



CHALMERS

Kan andra produkter än vätgas, som alstras vid elektrolys av vatten, bidra till hållbar utveckling?

En undersökning utifrån bränslecellsdriven fordonstrafik

Examensarbete inom Sjöingenjörsprogrammet

Valter Zagroba

RAPPORTNR. SI-15/159

Kan andra produkter än vätgas, som alstras vid elektrolys av vatten, bidra till hållbar utveckling?

En undersökning utifrån bränslecellsdriven fordonstrafik

Valter Zagroba

Institutionen för sjöfart och marin teknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige, år 2015

Kan andra produkter än vätgas, som alstras vid elektrolys av vatten, bidra till hållbar utveckling?

En undersökning utifrån bränslecellsdriven fordonstrafik.

Can other products than hydrogen, created by electrolysis of water, contribute to a sustainable development

A study out of the transport sector

Valter Zagroba

© Valter Zagroba, 2015.

Rapportnr. SI-15/159

Institutionen för sjöfart och marin teknik

Chalmers tekniska högskola

SE-412 96 Göteborg

Sverige

Telefon + 46 (0)31-772 1000

Tryckt av Chalmers

Göteborg, Sverige, år 2015

Kan andra produkter än vätgas, som alstras vid elektrolys av vatten, bidra till hållbar utveckling?

En undersökning utifrån bränslecellsdriven fordonstrafik.

Valter Zagroba

Institutionen för sjöfart och marin teknik

Chalmers tekniska högskola

Sammanfattning

Sverige, liksom övriga världen, står inför ett omfattande skifte av energisystem bort från fossila energikällor till ett mer hållbart energisystem. I denna uppsats behandlas landbaserad fordonstrafik, som kan drivas med elmotorer. Jag avgränsar mig till att studera fordon som drivs av bränsleceller matade med vätgas. Frågan är om biprodukter till vätgas producerad genom elektrolys av vatten samt om biprodukterna till framdrivning av fordonen kan användas för att underlätta skiftet av energisystem. Undersökningen har gjorts som en litteraturstudie, som också tar i beaktande att det skall finnas praktiskt fungerande teknologier. Jag fann att syrgasen kan nyttiggöras på flera sätt samt att värme, kyla, vätgas och vatten kan komma att bidra till ekonomin vid transformationen av energisystem. Vidare fann jag, att med nuvarande bränslecellsteknik, kan vätgas i bränsleceller inte i stor skala ersätta fossila bränslen eftersom en de nödvändiga metallerna är relativt sällsynta. Därtill kommer att tillgängligheten, med nuvarande teknik, till de fossilfria flödande energikällorna såsom sol, vind och vatten är otillräcklig.

Nyckelord: Bränsleceller, vätgas, syrgas, fordonstrafik, elektrolys, vatten, värme, kyla, energisystem, platina, återvinning.

Abstract

Sweden, as rest of the world, stands before an extensive alteration of the energy technology system, away from the use of fossil fuels to a more sustainable energy system. In this report land based traffic, driven by electric motors, is discussed. The thesis is about vehicles propelled by fuel cells, fuelled by hydrogen. The question is if the by-products of the electrolysis of water and the by-products of hydrogen fuelled fuel cell driven vehicles, can be used to facilitate the technology shift. The thesis is a literature study, which also take to account that there should be functional and commercial technologies available. It was found that the oxygen can be utilized in several ways, heat, chill, hydrogen and water can make an economical contribution to the technology shift. It was further found that existing fuel cell and electrolysis technologies cannot replace the use of fossil fuels in a big scale, cause of the lack of the scarce metals. To that the availability of the flowing energy sources, as sun and wind power, are with current technologies not ample enough.

Keywords: Fuel cell, hydrogen, oxygen, traffic, electrolysis, water, heat, chill, energy system, platinum, re-cycling.

Förord

Jag vill rikta ett stort tack till både Bo Eriksson och min käresta Helena Samuelsson.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	i
Abstract.....	ii
Förord	iii
Figurförteckning	v
Tabellförteckning.....	v
1 Introduktion.....	1
1.1 <i>Syfte.....</i>	2
1.2 <i>Frågeställning.....</i>	2
2 Avgränsningar	2
3 Bakgrund.....	3
3.1 <i>Elektrolys av vatten till vätgas och dess övriga produkter.....</i>	5
3.1.1 Handhavande av vätgas	7
3.1.2 Handhavande av syrgas.....	7
3.1.3 Handhavande av värme.....	7
3.2 <i>Generering av el i bränsleceller och dess övriga produkter</i>	7
3.2.1 Bränslecellens funktion och produkter	8
3.2.2 Handhavande av bränslecellsprocessens produkter.	9
3.3 <i>Sammanfattning av de funna biprodukterna.....</i>	10
4 Metod	10
5 Resultat.....	10
5.1 <i>Specifika användningsområden för biprodukten syrgas.....</i>	10
5.1.1 Syre från elektrolysprocessen	10
5.1.2 Syrgas som bidrag till restaurering av syrefattiga havs- och sjöbottnar.....	11
5.2 <i>Värme från elektrolysprocessen.....</i>	12
5.2.1 Fjärrvärme	12
5.2.2 Vattenånga från bränslecellsprocessen	12
5.3 <i>Värme från bränslecellsprocessen.....</i>	12
5.4 <i>Kyla från bränslecellsprocessen.....</i>	13
6 Diskussion	13
7 Slutsatser	17

1 Figurförteckning

Figur 1. Elektrolyprocessens produkter	5
Figur 2. Bränslecellens produkter	8
Figur 3 Bränslecellens funktion. Illustration: Helena Samuelsson	9

Tabellförteckning

Tabell 1 Sammanställning av kommersiellt tillgängliga elektrolysteknologiers produktionskapacitet för vätgas och syrgas, uttryckt i kg/h (kilogram/timme), samt verkningsgrad, det vill säga hur mycket elektrisk energi som går åt för att producera 1 kg vätgas i förhållande till den i vätgasen teoretiskt lagrade energin.....	6
Tabell 2. "Ekologisk status" i Svenska kust-, sjö- och vattendragsförekomster med avseende på "Ytvattenrelaterade problem" med "Övergödning och syrefattiga förhållanden"	1

1 Introduktion

Sverige, liksom övriga världen, behöver av hållbarhetsskäl ställa om samhället till fossilfri energianvändning. Det finns en mängd hinder för att genomföra sådana tekniskiften och jag tänker begränsa mig till en möjlighet: Att driva den landbaserade fordonstrafiken med vätgasmatade bränsleceller.

Gröndahl and Svanström (2011) visar en modell för hållbarhetsprinciper angående hur våra naturresurser ska hanteras. Naturresurserna kategoriseras som:

- Lagerresurser: till exempel fossila bränslen. Beträffande dessa ger de det komprimerade rådet ”minimera användning eller åstadkom ett hundra procentigt tekniskt kretslopp”.
- Fondresurser: till exempel skog. Beträffande dessa ger de rådet ”gör uttag, men inte större än återväxten.”
- Flödande resurser: till exempel vindkraft. Beträffande dessa ger de rådet ”använd gärna, men så effektivt som möjligt” (Gröndahl & Svanström, 2011).

Doll and Wietschel (2008) visar att introduktion av vätgas som bränsle i fordonstrafiken på ett betydande sätt kan minska samhällets kostnader i form av minskade ohälsotal i befolkningen och i miljörelaterade kostnader. Kostnader som den fossilbaserade fordonstrafiken är orsak till, men ekonomiskt inte kompenserar fullt ut. De visar även att nyttjandet av lagerresurser kommer att minska, samt att de fonderade och de flödande naturresurserna kommer att nyttjas effektivare och i större utsträckning, om vätgas introduceras som drivmedel i fordonstrafiken (Doll & Wietschel, 2008). Mitt arbete tar avstamp i hållbarhetsprincipen för flödande resurser, att använda teknologierna kring vätgasdriven fordonstrafik på effektivast möjliga sätt.

Vi kan idag inte omvandla flödande energikällor i sådan omfattning att vi kan köra våra fordon direkt drivna av dessa. Det finns experimentbilar som drivs direkt av solceller, men de får problem om nätterna och när det är molnigt. Våra fordon är således beroende av lagrad energi och lär så vara även inom överskådlig framtid. Av de alternativ till fossila bränslen som finns i dag, så som biobränslen, batteridrift eller vätgasdrift, kommer ingen på egen hand att kunna ersätta fossil energi i våra fordon (Armaroli & Balzani, 2011; Doll & Wietschel, 2008). För närvarande är batteridrift den effektivaste metoden att driva fordon med flödande resurser, sett i kort tidsrymd. Batteriteknologin har minst förluster sett i ”well to wheel” (från källa till hjul) ur energisynpunkt, vilket är viktigt. Däremot är batteriteknologin inte lika utvecklad för att lagra stora mängder energi ifrån till exempel solkraft om sommarhalvåret, för att senare nyttjas i fordon under vinterhalvåret. En av vätgasens förtjänster är att det i stor skala och över lång tidsrymd går att lagra energi i den, genom elektrolys av vatten, på ett sådant sätt att den är användbar i fordon. Att ladda ackumulatorer med el från vätgasdrivna bränsleceller är dock inte lika effektivt som att driva bränslecellsfordon direkt med vätgas. Bränsleceller genererar elkraft och fordonen drivs av elmotorer. I detta avseende är bränslecellsdrivna fordon lika eldrivna fordon som drivs av el från ackumulatorer. Jag räknar med att båda dessa tekniker kan komma att användas i stor skala och jag ser dem som kompletterande möjligheter. Drivmotorerna i de olika bilarna skiljer sig inte i verkningsgrad. Elenergin för laddning av batterier måste finnas tillgänglig just då batteriet laddas, vätgasen kan lagras och därmed finnas tillgänglig vid behov.

Nu lämnas batteridrivna fordon därhän. Bränsleceller kan drivas av många olika bränslen, bland annat metanol, men vi begränsar oss till vätgasdrivna bränsleceller då det är sådana som nu lanseras på fordonsmarknaden.

Att införa bränslecellsbilar innebär ett teknikskifte med flera tröskleffekter. En tröskel är att det behövs ett nät av tankställen för vätgas spritt över hela landet. Samtidigt bör produktionen ske distribuerat över landet för att minimera transportbehov av gaserna. Det är i teknikskiftet svårt att finna medel för investeringar i vätgastankställen så länge det inte finns någon efterfrågan från vätgasdrivna fordon och det är svårt att finna köpare till vätgasdrivna fordon så länge det knappast finns några tankställen. Det är i detta moment 22, som jag är intresserad av att studera om biprodukterna vid hanteringen av vätgas kan komma att bidra med incitament till att investera i teknikskiftet.

Bränslecellstekniken är idag naturligtvis behäftad med många nackdelar som jag behandlar mycket sparsamt. En sådan begränsning är tillgång till platina (Armaroli & Balzani, 2011; Doll & Wietschel, 2008) som används som katalysatorer i bränslecellerna och i elektrolysörer. I den mån denna metall återvinns ur använda produkter blir miljöbelastningen mycket mindre (Doll & Wietschel, 2008).

1.1 Syfte

Att genom litteraturstudier undersöka och beskriva några förutsättningar för att biprodukter till vätgashanteringen i praktiskt fungerande tillämpningar skulle kunna bidra till ett resursutnyttjande, som ger tillskott för att underlätta en introduktion av vätgasdrivna bränsleceller i fordonstrafiken.

1.2 Frågeställning

Fråga 1 Finns det praktisk användning för biprodukterna som erhålls vid elektrolys av vatten för vätgasproduktion, samt vätgasdriven bränslecellsanvändning?

Fråga 2 Kan någon av biprodukterna ge en eftersträvd miljöeffekt utöver den fossilfria driften??

2 Avgränsningar

Bränsleceller kan drivas av flera olika ämnen såsom direkt av metanol eller vätgas utvunnen ur till exempel naturgas. Jag begränsar mig till energisystem baserade på vätgas- och luft-syrgasmatade bränsleceller för fordonstrafiken. Den erforderliga vätgasen kan alstras på en mängd olika sätt och jag avgränsar undersökningen till vätgasen som alstras genom elektrolys av vatten.

3 Bakgrund

Enligt Elding (2015) är väte universums vanligaste grundämne. Däremot finns vätgas knappt i fri form på jorden. Vätet är bundet i kemiska föreningar. Vanliga föreningar är vatten och kolhydrater, så som i växter och djur som också så småningom blir till fossila resurser. Vätgas måste alltså framställas ur dessa ämnen. Det kan ske på många olika sätt men alla kostar energi. Vätgasproduktion genom förgasning och ångreforming av biologiska kolväten är idag möjligt, men görs istället ur fossila kolväten då dessa är billigare ur ett marknadsekonomiskt perspektiv. Vätgas kan också produceras genom elektrolys av vatten, detta görs idag endast i förhållandevis liten skala då produktion ur de fossila råvarorna även i jämförelse med detta är billigare ur ett marknadsekonomiskt perspektiv (Bertuccioli et al., 2014; Doll & Wietschel, 2008). Stora mängder väte produceras för att användas inom bland annat jordbruk, transport- och industrisektorn. Industriell framställning av ammoniak, metanol och saltsyra, avsvavling av petroleum, katalytisk krackning av petroleumprodukter och hydrogenering av omättade oljeprodukter görs med hjälp av vätgas. Vätgas framställs och används således redan för att kunna använda fossila kolväten. (Elding, 2015).

I detta arbete är vätgasproduktionen avsedd för lagring av energi främst från intermittent flödande energikällor så som sol-, vind och vågkraft. I takt med att dessa energiformer introduceras på energimarknaden blir marknaden allt mer komplex. Periodvis sker det, av olika tekniska orsaker, en överproduktion av energi i våra elnät (Sundberg, 2014). Denna överskottsenergi kan vara värd att ta hand om och lagra till andra tillfällen då den behövs, oavsett om den är baserad på förnybara källor eller fossila källor.

Det är svårt att lagra flödande energi och/eller överproduktion av energi. Detta görs idag främst genom vattenkraftsdammar, där vattnet vid överproduktion pumpas tillbaks till dämnet, men den totala potentialen i tekniken är för liten (Alpman, 2015). Omfattande forskning pågår kring energilagring, där lagring i vätgas genom elektrolys av vatten kan vara en av de mest lovande teknologierna (Doll & Wietschel, 2008).

Väte har relativt kolväten en låg energidensitet (energiinnehåll/volymenhet). Flytande väte tar ca tre gånger så stor plats som bensin om samma energimängd ska lagras, vilket är en bidragande tröskeffekt till väte som energibärare för fordonsbranschen. För att få ner volymen på vätgasen som ska lagras (det vill säga öka energidensiteten) tillämpas idag komprimering, kylning till flytande form och i stationära lagringslösningar i metallhydrider. Vätgasen komprimeras till 200 bar, 350 bar, 700 bar eller 900 bar, främst beroende på användningsområde (AGA, 2015d; Vätgas Sverige & Gasföreningen, 2009). Om man kyller väte till -253 °C i normalt lufttryck håller den sig flytande (AGA, 2015a). Att öka energidensiteten på vätgasen kostar energi. De tekniker för att öka energidensiteten som ger högst energidensitet är också de tekniker som kräver mest energi i processen. För att sedan hålla vätgasen med den högre energidensiteten lagrad under längre tid krävs för vissa lagringsformer också energi: flytande väte och flytande metangas kräver kontinuerlig kylning utifrån eller att man låter gaserna ånga av. Minst energiförluster i processen att både öka energidensitet och lagra energin en längre tid erhålls med komprimering och lagring i metallhydrider.

Metallhydrider är metallstrukturer vilka under lågt tryck löser väte. När trycket minskar släpper metallstrukturen vätet. Metallhydrider blir dock väldigt tunga och har svårt att släppa vätet ifrån sig tillräckligt fort för många applikationer (Vätgas Sverige & Gasföreningen, 2009).

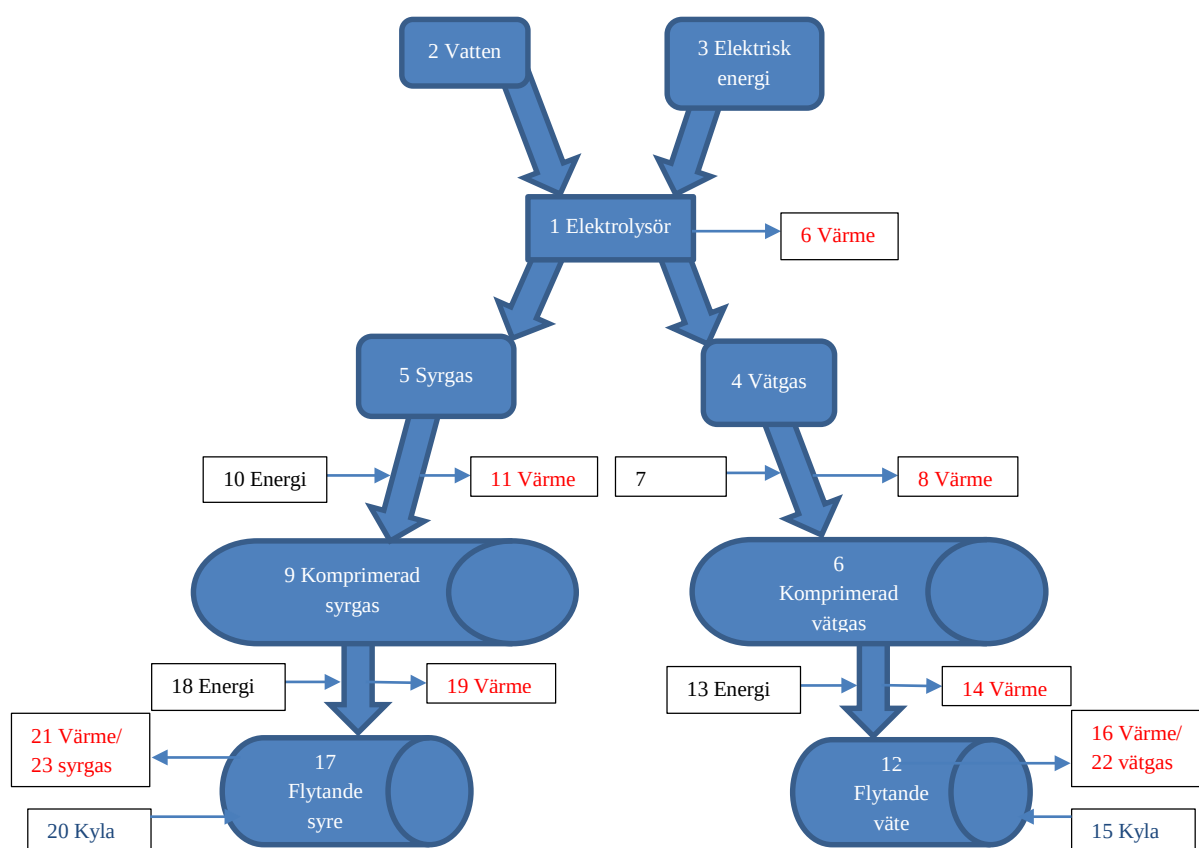
Energilagring i vätgas producerat genom elektrolys av vatten kan göras distribuerat, då elnätet är väl utbyggt, och på så vis minimera behovet av transporter av gaser och investeringar i övrig infrastruktur såsom exempelvis pipelines. Även om det totalt sett inte är lika energi- och kostnadseffektivt att ha många små vätgasproducenter, så sprids investeringsrisken över fler intressenter.

Att bestämma vätgasens miljöpåverkan blir då till en stor del att avgöra ur vilket ämne vätgasen framställs samt vilken energikällan är för framställningsprocessen, men även att se vad det kostar att producera vätet i energiförluster.

Serietillverkade bilar, som drivs av vätgasdrivna bränsleceller, har nyligen lanserats på marknaden. Hyundai ix35 Fuel Cell har en trycktank om 144 liter av kompositmaterial, 700 bar och den tar ca 5 kg vätgas. Bilen kan köra så långt som 594 km och ger en motoreffekt på 100 kW (Hyundai Bilar, 2015; Söderholm, 2015). Hyundai använder samma chassi för bensen eller dieseldrift och har då en bränsletank på 58 liter. Med en bensindriven tvålitersmotor med effekt om 122 kW förbrukas 6,7 liter bensen/100 km. Dieselmotoralternativet om 135 kW förbrukar 6 liter diesel/100 km. Hyundai friskriver sig angående räckvidden för dessa och påpekar att den beror av körstil (Hyundai, 2015). En överslagsräkning ger att räckvidden torde vara 866 km för bensenmotorn och 977 km för dieselmotorn. Det noteras att de anger volymen för kupé och lastutrymme på olika vis för bränslecellsbilen och förbränningsmotorbilarna.

3.1 Elektrolys av vatten till vätgas och dess övriga produkter.

Enligt Holmström (2015) är elektrolys ett ”elektrokemiskt förlopp varvid utifrån tillförd elektrisk energi framkallar en kemisk reaktion”. Elektrolys kan således användas för att framställa ett antal ämnen, så som t.ex. klorgas och aluminium. I figur 1 illustreras elektrolysprocessen och dess produkter med en schematisk bild. Elektrolysprocessen (1) tillförs vatten (2) och elektrisk energi (3). Ur processen får man: Vätgas (4), syrgas (5) och värme (6).



Figur 1. Elektrolysprocessens produkter

Den process som avses i punkt 1 Elektrolysör i Figur 1 avser mer specifikt processen för produktion av vätgas, enligt reaktionen $2\text{H}_2\text{O} + \text{elenergi} \Rightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2$ (Holmström, 2015). De olika tillämpade teknologierna för elektrolys av vatten för produktion av vätgas kategoriseras utefter deras elektrolyt. I en kommersiell översikt hävdar Bertuccioli et al. (2014) att de kommersiellt tillgängliga teknologierna för elektrolys av vatten i dag är Alkaliska (Alkaline), Proton Exchange Membrane (PEM) och Anion Exchange Membrane (AEM). AEM kallas även alkaline PEM (Polymer Electrolyte Membrane)). En lovande teknologi för industriell kapacitet är dessutom Solid Oxide Electrolysis (SOE), vilken har låga kostnader och god verkningsgrad, men endast finns för småskalig vätgasproduktion i laborationsmiljö eller i större experimenttillämpningar. De redovisar i Appendix 2 en sammanfattning över hur 17 tillverkare i världen (Europa och USA) har uppgivit data kring sina produkter. De listade verkningsgraderna varierar mellan 52-67 % jämfört mot LHV_{H_2} (LHV =Low Heating

Value=Effektivt värmevärde=33,3 kWh/kg H₂) (Bertuccioli et al., 2014). En fördjupad sammanställning visas i **Tabell 1** s.6.

Tabell 1 Sammanställning av kommersiellt tillgängliga elektrolysteknologiers produktionskapacitet för vätgas och syrgas, uttryckt i kg/h (kilogram/timme), samt verkningsgrad, det vill säga hur mycket elektrisk energi som går åt för att producera 1 kg vätgas i förhållande till den i vätgasen teoretiskt lagrade energin.

Teknologi	Kapacitet (kg H ₂ /h)	Kapacitet (kg O ₂ /h)	Renhet H ₂ (Avrundat) (%)	Arbetstryck (bar)	Arbetstemperatur (°C)	Effekt (kW)	Investeringskostnad (€/kW)	Verkningsgrad/effektivitet (kWh el/kg H ₂)	Verkningsgrad (HHV _{H2} /(kWh el/kg H ₂))
Alkaline	0,022 till 68,3 ^[2]	0,18 till 541 ^[6]	99,5+ ^[1]	>30 ^[1]	60 till 80 ^[5]	1,8 till 5300 ^[1]	1000 till 1200 ^[1]	50 till 78 ^[3]	0,79 till 0,51 ^[4]
PEM	0,0009 till 21,6 ^[2]	0,007 till 171 ^[6]	99,9+ ^[1]	>30 ^[1]	50 till 80 ^[5]	0,2 till 1150 ^[1]	1900 till 2300 ^[1]	50 till 83 ^[3]	0,79 till 0,47 ^[4]
AEM	0,009 till 0,09 ^[2]	0,071 till 0,71 ^[6]	99,4+ ^[1]			0,7 till 4,5 ^[1]			
[1] "Table 1: Overview of commercially available electrolyser technologies" (Bertuccioli et al., 2014). [2] "Table 1:..." omräknade från Nm³ H₂/h till kg H₂/h (Bertuccioli et al., 2014). [3] "Figure 3: Electrical energy input (efficiency) trend lines for alkaline and PEM elektrolysers" (Bertuccioli et al., 2014). [4] Uträknad med HHV_{H2}=39,6 kWh/kg H₂. (HHV=High Heating Value=kalorimetriskt värmevärde) (Bertuccioli et al., 2014). [5] (Carmo, Fritz, Mergel, & Stolten, 2013). [6] Egen uträkning utifrån kapacitet H₂ * (888/112) och vattnets molekylstruktur.									

1 Nm³ är den volym 44,6 kmol gas upptar vid 1,01325 kPa och 0 °C. Vikten för olika gaser är således olika, beroende av gasens sammansättning och de ingående molekylstrukturerna. 1 Nm³ vätgas, H₂ väger enligt gaslagen och allmänna gaskonstanten 8,314 J/(mol*K) 0,0899 kg (Ekbom, 1995). I fortsättningen kommer vikten på gasen att användas för att ange mängd. I de fall källorna anger i Nm³ räknas mängden om till vikt. Skälet till detta är att det är massan av vätgas som har ett energiinnehåll och det är också förhållandevis enkelt att relatera massan till olika lagringsmedia.

1 m³ vatten väger 1000 kg och består av molekylen H₂O. Vätets atommassa är 1,0080 u, syrets atommassa är 15,9994 u och vattenmolekylens molekylmassa är 2*1,01+16,0=18,02 u. 1000 kg vatten ger alltså genom elektrolys $2*1,01*1000/18,02=112$ kg vätgas och $16,0*1000/18,02=888$ kg syrgas (Ekbom, 1995).

3.1.1 Handhavande av vätgas

Beroende på om vätgasen används omedelbart eller inte, kan det vara nödvändigt att buffra vätgasen för framtida bruk. Vätgasen kan komprimeras och buffras i trycktankar, se Figur 1 s.5 (6). Enligt Erik Wiberg, Vätgas Sverige, förvaras den fossil-producerade vätgasen på Sveriges två befintliga tankstationer för vätgas i trycktankar. En stor tank med 200 bars tryck och en mindre med 900 bars tryck, för att kunna förse de bilar med tankar som tar 5 kg vätgas med 700 bar på kort tid. Att fylla tanken i en bil tar ca 3 minuter, var på den mindre 900 bars tanken åter fylls på från den större 200 bars tanken (personlig kommunikation, 2015-04-17). Ska stora mängder vätgas lagras eller transporteras kan de kylas till vätskefas och buffras i vacuumisolerade cisterner (12) (AGA, 2015a). Både kompressions- (7) och kylprocessen (13) kräver energi och de ger båda värme (8)(14) som biprodukter. Flytande väte (12), behöver kontinuerligt kylas för att hålla -253 °C om det inte låts ånga av för att hålla rätt tryck och temperatur (22). Denna kylprocess kräver energi (15) och ger värme (16) som biprodukt.

3.1.2 Handhavande av syrgas.

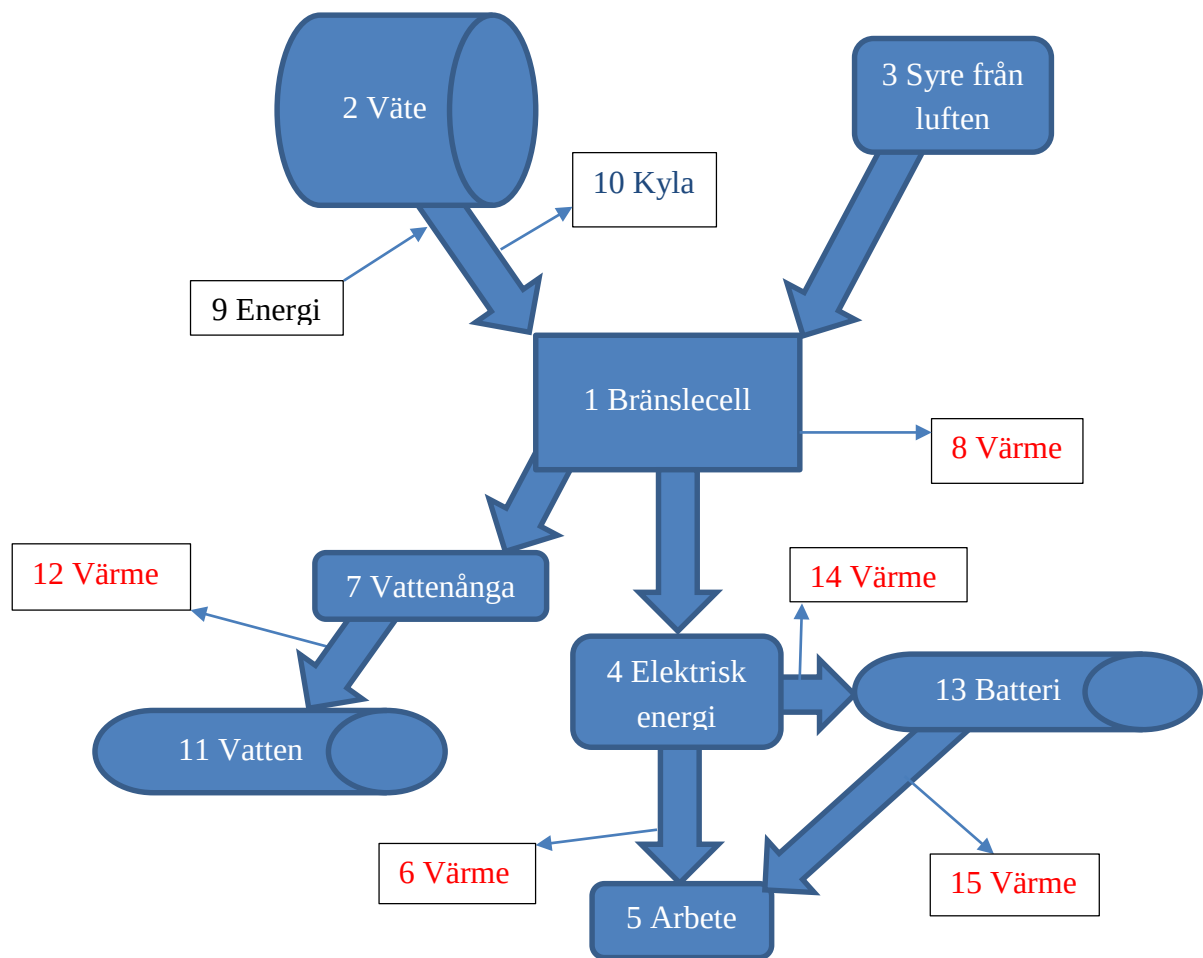
På samma sätt som för vätgas kan det vara nödvändigt att buffra syrgas för att hålla erforderlig tillgång. Syrgas förvaras traditionellt i små mängder komprimerat i tryckkärl (9), ca 300 bar, se Figur 1 (AGA, 2015d). Då stora mängder ska transporteras och förvaras kylar man syrgasen till flytande form, - 183 °C, och förvarar syret i vacuumisolerade kryotiska mobila tankar eller leder det flytande syret i vacuumisolerade rör till kunden (AGA, 2015a). Både komprimeringsprocess (10) och kylprocess (18) kräver energi och ger värme som biprodukter (11)(19). Då de kryotiska tankarna inte är byggda för att klara höga tryck, måste antingen syrgasen släppas ut allteftersom den ångar av eller kontinuerligt kylas (20), vilket kostar energi och ger värme (21) som biprodukt.

3.1.3 Handhavande av värme

Antingen används värmen direkt på plats eller transporteras till plats där den används, till exempel genom anslutning till fjärrvärmesystem. Värme kan lagras i isolerade ackumulatortankar med vatten.

3.2 Generering av el i bränsleceller och dess övriga produkter

Vätgas (2) och syre från luften (3) tillförs bränslecellen (1). Processen ger då produkterna elenergi (4), vattenånga (7), värme (8) och kyla (10), se Figur 2 s. 8.

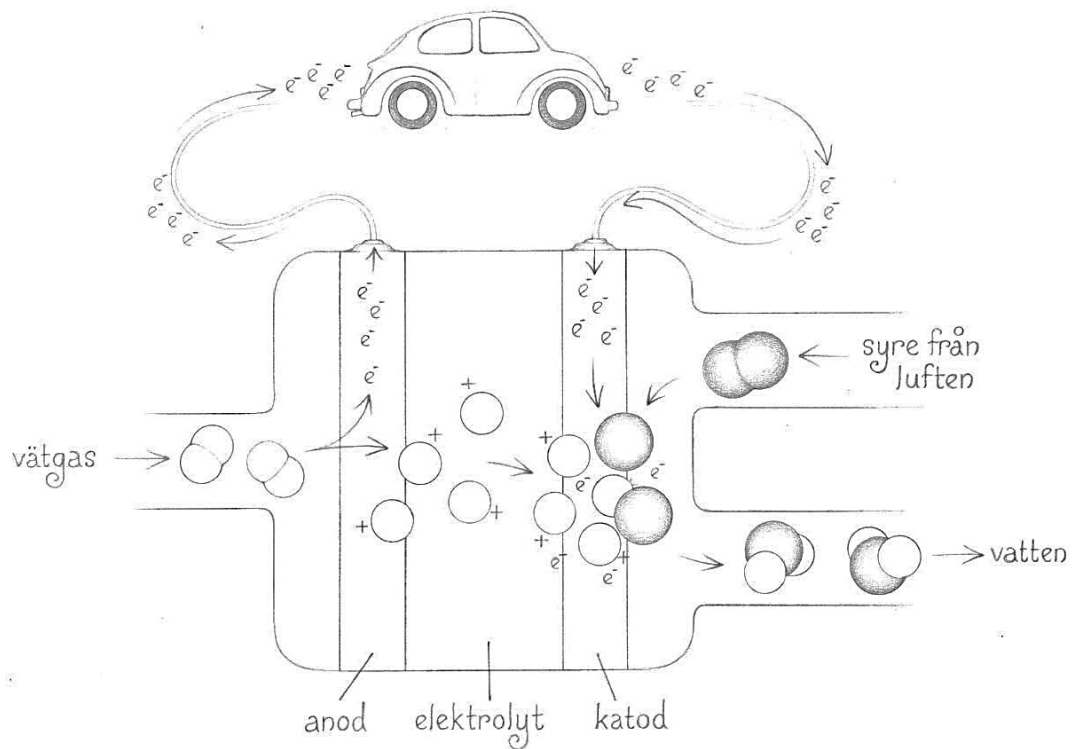


Figur 2. Bränslecellens produkter

3.2.1 Bränslecellens funktion och produkter

I Nationalencyklopedin (Lindström & Sylwan, 2015) definieras en bränslecell som en elektrokemisk cell med yttre tillförsel av ett bränsle (i allmänhet vätgas) och en oxidant (syrgas, ofta luftsyre). Vidare konstaterar de: "Den höga verkningsgraden vid låg arbetstemperatur är bränslecellens viktigaste egenskap. I motsats till förbränningsmotorn avger därför bränslecellen inga skadliga biprodukter, såsom kväveoxider" (Lindström & Sylwan, 2015)

En förenklad beskrivning av bränslecellen är att bränslecellen består av två elektroder, anod



Figur 3 Bränslecellens funktion. Illustration: Helena Samuelsson

och katod, vilka är separerade med en vätska eller ett membran, kallad elektrolyt, se Figur 3 s. 9. Elektrolyten leder inte ström, elektroner, men väl joner. Då vätgas leds till anoden och syrgas (från luften) till katoden, kan två kemiska reaktioner ske om anod och katod har elektrisk förbindning, det vill säga att elektroner kan ledas mellan anod och katod via en elektrisk krets.

- Vätgasen, H_2 , sönderdelar sig till två vätejoner, H^+ , samt två elektroner vilka fångas upp av anoden.
- Vid katoden kan då syrgas, O_2 , sönderdelas sig till två syrejoner, O^{2-} . Syrejonerna förenar sig med vätejonerna, H^+ , vilka leds genom elektrolyten, och elektronerna som leds genom den elektriska kretsen och förenar sig till vatten, H_2O .

(Chalmers, 2015)

Bränslecellsteknologierna för vätgasdrift brukar kategoriseras efter vilken elektrolyt som används. Vidare kan olika teknologier arbeta med olika arbetstryck och under olika arbetstemperatur, vilket påverkar bränslecellens verkningsgrad.

3.2.2 Handhavande av bränslecellsprocessens produkter.

Beroende på avsättningsmöjligheten för produkterna vid tillfället för driften av bränslecellen kan det vara nödvändigt att buffra biprodukterna.

Elenergin från bränslecellen avses användas direkt. Då elenergin lagras i ett batteri är det för att kompensera bränslecellens tröghet att svara på belastningsändringar. Denna laddström till batteriet ger värme som biprodukt, liksom övrig elenergi gör.

Vattenånga (7) kan kondenseras till vatten i vätskefas (11), vilket ger värme (12) som biprodukt. Kyla är svårt att buffra effektivt, men kan ändå vara användbart.

3.3 Sammanfattning av de funna biprodukterna

Elektrolysisprocessen ger syre och värme som biprodukter. Den vätgasdrivna bränslecellsprocessen ger vattenånga, värme och kyla som biprodukter, samt eventuellt även vätgas om vätet förvaras kryogent.

4 Metod

Genom litteraturstudier söker jag praktiska tillämpningar där biprodukterna från de redovisade vätgasteknikerna används. Jag redovisar ingen fullständig lista över användningen av biprodukterna utan nöjer mig när jag funnit åtminstone en tillämpning. De tillämpningar jag söker är sådana, som ger en nytta ur hållbarhetssynpunkt utöver den fossilfria framdriften av fordon. Särskilt letade jag efter tillämpningar där inte bara resurserna användes utan att de också skulle bidra till att i biotoper återställa bristande funktioner i fall där bristerna anses vara antropogena. Jag sökte i databaser med vetenskapliga artiklar och allmänt på internet. Utifrån de träffar jag fann sökte jag mig vidare. I databaserna (Sumon, Web of Science, Nationalencyklopedin m.fl.) över vetenskapliga artiklar sökte jag i referenser samt i de artiklar, som senare refererat artikeln. De övriga källorna på internet gav på olika sätt uppslag till att söka vidare. När jag fann tillämpningen av syresättning av sjöar sökte jag också i Vattenmyndighetens presentationer och databaser (VISS). När jag hade svårt att hitta uppgifter tog jag personlig kontakt med enskilda personer dels från Vätgas Sverige, en intresseorganisation, och dels från AGA, en distributör och producent av gaser

5 Resultat

Här redovisar jag svar på mer preciserade frågor utifrån de produkter, utöver vätgas, som processerna bidrar med.

5.1 Specifika användningsområden för biprodukten syrgas

5.1.1 Syre från elektrolysisprocessen

Syrgas har ett flertal olika användningsområden.

Kato, Kubota, Kobayashi, and Suzuoki (2005) belyser att syrgasen som bildas i PEM-processen är så ren att den är användbar som läkemedel inom Japans sjukvård. Om det finns avsättning för vätgas producerat via elektrolys av vatten, så kan syrgasen ge ett ekonomiskt tillskott till investeringen, och öka processens energieffektivitet. Dock påtalar de att syrgas för läkemedelsanvändning kan produceras på ett ur ekonomisk synvinkel billigare sätt. De avser

att i en senare studie undersöka närmare hur stor del av den genom elektrolys producerade syrgasen som behöver ha avsättning, för att det ska löna sig att ta vara på den, men påtalar att även om stora mängder syrgas dumpas har dess användning inom sjukvården ekonomiska fördelar. Varken kalorimetriskt eller effektivt värmevärde för väte anges (Kato et al., 2005). Saxe and Alvfors (2007) visar att syrgasen som bildas vid elektrolys av vatten, med alkali-baserad teknologi, kan ge ekonomiskt bidrag till vätgasproduktion. Deras studie avser att använda syrgasen i Sveriges pappersmassaindustri och ett studiefall presenteras. Pappersmassefabriken behöver 7 300 000 kg_{O2}/år. För att få ut denna mängd syrgas som biprodukt vid elektrolys av vatten, krävs en elektrolysör med kapacitet om 1300 Nm³_{H2}/h (117 kg H₂/h) vilket ger en vätgasproduktion om 1 000 000 kg_{H2}/år. Att använda sig av biprodukten syre vid elektrolys, i stället för att producera syre med kryogen luftseparering, resulterar i en total energibesparing om 0,25 kWh/Nm³ H₂ (5,5 % av 4,4 kWh/Nm³ H₂). De anger kalorimetriskt värmevärde till HHV=3,55 kWh/kg H₂ (Saxe & Alvfors, 2007).

5.1.2 Syrgas som bidrag till restaurering av syrefattiga havs- och sjöbottnar

Att syresätta sjöar och vattendrag vilka är syrefattiga, främst på grund av övergödning och dålig cirkulation i vattnen, forskas det på en del:

Prepas and Burke (1997) utvärderar effekten av att syresätta en övergödd sjö, Lake Amisk i Kanada, med ny teknologi baserad på ren komprimerad syrgas. Vintertid tillfördes 593 kg_{O2}/dag och sommartid 1133 kg_{O2}/dag. De fann att tekniken fungerade och att sjön i många avseenden fick bättre ekologisk status under projektets gång (Prepas & Burke, 1997).

Lone Liboriussen et al. (2009) utvärderar effekten av att syresätta fem övergödda sjöar i Danmark med ren syrgas. Syretillförseln mellan de olika sjöarna varierade mellan 5,4–650 ton_{O2}/år och på dagsbasis, för att avgöra produktionskapacitet, mellan 50–4400 kg_{O2}/dag. De fann att sjöarnas ekologiska status ökade under syresättningen, men att sjöarna snabbt återtog sin tidigare status när syresättningen upphört, om inte flödet av näringar till sjöarna stoppats (L. Liboriussen et al., 2009).

Eriksson Wiklund and Sundelin (2003) konstaterar att syresättning av vattendrag kring Stockholm inte ökar risken för att skadliga metaller ska frigöras ur bottensedimenten och spridas i vattnet till följd av syresättningen.

Stigebrandt et al. (2015) rapporterar att forcerad syresättning av Byfjordens djupvatten, Sverige, förbättrade vattnets ekologiska status och inte påverkade omgivande vatten negativt. Experimentet genomfördes med vindkraftsdrivna pumpar vilka forcerade syrerikt ytvatten till det saltare och syrefattiga djupvattnet (Stigebrandt et al., 2015).

För att få en bild av potentiella syresättningsprojekt i Svenska vattendrag gjordes sökningar i Vattenmyndigheternas databas Vatteninformationssystem Sverige (VISS), relaterade till kriterier som framkommit ur (Eriksson Wiklund & Sundelin, 2003; Lone Liboriussen et al., 2009; Prepas & Burke, 1997; Stigebrandt et al., 2015) se **Tabell 2 s.Error! Bookmark not defined.**

Sammanfattning: Av 23161 registrerade kust-, sjö- och vattendragsförekomster har Vattenmyndigheterna inte bedömt 489 angående ekologisk status. 14224 vattenförekomster av 23161, har bedömts på den lägre delen av skalan angående ekologisk status. 2259 av

vattenförekomster med ekologisk status på den lägre delen av skalan (14224) bedöms ha ytvattenrelaterade problem i kategorin "Övergödning och syrefattiga förhållanden". I sökningar angående vilka åtgärder som kan vidtagas för att öka en vattenförekomsts kvalitet, bedömer Vattenmyndigheterna att två vattenförekomster är möjliga för åtgärden "syresättning"; kustvattenförekomsterna Byfjorden och Havsstensfjorden.

5.2 Värme från elektrolysisprocessen

5.2.1 Fjärrvärme

Saxe and Alvfors (2007) visar också att värmen från elektrolysisprocessen kan avsättas till ett fjärrvärmenät vilket ger en energibesparing om 0,75 kWh/Nm³H₂ (15,5 % av 4,4 kWh/Nm³H₂) vid vätgasproduktion, vilket på ett betydande sätt bidrar till den alkalibaserade elektrolysisprocessens energieffektivitet och ekonomi. I deras studie går det att förse högtemperaturdelen av fjärrvärmenätet med 80-110 °C varmt vatten, och lågttemperaturdelen kan ta emot vatten med 50-60 °C. De poängterar att den spillvärme som kompression av gaserna ger, inte ingår i deras studie.

5.2.2 Vattenånga från bränslecellsprocessen

AutoMotoTV (2014) visar i ett youtube-klipp att avgaserna från en personbil, Mercedes-Benz B-Class F-CELL, kan processas till drickbart vatten. I den dramatiserade framställningen visar de på det potentiella behovet av dricksvatten när bilen körs i ökenmiljö (AutoMotoTV, 2014). Bilen drivs av en vätgas och luft-syrematad bränslecell (Daimler, 2015).

I en populärvetenskaplig artikel i Teknikens värld, återger Rabe (2014) en intervju med Seiji Mizuno, designer av bilmodellen Toyota Mirais bränslecell. Toyota hävdar angående drickbarheten "att vattnet är säkrare än mjölk". "Men vattnet då? Ska det bara rinna ut och förångas i naturen? Det är tanken, men det går faktiskt att dricka". Utan att redovisa orsaken avslutas artikeln med: "Oavsett vattnets goda kvalitet rekommenderar Toyota inte att vi dricker det." (Rabe, 2014).

United Nations Department of Economic and Social Affairs (UNDESA) (2006) säger att 1,2 miljarder människor lever i områden med brist på tillgång till rent vatten och 500 miljoner människor närmar sig en liknande situation.

5.3 Värme från bränslecellsprocessen

Inga resultat har funnits angående hur värme tas hand om i bränslecellsdrivna fordon, eller angivelser för verkningsgraden för bränslecellerna i fordon.

Dock räknar Kato et al. (2005) på ett scenario vid ett sjukhus som producerar syrgas för eget bruk genom elektrolysis av vatten med PEM-teknologi. Produkten vätgas användes till en bränslecell med PEM-teknologi, som försåg sjukhuset med erforderlig ström. Den elektriska verkningsgraden var 36 %, samt att spillvärmen från bränslecellen togs om hand med en verkningsgrad på 40 %.

5.4 Kyla från bränslecellsprocessen

Inga resultat har funnits angående hur kyla tas om hand i bränslecellsdrivna fordon. Inte heller har det funnits angivelser vid vilket arbetstryck eller vilken arbetstemperatur bränslecellerna uträttar sitt arbete. Inte heller har det funnits resultat angående kyla för stationära bränslecellsapplikationer.

6 Diskussion

Jag hade stora svårigheter att arbeta med de vetenskapliga databaserna på grund av den stora mängden artiklar. De referenserna var ofta av bristande värde för mig, då de redovisar resultat från forskningsfronten och där det ännu inte fanns praktiska tillämpningar. I en del fall redovisade forskningsartiklarna beräkningar för industriellt bruk, men där det inte redovisades att de processer som beskrevs ännu kommit i kommersiell drift. Jag har valt att ta med några sådana resultat. För artiklar ur vetenskapliga databaser bedömer jag att källans värde är högt. När det gällde praktiskt fungerande tillämpningar är den vetenskapliga litteraturen mer sparsam. I det sökandet gav den allmänna sökningen på internet mer resultat. Jag har ur dessa källor främst tagit uppgifter från marknadsöversikter och från försäljningsmaterial. Ur källsynpunkt finner jag dessa uppgifter tillförlitliga med en dragning åt att sådana källor snarare kan antas ge en något förskönande bild av sakernas tillstånd än en underskattning av de fördelar man vill redovisa. På samma sätt värderar jag de personliga meddelandena från Vätgas Sverige, som är en intresseorganisation, och från AGA en försäljningsorganisation.

Jag finner att de olika processer som ingår i hanterandet kring vätgas, framställd genom elektrolys av vatten, som bränsle för fordonstrafiken ger ett antal biprodukter och att det har satts ekonomiska värden på en del av dessa. De biprodukter som erhålls vid elektrolysprocessen är värme, syrgas samt avångande vätgas om den förvaras kryogent utan yttre kylning. De biprodukter som erhålls vid användning av vätgasmatade bränsleceller är vattenånga, värme och kyla.

Elektrolysprocessens verkningsgrad påverkar mängden av biprodukterna, framförallt värme. Verkningsgraden definieras som den energi som finns lagrat i vätet (värmevärde) som produceras i förhållande till den energi som används för att generera vätet.

Ingen av källorna (Bertuccioli et al., 2014; Kato et al., 2005; Saxe & Alvfors, 2007) är överens om vätets kalorimetriska och effektiva värmevärde. Kato et al. (2005) har inte angivit värden alls, men talar ändå om elektrolysens effektivitet och verkningsgrad och hänvisar till totalt fyra källor:

Wurster R, Zittel W. Hydrogen energy. Published at the workshop on energy technologies to reduce CO₂ emissions in Europe: prospects, competition, synergy. Energieonderzoek Centrum Nederland ECN, Petten, The Netherlands, 11–12 April; 1994.

Berry GD. Hydrogen as a transportation fuel: costs and benefits. Report UCRL-ID-123465. Livermore, CA: Lawrence Livermore National Laboratory, US Department of Energy; 1996.

Basye L, Swaminathan S. Hydrogen production costs—a survey. SENTECH Inc., report DOE/GO/10170-778. Washington, DC: US Department of Energy; 1997.

Block DL. Comparative costs of hydrogen produced from photovoltaic electrolysis and from photoelectrochemical processes. Proceedings of the 12th World Hydrogen Energy Conference, Argentina; 1998.

Bertuccioli et al. (2014) och Saxe and Alvfors (2007) ger inte källhänvisning till de värmevärden de använder sig av, men gör resonemang kring systembegränsning för elektrolysprocessen, resonemang vilka skiljer sig åt. Bertuccioli et al. (2014) behandlar 17 tillverkares elektrolysörprodukter och försöker göra en så i rättvis systembegränsning som möjligt i jämförelsen mellan produkterna. De understryker att de data som behandlats i rapporten är tillhandahållna från tillverkare. De använder samma värmevärden för sina uträkningar och jämförelser. Däremot behandlas inte biprodukterna syrgas och värme som tillgångar, de varken inkluderas eller exkluderas i rapporten (Bertuccioli et al., 2014). Det blir således svårt att göra säkra kvantifieringar med de i bakgrunden och i resultatet redovisade artiklarna som underlag.

Att producera värme genom elektrolys av vatten är inte en lönsam affär. Däremot visar det sig att överskottsvärmen är en viktig biprodukt att ta hand om, om man avser att lagra energi i vätgas. Om den värme, som uppstår vid elektrolys av vatten tas tillvara, liksom värmen som måste kylas bort vid kompression och kylning av gaserna, kan denna sammanlagda värme ge ekonomiskt tillskott om den avsätts till exempelvis ett fjärrvärmenät. Där kommer värmen till nytta antingen för uppvärmning av hus i stadsmiljöer eller kylning av de hus som är kopplade till fjärrkylnätet. Källor angående att ta tillvara värmen från småskalig vätgasproduktion har i detta arbete inte hittats. Däremot är det troligt att det är möjligt att avsätta sådan värme till mindre ackumulatortankar för exempelvis uppvärmning av enskilda hus.

Att producera syrgas genom elektrolys av vatten är inte heller det en lönsam affär. Om vätgas framställs i syfte att lagra energi, till exempel från intermittenta flödande energikällor som annars gått till spillo, kan dock syre vara en användbar biprodukt. Syrgasen kan ge ekonomiska fördelar genom att användas inom till exempel sjukvården eller industrin. De elektrolysapparater som finns på marknaden har ett spektrum av kapaciteter och produktionsmängden kan därför skräddarsys efter verksamhetsbehov. Verksamheter som har behov av syrgas är vitt spridda i landet. Det finns väl spridd industri som konsumerar syrgas och i varje landsting eller region finns stora regionsjukhus. Dock är vätgasproduktionen direkt kopplad till syrgasproduktionen genom vattnets molekylstruktur, varför ett större behov av den ena förutsätter avsättning för det andra, för att maximal nytta och bästa möjliga ekonomi ska uppnås. Det kan vara svårt att i praktiken faktiskt matcha en sådan perfekt jämvikt för avsättningarna och det kan trots allt bli nödvändigt att dumpa någon av gaserna. Erik Wiberg, Vätgas Sverige (personlig kommunikation, 2015-04-17) uppger att de elektrolysörer som är i drift för vätgasproduktion till fordonsbranschen i Norge och på kontinenten i Europa, troligtvis dumpar sitt syre till luften då det handlar om så ”små mängder”.

Sökningarna i VISS ger bara två träffar för åtgärd "syresättning" som "möjlig", och de övriga sökningarna antyder att det inte är enbart statusen för ett vatten som avgör om forcerad syresättning är "möjlig". Jag förstår de i resultatet presenterade artiklarna om syresättning av övergödda vatten, som att de alla är överens om att forcerad syresättning inte botar övergödda vatten från felkällan. Syresättning kan dock ge de biotoper som önskas skyddas respit, tills åtgärder mot tillflödet av nutrienter har satts i verket samt under väntetiden tills de i vattnen ackumulerade nutrienterna har brutits ned.

Bland de 2259 vatten i Sverige med låg ekologisk status och som har "Övergödning och syrefattiga förhållanden" finns någon eller några strategiskt placerade vatten som kan klassas för åtgärd "syresättning" "möjlig". Byfjorden, där försök med syresättning av vattenmassan framgångsrikt genomförts, ligger invid Uddevalla som har fjärrvärmenät, ganska nära europamotorväg E6, mitt emellan vätgasstationer i Oslo och Malmö. Den teknik som tillämpades åren innan 2015 var att pumpa ned syrerikt ytvatten till djupvattnet. Detta ytvatten hade dock lägre densitet genom sin naturligt lägre salthalt. Vattnets ekologiska status förbättrades, men vilka organismer i biotopen på botten premierades av vatten med lägre salthalt och vilka tog skada? Denna aspekt skulle kunna vara en intressant parameter att undersöka, genom att syresätta med syrgas i stället, vilket inte skulle påverka djupvattnets densitet, salthalt, cirkulation, extra kvävetillförsel från luften mm.

Enligt Eriksson Wiklund and Sundelin (2003) fanns vatten kring Stockholm som möjliga recipienter för syresättning. VISS tar upp att många vatten i Mälardalen fortfarande har dålig ekologisk status men tar inte upp dessa som objekt där syresättning är möjlig. Detta kan till exempel tyda på kunskapsluckor eller skilda meningar om den forcerade syresättningens påverkan. Det kan också bero på att kunskapsläget har utvecklats sedan 2003 då artikeln av Eriksson Wiklund and Sundelin (2003) skrevs eller att förutsättningarna för syresättning av andra anledningar inte är de rätta. Hela Mälardalen är befolkningstät med flera fjärrvärmesystem och faller klart in i Doll and Wietschel (2008) beskrivning på samhällen som har förtjänster att göra på ett ökat användande av bränslecellsteknik.

Vad gäller bränsleceller i fordon så är de mobila och dess produkter blir således svåra att kontinuerligt ta tillvara på i stationära lösningar.

Biprodukten ånga släpps idag endast ut i luften. En Toyota tar ca 5 kg vätgas och producerar alltså 39 kg vattenånga om tanken körs tom. Ånga kan kondenseras till flytande vatten. I de regioner där tillgång på rent vatten är knapp, till exempel i ökenområden och i sumpområden, är 39 liter inte alls en försumbar mängd vatten. Det är oklart varför Toyota anser att detta vatten inte ska drickas, men det skulle kunna bero på att de inte kan veta hur ren luften är där bilen används och därför inte kan garantera kvaliteten på slutprodukten. Annars borde vattnet vara lika rent som det destillerade vatten människorna i dessa utsatta områden ändå dricker. Att installera en vattentank på en bil som redan lider av minskat utrymme på grund av det stora tryckkärlet för vätgas i jämförelse med en bensindriven bil, förstår jag att biltillverkarna drar sig för. Ytterligare en anledning till att inte kondensera ångan i bilen skulle kunna vara i kalla klimat då vattnet okontrollerat kan frysa till is och förstöra värmeväxlare och annan utrustning. Men rent vatten är i somliga regioner en dyrbar resurs och problemet är kanske lösbart.

Bränslecellen står för energiomvandlingen från kemisk energi till elektrisk energi, under värmeutveckling. Man gör vad man kan för att denna värmeutveckling ska bli så liten som möjligt då den är direkt kopplad till bränslecellens verkningsgrad. Men värmen är dock inte bara av ondo, det finns processer i en bil som kan nyttja denna värme då den går att fånga i en värmebärare/kylvatten. Då komprimerad gas släpps ut i ett lägre tryck behöver gasen värme för att expandera. Kupén behöver värmas ibland. Då är värme från bränslecellen och 39 kg vattenånga, vilken dessutom kondenseras till vatten på köpet, inte alls att förakta. Värme är det med den värme som uppstår i strömledningar och elmotorer när arbete utträttas. De är spridda i bilen och ger förmodligen ganska lågvärdig värme.

Som nämnt kräver komprimerad gas värme för att expandera till ett lägre tryck, det upplever vi som kyla då gasen tar energin från omgivningen, om den inte tillförs på annat vis. Denna kyla kan när bilen är i drift, eller när bilen står still och batteriet laddas, nyttjas till bilens luftkonditionering. I somliga regioner i världen kan det i parkerade bilar bli så varmt i bilen att det är farligt att gå in och direkt köra den. Dessa bilägare har för vana att starta sina bilar en stund innan de ska köra, för att låta luftkonditioneringen få gå en stund. Genom att nyttja batteriet på detta vis kan man kanske minska på "slöseriet" en aning. I en tänkt framtid när bränslecellsdrivna lastbilar kommer på marknaden, hoppas jag att kylan från gasflödet för lastbilens framdrift nyttjas i kylutrymmet vid kyltransporter. Då större mängder vätgas transporteras på vägar kan det ske med kryogena tankar. Om dragbilen då är bränslecellsdriven skulle man kunna nyttja lasten för att driva dragbilen och på så vis minska svinnet av vätgas samtidigt som lasten faktiskt kyles av avångningen, ungefär på samma vis som tillämpas på en del LNG (Liquified Natural Gas) fartyg för framdrift.

Det är viktigt att våra maskiner uträttar maximal nytta, att de har så god verkningsgrad som är möjligt för att minska på energianvändandet. När våra energisystem är konstruerade på ett sådant vis att det periodvis inte går att ta hand om den energi som vi egentligen vill tygla, de svårtillgängliga och flödande energikällorna som sol- vind- och vågkraft, kanske det i en kort tidsaspekt spelar mindre roll om elektrolysprocessen har 45 % verkningsgrad eller 80 %. Saxe and Alvfors (2007) visade att elektrolystekniken kan ge 101 % verkningsgrad om man definierar sitt system och nyttjar systemet på rätt sätt. Det är dock inte ett argument för att på kort tid byta helt till en vätgasbaserad ekonomi. Vätgasen löser nämligen inte problemet med att de flödande resurserna med dagens tillgängliga teknologier är för knapphändiga för att kunna ersätta de fossila resurserna i stor skala på kort tid. Vidare är dagens elektrolys och bränslecellsteknik baserad på sällsynta metaller som inte kommer att räcka till ett fullständigt skifte av teknik i världen. Doll and Wietschel (2008) visar att transportsektorn kommer att nyttja flödande resurser, fondresurser och lagerresurser effektivare om vätgas introduceras som bränsle, vilket är ett högre mål om världen ska öka effektiviteten i sina energisystem. Saxe and Alvfors (2007) och Kato et al. (2005) har visat på hur det praktiskt kan gå till genom att nyttja biprodukterna i industrin. Här har visats att det finns elektrolysörer i ett brett kapacitetsspann och att det potentiellt kan finnas flera intressenter för elektrolysens biprodukter vid vätgasframställning.

7 Slutsatser

Jag fann att syrgasen kan nyttiggöras på flera sätt samt att värme, kyla och rent vatten kan komma att bidra till ekonomin vid transformationen av energisystem. Behoven av syrgas är spridd över landet och kan därmed bidra till ett nät av vätgasstationer i olika storlekar för att lösa den delen av moment 22, så att det finns tillgång till vätgas för en möjligt växande fordonspark.

Referenser

- AGA, L. I. G. (2015a). Bulkleverans. from http://www.aga.se/sv/products_ren/supply_modes/bulk_supply/index.html
- AGA, L. I. G. (2015d). Flaskor. from http://www.aga.se/sv/products_ren/supply_modes/cylinders/index.html
- Alpman, M. (2015). 10 heta sätt att lagra energi. *NyTeknik*. Retrieved 2015-06-19, from http://www.nyteknik.se/nyheter/energi_miljo/energi/article2500713.ece
- Armaroli, N., & Balzani, V. (2011). The Hydrogen Issue. *Chemsuschem*, 4(1), 21-36. doi: 10.1002/cssc.201000182
- AutoMotoTV. (2014, 2014-01-31). Mercedes-Benz B-Class F-CELL - Into the desert serves as water supply | AutoMotoTV. from <https://www.youtube.com/watch?v=Z-d5mS1anJ8>
- Bertuccioli, L., Chan, A., Hart, D., Lehner, F., Madden, B., & Standen, E. (2014). Study on development of water electrolysis in the EU. from http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/study%20electrolyser_0-Logos_0_0.pdf
- Carmo, M., Fritz, D. L., Mergel, J., & Stolten, D. (2013). A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(12), 4901-4934. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.151>
- Chalmers. (2015). Vad är en bränslecell? Retrieved 2015-06-13, from <http://fy.chalmers.se/~f1xjk/FysikaliskaPrinciper/Projekt/Projekt30/vadar.html>
- Daimler. (2015). *Fuel Cell Drive Technology*. Retrieved from <http://www.daimler.com/dccom/0-5-1228969-1-1231002-1-0-0-1401206-0-0-135-0-0-0-0-0-0-0.html>
- Doll, C., & Wietschel, M. (2008). Externalities of the transport sector and the role of hydrogen in a sustainable transport vision. *Energy Policy*, 36(11), 4069-4078. doi: 10.1016/j.enpol.2008.06.027
- Ekbom, L. (1995). *Tabeller och formler: Ma, Fy, Ke : NV*. Solna: Esselte studium.
- Elding, L. I. (2015). Väte *Nationalencyklopedin*.
- Eriksson Wiklund, A.-K., & Sundelin, B. (2003). Stockholm förorenade bottnar - vad händer om de syresätts? (S. Stockholms universitet, Swedish Environmental Protection Agency, Trans.): Stockholms universitets marina forskningscentrum (SMF).
- Holmström, B. (2015). elektrolys *Nationalencyklopedin*.

- Hyundai. (2015, 2015-01-13). Specifications & Range ix35. Retrieved 2015-06-19, from <http://www.hyundai.com.au/vehicles/ix35/specifications-and-range>
- Hyundai Bilar, S. (2015). ix35 Fuel Cell. Retrieved 2015-06-14, from <http://www.hyundai.se/showroom/show/ix35fuelcell>
- Kato, T., Kubota, M., Kobayashi, N., & Suzuoki, Y. (2005). Effective utilization of by-product oxygen from electrolysis hydrogen production. *Energy*, 30(14), 2580-2595. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2004.07.004>
- Liboriussen, L., Sondergaard, M., Jeppesen, E., Thorsgaard, I., Grunfeld, S., Jakobsen, T. S., & Hansen, K. (2009). Effects of hypolimnetic oxygenation on water quality: results from five Danish lakes. *Hydrobiologia*, 625, 157-172. doi: 10.1007/s10750-009-9705-0
- Liboriussen, L., Søndergaard, M., Jeppesen, E., Thorsgaard, I., Grünfeld, S., Jakobsen, T. S., & Hansen, K. (2009). Effects of hypolimnetic oxygenation on water quality: results from five Danish lakes. *Hydrobiologia*, 625(1), 157-172. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-009-9705-0>
- Lindström, O., & Sylwan, C. (2015). Bränslecell *Nationalencyklopedin*.
- Prepas, E. E., & Burke, J. M. (1997). Effects of hypolimnetic oxygenation on water quality in Amisk Lake, Alberta, a deep, eutrophic lake with high internal phosphorus loading rates. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 54(9), 2111-2120. doi: 10.1139/cjfas-54-9-2111
- Rabe, M. (2014, 2014-11-27). Toyotas bränslecellsvatten hälsosammare än mjölk. Retrieved 2015-06-14, 2015, from <http://teknikensvarld.se/toyotas-branslecellsvatten-halsosammare-an-mjolk-167319/>
- Saxe, M., & Alvfors, P. (2007). Advantages of integration with industry for electrolytic hydrogen production. *Energy*, 32(1), 42-50. doi: 10.1016/j.energy.2006.01.021
- Stigebrandt, A., Liljebladh, B., de Brabandere, L., Forth, M., Granmo, A., Hall, P., . . . Viktorsson, L. (2015). An Experiment with Forced Oxygenation of the Deepwater of the Anoxic By Fjord, Western Sweden. *Ambio*, 44(1), 42-54. doi: 10.1007/s13280-014-0524-9
- Sundberg, M. (2014). Forskare varnar för överproduktion av el. *Dagens Nyheter*. Retrieved from <http://www.dn.se/arkiv/ekonomi/forskare-varnar-for-overproduktion-av-el>
- Söderholm, E. (2015, 2014-06-26). Toyotas nya modell är lika dyr som en BMW M3. *auto motor & sport AB*. Retrieved 2015-06-14, from <http://www.automotorsport.se/artiklar/nyheter/20140626/toyotas-nya-branslecellsbil-kostar-700000-kronor>

United Nations Department of Economic and Social Affairs (UNDESA). (2006). International Decade for Action 'Water for Life' 2005-2015. Focus Areas: Water scarcity. Retrieved 2015-06-14, 2015, from <http://www.un.org/waterforlifedecade/scarcity.shtml>

Vätgas Sverige, & Gasföreningen. (2009). Vätgas *Energigas*. http://www.energigas.se/Energigaser/Vatgas/~media/Files/www_energigas_se/Publikationer/Infomaterial/Vatgasbroschyr.ashx.

Bilagor

Vattenmyndigheternas databas VattenInformationsSystem Sverige (VISS)

Sökningar efter potentiella vattenförekomster i Sverige att forcera syresättning i.

Tabell 2. "Ekologisk status" i Svenska kust-, sjö- och vattendragsförekomster med avseende på "Ytvattenrelaterade problem" med "Övergödning och syrefattiga förhållanden"

Kategori av vattenförekomst	Registrerade förekomster	Ekologisk status = "NULL"	Ekologisk status = ("Måttlig" OR "Otillfredsställande" OR "Dålig")	(Ekologisk status = ("Måttlig" OR "Otillfredsställande" OR "Dålig")) AND (Ytvattenrelaterade problem = "Övergödning och syrefattiga förhållanden")	Åtgärd = "syresättning" ^[4]
Kustvatten ^[1]	652	21	526	462	2
Sjövatten ^[2]	7424	198	3620	621	0
Vattendrag ^[3]	15085	270	10078	1176	0
Totalt ^[5]	23161	489	14224	2259	2

[1] Vattenmyndigheten. (2015a). SB02 Statussammanställning kustvattenförekomster hela Sverige senaste klassningen efter 2011-01-01. Hämtad

<http://www.viss.lansstyrelsen.se/RepeatedExports/SB02%20Statussammanställning%20kustvattenförekomster%20hela%20Sverige%20senaste%20klassningen%20efter%202011-01-01%202015-06-12%2018.02.xlsx>

[2] Vattenmyndigheten. (2015b). SB03 Statussammanställning sjövattenförekomster hela Sverige senaste klassningen efter 2011-01-01 2015-06-12 18.04.xlsx. Hämtad

<http://www.viss.lansstyrelsen.se/RepeatedExports/SB03%20Statussammanställning%20sjövattenförekomster%20hela%20Sverige%20senaste%20klassningen%20efter%202011-01-01%202015-06-12%2018.04.xlsx>

[3] Vattenmyndigheten. (2015c). SB04 Statussammanställning vattendragsförekomster hela Sverige senaste klassningen efter 2011-01-01 - 2015-06-12 18.07.xlsx. I Tillgänglig:

<http://www.viss.lansstyrelsen.se/RepeatedExports/SB03%20Statussammanställning%20sjövattnenförekomster%20hela%20Sverige%20senaste%20klassningen%20efter%202011-01-01%20%202015-06-12%2018.04.xlsx>

[4] Vattenmyndigheten. (2015d). VISS avancerad sök "åtgärd" = "syresättning". Hämtad

http://www.viss.lansstyrelsen.se/Search.aspx?searchType=Measures&SearchOnLoad=true&LockWaterDataset=&LocationTypeSearchOption=0&freeTextSearch=syre&competentAuthorityID=&areaID=&countyID=&municipalityID=&basinID=&subUnitID_2=&subUnitID_8=&subUnitID_1=&subUnitID_4=&subBasinID=&measureTypeID=244&recursive=1&measureExternalDatabaseID=&measureStatusID=&measureSurfaceWaterPressureTypeID=&measureGroundWaterPressureTypeID=&measureSurfaceWaterImpactTypeID=&measureGroundWaterImpactTypeID=&MeasureFlagSearchOption=0&DialogMode=&DoSearch=&SortType=2&ReversSort=false&requirePermissionsToSelect=false&searchLockAreas=false&searchLockBasins=false&searchLockMunicipality=false&searchLockWaterType=false&AssociatedWaters=&postbackAction=&searchLockReportUnitSearchTypes=

[5] Vattenmyndigheterna visar utbredningen av dessa vattenförekomster i Sverige på en online-karta:

<http://www.viss.lansstyrelsen.se/SimpleMapPage.aspx>

Förklaring till Tabell 2. VISS kategoriserar *vattenförekomster* i Sverige och sökningar gjordes utefter de kriterier som tros vara lämpliga objekt för syresättning, det vill säga utefter sådana kriterier som framkommit ur ovan nämnda artiklar. Exempelvis tros till exempel kategori *vattenförekomst* "grundvatten" inte vara lämpligt objekt för syresättning och har därför exkluderats i sökningarna.

Vattenförekomsterna bedöms i VISS utefter rådande *ekologisk status*. För en del vattenförekomster uppges ingen ekologisk status, det vill säga Ekologisk status = "NULL" (Boolesk algebraisk term som betyder ungefär "tom" eller "ej angiven").

När ekologisk status anges för en vattenförekomst sammanfattar VISS en rad parametrar som har med ekologisk status att göra till "Hög, god, måttlig, otillfredsställande eller dålig" ekologisk status. De vattenförekomster vilka tros vara lämpliga för forcerad syresättning, med ovan nämnda artiklar som grund, torde vara de på den lägre delen av denna sammanfattande skala, det vill säga Ekologisk status = "måttlig, otillfredsställande eller dålig".

VISS anger inte explicit djupvattnens status, men dock *Ytvattenrelaterade problem*. En gruppering av problem som listas i Ytvattenrelaterade problem är "Övergödning och syrefattiga förhållanden". Utifrån ovan nämnda artiklars kriterier på lämpliga vattenförekomster för forcerad syresättning tros de vattenförekomster med ekologisk status på den lägre delen av bedömningsskalan i kombination med ytvattenrelaterade problem som faller inom grupperingen övergödning och syrefattiga förhållanden, vara potentiellt lämpliga vattenförekomster att syresätta.

VISS listar och grupperar *åtgärder* för att öka vattenförekomsternas kvalitet. Inom grupperingen "Övriga åtgärder", vilken inte är vidare grupperad eller specificerad, finns åtgärden "syresättning".