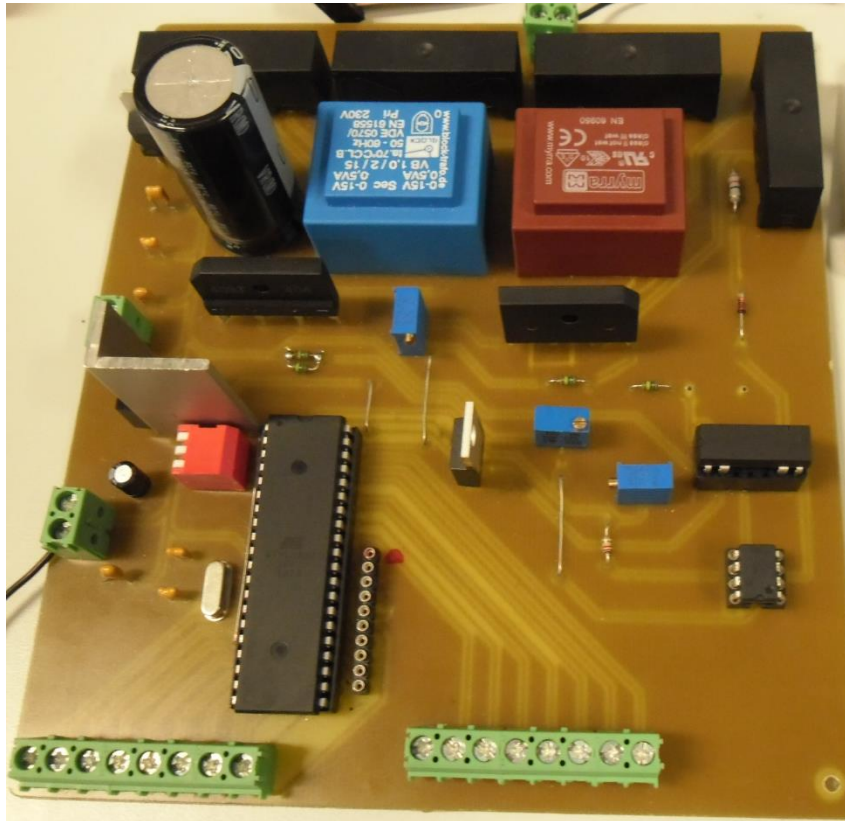
## 2.3 Printplaatontwerp

De plaatsing van de componenten moet zo gebeuren dat alles dicht genoeg bij elkaar staat. Dit om een zo klein mogelijke printplaat te bekomen. Maar er moet ruimte overblijven om de componenten te kunnen plaatsen en metingen te kunnen uitvoeren. Ook moet er rekening gehouden worden met het aantal kruisingen, dat de banen maken. Er mag namelijk geen kruising voorkomen in eenzelfde laag op de print. Dit zou betekenen dat er twee of meer onderdelen ongewenst met elkaar verbinding maken. Het is echter niet altijd mogelijk om een printplaat te ontwerpen waarbij geen enkele kruising voorkomt. Hierdoor moet er dus overgegaan worden naar een andere laag. De meeste leidingen liggen in het grondvlak, aan de onderkant van de print. Wanneer er een kruising niet vermeden kan worden moet er een verbinding gelegd worden naar de bovenkant van de print en loopt hier de baan ongehinderd verder tot na de kruising. Hierna gaat deze baan terug naar de onderkant van de print. Dit kan zowel gebeuren op een dubbelzijdige printplaat (kopervlak aan de boven en de onderkant) als met een enkelvoudige print (enkel kopervlak aan de onderkant). Wanneer de print enkelzijdig uitgevoerd is moeten de verbindingen gelegd worden met behulp van een ongeïsoleerde geleider.

### 2.3.1 Het hoofdbord

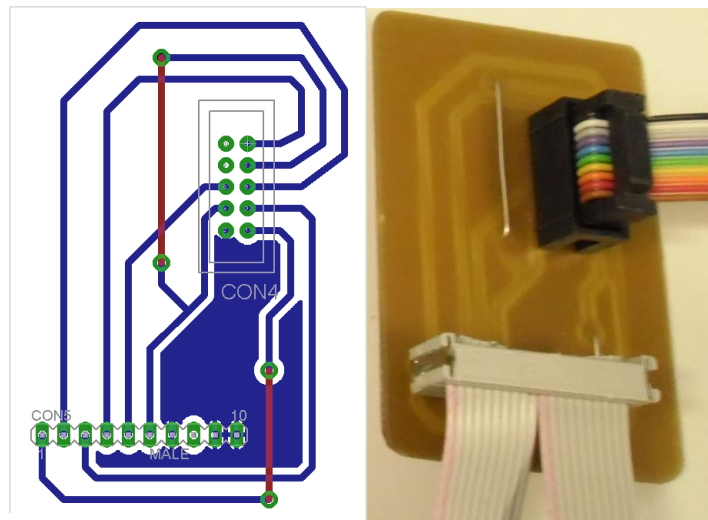


**Figuur 52: Printplaat ontwerp**



Figuur 53: Printplaat met componenten

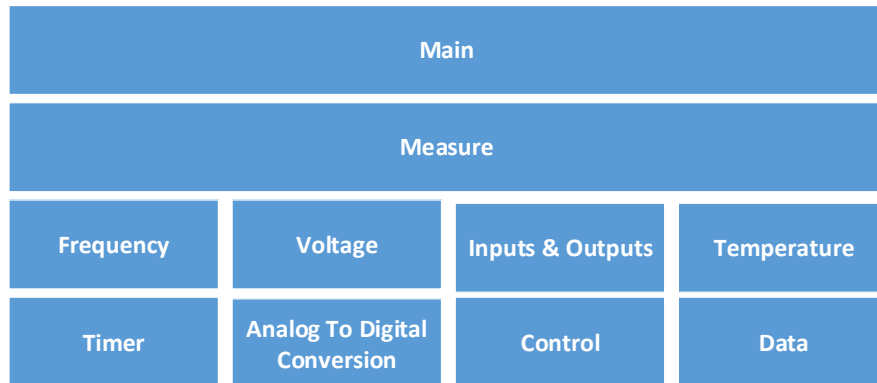
### 2.3.2 Printplaat voor de JTAG-connectie



Figuur 54: JTAG-printplaat

## 2.4 Programmacode

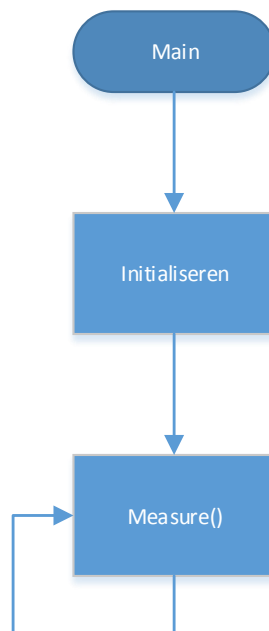
Om de code op een overzichtelijke manier op te bouwen en eveneens eenvoudig uit te breiden, wordt er gebruik gemaakt van verschillende *layers*. Bij het programmeren krijgt ieder object (bijvoorbeeld: Frequency) zijn verantwoordelijkheden. Deze objecten kunnen gegevens binnen een layer uitwisselen of met één layer onder hun. Wanneer binnen een object verwezen wordt naar een ander object, wordt dit aangegeven met behulp van ( ), bijvoorbeeld 'Frequency()'.



**Figuur 55: Layers**

### 2.4.1 Layer 1: Main

De bovenste layer heeft als doel om de initialisatie te garanderen en zorgt er ook voor dat het programma in een lus blijft functioneren. Nadat de code in deze layer uitgevoerd is, moet deze opnieuw uitgevoerd worden om een voortdurende werking te garanderen. Deze continue werking, is het resultaat van Layer 1.



**Figuur 56: Layer 1- Main**

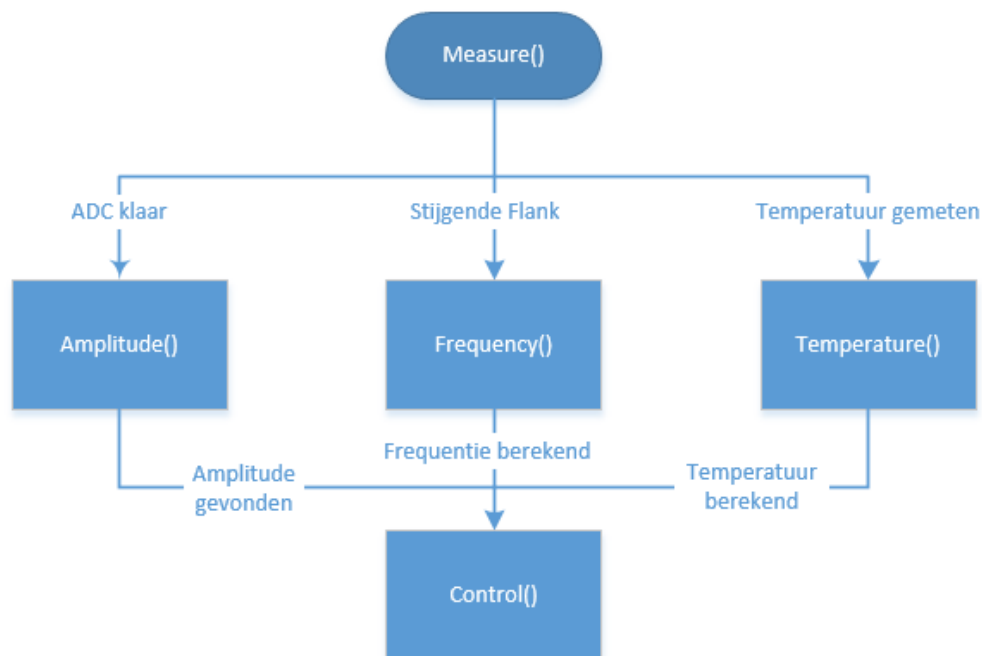


## 2.4.2 Layer 2: Measure

Layer 2 bevat de uit te voeren functies. Dit programma bevat slechts één functie: Meten (EN: Measure). Hier wordt dus ook bepaald wanneer er gemeten moet worden, zoals in onderstaande figuur te zien is. Er zijn drie metingen, met elk hun eigen voorwaarde:

- amplitude: wanneer de Analoog naar Digitaal Conversie (ADC) uitgevoerd is (zie 2.4.8);
- frequentie: na elke stijgende flank, die gedeteceerd wordt door de microcontroller;
- temperatuur: elke minuut wordt er een temperatuursmeting uitgevoerd, na deze meting wordt een gemiddelde temperatuur berekend.

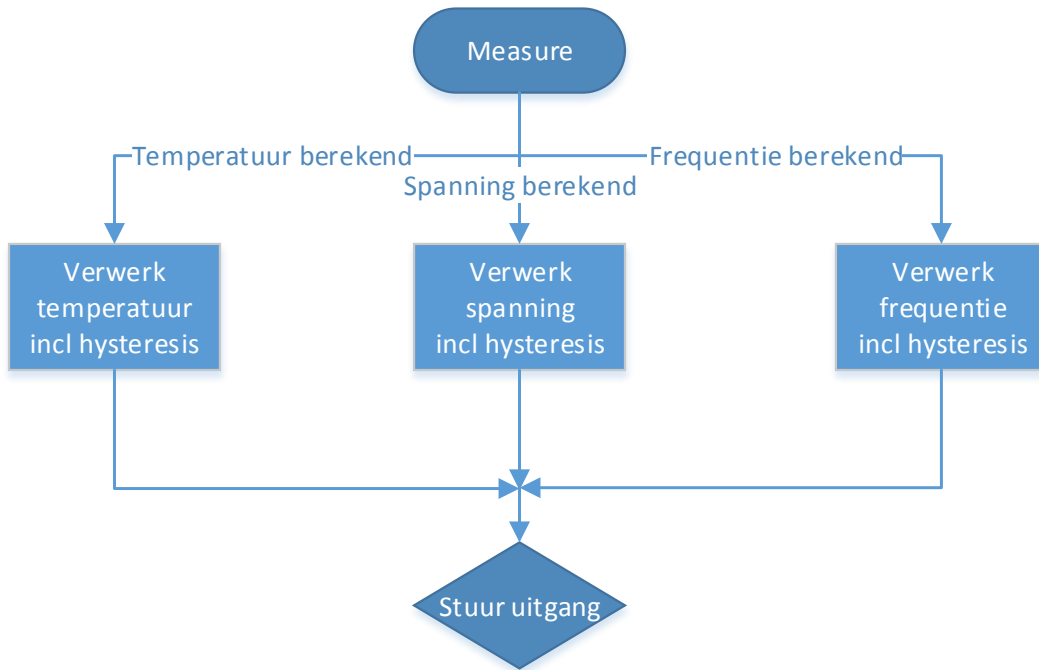
Na het uitvoeren van de Sturing() ( EN: Control), of indien er geen gemiddelde waarden voor frequentie, spanning of temperatuur berekend zijn, wordt er teruggekeerd naar Main().



Figuur 57: Layer 2- Measure

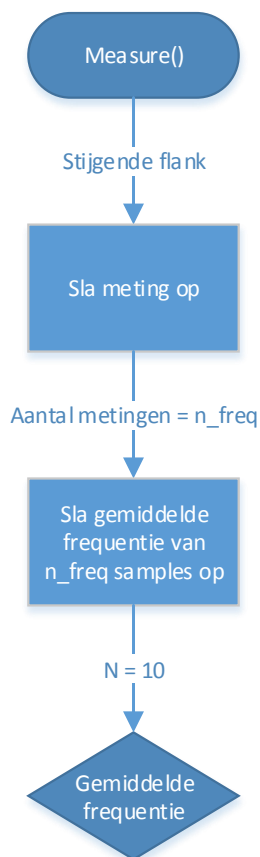
## 2.4.3 Layer 3: Control

In het sturingsgedeelte van de code worden de berekende gegevens van de meetsystemen verwerkt naar een aan-/uitsignaal om de buffer al dan niet op te laden. Dit gebeurt door middel van de meetgegevens gescheiden in te lezen en te vergelijken met hun hysteresis. Die is nodig om het schakelpatroon te doen afnemen binnen een geschikte en veilige band.



**Figuur 58: Flowchart Control**

#### 2.4.4 Layer 3: Frequency



**Figuur 59: Flowchart frequentie**

Om de frequentiemeting uit te voeren wordt de periode gemeten. Deze periode wordt opgemeten door een timer (zie 2.4.7). Met deze timer is het mogelijk om een zogenaamde ISR (Interrupt Service Routine) te verkrijgen. Tijdens een ISR wordt het programma kortstondig onderbroken om de desbetreffende ISR uit te voeren.

Met behulp van deze ISR is het mogelijk om de stijgende flanken van de blok golf (zie 2.2.5) te detecteren. De bijhorende berekeningen worden op volgende wijze uitgevoerd:

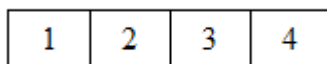
1. na elke stijgende flank, gedetecteerd via de input capture, wordt de periode opgeslagen;
2. wanneer er een bepaald aantal periodes ( $n\_freq$ ) zijn berekend, wordt er een gemiddelde periode berekend uit deze dataset;
3. nadat er 10 gemiddelden zijn berekend, wordt er een nieuw gemiddelde berekend.

Dit gemiddelde is het resultaat waarmee later vergeleken wordt. Wanneer deze waarde groter is dan een bovengrens of onder de ondergrens ligt, wordt een uitgang aan- of uitgeschakeld.

## 2.4.5 Layer 3: Voltage

Een amplitude kan berekend worden of gedetecteerd. Om deze te detecteren, moet er gekeken worden of een bepaalde waarde de grootste is uit een reeks. Als de amplitude detectie maar toegepast wordt in de betreffende situatie, wordt er vereist om een amplitude detectie uit te voeren van een sinusvormig signaal. In extreme gevallen kan het voorkomen dat de sinus afgevlakt wordt zoals op de afbeelding hieronder te zien is.

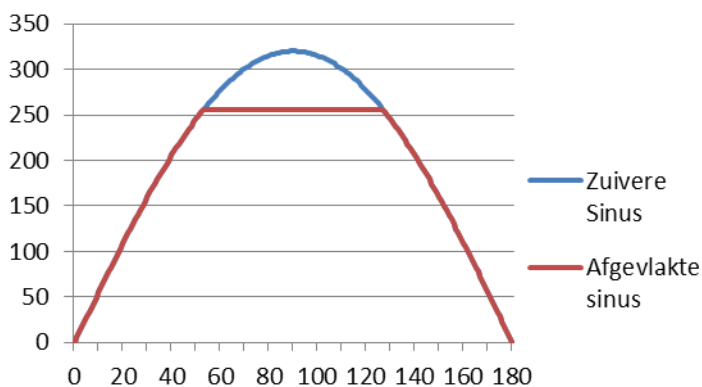
Voor de detectie van de amplitude van een sinus wordt er gebruik gemaakt van een dataset met vier variabelen. Elke nieuwe meting wordt rechts in de dataset ingeschoven (op plaats 4), waarmee de vorige waarden steeds opschuiven naar links. Wanneer op de tweede plaats de grootste waarde zit van de dataset, is er sprake van een amplitude. De voorwaarden zijn er als volgt uit:



**Figuur 60: Dataset**

- als 2 groter is dan 1;
- als 2 groter is dan 3;
- als 2 groter is dan 4.

Als aan alle voorwaarden voldaan wordt, is er sprake van een amplitude



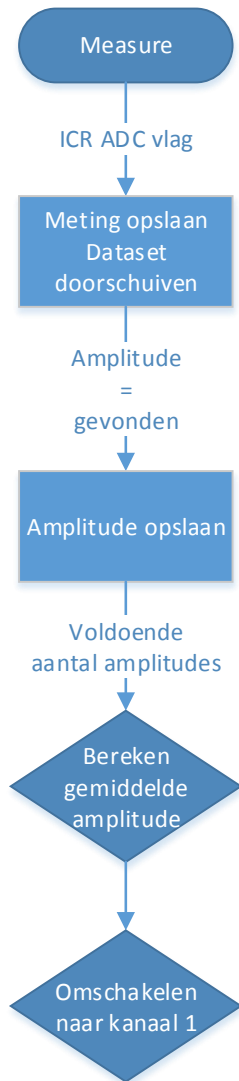
**Figuur 61: Afgevlakte sinus**

Om rekening te houden met een afgevlakte sinus moeten de voorwaarden lichtjes gewijzigd worden:

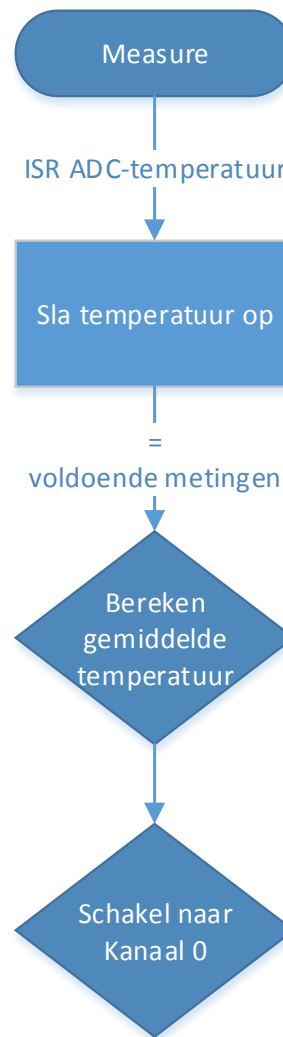
- als 2 groter is dan 1;
- als 2 groter of gelijk is aan 3;
- als 2 groter of gelijk is aan 4.

Zoals te zien is in Figuur 63, zal iedere keer wanneer een conversie door de ADC afgerond wordt de meting opgeslagen worden. Elke gedetecteerde amplitude wordt op zijn beurt opgeslagen en het aantal bijgehouden. Indien een aantal vooraf bepaalde amplitudes gevonden zijn, wordt hiervan een gemiddelde berekend. Met dit gemiddelde zal verder gewerkt worden om later de uitgang al dan niet aan- of uit te schakelen.

Wanneer de gemiddelde amplitude berekend is, wordt er overgeschakeld naar 'Channel 1', om de temperatuur van de boiler op te nemen.



**Figuur 62: Flowchart amplitude detectie**



**Figuur 63: Flowchart temperatuur**

### 2.4.6 Layer 3: Temperature

Om het comfort van de gebruiker te garanderen, is het nodig om de huidige temperatuur te raadplegen in het toestel. In de proefopstelling wordt hier een elektrische boiler gebruikt, waarin het nodig is om de watertemperatuur te meten. Dit wordt uitgevoerd met een thermokoppel, type J.

Een thermokoppel is een temperatuursensor dat twee verschillende metalen in contact brengt met elkaar via een las. Door het in contact brengen van twee metalen, wekt men een kleine spanning op aan de uiteinden van deze las. De minieme spanning moet versterkt worden door een geschikte omvormer die bij het type thermokoppel hoort, de AD594 is hiervoor in de hardware voorzien.

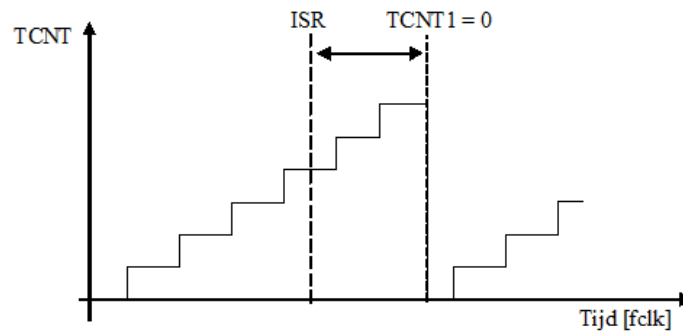
Na elke amplitude berekening wordt omgeschakeld naar het kanaal van de temperatuur. Dit brengt met zich mee dat niet een ADC-amplitude vlag wordt gezet, maar een ADC-temperatuur. Iedere keer wanneer deze vlag gezet wordt, is een conversie klaar en zal de spanning van het thermokoppel opgehaald worden. Als er voldoende temperaturen opgenomen zijn, wordt er een gemiddelde berekend en zal het kanaal terug op de amplitude gezet worden.

## 2.4.7 Layer 4: Timer

Een timer is een eenvoudige en zeer nauwkeurige tool om tijdsmetingen uit te voeren. De gebruikte microcontroller, Atmega32, beschikt over twee 8-bit en een 16-bit timer. Een timer verhoogt zijn register (TCNTx, 8- of 16-bit) met een waarde '1', dit met een frequentie die wordt bepaald door het klokkristal. Om de timer te kunnen integreren in verschillende doeleinden wordt er gebruik gemaakt van twee registers: TCCR1A en TCCR1B

### 2.4.7.1 Input Capture

In deze toepassing is de *Input Capture modus* de meest nuttige eigenschap van timer1. Wanneer deze timermodus geselecteerd wordt, luistert deze naar een stijgende of dalende flanken op een bepaalde pin van de microcontroller. Indien de flank gedetecteerd wordt op de pin, schuift de microcontroller de TCNT1-telwaarde naar het register ICR1. Deze input capture creëert een *Interrupt Service Routine* (ISR), die de programmacode stillegt en onmiddellijk naar de gepaste ISR springt. De vertraging tussen het wegschrijven naar ICR1 en het resetten van TCNT1 in de ISR, brengt met zich mee dat er een correctiefactor nodig is.



**Figuur 64: Tijdsvertraging input capture**

### 2.4.7.2 TCCR1

Het Timer/Counter Control Register is opgesplitst in twee 8-bit registers A en B. Deze registers maken het mogelijk om het gedrag van de timer1 te controleren.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	COM1A1	COM1A0	COM1B1	COM1B0	FOC1A	FOC1B	WGM11	WGM10	TCCR1A
	ICNC1	ICES1	-	WGM13	WGM12	CS12	CS11	CS10	TCCR1B

**Figuur 65: Inhoud TCCR1A en TCCR1B**

In Figuur 65 is de inhoud van TCCR1A en TCCR1B terug te vinden. De functies van elk element zijn terug te vinden in de datasheet van Atmega32. In de verdere uitleg wordt slechts besproken wat verder gebruikt is.

TCCR1B wordt in volgende stappen bepaald:

- om een “gewone” timer modus te verkrijgen, dienen alle WGM-bits ‘0’ te zijn.;
- om een snelle verwerking te verkrijgen, wordt de *noise canceler*(ICNC1) uitgeschakeld;
- om een stijgende flank detectie te gebruiken, moet een logische 1 naar ICES1 geschreven worden;
- om een zo nauwkeurig mogelijke meting te verkrijgen, wordt er geen prescaler gebruikt dus moet een  $(001)_2$  naar CS12:0 geschreven worden.

Het resultaat van TCCR1 is een timer die met een frequentie van 4MHz telt. De telwaarde wordt naar een register geschreven, wanneer er een stijgende flank aan de Input Capture pin van de microcontroller komt. Dit wordt verkregen met onderstaande instellingen:

- TCCR1A =  $(00)_{16}$
- TCCR1B =  $(41)_{16}$

### 2.4.7.3 Timer Overflow

Een *timer overflow* wil zeggen dat de timer een waarde boven zijn maximale telwaarde bereikt. De 16-bit timer heeft een maximale waarde van  $(FFFF)_{16}$ . De timer wordt in dit programma gebruikt om een periode van de netspanning te tellen. Als er een maximale frequentie van 50,05 Hz verwacht wordt, is het belangrijk om te controleren of er een overflow zal behaald worden. Om dit te bepalen zijn er volgende berekeningen nodig:

$$\begin{aligned}f_{clk} &= 4.000.000 \text{ Hz} \\ \max f_{input \text{ capture}} &= 50,05 \text{ Hz} \\ \text{telwaarde: } \frac{4000000}{50,05} &= 79920 \\ (79920)_{10} - (FFFF)_{16} &= (14385)_{10}\end{aligned}$$

Na deze berekeningen volgt dat er een overflow zal volgen tijdens het meten van een 50 Hz signaal. Deze overflow zal moeten verrekend worden bij de tijdsopname.

### 2.4.7.4 Herschalen naar microseconden

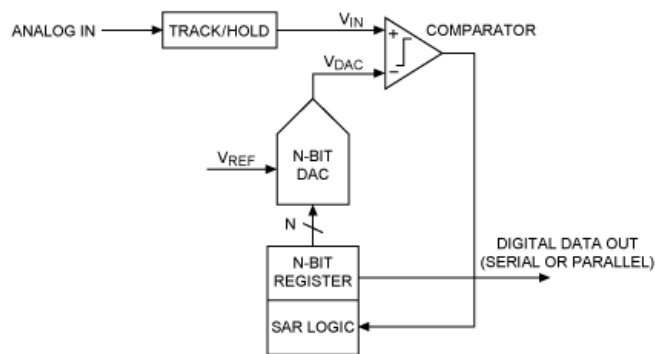
Om het aantal klokpulsen te herschalen naar microseconden moet het aantal verlopen pulsen berekend worden. Deze wordt berekend op basis van het aantal overflows, de input capture en de tijdsvertraging. Hierbij wordt rekening gehouden met de tijd tussen de Input Capture en de TCNT1-reset. Die berekeningen gaan als volgt:

$$\text{cycli} = \text{overflow} * (FFFF)_{16} + ICR + \text{vertraging}$$

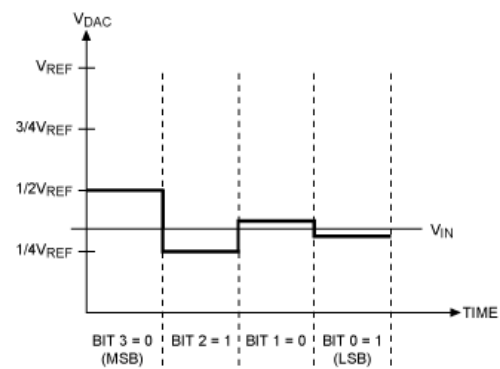
Met een clockfrequentie van 4MHz, delen we het aantal cycli door 4.

## 2.4.8 Layer 4: Analooq naar Digitaal Conversie (ADC)

De ADC is een tool van de microcontroller, die een analoge spanningswaarde omvormt naar een digitale waarde. De microcontroller werkt op basis van het 10-bit “successieve benaderingsmethode”. Op elke stijgende flank van de klokpuls wordt het analogeingangssignaal vastgehouden door het “track/hold”-circuit. Het “successieve benaderings register” (SAR) bepaalt een digitale waarde die in het begin overeenkomt met een analoge spanning  $V_{ref}/2$ . Wanneer deze spanning te groot is, zal de SAR de vorige waarde verminderen met de helft of vermeerderen met de helft indien de waarde te klein is. Wanneer  $V_{DAC}$  en  $V_{IN}$  voldoende dicht bij elkaar liggen, zal het 8-bit register vrijgesteld worden, om geraadpleegd te worden. Deze vrijstelling wordt in de microcontroller vastgesteld met behulp van een interrupt.



Figuur 66: Successieve Benaderings methode [44]



Figuur 67: Werkingsprincipe 4-bit SAR[44]

Het gedrag van de ADC, wordt in de atmega32 ingesteld met behulp van twee registers. Het ADMUX register bevat grotendeels de kanaalinstellingen. Daarnaast houdt ADCSRA zich bezig met de conversie zelf.

	7	6	5	4	3	2	1	0
ADMUX	REFS1	REFS0	ADLAR	MUX4	MUX3	MUX2	MUX1	MUX0
ADCSRA	ADEN	ADSC	ADATE	ADIF	ADIE	ADPS2	ADPS1	ADPS0

Figuur 68: ADMUX en ADCSRA

Om ADMUX te bepalen zijn er slechts drie keuzes nodig:

- er wordt gebruik gemaakt van kanaal 0, waardoor MUX4:0 allemaal overschreven kunnen worden met een logische ‘0’;
- ADLAR maakt het mogelijk om een 8-bit ADC te gebruiken, om de volledige 10-bit te gebruiken hoort er een logische ‘0’ geschreven te worden;
- REFS1:0 is hardware gebonden aan de gebruikte voedingsspanning, in dit geval word er gebruik gemaakt van een stabiele voeding met een externe capaciteit.

ADCSRA is het cruciale register voor de ADC. Hierin wordt bepaald of deze ingeschakeld is of wanneer de ADC klaar is met berekenen. In deze toepassing is een ADC gewenst die op maximale snelheid waarden opneemt, zie 2.4.5. De instellingen worden als volgt bepaald:

- er wordt een logische '1' naar ADEN geschreven om de ADC in te schakelen;
- de ADC wordt in 'Free-Running' mode gezet, maar de eerste bewerking moet gestart worden met een logische '1' naar ADSC te schrijven;
- aangezien in deze toepassing de ADC gestart wordt en blijft lopen, is er geen trigger signaal nodig. Het trigger signaal maakt mogelijk om een conversie te starten op een stijgende of dalende flank. Er wordt een logische '0' geschreven naar ADATE;
- ADIF is de locatie van de interrupt vlag in ADCSRA. Deze vlag wordt hoog nadat de conversie is afgelopen;
- door een logische '1' te schrijven naar ADIE, wordt het mogelijk gemaakt om een Interrupt te verkrijgen als de conversie afgerond is;
- ADPS2:0 zorgt voor een geschaalde klokfrequentie, voor deze toepassing is het gunstig om aan maximale snelheid te verwerken. De ADC beschikt echter over een maximale frequentie van 200kHz, waardoor er een prescaler van 64 wordt toegepast.

Als de instellingen van ADCSRA en ADMUX correct worden doorgevoerd, wordt voor deze toepassing de volgende resultaten verkregen:

$$ADCSRA = (CE)_{16}$$

$$ADMUX = (40)_{16}$$

## 2.5 Power quality analyse van het net

Om de geschikte grenzen te bepalen voor de hysteresis van de spanning- en frequentieniveaus is het nodig de netkwaliteit te onderzoeken. Om de netkwaliteit te bespreken wordt er gekeken naar verschillende gebeurtenissen of storingen in het net, bijvoorbeeld: harmonische storing of variatie in de spanning en frequentie.

Om de netkwaliteit of *power quality* van het elektriciteitsnet te kennen moeten er metingen plaatsvinden die gelogd worden. Die logging kan gebeuren met behulp van verschillende programma's en meettoestellen. De metingen die verder onderzocht worden zijn afkomstig van een *PQube* en een *Fluke 1750 driefase Power Recorder*.

Metingen met een *PQube* vonden plaats in de KHLim en tonen de frequentie schommelingen en spanningsvariaties in een sterk en stabiel net. De metingen die verder geanalyseerd worden, zijn van de eerste week in november 2013 en van een week met goede zonneopbrengst in juli 2013, beide zijn op dezelfde plaats gemeten.

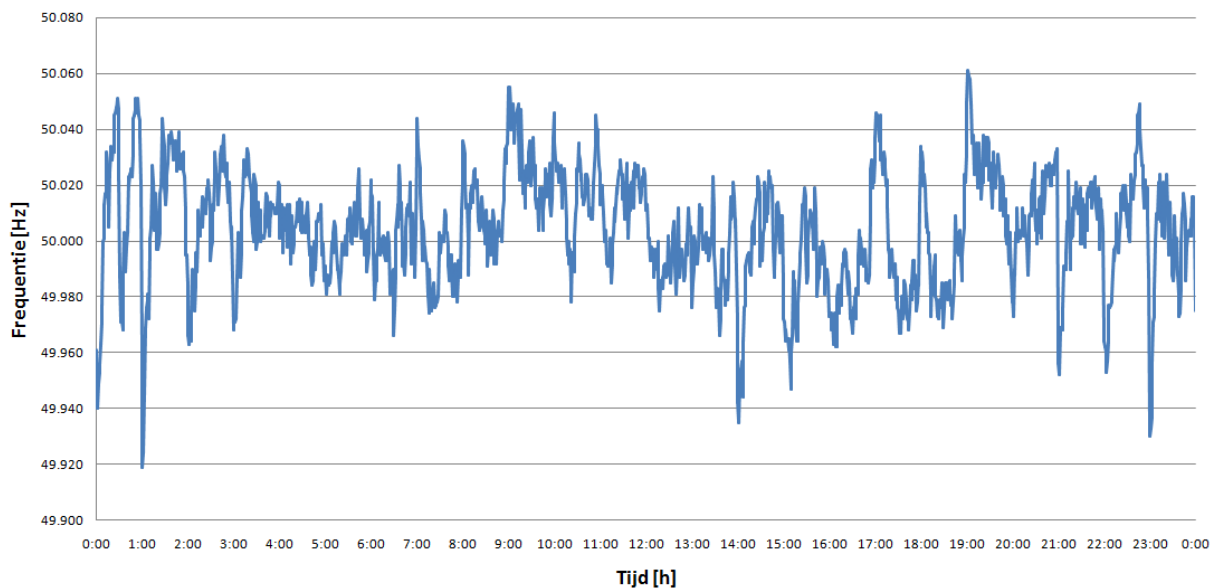
Verder wordt data geanalyseerd op woningniveau, deze metingen werden uitgevoerd met behulp van de *Fluke 1750*. De woningen waar de metingen werden uitgevoerd beschikken over fotovoltaïsche panelen.



### 2.5.1 Analyse van de PQube data

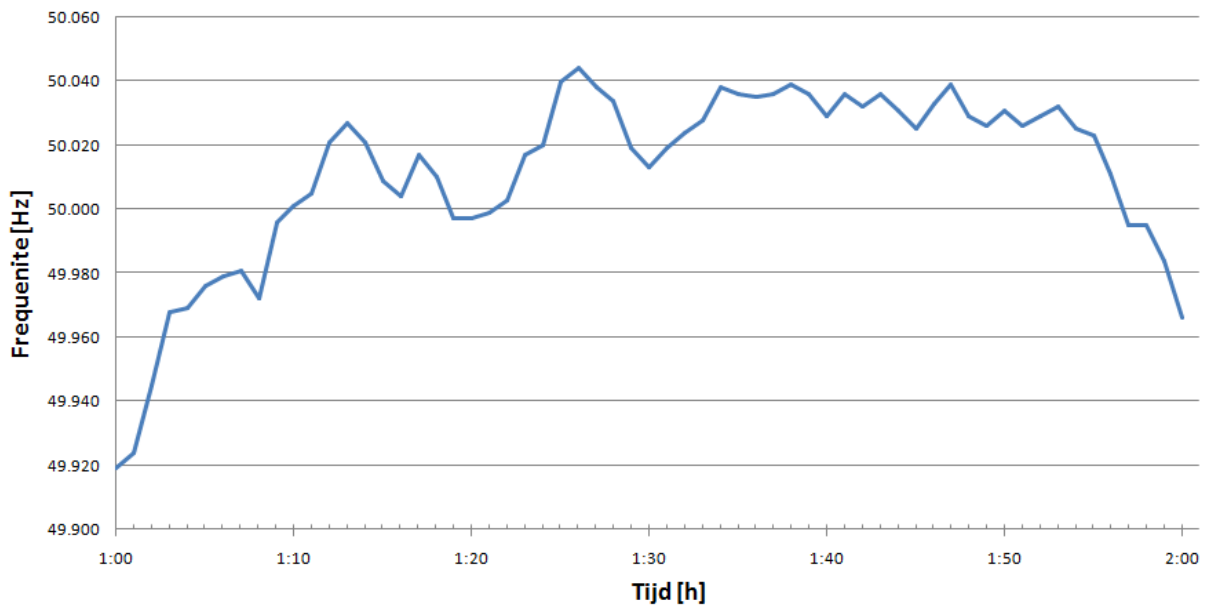
Een PQube is een instrument dat permanent de netkwaliteit meet en logd. Het toestel wordt geplaatst in de verdeelkast en moet aangesloten worden zodat het de lijnspanningen en -stromen kan meten. Vanuit deze waarden berekent het toestel de vermogens en registreert het speciale gebeurtenissen. Zo een speciale gebeurtenis is bijvoorbeeld een spanningsdip.

De PQube logt onder andere voor iedere minuut de minimum, maximum en gemiddelde frequentie. Deze data van de KHLim is beschikbaar via internet:<http://map.pqube.com/view2.html#/khlm/TrendsStatistics.htm>



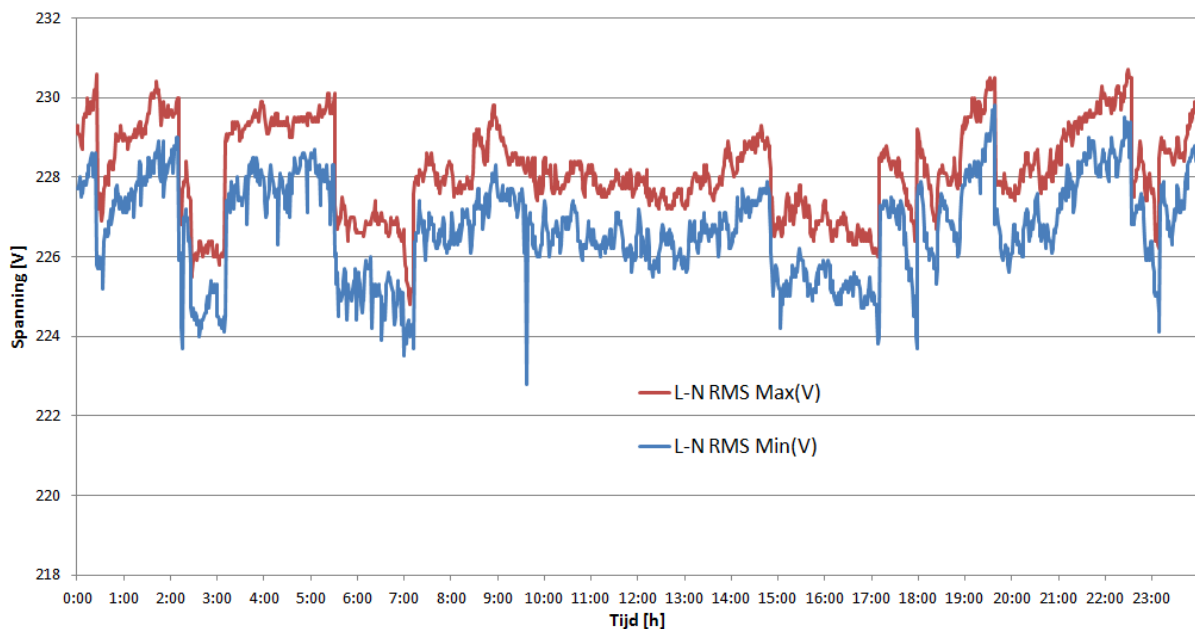
**Figuur 69: Frequentieverloop in de KHLim op 1/11/2013**

In het bovenstaand frequentieverloop is duidelijk zichtbaar dat de netfrequentie niet constant 50,00 Hz bedraagt. De schommelingen zijn afhankelijk van de hoeveelheid actief vermogen in het net. Wanneer er namelijk meer actief vermogen geproduceerd wordt dan dat er verbruikt wordt zal de frequentie toenemen. Dit komt doordat de generatoren op een hoger toerental moeten draaien om nog energie naar het net te kunnen leveren. Wanneer het toerental toeneemt, zal bijgevolg ook de frequentie toenemen.



**Figuur 70: Detail van het frequentieverloop over 1 uur**

Door analyse van de meetdata is een hysteresis bepaald waarbij de sturing in- en uitschakelt. De schakelwaarden zijn gekozen door gebruikt te maken van een macro in excel die berekend hoelang de sturing ingeschakeld geweest zou zijn. Door de waardes zo te kiezen dat de sturing niet te vaak aan- en uitschakelt en toch gedurende voldoende lange tijd kan bufferen. De sturing zal energie gaan opslaan wanneer de gemiddelde frequentie (van 80 metingen) boven de 50,02 Hz komt. De buffering stopt wanneer die gemiddelde frequentie onder de 49,99 Hz zakt.



**Figuur 71: Spanningsverloop in de KHLim op 1/11/2013**

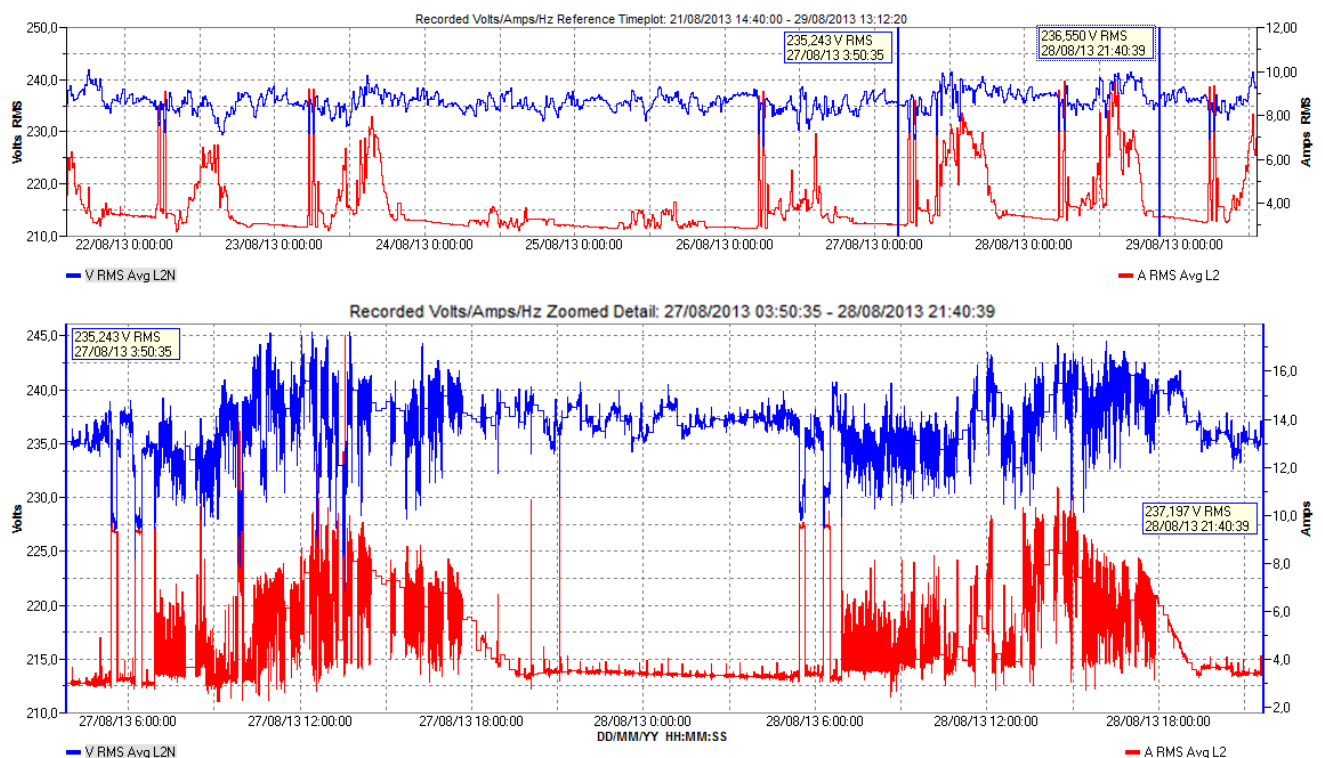
Voor het schakelniveau van de spanning is andere data noodzakelijk, de fasespanning (spanning van lijn tot neuter) komt namelijk zelden boven 230V.

## 2.5.2 Analyse van de data met de Fluke 1750

De Fluke 1750 wordt gebruikt om een week lang de netkwaliteit te analyseren en te loggen. In tegenstelling met de PQube wordt dit toestel niet geïmplementeerd in de verdeelkast. Dit toestel is wel nauwkeuriger dan de PQube maar geeft dus enkel resultaten gedurende de tijd dat het toestel aangesloten is.

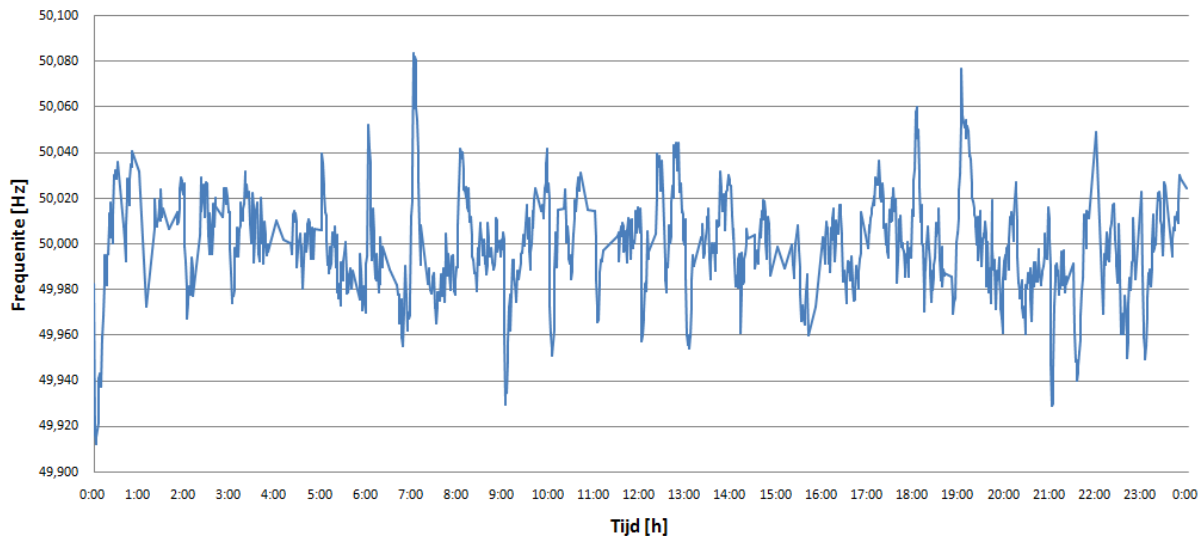
Dit toestel wordt door i-NET vooral gebruikt om de netkwaliteit van huizen en gebouwen te controleren die zonnepanelen geplaatst hebben. Hierbij is het belangrijk de invloed van fotovoltaïsche energie op de spanning en frequentie na te gaan.

De spanning is duidelijk minder stabiel in deze metingen dan in de metingen met de PQube. Maar stijgt bij input van zonne-energie en komt zelfs regelmatig over 240 V.



**Figuur 72: Spanning- en stroomverloop van de meetperiode 21/8/2013 tot 29/8/2013 en detail**

Om een ideaal spanningsniveau te kiezen zou er eerst plaatselijk een analyse van het spanningsverloop opgenomen moeten worden. Standaard zal de hysteresis ingesteld zijn op 240V en 230V. Er zal dus gebufferd worden wanneer de spanning boven de 240V gaat en het bufferen zal stoppen bij 230V indien de andere stuursignalen niet meer aansturen.



**Figuur 73: Frequentieverloop voor 24/4/2013**

Het frequentieverloop, opgemeten met de Fluke 1750, heeft geen significante afwijking ten opzichte van de metingen van de PQube. Er kan dus verondersteld worden dat de hysteresis voor de frequentie ongewijzigd mag blijven op woningniveau.

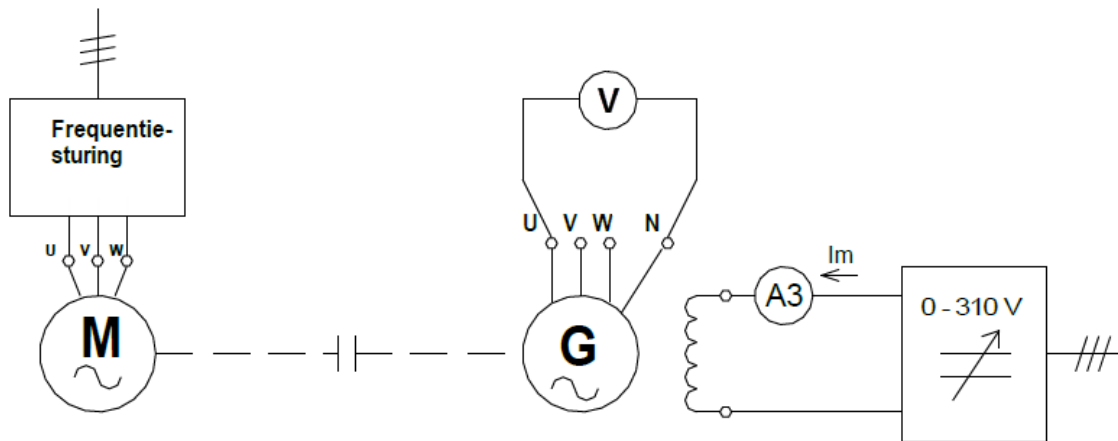
## 2.6 Testen

De sturing werd op twee manieren getest voordat ze geïmplementeerd werd in de uiteindelijke testopstelling. Een eerste test maakt gebruik van een asynchrone motor die gevoed is met het net en een synchrone generator aandrijft. De tweede testopstelling maakt gebruik van de PV-opstelling. Deze opstelling wordt belast met een lampenbak, om meer belasting toe te voegen.

### 2.6.1 Asynchrone motor met frequentiesturing

De eerste opstelling (zie principeschema in Figuur 74) met de asynchrone motor is bestuurd met een frequentieregelaar, die toelaat het toerental naar wens te veranderen. De synchrone generator wekt dan een spanning op met de zelfde frequentie als de asynchrone motor. De uitgangsspanning is hierbij regelbaar door de bekrachtigingsstroom aan te passen via een regelbare DC bron.

Met deze opstelling is het mogelijk om de maximale spanning te testen. Daarnaast is het mogelijk om de nauwkeurigheid van de metingen te controleren en indien nodig een offset te bepalen. Deze opstelling voldoet echter niet aan de testcondities. De frequentiesturing zorgt voor te veel storing (Elektromagnetische- of hoogfrequente storing door de frequentieregelaar) waardoor de pulsen voor de frequentiemeting geen constante frequentie behalen.

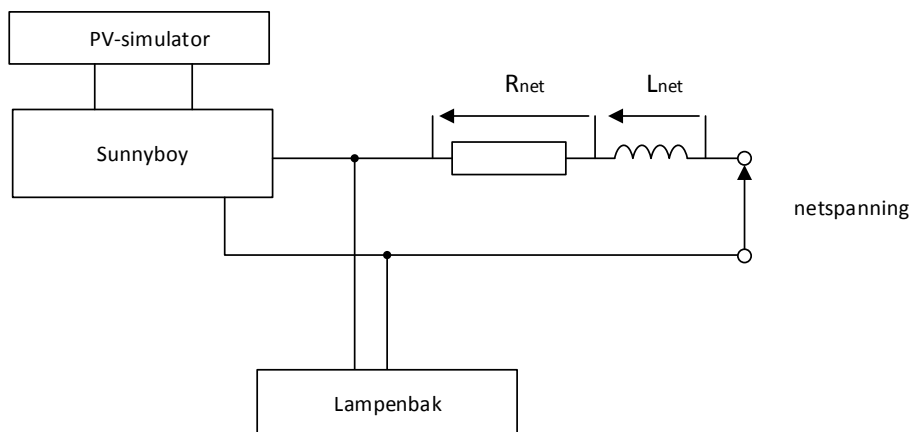


**Figuur 74: Testopstelling met asynchrone motor en synchrone generator.**

### 2.6.2 Invertor voor zonnepanelen belast met lampenbak

Met behulp van het prinsipeschema hieronder is het mogelijk om op een minder flexibele manier de spanning en frequentie te laten variëren. Door het instellen van de PV-simulator kan de zonneinstraling gesimuleerd worden. Dit zorgt voor een wijziging van de geïnjecteerde spanning en stroom. Volgens het vectordiagram in Figuur 77 moet de invertor een hogere spanning injecteren om de netimpedantie te compenseren. Een hogere netimpedantie werd behaald door een kabel te gebruiken van 400 m lang.

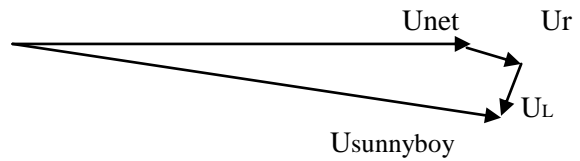
Door het geïnjecteerde vermogen te laten toenemen, zullen de netspanning en frequentie variëren. Met behulp van dit principe kunnen we op een minder flexibele manier de sturing testen. Met deze manier is het niet mogelijk om de frequentie en spanning onafhankelijk van elkaar te regelen. Uit deze testen volgende dat de sturing schakelt op de ingestelde waarden.



**Figuur 75: Sunnyboy met lampenbak**



**Figuur 76: Zonne-instraling simulator**



**Figuur 77: Vectordiagram netimpedantie**

## 2.7 Conclusie

Er is een sturing ontworpen en ontwikkeld met een kostprijs van €37,72. Deze sturing maakt het mogelijk de spanning en de frequentie uit het net om te vormen tot een meetsignaal. Dat meetsignaal wordt met behulp van de microcontroller en het nieuwe programma nauwkeurig verwerkt, zodat een energieoverschot in het elektriciteitsnet gedetecteerd wordt.

Via een testopstelling zijn verschillende scenario's getest, die in het elektriciteitsnet kunnen voorkomen. Hierbij reageerde de sturing zoals verwacht. De sturing is dus nu integreerbaar in opslagsystemen zoals warmtepompboilers, batterijen en elektrische boilers.

### 3 Praktische opstelling

Om de invloed van energieopslag te onderzoeken op de netkwaliteit wordt er een proefopstelling opgebouwd. De proefopstelling omvat een energieopslagsysteem, welk energie stockeert wanneer er een overschot is in het elektriciteitsnet. Deze opslag blijft plaatsvinden zolang er een overschot is of tot de buffer volledig opgeladen is. Het verbruik van deze energie is afhankelijk van de energievraag. In deze proefopstelling is dit de waterafname van de boiler.

De opslag kan plaatsvinden in verschillende vormen. Zo kan er zowel elektrisch als thermisch opslag plaatsvinden en dit in verschillende soorten energiebuffers. Voor deze masterproef is er gekozen voor energieopslag in een elektrische boiler omdat boilers in bijna iedere woning al aanwezig zijn. Maar deze sturing is eveneens bruikbaar bij andere opslagsystemen zoals onder andere: het laden van batterijen, warmtepompboilers, ...

#### 3.1 Boiler

De boilerinstallatie, die geplaatst is in de technische ruimte van de KHLim, bestaat uit een elektrisch verwarmde boiler. Het verwarmingselement is echter niet intern aanwezig in de boiler. Bij veel elektrische boilers is dat wel het geval. Ook was er geen temperatuursregeling aanwezig in de boiler, wat maakt dat de integratie van de sturing eenvoudiger was.

##### 3.1.1 Boiler volume

Om de inhoud van de boiler te bepalen moet er rekening gehouden worden met het waterverbruik. Dit verbruik is afhankelijk van het aantal personen in een gezin. De boiler die beschikbaar is voor de praktische opstelling heeft een inhoud van 300 liter. Dit buffervat volstaat dus voor een gezin van vijf tot zes personen waarbij energie gebufferd wordt op momenten dat er zich een overschot aan energie voordoet.

Aanbevolen waterinhoud in l van elektrische voorraadtoestellen. (De inhoud wordt uitgedrukt in liter)			
Aftappunten	Aantal personen per gezin	(voor een watertemperatuur van 60 °C)	
		Normaal of tweevoudig tarief	Nachttarief
Spoeltafel (gebruik keuken)	1 - 2	10	
	3 - 4	10 - 15	
	5 - 6	15	
Wastafel	1 - 2	10	
	3 - 4	10 - 15	
	5 - 6	15	
Spoeltafel + wastafel	1 - 2	15	
	3 - 4	50	100
	5 - 6	80	150
Wastafel + douche (10 l/min.)	1 - 2	30	
	3 - 4	50	100
	5 - 6	80	150
Wastafel + zitbad	1 - 2	50	
	3 - 4	75	150
	5 - 6	100	150
Wastafel + ligbad (± 160 l)	1 - 2	120	
	3 - 4	150	200
	5 - 6	200	300
Wastafel + spoeltafel + douche(10l/min.)	1 - 2	50	
	3 - 4	80	150
	5 - 6	150	200
Spoeltafel + wastafel + zitbad	1 - 2	75	
	3 - 4	100	150
	5 - 6	150	200
Spoeltafel + wastafel + ligbad (± 160 l)	1 - 2	75	150
	3 - 4	150	200
	5 - 6	200	300

**Figuur 78: Selectie van boiler volume [45]**

### 3.1.2 Boiler opstelling

De testopstelling bestaat uit volgende onderdelen:

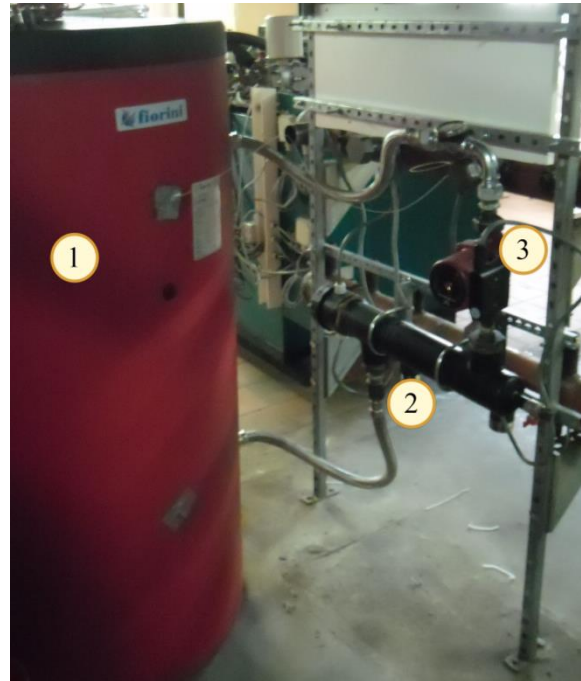
- boilervat,
- elektrisch verwarmingselement,
- thermostaat,
- circulatiepomp,
- thermokoppel,
- expansievat,
- overdrukventiel.

De elektrische verwarming is niet intern verwerkt in de boiler. Ook de sturing voor dit verwarmingselement en de boilerregeling zijn niet aanwezig. Hierdoor is de integratie van de sturing voor energiebuffering eenvoudiger, maar moet de sturing ook rekening houden met deze factoren. Zo zal de sturing voor deze opstelling uitgebreider zijn om ook de boiler temperatuur te meten en dit aan



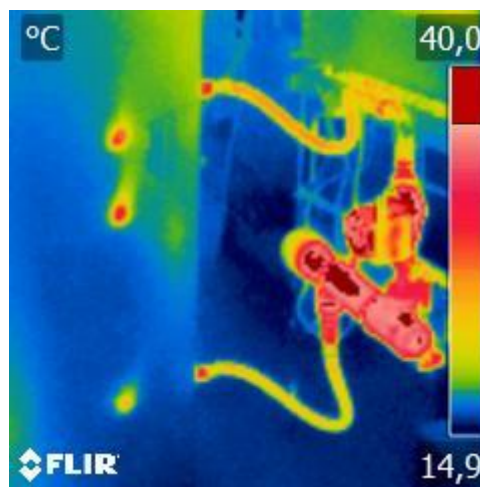
de hand van een thermokoppel. Verder wordt de circulatiepomp gelijktijdig gestuurd met het verwarmingselement. Het verwarmingselement bevat intern een thermostaat, waarbij een temperatuurbeveiliging instelbaar is.

In onderstaande foto's zijn de boiler (1), het verwarmingselement (2) en de pomp (3) zichtbaar.



**Figuur 79: Praktische opstelling van de elektrische boiler**

In Figuur 80, is een infraroodbeeld van de boilerinstallatie weergegeven. De infraroodcamera die gebruikt werd voor het maken van de foto, maakte het mogelijk de temperaturen te controleren. Op de foto is duidelijk te zien dat het verwarmingselement het warmste is. De metalen leidingen zien er koud uit maar dit komt door een verschil in emissiviteit waardoor ze als kouder beschouwd worden. Om de juiste temperatuur van de leidingen te meten, moet de emissiviteit aangepast worden.

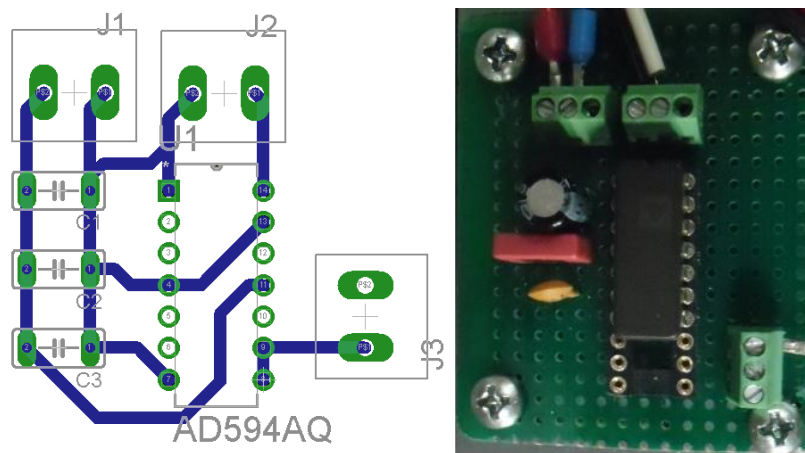


**Figuur 80: Infrarood beeld van de boiler, verwarming en circulatiepomp**

### 3.1.2.1 Printplaat voor thermokoppel

Omdat de boiler zelf niet beschikt over een temperatuursmeting moet deze voorzien worden. De temperatuur in de boiler wordt gemeten via een thermokoppel type J. Bij dit type bestaat de warme las uit ijzer en constantaan. Als versterker wordt de AD594 gebruikt. Die zorgt voor een uitgangssignaal van 10 mV/°C. Wanneer de boiler dus 60 °C bedraagt, meet de uitgang van de versterker 600 mV. Omdat deze kleinere print zijn voeding haalt van de hoofdprint, is het noodzakelijk de voeding te filteren door condensators.

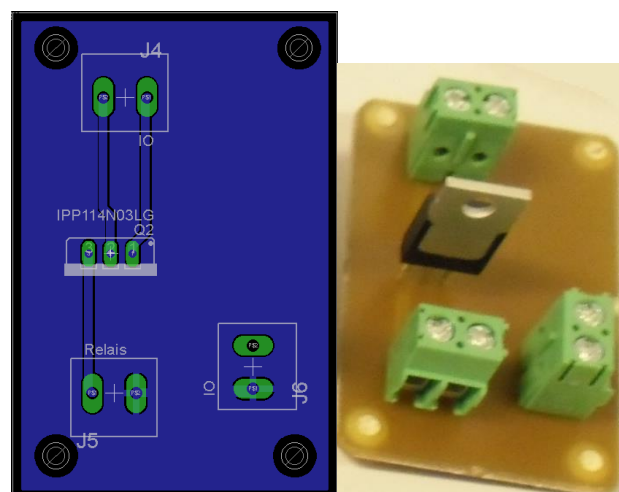
Voor de veiligheid is een maximale temperatuur ingesteld in de microcontroller. Als het thermokoppel 90°C meet zal de verwarming niet meer aangestuurd worden.



Figuur 81: Versterker voor het thermokoppel

### 3.1.2.2 Printplaat voor aansturing verwarming en pomp

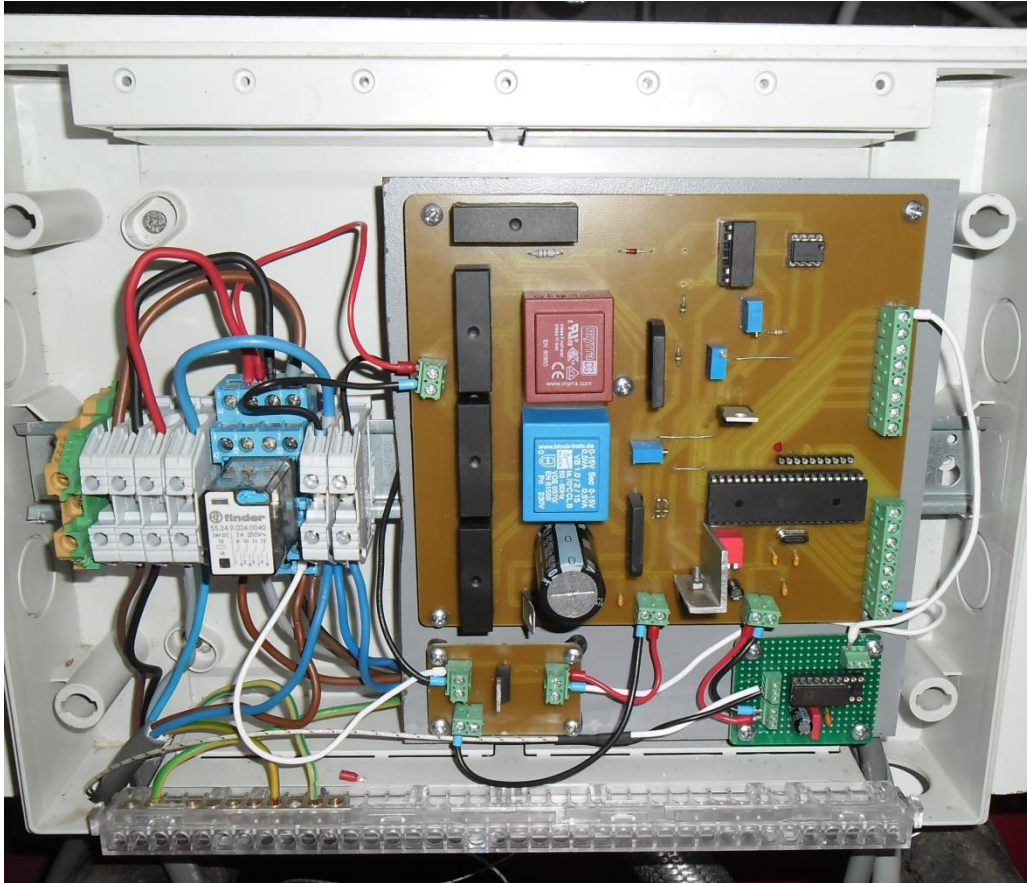
Om storingen te voorkomen, moet de vermogensturing op een andere print plaatsvinden dan op de hoofdprint. Om het vermogen te schakelen is er een mosfet voorzien. De mosfet dient gevoed te worden met 24V aan de *drain* en het stuursignaal van de microcontroller wordt aangelegd aan de *gate*. De *source* moet rechtstreeks aan de massa aangesloten worden.



Figuur 82: Mosfet voor aansturing van het aansturen van de vermogenkring

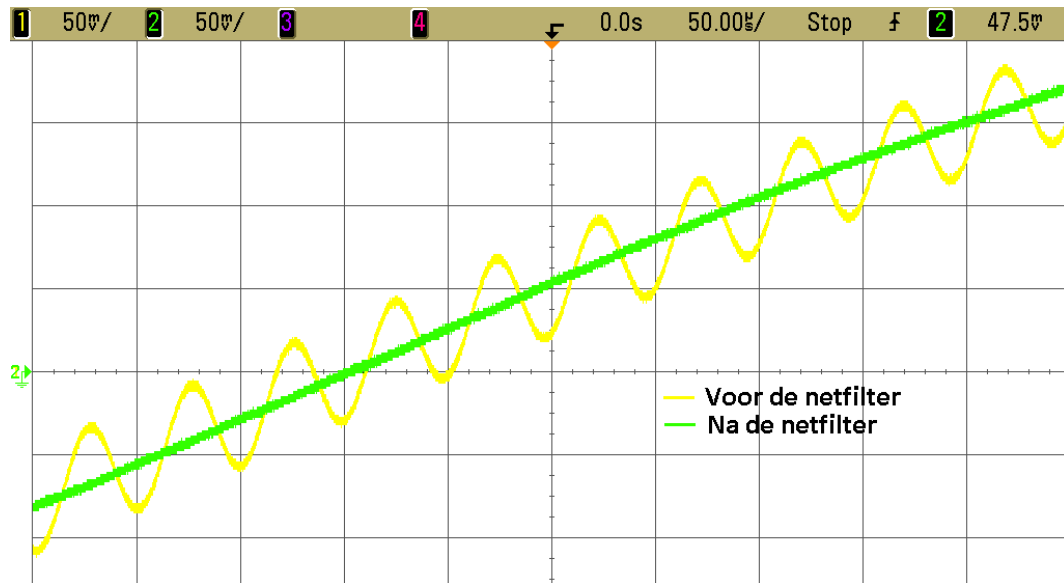
## 4 Integratie van de sturing met de boiler

Om de werking van de sturing aan te tonen is deze geïntegreerd bij de boileropstelling in de technische ruimte. De sturing is ondergebracht in een afgesloten elektriciteitskast samen met de voeding van de boiler, de temperatuursmeting, de mosfet en het relais voor het aansturen van het verwarmingselement.



**Figuur 83: Boilersturing**

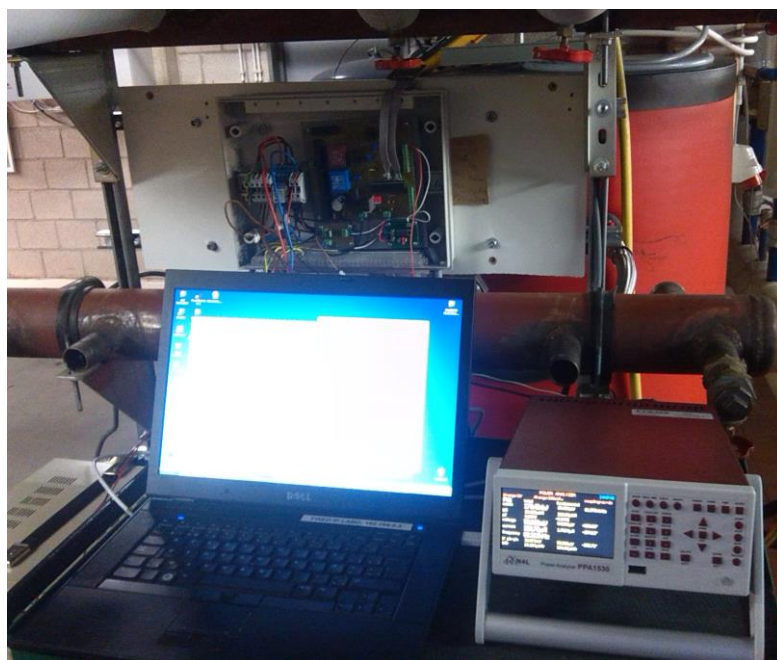
De sturing ondervond problemen met de kwaliteit van de netspanning. Dit kwam wellicht door de aanwezigheid van frequentieregelaars in de technische ruimte. Er zit namelijk een gesuperponeerde storing van ongeveer 20 kHz op de netspanning (het gele verloop in Figuur 84) dat niet aanwezig was bij het testen buiten de technische ruimte. Deze storing zorgde ervoor dat de gegenereerde blokgolf niet meer constant was, waardoor de frequentie meting niet naar behoren kon functioneren.



**Figuur 84: Zoom van de netspanning, 50µs/vak, 50mV/vak**

Deze fout komt normaal niet voor, tenzij er frequentieregelaars in de dichte omgeving staan. Dit is op te lossen door het plaatsen van een laagdoorlaatfilter.

Om gegevens te loggen en dus de invloed te kunnen bestuderen is er gebruik gemaakt van een *Power Analyser* PPA1530 van N4L. Die meter is gekoppeld aan een laptop die alle data logt. De opstelling van log- en meetapparatuur is te zien in Figuur 85.



**Figuur 85: Opstelling voor het testen van de sturing en gegevenslogging**

De sturing wordt dan in twee verschillende netsamenstellingen gecontroleerd. Een eerste is het gewone elektriciteitsnet. Een tweede opstelling kan gemaakt worden door middel van het microgrid dat aanwezig is bij i-NET. Dit microgrid kan losgekoppeld worden van het schoolnet. Het kan in eilandbedrijf een driefasig net vormen door middel van batterijen en drie SMA Sunny Islands (gele toestellen in Figuur 86).



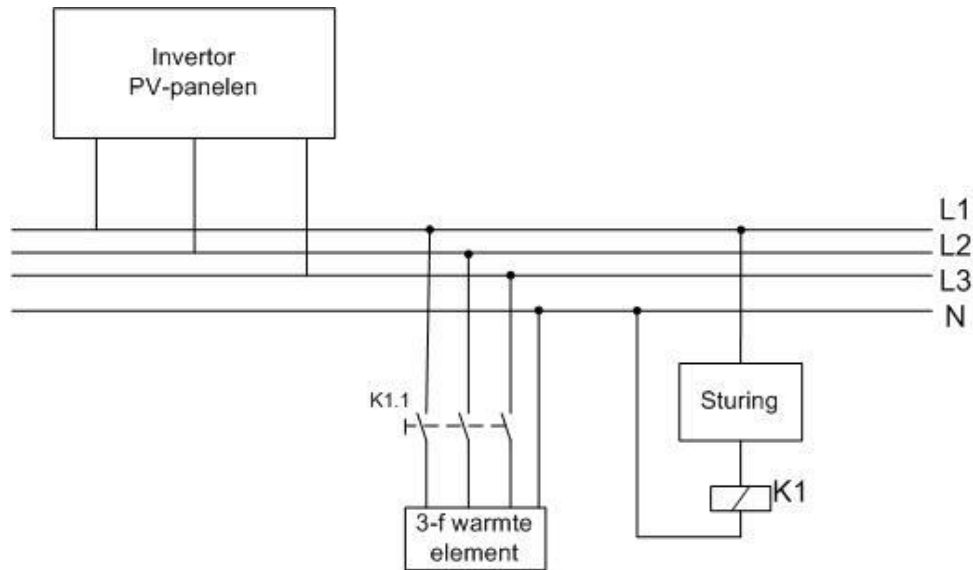
## 4.1 Testen op het gewone elektriciteitsnet

Door de lokale elektriciteitsproductie van PV-installaties stijgt de spanning met een paar volts op het ogenblik dat er veel radiantie is. Deze stijging is afhankelijk van de netimpedantie en is in onze opstelling eerder klein. In de labo-opstelling zijn er drie invertoren. Twee kunnen 1,7 kW leveren en één 2,1 kW. In de plaats van PV-panelen wordt een PV-simulator gebruikt zodat de “instraling” op ieder ogenblik geregeld kan worden. De invertoren die gebruikt worden zijn van het merk SMA, ook bekend als Sunny Boy (rode toestellen in Figuur 86).



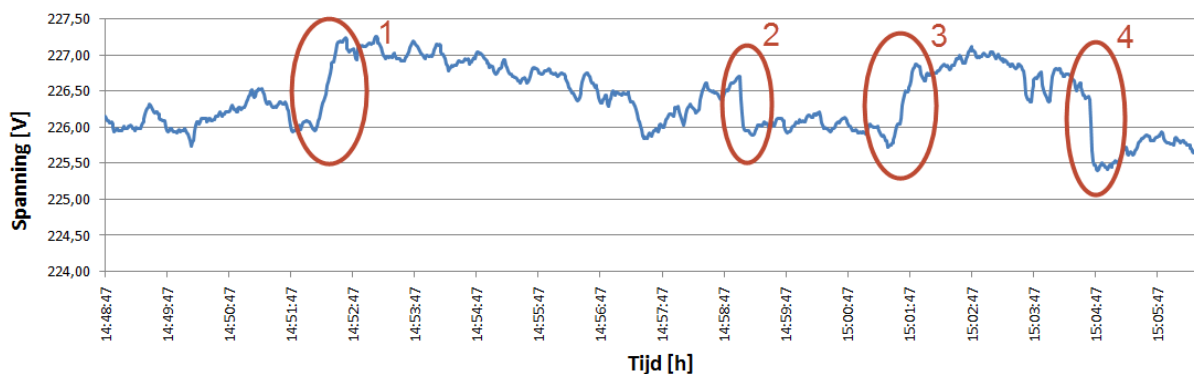
**Figuur 86: Regelbare zonne-instraling met behulp van PV-simulator en gelijkspanningsbron**

De energie, die door de PV-panelen geleverd wordt, komt bij op het schoolnet en laat de spanning beperkt toenemen. De sturing voor de boiler zal op spanning en frequentie schakelen wanneer één of beiden boven de ingestelde waarde gaan. Hierdoor zal de boiler extra warmte opslaan tot wanneer de ondergrens van de ingestelde hysteresis bereikt is.



**Figuur 87: Opbouw voor de test op het schoolnet**

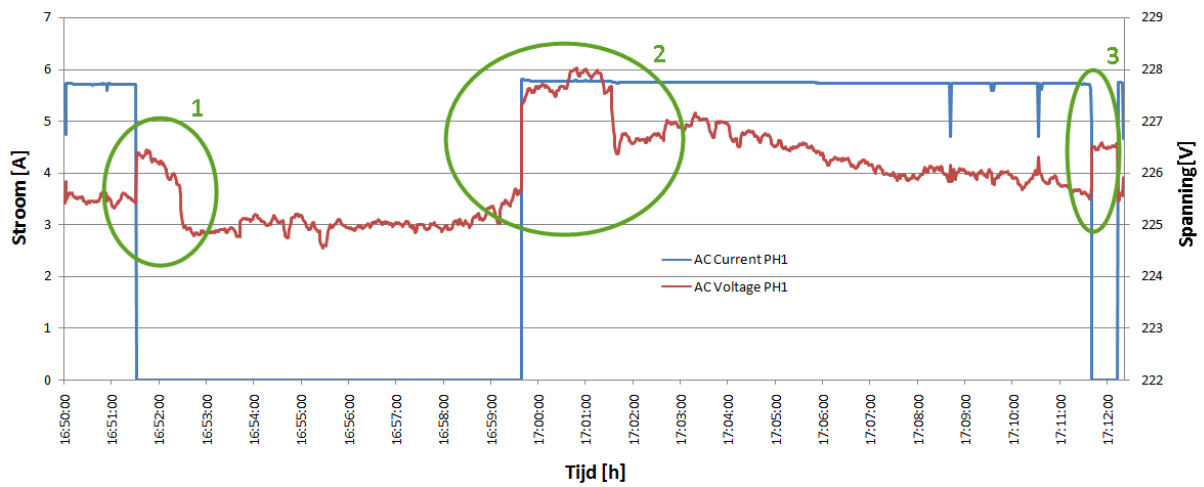
De invloed van de zonnepanelen op de netspanning is te zien in Figuur 88. De inverter van de zonnepanelen werd op korte tijd van volledig uit naar maximaal vermogen geregeld. De invloed op de spanning is zichtbaar in de punten 1 en 3, waar de spanning plots 1V stijgt. Het uitschakelen gebeurde in de punten 2 en 4, ook hier zakt de spanning ongeveer 1V. Deze stijging van de spanning mag slechts binnen zeer nauwe grenzen gebeuren. Daarom wordt er op deze momenten best ingegrepen door de energie die op het net gezet wordt af te nemen met bijvoorbeeld een boiler. Door vervolgens de boiler opnieuw af te schakelen wanneer er een spanningsdaling wordt vastgesteld, wordt er bijdrage geleverd om de stabiliteit te ondersteunen.



**Figuur 88: Spanningsverloop bij snelle verhoging van de zonne-instraling**

De invloed van de boilersturing op de spanning is te zien in Figuur 89. Hierbij valt op dat de spanning in het net onmiddellijk toeneemt nadat de boiler uitschakelt (event 1 en 3 in de figuur). Wanneer de spanning verhoogd wordt door bijvoorbeeld opbrengst van PV-panelen, schakelt de boiler in. In deze test gebeurt dat wanneer de spanning boven het ingestelde punt ligt van 227 V ligt. De boiler buffert dan deze zonne-energie (event 2 in de figuur). Aangezien de stijging van de spanning bij event 2 normaal nog groter ging zijn, zonder het inschakelen van de boiler, heeft de sturing dus een positief effect op de kwaliteit van de spanning van het elektriciteitsnet en laat het toe op spanningsniveau energie te bufferen.

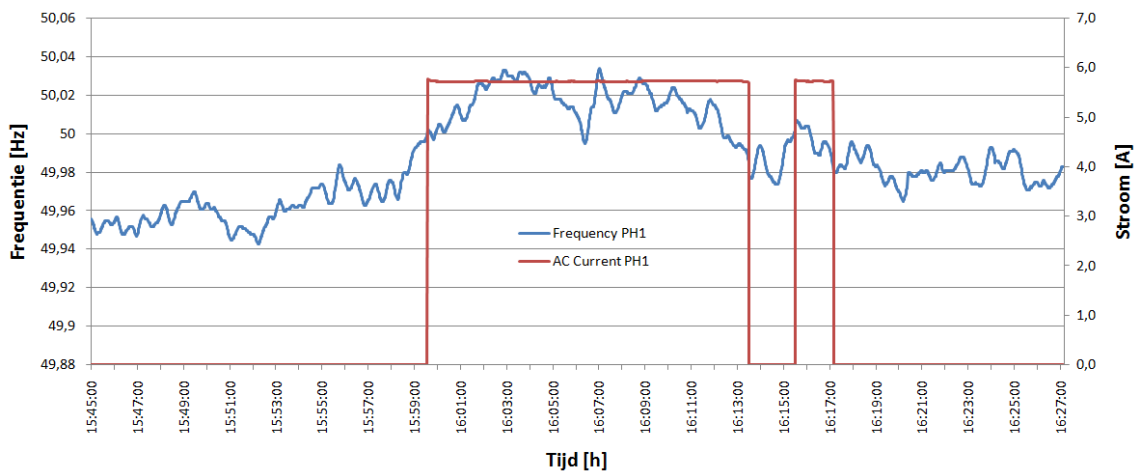
Via deze regeling moeten PV-panelen dus niet hun energie kwijt te kunnen in het net, maar kan die opgeslagen worden in een boiler. Wat de netkwaliteit ten goede komt en het nuttige lokale verbruik van duurzame energie verhoogt.



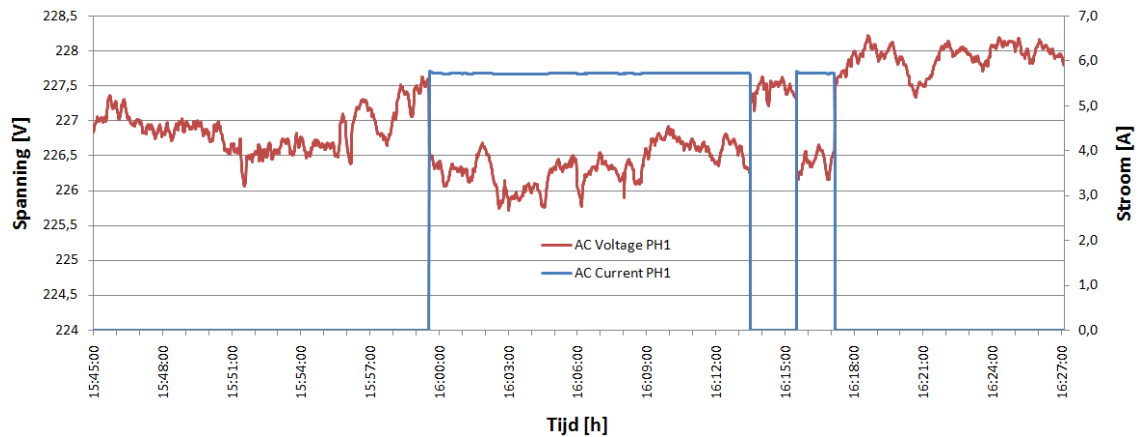
**Figuur 89: Invloed van de boilersturing op de spanning**

De frequentie stijgt als er een overaanbod is van elektriciteitsproductie op het net. De boiler wordt op dat moment ingeschakeld. Om te testen of de boiler invloed heeft op de frequentie, werden de grenzen gekozen op inschakelen op 50,00 Hz en uitschakelen op 49,99 Hz. In Figuur 90 is het schakelverloop duidelijk gemaakt, wanneer de frequentie boven 50,00 Hz komt, schakelt de boiler aan.

Het is duidelijk dat één boiler geen invloed heeft op de frequentie, de frequentie blijft namelijk toenemen na het inschakelen van de boiler. Om de frequentie te beïnvloeden moet het vermogen veel hoger liggen. Wanneer er meerdere toepassingen deze sturing gebruiken is dat wel een mogelijkheid. Hoeveel het verbruik moet toenemen, of hoeveel van deze sturingen geïmplementeerd moeten worden om de frequentie aan te passen, is momenteel nog niet onderzocht.



**Figuur 90: Inschakelen van de boiler op frequentieniveau**



**Figuur 91: Invloed op de spanning bij te hoge frequentie**

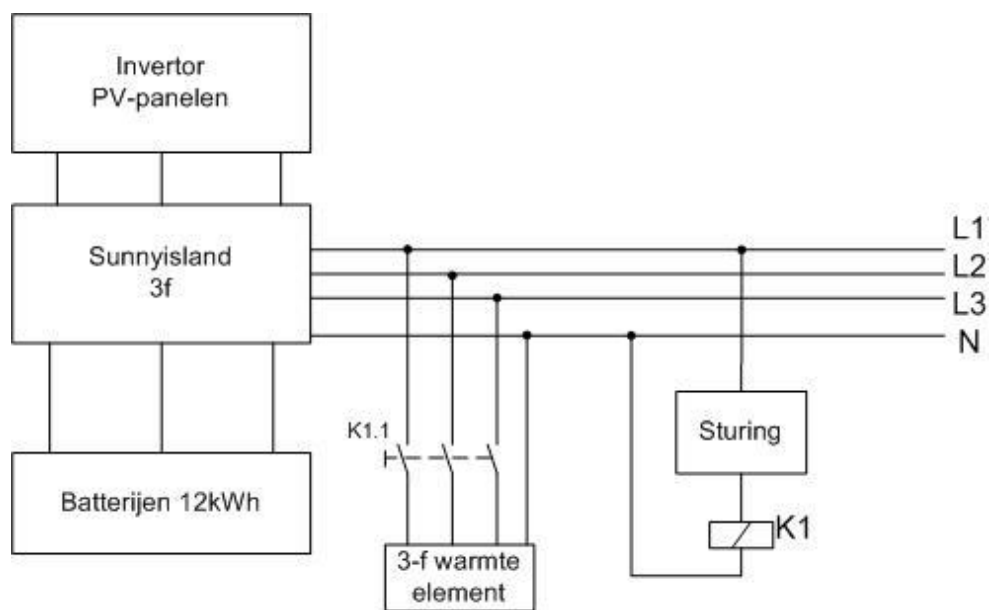
## 4.2 Testen van de sturing in eilandbedrijf

Met Sunny Island modules en batterijen kan er een volledig autonoom driefasig net gerealiseerd worden. Op het ogenblik dat er in dat net meer productie is dan verbruik, worden de batterijen opgeladen. Als er meer verbruik is dan productie, wordt energie uit de batterijen gehaald. De batterijen kunnen opgeladen worden doormiddel van PV-panelen. Wanneer de loodzuur batterijen bijna volledig opgeladen zijn, verhogen de Sunny Islands de frequentie in het microgrid. Toestellen verdragen beter een hogere frequentie dan een hogere spanning. Nominaal is er in het microgrid een frequentie van 50,00 Hz. Maar als de batterijen volledig opgeladen zijn en er is meer energieproductie (door bijvoorbeeld zonnepanelen) dan afname, dan zal de frequentie snel en sterk toenemen. Recente PV-invertoren gaan de output verlagen bij toenemende frequentie, iets wat de oudere modellen nog niet doen. Wanneer er een te grote overproductie is, gaat de omvormer de frequentie zo hoog maken dat de inverter van de zonnepanelen uitgaat. Om te voorkomen dat de opbrengst van de PV-panelen verloren gaat, schakelt de boilersturing in en slaat de zonne-energie thermisch op wanneer de elektrische opslag al verzadigd is. Op deze manier wordt de samenwerking van deze twee opslagsystemen optimaal gebruikt. Dit doordat de stilstandsverliezen van de batterij uitermate klein zijn ten opzichten van de verliezen in de boiler.



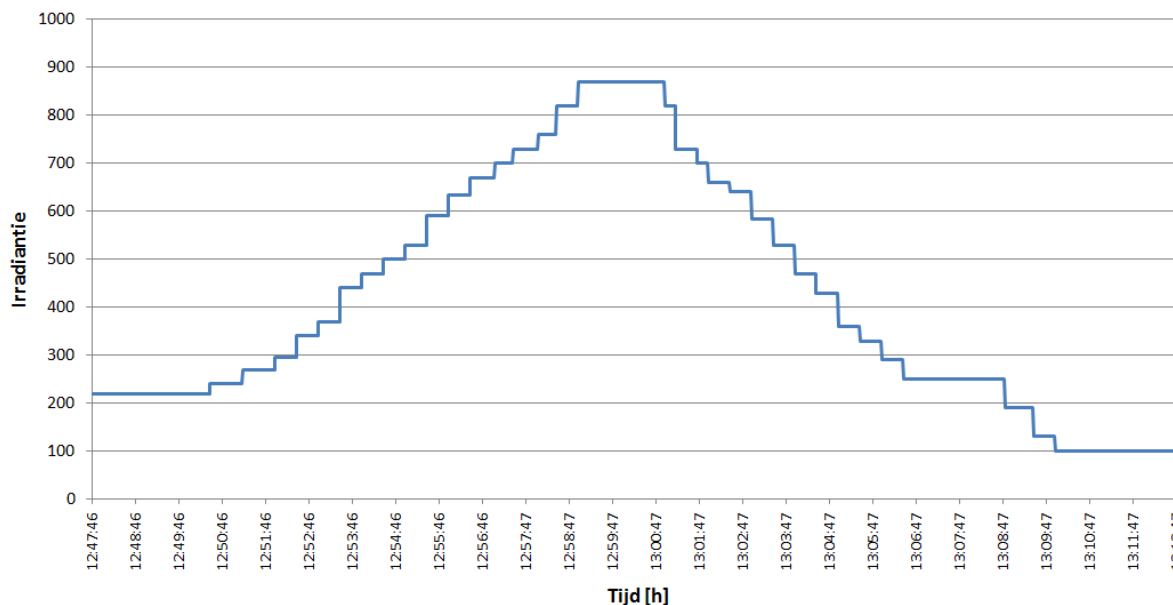


**Figuur 92: Sunny Islands in combinatie met loodzuur batterijen**

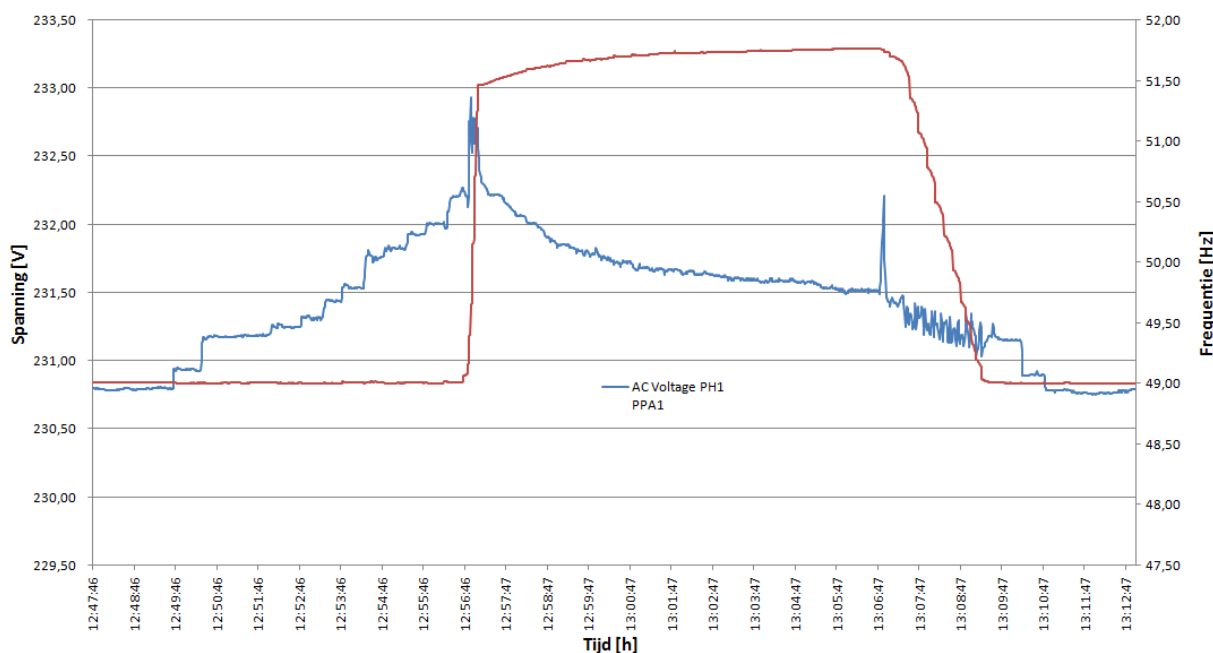


**Figuur 93: Schematische opbouw van de proefstand voor eilandwerking**

De volgende meting geeft het verloop van de spanning en de frequentie bij volle batterijen en systematische verhoging van de zonne-opbrengst. De irradiantie (sterkte van de zoninstraling) is regelbaar met de PV-simulator.



**Figuur 94: Irradiantie geleidelijk verhogen bij test in eilandbedrijf**



**Figuur 95: Frequentie- en spanningsverandering bij irradiantie verandering**

De spanning zal bij bijna volle batterijen en stelselmatige verhoging van de irradiantie eerst toenemen en vanaf een bepaald vermogen stijgt de frequentie sterk. Wanneer het vermogen terug laag genoeg is, zakt de frequentie en de spanning. De boilersturing kan ingrijpen vanaf het moment dat of de spanning of de frequentie het schakelniveau bereikt. Door het verhogen van het verbruikt zal de frequentie stabiel blijven. Indien er geen extra verbruikers worden in geschakeld, zal de frequentie blijven stijgen tot de inverter van de zonnepanelen uitschakelt. De Sunny Boys die gebruikt worden, schakelen in eilandmode uit bij een frequentie boven de 54,5 Hz. Bij nieuwere invertoren wordt de output al eerder verlaagd wanneer de frequentie te hoog is.

### 4.3 Conclusie

De sturing die gebruik maakt van een microcontroller, werkt nauwkeurig en kan schakelen op de ingestelde frequentie- en spanningswaarden. De sturing kan gebruikt worden voor het aansturen van een boiler, waarmee de duurzame energie opgeslagen kan worden in warmte. De sturing zou eveneens bruikbaar zijn voor andere toepassingen. Verder onderzoek kan dit aantonen.

Door het bufferen is de sturing in staat de netkwaliteit te beïnvloeden. Het is mogelijk de spanning te reduceren in geval van overproductie. Zelfs door enkel gebruik te maken van één boiler is de reductie zichtbaar. De reductie is afhankelijk van de netimpedantie en de verhouding tussen verbruik en productie. Bij de testopstelling is de invloed relatief klein (1-2V). Om invloed uit te oefenen op de frequentie zijn er echter grotere of meer verbruikers nodig. Hoeveel het verbruik moet toenemen, of hoeveel van deze sturingen geïmplementeerd dienen te worden om de frequentie aan te passen, is momenteel nog niet onderzocht.

Via de sturing kan duurzame energie op een manier gebruikt worden waarmee de stromen naar het net minder voorkomen, doordat op momenten van piekproductie het overschot gebufferd kan worden. Hierdoor zal de decentrale productie het net minder belasten waardoor de kwaliteit van de spanning verbetert.



## Algemeen besluit

In dit eindwerk werd er een literatuuronderzoek gedaan naar de verschillende mogelijke technologieën om energieopslag te doen op woningniveau. Uit die literatuurstudie blijken er verscheidene interessante manieren te zijn om energieopslag uit te voeren en is er een continue verbetering in de technieken voor zowel thermische als elektrische opslagmogelijkheden.

Naast de literatuurstudie werd een sturing ontwikkeld, met een bedrag van € 37,72, om energieopslag toe te passen in thermische vorm. Om deze opslag uit te voeren werd een schakeling ontworpen die de netspanning verwerkt naar twee meetsignalen. Eén van die signalen is een blok golf waarbij de periode van de netspanning wordt gemeten. Het andere signaal is een gelijkgerichte sinus en wordt gebruikt om de amplitude van de netspanning te meten. Beide signalen worden aangelegd aan een microcontroller, die op basis van de twee meetsignalen bepaald of er zich al dan niet een energieoverschot voordoet.

Om het eindwerk af te ronden werd de printplaat met het ontworpen programma aan een boiler gekoppeld. Deze boiler werd ingeschakeld bij een energieoverschot op het net en dient zo als thermische buffer. Door middel van testen op schoolnet en het micro-grid van i-NET werd aangetoond dat de verwachte resultaten behaald werden. Uit de metingen konden twee besluiten gevormd worden namelijk:

- bij het inschakelen van de boiler is er een spanningsdaling op te merken, waardoor het energieoverschot vermindert;
- in een groot, stabiel net is het niet mogelijk om met een enkele boiler de frequentie te belasten. Om hier invloed op te hebben moeten er meer en/of elektrisch zwaardere boilers gebruikt worden.



## Literatuurlijst

- [1] K. Jespers, K. Aernouts en Y. Dams, *Inventaris duurzame energie in Vlaanderen 2012 DEEL I: hernieuwbare energie*, Vito, okt. 2013
- [2] Vlaamse Regering, “Vlaams Klimaatbeleidsplan 2013-2020”, lne.be, 28 juni 2013 [online]. Beschikbaar: [www.lne.be/themas/klimaatverandering/vlaams-klimaatbeleidsplan-2013-2020](http://www.lne.be/themas/klimaatverandering/vlaams-klimaatbeleidsplan-2013-2020) geraadpleegd op 18/11/2013 [Geraadpleegd op 29 november 2013].
- [3] W. D’haeseleer, et al., *Energie vandaag en morgen: beschouwingen over energievoorziening en – gebruik*, Acco, 2005, p251-259
- [4] G. Deconinck en P. Saey, *Elektrotechniek en Automatisering capita selecta*, Academia Press, 2011, 331-335
- [5] T. Vandoorn, *Spanningsgebaseerde proportionele regeling van convertorgekoppelde gedistribueerde generatoren in microgrids*, [thesis], 2013, p49-51].
- [6] Osii.com, “Smart grid initiatives”, osii.com. [Online] Beschikbaar: <http://www.osii.com/fr/files/smartgridinitiativeswhitepaper.pdf>. [Geraadpleegd op 14-01-2014].
- [7] J. Ning-Wei Chiu, “Heat Transfer Aspects of Using Phase Change Material in Thermal Energy Storage Applications”, Ongepubliceerd eindwerk, KTH School of Industrial Engineering and Management, Stockholm, 2011.
- [8] Giorgio Urbano et al., “Energy-Hub for residential and commercial districts and transport: Inventory of existing technologies for energy storage and conversion”, e-hub.org, 15 december 2011.[online]. Beschikbaar: [http://www.e-hub.org/pdf/D1.4\\_EnergyRatingSystemAndEvaluationMethodology-ExecSummary.pdf](http://www.e-hub.org/pdf/D1.4_EnergyRatingSystemAndEvaluationMethodology-ExecSummary.pdf) [Geraadpleegd op 29 december 2013].
- [9] P. Steffes, “Grid-Interactive Electric Thermal Storage (GETS) Water Heating”, steffes.com, [online] Beschikbaar: [www.steffes.com/LiteratureRetrieve.aspx?ID=115580](http://www.steffes.com/LiteratureRetrieve.aspx?ID=115580) [Geraadpleegd op 15 december 2013].
- [10] Julien Eynard et al., “Predictive control and thermal energy storage for optimizing a multi-energy district boiler”, *Journal Of Process Control*, vol. 22 , issue 7, pp. 1246-1255, Augustus 2012, [online] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959152412001266> [Geraadpleegd op 15 december 2013].
- [11] N-ERGIE Kraftwerke GmbH, “Warmwasserspeicher HKW Sandreuth”, nuernberg.de, 25.10.2012. [online] Beschikbaar: [http://www.nuernberg.de/imperia/md/baureferat/dokumente/bkb/2012/2\\_beschreibung\\_plaene\\_ansichten\\_2012\\_10\\_25.pdf](http://www.nuernberg.de/imperia/md/baureferat/dokumente/bkb/2012/2_beschreibung_plaene_ansichten_2012_10_25.pdf) [Geraadpleegd op 15 december 2013].
- [12] H. Mehling, L. F. Cabeza, “Heat and Mass Transfer: Heat and cold storage with PCM”, Berlijn: Springer-Verlag, 2008.
- [13] Sciencercay, “How to make Sodium Acetate”, 2014. [online] Beschikbaar: <http://sciencercay.com/chemistry/how-to-make-sodium-acetate/>. [Geraadpleegd: 09 januari 2014].

- [14] Z. Zhengguo, S. Guoquan, W. Shuping, F. Xiaoming, L. Xiaohong, “Thermal energy storage cement mortar containing n-octadecane/expanded graphite composite phase change material”, *Renewable Energy*, vol. 50, pp. 670-675, februari 2013.
- [15] A. Mills, M. Farid, JR. Selman, S. Al-Hallaj, “Thermal conductivity enhancement of phase change materials using a graphite matrix”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 26, pp. 1652-1661, oktober 2006.
- [16] A. Willemsen, M.S. Godschalk, “Geothermal Energy” [online] Beschikbaar: <http://www.painternational.org/documents/MicrosoftWord-managementofhotandcoldwater-GuusWillemsen.pdf> [Geraadpleegd op: 27 december 2013].
- [17] B. Vande Meerssche, G. Van Ham, G. Deconinck, “Capacity of a freezer for active demand side management”, april 2010 [Online]. Beschikbaar: <http://www.kenniscentrumenergie.be/publicaties>. [Geraadpleegd op 30 december 2013].
- [18] E. W. Kurkinen, “Low-Energy House with Heat Storage in the Ground Using Solar Collectors”, [web.ornl.gov](http://web.ornl.gov), 20 november 2012. [online]. Beschikbaar: [http://web.ornl.gov/sci/buildings/2012/2010%20B11%20papers/108\\_Kurkinen.pdf](http://web.ornl.gov/sci/buildings/2012/2010%20B11%20papers/108_Kurkinen.pdf) [Geraadpleegd op 30 december 2013].
- [19] R. Green, “The Effects of Cycling on Heat Pump Performance”, [gov.uk](http://www.gov.uk), november 2012. [online] Beschikbaar: [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/65695/7389-effects-cycling-heat-pump-performance.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/65695/7389-effects-cycling-heat-pump-performance.pdf) [Geraadpleegd op 29 december 2013].
- [20] K. Leemans, H. Claes, “Energieopslag van fotovoltaïsche installaties door loodzuur batterijen”, Ongepubliceerd eindwerk, KHKempen, Geel, 2011
- [21] Servaas Duterloo et al., “IA Special: Innovation on Smart Grids and energy storage”, [rvo.nl](http://www.rvo.nl), november 2012. [Online]. Beschikbaar: [http://www.rvo.nl/sites/default/files/Smart%20Grids%20\(NL\).pdf](http://www.rvo.nl/sites/default/files/Smart%20Grids%20(NL).pdf). [Geraadpleegd op: 4 januari 2014].
- [22] Electricity Storage Association, “Technology Comparisons”, [electricitystorage.org](http://www.electricitystorage.org). [online] Beschikbaar: [http://www.electricitystorage.org/technology/tech\\_archive/technology\\_comparisons](http://www.electricitystorage.org/technology/tech_archive/technology_comparisons). [Geraadpleegd op 09/01/2014].
- [23] I. Buchmann, “Battery University”, [www.batteryuniversity.com](http://www.batteryuniversity.com). [online]. [Geraadpleegd op 9 januari 2014].
- [24] D. Capsoni et al., “Recent advances in the development of Li-air batteries”, *Journal Of Power Sources*, vol. 220, pp. 253-263, december 2012.
- [25] T. Nuytemans, “Betere batterijen: Groen en eeuwig leven”, *Eos*, vol. 5, mei 2013.
- [26] M. Van Zundert, “Katoen”, *Chemische Feitelikheden*, vol. 235, editie 53, juni 2007.
- [27] B.N. Grgur et al., “Polypyrrole as possible electrode materials for the aqueous-based rechargeable zinc batteries”, *Electrochimica Acta*, vol. 53, Issue 14, pp. 4267-4632, mei 2008
- [28] S.J. Tong, A. Same, M. A. Kootstra, J.W. Park, “Off-Grid Photovoltaic Vehicle Charge Using Second Life Lithium Batteries: An Experimental And Numerical Investigation”, *Applied Energy*, vol. 104, pp. 740-750, april 2013.



- [29] K. Clement-Nyns, E. Haesen, J. Driesen, “The Impact of Charging Plug-In Hybrid Electric Vehicles on a Residential Distribution Grid”, IEEE Transactions On Power Systems, vol. 25, n°1, februari 2010.
- [30] E. D. Haukedal, “Load-Scheduling and Plug-in Hybrid Electric Vehicles in the Smart Grid”, juni 2012. [online]  
Beschikbaar: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:566136/FULLTEXT01.pdf>
- [31] K. Mets, T. Verschueren, F. De Turck, C. Develder, “Exploiting V2G to optimize residential energy consumption with electrical vehicle (dis)charging”, Ghent University Academic Bibliography. [Online]. Beschikbaar: <https://biblio.ugent.be/publication/2029572>. [14 februari 2012].
- [32] C. Rayment, S. Sherwin, “Introduction to Fuel Cell Technology”, cursustekst, University of Notre Dame, Notre Dame (U.S.A.), 2003.
- [33] M. Van Vlasselaer, F. Van Bellinghen, G. Behets, W. Deseure, “Theorie Waterstof”, telescript.denayer.wenk.be, aj 2010-2011. [Online.] Beschikbaar:  
[http://telescript.denayer.wenk.be/2010-11/c5b/public\\_html/Waterstof%20theorie.shtml](http://telescript.denayer.wenk.be/2010-11/c5b/public_html/Waterstof%20theorie.shtml)  
[Geraadpleegd op 4 januari 2014].
- [34] A. Mortensgaard, “Balancing the Future Danish Energy System”, december 2012. [online]  
Beschikbaar: <http://www.hydrogennet.dk/744>. [Geraadpleegd op 4 januari 2014].
- [35] M. Odgaard, “A 1 kW Portable Power Generator”, ec.europa.eu. [online] Beschikbaar:  
[http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/efchp\\_fuelcell28.pdf](http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/efchp_fuelcell28.pdf). [Geraadpleegd op: 4 januari 2014].
- [36] J. Pandey, “Studies on Direct Methanol Fuel Cell: An electro-chemical energy conversion device”, University of Delhi, 08 april 2012 [online]. Beschikbaar:  
<http://people.du.ac.in/~mrana/EESC/EESC-presentation/jay%20PPT%20chemcon.ppt>.  
[Geraadpleegd op: 4 januari 2014].
- [37] Fuel Cell Today, “Fuel cell basics: technology types”, fuelcelltoday.com [online].  
Beschikbaar: [http://www.fuelcelltoday.com/media/1637138/fc\\_basics\\_technology\\_types.pdf](http://www.fuelcelltoday.com/media/1637138/fc_basics_technology_types.pdf).  
[Geraadpleegd op: 4 januari 2014].
- [38] HydrogenTrade, “Hydrogen Storage”, hydrogentrade.com. [online] Beschikbaar:  
<http://www.hydrogentrade.com/storage/>. [Geraadpleegd op 4 januari 2014].
- [39] J. Neubauer, A. Pesaran, “PHEV/EV Li-Ion Battery Second-Use Project”, nrel.gov, april 2010. [Online]. Beschikbaar: <http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/48018.pdf>.  
[Geraadpleegd op 9 januari 2014].
- [40] Fuelcells.org, “Fuel Cells 2000 – Types of fuel cells”, fuelcells.org [Online]. Beschikbaar:  
[http://www.fuelcells.org/base.cgim?template=types\\_of\\_fuel\\_cells](http://www.fuelcells.org/base.cgim?template=types_of_fuel_cells). [Geraadpleegd op 4 januari 2014].
- [41] M. Chaplin, “Magnetic and electric effect on water”, lsbu.ac.uk, 04 december 2013. [Online].  
Beschikbaar: <http://www1.lsbu.ac.uk/water/electrolysis.html> [Geraadpleegd op 15 januari 2014].
- [42] www.vlaanderen.be. [Online] Beschikbaar:  
[http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/doc/code\\_warmtepompen.pdf](http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/doc/code_warmtepompen.pdf) [Geraadpleegd op 14/01/2014].

- [43] C. Ingeol, L. Chaedeok, “ES-Debugger : the flexible Embedded System Debugger based on JTAG technology”, Ieeexplore.ieee.org. [Online].  
Beschikbaar: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1462923>. [Geraadpleegd op: 27 december 2013].
- [44] Atmel Corporation, “ATmega32/L Datasheet”, atmel.com. [Online]. Beschikbaar: [www.atmel.com/Images/doc2503.pdf](http://www.atmel.com/Images/doc2503.pdf). [Geraadpleegd op: 20 december 2013].
- [45] Boeynaems, et al., *De sanitair warmwaterbereiding*, fvb.constructiv.be, 2000. [Online]  
Beschikbaar:  
[http://fvb.constructiv.be/~media/Files/Shared/FVB/Sanitair%20Installateur/NL/Sanitair%20water\\_for\\_web.pdf](http://fvb.constructiv.be/~media/Files/Shared/FVB/Sanitair%20Installateur/NL/Sanitair%20water_for_web.pdf)
- [46] Synergrid, “C10-11: Specifieke technische voorschriften voor decentrale productie – installaties die in parallel werken met het distributienet”, juni 2012, p10-13 [online] Beschikbaar: [http://www.synergrid.be/download.cfm?fileId=C10-11\\_NL\\_120604.pdf&language\\_code=NED](http://www.synergrid.be/download.cfm?fileId=C10-11_NL_120604.pdf&language_code=NED) [geraadpleegd op 20/11/2013]
- [47] I. Dinçer, M. A. Rosen, *Thermal energy storage: Systems and applications*, 2<sup>nd</sup> ed., Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2011.

## **Bijlagen**

Bijlage A: Excel met prijsberekening

Bijlage B: Programmacode

Bijlage C: Ontwerptekeningen in Eagle

Bijlage D: Logfiles

## **Auteursrechtelijke overeenkomst**

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:  
**Sturing van energiebuffering op woningniveau**

Richting: **master in de industriële wetenschappen: energie-elektrotechniek**  
Jaar: **2014**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

**Peeters, Daan**

**Santermans, Christophe**

Datum: **20/01/2014**