

Decentrale elektri- citeitsvoorziening in de gebouwde

omgeving

Evaluatie van transities op basis van systeemopties

Beleidsstudies

Decentrale elektriciteitsvoorziening in de gebouwde omgeving

Evaluatie van transities op basis van systeemopties

A.Faber en J.P.M. Ros

Met medewerking van:

P. de Boer en B. in 't Groen (KEMA)



Decentrale elektriciteitsvoorziening in de gebouwde omgeving – Evaluatie van transitie op basis van systeemopties

© Planbureau voor de Leefomgeving (PBL), april 2009
PBL-publicatienummer 500083011

Contact: A. Faber; albert.faber@pbl.nl

U kunt de publicatie downloaden van de website www.pbl.nl of opvragen via reports@pbl.nl onder vermelding van het PBL-publicatienummer.

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: 'Planbureau voor de Leefomgeving, de titel van de publicatie en het jaartal.'

Het Planbureau voor de Leefomgeving is hét nationale instituut voor strategische beleidsanalyses op het gebied van milieu, natuur en ruimte. Het PBL draagt bij aan de kwaliteit van het strategische overheidsbeleid door een brug te vormen tussen wetenschap en beleid en door gevraagd en ongevraagd, onafhankelijk en wetenschappelijk gefundeerd, verkenningen, analyses en evaluaties te verrichten waarbij een integrale benadering voorop staat.

Vestiging Bilthoven
Postbus 303
3720 AH Bilthoven
T: (030) 274 2745
F: (030) 274 44 79

Vestiging Den Haag
Postbus 30314
2500 GH Den Haag
T: (070) 328 87 00
F: (070) 328 87 99

E: info@pbl.nl
www.pbl.nl

Voorwoord

Dit rapport is geschreven in het kader van het project ‘Evaluatie van transitieprocessen’. Binnen dit project geeft het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) (voorheen het Milieu- en Natuurplanbureau, MNP) aan de hand van systeemvarianten een beeld van effecten, voortgang en beleid rond energietransitieprocessen. Daarbij wordt aangesloten op het transitiebeleid zoals dat is geformuleerd in navolging van het NMP4. Dit rapport gaat over de mogelijkheden en effecten van een decentrale elektriciteitsvoorziening, en de rol die verschillende sectoren, spelers, instituties en technieken spelen in een mogelijk transitieproces naar een dergelijk systeem.

Dit rapport is deels gebaseerd op een deelproject in samenwerking met KEMA. De auteurs danken Petra de Boer, Bart in 't Groen en Ton van Wingerden voor hun belangrijke bijdragen, relevante inzichten en vooral de zeer prettige samenwerking. We danken Olivier Ongkiehong (SenterNovem) voor zijn beschikbaarheid als vraagbaak en spin in het web van de werkgroep Decentrale Infrastructuur, onder het platform Duurzame Elektriciteitsvoorziening binnen de Energietransitie.

Dit rapport is op verschillende onderdelen becommentarieerd door Petra de Boer (KEMA), Bart in 't Groen (KEMA), Ton van Wingerden (KEMA), Ruud van den Wijngaart (PBL), Martijn Bongaerts (Alliander), René Kamphuis (ECN), Ivo Opstelten (ECN), Olivier Ongkiehong (SenterNovem), Geert Verbong (TUE), Harry Droog (werkgroep Decentrale Infrastructuur), Rémon Dantuma (EZ) en Sander Verbrugge (Roland Berger Consultants). De uitgebreide review heeft zeer bijgedragen ter verbetering en verfijning van de analyses en resultaten in dit rapport, waarvoor onze grote waardering.

Johanna Montfoort, Dick Nagelhout, Leon Janssen en Rob Folkert hebben als leden van het projectteam op verschillende momenten een bijdrage geleverd aan de totstandkoming van dit rapport. We danken Marian Abels en Filip de Blois voor de vormgeving van de figuren. Tevens gaat onze waardering uit naar Ron van Dijk voor zijn hulp bij de opzet van de databestanden over wijktypen.

Abstract

Distributed electricity production in the built environment

Local sustainable electricity production technologies as well as technologies with high domestic electricity demand are generally expected to develop in the long run and largely affect the local electricity networks. Distributed sustainable electricity systems are a realistic option to ensure a sustainable, affordable and secure energy supply, but systemic, technical and institutional adaptations are required for their further development. Moreover, distributed production systems do not necessarily offset the opportunities that can be met with central production options. Developing a distributed electricity network, with high levels of local electricity production as well as demand, could lead to significant reductions in environmental pressure, but high investments are required, while security of supply remains a function of reliability of electricity production and network control. Domestic electricity demand becomes generally higher, largely due to electric cars and heat pumps. Depending on car loading patterns, the daily demand profiles may become more pronounced. These developments may be accommodated by improved interlinkages between production and consumption, thus elaborating a distributed electricity network. Such interlinkages require the articulation of consumers in a role of co-producers, while network balancing shifts from top-down control to a bottom-up balancing activity.

Inhoud

- Voorwoord 5
- Abstract 7
- Samenvatting 11
- 1 Inleiding 15
 - 1.1 Voortgang energietransitie 15
 - 1.2 Motivering: decentrale elektriciteitsvoorziening als transitieproces 15
 - 1.3 Beleidscontext 16
 - 1.4 Doelstelling, opbouw en onderzoeksmethode 17
- 2 Beschrijving decentrale elektriciteitssystemen en context voor ontwikkeling 19
 - 2.1 Context voor veranderingen in het elektriciteitssysteem 19
 - 2.2 Balancing en sturing in decentrale elektriciteitssystemen 21
 - 2.3 Belangrijke spelers in de vormgeving van het elektriciteitssysteem 22
 - 2.4 Technologieën in een decentraal energiesysteem 23
 - 2.5 Concurrentie en samenhang tussen energiesystemen 28
- 3 Vraag en aanbod in een decentraal elektriciteitssysteem in woonwijken 31
 - 3.1 Introductie: doelstelling en aanpak 31
 - 3.2 Achtergronden en beschrijving van systeemvarianten 31
 - 3.3 Vraag en aanbod van elektriciteit op wijkniveau in een decentraal energiesysteem 36
- 4 Effectbeoordeling decentrale elektriciteitssystemen in de gebouwde omgeving 41
 - 4.1 Criteria en indicatoren 41
 - 4.2 Milieudruk 42
 - 4.3 Ruimtelijke effecten 43
 - 4.4 Leveringszekerheid voor huishoudens 44
 - 4.5 Voorzieningszekerheid 45
 - 4.6 Investerings 46
- 5 Huidige activiteiten in voorontwikkelingsfase van decentrale elektriciteitsvoorziening 49
 - 5.1 Ontwikkeling probleempceptie 49
 - 5.2 Visieontwikkeling decentrale elektriciteitsvoorziening 49
 - 5.3 Onderzoeksactiviteiten (R&D) 51
 - 5.4 Experimenten in de praktijk 53
- 6 Transitie naar een decentraal elektriciteitssysteem: ontwikkelingspaden, instituties en co-evolutie 55
 - 6.1 Ontwikkelingspaden voor decentrale elektriciteitsvoorziening 55
 - 6.2 Institutionele vormgeving en barrières 55
 - 6.3 Co-evolutie van instituties en technologie 57
- 7 Conclusies 59
 - 7.1 Achtergrond en motivering 59
 - 7.2 Belangrijke kenmerken van een decentraal elektriciteitssysteem 59
 - 7.3 Potentiële effecten van decentrale elektriciteitsvoorziening 60
 - 7.4 Stappen richting realisatie 61

- Bijlage 1 Kengetallen per wijktype (2050) als uitgangspunt voor berekeningen systeemoptie 62
- Bijlage 2 Achtergrondberekeningen milieueffecten systeemvarianten 63
- Afkortingen 65
- Literatuur 66
- Colofon 69

Samenvatting

Een decentrale elektriciteitsvoorziening in de gebouwde omgeving kan op de lange termijn een significante bijdrage leveren aan de invulling van de belangrijkste doelstellingen van het energiebeleid: voorzieningszekerheid, betaalbaarheid en vermindering van milieudruk. Bij een decentraal elektriciteitssysteem wordt een groot deel van de elektriciteit lokaal geproduceerd. De ontplooiing van een decentraal elektriciteitssysteem vergt echter systeemtechnische en institutionele aanpassingen, bij voorkeur in samenhang met de ontwikkeling van lokale warmtesystemen.

Voor een grootschalige inpassing van lokale, duurzame technologieën voor elektriciteitsproductie is een decentralisatie van het elektriciteitssysteem nodig, met forse uitdagingen op het gebied van aansturing en netwerkbalancering. Of een decentraal elektriciteitssysteem op de lange termijn een breed toegepaste optie wordt, hangt af van de ontwikkeling van technologieën voor opwekking en opslag, en van de gelijktijdige vormgeving van institutionele kaders voor de aansturing van een dergelijk systeem.

Grootschalige toepassing van lokale, duurzame elektriciteitsopwekking vergt veranderingen in aansturing en vormgeving van het elektriciteitssysteem

In het Nederlandse en Europese energiebeleid zijn milieu, voorzieningszekerheid en betaalbaarheid de leidende doelstellingen voor de vormgeving van het energiesysteem op de lange termijn. In het energietransitiebeleid wordt benoemd dat een systeemverandering binnen enkele decennia nodig is om de doelstelling van duurzaamheid werkelijk vorm te kunnen geven. In het *Energierapport 2008* wordt decentrale productie van elektriciteit en warmte neergezet als een mogelijke systeemoptie voor een duurzame energievoorziening in de toekomst.

In een duurzaam decentraal elektriciteitssysteem wordt op lokale schaal met behulp van innovatieve technologieën en organisatiemethoden gestreefd naar een goede balans tussen vraag en aanbod van elektriciteit. Verschillende technische opties voor decentrale elektriciteitsvoorziening kunnen in de gebouwde omgeving worden geïntegreerd, zoals zonnestroom (PV), kleinschalige warmtekrachtkoppeling (micro-wkk), kleinschalige windturbines en elektriciteitsopslag. Op de lange termijn moet ook rekening worden gehouden met extra elektriciteitsvraag, niet alleen als gevolg van de vraag naar meer comfort en gemak (bijvoorbeeld airconditioning), maar ook door mogelijke nieuwe systeemconcepten voor verkeer (elektrisch rijden) en warmtevoorziening (elektrische warmtepompen). Aansturing, vormgeving en afstem-

ming met andere energiesystemen is in een decentraal elektriciteitssysteem echter fundamenteel anders dan in het huidige systeem, dat sterk leunt op centraal geproduceerde elektriciteit.

De belangrijkste uitdaging voor elk elektriciteitssysteem ligt in de balancering van vraag en aanbod. In een centraal gestuurd elektriciteitssysteem worden grote fluctuaties ondervangen doordat pieken in de vraag kunnen worden afgevlakt door dalen elders of door de inzet van regelbaar vermogen in de vorm van gascentrales. In een decentraal systeem is dit lastiger. Bovendien zijn fluctuaties van duurzame elektriciteitsproductie vaak lastig te voorspellen en aan te sturen. Dat vergt een alternatieve aansturingsfilosofie voor de balancering van het elektriciteitssysteem. Hiervoor is een aantal opties denkbaar:

- Onbalans tussen vraag en aanbod kan tijdelijk worden opgevangen door opslag in batterijen of door verzwaren van het (decentrale) netwerk.
- Er kan worden gestuurd op aanpassing van de vraag, bijvoorbeeld door (tijdelijke) afkoppeling van aansluitingen of van specifieke apparaten, zoals het laden van de elektrische auto of apparaten met een groot bufferend vermogen zoals boilers.
- De capaciteit van slecht stuurbare maar duurzame elektriciteitsopwekkers kan worden vergroot door centrale inzet van meer gascentrales, die gebruikt worden om pieken te ondervangen.

Voor de ontwikkeling van decentrale elektriciteitssystemen moet rekening worden gehouden met de concurrerende ontwikkeling van centrale elektriciteitssystemen. Bij een stapsgewijze, incrementele ontwikkeling van productietechnologieën is de kans groot dat een systeem ontstaat dat voor beide systeemtypen sub-optimaal is, maar wel ruimte laat voor grote mate van flexibiliteit. Daarnaast is het belangrijk te onderkennen dat warmte- en elektriciteitssystemen in de gebouwde omgeving in samenhang met elkaar worden ontwikkeld. Een technologische keuze binnen het ene systeem zal in veel gevallen implicaties hebben voor de vormgeving van het andere systeem.

Verandering van rollen en spelregels in een decentraal elektriciteitssysteem

Een brede toepassing van lokale opwekking van elektriciteit vergt tweerichtingsverkeer van zowel elektriciteit als informatie, waardoor onderlinge uitwisseling mogelijk wordt tussen

decentrale vraag- en productie-eenheden. Door installatie van zogenoemde slimme meters kan worden voorzien in de koppeling tussen stromen van elektriciteit en informatie. De vereiste netwerkbalans kan top-down georganiseerd worden, in lijn met de huidige institutionele vormgeving van het elektriciteitsnetwerk, of in de vorm van een lokaal netwerk, waarbij productie- en consumptie-eenheden onderling informatie en elektriciteit uitwisselen en waarin eenheden aan- of uitschakelen om de totale systeembalans te handhaven ('smart grid'). In een werkelijk decentraal systeem krijgen consumenten een nieuwe rol toebedeeld, als co-producent van elektriciteit.

Technische uitdagingen in de ontwikkeling van decentrale elektriciteitsvoorziening

Een primaire uitdaging voor een duurzame elektriciteitsvoorziening ligt in de technische ontwikkeling van schone of meer efficiënte elektriciteitssystemen als PV, brandstofceltechnieken voor micro-wkk en opslagsystemen. Bij toepassing van volwassen, goed ontwikkelde, lokale duurzame elektriciteitsproductie kunnen dagrhythmes en seizoenspatronen in de netto-elektriciteitsvraag van huishoudens op de lange termijn sterk veranderen in vergelijking met het huidige patroon. Daarbij speelt ook de stijgende vraag naar elektriciteit een cruciale rol, met name door de grootschalige toepassing van elektrische auto's en warmtepompen. Een zekere mate van flexibiliteit ten aanzien van de uren waarin de accu wordt opgeladen biedt echter goede mogelijkheden om dit op wijkniveau te kunnen opvangen. Daarvoor is wel een verdere ontwikkeling nodig in de koppeling tussen elektriciteit en informatie, om uitwisseling van elektriciteit binnen de wijk door afstemming van vraag en aanbod te kunnen faciliteren. Dit vergt dus een systeeminnovatie in de vorm van slimme lokale netwerken.

Voor de balancerings van de verhoogde elektriciteitsvraag in combinatie met grootschalige lokale elektriciteitsopwekking is het van belang om vraag en aanbod goed op elkaar af te kunnen stemmen. Een globale indicatie van de maximale dagelijkse verschuiving in de vraag- en aanbodpatronen in een decentraal elektriciteitssysteem in een woonwijk is circa 2,5 kWh/dag per woning (gemiddeld over een wijk en inclusief fors gebruik van elektrische auto's). Om deze verschuiving te ondervangen zal in Nederland meestal het overkoepelende netwerk een rol spelen als achtervang, waarvoor echter wel tweerichtingsverkeer door transformatoren mogelijk moet zijn. Ook opslagsystemen kunnen een belangrijke rol spelen. Voor de opslag van elektriciteit kunnen batterijsystemen centraal in de wijk worden geplaatst, of verspreid in loze ruimtes van huizen (kruipruimte, kelder of vliering). Op de lange termijn bedraagt de benodigde investering voor dergelijke systemen naar schatting enkele honderden euro's. Ook accu's van elektrische auto's kunnen als opslagsysteem dienen. De benodigde opslagcapaciteit kan mogelijk ook beperkt worden door betere afstemming van fluctuaties vraag en aanbod op lokaal of huishoudelijk niveau.

Milieudruk neemt af, maar resterende emissies zijn diffuus en daardoor lastig af te vangen

De elektriciteitsvraag neemt in alle berekende varianten van decentrale elektriciteitsvoorziening sterk toe door de ontwikkeling van met name elektrische auto's en warmtepompen. Deze vraag wordt deels centraal opgevangen en naar ver-

wachting zeer efficiënt en tegen lage CO₂-emissies geproduceerd. Het restant wordt decentraal geproduceerd met vooral duurzame technologieën. Bij decentrale elektriciteitsproductie met micro-warmtekrachtkoppeling op basis van aardgas is de facto sprake van een decentralisatie van CO₂-emissies, waarbij de mogelijkheid voor afvang en opslag in principe vervalt. Duurzame elektriciteitsvoorziening met zonnestroom en kleinschalige windturbines is zeer schoon en meestal ook betrouwbaar en zeker.

Het ruimtebeslag van een decentrale elektriciteitsvoorziening binnen de gebouwde omgeving is relatief gering, maar door grootschalige toepassing van warmte/koude-opslag ontstaat een toenemende competitie om het gebruik van de ondergrond. Emissies van NO_x, SO₂ en fijn stof zullen eveneens afnemen, met name door een verbeterde efficiëntie bij centrale productie en door elektrisch autorijden, maar ook concurrerende conventionele autosystemen vertonen naar verwachting sterke verbeteringen ten aanzien van de lokale luchtkwaliteit.

Bij ontwikkeling van een decentrale elektriciteitsvoorziening op basis van duurzame productietechnieken neemt de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen af. De leveringszekerheid van elektriciteit voor huishoudens binnen het huidige, centrale elektriciteitssysteem is bijzonder groot. Bij decentrale elektriciteitsvoorziening is de leveringszekerheid afhankelijk van de vormgeving van het decentrale systeem, waarbij met name de omvang van de opslagcapaciteit een belangrijke rol speelt.

Investerings voor decentrale elektriciteitssystemen zijn hoog, maar de flexibiliteit hiervan kan lock-in voorkomen en ontwikkeling van andere technische routes openhouden

De totale kosten voor het decentrale systeem omvatten investeringen in decentrale elektriciteitsproductie, opslagcapaciteit, de infrastructuur met de aansturing van het netwerk en de institutionele vernieuwing. Veel duurzame technieken zijn nu nog relatief duur, maar bij grootschalige toepassing kunnen de kosten op de lange termijn sterk dalen. Technisch is het nu al goed mogelijk om dergelijke technieken tegen een hoge maar dalende meerprijs in duurzame bouw-concepten te integreren. De totale investeringskosten voor een decentraal elektriciteitssysteem zijn momenteel echter hoger dan de meeste centrale alternatieven.

Om volledig tegemoet te komen aan de eisen van voorzieningszekerheid, betaalbaarheid en verlaging van de milieudruk zal een veelvoud aan zeer verschillende typen elektriciteitsopwekking nodig zijn. Om deze verschillende opties adequaat in te kunnen passen is flexibiliteit een cruciale eigenschap voor het elektriciteitssysteem van de toekomst. Hiervoor is een doordacht ontwerp van het elektriciteitssysteem nodig, dat ruimte biedt voor verschillende centrale en decentrale opties voor de elektriciteitsproductie.

Verschiede experimenten en onderzoeken bieden inzicht in de technische, systeeminterne en institutionele barrières voor de grootschalige ontwikkeling van een decentraal elektriciteitssysteem. Een transitie naar een decentrale elektriciteitsvoorziening vergt aanpassingen in de institutionele

omgeving, die nog sterk is toegesneden op centrale elektriciteitsopwekking. Een effectieve toepassing van decentrale opwekkingstechnieken betekent in veel gevallen dat andere spelregels nodig zijn en dat het onderscheid tussen producenten en consumenten vervaagt.

Inleiding



1.1 Voortgang energietransitie

In 2001 heeft het vierde Nationaal Milieubeleidsplan (NMP4) een beleidsimpuls gegeven aan het denken in termen van systeemverandering voor de aanpak van hardnekkige milieuproblemen op de lange termijn (Ministerie van VROM, 2001). Vanuit dit kader is het transitiebeleid opgezet, dat expliciet een systeemverandering naar een duurzame maatschappij binnen één generatie nastreeft. Transitie management geeft invulling aan het transitiebeleid, niet alleen door de introductie van milieuvriendelijke technologieën en gedragsveranderingen, maar vooral door grootschalige en systematische sociaal-economische en technische aanpassingen voor een inherent duurzame samenleving.

Het transitiebeleid is inmiddels stevig geïnstitutionaliseerd, met name rond het thema energie, waarvoor enkele jaren geleden een Interdepartementale Programmadirectie Energietransitie (IPE) is opgericht. Monitoring en evaluatie van transitiebeleid worden steeds belangrijker als gevolg van deze toenemende beleidsinstitutionalisering. De evaluatie van transitiebeleid is echter lastig, vanwege de lange termijn (2030 tot 2050) en algemene aard waarop beleidsdoelen zijn gesteld, vanwege het doelzoekende karakter van transitieprocessen, en vanwege de brede maatschappelijke inzet die vereist is, waardoor beleidsvoornemens niet altijd meer eenvoudig te koppelen zijn aan effecten. Een methode om deze bezwaren te ondervangen kan worden gevonden in het concept 'systeemopties', dat binnen het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) is ontwikkeld als uitgangspunt voor de evaluatie van transitiebeleid. Een systeemoptie beschrijft een deel van het toekomstige systeem, zoals dat *zou kunnen worden gerealiseerd*, binnen de algemene kaders en doelstellingen van het transitiebeleid. Zo'n beschrijving omvat een samenhangend overzicht van de technologieën binnen een systeemoptie, de belangrijkste spelers in het veld en de context voor verandering.

De beleidsevaluatie richt zich vervolgens op het proces om deze systeemoptie te realiseren en dus op de voorwaarden die moeten worden vervuld om de potenties van de systeemoptie te verzilveren. Daarbij wordt in acht genomen dat in het brede transitieproces ook mogelijke, soms aanvullende, soms concurrerende alternatieven worden ontwikkeld. Hoewel het proces en de rol van het beleid in deze evaluatiemethodiek centraal staan, wordt ook een eerste beoordeling van de mogelijke *effecten* op verschillende duurzaamheids-

aspecten bij realisatie van de systeemoptie gegeven. Een inschatting van dergelijke effecten door betrokken spelers in het veld kan van grote invloed zijn op de houding en positie van deze spelers ten aanzien van het transitieproces, waardoor een beeld ontstaat van het krachtenveld en de visievorming rond de systeemoptie. Dit is vervolgens van invloed op de identificatie van mogelijke ontwikkelingspaden en barrières.

De methodiek voor evaluatie van transitiebeleid aan de hand van systeemopties is in 2006 is door het toenmalige Milieu- en Natuurplanbureau (MNP) uitgewerkt (Ros et al., 2006a; Ros et al., 2009), en vervolgens toegepast op de thema's vloeibare biobrandstoffen (Ros en Montfoort, 2006), groene diensten in de landbouw (Reudink et al., 2006), biograndstoffen voor de chemische industrie (Van den Born en Ros, 2006), duurzame viskweek (Rood et al., 2006), brandstofcelauto op waterstof verkregen uit zonthermische krachtcentrales (Nagelhout en Ros, 2006), micro-warmtekracht en de virtuele centrale (Elzenga et al., 2006). Een samenhangend overzicht van de transitieprocessen rond deze thema's en de rol van het beleid wordt gegeven in Ros et al. (2006b). Vervolgens is een verdere uitwerking voorzien van de evaluatie van transitieprocessen in de gebouwde omgeving. Inmiddels zijn rapportages verschenen rond de thema's zonne-energie in woningen (Montfoort en Ros, 2008) en elektrische autorijden (Nagelhout en Ros, 2009), en volgt binnenkort een rapport over warmte/koude-opslag (Janssen en Ros, 2009). Het onderhavige rapport over decentrale energievoorziening valt ook binnen deze onderzoekslijn, maar overstijgt deze ook omdat verschillende sectoren samenkomen rond het thema decentrale energie en omdat een veelheid aan technieken een rol spelen voor de uitwerking van decentrale energiesystemen.

1.2 Motivering: decentrale elektriciteitsvoorziening als transitieproces

Zowel het Europese als het Nederlandse energiebeleid worden gestuurd vanuit de drie hoofdlijnen voorzieningszekerheid, ecologische duurzaamheid en betaalbaarheid. De keuzes die worden gemaakt vinden plaats in een context van klimaatverandering, opkomende technologieën voor duurzame energieproductie en controlesystemen, en de toenemende noodzaak voor vernieuwing van het verouderende elektriciteitsnetwerk. Voor de verkenning van de elektriciteitsvoorziening in de context van het transitiebeleid

zijn verschillende scenario's denkbaar, variërend in schaalniveau, betrokkenheid van actoren, institutionele inbedding en transitiepaden (Elzen en Hofman, 2007). In toenemende mate gaat de aandacht uit naar de uitwerking van *decentrale* elektriciteitssystemen, waarin op lokale of regionale schaal met behulp van innovatieve technologieën en organisatiemethoden wordt gestreefd naar een goede balans tussen vraag en aanbod. De grootschalige toepassing van duurzame elektriciteitsproductie is echter bijzonder lastig zonder een radicaal andere organisatie van de elektriciteitsvoorziening. Een grote uitdaging ligt in de grote en lastig bij te sturen fluctuaties in de productie met duurzame productietechnologieën (bijvoorbeeld op dagen met variabele wind of bewolking). Bij een productieoverschot neemt de spanning op het net toe en kunnen storingen optreden aan apparaten. Door grootschalige invoering van decentraal geproduceerde elektriciteit, afgewisseld met grote pieken in de vraag, kan bovendien verstoring optreden in de spanningsprofielen (Meeuwssen, 2007). Bij een vraagoverschot kan het gebeuren dat apparaten niet goed werken doordat er onvoldoende spanning op het net staat. Daarnaast vergt de ontwikkeling van een decentraal elektriciteitssysteem enkele institutionele veranderingen rond netwerkbeheer en elektriciteitsdistributie, omdat consumenten zich (deels) zullen profileren als producenten van elektriciteit en omdat elektriciteit in toenemende mate op lokaal niveau in het systeem ingevoerd wordt. Elektriciteitsstromen worden sterk gekoppeld aan informatiestromen en er ontstaan alternatieve modellen voor netwerkbalancing. Een hoog aandeel duurzame opwekkingstechnologieën vergt dan ook aanpassingen op systeemniveau.

De verschillen tussen het huidige elektriciteitssysteem en een systeem dat inpassing van duurzame, decentrale energieproductie mogelijk maakt, zijn zowel technisch als institutioneel van aard: nieuwe en diverse technologieën voor opwekking van energie, nieuwe eigendomsverhoudingen, alternatieve systemen voor netbeheer (inclusief elektriciteitsopslag), alternatieve garanties ten aanzien van kwaliteit en voorzieningszekerheid, inclusief nieuwe bijbehorende juridische afspraken en gedragsveranderingen spelen alle een rol ten aanzien van de ontwikkeling en toepassing van een decentraal energiesysteem.

In dit rapport wordt een beschrijving gegeven van een systeemoptie van decentrale elektriciteitsvoorziening. Daarbij ligt de nadruk op de afstemming tussen vraag en aanbod van elektriciteit op een lokaal niveau binnen de gebouwde omgeving van woonwijken.

1.3 Beleidscontext

Het *Energierapport 2008* schetst drie beelden van de mogelijke toekomstige elektriciteitsvoorziening in Nederland (Ministerie van Economische Zaken, 2008a):

1. Nederland als *Powerhouse van Europa*, met nadruk op levering van basislastvermogen voor omringende landen op basis van grootschalige kolencentrales;
2. Nederland als *energieflexwerker van Europa*, met nadruk op voorziening van piekvermogens op basis van de gasgestookte centrales;

3. Nederland als *SmartEnergy City*, met nadruk op kleinschalig en lokaal geproduceerde energie en decentrale elektriciteitsnetwerken.

In het derde toekomstbeeld neemt een decentralisatie van de elektrische infrastructuur een prominente plaats in, waarbij slimme netwerken als icoon voor toekomstige energie-infrastructuur worden neergezet. Als randvoorwaarden voor deze ontwikkeling gelden ten eerste een actief innovatiebeleid ten behoeve van nieuwe, kleinschalige technieken, en daarnaast beleid om infrastructuur voor met name elektriciteit flexibeler en slimmer te maken. In dit kader is een grootschalige introductie van zogenaamde slimme meters voorzien, waarmee een koppeling wordt gemaakt tussen elektriciteit- en informatiestromen en decentrale elektriciteitsopwekking beter in het systeem kan worden opgenomen. Daarnaast is de oprichting van een Transitieplatform SmartGrids aangekondigd, naast de al bestaande zeven transitieplatforms. Hiermee wordt de verdere coördinatie van onderzoek en ontwikkeling rond dit thema expliciet geplaatst binnen het kader van het energietransitiebeleid. Tevens heeft het platform opdracht om een visie te maken voor de ontwikkeling van lokale, slimme netwerken op de middellange- en lange termijn, daarbij tevens in een actieprogramma aangevend hoe deze visie gerealiseerd kan worden. Ten slotte wordt de diffusie van verschillende decentrale energieproductietechnologieën vanaf 2008 financieel ondersteund, zoals met de regelingen Duurzame Warmte en Stimulering Duurzame Energieproductie (SDE).

In de Innovatieagenda Energie wordt gesignaleerd dat de elektrische infrastructuur niet voldoende wordt aangepast aan het toenemende aanbod van individuele energie-opwekking en de toekomstige extra vraag naar elektriciteit door plug-in elektrische auto's. De overheid beoogt netwerkbeheerders te stimuleren om beter te anticiperen op deze ontwikkelingen en om daarbij gebruik te maken van onderlinge leereffecten (Ministerie van Economische Zaken, 2008b). Daarbij zullen de mogelijkheden worden onderzocht om te experimenteren met intelligente netwerken. Ten aanzien van dit onderwerp ligt de leidende rol met name bij het ministerie van Economische Zaken. Deze ambities, ideeën en activiteiten sluiten aan bij het Europees Strategisch Plan voor Energietechnologie (SET), dat eind 2007 door de Europese Commissie is uitgebracht (European Commission, 2007a). Dit plan concentreert zich rond zes thema's, waaronder de ontwikkeling van 'intelligente netten' voor elektriciteit. De Europese Commissie beoogt op Europese schaal samenhang aan te brengen in onderzoek en ontwikkeling. Nederland heeft de expliciete ambitie om op het gebied van elektriciteit en intelligente netwerken de rol van koploper te vervullen, inspelend op de sterke nationale kennispositie hierin (Ministerie van Economische Zaken, 2008a). Deze positie is met name te danken aan het feit dat Nederland nu al een relatief gedecentraliseerd energiesysteem heeft door de grote aantallen wkk-eenheden, geïnstalleerd in de jaren negentig.

Het Werkprogramma Schoon & Zuinig onderkent dat met name de uitbreiding van windenergie consequenties heeft voor (verzwaring van) de netten, balanshandhaving en de markt voor elektriciteit. De overheid voorziet voor zichzelf hier een coördinerende rol, met name voor het ministerie van

Economische Zaken. Daarnaast zal worden gewerkt aan innovaties voor elektriciteitsopslag, waarbij de nadruk sterk ligt op grootschalige opties. Het kabinet streeft voor 2020 naar 30% reductie in broeikasgassen ten opzichte van 1990, jaarlijks 2% energiebesparing en 20% duurzame opwekking van energie (Ministerie van VROM, 2008b).

1.4 Doelstelling, opbouw en onderzoeksmethode

In dit rapport staan de volgende vragen centraal, met tussen haakjes de paragraaf waarin ze verder worden uitgewerkt:

1. Hoe ziet de systeemoptie van een decentrale elektriciteitsvoorziening op basis van duurzame energiebronnen er uit?
 - a. Wat is de historische en maatschappelijke context voor verandering van het huidige energiesysteem naar een decentraal energiesysteem, met nadruk op het elektriciteitssysteem? (paragraaf 2.1)
 - b. Welke technologieën spelen een rol in een decentraal elektriciteitssysteem? (paragraaf 2.4)
 - c. Welke rol speelt de opbouw en architectuur van de infrastructuur in decentrale elektriciteitsvoorziening (paragraaf 2.2)
 - d. Wat zijn de belangrijkste spelers in de institutionele vormgeving van het elektriciteitssysteem en hun motieven voor handhaving of verandering van het systeem? (paragraaf 2.3)
 - e. Welke mechanismen spelen een rol in de afstemming tussen vraag en aanbod, en de sturing van een decentraal elektriciteitssysteem, en in hoeverre zijn deze anders dan in een centraal gestuurd elektriciteitssysteem? (paragraaf 2.2.2)
2. Hoe verhouden vraag en aanbod in een decentraal energiesysteem zich tot elkaar? Aan de hand van wijktypen en de inzet van verschillende decentrale technologieën voor vraag en aanbod wordt een aantal systeemvarianten geïntroduceerd (paragraaf 3.2), waarmee vraag- en aanbodpatronen van elektriciteit op woonwijkeniveau worden beschreven (paragraaf 3.3). Daarbij wordt specifiek gekeken naar de volgende deelvragen:
 - a. Wat zijn de potentiële elektriciteitspatronen op wijkniveau voor de verschillende systeemvarianten?
 - b. Welke verschuivingen in de netto vraagpatronen treden op in relatie tot het huidige patroon?
 - c. Welke technologieën spelen een rol in deze verschuivingen?
 - d. Hoe groot is de onbalans tussen vraag en aanbod in een decentraal energiesysteem en hoe kan dit op elkaar worden afgestemd?
3. Welke effecten kunnen worden geïdentificeerd bij de vormgeving van een decentraal elektriciteitssysteem langs de lijn van de beschreven systeemvarianten? Is het mogelijk een kwantitatieve indicatie te geven van dit effect? De effectbeoordeling wordt gegeven voor aantal indicatoren: milieudruk (paragraaf 4.2), ruimtelijke effecten (paragraaf 4.3), leveringszekerheid (paragraaf 4.4), voorzieningszekerheid (paragraaf 4.5) en investeringen (paragraaf 4.6).
4. Welke activiteiten kunnen worden geïdentificeerd in de voorontwikkelingsfase van decentrale elektriciteitsvoorziening, met nadruk op probleemperceptie (paragraaf 5.1), visieontwikkeling (paragraaf 5.2), onderzoeksactiviteiten

(paragraaf 5.3) en experimenten in de praktijk (paragraaf 5.4)?

5. Wat zijn de technische en institutionele barrières voor de ontwikkeling van een decentraal elektriciteitsysteem?
 - a. Welke ontwikkelingspaden zijn denkbaar in de transitie naar een decentrale elektriciteitsvoorziening? (paragraaf 6.1)
 - b. Welke institutionele barrières kunnen worden geïdentificeerd voor de ontwikkeling van een decentraal elektriciteitsysteem? (paragraaf 6.2)
 - c. Wat is de samenhang tussen technologieën en instituties in de ontwikkeling van een decentraal elektriciteitsysteem? (paragraaf 6.3)

De bovenstaande vragen omvatten een zeer brede analyse van het thema decentrale elektriciteitsvoorziening. In dit rapport is zoveel mogelijk tegemoet gekomen aan de gedachte dat elke deelvraag de toepassing van een specifieke onderzoeksmethode of evaluatie-tool oproept. Hoofdstuk 2 is grotendeels gebaseerd op literatuurstudie. Hoofdstuk 3 omvat een beschrijving van systeemvarianten en sluit daarbij aan op methoden voor *back-casting*. In samenwerking met KEMA zijn de systeemvarianten nauwkeurig beschreven en vervolgens doorgerekend met behulp van het Elektriciteitsvraagpatroon Model. De effectrapportage in hoofdstuk 4 kent verschillende methoden, afhankelijk van de indicatoren. De milieueffecten zijn berekend op wijkniveau aan de hand van emissiefactoren voor de verschillende technologieën. Ruimtelijke effecten, leveringszekerheid en voorzieningszekerheid zijn vooral kwalitatief beoordeeld en beargumenteerd. De evaluatie van investeringen is gebaseerd op literatuurstudie. De institutionele analyse in hoofdstuk 5 is een nieuwe toepassing van een elders ontwikkeld theoretisch raamwerk. De techniekanalyse volgt grotendeels uit literatuur. De analyse in hoofdstuk 6 sluit aan bij de transitie-evaluatiemethodiek zoals die eerder binnen het MNP en PBL is ontwikkeld.

Deze studie wordt afgebakend met een focus op elektriciteit, maar met inachtneming van andere energiesystemen waar dat relevant is. Met name de interactie met warmtesystemen in de gebouwde omgeving kan belangrijk zijn in de vormgeving van een toekomstig energiesysteem. Een uitgebreide verkenning van systeemopties voor warmtesystemen volgt in Janssen en Ros (2009). De uitwerking van decentrale energiesystemen wordt gemaakt aan de hand van systeemvarianten, waarin de nadruk ligt op woonwijken. Er wordt geen verdere uitwerking gemaakt met de (in zichzelf zinvolle) koppeling met industriële partijen. De systeemvarianten hanteren 2050 als richtjaar, maar niet als exact referentiepunt (en onder andere daarin onderscheiden systeemopties zich van scenario's).

Beschrijving decentrale elektriciteitssystemen en context voor ontwikkeling

2.1 Context voor veranderingen in het elektriciteitssysteem

2.1.1 Ontwikkeling van het Nederlandse elektriciteitsnet als grootschalig systeem

Het elektriciteitssysteem in Nederland is sinds het eind van de negentiende eeuw in concurrentie met gas ontwikkeld vanuit lokale publieke energiecentrales op gemeentelijke schaal, eerst vooral ten behoeve van openbare verlichting (Verbong, 2000). In de vorming van dit systeem concurreerden wisselstroom- en gelijkstroomssystemen, waarbij wisselstroom veel betere kansen bood voor schaalvergroting, omdat elektriciteit over veel grotere afstanden getransporteerd kan worden. De schaalvergroting bood vervolgens weer kansen om de afzet te verbreden, waardoor fluctuaties in vraag en aanbod makkelijker te ondervangen zijn (Hesselmans en Verbong, 2000). Aanvankelijk waren de belangrijkste spelers in het elektriciteitssysteem de gemeenten en particuliere elektriciteitsbedrijven, maar door de expansie van de netwerken namen provincies na de Eerste Wereldoorlog deze rol steeds meer over met de oprichting van publieke elektriciteitsbedrijven voor zowel productie als distributie. Met de ontwikkeling van hoogspanningsnetten werd in het interbellum de algehele elektrificatie van Nederland een feit, grotendeels langs provinciale lijnen en vaak nog zonder onderlinge koppeling van de netwerken (Hesselmans et al., 2000a). Na de Tweede Wereldoorlog kreeg de koppeling van deze regionale netten een sterke impuls door de samenwerking van de provinciale elektriciteitsbedrijven in de SEP, de samenwerkende energieproductiebedrijven. Hierdoor werd landelijke afstemming in productie en distributie mogelijk, waardoor de productie, de efficiëntie en de betrouwbaarheid van het elektriciteitssysteem sterk kon toenemen. Deze integratie en schaalvergroting bleef de allesoverheersende tendens in de elektriciteitsvoorziening in de navolgende decennia (Hesselmans et al., 2000b).

Dergelijke grootschalige technische systemen bepalen vaak sterk hun eigen evolutie en kennen een zeker determinisme in hun ontwikkeling op basis van eerder gemaakte keuzes

(Hughes, 1987). De elektriciteitsvoorziening in Nederland en andere Europese landen was een groot deel van de twintigste eeuw onderhevig aan een autonoom lijkende expansie en schaalvergroting. Deze werd gedreven door schaalvoordelen, de wisselwerking met andere energiesystemen (met name gasvoorziening en de inbedding van warmtekrachtkoppeling) en veranderingen in de maatschappelijke context als gevolg van verdere Europese integratie, marktwerking en toenemende zorg voor het milieu (Verbong, 2000). In grootschalige systemen ontstaan echter altijd achterblijvende elementen, die functioneren als barrières voor verdere ontwikkeling (Hughes, 1987). In de sterk aanbodgedreven publieke energievoorziening bleken zulke barrières te liggen in de flexibiliteit om in te spelen op milieuproblemen, op toenemende marktwerking en op specifieke wensen van afnemers. Sinds eind jaren tachtig is het systeem van de energievoorziening in Nederland geleidelijk veranderd van een publieke nutsvoorziening naar een open geliberaliseerde energiemarkt, met als belangrijkste doelstelling om een zekere mate van concurrentie te introduceren als een middel om de efficiëntie te verhogen en om klantgerichtheid en keuzevrijheid te bevorderen. De zorg voor elektriciteitsinfrastructuur is daarmee onder de hoede gekomen van diverse partijen onder meerdere bestuurslagen (WRR, 2008).

Het huidige nationale elektriciteitsnetwerk is opgezet rond een aantal grote elektriciteitsproductiecentrales, met daarnaast een vrij groot aandeel industriële wkk-installaties, grootschalige eenheden van stadsverwarming en warmte-distributie, en kleinschalige warmtekrachtkoppeling in bijvoorbeeld de tuinbouw of voor ziekenhuizen (ECN en MNP, 2005). Bovendien is het elektriciteitsnetwerk steeds sterker gekoppeld met omliggende landen. Deze infrastructuur is van hoge kwaliteit, met een zeer grote fijnmazigheid en een hoge betrouwbaarheid in termen van uitvalduur van elektriciteitsvoorziening (Ministerie van Economische Zaken, 2008a).

2.1.2 Context voor de ontwikkeling van decentrale energievoorziening

Het huidige elektriciteitsnetwerk in Nederland is ongeveer vijftig jaar oud en nadert daarmee het eind van zijn technische levensduur (Ministerie van Economische Zaken, 2008a). Inschattingen over de termijn van deze afschrijving lopen nogal uiteen, maar op afzienbare termijn zullen grootschalige investeringen zeker nodig zijn voor de vernieuwing en vervanging van het netwerk. Om een goed functionerende infrastructuur op de lange termijn te garanderen is het cruciaal om rekening te houden met een aantal fundamentele ontwikkelingen.

Ten eerste is de markt voor elektriciteitsvoorziening getransformeerd van een publieke nutsvoorziening naar een complexe en gedereguleerde markt met toezichhouders. Het elektriciteitsnetwerk is daarmee niet alleen meer de ondergrond voor de distributie van elektriciteit naar consumenten, maar ook voor handel tussen contractpartijen, zowel binnen Nederland als internationaal. De transmissie en distributie van elektriciteit in het netwerk zijn daardoor lastiger voorspelbaar en vertonen grotere fluctuaties, waardoor de stabiliteit van het netwerk meer onder druk komt te staan (Meeuwssen, 2007). In anticipatie op deze ontwikkeling wordt het Nederlandse netwerk steeds hechter geïntegreerd met omliggende Europese landen. Daarnaast zijn de eigendomsverhoudingen tussen enerzijds het beheer van elektriciteitsnetwerken en anderzijds de energieproductie en -levering veranderd als gevolg van de wettelijk verplichte ontkoppeling. De invloed van de netwerkbeheerders op de ontwikkeling van energiecentrales is hierdoor afgenomen, waardoor het netwerk op nationaal niveau niet altijd meer op het meest optimale (efficiënte) niveau kan functioneren (Meeuwssen, 2007). Balanceren van het netwerk, waarbij vraag en aanbod exact in evenwicht moeten zijn, wordt daardoor steeds lastiger. Elektriciteitsproducenten die goed in kunnen springen op fluctuaties of bereid zijn om zo nodig productiecapaciteit tijdelijk stil te leggen creëren daarmee een voordeel op de elektriciteitsmarkt, waardoor op sommige momenten een prijs kan ontstaan voor *afzien* van levering om zo de systeembalans te kunnen handhaven.

Ten tweede neemt duurzame en decentrale energieproductie in het energiesysteem een steeds belangrijker plaats in. De inpassing van windturbines aan het netwerk versterkt het bovenstaande probleem van netbalancing, doordat de elektriciteitsproductie lastig is bij te sturen en bovendien sterk kan fluctueren met de beschikbare windenergie. Bovendien ontwikkelt op huishoudelijk niveau, door de ontwikkeling van fotovoltaïsche zonne-energie (PV), de wens om elektriciteit aan het net terug te kunnen leveren. Door alle energiebedrijven zijn inmiddels teruglevertarieven vastgesteld voor kleinschalige elektriciteitsproducenten (huishoudelijk niveau), waardoor technisch, economisch en institutioneel tweerichtingsverkeer van energiestromen ontstaat en consumenten zich in toenemende mate als producenten kunnen profileren. Het huidige niveau van decentrale productie kan nog goed in het elektriciteitsnetwerk worden opgevangen zonder dat er instabiliteit ontstaat, maar voorbij een bepaalde drempel zullen investeringen nodig zijn om het (laagspannings)net de capaciteit te geven voor een adequate opname van terugleveringen. Lokaal is dit in Nederland ook al het geval in gebieden met veel windenergie. Door de sterke fluctuaties in productie en de beperkte mogelijkheden tot bijsturing van duurzame energieproductie op basis van zon en wind zal bovendien extra productiecapaciteit of andere voorzieningen (met name opslag) geïnstalleerd moeten worden om afdoende en op elk moment te kunnen voorzien in de vraag (Meeuwssen, 2007), een kwestie die ook beleidsmatig wordt onderkend (Ministerie van VROM, 2008b).

De ontwikkeling van decentrale elektriciteitsnetwerken in de vorm van intelligente netwerken is een strategische mogelijkheid om in bovengenoemde context en met behoud van voorzieningszekerheid een groot aandeel duurzame energietechnologieën in het elektriciteitssysteem in te bouwen. Een intelligent netwerk kenmerkt zich door de internetachtige architectuur van het netwerk, waarbij alternatieve controlefilosofieën nodig zijn op basis van geavanceerde technologische mogelijkheden (Scott et al., 2008). In een dergelijk systeem ontwikkelt de consument zich als co-producent van elektriciteit, waardoor een decentralisatie van de netwerkcontrole ontstaat, mede vormgegeven door de technologische mogelijkheden voor controle en monitoring van elektriciteit en informatie in het netwerk. Daardoor verandert

Duurzame elektriciteit in Nederland

De binnenlandse netto-elektriciteitsproductie uit duurzame bronnen was in 2006 in Nederland 6,5% van het netto binnenlands elektriciteitsverbruik, in 2008 gestegen tot 7,5%. Ter vergelijking (2005): in Duitsland bedroeg dit 12,0%, in België 2,5%, in Denemarken 25,3% en gemiddeld in de EU-27 13,7%. Het overgrote deel van de Nederlandse productie van duurzame elektriciteit bestaat uit windenergie (2733 GWh) en verschillende technische opties op basis van biomassa (4715 GWh) (getallen voor 2006). Water (106 GWh) en zonnestroom (35 GWh) leveren een relatief kleine bijdrage, terwijl duurzame opties als geothermie en getijdenenergie geen rol van betekenis spelen (CBS, 2007). Slechts een klein deel van de duurzame elektriciteitsproductie vindt decentraal op huishoudelijk of wijkniveau plaats.

De overheid streeft naar 9% duurzame elektriciteitsproductie voor 2010. In de referentieraming uit 2005 wordt voor 2020, afhankelijk van het scenario, een stijging voorzien naar 16,3-23,6% in 2020. Deze toenames zijn met name toe te schrijven aan windparken op zee, vervanging van oude kleinere windturbines door nieuwe grotere turbines op land, en door het meestoken van biomassa in kolencentrales. De inschatting is dat het aandeel PV-systemen in de energieproductie in 2020 relatief laag blijft door een gebrek aan beleidsprikkele (ECN en MNP, 2005), maar dit wordt mogelijk ondervangen door de meer recent ingestelde SDE-subsidies.

de maatschappelijke en institutionele context van de elektriciteitsproductie, met name in het netwerkbeheer en ten aanzien van gedragsveranderingen als gevolg van verschuivende economische drijfveren bij betrokken actoren. Economische, sociale, institutionele en technische ontwikkelingen hangen dus integraal samen. Ondanks deze complexiteit ontstaat inmiddels in toenemende mate een gedeelde visie op decentrale elektriciteitsvoorziening (European Commission, 2006a; Scott et al., 2008). Dat biedt mogelijkheden om in de komende hoofdstukken een decentraal energiesysteem te beschrijven, het vraagstuk van afstemming tussen vraag en aanbod verder te verkennen en een globale inschatting te maken van verschillende effecten. De veranderingen die nodig zijn om een dergelijke transitie te maken worden in hoofdstuk 6 verkend.

Voor een evaluatie van decentrale ontwikkelingen in de elektriciteitsvoorziening is het van belang om de warmte/koude-vraag in de gebouwde omgeving als context mee te nemen. Circa 70% van het primaire huishoudelijk energieverbruik wordt gebruikt voor hoogwaardige (16%) en laagwaardige (55%) verwarming. Elektriciteitsvoorziening vergt circa 20% van het huishoudelijk energieverbruik (data op basis van Milieu- en Natuurcompendium (2008) in combinatie met Ministerie van VROM, 2007). Dit betekent dat verbetering van de energiehuishouding in de gebouwde omgeving in principe begint met de warmtevoorziening, bijvoorbeeld door bijvoorbeeld de bouw van passiefhuizen, juiste oriëntatie op de zon, verbeterde isolatiemaatregelen in nieuwbouw en bestaande bouw en betere afstemming van energietechnieken in het huis. Voor de elektriciteitshuishouding betekent de beperking in de warmtevraag op de lange termijn dat warmtevoorzienende technologie, zoals warmtepompen, zonneboilers en warmte/koude-opslag, steeds kleiner gedimensioneerd kan zijn. Voor micro-wkk betekent dit bovendien dat co-productie van elektriciteit steeds beperkter kan zijn. Daar staat tegenover dat het huishoudelijk elektriciteitsverbruik steeds verder zal toenemen (CPB et al., 2006b). In onderhavig rapport worden verschillende systeemvarianten voor de decentrale huishoudelijke elektriciteitsvoorziening uitgewerkt; zie Janssen en Ros (2009) voor een uitwerking van warmte en koeling in de gebouwde omgeving.

2.2 Balancerings en sturing in decentrale elektriciteitssystemen

2.2.1 Systeembalancerings

Een groot aantal duurzame energietechnologieën vergt een decentrale inpassing in het elektriciteitsnet, met een koppeling op midden- en laagspanningsniveau. In dat geval komen productie en consumptie van elektriciteit veel dicht bij elkaar te liggen. Dit levert om een aantal redenen belangrijke uitdagingen op voor de afstemming tussen vraag en aanbod:

- Elektriciteitsproductie met duurzame energietechnologieën op basis van zon en wind is doorgaans lastig bij te sturen als er fluctuaties optreden in de vraag.
- De fluctuaties in de vraag zijn op lokale schaal relatief groot, omdat ze niet worden afgevlakt door ontwikkelingen elders. Het opvangen van dergelijke fluctuaties vergt een snelle bijsturing van de productie, de mogelijkheid

om bij te kunnen sturen in de vraag, of de mogelijkheid elektriciteit op te slaan die bij pieken in de vraag weer snel kan worden ingezet.

- Consumenten die productietechnologieën in beheer hebben kunnen zich ontplooiën als co-producent van energie, waardoor sterke veranderingen kunnen optreden in de marktmechanismen voor elektriciteit.

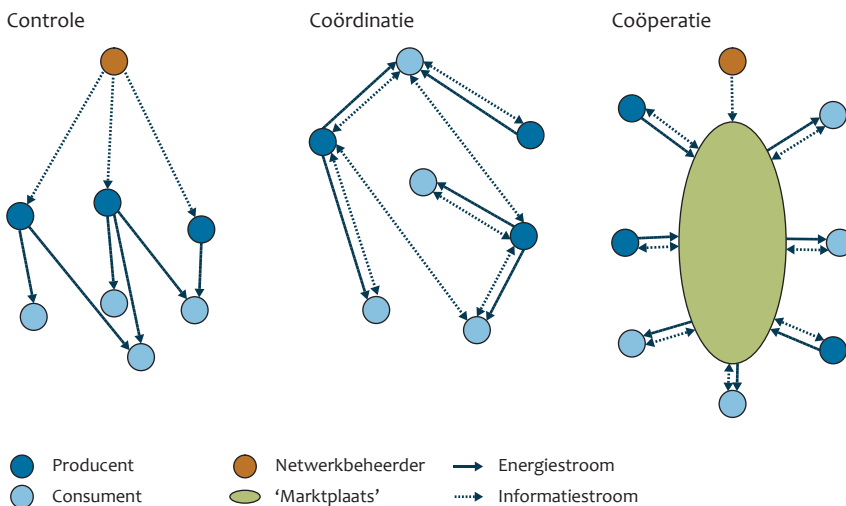
Balancerings van het huidige elektriciteitssysteem is grotendeels gebaseerd op de mogelijkheid om productie in met name de gasgestookte centrales aan te passen aan de van te voren ingeschatte vraag. Deze vraag wordt ingeschat op basis van kennis van reguliere dag- en seizoensvraagpatronen en op basis van aangemelde vraagpieken door grote industriële klanten. Daarnaast kunnen sommige grote industriële klanten ten behoeve van de balancerings en tegen een forse vergoeding tijdelijk de elektriciteitsvraag terugschroeven. Voor het afstemmen van vraag en aanbod ten behoeve van de systeembalancerings in een decentraal netwerk bestaan de volgende algemene mogelijkheden:

- Beïnvloeding van de *vraag* naar elektriciteit, bijvoorbeeld door tijdelijke afkoppeling van vragende partijen, door vraagspreiding (bijvoorbeeld in het opladen van elektrische auto's) of door het articuleren en afremmen van vraag met behulp van prijsmechanismen.
- Beïnvloeding van het *aanbod* van elektriciteit door het verhogen of verlagen van de inzet van productie-eenheden. Voor met name wind- en zongestuurde technologieën is het niet eenvoudig om de inzet bij piekvragen te vergroten, maar tijdelijke afkoppeling is wel mogelijk.
- *Opslag* van energie kan gebruikt worden om tijdens pieken in de productie (of dalen in de vraag) de geproduceerde energie tijdelijk op te slaan in bijvoorbeeld accu's, terwijl deze bij dalen in de productie (of pieken in de vraag) weer kan worden ingezet. Een voorbeeld is warmte/koude-opslag, waarbij in de winter warmte en in de zomer koeling wordt geleverd.
- *Conversie* van energiestromen omvat de omzetting van bijvoorbeeld elektriciteit in warmte. Een dal in de vraag naar de ene energiestroom kan zo worden gebruikt om bij te leveren aan pieken in de vraag naar andere energiestromen.

In aanvulling hierop is een verdere integratie denkbaar tussen verschillende energiesystemen, met name ten aanzien van elektriciteit en warmte (zie ook paragraaf 2.5).

2.2.2 Systeemsturing en regelstrategieën

Afstemming en controle in een decentraal elektriciteitsnetwerk vergt een visie op de mechanismen van sturing en coördinatie, met als uitgangspunt het balanceren van vraag en aanbod. In een gecentraliseerd netwerk vindt de operationele controle van bovenaf plaats. Bij een gedecentraliseerd netwerk verandert dit in een lokale coördinatie op laagspanningsniveau. Bijsturing in vraag en aanbod is om een aantal redenen lastig in een decentraal elektriciteitssysteem. Ten eerste zijn de fluctuaties groter in een systeem met veel opwekkers op basis van zonne- of windenergie. Ten tweede is niet op voorhand vastgesteld hoe de verhoudingen van eigendom en controle van elektriciteitsproductie in een dergelijk systeem zullen zijn (zie hiervoor ook paragraaf 6.1). Ten



derde kunnen verschillende partijen zich profileren als zowel consument en producent, met hoge eisen ten aanzien van de flexibiliteit van het systeem om in te spelen op fluctuaties in vraag en aanbod. Grosso modo zijn in een decentraal systeem met een afstemmingsvraagstuk drie regelstrategieën denkbaar: controle, coördinatie en coöperatie.

- **Controle** van een decentraal energiesysteem betekent dat de sturing van bovenaf of door een regulerende instantie binnen het systeem wordt georganiseerd. De netbeheerder behoudt dan de controle over de inzet van decentrale productie-eenheden, inclusief de eenheden die in huishoudens zijn geplaatst. Afstemming tussen afzonderlijke huishoudens kan worden gecoördineerd op basis van scenario's voor bijvoorbeeld energieprijzen en consumptiepatronen (Negenborn, 2007). Vaak wordt verwezen naar het concept van de virtuele centrale, waarin decentrale productie-eenheden functioneren als modules die op afstand worden aangestuurd ten behoeve van de afstemming met de algehele elektriciteitsproductie (Overdiep, 2005; Scheepers et al., 2007) (zie ook paragraaf 2.4.5).
- **Coördinatie** binnen een decentraal energiesysteem legt meer nadruk op de onderlinge afstemming tussen actoren en/of energieproductie-eenheden. Deze afstemming kan plaatsvinden in onderlinge en gelijkwaardige interactie, vergelijkbaar met *peer-to-peer*-interactie op internet. In de praktijk kan dit betekenen dat de decentrale productie van elektriciteit wordt ingeschakeld in antwoord op een decentrale vraag elders in het systeem (Technology Review, 2009a). Een groot voordeel is dat er geen kritieke elementen meer zijn voor het functioneren van het systeem (Duan, 2008).
- **Coöperatie** tussen de systeemelementen vindt plaats in een variant van controle en coördinatie, door de afstemming tussen elektriciteitsvragende actoren en elektriciteitsproducerende modules plaats te laten vinden via een *broker*-mechanisme. Dit mechanisme introduceert een marktplaats tussen de eenheden, waar op basis van prijs vraag en aanbod zodanig op elkaar worden afgestemd dat er een evenwicht ontstaat en de onbalans dus is vermeden (Powermatcher, 2008). Het marktmechanisme kan ver-

taald worden in een geautomatiseerde sturing en optimalisatie van het systeem is in een dergelijke setting relatief eenvoudig en efficiënt.

In Figuur 2.1 worden deze aansturingssystemen schematisch weergegeven. Een belangrijk onderscheid tussen de regelstrategieën is de schaal waarop de netwerkautoriteit functioneert. Voor balancering van het netwerk op hogere schaalniveaus worden doorgaans langere tijdschalen en meer geaggregeerde modellen beschouwd, terwijl bij regeling op kleiner schaalniveau meer gedetailleerde modellen en kortere tijdschalen nodig zijn. Een decentrale regelstrategie zal vaak gebaseerd zijn op de aansturing van een deelnetwerk, waarbij de afstemming tussen de verschillende deelnetwerken een cruciaal element is voor de hogere netwerkbalancering (Negenborn, 2007).

2.3 Belangrijke spelers in de vormgeving van het elektriciteitsstelsel

De primaire spelers in de elektriciteitssector in Nederland zijn de producenten, distributeurs, leveranciers, netbeheerders, afnemers en de overheid, die alle met eigen doelstellingen en aspiraties opereren (Scott et al., 2008). De Energiekamer, een dienst van de Nederlandse Mededingingsautoriteit, houdt toezicht op de energiemarkt.

De *netbeheerders* zijn verantwoordelijk voor het beheer van de netwerken (inclusief de fysieke aansluitingen) en voor de afstemming van vraag en aanbod. TenneT is als (semi)overheidsorganisatie de Nederlandse Transmission System Operator (TSO) en als zodanig verantwoordelijk voor de veiligheid en betrouwbaarheid van de nationale elektriciteitsvoorziening. Bovendien is TenneT de beheerder van de Nederlandse hoogspanningsnetwerken van 220 kV en 380 kV, en van het regionale net in Zuid-Holland. De overige netwerken op middenspanning en laagspanning zijn in beheer van regionale netbeheerders, zoals Liander (voorheen Continuum), Enexis (voorheen Essent Network) en Stedin (voorheen Eneco

Netbeheer). Deze beheerders zijn bij de liberalisatie van de Nederlandse elektriciteitsmarkt afgesplitst van de producenten en hebben bij wet een meerderheidsbelang van de overheid. In hun gebied zijn de beheerders monopolist. Onbalans als gevolg van grote vraagpieken wordt door TenneT en de andere netbeheerders financieel ontmoedigd.

Productie van elektriciteit in Nederland gebeurt grotendeels in centrales, gestookt op kolen voor de basislast of aardgas voor het ondervangen van pieken en fluctuaties. De program-maverantwoordelijke (PV-partij) koopt elektriciteit in op de energiebeurs (APX), bij een andere partij, direct bij een centrale (die soms in eigendom is van een PV-partij) of in het buitenland. Onverwachte bijstellingen ten behoeve van netwerkbalancing zijn zeer kostbaar, waardoor de PV-partij een prijsrisico draagt en geld verdient aan een adequate inschatting van de vraag naar elektriciteit. Om deze vraag te kunnen beïnvloeden ontstaan prijspremies voor inschakeling of juist uitschakeling van vraag op bepaalde momenten, om balans te handhaven en te kunnen voorzien in de (zo goedkoop mogelijk ingekochte) elektriciteit. *Leveranciers* kopen elektriciteit in bij de PV-partij en leveren deze met een servicepakket aan de consument, tegen een verkoopprijs die hoger ligt dan de inkoopprijs. Deze prijzen fluctueren voor kleinverbruikers doorgaans maar weinig, waardoor stabiele inkomsten ontstaan. Wel bestaan er prijsverschillen tussen leveranciers onderling. De leverancier bepaalt zelf welke PV-partij hij inschakelt. In een decentraal elektriciteitsnetwerk kan de PV-partij in het meest extreme geval veranderen in een voorziener van pieklasten, als achtervang voor het decentrale netwerk. Daarnaast is het ook denkbaar dat de ontwikkeling van decentrale energienetwerken een business case is voor de PV-partij en de leveranciers, al ligt het meer voor de hand dat de (regionale) netbeheerders hier het voortouw nemen. *Consumenten* hebben vrije keuze voor de leverancier. Ze kunnen dus overstappen als ze een betere prijs bedingen bij een andere leverancier of de service elders hoger inschatten. Voor consumenten zijn prijs, kwaliteit, service en zekerheid de belangrijkste elementen van het te leveren elektriciteitspakket. Deze elementen zullen ook in een decentraal energienetwerk leidend zijn.

De overheid hanteert als primaire motieven de leveringszekerheid, betaalbaarheid en milieuvriendelijkheid van de energievoorziening. Ook bij decentrale energievoorziening dienen deze motieven als voorwaarden voor ontwikkeling. Naast alle bovenstaande partijen kunnen verschillende andere partijen worden geïdentificeerd als stakeholder in de ontwikkeling van decentrale netwerken of onderdelen daarvan, zoals aandeelhouders, productontwikkelaars, onderzoeksinstituten, ICT-ontwikkelaars, financiers en verzekeraars (Scott et al., 2008).

Bij een decentralisatie van de energievoorziening is ook een toenemende interactie met de gasvoorziening denkbaar, met name bij een verdere ontwikkeling van micro-wkk. De beheerder van het Nederlandse gasnet is de Nederlandse Gasunie. De verkoop van aardgas is in handen van GasTerra, een afsplitsing van de Gasunie. Dit is een belangrijke partij in de ontwikkeling van micro-wkk, waardoor GasTerra zich een rol creëert in de ontwikkeling van de samenhang tussen warmte- en elektriciteitsvoorziening op decentraal niveau.

2.4 Technologieën in een decentraal energiesysteem

2.4.1 Technologieën voor productie van elektriciteit op huishoudelijke schaal

In dit rapport wordt vooral ingegaan op technologie die kan worden geïntegreerd in de gebouwde omgeving. Dat betekent dat in dit rapport geen aandacht wordt besteed aan grote windturbines op land, op afstand van de woonomgeving. Desalniettemin is dat ook een vorm van decentrale elektriciteitsproductie, waarvoor elementen die verband houden met de aanpassingen van het net en het tweerichtingsverkeer van elektriciteit en informatie van de hier beschreven systeemoptie van toepassing zijn.

Fotovoltaïsche (PV-) systemen

Fotovoltaïsche systemen (PV, van photovoltaic) wekken elektriciteit op met behulp van zonlicht, een volledig duurzame bron van energie. Elektriciteit wordt opgewekt door middel van zonnecellen, die direct licht omzetten in elektriciteit. Er bestaan verschillende zonneceltechnieken, met verschillende rendementen en verschillende stadia van ontwikkeling. Momenteel is de multikristallijne siliciumcel met 15%-20% rendement het meest in gebruik, maar voor de toekomst (na 2020) zijn ook hoge verwachtingen voor dunne-filmtechnieken voor toepassing van koper-indiumselenide (of sulfide) of cadmiumtelluride. Nog verder in de toekomst liggen beloftes voor organische en polymere cellen, die nu alleen nog in het laboratorium te vinden zijn. Zonnecellen worden meestal in panelen geplaatst, soms in verschillende lagen om het rendement te verhogen. Dit maakt PV-systemen bij uitstek geschikt voor modulaire toepassingen. In de kinderschoenen staat een meer geïntegreerde toepassing van cellen, bijvoorbeeld in dakpannen of anderszins op gebouwen. PV-systemen produceren gelijkstroom, die tijdelijk kan worden opgeslagen of kan worden omgezet in wisselstroom met behulp van een zogenoemde 'inverter'. Naast PV-systemen zijn ook thermische systemen ontwikkeld, die gebruik maken van zonnewarmte (zonneboilers). Beide systemen kunnen worden geïntegreerd in PV-thermische systemen (PVT) (Montfoort en Ros, 2008).

Voor de lange termijn worden PV-systemen met een potentieel vermogen van 200-300 W_p per m² voorzien. Voor 2050 is in Nederland een totaal *technisch potentieel* in de gebouwde omgeving denkbaar van 80-120 GW_p (Menkveld, 2004; Montfoort en Ros, 2008). Schattingen voor het *maximaal realiseerbaar potentieel* voor 2050 in heel Nederland zijn afhankelijk van beperkingen in de groei van de productiecapaciteit en lopen uiteen van 49 GW_p (Menkveld, 2004) tot 75 GW_p (Platform Duurzame Elektriciteitsvoorziening en Platform Nieuw Gas, 2007), maar met onzekerheden variërend van 7-180 GW_p, zij het dat voor de hoge schatting ook PV-toepassingen buiten de gebouwde omgeving zijn meegenomen (Menkveld, 2004). Elektriciteitsproductie met behulp van PV in Nederland in 2040 kan in een optimistisch scenario oplopen tot 2,4 TWh/jaar (CPB et al., 2006a), met een technisch potentieel van 68-108 TWh/jaar op de nog langere termijn bij inbedding van zonnecellen op *alle* daken in de gebouwde omgeving in Nederland, vergelijkbaar met 60-95% van het huidige elektriciteitsgebruik in Nederland (Montfoort en Ros, 2008).

Micro-wkk

Warmtekrachtkoppeling (wkk) is een techniek voor de gecombineerde opwekking van warmte en elektriciteit. Op de schaal van een huishouden is bij toepassing sprake van micro-wkk. Micro-wkk combineert hoogrendement (hr) warmteproductie met reguliere warmtekrachtkoppeling, waarbij de warmtevraag in beginsel leidend is. Grootschaliger varianten voor utiliteit of blokverwarming worden doorgaans gevat onder de noemer mini-wkk. Door een hoge efficiëntie in de totale energieproductie levert micro-wkk een besparing op in de CO₂- en NO_x-emissies (Elzenga et al., 2006). Er zijn verschillende technieken in ontwikkeling, met voorop de Stirling motor, de gasturbine met name voor mini-wkk, en brandstofcellen voor in de verdere toekomst (Pehnt et al., 2006). Deze technieken onderscheiden zich onder andere door verschillen in elektriciteitsproductie in verhouding tot de warmteproductie.

Op huishoudelijk niveau kan opslagcapaciteit nodig zijn om de afstemming tussen warmte- en elektriciteitsproductie te faciliteren. Micro-wkk's met een Stirling- of gasmotor worden in beginsel aangedreven met aardgas, al zijn voor Stirling-motoren ook andere brandstoffen denkbaar. Brandstofcellen worden gedreven door waterstof, dat in de toekomst op afstand centraal kan worden gevormd in waterstofcentrales, maar ook decentraal kan worden omgezet uit aardgas met behulp van (dure) reformers.

Voor huishoudens wordt micro-wkk momenteel gepresenteerd als opvolger van hoogrendement-ketels (Overdiep, 2005). Om in de gemiddelde huishoudelijke warmtevraag te kunnen voorzien is een eenheid van 15-22 kW_{th} nodig, maar met een fors buffervat of een ondersteunende piekbrander kan worden volstaan met circa 10kW_{th} (Elzenga et al., 2006). Bij toepassing van een reguliere Stirling-motor in een micro-wkk voor de gehele huishoudelijke warmtevraag kan dan in een gemiddeld huidig huishouden op jaarbasis worden voorzien in circa tweederde van de elektriciteitsvraag, tegen bijna 30% extra invoer van aardgas (Faber et al., 2008). Dit leidt per saldo tot een lagere energierekening, wat een belangrijke drijfveer kan zijn voor de grootschalige toepassing van micro-wkk.

De verschillende micro-wkk-technieken onderscheiden zich in termen van emissies, welke voor brandstofcel-micro-wkk's in alle gevallen het laagst zijn. Daarnaast zijn er verschillen in de co-productie van elektriciteit: bij Stirling-motoren is de verhouding tussen productie van warmte en kracht (i.e. elektriciteit) 9:1 tot 4:1, voor brandstofcellen is dit 2:1 tot 1:1. De huidige (2005) verhouding in jaarlijkse warmte- en elektriciteitsvraag van een gemiddeld huishouden in Nederland is circa 4,3:1 (op basis van Ministerie van VROM, 2007). Stirling-micro-wkk wordt in het algemeen dan ook gedimensioneerd op de warmtevraag, met co-productie van elektriciteit. Voor micro-wkk op basis van brandstofcellen is ook een dimensionering op elektriciteitsvraag mogelijk, met co-productie van warmte. Dimensionering van brandstofcel-micro-wkk op basis van warmtevraag zal een overschot aan elektriciteit leveren, waardoor teruglevering aan het net of opslag veel groter wordt dan bij de eerste generatie micro-wkk's. Voor de toekomst wordt voorzien dat de huishoudelijke warmte-

vraag afneemt en de elektriciteitsvraag toeneemt (CPB et al., 2006b; Elzenga et al., 2006). Dat betekent dat micro-wkk op basis van brandstofcellen in de toekomst beter aansluit op de verhouding tussen warmte- en elektriciteitsvraag. Een algemene inschatting is dat micro-wkk op basis van de Stirling-motor een transitietechnologie is op weg naar duurzame, niet-fossielgestookte technologieën of naar elektrisch gedreven warmtevoorzieningen (Menkveld, 2004; Feenstra, 2008). Voor de verdere toekomst wordt micro-wkk voorzien op basis van brandstofcellen in de context van een mogelijke 'waterstofeconomie'.

Kleinschalige windenergie in de gebouwde omgeving ('urban wind')

Kleine windturbines zijn speciaal ontwikkeld voor de toepassing op of naast gebouwen. Dit betekent dat ze optimaal functioneren onder het windregime in de gebouwde omgeving en plotselinge windvlagen en turbulenties goed kunnen weerstaan. Het vermogen van deze turbines ligt tussen 0,5 en 20 kW. Dit soort turbines wordt niet in plaats van grote turbines gebruikt, maar voor de opwekking van energie op locaties waar geen ruimte is voor grote turbines. De turbines zijn qua patroon van elektriciteitsproductie in de tijd vaak complementair aan zonne-energie (Cace en Ter Horst, 2007).

Met name in Nederland, het Verenigd Koninkrijk en Frankrijk zijn verschillende turbine-typen in een relatief vroeg stadium van ontwikkeling. Daarbij wordt een onderscheid gemaakt van molens op de horizontale as, zoals klassieke windmolens, en turbines waarbij de molen verticaal geplaatst is. Dit laatste biedt het voordeel dat de molens altijd goed geplaatst zijn ten opzichte van de windrichting, wat ze gemakkelijker inpasbaar maakt in de gebouwde omgeving. De kosten voor urban wind liggen in de orde van enkele duizenden euro per kW (vergelijk circa 1000 euro per kW voor grote turbines op land). In Nederland zijn per 2008 nog slechts ruim honderd voornamelijk solitaire turbines geplaatst. Daarnaast zijn verschillende projecten in uitvoering of voorbereiding. De terugverdientijden voor gebruikers op basis van een recente proef in Zeeland belopen dertig jaar in het meest gunstige geval, oplopend tot enkele honderden jaren voor andere modellen (Energiegids, 2008b, 2009c). Momenteel is er geen SDE-subsidie voor urban windturbines, maar er zijn wel enkele lokale steunmaatregelen. Daar staat tegenover dat urban wind turbines nog aan het begin van hun ontwikkeling staan en dat kostendalingen in de toekomst mogen worden verwacht, met name als serieproductie van de grond komt.

Onderzoek naar verdere ontwikkeling van urban-windturbines is nog vrij gefragmenteerd en kleinschalig. Als belangrijkste knelpunten voor grootschalige toepassing worden benoemd: de nog vroege fase van ontwikkeling, het gebrek aan kwaliteitsnormen en informatie, het ontbreken van overheidssteun voor projecten, de slechte locatiekeuze, de hoge kosten, de overschatting van positieve effecten (opbrengsten), de onderschatting van negatieve effecten (geluid) en een moeizame vergunningverlening. De inschattingen voor het potentieel van urban wind lopen sterk uiteen, van 60-517 MW voor 2020 en van 116-1161 MW voor 2040 (Cace en Ter Horst, 2007).

2.4.2 Technologieën met grote invloed op huishoudelijke vraag naar elektriciteit

Warmtepompen

Hoewel in dit rapport niet expliciet op de warmtesystemen in de gebouwde omgeving wordt ingegaan, kan de warmtevoorziening (en koeling) niet los worden gezien van de elektriciteitsvoorziening. Dat geldt niet alleen voor micro-wkk, maar ook voor de elektrische warmtepomp. Een elektrische warmtepomp gebruikt elektriciteit om laagwaardige warmte verder op te werken tot een goed bruikbare temperatuur voor ruimte- of tapwaterverwarming. De temperatuurbron kan ventilatielucht zijn, maar ook een geboorde bron of een aquifer. De efficiëntie van een elektrische warmtepomp ligt aanzienlijk hoger dan die van de huidige hr-ketels. Bovendien kan duurzaam opgewekte elektriciteit worden gebruikt, waarmee de elektrische warmtepomp een duurzame optie wordt. Door het gebruik van een elektrische warmtepomp zal het elektriciteitsverbruik van een huishouden echter aanzienlijk stijgen. Bovendien heeft dit een aanzienlijk effect op het elektriciteitsnetwerk, omdat er sprake is van een hoge gelijktijdigheid (als het koud is worden alle warmtepompen tegelijk gebruikt).

Door toepassing van een warmtepomp gaat het elektriciteitsverbruik van een woning sterk omhoog, maar neemt het aardgasverbruik fors af. Met name in nieuwbouwwijken kan dit nu al leiden tot een significant effect op het lokale elektriciteitsnet. Voor decentrale opwekkers bestaat momenteel een meldingsplicht bij de netbeheerder, maar dat geldt niet voor decentrale verbruikers van elektriciteit zoals warmtepompen. De netbeheerders stellen dan ook voor om een dergelijke meldingsplicht in te voeren en te onderzoeken in hoeverre warmtepompen door netbeheerders aangestuurd kunnen en mogen worden (Werkgroep Decentrale Infrastructuur, 2008).

Bij de inzet van warmtepompen is het energie-efficiënt om de temperatuur maar beperkt te hoeven verhogen, tot zo'n 25-30°C. Bij een relatief kleine warmteoverdracht maakt een groot warmtewisselend oppervlak als in vloer- of muurverwarming de toepassing van warmtepompen veel efficiënter. Deze systemen zijn geschikt voor toepassing in nieuwbouw of bij ingrijpende renovatie, maar niet bij kleinere aanpassingen in bestaande bouw (Janssen en Ros, 2009).

Volgens hoge schattingen kan in 2020 in 80% van de nieuwbouwwoningen en 50% van de bestaande bouw een warmtepomp zijn geplaatst (Platform Duurzame Elektriciteitsvoorziening en Platform Nieuw Gas, 2007).

Elektrisch autorijden

Elektrisch aangedreven auto's worden aan het reguliere elektriciteitsnetwerk opgeladen (plug-in). Ze zijn aantrekkelijk omdat ze veel energie-efficiënter zijn dan verbrandingsmotoren en omdat ze veel minder lokale luchtverontreiniging en geluidsoverlast veroorzaken. De doorbraak van elektrische auto's is sterk afhankelijk van de ontwikkeling van de accu, die bepalend is voor de actieradius van de auto (Nagelhout en Ros, 2009).

Ten opzichte van het gemiddelde huidige huishoudelijke stroomverbruik kan de elektriciteitsvraag met ongeveer 50% toenemen. Dit kan voor een groot deel opgevangen worden door 's nachts de auto's op te laden, als het reguliere elektriciteitsverbruik laag is (zie paragraaf 3.1). In principe zal afstemming nodig zijn voor het opladen van de accu's om piekbelasting van het net te voorkomen als iedereen tegelijk de auto laadt. Daarnaast is het denkbaar dat niet thuis, maar bijvoorbeeld op het werk, bij parkeerplaatsen van winkelcentra of langs de (snel)weg opgeladen wordt. Hiervoor is een systeem nodig van technische eisen van laadpunten voor elektrische auto's, een methode voor toerekening van de kosten aan de eigenaar van de auto in plaats van aan de eigenaar van het laadpunt, en een methodiek voor afstemming van de vraag ten opzichte van het dan geldende aanbod door aanpassing in de laadsnelheid. Hierover lopen momenteel verschillende onderzoeksprojecten, onder andere bij Essent en bij KEMA (ITM-project) (Werkgroep Decentrale Infrastructuur, 2008). Teruglevering van elektriciteit van de auto naar het net is technisch ook denkbaar ('vehicle to grid'), waardoor de elektrische auto ook kan functioneren als tijdelijk opslagsysteem.

Koeling/airconditioning

Voor met name bestaande woningen neemt de vraag naar koeling door middel van airconditioning de laatste jaren vrij sterk toe als gevolg van toenemende comfortwensen. Goed geïsoleerde woningen hebben een lager warmtetransport en blijven daardoor in de zomer ook beter gekoeld in vergelijking met oudere en minder goed geïsoleerde woningen. Alternatieven voor airconditioning richten zich voornamelijk op het voorkomen van opwarming van de lucht, in plaats van het afvoeren van opgewarmde lucht. Isolatie van de woning is hiervoor een optie, maar ook bijvoorbeeld de afscherming van instraling op de ramen door middel van zonnewering en door reductie van warmteafgifte door interne bronnen. Daarnaast kan lucht ook gekoeld worden door circulatie via een warmtepompsysteem. Installatie van dergelijke systemen in bestaande bouw vergt vaak een renovatie en is dus lastiger dan toepassing van airconditioning.

Airconditioning vergt veel elektriciteit en een vermogen van 1,5 kW is niet ongewoon. De grootschalige toepassing van dergelijke koelende apparatuur kan dus grote invloed hebben op het elektriciteitssysteem. Voor bestaande bouw is voor 2030 een marktaandeel van 25-45% verondersteld, maar de penetratiegraad van airconditioning in nieuwbouwwoningen wordt als zeer gering verondersteld. De gezamenlijke piekbelasting van airconditioning in Nederland kan voor 2030 tussen de 1600 en 2900 MW bedragen (Scheepers et al., 2007).

2.4.3 Opslagtechnologieën

Bij grote lokale pieken in het lokale elektriciteitsnetwerk kan het noodzakelijk zijn netverzwaringen toe te passen om deze pieken op te vangen. Een alternatief voor netverzwaring is het reduceren van piekbelasting door het sturen van elektriciteitsvraag en -aanbod, waarbij energieopslagsystemen een belangrijke rol kunnen spelen.

In deze paragraaf wordt een beschrijving gegeven van opslagtechnologieën, met nadruk op toepassing voor netbalancering (overzicht op basis van De Boer-Meulman en

	Fysisch	Chemisch
Elektriciteit	Pompaccumulatie (op basis van water of lucht) Vliegwielen (Ultra)capacitors Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)	Conventionele batterijen Flow batterijen
Warmte	Organische componenten Anorganische componenten Water Gesteente, olie	Metaalhydriden Gasreacties
Waterstof	Vloeibaar (cryogene opslag) Onder druk	Metaalhydriden Koolstofnanobuisjes

In 't Groen, 2009). Opslag van elektriciteit gebeurt in principe in de vorm van potentiële energie, die weer vrijgeven kan worden bij een vraagoverschot. Opslagtechnologieën kenmerken zich door de hoeveelheid energie die kan worden opgeslagen en de snelheid waarmee deze wordt opgeslagen en vrijgegeven. Daarnaast kan een onderscheid worden gemaakt tussen fysische en chemische opslagtechnieken (zie Tabel 2.1). Voor opslagsystemen moet een onderscheid worden gemaakt tussen opslag van vermogen (MW) en opslag van energie (MWh), twee in principe los van elkaar staande grootheden, die echter sterk bepalend zijn voor de toepassingsmogelijkheden.

Pompaccumulatie betreft de grootschalige opslag van energie in de vorm van water (spaarbekkens), pekkel (ondergrondse zoutlagen) of lucht (ondergronds onder druk). In Europa (en wereldwijd) zijn pompaccumulatiesystemen met waterreservoirs het meest toegepast, maar Nederland heeft hiervoor onvoldoende hoogteverschil. Recentelijk zijn verschillende grootschalige projecten benoemd en onderzocht in de vorm van een energie-eiland en van ondergrondse opslag in oude mijnschachten (Platform Duurzame Elektricitetsvoorziening, 2007; Scheepers et al., 2007). Fysische opslag van elektriciteit in een magnetisch veld van supergeleidend materiaal wordt aangeduid als Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES). Ook SMES kan snel ontladen en daardoor worden ingezet voor het ondervangen van piekbelastingen. Daarnaast geeft de supergeleidende spoel zeer weinig weerstand, waardoor de energieverliezen laag zijn. SMES is commercieel verkrijgbaar, maar wordt vanwege de hoge kosten voor koeling van het supergeleidende materiaal alleen toegepast voor kortdurende opslag.

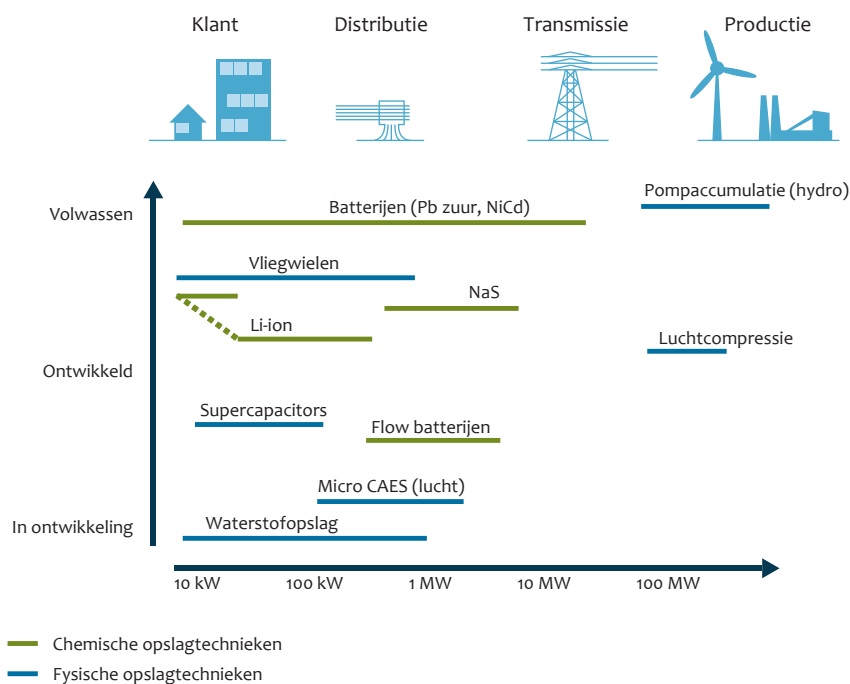
Daarnaast kunnen kleinschalige fysische opslagsystemen als vliegwielen en capacitors een rol spelen in de elektriciteitsinfrastructuur van de toekomst. Een vliegwiel is een roterende schijf, die is aangesloten op een generator en energie opslaat als bewegingsenergie. Kleinschalig worden deze systemen al regelmatig toegepast, bijvoorbeeld voor de regeneratie van remenergie van treinen of om apparaten gelijkmatiger te laten lopen. Een reguliere capacitor bestaat uit twee parallelle geleidende folies met tegengestelde lading en daartussen een slecht geleidend medium. Een ultracapacitor heeft een elektrische dubbellaag tussen de geleiders, waardoor de capaciteit veel hoger wordt. (Ultra)capacitors kunnen zeer snel worden geladen of ontladen en ze degraderen nauwelijks door gebruik, waardoor ze een erg lange levensduur hebben. Op termijn kunnen capacitors mogelijk worden toe-

gepast in elektrische auto's en in samenhang met duurzame opwekkingstechnieken.

Voor kleinschalige toepassingen van elektriciteitsopslag worden vaak batterijen gebruikt, maar de kosten per opgeslagen eenheid energie zijn al gauw een factor vijf hoger dan bij toepassing van grootschalige energieopslag (pompaccumulatie) in Nederland. *Conventionele batterijen* of *accu's* bestaan uit één of meerdere cellen, waarbij in de cel bij het ontladen chemische energie wordt omgezet in elektrische energie en vice versa. In de cel bevinden zich twee elektroden voor de chemische omzettingen en een elektrolyt voor de geleiding van de elektrische lading. Een interessante toepassingsmogelijkheid in het perspectief van deze studie is de opslag van elektriciteit in *accu's* van elektrische auto's, waarvoor verschillende batterijtypen worden ontwikkeld (zie ook Nagelhout en Ros, 2009). Een voordeel van batterijsystemen is de mogelijkheid van modulaire toepassing, waarbij meerdere modules worden samengevoegd tot één flexibel systeem. Daarnaast bieden batterijen in het algemeen een goede stroomkwaliteit, waardoor ze een waarborg leveren voor de stabiliteit van toekomstige distributienetten. Op het niveau van een wijk zijn batterijen momenteel dan ook de belangrijkste optie voor opslag van elektriciteit (Scheepers, 2008).

Batterijen worden gekenmerkt door het type elektrode of elektrolyt en ze onderscheiden zich onder andere door energiedichtheid, vermogensdichtheid, gebruiks- en onderhoudskosten, toepassingsmogelijkheden, toxiciteit en veiligheid:

- Loodzwavelzuurbatterijen worden het meest toegepast, vanwege de lage kosten en de lange levensduur. De toepassingsmogelijkheden zijn groot, in decentrale energiesystemen met name ter ondersteuning van de frequentieregeling in het elektriciteitsnet. Nadeel is dat de capaciteit omlaag gaat bij diepe ontlading, waardoor dit batterijtype minder geschikt is voor de afstemming van vraag en aanbod.
- Nikkel-cadmiumbatterijen (NiCd) of nikkel-metaalhydride batterijen (NiMH) worden toegepast voor stationaire ontwikkelingen of mobiele telefoons. NiCd-batterijen zijn goedkoop en kunnen hoge stromen leveren, maar een belangrijk nadeel is de toxiciteit van cadmium en het geheugeneffect, waardoor de capaciteit na verloop van tijd kan afnemen. Deze nadelen worden ondervangen door de NiMH-batterijen, maar deze zijn vooralsnog wel veel duurder. Bovendien zijn ze, net als loodzwavelzuurbatterijen, niet erg geschikt voor diepe ontlading. NiCd-batterijen worden op grond van de nadelen steeds minder



Omvang en ontwikkelingsstadium van verschillende opslagtechnieken. Bron: presentatie Eric Lysen (UU) bij KNAW, http://www.knaw.nl/agenda/pdf/Lezing_lysen.pdf

gebruikt en zijn sinds 2008 vanwege hun milieubelasting door de EU verboden.

- Lithium-ionbatterijen (Li-ion) vertonen goede prestaties op het gebied van energieinhoud, vermogensdichtheid, levensduur en betrouwbaarheid, waardoor de toepassingsmogelijkheden van dit type batterij erg hoog zijn. Door de energiedichtheid en de reactiviteit van lithium spitst veel onderzoek zich toe op de veiligheid van de batterijen voor grootschalige systemen en is toepassing nog beperkt tot kleinschalige systemen als laptops en mobiele telefoons. De veiligheid van dit type batterij is de laatste jaren dan ook sterk verbeterd. De snelle responstijd maakt dit type voor de toekomst erg geschikt voor toepassingen zoals elektrische auto's.
- Een batterijtype voor stationaire toepassingen is de natrium-zwavelbatterij (NaS). Deze batterijen hebben een interne temperatuur van 300 °C en ook als het systeem niet wordt gebruikt is verwarming nodig. Dat beperkt de mogelijkheden voor toepassing, maar daar staat tegenover dat de batterij onbeperkt kan worden geladen en ontladen.

Bij flowbatterijen worden de actieve chemische componenten niet in de batterij opgeslagen, maar in opgeloste vorm buiten de batterijen. Ook hier bestaan verschillende typen, zoals zinkbromide voor toepassing in elektrische voertuigen en het elektriciteitsnetwerk en vanadiumbatterijen voor toepassing in combinatie met windturbineparken. Alle typen flowbatterijen zijn nog in de demonstratiefase.

Tenslotte kan energie ook worden opgeslagen in de vorm van warmte (zie Janssen en Ros, 2009, voor een overzicht) of in de vorm van waterstof als energiedrager. Dit laatste

zou kunnen passen bij de combinatie van PV en micro-wkk, waarbij de overtollige elektriciteit van PV met elektrolyse wordt omgezet in brandstof voor de brandstofcel.

Conceptueel is de teruglevering van een overschot aan elektriciteit naar het achterliggende elektriciteitsnet ook een vorm van opslag, waar pieken in vraag en aanbod op een groter schaalniveau kunnen worden ondervangen. Overproductie op lokale schaal kan dan worden teruggeleverd aan het regionale of landelijke net, terwijl bij vraagoverschotten elektriciteit op het lokale net wordt ingevoerd.

2.4.4 Conversietechnologieën

Conversietechnologieën zetten energiedragers om in een ander type energiedrager. In de meeste gevallen dient de inkomende energiedrager hierbij als brandstof voor de productie van een andere vorm van energie, met een specifieke, op dat moment gewenste of vereiste toepassing (zie Tabel 2.2).

Omzetting van elektriciteit in elektriciteit is strikt genomen geen conversie, maar deze stap kan noodzakelijk zijn, bijvoorbeeld voor de omzetting van gelijkspanning (van PV) naar wisselspanning (van het elektriciteitsnet) door middel van een inverter of bij verandering van spanningsniveau door middel van een transformator. Omzetting van elektriciteit naar warmte met behulp van een boiler is eenvoudig toe te passen voor ruimte- en tapwaterverwarming, al is het vanuit exergetisch oogpunt geen goede optie om hoogwaardige elektriciteit om te zetten in laagwaardige warmte. Een elektrische warmtepomp ondervangt dit door laagwaardige warmte verder op te werken tot de gewenste hogere temperatuur.

Van/ naar	Elektriciteit	Warmte	Waterstof
Elektriciteit	Vermogenselektronica Transformator Inverter	Elektrische boiler Elektrische warmtepomp	Elektrolyse
Warmte	Stirling-motor stoomturbine TEG TPV ORC	Absorptiewarmtepomp Adsorptiewarmtepomp	Thermochemische processen
Waterstof	Brandstofcel	Katalytische brander	Compressie/expansie Liquefractie/verdamping

2.4.5 Technologieën voor afstemming en beheer: virtuele centrale en slimme meters

Het beheersysteem voor de afstemming van opwekkings- en vraagtechnologieën binnen een decentraal elektriciteitsnetwerk vergt enkele specifieke systeemeisen. Aansturing van een dergelijke aggregaat van decentrale energietechnologieën kan worden aangeduid met de term virtuele centrale ('virtual power plant'), waarin verschillende decentrale opwekkingsinstallaties worden aangestuurd als ware het één centrale (Overdiep, 2005; Elzenga et al., 2006; Pehnt et al., 2006). Flexibiliteit ten behoeve van balancering kan in de virtuele centrale worden ingebracht door tegen een prijs of bij afgesproken condities tijdelijk eenheden en apparaten binnen huishoudens kortstondig in- of uit te schakelen. Dit kan dan worden opgevangen door buffers of opslagsystemen. Tijdelijke afkoppeling van apparaten binnen een virtuele centrale kan vooral een optie zijn voor installaties met een substantiele elektriciteitsvraag en met een warmte- of koudebuffer, zoals vrieshuizen, elektrische warmtepompen, elektrische boilers, airconditioning en pompen (CRISP, 2006; Scheepers et al., 2007).

Cruciaal voor een dergelijk systeem is de koppeling tussen stromen van elektriciteit en informatie, waardoor bij fluctuaties in vraag of aanbod meteen actie kan worden ondernomen om de systeembalans te handhaven (Technology Review, 2009b). Zogenaamde 'slimme meters' kunnen een belangrijke bijdrage leveren aan de verzorging van de communicatie tussen decentrale elektriciteitsopwekkers, verbruikers en leveranciers. In het *Actieplan Decentrale Infrastructuur* nemen de netbeheerders het initiatief om functies voor de slimme meter te ontwikkelen, zodat deze een centrale rol kunnen spelen in de verdere ontwikkeling van een decentrale infrastructuur (Werkgroep Decentrale Infrastructuur, 2008). Een positief neveneffect van slimme meters is de energiebesparing die het kan opleveren voor huishoudens als gevolg van het verbeterde inzicht in het eigen stroomverbruik (Energiegids, 2009a).

De basisvariant van de slimme meter registreert en communiceert verbruik en teruglevering van elektriciteit (zie Figuur 2.3). Voor een grootschalige toepassing van decentrale opwekkingstechnologieën zijn echter extra functies nodig, zoals directe informatie-uitwisseling met andere apparaten zonder tussenkomst van de netbeheerder. Kerngedachte daarbij is het faciliteren van passieve consumptie naar actieve participatie in elektriciteitsnetwerken, waarbij tweerichtingsverkeer mogelijk wordt gemaakt door toepassing van slimme meters. Het blijft een discussiepunt hoe slim 'slim' is: actief

beheer van netwerken kan betekenen dat netbeheerders in samenspel met de retailers niet alleen het transport van elektriciteit in het net actief aansturen, maar ook (binnen bepaalde grenzen) de opwekking en het verbruik van elektriciteit bij consumenten kunnen bijsturen, bijvoorbeeld aan de hand van innovatieve tariefstructuren. Dit betekent dat een slimme meter in twee richtingen zowel de elektriciteit als de kosten moet registreren, functies waarin het huidige Nederlandse meterontwerp nog niet voorziet (Kester, 2008). In alle gevallen is verdergaande standaardisering nodig om de centrale rol in de informatie-uitwisseling te kunnen waarborgen.

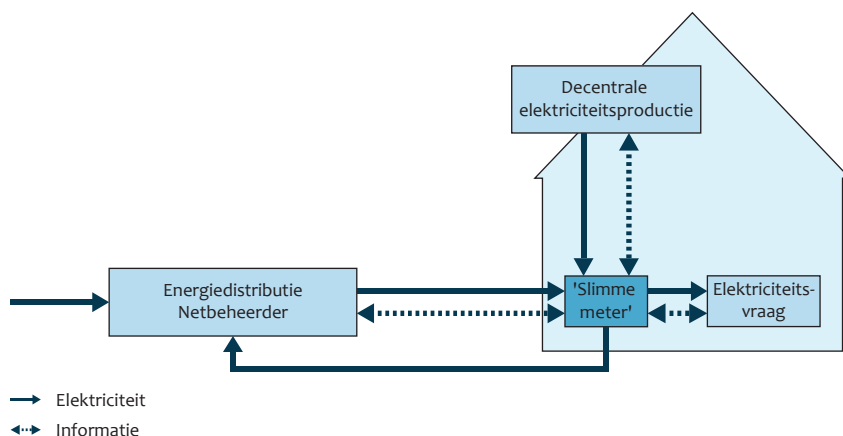
De introductie van slimme meters voor kleinverbruikers (waaronder huishoudens) is nog onderdeel van politieke discussie, met name vanwege zorgen over de mogelijke inbreuk op privacy en vanwege het verplichtende karakter van de invoering ervan. De Eerste Kamer heeft in april 2009 op deze gronden de verplichte invoering van slimme meters voorlopig aangehouden. Het ministerie van Economische Zaken beraadt zich nu op aanpassing van het invoeringsvoorstel, dat vervolgens eerst weer in de Tweede Kamer behandeld zal moeten worden.

2.5 Concurrentie en samenhang tussen energiesystemen

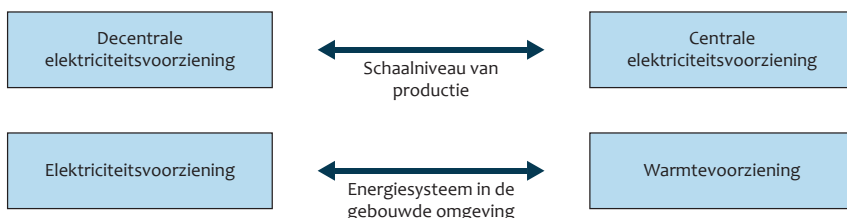
In het *Energierapport 2008* wordt decentrale productie van elektriciteit beschouwd als een mogelijke systeemoptie voor een duurzame energievoorziening in de toekomst. Een decentralisatie van de elektriciteitsvoorziening staat echter niet op zichzelf en ontwikkelt zich in relatie tot een centrale elektriciteitsvoorziening en tot andere energiesystemen, met name ten aanzien van warmtevoorziening.

Centrale elektriciteitssystemen versus decentrale elektriciteitssystemen

Voor zowel centrale als decentrale elektriciteitssystemen zijn duurzaamheid, betaalbaarheid en voorzieningszekerheid de kerncriteria waar de elektriciteitsvoorziening aan zou moeten voldoen. In het *Energierapport 2008* worden voor Nederland twee scenario's benoemd op basis van centrale elektriciteitsvoorziening (Ministerie van Economische Zaken, 2008a): een scenario voor basislastvoorziening van elektriciteit met kolen en eventueel nucleaire energie (*Nederland als powerhouse*), en een scenario om met gasgestookte centrales snel in te kunnen spelen op de piekvermogens in grootschalige wind- en zonne-energie (*Nederland als energieflexwerker*). Beide scenario's kunnen een rol spelen in een aanscher-



Rol van slimme meter in een huishouden in een decentraal elektriciteitsnetwerk. Kerntaak is de volwaardige koppeling van elektriciteitsstromen en informatie.



pend klimaatbeleid, met name door CO₂-afvang en -opslag, bijstook van biomassa en gebruik van restwarmte. Tevens is de grootschalige en ontwikkeling van (offshore) windparken als centrale optie van belang in verschillende toekomstscenario's. Voorzieningszekerheid is het drijvende mechanisme in het *powerhouse*-scenario, waarin kolen worden aangeleverd via de Rotterdamse haven of de Eemshaven. De betaalbaarheid van elektriciteit uit kolencentrales met CO₂-opslag kan afnemen, doordat de efficiëntie van elektriciteitsproductie afneemt. Het inspelen op piekvragen in Europa met behulp van gascentrales zal op termijn afhankelijk zijn van de import van gas of van relatief dure vergassingstechnieken, maar deze kosten kunnen terugverdiend worden door de hogere waarde van piekbelastingen in vergelijking met basislast.

Voor de vormgeving van het elektriciteitssysteem van de toekomst concurreren centrale en decentrale systemen met elkaar. Deze concurrentie wordt niet alleen bepaald op grond van systeeminherente kosten en baten, maar ook op basis van de specifieke afweging die consumenten en andere stakeholders maken. Publieke acceptatie van kolencentrales met CO₂-opslag of van grootschalige windparken aan de horizon kan daarbij een cruciale barrière zijn. Een voordeel bij de ontwikkeling van grootschalige productie-eenheden is dat er eenvoudiger een aansluiting gevonden kan worden op het huidige systeem van centrale energievoorziening.

De vraag is of centrale en decentrale systemen elkaar ook *uitsluiten*. Als niet op voorhand een richting of toekomstper-

spectief kan worden aangegeven is een incrementele ontwikkeling van elektriciteitsproductie goed denkbaar, waarop de ontwikkeling van het netwerk volgt en geen enkel systeem domineert. De totale kosten voor systeemontwikkeling zullen dan ook hoger liggen, met name door de overdimensionering van transmissie- en distributiesystemen (Meeuwssen, 2007; Roland Berger Strategy Consultants, 2008). Daar staat tegenover dat het risico van insluiting ('lock in') in een niet levensvatbaar systeem afneemt. In algemene zin is de aansturing, vormgeving en afstemming met andere energiesystemen in een decentraal elektriciteitssysteem fundamenteel anders dan in het huidige, grootschalige systeem. Op het niveau van huishoudens kunnen de verschillende systemen echter met elkaar worden verenigd door gebruik van slimme meters.

Warmte in samenhang met elektriciteit

In de gebouwde omgeving worden warmte- en elektriciteitsystemen ontwikkeld in samenhang met elkaar. Een veelheid aan bronnen kan voorzien in de warmtevoorziening van huishoudens. Voor de toekomst zijn de meest voor de hand liggende opties een warmtevoorziening op basis van elektriciteit, aardgas of door middel van gecentraliseerde stadsverwarming op wijkniveau, die vaak gebruik maakt van restwarmte.

Een technologische keuze binnen het ene systeem zal in veel gevallen implicaties hebben voor de vormgeving van het andere systeem. De integratie van micro-wkk in het energiesysteem zorgt voor een directe koppeling tussen huishoude-

lijke warmte- en elektriciteitssystemen door de co-productie van elektriciteit en warmte. Elektrische warmtepompen leveren een efficiënte bijdrage aan de huishoudelijke warmtevoorziening, maar leiden wel tot significante toenames in het elektriciteitsverbruik. De installatie van collectoren voor een zonneboiler vergt fysieke ruimte die anders beschikbaar zou kunnen zijn voor PV-panelen.

Dit rapport is afgebakend tot de toekomstige decentrale elektriciteitsvoorziening in huishoudens. Voor de optimalisatie van de *totale* energiebalans in een huishouden is echter een meer integrale insteek vereist. Zie Janssen en Ros (2009) voor een uitwerking van warmteconcepten in de gebouwde omgeving.

3

Vraag en aanbod in een decentraal elektriciteitssysteem in woonwijken

3.1 Introductie: doelstelling en aanpak

De uitwerking van een decentraal elektriciteitssysteem roept de vraag op of een overzicht is te geven van de huidige en de potentiële vraag en aanbod in elektriciteit over het verloop van een dag en over het verloop van een jaar, inclusief de noodzaak van energieopslag en de mogelijkheden daarvoor. Hiermee kan een inschatting worden gemaakt van de dimensionering van de lokale afstemming in het decentrale elektriciteitssysteem op het niveau van een woonwijk. Daarmee ontstaat tevens een beeld van een aantal barrières in een transitie naar een decentrale elektriciteitsvoorziening.

Gezien de veelheid aan technologieën voor opwekking, vraag, opslag, conversie en controle van elektriciteit is het niet mogelijk om een eenduidig decentraal systeem voor elektriciteitsvoorziening te schetsen. Bovendien kan het wijktype van belang zijn voor de inpassing van deze technologieën, voor de demografische opbouw en het type bouw, en daaraan gerelateerde vraagpatronen. Om toch een inzicht te kunnen geven in de huidige en toekomstige huishoudelijke elektriciteitsvraag en het -aanbod, worden vier verschillende technologische systeemvarianten (plus een basisvariant) geschetst voor vijf verschillende wijktypen. De systeemvarianten omvatten zes energietechnologieën, die in meer of mindere mate worden ingezet. Voor al deze varianten worden elektriciteitsvraag- en aanbodpatronen doorgerekend. Het verschil tussen deze patronen op een dag of in een seizoen is een maat voor de inspanning die vereist is om vraag en aanbod op elkaar af te stemmen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van gegevens over:

- de kenmerken van verschillende woonwijken;
- nieuwe technologieën voor elektriciteitsproductie en -verbruik;
- mogelijke toekomstige veranderingen in elektriciteitsvraag- en aanbod.

Om de elektriciteitsvraag van huishoudens en wijken te kunnen voorspellen wordt gebruik gemaakt van de door KEMA ontwikkelde Sepath-patroongenerator, waarmee curves van het huidige elektriciteitsverbruik van woningen en woonwijken kunnen worden weergegeven. Om de toekomstige energievraag van wijken te bepalen, moeten ook nieuwe technologieën zoals micro-wkk's en zonnepanelen meegenomen worden in de berekeningen. Daarbij zijn er verschillende toekomstbeelden mogelijk die de elektriciteitsvraag en het -aanbod kunnen beïnvloeden. Al deze factoren zijn vervolgens doorgerekend in het door KEMA ontwikkelde ElektriciteitsvraagPatroon (EVP) 2050 Model. Als resultaat kan de huidige en toekomstige energievraag van wijken worden bepaald (zie Figuur 3.1). De belastingpatronen worden voor een gemiddeld huishouden op wijkniveau voor een gemiddelde winterdag en een gemiddelde zomerdag berekend voor het zichtjaar 2050.

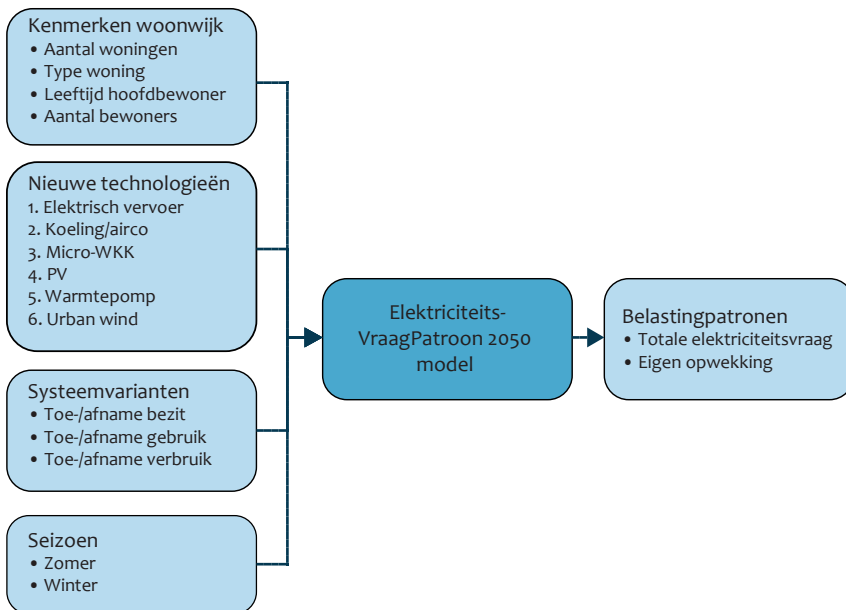
In dit hoofdstuk volgt een beschrijving van de wijktypen, technologieën en systeemvarianten voor de analyse, gevolgd door een overzicht van resultaten van de berekeningen.

3.2 Achtergronden en beschrijving van systeemvarianten

3.2.1 Wijktypen

Op basis van fysieke kenmerken van wijken, zoals bebouwingdichtheid, woningtype en functiemenging zijn verschillende categorieën woonmilieu te onderscheiden, hierna verder benoemd als wijktype. Er worden vijf wijktypen onderscheiden (ABF Research, 2008):

1. *Centrum-stedelijk*. Omvat stedelijke centra en enkele centraal gelegen wijken, gekenmerkt door de afstand tot het centrum, het percentage werkgelegenheid in horeca, detailhandel en zakelijke diensten, de dichtheid, aanwezigheid van meergezinswoningen en de aanwezigheid van (groot-) stedelijke voorzieningen (bioscoop, theater, museum).



De in- en uitvoergegevens voor het Elektriciteits Vraag Patroon Model om belastingpatronen van een woonwijk te bepalen.

2. *Buiten-centrum*. Omvat wijken op iets grotere afstand tot het centrum, met een hogere dichtheid dan de navolgende wijktypen en vaak ook in vergelijking met het wijktype centrum-stedelijk. Dit wijktype is zeer gevarieerd en omvat tuindorpen, vooroorlogse etagebouw en naoorlogse hoogbouw wijken.
3. *Groen-stedelijk*. Gedefinieerd op basis van dichtheid en samenstelling van de woonvoorraad en omvat met name nieuwbouwwijken.
4. *Centrum-dorps*. Omvat gebieden in dorpen met een met een hogere dichtheid of meer voorzieningen dan in het wijktype landelijk wonen.
5. *Landelijk wonen*. Omvat gebieden in dorpen met een lage dichtheid en relatief weinig voorzieningen. Dit kunnen dus woonwijken zijn in een lage dichtheid, maar ook landelijke gebieden met verspreide bebouwing.

Voor al deze wijktypen zijn voor 2050 kengetallen vastgesteld (zie Bijlage 1). Deze kengetallen zijn gebaseerd op gegevens uit 2000-2006 uit de databases van het WOONonderzoek 2006 (Ministerie van VROM, 2008a) en op een bewerking van de bij het PBL beschikbare Combimonitor database. Demografische en maatschappelijke ontwikkelingen zijn trendmatig doorgetrokken tot 2050 met het Global Economy (GE) scenario uit de studie Welvaart en Leefomgeving (WLO) als uitgangspunt (CPB et al., 2006b). De WLO-studie veronderstelt voor de verdeling per type woning naar woonmilieu (wijktype) dat de aandelen stedelijk en niet-stedelijk in de nieuwbouw zullen aansluiten bij de realisaties in het recente verleden (ibid, p. 75). In onze verdere analyses nemen we de verdeling van woningtypes uit 2006 over voor de berekening voor 2050. Bovendien worden alle wijken afgekaderd tot alleen woonwijken, dus zonder utiliteit, winkels of industrie.

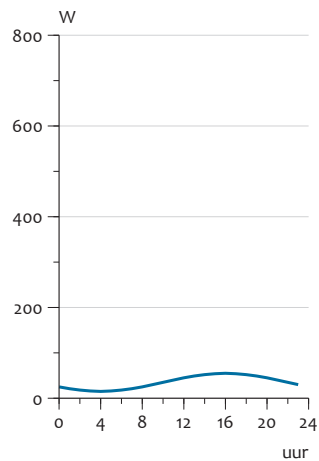
3.2.2 Aannames over technologieën in de systeemvarianten

Voor de systeemvarianten wordt een inschatting gemaakt van de dekkingsgraad van verschillende technologieën, die in de toekomst van belang worden geacht voor de decentrale elektriciteitsvoorziening. Koeling, warmtepompen en elektrische auto's zijn technologieën op huishoudelijke schaal met een grote invloed op de *vraag* naar elektriciteit, terwijl PV, micro-wkk en urban wind op decentrale schaal bijdragen aan de *productie* van elektriciteit. Het GE-scenario van de WLO voorziet voor 2040 10,1 miljoen woningen. Op basis van de afvlakkende demografische ontwikkelingen tegen die tijd, hanteren we dit aantal ook voor 2050 als basis voor het bepalen van de dekkingsgraad van de verschillende technologieën. Voor alle technologieën wordt een zogenaamde 'energieprint' vastgesteld, met het maximale huishoudelijke verbruik over een dag, gemiddeld over een wijk (zie Figuur 3.2).

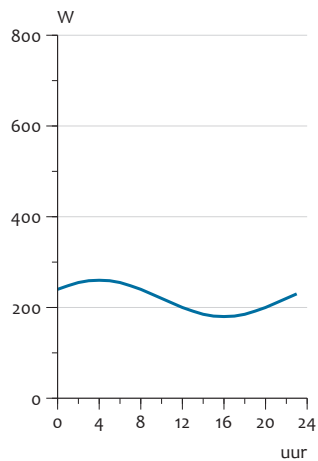
PV

Voor PV is het uitgangspunt een maximale productie in Nederland van 200 kWh/jaar per vierkante meter paneel. Dit is in lijn met de middelhoge range van de meeste scenario's en ongeveer het dubbele van de huidige stand der techniek. Op basis van informatie over beschikbaar dakoppervlak per huis is vervolgens een verdelingsfactor per wijktype berekend. De beschikbaarheid is een functie van het dakoppervlak en de oriëntatie op het zuiden. De verdelingsfactor komt er op neer dat de grootste toepassingsmogelijkheden in centrum-dorps zijn, met een correctiefactor van 0,8 voor groen-stedelijk en landelijk wonen en een correctiefactor van 0,6 voor centrum-stedelijk en buiten-centrum (zie Bijlage 1). De uiteindelijke inzet is gespecificeerd per systeemoptie.

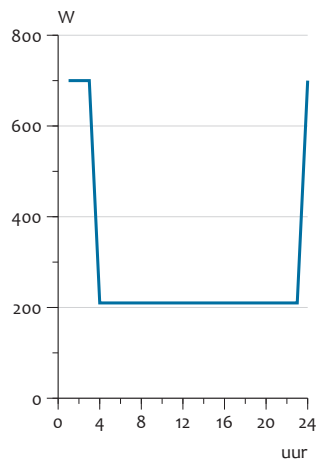
Airco zomer



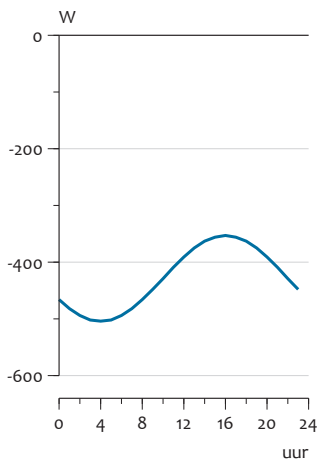
Warmtepomp winter



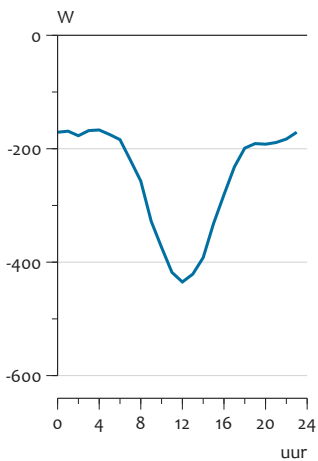
Elektrische auto



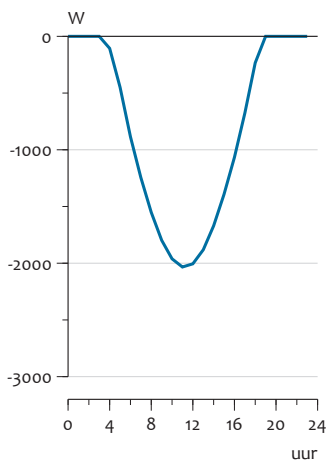
Micro WKK winter (opwekking)



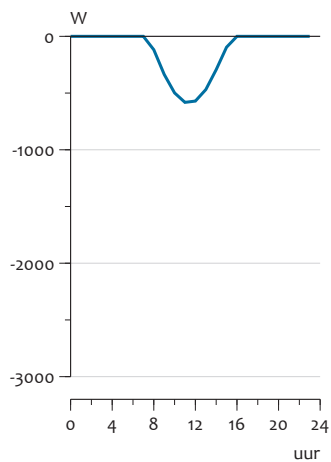
Urban wind



Opwekking PV zomer



Opwekking PV winter



	Centrum-stedelijk	Buiten-centrum	Groen-stedelijk	Centrum-dorps	Landelijk wonen
Gemiddeld aantal auto's per huishouden	1,47	1,58	1,75	1,87	1,9
Inzet scenario laag (20%)	29%	32%	35%	37%	38%
Inzet scenario hoog (40%)	59%	63%	70%	75%	76%

Warmtepompen en koeling/airco

Voor warmtepompen is het uitgangspunt dat ze alleen worden geïnstalleerd bij nieuwbouw of bij grote renovaties in bestaande bouw. Uitgangspunt van de analyses is dat nieuwbouw in alle wijktypen in gelijke mate plaatsvindt, waardoor geen sprake is van een wijkspecifieke inzet. Naar schatting is in 2050 30% nieuwbouw ten opzichte van de huidige woningvoorraad (WLO GE-scenario). Daarnaast schatten we het aandeel groot gerenoveerde bestaande bouw per 2050 op 20%. Dat betekent een maximale inzet van 50% warmtepompen. Door een lagere inschatting van de toepassing van warmtepompen in de bestaande bouw is deze inschatting significant lager dan de inschatting waarop de werkgroep Decentrale Infrastructuur (2008) zich baseert.

De piekbelasting van airconditioning kan 1,5 kW belopen, maar dit is doorgaans van korte duur. Gemiddeld op wijkniveau staat slechts een deel van de apparaten aan, doorgaans niet op maximaal niveau. Op basis van metingen tijdens hoogzomer wordt een gemiddelde belasting vastgesteld per huishouden van 750-850 kWh/jaar. Voor het jaar 2050 wordt een afgevlakt patroon gehanteerd als gevolg van betere woningisolatie en dus een groter bufferend vermogen.

Warmtepompen hebben ook een koelfunctie en het is redelijk te veronderstellen dat deze in de zomermaanden ook als zodanig wordt gebruikt. De aanwezigheid van een warmtepomp maakt daardoor een andere koelinstallatie of airconditioning overbodig. Per systeemoptie wordt de dekkinggraad van airconditioning gerelateerd aan de dekkinggraad van warmtepompen.

Elektrische auto's

Uitgangspunt voor elektrische auto's is een dagvraag van 7 kWh, nodig voor een gemiddelde dagelijkse rit van 50 km. Voor elektrische auto's wordt een wijkspecifieke inzet aangenomen, op basis van het gemiddeld aantal auto's per huishouden in een wijk. Voor 2050 wordt de aanwezigheid verondersteld van twee auto's bij elk huis en één auto bij elk appartement. De wijkspecifieke correctiefactor is weergegeven in Bijlage 1. De dekkinggraad wordt vervolgens berekend door: gemiddeld aantal auto's maal het inzetpercentage, waarvoor twee scenario's worden gehanteerd (Tabel 3.1):

- een gematigd scenario met een gemiddelde inzet van 20% elektrische auto's;
- een hoog scenario met een gemiddelde inzet van 40% elektrische auto's, in lijn met het BLUE Conservative scenario van IEA (IEA, 2008).

Het percentage van de dekkinggraad geeft aan hoeveel maal er 7 kWh/dag geladen moet worden. Bij meerdere auto's in een huishouden is dus theoretisch een dekkinggraad van meer dan 100% mogelijk.

Voor scenario's op de kortere termijn wordt vaak aangenomen dat slechts een beperkt aantal huishoudens thuis kan opladen, doordat niet iedereen een garage of carport heeft (Scheepers et al., 2007), maar voor de langere termijn gaan we er vanuit dat ook voor andere huizen openbare of private voorzieningen worden getroffen om dit te ondervangen.

Urban wind

Op basis van potentieelschattingen blijkt dat een significante schaal van toepassing van deze technologie in geen enkel scenario echt realistisch is (Cace en Ter Horst, 2007). We nemen aan dat alleen in een systeemoptie met een sterk decentrale energievoorziening een zekere dekkinggraad voor urban wind ontstaat. Daarbij wordt aangenomen dat deze sterker wordt ingezet op hoge en ruime plaatsen (centrum-stedelijk en landelijk wonen). In de andere wijken wordt uitgegaan van tweederde van de maximale toepassingsmogelijkheden (zie wijkspecifieke correctiefactor in Bijlage 1).

Micro-wkk

Op basis van twee scenario's van de Werkgroep Decentrale Gastoepassingen (2008) tot 2030 is een gematigde en een optimistische inschatting berekend voor de ontwikkeling van micro-wkk tot 2050 aan de hand van een doorgetrokken natuurlijk logaritmische trendlijn. Hierin zit het uitgangspunt verwerkt dat de marktpenetratie verder in de toekomst door verzadiging geleidelijk af zal nemen. Voor 2050 wordt aangenomen dat alle micro-wkk's op basis van brandstofcellen werken. Het leverend vermogen van micro-wkk per huishouden is als volgt berekend:

- De warmtevraag per woning in 2008 is circa 51 GJ. Met een geleidelijke jaarlijkse efficiëntieverbetering van 1,5% in de warmtevraag betekent dit voor 2050 een warmtevraag van circa 27 GJ;
- met een w/k-verhouding van 2:1 voor micro-wkk met brandstofcellen betekent dit een jaarlijkse elektriciteitsproductie van circa 13,5 GJ, ofwel 3755 kWh.

Daarnaast gaan we uit van een afvlakkend productiepatroon, waardoor de pieken in de elektriciteitsproductie worden afgevlakt als gevolg van technische bufferende maatregelen zoals isolatie en vloerverwarming. Op basis van deze aanname verandert het grillige piekenpatroon in een (kunstmatige) sinusgolf, met een productiepiek in de ochtend. Er is geen onderscheid tussen de wijktypen ten aanzien van de inzet van micro-wkk. Ten slotte veronderstellen we in alle gevallen aardgas als brandstof, wat voor PEMFC's toepassing van een converter (naar waterstof) vereist. Specificatie hiervan wordt in de analyses verder niet meegenomen.

Overige elektrische apparaten

De recente historische toename in huishoudelijk elektriciteitsverbruik tussen 1990-2007 is circa 2,8% per jaar (MNC, 2008),

Wijk specifieke dekking van energietechnologieën in systeemvariant 1

Tabel 3.2

Energietechnologie	Centrum-stedelijk	Buiten-centrum	Groen-stedelijk	Centrum-dorps	Landelijk wonen	Aannames
Koeling/airco	20%	20%	20%	20%	20%	Trendontwikkeling
PV	12%	12%	16%	20%	16%	Gematigd scenario: 20% max. toepassing
Warmtepompen	20%	20%	20%	20%	20%	Trendontwikkeling
Micro-wkk	26%	26%	26%	26%	26%	Op basis van gematigd scenario
Elektrische auto's	29%	32%	35%	37%	38%	Op basis van gematigd scenario met 20% inzet (maal gem. aantal auto's)
Urban wind	0%	0%	0%	0%	0%	Op basis van gematigd scenario

% betekent: dekkingsgraad (percentage van aantal woningen in 2050)

Wijk specifieke dekking van energietechnologieën in systeemvariant 2a

Tabel 3.3

Energietechnologie	Centrum-stedelijk	Buiten-centrum	Groen-stedelijk	Centrum-dorps	Landelijk wonen	Aannames
Koeling/airco	10%	10%	10%	10%	10%	Helpt van trendmatige toename, omdat koeling gedeeltes door warmtepompen wordt voorzien
PV	24%	24%	32%	40%	32%	Basis-scenario: 40% max. toepassing
Warmtepompen	50%	50%	50%	50%	50%	Volledig bij nieuwbouw en renovatie; overige stadsverwarming
Micro-wkk	0%	0%	0%	0%	0%	In <i>all electric</i> zijn geen gas-aansluitingen meer
Elektrische auto's	29%	32%	35%	37%	38%	Op basis van gematigd scenario met 20% inzet (maal gem. aantal auto's)
Urban wind	0%	0%	0%	0%	0%	Op basis van gematigd scenario

% betekent: dekkingsgraad (percentage van aantal woningen in 2050)

Wijk specifieke dekking van energietechnologieën in systeemvariant 2b

Tabel 3.4

Energietechnologie	Centrum-stedelijk	Buiten-centrum	Groen-stedelijk	Centrum-dorps	Landelijk wonen	Aannames
Koeling/airco	10%	10%	10%	10%	10%	Helpt van trendmatige toename, omdat koeling gedeeltes door warmtepompen wordt voorzien
PV	24%	24%	32%	40%	32%	Basis-scenario: 40% max. toepassing
Warmtepompen	50%	50%	50%	50%	50%	Volledig bij nieuwbouw en renovatie; overige stadsverwarming
Micro-wkk	0%	0%	0%	0%	0%	In <i>all electric</i> zijn geen gas-aansluitingen meer
Elektrische auto's	59%	63%	70%	75%	76%	Op basis van gematigd scenario met 40% inzet (maal gem. aantal auto's)
Urban wind	0%	0%	0%	0%	0%	Op basis van gematigd scenario

% betekent: dekkingsgraad (percentage van aantal woningen in 2050)

Wijk specifieke dekking van energietechnologieën in systeemvariant 3

Tabel 3.5

Energietechnologie	Centrum-stedelijk	Buiten-centrum	Groen-stedelijk	Centrum-dorps	Landelijk wonen	Aannames
Koeling/airco	20%	20%	20%	20%	20%	Huidig aandeel 2,5% met trend van ca. 5% toename per jaar
PV	60%	60%	80%	100%	80%	Maximale toepassing 100%
Warmtepompen	20%	20%	20%	20%	20%	Trendontwikkeling; rest warmtevoorziening met micro-wkk en hr
Micro-wkk	60%	60%	60%	60%	60%	Op basis optimistisch scenario.
Elektrische auto's	29%	32%	35%	37%	38%	Op basis van gematigd scenario met 20% inzet (maal gem. aantal auto's)
Urban wind	5%	3%	3%	3%	5%	Max potentieel

% betekent: dekkingsgraad (percentage van aantal woningen in 2050)

vooral toe te schrijven aan de grootschalige introductie in de jaren negentig van een aantal apparaten met een hoog specifiek gebruik (CPB et al., 2006a). De laatste jaren is de groei afgevlakt tot circa 1,4% per jaar. Voor de inschatting van

het elektriciteitsgebruik in de gebouwde omgeving in 2050 hanteert (IEA, 2008) een jaarlijks groeicijfer van 2,5% voor het basisscenario, en 1,6% voor de meer gematigde scenario's. Inschattingen voor huishoudelijk elektriciteitsverbruik in de

WLO-studie zijn veel lager, variërend van 0,3 tot 1,5% per jaar (CPB et al., 2006a). In de meeste scenariostudies zit (vaak impliciet) al de aanname van een zekere mate van toepassing van warmtepompen, koeling en elektrische auto's, wat in onderhavige studie wordt toegevoegd in de vorm van een systeemoptie. Voor de berekeningen van het basiselektriciteitsverbruik – dus exclusief de bovengenoemde technologieën – hanteren we daarom een meer gematigde jaarlijkse toename in elektriciteitsverbruik van 0,5%. Dat betekent dat de huidige gemiddelde jaarlijkse huishoudelijke basisvraag van 3400 kWh zal zijn gestegen tot ongeveer 4200 kWh in 2050.

3.2.3 Systeemvarianten

Er worden vier systeemvarianten van decentrale elektriciteitsvoorziening beschouwd met 2050 als richtjaar, plus een basisreferentie van de huidige situatie. Van alle systeemvarianten worden voor zowel zomer als winter vraag- en aanbodpatronen op wijkniveau berekend. Vervolgens worden effecten berekend voor emissies, leveringszekerheid, voorzieningszekerheid, investeringen en ruimtelijke effecten (hoofdstuk 4).

o-scenario: Basisreferentie (2006)

Dit is een referentieberekening, op basis van de *huidige* (2006) kengetallen voor de wijktypen en voor het regulier dagelijks huishoudelijk gebruik van elektrische apparaten. In deze basisreferentie staat de penetratiegraad van de zes bovengenoemde technologieën voor alle wijktypen op 0%. Deze aanname klopt niet helemaal voor airconditioning (circa 2%), maar voldoet voor de algemene lijn in de argumentatie om in de navolgende berekeningen zo goed mogelijk het effect van deze technologieën te kunnen onderscheiden. De huishoudelijke basisvraag voor elektriciteit is gesteld op 3400 kWh/jaar.

Systeemvariant 1: *Business as usual*

Deze systeemvariant is gebaseerd op de basisreferentie voor het gebruik van elektrische apparaten, maar daarbovenop is voor de inzet van de zes technologieën een inschatting gemaakt voor 2050 op basis van verschillende studies (CPB et al., 2006b; Elzenga et al., 2006; Cace en Ter Horst, 2007; Platform Duurzame Elektriciteitsvoorziening en Platform Nieuw Gas, 2007; Scheepers et al., 2007; IEA, 2008; Montfoort en Ros, 2008; Werkgroep Decentrale Gastoepassingen, 2008). Voor alle specifieke technologische toepassingen wordt een gematigde dekkingsgraad verondersteld, gebaseerd op zeer geleidelijke trendontwikkelingen of gematigde inschattingen uit scenariostudies (Tabel 3.2). Voor koeling/airco wordt de dekkingsgraad gebaseerd op een trendmatige jaarlijkse toename van circa 5% vanuit het huidig aandeel van 2,5%, resulterend in een dekking van 20%.

Systeemvariant 2a: All electric (met beperkt aandeel elektrische auto's)

In deze systeemvariant is aangenomen dat huishoudens voor hun gehele energievoorziening alleen nog op het elektrische net zijn aangesloten en dat de warmtevraag met behulp van elektriciteit of zonnecollectoren wordt gedekt. Gasaansluitingen zijn vervallen in deze systeemvariant en daarmee ook de inzet van micro-wkk. Voor warmtepompen is op wijkniveau in nieuwbouwwijken een penetratiegraad van 100% denkbaar, maar gemiddeld wordt 50% gehanteerd, uitgaande van volledige installatie bij nieuwbouw en renovatie. De rest

wordt verwarmd op basis van stadsverwarming. Het aandeel koeling wordt afgezwakt vanwege het relatief grote aandeel warmtepompen, die ook een koelende functie hebben. De dekking van airconditioning wordt daarom gehalveerd tot 10%, met name toegepast in bestaande bouw waar geen grote renovaties hebben plaatsgevonden. Voor de inzet van PV is een basisscenario aangenomen met een dekking van maximaal 40%. Elektrische auto's worden ingezet op basis van een gematigd scenario, met 20% van alle auto's elektrisch. De dekkingsgraad wordt berekend aan de hand van het aantal auto's per huishouden in de verschillende wijktypen (Tabel 3.3).

Systeemvariant 2b: All electric (met hoog aandeel elektrische auto's)

Deze systeemvariant hanteert dezelfde aannames als variant 2a, maar hier is sprake van maximale inzet van elektrische auto's (Tabel 3.4). Deze wordt gesteld op 40%, in lijn met het BLUE Conservative-scenario van IEA (2008) en vervolgens voor de dekkingsgraad wederom vermenigvuldigd met het aantal auto's per huishouden in een wijk.

Systeemvariant 3: Maximaal decentraal

In deze systeemvariant wordt uitgegaan van een maximale inzet van decentrale productie van elektriciteit (Tabel 3.5). Voor PV staat 100% inzet gelijk aan 20 m² geïnstalleerd zonnepaneel (in centrum-dorpse wijken). De jaarlijkse opbrengst is in alle gevallen 200 kWh/m². Voor warmtepompen geldt dezelfde aanname (20%) als in systeemvariant 1, in plaats van de maximale inzet uit systeemvarianten 2a en 2b, omdat hier het restant kan worden geleverd door gas-aangedreven decentrale warmteopwekkers als micro-wkk en hr-ketels. Voor micro-wkk is een maximale inzet voor 2050 trendmatig berekend op basis van eerdere inschattingen tot 2030 (Werkgroep Decentrale Gastoepassingen, 2008), met een dekking van 60% voor alle wijktypen. Voor urban wind oogt de inzet gering, maar dit is een zeer optimistische aanname in vergelijking met potentieelstudies voor 2040 (Cace en Ter Horst, 2007). Het jaarlijkse maximumpotentieel wordt geschat op 5000 kWh/jaar per gebouw. Voor elektrische auto's wordt een gematigd middenscenario gehanteerd.

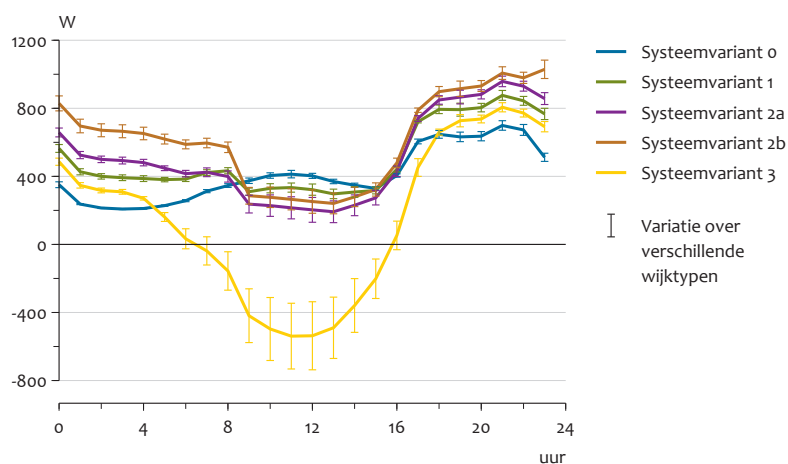
3.3 Vraag en aanbod van elektriciteit op wijkniveau in een decentraal energiesysteem

3.3.1 Energievraagpatronen in de verschillende systeemvarianten

De gemiddelde dagelijkse elektriciteitsvraagpatronen van een woning in een wijk voor verschillende systeemvarianten toont het effect van de inzet van verschillende nieuwe technologieën, waardoor in sterke mate het uiteindelijke belastingspatroon wordt bepaald (zie Figuur 3.3). Met name de effecten van systeemvarianten 3 (voornamelijk door inzet van PV) en 2b (inzet van elektrische auto's) zijn zeer duidelijk zichtbaar. De verschillen in de wijktypen, aangegeven door middel van marges, blijken beperkt; in de verdere analyse wordt daarom gewerkt met gemiddelden van alle wijken.

Figuur 3.4 toont de zomer- en winterpatronen van de netto elektriciteitsvraag voor de verschillende systeemvarianten voor een woning op basis van een weekgemiddelde en gemid-

Gemiddelde woning op wijkniveau (zomer en winter)



Jaargemiddelde elektriciteitsvraag patroon van een gemiddeld huishouden op wijkniveau. De marges geven de variatie voor verschillende wijktypen aan.

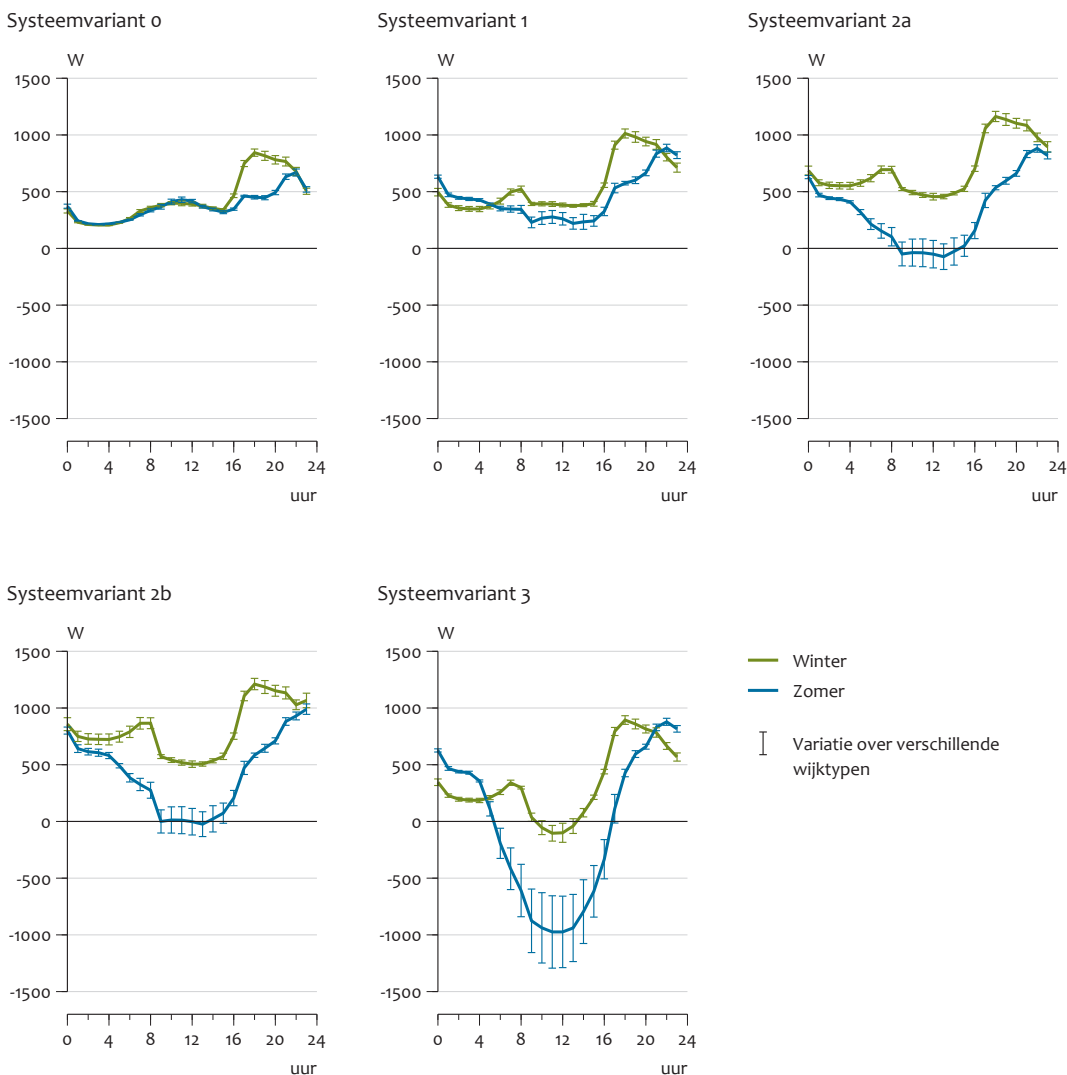
deld over een wijk. Seizoensinvloeden tonen zichtbaar meer verschil dan de specificatie van het wijktype. In de zomer is de vraag naar elektriciteit minder, omdat mensen minder thuis zijn en bijvoorbeeld minder verlichting nodig hebben dan in de winter. In systeemvariant 1 is een inschatting gemaakt van het elektriciteitsvraagpatroon onder een trendmatige groei (business as usual) van de elektriciteitsvraag tot 2050, waarmee ten opzichte van het huidige patroon een toename is te zien van ongeveer eenderde. Een sterkere inzet van elektrische apparaten, in combinatie met een gematigde (20%) inzet van elektrische auto's (systeemvariant 2a) toont in vergelijking met systeemvariant 1 een stijgend energieverbruik, voornamelijk in de avonden. Hierdoor wordt de belasting op het netwerk en de wijktransformator significant vergroot.

Dit effect wordt aanzienlijk versterkt bij een forsere inzet (40%) van elektrische auto's (systeemvariant 2b), waarbij met name gedurende de nacht de netto elektriciteitsvraag wordt verhoogd door het laden van de elektrische auto's. Het effect van elektrische auto's is dus een zeer bepalende factor in de uiteindelijk berekende elektriciteitsvraagpatronen. Hiervoor zijn twee parameters van belang: het aantal elektrische auto's in 2050 en het laadprofiel van een elektrische auto. Het aantal auto's is nu geschat ten opzichte van maximale toepassing met een maximum van 40%. IEA presenteert ook een specifiek hoog scenario voor 'elektrisch succes' (75%), maar op wijkniveau zal dit de uitkomsten van de berekeningen zo sterk overheersen dat analyse niet zinvol meer is. Op landelijk niveau is dit hoge uitgangspunt echter goed denkbaar door de aanname dat elektrische auto's ook elders worden geladen, bijvoorbeeld op het werk of langs de snelweg. Voor de berekening van het laadprofiel geldt de (conservatieve) aanname van gemiddeld 7 kWh/dag aan elektriciteitsgebruik voor een elektrische auto, afgeleid uit het gemiddelde woon-werkverkeer in Nederland. Voor alle systeemvarianten is aangenomen dat het grootste deel van de auto's nachts in enkele uren wordt geladen, terwijl gedurende de dag een

klein deel van de auto's wordt geladen, maar variatie op dit profiel kan grote invloed hebben op de berekeningen van de dagelijkse vraag- en aanbodpatronen (Nagelhout en Ros, 2009). Een oplossing hiervoor is verzwarende van het lokale netwerk of versterking van de transformator, maar het is ook denkbaar dat er aangestuurd wordt op een grotere spreiding in de laadprofielen. Er zijn vanzelfsprekend ook concepten denkbaar waarbij auto's (groten)deels worden geladen bij bedrijven of centrale (snel)laadpunten. In dat geval is de invloed op de vraag in woonwijken beperkter.

Bij een hoge inzet van nieuwe opwekkingstechnologieën (systeemvariant 3) worden seizoensinvloeden dominant zichtbaar. Door de inzet van PV wordt de netto elektriciteitsvraag in de zomer gedurende de dag lager, maar de vraag wordt door met name airconditioning gedurende de avonden juist hoger. Dit verhoogt het verschil tussen dag en nacht. In de winter verandert het profiel minder sterk. Zowel gedurende de dag als gedurende de nacht zal het elektriciteitsverbruik toenemen. Alleen in situaties met heel veel micro-wkk's en PV zal het elektriciteitsverbruik gedurende de dag lager worden. Dit effect is echter minder sterk dan in de zomer.

Elektriciteitsopwekking met behulp van PV is in de zomer is ongeveer zes maal hoger dan in de winter. Met een groot aandeel duurzame energiebronnen kan uiteindelijk zelfs netto elektriciteitsproductie ontstaan (in Figuur 3.4 zichtbaar als een negatieve elektriciteitsvraag). Bij de toepassing van energieopslag- of conversiesystemen voor het opvangen van seizoensverschillen in deze systeemvariant is een forse dimensionering noodzakelijk voor de opslag en adequate vrijgave van grote hoeveelheden energie. Daarnaast stelt het eisen aan de dimensionering voor lokale dag/nacht-opslagsystemen, om de overdag met PV opgewekte elektriciteit 's avonds tijdens de piekvraag te kunnen verbruiken.



Energievraagpatronen voor zomer en winter van een gemiddelde woning op wijkniveau voor de verschillende systeemvariant.

Er blijkt een sterke gevoeligheid van de resultaten voor de aannames voor PV. In alle systeemvarianten wordt gerekend met een opbrengst van 200 kWh per vierkante meter paneel; in systeemvariant 3 wordt maximaal 20 m² paneel per woning neergezet, waardoor een jaaropbrengst van 4000 kWh/woning mogelijk is. Dit is in dezelfde ordegrrootte als de 'kale' elektriciteitsvraag, zonder extra inzet van technologieën als airco, warmtepompen of elektrische auto's. De inschatting van het maximale gemiddelde oppervlak PV-panelen is behoorlijk optimistisch, temeer daar geen rekening wordt gehouden met mogelijke concurrentie voor dakoppervlak met panelen voor zonneboilers of door 'groene daken'. Aan de andere kant is er ook de mogelijkheid dat over enkele decennia het concept van panelen grotendeels zal zijn vervangen door volledige integratie van fofovoltaïsche en thermische systemen in gebouwen (Montfoort en Ros, 2008). Daarnaast is het aantal eenheden micro-wkk in een wijk ook in grote mate bepalend voor de netto elektriciteitsvraag in met

name systeemvarianten 1 en 3. Kenmerkend voor micro-wkk is dat elektriciteit vooral in de wintermaanden gedurende de avonden geproduceerd wordt, wanneer de warmtevraag hoog is (onder de aanname dat de inzet van micro-wkk's wordt gestuurd op de warmtevraag).

De berekeningen van elektriciteitspatronen geven een duidelijke trend voor alle systeemvarianten: overdag is er in verhouding veel elektriciteitsproductie door met name PV, waardoor de nettovraag beperkt is (en in sommige gevallen zelfs negatief); 's avonds is de productie beperkt en de vraag juist groot, waardoor er een piek in de netto elektriciteitsvraag te zien is gedurende de avonduren. Daarnaast is een duidelijke seizoensinvloed te zien. De netto elektriciteitsvraag is in de winter hoger dan in de zomer. Als dit wordt uitgezet in een jaarcurve, is er dus een piek te zien gedurende de wintermaanden.

Opslagcapaciteit wijk (MWh)	Centrum-stedelijk	Buiten-centrum	Groen-stedelijk	Centrum-dorps	Landelijk wonen
Systeemoptie 1	4	4	2	3	0
Systeemoptie 2a	4	4	2	3	0
Systeemoptie 2b	8	7	5	6	1
Systeemoptie 3	4	4	2	3	0

Per saldo kan geconcludeerd worden dat de fluctuaties in het energieverbruik sterk afhankelijk zijn van het type nieuwe technologieën dat wordt toegepast en het aantal woningen in de wijk. Vooral de opkomst van elektrische auto's zal voor een sterke stijging van de elektriciteitsvraag leiden, tot mogelijk ruimschoots een verdubbeling van de huidige vraag. Groot-schalige toepassing van PV en in mindere mate micro-wkk kan daarentegen tot een aanzienlijke productie van elektriciteit leiden. Daarnaast verandert ook het elektriciteitspatroon gedurende de dag. Door veel lokale productie met nieuwe technologieën kan de vraag overdag zelfs negatief worden, terwijl de vraag gedurende de nacht juist toeneemt, met name door het opladen van elektrische auto's en het gebruik van elektrische warmtepompen. De exacte samenstelling van de wijk is slechts van zeer beperkt belang in deze analyse.

3.3.2 Afstemming vraag en aanbod

De afstemming tussen vraag en aanbod van elektriciteit kan op verschillende manieren georganiseerd worden (zie paragrafen 2.2 en 4.4), met als primaire optie de opslag of conversie van energie. Daarbij kan onderscheid gemaakt worden tussen twee soorten opslag: opvangen van dag/nacht-ritme en seizoensopslag.

Opvangen dag/nacht-ritme

Voor het opvangen van dag/nacht-ritmes wordt overdag geproduceerde elektriciteit gebruikt tijdens piekuren 's avonds. Afhankelijk van de systeemvariant, kan voor het afvlakken van de pieken in de netto vraagpatronen van een gemiddelde woning op wijkniveau, per woning gedurende circa zes uur ongeveer 400 W worden verschoven. Deze 400 W is het verschil tussen de gemiddelde elektriciteitsvraag en de piek. Hiervoor zou een opslagsysteem nodig zijn met een capaciteit van gemiddeld ongeveer 2,5 kWh per woning, in systeemvariant 3 mogelijk oplopend tot circa 5 kWh. Een systeem van 2,5 kWh kan op woningniveau worden toegepast, maar dan moet rekening worden gehouden met veel grilliger vraagpatronen, met pieken tot 10 kW. Hierdoor is veel extra capaciteit nodig in de dimensionering van een opslagsysteem. Op wijkniveau is het gemiddelde vraagpatroon per huishouden veel vlakker, waardoor het goedkoper en efficiënter is om de verschillen op wijkniveau op te vangen. Bovendien is op wijkniveau vaak een betere combinatie te maken met verschillende lokale energieproducenten, waardoor de netto vraag lager is. Voor een wijk van duizend woningen volstaat op basis van bovenstaande berekening een opslagsysteem in de orde van grootte van 2,5 MWh en 400 kW. Dit is geen nauwkeurige dimensionering, maar een globale indicatie voor de dimensionering van een opslagsysteem op wijkniveau. In de praktijk zal waarschijnlijk altijd een groter systeem nodig zijn, met name omdat batterijen vaak niet volledig ontladen

kunnen worden en omdat de efficiëntie van opslagsystemen nooit 100% is.

De meest aantrekkelijke technieken voor opslag zijn waarschijnlijk de NaS-batterijen of stationaire lithiumbatterijen, waarbij de kosten op de lange termijn waarschijnlijk onder de 1000 euro per woning komen. Een andere optie voor het opvangen van dit dag/nacht-ritme is om warmte op te slaan in buffervaten. De warmte die overdag direct of via conversie wordt geproduceerd kan dan 's nachts worden gebruikt voor verwarming of, wederom via conversie, voor elektriciteitsproductie.

Voor de opslag van elektriciteit kan ook gebruik worden gemaakt van de capaciteit van accu's in elektrische auto's, waarbij dan wel de functionaliteit vereist is dat elektriciteit uit de accu's aan het net teruggeleverd kan worden ('vehicle-to-grid' of V2G) (Scheepers et al., 2007). Van belang zijn dan de opslagcapaciteit die geboden wordt en de mate waarin gevarieerd kan worden in het laadprofiel. Bij elektrische auto's met een nominale capaciteit van 10 kWh en een benodigde capaciteit van 7 kWh voor de dagelijkse ritten resteert een gemiddelde dagelijkse opslagcapaciteit van 3 kWh. Dit betekent dat in theorie de gehele benodigde opslag van 2,5 MWh op wijkniveau in de meeste wijktypen met elektrische auto's kan worden gedekt, behalve in het wijktype 'landelijk wonen' en in enkele systeemvarianten onder 'groen stedelijk' (zie Tabel 3.6).

De mogelijkheid om vraag en aanbod af te stemmen door te variëren in het laadprofiel wordt al zichtbaar in de gevoeligheid van de profielen voor de aannames ten aanzien van het laadprofiel. Het is voor de eigenaar niet belangrijk wanneer de elektrische auto exact geladen wordt, als hij of zij maar weer kan vertrekken met een volgeladen accu. Dit kan voor een zekere spreiding zorgen van de elektriciteitsvraag voor elektrische auto's, waarmee de pieken in het elektriciteitsverbruik in een wijk worden afgevlakt.

Opvangen seizoensverschillen

In alle systeemvarianten is er een verschil tussen de dagelijkse elektriciteitsvraag in de zomer en in de winter. De omvang van dit seizoensverschil is sterk afhankelijk van de systeemvariant, maar ligt in de orde van grootte van 1 kWh/dag per woning. Voor een adequate afstemming van vraag en aanbod over de seizoenen betekent dit een seizoensopslagcapaciteit van ongeveer 150 kWh/woning.

Een elektriciteitsopslagsysteem op seizoensbasis is niet alleen fors in omvang, maar ook erg inefficiënt in gebruik doordat slechts één keer per jaar wordt geladen en ontladen. Hiervoor zijn de meeste opslagsystemen te duur. Bovendien spelen

aspecten als zelfontlading bij deze lange opslagperioden een belangrijke rol. Seizoensopslag van elektriciteit is daardoor in de praktijk niet of nauwelijks haalbaar. Voor warmte kan seizoensopslag wel aantrekkelijk zijn, bijvoorbeeld met warmte/koude-opslagsystemen (Janssen en Ros, 2009). Door koppeling van warmte- en elektriciteitssystemen kan warmteopslag mogelijk wel een rol spelen in afstemming van seizoenspatronen in vraag en aanbod van elektriciteit.

Afstemming inzet energietechnologieën

Om een goedwerkende decentrale energievoorziening te hebben, kan het interessant zijn om bepaalde technologieën in samenhang met elkaar toe te passen, waardoor vraag en aanbod beter op elkaar afgestemd kunnen worden en de behoefte aan opslag of conversie beperkt wordt. PV en micro-wkk vullen elkaar goed aan in de productie van elektriciteit over de seizoenen. Bij toepassing van beide technieken kan over het gehele jaar een flink aandeel van de elektriciteitsvraag worden gedekt. Ook de toepassing van airconditioning in combinatie met PV kan aanvullend werken, doordat de toename in elektriciteitsvraag over zowel seizoen als zomerdag een hoge mate van gelijktijdigheid kent met de elektriciteitsproductie door middel van PV (IEA, 2008). Ook micro-wkk en warmtepompen zijn interessant in combinatie met elkaar, als de elektriciteit geproduceerd met behulp van een micro-wkk in een huis correleert met de behoefte aan elektriciteit voor de warmtepomp in een ander huis.

Daarnaast zijn steeds meer connecties en afhankelijkheden denkbaar van de elektriciteitsvoorziening met andere energiebronnen, zoals het aardgasnet, mogelijke warmtenetten of in de toekomst wellicht waterstof. Verschillende energiesystemen worden gekoppeld in technieken als micro-wkk, waarin aardgas of waterstof als brandstof wordt gebruikt voor de productie van zowel warmte als elektriciteit, en in warmtepompen die elektriciteit gebruiken voor de productie van warmte. In dit rapport is de koppeling tussen het elektriciteitssysteem en andere energiesystemen niet verder geanalyseerd.

4

Effectbeoordeling decentrale elektriciteitssystemen in de gebouwde omgeving

4.1 Criteria en indicatoren

Het effect van de systeemoptie decentrale elektriciteitsvoorziening in de gebouwde omgeving kan worden getoetst aan de hand van verschillende indicatoren. In de PBL-transitiemethodiek is een raamwerk ontwikkeld om de indicatoren te classificeren naar schaal en naar de dimensies ecologie, economie en sociaal (Ros et al., 2006a). Daarnaast hangt de keuze van deze indicatoren af van het effect en de mate waarin kwantitatief gescoord kan worden. Omdat de analyse van de casus decentrale energievoorziening sterk afhankelijk is van het schaalniveau, wordt het raamwerk iets uitgebreid voor een classificatie van effecten op drie verschillende schaalniveaus (zie Tabel 4.1).

Binnen dit raamwerk wordt een evaluatie van de effecten van de systeemoptie decentrale energievoorziening uitgevoerd op de volgende indicatoren (met tussen haakjes de categorieën waarin de indicatoren worden uitgewerkt):

- *Milieudruk* (C, F, I) hangt primair samen met de mate waarin emissies kunnen worden gereduceerd door inzet van duurzame elektriciteitsopwekkers. Voor de inzet van de verschillende technieken kan een indicatie gegeven worden van emissies van CO₂ (I), NO_x (C, F) en fijn stof (C). Hierbij wordt voortgebouwd op eerdere transitierapporten over verschillende decentrale energietechnologieën in de gebouwde omgeving (Elzenga et al., 2006; Montfoort en Ros, 2008; Janssen en Ros, 2009; Nagelhout en Ros, 2009).
 - *Ruimtelijke effecten* (A, B, C) hangen samen met de inbedding van specifieke technologieën en met de architectuur van het netwerk op wijkniveau.
 - *Leveringszekerheid op de schaal van huishoudens* (A, B) hangt samen met technische betrouwbaarheid van het systeem en de organisatie van coördinatiemechanismen. De kwetsbaarheid van het systeem voor uitval en door de mate waarin pieken kunnen worden opgevangen, is een belangrijke indicator voor de leveringszekerheid.
- Na opschaling kan een aantal indicatoren specifiek uitgewerkt worden voor een wijkoverstijgend schaalniveau:
- *Voorzieningszekerheid* (D, E, H) van grondstoffen zal verschuiven van levering van brandstof naar levering van componenten voor de opbouw en instandhouding van het systeem.
 - *Investeringen* (E, H) in het een decentrale netwerk kunnen vergeleken worden met investeringen in het elektriciteitsnet die überhaupt gemaakt moeten worden ter vervanging van afgeschreven onderdelen. Hier wordt voortgebouwd op enkele vrij generieke inschattingen.

Met deze indicatoren worden alle dimensies in het evaluatieraamwerk geëvalueerd, behalve de internationale sociale dimensie. Deze is lastig te vatten in een evaluatie van lokale energiesystemen, anders dan in het kader van mogelijke afwentelingen en verschuivingen in sociaal-economische verhoudingen. Deze zijn echter zeer lastig te voorzien en daarom buiten de context van deze analyse gehouden.

Classificatie effectbeoordeling van systeemopties

Tabel 4.1

	Sociaal	Economisch	Ecologisch
Wijkniveau	A	B	C
Nederland	D	E	F
Elders	G	H	I

4.2 Milieudruk

Voor de berekening van emissiereducties in de verschillende systeemvarianten is uitgegaan van *volledige* inzet van decentrale elektriciteitsopslagstechnologieën, om te voorkomen dat elektriciteit verloren gaat of extra moet worden ingenomen van het achterliggende netwerk. Daarnaast is de analyse afgebakend tot *directe* emissies; emissies als gevolg van productie van bijvoorbeeld zonnepanelen zijn in de berekeningen dus niet meegenomen. Op de lange termijn worden deze overigens ook als laag ingeschat (Montfoort en Ros, 2008). Voor het gebruik van elektrische auto's is een vergelijking gemaakt met ingeschatte emissies van 'conventionele' auto's op basis van fossiele brandstoffen in 2050. Voor warmtepompen en micro-wkk geldt de hr-ketel als referentiepunt. De achtergrondberekeningen en aannames zijn toegelicht in Bijlage 2.

In alle systeemvarianten geldt, ten opzichte van de huidige situatie als referentie, een toename in de bruto huishoudelijke elektriciteitsvraag, met name als gevolg van de toepassing van elektrische auto's en elektrische warmtepompen. Vervolgens onderscheiden de systeemvarianten zich door de wijze waarop in deze vraag wordt voorzien. In alle systeemvarianten is dit voor een (fors) deel door middel van lokale opwekkers als micro-wkk en PV, maar in alle gevallen wordt een deel van de elektriciteit ingenomen uit het netwerk en geproduceerd op basis van centrale opwekking. Voor een inschatting van de CO₂-emissies in de verschillende systeemvarianten is het dan ook van belang hoe de centrale elektriciteitsproductie is vormgegeven. In de berekeningen worden per systeemvariant twee toekomstige opties van centrale productie verkend: kolen of gas, in combinatie met CO₂-opslag. Deze opties leiden tot een forse CO₂-emissiereductie (Van den Wijngaart en Ros, 2009), wat een sterke weerslag heeft op de resultaten van de berekeningen voor de decentrale systeemvarianten. Daarom is ook een berekening gemaakt van de CO₂-emissiereductie met een centrale elektriciteitsproductie op basis van het huidige productiepark. Hier treden dus geen verbeteringen op in de centrale productie, maar spitst het resultaat zich toe op *sec* de decentralisatie van het systeem.

Voor alle systeemvarianten met decentrale elektriciteitsvoorziening geldt dat CO₂-emissies per huishouden (gemiddeld over alle wijktypen) fors afgenomen zijn in 2050 (zie Figuur 4.1). De CO₂-reductie is voor circa tweederde toe te schrijven aan de lagere emissies als gevolg van een efficiëntere centrale elektriciteitsproductie, behalve in systeemvariant 3, waar emissies vooral worden vermeden door een duurzame decentrale productie met PV en urban wind. Daarnaast leidt in alle gevallen vooral elektrisch rijden tot forse CO₂-emissiereducties. In de varianten 2a en 2b wordt bovendien veel winst gehaald door de inzet van warmtepompen, die weliswaar de vraag naar elektriciteit fors verhogen, maar door hun efficiënte warmteproductie per saldo flink kunnen bijdragen aan CO₂-emissiereducties. In systeemvariant 3 wordt decentraal zoveel elektriciteit opgewekt met micro-wkk en PV dat centrale productie nauwelijks nog nodig is en in sommige wijken zelfs overschotten worden geproduceerd.

Onder de aanname dat centrale elektriciteitsproductie niet efficiënter wordt ('huidig park' in Figuur 4.1) zijn de emissie-

reducties iets gematigder, maar nog altijd significant. Bij een trendmatige ontwikkeling, zonder bovenmatige inzet van decentrale elektriciteitsopwekking (systeemvariant 1) treedt al een gemiddelde jaarlijkse emissiereductie van circa 1000 kg CO₂ per huishouden op. Bij grootschalige inzet van decentrale opwekking maakt de wijze van centrale productie niet veel meer uit en zijn de emissiereducties vergelijkbaar met systeemvarianten 1 en 2a, inclusief kolen en CO₂-opslag.

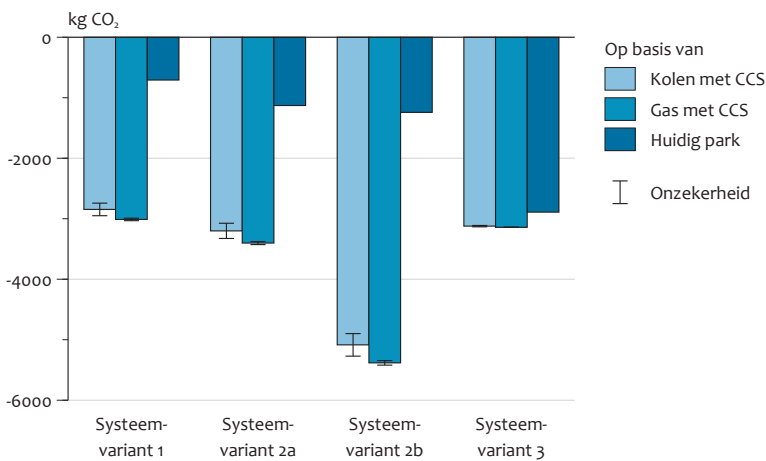
Voor micro-wkk is de CO₂-emissiefactor afhankelijk van de manier waarop waterstof wordt geproduceerd. Bij een centrale omzetting van aardgas naar waterstof kunnen bijbehorende CO₂-emissies worden afgevangen en opgeslagen, maar bij een kleinschalige en decentrale waterstofproductie is dit niet meer mogelijk. Op de lange termijn kan dit onderdeel van het decentrale systeem dan ook leiden tot hogere CO₂-emissies dan centrales op fossiele brandstoffen met CO₂-afvang en -opslag. Centrale productie van waterstof vereist echter wel een infrastructuur voor de distributie ervan.

Voor de emissies van NO_x zijn de centrale opties minder onderscheidend, omdat hier in alle gevallen voldaan moet worden aan wettelijke prestatienormen in het kader van de NO_x-emissiehandel (Elzenga et al., 2006). Wel kan een vergelijking worden gemaakt tussen emissies van centrales op basis van huidige emissiefactoren en op basis van een 'verbeterd park' met een aangescherpte norm van 30 g NO_x per GJ (zie Figuur 4.2). Op basis van de huidige emissienormen neemt in alle gevallen de NO_x-emissie toe als gevolg van een grotere vraag naar elektriciteit bij centrale productie; alleen in systeemvariant 3 wordt centrale productie voor een groot deel vervangen door decentrale opwekking met veel minder NO_x-emissies. Bij verbeterde centrale emissienormen wordt het effect van de grotere vraag enigszins afgezwakt. Dit betekent overigens niet dat de totale huishoudelijke NO_x-emissies noodzakelijkerwijs hoger zijn, want de emissies als gevolg van automobilititeit zijn bij zowel elektrisch vervoer als in de referentie bijna tot nul gereduceerd.

Emissies van fijn stof en SO₂ zijn enkel gerelateerd aan centrale elektriciteitsopwekking. Bij een hogere netto vraag naar centrale elektriciteitsopwekking nemen de totale emissies voor deze stoffen in beginsel iets toe (op basis van emissiefactoren uit het BEES-B-akkoord). Bij een hoog aandeel decentrale opwekking, in systeemoptie 3, zijn de emissies navenant lager.

Een decentraal energiesysteem met een groot aandeel duurzame bronnen kan dus een significante bijdrage leveren aan de reductie van CO₂-emissies, door uitsparing van elektriciteit opgewekt met fossiele bronnen. Ook andere emissies zoals NO_x, SO₂ en fijn stof kunnen sterk worden beïnvloed door een dergelijke systeemverandering. Een volwaardig gebruik van de duurzame bronnen vergt echter wel dat leveringsoverschotten van elektriciteit uit zon en wind kunnen worden opgeslagen, en dat deze vrij kunnen komen bij leveringstekorten. Opslag is dan een methode om de afstemming tussen aanbod uit wind en zon beter af te stemmen op de vraag, en zodoende het uitgespaarde fossiele vermogen te vergroten (Menkveld, 2004). Overigens dient hierbij aangetekend te worden dat emissies in een decentraal energiesysteem diffu-

Ten opzichte van systeemvariant 0

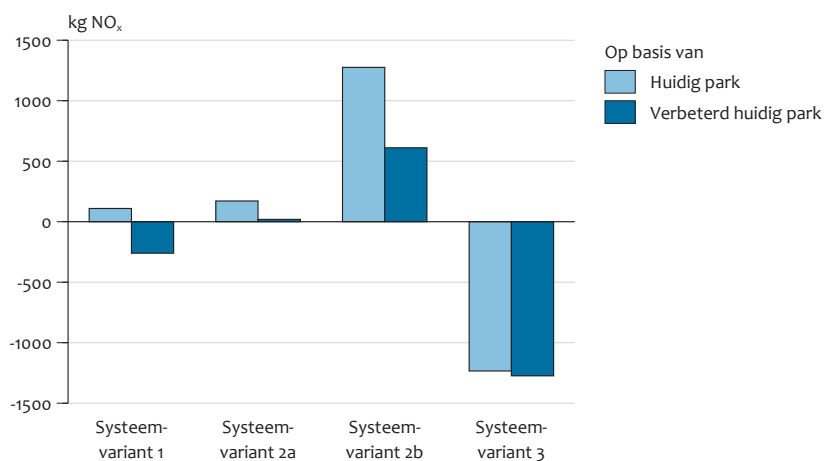


Vershil CO₂-emissies (in kg per huishouden) voor de systeemvarianten in 2050, ten opzichte van huidige niveau. Voor het aandeel elektriciteit uit de centrale productie zijn drie mogelijkheden vergeleken.

NO_x-emissie per huishouden 2050

Figuur 4.2

Ten opzichte van systeemvariant 0



Vershil NO_x-emissies (g per huishouden) ten opzichte van huidige niveau, met centrale productie op basis van huidige emissiecoëfficiënten en op basis van verbeterde coëfficiënten.

ser zijn, waardoor technische mitigatie-opties als afvang lastig of onmogelijk worden.

4.3 Ruimtelijke effecten

Ruimtelijke effecten van een decentrale energievoorziening hangen samen met de architectuur van het netwerk, de inpassing in de wijk en het aantal toegepaste technologieën.

De huidige laagspanningsinfrastructuur is nagenoeg volledig ondergronds gebracht. Ruimtelijke effecten in samenhang met de netwerkarchitectuur op wijkniveau zijn bovengronds

dan ook te verwaarlozen, maar ondergronds is een toenemende concurrentie om het gebruik van de bodem denkbaar. Deze concurrentie wordt versterkt door de inpassing van technologieën die ook gebruik maken van de ondergrond, zoals warmtepompen of warmte/koude-opslag. Hierdoor ontstaat in toenemende mate behoefte aan regelgeving om de ruimtelijke ordening in de ondergrond te coördineren (zie ook Janssen en Ros, 2009).

Bovengronds zijn slechts marginale effecten te verwachten door inpassing van de decentrale technologieën in deze studie. Airconditioning, micro-wkk en warmtepompen zijn technologieën die in huizen toegepast worden, eventueel

deels onder de grond. PV en urban wind kunnen geïnstalleerd worden op daken, waardoor in feite gebruik gemaakt wordt van beschikbare ruimte, zij het dat een groot deel niet beschikbaar is in verband met oriëntatie, schaduw, windpatronen en andere gebruiksfuncties. Gemeenten en stedenbouwkundigen kunnen een belangrijke rol spelen in de ontwikkeling van een meer zonvriendelijke verkaveling, om zo in te spelen op de mogelijkheden voor inpassing van zonnepanelen (Menkveld, 2004). Elektrische auto's hebben op wijkniveau in beginsel een forse ruimtelijke impact, maar als er sprake is van vervanging van reguliere auto's met verbrandingsmotor is hooguit sprake van beperkte *extra* impact. Wel is het denkbaar dat in de openbare ruimte voorzieningen moeten worden getroffen voor centrale (snel)laadmogelijkheden, terwijl het aantal tankstations kan afnemen (Nagelhout en Ros, 2009). Ten slotte kan benoemd worden dat er een toenemende maatschappelijke weerstand tegen hoogspanningsleidingen wordt gesignaleerd (zie ook Ministerie van Economische Zaken, 2008a), maar er valt niet direct te verwachten dat een verregaande ontwikkeling van de systeemoptie decentrale energie leidt tot een afname in het gebruik van hoogspanningsleidingen (Meeuwssen, 2007).

De ruimtelijke uitwerking van een 'regelhuis' op wijkniveau voor de balancerings van vraag en aanbod vergt een idee van de omvang ervan. De dimensionering van de opslagcapaciteit wordt sterk bepaald door de toegepaste opslagtechnologie. Op het niveau van een wijk zijn alleen batterijen een serieuze optie voor opslag door de flexibele inzetbaarheid en relatief eenvoudige inpasbaarheid in het netwerk. Ze kunnen op huishoudelijk niveau ingepast worden, bijvoorbeeld onder de nok van het dak. Op wijkniveau kunnen ze ingepast worden door een (beperkte) uitbreiding van het transformatorhuis, waar bij de (her)inrichting van een wijk rekening mee gehouden kan worden (Scheepers, 2008).

4.4 Leveringszekerheid voor huishoudens

De Nederlandse energie-infrastructuur is één van de meest betrouwbare ter wereld. De infrastructuur voor aardgas is zeer uitgebreid en nagenoeg ieder huishouden heeft een gasaansluiting. Ook de elektriciteitsinfrastructuur is van hoge kwaliteit, fijnmazig en zeer betrouwbaar. De uitval is met gemiddeld 30 minuten per huishouden per jaar zeer gering (KEMA, 2008). De betrouwbaarheid van het elektriciteitsstelsel wordt nog versterkt doordat Nederland relatief veel verbindingen heeft met buitenland en ook relatief veel decentrale (wkk) productiecapaciteit (Ministerie van Economische Zaken, 2008a).

4.4.1 Rol van aansturingmechanismen

In het klassieke model hangt leveringszekerheid van elektriciteit sterk samen met de technische betrouwbaarheid van het systeem en met de organisatie van coördinatiemechanismen. In het model van decentrale elektriciteitsvoorziening wordt de leveringszekerheid sterk bepaald door de kwetsbaarheid van het systeem voor uitval en door de mate waarin pieken kunnen worden opgevangen. De omvang van het geïnstalleerd vermogen en de wijze van afstemming tussen vraag en aanbod zijn dus bepalend voor de leveringszekerheid.

Daarnaast is de leveringzekerheid sterk afhankelijk van de betrouwbaarheid van de opwekkingstechnologieën in het systeem; met name technologieën die afhankelijk zijn van wisselvallige bronnen als zon en wind kunnen onbetrouwbaar zijn voor de elektriciteitsvoorziening. Ten slotte spelen de aard en opbouw van het elektriciteitsnetwerk een belangrijke rol ten aanzien van de kwetsbaarheid en daarmee ook in de betrouwbaarheid van het decentrale elektriciteitsstelsel.

Op wijkniveau zijn batterijen momenteel de belangrijkste optie voor elektriciteitsopslag, vanwege de combinatie tussen de relatief grote capaciteit en snelle responstijd. Hierdoor hebben batterijsystemen een grote flexibiliteit en kunnen ze de stabiliteit en stroomkwaliteit van toekomstige distributienetten in veel verschillende situaties goed waarborgen (Scheepers, 2008). Deze batterijen kunnen worden geplaatst in huizen of worden vormgegeven op wijkniveau, maar ook accu's in elektrische auto's kunnen een functie vervullen als opslag in het energiesysteem.

Als vraagsturing ('demand management' of 'demand response') een rol speelt in de balancerings van het elektriciteitsstelsel, ontstaat de mogelijkheid om de elektriciteitsvraag af te vlakken door tijdelijk de stroomvraag van apparaten te beperken. In een virtuele centrale kan dit mogelijk een verminderde leveringszekerheid betekenen voor huishoudens die beschikbaar zijn voor een dergelijke afkoppeling. Leveringszekerheid zal daarmee een prijs krijgen: het toestaan van tijdelijke afkoppeling kan worden gecompenseerd door bijvoorbeeld een korting op de elektriciteitsprijs. Overigens is het in dit scenario niet reëel te veronderstellen dat een heel huishouden als zodanig wordt afgekoppeld. Het zal veeleer gaan om specifieke apparaten met een bufferfunctie, zoals warmtepompen.

4.4.2 Rol van decentrale energieproductietechnieken

De betrouwbaarheid van het decentrale elektriciteitsstelsel is daarnaast afhankelijk van de betrouwbaarheid van de elektriciteitsproductie met de aanwezige opwekkingstechnologieën. Voor PV hangt deze betrouwbaarheid samen met de mate van zonneshijn op een dag. Het intermitterende karakter van zonne-energie kan – afhankelijk van het aandeel ervan en van de regelbaarheid van de rest van het elektriciteitspark – mogelijk wel leiden tot problemen ten aanzien van de leveringszekerheid. Dit kan bij grootschalige toepassing van PV ondervangen worden door de inzet van snel regelbaar achtergrondvermogen. Bij een hoge penetratiegraad van PV is dus bufferwerking nodig, bijvoorbeeld met behulp van opslagsystemen. Ongeveer 10% van het totaal opgestelde elektriciteitsproductievermogen kan als piekvermogen worden ingevoerd zonder bijzondere maatregelen te hoeven treffen aan de elektriciteitsinfrastructuur (Menkveld, 2004). Dit aandeel kan nog aanzienlijk verhoogd worden door verbeteringen in de windvoorspellingen voor de korte termijn en door (internationale) verhandeling van overschotten in productie (Ummels, 2009).

Op lokaal niveau en met gemiddelde variaties gedurende langere tijd kan de gezamenlijke inzet van decentrale energietechnologieën in alle systeemvarianten de 10% gemakkelijk overstijgen. Bij een maximale productiepiek, in systeemvari-

ant 3 in de zomer rond het midden van de dag, kan in met name centrum-dorpse wijken met een hoog aandeel PV de productie het drievoudige zijn van de vraag op dat moment. Per saldo is de dagelijkse vraag groter dan de dagelijkse productie, dus opslagsystemen zullen uitkomst moeten bieden om de leveringszekerheid aan huishoudens te kunnen garanderen. Daarnaast is ook in systeemoptie 3 een aanvullende invoer van elektriciteit nodig uit het achterliggende netwerk, zeker als het aandeel elektrische auto's hoger uitpakt dan in deze optie is aangenomen.

Voor micro-wkk is de productie beter te regelen, maar wel gekoppeld aan de warmtevraag in plaats van aan de elektriciteitsvraag. In goed geïsoleerde huizen kan echter een warmtebuffering ontstaan, waardoor de micro-wkk tijdelijk afgeschakeld kan worden van de elektriciteitslevering, om zo piekproductie af te vlakken. Voor micro-wkk (op basis van brandstofcellen) is voor 2050 een afgevlakt productiepatroon aangenomen, waardoor de dagelijkse pieken relatief klein zijn. Rekening houdend met seizoensfluctuaties zal micro-wkk echter vooral in de winter elektriciteit produceren (volgend op de warmtevraag), terwijl PV vooral 's zomers zal produceren. Voor windenergie is het seizoenspatroon minder uitgesproken.

De installatie van decentrale energieopwekkers bevinden zich 'achter de meter' van woningen, of leveren stroom aan gebouwen of direct aan het laagspanningsnet. Wanneer op lange termijn een groot aandeel van deze technologieën wordt ingezet, kan op hoogspanningsniveau de belastinggraad van verbindingen lager worden (Menkveld, 2004), al zijn er ook inschattingen die uitgaan van een minimaal gelijkblijvende hoogspanningsbelasting (Meeuwssen, 2007). Wel zijn in sommige gevallen verzwaringen in het laagspanningsnet nodig. Aanpassingen zullen in het algemeen geleidelijk kunnen plaatsvinden (Menkveld, 2004).

4.4.3 Kwetsbaarheid en betrouwbaarheid als functie van de vormgeving van het netwerk

Het systeemontwerp van vrijwel alle elektriciteitsnetwerken wordt gekenmerkt door het ontbreken van schaal-effecten: de topologie van het netwerk verandert niet als het wordt uitgebreid of als een deel ervan wordt beschouwd. In dergelijke niet-homogene netwerken (zoals ook sociale netwerken, internet, enzovoorts) heeft een beperkt aantal netwerkpunten erg veel contacten, terwijl de meeste netwerkpunten met een beperkt aantal contacten in het netwerk opgenomen zijn. Het netwerk wordt dus in sterke mate bepaald door een klein aantal cruciale netwerkpunten, in het geval van het elektriciteitsnetwerk bijvoorbeeld grote productie-eenheden of grensovergangen. Dergelijke netwerken kennen een zeer hoge tolerantie tegen willekeurige uitval van netwerkpunten: in de meeste gevallen heeft dit immers maar een beperkt aantal contacten in het netwerk. Echter, bij moedwillige of toevallige uitval van één van de cruciale punten in het netwerk zal het hele netwerk in kunnen storten ('cascading failure') (Albert et al., 2000). Een recent voorbeeld is de stroomuitval in grote delen van Europa als gevolg van het afsluiten van een hoogspanningskabel over de Eems in november 2006. Grootschalige inzet van decentrale energieproductie spreidt in theorie de effecten bij uitval van

productie-eenheden door een meer homogene topologie van het netwerk. Hierdoor wordt het netwerk minder robuust tegen willekeurige uitval van productie-eenheden, maar de kans op uitval van (grote delen van) het elektriciteitsstelsel is minder groot door het ontbreken van cascade-effecten.

4.5 Voorzieningszekerheid

De voorzieningszekerheid van grondstoffen zal verschuiven van levering van brandstof naar levering van componenten voor de opbouw en instandhouding van het systeem. Binnenlandse elektriciteitsopwekking met behulp van technieken die niet afhankelijk zijn van de import van fossiele brandstoffen heeft per saldo een positief effect op de voorzieningszekerheid, mits de levering van systeemcomponenten geen nieuwe knelpunten oplevert. Daarnaast geldt voor autonome systemen dat deze altijd in positieve zin bijdragen aan de voorzieningszekerheid (Menkveld, 2004)

Voor een grootschalige inzet van micro-wkk, zoals in met name systeemvariant 3, kan de afhankelijkheid van aardgas worden vergroot, ten koste van elektriciteitsproductie op basis van centrale bronnen (vaak kolen). Echter, bij een efficiënte elektriciteitsproductie met micro-wkk op basis van brandstofcellen kan de totale hoeveelheid benodigd aardgas voor de dekking van warmtevraag én elektriciteitsvraag in vergelijking met centrale productie lager zijn, waardoor de voorzieningszekerheid per saldo toeneemt. Bij minder efficiënte Stirling-gedreven micro-wkk is dit echter nog niet het geval. Bovendien kan de decentrale aardgasafhankelijkheid ook vergeleken worden met afhankelijkheid van centraal gestookte kolen, die vooralsnog op de mondiale energiemarkt beter en ruimer beschikbaar zijn dan aardgas. Er van uitgaande dat in 2050 de gasvoorraad van Nederland goeddeels uitgeput zal zijn, kan de afhankelijkheid van gas voor gasgestookte decentrale elektriciteitsproductie (micro-wkk) of voor de opvang van vraagpieken in het systeem de afhankelijkheid van buitenlandse leveringen vergroten.

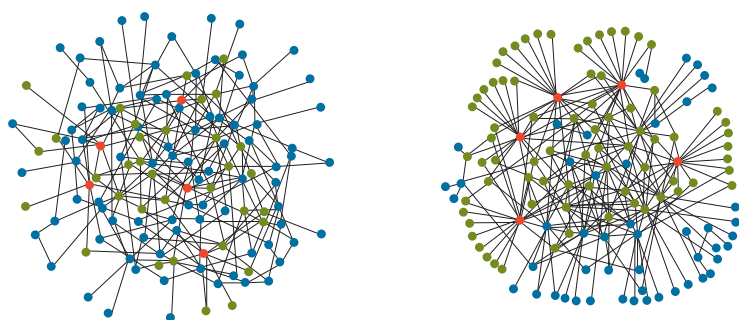
Opslagtechnologieën (eventueel in de vorm van accu's in elektrische auto's) kunnen een bijdrage leveren aan de vermindering van de afhankelijkheid van geïmporteerde fossiele brandstoffen, met name door de rol die ze spelen in het vergroten van de potentiële inzet van duurzame maar intermitterende technieken op basis van zon en wind. Het effect van opslagtechnieken op de voorzieningszekerheid is dus indirect. Daarnaast is het denkbaar dat het piekvermogen door de grootschalige inzet van fluctuerende elektriciteitsbronnen niet met opslagtechnologieën wordt opgevangen, maar met de inzet van gascentrales. De afhankelijkheid van gas uit het buitenland neemt in die situatie dus toe, waardoor de voorzieningszekerheid afneemt.

4.6 Investerings

In de komende decennia zullen in alle gevallen forse investeringen nodig zijn voor vernieuwing, uitbouw en reparatie van het huidige elektriciteitsnetwerk, dat op afzienbare termijn tegen het einde van de reguliere levensduur aan loopt. De IEA

Homogeen exponentieel netwerk

Schaalvrij, niet-homogeen netwerk



- 5 knooppunten met grootste aantal verbindingen
- Directe buren van de grootste 5
- Overige knooppunten

Vergelijking tussen een homogeen exponentieel netwerk en een schaalvrij, niet-homogeen netwerk. In een exponentieel netwerk hebben de meeste knooppunten een vergelijkbaar aantal verbindingen. In een schaalvrij netwerk hebben de meeste knooppunten slechts één of twee verbindingen, terwijl enkele knooppunten een groot aantal verbindingen hebben, waardoor het systeem volledig gekoppeld is. In rood zijn de vijf knooppunten met het grootste aantal verbindingen weergegeven, in groen de directe buren. De vijf rode knooppunten voorzien direct 27% van het exponentiële netwerk, maar 60% van het schaalvrije netwerk. Bron: (Albert et al., 2000)

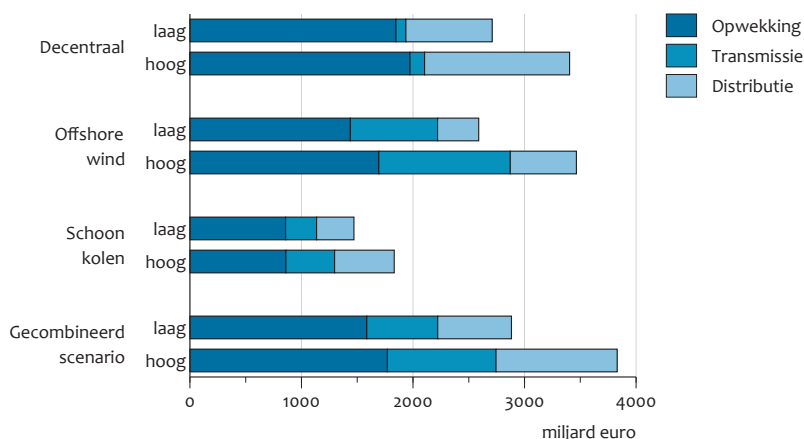
schat de wereldwijde investeringen in ontwikkeling en vervanging van de infrastructuur voor elektriciteitsvoorziening in de periode 2001-2030 in de orde van circa 8200 miljard euro, waarvan 925 miljard euro voor Europa (EU-15) (IEA, 2003). De Europese Commissie schat dat tot 2030 een investering in de energie-infrastructuur nodig is van circa 1000 miljard euro, inclusief de aanleg van windmolenparken, gaspijpleidingen, verbetering van opslagmogelijkheden voor gas en de aanleg van een ‘energie-ring’ rond de Middellandse Zee ten behoeve van zonne-energie (Energiegids, 2008a). In de meer recente *Energy Technology Perspectives 2008* geeft de IEA wereldwijd tot 2050 voor het basisscenario een geschatte mondiale investeringsopgave van circa 9900 miljard euro (IEA, 2008). In de meer recente studie wordt geen specificatie naar Europa gemaakt, maar teruggerekend via schattingen voor de OESO kan de investering in het elektriciteitsnetwerk tot 2050 oplopen tot 2000 miljard euro. De Europese Commissie schat in een recent rapport dat op Europese schaal in de komende drie decennia zeker 750 miljard euro aan investeringen nodig is voor een decentralisatie van de elektriciteitsinfrastructuur, gelijkmatig verdeeld over elektriciteitsvoorziening en distributienetwerken (European Commission, 2007b).

Voor decentrale energiesystemen geldt in dit geval met name dat geconcurrereerd wordt met centrale systeemopties, zowel op basis van fossiele energie (al dan niet met CO₂-opslag) en nucleaire energie als op basis van grootschalige zon (CSP)- en windparken. Dat roept de vraag op of een decentraal energiesysteem qua kosten gunstig scoort in vergelijking met de concurrerende systemen, en of er een aandeel gedeelde kosten denkbaar is die voor alle systemen gemaakt moet worden. Voor een scenario op basis van decentrale energie liggen de grootste investeringsbarrières in de algehele verdere ontwikkeling van technologieën die zich nu nog vaak in een

vroeg (experimentele) fase bevinden, in de versterking en ontwikkeling van het tweerichtingsdistributienetwerk en in de ontwikkeling van een coördinerende ICT-infrastructuur. Deze meerkosten kunnen worden vergeleken met investeringen op het gebied van CO₂-opslag in een scenario met schoon fossiel en in investeringen voor een netwerk van hoogspanningskabels en bijbehorende infrastructuur in het scenario met centrale duurzame energieparken (zie Figuur 4.4). De totale schattingen voor investeringen in een decentraal elektriciteitssysteem voor de hele EU-27 belopen dan 2750-3400 miljard euro, afhankelijk van onzekerheden in kosten en exclusief investeringen in coördinerende technologieën vanwege de grote onzekerheden in de schattingen van kosten hiervoor (Roland Berger Strategy Consultants, 2008).

De kosten voor elektriciteitsproductie met PV in Nederland liggen momenteel in de orde van 50 eurocent per kWh, een factor tien hoger dan van de huidige centrale productiesystemen. De technologie is nog volop in ontwikkeling. Nederland is echter minder bedeed met zon dan vele andere landen, waardoor ook op de lange termijn rekening moet worden gehouden met een factor 2 à 3 verschil (IEA, 2008; Montfoort en Ros, 2008).

Investeren in een nieuwe technologie kent voor de investeerder meer risico's en onzekerheden dan het *sac* vernieuwen of uitbreiden van bestaande technologieën (Scott et al., 2008). Dit geldt met name voor infrastructurele investeringen, die het ontwerp van een heel systeem bepalen en een investeringsfocus van verschillende partijen vergt. Daarbij kan een gedeelde visie ontstaan op één van bovenstaande scenario's (of een ander scenario), maar het is ook denkbaar dat alle scenario's zodanig worden ontwikkeld dat alle ontwikkelingsmogelijkheden open worden gehouden, tegen zo laag



Investerings voor elektriciteitsvoorziening in de EU (tot 2030) op basis van drie scenario's en één gecombineerd scenario. (Bron: Roland Berger Strategy Consultants, 2008).

mogelijke kosten. In het geval van decentrale energievoorziening kunnen dergelijke investeringen worden gemaakt in het hoogspanningsnet, waardoor een achtervang ontstaat voor decentrale opwekking, maar ook de mogelijkheid open wordt gehouden voor aankoppeling van centrale duurzame energieproductie, bijvoorbeeld in de vorm van windparken op zee of zonnecentrales in zonnige streken. Bovendien blijft hiermee de koppeling open met energiecentrales op basis van fossiele opwekking en CO₂-opslag (Roland Berger Strategy Consultants, 2008).

Specifiek voor opslagtechnologieën in een decentraal systeem zijn de additionele kosten per kilowattuur voor elektriciteitsopslag sterk afhankelijk van het daadwerkelijke gebruik van de opslag. Voor de goedkoopste opslagtechnologieën wordt doorgaans gerekend met een additionele elektriciteitsprijs van enkele eurocenten per kWh, significant in vergelijking met andere ontwikkelingsscenario's voor de uiteindelijke consumentenprijs. Op de lange termijn zullen de kosten voor opslag naar verwachting fors kunnen dalen als gevolg van leereffecten.

Voor consumenten geldt dat investeringen in duurzame productietechnieken vooralsnog beperkt zijn door de hoge kosten ervan, die voor verschillende technieken (deels) worden ondervangen door subsidieregelingen als SDE en Duurzame Warmte. Grootschalige toepassing van duurzame energietechnologieën kan daardoor op de lange termijn tot sterk dalende kosten leiden, waardoor verdergaande investering interessanter wordt (Van den Wijngaart en Ros, 2009). De waarde van een investering is daarnaast afhankelijk van de prijs/prestatieverhouding tijdens het gebruik van de techniek, maar dit vergt een lastige inschatting van toekomstige operationele kosten en baten, zeker bij lage of onduidelijke terugleververgoedingen (Watson et al., 2006; Faber et al., 2008; Feenstra, 2008).

5

Huidige activiteiten in voorontwikkelingsfase van decentrale elektriciteitsvoorziening

5.1 Ontwikkeling probleemperceptie

Een belangrijke motivatie voor de ontwikkeling van decentrale energiesystemen bestaat uit het beeld dat het huidige dominante systeem oploopt tegen hardnekkige en systeeminterne problemen op de fundamentele energiebeleids-thema's betaalbaarheid, betrouwbaarheid en duurzaamheid (Ministerie van Economische Zaken, 2008a). Met name de voorzieningszekerheid, als belangrijk aspect van de betrouwbaarheid van de huidige energievoorziening, staat regelmatig ter discussie in het licht van de afhankelijkheid van politiek instabiele staten voor de levering van fossiele brandstoffen. Daarnaast leiden de afnemende mondiale energiereserves en beperkte mondiale spreiding van leveringsgebieden tot een toenemende kwetsbaarheid voor crises en verstoringen. Op het thema betaalbaarheid overheerst met name de zorg over stijgende prijzen van olie en de daaraan gekoppelde grondstofprijzen. Hierdoor staat het energiesysteem op basis van fossiele brandstoffen onder druk, zij het dat ook nucleaire energie of grootschalige duurzame energievoorzieningen (CSP, windparken op zee) als alternatief worden gezien.

Ten slotte loopt het huidige systeem tegen de grenzen aan van een duurzame en schone energievoorziening. Met name broeikasgasemissies spelen een cruciale rol in de probleemperceptie van energievoorziening op basis van fossiele brandstoffen, zeker in het licht van de toenemende druk op beleidsmakers om een tot een nieuw en ambitieus klimaatverdrag te komen als opvolger van het Kyoto Protocol. Terugdringen van broeikasgasemissies uit de energiesector speelt daarbij in alle gevallen een sleutelrol. Ook andere milieuaspecten spelen een rol, met name bij alternatieven als windparken (aantasting landschap) en kernenergie (radioactief afval).

Een decentrale energievoorziening sluit aan bij een sterk ecologisch profiel, door de inpassing van energieproductietechnologieën op basis van zonne- en windenergie. Daarnaast wordt vaak verwezen naar 'slimme elektriciteitsnetten', die

de inpassing van decentrale opwekkers en elektrische auto's lokaal kunnen accommoderen. Slimme netten ondersteunen tweewegdistributie tussen klant en leverancier, met meer informatie, keuzemogelijkheden en deelname van gebruikers (Ministerie van Economische Zaken, 2008a). Voor consumenten wordt soms verwezen naar zelfvoorziening als ideaalbeeld, maar door de grote leveringszekerheid van het reguliere netwerk speelt dit in de praktijk geen grote rol (SEO Economisch Onderzoek, 2008).

Andere drijvende krachten voor de ontwikkeling van decentrale netwerken zijn reeds benoemd in paragraaf 2.1.2 en omvatten de wens voor flexibilisering van het energiesysteem om nieuwe (decentrale) energieopties beter in te kunnen passen en de noodzakelijke vervanging of opwaardering van een groot deel van het elektriciteitsnetwerk bij nadering van de afschrijftermijn.

5.2 Visieontwikkeling decentrale elektriciteitsvoorziening

5.2.1 Europa

Het Europese elektriciteitsnetwerk is gevormd rond grootschalige energieproductiecentra. De ontwikkeling van nieuwe energieproductiemiddelen en een toenemende interactie met de vraagkant leidt nu tot de ontwikkeling van meer vraaggeoriënteerde netwerken, waardoor een fundamentele verandering in ontwerp en controle van elektriciteitsnetwerken nodig zal zijn in de toekomst. In 2005 is daarom het European Technology Platform SmartGrids opgericht, dat in 2006 een visie en strategie op de Europese elektriciteitsnetwerken heeft geformuleerd (European Commission, 2006a). In de visie wordt een scala aan voordelen van intelligente netwerken genoemd, variërend van 'duurzame ontwikkeling' tot kansen op werkgelegenheid en innovatie.

De context van de visie van het Technology Platform wordt gegeven door het Groenboek *A European strategy for sustain-*

able, competitive and secure energy uit 2006 (European Commission, 2006b) en gaat uit van de doelstellingen schoon, voorzieningszekerheid en concurrentiekracht; doelstellingen die ook in het Nederlandse energiebeleid weerklinken (Ministerie van Economische Zaken, 2008a). In de visie van het European Technology Platform zijn decentrale netwerken en productiesystemen nodig om deze doelstellingen te kunnen halen, met inachtneming van een viertal randvoorwaarden: flexibiliteit, toegankelijkheid (voor gebruikers en producenten), betrouwbaarheid en kosteneffectiviteit. Om elektriciteitsnetwerken als smartgrids volgens deze voorwaarden vorm te geven, zijn in deze visie verdere technologische ontwikkelingen nodig op het gebied van netwerktechnologie, energieproductietechnologie, simulatietools en ontwikkelingen op het gebied van ICT, waaronder de ontwikkeling van slimme meters en business-systemen (European Commission, 2006a).

De visie op decentrale netwerken is in verschillende werkgroepen verder uitgewerkt in een strategische onderzoeksagenda, die beoogt een referentie te zijn voor Europese en nationale programma's (European Commission, 2007b). De financiering is voorzien in deze kaderprogramma's, in nationale programma's of via marktpartijen. Een kernprincipe van deze onderzoeksagenda is de centrale positie van *gebruikers* van het netwerk, waardoor een fundamenteel andere ontwikkeling van het elektriciteitsnetwerk wordt voorzien. In de strategische onderzoeksagenda wordt in een aantal onderzoekthema's uitwerking gegeven aan technische, organisatorische en beleidsmatige uitdagingen voor de ontwikkeling van decentrale distributie- en transmissiesystemen. Daarbij wordt ook expliciet aandacht gegeven aan de technische en organisatorische aansluiting op de bestaande netwerken, en aan harmonisatie van commerciële, wettelijke en institutionele raamwerken binnen Europa (European Commission, 2006a, 2007b).

Het is interessant op te merken dat de visieontwikkeling en uitwerking van het strategisch onderzoek nog voornamelijk wordt gecoördineerd door DG Onderzoek en nog geen uitwerking heeft gekregen in de vorm van richtlijnen of andere wettelijke beslissingen op het niveau van de gehele Commissie (en dan waarschijnlijk onder coördinatie van DG Energie). Decentrale elektriciteitsnetwerken bevinden zich als thema daarmee nog in de onderzoeksfase van de Europese beleidsagenda.

5.2.2 Nederland

Stakeholders hebben verschillende motivaties en belangen om activiteiten in een sector te ontplooiën, waardoor de ontwikkeling van een gedeelde toekomstvisie niet triviaal is. In de Nederlandse beleidscontext speelt het Platform Duurzame Elektriciteitsvoorziening (een van de zeven platforms binnen de Energietransitie) een belangrijke rol in de visieontwikkeling rond decentrale elektriciteitsvoorziening. Binnen dit platform worden in verschillende werkgroepen transitiepaden uitgewerkt voor zowel centrale als decentrale infrastructuur (Energietransitie, 2008). Afstemming in de visievorming tussen de werkgroepen wordt deels ondervangen door een zekere mate van personele overlap tussen de beide werkgroepen.

De werkgroep Centrale Elektrische Infrastructuur voorziet dat duurzame elektriciteitsproductie en decentralisatie effecten hebben op de balans, regelbaarheid, transport- en opslagcapaciteit van de centrale elektriciteitsnetwerken. Deze consequenties zijn globaal uitgewerkt in een publicatie van de werkgroep, waarin wordt betoogd dat een aanpassing of uitbreiding van het centrale netwerk nu al kan worden voorzien vanwege de naderende grenzen in de transportcapaciteit (Platform Duurzame Elektriciteitsvoorziening, 2007). De balans tussen vraag en aanbod kan daarin gehandhaafd worden door sturing van het aanbod, sturing van de vraag of door het inbouwen van buffers. Zo kan de beurswaarde van elektriciteit worden gebruikt voor beïnvloeding van de vraag ernaar, om zo de balans van het systeem te handhaven. Enige bekendheid kreeg het idee om elektriciteit grootschalig op te slaan door in de vorm van een opslageiland in de Noordzee in een watervolume een hoogteverschil op te bouwen (plan Lievense).

De werkgroep Decentrale Infrastructuur (die tevens ressorteert onder het Platform Nieuw Gas) beperkt zich niet tot elektriciteitsnetwerken, maar houdt zich bezig met decentrale netwerken voor elektriciteit, gas en warmte. In deze werkgroep is veel aandacht voor de coördinatie en de beleidsmatige en institutionele inbedding van de decentrale infrastructuur. Voor de visie op de langere termijn (2050) worden globaal de effecten verkend van grootschalige toepassing van decentrale productiesystemen op het niveau van huishoudens en wijken, met name voor de structuur, omvang en systeemtechnische ontwikkeling van gas- en elektriciteitsnetten en in enkele gevallen ook voor de afzetmogelijkheden, kosten en concurrerende systemen. In een uitgebreidere rapportage zijn deze effecten in meer detail uitgewerkt en is bovendien de samenhang met andere transitiepaden aangegeven (Werkgroep Decentrale Infrastructuur, 2007).

In oktober 2008 is het *Actieplan Decentrale Infrastructuur* gepresenteerd door de werkgroep Decentrale Infrastructuur (2008). In dit actieplan wordt, net als in het *Energierapport 2008*, voorzien in de promotie van de werkgroep tot een platform in het kader van de Energietransitie. Begin 2009 is deze institutionele verandering nog in wording. Daarnaast biedt het Actieplan een overzicht van coördinerende maatregelen voor de komende vier jaar ten behoeve van onderzoek en de verdere ontwikkeling van decentrale elektriciteitsystemen. Daarin wordt een onderscheid gemaakt tussen acties voor de netwerkbeheerders en andere betrokkenen op de korte termijn en strategische activiteiten voor de lange termijn. Voor de korte termijn worden de standaardisering en regulering voor de ontplooiing van slimme meters als actie benoemd (zie ook paragraaf 2.4.5).

In het *Energierapport 2008* presenteert het kabinet een visie op de Nederlandse energievoorziening voor de lange termijn (Ministerie van Economische Zaken, 2008a). Hierin worden drie beelden neergezet die als systeemopties kunnen worden beschouwd. Ze kunnen deels concurrerend, deels aanvullend zijn. Nederland als *Smart Energy City* is één van die beelden.

Ook andere partijen in Nederland ontwikkelen ideeën of scenario's over de toekomst van het Nederlandse elektrici-

teitsnetwerk. Voor TenneT als beheerder van het Nederlandse elektriciteitstransportnet staan betrouwbaarheid en doelmatigheid voorop. ECN heeft een aantal scenario's uitgewerkt tot 2030 (Scheepers et al., 2007), waarmee TenneT inzicht verkrijgt in piekbelastingen voor enkele realistische extreme varianten (TenneT, 2008). Om op de lange termijn met het netwerk flexibel te zijn voor de inpassing van verschillende technieken, is een netconcept op hoogspanningsniveau ontwikkeld dat geschikt is voor ontwikkelingen in alle scenario's, gebaseerd op één sterke 380 kV-ring in de nabijheid van de belasting in het midden en westen van Nederland. Deze ringfilosofie maakt het mogelijk om in te spelen op zowel grootschalige decentrale ontwikkeling als op de ontwikkeling van centrale elektriciteitsproductie bij kustlocaties of met windenergie op zee (TenneT, 2008).

5.3 Onderzoeksactiviteiten (R&D)

5.3.1 Coördinatie en samenhang

Een belangrijke doel bij de ontplooiing van onderzoeksactiviteiten (R&D) op het gebied van decentrale elektriciteitsnetwerken bestaat uit het zoveel mogelijk benutten van zowel centrale als decentrale (duurzame) opwekkingscapaciteit, waarbij eindgebruikers in toenemende mate een interactieve partij worden op zowel het netwerk als in de markt. Deze doelstelling leidt tot een breed scala aan onderzoeksactiviteiten, die door de *Strategic Research Agenda* van de Europese Commissie wordt onderverdeeld in vijf onderzoeksvelden (European Commission, 2007b):

1. Infrastructuur en netwerk design.

Omvat de ontwikkeling van scenario's, transitiestrategieën, maatschappelijke studies, (nieuwe tools voor) netwerkdesign, investeringsstrategieën en risicoanalyse.

2. Smart operation: beheer van energiestromen en consument als producent.

Omvat operationele vragen ten aanzien van de integratie van kleinschalige producenten en actieve consumenten, en innovatief energiemanagement voor de ontwikkeling van kleinschalige opwekking in samenhang met grootschalige opwekking, inclusief de rol voor opslag en vraagsturing.

3. Smartgrid assets and asset management.

Omvat vragen ten aanzien van kosten en baten van beheer, eigendom, vervanging en ontplooiing van netwerken, inclusief inzicht in de dragers van de kosten en de baten, synergie met andere netwerken, en de ontwikkeling van business cases voor verschillende betrokken partijen.

4. Europese samenwerking en samenhang tussen energiesystemen.

Aandacht voor Europese samenwerking en samenhang, inclusief de ontwikkeling van verbeterde (lange afstand) transportmogelijkheden (super-grid), verkennen van ontwikkelings- en aansluitingsmogelijkheden van smartgrids, duurzaamheidsvragen ten aanzien van neveneffecten en balancering, en de samenhang tussen hoogspanning en laagspanning, inclusief synchronisatie en afkoppeling. Daarnaast is er aandacht voor standaardisatie op Europees niveau en voor de ontwikkeling van geavanceerde tools voor inschatting van toekomstige vraag en aanbod ten behoeve van optimaal beheer.

5. Cross-cutting issues.

Doorsnijdende onderwerpen, waaronder slimme meters en andere technologische ontwikkelingen op de schaal van consumenten, veldtesten en validaties, ICT, interconnectie tussen energiesystemen, meervoudige energiesystemen, multicriteria analyse en optimalisatie, opslag en conversie, materiaalontwikkeling.

Binnen Nederland financiert het programma EOS Lange termijnonderzoek (EOS LT) (deels) elf R&D onderzoeksactiviteiten ten aanzien van toekomstige architectuur en het toekomstige beheer van de elektriciteitsnetten. Daarnaast worden twee projecten gesubsidieerd vanuit de IS-regeling (Innovatiesubsidie Samenwerkingsprojecten) en één project vanuit de nieuwe EOS regeling voor het kortetermijnonderzoek (EOS KTO). Onder de drie programma's samen is sinds 2005 voor bijna 16 miljoen euro gefinancierd en/of toegezegd op het thema. De R&D-projecten hebben verschillende invalshoeken, zoals technische knelpunten, opslag, ICT, kosteneffectieve opties om stroomkwaliteit te waarborgen, socio-economische inbedding van decentrale systemen, samenhang tussen schone en betrouwbare stroomvoorziening, transitieprocessen en rolverdeling tussen betrokken actoren.

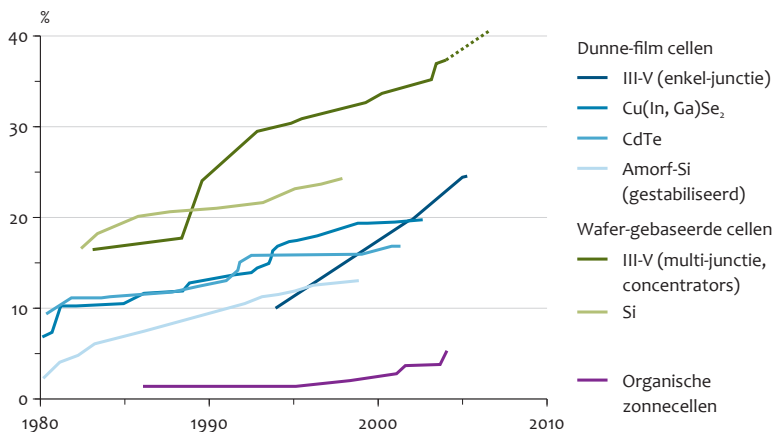
Verschillende partijen zijn bij de onderzoeksprojecten betrokken, met belangrijke coördinerende rollen voor ECN, KEMA, TU Eindhoven, TU Delft en het Centrum voor Wiskunde en Informatica (CWI). De projecten waarbij de TU Eindhoven is betrokken worden samengebracht onder de noemen Future Power Systems (Future Power Systems, 2008), maar ook in deze projecten zijn vele andere partijen betrokken in samenwerkingsverbanden en consortia. De mate van interdisciplinaire samenwerking tussen verschillende partijen van binnen en buiten het elektriciteitsdomein in Nederland is vrij uniek in vergelijking met andere landen (zie ook Energiegids, 2009b).

Naast deze projecten vinden nog enkele meer technische projecten plaats in het kader van EOS of onder het Innovatieonderzoekprogramma (IOP) Intelligentie in elektriciteitsnetten. Ook hier speelt de TU Eindhoven een sterke coördinerende rol. Daarnaast heeft NWO sinds 2000 in samenwerking met SenterNovem verschillende onderzoeksprojecten rond decentrale energievoorziening gefinancierd in het kader van het Stimuleringsprogramma Energieonderzoek (NWO, 2008), onder andere rond duurzame elektriciteit, specifieke technologieën voor zon en wind, onzekerheden en transitie scenario's.

5.3.2 Onderzoek en leereffecten van technologieën

In algemene zin kan een aantal (samenhangende) factoren worden benoemd dat bijdraagt tot een kostendaling voor (milieu)technologieën (Oosterhuis en Faber, 2007):

- schaalvoordelen leiden tot lagere productiekosten per eenheid;
- 'learning-by-doing' beschrijft ervaringseffecten in de toepassing van technologie, waardoor routine ontstaat en kan worden volstaan met minder controles, inspecties en onderhoud;
- incrementele verbeteringen omvatten tal van kleine verbeteringen tijdens de verdere verspreiding van een innovatie, waardoor kinderziekten verdwijnen en de toepassing efficiënter kan worden;



Ontwikkelingen rendementen zonnestroom technologie (PV). Bron: Montfoort en Ros (2008)

- concurrentie kan leiden tot lagere kosten voor de gebruiker als de producent onder druk van andere aanbieders een impuls krijgt om goedkoper te produceren.

Afhankelijk van het type technologie, de markt, de toepassingsmogelijkheden en de infrastructurele inbedding spelen deze factoren een rol in de afname van de productiekosten en de prijs van een technologie.

De verbetering van PV-technologie wordt aangegeven aan de hand van productiekosten en van efficiëntie in elektriciteitsproductie (rendement). Voor alle technologietypen nemen de rendementen over de jaren toe (zie Figuur 5.1). Ook de productiekosten van PV-systemen dalen sterk, maar op dit moment is toepassing nog behoorlijk prijzig. De kosten van een PV-systeem omvatten twee elementen: de materiaalkosten van de module zelf en de kosten voor systeembalancerings door middel van batterijen en inverters van gelijkstroom naar wisselstroom (Anderson et al., 2006). Kostenreducties voor de module en de aansluitingen lijken door leerervaringen sneller te verlopen dan voor de inverter (Montfoort en Ros, 2008). Eind jaren tachtig was een systeemprijs van 15 euro/W_p, niet ongewoon, met een rendement dat slechts de helft was van de huidige efficiëntie (Anderson et al., 2006), waardoor toepassing en technologische ontwikkeling in eerste instantie vooral plaatsvond in specifieke nichemarkten (Van den Bergh et al., 2006). De kostendalingen als gevolg van verdergaande schaalvergroting in de productie zijn echter groot, al zijn de aanschafkosten van een middelgroot PV-systeem (3 kW) met circa 5 euro/W_p, nog altijd vrij fors. De kostendaling bij een verdubbeling van de cumulatieve productie toont een leereffect (*progress rate*) van circa 0,87 en voor 2030 worden schattingen gemaakt van circa 1 euro/W_p (Montfoort en Ros, 2008). Zonnestroom kan met een huidig systeem geproduceerd worden tegen circa 0,50 euro/kWh (in vergelijking met een huidige elektriciteitsprijs van circa 0,20 euro/kWh), wat naar verwachting rond 2030 gedaald kan zijn tot circa 0,10 euro/kWh. Toepassing van PV-systemen wordt momenteel gestimuleerd met een subsidie (SDE) op de productie van zonnestroom,

waarmee een PV-systeem in gemiddeld vijftien jaar terugverdiend zou moeten zijn.

De belangrijkste barrière voor grootschalige toepassing van micro-wkk ligt met name in de hoge aanschafkosten ervan (Elzenga et al., 2006; Pehnt et al., 2006; Faber et al., 2008; Feenstra, 2008). Een (forse) marktvergroting is nodig om de prijs per micro-wkk-eenheid te doen dalen tot een beperkte meerprijs (circa 1500 euro volgens marktpartijen) ten opzichte van reguliere hr-ketels. Op afzienbare termijn wordt marktintroductie voorzien van Stirling-micro-wkk's tegen een aanschafprijs van circa 6000 euro, waarvoor in het kader van de regeling Duurzame Warmte voor de eerste 10000 exemplaren een subsidie mogelijk is van 4000 euro, waarmee de meerprijs ten opzichte van hr-ketels ongeveer wordt afgedekt. Daarnaast kan de aanpak van enkele institutionele barrières, met name ten aanzien van 'dubbele energiebelasting' (zie paragraaf 6.2), leiden tot significante dalingen in de nettokosten voor gebruik, waardoor ook de aanschaf van micro-wkk aantrekkelijker wordt.

De grootschalige toepassing van brandstofcellen in micro-wkk kent nog verschillende technologische barrières. Waterstof is de brandstof voor nagenoeg alle typen brandstofcel. Voor de voeding van brandstofcellen is dus een aangepaste infrastructuur ('waterstofeconomie') nodig, of een zogenaamde reformer, waarmee aardgas vlak voor voeding van de brandstofcel wordt omgezet in waterstof, waarbij onder andere CO₂ vrij komt en de systeemefficiëntie verlaagd wordt. Verschillende typen brandstofcel kennen daarnaast nog enkele specifieke technologische uitdagingen, met als belangrijkste de kwetsbaarheid voor vervuiling van de brandstof (met name door koolstofmonoxide), de benodigde opstarttijd, de operationele temperatuur en de beschikbaarheid van het katalysator materiaal, leidend tot verschillende toepassingsmogelijkheden en fase van ontwikkeling (Faber et al., 2008).

Brandstofcellen en PV produceren gelijkstroom (DC), terwijl het netwerk en huishoudelijke apparaten wisselstroom (AC) nodig hebben. In al deze gevallen is dus een omvormer nodig,

waardoor de kosten toenemen en de systeemefficiëntie afneemt.

Volwaardige opslagtechnieken zijn een kernpunt van een decentraal elektriciteitsnetwerk. Belangrijke technische barrières liggen in de hoge kosten, de levensduur, efficiëntie, responstijd, energiedichtheid, operationele effecten en toxiciteit. Lithium-ionbatterijen zijn zeer geschikt voor kleinschalige mobiele toepassingen zoals telefoons en laptops. De responstijd is zeer snel, maar de capaciteit is nog beperkt en daardoor ook de mogelijkheid voor toepassing in een decentraal netwerk. Opschaling is echter een kernpunt van onderzoek en grootschalige toepassing in elektrische auto's is zeker denkbaar. Natriumzwevelbatterijen (NaS-batterijen) zijn goed toepasbaar voor grootschaliger opslagsystemen, bijvoorbeeld in integratie met windturbines, maar ook voor frequentieregeling. Een nadeel is de hoge interne temperatuur en de noodzaak om het systeem verwarmd te houden, waardoor toepassing vaak beperkt is tot stationaire applicaties.

Ten behoeve van de integratie van decentrale elektriciteitssystemen bestaan nog verschillende ICT-gerelateerde technische uitdagingen. Een belangrijk punt is de vormgeving en uitwerking van de slimme meter, met name op het gebied van standaardisering van communicatieprotocollen, maar ook over de informatie die uiteindelijk uitgewisseld kan worden. De basisfuncties voor de slimme meter omvatten minimaal reeds vastgelegde technische afspraken (NTA 8130), maar de mogelijkheid voor interactie met de bestaande elektrische infrastructuur moet daarbij ook gegarandeerd zijn (Ministerie van Economische Zaken, 2008c).

De elektriciteitsstromen zullen sterk toenemen bij grootschalige uitwisseling van elektriciteit in een lokaal netwerk. Hiervoor is in veel gevallen een grotere capaciteit nodig van het distributienetwerk. Het vergroten van de transformator wordt vaak gezien als een eerste, pragmatische oplossing voor het invoegen van grote aantallen decentrale opwekkingseenheden in het elektriciteitssysteem.

5.3.3 Systeemtechnische barrières

Clustering van decentrale energietechnologieën kan een positief effect hebben in het afvlakken van pieken in vraag en aanbod. Met name bij inzet van duurzame technologieën, met een beperkt controleerbare output, kan dit een grote bijdrage leveren ten behoeve van het netwerkmanagement. Het beheersysteem voor de afstemming binnen een fijschalige distributie van opwekkings- en vraagtechnologieën vergt enkele specifieke systeemeisen (Kok et al., 2008):

- Het systeem moet goed op te schalen zijn. Door het grote aantal componenten zal gecentraliseerde controle van het complexe systeem op een gegeven moment tegen de grenzen van schaal en communicatiemogelijkheden aanlopen.
- Het informatiesysteem moet open en transparant zijn, zodat individuele energietechnologieën in het systeem naar wens of behoefte kunnen aan- of afkoppelen.
- Het informatiesysteem moet de interactie tussen een veelheid aan actoren faciliteren en het systeem daardoor balanceren.

Deze systeemeisen beargumenteren een *multi-agent-systeem*, zoals de bij ECN ontwikkelde PowerMatcher (Powermatcher, 2008). In veel gevallen is de huidige institutionele ontwikkeling voor de accommodatie van een decentraal technologiesysteem sterk gericht op een *centrale aansturing*, in lijn met de huidige praktijk van beheer. Dit systeem is zeer nuttig gebleken voor een elektriciteitssysteem op basis van grootschalige productie-eenheden, maar bij verdere decentralisatie van het elektriciteitssysteem kan een kloof ontstaan tussen institutionele en technische vormgeving (Künneke, 2008).

Technische barrières in grootschalige technische systemen zijn die elementen die het functioneren, de effectiviteit of de verdere ontwikkeling van het systeem als geheel belemmeren (Hughes, 1987). Dergelijke achterblijvende systeemcomponenten ('reverse salients') kunnen bestaan uit systeemtechnische barrières, maar ook uit slecht ontwikkelde technologieën, die niettemin een sleutelfunctie in het gehele systeem hebben. Daarnaast kan de concurrentie tussen verschillende energiesystemen op korte termijn tot andere uitkomsten leiden dan op de lange termijn. Bijvoorbeeld: micro-wkk is een technologie die de afhankelijk van de aardgasinfrastructuur zal versterken, maar daarnaast faciliterend werkt voor de ontwikkeling van cruciale elementen in een decentrale infrastructuur, zoals geavanceerde terugleveringsopties en de mogelijke ontwikkeling van een virtuele centrale. Als gevolg hiervan is het denkbaar dat de ontwikkeling van meer duurzame technieken, zoals PV en urban wind, op termijn eenvoudiger in de elektriciteitsinfrastructuur in de gebouwde omgeving kunnen worden ingepast. Micro-wkk is in zo'n scenario een 'enabling technology'.

5.4 Experimenten in de praktijk

Er lopen verschillende onderzoeken en experimenten gericht op toepassingen van individuele technieken en interactie met het netwerk, maar er is nog weinig onderzoek verricht op het gebied van totale systeemintegratie. Decentrale opwekkingstechnieken zijn in verschillende fasen van ontwikkeling, van commerciële en vaak gesubsidieerde verkrijgbaarheid op de markt (PV) tot de beginfase van marktintroductie (elektrische auto's, micro-wkk). Experimenten voor de toepassing van volledige decentrale systeemconcepten, met onderlinge afstemming van een groot aantal technieken, zijn nog zeer beperkt. Voor het grootste deel gaat het hier om gecontroleerde onderzoeksprojecten en nog niet om grootschalige demonstratieprojecten.

Al in het kader van het Vijfde Kaderprogramma (1998-2002) zijn twee grote projecten gefinancierd voor het onderzoek naar decentrale netwerken, waar verschillende onderzoeksinstituten bij zijn betrokken. In het Zesde Kaderprogramma (2002-2006) en daarna zijn ook experimenten opgezet voor het daadwerkelijk testen van decentrale netwerken in de praktijk, onder andere in Nederland, Griekenland en Duitsland, met verschillende andere projecten in ontwikkeling. De nadruk ligt daarbij op de ontwikkeling van operationele controlestrategieën, onderzoek naar alternatieve netwerkontwerpen, standaardisatie en effectanalyse (CRISP, 2006; Hatzigiorgiou et al., 2007).

De netbeheerders Stedin, Enexis en Liander zijn in Nederland momenteel betrokken bij verschillende demonstratieprojecten rond intelligente netwerken. De projecten zijn in eerste instantie gericht op de inpassing van zware elektriciteitsvragers of –producenten in het lokale netwerk. Daarbij is ook aandacht voor aansturing op afstand. In Heerlen wordt de ontwikkeling van een integraal lokaal microgrid beoogd met een klein aantal woningen, autonoom van het reguliere netwerk. In Zutphen is door Liander een autonoom netwerk ontwikkeld waarin een koppeling is gemaakt tussen PV en elektriciteitsopslag. In Den Bosch loopt een onderzoek naar de bestaande potentie van duurzame energiebronnen in bestaande omgeving (Enexis). In Apeldoorn loopt al enige tijd een experiment voor de inpassing van grote aantallen micro-wkk's achter één transformator. Een tweede grote lijn van experimenten bestaat uit het testen van opslagtechnieken voor de ondersteuning van windturbines of PV. Een derde grote lijn bestaat uit het ontwikkelen en verfijnen van methoden voor monitoring en meting. Hiervoor zijn plannen voor een project in Leeuwarden met betrokkenheid van onder andere Enexis en Liander.

Voor micro-wkk zijn in 2006-2008 enkele experimenten gevoerd en proefopstellingen met gekoppelde eenheden getest, waarna nu aanpassing en marktintroductie wordt voorzien voor eind 2009 of in 2010. Inmiddels is reeds SDE-subsidie verkrijgbaar voor de aanschaf van een micro-wkkeenheid (hrc-ketel). Windenergie in de gebouwde omgeving zit met circa honderd turbines ook nog sterk in de experimentele fase, met name gericht op kostenreductie en inpassing in de omgeving (Cace en Ter Horst, 2007). Verschillende wooncorporaties bieden ondersteuning of subsidie voor de installatie van decentrale energieopwekkingstechnieken, om daarmee de variabele kosten te drukken.

Wellicht het meest geavanceerde experiment voor intelligent netwerkbeheer vindt plaats in Boulder in Colorado (Verenigde Staten), waar Xcel Energy 100 miljoen dollar investeert in een smart grid-infrastructuur voor circa 50000 huishoudens. Primaire doel is om vraagpieken zoveel mogelijk af te toppen, waarvoor bij alle huiseigenaren slimme meters worden geïnstalleerd, terwijl sommige apparaten worden aangepast om afgeschakeld te kunnen worden bij perioden van hoge vraag. Tevens is een programma gestart om huishoudens te stimuleren zonnepanelen te installeren, in combinatie met batterijsystemen in bijvoorbeeld de kelder. Bovendien wordt getest of elektrische auto's een rol kunnen spelen in het opslagsysteem (Technology Review, 2009b).

6

Transitie naar een decentraal elektriciteitssysteem: ontwikkelingspaden, instituties en co-evolutie

6.1 Ontwikkelingspaden voor decentrale elektriciteitsvoorziening

Een decentrale energievoorziening komt niet vanzelf tot stand. Naast grootschalige investeringen zijn ook institutionele aanpassingen vereist, inclusief de sociale acceptatie van dergelijke systemen. Met name de nieuwe rol van consumenten in de co-voorziening van energie vergt een geheel vernieuwd maatschappelijk raamwerk voor de energie-infrastructuur (Sauter en Watson, 2007). Met nadruk op elektriciteitsvoorziening opent het spectrum aan nieuwe rollen voor consumenten in deze systeemoptie een perspectief op drie mogelijke modellen voor de ontwikkeling van decentrale energiesystemen (Watson et al., 2006; Sauter en Watson, 2007):

- *Company Control* is een model waarin decentrale energietechnologieën middels marketing en (lease) contracten door energiebedrijven op de markt worden gezet, waarna ze zelf controle houden over de inzet van decentrale energieproductie door deze op afstand aan te sturen. Dit sluit sterk aan bij het concept van de virtuele centrale (zie paragraaf 2.4.5). De consument is in dit model vrij passief en stelt in feite vooral een locatie beschikbaar voor de plaatsing van de technologie. Het is mogelijk (maar is niet noodzakelijk) dat de consument bij een tijdelijke afkoppeling van de bij hem geplaatste technologie tijdelijk verstoken raakt van energievoorziening en het ligt voor de hand dat hij voor dergelijke situaties een premie bedingt bij het energiebedrijf.
- *Community Microgrid* is een model waarbij verschillende kleinschalige productietechnologieën op lokaal niveau worden gekoppeld middels een 'community-owned microgrid'. Optimalisatie vindt plaats op het niveau van het lokale netwerk, dat niet noodzakelijkerwijs aan een centraal netwerk gekoppeld hoeft te zijn. Dit scenario benoemt de consument als aanjager van de ontwikkeling van het decentrale netwerk, waardoor een hoge mate van

betrokkenheid wordt gegarandeerd voor de eigen energieproductie. De (financiële) drijfveer kan liggen in de aandelen die consumenten hebben in het door de gemeenschap opgerichte lokale energiebedrijf. Opvallend in dit scenario is de overeenkomst met de ontwikkeling van elektriciteitsnetwerken aan het eind van de negentiende en het begin van de twintigste eeuw (zie paragraaf 2.1.1).

- *Plug & Play* is een model waarin decentrale energie-opwekking consumenten toestaat om (gedeeltelijk) onafhankelijk te worden van conventionele energievoorziening. In dit model zijn deze decentrale energietechnologieën in eigendom van de consument, die ze ook zelf financiert. Consumenten handelen in reactie op prijsmechanismen, waardoor consumenten hun productie en bijbehorende opbrengsten zullen maximaliseren. Energieconsumptiepatronen zullen daardoor sterk veranderen en consumenten nemen de rol van energieproducent op zich. In dit model zijn 'early adopters' nodig om de diffusie van de nieuwe technologieën op gang te brengen.

De modellen onderscheiden zich onder andere door de wijze waarop de technologieën zich op de markt verspreiden, de eigendomsverhoudingen, de initiatiefnemende partijen, de rolverdeling en de bijbehorende institutionele vormgeving, de mate van acceptatie, het niveau van optimalisatie van het systeem (en bijbehorend milieueffect), en de inpassingsmogelijkheden in het centrale energiesysteem. Er is niet op voorhand een gedeelde voorkeur voor een van de drie modellen in de ontwikkeling van decentrale elektriciteitsnetwerken in Nederland.

6.2 Institutionele vormgeving en barrières

De juridische en regulerende context werkt stabiliserend voor het bestaande systeem door bijvoorbeeld standaardisering ten aanzien van het beheer van het elektriciteitssys-

teem, door beperkingen in de mogelijkheden van decentrale teruglevering, of door steun voor concurrerende productie-technieken, bijvoorbeeld in samenhang met CO₂-opslag. Deze stabilisatie van het bestaande elektriciteitssysteem aan de hand van institutionele regulerende regels kan een lock-in opleveren als de transformatie naar een ander systeemtype wordt beperkt door de institutionele regels (Genus, 2008). Een significante institutionele barrière voor terugleverende decentrale elektriciteitsopwekkers is de lage terugleververgoeding en de voorrang die in veel gevallen wordt toegekend aan grote institutionele producenten.

Actoren kunnen ervoor kiezen om van regels af te wijken, als de baten opwegen tegen de sanctie of kosten van afwijking (Van den Hoed, 2004). Zo wordt vaak verwezen naar de complexe administratieve handelingen die wettelijk voorgeschreven zijn bij plaatsing van een elektriciteitsgenerator (Elzenga et al., 2006). Bovendien speelt er een discussie over dubbele energiebelasting bij de bruto- of nettoberekening van elektriciteitsproductie, waardoor de institutionele inbedding van micro-wkk lastig is. Het systeem van *checks and balances*, dat infrastructurele reorganisatie en aanpassing aan nieuwe eisen moet waarborgen, is nog onder het oude regime ontwikkeld, terwijl onder het huidige regime de meeste prikkels hiervoor gericht zijn op vergroting van efficiëntie (WRR, 2008). Hier staat tegenover dat de institutionele context ook de ontwikkeling van alternatieve technologieën kan stimuleren, met name als regelgeving de zekerheid biedt van vermindering van bedrijfsrisico's in de sector (Sine et al., 2005). Momenteel gebeurt dit door middel van subsidies voor de toepassing van PV en micro-wkk, met name in het kader van de SDE-regeling.

Daarnaast kunnen betrokkenen in het systeem geleid worden door morele en normatieve drijfveren, in plaats van op grond van specifieke regelgeving (Scott, 1995; Van den Hoed, 2004). Dit is vaak de basis voor de ontwikkeling van levensvatbare businessmodellen ten aanzien van decentrale energievoorziening, waarin eigendomsverhoudingen, operationele vormgeving en ontwikkeling en toepassing van decentrale technologieën een rol kunnen krijgen (Genus, 2008). Netbeheerders anticiperen nog onvoldoende op mogelijke institutionele veranderingen in een decentraal elektriciteitssysteem, met name ten aanzien van mogelijke andere eigendomsverhoudingen tussen consument en producent. Dit hangt samen met het feit dat de netbeheerders puur economisch worden gereguleerd en dat het huidige reguleringskader nauwelijks stimuleert om voor-investeringen te doen ten behoeve van een energietransitie. Dit wordt beleidsmatig wel onderkend en momenteel wordt ook gewerkt aan mogelijke wijzigingen in dit kader.

Het *Energierapport 2008* stelt expliciet dat een actief kennis- en innovatiebeleid nodig is voor de ontwikkeling van kleinschalige technieken, in combinatie met beleid voor het flexibeler en slimmer maken van de elektriciteitsinfrastructuur, inclusief de totstandkoming van standaarden en de mogelijkheid voor systeemexperimenten (Ministerie van Economische Zaken, 2008a). Deze randvoorwaarden worden verder uitgewerkt in een regulerend kader van subsidieregelingen (SDE, Duurzame Warmte), coördinatie (intentie tot oprichting van een Transi-

tieplatform Smart Grids) en op termijn de verplichte toepassing van slimme meters.

Cognitieve regels zijn verbonden met ideeën en beelden over bijvoorbeeld de effectiviteit van beleidsinstrumenten en de maatschappelijke voordelen van de technologieën. Cognitieve regels omvatten sociaal geconstrueerde afspraken en worden vaak vervat in routines. Deze regels kunnen gedeeld worden in grotere groepen en vormen dan een kader voor de transitie naar een decentraal elektriciteitssysteem, dat enerzijds de vormgeving van het bestaande systeem kan versterken, maar anderzijds ook openingen kan bieden om het systeem te veranderen. Ideeën over de maatschappelijke voordelen van een decentrale energievoorziening spelen in op de gedachte dat lokaal geproduceerde, kleinschalig opgewekte elektriciteit een oplossingsrichting is voor de voorzieningszekerheid. Daarnaast komen beelden naar voren waarin de ontwikkeling van de consument tot energieproducent haast wordt gepresenteerd als burgeremancipatie, waarin ieder huishouden een eigen opwekkingseenheid heeft met een eigen ontwerp en toegevoegde waarde in het elektriciteitssysteem. Ten slotte sluit het beeld van een decentrale energievoorziening aan bij een sterk ecologisch profiel, door de inpassing van met name technieken op basis van zonne- en windenergie.

Voor de acceptatie van decentrale energieopwekking door consumenten spelen drie belangrijke aspecten een rol (Sauter en Watson, 2007): houding, investeringen en mogelijke gedragsveranderingen. Een positieve grondhouding van consumenten, maar ook van andere betrokkenen in het decentrale energiesysteem, hangt sterk samen met de kennis die erover is ontwikkeld. Voor een nieuwe sector als deze is een brede kennisbasis nog verre van algemeen, en de betrokkenen bespelen nog een nichemarkt in de energievoorzieningssector. De ontwikkeling van met name zichtbare decentrale energietechnologieën zoals PV-panelen op daken, promotie voor subsidieregelingen en van technologieproducenten, toenemende probleemperceptie in het dominante technische systeem en aandacht in de media hiervoor kunnen een belangrijke rol spelen in de ontwikkeling van een brede kennisbasis (Sine et al., 2005; Sauter en Watson, 2007; Genus, 2008). De mate waarin huishoudens bereid zijn investeringen te doen in energietechnologieën hangt sterk samen met de ingeschatte terugverdientijd. Daarbij dient aangetekend te worden dat consumenten zich maar zelden begeven in rationele berekeningen hiervoor, maar op basis van beperkte informatie een ruwe inschatting maken. Het feit dat de aanschafprijs vaak direct betaald moet worden, terwijl de besparingen pas in de loop der jaren zichtbaar worden, speelt mee in een algemene overschatting van de kosten voor installatie van energietechnologieën in huis (Sauter en Watson, 2007). Ten slotte speelt mogelijke gedragsverandering een rol in het beeld dat consumenten hebben van de toepassing van zulke technologieën. De verandering van passieve energieconsument naar actieve energie *co-provider* is zeer significant voor de dagelijkse routine. Enerzijds kan dit bijdragen in het energiebewustzijn van de consument, anderzijds kan het een forse barrière betekenen voor de ontwikkeling van decentrale energietechnologieën. Uit zeer voorlopige test-enquêtes blijkt dat consumenten voorsnog zeer hechten aan de betrouwbaarheid van het huidige energiesysteem en dat de

Niveau	Institutionele vormgeving	Technologische vormgeving
1	Sociale context met waarden, tradities en normen	Technologische paradigma
2	Institutionele omgeving met formele regelgeving	Technologische trajecten
3	Governance structuren en (informele) spelregels	Technologische routines
4	Dagelijkse beslissingen op de werkvloer	Technisch management en operationele zaken

Bron: Künneke (2008)

wens tot zelfvoorziening geen grote rol speelt bij consumenten die nu al in sterke mate decentrale energietechnologieën toepassen (SEO Economisch Onderzoek, 2008).

De vraag is of de markt in het huidige regime in staat is om adequaat in te spelen op publieke waarden die relevant zijn op de langere termijn, en om de daarbij horende investeringsbeslissingen te nemen (WRR, 2008). De Wet Onafhankelijk Netbeheer (Splitsingswet) heeft de verantwoordelijkheid voor de netwerken in Nederland behouden als publieke voorziening, wat betekent dat ook het overgrote deel van de investeringen hierin op basis van publieke financiering zal zijn. Echter, ook voor private partijen zijn er redenen om bij te dragen. Ten eerste is het elektriciteitsnetwerk de verbinding tussen productie en vraag, waardoor een goed functionerend netwerk fundamenteel is voor de bedrijfsvoering. Daarnaast accommoderen de netwerken de uitwisseling van grote volumes tussen commerciële partijen op de geliberaliseerde elektriciteitsmarkt. Tenslotte kan een goed functionerend netwerk bijdragen aan reductie van verliezen, wat ook bij kan dragen aan een efficiëntere bedrijfsvoering. Niettemin zijn de totale investeringen vanuit de elektriciteitssector sinds de privatiseringsgolf (1995-2000) sterk verminderd (IEA, 2003). De uitdagingen van grootscheeps onderhoud, nieuwe aanleg van infrastructuur en investeringen in systeeminnovatie vergen dan ook een heroverweging van de publiek/private interactie. Daarbij speelt niet alleen een bezinning op de rol die de overheid zou kunnen of moeten spelen, maar ook op de rol van grote private investeerders zoals pensioenfondsen (WRR, 2008).

6.3 Co-evolutie van instituties en technologie

Voor een fundamentele transformatie van het energiesysteem zullen de technische configuratie en de institutionele context in samenhang met elkaar moeten veranderen. Dit is een co-evolutionair proces, waarin de technische en institutionele praktijken op elkaar afgestemd worden tot een coherent systeem. Deze afstemming kan geanalyseerd worden op verschillende systeemniveaus, waarin dan zowel institutionele als technologische ontwikkeling kunnen worden geanalyseerd (Kemp et al., 2007; Künneke, 2008).

Künneke (2008) onderscheidt vier niveaus voor zowel institutionele als technologische vormgeving en vergelijkt de ontwikkeling op elk niveau voor het (Nederlandse) elektriciteitsstelsel (zie Tabel 6.1). In al deze niveaus zijn de termen landschap, regime en routine of praktijk te herkennen uit de multi-levelbenadering in de meeste transitietheorieën (Kemp et al., 1998; Rotmans et al., 2000; Rotmans et al., 2001; Geels, 2002; Loorbach, 2007).

De meer omvattende niveaus zijn erg resistent tegen veranderingen, terwijl de onderliggende niveaus vrij continu worden bijgesteld. Verandering in beide systemen hangt samen met de aanwezigheid van eerdere ontplooiingskosten, leereffecten, coördinatie-effecten en verwachtingen ten aanzien van adaptieve mogelijkheden. Op alle niveaus kan bekeken worden of de institutionele en technologische vormgeving in samenhang met elkaar ontwikkelen. Ten aanzien van de liberalisering van de energiemarkt stelt Künneke (2008) dat hiermee binnen het institutionele raamwerk een ontwikkeling plaatsvindt op het regelgevende niveau, maar dat de aanpassing van technologische trajecten nog zeer gebonden is in het voorgaande systeem van grootschalige en gecentraliseerde aansturing (lock-in). Het co-evolutionaire perspectief biedt twee aanpassingsopties: technische aanpassing aan een meer marktgerichte aansturing, of institutionele aanpassing aan de technische lock-in.

Dit raamwerk kan ook gebruikt worden voor de beschrijving van de eerder gesignaleerde ontwikkelingspaden voor een decentrale elektriciteitsvoorziening (zie paragraaf 6.1). In al deze gevallen is de grootschalige toepassing van decentrale energietechnologieën een gegeven voor de beschrijving van de systeemvarianten. De technologische vormgeving van het systeem verandert op alle niveaus:

- Het technologisch paradigma verandert fundamenteel naar een decentrale en op duurzame technieken gebaseerde infrastructuur.
- Binnen technologische trajecten zijn gradaties van decentralisatie denkbaar als gevolg van koppeling tussen opwekkingstechnieken (zoals in de virtuele centrale).
- Technologische routines verbreden zich door de mogelijkheid van vraagsturing en inzet van opslagtechnologieën.
- Technisch management is steeds meer afhankelijk van omgevingsfactoren als zon, wind en optimalisatie door andere concurrerende of samenwerkende partijen.

De vraag is nu of de institutionele vormgeving zich adequaat aan deze ontwikkeling kan aanpassen.

In het model *Company Control* behouden de energiebedrijven de mogelijkheid voor aansturing van decentraal geplaatste technologieën, terwijl de consument zich vrij passief opstelt. Op institutioneel niveau kan voor energiebedrijven met name het institutionele beheer van aansturing (niveaus 3 en 4) sterk veranderen in de context van deze virtuele centrale, omdat de systeemcontrole en allocatie van inzet van technologieën complexer wordt. Voor huishoudens hoeft dit niet noodzakelijkerwijs tot veel aanpassingen in de dagelijkse routine te leiden, tenzij de sturingsmogelijkheden van eigen apparaten beperkt worden. Verandering in de meer overkoepelende inbedding (institutionele niveaus 1 en 2) kan beperkt blijven,

doordat er conceptueel nog steeds sprake is van centrale aansturing en van behoud van bestaande eigendomsverhoudingen, marktstructuur en regulerend raamwerk.

In het model *Plug & Play* zijn de decentrale energietechnologieën in eigendom van de consument, die ze ook zelfstandig financiert en beheert. Consumenten nemen hier (een deel van) de rol van energieproducent op zich en stellen zich onafhankelijk op van conventionele energievoorziening. Systeemoptimalisatie vergt in dit geval centraal inzicht of centraal toezicht, terwijl voorheen op centraal niveau met kennis van de vraag het aanbod afgestemd kon worden. Dat betekent dat een nieuwe formele institutionele vormgeving nodig zal zijn, waarin regels of mechanismen zijn vervat voor het bepalen van de gedecentraliseerde inzet van de technologieën. Daarbij kan gebruik worden gemaakt van vraagsturing als afstemmingsmechanisme, maar ook kan een decentrale partij het beheer voor de inzet van opslagtechnologieën op zich nemen. Hiervoor kan wel aangesloten worden op herkenbare marktmechanismen van de geliberaliseerde energiemarkt, bijvoorbeeld door de prijs van energielevering afhankelijk te maken van de vraag en de bijdrage aan de systeembalancing. Dat betekent dat de elektriciteitsprijs dagelijks zal moeten kunnen fluctueren, in plaats van jaarlijks worden vastgesteld.

In het model *Community Microgrid* worden kleinschalige productietechnologieën op lokaal niveau gekoppeld tot een 'community-owned microgrid'. Optimalisatie vindt plaats op het niveau van het lokale netwerk, dat niet noodzakelijkerwijs aan een centraal netwerk gekoppeld hoeft te zijn. Centraal staat nu de lokalisering van de energievoorziening, waarvoor forse opwekkingscapaciteit en opslagmogelijkheden nodig zijn. Dit scenario vergt niet alleen verregaande institutionele aanpassingen van marktwerking naar lokale energievoorziening, maar ook een fundamentele heroriëntatie in het technologische paradigma, van centrale naar strikt lokale energievoorziening. In de meest extreme vorm van dit scenario is er geen koppeling meer met een centraal aangestuurd elektriciteitsnetwerk, waardoor in feite sprake is van een autarkische energievoorziening. De institutionele vormgeving op niveau 3 verandert eveneens sterk, door fundamentele aanpassingen in de eigendomsverhoudingen, marktstructuur en regulerend kader. De rol van de elektriciteitsbedrijven als leverancier van elektriciteit lijkt in dit scenario uitgespeeld, maar mogelijk kunnen de bedrijven zich aan de hand van de serviceverlenende functie transformeren tot leveranciers van opwekkingstechnologieën en technische beheerders. Daarnaast kan de gemeenschap een lokaal energiebedrijf ontwikkelen, mogelijk in samenspraak of gedeeld eigendom met een bestaand energiebedrijf. Ook dit model vergt fundamentele institutionele aanpassingen in de bedrijfsvoering. Dit scenario stelt de consument voor als aanjager van de ontwikkeling van het decentrale netwerk, waardoor een hoge mate van betrokkenheid wordt gegarandeerd voor de eigen energieproductie. Op institutioneel niveau betekent dit een verandering van de rol van consument naar een functie van co-producent voor de lokale energievoorziening.

In een verregaande decentralisatie van de elektriciteitsvoorziening is in alle gevallen een institutionele aanpassing nodig,

in elk geval ten aanzien van het regulerend kader en waarschijnlijk ook voor de toepassing van marktmechanismen. Afhankelijk van het ontwikkelingsmodel vergt dit in meer of mindere mate aanpassing van de energiebedrijven en de consumenten. Deze aanpassingen zijn met name gerelateerd aan de wijze waarop de controle voor het elektriciteitssysteem is georganiseerd, waardoor de inzet en toepassing van de beschikbare technologieën (tot op zekere hoogte) wordt bepaald.

Momenteel hebben de meeste netten nog voldoende capaciteit voor de opname van een zeker aandeel decentrale elektriciteitsproductie, maar de steeds belangrijker rol van informatie-uitwisseling en de mogelijkheid van tweerichtingsverkeer maakt het wenselijk dat netbeheerders en marktpartijen tijdig afspraken maken en oplossingen organiseren. Dit geldt ook voor de ontwikkeling van nieuwbouwwijken of bij grootschalige renovaties, waar vaak op voorhand wordt gekozen voor één type technologie, zoals bijvoorbeeld warmtepompen, waardoor een zwaarder uitgevoerd net of een alternatieve infrastructuur (bijvoorbeeld collectieve warmte in plaats van aardgasinfrastructuur) gewenst kan zijn.

Conclusies

7

7.1 Achtergrond en motivering

Een belangrijke motivering voor de ontwikkeling van decentrale energiesystemen is het beeld dat het huidige dominante systeem oploopt tegen hardnekkige en systeem inherente problemen op alle fundamentele energiebeleidsthema's betaalbaarheid, betrouwbaarheid en milieu (Ministerie van Economische Zaken, 2008a). Daarnaast nadert het huidige elektriciteitssysteem het einde van de levensduur, waardoor vervanging of opwaardering van een groot deel van het elektriciteitsnetwerk noodzakelijk wordt. Deze drijvende krachten laten ruimte voor verschillende oplossingsrichtingen. Voor de ontwikkeling van het elektriciteitsnetwerk staat flexibiliteit ten aanzien van het inpassen van verschillende van deze opties centraal (Ministerie van Economische Zaken, 2008a; TenneT, 2008). Een beoordeling van decentrale elektriciteitsvoorziening kan niet los worden gezien van de deels aanvullende, deels concurrerende systeemopties voor centrale elektriciteitsvoorziening. Daarnaast is het van belang om de samenhang tussen decentrale elektriciteitsvoorziening en warmteconcepten in de gebouwde omgeving in acht te nemen. Hierin zit bijvoorbeeld een afweging tussen het benutten van geschikt dakoppervlak voor zonnepanelen (stroom), zonnecollectoren (warmte) of gecombineerde systemen. Dit is in dit rapport alleen kwalitatief uitgewerkt.

7.2 Belangrijke kenmerken van een decentraal elektriciteitssysteem

Bij een decentraal elektriciteitssysteem wordt een groot deel van de elektriciteit lokaal geproduceerd. Afstemming van vraag en aanbod in een dergelijk systeem is lastig, omdat het aanbod van elektriciteit op basis van duurzame bronnen vaak sterk fluctueert en moeilijk voorspelbaar is. Bovendien neemt de huishoudelijke elektriciteitsvraag in de meeste toekomstscenario's toe.

Opwekkingstechnieken zoals zonnestroom (PV) en warmtekrachtkoppeling op het niveau van huishoudens (micro-wkk) vormen de kern vormen van een decentraal elektriciteits-systeem in de gebouwde omgeving. Andere decentrale technieken zoals grote windmolens of biomassaverwerking vinden vooral in het buitengebied plaats. Het potentieel van windenergie in de gebouwde omgeving is klein.

Fluctuaties in het elektriciteitsverbruik op huishoudelijk niveau hangen sterk af van de typen nieuwe technologieën die worden toegepast, met name elektrische auto's en warmtepompen. Voor elektrische auto's is voor alle berekende systeemvarianten aangenomen dat gemiddeld 7 kWh/dag 's nachts in enkele uren wordt geladen. Variatie op dit profiel kan grote invloed hebben op de berekeningen van de dagelijkse vraag- en aanbodpatronen. Er zijn vanzelfsprekend ook concepten denkbaar waarbij auto's (groten)deels worden geladen bij bedrijven of centrale (snel)laadpunten. Daarnaast hebben met name elektrische warmtepompen een forse invloed op de toename in de elektriciteitsvraag, zij het dat de vraagpatronen meer gelijkmatig over de (winter)dag verlopen.

Naarmate een systeem op kleinere schaal wordt ingericht, worden pieken in de elektriciteitsvraag minder afgevlakt door een lage vraag elders. Daarnaast zijn decentrale productietechnieken op basis van zon of wind doorgaans ook sterk fluctuerend en vaak lastig voorspelbaar. Dit betekent dat een decentrale elektriciteitsvoorziening een koppeling vergt aan een centraal systeem en/of voldoende opslagcapaciteit om pieken op te vangen en vraag en aanbod op elkaar af te stemmen. Overdag geproduceerde elektriciteit kan dan tijdens piekuren 's avonds weer gebruikt worden. Toepassing van een dergelijk systeem op wijkniveau ondervangt ook de meeste pieken op het niveau van huishoudens. Voor een wijk van duizend woningen zou dan een opslagsysteem nodig zijn in de orde grootte van 2,5 MWh en 400 kW. De meest aantrekkelijke technieken voor directe opslag zijn waarschijnlijk batterijsystemen op basis van NaS of lithium, vanwege de combinatie tussen de relatief grote capaciteit en snelle responstijd. Ook accu's van elektrische voertuigen kunnen als achtervang worden ingezet, mits deze voldoende capaciteit hebben en geschikt zijn voor teruglevering van elektriciteit aan het netwerk. Een indirecte optie voor opslag van elektriciteit is via warmte in buffervaten. In de meeste gevallen zal de toename van lokale elektriciteitsstromen leiden tot een verzwarend van het lokale hoofdnet.

Voor de organisatie van het systeem en de toekenning van beheersverantwoordelijkheden zijn verschillende institutionele varianten denkbaar. Regeling (controle) van de lokale elektriciteitsproductie vanuit het centrale systeem via de netbeheerder is een mogelijkheid, waardoor het systeem als een virtuele centrale wordt aangestuurd. Daarnaast is ook een vorm van vraagsturing denkbaar, waarbij de inzet van

grote elektriciteitsvragers wordt afgestemd op het productie-niveau. Elektriciteitsvragende technieken met een grote warmtebuffer, zoals warmtepompen, kunnen dan korte tijd worden afgeschakeld ten behoeve van de systeembalancering. Voor de inzet van elektrische auto's is het denkbaar dat aangestuurd wordt op een grotere dagelijkse spreiding in de laadprofielen. Ten slotte kan het aanbod van elektriciteit in een decentraal elektriciteitssysteem worden aangevuld door of verevend met behulp van een centraal aanbodstelsel.

De ontwikkeling van een decentraal systeem vergt niet alleen tweerichtingsverkeer van elektriciteit, maar ook een koppeling van elektriciteits- en informatiestromen. Oplaadsystemen voor elektrische auto's kunnen daarin nog een extra element brengen, zoals de herkenbaarheid van de auto op willekeurige oplaadpunten. De ontwikkeling van zogenoemde slimme meters is cruciaal om deze stromen adequaat te kunnen monitoren als basis voor de regeling in het systeem.

Het is van cruciaal belang dat het systeem van aansturing van het netwerk recht doet aan de complexiteit van het decentrale elektriciteitssysteem. Centrale controle sluit het meest aan bij het huidige systeem met grote energiebedrijven, maar kan conflicteren met het beeld van autonomie over apparaten in het eigen huis. Een alternatief aansturingssysteem sluit aan op de mogelijkheid van onderlinge interactie tussen de verschillende eenheden van consumptie en productie in het systeem, mogelijk via een (lokaal) marktmechanisme. De kwetsbaarheid van centrale aansturing vervalt dan en het netwerk ontwikkelt zich tot wat met de term 'smart grid' aangeduid kan worden. Een dergelijk scenario vergt echter grootschalige institutionele aanpassingen.

7.3 Potentiële effecten van decentrale elektriciteitsvoorziening

Betaalbaarheid, betrouwbaarheid en milieu zijn de kernkwaliteiten van het energiebeleid. Op deze indicatoren kunnen de potentiële effecten voor een decentrale elektriciteitsvoorziening worden ingeschat. Daarbij is een vergelijking met (toekomstige) centrale systemen zinvol.

Betaalbaarheid

De totale schattingen voor investeringen in een decentraal elektriciteitssysteem voor de hele EU-27 belopen 2750-3400 miljard euro, afhankelijk van onzekerheden in kosten en exclusief investeringen in coördinerende technologieën vanwege de grote onzekerheden in de schattingen van kosten hiervoor (Roland Berger Strategy Consultants, 2008). De grootste investeringsbarrières liggen in de algehele verdere ontwikkeling van technologieën die zich nu nog vaak in een vroege (experimentele) fase bevinden, in de versterking en ontwikkeling van distributienetwerk met overlap tussen consumenten en producenten, en in de ontwikkeling van een coördinerende ICT-infrastructuur. In vergelijking met centrale elektriciteitssystemen op basis van schoon fossiel of duurzame opwekkingstechnieken liggen de totale kosten voor decentrale systeemontwikkeling hoger, maar daar staat tegenover dat het risico van insluiting (lock-in) in een niet levensvatbaar systeem afneemt.

In de decentrale elektriciteitsvoorziening in de gebouwde omgeving nemen zonnepanelen (PV) en micro-wkk een belangrijke plaats in; het potentieel voor urban wind is verwaarloosbaar. Opslag en sturing van het decentrale elektriciteitssysteem is echter nodig voor de grootschalige ontwikkeling van deze technieken.

PV is op dit moment een dure technologie. Toepassing in Nederland heeft het nadeel dat de intensiteit van de zoninstraling relatief laag is, waardoor de opbrengst beperkt blijft. Hoewel een inschatting van de technologische verbetering op de lange termijn met veel onzekerheden gepaard gaat, moet er rekening mee worden gehouden dat PV in Nederland een relatief dure techniek blijft. Micro-wkk, zeker op basis van brandstofceltechnologie, moet eveneens nog een groot deel van de leercurve doorlopen. Daarnaast zijn er extra kosten voor de productie van waterstof, centraal of decentraal. Centrale productie van waterstof leidt tot extra investeringen in en veiligheidsmaatregelen bij de infrastructuur voor de distributie. Naar verwachting zal ook deze technologie relatief duur blijven. Decentrale productie vergt de inzet van een dure converter voor het omzetten van aardgas naar waterstof.

De 'slimme' koppeling aan het centrale net met uitwisseling van gegevens voor systeembesturing en van elektriciteit leidt tot een iets duurder netwerksysteem dan het bestaande. Voor de lokale afstemming van vraag en aanbod door opslag van elektriciteit in batterijsystemen is op wijkniveau een opslagcapaciteit van gemiddeld circa 2,5 kWh per woning nodig. Op basis van prijsontwikkelingen van accu's voor elektrische auto's (Nagelhout en Ros, 2009) zou dit op de lange termijn neerkomen op circa 500 euro per woning.

Betrouwbaarheid

Een systeem op basis van duurzame elektriciteitsopwekking kan een belangrijke bijdrage leveren aan de voorzieningszekerheid. PV is na installatie van het systeem onafhankelijk van brandstoffen. Risico's voor calamiteiten of neveneffecten zijn niet direct te voorzien. Daarmee biedt PV voordelen ten opzichte van centrale alternatieven als kernenergie (afvalprobleem, uraniumvoorraad) en CO₂-opslag (tijdelijke oplossing en capaciteit nog onzeker). Voor micro-wkk gelden deze voordelen in veel mindere mate, omdat de afhankelijk van grondstoffen (gas direct of gas dan wel waterstof uit kolen en biomassa) blijft.

De leveringszekerheid van elektriciteit voor de consument ligt met het huidige systeem in Nederland op een hoog niveau, met weinig ruimte voor verdere verbetering. Door de ontwikkeling van vele decentrale productie-eenheden, opslagsystemen en een nieuw besturingssysteem wijzigt de structuur van het systeem ingrijpend. De toenemende complexiteit van een dergelijk systeem kent dan ook een reëel risico op afnemende leveringszekerheid van elektriciteit. Daartegenover staat dat uitval van kleine eenheden minder ingrijpende gevolgen heeft. Bovendien kunnen decentrale opslagsystemen tijdelijke uitval opvangen. In deze studie is geen kwantitatieve beoordeling gemaakt van de leveringszekerheid van het gehele systeem.

Milieu

In alle berekende varianten van decentrale elektriciteitsvoorziening neemt de elektriciteitsvraag sterk toe door de ontwikkeling van met name elektrische auto's en warmtepompen. Deze vraag wordt deels centraal opgevangen, naar verwachting zeer efficiënt en tegen lage CO₂-emissies. Het restant wordt decentraal geproduceerd met vooral duurzame technologieën. De directe CO₂-emissiefactor van PV is nul, maar ook de indirecte emissiefactor (energie voor de productie en installatie van de zonnepanelen) is op de lange termijn zeer laag. Datzelfde geldt voor wind op land of op zee, voor kernenergie en voor grote zonnecentrales in zonnrijke streken. De emissiefactoren voor biomassa centrales of biomassa in centrales ligt iets hoger, net als de emissiefactoren voor schoon fossiel: kolen en gas met CO₂-afvang en -opslag (CCS). Alleen de combinatie van biomassa met CCS kent nog lagere en zelfs negatieve emissiefactoren, omdat netto CO₂ wordt verwijderd uit de lucht. PV biedt dus een goede aanvulling op het technisch potentieel voor schone technieken.

Micro-wkk op aardgas ontbeert de mogelijkheid van CO₂-afvang en leidt daarom – in een streefbeeld met zeer lage broeikasgasemissies – juist tot relatief hoge emissiefactoren. Lagere emissiefactoren kunnen worden bereikt door meer biogas in het net of door centrale productie van schone waterstof.

7.4 Stappen richting realisatie

In het *Energierapport 2008* wordt de ontwikkeling van intelligente netwerken voorgesteld als een mogelijke ontwikkelingsrichting voor de energievoorziening in Nederland, naast gecentraliseerde voorziening van Europese basislast (op basis van kolen) of pieksturing (op basis van gas). Van deze opties vergt decentrale elektriciteitsvoorziening de grootste institutionele aanpassingen. De huidige beleidsactiviteiten op dit thema vinden nog grotendeels plaats in het domein van de visievorming, waarvoor met name de werkgroep Decentrale Infrastructuur van de Interdepartementale Programmadi-rectie Energietransitie (IPE) een coördinerende rol vervult. Daarnaast zijn ook verschillende netwerk- en energiebedrijven actief betrokken bij de verdere ontwikkeling van decentrale elektriciteitssystemen en de inpassing van duurzame energietechnieken. De belangrijkste activiteiten van verschillende betrokkenen rond het thema bestaan momenteel uit aansturing van standaardisering en uitrol van slimme meters, ondersteuning van en deelname aan verschillende (systeem) technische onderzoeksprojecten, en testen en toepassen van decentrale technieken.

Technologische ontwikkelingen

Er is de laatste jaren flinke vooruitgang geboekt bij de verdere verbetering van technologieën als PV en micro-wkk (zie daarvoor Elzenga et al., 2006; Montfoort en Ros, 2008). Voor PV is de ontwikkeling in Nederland enkele jaren gestagneerd door beleid dat te weinig zekerheden bood aan de marktpartijen. Het huidige kabinet heeft nieuwe impulsen gegeven met financiële ondersteuningsmogelijkheden in het kader van de SDE-regeling. Internationaal zijn de ontwikkelingen doorgegaan en is de prijs/prestatieverhouding aanzienlijk verbeterd.

De ontwikkeling van micro-wkk betreft voor de korte termijn vooral de Stirling-motor. Hoewel marktpartijen in Nederland al enige tijd in de startblokken lijken te staan, vormen de hoge investeringskosten nog een te grote barrière voor daadwerkelijke commerciële marktintroductie. De technische mogelijkheden voor micro-wkk hebben vooral een impuls gegeven aan het nadenken over decentrale concepten, zoals de virtuele centrale en terugleververgoedingen. Binnen het micro-wkk-concept wordt de Stirling-motor gezien als eerste stap naar de brandstofcel als veel efficiëntere, maar op systeemniveau fundamenteel andere technologie. Micro-wkk versterkt dus in eerste instantie de afhankelijkheid van de aardgasinfrastructuur, maar kan daarnaast ook faciliterend zijn voor de ontwikkeling van cruciale elementen in een decentrale infrastructuur, zoals geavanceerde terugleveringsopties en de mogelijke ontwikkeling van een virtuele centrale.

De ontwikkeling van de accu heeft de laatste jaren flinke impulsen gekregen. Tal van toepassingen hebben hieraan bijgedragen, zoals laptops en elektrische auto's (Nagelhout en Ros, 2009). Voor toepassing in netbalancering zijn lithium-ionbatterijen, vaak toegepast in elektrische auto's, een belangrijke kandidaat, maar ook natriumzwavelbatterijen komen in aanmerking, vooral vanwege de grotere potentiële capaciteit.

Ten behoeve van de integratie van decentrale elektriciteitssystemen bestaan nog verschillende ICT-gerelateerde technische uitdagingen. Een belangrijk punt is de vormgeving en uitwerking van de slimme meter, met name op het gebied van standaardisering van communicatieprotocollen, maar ook over de informatie die uiteindelijk uitgewisseld kan worden. Politieke afstemming over de standaardisering wordt op afzienbare termijn verwacht.

Er lopen verschillende onderzoeken gericht op toepassingen van individuele technieken en interactie met het netwerk, maar er is nog weinig onderzoek verricht op het gebied van totale systeemintegratie. Wel lopen in Nederland en elders verschillende experimenten op dit gebied, vaak met betrokkenheid van netwerkbeheerders en specifieke onderzoekscentra als KEMA en TU Eindhoven.

Institutionele ontwikkelingen

Voor een fundamentele transformatie van het energiesysteem zullen de technische configuratie en de institutionele context in samenhang met elkaar moeten veranderen. Dit is een co-evolutionair proces, waarin de technische en institutionele praktijken op elkaar afgestemd worden tot een coherent systeem. Deze afstemming kan geanalyseerd worden op verschillende systeemniveaus, waarin dan zowel institutionele als technologische ontwikkeling kunnen worden geanalyseerd (Künneke, 2008). Er zijn verschillende aansturingmodellen denkbaar voor een decentraal elektriciteitssysteem, variërend van een sterk gecentraliseerde aansturing tot een hoge mate van decentrale interactie tussen vraag- en productie-eenheden. In het gecentraliseerde sturingsmodel van top-downcontrole ontstaat echter een kloof tussen de technologische en de institutionele vormgeving van het elektriciteitssysteem. In het interactieve model van coöperatie zijn de institutionele en de technologische vormgeving beter op elkaar afgestemd, maar dit vereist een ingrijpend transitieproces.

Bijlage 1 Kengetallen per wijktype (2050) als uitgangspunt voor berekeningen systeemoptie

Kengetallen per wijktype (2050)

Tabel B1.1

			Centrum-stedelijk	Buiten-centrum	Groen-stedelijk	Centrum-dorps	Landelijk wonen
Aantal personen	1	[%]	60%	50%	42%	36%	32%
	2	[%]	24%	26%	31%	32%	35%
	3	[%]	8%	10%	11%	12%	11%
	4	[%]	6%	10%	12%	15%	16%
	> 4	[%]	3%	4%	4%	6%	7%
Type woning	vrijstaand	[%]	6%	4%	13%	25%	50%
	2/1 kap	[%]	5%	5%	15%	18%	17%
	rij/tussen	[%]	38%	49%	47%	43%	22%
	portiek, flat	[%]	42%	36%	18%	8%	3%
	onbekend/anders	[%]	6%	3%	3%	4%	5%
Leeftijdscategorie hoofdbewoner (jaren)	< 30	[%]	18%	18%	12%	9%	8%
	30-40	[%]	15%	17%	15%	14%	15%
	40-50	[%]	14%	16%	17%	17%	17%
	50-65	[%]	21%	22%	23%	26%	27%
	>65	[%]	32%	27%	33%	35%	33%
Aantal woningen ¹⁾		[aantal]	4490	3781	2228	2657	375
Aantal wijken ²⁾		[aantal]	149	721	415	854	1875

% betekent: aandeel van deze categorie in het wijktype.

1) Bepaald als quotiënt van totaal aantal woningen in categorie en totaal aantal wijken.

2) Aantal wijken: postcode 4-gebieden.

Wijkspecifieke correctiefactor voor inzet technologie

Tabel B1.2

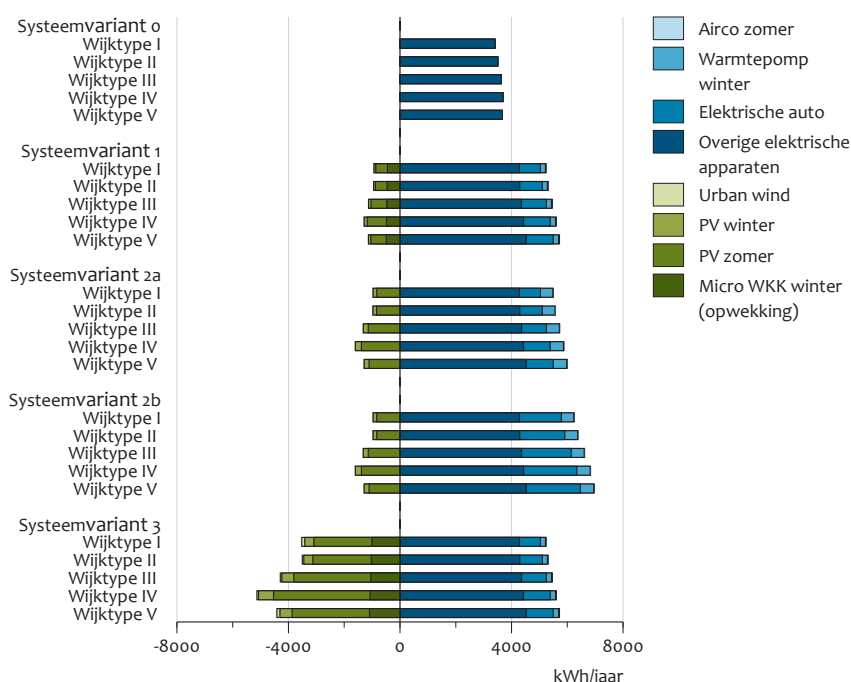
Energietechnologie	Centrum-stedelijk	Buiten-centrum	Groen-stedelijk	Centrum-dorps	Landelijk wonen	Aanname
Koeling/airco	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	Gelijk voor alle wijktypen
PV	0,6	0,6	0,8	1,0	0,8	Op basis van beschikbaar dakoppervlak
Warmtepompen	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	Gelijk voor alle wijktypen
Micro-wkk	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	Gelijk voor alle wijktypen
Elektrische auto's	0,8	0,8	0,9	1,0	1,0	Afhankelijk van aantal auto's per huishouden in een wijk
Urban wind	1,0	0,67	0,67	0,67	1,0	Vooral op hoge en vrijstaande plaatsen

Bijlage 2

Achtergrondberekeningen milieueffecten systeemvarianten

Gemiddelde huishoudelijke elektriciteitsvraag 2050

Figuur B2.1



Huishoudelijk energieverbruik op jaarbasis per systeemoptie, wijk en technologie.

Effecten op emissies worden berekend op basis van het huishoudelijk energieverbruik op jaarbasis in de verschillende systeemvarianten, waarin vraag- en aanbodtechnologieën in verschillende mate worden ontplooid (zie Figuur B2.1). Naast de decentrale elektriciteitsvoorziening wordt daarbij ook rekening gehouden met verschillende varianten voor de centrale elektriciteitsproductie. Voor de berekening van de netto-energievraag en de daaraan gekoppelde emissiereducties wordt een vergelijking gemaakt met de huidige energiehuishouding (systeemvariant 0).

Voor alle systeemvarianten wordt als volgt een berekening gemaakt van de veranderingen in emissies voor CO₂, NO_x, fijn stof en SO₂ volgens de algemene rekenregel:

Emissiereductie per systeemoptie

- = Emissies a.g.v. centrale elektriciteitsproductie
- + Emissies a.g.v. elektriciteitsproductie met micro-wkk
- + Emissies a.g.v. elektriciteitsproductie met PV
- + Emissies a.g.v. elektriciteitsproductie met urban wind
- + Emissies a.g.v. centraal geproduceerde elektriciteit
- Besparing a.g.v. elektrisch autorijden
- Besparing a.g.v. gebruik warmtepompen

Voor PV en urban wind zijn de emissiefactoren in de verdere berekeningen voor alle directe emissies op 0 gesteld. Emissies door inzet van brandstofcel-micro-wkk betekenen vaak een besparing op de referentie, hr-ketels (zie onder bij NO_x).

CO₂-emissies

Voor de berekening van de veranderingen in de systeemvarianten in 2050 worden twee referenties gebruikt voor centrale opwekking, respectievelijk op basis van kolencentrales met CO₂-opslag (50-100 kg CO₂/MWh) en op basis van schone gasgestookte centrales (30-40 kg CO₂/MWh) (Van den Wijngaart en Ros, te verschijnen in 2009).

Voor micro-wkk geldt dat warmte wordt geproduceerd ter vervanging van hr-ketels, maar met dezelfde emissiefactor (Elzenga et al., 2006). Elektriciteit is hier een bijproduct, dat in mindering kan worden gebracht op de elektriciteit die van het netwerk ingenomen wordt. Per saldo betekent dit dat de emissiefactor voor micro-wkk ook 0 is, want gelijk aan het alternatief in de referentie (hr).

Aan de hand van deze aannames kan de algemene rekenformule worden vereenvoudigd tot:

CO₂-emissiereductie per systeemoptie

- = CO₂-emissies a.g.v. centrale elektriciteitsproductie
- Besparing CO₂-emissies a.g.v. elektrisch autorijden
- Besparing CO₂-emissies a.g.v. gebruik warmtepompen

Voor warmtepompen geldt als referentie dat de productie van 1 GJ warmte (met een hr-ketel) tot circa 70 kg CO₂-emissie leidt. Een elektrische warmtepomp (COP=3) produceert met 1 GJ elektriciteit circa 3 GJ aan warmte.¹ Met elke GJ elektriciteit voor de warmtepomp wordt dus $3 \times 70 = 210$ kg CO₂ uitgespaard voor de warmteproductie (Janssen en Ros, 2009). Emissies als gevolg van de productie van elektriciteit worden meegenomen in de emissies als gevolg van de netto elektriciteitsvraag.

Voor elektrische auto's wordt een vergelijking gemaakt met gemiddelde emissies van conventionele voertuigen op basis van fossiele brandstoffen, ingeschat voor 2050. Hiervoor hanteren we een referentie van 120 g CO₂/km (Nagelhout en Ros, 2009). Uitgangspunt van alle laadprofielen is een gemiddelde dagelijkse forensenrit van 50 km, dus dit levert een gemiddelde dagelijkse besparing op van 6 kg CO₂.

NO_x-emissies

Voor NO_x-emissies geldt een vergelijkbare rekenmethodiek. Hierbij speelt de inzet van micro-wkk wel een rol, omdat NO_x-emissies door micro-wkk op basis van brandstofcellen anders is dan NO_x-emissies op basis van hr-ketels in de referentie. Dat betekent dat de volgende rekenformule wordt gehanteerd:

NO_x-emissiereductie per systeemoptie = NO_x-emissies a.g.v. centrale elektriciteitsproductie

- Besparing NO_x-emissies a.g.v. micro-wkk (brandstofcel)
- Besparing NO_x-emissies a.g.v. elektrisch autorijden
- Besparing NO_x-emissies a.g.v. gebruik warmtepompen

Voor de berekening van NO_x-emissies als gevolg van de centrale elektriciteitsvraag wordt voor het huidige park een norm van 40 g/GJ vastgesteld (op basis van het emissieplafond in het kader van de NO_x-emissiehandel), aangescherpt 30 g/GJ op de lange termijn (Elzenga et al., 2006).

Voor brandstofcel-micro-wkk geldt een emissiefactor van 1 g per GJ ingezette brandstof en voor hr-ketels geldt een emissiefactor van 20 g per GJ ingezette brandstof. In beide gevallen is de ingezette brandstof aardgas (Elzenga et al., 2006). De warmte/kracht-verhouding voor een brandstofcel-micro-wkk-systeem wordt gesteld op 1:1, dus warmteproductie van x GJ gaat gepaard met een elektriciteitsproductie van eveneens x GJ, met een ingeschat totaalrendement van 90% voor het hele systeem. Voor elke GJ aan elektriciteit geproduceerd is 1,11 GJ aan aardgas nodig. Dit levert een NO_x-emissie van 1,11 g. Een hr-ketel produceert warmte met een totaalrendement van 105%. Dit levert voor een input van 1,11 GJ aardgas een NO_x-emissie van $1,11/105\% \times 20 \text{ g} = 21,2 \text{ g NO}_x$. Daardoor ontstaat voor elke GJ aan elektriciteit geproduceerd dus een NO_x-emissiereductie van $21,2 - 1,11 = 20,1 \text{ g NO}_x$.

Bij inzet van warmtepompen wordt het uitgangspunt gehanteerd van vervanging van hr-ketels, met een emissie van 20 g NO_x/GJ. Voor warmtepompen geldt een directe NO_x-emissie van 0. De directe NO_x-emissies zijn dus lager, maar nemen wel toe bij centrale productie.

Voor elektrische auto's geldt eveneens een directe NO_x-emissie van 0, maar dat geldt ook voor het referentie. Hiervoor wordt voor 2050 aangenomen wordt dat emissies van NO_x en fijn stof door (nu al technisch haalbare) forse naverbranding tot 0 zijn gereduceerd.

Fijn stof en SO₂

Emissies van fijn stof (PM10) en SO₂ zijn enkel gerelateerd aan centrale elektriciteitsopwekking. Bij een hogere netto vraag naar centrale elektriciteitsopwekking nemen deze emissies in beginsel iets toe (op basis van emissiefactoren uit het BEES-B akkoord). Hiervoor geldt voor alle typen centrales een emissiefactor van 70 g SO₂/GJ en van 1,7 g fijn stof/GJ.

¹ Correcter geformuleerd geldt dat 1 GJ warmte wordt verplaatst, in plaats van geproduceerd.

Afkortingen

AC alternating current (wisselstroom)	MNP Milieu- en Natuurplanbureau	TPV Thermovoltatische omzetting (energieconversie)
APX Amsterdam Power Exchange (energiebeurs)	MW megawatt	TWh terawattuur
BEES Besluiten emissie-eisen stookinstallaties	MWh megawattuur	V2G vehicle-to-grid (teruglevering elektriciteit van elektrische auto aan netwerk)
CCS Carbon Capture and Storage (CO ₂ -afvang en opslag)	NaS natrium-zwavel (batterijtype)	wkk warmtekrachtkoppeling
CPB Centraal Planbureau	NiCd nikkel-cadmium (batterijtype)	WLO Welvaart en Leefomgeving (scenariostudie)
CSP Concentrating Solar Power	NiMH nikkel-metaalhydride (batterijtype)	W_p piek watt
DC direct current (gelijkstroom)	NMP4 Vierde Nationaal Milieubeleidsplan	
DG directoraat-generaal	NWO De Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek	
ECN Energie Centrum Nederland	OESO Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling	
EOS Energie Onderzoek Subsidie	ORC Organic Rankine Cycle (t.b.v. energieconversie)	
EVP model-ElektriciteitsVraagPatroon Model	PEMFC Proton exchange membrane fuel cell (type brandstofcel)	
GE Global Economy (scenario)	PV photovoltaic (fotovoltaïsch, of zonnestroom)	
GJ gigajoule (10 ⁹ joule)	PV-partij programmaverantwoordelijke partij (voor inkoop van elektriciteit)	
GWh gigawattuur	PVT fotovoltaïsch + thermisch	
hr hoogrendement	R&D Research & Development	
IEA International Energy Agency	SDE Stimulering Duurzame Energieproductie (subsidieregeling)	
IOP Innovatieonderzoeksprogramma	SET Strategisch Plan voor Energietechnologie (EU)	
IPE Interdepartementale Programmadirectie Energietransitie	SMES Superconducting Magnetic Energy Storage	
ITM EOS-project 'Intelligent E-Transport Management'	TEG Thermo-ionische omzetting (energieconversie)	
kW kilowatt	TSO Transmission System Operator (beheerder landelijk hoogspanningsnetwerk)	
kWh kilowattuur		

Literatuur

- ABF Research (2008). Zie website: <http://www.abfresearch.nl/default.asp?p=20>
- Albert, R., H. Jeong en A.L. Barabási (2000). Error and attack tolerance of complex networks. *Nature* 406, 378-381.
- Anderson, J., S. Bassi, E. Stantcheva en P. Ten Brink (2006). Innovation case study: photovoltaics. Assessing innovation dynamics induced by environment policy. IEEP, Brussels.
- Bergh, J.C.J.M. van den, A. Faber, A.M. Idenburg en F.H. Oosterhuis (2006). *Evolutionary economics and Environmental policy. Survival of the Greenest*. Edward Elgar, Cheltenham.
- Boer-Meulman, P.D.M. de, en B.A.G. In 't Groen (2009). Wijkniveauvoorspellingen van elektriciteitsvraag en aanbod van woningen. KEMA (50863640-TOS/NET 09-5221), Arnhem.
- Born, G.J. van den, en J.P.M. Ros (2006). Biogrondstoffen voor de Chemische Industrie. Evaluatie van transitie op basis van systeemopties. MNP (500083005), Bilthoven.
- Cace, J. en E. Ter Horst (2007). Urban wind turbines, leidraad voor kleine windturbines in de bebouwde omgeving. Wineur.
- CBS (2007). Duurzame energie in Nederland 2006. CBS, Voorburg/Heerlen.
- CPB, MNP en RPB (2006a). Welvaart en Leefomgeving, een scenariostudie voor Nederland in 2040, achtergronddocument. Centraal Planbureau, Milieu- en Natuurplanbureau en Ruimtelijk Planbureau, Den Haag, Bilthoven.
- CPB, MNP en RPB (2006b). Welvaart en Leefomgeving, een scenariostudie voor Nederland in 2040. Centraal Planbureau, Milieu- en Natuurplanbureau en Ruimtelijk Planbureau, Den Haag, Bilthoven.
- CRISP (2006). Distributed intelligence in CRITICAL Infrastructures for Sustainable Power. <http://crisp.ecn.nl>
- Duan, R. (2008). Agent coordination for supply and demand match in microgrid with auction mechanism. In: *Building Networks for a Brighter Future, 1st International Conference on Infrastructure Systems*, Rotterdam, 10-12 November 2008.
- ECN en MNP (2005). Referentieramingen energie en emissies 2005-2020. ECN/ MNP, Petten/ Amsterdam/ Bilthoven.
- Elzen, B. en P. Hofman (2007). Transition paths towards a sustainable electricity system, an exploration using sociotechnical scenarios. University of Twente (STeHSP, CSTM), Enschede.
- Elzenga, H.E., J.A. Montfoort en J.P.M. Ros (2006). Micro-warmtekracht en de virtuele centrale: Evaluatie van transitie op basis van systeemopties. MNP (500083003), Bilthoven.
- Energiegids (2008a). EC: biljoen euro nodig voor energie-investering. 14 November 2008. <http://www.energiegids.nl/nieuws/details.tiles?doc=/content/energie/nieuws/2008/11/14/energieplan.xml>
- Energiegids (2008b). Meer rugwind nodig voor kleine windmolens. November 2008 (6), pagina 7.
- Energiegids (2009a). "Een derde van slimme-metergebruikers bespaart 5 procent op energierekening". 13 maart 2009. <http://www.energiegids.nl/nieuws/details.tiles?doc=/content/energie/nieuws/2009/03/12/EM-slimme-meters.xml>
- Energiegids (2009b). Wiskundigen onderzoeken inpassing duurzame energie. 20 januari 2009. <http://www.energiegids.nl/nieuws/details.tiles?doc=/content/energie/nieuws/2009/01/20/CWI.xml@selectedDossier=000061@dossier=000062,000063,000064,000065,000066,000067>
- Energiegids (2009c). Kleine windturbines leveren veel te weinig op. 17 maart 2009. <http://www.energiegids.nl/details.tiles?doc=/content/energie/nieuws/2009/03/17/DE-windmolens.xml>
- Energietransitie (2008). Zie website: <http://www.energietransitie.nl/>
- European Commission (2006a). European SmartGrids Technology Platform. Vision and strategy for Europe's electricity networks of the future. DG Research (EUR22040), Brussels.
- European Commission (2006b). A European strategy for sustainable, competitive and secure energy. European Commission (COM (2006) 105 def), Brussels.
- European Commission (2007a). Europees Strategisch Plan voor Energietechnologie (SET-plan), 'Naar een koolstofarme toekomst'. European Commission (COM (2007) 723 def), Brussel.
- European Commission (2007b). Strategic Research Agenda for Europe's electricity networks of the future. DG Research/ European Technology Platform SmartGrids (EUR22580), Brussels.
- Faber, A., M. Valente, P. Janssen en K. Frenken (2008). Domestic micro-cogeneration in the Netherlands: an agent-based demand model for technology diffusion. DIME working paper (in review).
- Feenstra, C.F.J. (2008). The flexible future of micro combined heat and power. An analysis of the social embedding of micro CHP in Dutch households in 2030. ECN (ECN-E-08-038), Petten.
- Future Power Systems (2008). Zie website: <http://www.futurepowersystems.nl/>
- Geels, F. (2002). Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. *Research Policy* 31, 1257-1274.
- Genus, A. (2008). Changing the rules? Regimes, niches and the transition to microgeneration. In: *DIME International Conference "Innovation, sustainability and policy"*, Bordeaux (Frankrijk), 11-13 september 2008.
- Hatziaargyriou, N., H. Asano, R. Iravani en C. Marnay (2007). Microgrids, an overview of ongoing Research, Development and Demonstration Projects. *IEEE power & energy magazine* July/August 2007, 79-94.
- Hesselmans, A.N. en G.P.J. Verbong (2000). Schaalvergroting en kleinschaligheid, de elektriciteitsvoorziening tot 1914. In: *Techniek in Nederland in de twintigste eeuw II: delfstoffen, chemie, energie* (ed J. Schot), pp. 124-139. Stichting Historie der Techniek/Walburg Pers, Zutphen.
- Hesselmans, A.N., G.P.J. Verbong en H. Buiters (2000a). Binnen provinciale grenzen, de elektriciteitsvoorziening tot 1940. In: *Techniek in Nederland in de twintigste eeuw II: delfstoffen, chemie, energie* (ed J. Schot), pp. 141-159. Stichting Historie der Techniek/Walburg Pers, Zutphen.
- Hesselmans, A.N., G.P.J. Verbong en P. Van den Berg (2000b). Elektriciteitsvoorziening, overheid en industrie 1949-1970. In: *Techniek in Nederland in de twintigste eeuw II: delfstoffen, chemie, energie* (ed J. Schot), pp. 221-237. Stichting Historie der Techniek/Walburg Pers, Zutphen.
- Hoed, R. van den (2004). Driving fuel cell vehicles. How established industries react to radical technologies, TU Delft, Delft.
- Hughes, T.P. (1987). The evolution of large technological systems. In: *The social construction of technological systems* (eds W.E. Bijker, T.P. Hughes & T. Pinch), pp. 51-82. MIT Press, Cambridge (MA).
- IEA (2003). *World Energy Investment Outlook*. IEA, Paris.
- IEA (2008). Energy Technology Perspectives 2008. Scenarios and strategies to 2050. IEA/OECD, Paris.
- Janssen, L. en J.P.M. Ros (2009). Warmteconcepten in de gebouwde omgeving. Evaluatie van transitie op basis van systeemopties. PBL (550083012), Bilthoven (nog te verschijnen).
- KEMA (2008). Betrouwbaarheid van elektriciteitsnetten in Nederland in 2007. KEMA (30813002-Consulting 08-0760), Arnhem.
- Kemp, R., J. Schot en R. Hoogma (1998). Regime shifts to sustainability through processes of niche formation: the approach of strategic niche management. *Technology Analysis & Strategic Niche Management* 10 (2), 175-195.
- Kemp, R., D. Loorbach en J. Rotmans (2007). Transition management as a model for managing processes of co-evolution towards sustainable development. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology* 14, 78-91.
- Kester, J. (2008). ECN: Slimme meter is halve oplossing. *EnergieGids* juli 2008, 35.
- Kok, K., Z. Derzsi, J. Gordijn, M. Hommelberg, C. Warmer, R. Kamphuis en H. Akkermans (2008). Agent-based electricity balancing with distributed energy resources, a multiperspective case study. In: *HICSS 2008 Conference*, Hawaii, 7-10 January 2008.
- Künneke, R.W. (2008). Institutional reform and technological practice: the case of electricity. *Industrial and Corporate Change* 17 (2), 233-265.
- Loorbach, D. (2007). Transition Management. New mode of governance for sustainable development, Erasmus Universiteit, Rotterdam.

- Meeuwse, J.J. (2007). Electricity networks of the future. Various roads to a sustainable energy system. Eindhoven University of Technology, Eindhoven.
- Menkveld, M., (red.), (2004). Energietechnologieën in relatie tot transitiebeleid - factsheets. ECN (ECN-C--04-020), Petten.
- Ministerie van Economische Zaken (2008a). Energierapport 2008. Ministerie van Economische Zaken, Den Haag.
- Ministerie van Economische Zaken (2008b). Innovatieagenda Energie. Ministerie van Economische Zaken, Den Haag.
- Ministerie van Economische Zaken (2008c). Invoering slimme meters - kernelementen. Informatie aan de markt. Ministerie van Economische Zaken, Den Haag.
- Ministerie van VROM (2001). *Een wereld en een wil, werken aan duurzaamheid - Nationaal Milieubeleidsplan 4*. Ministerie van VROM, Den Haag.
- Ministerie van VROM (2007). Cijfers over wonen 2006. Ministerie van VROM, Den Haag.
- Ministerie van VROM (2008a). WOONonderzoek Nederland, Zie website: <http://www2.vrom.nl/pagina.html?id=9936&o=2>
- Ministerie van VROM (2008b). Nieuwe energie voor het klimaat. Werkprogramma Schoon en Zuinig. Ministerie van VROM, Den Haag.
- MNC (2008). Milieu- en Natuurcompendium, Zie website: <http://www.milieuennatuurcompendium.nl/>
- Montfoort, J.A. en J.P.M. Ros (2008). Zonne-energie in woningen; Evaluatie van transities op basis van systeemopties. MNP (500083009), Bilthoven.
- Nagelhout, D. en J.P.M. Ros (2006). Brandstofcelauto op waterstof verkregen uit zonthermische krachtcentrales (CSP). Evaluatie van transities op basis van systeemopties. MNP (500083007), Bilthoven.
- Nagelhout, D. en J.P.M. Ros (2009). Elektrische autorijden, evaluatie van transities op basis van systeemopties. PBL (550083010), Bilthoven.
- Negenborn, R. (2007). Multi-agent model predictive control with applications to power networks, TU Delft, Delft.
- NWO (2008). Zie website: http://www.nwo.nl/nwohome.nsf/pages/NWOP_5T2H6X
- Oosterhuis, F.H. en A. Faber (2007). Brede toepassing maakt milieutechnologie goedkoper. *Milieu* 6, 17-21.
- Overdiep, H. (2005). Thuiscentrale opvolger van de hr-combiketel? Micro-wkk als onderdeel van de Virtuele Elektriciteitscentrale. *Arena* 2, 25-28.
- Pehnt, M., M. Cames, C. Fischer, B. Praetorius, L. Schneider, K. Schumacher en J.-P. Voss (2006). *Micro cogeneration, towards decentralized energy systems*. Springer, Heidelberg.
- Platform Duurzame Elektriciteitsvoorziening (2007). Naar een duurzame elektriciteitsvoorziening, aandachtsgebied centrale elektrische infrastructuur. http://www.senternovem.nl/mmfiles/Naar%20een%20duurzame%20elektriciteitsvoorziening%20-%20Aandachtsgebied%20centrale%20elektrische%20infrastructuur%20-%2014%2E11%2E07_tcm24-246521.pdf
- Platform Duurzame Elektriciteitsvoorziening en Platform Nieuw Gas (2007). Naar een duurzame elektriciteitsvoorziening, aandachtsgebied decentrale infrastructuur. http://www.senternovem.nl/mmfiles/Naar%20een%20duurzame%20elektriciteitsvoorziening%20-%20Aandachtsgebied%20decentrale%20infrastructuur%20-%2014%2E11%2E07_tcm24-246523.pdf
- Powermatcher (2008). Zie website: <http://www.powermatcher.net/>
- Reudink, M., H.v. Zeijts en J.P.M. Ros (2006). Markt voor groene diensten: evaluatie van transities op basis van systeemopties. MNP (500083004), Bilthoven.
- Roland Berger Strategy Consultants (2008). Secure and green energy, but at what cost? A holistic view on investment alternatives for European electricity supply. Roland Berger Strategy Consultants.
- Rood, G.A., D. Nagelhout, J.P.M. Ros en H.C. Wilting (2006). Duurzame viskweek voor behoud van de visvoorraad. Evaluatie van transities op basis van systeemopties. MNP (500083006), Bilthoven.
- Ros, J.P.M., J.C.M. Farla, J.A. Montfoort, D. Nagelhout, M. Reudink, G.A. Rood en H.v. Zeijts (2006a). Evaluatiemethodiek voor NMP-4 transitie, bouwtekening voor de evaluatie ter ondersteuning van systeeminnovatie op de lange termijn. MNP (500083001), Bilthoven.
- Ros, J.P.M. en J.A. Montfoort (2006). Evaluatie van transities: Systeemoptie vloeibare biobrandstoffen. MNP (500083002), Bilthoven.
- Ros, J.P.M., G.J. Van den Born, H.E. Elzenga, J.A. Montfoort, D. Nagelhout, M. Reudink, G.A. Rood en H.v. Zeijts (2006b). Transitieprocessen en de rol van het beleid - Evaluatie op basis van zes systeemopties. MNP (500083008), Bilthoven.
- Ros, J.P.M., D. Nagelhout en J.A. Montfoort (2009). New environmental policy for system innovation: Casus alternatives for fossil motor fuels. *Applied Energy* 86, 243-250.
- Rotmans, J., R. Kemp, M. van Asselt, F. Geels, G. Verbong en K. Molendijk (2000). Transitie en transitie management, de casus van een emissiearme energievoorziening. ICIS/ MERIT, Maastricht.
- Rotmans, J., R. Kemp en M. van Asselt (2001). More evolution than revolution, transition management in public policy. *Foresight* 3 (1), 1-17.
- Sauter, R. en J. Watson (2007). Strategies for the deployment of micro-generation: implications for social acceptance. *Energy Policy* 35, 2770-2779.
- Scheepers, M.J.J., A.J. Seebregts, C.B. Hanschke en F.J.D. Nieuwenhout (2007). Invloed van innovatieve technologie op de toekomstige elektriciteitsinfrastructuur. ECN (ECN-E-07-068), Petten.
- Scheepers, M.J.J. (2008). Personal communication.
- Scott, J., P. Vaessen en F. Verheij (2008). Smart Grids for the Future. Reflections (nummer 11). KEMA, voor het ministerie van Economische Zaken, Den Haag.
- Scott, W.R. (1995). *Institutions and Organizations*. Sage, Thousand Oaks (CA).
- SEO Economisch Onderzoek (2008). Zelfvoorzienendheid in elektriciteit. SEO (2008-53), Amsterdam.
- Sine, W.D., H.A. Haveman en P.S. Tolbert (2005). Risky Business? Entrepreneurship in the new independent-power sector. *Administrative Science Quarterly* 50, 200-232.
- Technology Review (2009a). Managing energy with Swarm logic. 4 Feb. 2009. <http://www.technologyreview.com/energy/22066/>
- Technology Review (2009b). Lifeline for Renewable Power. *Technology Review* 112 (1), January/February 2009, 40-47.
- TenneT (2008). Visie2030. TenneT, Arnhem.
- Ummels, B. (2009). Wind integration. Power system operation with large-scale wind power in liberalised environments, TU Delft, Delft.
- Verbong, G.P.J. (2000). Grote technische systemen in de energievoorziening. In: *Techniek in Nederland in de twintigste eeuw II: delfstoffen, chemie, energie* (ed J. Schot), pp. 113-123. Stichting Historie der Techniek/Walburg Pers, Zutphen.
- Watson, J., R. Sauter, B. Bahaj, P.A. James, L. Myers en R. Wing (2006). Unlocking the Power House: policy and system change for domestic micro-generation in the UK. SPRU (University of Sussex), Brighton (UK).
- Werkgroep Decentrale Gastoepassingen (2008). Energie- en CO₂-besparingspotentieel van micro-wkk in Nederland (2010-2030), update 2008. Energietransitie (Platform Nieuw Gas), Den Haag.
- Werkgroep Decentrale Infrastructuur (2007). Decentrale infrastructuur. Interim-rapportage van de werkgroep decentrale infrastructuur. Energietransitie, Den Haag.
- Werkgroep Decentrale Infrastructuur (2008). Actieplan decentrale infrastructuur. Actiepunten in initiatieven vanuit de netbeheerders om decentrale toepassingen in te passen in de energievoorziening. Energietransitie, Den Haag.
- Wijngaart, R.A. van den, en J.P.M. Ros (2009). Schoon en Zuinig in breder perspectief. PBL (500115009), Bilthoven.
- WRR (2008). Sturen op infrastructuur, een investeringsopdracht. Wetenschappelijke Raad voor het Regeringsbeleid, Den Haag.

Colofon

Eindverantwoordelijkheid

Planbureau voor de Leefomgeving

Coördinatie

A. Faber en J.P.M. Ros

Overige bijdragen

P. de Boer en B. in 't Groen (KEMA)

Review en commentaar

P. de Boer (KEMA), B. in 't Groen (KEMA), T. van Wingerden (KEMA), R. van den Wijngaart (PBL), M. Bongaerts (Alliander), R. Kamphuis (ECN), I. Opstelten (ECN), O. Ongkiehong (SenterNovem), G. Verbong (TUE), H. Droog (werkgroep Decentrale Infrastructuur), R. Dantuma (EZ) S. Verbrugge (Roland Berger Consultants), L. Janssen (PBL), J. Montfoort (PBL), D. Nagelhout (PBL), R. Folkert (PBL)

Redactie figuren

M. Abels en F. de Blois

Vormgeving en opmaak

Uitgeverij RIVM

Contact

A. Faber; albert.faber@pbl.nl

Elektriciteit uit eigen huis: een uitdaging voor organisatie en techniek

Er zijn vele technische mogelijkheden om op lokale schaal – op gebouwen, in woningen en wijken – efficiënter en schoner elektriciteit te produceren. Zonnepanelen, windmolens en brandstofcellen zijn hiervan voorbeelden. Het aanbod van elektriciteit uit deze systemen vertoont echter grote fluctuaties. Bovendien kan de elektriciteitsvraag in huishoudens in de toekomst sterk toenemen voor het opladen van elektrische auto's of de toepassing van warmtepompen. Het vraagt daarom nogal wat aanpassingen in vormgeving en aansturing van het systeem om vraag en aanbod in balans te houden.

Er zijn verschillende mogelijkheden deze balans te realiseren: beïnvloeding van vraag of aanbod, door tijdelijke opslag van elektriciteit, door gebruik te maken van het bovenliggende netwerk, of door versterking van de samenhang met lokale warmtesystemen.

Dit rapport schetst de technische en institutionele uitdagingen, barrières en effecten die gepaard gaan met de grootschalige ontplooiing van een decentrale elektriciteitsvoorziening.