

Prosjekt i Fy 1303
Brenselceller

av
Bård Martin Kjelling
Tor Nordam

Innholdsfortegnelse

Abstract	side 3
Innledning	side 3
Teori	side 3
Introduksjon	side 3
Reversibel cellespenning	side 5
Bidrag til overspenning	side 6
Utrykk for overspenning som funksjon av strøm	side 8
Impedansspektroskopi og strømbruddstest	side 8
Ekperimentelt	side 9
Resultater	side 12
Diskusjon	side 14
Strøm som funksjon av motstand	side 14
Karakteristisk spenningskurve	side 15
Strømbrudd	side 17
Applikasjoner	side 18
Oppsummering	side 19
Referanser	side 20

Abstract:

I teoridelen beskrives først det grunnleggende konseptet bak Proton Exchange Membrane (PEM) brenselceller som går på hydrogen og oksygen. Oppbyggingen og reaksjonen som driver den beskrives. Deretter presenteres en utregning av den reversible spenningen til en slik celle, før vi går gjennom et forsøk på å utlede en beskrivelse av hvordan spenningen vil variere med strømmen for en reell celle. To teknikker som brukes for å studere brenselceller, impedansspektroskopi og strømvavbrudd, beskrives kvalitativt. I resultatdelen presenteres målinger gjort på en HydroGenius brenselcelle av typen PEM fra Heliocentris. I diskusjonsdelen diskuteres resultatene, og kurven som viser målt spenning som funksjon av strøm sammenlignes med forskjellige modeller beskrevet i teoridelen. Metodene som ble brukt diskuteres også. I applikasjoner diskuteres litt generelt om hvor det er aktuelt å bruke brenselceller, hva som gjør brenselceller egnet til ulike formål og hva som er utfordringene for at dette skal bli vanlig. I oppsummeringen presenteres noen tanker omkring selve prosjektet.

Innledning:

Siden 1839, det året da William Grove først viste verden hva en brenselcelle er, har vi først de siste 35-40 årene virkelig åpnet øynene for hvilken nytte brenselcellen kan ha for oss. Bemannede romskip har helt fra starten benyttet seg av denne teknologien, mens mer hverdagslige anvendelser nå begynner å komme på banen [1]. Casio har utviklet en brenselcelle som driver en bærbar PC med fire ganger så lang levetid som et typisk Litium ion-batteri [2]. Denne planlegger de å få ut på markedet i 2007. I samme året vil etter planen Toshiba ha sine brenselceller i bruk i mobiltelefoner [3]. Det at dette er et tema det forskes mye på gjorde at vi synes det var et interessant tema å sette oss inn i. Vi regnet også med at det ville være lett å finne oppdatert stoff om temaet, og at det ville være mulig å gjøre forsøk for å sammenligne teori og praksis.

Teori:

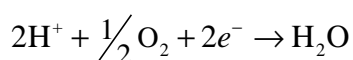
Introduksjon:

Prinsippet bak en brenselcelle er at en redoksreaksjon finner sted ved at elektronene passerer gjennom en ytre krets fra en høyere energitilstand til en lavere, i stedet for direkte, som de ville gjort i en vanlig forbrenningsreaksjon. Derved kan en mye bedre utnyttelse av brenselet oppnås enn ved å bruke varme fra forbrenningen til å produsere damp som overfører energien til en turbin.

I en redoksreaksjon vil et stoff gi fra seg elektroner, som tas opp av et annet stoff. For at disse elektronene skal passere gjennom en ytre krets må reaktantene være atskilte, så de ikke kan reagere direkte. I en Proton Exchange Membrane (PEM) celle er det som navnet tilsier en protonpermeabel membran som skiller reaktantene. For en celle som drives av hydrogen og oksygen er halvreaksjonene



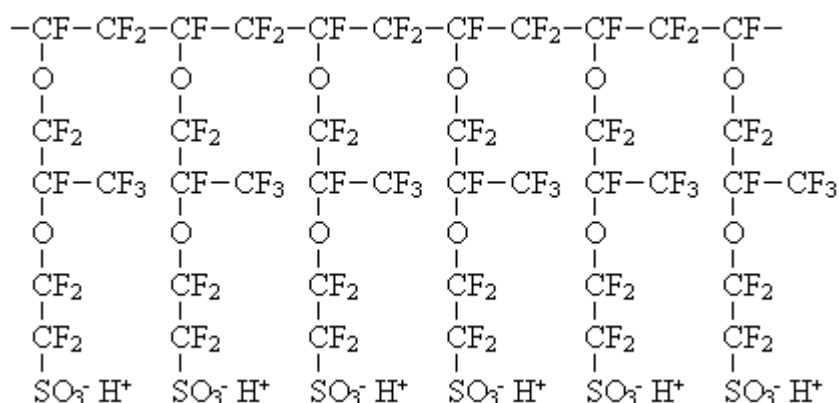
ved anoden, og



ved katoden. Til sammen er dette den samme reaksjonen som en vanlig forbrenning av hydrogen i oksygenatmosfære.

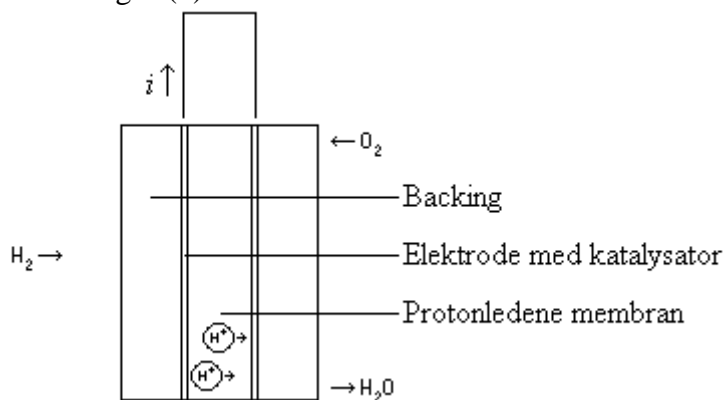
Kjernen i en PEM celle er membranen[4], som ideelt sett kun skal slippe H^+ igjennom, og være helt tett for elektroner og H_2 . En slik membran er som oftest oppbygd av en kjerne av en teflonlignende polymer med sidegrener fra annethvert karbonatom. Til endene på sidegreinene er det bundet sulfittioner, med tilhørende H^+ . Når membranen blir mettet med vann forblir sulfittionene bundet til sidegreinene, mens H^+ kan bevege seg fritt gjennom membranen. En vanlig membran, NafionTM fra DuPont er vist i figur (1).

Figur (1): Strukturformel for NafionTM



På hver side av membranen er det påført et elektrodslag som består av karbon og finfordelt platina. Dette kan for eksempel påføres som en løsning og tørkes. Deretter legges det en backing på hver side. Denne må være tilstrekkelig porøs til at gassen kan strømme gjennom den for å nå frem til katalysatorpartiklene, og den må ha stor kontaktflate med katalysatoren for å frakte elektroner effektivt. I tillegg må den ha god ledningsevne. Karbonpapir er vanlig å bruke til dette formålet. Den ferdige membran med elektrode og backing er typisk 500 til 1000 mikrometer tykk. En skjematisk fremstilling av en ferdig membran er vist i figur (2).

Figur (2): Membran.



På hver side av den ferdige membranen monteres det så en kombinert gasstilførsel og elektronsamler, som gjerne består av en plate av grafitt eller metall, med spor i, så gassen kan ledes til hele overflaten av backingen. I en seriekobling av flere celler benyttes slike plater mellom cellene. Det er da frest spor på hver side, slik at platen leder oksygen til, og fjerner vann fra, katoden på den ene cellen, og leder hydrogen til anoden på den andre. Det kan i tillegg lages et tredje sett kanaler i platen for å lede et kjølemedium. Plater som benyttes til seriekobling kalles bipolare plater. Det er svært viktig at materialet som brukes i bipolare plater ikke leder gass. Da ville en blanding av hydrogen og oksygen kunne reagere direkte på katalysatoren, uten å bidra til en ytre strøm.

Reversibel celledspenning

Det største teoretiske arbeidet, W , cellen kan levere er gitt ved endringen i Gibbs fri energi mellom produktet (vann) og reaktantene[5]:

$$W = \Delta G = \Delta_f G(\text{H}_2\text{O}) - (\Delta_f G(\text{H}_2) + \frac{1}{2} \Delta_f G(\text{O}_2)) \quad (1)$$

Ved standard trykk og temperatur (STP) er $\Delta_f G = \Delta_f G^0$ for grunnstoffer i sin mest stabile tilstand er definert som null, som gjør at den totale endringen i energi for reaksjonen ved STP er $\Delta_f G^0(\text{H}_2\text{O}) = -237,11 \text{ kJ/mol}$ [6]. Høyeste teoretiske spenning, E^0 , for cellen ved STP er gitt ved sammenhengen

$$W = \Delta G = -zFE^0 \quad (2)$$

der z er valenstallet og F er Faradays konstant (96487 C/mol). Dette gir

$$E^0 = \frac{\Delta_f G(\text{H}_2\text{O})}{-2 \cdot F} = \frac{-237,11 \cdot 10^3}{-2 \cdot 96487} = 1,229 \text{ V} \quad (3)$$

som er celledspenningen for en reversibel reaksjon. En reell brenselcelle vil imidlertid ikke reagere reversibelt, og vil dermed ha en lavere spenning enn den teoretisk høyeste. Dette avviket kalles overspenning. Det er flere faktorer som bidrar til irreversibiliteter i cellen.

Bidrag til overspenning

Indre motstand[7]

Det vil alltid være en viss indre motstand i cellen, som gir et effekttap. Etter Ohms lov er spenningsfallet ΔV_r gitt som

$$\Delta V_r = -I \cdot R_i \quad (4)$$

der I er strømmen og R_i er den indre motstanden.

Aktiveringsenergi

For strømmen i en elektrokjemisk reaksjon har vi generelt[8]

$$I = nFA_k k_k - nFA_a k_a \quad (5)$$

der n er valenstallet, A_k er arealet av katoden, A_a er arealet av anoden, k_k er hastighetskoeffisienten til reaksjonen ved katoden, og k_a er hastighetskoeffisienten til reaksjonen ved anoden. Sammenhengen mellom aktiveringsenergi og reaksjonshastighet er gitt av Arrhenius' ligning

$$k = A e^{\frac{-\Delta G^\ddagger}{RT}} \quad (6)$$

der ΔG^\ddagger er den molare energien som kreves for å danne et aktivert kompleks som inngår i reaksjonen, og R er gasskonstanten. Denne energien avhenger av potensialet, h , på elektrodeoverflaten, og kan skrives [9]

$$\Delta G_k^\ddagger = \Delta G_{0k}^\ddagger - a n F h \quad (7)$$

for katoden og

$$\Delta G_a^\ddagger = \Delta G_{0a}^\ddagger + (1-a) n F h \quad (8)$$

for anoden. Dette gir sammenhengene

$$k_k = A e^{\frac{-\Delta G_{0k}^\ddagger}{RT}} e^{\frac{-a n F h}{RT}} \quad (9)$$

$$k_a = A e^{\frac{-\Delta G_{0a}^\ddagger}{RT}} e^{\frac{(1-a) n F h}{RT}} \quad (10)$$

Dette gir Butler-Volmer-ligningen, som beskriver sammenhengen mellom strøm og potensial når man kan se bort fra transporteffekter

$$I = I_0 \left(e^{\frac{-a n F h}{RT}} - e^{\frac{(1-a) n F h}{RT}} \right) \quad (11)$$

der i_0 er likevektsutvekslingsstrømmen, som er en elektrodespesifikk konstant, gitt ved

$$I_0 = nFA_a k_a [\text{H}_2] e^{\frac{(1-a)F}{RT}} = nFA_k k_k [\text{O}_2] e^{\frac{-aF}{RT}} \quad (12)$$

der $[\text{H}_2]$ er konsentrasjonen av hydrogen ved anoden, og $[\text{O}_2]$ er konsentrasjonen av oksygen ved anoden. Hvis h er større enn $5 \cdot 10^{-2}$ V, kan vi, avhengig av fortegnet på h , se bort fra enten det første eller det andre leddet i Butler-Volmer ligningen (12). I vårt tilfelle er h positiv, og ligning (12) kan dermed omskrives til

$$h = \frac{RT}{(1-a)nF} \ln \frac{I_0}{I} \quad (13)$$

Hvis membranen ikke er perfekt vil den slippe gjennom både elektroner og H₂ som reagerer direkte med oksygen uten å bidra til strømmen i den ytre kretsen. Vi antar at et H₂-molekyl gjennom membranen gir samme overspenning på grunn av aktiveringsenergien til reaksjonen som to elektroner gjennom den ytre kretsen. En slik brenseltransport direkte gjennom membranen vil derfor redusere spenningen ved null ytre strøm, og må regnes med i strømmen i uttrykket for aktiveringsoverspenningen. Vi kaller denne transporten I_n , gitt for STP ved

$$I_n = \frac{nFPV}{3600RT} = \frac{2 \cdot 96485 \cdot 1 \cdot V}{3600 \cdot 0,082 \cdot 298} \quad (14)$$

der P er trykket i atmosfærer, V er volumet hydrogen som forbrukes ved null strøm per time, R er gasskonstanten med enheter L atm mol⁻¹ K⁻¹. Uttrykket for overspenningen på grunn av aktiveringsenergi, som funksjon av strøm blir da

$$\Delta V_a = \frac{RT}{(1-a)nF} \ln \frac{I_0}{(I + I_n)} \quad (15)$$

Konsentrasjon og Transporteffekter

Dette er ting som i praksis er veldig viktig, fordi en brenselcelle i for eksempel en bil vil gå på oksygen fra lufta. Gibbs-energien til oksygen i luft er en annen enn for rent oksygen[10], gitt ved

$$\Delta G = \Delta G^0 - RT \ln a \quad (16)$$

der a er aktiviteten. For en ideell gass er aktiviteten definert som

$$a = \frac{p_a}{p_0} \quad (17)$$

der p_a er partialtrykket til gassen, og p_0 er totaltrykket. Transporteffekter vil særlig gjøre seg gjeldende ved høye strømmer. Hvis det ikke benyttes rent hydrogen og oksygen som brensel vil konsentrasjonen av reaktanter synke når strømmen øker, fordi reaktanten blir forbrukt mens inerte gasser ikke blir det. Hvis det benyttes oksygen fra luft vil oksygen forbrukes, mens nitrogen ikke vil reagere. Dermed synker partialtrykket av oksygen. Når strømmen blir tilstrekkelig stor vil reaktantene forbrukes like raskt som de kan fraktes til elektroden, og det blir da den største strømmen cellen kan produsere. Hvis vi kaller denne maksimale strømmen i_l , og antar at trykket avtar lineært med økende strøm, får vi for sammenhengen mellom strøm og trykk [11]

$$p_a = p_{a0} \left(1 - \frac{(I + I_n)}{I_l}\right) \quad (18)$$

der p_{a0} er partialtrykket av gassen ved null strøm. Dette gir for spenningsfallet som følge av transporttap:

$$\Delta V_r = \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{p_{a0}}{p_0} \left(1 - \frac{(I + I_n)}{I_l}\right)\right) \quad (19)$$

Utrykk for overspenning som funksjon av strøm

$$\Delta V_r = -I \cdot R_i \quad (4)$$

$$\Delta V_a = \frac{RT}{(1-a)nF} \ln \frac{I_0}{(I + I_n)} \quad (15)$$

$$\Delta V_t = \frac{RT}{nF} \ln\left(a \left(1 - \frac{(I + I_n)}{I_l}\right)\right) \quad (19)$$

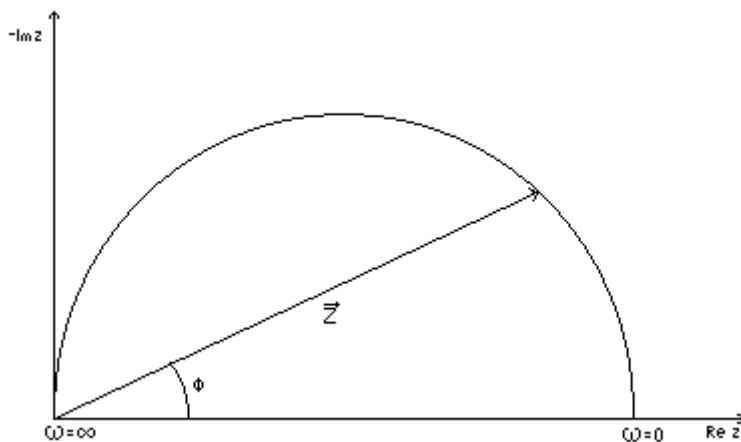
Dette gir følgende sammenheng mellom spenning og strøm

$$V = E^0 - IR_i - \frac{RT}{(1-a)nF} \ln \frac{(I + I_n)}{I_0} + \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{p_{a0}}{p_0} \left(1 - \frac{(I + I_n)}{I_l}\right)\right) \quad (20)$$

Impedansspektroskopi og strømbruddstest

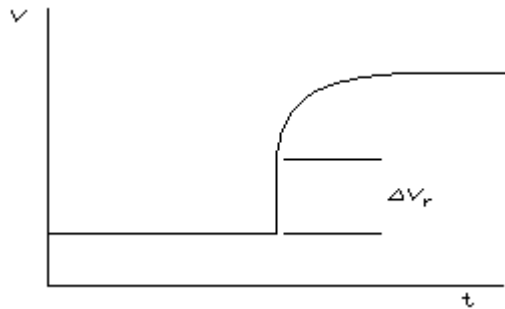
En brenselcelle er essensielt en katalysert membranreaktor, og dens oppførsel avhenger av en rekke faktorer, som er åpenbart fra et plott av spenning som funksjon av strøm for en celle. Impedansspektroskopi [12, 13] er en teknikk som kan si en del om flere av disse faktorene. En likespenning lik cellens åpen-krets-spenning trykkes på cellen, og en vekselspenning på 10-30 mV varieres i frekvens fra typisk 10^{-2} til 10^7 Hz, og cellens impedans måles for et stort antall frekvenser. Det finnes så flere måter å tolke resultatene, men en vanlig måte er å lage et Nyquist-plott, der man tegner inn punkter i det komplekse planet som bestemt av impedansvektoren for hver frekvens. Basert på disse målingene kan man modellere en ekvivalentkrets for cella, som kan si mye om prosessene som påvirker spenningen. En svært enkel ekvivalentkrets kan være en motstand i parallell med en kapasitans. Nyquist-plottet for en slik krets er vist i figur 3.

Figur 3: Nyquist-plott for en en-kapasitans ekvivalenskrets.



En slik måling er en nokså langvarig og komplisert prosess. Et enklere alternativ er en såkalt strømavbruddstest[14]. Der leverer cellen en strøm gjennom en motstand, så brytes kretsen mens spenningen måles som funksjon av tiden. Resultatet blir en kurve som gjør et umiddelbart hopp i det kretsen brytes, og som deretter stiger langsommere mot åpen-krets-spenningen.

Figur 4: Kvalitativ strømavbruddskurve.



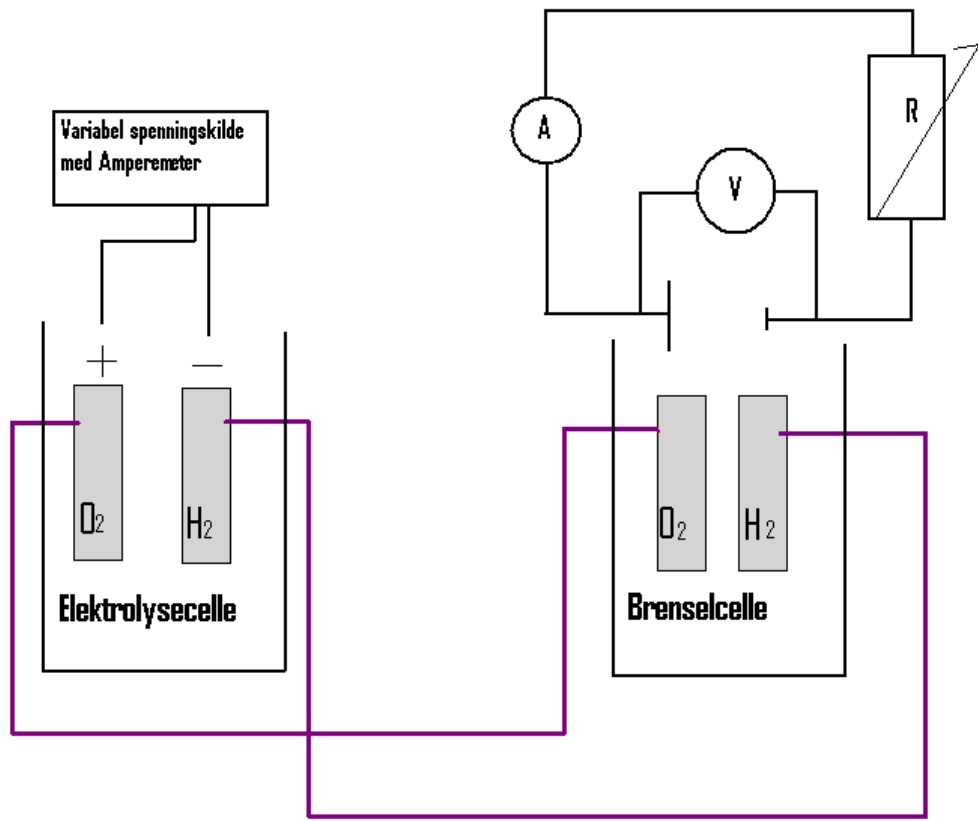
Det raske hoppet i spenningen skyldes at spenningsfallet som kommer av strøm gjennom motstand forsvinner straks strømmen opphører. I overgangen mellom elektrolytt og elektrode vil det eksistere et såkalt ladningsdobbeltag. Det kommer av coulombkrefter mellom de mobile elektronene i elektroden og de mobile protonene i elektrolytten. Når strømmen blir null endres likevektsbetingelsene for dette ladningsdobbeltaget, og dette er årsaken til den langsomme delen av spenningsstigningen i Figur 4. Atskilte ladninger med motsatt fortegn er essensielt en kondensator, og det er egenskapene til ladningsdobbeltaget man kan si noe om ut fra kapasitansen(e) i en ekvivalentkrets. I en brenselcelle har man to slike ladningsdobbeltag, et ved katoden og et ved anoden. For å få en god ekvivalenskrets er det derfor gjerne nødvendig med to kapasitanser.

Eksperimentelt:

Til forsøkene ble det brukt en Hydro-Genius brenselcelle fra Heliocentris. Cellen var av typen Proton Exchange Membrane, og ble drevet av hydrogen og oksygen. Som kilde til hydrogen og oksygen ble det brukt en elektrolysecelle som elektrolyserte destillert vann. Denne ble drevet med en strøm på 0,5 A.

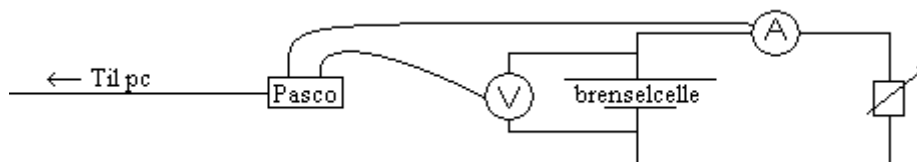
Et forsøk ble utført der brenselcellen ble koblet i serie med en variabel motsand og et amperemeter, og spenningsfallet over cellen ble målt med et voltmeter. Spenningen og strømmen ble målt for en rekke motstander. Oppkoblingen er vist i figur 5. Resultatene finnes i vedlegg 1.

Figur 5: Skjematisk fremstilling av oppsettet



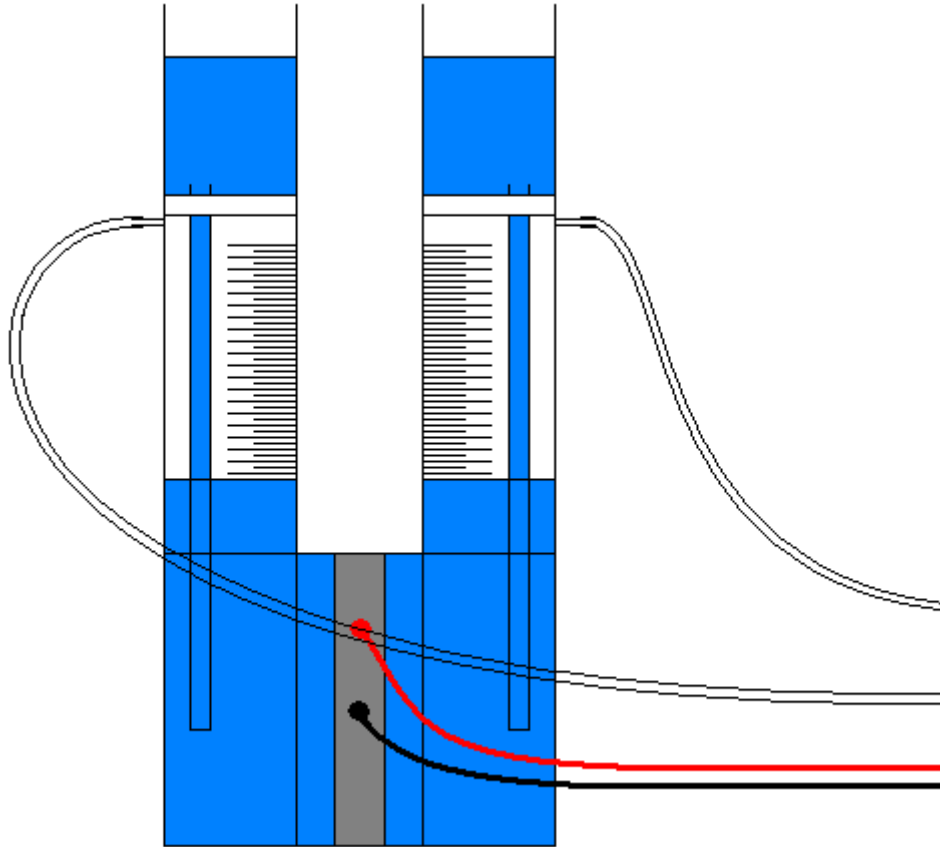
Et forsøk ble utført der cellen ble seriekoblet med en variabel motstand. En strømmåler koblet til en datalogger ble seriekoblet inn i kretsen, og spenningsfallet over cellen ble målt med datalogger. Kretsen ble brutt, og spenningen og strømmen ble målt som funksjon av tiden, med en loggefrequens på 200 målinger i sekundet. Motstanden gjennom den variable motstanden og amperemeteret ble målt med ohm-meter. Forsøket ble utført for ytre motstander på 3,15 ohm, 7,15 ohm og 12,15 ohm. Oppkoblingen er vist i figur 6.

Figur 6: Skjematisk fremstilling av strømbruddstestoppsett



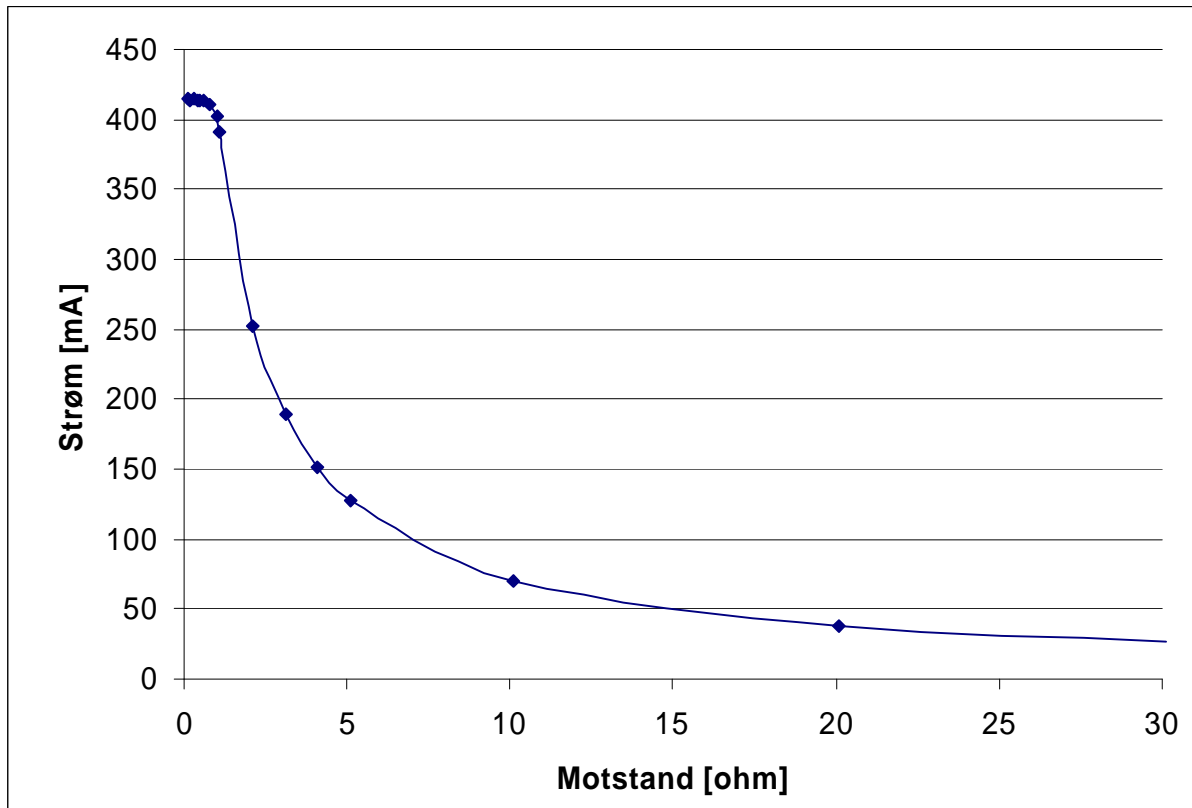
Et forsøk ble utført der elektrolysecellen ble koblet til brenselcellen, og utløpene fra cellen ble tettet. Cellen var ikke del av en sluttet krets. Forbruket av gass ble målt ved vannstanden i elektrolysecellen. Forsøket ble utført to ganger.

Figur 7: Elektrolysecelle

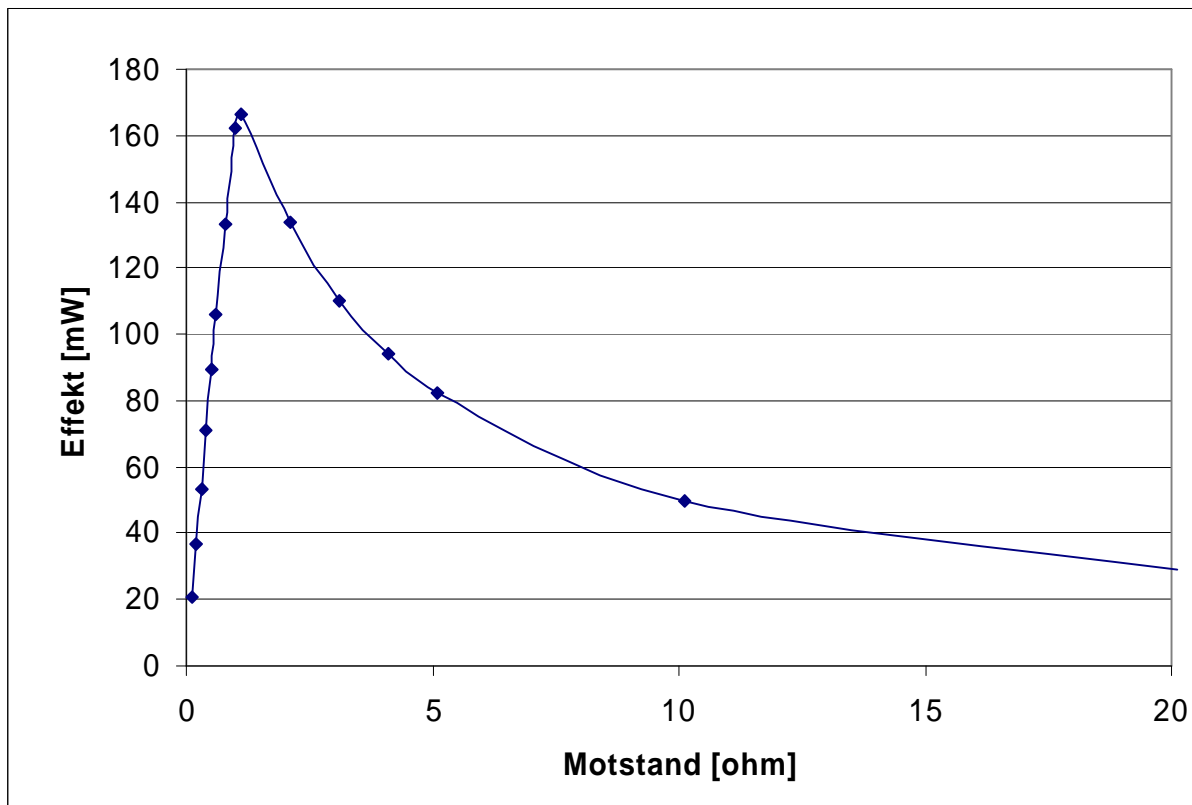


Resultater

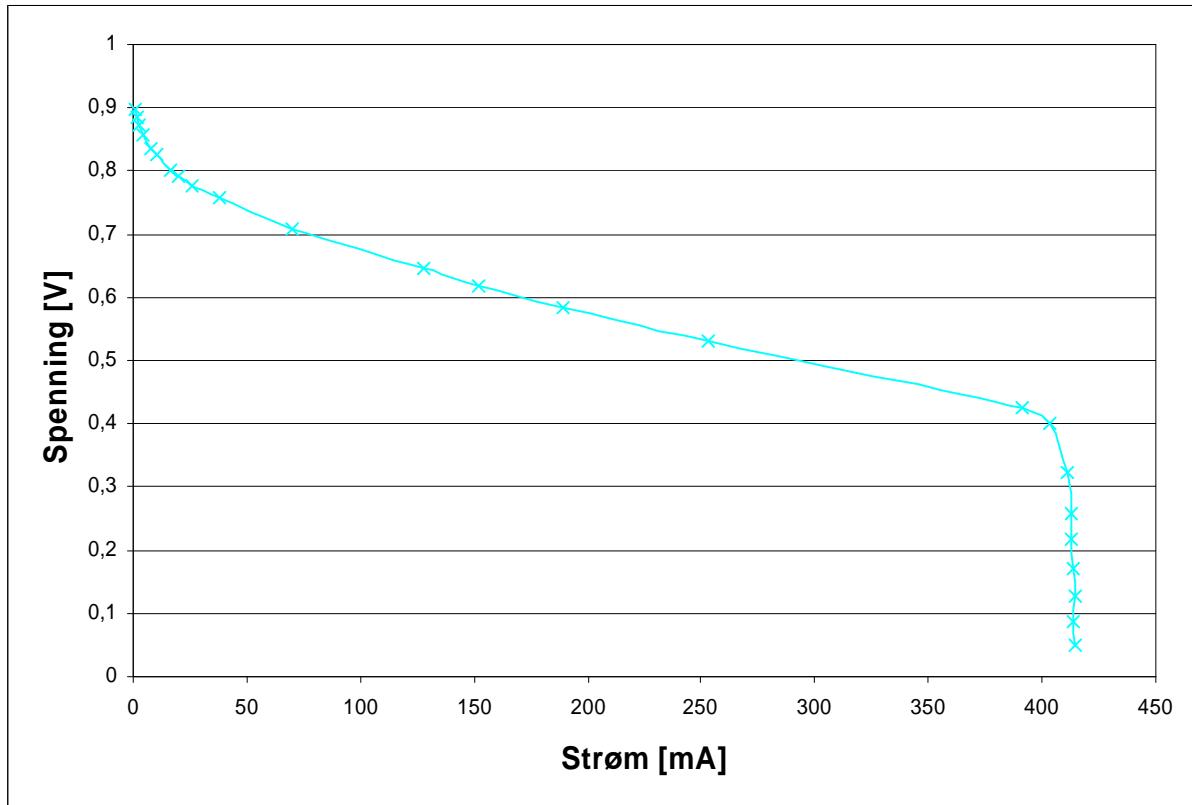
Figur 8: Strøm som funksjon av motstand



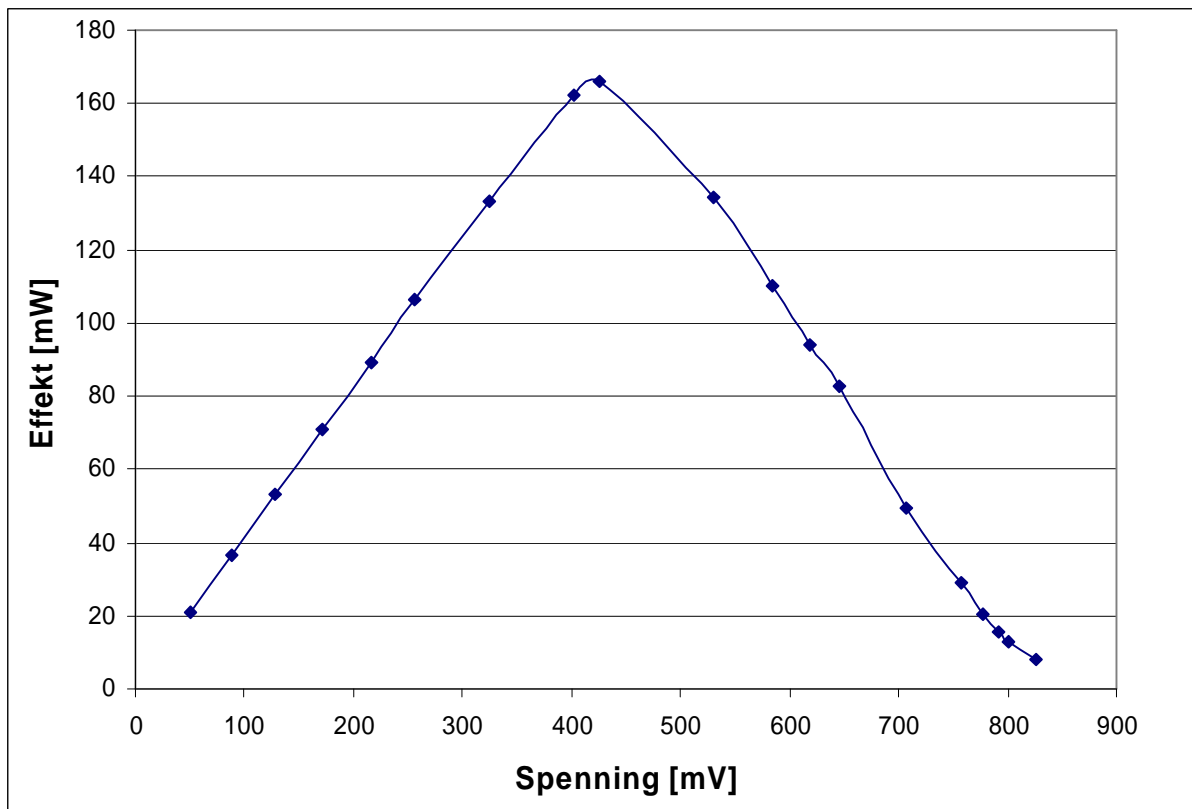
Figur 9: Effekt i ytre krets som funksjon av motstand



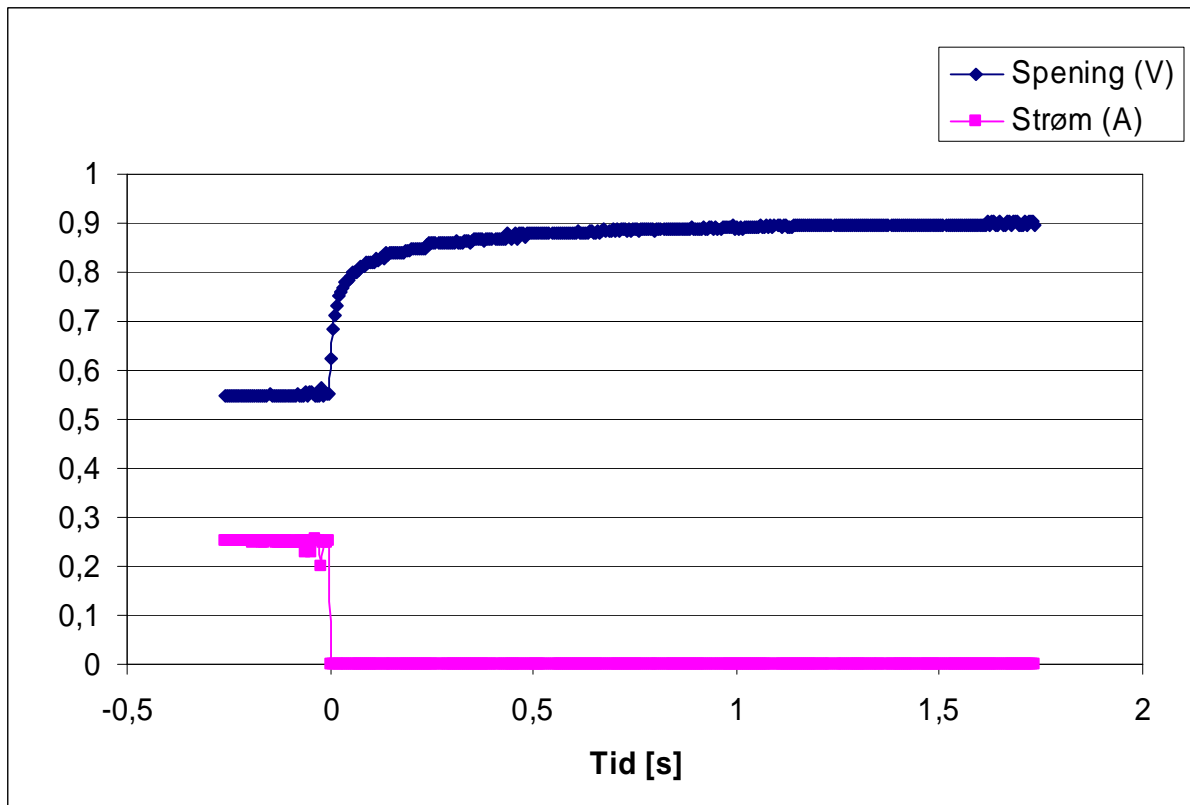
Figur 10: Spenning som funksjon av strøm



Figur 11: Effekt som funksjon av spenning



Figur 12: Strøm og spenning som funksjon av tid i strømbruddstest



Det ble funnet at cellen brukte 10 ml hydrogen i løpet av en time ved null strøm. Det dannet seg kondens inne i cella i løpet av forsøket, så det er rimelig å anta at i allefall en del av denne gassen har passert gjennom membranen og reagert med oksygen direkte på katalysatoren på katoden. Fra dette resultatet og ligning (14) får vi $I_n = 21,9$ mA

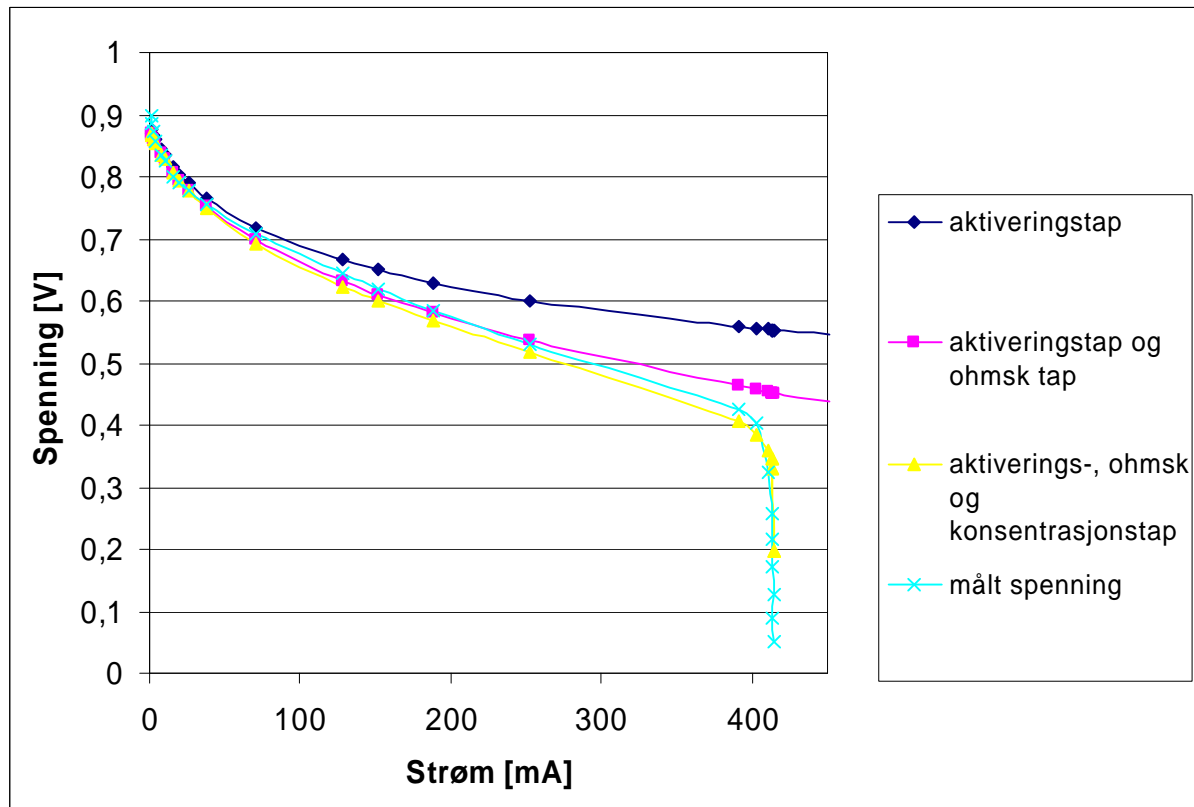
Diskusjon:

Strøm som funksjon av motstand

Fra figur 8 er det tydelig at for store motstander endrer strømmen seg omtrent som for en ideell spenningskilde. Dette er forventet, fordi ved store ytre motstander blir den indre motstanden i systemet av liten betydning. For lave motstander er det tydelig at strømmen går mot en maksimal verdi. Denne største strømmen er omtrent det samme som I_l i ligning (17), men i vårt tilfelle skyldes den ikke begrenset diffusjonshastighet, men begrensning i gasstilførselen. Elektrolysecellen ble operert ved 0,5 A, og hvis man tar hensyn til indre brenseloverføring i cellen, og indre elektronstrøm i elektrolysecellen virker det rimelig at den største strømmen blir omtrent 420 mA.

Karakteristisk spenningskurve

Figur 12: Spenning som funksjon av strøm, målte verdier, og forskjellige teoretiske



For sammenhengen mellom spenning og strøm har vi funnet ligning (20) i teorien

$$V = E^0 - IR_i - \frac{RT}{(1-a)nF} \ln \left(\frac{I + I_n}{I_0} \right) + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{p_{a0}}{p_0} \left(1 - \frac{I + I_n}{I_l} \right) \right) \quad (20)$$

Den kan omskrives til

$$V(I) = E^0 - IR_i - A \ln \left(\frac{I + I_n}{I_0} \right) + B \ln \left(\left(1 - \frac{I + I_n}{I_l} \right) \right) \quad (21)$$

Konstanten $\frac{p_{a0}}{p_0}$ for våre forsøk er lik 1 siden vi brukte ren oksygen og ren hydrogen.

Konstantene A og B er gitt som: $A = \frac{RT}{(1-a)nF}$ og $B = \frac{RT}{nF}$.

Ligning (21) er den matematiske formen på den tilpassede funksjonen som viser spenning med ohmske tap, konsentrasjonstap og aktivasjonstap. Verdiene for konstantene i uttrykket er gitt i tabell 1.

Tabell 1: Konstanter i ligning (21)

I_n [mA]	A [V]	I_0 [mA]	I_l [mA]	B [V]	R_i [ohm]
18,343	0,1035	0,836082	433,3444	0,02	0,235294

Aktiveringstapkurven viser spenningen cella gir antatt at A -leddet i uttrykket er det eneste bestemmende for spenningsfallet. Grafen som vi har kalt aktiveringstap og ohmsk tap, viser spenningen cella gir for forskjellige strømmer, hvis vi antar at konsentrasjonstap ikke vil skje. Av denne kan vi se at for høye strømmer oppfører spenningen seg som en vanlig spenningskilde med en viss indre motstand R_i . For grafen som inkluderer alle effektene, nemlig ohmsk-, aktiverings-, og konsentrasjonstap, følger den de målte verdiene meget godt.

Konstantene i ligning (21) ble funnet med kurvetilpasning via minste kvadraters metode i Excel. Det ble gjort ved å lage en kolonne for kvadratavvik mellom den målte spenningen, og spenningen beregnet med teorien, og så minimere kvadratavviket med Solver-funksjonen ved å endre parametrene som er vist i tabell 1. Vi tilpasset først kurven ved små verdier for strømmen, så tilpasset vi R_i for å få riktig generell stigning for grafen, og inkluderte til slutt høye verdier for strømmen. På grunn av det meget bratte fallet for spenningen ved høye og lave strømmer gjorde kvadratavvik-metoden upresis, med en kurve som falt noe for tidlig for høye strømmer og feilet i å falle bratt nok for lave strømmer. Vi brukte derfor en god mengde med skjønn i prosessen med å finne en kurve som avvek minst mulig. På grunn av egenskapene til det matematiske uttrykket hvor hvert ledd dominerer et område av grafen er det ganske greit å vite hvor man må forandre parametre for å få en bedre tilpasning. Men siden det tross alt er en viss påvirkning fra ledd i intervall hvor et annet eller de andre leddene i teorien skulle være helt dominerende, forventer vi å ikke få en fullstendig unik løsning av tilpasningsparametrene, og ergo korrekt beskrivelse av ytelsen til cella for alle strømmene. Dette kan være med å gjøre det vanskelig å for eks. finne en riktig verdi for motstanden R_i .

Generelt vil de mest interessante parameterne å finne i slike tilpasninger av kurver være verdier for I_0 og R_i . Disse sier direkte noe om prestasjonen til cella. I_0 , som er likevektsutvekslingsstrømmen, sier noe om aktiviteten til elektrodene. Det er viktig at denne gjøres størst mulig. Faktorer som påvirker denne er katalysatormaterialet, og overflaten på katalysatoren. Det er viktig at denne gjøres størst mulig. Vi ser fra det tredje leddet i ligning (21) at en høyere I_0 vil ha en positiv effekt på spenningen.

De to verdiene vi har best forutsetning for å diskutere er I_n og I_l . I_n har vi målt direkte, og funnet en verdi på 21,9 mA. Dette er litt høyere enn verdien vi fant ved kurvetilpasning. Det er mulig at dette kan skyldes en liten lekkasje i gass-systemet, samt at noe av gassen kan ha blitt løst i vannet den timen forsøket pågikk. I_l ser også ut til å stemme bra, siden den er ca lik den høyeste strømmen vi målte pluss I_l . Til tross for noen mindre avvik er det rimelig å tro at vi har funnet en ganske god sammenheng mellom strøm og spenning for cellen vi brukte. Noen typiske verdier for en PEM brenselcelle [15] er oppgitt i tabell 2, omregnet til samme elektrodestørrelse som vår celle.

Tabell 2 Typiske verdier for en PEM brenselcelle

	I_n [mA]	A [V]	I_0 [mA]	I_l [mA]	B [V]	R_i [ohm]
Typisk celle	17	0,06	0,57	7650	0,05	0,03
Vår celle	18,343	0,1035	0,836082	433,3444	0,02	0,235294

Det vi skal legge merke til her er forskjellen i B , A og R_i . I_l kunne vi også gjort større med større gasstilførsel. I_n og I_0 er innenfor spekteret av typiske verdier. Vi ser fra ligning (21) at en større A indikere at aktiveringsoverspenningen er av større betydning. Denne er nesten dobbelt så stor i vår celle som en typisk verdi. Den største fordelen ligger imidlertid i den

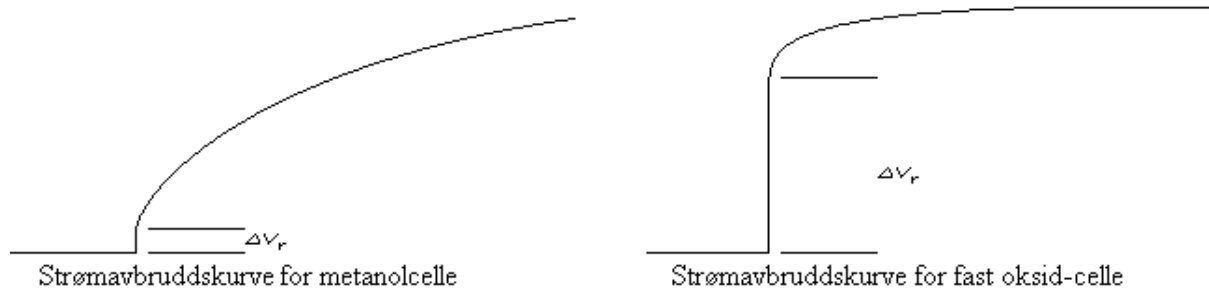
indre motstanden. Her har vår celle en verdi som er nesten 8 ganger en typisk verdi. Det er ikke urimelig at dette kommer av at membranen ikke ble fuktet tilstrekkelig. Siden de protonledende egenskapene til membranen er avhengig av at membranen er mettet med vann er det vanlig å større celler å bruke fuktig hydrogen som drivstoff. Vi gjorde ikke noe i forhold til dette.

Det at B har forskjellige verdier for forskjellige celler er alarmerende, for å si det mildt, siden denne etter vår teori skal være gitt som $B = \frac{RT}{nF}$. Dette ble imidlertid oppdaget på et svært sent stadium i prosjektet, så det ble ikke tid til å rette det opp.

Strømvbruddstest:

Det er vanskelig å si noe kvantitativt ut fra denne testen, men rent kvalitativt kan den indikere forholdet mellom aktiveringsoverspenningen og det ohmske tapet. Det raske hoppet i det strømmen brytes er knyttet til den indre motstanden i cellen, og den langsomme stigningen er knyttet til ladningsdobbel laget og aktiveringsoverspenningen. For en PEM celle på hydrogen er disse to typisk av samme størrelsesorden, mens for eksempel en metanolbrenselcelle har mye større aktiveringsenergi på anoden enn hydrogen cellen, og strømvbruddskurven for en metanolcelle ser annerledes ut. For en fast oksid-celle som opererer ved om lag 700 °C er aktiveringsenergien mye mindre, og dermed blir det raske hoppet den dominerende karakteristikken for strømvbruddskurven.

Figur blabla: Kvalitative strømvbruddskurver[16]



Applikasjoner av brenselceller:



Casios bærbare PC med metanoldrevet brenselcelle som strømkilde..
<http://world.casio.com/info/2002/fuelcell.html>

Det er i dag ikke mye anvendelse av brenselceller i energitilførselen, men fordelene ved bruk av dem er likevel mange. Brenselcelleteknologi har høy grad av reliabilitet, med ingen bevegelige deler[17]. Viktig er det å nevne brenselcellers miljøvennlighet, med lave mengder skadelige utslipp forbundet ved seg, og maskiner som bruker brenselceller er svært lite lydforurensende. Grunnet brenselcellens lange levetid og lette vekt i forhold til tradisjonelle batterier begynner det amerikanske militæret å se dypt inn i mulighetene til brenselceller for sitt bærbare utstyr, men også for stasjonære system[18]. Når brenselceller på stedet brukes til å forsyne mindre anlegg med strøm kan man også benytte spillvarmen til å dekke deler av anleggets oppvarmingsbehov, og slik kan man få effektiviteten opp mot 85%. Teknologien har allerede kommet så langt at brenselceller er utviklet for bruk på fly[19]. Det er godt håp for at forskningen intensiveres videre, og bringer mulighetene for kommersialisering og applikasjoner til et nytt nivå.

Hvorfor er ikke brenselceller mer anvendt i dag? Brenselceller har høy energieffektivitet, men kostnaden per kWt produsert er for høy til at kommersialiseringen av brenselceller har kommet særlig langt[20]. Det må dog nevnes at kostnadene er betraktelig redusert de siste årene. En celle alene gir ca. bare 0,7 volt ved normal strøm, slik at mange celler må seriekobles for å få høy nok spenning til vanlig forbrukerelektronikk. For å effektivisere sammenkoplingen av cellene bruker man en såkalt bipolar plate, som leder strøm fra en anode til katoden i neste celle, og dessuten har kanaler for tilførsel av henholdsvis hydrogen og oksygen, og i noen brenselceller også kjølekanaler. Designet av den bipolare platen må balanseres mellom forskjellige viktige hensyn. Den må ha så mye tilførsel av gass som mulig, noe som begrenser den elektriske konduktiviteten. Platen bør være så tynn som mulig for å sikre god konduktivitet og dessuten ikke ha for høy massetetthet. [21] Dette er en av hovedfaktorene til hvorfor prosessen med å lage brenselceller har blitt meget komplisert, og kostnadene i dag generelt er så høye at kommersialiseringen av teknologien virker å la vente på seg. Membranen i en proton-exchange-membrane type brenselcelle (PEM-celle) er avhengig av akkurat den riktige tilførselen av vann for å yte best mulig. Det viser seg å være rimelig komplisert å finne den riktige likevekten for opererende celler. Katalysatoren i en PEM-celle er sårbar for tilførsel av til og med små mengder karbonmonoksid. [22]

Utfordringene brenselcelleteknologien strekker seg over flere plan enn dette, og vi har bare skrappt overflaten ved å nevne noen.



*Fem 200kW brenselceller i Alaska med naturgass som drivstoff
<http://www.nrel.gov/hydrogen/photos.html>*

Oppsummering

I dette prosjektet om et mangfoldig tema har vi fått mulighet til å lære teorien bak og om anvendelsen til en av fremtidens energikilde. Det har vært fascinerende å få kunnskap om et felt som ligger i et krysningsfelt mellom elektrofysikk og kjemi. Vi synes vi har funnet en modell som gir en rimelig beskrivelse av den karakteristiske spenningskurven til en brenselcelle, og dermed gir litt innblikk i mekanismene som ligger til grunn, og hvor utfordringene i videre forskning ligger.

Referanser

- [1] Larminie, J., Dicks, A., *Fuel cell systems explained*, J. Wiley & sons, 1999, s. 11
- [2] <http://world.casio.com/info/2002/fuelcell.html>
- [3] <http://www.computerweekly.com/Article134032.htm>
- [4] Hefte "Fuel cells – Green Power" Vedlagt s. 9-13
- [5] Helbæk, M., *Fysikalsk kjemi*, Fagbokforlaget, 1999, s. 447
- [6] Lide, D. R., *Handbook of Chemistry and Physics*, 85th ed., CRC Press, 2004, s. 5-18
- [7] Larminie, J., Dicks, A., *Fuel cell systems explained*, J. Wiley & sons, 1999, s. 49
- [8] Amphlett, J. C., Baument, R. M., Mann, R. E., Peppley, B. A., Roberge, P. R., Harris, T. J., 1995, "Performance modelling of the Ballard Mark V solid polymer electrolyte fuel cell", *Journal of the electrochemical society*, Vol. 142, s. 1-8
- [9] Sawyer, D. T., Sobkowiak, A., Roberts, Jr., J. L., *Electrochemistry for Chemists*, J. Wiley & sons, 1995, s. 17-19
- [10] Helbæk, M., *Fysikalsk kjemi*, Fagbokforlaget, 1999, s. 182
- [11] Larminie, J., Dicks, A., *Fuel cell systems explained*, J. Wiley & sons, 1999, s. 50
- [12] http://www.gamry.com/App_Notes/EIS_Primer/EIS_Primer.htm
- [13] Ciureanu, M., Mikhailenko, S. D., Kaliaguine, S., "PEM fuel cells as membrane reactors: kinetic analysis by impedance spectroscopy", *Catalysis Today*, Vol. 82, s. 195-206
- [14] Larminie, J., Dicks, A., *Fuel cell systems explained*, J. Wiley & sons, 1999, s. 56-59
- [15] Larminie, J., Dicks, A., *Fuel cell systems explained*, J. Wiley & sons, 1999, s. 53
- [16] Larminie, J., Dicks, A., *Fuel cell systems explained*, J. Wiley & sons, 1999, s. 58
- [17] <http://www.fuelcells.org/basics/benefits.html>
- [18] <http://www.abiresearch.com/reports/MFM.html>
- [19] <http://www.dfrc.nasa.gov/Gallery/Photo/Helios/HTML/ED03-0152-1.html>
- [20] http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_challenges.html
- [21] Larminie, J., Dicks, A., *Fuel cell systems explained*, J. Wiley & sons, 1999, s. 7-9
- [22] <http://www.sanewsletters.com/FCIR/glossary1.asp>

Vedlegg 1: Resultater fra måling av strøm og spenning for forskjellige motstander

Motstand [Ohm]	Strøm [mA]	Spenning [mV]	Effekt [mW]
0,1	415	50	20,75
0,2	414	88	36,432
0,3	415	128	53,12
0,4	414	171	70,794
0,5	413	216	89,208
0,6	413	257	106,141
0,8	411	324	133,164
1	403	402	162,006
1,1	391	425	166,175
2,1	253	530	134,09
3,1	189	584	110,376
4,1	152	619	94,088
5,1	128	645	82,56
10,1	70	707	49,49
20,1	38	757	28,766
30,1	26	777	20,202
40,1	20	791	15,82
50,1	16	801	12,816
80,1	10	826	8,26
100,1	8	835	6,68
200,1	4	857	3,428
300,1	2,8	874	2,4472
500,1	1,7	886	1,5062
1000,1	0,9	898	0,8082
uendelig	0	916	0