



Resultaten en bevindingen van project

Hydrogen Storage materials and Reactors: HyStoRe

Dit rapport is onderdeel van de projectencatalogus energie-innovatie. Tussen 2005 en 2011 kregen ruim 1000 innovatieve onderzoeks- en praktijkprojecten subsidie. Ze delen hun resultaten en bevindingen, ter inspiratie voor nieuwe onderzoeks- en productideeën. De subsidies werden verleend door de energie-innovatieprogramma's Energie Onderzoek Subsidie (EOS) en Innovatie Agenda Energie (IAE).

Datum December 2011
Status Definitief

Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN); e.a.
in opdracht van Agentschap NL

Colofon

Projectnaam	Hydrogen Storage materials and Reactors: HyStoRe
Programma	Energie Onderzoek Subsidie
Regeling	Lange Termijn
Projectnummer	EOSLT06024
Contactpersoon	Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN)

*Hoewel dit rapport met de grootst mogelijke zorg is samengesteld kan
Agentschap NL geen enkele aansprakelijkheid aanvaarden voor eventuele fouten.*



Energy research Centre of the Netherlands

Hydrogen Storage materials and Reactors: HyStoRe

**EOSLT 06024, 30 juni 2007 – 30 juni 2011:
Openbaar eindrapport**

W.G. Haije

Verantwoording

Het project “Hydrogen Storage materials and Reactors: HyStoRe” is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie, regeling EOS: Lange Termijn uitgevoerd door Agentschap NL. Het EOS-LT projectnummer is EOSLT 06024, en stond binnen de ECN administratie bekend als project 7.0324. Het werk is uitgevoerd in de periode 30 juni 2007 tot 30 juni 2011 door ECN (penvoerder), de Universiteit Utrecht, de Technische Universiteit Eindhoven en HyGear.

Inhoud

Lijst van tabellen	4
Lijst van figuren	4
Samenvatting	5
1. Inleiding	7
1.1 Achtergrond	7
1.2 Probleemdefinitie en projectdoel	7
2. Resultaten en vooruitzichten	9
2.1 Resultaten	9
2.2 Vooruitzichten	11
2.3 Bijdrage aan de doelstellingen van de EOS regeling	11
2.3.1 Duurzame energiehuishouding	11
2.3.2 Kennisuitwisseling	12

Lijst van tabellen

Tabel 2.1	<i>Energie gebruik voor en na een totale overgang naar PEMFC aangedreven voertuigen</i>	11
-----------	-----------------------------------------------------------------------------------------	----

Lijst van figuren

Figuur 1	<i>Hydrogen storage materials for mobile applications, L. Schlapbach, A. Züttel, Nature, 414 2001 353-358, van rechts naar links: gecomprimeerd, vloeibaar, zwaar hydride LaNi_5H_6, licht hydride Mg_2NiH_4</i>	7
Figuur 2	<i>Foto van de opstelling; links de reactor, rechts het gassenrek.</i>	9
Figuur 3	<i>Capaciteiten van de metingen aan een klein monster. Pas boven de 250°C lijkt het materiaal pas echt goed te gaan werken.</i>	10
Figuur 4	<i>Zeven maanden later is er geen verschil meer tussen opname van stikstof en waterstof. Waarschijnlijk is het door reductie dat de tweede cyclus weer wel opslag laat zien.</i>	10

Samenvatting

Waterstofopslag in vaste stoffen, metalen en keramiek is een *key enabling technology* voor de introductie van een economie die op waterstof als energiedrager is gebaseerd. Dit geldt zowel voor de mobiele als de kleinschalige stationaire brandstofcel aangedreven applicaties. Om verschillende redenen voldoen huidige opties niet aan de eisen die door onder andere het DoE aan waterstofopslag worden gesteld, zoals een hoog waterstofopslagcapaciteit per eenheid volume en gewicht en een geschikte werktemperatuur.

Nieuwe materialen, waaronder alkali-borohydriden en -alanaten, keramische Li-N verbindingen, Multi-component metallische glazen, Mg-Ti-H metastabiele random legeringen, waterstof-clathraten, nano-composieten van nieuwe en bestaande metallische systemen, zoals $Mg_{95}Ni_5$, op koolstof nanobuisjes, om er en paar te noemen, zouden in theorie wel kunnen voldoen. Van sommige is dit ook op zeer kleine schaal onder ideale condities aangetoond.

Het in dit rapport gepresenteerde onderzoek volgt drie lijnen. De eerste lijn onderzoekt de eigenschappen van enkele van de hiervoor genoemde materialen. De tweede lijn is het ontwikkelen, doorrekenen en realiseren van ontwerpen voor opslagsystemen en de derde lijn is ontwikkeling en bouw van een testopstelling waarin onder reële condities grotere hoeveelheden, 100 ml, van opslag materialen kunnen worden beproefd.

Net zo min als het onderzoekers wereldwijd is gelukt om een goed werkend waterstofopslagmateriaal te vinden is ook in dit project de Heilige Graal niet gevonden. De op koolstof gedragen $Mg_{95}Ni_5$ is in dit project getest in op 100 ml schaal en lijkt een goede kandidaat, hoewel de werktemperatuur nog steeds te hoog is. Ook de volumetrische opslagdichtheid is nog te laag maar in samenhang met de ontwikkeling van veel lichtere auto's zou daar toch een toepassing liggen.

De overall conclusie is dat de prioriteit voor de ontwikkeling van vaste waterstofopslagmaterialen moet liggen op het oplossen van een aantal fundamentele problemen, voordat tot opschaling kan worden overgegaan. Dit project heeft met een grote aantal wetenschappelijke publicaties en presentaties substantieel bijgedragen aan het vergroten van de kennis op dit gebied.

1. Inleiding

1.1 Achtergrond

Waterstofopslag in vaste stoffen, metalen en keramiek is een *key enabling technology* voor de introductie van een economie die op waterstof als energiedrager is gebaseerd. Dit geldt zowel voor de mobiele als de kleinschalige stationaire brandstofcel aangedreven applicaties.

De huidige opties, cryogeen waterstof en hoge druk waterstof kosten meer dan 10% van de verbrandingswaarde door hun bereiding om te kunnen voldoen aan de geldende eisen voor volumetrische en gravimetrische energie opslagdichtheid. Opslag in vaste stoffen zouden zonder genoemde verliezen waterstof op kunnen slaan. Bestaande verbindingen zoals $\text{LaNi}_5\text{-H}$, $\text{Mg}_2\text{Ni-H}$ en Mg-H hebben respectievelijk een te lage gravimetrische capaciteit, cyclische instabiliteit of moeten actief gekoeld en verwarmd worden om te functioneren binnen de doelstellingen (Figuur 1). Nieuwe materialen, waaronder alkali borohydriden and alanaten, keramische Li-N verbindingen, Multi-component metallische glazen, Mg-Ti-H metastabiele random legeringen, waterstof clathraten, nano-composieten van nieuwe en bestaande metallische systemen op koolstof nanobuisjes, om er en paar te noemen, zouden in theorie wel kunnen voldoen. Van sommige is dit ook op zeer kleine schaal onder ideale condities aangetoond.



Figuur 1 *Hydrogen storage materials for mobile applications*, L. Schlapbach, A. Züttel, *Nature*, 414 2001 353-358, van rechts naar links: gecomprimeerd, vloeibaar, zwaar hydride LaNi_5H_6 , licht hydride Mg_2NiH_4

1.2 Probleemdefinitie en projectdoel

Voor praktische toepassing is voldoende capaciteit natuurlijk niet genoeg. Kinetiek van ab- en desorptie reacties, mechanische stabiliteit, vergiftiging (chemische stabiliteit), massa- en warmtetransport onder realistische condities in een reactor bed en tenslotte opschalen van de synthese procedure zijn zeker zo belangrijk. Door dit in een zo vroeg mogelijk stadium mee te nemen wordt de kans op het vinden van een echt toepasbaar opslagmateriaal vergroot.

Het projectdoel is hiermee te omschrijven als

Het evalueren en ontwikkelen van nieuwe opslag materialen door een combinatie van materiaalonderzoek en procesontwikkeling.

Nieuwe materialen zullen worden gemodelleerd en getest onder gesimuleerde praktische omstandigheden en via de gevonden uitkomsten kan op iteratieve wijze een verbetering van materiaaleigenschappen, componenten en procesontwerp bewerkstelligd worden.

De samenwerkende partijen zijn:

De Universiteit Utrecht(UU), projectleider Dr Petra de Jongh

De Technische Universiteit Eindhoven (TU/e), projectleider Dr. Bert Hintzen

Hygear, Dr-Ing Michael Walter

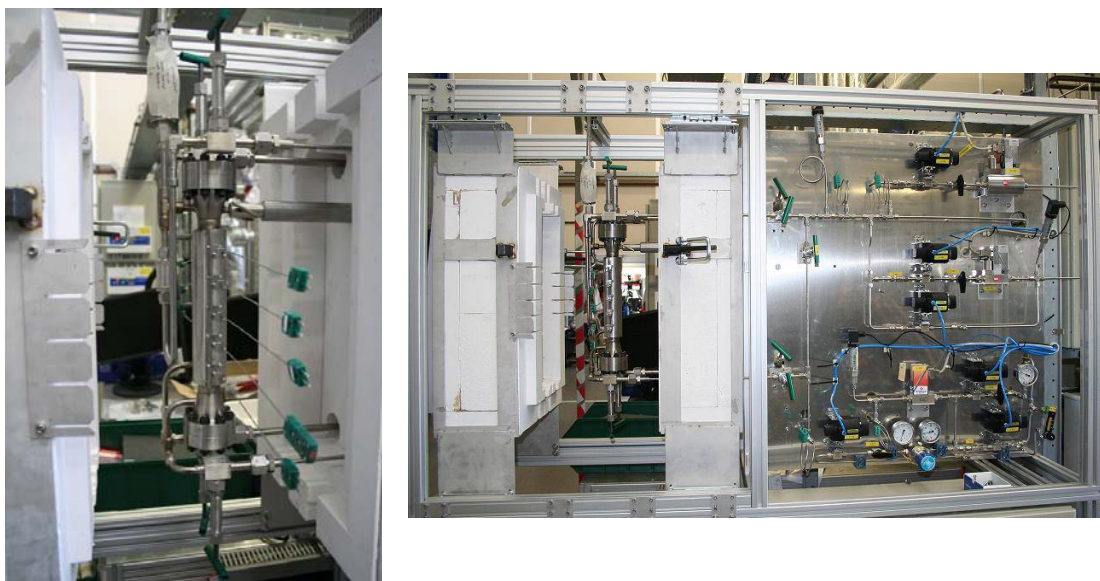
ECN, penvoerder/projectleider Dr Wim Haije



2. Resultaten en vooruitzichten

2.1 Resultaten

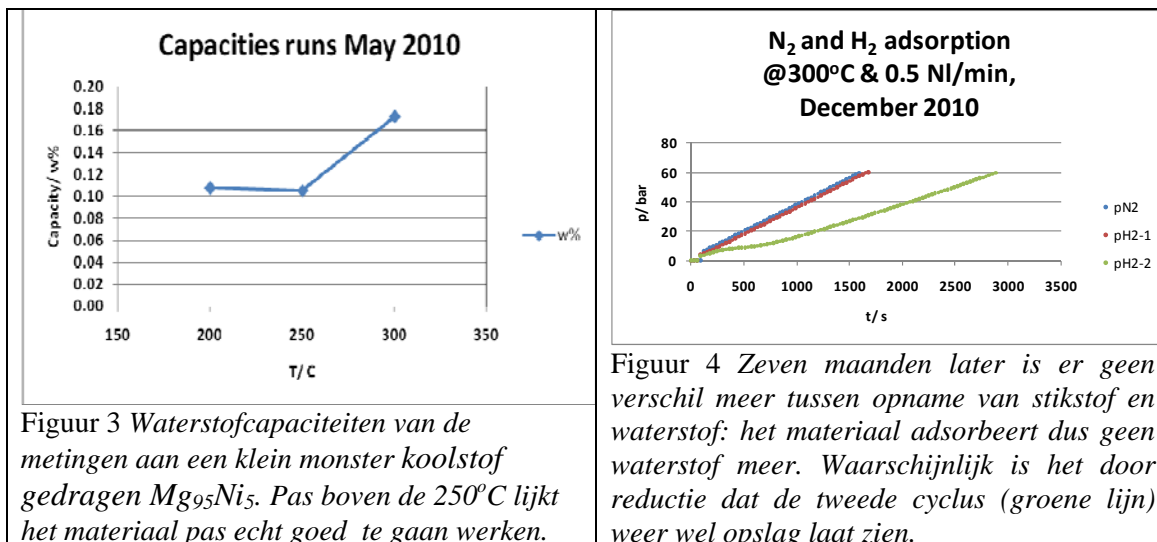
Bij ECN is een waterstofopslagreactor ontwikkeld en gebouwd waarmee onder realistische omstandigheden grotere volumina metaalhydrides kunnen worden gekarakteriseerd (Figuur 2). Het temperatuurverloop door het vaste-stof bed in de reactor kan worden gevolgd, waterstof kan met verschillende drukken, bij verschillende stroomsnelheden, bij verschillende temperaturen en met verschillende verontreinigingen worden toegevoerd. Absorptie- en desorptiekenmerken van waterstof geven dan het opslaggedrag bij zowel tanken als gebruik van het opslagmateriaal.



Figuur 2 Foto van de opstelling; links de reactor, rechts het gasmengstation

De gevraagde parameters zijn over het algemeen de waterstofopslagcapaciteit, de warmte-ontwikkeling, en de snelheid van opname en afgifte.

Binnen het project zijn metingen ter bepaling van het functioneren uitgevoerd aan LaNi_5 type verbindingen (TU/e en Hygear) en qua nieuwe materialen aan Mg:Ni nanodeeltjes op koolstof (Universiteit Utrecht, (Figuur 3, Figuur 4)).



Figuur 3 Waterstofcapaciteiten van de metingen aan een klein monster koolstof gedragen $Mg_{95}Ni_5$. Pas boven de $250^{\circ}C$ lijkt het materiaal pas echt goed te gaan werken.

Figuur 4 Zeven maanden later is er geen verschil meer tussen opname van stikstof en waterstof: het materiaal adsorbeert dus geen waterstof meer. Waarschijnlijk is het door reductie dat de tweede cyclus (groene lijn) weer wel opslag laat zien.

UU heeft uit de variabelen Mg met legeringselement X, de concentratie hiervan, de manier van aanbrengen op de support en de vele typen support uiteindelijk als drager gekozen voor een “high surface area graphite” en voor Ni als katalysator in de verhouding $Mg_{95}Ni_5$. Smelt infiltratie bleek de best manier om tot een zich goed gedragend materiaal te komen. Daarnaast is er een infrastructuur opgezet om grotere hoeveelheden te maken die uiteindelijk bij ECN zijn gemeten. Hierbij is de enorme gevoeligheid voor vocht en zuurstof een zeer belangrijke hinderende eigenschap van deze materialen, zoals blijkt uit Figuur 4.

Binnen de TU/e is gekeken naar de waterstof opslageigenschappen van verschillende materiaalklassen ($LaNi_5$ -legeringen, Mg-legeringen, Li-nitride gebaseerde verbindingen) waarbij de invloed van chemische substituties en processing is onderzocht. Van veelbelovende materialen zijn grotere batches gemaakt voor testen in de ECN reactor.

Chemische substituties in $LaNi_5$ leiden tot meer geschikte materialen als Ni deels door Al wordt vervangen. Bij Mg gebaseerde systemen blijkt alleen Sc stabiele legeringen te vormen. Voorts treedt onder invloed van cyclisch hydreren/dehydreren fasenontmenging op, hetgeen een probleem is voor de levensduur. Thermodynamisch gezien verandert er niet veel zodat voor mobiele toepassingen nog geen kandidaat is gevonden in deze klasse. Het legeringsproces is lastig met conventionele middelen, smelten en vergruizen lijkt het beste. In de klasse van Li-nitride keramiek is wel meer inzicht ontstaan maar er moet nog veel gedaan worden aan het voorkomen van ontmenging, cycleerbaarheid en synthese voordat er iets over de toepasbaarheid kan worden gezegd. Testen op grote schaal van deze materialen was in dit stadium van het onderzoek nog niet zinvol.

HyGear heeft haalbaarheidsstudies gedaan naar het gebruik van waterstofopslag in vaste stoffen (legeringen). Daartoe zijn er simulatietools ontwikkeld en ontwerpen gemaakt voor zowel een systeem voor mobiele als voor stationaire toepassingen. Voor stationaire toepassingen is heel goed een systeem te ontwerpen dat vraag en aanbod van waterstof kan regelen. Dit systeem is zeer gevoelig voor de deeltjesgrootte in het opslagbed. Het verbrossen onder invloed van waterstof moet dus worden vermeden. Voor mobiele systemen bleek dat gewicht van conventioneel opslagmateriaal ($LaNi_5$) en de tank wel heel substantieel zijn en voorlopig de invoering hiervan als tank in de weg staat. Het moet dus echt van de veel lichtere Mg-achtige of de Li-Nitride materialen komen, maar voordat praktische toepassing van deze materialen mogelijk is, zullen er nog enige hindernissen genomen moeten worden.

Hygear heeft een opslagsysteem gebouwd en getest. Warmte-uitwisseling bij laden en ontladen is cruciaal. Na een aantal cycli ging de prestatie achteruit, vermoedelijk door een combinatie

van verbrossing (verhoging warmteweerstand) en vergiftiging (verlaging beladingsgraad en kinetiek).

2.2 Vooruitzichten

Net zo min als het onderzoekers wereldwijd is gelukt om een goed werkend waterstofopslagmateriaal te vinden is ook in dit project de Heilige Graal niet gevonden. De op koolstof gedragen $Mg_{95}Ni_5$ is in dit project getest in op 100 ml schaal en lijkt een goede kandidaat, hoewel de werktemperatuur nog steeds te hoog is. Ook de volumetrische opslagdichtheid is nog te laag maar in samenhang met de ontwikkeling van veel lichtere auto's zou daar toch een toepassing liggen.

Er lopen nog steeds activiteiten op het gebied van het veranderen van de thermodynamica van Mg door te spelen met opsluiting waardoor het mechanisch-elastisch gedrag wordt beïnvloed. Verder zijn er nog materialen als quasi-kristallen en lichte metallische glazen die op het gebied van mechanische stabiliteit superieur zouden kunnen zijn, maar dit moet nog bewezen worden. Zoals blijkt uit de uiteindelijke individuele bijdragen van de consortiumpartners is het vinden van het juiste materiaal om echt een stap te maken weerbarstiger dan gedacht bij aanvang. Daarom ook zijn er nog steeds projecten binnen programma's als ACTS duurzaam waterstof ingediend en gehonoreerd om, ook op de materialen bestudeerd in dit project, nog opties te verkennen. Dit project heeft wel flink bijgedragen aan het vergroten van de kennis op dit gebied, getuige het grote aantal wetenschappelijke publicaties en presentaties.

Voor de opslag van waterstof in mobiele toepassingen zijn tanks voor hoge-drukopslag tot 750 bar al gecertificeerd in de VS, maar het volume van de tanks is nog steeds een probleem. Een nieuwe ster aan het firmament is het concept Solar Fuels, waarbij CO_2 met duurzaam waterstof kan worden gekoppeld en tot synthetische brandstoffen kan worden gevormd. Hierbij blijft de bestaande infrastructuur in stand. Tussen de regels door lezend lijkt de moeizame zoektocht naar geschikte vaste opslagmaterialen voor waterstof oorzaak van deze verlegging van het onderzoeksveld naar opslag in de vorm van koolwaterstoffen.

2.3 Bijdrage aan de doelstellingen van de EOS regeling

2.3.1 Duurzame energiehuishouding

De uitkomsten van het onderzoek zijn van dien aard dat de vooraf verwachte bijdragen aan de duurzame welliswaar nog steeds van kracht zijn, grosso modo alle aspecten van de duurzame waterstofeconomie, o.a. geen verkeersemisies door verbranding van waterstof in een brandstofcel (Tabel 2.1), schone mini of micro WKK voor stationaire toepassingen met hoger rendement, etc.

Tabel 2.1 *Energie gebruik voor en na een totale overgang naar PEMFC aangedreven voertuigen*

Voertuig type	Energie gebruik 2002 [PJ/j]	Energie gebruikna 100% overgang op PEMFC [PJ/j]
Gezinsauto op gasoline	185	75
Gezinsauto op LPG	20	8
Gezinsauto op diesel	75	40
Trucks and bussen	200	106
Totaal	480	230

Deze getallen (Tabel 2.1) zijn in principe nog steeds geldig. Het is echter op dit moment onduidelijk of PEMFC op termijn nog steeds de voorkeursaandrijving is. In ieder geval is de

horde naar een toepasbaar opslag medium nog niet overbrugd. Vandaar de slotopmerking bij paragraaf 2.2 over de opkomst van de synthetische fuels.

2.3.2 Kennisuitwisseling

Presentaties

1. Haije W.G. & Westerwaal R.J., Energy research Centre of the Netherlands (ECN), Meeting No.8 of the IEA Advanced Fuel Cells Annex XX: Fuel Cells for transport, 16-17 December, Rome, Italy. Task B (On board Hydrogen storage systems)
2. Westerwaal R.J., Energy research Centre of the Netherlands (ECN), College Waterstoftechnologie, Scheikundige Technologie OGO (Ontwerp Gericht Onderwijs) Sustainable Energy, TU/Eindhoven, Nederland, Waterstofopslag: toepassingen, status, en ontwikkelingen.
3. Haije, W.G.: Energy research Centre of the Netherlands (ECN), Results are partly used in adjacent activities, ranging from hydrogen membrane development to Classes given at the TUDelft on Sustainable Process design.
4. Haije, W.G. van de Oosterkamp, P, Energy research Centre of the Netherlands (ECN), On board hydrogen storage systems, IEA Advanced Fuel cells Annex XX Fuel Cells for transport, meeting 7, April 16&17 at H2Logic, Denmark
5. Westerwaal, R.J., Haije W.G., Energy research Centre of the Netherlands (ECN), From fundamental research towards a down scaled realistic packed bed storage reactor: *HyStoRe*, Physics@FOM, Veldhoven, 20 and 21 January 2009, Veldhoven, The Netherlands
6. R. Bogerd, P. Adelhelm, S. S. Tatiparti, K.P. de Jong, P.E. de Jongh, Carbon-supported Mg(Ni) Nanocrystallites for Hydrogen Storage, Europacat, Salamanca, September 2009 (oral)
7. Sankara Tatiparti, René Bogerd, Krijn de Jong, Petra de Jongh, Carbon Supported Nanocrystalline Mg_xNi_{1-x} for Hydrogen Storage, MRS Fall Meeting, Boston, December 2009 (oral)
8. P.H.L. Notten, “2nd international symposium on hydrogen and energy”, Braunwald, Switzerland, 21-25 January (2008).
9. S.X. Tao. W.P. Kalisvaart, P.H.L. Notten, R.A. van Santen and A.P.J. Jansen, “DFT studies of hydrogen storage in magnesium based alloy“, Chingqing, (2008).
10. P.H.L. Notten (invited), “High energy density materials for hydrogen and electricity storage” Lecturer Debije Spring school, Callantsoog (Netherlands), April (2008).
11. H.T. Hintzen (invited), “Nitride-based materials: from structural to functional properties”, Max-Planck Institut Dresden, 15 April 2008 (Germany).
12. P. Vermeulen and P.H.L. Notten, “In situ XRD study of $Mg_yTi_{(1-y)}$ thin films”, Rykjavik (Island) 2008.
13. H.T. Hintzen (invited), “Nitride-based materials: from structural to functional properties and applications”, 4th International Workshop on Spinel Nitrides and Related Materials, 31st August – 5th September 2008, Rudesheim (Germany).
14. P.H.L. Notten (invited), “Fluorite-structured Mg-based hydrogen storage materials: a challenging route towards the future hydrogen economy”, Zhenjiang (China) October 2008.
15. H.T. Hintzen (invited), “Nitride-based materials: from structural to functional properties”, Technical University Aachen, 14 november 2008 (Germany).
16. A. Ledovskikh, D. Danilov, P. Vermeulen and P. Notten, "Electrochemical Modeling of Hydrogen Storage in Hydride-forming Electrodes", Electrochemical Society Meeting (Abstract 340), Vienna 2009.
17. H.T. Hintzen (invited), “Nitride-based materials: from structural to functional properties”, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, 15 May 2009 (China).
18. H.T. Hintzen (invited), “Nitride-based materials: progress and prospects”, 3rd International Symposium on Sialons and Non-Oxides, June 2010, Cappadocia, (Turkey).

19. H.T. Hintzen (invited), "Nitride-based materials: from structural to functional properties", Koc University, Istanbul, June 2010 (Turkey).
20. J.K. Bendyna, M.F.H. Vliex, P. H.L. Notten and H.T. Hintzen, "Revised $\text{LiNH}_2\text{:MgH}_2$ hydrogen storage system", E-MRS 2010 Fall Meeting, Warsaw, September 2010 (Poland).
21. H.T. Hintzen (invited), "Nitride-based materials: from structural to functional properties", University of California Santa Barbara 18-10-2010 (USA).
22. K. Kiraz and P.H.L. Notten, "Optical Monitoring of Hydrogen Storage in Mg-Alloy Thin Films", European Graduate School, Nyborg, December 2010 (Denmark).
23. J.K. Bendyna, M.F.H. Vliex, P. H.L. Notten and H.T. Hintzen, "New hydrogen storage materials based on modified nitrides", ACTS symposium Dutch Organisation for Scientific Research (NWO), Lunteren, January 2011 (The Netherlands).
24. T. Gobichettipalayam Manivasagam and P.H.L. Notten, "Multicomponent Mg based Hydrogen storage materials", Advances in Dutch Hydrogen and Fuel Cell Research Symposium, Eindhoven, March 2011 (The Netherlands).
25. J.K. Bendyna, M.F.H. Vliex, P. H.L. Notten and H.T. Hintzen, "Li-N-H hydrogen storage system revisited", Advances in Dutch Hydrogen and Fuel Cell Research Symposium, Eindhoven, March 2011 (The Netherlands).
26. T. Gobichettipalayam Manivasagam, K. Kiraz and P.H.L. Notten, "Multicomponent Mg based Hydrogen storage materials", ICMAT 2011, Singapore, June 2011.
27. J.K. Bendyna, M.F.H. Vliex, P. H.L. Notten and H.T. Hintzen (invited), "The properties and potential applications of nitrides as hydrogen storage and luminescence materials", EMPA Dübendorf, July 2011 (Switzerland).
28. P.H.L. Notten, A.V. Ledovskikh and D. Danilov (invited Keynote address), "Modelling of hydride-forming materials characteristics", World carbon, Dalian, November 2011.

Publicaties (gerefereerd)

1. R. J. Westerwaal, R. G. Nyqvist, and W. G. Haije, Testing facility for hydrogen storage materials designed to simulate application based conditions, Review of Scientific Instruments 82, 045107 (2011)
2. Bogerd, R., P. Adelhelm, J.H. Meeldijk, K.P. de Jong and P.E. de Jongh, The structural characterization and H_2 sorption properties of carbon-supported $\text{Mg}_{1-x}\text{Ni}_x$ nanocrystallites, Nanotechnology 20 (2009) 204019.
3. W.P. Kalisvaart and P.H.L. Notten, "Mechanical alloying and electrochemical hydrogen storage of Mg-based systems", Journal of Materials Research, 23 (2008) 2179-2187.
4. B.R. Pauw, P. Kalisvaart, S.X. Tao, M.C.M. Koper, A.P.J. Jansen and P.H.L. Notten, "Cubic MgH_2 stabilised by alloying with transition metals: a density functional theory study", Acta Materialia, 56 (2008) 2948-2954.
5. P.C.M.M. Magusin, W.P. Kalisvaart, P.H.L. Notten, R.A. van Santen, "Hydrogen sites and dynamics in light-weight hydrogen-storage material magnesium-scandium hydride investigated with ^1H and ^2H NMR", Chemical Physical Letters., 456 (2008) 55-58.
6. W.P. Kalisvaart, M. Latroche, F. Cuevas and P.H.L. Notten, "In situ neutron diffraction study on Pd-doped $\text{Mg}_{0.65}\text{Sc}_{0.35}$ electrode material", Journal of Solid State Chemistry, 181 (2008) 1141-1148.
7. A. Ledovskikh, D. Danilov and P.H.L. Notten, "Equilibrium Kinetics of Chemisorption Processes", ChemPhysChem, 9 (2008) 1040-1045.
8. P. Vermeulen, H.J. Wondergem, P.C.J. Graat, D.M. Borsa, H. Schreuders, B. Dam, R. Griessen and P.H.L. Notten, "In situ electrochemical XRD study of (de)hydrogenation of $\text{Mg}_y\text{Ti}_{100-y}$ thin films", Journal of Materials Chemistry, 18 (2008) 3680-3687.
9. P. Vermeulen, P.C.J. Graat, H.J. Wondergem and P.H.L. Notten, "Crystal structures of $\text{Mg}_y\text{Ti}_{100-y}$ thin film alloys in the as-deposited and hydrogenated state", International Journal of Hydrogen Energy, 18 (2008) 3680-3687.
10. D. Moser, D. Bull, T. Sato, D. Noreus, D. Kyoi, T. Sakai, N. Kitamura, H. Yusa, T.

- Taniguchi, W.P. Kalisvaart and P.H.L. Notten, "Structure and stability of high pressure synthesized Mg-TM hydrides (TM = Ti, Zr, Hf, V, Nb and Ta) as possible new hydrogen rich hydrides for hydrogen storage", *Journal of Materials Chemistry*, DOI: 10.1039/b911263d (2009).
11. S. Srinivasan, P.C.M.M. Magusin, W.P. Kalisvaart, P.H.L. Notten, F. Cuevas, M. Latroche and R.A. van Santen, "Nanostructure of magnesium-titanium deuteride studied with X-ray diffraction, neutron diffraction and magic-angle-spinning 2H NMR spectroscopy", *Physical Review B*, 81 (2010) 054107.
 12. P. Vermeulen, A. Ledovskikh, D. Danilov and P.H.L. Notten, "Thermodynamics and kinetics of the thin film Magnesium-Hydrogen system", *Acta Materialia*, 57 (2009) 4967–4973.
 13. A. Ledovskikh, D. Danilov, P. Vermeulen and P.H.L. Notten, "Electrochemical modeling of hydrogen storage in hydride-forming electrodes", *Electrochimica Acta*, (2009), doi:10.1016/j.electacta.2009.06.036
 14. R. Bosch, P.H.L. Notten and H.T. Hintzen, "Productie van waterstof uit water met zonlicht en fotokatalytische oxynitride materialen", *KGK*, 30 (2009).
 15. P.H.L. Notten and M. Latroche, "Metal Hydrides" (book contribution, Editors: J. Garche, C. Dyer, P. Moseley, Z. Ogumi, D. Rand and B. Scrosati, *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, 4 (2009) 502-521, Elsevier. ISBN 9780444520937, (2009).
 16. S.X. Tao, P.H.L. Notten, R.A. van Santen and A.P.J. Jansen, "Density Functional theory studies of the hydrogenation properties of Mg and Ti", *Physical Review*, B 79 (2009) 144121.
 17. A. Ledovskikh, D. Danilov, P. Vermeulen and P.H.L. Notten, "Modeling of Electrochemical Hydrogen Storage in Metal Hydride Electrodes", *Journal of the Electrochemical Society*, 157 (2010) A861-A869.
 18. S. Srinivasan, P.C.M.M. Magusin, R.A. van Santen, P.H.L. Notten, H. Schreuders and B. Dam, "Siting and mobility of deuterium absorbed in co-sputtered Mg_{0.65}Ti_{0.35}: A MAS 2H NMR study", *Journal of Physical Chemistry*, in press (2010).
 19. S.X. Tao, P.H.L. Notten, R.A. van Santen and A.P.J. Jansen, "DFT studies of hydrogenation properties of Mg_{0.75}Ti_{0.25}", *Journal of Alloys and Compounds*, 509 (2011) 210-216.
 20. S.X. Tao, P.H.L. Notten, R.A. van Santen and A.P.J. Jansen, "Fluorite transition metal hydride induced destabilization of the MgH₂ system in MgH₂/TMH₂ multilayers (TM=Sc, Ti, V, Cr, Y, Zr, Nb, La, Hf)", *Physical Review B*, 82 (2010) 125448.
 21. M.F.H. Vliex en H.T. Hintzen, "Meer waterstof binden met mechanisch geweld", *LabVision*, 11 (2010) 26.
 22. S.X. Tao, P.H.L. Notten, R.A. van Santen and A.P.J. Jansen, "First principles prediction of potential hydrogen storage materials: Nano-sized Ti(core)/Mg (shell) hydrides", *Physical Review B*, 83 (2011) 195403.
 23. S.X. Tao, P.H.L. Notten, R.A. van Santen and A.P.J. Jansen, "Dehydrogenation properties of epitaxial (100) MgH₂/TiH₂ multi-layers: a DFT study", *Computational Materials Science*, 50 (2011) 2960-2966.
 24. A. Ledovskikh, D. Danilov, M. Vliex and P.H.L. Notten, "Thermodynamics of hydrogen storage. Extended Lattice Gas Model", *Langmuir*, in preparation (2011).
 25. A. Ledovskikh, D. Danilov, M. Vliex and P.H.L. Notten, "Non-equilibrium kinetics of gas-phase hydrogen storage", *Physical Review B*, in preparation.
 26. M.F.H. Vliex and P.H.L. Notten and H.T. Hintzen, "The influence of Ce and Al substitution on the hydrogen storage properties of LaNi₅ alloys" (in preparation).
 27. M.F.H. Vliex, T. Gobichettipalayam Manivasagam, P.H.L. Notten and H.T. Hintzen, "A comparison of electrochemical and gas-phase hydrogen storage in Mg_{0.65}Sc_{0.35} alloys" (in preparation).

28. J. Bendyna, M.F.H. Vliex and P.H.L. Notten and H.T. Hintzen, "The influence of processing parameters on the hydrogen storage properties of Li-nitride based materials" (in preparation).
29. J. Bendyna, M.F.H. Vliex and P.H.L. Notten and H.T. Hintzen, "The influence of chemical substitutions on the hydrogen storage properties of Li-nitride based materials" (in preparation).