

Hvernig myndast vetnissameindin úr róteindum og rafeindum ?

Egill Skúlason

Raunvísindastofnun Háskólans, Háskóli Íslands

Vefútgáfa: 18. janúar 2010

Ágrip – Í leit að leið til að lækka kostnað við vetnisvinnslu koma skammtafræðilegir tölvureikningar að góðum notum. Í þessari grein er fjallað á almennan hátt um kennilegar rannsóknir vísindamanna við Háskóla Íslands og Tækniháskóla Danmerkur (DTU) þar sem leitast er við að fá nákvæma mynd af hvernig vetnissameindin myndast úr grunneiningum sínum, róteindum og rafeindum, á skilfleti málms og lausnar. Vonir standa til að sá skilningur geti hjálpað til við þróun nýrra efnahvata sem stuðlað geta að uppbyggingu vetnishagkerfis.

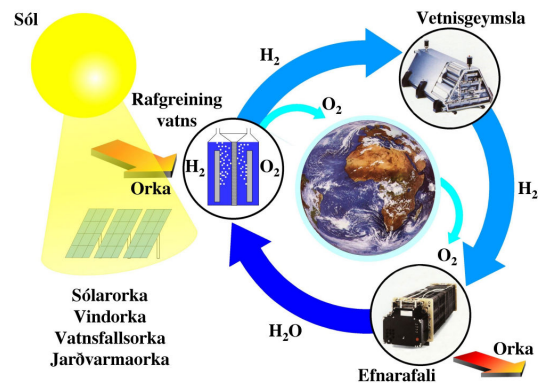
1. Inngangur

Heimurinn stendur frammi fyrir þverrandi olúlindum og umhverfisröskun sem hlýst af bruna jarðefnaeldsneytis. Það sem einna mest hefur verið rannsakað og jafnframt talið eitt áhugaverðasta umhverfisvæna eldsneytið sem leyst geti olfuna af hólmi, er vetni, léttasta frumefnið í lotukerfinu. Vetni er tvíatóma sameind, táknnað H_2 og samanstendur af tveimur róteindakjörnum og tveimur rafeindum. Þessi minnsta og einfaldasta sameind sem til er getur varðveitt gríðarlegt magn orku. Vetnið er því tilvalið sem orkuberi. Mynd 1 er yfirlitsmynd af hugsanlegu vetnishagkerfi.

Til að byggja upp vetnishagkerfi er nauðsynlegt að ráða fram úr tveimur tæknilegum atriðum. Annars vegar þarf að þróa og hanna að nothæfu formi nýja efnahvata til vetnismyndunar og vetnissundrunar í stað platínu og hins vegar þarf að finna góðan og öruggan geymslumáta fyrir vetnið.

Í því sambandi kemur nanótæknin til hjálpar, en það er sú tækni sem fæst við kerfi af nanóstærð. Nanómetri er einn milljarðasti hluti úr metra. 10 vetnisatóm í röð spanna 1 nanómetra. Nanótæknin fæst venjulega við kerfi á bilinu 10–10.000 atóm að stærð, eða við þá veröld sem sameindirnar lifa í.

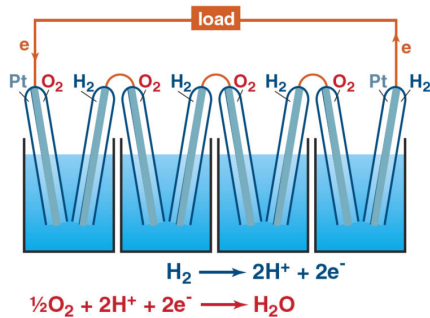
Skyggnumst inn í heim vetnisrannsókna við upphaf nýrrar aldar og skoðum ástæðuna fyrir því af hverju vetnisbílar eru ekki enn orðnir samkeppnishæfir við venjulega bensínbíla.



Mynd 1. Yfirlitsmynd af vetnishagkerfi. Umhverfisvæn orka, sem notuð er til að kljúfa vatn og framleiða vetni, gæti t.d. komið frá sólinni, með vindi, frá jarðvarma eða vatnsfalli. Það þarf að vera hægt að geyma vetnið þegar það er flutt á milli staða og losa það út þegar þörf krefur. Vetnið er notað sem eldsneyti fyrir efnarafala sem framleiðir raforku, t.d. til að knýja bifreið áfram og eina aukaafurðin er vatn sem fer aftur inn í hringrásina [1].

2. Þurfum að skipta platínu út fyrir ódýrari efnahvata

Þegar vetni er unnið með rafgreiningu vatns (sundrun í vetni og súrefni) og vetnissameindunum síðan sundrað í efnarafala (tæki sem elur af sér rafmagn með því að umbreyta efnaorku vetnis yfir í raforku) er sá galli á gjöf Njarðar að besti efnahvatinn til þess verks er



Mynd 2. Efnarafali hannaður af Grove árið 1839. Kerfið og ferlið er í meginatriðum eins í dag [2]. Efnarafali notar vetni og súrefni til að mynda vatn og rafmagn. Ef efnahvörfunum er snúið við er vatni sundrað og búið til vetni og súrefni með því að stinga rafgreiningartækinu í samband við rafmagn. Öll rafskautin eru gerð úr platínu.

eðalmálmurinn platína, sem vart þarf að taka fram að er bæði sjaldgæfur og dýr. Efnahvatar eru nauðsynlegir til að hvetja efnahvörf áfram, koma þeim úr einu efnasambandi í annað, frá hvarfefni **A** í myndefni **B**. Á mynd 2 er teikning af fyrsta efnarafalanum, hannaður af William Grove árið 1839. Enn í dag byggja efnarafalar á sömu lögmálum og svipaðri hönnun og fyrir tæpum tveimur öldum síðan, og enn er platína besti efnahvatinn.

Aðeins um 180 tonn af platínu eru unnin úr platínunámum jarðarinnar ár hvert [3] sem þýðir að aðeins er hægt að nota þennan eðalmálm í allra verðmætustu afurðirnar, þ.e. í efnahvata og skartgripi. Eins og staðan er í dag þarf um 100 grömm af platínu í efnarafala fyrir hvern vetnisbíl svo fræðilega séð væri aðeins hægt að framleiða um 1.8 milljónir bíla á ári með platínu sem efnahvata [4]. Það gefur því auga leið að þetta litla magn af platínu dugar ekki til fyrir allar þær vetnisverksmiðjur og alla þá efnarafala sem þarf til að koma vetnishagkerfi á laggirnar.

Til að vetnishagkerfi geti orðið að veruleika þarf því að finna, eða hanna, efnahvata sem bæði er jafn hvatfús og platína, og af hagkvæmnisástæðum, gerður úr ódýrari og aðgengilegri frumefnum. Þar sem virkni helstu málma er fyrir löngu mæld verður að leita annarra leiða, t.d. að blanda saman tveimur eða fleiri frumefnum í málmkristall og mæla virkni til vetnismyndunar.

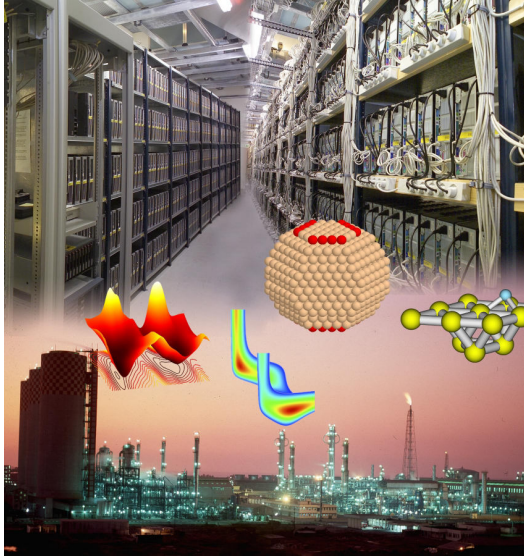
Í leit að góðum hvata til vetnismyndunar má t.d. horfa til hvernig náttúran hefur þróað sína ódýru efnahvata í milljónir ára. Þar má bæði finna vetnismynd-

andi bakteríur en einnig getum við lært af laufblöðunum, sem umbreyta sólarorku í efnaorku. Annar möguleiki til að finna hina réttu blöndu frumefna væri að prófa þúsundir eða milljónir mismunandi efnablöndur í hvatann og mæla virkni. Þriðji möguleikinn, og viðfangsefni þessarar greinar, er sá að reyna að fá skýrari mynd af því hvernig vetnissameindir myndast og sundrast á hvatanum úr grunneiningum sínum, róteindum og rafeindum, og má þá t.d. nota skammtafræðilega tölvureikninga eins og hér er gert. Með dýpri skilningi á því hvernig vetnissameind myndast væri hugsanlega hægt að átta sig á því hvaða eiginleika efnahvatinn þarf að hafa til að hvata efnahvarfið áfram, á ódýran en árangursríkan hátt. Þetta er auðvitað ekki tæmandi listi yfir rannsóknaraðferðir en með þeim öllum væri hugsanlega hægt að uppgötva nýja tegund efnahvata sem leyst gæti platínu af hólmi.

3. Skammtafræðilegir tölvureikningar

Í nútíma eðlisvísindum eru skammtafræðilegir tölvureikningar iðulega notaðir til að svara spurningum sem erfitt er að fá úr skorið með tilraunum. Þessir reikningar felast í því að leysa grundvallarjöfnur eðlisfræðinnar en skammtafræðin, sem þróaðist á fyrri hluta 20. aldar, fjallar um hinn smásæja heim. Skammtafræðilega tölvureikninga er því hægt að nota sem rannsóknarverkfæri í hinni ört vaxandi nanótækni – tækni smásæja heimsins.

Þar sem þessir reikningar eru óvinnandi verk með handafli eru tölvur notaðar til að léttu róðurinn. Að framkvæma slíka tölvureikninga er í rauninni sáraeinfalt. Það eina sem gera þarf er að raða frumeindunum upp í tölvuforriti á þann hátt sem líklegast er að þær vilji raða sér, í sameind eða kristal, og ýta síðan á ENTER. Tölvun sér um restina, en þá byrja frumeindirnar að finna fyrir kröftum hver frá annarri og raða sér upp á nýjan hátt þar til engir kraftar verka lengur á frumeindirnar og sameindin er komin í orkulægstu stöðu. Iðulega má finna nokkur slík orkulágmörk og er það lægsta valið til frekari úrvinnslu því sameindir leitast ávallt eftir að koma sér í orkulægstu og þægilegustu stellinguna. Mynd 3 sýnir hvernig tölvur geta verið settar saman í tölvuþyrpingu og síðan notaðar til að reikna út efnahvörf á efnahvötum. Þannig má ná betri skilningi á efnaferlinu sem getur stuðlað að hagkvæmari aðferðum í efnaíðnaði.



Mynd 3. Hér eru venjulegar heimilistölvur tengdar saman í margra hundraða örgjörva tölvuklasa. Í tölvunum er hægt að líkja eftir efnahvörfum á t.d. nanóögnum, sem hægt er að nýta í þróun efnahvata fyrir efnaverksmiðjur líkt og þeirri sem sést hér neðst á myndinni [5].

4. Líkt eftir raunveruleikanum

Ekki er vitað nákvæmlega hvernig vetnissameind myndast á yfirborði rafskauts úr róteindum og rafeindum. Til að kveða á um með hvaða hvarfgangi þetta gerist er hægt að útbúa tölvureikninga sem innihalda rafskaut með auka rafeindum og vatnslausn með auka róteindum, öðru nafni sýru. Í þessari uppsetningu myndast rafspennunumur á skilfleti málmsins og lausnarinnar, líkt og í alvöru rafefnafræðilegu kerfi eins og rafhlöðu.

Vísindamenn við Tækniháskóla Danmerkur og Háskóla Íslands hafa nýlega þróað aðferð sem tekur alla þessa þætti með í reikningana [6, 7, 8, 9]. Greinarhöfundur hefur átt þess kost að taka þátt í þeim rannsóknum.

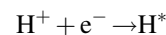
Aðferðin byggir á svokallaðri þéttifellaaðferð (e. density functional theory, DFT) sem þróuð var á sjötta áratug síðustu aldar [10, 11] en fyrir þetta framlag hlaut Walter Kohn Nóbelsverðlaunin í efnafræði árið 1998 [12]. Kenningin leysir Schrödinger jöfnuna á óbeinan hátt, út frá rafeindapétteleika í kerfinu. DFT er mest notaða aðferðin í dag þegar ákvarða skal rafeindabyggingu sameinda og kristalla, því hún gefur nógu nákvæmar niðurstöður þegar borið er saman við

tílaunir en getur einnig unnið með hlutfallslega stór kerfi.

Aðferðafræðin sem greinarhöfundur hefur tekið þátt í að þróa notar DFT kenninguna, en aðalþróunin hefur falist í að líkja eftir hinu flókna kerfi sem er á skilfleti rafskauts og raflausnar, þar sem hægt þarf að vera að breyta þéttleika rafeindanna í málminum og róteindanna í lausninni (mynd 4). Ekki var vitað hvernig hægt væri að líkja eftir þessum flókna rafefnafræðilega skilfleti á atómgrundvelli. Á efsta hluta myndar 4 má sjá vatnslausn á platínu yfirborði. Á miðmyndinni og þeirri neðstu hafa verið settar auka rafeindir í málminn og auka róteindir í vatnslausnina. Á miðmyndinni er H_3O^+ bygging jónarinnar í vatninu gefin til kynna. Á neðstu myndinni er neikvæða rafhleðslan á rafskautinu lituð fjólublá en jákvæða hleðslan í vatninu er lituð blá.

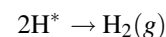
5. Hin aldargömlu efnahvörf

Þegar vetnissameindir myndast úr róteindum og rafeindum er fyrsta skrefið að koma róteindunum (H^+) úr lausninni yfir á rafskautið þar sem þær sameinast rafeindum (e^-) og mynda vetnisatóm sem bindast yfirborði skautsins (H^*) þ.s. * merkir bindistaður á yfirborðinu. Þetta kallast Volmer hvarf [13]:

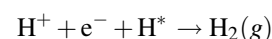


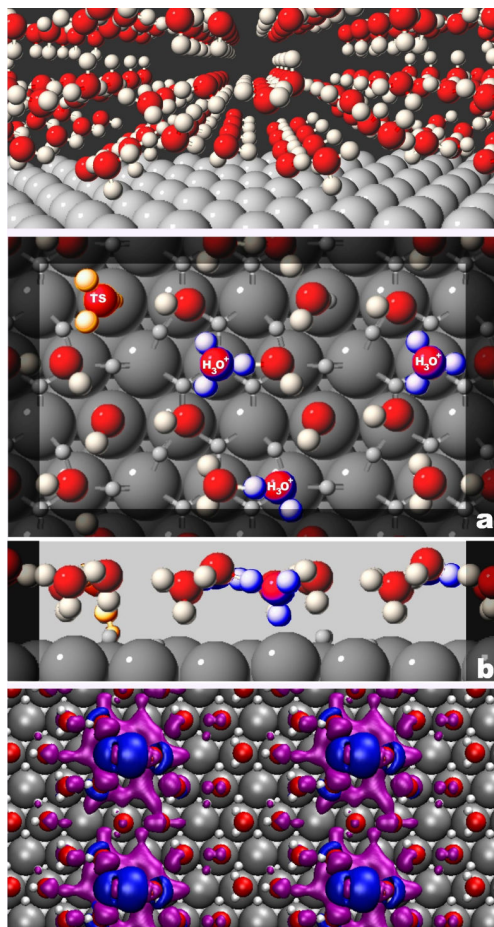
Þeim mun neikvæðara sem skautið er (fleiri mínushlaðnar rafeindir) þeim mun fleiri plúshlaðnar róteindir frá lausninni dragast að skautinu og bindast því (vegna aðdráttarkraftanna sem verka á milli rafeinda og róteinda).

Þegar vetnið þekur málmyfirborðið nægilega mikið geta vetnisgassameindir farið að myndast og losna frá yfirborðinu. Tveir mismunandi hvarfgangar eru hugsanlegir. Annars vegar sá að tvö vetnisatóm, sem bundin eru við yfirborð málmsins, geti sameinast í eina vetnissameind, nefnt Tafel hvarf [14]:



Hinn möguleikinn er að róteind úr lausninni hvarfist beint við vetnisatóm, sem bundið er við yfirborðið, ásamt því að taka eina rafeind frá skautinu og myndi þannig vetnissameind, en þessi hvarfgangur er kenndur við Heyrovský [15]:





Mynd 4. Á efstu myndinni er hrein vatnslausn yfir platínu rafskauti. Platínan er lituð grá, súrefnisatóm rauð og vetnisatóm hvít. Á miðmyndinni og þeirri neðstu er búíð að bæta við róteindum í vatnið og rafeindum í rafskautið. Miðmyndin sýnir sameindabyggingu síru vatnslausnarrinnar þar sem auka róteindirnar mynda H_3O^+ jónir (lituð blátt). Virkjunarástand (e. transition state, TS) Heyrovský efnahvarfsins er einnig sýnt (lituð gult). Á miðmyndinni er bæði sýnt ofan á yfirborðið (a) og þvert á yfirborðið (b). Á neðstu myndinni er jákvæð hleðsla vatnsins lituð blá en neikvæð hleðsla rafskautsins er lituð fjólublá. Niðurstöðurnar er fengnar með tölvureikningum [6, 7, 8, 9].

Efnahvörfin hér að ofan eru kennd við þá efnahvörf sem fyrstir lýstu möguleikunum á þessum hvarfleiðum í tengslum við vetnismyndun. Niðurstöðurnar birtu þeir í vísindagreinum á fyrri hluta 20. aldar, en rannsóknir í rafefnafræði voru mjög virkar á nítjándu öld og byrjun þeirrar tuttugustu, eða frá því að fyrsti efnarafalinn var búinn til árið 1839

og þar til sprengihreyfillinn hafði rutt sér til rúms og var orðinn algeng sjón á götum bæja og borga upp úr aldamótunum 1900. Nauðsyn þess að finna orkugjafa, sem leyst getur olíuna af hólmi og krafa um umhverfisvænt eldsneyti hefur gert það að verkum að rafefnafræðin er aftur orðin að virku rannsóknarsviði.

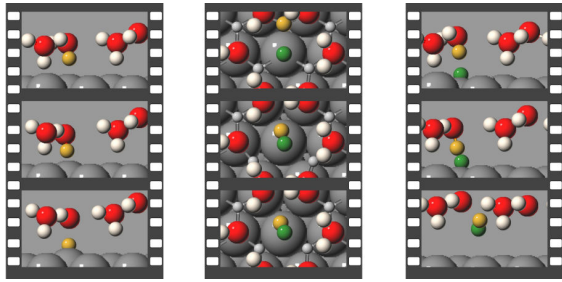
6. Ljósmyndun rafefnahvarfa

Í rauninni hefur ekki enn verið hægt að „ljósmynda“ þessi efnahvörf með mælitækjum nútímans, og því afar erfitt að segja til um hvaða hvarfgangar eru mikilvægir og hverjir ekki, þó svo að reynt hafi verið með óbeinum mælingum að skera úr um það [16]. Smásjárnar ráða enn aðeins við að framkalla skýrar myndir s.s. af uppröðun atóma eða sameinda á yfirborði málms í nánast lofttæmi, en geta ekki greint þau hröðu efnahvörf sem hinn smái vetniskjarni tekur þátt í á skilum vatnslausnarrinnar og rafskautsins. Í því sambandi hafa skammtafræðilegir tölvureikningar einmitt komið að miklu gagni því þeir hafa gert okkur kleift að öðlast skýra mynd af því sem er að gerast á yfirborði rafskauts þegar vetni myndast úr róteindum og rafeindum – nokkurs konar ljósmynd af efnahvarfinu.

Volmer og Heyrovský hvarfgangarnir eru mun erfiðari viðureignar en Tafel hvarfgangurinn þegar lýsa skal ferlinu með tölvureikningum því það hefur ekki verið ljóst hingað til hvernig lýsa eigi auka rafeindum í skautinu, og auka róteindum í lausninni, með slíkum reikningum, en aðferð okkar hefur einmitt gert það kleift [6, 8, 9]. Á mynd 5 má sjá niðurstöður tölvureikninga á efnahvörfum Volmers, Tafels og Heyrovskýs.

Reikningarnir hafa aukið skilning okkar á því hvernig vetni myndast á rafskautum. Þegar vetnisatóm eru farin að þekja rafskautið, samkvæmt hvarfgangi Volmers, taka vetnissameindir að myndast með Tafel hvarfleiðinni á öllum gerðum málmyfirborða, sama hverjar aðstæðurnar eru og sama hvað frumefnið heitir; platína, járn eða gull, þó málmarir séu að sjáfsögðu mis afkastamiklir við að mynda vetni. Niðurstöður reikninganna sýna að Heyrovský hvarfgangurinn kemur hvergi nálægt þegar vetnið er myndað, sem eru frekar óvæntar niðurstöður, en jafnframt mjög áhugaverðar og eiga eflaust eftir að hjálpa til við að þróa nýja efnahvata.

Í stuttu máli sagt er mikilvægast að góður efnahvati fyrir vetnismyndun bindi hvorki vetnið of fast



Mynd 5. „Ljósmyndir“ af Volmer rafefnahvarfi (til vinstri), Tafel hvarfinu (fyrir miðju) og Heyrovský rafefnahvarfi (til hægri). Niðurstöðurnar eru fengnar með tölvureikningum. Róteind (lituð gul) frá vatninu hvarfast beint við rafeind frá platínu rafskautinu með Volmer hvarfi og myndar vetnisatóm sem bundið er við yfirborðið. Vetnisatómið (lituð gult) hvarfast beint við annað vetniatóm (lituð grænt) sem einnig er bundið við Pt yfirborðið og mynda vetnissameind sem fer í gasfasann með Tafel hvarfi. Annar hugsanlegur hvarfgangur er að róteind (lituð gul) hvarfast beint við rafeind frá yfirborðinu og vetnisatóm (lituð grænt) sem bundið er við yfirborðið og mynda þannig vetnissameind með Heyrovský hvarfleidd [6]. Fyrir Volmer og Heyrovský ljósmyndirnar er horft þvert á yfirborðið en beint ofan á yfirborðið fyrir Tafel ljósmyndina.

né of laust, en það eru einmitt eiginleikar platínunnar. Þetta gerir það að verkum að við getum notað tölvurnar kerfisbundið til að leita að efnahvata sem uppfyllir þessi skilyrði í von um að finna hentuga efnasamsetningu úr ódýrum frumefnum.

7. Smíðaverkstæði nanótækninnar

Sá grundvallarskilningur, sem hefur skapast í þessum fræðum síðasta áratuginn eða svo, er nú þegar farinn að opna vísindamönnum nýjar leiðir til að hanna hinn efnahvata fyrir vetnisframleiðslu og í efnarafala.

Nokkrir efnahvatar hafa nýlega verið uppgötvaðir með tölvureikningum og þeir síðan búnir til á tilraunastofu, á smíðaverkstæði nanótækninnar – frumeind fyrir frumeind, og hefur virkni þeirra til vetnismyndunar jafnvel mælst betri en hjá hreinni platínu þó svo að platínuinnihaldið hafi verið minnkað í hvatnum [17]. Svipaða sögu má segja af hinu rafskautinu í tveggja-skauta kerfinu sem breytir vatni í súrefni, róteindir og rafeindir [18]. Þetta er þó ekki endanleg lausn því við viljum losna algjörlega við platínunotkunina. Einnig hafa nokkrir efnahvatar verið hannaðir úr ódýrum og aðgengilegum frumefnum, þar sem reynt hefur verið að læra af því hvernig náttúran hef-

ur þróað sína efnahvata í milljónir ára, en virkni þeirra hefur ekki enn mælst eins góð og hjá platínunni sjálfri [19, 20, 21].

Með áframhaldandi vinnu þúsunda vísindamanna á þessu sviði um allan heim eru miklar líkur til að fundinn verði ódýr en afkastamikill efnahvati innan nokkurra ára sem leyst getur platínuna af hólmi og opnað þar með gáttir í átt að alþjóðlegu vetnishagkerfi. Þess má geta að ýmsir fagmenn á þessu sviði eru vongóðir um að öll grundvallarvandamál (efnahvatar og vetnisgeymsla) verði leyst innan tveggja áratuga eða svo þannig að vetnisbílar verði samkeppnishæfir við venjulega bensínbíla.

Þakkir

Baldur Arnarson, blaðamaður, fær sérstakar þakkir fyrir ýmis góð ráð í sambandi við að koma niðurstöðunum á almennara form. Stefanía Helga Skúladóttir hjá RÚNINNI sá um handritalestur, og fær miklar þakkir fyrir vel unnin störf.

Summary: In the search for a solution to replace fossil fuels and produce alternative, environmentally friendly fuel such as hydrogen, computerbased electronic structure calculations become important. In this review article, theoretical calculations performed by scientists at the University of Iceland and at the Technical University of Denmark (DTU) are explained on a general basis, and therefore should be readable to everyone interested in natural science. In this study, the focus has been to get a detailed picture of how the hydrogen molecule is formed from its elementary particles, protons and electrons, at the interface between a solid electrode and a liquid water phase. The hope is that the new information can help developing and designing new catalysts that can speed the establishment of a hydrogen economy.

Heimildir

- [1] *Hydrogen as a Future Energy Carrier*, eds. A. Zuttel, A. Borgschulte, and L. Schlapback, Wiley-VCH Verlag GmbH Co. KGaA, Weinheim (2008).
- [2] Markovic, N. M. and P. N. Ross. *CATTECH* **4** 110 (2000).
- [3] <http://platinum.matthey.com>
Vielstich W., A. Lamm, and H. Gasteiger. *Handbook of fuel cells: fundamentals, technology and applications*, Wiley, Chichester UK (2003).
- [4] Hellman, A., M. Biczysko, T. Bligaard, C.H. Christensen, D.C. Clary, S. Dahl, R. van Harrevelt, K. Honkala, H. Jónsson, M. Luppi, E.J. Baerends,

- G.J. Kroes, U. Manthe, J.K. Nørskov, R.A. Olsen, J. Rossmeisl, E. Skúlason, C.S. Tautermann, A.J.C. Varandas, and J.K. Vincent. *Journal of Physical Chemistry B* **110** 17719 (2006).
- [5] Skúlason, E., G.S. Karlberg, J. Rossmeisl, T. Bligaard, J. Greeley, H. Jónsson, and J.K. Nørskov. *Physical Chemistry Chemical Physics* **9** 3241 (2007).
- [6] Karlberg, G.S., T.F. Jaramillo, E. Skúlason, J. Rossmeisl, T. Bligaard, and J.K. Nørskov. *Phys. Rev. Lett.* **99** 126101 (2007).
- [7] Rossmeisl, J., E. Skúlason, M.E. Björketun, V. Tripkovic and J.K. Nørskov. *Chemical Physics Letters* **466** 68 (2008).
- [8] Skúlason, E., V. Tripkovic, M. Björketun, S. Gudmundsdóttir, G.S. Karlberg, J. Rossmeisl, T. Bligaard, H. Jónsson, and J.K. Nørskov. Grein í vinnslu (2009).
- [9] Hohenberg, P. and W. Kohn. *Phys. Rev.* **136**, B864 (1964).
- [10] Kohn, W. and L. J. Sham. *Phys. Rev.* **140**, A1133 (1965).
- [11] Kohn, W. Nóbél-fyrirlestur: *Electronic structure of matter – wavefunctions and density functionals*, *Reviews of Modern Physics* **71**, 1253 (1999).
- [12] Volmer, T. and M. Erdely-Gruz. *Z. Phys. Chem. Abt. A* **150**, 203 (1930).
- [13] Tafel, J. *Z. Phys. Chem. Stoechiom. Verwandtschaftsl.* **50**, 641 (1905).
- [14] Heyrovsky, J. *Recl. Trav. Chim. Pays-Bas* **46**, 582 (1927).
- [15] Markovic, N. M., B. N. Grgur, and P. N. Ross. *Journal of Physical Chemistry B* **101**, 5405 (1997).
- [16] Greeley, J., T.F. Jaramillo, J. Bonde, I. Chorkendorff, and J.K. Nørskov. *Nature Materials* **5**, 909 (2006).
- [17] Greeley, J., I.E.L. Stephens, A.S. Bondarenko, T.P. Johansson, H.A. Hansen, T.F. Jaramillo, J. Rossmeisl, I. Chorkendorff and J. K. Nørskov. *Nature Chemistry* **1**, 552 (2009).
- [18] Hinnemann, B., P. Moses, J. Bonde, K. Jørgensen, J. Nielsen, S. Horch, I. Chorkendorff, and J. Nørskov. *Journal of the American Chemical Society* **127**, 5308 (2005).
- [19] Jaramillo, T.F., K. Jørgensen, J. Bonde, J. Nielsen, S. Horch, and I. Chorkendorff. *Science* **317**, 100 (2007).
- [20] Kanan, M. and D. Nocera. *Science* **321**, 1072 (2008).

Um höfundinn: Egill Skúlason lauk meistaranámi í efnafræði við Háskóla Íslands árið 2005 og doktorsnámi í eðlisfræði við Tækniháskóla Danmerkur (DTU) árið 2009. Hann starfar nú sem nýdoktor við Efnafræðistofu Raunvísindastofnunar Háskólans.

Egill Skúlason
Raunvísindastofnun Háskólans
Dunhaga 3
107 Reykjavík
egillsk@hi.is
Móttekin: desember 2009