



Framtida utmaningar i SOFC teknologin

Jan-Erik Svensson

Energi och material
Institutionen för Kemi- och Kemiteknik
Chalmers tekniska högskola

Applikation APU



Rullande bostäder som behöver elektricitet

Fördelar med SOFC-APU



SOFC-APU kan drivas med diesel

- Det krävs ingen separat tank
- Det krävs ingen ny infrastruktur
- En APU är tyst...
- Mer effektiv än diesel generator (Verkningsgrad 35% mot 15%)

Det finns flera typer av bränsleceller, de två vanligaste är:

- **PEM (Polymer Electrolyte Membrane Fuel cells)**

Arbetar vid 80 °C, **hög effektivitet**, **snabb start-up**, **stor känslighet för bränsleföroreningar**

- **SOFC (Solid oxide fuel cells)**

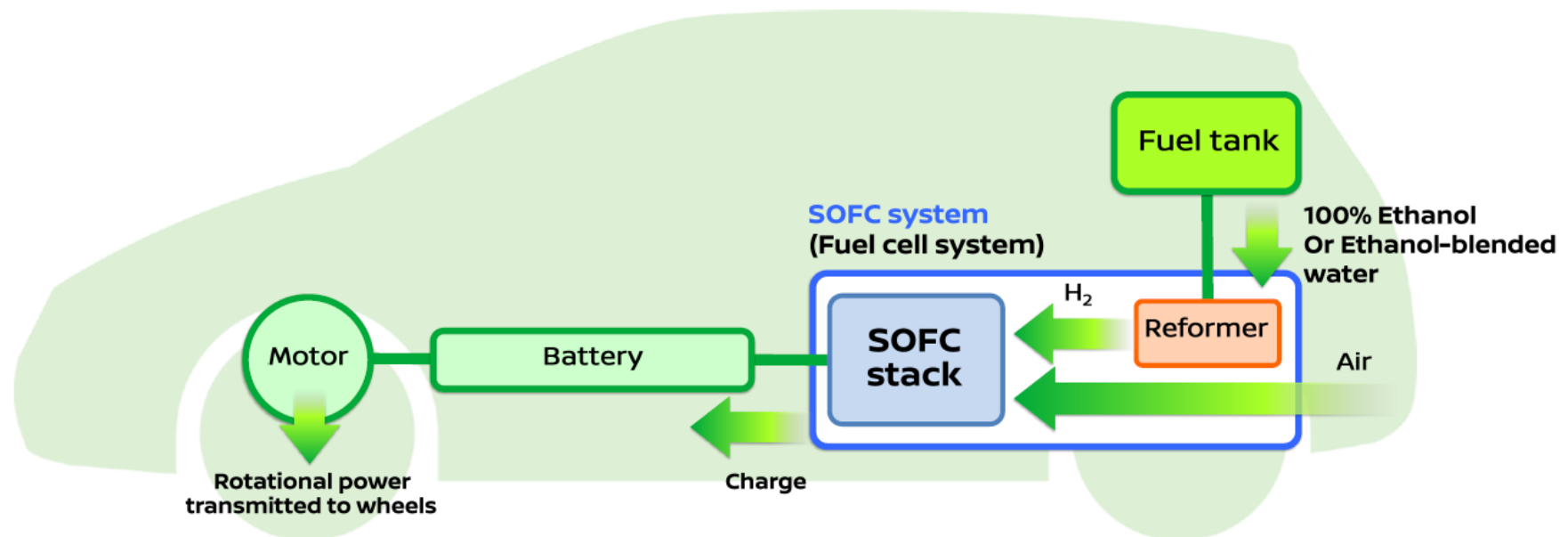
Arbetar vid 600-900 °C, **hög effektivitet**, **flexibel bränsletyp**, **hög-temperatur korrosion**

SOFC range extender

NISSAN

How the e-Bio Fuel Cell system works 1/2

- Fueled by liquid fuel: easy to handle, can use conventional fuel tank
- Hydrogen generated through reformation of 100% ethanol or ethanol-blended water
- Power generated by SOFC (solid oxide fuel cell) stack from reformat hydrogen and air
- Generated electricity charges battery and powers drive motor



SOFC : Solid Oxide Fuel Cell

Stationära SOFC



500kW SOFC installerat på
Ebay Campus San Jose, CA

Bloomenergy

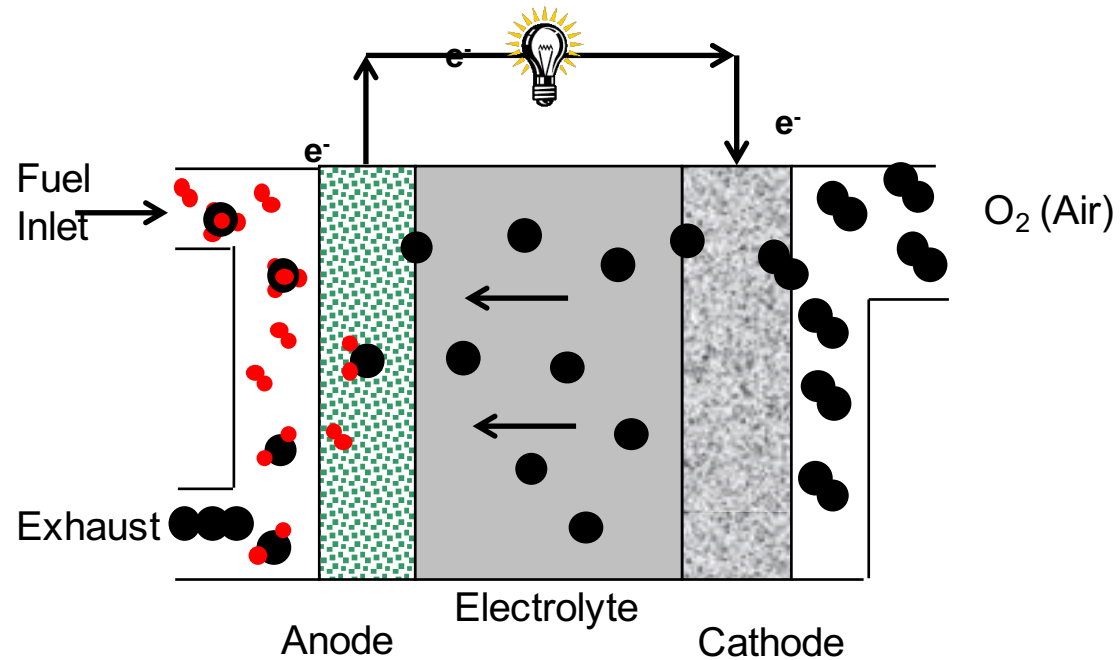
5 x 100kW "Bloomboxes"
installerades i Februrari
2010 som drivs med
100% biogas.

Är investeringen ekonomiskt
försvarbar???

Kan forskningen hjälpa till att
göra tekniken kommersiell på
en internationell marknad?

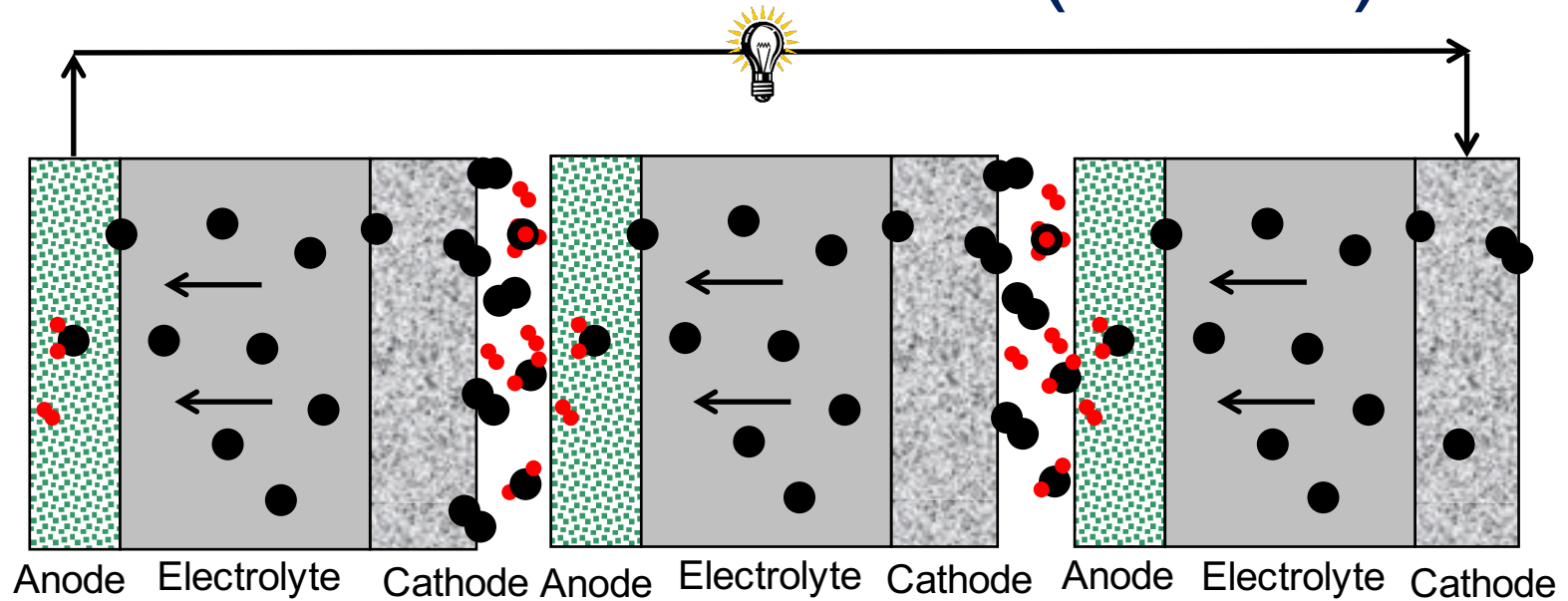
Fast Oxid Bränsle Cell

Solid Oxide Fuel Cell

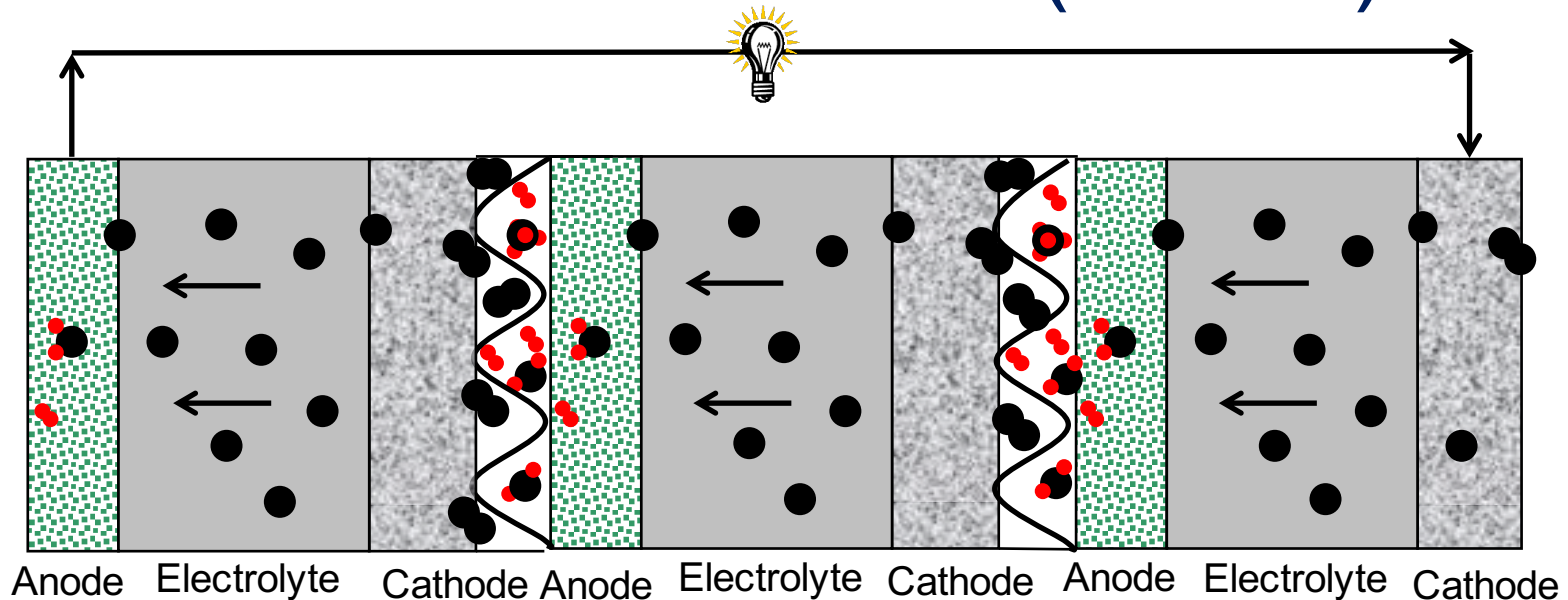


Temperatur: 600-900°C

Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)



Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)



Krav för bipolära plattor:

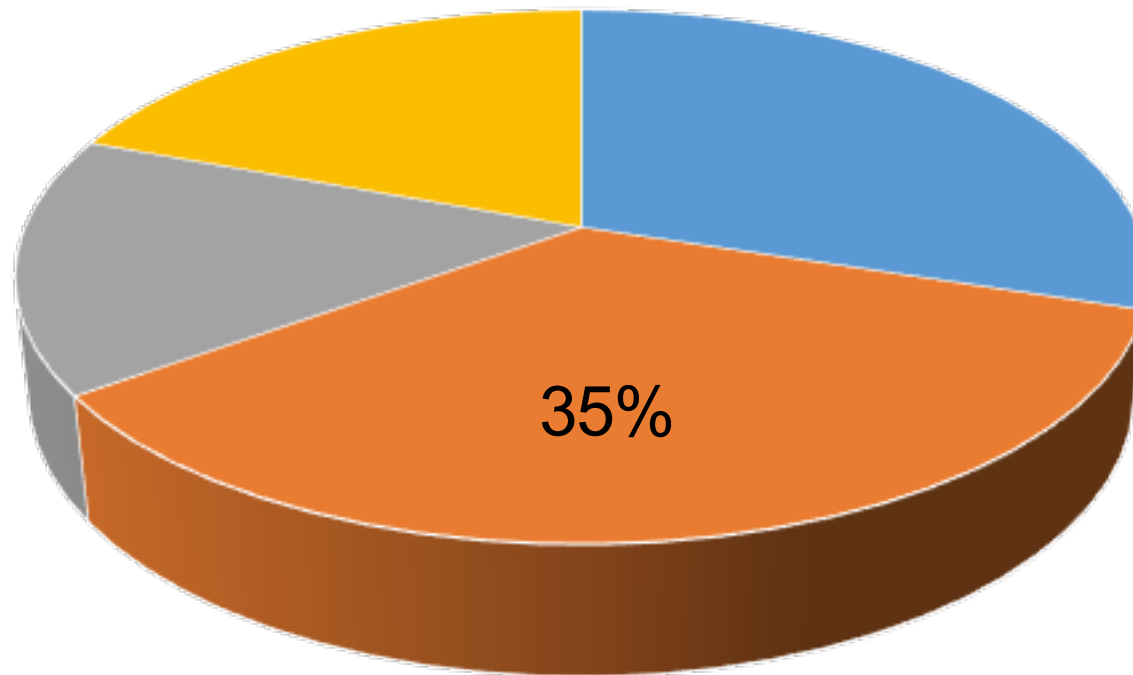
- Termiskt utvigningskoefficient som är lika med andra SOFC komponenter
- God elektrisk ledningsförmåga
- Billiga att tillverka (bipolärplattan kan motsvara upp till 40% av stack kostnaden¹)

→ **Ferritiska rostfria stål**

1) Hall, T. D., McCrabb, H. A., Wu, J., Zhang, H., Liu, X., & Taylor, E. J. (2011). in S. C. Singhal & K. Eguchi (Eds.), *Solid Oxide Fuel Cells 12* (Vol. 35, pp. 2489-2502). Pennington: Electrochemical Society Inc.

Cost analysis 1kW Stack

1kW Stack Manufacturing Cost
(50 000Units)

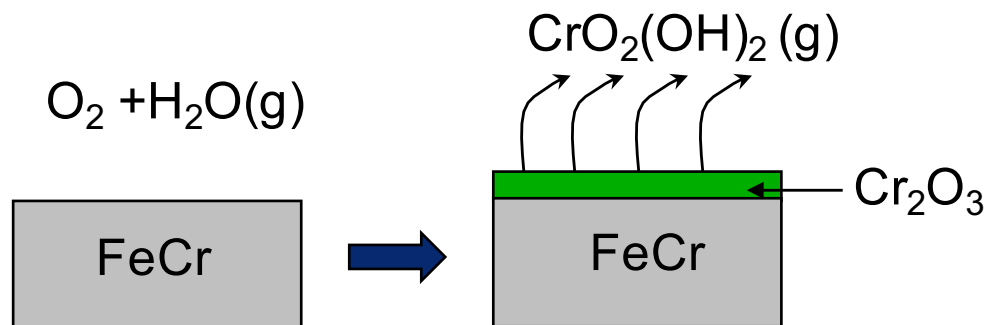
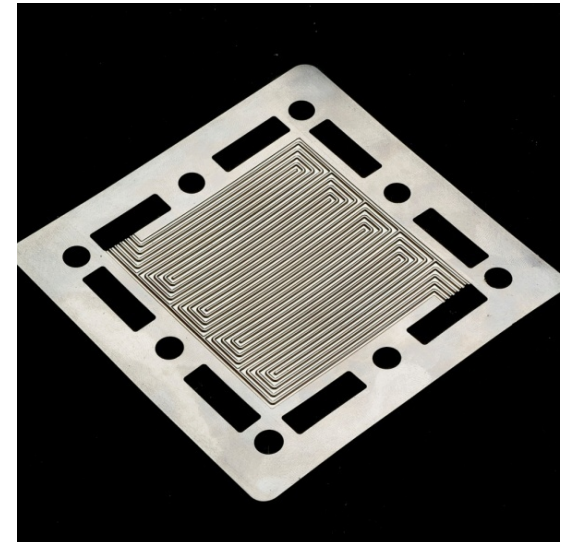


■ Cells ■ Interconnects ■ Sealing, End plate etc ■ Assembly Hardware

Source: Battelle study prepared for US DOE (2014)

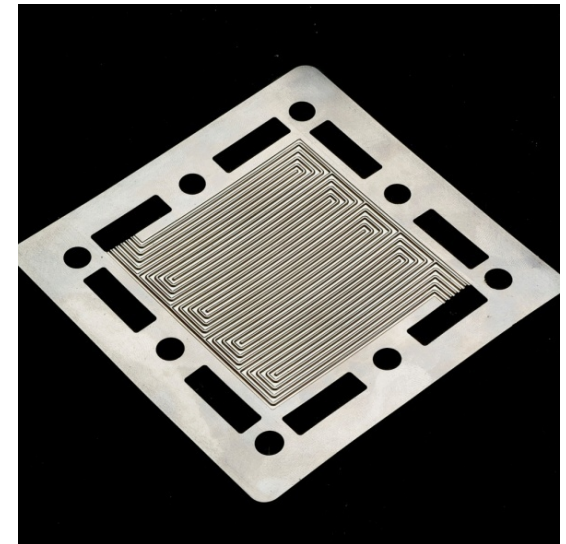
Utmaningar med ferritiska stål

- **Cr-förångning**
 - Förgifta katoden
 - Förvärra korrosionsproblematiken
- **Korrosion** på katodsidan
- **Korrosion** på anodsidan
- Förbättra **ledningsförmågan** av oxiden
- Interdiffusion med andra cellkomponenter
- Påverkan av ström och "dual atmosphere"
- Föroreningar som påverka korrosionen (t.ex. salt)

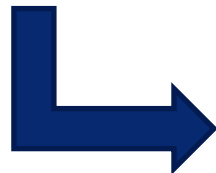


Utmaningar med ferritiska stål

- Cr-förångning
 - Förgifta katoden
 - Förvärra korrosionsproblematiken
- Korrosion på katodsidan
- Korrosion på anodsidan
- Förbättra ledningsförmågan av oxiden
- Interdiffusion med andra cellkomponenter
- Påverkan av ström och “dual atmosphere”
- Föroreningar som påverka korrosionen (t.ex. salt)



Ytegenskaper som är nyckeln



Kan styras genom beläggningar

Mål

Idé:

Förbelagt stål för storskalig
produktion

→ Metalliska tunnfilmer

Målet med beläggningen:

- Minimera Cr-förångningen
- Förbättra korrosionsmotståndet
- Förbättra ledningsförmågan



Mål

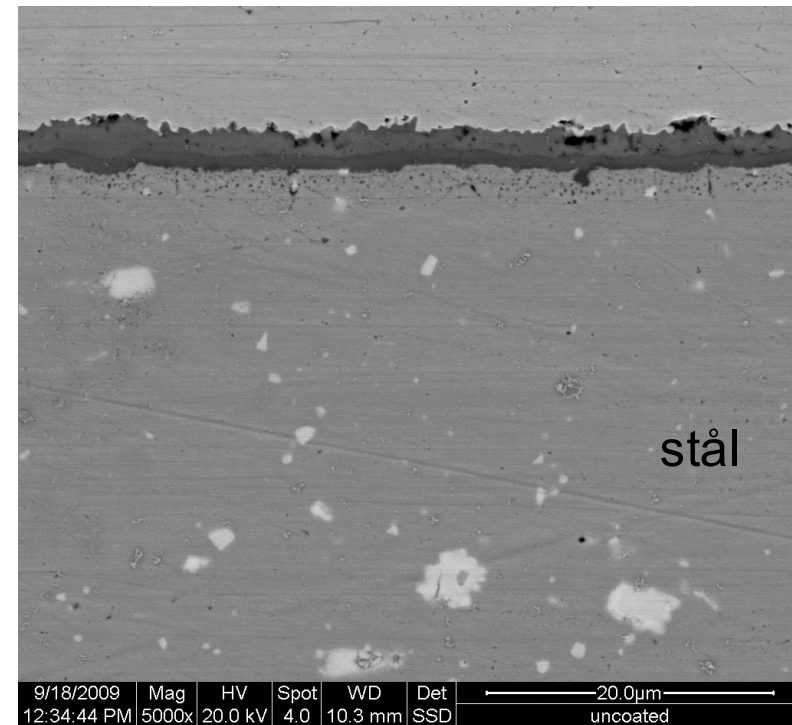
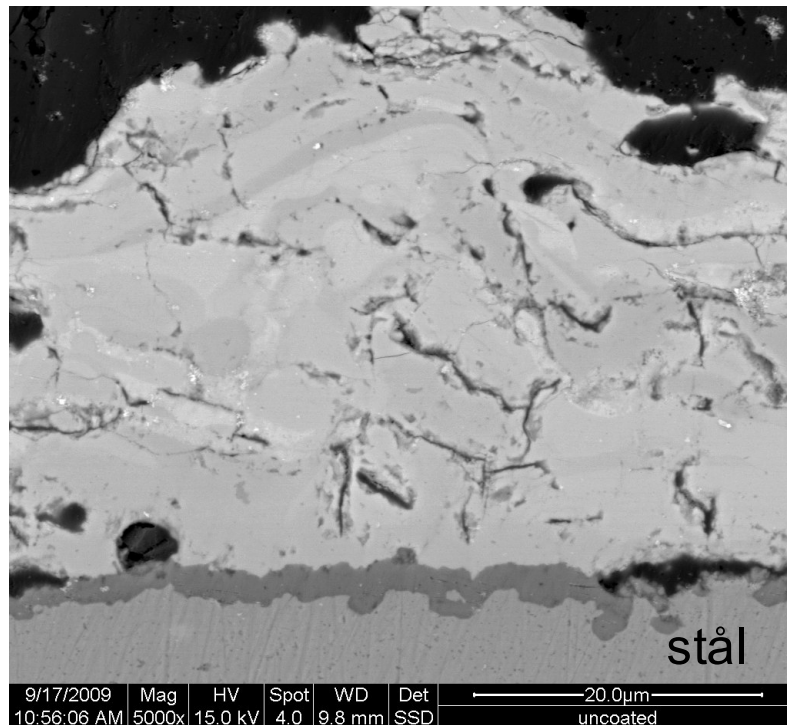
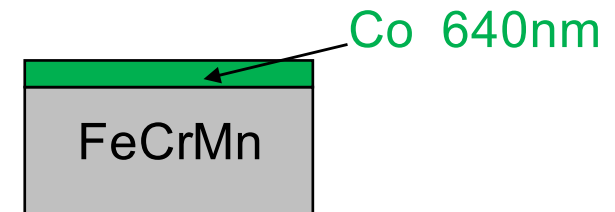
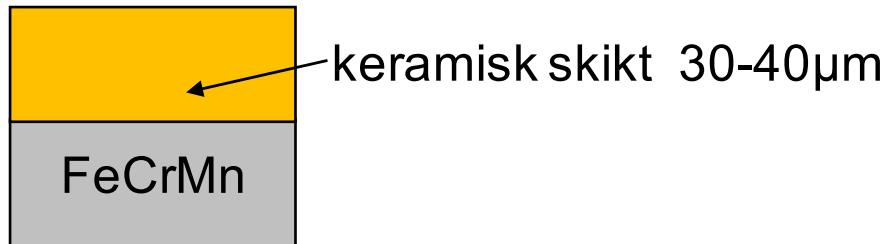
Förbättringar av livslängden av fastoxidbränsleceller-APU
på ett kostnadseffektivt sätt

➔ Metalliska bipolära plattor är en nyckelkomponent!
(upp till 40% av stackkostnaden)

Ideen bakom projektet är att samarbeta i ett starkt konsortium för att kunna lösa dessa problem på ett kostnadseffektivt sätt genom användning av FeCr stål skyddat av en flerskiktad nanobeläggning.

Nanosikt mot krom förångning

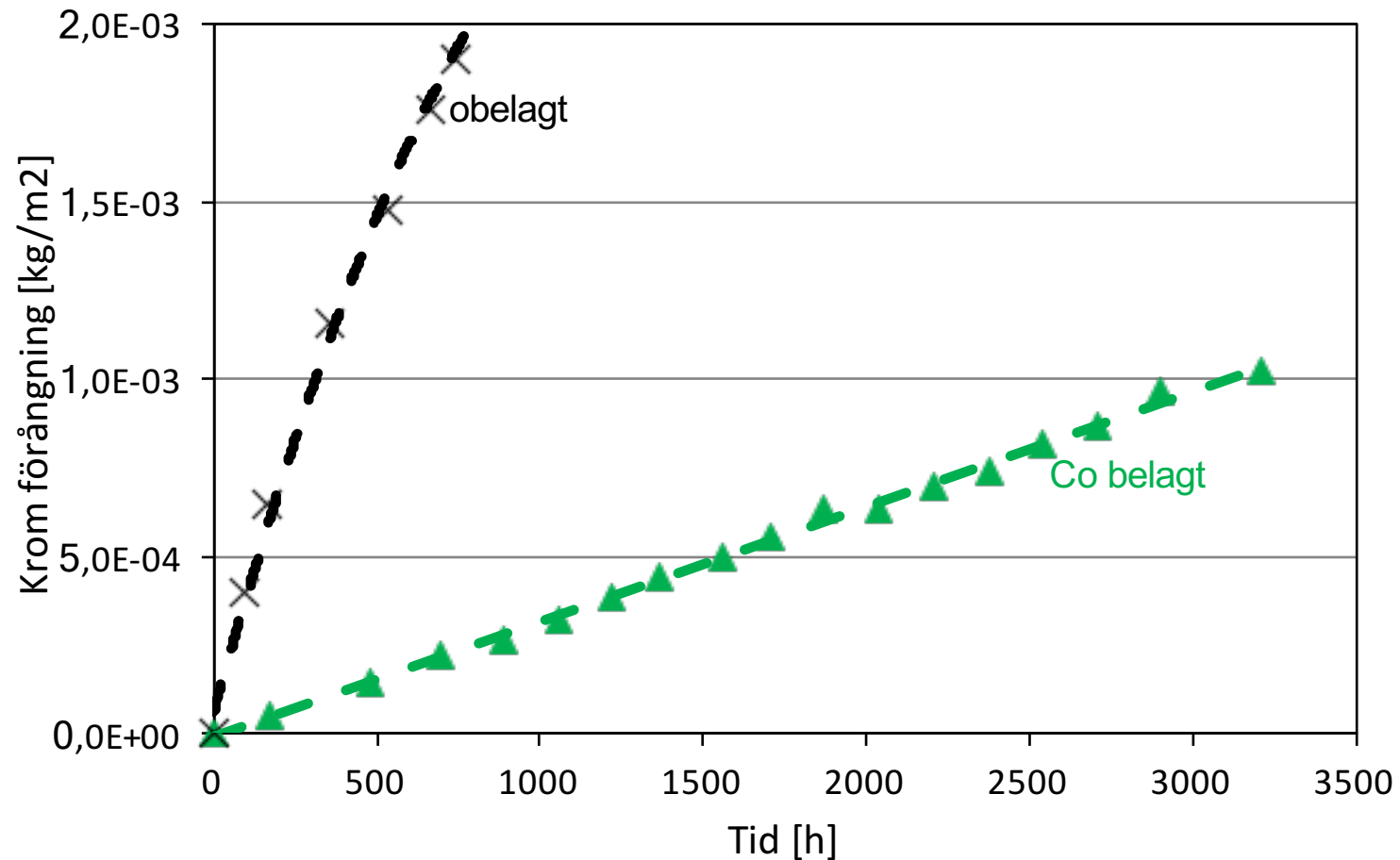
-jämfört med "State of the art"



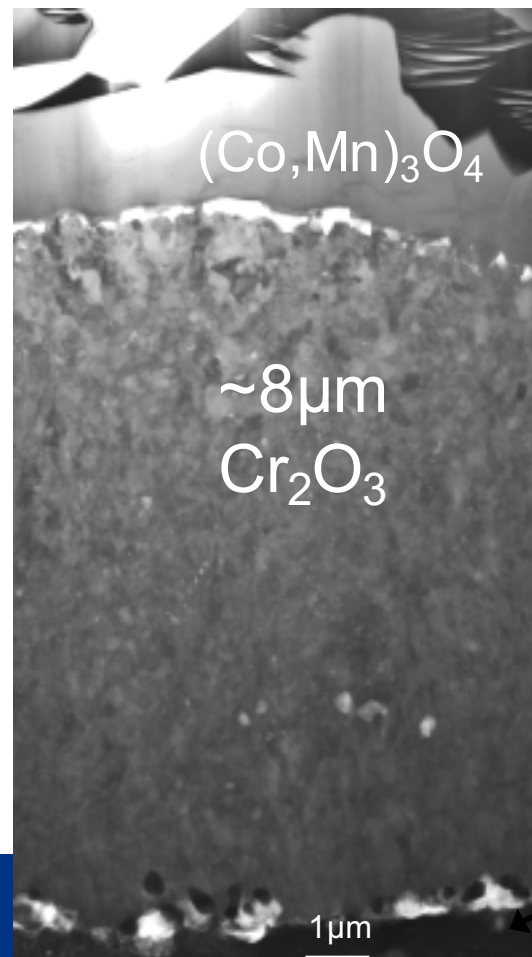
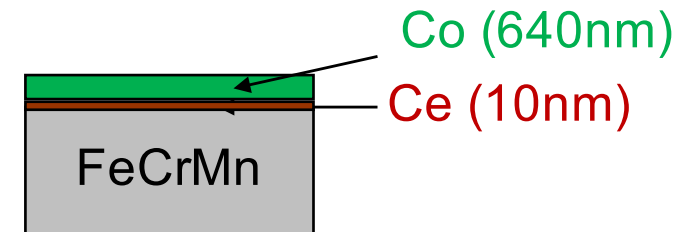
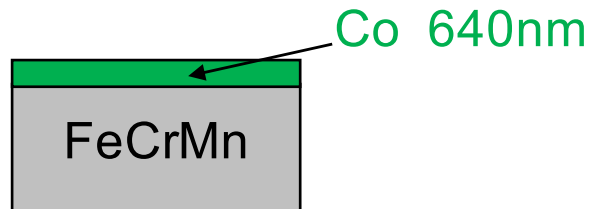
Luft, 168h, 850°C

Nanosikt mot krom förångning

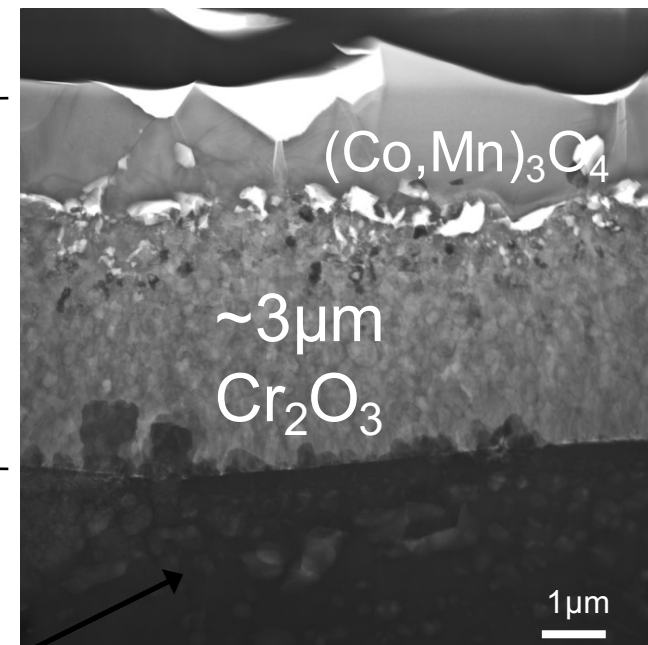
-Långtids prestanda



Nanosikt för bättre korrosionsmotstånd



Oxidskikt



stål

Luft, 3000h, 850°C

Utmaningar

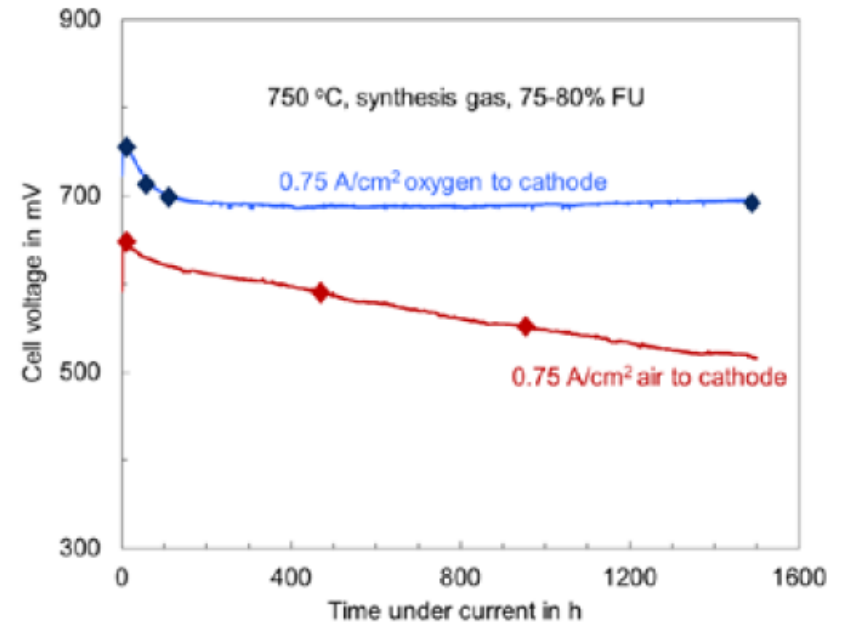
Kostnad

Kostnad

Kostnad

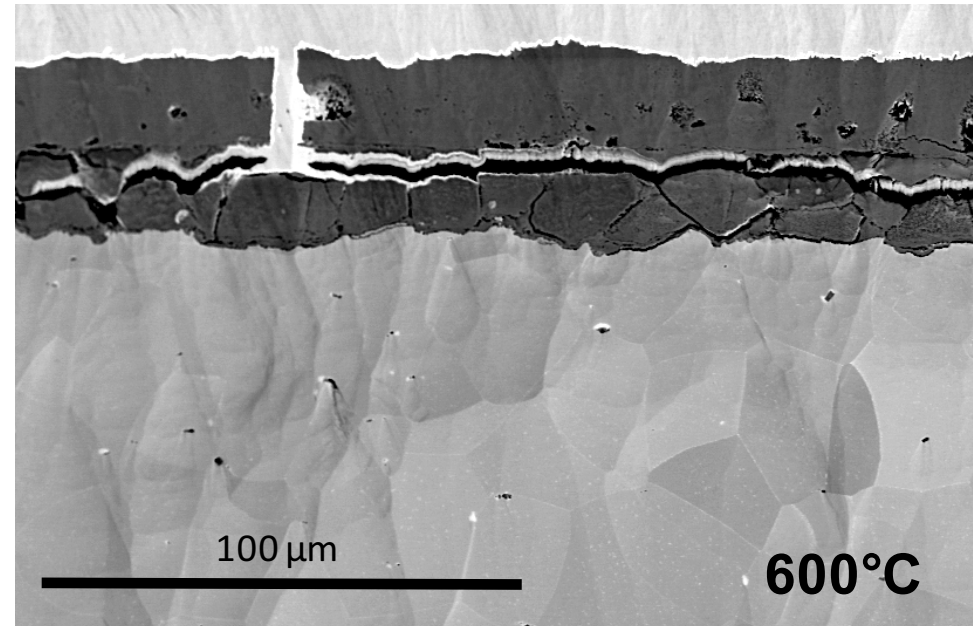
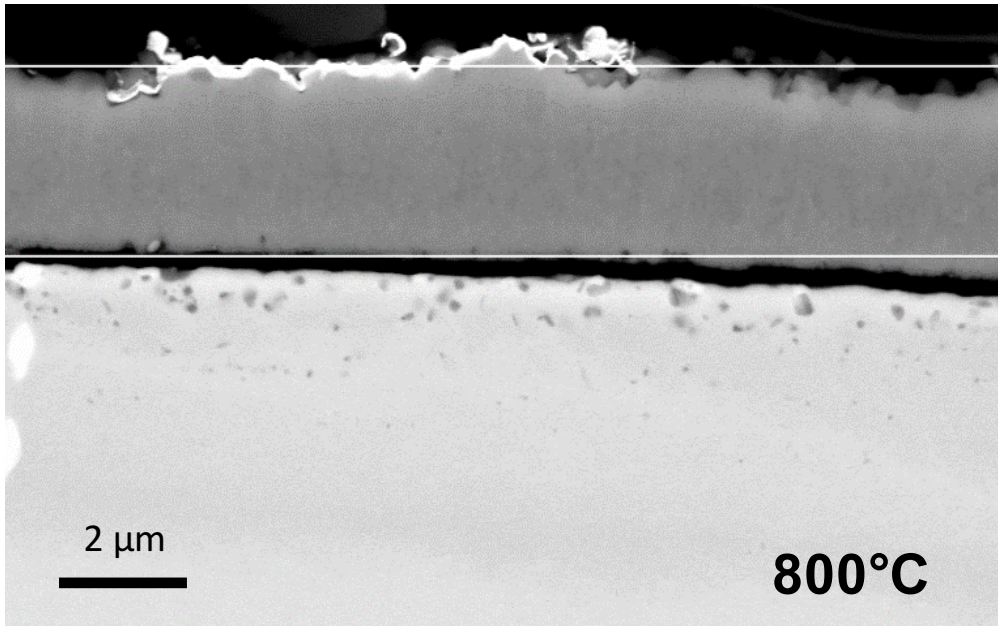
Livslängd

Mer utmanande bränslen



- Lägre temperaturer
- Metal supported cells

Lägre temperatur



Under vissa omständigheter ger
en lägre temperatur större materialutmaningar

Metal supported cells



2011-2015



Robust **A**dvanced **M**aterials
for metal **S**upport**E**d
Solid oxide fuel cell

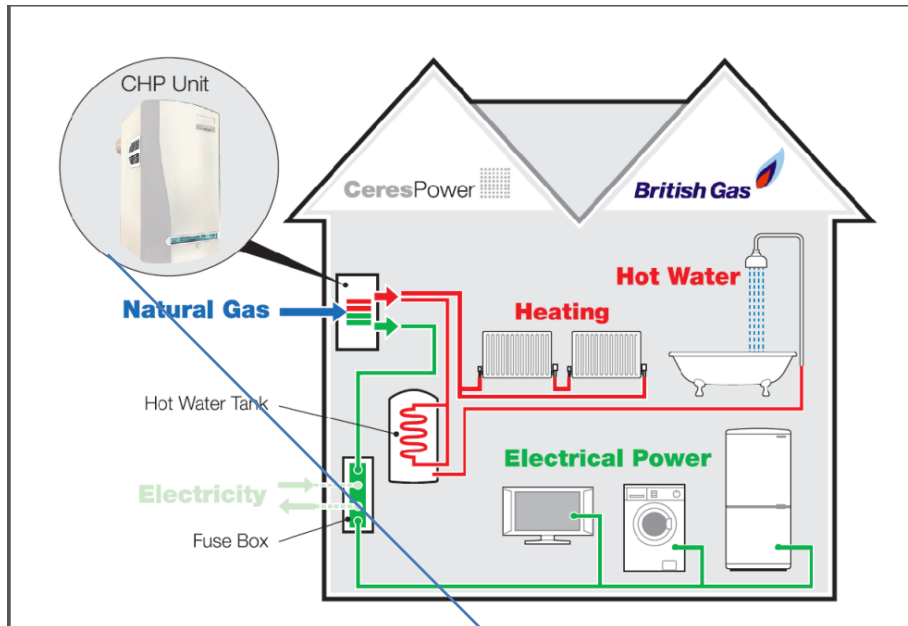
2011-2014
Tubular MSC

Höganäs 



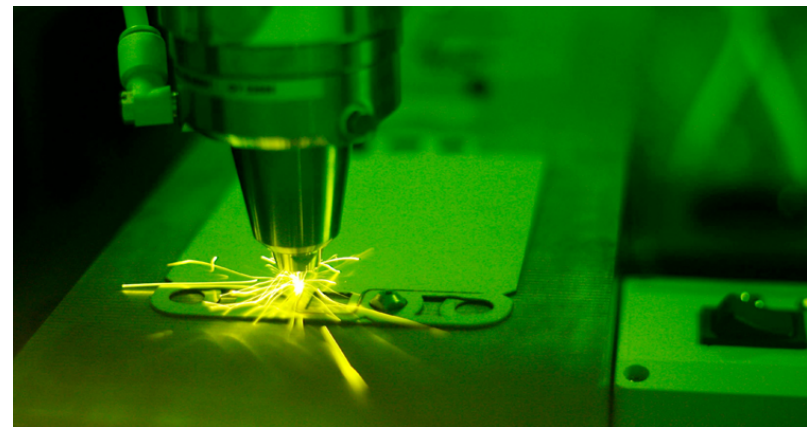
NISSAN

Ceres Power



Ceres Power:

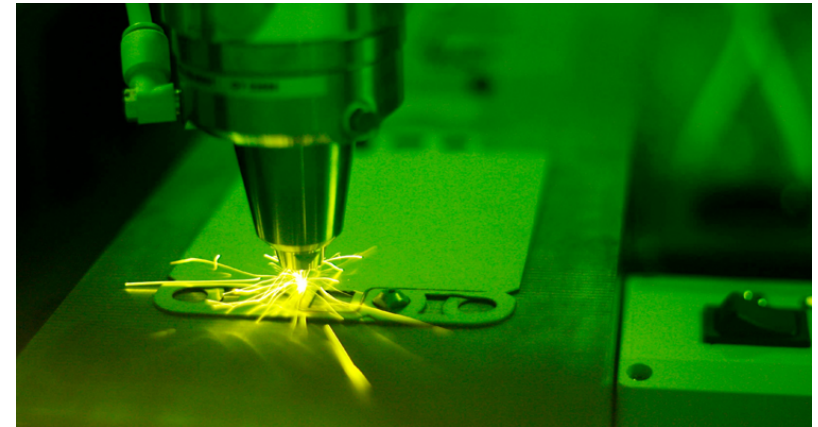
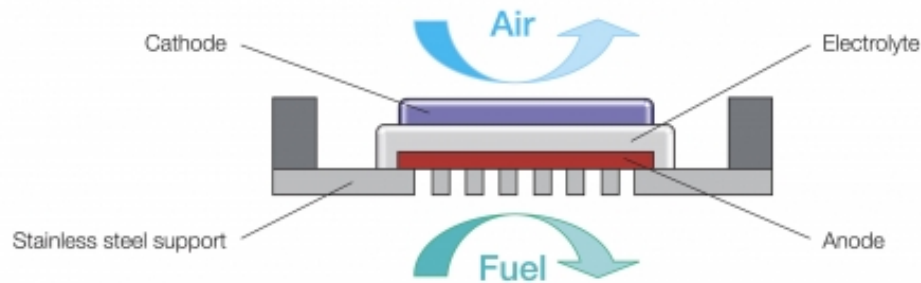
- Low temperature ($<600^{\circ}\text{C}$), low cost approach
- 97% of the stack is steel – 3% ceramics



Source: <http://www.cerespower.com/ProductOverview/ResidentialCHP/>

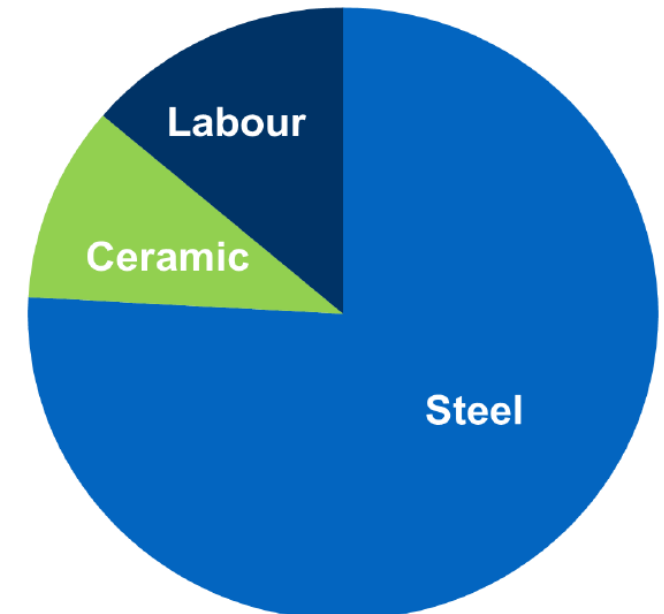
Metal supported FC

The steel cell



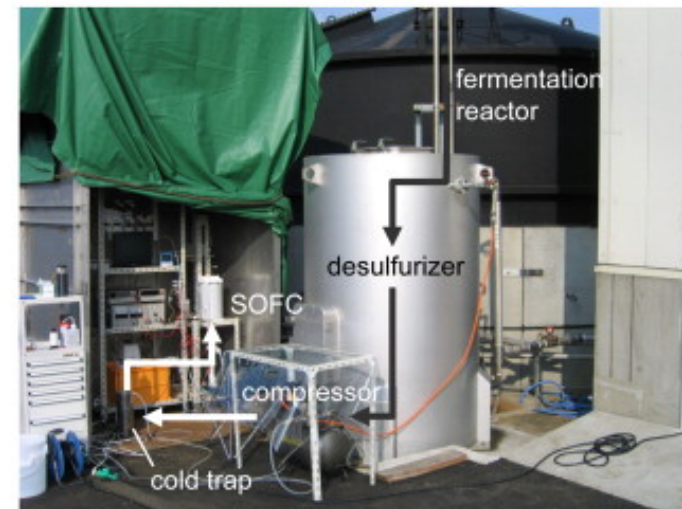
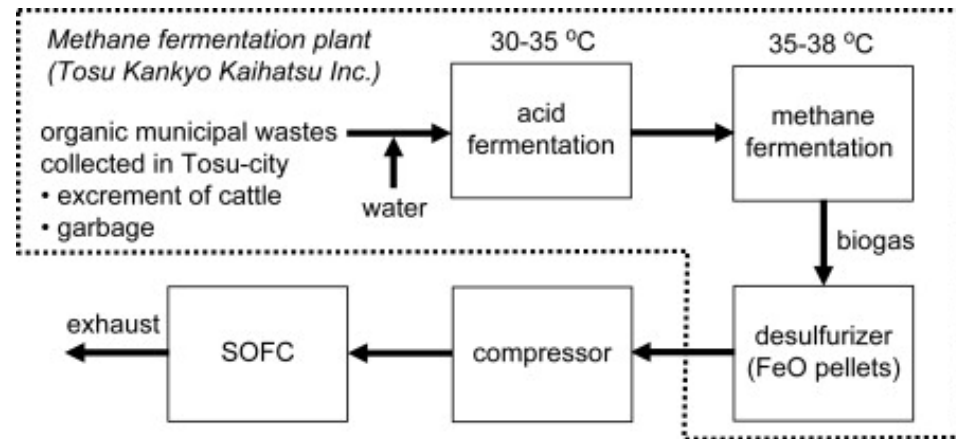
- 50% electrical efficiency (goal is 55%)
- Natural Gas, steam reforming
- $< 600^{\circ}\text{C}$ $\Rightarrow$ low cost materials
- Start up time < 30 min

CeresPower 



Realistiska bränslen

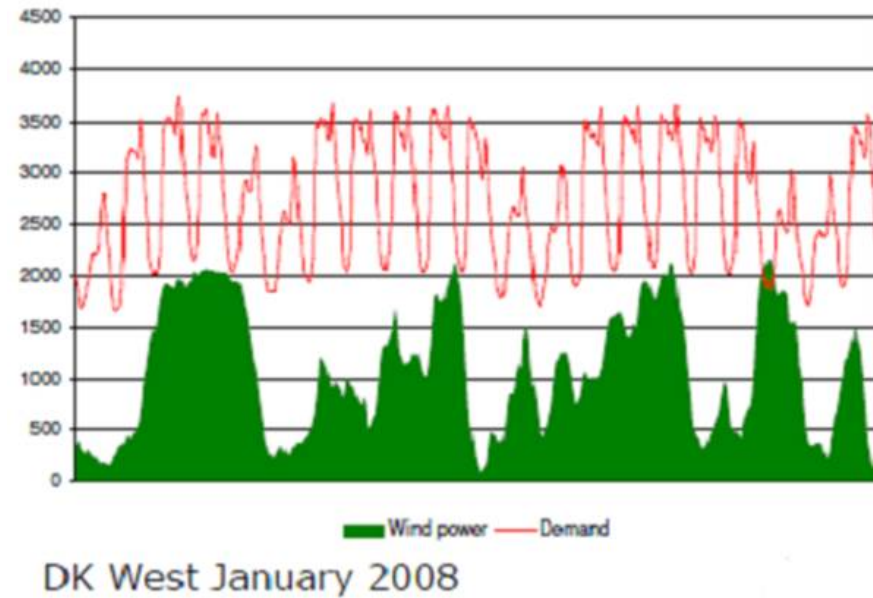
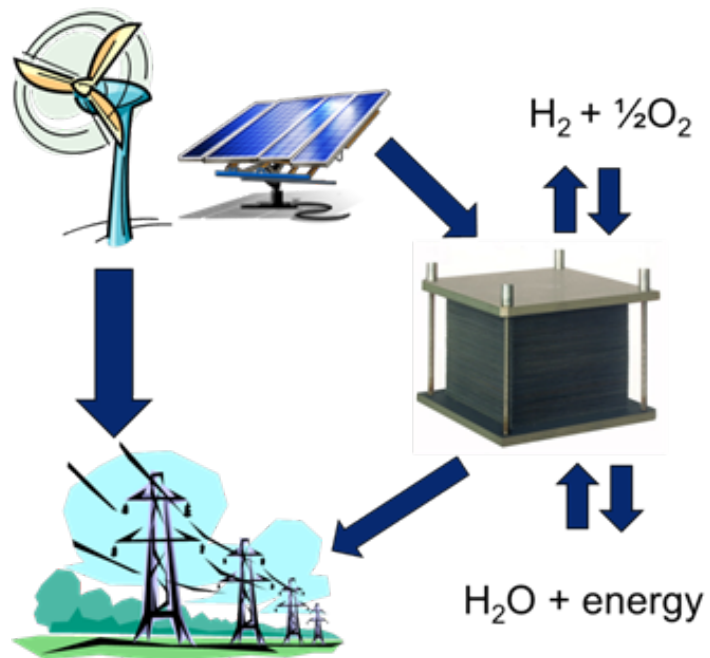
Biogas
Dieselreformat



SOEC

Sofc bakvänt

Samma materialproblem, andra applikationer



SOEC - Vätgas produktion

Högre temperatur i SOEC leder till att mindre elektrisk energi behöver tillföras

När resistansen i stacken generar lika mycket värme som elektrolysen förbrukar kallas det för "thermo neutral"

I detta läge är den elektriska verkningsgraden 100 %

Om hög-temp spillvärme finns tillgänglig kan man köra stacken över 100 % el-verkningsgrad

Vätgasen som produceras är mkt ren (jmf med reformering av NG)

God möjlighet för lokal produktion av vätgas exempelvis för vätgastankstationer.

SOEC - Biomass upgrade

Biogas innehåller höga halter av CO_2 och H_2O

Genom elektrolys med SOEC kan kvaliteten höjas till "pipeline grade" naturgas

H_2O elektrolyseras till H_2

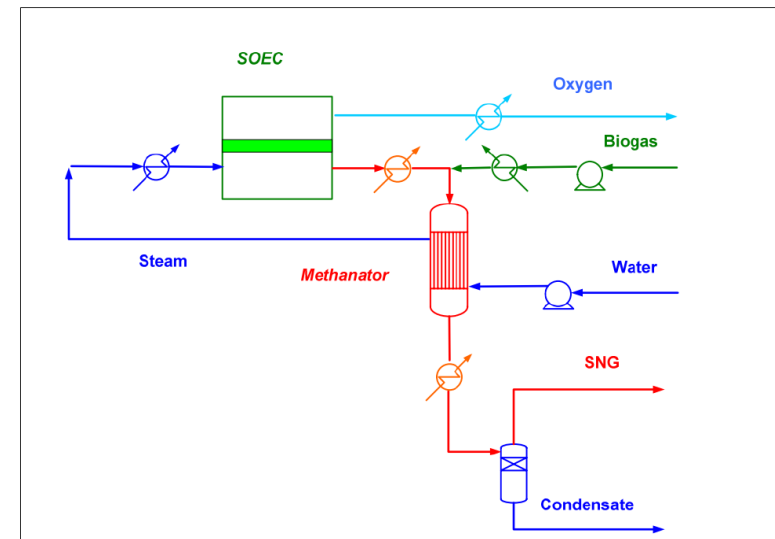
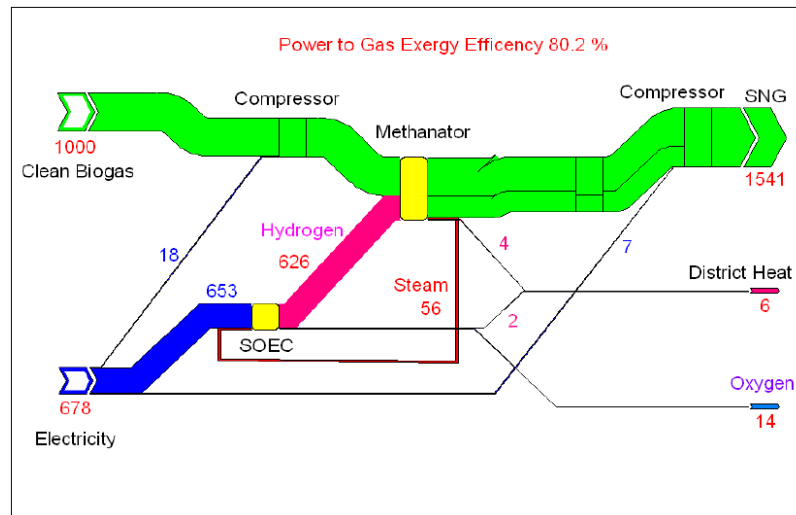
Även möjligt att elektrolysera CO_2 till CO

SOEC okänslig för CO jmf med PEM

O_2 kan användas exempelvis till rening av svavel utan att späda med N_2 (jmf med luft)

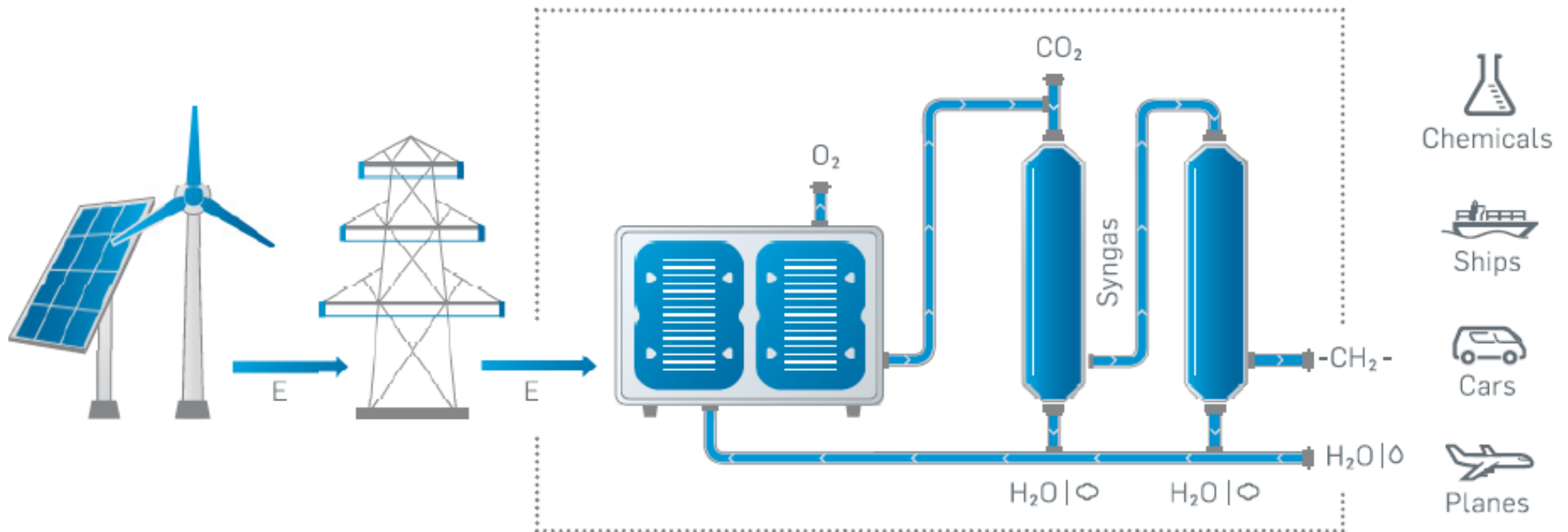
Värme från processen används för att värma stacken som arbetar i "thermoneutral" state. Dvs ingen spillvärme från elektrolysen

SOEC - Biomass upgrade



J. B. Hansen, F. Fock, H. H. Lindboe, Biogas Upgrading: By Steam Electrolysis or Co-Electrolysis of Biogas and Steam. *ECS Trans.* **57**, 3089–3097 (2013).

SOEC Power to liquid process:
 Process efficiency 70%
 SOEC efficiency >90%
 Cost (500t/day) ~1€/liter



Svensk perspektiv



Glesbefolkat

->Decentraliserade lösningar



Biomassa

->En CO₂ neutral energikälla



Stålindustrin

->Världsledande

Fuel Cell Group



Jan Erik
Svensson



Jan
Froitzheim



Mohammad
Sattari



Christine
Geers (30%)



Gert
Göransson (50%)



Per
Malmberg (20%)



Patrik
Alnegren



Rakshith
Sachitanand



Hannes
Falk Windisch



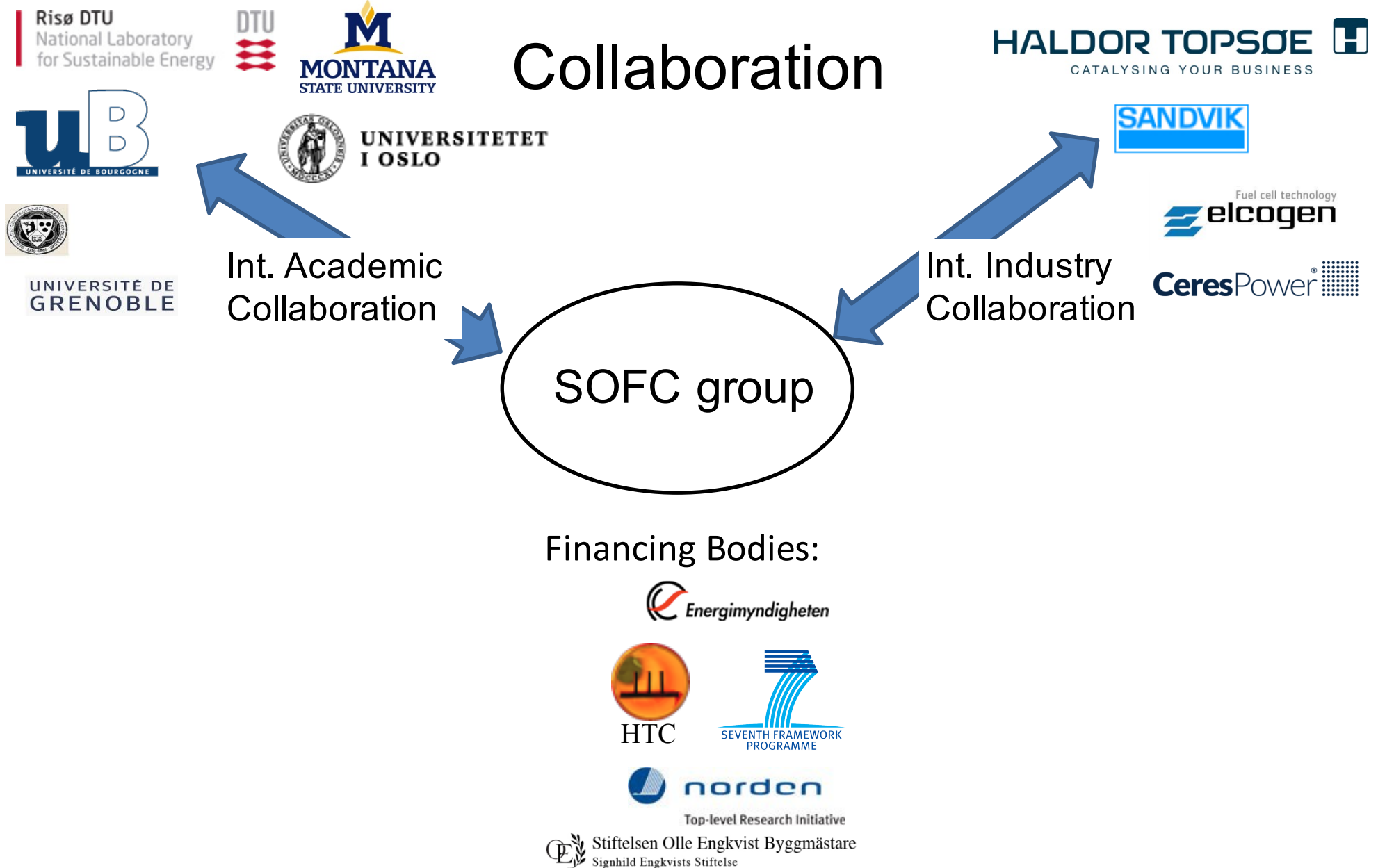
Jan
Grolig



Maria
Nikumaa

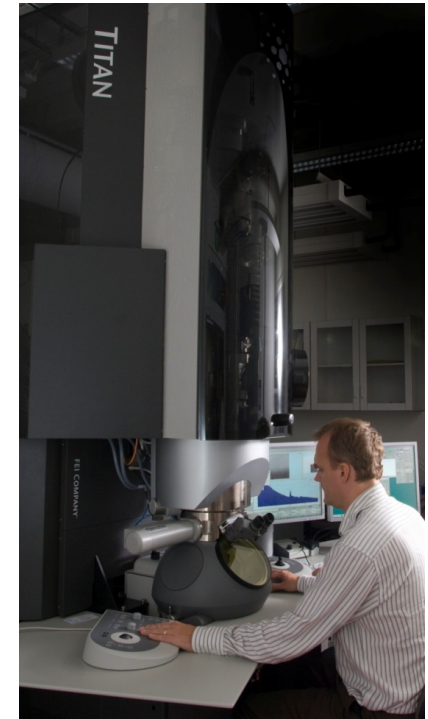
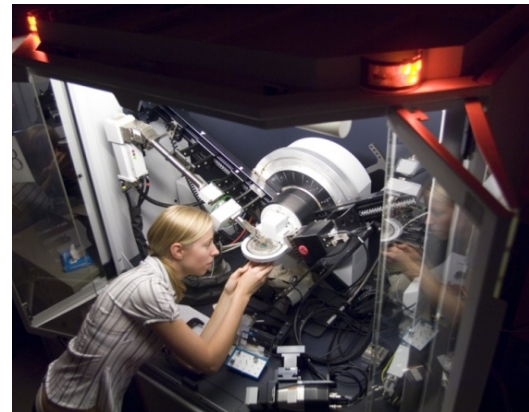


Claudia
Göbel

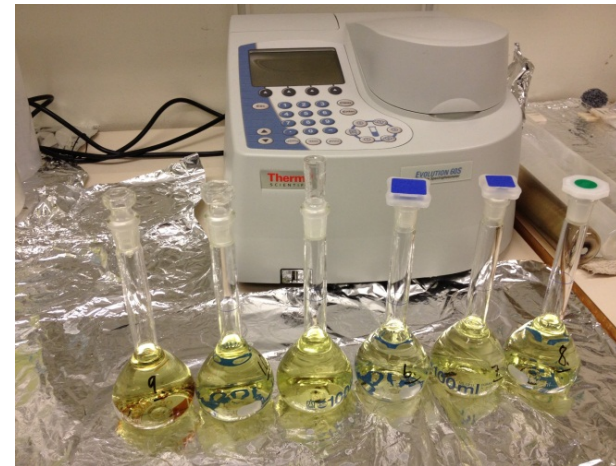
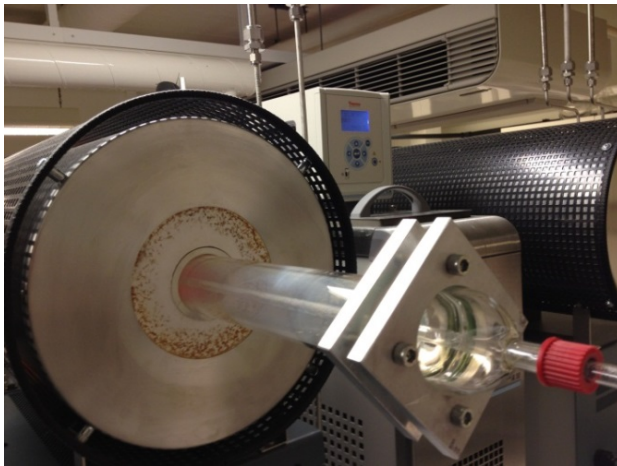
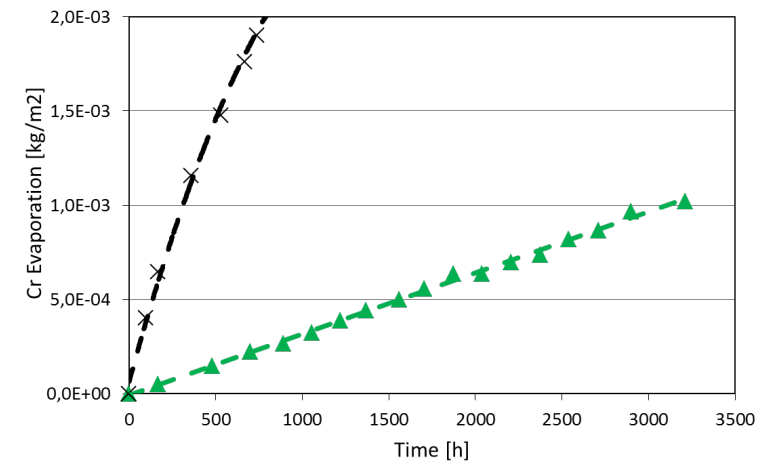
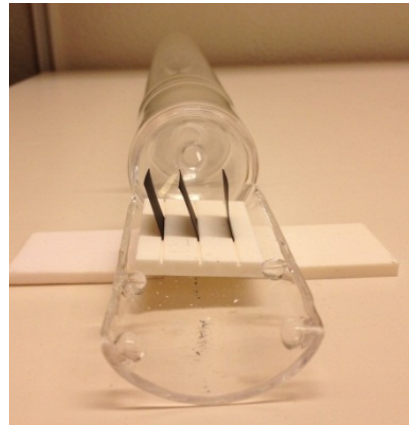


Lab faciliteter

- Setup för exponeringar i luft, H₂, H₂O, CO, CO₂, CH₄, H₂S, HCl
- > 80 högtemperatur ugnar
- Avancerad material analys: SEM, TEM, XRD mm



Världsunik metod att mäta krom förångning



Nyckeln till framgång

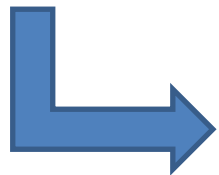
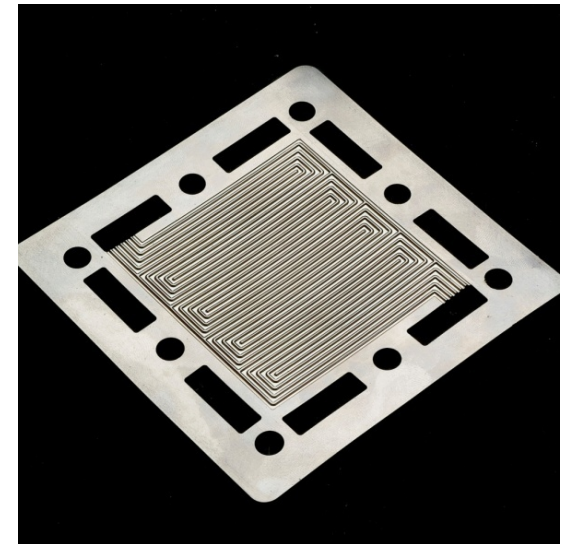
- Långsiktig forskning
- Nationell finansiering
- Industri support Nationell som internationell
(viktig att ha hela kedjan från materialtillverkare, process utvecklare samt slutanvändare)
- Aktiv inom EU-projekt

Göra skillnad! 😊

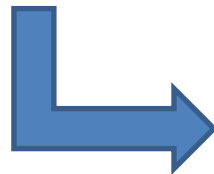


Utmaningar med ferritiska stål

- Cr-förångning
 - Förgifta katoden
 - Förvärra korrosionsproblematiken
- Korrosion på katodsidan
- Korrosion på anodsidan
- Förbättra ledningsförmågan av oxiden
- Interdiffusion med andra cellkomponenter
- Påverkan av ström och “dual atmosphere”
- Föroreningar som påverka korrosionen (t.ex. salt)



Ytegenskaper som är nyckeln



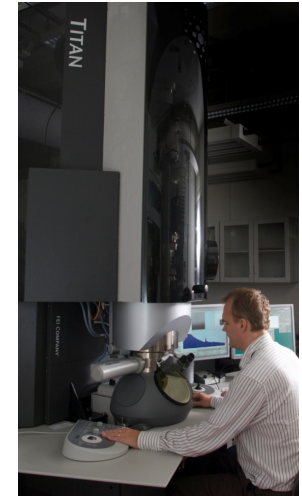
Kan styras genom beläggningar



Nyckeln till framgång Projektpartners



CHALMERS



Från materialtillverkare till slutanvändare

Från Ax till Limpa



Mål

Idé:

Förbelagt stål för storskalig produktion

→ Metalliska tunnfilmer

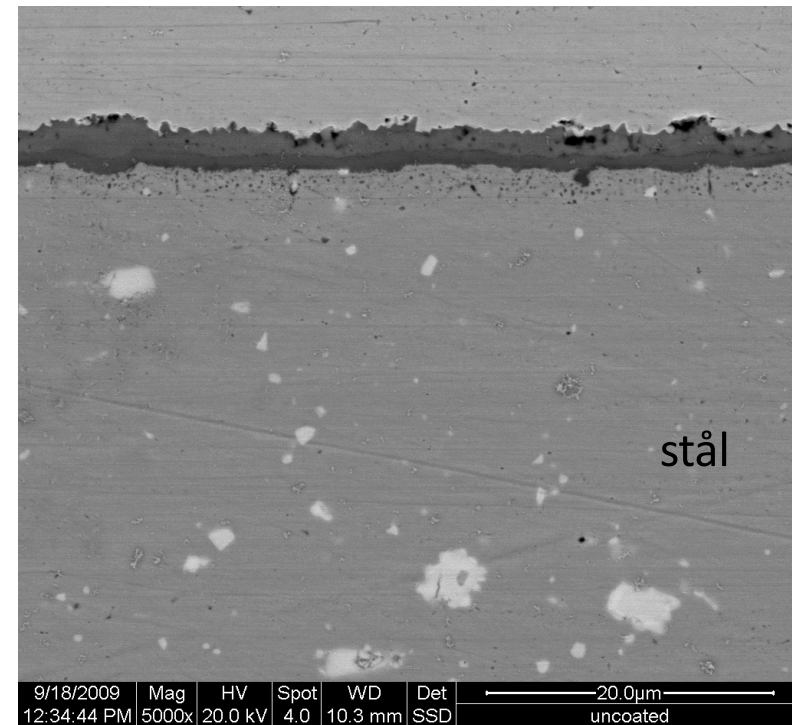
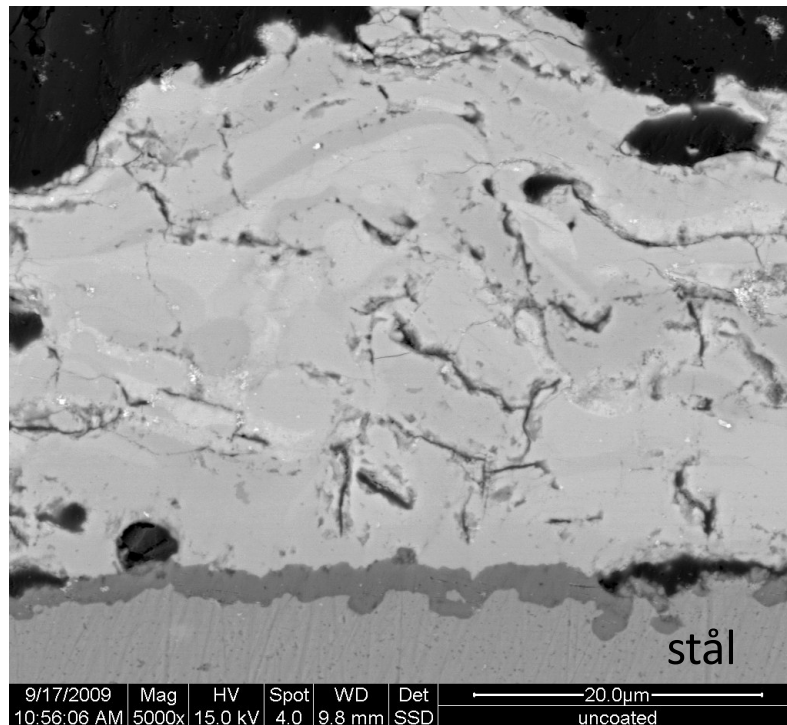
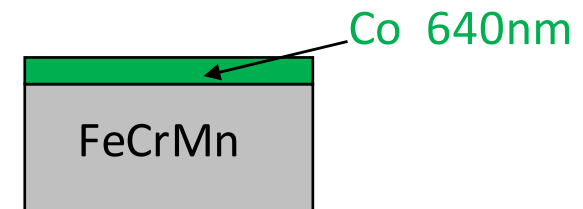
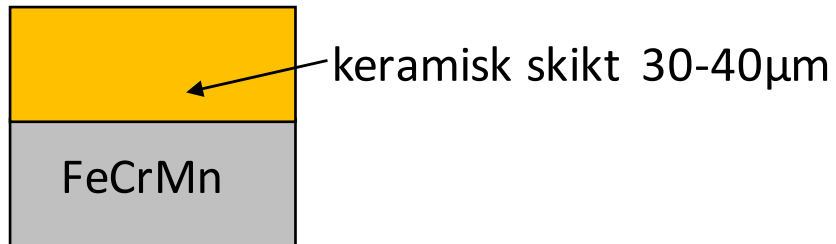
Målet med beläggningen:

- Minimera Cr-förångningen
- Förbättra korrosionsmotståndet
- Förbättra ledningsförmågan



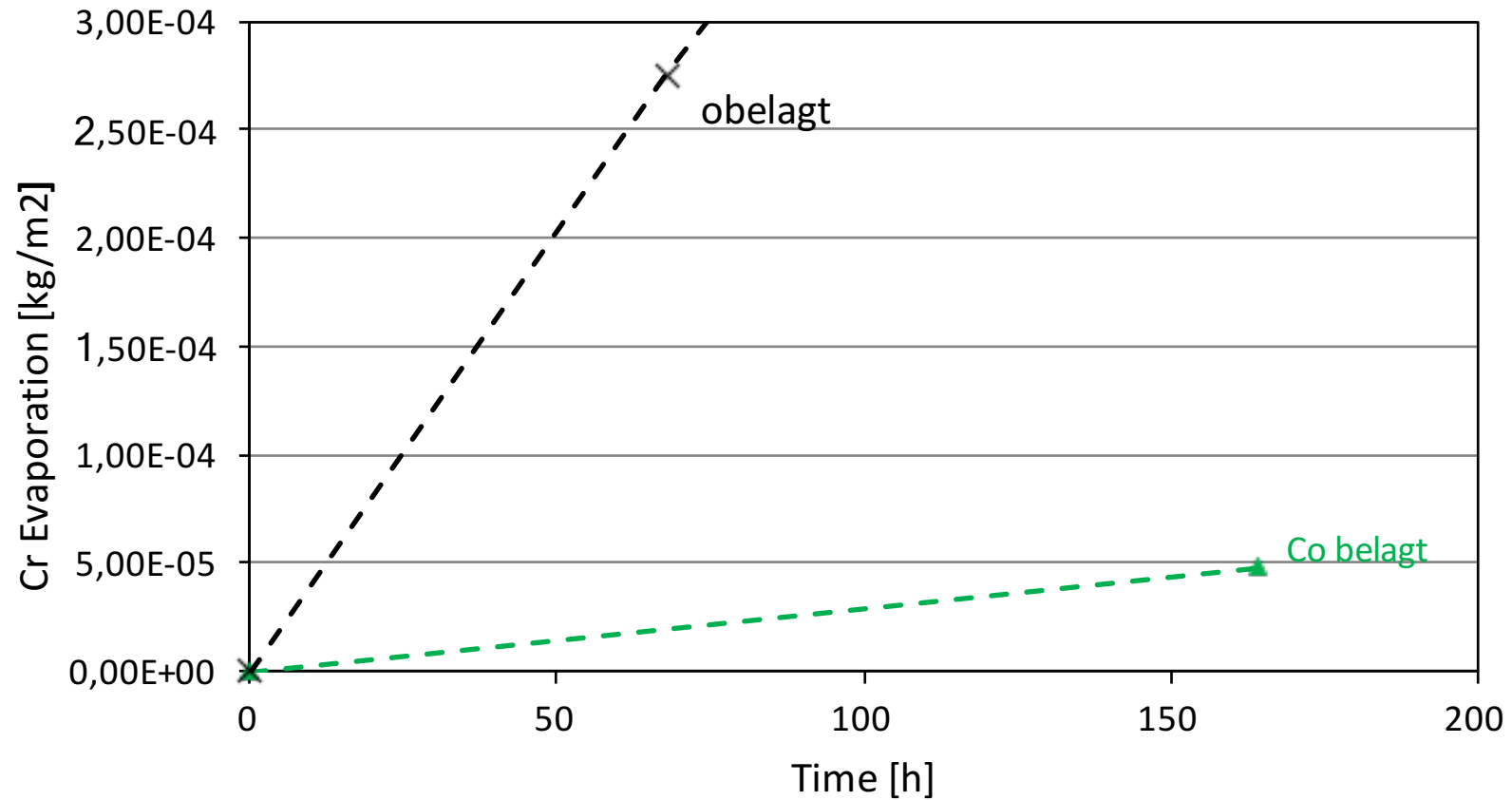
Nanoskikt mot krom förångning

-jämfört med "State of the art"



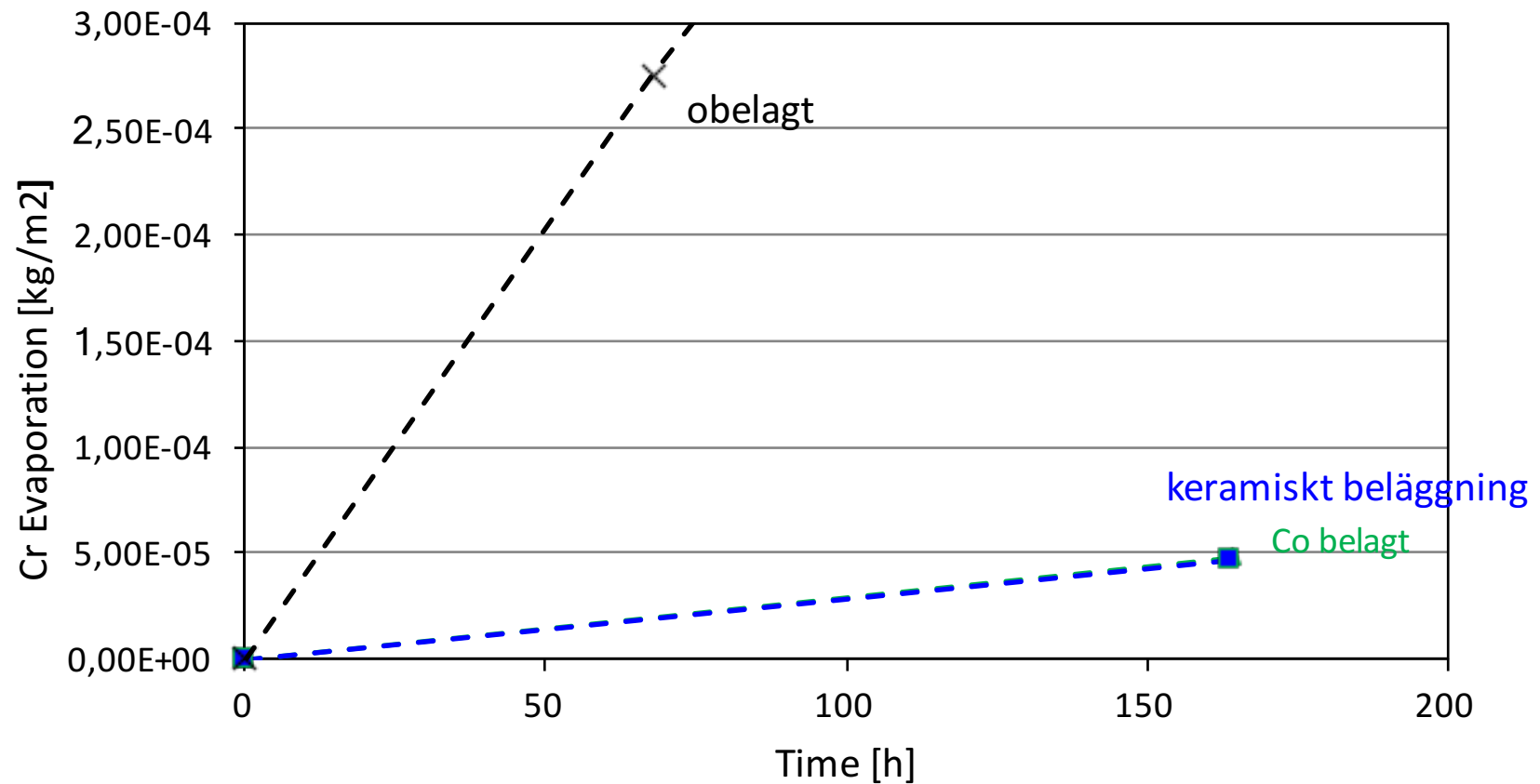
Nanosikt mot krom förångning

-jämfört med “State of the art”



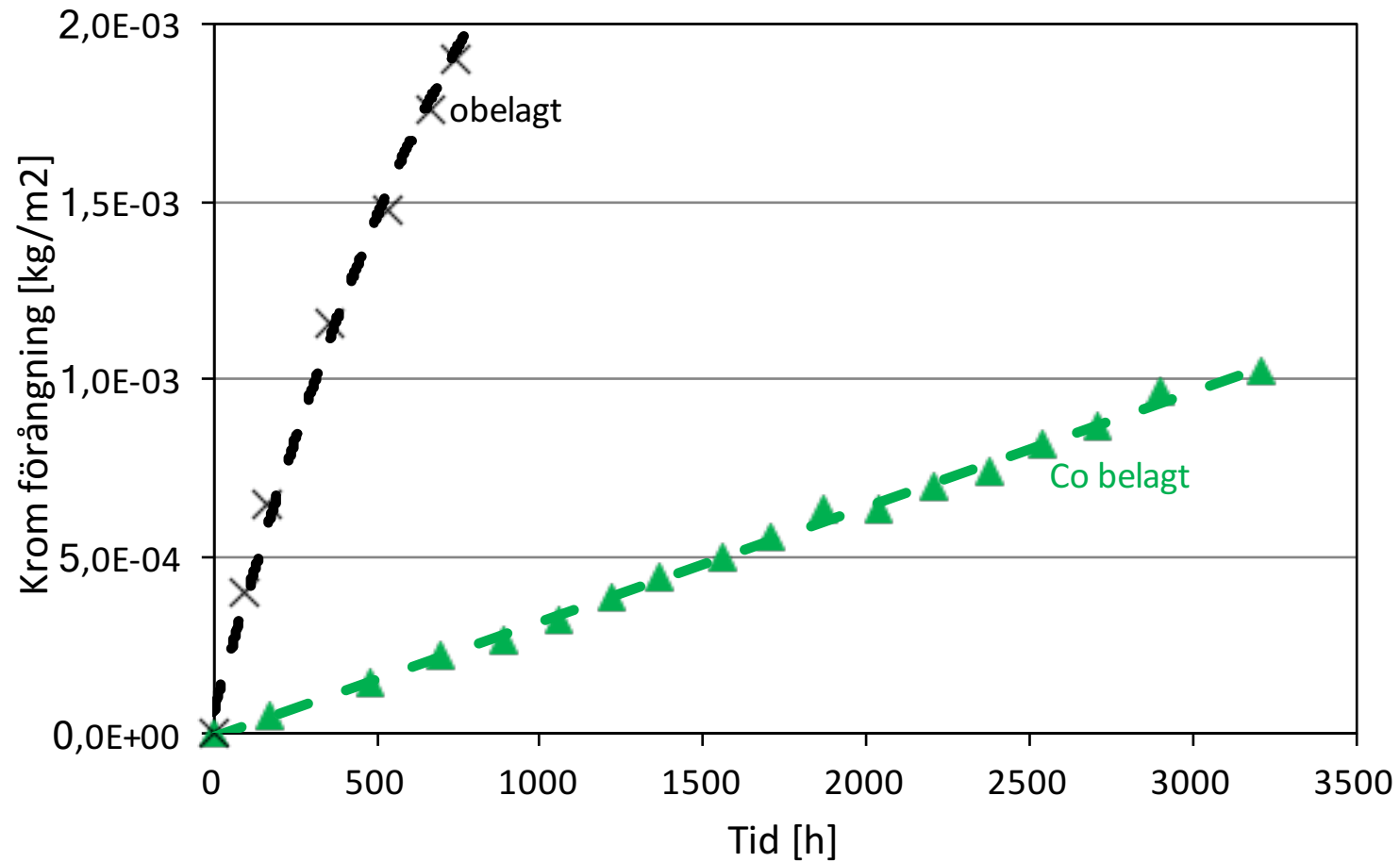
Nanosikt mot krom förångning

-jämfört med "State of the art"

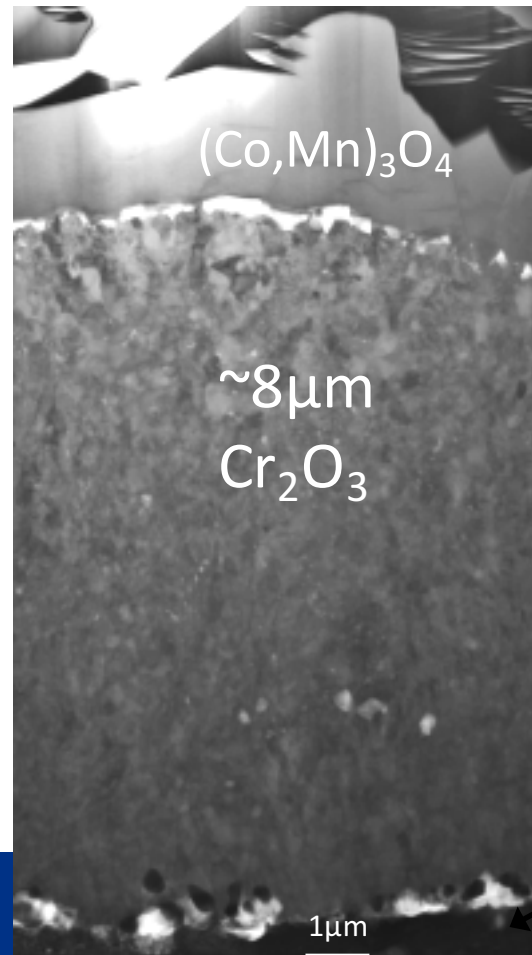
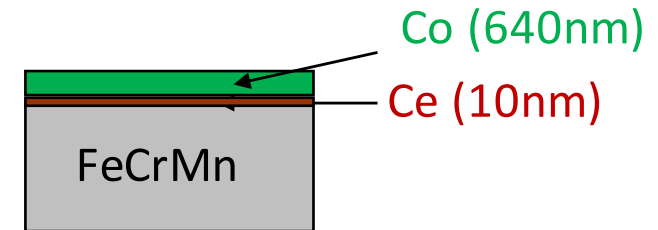
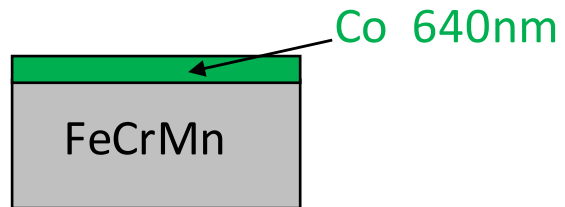


Nanosikt mot krom förångning

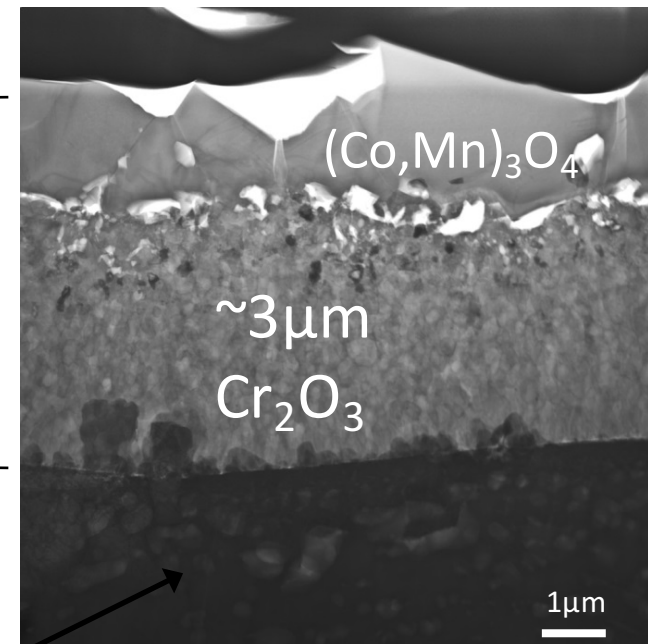
-Långtids prestanda



Nanoskikt för bättre korrosionsmotstånd



Oxidskikt



stål

Luft, 3000h, 850°C

Sammanfattning

- Vi har tagit fram nya nano beläggningar med överlägsna egenskaper:
 - i. Kromförångning
 - ii. Korrosionsmotstånd
- Förbelagda stålkonceptet minskar kostnader
- Stack tester (Elcogen) med våra nya nano beläggningar har startat, preliminära resultat är mycket lovande.

Fuel Cell Group



Jan Erik
Svensson



Jan
Froitzheim



Mohammad
Sattari



Christine
Geers (30%)



Gert
Göransson (50%)



Per
Malmberg (20%)



Patrik
Alnegren



Rakshith
Sachitanand



Hannes
Falk Windisch



Jan
Grolig



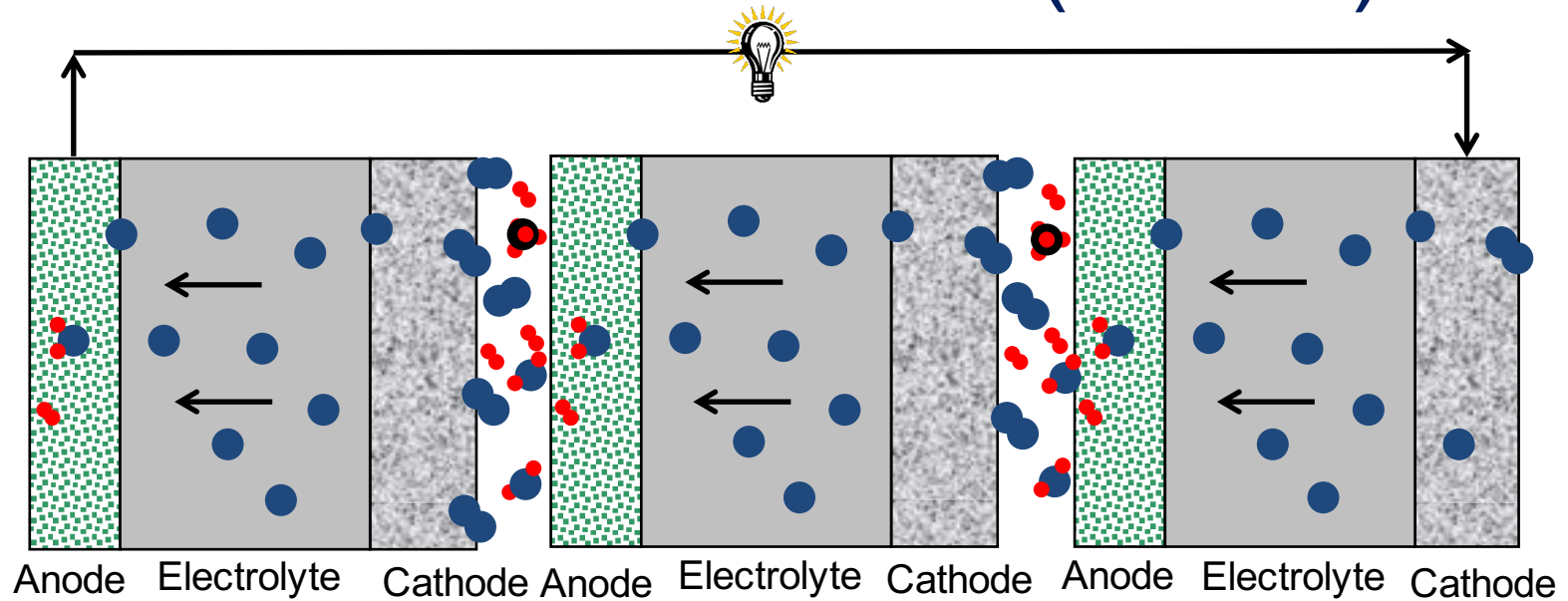
Maria
Nikumaa



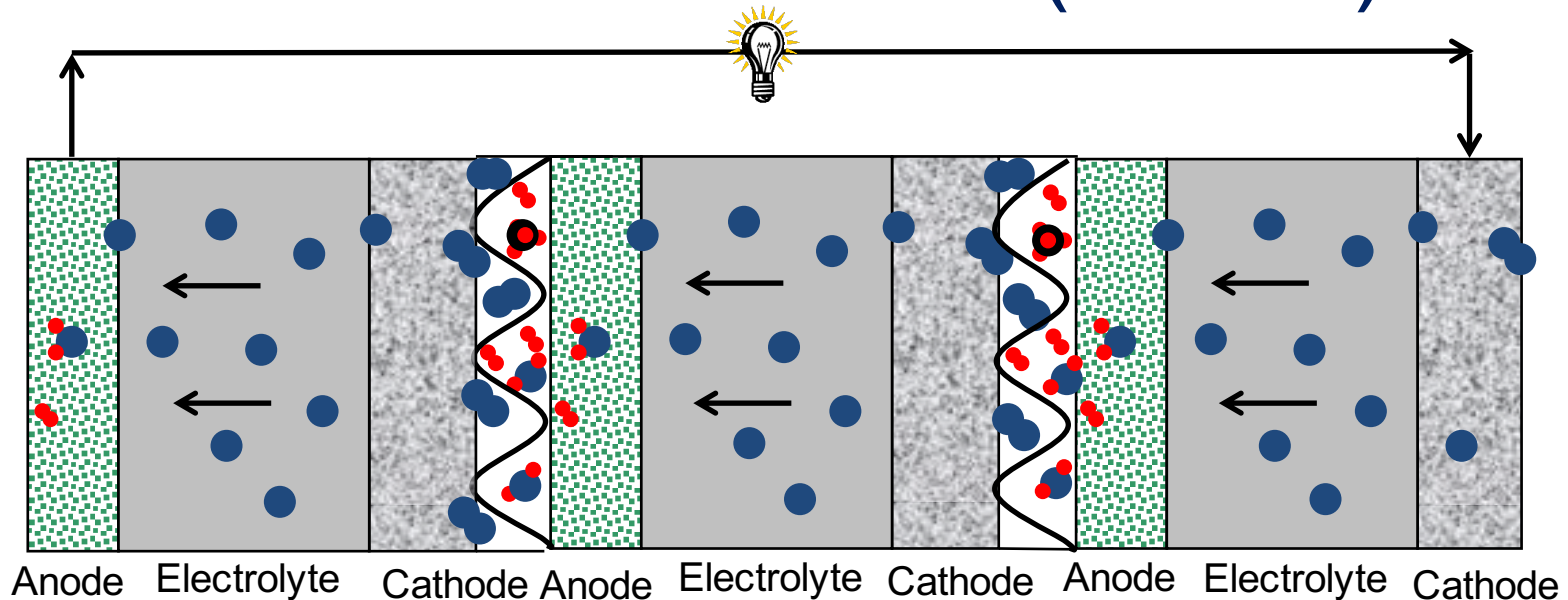
Claudia
Göbel



Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)



Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)



Krav för bipolarra plattor:

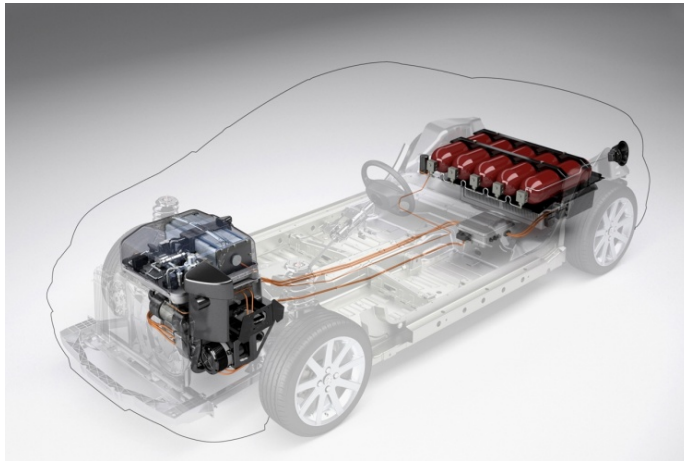
- Termiskt utvigningskoefficient som är lika med andra SOFC komponenter
- God elektrisk ledningsförmåga
- Billiga att tillverka (bipolarplattan kan motsvara upp till 40% av stack kostnaden¹⁾)

→ **Ferritiska rostfria stål**

1) Hall, T. D., McCrabb, H. A., Wu, J., Zhang, H., Liu, X., & Taylor, E. J. (2011). in S. C. Singhal & K. Eguchi (Eds.), *Solid Oxide Fuel Cells 12* (Vol. 35, pp. 2489-2502). Pennington: Electrochemical Society Inc.

Fuel Cells

A fuel cell is an electrochemical device that converts chemical energy directly into electricity and heat, with high efficiency!
(more efficiently than conventional combustion-based technologies)



There are several different types of fuel cells, two of the most common are:

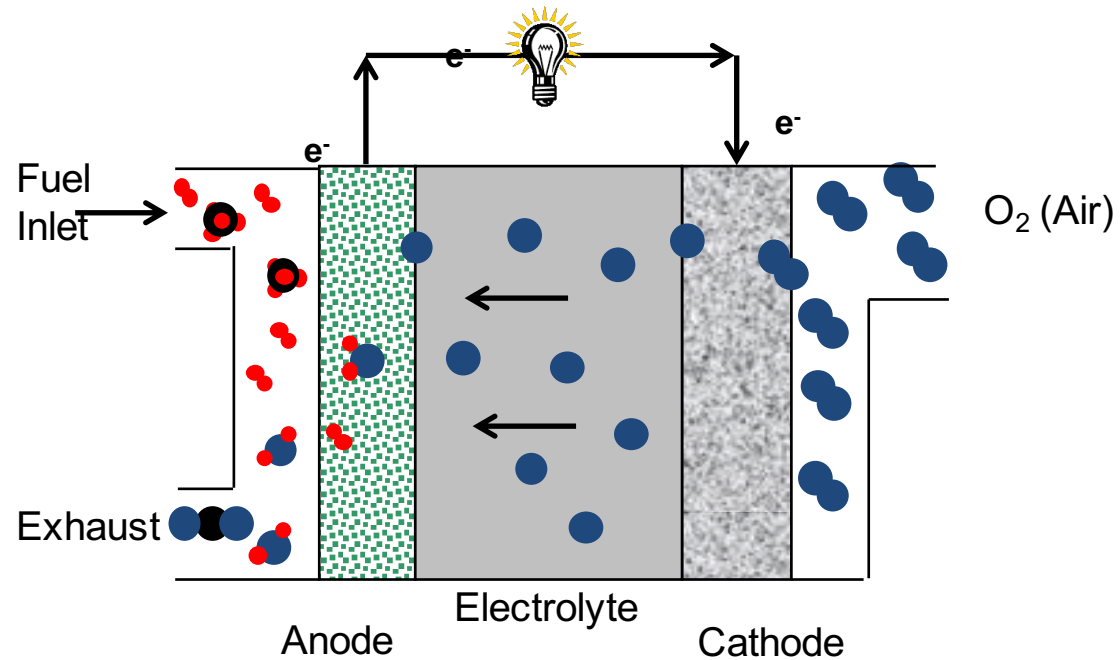
- **PEM (Polymer Electrolyte Membrane Fuel cells)**

Works at 80 °C, high efficiency, Quick-start up, high sensitivity to fuel impurities

- **SOFC (Solid oxide fuel cells)**

Works at 700-850 °C, high efficiency, fuel flexible, high temperature corrosion

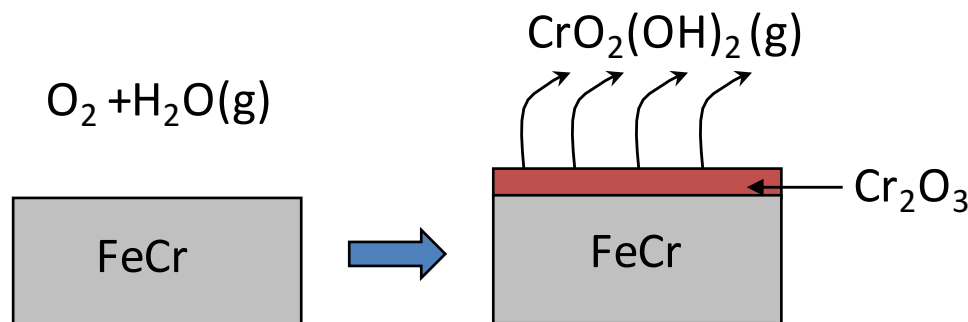
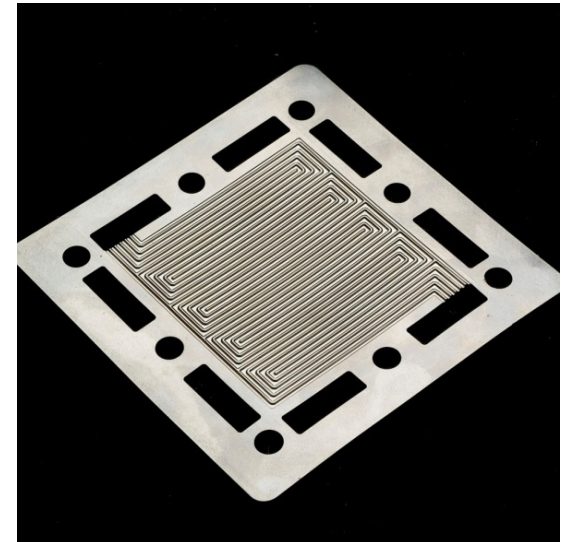
Fast Oxid Bränsle Cell

 $\text{SolidO}_{\text{xide}}\text{F}_{\text{uel}}\text{C}_{\text{ell}}$ 

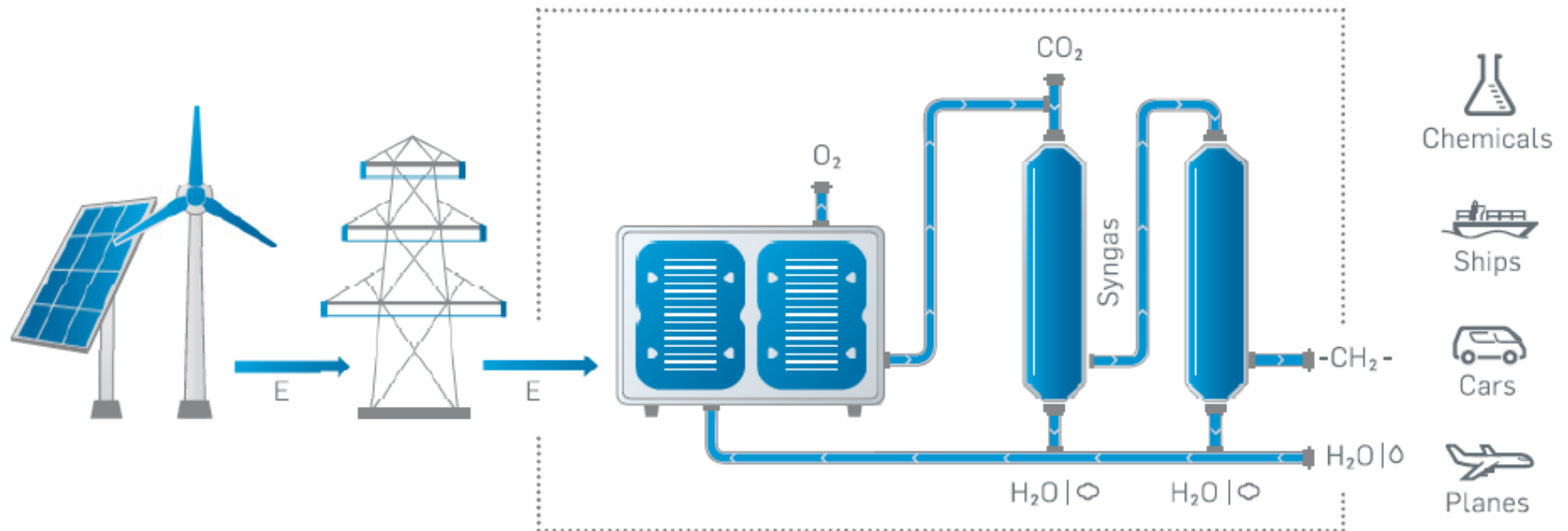
Temperatur: 600-900°C

Utmaningar med ferritiska stål

- Cr-förångning
 - Förgifta katoden
 - Förvärra korrosionsproblematiken
- Korrosion på katodsidan
- Korrosion på anodsidan
- Förbättra ledningsförmågan av oxiden
- Interdiffusion med andra cellkomponenter
- Påverkan av ström och "dual atmosphere"
- Föroreningar som påverka korrosionen (t.ex. salt)

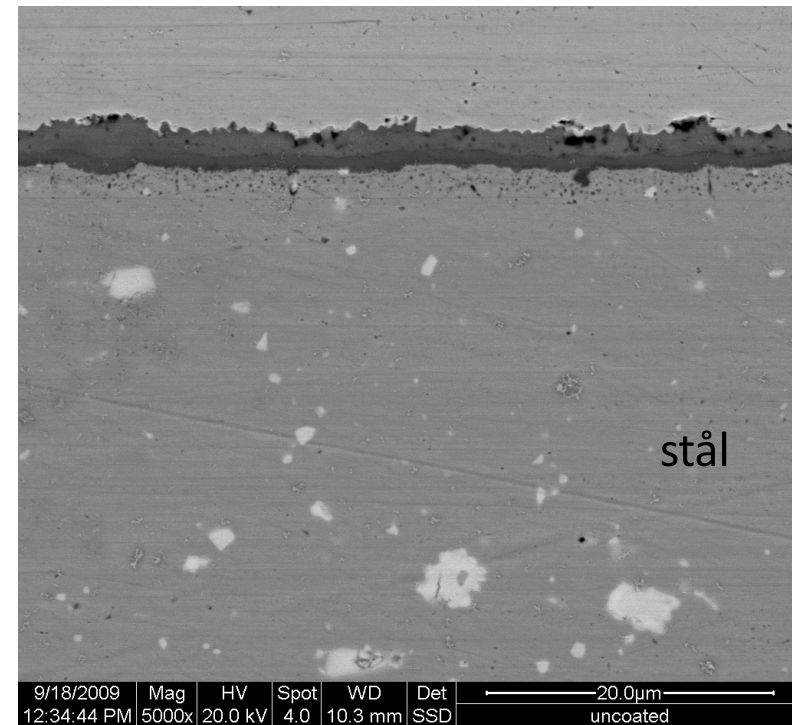
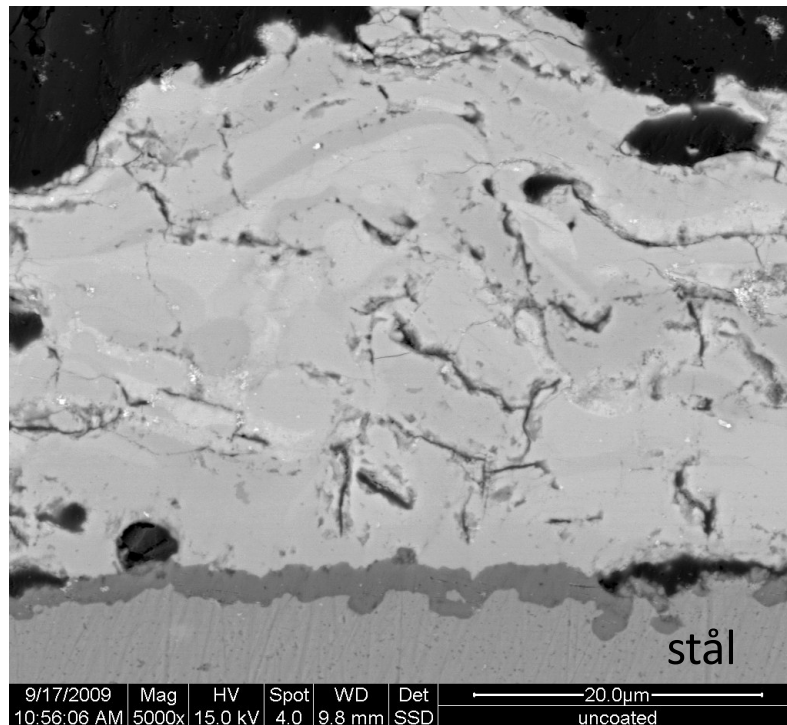
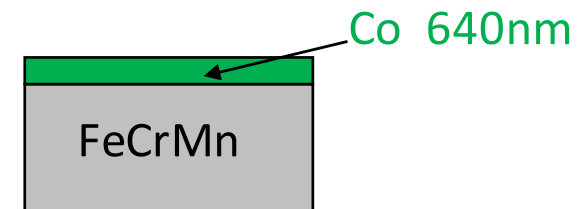
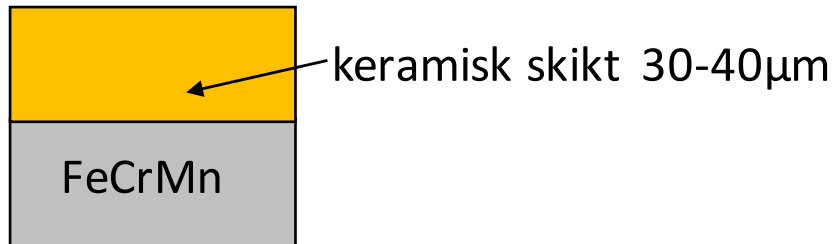


SOEC - Power to liquid



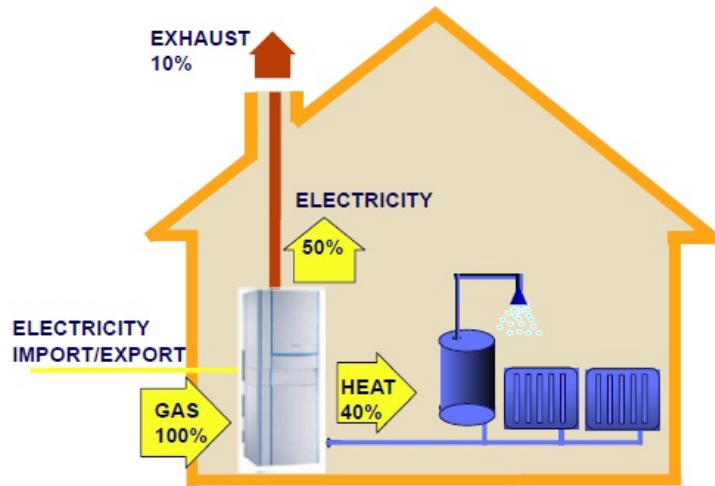
Nanoskikt mot krom förångning

-jämfört med "State of the art"



Luft, 168h, 850°C

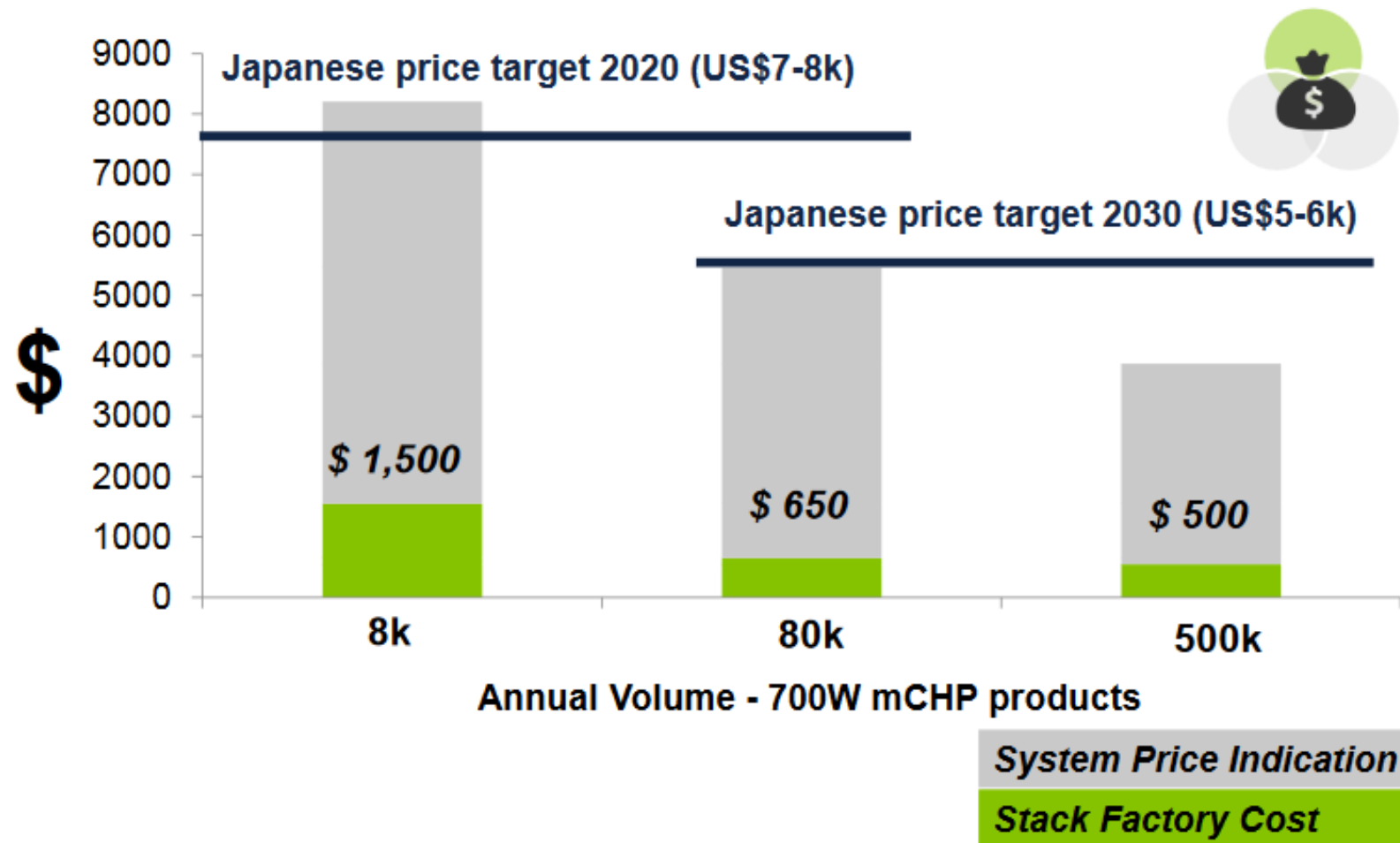
applikation



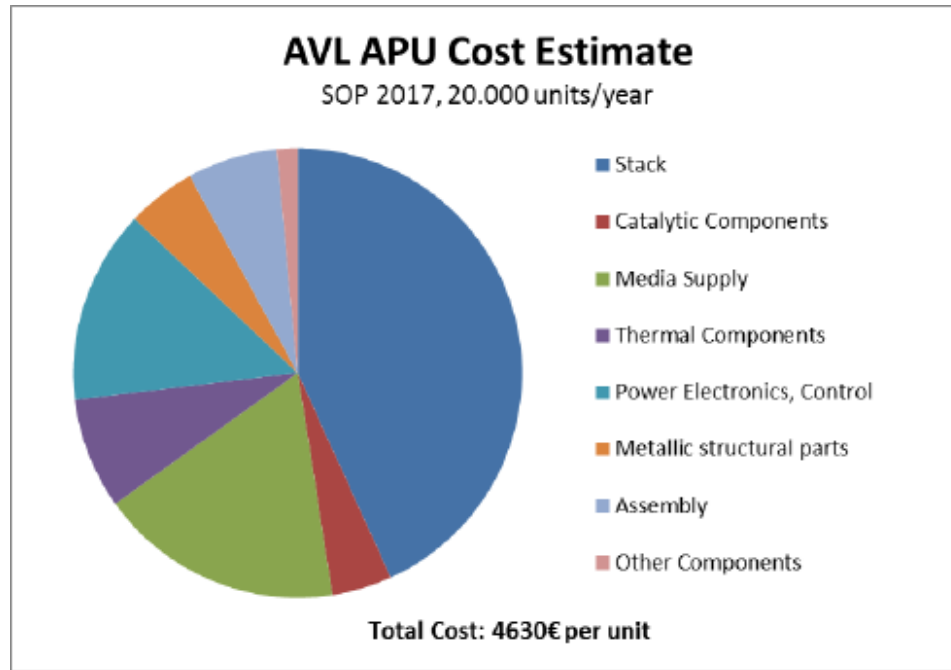
Micro CHP replaces boiler in conventional central heating system.



\$500 per kW stack – Meets long term market needs



Kanske inte visar men som kommentar till AVLS beräkningar att metal supported k



1st market introduction
Truck APU

Mid- longterm cost target
Truck APU



Fuel flexibility

Har någon material?

