

REPORT



Im Auftrag von:



DIE ÖKO-WASSERSTOFF-TANKSTELLE DER ZUKUNFT

***Demonstration der gekoppelten elektrolytischen
Erzeugung und Nutzung von Wasserstoff, Sauerstoff und
Wärme aus Öko-Strom am HyCentA***

**M. BEERMANN, G. JUNGMEIER, P. ENZINGER, M. KLELL,
G. BRANDSTÄTTER, M. SATORY, W. BÖHME, E. WEISSENSTEINER,
M. MAYER, F. LEICHTFRIED, J. ZIEGERHOFER**

INNOVATION aus TRADITION



BIOVEST CONSULTING

WEIZER natur energie®
Die Energie für Umweltbewusste.
www.weizernaturenergie.at

RESOURCES INSTITUT FÜR WASSER, ENERGIE UND NACHHALTIGKEIT

ELISABETHSTRASSE 5, A-8010 GRAZ
TEL. (0316) 876/1338
FAX (0316) 876/1320

Gefördert von:
BMVIT / FFG
Projekt Nr.: 812954
Land Steiermark A3
Projekt Nr.: 22T2-2007-2
OMV AG

Projekt Nr: RES.04-07.GF.011-01/04
Bericht Nr.: ENG-B-07/10
Endbericht 174 Seiten (inkl. 5 Anhänge)

DIE ÖKO-WASSERSTOFF-TANKSTELLE DER ZUKUNFT

**Demonstration der gekoppelten elektrolytischen
Erzeugung und Nutzung von Wasserstoff, Sauerstoff und
Wärme aus Öko-Strom am HyCentA**

M. BEERMANN, G. JUNGMEIER, P. ENZINGER, M. KLELL,
G. BRANDSTÄTTER, M. SATORY, W. BÖHME, E. WEISSENSTEINER,
M. MAYER, F. LEICHTFRIED, J. ZIEGERHOFER

APRIL 2011

Projekt Nr.: RES.04-07.GF.011-01/04
Bericht Nr.: ENG-B-07/10
Freigegeben: Graz, am 30. April 2011





R. Padinger
Institutsleiter



M. Beermann
Projektleiter

Projektkonsortium

**JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH
RESOURCES – Institut für Wasser, Energie und Nachhaltigkeit
Energieforschung**

DI. Martin Beermann
Peter Enzinger
Dr. Gerfried Jungmeier
Ing. Anton Wenzel

Elisabethstraße 5
8010 Graz

martin.beermann@joanneum.at
www.joanneum.at



HyCentA Research GmbH

Dr. Manfred Klell
DI. Stefan Brandstätter
DI. Markus Satory

Inffeldgasse 15
8010 Graz
Tel. +43/316/873/9501
office@hycenta.at
www.hycenta.at



OMV Refining & Marketing GmbH

Dr. Walter Böhme
Gerda Pulletz

Trabrennstraße 6-8
1020 Wien
Tel. +43/1/40440-0
gerda.pulletz@omv.at
www.omv.at



Linde Gas GmbH

Ing. Erich Weissensteiner
DI. Markus Mayer

Waschenbergerstraße 13
4651 Stadl-Paura
Tel. +43/5/4273-0
erich.weissensteiner@at.linde-gas.com
www.linde-gas.at



Biovest Consulting GmbH

BIOVEST CONSULTING

Dr. Franz Leichtfried

Dr.-Bruno-Klein-Strasse 2

3423 Woerdern

Tel. +43/2242/31006

franz.leichtfried@biovest.at

Weizer Naturenergie GmbH

Ing. Johann Ziegerhofer

Siegfried-Esterl-Gasse 8

8160 Weiz

Tel. +43/03172 /44410

johann.ziegerhofer@e-steiermark.at

www.weizernaturenergie.at

WEIZER natur energie®

Die Energie für Umweltbewusste.

www.weizernaturenergie.at

Die Finanzierung dieses Projektes erfolgte über Mittel der Industriepartner

Linde-Gas GmbH, Biovest Consulting GmbH und Weizer Naturenergie GmbH

sowie der folgenden Fördergeber:

BMVIT

im Rahmen der „Österreichischen Wasserstoff- und
Brennstoffzelleninitiative“ im A3-Programm,
2. Ausschreibung für Strategische Leitprojekte



Land Steiermark

Abteilung A3 Wissenschaft und Forschung



OMV Refining & Marketing GmbH



Inhaltsverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG	9
SUMMARY.....	11
1 EINLEITUNG	13
1.1 MOTIVATION.....	13
1.2 ZIELSETZUNG	13
1.3 AUFBAU DES BERICHTS	14
2 TECHNOLOGIEN FÜR ÖKO-WASSERSTOFF-TANKSTELLEN.....	15
2.1 ÜBERSICHT ÖKO-WASSERSTOFF-TECHNOLOGIEN	15
2.2 ÖKO-WASSERSTOFF IM TRANSPORTSEKTOR.....	16
2.3 ÖKO-WASSERSTOFF AUS DER ELEKTROLYSE.....	16
2.3.1 Elektrolyse-Technologien	17
2.3.2 Erzeugung von Öko-Strom	20
2.3.2.1 Erzeugung und Verbrauch in Österreich.....	20
2.3.2.2 Ausbaupotentiale	21
2.3.3 Gekoppelte Erzeugung von Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme.....	23
2.3.4 Nutzungsmöglichkeiten von Sauerstoff und Wärme	24
2.4 ANFORDERUNGEN AN ÖKO-WASSERSTOFF-TANKSTELLEN	25
2.4.1 Richtlinien, Normen und Standards.....	25
2.4.2 Erkenntnisse aus Demonstrationsprojekten	28
2.5 DERZEITIGE TANKSTELLENINFRASTRUKTUR.....	29
3 EERRICHTUNG DER DEMONSTRATIONSANLAGE AM HYCENTA.....	31
3.1 BESTEHENDE INFRASTRUKTUR AM HYCENTA	31
3.2 AUSLEGUNG DER ANLAGENKOMPONENTEN	32
3.2.1 Übersicht der Komponenten	32
3.2.2 Anlagenmodul „Elektrolyse“	33
3.2.3 Anlagenmodul „Öko-Wasserstoff“	35
3.2.4 Anlagenmodul „Sauerstoff“	36
3.2.5 Anlagenmodul „Wärme“	38
3.3 MESSKONZEPT	39
3.3.1 Systemgrenzen	39
3.3.2 Festlegung Wirkungs- und Nutzungsgrad	40
3.3.2.1 Wirkungsgrad des Zellstapels	41
3.3.2.2 Wirkungsgrad des Elektrolysegeräts	43
3.3.2.3 Wirkungsgrad der Öko-Wasserstoff-Tankstelle	44
3.3.2.4 Wirkungsgrad der Öko-Wasserstoff-Tankstelle mit einer Photovoltaikanlage	45
3.3.3 Messparameter, -stellen und –instrumente	46
3.3.4 Messdatenerfassung	48
3.4 EERRICHTUNG UND INBETRIEBNAHME.....	50
3.4.1 Öko-Strom-Versorgung	50
3.4.2 Wasserdeionisierung	50
3.4.3 Anlagenmodul „Elektrolyse“	51
3.4.4 Anlagenmodul „Öko-Wasserstoff“	51
3.4.5 Anlagenmodul „Sauerstoff“	52

3.4.6	Anlagenmodul „Wärme“	53
3.4.7	Sicherheitsmanagement	53
3.5	<i>INBETRIEBNAHME DER GESAMTANLAGE</i>	54
4	ERGEBNISSE AUS DEM BETRIEB DER DEMONSTRATIONSANLAGE	55
4.1	<i>BETRIEBSBEDINGUNGEN DES ELEKTROLYSEURS</i>	55
4.2	<i>WIRKUNGS- UND NUTZUNGSGRAD</i>	56
4.2.1	Statischer Voll- und Teillastbetrieb	56
4.2.2	Intermittierender Betrieb	60
4.3	<i>WASSERBILANZ</i>	62
4.4	<i>TECHNISCHE OPTIMIERUNGSPOTENTIALE</i>	62
5	DRIVING EVENT MIT WASSERSTOFF-FAHRZEUGEN AM HYCENTA	64
5.1	<i>VERANSTALTUNGSRAHMEN</i>	64
5.2	<i>DEMONSTRATION DER ÖKO-WASSERSTOFF-TANKSTELLE MIT WASSERSTOFF-FAHRZEUGEN</i>	65
5.3	<i>WASSERSTOFF-FAHRZEUGE BEIM DRIVING EVENT</i>	66
5.3.1	Mercedes E200 NGT „HYCAR“	66
5.3.2	Mitsubishi Lancer Evolution IX	67
6	MODELLIERUNG UND ANALYSE EINER ÖKO-WASSERSTOFF-TANKSTELLENINFRASTRUKTUR IN ÖSTERREICH	68
6.1	<i>ERFAHRUNGEN AUS DEM TANKSTELLEN-INFRASTRUKTURAUFBAU ALTERNATIVER TREIBSTOFFE</i> 68	
6.1.1	Entwicklung von CNG und LPG in Österreich, Deutschland und Italien	68
6.1.2	Erfolgsfaktoren und Hindernisse	71
6.1.2.1	<i>Treibstoffverteilung</i>	71
6.1.2.2	<i>Tankstellen</i>	71
6.1.2.3	<i>Fahrzeuge</i>	72
6.1.2.4	<i>Kosten</i>	72
6.1.2.5	<i>Politikmaßnahmen</i>	72
6.1.3	Anforderungen an Tankstelleninfrastruktur alternativer Treibstoffe	73
6.2	<i>WASSERSTOFF-FAHRZEUGE</i>	73
6.3	<i>MÖGLICHE STANDORTE FÜR ÖKO-WASSERSTOFF-TANKSTELLEN IN ÖSTERREICH</i>	74
6.4	<i>FESTLEGUNG VON STANDARD-ÖKO-WASSERSTOFF-TANKSTELLEN</i>	76
6.4.1	Darstellung der Auslegungsvarianten	76
6.4.2	Anlagenkonzept	77
6.4.3	Anlagenkomponenten	78
6.5	<i>ÖKONOMISCHE ANALYSE</i>	81
6.5.1	Methodik	81
6.5.2	Kapitalkosten	81
6.5.3	Betriebskosten	82
6.5.4	Erlöse	83
6.5.5	Kosten der Wasserstofferzeugung	84
6.6	<i>ÖKOLOGISCHE ANALYSE</i>	85
6.6.1	Methodik	85
6.6.2	Untersuchte Systeme	87
6.6.3	Treibhausgasemissionen	88
6.6.4	Kumulierter Primärenergiebedarf	89
6.6.5	Versauerungspotential und Ozonbildungspotential	91
6.6.6	Zusammenfassender Vergleich	93

6.7 MODELLIERUNG EINER ÖKO-WASSERSTOFF-TANKSTELLEN-INFRASTRUKTUR IN ÖSTERREICH....	94
6.7.1 Entwicklungsszenarien	94
6.7.2 Ergebnisse für den Aufbau einer Tankstellen-Infrastruktur	95
7 LITERATURVERZEICHNIS	100
8 ANHANG	103
8.1 ANFORDERUNGEN AN WASSERSTOFF-TANKSTELLEN.....	103
8.2 DATENBLATT ELEKTROLYSEUR HOGEN S 40.....	116
8.3 PROGRAMM DRIVING EVENT	119
8.4 PRÄSENTATIONEN ZUM DRIVING EVENT	124
8.5 PRÄSENTATIONEN HYCENTA ZU FAHRZEUGEN MERCEDES UND MITSUBISHI.....	166

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Übersicht über die Möglichkeiten zur Erzeugung von Wasserstoff mit erneuerbarer Energie („Öko-Wasserstoff“).....	15
Abbildung 2-2: Elemente für Energiesysteme mit Öko-Wasserstoff	16
Abbildung 2-3: Prinzip der elektrolytischen Wasserspaltung (nach Stolten 2010).....	17
Abbildung 2-4: PEM (Proton Exchange Membrane)–Elektrolyse (Leichtfried 2010)	18
Abbildung 2-5: Temperaturabhängigkeit der Energieanteile bei der Elektrolyse (nach Stolten 2010) .	19
Abbildung 2-6: Strom aus Erneuerbaren in Österreich – Produktion und Ausbaupotentiale.....	23
Abbildung 2-7: Schematische Darstellung der Stromdichte-Zellspannungs-Kennlinie von alkalischen Elektrolyseuren (Winter, 1986)	24
Abbildung 2-8: Elektrolytische Erzeugung von Öko-Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme	24
Abbildung 2-9: Energieflossbild Österreich (Primärenergie bis Endenergie) 2009 (Statistik Austria 2011).....	25
Abbildung 2-10 : Kennzeichnung für explosionsgefährdete Bereiche	28
Abbildung 2-11: Wasserstoff-Tankstellen in Europa 2009 (www.h2-stations.org, LBST 2010).....	30
Abbildung 2-12: Wasserstoff-Tankstellen in USA 2009 (www.h2-stations.org, LBST 2010)	30
Abbildung 3-1: Hydrogen Center Austria (HyCentA).....	31
Abbildung 3-2: Lageplan der bestehenden Infrastruktur am HyCentA	31
Abbildung 3-3: Die 4 Anlagenmodule der „Öko-Wasserstoff-Tankstelle der Zukunft“	32
Abbildung 3-4: Integration der Anlagenmodule in die Infrastruktur des HyCentA.....	33
Abbildung 3-5: Vorder- und Rückansicht des Elektrolyseurs HOGEN S40	34
Abbildung 3-6: Schema Anlagenmodul „Elektrolyse“ (Leichtfried 2010).....	35
Abbildung 3-7: Schema Anlagenmodul „Öko-Wasserstoff“.....	36
Abbildung 3-8: Schema Anlagenmodul „Sauerstoff“	38
Abbildung 3-9: Schema Anlagenmodul „Wärme“	39
Abbildung 3-10: Betrachtungsgrenzen für Wirkungsgradanalyse	40
Abbildung 3-11: Schematische Darstellung der Stromdichte-Zellspannungs-Kennlinie von alkalischen Elektrolyseuren (Winter, 1986)	42
Abbildung 3-12: Wirkungsgrade des Zellstapels fortschrittlicher Konzepte der alkalischen Wasserelektrolyse (Schnurnberger, 2004)	43
Abbildung 3-13: Spezifischer Energieverbrauch und Wasserstoffproduktion in alkalischen und PEM-Elektrolysegeräten (Smolinka, 2007)	44
Abbildung 3-14: Leistung Wasserstoff-Verdichtung mittels Kompressor und Druckelektrolyse (Garche, 2008).....	44
Abbildung 3-15: Vergleich der Wirkungsgrade alkalischer druckloser und Druck-Elektrolyseure (Smolinka, 2007)	45
Abbildung 3-16: Fluktuerendes Stromerzeugungsprofil einer Photovoltaik- bzw. Windkraftanlage.....	45
Abbildung 3-17: Messstellen für die in Tabelle 3-2 beschriebenen Messparameter	48
Abbildung 3-18: Ausstattung Messdatenerfassung im Prüfcontainer	48
Abbildung 3-19: Startbildschirm MDE	49
Abbildung 3-20: Visualisierung Systemstatus Anlagenmodul „Öko-Wasserstoff“.....	49
Abbildung 3-21: Visualisierung Systemstatus Anlagenmodul „Sauerstoff“	49
Abbildung 3-22: Visualisierung Systemstatus Anlagenmodul „Wärme“	49
Abbildung 3-23: Schaltschrank mit Ökostromzähler (Installation durch Weizer Naturenergie)	50
Abbildung 3-24: Wasser-Deionisierung im Personalcontainer des HyCentA	50
Abbildung 3-25: Millipore-Deionisierungsanlage	50
Abbildung 3-26: Prüfcontainer mit Elektrolyseur	51
Abbildung 3-27: Inbetriebnahme des HOGEN S40 durch Biovest.....	51
Abbildung 3-28: Wasserstoff-Zwischenspeicher	52

Abbildung 3-29: Hochdruck-Wasserstoffverdichter am HyCentA	52
Abbildung 3-30: Anlagenmodul „Sauerstoff“ (zusammengebaut bei Fa. Turner)	52
Abbildung 3-31: Anlagenmodul „Sauerstoff“ integriert am HyCentA.....	52
Abbildung 3-32: Plattenwärmetauscher und Mischventil MV_2	53
Abbildung 3-33: Mischventil MV_3 am Personalcontainer.....	53
Abbildung 3-34: Heizung im Personalcontainer	53
Abbildung 3-35: Inbetriebnahme der Gesamtanlage durch Fa. Machintelligence	54
Abbildung 3-36: Kalibrierung der Messdatenerfassung	54
Abbildung 4-1: PV-Anlage Pichler Werke, Werksweg Weiz.....	55
Abbildung 4-2: Typisches Tagesprofil PV-Anlage (teilweise bewölkter Tag).....	55
Abbildung 4-3: Leistung der stromverbrauchenden Komponenten bei Vollast (1 Nm ³ H ₂ /h)	56
Abbildung 4-4: Leistung der stromverbrauchenden Komponenten bei Teillast (0,52 Nm ³ H ₂ /h)	56
Abbildung 4-5: Wirkungsgrad Gleichrichter, Zellstapel und Elektrolyseur bei unterschiedlichen Lastzuständen	58
Abbildung 4-6: Wirkungsgrad „Öko-Wasserstoff-Tankstelle“ bei unterschiedlichen Lastzuständen	59
<i>Abbildung 4-7: Öko-Stromprofil und Lastbereich Zellstapel im Fallbeispiel „PV Werksweg“.....</i>	60
Abbildung 4-8: Ökostromprofil und erzeugte Koppelprodukte im Fallbeispiel „PV Werksweg“ (10- Minuten-Mittelwerte)	61
Abbildung 4-9: Elektrische Leistung der stromverbrauchenden Komponenten im Fallbeispiel „PV Werksweg“ (10-Minuten-Mittelwerte)	61
Abbildung 4-10: Wirkungsgrade im Fallbeispiel „PV Werksweg“ (10-Minuten-Mittelwerte).....	62
Abbildung 5-1: Vortragsprogramm des mit dem WEC veranstalteten Abschlussevents (siehe auch Anhang 8.3)	64
Abbildung 5-2: Driving Event am HyCentA	65
Abbildung 5-3: Demonstrationsbetankung beim Driving Event.....	65
Abbildung 5-4: Interessierte bei der Anlagenbesichtigung	65
Abbildung 6-1: CNG-Tankstellen in Österreich 2010 (OMV 2010)	69
Abbildung 6-2: Entwicklung der CNG-Fahrzeuge und öffentlichen CNG-Tankstellen in Österreich seit 2005	69
Abbildung 6-3: Entwicklung der CNG- bzw. LPG-Fahrzeuge und -Tankstellen in Deutschland seit 2005	70
Abbildung 6-4: Entwicklung der CNG-Fahrzeuge und -Tankstellen in Italien seit 2005	71
Abbildung 6-5: PKW-Belastung der Hauptverkehrskorridore Österreichs (BMVIT, 2007).....	75
Abbildung 6-6: Standorte Krankenhäuser in Österreich (BMWfj, 2008)	76
Abbildung 6-7: Schema Mehrbank-Speicherkonzept der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen	78
Abbildung 6-8: Berechnungsmethode der Kosten der Wasserstofferzeugung	81
Abbildung 6-9: Kosten der Wasserstofferzeugung in Abhängigkeit vom Sauerstofferlös.....	85
Abbildung 6-10: Untersuchte Systeme – Prozessketten	87
Abbildung 6-11: Treibhausgasemissionen pro Jahr der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstelle „Krankenhaus klein“	89
Abbildung 6-12: Kumulierter Primärenergiebedarf pro Jahr der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstelle „Krankenhaus klein“	90
Abbildung 6-13: Kumulierter Primärenergiebedarf fossil, erneuerbar, sonstiger) der Standard-Öko- Wasserstoff-Tankstelle „Krankenhaus klein“	90
Abbildung 6-14: Versauerungspotential der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstelle „Krankenhaus klein“	91
Abbildung 6-15: Ozonbildungspotential der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstelle „Krankenhaus klein“	92
Abbildung 6-16: Vergleich der Umweltwirkungen Öko-Wasserstoff-Tankstelle mit H2-Fahrzeug mit BZ mit Referenzsystem mit Benzin-Fahrzeug	93
Abbildung 6-17: Vergleich der Umweltwirkungen Öko-Wasserstoff-Tankstelle mit H2-Fahrzeug mit VKM mit Referenzsystem mit Benzin-Fahrzeug.....	93

Abbildung 6-18: Verteilung der PKW in Österreich auf Bundesländer und Landeshauptstädte	95
Abbildung 6-19: Verteilung und Anzahl der Standard-Öko-wasserstoff-Tankstellen für die Entwicklungsszenarien	96
Abbildung 6-20: Standard-Öko-wasserstoff-Tankstellen für je 100 Fahrzeuge in Graz, Linz und Wien	96
Abbildung 6-21: Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen für je 1.000 Fahrzeuge in Graz, Linz und Wien	97
Abbildung 6-22: Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen für 5.000 Fahrzeuge	97
Abbildung 6-23: Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen für 10.000 Fahrzeuge	97
Abbildung 6-24: Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen für 50.000 Fahrzeuge	98
Abbildung 6-25: Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen für 100.000 Fahrzeuge	98
Abbildung 6-26: Investitionskosten für den Aufbau der Öko-Wasserstoff-Tankstellen-Infrastruktur	99
Abbildung 6-27: Reduktionspotential der Treibhausgasemissionen	99

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Vergleich der wichtigsten Eckdaten unterschiedlicher Elektrolyseure	18
Tabelle 2-2: Thermodynamische Betriebsweisen der Elektrolyse bei Standardbedingungen (nach Stolten 2010)	20
Tabelle 2-3: Strombilanz der österreichischen Elektrizitätsversorgung 2008 (e-control 2010).....	21
Tabelle 2-4: Strom-Mix Österreich 2008 (Anteile der Stromerzeugung zur Deckung des Stromverbrauchs in Österreich).....	21
Tabelle 2-5: Strom aus Erneuerbaren in Österreich – Produktion und Potentiale	23
Tabelle 2-6: Anwendungsbereiche und Sauerstoffbedarf in Österreich 2010	25
Tabelle 2-7: Kennzeichnung für Wasserstoff und Methan	27
Tabelle 3-1: Systemfestlegung für Wirkungsgradbetrachtung	40
Tabelle 3-2: System-Kennzahlen und Messparameter	47
Tabelle 4-1: Leistung der stromverbrauchenden Komponenten bei Voll- und Teillast	57
Tabelle 4-2: Erzeugte Mengen Öko-Wasserstoff und Sauerstoff.....	57
Tabelle 4-3: Erzeugte Wärme und Temperaturen der Wasserkreisläufe.....	57
Tabelle 4-4: Wirkungsgrad der untersuchten Systeme	59
Tabelle 4-5: Wasserbedarf des Elektrolysesystems	62
Tabelle 5-1: Vorgestellte Fahrzeuge im Rahmen des Driving Events am HyCentA	67
Tabelle 6-1: CNG- und LPG-Fahrzeuge und -Tankstellen in Österreich, Deutschland, Italien	68
Tabelle 6-2: Treibstoffpreise CNG, LPG im Vergleich zu Benzin, Diesel	72
Tabelle 6-3: Kennwerte des Wasserstoff-Fahrzeugs für die Modellierung	73
Tabelle 6-4: Technische Daten Wasserstoff-Fahrzeuge.....	74
Tabelle 6-5: Anwendungsbereiche und deren Bedarf für Sauerstoff in Österreich 2010	75
Tabelle 6-6: H ₂ -, O ₂ - bzw. Wärmebedarf der möglichen Standorte für „Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen“	77
Tabelle 6-7: Auslegung der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen.....	77
Tabelle 6-8: Zeitlicher Verlauf der Fahrzeugbetankung	79
Tabelle 6-9: Wasserstoff-Verdichter für Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen	79
Tabelle 6-10: Auslegung der Wasserstoff-Speicher der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen.....	80
Tabelle 6-11: Auslegung der Sauerstoff- und Wärme-Speicher der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen	80
Tabelle 6-12: Investitions- und Kapitalkosten der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen.....	82
Tabelle 6-13: Betriebskosten der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen	83
Tabelle 6-14: Erzeugte Jahresmengen Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme.....	83
Tabelle 6-15: Kosten der Wasserstofferzeugung der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen	84

Tabelle 6-16: Äquivalenzfaktoren der Emissionen mit Beitrag zum Treibhauseffekt.....	86
Tabelle 6-17: Äquivalenzfaktoren der Emissionen mit Beitrag zur Versauerung.....	86
Tabelle 6-18: Äquivalenzfaktoren der Emissionen mit Beitrag zur Ozonbildung	86
Tabelle 6-19: Transportdienstleistungen, Sauerstoff- und Wärmemengen der untersuchten Systeme	88
Tabelle 6-20: Übersicht der untersuchten Prozessketten	88
Tabelle 6-21: Treibhausgasemissionen der untersuchten Systeme	89
Tabelle 6-22: Kumulierter Primärenergiebedarf der untersuchten Systeme	91
Tabelle 6-23: Versauerungspotential der untersuchten Systeme	92
Tabelle 6-24: Ozonbildungspotential der untersuchten Systeme.....	92
Tabelle 6-25: Entwicklungsstufen der ersten 100.000 Wasserstoff-Fahrzeuge und benötigte Wasserstoffmengen.....	94
Tabelle 6-26: Öko-Wasserstofferzeugung in den Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen	94
Tabelle 6-27: Anzahl der Krankenhäuser in den Bundesländern (aus BMWfj 2008)	95

Zusammenfassung

Wasserstoff kann als alternativer Treibstoff in Zukunft eine bedeutende Rolle spielen, da er aus verschiedenen Primärenergieträgern gewonnen werden kann und die lokalen Emissionen beim Betrieb der Fahrzeuge stark, mit Brennstoffzellen-Fahrzeugen ganz reduziert werden können. Diese Rolle kann Wasserstoff allerdings nur dann erreichen, wenn seine Erzeugung, Speicherung und Verteilung nachhaltig erfolgen, das heißt, wenn er als sogenannter „Öko-Wasserstoff“ aus erneuerbaren Energieträgern energieeffizient erzeugt wird, und wenn die Kosten vergleichbar mit anderen Transportsystemen sind.

Bei der elektrolytischen Wasserstoff-Erzeugung wird Wasser mit elektrischer Energie in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Bisherige Anlagenkonzepte nutzen aber den Sauerstoff und die Abwärme der Elektrolyse nicht. In diesem Projekt wurde am Hydrogen Center Austria HyCentA in Graz eine erste Demonstrationsanlage zur praxisnahen Anwendung der gekoppelten elektrolytischen Erzeugung und Nutzung von Öko-Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme errichtet. Das Ziel war, den Zusatznutzen aus der Sauerstoff- und Wärmenutzung zu evaluieren und das Gesamtsystem einer „Öko-Wasserstoff-Tankstelle der Zukunft“ zu demonstrieren. Neben der Errichtung und Integration der Anlagenkomponenten am HyCentA lag daher ein Schwerpunkt des Demonstrationsprojektes auf der messtechnischen Evaluierung des Anlagenbetriebs. Es wurden ein Messkonzept entwickelt und Messinstrumente und ein Messdatenerfassungssystem installiert. Unter der Annahme, dass Wasserstoff zukünftig als alternativer Treibstoff eine bedeutende Rolle spielen wird, wurde weiters der Aufbau einer Öko-Wasserstoff-Tankstellen-Infrastruktur für die Versorgung erster Wasserstoff-Fahrzeugflotten in Österreich ökologisch und ökonomisch untersucht.

Der Fokus der Anlagenerrichtung lag auf den Schnittstellen zwischen dem Polymer-Elektrolyt-Membran (PEM)-Elektrolyseur mit einer Wasserstofferzeugung von 1 Nm³/h und der Nutzung des Öko-Wasserstoffs, Sauerstoffs und der Wärme sowie auf der modularartigen Integration der neuen Komponenten ins HyCentA. Das Anlagenmodul „Öko-Wasserstoff“ umfasst den Elektrolyseur und führt den erzeugten Wasserstoff mit 14 bar über einen Pufferspeicher der Wasserstoff-Verdichterstation des HyCentA zu. In der Verdichterstation wird der Wasserstoff bis auf 450 bar verdichtet und in der Speicherbank des HyCentA gespeichert, aus der dann Wasserstoff-Fahrzeuge betankt werden. Das Anlagenmodul „Sauerstoff“ erfasst den vom Elektrolyseur bei Umgebungsdruck abgegebenen Sauerstoff, scheidet das Wasser im Sauerstoff ab und verdichtet ihn auf 50 bar zur Auffüllung in Gasflaschen für die weitere Verwendung als technisches Gas. Im Anlagenmodul „Wärme“ wird die Wärme des Kühlwasserkreislaufs des Elektrolyseurs über einen Wasser-Wasser-Wärmetauscher ausgekoppelt und für die Beheizung des Personalcontainers am HyCentA genutzt. Im Volllast-Betrieb des Elektrolyseurs wird Heizwärme mit einer Temperatur von 50 °C erzeugt.

Von besonderer Bedeutung für das Konzept der gekoppelten Erzeugung und Nutzung von Öko-Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme ist die Auswirkung verschiedener Betriebsweisen auf den Wirkungs- und Nutzungsgrad der Umwandlung von elektrischer Energie in die drei Produkte. Der Strombedarf der Öko-Wasserstoff-Tankstelle beträgt bei Volllast 9,3 kWh/Nm³ H₂. Davon entfallen 6,9 kWh/Nm³ H₂ auf den Elektrolyseur, 0,9 kWh/Nm³ H₂ auf den Wasserstoffverdichter und 1,5 kWh/Nm³ H₂ auf das Sauerstoffmodul. Wird die eingesetzte elektrische Energie auf die erzeugte Energie im Wasserstoff mit dem unteren Heizwert H_u von 3 kWh/Nm³ H₂ und auf die Wärme mit 1,2 kWh/h bezogen, hat die Öko-Wasserstoff-Tankstelle bei Volllast einen Gesamtwirkungsgrad von 45 % bei einem Teilwirkungsgrad des Elektrolyseurs von 43 %. Im Vergleich zum Betrieb ohne Nutzung der Koppelprodukte Sauerstoff und Wärme mit einem Wirkungsgrad von 39 % erhöht die Nutzung der Koppelprodukte den Wirkungsgrad um 6 %. Bei 20 % Teillast sinkt der Wirkungsgrad der Öko-Wasserstoff-Tankstelle bis auf 10 %. Dies ist auf eine nicht für den Teillastbereich optimierte Betriebsweise des Elektrolyseurs zurückzuführen.

Für die Untersuchung einer Öko-Wasserstoff-Tankstellen-Infrastruktur für die Versorgung erster Wasserstoff-Fahrzeugflotten in Österreich wurden in einem Modell „Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen“ an geeigneten Standorten für eine optimierte Nutzung der Koppelprodukte Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme festgelegt und ökonomisch und ökologisch bewertet. Die notwendige Anzahl und Verteilung der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen in Österreich wurde aufbauend auf Implementierungsszenarien von Wasserstoff-Fahrzeugen modelliert sowie die Auswirkungen auf die Treibhausgasemissionen, den Energieverbrauch und die Kosten gesamthaft bewertet.

Sechs „Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen“ bei Autowaschanlagen, Krankenhäusern und konventionellen Tankstellen versorgen jeweils zwischen maximal 6 und 110 Wasserstoff-Fahrzeuge pro Tag. Der Sauerstoff wird zur technischen und medizinischen Nutzung verkauft. Unter Berücksichtigung der Betriebs- und Kapitalkosten sowie von Erlösen aus der Sauerstoff- und Wärmenutzung liegen die Kosten der Wasserstofferzeugung zwischen 17 €/kg H₂ bei kleineren und 9 €/kg H₂ bei größeren Tankstellen. Der Erlös aus dem Sauerstoffverkauf deckt dabei lediglich die zusätzlichen Kosten der Sauerstofferzeugung und -aufbereitung je nach Druckniveau zwischen 0,02 und 0,47 €/Nm³ Sauerstoff. In der ökologischen Bewertung wurden die Umweltwirkungen eines Transportsystems mit einem Brennstoffzellen-Fahrzeug mit Wasserstoff aus einer Öko-Wasserstoff-Tankstelle mit einem Benzin-Fahrzeug sowie der Sauerstofferzeugung aus der Luftzerlegung und der Wärmeerzeugung aus Heizöl in einer Lebenszyklusanalyse verglichen. Bezogen auf die Jahresmengen können die Treibhausgasemissionen um etwa 90 % und die Emissionen mit Beitrag zur Versauerung und Ozonbildung um etwa 70 % reduziert werden. Der kumulierte Primärenergiebedarf kann um etwa 35 % reduziert werden, der fossile Primärenergiebedarf um etwa 90 %.

Die Implementierungsszenarien von Wasserstoff-Fahrzeugen reichen von 100 Wasserstoff-Fahrzeugen in Modellregionen bis 100.000 Wasserstoff-Fahrzeuge flächendeckend in Österreich. Die Anzahl der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen liegt zwischen 2 in den Modellregionen und 386 Tankstellen beim flächendeckenden Szenario. Die Investitionskosten des flächendeckenden Ausbaus liegen dabei bei ca. 500 Mio €. Die Treibhausgasemissionen können um bis zu 280.000 Tonnen pro Jahr reduziert werden, das sind etwa 1 bis 2 % der heutigen Emissionen im österreichischen Verkehrssektor. Der fossile Primärenergiebedarf kann um bis zu 1,1 TWh pro Jahr reduziert werden.

Summary

Hydrogen is regarded as future alternative fuel as it can be produced from various primary energy sources and as local vehicle emissions can be reduced, with fuel cell vehicles down to zero. However, hydrogen will only be successful if it is produced energy efficiently from renewable energy sources and if costs are comparable to other transport systems.

In electrolysis electricity is used to split water into hydrogen and oxygen. Today's technical applications commonly do not use the oxygen and heat coproduced. In this project a first demonstration facility was installed at the Hydrogen Center Austria HyCentA in Graz to demonstrate the coproduction and use of renewable hydrogen, oxygen and heat and thus the system of the "Renewable Hydrogen Filling Station of Tomorrow". The objectives of the project were the development and installation of the technical components as well as the evaluation of the additional benefit by using the oxygen and heat. A measurement concept was developed and measurement instruments and a data recording system installed. Assuming that hydrogen will become an important future fuel, the development of a renewable hydrogen filling station infrastructure for the supply of the first hydrogen vehicle fleets in Austria was analysed.

The technical development focused on the interfaces between the Polymer-Electrolyte-Membrane (PEM)-electrolyser with a hydrogen production of 1 Nm³/h and the use of the renewable hydrogen, oxygen and heat. The technical components were integrated into the HyCentA infrastructure in the form of modules. The module "Renewable Hydrogen" includes the electrolyser and a buffer storage and transports the produced hydrogen with 14 bar to the hydrogen compressor station of HyCentA. In the compressor station the hydrogen is compressed to up to 450 bar and stored in the storage bank for fuelling hydrogen vehicles. The module "Oxygen" separates the water from the oxygen supplied by the electrolyser at ambient pressure and compresses the oxygen up to 50 bar into pressure vessels for use as technical gas. The module "Heat" includes a heat exchanger to use the heat for heating the personal container at HyCentA. At full load operation of the electrolyser heat with 50 °C is generated.

For the concept of coproduction and use of renewable hydrogen, oxygen and heat the efficiency of using the electricity at different operating modes is of particular importance. Full-load operation of the Renewable Hydrogen Filling Station requires 9.3 kWh electricity per Nm³ H₂ produced, with 6.9 kWh for the electrolyser, 0.9 kWh for the hydrogen compressor and 1.5 kWh for the module "Oxygen". The efficiency of the Renewable Hydrogen Filling Station is calculated as ratio of the lower heating value of hydrogen with 3 kW/Nm³ H₂ and the produced heat with 1.2 kW to the electricity required and results in 45 % at full-load operation. Compared to the operation without use of oxygen and heat with an efficiency of 39 % the use of the co-products increases the efficiency by 6 %. At 20 % partial load the efficiency of the Renewable Hydrogen Filling Station decreases to 10 % which is due to an operation mode not optimized for partial-load operation.

For the analysis of a renewable hydrogen filling station infrastructure for the supply of the first hydrogen vehicle fleets in Austria so-called "Standard-Renewable-Hydrogen-Filling-Stations" were defined in a model for suitable locations with an optimized use of the co-products renewable hydrogen, oxygen and heat. The required amount and geographical distribution of the "Standard-Renewable-Hydrogen-Filling-Stations" in Austria was modelled based on implementation scenarios of hydrogen vehicles. The impacts on greenhouse gas emissions, total energy consumption and costs were evaluated.

Six "Standard-Renewable-Hydrogen-Filling-Stations" at car wash stations, hospitals and conventional filling stations supply between 6 and 110 hydrogen vehicles per day. The oxygen is sold for technical and medical use. The costs for hydrogen supply including capital

and operating costs as well as revenues from oxygen and heat are between 17 €/kg H₂ for smaller and 9 €/kg H₂ for bigger filling stations. Revenues from oxygen are assumed to cover the additional costs of oxygen production and are between 0.02 and 0.47 €/Nm³ O₂ depending on the oxygen pressure supplied. In an ecological analysis the environmental impacts of a transport system with a fuel cell vehicle with hydrogen supplied by a "Standard-Renewable-Hydrogen-Filling-Station" were compared to a gasoline-vehicle as well as oxygen from air separation and heat from heating oil. In relation to the yearly production the greenhouse gas emissions can be reduced by about 90 % and the emissions contributing to acidification and ozone formation by about 70 %. The cumulated primary energy demand can be reduced by about 35 %, the fossil share by about 90 %.

The implementation scenarios of hydrogen vehicles have been defined from 100 vehicles in Austrian model regions up to 100,000 vehicles nationwide. The amount of required "Standard-Renewable-Hydrogen-Filling-Stations" supplying the vehicles resulted from 2 in the model regions up to 386 filling stations nationwide. The investment costs for the nationwide development are about 500 Mio €. The greenhouse gas emissions can be reduced by about 280,000 tons per year, these are about 1 to 2 % of today's emissions in Austrian transport sector. The fossil primary energy demand can be reduced by about 1.1 TWh/a.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Wasserstoff kann als zukünftiger alternativer Treibstoff eine bedeutende Rolle spielen, da er aus verschiedenen Primärenergieträgern gewonnen werden kann und die lokalen Emissionen bei Betrieb der Fahrzeuge stark (mit Brennstoffzellenfahrzeugen ganz) reduziert werden können. Diese Rolle kann Wasserstoff allerdings nur dann erreichen, wenn seine Erzeugung, Speicherung und Verteilung nachhaltig erfolgen, das heißt, wenn er aus erneuerbaren regional verfügbaren Energieträgern energieeffizient erzeugt wird („Öko-Wasserstoff“), und die Kosten vergleichbar mit anderen Transportsystemen sind.

Die Studie „Öko-Wasserstoff in Österreich“ (Jungmeier et al 2006) kommt unter anderem zu folgenden Schlussfolgerungen: „Die mittel- bis langfristig interessanteste energiewirtschaftliche Option für Öko-Wasserstoff in Österreich ist die Bereitstellung von Transportdienstleistungen mit Fahrzeugen, die gasförmigen Wasserstoff aus der Elektrolyse mit Strom aus Wasser- und Windkraft nutzen. Im Transportsektor könnte Wasserstoff aus Öko-Strom mittel- und langfristig als Treibstoff einen bedeutenden Beitrag leisten.“

Um die Effizienz der Elektrolyse von Wasser zu erhöhen, ist die Nutzung der Koppelprodukte Sauerstoff und Wärme notwendig. Im Projekt „Öko-Wasserstoff innovativ“ (Schaffer et al 2008) wurde eine Machbarkeitsstudie für die innovative gekoppelte Erzeugung von Öko-Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme am Standort Hydrogen Center Austria (HyCentA) in Graz durchgeführt, auf dessen Grundlage die Planung und Errichtung einer Öko-Wasserstoff-Tankstelle der Zukunft in diesem Projekt vorbereitet wurde.

1.2 Zielsetzung

Ziel des Projektes war es, eine erste vorwettbewerbliche Demonstrationsanlage zur praxisnahen Anwendung der gekoppelten elektrolytischen Erzeugung und Nutzung von Öko-Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme zu errichten, den Zusatznutzen aus der Sauerstoff- und Wärmenutzung zu evaluieren und das Gesamtsystem einer „Öko-Wasserstoff-Tankstelle der Zukunft“ zu demonstrieren. Für den Aufbau und die Integration der Anlage bietet das HyCentA mit seiner seit 2005 bestehenden Wasserstoff-Forschungsinfrastruktur bzw. dem lokal vorhandenen Bedarf an Wasserstoff für F&E-Aktivitäten bzw. an Wärme und Sauerstoff am TU-Gelände im Umfeld des HyCentA sehr günstige Voraussetzungen.

Neben der Errichtung und Integration der Anlagenkomponenten am HyCentA lag ein Schwerpunkt des Demonstrationsprojektes auf der messtechnischen Evaluierung des Anlagenbetriebs, wobei insbesondere die Funktionsfähigkeit der Komponenten und die Analyse der energetischen und stofflichen Effizienz der „Öko-Wasserstoff-Tankstelle“ im praktischen Betrieb sowie die Identifizierung von Optimierungspotentialen im Vordergrund standen. Ein Driving Event mit Wasserstoff-Fahrzeugen hatte die Demonstration des Anlagenbetriebs und die Darstellung der möglichen mittelfristigen Markteinführung von Öko-Wasserstoff als alternativen Treibstoff an Tankstellen der Zukunft vor eingeladenem Fachpublikum zum Ziel.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Anlagenerrichtung und des Betriebs war ein weiteres Ziel des Projektes, die energiewirtschaftliche Bedeutung von Öko-Wasserstoff-Tankstellen in Österreich zu bewerten und den Aufbau einer entsprechenden Tankstelleninfrastruktur für die Versorgung erster Wasserstoff-Fahrzeugflotten in Österreich in einem Modell zu untersuchen. Ausgehend von Implementierungsszenarien von Wasserstoff-Fahrzeugen in Österreich und geeigneten Standorten für eine optimierte Nutzung der Koppelprodukte Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme wurden die notwendige Tankstellenanzahl und

-verteilung untersucht sowie die Auswirkungen auf die Treibhausgasemissionen, den Energieverbrauch und die Kosten bewertet.

1.3 Aufbau des Berichts

Der Bericht ist in fünf Kapitel gegliedert:

- Kapitel 2: Technologien für Wasserstoff-Tankstellen
- Kapitel 3: Errichtung der Demonstrationsanlage am HyCentA
- Kapitel 4: Ergebnisse aus dem Betrieb der Demonstrationsanlage
- Kapitel 5: Driving Event mit Wasserstoff-Fahrzeugen am HyCentA
- Kapitel 6: Modellierung einer Öko-Wasserstoff-Tankstellen-Infrastruktur in Österreich

In Kapitel 2 werden in einem Überblick Technologien zur Elektrolyse, zur Erzeugung von Öko-Strom und zur gekoppelten Erzeugung und Nutzung von Öko-Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme dargestellt. Ausgehend von Richtlinien und Normen für Wasserstoff-Tankstellen sowie von Erkenntnissen aus bisherigen Demonstrationsprojekten werden Anforderungen an Öko-Wasserstoff-Tankstellen zusammengestellt.

In Kapitel 3 werden die Anlagenkomponenten sowie deren Errichtung und Integration ins HyCentA sowie der Betrieb der Anlage dargestellt. Das Messkonzept mit den Messparametern und -instrumenten sowie der Messdatenerfassung wird beschrieben.

In Kapitel 4 werden aufbauend auf unterschiedlichen Betriebsbedingungen die Ergebnisse der messtechnischen Evaluierung des Anlagenbetriebs sowie technische Optimierungspotentiale dargestellt.

In Kapitel 5 werden das Driving Event und die wissenschaftliche Begleitveranstaltung zusammengefasst sowie die dabei eingesetzten Wasserstoff-Fahrzeuge vorgestellt.

In Kapitel 6 wird der Aufbau einer Öko-Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur für die Versorgung erster Wasserstoff-Fahrzeugflotten in Österreich in einem Modell untersucht. Ausgehend von unterschiedlichen Implementierungsszenarien von Wasserstoff-Fahrzeugen werden die Auswirkungen auf Umweltwirkung und Kosten bewertet.

2 Technologien für Öko-Wasserstoff-Tankstellen

2.1 Übersicht Öko-Wasserstoff-Technologien

In der Natur kommt Wasserstoff nur in Molekülen mit anderen Elementen gebunden vor, elementarer Wasserstoff würde sofort mit dem Sauerstoff der Luft reagieren. Er ist also keine Energiequelle wie Kohle, Erdgas oder Sonnenstrahlung und muss als Energieträger erst unter Energieeinsatz hergestellt und je nach Verwendung aufbereitet, verteilt und gespeichert werden.

Um in einem zukunftsorientierten Energiesystem eine Rolle spielen zu können, muss Wasserstoff aus erneuerbarer Energie erzeugt werden („Öko-Wasserstoff“). Die Möglichkeiten, Wasserstoff mit erneuerbarer Energie zu erzeugen, unterscheiden sich durch die Art der Energiezufuhr (Abbildung 2-1). Alle Verfahren der Wasserstofferzeugung beruhen direkt oder indirekt auf der Spaltung von Wasser, die hierfür einzusetzende Primärenergie kommt in allen Fällen aus der Sonnenenergie:

- Thermolyse: Spaltung von Wasser mit Wärme bei hoher Temperatur
- Elektrolyse: Spaltung von Wasser mit elektrischer Energie, z. B. aus Wasserkraft
- Umwandlung von Biomasse: Spaltung von Wasser durch die Zufuhr chemisch gebundener Energie aus der Biomasse
- Photolyse: Spaltung von Wasser mit Licht mittels Bakterien oder Halbleiter

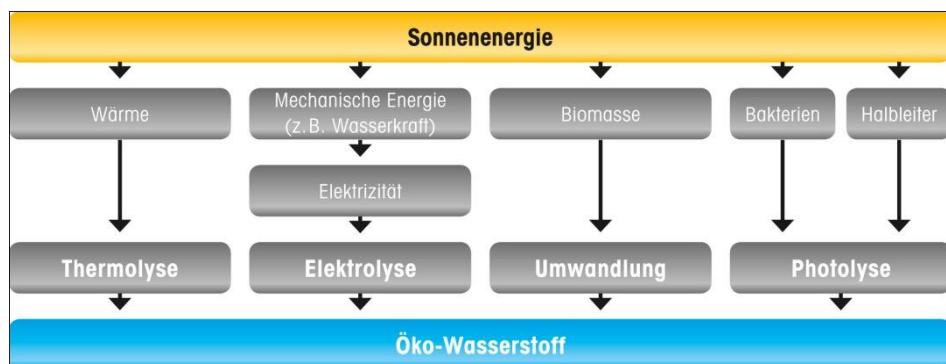


Abbildung 2-1: Übersicht über die Möglichkeiten zur Erzeugung von Wasserstoff mit erneuerbarer Energie („Öko-Wasserstoff“)

Energiesysteme mit erneuerbarem Wasserstoff umfassen alle technischen Komponenten, von der Nutzung der erneuerbaren Energiequellen für die Erzeugung bis zur Bereitstellung einer Energiedienstleistung.

Erzeugung und Nutzung von Wasserstoff aus erneuerbarer Energie kann, wie in Abbildung 2-2 dargestellt, folgendermaßen aussehen: Zunächst wird Wasserstoff über Strom-, Wärme- oder Lichtzufuhr (Elektrolyse, Thermolyse oder Photolyse) aus Wasser oder durch Umwandlung von Biomasse erzeugt. Danach wird er aufbereitet – verdichtet oder verflüssigt –, um per LKW, Bahn oder Pipeline transportiert werden zu können. Gelagert wird Wasserstoff in Druck-, Tieftemperatur- oder Feststoffspeichern. Anschließend kann er sowohl zum Antrieb von Fahrzeugen als auch zur Strom- und Wärmeerzeugung genutzt werden.

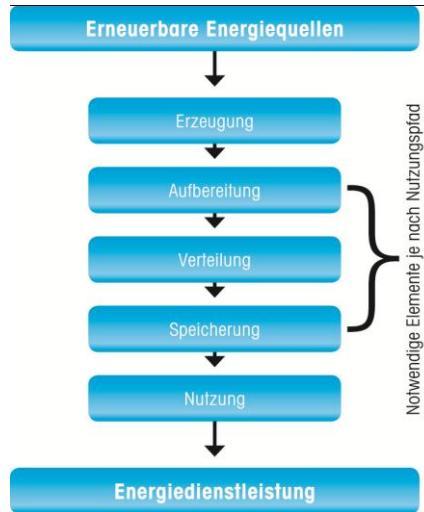


Abbildung 2-2: Elemente für Energiesysteme mit Öko-Wasserstoff

2.2 Öko-Wasserstoff im Transportsektor

Es wird erwartet, dass mittel- bis langfristig (bis 2050) der Hauptbereich für die Anwendung von Wasserstoff neben der chemischen und Metallindustrie der Transportsektor sein wird (Jungmeier 2006, HyWays 2008, GermanHy 2009). Insbesondere durch den Einsatz von erneuerbar erzeugtem Wasserstoff wird dabei eine Reduktion der Treibhausgasemissionen und Luftschadstoffen sowie eine Verringerung der derzeitigen Abhängigkeit von fossilen Energieressourcen möglich.

Die Nutzung von Wasserstoff ist dabei vor allem in PKW, leichten Nutzfahrzeugen und Stadtbussen interessant (HyWays 2008). Als Antriebssystem wird sich der Elektromotor mit Brennstoffzelle aufgrund des hohen Nutzungsgrades durchsetzen, der Wasserstoff-Verbrennungskraftmotor kann eine Übergangstechnologie darstellen. Im PKW-Sektor werden Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge vor allem für Mittel- und Oberklassefahrzeuge mit größeren Reichweiten erwartet, für Kleinwagen mit kürzeren Reichweiten vor allem Batterie-Elektrofahrzeuge (McKinsey 2010).

Die Erzeugung von Öko-Wasserstoff über die Elektrolyse mit Strom aus Wasserkraft und Windenergie ist kurz und mittelfristig günstiger zu beurteilen als die Erzeugung aus Biomasse. Öko-Wasserstoff aus Biomasse kann nur langfristig bedeutsam werden, da Biomasse zur Erzeugung von Wärme, Strom und Biotreibstoffen die Leitprinzipien nachhaltiger Technologieentwicklung wesentlich besser erfüllt. Die Wasserstoff-Erzeugung durch Dampfreformierung von Erdgas erscheint auch als Übergangsstrategie zu Öko-Wasserstoff nur in Verbindung mit CO₂-Speicherung zweckmäßig – vor allem im Hinblick auf die notwendige Reduzierung der Treibhausgasemissionen in Österreich (Jungmeier 2006).

Kurz- bis mittelfristig werden die “On-site”- Elektrolyse mit Öko-Strom und die Nutzung von gasförmigem Öko-Wasserstoff an der Tankstelle interessant sein. Entweder ist die Tankstelle direkt am Ort der Öko-Stromerzeugung oder der Öko-Strom wird über das Stromnetz zur Tankstelle übertragen. Hierzu ist ein leistungsfähiges Stromnetz erforderlich, wobei durch die Elektrolyse und die Speicherung von Öko-Wasserstoff Synergieeffekte für Lastmanagement möglich sind, wenn die Elektrolyse in Schwachlastzeiten bzw. bei aktuellem „Überschuss“ an Öko-Strom betrieben wird (Jungmeier 2006).

2.3 Öko-Wasserstoff aus der Elektrolyse

Um Wasserstoff aus der Elektrolyse mit Öko-Strom als alternativen Treibstoff effizient bereitstellen zu können, ist die innovative Nutzung der Nebenprodukte Sauerstoff und Wärme notwendig. In der Studie „Öko-Wasserstoff innovativ“ (Schaffer 2008) wurden

technische Möglichkeiten und unterschiedliche Auslegungsvarianten der gekoppelten Erzeugung von Wasserstoff (H_2), Sauerstoff (O_2) und Wärme durch Elektrolyse sowie deren Nutzung analysiert und in einer Machbarkeitsstudie dessen technische Umsetzbarkeit und Integration ins Hydrogen Center Austria (HyCentA) in Graz untersucht. Diese bildete den Ausgangspunkt für die Umsetzung des Projektes „Die Öko-Wasserstoff-Tankstelle der Zukunft“ am HyCentA.

Die Grundlagen für die gekoppelte Erzeugung von Wasserstoff (H_2), Sauerstoff (O_2) und Wärme mittels Elektrolyse sowie die Nutzung von Sauerstoff (O_2) und Wärme werden im Folgenden zusammengefasst.

2.3.1 Elektrolyse-Technologien

Die elektrolytische Erzeugung von Wasserstoff erfolgt durch die Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff mittels Zufuhr von elektrischer Energie. Abbildung 2-3 stellt das Prinzip der elektrolytischen Wasserspaltung am Beispiel der alkalischen Elektrolyse dar. Eine Einheit aus Kathode, Anode und Diaphragma oder Membran (je nach Elektrolysetechnologie) wird als Zelle bezeichnet, die Kombination mehrerer Zellen als Zellstapel und die verwendeten Geräte als Elektrolyseure.

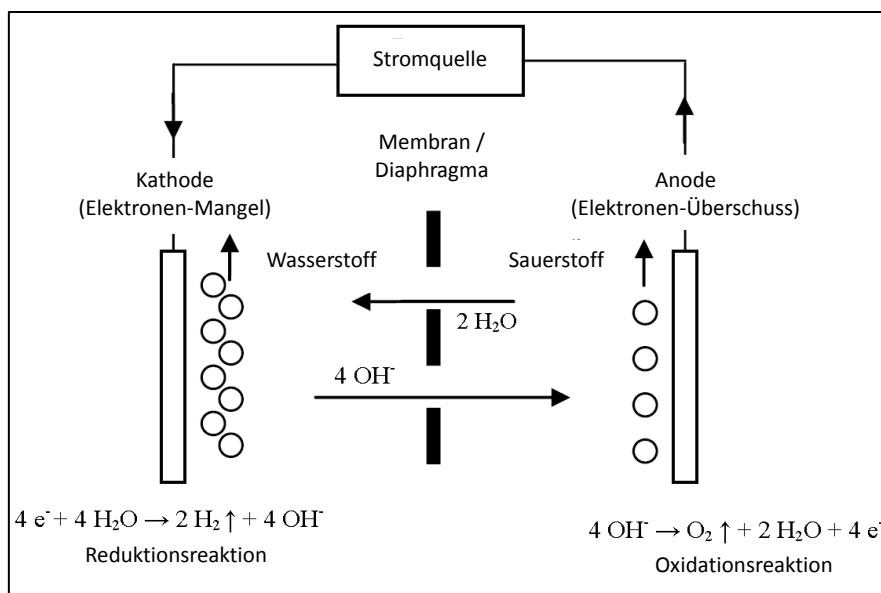


Abbildung 2-3: Prinzip der elektrolytischen Wasserspaltung (nach Stolten 2010)

Elektrolyseure lassen sich im Wesentlichen durch den verwendeten Elektrolyten sowie durch Betriebstemperatur und –druck unterscheiden (Tabelle 2-1). Stand der Technik und damit kurz- und mittelfristig interessant sind alkalische und PEM-Elektrolyseure, die mit Drücken bis zu 30 bar arbeiten. Die Hochtemperatur-Elektrolyse befindet sich derzeit noch in Labor-entwicklung.

Elektrolyseure werden in Modulen unterschiedlicher Größe (Erzeugung von 0,01 bis 760 Nm³/ h) gefertigt, die zu größeren Anlagen zusammengesetzt werden können. Die derzeit verwendeten Materialien erlauben Betriebsdrücke bis 30 bar, angestrebt werden 200 bar. Höhere Betriebsdrücke haben den Vorteil, dass bei der nachfolgenden Speicherung von gasförmigem Wasserstoff in Druckspeichern die erforderliche Kompressionsarbeit geringer ist. Allerdings sinkt bei höheren Drücken der Gesamtwirkungsgrad eines Elektrolyseurs.

Tabelle 2-1: Vergleich der wichtigsten Eckdaten unterschiedlicher Elektrolyseure

Technologie	Elektrolyt	Temperatur	Kapazität	Druck
Alkalisch ¹	Wässrige Kalilauge	70 - 200°C	0,5 - 760 Nm ³ /h	3 - 30 (200) ³ bar
PEM ¹	Protonenleitende Membran	20 - 100°C	0,01 - 30 Nm ³ /h	1 - 30 (100) ³ bar
Hoch-Temperatur ²	Keramikmembran	700 - 1000°C	Pilotanlagen	1 bar
1 Stand der Technik				
2 Labor- und Pilotanlagen				
3 Entwicklungsziel für Hochdruckanlagen				

Alkalische Elektrolyseure werden heute vor allem zur Herstellung größerer Mengen an Wasserstoff für die chemische Grundstoffindustrie eingesetzt. Im wässrigen Elektrolyten läuft die Ionenleitung zwischen den Elektroden über Hydroxid-Ionen (OH^- -Ionen) ab. Durch Weiterentwicklungen wird die Effizienz dieser Elektrolysesysteme ständig erhöht, beispielsweise durch neue Elektrodenmaterialien, optimierte Elektrolytkreisläufe und verbesserte Produktgas-Separatoren.

Bei Membranelektrolyseuren (SPE–Solid Polymer Elektrolyzer und PEM–Proton Exchange Membrane Elektrolyzer) dient die Polymermembran selbst als Festelektrolyt. Die Ionenleitung zwischen den Elektroden wird in dieser Membran durch Protonen (H^+ -Ionen) bewerkstelligt (Abbildung 2-4). Für diesen Elektrolyttypen müssen Edelmetall-Katalysatoren verwendet werden, um eine ausreichende Reaktionsgeschwindigkeit zu erreichen. Der Vorteil besteht darin, dass man sich bei einem festen Elektrolyten den internen Elektrolytkreislauf sowie die Reinigung des Wasserstoffs vom Elektrolyten erspart. PEM-Elektrolyseure werden derzeit nur zur Erzeugung geringer Wasserstoffmengen (bis max. 30 Nm³/h pro Modul) eingesetzt, da großflächigere Membran-Elektroden für höhere Modul-Leistungen technisch (noch) nicht herstellbar sind.

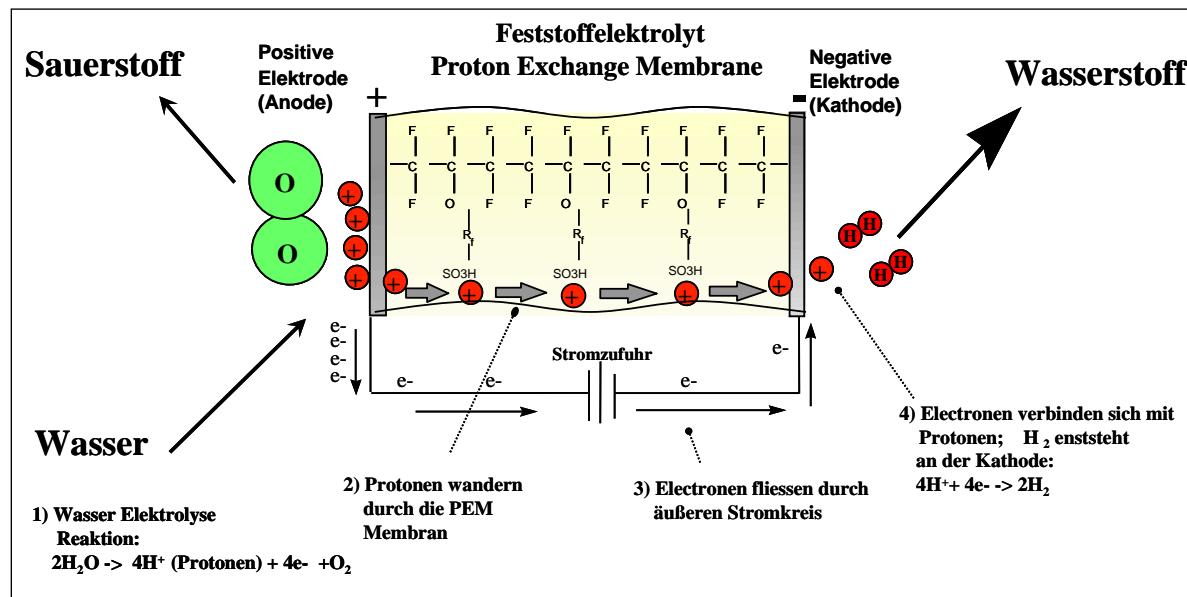


Abbildung 2-4: PEM (Proton Exchange Membrane)–Elektrolyse (Leichtfried 2010)

Die Hochtemperatur-Wasserdampf-Elektrolyse befindet sich derzeit noch in Labor-entwicklung. Seit vielen Jahren werden Forschungen zur Wasserdampf-Elektrolyse (z. B. Forschungsprojekte HOTELLY oder Hi2H2) durchgeführt, wobei die Entwicklung neuer Materialien sowie kompaktere Anlagenkomponenten die Voraussetzungen dafür geschaffen haben, die Wasserdampf-Elektrolyse erstmals zu demonstrieren.

Im Folgenden wird der Einfluss der Temperatur in der Elektrolyse beschrieben.

Die elektrolytische Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff ist eine endotherme Reaktion und erfordert daher die Zufuhr von Energie. Die notwendige Energiezufuhr setzt sich aus der Energie für die Verdampfung und für die Spaltung des Wassers zusammen. Die Spaltungsenergie wird dabei über die Gibbs-Helmholtz-Gleichung beschrieben.

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T \Delta S^0$$

mit ΔG^0 freie Reaktionsenthalpie, ΔH^0 Reaktionsenthalpie, T Temperatur und ΔS^0 Reaktionsentropie, alle bei Standardbedingungen 25°C und 1 bar.

Die freie Reaktionsenthalpie ΔG ist bei der Elektrolyse mit der elektrischen Arbeit gleichzusetzen, die mit steigender Temperatur ($T \Delta S$) abnimmt (Abbildung 2-5). Dies wird in der Hochtemperatur-Elektrolyse ausgenutzt, in der z. B. über Nutzung einer externen Wärmequelle (z.B. Abwärme eines Industrieprozesses) der Anteil der elektrischen Arbeit reduziert wird. Wird das Wasser statt im flüssigen im gasförmigen Zustand zugeführt, vermindert sich die Reaktionsenthalpie ΔH um die Verdampfungsenthalpie (ΔH_v).

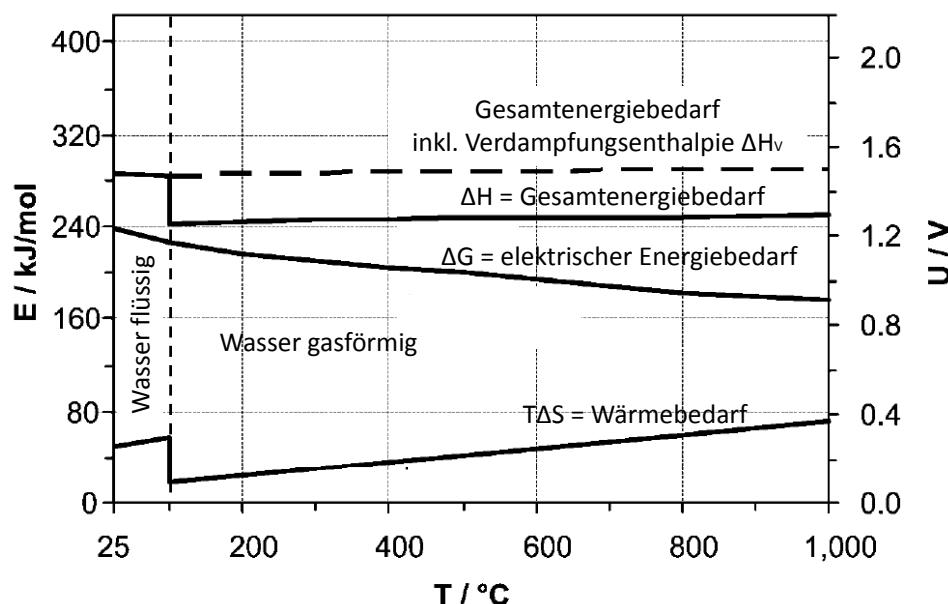


Abbildung 2-5: Temperaturabhängigkeit der Energieanteile bei der Elektrolyse (nach Stolten 2010)

Über die Faraday'sche Gleichung erhält man die der Reaktionsenthalpie entsprechende elektrochemische Elektrolysespannung.

$$E = - \frac{\Delta H}{n \cdot F}$$

mit E Spannung, ΔH Reaktionsenthalpie, n Elektronenanzahl und F Faraday-Konstante

In Tabelle 2-2 sind die vier möglichen thermodynamischen Betriebsweisen der Elektrolyse bei vergleichbaren Standardbedingungen (25°C, 1 bar) dargestellt. Die Reaktionsenthalpie ΔH für die Spaltung von flüssigem Wasser entspricht dem inversen Wert der Standard-Bildungsenthalpie von Wasser mit 285,6 kJ/mol (das sind umgerechnet 39,6 kWh/kg bzw. 3,54 kWh/Nm³ Wasserstoff¹). Erfolgt die gesamte Energiezufuhr elektrisch, ist die theoretische Elektrolysespannung 1,48 V. Bei gasförmigem Wasser entfällt die Verdampfungsenthalpie, die Reaktionsenthalpie ΔH für die Spaltung des Wassers ist

¹ 1 Nm³ H₂ = 44,6 mol; 1 kJ = 2,77E-04 kWh

242 kJ/mol (33,5 kWh/kg bzw. 3 kWh/Nm³ Wasserstoff). Die Elektrolysespannung ist dann bei elektrischer Energiezufuhr 1,25 V.

In der Hochtemperatur-Elektrolyse bei beispielsweise 1.000°C ist die Reaktionsenthalpie ΔH 293 kJ/mol, die notwendige elektrische Energie ΔG 176 kJ/mol ([Abbildung 2-5](#)). Damit können theoretisch 40 % des Gesamtenergiebedarfs über Wärme zugeführt werden.

Tabelle 2-2: Thermodynamische Betriebsweisen der Elektrolyse bei Standardbedingungen (nach Stolten 2010)

	ΔH^0 (kJ/mol)	E^0 (V)	ΔG^0 (kJ/mol)	E^0 (V)
Wasser flüssig	285,6	1,48	237,1	1,23
	ΔH_V Strom $T\Delta S$ Strom ΔG Strom (Basisfall Elektrolyse)		ΔH_V Strom $T\Delta S$ Wärme ΔG Strom	
Wasser gasförmig	241,8	1,25	228,6	1,19
	ΔH_V Wärme (Dampfzufuhr) $T\Delta S$ Strom ΔG Strom		ΔH_V Wärme (Dampfzufuhr) $T\Delta S$ Wärme ΔG Strom (Hochtemperatur-Elektrolyse)	

Im Betrieb von Elektrolysezellen muss zusätzlich zur elektrochemisch notwendigen Zellspannung eine Überspannung berücksichtigt werden, die für die Überwindung des ohmschen Widerstands innerhalb der Zelle und aufgrund von kinetischen Elektrodenprozessen (Aktivierungsenergien der Elektrodenreaktionen) notwendig ist. Die Überspannung hängt von der Stromdichte, der Temperatur und dem Elektrodenmaterial ab (siehe [Kapitel 2.3.3](#)).

2.3.2 Erzeugung von Öko-Strom

Entsprechend der umweltpolitischen Gesamtstrategie hinter der zukünftigen Mobilität im Straßenverkehr soll in der elektrolytischen Erzeugung von Öko-Wasserstoff der dafür notwendige Strom aus erneuerbaren Energiequellen erzeugt werden. In diesem Kapitel werden ausgehend von der derzeitigen Stromerzeugung die zukünftigen Potentiale für erneuerbare Stromerzeugung in Österreich dargestellt.

2.3.2.1 Erzeugung und Verbrauch in Österreich

In [Tabelle 2-3](#) sind für das Jahr 2008 die Stromaufbringung als Summe von inländischer Stromerzeugung in Österreich und Stromimport sowie die Stromverwendung als Summe von inländischem Stromverbrauch und Stromexport dargestellt. Es wurde dabei angenommen, dass der importierte Strom dem europäischen UCTE-Strom-Mix (Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity) entspricht.

Insgesamt wurden 66,8 TWh Strom erzeugt, die 77,1 % des österreichischen Verbrauchs deckten, 22,9 % wurden importiert. Gleichzeitig wurden 17,2 % des inländisch erzeugten Stroms exportiert, sodass sich für die Deckung des österreichischen Stromverbrauchs von 86,6 TWh ein Mix aus 72,4 % inländisch erzeugtem (Österreich-Mix) und 27,6 % importiertem Strom (UCTE-Mix) ergab ([Tabelle 2-4](#)).

Tabelle 2-3: Strombilanz der österreichischen Elektrizitätsversorgung 2008 (e-control 2010)

Bilanz öffentliches Netz in Österreich	
2008	[TWh]
Stromerzeugung in Österreich	66,8
Stromimport (=UCTE-Mix) ¹⁾	19,8
Aufbringung	86,6
Stromverbrauch in Österreich	71,7
Stromexport (=Österreich-Mix) ¹⁾	14,9
Verwendung	86,6
Erzeugung - Export (Österreich-Mix)	51,9
Import (UCTE-Mix)	19,8
Stromverbrauch in Österreich	71,7

Quelle: e-control; 1) Eigene Annahme

Tabelle 2-4: Strom-Mix Österreich 2008 (Anteile der Stromerzeugung zur Deckung des Stromverbrauchs in Österreich)

Strom-Mix Österreich 2008	
inkl. Export und Import	
Ostereich-Mix	72,4%
UCTE-Mix	27,6%
Wasserkraft	47,3%
Kohle	14,8%
Erdgas	16,7%
Kernenergie	8,1%
Biogene Brennstoffe	5,8%
Erdöl	4,0%
Wind	3,2%
PV	0,0%
Summe	100%

2.3.2.2 Ausbaupotentiale

Für die Beschreibung der Ausbaupotentiale erneuerbarer Stromerzeugung werden folgende Begrifflichkeiten festgelegt:

- „Theoretisches Potential“: theoretisch physikalisch nutzbares Energieangebot
- „Technisch-wirtschaftliches Ausbaupotential“: Anteil des theoretischen Potentials, der unter Berücksichtigung von gegebenen technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen zusätzlich nutzbar ist.
- „Reduziertes technisch-wirtschaftliches Ausbaupotential“: Anteil des technisch-wirtschaftlichen Ausbaupotentials, der unter Berücksichtigung von ökologischen Einschränkungen zusätzlich nutzbar ist (v.a. bei Wasserkraft).
- „Ausbaupotential 2020“: (reduziertes) technisch-wirtschaftliches Ausbaupotential bis 2020 unter für den Ausbau günstigen Rahmenbedingungen

2.3.2.2.1 Wasserkraft

Im Jahr 2007 beträgt das Regelerbeitsvermögen aller Wasserkraftanlagen ca. 39.000 GWh, wovon ca. 22.700 GWh auf Laufkraftwerke größer 10 MW, ca. 11.700 GWh auf Speicherkraftwerke größer 10 MW und ca. 4.600 GWh auf Kleinwasserkraftwerke kleiner 10 MW entfallen (e-control 2009). Die Wasserkraftpotentialstudie des VEÖ (Pöyry 2008) beschreibt

das technisch-wirtschaftliche Ausbaupotential mit ca. 18.000 GWh. Unter Berücksichtigung der Nutzungseinschränkung in sensiblen Gebieten (Nationalparks, Welterbe) ergibt sich ein reduziertes technisch-wirtschaftliches Ausbaupotential von ca. 13.000 GWh. Davon wiederum könnten ca. 11.500 GWh durch neue Kraftwerke und 1.500 GWh durch Optimierung bestehender Anlagen gewonnen werden. Dieses Ausbaupotential deckt sich auch mit Angaben aus anderen Quellen (z.B. Kaltschmitt 2009).

Für die Darstellung des bis 2020 reduzierten technisch-wirtschaftlichen Ausbaupotentials sind in einem „ambitioniert-realistischen“ Szenario 4.000 GWh zu erwarten, wobei davon etwa $\frac{3}{4}$ (3.000 GWh) auf Großwasserkraft und $\frac{1}{4}$ (1.000 GWh) auf Kleinwasserkraft entfallen (BMLFUW 2009).

2.3.2.2.2 Windkraft

Die 2009 installierte Windkraftleistung in Österreich beträgt ca. 1.000 MW aus ca. 600 Anlagen, die ca. 2.000 GWh Strom pro Jahr produzieren. Hier gibt es noch großes Ausbaupotential, einerseits durch Erschließung neuer Standorte, andererseits durch sogenanntes Repowering, indem bestehende, alte Windkraftanlagen durch neue, leistungsstärkere Anlagen ersetzt werden. Das technisch-wirtschaftliche Ausbaupotential bis 2020 wird in einer Studie der IG-Windkraft (Hantsch 2007) auf Grundlage eines Vergleichs von Potentialstudien verschiedener Autoren mit insgesamt 3.500 MW und 7.300 GWh erzeugten Strom aus ca. 1.100 Anlagen beschrieben. Kaltschmitt (Kaltschmitt 2009) gibt das Ausbaupotential für Österreich mit 18.000 GWh pro Jahr an (Berechnung des VEÖ 2007, dies entspricht einer Anlagenleistung von ca. 9.000 MW bei 2.000 Vollaststunden pro Jahr).

2.3.2.2.3 Photovoltaik

Im Jahr 2008 betrug die kumulierte Peakleistung in Österreich ca. 32 MW_{peak} mit einer Stromproduktion von ca. 29 GWh (Biermayr 2009). Für die im Jahr 2009 zusätzlich installierte Leistung werden von PV-Austria zwischen 5 und 10 MW_{peak} vorhergesagt. In der Technologie-Roadmap für Photovoltaik (Fechner 2007) wird das noch zusätzlich realisierbare Potential allein bei gebäudeintegrierten Flächen mit 23.000 GWh angegeben. Für ein Erreichen eines Anteils von 20 % Photovoltaik in der Stromerzeugung im Jahr 2050 müssten 22,5 GW für ca. 20.000 GWh ($\frac{3}{4}$ Dach, $\frac{1}{4}$ Fassade, Wirkungsgrad 20 %) installiert werden. Kaltschmitt (2009) gibt für das technische Angebotspotential auf Dächern, Fassaden und Lärmschutzwänden eine Bandbreite von ca. 19.000 GWh (Wirkungsgrad 7 %) bis 43.000 GWh (Wirkungsgrad 16 %) an. Das Lebensministerium (BMLFUW 2009) bewertet das Potential bis 2020 mit 2.000 bis 3.000 GWh.

2.3.2.2.4 Biomasse

Laut Kaltschmitt (Kaltschmitt 2009) liegt das technisch-wirtschaftliche Ausbaupotential bei festen Bioenergieträgern bei 12.500 GWh, bei Biogas bei 2.200 GWh und bei flüssigen Bioenergieträgern bei 100 GWh pro Jahr. Bis 2020 könnten ca. 5.000 GWh Strom aus Biomasse erzeugt werden. Laut Spitzer (2007) ist das Potential der Stromerzeugung 2020 aus Biomasse mit ca. 4.000 GWh berechnet.

2.3.2.2.5 Zusammenfassung

In Tabelle 2-5 und Abbildung 2-6 werden für die oben dargestellten Technologien die im Jahr 2007 erzeugten erneuerbaren Strommengen und das technisch-wirtschaftliche Ausbaupotential dem Gesamtstromverbrauch 2007 bzw. dem erwarteten Stromverbrauch für die Erzeugung von Öko-Wasserstoff mit Elektrolyse für den Betrieb von 1 Million Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge (Wirkungsgrad Elektrolyse: 60 %; Verbrauch Fahrzeug: 1,1 kg H₂/100 km, Fahrleistung Fahrzeug: 14.000 km/a) gegenübergestellt.

Tabelle 2-5: Strom aus Erneuerbaren in Österreich – Produktion und Potentiale

	Biomasse fest	Biomasse flüssig	Biomasse gasförmig	Wind	Photo-voltaik	Wasser-kraft klein	Wasser-kraft groß	Gesamt-potential
	[TWh]							
Produktion 2007	1,9	> 0	0,5	2,0	> 0	4,6	34,4	43,5
Technisch-wirtschaftliches Ausbaupotential	10,6	0,1	1,7	16,0	23,0	3,3	9,8	64,3
Ausbaupotential 2020	4,3	> 0	0,7	5,3	2,0	1,0	3,0	16,3

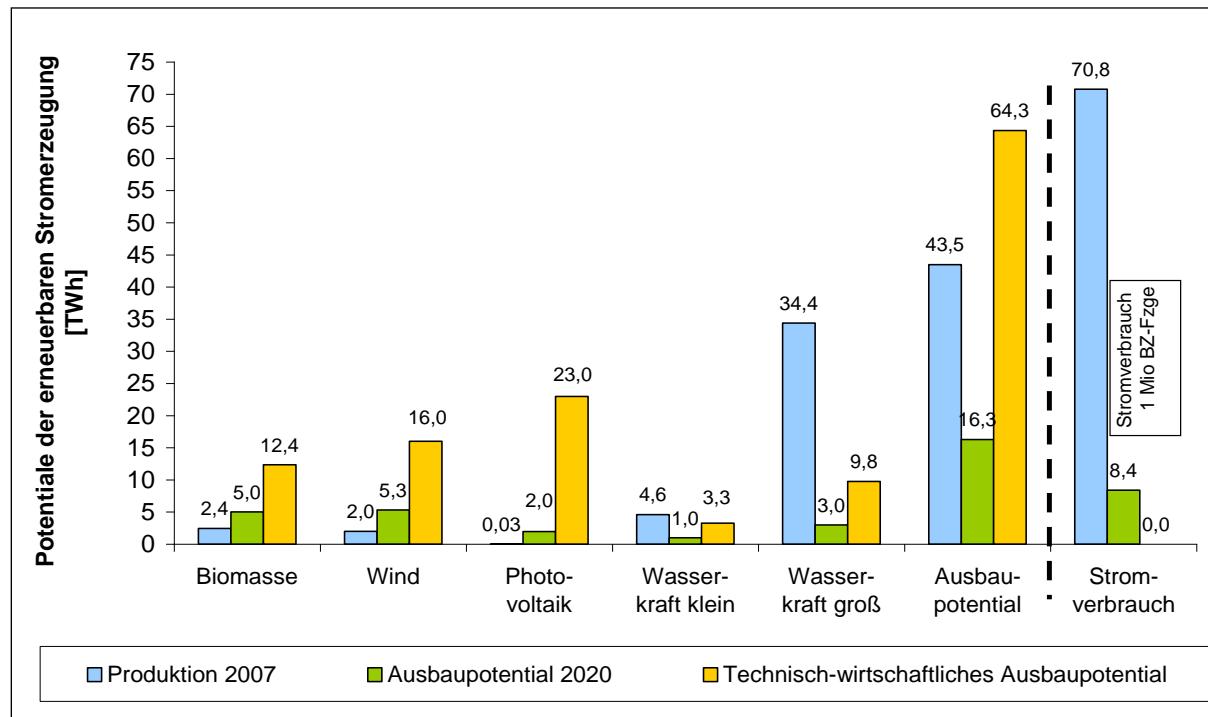


Abbildung 2-6: Strom aus Erneuerbaren in Österreich – Produktion und Ausbaupotentiale

2.3.3 Gekoppelte Erzeugung von Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme

In einem Elektrolyseur wird die elektrische Energie bedingt durch thermische Prozesse im Zellstapel teilweise in Wärme umgewandelt.

Grundsätzlich ist die Wasserstoffproduktionsrate pro Elektrodenfläche direkt proportional zur Stromdichte (A/m^2 Elektrodenfläche). Beim Betrieb einer realen Elektrolysezelle treten Verluste aufgrund des ohmschen Widerstands der Zelle und aufgrund von kinetischen Elektrodenprozessen (Aktivierungsenergien der Elektrodenreaktionen) auf, die durch die Kennlinie der Elektrolysezelle, die die Abhängigkeit der Zellspannung von der Stromdichte beschreibt, bestimmt sind (Abbildung 2-7). Bei Erhöhung der Stromdichte erhöht sich auch die Zellspannung, diese Erhöhung wird wie oben beschrieben in den ohmschen Spannungsabfall im Elektrodenzwischenraum (iR) und in die anodische (η_a) und kathodische Überspannung (η_c) aufgeteilt. Diese Verluste führen dabei zu einer Wärmeproduktion, so dass bei hoher Stromdichte eine Kühlung der Zelle notwendig ist. Bei fortschrittlichen Konzepten der Elektrolyse wurden durch Weiterentwicklungen (z.B. katalytische Aktivierung

der Elektroden) die Überspannungsverluste reduziert, was zu einer entsprechenden Reduktion des Energieaufwands geführt hat.

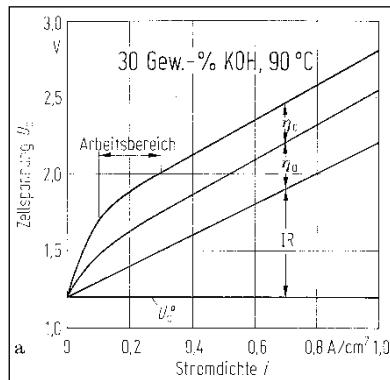


Abbildung 2-7: Schematische Darstellung der Stromdichte-Zellspannungs-Kennlinie von alkalischen Elektrolyseuren (Winter, 1986)

Elektrolyseure werden daher auf etwa 60 bis 90°C gekühlt, die Kühlwärme kann für Niedertemperaturanwendungen (z.B. Raumheizung) ausgekoppelt werden. Abbildung 2-8 stellt die Energiebilanz der gekoppelten Erzeugung von Öko-Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme dar. Die messtechnische Erfassung des Strombedarfs (x kWh) ist ein Ziel dieses Projektes.

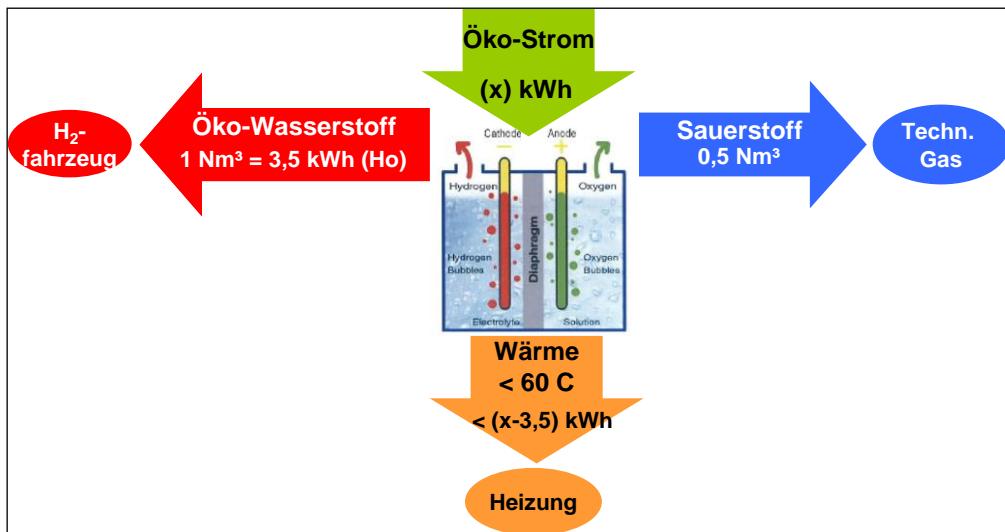


Abbildung 2-8: Elektrolytische Erzeugung von Öko-Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme

2.3.4 Nutzungsmöglichkeiten von Sauerstoff und Wärme

Die Nutzungsmöglichkeiten von Sauerstoff orientieren sich am Sauerstoffbedarf unterschiedlicher Sektoren in Österreich. In Tabelle 2-6 sind die Anwendungsbereiche und deren Bedarf für Sauerstoff in Österreich im Jahr 2009 dargestellt. Die Eisen- und Metallindustrie hat dabei den größten Bedarf von etwa 45% des jährlichen Sauerstoffbedarfes. Betriebe, die an einem Standort einen Sauerstoffbedarf von etwa 15 Mio. Nm³/a haben, das sind etwa 1.900 Nm³/h bei 8.000 Jahresvollaststunden, werden mit flüssigem Sauerstoff aus einer Luftzerlegungsanlage in unmittelbarer Nähe versorgt (Schaffer 2008).

Tabelle 2-6: Anwendungsbereiche und Sauerstoffbedarf in Österreich 2010

	[m³/a] (flüssig)	[Mio Nm³/a]	[%]
Nahrungsmittelindustrie	18.750	16	1,5%
Medizinischer Bereich	141.250	120	11,3%
Chemische Industrie	106.250	91	8,5%
Metall- und Stahlindustrie	672.500	574	53,8%
Gewerbeindustrie	105.000	90	8,4%
Papier- und Zellstoffindustrie	17.500	15	1,4%
Sonstige (z.B. Kläranlagen)	188.750	161	15,1%
Gesamt	1.250.000	1.066	100%

In Abbildung 2-9 ist das Energieflussbild Österreich im Jahr 2009 dargestellt. Vom gesamten Endenergieeinsatz von 1.077 PJ/a werden etwa 305 PJ/a oder 28% zur Deckung des Raumwärme- und Klimatisierungsbedarfes eingesetzt (Statistik Austria 2011). Die eingesetzte Endenergie wird zur Bereitstellung von 248 PJ/a Nutzwärme für Heizung, Klimatisierung und Warmwasser umgewandelt. Der Bedarf an Nutzwärme an unterschiedlichsten Standorten ist daher sehr groß.

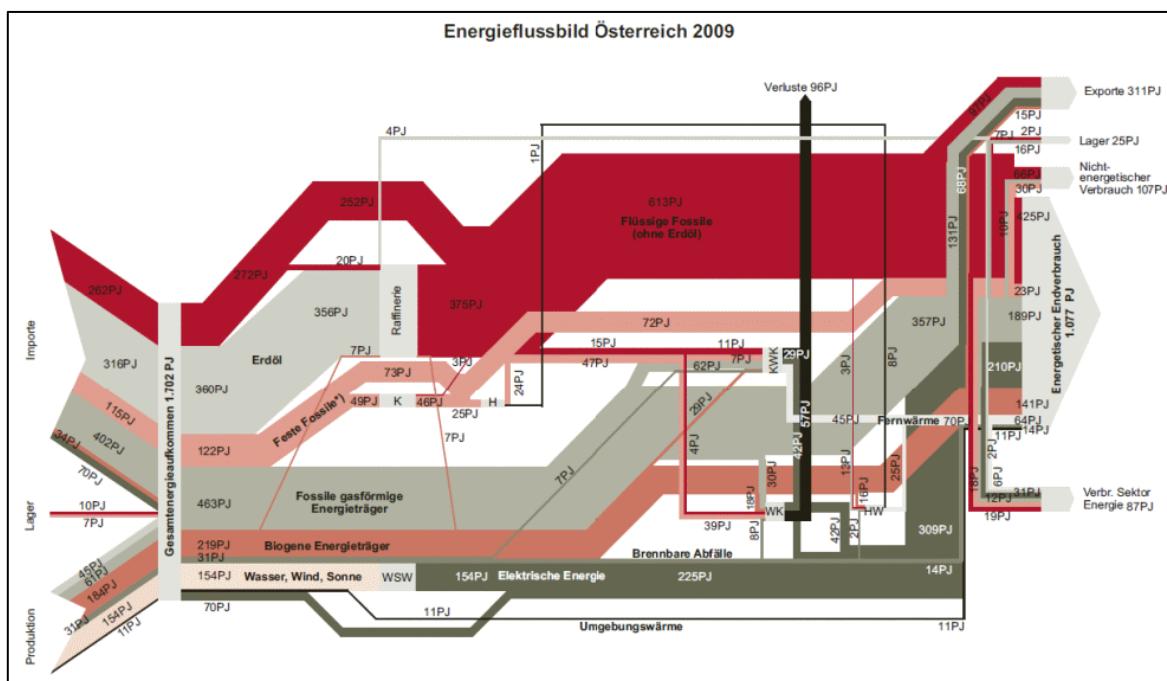


Abbildung 2-9: Energieflussbild Österreich (Primärenergie bis Endenergie) 2009 (Statistik Austria 2011)

2.4 Anforderungen an Öko-Wasserstoff-Tankstellen

2.4.1 Richtlinien, Normen und Standards

Richtlinien und Normen für Wasserstoff-Tankstellen definieren die anlagen- und sicherheits-technischen Anforderungen an die Komponenten, die Errichtung und den Betrieb solcher Anlagen, die die rechtliche Grundlage für die Anlagengenehmigung darstellen. Darüber hinaus gibt es rechtlich nicht verbindliche Standards, die meist international vereinheitlichte Anforderungen insbesondere an die Kompatibilität unterschiedlicher technischer Systeme (z.B. Schnittstelle Tankstelle - Fahrzeug) festlegen.

Der sicherheitstechnisch bedenkenlose Umgang mit Wasserstoff auf Tankstellen bedarf einer Auseinandersetzung mit einer Vielzahl von nationalen und internationalen Gesetzen, Verordnungen und Richtlinien. In den europäischen EG-Richtlinien werden grundlegende Anforderungen für die Sicherheit und den Schutz der Gesundheit bei Produkten innerhalb des europäischen Marktes festgelegt, die dann als Gesetze bzw. Verordnungen in die österreichische Gesetzgebung übernommen werden.

In Normen und technischen Regelwerken sind konkrete Anforderungen, Berechnungsvorschriften und Vorgehensweisen für die Konstruktion von Produkten, für Abläufe von Prozessen oder die Durchführung von Messungen enthalten. Normen werden von Normungsinstitutionen wie CEN (Europäisches Komitee für Normung), CENELEC (Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung) und ETSI (Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen) erarbeitet, mit deren Hilfe die in den EG-Richtlinien festgelegten allgemeinen Anforderungen für ein bestimmtes Produkt konkretisiert werden.

Auch technische Regeln geben den Stand der Technik wieder, jedoch werden diese im Unterschied zu Normen ohne Beteiligung von Normungsinstituten von sogenannten „Verkehrskreisen“ erarbeitet und veröffentlicht. Unter „Verkehrskreisen“ werden branchenspezifische Fachinstitutionen, Verbände oder Herstellergemeinschaften verstanden wie zum Beispiel OVE (Österreichischer Verband für Elektrotechnik), BGR (Berufsgenossenschaftliche Regeln für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit), FDBR (Fachverband Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau e.V.), VdTÜV (Verband der technischen Überwachungsvereine), ÖVGW (Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach).

Standards sind meist international festgelegte vereinheitlichte, per se rechtlich nicht bindende Anforderungen, die in einer Gemeinschaft von öffentlichen Institutionen und der Industrie erarbeitet werden. Das ISO/TC 197 ist das Internationale Technische Komitee (TC) für Wasserstofftechnologien innerhalb der ISO, dessen Zuständigkeitsbereich die Entwicklung von Normen für Wasserstoffkomponenten und -systemen im Bereich Produktion, Speicherung, Transport, Messung und Nutzung ist. Derzeit sind 21 Staaten am Entwurfsprozess beteiligt, diese Standards beinhalten auch Anforderungen für die Ausführung von Wasserstoftankstellen. Eine weitere Institution, die für Fahrzeuge und die Schnittstellen zur Betankungsinfrastruktur relevante Standards veröffentlicht, ist die SAE-International.

Die wichtigsten Richtlinien, Normen und Standards für Wasserstoftankstellen werden im Folgenden beschrieben. Zum Teil sind die angegebenen Bestimmungen mit denen konventioneller Tankstellen identisch.

Die Kennzeichnung chemischer Stoffe erfolgt durch Angabe von Gefahrensymbolen, Risikohinweisen und Sicherheitshinweisen nach der Chemikalienrichtlinie 67/548/EWG. Wasserstoff ist als hochentzündlich eingestuft, die Kennzeichnung im EG Sicherheitsdatenblatt erfolgt entsprechend Tabelle 2-7.

Stoffe mit dem Gefahrensymbol "F+" werden laut Chemikalienrichtlinie als hochentzündlich eingestuft und mit der Gefahrenbezeichnung "Hochentzündlich" gekennzeichnet, wenn sie:

- in flüssigem Zustand einen extrem niedrigen Flammpunkt (unter 0 °C) und einen niedrigen Siedepunkt (höchstens 35 °C) haben oder
- als Gase bei gewöhnlicher Temperatur und Normaldruck in Mischung mit Luft einen Explosionsbereich haben.

R-Sätze beinhalten die Bezeichnungen der besonderen Risiken bei gefährlichen Stoffen und Zubereitungen. S-Sätze stellen Sicherheitsratschläge bei gefährlichen Stoffen und Zubereitungen dar. Bei Wasserstoff als hochentzündlichem Stoff ist zu beachten: Von offenen Flammen, Wärmequellen und Funken fernhalten. In der Chemikalienrichtlinie sind dementsprechende einheitliche Gefahrensymbole sowie R-Sätze und S-Sätze angegeben:

Tabelle 2-7: Kennzeichnung für Wasserstoff und Methan

Gefahrensymbol	R-Satz	S-Satz
F+  Hochentzündlich	R12 Hochentzündlich	S9: Behälter an einen gut belüfteten Ort aufbewahren S16: Von Zündquellen fernhalten – nicht rauchen S33: Maßnahmen treffen, um elektrostatische Aufladung zu verhindern

Die Druckgeräterichtlinie 97/23/EG findet Anwendung für die Auslegung, Fertigung und Konformitätsbewertung von Druckgeräten und Baugruppen, die mit einem maximal zulässigen Druck von über 0,5 bar ü betrieben werden. In der Druckgeräterichtlinie werden Fluide der Gruppe 1 und Fluide der Gruppe 2 unterschieden. Wasserstoff zählt zu den Fluiden der Gruppe 1, da es explosionsgefährlich und hochentzündlich ist. Es sind daher geeignete Schutzmaßnahmen bei nicht zu beseitigenden Gefahren zu treffen. Für Wasserstofftankstellen betrifft dies die Sachgebiete Werkstoffe, Konstruktion, Herstellung, Prüfung, Konformitätsbewertung, Überwachung, Kennzeichnung sowie Dokumentation. Hinsichtlich Werkstoffe wird explizit darauf hingewiesen, dass die für die Betriebssicherheit erforderlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe durch das geführte Fluid während der Lebensdauer nicht wesentlich beeinflusst werden dürfen.

Die Richtlinie 94/9/EG (ATEX-Richtlinie 95 "Atmospheres Explosibles") beschreibt den sicheren Umgang mit explosionsfähigen Atmosphären. Als explosionsfähige Atmosphäre gilt ein Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen unter atmosphärischen Bedingungen, in dem sich der Verbrennungsvorgang nach erfolgter Zündung auf das gesamte unverbrannte Gemisch überträgt. Ein explosionsgefährdeter Bereich liegt vor, wenn aufgrund der örtlichen und betrieblichen Verhältnisse eine Atmosphäre explosionsfähig werden kann. Der Arbeitgeber ist verpflichtet, ein Explosionsschutzdokument zu erstellen, in dem Gefährdungen festgelegt, Risiken bewertet und Maßnahmen zum Schutz der Gesundheit und Sicherheit der Arbeitnehmer definiert sind.

Eine Maßnahme dafür stellt der primäre Explosionsschutz dar, bei dem die Bildung explosionsfähiger Atmosphären zu verhindern ist. Systeme mit entzündlichen Stoffen wie Behälter und Rohrleitungen sind technisch dicht und aus geeigneten Werkstoffen herzustellen. Brandgefährliche Arbeitsstoffe sind zu vermeiden oder auf das Mindestmaß zu begrenzen. Werden entzündliche Stoffe freigesetzt, ist die Bildung explosionsgefährdeter Bereiche durch natürliche oder mechanische Belüftung zu verhindern. Ist die Bildung explosionsgefährdeter Bereiche nicht auszuschließen, sind kontinuierlich messende Einrichtungen zur Überwachung der Konzentration einzusetzen.

Eine weitere Sicherheitsmaßnahme beschreibt der sekundäre Explosionsschutz zur Vermeidung von Zündquellen wie zum Beispiel heiße Oberflächen, offene Flammen, offenes Licht, mechanisch oder elektrisch erzeugte Funken, elektrische Anlagen, statische Elektrizität, Ultraschall und Strahlung. Gegenstände und Arbeitsmittel müssen für den Betrieb geeignet sein, elektrische Anlagen sind "exgeschützt" auszuführen. Können Zündquellen nicht ausgeschlossen werden, sind Maßnahmen zur Begrenzung möglicher Schäden im Brandfall zu treffen. Dazu zählen automatische und manuelle Notabschalteinrichtungen, bei deren Betätigung die Wasserstoffzufuhr unterbrochen wird oder Explosionsdruckentlastungen (Explosionsschutzklappen), die den Aufbau von Druckwellen verhindern.

Die Richtlinie 99/93/EG oder auch ATEX 137 Richtlinie genannt, zielt auf den Schutz der ArbeitnehmerInnen im Sinne des ArbeitnehmerInnenschutzgesetzes, der Umwelt und der

Anlagenteile ab. Sie teilt explosionsfähige Bereiche in Zonen und legt fest, welche Geräte und Schutzsysteme in welcher Zone verwendet werden dürfen. Der Betreiber von Wasserstoffanlagen hat bei der Erstellung des Explosionsschutzdokumentes auf die Besonderheiten der Eigenschaften von Wasserstoff einzugehen, und muss dementsprechende Maßnahmen setzen um mögliche Gefahren zu minimieren. Durch die Definition von verschiedenen Zonen die die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer explosionsfähigen Atmosphäre berücksichtigt, können je nach Zone adäquate Maßnahmen und Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden. Explosionsgefährdete Bereiche für brennbare Gase werden nach Ausmaß, Häufigkeit und Dauer in folgende Zonen eingeteilt:

- Zone 0: explosionsfähige Atmosphären sind ständig, über lange Zeiträume oder häufig vorhanden.
- Zone 1: explosionsfähige Atmosphären sind gelegentlich vorhanden.
- Zone 2: explosionsfähige Atmosphären sind selten und nur kurzzeitig vorhanden.

Explosionsgefährdete Bereiche sind mit dem Warnzeichen "Warnung vor explosionsfähigen Atmosphären" und dem Verbotszeichen "Feuer, offenes Licht und Rauchen verboten" zu kennzeichnen, siehe Abbildung 2-10.



Abbildung 2-10 : Kennzeichnung für explosionsgefährdete Bereiche

Bei Systemen, die ursprünglich mit anderen Arbeitsmitteln als Wasserstoff (z.B. Erdgas) betrieben wurden, kann somit das vorhandene Explosionsschutzdokument mit den nötigen Erweiterungen und Überarbeitungen verwendet werden.

Ein wichtiges technisches Regelwerk ist das Merkblatt Druckgase A 514 „Anforderungen an Wasserstoftankstellen“ (2009) des deutschen TÜV, das die nach dem Stand der Technik erforderlichen Sicherheitsmaßnahmen festlegt für den Betrieb von Wasserstoftankstellen sowie deren Anlageteile, die gasförmigen Wasserstoff als Kraftstoff zum Antrieb bzw. Betrieb eines Fahrzeuges in Behälter oder Flaschen abgeben.

Ein österreichisches technisches Regelwerk für Wasserstoff-Tankstellen gibt es bislang nicht, daher ist derzeit die ÖVGW-Richtlinie G97 „Erdgas (CNG)- Betankungsanlagen“ (2008) aufgrund ähnlicher Anforderungen relevant.

Ein bedeutender internationaler Standard ist der SAE Technical Information Report J2601 „Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles“ (2010). Dieser definiert die Anforderungen und die Betriebsbedingungen für die Betankung von Wasserstoff-Fahrzeugen (siehe auch Kapitel 6.4).

Eine detaillierte Auflistung von nationalen und internationalen gesetzlichen Richtlinien, Normen sowie Standards befindet sich im Anhang 8.1.

2.4.2 Erkenntnisse aus Demonstrationsprojekten

Im Folgenden werden Erkenntnisse aus europäischen Demonstrationsprojekten (HyFleet:Cute, Zero-Regio, CEP-Clean Energy Partnership und Scandinavian Hydrogen Highway Partnership) sowie aus dem EU-Projekt HyLights zu Anforderungen für den Betrieb und die Integration von Demo-Wasserstoff-Tankstellen in konventionelle Tankstellen zusammengefasst. Dies wurden weitest möglich auch bei diesem Demonstrationsvorhaben berücksichtigt.

- Schlüsselfertige Gesamtanlage von einem Technologieanbieter empfehlenswert, auch hinsichtlich Instandhaltung

- Vorgefertigte Modul-Bauweise für leichte Integration der Komponenten in bestehende Tankstellen mit geringem Flächenverbrauch bzw. für leichtere Anpassung an zukünftige Technologien
- Verantwortlichkeit für Genehmigungsverfahren, Errichtung und Betrieb in einer Hand, da Genehmigungsverfahren aufwendig sind (Neuland für Behörden, Richtlinien fehlen in manchen Ländern noch), erfordert intensive Kommunikation mit den Behörden
- Automatisierter Betrieb, mit 24 h online-Überwachung
- Bei Wasserstoff-Erzeugung on-site Möglichkeit des Teillastbetriebs bei geringerer Tankstellen-Auslastung vorsehen
- Auslegung der Systemkomponenten (Erzeugung, Verdichtung, Speicherung) standortabhängig (in der Nachbarschaft von Wohnsiedlungen werden evtl. nur kleine Speicher genehmigt)
- Klare Kennzeichnung der Wasserstoftankanlagen in konventionellen Tankstellen
- Klare Anleitung bzw. Training der Tankstellenkunden für eine sichere Betankung essentiell, Verhalten aller Tankstellenkunden bei Alarm/Notfällen
- Ausfallszeiten hauptsächlich aufgrund technischer Problem mit Verdichter und Tankstutzen bzw. aufgrund fehlender Backup-Wasserstoff-Versorgung (HyFleet:Cute)

2.5 Derzeitige Tankstelleninfrastruktur

Im Jahr 2009 gab es weltweit 206 Wasserstoff-Tankstellen. Weitere 108 Tankstellen waren 2009 weltweit in Planung. Von den 206 Tankstellen sind in Europa 70 (Deutschland 25) und in Nordamerika 92 in Betrieb. Diese umfassen sowohl öffentlich zugängliche Tankstellen als auch solche auf Privat- (Firmen-) flächen. Abbildung 2-11 zeigt einen Überblick über die geographische Verteilung der Tankstellen (-projekte) in Europa. Informationen über die Art der Wasserstoffbereitstellung (zentral bzw. onsite, fossil bzw. erneuerbar) sind in einer Datenbank zu weltweiten Wasserstoff-Tankstellen² (Stand 2009) dargestellt.

Eine Studie zur „European Hydrogen Energy Roadmap“ (HyWays, 2008) sagt für den Zeitraum von 2010-2015 einen Bedarf von ca. 400 Wasserstoff-Tankstellen in europäischen Ballungsgebieten und 500 zusätzlichen entlang europäischer Hauptverkehrsrouten voraus. In einem weiteren Ausbauschritt (2015-2025) könnten 13.000 - 20.000 Tankstellen Wasserstoff für bis zu 10 Millionen Fahrzeuge bereitstellen.

² <http://www.fuelcells.org/info/charts/h2fuelingstations.pdf>



Abbildung 2-11: Wasserstoff-Tankstellen in Europa 2009 (www.h2-stations.org, LBST 2010)

Abbildung 2-12 zeigt die Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur in den USA. Bei den mit öffentlichen Fördermitteln finanzierten Tankstellen in Kalifornien muss laut Gesetz 1/3 des Wasserstoffs erneuerbar erzeugt werden.



Abbildung 2-12: Wasserstoff-Tankstellen in USA 2009 (www.h2-stations.org, LBST 2010)

3 Errichtung der Demonstrationsanlage am HyCentA

3.1 Bestehende Infrastruktur am HyCentA

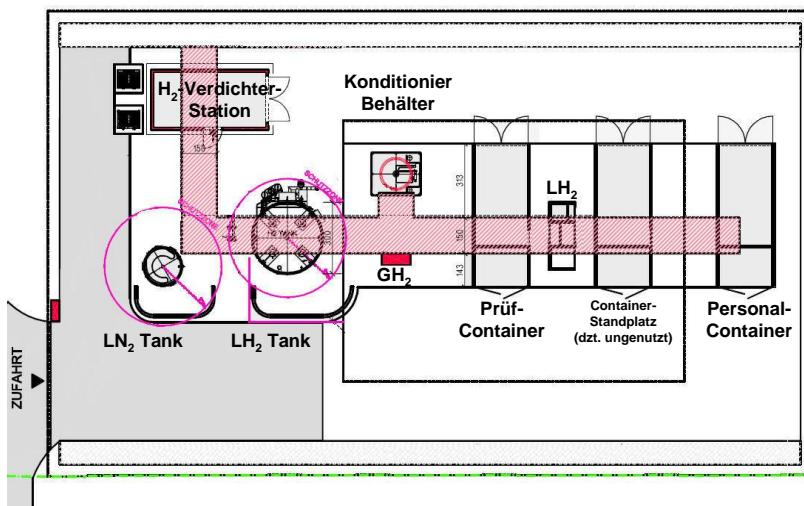
Das Hydrogen Center Austria (HyCentA) ist das erste österreichische Forschungszentrum für Wasserstoff mit Prüfständen und einer Wasserstoffabgabestelle.

Der Standort des HyCentA auf dem Gelände der Technischen Universität Graz in der Inffeldgasse ([Abbildung 3-1](#)) in unmittelbarer Nachbarschaft des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, des Großmotorenzentrums LEC und des Frank Stronach Institute FSI weist besonders günstige Synergieeffekte bezüglich Infrastruktur und Anbindung an die Aktivitäten in Forschung und Lehre der TU Graz sowie der örtlichen Industriepartner auf.

Die Ausstattung der Anlage umfasst Tankanlagen für tiefkalt verflüssigten Stickstoff (3.200 l) und Wasserstoff (17.600 l), 2 Verdampfereinheiten mit einer Verdampfungsleistung von 150 Nm³/h Wasserstoff, eine Wasserstoff-Verdichterstation (bis 450 bar), Prüfstände mit Anschlüssen für Stickstoff, Helium und flüssigem wie gasförmigem Wasserstoff mit modernster Messtechnik und geschultem Fachpersonal sowie Abgabestellen für flüssigen und gasförmigen Wasserstoff bei 400 bar. [Abbildung 3-2](#) zeigt den Lageplan der Hauptkomponenten der technischen Ausstattung am HyCentA.



[Abbildung 3-1:](#) Hydrogen Center Austria (HyCentA)



[Abbildung 3-2:](#) Lageplan der bestehenden Infrastruktur am HyCentA

Die hochmoderne Infrastruktur erlaubt die Durchführung wasserstoffrelevanter Forschungs- und Entwicklungsprojekte. Die günstigen Randbedingungen am HyCentA (H₂-Infrastruktur, H₂-Kompressor, H₂-Speicher, Bedarf an Wasserstoff für F&E-Aktivitäten, Wärmebedarf und Sauerstoffbedarf am TU-Gelände im Umfeld des HyCentA) waren auch die Basis für das Projekt „Die Öko-Wasserstoff-Tankstelle der Zukunft“.

3.2 Auslegung der Anlagenkomponenten

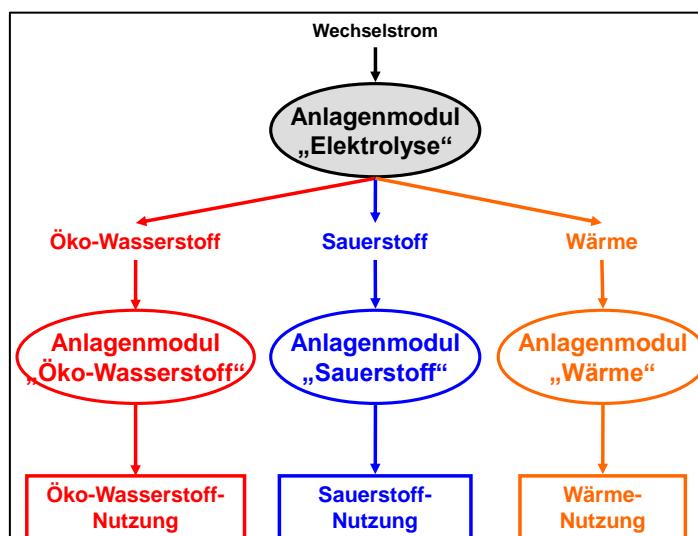
3.2.1 Übersicht der Komponenten

In diesem Projekt wurde das HyCentA um die Komponente der gekoppelten elektrolytischen Erzeugung und Nutzung von Öko-Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme erweitert, um somit das Gesamtsystem einer „Öko-Wasserstoff-Tankstelle der Zukunft“ zu demonstrieren.

Die Komponenten wurden in Modulbauweise errichtet, um die Anlagenmodule des Demonstrationsprojektes gut sichtbar und verständlich darzustellen bzw. leicht in allfällige neue Randbedingungen flexibel und anpassungsfähig integrieren zu können.

Dabei wurden die folgenden 4 Anlagenmodule festgelegt ([Abbildung 3-3](#)):

- Anlagenmodul „Elektrolyse“
- Anlagenmodul „Sauerstoff“
- Anlagenmodul „Öko-Wasserstoff“
- Anlagenmodul „Wärme“



[Abbildung 3-3: Die 4 Anlagenmodule der „Öko-Wasserstoff-Tankstelle der Zukunft“](#)

Die Integration der Module erfolgte unter Nutzung und Adaptierung der bestehenden Infrastruktur am HyCentA. Die Anlagenmodule „Elektrolyse“, „Wasserstoff“, „Sauerstoff“ und „Wärme“ wurden im Prüfcontainer installiert, um diese optimal in das HyCentA-Sicherheitssystem zu integrieren. Einzelne Komponenten befinden sich im Personalcontainer und im Verdichtercontainer. [Abbildung 3-4](#) stellt die schematische Integration der Anlagenmodule in die bestehende HyCentA-Infrastruktur dar.

Anlagenmodul „Elektrolyse“: Der Elektrolyseur ist in einer der beiden Prüfzellen des Prüfcontainers installiert. Die elektrische Versorgung des Elektrolyseurs erfolgt mit Ökostrom über einen außen am Prüfcontainer montierten beheizbaren Schaltschrank. Das Speisewasser des Elektrolyseurs wird in einer im Personalcontainer untergebrachten Anlage deionisiert. Das deionisierte Speisewasser wird durch eine beheizte Wasserleitung zum Elektrolyseur geführt.

Anlagenmodul „Öko-Wasserstoff“: Der produzierte Wasserstoff wird zunächst in einer Taupunktmessung auf Feuchte geprüft (feuchter Wasserstoff wird in die Umgebung abgeleitet) und über eine Leitung zu den im Verdichtercontainer aufgestellten Zwischenspeicherflaschen (3 x 50 Liter) geführt. Über den HyCentA-Verdichter wird der Wasserstoff dann mit bis zu 300 bar in den stationären Nieder- und Mitteldruck-Flaschenbündeln gespeichert. Dort steht er für die Betankung von Wasserstoff-Fahrzeugen über die Abgabestation für gasförmigen Wasserstoff zur Verfügung.

Anlagenmodul „Sauerstoff“: Der Sauerstoff verlässt den Elektrolyseur wasserdampfgesättigt und wird über Wasserkühlung und Kondensatabscheidung getrocknet. Anschließend wird der Sauerstoff über eine 2-stufige Verdichtung (Membranpumpe und ein mit einem Luftkompressor angetriebener pneumatischer Kompressor) in die Speicherflaschen (3 x 10 Liter, ca. 45 bar) verdichtet. Der Sauerstoff kann dann als technisches Gas eingesetzt werden.

Anlagenmodul „Wärme“: Die Kühlwärme aus dem Wasserkreislauf des Zellstapels im Elektrolyseur wird über einen Plattenwärmetauscher und eine Heizkreiswasserpumpe in einen Heizwasserkreislauf im Personalcontainer übertragen, wo sie über einen Radiator zur Beheizung eingesetzt wird.

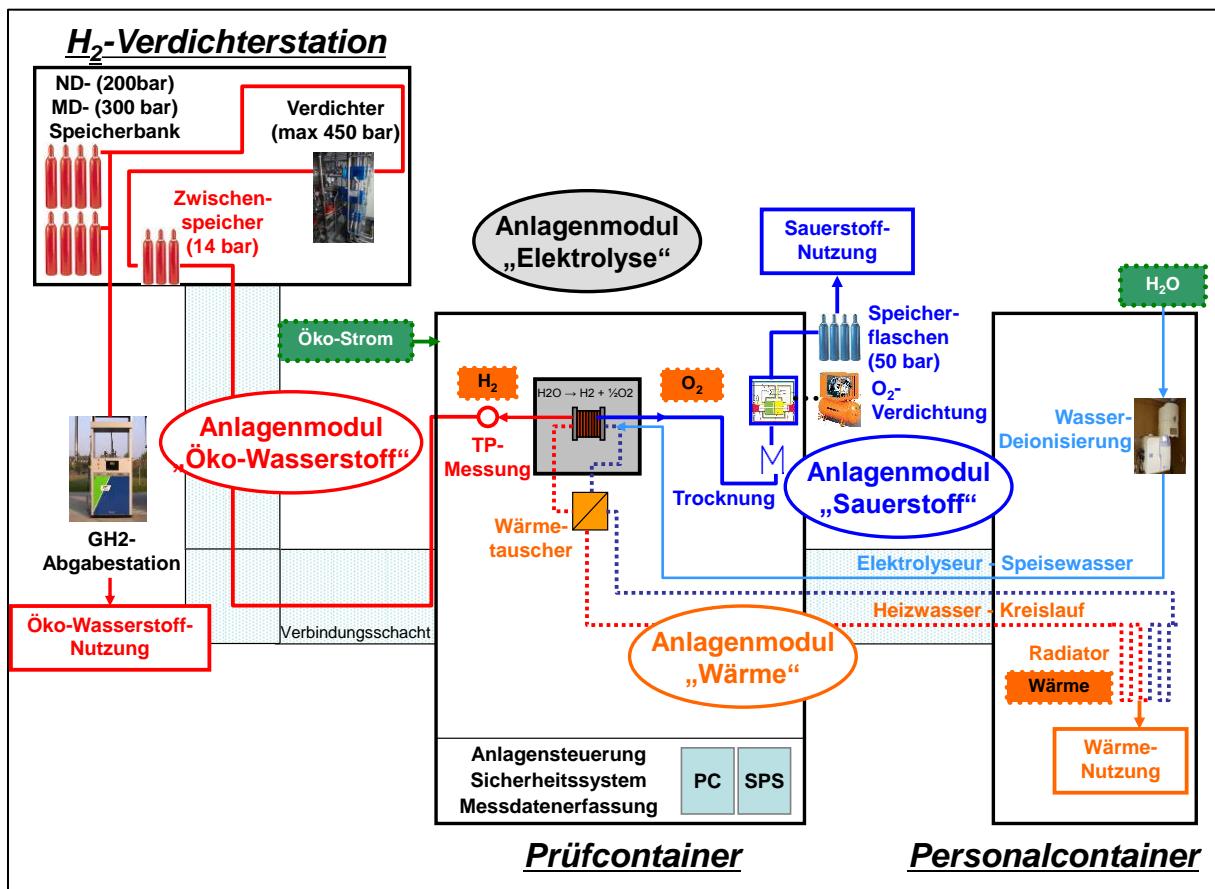


Abbildung 3-4: Integration der Anlagenmodule in die Infrastruktur des HyCentA

3.2.2 Anlagenmodul „Elektrolyse“

Auf Grundlage einer Marktrecherche zu Elektrolyseuren, die im Rahmen der Studie „Öko-Wasserstoff innovativ“ durchgeführt wurde (Schaffer, 2008), und einer Anforderungsanalyse unterschiedlicher Elektrolyseure hinsichtlich ihrer Eignung für den Betrieb mit einer intermittierenden Stromversorgung einerseits und für die Entwicklung der Schnittstellen zu den Anlagenmodulen „Öko-Wasserstoff“, „Sauerstoff“ und „Wärme“ andererseits wurde für

dieses Projekt ein PEM (Proton Exchange Membrane)-Elektrolyseur (HOGEN S40 der Firma Proton Energy Systems) ausgewählt (Abbildung 3-5).

PEM-Elektrolyseure reagieren binnen Sekundenbruchteilen auf das intermittierende Stromangebot. Zudem ist es möglich, auch bei geringer Sonneneinstrahlung den Elektrolyseur im niedrigen Teil-Lastbereich zu fahren. Alkalische Elektrolyseure benötigen eine permanente Versorgung des Zellstapels von bis zu 40% der Maximallast, um die Querdiffusion von Wasserstoff durch die Membran zu kompensieren. Diese ist beim PEM-Elektrolyseur bei Null-Last und geringen Teil-Lasten vernachlässigbar.

Der HOGEN S40 ist ein PEM (Polymer Electrolyte Membrane)-Elektrolyseur (siehe auch Abbildung 2-4) mit einer Erzeugungskapazität von max. 1,05 Nm³/h Wasserstoff (das sind 2,3 kg/24 h). Der Wasserstoff ist hochrein (99,9995%) mit einer Restfeuchte von kleiner 5 ppm und einem Reststickstoffgehalt von kleiner 2 ppm. Laut Datenblatt (siehe Anhang 8.2) benötigt der Elektrolyseur 6,7 kWh Strom / Nm³ und 0,94 l Wasser / Nm³ (siehe auch Kapitel 4 „Ergebnisse aus dem Betrieb des Elektrolyseurs“).

Mitentscheidend für die Auswahl dieses Elektrolyseurs waren auch der vorhandene Sauerstoffausgang sowie der technisch einfache Zugang zum Kühlwasserkreislauf des Zellstapels (Abbildung 3-5) für die Entwicklung der Schnittstellen zwischen dem Anlagenmodul „Elektrolyse“ und den weiteren Anlagenmodulen sowie dem HyCentA.

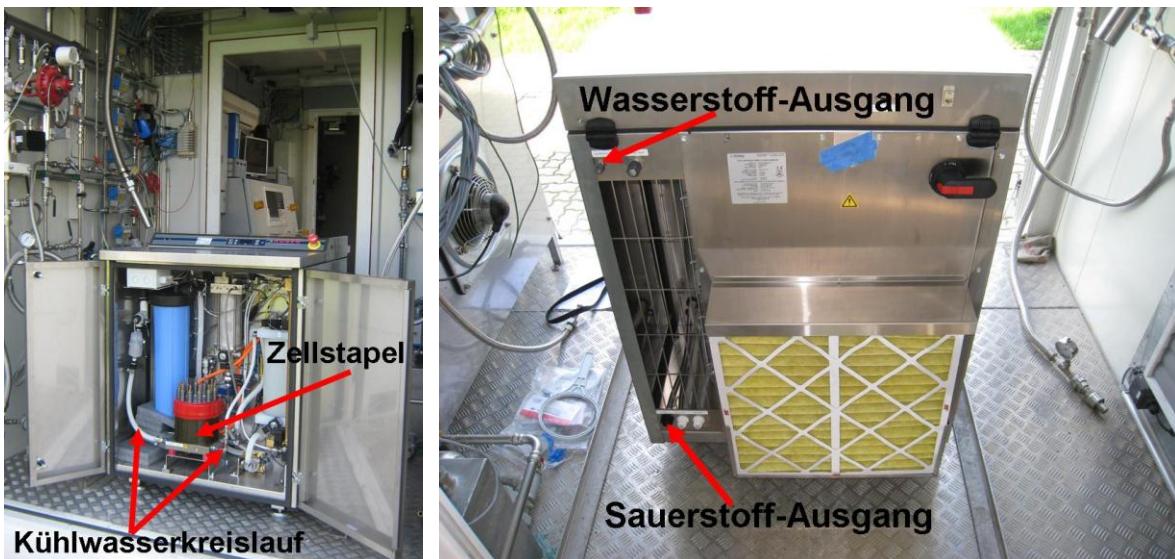


Abbildung 3-5: Vorder- und Rückansicht des Elektrolyseurs Hogen S40

Abbildung 3-6 stellt das Schema des Anlagenmoduls „Elektrolyse“ dar, die wichtigsten Komponenten werden im Folgenden beschrieben.

Der PEM-Stack (EM 100) ist der Zellstapel des Elektrolyseurs. Jede der Zellen besteht aus zwei Elektrodenplatten, die durch die Proton-Exchange-Membran voneinander getrennt sind. Im PEM-Zellstapel findet der eigentliche chemische Prozess der Elektrolyse statt. Das zugeführte Wasser wird mit elektrischer Energie in die Komponenten Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Der Betrieb des Elektrolyseurs erfordert dabei deionisiertes Wasser, die Wasseraufbereitung erfolgt nach dem Prinzip der Umkehrosmose mit nachgeschalteter Deionisation.

Die Aufgabe des Sauerstoff-Phasentrenners (A 200) ist es, den wasserdampfgesättigten Sauerstoff aus dem PEM-Zellstapel vom Wasser zu trennen. Des Weiteren regelt der Sauerstoff-Phasentrenner den Wasserbedarf im Elektrolysesystem. Das Wasser im Elektrolysesystem wird einerseits zur elektrochemischen Umsetzung verwendet und andererseits zur Ableitung der entstehenden Wärme aus der chemischen Umsetzung im PEM-Zellstapel über einen Wärmetauscher.

Der Wasserstoff-Phasentrenner (A 300) scheidet das Wasser, das durch die Membran des PEM-Stack diffundiert, vom Wasserstoffgas, ab. Das abgeschiedene Wasser gelangt schließlich wieder in den Kreislauf zurück.

Im Wasserstoff-Trockner (X 334) wird das Wasserstoffgas getrocknet, um die vorgegebene Spezifikation von 5 ppm Wassergehalt zu erreichen. Die Funktionsweise des Trocknungsvorgangs beruht auf dem Prinzip der Druckwechseladsorption. Die Adsorption des Wasserdampfes vom Wasserstoffgas an Silicagel erfolgt jeweils in einer Röhre, während parallel das Wasser in der zweiten Röhre desorbiert wird, sodass diese regeneriert. Adsorption und Desorption in den Röhren wechseln einander kontinuierlich ab. Die Desorption des Wassers erfolgt über getrockneten Wasserstoff.

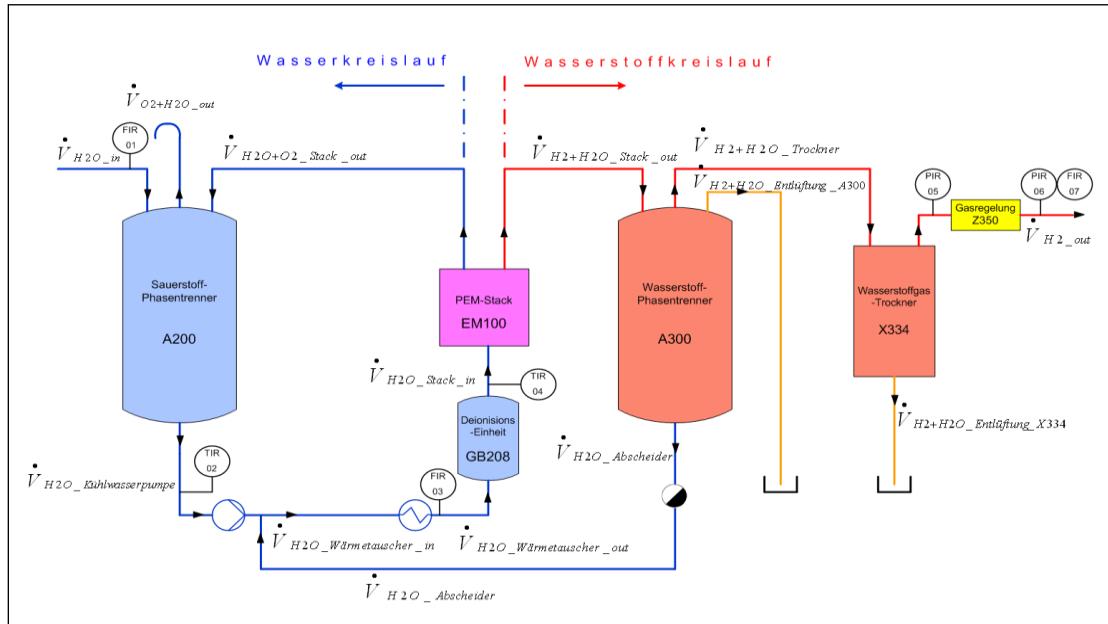


Abbildung 3-6: Schema Anlagenmodul „Elektrolyse“ (Leichtfried 2010)

3.2.3 Anlagenmodul „Öko-Wasserstoff“

Das Anlagenmodul „Öko-Wasserstoff“ erfasst den im Elektrolyseur erzeugten Wasserstoff und führt ihn dann der Wasserstoff-Verdichterstation des HyCentA zu. In dieser Verdichterstation wird der Wasserstoff bis auf 450 bar verdichtet und in der Niederdruck (ND)- bzw. Mitteldruck (MD)-Speicherbank des HyCentA gespeichert, aus dem dann Wasserstoff-Fahrzeuge betankt werden.

Abbildung 3-7 stellt das Anlagenschema dieses Moduls dar, die wichtigsten Komponenten werden im Folgenden beschrieben.

Mit dem Massendurchflussregler (MFC) wird der Wasserstoffdurchfluss (Nm^3/h) gemessen. Der Taupunktsensor (TP_H2) überwacht die Wasserstofffeuchte. Bei nicht ausreichender Qualität wird der Wasserstoff über das Pneumatikventil (PV_1) und das Rückschlagventil in den zwangsbelüfteten Innenraum der Prüfzelle abgeblasen. Wenn dieser Störfall längere Zeit besteht (ca 15 min; einstellbar) wird der Elektrolyseur abgeschaltet (Störungsmeldung). Der Druckregler (DR_1) hält den pulsartig aus dem Elektrolyseur austretenden Wasserstoff auf einem für Massendurchfluss- und Taupunktmessung benötigten konstanten Druck von 11 bar(ü).

Danach gelangt der Wasserstoff über eine Rohrleitung in den Zwischenspeicher (3 Stück 50 Liter Gasflaschen) in der Verdichterstation des HyCentA. Das Volumen des Zwischenspeichers (150 Litern geometrisches Volumen) wurde so gewählt, dass der HyCentA-Verdichter (2-stufiger Kolbenverdichter mit Hydraulikantrieb mit einer Förderleistung im Normalbetrieb von 150 Nm^3/h) alle 10 Minuten ca. 50 Sekunden in Betrieb

ist. Die Schaltung des HyCentA-Verdichters erfolgt über den Drucksensor ($P_{H2_2} = X2$) bei einem Überdruck im Zwischenspeicher von ca. 10 bar(ü).

Wenn kein Wasserstoff benötigt wird (HyCentA-Verdichter ist ausgeschaltet oder Pneumatikventil ($PV3 = X9$) ist zu), aber aus versuchstechnischen Gründen Wasserstoff produziert werden soll, steigt der Druck am Drucksensor ($P_{H2_2} = X2$) bis zu einem Schwellwert von 10,5 bar(ü) an, bei dem das Pneumatikventil ($PV_2 = X3$) öffnet und der Wasserstoff über das Rückschlagventil (X4) und das Einstellventil (X5) in den Sammelkamin abgeleitet wird.

Über das Rückschlagventil (X14) kann bei Bedarf zusätzlich Wasserstoff dem HyCentA-Verdichter von einem Backup-Flaschenbündel zugeführt werden. Dazu muss das Pneumatikventil ($PV3 = X9$) geschlossen werden. Wasserstoff vom Elektrolyseur wird vorrangig genutzt.

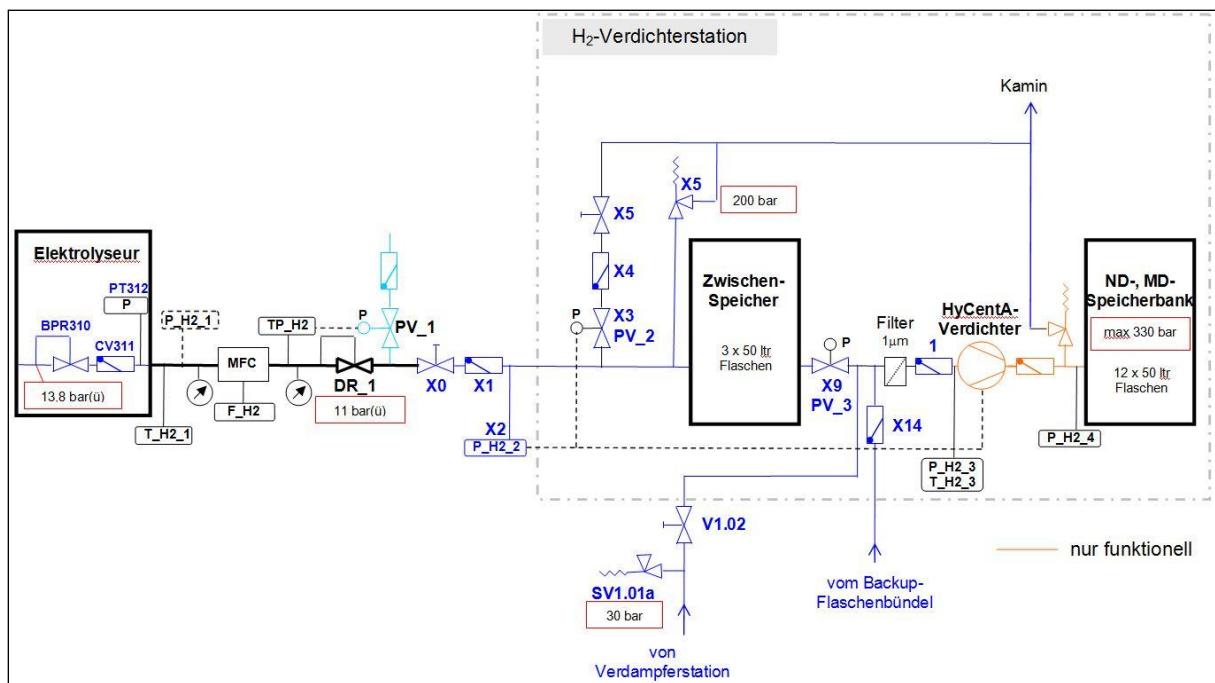


Abbildung 3-7: Schema Anlagenmodul „Öko-Wasserstoff“

3.2.4 Anlagenmodul „Sauerstoff“

Das Anlagenmodul „Sauerstoff“ erfasst den im Elektrolyseur erzeugten Sauerstoff und verdichtet ihn in Gasflaschen zur weiteren Verwendung als technisches Gas. Weiters wird die mit dem Sauerstoff ausgetragene Wassermenge erfasst. Abbildung 3-8 stellt das Anlagenschema dieses Moduls dar, die wichtigsten Komponenten werden im Folgenden beschrieben.

Im Elektrolyseur HOGEN S40 werden maximal 0,55 Nm³/h wasserdampfgesättigter Sauerstoff mit einer Maximaltemperatur von 65 °C produziert. Der Sauerstoff wird im Originalzustand des Gerätes drucklos an die Umgebung abgegeben.

Für die Gasmengenmessung (F_{O2_1}) darf der Sauerstoff nicht wasserdampfgesättigt sein. Dies wird erreicht, indem überschüssiges Wasser durch Kühlung des Sauerstoffs (mit Leitungswasser) im Kondensatbehälter abgeschieden und mit einem automatischen Kondensatabscheider abgeleitet wird. Diese Gastrocknung ist am effektivsten bei möglichst hohem Druck. Dieser wird durch den Druckregler (DR_1) eingestellt, der gleichzeitig den Sollwert von 0,83 bar(ü) im Elektrolyseur sicherstellt. Nach dem (DR_1) stellt sich der Druck abhängig von der Fördermenge der Membranpumpe ein, erreicht jedoch durch den Druckregler (DR_2) zumindest 0,2 bar(ü) erreichen. Durch die Druckreduktion an (DR_1) von 0,83 bar(ü) auf zumindest 0,2 bar(ü) wird die für die Gasmengenmessung (F_{O2_1})

geforderte Gasfeuchte unter 100 % erreicht. Gasfeuchte (RH_O2_1), Gastemperatur (T_O2_1) und Gasdruck (P_O2_1) werden erfasst. Der Gasdurchfluss kann auch am Schwebekörper-Durchflussmesser kontrolliert werden.

Die Membranpumpe erzeugt den für den pneumatischen Kompressor erforderlichen Vordruck (4 bar). Durch den Pulsationsdämpfer und das Regelventil (RV_1) vor der Membranpumpe wird der Gasstrom durch die Durchflussmesser vergleichmäßig. Der Thermostat (TS_O2_2) schützt die Membranpumpe vor Überhitzung. Im Kühler nach der Membranpumpe wird der Sauerstoff gekühlt und das anfallende Kondenswasser durch den automatischen Kondensatabscheider abgeleitet.

Der pneumatische Kompressor erzeugt den für die Abfüllung des Sauerstoffs in die Gasflaschen notwendigen Druck (max. 54 bar). Der pneumatische Kompressor benötigt einen minimalen Vordruck (3 bar), der durch den Pressostaten (PS_O2_1) geregelt wird.

Die Förderleistung des pneumatischen Kompressors wird in 2 Stufen geregelt:

1. nach Überschreiten des minimalen Vordrucks (PS_O2_1) ist die Fördermenge entsprechend der Einstellung des Regelventils (RV_2).
2. Nach Überschreiten des auf (PS_O2_2) eingestellten Drucks wird zusätzlich Antriebsluft mittels (MV_L_2) dem Pneumatischen Kompressor zugeführt, wodurch sich dessen Förderleistung erhöht.

Die Maximaltemperatur am pneumatischen Kompressor wird mit dem Thermostat (TS_O2_3) überwacht. Eingangsseitig beim pneumatischen Kompressor befindet sich ein Pulsationsdämpfer.

Nach dem pneumatischen Kompressor wird der Sauerstoff wieder gekühlt. Das Kondenswasser wird im Kondensatbehälter gesammelt und etwa im einwöchigen Intervall händisch (EV_3) entleert. Das Druckregelventil (DR_3) hält den Druck im Kühler auf zumindest 30 bar(ü) (einstellbar), was die Wasserabscheidung begünstigt. Der Ausgangsdruck des pneumatischen Kompressors wird durch dessen Druck-Übersetzungsverhältnis (hier 1:6) selbsttätig begrenzt und erreicht bei 9 bar Druckluftversorgung daher maximal 54 bar.

An der Container-Außenwand befinden sich die Anschlüsse für 3 Gasflaschen, in die der Sauerstoff zur weiteren Nutzung abgefüllt wird.

Wenn die Flaschen voll sind, schaltet der Pressostat (PS_O2_3) die Druckerhöhungsanlage ab und es bleibt nur das Kühlwasser Magnetventil (MV_H2O_1) geöffnet. Der anfallende Sauerstoff wird dann, nachdem er messtechnisch erfasst worden ist, über den Druckregler (DR_2) an die Umgebung abgegeben. Falls irrtümlich eine volle Sauerstoffflasche mit zu hohem Druck angeschlossen wird, wird die Anlage – falls auch das Rückschlagventil undicht ist – durch das Sicherheitsventil (SV_2) vor Überdruck geschützt.

Die anfallenden Kondenswassermengen können mittels Messbechern bestimmt werden.

Mittels der Regelventile (RV_H2O_1), (RV_H2O_2) und (RV_H2O_3) werden die erforderlichen Kühlwassermengen eingestellt. Wenn in einem Kühlwasserkreis kein Durchfluss herrscht schalten die Strömungswächter (F_H2O_1), (F_H2O_2) oder (F_H2O_3) die Sauerstoffverdichtung ab.

Wenn aufgrund von Kühlwassermangel die Sauerstoff-Feuchte (RH_O2_1) den Maximalwert (zB 80 % RH; einstellbar) überschreitet, wird der Elektrolyseur abgeschaltet. Wenn die Temperaturen (T_O2_2) oder (T_O2_3) einen Grenzwert überschreiten, wird die Sauerstoffaufbereitung gesperrt (Kühlwassermangel).

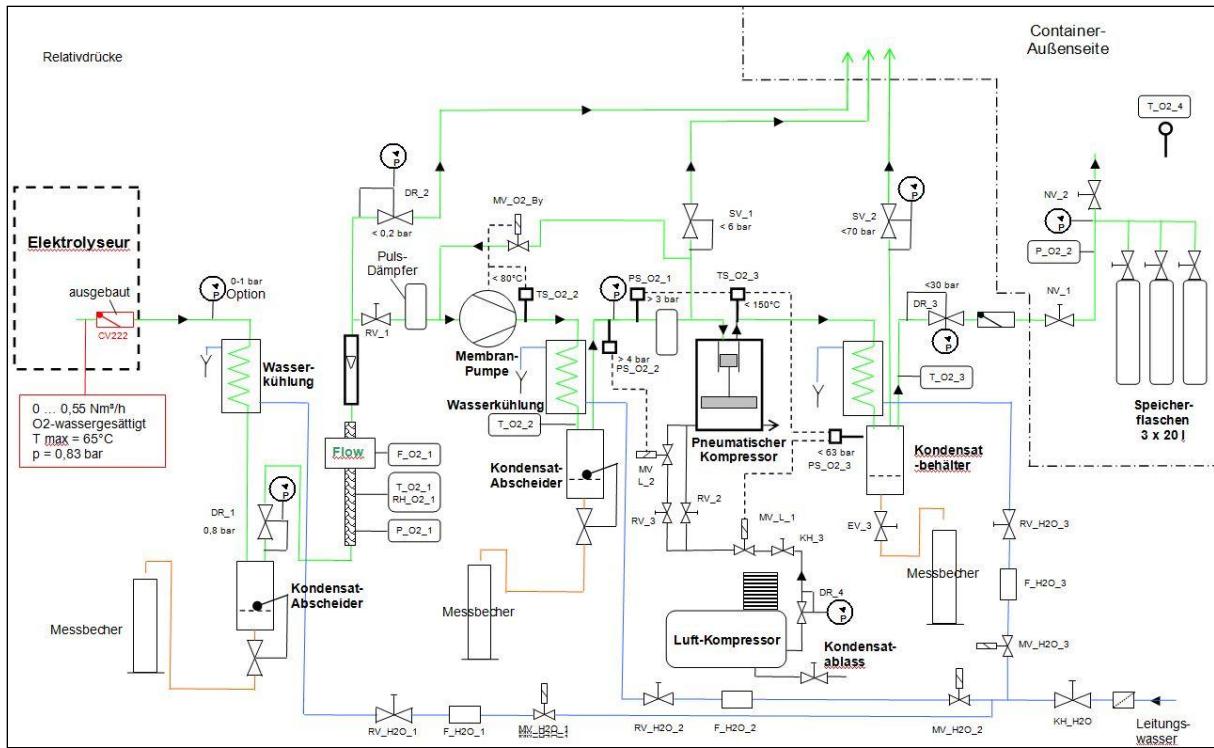


Abbildung 3-8: Schema Anlagenmodul „Sauerstoff“

3.2.5 Anlagenmodul „Wärme“

Im Anlagenmodul „Wärme“ wird die Kühlwärme des Kühlwasserkreislaufs vom Zellstapel im Elektrolyseur für Heizzwecke ausgekoppelt und nutzbar gemacht.

Abbildung 3-9 stellt das Anlagenschema dieses Moduls dar, die wichtigsten Komponenten werden im Folgenden beschrieben. Das deionisierte Wasser für die Elektrolyse wird gleichzeitig auch für den Wärmeabtransport aus dem Zellstapel verwendet. Im Originalzustand des HOGEN S40 wird die Wärme über einen Wasser/Luft-Wärmetauscher (HX203) ausgekoppelt und an die Umgebung des Elektrolyseurs abgegeben. Durch Einbindung des Plattenwärmetauschers kann die Abwärme des Zellstabels auch für die Beheizung weiter entfernter Räume verwendet werden.

Es muss jedoch die erforderliche Betriebstemperatur des Zellstabels weiterhin sichergestellt werden. Damit die Mindest-Wassertemperatur vor dem Zellstapel nicht unterschritten wird, wird mit dem Magnetventil MV2 bis zur festgelegten Temperatur ($T_{nWT_min\text{-}MV2}$, 30°C) die Wärmeabgabe in den Heizkreis verhindert. Zusätzlich wird erst bei Temperaturen über $T_{nWT_min\text{-}P}$ (28 °C) die Heizungspumpe (P_{Heiz}) eingeschaltet (günstiger beim Anfahren und außerdem zusätzliche Sicherheit). Das Magnetventil MV3 stellt sicher, dass erst nach Überschreiten der für den Personalcontainer ausreichenden Vorlauf-Temperatur ($T_{VL2_min\text{-}MV3}$) der Heizkreis 2 zugeschaltet wird. Der Lüfterheizer-Ventilator (Option) im Heizkreis 2 wird bei Überschreiten der Vorlauftemperatur T_{VL2_Soll2} (oder T_{RL_Soll}) zugeschaltet. MV3_min (minimaler Öffnungsgrad von MV3; z.B. 10 %; einstellbar) stellt einen geringen Durchfluss im Heizkreis sicher auch bei geschlossenem Heizkörper im Personalcontainer. Das Mischventil MV 1 stellt sicher, dass die maximal zulässige Wassertemperatur nach dem Zellstapel ($T_{nSt_max\text{-}MV1}$; z.B. 60 °C) nicht überschritten wird. Dazu wird bei Bedarf entsprechend mehr Wasser dem Wasser/Luftkühler HX 203 zugeführt. Der Ventilator des HX 203 muss ständig laufen, da er auch zur Bauteilkühlung und Erzeugung des aus Sicherheitsgründen notwendigen Überdrucks im Gerät verwendet wird.

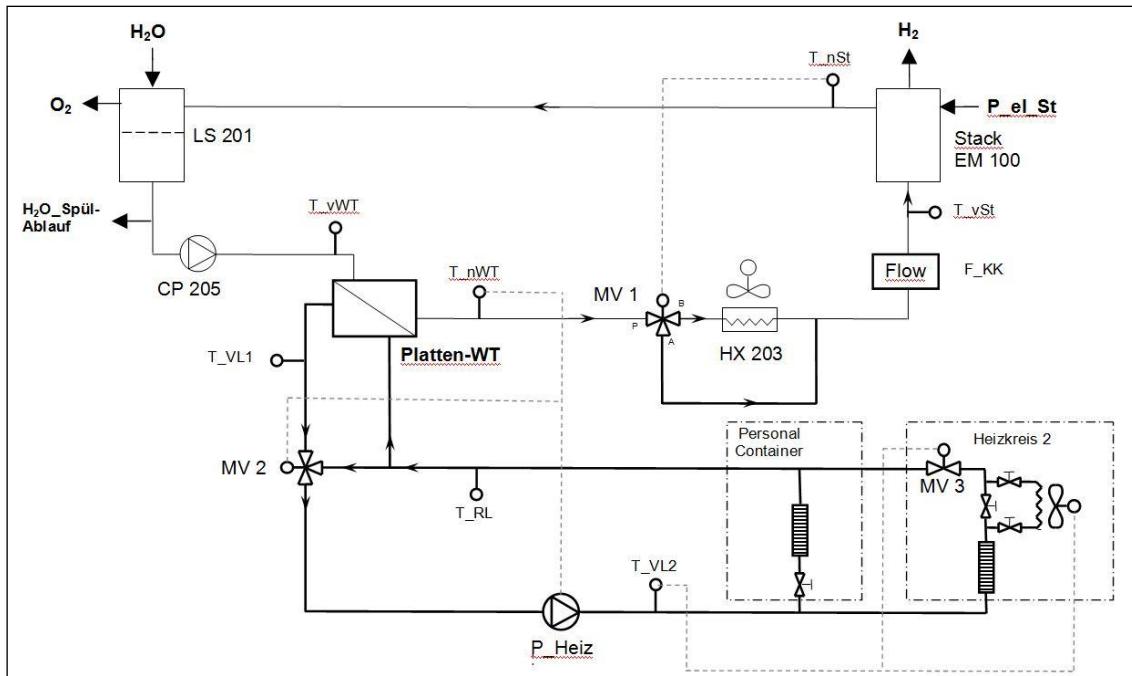


Abbildung 3-9: Schema Anlagenmodul „Wärme“

3.3 Messkonzept

Neben der Entwicklung und Errichtung der technischen Komponenten der „Öko-Wasserstoff-Tankstelle der Zukunft“ lag der Fokus des Projektes auf der messtechnischen Evaluierung der Funktionsfähigkeit der Komponenten, der Einpassung in das Gesamtkonzept am HyCentA sowie der Erprobung im praktischen Betrieb. Von besonderer Bedeutung für das Konzept der gekoppelten Erzeugung und Nutzung von Öko-Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme ist naturgemäß die Auswirkung verschiedener Betriebsweisen auf den Wirkungs- und Nutzungsgrad der zugeführten elektrischen Energie. Ebenfalls von Interesse war die Erstellung einer Wasserbilanz.

Im Folgenden werden mit der Festlegung der Systemgrenzen und des Wirkungs- und Nutzungsgrades die Grundlagen für das entwickelte und in Kapitel 3.3.3 dargestellte Messkonzept, die Messparameter, -stellen und –instrumente beschrieben.

3.3.1 Systemgrenzen

Die Grundlage für die Wirkungs- und Nutzungsgradbetrachtung der gekoppelten elektrolytischen Erzeugung und Nutzung von Öko-Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme ist die Definition der betrachteten Systeme mit der Festlegung der Systemelemente (wirkungsgradrelevante Anlagenelemente), der Systemgrenzen und der Energie- und Stoffflüsse über die Systemgrenzen (zugeführte elektrische Leistung und nutzbare Produkte).

Ausgehend vom Anlagenschema in Abbildung 3-4 wurden die in Tabelle 3-1 bzw. Abbildung 3-10 dargestellten Systeme festgelegt. Die zugeführte elektrische Leistung jedes Systems in Form von Gleich- oder Wechselstrom (P_{AC} , P_{DC}) ergibt sich aus der Summe des Energieverbrauchs bzw. -verlustes der zugehörigen Komponenten (P_{Vx}). Die nutzbaren Produkte der gekoppelten Erzeugung sind Wasserstoff (\dot{Q}_{H_2}), Wärme (\dot{Q}_W) und Sauerstoff (\dot{Q}_{O_2}).

Folgende Systeme werden betrachtet:

- „Zellstapel“ des Elektrolyseurs Hogen S40

- „Elektrolysegerät“: Anlagenmodul „Elektrolyse“ (HOGEN S40)
- „Öko-Wasserstoff-Tankstelle“: Anlagenmodule „Elektrolyse“, „Öko-Wasserstoff“, „Sauerstoff“, „Wärme“
- „Öko-Wasserstoff-Tankstelle in Kombination mit PV/Stromnetz“: Erweiterung um Photovoltaik (PV)-Anlage mit Umwandlung des PV-Gleichstroms in Wechselstrom und Netzeinspeisung, Energieversorgung der Öko-Wasserstoff-Tankstelle über Netzanschluss

Tabelle 3-1: Systemfestlegung für Wirkungsgradbetrachtung

System	Elektrischer Input	Wirkungsgradrelevante Anlagenelemente	Nutzbare Produkte
„Zellstapel“	Gleichstrom – P_{DC-1}	Zellstapel - P_{V1}	Wasserstoff, Wärme, Sauerstoff $\dot{Q}_{H_{H_2}}$ \dot{Q}_W \dot{Q}_{O_2}
„Elektrolysegerät“	Wechselstrom – P_{AC-1}	„Zellstapel“ - P_{V1} Pumpe Speise-(Kühl-)wasser - P_{V2} Gleichrichter - P_{V3} Deionisierung - P_{V4} Ventilator - P_{V5} Elektronik - P_{V6}	Wasserstoff, Wärme, Sauerstoff $\dot{Q}_{H_{H_2}}$ \dot{Q}_W \dot{Q}_{O_2}
„Öko-Wasserstoff-Tankstelle“	Wechselstrom – P_{AC-2}	„Elektrolysegerät“ - P_{V1} bis P_{V6} Verdichter H_2 - P_{V7} Luft-Kompressor O_2 - P_{V8} O_2 -Modul - P_{V9} Pumpe Heizkreis - P_{V10} Sicherheitssystem – P_{V11}	Wasserstoff, Wärme, Sauerstoff $\dot{Q}_{H_{H_2}}$ \dot{Q}_W \dot{Q}_{O_2}
„Öko-Wasserstoff-Tankstelle mit PV / Stromnetz“	Gleichstrom – P_{DC-2}	„Öko-Wasserstoff-Tankstelle“ - P_{V1} bis P_{V6} P_{V11} Wechselrichter - P_{V12} Stromnetz - P_{V13}	Wasserstoff, Wärme, Sauerstoff $\dot{Q}_{H_{H_2}}$ \dot{Q}_W \dot{Q}_{O_2}

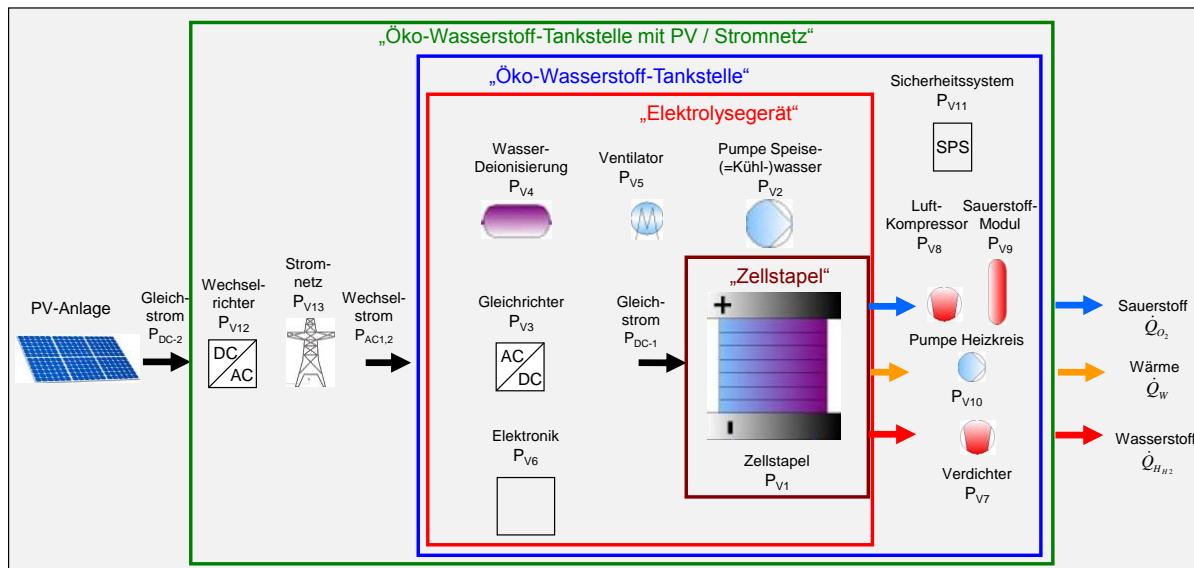


Abbildung 3-10: Betrachtungsgrenzen für Wirkungsgradanalyse

3.3.2 Festlegung Wirkungs- und Nutzungsgrad

Der Wirkungsgrad eines Systems ist allgemein definiert als das Verhältnis des erzeugten Nutzens zum eingesetzten Aufwand. Der Wirkungsgrad wird für einen bestimmten Betriebszustand zu einem bestimmten Zeitpunkt (z.B. bei Volllast oder Teillast) gemessen,

im Unterschied zum Nutzungsgrad, der über einen längeren Zeitraum (z.B. 1 Jahr für den Jahresnutzungsgrad) als Durchschnitt über alle Betriebszustände (wechselnde Lastzustände, Anfahrzustände etc.) ermittelt wird.

Für eine Elektrolyse, die für die Produktion von Wasserstoff verwendet wird, berechnet sich der Wirkungsgrad aus dem Verhältnis der erzeugten Menge an nutzbarer Energie des Wasserstoffs $\dot{Q}_{H_{H_2}}$ und der zugeführten elektrischen Leistung $P_{zu,el}$ (kW/Nm³/h H₂), die sich aus der Summe der Leistung bzw. der Verluste der zum System gehörenden Komponenten (P_{Vi}) ergibt.

$$(1) \quad \eta_{Elektrolyse} [\%] = \frac{\dot{Q}_{H_{H_2}}}{P_{zu,el}} = \frac{\dot{Q}_{H_{H_2}}}{\sum_i P_{Vi}} \left[\frac{kW / Nm^3 / h}{kW / Nm^3 / h} \right]$$

Für die Berechnung des Wirkungsgrades muss bei der nutzbaren Energie des Wasserstoffs zwischen dem unteren (H_u 3,00 kWh/Nm³ H₂) und oberen Heizwert (H_o 3,54 kWh/Nm³ H₂) unterschieden werden. Bei der PEM-Elektrolyse wird flüssiges Wasser in gasförmigen Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Ein Teil des Stroms wird bei diesem Vorgang für den Phasenwechsel von flüssig zu gasförmig eingesetzt. Folglich sollte bei der Elektrolyse der obere Heizwert von Wasserstoff verwendet werden, da dieser beim Austritt aus dem Elektrolyseur auch die Kondensationswärme enthält. Wenn jedoch Wasserstoff genutzt wird, z. B. in einer Brennstoffzelle in Strom rückumgewandelt wird, wird nur die chemische Energie des Wasserstoffs eingesetzt, die dem unteren Heizwert entspricht (Smolinka 2010). Bei Betrachtung des Wirkungsgrades von Wasserstoffspeichersystemen, die sowohl Elektrolyse als auch Brennstoffzelle enthalten, führt eine Vermischung der Bezugspunkte für den Heizwert von Wasserstoff zu falschen Aussagen. Oft wird daher der Wirkungsgrad nur in [kWh/Nm³ H₂] angegeben. Wirkungsgrade in diesem Bericht werden sowohl bezogen auf den oberen als auch auf den unteren Heizwert dargestellt.

Im Fall der gekoppelten elektrolytischen Erzeugung von Wasserstoff, Wärme und Sauerstoff wird für den Wirkungsgrad die Summe aus nutzbarer Energie des Wasserstoffs und nutzbarer Wärmeleistung (Sauerstoff hat keinen Brennwert) auf die eingesetzte elektrische Leistung bezogen. Die Wärmeleistung \dot{Q}_w ergibt sich aus der nutzbaren Temperaturdifferenz von Vor- und Rücklauf (T_V-T_R) des Kühlwasserkreislaufs des Zellstapels, des Kühlwasser-Volumenstroms \dot{V} , der Dichte ρ und der spezifischen Wärmekapazität c_w von Wasser. Beim Sauerstoff wird die für die Aufbereitung aufgewendete elektrische Leistung berücksichtigt.

$$(2) \quad \dot{Q}_w [W] = \dot{V} \left[\frac{m^3}{s} \right] \cdot \rho \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot c_w \left[\frac{Ws}{kgK} \right] \cdot (T_V - T_R) [K]$$

Der Wirkungsgrad der gekoppelten Erzeugung wird demnach wie folgt berechnet:

$$(3) \quad \eta_{Elektrolyse} = \frac{\dot{Q}_{H_{H_2}} + \dot{Q}_w}{P_{zu,el}} = \frac{\dot{Q}_{H_{H_2}} + \dot{Q}_w}{\sum_i P_{Vi}}$$

Auf Basis der Systemdefinitionen wird in den folgenden Kapiteln unterschieden zwischen dem Wirkungsgrad des Zellstapels, des Elektrolysegeräts, der Öko-Wasserstoff-Tankstelle und der Öko-Wasserstoff-Tankstelle in Kombination mit einer Photovoltaikanlage.

3.3.2.1 Wirkungsgrad des Zellstapels

Der Wirkungsgrad des Zellstapels wird für die anschließende Betrachtung als Verhältnis der nutzbaren Energie des Wasserstoffs ($\dot{Q}_{H_{H_2}}$) zur elektrischen Leistung des Zellstapels ($P_{V1}=P_{DC-1}$) bestimmt:

$$(4) \quad \eta_{\text{Zellstapel}} = \frac{\dot{Q}_{H_{H_2}}}{P_{DC-1}} = \frac{\dot{Q}_{H_{H_2}}}{P_{V1}}$$

Um Wasserstoff durch elektrolytische Zersetzung von Wasser herstellen zu können, wird an den Zellstapel eine elektrische Spannung (Zersetzungsspannung) angelegt. Diese ergibt sich aus der elektrochemisch notwendigen Zellspannung auf Basis der Differenz der Standardelektrodenpotentiale der an den Zellreaktionen beteiligten Substanzen (siehe Kapitel 2.3.1) und der Überspannung, die für die Überwindung des ohmschen Widerstands der Zelle und aufgrund von kinetischen Elektrodenprozessen (Aktivierungsenergien der Elektrodenreaktionen) notwendig ist. Die Überspannung und damit die Verluste bzw. in Folge der Wirkungsgrad hängen von der Stromdichte, der Temperatur und dem Elektrodenmaterial ab.

Grundsätzlich ist die Wasserstoffproduktionsrate pro Elektrodenfläche direkt proportional zur Stromdichte (A/m^2 Elektrodenfläche). Beim Betrieb einer realen Elektrolysezelle treten die oben beschriebenen Verluste (ohmscher Widerstand, kinetische Verluste) auf, die durch die Kennlinie der Elektrolysezelle, die die Abhängigkeit der Zellspannung von der Stromdichte beschreibt, bestimmt sind (Abbildung 2-7). Bei Erhöhung der Stromdichte erhöht sich auch die Zellspannung, diese Erhöhung wird wie oben beschrieben in den ohmschen Spannungsabfall im Elektrodenzwischenraum (iR) und in die anodische (η_a) und kathodische Überspannung (η_c) aufgeteilt. Diese Verluste führen dabei zu einer Wärmeproduktion, so dass bei hoher Stromdichte eine Kühlung der Zelle notwendig ist. Bei fortschrittlichen Konzepten der Elektrolyse wurden durch Weiterentwicklungen (z.B. katalytische Aktivierung der Elektroden) die Überspannungsverluste reduziert, was zu einer entsprechenden Reduktion des Energieaufwands geführt hat.

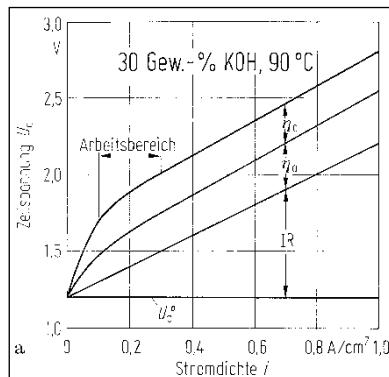


Abbildung 3-11: Schematische Darstellung der Stromdichte-Zellspannungs-Kennlinie von alkalischen Elektrolyseuren (Winter, 1986)

Aufgrund des oben beschriebenen Zusammenhangs nimmt der Wirkungsgrad des Zellstapels bei steigender Stromdichte (bzw. Wasserstoffproduktionsrate) und entsprechend steigenden Verlusten aufgrund von Überspannung ab bzw. ist der Wirkungsgrad bei geringer Teillast theoretisch am höchsten, wie in Abbildung 3-12 am Beispiel der alkalischen Elektrolyse dargestellt. Im praktischen Betrieb ist bei alkalischen Elektrolyseuren jedoch eine Mindest-Teillast von 20 - 25% erforderlich, bei PEM-Elektrolyseuren von 5%.

Dieses Teillastverhalten ist vorteilhaft bei der Kopplung von Elektrolyseuren mit variablem Stromangebot (Windkraftanlagen, PV-Anlagen) oder für das Lastmanagement mit Wasserstoffspeicherung in Netzen mit ausgeprägt wechselnden Lastprofilen.

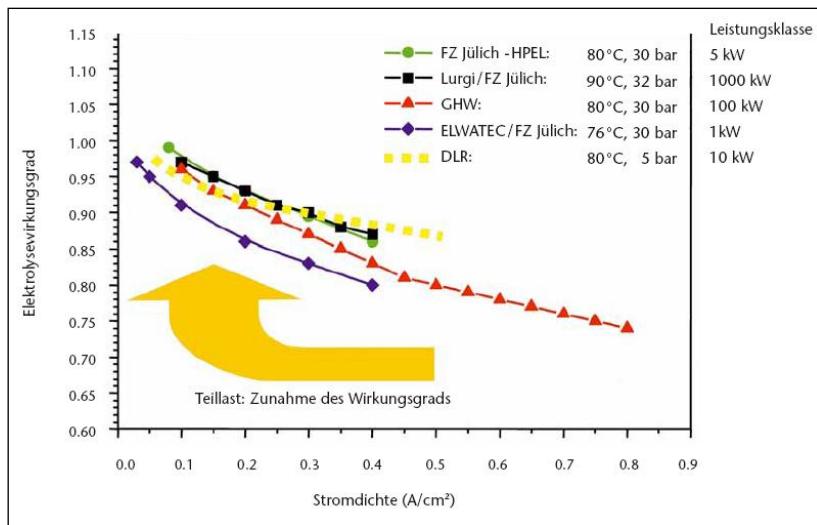


Abbildung 3-12: Wirkungsgrade des Zellstapels fortschrittlicher Konzepte der alkalischen Wasserelektrolyse (Schnurnberger, 2004)

3.3.2.2 Wirkungsgrad des Elektrolysegeräts

Der Wirkungsgrad des Elektrolysegeräts wird wie folgt ermittelt:

$$(4) \quad \eta_{\text{Elektrolysegerät}} = \frac{\dot{Q}_{H_2} + \dot{Q}_W}{P_{AC-1}} = \frac{\dot{Q}_{H_2} + \dot{Q}_W}{\sum_{i=1-6} P_{Vi}}$$

In einer Marktanalyse zu am Markt verfügbaren Elektrolysegeräten, die im Rahmen der Studie „Öko-Wasserstoff innovativ“ (Schaffer 2008) durchgeführt wurde, wurden auch die Wirkungsgrade der Geräte erhoben, die aber generell nur von einer Nutzung des Wasserstoffs (keine Sauerstoff- und Wärmenutzung) ausgehen.

Bei den Herstellerangaben zu alkalischen Elektrolyseuren wird die nutzbare Energie des Wasserstoffs zudem meist nur auf die zugeführte elektrische Leistung für Zellstapel (P_{V1}) und Pumpe für Elektrolytzirkulation (P_{V2}) bezogen. Die Leistung wird entsprechend mit ca. 4,2 kW/Nm³/h H₂ angegeben, was einem Wirkungsgrad von ca. 83 % (H_O) bzw. 72 % (H_U) entspricht. Unter Berücksichtigung aller wirkungsgradrelevanten Elemente eines alkalischen Elektrolysegerätes mit einer Leistung von ca. 4,5 - 5 kW/Nm³/h ergibt sich ein Wirkungsgrad von ca. 70 – 78 % (H_O) bzw. 60 – 66 % (H_U) (Abbildung 3-13).

Für PEM-Elektrolysegeräte gibt ein Hersteller die zugeführte elektrische Leistung auf Basis des Energieverbrauchs aller Anlagenelemente des Elektrolysegerätes mit 6,7 - 7,3 kW/Nm³/h an, was einem Wirkungsgrad des Elektrolysegerätes von ca. 48 – 52 % (H_O) bzw. 41 – 44 % (H_U) entspricht. Grundsätzlich ist bei der PEM-Elektrolyse der Energieverbrauch eines Elektrolysegerätes geringer als bei einem alkalischen Elektrolyseur aufgrund des geringeren verfahrenstechnischen Aufwands (keine Elektrolytzirkulation notwendig; externe Separation von Flüssigelektrolyt und den Reaktionsprodukten Wasserstoff und Sauerstoff entfällt). Vor allem aufgrund bisher fehlender Verfahren zur Herstellung von großflächigen Membran-Elektroden-Einheiten gibt es die PEM-Technologie aber bisher nur im kleinen Leistungsbereich (bis 10 Nm³/h H₂), die im Gegensatz zu alkalischen Elektrolyseuren, die in der industriellen Produktion im höheren Leistungsbereich mit jahrzehntelanger Betriebserfahrung eingesetzt werden, noch nicht optimiert sind. Aufgrund der technologischen Weiterentwicklung der PEM-Elektrolysegeräte wird mit einer wesentlichen Reduktion des Stromverbrauchs gerechnet, was Wirkungsgrade von ca. 80% (H_O, bei Nennlast) erwarten lässt (siehe „Neue Entwicklungen“ in Abbildung 3-13).

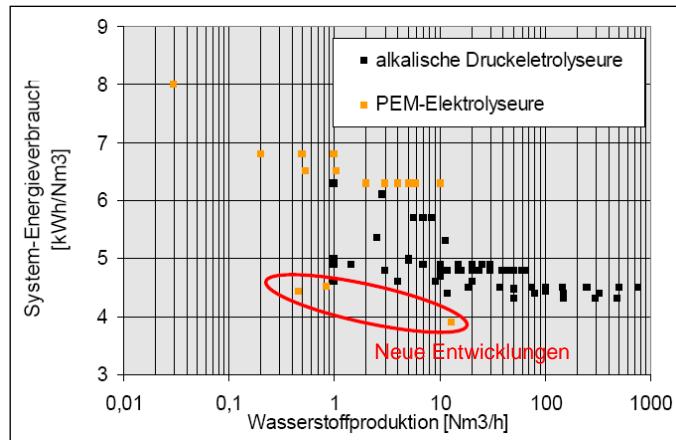


Abbildung 3-13: Spezifischer Energieverbrauch und Wasserstoffproduktion in alkalischen und PEM-Elektrolysegeräten (Smolinka, 2007)

3.3.2.3 Wirkungsgrad der Öko-Wasserstoff-Tankstelle

Der Wirkungsgrad der Öko-Wasserstoff-Tankstelle wird wie folgt ermittelt:

$$(5) \quad \eta_{\text{Elektrolysesystem}} = \frac{\dot{Q}_{H_{H_2}} + \dot{Q}_W}{P_{AC-2}} = \frac{\dot{Q}_{H_{H_2}} + \dot{Q}_W}{\sum_{i=1-11} P_{Vi}}$$

In der Öko-Wasserstoff-Tankstelle wird zusätzlich zum Elektrolysegerät der Energieaufwand für die Verdichtung der Produkte Wasserstoff und Sauerstoff sowie der Wärmeübertragung berücksichtigt. Die Verdichtung der Produktgase auf 200 bis 400 bar (in Versuchsanlagen bis über 900 bar) kann sowohl über einen externen Verdichter als auch teilweise über Systemdruckaufbau im Elektrolysegerät erfolgen. Dabei kann mit einem Druckelektrolyseur der Energiebedarf für die Verdichtung im Vergleich zum Kompressor um z.B. bei 400 bar bis zu 50% reduziert werden (Abbildung 3-14).

In Abbildung 3-15 wird der Wirkungsgrad von alkalischen Druckelektrolysegeräten und drucklosen Elektrolyseuren dargestellt, für einen direkten Vergleich dieser Systeme fehlt beim drucklosen Elektrolyseur jedoch der Energiebedarf des externen Verdichters.

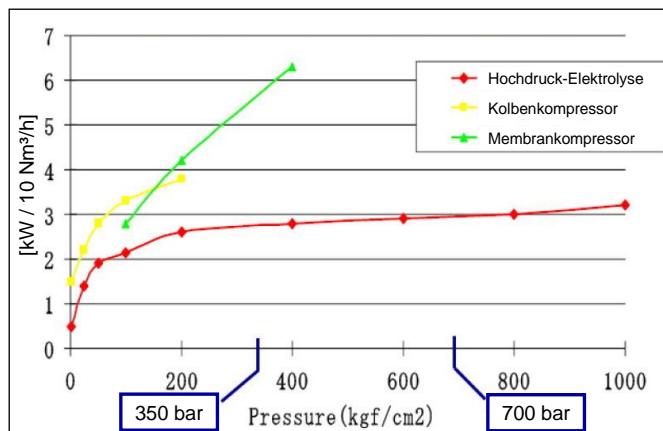


Abbildung 3-14: Leistung Wasserstoff-Verdichtung mittels Kompressor und Druckelektrolyse (Garche, 2008)

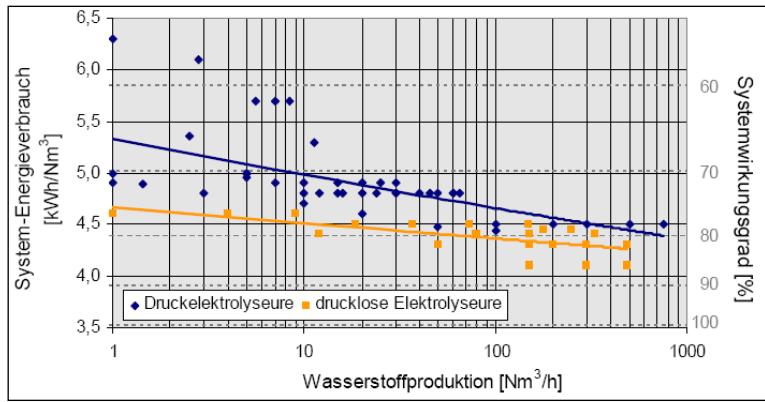


Abbildung 3-15: Vergleich der Wirkungsgrade alkalischer druckloser und Druck-Elektrolyseure (Smolinka, 2007)

3.3.2.4 Wirkungsgrad der Öko-Wasserstoff-Tankstelle mit einer Photovoltaikanlage

Der Wirkungsgrad der Öko-Wasserstoff-Tankstelle in Kombination mit einer Photovoltaikanlage wird wie folgt ermittelt:

$$(6) \quad \eta_{\text{Elektrolysesystem+PV / Stromnetz}} = \frac{\dot{Q}_{H_{H_2}} + \dot{Q}_W}{P_{DC-2}} = \frac{\dot{Q}_{H_{H_2}} + \dot{Q}_W}{\sum_{i=1-13} P_{Vi}}$$

Zusätzlich zur Öko-Wasserstoff-Tankstelle berücksichtigt werden Verluste des Wechselrichters vor der Netzeinspeisung des Stroms aus der Photovoltaikanlage sowie Verluste des Übertragungsstromnetzes. Der Wirkungsgrad eines Wechselrichters einer Photovoltaikanlage liegt zwischen 95 und 99 %, Die Übertragungsverluste im Stromnetz liegen bei ca. 6 %. Der Wirkungsgrad der Öko-Wasserstoff-Tankstelle wird daher mit dem Faktor 0,9 bis 0,93 multipliziert.

Charakteristisch für eine Photovoltaikanlage (ebenso Windkraftanlage) ist ein fluktuierendes, vom Verlauf der Sonneneinstrahlung abhängiges Stromerzeugungsprofil (Abbildung 3-16), was einen intermittierenden Betrieb (wechselnde Last) des Elektrolyseurs zur Folge hat.

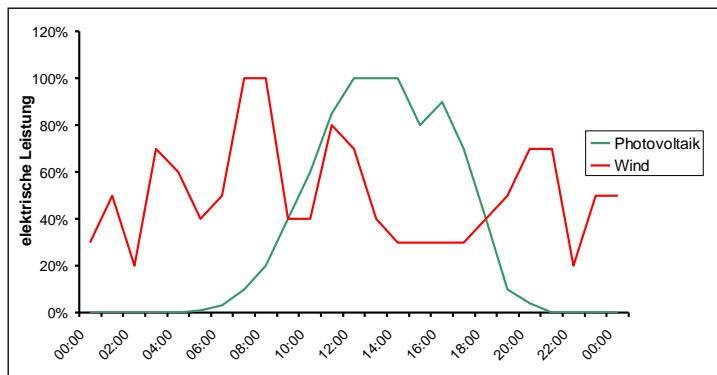


Abbildung 3-16: Fluktuierendes Stromerzeugungsprofil einer Photovoltaik- bzw. Windkraftanlage

Aufgrund des beschriebenen Zusammenhangs zwischen Zellspannung, Stromdichte und Wirkungsgrad des Zellstapels von Elektrolyseuren nimmt der Wirkungsgrad des Zellstapels im Teillastbereich zu. Dieses (theoretisch) günstige Teillastverhalten ist besonders vorteilhaft bei der Kopplung von Elektrolyseuren mit variablem Stromangebot (Windkraftanlagen, Photovoltaik-Anlagen). Aufgrund der für den Betrieb der Komponenten der Öko-Wasserstoff-Tankstelle erforderlichen Mindestleistung ist jedoch im praktischen intermittierenden Betrieb eine Mindestlast erforderlich. Ein Ziel dieses Projektes war daher unter anderem die

messtechnische Evaluierung des Wirkungsgrades der verschiedenen Systeme im intermittierenden Betrieb.

3.3.3 Messparameter, -stellen und –instrumente

Für die messtechnische Evaluierung des Anlagenbetriebs wurde ein Messkonzept mit den zu messenden Energie- und Stoffströmen, den Messstellen und den Messinstrumenten erarbeitet (Tabelle 3-2, Abbildung 3-17). Mit den gemessenen Energie- und Stoffströmen werden die Systemkennzahlen (z.B. Wirkungsgrad) für die Systeme „Zellstapel“, „Elektrolysegerät“ und „Öko-Wasserstoff-Tankstelle“ (Kapitel 3.3.2) berechnet.

Der Wirkungsgrad des Systems „Zellstapel“ berechnet sich über die im Zellstapel erzeugte Menge Wasserstoff und die anliegende elektrische Leistung. Die erzeugte Wasserstoffmenge setzt sich zusammen aus dem Wasserstoff-Produktgas (nutzbare Energie Wasserstoff, max. 1 Nm³/h) und einer Menge Wasserstoff, die intern im Elektrolyseur als Spülgas in einer Druckwechseladsorptionsanlage für die Wasserstofttrocknung verwendet wird und den Elektrolyseur über eine Entlüftungsleitung in die Umgebung verlässt. Für die im Wasserstoff enthaltene Energie wird wahlweise der untere oder obere Heizwert (3,00 oder 3,54 kWh/Nm³) eingesetzt (siehe Kapitel 3.3.2).

Im System „Elektrolysegerät“ wird für die Wirkungsgradberechnung die am Elektrolysegerät HOGEN S40 anliegende elektrische Leistung gemessen. Die elektrische Leistung der weiteren wirkungsgradrelevanten Komponenten des Elektrolyseurs (Gleichrichter, Ventilator, Wasserpumpe, Elektronik) berechnet sich aus der Differenz der elektrischen Leistung am Elektrolysegerät und am Zellstapel. Um den Wirkungsgrad des Gleichrichters, der den Zellstapel mit Gleichspannung versorgt, eigens berechnen zu können, wurde auch die Leistung am Gleichrichter gemessen.

Für die Wirkungsgradberechnung „Öko-Wasserstoff-Tankstelle“ wurde die elektrische Leistung aller relevanten zusätzlichen Komponenten (Wasserstoff-Verdichter, Luftkompressor für Sauerstoffverdichtung, Sauerstoffmodul, Heizkreispumpe, Messdatenerfassung und Steuerung) sowie Wasserdurchfluss, Vor- und Rücklauftemperaturen für die Berechnung der thermischen Leistung des Heizkreises für die Nutzung der Zellstapelkühlwärme gemessen. Zusätzlich erfasst wurden Kühlwasserfluss, Vor- und Rücklauftemperatur des Kühlwasserkreises des Zellstapels für die Berechnung der maximalen thermischen Leistung und die Abwärmeverluste des Plattenwärmetauschers.

Die Erstellung einer Wasserbilanz erfolgte auf Basis von gemessenen und berechneten Wasserströmen in der „Öko-Wasserstoff-Tankstelle“:

- Wasserbedarf für die elektrolytische Wasserspaltung in Wasserstoff und Sauerstoff im Zellstapel,
- Wassergehalt des an die Umgebung abgegebenen Wasserstoffs aus der Wasserstofttrocknung im Elektrolyseur
- Wassergehalt des Sauerstoffs (beim Austritt aus dem Elektrolyseur bzw. vor der Speicherung in den Gasflaschen)

Der Wassergehalt von feuchtem Wasserstoff bzw. Sauerstoff wird im Mollier H-x-Diagramm anhand der gemessenen Temperatur, dem Druck und der relativen Feuchtigkeit bestimmt.

Tabelle 3-2: System-Kennzahlen und Messparameter

System	System-Kennzahl				Messparameter				
	Bezeichnung	Abkürzung	Einheit	Berechnung	Nr.	Abkürzung	Gemessener Energie-/Stoffstrom	Einheit	Messmethode
"Zellstapel"	Wirkungsgrad Zellstapel	η_{ST}	%	$\eta_{ST} = P_{H2-ST} / P_{ST}$					
	Erzeugte Energie Wasserstoff	P_{H2-ST}	kW	$P_{H2-ST} = (F_{H2} + F_{H2-VELY}) \times H_{H2}$ ¹⁾	1	F_{H2}	Volumensstrom H ₂ -Produktgas	Nm ³ /h	Massflow Control (MFC)
	Zugeführte Leistung Zellstapel	P_{ST}	kW	$P_{ST} = U_{ST} \times I_{ST}$	2	$F_{H2-VELY}$	Volumensstrom H ₂ -Verlust Elektrolyseur ²⁾	Nm ³ /h	Verdrängungsmethode (man.)
"Elektrolysegerät"	Wirkungsgrad Elektrolysegerät	η_{ELY}	%	$\eta_{ELY} = P_{H2} / (P_{ELY} + P_{Deion})$	3	I_{ST}	Strom Zellstapel	A	Stromwandler
	Nutzbare Energie Wasserstoff	P_{H2}	kW	$P_{H2} = F_{H2} \times H_{H2}$	4	U_{ST}	Spannung Zellstapel	V	Spannungswandler
	Wirkungsgrad Gleichrichter	η_{GR}	%	$\eta_{GR} = P_{ST} / P_{GR}$	5	P_{ELY}	Leistung Elektrolysegerät	kWh/h	Stromzähler
	Wasserbedarf Elektrolyseur	$F_{H2O-ELY}$	l/h	$F_{H2O-ELY} = F_{H2O-Deion} - F_{H2O-O2} - F_{H2O-H2-VELY}$	6	P_{Deion}	Leistung Deionisierung und Wasserpumpe	kWh/h	Stromzähler
	Wassergehalt im H₂-Verlust Elektrolyseur²⁾	$F_{H2O-H2-VELY}$	l/h	H-x-Diagramm mit p_{H2-ELY} , T_{H2-ELY} , $RH_{H2-ELY}=100\%$	7	P_{GR}	Leistung Gleichrichter ³⁾	kWh/h	Stromzähler
					8	$F_{H2O-Deion}$	Volumensstrom deionisiertes Wasser	l/h	Flügelrad-Durchflussmesser
					9	p_{H2-ELY}	Druck Wasserstoff im Elektrolyseur	bar	Druckmessumformer (im Elektrolyseur)
"Elektrolysesystem"	Wirkungsgrad Elektrolyse-System	η_{ELS}	%	$\eta_{ELS} = (P_{H2} + P_{th}) / (P_{ELY} + P_{H2-VD} + P_{LK} + P_{O2-Mod} + P_{HKP} + P_{MDE-SPS})$	10	T_{H2-ELY}	Temperatur Wasserstoff im Elektrolyseur	°K	Temperatursensor (im Elektrolyseur)
	Nutzbare Wärme Heizkreis	P_{th-HK}	kW	$P_{th-HK} = \sigma_{H2O} \times F_{H2O-HK} \times c_{W-H2O} \times (T_{VL-HK} - T_{RL-HK})$ ⁴⁾	11	F_{H2O-HK}	Volumensstrom Wasser im Heizkreis	l/h	Turbinenrad-Durchflussmesser
					12	T_{VL-HK}	Vorlauftemperatur Heizkreis	°K	Pt100-Temperatursensor
					13	T_{RL-HK}	Rücklauftemperatur Heizkreis	°K	Pt100-Temperatursensor
					14	P_{H2-VD}	Leistung Wasserstoff-Verdichter	kWh/h	Stromzähler
					15	P_{H2-VD}	Leistung Luftkompressor	kWh/h	Stromzähler
					16	P_{O2-Mod}	Leistung Sauerstoffmodul (ohne Luftkompressor)	kWh/h	Stromzähler
					17	P_{HKP}	Leistung Heizkreispumpe	kWh/h	Stromzähler
					18	$P_{MDE-SPS}$	Leistung Messdatenerfassung und Steuerung	kWh/h	Stromzähler
	Kühlwärme Zellstapel	P_{th-ST}	kW	$P_{th-ST} = \sigma_{H2O} \times F_{H2O-ST} \times c_{W-H2O} \times (T_{VWT} - T_{RWT})$	19	F_{H2O-ST}	Volumensstrom Wasser im Zellstapel	Nm ³ /h	Turbinenrad-Durchflussmesser
	Wirkungsgrad Plattenwärmetauscher	η_{WT}	%	$\eta_{WT} = P_{th-HK} / P_{th-ST}$	20	T_{VL-ST}	Vorlauftemperatur Kühlkreis	°K	Pt100-Temperatursensor
	Wassergehalt im Sauerstoff nach Elektrolyseur	F_{H2O-O2}	l/h	$F_{H2O-O2} = AH_{O2-ELY} \times F_{O2} \times 10^{-3}$	21	T_{RL-ST}	Rücklauftemperatur Kühlkreis	°K	Pt100-Temperatursensor
	Kontrollmessung $RH_{O2-1} < 100\%$ für F_{O2} -Messung				22	F_{O2}	Volumensstrom Sauerstoff	Nm ³ /h	Massflow Control (MFC)
	Absolute Feuchte Sauerstoff	AH_{O2-ELY}	g/Nm ³	H-x-Diagramm mit p_{O2-ELY} , T_{O2-ELY} , $RH_{O2-ELY}=100\%$	23	p_{O2-1}	Druck Sauerstoff	bar	Druckmessumformer
					24	T_{O2-1}	Temperatur Sauerstoff	°K	Kombinierter Temperatur- und Feuchtesensor
					25	RH_{O2-1}	Relative Feuchte Sauerstoff	g/Nm ³	
					26	p_{O2-ELY}	Druck Sauerstoff	bar	Druckregelung DR-1
					27	T_{O2-ELY}	Temperatur Sauerstoff	°K	Temperatursensor (im Elektrolyseur)
	Wassergehalt im gespeicherten Sauerstoff	$F_{H2O-O2-SP}$	l/h	$F_{H2O-O2-SP} = AH_{O2-2} \times F_{O2} \times 10^{-3}$	28	p_{O2-2}	Druck Sauerstoff	bar	Druckmessumformer
	Absolute Feuchte Sauerstoff	AH_{O2-2}	g/Nm ³	H-x-Diagramm mit p_{O2-2} , T_{O2-3} , $RH_{O2-2}=100\%$	29	T_{O2-3}	Temperatur Sauerstoff	°K	Pt100-Temperatursensor

1) H_{H2} : unterer bzw. oberer Heizwert Wasserstoff: 3,00 bzw. 3,54 kWh/Nm³

2) H_2 -Verlust Elektrolyseur: Verwendung von produziertem H₂ im Elektrolyseur-internen H₂-Trockner (Druckwechselabsorption)

3) Vor dem Gleichrichter anliegende Leistung: Gleichrichter versorgt den Zellstapel

4) c_{W-H2O} : Wärmekapazität Wasser: 1,163 kWh/kgK

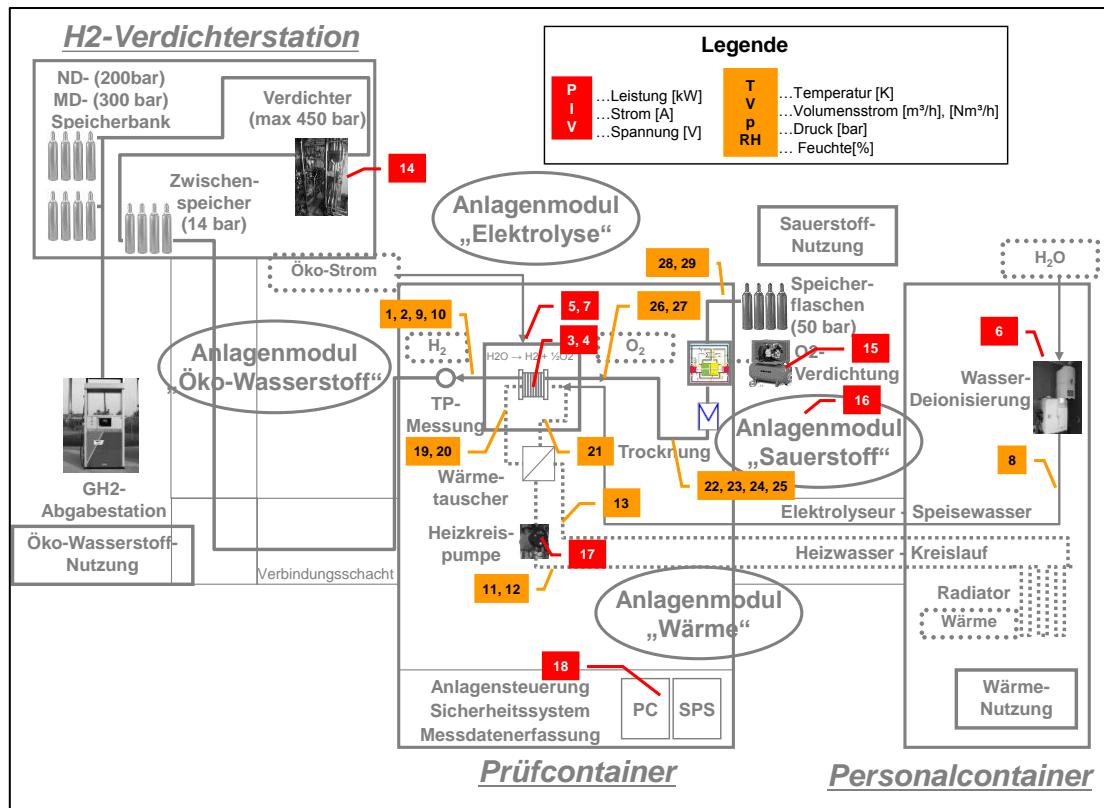


Abbildung 3-17: Messstellen für die in Tabelle 3-2 beschriebenen Messparameter

3.3.4 Messdatenerfassung

Für die Erfassung, Speicherung, Auswertung und Visualisierung der Messdaten wurde ein Datenmanagementsystem (Messdatenerfassung MDE) entwickelt, das in die bestehende elektronische Anlagensteuerung des HyCentA integriert wurde. Die dafür notwendige Ausstattung (Rechner, Bildschirme) ist im Prüfcontainer im PC-Raum zwischen den beiden Prüfzellen installiert (Abbildung 3-18).



Abbildung 3-18: Ausstattung Messdatenerfassung im Prüfcontainer

Folgende Funktionen wurden im Datenmanagementsystem implementiert:

- Messdatenerfassung und -verarbeitung in Echtzeit
- Visualisierung des Systemstatus
- Sollwerteingabe für Anlagensteuerung
- Integration in das Sicherheitskonzept des HyCentA
 - Leckageüberwachung über Gasdetektoren
 - Einleitung von Notmaßnahmen bei Alarm („Not-Aus-Matrix“)

Abbildung 3-19 bis Abbildung 3-22 zeigen Momentaufnahmen (Screenshots) der Systemstatus-Visualisierung der Anlagenmodule „Öko-Wasserstoff“, „Sauerstoff“ und „Wärme“.

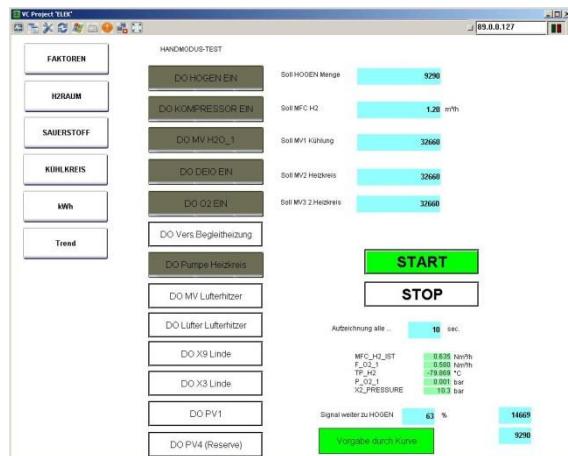
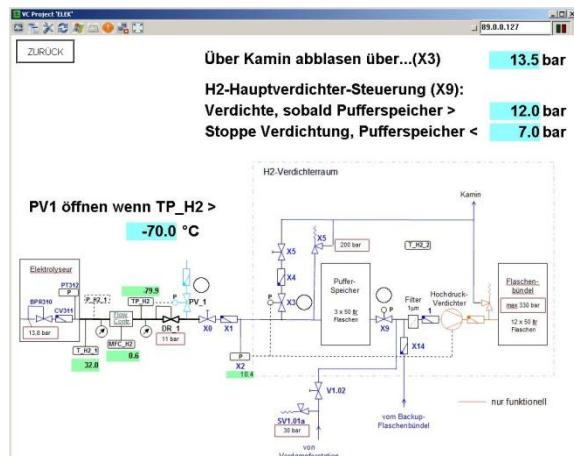


Abbildung 3-19: Startbildschirm MDE



3.4 Errichtung und Inbetriebnahme

3.4.1 Öko-Strom-Versorgung

Die elektrische Versorgung der Anlagenmodule erfolgt mit Ökostrom über den Netzanschluss der Technischen Universität Graz. Die verbrauchte Strommenge kann über einen eigenen Zähler der Weizer Naturenergie (Lastprofilzähler mit GSM Fernauslesung und Impulsausgaberelais), der in einem Schaltschrank außen am Prüfcontainer installiert wurde, ermittelt werden ([Abbildung 3-23](#)). Über den Schaltschrank werden auch alle weiteren elektrischen Komponenten elektrisch versorgt.



Abbildung 3-23: Schaltschrank mit Ökostromzähler (Installation durch Weizer Naturenergie)

3.4.2 Wasserdeionisierung

Der Betrieb des Elektrolyseurs erfordert deionisiertes Wasser (Leitfähigkeit 0,1 bis max. 1 micro Siemens/cm), das in einer im Personalcontainer installierten Deionisierungsanlage (Millipore ELIX-System) zur Verfügung gestellt wird ([Abbildung 3-24](#), [Abbildung 3-25](#)). Das Deionisierungsverfahren basiert auf Umkehrosmose und elektrischer Deionisierung (Elix-Technologie). Die Anlage hat eine konstante Deionisierungsleistung von 3 l/h Wasser. Das deionisierte Wasser wird in einer beheizten Leitung vom Personalcontainer über den Versorgungsschacht zum Elektrolyseur gepumpt und hat dort einen Eingangsdruck von max. 4 bar.

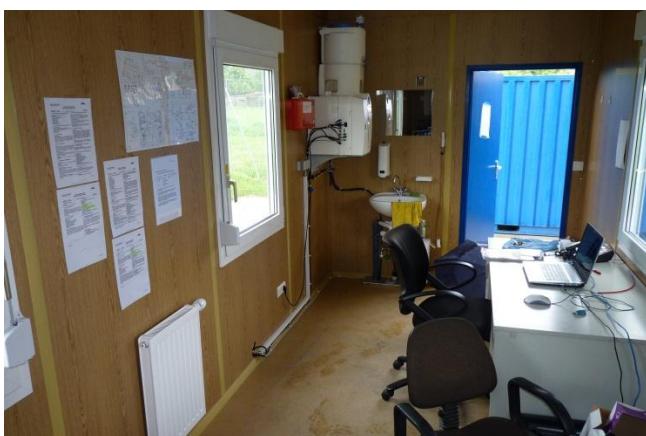


Abbildung 3-24: Wasser-Deionisierung im Personalcontainer des HyCentA



Abbildung 3-25: Millipore-Deionisierungsanlage

3.4.3 Anlagenmodul „Elektrolyse“

Der PEM-Elektrolyseur Hogen S40 der Firma Proton Energy Systems (USA) wurde von Partner Biovest zusammen mit der Firma Diamond Lite (Schweiz) installiert und in Betrieb genommen. Die Aufstellung des Elektrolyseurs erfolgte in einer der beiden Prüfzellen des bestehenden Prüfcontainers am HyCentA ([Abbildung 3-26](#), [Abbildung 3-27](#)) mit der für wasserstoffbezogene Forschungsaktivitäten notwendigen und bereits vorhandenen Ausstattung, insbesondere der Sicherheits- (Explosionsschutz-) maßnahmen (siehe auch [Kapitel 3.4.7](#)).

Der Hogen S40 ist nach der Europäischen ATEX-Richtlinie 94/9/EC zugelassen. Der Elektrolyseur ist für den Betrieb in nicht-explosiven Umgebungen ausgeführt. Für die Herstellung einer internen nicht-explosiven Gas-Atmosphäre wird das abgedichtete Gehäuse ständig mit Frischluft durchspült. Ein Wasserstoff-Sensor ist beim Austritt des SpülLuftstroms angeordnet, der bei einer Wasserstoffkonzentration von mehr als 1,2 % (30 % UEG) im SpülLuftstrom eine Alarmsmeldung und ein automatisches Abschalten des Hogen bewirkt. Die erforderliche Frischluft-Belüftungsrate wird vom Hersteller mit größer 100-mal der Wasserstofferzeugungsrate angegeben, die durch eine bei Erreichen von 40 % UEG automatisch aktivierte Querlüftung der Prüfzelle ([Kapitel 3.4.7](#)) sichergestellt ist. Der Elektrolyseur benötigt laut Hersteller für Lagerung bzw. Betrieb einen Umgebungstemperaturbereich von 5°C bis 40°C. Eine Container-Heizung für den Frostschutz ist vorhanden.

Die Schnittstellen zu den weiteren Anlagenmodulen und dem HyCentA sind in den folgenden [Kapiteln 3.4.4 bis 3.4.6](#) dargestellt.



Abbildung 3-26: Prüfcontainer mit Elektrolyseur



Abbildung 3-27: Inbetriebnahme des Hogen S40 durch Biovest

3.4.4 Anlagenmodul „Öko-Wasserstoff“

Das Anlagenmodul „Öko-Wasserstoff“ mit den Schnittstellen zum Elektrolyseur sowie zum bestehenden Wasserstoff-Verdichter des HyCentA wurde von Partner Linde errichtet.

[Abbildung 3-28](#) zeigt den Wasserstoff-Pufferspeicher, aus dem der Wasserstoff im Hochdruckverdichter ([Abbildung 3-29](#)) in die Speicherbanken am HyCentA verdichtet wird.



Abbildung 3-28: Wasserstoff-Zwischenspeicher



Abbildung 3-29: Hochdruck-Wasserstoffverdichter am HyCentA

3.4.5 Anlagenmodul „Sauerstoff“

Abbildung 3-30 zeigt das bei der Fa. Turner zusammengebaute Anlagenmodul „Sauerstoff“, Abbildung 3-31 nach seiner Integration am HyCentA.



Abbildung 3-30: Anlagenmodul „Sauerstoff“ (zusammengebaut bei Fa. Turner)



Abbildung 3-31: Anlagenmodul „Sauerstoff“ integriert am HyCentA

3.4.6 Anlagenmodul „Wärme“

Abbildung 3-32, Abbildung 3-33 und Abbildung 3-34 zeigen verschiedene Komponenten (Plattenwärmetauscher, Mischventile und Radiator) des Anlagenmoduls „Wärme“.



Abbildung 3-32:
Plattenwärmetauscher
und Mischventil MV_2

Abbildung 3-33: Mischventil
MV_3 am Personalcontainer

Abbildung 3-34: Heizung im
Personalcontainer

3.4.7 Sicherheitsmanagement

Der Betrieb der „Öko-Wasserstoff-Tankstelle der Zukunft“ mit den Anlagenmodulen „Öko-Wasserstoff“, „Sauerstoff“ und „Wärme“ im Prüfcontainer des HyCentA erfordert die Berücksichtigung von Sicherheits (Explosionsschutz-) Maßnahmen bzw. die Integration in das bestehende Sicherheitskonzept des HyCentA.

Das Sicherheitskonzept des HyCentA beinhaltet

- primäre (Vermeidung von explosionsfähiger Atmosphäre)
- sekundäre (Vermeidung von Zündquellen) und
- tertiäre (Begrenzung von Explosionsauswirkungen)

Explosionsschutzmaßnahmen.

Einen wesentlichen Bestandteil des Sicherheitskonzepts stellt die „Not-Aus-Matrix“ als primäre bzw. sekundäre Maßnahme dar. Die Not-Aus-Matrix ist eine Verschaltung mehrerer Not-Aus-Kreise am HyCentA:

- Haupt Not-Aus (nur der Torantrieb, die Sicherheitsleittechnik und die Notbeleuchtung bleiben in Betrieb)
- Not-Aus Wasserstofftankanlage
- Not-Aus rechte und linke Prüfzelle
- Not-Aus Verdichter

Der Not-Aus-Kreis in der Prüfzelle, in der die Anlagenmodule der „Öko-Wasserstoff-Tankstelle“ untergebracht sind, hat die Messung der Wasserstoffkonzentration als Grundlage und schaltet bei Erreichen einer Wasserstoffkonzentration von 40 % der unteren Explosionsgrenze (UEG) am Wasserstoffsensor in der Prüfzelle alle elektrischen Komponenten bis auf die Sensorik, Beleuchtung und Lüftung spannungslos. Außerdem wird die Querlüftung der Zellen aktiviert. Bei Vorhandensein einer Wasserstoffatmosphäre in der Zelle wird somit der Abtransport des Wasserstoffs eingeleitet und die Frischluftzufuhr in der Zelle wird hergestellt.

3.5 Inbetriebnahme der Gesamtanlage

Nach der Installation und Inbetriebnahme der einzelnen Anlagenmodule erfolgten in enger Zusammenarbeit mit der Firma MachIntelligence ([Abbildung 3-35](#)) deren gemeinsame Inbetriebnahme zusammen mit der am HyCentA genutzten bestehenden Infrastruktur. Die Messdatenerfassung und -verarbeitung in Echtzeit und die Sollwerteingabe für Anlagensteuerung und Sicherheitskonzept des HyCentA wurden in die bestehende Infrastruktur eingebunden und kalibriert. ([Abbildung 3-36](#)).



Abbildung 3-35: Inbetriebnahme der Gesamtanlage durch Fa. Machintelligence

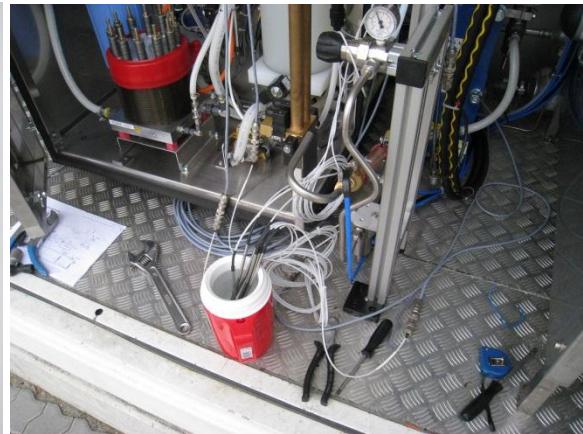


Abbildung 3-36: Kalibrierung der Messdatenerfassung

4 Ergebnisse aus dem Betrieb der Demonstrationsanlage

4.1 Betriebsbedingungen des Elektrolyseurs

Die Anlage wurde im Zeitraum zwischen April und September 2010 ca. 1.000 Stunden betrieben. Das Ziel war die messtechnische Evaluierung unterschiedlicher Betriebszustände der Öko-Wasserstoff-Tankstelle der Zukunft auf Basis des in Kapitel 3.3 vorgestellten Messkonzeptes. Folgende Betriebszustände wurden dabei berücksichtigt:

- Statischer Vollastbetrieb
- Statischer Teillastbetrieb (20 %, 40 %, 60 % und 80 % der Volllast-Stromstärke am Zellstapel)
- Intermittierender Betrieb auf Grundlage typischer Lastprofile von Ökostromanlagen am Fallbeispiel „PV Werksweg“:
 - fassadenintegrierte Photovoltaikanlage am Betriebsgebäude Pichler Werke Weiz Werksweg (Abbildung 4-1, Abbildung 4-2)
 - Leistung: 4,6 kWp, Jahreserzeugung: ca. 4.000 kWh p.A.



Abbildung 4-1: PV-Anlage Pichler Werke, Werksweg Weiz

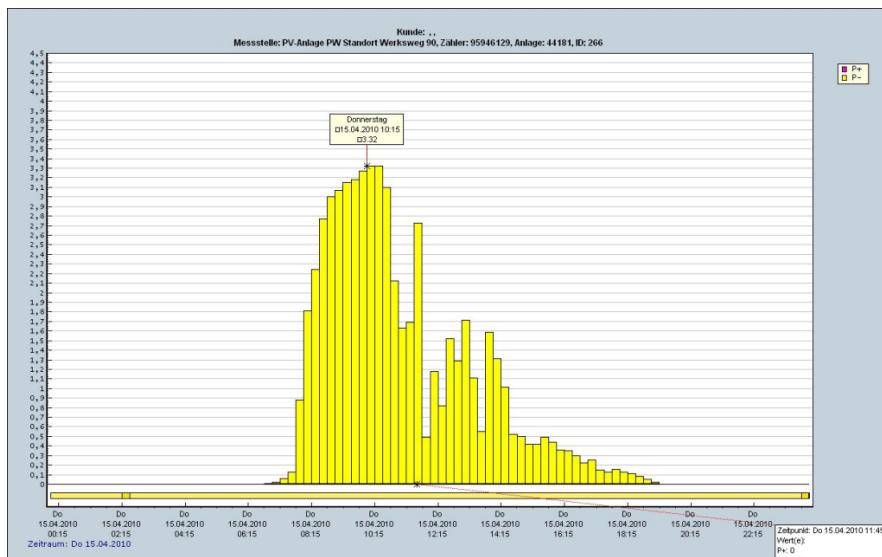


Abbildung 4-2: Typisches Tagesprofil PV-Anlage (teilweise bewölkter Tag)

4.2 Wirkungs- und Nutzungsgrad

4.2.1 Statischer Voll- und Teillastbetrieb

Nachfolgend sind Ergebnisse für die elektrische Leistung (in kW pro erzeugtem Nm³ Wasserstoff pro Stunde) der Anlagenmodule „Elektrolyse“, „Öko-Wasserstoff“, „Sauerstoff“ und „Wärme“ und von Einzelkomponenten sowie der Gesamtanlage „Öko-Wasserstoff-Tankstelle“ dargestellt. Abbildung 4-3 zeigt die Leistung der stromverbrauchenden Komponenten bei Volllastbetrieb (100 %) mit einer Erzeugung von 1 Nm³ Wasserstoff pro Stunde, in Abbildung 4-4 ist die Leistung beim Teillastbetrieb (60 %) mit 0,52 Nm³/h dargestellt.

Die Leistung von Gleichrichter und Zellstapel im Elektrolyseur ist lastabhängig, wie auch von Wasserstoff- und Sauerstoffverdichtung. Die Leistung von sonstigen Verbrauchern (Ventilator, Elektronik im Elektrolyseur sowie die Steuerung im Sauerstoff-Modul) und die Wasserpumpe im Wärmemodul sind nahezu lastunabhängig (Tabelle 4-1).

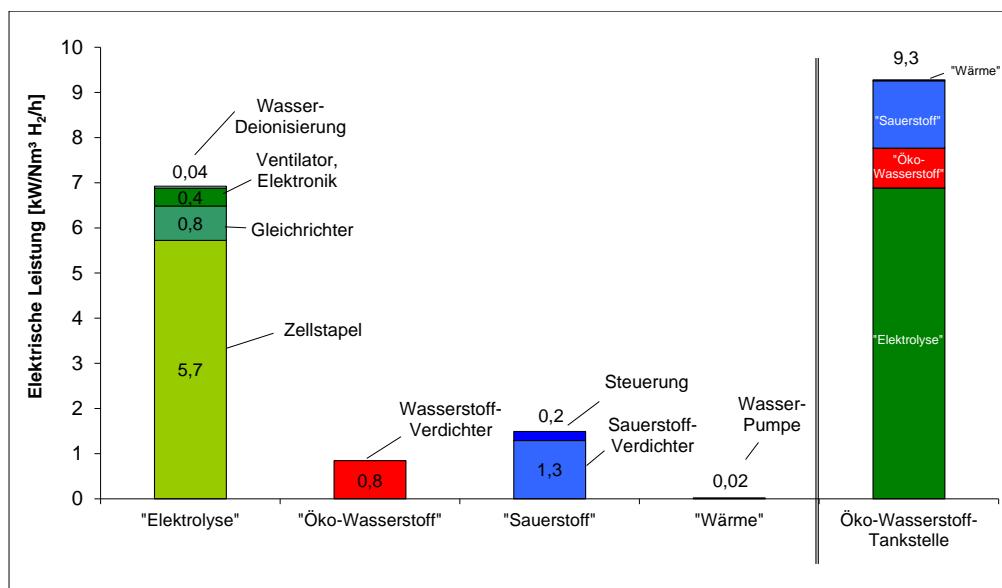


Abbildung 4-3: Leistung der stromverbrauchenden Komponenten bei Volllast (1 Nm³ H₂/h)

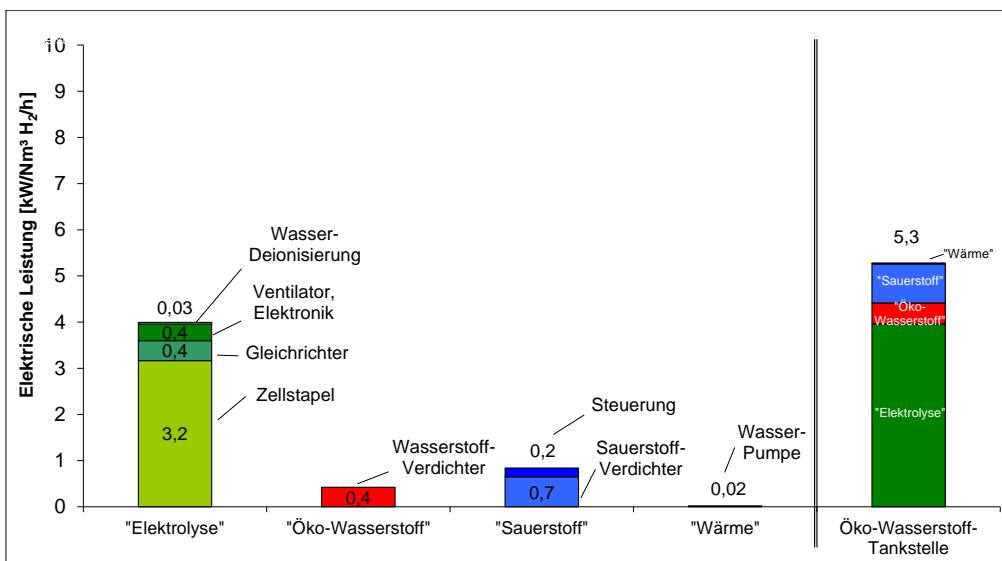


Abbildung 4-4: Leistung der stromverbrauchenden Komponenten bei Teillast (0,52 Nm³ H₂/h)

Tabelle 4-1: Leistung der stromverbrauchenden Komponenten bei Voll- und Teillast

	Lastzustand [Nm ³ H ₂ /h]	Volllast					Teillast				
		100%	80%	60%	40%	20%	1	0,76	0,52	0,28	0,05
Anlagenmodule										Elektrische Leistung [kW/Nm³/h]	
"Elektrolyse"		6,92	5,45	3,99	2,65	1,45					
Zellstapel		5,72	4,43	3,17	1,97	0,90					
Gleichrichter		0,76	0,60	0,43	0,29	0,17					
Sonstige Verbraucher		0,40	0,38	0,37	0,36	0,35					
Wasser-Deionisierung		0,04	0,04	0,03	0,03	0,03					
"Öko-Wasserstoff"		0,84	0,56	0,42	0,35	0,24					
Wasserstoff-Verdichter		0,84	0,56	0,42	0,35	0,24					
"Sauerstoff"		1,49	1,11	0,84	0,62	0,30					
Luft-Kompressor		1,29	0,91	0,65	0,44	0,13					
Sonstige Verbraucher		0,20	0,19	0,19	0,18	0,18					
"Wärme"		0,02	0,02	0,02	0,02	0,02					
Wasserpumpe		0,02	0,02	0,02	0,02	0,02					
Öko-Wasserstoff-Tankstelle		9,28	7,14	5,28	3,64	2,01					

Die Einbindung in die HyCentA-Sicherheitstechnik sowie die Elektronik für die Messdatenerfassung weist eine lastunabhängige Leistung von 0,07 kW/Nm³/h Wasserstoff auf. Diese wurden als projektspezifische, für eine zukünftige Öko-Wasserstoff-Tankstelle jedoch nicht relevante Verbraucher bei den Auswertungen nicht berücksichtigt.

Tabelle 4-2 stellt die erzeugten Mengen Öko-Wasserstoff (inklusive und ohne Spülgas) und Sauerstoff für die unterschiedlichen Lastbereiche dar. In Tabelle 4-3 sind die erzeugte Wärmeleistung sowie die Temperaturen der Wasserkreisläufe (Kühlkreis im Elektrolyseur, Heizkreis im Personalcontainer) zusammengestellt.

Tabelle 4-2: Erzeugte Mengen Öko-Wasserstoff und Sauerstoff

		Volllast					Teillast				
		100%	80%	60%	40%	20%	[Nm ³ /h]				
Koppelprodukte											
Öko-Wasserstoff (inklusive Spülgas)		1,15	0,91	0,67	0,43	0,2					
Öko-Wasserstoff (ohne Spülgas)		1	0,76	0,52	0,28	0,05					
Sauerstoff		0,58	0,45	0,32	0,19	0,09					

Tabelle 4-3: Erzeugte Wärme und Temperaturen der Wasserkreisläufe

		Volllast					Teillast				
		100%	80%	60%	40%	20%	[kWh/h]				
Koppelprodukt Wärme		1,23	0,91	0,56	0,20	0,03					
Kühlkreis Zellstapel							Wassertemperatur [°C]				
Temperatur vor Wärmetauscher		49,3	42,8	41,0	40,4	34,9					
Temperatur nach Wärmetauscher		47,0	41,1	40,0	40,0	34,8					
Heizkreis Personalcontainer											
Vorlauf-Temperatur		49,1	42,6	40,9	39,5	30,0					
Rücklauf-Temperatur		39,9	35,2	31,3	25,1	21,2					

Im Folgenden wird der Wirkungsgrad der Systeme „Zellstapel“, „Elektrolyseur“ und „Öko-Wasserstoff-Tankstelle“ dargestellt (Grundlagen siehe Kapitel 3.3.2). In Abbildung 4-5 ist der

Wirkungsgrad des Zellstapels, des Elektrolyseurs sowie des Gleichrichters im Elektrolyseur für unterschiedliche Lastzustände dargestellt.

Der Wirkungsgrad des Gleichrichters als Verhältnis der Leistung am Ausgang zur Leistung am Eingang ist im Lastbereich zwischen 0,5 und 1 Nm³/h Wasserstoff nahezu konstant bei 88 % und sinkt im unteren Teillastbereich auf 84 % (siehe auch Optimierungspotentiale in Kapitel 4.4).

Der Wirkungsgrad des Zellstapels hat einen typischen Verlauf mit einem bei Teillast höheren Wirkungsgrad gegenüber dem Volllastbetrieb (siehe Kapitel 3.3.2.1). Der Wirkungsgrad liegt zwischen 71 % und 78 % (bezogen auf den oberen Heizwert Ho von Wasserstoff).

Der Elektrolyseur zeigt einen mit abnehmender Last fallenden Wirkungsgrad. Bezogen auf den Ho von Wasserstoff liegt der Wirkungsgrad im oberen Teillastbereich zwischen 51 % und 47 %, und fällt im unteren Teillastbereich auf 38 % bzw. 11 % ab. Die Ursache dafür sind zum einen die lastunabhängige Leistung verschiedener stromverbrauchender Komponenten wie der Ventilator und die Leistungselektronik (siehe Tabelle 4-1) und zum anderen der Verlust eines Teils des produzierten Wasserstoffs als Spülgas in der elektrolyseur-internen Wasserstoff-Trocknungseinheit (Druckwechseladsorptionsanlage, siehe Kapitel 3.2.2). Diese konstante lastunabhängige Menge Wasserstoff (0,15 Nm³/h) wird über eine Entlüftungsleitung an die Umgebung abgegeben.

Abbildung 4-6 vergleicht den Wirkungsgrad der Öko-Wasserstoff-Tankstelle (mit gekoppelter Nutzung von Öko-Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme) mit dem einer „konventionellen“ Wasserstoff-Tankstelle (ohne Nutzung von Sauerstoff und Wärme) für unterschiedliche Lastzustände. Der Wirkungsgrad der Öko-Wasserstoff-Tankstelle wird dabei auf die Summe aus Energieinhalt des Wasserstoffs (Ho) und des nutzbaren Wärmeanteils bezogen. Bei Volllast ist der Wirkungsgrad der Öko-Wasserstoff-Tankstelle 5,6 % höher als bei der Wasserstoff-Tankstelle. Mit abnehmender Last wird der Unterschied jedoch zunehmend geringer, ab ca. 0,3 Nm³/h ist der Wirkungsgrad nahezu gleich.

In Ergänzung zu den oben beschriebenen Systemen wurde der Wirkungsgrad der Öko-Wasserstoff-Tankstelle für den Fall berechnet, dass eines der Koppelprodukte Sauerstoff oder Wärme nicht genutzt wird und die entsprechenden stromverbrauchenden Komponenten des Sauerstoff- oder Wärmemoduls wegfallen. In Tabelle 4-4 ist der Wirkungsgrad aller untersuchten Systeme bezogen auf den oberen (Ho) und unteren Heizwert (Hu) von Wasserstoff zusammengestellt.

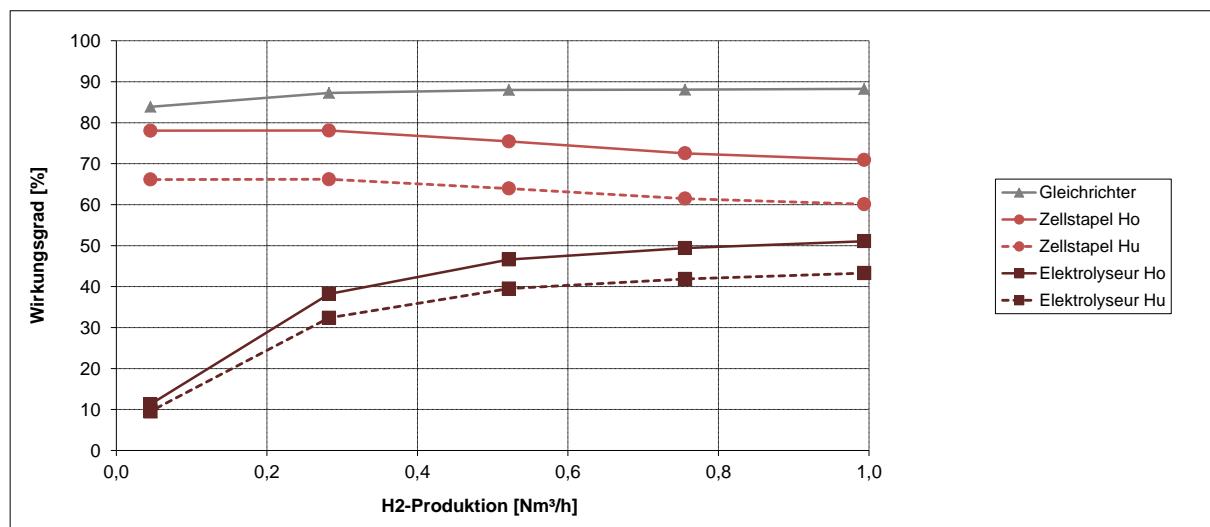


Abbildung 4-5: Wirkungsgrad Gleichrichter, Zellstapel und Elektrolyseur bei unterschiedlichen Lastzuständen

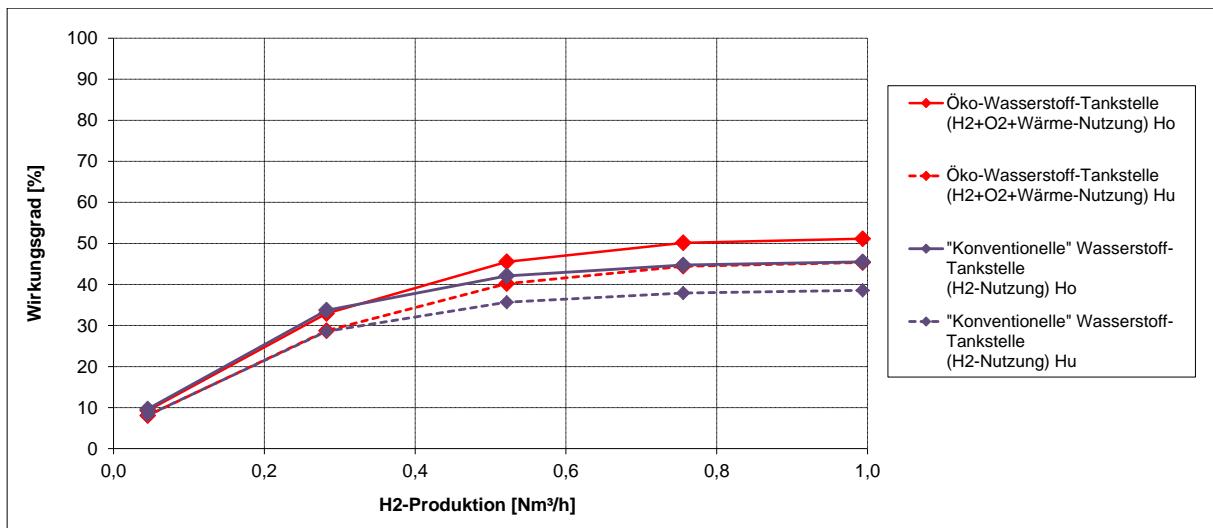


Abbildung 4-6: Wirkungsgrad „Öko-Wasserstoff-Tankstelle“ bei unterschiedlichen Lastzuständen

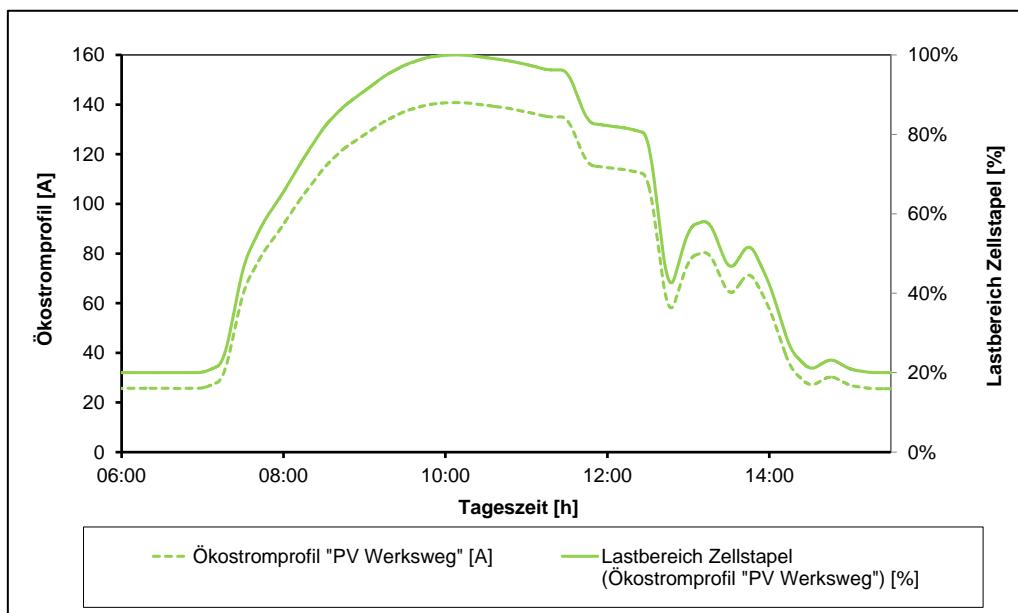
Tabelle 4-4: Wirkungsgrad der untersuchten Systeme

Systeme	Lastzustand [Nm³ H₂/h]	Volllast					Teillast				
		100%		80%		60%		40%		20%	
		1	0,76		0,52		0,28		0,05		
Wirkungsgrad (Ho Wasserstoff) [%]											
Zellstapel		71%	73%	75%	78%	78%					
Elektrolyseur		51%	49%	47%	38%	11%					
Gleichrichter		88%	88%	88%	87%	84%					
\"Konventionelle\" Wasserstoff-Tankstelle H2-Nutzung		46%	45%	42%	34%	10%					
Öko-Wasserstoff-Tankstelle H2-, O2-, Wärmenutzung		51%	50%	46%	33%	9%					
Öko-Wasserstoff-Tankstelle H2-, O2-Nutzung		38%	38%	35%	28%	8%					
Öko-Wasserstoff-Tankstelle H2-, Wärmenutzung		61%	60%	55%	40%	11%					
Wirkungsgrad (Hu Wasserstoff) [%]											
Zellstapel		60%	61%	64%	66%	66%					
Elektrolyseur		43%	42%	39%	32%	10%					
Gleichrichter		88%	88%	88%	87%	84%					
\"Konventionelle\" Wasserstoff-Tankstelle H2-Nutzung		39%	38%	36%	29%	8%					
Öko-Wasserstoff-Tankstelle H2-, O2-, Wärmenutzung		45%	44%	40%	29%	8%					
Öko-Wasserstoff-Tankstelle H2-, O2-Nutzung		32%	32%	30%	24%	7%					
Öko-Wasserstoff-Tankstelle H2-, Wärmenutzung		54%	53%	48%	35%	10%					

4.2.2 Intermittierender Betrieb

Am Beispiel des Betriebs des Elektrolyseurs und der Öko-Wasserstoff-Tankstelle auf Grundlage eines typischen intermittierenden Ökostromprofils einer Photovoltaik-Anlage (Fallbeispiel „PV Werksweg“) wurden die Auswirkungen von Lastwechseln auf die Erzeugung der Koppelprodukte Öko-Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme ([Abbildung 4-8](#)), den Lastverlauf der stromverbrauchenden Komponenten und der Gesamtanlage ([Abbildung 4-9](#)) sowie auf den Nutzungsgrad ([Abbildung 4-10](#)) dargestellt.

Das vorgegebene Ökostromprofil (Verlauf der Stromstärke über die Zeit) „PV Werksweg“ wurde modellhaft an den Lastbereich des Zellstapels angepasst ([Abbildung 4-7](#)). Das Maximum des Profils mit einer Stromstärke von 140 A liegt dabei im Vollastbereich des Zellstapels (100%), als Mindeststromstärke wurden 26 A festgelegt (entspricht 20% Teillast). 20 A sind für die Grundlast des Elektrolyseurs (Ventilator, Pumpe, Steuerung, Elektronik) erforderlich, deren Unterschreiten eine automatische Abschaltung des Gerätes zur Folge hat.



[Abbildung 4-7: Öko-Stromprofil und Lastbereich Zellstapel im Fallbeispiel „PV Werksweg“](#)

Grundsätzlich folgt die Erzeugung der Koppelprodukte Öko-Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme im Zellstapel unmittelbar dem Ökostrom-Profil ([Abbildung 4-8](#)). Aufgrund der Betriebsweise des Elektrolyseurs und kurzzeitig stark schwankenden Durchflussraten für den erzeugten Wasserstoff aufgrund des internen Wasserstoff-Trocknungsvorganges (siehe [Kapitel 3.2.2](#)) sind zur Vergleichsmäßigung 10-Minuten-Mittelwerte dargestellt. Der zeitliche Verlauf der nutzbaren Wärmemenge unterliegt im Vergleich zum Ökostrom-Profil Schwankungen, die auf Wassermischvorgänge zur Temperaturregelung im Zellstapel zurückzuführen sind.

Die elektrische Leistungen für die Wasserstoffverdichtung und weitere stromverbrauchende Komponenten sowie die Öko-Wasserstoff-Tankstelle ([Abbildung 4-9](#)) sind ebenfalls als 10-Minuten-Mittelwerte dargestellt. Der Wasserstoffverdichter ist im Lastbereich zwischen 80 und 100 % alle 30 Minuten durchschnittlich 45 Sekunden in Betrieb mit einer elektrischen Leistung von 24 kW im Durchschnitt und 108 kW (für eine Dauer von 15 Sekunden) maximal. Diese Leistungsspitzen müssten für die Auslegung der Stromerzeugung vor Ort (Inselbetrieb der Öko-Wasserstoff-Tankstelle) berücksichtigt werden.

Der Verlauf der Wirkungsgrade in [Abbildung 4-10](#) ist analog zu den erzeugten Koppelprodukten und den elektrischen Leistungen ebenfalls als 10-Minuten-Mittelwert dargestellt. Dabei zeigen sich die in [Abbildung 4-5](#) und [Abbildung 4-6](#) dargestellten Zusammenhänge zwischen Lastbereich und Wirkungsgrad beim Zellstapel, dem

Elektrolyseur und der Öko-Wasserstoff-Tankstelle. Im Durchschnitt ist im Lastbereich größer 20 % über die Zeit von 8 Stunden der Nutzungsgrad des Zellstapels 74 %, des Elektrolyseurs 43 % und der Öko-Wasserstoff-Tankstelle 42 %.

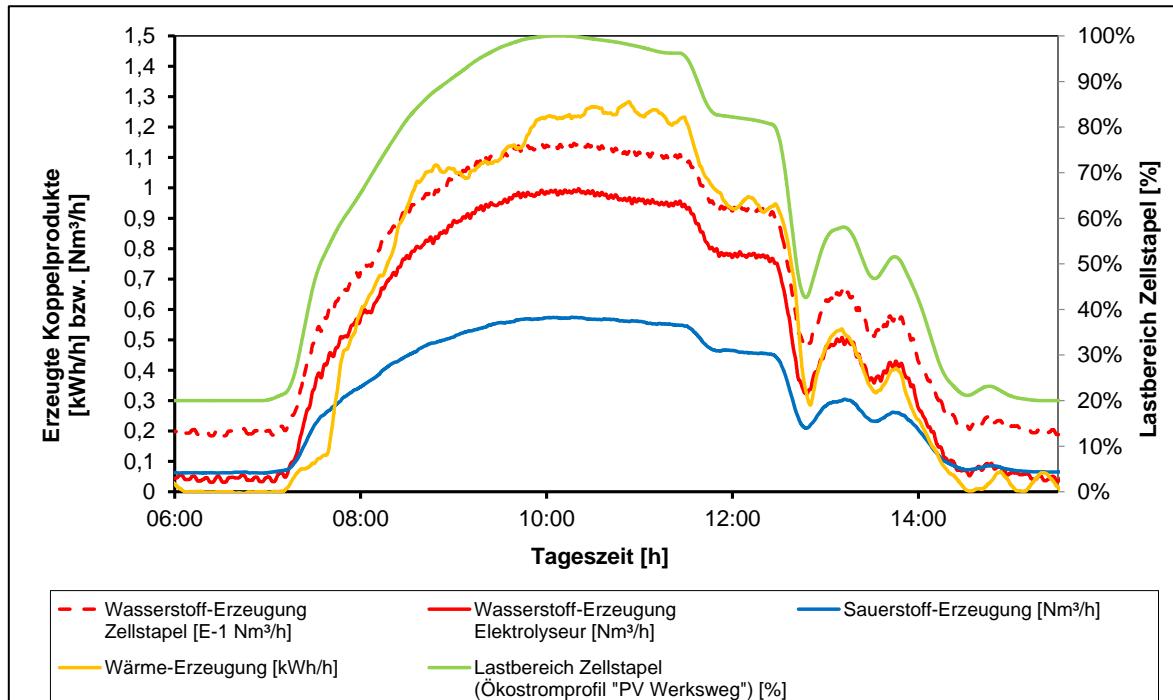


Abbildung 4-8: Ökostromprofil und erzeugte Koppelprodukte im Fallbeispiel „PV Werksweg“ (10-Minuten-Mittelwerte)

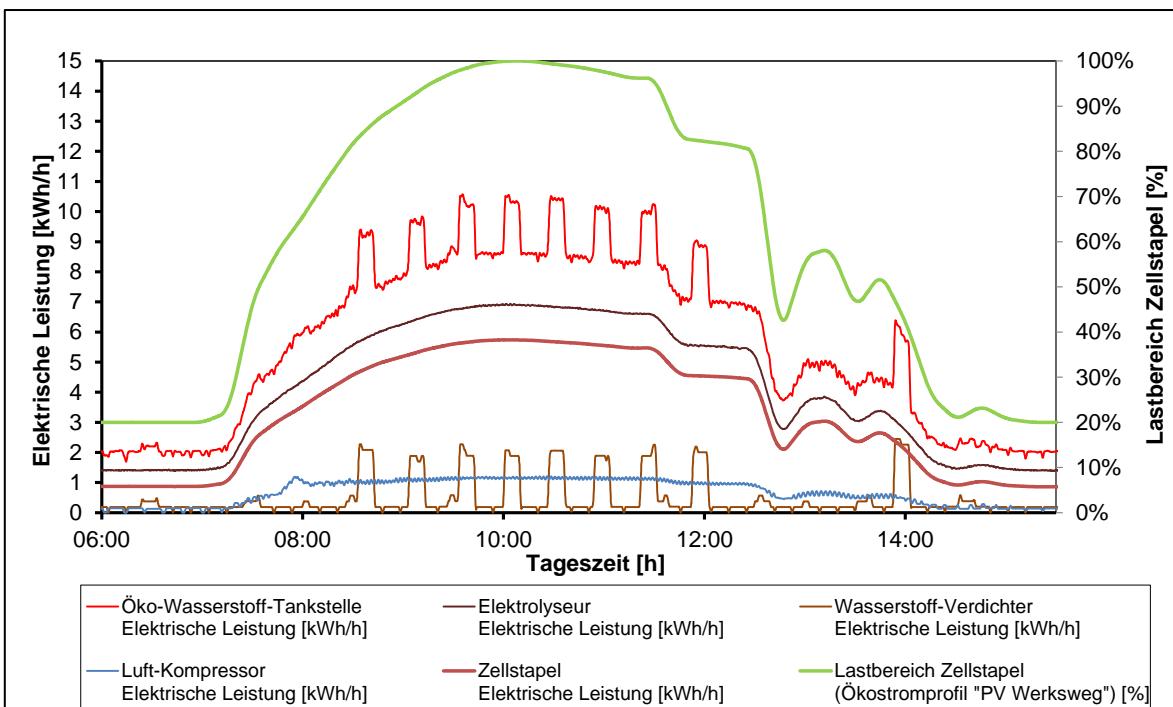


Abbildung 4-9: Elektrische Leistung der stromverbrauchenden Komponenten im Fallbeispiel „PV Werksweg“ (10-Minuten-Mittelwerte)

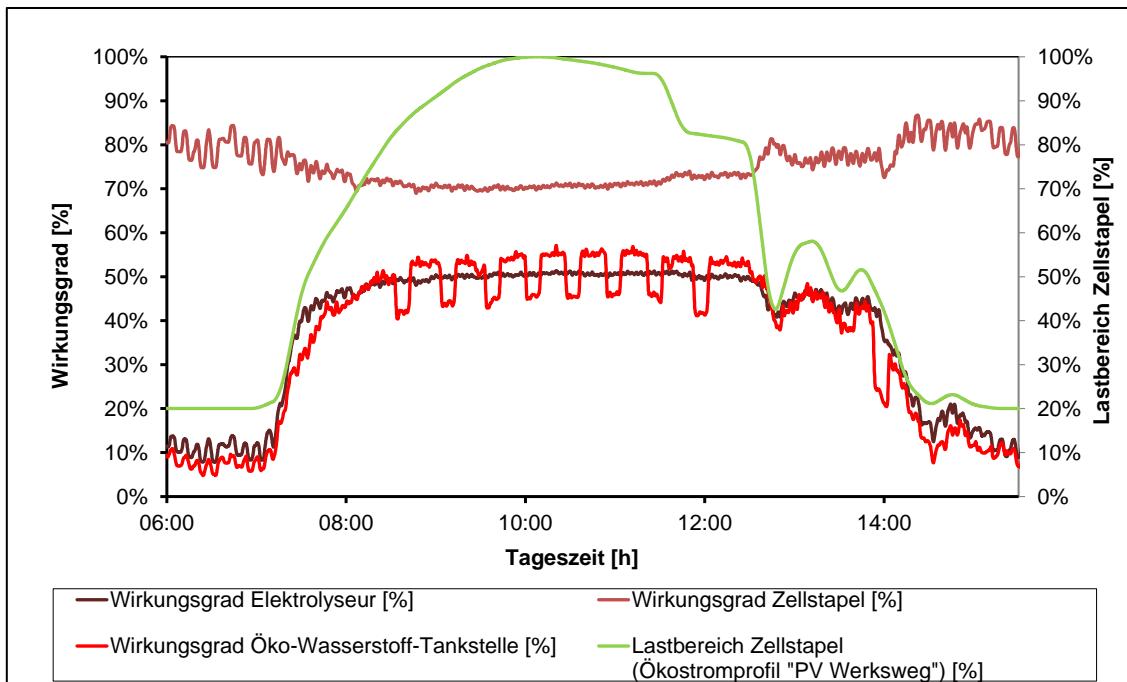


Abbildung 4-10: Wirkungsgrade im Fallbeispiel „PV Werksweg“ (10-Minuten-Mittelwerte)

4.3 Wasserbilanz

Die benötigte Wassermenge setzt sich aus dem Wasserbedarf für die elektrolytische Wasserspaltung, dem Wassergehalt des Wasserstoff-Spülgenes in der elektrolyseur-internen Wasserstoff-Trocknungseinheit und dem Wassergehalt des Sauerstoffs zusammen (siehe [Kapitel 3.3.3](#)). Diese Wassermengen sind in [Tabelle 4-5](#) für unterschiedliche Lastzustände dargestellt. Bei Volllast (1 Nm³/h Wasserstoff-Produktion) ist der Wasserbedarf 0,96 l/h, der mit sinkender Last anteilig abnimmt.

Tabelle 4-5: Wasserbedarf des Elektrolysesystems

	Vollast	Teillast				
		100%	80%	60%	40%	20%
Lastzustand [Nm ³ H ₂ /h]	1	0,76	0,52	0,28	0,05	
Wasserbedarf	[g H ₂ O / Nm ³ H ₂]					
Elektrolyse	927	735	544	347	171	
Wassergehalt Sauerstoff	24	10	3	2	1	
Wassergehalt Wasserstoff-Spülgas	8	8	8	8	8	
Gesamt	959	753	555	357	180	

4.4 Technische Optimierungspotentiale

Optimierungspotentiale bestehen für

- Wasserstoff-Trocknung,
- Gleichrichter,
- Sauerstoff-Verdichtung und
- Wasserstoff-Verdichtung.

Wie in den Ergebnissen der messtechnischen Evaluierung ([Abbildung 4-6](#)) dargestellt, sinkt der Wirkungsgrad des Elektrolyseurs HOGEN S40 und der Öko.-Wasserstoff-Tankstelle im Teillastbereich. Die Ursache dafür ist die Nutzung einer konstanten Menge des im Zellstapel erzeugten Wasserstoffs als Spülgas in der elektrolyseur-internen Wasserstoff-Trocknungseinheit (siehe [Kapitel 3.3.3](#)). Die für den Betrieb bei Volllast ausgelegte Steuerung weist daher für den Teillastbetrieb ein Optimierungspotential auf.

Der Gleichrichter des Elektrolyseurs weist bei Volllast einen Wirkungsgrad von ca. 88 % auf, der im Teillastbereich abnimmt (ca. 84 % bei 5 % Last, siehe [Abbildung 4-6](#)). Gegenüber dem heutigen Stand der Technik bei Gleichrichtern mit ca. 95 % Wirkungsgrad bei Volllast besteht ein Optimierungspotential.

Die Verdichtung des Sauerstoffs auf maximal 50 bar für die Speicherung in Gasflaschen erfolgt über Membranvorverdichtung und mit Luftkompressor angetriebener pneumatischer Kolbenverdichtung. Diese technische Lösung für das Sauerstoffmodul, die mangels Marktangeboten für elektrisch angetriebene Kolbenverdichter für die Verdichtung der geringen Sauerstoffmengen (max 0,5 Nm³/h) entwickelt wurde, hat aufgrund des Wirkungsgrades des Luftkompressors (ca. 40 %) einen niedrigen Gesamtwirkungsgrad. Hier besteht ein Optimierungspotential bei größeren Sauerstoffmengen, für die direkt elektrisch angetriebene Kolbenverdichter angeboten werden.

Die Verdichtung des Wasserstoffs erfolgt über einen externen Kolbenverdichter. Bei Einsatz eines Hochdruckelektrolyseurs kann der Energiebedarf für den Kolbenverdichter um bis zu 35% reduziert werden ([Abbildung 3-14](#)). Als eine weitere Möglichkeit für die Reduktion des Energiebedarfs für die Wasserstoff-Verdichtung kann unter bestimmten Bedingungen die thermische Wasserstoffverdichtung auf der Basis von Metallhydriden sein (Bonhoff 1998). Die Absorptions- und Desorptionsreaktion der Metalle bzw. Legierungen mit Wasserstoff (Hydrierung) erfolgt temperaturabhängig bei unterschiedlichen Gleichgewichtsdrücken. Dieses Verhalten wird genutzt, um Wasserstoff unter Aufwendung thermischer Energie zu verdichten.

5 Driving Event mit Wasserstoff-Fahrzeugen am HyCentA

5.1 Veranstaltungsrahmen

Ein Ziel des Projekts war, das Gesamtsystem der „Öko-Wasserstoff-Tankstelle der Zukunft“ einem interessierten Fachpublikum und der Öffentlichkeit vorzustellen und die Möglichkeit für die mittelfristige Markteinführung von Öko-Wasserstoff als alternativen Treibstoff an Tankstellen der Zukunft darzustellen.

Am 28. September 2010 wurde am HyCentA ein Driving Event mit zwei Wasserstoff-Fahrzeugen (siehe [Kapitel 5.3](#)) veranstaltet, das durch Präsentationen aller Projektpartner (siehe [Anhang 8.4](#)) und eine Besichtigung der Demonstrationsanlage am HycentA umrahmt wurde. Um inhaltliche Synergien zu nutzen, fand dieses Event gemeinsam mit einem Workshop des World Energy Council (WEC Austria) und wissenschaftlichen Vorträgen zum Thema „Nachhaltige Energieversorgung und Mobilität – Wasserstoff als Energieträger, Treibstoff und Ökostromspeicher“ ([Abbildung 5-1](#)) statt und war mit ca. 80 Teilnehmern aus Österreich und Deutschland eine erfolgreiche Veranstaltung zur Verbreitung der Projektergebnisse und Demonstration der Öko-Wasserstoff-Tankstelle der Zukunft.

Dienstag, 28. September 2010	
WEC-Workshop: Nachhaltige Energieversorgung und Mobilität – Wasserstoff als Energieträger, Treibstoff und Ökostromspeicher	
09.30 Uhr	Begrüßung und Einleitung Dr. Alexander Gratzer (WEC Austria), Vizerektor Prof. Dr. Harald Kainz (TU Graz), DI. Martin Beermann (JOANNEUM RESEARCH), Dr. Franz E. Leichtfried (Biovest GmbH)
09.45 Uhr	Wasserstoff aus nachhaltigen Primärenergieträgern Vorsitz: Mag. Dorothea Sulzbacher, MBA, OMV Future Energy Fund Univ.-Prof. Dr. Günther Brauner, TU Wien – „Bedeutung von Wasserstoff in nachhaltigen Energiesystemen“ DI. Mag. Wolfgang Pell, Verbund AG – „Verbundinitiative nachhaltige Mobilität mit Ökostrom“ DI. Hans Vock, Proton Energy Systems/Diamond Lite und Dr. Franz E. Leichtfried, Biovest GmbH – „PEM-Elektrolyse: Der einfachste Weg vom Ökostrom zum Wasserstoff“
11.15 Uhr	Pause
11.35 Uhr	Wasserstoff als Ökostromspeicher und Treibstoff Vorsitz: Dr. Christine Zach, ÖAMTC Akademie Dr. Ewald Wählmüller, Fronius GmbH - „Die Fronius Energiezelle: Öko-Wasserstoff bestmöglich genutzt“ DI. Dr. Wolfgang Schnitzhofer, Profactor GmbH - „H2 PROFERM – Wasserstoff aus Biomasse“ DI. Dr. Walter Böhme, OMV AG – „The role of Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles within a portfolio of power-trains for Europe“
13.00 Uhr	Mittagspause
„Die Öko-Wasserstoff - Tankstelle der Zukunft“ - Projektabschluss und Driving Event mit Wasserstofffahrzeugen am HyCentA	
14.00 Uhr	Vorsitz: MR Dr. Andreas Dorda (A3PS und BMVIT) Ing. Johann Ziegerhofer, Weizer Naturenergie GmbH - „Erzeugung zusätzlichen Ökostroms für die Mobilität der Zukunft“ DI. Martin Beermann, JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH „Die Öko-Wasserstoff-Tankstelle der Zukunft“ DI. Markus Mayer, Linde GmbH – „Die Wasserstoff-Technologie der Zukunft“ Univ. Prof. DI. Dr. Helmut Eichlseder, TU Graz – „Potential von Wasserstoff-Mischgasfahrzeugen anhand eines Prototyps“
16.00 Uhr	Driving Event mit Wasserstoff-betriebenen Fahrzeugen und Besichtigung der Öko-Wasserstoff-Tankstelle am HyCentA

[Abbildung 5-1:](#) Vortragsprogramm des mit dem WEC veranstalteten Abschlussevents (siehe auch [Anhang 8.3](#))

5.2 Demonstration der Öko-Wasserstoff-Tankstelle mit Wasserstoff-Fahrzeugen

Im Rahmen des Driving Events am HyCentA standen mit einem Mercedes E200 NGT und einem Mitsubishi Evolution IX zwei Fahrzeuge mit wasserstoffbetriebenem Verbrennungskraftmotor für Demonstration des Tankstellenbetriebs sowie der Fahrzeugtechnologie zur Verfügung ([Abbildung 5-2](#)). Mit einem Fahrzeug wurde eine Demonstrationsbetankung vorgenommen ([Abbildung 5-3](#)), im Anschluss wurde Interessierten die Möglichkeit einer Testfahrt geboten. Weiters konnte die Öko-Wasserstoff-Tankstelle im Betriebszustand besichtigt werden ([Abbildung 5-4](#)).



[Abbildung 5-2: Driving Event am HyCentA](#)



[Abbildung 5-3: Demonstrationsbetankung beim Driving Event](#)



[Abbildung 5-4: Interessierte bei der Anlagenbesichtigung](#)

5.3 Wasserstoff-Fahrzeuge beim Driving Event

5.3.1 Mercedes E200 NGT „HYCAR“

Der Mercedes E200 NGT wurde im Rahmen eines Forschungsprojekts zwischen HyCentA und FVT (Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik mbH) von bivalentem Benzin-Erdgas-Betrieb auf den trivalenten Betrieb mit Benzin, Erdgas, Wasserstoff und beliebigen H₂-Erdgas-Gemischen umgebaut.

Dazu waren Änderungen am Motor und an kraftstoffführenden Bauteilen erforderlich, wie andere Injektoren, ein Saugrohr aus Aluminium und insbesondere eine Adaptierung der elektronischen Motorsteuerung für den Wasserstoffbetrieb. Die Motorsteuerung wurde am Motorprüfstand für den Betrieb mit Wasserstoff und verschiedene Gemische von Wasserstoff und Erdgas optimiert. Aufgrund der weiten Zündgrenzen von Wasserstoff ist ein wirkungsgradgünstiger Betrieb des Motors mit Luftüberschuss im gesamten Motorbetriebsbereich möglich. Dies mindert auch die Neigung zu Verbrennungsanomalien, verursacht aber bei äußerer Gemischbildung eine Reduktion des Leistungspotenzials. Während im Benzinbetrieb eine maximale Leistung von rund 120 kW bei 6000 U/min erzielt wird, erreicht der Motor im Wasserstoffbetrieb eine maximale Leistung von ~70 kW bei 5000 U/min. Der Motor läuft dafür umweltfreundlich und emissionsarm. Die Emission von Stickoxiden ist durch den Magerbetrieb sehr gering, kohlenstoffbasierte Emissionen wie CO, CH und CO₂ treten im Wasserstoffbetrieb praktisch nicht auf.

Es wurde auch die Adaption des Fahrzeugs durchgeführt. Die wichtigsten Änderungen am Fahrzeug betrafen den Tausch der originalen Druckgaszyylinder gegen Drucktanks, die bei Drücken bis 350 bar für Wasserstoff, Erdgas sowie Gemische daraus geeignet sind. Für das Gassystem wurde am HyCentA ein elektronisches Gassicherheitssystem entwickelt, das während der Fahrt alle wesentlichen Betriebsparameter des Gassystems überwacht und über einen Bildschirm anzeigt sowie die Aktivierung bzw. Desaktivierung des gesamten Gassystems regelt. Folgende Funktionen sind implementiert:

- Messdatenerfassung und -verarbeitung in Echtzeit
- Füllstandsberechnung für die Gastanks
- Leckageüberwachung über Massenbilanz, Druckgradienten und Gasdetektoren
- Umschaltung zwischen Gas-/Benzinbetrieb
- Visualisierung des Systemstatus
- Elektronisches Fahrtenbuch
- Einleitung von Notmaßnahmen bei Alarm

Das Fahrzeug entspricht im Wesentlichen der europäischen Regelung EG 79/2009 für die Genehmigung von Wasserstoff-Fahrzeugen, wurde vom TÜV Austria begutachtet und erhielt einen Einzelgenehmigungsbescheid für die Zulassung zum allgemeinen Straßenverkehr.

Dieses innovative und so erstmals umgesetzte Konzept eines multivalenten Fahrzeugs ist eine vielversprechende Brückentechnologie für den Übergang zu CO₂-freien Wasserstoffanwendungen. Unter der gewohnten Funktionalität des bewährten Verbrennungsmotors und unter Nutzung vorhandener Tankinfrastruktur ist eine praxisnahe CO₂-freie Mobilität bei H₂-Betrieb umsetzbar. Das Konzept kann kurzfristig in eine Serienapplikation übergeführt werden.

Die Arbeit wurde im SAE Technical Paper 2009-01-1420 veröffentlicht und im Rahmen des SAE World Congress & Exhibition im April 2009 präsentiert (Eichlseder 2009).

5.3.2 Mitsubishi Lancer Evolution IX

Der ausgestellte Mitsubishi Lancer Evolution IX wurde im Auftrag der Firma Alset Technology LLC von der FVT (Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik mbH) für den bivalenten Betrieb mit Benzin und Wasserstoff vorbereitet. Der Motor des Fahrzeugs wurde als Basis beibehalten. Beim Basismotor handelt es sich um einen 4 Zylinder Ottomotor mit Abgasturboaufladung.

Die Gemischbildung erfolgt durch 4 Injektoren am Saugrohr. Um den Betrieb mit Wasserstoff zu gewährleisten wurde der Motor einigen Modifikationen unterzogen. Dazu wurde dieser aus dem Fahrzeug ausgebaut und auf dem stationären Motorprüfstand aufgebaut. Eine Präsentation erfolgte im Oktober 2010 auf der 5. Gasfahrzeugtagung in Berlin (Eichlseder 2010). Tabelle 5-1 bzw. Anhang 8.5 gibt eine Übersicht über die Eckdaten der beiden vorgestellten Fahrzeuge.

Tabelle 5-1: Vorgestellte Fahrzeuge im Rahmen des Driving Events am HyCentA

Mercedes E200 NGT	Mitsubishi Lancer Evolution IX
<ul style="list-style-type: none"> • 1.8 l Ottomotor (Kompressoraufbladung) • Leistung / Drehmoment: <ul style="list-style-type: none"> ◦ Benzin: 120 kW / 240 Nm ◦ H₂: 70 kW / 150 Nm • Verbrauch: <ul style="list-style-type: none"> ◦ Benzin: 8,5 l/100km ◦ H₂: 2,2 kg/100km 	<ul style="list-style-type: none"> • 2 l Ottomotor (Turboaufbladung) • Leistung / Drehmoment: <ul style="list-style-type: none"> ◦ Benzin: 156 kW / 350 Nm ◦ H₂: 115 kW / 225 Nm • Verbrauch: <ul style="list-style-type: none"> ◦ Benzin: 10 l/100km ◦ H₂: 2,6 kg/100km
	
<p>Adaptionen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Injektoren, Rail, Saugrohr • Neubedatung beider ECUs (drehmomentengeführt) • Luftzufuhr • ELGASS Gassicherheitssystem • Zündung 	<p>Adaptionen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Injektoren, Rail, Saugrohr • Abgaskrümmer • Turbolader, Wastegate • Elektronische Drosselklappe • Neue Motorsteuerung
	

6 Modellierung und Analyse einer Öko-Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur in Österreich

Unter der Annahme, dass Wasserstoff als alternativer Treibstoff in Zukunft eine zunehmend bedeutende Rolle spielen wird, wurde in diesem Projekt der Aufbau einer Öko-Wasserstoff-Tankstellen-Infrastruktur für die Versorgung erster Wasserstoff-Fahrzeugflotten in Österreich in einem Modell untersucht. Mit der dezentralen Wasserstofferzeugung durch Elektrolyse vor Ort bei den Öko-Wasserstoff-Tankstellen ist damit in der Markteinführungsphase mit geringem Wasserstoffbedarf noch keine Infrastruktur für die energiewirtschaftliche Wasserstoffverteilung notwendig.

Ausgehend von geeigneten Standorten für eine optimierte Nutzung der Koppelprodukte Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme wurden „Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen“ festgelegt und ökonomisch und ökologisch bewertet. Aufbauend auf Implementierungsszenarien von Wasserstoff-Fahrzeugen in Österreich wurde die notwendige Tankstellenanzahl und deren geografische Verteilung modelliert sowie die Auswirkungen des Wasserstoff-Transportsystems auf die Treibhausgasemissionen, den Energieverbrauch und die Kosten im Vergleich zu fossilen Transportsystemen bewertet.

6.1 Erfahrungen aus dem Tankstellen-Infrastrukturaufbau alternativer Treibstoffe

Die Einführung alternativer Treibstoffe im Straßenverkehr erfolgt neben der Beimischung zu konventionellen fossilen Treibstoffen unter Nutzung der bestehenden Tankstelleninfrastruktur und Fahrzeuge (Biodiesel, Bioethanol) auch über neu zu errichtende Infrastrukturen, wie z.B. für Erdgas (Compressed Natural Gas, CNG), Flüssiggas (Liquified Petroleum Gas, LPG, Propan-Butan-Gemisch als Raffinerie-Nebenprodukt) und Bioethanol (E85). Angelehnt an die im Folgenden beschriebene Entwicklung der CNG- bzw. LPG-Tankstelleninfrastruktur in Österreich, Deutschland und Italien werden mögliche Erfolgsfaktoren und Hindernisse untersucht sowie Anforderungen an den Aufbau einer Öko-Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur abgeleitet.

6.1.1 Entwicklung von CNG und LPG in Österreich, Deutschland und Italien

In den EU-27 Ländern waren Ende 2010 mehr als die Hälfte aller CNG-Fahrzeuge in Italien unterwegs (0,65 Mio), gefolgt von Deutschland (90.000) und Schweden (28.000). In Österreich waren es 6.000 CNG-Fahrzeuge. Die meisten CNG-Tankstellen waren 2010 in Deutschland (900, davon 850 öffentlich), gefolgt von Italien (800, davon 700 öffentlich) und Österreich (220, davon 170 öffentlich). Neben CNG ist für gasangetriebene Fahrzeuge in Deutschland und Italien auch LPG weit verbreitet (Tabelle 6-1). Im Vergleich gibt es in Österreich derzeit ca. 4,3 Mio Benzin- und Diesel-Fahrzeuge und 2.700 Tankstellen.

Tabelle 6-1: CNG- und LPG-Fahrzeuge und -Tankstellen in Österreich, Deutschland, Italien

2010	Österreich	Deutschland	Italien
CNG-Fahrzeuge	6.000	90.000	650.000
CNG-Tankstellen (öffentl.)	220 (170)	900 (850)	800 (700)
CNG-Fahrzeuge / CNG-Tankstelle (öffentl.)	35	106	929
LPG-Fahrzeuge	7.000	430.000	1.500.000
LPG-Tankstellen öffentlich	20	6.200	2.200
LPG-Fahrzeuge pro LPG-Tankstelle	350	69	682
Quellen:			
www.gibgas.de ; www.gas-tankstellen.de ; www.kba.de ;			
www.autogas-forum.info ; www.autogasvergleich.de ; www.dvg.de ; www.fluessiggas.eu			

In Österreich wurde 1997 die erste CNG-Tankstelle in Graz eröffnet, seit 2003 gibt es eine lückenlose Versorgung entlang der Hauptverkehrsrouten bzw. entlang der ausgebauten Gasversorgung (Gasnetz). In Abbildung 6-1 sind die Standorte der ca. 170 öffentlichen CNG-Tankstellen in Österreich dargestellt. Daneben versorgen rund 50 Betriebstankstellen die jeweiligen Fahrzeugflotten mit CNG.

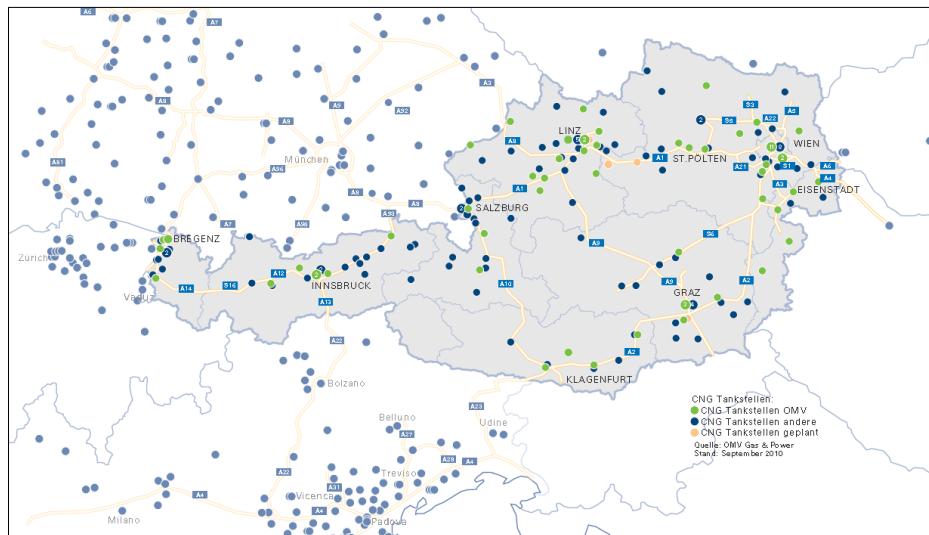


Abbildung 6-1: CNG-Tankstellen in Österreich 2010 (OMV 2010)

Abbildung 6-2 zeigt eine konstante Anzahl von ca. 50 CNG-Betriebstankstellen seit 2005, während insbesondere seit dem Jahr 2008 die Anzahl der öffentlichen CNG-Tankstellen sowie der CNG-Fahrzeuge stark angestiegen ist. Dies ist zeitgleich mit der Einführung von steuerlichen Anreizen (Ökologisierungsgesetz 2007) und Investitionsförderungen der öffentlichen Hand und der Gasindustrie sowie mit dem forcierten Aufbau der Tankstellen-Infrastruktur, u.a. im Rahmen des „5-Punkte Aktionsprogramms CNG / Bio-CNG“ des Lebensministeriums und der OMV.

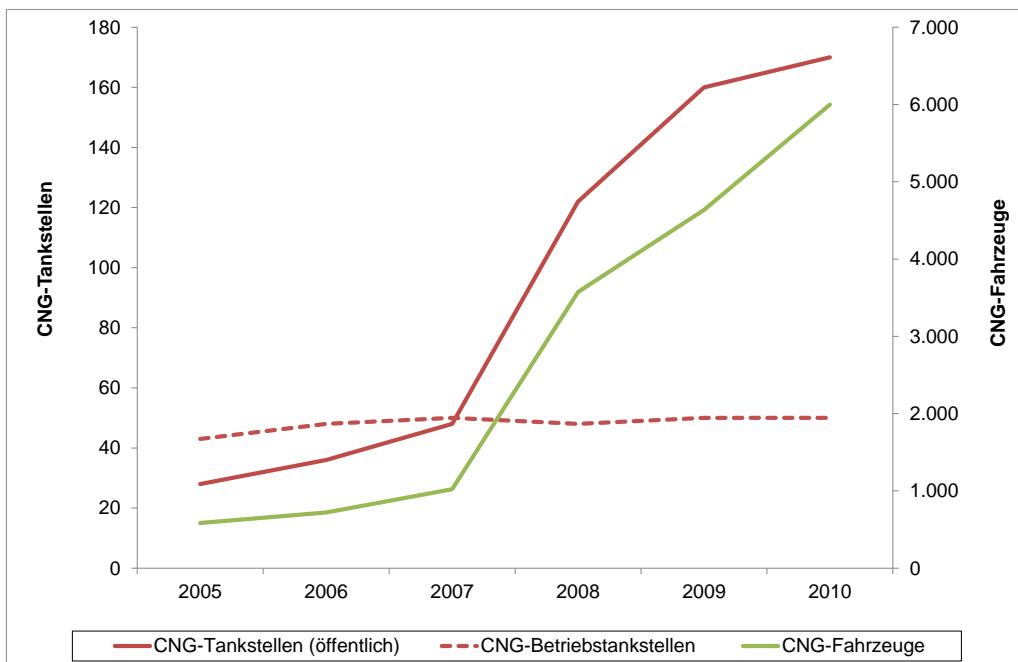


Abbildung 6-2: Entwicklung der CNG-Fahrzeuge und öffentlichen CNG-Tankstellen in Österreich seit 2005

Derzeit gibt es in Österreich nur 20 LPG-Tankstellen für insgesamt rund 5.000 bis 7.000 LPG-Fahrzeuge (ÖVFG 2011). Der Grund ist, dass in Österreich erst im August 2010 die gesetzlichen Rahmenbedingungen für den Bau und Betrieb von öffentlichen LPG-Tankstellen geschaffen wurden. Von den LPG-Fahrzeugen sind 500 LPG-Busse der Wiener Linien.

Abbildung 6-3 zeigt die Entwicklung von CNG- bzw. LPG-Fahrzeugen und -Tankstellen in Deutschland seit 2005. Ausgehend von einem vergleichbaren Fahrzeugbestand von ca. 40.000 im Jahr 2005 hat sich bis 2010 die Anzahl der LPG-Fahrzeuge verzehnfacht, während die Anzahl der CNG-Fahrzeuge nur um das Doppelte gestiegen ist. Bei den Tankstellen ist der Unterschied in den Steigerungsraten ebenfalls groß (Verfünffachung der LPG-Tankstellen, +50 % bei den CNG-Tankstellen). Einflussfaktoren für diese Entwicklungen werden in Kapitel 6.1.2 erläutert.

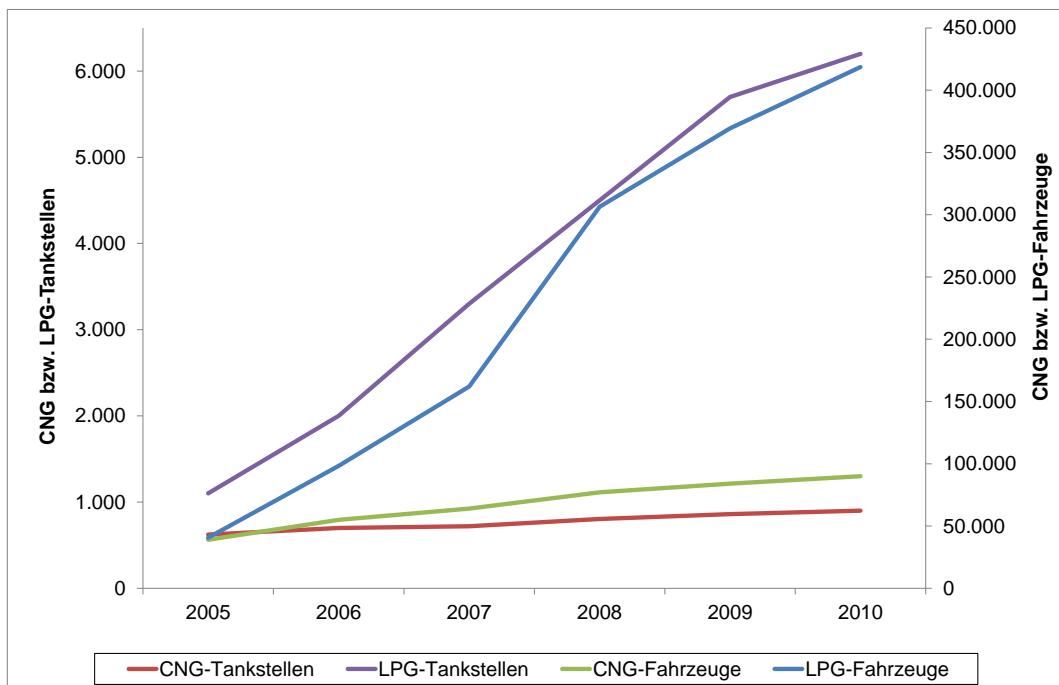


Abbildung 6-3: Entwicklung der CNG- bzw. LPG-Fahrzeuge und -Tankstellen in Deutschland seit 2005

In Italien haben Antriebssysteme vor allem mit LPG eine lange Tradition. Seit den 70-er Jahren wurde vor allem LPG als alternativer Treibstoff eingesetzt, Italien hat heute mit 1,5 Mio (ca. 5 % der 28 Mio Fahrzeuge in Italien) die meisten LPG-Fahrzeuge in Europa. Die Anzahl von CNG-Fahrzeugen ist mit 0,65 Mio ebenfalls die höchste in Europa. Die CNG-Tankstellen-Infrastruktur wird wie in Deutschland kontinuierlich ausgebaut, zwischen 2001 und 2010 wurde die Tankstellenanzahl verdoppelt (Abbildung 6-4). Die Auslastung der Tankstellen ist in Italien mit ca. 800 Fahrzeugen pro Tankstelle weit höher als in Deutschland mit ca. 100 oder in Österreich mit ca. 30 Fahrzeugen.

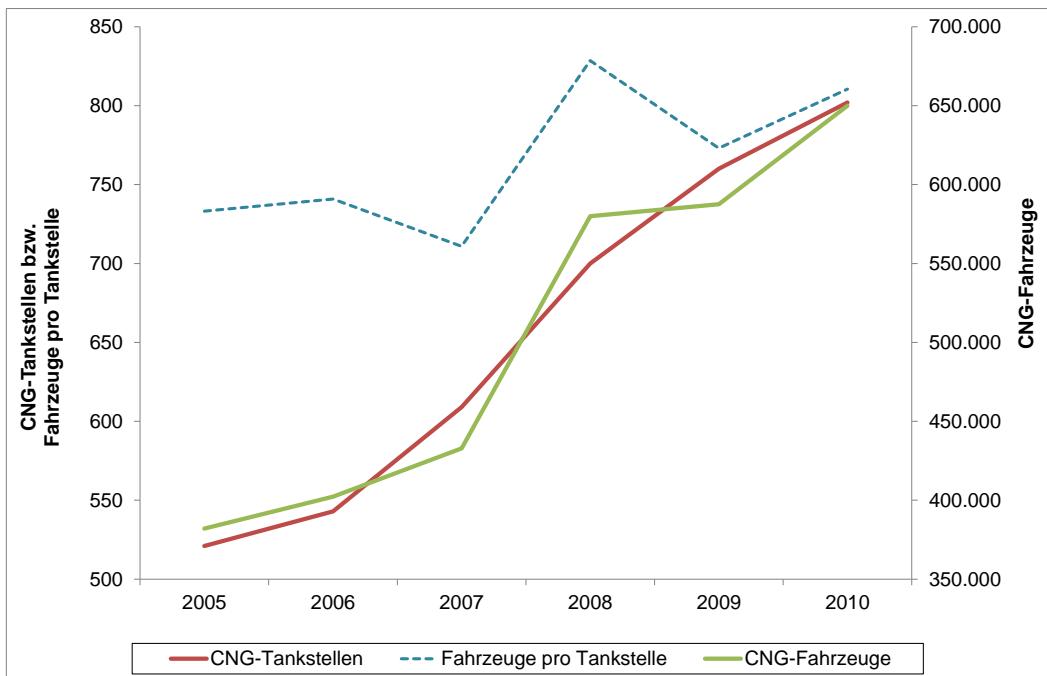


Abbildung 6-4: Entwicklung der CNG-Fahrzeuge und -Tankstellen in Italien seit 2005

6.1.2 Erfolgsfaktoren und Hindernisse

Im Folgenden wurden Erfolgsfaktoren sowie Hindernisse in der Einführung von CNG und LPG in Österreich, Deutschland und Italien zusammengestellt. Insbesondere werden Aspekte der Treibstoffverteilung, der Tankstellen, der Fahrzeuge sowie der Kosten und Förderungen betrachtet.

6.1.2.1 Treibstoffverteilung

Die Verteilung von CNG erfolgt über das bestehende Gasnetz. Dieser wesentliche Vorteil der Nutzung bestehender Infrastruktur steht allerdings dem Nachteil gegenüber, dass das Gasnetz (noch) nicht überall dort verfügbar ist, wo CNG benötigt wird, vor allem an Autobahntankstellen. Dies kann ein wesentliches Hindernis in der Einführung von alternativen Treibstoffen sein („GasHighway“ National Reports Italy, Germany 2010). Die Verteilung von LPG erfolgt über LKW, in Deutschland und Italien ist die Versorgung entlang der Hauptverkehrs Routen flächendeckend.

6.1.2.2 Tankstellen

CNG wird erst vor Ort bei der Tankstelle auf den für die Betankung erforderlichen Tankdruck (200 bar) komprimiert. Die notwendige Ausstattung von CNG-Tankstellen mit Verdichter und Hochdruckspeichern, die an die Anforderungen an Betankungsdauer (2-4 Minuten) und sofortige Verfügbarkeit für die nächste Betankung angepasst werden müssen, macht sie erheblich teurer als LPG-Tankstellen (Tankdruck LPG 8-10 bar). In Italien zählen lange Tankzeiten (10-15 Minuten) in Folge von technischen Verfügbarkeitsengpässen zu einem der Hindernisse in der Akzeptanz von CNG als alternativem Treibstoff („GasHighway“ National Reports Italy 2010).

Der Standort der CNG- und LPG-Tankstellen kann als Erfolgsfaktor wichtiger sein als deren Anzahl („GasHighway“ National Reports Italy, Germany 2010). Insbesondere ist die Integration der Betankungsanlagen in konventionelle Tankstellen entlang der Autobahnen und Hauptverkehrs Routen sowie in Stadtzentren ein Erfolgsfaktor.

Die gesetzliche Grundlage für die Errichtung und Integration von CNG- und LPG-Tankstellen in konventionelle Tankstellen existiert erst seit relativ kurzer Zeit. In Österreich ist beispielsweise erst seit August 2010 der Bau von öffentlichen LPG-Tankstellen möglich. In Italien ist die Integration einer CNG-Betankung beim Bau neuer Tankstellen verpflichtend.

6.1.2.3 Fahrzeuge

Am Markt werden sowohl Serienfahrzeuge für den Betrieb mit CNG und LPG angeboten als auch Umrüstmöglichkeiten für Benzin-Fahrzeuge. LPG-Fahrzeuge sind grundsätzlich etwas günstiger als vergleichbare CNG-Fahrzeuge. Zudem werden am europäischen Markt weit mehr LPG-Serienfahrzeuge (ca. 125 Modelle) als CNG-Fahrzeuge (ca. 20 Modelle) angeboten. Insbesondere das Angebot in den absatzstärksten Marken (z.B. „Golf-Klasse“) ist entscheidend für die erfolgreiche Einführung alternativer Treibstoffe. CNG-Fahrzeuge werden derzeit nur von italienischen (Fiat) und deutschen (Opel, VW, Daimler, Ford) OEMs angeboten.

Ein Hindernis in der Einführung dieser Fahrzeuge ist das oft fehlende Informationsangebot bei den Fahrzeughändlern, insbesondere bei der Darstellung von Anschaffungs- und Betriebskosten als auch aufgrund fehlender Vorführfahrzeuge („GasHighway“ National Reports Austria, Germany 2010).

6.1.2.4 Kosten

Die Anschaffungskosten für CNG-Fahrzeuge sind derzeit um ca. 1.500 bis 4.000 EUR höher als für ein vergleichbares Benzin- oder Dieselfahrzeug (Dena-Studie 2010, Car-Studie 2010). Für LPG-Fahrzeuge sind die Mehrkosten aufgrund des einfacheren Zusatztanks geringer. Anschaffungskosten haben für die Kaufentscheidung oft mehr Gewicht als die Betriebskosten (Dudenhofer 2010), eine Reduktion der Mehrkosten kann daher ein entscheidender Erfolgsfaktor sein (siehe Kapitel 6.1.2.5).

Bei den Treibstoffkosten werden oft ausschließlich die ausgewiesenen Tankstellenpreise verglichen, ohne Unterschiede im Energiegehalt zu berücksichtigen. Die ausgewiesenen Treibstoffkosten liegen derzeit (2011) bei ca. 1 €/kg CNG bzw. ca. 0,8 €/l LPG. Der Heizwert von CNG und LPG ist ungefähr gleich mit ca. 13 kWh/kg, etwas höher als der von Benzin und Diesel (ca. 12 kWh/kg). Werden die Treibstoffpreise bezogen auf den gleichen Energiegehalt pro kWh dargestellt (Tabelle 6-2), ist LPG ca. 30 % und CNG mehr als 50 % billiger als Benzin. Es muss dabei aber berücksichtigt werden, dass dieser Vorteil der alternativen Treibstoffe von der derzeit niedrigen Besteuerung abhängt..

Unter Berücksichtigung der Kraftstoffkosten ergibt sich je nach jährlicher Laufleistung und aktuellen Energiepreisen die Dauer bis zur Amortisation des erhöhten Anschaffungspreises. Diese variiert sehr stark, liegt jedoch für einen Großteil der Pkw zwischen zwei und acht Jahren (Dena-Studie 2010).

Tabelle 6-2: Treibstoffpreise CNG, LPG im Vergleich zu Benzin, Diesel

	Tankstellen- preise		Heizwert		Tankstellenpreise nach Energiegehalt		Verbrauch (Fiat Multipla)		Treibstoffkosten nach Verbrauch	
Benzin	1,5	€ / l	8,9	kWh / l	0,17	€ / kWh	8,5	l / 100km	12,8	€ / 100km
Diesel	1,4	€ / l	9,8	kWh / l	0,14	€ / kWh	6,5	l / 100km	9,1	€ / 100km
LPG	0,8	€ / l	6,6	kWh / l	0,12	€ / kWh	8,3	l / 100km	6,6	€ / 100km
CNG	1,0	€ / kg	13,0	kWh / kg	0,08	€ / kWh	6,2	kg / 100km	6,2	€ / 100km
								w w w . s p r i t m o n i t o r . d e		

6.1.2.5 Politikmaßnahmen

Politikmaßnahmen für alternative Treibstoffe zielen hauptsächlich darauf ab, die Mehrkosten für Fahrzeuganschaffung und die Betriebskosten im Vergleich zu den konventionellen

Treibstoffen zu reduzieren. Die Fahrzeuganschaffung wird in manchen Ländern (Österreich, Deutschland, Italien) indirekt über reduzierte Steuern und Abgaben (z.B. NOVA in Österreich) bzw. direkt über Investitionsförderungen gefördert. Weiters gibt es Subventionen für die Tankstelleninfrastruktur. Die Treibstoffkosten werden über erheblich reduzierte Energiesteuern gestützt, z.B. ist Erdgas in Österreich geringer besteuert als Benzin und Diesel. Ein Erfolgsfaktor dabei ist die langfristige Festlegung der Energiesteuern (in Deutschland bis 2018), die den Fahrzeugnutzern Planungssicherheit gibt.

6.1.3 Anforderungen an Tankstelleninfrastruktur alternativer Treibstoffe

Aus den Untersuchungen zur Einführung von CNG und LPG lassen sich Anforderungen an die Tankstelleninfrastruktur von alternativen Treibstoffen wie Öko-Wasserstoff ableiten.

- Betankungszeit pro Fahrzeug 2 bis 4 Minuten, sofortige Verfügbarkeit für nächste Betankung
- Integration in Selbstbedienungstankstellen auf Autobahnen und städtischen Hauptstraßen sowie in Stadtzentren
- Stützung des Aufbaus des Tankstellennetzes. Die Auslastung der CNG-Tankstellen liegt in Österreich derzeit durchschnittlich bei 35 Fahrzeugen pro Tankstelle, in Deutschland bei etwa 100 (Tabelle 6-1). Für einen betriebswirtschaftlich sinnvollen Betrieb einer CNG-Tankstelle kann eine Auslastung mit mehr als 200 („GasHighway“ National Report Austria, 2010, Dena 2010) bis 1.000 Fahrzeugen (Seidinger 2006) angenommen werden.
- Förderprogramme für erste Fahrzeugflotten notwendig; Bsp OMV Impulsprogramm für erste 100.000 CNG- / Bio-CNG-PkW (Seidinger 2006)

6.2 Wasserstoff-Fahrzeuge

Als Antriebssysteme für Wasserstoff-Fahrzeuge eignen sich grundsätzlich Verbrennungskraftmotoren und Brennstoffzellen in Verbindung mit Batterie und Elektromotoren. Beide Systeme werden von Automobilherstellern bei Demofahrzeugen eingesetzt, mehrheitlich mit Brennstoffzellentechnologie. Verbrennungskraftmotoren, z.B. mit bivalentem Betrieb mit Benzin und Wasserstoff, werden vor allem als Übergangstechnologie in der Einführungsphase von Wasserstoff als alternativen Treibstoff gesehen.

Derzeit gibt es keine Wasserstoff-Fahrzeuge, die am Markt gekauft werden können. Die Fahrzeuge sind Demofahrzeuge bzw. werden in ersten Kleinserien produziert und in Wasserstoff-Modellregionen eingesetzt. Tabelle 6-4 gibt einen Überblick zu Wasserstoff-Demofahrzeugen, davon sind 5 mit Brennstoffzellen und 2 mit Verbrennungskraftmotoren. Das „HyCar“ ist ein von der Technischen Universität Graz auf multivalenten Betrieb umgerüsteter Mercedes-Benz 200 NGT, der mit Erdgas, Benzin und Wasserstoff betrieben werden kann (siehe Kapitel 5.3).

Die in Tabelle 6-3 dargestellten Kennwerte eines Wasserstoff-Fahrzeugs wurden den weiteren Modellrechnungen für die Auslegung von Öko-Wasserstoff-Tankstellen zugrunde gelegt.

Tabelle 6-3: Kennwerte des Wasserstoff-Fahrzeugs für die Modellierung

Tankinhalt [kg H ₂]	Tankdruck [bar]	Verbrauch [kg H ₂ /100km]	Reichweite [km]	Fahrleistung [km/a]	Verbrauch [kg H ₂ /Tag]
4,4	350	1,1	400	13.500	0,41

Tabelle 6-4: Technische Daten Wasserstoff-Fahrzeuge

Modell	GM Hydrogen4	Fiat Panda Hydrogen	VW Tiguan HyMotion	Honda FCX Clarity	Daimler B-Klasse F-Cell	Mazda RX-8 Hydrogen	Daimler E-Klasse „Hycar“
Antriebssystem	Brennstoffzelle – Batterie- Elektromotor					Verbrennungskraftmotor	
Leistung Antriebssystem [kW]	73 (BZ) k.A. (EM)	70 (BZ) 60 (EM)	80 (BZ) 100 (EM)	100 (BZ) 95 (EM)	k.A (BZ) 100 (EM)	81 (VKM)	69 (VKM)
Verbrauch [kg H₂ / 100 km]	1,3	0,83	1,39	0,90	1,04	2,5	2,2
Reichweite [km]	320	300	230	435	385	100	70
Tankinhalt [kg], [l]	4,2 (108)	2, (110)	3,2 (82)	3,9 (171)	4 (103)	2,5 (110)	1,5 (64)
Tankdruck [bar]	700	350	700	350	700	350	350

6.3 Mögliche Standorte für Öko-Wasserstoff-Tankstellen in Österreich

Die Auswahl von geeigneten Standorten für Öko-Wasserstoff-Tankstellen richtet sich nach den Möglichkeiten und Bedingungen der Wasserstoff-, Sauerstoff- bzw. Wärmenutzung. Einer zunehmend flächendeckenden Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur muss auch ein Bedarf an den Produkten Sauerstoff und Wärme gegenüberstehen. Für die Modellierung wird grundsätzlich festgelegt, dass die Wasserstoff- bzw. Wärmenutzung immer vor Ort an der Tankstelle bzw. in unmittelbarer Umgebung erfolgt, während der Sauerstoff bei fehlender Nutzungsmöglichkeit vor Ort über eine entsprechende Logistik auch an andere Orte verteilt werden kann.

Je nach vorrangigem Produkt (H₂, O₂, Wärme) sind grundsätzlich drei Auslegungsvarianten möglich:

1. Wasserstoff- (H₂-) orientierter Betrieb
2. Sauerstoff- (O₂-) orientierter Betrieb
3. Wärme-orientierter Betrieb

Beim H₂-orientierten Betrieb bestimmt die Anzahl und Frequenz der zu betankenden Wasserstoff-Fahrzeuge die Anlagenkonzeption. Die Wasserstoffnutzung für die Betankung von Fahrzeugen setzt grundsätzlich die Erreichbarkeit der Tankstelle über das öffentliche Straßennetz voraus. Wie die Erfahrungen aus dem Infrastrukturaufbau anderer alternativer Treibstoffe zeigen ([Kapitel 6.1.2](#)), sind Standorte entlang der Hauptverkehrsstraßen in Stadtgebieten sowie entlang von Autobahnen vorteilhaft. In [Abbildung 6-5](#) sind die Hauptverkehrskorridore Österreichs und deren PKW-Belastung dargestellt.



Abbildung 6-5: PKW-Belastung der Hauptverkehrskorridore Österreichs (BMVIT, 2007)

Der Ausgangspunkt beim O₂-orientierten Betrieb ist der Sauerstoffbedarf vor Ort. Sauerstoff wird in den unterschiedlichsten Bereichen angewandt, in Tabelle 6-5 sind die Bereiche und deren Bedarf für Sauerstoff in Österreich im Jahr 2010 dargestellt.

Die Eisen- und Metallindustrie hat den größten Bedarf mit etwa 570 Mio Nm³ Sauerstoff pro Jahr (54 %) und wird mit flüssigem Sauerstoff aus Luftzerlegungsanlagen in unmittelbarer Nähe der Produktionsanlagen (Linz, Donawitz, Graz) versorgt. Der Sauerstoffbedarf pro Industriebetrieb liegt dabei zwischen ca. 3 Mio Nm³ (Breitenfeld) und ca. 400 Mio Nm³ Sauerstoff pro Jahr (VOEST Linz). Aufgrund des auf wenige Standorte in Österreich konzentrierten Sauerstoffbedarfs erscheint die Metallindustrie für den Aufbau einer flächendeckenden Öko-Wasserstoff-Tankstellen-Infrastruktur nicht geeignet.

Tabelle 6-5: Anwendungsbereiche und deren Bedarf für Sauerstoff in Österreich 2010

	[m ³ /a] (flüssig)	[Mio Nm ³ /a]	[%]
Nahrungsmittelindustrie	18.750	16	1,5%
Medizinischer Bereich	141.250	120	11,3%
Chemische Industrie	106.250	91	8,5%
Metall- und Stahlindustrie	672.500	574	53,8%
Gewerbeindustrie	105.000	90	8,4%
Papier- und Zellstoffindustrie	17.500	15	1,4%
Sonstige (z.B. Kläranlagen)	188.750	161	15,1%
Gesamt	1.250.000	1.066	100%

Der Sauerstoffbedarf im medizinischen Bereich von ca. 120 Mio Nm³ pro Jahr verteilt sich unter anderem auf die insgesamt 264 Krankenhäuser in Österreich mit einer Kapazität von 63.354 Betten. Davon haben

- 74 Krankenhäuser weniger als 100 Betten,
- 94 Krankenhäuser 100 bis 200 Betten,
- 65 Krankenhäuser 200 bis 500 Betten,
- 25 Krankenhäuser 500 bis 1000 Betten und
- 11 Krankenhäuser mehr als 1000 Betten

Abbildung 6-6 zeigt die Standorte der Krankenhäuser in Österreich.



Abbildung 6-6: Standorte Krankenhäuser in Österreich (BMWfj, 2008)

Der durchschnittliche jährliche Sauerstoffbedarf ist ca. 220 Nm³ pro Bett und Jahr. (Luttenberger 2010) Zusätzlich haben Krankenhäuser auch einen konstanten Wärmebedarf für die Warmwasserversorgung. Je nach Ausstattung und Typ der Krankenhäuser liegt der tägliche Warmwasserverbrauch pro Bett zwischen 100 und 300 Litern bei 60 °C (Recknagel 2010).

Aufgrund der flächendeckenden Verteilung in Österreich, der Lage im Stadtgebiet sowie des konstanten Sauerstoff- und Wärmebedarfs bieten sich Krankenhäuser daher als Standorte für den Aufbau einer Öko-Wasserstoff-Tankstellen-Infrastruktur grundsätzlich an.

Für den wärme-orientierten Betrieb ist der benötigte Niedertemperatur-Wärmebedarf (ca. 60°C) vor Ort maßgeblich, als Beispiel wurde eine Autowaschanlage gewählt.

6.4 Festlegung von Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen

6.4.1 Darstellung der Auslegungsvarianten

Die Auslegung von Öko-Wasserstoff-Tankstellen orientiert sich am täglichen Wasserstoffbedarf sowie den in Kapitel 6.3 beschriebenen Randbedingungen an den möglichen Standorten. Auf dieser Grundlage wurden „Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen“ festgelegt, die die Grundlage für die Modellierung des Aufbaus einer ersten Tankstellen-Infrastruktur in Österreich darstellen.

In Tabelle 6-6 sind der Wasserstoff-, Sauerstoff- und Wärmebedarf der möglichen Standorte als Ausgangspunkt für die Auslegung von „Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen“ dargestellt. Die Auslegung erfolgt dabei

- wärme-orientiert für eine Autowaschanlage,
- O₂-orientiert für ein kleines, mittleres und großes Krankenhaus und
- H₂-orientiert für eine kleine und große Tankstelle.

Bei den Krankenhäusern sowie den Tankstellen mit Shop bzw. Raststätte besteht vor Ort zusätzlich Bedarf für Warmwasser.

Tabelle 6-6: H₂-, O₂- bzw. Wärmebedarf der möglichen Standorte für „Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen“

Standorte für Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen	H ₂ -, O ₂ - und Wärme-orientierte Auslegungsvarianten			
	H ₂ -Bedarf [kg/Tag]	O ₂ -Bedarf [Nm ³ O ₂ /Jahr]	Wärmebedarf [kW]	Anmerkungen
Autowaschanlage	-	-	10	Waschanlage mit 80 Fahrzeugen pro Tag (4 Boxen je 20 Fahrzeuge), 55 l Warmwasser bei 60 °C pro Fahrzeug
Krankenhaus klein	-	42.000	70	200 Betten-Krankenhaus, 210 Nm ³ O ₂ /Bett und Jahr, 150 l Warmwasser bei 60 °C pro Bett und Tag
Krankenhaus mittel	-	105.000	174	500 Betten-Krankenhaus, 210 Nm ³ O ₂ /Bett und Jahr, 150 l Warmwasser bei 60 °C pro Bett und Tag
Krankenhaus groß	-	210.000	348	1.000 Betten-Krankenhaus, 210 Nm ³ O ₂ /Bett und Jahr, 150 l Warmwasser bei 60 °C pro Bett und Tag
Tankstelle klein	39	-	58	Tankstelle für bis zu 10 Wasserstoff-Fahrzeuge pro Tag, Raststätte 12 l Warmwasser pro Person und Tag, 2.000 Personen pro Tag
Tankstelle groß	390	-	58	Tankstelle für bis zu 100 Wasserstoff-Fahrzeuge pro Tag, Raststätte 12 l Warmwasser pro Person und Tag, 2.000 Personen pro Tag

Tabelle 6-7 zeigt eine Übersicht der Auslegungsparameter von 6 Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen. Ausgehend von den Erzeugungskapazitäten der Elektrolyseure (Nm³ H₂/h) und einem 24-Stunden-Betrieb (bei 8.400 Betriebsstunden im Jahr, 2 Wochen Instandhaltung) sind die Anzahl der pro Tag betankbaren Wasserstoff-Fahrzeuge, die erzeugten Sauerstoffmengen (Nm³ O₂/a) und die Wärmeleistungen (kW) sowie der Deckungsgrad des ganzjährigen Wärmebedarfs (%) vor Ort dargestellt.

Tabelle 6-7: Auslegung der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen

Standard Öko-Wasserstoff-Tankstelle	Auslegungs-variante	Wasserstoff-Erzeugung [Nm ³ H ₂ /h]	Wasserstoff-Erzeugung [kg H ₂ /Tag] ¹⁾	Betankbare H ₂ -Fahrzeuge pro Tag ²⁾	Sauerstoff-Erzeugung [Nm ³ O ₂ /a]	Wärme-Erzeugung [kW]	Deckungsgrad Wärmebedarf [%]
Autowaschanlage	Wärme-orient	10	22	6	41.975	10	100%
Krankenhaus klein	O ₂ -orientiert	10	22	6	41.975	10	15%
Krankenhaus mittel	O ₂ -orientiert	30	65	17	125.925	31	18%
Krankenhaus groß	O ₂ -orientiert	50	108	28	209.875	51	15%
Tankstelle klein	H ₂ -orientiert	20	43	11	83.950	21	35%
Tankstelle groß	H ₂ -orientiert	200	432	111	839.500	144	100%

1) Dichte Wasserstoff 0,0899 kg/Nm³

2) Wasserstoffmenge pro Fahrzeug 3,9 kg (0,5 kg Rest im Tank), Tankfrequenz 1 x pro 10 Tage

6.4.2 Anlagenkonzept

Als Anlagenkonzept wurde für die Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen das Wasserstoff-Mehrbank-Speicherkonzept mit einem Wasserstoff-Verdichter festgelegt ([Abbildung 6-7](#)). Dabei werden mehrere Wasserstoffspeicher zu so genannten Speicherbänken zusammengeschlossen. Diese bestehen aus einem Niederdruckspeicher (ND-Speicher, 200 bar), einem Mitteldruckspeicher (MD-Speicher, 300 bar) und einem Hochdruckspeicher (HD-Speicher, 450 bar). Dieses System ist derzeit auch am HyCentA installiert.

Bei der Betankung eines Fahrzeuges strömt zuerst Wasserstoff aus dem ND-Speicher in den Fahrzeugtank. Wenn die Druckdifferenz zwischen dem ND-Speicher und dem Fahrzeugtank so gering ist, dass nur noch geringe Wasserstoffmengen in den Tank strömen, schaltet das System auf den MD-Speicher um. Nach dem Ausgleich der Druckdifferenz zwischen dem MD-Speicher und dem Fahrzeugtank wird die Betankung über den Wasserstoff-Verdichter im Boosterbetrieb mit einem Tankdruck von 350 bar abgeschlossen. Der HD-Speicher dient dazu, mit kurzen Druckstößen den Fahrzeugtank auf Dichtheit und Druck vor der Betankung zu prüfen. Der große Vorteil eines Mehr-Bank Speichersystems gegenüber einem einstufigen Speicher ist die bessere Ausnutzung der Speicherkapazitäten und ein rascherer

Betankungsvorgang. Der Kompressor bringt entleerte Speicherbänke nach einer Betankung wieder auf den maximalen Speicherdruck. Dies kann bereits erfolgen, während andere Speicherbänke noch im Betankungsvorgang aktiv sind.

Mit der SAE 2601 (Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles) wurde 2010 ein internationaler Industriestandard für den Betankungsvorgang von Wasserstoff-Fahrzeugen festgelegt, an dem sich auch die Auslegung der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen orientiert. Die Anforderungen der SAE 2601 beziehen sich auf 350 bzw. 700 bar Enddruck im Fahrzeugtank und legen eine maximale Betankungszeit von 3 Minuten pro Fahrzeug und einen Zeitabstand von maximal 2 Minuten zwischen zwei aufeinanderfolgenden Betankungen fest sowie bestimmte Temperaturen des Wasserstoffs beim Eintritt in den Fahrzeugtank. Aufgrund des deutlich höheren technischen Aufwands für die 700 bar Technologie (Verdichtung, Gaskühlung) und den höheren Kosten wird in diesem Projekt nur die 350 bar Technologie berücksichtigt, wie sie auch am HyCentA in der Öko-Wasserstoff-Tankstelle der Zukunft zum Einsatz kommt.

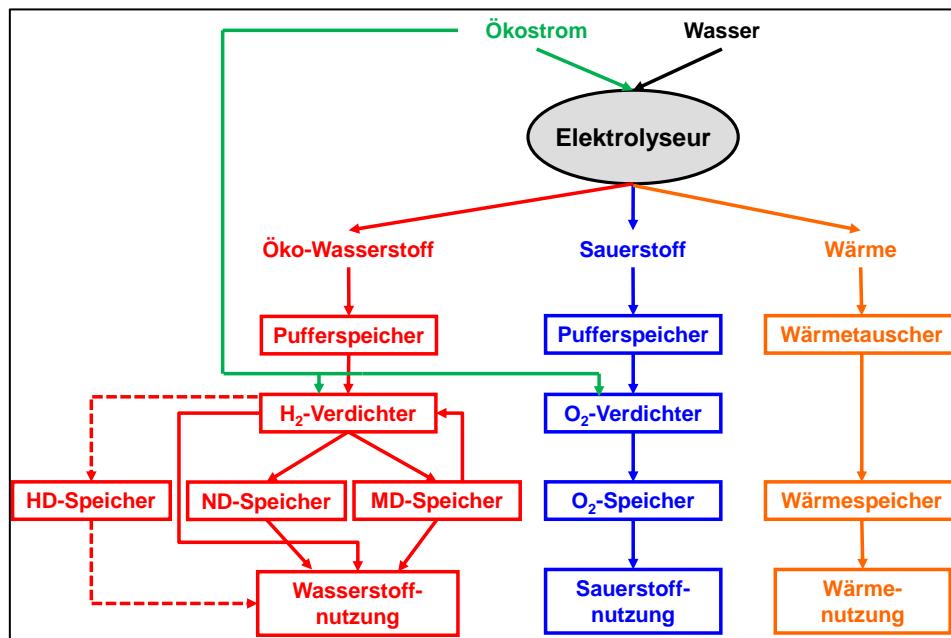


Abbildung 6-7: Schema Mehrbank-Speicherkonzept der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen

Der Sauerstoff wird über einen Sauerstoff-Kompressor mit 200 bar in Druckgasflaschen gespeichert. Die Abwärme des Elektrolyseurs wird über einen Wasser-Wasser-Wärmetauscher und einen Wärmespeicher für die Warmwassererzeugung genutzt.

6.4.3 Anlagenkomponenten

Im Folgenden wird die Auslegung der Anlagenkomponenten des Mehrbankspeicher-Konzeptes (Abbildung 6-7) beschrieben.

Die Elektrolyseure haben Erzeugungskapazitäten zwischen 10 und 200 Nm³ H₂/h (Tabelle 6-7) und sind alkalische Elektrolyseure desselben Herstellers.

Eine zentrale Komponente für die Befüllung der Speicherbank als auch für die Betankung des Fahrzeugs ist der Wasserstoffverdichter. Für die Betankung des Fahrzeugs wird bis zu einem Tankdruck von ca. 230 bar der Druckunterschied zwischen Speicherbank und Fahrzeugtank für das Überströmen des Wasserstoffs ausgenutzt, mit dem Verdichter wird der Tankenddruck von 350 bar erreicht. Der Standard SAE 2601 für die Fahrzeugbetankung legt dabei die Betankungszeit von insgesamt maximal 3 Minuten und eine Druckzunahme von maximal 5 bar/Sekunde fest. Bei einem PKW mit einem Tankdruck von 40 bar zu Beginn

der Betankung ergibt sich folgender zeitlicher Verlauf der Betankung mit 3,9 kg Wasserstoff (Tabelle 6-8). Damit ist die maximale Laufzeit des Verdichters und dessen Mindest-Förderleistung bestimmbar.

Tabelle 6-8: Zeitlicher Verlauf der Fahrzeugbetankung

	[sec]	[kg] H ₂
Prüfstoß-Dichtheit	10	-
Prüfstoß-Tankinhalt	10	-
1. Druckstufe 40 - 180 bar	30	2,0
2. Druckstufe 180 - 230 bar	10	1,2
Verdichter 230 - 350 bar	max 120	0,7
Betankung gesamt	max 180	3,9

Die Menge von 0,7 kg Wasserstoff in 120 Sekunden entspricht 21 kg Wasserstoff pro Stunde, das sind 233 Nm³ Wasserstoff pro Stunde. Der für die Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen ausgewählte Wasserstoffverdichter eines Herstellers ist in Tabelle 6-9 dargestellt. Damit ist die Betankungszeit für ein Fahrzeug ca. 2,5 Minuten.

Tabelle 6-9: Wasserstoff-Verdichter für Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen

Zweistufiger Wasserstoff- Verdichter	Stufe 1			Stufe 2			Installierte Motorleistung [kW]
	Saugdruck [bar]	Förder- leistung [Nm ³ /h]	Enddruck (Max.) [bar]	Saugdruck [bar]	Förder- leistung [Nm ³ /h]	Enddruck (Max.) [bar]	
	25	170	300	300	315	450	36

In Tabelle 6-10 sind die Auslegungsdaten für die Wasserstoff-Speicher dargestellt. Die Wasserstoffspeicher werden in Form von Flaschenbündeln errichtet, wobei ein Bündel aus 12 x 50 l-Flaschen eine Speichereinheit (SE) darstellt.

Der Pufferspeicher (25 bar) ist für die in einer 1 Stunde vom Elektrolyseur erzeugte Wasserstoffmenge ausgelegt, die vom Wasserstoffverdichter in die ND- und MD-Speicherbank verdichtet wird. Die Kapazität der ND- (200 bar) und MD-Speicherbank (300 bar) ist für die in 24 Stunden erzeugte Wasserstoffmenge ausgelegt (ND-Speicher für 10 Stunden, MD-Speicher für 14 Stunden). Der HD-Speicher (450 bar) für die Fahrzeugtank-Prüfstöße zu Beginn der Betankung ist mit einem Speichervolumen von 50 l pro Zapfsäule festgelegt. Die Tankstellen „Krankenhaus groß“ und „Tankstelle groß“ haben 2 Zapfsäulen, die anderen Tankstellen jeweils 1 Zapfsäule.

Die „Tankstelle groß“ erfordert einen zweiten Verdichter für die Befüllung der Speicherbank (Leistung 110 Nm³ Wasserstoff pro Stunde). Der Pufferspeicher ist bei dieser Tankstelle als Tank (2m Durchmesser, 4m Höhe) ausgeführt.

Tabelle 6-10: Auslegung der Wasserstoff-Speicher der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen

Standard Öko-Wasserstoff-Tankstelle	Wasserstoff-Verdichter				Wasserstoff-Speicher			
	Speicherbefüllung		Fahrzeugbetankung		Pufferspeicher 25 bar [m³] ³⁾	ND-Speicher 200 bar [m³] ⁴⁾	MD-Speicher 300 bar [m³] ⁵⁾	HD-Speicher 450 bar [m³] ⁶⁾
	Stufe 1 25 - 300 bar [Nm³/h]	Betriebs- stunden [h/Tag] ¹⁾	Stufe 2 300 - 450 bar [Nm³/h]	Betriebs- stunden [h/Tag] ²⁾				
Autowaschanlage	170	1,4	315	0,1	0,6 (1 SE) ⁷⁾	0,6 (1 SE)	0,6 (1 SE)	0,05
Krankenhaus klein	170	1,4	315	0,1	0,6 (1 SE)	0,6 (1 SE)	0,6 (1 SE)	0,05
Krankenhaus mittel	170	4,2	315	0,4	1,8 (3 SE)	1,8 (3 SE)	1,8 (3 SE)	0,05
Krankenhaus groß	170	7,1	315	0,7	3,0 (5 SE)	3,0 (5 SE)	3,0 (5 SE)	0,10
Tankstelle klein	170	2,8	315	0,3	1,2 (2 SE)	1,2 (2 SE)	1,2 (2 SE)	0,05
Tankstelle groß	170 + 110 ⁸⁾	14,1 + 21,8 ⁸⁾	315	2,8	12 ⁹⁾	12 (20 SE)	12 (20 SE)	0,10

1) Verdichtung des Wasserstoffs vom Pufferspeicher in den ND- und MD-Speicher 1 x pro Stunde
 2) 1,54 Minuten pro Fahrzeug für 0,7 kg Wasserstoff, 350 bar + Befüllung HD-Speicher
 3) Pufferung der Wasserstofferzeugung in 1 h; Dichte Wasserstoff bei 25 bar: 1,5 kg/m³
 4) Speicherung der Wasserstoff-Erzeugung in 10 h; Dichte Wasserstoff bei 200 bar: 14,8 kg/Nm³
 5) Speicherung der Wasserstoff-Erzeugung in 14 h; Dichte Wasserstoff bei 300 bar: 20,7 kg/Nm³
 6) 1 x 50 l HD-Gasflasche pro Zapfsäule für Tank-Prüfstöße mit 450 bar
 7) 1 Speichereinheit SE = Gasflaschenbündel 12 x 50 l Flaschen = 0,6 m³
 8) Zwei Wasserstoff-Verdichter für Stufe 1 / 25 - 300 bar: V1 mit 170 Nm³/h + V2 mit 110 Nm³/h
 9) Speicherung in einem 12,6 m³ Tank (Durchmesser 2m, Höhe 4 m)

In Tabelle 6-11 sind die Auslegungsdaten für die Sauerstoff- und Wärme-Speicher dargestellt. Der Sauerstoff verlässt den Elektrolyseur mit einem Druck von 25 bar und wird von einem Pufferspeicher (1 Stunde Speicherkapazität) in 200 bar-Hochdruckflaschen (24 Stunden Speicherkapazität) verdichtet. Die Sauerstoffspeicher werden in Form von Flaschenbündeln errichtet, wobei ein Bündel aus 12 x 50 l-Flaschen eine Speichereinheit (SE) darstellt.

Die Warmwasserspeicher sind für 8 Stunden ausgelegt, eine Speichereinheit hat maximal 10 m³ Volumen.

Tabelle 6-11: Auslegung der Sauerstoff- und Wärme-Speicher der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen

Standard Öko-Wasserstoff-Tankstelle	Sauerstoff- Verdichter	Sauerstoff- Speicher		Wärme- Speicher	
	25-200 bar [Nm³/h] ¹⁾	Pufferspeicher 25 bar [m³] ²⁾	200 bar [m³] ³⁾	Wasser- menge [m³/h] ⁴⁾	Puffer- Speicher [m³] ⁵⁾
Autowaschanlage	10	0,2	0,6 (1 SE)	0,9	7
Krankenhaus klein	10	0,2	0,6 (1 SE)	0,9	7
Krankenhaus mittel	30	0,7	1,8 (3 SE)	2,7	21
Krankenhaus groß	50	1,1	3,0 (5 SE)	4,4	35
Tankstelle klein	20	0,4	1,2 (2 SE)	1,8	14
Tankstelle groß	200	4,5	12 (20 SE)	5,0	40

1) Förderleistung Sauerstoff-Verdichter 2 x erzeugte Sauerstoffmenge pro Stunde
 2) Speicherung der Sauerstoff-Erzeugung in 1 h; Dichte Sauerstoff bei 25 bar: 33,4 kg/m³
 3) Speicherung der Sauerstoff-Erzeugung in 24 h; Dichte Sauerstoff 200 bar: 279,6 kg/m³
 4) Q/(Dichte * cp * dT); cp=4,18 kJ/(kg*K)
 5) Wärmespeicherung 8 h; Wärmespeichereinheit max 5 m³

6.5 Ökonomische Analyse

6.5.1 Methodik

Bei der Ermittlung der jährlichen Kosten der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen [€/a] sowie der Kosten der Wasserstofferzeugung [€/kg H₂] wurden Betriebs- und Kapitalkosten sowie Erlöse aus der Sauerstoff- und Wärmenutzung berücksichtigt. Abbildung 6-8 stellt die Berechnungsmethode der Kosten dar. Die Kapitalkosten der Investitionen wurden mit der Annuitätenmethode berechnet. Die Lebensdauer aller Komponenten wurde mit 15 Jahren angenommen. Der Zinssatz für die Berechnung des Annuitätenfaktors wurde mit 5 % angenommen. Alle Kosten wurden ohne Berücksichtigung von Steuern berechnet.

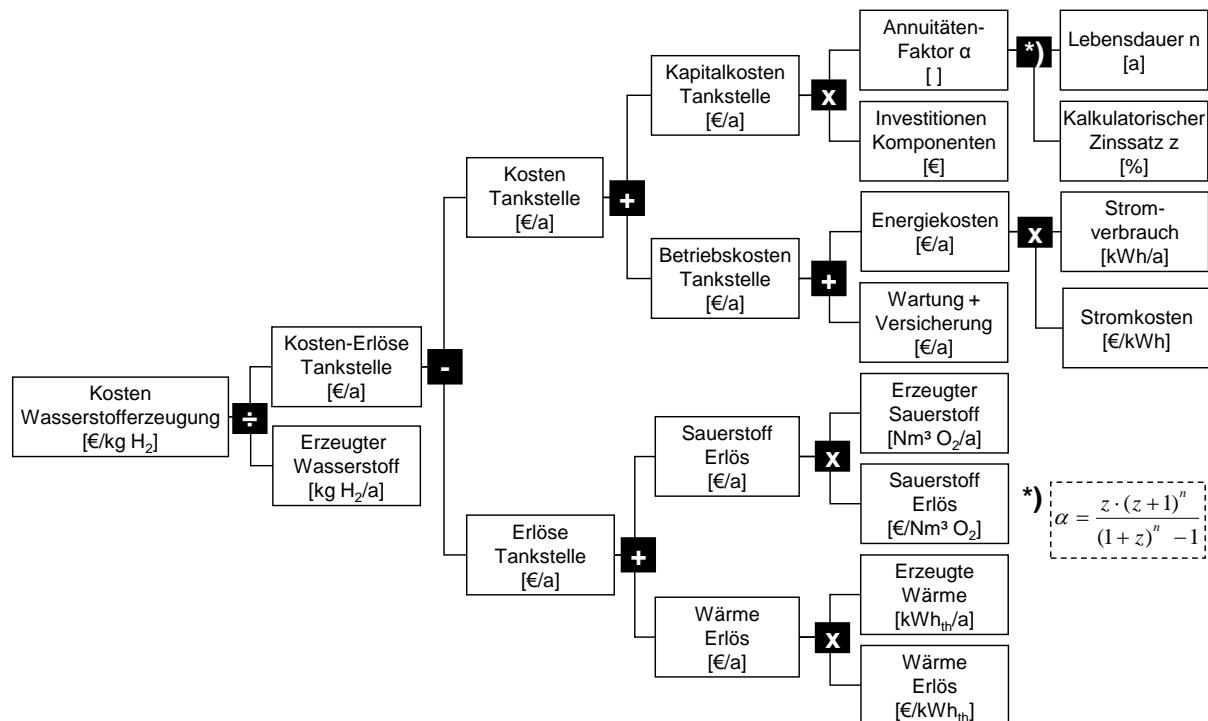


Abbildung 6-8: Berechnungsmethode der Kosten der Wasserstofferzeugung

6.5.2 Kapitalkosten

Die Investitions- und Kapitalkosten der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen sind in Tabelle 6-12 zusammengestellt. Die Kosten wurden auf Grundlage der in Kapitel 6.4 dargestellten Auslegungsparameter bestimmt. Kosten für Planung und Inbetriebnahme der Anlage wurden mit 30 % der Investitionskosten der Anlagenkomponenten berücksichtigt. Der Elektrolyseur bzw. die Verdichter für Wasserstoff und Sauerstoff haben jeweils einen Anteil von ca. 25 bis 40 % an den Gesamt-Investitionskosten.

Tabelle 6-12: Investitions- und Kapitalkosten der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen

	Auto-waschanlage	Krankenhaus klein	Krankenhaus mittel	Krankenhaus groß	Tankstelle klein	Tankstelle groß
Investitionskosten						
Elektrolyseur [k€]	151	151	271	443	229	1.029
H ₂ -Pufferspeicher [k€]	4	4	13	22	9	65
H ₂ -Verdichter [k€]	220	220	220	220	220	400
H ₂ -Speicherbank [k€]	16	16	35	61	25	207
H ₂ -Zapfsäule [k€]	120	120	120	240	120	240
Summe H ₂ -Komponenten [k€]	511	511	660	985	603	1.940
O ₂ -Trocknung [k€]	20	20	29	35	25	55
O ₂ -Pufferspeicher [k€]	1	1	4	7	3	27
O ₂ -Verdichter [k€]	84	84	122	145	106	233
O ₂ -Speicher [k€]	4	4	11	18	7	72
Summe O ₂ -Komponenten [k€]	109	109	166	204	142	387
Wärme-Speicher [k€]	5	5	15	26	11	29
Summe Wärme-Komponenten [k€]	5	5	15	26	11	29
Gesamt [k€]	625	625	841	1.216	756	2.356
Gesamt inkl. Errichtung [k€] ¹⁾	813	813	1.093	1.580	983	3.062
Kapitalkosten						
H ₂ -Komponen [k€/a]	49	49	64	95	58	187
O ₂ -Komponenten [k€/a]	10	10	16	20	14	37
Wärme-Komponenten[k€/a]	1	1	1	2	1	3
Gesamt [k€/a]	139	139	186	269	168	522

1) Errichtung (Planung und Inbetriebnahme) 30% der Investitionskosten

6.5.3 Betriebskosten

Die Betriebskosten der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen sind in Tabelle 6-13 zusammengestellt. Diese setzen sich aus Kosten für Strom, Wartung, Versicherung und Hilfsstoffe zusammen. Die Stromkosten wurden mit 12 Cent/kWh (Energiepreis und Netztarif für Gewerbe, ohne Steuern) angenommen, als hauptsächliche stromverbrauchende Komponenten wurden Elektrolyseur, Wasserstoff- und Sauerstoff-Verdichter berücksichtigt. Die Kosten für Wartung (inklusive Personalkosten), Versicherung und Hilfsstoffe wurden über prozentuelle Anteile der Investitionskosten berechnet. Der überwiegende Anteil der Betriebskosten (ca. 70 bis 90 %) sind Stromkosten.

Tabelle 6-13: Betriebskosten der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen

	Auto-waschanlage	Krankenhaus klein	Krankenhaus mittel	Krankenhaus groß	Tankstelle klein	Tankstelle groß
Stromverbrauch						
Elektrolyseur [MWh/a]	425	425	1.275	2.125	850	8.499
H ₂ -Verdichter [MWh/a]	20	20	59	98	39	343
O ₂ -Verdichter [MWh/a]	20	20	61	102	40	357
Gesamt [MWh/a]	465	465	1.395	2.325	929	9.199
Betriebskosten						
Strom [k€/a]	55	55	165	274	110	1.085
Wartung [k€/a] ¹⁾	6	6	8	12	8	24
Versicherung [k€/a] ²⁾	13	13	17	24	15	47
Hilfsstoffe [k€/a] ³⁾	3	3	4	6	4	12
Gesamt [k€/a]	77	77	194	317	136	1.168
1) Wartungskosten 1 % der Investitionskosten						
2) Versicherungskosten 2 % der Investitionskosten						
3) Kosten für Hilfsstoffe 0,5 % der Investitionskosten						

6.5.4 Erlöse

In Tabelle 6-14 sind die jährlich erzeugten Mengen an Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme dargestellt.

Tabelle 6-14: Erzeugte Jahresmengen Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme

	Auto-waschanlage	Krankenhaus klein	Krankenhaus mittel	Krankenhaus groß	Tankstelle klein	Tankstelle groß
Wasserstoff [t/a]	7,6	7,6	22,7	37,8	15,1	151,0
Sauerstoff [1.000 Nm ³ /a]	42	42	126	210	84	840
Wärme [MWh/a]	86	86	259	432	173	487

Mit der Nutzung der Koppelprodukte Sauerstoff und Wärme werden Erlöse erzielt. Für die Wärme wird ein Erlös von 5 cent/kWh angenommen.

Beim Sauerstoff hängt der Erlös stark von der Nutzung und den Anforderungen an Gaseigenschaften bzw. deren Zertifizierung ab. Generell wird der österreichische Markt für Sauerstoff im medizinischen als auch im Industrie-Bereich durch wenige Großproduzenten versorgt. Vor allem im medizinischen Bereich ist eine teure Mess- und Analysetechnik zur Sicherstellung zertifizierter Gaseigenschaften notwendig, deren Betrieb aufgrund der aufwendigen Vorschriften und Genehmigungsverfahren nur durch Großfirmen (z.B. Linde Gas) möglich ist. Aufgrund dieser Marktgegebenheiten ist der Vertrieb von Sauerstoff für medizinische Zwecke durch einzelne Wasserstoff-Tankstellenbetreiber als schwierig zu bewerten.

Ein möglicher Weg ist die Abnahme des in Öko-Wasserstoff-Tankstellen produzierten Sauerstoffs durch Gase-Großfirmen, die ihn dann entsprechend aufbereiten und über die vorhandenen Vertriebswege verkaufen können. Dafür fehlen aber Marktpreise und somit mögliche in der Kostenanalyse verwendbare Sauerstofferlöse für Wasserstoff-Tankstellenbetreiber.

Es wurde daher der Sauerstoff-Mindestlerös berechnet, der für die Deckung der Kapital- und Betriebskosten der Sauerstoffkomponenten der Standard-Wasserstoff-Tankstellen erforderlich ist. Für die Abgabe des trockenen Sauerstoffs an die Gasefirma wurden zwei unterschiedliche Druckniveaus angenommen:

- 25 bar - Abgabe auf Druckniveau des Elektrolyseurs, keine Sauerstoff-Verdichtung
- 200 bar - Sauerstoff-Verdichtung notwendig

Zusätzlich wurde der Sauerstofferlös berechnet, der zur Erzielung beispielhafter Wasserstofferzeugungskosten [€/kg H₂] erforderlich ist. Ergebnisse sind in [Kapitel 6.5.5](#) dargestellt.

6.5.5 Kosten der Wasserstofferzeugung

Die Kosten der Wasserstofferzeugung [€/kg H₂] der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen sind in [Tabelle 6-15](#) für drei Varianten dargestellt:

- „Keine O₂- und Wärme-Nutzung“: ohne Kosten für Sauerstoff- und Wärmekomponenten sowie ohne Sauerstoff- und Wärme-Erlöse
- „O₂- und Wärme-Nutzung, O₂ 25 bar“: Kosten für Wärmespeicher, Sauerstoff-Trocknung, -Pufferspeicher; Sauerstoff-Abgabe bei 25 bar; Erlöse für Sauerstoff und Wärme
- „O₂- und Wärme-Nutzung, O₂ 200 bar“: Kosten für Wärmespeicher, Sauerstoff-Trocknung, -Pufferspeicher, -Verdichter und –Speicherflaschen; Sauerstoff-Abgabe bei 200 bar; Erlöse für Sauerstoff und Wärme

Ohne Sauerstoff- und Wärmenutzung liegen die Kosten der Wasserstoff-Erzeugung zwischen 9 und 17,8 €/kg H₂. In der Studie „A portfolio of powertrains for Europe“ liegen die Kosten bei ca. 17 bis 18 €/kg H₂, wenn der Wasserstoff durch Elektrolyse mit Ökostrom erzeugt wird. Werden Sauerstoff und Wärme genutzt und wird ein kostendeckender Sauerstofferlös angenommen, liegen die Kosten der Wasserstoff-Erzeugung zwischen 8,8 und 17,3 €/kg H₂. Der Wärmeerlös wurde mit 5 cent /kWh Wärme angenommen. Bei Abgabe des Sauerstoffs mit 25 bar liegt der Mindestelerlös zur Kostendeckung der Sauerstoffkomponenten zwischen 2 und 8 cent /Nm³ O₂, bei Abgabe mit 200 bar zwischen 12 und 48 cent /Nm³ O₂.

[Tabelle 6-15: Kosten der Wasserstofferzeugung der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen](#)

	Auto-waschanlage	Krankenhaus klein	Krankenhaus mittel	Krankenhaus groß	Tankstelle klein	Tankstelle groß
Kosten der H₂-Erzeugung						
"Keine O ₂ - und Wärme-Nutzung"						
Kapitalkosten [€/kg H ₂]	8,5	8,5	3,6	3,3	5,0	1,6
Betriebskosten [€/kg H ₂]	9,3	9,3	8,0	7,9	8,3	7,4
Gesamt [€/kg]	17,8	17,8	11,6	11,1	13,3	9,0
Kosten der H₂-Erzeugung						
"O ₂ - und Wärme-Nutzung, O ₂ 25 bar"						
Kapitalkosten [€/kg H ₂]	8,9	8,9	3,9	3,5	5,3	1,7
Betriebskosten [€/kg H ₂]	9,4	9,4	8,0	7,9	8,4	7,4
Erlös Wärme [€/kWh] ¹⁾	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Erlös Wärme [€/kg H ₂] ¹⁾	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,0
Erlös Sauerstoff (25 bar) [€/Nm ³ O ₂] ²⁾	0,08	0,08	0,04	0,03	0,05	0,02
Erlös Sauerstoff (25 bar) [€/kg H ₂] ²⁾	0,45	0,45	0,23	0,18	0,30	0,09
Gesamt [€/kg]	17,3	17,3	11,1	10,7	12,9	9,0
Kosten der H₂-Erzeugung						
"O ₂ - und Wärme-Nutzung, O ₂ 200 bar"						
Kapitalkosten [€/kg H ₂]	10,4	10,4	4,6	4,0	6,3	2,0
Betriebskosten [€/kg H ₂]	10,2	10,2	8,6	8,4	9,0	7,7
Erlös Wärme [€/kWh] ¹⁾	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Erlös Wärme [€/kg H ₂] ¹⁾	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,0
Erlös Sauerstoff (200 bar) [€/Nm ³ O ₂] ³⁾	0,47	0,47	0,27	0,21	0,33	0,12
Erlös Sauerstoff (200 bar) [€/kg H ₂] ³⁾	2,63	2,63	1,49	1,19	1,82	0,69
Gesamt [€/kg]	17,3	17,3	11,1	10,7	12,9	9,0

1) Annahme

2) Erlös Sauerstoff deckt die zusätzlichen Kosten der Sauerstofferzeugung bei Abgabe mit 25 bar (keine Verdichtung)

3) Erlös Sauerstoff deckt die zusätzlichen Kosten der Sauerstofferzeugung bei Abgabe mit 200 bar (Verdichtung)

In Abbildung 6-9 sind die Kosten der Wasserstofferzeugung [€/kg H₂] in Abhängigkeit des Sauerstofferlös [€/Nm³ O₂] für zwei Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen (Autowaschanlage, Tankstelle groß) dargestellt. Neben dem Sauerstoff-Mindestelerlös (0,12 bzw. 0,48 €/Nm³ O₂) für den kostendeckenden Betrieb der Sauerstoffkomponenten ist beispielhaft der Sauerstofferlös (0,48 bzw. 2,36 €/Nm³ O₂) zur Erzielung von Wasserstoff-erzeugungskosten von 6,8 €/kg H₂ (entspricht 2 €/l Diesel) dargestellt.

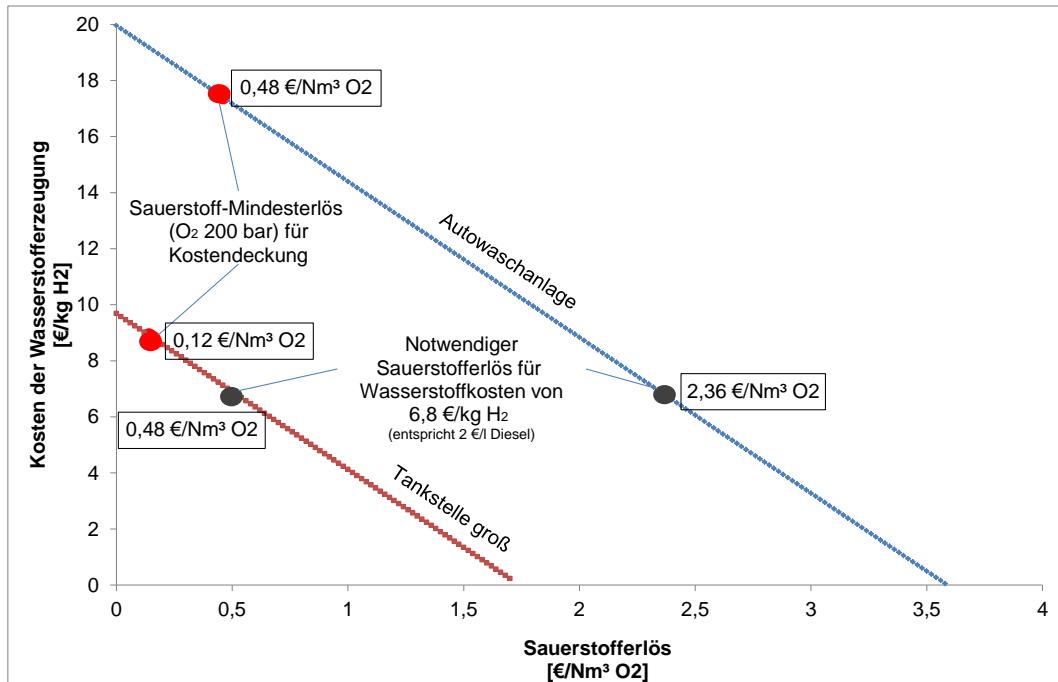


Abbildung 6-9: Kosten der Wasserstofferzeugung in Abhängigkeit vom Sauerstofferlös

6.6 Ökologische Analyse

6.6.1 Methodik

Ziel der ökologischen Betrachtung ist es, die zu erwartenden Vorteile von Transportsystemen mit dem Treibstoff Wasserstoff, der in Öko-Wasserstoff-Tankstellen erzeugt wird, mit Transportsystemen mit fossilen Treibstoffen (Benzin) zu vergleichen. Dabei wurden folgende Umweltwirkungen betrachtet:

- Beitrag zum Treibhauseffekt in CO₂-Äquivalent (CO₂-Äq.): Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Lachgas (N₂O)
- Kumulierter Primärenergiebedarf: fossile, erneuerbar und sonstige Energieträger
- Beitrag zur Versauerung in SO₂-Äquivalent (SO₂-Äq.): Schwefeldioxid (SO₂) und Stickstoffoxid (NO_x)
- Beitrag zur bodennahen Ozonbildung in C₂H₄-Äquivalent: Kohlenmonoxid (CO), Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (NMVOC), Stickstoffoxid (NO_x), Methan (CH₄)

Als Maß für die Treibhauswirkung dieser Gase wird das Treibhausgaspotential (GWP - Global Warming Potential) verwendet, das den Beitrag verschiedener Gase zu einer möglichen Erwärmung der Erdatmosphäre in Form einer äquivalenten Menge Kohlendioxid ausdrückt. Die Treibhauswirkung eines Kilogramms des Gases wird als Vielfaches ("Äquivalenzfaktor") der Treibhauswirkung von einem Kilogramm CO₂ angegeben. Mit den Äquivalenzfaktoren (Tabelle 6-16) werden die Gasmengen von CH₄ und N₂O in äquivalente CO₂-Mengen (CO₂-Äq.) umgerechnet.

Tabelle 6-16: Äquivalenzfaktoren der Emissionen mit Beitrag zum Treibhauseffekt

Emissionen mit Beitrag zum Treibhauseffekt	CO ₂ -Äquivalent
CO ₂	1
CH ₄	25
N ₂ O	298

Als Maß für die Versauerungswirkung dieser Emissionen wird das Versauerungspotential (AP - Acidification Potential) verwendet, das den Beitrag verschiedener Gase zur Versauerung in Form einer äquivalenten Menge SO₂ ausdrückt. Die Versauerungswirkung eines Kilogramms des Gases wird als Vielfaches ("Äquivalenzfaktor") der Versauerungswirkung von einem Kilogramm SO₂ angegeben. Mit den Äquivalenzfaktoren werden die Gasmengen von NO_x in äquivalente SO₂-Mengen (SO₂-Äq.) umgerechnet (Tabelle 6-17).

Tabelle 6-17: Äquivalenzfaktoren der Emissionen mit Beitrag zur Versauerung

Emissionen mit Beitrag zur Versauerung	SO ₂ -Äquivalent
SO ₂	1
NO _x	0,7

Als Maß für die bodennahe Ozonbildung dieser Emissionen wird das Ozonbildungspotential (OCP – Ozon Creation Potential) verwendet, das den Beitrag verschiedener Gase zur Ozonbildung in Form einer äquivalenten Menge C₂H₄ ausdrückt. Die Ozonbildung eines Kilogramms des Gases wird als Vielfaches ("Äquivalenzfaktor") der Ozonbildung von einem Kilogramm C₂H₄ angegeben. Mit den Äquivalenzfaktoren werden die Gasmengen von NO_x, CO, NMVOC und CH₄ in äquivalente C₂H₄-Mengen (C₂H₄-Äq.) umgerechnet (Tabelle 6-18).

Tabelle 6-18: Äquivalenzfaktoren der Emissionen mit Beitrag zur Ozonbildung

Emissionen mit Beitrag zur Ozonbildung	C ₂ H ₄ -Äquivalent
C ₂ H ₄	1
NMVOC	1
CO	0,11
NO _x	1,22
CH ₄	0,014

Für eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Umweltwirkungen wird auf bereits veröffentlichte Projektberichte verwiesen (z.B. Endbericht „FT-Treibstoffe aus Biomasse in Österreich“, 2008).

Die Emissionen und der Energiebedarf werden auf Basis einer Lebenszyklusanalyse (LCA) berechnet. Nach ISO 14040 „Ökobilanz“ ist die Lebenszyklusanalyse eine Methode zur Abschätzung der Umweltauswirkungen eines Produktes (z.B. wie in der vorliegenden Untersuchung Transportdienstleistungen), wobei Umweltaspekte im Verlauf des Lebensweges eines Produktes (d.h. „von der Wiege bis zur Bahre“) von der Rohstoffgewinnung, über die Produktion, Anwendung bis zur Entsorgung untersucht werden.

Die funktionale Einheit dieser Lebenszyklusanalyse sind Emissionen oder Energiebedarf bezogen auf ein Jahr, z.B. t CO₂-Äq./a.

Zur Berechnung der Treibhausgasemissionen in der Lebenszyklusanalyse wurde das Computerprogramm GEMIS V4.5 (<http://www.oeko.de/service/gemis>, Gesamt-Emissions-

Modell Integrierter Systeme) eingesetzt, wobei der verfügbare Datensatz GEMIS Österreich (UBA 2008) und „ELEKTRA“ (Jungmeier et al. 2009) verwendet wurden.

6.6.2 Untersuchte Systeme

Die Basis für die Lebenszyklusanalyse bilden Prozessketten, die für jedes untersuchte Transportsystem modelliert wurden. Eine Prozesskette beschreibt den gesamten Lebenszyklus von der Rohstoffbereitstellung bis zur Transportdienstleistung.

In Abbildung 6-10 ist die untersuchte Prozesskette für das Transportsystem mit dem Treibstoff Wasserstoff aus der Öko-Wasserstoff-Tankstelle dargestellt. Als Referenzsystem wird dem Wasserstoff-Transportsystem eine Prozesskette mit Benzin mit 10 Vol-% Bioethanol als Treibstoff gegenübergestellt. Für die in der Öko-Wasserstoff-Tankstelle erzeugten Produkte Sauerstoff und Wärme wurden als Referenzsysteme die Sauerstofferzeugung über Luftzerlegung und die Wärmeerzeugung aus Heizöl angenommen.

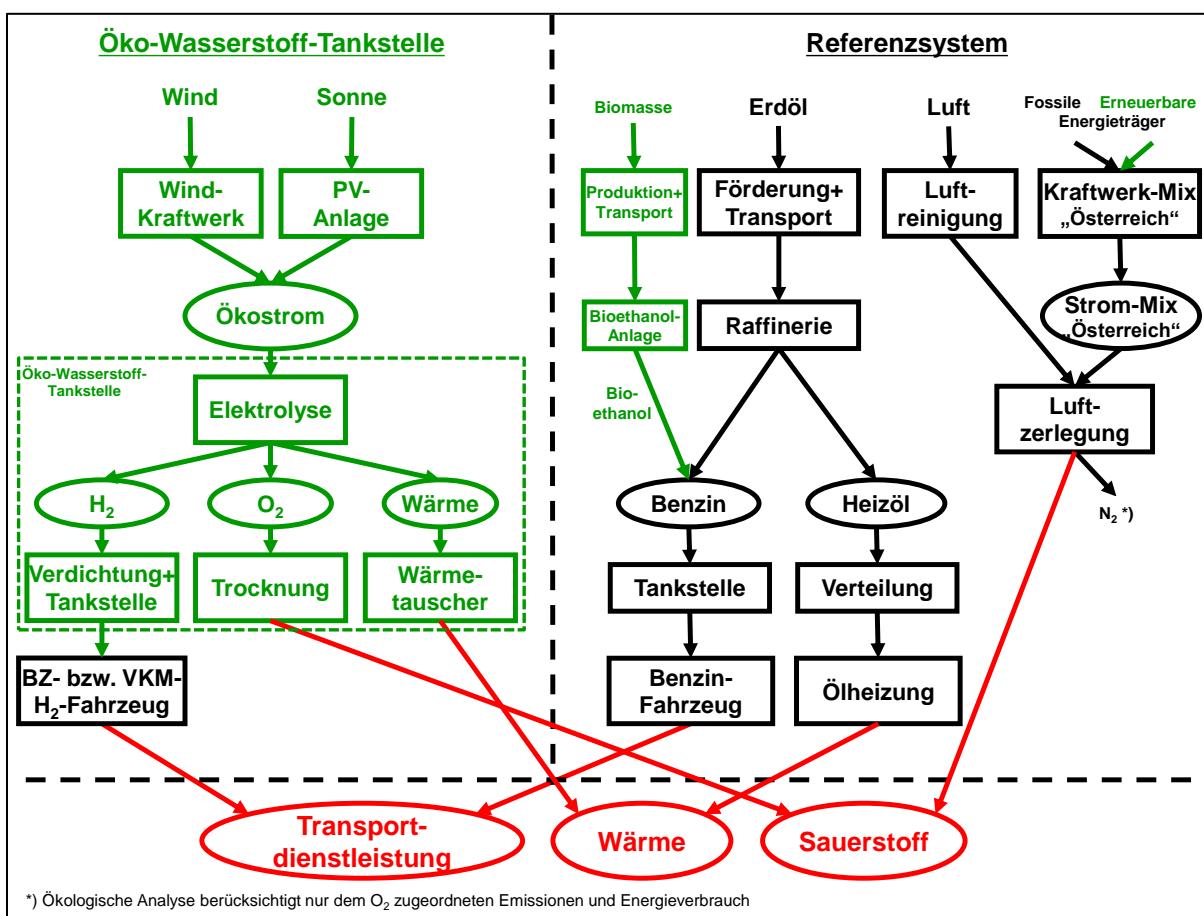


Abbildung 6-10: Untersuchte Systeme – Prozessketten

Der Strom für den Betrieb der Öko-Wasserstoff-Tankstelle wurde als Ökostrom aus 75 % Windkraft und 25 % Photovoltaik angenommen.

Bei den Wasserstoff-Fahrzeugen wurden zwei Fahrzeuge angenommen:

- Wasserstoff-Fahrzeug mit Brennstoffzelle (BZ) (Verbrauch 1,1 kg H_2 /100 km)
- Wasserstoff-Fahrzeug mit Verbrennungskraftmotor (VKM) (Verbrauch 2,2 kg H_2 /100 km)

Die jährliche Transportdienstleistung [km/a] der Wasserstoff-Fahrzeuge mit VKM liegt aufgrund des doppelten Wasserstoffverbrauchs bei 50% der Transportdienstleistung der Wasserstoff-Fahrzeuge mit BZ.

Der Strom für den Betrieb der Luftzerlegungsanlage im Referenzsystem wurde als österreichischer Strom-Mix angenommen.

Beim Treibstoff Benzin wurde eine Beimischung von 10 Volumenprozent Bioethanol angenommen. Der Bioethanol wird aus 80 % Weizen und 20 % Zuckerrüben hergestellt. Bei den Benzin-Fahrzeugen wird Technologie mit europäischer Abgasemissionsgesetzgebung nach Euro 6 betrachtet. Der Verbrauch des Benzin-Fahrzeugs wurde mit 7,7 l/100 km angenommen. Die Analyse der Emissionen und des Energiebedarfs der Fahrzeuge erfolgt auf Basis von Projektergebnissen der TU Graz im Projekt „FT-Treibstoffe aus Biomasse in Österreich“ im Programm Energiesysteme der Zukunft.

Die Berechnung der jährlichen Emissionen und des Energiebedarfs erfolgt auf Basis der von den untersuchten Systemen bzw. Referenzsystemen bereitgestellten Transportdienstleistungen und Produktmengen Sauerstoff und Wärme (Tabelle 6-19).

Tabelle 6-19: Transportdienstleistungen, Sauerstoff- und Wärmemengen der untersuchten Systeme

Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen	Auto-waschanlage	Krankenhaus klein	Krankenhaus mittel	Krankenhaus groß	Tankstelle klein	Tankstelle groß
Transportdienstleistung						
H ₂ -Fahrzeug mit BZ [km/a]	686.509	686.509	2.059.527	3.432.545	1.373.018	13.730.182
H ₂ -Fahrzeug mit VKM [km/a]	343.255	343.255	1.029.764	1.716.273	686.509	6.865.091
Sauerstoff [t/a]	56	56	169	281	113	1126
Wärme [MWh/a]	86	86	259	432	173	487

Insgesamt wurden 6 Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen mit 2 Wasserstoff-Fahrzeugen und deren Referenzsysteme mit einem Benzin-Fahrzeug untersucht, das sind in Summe 24 Prozessketten (Tabelle 6-20).

Tabelle 6-20: Übersicht der untersuchten Prozessketten

	Auto-waschanlage	Krankenhaus klein	Krankenhaus mittel	Krankenhaus groß	Tankstelle klein	Tankstelle groß
Öko-Wasserstoff-Tankstelle mit H ₂ -Fahrzeug mit BZ	x	x	x	x	x	x
Referenzsystem mit Benzinfahrzeug	x	x	x	x	x	x
Öko-Wasserstoff-Tankstelle mit H ₂ -Fahrzeug mit VKM	x	x	x	x	x	x
Referenzsystem mit Benzinfahrzeug	x	x	x	x	x	x

Die Ergebnisse der ökologischen Analyse werden für jede Umweltwirkung am Beispiel der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstelle „Krankenhaus klein“ dargestellt. Die Zusammenfassungen für alle untersuchten Prozessketten sind für die einzelnen Umweltwirkungen in den Übersichtstabellen Tabelle 6-21 bis Tabelle 6-24 bzw. in Abbildung 6-16 und Abbildung 6-17 dargestellt.

6.6.3 Treibhausgasemissionen

Die jährlichen Treibhausgas- (THG-) Emissionen (Abbildung 6-11) für das Transportsystem mit Wasserstoff aus der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstelle „Krankenhaus klein“ betragen zwischen 33 (Wasserstoff-Fahrzeug mit BZ) und 21 t CO₂-Äq./a (Wasserstoff-Fahrzeug mit VKM). Die Jahres-Emissionsmenge ist beim Fahrzeug mit VKM trotz der spezifisch höheren Emissionen pro gefahrenen Kilometer aufgrund der halbierten Jahreskilometerzahl geringer als beim Fahrzeug mit BZ. Für das Transportsystem mit dem Treibstoff Benzin betragen die

jährlichen THG-Emissionen 164 bzw. 82 t CO₂-Äq./a. Die THG-Emissionen der Referenzsysteme zur Sauerstoff- und Wärmeerzeugung betragen 2 und 33 t CO₂-Äq./a. Das bedeutet, die Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstelle „Krankenhaus klein“ reduziert die jährlichen THG-Emissionen je nach Wasserstoff-Fahrzeug um 167 t CO₂-Äq./a (mit BZ) bzw. 97 t CO₂-Äq./a (mit VKM). Das entspricht einem Reduktionspotential von 83 bzw. 82%.

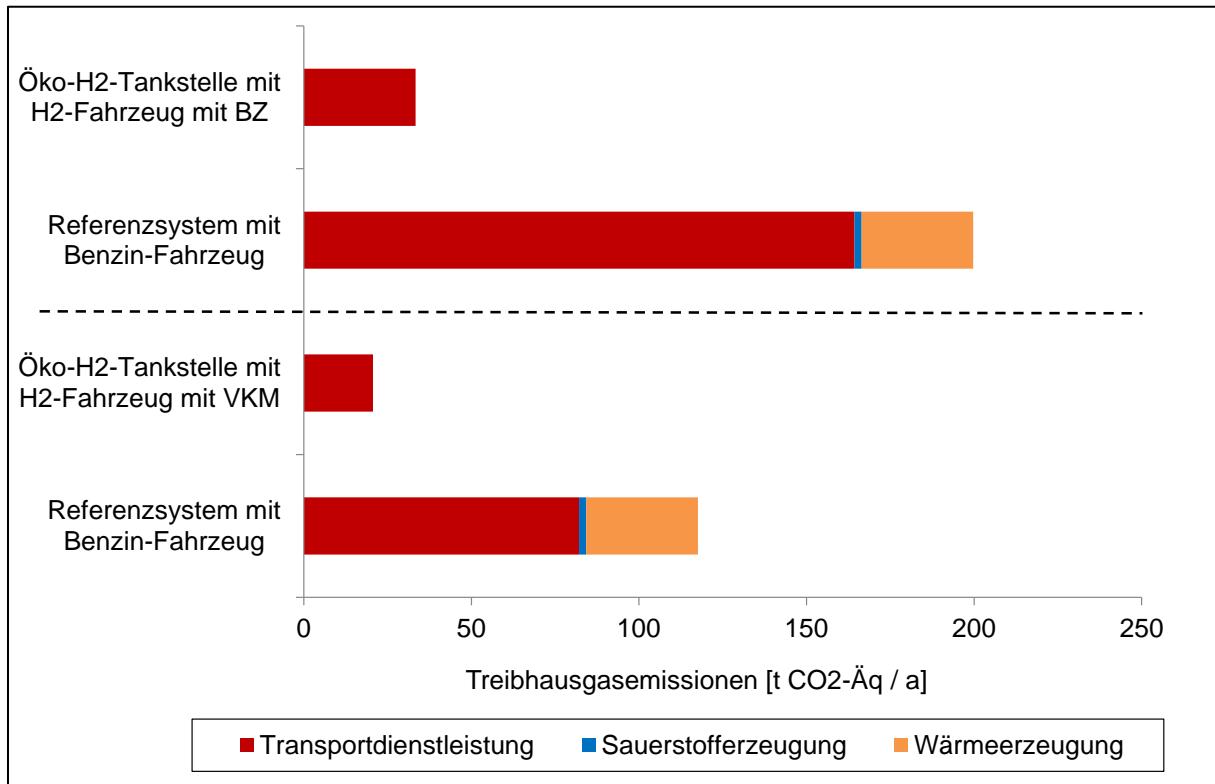


Abbildung 6-11: Treibhausgasemissionen pro Jahr der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstelle „Krankenhaus klein“

Tabelle 6-21: Treibhausgasemissionen der untersuchten Systeme

	Autowaschanlage = Krankenhaus klein		Krankenhaus mittel		Krankenhaus groß		Tankstelle klein		Tankstelle groß	
	Gesamt		Gesamt		Gesamt		Gesamt		Gesamt	
	THG-Emissionen [t CO ₂ -Äq/a]	Reduktion [%]	THG-Emissionen [t CO ₂ -Äq/a]	Reduktion [%]	THG-Emissionen [t CO ₂ -Äq/a]	Reduktion [%]	THG-Emissionen [t CO ₂ -Äq/a]	Reduktion [%]	THG-Emissionen [t CO ₂ -Äq/a]	Reduktion [%]
Öko-H2-Tankstelle mit H2-Fahrzeug mit BZ	33	-83%	100	-83%	167	-83%	67	-83%	667	-81%
Referenzsystem mit Benzin-Fahrzeug	200		599		999		399		3516	
Öko-H2-Tankstelle mit H2-Fahrzeug mit VKM	21	-82%	62	-82%	103	-82%	41	-82%	413	-78%
Referenzsystem mit Benzin-Fahrzeug	118		353		588		235		1873	

6.6.4 Kumulierter Primärenergiebedarf

Der gesamte kumulierte Primärenergiebedarf für das Transportsystem mit Wasserstoff aus der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstelle „Krankenhaus klein“ ist beim H2-Fahrzeug mit BZ niedriger, beim H2-Fahrzeug mit VKM höher als für die Referenzsysteme mit dem Benzin-Fahrzeug (Abbildung 6-12). Der fossile Anteil am kumulierten Primärenergiebedarf ist in beiden Fällen mit 50 - 70 MWh/a für die Wasserstoff-Fahrzeuge jedoch deutlich geringer als für die Benzin-Fahrzeuge mit 420 bzw. 710 MWh/a (Abbildung 6-13). Das bedeutet, die Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstelle „Krankenhaus klein“ reduziert den jährlichen fossilen

Primärenergieaufwand je nach Wasserstoff-Fahrzeug um 640 MWh/a (mit BZ) bzw. 370 MWh/a (mit VKM). Das entspricht einem Reduktionspotential von 90 bzw. 87%.

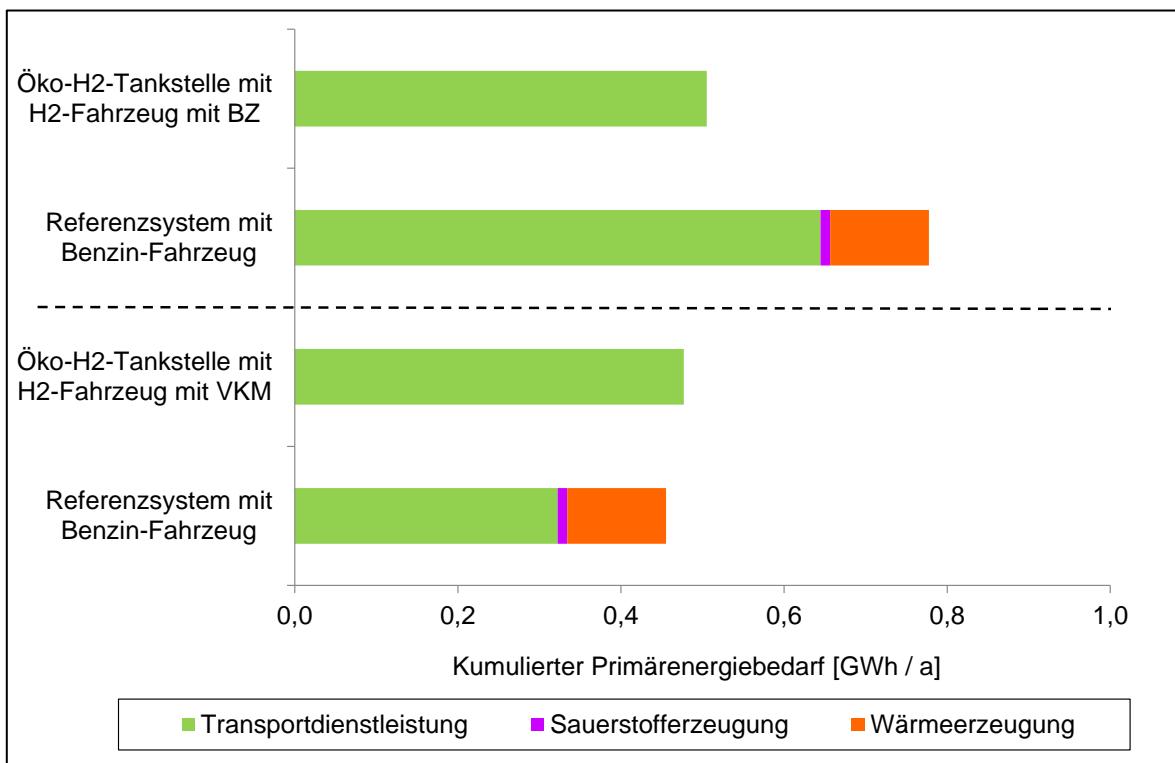


Abbildung 6-12: Kumulierter Primärenergiebedarf pro Jahr der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstelle „Krankenhaus klein“

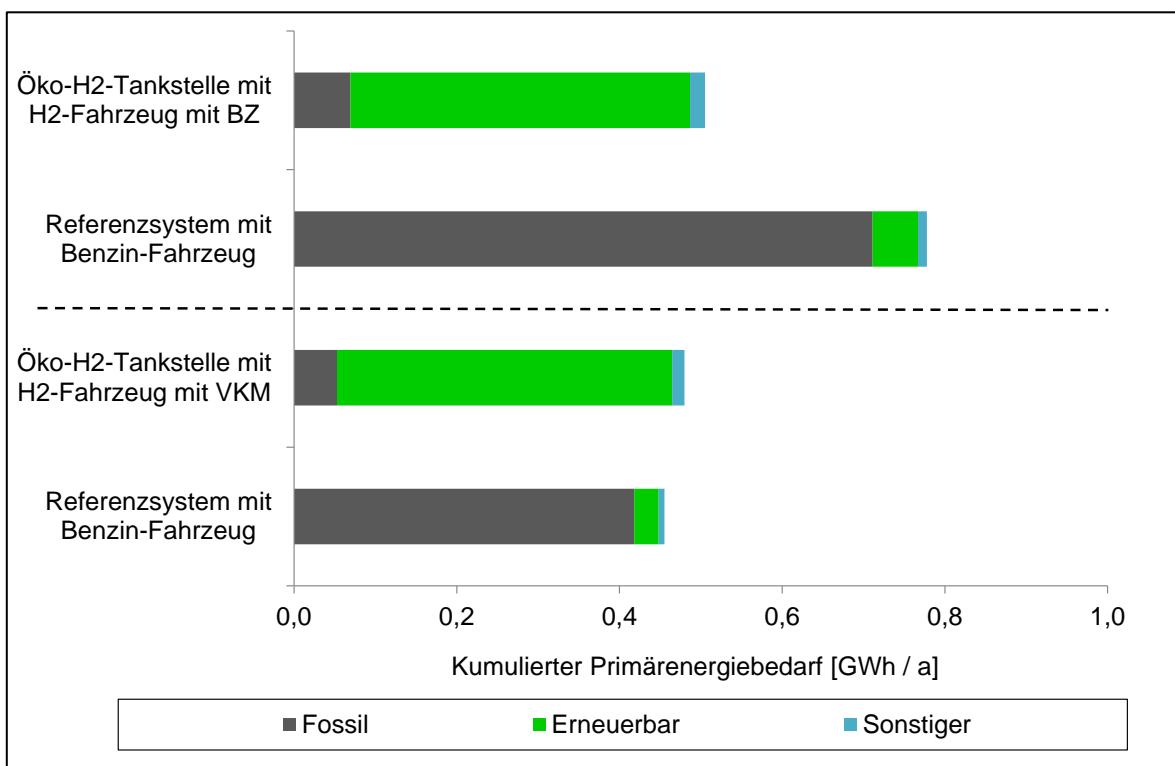


Abbildung 6-13: Kumulierter Primärenergiebedarf fossil, erneuerbar, sonstiger) der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstelle „Krankenhaus klein“

Tabelle 6-22: Kumulierter Primärenergiebedarf der untersuchten Systeme

	Autowaschanlage = Krankenhaus klein	Krankenhaus mittel	Krankenhaus groß	Tankstelle klein	Tankstelle groß			
	Gesamt [GWh/a]	Gesamt [%]	Gesamt [GWh/a]	Gesamt [%]	Gesamt [GWh/a]	Gesamt [%]	Gesamt [GWh/a]	Gesamt [%]
Öko-H2-Tankstelle mit H2-Fahrzeug mit BZ	0,51	-35%	1,52	-35%	2,53	-35%	1,01	-35%
Referenzsystem mit Benzin-Fahrzeug	0,78		2,33		3,89		1,56	
Öko-H2-Tankstelle mit H2-Fahrzeug mit VKM	0,48	5%	1,43	5%	2,39	5%	0,95	5%
Referenzsystem mit Benzin-Fahrzeug	0,46		1,37		2,28		0,91	
							7,37	

6.6.5 Versauerungspotential und Ozonbildungspotential

Bei den jährlichen Emissionen mit Beitrag zur Versauerung und zur bodennahen Ozonbildung weist das Transportsystem mit Wasserstoff aus der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstelle „Krankenhaus klein“ niedrigere Emissionen auf als die Referenzsysteme mit Benzin-Fahrzeugen. Die Emissionen mit Beitrag zur Versauerung betragen für das Wasserstoff-Transportsystem 0,07 bis 0,11 t SO₂-Äq./a und für die Referenzsysteme 0,21 bis 0,34 t SO₂-Äq./a. Die Emissionen mit Beitrag zur bodennahen Ozonbildung betragen für das Wasserstoff-Transportsystem 0,08 bis 0,11 t C₂H₄-Äq./a und für die Referenzsysteme 0,20 bis 0,35 t C₂H₄-Äq./a. Das bedeutet, die Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstelle „Krankenhaus klein“ reduziert die jährlichen Emissionen zur Versauerung bzw. Ozonbildung je nach Wasserstoff-Fahrzeug um 0,14 bis 0,23 t SO₂-Äq./a bzw. um 0,12 bis 0,24 t C₂H₄-Äq./a. Das entspricht einem Reduktionspotential von 68 % beim Versauerungspotential bzw. 61 bis 69 % beim Ozonbildungspotential.

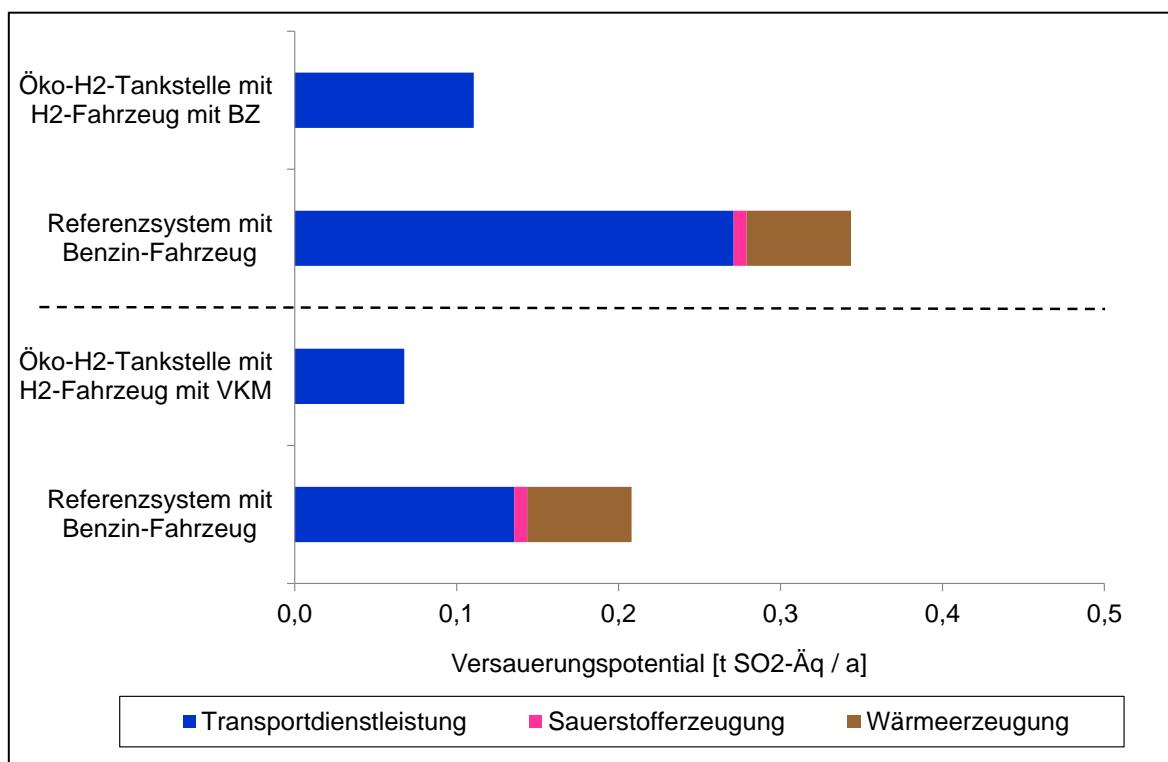


Abbildung 6-14: Versauerungspotential der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstelle „Krankenhaus klein“

Tabelle 6-23: Versauerungspotential der untersuchten Systeme

	Autowaschanlage = Krankenhaus klein		Krankenhaus mittel		Krankenhaus groß		Tankstelle klein		Tankstelle groß	
	Gesamt		Gesamt		Gesamt		Gesamt		Gesamt	
	[t SO2-Äq/a]	[%]	[t SO2-Äq/a]	[%]	[t SO2-Äq/a]	[%]	[t SO2-Äq/a]	[%]	[t SO2-Äq/a]	[%]
Öko-H2-Tankstelle mit H2-Fahrzeug mit BZ	0,11	-68%	0,33	-68%	0,55	-68%	0,22	-68%	2,21	-63%
Referenzsystem mit Benzin-Fahrzeug	0,34		1,03		1,72		0,69		5,94	
Öko-H2-Tankstelle mit H2-Fahrzeug mit VKM	0,07	-68%	0,20	-68%	0,34	-68%	0,14	-68%	1,35	-58%
Referenzsystem mit Benzin-Fahrzeug	0,21		0,62		1,04		0,42		3,23	

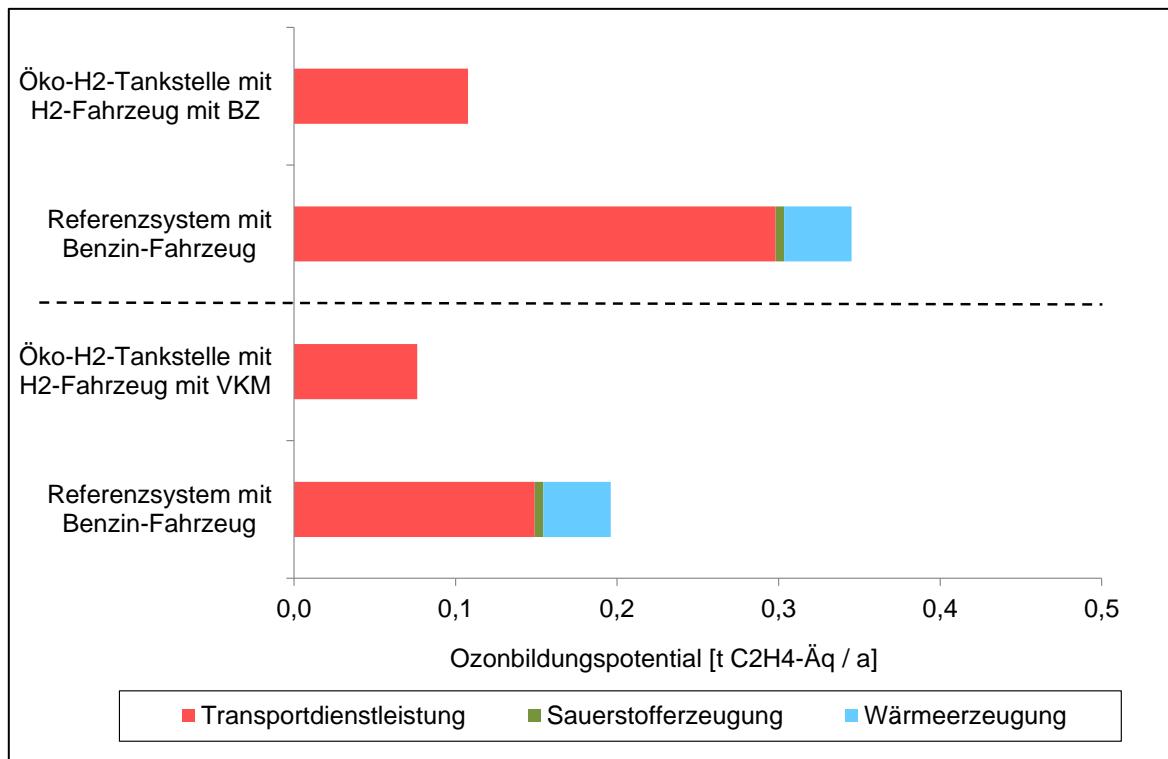


Abbildung 6-15: Ozonbildungspotential der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstelle „Krankenhaus klein“

Tabelle 6-24: Ozonbildungspotential der untersuchten Systeme

	Autowaschanlage = Krankenhaus klein		Krankenhaus mittel		Krankenhaus groß		Tankstelle klein		Tankstelle groß	
	Gesamt		Gesamt		Gesamt		Gesamt		Gesamt	
	[t C2H4-Äq/a]	[%]	[t C2H4-Äq/a]	[%]	[t C2H4-Äq/a]	[%]	[t C2H4-Äq/a]	[%]	[t C2H4-Äq/a]	[%]
Öko-H2-Tankstelle mit H2-Fahrzeug mit BZ	0,11	-69%	0,32	-69%	0,54	-69%	0,22	-69%	2,15	-66%
Referenzsystem mit Benzin-Fahrzeug	0,35		1,04		1,73		0,69		6,30	
Öko-H2-Tankstelle mit H2-Fahrzeug mit VKM	0,08	-61%	0,23	-61%	0,38	-61%	0,15	-61%	1,53	-54%
Referenzsystem mit Benzin-Fahrzeug	0,20		0,59		0,98		0,39		3,32	

6.6.6 Zusammenfassender Vergleich

In Abbildung 6-16 und Abbildung 6-17 werden die Umweltwirkungen der Öko-Wasserstoff-Tankstellen mit Wasserstoff-Fahrzeugen den Umweltwirkungen der Referenzsysteme mit Benzin-Fahrzeugen gegenübergestellt. Die Basis für den Vergleich bilden die Referenzsysteme, die mit 100% dargestellt sind.

In Abbildung 6-16 wird die Öko-Wasserstoff-Tankstelle mit dem Wasserstoff-Fahrzeug mit BZ und in Abbildung 6-17 mit VKM mit dem Referenzsystem mit Benzin-Fahrzeug verglichen. Bezogen auf die Jahresmengen können die Treibhausgasemissionen um bis zu 90 % und die Emissionen mit Beitrag zur Versauerung bzw. Ozonbildung um bis zu 70 % reduziert werden. Der kumulierte Primärenergiebedarf kann um bis zu 35 % reduziert werden, der fossile Primärenergiebedarf um bis zu ca. 90 %.

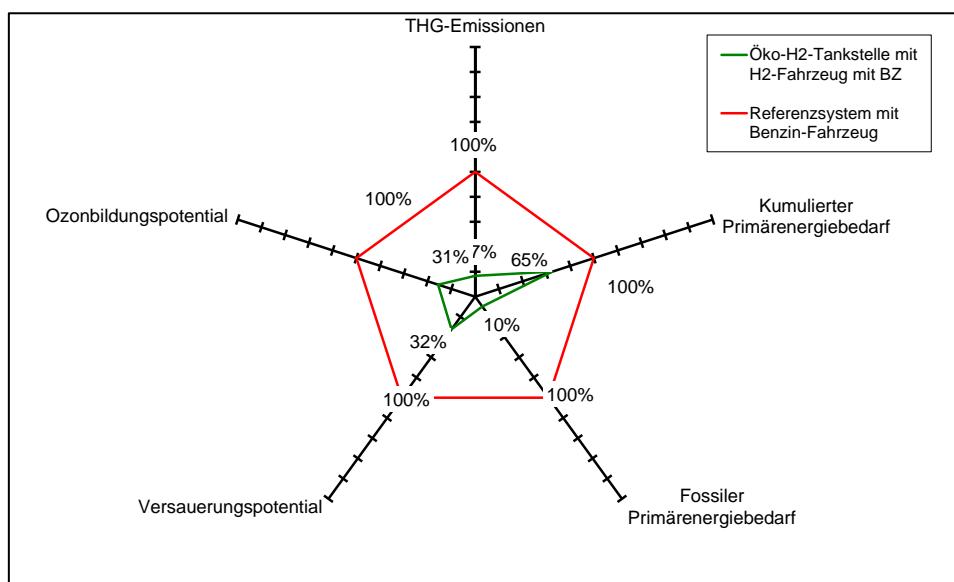


Abbildung 6-16: Vergleich der Umweltwirkungen Öko-Wasserstoff-Tankstelle mit H2-Fahrzeug mit BZ mit Referenzsystem mit Benzin-Fahrzeug

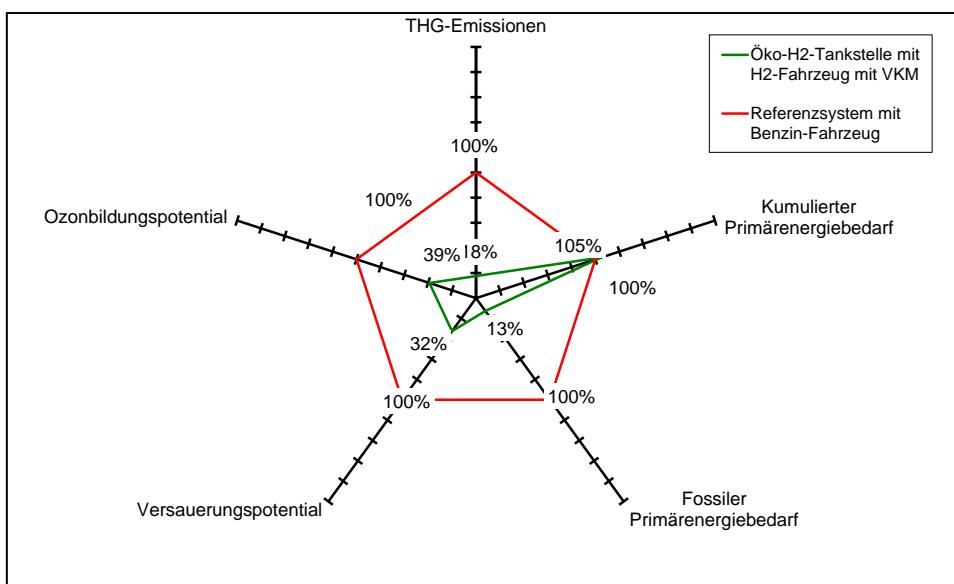


Abbildung 6-17: Vergleich der Umweltwirkungen Öko-Wasserstoff-Tankstelle mit H2-Fahrzeug mit VKM mit Referenzsystem mit Benzin-Fahrzeug

6.7 Modellierung einer Öko-Wasserstoff-Tankstellen-Infrastruktur in Österreich

6.7.1 Entwicklungsszenarien

In dieser Analyse wird der Aufbau einer Öko-Wasserstoff-Tankstellen-Infrastruktur anhand von Entwicklungsschritten der ersten Wasserstoff-Fahrzeugflotten bis zu 100.000 Fahrzeuge in Österreich modelliert. Wie bei der Einführung von ersten CNG-Fahrzeugen oder derzeit von Elektrofahrzeugen bilden betriebliche Flotten sowie ausgewählte Modellregionen den Startpunkt für 100 bis 1.000 Fahrzeuge, die anfangs auch nur innerhalb der Modellregionen eingesetzt werden. Mit weiter steigender Fahrzeuganzahl wird ein zunehmend flächendeckender Einsatz der Fahrzeuge in Österreich angenommen.

In Tabelle 6-25 sind die Entwicklungsstufen der Wasserstoff-Fahrzeugflotte für die ersten 100.000 Fahrzeuge für die Modellierung dargestellt. Auf Grundlage der Gesamtfahrzeuganzahl jeder Entwicklungsstufe, der Betankungsfrequenz und der Wasserstoffmenge pro Betankung wird der tägliche Wasserstoffbedarf berechnet. Dieser liegt zwischen 450 Nm³ (100 Fahrzeuge) und 450.000 Nm³ pro Tag (100.000 Fahrzeuge).

Tabelle 6-25: Entwicklungsstufen der ersten 100.000 Wasserstoff-Fahrzeuge und benötigte Wasserstoffmengen

	Modellregionen Graz, Wien, Linz		Flächendeckend in Österreich			
	je 100	je 1000	5.000	10.000	50.000	100.000
Fahrzeuganzahl gesamt	je 100	je 1000	5.000	10.000	50.000	100.000
Zu betankende Fahrzeuge / Tag ¹⁾	10	104	521	1.042	5.209	10.419
Benötigter Wasserstoff / Tag [kg/24h] ²⁾	41	406	2.032	4.063	20.316	40.633
Benötigter Wasserstoff / Tag [Nm ³ /24h]	452	4.520	22.599	45.198	225.989	451.978
1) Tankfrequenz 1 x pro 10 Tage (13.500 km/a, 355 km Reichweite/Betankung)						
2) Wasserstoffmenge pro Fahrzeug 3,9 kg (0,5 kg Rest im Tank)						

Dem Wasserstoffbedarf gegenüber steht die Öko-Wasserstofferzeugung in den Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen (Tabelle 6-26).

Tabelle 6-26: Öko-Wasserstofferzeugung in den Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen

Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen	Auto-waschanlage	Krankenhaus klein	Krankenhaus mittel	Krankenhaus groß	Tankstelle klein	Tankstelle groß
Öko-Wasserstoff [kg / 24 h]	22	22	65	108	43	432
Öko-Wasserstoff [Nm ³ / 24 h]	240	240	720	1.200	480	4.800
Betankbare Fahrzeuge pro Tag ¹⁾	6	6	17	28	11	111
Fahrzeuganzahl gesamt ²⁾	53	53	159	265	106	1.062
1) Wasserstoffmenge pro Fahrzeug 3,9 kg (0,5 kg Rest im Tank)						
2) Tankfrequenz 1 x pro 10 Tage (13.500 km/a, 355 km Reichweite/Betankung)						

Die Standorte und Anzahl der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen „Krankenhaus klein“, „mittel“ und „groß“ orientiert sich an den vorhandenen Krankenanstalten in Österreich (Abbildung 6-6, Tabelle 6-27).

Tabelle 6-27: Anzahl der Krankenhäuser in den Bundesländern (aus BMWfj 2008)

	Krankenhaus klein	Krankenhaus mittel	Krankenhaus groß
	200 Betten	500 Betten	1.000 Betten
Bundesland (Hauptstadt)	Anzahl		
Burgenland (Eisenstadt)	3 (1)	-	-
Kärnten (Klagenfurt)	7 (2)	2 (1)	1 (1)
Niederösterreich (St. Pölten)	8 (1)	6 (0)	1 (1)
Oberösterreich (Linz)	13 (5)	4 (2)	2 (1)
Salzburg (Salzburg)	2 (1)	2 (1)	1 (1)
Steiermark (Graz)	12 (4)	4 (3)	1 (1)
Tirol (Innsbruck)	5 (0)	1 (1)	1 (1)
Vorarlberg (Bregenz)	3 (1)	1 (0)	-
Wien	16	5	4
Gesamt	69	25	11

Es wurde angenommen, dass in drei österreichischen Modellregionen Graz, Linz und Wien die ersten - jeweils 100 bis 1.000 - Wasserstoff-Fahrzeuge zum Einsatz kommen. Mit weiter steigender Gesamtfahrzeuganzahl verteilen sich die Tankstellen zunehmend auf ganz Österreich (ab 5.000 Fahrzeugen auf die österreichischen Landeshauptstädte, ab 10.000 Fahrzeugen flächendeckend). Die Aufteilung der Fahrzeuge auf die einzelnen Bundesländer erfolgt anteilmäßig entsprechend der derzeitigen geografischen Verteilung der derzeit 4,3 Mio PKW auf Bundesländer und Landeshauptstädte (Abbildung 6-18).

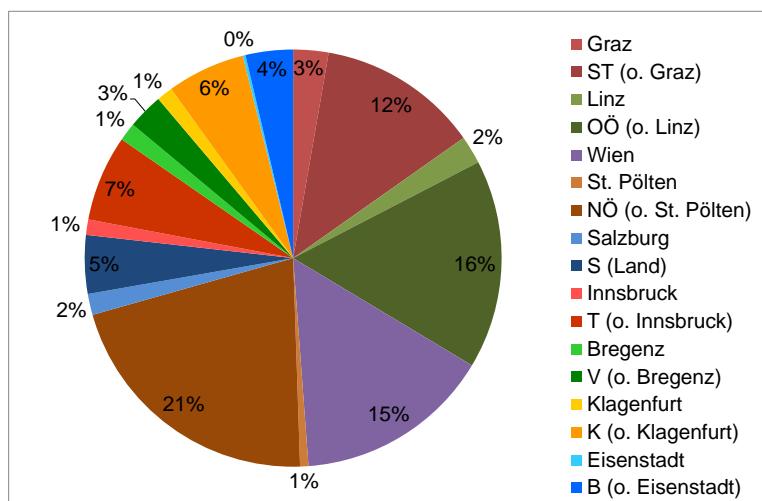


Abbildung 6-18: Verteilung der PKW in Österreich auf Bundesländer und Landeshauptstädte

Bei der Standortwahl der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen für die Fahrzeug-Entwicklungsszenarien wurden die Krankenhäuser aufgrund der Nutzungsmöglichkeit von Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme vor Ort bevorzugt.

6.7.2 Ergebnisse für den Aufbau einer Tankstellen-Infrastruktur

In Abbildung 6-19 bis Abbildung 6-25 sind die Modellergebnisse für den Aufbau einer Öko-Wasserstoff-Tankstellen-Infrastruktur und deren geografische Verteilung für die ersten Wasserstoff-Fahrzeugflotten in Österreich dargestellt. Die Anzahl der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen reicht von 2 für die ersten 100 Fahrzeuge in ersten Modellregionen (am Beispiel von Graz, Linz und Wien) bis zu 386 für 100.000 Fahrzeuge in ganz Österreich. Derzeit gibt es in Österreich ca. 2.800 konventionelle Tankstellen für 6 Mio Benzin- und Diesel-Kraftfahrzeuge.

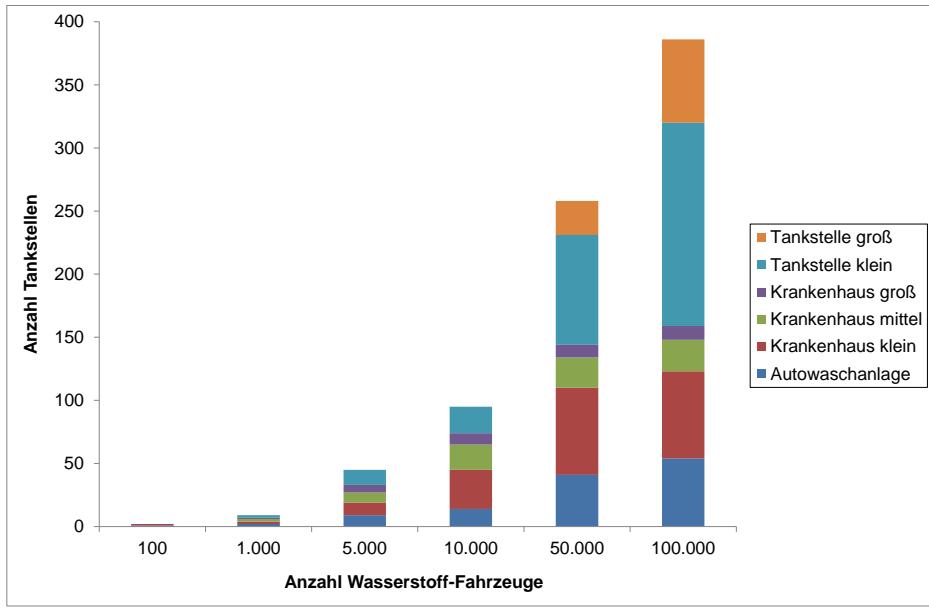


Abbildung 6-19: Verteilung und Anzahl der Standard-Öko-wasserstoff-Tankstellen für die Entwicklungsszenarien

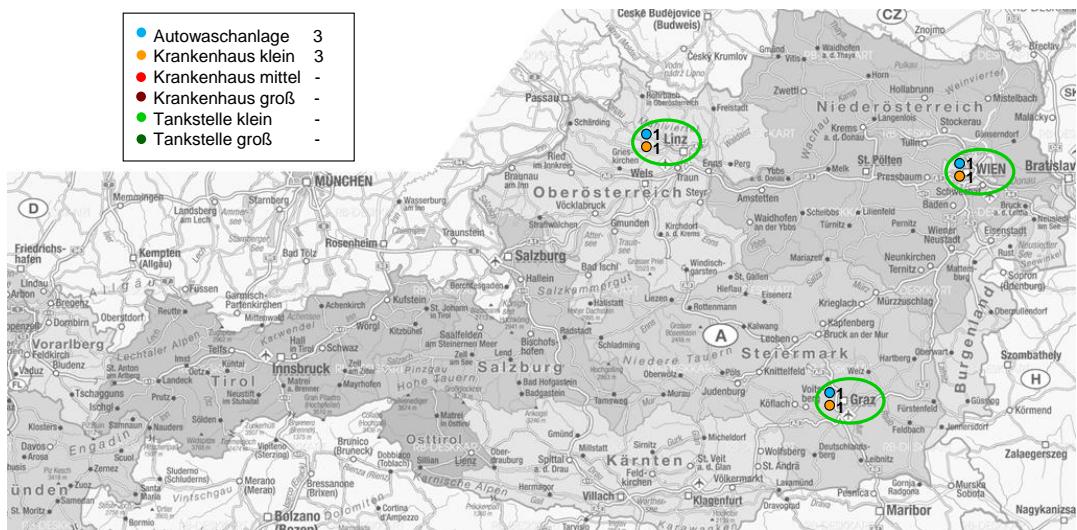


Abbildung 6-20: Standard-Öko-wasserstoff-Tankstellen für je 100 Fahrzeuge in Graz, Linz und Wien

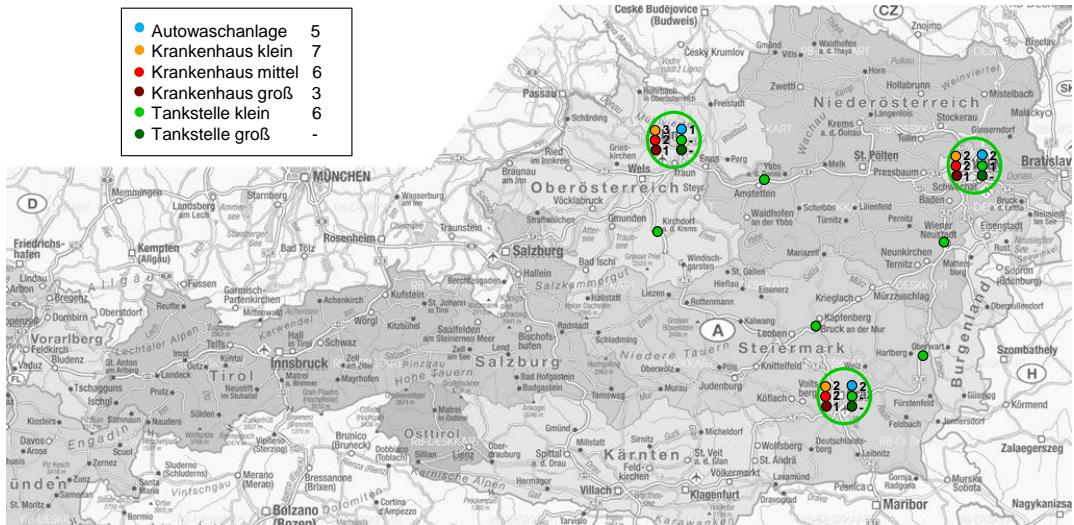


Abbildung 6-21: Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen für je 1.000 Fahrzeuge in Graz, Linz und Wien

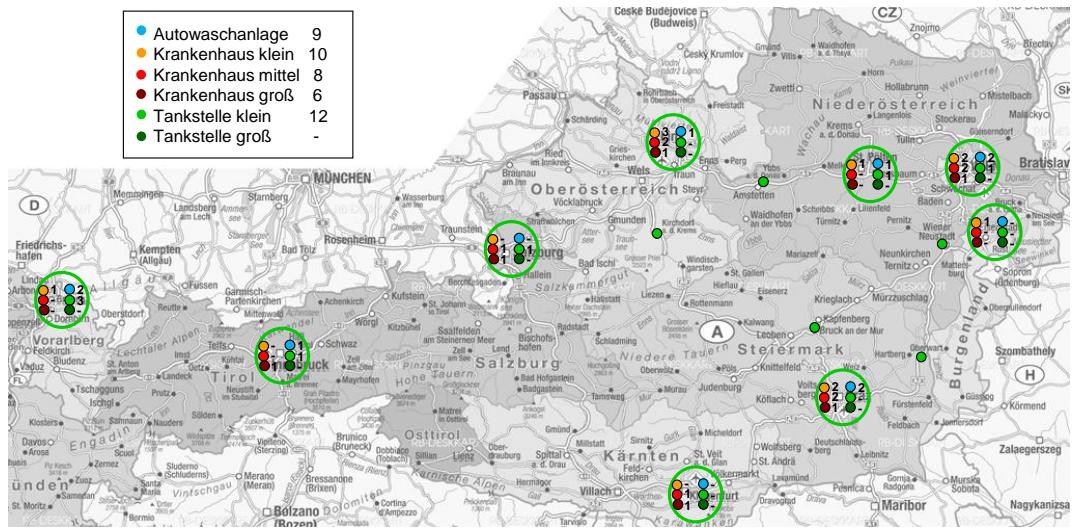


Abbildung 6-22: Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen für 5.000 Fahrzeuge

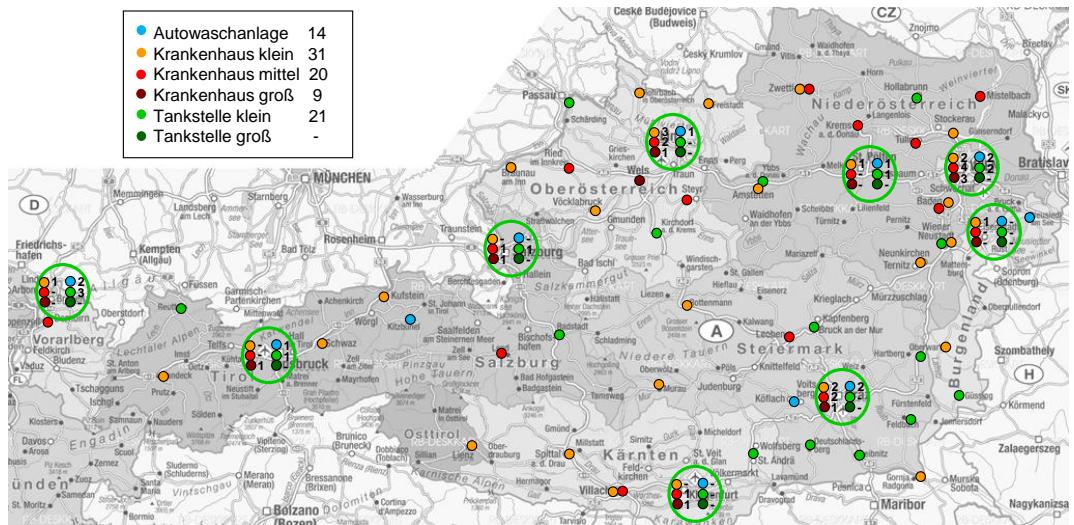


Abbildung 6-23: Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen für 10.000 Fahrzeuge

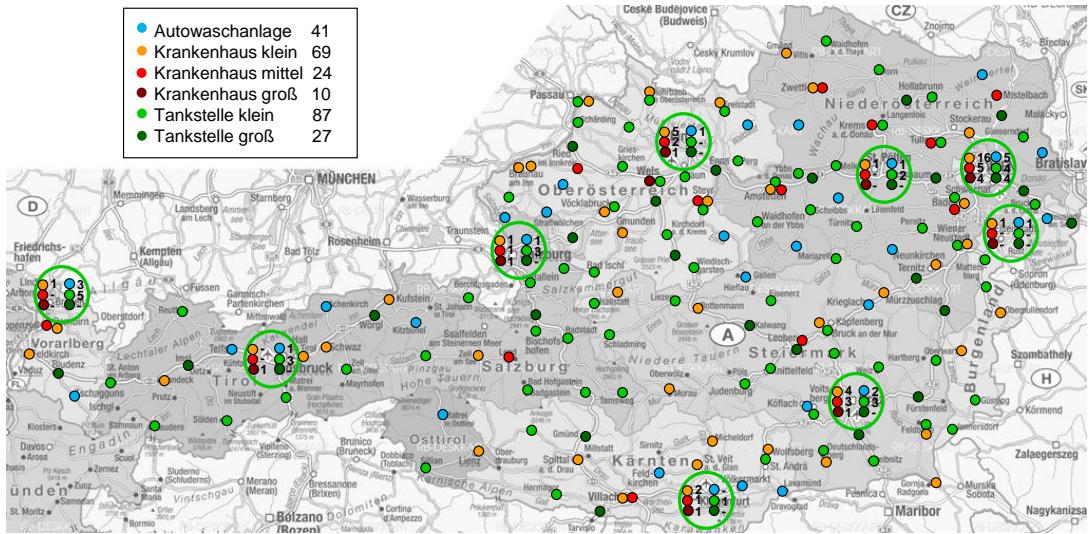


Abbildung 6-24: Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen für 50.000 Fahrzeuge

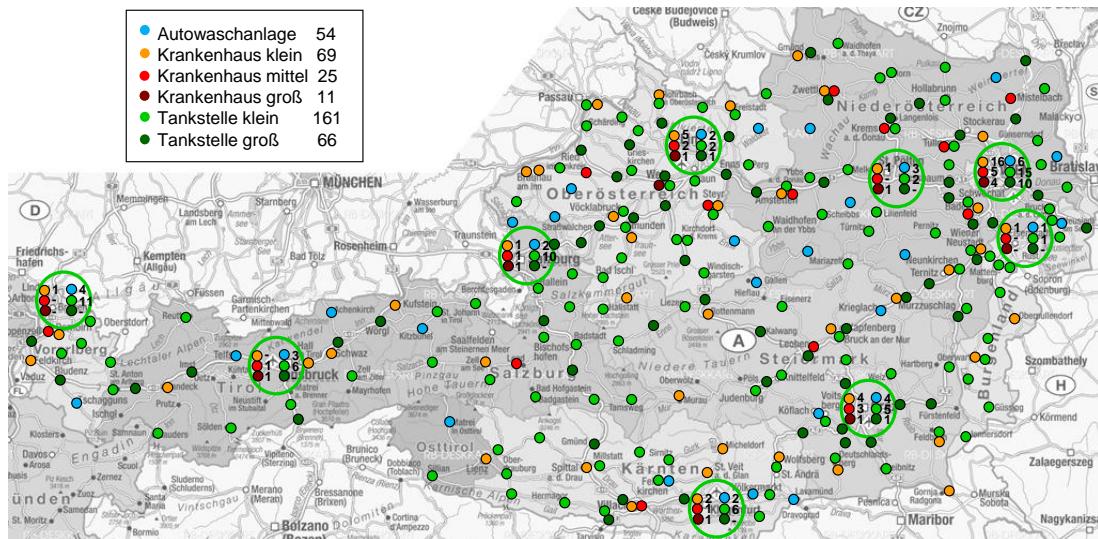


Abbildung 6-25: Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen für 100.000 Fahrzeuge

Auf Grundlage der in [Tabelle 6-12](#) dargestellten Investitionskosten der Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen ergeben sich Gesamtinvestitionen von ca. 1,6 Mio € für die Tankstellen zur Versorgung der ersten 100 Fahrzeuge bis ca. 500 Mio € für die Tankstellen für 100.000 Fahrzeuge ([Abbildung 6-26](#)). In einer europäischen Studie wurden die Investitionskosten für eine Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur auf 3 Mrd € für 1 Mio Fahrzeuge im Jahr 2020 geschätzt.

Das Reduktionspotential bei den jährlichen Treibhausgasemissionen beträgt zwischen 330 (100 Fahrzeuge) und 284.000 t CO₂-äq/a (100.000 Fahrzeuge) ([Abbildung 6-27](#)). Der fossile Primärenergiebedarf kann um 1,3 (100 Fahrzeuge) bis 1,1 TWh/a (100.000 Fahrzeuge) reduziert werden.

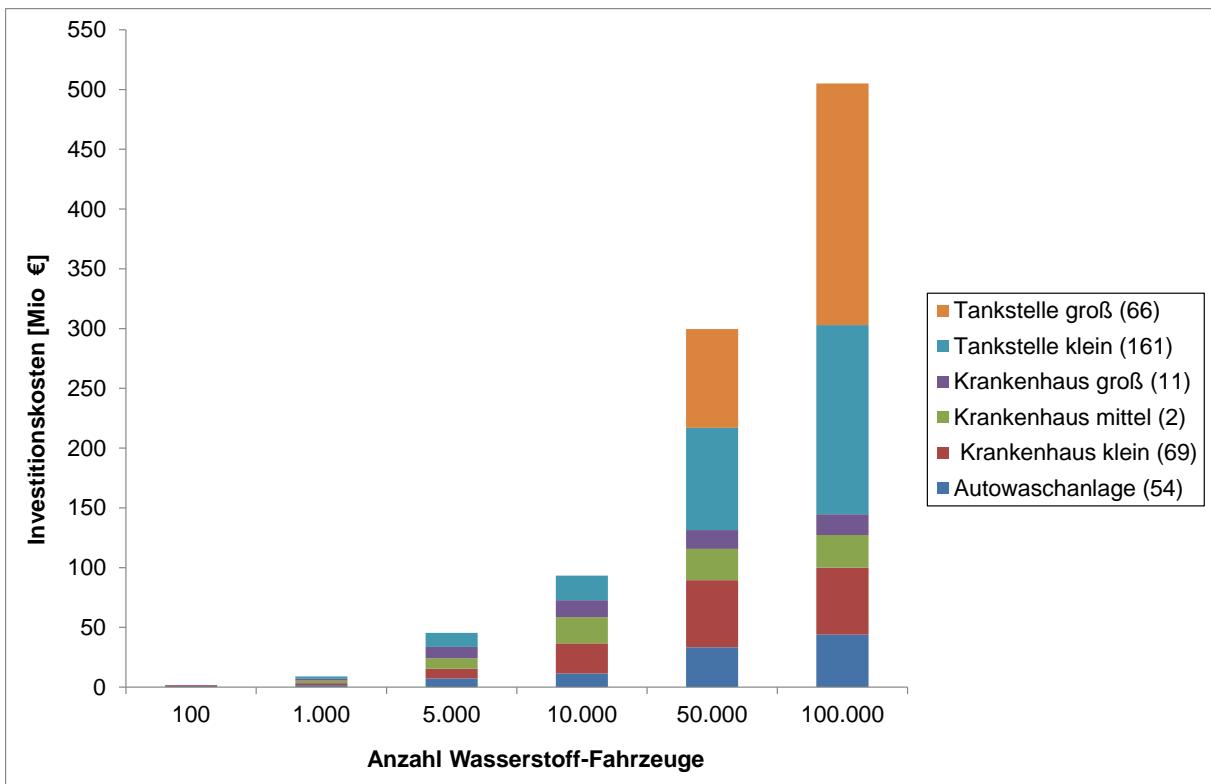


Abbildung 6-26: Investitionskosten für den Aufbau der Öko-Wasserstoff-Tankstellen-Infrastruktur

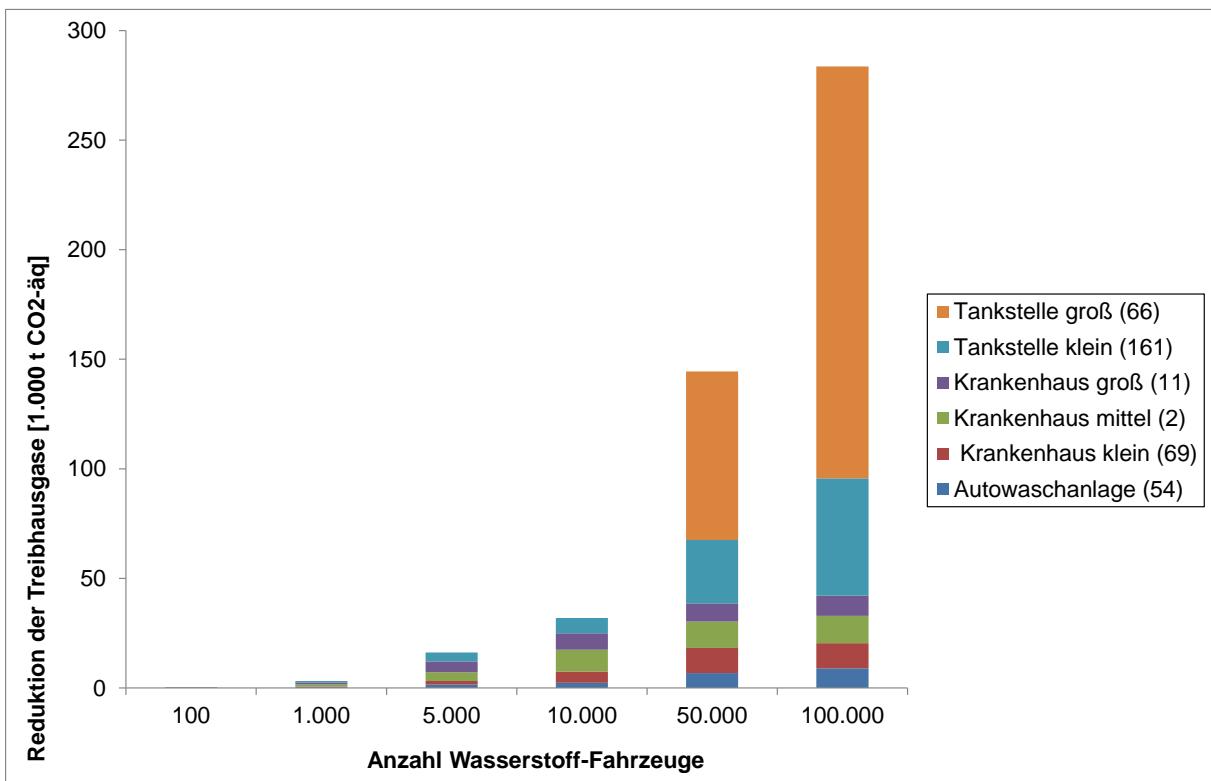


Abbildung 6-27: Reduktionspotential der Treibhausgasemissionen

7 Literaturverzeichnis

Kapitel 1 - Einleitung

Jungmeier G. et al. 2006. Wasserstoff aus erneuerbarer Energie in Österreich – Ein Energieträger der Zukunft? Projektbericht. Graz.

Schaffer T. et al. 2008. Öko-Wasserstoff innovativ – Innovative gekoppelte Erzeugung von Öko-Wasserstoff als alternativer Treibstoff mit Nutzung der Nebenprodukte Sauerstoff und Wärme. Projektbericht. Graz

Kapitel 2 – Technologien für Öko-Wasserstoff-Tankstellen

Biermayr P. 2009. Erneuerbare Energie in Österreich - Marktentwicklung 2008. Energy Economics Group, TU Wien.

BMLFUW – Lebensministerium. 2009. Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan 2009 – NGP 2009. Wien.

E-control. 2009, 2010. <http://www.e-control.at/de/statistik/strom>.

Fechner H. 2007. Technologie-Roadmap für Photovoltaik in Österreich. Arsenal Research, Wien.

Hantsch S. 2007. Das realisierbare Windkraftpotenzial in Österreich bis 2020. Kurzstudie. St.Pölten.

Hyways – The European Hydrogen Energy Roadmap. 2008. Final Report. Ottobrunn, Deutschland.

GermanHy – Woher kommt der Wasserstoff in Deutschland bis 2050? 2009. Abschlussbericht. Berlin, Deutschland.

Jungmeier G. et al. 2006. Wasserstoff aus erneuerbarer Energie in Österreich – Ein Energieträger der Zukunft? Projektbericht. Graz.

Kaltschmitt M. 2009. Regenerative Energien in Österreich. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden.

Leichtfried F. 2010. PEM-Elektrolyse: Der einfachste Weg vom Ökostrom zum Wasserstoff. Vortrag bei Driving Event 28. September 2011, Graz.

McKinsey. 2010. A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis. The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. Final Report.

Pöry Energy GmbH. 2008. Wasserkraftpotentialstudie Österreich. Wien.

Schaffer T. et al. 2008. Öko-Wasserstoff innovativ – Innovative gekoppelte Erzeugung von Öko-Wasserstoff als alternativer Treibstoff mit Nutzung der Nebenprodukte Sauerstoff und Wärme. Projektbericht. Graz

Spitzer J. 2007. Biomasseaufkommen Österreich. Joanneum Research, Graz.

Statistik Austria. 2011. Gesamtenergiebilanz 1970 bis 2009, Energieflussbild 2009. http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_und_umwelt/energie/energiebilanzen/index.html.

Stolten D., Krieg D. Alkaline Electrolysis – Introduction and Overview. In Stolten D. (Ed.) 2010. Hydrogen and Fuel Cells. Wiley-VCH Verlag. Weinheim, Deutschland.

Winter C.J., 1986. Wasserstoff als Energieträger. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, Deutschland.

Kapitel 3 – Errichtung der Demonstrationsanlage am HyCentA

Garche J., 2008. Regenerativer Wasserstoff aus der Elektrolyse - ein Überblick. WBZU Workshop, Ulm, Deutschland.

Leichtfried F. 2010. PEM-Elektrolyse: Der einfachste Weg vom Ökostrom zum Wasserstoff. Vortrag bei Driving Event 28. September 2011, Graz.

Schaffer T. et al. 2008. Öko-Wasserstoff innovativ – Innovative gekoppelte Erzeugung von Öko-Wasserstoff als alternativer Treibstoff mit Nutzung der Nebenprodukte Sauerstoff und Wärme. Projektbericht. Graz

Schnurnberger W., 2004. Wasserspaltung mit Strom und Wärme. Beitrag Jahrestagung des Forschungs-Verbunds Sonnenenergie (FVS). Berlin, Deutschland.

Smolinka T., 2007. Wasserstoff aus Elektrolyse – Ein technologischer Vergleich der alkalischen und PEM-Wasser-Elektrolyse. Vortrag FVS-Workshop, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. Ulm, Deutschland.

Smolinka T. et al. Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Water Electrolysis. In Stolten D. (Ed.) 2010. Hydrogen and Fuel Cells. Wiley-VCH Verlag. Weinheim, Deutschland.

Winter C.J., 1986. Wasserstoff als Energieträger. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, Deutschland.

Kapitel 5 – Demonstration der Öko-Wasserstoff-Tankstelle mit Wasserstoff-Fahrzeugen

Eichlseder H. et al. 2009. Potential of Synergies in a Vehicle for Variable Mixtures of CNG and Hydrogen. Paper, SAE World Congress & Exhibition 2009. Detroit, USA.

Eichlseder H. et al. 2010. Bivalenter Fahrzeugprototyp für Wasserstoff und Benzin als Übergangstechnologie zur Wasserstoffwirtschaft. Vortrag bei Gasfahrzeugtagung 2010. Berlin, Deutschland.

Kapitel 6 – Modellierung und Analyse einer Öko-Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur in Österreich

BMVIT – Verkehr in Zahlen. Ausgabe 2007. Wien.

BMWfj – Krankenanstalten in Österreich. 2008. Wien.

DENA-Studie: Erdgas und Biomethan im künftigen Kraftstoffmix. 2010. Berlin, Deutschland.

Dudenhofer F. et al. Erdgas als automotiver Kraftstoff für Europa: sind 5 % + x Marktanteil für Europa möglich? Notwendige Schritte und Aktivitäten. CAR-Studie. 2011. Duisburg, Deutschland.

GasHighway project – National report on state of CNG/biomethane filling station – Germany. Deliverable 3.1. 2010. Kirchberg, Deutschland.

GasHighway project – National report on state of CNG/biomethane filling station – Italy. Deliverable 3.1. 2010. Florenz, Italien.

GasHighway project – National report on state of CNG/biomethane filling station – Austria. Deliverable 3.1. 2010. Graz.

Jungmeier G. 2009. ELEKTRA - Entwicklung von Szenarien der Verbreitung von PKW mit teil- und voll-elektrifiziertem Antriebsstrang unter verschiedenen politischen Rahmenbedingungen. GEMIS-Datensatz - Ökologische Analyse. Joanneum Research, Graz.

Luttenberger J. 2010. Optimierung der gekoppelten Erzeugung und Nutzung von Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme in der Öko-Wasserstoff-Tankstelle der Zukunft. Diplomarbeit. Kapfenberg.

OMV Gas & Power GmbH. 2010. OMV-Erdgas-Tankstellen in Österreich. Prospekt.

ÖVFG – Österreichischer Verband für Flüssiggas. Mündliche Auskunft, Februar 2011.

Recknagel H. et al. Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. 2010. Oldenbourg Industrieverlag.

Seidinger P. 2006. Bio-CNG als Kraftstoff – Markteinführung. Vortrag bei Biomassetag. Tulln.

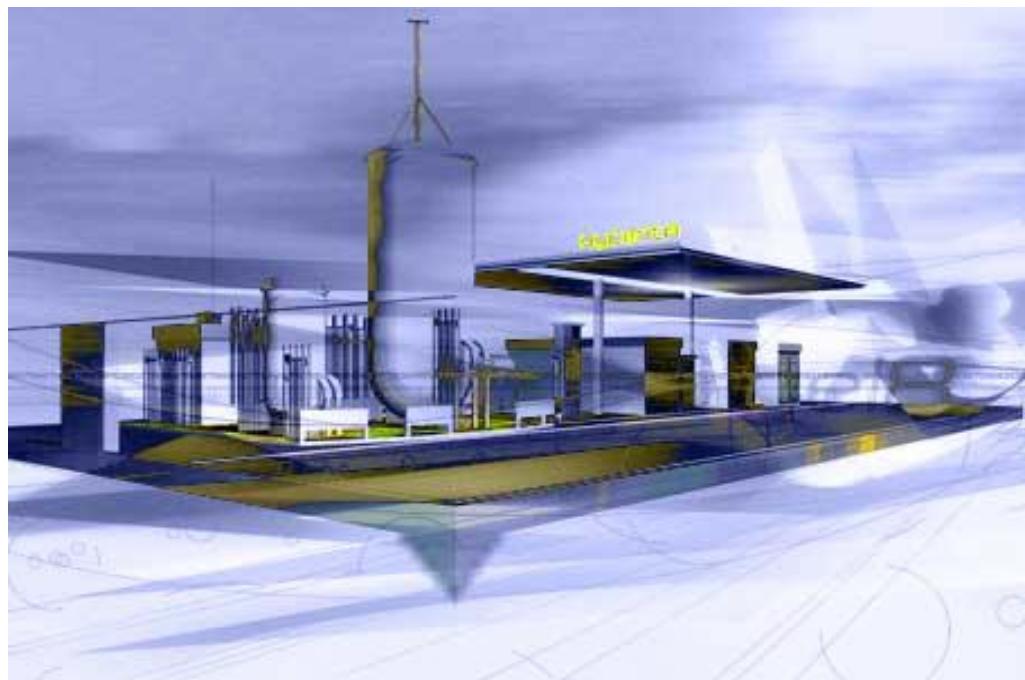
UBA - Umweltbundesamt Wien. 2008. GEMIS - Österreich. Gesamt Emissionsmodell Integrierter Systeme für Österreich. Version 4.5. Institut für angewandte Ökologie e.V. (Öko-Institut), Freiburg.

8 Anhang

8.1 Anforderungen an Wasserstoff-Tankstellen

Bericht der HyCentA Research GmbH

International veröffentlichte und in Vorber- eitung befindliche Standards



Bericht der HyCentA Research GmbH

International veröffentlichte und in Vorber- eitung befindliche Standards

Verfasst von

Dipl.-Ing. Stefan Brandstätter

Graz, am 26.01.2011

Dieser Bericht darf nur vollinhaltlich, ohne Weglassen und
Hinzufügen, veröffentlicht werden.

Sollte er auszugsweise abgedruckt oder vervielfältigt werden,
so ist vorher die schriftliche Zustimmung der Ersteller einzuholen.

Keywords:		

Freigegeben	Dr. Manfred Klell	26.01.2011
Erstellt	Dipl.-Ing. Stefan Brandstätter	26.01.2011

Übersicht über international veröffentlichte und in Vorbereitung befindliche Standards für Wasserstoffinfrastruktur

Quelle: www.fuelcellstandards.com

Published	Under Development / Proposed
Hydrogen - Properties	Hydrogen - Properties
<u>CGA Publication P6</u> Standard Density Data, Atmospheric Gases & Hydrogen (United States)	
<u>CGA Publication G-5</u> Hydrogen (United States)	
Hydrogen - Safety	Hydrogen - Safety
<u>US Department of Labor, OSHA: 29 CFR 1910.103</u> Hydrogen (United States)	<u>European Integrated Hydrogen Project (EIHP) - Work Package 5</u> Safety (European Union)
<u>AIAA G-095</u> Guide to Safety of Hydrogen and Hydrogen Systems (United States)	<u>20083230-T-469</u> Fundamental Requirements on Hydrogen System Safety (China)
<u>CGA Publication P12</u> Safe Handling of Cryogenic Liquids (United States)	<u>Working Group #16</u> Basic Considerations for the Safety of Hydrogen Systems (International)
<u>ISO TR 15916</u> Basic Considerations for the Safety of Hydrogen Systems (International)	
<u>GB/T 3634.1-2006</u> Hydrogen - Part 1: Industrial hydrogen (China)	
<u>GB 4962-2008</u> Technical safety regulation for gaseous hydrogen use (China)	
<u>KS B ISO 15916</u> Basic consideration for the safety of hydrogen systems (Korea)	
Hydrogen - Fuel Specifications	Hydrogen - Fuel Specifications
<u>CGA Publication G5.3</u> Commodity Specification for Hydrogen (United States)	<u>CEN/TC19</u> Expert Watch Group on Fuels for Fuel Cells (European Union)
<u>ISO/TS 14687-2</u> Hydrogen Fuel - Product Specification, Part 2: PEM fuel cell applications for road vehicles (International)	<u>ISO 14687-3</u> Hydrogen Fuel – Product specification – Part 3: PEM Fuel Cell Application for Stationary Applications (International)
<u>SAE J2719</u> Hydrogen Quality Guideline for	

Fuel Cell Vehicles (United States & Other Locales)

State of California Regulations Hydrogen Fuel Standard (California)

GB/T 7445-1995 Pure hydrogen, high purity hydrogen and ultra pure hydrogen (China)

KS B ISO 14687 Hydrogen fuel - Product specification (Korea)

Hydrogen - Contaminant Tests

ASTM D7550-09 Standard Test Method for Ion Chromatography Based Determination of Cations in Hydrogen and Other Fuel Cell Feed Gases (United States)

ASTM D7650-10 Standard Test Method for Determination and Sampling of Particulate Matter in High Pressure Hydrogen Used as a Gaseous Fuel with an In-Stream Filter (United States)

ASTM D7651-10 Gravimetric Measurement of Particulate Concentration in Hydrogen Fuel (United States)

Hydrogen - Contaminant Tests

ASTM WK4548 Standard Test Method for Determination of Trace Contaminants in Hydrogen and Related Fuel Cell Feed Gases (United States)

ASTM WK 5847 Standard Practice for Sampling of High Pressure Hydrogen and Related Fuel Cell Feed Gases (United States)

ASTM WK6527 Standard Test Method for Ion Selective Electrode Based Determination of Ammonia in Hydrogen and Other Fuel Cell Feed Gases (United States)

ASTM WK6624 Standard Test Method for Determination of Formaldehyde and Other Carbonyl Compounds in Hydrogen and Other Fuel Cell Feed Gases (United States)

ASTM WK8150 Standard Test Method for Determination of Ammonia in Hydrogen and Other Fuel Cell Feed Gases by Gas Chromatography and Nitrogen Chemiluminescence Detection (United States)

ASTM WK10196 Standard Test Method for Determination of Ammonia and Trace Water in Hydrogen and Other Fuel Cell Gaseous Fuels by Infrared Spectroscopy (United States)

ASTM WK21162 Standard Test Method for the Characterization of Particles from Hydrogen Fuel Streams by Scanning Electron Microscope (United States)

ASTM WK21597 Microscopic Measurement

of Particulates in Hydrogen Fuel (United States)

ASTM WK22378 Standard Test Method for Analysis of Total Hydrocarbon Content in Hydrogen Fuel Using a THC Analyzer (United States)

ASTM WK23815 Standard Test Method for Determination of Total Halocarbons Contained in Hydrogen and Other Gaseous Fuels (United States)

ASTM WK24073 Standard Test Method for Determination of Trace Hydrogen Sulfide, Methyl Mercaptan and Carbonyl Sulfide in Hydrogen Fuel (United States)

ASTM WK27163 New Test Method for Determination of Trace Gaseous Impurities in Hydrogen Fuel by Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy (United States)

Hydrogen - Terminology

CGA Publication H4 Terminology Associated with Hydrogen Fuel Technologies (United States)

GB/T 24499-2009 Technology glossary for gaseous hydrogen, hydrogen energy and hydrogen energy system (China)

KS D 0066 Glossary of Terms used in Hydrogen Absorbing Alloys (Korea)

Hydrogen - Terminology

Hydrogen Generators - Safety / General Design

CSA International Requirement No. 5.99 Hydrogen Generators (United States & Canada)

Outline of Investigation UL Subject 2264B Gaseous Hydrogen Generation Appliances - Water Reaction (United States & Other Locales)

ISO 16110-1 Hydrogen Generators Using Fuel Processing Technologies: Part 1 - Safety (International)

ISO 22734-1 2008 Hydrogen Generators Us-

Hydrogen Generators - Safety / General Design

UL Subject 2264 A Gaseous Hydrogen Generation Appliances - Electrolyzer Technology Waiting for international standard ISO TC197 WG#8 (United States & Other Locales)

UL Subject 2264 C (Joint activity with CSA America; FC5) Gaseous Hydrogen Generation Appliances - Fuel Processing Technology Waiting for international standard ISO TC197 WG#9 (United States & Other Locales)

ISO 22734-2 Hydrogen Generators Using Water Electrolysis Process – Part 2: Residential

ing Water Electrolysis Process – Part 1: Industrial and Commercial Applications (International)

GB 19773-2005 Specification of hydrogen purification system on pressure swing adsorption (China)

GB/T 19774-2005 Specification of water electrolyte system for producing hydrogen (China)

Applications (International)

20083231-T-469 Absorber for Pressure Swing Absorption Hydrogen System Safety (China)

20083232-T-469 Water Electrolyte Oxygen-Hydrogen Generator (China)

Hydrogen Generators - Performance

ISO TC197 Working Group 9 (ISO 16110-2) Hydrogen Generators Using Fuel Processing Technologies Part 2: Test Method for Performance (International)

Hydrogen Generators - Performance

20074533-T-469 Calculation of energy conversion efficiency and quantum yields for the system of solar energy photocatalytic water splitting for hydrogen production (China)

20074535-T-469 Methods for Performance Evaluation of Small-Size Integrative Hydrogen Energy System (China)

Hydrogen Generators - Installation

US Department of Labor, OSHA: 29 CFR 1910.103 Hydrogen (United States)

US Department of Energy Hydrogen and Fuel Cells Permitting Guide (United States)

CAN/BNQ 1784 Canadian Hydrogen Installation Code (Canada)

HYPER Project Installation Permitting Guidance for Hydrogen and Fuel Cells Stationary Applications EU-Supported Coordinating Activity (European Union)

Hydrogen Generators - Installation

Hydrogen Storage & Transport

- Safety / General Design

CGA Publication P12 Safe Handling of Cryogenic Liquids (United States)

CGA Publication P28 Risk Management Plan Guidance Document for Bulk Liquid Hydrogen Systems (United States)

International Code Council International Fire Code (United States & Other Locales)

International Code Council International Fuel Gas Code (United States & Other Locales)

US Department of Labor, OSHA: 29 CFR 1910.103 Hydrogen (United States)

NFPA 55 Storage, Use and Handling of Compressed Gases and Cryogenic Fluids in Portable and Stationary Containers, Cylinders and Tanks: Chapter 10 Gaseous Hydrogen Systems (United States)

CAN/BNQ 1784 Canadian Hydrogen Installation Code (Canada)

CGA Publication H5 Installation Standard for Bulk Hydrogen Supply Systems (United States)

State of Michigan Storage and Handling of Gaseous and Liquefied Hydrogen Systems (Michigan)

CGA Publication G-5.6 (EIGA Doc 120/04)
Hydrogen Pipeline Systems (United States)

Hydrogen Storage & Transport - Tanks & Storage

[ASME Boiler & Pressure Vessel Code](#) (United States & Other Locales)

[ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XII- Transportation Tanks](#) (United States & Other Locales)

[CGA Publication H3 Cryogenic Hydrogen Storage](#) (United States)

[CGA Publication PS17 Underground Installation of Liquid Hydrogen Storage Tanks](#) (United States)

[CGA Publication PS20 Direct Burial of Gaseous Hydrogen Storage Tanks](#) (United States)

[CGA Publication PS21 Adjacent Storage of Compressed Hydrogen and Other Flammable Gases](#) (United States)

[CGA Publication PS25 Aerial Storage of Compressed Hydrogen](#) (United States)

[CGA Publication PS26 Use of Carbon Fiber Fully Wrapped Composite Storage Vessels Permanently Installed in Stationary Gaseous Hydrogen Fueling Systems](#) (United States)

[CGA Publication PS33 Use of LPG or Propane Tank as Compressed Hydrogen Storage Buffers](#) (United States)

[NFPA 55 Storage, Use and Handling of Compressed Gases and Cryogenic Fluids in Portable and Stationary Containers, Cylinders and Tanks Chapter 10 Gaseous Hydrogen Systems](#) (United States)

[KS B ISO 16111 Transportable gas storage devices - Hydrogen absorbed in reversible metal hydride](#) (Korea)

Hydrogen Storage & Transport - Tanks & Storage

[CGA Publication H6 Design Requirements for Hydrogen Storage Systems Using Metal Hydrides](#) (United States & Other Locales)

[Working Group #15 Gaseous Hydrogen – Cylinders and Tubes for Stationary Storage](#) (International)

Hydrogen Storage & Transport Hydrogen Storage & Transport - Embrittlement Tests - Embrittlement Tests

ASTM F326-96 / WK10222 Standard Test
Method for Electronic Measurement for Hydrogen Embrittlement from Cadmium-Electroplating Processes (United States)

ASTM F519-08 / WK24948 Standard Test
Method for Mechanical Hydrogen Embrittlement Evaluation of Plating Processes and Service Environments (United States)

ASTM F1113-87 Standard Test Method for Electrochemical Measurement of Diffusible Hydrogen in Steel (United States)

ASTM F1459-06 Standard Test Method for Determination of the Susceptibility of Metallic Materials to Hydrogen Gas Embrittlement (United States)

ASTM F1624-06 / WK23088 & WK25783
Standard Test Method for Measurement of Hydrogen Embrittlement Threshold in Steel by the Incremental Step Loading Technique (United States)

ASTM F2078-08a / WK12962 Standard Terminology Relating to Hydrogen Embrittlement (United States)

GB/T 3965-1995 Methods for determination of diffusible hydrogen in deposited metal (China)

Hydrogen Storage & Transport Hydrogen Storage & Transport - Piping & Pipelines - Piping & Pipelines

ASME B31 Series Piping and Pipelines (United States & Other Locales)

ASME B31.12 Hydrogen Piping and Pipelines (United States & Other Locales)

ASME STP-PT-006 Design Guidelines for Hydrogen Piping and Pipelines (United States & Other Locales)

CGA Publication G5.4 Hydrogen Piping Systems at Consumer Locations (United States)

CGA Publication G5.6 Hydrogen Pipeline Systems (United States)

CGA Publication G5.8 High Pressure Hydrogen Piping Systems at Consumer Locations (United States)

CGA Publication G5.7 (EIGA Doc 120/04) Carbon Monoxide and Syngas Pipeline Systems (United States / Europe)

Hydrogen Storage & Transport

- Venting

CGA Publication G5.5 Hydrogen Vent Systems (United States)

Hydrogen Storage & Transport

- Labeling

CGA Publication H2 Guidelines for the Classification and Labeling of Hydrogen Storage Systems with Hydrogen Absorbed in Reversible Metal Hydrides (United States)

Hydrogen Fueling Stations & Dispensing

- Fueling Station Design

US Department of Energy Hydrogen Fueling Station Codes and Standards (United States)

International Code Council International Fire Code (United States & Other Locales)

International Code Council International Fuel Gas Code (United States & Other Locales)

NFPA 55 Storage, Use and Handling of Compressed Gases and Cryogenic Fluids in Portable and Stationary Containers, Cylinders and Tanks Chapter 10 Gaseous Hydrogen Systems (United States)

CAN/BNQ 1784 Canadian Hydrogen Installation Code (Canada)

ISO/PAS 15594 Airport Hydrogen Fuelling

Facility Operation

[ISO TC197 Working Group #11 / ISO TS 20100](#) Gaseous Hydrogen - Service Stations (International)

[GB 50177-2005](#) Design code for hydrogen station (China)

Hydrogen Fueling Stations & Dispensing - Dispensing Equipment

[SAE J2600](#) Compressed Hydrogen Vehicle Fueling Connection Devices (United States & Other Locales)

[NFPA 52](#) Vehicle Fuel Systems Code (United States)

[ISO 17268](#) Compressed Hydrogen Surface Vehicle Refueling Connection Devices (International)

[SAE J2799 - TIR](#) 70 MPa Compressed Hydrogen Surface Vehicle Refueling Connection Device and Optional Vehicle to Station Communication (United States & Other Locales)

[OIML R 81](#) Dynamic Measuring Devices and Systems for Cryogenic Liquids (International)

[OIML R 139](#) Compressed Gaseous Fuel Measuring Systems for Vehicles (International)

Hydrogen Fueling Stations & Dispensing - Dispensing Equipment

[SAE J2783](#) Liquid Hydrogen Surface Vehicle Refueling Connection Devices (United States & Other Locales)

[SAE J2601](#) Compressed Hydrogen Vehicle Fueling Communication Devices (United States & Other Locales)

[CSA America HGV4](#) Fuel Dispensing for Hydrogen Gas Powered Vehicles (United States)

[USA National Institute of Standards and Technology \(NIST\) Weights and Measures Division](#) Hydrogen Gas Meter Code (United States)

[European Integrated Hydrogen Project \(EIHP\) - Work Package 3](#) Refueling Interface (European Union)

[20083233-T-469](#) Specification on Compression Hydrogen Dispenser for Surface Vehicle (China)

[20083234-T-469](#) Liquid Hydrogen Fueling System Interface for Land Vehicle (China)

[20083235-T-469](#) Compressed Hydrogen Surface Vehicle Refueling Connection Devices (China)

Hydrogen Fueling Stations & Dispensing - Installation

Hydrogen Fueling Stations & Dispensing - Installation

US Department of Energy Hydrogen and Fuel Cells Permitting Guide (United States)

HyApproval Project Handbook for Approval of Hydrogen Refuelling Stations (United States & Other Locales)

State of South Carolina – Hydrogen (and Fuel Cell) Permitting Act (United States – South Carolina)

Hydrogen Detectors

ANSI/UL 2075 Gas and Vapor Detectors and Sensors (United States)

ISA 12.13.01 Equipment for Explosive Atmospheres (United States)

BS EN 50073 Guide for selection, installation, use and maintenance for the detection and measurement of combustible gases or oxygen (International)

IEC 60079-29-1 Explosive atmospheres – Part 29-1: Gas detectors- Performance requirements of detectors for flammable gases (International)

IEC 60079-29-2 Explosive atmospheres – Part 29-2: Gas detectors- Selection, installation, use and maintenance of detectors for flammable gases and oxygen (International)

ISO 26142 Hydrogen Detector Apparatus– Stationary applications (International)

Hydrogen Detectors

8.2 Datenblatt Elektrolyseur Hogen S 40

Technical Specifications

Hogen®

Hydrogen Generation Systems



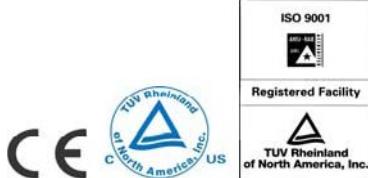
	Hogen® S Series Hydrogen Generators		Hogen® H Series Hydrogen Generators			
	S 20	S 40	H 2m	H 4m	H 6m	
DESCRIPTION	On-site hydrogen generator in an integrated, automated, site-ready enclosure. Load Following operation automatically adjusts output to match demand.					
ELECTROLYTE	Proton Exchange Membrane (PEM) - caustic-free					
HYDROGEN PRODUCTION						
Net Production Rate:	Nm ³ /hr @ 0° C, 1 bar SCF/hr @ 70° F, 1 atm SLPM @ 70° F, 1 atm kg per 24 hours	0.53 Nm ³ /hr 20 SCF/hr 9.4 SLPM 1.14 kg/24hr	1.05 Nm ³ /hr 40 SCF/hr 18.8 SLPM 2.27 kg/24hr	2 Nm ³ /hr 76 SCF/hr 35.8 SLPM 4.31 kg/24hr	4 Nm ³ /hr 152 SCF/hr 71.7 SLPM 8.63 kg/24hr	6 Nm ³ /hr 228 SCF/hr 107.6 SLPM 12.94 kg/24hr
Delivery Pressure - Nominal	13.8 barg (200 PSIG)		15 barg (218 PSIG)			
Power Consumed Volume of H₂ Gas Produced	6.7 kWh/ Nm ³ 17.6 kWh/100 ft ³		7.3 kWh/ Nm ³ 19.2 kWh/100 ft ³	7.0 kWh/ Nm ³ 18.5 kWh/100 ft ³	6.8 kWh/ Nm ³ 17.8 kWh/100 ft ³	
Purity Concentration of Impurities:	99.9995% Water Vapor < 5 PPM water, -65°C (-85°F) Dewpoint, N2 < 2 PPM, O2 < 1 PPM, All Others Undetectable					
Turndown Range	0 to 100% net product delivery					
Upgradeability	N/A		Field upgradeable to a maximum of 6 Nm ³ /hr (228 SCF/hr)		N/A	
DI WATER REQUIREMENT						
Rate at Max Consumption Rate	0.47 L/hr (0.13 gal/hr)	0.94 L/hr (0.25 gal/hr)	1.83 L/hr (0.50 gal/hr)	3.66 L/hr (0.96 gal/hr)	5.50 L/hr (1.42 gal/hr)	
Temperature	5°C to 35°C (41°F to 95°F)		5°C to 50°C (41°F to 122°F)			
Pressure	1.5 to 4 barg (21.8 to 58.0 PSIG)					
Input Water Quality	ASTM Type II Deionized Water required, < 1 micro Siemen/cm (>1 megOhm-cm) ASTM Type I Deionized Water preferred, < 0.1 micro Siemen/cm (> 10 megOhm-cm)					
HEAT LOAD AND COOLANT REQUIREMENT						
Cooling	Air-Cooled		Liquid-Cooled			
Heat Load from System	2.2 kW Max.	4.3 kW Max.	8.1kW Max.	16.1kW Max.	23.7 kW Max	
Coolant	Ambient Air, 5°C to 40°C (41°F to 104°F)		15-87 lpm (4 to 23 GPM), depends on model and coolant temp 0 to 50% anti-freeze, non-fouling; 1.4 to 6.9 barg (20 to100 PSIG); 5°C to 35°C (41 F to 95°F)			

Consult Proton Energy Systems Applications Department for proper installation guidelines. Specifications subject to change.



	Hogen® S Series Generators		Hogen® H Series Generators							
	S 20	S 40	H 2m	H 4m	H 6m					
ELECTRICAL SPECIFICATIONS										
Recommended Breaker Rating <i>base configuration</i>	8 kVA	12 kVA	22 kVA	40 kVA	58 kVA					
Electrical Specification	205 to 240 VAC, single phase, 50 or 60 Hz									
INTERFACE CONNECTIONS										
H ₂ Product Port	1/4" CPI compression tube fitting, SS									
H ₂ /H ₂ O Vent Port	1/2" CPI compression tube fitting, SS		1/2" FNPT, SS							
DI Water Port	1/4" tube push-to-lock, polypropylene		1/4" FNPT, SS							
Calibration-Gas Port	N/A		1/8" FNPT, brass							
Coolant Supply Port	N/A		1" FNPT, brass							
Coolant Return Port	N/A		1" FNPT, brass							
Drain Port	1/4" tube push-to-lock, polypropylene		3/8" FNPT, brass							
Electrical	Connect to on-board circuit breaker									
Communications	RS 232, Ethernet		Ethernet							
CONTROL SYSTEMS										
Standard Features	Fully automated, push button start/stop. E-stop. On-board H ₂ detection. Automatic fault detection and system depressurization.									
Remote Alarm	Form C relay, 2A/30VDC rated switching		Form C relay, 5A, 250V, 150W Max. rated switching							
Remote Shutdown	Circuit breaker shunt trip		Safety circuit trip							
ENCLOSURE CHARACTERISTICS										
Dimensions, L x D x H	97 cm x 79 cm x 106 cm (31" x 38" x 42")		180 cm x 81 cm x 190 cm (71" x 32" x 75") <i>Note: add 8 cm (3") to height for installed lifting brackets</i>							
Weight	215 kg (475 lbs)		700 kg (1500 lbs)	747 kg (1600 lbs)	794 kg (1700 lbs)					
Rating	IP22		IP66 for electronics compartment. IP43 for fluids compartment; Upgradeable to IP56.							
ENVIRONMENTAL CONSIDERATIONS										
Standard Siting Location	Indoor, level ± 1°, 0 to 90% RH non-condensing, Non-hazardous/non-classified environment.									
Storage/ Transport Temperature	5°C to 60°C (41°F to 140°F)									
Ambient Temperature Range	5°C to 40°C (41°F to 104°F)		5°C to 50°C (41°F to 122°F)							
Altitude Range - Sea Level to:	1520 m (5000 ft)		2400 m (7874 ft)							
Ventilation	Proper ventilation must be provided from a non-hazardous area, at a rate in accordance with IEC60079-10, Zone 2 NE									
SAFETY AND REGULATORY CONFORMITY										
Maximum On-board H ₂ Inventory at Full Production	0.016 Nm ³ 0.6 SCF 0.0014 kg		0.040 Nm ³ 1.5 SCF 0.0036 kg							
Cabinet Ventilation with Environment	NFPA 69 and EN 1127-1, Clause 6.2.									
	Vent fan draws fresh air up to 28 Nm ³ /min (1000 ft ³ /min)									
Noise dB(A) at 1 Meter	< 70		< 83							
Approvals	cTUVus (UL and CSA equivalent), CE (PED, ATEX, LVD, Mach. Dir., EMC)		NYFD Approval Received							
	NYFD Approval - Pending									
OPTIONS										
Proton Energy Systems offers a wide range of options to tailor your Hogen hydrogen generation system to meet your specific operational requirements. Please contact your local representative to discuss the current list of options available to best fit your needs.										

Consult Proton Energy Systems Applications Department for proper installation guidelines. Specifications subject to change.



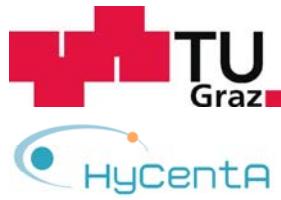
PD-0600-0002 Rev.03/08
© 2008 Proton Energy Systems, Inc. All Rights Reserved.
Hogen, Proton, Proton Energy Systems and the Proton symbol are registered trademarks of Proton Energy Systems, Inc.

Proton Energy Systems
10 Technology Drive
Wallingford, CT 06492
Tel: +01.203.678.2000
Fax: +01.203.949.8016
customerservice@protonenergy.com
www.protonenergy.com

8.3 Programm Driving Event



World Energy Council
CONSEIL MONDIAL DE L'ENERGIE



Einladung

28.September 2010 – 09.30-18.00 Uhr

WEC Workshop: **Nachhaltige Energieversorgung und Mobilität - Wasserstoff als Energieträger, Treibstoff und Ökostromspeicher**



BIOVEST CONSULTING



„Die Öko-Wasserstoff - Tankstelle der Zukunft“ – Projektabschluss und Driving Event mit Wasserstofffahrzeugen am HyCentA



BIOVEST CONSULTING



Veranstaltungsort:

TU Graz
Inffeldgasse 25/D
Hörsaal i7
A-8010 Graz

Für die chemische Industrie und die Mineralölindustrie ist Wasserstoff seit dem 19. Jahrhundert einer der wichtigsten Grundstoffe. Im Stadtgas, das bei uns bis in die Siebzigerjahre des 20. Jahrhunderts und in den osteuropäischen Ländern noch immer der wichtigste Energieträger im städtischen Bereich war/ist, ist 50 % Wasserstoff enthalten.

Öko-Wasserstoff kann heute mit serienmäßig gefertigten „Elektrolyseuren“ aus nachhaltig erzeugtem, unerschöpflich verfügbarem Ökostrom und Wasser industriell hergestellt werden und ist dadurch zu einem vielseitig einsetzbaren sekundärem Energieträger, vor allem für dezentrale vor-Ort-Erzeugung, geworden. Dezentral erzeugter Öko-Wasserstoff kann auch in bestehende Gasnetze – gemischt mit Methan (Bio- oder Erdgas) analog zum Stadtgas – eingespeist werden.

Mit Hilfe der Brennstoffzelle lässt sich Wasserstoff wieder in elektrischen Strom umsetzen und kann somit über ein Range-Extender-Antriebssystem die Reichweite elektrisch angetriebener Fahrzeuge erweitern. Bei dieser Umwandlung wird auch Wärme frei, die insbesondere für die Innenraumbeheizung und -klimatisierung der Fahrzeuge genutzt werden kann, die bei reinem Batteriebetrieb die elektrische Reichweite erheblich verringern würde.

(Öko-) Wasserstoff lässt sich aber auch in Verbrennungsmotoren als Treibstoff einsetzen und ist dabei mit Methan (Erdgas oder Biogas) in weiten Bereichen mischbar.

In den dezentralen Stromnetzen der Zukunft fungiert Wasserstoff als dezentraler Energiespeicher für nicht konstant verfügbaren Wind- oder Solarstrom. Berücksichtigt man die anfallende Umwandlungswärme, die für Niedertemperaturheizungen verwendet werden kann, beträgt der Wirkungsgrad für den Kreisprozess Strom -> Wasserstoff -> Strom ca. 80%.

Somit ist Wasserstoff gerade in mittleren und nördlichen Breiten ein nachhaltiger Energieträger, Treibstoff und Ökostromspeicher mit großem Nutzungspotenzial für die Zukunft.

WEC Austria ist die österreichische Vertretung des seit 1923 bestehenden WELTENERGIERATES - WORLD ENERGY COUNCIL. Der Weltenergierat ist die einzige nicht kommerzielle NGO, die sich mit allen Energieträgern befasst und, unter Mitwirkung von Experten aus dem Kreis ihrer Mitglieder und anderer internationaler Organisationen, Strategien und Empfehlungen zur Energieversorgung und Energiepolitik erstellt. Er setzt sich dabei für eine langfristig nachhaltige Energieversorgung zum größtmöglichen Nutzen aller ein.

Am Hydrogen Center Austria (HyCentA) in Graz, Österreich wurde die seit 2005 bestehende Wasserstoff - F&E - Infrastruktur um die wesentliche Komponente der innovativen gekoppelten Öko-Wasserstoff-Erzeugung und –Nutzung erweitert und demonstriert nun das Gesamtsystem einer „**Öko-Wasserstoff-Tankstelle der Zukunft**“. Die Erzeugung des Öko-Wasserstoffs erfolgt über Elektrolyse mit Öko-Strom, wobei neben dem Wasserstoff auch der erzeugte Sauerstoff und die anfallende Wärme genutzt werden.

Neben der Errichtung und Integration der Anlagenkomponenten lag der Fokus des Demonstrationsprojektes auf der messtechnischen Evaluierung der Anlage, wobei insbesondere die Funktionsfähigkeit der Komponenten, die Einpassung in das Gesamtkonzept am HyCentA und die energetische und stoffliche Effizienz der „Öko-Wasserstoff-Tankstelle“ im praktischen Betrieb analysiert wurden.

Die Umsetzung am HyCentA erfolgt durch ein Konsortium aus industriellen und außeruniversitären Forschungspartnern unter der Koordination durch JOANNEUM RESEARCH, die Finanzierung des Projektes über öffentliche Fördergeber (BMVIT, Land Steiermark) und Industriepartner (OMV, Linde Gas, Biovest Consulting, Weizer Naturenergie) und repräsentiert damit ein erfolgreiches Beispiel eines Public-Private-Partnerships.

Dienstag, 28. September 2010

WEC-Workshop: Nachhaltige Energieversorgung und Mobilität – Wasserstoff als Energieträger, Treibstoff und Ökostromspeicher

09.30 Uhr	Begrüßung und Einleitung Dr. Alexander Gratzer (WEC Austria), Vizerektor Prof. Dr. Harald Kainz (TU Graz), DI Martin Beermann (JOANNEUM RESEARCH), Dr. Franz E. Leichtfried (Biovest GmbH)
09.45 Uhr	Wasserstoff aus nachhaltigen Primärenergieträgern Vorsitz: Mag. Dorothea Sulzbacher, MBA, OMV Future Energy Fund Univ.-Prof. Dr. Günther Brauner, TU Wien – „Bedeutung von Wasserstoff in nachhaltigen Energiesystemen“ DI Mag. Wolfgang Pell, Verbund Austrian Renewable Power GmbH – „Verbundinitiative nachhaltige Mobilität mit Ökostrom“ DI Hans Vock, Proton Energy Systems/Diamond Lite und Dr. Franz E. Leichtfried, Biovest GmbH – „PEM-Elektrolyse: Der einfachste Weg vom Ökostrom zum Wasserstoff“
11.15 Uhr	Pause
11.35 Uhr	Wasserstoff als Ökostromspeicher und Treibstoff Vorsitz: Dr. Christine Zach, ÖAMTC Akademie Dr. Ewald Wahlmüller, Fronius GmbH - „Die Fronius Energiezelle: Öko-Wasserstoff bestmöglich genutzt“ DI. Dr. Wolfgang Schnitzhofer, Profactor GmbH - „H2 PROFERM – Wasserstoff aus Biomasse“ DI Dr. Walter Böhme, OMV AG – „The role of Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles within a portfolio of power-trains for Europe“
13.00 Uhr	Mittagspause

„Die Öko-Wasserstoff - Tankstelle der Zukunft“ - Projektabschluss und Driving Event mit Wasserstofffahrzeugen am HyCentA

14.00 Uhr	Vorsitz: MR Dr. Andreas Dorda (A3PS und BMVIT) Ing. Johann Ziegerhofer, Weizer Naturenergie GmbH - „Erzeugung zusätzlichen Ökostroms für die Mobilität der Zukunft“ DI Martin Beermann, JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH „Die Öko-Wasserstoff-Tankstelle der Zukunft“ DI Markus Mayer, Linde GmbH – „Die Wasserstoff-Technologie der Zukunft“ Prof. DI Dr. Helmut Eichlseder, TU Graz – „Potential von Wasserstoff-Mischgasfahrzeugen anhand eines Prototyps“
16.00 Uhr	Driving Event mit Wasserstoff-betriebenen Fahrzeugen und Besichtigung der Öko-Wasserstoff-Tankstelle am HyCentA

Anmeldung zur Veranstaltung

TU Graz, Dienstag, 28.September 2010, 09.30-18.00 Uhr

An: WEC - Sekretariat
Frau Cassia Zeugswetter-Fasching
Email: wec-austria@speed.at
Fax: 0043 - 1 504 71 86

WEC Austria
Österreichisches Nationalkomitee des Weltenergierates
Brahmsplatz 3
1041 Wien
Tel.: 0043 - 1 504 69 86

Name, Vorname, Titel: _____

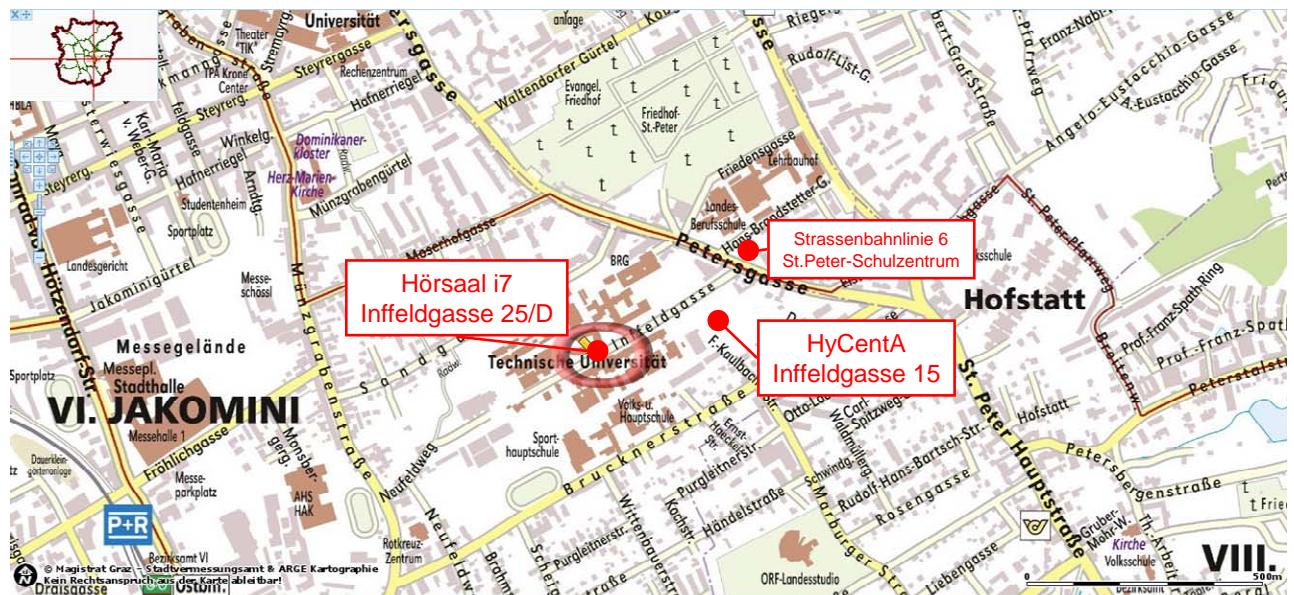
Unternehmen: _____

Adresse: _____

Tel.: _____ E-Mail: _____

Unterschrift: _____

Bitte beachten Sie:
Eine Anmeldung ist erforderlich, die Teilnahme ist kostenlos.



8.4 Präsentationen zum Driving Event

PEM-Elektrolyse:

Der einfachste Weg vom Ökostrom zum Wasserstoff

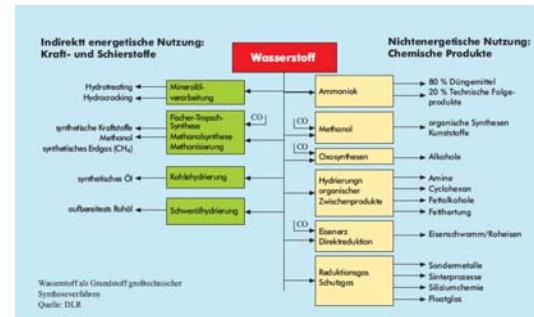
© 2010
Franz E. Leichtfried
Biovest GmbH

Wasserstoff in der chemischen Industrie und Petrochemie

- Schon seit hundert Jahren gibt es eine etablierte Wasserstoffindustrie
- Jährlich werden weltweit 500 Milliarden m³ Wasserstoff erzeugt

2

Wasserstoff in der Industrie – gestern und heute



3

Sicherheit: reichhaltige Erfahrungen mit Wasserstoff im Stadtgas

- Stadtgas aus der Verkokung von Kohle
- ca. 50 % H₂ – Gehalt!
- für Gasherde, Gasheizung und Gaslicht verwendet
- In Österreich/Deutschland von ca. 1830 bis in 1970er Jahre
- In Osteuropa noch heute!
- Sicherheitsbestimmungen Stadtgas waren weniger stringent !

4

Wasserstoff: Einsatzmöglichkeiten in Energiewirtschaft und Mobilität

- Direktverwendung als Treibstoff (1 kg Wasserstoff entspricht 4 l Benzin)
- Wasserstoff als Energiespeicher für Ökostrom
 - Besonders geeignet für Speicherung elektrischer Energie aus Photovoltaik und Windkraft (WG: 50 – 60 % elektrisch, bis zu 40 % therm.)
 - Rückumwandlung in elektrische und thermische Energie mittels Brennstoffzelle (WG: 50 – 60 % elektrisch, bis zu 40 % therm.)

5

Ökostrom-Mobilität: Wasserstoff als Speicher und Reichweitenverlängerer

- Hybridfahrzeuge mit Batterie und Brennstoffzelle: längere Reichweite durch Brennstoffzelle - Wasserstoff hat höchste Energiedichte pro Masseneinheit
- Wasserstoff lässt sich in mittleren Mengen gut speichern/lagern; Elektrizität weniger gut
- Wasserstoff im Verbrennungsmotor: sanfter Übergang zur Elektromobilität ?

6

Tesla Roadster: größte Reichweite eines Elektrofahrzeuges



- „die gemessene Reichweite liegt zwischen 200 Kilometern bei strammer Fahrt, über 250 bei gemischter und knapp 330 bei gemäßigtem Tempo.“
- „Leistungsabgabe sehr temperaturabhängig“
- http://www.auto-motor-und-sport.de/einzeltests/tesla-roadster-sport-im-test-sportwagen-mit-elektromotor-1853449.html?paging_current=2

7

Neue E-Autos 2011: Reichweiten



- Renault Kangoo 2008: 90 km (http://www_elektro-auto.net/index.php?option=com_content&task=view&id=82&Itemid=57)
- CITROËN C-ZERO 2011: 130 km (http://www_c-zero.citroen.com/#/at/news/vorstellungskraft-teil2)
- Renault/Nissan Leaf 2011: 160 km (<http://kurier.at/freizeit/motor/2030841.php>)
- Andere Marken: <http://www.faz.net/s/Rub1DABC609A05048D997A5F315BF55A001/Doc-E5170E852FE2D41EEBE5F454E40C061FB~ATpl~Ecommon~Scontent.html>

8

...und im Winter ?

- „Die meiste Energie geht neben dem Fahren durchs Heizen und Kühlen verloren.“
- Elektroantrieb hat hohen Wirkungsgrad und wenig Abwärme
- Elektroheizung verkürzt Reichweite drastisch
- Matthias Küsell, Entwicklungsleiter für Elektrofahrzeug- und Hybridsysteme bei Bosch (<http://kurier.at/freizeit/motor/2018582.php>)



9

Alle elektrischen Verbraucher verkürzen Reichweite

- Heizen/Kühlen: Reichweiten im Winter um 10% kürzer; bei Gebrauch der elektrischen Heizung nochmals minus 10% (http://www_elektro-auto.net/index.php?option=com_content&task=view&id=82&Itemid=57)
- Servolenkung, Servobremsen
- Vielzahl von Stellmotoren:
- Elektrische Sitzverstellung, Fensterheber, Spiegelverstellung, etc.
- „Klar ist, dass das Auto für den E-Antrieb praktisch neu entwickelt werden muss, um eine Reichweite von rund 200 km zu einem vertretbaren Preis zu erlauben.“
- Matthias Küsell, Entwicklungsleiter für Elektrofahrzeug- und Hybridsysteme bei Bosch (<http://kurier.at/freizeit/motor/2018582.php>)

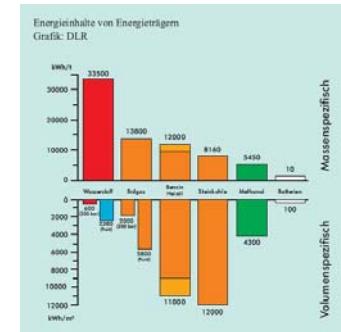
10

Reichweitenverlängerung

- „Plug-in“: lange Ladedauer
- Benzin-Hybrid (z.B. Prius): CO₂-Problematik
- Brennstoffzelle:
 - 50 % Wirkungsgrad, Rest ist Abwärme
 - Wasserstoff hat höchste Energiedichte pro Masseneinheit
 - Volumenbedarf (700 bar oder flüssig): ca. 4x höher als Benzin
 - Klimafreundliche Lösung
- Honda FCX Clarity: Brennstoffzellenhybrid:
 - Reichweite 386 km (mit 700 bar Wasserstoff ca. 580 km)
 - 350 bar, 3,92 kg Wasserstoff
 - Alle Servoantriebe wie bei Benzinier: <http://automobiles.honda.com/fcx-clarity/specifications.aspx>



Wasserstoff Energieinhalt



11

12

HYCAR 1 mit Verbrennungsmotor: erstes österreichisches Wasserstoffauto

- Entwicklung durch TU Graz
- Multivalent: Benzin, Wasserstoff oder Erdgas oder mit jeder beliebigen Mischung aus Wasserstoff und Erdgas
- Wasserstoff aus Ökostrom: nahezu CO₂-frei
- Beruht auf Standard Ottomotor
- Das Konzept kann kurzfristig in eine Serienapplikation übergeführt werden
- http://www.hycena.tugraz.at/Image/Einladung_HYCAR1.pdf



13

Daimler Chrysler Citaro H₂-Bus fährt seit 2003 in Hamburg



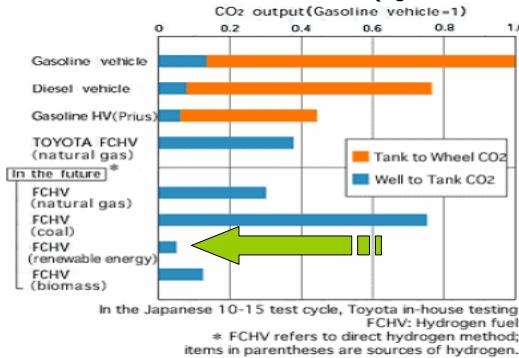
14

CUTE (Clean Urban Transport for Europe)

- 2003 – 2005; EU gefördert (22 Mio. Euro Förderung)
- 33 Brennstoffzellen-Busse und 11 Wasserstoff-Tankstellen in 11 teilnehmenden Städten
- Amsterdam, Barcelona, Hamburg, London, Luxemburg, Madrid, Porto, Stockholm, Stuttgart, Reykjavik/Island (ECTOS), Perth/Australien (STEP)
- 3,5 Millionen Passagiere; 1,25 Mio. km; 86.000 hrs
- Busse > 8.900 x betankt
- www.cute-hamburg.de
- Click: Presentations

15

Mehr als zehnfache CO₂ – Reduktion durch Fahren mit Öko-Wasserstoff (Quelle: Toyota)



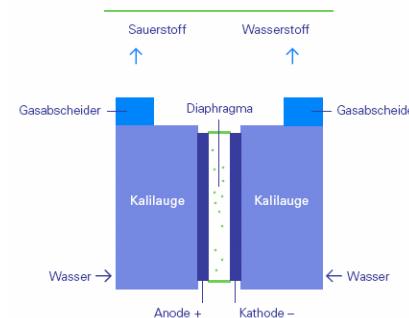
16

Elektrolyse: Wasserstofferzeugung aus Ökostrom und Wasser

- Alkalische (KOH) Elektrolyseure
- „Polymer-Elektrolyt-Membran“ (PEM) oder „proton exchange membrane“ (PEM) Elektrolyseure

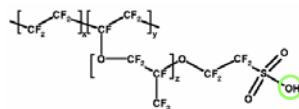
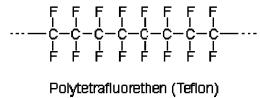
17

Funktionsschema alkalischer Elektrolyseur



18

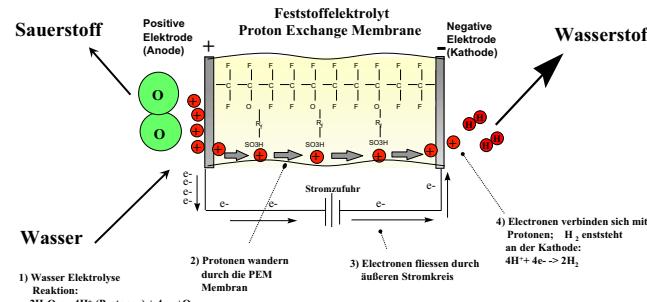
Wie funktioniert der Feststoffelektrolyt?



- „Proton Exchange membrane“ aus Nafion® von Dupont
- Tetrafluoräthylen (Teflon) mit sulfonierte Seitengruppen
- Ausgezeichnete thermische und mechanische Stabilität
- H^+ -Ionen (Protonen) springen von einer Sulfonatgruppe zur anderen
- Membranporen erlauben Bewegung von H^+ -Ionen, aber nicht Anionen oder Elektronen
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Nafion>

19

Polymerelektrolytmembran - Elektrolyse (PEM; proton exchange membrane)



20

Vorteile der H_2 -Erzeugung mittels PEM-Elektrolyseur

- Elektrolyt ist Feststoffmembran, keine Flüssigkeit involviert
- Erzeugt hochreinen H_2 ; keine aufwendige Nachreinigung erforderlich
- Kompaktere Bauweise
- Sicher und weitgehend wartungsfrei: Keine gefährlich heißen und hochkonzentrierten Alkalikreisläufe

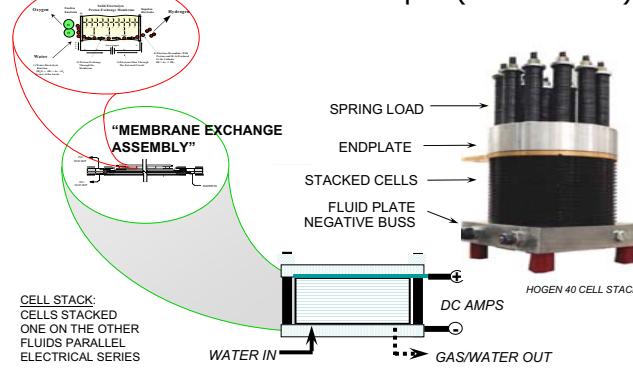
21

Vorteile der H_2 -Erzeugung mittels PEM-Elektrolyseur

- Keine Knallgasbildung: Vernachlässigbare Sauerstoffdiffusion durch PEM-Membran (Sauerstoffseite drucklos)
- Deswegen muss keine Sockelspannung zur Vermeidung der Querdiffusion angelegt werden (alkalische Elektrolyseure können wegen Querdiffusion durch Asbestmembran erst ab ca. 35 % der Voll-Last betrieben werden)
- PEM Elektrolyseure laufen von 0 – 100 % Last stufenlos und erzeugen automatisch und nachfragegeführt hochreinen Wasserstoff bei derzeit bis 165 bar; reagieren in Sekundenbruchteilen auf Lastanforderung
- > einzige sinnvolle Variante für PV/Windkraft - Inselsysteme

22

PEM Membranen ("Zellen" oder "MEA's") bilden einen Zellstapel ("cell stack")



23

Aufbau eines Elektrolyseurs



24

PEM-Elektrolyseur Hogen S 40



25

Voll-Last-Betriebsdaten und Wirkungsgrad

- Hogen S40 Elektrolyseur bei Fronius vermessen; Betriebsdaten bestätigt:
- Spannung: 2,2 V pro Zelle; 44 V bei 20 Zellen
- Stromstärke: 113 Amp bei Voll – Last
- Leistung: 6,1 kW
- Strom-Verbrauch: 5.9 kWh/Nm³ H₂
- Wirkungsgrad inkl. „parasitic load“: 52 % (1 Nm³ H₂ enthält 3 kWh Energie (Heizwert))

26



Hogen H Serie: 2 – 6 Nm³/h

Hogen H Serie: Erhöhung des Wirkungsgrades auf fast 90%



Figure 31 Coolant Water Interface

- Anschluss für Wärmetauscher
- Wärmeabgabe (pro Modell): 8,1 kW; 16,1 kW; 23,7 kW
- Durchfluss: 900 to 5225 l/hr
- 50° C
- Wirkungsgrad_{el}: >50%
- Wirkungsgrad_{therm}: ca. 40%

28

Hogen® C Serie

- 10, 20 und 30 Nm³/h H₂ (65 kg/Tag) bei 30 bar
- 5-fach gesteigerte H₂-Produktionsrate im Vergleich zur H Serie, aber nur 50 % größere Stellfläche
- Verwendet eine für Marine-U-Boote entwickelte Zellstapel-Plattform (Gemeinsam mit Hamilton Sundstrand entwickelt).



29



29

Proton Energy Systems

- Hersteller von Proton Exchange Membrane (PEM) Wasserstofferzeugern auf Elektrolysebasis
- Gegründet 1996
- Wallingford, Connecticut.
- > 1.200 Elektrolyseure



30

Serienfertigung von Elektrolyseuren



PEM Zellstapel



Schlüsselfertige Systeme

31

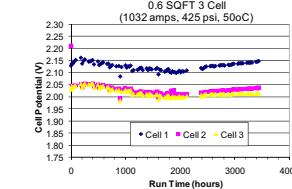
Entwicklungsschwerpunkte

- höhere H₂ Produktionskapazität:
 - Zellstapel
- Verbesserung des Wirkungsgrades
 - Wasserstofftrockner
 - Wirkungsgrad Steigerung der Gleichrichter auf 95 %
- Höherer Produktdruck:
 - Von derzeit 30 bar und 165 bar auf bis zu 350 bar
 - Vorverdichter fallen weg; nur mehr Booster Kompressor notwendig

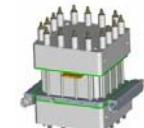
32

Entwicklung eines noch größeren Zellstapels

- Bipolar 550 cm² plate design
- Schon getestet auf 30 bar Produktdruck
- 55 kg/Tag pro Stack = 25 Nm³ pro Stunde



3-cell Prototype Stack



33

Kleiner Hochdruck-Elektrolyseur

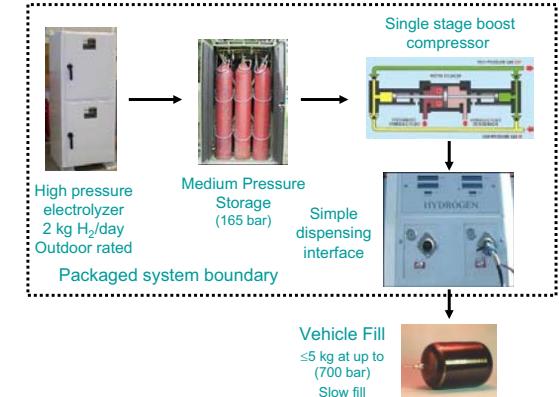
- 2,400 psi (165 bar) Produktdruck
- 0,6-2,2 kg H₂/Tag
- Zur Zeit im beta-Testbetrieb im Feld
- Über 20,000 hr ununterbrochener Betrieb
- Outdoor Version verfügbar
- 350 bar Zellen bereits im Testbetrieb



34



34



"Haustankstelle" für ein Fahrzeug

36

36

Haustankstelle Konzept Design



Haustankstelle bei Volkswagen im Technologiezentrum Isenbüttel

- Elektrolyseur Hogen S40 von Proton Energy Systems
- gespeist aus 50 m² Solarpaneelen
- Die Anlage erzeugt pro Tag etwa 25 Kubikmeter Wasserstoff, was ausreicht, um mit einem Brennstoffzellenfahrzeug etwa 200 Kilometer weit zu fahren

38

Für Betrieb eines Wasserstoffautos erforderliche H₂-Produktion

- 12.000 km pro Jahr
- Verbrauch: 1,1 kg H₂/100 km
- Jahresverbrauch: 132 kg H₂ oder 1.468 Nm³
- Benötigte Tagesmenge (300 Tage /Jahr): 0,45 kg H₂ oder 5 Nm³
- 5 Nm³ Tagesproduktion:
PEM-Elektrolyseur Proton Energy Hogen S40 (**siehe HyCentA in Graz**) mehr als ausreichend (1 Nm³ pro Stunde)

39

Elektrolyse Stromverbrauchsberechnung

- Benötigte Jahremenge: 132 kg H₂ oder 1.468 Nm³
- Stromverbrauch : 6 kWh/ Nm³ H₂
- Jahresgesamtstromverbrauch (300 Tage Betrieb): 8.808 kWh

40

Erforderliche Kapazität – Photovoltaik oder Wind

- Zur Erzeugung von jährlich 8.808 kWh:
- **53 m² (8,8 kWp) PV-Anlage** bei 20% Wirkungsgrad und PV-Jahresertrag von 1.000 kWh/kW_p
 - **5 kW Windturbine**

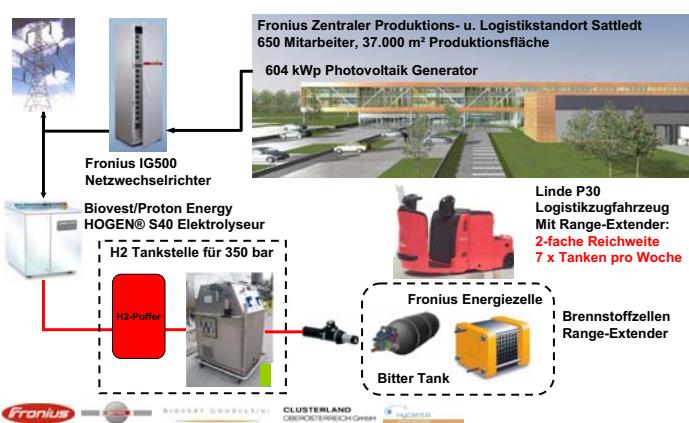
41

H₂-Erzeugungskapazität mit großem Hogen C30

- H₂-Erzeugung: 30 Nm³ H₂/Stunde
- Strombedarf: ca. 200 kW
- in % der Windturbine: ca. 10
- 10 Hogen C30 oder 4 eines zukünftigen C75 Modells, um allen Strom einer 2 MW Windturbine in Wasserstoff umzuwandeln

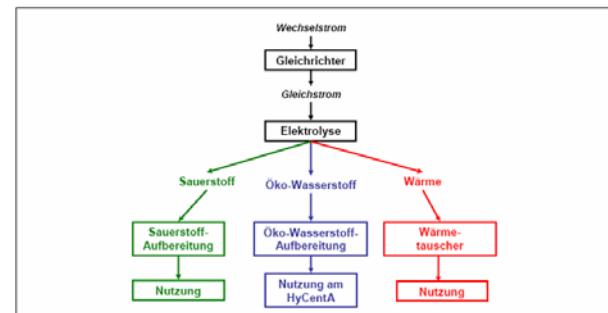
42

HyLog Projekt Fronius



43

Öko-Wasserstoff-Tankstelle der Zukunft am HyCentA in Graz



44



Abbildung 2: HyCentA – Hydrogen Center Austria (www.hycenta.at)

Solar angetriebene PEM-Elektrolyseure

Beispiele Proton Energy:

- Solartankstelle bei VW in Isenbüttel (siehe oben)
- APS Solar-Tankstelle Arizona:
http://avt.inl.gov/pdf/hydrogen/n_ha_presentation_2005.pdf
<http://avt.inl.gov/pdf/hydrogen/h2factsheet.pdf>
<http://avt.inl.gov/hydrogen.shtml>
<http://avt.inl.gov/pdf/hydrogen/h2stationreport.pdf>
- Proyecto Aeropila von BESEL, Spanien

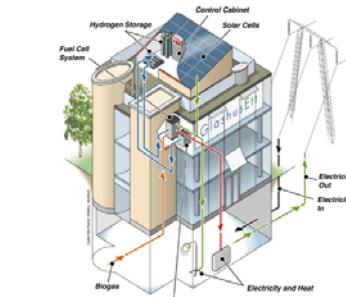


46

Andere Beispiele für Wasserstofftankstellen

<http://www.h2stations.org/>

PEM-Elektrolyseur (Proton Energy) im GlasHusEtt (The Clever Building)



47

48

Strombedarf für die H₂-Versorgung 2020

- EU Zielvorstellung für 2020:
5 % der Fahrzeuge fahren mit Wasserstoff
- Das sind 205.000 PKW's in Österreich
- Erforderliche Elektrizitätsmenge:
 $1,15 - 1,75 \times 10^9$ kWh pro Jahr
- Dies entspricht ca. 1,65 – 2,5 % der in Österreich verbrauchten Strommenge von 6×10^{10} kWh pro Jahr.
- Und könnte zum Teil aus nicht genutzter Wasserkraft (NVA; nicht verwertete Arbeit) erzeugt werden.

49

H₂-Versorgung 2020 aus Wind/PV

- 205.000 PKW's
- 335 Windturbinen mit 2 MW Leistung (doppelt soviele als die 2002 installierten mit durchschnittlich 1,2 MW Leistung) zum Preis von rund 590 Millionen Euro oder
- 9,6 km² (3 x 3 km) Photovoltaikpaneele (rd. 7,15 Milliarden Euro, allerdings wenn man vom Einzelhandelspreis ausgeht), das sind 0,011 % der Gesamtfläche Österreichs von 83 857 km² oder 0,5 % der bebauten Fläche.

50

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !

Biovest:
Projektdesign und –management
für Wasserstoffprojekte
(franz.leichtfried@biovest.at)

Wasserstoff im Transportsektor

Wasserstoff hat großes Potenzial als sekundärer Energieträger und Treibstoff. Durch Transformation elektrischer in chemische Energie mittels Elektrolyse lässt sich Wasserstoff überall aus elektrischem Strom herstellen. Besonders als Speicher für aus erneuerbaren Quellen hergestelltem elektrischen Strom eignet sich Wasserstoff hervorragend (siehe www.dwv-info.de; neue Broschüre "Energie-Infrastruktur 21 - Rolle des Wasserstoffs angesichts der Herausforderungen im neuen globalen Energiesystem").

Im Bereich der Mobilität kann aus erneuerbaren Quellen (Windenergie, Photovoltaik, Geothermie, etc.) erzeugter Wasserstoff ohne weitere Energiewandlung unmittelbar als Treibstoff sowohl im klassischen Verbrennungsmotor (als sanfter Übergang zur Elektromobilität) als auch in der Brennstoffzelle in einem Brennstoffzellen-Batterie-Hybridfahrzeug eingesetzt werden (1 kg Wasserstoff entspricht 4 l Benzin).

Die Wirkungsgrade Wasserstoff-betriebener Brennstoffzellen liegen zwischen den Wirkungsgraden von Batterien und Verbrennungsmotoren. Dieser scheinbare Nachteil gegenüber einem reinen Batterie-betriebenen Elektrofahrzeug wird durch die größere massebezogene Energiespeicherdichte des Wasserstoffs mehr als aufgewogen und hat folgende Auswirkungen:

- 1) Verlängerung der Reichweite von 100 – 200 km auf 400 km
- 2) Mehr Abwärme zum Heizen des Fahrzeuges im Winter
- 3) Mehr Restenergie zum Betrieb elektrischer Servomotoren

Außerdem lässt sich Wasserstoff in mittleren Mengen besser speichern/lagern als Elektrizität.

In einem kürzlich vorgestellten Report namhafter Fahrzeughersteller und Energieversorgungsunternehmen wird angenommen, dass die Anteile von rein elektrisch getriebenen und durch Wasserstoff angetriebenen Fahrzeugen an der Mobilität 2050 zwischen 25 und 50 % (Wasserstoff) und 25 – 35 % (elektrisch) liegen werden (http://www.zeroemissionvehicles.eu/uploads/Power_trains_for_Europe.pdf; Executive Summary, Seite 3).

1) Verlängerung der Reichweite:

Reichweiten neuer BEVs (battery electric vehicles):

- **Renault Kangoo 2008:** 90 km (http://www.elektro-auto.net/index.php?option=com_content&task=view&id=82&Itemid=57)
- **CITROËN C-ZERO 2011:** 130 km (<http://www.c-zero.citroen.com/#/at/news/vorstellungskraft-teil2>)
- **Renault/Nissan Leaf 2011:** 160 km (<http://kurier.at/freizeit/motor/2030841.php>)
- **Tesla Roadster:**
 - die gemessene Reichweite liegt zwischen 200 Kilometern bei strammer Fahrt, über 250 bei gemischter und knapp 330 bei gemäßigtem Tempo.“
 - „Leistungsabgabe sehr temperaturabhängig“
 - http://www.auto-motor-und-sport.de/einzeltests/tesla-roadster-sport-im-test-sportwagen-mit-elektromotor-1853449.html?paging_current=2
- **Andere Marken:**
<http://www.faz.net/s/Rub1DABC609A05048D997A5F315BF55A001/Doc~E5170E852FE2D41EEBE5F454E40C061FB~ATpl~Ecommon~Scontent.html>

2) Mehr Abwärme zum Heizen des Fahrzeugs im Winter:

Matthias Küsell, Entwicklungsleiter für Elektrofahrzeug- und Hybridsysteme bei Bosch (<http://kurier.at/freizeit/motor/2018582.php>):

- „Die meiste Energie geht neben dem Fahren durchs Heizen und Kühlen verloren.“
- „Elektroantrieb hat hohen Wirkungsgrad und wenig Abwärme.“
- „Elektroheizung verkürzt Reichweite drastisch.“
- Heizen/Kühlen: Reichweiten im Winter um 10% kürzer; bei Gebrauch der elektrischen Heizung nochmals minus 10% (http://www.elektro-auto.net/index.php?option=com_content&task=view&id=82&Itemid=57)

3) Mehr Restenergie:

Alle elektrischen Verbraucher verkürzen Reichweite:

- Servolenkung, Servobremsen
- Vielzahl von Stellmotoren:
- Elektrische Sitzverstellung, Fensterheber, Spiegelverstellung, etc.
- „Klar ist, dass das Auto für den E-Antrieb praktisch neu entwickelt werden muss, um eine Reichweite von rund 200 km zu einem vertretbaren Preis zu erlauben.“
- Matthias Küsell, Entwicklungsleiter für Elektrofahrzeug- und Hybridsysteme bei Bosch (<http://kurier.at/freizeit/motor/2018582.php>)

4) Reichweitenverlängerung:

Reichweitenverlängerung am Beispiel des ersten seriengerecht gefertigten Brennstoffzellen-Batterie-Hybridfahrzeugs Honda FCX Clarity:

- Reichweite 386 km
(mit 700 bar Wasserstoff ca. 580 km)
- 350 bar, 3.92 kg Wasserstoff
- Alle Servoantriebe wie bei Benzin-getriebenen Fahrzeugen:
<http://automobiles.honda.com/fcx-clarity/specifications.aspx>

5) Vergleich der verschiedenen Antriebsarten:

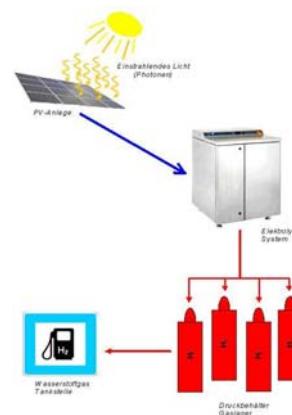
- „Plug-in“-Hybridfahrzeug: lange Ladedauer
- Benzin-Hybrid (z.B. Prius): CO₂-Problematik
- Brennstoffzelle:
 - 50 % Wirkungsgrad, Rest ist Abwärme
 - Wasserstoff hat höchste Energiedichte pro Masseneinheit
 - Volumenbedarf (700 bar oder flüssig): ca. 4x höher als Benzin
 - Klimafreundliche Lösung

6) Überlegungen zur Sicherheit beim Umgang mit Wasserstoff:

reichhaltige Erfahrungen mit Wasserstoff im Stadtgas:

- Stadtgas aus der Verkokung von Kohle hat(te) ca. 50 % H₂ – Gehalt
- In Österreich/Deutschland von ca. 1830 bis in 1970er Jahre
- In Osteuropa noch heute!
- Sicherheitsbestimmungen Stadtgas waren weniger stringent

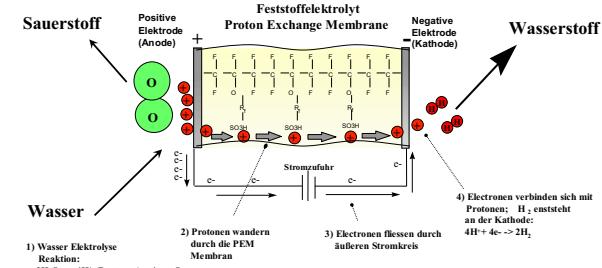
Elektrolyse: Oeko-Wasserstofferzeugung aus Ökostrom und Wasser



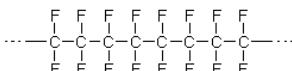
Transformation der elektrischen in chemische Energie mittels Elektrolyse:

Funktionsweise der PEM Elektrolyse (Polymerelektrolytmembran-Elektrolyse)
(oder PEM=proton exchange membrane)

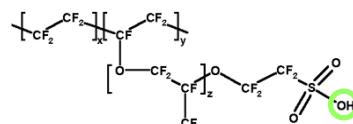
Prinzip - Polymerelektrolytmembran-Elektrolyse (PEM; proton exchange membrane)



Molekularer Aufbau des Feststoffelektrolyten:



Polytetrafluoroethene (Teflon)



- Proton Exchange membrane® aus Nafion® von Dupont
- Tetrafluoräthylen ([Teflon](#)) mit sulfonierte Seitengruppen
- Ausgezeichnete thermische und mechanische Stabilität
- H⁺-Ionen (Protonen) springen von einer Sulfonylgruppe zur anderen
- Membranporen erlauben Bewegung von H⁺-Ionen, aber nicht Anionen oder Elektronen
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Nafion>

Vorteile der Wasserstoff-Erzeugung mittels PEM-Elektrolyseur

- Elektrolyt ist Feststoffmembran, keine Flüssigkeit involviert
- Erzeugt hochreinen H₂; keine aufwendige Nachreinigung erforderlich
- Kompaktere Bauweise
- Sicher und weitgehend wartungsfrei: Keine gefährlich heißen und hochkonzentrierten Alkalikreisläufe
- Keine Knallgasbildung: Vernachlässigbare Sauerstoffdiffusion durch PEM-Membran (Sauerstoffseite drucklos)
- Deswegen muss die Sockelspannung zur Vermeidung der Querdiffusion angelegt werden (alkalische Elektrolyseure können wegen Querdiffusion durch Asbestmembran erst ab ca. 35 % der Voll-Last betrieben werden)
- PEM Elektrolyseure laufen von 0 – 100 % Last stufenlos und erzeugen automatisch und nachfragegeführt hochreinen Wasserstoff bei derzeit bis 165 bar; reagieren in Sekundenbruchteilen auf Lastanforderung

➔ einzige sinnvolle Variante für PV/Windkraft – Inselsysteme

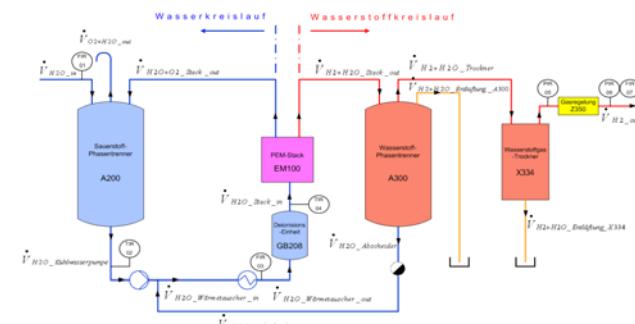
Für dieses Projekt wurde ein PEM Elektrolyseur gewählt und zwar vor allem aus folgenden Gründen:

- Vernachlässigbare Querdiffusion von Wasserstoff zur Sauerstoffseite bei Null-Last und geringen Teil-Lasten:
Dadurch ist es möglich, auch bei geringer Sonneneinstrahlung den Elektrolyseur im niedrigen Teil-Lastbereich zu fahren. Alkalische Elektrolyseure hingegen benötigen eine permanente Versorgung des Zellstapels von bis zu 40% der Maximallast, um die Querdiffusion von Wasserstoff durch die Asbestmembran zu kompensieren.
- Sehr rasches Ansprechen des Stacks auf intermittierende Strom-Versorgung durch den Solargenerator:
Der Elektrolyseur reagiert binnen Sekundenbruchteilen auf das im Bereich 0-100% schwankende Stromangebot.
- Keine komplexe (und stromfressende) Peripherie zur Laugenumwälzung und Handling von Flüssigkeiten

Aufbau des Elektrolyse-Systems:

Der Elektrolyseteil des Gesamtsystems kann in drei Teilbereiche unterteilt werden:

- 1) Wasserstoff-Kreislauf
- 2) Wasser-Kreislauf
- 3) Elektrische Versorgung
 - a. Für den Elektrolyse-Zellstapler (Stack)
 - b. Für die Peripherie



Aufbau des Elektrolyse-Systems

Die Wahl des PEM (Proton Exchange Membrane) Elektrolyseurs zeigt sich als sehr günstig, da dieser bei intermittierender Stromversorgung durch den Solargenerator binnen Sekundenbruchteilen auf das im Bereich 0-100% schwankende Stromangebot reagiert. Alkalische Elektrolyseure hingegen benötigen eine permanente Versorgung des Zellstapels von bis zu 40% der Maximallast, um die Querdiffusion von Wasserstoff durch die Asbestmembran zu kompensieren.

Anforderungen seitens des Elektrolyseurs:

Der Wasserstoff wird mittels eines PEM (Proton Exchange Membrane) Elektrolyseurs vom Typ Proton Energy Hogen® S 40 erzeugt.

Übersicht – Technische Daten: PEM-Elektrolyseur Hogen® S40



Erzeugungsleistung: max. 1,05 Nm³/h

Reinheit: 99,9995 %

H2 Druck : 13,8 bar

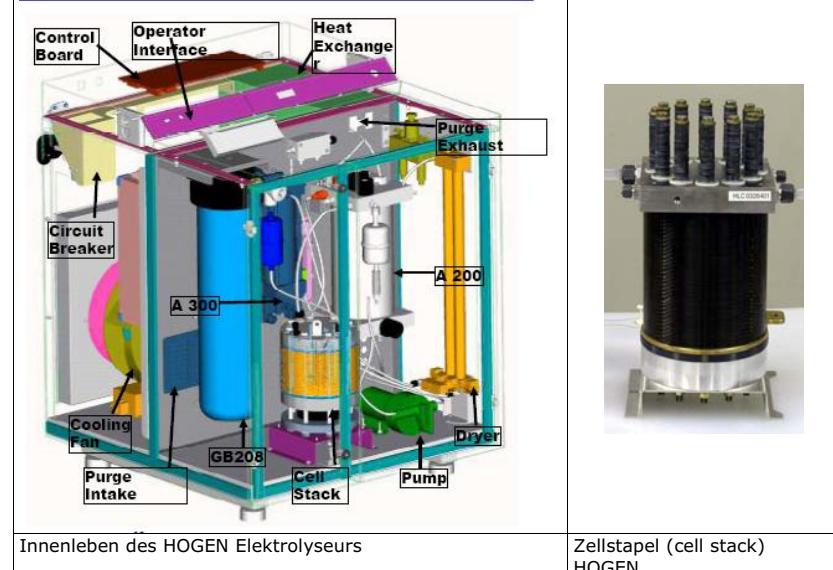
Wasserverbrauch : max. 0,94 l/h

Netzanschluss: 12 kVA, 220 V, 50 Hz

Stromverbrauch des Zellstapels in kWh/Nm³:

5,9 (Neu) – 8,7 (Ende der Lebensdauer)

Am Zellstapel selbst wird eine Spannung von max. 54 V benötigt (Nennlast) und eine Stromstärke von max. 113 A bei einer Vollast von 6,1 kW. Der Elektrolyseur hat 2 Netzteile in Serie: 60 V, 150 Amp. Der eingebaute AC-DC Wandler bedingt einen Verlust von 15 – 20 % der zugeführten elektrischen Energie.



Zellstapel (cell stack)
Hogen

Technische Optimierungspotenziale (beim Hersteller laufende Entwicklungsarbeiten):

- höhere H2 Produktionskapazität:
 - Zellstapel
- Verbesserung des Wirkungsgrades
 - Wasserstofftrockner
 - Wirkungsgrad Steigerung der Gleichrichter auf 95 %
- Höherer Produktdruck:
 - Von derzeit 14 bar, 30 bar und 165 bar auf bis zu 350 bar
 - Vorverdichter fallen weg; nur mehr Booster Kompressor notwendig

Überlegungen zur Einführung einer Ökowasserstoff-Infrastruktur für den Individualverkehr in Österreich:

Für den Betrieb eines Wasserstoffautos erforderliche H2-Produktion:

- Durchschnittliche Fahrleistung eines PKWs in Österreich:
12.000 km pro Jahr
- Verbrauch eines typischen Wasserstoffautos
(Brennstoffzellen-Batterie-Hybridfahrzeugs Honda FCX Clarity):
1,1 kg H₂/100 km
- Jahresverbrauch:
132 kg H₂ oder 1.468 Nm³ H₂
- Benötigte Tagesmenge (300 Tage /Jahr):
0,45 kg H₂ oder 5 Nm³ H₂
- für 5 Nm³ Tagesproduktion:
PEM-Elektrolyseur Proton Energy Hogen S40
(siehe HyCentA in Graz) mehr als ausreichend
(1 Nm³ pro Stunde); kann mehr als vier PKWs versorgen!

Berechnung des Stromverbrauchs für die Wasserstoffproduktion mittels Elektrolyse:

- Benötigte Jahremenge für ein Fahrzeug:
132 kg H₂ oder 1.468 Nm³ H₂
- Spezifischer Stromverbrauch des Elektrolyseurs: 6 kWh/Nm³ H₂
- Jahresgesamtstromverbrauch (300 Tage Betrieb):
8.808 kWh

Erforderliche Ökostrom-Erzeugungskapazität – aus Photovoltaik oder Windkraft:

Zur Erzeugung von jährlich 8.808 kWh sind erforderlich:

- 53 m² (8,8 kW_p) PV-Anlage bei 18,6 % Modul-Wirkungsgrad und PV-Jahresertrag von 1.000 kWh/kW_p,
(z.B.: Sanyo HIT-N235SE10: 18,6% Modul- und 21,1% Zellwirkungsgrad,
<http://www.solarserver.de/solar-magazin/nachrichten/aktuelles/sanyo-bringt-hit-solarmodule-mit-weltweit-fuehrendem-wirkungsgrad-von-211-auf-den-markt.html>)
- 5 kW Windturbine

Strombedarf für die H₂-Versorgung 2020:

- EU Zielvorstellung für 2020:
5 % der Fahrzeuge fahren mit Wasserstoff
- Das sind 205.000 PKW's in Österreich
- Erforderliche Elektrizitätsmenge:
1,15 – 1,75 x 10⁹ kWh pro Jahr
- Dies entspricht ca. 1,65 – 2,5 %
der in Österreich verbrauchten Strommenge von ca. 6x10¹⁰ kWh pro Jahr.
- Dieser Strom könnte teilweise aus Überschussenergie aus nicht genutzter Wind- oder Wasserkraft (NVA; nicht verwertete Arbeit) ohne zusätzlich installierte Erzeugungskapazitäten erzeugt werden.

Wenn der für die H₂-Versorgung 2020 notwendige Ökostrom nicht aus Überschussenergie, sondern zur Gänze aus neu installierten Anlagen erzeugt werden sollte, wären für den Betrieb von 205.000 Wasserstoff-betriebenen PKW's folgende Neuinstallation notwendig:

- 335 Windturbinen mit insgesamt 670 MW Leistung zum Preis von rund 500 Millionen Euro
 - Zum Vergleich: Ende 2010 waren 625 Windenergieanlagen mit einer Leistung von insgesamt 1.010 MW installiert
(<http://de.wikipedia.org/wiki/Windenergie>)
- oder
- 9,6 km² (3 x 3 km) Photovoltaikpaneele
(rd. 5 Milliarden Euro, allerdings wenn man vom Einzelhandelspreis ausgeht), das sind 0,011 % der Gesamtfläche Österreichs von 83 857 km² oder 0,5 % der bebauten Fläche.
 - Zum Vergleich: In Oberösterreich alleine stehen 7 km² theoretisch nutzbare Dachflächen auf Wohngebäuden zur Verfügung (Betriebsgebäude sind nicht berücksichtigt);
<http://www.anschober.at/politik/presse/990/oberoesterreich-geht-den-solaren-weg---ein-land-wird-zum-solar-valley>)

The role of Fuel Cell Electric Vehicles within a portfolio of power-trains

Graz, September 28, 2010

A factual comparison based on proprietary industry data

Move & Improve. OMV

Content

1. Introduction
2. Approach
3. Detail: Hydrogen Cost
4. Results

2 | OMV AG, Walter Böhme, February 2, 2011

This is a first project in a series to build the industry

► EU hydrogen FCEV Coalition

- Fact-based evaluation of the potential of FCEV until 2050
- Integrated perspective across hydrogen value chain



3 | OMV AG, Walter Böhme, February 2, 2011

SOURCE: Working team

► H₂-Mobility

- Business plan for roll-out of H₂ infrastructure in Germany
- Definition of technological standards
- Establishment of "future consortium"
- Implementation of comprehensive business case (incl. e.g., funding)



OMV

► Investment and Business Building

- Establishment of "future consortium"
- Implementation of comprehensive business case (incl. e.g., funding)

Core questions to be answered

- 1 How do FCEVs compare to other powertrains over the medium to long-term on emissions, performance, and economics?
- 2 What are the potential market segments for FCEVs?
- 3 How do the hydrogen production, distribution, and retail pathways compare?
- 4 What is required on a high level to develop and implement FCEVs, as input to a rollout plan (H₂ mobility)?

OMV

End products

- Detailed cost, emission, and performance drivers by car segment, powertrain, supply technology
- Detailed evaluation of FCEV, BEV, PHEV, and ICE by segment over time
 - Projected cost, performance, emissions developments
 - Relative scoring
 - Sensitivities and trigger points
- Integrated storyline of the future role of different powertrains
 - Relative advantage
 - Cost and performance trajectory
 - Segmentation
 - Investment for ramp-up
 - Benefits to society

5 | OMV AG, Walter Böhme, February 2, 2011
SOURCE: Working team

Content

1. Introduction
2. Approach
3. Detail: Hydrogen Cost
4. Results

OMV

4 | OMV AG, Walter Böhme, February 2, 2011

6 | OMV AG, Walter Böhme, February 2, 2011

1 Three reference vehicle segments were chosen

Vehicle segment	Typical characteristics	Example	EU vehicle production 2008, percent
A – City	• <3800 mm • 2-door hatchback • < € 15k	• Smart	6
B – Super mini	• 3700 - 4200 mm • 3-door hatchback • > € 15k	• Toyota Yaris	23
C – Medium	• 4000 - 4500 mm • 5-door hatchback • > € 25k - 45k	• Honda Focus	23
D – Upper medium	• 4400 - 5000 mm • 4-door sedan • > € 25k - 45k	• Renault Laguna	13
E – Large	• 4700 - 5100 mm • Mercedes E/S • > € 40k - 120k	• Lexus GS	5
F – Luxury	• 5250+ sedan • > € 100k	• Maybach	<1
G – Sport	• 2-door coupe • > € 30k	• Mercedes CLK	<1
M1 – Small MPV	• 3900 - 4400 mm • 5-door MPV • > € 10k - 30k	• Nissan 370Z	12
M2 – Large MPV	• 4400 - 5000 mm • 7-seat MPV • > € 25k - 50k	• Renault Scenic	9
J1 – Small SUV	• 3700 - 4000 mm • 5-door SUV • > € 10k - 30k	• Toyota RAV4	5
J2 – Large SUV	• 4000 - 5100 mm • 7-seat SUV • > € 25k - 75k	• Toyota Highlander	3
Mercedes C		• Ford Explorer	

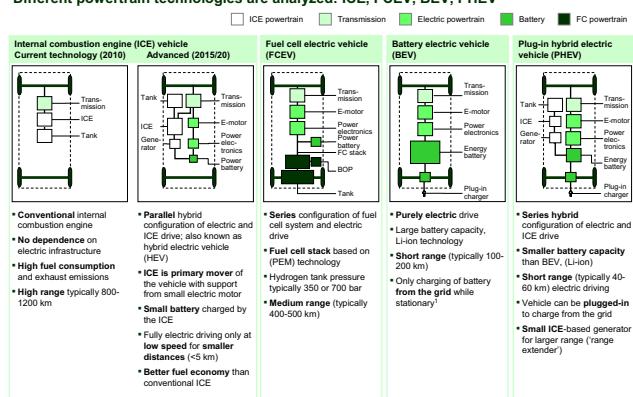
SOURCE: FCEV Coalition; HIS Global Insight 2010

Defined reference segments

Rationale

- Balanced mix of existing vehicle segments represented by selected small, medium, and SUV segments
- No bias for a specific powertrain concept by only selecting small or large segments
- Segments with significant volumes
- High data availability among coalition partners
- Data scaling between segments is possible

Different powertrain technologies are analyzed: ICE, FCEV, BEV, PHEV



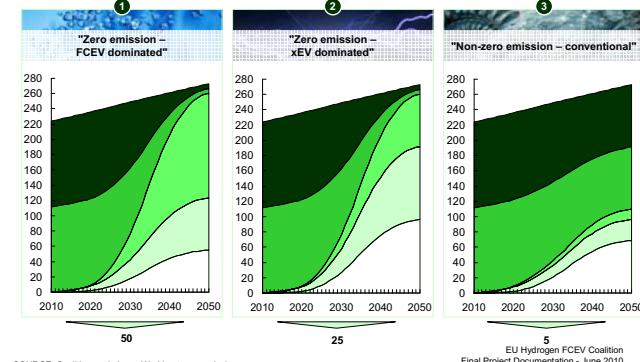
1 Exchange of battery pack is possible, but not considered in this study

SOURCE: Coalition workshops, Working team analysis

ICE powertrain Transmission Electric powertrain Battery FC powertrain

Ramp-up of FCEVs, BEVs and PHEVs depend on the "world" after 2020

Total EU car park, million vehicles



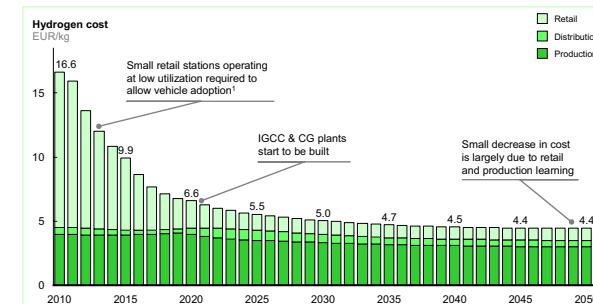
SOURCE: Coalition workshops, Working team analysis

Content

- Introduction
- Approach
- Detail: Hydrogen Cost**
- Results

Cost of production is projected to reduce by 70% in the first 15 years, after which it stays relatively flat

Delivered at pump, w/o taxes or excises



1 Coverage requirement sets area and retail station density requirements for vehicle adoption

SOURCE: Clean team sanitized data, coalition workshops, Working team analysis

EU Hydrogen FCEV Coalition Final Project Documentation - June 2010

10 | OMV OMV AG, Walter Böhme, February 2, 2011



Content

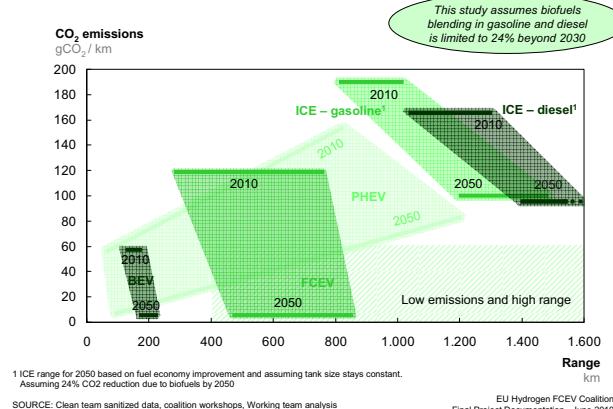
- Introduction
- Approach
- Detail: Hydrogen Cost**
- Results



12 | OMV OMV AG, Walter Böhme, February 2, 2011

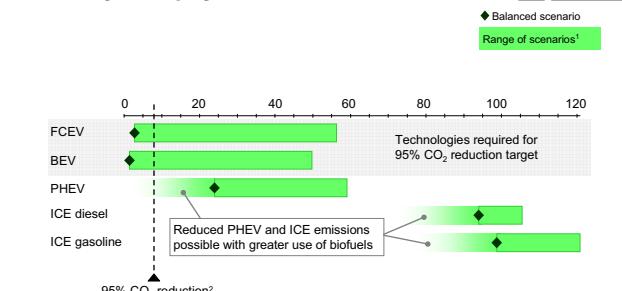
Electric vehicles (BEV, PHEV, FCEV) can achieve near zero CO₂ emissions with BEVs showing limitations in driving range

C/D SEGMENT



BEVs and FCEVs can abate 95% of the CO₂ emissions

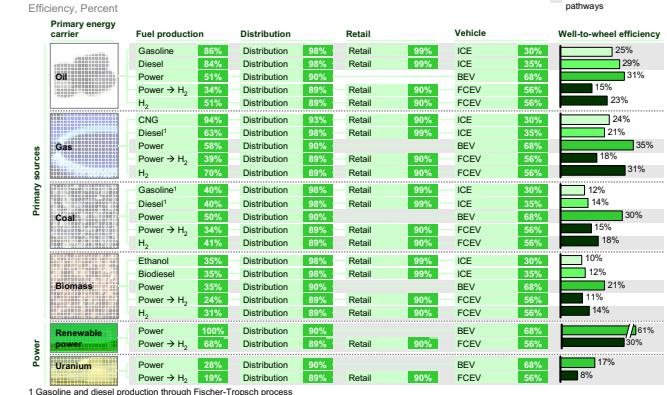
Well-to-wheel CO₂ emissions, g CO₂/km



FCEV well-to-wheel efficiency is competitive to ICE with flexible use of feedstock, whereas BEV remains the most efficient powertrain

2020

Common production pathways



TCO calculation breakdown for all segments

EUR

25% FCEV WORLD

AB Segment	Vehicle	Purchase price	Maintenance	Fuel cost ¹	Infrastructure ²	TCO
	FCEV	15,957	2,500	4,372	1,175	24,004
	BEV	15,196	2,241	2,653	2,509	22,598
	PHEV	13,674	2,841	3,419	1,404	21,338
	ICE - gasoline	11,131	2,967	4,131	459	18,688
	ICE - diesel	11,191	2,990	4,146	390	18,717
C/D Segment	Vehicle	Purchase price	Maintenance	Fuel cost	Infrastructure	TCO
	FCEV	25,737	4,188	5,159	1,387	36,471
	BEV	26,325	3,623	3,157	2,509	35,614
	PHEV	25,037	4,850	3,743	1,404	35,035
	ICE - gasoline	21,064	5,369	5,258	584	32,274
	ICE - diesel	21,607	5,572	5,244	493	32,916
I Segment	Vehicle	Purchase price	Maintenance	Fuel cost	Infrastructure	TCO
	FCEV	32,728	5,252	6,249	1,680	45,910
	BEV	37,320	5,199	3,904	2,509	48,931
	PHEV	34,721	6,653	5,142	1,404	47,920
	ICE - gasoline	28,252	7,020	6,907	767	42,945
	ICE - diesel	29,149	7,357	7,229	680	44,414

1 Includes production and distribution cost

2 Includes retail cost

NOTE: Assuming 15 year lifetime, annual driving distance of 12,000 km, no tax (e.g., fuel excise, VAT)

EU Hydrogen FCEV Coalition
Final Project Documentation - June 2010

Results

Only BEVs and FCEVs can decarbonise road transport by 95% by 2050

- ▶ BEVs and FCEVs can use a range of feedstocks
- ▶ BEVs are most suited to smaller cars and shorter trips
- ▶ FCEVs are the only low-carbon solution for medium/larger cars and longer trips

Results

After 2030, the total cost of ownership (TCO) of all power-trains converges

- ▶ By 2020, the cost of a fuel cell system falls by 90%, BEV components by 80%
- ▶ The cost of Hydrogen at the pump reduces by 70% by 2025
- ▶ By 2030, FCEVs are cost-competitive with ICEs for larger cars
- ▶ Incentives could make BEVs and FCEVs cost-competitive with ICEs by 2015 and 2020



17 | OMV AG, Walter Böhme, February 2, 2011

18 | OMV AG, Walter Böhme, February 2, 2011



Results

Only a portfolio of power-trains can meet the needs of consumers and the environment

- ▶ Only FCEVs are comparable to ICEs on driving performance and range
- ▶ Snapshot of 2030: different power-trains meet different needs

Government support is needed to act as a catalyst

- ▶ ~1 million FCEVs by 2020 requires 3 - 5 billion investment in infrastructure
- ▶ Up to 2020, FCEVs face a cumulative economic gap of ~ 25 billion

19 | OMV AG, Walter Böhme, February 2, 2011



Thank you for your attention!



20 | OMV AG, Walter Böhme, February 2, 2011

Weizer Naturenergie® GmbH

Siegfried-Esterl-Gasse , 8160 Weiz

Ökostromerzeugung für die Mobilität der Zukunft

WEC Workshop
28. September 2010
Graz

www.weizernaturenergie.at

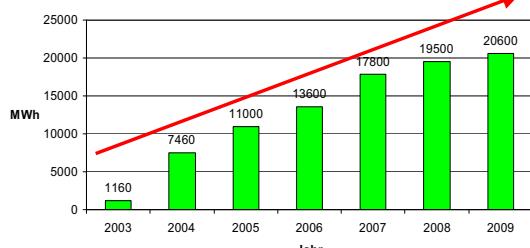
Agenda

- Unternehmensstruktur / Umsatzentwicklung / Ökostromaufbringung der WEIZER Naturenergie GmbH
- Ökostromerzeugung spezifische Anlagentypen mit Erzeugungscharakteristik
 - Kleinwasserkraft
 - Windkraft
 - Photovoltaik
- Energiebilanzen Wasserstoffeinsatz Mobilität
- Energie Steiermark Aktivitäten Ökostromerzeugung

Organisation

- Die WEIZER Naturenergie GmbH ist eine 100%ige Tochter der PW Stromversorgungsgesellschaft m.b.H. in Weiz, diese wiederum eine 100%ige Tochter der Energie Steiermark AG.
- Die Weizer Naturenergie GmbH ist die ÖKOSCHIENE der Energie Steiermark AG
- Ökostromaufbringung
 - 4 Kleinwasserkraftwerke an der Raab und der Feistritz
 - Gesellschaftliche Beteiligung und gesamte Energieübernahme der Windkraftanlage Plankogl/Sommeralm
 - 5 Photovoltaikanlagen mit einer Leistung von 30 kWp

Ökostrom - Umsatzentwicklung



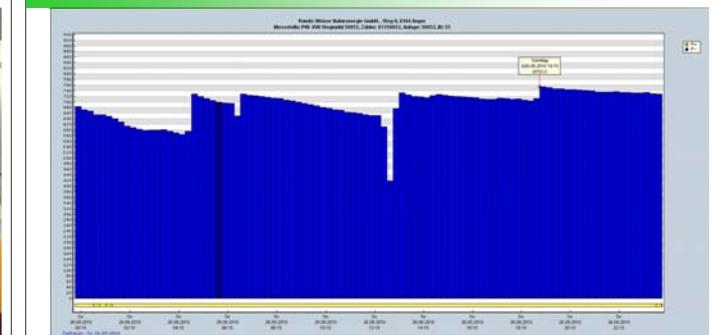
www.weizernaturenergie.at

Kleinwasserkraft



www.weizernaturenergie.at

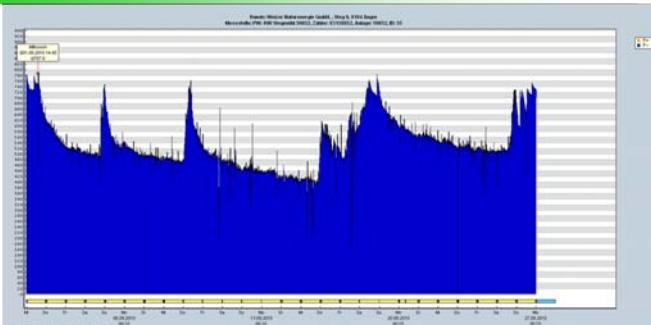
Kleinwasserkraft Lastprofil Tag



www.weizernaturenergie.at

Kleinwasserkraft Lastprofil Monat

WEIZER natur energie[®]
Die Energie für Umweltbewusste.



www.weizernaturenergie.at

Windkraft

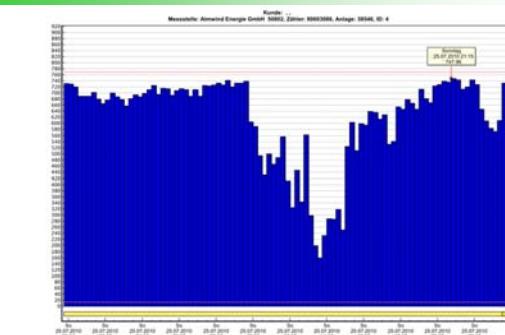
WEIZER natur energie[®]
Die Energie für Umweltbewusste.



www.weizernaturenergie.at

Windkraft Lastprofil Tag

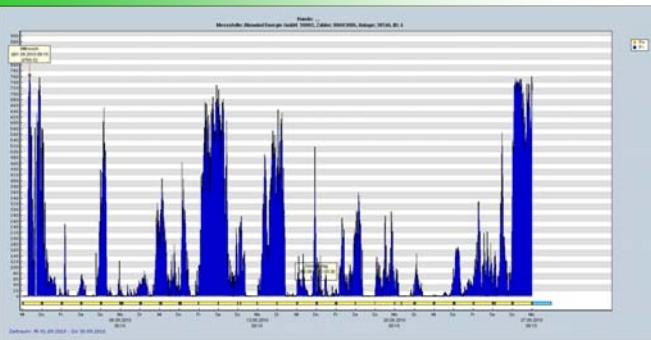
WEIZER natur energie[®]
Die Energie für Umweltbewusste.



www.weizernaturenergie.at

Windkraft Lastprofil Monat

WEIZER natur energie[®]
Die Energie für Umweltbewusste.



www.weizernaturenergie.at

Photovoltaik

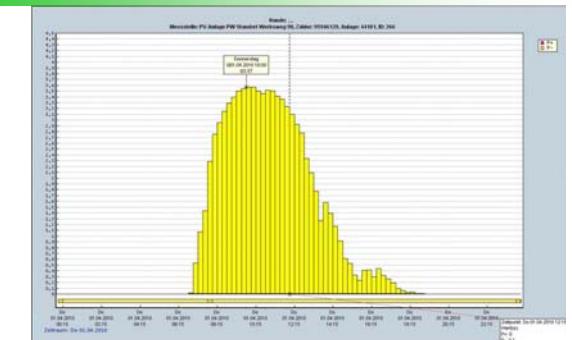
WEIZER natur energie[®]
Die Energie für Umweltbewusste.



www.weizernaturenergie.at

Photovoltaik Lastprofil Tag

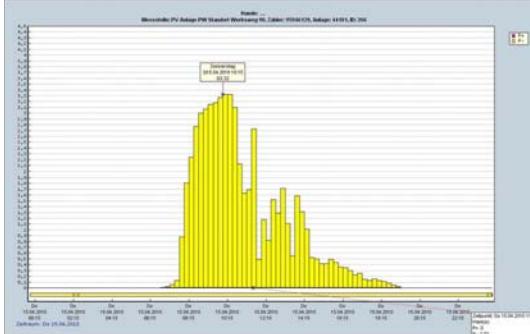
WEIZER natur energie[®]
Die Energie für Umweltbewusste.



www.weizernaturenergie.at

Photovoltaik Lastprofil Tag

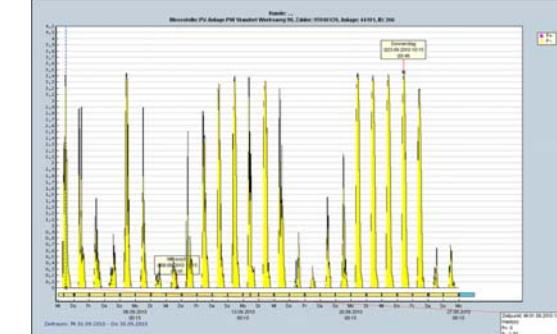
WEIZER natur energie[®]
Die Energie für Umweltbewusste.



www.weizernaturenergie.at

Photovoltaik Lastprofil Monat

WEIZER natur energie[®]
Die Energie für Umweltbewusste.



www.weizernaturenergie.at

Photovoltaik Heliostat

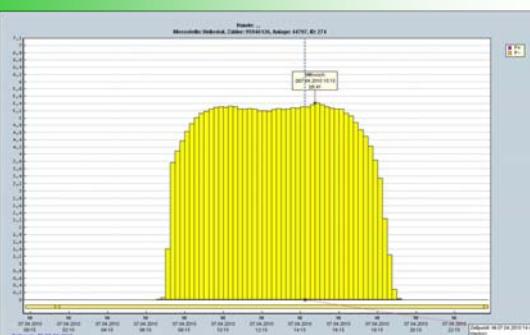
WEIZER natur energie[®]
Die Energie für Umweltbewusste.



www.weizernaturenergie.at

Photovoltaik Heliostat Lastprofil Tag

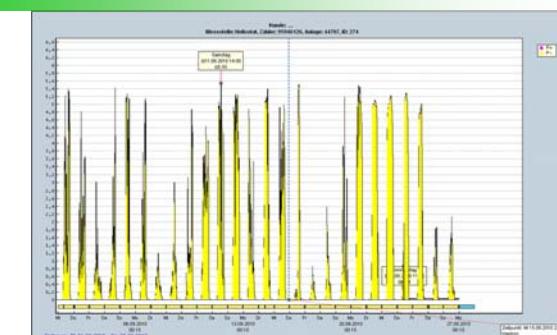
WEIZER natur energie[®]
Die Energie für Umweltbewusste.



www.weizernaturenergie.at

Photovoltaik Heliostat Lastprofil Monat

WEIZER natur energie[®]
Die Energie für Umweltbewusste.



www.weizernaturenergie.at

Ökostrom-Erzeugungsanlagen

WEIZER natur energie[®]
Die Energie für Umweltbewusste.

- **Kleinwasserkraft:**
 - Prognose: Planbarkeit sehr gut, stetiger Erzeugungsverlauf
- **Windkraft:**
 - Prognose: Nur bedingt möglich, wenn in größeren räumlichen Zusammenhängen unstetiger Erzeugungsverlauf
- **Sonnenenergie:**
 - Prognose: Nur bedingt möglich, unstetiger Erzeugungsverlauf

www.weizernaturenergie.at

Energiebilanz

WEIZER natur energie®
Die Energie für Umweltbewusste.

- H₂ Erzeugung Elektrolyse:
 - 1 kWh Strom → 18 g H₂ (0,6 kWh H₂)
- H₂ im Einsatz als Fahrzeugsantriebsenergie/Brennstoffzelle:
 - 100 km 1,1 kg H₂
- Jahresenergieeinsatz bei 14000 km Fahrleistung PKW:
 - 150 kg H₂ 8400 kWh Strom

www.weizernaturenergie.at

Energiebilanzen

WEIZER natur energie®
Die Energie für Umweltbewusste.

- Eine PV-Anlage mit 6 kW:
 - Jahresenergiemenge für den Betrieb von einem PKW
- Ein Kleinwasserkraftwerk mit 1 MW ergibt:
 - Jahresenergiemenge für den Betrieb von 720 PKW
- Ein Windpark mit einer Leistung von 23 MW:
 - Jahresenergiemenge für den Betrieb von 6000 PKW
- Ein mittleres Wasserkraftwerk mit einer Leistung von 20 MW:
 - Jahresenergiemenge für den Betrieb von 12500 PKW

www.weizernaturenergie.at

Aktivitäten Energie Steiermark Ökostromerzeugung

WEIZER natur energie®
Die Energie für Umweltbewusste.

- Wasserkraft:
 - 2 Murkraftwerke in Bau, weitere in der Projektierungsphase
 - Projektierung von Kleinwasserkraftwerken an der Mürz und Feistritz
- Biomasse:
 - F&E-Projekt für hocheffiziente Biomasseverstromung fertig gestellt
- Windkraft:
 - Projektentwicklung für Standorte in der Steiermark mit ca. 40 MW
- Photovoltaik:
 - Machbarkeitsstudien mit Standortanalyse
 - Vertriebsaktionen/Einspeiseförderung für Anlagen bis 5 kWp bzw. 10 kWp

www.weizernaturenergie.at

Viel Öko-Energie für unsere Mobilität !

Kontakt:

Weizer Naturenergie® GmbH
Siegfried-Esterl-Gasse , 8160 Weiz
office@weizernaturenergie.at
Tel: +43 3172/ 44410

Ansprechpartner: Ing. Johann Ziegerhofer

www.weizernaturenergie.at

WEIZER natur energie®

Die Energie für Umweltbewusste.

www.weizernaturenergie.at

Die Ökostrom – Wasserstoff -Tankstelle der Zukunft

Die Weizer Naturenergie GmbH als Kooperationspartner Ökostromlieferung

Das Unternehmen WEIZER Naturenergie GmbH

Gegründet 2002 als eine 100%ige Tochter der PW Stromversorgungsgesellschaft m.b.H. mit Sitz in Weiz, diese ist wiederum eine 100%ige Tochter der Energie Steiermark AG. Die Weizer Naturenergie GmbH ist die ÖKOSCHIENE der Energie Steiermark AG.

Unternehmensphilosophie:

Wir wollen für und mit unseren Kunden und Partnern durch die ressourcenschonende und möglichst umweltfreundliche Elektrizitätserzeugung auf Basis erneuerbarer Energie einen nachhaltigen Beitrag zu einer lebenswerten Umwelt leisten.

Ökostromaufbringung:

- 4 Kleinwasserkraftwerke an der Raab und der Feistritz
- Gesellschaftliche Beteiligung und gesamte Energieübernahme der Windkraftanlage Plankogel/Sommeralm
- 5 Photovoltaikanlagen mit einer Leistung von 30 kWp

Ökostromvertrieb:

Im Jahr 2002 wurden 1,2 Mio. kWh Ökostrom verkauft, durch laufende Vertriebsaktivitäten im Rahmen der Firmenphilosophie konnte dieser Wert im Jahr 2010 bereits auf 20,9 Mio. kWh gesteigert werden.

Kundenstruktur:

Derzeit werden ca. 1500 Kundenanlagen mit Ökoenergie versorgt. Die Segmentierung teilt sich in 31 % Privatanlagen, 29 % Gewerbe und 40 % Gemeinden.

Siehe: www.weizernaturenergie.at

Ökostrom Erzeugungsanlagen:

Die typischen Ökostromerzeugungsanlagen - Kleinwasserkraft, Windkraft und Sonnenenergie/Photovoltaik - sind hinsichtlich ihrer charakteristischen Eigenschaften stark unterschiedlich und werden nachfolgend anhand konkreter Anlagen der Weizer Naturenergie GmbH dargestellt.

Kleinwasserkraft:

Fallbeispiel KW Stegmühl Laufkraftwerk an der Feistritz nördlich von Anger gelegen, Ausbauleistung 820 kW, Regalarbeitsvermögen 4,5 Mio. kWh

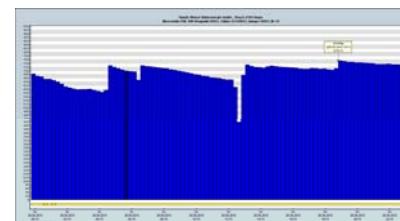
Wehranlage:



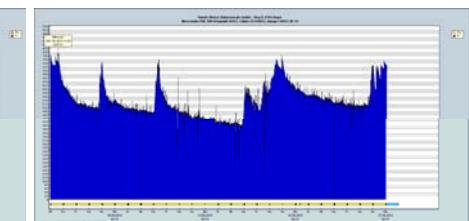
Krafthaus:



Tageslastprofil



Monatslastprofil



Spezifische Eigenschaften:

- gute Prognostizierbarkeit der Erzeugung
- relativ stetiger Erzeugungsverlauf
- hohe spezifische Energieerzeugung je Leistungseinheit ca. 5500 kWh p.a. je kW Anlagenleistung

Wasserwirtschaft ist im Allgemeinen positiv besetzt.

Bei Neuanlagen:

- schwieriges Umsetzungsverfahren bei Neuanlagen
- Wasserrecht Restwasserdotierung, Fischereifragen

Begrenztes Ausbaupotenzial

Windkraft:

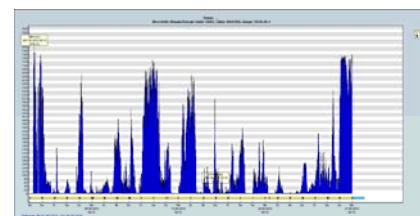
Fallbeispiel Windkraftanlage Plankogel Sommeralm auf 1450 m Seehöhe
Ausbauleistung 750 kW, Regelarbeitsvermögen 1,25 Mio. kWh
Errichtung und Inbetriebnahme 1998/1999, damals war diese Anlage die höchstgelegene netzgekoppelte Windkraftanlage Europas.



Tageslastprofil:



Monatslastprofil:



Spezifische Eigenschaften:

Prognostizierbarkeit des Erzeugungsverlaufes nur bedingt in größeren räumlichen Zusammenhängen möglich, mehrere Windparks mit entsprechenden Wetterprognosen, unstetiger Erzeugungsverlauf, relativ geringe spezifische Energieerzeugung je Leistungseinheit ca. 2000 kWh p.a. je kW Anlagenleistung.

Bei Neuanlagen:

- schwieriges Genehmigungsverfahren
Natur- und Landschaftsschutz

Begrenztes Ausbaupotenzial, wirtschaftlich nur mit Ökostromförderung darstellbar.

Photovoltaik:

Fallbeispiel: Freistehende zweiachsig nachgeführte Photovoltaikanlage „Heliostat“
Gemeinde Hohenau an der Raab
Leistung: 5,8 kWp, Jahreserzeugung: 8.500 kWh p.A.

Vorteil: ca. 35 % höhere spezifische Jahreserträge

Nachteil: höhere Investitionskosten für Mechanik, zusätzlicher Flächenbedarf

PV-Anlage:



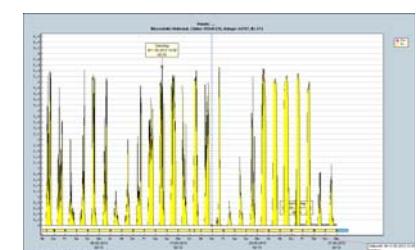
Infotafel:



Tageslastprofil:



Monatslastprofil:



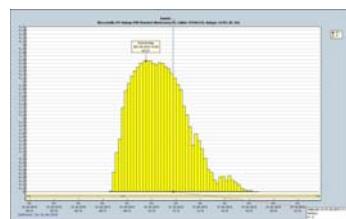
Fallbeispiel: fassadenintegrierte Photovoltaikanlage
Betriebsgebäude Pichler Werke Weiz Werksweg
Leistung: 4,6 kWp, Jahreserzeugung: ca. 4.000 kWh p.A.

Vorteil: einfache Montage, geringere Kosten, kein zusätzlicher Flächenbedarf
Nachteil: geringere spezifische Jahreserträge

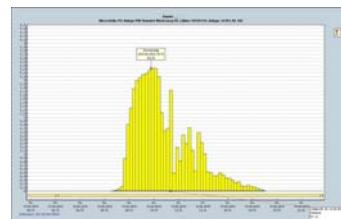
PV-Anlage:



Tageslastprofil (sonnig)



Tageslastprofil (teilweise bewölkt)



Spezifische Eigenschaften Photovoltaik

Prognostizierbarkeit des Erzeugungsverlaufes nur bedingt in größeren räumlichen Zusammenhängen mit entsprechenden Wetterprognosen möglich, unstetiger Erzeugungsverlauf, geringe spezifische Energieerzeugung je Leistungseinheit ca. 1100 kWh p.a. je kW Anlagenleistung.

Photovoltaik ist in der Gesellschaft sehr positiv besetzt.

Wirtschaftlich nur mit (hoher) Ökostromförderung darstellbar.

Ökostromspeicherung:

Die Fallbeispiele für die Ökostromerzeugung zeigen aufgrund des meist unstetigen Erzeugungsverlaufes für eine uneingeschränkte Verbrauchernutzung einen Netzparallelbetrieb, wobei das Netz auch die Speicherfunktion übernimmt. Großtechnisch basiert dies in Österreich durch leistungsstarke Pumpspeicherwerke.

Durch die zukünftig zu erwartende wesentliche Steigerung können auch weitere Verfahren wie z.B. die Elektrolyse zur Anwendung kommen.

Die nachfolgenden dargestellten Energiebilanzen beziehen sich auf das im gegenständlichen Projekt getestete Verfahren der elektrolytischen Wasserstofferzeugung und der weiteren Nutzung des Wasserstoffs im Bereich der E-Mobilität Brennstoffzellentechnologie als Fahrzeugsantriebsenergie.

Vergleichswerte des Gesamtsystemwirkungsgrades im Vergleich zu Akkuladung aus dem Netz wurde nicht bewertet.

Energiebilanzen:

H₂ Erzeugung Elektrolyse:

- 1 kWh Strom 18 g H₂ (0,6 kWh H₂)

H₂ im Einsatz als Fahrzeugsantriebsenergie/Brennstoffzelle:

- 100 km 1,1 kg H₂

Energieeinsätze:

Jahresenergieeinsatz bei 14000 km Fahrleistung PKW:

- 150 kg H₂ 8400 kWh Strom

Eine PV-Anlage mit 6 kW:

- Jahresenergiemenge für den Betrieb von 1 PKW

Ein Kleinwasserkraftwerk mit 1 MW ergibt:

- Jahresenergiemenge für den Betrieb von 720 PKW

Ein Windpark mit einer Leistung von 23 MW:

- Jahresenergiemenge für den Betrieb von 6000 PKW

Ein mittleres Wasserkraftwerk mit einer Leistung von 20 MW:

- Jahresenergiemenge für den Betrieb von 12500 PKW

Aktivitäten Energie Steiermark

Ökostromerzeugung

Wasserkraft:

- 2 Murkraftwerke in Bau, weitere in der Projektierungsphase
- Projektierung von Kleinwasserkraftwerken an der Mürz und an der Feistritz

Biomasse:

- F&E-Projekt für hocheffiziente Biomasseverstromung fertig gestellt

Windkraft:

- Projektentwicklung für Standorte in der Steiermark mit ca. 40 MW Leistung

Photovoltaik:

- Machbarkeitsstudien mit Standortanalyse
- Vertriebsaktionen/Einspeiseförderung für Anlagen bis 5 kWp bzw. 10 kWp

Zusammenfassung Ausblick

Die dezentrale Speicherung von Ökoenergie über den Energieträger Wasserstoff kann zukünftige Möglichkeiten schaffen, das meist sehr unstetige Erzeugungsangebot von Ökostromanlagen mit verbrauchsgerechter Leistungsverfügbarkeit zu verbinden.

Im Bereich der E-Mobilität bietet sich Wasserstoff als Energieträger für brennstoffzellenversorgten E-Fahrzeugflotten sehr gut an.

Die angeführten Energiebilanzen zeigen aber auch, dass für aus den energiepolitischen Zielen abgeleiteten E-Mobilitätsplanungen (z.B. 20% bis 2020) die Neuerrichtung von Ökostromerzeugungsanlagen wesentlich intensiviert werden muss, einher gehend mit geeigneten Rahmenbedingungen für die Genehmigungsverfahren.

Kontakt:

Weizer Naturenergie® GmbH
Siegfried-Esterl-Gasse 8, 8160 Weiz
office@weizernaturenergie.at
Tel: +43 3172/ 44410

Ansprechpartner: Ing. Johann Ziegerhofer

JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH



Die Öko-Wasserstoff-Tankstelle der Zukunft
Projektergebnisse

M. Beermann, G. Jungmeier, P. Enzinger, M. Kell, S. Brandstätter,
E. Weissensteiner, M. Mayer, W. Böhme, F. Leichtfried, J. Ziegerhofer

28.09.2010, Graz

INNOVATION aus TRADITION

Überblick

1. Gekoppelte Erzeugung und Nutzung von Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme
2. „Die Öko-Wasserstoff-Tankstelle der Zukunft“ – Demonstrationsprojekt am HyCentA
3. Projektergebnisse
 - i. Anlagenbau
 - ii. Messtechnische Evaluierung
 - iii. Öko-Wasserstoff-Tankstellen für erste Wasserstoff-Fahrzeug-Flotten in Österreich
4. Ausblick

2

INNOVATION aus TRADITION

Welche Rolle kann Öko-Wasserstoff in einem nachhaltigen Energiesystem 2050 spielen?

? Wasserstoff aus erneuerbarer Energie („Öko-Wasserstoff“) – Ein Energieträger der Zukunft?

???: Gibt es energiewirtschaftlicher Optionen für die Erzeugung und Nutzung von Öko-Wasserstoff in Österreich für

- Strom und Wärme
- Transport?

????: Wie soll erneuerbare Energie genutzt werden?

Direkte Nutzung
erneuerbarer
Energie



Indirekte Nutzung
erneuerbarer
Energie „Öko-Wasserstoff“

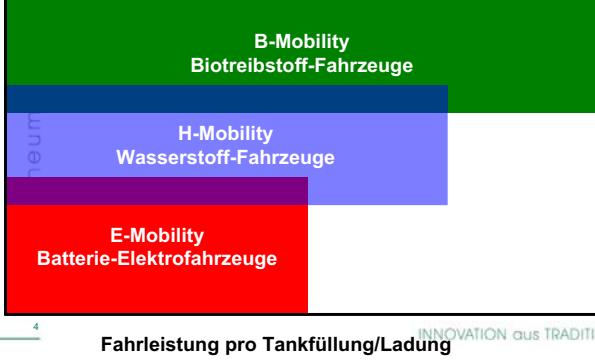
G. Jungmeier, R. Haas et al. 2006

3

INNOVATION aus TRADITION

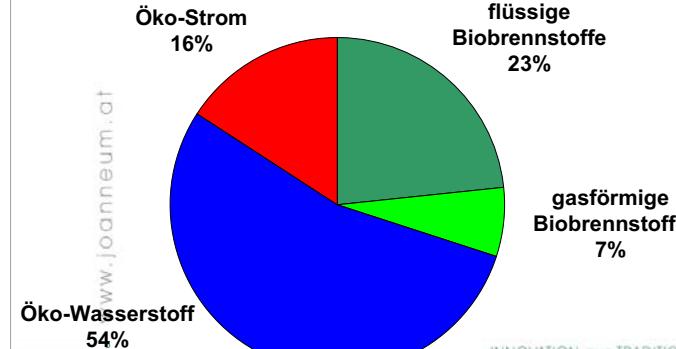
Optimale Anwendungsbereiche für Fahrzeuge mit erneuerbaren Treibstoffen

Fahrzeuggewicht

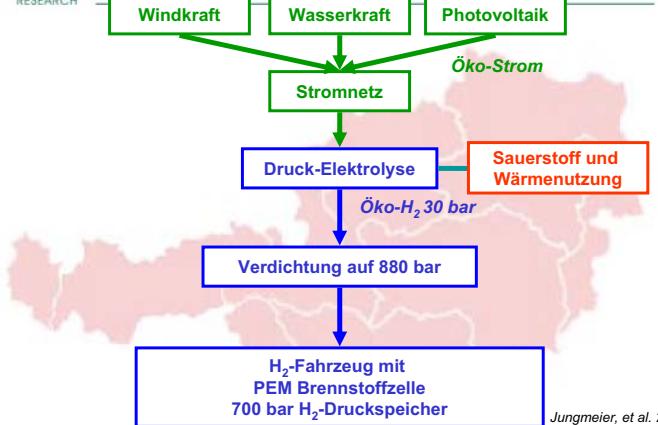


Endenergieträger Verkehr „Nachhaltiges Österreichisches Energiesystem 2050“

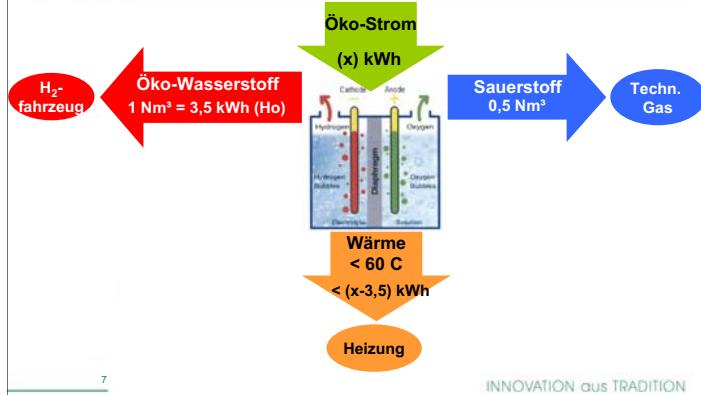
“Nachhaltiger“ Verkehrssektor Österreich 117 PJ/a (derzeit 320 PJ/a)



Langfristig interessante energiewirtschaftliche Option: Wasserstoff für Transportdienstleistung



Gekoppelte Erzeugung und Nutzung von Öko-Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme



7

Überblick

1. Gekoppelte Erzeugung und Nutzung von Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme
2. „Die Öko-Wasserstoff-Tankstelle der Zukunft“ – Demonstrationsprojekt am HyCentA
3. Projektergebnisse
 - i. Anlagenaufbau
 - ii. Messtechnische Evaluierung
 - iii. Öko-Wasserstoff-Tankstellen für erste Wasserstoff-Fahrzeug-Flotten in Österreich
4. Ausblick

INNOVATION aus TRADITION

8

Ziele des Demonstrationsprojektes

- Entwicklung und Aufbau von Schnittstellen zwischen dem Elektrolyseur und Nutzung von H₂ zum Betanken von Fahrzeugen
- Wärme zur Raumheizung
- Sauerstoff als technisches Gas (Schweißen)
- Integration eines Messsystems für die Messung des Wirkungsgrades in verschiedenen Systemgrenzen und bei unterschiedlichen Lastzuständen

INNOVATION aus TRADITION

9

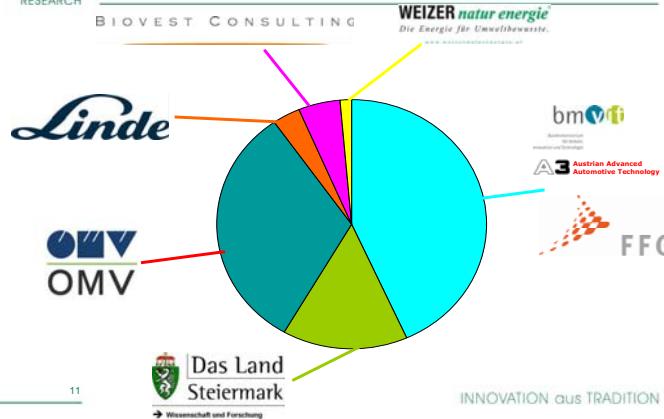
Integration am HyCentA, Graz (Hydrogen Center Austria)



www.joanneum.at

10

Finanzierung über Private-Public-Partnership



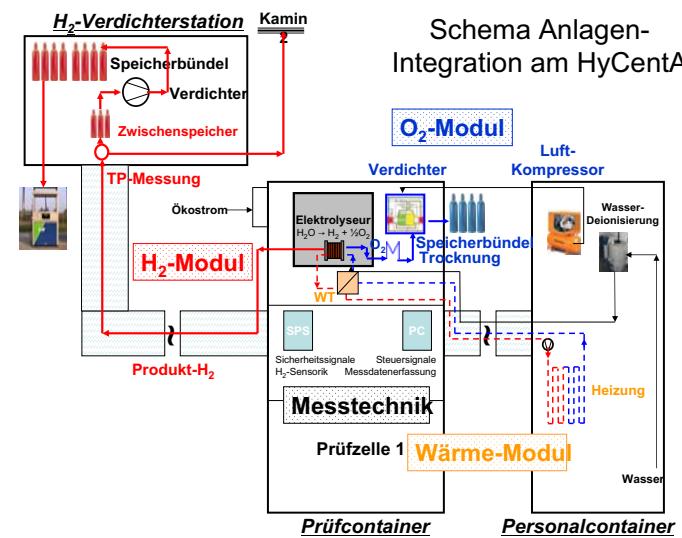
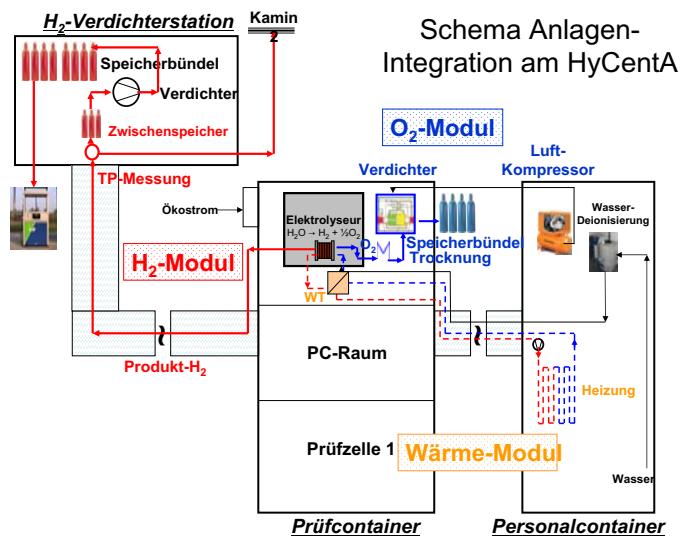
11

Überblick

1. Gekoppelte Erzeugung und Nutzung von Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme
2. „Die Öko-Wasserstoff-Tankstelle der Zukunft“ – Demonstrationsprojekt am HyCentA
3. Projektergebnisse
 - i. Anlagenaufbau
 - ii. Messtechnische Evaluierung
 - iii. Öko-Wasserstoff-Tankstellen für erste Wasserstoff-Fahrzeug-Flotten in Österreich
4. Ausblick

INNOVATION aus TRADITION

12

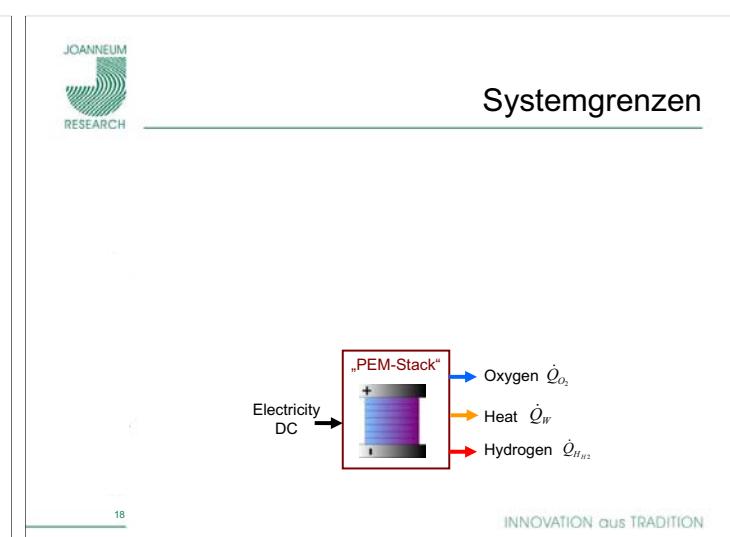
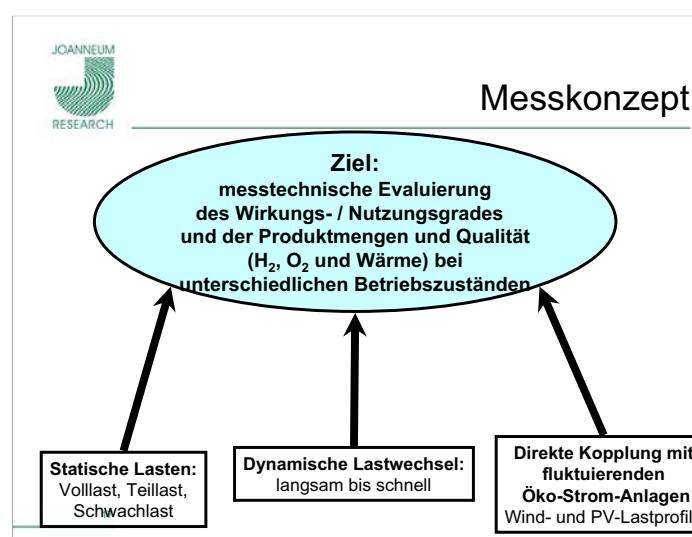


Überblick

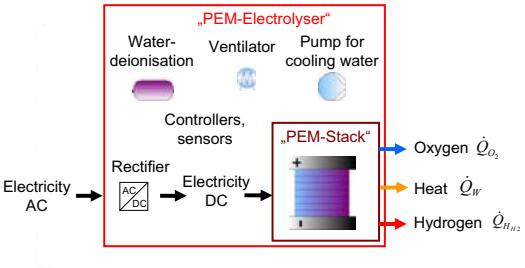
Detailed description: An overview slide with the JOANNEUM RESEARCH logo. It lists the project's main objectives and results:

1. Gekoppelte Erzeugung und Nutzung von Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme
2. „Die Öko-Wasserstoff-Tankstelle der Zukunft“ – Demonstrationsprojekt am HyCentA
3. Projektergebnisse
 - i. Anlagenaufbau
 - ii. Messtechnische Evaluierung
 - iii. Öko-Wasserstoff-Tankstellen für erste Wasserstoff-Fahrzeug-Flotten in Österreich
4. Ausblick

INNOVATION aus TRADITION



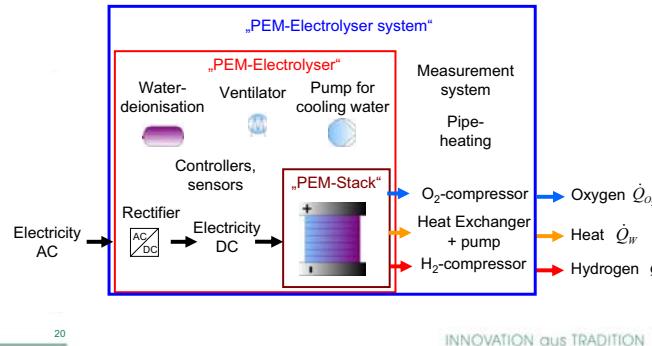
Systemgrenzen



19

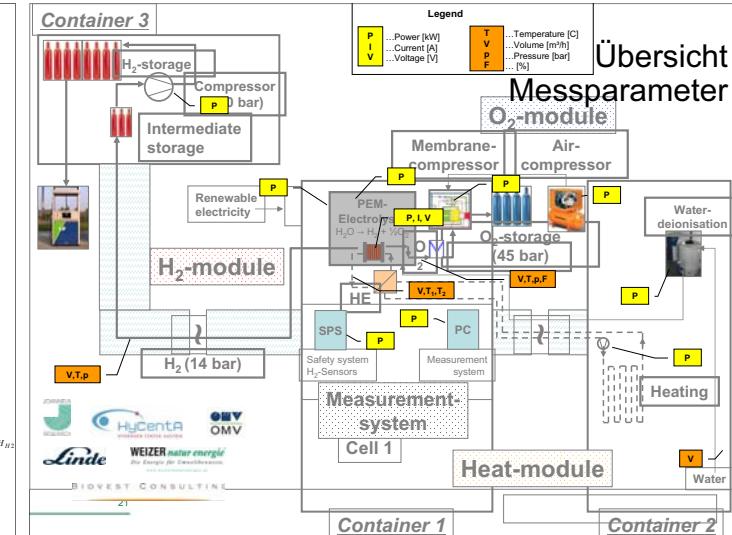
INNOVATION aus TRADITION

Systemgrenzen



20

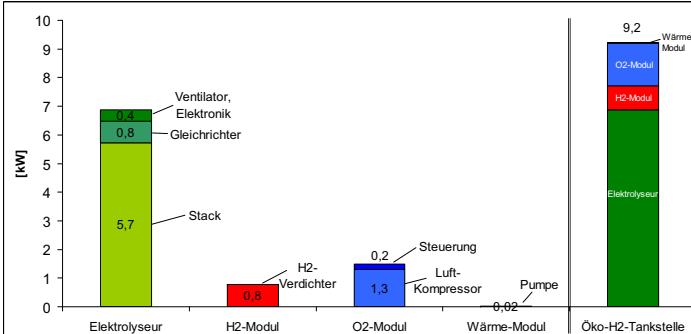
INNOVATION aus TRADITION



21

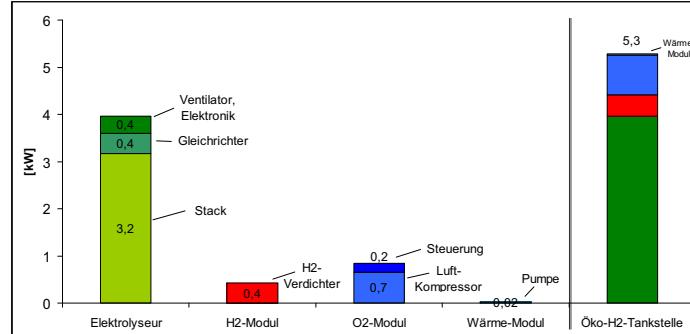
Übersicht Messparameter

Leistungen der stromverbrauchenden Komponenten bei Volllast (1 Nm³/h H₂)



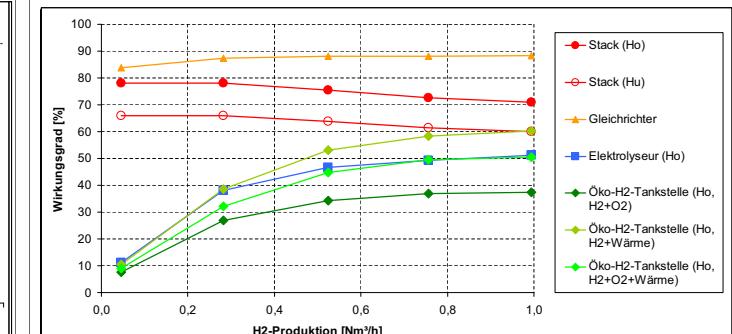
22

Leistungen der stromverbrauchenden Komponenten bei Teillast (0,5 Nm³/h H₂)



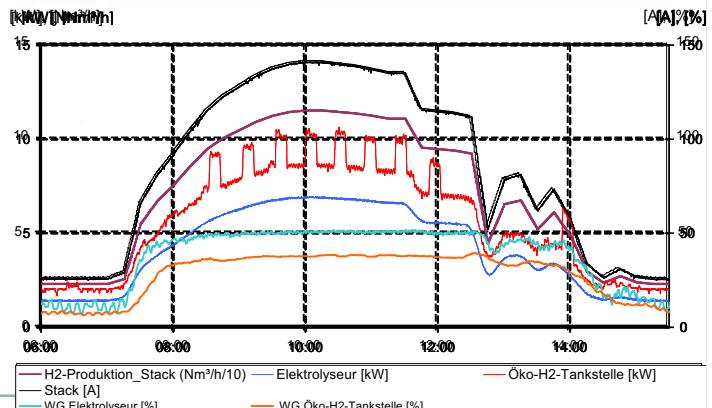
23

Wirkungsgrade bei unterschiedlichen statischen Lasten



24

Wirkungsgrad bei direkter Kopplung mit erneuerbarem Strom (PV-Profil)



Überblick

1. Gekoppelte Erzeugung und Nutzung von Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme
2. „Die Öko-Wasserstoff-Tankstelle der Zukunft“ – Demonstrationsprojekt am HyCentA
3. Projektergebnisse
 - i. Anlagenaufbau
 - ii. Messtechnische Evaluierung
 - iii. Öko-Wasserstoff-Tankstellen für erste Wasserstoff-Fahrzeug-Fleotten in Österreich
4. Ausblick

INNOVATION aus TRADITION

Gekoppelte Erzeugung und Nutzung von Öko-Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme

Mögliche Anwendungen i.d. Energiewirtschaft

	H ₂ – orientiert	O ₂ – orientiert	Wärme – orientiert
Produkt:	H ₂	O ₂	Wärme
Koppel-Produkte:	O ₂ und Wärme	H ₂ und Wärme	H ₂ und O ₂
Anwendung:	Autobahn-Tankstelle	Krankenhäuser, Metallindustrie	Autowaschanlage Wohnanlage

26

INNOVATION aus TRADITION

Festlegung von „Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen“

H₂ – orientiert

„Autobahn-Tankstelle klein“:
 → Elektrolyseur 10 Nm³/h
 → Tankleistung: 5 PKW/Tag bzw. 53 PKW gesamt

„Autobahn-Tankstelle groß“:
 → Elektrolyseur 200 Nm³/h
 → Tankleistung: 100 PKW/Tag bzw. 1.060 PKW ges.

INNOVATION aus TRADITION

O₂ – orientiert

„Krankenhaus 200 Betten“: O₂-Bedarf 220 Nm³ pro Bett und Jahr,
 Warmwasserbedarf 4 MWh / Bett und Jahr
 → Elektrolyseur 10 Nm³/h
 → Tankleistung: 5 PKW/Tag bzw. 53 PKW gesamt

„Krankenhaus 500 Betten“: O₂-Bedarf 220 Nm³ pro Bett und Jahr,
 Warmwasserbedarf 4 MWh / Bett und Jahr
 → Elektrolyseur 30 Nm³/h
 → Tankleistung: 15 PKW/Tag bzw. 159 PKW gesamt

„Krankenhaus 1000 Betten“: O₂-Bedarf 220 Nm³ pro Bett und Jahr,
 Warmwasserbedarf 4 MWh / Bett und Jahr
 → Elektrolyseur 50 Nm³/h
 → Tankleistung: 25 PKW/Tag bzw. 265 PKW gesamt

INNOVATION aus TRADITION

29

Standorte Krankenhäuser in Österreich

Legende:

- Staatsgrenzen
- Dekrete Zonen
- Grenzen der Versorgungszonen
- Sonder-KA (inkl. UH)
- Stadtkreise
- KA-Verbund



Festlegung von „Standard-Öko-Wasserstoff-Tankstellen“

Wärme-orientiert

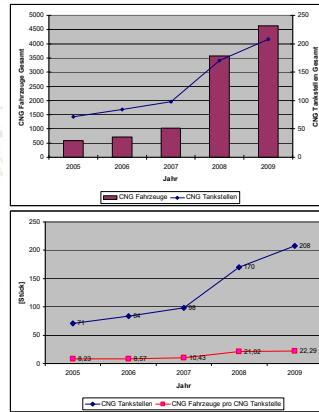
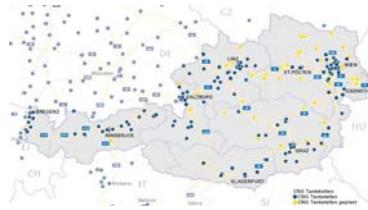
„Geschoßwohnbau“: 19 WE, Warmwasserbedarf 1,5 MWh / WE und Jahr
 → Elektrolyseur 4 Nm³/h
 → Tankleistung: 2 PKW/Tag bzw. 21 PKW gesamt

„Auto-Waschbox“: 4 Boxen, 20 Fahrzeuge / Box und Tag
 Warmwasserbedarf 10 kWh / h
 → Elektrolyseur 10 Nm³/h
 → Tankleistung: 5 PKW/Tag bzw. 53 PKW gesamt

INNOVATION aus TRADITION

Mögliche Entwicklung der Tankstellen-Infrastruktur für erste H2-Fahrzeugfлотten

CNG-Tankstellen in Österreich



Mögliche Entwicklung der Tankstellen-Infrastruktur für erste H2-Fahrzeugfлотten

100 Fahrzeuge in Graz



Mögliche Entwicklung der Tankstellen-Infrastruktur für erste H2-Fahrzeugfлотten

100 Fahrzeuge in Graz, Linz, Wien



Mögliche Entwicklung der Tankstellen-Infrastruktur für erste H2-Fahrzeugfлотten

1.000 Fahrzeuge in Graz, Linz, Wien



Mögliche Entwicklung der Tankstellen-Infrastruktur für erste H2-Fahrzeugfлотten

5.000 Fahrzeuge in Österreich



Mögliche Entwicklung der Tankstellen-Infrastruktur für erste H2-Fahrzeugfлотten

10.000 Fahrzeuge in Österreich



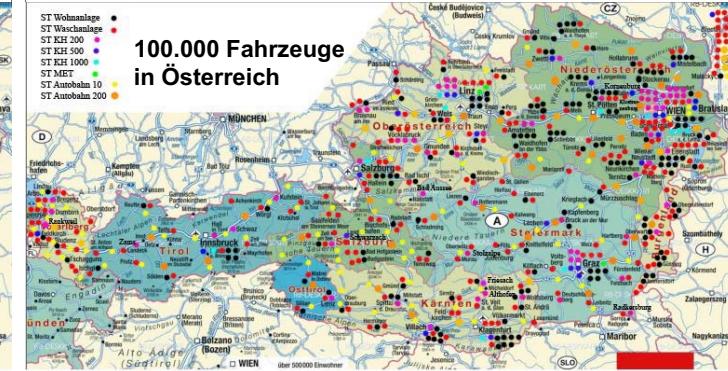
Mögliche Entwicklung der Tankstellen-Infrastruktur für erste H2-Fahrzeugfлотten

50.000 Fahrzeuge in Österreich



Mögliche Entwicklung der Tankstellen-Infrastruktur für erste H2-Fahrzeugfлотten

100.000 Fahrzeuge in Österreich



Überblick

1. Gekoppelte Erzeugung und Nutzung von Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme
2. „Die Öko-Wasserstoff-Tankstelle der Zukunft“ – Demonstrationsprojekt am HyCentR
3. Projektergebnisse
 - i. Anlagenaufbau
 - ii. Messtechnische Evaluierung
 - iii. Öko-Wasserstoff-Tankstellen für erste Wasserstoff-Fahrzeug-Fлотten in Österreich
4. Ausblick

Ausblick

- Ergebnis-Dokumentation „Die Öko-Wasserstoff-Tankstelle der Zukunft“ bis Ende 2010
- Vierte Österreichische Wasserstoff-Konferenz in Graz 21.September 2011
www.joanneum.at/ief/wasserstoff





Agenda



- 1. SAE J2601 New Standard / Concepts
- 2. Compression Products / Applications
- 3. Ionic Compressors New Technologies by Linde

09/02/2011

2

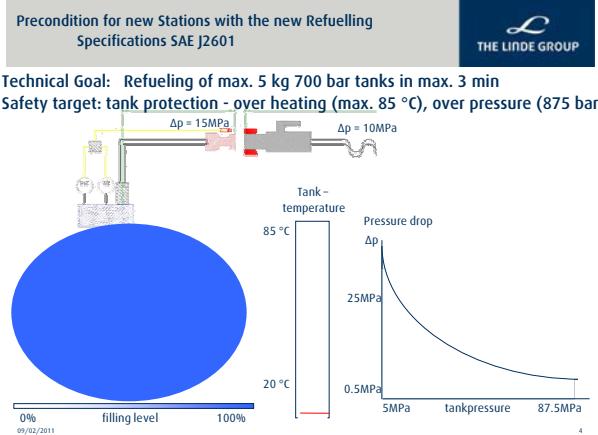
Topic



- 1. SAE J2601 New Standard / Concepts

09/02/2011

3



Refuelling Specification Regarding SAE J2601 Hardware



Necessary equipment: (Hardware)



Pic.1) Ultra Low Cold Fill Unit: Cooling temperature -40°C

09/02/2011

Refuelling Specification Regarding SAE J2601 Hardware



Pic. 2) Infrared Communication System:



Pic. 3) Pressure Ramping regulators:

09/02/2011

6

Dispenser SAE J2601



700 bar Nozzle:

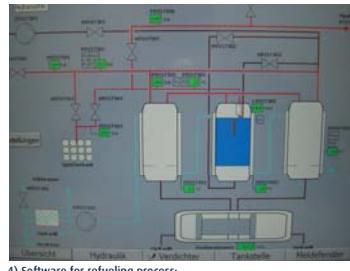
- Type: IK 17 IR
- Refueling protocol: SAE J2601

350 bar nozzle:

- Type: IK 16 and TK16 HF (bus)

09/02/2011

Refuelling Specification Regarding SAE J2601 Software



09/02/2011

DESIGN Example hydrogear Concept



Double compressor hydrogear - Version for low inlet pressure and Cold Fill



09/02/2011

Main technical data

- Delivery rate 300 Nm³/h
- Inlet pressure min. 2 bar
- Refueling time 3 min
- Recharge time 12 kg 28 min
- Refueling temperature -40°C
- The System [does fulfill SAE J2601](#)

9

Topic



2. Compression Products /Applications

09/02/2011

Hydrogen fueling Core technologies & product lines



Fueling Technology	Description	Capacity ¹	Pressure	Product Lines
Dry-Runner	Lubricant free piston compression	50 – 250 Nm ³ /h	450/900 bar	Mini Fueler 90 Max Fueler 90 High Flow Fueler 45 High Flow Fueler 90
Ionic	Ionic liquid as piston for compression.	140 – 4.000 Nm ³ /h	420/450/ 900 bar	Ionic Fueler 42 Ionic Fueler 45 Ionic Fueler 90 H Ionic Fueler 90 Plus
Cryo Comp.	Processes liquid and gaseous hydrogen feed	< 3.500 Nm ³ /h	400/450 bar	Cryo Fueler 40 Cryo Fueler 45
Cryo Pump	Processes liquid hydrogen feed	≤ 1.440 Nm ³ /h	450/900 bar	Cryo Pump 45 Cryo Pump 90
Sourced	Other (mainly membrane)	Aprr. 60 Nm ³ /h	450/900 bar	FuelH 45

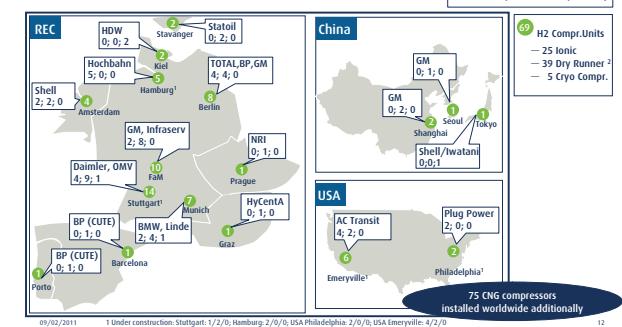
1 Capacity @ 900bar compression with exception of Cryo Pump & Cryo Comp. In booster mode capacity increases up to 36.000Nm³/h for dry runner
2 Process gas compressor with 6000 Nm³/h under development

10

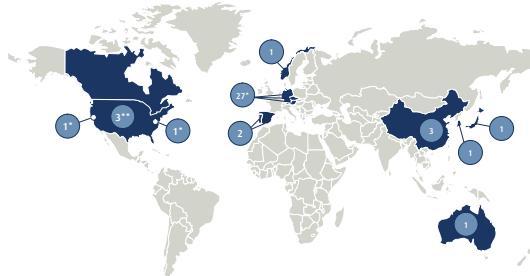
Overview of H2 compression units delivered



So far strongly focused on European markets



Hydrogen refuelling stations installed by LINDE



09/02/2011
Note: Numbers refer to fixed & mobile H2 stations
* Under construction: Germany 2 stations, USA 2 stations
** Fork lift H2 stations in USA

13

Topic

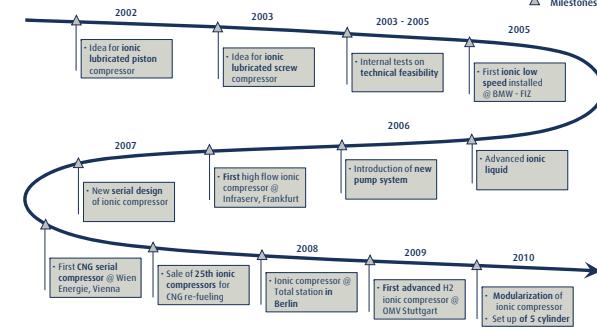


3. Ionic Compressors / New Technologies by Linde

09/02/2011

14

Linde has systematically developed its distinct ionic compressor technology over the last years



09/02/2011

15

Development steps ionic compressor system: performance increase

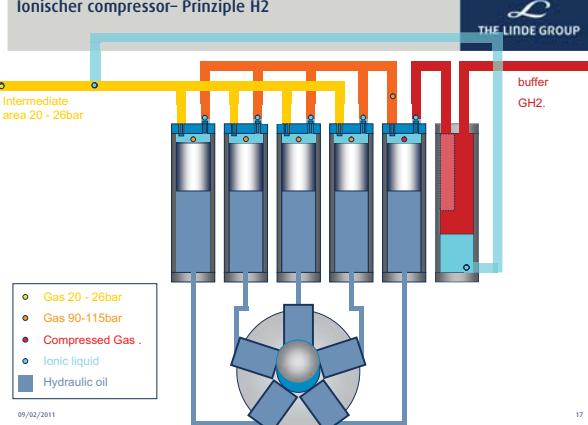


	Dry Runner	hydrogear	5 cylinder	Target specification
Pressure ratio	> 2 to 875 bar_a (incl. pre compressor)	> 2 to 900 bar_a (incl. pre compressor)	≤ 5 to 900 bar_a (no pre compressor required)	
Pressure steps	5 steps ¹	3 steps ¹	5 steps ²	
Volume flow	1 x 200 Nm ³ H2/h	2 x 150 Nm ³ H2/h	1 x 400 Nm ³ H2/h	
Driving power ³	45 kW	160 kW	75 kW	
Drive train frequency	~ 0,5 Hz	~ 1,0 Hz	> 5,0 Hz	
System footprint	20 ft container	20 ft container	10 ft container (space only used by ~ 50%) ⁴	

¹ Dry runner: 1st step in pre compressor (> 2 - 25 bar_a), 2nd to 5th step in main compressor cylinders; OMV station: 1st step in pre compressor (> 2 - 25 bar_a);
2nd & 3rd step in main compressor unit
² 1st & 2nd step in main compressor unit
³ Refers to main compressor unit for dry runner & OMV station @ 25 bar_a inlet pressure of H2 flow; in case of 5 cylinder concept: @ 5 bar_a inlet pressure of H2. 16
⁴ Ability to house second 1 x 400 Nm³ H2/h compressor train

09/02/2011 1 Pre compression: one compression step; main compression: two compression steps
2 Pre compressor = 1 x 45 kW; main compressor = 2 x 30 kW; peripherals = 1 x 5 kW

Ionic compressor- Principle H2



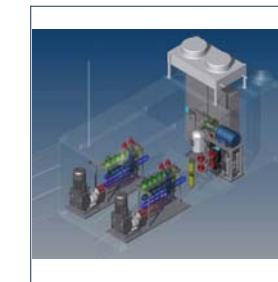
09/02/2011

17

exemplary H2 compression Containerized IC 50



Containerized IC 50



Technical properties

- Type: 3 stage compression¹
- Compression concept: ionic compressor
- Min. inlet pressure: 2,5 bar_a
- Max. output pressure: 500 bar
- Max. capacity : 290 Nm³ H2/h
- Input power @ 2,5 bar_a inlet: 45 kW + 2 x 30 kW + 5 kW peripherals²
- Footprint: 20' container

09/02/2011 1 Pre compression: one compression step; main compression: two compression steps
2 Pre compressor = 1 x 45 kW; main compressor = 2 x 30 kW; peripherals = 1 x 5 kW

18

Deep dive Ionic compressor



Ionic compressor unit



09/02/2011

Technical properties

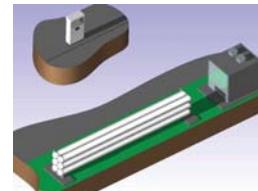
- Type: 5-stage ionic compressor
- Operating medium: Ionic liquid
- Min. inlet pressure: 9 barg
- Max. output pressure: 1.000 barg (intermediate pressure tapping after 2. (~50 barg) and 4. (~450 barg) stage)
- Footprint: 10 " container
- Max. capacity : 406 Nm³/h

19

Footprint optimized hydrogen gas compressor system with compresses hydrogen on-site storage - I

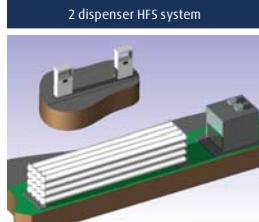


1 dispenser HFS system



09/02/2011

2 dispenser HFS system



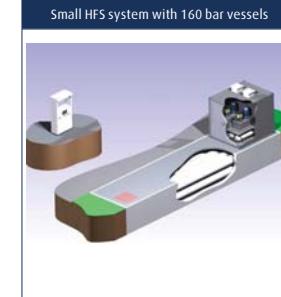
Easy upgrade from 1 to 2 dispenser HFS system enabled via pre-installation of basic hardware components
Underground installation of on-site storage possible as well

20

Cost- & footprint optimized hydrogen gas compressor system with compresses hydrogen on-site storage - II

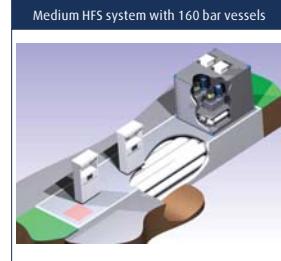


Small HFS system with 160 bar vessels



09/02/2011

Medium HFS system with 160 bar vessels



21

Reference projects Linde Gas/ATZ (SAE-J2601 plants)



09/02/2011



22

Projects ATZ, Agip Frankfurt In operation



09/02/2011

Accessibility: Public

Start of operation: 2006

Dispensing lines: 1 x 700 bar
1 x 350 bar
1 x LH2

Technology: Ionic Compression

H2 source: LH2 storage tank
900 bar pipeline

Customer:
 

23

Reference projects Linde Gas/ATZ, Iwatani Tokyo



09/02/2011

Accessibility: Public

Start of operation: 2003

Dispensing lines: 1 x 350 bar

Technology: CryoCompressor

H2 source: LH2 storage tank

Customer: Iwatani

Iwatani

24

Reference projects Linde Gas/ATZ, OMV Stuttgart



Accessibility: Public

Start of operation: 2009

Dispensing lines: 1 x 700 bar
1 x 350 bar

Technology: Ionic Compression
Hydrogear

H2 source: 50 bar storage tank

Customer:



09/02/2011

* Excluding ATZ margin

25

Reference projects Linde Gas/ATZ, Vattenfall Hamburg



Accessibility: Public

Start of operation: 2011

Dispensing lines: 1 x 700 bar car
1 x 350 bar car
1 x 350 bar bus

Technology: Ionic Compression (2x)

H2 source: Electrolysis
GH2 storage tank

Customer:



09/02/2011

26

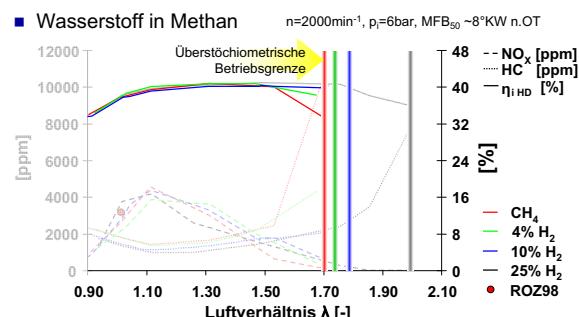
Thank you for your attention.

Leading.



Experimentelle Untersuchungen

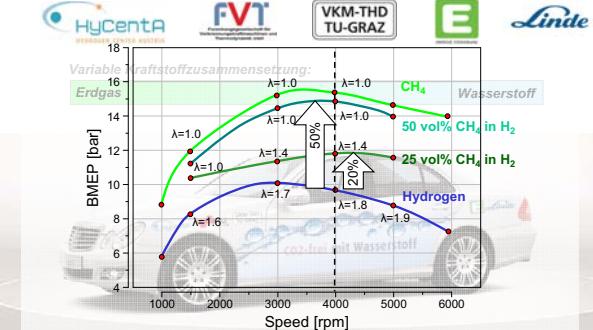
Emissionen und Wirkungsgrad



Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
Technische Universität Graz

Trivales Fahrzeugkonzept

Abdeckung aller Stadien einer möglichen Infrastrukturentwicklung



Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
Technische Universität Graz

Adaptierte Fahrzeuge

Mercedes E200 NGT

- 1.8 l Ottomotor
- Kompressoraufladung
- Leistung / Drehmoment:
Benzin: 120 kW / 240 Nm
H2: 70 kW / 150 Nm



Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
Technische Universität Graz

Mitsubishi Evolution IX

- 2 l Ottomotor
- Turboaufladung
- Leistung / Drehmoment:
Benzin: 156 kW / 350 Nm
H2: 115 kW / 225 Nm



HyCentA
Hydrogen Center Austria

Motorseitige Adaptionen

Mercedes E200 NGT

- Injektoren, Rail, Saugrohr
- Neubedatung beider ECUs (drehmomentengeführt)
- Luftzufuhr
- Zündung



Mitsubishi Evolution IX

- Injektoren, Rail, Saugrohr
- Abgaskrümmer
- Turbolader, Wastegate
- Elektronische Drosselklappe
- Neue Motorsteuerung



Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
Technische Universität Graz

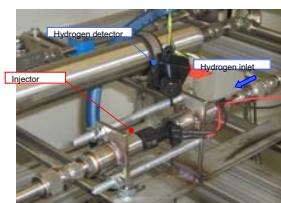
Komponenten

Saugrohr



Injektorprüfstand (Werkstoff, Schmierung)

- Innere Leckage
- Äußere Leckage
- Dauerläufe
- Durchflusskennfeld



Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
Technische Universität Graz

Fahrzeugseitige Adaptionen

Kraftstoffversorgungssystem mit

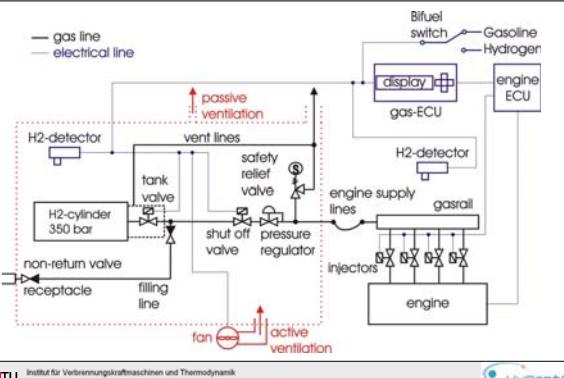
- Typ 3 Tanks für 350 bar H₂
 - Mercedes: 1.7 kg H₂ (56.6 kWh)
 - Mitsubishi: 2.4 kg H₂ (78.9 kWh)
- Rohrleitungen aus Wasserstoff - kompatiblen Werkstoffen
- Druckregelung
- Mechanische und thermische Sicherheitseinrichtungen
- Gasdichte Hülle mit Entlüftungssystem
- Elektronisches Gassicherheitssystem



Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
Technische Universität Graz

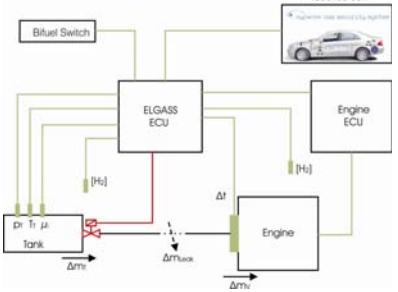
HyCentA
Hydrogen Center Austria

Schema Kraftstoffversorgungssystem



ELGASS - Elektronisches Gassicherheitssystem

- Gasdetektion
- Umschaltung
- Gasmasse
- Gasverbrauch
- Dictheit
- Infoscreen

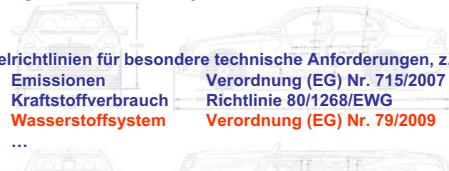


ELGASS im Mercedes



EU-Typengenehmigung von Fahrzeugen

Rahmenrichtlinie 2007/46/EG für die Typengenehmigung von Fahrzeugen, Bauteilen und Systemen für den Einsatz in Fahrzeugen



Verordnung (EU) Nr. 406/2010 zur Durchführung der Verordnung 79/2009 über die Typengenehmigung von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen

Normen und Standards

- UNECE – United Nations Economic Commission for Europe (56 Mitglieder)
Ende 2003 wurden innerhalb des UNECE-Bereiches „Transport division“ zwei Wasserstoff - Arbeitsgruppen gegründet
SGE: Subgroup on Environment
SGS: Subgroup on Safety
- ISO - Internationale Organisation für Normung
Mitglieder: 169 Normungsinstitutionen
Normungsarbeit für Wasserstofftechnologien erfolgt innerhalb des **TC197** (dzt. 16 Normen)



Zusammenfassung Gemische CNG / H2 in VKM

- Reduktion von CO₂-Emissionen
- Magerbetrieb für höheren Wirkungsgrad
- Vergrößerte Reichweite
- Synergien bei Komponenten und Infrastruktur
- Modifikationen am Motor und Fahrzeug, moderate Kosten

VKM:

- einfach, robust, langlebig
- hohe Leistungsdichte
- vielstofffähig
- niedrige Baukosten (30 € / kW)

Pressepräsentation 4. Sept. 2009

Erstes Fahrzeug für Mischbetrieb Benzin / Wasserstoff / Erdgas

FVT

Linde

E



Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
Technische Universität Graz

HyCentRA
Hydrogen Energy Center

Literaturhinweise

Eichlseder, H.; Klell, M.: **Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik**. 2. Auflage, Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2010

Klell, M.: **Thermodynamik des Wasserstoffs**. Habilitationsschrift, TU Graz 2010

Klell, M.; Eichlseder, H.; Sartory, M.: Variable mixtures of hydrogen and methane in the internal combustion engine of a prototype vehicle: regulations, safety and potential.
Int. J. Vehicle Design, Vol. 54, No 2, pp 137 – 155, 2010

Eichlseder, H.; Klell, M.; Schaffer, K.; Leitner, D.; Sartory, M.: Potential of Synergies in a Vehicle for Variable Mixtures of CNG and Hydrogen.
SAE Paper 2009-01-1420, 2009

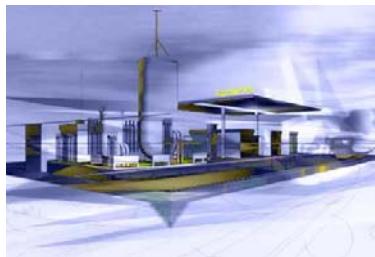


Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
Technische Universität Graz

HyCentRA
Hydrogen Energy Center

8.5 Präsentationen HyCentA zu Fahrzeugen Mercedes und Mitsubishi

**Verordnungen und Richtlinien für die Genehmigung von
Wasserstofffahrzeugen – Überblick und Umsetzung an zwei
Prototypenfahrzeugen mit Verbrennungsmotor**



M. Sartory, M. Kiehl
HyCentA Research GmbH
5. Gasfahrzeugtagung, Berlin, 1. Oktober 2010

Inhalt

- Einleitung
- Regelwerke für H₂-Fahrzeuge
 - EU - Vorschriften
 - UNECE - Richtlinien
 - ISO - Normen
- Aufbau zweier Prototypenfahrzeuge
 - Fahrzeuge
 - Fahrzeugadaptionen
 - Elektronisches Gassicherheitssystem
 - Straßenzulassung in Österreich
- Zusammenfassung
- Literatur



**Einleitung
Hydrogen Center Austria (HyCentA)**



Erstes österreichisches **Forschungszentrum für Wasserstoff** mit
Abgabestellen für LH₂ und CGH₂, eröffnet Oktober 2005



3

**Einleitung
Kernkompetenzen und Aktivitäten**

- **Prüftätigkeit** mit kundenspezifischen Aufbauten und elektronischer Prozessregelung für LH₂ und GH₂
- Wasserstoff in **Grundlagenforschung, industrieller Forschung und Lehre**
- **Thermodynamische Analyse** von Prozessen und Systemen
- **Sicherheitsfragen und Standards**
- **Öffentlichkeitsarbeit**

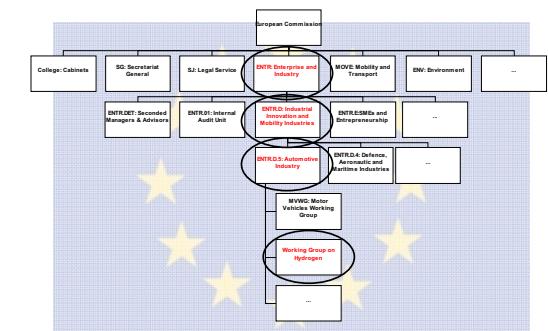


4

Regelwerke für H₂-Fahrzeuge



**EU - Vorschriften
Working Group on Hydrogen**



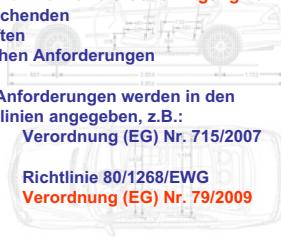
6

EU - Vorschriften EU-Typengenehmigung von Fahrzeugen



Rahmenrichtlinie 2007/46/EG für die Typengenehmigung von Fahrzeugen, Bauteilen und Systemen für den Einsatz in Fahrzeugen

- Schafft **harmonisierten Rahmen für die Genehmigung von Fahrzeugen mit entsprechenden Verwaltungsvorschriften und allgemeinen technischen Anforderungen**
- Besondere technische Anforderungen werden in den zugehörigen Einzelrichtlinien angegeben, z.B.:
 - Emissionen Verordnung (EG) Nr. 715/2007
 - CO₂-Emissionen/
Kraftstoffverbrauch Richtlinie 80/1268/EWG
 - **Wasserstoffsystem** Verordnung (EG) Nr. 79/2009
 - ...



7

EU - Vorschriften Verordnung für Wasserstoffsysteme



Verordnung (EG) Nr. 79/2009 für die Typengenehmigung von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen

- **Inhalt**
 - Pflichten der Hersteller
 - Allgemeine Vorschriften für Wasserstoff führende Bauteile
 - Vorschriften für Kraftstoffbehälter und Kraftstoff führende Bauteile für flüssigen und gasförmigen, komprimierten Wasserstoff
 - Grundlegende Vorschriften für den Einbau von Wasserstoff führenden Bauteilen und Wasserstoffsystmen
- **Inkrafttreten: 24. Februar 2009**
- **Typengenehmigungsvorschriften verbindlich ab 24. Februar 2011**



8

Europäische Union Verordnung für Wasserstoffsysteme



Verordnung (EU) Nr. 406/2010 zur Durchführung der Verordnung 79/2009 über die Typengenehmigung von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen

- **Inhalt**
 - Verwaltungsvorschriften für die EG-Typengenehmigung
 - Regelungen über die vom Hersteller zu machenden Angaben
 - Ausführliche Regelungen über Prüfverfahren und den Einbau von Wasserstoff führenden Bauteilen und Systemen
 - Ausführliche Regelungen für den sicheren Betrieb von Wasserstofffahrzeugen
 - Ausführliche Regelung zur Etikettierung für die eindeutige und schnelle Identifikation von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen
- **Inkrafttreten: 07. Juni 2010**



9

EU - Vorschriften Verordnungen für Wasserstoffsysteme



- **Notwendige Adaptionen** bestehender Verordnungen und Richtlinien für Wasserstofffahrzeuge

Gegenstand	Einzelverordnung/-richtlinie
CO ₂ -Emissionen/Kraftstoffverbrauch	Richtlinie 80/1268/EWG
Motorleistung	Richtlinie 80/1269/EWG
Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5/Euro 6)	Verordnung (EG) Nr. 715/2007 (inklusive Durchführungsverordnung (EG) Nr. 692/2008)
Emissionen (Euro VI) schwerer Nutzfahrzeuge/Zugang zu Informationen	Verordnung (EG) Nr. 595/2009 (inklusive Durchführungsverordnung)
Wiederverwendbarkeit, Recyclingfähigkeit und Verwertbarkeit von Bauteilen	Richtlinie 2005/64/EG

10

EU - Vorschriften Verordnungen für Wasserstoffsysteme



- **CO₂-Emissionen/Kraftstoffverbrauch** (Richtlinie 80/1268/EWG)
 - CO₂-Emissionen nicht zutreffend
 - C-basiertes Messprinzip für Kraftstoffverbrauch nicht geeignet
- **Motorleistung** (Richtlinie 80/1269/EWG)
 - Anpassung speziell für H₂-FC Hybridfahrzeuge nötig
- **Emissionen** (Verordnung 715/2007 und 595/2009)
 - C-basierte Emissionslimits nicht zutreffend
 - C-basierte Berechnungsmethode der Massenemissionen bei CVS-Messungen nicht geeignet
 - NO_x-Limits bei Verbrennungskraftmotoren nötig
 - NH₃-Limits bei NO_x-Nachbehandlungssystemen nötig
- **Recycling** (Richtlinie 2005/64/EG)
 - Erweiterung speziell für Brennstoffzellenbauteile nötig

11

UNECE - Richtlinien Hintergrund



- **UNECE: Vereinte Nationen - Wirtschaftskommission für Europa** (eine von 5 regionalen Wirtschaftskommissionen der UN)
- **56 Mitgliedsstaaten**
 - Europäische Union
 - Nicht EU-Mitgliedsstaaten
 - Nordamerika (Kanada, USA)
 - Zentralasiatische Länder
- **Sitz in Genf**
- **Ziel**
 - Förderung der wirtschaftlichen Zusammenarbeit der Mitgliedsländer

12

UNECE - Richtlinien UNECE ↔ Europäische Union



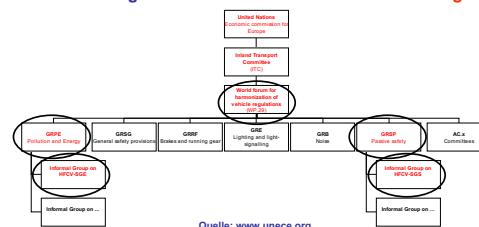
- **Ziele EU:** Förderung der Globalisierung des technischen Rechtsrahmen zur Stärkung der internationale Wettbewerbsfähigkeit
 - dies geschieht u. a. auf Basis der UNECE Übereinkommen von 1958 und 1998
- **Übereinkommen von 1958 → ECE - Richtlinien**
 - Internationale technische Harmonisierung im Kraftfahrzeugsektor
 - Richtlinien durch Mehrheitsabstimmung beschlossen
- **Parallelübereinkommen 1998 → GTRs**
 - Entwicklung von Globalen Technischen Richtlinien (GTRs)
 - auch von Staaten unterzeichnet, die das Übereinkommen von 1958 nicht unterzeichnet haben
 - Richtlinien durch Konsens aller Beteiligten beschlossen

13

UNECE - Richtlinien GTR für Wasserstofffahrzeuge



- Ende 2003 wurden innerhalb der UNECE-Abteilung „Transport division“ zwei **Wasserstoff-Arbeitsgruppen** gegründet
 - SGE: Subgroup on Environment
 - SGS: Subgroup on Safety
- **Ziel:** Erarbeitung von **Richtlinien für Wasserstofffahrzeuge**



14

UNECE - Richtlinien GTR für Wasserstofffahrzeuge



- 2005: Zustimmung von **WP.29/AC.3** zum Projektentwurf Deutschlands, Japans und der USA eine **GTR für Wasserstofffahrzeuge** zu erarbeiten

➤ Grundlage für die GTR

- Bereits etablierte Wasserstoffrichtlinien Japans, Amerikas und Europas
 - z.B. EIHP-Richtlinien (www.eihp.org) für GH₂- und LH₂-Wasserstoffsysteinen in Fahrzeuge

➤ Geplanter Anwendungsbereich

- Brennstoffzellenfahrzeuge
- Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor
- für flüssigen und gasförmig, komprimierten Wasserstoff

- **Aktueller Stand H₂-GTR:** siehe www.unece.org

15

ISO - Normen TC197 Wasserstofftechnologien



- Internationale Organisation für Normung
 - Mitglieder: 169 Normungsinstitutionen
- Innerhalb der ISO sind technische Komitees für die Erarbeitung von Normen zuständig
- Normungsarbeit für Wasserstofftechnologien erfolgt innerhalb des **TC197**
 - 20 mitarbeitende Staaten
 - Aktuell **16 Normen** erarbeitet im Bereich
 - Wasserstoffspeicher für LH₂, GH₂
 - Spezifikationen für Wasserstoff als Kraftstoff
 - Befüllkupplungen für Wasserstoff
 - Wasserstoffbetankungsanlagen
 - Richtlinien für den sicheren Umgang mit Wasserstoff
 - Wasserstoffdetektoren

16

Aufbau zweier Prototypenfahrzeuge



17

Fahrzeuge



Mercedes E200 NGT

- 1.8 l Ottomotor
- Kompressoraufladung
- Leistung / Drehmoment:
 - Benzin: 120 kW / 250 Nm
 - H₂: 69 kW / 150 Nm



Mitsubishi Evolution IX

- 2 l Ottomotor
- Turboaufladung
- Leistung / Drehmoment:
 - Benzin: 156 kW / 350 Nm
 - H₂: 115 kW / 225 Nm



18

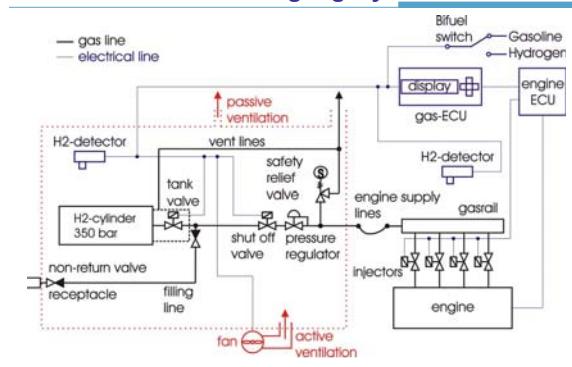
Fahrzeugadaptionen

- Motorseitige Adaptionen siehe anschließenden Vortrag
- Kraftstoffversorgungssystem mit
 - Typ 3 Tanks für 350 bar H₂
 - Mercedes: 1.7 kg H₂ (56.6 kWh)
 - Mitsubishi: 2.4 kg H₂ (78.9 kWh)
 - Rohrleitungen aus Wasserstoff - kompatiblen Werkstoffen
 - Druckregelung
 - mechanischen, thermischen Sicherheitseinrichtungen
 - H₂-tauglichen Einblasdüsen
 - Gasdichte Hülle mit Entlüftungssystem
 - Elektronisches Gassicherheitssystem



19

Fahrzeugadaptionen Schema Kraftstoffversorgungssystem



20

Prototypenfahrzeuge Zulassungsprozess

- Konstruktion und Ausführung der Gasanlagen in Anlehnung an
 - Einzelverordnung (EG) Nr. 79/2009
 - Regelwerke für Erdgasfahrzeuge: OVGW G95 (ECE-R-110 u. 115)
- Technisches Gutachten:
 - TÜV Austria Automotive
- Abnahme des Fahrzeuges durch die Fachabteilung 17B – Kraftfahrtwesen und Sicherheitsdienst des Landes Steiermark
- Ausstellung des Einzelgenehmigungsbescheids
 - Rechtsgrundlage §28 und §34 des Kraftfahrgesetzes 1967, BGBl. Nr. 267/1967 i.d.g.F.



22

Prototypenfahrzeuge Pressepräsentation 4. Sept. 2009



23

Elektronisches Gassicherheitssystem am Beispiel Mercedes



21

Prototypenfahrzeuge Mitsubishi Evolution IX Bifuel

- TÜV Abnahme erfolgreich durchgeführt



24

Zusammenfassung



- **Grundlegender Rahmen für die EG-Typengenehmigung von CGH2 und LH2-Fahrzeugen wurde erarbeitet:**
 - Verordnung (EG) Nr. 79/2009 für die Typengenehmigung von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen
 - Verordnung (EU) Nr. 406/2010 zur Durchführung der Verordnung 79/2009 über die Typengenehmigung von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen
- **Weitere Anpassung von Einzelrichtlinien für die EG-Typengenehmigung muss erfolgen:**
 - Emissionen, Kraftstoffverbrauch, Leistungsmessung, Recycling, usw.
- **EIHP - Richtlinien mit grundlegenden Sicherheitsanforderungen für GH2- und LH2-Kraftstoffanlagen existieren**
- **Einzelne ISO Normen für Wasserstofftechnologien existieren**
- **Globale technische Richtlinie für Wasserstofffahrzeuge ist in Arbeit**

25

Literatur



- Kiell, M.; Eichlseder, H.; Sartory, M.: *Variable mixtures of hydrogen and methane in the internal combustion engine of a prototype vehicle: regulations, safety and potential*, Int. J. Vehicle Design, Vol. 54, No 2, pp 137 – 155
- Eichlseder, H.; Kiell, M.; Schaffer, K.; Leitner, D.; Sartory, M.: *Potenzial eines Fahrzeugs für variablen Erdgas/Wasserstoff-Mischbetrieb*, ATZ / MTZ - Konferenz - Energie 2010, CO2 - Die Herausforderung für unsere Zukunft, 26.-27. Jänner 2010, München, 2010
- Eichlseder, H.; Kiell, M.; Schaffer, K.; Leitner, D.; Sartory, M.: *Potential of Synergies in a Vehicle for Variable Mixtures of CNG and Hydrogen*. SAE Paper 2009-01-1420 in: Hydrogen IC Engines, SP-2251, ISBN 978-0-7680-2147-9, S. 19 – 28, SAE International 2009
- Eichlseder, H.; Kiell, M.: *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik*. Vieweg+Teubner, Wiesbaden, ISBN 9783834810274, 2010

26

Danke für Ihre
Aufmerksamkeit!



DI Markus Sartory

HyCentA Research GmbH

Addresse: Inffeldgasse 15
A-8010 Graz

Tel: +43-316-873-9507
Fax: +43-316-873-9502
Web: www.hycenta.at
Email: sartory@hycenta.at

27

Bivalenter Fahrzeugprototyp für Wasserstoff und Benzin als Übergangstechnologie zur Wasserstoffwirtschaft



Christof Hepp, Daniel Leitner, Prof. H. Eichlseder

1 Christof Hepp Berlin, 01.10.2010 Gasfahrzeuge

Übersicht

- Eigenschaften von Wasserstoff
- Motivation – Warum bivalexe Fahrzeuge?
- Brennverfahren für Wasserstoff
- Emissionsstrategien
- Aufladung für bivalexe Wasserstoff/Benzinmotoren
- Wirkungsgrade
- Prototypenfahrzeuge am IVT/FVT
- Zusammenfassung

2 Christof Hepp Berlin, 01.10.2010 Gasfahrzeuge

Eigenschaften von H₂ und Benzin

Bei 1.013 bar, 273 K

Eigenschaften	Einheit	H ₂	Benzin
Dichte, ρ	kg/m ³	0.09	730–780
Zündgrenzen in Luft a)	vol. %	4–76	1–7.6
Minimale Zündenergie	mJ	0.2	0.24
Selbstzündungstemperatur	°C	585	230–450
Lam. Flammengeschwindigk. bei $\lambda = 1$	cm/s	230	40
Dichte bei stöch. Mixtur, ρ_{mix}	kg/m ³	0.94	1.42
Luftbedarf stöch., L_{st}	–	34.3	14.1
Unterer Heizwert, H_u	MJ/kg	120	42.1
Gemischheizwert, H_{mix}	MJ/m ³	3.2 b)	3.8 b)
		4.5 c)	3.9 c)

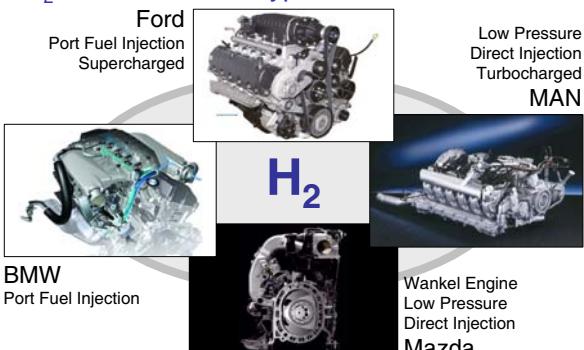
a) bei 293 K

b) Saugrohreinspritzung

c) Direkteinspritzung

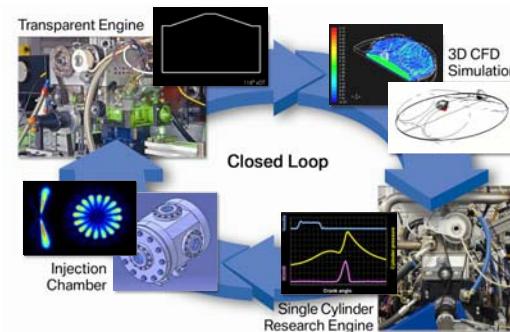
3 Christof Hepp Berlin, 01.10.2010 Gasfahrzeuge

H₂-Motoren in Prototypen u. Kleinserie



4 Christof Hepp Berlin, 01.10.2010 Gasfahrzeuge

Entwicklungswerkzeuge



5 Christof Hepp Berlin, 01.10.2010 Gasfahrzeuge

Motivation

→ Warum H₂ als Energieträger?

- CO₂-frei (bei Herstellung aus erneubaren Energieträgern)
- Begrenzte fossile Energiereserven
- Gute Eigenschaften für motorische Verbrennung
- Geringe Emissionen

6 Christof Hepp Berlin, 01.10.2010 Gasfahrzeuge

Bivalente Wasserstofffahrzeuge

Konventionelle Ottomotoren



Bi-fuel Ottomotoren

"Transitionprocess"

Hydrogen Fuel Cells



Christof Hepp

Berlin, 01.10.2010

Gasfahrzeuge

7

Versuchsträger – Mitsubishi Lancer Evolution IX

Merkmale:

- Hubraum 1997ccm
- 16V DOHC
- Twin scroll Turbo mit Wastegate
- Ladeluftkühlung
- Äußere Gemischbildung
- Verdichtungsverhältnis 8.8
- Hub/Bohrung 88mm/85mm
- Phasenverstellung der Einlassnockenwelle (MIVEC)
- Mechanische Drosselklappe
- Waste Spark Zündanlage
- 206kW / 6500rpm
- 355Nm / 3500rpm



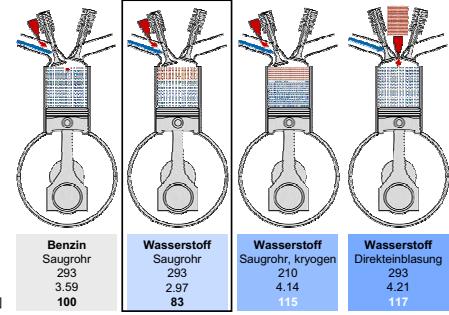
Christof Hepp

Berlin, 01.10.2010

Gasfahrzeuge

8

Brennverfahren - Leistungsdichte

Vergleich H₂ und Benzin

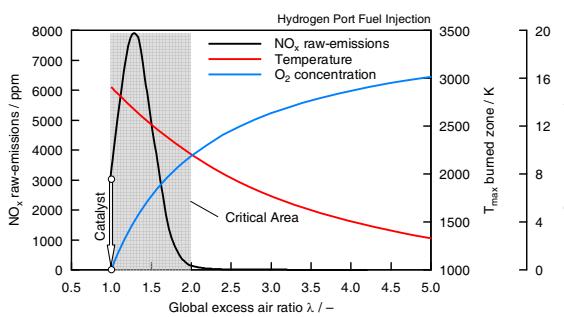
Christof Hepp

Berlin, 01.10.2010

Gasfahrzeuge

9

Brennverfahren - Emission



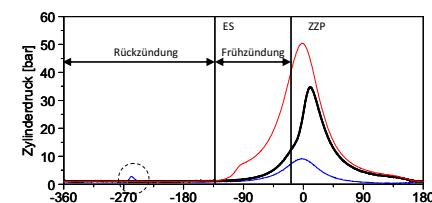
10

Christof Hepp

Berlin, 01.10.2010

Gasfahrzeuge

Brennverfahren für Wasserstoff - Anomalien



Stoichiometrischer Betrieb kann nur schwer erreicht werden!

11

Christof Hepp

Berlin, 01.10.2010

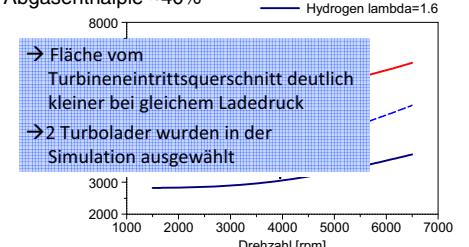
Gasfahrzeuge

Aufladung von bivalenten Motoren

- Geringerer Massenstrom ~20% ($\lambda=1.6$)

Gasoline Hydrogen lambda=1
Hydrogen lambda=1.6

- Geringere Abgasenthalpie ~40% ($\lambda=1.6$)



12

Christof Hepp

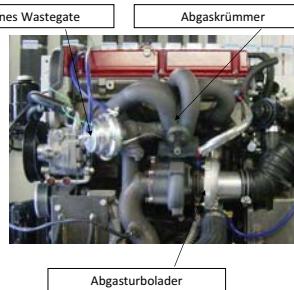
Berlin, 01.10.2010

Gasfahrzeuge

Modifikationen Motor

Motormechanik

- Wasserstoff Injektoren
- Wasserstoffrail
- Saugrohr
- Abgaskrümmer
- Neuer Abgasturbolader
- Wastegate
- Elektronische Drosselklappe
- Integration einer neuen Motorsteuerung



Christof Hepp

Berlin, 01.10.2010

Gasfahrzeuge

13

Applikation

Benzinbetrieb $\lambda=1$ Quantitätsgeregt

- Begrenzung der Abgastemperatur durch Kraftstoffanreicherung
- AGR im untersten Lastbereich

Wasserstoffbetrieb Qualitätsgeregt

- Magerbetrieb bis max. $\lambda=4.5$
- Abgastemperatur im Wasserstoffbetrieb nicht kritisch für die Turbine

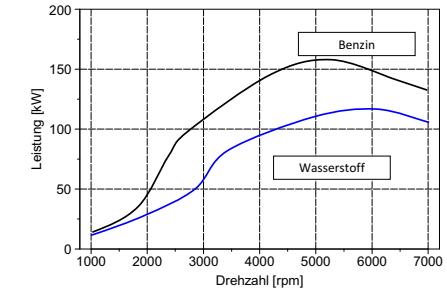
Christof Hepp

Berlin, 01.10.2010

Gasfahrzeuge

14

Ergebnisse

Vollastkurve H₂ und Benzin

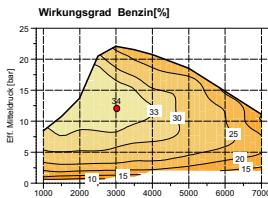
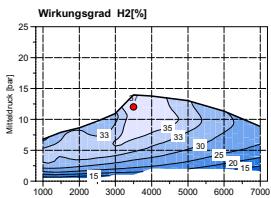
Christof Hepp

Berlin, 01.10.2010

Gasfahrzeuge

15

Wirkungsgrad H₂ und Benzin



Christof Hepp

Berlin, 01.10.2010

Gasfahrzeuge

16

Prototypenfahrzeuge an der TU Graz

Basis: Mercedes E200NGT



Hubraum [cm³]	Benzin	H2
Verdichtungsverhältnis [-]	9.5:1	
Leistung [kW]	120	70
Drehmoment [Nm]	240	150



Christof Hepp

Berlin, 01.10.2010

Gasfahrzeuge

Basis: Mitsubishi Evo IX

Drucktank mit 350bar
Mehrstufige Druckregelung

Hubraum [cm³]	Benzin	H2
Verdichtungsverhältnis [-]	8.8:1	
Leistung [kW]	156	115
Drehmoment [Nm]	353	225



Zusammenfassung

• Erfolgreiche Realisierung des ersten bivalenten Wasserstoff/Benzinmotor mit Abgasturboaufladung

• Wirkungsgradvorteil H₂ Betrieb

• Eckdaten

- Benzin: 353Nm (22,2bar) / 3000U/min 156kW/5000U/min
- H2: 225Nm (14,2bar) / 3500U/min 115kW/6000U/min

→ um mehr als 30% höherer Mitteldruck und mehr als 50% höhere Literleistung als alle bisher veröffentlichten Wasserstofffahrzeuge

Christof Hepp

Berlin, 01.10.2010

Gasfahrzeuge

18