

SlimmeGebruikers

haalbaarheid van energiebesparing door middel van grootschalige gebruikersinteractie en

slimme meters

Nieuw Energie Onderzoek – eindrapportage

openbaar

Hoffmann RD

Dr.ir. M.R. Hoffmann

sgneo@slimmegebruikers.nl

augustus 2010

Dit project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, regeling EOS: Nieuw Energieonderzoek, uitgevoerd door SenterNovem.

Project nummer: NEOH04003

Penvoerder: Hoffmann RD

Bij het tot stand komen van deze haalbaarheidsstudie was vanuit SenterNovem dhr. O. Ongkiehong betrokken.

Dr.ir. M.R. Hoffmann

Hoffmann RD

email: sgneo@slimmegebruikers.nl , sgneo@h-rd.org

<http://www.h-rd.org>

© 2009, 2010 Hoffmann RD

Inhoudsopgave

Samenvatting	4
1 Inleiding	5
1.1 Achtergrond	6
1.2 Probleemstelling	7
1.3 Doelstelling	8
1.4 Werkwijze en Bereik van het Onderzoek	9
2 Energiebesparing en Gebruikersadviezen	10
2.1 Achtergrondinformatie	10
2.2 Use Cases	11
2.2.1 Use Case Lisa	11
2.2.2 Use Case Peter	12
2.2.3 Use Case Marieke	12
2.2.4 Gebruik Use Cases	13
2.3 Beschrijving Slimme Meter	14
2.4 Beschrijving van het Idee SlimmeGebruikers	15
2.4.1 Tijdreeksformatie	16
2.4.2 Tijdreeksaggregatie en vergelijking	16

2.4.3	Tagging van Tijdreeksen	17
2.4.4	Automatische Gebruiksadviezen	18
2.4.5	Automatische Terugkoppeling	18
2.4.6	Additionele Onderzoekspunten	19
2.5	Resultaten van eerder Onderzoek	20
2.6	Uitvoering van het project	21
3	Systeemonderzoek SlimmeGebruikers	22
3.1	Data Modelering	22
3.2	Schaalbare algoritmes	23
3.3	Tijdreeksanalyse	24
3.3.1	Tijdreeks modelering	25
3.3.2	Beschrijving van SAX	26
3.4	Automatische advisering	29
3.4.1	Adviesstrategien	31
3.5	Kennisrepresentatie	32
3.5.1	Regel-gebaseerde Systemen	34
3.5.2	Agent Systemen	35
3.5.3	Probabilistische Systemen	39
3.5.4	Logica Systemen	39
3.6	Zelflerende systemen	40
3.6.1	Reinforcement Learning	40
3.7	Data-Mining	41
3.8	Gebruikers Interactie	42
3.9	Implementatie	42
3.9.1	Gebruikersinterface	43
3.10	Gebruikersmotivatie en maatschappelijke aspecten	44

4 Resultaten en Discussie	45
4.1 Beschrijving en Systematische Analyse van de Resultaten	45
4.2 Discussie	47
4.3 Onzekerheden	47
5 Conclusies en Aanbevelingen	49
5.1 Samenvatting Resultaten	49
5.2 Haalbaarheidsanalyse	50
5.2.1 Technische Haalbaarheid	50
5.2.2 Economische Haalbaarheid	50
5.3 Geïntegreerde Analyse en Beoordeling Haalbaarheid	51
5.4 Aanbevelingen	51
5.4.1 Aanbevelingen Technisch-Wetenschappelijk Vervolgonderzoek . .	52
Referenties	53

Samenvatting

Deze rapportage geeft de resultaten van een haalbaarheidsstudie naar een mogelijke toepassing van de slimme meter voor energiebesparing. Met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken is via SenterNovem onder de regeling Nieuw Energie Onderzoek (NEO) onderzoek gedaan naar het project SlimmeGebruikers - haalbaarheid van energiebesparing door middel van grootschalige gebruikersinteractie en slimme meters.

Voor de beoordeling van de haalbaarheid is een theoretische studie met literatuuronderzoek en internetonderzoek uitgevoerd en zijn enkele veelbelovende technologisch-wetenschappelijk ontwikkelingen in detail bestudeerd. Binnen het onderzoek zijn geen fundamentele technisch-wetenschappelijke problemen gevonden die de realisatie van SlimmeGebruikers onmogelijk maken. Wel is duidelijk dat verder onderzoek nodig is om het systeem functioneel en operationeel te maken. Dit geldt in het bijzonder voor de symbolische tijdreeksformatie met behulp van iSAX.

De belangrijkste aanbevelingen zijn: 1.) Niet-technische aspecten van SlimmeGebruikers verdienen op dit moment de meeste aandacht. 2.) Om de kennispositie van Nederland te versterken is het nodig een aantal pilots door te voeren. 3.) Meer openbaar onderzoek over het gebruik van de slimme meter kan voor een betere verspreiding van kennis binnen Nederland zorgen en nieuwe ideeën voor toepassingen doen ontstaan. 4.) Een duidelijke, begrijpelijke en openbare strategie voor de invoering van de slimme meter en de daarbij behorende dataprotocollen alsmede de kosteneffectieve toegang tot de data van de slimme meter zijn essentiële voorwaarden voor SlimmeGebruikers en andere diensten die onafhankelijk van de energiebedrijven opereren.

De belangrijkste technisch-wetenschappelijke aanbevelingen/onderzoeksvragen zijn: 1.) Een verificatie van iSAX voor energiegebruiksdata is aan te bevelen. 2.) Een studie naar de beperkingen en mogelijkheden voor het migreren van het adviessysteem naar clients zoals mobieltjes. 3.) Een onderzoek naar de interactie tussen teleo-reactive agents en reinforcement learning. 4.) een onderzoek naar een efficiënte koppeling van iSAX en data-mining.

Hoofdstuk 1

Inleiding

SlimmeGebruikers - haalbaarheid van energiebesparing door middel van grootschalige gebruikersinteractie en slimme meters

Dit rapport beschrijft een haalbaarheidsstudie naar de energiebesparing door middel van toepassing van de gegevens van de slimme meter en gebruikersinteractie.

In de komende jaren worden in Nederland “slimme meters” geïnstalleerd. Hierbij gaat het om digitale meters voor het elektriciteits- en gasgebruik van huishoudens. Deze slimme meters kunnen communiceren met een centrale datafaciliteit van de netbeheerder. Het project SlimmeGebruikers heeft de haalbaarheid van de technische mogelijkheden van fundamenteel onderzoek over het gebruik van de slimme meter voor energiebesparing onderzocht. Centraal hierbij staat het uitbreiden van kennis omtrent algoritmes voor grootschalige gebruikersinteractie en automatisch advies over communicatienetwerken. Daardoor kan het gebruik van de slimme meter door huishoudens bevorderd worden, met als einddoel een significante verlaging van het energiegebruik.

Door de toekomstige beschikbaarheid van een veelvoud aan gebruiksdata uit de slimme meters is het theoretisch mogelijk dat huishoudens data delen en van elkaar kunnen leren. Ook is het mogelijk dat gebruikers elkaar kunnen motiveren door competities. Cruciaal daarvoor is een technisch platform dat deze informatieuitwisseling mogelijk maakt. De gebruiker moet informatie over het energiegebruik op een zodanige manier teruggekoppeld krijgen dat hij daadwerkelijk de mogelijkheid en motivatie heeft zijn gedrag aan te passen. Het haalbaarheidsonderzoek heeft als doelstelling: *Het uitwerken, systematisch analyseren*

en evalueren van de technische mogelijkheden van fundamenteel wetenschappelijk onderzoek met als einddoel energiebesparing door grootschalige gebruikersinteractie en slimme meters.

1.1 Achtergrond

Energietransitie en energiebesparing zijn een centraal beleidsdoel van de Nederlandse overheid. Dit rapport richt zich primair op energiebesparing. De gegevens over energiegebruik en de mogelijkheden van alternatieve, minder milieubelastende opwekking van energie laten zien dat een energietransitie op korte termijn zeer grote inspanningen vereist (Hermans, 2008; MacKay, 2008). Aan de andere kant is het steeds beter mogelijk het gedrag van mensen te voorspellen aan de hand van data (Ayres, 2007). Dit in combinatie met het steeds geavanceerder worden van ICT technologieën maakt een systeem als SlimmeGebruikers mogelijk.

De installatie van de slimme meter in alle Nederlandse huishoudens opent een veelvoud aan mogelijkheden voor het benutten van energiegebruiksdata. Tot nu toe ligt de nadruk op het gebruik van de data van de slimme meters bij netbeheerders en stroomproducenten. In het Actieplan Decentrale Infrastructuur van de Platforms Nieuw Gas en Duurzame Elektriciteitsvoorziening (Werkgroep Decentrale Infrastructuur, 2008) wordt aandacht besteed aan de rol van netbeheerders en producenten, en de daaruit voortvloeiende eisen aan de slimme meters. Ook in de Innovatieagenda Energie van EnergieTransitie uit juli 2008 (EnergieTransitie, 2008) wordt slechts in een voetnoot verwezen naar de potentie van de slimme meter (p. 25): *“Veranderende consumptiepatronen: door de ‘slimme elektriciteitsmeter’ kan de consument stroom gebruiken wanneer die het goedkoopst is, en zelf bijhouden welk gedrag tot energieverstopping leidt.”* De nadruk ligt daarbij op het zelf bijhouden door de consumenten van hun gedrag. Dit vergt een grote inspanning van de consument en zal mogelijk motivatieproblemen veroorzaken. Daardoor kan de gerealiseerde energiebesparing relatief klein uitvallen. Het project SlimmeGebruikers wil juist de kennisontwikkeling bevorderen van wetenschappelijke technologieën die de consumenten verlossen van het zelf bijhouden en daardoor consumenten motiveren hun gedrag aan te passen. Ook het ministerie van EZ legt in haar Energierapport 2008 (Ministerie van Economische Zaken, 2008) grotendeels de nadruk op mogelijkheden voor stroomproducenten en netbeheerders: *“Door de mogelijkheden voor het uitwisselen van informatie kan een enorm potentieel aan intelligente producten en diensten worden aangeboden. Naar verwachting gaan leveranciers op termijn - net als in de telefonie - tariefpak-*

ketten en bundels aanbieden, al dan niet met een persoonlijk piek/dal tarief en flexibele actuele prijzen.” Slechts in de volgende zin wordt naar het directe nut voor gebruikers en het potentieel voor energiebesparing verwezen: “Gebruikers krijgen met de nieuwe meter veel meer informatie over hun verbruik, en daarmee mogelijkheden voor energiebesparing.”

Het project SlimmeGebruikers is een aanvulling op bestaande onderzoeksprogramma's en commerciële activiteiten. Het uiteindelijke doel is de haalbaarheid te onderzoeken van een geavanceerd technisch systeem dat het voor gebruikers mogelijk maakt om het energiegebruik te verlagen. Het cruciale element is dat gebruikers die nieuwe informatie willen opnemen en daadwerkelijk kunnen gebruiken voor energiebesparing.

Ook wordt onderzoek gedaan naar de even belangrijke niet-technische aspecten van groot-schalige gebruikersparticipatie over communicatienetwerken. Centraal daarbij staan vragen die betrekking hebben op gebruikersmotivatie, privacy en marketing. Daarbij hoort de vraag of –en hoe– huishoudens de technische mogelijkheden van dit project als vanzelfsprekend kunnen gebruiken.

In deze haalbaarheidsstudie wordt middels een systematische analyse en additioneel theoretisch onderzoek naar schaalbare algoritmes een inschatting van de mogelijkheden van SlimmeGebruikers verkregen. De resultaten van deze haalbaarheidsstudie zijn beoogd voor verder fundamenteel onderzoek naar aspecten van kennisontwikkeling en toepassing van en samenwerking voor SlimmeGebruikers. De potentie van SlimmeGebruikers voor energiebesparing is groot.

De directe aanleiding voor SlimmeGebruikers is om in de toekomst gebruik te kunnen maken van de mogelijkheden die de introductie van de slimme meter biedt.

1.2 Probleemstelling

Hoe is het mogelijk energiegebruikers te motiveren en te bewegen energie te besparen? Veel gebruikers geven aan dat zij energie willen besparen, maar in de praktijk blijkt de animo daarvoor gering. Dit komt aan de ene kant door een tekort aan doorzettingsvermogen, en aan de anderen kant door een tekort aan aan terugg koppeling tussen (energiebesparend) gedrag en het feitelijke energiegebruik.

Door de toekomstige beschikbaarheid van een veelvoud aan gebruiksdata uit de slimme meters is het theoretisch mogelijk dat huishoudens data delen en van elkaar kunnen leren. Ook is het mogelijk dat gebruikers elkaar kunnen motiveren door competities (zie

bijvoorbeeld <http://www.carbonrally.com/>). Cruciaal daarvoor is een technisch platform dat deze informatieuitwisseling mogelijk maakt. De gebruiker moet informatie over het energiegebruik op een zodanige manier teruggekoppeld krijgen dat hij daadwerkelijk de mogelijkheid en motivatie heeft zijn gedrag aan te passen. Enkel het aanbieden van een website met een grafiek van het energiegebruik zal slechts een beperkte energiebesparing bereiken (Darby, 2006). Meerdere problemen moeten daarvoor worden opgelost. Het haalbaarheidsonderzoek richt zich op het analyseren en verkennen van de technische mogelijkheden van de wetenschappelijke kennisontwikkeling en het versterken van de Nederlandse kennispositie.

1.3 Doelstelling

Het doel van het haalbaarheidsonderzoek SlimmeGebruikers is: *Het uitwerken, systematisch analyseren en evalueren van de technische mogelijkheden van fundamenteel wetenschappelijk onderzoek met als einddoel energiebesparing door grootschalige gebruikersinteractie en slimme meters.*

De bovenstaande doelstelling kan verder puntsgewijs worden uitgewerkt als volgt:

- *Het uitwerken, systematisch analyseren en evalueren van de technische mogelijkheden van fundamenteel wetenschappelijk onderzoek ...* Hiermee wordt bedoeld dat binnen deze haalbaarheidsstudie onderzoek wordt gedaan naar naar niet-bestaande, nieuwe kennis.
- *... met als einddoel energiebesparing door grootschalige gebruikersinteractie ...* Het voorgaande betekent dat primair haalbaarheidsonderzoek wordt gedaan naar kennis die het mogelijk maakt met behulp van grootschalige gebruikersinteractie energie te besparen. Over dit onderwerp is tot nu toe zeer weinig bekend. Wel is uit andere vakgebieden bekend dat wederzijdse beïnvloeding van actoren een cruciaal element is bij het bereiken van doelen door grote groepen individuele actoren.
- *... en slimme meters.* De nadruk in deze haalbaarheidsstudie ligt op het gebruik maken van de mogelijkheden van de slimme meter voor huishoudens. Ander gerelateerd onderzoek richt zich op de toepassingen van de slimme meter voor energiebedrijven en netbeheerders, of op onderzoek m.b.t. domotica.

Centraal staat in dit onderzoek de vraag of het haalbaar is een idee als SlimmeGebruikers in Nederland (op grote schaal) toe te passen.

1.4 Werkwijze en Bereik van het Onderzoek

Binnen dit onderzoek is gekozen voor een werkwijze die aansluit aan de eisen voor een haalbaarheidsonderzoek: Er is een verkennend bibliografisch en internetonderzoek uitgevoerd, daarna zijn interessante punten dieper uitgewerkt en is er in een analyse gekeken naar kennislacunes. Met de verkregen gegevens is nog een keer een onderzoek naar verschillende bronnen gedaan en is gestart met de rapportage.

Het bereik van het onderzoek bevat wetenschappelijke kennis en technologieën die wereldwijd zijn ontwikkeld. Deze kennis en technologieën kunnen in potentie door middel van verder wetenschappelijk en technologisch onderzoek een basis vormen om de doelen van SlimmeGebruikers te bereiken. De nadruk bij het onderzoek is het verkennen van de haalbaarheid van verder onderzoek.

Hoofdstuk 2

Energiebesparing en Gebruikersadviezen

Binnen Nederland en wereldwijd is relatief veel kennis aanwezig over het theoretisch potentieel van gerichte gebruikersadviezen op energiebesparing. Onderzoek wijst uit dat tot ongeveer een derde van het energiegebruik kan worden bespaart. Deze besparingen vereisen en veranderen gedrag van energiegebruikers, maar verlagen in principe niet het comfort van de gebruiker. Te denken valt aan eenvoudige maatregelen als het lager zetten van de verwarming bij het verlaten van het huis of het verminderde gebruik van een wasdroger bij mooi weer. In dit hoofdstuk wordt nader ingegaan op de aspecten van belang voor SlimmeGebruikers. Om een beter beeld te geven van het mogelijke gebruik van SlimmeGebruikers worden een aantal use cases als voorbeeld gegeven.

2.1 Achtergrondinformatie

Al geruime tijd proberen overheden het gebruik van energie te verlagen. Om dit te bereiken zijn verschillende methodes getest om gebruikers ertoe te bewegen minder energie te gebruiken. In het verleden lag de nadruk op voorlichting, voornamelijk gebaseerd op algemene adviezen zoals: “Zet de verwarming lager voordat je naar bed gaat.” Pas gedurende de laatste jaren wordt in Nederland geprobeerd gericht advies te geven door bijvoorbeeld energieadviseurs voor individuele huishoudens beschikbaar te stellen. Deze maatregelen hebben het potentieel van energiebesparing aangetoond, maar niet is gebleken dat daardoor op significante schaal energie is bespaard. Een belangrijke rol daarbij speelt dat de

kosten van energiegebruik voor huishoudens laag zijn in vergelijking met andere kosten zoals boodschappen en mobiliteit. Een groot deel van de kosten voor elektriciteit ligt daarbij ook nog vast door de kosten van de levering van elektriciteit.

Voor gebruikers betekent dit dat vaak een sterke motivering ontbreekt om energie te besparen. Wel is bij de meeste gebruikers de wil aanwezig om energie te besparen. De vraag is dan hoe het eenvoudig mogelijk is voor huishoudens om energie te besparen. Onderzoek heeft aangetoond dat juist directe informatie en feedback kan leiden tot energiebesparing. Darby (2006) heeft in een onderzoek aangetoond dat het effect van slimme meters op het energiegebruik groot kan zijn. Darby vindt dat in het bijzonder directe feedback naar huishoudens belangrijk is. Daarbij speelt ook een rol hoe die informatie gepresenteerd wordt. In haar onderzoek zijn aanwijzingen te vinden dat het effectief is historische gegevens van een huishouden te vergelijken met het huidige gebruik. Het vergelijken met referentiedata lijkt minder effectief. Wat wel door huishoudens gewenst wordt is informatie over welke apparatuur hoeveel energie gebruikt.

2.2 Use Cases

De volgende use cases zijn als voorbeelden gehanteerd bij het plannen van het systeem SlimmeGebruikers. Use cases zijn aan de ene kant belangrijk voor het (in gedachten) ontwerpen van het systeem en zijn mogelijkheden, maar kunnen ook belangrijk zijn als basis voor een systeem van case-based reasoning (Maher et al., 1995). De use cases zijn op een informele manier opgeschreven en geven een exemplarisch voorbeeld van mogelijk gebruik van SlimmeGebruikers en de motivaties van gebruikers.

2.2.1 Use Case Lisa

Lisa is bezig met haar schoolproject "Klimaatverandering: wat kunnen wij doen". Ze start google en zoekt op klimaat en energie. Een van de eerste hits is www.slimmegebruikers.nl. Hier leest ze: "Hoe kan ik energie besparen en zo klimaatverandering tegengaan?" De link gaat naar een pagina met een korte uitleg en grafieken, een link: "Ik wil meedoen", een link: "Mijn vrienden". Lisa schrijft zich in voor meedoen en krijgt dan regelmatig energiebesparingstips. Maar ze laat het ook aan haar klasgenoten zien. Een aantal klasgenoten doen mee en schrijven zich in. Zij voeren regelmatig hun energiegebruiksdata in via twitter of SMS. Onmiddellijk krijgen zij feedback: "Goed Lisa, je gebruikt minder energie

dan je vrienden". Op het web is een (privé) pagina met een ranglijst wie hoeveel energie gebruikt. Slimmegebruikers.nl gaat automatisch tips geven en het groepje aansporen het energiegebruik te verminderen: SMS: "Lisa, jij bent nummer 2, nog 20 kWh besparen en jij bent nummer 1".

Lisa is 13 jaar oud en zit op het VWO. Zij is niet bijzonder geïnteresseerd in energiebesparing, maar zij is wel bezorgd over het klimaat. Voor haar moet het vooral leuk en interessant zijn.

2.2.2 Use Case Peter

Peter is een drukke financieel adviseur. Hij heeft geld zat, maar wil nooit teveel betalen. In de file hoort hij op de radio dat de slimme meter zijn energierekening kan verlagen. Thuis googelt hij op: "slimme meter energierekening". Hij ziet: www.slimmegebruikers.nl: De laagste rekening gegarandeerd! Hij opent de pagina en krijgt direct een overzicht van de verschillende energietarieven met bovenaan: Welke energietarieven zijn voor MIJ het beste? Terwijl hij een paar vragen beantwoord verschuift onderaan de pagina een ranglijst van energieabonementen. Hij krijgt een aanbeveling + een top 5 van energieabonementen. Dan een link: "Koop via slimmegebruikers.nl en krijg gratis energieadvies". En ook een link: "Houd mij op de hoogte als er een goedkoper tarief voor mij is". Hier vult hij zijn email en energiecontract in. Dan krijgt hij 1 tot 2 keer per jaar een overzicht van de beste tarieven en een link: "nu geld en energie besparen". Na een jaar volgt hij een keer deze link. Een SMS die hij krijgt: "500 euro verdienen met je verwarming?" laat hem een link volgen naar de thermostaat pagina calculator. Hij rekent uit dat het beter instellen van zijn tijdsthermostaat hem per jaar 642 euro scheelt (en ook 2 ton CO₂ uitstoot). Dit gaat hij doen.

Peter is 38, woont in Veenendaal en werkt in Den Haag. Dagelijks staat hij een uur in de file met zijn leaseauto. Hij heeft geen zin in de trein te stappen of zich druk te maken over het milieu. Hij laat zijn verwarming altijd op 21 graden staan. Wel is hij vaak bezig te bedenken hoe hij een betere koop kan bedingen. Daarom heeft hij ook een HR-e ketel, omdat dat toch op den duur een paar honderd euro per jaar zal opleveren.

2.2.3 Use Case Marieke

Marieke doet altijd boodschappen bij buurtsupermarkt. Van haar ouders heeft ze nog overgenomen: "Goedkoop is duurkoop", dus gaat ze niet vaak naar de discounter. Zij is

54 jaar en heeft twee kinderen op de middelbare school. Door de kredietcrisis is haar man net ontslagen bij machinefabriek MALITECO. Marieke is bezorgd, zowel om het milieu als ook om hun toekomst. Bij de jaarlijkse energieafrekening van de woningbeheerder zit ook een folder: "Bespaar op het Milieu en je Portemonnee". Marieke gaat de tips na: Isoleer de deuren met tochtstrippen; Zet de verwarming lager; Hou je energiegebruik bij met slimmegebruikers.nl. Marieke is niet echt weg van computers, maar gaat toch naar slimmegebruikers.nl. Hier ziet ze direct de link: "Vraag het boekje "Honderd manieren om energie te besparen: Milieu en Portemonnee" aan. Ze vult haar email en adres in en krijgt binnen een week het boekje. Hier zit ook coupon bij: "IEDERE DAG EEN SMS TIP". Marieke gaat dit doen omdat haar mobieltje toch altijd aanstaat zodat zij bereikbaar is voor de kinderen. Tegelijkertijd zit er een machtiging in voor slimmegebruikers.nl voor de data van de slimme meter. Met deze data maakt slimmegebruikers.nl dagelijks een advies en sms't het naar Marieke: "Goed weer verwacht: je kunt de was buiten hangen." / "Overdag huis leeg? Zet de verwarming op 15 graden." / "Gordijnen dicht in de winter levert tot 378 euro op."

Marieke, 54 jaar, is getrouwd met Lucas. Zij hebben twee kinderen. Zij zijn bezorgd om het milieu, maar gaan wel regelmatig met vliegvakantie. Marieke houdt van biologisch eten en koopt daarom vaak het biologisch merk. Maar het mag toch niet te duur zijn. Haar man is niet zo op het milieu gesteld, maar is wel gevoelig voor het argument dat energiebesparing ook geld oplevert. Daarom heeft hij een paar jaar geleden ook een zonneboiler geïnstalleerd.

2.2.4 Gebruik Use Cases

De use cases zijn in eerste instantie gebruikt om een beeld van verschillende gebruikersprofielen te verkrijgen. In een later stadium kan met behulp van deze gebruikersprofielen de gebruikersinterface voor verschillende doelgroepen worden aangepast en geoptimaliseerd. Een andere belangrijke functie is het communiceren van gebruiksspecificaties naar de technische ontwikkeling van SlimmeGebruikers. Daardoor is het mogelijk dat bij de ontwikkeling en implementatie van SlimmeGebruikers rekening wordt gehouden met de eindgebruikers.

2.3 Beschrijving Slimme Meter

Een slimme meter is een meetinstrument dat in Nederlandse huishoudens wordt geplaatst. Dit meetinstrument meet het verbruik van gas, water en elektriciteit. Op regelmatige tijdstippen (bijvoorbeeld elke 15 minuten) worden de meetgegevens doorgeseind naar de netbeheerder (Aalbers and de Nooij, 2006; Ministerie van Economische Zaken, 2008; EnergieTransitie, 2008) Voor de gebruiker is het directe nut van een slimme meter in zo'n opstelling vrij gering. Pas als er voor de gebruiker eenvoudige toegang tot de data van de slimme meter is en deze data op een effectieve manier kunnen worden gebruikt, ontstaat een voordeel voor de gebruiker. Om op een effectieve manier met de data om te gaan zijn verschillende interactie-mogelijkheden onderzocht (Darby, 2006):

- De gebruiker een overzicht geven van het momentane energiegebruik.
- De gebruiker een kwalitatieve feedback over het energiegebruik geven, bijvoorbeeld door middel van een decoratieve kubus in de woonkamer die van kleur verandert (groen = weinig energiegebruik, rood = veel energiegebruik).
- De gebruiker door middel van de prijs voor energie op de hoogte stellen van mogelijkheden om op het energiegebruik te besparen.

De data die de slimme meter aanlevert zijn in principe geïntegreerde verbruiksdata over een bepaald tijdsbereik. Deze data worden als numerieke waarden met een bepaalde precisie verstrekt. Voor de gebruiker is het belangrijk dat hij toegang heeft tot deze data. In principe kan dit op twee manieren:

1. De gebruiker communiceert direct met de slimme meter en slaat de data in een eigen systeem op.

Voordelen:

- De gebruiker heeft zelf volledige controle over de data.
- Er is geen (aparte) netwerkverbinding nodig voor het verkrijgen van de data.
- De gebruiker controleert de privacy van de data zelfstandig.

Nadelen:

- Het beheer van de data kan ingewikkeld zijn.

- De gebruiker moet de beschikking hebben over eigen apparatuur (computer of terminal).
 - De gebruiker is verantwoordelijk voor de lange termijn opslag van de data.
2. De gebruiker krijgt de data van de netbeheerder.

Voordelen:

- De gebruiker hoeft de data niet zelf op te slaan.
- De netbeheerder kan kwaliteitscontrole op de data toepassen.
- Centrale opslag bij de netbeheerder is waarschijnlijk efficiënter.

Nadelen:

- De gebruiker verliest de controle over zijn data ten dele.
- Een netwerkverbinding is vereist om de data te bekijken en te interpreteren.

SlimmeGebruikers kan met beide vormen van data-opslag samen werken. Het is wel nodig dat de data automatisch beschikbaar zijn voor SlimmeGebruikers.

Een interactieve methode die nu kan worden ontwikkeld kan direct gebruik maken van mobieltjes. Doordat deze nagenoeg altijd aan staan kan een directe terugkoppeling over energiegebruik aan de gebruiker worden gegeven. Technisch zijn er geen significante obstakels voor het gebruik van mobieltjes. De keuze gaat primair over het mogelijke interface naar de gebruiker toe en het mogelijk maken data te delen en tegelijk de privacy van de gebruiker te beschermen. Een directe en eenvoudige toepassing is het gebruik van twitter in combinatie met een server die van meerdere gebruikers het energiegebruik bijhoudt en daarmee een competitie mogelijk maakt. Naast deze aspecten is toegang tot de data over het energiegebruik van groot belang. Als gebruikers bijvoorbeeld tijdens dagelijkse activiteiten toegang tot de data hebben (zoals bijvoorbeeld bij het vullen van de wasdroger), kan specifiek op de situatie toegesneden advies verstrekt worden.

2.4 Beschrijving van het Idee SlimmeGebruikers

SlimmeGebruikers is een systeem dat het voor gebruikers zeer eenvoudig maakt om energie te besparen. Voor de gebruiker betekent dit een meer directe terugkoppeling tussen gedrag en energiegebruik.

Centraal aan SlimmeGebruikers staan kennis en technologieën die het mogelijk maken dat de data van de slimme meters per gebruiker worden geanalyseerd en worden gerelateerd aan data van andere gebruikers. Daarvoor is het nodig dat de “ruwe” data in een vorm worden getransformeerd die deze stappen mogelijk maakt. Binnen het haalbaarheidsonderzoek zijn daarvoor een aantal potentiële technologieën onderzocht en is het werkingsprincipe van deze technologieën beoordeeld. Daaruit zijn de volgende stappen naar voren gekomen:

1. Tijdreeksformatie
2. Tijdreeksaggregatie en vergelijking
3. Tagging van tijdreeksen.
4. Automatische gebruikersadviezen
5. Automatische terugkoppeling

Deze opsomming bevat de belangrijkste punten voor de systematische analyse van het domein. De bovengenoemde punten van het werkingsprincipe worden in het vervolg verder uitgewerkt.

2.4.1 Tijdreeksformatie

Tijdreeksen van het energiegebruik, verkregen uit de slimme meter, worden getransformeerd naar een symbolische representatie. Hiervoor is het nodig de individuele gebruiksgedaten te transformeren naar een symbolisch alfabet. Het is de bedoeling daarvoor de technieken voor tijdreeksformatie van Lin, Keogh, Lonardi, and Chiu (2003) te gebruiken. Deze technieken zijn nieuw en nog niet toegepast in de context van energiegebruiksdata. Wetenschappelijk onderzoek moet aantonen of de data voldoen aan de effectieve eisen voor de algoritmes. Deze tijdreeksformatie vormt de basis voor het efficiënt vergelijken van verschillende tijdreeksen en het vergelijken van het verbruik van huishoudens op verschillende tijdstippen.

2.4.2 Tijdreeksaggregatie en vergelijking

Tijdreeksaggregatie betekent dat verschillende (delen van) tijdreeksen worden samengevoegd. Dit kan bijvoorbeeld door een gewogen gemiddelde van de genormaliseerde

tijdreeksen te nemen. Zo'n geaggregeerde tijdreeks kan dan als "typisch" prototype voor het energiegebruik in een bepaalde periode gezien worden. Zulke prototypes voor energiegebruik zijn belangrijk om de energiegebruiksdata van de huishoudens te classificeren en effectief te kunnen vergelijken.

De getransformeerde tijdreeksen worden vergeleken en geaggregeerd. Hiervoor is het nodig algoritmes te gebruiken die schaalbaar zijn naar grote aantallen gebruikers (= verschillende tijdreeksen). Dit is een informatietechnisch en wetenschappelijk complex probleem. Een veelbelovende technologie leek daarvoor te vinden binnen de biologie (c.q. bio-informatica). In de bio-informatica bestaat een gelijksoortig wiskundig probleem, namelijk het classificeren, vergelijken en aan elkaar relateren van DNA-reeksen (Mount, 2004). Tijdens het onderzoek is gebleken dat een multiscale transformatie van de tijdreeksen mogelijk een betere methode is om toe te passen. Dit sluit goed aan bij de gekozen tijdreeksformatie (Shieh and Keogh, 2008).

Het vergelijken van de tijdreeksen moet zeer effectief kunnen gebeuren. Hierbij is het belangrijk dat niet alle tijdreeksen met elkaar worden vergeleken. Zou dit nodig zijn, dan zou de rekencomplexiteit van SlimmeGebruikers veel te hoog zijn: Als er al een miljoen tijdreeksen in het systeem zitten zou het toevoegen van een extra tijdreeks het vergelijken met de een miljoen al aanwezige tijdreeksen nodig maken. Als dan ook nog correlaties tussen al deze tijdreeksen zouden worden berekend, zou dit betekenen dat SlimmeGebruikers vanwege de rekencomplexiteit snel zou vastlopen. Een relatief eenvoudige methode om dit vastlopen te voorkomen is het clusteren van de tijdreeksen. Nieuwe tijdreeksen worden dan eerst aan een bepaald cluster toebedeeld en daarna slechts binnen het cluster vergeleken.

2.4.3 Tagging van Tijdreeksen

Tagging van tijdreeksen betekent dat extra informatie wordt toegevoegd aan een tijdreeks. Dit kan een opmerking zijn zoals: "Wasmachine aangezet" of "Verwarming in nachtstand gezet". Een belangrijk aspect is dat dit tagging (semi-)automatisch kan gebeuren. Bijvoorbeeld kan tagging-informatie door middel van data-mining gekoppeld worden aan de getransformeerde tijdreeksen. Voor het tagging (ofwel annoteren) van de tijdreeksen is het daarnaast nodig een makkelijk te gebruiken user-interface aan te bieden. Een belangrijk aspect daarbij is dat de algoritmes de tags daadwerkelijk moeten kunnen gebruiken in het analyseren van de tijdreeksen. De tagging kan werken door het ontdekken van ongebruikelijke gebeurtenissen in een tijdreeks (Keogh et al., 2005; Mueen et al., 2009)

2.4.4 Automatische Gebruiksadviezen

Gebruikersadviezen worden automatisch gegenereerd. Voor het automatisch aanmaken van adviezen is het nodig een systeem te gebruiken dat zich aanpast aan de tijdreeks van de gebruiker, en dat daarnaast gebruik maakt van vergelijkbare tijdreeksen en externe informatie. In eerste instantie lijkt daarvoor een systeem vergelijkbaar met de “teleo-reactive agents” van Nilsson (Nilsson, 1994; Gordon and Logan, 2003) geschikt. Maar het is nog niet duidelijk wat de haalbaarheid van zo’n systeem is. Immers lijkt het nodig dat deze agents van elkaar leren. In de wetenschappelijke literatuur bestaan daarover een groot aantal theoretische studies, maar voor zover bekend ontbreekt de kennis omtrent de daadwerkelijke haalbaarheid van toepassing daarvan. Een formele beschrijving van deze adviezen kan gebaseerd worden op een logica (bijvoorbeeld default logics) (Mueller, 2006). Om de adviezen voor de implementatie begrijpelijk te formuleren is het nodig deze samen met een systeem van condities te gebruiken. Primair zijn dit precondities en postcondities (Jackson, 1998).

Een bijkomend onderzoek betreft het programmeren van de agents voor de gebruikersadviezen. Deze agents kunnen bij het begin van SlimmeGebruikers aan de hand van bestaande energiegebruiksadviezen geprogrammeerd worden. In een later stadium is het dan mogelijk door een systeem van data-mining en reinforcement learning nieuwe agents automatisch aan te maken en deze te testen.

2.4.5 Automatische Terugkoppeling

Met automatische terugkoppeling wordt een systeem van (kwaliteits-)controle bedoeld. Als een advies aan een huishouden wordt gegeven is er een mechanisme van terugkoppeling nodig die aangeeft of het advies überhaupt is opgevolgd (en waarom wel of niet), en ook kijkt of dit advies het gewenste effect heeft gehad. Deze automatische terugkoppeling van adviezen naar tagging-informatie en evaluatie van de energiebesparing is nodig zodat SlimmeGebruikers efficiënt en effectief werkt. Dit punt heeft ook te maken met het automatisch leren van het systeem. Waarschijnlijk is het hiervoor niet nodig dat het systeem actief exploratief leert, want door de grote hoeveelheid en verscheidenheid van de tijdreeksen zijn er voldoende adviesstrategieën beschikbaar om met elkaar te vergelijken. Een mogelijkheid is een vorm van reinforcement learning te gebruiken. De kennislacune daarbij is de efficiënte representatie van de “state space” en de indexering daarvan (Witten and Frank, 2005).

2.4.6 Additionele Onderzoekspunten

Naast de bovengenoemde kernonderzoekspunten spelen een aantal deelonderzoeken een belangrijke rol:

- Het is nodig dat het systeem in near real time werkt. Dat betekent dat het genereren van advies voor een gebruiker snel moet kunnen gebeuren (vermoedelijk in de orde van enkele seconden). Daaruit volgt dat al bij het inlezen van de gebruiksdata een preprocessing stap nodig is. Hoe kan deze stap worden uitgevoerd, zodanig dat referenties terug naar de originele gebruiksdata efficiënt mogelijk zijn?
- Hoe kan het systeem effectief, afhankelijk van plaats en tijd het advies naar de gebruiker communiceren? Soms is communicatie via mobieltje optimaal, maar op andere tijdstappen kan het efficiënter zijn een boodschap op de televisie van de gebruiker te projecteren of zelfs per post een boekje op te sturen.
- Hoe kan SlimmeGebruikers de privacy van de gebruikers garanderen? In principe zijn de gebruiksdata, gekoppeld aan een gebruiker en/of een adres, zeer privacy-gevoelige data. Het is dan ook nodig vanaf het begin van het ontwerp van het systeem waarborgen in te bouwen die de privacy versterken of warborgen. Hierbij gaat het niet om de toegangscontrole tot het systeem SlimmeGebruikers, want de methodes hiervoor zijn bekend. Wel gaat het om de aspecten van de algoritmes die de verschillende tijdreeksen vergelijken en koppelen aan advies voor gebruikers. Waarschijnlijk wordt de participatie vergroot als bijvoorbeeld meerdere huishoudens een wedstrijdspel om het laagste energiegebruik spelen. Hoeveel data kunnen dan worden gedeeld (met toestemming van de gebruiker), en hoeveel data zijn minimaal nodig om zo'n applicatie mogelijk te maken? Een cruciaal aspect bij het project SlimmeGebruikers is privacy. Hiervoor dient nog een uitgebreid verder onderzoek plaats te vinden. Een technische mogelijkheid privacy te versterken is gebruik te maken van geaggregeerde data.
- Hoe kun optimaal vorm gegeven worden aan de gebruikersinterfaces? SlimmeGebruikers zal door zeer verschillende doelgroepen worden gebruikt. Senioren vereisen een totaal ander interface dan pubers. Dit onderzoek staat nog in de kinderschoenen en helaas zijn er geen kant en klare oplossingen voor in de literatuur of op internet te vinden.
- Welke componenten van een competitie/spel spelen optimaal in op de motivatie van de gebruiker om samen met een groep zoveel mogelijk energie te besparen?

2.5 Resultaten van eerder Onderzoek

Tijdens deze haalbaarheidsstudie is geen direct vergelijkbaar onderzoek gevonden. De gekozen oplossingsrichting is nieuw gebleken, en het is noodzakelijk nieuwe kennis en technologieën te ontwikkelen alvorens SlimmeGebruikers daadwerkelijk kan worden toegepast.

Wel is er eerder onderzoek bekend omtrent de mogelijke energiebesparing door gebruikers (Darby, 2006; Volkskrant, 2008). Hieruit blijkt dat door vrijwillige verandering van het gedrag een significante besparing op het energiegebruik kan worden bereikt.

Voor dit haalbaarheidsonderzoek is uitgebreid vooronderzoek verricht op zowel het gebied van bestaande technologieën, concurrerende concepten als ook op het gebied van wetenschappelijke literatuur. Door de nadruk op de kennis over algoritmes is binnen de EU octrooiliteratuur van minder belang doordat (wiskundige) algoritmes niet octooierbaar zijn.

Minder kennisintensieve projecten en concepten, die zich richten op de introductie van de slimme meter, kunnen sneller tot marktintroductie komen. Te denken valt aan advisering van gebruikers, door middel van het vergelijken van het energiegebruik met een "standaard" gebruik (afhankelijk van temperatuur, jaargetijde, ...). Voorbeelden van zo'n project zijn NUONenergiebesparen (2010) en Google Inc. (2010). Deze bevatten veel minder technologische risico's, omdat hier niet de interactie tussen de verschillende gebruikers centraal staat.

Andere gerelateerde concepten zijn de ontwikkelingen op het gebied van "ambient intelligence" en "agent-based control" van elektrische apparatuur. Dit houdt in dat elektrische apparaten via een "intelligent elektriciteitsnetwerk" informatie krijgen over beschikbaarheid en prijs van elektriciteit. Door middel van "embedded intelligence" kan deze apparatuur vervolgens de elektriciteitsvraag automatisch aanpassen (Cook et al., 2009). SlimmeGebruikers kan deze concepten aanvullen en het is de verwachting dat er een kruisbestuiving van technologieën tussen de vakgebieden plaatsvindt. Bij verder onderzoek naar het concept SlimmeGebruikers is het nodig de interactie tussen deze benaderingen te verkennen.

2.6 Uitvoering van het project

Binnen dit haalbaarheidsproject is primair gekeken naar aspecten voorafgaand aan fundamenteel onderzoek die betrekking hebben op het mogelijk kunnen toepassen van groot-schalige gebruikersinteractie met de data van de slimme meters om zo het energiegebruik te verlagen.

De werkzaamheden kunnen als volgt worden samengevat:

- Internetonderzoek, waarbij gebruik wordt gemaakt van o.a. wetenschappelijke zoekmachines.
- Bibliografisch onderzoek in wetenschappelijke databases en onderzoek in wetenschappelijke bibliotheken.
- Bestuderen van gevonden literatuur en andere bronnen.
- Het opstellen van een systematische analyse van het project SlimmeGebruikers.
- Het maken van een inschatting van de technische mogelijkheden van fundamenteel (vervolg) onderzoek met als kernpunten:
 - schaalbare algoritmes
 - automatische advisering
 - zelflerende systemen
 - gebruikersmotivatie en maatschappelijke aspecten
- Vergelijken van de uitkomsten van het onderzoek met concurrerende technologieën en alternatieven.
- Rapportage van de gevonden resultaten.

Hoofdstuk 3

Systeemonderzoek SlimmeGebruikers

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de verschillende deelsystemen van SlimmeGebruikers. Hierbij is primair aandacht besteed aan de aspecten die verder onderzoek nodig hebben. Deze deelsystemen vormen slechts het technisch-wetenschappelijke deel van SlimmeGebruikers. Daarnaast zijn er ook sociologische en maatschappelijke aspecten, die binnen dit haalbaarheidsonderzoek niet direct aan de orde komen.

3.1 Data Modelering

SlimmeGebruikers is data gedreven. Dat betekent dat voor het succes van SlimmeGebruikers grote hoeveelheden data nodig zijn. In principe worden de meeste data geleverd door de slimme meter in combinatie met de (vaste) gegevens over een specifiek huishouden. Elk afzonderlijk kunnen huishoudens met deze data op een relatief eenvoudige manier energie besparen: door het huidige verbruik te vergelijken met het verbruik in het verleden. Eerder onderzoek heeft aangetoond dat daarvoor een grote en blijvende motivatie bij gebruikers aanwezig moet zijn. Helaas ontbreekt die motivatie vaak. SlimmeGebruikers wil juist door het combineren van data van verschillende gebruikers een sociale interactie tussen gebruikers mogelijk maken en daardoor de motivatie om deel te nemen verhogen. Data-technisch betekent dit dat de actuele gebruiksdata van verschillende huishoudens worden vergeleken en geclassificeerd. Gelijksortige data kunnen dan worden geaggregeerd en geanonimiseerd gebruikt worden. Maar het is dan ook mogelijk vrijwillig data met andere huishoudens te delen en zo sociale games mogelijk te maken, bijvoorbeeld "Wie bespaart het meest?".

Technisch bestaan de data uit de slimme meter uit gebruiksgetallen met een bepaalde precisie. De data over de huishoudens zelf zijn relatief divers, maar bevatten tenminste enige persoonsgegevens, locatie, huishoudingssamenstelling en indirect informatie over elektrische apparatuur. Voor opslag van deze data is een standaard database systeem waarschijnlijk het meest geschikt. In verband met het gebruik van de data door grote aantallen huishoudens zal dit database systeem naar verwachting met een master-slave systeem met een aantal partiële, read-only replicas werken.

3.2 Schaalbare algoritmes

Binnen de context van dit onderzoek worden onder schaalbare algoritmes algoritmes verstaan waarbij de reken-complexiteit niet bovenmatig stijgt met het aantal verschillende tijdreeksen en/of de lengte van de tijdreeksen (Li and Vitányi, 2008; Witten et al., 1999). In de praktijk betekent dit dat het toevoegen van een additioneel huishouden aan SlimmeGebruikers extra rekenwerk vergt, maar dat dit extra rekenwerk maar beperkt afhankelijk is van het aantal huishoudens dat al deelneemt aan SlimmeGebruikers. De algoritmes in dit haalbaarheidsonderzoek richten zich op het beperken van de extra benodigde rekenkracht. Daarnaast is het relatief eenvoudig de data van de huishoudens te partitioneren. Daardoor worden de groepen huishoudens die met elkaar worden vergeleken kleiner en neemt de rekencomplexiteit enorm af. Een evenwicht tussen partitionering van de data en het vermogen van de algoritmes om bruikbare adviezen te geven moet in een praktijkonderzoek worden uitgezocht. Deze partitionering van de data kan bijvoorbeeld op basis van geografische restricties. Dit heeft als voordeel dat bij dicht bij elkaar liggende huishoudens vergelijkbare weeromstandigheden zijn. Maar mogelijkserwijs is het interessanter de data zodanig te splitsen dat gelijksoortige huishoudens in dezelfde groep terechtkomen. Een derde aspect betreft de sociale interactie tussen gebruikers. Huishoudens die aangeven met elkaar data te willen vergelijken moeten aan elkaar worden gekoppeld. Naar verwachting is dit mogelijk door zo'n huishouden aan een additioneel cluster toe te voegen. Dit betekent dat een huishouden bij meerdere clusters kan horen.

Een gerelateerd aspect dat bij de schaalbaarheid van SlimmeGebruikers speelt is hoe de automatische adviezen worden gemaakt. Als dit op een centrale computerfaciliteit gebeurt is de schaalbaarheid van SlimmeGebruikers volledig afhankelijk van de uitbouw van deze faciliteit. Binnen dit onderzoek wordt juist ook gekeken naar mogelijkheden waarbij het aanmaken van de adviezen door 'client-side computation' gebeurt. Vereist daarvoor is dat de "intelligentie" van het systeem SlimmeGebruikers op een eenvoudige manier kan

worden gedistribueerd naar de client side. Daarvoor is het nodig een precompilatie van de automatische adviezen uit te voeren, zodat deze op een client side direct kunnen worden gebruikt. Een tweede vereiste daarvoor is de distributie van de benodigde data. Het adviessysteem kan, als het interferentie programma daarom vraagt, additionele data over het netwerk opvragen. Te denken valt aan data over weers(voorspellingen), data over het energiegebruik van vrienden (sociale data interactie) en geaggregeerde data.

De algoritmes voor SAX en iSAX zijn inherent schaalbaar door binnen de PAA representatie te kiezen voor een groter middelings-interval. Verder onderzoek moet uitwijzen hoe de betrouwbaarheid van de adviezen verandert bij een verandering van het middelings-interval.

3.3 Tijdreeksanalyse

Tijdreeksanalyse is een overkoepelend begrip voor de (wiskundige) analyse van tijdreeksen. In deze sectie worden de voor SlimmeGebruikers belangrijke aspecten verder uitgediept en hun haalbaarheid geanalyseerd.

De data uit de slimme meter zijn in feite een tijdreeks van de gebruiksdata. Deze data worden gegeven als een combinatie van een verbruiksgetal met een tijds waarde. De precisie van deze data is nog niet exact bekend, maar in dit onderzoek wordt ervan uitgegaan dat de precisie van deze data vergelijkbaar is met de precisie die direct kan worden verkregen van de slimme meter. Voor zulke tijdreeksdata is een groot aantal verschillende algoritmes beschikbaar (Lin et al., 2007):

- Het indexeren van de tijdreeks. Dit is nodig zodat zoekopdrachten efficiënt kunnen verlopen. In het bijzonder is dit nodig voor het zoeken naar op elkaar lijkende stukken en stukken die bijzonder afwijken van het gewone verloop van de tijdreeks.
- Het groeperen van gelijksoortige delen van de tijdreeks (clustering).
- Classificatie van verschillende delen van de tijdreeks zodat deze aan bepaalde klassen worden toegewezen.
- Het maken van een samenvatting van de tijdreeks zodat de essentiële kenmerken blijven behouden.
- Het detecteren van ongewone gebeurtenissen in de tijdreeks, zodat nieuwe situaties automatisch worden opgemerkt.

Volgend op deze fundamentele algoritmes kan een verdere modellering van de tijdreeks plaatsvinden.

3.3.1 Tijdreeks modelering

Klassiek worden tijdreeksen van data zoals elektriciteitsgegevens, maar ook financiële gegevens gemodelleerd met behulp van statistische technieken. Deze klassieke methodes worden beschreven in Chatfield (2004). Deze methodes zijn over algemeen redelijk betrouwbaar. Met behulp van ARIMA modellen of State-Space modellen en Kalman filters is het zeer goed mogelijk goede voorspellingen te doen voor individuele tijdreeksen. Als de tijdreeksen significante cyclische of periodieke elementen hebben is een analyse in het frequentiedomain standaard. Het probleem bij deze technieken is dat het niet mogelijk is deze uit te breiden naar het simultaan in overweging nemen van zeer grote aantallen tijdreeksen. Door de toegenomen rekencomplexiteit zijn deze algoritmes niet schaalbaar.

In Lin et al. (2003) en Lin et al. (2007) wordt een nieuwe methode voor tijdreeksformatie voorgesteld: SAX (Symbolic Aggregate approXimation). Met de SAX transformatie is het mogelijk de tijdreeksen in een symbolisch alfabet te vertalen. Daardoor is het dan ook mogelijk algoritmes van discrete tijdreeksanalyse en voorspelling te gebruiken. Voor het project SlimmeGebruikers kan bijvoorbeeld de methode van Laird and Saul (1994), genoemd TDAG (Transition Directed Acyclic Graph), gebruikt worden. Deze “discrete sequence prediction” methode werkt op basis van een representatie van de tijdreeks in een niet-cyclische graph structuur. Nieuw inkomende gegevens van de tijdreeks worden op de graph geprojecteerd en daardoor kan de kans worden berekend dat een bepaalde gebeurtenis optreedt. Doordat deze methode zeer efficiënt werkt in termen van tijd en opslag complexiteit is het eenvoudig haar toe te passen op grote aantallen tijdreeksen. Ook is het zonder meer mogelijk verschillende tijdreeksen op dezelfde graph te projecteren en daardoor ensemble projecties te verkrijgen.

Een mogelijk verder onderzoek is het vergelijken van het TDAG algoritme met SEQUITUR (Nevill-Manning and Witten, 1997a,b). SEQUITUR is een zeer efficiënte methode om (tijd)reeksen samen te vatten in een hiërarchische structuur. Daardoor is het mogelijk tijdreeksen abstract te vergelijken en conclusies te trekken of verschillende tijdreeksen dezelfde structuren hebben. SEQUITUR werkt met een lineaire complexiteit in de tijd, maar de groei in het benodigde rekeengeheugen is niet lineair in de tijd. Het is nog niet duidelijk of dat betekent dat SEQUITUR niet toepasbaar is op de data van de slimme meter.

Daarnaast is het mogelijk een tijdreeks modellering en voorspelling op basis van PPM (Prediction by Partial Match) te gebruiken (Gopalratnam and Cook, 2004; Bell et al., 1990). Deze methode werkt op basis van de informatie-entropie die aanwezig is in de tijdreeks en is analoog aan de in datacompressie gebruikte technologieën. In feite worden voor de modellering zogenoemde Markov modellen gebruikt (Rabiner, 1989). Deze Markov modellen hebben als nadeel dat zij niet direct externe informatie in de modellering kunnen gebruiken. Dat betekent bijvoorbeeld dat het moeilijk is gebruik te maken van tags in de tijdreeks.

Gemeenschappelijk aan deze methodes is de noodzaak de data “te vertalen” naar het specifieke algoritme. Binnen dit project is verder onderzoek gedaan of dit effectief met parsing technieken mogelijk is. Mogelijke technieken zijn bijvoorbeeld “syntax directed translation” in combinatie met een “top-down-recognizer” (Gries, 1971; Wirth, 1986; Lampe, 1998). Deze technologieën zijn vooral bekend uit de informatica literatuur in samenhang met het maken van compilers. In feite kan het vertalen van de data naar de vorm die benodigd is voor een specifiek algoritme of model worden gezien als een “pre-compilatie” van de data.

Als alternatief voor een top-down recognizer is het ook mogelijk met templates te werken (Bentley et al., 1993). Hiervan is het nadeel dat deze veel minder flexibel zijn. Daarom is dit alternatief niet verder onderzocht.

Voor dit vertalen van de data naar een specifiek algoritme kan bijvoorbeeld de SAX transformatie worden gebruikt. De energiegebruiksdata moeten worden ingelezen, de vorm van de data moet worden geverifieerd (bijvoorbeeld kunnen er foutieve waarden in de tijdreeks staan, zoals een tijd van 25:12) en de data moeten worden vertaald in een data-structuur voor het algoritme (bijvoorbeeld als array data).

Binnen dit haalbaarheidsonderzoek is er na een literatuurstudie voor gekozen een symbolische tijdreeksformatie voor de modellering toe te passen: SAX.

3.3.2 Beschrijving van SAX

SAX (Symbolic Aggregate approXimation) is een methode om data van tijdreeksen op een eenvoudige en slimme manier te transformeren (Lin et al., 2003, 2007). Deze methode is uitgewerkt in het artikel “A Symbolic Representation of Time Series, with Implications for Streaming Algorithms” van Lin, Keogh, Lonardi, and Chiu (2003). Deze transformatie bewerkstelligt een significante reductie in de dimensionaliteit van het data set, met als voordeel dat eenvoudig relatief grote data sets uitgewerkt kunnen worden. Direct daaraan

gekoppeld is het voordeel dat daardoor grote aantallen van tijdreeksen kunnen worden vergeleken.

SAX werkt door eerst de tijdreeks te transformeren naar een Piecewise Aggregate Approximation (PAA). In formulevorm is de PAA representatie van een tijdreeks gegeven door:

$$\bar{c}_i = \frac{w}{n} \sum_{j=\frac{n}{w}(i-1)+1}^{\frac{n}{w}i} c_j \quad (3.1)$$

Deze formule is erop gebaseerd dat de tijdreeks wordt onderverdeeld in een aantal gelijk grote stukjes. Voor ieder stukje wordt het gemiddelde bepaald, en dit wordt de PAA benadering van de tijdreeks. Hoe langer (in de tijd) zo'n stukje is, hoe groter de reductie in dimensionaliteit van de tijdreeks. Een relatief kleine reductie in dimensionaliteit laat een zeer nauwkeurige beschrijving van de tijdreeks toe, maar heeft als nadeel dat relatief veel rekengeheugen nodig is. Een grotere reductie daarentegen zorgt voor een relatief onnauwkeurige reproductie van de tijdreeks, maar vergt minder rekengeheugen. Verder onderzoek moet uitwijzen wat de optimale reductie in dimensionaliteit voor energiegebruiksdata is.

Een belangrijke stap is dat voor de PAA transformatie de tijdreeks wordt genormaliseerd zodat het gemiddelde 0 is en de standaard deviatie 1 is:

$$x_n = \frac{x_t - \mu}{\sigma} \quad (3.2)$$

In een online toepassing zoals bij SlimmeGebruikers kan natuurlijk niet de hele tijdreeks worden genormaliseerd, en wordt deze normalisatie voor ieder stukje apart doorgevoerd (Lin et al., 2007). In de gewone SAX benadering wordt eerst de gehele tijdreeks genormaliseerd, en daarna ieder stuk apart (zie Lin et al., 2007, p. 123). Bij het normaliseren van de tijdreeks is bijzondere aandacht nodig als bijvoorbeeld s'navonds het energiegebruik zeer laag is (dichtbij 0) en dan een kort piekverbruik optreedt. Dit vertaalt zich in een relatief hoge waarde voor het piekverbruik door de normalisatie (Lin et al., 2003). Een optimaal schema om met deze gebeurtenissen in een tijdreeks van energiegebruiksdata om te gaan moet door verder onderzoek worden gevonden. Lin et al. (2007) laten een relatief eenvoudig algoritme zien om daarvoor te corrigeren, maar naar verwachting is dit niet voldoende voor SlimmeGebruikers.

De volgende stap is de discretisatie van de tijdreeks. Hierbij worden symbolische waarden toegekend aan de numerieke waarden van de tijdreeks, gebaseerd op een histogram

van de verdeling van de symbolen. Bij SAX worden meestal alfabetische symbolen gekozen vanwege de eenvoud van het coderen en de herkenbaarheid door mensen. iSAX (Shieh and Keogh, 2008), een nieuwe, verdere ontwikkeling van SAX, gebruikt daarentegen een binaire getallen codering. Dit heeft als voordeel dat een multi-schaal codering het relatief efficiënt maakt verschillende tijdreeksen te vergelijken. De kardinaliteit van de discrete tijdreeks wordt gedefinieerd door het aantal verschillende discrete symbolen. Bij een binaire codering zijn de kardinaliteiten de geheelgetallige machten van twee: 2, 4, 8, 16, 32, De iSAX codering maakt het relatief eenvoudig tijdreeksen van verschillende kardinaliteit onderling te vergelijken.

Een punt dat bij SlimmeGebruikers nog verdere aandacht nodig heeft is de vraag of reeksen van energiegebruiksdata als normaal verdeeld kunnen worden beschouwd, of dat er een andere distributie voor de modellering van deze data gebruikt dient te worden. Bij voorbaat staat al vast dat het gebruik niet negatief kan zijn. Wel is het mogelijk dat de slimme meter een negatieve waarde waarneemt, omdat stroom aan het net wordt geleverd. Dit is bijvoorbeeld het geval als een huishouden een photovoltaische installatie heeft. De verdelingen van de energiegebruiksdata kunnen bij de beperking naar positieve waarden mogelijkwijs met een log-normale verdeling beter worden weergegeven. Mogelijk kunnen de energiegebruiksdata als een discrete som beschouwd worden en kan dan bijvoorbeeld een Poisson verdeling gebruikt worden om de data te modelleren. Deze onzekerheden over de vorm van de verdeling van de data zijn geen fundamentele beperking van SAX. Als blijkt dat de aannames niet 100% kloppen betekent dit dat SAX iets minder efficiënt zal werken, maar nog steeds met de garantie dat het algoritme de juiste antwoorden zal geven.

Een verdere ontwikkeling van SAX is HOT SAX (Keogh et al., 2005). Met deze aanpassing van SAX is het mogelijk ongebruikelijke of vreemde gebeurtenissen in tijdreeksen automatisch op te sporen. Zulke vreemde gebeurtenissen kunnen bijvoorbeeld een plotse verhoging van het energiegebruik door een defect elektrisch apparaat zijn. Als bij een door HOT SAX gedetecteerde gebeurtenis een annotatie aan de gebruiker wordt gevraagd kan met behulp van statistische informatie van andere tijdreeksen een voorspelling van deze uitzonderlijke gebeurtenissen plaatsvinden. Toepassingen hiervan zijn bijvoorbeeld het vroegtijdig onderkennen van problemen met elektrische apparaten of lokale overbelasting van het stroomnet.

iSAX is een uitgebreide vorm van SAX (Shieh and Keogh, 2008). Hierbij staat de i voor indexable (iSAX: indexable Symbolic Aggregate approXimation). iSAX is gebaseerd op SAX. Toegevoegd is een extensible hashing functie, zodat SAX multi-resolutie eigen-

schappen verkrijgt. Deze multi-resolutie eigenschappen werken op basis van een binaire codering van de door de PAA approximatie verkregen data binnen SAX. Door het combineren van de binaire codering en een inverse transformatie gebaseerd op de onderliggende verdeling van de energiegebruiksdata is het direct mogelijk tijdreeksen van verschillende kardinaliteit te vergelijken. Daarmee is het mogelijk met behulp van iSAX een schaalbaar algoritme voor de tijdreeks modellering toe te passen. In het vervolg worden gerelateerde aspecten van schaalbare algoritmes onderzocht.

Ook bij het voorspellen van tijdreeksen voor het optimaliseren van logistieke processen wordt gebruik gemaakt van SAX (Meulstee, 2008). In principe heeft deze toepassing een vergelijkbaar doel als SlimmeGebruikers: Hoe kun je logistieke managers optimaal advies geven voor het inkopen van voorraden van een product. Maar er zijn ook belangrijke verschillen: de adviezen aan de logistieke managers zijn slechts kwantitatief, terwijl de adviezen voor SlimmeGebruikers adviezen in natuurlijke taal moet geven.

3.4 Automatische advisering

In het project SlimmeGebruikers ligt de nadruk op automatische advisering aan gebruikers. Dit is simpelweg te verklaren uit het feit dat het persoonlijk adviseren van huishoudens (op een dagelijkse basis, mogelijk zelfs meerdere keren per dag) te duur is, zowel financieel als ook in termen van menskracht. Automatisch advies kan op de individuele gebruiker direct worden afgestemd, en door middel van feedback kan het advies aangepast worden aan veranderende omstandigheden van de gebruiker.

Adviezen voor energiebesparing zijn semantisch vrij eenvoudig en kunnen van tevoren worden aangemaakt. Aan deze adviezen kan een aantal condities worden gekoppeld. Bij het vervullen van deze condities is het advies dan in principe van toepassing. Het automatisch adviessysteem moet dan een selectie van de mogelijke adviezen maken en het "beste" advies aan de gebruiker mededelen.

Met automatische advisering wordt een systeem bedoeld dat zelfstandig (d.w.z. zonder direct ingrijpen van de mens) adviezen opstelt om het energiegebruik te verlagen. Deze adviezen moeten aan een aantal criteria voldoen:

- De adviezen moeten zijn aangepast aan de specifieke gebruiker. Het heeft weinig zin een huishouden zonder wasdroger aan te bevelen de was een keer naar buiten te hangen in plaats van in de wasdroger te drogen. Deze aanpassing kan gebeuren

doordat gebruikers feedback geven, of door informatie over de gebruikers tijdens het aanmelden te verkrijgen.

- De adviezen moeten op het juiste tijdstip komen. Een werkende om 10 uur s'ochtends te vertellen dat de zon schijnt en dat de luxaflex open moeten om de warmte op te vangen heeft geen zin. Daarvoor is het nodig dat het systeem met tijd en tijdsintervallen kan redeneren.
- De adviezen moeten voor de gebruiker te begrijpen zijn. Dat betekent dat een inhoudelijk gelijkkluidend advies verschillende formuleringen kan hebben.
- De adviezen moeten uitvoerbaar zijn.
- De adviezen moeten bijna altijd juist zijn, maar hoeven niet altijd te kloppen. Een geringe mate van fouten wordt door gebruikers geaccepteerd en kan zelfs gebruikers daartoe zetten beter adviezen dan het systeem SlimmeGebruikers te bedenken.

Bij het maken van advies is het belangrijk te beoordelen hoeveel informatie beschikbaar is en hoeveel informatie het systeem daadwerkelijk kan gebruiken. Als bijvoorbeeld geen informatie over het al dan niet hebben van een wasdroger aanwezig is, kan het systeem van een default uitgaan. Om met deze defaults te kunnen redeneren is een systeem op basis van default logica mogelijk (Antoniou and Ghose, 1999). Abductie binnen de logica is te complex voor het systeem SlimmeGebruikers en zal derhalve niet worden gebruikt (Jackson, 1998; Mueller, 2006). Een direct gevolg van het werken met defaults is dat adviezen soms onjuist en/of niet van toepassing zijn op een bepaald huishouden. Om deze fouten te kunnen verbeteren is het noodzakelijk meer informatie of feedback over de uitgebrachte adviezen aan de gebruiker te vragen. Als wordt gekozen voor een interface via mobieltje is dat vrij eenvoudig mogelijk, alhoewel hier beperkingen op de manier van de respons van de gebruiker zijn.

Het redeneren van het systeem met tijd en tijdsintervallen is mogelijk door gebruik te maken van een "temporal logic" (Mueller, 2006).

Vanuit het systeem SlimmeGebruikers is het mogelijk de adviezen naar uitvoerbaarheid voor de gebruikers te classificeren en afhankelijk daarvan aan de gebruikers aan te bieden. Een mogelijke classificatie is:

- Eenvoudig advies, bijvoorbeeld "Hang de was buiten bij mooi weer."
- Redelijk uitvoerbaar advies: "Koop een energiebesparende koelkast."

- Ingewikkeld advies: “Isoleer je huis.”

Daarnaast is het van belang de adviezen ook met andere criteria te classificeren: Kosten van uitvoering, tijd nodig voor implementatie en vereist doorzettingsvermogen van de gebruiker. De classificatie moet dan weer met data-mining gekoppeld worden aan de effecten van de verschillende adviezen, zoals kosteneffectiviteit, tijdschaal op welke de adviezen het energiegebruik reduceren en hoe effectief de adviezen zijn om de motivatie van een gebruiker in stand te houden dan wel te vergroten.

3.4.1 Adviesstrategien

Voor adviessystemen die gebruikers automatisch moeten adviseren zijn verschillende strategieën bekend:

- **Expertsystemen:** Deze systemen werken meestal op basis van regels die van tevoren zijn geprogrammeerd. Een voorbeeld voor zo'n soort systeem is XCON (Jackson, 1998).
- **Agent-based systemen.** Deze systemen bestaan uit verschillende onafhankelijke agents, die gezamenlijk het gedrag en de adviezen van het systeem bepalen (Russel and Norvig, 2003). Binnen het project SlimmeGebruikers wordt in eerste instantie onderzoek gedaan naar Teleo-Reactive Agents, een systematiek ontwikkeld in Nilsson (1994).
- **Statistische Systemen:** Meestal werken statistische systemen op basis van kansverdelingen die van tevoren of gedurende de werking van het systeem zijn verzameld (Russel and Norvig, 2003). Meestal bevatten de andere adviessystemen elementen van statistische systemen om met onzekerheden te kunnen redeneren.
- **Neurale Netwerken:** Neurale netwerken zijn een data gedreven techniek voor het modelleren en voorspellen van uitkomsten afhankelijk van de data (Russel and Norvig, 2003). Vereist voor het gebruik is een uitgebreide calibratie van het neurale netwerk. Vanwege de vereiste calibratie zullen neural netwerken naar verwachting niet bij SlimmeGebruikers worden toegepast.
- **Semantische Netwerken:** Binnen SlimmeGebruikers zijn semantische netwerken van belang voor het formuleren van verschillende adviesstrategien. Deze netwerken werken op basis van een gerichte graph (Nilsson, 1998). De knooppunten geven de gemodelleerde concepten weer, en de verbindingen modelleren invloeden.

- Systemen gebaseerd op (Default) Logica (Antoniou and Ghose, 1999): Dit type systemen zijn nog in ontwikkeling. Daarbij spelen in het bijzonder aspecten van het logisch redeneren in de tijd een rol. Binnen SlimmeGebruikers is onderzoek gedaan naar regelgebaseerde defaults en in mindere mate aan op logica gebaseerde defaults omdat deze te complex zijn voor SlimmeGebruikers.
- Blackboard Systemen: Deze systemen zijn een soort metasysteem dat de controle over verschillende subsystemen heeft. Als subsystemen worden meestal expertsystemen gebruikt, maar andere combinaties zijn vrij eenvoudig mogelijk.
- Constraint systemen bestaan in een groot aantal verschillende vormen. Voor SlimmeGebruikers is een combinatie met een expertstelsel belangrijk. Het systeem Babylon (Christaller et al., 1989) met het constraint systeem Consat kan als een voorbeeld daarvoor gebruikt worden. Verder onderzoek is nodig om zo'n constraint systeem te koppelen aan de Teleo-Reactive Agents van Nilsson (1994, 1998).
- Bayesiaanse Netwerken: Deze systemen zijn een specialisatie van statistische systemen. Gedurende de laatste jaren worden Bayesiaanse netwerken steeds vaker toegepast, omdat efficiënte rekenmethodes zijn ontwikkeld om deze netwerken te calibreren en de vereiste kansverdelingen te benaderen (Russel and Norvig, 2003).
- Alternatief zijn er ook systemen ontstaan op basis van Fuzzy Logica. Deze systemen zijn gedurende de laatste jaren in belangrijke mate gebruikt bij de ontwikkeling van "intelligentie" van computergames (Buckland, 2005). Voor SlimmeGebruikers betekent dit dat de resolutie met een kwantitatieve resolutie op basis van fuzzy regels plaatsvindt in plaats van met een conflict resolutie algoritme van een expertstelsel.

In veel "real-world" toepassingen worden een aantal van de bovengenoemde strategieën gecombineerd. Voor SlimmeGebruikers is het bij de implementatie belangrijk de strategie van de teleo-reactive agents van Nilsson te combineren met defaults en een statistisch systeem om onzekerheden te kunnen modelleren.

3.5 Kennisrepresentatie

De te geven adviezen moeten op een bepaalde manier worden ontsloten voor het adviesprogramma, zodat redeneren met de adviezen relatief eenvoudig mogelijk is. Daarvoor is

een bepaalde kennisrepresentatie van deze adviezen nodig. In een ontologie kan de kennis op een formele manier worden vastgelegd (Russel and Norvig, 2003; Andersson et al., 2006). Omdat de adviezen ook onzekere informatie bevatten is directe vertaling naar een puur op logica gebaseerde representatie naar verwachting niet ideaal. In principe kan de representatie van een teleo-reactive agent onzekerheden aan door deze expliciet te coderen. SlimmeGebruikers zal niet beschikken over een volledig gespecificeerde kansverdeling, en kan dus geen strikt Bayesiaanse benadering gebruiken bij het bepalen van het beste advies. Daarom is het naar verwachting in praktische termen beter een systeem gebaseerd op “certainty factors” zoals bij het expertsysteem MYCIN te gebruiken (Jackson, 1998; Luger and Stubblefield, 1993). De implementatie daarvan is redelijk eenvoudig en begrijpelijk uit te voeren.

Deze systemen voor kennisrepresentatie kunnen automatisch worden doorzocht door verschillende zoekmethodes. Deze zoekmethodes moeten zich aanpassen aan de veranderingen in energiegebruikspatronen van huishoudens. Voorbeelden hiervan zijn:

- Best match methodes: Hierbij wordt een zo goed mogelijk vergelijkbaar deel van een (prototype) tijdreeks gezocht. Op basis daarvan wordt een in het verleden succesvol advies aan de gebruiker verstrekt.
- Genetic Programming: Binnen genetic programming wordt met een door evolutie geïnspireerde zoekmethode een advies gezocht dat optimaal bij de gebruiker past. Helaas heeft deze methode als nadeel dat een groot aantal “testadviezen” nodig zijn om tot een optimaal advies te komen. Dat betekent dat een gebruiker (zeer) lange tijd aan SlimmeGebruikers mee moet doen voordat hij/zij optimale adviezen ontvangt.
- Genetic Algorithms: Genetische algoritmes zijn in principe vergelijkbaar met genetisch programmeren. De implementatie is verschillend, maar ook hier wordt een groot aantal testadviezen aangemaakt, wat deze methode onpraktisch maakt.
- Evolutionary Programming: Meestal is deze zoekmethode beperkt tot numerieke adviezen en daardoor niet direct van toepassing voor SlimmeGebruikers.
- Inductive Logic Programming: Als zoekmethode is Inductive Logic Programming minder geschikt door de vereiste rekenkracht. Naar verwachting is het niet mogelijk binnen een beperkte rekentijd met goede adviezen te komen.

- Aanpassen van numerieke weegfactoren, bijvoorbeeld bij statistische systemen en neurale netwerken. Dit is normaal gesproken gebaseerd op numerieke optimalisatie technieken. Daarvoor is het nodig kwantitatief feedback van gebruikers te verkrijgen. In het huidige stadium van SlimmeGebruikers is dit geen veelbelovende techniek.
- Reinforcement Learning: Naar verwachting kan reinforcement learning als eerste techniek relatief eenvoudig worden toegepast. Doordat veel huishoudens deelnemen kan met een beperkte exploratie van de adviezen en gebruikerfeedback een goed beeld van effectieve adviesstrategieën worden verkregen.

Niet alle zoekmethodes kunnen met alle systemen van kennisrepresentatie gecombineerd worden.

De adviezen moeten voldoen aan voorwaarden die de gebruiker kan vastleggen. Bijvoorbeeld is het mogelijk dat een gebruiker vraagt geen adviezen over was en wasdrogers te krijgen. Deze voorwaarden worden binnen SlimmeGebruikers als constraints gemodelleerd. Om de rekencomplexiteit laag te houden zullen deze constraints niet direct in de regelbasis van de teleo-reactive agents opgenomen worden, maar als een soort preprocessing stap bij het aanmaken van de agent gebruikt worden.

Een andere mogelijkheid voor automatische advisering is gebaseerd op een systeem dat automatisch met gegevens uit zijn omgeving redeneert. Dit redeneren kan op een probabilistische manier gebeuren en/of gebaseerd zijn op een formele logica. De probabilistische systemen zijn meestal gebaseerd op statistieken van gebeurtenissen, terwijl de logica gebaseerde systemen meer zijn gebaseerd op regels (Russel and Norvig, 2003).

3.5.1 Regel-gebaseerde Systemen

Bekende benaderingen voor regel-gebaseerde systemen zijn expertsystemen (Brownston et al., 1985; Norvig, 1992; Jackson, 1998; Russel and Norvig, 2003). Deze expertsystemen werken meestal op basis van regels en een vooraf vastgestelde conflict resolutie algoritme.

Expertsystemen zijn meestal zoals de logica systemen gebaseerd op regels. Omdat de regels niet volgens een formele logica worden geïnterpreteerd, kan een expertsysteem ook met (volgens de logica) niet sluitende regels omgaan. Daarbij is het ook geen probleem als regels elkaar tegenspreken. Zulke conflicten worden door het besturingsalgoritme van het expertsysteem opgelost (Brownston et al., 1985; Giarratano and Riley, 1994). Voor de gebruiker is het vrij eenvoudig regels toe te voegen, maar het is normaal gesproken niet

eenvoudig na te gaan waarom het expertstelsel een bepaalde beslissing heeft genomen. Regels zijn aan een bepaalde structuur gebonden. Als eenvoudig voorbeeld wordt een advies over wasdrogen gebruikt.

name: Was buiten ophangen i.p.v. wasdroger.
conditie: wasdroger aanwezig, waslijn aanwezig
preconditie: droog weer, tijd om was op te hangen,
gebruiker is thuis (locatie)
postconditie: --

De integratie van constraints met expertsystemen was het meest ver gevorderd in het systeem Babylon (Christaller et al., 1989).

Onzekerheden kunnen vrij eenvoudig worden meegenomen in een expert systeem. Voor SlimmeGebruikers is een systeem gebaseerd op certainty factors te werken het meest toepasselijk, omdat voor een volledig Bayesiaanse benadering niet voldoende conditionele kansverdelingen bekend zijn.

3.5.2 Agent Systemen

Agent systemen zijn eigenlijk een meer overkoepelend begrip van mogelijk verschillende subsystemen. Het gemeenschappelijke kenmerk is dat deze agent systemen bestaan uit semi-onafhankelijke onderdelen (de agents), en dat deze door met elkaar te communiceren en onderhandelen tot een advies komen (Nilsson, 1998; Russel and Norvig, 2003). Binnen SlimmeGebruikers ligt een traditioneel agent systeem niet voor de hand, omdat zo'n systeem redelijk veel communicatie tussen de agents vereist. Bij SlimmeGebruikers wordt juist uitgegaan van een directe communicatie van de agents met de servers van SlimmeGebruikers, en niet met een directe communicatie tussen agents van verschillende huishoudens onderling. Als zo'n directe communicatie mogelijk is, moeten additionele protocollen voor privacy, data-security en identity management worden geïmplementeerd.

Voor het gebruik van een agent systeem is het noodzakelijk het "task environment" (zeg maar het systeem dat de agent omgeeft) te specificeren. Deze specificatie bevat onder andere de eisen op het gebied van performance, omgeving, mogelijke adviezen en informatievoorziening van de agent. Kenmerken van het task environment bij SlimmeGebruikers zijn:

- De agent kan het systeem maar ten dele observeren (partially observable task environment).
- De omgeving van de agent kan stochastisch veranderen, dat betekent dat in een gelijksoortige situatie dezelfde adviezen niet altijd hetzelfde effect zullen hebben (stochastic task environment).
- Afhankelijk van de opzet van het agent systeem kan worden gekozen voor een episodisch of een sequentieel model voor het task environment.
- De omgeving waarin de agent opereert verandert voortdurend. Dat betekent dat de task environment dynamisch is.
- De waarnemingen van de agent en de mogelijke uitkomsten van de adviezen zijn zeer divers. Meestal gaat het om “continue” verbruiksdata en geordende kwalitatieve data.

Teleo-Reactive Agents

Teleo-Reactive agents vormen in principe een vereenvoudigd regelgebaseerd productie systeem. Een agent wordt gevormd door een geordende reeks productie regels:

$$\begin{aligned}k_1 &\rightarrow a_1 \\k_2 &\rightarrow a_2 \\k_3 &\rightarrow a_3 \\&\vdots \\k_n &\rightarrow a_n\end{aligned}$$

De k_n zijn condities en informatie van buitenaf, en de a_n zijn de uitgevoerde acties. Een actie zelf kan weer opgemaakt zijn uit een teleo-reactive agent. Daarmee is het mogelijk een recursieve formulering van te bereiken doelen te gebruiken. De interpretatie van de regels is in geordende volgorde. Steeds wordt de eerste regel waarbij wordt voldaan aan de k_n uitgevoerd.

De vraag bij het gebruik van teleo-reactive agents is de hoe de verschillende regels gerangschikt worden. Mogelijke parameters daarvoor zijn: verwachte energiebesparing bij uitvoering van de regel, gebruiksvriendelijkheid en hoeveel input het volgen van de regel

nodig heeft. De rangschikking van de regels zal semi-automatisch worden aangepast. Een methode die zich hiervoor leent is reinforcement learning (Russel and Norvig, 2003).

Als voorbeeld hoe zo'n teleo-reactive agent in een procedurele programmeertaal er uit ziet is een experimentele versie in TCL (Ousterhout and Jones, 2010; Harrison and McLennan, 1998) ontwikkeld. De code is gebaseerd op een idee van N. Madden vergelijkbaar met de teleo-reactive architectuur in Gordon and Logan (2003); Nilsson (1994, 1998).

```
proc goal {name} {
    global GOAL
    set GOAL $name
}

proc plan {goal body} {
    global GOAL ACTIONS ELSE
    set GOAL $goal
    set ACTIONS($GOAL) [list]
    set ELSE($GOAL) ""
    uplevel #0 $args
}

proc when {cond _do_ action} {
    global ACTIONS GOAL
    lappend ACTIONS($GOAL) $cond $action
}

proc otherwise {action} {
    global ELSE GOAL
    set ELSE($GOAL) $action
}

# Typically, "run" would be incorporated into the advice main-loop
proc run {} {
    global ACTIONS GOAL ELSE
    while 1 {
        set fired 0
        foreach {cond action} $ACTIONS($GOAL) {
```

```
        if {[uplevel #0 [list expr $cond]]} {
            uplevel #0 $action
            set fired 1
            break; # Only first matching action fires
        }
    }
    if {!$fired} {
        uplevel #0 $ELSE($GOAL)
    }
}

}

#example conditions and code
set energy_use 100      ;# current energy use in W
set at_home T          ;# user is at home
set weather_forecast dw ;# code for specific weather forecast type
# etc ...

plan Save_energy {
    when {$energy_use < 10} do { goal Wait }
    when {$energy_use > 1000} do { sent_alert "Very high energy use!" }
    otherwise { search_advice }
}

plan Dry_wash_outside {
    when {[value $Weather_forecast] > 60 && $at_home && $wash_done_recently}
        do { goal Hang_wash_outside }
    when {! $at_home} do { move_to $home }
    otherwise { skip }
}

goal Save_energy
run
```

Zoals aan de opbouw van de code is te zien kunnen modulair nieuwe energiebesparingstips ingevoerd worden.

3.5.3 Probabilistische Systemen

Probabilistische systemen zijn in principe eenvoudig te maken en te gebruiken. Als ze zelfstandig additionele data verzamelen kunnen deze systemen zich automatisch aanpassen aan veranderende omstandigheden. Een nadeel is dat het niet eenvoudig is de algoritmes of conclusies van zo'n systeem direct te laten beïnvloeden door gebruikers (Russel and Norvig, 2003). Dat betekent dat deze systemen veelal als een black-box systeem werken. Binnen de context van SlimmeGebruikers heeft dit als nadeel dat het moeilijk is aan gebruikers uit te leggen waarop de conclusies van zo'n systeem zijn gebaseerd. Het is juist belangrijk dat gebruikers de mogelijkheid hebben de werking van het systeem enigszins te doorgronden, zodat zij later kunnen leren zelfstandig adviessituaties te herkennen en energie te besparen.

Een veel toegepaste methode voor probabilistische systemen is die van Bayesiaanse netwerken (Russel and Norvig, 2003). Voor het opstellen van zo'n netwerk wordt de conditionele kansverdeling van verschillende gebeurtenissen berekend en daarmee is het mogelijk voorspellingen te doen dan wel adviezen te verstrekken. Deze Bayesiaanse netwerken zijn niet eenvoudig direct te combineren met een teleo-reactive agent of een expertsysteem omdat zij met een ander, puur op kansrekening gebaseerde, formalisme werken.

Ook kunnen systemen gebaseerd op informatietheorie onder de categorie van probabilistische systemen vallen (Cover and Thomas, 2006; MacKay, 2003). Deze systemen hebben vanuit het oogpunt van de gebruiker diezelfde nadelen doordat zij ook black-box systemen zijn.

3.5.4 Logica Systemen

Systemen gebaseerd op logica hebben als voordeel dat een expliciet en direct oorzakelijk verband bestaat tussen de regels waar het systeem op gebaseerd is en de adviezen die het systeem maakt. In zo'n systeem is het zeer complex om alle regels goed vast te leggen. Dit is niet te doen voor de eindgebruikers, omdat de regels aan een aantal formele eisen moeten voldoen. Als dit niet zo is zal een logisch systeem zal eenvoudigweg falen (Mueller, 2006; Tarver, 2008). Dit wordt onder ander veroorzaakt door de interactie tussen de regels.

Systemen puur gebaseerd op logica zijn uitermate moeilijk te combineren met stochastische systemen, omdat dan de logica resolutie vaak slechts te algemene conclusies kan trekken. Dat betekent dat de aangemaakte adviezen van zeer algemene vorm zullen zijn.

Binnen SlimmeGebruikers worden daarom primair systemen onderzocht die maar een beperkte vorm van logische resolutie gebruiken. Als voorbeeld kan een expertsysteem met regels gebaseerd op Allen's temporal logic gebruikt worden. Het expertsysteem CLIPS is succesvol op een vergelijkbare manier gebruikt (Giarratano and Riley, 1994).

3.6 Zelflerende systemen

Zelflerende systemen zijn systemen die zich lijken aan te passen op inkomende data. In deze zin zijn zelflerende systemen data gedreven. Daarbij kunnen deze systemen worden geclassificeerd in supervised en unsupervised learning schemes. Binnen SlimmeGebruikers is een combinatie van beide technieken vereist. Experts kunnen vrij eenvoudig tijdreeksen met behulp van achtergrondinformatie taggen en adviezen aandragen. Deze kan SlimmeGebruikers dan overnemen. SlimmeGebruikers zelf moet unsupervised leren van de combinatie van de verschillende tijdreeksen. Dit kan gebeuren door middel van autonoom clusteren of een vergelijkbare technologie (Witten and Frank, 2005). In de literatuur zijn ook methodes bekend op basis van 'genetic algorithms' (Goldberg, 1989) en 'genetic programming' (Ferreira, 2006). Deze methodes van autonoom leren lijken voor SlimmeGebruikers te veel rekenkracht te vergen. Voor de teleo-reactive agenten is een vorm van reinforcement learning waarschijnlijk een goede methode om adviezen op een specifiek deelgebied te optimaliseren. Bijvoorbeeld kan een agent zo optimale adviezen leren over het hoog dan wel laag zetten van de verwarming en de terugkoppeling met de gebruiker.

Een ander soort zelflerend systeem is te vinden in het onderzoek van Fogel et al. (1966). Hierbij leert een systeem door middel van automata een (tijd)reeks te voorspelen. Verder onderzoek naar het identificeren van automata (Gaines, 1976; Gold, 1978) heeft laten zien dat daarvoor aanzienlijke kosten in termen van rekenkracht nodig zijn. Daardoor zijn deze systemen minder geschikt voor SlimmeGebruikers.

3.6.1 Reinforcement Learning

Reinforcement Learning is een methode die gebruikt kan worden voor het automatisch leren en optimaliseren van adviezen. Een voorbeeld is als volgt: Een teleo-reactive agent kan verschillende adviezen aan de gebruiker geven. Als die agent niet kan besluiten welk advies het beste is, geeft hij een van de passende adviezen en observeert de verandering in energiegebruik bij de gebruiker. De verandering in energiegebruik wordt dan gekoppeld

aan het eerder gegeven advies. Is er een positieve correlatie, dan kan deze relatie de regelbasis van de agent versterken. Blijkt er geen correlatie, dan wordt een volgende keer een ander, passend advies geprobeerd. Dat betekent dat het systeem van fouten (slechte adviezen) leert en zich automatisch aanpast als de omstandigheden in een huishouden wijzigen.

Een aspect dat verder door wetenschappelijk onderzoek moet worden bekeken is het uitwisselen van kennis tussen verschillende teleo-reactive agents. Doordat de correlaties tussen gegeven adviezen en energiegebruik per huishouden verschillend zijn moet er een methode worden gevonden voor het betrouwbaar combineren van de correlaties.

Een tweede aspect dat verder onderzoek vraagt is het coördineren van agents bij het uitproberen van verschillende adviezen. Hierover is in de wetenschappelijke literatuur zeer weinig bekend.

3.7 Data-Mining

Data-Mining is een technologie waarbij met behulp van (grote hoeveelheden) data informatie wordt verkregen uit gegevensbanken (Witten and Frank, 2005; Jackson, 1998). Afhankelijk van het type data en de gezochte informatie worden hiervoor verschillende algoritmes en technieken gebruikt. Data-mining op het gebied van tijdreeksen is minder ver ontwikkeld dan data-mining op bijvoorbeeld het gebied van classificatie. Daarom is het nodig voor het project SlimmeGebruikers nieuwe technologieën voor data-mining te ontwikkelen. De gezochte informatie moet eenvoudig voor gebruikers te begrijpen en toepasbaar zijn. Menzies and Hu (2003) heeft een zogenoemde contrast learner, een algoritme dat zoekt naar de meest belangrijke verschillen in de data en daardoor de belangrijkste (on)regelmatigheden in de data kan ontdekken.

Het algoritme uit Menzies and Hu (2003) heet TAR2. In een voorbeeld in het artikel wijzen zij op het begrijpelijk maken van een semantisch net. Dit is het soort toepassing dat voor SlimmeGebruikers interessant is. Immers is het relatief eenvoudig adviezen en hun grondslagen in een semantisch net te modelleren. Met behulp van TAR2 kan dan het best passende advies bij de data worden gezocht. Dit advies kan worden gebruikt om een teleo-reactive agent te programmeren (Nilsson, 1994).

Verder wetenschappelijk onderzoek moet uitwijzen of het mogelijk is TAR2 te koppelen aan iSAX. Juist deze koppeling zou het mogelijk maken begrijpelijk advies aan huishoudens

te verstrekken. Een probleem daarbij is de toenemende rekencomplexiteit van TAR2 bij toename van de aantallen tijdreeksen.

Als alternatief voor TAR2 is het mogelijk parameter-vrije data-mining technologieën gebaseerd op informatie theorie te gebruiken (Keogh et al., 2004; Li and Vitányi, 2008). Deze technieken zijn gebaseerd op de informatie entropie die aanwezig is in de verschillende tijdreeksen. Maar ook hierbij is schaalbaarheid naar grote aantallen gebruikers mogelijk een probleem.

3.8 Gebruikers Interactie

Voor het geven van goede adviezen en het motiveren van de gebruikers maakt SlimmeGebruikers gebruik van interactie tussen de data van de gebruikers. Dit gebeurt op verschillende niveaus:

1. Data interactie: clusteren en groeperen van tijdreeksen met SAX en data-mining.
2. Advies interactie: vaak worden adviezen decentraal opgesteld en/of uitgevoerd. Zulke adviezen kunnen dan worden opgenomen in het semantisch netwerk voor de adviezen, waarmee dan de afhankelijkheden gemodelleerd worden.
3. Zelflerend advies systeem interactie: het algoritme voor het automatisch aanpassen van de adviezen, reinforcement learning, kan direct gebruik maken van de verbanden tussen gegeven adviezen en veranderingen in energiegebruik bij verschillende huishoudens.
4. Directe gebruikersinteractie: bijvoorbeeld door competities en spel-elementen kan directe interactie tussen verschillende gebruikers aangemoedigd worden.

3.9 Implementatie

De implementatie van SlimmeGebruikers als een informatiesysteem is vrij complex, omdat er verschillende deelsystemen autonoom naast elkaar opereren. Voor dit haalbaarheids-onderzoek is het systeem van het verkrijgen van de tijdreeksdata en de opslag daarvan buiten beschouwing gelaten, omdat dit met bestaande technologische oplossingen kan

worden gedaan. Ook zal naar verwachting de data opslag primair door netbeheerders worden uitgevoerd.

Al tijdens het ontwerp van een gebruikersinterface van SlimmeGebruikers is het nodig om een testpanel van gebruikers feedback te laten geven op de ontwikkeling. Een technologie die zich daarvoor leent is het FIT systeem (Mugridge and Cunningham, 2005).

Het ontwerp van het server systeem en het systeem voor de interface naar de gebruiker toe (bijvoorbeeld op een mobieltje) kan met technieken van metaprogrammering worden ontwikkeld (Tarver, 2008). Als mogelijk deel van het serverplatform kan TCL gebruikt worden (Ousterhout and Jones, 2010). Op de client side naar de gebruiker toe lijkt een mobiele scripting taal als Javascript (ECMAScript) de primaire keuze, in combinatie met een html gebaseerd interface (Crockford, 2008; Zakas, 2009)

Een voorbeeld hoe eenvoudige adviezen gekoppeld worden met toegankelijk achtergrondinformatie is te vinden in het "Global Warming Survival Handbook" van de Rothschild (2007).

Bij de implementatie van een systeem als SlimmeGebruikers staat het aspect van de beschikbaarheid van data centraal. Deze beschikbaarheid zal naar verwachting aan veranderingen onderhevig zijn. Dat betekent dat het systeem SlimmeGebruikers zeer flexibel moet zijn. Het is dan aan te bevelen een vorm van metaprogrammering te gebruiken, waarbij de data specificatie centraal staat.

Omdat het systeem SlimmeGebruikers flexibel op veranderingen in moet kunnen spelen is een vorm van "Aspect Oriented Programming" (AOP) zeer interessant (Costanza, 2003). Binnen AOP verandert het gedrag van een programma afhankelijk van de toestand waarin het programma zich bevindt.

3.9.1 Gebruikersinterface

De gebruikersinterface voor SlimmeGebruikers moet zo worden ontworpen dat verschillende interactiemethodes mogelijk zijn. Een gebruikersinterface op een mobieltje kan bijvoorbeeld met spraaktechnologie werken. Ook is het nodig dat de gebruikersinterface is aangepast aan de verschillende soorten gebruikers. Oudere mensen hebben een andere visuele interface nodig dan jongeren.

Bij het ontwerp van de gebruikersinterface speelt de locatie van de gebruiker een grote rol. Met behulp van bijvoorbeeld GPS kan de positie van de gebruiker eenvoudig worden vastgesteld en met behulp van deze plaatsbepaling kan specifiek advies wel –of niet –

worden aangeboden. Bijvoorbeeld is het niet zinvol aan een gebruiker het advies te geven de gordijnen te openen of te sluiten als de gebruiker ver van huis is. Daaraan gerelateerd is de koppeling van SlimmeGebruikers aan (remote) domotica. Een aantal aspecten van deze twee gebieden hebben duidelijke raakvlakken en het is zeer interessant de gebruikers-interface van SlimmeGebruikers te koppelen aan toekomstige domotica om zo nog een groter potentieel voor energiebesparing te hebben.

Het is een grote uitdaging de sociale component van het gebruikersinterface vorm te geven. Daarvoor kunnen meerdere voorbeelden gebruikt worden. Aan de ene kant zijn er applicaties zoals Hyves en Facebook, en aan de andere kant online games met virtuele werelden zoals Habbo en Secondlife.

Het voorgaande betekent dat de gebruikersinterface van SlimmeGebruikers zeer flexibel moet zijn en naar verwachting continu aan veranderende gebruikspatronen wordt aangepast.

3.10 Gebruikersmotivatie en maatschappelijke aspecten

Binnen het haalbaarheidsonderzoek SlimmeGebruikers wordt primair naar de technische aspecten gekeken. Gebruikersmotivatie en maatschappelijke aspecten spelen ook een zeer belangrijke rol, maar worden buiten het hier beschreven haalbaarheidsonderzoek onderzocht. De methode van gebruikersonderzoek zal voor een belangrijk deel zijn gebaseerd op discrete choice modelling (Train, 2009). Daarmee is het mogelijk gebruikersgedrag te modelleren en te voorspellen en zo tot een optimale advisering van gebruikers te komen. Nalebuff and Ayres (2003) stellen in hun boek niet-conventionele methodes voor om gebruikers met nieuwe ideeën te motiveren. Binnen SlimmeGebruikers zal zo'n aanpak op het gebied van sociale interactie tot nieuwe inzichten leiden.

Bij sociale interactie is het belangrijk gebruikers in te delen in groepen of teams. Aan de ene kant is het daarbij belangrijk dat gebruikers zelf voorkeuren aan kunnen geven, maar aan de andere kant is het nodig dat teams een zo goed mogelijke match vertonen.

Hoofdstuk 4

Resultaten en Discussie

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de haalbaarheidsstudie SlimmeGebruikers in het kort weergegeven.

4.1 Beschrijving en Systematische Analyse van de Resultaten

Het onderzoek naar de haalbaarheid van SlimmeGebruikers heeft de volgende resultaten opgeleverd:

- De primaire data over het energiegebruik moeten met data over huishoudens worden gecombineerd om passende adviezen te kunnen aanmaken. Deze basisdata zijn variabel in de tijd en worden dus regelmatig aangepast. Daarvoor is het nodig efficiënte algoritmes te gebruiken zodat het systeem SlimmeGebruikers met grote aantallen gebruikers om kan gaan en snel en flexibel op veranderingen in kan spelen.
- Voor de energiegebruiksdata is het mogelijk een tijdreeksformatie naar een symbolisch alfabet te gebruiken. Doordat deze tijdreeksdata verschillende resoluties hebben, zowel tussen huishoudens als ook in de tijd, is het noodzakelijk een tijdreeksformatie te gebruiken die multiresolutie eigenschappen heeft. iSAX (Shieh and Keogh, 2008) is hiervoor de aangewezen methode. Doordat iSAX de tijdreeks comprimeert kan deze tijdreeks makkelijk worden opgeslagen en mogelijk zelfs bij de gebruiker zelf verder verwerkt worden. iSAX voldoet ook aan de eisen van schaalbaarheid omdat deze methode incrementeel werkt.

- Voor het vergelijken en groeperen (clusteren) van de energiegebruiksdata en de data over huishoudens is het in dit stadium van het onderzoek niet mogelijk een definitief antwoord te geven. Verder wetenschappelijk onderzoek is nodig met echte datasets. Op basis van de literatuurstudie lijkt de beste methode deze stap te combineren met een conceptueel model van het energiegebruik in een huishouden. Zo'n conceptueel model kan door experts in een semantisch netwerk gemodelleerd worden. Met behulp van een association rule learner (Menzies and Hu, 2003) of met een eenvoudige statistische methode (Russel and Norvig, 2003) kan dan een adviesmodel worden samengesteld.
- De automatische advisering kan het beste met een regel-gebaseerd systeem worden uitgevoerd. Het concept van teleo-reactive agents (Nilsson, 1994) is hiervoor zeer goed geschikt, omdat deze agents door hun ontwerp eenvoudig op mobieltjes van de gebruiker kunnen draaien en het ontwerpen daarvan relatief eenvoudig is.
- Doordat de data van het energiegebruik en de samenstelling van een huishouden voortdurend veranderen (bijvoorbeeld geboorte van een kind) is het nodig dat het adviessysteem zich voortdurend aanpast aan nieuwe situaties. Dit betekent dat een zelflerend systeem noodzakelijk is. Reinforcement Learning lijkt hiervoor de aangewezen methode.

Het voorgaande heeft laten zien dat SlimmeGebruikers een complexe samenvoeging van verschillende technologieën vereist. Daarbij is het niet voldoende slechts deze technologieën bij elkaar te brengen, maar deze technologieën moeten op elkaar worden aangepast. Dit aanpassen vereist verdergaand wetenschappelijk onderzoek om zo'n goede basis voor de implementatie van SlimmeGebruikers te verkrijgen.

Op het gebied van data opslag en modellering is het van voordeel met een centraal database-management systeem te werken. Vanuit dit systeem kunnen dan zowel de energiegebruiksdata als ook de regelbasis van het adviessysteem worden aangestuurd. Voor deze data opslag zijn commerciële en open source oplossingen beschikbaar.

Voor de tijdreeksanalyse en -modellering is een benadering op basis van iSAX goed mogelijk. Doordat iSAX een multi-resolutie benadering toestaat kunnen tijdreeksen van verschillende kardinaliteit geaggregeerd en vergeleken worden.

Automatische adviezen kunnen in generiek vorm door experts worden opgesteld. Daarna worden deze adviezen in een semantisch netwerk gemodelleerd. Van daaruit kan dan een

vertaling naar teleo-reactive agents plaatsvinden. Deze teleo-reactive agents kunnen semi-zelfstandig adviezen geven en zelfs op een mobieltje van de gebruiker draaien in plaats van op de server.

Het zelflerende aspect en het voortdurend automatisch aanpassen aan data en veranderende adviezen kan naar verwachting goed door een systeem op basis van reinforcement learning worden uitgevoerd. Hierbij is maar in zeer beperkte mate ingrijpen van menselijke experts nodig.

4.2 Discussie

Het valt op dat in de wetenschappelijke literatuur zeer veel kennis omtrent specifieke deelsystemen van SlimmeGebruikers is te vinden, maar dat weinig tot geen onderzoek met geïntegreerde systemen is te vinden.

Het lijkt dat bij realisatie van SlimmeGebruikers geen fundamentele technisch-wetenschappelijke problemen bestaan, maar dat verder onderzoek zeker nodig is om het systeem functioneel en operationeel te maken. De tijdreeksformatie met behulp van iSAX is niet eerder toegepast op het gebied van energiegebruik. Dit is verbazingwekkend gezien de zeer goede resultaten die in de literatuur zijn beschreven!

Eenvoudige adviessystemen die op grote schaal kunnen werken worden op dit moment ook nauwelijks toegepast. De bestaande systemen zijn centraal georganiseerd en door deze architectuur maar beperkt schaalbaar. Het ontwerp van SlimmeGebruikers om met een centraal gestuurd adviesmodel teleo-reactive agents te programmeren en deze dan op een mobieltje van de gebruiker te laten draaien is nieuw. Door deze nieuwheid moeten een aantal aspecten door verder technisch-wetenschappelijk onderzoek worden uitgezocht: privacy bij de migratie van teleo-reactive agenten en run-time aspecten daarvan.

4.3 Onzekerheden

Het haalbaarheidsonderzoek SlimmeGebruikers betreft een desktop studie. Binnen dit onderzoek is vooral wetenschappelijke literatuur bestudeert. Dat betekent dat het niet is uit te sluiten dat bij de implementatie van SlimmeGebruikers onvoorziene moeilijkheden op

kunnen treden. De voorgestelde algoritmes zijn vaak niet eenvoudig te begrijpen en vereisen een denken in verschillende wetenschappelijke disciplines. Doordat verder technisch-wetenschappelijk onderzoek nodig is voor een functionele realisatie van SlimmeGebruikers bestaat het risico dat de resultaten van dit onderzoek aantonen dat SlimmeGebruikers in de voorgestelde vorm niet haalbaar is en aangepast moet worden. Een realistische inschatting is dat SlimmeGebruikers wel haalbaar is. Dit komt door de modulaire opbouw van het systeem. Als bijvoorbeeld de complexiteit van teleo-reactive agents te groot blijkt, is het mogelijk deze te vervangen door een ander subsysteem zodat het systeem SlimmeGebruikers in zijn geheel nog steeds haalbaar is.

Hoofdstuk 5

Conclusies en Aanbevelingen

In dit hoofdstuk worden de conclusies per onderwerp gegeven, samen met aanbevelingen op basis van deze conclusies.

5.1 Samenvatting Resultaten

De belangrijkste resultaten uit het haalbaarheidsproject SlimmeGebruikers zijn de antwoorden op de vragen:

1. Is het zinvol verder fundamenteel onderzoek over het idee SlimmeGebruikers voort te zetten?

Pas na een uitgebreide analyse van de niet-technische aspecten van SlimmeGebruikers is het zinvol verder fundamenteel onderzoek uit te voeren. De volgende aspecten zijn daarvoor van belang:

- *De motivatie van de gebruikers om deel te nemen en de invloed van financiële en niet-financiële prikkels.*
- *Het ontwikkelen van een bussines case voor exploitatie van SlimmeGebruikers, met bijzondere aandacht voor mogelijke partijen die SlimmeGebruikers kunnen aanbieden.*

2. Is er zicht op het ontwikkelen van een praktische c.q. technisch haalbare toepassing van SlimmeGebruikers?

Ja, binnen dit haalbaarheidsonderzoek zijn geen fundamentele problemen gevonden en naar verwachting is realisatie van SlimmeGebruikers mogelijk.

3. Kunnen de effecten van het toepassen van SlimmeGebruikers voor de Nederlandse energiehuishouding worden gekwantificeerd?

Nee, de effecten kunnen pas na praktische testen worden gekwantificeerd.

5.2 Haalbaarheidsanalyse

5.2.1 Technische Haalbaarheid

Binnen dit onderzoek zijn geen fundamentele obstakels voor de realisatie van SlimmeGebruikers ontdekt. Daarbij zijn de verschillende deelsystemen zoals tijdreeksanalyse, automatisch adviessysteem en zelflerend systeem afzonderlijk onderzocht. Het is de verwachting dat de integratie van de verschillende deelsystemen pas na verder technisch-wetenschappelijk onderzoek afgerond kan worden.

5.2.2 Economische Haalbaarheid

De economische haalbaarheid van SlimmeGebruikers is binnen dit onderzoek niet kwantitatief onderzocht. Op grond van het ontwerp van SlimmeGebruikers kunnen slechts algemene conclusies over de economische haalbaarheid worden gegeven.

Een primair aspect bij de economische haalbaarheid is de schaal van toepassing van SlimmeGebruikers. Bij grote aantallen consumenten kan naar verwachting een economisch rendabel systeem worden opgezet. Daarvoor is in de huidige situatie coöperatie van verschillende energiebedrijven noodzakelijk. Doordat de energiebedrijven aan de andere kant concurrenten van elkaar is het niet waarschijnlijk dat zij een systeem als SlimmeGebruikers gezamenlijk willen exploiteren. SlimmeGebruikers richt zich namelijk direct op de consument, en dus aan de klanten van de verschillende energiebedrijven. Daardoor bestaat voor energiebedrijven het risico dat SlimmeGebruikers consumenten in hun keuze voor een bepaald energiebedrijf beïnvloedt. Zelfs al zou er geen beïnvloeding van de onderlinge concurrentie optreden, dan is het nut van SlimmeGebruikers voor energiebedrijven marginaal.

Gerelateerd aan de economische haalbaarheid zijn twee aspecten: Is het systeem SlimmeGebruikers rendabel op te zetten en te exploiteren, en welke partij kan economisch voordeel halen door de inzet van SlimmeGebruikers?

De inschatting is dat bij deelname van grote aantallen huishoudens SlimmeGebruikers een positief economisch saldo zal hebben. Naar verwachting word de motivatie van consumenten om deel te nemen onder de huidige omstandigheden primair gegeven uit zorg voor het milieu en klimaatverandering. Door de lage variabele kosten voor energie is een financieel gedreven deelname minder doorslaggevend. Pas als de variabele delen van het energietarief zeer significant stijgen ontstaat er een significante economische motivatie voor consumenten om deel te nemen aan SlimmeGebruikers.

Het is nog niet duidelijk welke partij SlimmeGebruikers rendabel kan exploiteren. Vereist is een partij met een redelijke schaalgrote, kennis van consumentengedrag en mobiele interfaces.

5.3 Geïntegreerde Analyse en Beoordeling Haalbaarheid

1. Uit dit en de voorgaande hoofdstukken blijkt *dat SlimmeGebruikers in principe haalbaar is.*
2. Uit de voorgaande hoofdstukken kan op grond van de tot nu toe beschikbare informatie de conclusie getrokken worden *dat SlimmeGebruikers technisch haalbaar is.* Dat betekent dat met toepassing van nieuwe en bekende technieken SlimmeGebruikers daadwerkelijk gerealiseerd kan worden.

5.4 Aanbevelingen

1. Niet-technische aspecten van SlimmeGebruikers verdienen op dit moment de meeste aandacht.
2. Om de kennispositie van Nederland te versterken is het nodig een aantal pilots door te voeren. Slechts door praktijktesten kan naar verwachting een succesvol systeem worden ontwikkeld.

3. Meer openbaar onderzoek over het gebruik van de slimme meter kan voor een betere verspreiding van kennis binnen Nederland zorgen en nieuwe ideeën voor toepassingen doen ontstaan.
4. Een duidelijke, begrijpelijke en openbare strategie voor de invoering van de slimme meter en de daarbij behorende dataprocolen alsmede de kosteneffectieve toegang tot de data van de slimme meter zijn essentiële voorwaarden voor SlimmeGebruikers en andere diensten die onafhankelijk van de energiebedrijven opereren. In de huidige situatie lijkt de invoering van de slimme meter primair gericht op de voordelen voor energiebedrijven, en lijkt het als of de voordelen voor consumenten in mindere mate een rol spelen.

5.4.1 Aanbevelingen Technisch-Wetenschappelijk Vervolgonderzoek

1. Een verificatie van iSAX voor energiegebruiksdata is aan te bevelen. Bijzondere aandacht is nodig voor het normaliseren van de data, omdat energiegebruiksdata mogelijk gevoelig zijn voor een standaard normalisatie.
2. Een studie naar de beperkingen en mogelijkheden als de teleo-reactive agents naar clients zoals mobieltjes migreren. Hierbij spelen just-in-time compilation en run-time translation een belangrijke rol.
3. Een onderzoek naar de interactie tussen teleo-reactive agents en reinforcement learning. Hoe kunnen teleo-reactive agents nieuw geleerde informatie terugkoppelen naar het centrale adviessysteem?
4. Wat is een efficiënte koppeling van iSAX en data-mining (bijvoorbeeld met behulp van TAR2)? Is het mogelijk hiervoor standaard data-mining tools te gebruiken of moeten er specialistische tools ontwikkeld worden?

Referenties

- Aalbers R. and de Nooij M. Per maand of per kwh? – beoordeling van de effecten van een ander tariefsysteem voor kleinverbruikers elektriciteit. SEO Economisch Onderzoek, SEO-rapport nr. 865, Onderzoek in opdracht van het ministerie van Economische Zaken, 2006.
- Andersson E., Greenspun P., and Grumet A. *Software Engineering for Internet Applications*. MIT Press, 2006. ISBN 0-262-51191-6.
- Antoniou G. and Ghose A. What is default reasoning good for? applications revisited. In *Proc. of the 32nd Hawaii Int. Conf. on System Sciences*. IEEE, 1999.
- Ayres I. *Super Crunchers – How Anything can be Predicted*. John Murray, 2007. ISBN 978-0-7195-6465-9.
- Bell T., Cleary J., and Witten I. *Text Compression*. Prentice Hall, 1990. ISBN 0-13-911991-4.
- Bentley J., Fernandez M., Kernighan B., and Schyer N. Template-driven interfaces for numerical subroutines. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 19(3):265 – 287, 1993.
- Brownston L., Farrel R., Kant E., and Martin N. *Programming Expert Systems in OPS5 – An Introduction to Rule-Based Programming*. Addison-Wesley, 1985. ISBN 0-201-10647-7.
- Buckland M. *Programming Game AI by Example*. Wordware, 2005. ISBN 1-55622-078-2.
- Chatfield C. *The Analysis of Time Series*. Chapman & Hall / CRC, 6th edn., 2004.
- Christaller T., Di Primo F., and Voss A., editors. *Die KI-Werkbank Babylon – Eine offene und portable Entwicklungsumgebung fuer Expertensysteme*. Addison-Wesley, 1989. ISBN 3-89319-155-0.

- Cook D., Augusto J., and Jakkula V. Ambient intelligence: Technologies, applications, and opportunities. *Journal of Pervasive and Mobile Computing*, 5(4):277 – 298, 2009.
- Costanza P. Dynamically scoped functions as the essence of aop. *ACM SIGPLAN Notices*, 38(8), 2003.
- Cover T. and Thomas J. *Elements of Information Theory*. Wiley, 2006. ISBN 0-471-24195-4.
- Crockford D. *JavaScript: The Good Parts*. O'Reilly, 2008. ISBN 978-0-596-51774-8.
- Darby S. The effectiveness of feedback on energy consumption – a review for defra of the literature on metering, billing and direct displays. Report, Environmental Change Institute, University of Oxford, 2006.
- de Rothschild D. *The Global Warming Survival Handbook – 77 Essential Skills to Stop Climate Change - or Live Through It*. Holtzbrinck Publishers, 2007. ISBN 1-59486-781-X.
- EnergieTransitie. Innovatieagenda Energie. Tech. rep., SenterNovem, 2008.
- Ferreira C. *Gene Expression Programming – Mathematical Modeling by an Artificial Intelligence*. Springer, 2nd edn., 2006. ISBN 3-540-32796-7.
- Fogel L., Owens A., and Walsh M. *Artificial Intelligence through Simulated Evolution*. John Wiley & Sons, 1966.
- Gaines B. Behaviour/structure transformation under uncertainty. *Int. J. Man-Machine Studies*, 8:337 – 365, 1976.
- Giarratano J. and Riley G. *Expert Systems – Principles and Programming*. PWS Publishing Company, 3rd edn., 1994. ISBN 0-534-95053-1.
- Gold E. Complexity of automaton identification from given data. *Information and Control*, 37:302 – 320, 1978.
- Goldberg D. *Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning*. Addison-Wesley, 1989. ISBN 0-201-15767-5.
- Google Inc. Google powermeter. Internet, 2010. URL <http://www.google.com/powermeter/about/index.html>. Last accessed 2010.04.09.

- Gopalratnam K. and Cook D. Active lezi: An incremental parsing algorithm for sequential prediction. *International Journal of Artificial Intelligence Tools*, 14(1 - 2):917 – 930, 2004.
- Gordon E. and Logan B. Grue: A goal processing architecture for game agents. Computer Science Technical Report No. NOTTCS-WP-2003-1, School of Computer Science and Information Technology, University of Nottingham, 2003.
- Gries D. *Compiler Construction for Digital Computers*. Wiley, 1971. ISBN 0-471-32776-X.
- Harrison M. and McLennan M. *Effective Tcl/Tk Programming – Writing Better Programs with Tcl and Tk*. Addison-Wesley, 1998. ISBN 0-201-63474-0.
- Hermans J. *Energie Survival Gids*. BetaText, 2008. ISBN 9789075541113.
- Jackson P. *Introduction to Expert Systems*. Addison-Wesley, 3rd edn., 1998. ISBN 0-201-87686-8.
- Keogh E., Lin J., and Fu A. Hot sax: Efficiently finding the most unusual time series subsequence. In *Proc. of the 5th IEEE International Conference on Data Mining (ICDM 2005)*, pp. 226 – 233. IEEE, Houston, Texas, 2005.
- Keogh E., Lonardi S., and Ratanamahatana C. Towards parameter-free data mining. In *Proceedings of the tenth ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*, pp. 206 – 215. ACM, ACM, 2004. ISBN 1-58113-888-1.
- Laird P. and Saul R. Discrete sequence prediction and its applications. *Machine Learning*, 15:43 – 68, 1994.
- Lampe J. Depot4 – a generator for dynamically extensible transaltors. *Software – Concepts & Tools*, 19:97 – 108, 1998.
- Li M. and Vitányi P. *An Introduction to Kolmogorov Complexity and Its Applications*. Springer, 3rd edn., 2008. ISBN 978-0-387-33998-6.
- Lin J., Keogh E., Lonardi S., and Chiu B. A symbolic representation of time series, with implications for streaming algorithms. In *Proceedings of the 8th ACM SIGMOD Workshop on Research Issues in Data Mining and Knowledge Discovery*. ACM, 2003.
- Lin J., Keogh E., Wei L., and Lonardi S. Experiencing sax: a novel symbolic representation of time series. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 15:107 – 144, 2007.

- Luger G. and Stubblefield W. *Artificial Intelligence – Structures and Strategies for Complex Problem Solving*. The Benjamin/Cummings Publishing Company, 2nd edn., 1993. ISBN 0-201-30626-3.
- MacKay D. *Information Theory, Inference, and Learning Algorithms*. Cambridge University Press, 2003. ISBN 978-0-521-64298-9.
- MacKay D. *Sustainable Energy - without the hot air*. UIT Cambridge, 2008. ISBN 978-0-9544529-3-3. URL <http://www.withouthotair.com>.
- Maher M., Balachandran M., and Zhang D. *Case-Based Reasoning in Design*. Lawrence Erlbaum Associates, 1995. ISBN 0-8058-1831-6.
- Menzies T. and Hu Y. Data mining for very busy people. *IEEE Computer*, pp. 18 – 25, 2003.
- Meulstee P. *Food Sales Prediction*. Graduation project thesis, Eindhoven University of Technology, 2008.
- Ministerie van Economische Zaken. *Energierapport 2008*. 2008. Publicatienummer: 08 ET 14.
- Mount D. *Bioinformatics: Sequence and Genome Analysis*. Cold Spring Harbor Press, 2004.
- Mueen A., Keogh E., Zhu Q., Cash S., and Westover B. Exact discovery of time series motifs. In *Proceedings of SDM 2009*. 2009.
- Mueller E. *Commonsense Reasoning*. Morgan Kaufmann, 2006. ISBN 0-12-369388-8.
- Mugridge R. and Cunningham W. *Fit for Developing Software – Framework for Integrated Tests*. Prentice Hall, 2005. ISBN 0-321-26934-9.
- Nalebuff B. and Ayres I. *Why Not? How to Use Everyday Ingenuity to Solve Problems Big and Small*. Harvard Business School Press, 2003. ISBN 1-4221-0434-6.
- Nevill-Manning C. and Witten I. Identifying hierarchical structure in sequences: A linear-time algorithm. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 7:67 – 82, 1997a.
- Nevill-Manning C. and Witten I. Inferring lexical and grammatical structure from sequences. In *Proc. Compression and Complexity of Sequences 1997*. Positano, 1997b.

- Nilsson N. *Artificial Intelligence: A New Synthesis*. Morgan Kaufmann, 1998. ISBN 1-55860-535-5.
- Nilsson N.J. Telemorphic programs for agent control. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 1:139 – 158, 1994.
- Norvig P. *Paradigms of Artificial Intelligence Programming: Case Studies in Common Lisp*. Morgan Kaufmann, 1992. ISBN 1-55860-191-0.
- NUONenergiebesparen. Nuon energiebesparen. Internet, 2010. URL <http://www.nuonenergiebesparen.nl>. Last accessed 2010.04.09.
- Ousterhout J. and Jones K. *Tcl and the Tk Toolkit*. Addison-Wesley, 2nd edn., 2010. ISBN 0-321-33633-X.
- Rabiner L. A tutorial on hidden markov models and selected applications in speech recognition. *Proceedings of the IEEE*, 77(2):257 – 286, 1989.
- Russel S. and Norvig P. *Artificial Intelligence - A Modern Approach*. Pearson Education International, 2nd edn., 2003. ISBN 0-13-080302-2.
- Shieh J. and Keogh E. isax: Indexing and mining terabyte sized time series. In *Proceeding of the 14th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, pp. 623 – 631. 2008. ISBN 978-1-60558-193-4.
- Tarver M. *Functional Programming in Qi*. Free University Press, 2nd edn., 2008. ISBN 978184426549-7.
- Train K. *Discrete Choice Methods with Simulation*. Cambridge, 2nd edn., 2009. ISBN 978-0-521-74738-7. URL <http://elsa.berkeley.edu/~train>.
- Werkgroep Decentrale Infrastructuur. Actieplan Decentrale Infrastructuur, Platform Nieuw Gas en Platform Duurzame Elektriciteitsvoorziening. Tech. rep., EnergieTransitie, SenterNovem, 2008.
- Wirth N. *Compilerbau*. B.G. Teubner, 4th edn., 1986. ISBN 3-519-32338-9.
- Witten I., Moffat A., and Bell T. *Managing Gigabytes – Compressing and Indexing Documents and Images*. Morgan Kaufmann, 2nd edn., 1999. ISBN 1-55860-570-3.
- Witten I.H. and Frank E. *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques*. Morgan Kaufmann, 2nd edn., 2005.



Zakas N. *JavaScript for Web Developers*. Wrox (Wiley), 2nd edn., 2009. ISBN 978-0-470-22780-0.

