

Duurzaam bouwen – brandveiligheid van installaties



Nederlands Instituut Publieke Veiligheid
Postbus 7010
6801 HA Arnhem
Kemperbergerweg 783, Arnhem
www.nipv.nl
info@nipv.nl
026 355 24 00

Colofon

© Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV), 2023

Auteurs J. Reinders, J. van der Graaf, M. Duyvis en M. Leene
Contactpersoon J. van der Graaf

Datum 6 april 2023

Wij hechten veel belang aan kennisdeling. Delen uit deze publicatie mogen dan ook worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding.

Het Nederlands Instituut Publieke Veiligheid is bij wet vastgelegd onder de naam Instituut Fysieke Veiligheid.

Inhoud

Inleiding	4
Achtergrond	4
Doel en doelgroep	5
Doelstelling van deze studie	5
Afbakening	5
Aanpak en leeswijzer	5
1 Ontwikkelingen	7
1.1 Energieopwekking	7
1.2 Energie-opslagsystemen	9
1.2.1 Chemisch	9
1.2.2 Elektrochemisch	12
1.2.3 Thermisch	14
1.2.4 Mechanisch	16
1.3 Selectie	17
2 Uitgewerkte systemen	21
2.1 Inleiding	21
2.2 Waterstof in woningen via bestaande aardgasleidingen	21
2.3 Opslag van elektriciteit in lithium-ion thuisaccu's	22
2.4 Opwekking van energie via PV-systemen (zonnepanelen)	24
Literatuur	25

Inleiding

Achtergrond

De laatste jaren is het steeds evidentier geworden dat het klimaat verandert, dat deze verandering steeds sneller gaat en kan worden toegeschreven aan de uitstoot van broeikasgassen (IPPC, 2021). Het gaat hierbij met name om de uitstoot van koolstofdioxide (CO₂) als gevolg van de verbranding van fossiele brandstoffen (steenkool, aardolieproducten en aardgas). Deze klimaatverandering brengt velerlei ongewenste effecten met zich mee. Duidelijke voorbeelden zijn extremere weersomstandigheden (hetere zomers, meer droogte, extremere regenval), afname van de dikte van de ijskappen op Groenland en Antarctica met als gevolg een stijging van de zeespiegel (KNMI, 2015), alsook een afname van de biodiversiteit (WWF, 2020).

Om de klimaatverandering en de gevolgen ervan het hoofd te bieden, wordt de roep om een duurzamere¹ maatschappij steeds luider. Dit vertaalt zich onder meer in regelgeving waarin duurzaamheid een steeds belangrijkere rol speelt. Zo ook in de woningbouw, waarin de toepassing van duurzamere bouwmethoden (minder energiegebruik, minder afval) en het gebruik van duurzamere bouwmaterialen (biobased, hergebruik van materialen) in toenemende mate worden vereist (zie bijvoorbeeld het Bouwbesluit 2012). Ook klimaatadaptief bouwen, dus zodanig dat de woningen beter bestand zijn tegen de gevolgen van klimaatverandering, wordt steeds belangrijker. Verder dienen woningen (en andere gebouwen) zodanig gebouwd te worden dat de bewoner of gebruiker zo weinig mogelijk van fossiele brandstoffen gebruik hoeft te maken. Ook de mogelijkheid om een gebouw te kunnen aanpassen aan veranderende behoeften, bijvoorbeeld door modulair te bouwen, wordt steeds belangrijker, hetgeen hergebruik van materialen gemakkelijker maakt.

De verschillende duurzaamheidsverhogende materialen en methodes kunnen van invloed zijn op de brandveiligheid van woningen. Wetgeving loopt altijd achter op innovaties en nieuwe ontwikkelingen, en dus ook op daaraan verbonden (brand)veiligheidsrisico's. De invloed van duurzame innovaties in de bouw zijn door NIPV beschreven in het rapport *Invloed van duurzaam, energiezuinig en circulair bouwen op de brandveiligheid van gebouwen* (NIPV, 2022b).

In voorliggende studie wordt ingegaan op de rol die op duurzaamheid gerichte innovaties van installaties (zullen) spelen in de brandveiligheid van woningen. Het gaat dan met name om ontwikkelingen in duurzame energievoorzieningen. Het is belangrijk hierbij in het oog te houden dat individuele apparaten ook aan veiligheidseisen moeten voldoen (producteisen, warenwet en dergelijke), en dat het dus de combinatie van apparaat en gebouw is die het totale (integrale) brandveiligheidsniveau bepaalt. Die combinatie is dan ook het onderwerp van dit onderzoek.

¹ De Engelse term voor 'duurzaam' is 'sustainable'. Een veel gehanteerde definitie komt uit het 'Brundtland Report' (Brundtland, 1987, p. 41): "Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs".

Doel en doelgroep

Deze publicatie is primair bedoeld voor brandveiligheidsadviseurs van veiligheidsregio's. De doelstelling is om deze doelgroep inzicht te geven in de wijze waarop de brandveiligheid van woningen wordt beïnvloed door (nieuwe, innovatieve en duurzame) installaties gericht op het verminderen van het gebruik van fossiele brandstoffen. Het betreft installaties die energie opwekken (zoals zonnepanelen) en energie-opslagsystemen die als buffer worden gebruikt voor periodes waarin het opwekken of extern verkrijgen van energie niet mogelijk, onwenselijk of duur is. Uiteraard kunnen ook andere partijen die betrokken zijn bij de ontwikkeling en realisatie van duurzame energiesystemen deze publicatie gebruiken.

Doelstelling van deze studie

Deze studie heeft ten doel:

1. Een beeld te geven van de typen installaties die momenteel of – naar verwachting – in de nabije toekomst toegepast zullen worden voor een duurzame energievoorziening (ook klimaatbeheersing) in (nieuwe) woningen in Nederland.
2. Aan te geven wat de invloed van deze installaties is op de brandveiligheid.
3. Hoe brandveiligheidsrisico's kunnen worden beperkt.

Afbakening

Deze studie heeft betrekking op individuele grondgebonden woningen, niet op overige gebouwen zoals woonblokken, flats, kantoren of bedrijfsgebouwen en niet op de gebouwde omgeving, zoals installaties die meerdere woningen bedienen.

Zoals gezegd richt deze studie zich uitsluitend op de brandveiligheid van de technische installaties. Daarbij gaat het specifiek om (nieuwe ontwikkelingen in) installaties voor duurzame energievoorziening in woningen. Deze studie richt zich niet op de *bouwkundige* brandveiligheid. De brandveiligheidsaspecten van duurzamere bouwmethoden en -materialen zijn reeds onderwerp geweest van een eerdere studie (NIPV, 2022b). Maatregelen met betrekking tot de incidentbestrijding worden in dit onderzoek eveneens buiten beschouwing gelaten.

Aanpak en leeswijzer

Allereerst is een verkennende literatuurstudie uitgevoerd, vooral via internet, naar de belangrijkste ontwikkelingen en inzichten zoals deze momenteel bekend zijn. Deze staan beschreven in hoofdstuk 1. In dit hoofdstuk is ook kort aangegeven of deze systemen worden toegepast in woningen en wat in hoofdlijnen de brandrisico's zijn.

Vervolgens zijn op basis van een inschatting door NIPV (zie ook NIPV, 2022a) installaties benoemd waarvan duidelijk is dat deze perspectief bieden op woningniveau, maar waarvan de veiligheidsrisico's, zeker bij grootschalig gebruik, nog niet geheel duidelijk zijn.

Hieruit zijn drie systemen geselecteerd die al op ruime schaal in of bij woningen worden toegepast, of waarvan de ontwikkelingen erop duiden dat dit binnen afzienbare tijd het geval zal zijn. De (brand)veiligheidsrisico's en beheersmaatregelen van deze drie toepassingen worden beschreven voor zover besproken in de literatuur (waaronder eerdere publicaties van het IFV / NIPV), door fabrikanten en installateurs, of op websites (bijvoorbeeld Wattisduurzaam, 2021a). Dit is beschreven in hoofdstuk 2.

1 Ontwikkelingen

Om in de toekomst op een duurzame manier te kunnen voorzien in de energiebehoefte in woningen en (andere) gebouwen is het noodzakelijk dat energieopwekking op een duurzame manier plaatsvindt, dat wil zeggen: zonder vorming van CO₂. Verder is het essentieel energie te kunnen opslaan in energiedragers. Dit is belangrijk voor mobiel gebruik (dus als 'brandstof' bij vervoer) en ook om, indien nodig, energie beschikbaar te hebben op momenten dat of locaties waarop opwekking van energie niet mogelijk is.

In dit hoofdstuk wordt beschreven welke typen installaties voor duurzame energieopwekking en -opslag momenteel, of mogelijk in de (nabije) toekomst in Nederland toegepast worden. Daarbij wordt vermeld of toepassing in woningen bestaat of te verwachten is en, op hoofdlijnen, welke veiligheidsrisico's daarbij aan de orde zijn. Hierbij is het gebruikelijke onderscheid gemaakt in energieopwekking en energieopslag. Energieopwekking² moet hier worden gezien als de (eerste) stap waarin een (niet direct bruikbare) vorm van energie (zonnestraling, wind) wordt omgezet in een bruikbare vorm (meestal elektriciteit). Indien deze bruikbare energievorm niet direct kan of hoeft te worden benut, moet hij worden opgeslagen voor gebruik later of gebruik in andere systemen zoals bij vervoer en transport.

1.1 Energieopwekking

Duurzame energieopwekking van elektriciteit aan huis vindt vooral plaats via zonnepanelen (PhotoVoltaic cells of PV-cellen). Het is ook mogelijk direct de warmte van de zon op te vangen via zonnecollectoren en deze te gebruiken voor warmte in huis, bijvoorbeeld voor warm water (zonneboiler) (Energie thuis, 2021). Sporadisch wordt gebruikgemaakt van (mini)windturbines, die bijvoorbeeld op het dak worden geplaatst (Urbanwind, 2021).

> Zonnepanelen (PhotoVoltaic cells – PV cells)

Beschrijving: Een zonnepaneel zet zonlicht om in elektriciteit. In de panelen zit (vrijwel altijd) silicium. Hieruit worden door het zonlicht elektronen losgemaakt, waardoor er een elektrische (gelijk)stroom gaat lopen. Via een omvormer wordt deze gelijkstroom omgezet in wisselstroom die geschikt is voor gebruik in gebouwen. Het geheel van zonnepanelen, omvormer, connectoren en kabels wordt een PV-systeem genoemd (IFV, 2021a).

Toepassing in woningen: Zonnepanelen worden op grote schaal toegepast en geïnstalleerd op woningen.

Veiligheidsissues: De gevaren die zonnepanelen met zich meebrengen, zijn hoofdzakelijk een gevolg van niet deskundig installeren van het PV-systeem, met als belangrijkste risico brand (IFV, 2021a).

² Strikt genomen is energieopwekking niet mogelijk. Het is alleen mogelijk om verschillende energievormen in elkaar om te zetten.

> **Zonnecollectoren**

Beschrijving: Zonnecollectoren bestaan uit panelen die (meestal) op het dak worden geplaatst. Door de collectoren lopen buizen met een vloeistof die door de zon wordt opgewarmd. De opgewarmde vloeistof wordt via een warmtewisselaar gebruikt om een woning van warm water te voorzien (zonneboiler). Soms ook wordt het cv-systeem erop aangesloten.

Toepassing in woningen: Zonnecollectoren worden veelvuldig toegepast op woningen.

Veiligheidsissues: Van (brand)veiligheidsissues konden op internet geen gegevens worden gevonden. Wel kan verwacht worden dat constructieve tekortkomingen zoals die bij zonnepanelen voorkomen (los raken bijvoorbeeld), hier ook een rol spelen.

> **(Mini)windturbines**

Beschrijving: Kleine windturbines zijn speciaal ontwikkeld voor de toepassing op of naast gebouwen. Het vermogen van deze turbines ligt tussen 0,5 en 20 kW (Urbanwind, 2021).

Toepassing in woningen: Van toepassingen op individuele woningen konden geen voorbeelden worden gevonden.

Veiligheidsissues: Van (brand)veiligheidsissues konden op internet geen gegevens worden gevonden.

> **Battolyser**

Beschrijving: De Battolyser is een nikkel-ijzerbatterij die stroom opslaat³ (BATTERij) en waterstof produceert via electrOLYSE (Battolyser, 2021). Pilotprojecten zijn gericht op industriële schaal (Battolyser, 2022).

Toepassing in woningen: Van toepassingen op individuele woningen konden geen voorbeelden worden gevonden.

Veiligheidsissues: Hierover kon geen informatie worden gevonden, maar er wordt waterstof gevormd, dus de bijbehorende risico's (brandbaar, explosief) zullen naar verwachting aanwezig zijn.

> **H2PS waterstofgenerator**

Beschrijving: Met behulp van elektriciteit (uit zonnecellen bijvoorbeeld) wordt waterstof gemaakt (hoe wordt niet vermeld). Dit waterstof wordt toegevoegd aan het aardgas dat naar de verwarmingsinstallatie van een woning of bedrijf gaat. Het systeem is al toegepast in enkele gebouwen (kantoren, gemeentehuis) (H2PS, 2021).

Toepassing in woningen: Van toepassingen op individuele woningen zijn geen voorbeelden gevonden.

Veiligheidsissues: Hierover wordt niets gezegd, maar er wordt waterstof gevormd, dus de bijbehorende risico's (brandbaar, explosief) zullen naar verwachting aanwezig zijn.

> **Brandstofcel (waterstof)**

Beschrijving: In een brandstofcel reageert waterstof met zuurstof. Hierbij wordt elektriciteit opgewekt en wordt water gevormd. Dit is het omgekeerde proces van elektrolyse. Hierbij komt ook warmte vrij. Brandstofcellen zijn vooral bekend om hun toepassing in auto's ('Fuel cell electric cars': Toyota, 2021; Hyundai, 2021) .

Toepassing in woningen: Er zijn systemen voor thuisgebruik (Panasonic, 2021), met name in Japan, maar ook in Engeland en Duitsland; deze zijn er echter (nog) niet in

³ Dit deel van de Battolyser kan als een energie-opslagsysteem worden gezien.

Nederland. Toepassing ligt dan vooral voor de hand indien waterstof via het gasnet (nu nog aardgasnetwerk) wordt gedistribueerd naar woningen en bedrijven.

Veiligheidsissues: Hierover worden in (Panasonic, 2021) geen mededelingen gedaan. Er vindt weliswaar geen opslag van energie plaats, maar wel een energieomzetting waarbij waterstof aanwezig is. De risico's worden dan met name gevormd door de brandstofcel of zijn een gevolg van de vervanging van aardgas in het aardgasnet door waterstof.

1.2 Energie-opslagsystemen

Energie kan worden opgeslagen in verschillende vormen (FME, 2017):

- > *Chemisch.* Dit is de bekendste vorm, waartoe ook de fossiele brandstoffen (aardolie, aardgas) behoren. Door een chemische reactie (bij verbranding: een reactie met zuurstof) komt de energie vrij. Waterstof wordt momenteel veelvuldig genoemd als vervangende, duurzame energiedrager.
- > *Elektrochemisch.* Ook bij elektrochemische reacties vindt energieoverdracht plaats tussen verschillende moleculen. Dit gebeurt echter niet door direct contact tussen de moleculen, maar door overdracht van energie (in de vorm van elektronen) door twee half-reacties. Het bekendste voorbeeld is de oplaadbare batterij.
- > *Thermisch.* Een medium wordt verwarmd, en door warmte te onttrekken wordt energie verkregen. Ondergrondse warmte-koude-opslag is het bekendste voorbeeld.
- > *Mechanisch.* Door gebruik te maken van fenomenen als zwaartekracht en druk kan (potentiële) energie worden opgeslagen. Een voorbeeld hiervan is lucht onder druk. Door de druk af te laten, komt de energie vrij. Een ander voorbeeld is waterkracht.

1.2.1 Chemisch

Chemische energieopslag betekent opslag in de chemische verbinding tussen de atomen in een molecuul. Door het verbreken van deze verbinding (en de daarmee gepaard gaande vorming van andere moleculen) kan de energie worden vrijgemaakt. De traditionele fossiele brandstoffen (koolwaterstoffen) behoren tot deze groep. Hierbij worden de verbindingen tussen de verschillende koolstofatomen en tussen de koolstof- en waterstofatomen verbroken en worden koolstof-zuurstof-verbindingen (CO₂) en waterstof-zuurstof-verbindingen (H₂O) gevormd. In geval van waterstof is de energie opgeslagen in de verbinding tussen de twee waterstofatomen van een waterstofmolecuul (H₂).

Waterstof

Waterstof kan als vervanger van aardgas een belangrijke rol gaan spelen in de gebouwde omgeving (zie bijvoorbeeld KIWA, 2018). Er kan gebruikgemaakt worden van de bestaande aardgasinfrastructuur om waterstof naar woningen te transporteren (IFV, 2021b). Waterstof zal echter voor 2030 nog geen rol van betekenis spelen voor wat betreft het verwarmen van woningen (Stedin, 2020).

Om ervaring op te doen en netbeheerders gereed te maken voor de transitie, zijn er verschillende pilots geïnitieerd:

- > In Lochem zijn 12 monumentale panden in november 2022 voorzien van waterstof. In dit pilotproject gebeurt dit via het bestaande aardgasnetwerk (Alliander, 2022). De woningen worden met behulp van een waterstofketel verwarmd. De benodigde waterstof wordt in tubetrailers in de omgeving opgeslagen, ingevoerd in het leidingstelsel en via leidingen naar de woningen getransporteerd.

- > In Hoogeveen wil men in een bestaande woonwijk overgaan op waterstof; ook zijn er plannen voor een nieuwe woonwijk op waterstof (Waterstof Hoogeveen, 2022). Er vindt geen opslag van waterstof in de woningen plaats, maar waterstof wordt aangevoerd vanuit een gemeenschappelijk waterstofcentrale of waterstoffabriek op enige afstand van de woningen.
- > In Stad aan 't Haringvliet loopt een project waarbij bestaande huizen via het aardgasnet van waterstof zullen worden voorzien. Ook hier vindt geen opslag van waterstof in de woning plaats. De benodigde waterstof komt uit tanks in een container via de bestaande aardgasleiding het huis binnen (Stad aan 't Haringvliet 2022).
- > In Wagenborgen in Groningen bestaan plannen om medio 2023 enkele tientallen huizen te laten overstappen op waterstof. Ook hier vindt geen opslag plaats in de woningen (Wagenborgen, 2022).

Waterstof kan op de volgende manieren worden opgeslagen:

- > **Opslaan als vloeistof (Liquid Hydrogen - LH2) in cryogene tanks**
Beschrijving: Deze technologie is ontwikkeld en wordt toegepast. Voor industrieel gebruik wordt waterstof opgeslagen in cryogene tanks, dat wil zeggen bij zeer lage temperatuur (-253 °C) . Als vervanger van diesel voor vrachtauto's wordt vloeibaar waterstof geschikt geacht (TTM, 2020).
Toepassing in woningen: Van opslag van LH2 in woningen zijn geen toepassingen bekend; er wordt ook niet verwacht dat dit in de toekomst wel het geval zal zijn.
Veiligheidsissues: Brandbaar, explosief, verstikkend, bevroering (IFV, 2021b).
- > **Opslaan als gecompriemd gas (Compressed Gaseous Hydrogen - CGH2) in druktanks**
Beschrijving: Ook deze technologie is ontwikkeld en wordt toegepast als vervanger van brandstoffen voor motorvoertuigen (bussen, vrachtauto's, personenauto's).
Toepassing in woningen: Er worden pilotstudies uitgevoerd naar gebruik en lokale opslag in de gebouwde omgeving (Waterstofnet, 2020). In het project Waterstofhuis op Goeree-Overflakkee (H2Platform, 2019) zijn de woningen voorzien van een opslagbuffer (buiten); dit is ook het geval en bij een privéwoning in Zweden (Zweden, 2017). Voor een ander pilotproject waarbij thuisopslag (alsook productie van CGH2) werd voorzien, is geen vergunning verleend (Zweden, 2020). De mogelijke gevaren van de voorziene 'waterstoffabriek' speelden hierbij een rol. Bij een test in Groningen werd waterstof opgeslagen bij 50 bar (H2Platform, 2018). Dit is aanzienlijk lager dan de gangbare drukken van 200-700 bar.
Veiligheidsissues: Brandbaar, explosief en (hoge) druk (tot 700 bar) (IFV, 2021c).
- > **Opslag in metaalhydrides**
Beschrijving: Metaalhydrides zijn poedervormige deeltjes van enkele micrometers doorsnede. Wanneer waterstof hiermee onder geringe druk (enkele tot enkele tientallen bars) in contact wordt gebracht, zal het adsorberen aan de deeltjes (met enige warmteontwikkeling). Bij drukverlaging komt het waterstof weer vrij. Opslag van waterstof in metaalhydrides vindt veelal plaats in cilinders. De techniek wordt commercieel toegepast in de industrie of in laboratoria (Fuelcellstore, 1999; Bronkhorst, 2021).
Toepassing in woningen: Verdere ontwikkeling vindt plaats en (demonstratie-)systemen voor thuis of kantoor bestaan reeds. Concrete toepassingen in woningen zijn niet bekend (Allesoverwaterstof 2021, LAVO 2021).

Veiligheidsissues: Brandbaar, waterstof staat onder druk (tot circa 30 bar), maar veel minder dan bij CGH₂. Ook zal bij lekken van de container het waterstof relatief langzaam vrij komen, met een geringere kans dan bij CGH₂ op explosieve gaswolken. Niettemin kan lekkend waterstof, dat opstijgt in lucht, door ophoping onder bijvoorbeeld een plafond toch een explosieve wolk vormen.

> **Opslag in Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHCs)**

Beschrijving: Onder verhoogde druk en temperatuur en met behulp van een katalysator wordt aan een organische vloeistof waterstof toegevoegd. Hierdoor wordt het waterstof aan de organische moleculen van de vloeistof gebonden. De waterstof komt weer vrij bij lagere druk (Niemann, M., et al. 2019).

De organische vloeistoffen (LOC) waaraan de waterstof kan worden gebonden zijn vaak (aromatische) verbindingen (methylcyclohexaan, naftaleen, perhydrodibenzyltolueen) (Arcadis Berenschot, 2021). De techniek bevindt zich nog in een experimenteel stadium.

Toepassing in woningen: Van toepassingen in woningen zijn geen voorbeelden bekend. De verwachting is wel dat LOHC's een aandeel zullen krijgen als energiedrager op zowel de kortere als de langere termijn (Arcadis Berenschot, 2021).

Veiligheidsissues: Eenmaal gebonden aan de organische moleculen zijn specifieke veiligheidsaspecten voor brandbare gasvormige producten (zoals de vorming van explosieve gaswolken) niet meer aanwezig. Ook de risico's van verhoogde druk zijn niet meer aanwezig. Brandbaarheid van de organische vloeistofstof waaraan het waterstof wordt gebonden kan wel een risico vormen. Ook kunnen mogelijk toxische eigenschappen van de LOHC een gezondheidsrisico vormen.

> **Opslag in de vorm van mierenzuur (CH₂O₂)**

Beschrijving: Uit waterstof en CO₂ wordt met behulp van een katalysator mierenzuur gemaakt, dat als vloeistof kan worden opgeslagen of vervoerd.⁴ Via de omgekeerde reactie wordt weer waterstof gevormd (Frontiers in Materials, 2019). Er wordt onderzoek naar gedaan bij het Voltachem innovatieprogramma (Voltachem, 2017).

Er zijn al commerciële toepassingen van installaties, zoals generatoren in een container (afmetingen circa 3 m x 2,4 m x 2,6 m) (Dens, 2021), die met behulp van een katalysator elektriciteit kunnen opwekken uit een op mierenzuur gebaseerde 'brandstof', genaamd 'Hydrozine' (Hydrozine, 2022).

Toepassing in woningen: Voorbeelden van toepassingen binnen woningen zijn niet bekend.

Veiligheidsissues: Mierenzuur is een brandbare en toxische vloeistof, die bovendien (huid)corrosief is (Arcadis Berenschot, 2021; Sigma-Aldrich, 2021)

> **Opslag in de vorm van ammoniak (via NH₃)**

Beschrijving: Waterstof kan met stikstof (N₂) relatief eenvoudig in NH₃ worden omgezet. NH₃ kan als energiebron in brandstofcellen worden gebruikt of direct worden verbrand (Affif, A. et al., 2016). Men voorziet mogelijkheden om waterstof via ammoniak over grote afstanden over zee te vervoeren (VNCI, 2021).

Toepassing in woningen: Voorbeelden van toepassingen binnen woningen zijn niet bekend.

⁴ In deze vorm is mierenzuur ook te beschouwen als een LOHC.

Veiligheidsissues: NH₃ is zeer toxisch, en daardoor minder (of zelfs niet) geschikt voor gebruik en opslag bij gebouwen of woningen, maar eventueel wel bij de (kunstmest) industrie die reeds NH₃ gebruikt.

> **Synthetische brandstoffen**

Uit CO₂ en waterstof kunnen brandstoffen (en grondstoffen voor de chemische industrie) worden gesynthetiseerd. Deze techniek wordt reeds toegepast; in 2021 heeft een passagierstoestel een vlucht gemaakt op synthetische kerosine (Shell, 2021; Natuur en milieu, 2022). In november 2022 heeft een Airbus van de Britse luchtmacht een vlucht gemaakt met 100 % synthetische brandstof (Innovationorigins, 2022).

Toepassing in woningen: Voorbeelden van toepassingen binnen woningen zijn niet bekend.

Veiligheidsissues: Deze zijn afhankelijk van de gemaakte (brand)stof.

1.2.2 Elektrochemisch

Ook bij elektrochemische reacties vindt energieoverdracht plaats tussen verschillende moleculen, echter niet door direct contact tussen de moleculen, maar via overdracht van energie (in de vorm van elektronen) door twee half-reacties. Een van de twee half-reacties vindt plaats aan een anode en de andere aan de kathode. De reactie wordt gedreven door het elektrisch potentiaalverschil tussen beide helften.

> **Loodaccu's**

Beschrijving: Loodaccu's dateren uit 1859 en zijn daarmee een van de oudste accutypes (Loodaccu, 2022). Dit type wordt vooral toegepast in auto's, maar ook in bijvoorbeeld vorkheftrucks.

Toepassing in woningen: In principe kunnen loodaccu's in woningen worden gebruikt voor opslag van elektriciteit. Commerciële toepassingen voor thuisgebruik zijn bijvoorbeeld UPS'en⁵ (zie bijvoorbeeld RS, 2022).

Veiligheidsissues: De accu's bevatten zwavelzuur, dat ernstige brandwonden en oogletsel kan veroorzaken (Roth, 2022).

> **Lithium-ion batterijen**

Beschrijving: Dit is de meest toegepaste vorm van opslag van duurzame energie (elektriciteit).

Toepassing in woningen: Lithium-ion accu's bestaan voor toepassing in woningen, zoals de Tesla Powerwall (Tesla 2021), de LG home Battery (LG, 2021) of de NorthVolt Powerpacks (Northvolt, 2021).

Veiligheidsissues: Brand door verhitting van de batterijcellen en als gevolg hiervan een thermal runaway (een exponentieel oplopende temperatuur waardoor brand wordt veroorzaakt), waarbij ook toxische stoffen (zoals HF) vrijkomen. Blussen is zeer moeilijk (IFV, 2021d; IFV, 2021e).

> **Andere accu's (nog in ontwikkeling):**

- Verbeterde lithium-ion anode (LeydenJar, 2021).
- Natrium-ion batterij (Faradion, 2023): het werkingsprincipe is als dat van lithium-ion, maar de lithium is vervangen door natrium en de anode is opgebouwd uit een andere vorm van koolstof.

⁵ UPS staat voor Uninterruptible Power Supply. UPS'en worden veel gebruikt om (kortstondige) stroomstoringen op te vangen van bijvoorbeeld computersystemen.

- NAWA's ultra-fast carbon electrodes (Nawatechnologies, 2021): dit is eigenlijk geen accu maar een condensator ('Super Capacitor'). Er vindt geen chemische reactie plaats tijdens op- of ontladen.
- Lithium-Metal Anode (Quantumscape, 2023).

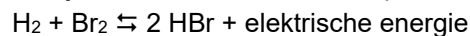
Toepassing in woningen / gebouwen: Van het type verbeterde lithium-ion bestaan toepassingen in consumentenelektronica en auto's. Van toepassingen in woningen wordt geen melding gemaakt. Van de natrium-ion batterij bestaan systemen voor toepassingen in huis.

Veiligheidsissues: Volgens websites:

- Verbeterde lithium-ion anode (LeydenJar, 2021) en NAWA's ultra-fast carbon electrodes (Nawatechnologies, 2021): geen informatie.
- Natrium-ion: "[...] a sodium-ion cell can be fully discharged to zero volts, akin to a capacitor. In this state, the potential for thermal runaway due to short-circuiting is eliminated [...]" (webpagina "superior-safety" op Faradion, 2023).
- Lithium-Metal Anode: "Pure lithium metal tends to form dendrites, which can diminish a battery's safety and service life. [...] Lithium metal is also highly reactive, which poses a problem for sulfides, liquids, and solid polymers. [...] Lithium foils also make the dendrite⁶ problem harder to solve." (webpagina "The Advantages of Lithium-Metal Anodes" op Quantumscape, 2023)

> **Waterstofbromide flow batterijen**

Beschrijving: Dit is een batterij waarin een redoxreactie⁷ plaatsvindt:



Voordelen volgens de fabrikant (Elestor, 2023):

"Hydrogen and bromine are abundantly available on a global scale. The supply is not restricted to geographical availability, and cannot be dominated by a small group of suppliers (unlike Lithium, Cobalt and Vanadium) [...] Since the chemical reaction of Elestor's storage systems is 100% reversible, its storage capacity [kWh] remains unchanged during the lifetime. While (dis)charging, the active materials are only used, not consumed, and in fact only the chemical composition of the electrolyte reservoir and the pressure of the hydrogen tank changes during the (dis)charge process."

Toepassing in woningen: Het systeem is als pilot toegepast bij kantoor Witteveen en Bos in Deventer. Ook Vopak overweegt gebruik. Van mogelijke toepassingen in woningen wordt geen melding gemaakt.

Veiligheidsissues: Gasvormig waterstof onder druk (zie eerder) en broom (toxisch en corrosief, kan ernstige brandwonden en oogletsel veroorzaken alsmede irritatie van de luchtwegen) (Roth, 2023).

> **Vanadium flow batterijen**

Beschrijving: Ook dit is een redoxbatterij.⁷ Als elektrolyt wordt vanadium in een waterige oplossing gebruikt (Invinity Systems, 2023). Doordat vanadium meerdere oxidatieniveaus kent, wordt elektrische lading opgebouwd. Vanadiumbatterijen zijn toegepast in California ter stabilisering van het elektriciteitsnetwerk. Ook Tennet overweegt het gebruik van deze technologie om stabiliteits- en capaciteitsproblemen in het elektriciteitsnetwerk weg te nemen (Topsector Energie, 2022).

⁶ Dendrites (dendrieten) zijn metaaldeeltjes die onder abnormale condities in een batterijcel kunnen ontstaan. Zij kunnen kortsluiting veroorzaken met als gevolg een thermal runaway.

⁷ Een redoxreactie is een reactie tussen atomen, moleculen en/of ionen waarbij elektronen worden uitgewisseld (elektronenoverdracht). De term redox is een samenstelling van de begrippen reductie en oxidatie, de twee half-reacties die plaatsvinden in batterijen en accu's (zie bijvoorbeeld [Redoxreactie - Wikipedia](#)).

Toepassing in woningen: Van toepassingen in woningen konden geen voorbeelden worden gevonden. Gezien de omvang (vergelijkbaar met die van een ISO-container⁸) lijkt de techniek ook niet gericht op toepassing in (individuele) woningen.

Veiligheidsissues: volgens de webpagina “Vanadium Flow Battery Fire Safety” van (Invinity Systems, 2023): “Compared with lithium batteries, the Invinity™ Vanadium Flow Battery has no fire risk and very low electrical fault risk, and has been independently assessed as providing a lower risk profile to facility operators and first responders.” Een vanadiumoplossing kan huid- en oogirritatie veroorzaken (Merck, 2022).

> **Op zink gebaseerde batterijen**

Beschrijving: Door Eos (Eos, 2021) gebouwde batterijen (‘Znyth battery’, zinc hybrid cathode battery technology). De technologie lijkt nog in ontwikkeling; (commerciële) toepassingen worden niet vermeld.

Toepassing in woningen: De technologie lijkt wel bruikbaar in de gebouwde omgeving, maar lijkt ook gericht op (grotere) systemen en bedrijven. Van toepassingen in woningen konden geen voorbeelden worden gevonden.

Veiligheidsissues: Op website van Eos staat dat te allen tijde een brandblussysteem aanwezig moet zijn, dat de batterijen giftige stoffen bevatten en steeds een (elektrische) lading moeten bevatten.

> **Reverse Electro Dialysis (RED)**

Beschrijving: Een technologie waarmee energie kan worden opgeslagen door zout water te scheiden in twee delen met verschillende zoutconcentraties. Bij samenvoeging wordt weer elektriciteit opgewekt (Redstack, 2021). De techniek, die kan worden ingezet op locaties waar zoet en zout water samenkomen (riviermondingen), verkeert nog in een experimenteel stadium. Op de afsluitdijk staat een proefcentrale.

Toepassing in woningen: Niet gericht op gebruik in woningen (te grote schaal – denk aan elektriciteitscentrales – en te locatiespecifiek).

Veiligheidsissues: Hiervan wordt geen melding van gemaakt.

1.2.3 Thermisch

(Overtollige) energie kan worden opgeslagen in de vorm van warmte. Deze warmte kan dan later worden gebruikt voor verhitte ruimtes, of worden omgezet in een andere energievorm zoals elektriciteit. Ook kan (overtollige) warmte worden vastgelegd in een chemische verbinding, die bij verbreking de warmte weer afgeeft.

Elektriciteit:

> **Opslag van warmte in steen ten behoeve van elektriciteitsopwekking**

Beschrijving: Met (overtollige) duurzame energie wordt steen (basalt bijvoorbeeld) verhit tot 800 °C. Hiermee kan een stoomturbine worden aangedreven en (opnieuw) elektriciteit worden geproduceerd (Wattisduurzaam, 2021a). De techniek wordt ontwikkeld door Siemens (Wattisduurzaam, 2021b). Er zijn grote volumes aan steen nodig om effectief te zijn.

Toepassing in woningen: Een toepassing in individuele gebouwen en woningen lijkt niet realistisch.

Veiligheidsissues: Hiervan wordt geen melding van gemaakt.

⁸ Een container van 6 of 12 m lang, 2,60 of 2,90 hoog en 2,44 m breed ([Intermodal container - Wikipedia](#)).

Warmte:

> **Opslag van voelbare warmte (DWA, 2020):**

Beschrijving: Opslag in vaste materialen zoals stenen of in vloeibare materialen (water). Om de warmte weer terug te winnen wordt vaak van een warmtepomp gebruikgemaakt om de vereiste temperatuur te verkrijgen.

Toepassing in woningen: Technisch is deze techniek volledig ontwikkeld; in praktijk is ze alleen in grote systemen realistisch vanwege warmteverliezen.

Veiligheidsissues: Geen bijzonder veiligheidsissues.

> **Opslag in faseovergangsmaterialen (Phase Change Materials - PCM's) (DWA, 2020; Orange Cimate, 2022, Solareis, 2022)**

Beschrijving: Warmteopslag door faseovergang (vast-vloeibaar) in bijvoorbeeld zouthydraten of paraffine of de overgang ijs-water bij 0 °C. Isolatie is van belang om energieverliezen tegen te gaan. PCM's op basis van zouthydraten zijn commercieel beschikbaar.

Toepassing in woningen: Dit principe is in de vorm van PCM-klimaatvloeren of -wanden al in een aantal woningen toegepast (Orange Cimate, 2022).

Veiligheidsissues: Brandbaarheid van paraffine; mogelijke corrosiviteit van zouthydraten (DWA, 2020).

> **Opslag in chemische verbindingen (Thermochemical Materials - TCM's) (DWA, 2020)**

Beschrijving: Warmteopslag door vorming van chemische verbindingen; het meest geschikt is CaCl₂-(30%wt)-silicagel. De techniek is nog sterk in ontwikkeling. Er zijn nog geen commerciële toepassingen.

Toepassing in woningen: Niet bekend.

Veiligheidsissues: Gekoppeld aan toxiciteit of brandbaarheid van het materiaal.

> **WKO: Warmte-koudeopslag in de bodem (DWA, 2020, Duurzaam doen, 2022)**

Beschrijving: Bij deze techniek wordt de ondergrond met grondwater als buffer gebruikt. In de open systemen wordt grondwater opgepompt. 's Winters wordt hier via een warmtepomp energie aan onttrokken en gebruikt voor verwarming en warm water. 's Zomers wordt het relatief koude grondwater gebruikt voor koeling. In een gesloten systeem wordt niet gebruikgemaakt van grondwater, maar wordt vloeistof door een buizensysteem (bodemplus) door de ondergrond gevoerd. Warmte-uitwisseling vindt op dezelfde wijze plaats als bij een open systeem. De techniek is ontwikkeld en verkrijgbaar.

Toepassing in woningen: De techniek wordt met name toegepast in woongebouwen.

Veiligheidsissues: Geen bijzondere veiligheidsissues worden vermeld.

> **Geothermie of aardwarmte**

Beschrijving: Bij deze techniek wordt heet water uit diepere grondlagen opgepompt (vanaf circa 500 m diepte) (Milieucentraal, 2022). Hieraan wordt warmte onttrokken (door de hoge temperatuur is geen warmtepomp nodig) die via warmtewisselaars aan een warmtenet (warm-waterleidingsstelsel) wordt overgedragen, waarna het water weer wordt geïnjecteerd in de bodem. Op het warmtenet aangesloten gebouwen gebruiken deze energie voor verwarming. De techniek is ontwikkeld en wordt op verschillende locaties in Nederland toegepast, vooral de tuinbouw. Er zijn echter ook projecten in het

kader van verwarming van woningen op wijkniveau (DWA, 2020, Geothermie, 2021).

Toepassing in woningen: De techniek wordt met name toegepast op wijkniveau.

Veiligheidsissues: (veiligheids)issues zijn (NIPV, 2021):

- Mogelijke vervuiling van grond- of drinkwater bij lekkende putten.
- Vrijkomen van (brandbaar) methaangas bij oppompen van het water.
- Een blow-out indien je bij het boren een gasbel raakt.
- (Bodem)vervuiling door de gebruikte chemicaliën.

Ook zijn er zorgen ten aanzien van mogelijke aardbevingen (AD, 2020, Warmtebron Utrecht, 2022).

> **Warmtepomp**

Beschrijving: Een warmtepomp slaat geen energie op, maar vormt vaak een onderdeel van een warmteopslagsysteem. Een warmtepomp brengt warmte van de ene locatie of ruimte naar de andere. Koelkasten, vriezers en airconditioners zijn voorbeelden van warmtepompen, maar met een warmtepomp wordt meestal een installatie aangeduid die warmte van buiten (buitenlucht, ondergrond, grondwater) naar binnen brengt (Milieucentraal, 2022) om een warmtebuffer van warmte te voorzien.

Toepassing in woningen: Warmtepompen worden op grote schaal toegepast in woningen voor warm water en/of verwarming. Vaak worden ze in combinatie met de cv-ketel gebruikt. Men spreekt dan van hybride warmtepompen.

Veiligheidsissues: Van bijzondere veiligheidsissues bij warmtepompen wordt in het algemeen geen melding gemaakt.

> **Warmtebatterij (TNO, 2021)**

Beschrijving: Hierbij wordt gebruikgemaakt van het principe dat adsorptie van water aan zout warmte genereert die voor verwarming kan worden gebruikt. Met bijvoorbeeld zonne-energie kan het zout weer worden 'gedroogd'. TNO en TU-Eindhoven hebben een warmtebatterij voor thuisgebruik ontwikkeld (TNO, 2021). Deze is nog in het teststadium.

Toepassing in woningen: Toepassingen worden niet vermeld.

Veiligheidsissues: Deze hangen af van gekozen zout: bij K_2CO_3 (waarschijnlijk) geen; bij NaS kan de reactie toxisch H_2S vormen.

1.2.4 Mechanisch

> **Vliegwiel**

Beschrijving: Met een draaiend vliegwiel kan energie (elektriciteit) worden opgewekt. Door het te laten roteren in vacuüm kan de weerstand worden verlaagd en dus de efficiëntie worden verhoogd. Er bestaan systemen voor gebruik als UPS (Hitec, 2022).

Toepassing in woningen: Er lijken nog geen producten te zijn, en de techniek lijkt ook niet gericht te zijn op gebruik in gebouwen (Quinteqenergy, 2021).

Veiligheidsissues: Er zijn geen gegevens bekend.

> **Andere systemen**

Waterkracht is een bekend voorbeeld, maar uiteraard niet op gebouwniveau.

In Wattisduurzaam (2021a) worden enkele andere technieken genoemd die gebruikmaken van de zwaartekracht (potentiële energie), alsook opslag van lucht onder druk in bijvoorbeeld zoutholtes.

Toepassing in woningen: Ook deze technieken zijn op woningniveau niet relevant.

Veiligheidsissues: Deze worden niet vermeld.

1.3 Selectie

In Tabel 1.1 zijn de verschillende installatietypes samengevat op basis van de beschrijving in voorgaande paragrafen. In deze paragraaf zullen enkele systemen worden geselecteerd die een nadere beschouwing verdienen. Allereerst zijn dit de systemen die al behoorlijk ver zijn ontwikkeld, reeds worden toegepast in woningen en/of naar onze verwachting in de nabije toekomst op grotere schaal toepassing zullen vinden in woningen. De brandrisico's van deze systemen worden in het volgende hoofdstuk nader beschouwd. Bij deze systemen staat in de laatste kolom van Tabel 1.1 ("Nader te beschouwen") een 'ja'. Ten tweede zijn dit systemen die toepasbaar zijn op individueel woningniveau maar zich nog in een experimenteel stadium bevinden en waarvan bovendien kan worden aangenomen dat er bijzondere brandrisico's aan verbonden zijn. Het ligt voor de hand om deze systemen in de komende jaren te blijven volgen. Bij deze systemen staat in de laatste kolom van Tabel 1.1 'mogelijk'. Bij de selectie is ook gebruikgemaakt van een studie die is uitgevoerd door wattisduurzaam.nl (Wattisduurzaam, 2021a).

Tabel 1.1 Overzicht van de behandelde systemen

Type installatie	Mate van ontwikkeling	Toepasbaar / toegepast in woningen	Bijzondere (brand)risico's	Nader te beschouwen
Energieopwekking				
PV's (zonnepanelen)	ontwikkeld	veelvuldig toegepast	ja	ja
Zonnecollectoren	ontwikkeld	veelvuldig toegepast	nee / beperkt	nee
(Mini)windturbines	ontwikkeld	weinig toegepast	nee	nee
Battolyser	ontwikkeld	minder geschikt door omvang / voorbeelden niet bekend	?	nee
H2PS	ontwikkeld	voorbeelden in woningen niet bekend	beperkt	nee
Brandstofcel	ontwikkeld	toepasbaar in woningen; geen voorbeelden in NL bekend	beperkt / ja	mogelijk
Chemische opslag				
H ₂ , vloeibaar opslag cryogeen	ontwikkeld	toepasbaar / voorbeelden niet bekend	significant	nee
H ₂ , gasopslag onder druk	ontwikkeld	pilottoepassing bekend	significant	nee
H ₂ in Metaalhydrides	ontwikkeld	toepasbaar / voorbeelden niet bekend	ja	mogelijk
H ₂ in LOHCs	experimenteel	toepasbaar / voorbeelden niet bekend	beperkt	nee
Mierenzuur	ontwikkeld	toepasbaar / voorbeelden niet bekend	ja	nee
NH ₃	ontwikkeld	toepasbaar / voorbeelden niet bekend	significant	nee
Synthetische brandstoffen	ontwikkeld	toepasbaar / voorbeelden niet bekend	beperkt	nee
H ₂ i.p.v. aardgas	ontwikkeld	in nabije toekomst verwacht / pilot toepassingen bekend	beperkt / ja	ja

Type installatie	Mate van ontwikkeling	Toepasbaar / toegepast in woningen	Bijzondere (brand)risico's	Nader te beschouwen
<i>Elektrochemische opslag</i>				
Loodaccu	ontwikkeld	toepasbaar / nauwelijks toegepast in het kader van energietransitie	nee	nee
Lithium-ion accu's	ontwikkeld	veelvuldig toegepast	ja	ja
Andere accu's	in ontwikkeling	toepasbaar / voorbeelden niet bekend	afhankelijk van type	mogelijk
HBr	in ontwikkeling	toepasbaar / voorbeelden bestaan	ja	mogelijk
Vanadium flow	ontwikkeld	minder geschikt door omvang / voorbeelden niet bekend	beperkt	nee
Znyth batterij	in ontwikkeling	minder geschikt door omvang / voorbeelden niet bekend	?	nee
RED	in ontwikkeling	niet geschikt door omvang	nee	nee
<i>Thermische opslag</i>				
Warmte in steen (basalt)	ontwikkeld	niet geschikt door omvang	nee	nee
Warmte in water	ontwikkeld	in verschillende vormen reeds toegepast	nee	nee
PCM	ontwikkeld	enkele toepassingen bekend	beperkt	mogelijk
TCM	in ontwikkeling	toepasbaar / voorbeelden niet bekend	mogelijk	mogelijk
WKO	ontwikkeld	voorbeelden in woningcomplexen	nee	nee
Geothermie	ontwikkeld	voorbeelden op wijkniveau	beperkt	nee
Warmtepomp	ontwikkeld	veelvuldig toegepast	nee	mogelijk
Warmtebatterij TNO	in ontwikkeling	toepasbaar / voorbeelden niet bekend	mogelijk	mogelijk
<i>Mechanische opslag</i>				
Vliegwiel / waterkracht / zwaartekracht / luchtdruk	ontwikkeld	niet geschikt door omvang	nee	nee

In zijn algemeenheid kan worden gesteld dat door de verschillende nieuwe energieopwekking- en energieopslagsystemen in de toekomst meer elektrische apparatuur in woningen aanwezig zal zijn dan momenteel het geval is. Alleen al hierdoor ontstaat er een verhoogd brandrisico.

Energieopwekking

In de gebouwde omgeving en ook voor particuliere woningen geldt dat energie vrijwel uitsluitend wordt gegenereerd door opwekking van elektriciteit met behulp van PV-installaties (zonnepanelen). Andere systemen spelen, zo ze al toepasbaar zijn, nog nauwelijks een rol van betekenis. Aangezien brandveiligheid een aandachtspunt is bij *PV-systemen* zal hieraan verderop aandacht worden besteed.

De *brandstofcel* zou een toekomstige kandidaat kunnen zijn voor toepassing in woningen. Waterstof dat via het leidingnet wordt aangevoerd kan dan worden omgezet in elektriciteit. Thuisopslag van energie (batterijen) is dan niet nodig.

Energieopslag

Overtollige elektrische energie kan op dit moment worden terug geleverd aan de energieleverancier. Deze terug geleverde energie kan worden weggestreept tegen eigen verbruik op een ander moment. Dit heet salderen.⁹ Daardoor is er momenteel weinig behoefte aan opslagcapaciteit (bufferopslag). Als de salderingsregeling wordt afgebouwd of afgeschaft, zal het (meer) lonend zijn zelf de overtollige energie op te slaan, om deze dan in een later stadium weer te kunnen gebruiken (Essent, 2021). Energieopslagsystemen bij woningen zullen er dan ook met name op gericht zijn de zelf opgewekte energie (tijdelijk) te kunnen opslaan. Ook kunnen deze systemen worden ingezet om periodes met hoge energieprijzen te bufferen met energie opgeslagen tijdens periodes met lagere energieprijzen. Dit zal uiteraard afhangen van de wijze van beprijzing door de energieleverancier.

Voor chemische opslag in de vorm van waterstof bestaan de nodige systemen zoals uit Tabel 1.1 blijkt. Hierbij is het noodzakelijk dat de opgewekte elektrisch energie wordt omgezet in waterstof. Technisch bestaan hiervoor geen beperkingen. Niettemin kleven de nodige nadelen aan de systemen waarbij een conversie van energievorm moet plaatsvinden. Zo vereisen productie, opslag en toepassing van waterstof complexe en dure apparatuur die aan allerlei veiligheidseisen moet voldoen. Dat is op huishoudelijk niveau niet zomaar mogelijk, ook niet bij een boerderij of klein bedrijf met een loods vol zonnepanelen op het dak (H2-platform, 2021). In feite worden industriële processen die door daarvoor opgeleide ingenieurs, procestechnologen en veiligheidkundigen worden uitgevoerd en bewaakt naar de consumentenwereld gehaald, met een verhoogd risico van ondeskundig gebruik als gevolg. Van opslag van waterstof in of nabij woningen zijn dan ook weinig voorbeelden bekend (hooguit enkele pilots); ook zijn er geen commerciële systemen voor binnenopslag van vloeibaar of gecombineerd waterstof. Het ligt dan ook niet voor de hand dat dit binnen voorzienbare tijd grootschalig zal worden toegepast.

Al met al ligt het meer voor de hand dat opslag van overtollige elektriciteit in de vorm van waterstof grootschalig en professioneel plaatsvindt, bijvoorbeeld bij energiecentrales. Daar kan het worden ingezet om elektriciteit op te wekken, of in het gasnet worden geïnjecteerd voor verwarming van woningen en gebouwen. Dit laatste wordt voorzien vanaf circa 2030; er loopt al een aantal pilotprojecten. Aan de risico's van *vervanging van aardgas door waterstof*, gebruikmakend van het huidige aardgasnetwerk, zal hieronder dan ook aandacht worden besteed. Omdat van opslag (onder lagere druk) van waterstof in de vorm van *metaalhydrides* al (experimentele) systemen bestaan die op woningniveau zouden kunnen worden toegepast, ligt het voor de hand deze opslagvorm in de nabij toekomst te volgen.

Opslag van elektrische energie vindt vrijwel uitsluitend plaats in lithium-ion accu's. Deze worden momenteel vooral gebruikt voor mobiele toepassingen zoals in telefoons, laptops, fietsen en auto's, maar ze zullen naar verwachting ook op steeds grotere schaal in woningen worden toegepast. Het is bekend dat hiermee een extra brandrisico gepaard gaat. Derhalve zullen de *brandrisico's van lithium-ion accu's* in woningen ook nader worden beschouwd.

⁹ De [salderingsregeling](#) zal in de periode 2025 – 2031 afgebouwd worden.

Er wordt intensief onderzoek verricht naar de toepassing van *andere (batterij)systemen* of elektrochemische energiedragers. Uiteraard moeten deze ontwikkelingen op de voet worden gevolgd.

Thermische opslag op woningniveau vindt plaats in zonneboilers en via WKO en warmtepompen. De warmtepomp bestaat al tientallen jaren, maar wordt als gevolg van de energietransitie nu veel meer toegepast en is daardoor flink in de belangstelling komen te staan. Van warmtepompen worden geen bijzondere risico's gemeld (Trendrapport, 2021). Door de installatiebranche wordt de warmtepomp ook als een tijdelijke innovatie in de energietransitie gezien. Uiteindelijk wordt meer verwacht van het gebruik van waterstof als energiedrager. Niettemin wordt de *warmtepomp* op grote schaal toegepast, waardoor het toch nuttig lijkt aandacht te besteden aan de brandrisico's ervan, bijvoorbeeld door incidenten met dergelijke installaties te volgen (warmtepompincidenten, 2019, 2021, 2022). Geothermie ten slotte zal niet op woningniveau worden toegepast.

Opslag in water werkt eigenlijk alleen bij grootschalige toepassingen. De *warmtebatterij* (TNO) en opslag in *TCM* (Thermochemical Materials) zijn nog in een ontwikkelingsstadium, maar kunnen mogelijk in de toekomst op woningniveau worden toegepast. Het lijkt derhalve ook nuttig om deze ontwikkelingen te volgen. De toepassingen van *PCM* (Phase Change Materials) zijn nog beperkt en brandrisico's lijken beperkt: er wordt gebruikgemaakt van anorganische zouten en de brandveiligheid van de PCM-panelen is gecertificeerd (Orange Climate, 2022). Niettemin wordt ook melding gemaakt van (brandbaar) paraffine. Bij toepassing in vloeren en plafonds kan dit een extra brandrisico opleveren. Derhalve verdient het ook aandacht de ontwikkeling van deze systemen in de nabije toekomst te volgen.

Al met al zullen PV-cellen, waterstof-verwarmingssystemen en lithium-ion accu's in de nabije toekomst belangrijke installaties gaan vormen in woningen. Ten aanzien van PV-cellen is dit reeds het geval. Deze drie systemen zijn in het volgende hoofdstuk verder uitgewerkt.

2 Uitgewerkte systemen

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden van drie systemen de brandveiligheidsissues meer in detail besproken. Ook mogelijke beheersmaatregelen zullen worden genoemd.

2.2 Waterstof in woningen via bestaande aardgasleidingen

Brandveiligheidsissues

Gebruik van waterstof in de huiselijke omgeving vindt nog slechts als pilot plaats (IFV, 2021b; Alliander, 2022). Omdat waterstof naar verwachting op woning- of gebouwniveau vooral zal worden toegepast om aardgas te vervangen, is een vergelijking met de risico's van aardgas nuttig (IFV, 2021b). Aardgas bestaat hoofdzakelijk uit methaan; de eigenschappen daarvan worden hieronder vergeleken met de eigenschappen van gasvormig waterstof:

- > Methaan en waterstof zijn beide ontvlambare gassen.
- > Waterstof heeft een breder ontvlambaarheidsgebied dan methaan (waterstof: 4 - 77 vol.%; methaan: 5,3 – 15 vol.%).
- > Bij lage concentraties (< 8 vol.%) zijn de ontstekingsenergieën van waterstof en methaan vergelijkbaar.
- > Ontsteking van een waterstofwolk geeft bij concentraties hoger dan 10 vol.% een explosie (deflagratie) en bij concentraties hoger dan 18 vol.% een detonatie. Of en hoe een explosie plaatsvindt, is erg afhankelijk van de omstandigheden.
- > Zowel methaan als waterstof heeft een lagere dichtheid dan lucht en zal dus na vrijkomen opstijgen, waarna ophoping kan plaatsvinden in besloten ruimtes of bijvoorbeeld onder het plafond. De dichtheid van waterstof is lager dan van methaan, dus waterstofgas stijgt sneller dan methaan.
- > Ontsteking van waterstof of aardgas dat onder druk uit een lek komt (jet), geeft een fakkel.
- > Methaan en waterstof kunnen niet door geur worden waargenomen (tenzij een geurstof wordt toegevoegd).
- > Waterstofvlammen zijn visueel nauwelijks waar te nemen (alleen als bijvoorbeeld stofdeeltjes in de vlam zitten). Waterstofvlammen zijn zeer heet, maar stralen relatief weinig warmte uit.
- > Methaanvlammen zijn zichtbaar en stralen meer warmte uit dan waterstofvlammen.
- > Waterstofmoleculen kunnen doordringen in het metaalrooster (van bijvoorbeeld de leidingen) en 'verbrossing' veroorzaken.
- > Doordat waterstofmoleculen kleiner zijn dan methaanmoleculen kunnen zij gemakkelijker lekken.

Beheersmaatregelen

Waterstof is in de industrie niet nieuw en de gevaren van waterstof in een industriële omgeving zijn bekend; waterstof is in principe niet gevaarlijker of minder gevaarlijk dan

andere brandbare gassen (zie ook pag. 22 in TNO, 2020). Door de toepassing van waterstof in een nieuwe omgeving (woningen), in afwezigheid van professionele operators en zonder veiligheidsmanagementsystemen, is het echter (nog) niet altijd duidelijk wanneer en op welke wijze deze gevaren zich openbaren. De hieruit voortvloeiende risico's kunnen worden beperkt door het nemen van maatregelen. Deze worden momenteel in pilotprojecten getest en richten zich met name op het voorkomen van lekken en het zich ophopen van waterstof in woningen.¹⁰ Passende maatregelen zijn dan bijvoorbeeld:

- > gasdetectie
- > ventilatie van de meterkast en ruimte van de cv-installatie
- > (handmatige) gasafsluiters
- > het gebruik van een gasstopper
- > odorisatie van waterstof.

Aanleg en onderhoud van deze installaties dienen door deskundige, gecertificeerde technici te worden uitgevoerd. Daarbij is het, gezien de 'nieuwe' omgeving waarin deze installaties worden aangelegd, van belang voor installateurs om *voortdurend op de hoogte te blijven van nieuwe inzichten* ten aanzien van uitvoeringen, locaties en dimensionering van de verschillende systemen zoals deze uit onderzoeken en de (test)praktijk naar voren komen.

2.3 Opslag van elektriciteit in lithium-ion thuisaccu's

De lithium-ion accu wordt op grote schaal gebruikt voor de opslag van elektrische energie, met name voor mobiele toepassingen (telefoons, laptops, fietsen, auto's), maar ook stationair in gebouwen.

Brandveiligheidsissues

De brandrisico's van een lithium-ion accu worden vooral gevormd door de zogenaamde thermal-runaway-reactie. Tijdens het opladen en ontladen van lithium-ion batterijen vinden voortdurend elektrochemische reacties plaats, waardoor energie vrijkomt (ontladen) of wordt opgenomen (opladen). Het is van belang dat de batterijcel tijdens deze elektrochemische reacties stabiel blijft. Het inwendige van de batterijcel is ontworpen om onder normale gebruiksomstandigheden stabiel te blijven.

Door veroudering of afwijkende omstandigheden als te snel laden of ontladen, laden of ontladen bij te hoge of te lage temperatuur, productiefouten of door mechanische beschadiging kan deze stabiliteit echter worden verstoord en kunnen inwendige componenten beschadigd raken. Als gevolg van deze beschadiging kan een soort inwendige kortsluiting ontstaan die leidt tot exotherme reacties waarbij hitte en gassen (toxisch en brandbaar) vrijkomen. De hitte en de exotherme reacties versterken elkaar, waardoor er op een gegeven moment sprake is van een *thermal runaway* (NIPV, 2023). Bij deze reactie komen gassen vrij in de batterij, die zorgen voor drukopbouw. Wordt deze druk te hoog, dan breekt de batterij (soms explosief) open, waardoor de gevormde brandbare en toxische gassen vrijkomen (vooral koolwaterstoffen, waterstof, waterstoffluoride, koolmonoxide en koolstofdioxide). Vaak zullen deze gassen ontsteken, met brand als gevolg.

Door verhitting van naburige batterijen zal het proces zich uitbreiden naar andere batterij-modules, waardoor deze ook in thermal runaway kunnen raken.

¹⁰ Gezien de lage drukken zijn de gevaren van vlammen/fakkels in woningen waarschijnlijk beperkt. Volgens (KIWA, 2018) zal waterstofverbrossing in de praktijk niet optreden.

Dit proces kan lange tijd duren, waarbij het zo kan zijn dat een brand geblust lijkt te zijn, maar na enige tijd toch weer opblaait, omdat het proces zich grotendeels onopgemerkt in het binnenste van de batterij afspeelt. Dit is met name het geval bij grotere systemen waarbij de thermische reactie zich van de ene naar de ander module verplaatst. Bij thuisaccu's is dit dan ook zeker een punt van aandacht.

Beheersmaatregelen

Al met al brengt de grootschalige introductie van lithium-ion batterijen een verhoging van het brandrisico in woningen met zich mee. Het is dan ook belangrijk om hieraan bij installatie en gebruik van batterijsystemen aandacht te besteden. Op basis van verschillende bronnen (IFV, 2021e, Solar-engineering, 2022; Risholt & Olsø, 2021) kunnen de volgende maatregelen worden voorgesteld:

- > Zorg voor rookdetectie en alarmering in de ruimte waar het batterijsysteem is geplaatst.
- > Zorg dat bij brand (of oververhitte batterijsystemen) vrijkomende rook niet in een vluchtroute terecht komt.
- > Plaats de thuisbatterij niet in een vluchtweg, indien mogelijk zelfs niet in de woning, maar in een van buitenaf benaderbare, externe ruimte. Let er wel op dat het systeem kan functioneren binnen de gebruiksspecificaties (de temperatuur bijvoorbeeld).
- > Zorg dat de ruimte waarin het batterijsysteem is geplaatst als zodanig te herkennen en ook goed bereikbaar is.
- > Zorg dat het systeem (op afstand) kan worden losgekoppeld van het elektriciteitsnet.
- > Houd brandbare materialen op voldoende afstand van het batterijsysteem of helemaal weg uit de ruimte waar het systeem is geïnstalleerd.
- > Zorg dat het Battery Management System (BMS¹¹) de gebruiker (of installatieverantwoordelijke) van de juiste informatie voorziet over het veilig in bedrijf zijn van de thuisaccu.
- > Voorkom dat beschadigde batterijsystemen of systemen waarvan de herkomst onduidelijk is (tweedehands bijvoorbeeld), worden geplaatst. Voorkom ook dat de batterijsystemen worden beschadigd.
- > Beperk de energie-inhoud van de aangebrachte systemen.¹²

Ook hier geldt weer dat installatie en onderhoud moeten worden overgelaten aan deskundige, erkende installateurs, die zich ervan hebben vergewist dat aan bovenstaande eisen is of kan worden voldaan en dat geschikte onderdelen (kabels, leidingen, schakelaars et cetera) worden gebruikt en op de juiste wijze worden geïnstalleerd.

¹¹ Het BMS zorgt ervoor dat het inwendige van de batterij stabiel blijft en kan suboptimaal werkende of defecte batterijcellen, -modules of -systemen uitschakelen. Ook kan het BMS waarschuwen voor een dreigende thermal runaway. Het BMS is het belangrijkste regel- en veiligheidssysteem van een Li-ion batterij. Bij een eenmaal werkend systeem kan het risico van een thermal runaway eigenlijk alleen worden beheerst door een goed werkend BMS.

¹² Een maximale energie-inhoud van 14 kWh wordt aanbevolen in Risholt & Olsø (2021). Dit is gebaseerd op een maximaal aanvaardbaar geachte hoeveelheid vrijkomende toxische gassen in een woning van 120 l bij brand van een lithium-ion accu.

2.4 Opwekking van energie via PV-systemen (zonnepanelen)

Brandveiligheidsissues

De oorzaken van brand van zonnepanelen liggen met name in een gebrekkig ontwerp (legplan), gebruik van inferieure materialen en gebrekkige uitvoering van een installatie (Brandweer Nederland, 2020). Zonnepanelen wekken niet alleen elektrische energie op, maar kunnen ook heet worden. Als de hitte niet kan worden afgevoerd, kan dit brand veroorzaken indien brandbare materialen in de buurt zijn. De elektrische systemen (met spanningen tot honderden volts en stromen van meerdere ampères) kunnen via kortsluiting en slechte verbindingen brand veroorzaken als gevolg van tekortkomingen zoals (IFV, 2021a; Brandweer Nederland, 2020):

- > Connectoren die niet goed op elkaar aansluiten of in water liggen.
- > Onvoldoende afstand (tussen zonnepanelen, tussen de zonnepanelen en het dak of tussen de zonnepanelen en de dakrand).
- > Beschadiging van kabels door bijvoorbeeld contact met scherpe voorwerpen, of door gebruik van te korte kabels.
- > De aanwezigheid van brandbaar (isolatie)materiaal in de nabijheid van zonnepanelen.

Verder kan brandoverslag optreden als (brandende) zonnepanelen losraken of door het dak zakken. Ze kunnen ook de brandweerinzet hinderen als de brandweer bijvoorbeeld toegang wil hebben tot het dak. Voor brandbestrijding en ook ter voorkoming van brandoverslag is het tevens belangrijk dat de brandweer beschikt over informatie ten aanzien van het aantal PV-panelen en vermogen ervan en de locatie van de omvormer en DC-schakelaar.

Bijzondere aandacht hierbij vraagt het in toenemende mate toepassen van zonnepanelen op buitenmuren (zie bijvoorbeeld (Soluxa, 2023)). In aanvulling op de hierboven genoemde risico's moet men beducht zijn op het "schoorsteeneffect" waarbij hitte en vlammen zich snel naar hoger gelegen etages kunnen verspreiden via de ruimte tussen de panelen en de muur, daarbij geholpen door, eventueel aanwezige, brandbare elementen van de op de buitenmuren aangebrachte PV systemen.

Beheersmaatregelen

Aanbevelingen en maatregelen hebben vooral betrekking op bovengenoemde factoren, dat wil zeggen: kwaliteitsborging van de componenten en installatie van PV-systemen. Ook hier geldt weer dat installatie moet worden overgelaten aan deskundige, erkende installateurs, die aandacht hebben voor bovenstaande punten (zie voor meer details Brandweer Nederland, 2020).

Literatuur

- AD, (2020). 'Winning van nieuwe energiebronnen als aardwarmte is niet zonder risico' | Den Haag | [AD.nl](#)
- Afif, A. et al., (2016). *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Vol. 60, 822-835, 2016.
- Allesoverwaterstof (2021). *LAVO introduces energy storage with hydrogen for home and office – All about Hydrogen* ([allesoverwaterstof.nl](#))
- Alliander (2022). *Lochem gaat op waterstof – Alliander*
- Arcadis Berenschot (2021). *Ketenstudie omgevingsveiligheid van duurzame waterstofrijke energiedragers, 4 oktober 2021.*
- Battolyser (2021). *Batterij en waterstoffabriek in één: is deze Nederlandse uitvinding de toekomst van energieopslag?* | [Change Inc.](#)
- Battolyser (2022). *News — BATTOLYSER SYSTEMS*
- Brandweer Nederland (2020). *Handreiking Risicobeheersing - ADVIES VEILIGE PV-SYSTEMEN*
- Bronkhorst (2021). *Gas flow meters voor waterstofopslag* | [Bronkhorst](#)
- Dens (2022). *DENS - DENS offers the solution for emission-free construction with generator*
- DWA (2020). *TKI-Urban-Energy-onderzoek-kleinschalige-opslag-def.pdf* ([dwa.nl](#))
- Duurzaam doen (2022). *Beste Warmtepomp | Duurzaam verwarmen en geld besparen! | 2022* ([duurzaamdoen.nl](#))
- Elestor (2023). *The Elestor Solution - Elestor*
- Eos (2021). *Home - Eos Energy Enterprises* ([eosenergystorage.com](#))
- Energie thuis (2021). *Thuis duurzame energie gebruiken* | [Energie thuis | Rijksoverheid.nl](#)
- Essent (2021). *Wat is een thuisaccu en hoe werkt deze met zonnepanelen?* | [Essent](#)
- Faradion (2023). *Home - Faradion en Will this CHEAP New Technology Solve Battery Shortages?! - YouTube*
- FME (2017). *FME-Visiedocument-Energieopslag-2017_Web.pdf* ([deingenieur.nl](#))
- Frontiers in Materials (2019). *Frontiers | New Approaches Toward the Hydrogen Production From Formic Acid Dehydrogenation Over Pd-Based Heterogeneous Catalysts | Materials* ([frontiersin.org](#))
- Fuelcellstore (1999). *How Do I Use My SOLID-H Metal Hydride?* ([fuelcellstore.com](#))
- Geothermie (2021). <https://geothermie.nl/>
- H2-platform (2018). *Brandstofcel die waterstof en elektriciteit produceert - opwegmetwaterstof.nl*
- H2-platform (2019). *Waterstofhuis op Goeree-Overflakkee* ([opwegmetwaterstof.nl](#))
- H2-platform (2021). *Kan ik zelf waterstof maken en opslaan? - H2Platform* ([opwegmetwaterstof.nl](#))
- Hitec (2022). *Hitec Power Protection | Continuous power in your control* ([hitec-ups.com](#))
- Hydrozine (2022). [hydrozine.nl](#)
- Hyundai (2021). *Fuel Cell Electric Vehicle – Hyundai Motor Group TECH*
- IFV (2021a). *Kennisbundel zonnepanelen.*

IFV (2021b). [Kennisbundel waterstof in de gebouwde omgeving](#).

IFV (2021c). [Waterstofauto's in parkeergarages](#).

IFV (2021d). [Brandveiligheid-parkeergarages-met-elektrisch-aangedreven-voertuigen-v2021](#).

IFV (2021e). [Veiligheidsprincipes kleinschalige EOS'en \(<20 kWh\) \(nipv.nl\)](#)

Innovationorigins (2022). [First ever UK aircraft with Sustainable Aviation Fuel takes flight - Innovation Origins](#)

Invinity Systems (2023) [Vanadium Flow Battery Energy Storage - Invinity](#).

IPPC (2021). [AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis](#).

KIWA (2018). [Toekomstbestendige gasdistributienetten](#)

KNMI (2015). [KNMI '14-klimaatscenario's voor Nederland; Leidraad voor professionals in klimaatadaptatie](#).

LAVO (2021). [Green Energy Hydrogen Battery by LAVO™ Australia](#)

LeydenJar (2022). [Learn about LeydenJar Technology \(leyden-jar.com\)](#)

LG (2021). [LG ESS Battery | Europe](#)

Loodaccu (2022). [Loodaccu - Wikipedia](#)

Milieucentraal (2022). [Warmtepomp: tips en stappenplan | Milieu Centraal en Aardwarmte: duurzame warmte uit de grond | Milieu Centraal](#)

Merck (2022). [Vanadium standard solution | 170245 \(merckmillipore.com\)](#)

Nature (2017). [Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires | Scientific Reports \(nature.com\)](#)

Natuur en milieu (2022). [Synthetische brandstoffen hebben de toekomst, maar alleen als we het direct goed aanpakken | Natuur & Milieu \(natuurenmilieu.nl\)](#)

Nawatechnologies (2021). [NAWATECHNOLOGIES - Innovations based on nanostructured materials](#)

Niemann, M., et al. (2019). [International Journal of Hydrogen Energy, Vol 4, 6631-6654, 2019](#)

NIPV (2021). [20210329-IFV-Kennisbundel-geothermie.pdf \(nipv.nl\)](#)

NIPV (2022a). [De doorwerking van de energietransitie op omgevingsveiligheid](#)

NIPV (2022b). [Duurzaam, energiezuinig, circulair en klimaat adaptief bouwen – De invloed op brandveiligheid](#).

NIPV (2023). [Scenarioboek Energietransitie – thuisbatterij \(v.a. juni 2023\)](#)

Northvolt (2021). [Systems | Northvolt](#)

Orange Climate (2022). [PCM als thermische accu Hoe werkt het?](#)

Panasonic (2021). [Hydrogen Fuel Cells for Heat and Electricity - Panasonic UK & Ireland](#)

Quantumscape (2023). [Building the Best Solid State Battery | QuantumScape](#)

Quinteqenergy (2021). [QuinteQ – Energy Storage \(quinteqenergy.com\)](#)

Redstack (2021). [REDstack Blue Energy Home](#)

Rise (2021). [Toxic Gases from Fire in Electric Vehicles \(diva-portal.org\)](#)

Risholt, B., Olsø, B. (2021). [Fire Safety of Norwegian Buildings with Lithium Ion Batteries for stationary energy storage, BOOK OF ABSTRACTS Nordic Fire and Safety Days 2021. Pp 65-66.](#)

Roth (2022). [Veiligheidsinformatieblad: Zwavelzuur \(carlroth.com\)](#)

Roth (2023) [Veiligheidsinformatieblad: Broomwaterstofzuur \(carlroth.com\)](#)

RS (2022). [The Complete Guide to UPS Power Supplies | RS \(rs-online.com\)](#)

Shell (2021). [Wereldprimeur: eerste passagiersvlucht met duurzame synthetische kerosine | Shell Nederland](#)

Sigma-Aldrich (2021). [Safety Data Sheet \(sigmaaldrich.com\)](#)

Solareis (2022). [Home | SolarEis](#)

Solar-engineering.nl (2022). [LinkedIn](#)

Soluxa (2023). [Soluxa Colored Solar Panels – Facade Solutions – Facade Solutions](#)

Stad aan 't Haringvliet (2022). [Primeur voor Stad aan 't Haringvliet: eerste woning verwarmd op waterstof - H2Platform \(opwegmetwaterstof.nl\)](#)

Tesla (2021). [Powerwall | Tesla Nederland](#)

H2PS (2021). [De unieke waterstofgenerator van Hydrogen Powered Solutions | Hydrogen Powered Solutions \(h2ps.nl\)](#)

TNO (2020). [Waterstof als optie voor een klimaatneutrale warmtevoorziening in de bestaande bouw](#)

TNO (2021). [Dé compacte warmtebatterij voor energieopslag thuis | TNO](#)

Topsector Energie (2022). [Pilot new technology for storing green energy - Topsector Energie](#)

Toyota (2021). [Toyota Fuel Cell Electric Vehicles | Toyota Europe \(toyota-europe.com\)](#)

Trendrapport (2021). [Verduurzaming - SBB \(s-bb.nl\)](#)

TTM (2020). [Linde wil Mercedes-Benz vloeibaar waterstof laten tanken • TTM.nl](#)

Urbanwind (2021). [Leidraad kleine windturbines voor de bebouwde omgeving](#)

VNCI (2021). [VNCI Koninklijke Vereniging van de Nederlandse Chemische Industrie - Artikel](#)

Voltachem (2017). [News | Driving on CO2: VoltaChem scales up sustainable production of formic acid - VoltaChem.](#)

Wagenborgen (2022). [WaterstofWijk Wagenborgen - Groninger Huis](#)

Watisduurzaam (2021a). [Tegenlicht over energieopslag: welke concepten gaan het maken? - Duurzaam energienieuws, WatisDuurzaam.nl](#)

Watisduurzaam (2021b). [Megafohn slaat windenergie op in gloeiend hete stenen - Duurzaam energienieuws, WatisDuurzaam.nl](#)

Waterstof Hoogeveen (2022). [Over Waterstof Hoogeveen - Waterstof Hoogeveen](#)

Waterstofnet (2021). [Use of hydrogen in buildings \(waterstofnet.eu\)](#)

Warmtebron Utrecht (2022). [Warmtebron Utrecht - Risico's en maatregelen](#)

Warmtepompincidenten, 2019, 2021, 2022:
[https://www.ad.nl/rotterdam/fikse-schade-aan-woning-nadat-warmtepomp-in-brand-vliegt~a96762c3/;](https://www.ad.nl/rotterdam/fikse-schade-aan-woning-nadat-warmtepomp-in-brand-vliegt~a96762c3/)
[https://www.ad.nl/amersfoort/warmtepomp-op-zolder-oorzaak-brand-nijkerk~aa5271cb/;](https://www.ad.nl/amersfoort/warmtepomp-op-zolder-oorzaak-brand-nijkerk~aa5271cb/)
<https://www.ed.nl/geldrop-mierlo-nuenen/brand-onder-dak-door-warmtepomp-in-gloednieuwe-woning-in-nuenen~a9083fa2/>

WWF (2020). [Living planet report 2020; Bending the curve of biodiversity loss.](#)

Zweden (2017). [A true pioneer goes off grid](#)

Zweden (2020). [Attentional hydrogen project in Vårgårda stopped - Teller Report](#)