

Systemperspektiv för effektiv produktion och användning av vätgas via koppling till fjärrvärme AP2.

## Studie över elektrolys-teknologier idag och i framtiden

### Sammanfattning

Denna rapport sammanfattar en kunskapsinsamling och litteraturstudie över olika elektrolys-teknologier som finns idag eller är under utveckling. Det är generellt tre olika teknologier som går igenom AEC, PEMEC samt SOEC. Respektive teknik beskrivs med avseende på historik, funktion, begränsningar och existerande anläggningar.

Har finns också matriser över leverantörer av de olika typerna av elektrolysörer samt tekniska data och jämförelse mellan olika modeller.

De viktigaste tekniska parametrarna för elektrolysörerna ur perspektivet koppling till fjärrvärme är elektrolysens prestanda och dess arbetstemperatur. Även reglerbarheten, alltså hur snabbt effekten kan ändras över tid, och livslängd är viktiga parametrar. I det avseendet jämförs nio leverantörer, tre inom varje kategori AEC, PEMEC samt SOEC.

Rapporten innehåller också en litteraturstudie över investeringskostnader för de olika elektrolysör-kategorierna samt hur kostnadsutveckling förväntas i framtiden. Även kostnader för drift och underhåll av elektrolysörer analyseras relativt kortfattat.

Rapporten utser ingen ”vinnare” utan ska hellre användas som ett underlag för detaljanalyser för respektive fjärrvärmeleverantör i arbetet att integrera och dimensionera den bästa elektrolysören utifrån varje företags speciella förutsättningar och egna bedömningar.

### Innehåll

Sammanfattning.....	1
Innehåll.....	1
Bakgrund.....	2
Kommersiella elektrolys-teknologier tillgängliga idag.....	3
Alkalisk vatten-elektrolysör (AEC) .....	4
Historik .....	4
Beskrivning av tekniken .....	4
Existerande anläggningar.....	5
Protonledandemembran-elektrolysör (PEMEC).....	6
Historik .....	6
Beskrivning av tekniken .....	6
Existerande anläggningar.....	7
Fastoxids-elektrolysör (SOEC) .....	7

Historik .....	7
Beskrivning av tekniken .....	7
Existerande anläggningar.....	9
Leverantörer av olika elektrolysörer .....	9
Studie över nio leverantörer i perspektivet koppling till fjärrvärme.....	10
Prestanda och egenskaper .....	10
Jämförelse av utvalda produkter .....	10
Ekonomisk jämförelse.....	12
Framtidsprognos med förväntad kostnadsutveckling.....	14
Drift av elektrolys.....	14
Underhåll & livstid av elektrolys.....	15
Två icke-kommersiella teknologier under utvecklande.....	15
Smältkarbonat-elektrolys (MCEC) .....	16
Alkaliskmembran-elektrolys (AEMEC) .....	16
Appendix.....	17
Litteraturstudie – CAPEX kostnader för elektrolys .....	17
Litteraturstudie – CAPEX utveckling för elektrolys .....	18
Referenser .....	18

## Bakgrund

Sveriges fjärrvärmeproducenter har ypperliga möjligheter att bidra i omställningsarbetet mot ett förnybart samhälle genom att tillverka grön vätgas under perioder med god tillgång till förnybar energi, framförallt vindkraft men också solkraft. Tack vare redan existerande infrastruktur (nätanslutning, processanläggningar, personal etc) samt möjligheterna att nyttiggöra både den förlustvärme och den syrgas som genereras vid grön vätgasframställning finns bästa möjliga förutsättningar för lönsamhet, energieffektivitet och resiliens i det svenska energisystemet. Förutom att vätgasen kan lagra energi i en allt mer väderberoende elproduktion så kan vätgasen också säljas till andra verksamheter, exempelvis för framdrift av tåg eller tunga fordon.

HyCoGen är ett projekt som beaktar dessa aspekter utifrån ett systemperspektiv. Projektet medfinansieras av Energimyndigheten och Göteborgs Energis Stiftelse för Forskning och Utveckling. Ett av arbetspaketerna arbetar med omvärldsanalys för att leverera indata och underlag till övriga arbetspaket. Denna rapport är resultatet av arbetet i detta arbetspaket och handlar om olika elektrolys-teknologier som finns idag eller är under utveckling.

## Kommersiella elektrolys-teknologier tillgängliga idag

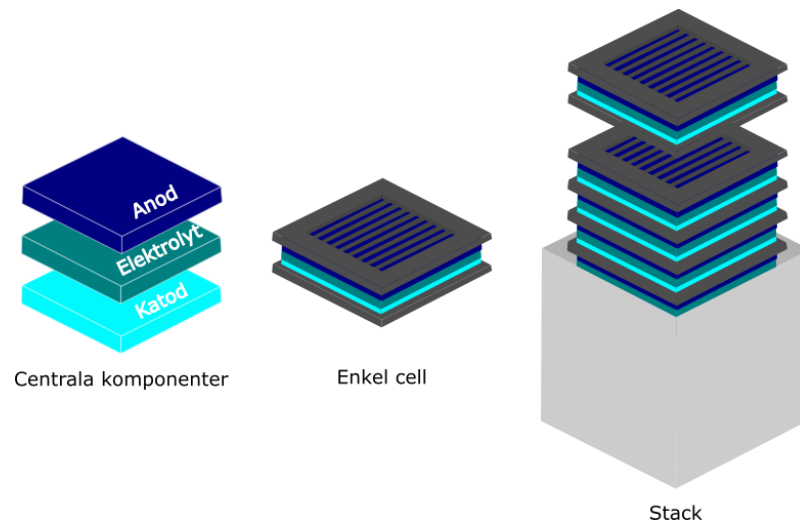
En elektrolysör utnyttjar el för att via en elektrokemisk reaktion bilda en kemisk produkt. Idag finns det flera olika typer av elektrolysörer, som används i allt från industriskalig kemikalieproduktion till framställning av vätgas för småskalig användning. I denna studie kommer enbart elektrolysörer för storskalig vätgasproduktion att utvärderas då applikationen syftar till att balansera kraftnätet med ett vätgaslager. De tre kommersiella tekniker som kommer att diskuteras är alkalisk vatten-elektrolys (AEC), protonledandemembran-elektrolys (PEMEC) och fastoxid-elektrolys (SOEC). I Tabell 1 visas en övergripande kvalitativ jämförelse mellan de olika elektrolysteknikerna.

Tabell 1 - En kvalitativ jämförelse mellan de olika elektrolysteknikerna som utvärderas inom projektet, Informationen kommer från [1].

Teknik	AEC	PEMEC	SOEC
Kritiskt material	Små mängder sällsynta jordartsmetaller	Iridium, Rutenium Platina	Små mängder sällsynta jordartsmetaller
Temperatur	20-80 °C	20-200 °C	500-1000 °C
Elektrisk effektivitet	65-85%	59-70%	Upp till 100%
Teknikmognadsgrad	Kommersiell sedan mitten av 1900-talet	Kommersiell senaste 5-10 åren	Ny på marknaden, senaste 1-2 åren
Fördelar	<ul style="list-style-type: none"> <li>Låg inköpskostnad</li> <li>Relativt stabil</li> <li>Hög teknikmognadsgrad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kompakt design</li> <li>H<sub>2</sub> med hög renhet</li> <li>Snabbstartad och snabbreglerad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hög effektivitet</li> <li>Lågt energikrav</li> <li>Även för syngasproduktion</li> </ul>
Utmaningar	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hög korrosiv elektrolyt</li> <li>Blandning av syrgas och vätgas</li> <li>Långsam dynamik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dyra katalysatorer, ädelmetaller</li> <li>Dyra polymermembran</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mekaniskt mindre stabila elektroder</li> <li>Säkerhetsrisker med försegling</li> <li>Livslängd</li> </ul>

Det finns för dessa tekniker flera olika begränsningar och utmaningar som relaterar till prestanda och ingående komponenter i en elektrolysstack. Varje elektrolysör-anläggning innehåller ofta flera stackar och varje stack består sedan av flertalet celler, en schematisk illustration visas i Figur 1. I figuren visas också tre av de centrala komponenterna som finns i alla elektrolysörer och de har följande funktioner:

- Anod (Elektrod med katalysator för syrgasreaktionen som skapar elektroner, den är elektronledande och jonledande)
- Elektrolyt (Jonledande och elektroniskt isolerande)
- Katod (Elektrod med katalysator för produktion av vätgas, den är elektronledande och jonledande)



Figur 1 – Visar på upp-skalningen från cell-komponenter till en stack som är en del av en elektrolys-anläggning.

Beroende på teknik används sedan olika material och funktioner för det som sitter mellan cellerna, bipolar platta i PEMEC och AEC eller separator och interconnect för SOEC. De olika komponenterna och deras materialkrav är nära kopplade till aspekter som prestanda, kostnad, flexibilitet och livslängd. Gemensamt för alla typer av elektrolysörer är att värmeproduktion, effektivitet och mängd vätgas som bildas beror på hur mycket elektrisk effekt anläggningen matas med. Vilka andra fördelar/begränsningar som finns kommer att beskrivas kort per elektrolysör nedan.

## Alkalisk vatten-elektrolysör (AEC)

### Historik

Alkalisk vattenelektrolys var den första etablerade elektrolystekniken, den utvecklades i början av 1800-talet och utvecklingen gynnades av sin koppling till Electro-dialys. Redan 1902 fanns fler än 400 stycken vatten-elektrolysörer i drift med diafragma mellan elektroderna för att hindra att vätgas och syrgas blandas. Under 1900-talets första halva skedde mycket av utvecklingen i Norge relaterat till aluminiumframställning. När de första trycksatta elektrolysörerna sen utvecklades användes asbest-cement som diafragma vilket medförde stora risker men inte hindrade utvecklingen. Idag används nya säkra material (t.ex. polysulfoner) i alla kommersiella AECs, men då utvecklingen tidigare aldrig fokuserat speciellt mycket på prestanda/storlek finns fortfarande utvecklingsarbete att göra med materialen i cellerna [2, 3].

### Beskrivning av tekniken

För AEC, som de flesta elektrokemiska tekniker, är värmeproduktion, effektivitet och mängd vätgas som bildas beroende på hur mycket elektrisk effekt anläggningen matas med. Detta då mängden el driver reaktionerna i den schematiska bilden nedan. En av de idag största fördelarna med denna teknik är att den är välbeprövad och att Nickel kan användas som katalysator, vilket är ett lättillgängligt material. I AEC används en vätskeformig elektrolyt i form av kalium- eller natriumhydroxid i vatten och ett polymer/keramiskt diafragma för att hindra blandning av vätgas och syrgas [4, 5]. Vilket visar på en av nackdelarna med tekniken, den väldigt basiska elektrolyten, som medför problem in form av korrosion, speciellt vid högre temperaturer. En annan nackdel är att prestandan fortfarande inte är speciellt hög i förhållande till anläggningens storlek, yt-arean per effekt är ca 40-60 m<sup>2</sup>/MW [6, 7, 8]. Detta gör att anläggningarna kan bli stora när effektkraven blir högre. Att förbättra prestandan per ytenhet är något som det jobbas aktivt med, främst genom att hitta nya material som har bättre

egenskaper och tål högre temperaturer. Fler tekniska begränsningar och utvecklingsmöjligheter hittas i faktarutan nedan.

<p><b>Kort om AEC</b></p> <p>I denna cell finns den vätskeformiga elektrolyten bestående av vatten och hydroxid i hela cellen, både på anod och katod. Det på katoden som vattnet reagerar och bildar vätgas och hydroxidjoner. Hydroxidjonerna transporteras sedan i elektrolyten genom diaframat till anoden där syrgas bildas. Denna teknik kyls vanligen med ett vätskekylningsystem.</p>	
<p><b>Begränsningar som påverkar prestanda/livslängd/pris</b></p>	<p><b>Förklaring och möjliga förbättringar</b></p>
<p>Temperatur</p>	<p>Den högkorrosiva elektrolyten gör att livslängden går ner markant vid högre temperaturer, för att motverka detta utvecklas nya material.</p>
<p>Anläggningsstorlek</p>	<p>I detta fall är storleken på anläggningar ofta kopplade till låg vätgasutveckling per area elektrod. Nya material och strukturer studeras.</p>
<p>Koldioxid-känslighet</p>	<p>Alla hydroxid lösningar reagerar med CO<sub>2</sub>, och slutar då innehålla hydroxid. Detta ställer krav på slutna system med hög renhet.</p>
<p>Vätgasföroreningar pga o-optimerade diafragma</p>	<p>Materialet som idag hindrar vätgas och syrgas från att blandas skulle kunna vara effektivare. Nya strukturer utvecklas.</p>
<p>Elektrodstabilitet och -prestanda</p>	<p>Elektrodena degraderar pga elektrolyten och kan lätt blockeras av de bildade gasbubblorna. Nya material och strukturer studeras.</p>
<p><b>Kritiska material</b></p>	<p>Zirconium</p>
<p><b>Reglerbarhet</b></p>	<p>Relativt dynamisk, men kan ha längre reglertid och uppstartstider jmf med PEMEC</p>

## Existerande anläggningar

Världens största alkaliska elektrolysör finnes vid anläggningen Fukushima Hydrogen Energy Research Field (FH2R) i Fukushimaområdet i Japan. Anläggningen drivs av ett konsortium med bland annat Toshiba, Tohoku Electric Power och Japans New Energy and Industrial Technology Development Organisation (NEDO). Elektrolysören är på 10 MW och det finns även en solcellspark på 20 MW. Anläggningen är en forskningsanläggning som är framförallt till för att testa och utveckla teknik [9].

En annan större alkalisk elektrolysör befinner sig utanför Innsbruck i Österrike. Elektrolysören är en Sunfire (IHT) på 4 MW. Vätgasen skall användas till fordon och som värmekälla till ett närbeläget bageri som drivs av en projektpartner. Anläggningen kommer även användas som resurs för att balansera elnätet [10].

## Protonledandemembran-elektrolysör (PEMEC)

### Historik

Grunden för den teknik som idag är PEM-elektrolys för vätgasproduktion kommer från klorframställningsindustrin. Där de har använt elektrolys sedan slutet av 1800-talet. Dock var det först 1970 polymera material började användas, tidigare var dessa membran inte varit tillräckligt stabila. Tekniken har utvecklats markant den senaste 30 åren och är idag en av de vanligaste implementerade elektrolysteknikerna [2, 3].

### Beskrivning av tekniken

Protonledandemembran-elektrolysörer har en fast elektrolyt och använder idag enbart vätskeformigt vatten på anoden/syrgas sidan. Detta och den höga effektdensiteten tillåter en relativt kompakt systemdesign vilket återspeglas i att arean per effekt är ca 30-40 m<sup>2</sup>/MW [11, 12, 13, 14]. Det är den i snitt lägsta area per megawatt för de studerade teknikerna. Tillsammans med den höga vätgasrenheten och den snabba regleringen gör det tekniken speciellt attraktiv i applikationer med ojämn last. Det som talar emot tekniken är behovet av ädelmetaller och det florerade membranet som gör tekniken dyr, men även mindre miljövänlig att producera. Tekniken har nu funnits på marknaden i ett par år och det sker ständiga förbättringar [2, 3, 15]. Det som dock fortfarande är osäkert i och med att tekniken inte är lika etablerad som AEC är hur lång den faktiska livstiden i en applikation är. Den uppskattas till 50 000 h men det finns idag få PEMEC-anläggningar som faktiskt har kört så länge [15]. Detta gör att det kommer bli intressant att följa den här tekniken de närmaste åren både avseende kostnadsutveckling och livslängd.

<p><b>Kort om PEMEC</b></p> <p>Vatten tillförs på anodsidan av cellen där det reagerar och bildar syrgas och protoner. Protonerna transporteras genom det polymera membranet till katoden där vätgas bildas. Den vanliga arbetstemperaturen är från rumstemperatur upp till 80 °C. Vid optimal operationspunkt krävs kylning av processen för att hålla temperaturen nere. Detta sker genom antingen luft- eller vätskekylning.</p>	
<p><b>Begränsningar som påverkar prestanda/livslängd/pris</b></p>	<p><b>Utvecklingsmöjlighet för bättre prestanda/livslängd/pris</b></p>
<p>Höga temperaturer</p>	<p>Polymermembranet är inte kemiskt eller termiskt stabilt långsiktigt, vilket påverkar livslängden och ibland prestanda. Det sker ständig materialutveckling för högre temperaturer.</p>
<p>Anläggningsstorlek</p>	<p>Trots att denna teknik har den minsta yt-arealen skulle förbättringar i prestanda leda till mindre anläggningar.</p>
<p>Ädelmetaller krävs i elektroderna</p>	<p>Idag är Iridium en vanlig och dyr katalysator. Det utvecklas både ädelmetallfria katalysatorer och elektroder med mindre mängd ädelmetall.</p>

Korrosion av komponenter	Speciellt vissa komponenter så som de bipolära plattorna har lätt att korrodera och detta påverkar livslängden samt möjligheterna till högre temperaturer.
Svårt att öka trycket	Ett högre tryck skulle kunna ge en bättre process, men membranet släpper då igenom för mycket gas och det leder till oren vätgas och andra förluster.
<b>Kritiska material</b>	Iridium och Platinagruppermetaller, perflorsulfonsyramembran
<b>Reglerbarhet</b>	Snabbstartad på minuter och det samma gäller dynamisk reglering när igång

## Existerande anläggningar

Det finns redan ett antal PEMEC anläggningar på megawattskala och även flera planeras. Europas största är för närvarande Shells REFHYNE på 10 MW vilket befinner sig i rheinland raffinaderiet vid tyska staden Köln. Tanken är att elektrolysören skall ersätta en del av den vätgas som raffinaderiet annars producerar från naturgas [16].

Världens största PEM-elektrolys är på 20 MW och ägs av Air Liquide, den befinner sig på anläggningen i Bécancour, Quebec, Kanada där det redan sedan tidigare har producerats vätgas och flytande väte. Elektrolysen invigdes i januari 2021 [17].

Linde planerar att slå båda dessa rekord när deras nya 24 MW PEM elektrolys invigs i slutet av 2022 i tyska Leuna. Vätgasen kommer användas till deras befintliga processer med vätgasbehov men tanken är även att del vätgas skall kunna gå till fordon [18].

Tabell 2: Exempel på PEM-elektrolysörer på MW-skala

Kapacitet	Leverantör elektrolys	Företag, Ort	Länk
24 MW (planerat)	ITM Linde Electrolysis GmbH	Linde, Leuna Chemical Complex Germany	<a href="#">Länk</a>
20 MW	Hydrogenics [19]	Air Liquide, Quebec	<a href="#">Länk</a>
10 MW	ITM Power	Shell, Köln	<a href="#">Länk</a>

## Fastoxids-elektrolysör (SOEC)

### Historik

SOEC är den nyaste elektrolystekniken på marknaden, de första resultaten i labbmiljö för denna teknik presenterades på 1980-talet [3]. Det är först de senaste 15 åren som tekniken har blivit lanserad i demoprojekt och de senaste två åren som tekniken har blivit tillgänglig som kommersiella produkter [20].

### Beskrivning av tekniken

Fastoxid-elektrolys bygger som namnet antyder på utnyttjandet av keramer eller fasta oxider i både elektroder och elektrolyt. Denna teknik som körs vid väldigt höga temperaturer ger en hög verkningsgrad och är lovande även om det fortfarande finns en del barnsjukdomar kvar. En av de största fördelarna med denna teknik är att den har betydligt högre verkningsgrad än de andra och det krävs därför en mindre mängd el för att producera samma mängd vätgas. Det

har också hittats lösningar på två av de viktiga problemen; att uppstartstiden är flera timmar från kall och att temperaturcyklning kraftigt påverkar livslängden. För att lösa detta kyls flesta av dessa system idag aldrig ner, utan de går på tomgång i varmt läge när de inte används. Detta innebär att en parasitisk last kommer dras av elektrolysören även då den inte producerar vätgas. Hur stor denna last är specificeras inte tydligt av dagens leverantörer.

Intressant att notera inför konstruktion av anläggningar är att yt-arean per effekt är väldigt spridd beroende på leverantör allt från 14 m<sup>2</sup>/MW [21] upp till 70-111 m<sup>2</sup>/MW [8, 22]. Detta kan bero på att utvecklingen fortfarande pågår och att olika leverantörer bygger system väldigt olika. Att det finns små system på marknaden redan nu visar mycket på den framtida utvecklingspotentialen [20].

<p><b>Kort om SOEC</b></p> <p>Vattenånga tillförs och reagerar på katoden med hjälp av tillförd elektricitet och bildar vätgas och oxidjoner. Oxidjonerna transporteras genom den keramiska elektrolyten till anoden där de reagerar och bildar syrgas och elektroner. Processen sker vid mycket höga temperaturer 600-1000 °C och till skillnad från många andra tekniker krävs inget kylsystem.</p>	
<p><b>Begränsningar som påverkar prestanda/livslängd/pris</b></p>	<p><b>Förklaring och möjliga förbättringar</b></p>
<p>Värmeutnyttjande</p>	<p>Höga temperaturer används, men systemet är integrerat för att bli så energieffektivt som möjligt. Idag arbetas det mot att bli mer integrerat istället för restvärmeutnyttjande.</p>
<p>Låg teknikmognadsgrad</p>	<p>Detta är en av de nyaste teknikerna på marknaden och det är fortfarande mycket kvar att göra för vidareutveckling, men stor potential finns.</p>
<p>Begränsat antal uppstart/nedstängnings cykler</p>	<p>De sköra keramiska materialen och hur de sitter ihop tål inte speciellt många temperaturcykler ner till rumstemperatur. En lösning som många leverantörer erbjuder är att alltid hålla stackarna varma, även när de inte används.</p>
<p>Livslängd</p>	<p>Pga av aggressiva förhållanden så som hög temperatur, två lösningar är att utveckla nya material och att försöka gå mot lägre temperatur utan att tappa prestanda.</p>
<p>Anläggningsstorlek</p>	<p>Storleken är här främst på grund av kring-systemet inte på grund av låg effektivitet. Förhoppningen är att det minskar med vidareutveckling.</p>
<p><b>Kritiska material</b></p>	<p>Zirconium, Lanthanium</p>
<p><b>Reglerbarhet</b></p>	<p>På minuter/sekunder när varm, men kallstart tar flera timmar. [23]</p>



## Existerande anläggningar

Projektet [MultiPHY](#) avser att bli världens första högtemperaturs elektrolysanläggningen på multipel megawattskala [24]. MultiPHY är ett EU-projekt som där företagen Sunfire, Neste, Paul Wurth, Engie och CEA medverkar. Tanken med projektet är att en Sunfire-HyLink SOEC elektrolysör på 2.6 MW skall installeras vid ett raffinaderi för biobränslen i Rotterdam. Projektet är ännu inte avslutat men de rapporterar att testerna av en elektrolysmodul (4e maj 2021) har varit framgångsrika [24]. Den hittills största implementationen av SOEC är annars en Sunfire-HyLink SOEC på 720 kW [25].

## Leverantörer av olika elektrolysörer

Företag	Teknologi	Land
<b>Enapter</b>	AEC	Tyskland, Italien
<b>GreenHydrogen.dk</b>	AEC	Danmark
<b>H-Tec Systems GmbH</b>	AEC	Tyskland
<b>thyssenkrupp Uhde Chlorine Engineers GmbH</b>	AEC	Tyskland
<b>HydrogenPro</b>	AEC	Norge
<b>Aquahydrax</b>	AEC	Australien
<b>Cockerill Jingli</b>	AEC	Kina
<b>MCPHY</b>	AEC	Frankrike, Italien, Tyskland
<b>Peric</b>	AEC	Kina
<b>TIANJIN</b>	AEC	Kina
<b>Areva H2Gen GmbH</b>	PEM	Tyskland
<b>Green H2 Systems (FEST group)</b>	PEM	Tyskland
<b>Siemens Energy</b>	PEM	Tyskland
<b>Honda</b>	PEM	Japan
<b>ITM</b>	PEM	Storbritannien
<b>Plug Power</b>	PEM	USA
<b>TELEDYNE</b>	PEM	USA
<b>Hydrogenics (Cummins Inc.)</b>	PEM & AEC	Tyskland
<b>Nel Hydrogen</b>	PEM & AEC	USA, Norge
<b>Hitachi Zosen</b>	PEM & AEC	Japan
<b>Haldor Topsoe</b>	SOEC	Danmark
<b>SOLIDpower</b>	SOEC	Storbritannien
<b>TOSHIBA</b>	SOEC	Japan
<b>Bloom</b>	SOEC	USA
<b>SUNFIRE</b>	SOEC & AEC	Tyskland
<b>Oxeon Energy</b>	SOEC	USA

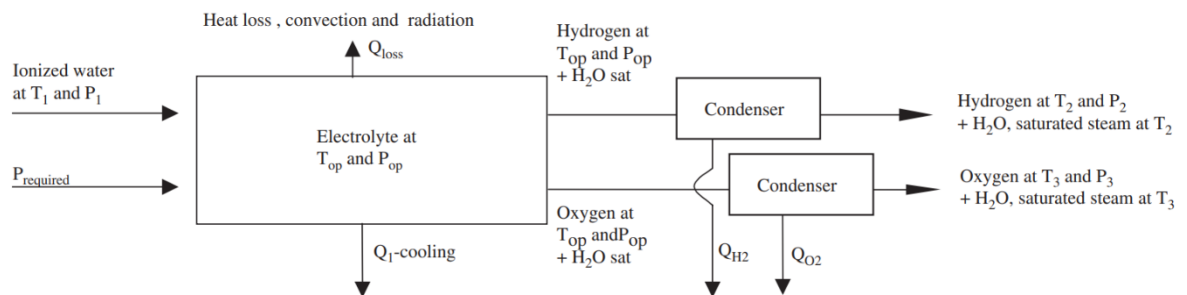
## Studie över nio leverantörer i perspektivet koppling till fjärrvärme

### Prestanda och egenskaper

De viktigaste tekniska parametrarna för elektrolysörerna ur perspektivet koppling till fjärrvärme är elektrolysens elförbrukning och dess arbetstemperatur. Elförbrukningen (ofta angiven i kWh/kg H<sub>2</sub>) anger hur mycket elektrisk energi som måste tillföras för att producera ett kilogram vätgas, typiskt är detta runt 45 – 55 kWh/kg H<sub>2</sub>. En låg elförbrukning innebär en mer effektiv elektrolysprocess där elförbrukningen är låg men även att produktionen av spillvärme är lägre. Elektrolysörens arbetstemperatur är avgörande för vid vilken temperatur som spillvärmerna kan utvinnas vid. Men även om temperaturen på spillvärmerna från elektrolysen är lägre än vad fjärrvärmenätet kräver kan det vara möjligt att utnyttja värmen med hjälp av en värmepump. Andra viktiga variabler är bl.a. elektrolysens reglerbarhet, dess storlek, arbetstryck och renhetsgrad på vätgasen (sistnämnda är viktiga för fordonsapplikationer).

Det finns flera, huvudsakligen skandinaviska, rapporter och examensarbeten som räknar på den ekonomiska potentialen i att utnyttja spillvärmerna från elektrolys men det är viktigt att notera att man (till författarnas kännedom) endast en gång i praktiken har testat att utnyttja spillvärmerna från elektrolys (I Esslingen, Tyskland). Överlag anger publikationerna att spillvärmerna öka lönsamheten för elektrolysören om värmen säljs för fjärrvärmepriser, det som saknas är vad nödvändiga investeringar i värmepumpar, ledningar och modifikationer av elektrolysör och liknande kostnader. I den tyska staden Esslingen har man testat att koppla upp en elektrolysör till ett bostadsområde så att spillvärmerna hjälper till att värma bostäderna, dock finns endast begränsat med information tillgängligt [26].

Dagens elektrolysörer är designade efter att värmen skall kylas bort i ett kylsystem eller återcirkuleras på något vis så som Haldor Topsoes fall. I ett tidigare RISE-projekt [22] frågades fyra elektrolys-företag (Haldor Topsoe, Siemens Energy, H-Tec & HydrogenPro) om möjligheterna för att utnyttja spillvärme från deras produkter. Företagen anger att för att utnyttja spillvärme över 50 °C krävs en specialdesign av elektrolysen (företagen kunde inte specificera någon kostnad för designändringen).



Figur 2: Schematisk illustration av flöden och värmeutveckling i en elektrolysör. Bildkälla: [42]

### Jämförelse av utvalda produkter

Från ett urval av mer än 30 olika elektrolysertillverkare har nio produkter valts ut för vidare jämförelse, 3 st AEC, 3 st PEMEC och 3 st SOEC. Den tillgängliga informationen är oftast begränsad till det tillverkarna själva väljer att publicera. De väljer själva vilka parametrar och hur dessa inkluderas i sina datablad, det kan därför ibland saknas uppgifter eller att de uttrycks på olika sätt. I fallet för Silyzer 300, AHPE och SOEC Haldor Topsoe har RISE tidigare varit i kontakt med företagen [22] och har således lite mer information. Kostnadsuppgifter om specifika produkter ges i stort sätt aldrig ut med mindre än att sekretessavtal signeras. Ekonomiska data behandlas i senare genom litterära källor.

I tabellerna nedan har vissa värden räknats om eller kompletterats med andra källor för att göra produkterna lätta att jämföra. Notera att SOEC produkterna har lägre elförbrukning men ibland kräver upphettad ånga istället för vatten. Vissa av dessa elektrolysörer har en inbyggd ånggenerator medans andra kräver att ånga tillförs, detta brukar anges på produktens datablad. En ånggenerator medför också viss energiförbrukning, i fallet för Haldor Topsoe räknar med att en sådan förbrukar 5.52 kWh/kg H<sub>2</sub> [22].

Tabell 3: Produktjämförelse (1/3) PEMEC

Produktnamn	Silyzer 300	M4000	ME 450/1400
Företag	Siemens	NEL	H-TEC / Euromekanik
Teknologi	PEM	PEM	PEM
Datablad/Hemsida	<a href="#">Wolf, 2021 [22]</a>	<a href="#">Länk</a>	<a href="#">Länk</a>
Arbetsstryck	1 bar	30 bar	15 - 30 bar
Renhetsgrad vätgas	"Ultra high purity 5,0"	99,9998 %	5,0
Vätgasproduktion	165 kg/h	360 kg/h	18,9 kg/h
Dellast	5 - 100 %	10 - 100 %	20 - 100 %
Vattenförbrukning	10 l/kg H <sub>2</sub>	10 l/kg H <sub>2</sub>	13,7 l/kg H <sub>2</sub>
Kapacitet	8,7/17,1 MW	18,1 MW	1 MW
Elförbrukning (stack)	52,72 kWh/kg	50,39 kWh/kg	
Elförbrukning (system)			53.39 kWh/kg
Yta	21.5m x 7.0 m (17.1 MW, inkluderar stack och gaskylare)	540 m <sup>2</sup>	40' container (12.2 m x 3 m x 5.7m)
Effektdensitet	114 kW/m <sup>2</sup>	33,5 kW/m <sup>2</sup>	27,3 kW/m <sup>2</sup>
Utloppstemperatur	60 °C (H <sub>2</sub> ) [27]		55-65 °C (vatten)
Arbetsstemperatur	~60-70 °C [28]	~50-80 °C [28]	~70 °C [29]

Tabell 4: Produktjämförelse (2/3) AEC

Produktnamn	AHPE	Hylink Alkaline	A3880
Företag	HydrogenPro	Sunfire	NEL
Teknologi	Alkalisk	Alkalisk	Alkalisk
Datablad/Hemsida	<a href="#">Wolf, 2021 [22]</a>	<a href="#">Länk</a>	<a href="#">Länk</a>
Arbetsstryck	> 15 bar	30 bar	30 bar
Renhetsgrad vätgas		> 99,6 -99,999%	99,99 – 99,999 %
Vätgasproduktion	158 kg/h	200 kg/h	215 - 350 kg/h
Dellast	20 - 100 %	40 - 100 %	3,75 - 100 %
Vattenförbrukning	10,6 l/kg H <sub>2</sub>	10 l/kg H <sub>2</sub>	10 l/kg H <sub>2</sub>

<b>Kapacitet</b>	7,9 MW	10 MW	17 MW
<b>Elförbrukning (stack)</b>	42,26 – 48,94 kWh/kg	52,28 kWh/kg	42,26 – 48,94 kWh/kg
<b>Elförbrukning (system)</b>			
<b>Yta</b>		600 m <sup>2</sup>	770 m <sup>2</sup>
<b>Effektdensitet</b>		16,7 kW/m <sup>2</sup>	22,1 kW/m <sup>2</sup>
<b>Utloppstemperatur</b>	85 °C (H <sub>2</sub> ) + kylning 18% av in effekt [30]		
<b>Arbetstemperatur</b>	~90 °C [30]	upp till 85 °C	~80-90 °C [28]

Tabell 5: Produktjämförelse (3/3) SOEC

Produktnamn	SOEC	HyLink SOEC	Bloom Electrolyser
<b>Företag</b>	<b>Haldor Topsoe</b>	<b>Sunfire</b>	<b>Bloom Energy</b>
<b>Teknologi</b>	SOEC	SOEC	SOEC
<b>Datablad/Hemsida</b>	<a href="#">Wolf, 2021 [22]</a>	<a href="#">Länk</a>	<a href="#">Länk</a>
<b>Arbetsstryck</b>	25 bar [31]	1 - 40 bar (med/utan kompression)	1 bar
<b>Renhetsgrad vätgas</b>		99,99%	99,99%
<b>Vätgasproduktion</b>	108 kg/h	67,4 kg/h	7,8 kg/h /modul
<b>Dellast</b>	1.3 - 100 %	5-100 %	20 - 100 %
<b>Vattenförbrukning</b>		12,76 kg ånga/kg H <sub>2</sub>	13.2 l/kg H <sub>2</sub>
<b>Kapacitet</b>	4,74 MW (AC)	2,7 MW	360 kW /modul
<b>Elförbrukning (stack)</b>	36,71 – 38,93 kWh/kg	36,71* kWh/kg (DC)	39,19* kWh/kg
<b>Elförbrukning (system)</b>		40,04 kWh/kg (AC)	46,15 kWh/kg
<b>Yta</b>	70 - 100 m <sup>2</sup> /MW	300 m <sup>2</sup>	5,06 m <sup>2</sup> /modul
<b>Effektdensitet</b>	10 - 14,3 kW/m <sup>2</sup>	9 kW/m <sup>2</sup>	71,1 kW/m <sup>2</sup>
<b>Utloppstemperatur</b>	< 100 °C (H <sub>2</sub> )		130 - 180 °C (H <sub>2</sub> )
<b>Arbetstemperatur</b>	700 °C	850 °C [32]	780 °C [28]

## Ekonomisk jämförelse

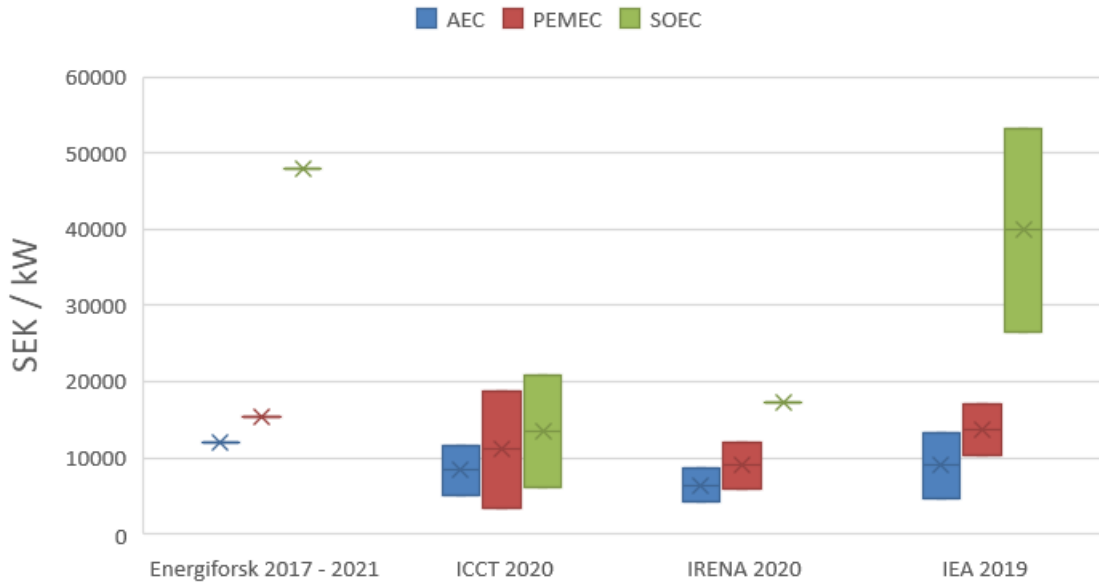
För att sätta kostnader för de olika teknikerna i perspektiv har en litteraturoversikt genomförts.

I Figur 3: Sammanställning av CAPEX-data . Se även Tabell 7 i Appendix.

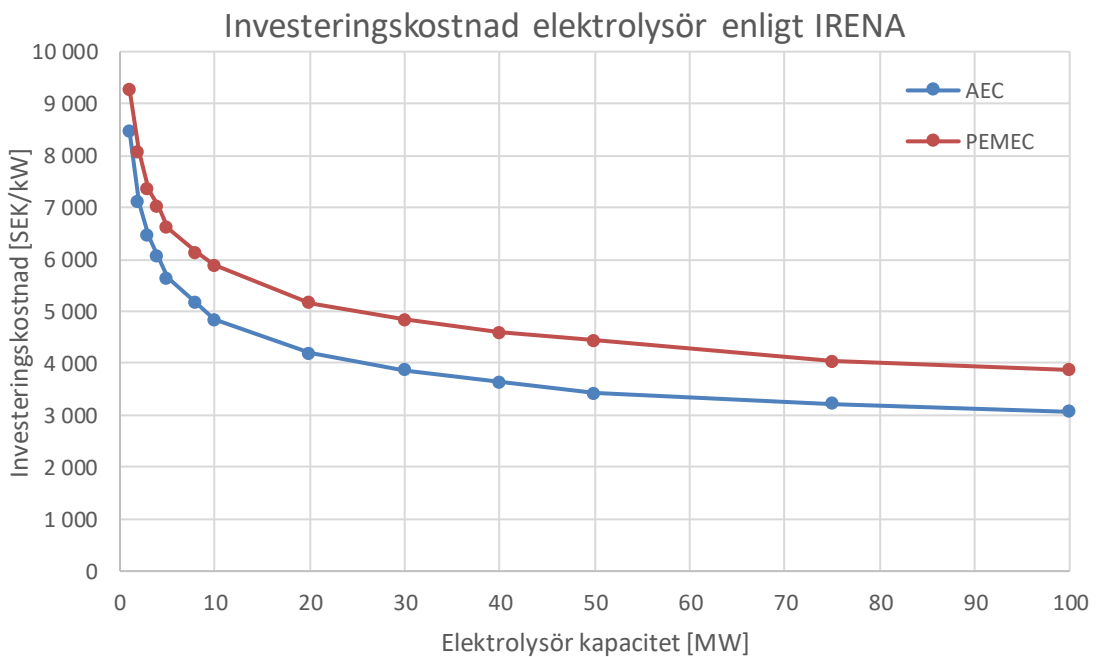
nedan finns approximativa kostnadsintervall för de olika teknikerna från en rad olika studier. I många tidigare studier och business case har det ofta antagits att investeringskostnaden för

elektrolysörer skalar linjärt mot dess kapacitet, dvs. att det inte finns några storleksmässiga fördelar (Se Figur 4). Senaste rapportering från IRENA [33] men även andra publikationer [34] påpekar att det finns kostnadsreduktioner på stor skala. IRENA uppger en skalfaktor på ungefär 0.8 [33].

Litteraturstudie: CAPEX-data för elektrolysörer



Figur 3: Sammanställning av CAPEX-data [33, 35, 36, 37]. Se även Tabell 7 i Appendix.



Figur 4: Investeringskostnad elektrolysör [33]

Investeringskostnader enligt IRENA [33].  $P_{EL}$  är elektrolysörens kapacitet i MW.

$$Capex_{AEC} = 9.38 \text{ MSEK} \cdot P_{EL}^{0.78}$$

$$Capex_{PEMEC} = 10.40 \text{ MSEK} \cdot P_{EL}^{0.81}$$

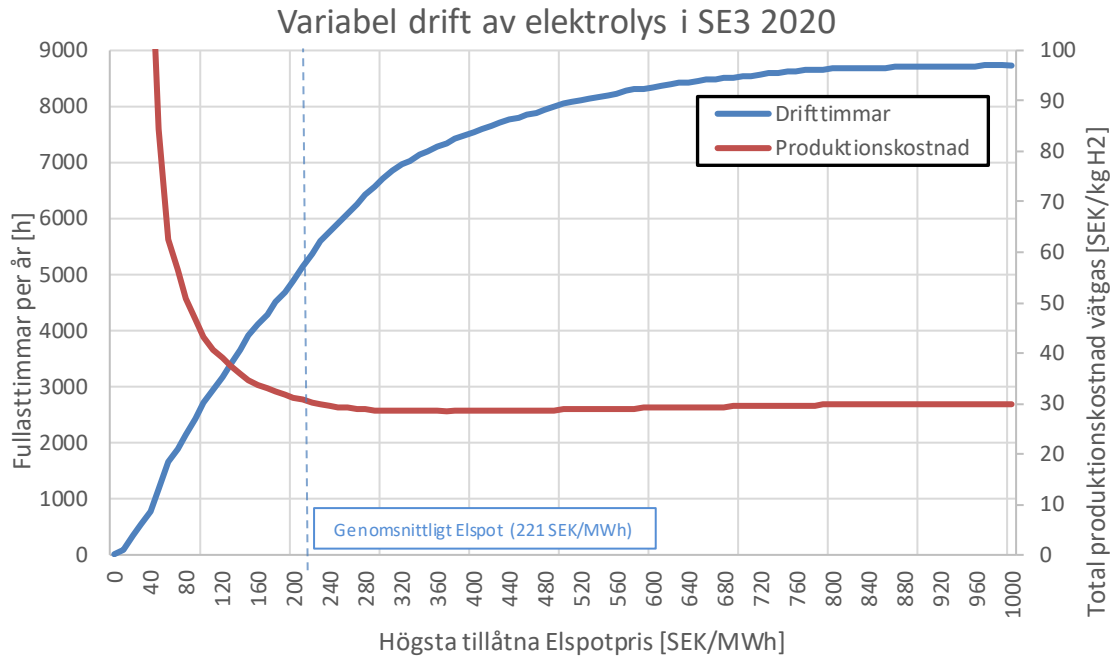
## Framtidsprognos med förväntad kostnadsutveckling

Elektrolysörer för vätgasproduktion efterfrågas i allt större utsträckningen och priserna förväntas sjunka både pga ökade volymer, men också med hjälp av teknikutvecklingar då allt större satsningar görs. Framtida prisutveckling har främst studerats internationellt fram till 2021 och hur priserna väntas sjunka varierar mycket mellan olika rapporter som kan ses i Tabell 8 i Appendix. IRENA rapporterar att kostnadsutvecklingen för elektrolysörer och bränsleceller är liknande den som även solceller har upplevt den senaste tiden. Detta i kombination med ambitiösa klimatmål skulle kunna leda till en kostnadsreduktion på 40 % fram till 2030 [33]. Mellan de olika teknikerna sker kostnadsreduceringen snabbast för SOEC följt av PEMEC och sist AEC [38]. Detta pga. att AEC är en redan mer väletablerat teknik med mindre potential för förbättringar.

## Drift av elektrolys

En elektrolysör kan drivas variabelt efter tillgången till elektricitet, t.ex. är det möjligt att köra på del-last eller ingen last alls om elpriset är tillfälligt högt. Då elpriset är avgörande för produktionskostnaden av vätgas kan det vara fördelaktigt att driva elektrolysören på detta vis. Elförbrukningen och den elektriska effektiviteten är även en funktion av del-lasten. Elektrolysörer har en lägsta last de kan köras vid (ca 5 – 20 % av maximal last) och är oftast som mest effektiva vid ca 30 – 50 % del-last [39]. Dock är det även viktigt att se till att få många fullasttimmar per år för att få avsättning för investeringskostnaden. Man bör också visa hänsyn till hur de olika elektrolysteknikerna är kompatibla med variabel drift, t.ex. hur dess livstid påverkas av att elektrolysören slås av/på eller hur fort den kan reglera sin effekt.

I Figur 5 illustreras ett exempel hur drifttimmar och produktionskostnad påverkas om elektrolysens drift styrs efter elpris. I exemplet är det tänkt att elektrolysen kör på fullast om spotpriset är under ett förbestämt värde, är spotpriset högre stängs elektrolysen av. Lägsta produktionskostnad uppnås vid ca 7000 h/år i detta fall vilket motsvarar nära konstant drift. Trots att det är tekniskt möjligt att köra variabel drift av elektrolys med PEM eller AEC saknas det ekonomiska initiativ för detta. Andra problem med variabel drift är att det kan bli tillfällig brist på vätgas om längre produktionsavbrott sker, detta kan åtgärdas med vätgaslager vilket å andra sidan även leder till ökade kostnader. Miljömässiga fördelar kan uppnås genom att köra hög produktion när tillgång till förnybar el är hög och låg produktion när förnybar el saknas.



Figur 5: Fullasttimmar och produktionskostnad för variabel drift av elektrolys i SE3 2020

## Underhåll & livstid av elektrolys

Den huvudsakliga driftskostnaden för elektrolys består av elkostnad för den elektricitet som förbrukas men även kostnader för underhåll och eventuell uppgradering av stacken tillkommer. Stacken i elektrolysören degraderas över tid vilket leder till ökad elförbrukning. Hur fort stacken degraderar beror bl.a. på hur elektrolysören drivs, arbetstemperatur med mera. Exakta uppgifter om underhållskostnader och kostnad för att byta ut stacken anges inte publikt av tillverkare men flera tidigare arbeten uppger underhållskostnader på 2 – 5 % av investeringskostnaden per år samt en kostnad på 20 – 40 % av den ursprungliga investeringskostnaden för att ersätta stacken. Ibland räknar man in ersättandet av stacken som en del av underhållskostnaden.

Tabell 6: Exempel på kostnader för underhåll och stackbyten. Kostnader angivna i % av ursprunglig investeringskostnad.

Produktnamn	Företag	Underhåll	Kostnad stackbyte	Drifttimmar mellan stackbyten	Referens
Silyzer 300	Siemens	< 3 %/år	20 – 25 %	80 000 h	[22]
AHPE	HydrogenPro	2 %/år	40 %	87 600 h	[22]
HCS S450/70 <sup>1</sup>	H-TEC	5 %/år	60 %	87 600 h	[22]

## Två icke-kommersiella teknologier under utvecklande

Det ökade intresset för vätgasframställning innebär att flertalet nya tekniker är under utvecklande. Två av dessa kommer att introduceras kort här. Smältkarbonat-elektrolys (MCEC) en teknik som har diskuterats i många år och alkaliskmembran-elektrolys (AEMEC) en systerteknik till PEM-elektrolys som har högt intresse just nu. Ingen av dessa tekniker är tillgängliga kommersiellt, men kan komma att få betydelse i framtiden.

<sup>1</sup> Kostnaden för stackbyten inkluderas i underhållskostnaden

### Smältkarbonat-elektrolys (MCEC)

MCEC är i elektrolyskonstruktionen relativt nära relaterad till SOEC och också en högttemperaturteknik. Två av de stora skillnaderna är att den kräver koldioxid för att jonledningen i elektrolyten ska fungera och att den använder litium som kommer att vara en begränsad råvara i framtiden. De flesta studier som görs på MCEC just nu är att den studeras som en reversibel teknik, där de utreder om man kan använda samma anläggning både för elektrolys och som bränslecell för elproduktion [40]. Några av de grundläggande problemen med tekniken har att göra med elektrolyten som är en flytande massa som är svår att hantera och gärna korroderar angränsande material.

### Alkaliskmembran-elektrolys (AEMEC)

Denna teknik är under utvecklande och funktionsmässigt syftar den till att kombinera de två kommersiella teknikerna AEC och PEMFC. Just nu jobbas det mycket aktivt med denna teknik på universitet och forskningsinstitut runt om i världen. Förhoppningsvis kommer den kunna leda till en hybrid av de två systemens fördelar som listats ovan. Dvs lättillgängliga katalysatormaterial som nickel och högre effektivitet per anläggningsstorlek från PEMEC. Förhoppningen är också att övergången till en alkaliskpolymerelektrolyt ska leda till att man kan använda rent vatten eller en lägre koncentration av hydroxidlösning, vilket skulle leda till en säkrare och mindre materialkrävande elektrolysör [4]. Det finns idag ett företag som säljer denna typ av elektrolysörer [41]. De ligger prestandamässigt jämförbart med den mer traditionella AEC tekniken, dock är teknikinformation fortfarande svårtillgänglig för produkten och hållbarheten okänd.

## RISE Research Institutes of Sweden AB Säkerhetsforskning - Förnybar energi från vind och hav

Utfört av

**Författat av**  
**Annika Carlson,**  
**Axel Nordin Fördös,**  
**Jenny Lindborg,**  
**Anders Wickström**



## Appendix

### Litteraturstudie – CAPEX kostnader för elektrolys

Tabell 7 - Litteratur studie över CAPEX kostnader för elektrolysörer på marknaden idag.

Rapport/Studie	Teknik	År	Pris (2021 kr/kW)*	Referens
<b>Energiforsk</b>	AEC	2017-2021	12 000	[35]
<b>ICCT</b>	AEC	2020	5200 - 11 540	[36]
<b>IRENA</b>	AEC	2020	4319 - 8640	[33]
<b>IEA</b>	AEC	2019	4750 - 13 300	[37]
<b>Energiforsk</b>	PEMEC	2017-2021	15 500	[35]
<b>ICCT</b>	PEMEC	2020	3504 - 18 819	[36]
<b>IRENA</b>	PEMEC	2020	6050 - 12 100	[33]
<b>IEA</b>	PEMEC	2019	10 450 - 17 100	[37]
<b>Energiforsk</b>	SOEC	2017-2021	48 000	[35]
<b>ICCT</b>	SOEC	2017-2020	6161 - 20 794	[36]
<b>IRENA</b>	SOEC	2020	> 17 300	[33]
<b>IEA</b>	SOEC	2019	26 600 - 53 200	[37]

**Litteraturstudie – CAPEX utveckling för elektrolys**

Tabell 8 - Litteraturstudie över estimerade CAPEX i kr/kW utvecklingen fram till 2050 för elektrolysörer.

Rapport/Studie	Teknik	Pris idag*	Pris 2030*	Pris >2050*	Referens
<b>Energiforsk</b>	AEC	12 000	3450	-	[35]
<b>ICCT</b>	AEC	5200 - 11 540	4923 - 10 993	4432 - 9919	[36]
<b>IRENA</b>	AEC	4319 - 8640	-	1820	[33]
<b>IEA</b>	AEC	4750 - 13 300	3800 - 8075	1900 - 6650	[37]
<b>Energiforsk</b>	PEMEC	15 500	5600	-	[35]
<b>ICCT</b>	PEMEC	3504 - 18 819	3321 - 17 909	2958 - 16207	[36]
<b>IRENA</b>	PEMEC	6050 - 12 100	-	1820	[33]
<b>IEA</b>	PEMEC	10 450 - 17 100	6175 - 14 250	1900 - 8550	[37]
<b>Energiforsk</b>	SOEC	48 000	6900	-	[35]
<b>ICCT</b>	SOEC	6161 - 20 794	5888 - 19 793	5342 - 17909	[36]
<b>IRENA</b>	SOEC	> 17 300	-	2730	[33]
<b>IEA</b>	SOEC	26 600 - 53 200	7600 - 10 450	4750 - 9500	[37]

\* Värden som har översatts från andra valutor har använt ett uppskattat medelvärde från året då respektive rapport publicerades och kan därmed skilja något beroende på valutakurs vid framtida offerter.

**Referenser**

- [1] F. M. Sapountzi, J. M. Garcia, C. J. (Kees-Jan) Weststrate, H. O. A. Fredriksson och J. W. Niemantsverdriet, "Electrocatalysts for the generation of hydrogen, oxygen and," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 58, pp. 1-35, 2017.
- [2] M. Paidar, V. Fateev och K. Bouzek, "Membrane electrolysis—History, current status and perspective," *Electrochimica Acta*, pp. Vol. 209, 737-756, 2016.
- [3] M. Carmo, D. L. Fritz, J. Mergel och D. Stolten, "A comprehensive review on PEM water electrolysis," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, nr 12, pp. 4901-4934, 2013.
- [4] I. Vincent och D. Bessarabov, "Low cost hydrogen production by anion exchange membrane electrolysis: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, nr 2, pp. 1690-1704, 2018.
- [5] M. David, C. Ocampo-Martínez och R. Sánchez-Peñaab, "Advances in alkaline water electrolyzers: A review," *Journal of Energy Storage*, vol. 23, pp. 392-403, 2019.

- [6] Greenhydrogen, "greenhydrogen.dk Brochure-electrolyser," [Online]. Available: <https://greenhydrogen.dk/#electrolysers>. [Använd 20 07 2021].
- [7] Nel Hydrogen, "Nelhydrogen, atmospheric-alkaline-electrolyser-a-series, specifications," [Online]. Available: <https://nelhydrogen.com/product/atmospheric-alkaline-electrolyser-a-series/>. [Använd 20 07 2021].
- [8] Sunfire, "sunfire.de, Factsheet Hylink Alkaline/SOEC," [Online]. Available: <https://www.sunfire.de/en/hydrogen>. [Använd 20 07 2021].
- [9] A. Lee, "Japan opens world's largest green-hydrogen plant near Fukushima disaster site," RECHARGE, 09 03 2020. [Online]. Available: <https://www.rechargenews.com/transition/japan-opens-worlds-largest-green-hydrogen-plant-near-fukushima-disaster-site/2-1-769361>. [Använd 02 08 2021].
- [10] Demo4Grid, "About Demo4Grid," Demo4Grid, 2017. [Online]. Available: <https://www.demo4grid.eu/project/>. [Använd 02 08 2021].
- [11] Nel Hydrogen, "Nel Hydrogen Electrolysers - Brochure," [Online]. Available: <https://nelhydrogen.com/wp-content/uploads/2020/03/Electrolysers-Brochure-Rev-C.pdf>. [Använd 20 07 2021].
- [12] Euromekanik, "Data Sheet Elektrolyser ME450/1400," [Online]. Available: [http://www.euromekanik.se/wp-content/uploads/elektrolys/HTEC\\_SYSTEMS-Data\\_Sheet\\_Elektrolyser-ME450\\_1400\\_EN-04022019.pdf](http://www.euromekanik.se/wp-content/uploads/elektrolys/HTEC_SYSTEMS-Data_Sheet_Elektrolyser-ME450_1400_EN-04022019.pdf). [Använd 20 07 2021].
- [13] Elcogen, "elcogenh2, product sheet multi MW," [Online]. Available: [https://elcogenh2.com/wp-content/uploads/2021/04/Elogen\\_Product\\_sheet-Multi-MW.pdf](https://elcogenh2.com/wp-content/uploads/2021/04/Elogen_Product_sheet-Multi-MW.pdf). [Använd 20 07 2021].
- [14] Hydrogenics, "directindustry.com," [Online]. Available: <https://pdf.directindustry.com/pdf/hydrogenics/onsite-hydrogen-generation-hylyzer-pem-electrolysis-technology/33492-420311.html>. [Använd 20 07 2021].
- [15] K. Ayers, "The potential of proton exchange membrane-based electrolysis technology," *Current Opinion in Electrochemistry*, vol. 18, pp. 9-15, 2019.
- [16] Shell, "REFHYNE," Shell, 2021. [Online]. Available: <https://refhyne.eu/about/>. [Använd 02 08 2021].
- [17] Air Liquide, "Inauguration of the worlds largest PEM electrolyzer," Air Liquide, 08 02 2021. [Online]. Available: <https://www.airliquide.com/magazine/energy-transition/inauguration-worlds-largest-pem-electrolyzer>. [Använd 02 08 2021].
- [18] Linde, "Linde to Build, Own and Operate World's Largest PEM Electrolyzer for Green Hydrogen," Linde, 13 01 2021. [Online]. Available: <https://www.linde.com/news-media/press-releases/2021/linde-to-build-own-and-operate-world-s-largest-pem-electrolyzer-for-green-hydrogen>. [Använd 03 08 2021].
- [19] Green Car Congress, "Air Liquide selects Hydrogenics for 20MW electrolyzer for hydrogen production; largest PEM electrolyzer in world," Green Car Congress, 26 02 2019. [Online]. Available: <https://www.greencarcongress.com/2019/02/20190226-airliquide.html>. [Använd 02 08 2021].
- [20] Bloom Energy, "White paper: THE ROLE OF SOLID OXIDE TECHNOLOGY IN THE HYDROGEN ECONOMY: A PRIMER," Bloom Energy, 2021.

- [21] Bloom Energy, "Bloom elektrolyzer datasheet," [Online]. Available: <https://www.bloomenergy.com/bloomelectrolyzer/>. [Använd 20 07 2021].
- [22] A.-K. Jannasch, J. Wolf, H. Pihl, M. Edvall, L. Axelsson och L.-O. Nordberg, "Detaljerad analys state-of-the-art elektrolys - fallstudie," RISE, 2021.
- [23] B. Vad Mathiesen, I. Ridjan, D. Connolly, M. Pagh Nielsen, P. Vang Hendriksen, M. Bjerg Mogensen, S. Højgaard Jensen och S. Dalgaard Ebbesen, "TECHNOLOGY DATA FOR HIGH TEMPERATURE SOLID OXIDE ELECTROLYSER CELLS, ALKALI AND PEM ELECTROLYSERS," Aalborg University, 2013.
- [24] MultiPHY, "MULTIPHY," MultiPHY, 2021. [Online]. Available: <https://multiplhy-project.eu/>. [Använd 02 08 2021].
- [25] GrInHy2.0, "GrInHy2.0," GrInHy2.0, 10 12 2020. [Online]. Available: <https://www.green-industrial-hydrogen.com/>. [Använd 02 08 2021].
- [26] Green Hydrogen Esslingen, "Klimaneutrales Stadtquartier in Esslingen," Green Hydrogen Esslingen, [Online]. Available: <https://green-hydrogen-esslingen.de/>. [Använd 30 08 2021].
- [27] Siemens Energy, "Siemens – Hydrogen and Power to X," Siemens Energy, 26 08 2020. [Online]. Available: <https://www.rqei.ca/wp-content/uploads/2020/09/RQEI-Online-Seminar-2020-08-26.pdf>. [Använd 31 08 2021].
- [28] Fraunhofer ISE, "Water Electrolysis: Status and Potential for Development," Fraunhofer ISE, 03 04 2014. [Online]. Available: <https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/2%20Water%20Electrolysis%20Status%20and%20Potential%20for%20Development.pdf>. [Använd 31 08 2021].
- [29] H-TEC Systems, "H-TEC Series-S: S 30/30," H-TEC, [Online]. Available: [https://www.euromekanik.se/wp-content/uploads/HTEC\\_SYSTEMS\\_Datasheet\\_Series-S\\_24022018.pdf](https://www.euromekanik.se/wp-content/uploads/HTEC_SYSTEMS_Datasheet_Series-S_24022018.pdf). [Använd 31 08 2021].
- [30] R. Espeseth, "Fuels of the Future - OPEN WORKSHOP," HydrogenPro, [Online]. Available: [https://ambition-research.eu/wp-content/uploads/2018/12/6\\_HydrogenPro-Workshop\\_Trondheim\\_13092018.pdf](https://ambition-research.eu/wp-content/uploads/2018/12/6_HydrogenPro-Workshop_Trondheim_13092018.pdf). [Använd 31 08 2021].
- [31] R. K. P. A. H. J. H. B. M. M. A. Hauch, "Recent advances in solid oxide cell technology for electrolysis," *Science*, vol. 370, nr 6513, 2020.
- [32] Sunfire, "Sunfire.com," Sunfire.com, [Online]. Available: <https://www.sunfire.de/en/>. [Använd 31 08 2021].
- [33] E. Taibi, H. Blanco, R. Miranda och M. Carmo, "GREEN HYDROGEN COST REDUCTION," International Renewable Energy Agency (IRENA), 2020.
- [34] J. Proost, "State-of-the art CAPEX data for water electrolysers, and their impact on renewable hydrogen price settings," *International Journal of Hydrogen Energy*, nr 44, pp. 4406-4413, 2019.
- [35] L. DYAB, P.-M. BONDESSON, H. SKÖLDBERG, J. HOLM, M. BROLIN, S. NYSTRÖM och R. SAMUELSSON, "Sektorskoppling för ett mer effektivt energisystem," Energiforsk, 2021.

- [36] A. Christensen, "Assessment of Hydrogen Production Costs from Electrolysis: United States and Europe," International Council on Clean Transportation, 2020.
- [37] IEA, "The Future of Hydrogen," International Energy Agency, 2019.
- [38] Bloomenergy, "The Role of Solid Oxide Technology in the Hydrogen Economy; A Primer," Bloomenergy, 2021.
- [39] D. P. Lettenmeier, "Efficiency – Electrolysis," Siemens Energy, 2021.
- [40] L. Hu, G. Lindbergh och C. Lagergren, "Performance and Durability of the Molten Carbonate Electrolysis Cell and the Reversible Molten Carbonate Fuel Cell," *Journal of Physical Chemistry C*, vol. 120, nr 25, pp. 13427-13433, 2016.
- [41] Enapter, "enapter.com Factsheet-electrolyser," [Online]. Available: <https://www.enapter.com/electrolyser>. [Använd 20 07 2021].
- [42] P. A. Maria Saxe, "Advantages of integration with industry for electrolytic hydrogen production," 2007.
- [43] T. Smolinka, "Water Electrolysis: Status and Potential for Development," Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2014.