

**VÄTGAS OCH SOLCELLER SOM
ENERGIKÄLLA FÖR FASTIGHETER**
EN SAMMANSTÄLLNING FÖR TEKNIKEN OCH DESS
ANVÄNDNING

Högskoleingenjörsutbildning i Energiteknik

Abdulaziz Almefrej
David Danninger



HÖGSKOLAN I BORÅS

Program: Energiingenjör

Svensk titel: Vätgas och solceller som energikälla för fastigheter

Engelsk titel: Hydrogen and solar cells as an energy source for properties

Utgivningsår: 2022

Författare: Abdulaziz Almefrej, David Danninger

Handledare: Johan Gustavsson, Abas Mohsenzadeh

Examinator: Abas Mohsenzadeh

Nyckelord: Vätgas, energilagring, bränslecell, elektrolysör, batteri, fastighet.

Sammanfattning

Vätgas har en potential som energibärare som har möjlighet att användas i fastigheter. Genom elektricitet och en elektrolysör kan vätgas utvinnas ur vatten för att sedan lagras i tankar. Vätgasen kan sedan passera genom en bränslecell för att generera elektricitet och värme. Genom att göra vätgas under sommarhalvåret när förnyelsebara energikällor som solkraft producerar som mest effekt kan vätgas produceras och lagras till vinterhalvåret. Under vinterhalvåret kan vätgasen användas som ett energilager som förser systemet med el. Att använda ett vätgassystem ger förmågan att självförsörja fastigheter med förnybar energi. Flera projekt som använder tekniken undersöks och riktvärden för att möjliggöra dess användning i fastigheter tas fram. Tekniken bedöms vara potentiellt användbar med dyr och tekniskt utmanande men med en stor utveckling på gång.

Abstract

Hydrogen can be used as an energy carrier with potential in buildings and households. Hydrogen gas can be extracted from water by an electrolyser and then stored in tanks. When needed, the hydrogen gas can then be converted by a fuel cell to electricity and heat. During the summer, when renewable energy sources such as solar power produce extra power, hydrogen can be produced and stored. During the winter, the hydrogen gas can be an extra energy source that supplies the system. Using a hydrogen system is an important step towards having households with self-supply of renewable energy. In this work, several projects that use this technology are investigated and guideline values for presuming its use in real estate are developed. The technology is considered to be potentially useful. However, it is expensive and technically challenging with major developments underway.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1 INLEDNING	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	3
2 Material och Metod	3
3 TEORI	3
3.1 Vätgas	3
3.2 Bränsleceller	5
3.3 Solceller	8
3.4 Elektrolysör	9
3.5 Batterier	11
3.5.1 Bly-syra batterier	11
3.5.2 Litium-jon batterier	12
3.6 Vätgaslagringssystem	13
4 Resultat	14
4.1 Hans-Olof Nilssons Off-grid hus	14
4.1.1 Husets elektricitet	14
4.1.2 Vätgas lagring, produktion och konsumtion	15
4.1.3 Elsystemets övervakning	15
4.1.4 Styrningen av vatten och klimat	15
4.1.5 Riskhantering	16
4.1.6 Ekonomi	17
4.2 Zero Sun	17
4.3 Kronoparkens förskola	18
4.4 Sjöbohem Hydrobust	18
4.5 E2B2 självförsörjande bostadshus simulering	19
4.6 Beräkningar på vätgaslagringssystem	19
4.6.1 Beräkningar på icke eluppvärmd villa	20
4.6.2 Beräkningar på eluppvärmd villa	23
4.6.3 Slutsatser från undersökta projekt och beräkningar	25
5 DISKUSSION OCH ANALYS	26
5.1 Hur fungerar vätgasproduktion och lagring med hjälp av solceller i en fastighet?	26
5.2 Hur ser möjligheten ut för att använda tekniken utifrån tekniska förutsättningar?	27
5.3 Hur ser möjligheten ut för att använda tekniken utifrån ekonomiska förutsättningar?	28
6 SLUTSATS	29
REFERENSER	30
Bil.1 Svenska Kraftnät rapport 2021, Elpriser	
Bil.2 Svenska Kraftnät rapport 2021, Prognos Kraftbalans 2021-2024	

1 INLEDNING

Omställningen till hållbar energi och ett fossilfritt samhälle har varit pågående i årtionden. Men ett återstående problem som hållbara energikällor har är den bristande lagringsförmågan. Kolväten som olja och naturgas i form av vätska och gas har förmågan att lagras och användas vid behov, medan fossilfria energikällor från vind, sol och vatten genereras som elektricitet. Nackdelen med direkt elektricitet är att om behov för elektriciteten inte existerar när den kan genereras går den till spillo. Medan kolväten kan lagras tills behovet uppkommer och kan vid förbränning generera el eller värme för att täcka behovet.

Detta kombinerat med det relativa överflödet av billiga kolväten har gjort att utfasningen av fossila kolväten för förbränning till en långsam process. Alternativ till kolväten som kärnkraft, vindkraft och solkraft har ifrågasatts över dess förmåga till att försäkra energiförsörjningen och deras kostnad. Att balansera energibehovet av befolkningen samtidigt som en utfasning av det mest tillförlitliga energikällorna sker har inte varit enkelt för många länder.

En potentiell lösning som har börjat bli mer och mer attraktiv är energilagring genom vätgas. Vätgas är en kemisk förening av två väteatomer (H_2) som är det vanligaste grundämnet i naturen och förekommer främst i molekylerna för vatten och kolväten. Vätgas kan dock framställas från vatten med elektricitet i en process som kallas elektrolys. Därefter med hjälp av en teknik kallad bränsleceller kan vätgasen kombineras med syre för att bilda vatten och elektricitet. Så idén är att använda den oanvända elektriska energin genererad av fossilfria källor till att tillverka vätgas, för att använda vätgasen som ett lagringsbart bränsle. Detta skulle resultera i ett fossilfritt framställt bränsle vars användning skulle endast ge restprodukten vatten.

Det finns flera möjligheter och begränsningar med tekniken och i detta arbete undersöker vi några av dessa för att försöka identifiera hur och vart tekniken skulle kunna implementeras.

1.1 BAKGRUND

Energipriserna har stigit drastiskt på senare år och det är till stor del från händelser i omvärlden (Teknikföretagen 2022). Medelpriserna för el höjdes från 26 euro/MWh till 39 euro/MWh mellan vintern 2019/2020 och 2020/2021, en ökning på 50% (Svenska Kraftnät 2021) vilket kan ses i bilaga 1. Förmågan för det svenska elnätet att försörja landet med effekt är bristande, under vintern 2021/2022 uppskattades det att 1600 MWh/h effekt skulle saknas från den svenska produktionen se tabell 1 nedan. Bristen på effekt är dock inte i hela Sverige utan främst lokaliserad i södra Sverige. I norra Sverige där den största produktionen av elkraft ligger finns ett överskott och Sverige är en exportör av elkraft större delen av året (Ekonomifakta 2021).

Tabell 1. Prognos för effektbalansen per elområde under vintern 2021/2022. Data från Svenska Kraftnät och sammanställd av Ekonomifakta.se.

Elområde	Normalvinter [MWh/h]	Tioårsvinter [MWh/h]	Tjugoårsvinter [MWh/h]
1 Luleå	3200	3100	3100
2 Sundsvall	4400	4300	4200
3 Stockholm	-6200	-7000	-7300
4 Malmö	-3000	-3200	-3300
Summa	-1600	-2800	-3300

Problemet ligger i att överföra den nödvändiga effekten från norr till söder har börjar bli problematisk. Med ett åldrande och begränsande stamnät kan inte alltid tillräckligt med effekt överförs över nätet dit den behövs (Svenska Kraftnät 2020).

Samtidigt har marknaden för energiteknik förändrats mycket det senaste årtiondet. Solcellsinstallationer har ökat kraftigt, speciellt de senaste åren med en ökning på 500 MW under 2021 vilket representerar en ökning på 46% från 2020. Den totala installerade solpanelseffekten i Sverige uppgår våren 2022 till nästan 1,6 GW (Energimyndigheten 2022). Elbilsägande har också skjutit upp kraftig dom senaste åren. Mellan våren 2021 till 2022 ökade laddhybrider och elbilar med 58% och våren 2022 utgör laddbara bilar 6% av personbilar i Sverige (Power Circle [2022-04-26]). En stor effektökning sker också i industrin där elektrifieringen har tagit fart för att fasa ut fossila bränslen (Svenska Kraftnät 2021) vilket påpekas i bilaga 2.

Problemet som har uppstått är att energibehovet har ökat snabbare än kapaciteten av kraftnätet. Därför finns behovet av nya energisparande och effektiviserings lösningar för både kraftnätet och användare, vilket kan minska belastningen för nätet och för att spara pengar för användare (Vätgas Sverige 2016).

En av de möjliga lösningarna till problemet är vätgas. Väte bildar naturligt en gas som har en stor energipotential i dess kemiska bindning. Genom att oxidera vätgas antingen genom förbränning eller bränsleceller kan energin i gasen frigöras. Vätgas framställs främst genom en teknik som kallas elektrolys vilket kräver elektricitet, så till skillnad från sol- vind och vattenkraft är det ingen energikälla som kan nyttjas för att öka vår användbara energimängd. Vad vätgas istället kan användas till är som ett energilager, alltså ett bränsle. Sol och vindkraft som båda är centrala i utvecklingen av förnybara energikällor genererar energi när solen skiner och vinden blåser, men det är inte nödvändigtvis då som effekten dom producerar behövs. Dessutom när vintern kommer och behovet för energi i form av värme är som högst är sol- och vindkraft som minst effektiva på grund av vinterklimatet. Möjligheten att spara på den oanvända förnybara effekten genererad under sommarhalvåret och spara denna till den kalla vintern vore ett steg mot att både minska effekt överföringen för kraftnätet och att öka användningsområdet och värdet på förnybara energikällor (Rise 2019) (Vätgas Sverige 2016).

Användningen och utvecklingen för vätgaslagring pågår i flera olika sektorer såsom fordon och industrier. För detta arbetet undersöks användningen och tekniken för fastigheter, främst mindre bostadshus, kontor och villor. Med det utbredande ägandet av privata solcellspaneler

och elbilar finns förhoppningsvis intresset och möjligheten att småskaliga lokala energilösningar har potentialen att bidra till den nationella och globala energiomställningen.

1.2 SYFTE

Att redogöra om tekniska och ekonomiska förutsättningarna för energilagring med vätgas i fastigheter.

Frågeställning

1. Hur fungerar vätgasproduktion och lagring i en fastighet?
 - a. Vilka komponenter ingår i ett sådant system?
 - b. Vad är fördelarna och nackdelarna med systemet?
2. Hur ser möjligheten ut för att använda tekniken utifrån tekniska förutsättningar?
 - a. Hur mycket vätgas krävs för att försörja en fastighet med el?
 - b. Hur mycket solceller krävs för att försörja ett vätgaslagringssystem?
3. Hur ser möjligheten ut för att använda tekniken utifrån ekonomiska förutsättningar?
 - a. Vad kostar ett vätgaslagringssystem för en fastighet?
 - b. Hur lång tid tar det för ett vätgaslagringssystem att betala tillbaka investeringen?

2 MATERIAL OCH METOD

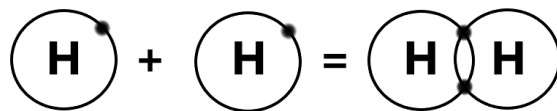
För att besvara frågeställningen undersöktes litteratur och hemsidor inom energiteknik för att ge en förståelse för tekniken och dess användning. För att förstå de tekniska förutsättningarna undersöktes teoretiska och pågående vätgas och energilagringssystem med ett fokus på arbeten i Sverige. Personer med erfarenhet i tekniken rådfördes också i mejl och intervjuer.

3 TEORI

För att undersöka vätgasens möjligheter och begränsningar i energitekniken följde en grundläggande undersökning av vätgas och tekniken som användas för försörjningen av en fastighet. Vätgaslagring kan också användas i samband med andra energibesparande åtgärder, såsom värmelagring, men fokuset för arbetet är på tekniken som ett vätgaslagringssystem till eldrift behöver för att fungera.

3.1 Vätgas

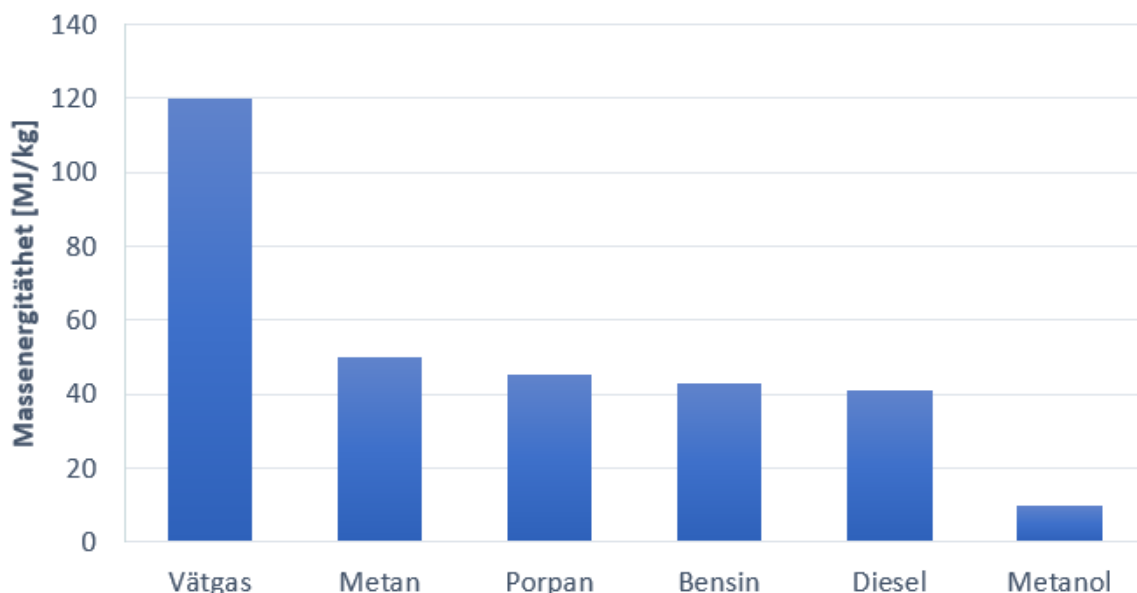
Enligt Hans Borén (2011, ss. 92-93, 181, 231-232) är väte universums lättaste atom bestående av endast en proton och en elektron och betecknas som H. Väte bildar naturligt molekylerna vätgas H_2 . Bindningen är kovalent, där atomernas valenselektroner i elektronskalen delas mellan atomerna och bildar en ädelgasstruktur enligt figur 1 nedan.



Figur 1. Illustration av vätgasens molekylstruktur. (Borén 2011 s. 92).

Väte på jorden hittas dock sällan i sin gasform, utan förekommer vanligast bunden till vatten H₂O eller kolväten som t ex metan CH₄. Vätgas kan omvandlas till en vätska vid -253,81°C. Kokpunkten kan höjas med tryck men når en kritisk punkt vid 13 bar där kokpunkten är 240°C och inte kan påverkas av högre tryck. Vätgas som produceras delas grovt in i 3 kategorier, grå, blå och grön vätgas. Grå vätgas produceras genom en kemisk reaktion med metan från fossila resurser som kräver en hög temperatur och har en stor mängd koldioxid som restprodukt. Blå vätgas är producerad på samma sätt dock med koldioxidinfångning med i processen för att orsaka mindre utsläpp. Grön vätgas är fossilfri och produceras genom en process som kallas elektrolys som beskrivs i kapitel 3.4 (Naturskyddsföreningen 2021). Vätgas är inte biologiskt farlig och läckage kan inte skada människor eller natur. Vätgas är dock högst brandfarligt och vid 18-60% koncentration blandat med syre också explosivt. Energiinnehållet i vätgas är ungefär 120 MJ/kg, vilket är markant högre än innehållet i metanol på runt 10 MJ/kg eller diesel på 40 MJ/kg vilket kan ses i figur 2 nedan (Solar HydroGenesis AB [2022-05-05]).

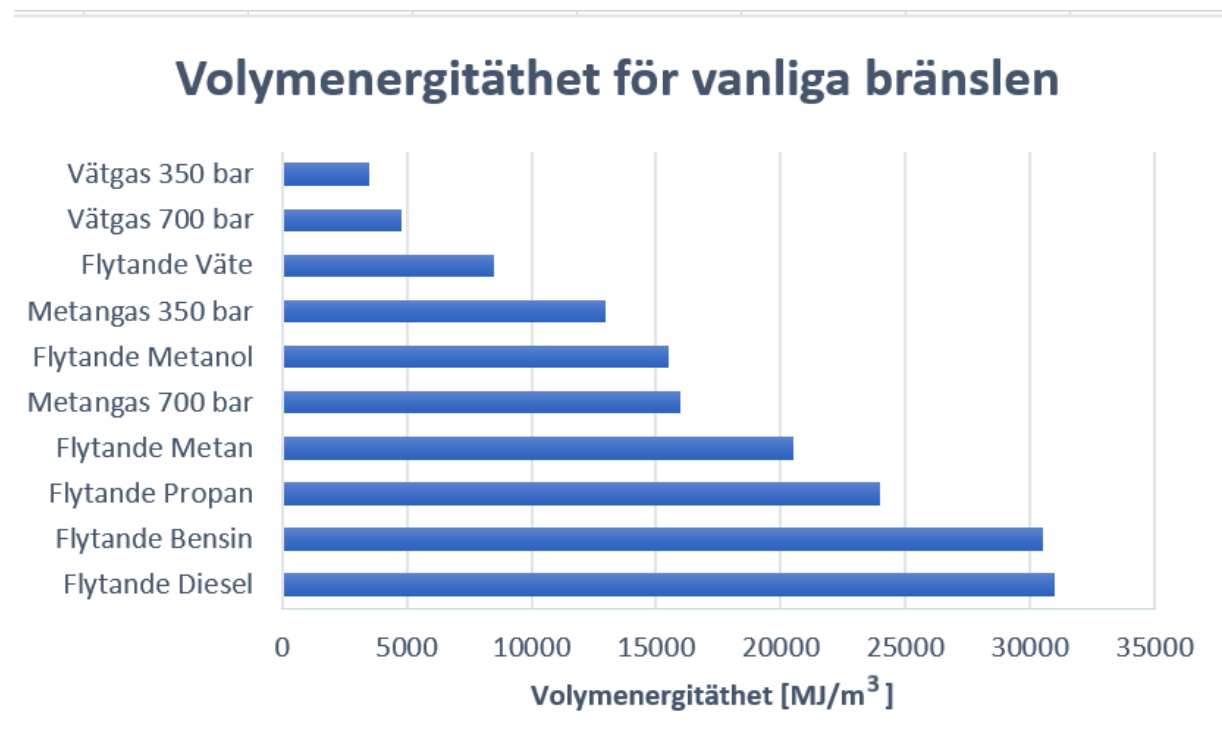
Massenergitäthet för vanliga bränslen



Figur 2. Stapeldiagram över Energidensiteten per massenhet för diverse bränslen (Hydrogen Storage 2003).

Vätgas har dock en låg densiteten även för en gas på 0,08988 g/dm³ vilket är 7% av luftens densitet och är därför högst flyktig. Detta utgör en av dom stora svårigheterna med vätgas som bränsle eftersom det gör att ett högt tryck är nödvändigt för att få en betydande mängd av vätgas i en behållare av rimlig storlek. Med standard gasbehållare på 350 och 700 bar är

energiinnehållet för vätgas lägre än naturgas och mycket lägre än flytande kolväten i energiinnehåll per volymenhet vilket kan ses i figur 3 (Hydrogen Storage 2003).



Figur 3. Stapeldiagram över Energidensiteten per volymenhet för diverse bränslen och tryck (Hydrogen Storage 2003).

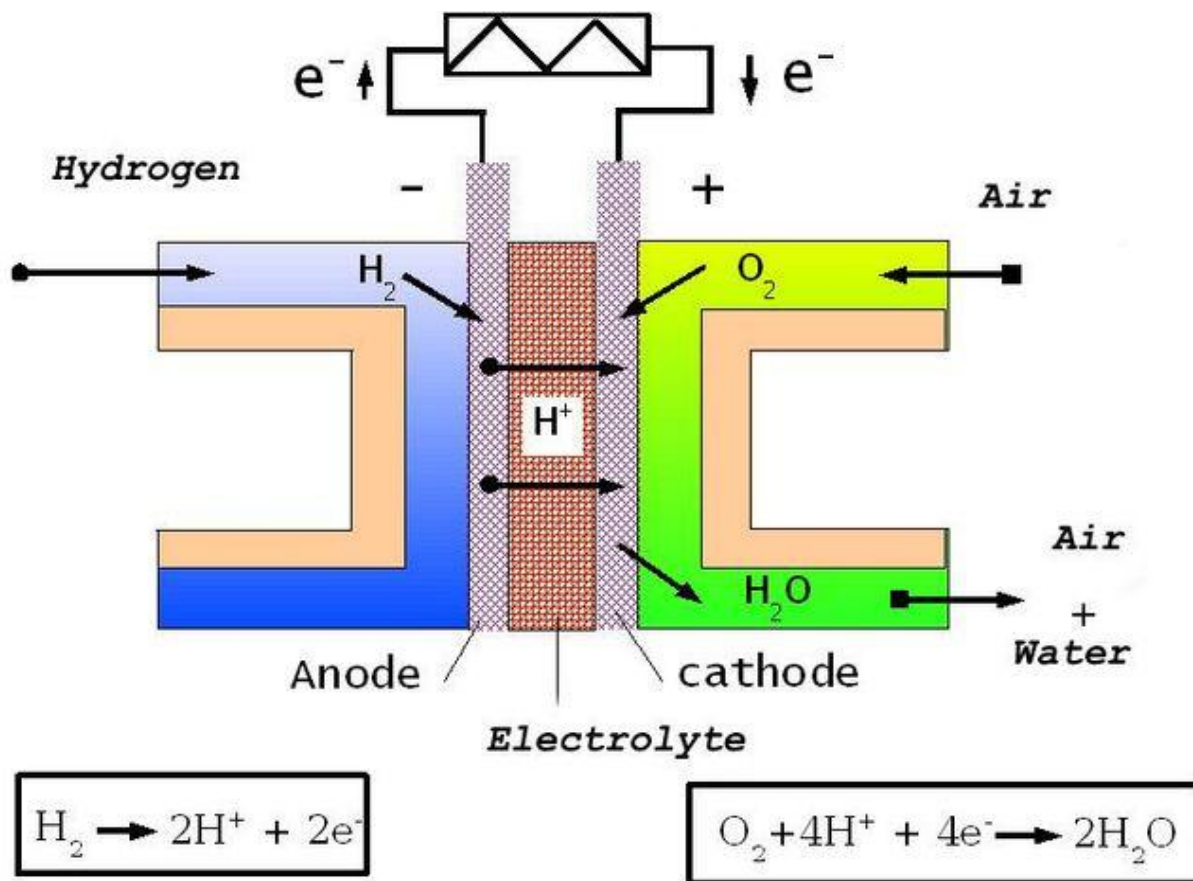
Vätgas har en stor en användning inom industri. Vätgaslagringen i industrin går genom säkerhetsbedömningar och trycktankarna är försedda med smältsäkringar som gör att vätgas släpps ut säkert i en öppen omgivning.

För nutiden finns inget uppenbart säkerhetsperspektiv till att visa metoden på att bygga en vätgasanläggning. Gamla certifieringar har allmän information om hantering av gas och inte vätgas. Det krävs större utveckling och kunskap på att bygga en sån anläggning på säkert sätt. Tyvärr så finns inte med vätgasen i regeringens standardiseringsstrategi och därför bör det skyndas med att ge tillstånd till certifieringar och branschstandarder.

Politiken behöver mer hjälp och forskning inom detta område för öka säkerhet och övervakning med vätgasens effekter på samhället och arbetsmarknaden
Mortgage-backed security måste under året 2021 ge allmänt tips och rådgivning om hantering av vätgas till folk och speciellt räddningstjänsten (Karin Lindström, Diar Balata, Agneta Persson, Anthesis, Bosse Wikensten och Aktea Energy 2021).

3.2 Bränsleceller

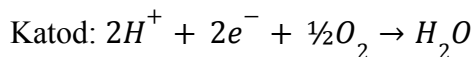
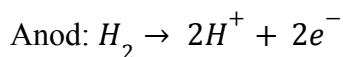
Bränsleceller är ett gemensamt namn för en teknik som genom en elektrokemisk process oxiderar ett vätebaserat bränsle. Bränsleceller drivs av vätgas eller ämnen som vätejoner (protoner) kan utvinnas ur. Nedan i figur 4 visas ett typexempel på hur en PEM (Proton Exchange Membrane) bränslecell driven på ren vätgas fungerar.



Figur 4. Illustration av en schematisk bränslecell där vätgas oxideras till vatten med engelska namn på komponenterna (Wikicommons [2022-04-17]).

Figuren visar ett inflöde av vätgas och ett inflöde av syrgas separerat av en elektrolyt; ett ämne som tillåter passagen av protoner med är isolerande för elektroner. På vätgasens sida av cellen finns ett katalytiskt ämne som separerar elektronen från protonen i vätet. Protonen kan sedan färdas över elektrolyten medan elektronen måste färdas genom en ledning vilket orsakar en ström. När protonerna når katoden återförenas protoner och elektroner och bildar tillsammans med syret vatten och en mängd värme, se figuren nedan.

Kemiskt kan reaktionen beskrivas som:



Total reaktion: *Vätgas + Syre → Vatten + Elektricitet + Värme*

Fördelen med bränsleceller över vanlig förbränning är att dom producerar elektrisk energi direkt och inte är begränsade av Carnot-faktorn där temperatur avgör verkningsgraden. Den ideala elektriska verkningsgraden för en bränslecell är 83%. Detta kan avgöras eftersom att en bränslecells effektivitet teoretiskt är den frigjorda energin (Gibbs fria energi) ΔG^0_f omvandlad till elektricitet vid reaktionen delat med entalpiskillnaden ΔH^2 mellan molekylerna per mol vid 25°C och atmosfärstryck:

$$\eta = \frac{\Delta G_f^0}{\Delta H^0} = \frac{237.1 \text{ kJ/mol}}{286.0 \text{ kJ/mol}} = 83\%$$

Med en ideal spänning från en individuell bränslecell på 1,23 V kan spänningsverkningsgraden för en bränslecell beräknas som:

$$\eta_{\text{spänning}} = \frac{U_{\text{cell}}}{1.23} \times 100\%$$

I verkligheten är verkningsgraden för en bränslecell mellan 45-70% och spänning på 0,5 – 1,0 V med resterande effekt avgiven i värme. För att uppnå en högre spänning behövs flera bränsleceller i seriekoppling. (Beckman 2005 ss. 271 – 273). Bränsleceller varierar i dess konstruktion men är främst definierad av elektrolysören och temperaturen/trycket som krävs för reaktionen. Temperaturen bränsleceller kräver kan variera mellan 50 – 900°C och trycket mellan atmosfärstryck (1 bar) och 80 bar. (Lrf [2022-04-20]). Den totala effektiviteten av en cell avgörs också av hur mycket av bränslet (vätgasen) som reagerar i cellen jämfört med hur mycket som passerar igenom cellen. Bränsleanvändningskoefficienten blir därför:

$$\mu_f = \frac{\text{massan av bränsle som reagerar i cellen}}{\text{massan av bränslet som passerar genom cellen}}$$

Den totala verkningsgraden för en bränslecell kan då beräknas som (Electrochemistry Encyclopedia 2011):

$$\eta_{\text{cell}} = \mu_f \times \frac{U_{\text{cell}}}{1.23} \times 100\%$$

På den kommersiella marknaden kan främst två typer av elektrolysörer i bränsleceller hittas. Den enklare och kompaktare av bränslecellerna är dom av PEM typen (Proton Exchange Membrane), även kallat polymerelektrolyt bränslecell. Den andra är alkaliska typen som är en äldre teknik med längre livslängd och lägre kostnad (Lrf [2022-04-20]). Det finns också andra typer av bränsleceller såsom Direktmetanolbränslecell, Smältkarbonatbränsleceller, Fosforsyrabränsleceller, Polymerelektrolytbränsleceller och Fastoxidbränsleceller.

PEM bränsleceller har flera fördelar som gör dom till dom vanligaste och mest användbara bränslecellerna till småskaliga effektproduktion. Som att dom är kompakta och väger så lite som 30 gram, att dom fungerar under en relativt låg temperatur på under 90°C och eftersom dom kan använda ren vätgas som bränsle har dom potentialen att vara helt utsläppsfria.

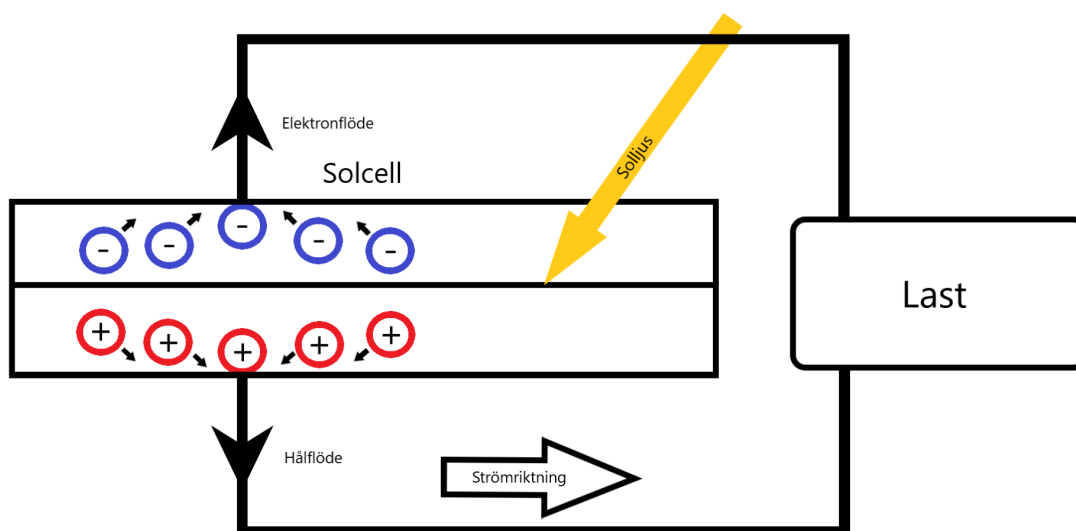
Platina är katalysatorn som används främst i PEM bränsleceller. Katalysatorn orsakar uppdelningen av vätet och syret i anoden och katoden respektive. Vätgasen atomer delas relativt enkelt men syret är svårare och orsakar betydande förluster i processen. Den andra stora förlusten i processen är membranets motstånd mot protonernas flöde. För att minska detta används mycket tunna membran på ungefär 50 µm. PEM bränsleceller degraderas också med användning, främst i avseende på katalysatorn och membranet och har en livslängd på ungefär 90 000 timmar vilket är 10 år (Solar HydroGenesis AB [2022-05-05]) (Electrochemistry Encyclopedia 2011).

3.3 Solceller

Solceller ger kraften till vätgassystemet då det är den vanligaste tekniken för förnyelsebar energi som individuella fastigheter kan driva. Solceller omvandlar energin i solstrålningen med hjälp av ett halvledarmaterial, vanligtvis kisel och omvandlar den till el. Det bildas en elektrisk spänning mellan fram och baksidan av solcellspanelen när solen skiner på solcellen. Elektrisk ström uppstår när elektronerna börjar röra sig från den ena till den andra sidan genom att koppla ihop fram och baksidan med en elkabel enligt figuren nedan.

Flera solceller bildar en solpanel och flera solpaneler placeras ofta på tak och används som strömkälla till byggnaden. En seriekoppling på solcellerna ökar spänning medan en parallellkoppling ökar strömmen. Solcellerna funkar bäst under sommaren då är solen som starkast och minst under vintern. (Naturskyddsföreningen 2022-03-23).

Solceller bygger på fenomenet att elektroner kan exciteras av ljus (fotoner). När detta sker i ett halvledarmaterial skapas laddningsbärare av elektroner och 'hål' (saknade elektroner). Dessa separeras av energibarriärer av elektricitet vilket orsakar att den absorberade fotonenergin lagras som spänning i laddningsbäraren. När en yttre krets läggs till kan elektrisk energi utvinnas enligt figur 5 nedan. En typisk kiselcell kan avge en spänningen på 500 – 600 mV med kortslutningsströmtätheten på ungefär 30 mA/cm² (Beckman 2005 ss. 278-279).



Figur 5. Diagram över en solpanel. (Wikicommons [2022-05-22])

Strömmen genererad av en solcell är likström, och för att användas som hushållselen i eluttagen måste strömmen passera en växelriktare för att omvandla strömmen till växelström. Strömmen fördelas därefter av en elcentral till fastighetens eluttag och oanvänd el produceras skickas den ut i elnätet för att användas där det finns behov (Hemsol 2021-11-11).

Effekten från en solcellspanel varierar baserat på geografiska faktorer som årlig solinstrålning på platsen och skuggning från omgivningen. Effekten från solpanelerna påverkas också med vinkeln mot solen, både horisontellt och vertikalt. Optimalt är den vertikala vinkeln 35–50° och sydlig riktning om solcellen inte kan rotera för att följa solens bana. Dessutom behöver den årliga snötäckningen av solpanelerna och eventuell nedsmutsning tas till hänsyn (Bengts villablogg [2022-05-03]).

Enligt hemsidan Hemsol (2021-11-04) så genereras i Sverige genomsnittligen årligen 800 – 1100 kWh per installerad kW effekt (även kallat peak effekt). En genomsnittlig solcellsanläggning på 9,2 kWp (kilo Watt peak) genererar då alltså 7360 – 10120 kWh per år. 65 – 70% av all sol produceras mellan april och augusti och under vintermånaderna minskar produktionen markant. Den årliga solinstrålningen i Sverige varierar mellan 1200 kWh/m² och 800 kWh/m² med störst instrålning i söder och minst i norr. Verkningsgraden för en solcellspanel är i praktiken 20 – 23% men kan under kontrollerade förhållanden i tester uppnå 40%. En genomsnittlig solpanel installerad med riktning söder och en god vinkel och 20% verkningsgrad kan antas ge ungefär 200 kWh/m² i genomsnitt.

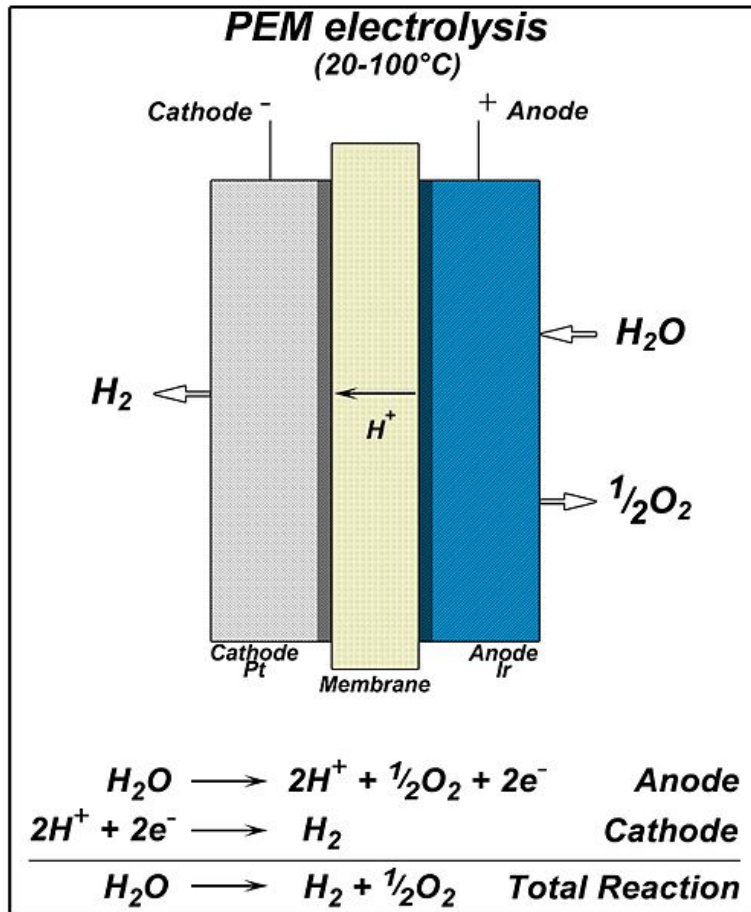
En vanlig solcellsinstallation i Sverige har en peakeffekt på 5 – 15 kW och tar upp en yta på 25 – 75m². För större solpanelsinstallationer på över cirka 11 kW behöver huvudsäkringarna på 16A i vanliga bostadshus antingen ökas eller växelriktaren underdimensioneras för att inte bryta säkringen (Solcellskollen 2021-07-07). En vanlig villa använder drygt 20 000 kWh per år men om värmen inte är eldriven utan kommer från fjärrvärme eller annan källa är användningen runt 5 000 kWh per år. Större lägenheter drar också 5 000 kWh årligen och små lägenheter drar ungefär 2 000 kWh (Konsumenternas Energimarknadsbyrå 2021-09-20).

Brandskyddsmyndigheterna är mer oroliga vid bränder som drabbar hus som har solceller på taket. Huset fortsätter att få elektricitet även om man slår av huvudströmbrytaren. Dessutom att gasen som finns i batterierna är ännu farliga vid bränder för de är svåra och riskfyllda att släcka (Karin Lindström, Diar Balata, Agneta Persson, Anthesis, Bosse Wikensten och Aktea Energy 2021).

3.4 Elektrolysör

Elektrolys är en metod för att separera molekylers atomer från varandra genom att använda elektricitet. För ett vätgaslagringssystem är elektrolys nödvändigt eftersom det används för att utvinna vätgas ur vatten. En vätgaselektrolysör producerar vätgas är genom att sära på syre- och väteatomerna i vatten H₂O vilket bildar syrgas O₂ och vätgas H₂ (Electrochemistry Encyclopedia 2015).

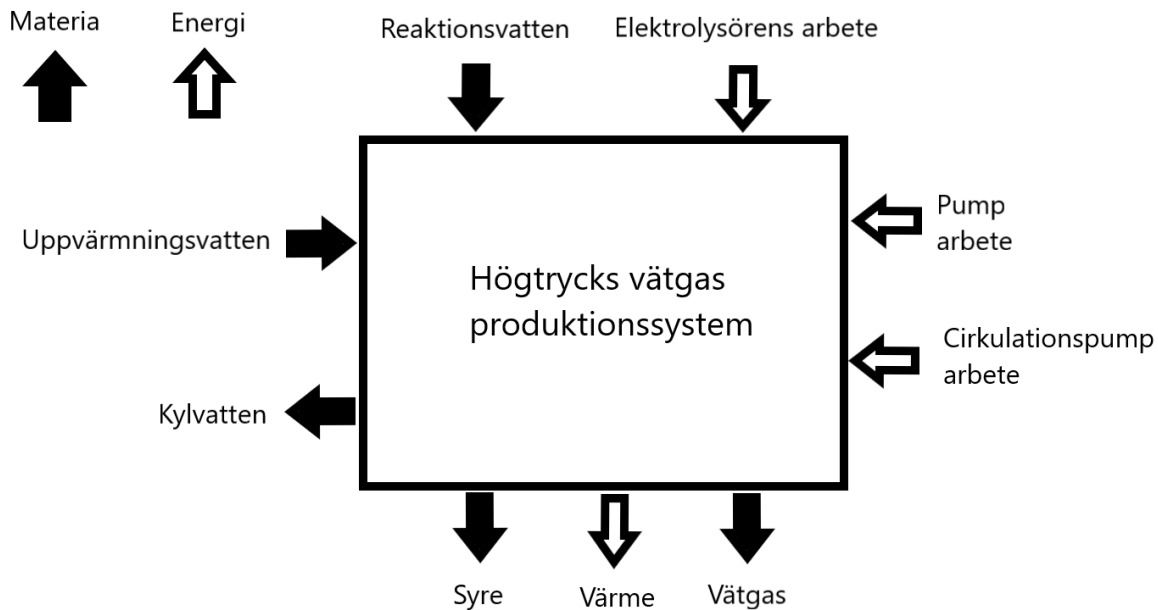
Tekniken fungerar genom att vatten delas upp i beståndsdelarna väte och syre med hjälp av en platina som är en väldigt effektiv katalysator. Därefter separeras väteatomerna och syreatomerna med hjälp av en spänning som läggs över ett angränsande membran, som är själva elektrolyten. Elektrolyten är ett elektriskt ledande material som endast tillåter joner att passera, vilket används för att separera ämnena från varandra och förhindrar att syret och vätet återförenas till vatten. Spänningen är nödvändig för att driva processen och orsakar splittringen med hjälp av katalysatorn, se figur 6 (Borén 2011 ss 271-273). Elektrolysörer för vätgas kan konstrueras med olika elektrolyter, men främst används polymerelektrolyt membran (PEM), alkalimetaller och keramiska material. Reaktionen kräver också en förhöjd temperatur, med lägre värden för PEM elektrolysörer på 70-90°C, mindre än 100°C för många alkaliska varianter och upp till 800°C för keramiska elektrolysörer. (U.S, Department of Energy [2022-05-05]). Figur 6 visar en PEM elektrolysör och reaktionen i anoden och katoden.



Figur 6. Flöden och reaktion i en PEM elektrolysör (Wikicommons [2022-04-19]).

Hela processen är klimatvänligt om elen som används i elektrolysen är fossilfri. Mellan 20 till 30% av processens energiinnehåll förloras i form av värme vid förvandlingen från vatten till vätgas, vilket orsakar lägre verkningsgrad. Utvecklingen pågår med att minska denna förlust till mellan 14 och 18 procent år 2030 (Uniper [2022-04-17]).

För ett elektrolysörsystem krävs vattenflöden för uppvärmning och nedkylning som krävs vid processen genom värmeväxlare. Figur 7 nedan visar ett exempel på hur ett elektrolysörsystem kan vara uppbyggt.



Figur 7. Flödesschema för ett högtrycks vätgas produktionssystem (Inac, Midilli, Dincer 2014 s. 17).

Vätet producerat från elektrolysörer lagras i vätgastankar. Vätgas kan lagras som en gas eller vätska, men då vätskeformen kräver avancerade kylteknik är det enklare med gaslagring. Vätgas producerad för fastigheter eller fordon använder främst standardvärdena 350 eller 700 bars lagringstryck. (Solar HydroGenesis AB [2022-05-05]).

3.5 Batterier

Enligt Batteriexperten Europe AB (2022) är ett batteri "... en anordning som omvandlar kemisk energi direkt till elektrisk energi genom en elektrokemisk reaktion". Batteriet är ett kemiskt energilager. När en last kopplas på börjar anoden oxideras och positiva joner släppas ut i elektrolyten som separerar anoden och katoden och ett överskott av elektroner bildas i anoden. Batteriet blir obalanserad och elektronerna färdas ur cellen, genom lasten i elkretsen och sen till katoden i batteriet. Denna situation fortsätter fram tills att Laddningsskillnaden mellan de två polerna är nästan noll, det vill säga tills den potentiell jämvikten mellan polerna nås av batteriet. Laddningsbara batterier kallas för sekundära och icke laddningsbara kallas för primära. I denna process är upprepad energilagringen viktig och därför används sekundära batterier (Batteriexperten 2022).

3.5.1 Bly-syra batterier

Den längst utvecklade batteritekniken och har funnits mer än 150 år. Typen används väldigt ofta till fordons. Batteriets delar består av pluspolen av blyoxid, minuspol av svampbly och elektrolyt som är uppbyggt av svavelsyra och destillerat vatten. Svampblyet blir anod vid urladdningen, alltså den får oxidation och lämnar från sig elektroner samtidigt skapas blyulfat när den reagerar med svavelsyran. Elektronerna går vidare till lasten och senare till batteriets katod, alltså pluspolen. Vid katoden sker en reaktion mellan vätejoner, blyoxiden och sulfatjonerna som resulterar i blyulfat och vatten. Det vattnet som bildats späder ut elektrolyten och densiteten sjunker. När en laddning sker vänder processen om vilket gör att densiteten sjunker ner igen och sulfaten befrias till elektrolyten. Därmed under laddningen så omvandlas minuspolen till katod och blyulfaten blir sulfatjoner och bly. Den maximala

syravikten vid fulladdade batterier minskar med tiden. Batteriets kapacitet minskar på grund av den ständiga bindningen mellan elektrolytens sulfat och metallplattorna (Nilsson 2017).

Fördelar med bly-syra batterier:

- Enkelt att tillverka.
- Klarar tuffa krav på i och urladdningar.
- Behöver inga säkerhetsanordningar.
- Låga självurladdningar och underhållskostnader.
- snabb urladdningshastighet vid behov av effekt under kort tid.

Nackdelar med bly-syra batterier:

- Urladdningsdjupet ligger på 20%.
- Låg energidensitet.
- Går ej att förvara i urladdat läge.
- Bestämda antal urladdningscykler.
- Farligt innehåll av bly.

3.5.2 Litium-jon batterier

Har haft den bästa utvecklingen av kapacitet bland batterier de senaste åren. Den består av en negativ elektrod som är gjord av grafit, den positiva av metalloxid och litium samt elektrolyten av litiumpolymer eller litiumkarbonat. litiumjonerna kan röra sig fritt på båda elektrodernas struktur. Det skapas litiumförening genom elektrolyten när litiumjonerna går från den negativa elektroden till den positiva under urladdning. Tvärtomt under laddning så får elektronerna ett högre energitillstånd när de går tillbaka till den negativa elektroden (Nilsson 2017).

Fördelar med litium-jon batterier:

- Har en låg energiurladdning och underhållskostnader
- Prisutvecklingen
- Hög energitäthet
- Liten installationsyta
- En lång livslängd

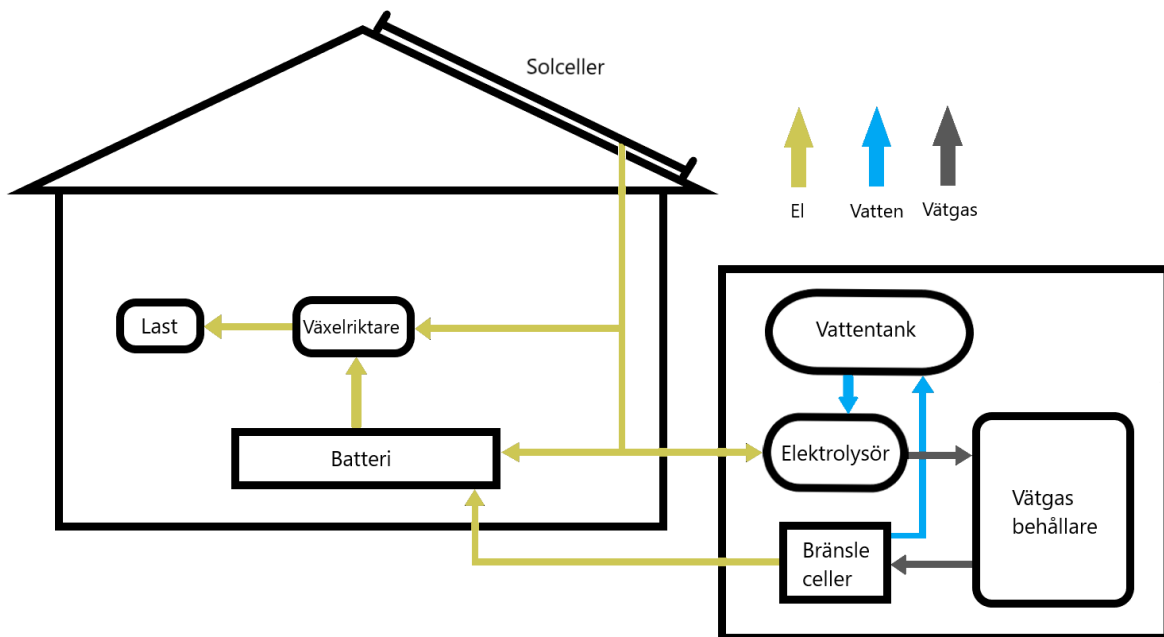
Nackdelar med litium-jon batterier

- Inre explosioner orsakas av metalledamm från tillverkningen som hamnar i elektrolyten.
- Dyr teknik
- Känsligt med för mycket urladdning och lång laddning, behöver skyddssystem.

Litium-jon batteriet har flera fördelar som gör den till en bra energilagring i byggnader som den den längre livslängden och relativt liten installationsyta som båda passar för ett långsiktigt system att installeras i en byggnad med begränsat utrymme för systemet.

3.6 Vätgaslagringssystem

Med bränsleceller, elektrolysör, batteri och vätgastankar kan ett energilagringssystem för en fastighet konstrueras enligt figur 8 nedan.



Figur 8. Illustration över ett vätgaslagringssystem för en fastighet.

Solceller kan tillhandahålla fastighetens energibehov för vissa delar av året. Delarna av året då solcellerna är otillräckliga för elförsörjning används ett vätgaslager som bränsle för bränsleceller som försörjer fastighetens energibehov.

Vätgasproduktionen drivs av solceller, som ger kraft åt en elektrolysör när effekten inte används i fastigheten. Elektrolysören använder avjoniserat vatten för att producera vät- och syrgas. Syrgasen kan möjligtvis sparas och säljas eller släppas ut i luften medan vätgasen lagras i behållare. Vid behov används vätgasen för att driva en stack av bränsleceller, vilket genererar elektricitet som används för att försörja huset. Värme produceras också vid processen och kan möjligtvis användas för värmeförsörjning till fastigheten. För att ge ett säkrare och jämnare utfördelning av effekten och ytterligare energilagringsskapacitet kan ett batteri användas som mellanhand mellan Solcellerna, bränslecellerna och fastighetens elektriska last.

För att alla komponenter ska fungera som dom ska behöver dom reglersystem som ser till att systemet samarbetar och producerar den nödvändiga effekten när den behövs. Växelriktare som omvandlar likspänningen från solcellerna till växelströmmen som behövs för fastigheten eller batteriet är nödvändigt. Elektrolysören och bränsleceller behöver dessutom ett system för att behandla vattnet utöver gaserna i processen. Kompressorer och tryckkärl som erhåller trycken som används i elektrolysören, bränslecellerna och vätgaslagret krävs.

4 RESULTAT

För att försöka besvara frågeställningarna användes verkliga exempel på vätgasdrivna energilagringssystem och vetenskapliga rapporter inom ämnet som källor till information. Genom att undersöka exemplen försöktes en översiktlig bild av hur tekniken används och vart utvecklingen är på väg målas.

4.1 Hans-Olof Nilssons Off-grid hus

Hans-Olof är en ingenjör som bor i Agnesberg som är 10 km från Göteborg. Han har byggt ett hus som är helt självförsörjande i energibehov på solceller, solfångare och vätgaslager. Enligt Hans Olof så drevs den här projektet enbart eget intresse för energiteknik och under 2013–2014 byggde han huset med en area på 500 kvadratmeter. Under sommaren så lagras solenergi som vätgas och används till el och värme till vintern (Michael J 2017).

I en ett mail från Hans-Olof Nilsson rörande hans vätgasdrivna husprojekt består systemet av: “Solceller, växelriktare, avjoniseringsanläggning för vatten, elektrolysör, kompressor, tryckkärl för vätgaslagring, bränsleceller, batterisystem, DC/AC inverter, styrsystem av hela energianläggningen, å lite till”. Huset har 3 våningar med solpaneler som ligger på hela södra taket med termiska solpaneler som ger en effekt på 13 kW, fotoelektriska paneler som ger en elektrisk effekt på 20 kWp och på fasadens sida sitter en solpanel med en elektrisk effekt på 0,8 kWp. På husets västliga fasad sitter också en serie solpaneler som levererar 2,0 kWp effekt från den sena eftermiddagssolen.

Det blir ett överskott av vätgasen som produceras årligen på ungefär 800 – 1000 kubikmeter, vilket kan räcka för att en bil med vätgas-motor ska kunna köra på 1000 mil (Michael J 2017).

4.1.1 Husets elektricitet

Elektriciteten från solpanelerna går ned till källaren där den fördelas mellan direktanvändning i huset, batteriet och vätgas produktionen. Två stycken 12 kW växelriktare omvandlar likspänningen från solpanelerna till växelström för direktanvändning i huset och vid överskott leds strömmen till sex stycken 8 kW kombinerade laddare och växelriktare för att ladda batteriet.

Kraftcentralen ligger i källaren där strömmarna genererade från solcellerna kommer till husets användning, elektrolysen och batteriernas laddning. Det finns olika färgade elskåp som de gula innehåller laddare och inverter med 8 kW styck, grått skåp med växelriktare (2 x 12 kW) som sköter det direkta elbehovet till huset och den energi som är över matar de gula skåpet med ström för uppladdning av batterier. Den tiden solen går ner fungerar batterierna som inverts, då skickas strömmen tillbaka till de gula skåpen som går till senare till husets elförbrukning fram till solen lyser upp igen. Varje tre gula lådor är i samband med en grå för att ge ett självständigt system och under normala driften är båda systemen igång. Fasadens sol-el sköts genom växelriktaren med 3 kW i de röda skåpet vidare till användning. Lådorna med växelriktare och inverter är från SMA men hela montagen av elsystemet är Olofs eget utförande.

Elen som lagras i batterier har 144 kWh kapacitet vilket kan försörja huset under 5 dygn. Batterien slutar ladda vid uppnådd 85% batteriladdning och går vidare strömmen till elektrolysen för vätgasproduktion. Batteriladdning minskar under oklara soliga dagar och går

nivån under 35% så används den lagrade vätgasen via bränsleceller för ladda upp batterierna som kan i sin tur leverera el till huset. Dessutom att batterierna som användes är bly-silikon men enligt Hans-Olof så har han bytt ut dem mot litium jon batterier. Dessa batterier är väldigt användbara och effektiva vilket förklarades förut (Michael J 2017).

4.1.2 Vätgas lagring, produktion och konsumtion

Det tillverkas 2 Nm³ vätgas i timmen under förbrukning av 5,5 kWh el per Nm³ via en alkalisk elektrolysrör. Man kan säga att det innehåller energi i 1 Nm³ är lika med 3,3 kWh, alltså det krävs en liter vatten som är avjoniserat för att producera 1 Nm³ vätgas. Man får av 1 Nm³ vätgas, 1,5 kWh värme i bränsleceller och 1,5 kWh el. Därmed i huset blandas bränslecellens värme med bostadens värmesystem. 0,5 kWh av 5,5 för att tillverka 1 Nm³ är att komprimera gasformigt väte vid ett tryck på 300 bar. Ytterligare elektrolysören är PEM-typen, kompressorer är termisk metalhydrida alltså fungerar genom temperaturvariationer och ens delar är ej rörlig. Förutom att husets årliga vätgasproduktion är cirka 3000 Nm³ så används bara 2200 Nm³ till värme och el och de resterande 800–1000 Nm³ tänker Olof förbruka i sin vätgasdriven bil.

Bränsleceller som är tillverkade av PowerCell. Det är en ömsesidig nytta på detta projektet. Medan Olof får el och värme så får Powercell vinst och erfarenheter genom att kunna fjärrstyra bränslecellen som är digitalt kopplad till deras ingenjörers data. Effekten som bränsleceller ger är 1,5 kW värme och 1,5 kW el. Dessutom att de två gråa rören är för att leverera värmen som kommer in med 70 C och ut med 65 C. Det levereras 48 V likström till förutnämnda laddare och inverter genom de två färgade kablarna med blå och röd. När systemet är full igång 24/7 är den elektriska effekten kan bli mycket mer än 1,5 kW vilket kan räcka för husets elanvändning. En annan bränslecell är snart installerad med en termisk och elektrisk effekt på 5 kW. Det tillfälliga experimentella vätelagret kommer bytas mot ett 12 kubikmeters vattenlager som kommer ligga utanför huset och som då kan den ha 3600 Nm³ väte under ett tryck på 300 bar. Ett sådant kapacitet kommer förbrukningen av huset att stiga i framtiden och möjligen även för vätgasdrivna bilar (Michael J 2017).

4.1.3 Elsystemets övervakning

Elektricitets övervakning och kontroll styr hela husets uttag och kontakter. Om någon inverter går snett eller fel kan den andra direkt sättas automatiskt in. Det är 7 ställen som räknas en central för elen i huset. Elförbrukningens övervakning sker av 67 energi-bildskärmar. Allt som har med temperatur att göra som vatten, värme i rummen, bränslecell och solfångare kontrolleras av 14 kamstrup. Därmed å taket finns 10 olika väderstationer som samlar ihop information om vädret. Slutligen samlas all data och information som kan utnyttjas till beräkningar och simulationer som senare kan ge en tydlig bild och förutsättningar om klimatet.

Enligt Hans-Olof så har han också utvecklat eget styrsystem RECA inklusive driftdatainsamling. Ännu mer avancerad kontroll sker på elektriciteten är husets elkvalitetsmätare som skickar digitalt data till en forskare på Luleå Tekniska Universitet. Det här kan ge Olof möjligheten att se på gamla data genom att spola tillbaka på en given händelse, till exempel vid inkoppling av flera apparater och belastningar. LTU kan istället få stora kunskaper och information om elnätet på ett Off-grid hus (J 2017).

4.1.4 Styrningen av vatten och klimat

De centrala värmelagringsenheterna består av tre stora tankar med en volym på 1000 liter/styck som innehåller varmt vatten med 35 C till ett avisningssystem som har rör 10 cm

långa under marken och täckta med asfalt och betong. De fungerar vid is och snöfall som hjälper till då med värma upp ytorna. Därmed finns det tre expansionsbehållare som har hand om övertrycksfall och två 400 liter hetvattentankar till hushållet med 50 C. Man ökar ofta värmen på vattnet med 15 C extra för att bli av med bakterier.

Det finns värmepump som skickar varmvatten, golvvärme till huset och avisningssystem när bränsleceller inte värmer tillräckligt under vintern.

Vatten är en väldigt viktig resurs för tekniken med vätgas och för själva huset därför finns det en Reserv-dricksvattentank på 500 liter. Den här möjligheten kan få huset klara sig vid vattenavbrott i tre dagar. Utan vatten kan inte vätgas-produktionen pågå vilket kan orsaka väldigt stora förluster i vätgasen.

Värmen går genom rör som har väldigt bra kvalitet och speciellt dragna. På rören sitter olika apparater som Kamstrup-mätare som har koll på termiska kWh- och liter-flöden och en annan mätare till vattenkonsumtionen. Därmed mäts den termiska produktionen från solcellerna. Varma vattnet cirkuleras i husets uppvärmningssystem genom pumpar. En värmeväxlare ingår för uteliggande avisningssystem och husets avkyllning (Michael J 2017).

4.1.5 Riskhantering

Vätgas och batterier klassas som brandfarliga och explosiva därför en bra riskhantering måste finnas (MSB 2022) (Batterigruppen 2021). Enligt Hans-Olof så riskanalysen och HAZOP gör anläggningen säker att använda. En årlig data från Hans-olof Nilssons hus visas nedanför på tabell 2 och 3.

Tabell 2 . Årlig energi- och direkt energikonsumtion.

Energiproduktion(kWh)	Direkt energikonsumtion(kWh)
Sol-el 22,000	Sol-el 7,000
Sol-värme 6,500	Sol-värme 1,500

Tabell 3. Andra källor där den årliga energin går åt.

Konsumeras	Produceras
Sol-el 15,000 kWh i vattenelektrolysen	3,000 Nm ³ vätgas
2,200 Nm ³	Värme och el från november till februari
Överskott på 800–1000 Nm går till tankning av en elbil	En körsträcka på 1000 mil

Målet med projektet enligt han att visa att det finns en befintlig teknik som gör det möjligt att vara helt självförsörjande på egenproducerad vätgas och allting gick som det var tänkt.

Huset har haft väldigt mycket beröm och besökare från Sverige och utomlands. Enligt Hans-Olof så gjorde han allt av sig själv från projektering, installation och driftsättning. Enligt honom så kostade hela anläggningen 2.2 miljoner kr.

Flera bolag som tyckte om idean med den här processen och såg framtid med det. Skellefteåkraft har blivit inspirerade av Nilssons hus och började bygga ett likadant med 150 kvadratmeter fast med enklare och billigare system, är inte lika smart dock men tillräckligt att kunna energiförsörja sig självt utan någon koppling till elnätet (SOLENERGI nyheter.se 2018)

4.1.6 Ekonomi

I ett mail från Hans-Olof Nilsson berättade han vad komponenterna i ett energisystem kostade.

Lista över nyckelkomponenter till ett förnybart energisystem

1. Solceller, ca 8-9000 kr/installerad kWp
2. Elektrolysör, Kapacitet 2 Kg/dygn 330 000 kr
3. Avjoniseringssystem för vatten som skall spjälkas, 29 000 kr
4. Vätgaskompressor 235 000 kr
5. Vätgaslager för 45 Kg@425bar 265 000 kr
6. Bränslecell, 10 kW uteffekt 450 000 kr
7. Batterisystem 5-6 000 kr/kWh
8. DC/AC Inverter, 10 kW 59 000 kr
9. Övergripande styrsystem 55 000 kr

Angivna priser utan moms, installation tillkommer

Enligt Nilsson rörande hans vätgas husprojekt: "...projektet kostade ca 2.2 miljoner kr, prisutvecklingen [går] neråt".

Nilsson ansåg att: "Tekniken är utvecklad, ”flaskhalsen” är lagring av vätgas som har den högsta kostnaden".

4.2 Zero Sun

Zero Sun är ett projekt skapat av Skellefteå Kraft som undersöker förmågan av ett energilagringssystem med vätgas skapat av solceller. Projektet i fråga ligger i centrala Skellefteå och är ett "kataloghus" som inte är byggt för att vara speciellt energisnålt. Huset bebos inte kontinuerligt utan kan hyras i några dagar eller veckor i taget. Målet var att undersöka förmågan av ett energilagringssystem försörjt av solceller på en plats i norra Sverige där mindre solljus och mer kyla ökar energibehovet samtidigt som energitillgången är mer begränsad.

Vätgastekniken som finns på marknaden är främst anpassad till industribruk, så för en villa som har mycket mindre produktionsenheter behövdes nästan allt i tekniken anpassas specifikt för projektet. Systemets komponenter sköts till stor del automatiskt och man behöver inte vara fackkunnig för att sköta det, men arbete kvarstår för att systemet ska vara enkelt nog att kunna skötas av en vanlig villaägare (Tidningen Energi 2021).

Solcellerna används för den daglig elförbrukningen och när ett överskott förekommer lagras det i batterier. När batterierna är fullt laddade används överskottet istället till att göra vätgas genom elektrolys och lagra gasen i vätgastankar i ett separat utrymme på tomten. Utrustningen för energilagringen finns i garaget och inkluderar styrutrustning, elektrolysör, ackumulatortank, bränslecellsstack och ett batterilager. Batterilagret har en kapacitet på 135

kWh, ungefär 150% kapaciteten av en Tesla elbil. Bränslecellerna är vattenkyld för att bibehålla för att inte överhettas och det upphettade kylvattnet kan därefter användas för varmvattenanvändningen i huset. (Tidningen Energi 2021) (Skellefteå kraft [2022-05-02]).

Vätgaslagret ligger i en stor jordkällare på tomten. Det finns lagar som dikterar hur vätgas får användas och lagras och det har skapat hinder för projektet. Det är viktigt att ingenting som kan orsaka gnistor får komma in i lagret och konstruktionen behöver utföras enligt regelverket (Tidningen Energi 2021-02-01).

Husets är 140 m² tillsammans med ett 33 m² garage och 8 m² för teknikutrymme. Taket täcks av 122 m² solcellspaneler som genererar ungefär 22 000 kWh/år med en maximal output på 27 kW. Vätgaslagret består av 165 vätgasflaskor som var och en kan innehålla 55 liter med en total lagringskapacitet på 2000 kubikmeter gas vilket vid fullt lager kan drivas genom bränsleceller för att ge 6000 kWh (Tidningen Energi 2021-02-01) (Skellefteå kraft [2022-05-02]).

4.3 Kronoparkens förskola

I januari 2022 invigdes Kronoparkens förskola, byggd för 144 elever i mariestad som använder ett vätgaslagringssystem. Förskolan är 'i princip' bortkopplad från elnätet och självförsörjande på solpaneler, batteri och bränsleceller. Kommunen samarbetade med Räddningstjänsten östra Skaraborg och myndigheten för samhällsskydd och beredskap för att utföra riskanalyser som blev godkända för bygget 2020 (Mariestads Kommun [2022-05-09]).

Förskolan är troligtvis den första i sitt slag att använda denna vätgaslagring som primär energiförsörjning. Två stycken teknikhus har uppförts tillsammans med förskolan, det första av vilka rymmer styrtekniken för solcellerna och bergvärmepump samt utrustning för sprinklersystemet. Det andra teknikhuset innehåller vätgasproduktionen, kompressorn och 33 st lagringstankar på runt 600 Nm³ för vätgasen. Solcellerna försörjer förskolan med dess elbehov och överskottet används för att göra vätgas genom elektrolys som lagras i tankarna. Teknikrummen är konstruerade med 30 cm tjocka betongväggar med ett tak bestående av tältduk som vid olycka eller gasutsläpp kan 'ge med sig' och lätta på trycket i byggnaden (Stordåd hd Kommunikation AB 2020).

Taket genererar uppskattat 167 kWh/år från 830 m² solcellspaneler med en vätgaslagring som kommer kunna lagra 61 MWh el i form av vätgas. Lagrets vätgastankar har ett tryck på 300 bar och vid elproduktion i bränslecellerna förs trycket ner till 4 bar (Stordåd hd Kommunikation AB 2020).

Byggentreprenören för projektet var Serenke i samarbete med kommunen. Nilsson Energy ansvarade för vätgassystemet. Kostnaden för projektet var 85 miljoner av vilka 15 gick till energisystemet. (Stordåd hd Kommunikation AB 2020).

4.4 Sjöbohem Hydrobust

I kommunen Sjöbo i södra Skåne har en vätgas produktionsanläggning byggts av AB Sjöbohem vid namn Hydrobust. Anläggning består av 800 solpaneler som har en installerad effekt på 269 kWp som tillsammans med ett vindkraftverk försörjer anläggningen med el och lagar överskottet som vätgas. Anläggningen har en lagringskapacitet på 3 000 kWh el och lika mycket värme från vätgasen. Av elen som produceras av anläggningen används ca 64 MWh av anläggningen och 169 skickas ut på elnätet (Vätgas Sverige 2021).

4.5 E2B2 självförsörjande bostadshus simulering

Energimyndigheten och IQ samhällsbyggnad driver ett forsknings och innovationsprogram som kallas E2B2 som 2020 publicerade en rapport om förutsättningarna för självförsörjande bostadshus i Jönköping.

Det projekterade bostadshuset skulle använda solceller, solfångare, bergvärme, regnvattenuppsamling och värmepump för att uppnå självförsörjningen. Med vätgasproduktion och lagring tillsammans med energisnål byggnadsteknik och markvärmelager uppnår byggnaden ett självförsörjande system som fungerar hela året. Utöver elektrisk generation är bostadshuset också planerat för att vara självförsörjande av vatten, avlopp och värme (E2B2 2020).

Modelleringen av byggnaden skedde via programmet OptiCE baserat på MATLAB och användes för att beräkna den ideala lösningen till energiförsörjningen och minimera kostnader. Tillämpningen till flerfamiljshus och dom nya energilösningarna relaterade till självförsörjningen utvecklades i projektet. Huset skulle innehålla 44 lägenheter med en total uppvärmd yta på 4 100 m².

Elproduktionen från solcellerna beräknades till 247 MWh/år och en värmeproduktion från solfångarna på 156 MWh/år och 97 MWh/år från värmepumpen. Värmen genererade i elektrolysören och bränslecellerna återvinns dessutom i systemet. Det årliga energibehovet för byggnaden blev 232 MWh och av detta är 100 MWh el och 132 MWh värme. Under ett år fanns ett underskott på 146 kWh under vissa perioder men ett övergripande årligt energiöverskott på 41 MWh. Det föreslår att med vidgat batteri eller vätgaslagringssystem så borde energisystemet kunna bli helt självförsörjande.

Kostnaderna för projektet uppskattades till ungefär 170 miljoner kronor av vilka 40 miljoner är självförsörjningstekniken. Inkluderande all teknik, installationskostnader och moms. Två olika ekonomiska scenarier baserat på bra eller dåliga förutsättningar ställdes upp och break-even punkten för systemet beräknades till 21 eller 26 år beroende på scenariot (E2B2 2020).

4.6 Beräkningar på vätgaslagringssystem

För att göra en uppskattning av möjligheterna för vätgaslager sammanställdes värdena tagna från vätgaslagringsprojekten i fastigheter som hittades i Sverige enligt tabell 4 nedan.

Tabell 4. Parametrarna för vätgaslagringsprojektet.

Projektägare	Hans-Olof Nilsson	Skellefteå Kraft	Mariestad Kommun	Energimyndigheten/E2B2
Projektamn	Off-grid hus	Zero sun	Kronoparkens förskola	OptiCE Simulering
Peak solcellseffekt [kW]	22,8	27	~166	*412
Årlig elproduktion [kWh]	22 000	22 000	167 000	247 000
Vätgaslager [Nm ³]	3600	2000	~20 333	Otillgängligt
Vätgaslager energiinnehåll [kWh]	~10 800	6000	61 000	Otillgängligt
Batterilager [kWh]	144	135	Otillgängligt	140
Fastighetsstorlek [m ²]	500	140	~1 600	4 100
Kostnad [Msek]	2,2	Otillgängligt	15	40

* Peak solcellseffekt för OptiCE simuleringen inkluderar den termiska effekten från solfångarna, så den elektriska effekten är lägre än anges i tabellen.

~ Uppskattade värden.

Off-grid husets vätgaslagring energiinnehåll uppskattades från Hans-Olofs påstående att varje Nm³ vätgas korresponderade till 3,3 kWh energiinnehåll och att för varje Nm³ vätgas kunde 1,5 kWh el och 1,5 kWh värme produceras. Vilket gav: $3600 * (1,5 + 1,5) = 10\ 800$ kWh.

Samma procedur fast omvänt användes för att uppskatta Kronoparkens förskolas vätgaslager: $61\ 000/3 = 20\ 333$ Nm³.

Kronoparkens fastighetsstorlek uppskattades också från att taket var näst intill täckt av solceller och rapporterades som 830 m² så den användbara ytan borde vara runt 1600 m² då det är en tvåplanigt byggnad där varje plan bör vara ungefär 800 m².

Peak solcellseffekt för förskolan uppskattades också genom att ta en genomsnittlig solcellseffekt på 200 W/m² enligt Hemsol och multiplicera det med dess 830 m² solceller: $0,2 * 830 = 166$ kW.

4.6.1 Beräkningar på icke eluppvärmd villa

För att ge en bild av hur mycket solceller och vätgaslagringskapacitet som krävdes för att skapa ett fungerande självförsörjande vätgassystem gjordes beräkningar utifrån värdena i vätgasprojektet. Beräkningarna gjordes på en hypotetisk villa i gott solläge med väl placerade solceller. Andra typer av fastigheter har andra energibehov och annorlunda förutsättningar än villor men dessa exempel kan ge en bild av förhållandet mellan produktionen och användningen av vätgas i ett system.

Som tidigare nämndes i kapitel 3.3 använder en villa ungefär 20 000 kWh el per år om villan är eluppvärmt och ungefär 5 000 kWh om det har värme från annan källa som fjärrvärme (Konsumenternas Energimarknadsbyrå 2021-09-20). Tabell 5 nedan visar den uppskattade elproduktionen från solceller av olika installerade effekter (kilo watt peak).

Tabell 5. Den årliga solcellsel produktionen beroende på installationsstorlek (Hemsol 2022-08-30).

Storlek på solceller (kW)	Elproduktion per år [kWh]
5	4000 - 5500
10	8000 - 11000
15	12000 - 16500
20	16000 - 22000
25	20000 - 27500

För att få månads användningen för villor utan elvärme delades det årliga behovet på 5 000 kWh ut jämnt mellan månaderna, eftersom den dagliga användningen av el utanför värmebehov inte brukar variera mycket mellan årstiderna. Månadsbehovet av el för icke eluppvärmda villor blir då $5000/12 = 416,6$ kWh.

Med antagandet att 5,5 kWh el används för att producera 1 Nm³ vätgas vid 300 bar och att varje 1 Nm³ av vätgas kan omvandlas till 1,5 kWh el som i Nilssons Off-grid hus kan det uppskattas hur mycket vätgas och solceller som skulle behöva lagras för att försörja en genomsnittlig villa med el.

Som ett exempel beräknades en 10 kW/månad solcellsinstallation för en villa med elbehovet 5 000 kWh/år. Den månadsvisa elproduktionen uppskattas från tabell 6 nedan.

Tabell 6. Den förväntade elproduktionen för solcellsanläggningar i storleken 5, 10 och 15 kW installerad effekt (Hemsol 2022-08-30).

Månad	Elproduktion/mån för 5 kW solceller [kWh]	Elproduktion/mån för 10 kW solceller [kWh]	Elproduktion/mån för 15 kW solceller [kWh]
Januari	58 - 80	117 - 161	175 - 241
Februari	136 - 187	272 - 374	408 - 561
Mars	358 - 492	716 - 985	1074 - 1477
April	508 - 699	1017 - 1398	1525 - 2 097
Maj	581 - 799	1162 - 1597	1742 - 2 396
Juni	575 - 790	1150 - 1581	1724 - 2371
Juli	568 - 781	1136 - 1562	1704 - 2343
Augusti	487 - 669	974 - 1339	1460 - 2008
September	378 - 520	757 - 1041	1135 - 1561
Oktober	228 - 313	455 - 626	682 - 939
November	82 - 113	165 - 227	247 - 340
December	40 - 56	81 - 111	121 - 167

Den genomsnittliga månads produktionen för 10 kWh solceller jämfördes sedan med månads behovet på 417 kWh i tabell 7 nedanför.

Tabell 7. Den månadsvisa produktionen, användningen och överskottet av solcellsproducerad el för en villa med energianvändning 5000 kWh per år och installerad solcellseffekt på 10 kWh.

Månad	Produktion	Användning	Överskott
Januari	139	417	-278
Februari	323	417	-94
Mars	851	417	434
April	1208	417	791
Maj	1380	417	963
Juni	1366	417	949
Juli	1349	417	932
Augusti	1157	417	740
September	899	417	182
Oktober	540	417	123
November	196	417	-221
December	96	417	-321
Summa	9504	5004	4500

Månaderna där ett underskott uppstår är November - Februari och summan av det underskottet är $273 + 94 + 221 + 321 = 909$ kWh. Därför måste nog med vätgas för att kunna producera 909 kWh av el framställas av överskottet av el under överskotts månaderna för att systemet ska vara självförsörjande. För att tillföra 909 kWh el med en omvandlingsprocess där 1 Nm^3 vätgas behövs för att framställa 1,5 kWh vätgas skulle $909/1,5 = 606 \text{ Nm}^3$ vätgas behövas. För att skapa 606 Nm^3 av vätgas skulle $606 * 5,5 = 3333$ kWh el behöva tillföras med omvandlingsfaktorerna baserade på Nilssons off-grid hus. Detta faller under exempelvillans 4500 kWh överskott med en marginal på 1167 kWh så systemet skulle varit självförsörjande med en viss marginal.

Hur stort vätgaslagret för ett system behöver vara kan variera beroende på hur mycket kapacitet som önskas. Det kan observeras från vätgasprojekten att kapaciteten på lagren jämfört med den årliga produktionen varierar:

- Off-grid hus $\frac{10\,800}{20\,000} = 54\%$
- Zero sun $\frac{6\,000}{20\,000} = 30\%$
- Kronoparkens förskola $\frac{61\,000}{167\,000} = 36,5\%$

Ett vätgas lager som är stort nog att täcka en hel årsförbrukning är inte nödvändigt. Under sommarhalvåret bör solpanelerna tillhandahålla nog med energi för att ta hand om det övervägande effektbehovet. Så ett lager stort nog att täcka månaderna med energiunderskott plus ett överskott för att mindre variationer i elproduktionen och användningen som kan förekomma inte orsakar en energibrist.

För exempelvillan med behovet 5000 kWh skulle ett lager på 40% av årsproduktionen kunna antas rimligt, då det faller mellan värdet på de verkliga projekten. Detta skulle resultera i ett vätgaslager på $9504 * 0.40 = 3801,6$ kWh energiinnehåll vilket skulle kräva ett vätgaslager som rymmer $3801,6/1,5 = 2534,4$ Nm³.

Storleken på solcellsanläggningen som skulle krävas för att driva vätgassystemet beräknades från uppskattade värden för effekten en solcellspanel på 1 m² producerar per år vilket är mellan 150 - 220 kWh per år. Vilket skulle då kräva $10000/220 = 45,45$ m² för en ideal installation och $10000/150 = 66,67$ m² med en sämre installation. Då en normalstor solcellsinstallation för fastigheter ligger på 50 m² är dessa inte av orimlig storlek (Hemsol 2022-08-30).

Värmen som resulterar från elektrolysporcessen var i detta fallet inte inräknad i energianvändningen då exempelvillan antogs använda icke eldriven värme. Men det kunde finnas möjligheter att ta tillvara på värmen genom varmvattentankar för att ge ytterligare energitillskott för villan i fråga.

4.6.2 Beräkningar på eluppvärmd villa

Därefter gjordes beräkningen på en villa med energibehov på 20 000 kWh där direktverkande el används för uppvärmning. I detta exempel tillgodoräknades värmen från elektrolysporcessen som energitillskott för att täcka behovet.

Då värmebehovet varierar mellan årstiderna blir månads användningen av energin mycket större och varierande. Därför behövs den uppskattade månadsanvändningen för en eluppvärmd villa. Tabell 8 nedan visar elförbrukningen på en 150 m² villa med en årlig elförbrukning på 18 000 kWh.

Tabell 8. Uppskattad elförbrukning för en villa med 18 000 kWh i elanvändning (Hemsol 2022-08-30).

Månad	Elanvändning [kWh]	Procentuell användning [%]
Januari	2500	14
Februari	2200	12
Mars	2200	12
April	1800	10
Maj	1100	6
Juni	700	4
Juli	500	3
Augusti	500	3
September	900	5
Oktober	1400	8
November	1900	10
December	2300	13

Värdena för elanvändningen per månad multipliceras med $\frac{20\,000\text{ kWh}}{18\,000\text{ kWh}} = 1,11$ för att få en uppskattad månads användningen för 20 000 kWh årligen. En solcellsinstallation på 25 kWh användes för beräkningen. Eftersom en sådan stor anläggning inte finns med i tabell 6 uppskattades månads produktionen genom att skala upp värdena från 15 kWh månadsproduktionen. Då värdena i tabellen följer en linjär proportionell ökning i produktion per installerad effekt bör en ökning från 15 kWh till 25 kWh följa en liknande ökning.

Det genomsnittliga värdet för 15 kWh elproduktion skalades upp med en faktor på $25/15 = 1,67$ för att få en uppskattad månads produktion för 25 kWh solcellsinstallationen. Därefter togs det uppskalade värdet för elanvändningen per månad från tabell 8 och jämfördes med produktionen i tabell 9 nedan.

Tabell 9. Den månadsvisa produktionen, användningen och överskottet av solcellsproducerad el för en villa med årlig energianvändning på 20 kWh och installerad solcellseffekt på 25 kWh.

Månad	Produktion	Användning	Överskott
Januari	347	2778	-2431
Februari	807	2444	-1637
Mars	2125	2444	-319
April	3017	2000	1017
Maj	3447	1222	2224
Juni	3411	778	2633
Juli	3371	556	2816
Augusti	2889	556	2333
September	2246	1000	1246
Oktober	1350	1556	-205
November	489	2111	-1622
December	240	2556	-2316
Summa	23739	20000	3739

Energiunderskottet för villan under månaderna oktober - mars blir $205 + 1662 + 2316 + 2431 + 1637 + 319 = 9470$ kWh. Alltså skulle minst 9470 kWh värt av vätgas behöva produceras under sommarhalvåret. I detta fall när villan har behov av både värme och el kan 1,5 kWh el och 1,5 kWh tillgodoräknas för varje 1 Nm³ vätgas. Villan behövde då $9470/3 = 3157$ Nm³ vätgas per år för att vara självförsörjande. För att producera 3157 Nm³ vätgas skulle $3157 * 5,5 = 17361,66$ kWh el överskott från solcellerna behövas, långt över vad solcellerna kan producera i överskott. En solcellsinstallation på 25 kWh skulle också kräva en stor yta för solceller på ungefär $25\ 000/220 = 113,63$ m² för en ideal installation och $25\ 000/150 = 166,67$ m² för en lågeffektiv anläggning. Energiinnehållet vätgas som skulle behöva lagras för att uppnå 40% av årsproduktionens kapacitet var $23739 * 0,40 = 9495,6$ kWh vilket skulle kräva ett vätgaslager på $9495,6/3 = 3165,2$ Nm³.

4.6.3 Slutsatser från undersökta projekt och beräkningar

Från det beräknade exemplen kan det uppskattas att det är möjligt att täcka det årliga elbehovet för en genomsnittlig villa med en väl placerad solcellsinstallation av normal storlek och ett vätgassystem. Men för villor som är eluppvärmda blir självförsörjning svårare och kräver betydligt större investeringar i solceller och lagringskapacitet av vätgas.

Om ett värmeåtervinningssystem som har liknande effektivitet som Hans-Olof Nilssons installerad, där 1 Nm³ vätgas framställer 1,5 kWh el och 1,5 kWh värme så blir verkningsgraden för elen producerad av vätgasen blir därför $\frac{1,5\ kWh}{5,5\ kWh} = 0,27$ och för system

där värmen också tas till vara på blir verkningsgraden $\frac{3,0 \text{ kWh}}{5,5 \text{ kWh}} = 0,55$. Den totala verkningsgraden från solljuset med en uppskattad verkningsgrad på 20% för en solcellspanel blir därför $0,2 * 0,27 = 0,054$ för elproduktion eller $0,2 * 0,55 = 0,11$ för el och värmeåtervinning.

Uppskattningsvis kan det alltså sägas att:

- 5,5 kWh behövs för att skapa 1 Nm³ vätgas.
- 1 Nm³ vätgas kan användas för att producera 1,5 kWh el och 1,5 kWh värme.
- En normal villa med elbehov med ett årligt elbehov på 5000 kWh kan rimligtvis försörjas av ett vätgassystem.
- En normal villa med ett el- och värmebehov på 20 000 kWh kräver solceller av större proportioner än normala solcellsanläggningar.
- Verkningsgraden för ett vätgaslagringsystem är ungefär 27 - 55% från solcellseffekten till användning och 5,4 - 11 % från solljuset till användning med variationer beroende på hur mycket av värmen som används.

5 DISKUSSION OCH ANALYS

Utifrån de undersökta komponenterna i ett vätgaslagringsystem och exempel på teknikens användning, diskuterades frågeställningen.

5.1 Hur fungerar vätgasproduktion och lagring med hjälp av solceller i en fastighet?

För att ett vätgaslagringsystem ska vara en miljöpositiv teknik behöver "grön" vätgas produceras genom förnybara energikällor. Det enklaste sättet att för en fastighet att producera förnyelsebar el är genom solceller, då andra förnyelsebara energikällor som vindkraft och vattenkraft inte har så stor utbredning inom individuell fastighets användning. Solcellerna placeras enklast på fastighetens tak och om möjligt i en sydlig riktning där störst mängd solenergi kommer från.

Solcellernas effekt används sedan för att uppfylla fastighetens energibehov under dagarna då solen skiner starkt. Likströmmen producerad av solcellerna behöver passera genom en växelriktare först. Vid dom tillfällena där solcellerna producerar mer effekt än som används i fastigheten kan denna effekten lagras i ett batteri och när det är fullt används effekten i en elektrolys för att producera vätgas från vatten.

Vätgasen lagras i trycksatta behållare för att kunna lagra en betydande mängd, då vätgas har ett väldigt stort energiinnehåll men en väldigt låg densitet. För att få upp trycket på vätgasen och vattnet som används i elektrolysen behövs kompressorer som får upp trycket till rätt nivå. Vätgasbehållarna bör dessutom lagras utanför fastigheten. Risk för en brand eller explosion är inte nödvändigtvis hög men den existerar, så säkerheten bör alltid prioriteras.

Vätgasen fungerar som ett energilager eller ett bränsle som kan användas vid behov för att producera elektricitet. Genom att mata bränslecellerna med vätgas och syre produceras vatten och elektricitet. Elektriciteten kan sedan användas vid behov för att ladda upp fastighetens batteri. Batteriet är användbart för att distribuera effekten från bränslecellerna, då det är svårt att momentant matcha effektbehovet med bränslecellens output av el. Istället kan bränslecellerna köras på full effekt för att ladda batteriet som tar hand om fastighetens elbehov.

Den exakta funktionen och utformningen för ett vätgaslagringsystem är beroende på utförandet. Då ingen riktigt standard har producerats för konceptet är designen beroende på beställarens önskan. Vätgaslagring kan användas för att endast uppfylla det elektriska behovet för fastigheter, men med tillräcklig storlek kan det också hantera värmebehovet genom elektrisk uppvärmning och värmeåtervinning från elektrolys- och bränslecellsprocessen.

Fördelen med ett energilagringssystem är att teoretiskt kan fastigheten bli helt självförsörjande på el och möjligtvis värme. Detta sparar på elkostnader, gör fastigheten immun mot strömavbrott och hjälper att avlasta elnätets börda i energidistribution. Det gör tekniken attraktiv både från ett individuellt och storskaligt synsätt. Lösningen kan vara penningssparande för bostadsägaren och underlättande för nätverkets belastning. Nackdelarna är dock att det är mycket teknik som krävs. Väldigt mycket kunskap och erfarenhet med tekniken krävs för att hela systemet ska fungera i harmoni. Även om personer som Hans-Olof Nilsson med mycket erfarenhet i området kan bygga ett system själva så är det undantagen snarare än regeln troligtvis. Komponenterna i systemet behöver också underhållas och bytas ut efter viss tid. Utan dom nödvändiga kunskaperna kan skötseln av ett vätgaslagringsystem bli problematisk. Systemet måste också överdimensioneras någorlunda, eftersom det inte går att räkna med att alla år har samma mängd solinstrålning eller temperaturer. Om solcellerna producerar för lite el eller energibehovet överstiger vad systemet kan lagra blir det strömavbrott i fastigheten. Skulle det hända behöver el från nätet köpas in så energibehovet täcks eller elanvändningen i fastigheten minskar.

Från ett större perspektiv kan vätgaslagring också bidra till energiomställningen, från fossila energikällor till förnyelsebara. Ett återkommande problem är att under vintern då solceller och vindkraft båda har sämre effektproduktion och för att täcka den saknade effekten används ofta fossila bränslen. Genom vätgas producerad av förnyelsebara källor på sommaren som lagrats till vintern kan effektbehovet täckas av bränsleceller drivna på vätgasen. På så sätt kan möjligtvis behovet för fossila bränslen under vintertid minskas om tekniken blir utbredd nog eller byggs på större skala än individuella fastigheter.

5.2 Hur ser möjligheten ut för att använda tekniken utifrån tekniska förutsättningar?

Detta är fortfarande väl över vad många solcellsanläggningar kan producera då den genomsnittliga produktionen är 7360 – 10120 kWh per år. Om solanläggningen ska ansvara för all vätgasproduktion utöver att producera el till fastigheten behövs en betydligt större solcellsanläggning än vad som är vanligt i Sverige. I projekten som tittades på för arbetet var den minsta solcellsanläggningen installerad på Zero Sun där 122m² solpaneler var installerade på taket. Vilket är betydligt större än vanliga stora solcellsanläggningar på runt 75m².

Utrymmet för tekniken är en möjligt problem också. Det exakta utrymmet som krävs för tekniken varierar så klart med komponenterna och konstruktionen, men det kan rimligt antas att betydande utrymme krävs för både bränslecellerna, elektrolysören samt vattensystemet som försörjer båda (kompressorer, avjoniseringsystem, vattentankar). Batterierna och vätgastankarna kräver också utrymme och i vätgasens fall ett helt separat utrymme utanför fastigheten för ökad säkerhet mot brand. Nilssons off-grid hus är utrustat med ett separat 12 m³ lager för vätgasflaskorna, vilket ger en kapacitet på 3600 Nm³ vilket borde vara i största laget för ett vätgaslager till en enda villa. Men speciellt om flera bostäder eller större byggnader ska använda vätgaslager är det möjligt att utrymmet skulle behöva öka, vilket är ett krav att ha i åtanke.

Med projekten i åtanke kan det sägas att tekniken för vätgaslagring är väl fungerande och kan ge betydande fördelar till energiförsörjningen av fastigheter. Förmågan att kunna spara på förnybara energi till perioder där produktionen är sämre ger bättre långsiktig hållbarhetsförmåga till tekniken. Vad som dock påvisas av de undersökta projekten är att lagringssystemet kräver mycket teknik, kunskaper och planering för att fungera väl. Dessutom har den genomsnittliga existerande solcellsanläggningen inte kapaciteten för att riktigt kunna förses en elektrolysör med effekten den behöver för att kunna bygga upp ett rimligt vätgaslager under en årsproduktion. Det återstår därför att se huruvida tekniken kommer att kunna användas för att ge ett energilagringssystem till existerande fastigheter, eller om exklusivt nybyggda fastigheter kommer kunna använda vätgaslagring.

Dom tekniska förutsättningarna för att använda tekniken verkar vara goda. Men det kommer kräva betydande investeringar och kunskaper för att göra tekniken utbredd och bidra till energiomställningen.

5.3 Hur ser möjligheten ut för att använda tekniken utifrån ekonomiska förutsättningar?

Kostnaden för ett vätgaslagringssystem kan variera massivt beroende på storlek och konstruktion. En ungefärlig kostnad kan dock uppskattas genom att titta på exempelprojekten.

Hans-Olof Nilssons energilagringssystem kostade 2,2 miljoner kronor, vilket endast tar hänsyn till komponenternas kostnader, då han installerade all teknik själv. Detta kan ses som ett lågt pris eftersom med installationskostnader kommer kostnaden oundvikligen öka markant. Vätgaslagringssystemet som drivs i Kronoparkensförskola designades av Nilsson Energy och kostade 15 miljoner. Systemet som simulerades i OptiCE skulle ha kostat 40 miljoner att bygga. Förutsägbart kan det sägas att större fastigheter med större energibehov kräver större energilösningar med högre priser.

Om vi utgår från priserna Hans-Olof delgav kan ett ungefärligt pris på ett energisystem uppskattas. Om vi gör ett antagande att varje installerad solcells kWp representerar medianen för Svenska solcellsanläggningar 950 kWh årligen och att priset blir 8500 kr/installerad kW kan vi beräkna vad en solcellsanläggning för ett vätgaslagringssystem skulle kosta. Om vi då tar antagandet från förr avsnittet att 9166 kWh är målet för att ett vätgaslagringssystem ska ha nog med energi för att producera vätgas för hela vinterhalvåret blir det installerade effektbehovet: $9166/950 = 9,65$ kWp. Då detta endast täcker vätgasproduktionen skulle den installerade effekten behöva vara ännu högre för att täcka energibehovet för fastigheten under sommarhalvåret också. Om vi utgår från det tidigare antagandet att en villa/stor lägenhet kräver 5000 kWh för sin elförsörjning per år kan en ytterligare installerad effekt på $\frac{5000}{950} = 5,26$ kWp krävas för att försörja byggnaden helt och hållet. Den kombinerade installerade effekten borde därför vara ~ 15 kWp. Med median priset per installerad effekt från Hans-Olof kan det då antas att kostnaden bör vara runt $8500 * 15 = 127\,500$ kr = 128 kk.

Dom fasta kostnaderna för bränsleceller, elektrolysör, kompressor, avjoniseringssystem, styrsystem, vätgaslager och växelriktare summeras till en total kostnad på $33\,000 + 29\,000 + 235\,000 + 2\,265\,000 + 450\,000 + 59\,000 + 55\,000 = 1\,423\,000$ kr.

Dessa beräkningar inkluderar inte inflations justeringar baserade på när tekniken köptes på grund av en stark inflation de senaste åren, vilket gör beräkningarna svårare att analysera ur ett långtidsperspektiv.

Med detta priset adderat med solcells kostnaden blir det totala priset för komponenterna strax norr om 1,5 miljoner kronor. Detta är också priset utan moms och installationskostnader. Som en grov uppskattning kan priset antas att dubbla med dessa tillkommande kostnader till ~3 miljoner kronor för en villa eller stor lägenhet. Det exakta värdet kommer självklart att variera beroende på vad dom tekniska specifikationerna är. Utöver det finns det alltid möjlighet att priser kan kraftigt ändras beroende på omständigheter i ekonomin och energiförsörjningen, så en exakt prisbild av när och hur vätgaslagringstekniken kommer vara prisvärd är svår att fastställa och skulle kräva en mycket djupare undersökning kring teknikens prisutveckling och dess konkurrerande energilösningar.

6 SLUTSATS

Möjligheterna att använda vätgas har potential men betydande hinder i form av kostnad och effektivitet. Vad som skulle kunna vara intressant att ta reda på är exakt prisbild av tekniken baserad på tekniska förutsättningar och hur det skulle kunna jämföras med andra energilösningar. Att kunna ta ett hus med vissa dimensioner och beräkna under vilka förhållanden och med vilken teknik vätgaslagring hade kunnat vara attraktivt.

REFERENSER

Baker, R. Zhang, J. Electrochemistry Encyclopedia (2011). *PROTON EXCHANGE MEMBRANE or POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE (PEM) FUEL CELLS*.
<https://knowledge.electrochem.org/encycl/art-f04-fuel-cells-pem.htm> [2022-04-27]

Batteriexperten Europe AB (2022) *Hur fungerar ett batteri?*
<https://www.batteriexperten.com/sv/info/batteri-wiki.html> [2022-05-02]

Batterigruppen (2021). *Hur farliga är batterier för vår miljö och hälsa?*
<https://batterigruppen.se/hur-farliga-ar-batterier-for-var-miljo-och-halsa/> [2022-05-08]

Beckman, O. Grimvall, G. Kjällerström, B. Sundström, T. (2005). *Energilära, grundläggande termodynamik*. 4 uppl. Stockholm: Liber AB.

Bengts villablogg (u, å). *Fakta solceller*.
<https://bengtsvillablogg.info/fakta-solceller/> [2022-05-03]

Bergmark, W. Hemsol (2021-11-11). *Verkningsgrad för solceller*
<https://hemsol.se/vanliga-fragor/verkningsgrad-solceller/> [2022-05-20]

Bergmark, W. Hemsol (2022-08-30). *Normal elförbrukning för villor*
<https://hemsol.se/solceller/elforbrukning-villa/> [2022-10-27]

Bommaraju, T. O'Brien, T. Electrochemistry Encyclopedia (2015). *BRINE ELECTROLYSIS*.
<https://knowledge.electrochem.org/encycl/art-b01-brine.htm> [2022-05-05]

Borén, H. Börner, M. Larsson, M. Lindh, B. Ragnarsson, M. Sundkvist, S. (2011). *Kemiboken I*. 4 uppl. Stockholm: Liber AB.

Bülow, E. Hemsol (2021-11-04). *Hur mycket el producerar solceller per år?*
<https://hemsol.se/vanliga-fragor/hur-mycket-el-producerar-solceller-per-ar/> [2022-05-20]

Energimyndigheten (2022) *Kraftig ökning av installerade solcellsanläggningar*.
<https://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2022/kraftig-okning-av-installerade-solcellsanlaggningar/> [2022-04-10]

Hellström, E. Svenska Kraftnät (2021). *Kraftbalansen på den svenska elmarknaden, rapport 2021*.
<https://www.svk.se/siteassets/om-oss/organisation/vara-rad/planeringsradet/2021/bilaga-5-kraftbalansrapporten.pdf> [2022-04-15]

Hemming, S. Hemsol (2022-08-30). *Så Mycket El Producerar Solceller: Per år, Månad, Dag & m2*.
<https://hemsol.se/solceller/produktion-per-ar-och-manad/> [2022-10-27]

Holmström, C. Ekonomifakta (2021) *Elbrist*.
<https://www.ekonomifakta.se/Fakta/Energi/Energibalans-i-Sverige/elbrist/> [2022-04-26]

Inac, S. Midilli, A. Dincer, I. (2014). Exergetic evaluation of a high-pressure hydrogen production system. I Dincer, I (red). Midilli, A (red). Kucuk, H (red). *Progress in Exergy, Energy, and the Environment* Volume 1. Springer international Publishing Switzerland, ss. 15-22.

J, M. (2017). *Svensk Energipionjär bygger Vätgas-hus i Göteborg*. LinkedIn.
https://www.linkedin.com/pulse/svensk-energipionj%C3%A4r-bygger-v%C3%A4tgas-hus-i-g%C3%B6teborg-michael-jensen/?original_Subdomain=se [2022-04-16]

Kofod-Hansen, M. Tidningen Energi, el värme & kyla (2021-03-01). *Villan som drivs av solet och vätgas*.
<https://www.energi.se/artiklar/2021/februari/villan-som-drivs-av-solel-och-vaetgas/>
[2022-05-13]

Konsumenternas Energimarknadsbyrå (2021-09-20). *Normal elförbrukning och elkostnad för villa*.
<https://www.energimarknadsbyran.se/el/dina-avtal-och-kostnader/elkostnader/elforbrukning/normal-elforbrukning-och-elkostnad-for-villa/> [2022-05-17]

Lantbrukarnas Riksförbund (u, å).
https://www.lrf.se/globalassets/dokument/mitt-lrf/_regioner/gotland/rapport-forstudie-vaetgas-och-energilagring-.pdf [2022-04-20]

Larsson, K. Stordåd hd Kommunikation AB (2020-11-30). *Förskola i Mariestad ska drivas av vätgas*.
<https://www.mynewsdesk.com/se/stordaaahd-kommunikation-ab/news/foerskola-i-mariestad-ska-drivas-av-vaetgas-416212> [2022-05-13]

Lindström, K. Balata, D. Persson, A. Anthesis, Bosse Wikensten och Aktea Energy. (2021-12-14) BeBo. *Flerbostadshus off-grid*. ss. 12-14.
<https://www.bebostad.se/media/5240/2021-03-flerbostadshus-offgrid.pdf>

Lundblad, A. Nilsson, K. Stridh, B. Campana, P. Löfstedt, P. Alexandersson, U. E2B2 (2020-12-23). *Självförsörjande bostadsområde i urban miljö*.
https://www.e2b2.se/media/yxioousi/slutrapport_sjalvf%C3%B6rsorjande-_bostadsomrade_i_urban_miljo.pdf [2022-05-19]

Mariestads kommun (2022-02-18). *Hållbar förskola*.
<https://mariestad.se/Mariestads-kommun/Hallbarhet--miljo/Strategiskt-hallbarhetsarbete/Agenda-2030/Projekt-och-goda-exempel/Hallbar-forskola> [2022-05-16]

MSB. Vätgas (u, å). *Vätgas*
<https://www.msb.se/sv/amnesomraden/skydd-mot-olyckor-och-farligen-amen/brandfarligt-och-explosivt/brandfarliga-gaser/vatgas/> [2022-05-08]

Naturskyddsföreningen (2022). *Vanliga frågor om solceller och solenergi*.
<https://www.naturskyddsforeningen.se/artiklar/vanliga-fragor-om-solceller-och-solenergi/>
[2022-05-03]

- Naturskyddsföreningen (2021-12-15). *Hur fungerar vätgas?*
<https://www.naturskyddsforeningen.se/faktablad/hur-fungerar-vatgas/> [2022-04-21]
- Nilsson, A. (2017-05-21). *Energilagring i byggnader*.
<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1117852/FULLTEXT01.pdf> ss.9-18.
[2022-05-10]
- Power Circle (2022). *SVERIGES NATIONELLA STATISTIK FÖR ELBILAR OCH LADDINFRASTRUKTUR*.
<https://www.elbilsstatistik.se/> [2022-04-26]
- Rise (2019-12-20)
<https://www.ri.se/sv/berattelser/solens-stralar-kan-lagras-med-hjalp-av-vatgas> [2022-04-17]
- Skellefteå kraft (u,å).
<https://www.zerosun.se/> [2022-05-02]
- Solar HydroGenesis AB (2021). *Om vätgas*.
<https://www.solarhydrogenesis.com/vatgas/> [2022-05-05]
- SOLENERGI nyheter.se (2018-05-16). *Svensk Energipionjär bygger Vätgas-hus i Göteborg*.
<https://www.solenerginyheter.se/20190803/1021/svensk-energipionjar-bygger-vatgas-hus-i-goteborg> [2022-10-26]
- Solcellskollen (2021-07-07). *Hur mycket solceller bör jag installera?*
<https://www.solcellskollen.se/vanliga-fragor/hur-mycket-solceller-bor-jag-installera>
[2022-05-14]
- Svenska Kraftnät (2020). *Minskad överföringskapacitet i kraftsystemet*.
<https://www.svk.se/press-och-nyheter/nyheter/allman-na-nyheter/2020/minskad-overforingskapacitet-i-kraftsystemet/> [2022-04-11]
- Teknikföretagen (2022) *Ökade energipriser har slagit igenom på ett bredare plan*.
<https://www.teknikforetagen.se/nyhetscenter/ekonomisk-analys/2022/okade-energipriser-har-slagit-igenom-pa-ett-bredare-plan/> [2022-05-15]
- Tzimas, E. Filiou, C. Petevs, SD and Veyret J.-B. *Hydrogen Storage: State-of-the-art and future perspective*. Petten, The Netherlands.
<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC26493/EUR%2020995%20EN.pdf> [2022-04-16]
- Vätgas Sverige (2013). *Vätgas och bränsleceller - pusselbitar i det förnybara energisystemet*.
https://www.vatgas.se/wp-content/uploads/2016/03/NM_broschyr130411_lowres.pdf
[2022-05-03]
- Vätgas Sverige (2016). *Vätgas som energilager*.
<https://vatgas.se/faktabank/energilagring/> [2022-04-27]

Vätgas Sverige (2021). *Småskalig vätgasproduktion och självförsörjande hus redan verklighet i Sjöbo*.

<https://vatgas.se/2021/10/11/smaskalig-vatgasproduktion-och-sjalvforsorjande-hus-redan-verklighet-i-sjobo/> [2022-06-08]

Uniper (u, å). *Vätgas*.

https://www.uniper.energy/sverige/vatgas?gclid=CjwKCAjwu_mSBhAYEiwA5BBmf_K7FHWpqDrFg7d9E7aRq8mWFfs4iuw_2f6gpLiF2X6ngTUS53vjYBoCjw4QAvD_BwE
[2022-04-19]

U.S, Department of Energy (2022). *Hydrogen Production: Electrolysis*.

<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis> [2022-05-05]

Wikicommons (2022).

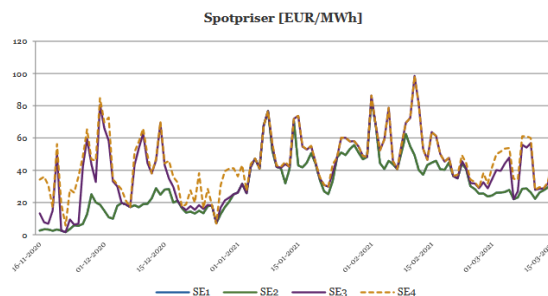
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?search=fuelcells&title=Special:MediaSearch&go=Go&type=image> [2022-04-17]

Yilanci, A. Dincer, I. Ozturk, H.K. (2008). Performance analysis of a PEM fuel cell unit in a solar–hydrogen system. *International Journal of Hydrogen Energy*. 33(24), ss. 7538-7552.
doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.10.016

BILAGA 1: Svenska Kraftnät rapport 2021, Elpriser

Elpriser

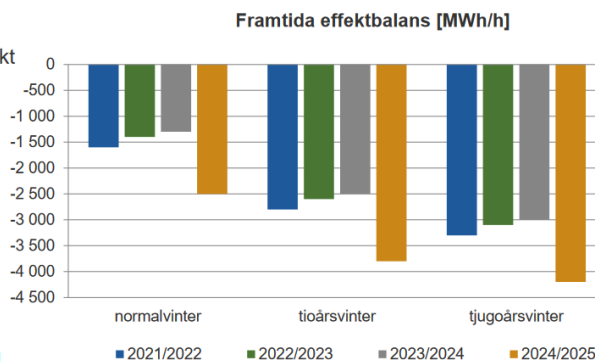
- > Timpriset per elområde sätts av tillgång och efterfrågan (produktion & förbrukning)
- > Medelpriset för vintern var 39 euro/MWh (förra vintern 26 euro/MWh)
- > Medelpris per elområde:
SE1: 31
SE2: 31
SE3: 41
SE4: 46
- > Negativt elpris en gång, 27 dec (SE4, Danmark, Tyskland). Förra vintern var första gången i Sverige.
- > Högsta pris: 254 euro/MWh, 30 nov (förra vintern 76 euro)



BILAGA 2: Svenska Kraftnät rapport 2021, Prognos Kraftbalans 2021-2024

Kraftbalans – kommande fyra åren

- > Ökande vindkraft ger större variation i tillgänglig effekt
→ mer svårplanerat.
- > Lågt elpris kan pressa undan planerbar produktion, både periodvis och leda till nedläggningar
→ mer svårplanerat.
- > Förbrukning: 2024/2025 börjar elektrifieringen av industrin ta fart. Elbilar ökar också succesivt, men fortfarande bara liten del av total förbrukning.
- > Lönsamhet för flexibilitet: ännu låg inom snar framtid.





HÖGSKOLAN I BORÅS

Besöksadress: Allégatan 1 · Postadress: 501 90 Borås · Tfn: 033-435 40 00 · E-post: registrator@hb.se · Webb: www.hb.se