

Fotonenboer

Elektriciteit tanken bij de boer in 2025

Dit essay is geschreven in opdracht van Stichting Innovatie Glastuinbouw, InnovatieNetwerk en Courage door:
Ir. P.D.M. de Boer en Ir. M. Schreurs, KEMA
Dr. K.J. Braber, CEA

Projectleiders:
P.T. Oei (InnovatieNetwerk en SIGN)
Ing. C.K. de Vries (Courage)

Dit rapport valt binnen het InnovatieNetwerk-thema 'Duurzaam Ondernemen', project 'Nieuwe Nutsinfrastructuur'.



Postbus 19197
3501 DD Utrecht
<http://www.innovatienetwerk.org>



Postbus 51
2665 ZH Bleiswijk
<http://www.glaskracht.nl>



Postbus 165
2700 AD Zoetermeer
<http://www.courage2025.nl>

ISBN: 978 – 90 – 5059 – 348 – 9

Overname van tekstdelen is toegestaan, mits met bronvermelding.

Rapportnr. 08.2.173, Utrecht, februari 2008.

Voorwoord

Eerdere studies van InnovatieNetwerk, SIGN en Courage hebben aangetoond dat de agrosector een belangrijke rol kan vervullen als leverancier van duurzame energie. Al deze vernieuwbare energie heeft het licht van de zon als oorsprong. De agrosector, die circa 70% van het grondoppervlak van Nederland beheert, is de grootste ontvanger van zonne-energie van ons land. Gewassen gebruiken slechts een miniem deel van deze energie: het overgrote deel van de lichtdeeltjes of fotonen die op de agrosector neerstralen, blijft nu nog onbenut. Door allerlei nieuwe technische mogelijkheden zal deze “fotonenoogst” in de toekomst echter flink toenemen. De fysisch meest rendabele manier om fotonen te oogsten, is de directe conversie van foton naar elektron, zoals bij het zonnepaneel. Naar verwachting zullen nieuwe generaties zonnecellen binnen tien jaar ook in economische zin rendabel zijn.

Een belangrijke beperking in het benutten en tot waarde brengen van duurzame elektriciteit is dat we elektriciteit moeilijk kunnen opslaan. Traditionele batterijen en accu's zijn beperkt qua capaciteit, kosten en gebruiksvriendelijkheid. Maar er dient zich een nieuwe mogelijkheid aan: de *redox flow*-batterij, een accu met verpompbare elektrolyten. Dit systeem kan op termijn een doorbraak genereren in de benutting en toepassingsmogelijkheden van duurzame elektriciteit. In dit essay leggen we uit hoe deze techniek werkt en wat zij op termijn kan betekenen voor de agrosector.

De opslag van duurzame elektriciteit biedt het agrarisch bedrijf unieke kansen om in te spelen op de onbalans in het elektriciteitsnet. Agrariers kunnen de stroom verkopen wanneer de vraag het grootst is, en daarmee de prijs het hoogst. Ook kunnen ze dankzij de opslag, de stroom beter benutten bij sterk fluctuerende behoeftes, zoals op een melkveebedrijf of bij een belichtende tuinder.

Een bijzonder voordeel van **het redox flow**-systeem is dat het geladen elektrolyt waarin je de elektronen opslaat, verpompbaar is. Dat maakt het concept in principe zeer geschikt voor elektrisch transport. **Tanken bij de Fotonenboer** is het wensbeeld: de agrosector draagt dan bij aan geluidsarm transport zonder uitstoot, een onvermoede combinatie.

Maar voor we zover zijn, willen we de komende jaren eerst stationaire opstellingen beproeven bij energieproducerende tuinders en melkveehouders. Het is de ambitie van InnovatieNetwerk, SIGN en Courage om daar in 2008 een begin mee te maken.

Dr. G. Vos,

Directeur InnovatieNetwerk

N. van Ruiten,

voorzitter SIGN

S.J. Schenk.

voorzitter Courage

Inhoudsopgave

Voorwoord

Samenvatting 1

1. 2025: Tanken bij de boer 5

1.1 Fotonenboer 6

2. Techniek 9

2.1 Duurzame elektriciteit 9

2.2 Elektriciteitsopslag in een *redox flow*-accu 10

3. Wat levert het op? 19

3.1 Voordelen voor het agrarische bedrijf 19

3.2 Voordelen voor de maatschappij 20

3.3 Financieel 22

3.4 Alle voordelen op een rijtje 24

4. Stap voor stap: wat moet er nog gebeuren? 27

4.1 2010: Toepassing van *redox flow*-systemen op dit moment 27

4.2 2012: Agrariër en eigen bedrijf: twee voorbeeldprojecten 28

4.3 2015: Professioneel regionaal transport 29

4.4 2020: Landelijk dekkend netwerk van oplaadpunten 30

4.5 2025: Consument en vervoer 30

4.6 Het tij is nog nooit zo gunstig geweest 31

4.7 Terug naar 2008: Concrete eerste stappen 33

Literatuurlijst 35

Bijlage 1: Financieel overzicht 37

Bijlage 2: Maar hoe zit het dan met al die andere veelbelovende ontwikkelingen? 43

Summary 47

Samenvatting

Zal in 2025 de manier van autorijden drastisch veranderd zijn? Transport zonder CO₂-uitstoot, minder geluidsoverlast en zonder uitstoot van fijn stof?

Dit essay verkent de mogelijkheden van zogeheten *redox flow*-accu's en de rol die de landbouw kan vervullen: de Fotonenboer, die duurzame energie weet op te slaan in een vloeistof, het elektrolyt.

Het elektrolyt kan getankt worden bij een netwerk van boeren door heel Nederland. De boer wekt duurzame elektriciteit op door het gebruik van wind, zon en biomassa. Deze elektriciteit wordt met behulp van een *redox flow*-accu omgezet en opgeslagen in elektrolyt. De consument tankt dit elektrolyt bij de boer, waarna het wordt gebruikt als "brandstof" voor het voertuig. Hiervoor worden de elektrische auto's uitgerust met een kleine versie van een *redox flow*-accu.

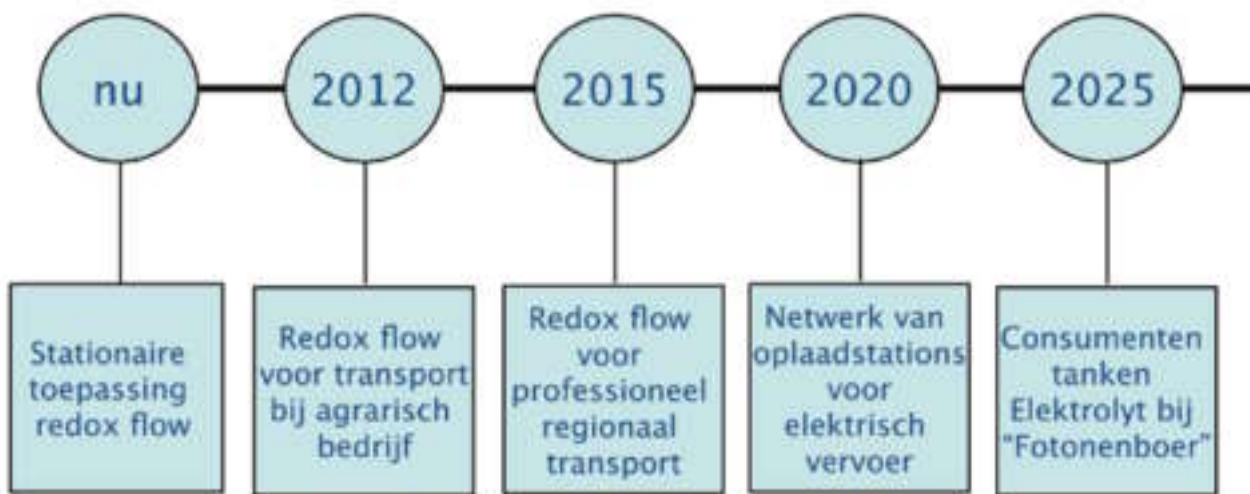
Tijdens het rijden wordt het elektrolyt ontladen. Dit ontladen elektrolyt levert de consument weer in bij de boer onder gelijktijdige vulling van de tank met geladen elektrolyt. De Fotonenboer laadt het elektrolyt weer op met behulp van duurzame energie, met name op momenten dat er op het agrarisch bedrijf een overschot aan duurzame energie is. Door deze techniek is het mogelijk om voertuigen niet alleen volledig op duurzame energie te laten rijden, maar ook snel op te laden. De lange laadduur is een van de problemen die elektrisch transport de komende jaren moet oplossen.

Met de aannames die in dit rapport gemaakt zijn, zijn de volgende voordelen in 2025 voor de verschillende actoren van toepassing.

Boer	Consument	Maatschappij
Creëert afzetmarkt voor overschot duurzame energie	Kan milieuvriendelijk autorijden	Optimaal gebruik van duurzame energie
Verdiert met verkoop elektrolyt als brandstof voor elektrische voertuigen	Kosten voor elektrolyt zijn lager dan benzine	Geen CO ₂ -, fijn stof- of NOx-uitstoot door elektrische voertuigen
Bespaart op eigen energiekosten doordat hij zijn eigen vraag en aanbod van duurzame energie op elkaar afstemt	Rijdt in een stille auto met een veel betere luchtkwaliteit in de auto	Drastische vermindering geluidsoverlast van verkeer
Heeft geen hoge kosten voor inpassing bedrijf aan het elektriciteitsnet	Kan groene stroom gebruiken doordat boer overschot duurzame energie aan het elektriciteitsnet levert	Stabiel elektriciteitsnet door stationaire toepassing redox flow-opslagsysteem

Tabel 1: Overzicht van voordelen van de Fotonenboer in 2025.

Om daadwerkelijk in 2025 elektrolyt te kunnen gebruiken voor voertuigen, moeten de onderstaande stappen worden genomen:



Figuur 1: Benodigde transitie voor realisatie van de "Fotonenboer".

I.

2025: Tanken bij de boer

Het is zomer, de zon schijnt en het is 35°C. U wordt gebeld door een vriend die aan de andere kant van Nederland woont en hij vraagt of u zin heeft om bij hem in Maastricht een terrasje te pakken. U twijfelt. U heeft nog veel te doen, het is ver rijden en u moet ook nog een rapport voor het werk schrijven. Maar ja, het is wel erg gezellig en het wordt wel weer eens tijd om bij te praten. Onderweg kunt u bovendien ook werken. Dus u besluit toch maar te gaan.

Gelukkig heeft u twee jaar geleden een elektrische auto gekocht, die op elektrolyt rijdt. De auto maakt nauwelijks geluid en stoot geen fijn stof en CO₂ uit. Toen kon u nog niet verwachten dat de prijs van elektrolyt zo snel lager zou worden. Maar wat een geluk, de prijs van elektrolyt is nu zelfs lager dan de prijs van benzine. Milieuvriendelijk en goedkoop, wie had dat gedacht.

U pakt uw digitale zakboek, die alle functies zoals de laptop, krant, autosleutels en portemonnee vervangt, en stapt in de auto. In reactie op uw nadering gaat de deur vanzelf open, stapt u in en start de motor automatisch. Even het adres inspreken waar u naartoe moet en rijden maar. Wat is het toch druk in de stad: veel verkeer van rechts, alle stoplichten op rood, dus dat is opletten geblazen. U wordt echter geholpen door allerlei elektronische snufjes in uw auto. Gelukkig bent u dan ook snel de stad uit en rijdt u de snelweg op. Uw auto piept een keer, u kunt uw stuur loslaten, dat vervolgens naar binnen schuift in het dashboard en u sluit aan in de autotrein. Vanaf hier neemt het automatische besturingssysteem het over en kunt u lekker de krant lezen en aan uw rapport werken.

Hé, daar piept de auto weer: een berichtje op het dashboard. Binnen nu en vijftig kilometer moet u tanken. De komende 50 kilometer komt u drie boeren tegen bij wie u elektrolyt kunt tanken. Boer Phi-

lipsen is vandaag de goedkoopste en heeft voldoende in voorraad. Wilt u bij hem tanken?

U klikt op “ja”. Na 20 kilometer piept de auto weer. U moet van de snelweg af en naar de parallelweg. U moet weer even zelf sturen. Bij de boer tankt u elektrolyt en het bedrag wordt automatisch van uw rekening afgeschreven. U rijdt weer naar de snelweg.

Eenmaal op de snelweg neemt het automatische besturingssysteem het weer over en tot aan Maastricht schrijft u heerlijk rustig uw rapport. U arriveert stipt op tijd in Maastricht en geniet van het terrasje. Vanavond weer deze rit naar huis en dan zit de dag erop.

Is dit een onwerkelijke droom, of kan dit in 2025 echt? Dit essay beschrijft wat er nodig is voor het rijden in een elektrische auto en het tanken van elektrolyt, hoe de techniek werkt, en wat er moet gebeuren tussen nu en 2025 om deze droom werkelijkheid te laten worden.

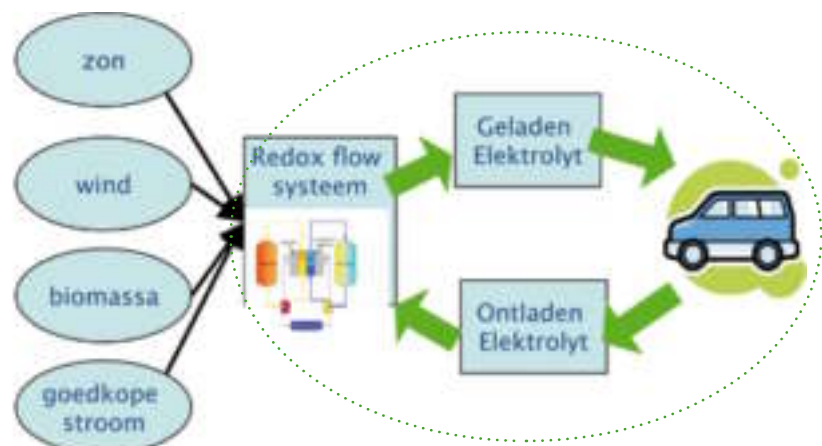
1.1 Fotonenboer

In 2025 wekt de land- en tuinbouw grote hoeveelheden duurzame energie op met behulp van wind, zon en biomassa. Een deel hiervan wordt gebruikt voor de eigen energiebehoefte, maar het overschot wordt opgeslagen in een *redox flow*-systeem. Het geladen elektrolyt wordt verkocht als brandstof voor elektrische auto's. Bezitters van elektrische voertuigen kunnen door heel het land bij de boer elektrolyt tanken en rijden daarmee milieuvriendelijk: zonder CO₂, NO_x- of fijn stof-uitstoot, bijzonder stil en onder terugwinning van remenergie. Het ontladen elektrolyt leveren ze weer in bij de boer onder gelijktijdige vulling van de tank met geladen elektrolyt. De Fotonenboer laadt het elektrolyt weer op met behulp van duurzame energie en kan het daarna opnieuw verkopen.

Energie uit biomassa ontstaat uit fotonen, die in de plant zijn omgezet in (hemi-)cellulose en suikers. Ook windenergie (wind is de stroming die ontstaat door het verschil tussen hogedrukgebieden en lagedrukgebieden) en zonne-energie vinden hun oorsprong in de zon, die fotonen (licht) straalt naar de aarde. Vandaar de naam **Fotonenboer**.

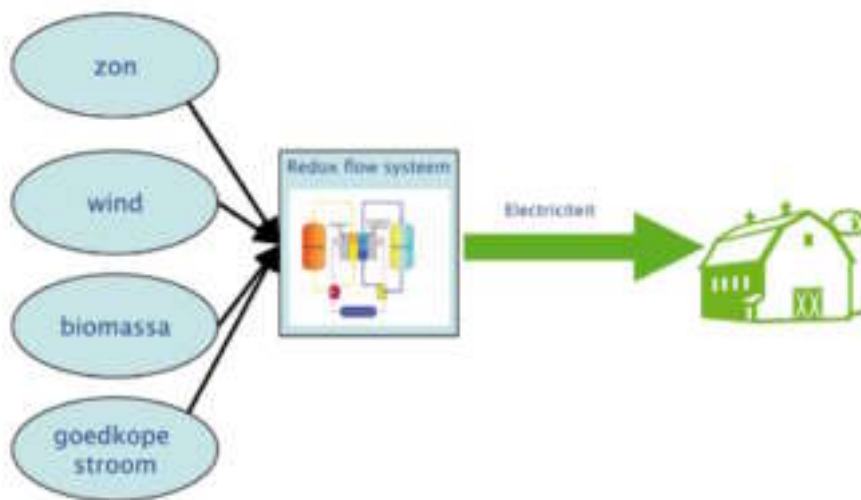
In onderstaand schema symboliseert de grote ellips de positie van de Fotonenboer in de keten van energiebronnen tot energiegebruiker:

Figuur 2: Positie van de Fotonenboer in de totale keten in 2025.



Figuur 2 geeft dit wensbeeld schematisch weer. Dit is een zeer aantrekkelijke toepassing van een *redox flow*-opslagsysteem op een agrarisch bedrijf. Op korte termijn is dit echter nog niet te realiseren, omdat er nog geen elektrische voertuigen zijn die op elektrolyt kunnen rijden. De technologieën zijn in ontwikkeling, maar er zijn nog grote stappen te maken om dit te realiseren.

Maar ook op korte termijn zijn er al toepassingen van een *redox flow*-systeem op een agrarisch bedrijf haalbaar. Door het *redox flow*-systeem als netgekoppelde elektriciteitsopslag te gebruiken, kan de boer de duurzame elektriciteit die op zijn eigen bedrijf is opgewekt, leveren aan het net op momenten dat de prijs voor elektriciteit hoog is. Bijvoorbeeld als de vraag heel hoog is of als een energiebedrijf niet aan zijn leveringsverplichtingen kan voldoen. Daarnaast kan de boer de elektriciteit voor zijn eigen bedrijf gebruiken (zie figuur 3).



Figuur 3: Positie van de Fotonenboer in de totale keten in 2010.

2.

Techniek

2.1

Duurzame elektriciteit

Deze eeuw moet de wereld een stuk duurzamer worden. In verschillende sectoren werkt men aan duurzame oplossingen, zoals energiebesparing en de productie van duurzame energie. In 2025 zal dit voor een groot deel al werkelijkheid zijn. Windmolens worden zowel in grote windparken op zee als kleinschalig toegepast, bijvoorbeeld op gebouwen of bij boerderijen. Zonnepanelen zijn een stuk goedkoper dan in 2007 en daardoor economisch rendabel, zodat bedrijven en particulieren op veel plekken decentraal duurzame elektriciteit produceren en er zelfs lokale overschotten optreden. Biomassacentrales leveren lokaal warmte, en in veel gevallen ook elektriciteit. En op enkele plaatsen wekt (stromend) water elektriciteit op, bijvoorbeeld door stroming bij sluizen of het potentiaalverschil tussen zoet en zout water bij de Afsluitdijk.

Ook melkveehouderijen en glastuinbouwbedrijven zijn deze weg ingeslagen. Elke melkveehouderij heeft in 2025 de daken van de stallen vol liggen met zonnecellen. Er staan vaak enkele windmolens, en bovendien gebruikt de veehouder de biomassa voor elektriciteitsproductie.

Ook bij glastuinbouwbedrijven zien we dergelijke ontwikkelingen. Door nieuwe ontwikkelingen is het mogelijk om bij deze bedrijven goedkope spectraal-selectieve zonnecellen toe te passen. Deze laten alleen dat licht door dat nodig is voor de plant, en zetten de rest om in zonnestroom. Nevenvoordeel is dat de gesloten kassen in de zomer minder snel oververhit raken. Vergisters maken daarnaast biogas uit de reststromen van de kas, maar ook uit de mest van nabijgelegen veehouderijen en het gft van de nabije steden en dorpen.

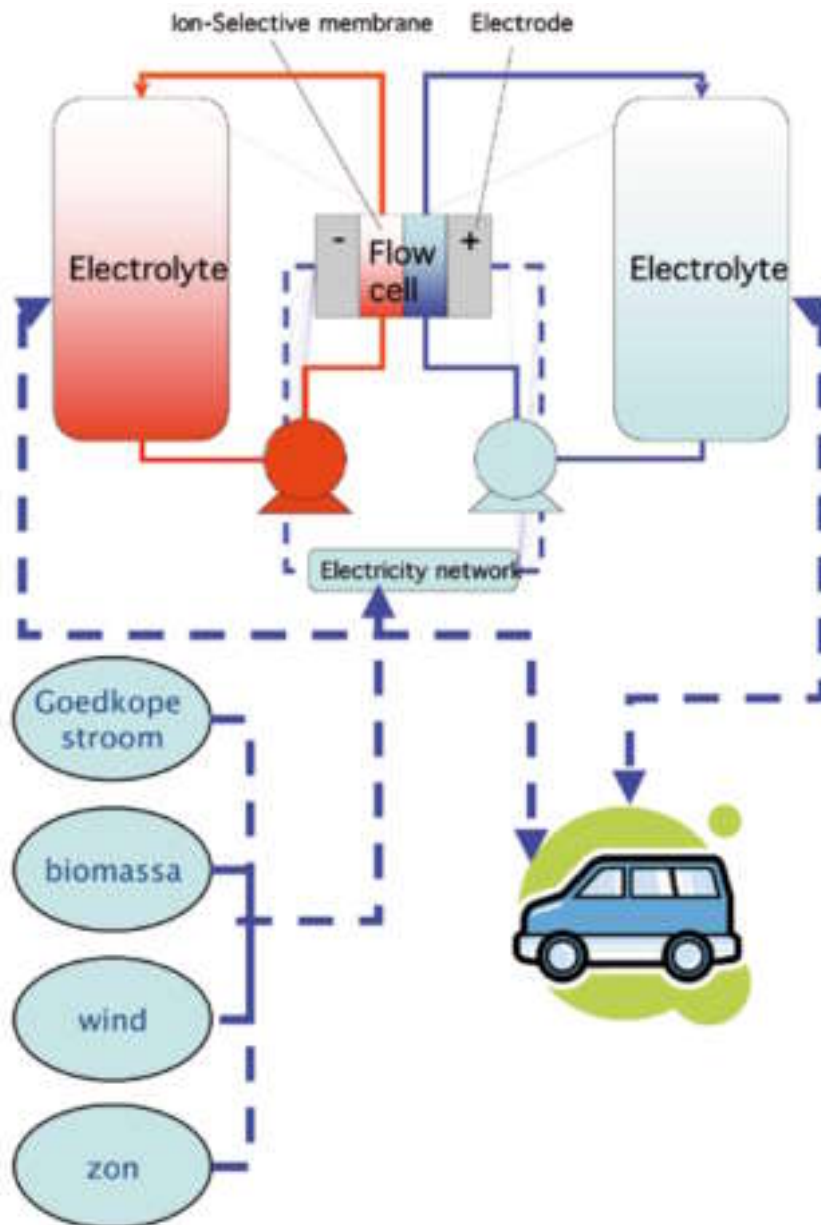
Deze maatregelen zorgen voor een aanzienlijke productie van duurzame elektriciteit in de agrarische sector, veel meer dan de bedrijven allemaal zelf kunnen gebruiken, omdat zo'n 70% van het land nog steeds een agrarische bestemming heeft. Het overschot aan elektriciteit slaat de boer op in speciale accu's (*redox flow*-systeem) en verkoopt hij als brandstof voor auto's en vrachtwagens.

2.2 Elektriciteitsopslag in een *redox flow*-accu

Een *redox flow*-accu is een nieuw soort accu, die bestaat uit twee tanks en een "omzetter". In de ene tank zit een elektrolyt, bijvoorbeeld V^{3+} en in de andere tank zit een tweede elektrolyt, bijvoorbeeld V^{4+} . Op het moment dat er een overschot aan duurzame energie op het bedrijf is, laadt de omzetter het elektrolyt op (waarbij V^{3+} wordt omgezet in V^{2+} en V^{4+} wordt omgezet in V^{5+}). Zodra het systeem volledig geladen is, bevatten de tanks dus V^{2+} en V^{5+} – dit wordt "geladen elektrolyt" genoemd. Elektrische voertuigen die met een kleine versie van een *redox flow*-accu zijn uitgerust, kunnen dit opgeladen elektrolyt tanken. In de auto zitten twee kleine tanks waarin de twee geladen elektrolyten worden gepompt. Dit geladen elektrolyt kan in de *redox flow*-accu worden ontladen, waarbij de elektriciteit beschikbaar komt voor de elektromotor. Hierdoor is de elektrolyt de brandstof voor het voertuig. Voordat de elektrolyt volledig ontladen is, moet de automobilist weer geladen elektrolyt tanken en de ontladen elektrolyt inleveren bij de boer, waarna de auto weer verder kan rijden.

2.2.1 Principe van een *redox flow*-batterij

In een *redox flow*-batterij wordt de batterij geladen en ontladen door een reversibele chemische (redox)reactie tussen twee vloeibare elektrolyten in de batterij. Het unieke aan een *redox flow*-batterij is dat de elektrolyten niet in de batterij zelf zijn opgeslagen, maar dat deze opslag in vloeistofvorm plaatsvindt in afgescheiden opslagtanks. Zodra de batterij stroom afgeeft, worden de elektrolyten door de elektrochemische cel van de batterij gepompt, waar de chemische redoxreactie plaatsvindt om de benodigde stroom op te wekken. Omdat de opslag van de elektrolyten buiten de reactor plaatsvindt, zijn de specificaties van de batterij heel flexibel – het vermogen en de capaciteit van het systeem kunnen onafhankelijk van elkaar worden bepaald, terwijl dit bij een conventionele batterij gekoppeld is. Het is voor een *redox flow*-accu eenvoudig om de hoeveelheid elektrolyt te vergroten d.m.v. grotere opslagtanks of bijvoorbeeld vervanging van de elektrolyten. Het ontwerp van de elektrochemische cel bepaalt het vermogen van de batterij, dit is dus onafhankelijk van de hoeveelheid elektrolyt die wordt gebruikt. Figuur 4 geeft de werking van een *redox flow*-accu schematisch weer.



Figuur 4: Schema van een redox flow-accu, inclusief opwekking en gebruik van elektriciteit.

De naam “*redox flow*-batterijen” is gebaseerd op de redoxreactie tussen de twee elektrolyten in het systeem. “Redox” is een afkorting voor “reductie-oxidatie”-reactie. Bij een dergelijke reactie verandert de ionisatiegraad van het atoom – bijvoorbeeld V^{2+} wordt V^{3+} , en omgekeerd. In een *redox flow*-cel zijn de twee elektrolyten gescheiden door een semi-permeabel membraan. Dit membraan laat wel ionen door, maar voorkomt volledige menging van de elektrolyten. Elektrisch contact wordt gemaakt door twee inerte conductors in de vloeistof. De ionen stromen dus door het membraan; de elektrische stroom gaat via de conductors.

Theoretisch zijn er veel combinaties te vinden die een redoxkoppel vormen. In de praktijk wordt dit echter beperkt, omdat veel combinaties onaantrekkelijk blijken, bijvoorbeeld door het optreden van nevenreacties. Tabel 2 geeft een overzicht van de aantrekkelijkste redoxkoppels die worden toegepast in *flow*-batterijen:

Koppel	Negatieve cel		Positieve cel		Totale cel
	Elektrolyt	Redoxpotentiaal [V]	Elektrolyt	Redoxpotentiaal [V]	Standaard Cel potential E_o [V]
Fe/Ti	$Ti^{3+} + e^- \rightarrow Ti^{2+}$	-0.9	$Fe^{3+} + e^- \rightarrow Fe^{2+}$	0.771	1.7
Fe/Cr	$Cr^{3+} + e^- \rightarrow Cr^{2+}$	-0.407	$Fe^{3+} + e^- \rightarrow Fe^{2+}$	0.771	1.2
V/V	$V^{3+} + e^- \rightarrow V^{2+}$	-0.255	$V^{5+} + e^- \rightarrow V^{4+}$	0.991	1.2
Br/S	$S + 2e^- \rightarrow 2S^{2-}$	-0.48	$Br_2 + 2e^- \rightarrow 2Br^-$	1.087	1.5
Zn/Br	$Zn^{2+} + 2e^- \rightarrow Zn$	-0.763	$Br_2 + 2e^- \rightarrow 2Br^-$	1.087	1.9
V/O	$V^{3+} + e^- \rightarrow V^{2+}$	-0.255	$O_2 + 4H^+ + e^- \rightarrow 2H_2O$	1.229	1.5
Ti/O	$Ti^{3+} + e^- \rightarrow Ti^{2+}$	-0.9	$O_2 + 4H^+ + e^- \rightarrow 2H_2O$	1.229	2.1
Cr/O	$Cr^{3+} + e^- \rightarrow Cr^{2+}$	-0.407	$O_2 + 4H^+ + e^- \rightarrow 2H_2O$	1.229	1.6

Tabel 2: Overzicht van mogelijke redoxkoppels voor een redox flow-batterij (versimpelde weergave) [21].

Zoals deze tabel laat zien, bepaalt de chemische reactie de spanning van de batterij.

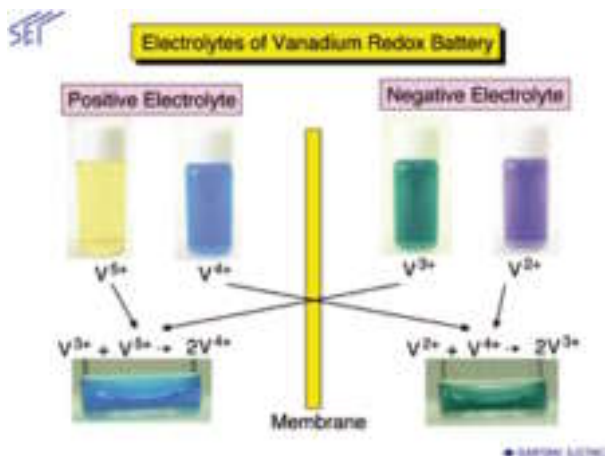
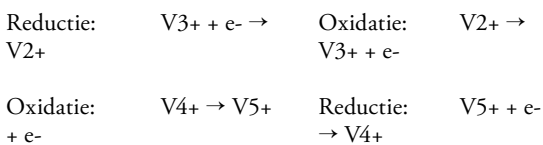
De meest veelbelovende redoxkoppels

In de afgelopen jaren bereikten drie typen *redox flow*-batterijen het stadium van demonstratie en commercialisatie, namelijk de vanadiumsystemen (V/V), polysulphide-natriumbatterijen (PSB) en Zink Broom-systemen (ZnBr). Ieder type heeft zijn eigen specificaties en wordt door fabrikanten ontwikkeld voor een specifieke toepassing. In de volgende paragrafen worden deze systemen nader toegelicht.

2.2.2 Vanadium (V/V)

Vanadium Redox Batterijen (VRB) gebruiken twee verschillende vanadiumelektrolyten (V^{2+}/V^{3+} and V^{4+}/V^{5+}). In onderstaande figuur is te zien welke reacties optreden tijdens het laden en ontladen (versimpelde weergave). Tijdens de laad/ontlaadcycli worden H^+ -ionen (protonen) door een proton-permeabel membraan tussen beide elektrolyten uitgewisseld om het ontstane ladingsverschil tussen de elektrolyten op te heffen.

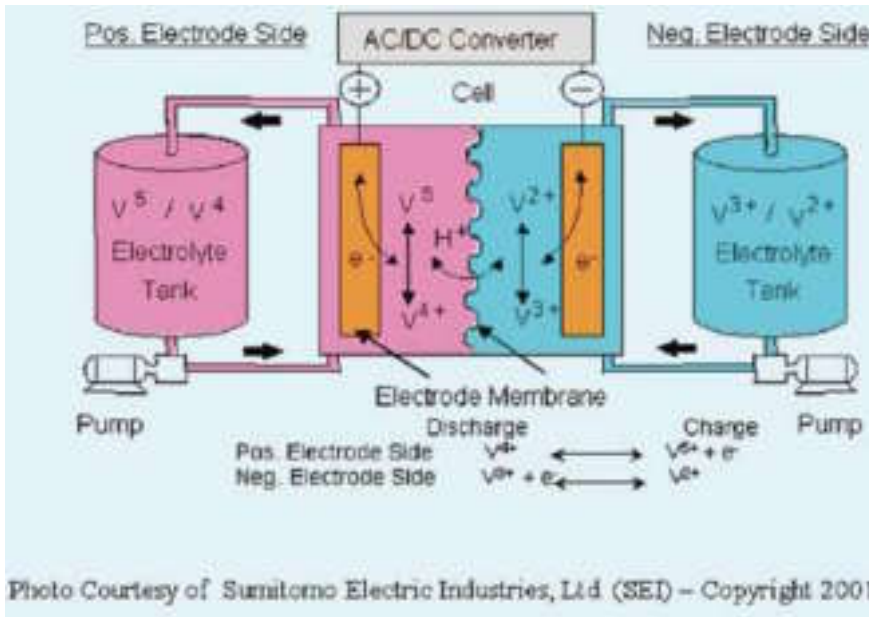
Laden (aan het stopcontact) **Ontladen (tijdens het rijden)**



Figuur 5: Overzicht van reacties die optreden in een V/V-systeem (versimpelde weergave).

Tijdens het tanken wordt dus V^{2+} en V^{5+} getankt, terwijl gelijktijdig V^{3+} en V^{4+} uit de auto wordt gehaald, zodat dit opnieuw kan worden geladen (en dus omgezet naar V^{2+} en V^{5+}).

Figuur 6 is een schematische weergave van het VRB-systeem.



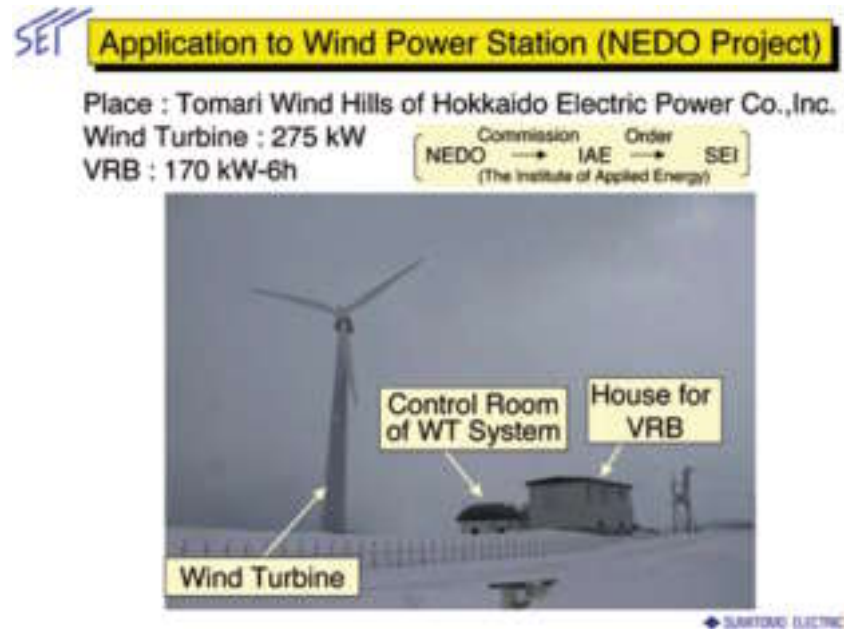
Figuur 6: Schema van Vanadium Redox Batterij [5].

Omdat in beide cellen vanadium wordt gebruikt, heeft dit systeem geen last van vervuiling door diffusie van ionen door het membraan. Dit is een groot voordeel van deze technologie. Vanadiumsystemen worden met name ontwikkeld voor grootschalige stationaire toepassingen, zoals plaatsing bij windparken. Sumitomo heeft in Japan inmiddels 16 redox flow-installaties draaiende (zie figuren 7 en 8 voor enkele impressies).



Figuur 7: Foto's van VRB-apparatuur [14].

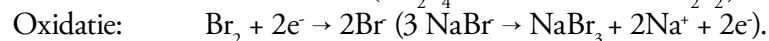
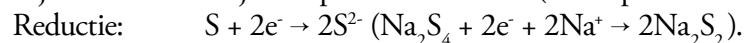
Figuur 8: Voorbeeld van een toepassing bij een windturbine [14].



2.2.3 Polysulphide Bromide Batterijen (PSB of Br/S)

In dit type batterij worden twee zoutoplossingen gebruikt als elektrolyt, namelijk een oplossing van natrium-bromide (NaBr) en een oplossing van natrium (Na)-polysulphide (S_n^{2-}). De Na-ionen gaan door het membraan tijdens het laden en ontladen van de batterij, terwijl de Br- en S-componenten de elektronen accepteren en afstaan. Daarom wordt dit systeem vaak afgekort als Br/S.

Tijdens het laden zijn de optredende reacties (versimpelde weergave):



Tijdens het ontladen vinden de omgekeerde reacties plaats.

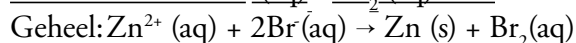
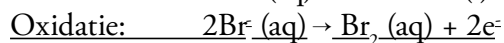
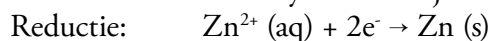
Dit systeem is ontwikkeld door Regenesys Technologies Ltd (en daarna door RWE Innogy) onder de naam "RegenesysTM", met als doel een netgekoppeld opslagsysteem te ontwikkelen voor toepassingen groter dan 5 MW_c voor toepassing bij grote windmolenparken. De bouw van een eerste demonstratie-installatie (12 MW_c/120 MWh) is nooit afgerond. Er is nog geprobeerd een tweede demonstratieproject te starten, maar ook dat project is een stille dood gestorven vanwege interne bedrijfskeuzes binnen RWE. Er zijn daarna geen nieuwe projecten meer aangekondigd.

2.2.4 Zink Broom (ZnBr)

In de zink-broom-systemen zijn de actieve componenten opgelost in de elektrolyten, namelijk oplossingen van zink en een oplossing van een complexe broom-verbinding. Feitelijk kunnen aan beide zijden dezelfde elektrolyten worden gebruikt, maar met andere broom-con-

concentraties. Als elektrodes worden een negatieve zink-elektrode en een positieve broom-elektrode gebruikt. Deze zijn gescheiden door een microporeus membraan.

Tijdens het laden wordt het zink vanuit het elektrolyt gegalvaniseerd op de anode en lost broom op aan de kathode. De elektrodes doen dus actief mee aan de reactie! Deze elektrodes moeten na gebruik gerege-nerend worden in een aparte opstelling. Dit is anders dan bij de andere twee beschreven systemen. Tijdens het laden zijn de reacties:



Bij het ontladen treden de omgekeerde reacties op.

In de praktijk blijkt het moeilijk om de elektrodes goed te laten functioneren, waardoor de capaciteit langzaam afneemt en de batterij niet meer volledig wordt geladen en ontladen. Dit is een belangrijk nadeel van dit systeem, wat resulteert in een relatief laag aantal laad- en ontladcycli.

Deze batterijen worden met name ontwikkeld voor relatief kleinschalige toepassingen.

2.2.5 Kenmerken van een redox flow-systeem

Belangrijkste kenmerken van *redox flow*-systemen zijn:

Hoog vermogen. Het celvermogen is afhankelijk van de chemische reactie, het vermogen van de totale batterij is afhankelijk van het ontwerp en de grootte (bijvoorbeeld totaal specifiek oppervlak van de elektrodes en/of de membranen) van de chemische cel.

- Hoge capaciteit. Dit wordt bepaald door het type en de hoeveelheid elektrolyt (volume van het voorraadvat).
- Flexibiliteit. De twee parameters vermogen en capaciteit zijn onafhankelijk van elkaar.
- De elektrolyten zijn eenvoudig te vervangen.
- De meeste redoxreacties zijn heel snel (snelle reactiekinetiek), waardoor het systeem een korte reactietijd heeft. Hierdoor heeft een *flow*-batterij een korte responsetijd en kan worden geschakeld van ontladmodes naar laadmodes in ongeveer 1/1000 s.
- De volledige *cycle efficiency* is relatief laag (75%-80%) vergeleken met conventionele batterijen. Dit komt door de pompenergie die nodig is om het elektrolyt rond te pompen en door verliezen veroorzaakt door chemische reacties (nevenreacties), bijvoorbeeld de vorming van waterstof.
- Het systeem heeft geen last van zelfontlading. Dit is vooral van belang in situaties waarin de energie gedurende langere periode moet worden opgeslagen, zoals het concept waarbij het elektrolyt wordt gebruikt als transportbrandstof.

2.2.6 Vergelijking van drie typen batterijen

De drie bovengenoemde systemen hebben elk specifieke kenmerken. In theorie kunnen alle systemen worden ontwikkeld voor iedere maat, maar in de praktijk focussen ontwikkelaars en fabrikanten zich op een specifieke range voor wat betreft vermogen en capaciteit. PSB richtte zich op grootschalige systemen (>1 MW), terwijl ZnBr vooral wordt toegepast voor systemen < 1 MW. V/V zit daartussenin. Gevolg hiervan is dat de PSB-systemen *turnkey* werden gebouwd, terwijl de kleinere systemen modulair worden opgebouwd (zie tabel 3 voor een vergelijking van de drie systemen).

	ZnBr	Vanadium	PSB
Typical power range (MW)	< 1	< 3	< 15
Typical size range (MWh)	0,01-5	0,5-5	0-120
Energy density (Wh/liter) [3]	60-90	16-33	20-30
Cycle efficiency [Wh ^{out} /Wh ⁱⁿ] (%)	65-75	70-85	60-75
Cycle life (cycles)	>2,000	>12,000	n/a
Life time (years)	5-10	5-10	15
Stage of development	Demonstration/ commercial units	Demonstration/ commercial units	Demonstration
Companies involved	ZBB, Premium Power	VRB, SEI, Pinnacle, Cellenium	TVA, VRB (using Regenesys technology)

Tabel 3: Vergelijking van de drie systemen, gebaseerd op de huidige technologische ontwikkelingen en gerangschikt op vermogen (van klein naar groot) [21].

3.

Wat levert het op?

3.1

Voordelen voor het agrarische bedrijf

3.1.1

Betere bedrijfsvoering, nieuwe afzetmarkt

De opslag van duurzame elektriciteit levert het agrarisch bedrijf unieke kansen voor de verkoop van duurzame elektriciteit op het moment dat de elektriciteitsprijs hoog is. Dit kan zijn op momenten dat de elektriciteitsvraag hoog is, maar ook op momenten dat de energiebedrijven hun verplichtingen voor elektriciteitslevering niet kunnen nakomen. Contracten met energiebedrijven voor stationaire toepassingen zijn dan ook zeer aantrekkelijk.

Op langere termijn is niet alleen de verkoop van elektriciteit via het elektriciteitsnet een afzetmarkt, maar kan de boer ook elektrolyt verkopen als brandstof voor elektrische voertuigen. Dit levert een nieuwe afzetmarkt op, waarbij de boer duurzame brandstoffen voor auto's kan verkopen aan consumenten.

3.1.2

Inpassing in het net

Door het elektriciteitsopslagsysteem is de inpassing van de duurzame energiebronnen bij de boer in het elektriciteitsnet eenvoudig te realiseren. Deze aansluiting hoeft niet te worden uitgelegd op de piekvraag van het bedrijf of de pieklevering van de duurzame energiebron: door de opslag van elektriciteit kan het opslagsysteem eventuele pieken opvangen. Dit voorkomt hoge investeringskosten.

3.1.3

Positief imago

Omdat de agrarische sector meewerkt aan een duurzame samenleving, zal dit een zeer positieve bijdrage leveren aan het imago van de duurzame agrarische sector. Wie wil er nou niet duurzame brandstoffen tanken bij de boer?

3.2

Voordelen voor de maatschappij

3.2.1

Elektromotor: forse verbetering van lokale luchtkwaliteit én geluidsreductie

Het rijden in elektrische auto's heeft een aantal grote voordelen voor de maatschappij. Een elektrische auto heeft geen verbrandingsmotor meer. Het fijn stof en NO_x dat ontstaat bij de verbranding van de nu gangbare brandstoffen, komt niet meer vrij bij een auto met elektromotor. Kortom: de uitstoot **van fijn stof en NO_x door auto's zal drastisch verminderen** wanneer iedereen met een elektromotor rijdt. Hierdoor verbetert de luchtkwaliteit, wat de leefomstandigheden in steden en rondom drukke verkeersaders sterk ten goede komt. Bovendien stoot een elektrische auto per saldo geen CO_2 uit als die stroom duurzaam is opgewekt (zie volgende paragraaf).

Tevens is een elektromotor in staat om remenergie om te zetten in elektriciteit. Deze elektriciteit wordt vervolgens opgeslagen in het opslagsysteem en daarna omgezet in beweging van de auto. De gevolgen hiervan op het verbruiksrendement zijn sterk afhankelijk van het gebruikspatroon van de auto (veel remenergie in stadsverkeer en weinig remenergie op de snelweg). Een elektromotor is bovendien heel stil, waardoor een groot deel van de **geluidsoverlast**, veroorzaakt door auto's, verdwijnt. Geluidsoverlast veroorzaakt door de wrijving van de banden over de straat zal blijven bestaan. Als iedereen in een elektrische auto rijdt, zijn er minder en/of minder hoge geluidsschermen en

geluidswallen nodig. Hierdoor wordt het landschap veel aantrekkelijker en zijn de snelwegpanorama's van het ministerie van VROM voordeliger en eenvoudiger te realiseren. Tevens zullen de maatschappelijke kosten voor de reductie van verkeerslawaaï drastisch verminderen.

3.2.2

Nieuw mobiliteitsconcept: flinke bijdrage aan oplossing van de klimaatproblematiek

Bij de verbranding van benzine, diesel en lpg komt direct CO₂ vrij. Ook voor de productie van elektriciteit is energie nodig, die meestal wordt opgewekt in een conventionele energiecentrale met een rendement van circa 50-60%. Bij de opwekking van deze energie wordt ook CO₂ geproduceerd. Deze wordt momenteel uitgestoten in de atmosfeer. In de toekomst zal de CO₂ bij opwekking in een energiecentrale worden afgevangen en worden opgeslagen (bijvoorbeeld ondergronds). Er wordt tegenwoordig veel gediscussieerd over de vraag of het opslaan van CO₂ nuttig, efficiënt en haalbaar is.

De huidige hybride en elektrische auto's worden respectievelijk via de benzinemotor of het elektriciteitsnet (*plug in* of *plug in hybrids*) opgeladen.

Aangezien de meeste elektriciteit nog in een conventionele centrale wordt opgewekt, betekent dat dat ook voor de productie van deze energie, CO₂ wordt uitgestoten. Het voertuig zelf stoot lokaal geen CO₂ meer uit, doordat er geen directe verbranding van een brandstof meer plaatsvindt.

In het geschetste nieuwe mobiliteitsconcept van rijden op elektrolyt dat is opgeladen door windmolens of zonne-energie bij de boer, is er helemaal **geen uitstoot van CO₂**. Zowel bij de productie van elektriciteit als bij het omzetten van elektriciteit in beweging (autorijden) komt er geen CO₂ meer vrij.

Aangezien CO₂ een belangrijke veroorzaker van het broeikas-effect is, en mobiliteit een belangrijke bijdrage levert aan die CO₂, levert de Fotonenboer door het rijden op elektrolyt mogelijk te maken, snel een belangrijke bijdrage aan de oplossing van de klimaatproblematiek.

3.2.3

Duurzaam vervoersconcept voor boer en burger: "Power To The People"

Duurzame energie kan door de grote energieconcerns worden opgewekt, bijvoorbeeld in grote windmolenparken langs de kust. Maar iedere burger kan ook zijn eigen duurzame elektriciteit opwekken met bijvoorbeeld zonnepanelen. Een modelveehouderij (circa 500 koeien, 250 ha), zoals beschreven in de "EnergyDiary 2025" [1], kan alleen al 71,5 TJ aan duurzame energie opwekken in 2025. Aangezien de melkveehouderij een deel van deze energie voor het eigen bedrijf gebruikt, blijft hiervan 49,6 TJ beschikbaar per modelbedrijf voor gebruikers buiten de sector [1]. Deze energie kan worden opgeslagen in een *redox flow*-systeem, waarna het elektrolyt kan worden getankt voor auto's. Deze hoeveelheid energie komt overeen met 13,8 GWh, wat – per

modelveehouderij! – weer gelijkstaat aan 138 miljoen km autorijden in een elektrische auto. Een dergelijk modelbedrijf kan zelfs meer opwekken dan waar voor de berekening van uit is gegaan (namelijk 50 MWh per boer per week). Uitgaande van het huidige gemiddelde jaar-kilometrage per automobilist per jaar kan een dergelijke modelveehouderij in 2025 een kleine 1000 automobilisten “bedienen”.

Een dergelijke decentrale opzet voor duurzame energievoorziening bij zowel boeren als burgers zorgt ervoor dat de maatschappij als geheel veel minder afhankelijk wordt van fossiele brandstoffen. Bovendien leidt zo'n opzet tot een situatie van “energie in overvloed” door de benutting van de grote hoeveelheid zonne-energie.

3.2.4 Meer decentrale duurzame energie

Nederland heeft hoge ambities voor de opwekking van duurzame energie. Er komt echter een moment dat we zoveel duurzame elektriciteit opwekken dat het niet meer mogelijk is om deze elektriciteit aan het elektriciteitsnet te leveren. Duurzame elektriciteit heeft bijvoorbeeld het nadeel dat het nogal sterke fluctuaties vertoont. Dit is niet erg als er een beperkte hoeveelheid op het net wordt geleverd. Maar als we te veel duurzame elektriciteit op het net brengen, kan dat wel grote gevolgen hebben. Een opslagsysteem kan helpen deze fluctuaties op te vangen. Hiermee kan er dus meer duurzame energie aan het net worden geleverd, waardoor het agrarisch bedrijf een directe bijdrage levert aan de verdere implementatie van duurzame energie in Nederland.

3.3 Financieel

Naast bedrijfsmatige en maatschappelijke voordelen, biedt het rijden op elektrolyt voor de consument ook financiële voordelen.

3.3.1 Economie van *redox flow*-systemen

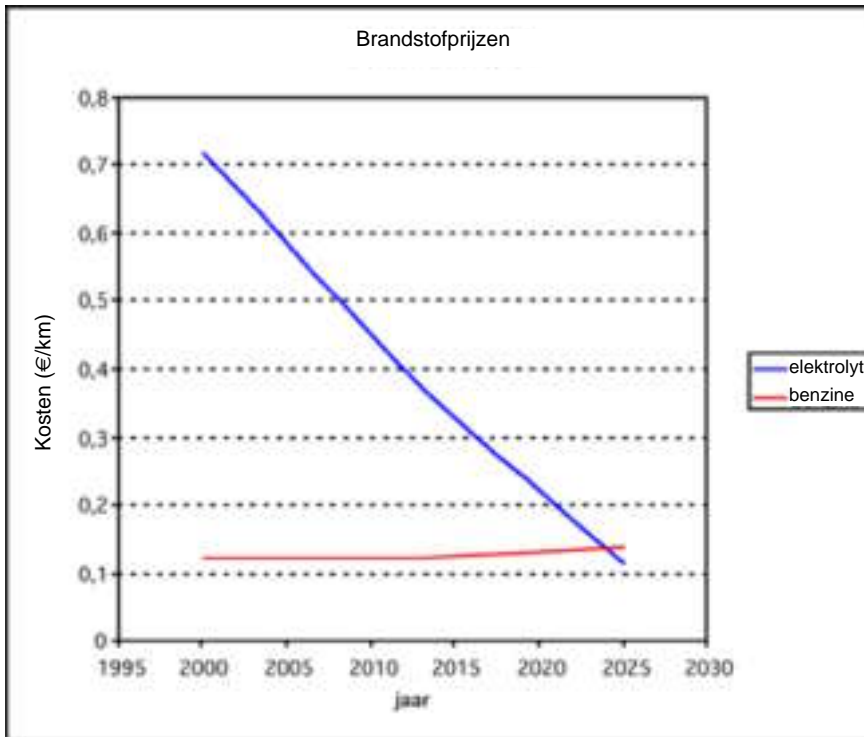
De kosten van het rijden op elektrolyt zijn teruggerekend naar de kosten van de brandstof per kilometer, waardoor het direct te vergelijken is met het rijden op benzine of diesel. In een eerste globale kostenschattning zijn de volgende kostenposten voor de brandstof meegenomen:

- De kosten van de duurzaam opgewekte elektriciteit,
- De kosten van het grote *redox flow*-opslagsysteem bij de boer,
- De kosten van de kleine *redox flow*-accu in de auto,
- De kosten van het elektrolyt,
- De kosten van het tankstation.

De brandstofkosten zijn teruggerekend naar de prijs per kilometer (€/km), inclusief btw en vergeleken met de prijs van benzine. De weergegeven kosten voor elektrolyt zijn exclusief accijns, omdat op dit moment nog geen accijns hoeft te worden betaald over elektriciteit.

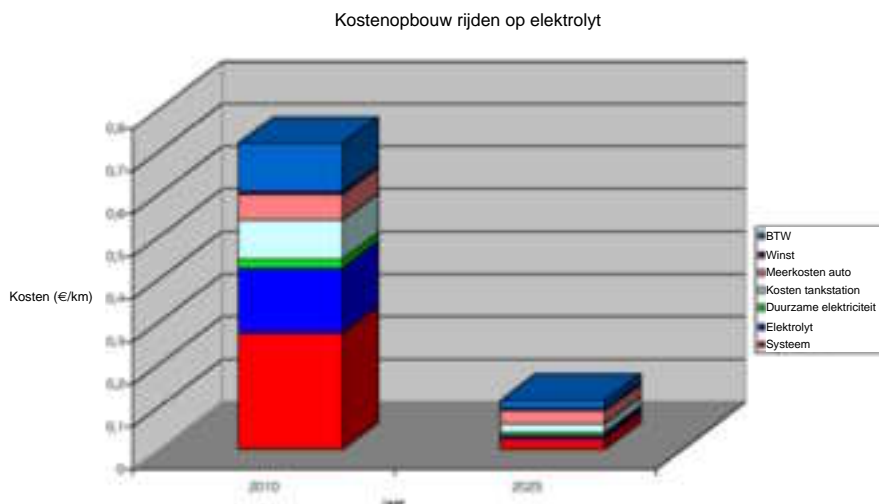
Gedetailleerde kostenopgaven voor *redox flow*-systemen zijn niet of nauwelijks bekend. Deze zijn sterk afhankelijk van de gekozen dimensies. Het is daarom niet eenvoudig de prijs van een installatie op te splitsen in kosten voor de omzetter en kosten voor het elektrolyt, terwijl dit van groot belang is voor de haalbaarheid van *redox flow*-systemen. Toch is een poging gedaan dit te doen, omdat dit van belang is voor het bepalen van de kosten voor het concept van de “Fotonenboer” (zie bijlage 1 voor de totale beschrijving van de economie).

Figuur 9 geeft de resultaten van de kostenschatting schematisch weer. Uit deze figuur blijkt dat de prijs per km van elektrolyttransport naar verwachting snel daalt tot het niveau van een benzinevoertuig, of zelfs daaronder.



Figuur 9: Verwachte brandstofprijzen van elektrolyt en benzine tot 2025.

Figuur 10 toont de opbouw van de berekende elektrolytprijs. Hierbij is de opbouw van de prijs in 2010 een theoretische situatie, omdat er dan nog geen elektrolyt getankt kan worden. Maar het overzicht geeft wel duidelijk aan hoe de prijs zou liggen op basis van de huidige kosten. Tevens is duidelijk te zien hoe de prijs sterk zal dalen, enerzijds doordat *redox flow*-systemen goedkoper worden en anderzijds omdat elektrische auto's zuiniger worden.



Figuur 10: Opbouw van de prijs van elektrolyt in €/km.

3.4

Alle voordelen op een rijtje

Onderstaande tabel toont de belangrijkste voordelen voor de boer, de consument en de maatschappij.

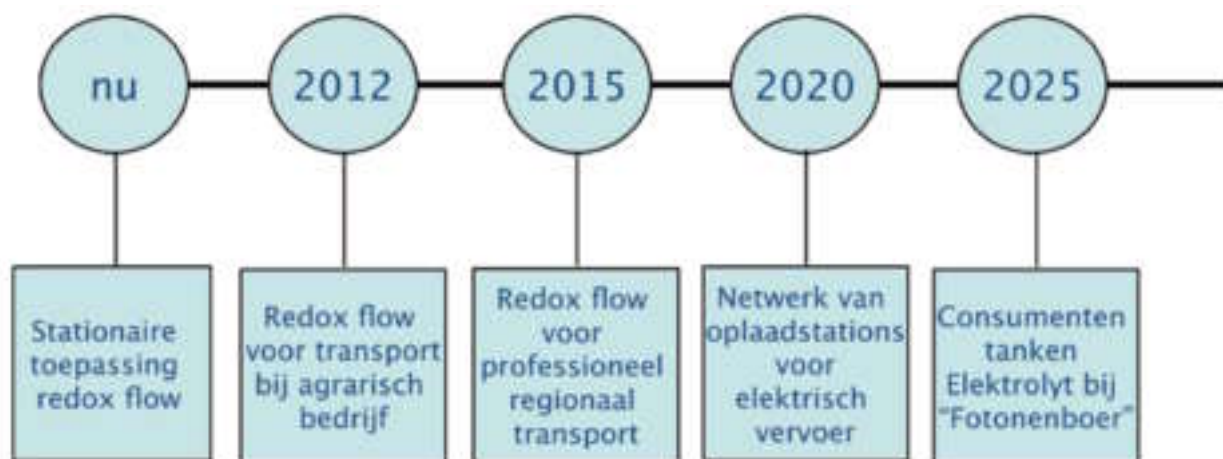
Boer	Consument	Maatschappij
Creëert afzetmarkt voor overschot duurzame energie	Kan milieuvriendelijk autorijden	Optimaal gebruik van duurzame energie
Verdiert met verkoop elektrolyt als brandstof voor elektrische voertuigen	Kosten voor elektrolyt zijn lager dan benzine	Geen CO ₂ -, fijn stof- of NOx-uitstoot door elektrische voertuigen
Bespaart op eigen energiekosten doordat hij zijn eigen vraag en aanbod van duurzame energie op elkaar afstemt	Rijdt in een stille auto met een veel betere luchtkwaliteit in de auto	Drastische vermindering van geluidsoverlast van verkeer
Heeft geen hoge kosten voor inpassing van het bedrijf aan het elektriciteitsnet	Kan groene stroom gebruiken doordat boer overschot duurzame energie aan het elektriciteitsnet levert	Stabiel elektriciteitsnet door stationaire toepassing redox flow-opslagsysteem

Tabel 4: Voordelen van het Fotonenboerconcept.

4.

Stap voor stap: wat moet er nog gebeuren?

Om daadwerkelijk in 2025 elektrolyt te kunnen gebruiken voor voertuigen, moeten er enkele stappen worden genomen. Schematisch stellen we in de komende 20 jaar het volgende marktintroductiepad voor:



In de volgende paragrafen gaan we nader in op elke tussenstap.

Figuur 11: Ontwikkelingspad tot de "Fotonenboer".

4.1

2010: Toepassing van *redox flow*-systemen op dit moment

Eerst zullen *redox flow*-accu's in stationaire systemen hun werking moeten bewijzen. Dit gebeurt momenteel o.a. door VRB in een 1 MWh V/V-installatie in King Island (Australië) en een 2 MWh-installatie in

Castle Vally in Utah (US). VRB heeft recent een contract getekend voor de levering van een 1.5 MW/2 MWh-systeem voor een windpark in Ierland. Door de specifieke eisen die aan de accu worden gesteld, zijn conventionele batterijen niet geschikt voor deze toepassing. Dit is de eerste commerciële toepassing van deze technologie voor windparken en is een belangrijke stap in het ontwikkelingspad.

Als de *redox flow*-systemen zichzelf hebben bewezen in dergelijke stationaire toepassingen, zal de stap worden gemaakt om het tevens toe te passen in elektrische voertuigen. Daarvoor is niet alleen de *redox flow*-accu nodig, maar ook een goed elektrisch voertuig dat voldoende opslagruimte voor elektrolyt biedt. Elektrische voertuigen worden nu nog op kleine schaal toegepast. In Rotterdam rijden 6 elektrische parkshuttles tussen metrostation Kralingse Zoom en Rivium bedrijvenpark. In Eindhoven rijden hybride bussen. De hybride voertuigen van Toyota, Nissan, Honda, Lexus en General Motors worden snel populairder (zie www.hybridcars.com en paragraaf 4.6).

VRB Power Systems heeft elektrische golfkarretjes uitgerust met een vanadium/vanadium-*redox flow*-accu. Deze accu kan net als een “conventionele” accu worden geladen via een stekker en het elektriciteitsnet. Het is echter de bedoeling dat op termijn de automobilist zijn accu kan laden door deze te vullen met geladen elektrolyt. Ontladen elektrolyt kan dan opnieuw worden geladen. Dit wordt echter nog nergens gedaan en moet nog worden ontwikkeld. Een belangrijke stap die hiervoor moet worden gezet, is de ontwikkeling van een tanksysteem, waarbij ontladen elektrolyt uit de auto wordt gehaald en er tegelijkertijd geladen elektrolyt in de auto wordt gepompt.

4.2 2012: Agrariër en eigen bedrijf: twee voorbeeldprojecten

Zodra de *redox flow*-systemen zichzelf stationair hebben bewezen, zijn de eerste demonstratieprojecten van mobiele toepassingen noodzakelijk. Als eerste stap tot succes kan de boer een *redox flow*-accu gebruiken om zijn eigen vraag aan elektriciteit af te stemmen met het aanbod van duurzame elektriciteit op zijn bedrijf. De energie uit wind, zon en biomassa wordt opgeslagen in de *redox flow*-accu, en zodra de agrariër elektriciteit nodig heeft – om bijvoorbeeld het klimaat of de belichting in zijn kas te regelen of om een stal te verwarmen of koeien te melken en de melk te koelen – haalt hij deze uit het *redox flow*-systeem.

Als de ontwikkeling van het tanksysteem is voltooid, kan een agrariër zijn interne vervoersmiddelen (bijvoorbeeld een trekker of een vorkheftruck) vervangen door een elektrisch voertuig op elektrolyt en zijn duurzame energie ook al gebruiken voor intern vervoer. De eisen aan de actieradius van deze voertuigen zijn lager dan voor personenvervoer. Daarmee is deze toepassing eerder haalbaar.

De agrariër is dan in staat te voorzien in zijn eigen elektriciteitsbehoefte en is niet meer afhankelijk van een energieleverancier.

Een mooi demonstratieproject om de voor- en nadelen te bepalen, is het gebruik van een *redox flow*-accu waarmee een tuinder, met duurzame elektriciteitsopwekking en -opslag, kan voorzien in zijn eigen elektriciteit voor zijn belichte teelt of een systeem waarmee een melkveehouder zijn stal en melkmachine kan voorzien van elektriciteit.

Voorbeeldproject 1: Demonstratie *redox flow* bij tomatenteler met gesloten kas

In het geval van een tomatenteler met een semi-gesloten kas (2 ha) met led-assimilatiebelichting (met een rendement van 50% voor de lamp en 44,4% voor het complete belichtingssysteem, zoals de verwachting is voor led-verlichting in 2020) is de vermogensbehoefte ~3365 MWh/jaar [2]. Dit komt neer op een *redox flow*-accu van ~10 MWh per dag om in eigen gebruik te voorzien. Als de tuinder niet over een duurzame opwekker beschikt, kan het systeem qua economische performance ook worden toegepast op basis van het goedkoop inkopen van elektriciteit gedurende de nacht en het inzetten van de opgeslagen elektriciteit wanneer de elektriciteitsprijs hoog is.

Voorbeeldproject 2: Demonstratie *redox flow* bij melkveehouder met 250 koeien

In het geval van een gemiddelde melkveehouder met 250 koeien verbruikt deze 1152 GJ elektriciteit per jaar [1]. Dit komt neer op 320 MWh per jaar en ~900 Wh per dag. Om zelfvoorzienend te zijn en vraag en aanbod van duurzame elektriciteit op elkaar af te stemmen, kan de boer hiervoor een *redox flow*-accu inzetten in combinatie met zonnepanelen op het dak of een biogasinstallatie.

***Fall back*-opties om toch een compleet systeem te beproeven**

Mochten de prijzen voor *redox flow*-systemen nog niet dusdanig gedaald zijn dat een demonstratieproject op basis hiervan mogelijk is, kan – om het voordeel van vraag en aanbod op elkaar af te stemmen – worden getest met andere kleinschalige opslagsystemen als lood-zwavel- of Li-ion-batterijen.

Als het tanksysteem nog niet voldoende is ontwikkeld, kunnen voertuigen worden omgebouwd naar een elektrolytisch systeem, waarbij het opladen via een stekker in het stopcontact plaatsvindt, zoals nu het geval is met de golfkarretjes van VRB. Zo is een stapsgewijze introductie mogelijk van *redox flow* en/of elektriciteitsopslag gekoppeld aan duurzame elektriciteitsopwekking.

Voor een eerste demonstratieproject is het dus als *fall back*-optie mogelijk om een batterijsysteem in te zetten dat commercieel op de markt verkrijgbaar is.

4.3 2015: Professioneel regionaal transport

Onder “professioneel regionaal transport” wordt onder andere bedoeld de agrarische en gemeentelijke *fleets* aan voertuigen.

Nadat bewezen is dat een *redox flow*-accu werkt voor gebruik op het eigen bedrijf, is de volgende stap het professioneel regionaal transport (*fleets*) in een specifieke sector. Hierbij valt te denken aan afvalophaaldiensten, veilingtransport, melkauto's en het transport van krachtvoer. Deze voorbeelden hebben gemeen dat de vervoersmiddelen allemaal op een vast punt bijeenkomen, waar dan een tanksysteem kan worden geplaatst. De actieradius van deze voertuigen is aanzienlijk groter dan die voor intern transport. Door te kiezen voor een sector die dicht bij de agrariër ligt, is het eenvoudiger om samenwerking te bewerkstelligen en de kosten/opbrengsten met elkaar te delen. Tevens geeft dit een positieve impuls aan het imago van de sector.

In overleg met de gemeente of vervoerders kan ook het lokale openbaar vervoer als volgende stap worden verduurzaamd door elektrificatie. Een mogelijk eerste voorbeeldproject hiervan zou bijvoorbeeld in Arnhem plaats kunnen vinden, waar al ervaring is met elektrische (trolley)bussen. Voordeel daar is dat de laadpunten al overal in de stad voorhanden zijn, desnoods gedurende de rit.

4.4 2020: Landelijk dekkend netwerk van oplaadpunten

Om de voordelen van elektrisch transport optimaal te benutten, is een landelijk netwerk van elektrolyttankstations nodig. Dit is een vereiste voordat consumenten een auto met elektrolyt als brandstof gaan gebruiken.

De Amsterdamse wethouders Marijke Vos van Milieu en Tjeerd Herrema van Vervoer openden het allereerste tankstation voor het elektrische vervoer van Nederland. Het tankstation beschikt nog niet over vloeibaar elektrolyt. Opladen gebeurt traditioneel met behulp van stekkers.



4.5 2025: Consument en vervoer

Zodra het sectoraal vervoer succesvol is, is de laatste stap om het tanken bij de boer landelijk uit te rollen. Aangezien het meeste verkeer via de snelweg gaat, is het noodzakelijk om elektrolyttankstations rondom de snelwegen te lokaliseren en in de buurt van wijken. Hier kan nu al rekening

mee worden gehouden in bestemmingsplannen. Voor snelwegen geldt dan dat er soms extra of andere afritten nodig zijn. In de loop van de tijd kunnen echter ook andere concessiesituaties ontstaan, met boeren langs de snelwegen in plaats van de huidige oliemaatschappijen of boeren die elektrolyt leveren aan de huidige oliemaatschappijen.

Omdat agrariërs niet altijd in de buurt van wijken, of in binnensteden aanwezig zijn, lijkt het in eerste instantie moeilijk om hier elektrolyttankstations te bouwen. Dit is echter niet het geval. In 2025 zullen er in woonwijken steeds meer decentrale opwekkers aanwezig zijn, zoals brandstofcellen of micro-WKK-installaties in huishoudens. Iedere wijk heeft een eigen windmolen en veel daken zullen zijn voorzien van zonnepanelen (de verwachte prijsdoorbraken moeten rond 2025 wel zijn bereikt). Ook hier geldt dat elektriciteitsvraag en elektriciteitsaanbod op elkaar moeten worden afgestemd. De verwachting is dat ook hiervoor *redox flow*-systemen een bijdrage kunnen leveren aan de energiebalans. Door hier een tankinstallatie aan vast te koppelen, ontstaat een landelijk dekkend elektrolyt-tanksysteem. Hierdoor kunnen consumenten hetzelfde tankgedrag behouden als ze nu ook hebben.

Mocht het tanken van elektrolyt in 2025 nog steeds niet mogelijk zijn, dan kan om de snelheid van tanken te garanderen, met een “cartridge”-systeem worden gewerkt. Een cartridge met daarin leeg elektrolyt wordt vervangen door een cartridge met vol elektrolyt bij de boer. Hierdoor is de snelheid van tanken van geladen elektrolyt niet meer gekoppeld aan de tijd die dat kost met het opladen via een stekker.



4.6 Het tij is nog nooit zo gunstig geweest

De transitie van brandstofmotoren naar elektrisch transport in 2025 heeft naast technische aspecten ook tal van organisatorische aspecten. Welke partijen zullen zich achter het idee scharen, wie zullen het idee juist torpederen? Niet voor niets is er een documentaire gemaakt met de titel “Who Killed The Electric Car?” Er zijn vele belangen en machtsfactoren in het spel die de ontwikkeling kunnen afremmen of juist versnellen. Echter, de opeenstapeling van factoren die elektrische mobili-

Op de Schoner Vervoer-tour in Amsterdam toonde een wijde range aan bijzondere voertuigen dat er steeds meer elektrische voertuigen op de markt komen.

teitsconcepten tot de meest logische vorm van vervoer bevorderen, is nog nooit zo groot geweest als anno 2007. We noemen hiervan:

- De hoge olieprijs en de sterk gevoelde afhankelijkheid daarbij van instabiele regio's in de wereld,
- De problematiek van slechte luchtkwaliteit, geluidshinder en daarmee samenhangende gezondheidsproblemen in stedelijke agglomeraties en langs drukke verkeersaders,
- Het breed gedragen bewustzijn van de urgentie van de klimaatproblematiek,
- De beschikbaarheid van technologie, onder andere op het gebied van elektriciteitsopslag (naast betere en lichtere (lithiumpolymeer) accu's ook condensatoren (*capacitors*) en de sensor- en regeltechniek plus software die optimalisaties mogelijk maakt,
- De actieve rol die de automobiellindustrie nu speelt in de ontwikkeling van elektrische vervoersconcepten.

In tegenstelling tot eerdere pogingen wordt nu vooral vanuit de automobiellindustrie en in de volle breedte daarvan ingezet op het ontwikkelen van (vooralsnog meestal hybride) elektrische vervoerssystemen (zie o.a. de recente Autosalon Frankfurt, van 15 t/m 23 september 2007, met als thema "Klimasalon"). De acceptatie van elektrische auto's is nog nooit zo groot geweest als anno 2007 (zie ook www.hybridcars.com). Zomaar een paar voorbeelden:

- Opel gaat binnenkort in serieproductie met de Flextreme, die naar keuze zowel 100% elektrisch (actieradius 50 km, laadtijd 3 uur) als separaat op diesel (actieradius 750 km, 40 gram CO₂ per km) kan rijden,
- Toyota zegt dat de opvolger van de huidige hybride Prius, de Prius *plug in* met een actieradius van minstens 60 km op 100% elektriciteit anno 2012 mainstream zal zijn, dus gewoon voor de massa beschikbaar,
- General Motors Precept (parallel hybride) en EV-1 (o.a. in verband met wetgeving in Californië (VS)),
- Citroen C-Cactus, een dieselhoopbride-variant van de C4 en de eerste hybride in het betaalbare segment.

En als klap op de vuurpijl: de recente TESLA Roadster, met een actieradius van bijna vierhonderd kilometer. Dat is een flinke prestatie voor een elektrische auto die in zo'n vier seconden van 0 naar 100 km/u sprint (zie kader).

Prototype van de elektrische Tesla Roadster



De Tesla Roadster is voorzien van 6.800 lithium-ion-batterijen – zoals we die onder meer kennen uit mobiele telefoons. Op normale accu's komt een elektrische auto maar 65 tot 100 kilometer ver. Dan zijn er nog de nikkel-cadmium-batterijen waarmee een elektrische auto tot zo'n 160 km ver komt. De EV-1 van General Motors, een revolutionaire elektrische auto van een paar jaar geleden, kwam met die techniek 225 km ver. Tesla heeft wat vertraging met de productie van de elektrische sportauto die vooral populair is onder filmsterren en mensen die werkzaam zijn in 'Silicon Valley'. In het eerste kwartaal van 2008 worden de eerste 50 stuks geproduceerd. Deze zijn overigens al geheel uitverkocht.

Daarna worden in dat jaar nog eens 600 stuks gebouwd. In 2009 krijgt het elektrische auto-avontuur met een sedan die voorlopig ‘White Star’ heet en in Mexico wordt gebouwd. Daarna komt er nog een kleine sedan maar daarvan zijn nog geen nadere gegevens bekend.

Deze golf van ontwikkelingen op het gebied van elektrische auto’s vormt een belangrijke ondersteuning voor de volgende stap om te gaan werken aan een concept voor *all electric* én duurzaam, maar dan met een grotere actieradius. Kortom: op basis van *redox flow*-batterijen.

4.7

Terug naar 2008: Concrete eerste stappen

Naast het in dit hoofdstuk geschetste ontwikkeltraject is het verstandig om op korte termijn enkele concrete stappen te maken:

- **Techniek:** *Proof of principle*-project formuleren om met een kleinschalig testmodel van een geschikt type *redox flow*-batterij aan de slag te gaan. Het meest voor de hand liggend is hiervoor een innovatief elektrotechnisch (ontwikkel)bedrijf(je) te zoeken of op te richten,
- Oriënterend overleg met enkele elektrotechnische bedrijven om na succesvolle testen van het *proof of principle*, het principe door te ontwikkelen in een geïntegreerd systeemconcept,
- Eventueel oriënterend overleg met enkele van de huidige hardwareleveranciers en ontwikkelaars van *redox flow*-systemen (sterke en zwakke punten, valkuilen, tips),
- Diepgaandere analyse van de potentie van *redox flow*-systemen en communicatie daarover ter vergroting van de bekendheid van de techniek en de mogelijkheden,
- Opstellen plan van aanpak voor de verdere uitrol en toepassing van *redox flow*-technologie in de agrarische sector als onderdeel van een totaalconcept op het gebied van duurzame energievoorziening.

- 1 Energy Diary 2025; Courage.
- 2 Ingrediënten voor een energieneutrale belichte glastuinbouw in 2020, Position Paper licht; KEMA, 07-9022, 2007.
- 3 Review of electrical energy storage technologies and systems and of their potential for the UK, EA technology, 2004.
- 4 A. Gonzalez et al, Study of Electricity Storage Technologies and Their Potential to address wind energy Intermittency in Ireland, 2004.
- 5 Electricity Storage Association, www.electricitystorage.org.
- 6 Proceedings EESAT 2005.
- 7 Status of Electrical Energy storage systems, Swanbarton Limited, 2004.
- 8 G. Strbac, M. Black, Future value of storage in the UK, 2004.
- 9 Energy Storage for Grid Connected Wind Generation Applications, EPRI DOE handbook supplement, 2004.
- 10 www.epri.com.
- 11 www.vrbpower.com.
- 12 Handbook of Chemistry and Physics, 79th edition, 1998-1999.
- 13 www.imr-oarai.jp/en/research/research4-5.html.
- 14 www.vrb.unsw.edu.au.
- 15 <http://www.energystoragecouncil.org/>.
- 16 www.tva.gov.
- 17 <http://www.delftintegraal.tudelft.nl/info/index0415.html?hoofdstuk=Artikel&ArtID=4169>.
- 18 EPRI-Doe Handbook of Energy Storage for Transmission and Distribution Applications, December 2003.
- 19 www.hybridcars.com.
- 20 http://thefraserdomain.typepad.com/energy/2006/01/vandium_reflux_.html.
- 21 <http://www.leonardo-energy.org/drupal/files/2007/Briefing%20paper%20-%20Flow%20batteries.pdf?download>.

Bijlage I: Financieel overzicht

Om een vergelijking te maken met de conventionele brandstoffen, zijn de kosten van het rijden op elektrolyt teruggerekend naar de kosten per kilometer. Hierin zijn meegenomen:

- De kosten van de duurzaam opgewekte elektriciteit,
- De kosten van het grote *redox flow*-opslagsysteem bij de boer,
- De kosten van de kleine *redox flow*-accu in de auto,
- De kosten van het elektrolyt,
- De kosten van het tankstation.

a. Kosten van de duurzame elektriciteit

De prijs van de opgewekte duurzame elektriciteit is vastgesteld op 0,1 euro/kWh in de huidige situatie en 0,05 euro/kWh in 2025. Dit zijn slechts aannames, de exacte kosten zijn sterk afhankelijk van het gebruikte systeem. In de berekeningen blijkt de invloed van deze kosten echter beperkt te zijn. Omdat het duurzame elektriciteit betreft, hoeft voor deze berekening geen rekening te worden gehouden met REB.

b. Kosten van de twee benodigde *redox flow*-systemen

De technologie van *redox flow*-systemen is inmiddels toegepast in stationaire demonstratieprojecten. Kleinschalige producten zijn al wel verkrijgbaar op commerciële schaal, maar nog beperkt. De grootschalige demonstratieprojecten, zoals bij windparken, moeten de technologie bewijzen. Verwacht wordt dat daarna de kosten van de technologie zullen dalen, waardoor de haalbaarheid van de systemen zal verbeteren.

De kosten van de drie systemen liggen in dezelfde orde van grootte. Voor de eerste systemen zal dat enkele duizenden euro's per kW betreffen, daarna zal het dalen tot ongeveer € 1500/kW.

Gedetailleerde kosten zijn niet of nauwelijks bekend. Deze zijn sterk afhankelijk van de gekozen dimensies. Het is daarom niet eenvoudig om de prijs van een installatie op te splitsen in kosten voor de omzetter en kosten voor het elektrolyt, terwijl dit van groot belang is voor de haalbaarheid van *redox flow*-systemen. Toch is een poging gedaan dit te doen, omdat dit van belang is voor het bepalen van de kosten voor het concept van de “Fotonenboer”. Deze kostenschattingen zijn gebruikt voor de kostenschatting van het grote *redox flow*-systeem. Voor de kosten van het kleinschalige systeem in de auto is (vereenvoudigd) aangenomen dat het *redox flow*-systeem met de elektromotor meerkosten heeft van €10.000 euro in 2010 en €5.000 euro in 2025. Uitgaand van een levensduur van 200.000 km, komt dit overeen met ongeveer 0,03€/km in 2025.

c. Kosten van het elektrolyt

Voor het opschalen van het systeem zijn de kosten van het elektrolyt van groot belang. Dit geldt ook voor het concept van de “Fotonenboer”. Er is immers meer elektrolyt nodig dan in een standaard situatie, omdat de auto’s elektrolyt meenemen als ze rondrijden en er ondertussen ander elektrolyt opnieuw moet worden geladen. ZnBr heeft de laagste elektrolytkosten (20 €/kWh opslagcapaciteit) en lijkt daardoor aantrekkelijk voor grootschalige toepassingen. Echter, V/V-systemen (~ 50 €/kWh opslagcapaciteit) kunnen eenvoudiger worden opgeschaald, en voor vanadium wordt een prijsdaling verwacht. In combinatie met het veel grotere aantal cycli is V/V toch vaak aantrekkelijker. Daarom is uitgegaan van een V/V-systeem.

Naast de kosten per kWh opslagcapaciteit is het de vraag hoeveel elektrolyt er extra nodig is, als voorraad, omdat niet iedereen een vast “tank-schema” heeft. Hiervoor zal – naast de hoeveelheid elektrolyt die in omloop is in de voertuigen – een buffer geladen elektrolyt bij de boer nodig zijn. Aangenomen is dat er twee keer zoveel elektrolyt nodig is dan in omloop is bij de automobilisten. Aangenomen is dat er 1000 auto’s per boer worden voorzien van elektrolyt (-25 MWh/week).

d. Kosten van het tankstation

De kosten van conventionele brandstof zijn als volgt gespecificeerd [website BOVAG]:

- Productie (0,42 €/liter),
- Distributie (0,07€/liter),
- Winst (0,06 €/liter, ofwel 0,005 euro/km),
- Accijns (0,68 €/liter),
- Btw (0,24 €/liter).

Aangenomen wordt dat de distributiekosten van elektrolyt aanzienlijk lager zijn dan de distributiekosten van conventionele benzine, omdat het elektrolyt niet hoeft te worden getransporteerd maar op het boerenbedrijf blijft. Bovendien wordt het tankstation op het bedrijf van de boer geplaatst en hoeft geen dure grond te worden aangekocht. Aangenomen is daarom dat de distributiekosten per liter 1/3 zijn van de kosten voor conventionele brandstoffen.

e. Brandstofkosten per kilometer

In onderstaande tabel staan de gebruikte aannames voor het bepalen van de brandstof-kilometerprijs. Hiervoor is de benzineprijs vergeleken

met de prijs voor elektrolyt (inclusief de meerkosten voor de auto). Om de vergelijking eerlijk te houden, is ook in deze berekeningen rekening gehouden met btw en met een winst van 0,5 eurocent/km. Voor de situatie met elektrolyt is wel gerekend met btw (in verband met de vergelijkbaarheid) maar nog niet met accijns, omdat hierover nog geen beleidsuitspraken zijn gedaan. Bovendien wordt ook voor de huidige elektrische vervoersystemen vooralsnog geen accijns (en overigens ook geen motorrijtuigenbelasting, in tegenstelling tot auto's op benzine, diesel en gas!) gehanteerd op de gebruikte elektriciteit.

De aangenomen levensduur van de stack is ongeveer 10 jaar. Daarna wordt de stack vervangen. Alle andere onderdelen, zoals de elektronica, leidingen en dergelijke, gaan echter langer mee. Daarom wordt aangenomen dat de stack na 10 jaar wordt vervangen voor 50% van de prijs van de volwassen technologie, zoals geschat in [16].

	2007 (Auto)	2007 (Boer)	2025 (Auto)	2025 (Boer)
Type systeem	V/V			V/V
Vermogen systeem (MW)		1		1
Capaciteit (MWh)		10		10
Levensduur stack (jaar)		10		10
Levensduur elektrolyt (jaar)		20		30
Energie-efficiency		75%		80%
Aantal keer tanken	1X/week		1X/week	
Km/tank	500		500	
Aantal auto's per boer		500		1000
Operationele/variabele kosten (€/MW geïnstalleerd vermogen)		60		60
Benzineprijs (€/liter)	1,5		3,5	
Benzineverbruik (km/liter)	12		25	
Vermogen auto (kW)	50		100	
Elektriciteitsverbruik (Wh/km)	200		100	
Energiedichtheid elektrolyt (Wh/liter)		50		100
Productiekosten elektriciteit (€/kWh)		0,1		0,05
Benodigd tankvolume in de auto in liter	2000		500	
Benodigde opslag bij de boer in m ³		200		100

Op basis van de uitgangspunten is in 2025 een tankinhoud in de auto van 500 liter nodig. Dit lijkt heel groot, maar met een slim ontwerp met benutting van loze ruimtes moet dit eenvoudig mogelijk zijn. Zeker omdat geen zware brandstofmotor meer nodig is. Verdeeld over de gehele bodemplaat is een hoogtebeslag van ruim 6 cm nodig.

Uit figuur 12 blijkt dat de prijs per km van elektrolyttransport naar verwachting zal dalen tot het niveau van een benzinevoertuig.

De kosten voor de brandstofprijzen zijn opgebouwd uit kosten voor het systeem, kosten voor het elektrolyt en kosten voor duurzame elektriciteit. Figuur 13 geeft weer hoe deze kosten zijn verdeeld. Hierbij is

Tabel 5: Aannames en systeemkenmerken voor mobiele toepassingen in de huidige situatie en voor 2025, voor zowel het systeemdeel bij de boer als in de voertuigen.

Bijlage 2: Maar hoe zit het dan met al die andere veelbelovende ontwikkelingen?

Uiteraard zijn er ook andere technologieën in ontwikkeling, zoals een auto op een conventionele (bijvoorbeeld Li-ion-) batterij, op waterstof of op biobrandstoffen. In vergelijking met een auto op waterstof is het omzettingsrendement van een *redox flow*-accu echter hoger. En in vergelijking met een auto op batterijen is het rijden op elektrolyt flexibeler qua oplaadmogelijkheden en is de oplaadtijd beperkt tot het moment van tanken.

a. Auto op batterij

De Toyota Prius en enkele andere op dit moment gangbare hybrides rijden bij lage snelheden op de batterij, die wordt opgeladen door remenergie en de benzine- of dieselmotor. Voor de Toyota Prius is het gemiddelde verbruik in de praktijk ongeveer 1 liter benzine op 20 kilometer. In vergelijking met dieselmotoren is dat eigenlijk geen bijzonder laag verbruik. In 2025 (en waarschijnlijk veel eerder) is het zeker mogelijk om een auto bij alle snelheden te laten rijden op de batterij. Aangezien remenergie alleen niet genoeg is om in de totale elektriciteitsbehoefte van de auto te voorzien (op de snelweg moet je zeker een uur kunnen rijden zonder te remmen), is een batterij met voldoende capaciteit (en hoge energiedichtheid) voor een actieradius van 400-500 km een eerste vereiste, aangevuld met een (in de toekomst steeds kleinere) hulp/noodvoorziening op fossiele brandstof voor de situatie van een platte batterij. Daarnaast is het ook in dit systeemconcept altijd mogelijk om de accu bij te laden via een stekker op een oplaadpunt (thuis of op het werk, of standaard op alle toekomstige parkeerplaatsen).

Nadeel van dit systeemconcept, zeker bij *all electric*-concepten, is dat heel veel batterijen nodig zijn. Dit levert fors veel extra gewicht op, wat een negatieve invloed heeft op het verbruik per kilometer. In de huidige automodellen gaat dit voorlopig ook nog ten koste van de ruimte in de auto, maar in toekomstige modellen zullen elektromoto-

ren in elk van de wielen zijn geïntegreerd. De vrijkomende ruimte onder de motorkap biedt dan voldoende plaats voor de elektriciteitsopslag (in welke vorm dan ook). Knelpunt blijft voorlopig vooral de lange oplaadtijd van de batterijen en tevens de investering in infrastructuur van oplaadpunten bij veel parkeerplaatsen.

Vooraf op het punt van oplaadtijd verslaat een *redox flow*-accu de traditionele batterij, omdat de consument overal kan tanken en dit bijna net zo snel gaat als het tanken van benzine.

b. Auto op waterstof

Waterstof is geen energiebron maar een drager van energie. Het produceren van waterstof via elektrolyse of vanuit aardgas (methaan) kost echter veel energie. Vervolgens moet het waterstof worden opgeslagen en in de auto weer worden omgezet in elektriciteit. Hierdoor is de energie-efficiëntie zeker op ketenniveau veel lager dan voor een auto op elektrolyt.

Elektrolyt heeft namelijk als groot voordeel dat het elektriciteit rechtstreeks in de vorm van elektrische lading opslaat, waardoor hier geen energie verloren gaat. Tevens is het bij een elektrisch voertuig veel eenvoudiger om remenergie op te slaan dan bij een brandstof/ waterstofmotor.

De ontwikkeling van voertuigen op waterstof is in volle gang, mede omdat de auto-industrie de meeste ervaring heeft met brandstofmotoren. Gezien de *technology push*, de ontwikkelkracht van de betrokken stakeholders en de steeds strengere milieuregelgeving (luchtkwaliteit), is de verwachting gerechtvaardigd dat dergelijke voertuigen in 2025 geschikt zijn voor personentransport. Vervoersconcepten gebaseerd op waterstof zullen tegen die tijd vermoedelijk een van de opties zijn naast *redox flow*, net zoals nu naast benzine en diesel ook lpg en bio-ethanol gangbare opties zijn.

c. Auto op biobrandstoffen

Verscheidende initiatieven zijn inmiddels gestart om auto's te laten rijden op biobrandstoffen zoals biodiesel of bio-ethanol. Het voordeel hiervan is dat de bestaande infrastructuur wordt gebruikt en dat deze brandstoffen kunnen worden gemengd met conventionele brandstoffen. Op de korte termijn lijkt dit een aantrekkelijke optie, ook al bestaan er nog veel problemen met de kwaliteit van de geproduceerde brandstoffen. Op de langere termijn heeft deze optie echter zijn beperkingen. Enerzijds omdat de voertuigen nog steeds emissies hebben en daarmee de lokale luchtkwaliteit niet sterk verbetert, zoals wel het geval is bij elektrisch vervoer. Anderzijds omdat er veel discussies worden gevoerd over de ethiek rondom het gebruik van biomassa als brandstof in plaats van als voedsel.

d. Auto op aardgas

In Nederland bestaat momenteel veel interesse in het rijden op aardgas. Dit is op korte termijn een aantrekkelijke wijze om de CO₂-uitstoot per kilometer te reduceren maar is op lange termijn geen voor de hand liggende optie, omdat de voorraden aardgas beperkt zijn en de uitstoot aanzienlijk hoger is dan de uitstoot van elektrische plug-in (hybride) voertuigen.

InnovationNetwork report No. 08.2.173;
K.J. Braber *et al*;
Photon Farmer – Topping up with farmyard electricity in 2025.
Utrecht, the Netherlands, February 2008

Will the way we drive have changed drastically by the year 2025? Transport with zero CO₂ emissions, less noise nuisance, and with no particulate emissions?

This essay explores the potential of Redox Flow Batteries and the part that agriculture could play. Such “Photon Farmers” would store sustainable energy in the form of a liquid electrolyte.

Drivers would call in at a network of farms throughout the country, to fill up with electrolyte. Farmers would generate sustainable electricity from wind, the sun, and biomass. This electricity would be converted in a Redox Flow Battery and stored in electrolyte. Consumers would then visit farms to fill up with this electrolyte, which their vehicles would use as fuel. To this end, electric cars would be fitted with a smaller version of a Redox Flow Battery.

As the vehicle travels, the electrolyte becomes discharged. When the consumer next visits a farmer for a top-up, discharged electrolyte is pumped out of their tank as charged electrolyte is pumped in. The Photon Farmer would then recharge the electrolyte using sustainable energy. This would mainly occur at times when the farm has an excess of sustainable energy. This technology has the dual benefit that it would enable vehicles to use sustainable energy while allowing them to rapidly recharge their depleted batteries. The length of time

currently required to charge a battery is one of the problems that electric transport must solve within the next few years.

If the assumptions made in this report are correct, then the various actors involved should be able to reap the following benefits in 2025.

Farmer	Consumer	Society
Creates a market for the sale of surplus sustainable energy.	Can drive while also being environmentally friendly.	Optimum use of sustainable energy.
Earns money from the sale of electrolyte as a fuel for electric vehicles.	Electrolyte will cost less than petrol.	Electric vehicles produce no CO ₂ , particulate, or NO _x emissions.
Cuts his energy bills by balancing his own supply of and demand for sustainable energy.	Drives in a noiseless vehicle, while enjoying much superior in-car air quality.	Drastic reduction in the noise nuisance from traffic.
Avoids the high cost of incorporating his farm into the electricity grid.	Can use green electricity, as the farmer supplies surplus sustainable energy to the electricity grid	Stable electricity grid due to the stationary application of the redox flow storage system

Table 1: Summary of the benefits of Photon Farming in 2025.

If electrolyte is actually to be used in vehicles in 2005 then the following steps must be taken.

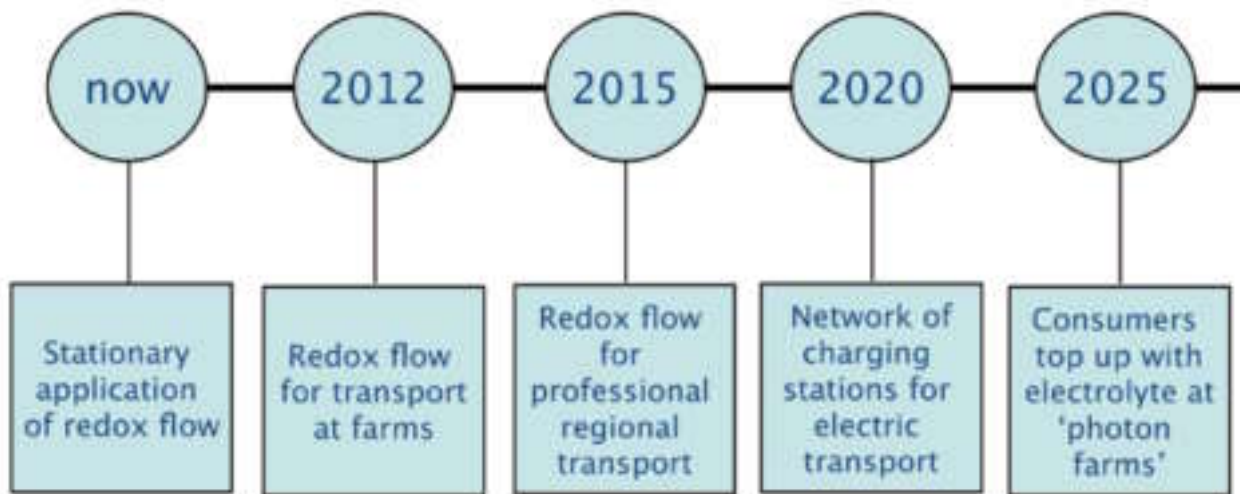


Figure 1: Transitional steps essential to the creation of "photon farmers".