

Schlussbericht

der Forschungsstelle(n)

Nr. 1 Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH

Nr. 2 Universität Duisburg-Essen, Elektrische Anlagen und Netze

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur
Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **15863 N**

***Entwicklung eines Auslegungstools für regenerative Energieversorgungssysteme mit
Wasserstoffspeicherung***

(Bewilligungszeitraum: 01.01.2009 - 30.06.2011)

der AiF-Forschungsvereinigung

Umwelttechnik

Duisburg,

Bernd Oberschachtsiek (FS1)

Duisburg

Prof. Dr. Gerhard Krost (FS2)

Ort, Datum

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung.....	1
2	Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse	2
2.1	Motivation.....	2
2.2	Speicherung elektrischer Energie in Form von Wasserstoff	3
2.3	AP1: Zusammenstellung geeigneter Modelle	3
2.4	AP2: Sicherheitsaspekte	4
2.5	AP3: Experimentalaufbau Wasserstoffpfad	6
2.6	AP4: Modellerstellung / Validierung Wasserstoffpfad	14
2.7	AP5 und AP6: Programmierung und Dokumentation des Auslegungstools	19
3	Ergänzende Erläuterungen zum Forschungsvorhaben	30
3.1	Soll-Ist-Vergleich.....	30
3.2	Erläuterungen zum zahlenmäßigen Nachweis.....	31
4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	31
5	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	31
6	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Forschungsergebnisse	33

1 Zusammenfassung

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung eines Softwaretools, das die Auslegung und den Betrieb autarker und netzparalleler regenerativer Energieversorgungssysteme ermöglicht. Dieser Auslegungsprozess sollte in drei Stufen durchgeführt werden.

1. Festlegung der unter wirtschaftlichen oder energetischen Gesichtspunkten optimalen Systemarchitektur des Systems durch Auswahl der verschiedenen Komponenten aus einer Modellbibliothek mit Hilfe eines regelbasierten Expertensystems.
2. Dimensionierung der Komponenten auf der Basis von Simulationsmodellen unter Berücksichtigung hochauflösender Energie- und Leistungsprofile.
3. Ermittlung einer optimalen Betriebsstrategie des Gesamtsystems. Dies kann unter technischen, energetischen oder wirtschaftlichen Gesichtspunkten geschehen. Technische Vorgaben wären z. B. min. Einschaltzeit der verschiedenen Komponenten, min. Wartezeit bis zum Wiedereinschalten oder max. Betriebszyklen pro Tag. Wetterprognosen können zur energetischen Optimierung des Betriebs einbezogen werden. Bei netzparallelen Systemen könnte als wirtschaftlicher Aspekt zusätzlich ein Erzeugermanagement zur gewinnoptimierten Stromerzeugung Berücksichtigung finden.

Neben der Berücksichtigung von Windrädern, PV-Modulen und Batterien sollten als wesentlicher Aspekt dieses Vorhabens die Komponenten eines Wasserstoffpfades zur Speicherung überschüssiger elektrischer Energie in der Auslegungssoftware implementiert werden. Hier lag ein Schwerpunkt in der Einbindung von Metallhydridspeichern, die sich insbesondere zur Speicherung von Wasserstoff bei niedrigen Drücken eignen.

Die angestrebten Ziele des Vorhabens wurden erreicht. Für die Bausteine des Wasserstoffspeicherpfades, Elektrolyseur, Druckspeicher und Stromerzeugungsaggregat, wurden die benötigten Modelle angepasst. Für den Einsatz von Metallhydridspeichern wurde ein Modell basierend auf neuronalen Netzen und umfangreichen Messergebnissen entwickelt. Das Expertensystem zur Komponentenauswahl, eine Simulationsroutine zur Komponentendimensionierung sowie ein auf Fuzzy-Logik basierender Programmteil zur Ermittlung und Validierung der Betriebsstrategie konnten entwickelt werden. Um diese

Programmteile benutzerfreundlich zu verbinden, wurde mit Hilfe des Programms Excel eine Benutzeroberfläche aufgebaut aus der heraus die einzelnen Programmkomponenten gestartet und in der die jeweiligen Ergebnisse zusammengefasst werden. Die Verifikation des Tools erfolgte anhand ausgewählter Beispiele.

2 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse

2.1 Motivation

Bei netzunabhängigen Energieversorgungssystemen (Inselssystemen), die auf regenerativen Energien wie Sonne und Wind basieren, ist zur zeitlichen Entkopplung der Energieerzeugung und der Last eine Energiespeicherung notwendig. Je nach gewünschtem Grad der Autarkie ist zwischen kurzfristiger, stunden- oder tageweiser Speicherung und langfristiger Speicherung über Wochen (Schlecht-Wetter-Perioden) bzw. Monate (Ausgleich von saisonalen Schwankungen) zu unterscheiden. In einem autarken oder dezentralen regenerativen Energieversorgungssystem sind unterschiedliche Systemkonfigurationen denkbar. Zur effektiven Nutzung solcher Systeme ist die geeignete Auswahl und Abstimmung der Bauteile sowie die optimale Dimensionierung der einzelnen Komponenten notwendig.

Gerade um Energie in ausreichender Menge und langfristig zu speichern, eignet sich Wasserstoff in besonderer Weise, da je nach Speichersystem im Gegensatz zu vielen anderen Speichervarianten eine quasi verlustfreie Lagerung möglich ist. Eine prinzipielle Darstellung derartiger Systeme sowohl mit Batteriespeicherung als auch mit Wasserstoffpfad zeigt Abb. 1.

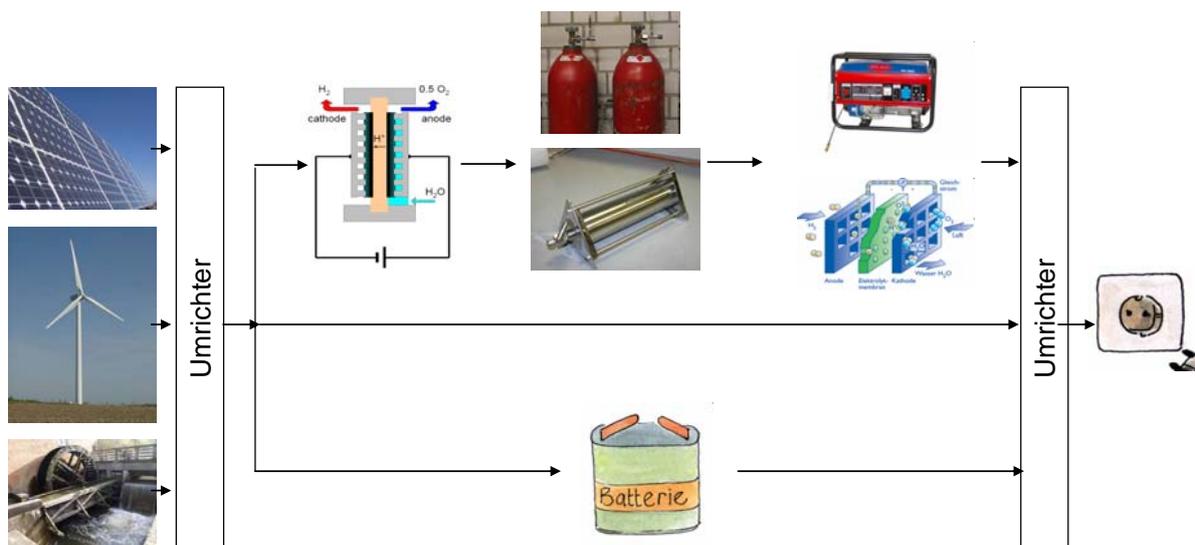


Abb. 1: Prinzipieller Aufbau autarker Energiesysteme.

Die Auslegung dieser Systeme erfordert umfangreiches Wissen in verschiedenen Fachgebieten wie z. B. Elektrotechnik, Verfahrenstechnik und Chemie und ist daher sehr komplex und zeitaufwändig. Das in diesem Vorhaben entwickelte Auslegungstool ermöglicht dagegen die zeitsparende Konfiguration optimierter Systeme und fördert somit den Einsatz der Photovoltaik, von Windkraftanlagen sowie der Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnik.

Innerhalb des Tools sind die wesentlichen Eigenschaften der zur Verfügung stehenden Komponenten in Form einer Modellbibliothek hinterlegt. Es berücksichtigt unterschiedliche Arten der Wasserstofferzeugung, der Wasserstoffspeicherung, und hier insbesondere den Einsatz von Metallhydriden, sowie verschiedene Möglichkeiten der Wasserstoffnutzung.

2.2 Speicherung elektrischer Energie in Form von Wasserstoff

Zur Nutzung von Wasserstoff als chemisches Speichermedium für überschüssige elektrische Energie werden drei Hauptkomponenten benötigt (siehe Abb. 1):

- Umwandlung der elektrischen Energie in Wasserstoff
- Speicherung des Wasserstoffs
- Erzeugung elektrischer Energie durch die stoffliche Umsetzung des Wasserstoffs gemeinsam mit Sauerstoff zu Wasser

Wasserstoff kann auf dem Wege der Wasserelektrolyse unter Einsatz von elektrischer Energie erzeugt werden. Dazu stehen zurzeit zwei Verfahren zur Verfügung: bei der alkalischen Elektrolyse erfolgt die Zersetzung des Wassers in einem flüssigen alkalischen Elektrolyten, bei der PEM-Elektrolyse wird eine saure Membran als Protonen-leitfähiger Elektrolyt verwendet.

Die Speicherung des Wasserstoffs in technisch relevanten Maßstäben erfolgt nach dem Stand der Technik als komprimiertes Gas, tiefkalt in flüssigem Zustand oder chemisch als Metallhydrid. Die Druckspeicherung lässt sich relativ leicht mit verschiedenen Kompressortypen z. B. bis zu Nenndrücken von 700 bar realisieren. Nachteilig auf die Gesamtbilanz wirkt sich die für die Verdichtung notwendige zusätzliche Energie aus. Mit steigenden Drücken nimmt dieser parasitäre Energieverbrauch überproportional zu. Die Verflüssigung von Wasserstoff bei Normaldruck findet erst unterhalb von -253 °C statt. Neben dem für dieses Verfahren ebenfalls sehr hohen Energieverbrauch erweist sich die hohe Komplexität der benötigten Anlagen als nachteilig. Während die Verdichtung von Wasserstoff mit kleinen Kompressoren dezentral z. B. an Wasserstofftankstellen technisch unproblematisch ist, werden Anlagen zur Verflüssigung von Wasserstoff nur zentral an wenigen Standorten betrieben. Die Erzeugung und Speicherung flüssigen Wasserstoffs ist daher für die Anwendung in autarken Energiesystemen ungeeignet. Demgegenüber bietet gerade die Nutzung von Metallhydriden in diesen Systemen verschiedene Vorteile. Klassische Niedertemperaturhydride speichern Wasserstoff bei Drücken bis zu ca. 30 bar und erreichen damit höhere volumetrische Speicherdichten, als bei der Druckgas-speicherung mit 200 bar erzielt werden können. Da sich die Verdichtung auf 30 bar über das Elektrolysesystem ohne den Einsatz eines Kompressors realisieren lässt, ergeben sich sowohl energetische wie auch technische Vorteile durch den Wegfall einer zusätzlichen Kompressionsstufe. Metallhydride zählen zu den chemischen Speicherverfahren. Bei der Beladung des Speichers entsteht Wärme, die an die Umgebung abgeführt werden muss. Umgekehrt ist zur Wasserstoffentnahme Energie in Form von Wärme zuzuführen. Aus diesem verfahrenstechnischen Nachteile dieser Speichervariante ergibt sich aus sicherheitstechnischer Sicht ein Vorteil. Bei einer unbeabsichtigten schlagartigen Entnahme des Wasserstoffs, z. B. in Folge einer plötzlich auftretenden Undichtigkeit, kann dem Speicher in der Regel nicht genug Wärme zugeführt werden, so dass der Speicher einfriert und der Wasserstoffaustritt zum Erliegen kommt.

Damit sind Drucktanks und Metallhydride sinnvolle Möglichkeiten zur Speicherung von Wasserstoff in autarken Energiesystemen.

Die Stromerzeugung aus dem gespeicherten Wasserstoff kann in diesen Systemen mit Brennstoffzellen oder Motor-Generator-Kombinationen erfolgen.

2.3 AP1: Zusammenstellung geeigneter Modelle

Die im Auslegungstool für autarke regenerative Energiesysteme notwendigen Simulationen erfordern Modelle aller in Frage kommenden Einzel-Komponenten.

Zunächst wurde überprüft, inwieweit bei der Forschungsstelle 2 (EAN) vorhandene Simulationsmodelle verwendet werden können. Dies stellte sich für die meisten Komponenten (Akkumulator, Elektrolyseur, Brennstoffzelle, Generator mit Gasmotor, Photovoltaik) als möglich heraus mit folgenden zwei Ausnahmen:

- Für kleine Windgeneratoren (< 30 kW) sind die vorhandenen Modelle zu aufwendig und oft unzutreffend (z.B. nicht vorhandene Pitch-Regelung); hier wurde auf eine Modellierung völlig verzichtet und die Nachbildung durch aus Messdaten realer Klein-Windgeneratoren erstellte Look-up-Tabellen erreicht.
- Für den im besonderen Fokus stehenden Metallhydrid-Speicher für Wasserstoff gab es überhaupt kein vorliegendes Modell, so dass ein solches neu erstellt werden musste. Wegen der hochgradigen Nicht-Linearität erwies sich die Modellbildung hier allerdings als extrem schwierig; eine Lösung wurde schließlich durch eine komplexe Struktur rekurrenter neuronaler Netze gefunden, die mit im Rahmen der experimentellen Untersuchungen (AP3) generierten Messdaten trainiert wurden. Dies ist weiter unten im Abschnitt zu AP4 ausführlich beschrieben.

Die erforderlichen Modelle liegen somit vollständig vor und konnten als Matlab/Simulink-Strukturen in die ebenfalls auf dieser Basis ablaufenden Berechnungen des Auslegungstools eingebunden werden.

Als realistische, leistungsmäßig skalierbare Lastprofile liegen nach Kontakt mit entsprechenden Betreibern inzwischen vor:

- Telekommunikationsstation (quasi Konstantlast);
- landwirtschaftlicher Betrieb;
- Alpenhütte.

Die Angebotsprofile für Wind- und Photovoltaikanlagen hängen, wie im Antrag schon formuliert, vom Standort der Anlage ab; entsprechende Messwerte für die Region (NRW) wurden bei der Validierung des Auslegungstools verwendet.

2.4 AP2: Sicherheitsaspekte

Regenerative Energieversorgungssysteme mit Wasserstoffspeicherung bestehen aus verschiedenen Anlagenteilen, für die jeweils die Sicherheitsaspekte betrachtet werden müssen. Die Sicherheit von autarken Systemen wird – wie bei anderen Anlagen und Maschinen auch – durch Anwendung diverser Gesetze, Richtlinien und Normen gewährleistet. Im Rahmen dieses AP wurden zu beachtende Regelwerke recherchiert.

Für alle Komponenten eines autarken Systems gelten die allgemeinen Richtlinien und Normen, die auf Maschinen oder Anlagen anzuwenden sind. Zu nennen sind hier beispielsweise:

- Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV)
- Geräte- und Produktsicherheitsgesetz – (GPSG)
- Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit von Betriebsmitteln (EMVG)
- Druckgeräte Richtlinie (DGRL) 97/23/EG
- Druckgeräteverordnung (14.GPSGV)
- Neue Maschinenrichtlinie 2006/42/EG sowie Maschinenrichtlinie 98/37/EG
- Gefahrstoffverordnungen

Zusätzlich existieren zu den einzelnen Komponenten spezielle Regelwerke, die den Betrieb und die Sicherheit dieser Anlagen regeln. Beispielsweise besteht für Windenergieanlagen die DIN EN-61400, die sich unter anderem in Teil 2 mit der Sicherheit kleiner Windenergieanlagen befasst. Auch für Photovoltaikanlagen (z. B. DIN EN 60904), Wasserkraftträder oder Batterien (z. B. DIN EN 50272) gibt es entsprechende Regelwerke. Im Bereich des Wasserstoffpfades stellt sich die Lage bezüglich der Regelwerke etwas anders dar. „Wasserstoff fällt als komprimiertes (oder tiefkalt verflüssigtes) brennbares Gas unter die entsprechenden einschlägigen Regelwerke. Besondere Gefahren gehen nicht von ihm aus, so dass es in Deutschland oder der EU gar kein wasserstoffspezifisches Regelwerk gibt.“ (Zitat DWV).

Da jedoch Wasserstoff bisher im Wesentlichen nur im industriellen Bereich genutzt wurde, werden zurzeit Regelwerke entwickelt, die sich in verschiedenen Formen mit Wasserstoff bzw. mit Wasserstoff nutzenden Systemen für portable, mobile und stationäre Anwendungen befassen, wie z. B. die ISO/TR 15916 „Basic considerations for the safety of hydrogen systems“, die für alle Komponenten des Wasserstoffpfades relevant ist.

Bei den Wasserstoffspeichern muss zwischen Druckgasspeicherung und Speicherung in Metallhydriden unterschieden werden. Wasserstoff in Druckgasbehältern (Flaschen oder Tanks) ist Stand der Technik und wird seit vielen Jahren im industriellen Bereich eingesetzt. Hierfür sind unter anderem folgende Richtlinien wichtig [Quelle: AirLiquide]:

- Betriebssicherheitsverordnung
- EG Richtlinie für Transportable Druckgeräte, 99/36/EG (TPED)
- Technische Regeln für Betriebssicherheit (TRBS) bzw. Technische Regeln Druckgase (TRG)
- Gefahrstoffverordnung
- Unfallverhütungsvorschriften und Merkblätter
- Gefahrgutverordnung Straße (GGVS/ADR)
- Laborrichtlinien

Für Metallhydridspeicher im stationären Bereich gibt es bisher keine speziellen Regelwerke, allerdings wurde ein Standard für transportable Metallhydridspeicher (im Sinne eines Onboard-Speichers in Fahrzeugen) erstellt (ISO 16111 „Transportable gas storage devices – Hydrogen absorbed in reversible metal hydride“).

Bezüglich Brennstoffzellen ist insbesondere die DIN EN 62282 „Brennstoffzellen“ zu nennen. Die unterschiedlichen Teile dieser Norm unterliegen jedoch einer ständigen Überarbeitung. Auch für die im Folgenden aufgeführten Normen existieren schon wieder neue Norm-Entwürfe bzw. Vornormen. Für Brennstoffzellen in autarken Systemen sind besonders interessant:

- DIN IEC/TS 62282-1; VDE V 0130-1:2011-03 [NEU] Brennstoffzellentechnologie - Teil 1: Begriffe
- DIN EN 62282-2; VDE 0130-201:2008-01 Brennstoffzellentechnologien - Teil 2: Brennstoffzellen-Module
- DIN EN 62282-3-1; VDE 0130-301:2008-02 Brennstoffzellentechnologien - Teil 3-1: Stationäre Brennstoffzellen-Energiesysteme - Sicherheit
- DIN EN 62282-3-2; VDE 0130-302:2007-02 Brennstoffzellentechnologien - Teil 3-2: Stationäre Brennstoffzellen-Energiesysteme - Leistungskennwerteprüfverfahren
- DIN EN 62282-3-3; VDE 0130-303:2008-10 Brennstoffzellentechnologien - Teil 3-3: Stationäre Brennstoffzellen-Energiesysteme - Errichtung
- DIN EN 62282-3-201; VDE 0130-3-201:2011-01 [NEU] Brennstoffzellentechnologien - Teil 3-201: Stationäre Brennstoffzellen-Energiesysteme - Leistungskennwerteprüfverfahren für kleine Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen-Energiesysteme
- VG 97010-1 Brennstoffzelle (allgemein)

Zur Wasserstofferzeugung wird in autarken Systemen die Wasserelektrolyse eingesetzt. Hier ist zu überprüfen, ob folgende Norm, bzw. Norm-Entwurf, zum Tragen kommt:

- ISO 22734-1 Hydrogen generators using water electrolysis process - Part 1: Industrial and commercial applications
- ISO/DIS 22734-2 (Norm-Entwurf) Hydrogen generators using water electrolysis process - Part 2: Residential applications

Eine detaillierte Berücksichtigung der verfügbaren Normen im Auslegungstool ist aufgrund der sich aktuell häufig ändernden Inhalte momentan noch nicht sinnvoll.

2.5 AP3: Experimentalaufbau Wasserstoffpfad

An der Forschungsstelle 1 (ZBT) wurde für die Entwicklung und Verifikation von kleinen Stromversorgungssystemen mit Wasserstoffspeicherung ein Teststand zur Untersuchung von Metallhydridspeichern umgebaut (Abb. 2), der über folgende Eigenschaften verfügt:

- möglicher Wasserstoffdruck im Teststand: 100 bar
- Wasserstoff-Durchflussmessung 0,01...20 NI/min
- Umgebungstemperatur des Wasserstoffspeichers einstellbar zwischen -20...+70 °C
- Wasserstoffreinheit 99,999 %

Druck und/oder Volumenstrom des Wasserstoffs können im oben angegebenen Bereich geregelt werden, ebenso die Umgebungstemperatur des Speicherbehälters. Für die Desorption des Wasserstoffs aus dem Metallhydrid, also für die Entleerung des Wasserstofftanks, wird der Wasserstoffdruck auf einen Wert von etwa 0,2...3 bar reduziert, wie er für den Betrieb von Brennstoffzellen oder Gasmotoren benötigt wird. Der Wasserstoffstrom wird im Bereich 0,01...10 NI/min eingestellt entsprechend einer Wasserstoffleistung von 1,8...1800 W_{th}. Ziel der unten beispielhaft beschriebenen Messungen ist die Bereitstellung einer umfangreichen Datenbasis als Grundlage einer Modellerstellung für Metallhydridspeicher sowie dessen Verifikation.

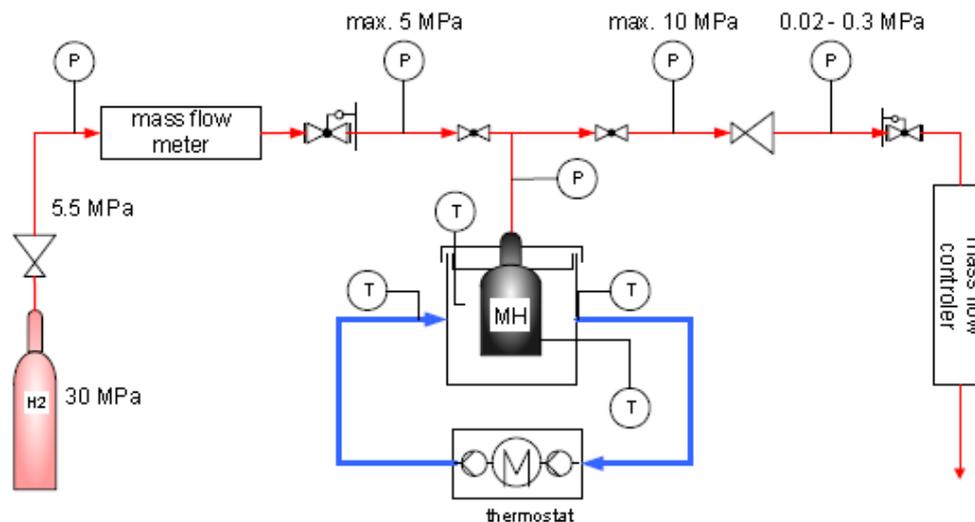


Abb. 2: Schematischer Aufbau des Teststandes an der Fst. 1

Innerhalb des Projektes wurden die in Tabelle 1 aufgelisteten vier Tanks vermessen.

Tabelle 1: Übersicht der vermessenen Metallhydridspeicher

Firma	Treibacher	Hbank	Ovonic/ Heliocentris (blau)	Ovonic /H2 industrial (schwarz)
Speicherbez.	Treibacher MHS1000N	Hbank HB-SC-0660-N	Ovonic HS 760	Ovonic MEH2 940
Kapazität / NI (laut Hersteller)	1000	660	760	960
Fülldruck / bar	1,5...30	40...50	10...17	17 bar
Gewicht / kg	11	6,1	7	7

Es wurden sowohl Absorptions- als auch Desorptionsmessungen durchgeführt, vgl. auch Abb. 3. Bei beiden Messarten wurden der Wasserstoffvolumenstrom, die Umgebungstemperatur sowie der Startfüllgrad variiert. Beim Absorptionsvorgang war zusätzlich die Änderung des Fülldrucks möglich. Außerdem wurde die Druckänderung des ruhenden Tanks bei sich ändernder Temperatur und bei unterschiedlichen Füllgraden gemessen. Die Variation des Fülldrucks wurde nur bei einem Speicher durchgeführt. Hierbei stellte sich ein nahezu linearer Verlauf zwischen Fülldruck und maximal erreichtem Füllgrad ein. Im Hinblick auf die Anwendung eines Metallhydridspeichers in einem autarken System ist es sinnvoll, den Speicher mit dem empfohlenen Druck zu befüllen, da nur so die maximale Speicherkapazität ausgenutzt werden kann. Für die weiteren Messungen wurde deshalb immer der für den jeweiligen Speicher empfohlene Fülldruck eingestellt.

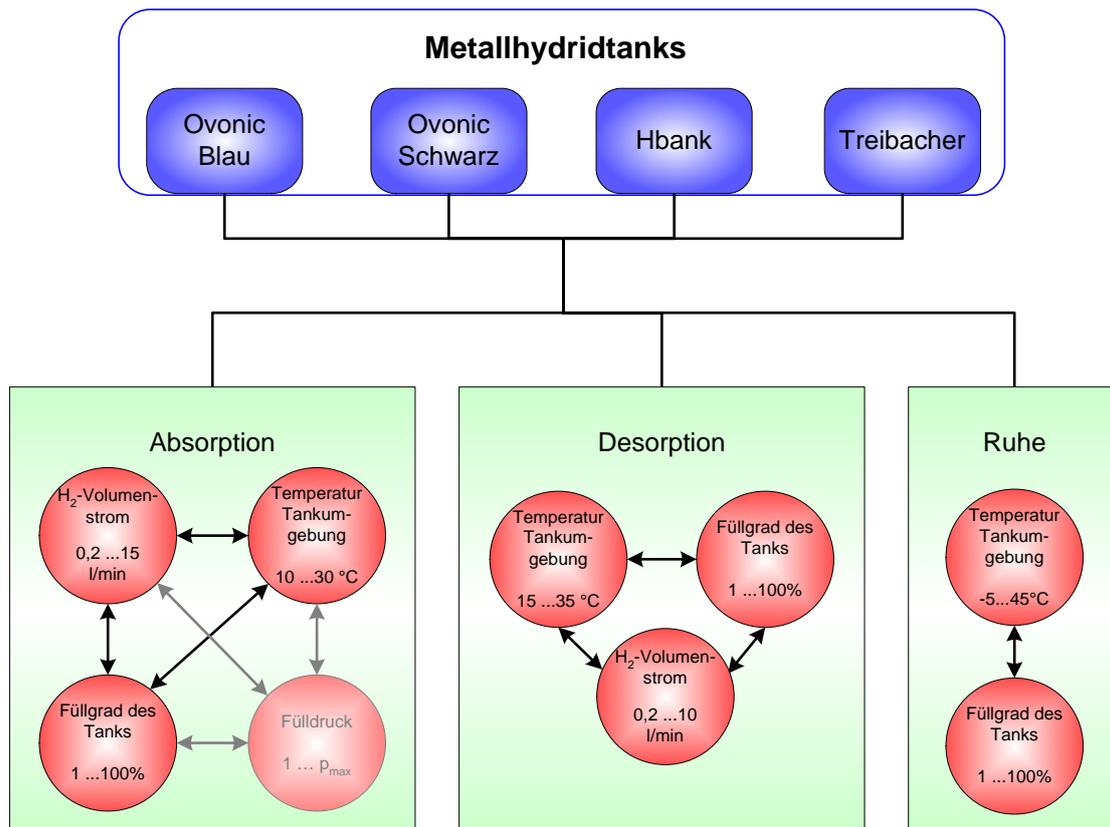


Abb. 3: Übersicht über die Messparameter

Abb. 4 zeigt den Einfluss der Temperatur auf den Druck im ruhenden Speicher. Bei höheren Temperaturen desorbiert der Wasserstoff aus dem Metallhydrid und trägt zur Druckerhöhung bei. Die Kurve für das ideale Gas zeigt, dass bei reiner gasförmiger Speicherung in dem untersuchten Temperaturintervall nahezu keine Druckerhöhung zu erwarten ist.

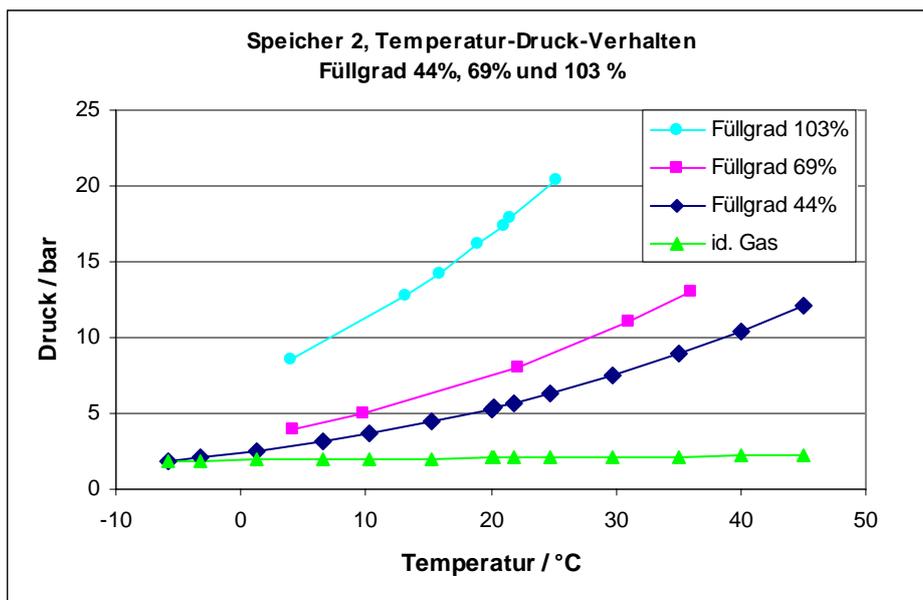


Abb. 4: Temperaturabhängigkeit des Drucks bei unterschiedlichen Füllgraden

Eine typische Messkurve für die Absorption ist in Abb. 5 gezeigt. Wird der Wasserstoff dem Speicher zugeführt, steigt der Druck langsam an. Durch die exotherme Reaktion und weil die Wärme nicht so schnell abgeführt werden kann, steigt die Temperatur ebenfalls an. Ist der maximal erlaubte Druck erreicht, regelt ein Druckregler den Wasserstoffstrom herunter. Die Schwingungen entstehen durch die Regelcharakteristik.

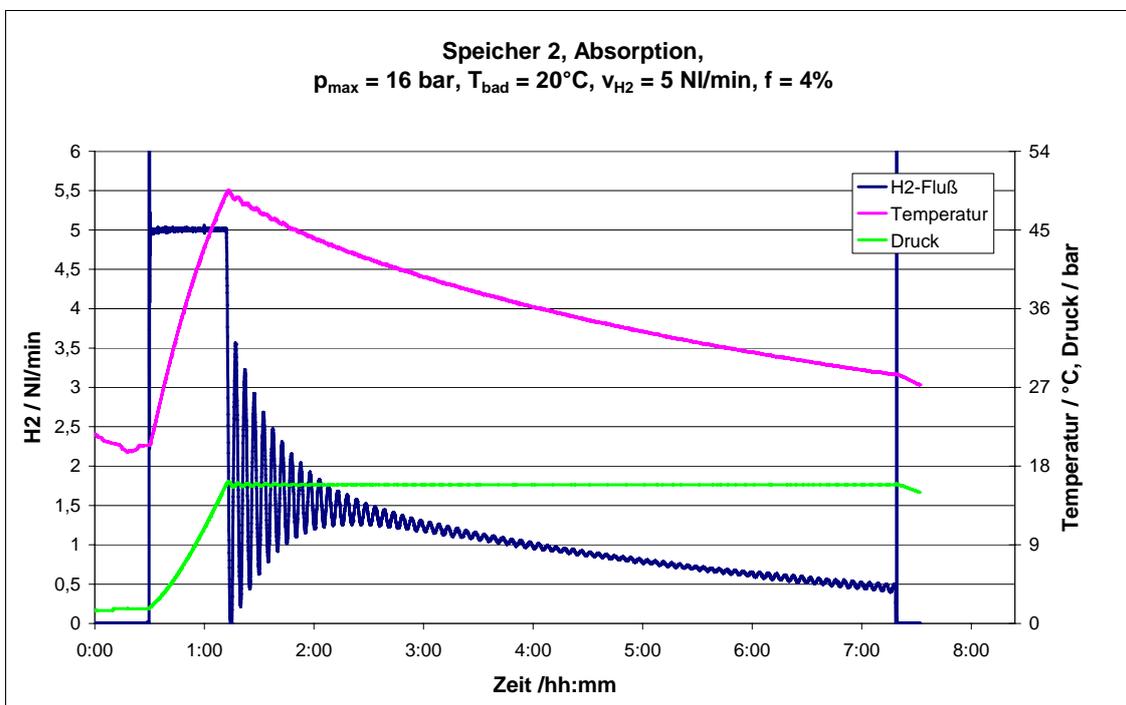


Abb. 5: Metallhydridspeicher 2, Absorption

Bei der Desorption handelt es sich um eine endotherme Reaktion. Da die Wärme nicht schnell genug zugeführt werden kann, sinkt die Temperatur sobald der Wasserstoff desorbiert. Wenn der Druck bis auf den eingestellten minimalen Druck ($p_{min} = 1,3 \text{ bar}_a$) gefallen ist, regelt ein Vordruckregler den Wasserstofffluss (s. Abb. 6).

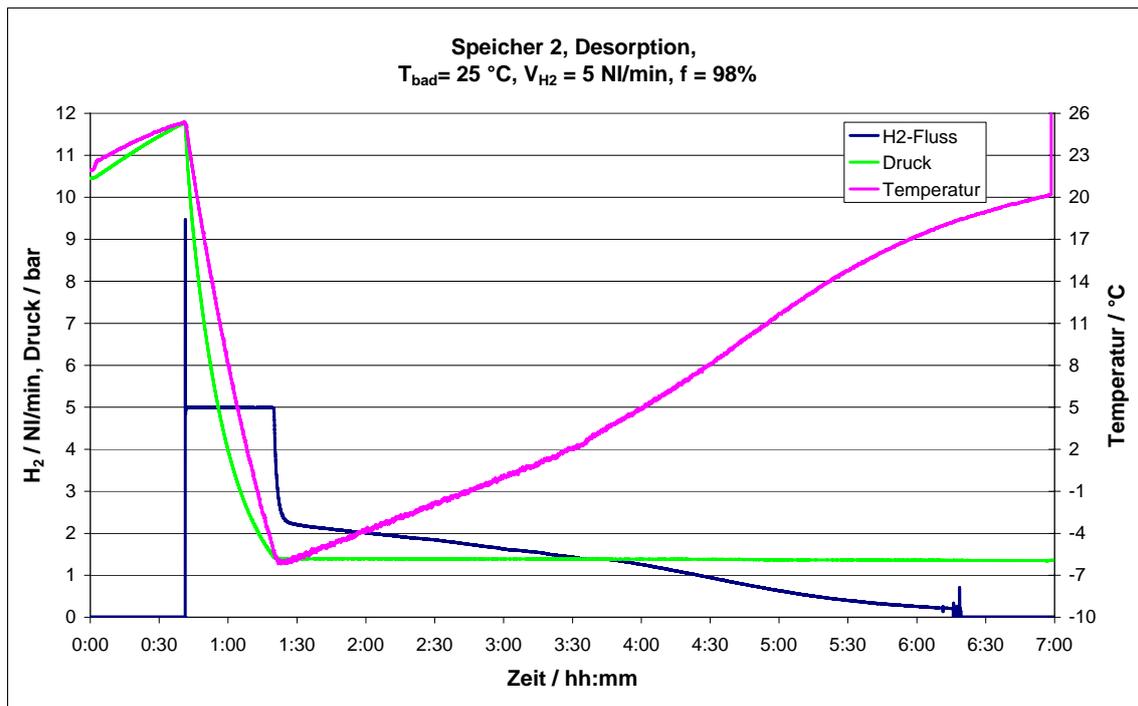


Abb. 6: Metallhydridspeicher 2, Desorption

Für den Einsatz in autarken Systemen und für die Simulationen der Speicher ist der zeitliche Verlauf der Absorptions- und Desorptionsvorgänge relevant. Für die Absorption wurden hierbei zunächst die leeren Speicher (Füllgrad ca. 2 %) mit dem empfohlenen Fülldruck p_{max} mit unterschiedlichen Wasserstoffvolumenströmen und bei unterschiedlichen Temperaturen befüllt. Gemessen wurde die Zeit über die der Sollvolumenstrom konstant blieb. Ein Beispiel für den Speicher 2 ist in Tabelle 2 angegeben.

Tabelle 2: Gemessene Zeit für konst. Sollvolumenstrom bei der Absorption

Absorption Zeit / min			
H2 / NI/min	Temperatur / °C		
	10	20	30
0,25	2796	2709	2420
0,5	1381	1285	1061
1	568	558	440
2,5	151	114	91
5	58	42	38
7,5	31	26	23
10	19	19	15
15	9	11	8

Für die Desorption wurde ähnlich wie bei der Absorption vorgegangen. Der Speicher wurde bei unterschiedlichen Füllgraden und unterschiedlichen Temperaturen mit unterschiedlichen Wasserstoffvolumenströmen entleert. Typische Desorptionskurven mit unterschiedlichen Werten für den eingestellten Entnahme-Wasserstoffstrom bei einer Umgebungstemperatur von 25 °C sind in Abb. 7 dargestellt: Bei 7 NI/min wurde ein konstanter Massenstrom für maximal 25 min aufrechterhalten, bei 2,5 NI/min für mehr als 2 h. Es ist ersichtlich, dass bei nur einem Speicher 5 NI/min (entsprechend 0,9 kW_{th}) für 37 min abgegeben werden können, während sich mit zwei parallelbetriebenen Speichern, die jeweils mit 2,5 NI/min entleert

werden, nicht nur eine Verdoppelung dieses Zeitraums, sondern eine Steigerung um den Faktor 3,6 auf 134 min ergibt. Verantwortlich für dieses Verhalten sind die im Innern des Speichers ablaufenden Wärme- und Stoffübertragungsprozesse, die bei der Entleerung des Speichers zum Abkühlen des Hydrids und somit zu einer abnehmenden Desorptionsgeschwindigkeit führen. Dieser Effekt ist umso gravierender, je höher der Entnahme-Volumenstrom aus dem Speicher ist. Tabelle 3 zeigt die Daten für den vollen Speicher 2.

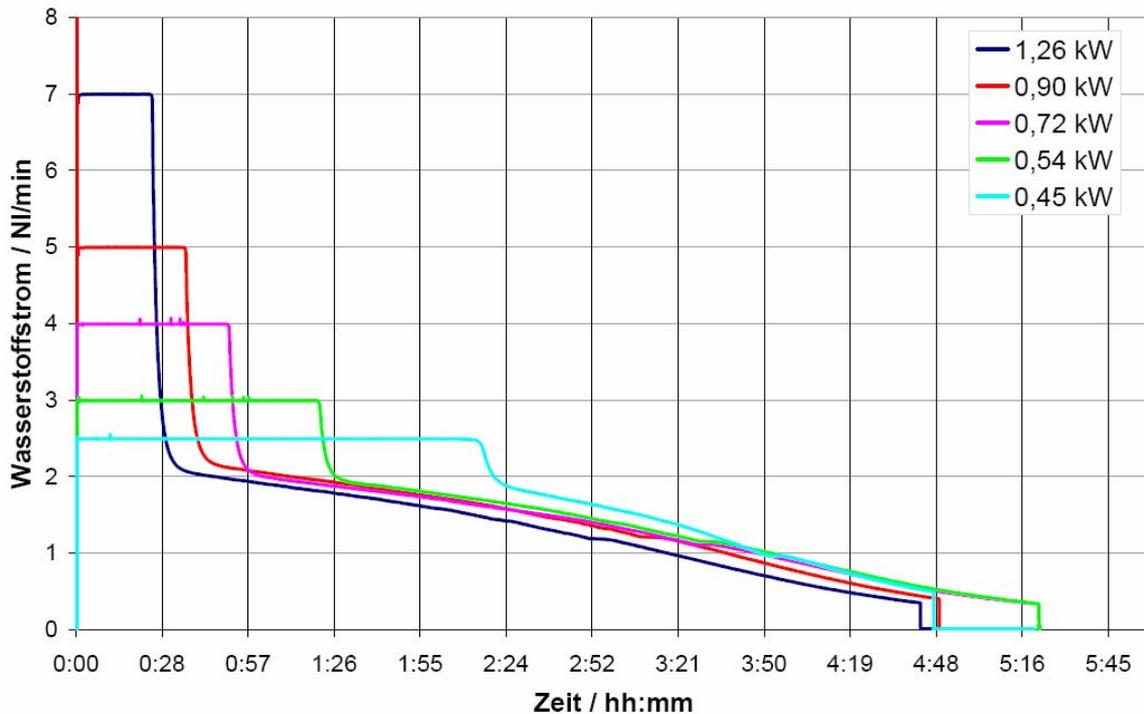


Abb. 7: Desorption bei unterschiedlichen Wasserstoff-Strömen bei einer Umgebungstemperatur von 25 °C

Tabelle 3: Gemessene Zeit für konst. Sollvolumenstrom bei der Desorption (Speicher 2)

Desorption Zeit / min			
H2 / NI/min	Temperatur / °C		
	15	25	35
0,25	2577	2632	2716
0,5	1231	1287	1315
1	561,6	615	790
2	160	222	280
3	59	82	120
5	26	38	48
7	17	20	26
9	14	18	23

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor auf die Einhaltung eines vorgegebenen Wasserstoffstromes ist die Umgebungstemperatur des Speichers. Aus Abb. 8a ist zu erkennen, dass bei den untersuchten Speichern die Entnahmedauer für einen konstanten Volumenstrom von 5 NI/min mit steigender Temperatur um etwa 1 min/K zunimmt.

Insbesondere bei autarken Energiesystemen, bei denen die Wasserstoffspeicher nicht dauernd voll geladen sind, muss der Füllstand des Speichers beachtet werden. Abb. 8b zeigt, dass mit abnehmendem Füllstand zu Beginn der Entladung die Entladedauer für einen konstanten Wasserstoffvolumenstrom (hier 5 NI/min) abnimmt.

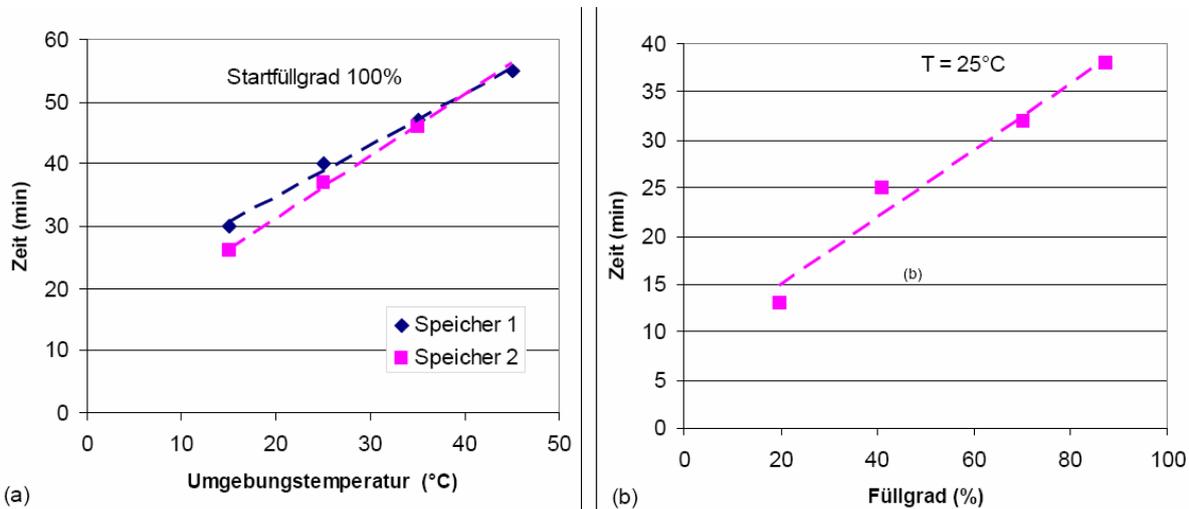


Abb. 8: Einfluss der Umgebungstemperatur (a) und des Füllstandes (b) auf die Entnahmedauer bei konstanter Entladung mit 5 NI/min Wasserstoff

Zusätzlich wurde der Startfüllgrad für die Absorption und die Desorption variiert. Idealerweise sollte ein Messmatrix für einen Speicher wie in Tabelle 4 folgt aussehen.

Tabelle 4: Ideale Messmatrix zur Charakterisierung der MH-Speicher

Absorption					
H2 / NI/min	Füllgrad / %				
	1	25	50	75	100
0,25					
0,5					
1		T = 10, 20, 30°C			
2,5					
5					
7,5					
10					
15					

Desorption					
H2 / NI/min	Füllgrad / %				
	1	25	50	75	100
0,25					
0,5					
1		T = 15, 25, 35°C			
2					
3					
5					
7					
9					

Im Laufe des Projektes zeigte sich das deutlich nicht-lineare Verhalten von Metallhydridspeichern, das die Erstellung eines physikalisch-mathematischen Modells schwierig gestaltet, insbesondere ohne die Kenntnis der Temperaturen im Innern des Speichers, die bei den hier betrachteten kommerziellen Speichern nicht gemessen werden können. An der Forschungsstelle 2 (EAN) wurde daher beschlossen, den Metallhydridspeicher auf der Basis neuronaler Netze zu simulieren, siehe dazu auch die Beschreibung zu AP 4. Für dieses Vorgehen waren deutlich mehr Messdaten notwendig, als bei der Antragstellung für das Projekt angenommen wurde. Daher musste dieser experimentelle Teil des Vorhabens stark ausgeweitet werden.

Zusätzlich zur Charakterisierung der Speicher bzw. zur Messdatenaufnahme für das Training der Neuronalen Netze, wurden dynamische Messungen durchgeführt, bei denen definierte Pausen zwischen den Befüll- oder Entleerungsvorgängen eingefügt wurden. Dieser Fall entspricht zum Beispiel der Befüllung eines Speichers bei intermittierendem Betrieb des Elektrolyseurs in einem autarken System. Außerdem wurde den Speichern ein Lastprofil aufgegeben. In Abb. 9 ist das Lastprofil eines Einfamilienhauses vorgegeben.

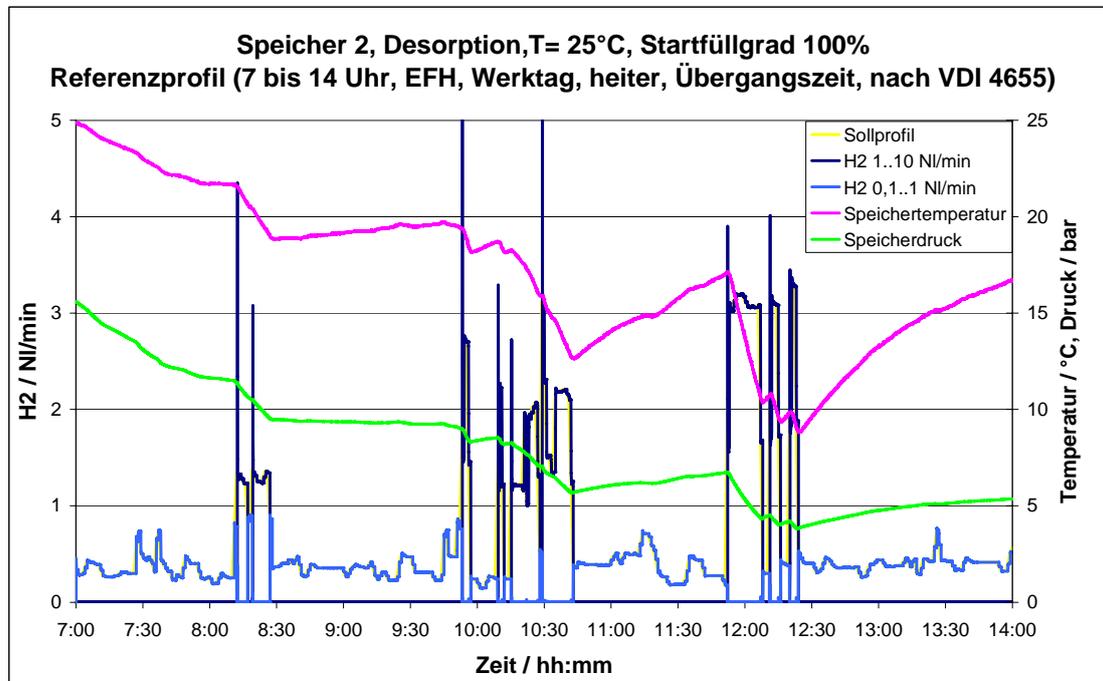


Abb. 9: Vorgabe eines Lastprofils zur Desorption des Speichers

Neben der hier dargestellten Wasserstoffspeicherung wurde im Rahmen des Projektes auch die Wasserstofferzeugung mittels Elektrolyse eingehend untersucht.

In einem ersten Ansatz wurde dazu ein Kleinelektrolyseur der Firma Sylatech eingesetzt, der mit Regelung, Wasserversorgung und Sicherheitseinrichtungen ausgestattet und in dieser Form als Produkt auf dem Markt verfügbar ist. Dieses Elektrolysesystem verfügt über eine Druckregelung, die gleichzeitig Sicherheitsfunktionen übernimmt. Für den Produktwasserstoff kann ein bestimmter Ausgangsdruck festgelegt werden. Wird dieser Druck unterschritten, schaltet sich der Elektrolyseur ein und produziert Wasserstoff. Kann der vorgegebene Druck innerhalb einer definierten Zeitspanne nicht erreicht werden, schaltet das System aus Sicherheitsgründen ab. Damit soll einem Gasaustritt durch mögliche Leckagen vorgebeugt werden. Dieses Sicherheitssystem erwies sich jedoch in Verbindung mit den zu befüllenden Metallhydridspeichern als ungeeignet, da sich ein kontinuierlicher Wasserstoffstrom zur Befüllung des Speichers nicht zufriedenstellend einstellen ließ und es durch die Regelung zu erheblichen Schwankungen bei der Wasserstoffversorgung kam, siehe Abb. 10.

Im weiteren Verlauf des Projektes wurde daher ein Versuchsstand am ZBT aufgebaut, mit dem einzelne PEM-Elektrolysestacks unter definierten Bedingungen und mit angepasster Regelung betrieben und mit einer nachgeschalteten Trocknungseinheit an einen Metallhydridspeicher gekoppelt werden können. Dazu wurde ein Stack verwendet, der von der Firma Sylatech als vorhabenbezogene Sachleistung zur Verfügung gestellt wurde.

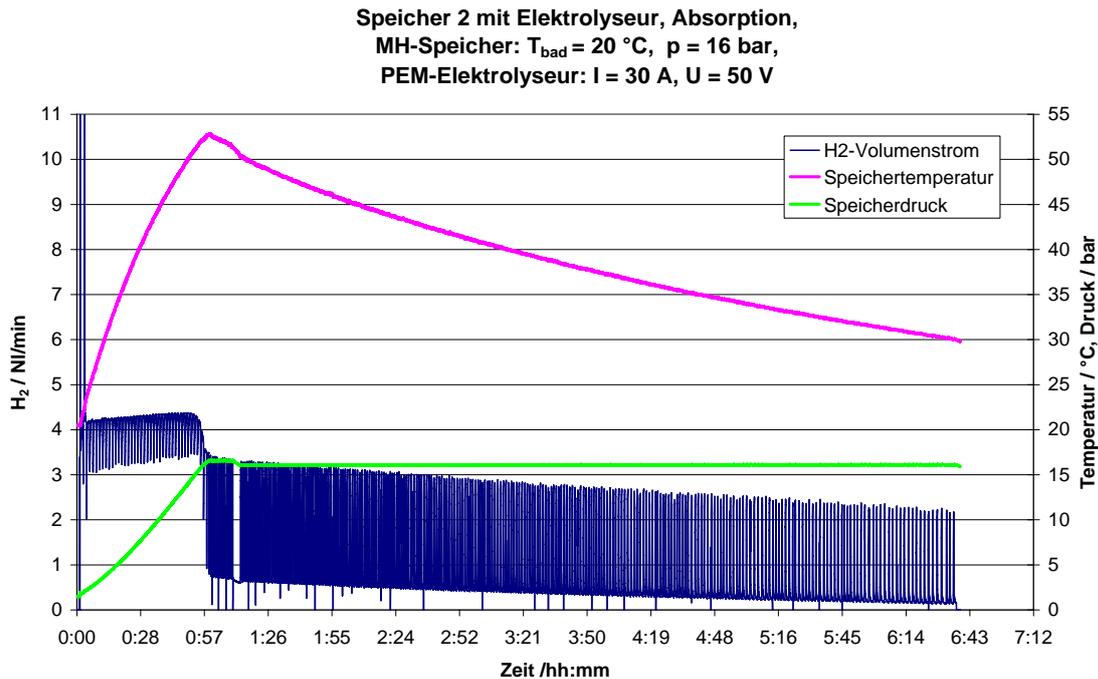


Abb. 10: Verhalten des H_2 -Volumenstroms am Austritt des Elektrolyseurs bei Kopplung mit einem Metallhydridspeicher

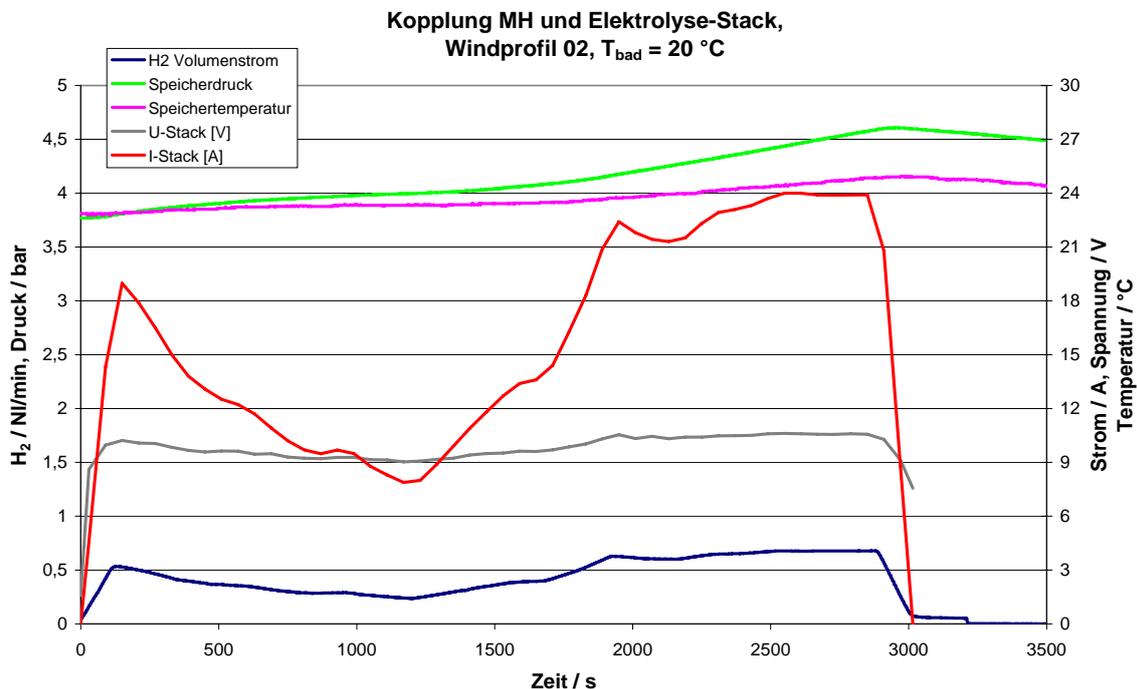


Abb. 11: Messdaten zur Kopplung eines Metallhydridspeichers mit einem PEM-Elektrolysestack, der mit einem realen Windleistungsprofil betrieben wurde

Abb. 11 zeigt beispielhafte Messdaten für den Betrieb des Elektrolyse-Stacks mit den Leistungsdaten aus einem realen Windprofil sowie für das Verhalten des angeschlossenen Metallhydridspeichers. Als Ergebnis dieser Untersuchungen stellte sich heraus, dass die

Kopplung des Stacks mit dem Speicher keine unerwarteten Auswirkungen auf das Verhalten des Speichers hatte.

Der Elektrolysestack-Teststand wurde zusätzlich noch zur detaillierten Charakterisierung des Elektrolysestacks verwendet. Wesentliches Kriterium zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit eines Elektrolysestacks sind so genannte Strom-Spannungs-Kennlinien (U-I-Kennlinien), wie sie beispielhaft in Abb. 12 gezeigt sind. Die erkennbare Hysterese ergibt sich aus der Richtung, in der der Strom geändert wird. Bei der Reduzierung des Stroms von 30 A auf 1 A liegen die benötigten Spannungen deutlich niedriger als es bei einer Erhöhung des Stroms von 1 A auf 30 A der Fall ist. Dieses Verhalten deutet darauf hin, dass das thermodynamische Gleichgewicht innerhalb des Stacks nicht erreicht wurde, obwohl die einzelnen Messpunkte bei diesen Versuchen für 15 min angefahren wurden. Versuche mit längeren Intervallen für stationäre Bedingungen haben ergeben, dass konstante Strom-Spannungs-Werte erst nach einem Betriebszeitraum von bis zu 2 Stunden erreicht werden. Gleichzeitig zeigt sich eine sehr starke Abhängigkeit des erreichbaren Wirkungsgrades von der Betriebstemperatur des Stacks.

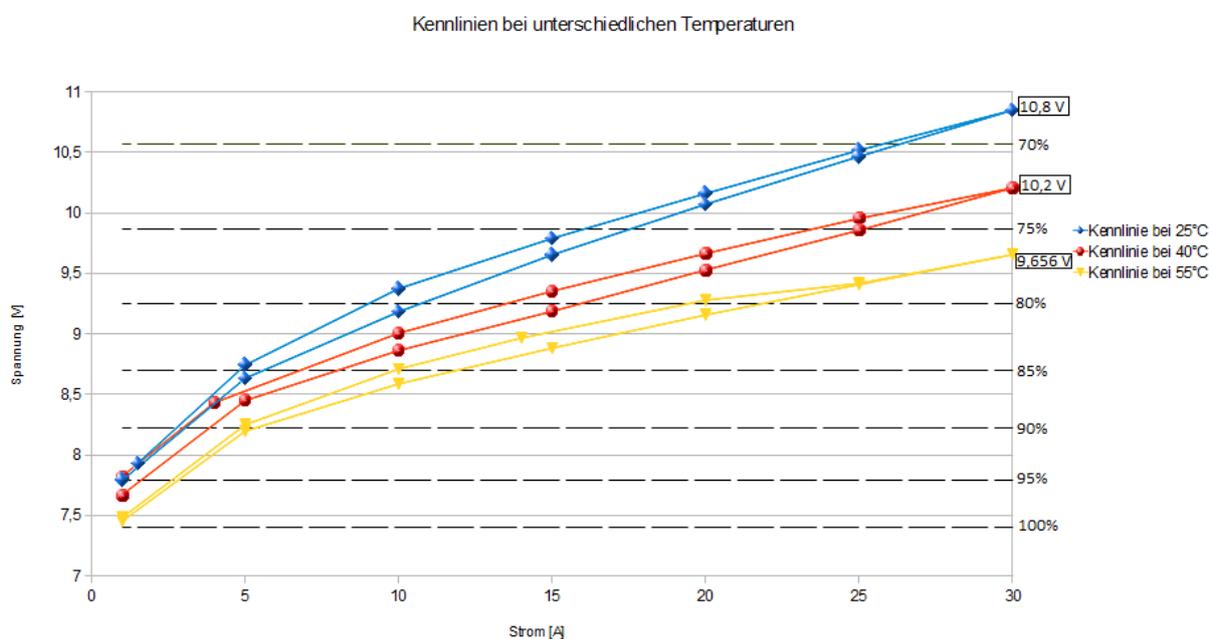


Abb. 12: U-I-Kennlinien PEM-Elektrolysestack: Speisewassertemperaturen 25, 40 und 55 °C, rechte Achse: Darstellung des Wirkungsgrades bezogen auf die thermoneutrale Spannung von 1,48 V je Zelle

Neben den dargestellten Abhängigkeiten der Strom-Spannungs-Kennlinien von der Betriebszeit und der Temperatur wirken sich auch der Druck sowie weitere Betriebsparameter auf den Wirkungsgrad eines Elektrolysestacks aus. Darüber hinaus bestimmen die Konstruktion, die verwendeten Katalysatoren sowie die eingesetzte Membran die Leistungsfähigkeit eines Stacks.

Bezüglich der Brennstoffzelle wurden im Rahmen des Projektes keine weiteren Untersuchungen durchgeführt. Die an den beiden Forschungsstellen vorhandenen Daten und Modelle, die im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte bereits erarbeitet wurden, reichten zur Erstellung des Tools aus.

2.6 AP4: Modellerstellung / Validierung Wasserstoffpfad

Auf Basis der im AP3 gewonnenen experimentellen Daten wurde ein Modell für den Metallhydrid-Speicher erstellt und mit weiteren Messergebnissen validiert. Dieses Modell

bildet in Kombination mit den Modellen für Elektrolyseur und Brennstoffzelle bzw. Generator mit Gasmotor den gesamten Wasserstoffpfad nach.

Grundsätzlich gibt es nur wenige Modelle für Metallhydrid-Speicher, und diese sind meist sehr typspezifisch (Hersteller) und basieren auf allgemein schwer zu ermittelnden Informationen über die innere Geometrie und spezifische Materialien der Speichers [9,10]. Grundsätzlich ist bekannt (und wurde durch die in AP3 erfolgten Messungen bestätigt), dass das Verhalten des Metallhydrid-Speichers hochgradig nichtlinear ist, was eine physikalisch-mathematische Modellbildung erheblich erschwert; außerdem wäre für eine physikalische Modellierung die Kenntnis der (kaum ermittelbaren) inneren Temperatur des Speichermaterials erforderlich. Daher wurde im vorliegenden Fall eine komplexe Struktur entwickelt, die auf rekurrenten neuronalen Netzen und (nichtlinear gewichtenden) Fuzzy-Systemen basiert. Die neuronalen Netze wurden trainiert (und damit das Modell parametrisiert) mit Messdatensätzen, für Lade- bzw. Entladevorgänge jeweils bestehend aus

- Druck,
- Umgebungstemperatur,
- Oberflächentemperatur des Speichers,
- Wasserstoff-Volumenstrom,
- Ladezustand in % (über das Speichergewicht) und
- Zeitverlauf des Lade- bzw. Entladevorgangs.

Da Lade- und Entladevorgang – Absorption und Desorption – sich in ihren Parametern stark unterscheiden, wurden identisch aufgebaute, aber unterschiedlich parametrisierte Modelle erstellt, siehe Abb. 13. Für jeden der beiden Prozesse wurde ein Cluster von Paaren aus zwei getrennten Feed-Forward-Neuronennetzen mit externer Rückführung – die jeweils die zwei zeitlichen Phasen der Lade- bzw. Entladevorgänge repräsentieren – etabliert und mit entsprechenden Messdaten trainiert; dies zunächst für den initial vollgeladenen Speicher beim Entladevorgang und den leeren Speicher beim Ladevorgang, siehe Abb. 13 oben, und für unterschiedliche Wasserstoff-Volumenströme bis zu 15 NI/min. Entsprechend dem vorgegebenen Soll-Volumenstrom werden die Ausgänge der einzelnen volumenstrom-bezogenen Neuronennetze durch ein Fuzzy-System nichtlinear gewichtet und führen damit auf die zeitabhängigen Verläufe von Wasserstoff-Volumenstrom und Temperatur, siehe Abb. 13 rechts.

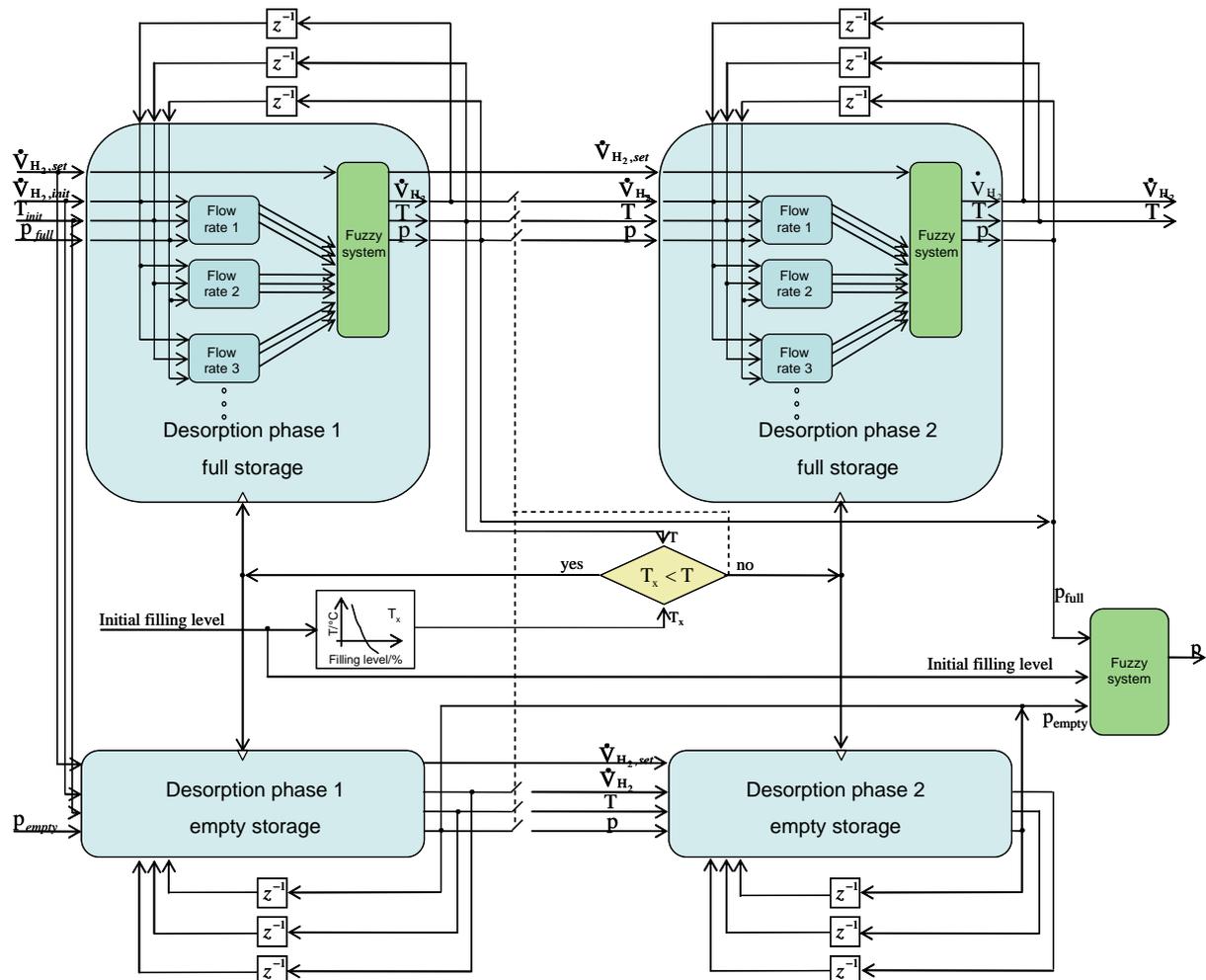


Abb. 13: Metallhydrid-Speicher Modell für die Desorption basierend auf rekursiven neuronalen Netzen

Auf eine spezielle Weise wird der jeweilige Anfangs-Füllstand des Speichers berücksichtigt: Das Modell – hier beispielhaft für die Desorption betrachtet – geht zunächst von einem völlig gefüllten Speicher aus. Ausgehend vom aktuellen Anfangs-füllstand wird aus einer Kennlinie diejenige Temperatur T_x bestimmt, bei welcher die 2. Phase der Speicherentladung beginnt, und diese mit der aktuellen Temperatur verglichen, die vom Neuronennetz der 1. Phase ausgegeben wird, siehe Mitte von Abb. 13. Solange die erste Phase des Neuronennetzes aktiv ist, werden dessen Ausgangswerte von Wasserstoff-Volumenstrom und Temperatur direkt auf den Ausgang des Systems (ganz rechts im Abb. 13) gelegt und sind dort verfügbar. Das Neuronale Netz der Phase 2 wird also solange umgangen. Doch sobald die Temperatur T am Ausgang des Netzes von Phase 1 den Wert T_x erreicht, werden die Ausgangswerte des Neuronennetzes für die 1. Phase als Initialwerte an das Netz für die 2. Phase übergeben und dieses gestartet, so dass dieses dann die Ausgangswerte von Volumenstrom und Temperatur für den entsprechenden Zeitbereich liefert. Allerdings hängt der Druckverlauf auch vom Ausgangs-Füllstand des Speichers ab. Für die Ausgabe des Druckverlaufes bei einem beliebigen Anfangs-füllstand stellt wiederum die Gewichtung des Ausgangs zweier Neuronennetze eine geeignete Lösung dar: während ein Cluster aus Neuronennetzen, wie oben beschrieben, für den voll geladenen Speicher als Ausgangszustand trainiert wurde, liefert ein zweites Neuronennetz-Cluster entsprechende Werte für einen nahezu entladenen Speicher-Ausgangszustand, siehe Abb. 13 unten; durch nichtlineare Fuzzy-Gewichtung ergeben sich Druckverläufe für beliebige Ausgangs-Ladezustände.

Insgesamt hat sich – wegen der Komplexität der Zusammenhänge – eine relativ komplizierte Struktur für das Modell ergeben, die in Abb. 14 noch einmal zusammenfassend skizziert ist. Dieses Modell wurde durch zahlreiche Testläufe mit unterschiedlichen Parameter-Zusammenstellungen für Ladung und Entladung des Speichers verifiziert, wie nachfolgend dargelegt wird.

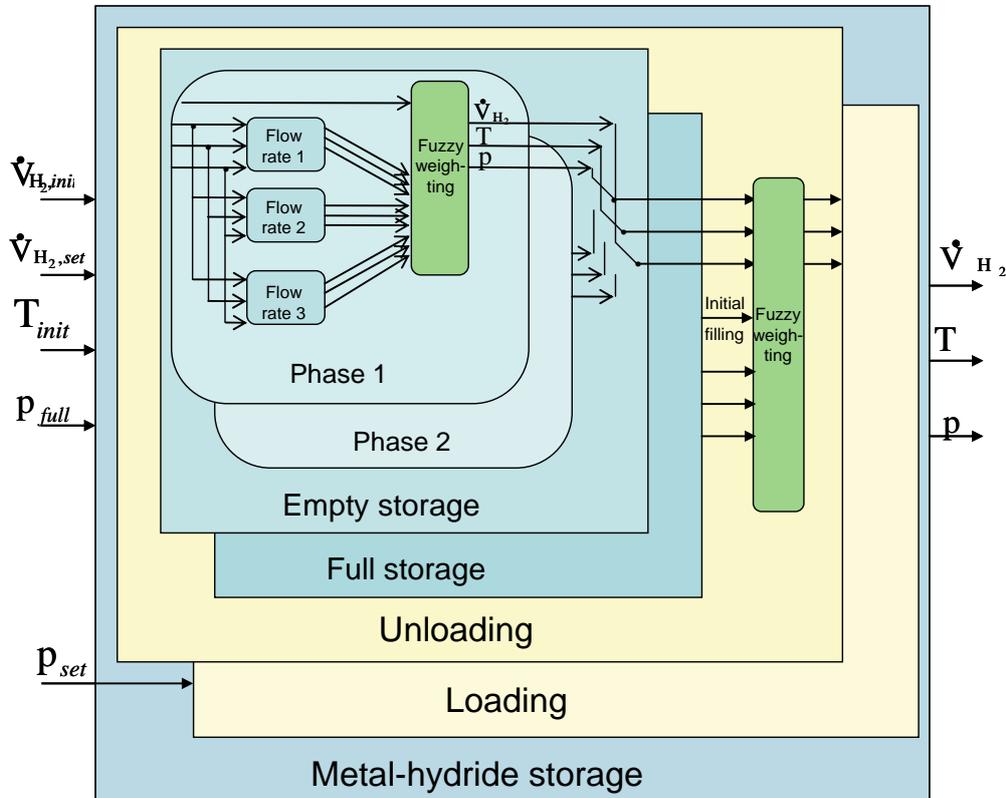


Abb. 14: Struktur des Metallhydrid-Speicher Modells

Als Beispiel für die Güte des erstellten Simulationsmodells zeigt Abb. 15 die Ergebnisse für einen Absorptionsvorgang – Ladung des Speichers – bei einem Wasserstoff-Volumenstrom von 5 NI/min bei einem Anfangsfüllgrad von 10 % im Vergleich zu entsprechenden Messergebnissen. Der Fülldruck wurde mit 16 bar vorgegeben und entspricht damit dem Ausgangsdruck eines Hochdruck-Elektrolyseurs. Die blauen Kurven zeigen den Volumenstrom – dunkelblau die Simulation und hellblau die Messung –, die roten Kurven die Temperatur und die violetten Kurven den Druck.

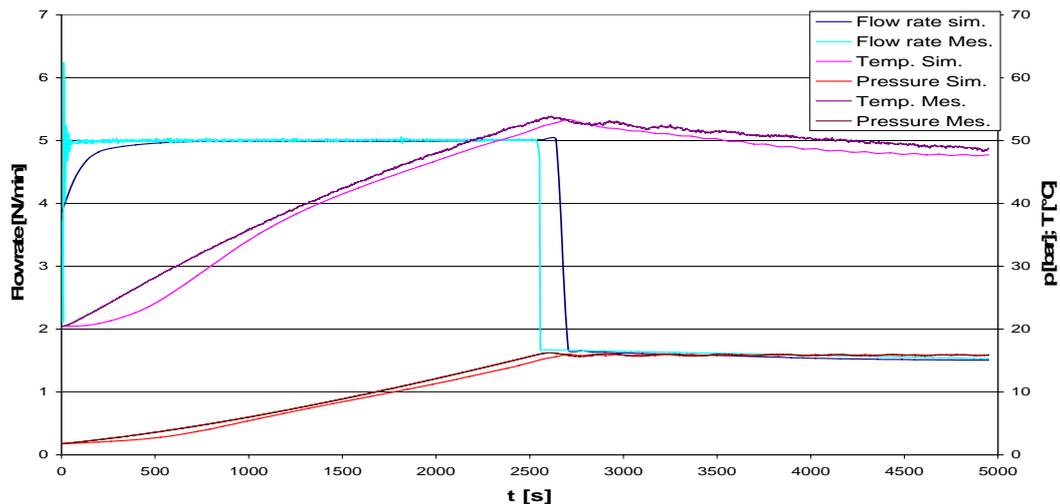


Abb. 15: Vergleich von neuronaler Modellierung des Ladevorgangs bei einem Metallhydrid-Speichers und entsprechenden Messergebnissen bei einem Volumenstrom von 5 NI/min

Eine entsprechend gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung zeigt auch der in Abb. 16 dargestellte Entladevorgang – Desorption – bei einem vorgegebenen Volumenstrom von in diesem Falle 5 NI/min und einem Anfangs-Füllgrad des Speichers von 97 %.

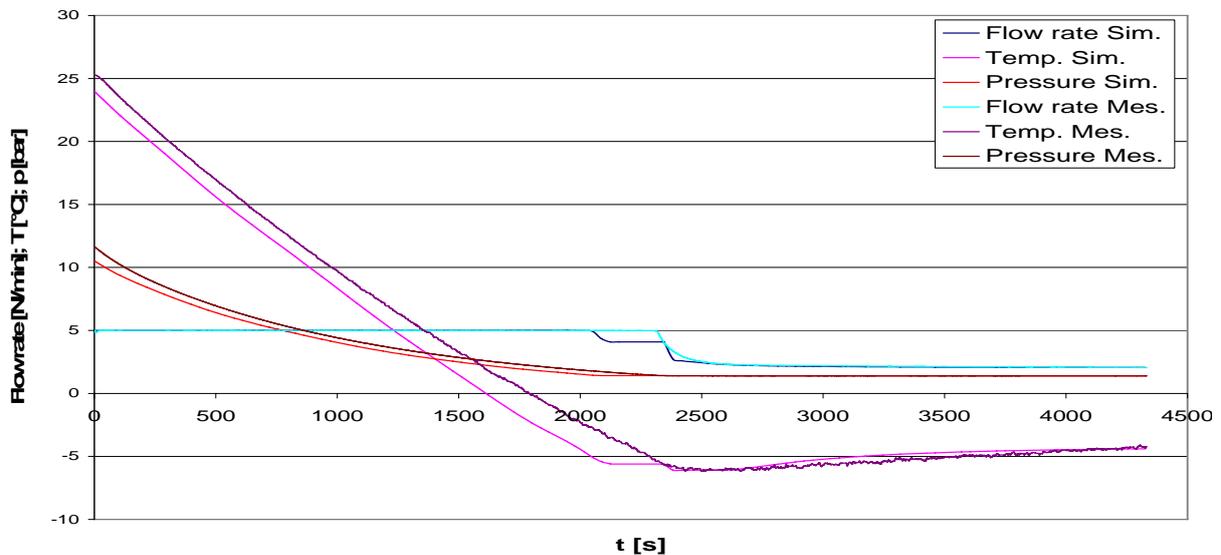


Abb. 16: Vergleich Modellierung – Simulation bei Entladung mit 5 NI/min

Im Gegensatz zu dem nahezu vollständig geladenen bzw. entladenen Anfangszustand des Speichers in den Bildern Abb. 15 und Abb. 16 zeigt Abb. 17 Ergebnisse für einen mittleren Anfangs-Ladezustand von 68 %. Der Wasserstoff-Volumenstrom beträgt in diesem Beispiel 2 NI/min, die Oberflächentemperatur des Speichers 15 °C und der Fülldruck 16 bar. Wiederum gibt die Simulation die Realität (Messung) recht gut wieder. Entsprechende Vergleiche wurden erfolgreich auch für viele andere Parametersätze durchgeführt.

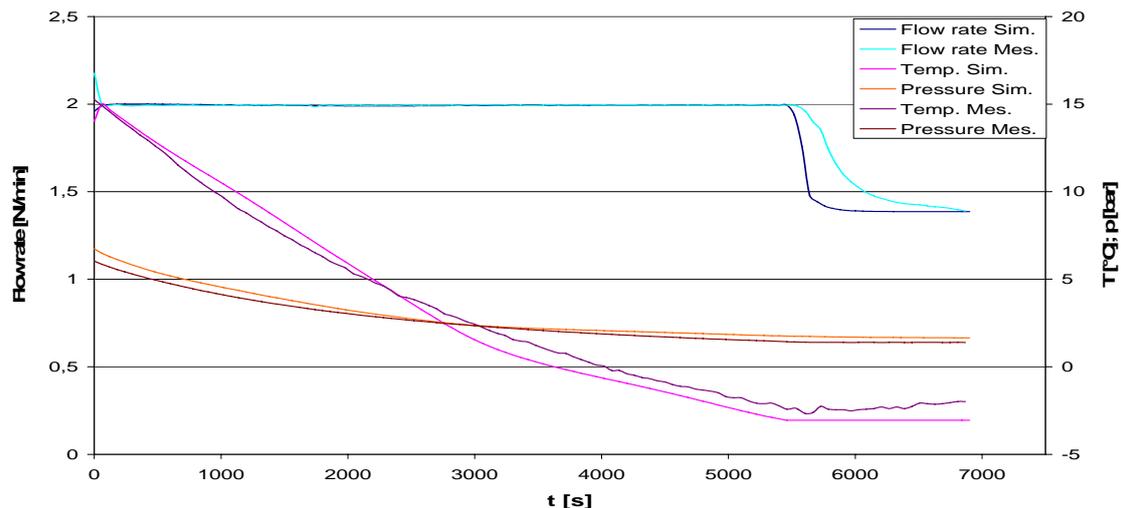


Abb. 17: Vergleich Modellierung – Simulation bei Entladung mit 2 Nl/min (Anfangs-Füllgrad von 68 %)

Trotz der starken Nichtlinearität des Speicherverhaltens ist es mit Hilfe der neuronalen Modellstruktur also möglich, das „Klemmenverhalten“ eines Metallhydrid-Speichers ohne Kenntnis interner Parameter mit ausreichender Genauigkeit zu modellieren.

2.7 AP5 und AP6: Programmierung und Dokumentation des Auslegungstools

Die Auslegung des Gesamtsystems erfolgt entsprechend der Antragstellung in folgenden Schritten:

- Auslegung der Systemkonfiguration über ein regelbasiertes Expertensystem
- Verknüpfung der Modelle mit den relevanten Last- und Erzeugungsprofilen zur Dimensionierung der einzelnen Komponenten
- Entwicklung eines Programmteils zur Optimierung der Betriebsstrategie
- Verifikation des Tools anhand von ausgewählten Beispielen
- Optimierung der Benutzerfreundlichkeit im Hinblick auf die späteren Anwender

a. Auslegung der Systemkonfiguration über ein regelbasiertes Expertensystem

Das bei der Forschungsstelle 2 entstandene Konfigurationswerkzeug besteht aus drei Stufen:

- Auswahl der Komponenten des Energiesystems (Erzeugung, Speicher, ...) durch ein Expertensystem
- Dimensionierung der Komponenten auf Basis numerischer Simulation
- Erstellung einer geeigneten Betriebsstrategie (Betriebszeiten, Speichermanagement, ...)

Der erste Teil, das Expertensystem zur Komponentenauswahl, wurde implementiert und mit verschiedenen Beispielfällen getestet; dieses wird im Folgenden kurz skizziert. Ein Expertensystem wurde für diese Aufgabe gewählt, da es eine verständliche und übersichtliche Eingabe der Auswahlkriterien in Form von Regeln sowie eine Gewichtung der dabei relevanten Entscheidungsfaktoren erlaubt und außerdem Transparenz durch eine Erklärungskomponente bietet.

Als Komponenten für die betrachteten Energiesysteme mit einer Struktur, wie in Abb. 18 dargestellt, kommen grundsätzlich in Frage:

- Kleine Windgeneratoren oder Photovoltaikmodule entsprechend den lokalen Gegebenheiten bzw. dem erwarteten Lastverhalten;
- Speicher für Kurzzeit (Tag-/Nachtzyklen) in Form verschiedener Akkumulatortypen bzw. für Mittel-/Langzeit (Wetterbedingungen, Jahreszeiten) als Wasserstoffspeicher, vorrangig auf Metallhydridbasis;
- Elektrolyseure zur Wasserstofferzeugung;
- Kleine Generatoren mit Gasmotor (Wasserstoff) oder Brennstoffzellen zur Rückwandlung in Elektrizität.

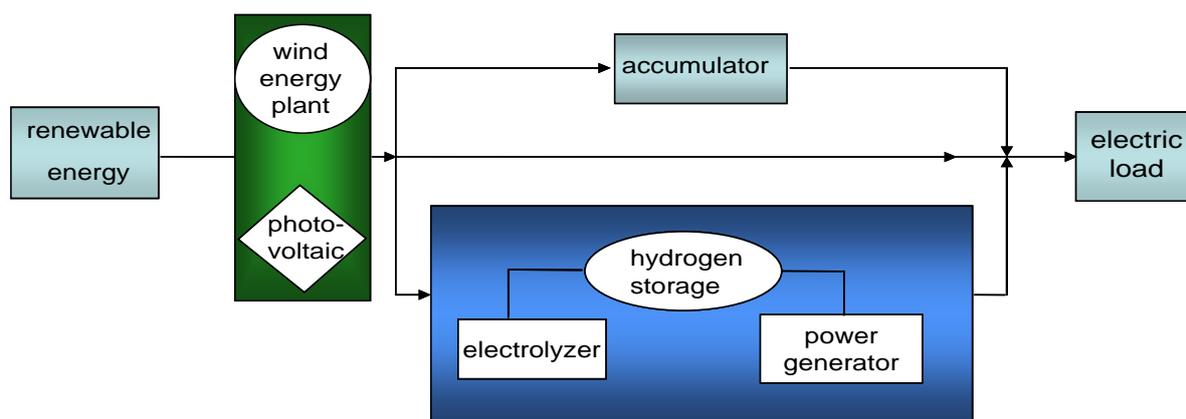


Abb. 18: Grundsätzliche Struktur eines Kleinversorgungssystems mit Speichern

Die in der Wissensbasis des Expertensystems in Form von etwa 580 Regeln veranlagte Expertise geht aus einer sorgfältigen Analyse der Entscheidungskriterien für die Komponentenauswahl bei solchen Systemen hervor. Auf oberer Entscheidungsebene spielen dabei z. B. folgende Aspekte eine Rolle:

- Stromerzeugung entsprechend dem lokal zu erwartenden Energieertrag (Wind/Solar), der verfügbaren Fläche sowie baulichen und weiteren Randbedingungen;
- Lastverläufe (qualitativ) bezüglich Zyklizität und Varietät;
- erforderliche(r) Speicher (Kurz- oder Mittel-/Langzeit oder beides) als Akkumulator oder Wasserstoffpfad sowie jeweilige Speichertechnologie;
- Rückwandlung des Wasserstoffs in Elektrizität nach Last-, Kosten- und Innovationskriterien;
- betriebliche Einschränkungen wie Belastungsgrenzen, Begrenzung der Betriebszyklenzahl oder minimale Betriebszeiten bestimmter Komponenten;
- wirtschaftliche Bedingungen.

Die Vielzahl der implementierten Regeln (581) ergibt sich aus dem Detailgrad der betrachteten Parameter und Verhältnisse. So wird entsprechend geographischen Angaben entweder solare oder Windenergieerzeugung bevorzugt vorgeschlagen, der bevorzugt vorgeschlagene Typ von Photovoltaik-Modulen ergibt sich aus den vorgegebenen Einstrahlungsbedingungen, der Typ eines Wasserstoffspeichers aus Zusammenhängen mit Sicherheitsanforderungen und Umgebungstemperatur usw..

Verwendet für das System wurde die im Internet verfügbare Expertensystem-Shell "KnowMe", da diese frei zugänglich und kostenlos ist und außerdem eine übersichtliche graphikbasierte Eingabe der Wissensbasis erlaubt. Die ebenfalls implementierte

Erklärungskomponente bietet nicht nur Transparenz bezüglich der vom Expertensystem gemachten Vorschläge bei dessen Anwendung, sondern erlaubt auch bereits während der Eingabe der Regeln durch systematisches Nachfragen deren Plausibilität unmittelbar zu überprüfen. Außerdem existieren Schnittstellen zu MS-Office-Programmen wie Excel oder Word, was die spätere Pflege und Erweiterung der Wissensbasis erleichtert.

Getestet wurde das Expertensystem mit einer Vielzahl unterschiedlicher vorgegebener Versorgungsaufgaben von der Telekommunikations-Umsetzerstation bis zu verschiedenen landwirtschaftlichen Versorgungsstrukturen auch in klimatisch extremen Zonen. In allen diesen Fällen erwiesen sich die Vorschläge des Expertensystems als sinnvoll und anwendbar. Der nächste Schritt zum Gesamt-Tool ist entsprechend dem Verlaufsplan die auf Simulationsrechnungen basierende Dimensionierung der einzelnen Systemkomponenten:

b. Verknüpfung der Modelle mit den relevanten Last- und Erzeugungsprofilen zur Dimensionierung der einzelnen Komponenten

Die prinzipielle Vorgehensweise ist wie folgt:

- Die Konfiguration der Anlage wird mit den jeweils zugehörigen Komponenten aufgebaut.
- Für die Einspeisung wird zunächst eine kleine Anlage (ca. 5-fache maximale Verbraucherlast) angenommen, bei Klein-Windkraftanlagen die kleinste verfügbare Baugröße).
- Die Ausgangsleistung für die Rückwandlung Wasserstoff → Elektrizität (Brennstoffzelle oder Generator mit Gasmotor) wird der maximalen Verbraucherleistung entsprechend angenommen.
- Ein fiktiver Speicher (Kurz- und Langzeitspeicher) wird zu Beginn als beliebig (sehr) groß angenommen.
- Mit den vorliegenden Jahres-Profilen von Last und (typischer) Einspeisung und einem Anfangs-Füllstand des sehr großen Speichers von 50 % wird simulativ überprüft, ob die Last von dieser Anlage das ganze Jahr über gedeckt werden könnte (d.h. keine Versorgungsausfälle auftreten) und der End-Speicherfüllstand etwa wieder dem Anfangszustand entspricht.
- Ist dies nicht der Fall (d.h. es treten Versorgungsausfälle auf und/oder der End-Speicherfüllstand ist niedriger als zu Beginn der Simulation) wird eine größere Einspeisung angenommen (d.h. eine um 20 % größere PV-Anlage bzw. die nächstgrößere verfügbare Windkraftanlage) und die Jahres Simulation wiederholt.
- Dies geschieht iterativ so lange, bis die o.g. Bedingungen (d.h. keine Versorgungsunterbrechungen und Speicher-Endfüllstand wie zu Beginn) erfüllt sind.
- Damit ist die Größe der erforderlichen regenerativen Einspeisung gefunden und wird entsprechend festgelegt.
- Die Dimensionierung des Gesamt-Speichervolumens ergibt sich gleichzeitig aus der Differenz der maximalen positiven und negativen Abweichungen vom Anfangsfüllstand während des Simulationszeitraumes.
- Dieser Wert wird für den Langzeitspeicher zugeordnet und beinhaltet damit für diesen noch eine Sicherheitsreserve.
- Die Kapazität des Kurzzeitspeichers wird pauschal mit 30 % derer des Langzeitspeichers angenommen und liegt damit ebenfalls auf der sicheren Seite.

Dieses relativ einfache, aber gut nachvollziehbare Verfahren hat in den bisher damit betrachteten Beispielen immer zu einer plausiblen Anlagenauslegung geführt.

c. Entwicklung eines Programnteils zur Optimierung der Betriebsstrategie

Eine sinnvolle Betriebsweise – insbesondere auch der Lang- und Kurzzeitspeicher – erfordert die eingehende Berücksichtigung der Einspeise- und Lastprofile. So ist es zum Beispiel bei erwarteter hoher regenerativer Einspeisung für eine längere Zeit (z. B. am Beginn eines sonnigen Tages) sinnvoller, den Langzeitspeicher zu laden, während kürzere zu erwartende Spitzen bei Einspeisung oder Last vorzugsweise über den Akkumulator als Kurzzeitspeicher ausgeglichen werden sollten. Dies bedeutet, dass die Betriebsstrategie für die Gesamtanlage sowohl an dem (vorliegenden) typischen Lastprofil wie auch an einer Prognose der zu erwartenden regenerativen Einspeisung orientiert werden sollte. Solch eine Abschätzung der zu erwartenden regenerativen Einspeisung kann durch automatische Auswertung einer Wetterprognose aus dem Internet – Windgeschwindigkeit oder solare Einstrahlung – vorgenommen werden. Ein entsprechendes Programm, welches die bei Wetterberichten üblichen Icons oder auch Schlagworte („leicht bewölkt“, „starker Wind“) entsprechend auswertet und in prozentuale Bewölkungsgrade bzw. mittlere Windgeschwindigkeiten „übersetzt“, wurde an der Forschungsstelle 2 (EAN) schon vor längerer Zeit im Rahmen eines anderen Projektes erstellt [10] und kann hier ebenfalls Verwendung finden.

Aufgrund der Tatsachen, dass die betrieblichen Anforderungen der einzelnen Systemkomponenten leicht als Regeln formuliert werden können, und dass außerdem die Einspeise- und Lastprofile nur mit einer gewissen Unschärfe vorliegen, wird die Betriebsstrategie für das gesamte autarke Energiesystem mit Hilfe der Fuzzy-Technik formuliert; Abb. 19 zeigt eine Übersicht über dessen grundsätzliche Struktur: es enthält separate Steuerblöcke für Akkumulator, Elektrolyseur und Rückverstromung des Wasserstoffs (Brennstoffzelle oder Generator mit Gasmotor), wobei jeder dieser Blöcke auch Informationen aus den jeweils anderen Zweigen mitberücksichtigen muss. Die regenerative Einspeisung wird nicht explizit gesteuert, d.h. die eingespeiste Energie wird nach Möglichkeit direkt verwendet bzw. gespeichert außer im Falle vollständig gefüllter Speicher, was dann zur Abregelung führt.

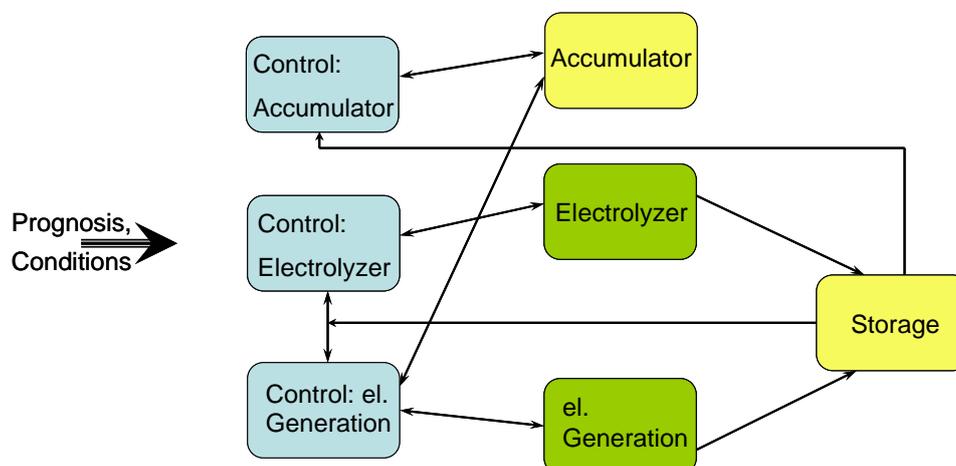


Abb. 19: Übersicht über die Struktur der Betriebsstrategie

Lastverlauf und Wetterprognose haben den höchsten Einfluss auf die Steuerung von Elektrolyseur und Rückverstromung; für diese beiden Komponenten gibt es eine Begrenzung der täglichen Betriebszyklen sowie eine Mindest-Einschaltdauer.

Nachfolgend werden die Zusammenhänge und Abhängigkeiten dargelegt, die es bei der Formulierung der Fuzzy-Betriebsregeln zu berücksichtigen galt. Generell wird die Versorgungszuverlässigkeit gegenüber ökonomischen Aspekten priorisiert. Die Regeln für den Wasserstoff-Pfad werden jeweils zuerst angewandt.

Die einzelnen Eingangsgrößen des Fuzzy-Systems wurden als „linguistische Variablen“ formuliert (für Speicher z. B. „leer“, „fast leer“, „halbvoll“, „nahezu voll“, „voll“) und diesen Zugehörigkeitsfunktionen für die entsprechenden Wertebereiche zugeordnet.

Im Einzelnen wurden in den Regeln für die Betriebsführung des Elektrolyseurs die folgenden Zusammenhänge berücksichtigt (siehe Abb. 20); in Anbetracht der Anzahl und Komplexität der Eingangsvariablen (ebenfalls aus Abb. 20 ersichtlich) wurde das Fuzzy-System aus zwei Ebenen aufgebaut, um die Regelbasis übersichtlicher zu gestalten.

- Wetter-Prognose: Sowohl qualitative als auch temporale („wie lange“) Information wird benötigt, für Wind z. B. „schwach“, „mittel“, „stark“, „zu stark“ sowie der entsprechende Zeithorizont bis maximal 24 h.
- Lastverlauf: Ebenfalls wird hier quantitative and temporale Information benötigt; die Last wird auf 1 kW normiert, so dass die Fuzzy-Regeln unabhängig von der spezifischen Systemgröße gültig sind. Der Zeithorizont ist auch hier maximal 24 h.
- Speicherzustand: Der Ladezustand der Speicher hat eine wesentliche Bedeutung; wegen der Mindestbetriebszeit des Elektrolyseurs darf der Elektrolyseur nicht betrieben werden, wenn der Wasserstoff-Speicher ganz oder nahezu gefüllt ist; darüber hinaus müssen der Druck und die Temperatur des Wasserstoffspeichers ebenfalls berücksichtigt werden als Indikator für die Zeit, für die der Speicher unter gegebenen Umständen gefüllt werden kann.
- Zustand des Elektrolyseurs: Um den Wirkungsgrad und die Lebenserwartung des Elektrolyseurs zu erhöhen, wurde die minimale Betriebszeit des Elektrolyseurs auf 2 Stunden gesetzt und die Betriebszyklen auf 3 pro Tag begrenzt.
- Diskrepanz zwischen erwarteter Einspeisung (entsprechend Wetterprognose) und aktueller Einspeisung: berücksichtigt inkorrekte Wetterprognosen, indem zwischen positiver (höhere Erzeugung als erwartet) und negativer Abweichung unterschieden wird.
- Diskrepanz zwischen erwarteter und aktueller Last: Berücksichtigt inkorrekte Lastprognosen wiederum in positiver oder negativer Richtung.

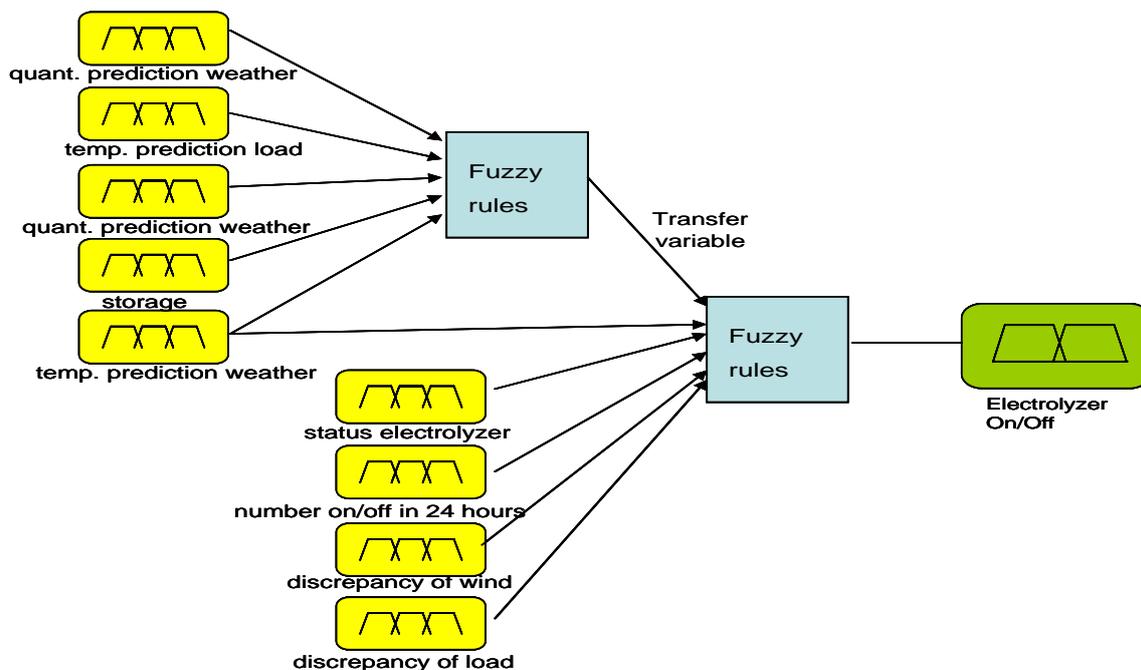


Abb. 20: Fuzzy-Betriebsführungsblock für den Elektrolyseur

Eine Regel für den Betrieb des Elektrolyseurs in Verbindung mit einem Windgenerator sieht zum Beispiel wie folgt aus (siehe auch Abb. 20):

Wenn (*Windprognose* ist nicht "stark") und (*Lastprognose* ist "hoch"), dann (*Transfervariable* ist "aus"). Wenn (*Transfervariable* ist "aus") und (*Status Elektrolyseur* ist "ein") und (*AnzBetrZykl* ist nicht "3") und (*DiskrepanzWind* ist nicht "negativ") und (*DiskrepanzLast* ist "negativ") und (*Windprognosezeit* ist "kurz"), dann (*Elektrolyseur* ist "ein").

In Abb. 21 ist beispielhaft der Einfluss von quantitativer Prädiktion von Windeinspeisung und Last auf den Betrieb des Elektrolyseurs gezeigt in Form der Zugehörigkeitsfunktionen der Regel-Alternativen. Die De-Fuzzifizierung ist hier relativ einfach: für Ausgangswerte größer oder gleich 0,5 wird der Elektrolyseur eingeschaltet, andernfalls nicht.

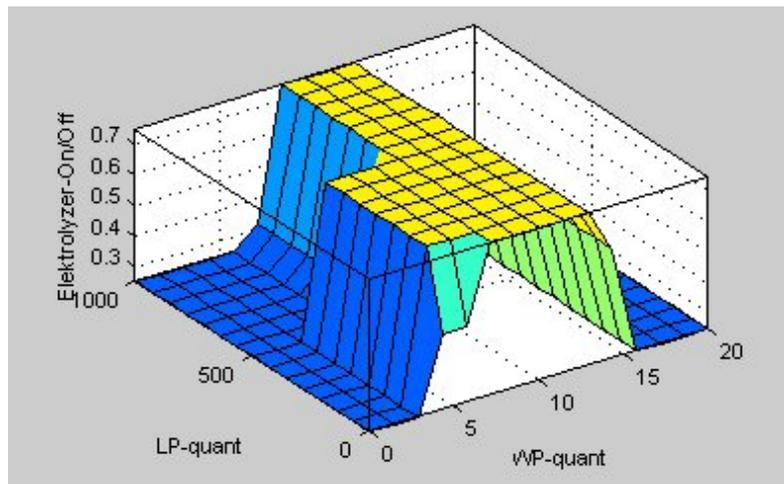


Abb. 21: Graphische Darstellung der Regel-Alternativen zum Einfluss von Last- und Windprognose auf den Einschaltzustand des Elektrolyseurs

Für die Betriebsführung der Rückwandlung Wasserstoff → Elektrizität (Generator mit Gasmotor oder Brennstoffzelle) sind folgende Variablen von Bedeutung:

- Diskrepanz in der Versorgungsleistung: Fehlende regenerative Erzeugerleistung wird bei geringer Unterdeckung für kurze Zeitabschnitte aus dem Akkumulator gedeckt; bei größerem Betrag und/oder längerem Zeitraum (> 2 h) wird die Brennstoffzelle bzw. der Gasmotor gestartet.
- Speicherzustand: Wegen der Mindestbetriebszeit wird der Gasmotor nicht gestartet, wenn der Wasserstoffspeicher ganz oder nahezu leer ist, solange der Akkumulator noch zu mehr als 20 % geladen ist und vorübergehend die Last decken kann.
- Versorgungszuverlässigkeit: Wenn der Akkumulator völlig leer ist, wird der Gasmotor auch für kürzere Betriebszeiten (unterhalb der eigentlichen Mindestbetriebszeit) gestartet, solange der Wasserstoffspeicher nicht leer ist.

Schließlich werden für den Akkumulator drei Variablen berücksichtigt:

- Tiefentladung: Diese muss unter allen Umständen vermieden werden (dauerhafte Schädigung). Bei Füllgraden unter 20 % wird der Gasmotor gestartet, auch wenn die Mindestbetriebszeit nicht erreicht wird, um die Versorgung aufrechtzuerhalten.
- Diskrepanz in der Versorgungsleistung: Bei einer negativen Abweichung der Versorgungsleistung wird der Akkumulator entladen, solange der Tiefentladeschutz nicht aktiviert wird. Im Falle einer positiven Abweichung wird der Akkumulator geladen.
- Ladebedingungen: Da ein vollgeladener Akkumulator nicht weitergeladen werden kann, muss die regenerative Erzeugung in diesem Falle abgeregelt werden.

Die Fuzzy-Teilsysteme für Wasserstoff-Rückwandlung und Akkumulator haben eine ähnliche, allerdings einfachere Struktur wie das in Abb. 20 für den Elektrolyseur gezeigte.

Mit den gegenwärtig etwa 40 Regeln wurden ausführliche Tests der Betriebsstrategie für unterschiedliche Anlagen-Konfigurationen durchgeführt; dies erfolgte auf Basis der Simulation der jeweiligen Anlage mit den entsprechenden Komponenten-Modellen. Ein Beispiel hierzu wird im nächsten Abschnitt gezeigt. Im Falle des Auftretens von Inkonsistenzen der Betriebsweise erlaubt die angewandte Fuzzy-Technik, die der natürlichen Sprache sehr nahen Regeln (vgl. Beispiel oben) auf einfache Weise anzupassen bzw. auszutauschen.

d. Verifikation des Tools anhand von ausgewählten Beispielen

Wie schon erwähnt, wurde die Verifikation der Betriebsstrategien auf Basis der vorhandenen bzw. im Projekt erarbeiteten Simulationsmodelle durchgeführt. Als relativ übersichtliches Beispiel wird dies hier für eine abgelegene Telekommunikations-Basisstation mit einer konstanten Last von 500 W gezeigt, die entsprechend den Ergebnissen des Expertensystems für die Komponenten-Auswahl durch einen Windgenerator versorgt wird. Als Langzeitspeicher wurde vom Expertensystem ein Wasserstoff-Pfad bestehend aus Elektrolyseur, Metallhydrid-Speicher und Gasmotor mit Generator vorgesehen, als Kurzzeitspeicher dient ein einfacher Bleiakkumulator.

Die Dimensionierung von Windgenerator, Metallhydridspeicher und Akkumulator erfolgte wie oben unter b. beschrieben, um über das gesamte Jahr eine gesicherte Versorgung zu erreichen. Konkret ergab sich dabei eine Nennleistung von 6 kW für den kommerziell erhältlichen Windgenerator; das Windprofil lag als reale 10-Minuten-Messwerte für einen Ort in NRW vor. Die Speicherkapazität wurde mit 6600 kWh für den Wasserstoffspeicher ermittelt, die Kapazität des Akkumulators beträgt wie oben beschrieben 30 % hiervon. Der PEM-Elektrolyseur hat eine Nennleistung von 5 kW bei einem angenommenen Wirkungsgrad von 40 % im gesamten Betriebsbereich. Die Wasserstoff-Rückwandlung geschieht durch einen Gasmotor-betriebenen 0,6-kW-Generator. Die minimale Betriebszeit wurde für Elektrolyseur und Gasmotor gleichermaßen mit 2 h vorgegeben, die Anzahl der täglichen Betriebszyklen mit jeweils 3.

In Abb. 22a) sind die Ausgangsleistung des Windgenerators (in dunkelblau) und das Lastprofil (in grün) für einen Zeitbereich von 24 h dargestellt. Die Differenzleistung zwischen Erzeugung und Last – die über die Speicherung ausgeglichen werden muss – ist in rot eingetragen; es ist ersichtlich, dass in den ersten 7 Stunden diese Differenzleistung tendenziell positiv ist, während in den letzten 8 Stunden eher die Last überwiegt. Entsprechend werden also der Elektrolyseur und der Gasmotor zu den jeweiligen Zeiten betrieben, wie deren in Abb. 22b) dargestellte Ansteuersignale belegen. Innerhalb von 24 Stunden werden der Elektrolyseur ebenso wie der Gasmotor mit Generator jeweils zweimal betrieben und die Mindestbetriebszeiten dabei eingehalten. Abb. 22c) zeigt noch einmal die Summenleistung aus Elektrolyseur (positiv) und Gasmotor-Generator (negativ) sowie in violett die Ausgleichsleistung, die vom Akkumulator beigetragen wird, so dass eine kontinuierliche Versorgung der Last erreicht wird. In Abb. 22d) sind schließlich noch die Füllstände von Akkumulator (grün) und Wasserstoffspeicher (violett) dargestellt. Während der windreichen Stunden wird der Wasserstoffspeicher geladen und während der windarmen Stunden entladen. Der Akkumulator liefert den kurzfristigen Ausgleich.

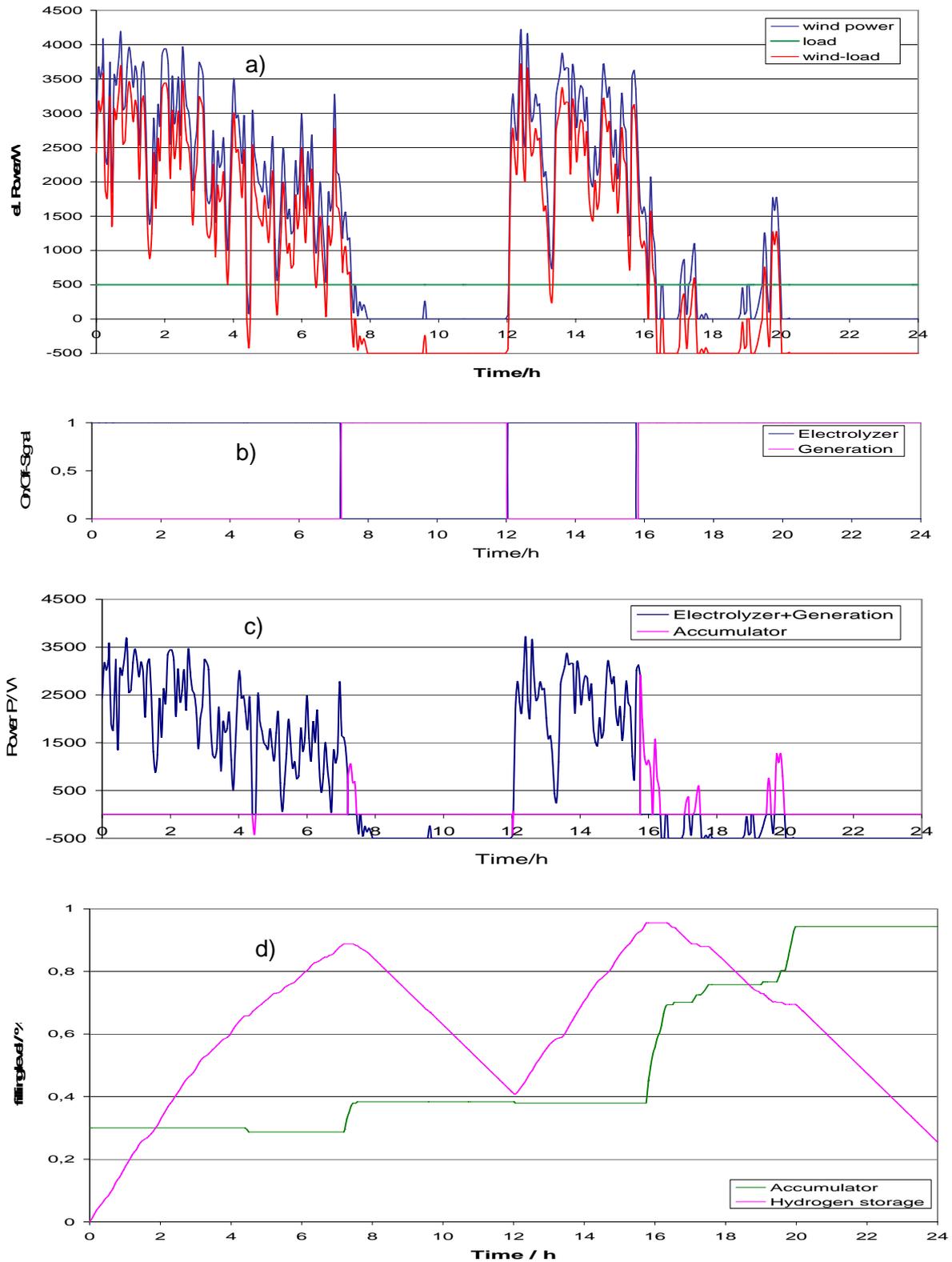


Abb. 22: a) Wind generation and load profile of example grid; b) Control signals for electrolyzer and hydrogen based generation; c) El. power of electrolyzer, electrical generation and accumulator; d) Filling levels of hydrogen storage and accumulator

Offensichtlich führt das implementierte Fuzzy-System zu einem plausiblen und vernünftigen Betriebsverhalten, was auch anhand weiterer Szenarien nachgewiesen wurde.

e. Optimierung der Benutzerfreundlichkeit im Hinblick auf die späteren Anwender

Die Bedienoberfläche für den späteren Anwender wurde über eine VBA-Programmierung in Microsoft Excel realisiert. Das Programm leitet den Anwender durch die einzelnen Auslegungsschritte und gibt Anweisungen und Erklärungen zu den erforderlichen Schritten und benötigten Eingaben. Weitere Programme (Matlab Simulink, KnowMe), die neben Excel für die Auslegung des Systems notwendig sind, werden automatisch aus dem VBA-Programm heraus gestartet. Die Berechnungen werden vorgenommen, die Daten zum Teil automatisiert an Excel übergeben und das jeweilige Unterprogramm wieder geschlossen. Der Anwender des Tools hat somit außer zu Excel keinen bzw. nur leichte Berührungspunkte zu den jeweiligen Unterprogrammen.

Zunächst wird dem Projekt ein Projektname, -nummer und Datum vom Anwender über eine Eingabemaske zugewiesen, siehe Abb. 23.



Abb. 23: Anlegen des Projektes über die Programmoberfläche

Arbeitsschritt eins befasst sich mit der *Komponentenauswahl* unter Verwendung des Expertensystem-Shell „KnowMe“. Über den Start-Button wird *KnowMe* aufgerufen; der Anwender muss nun dem automatischen Laden der Wissensbasis zustimmen und über einen Button einen neuen Fall (KnowMe-Projekt) starten. Der Internetexplorer mit den Expertenfragen öffnet sich, wie in Abb. 24 dargestellt, und der Anwender kann durch Beantworten der Fragen mit der Komponentenauswahl beginnen.

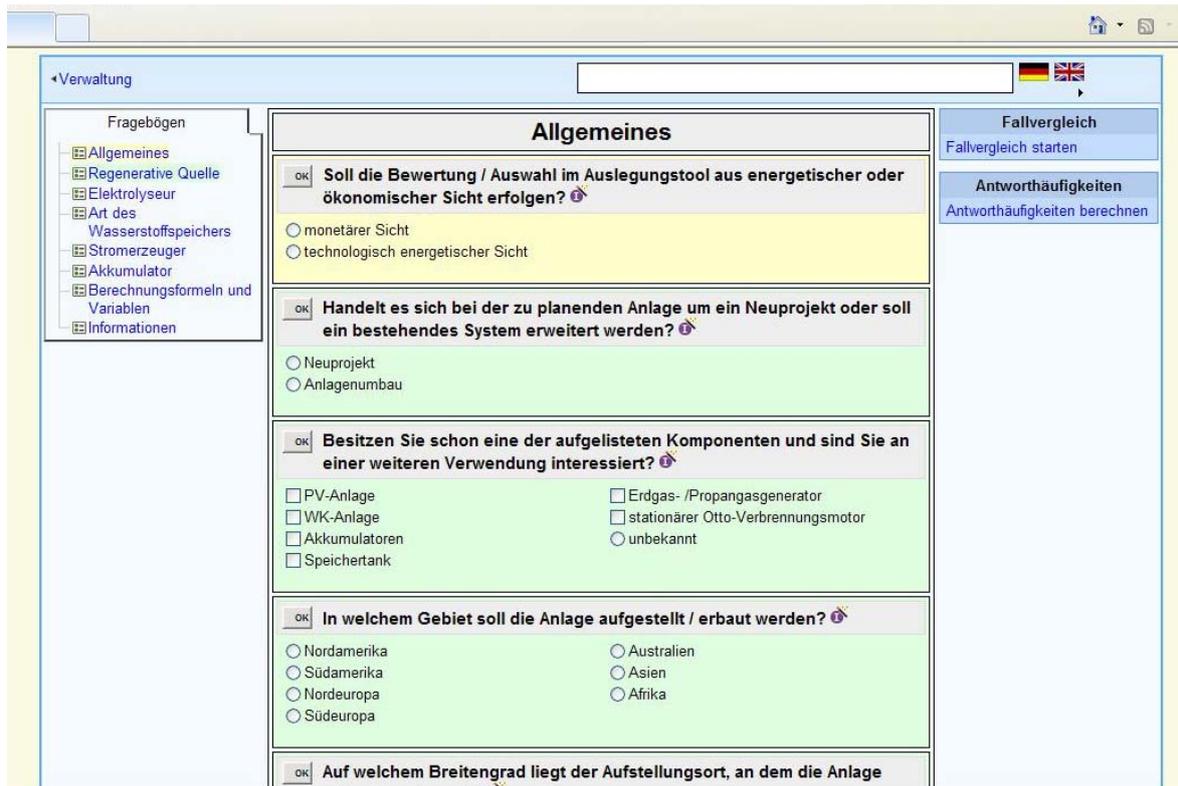


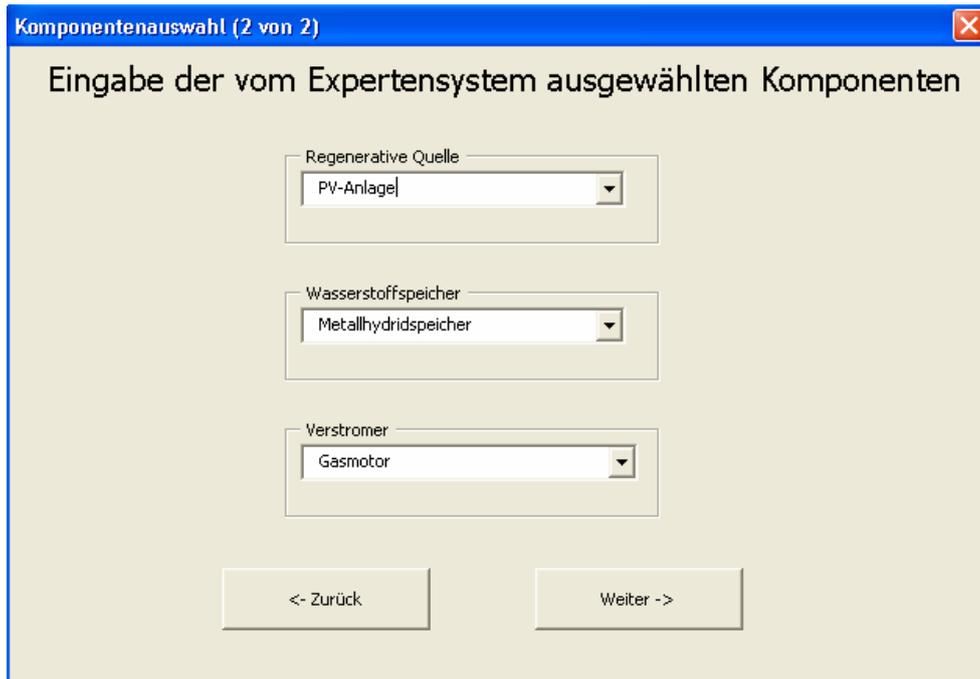
Abb. 24: Expertenfragen im Internet-Explorer

Nach Beantwortung des Fragenkatalogs erscheint die Ergebnistabelle des Expertensystems, Abb. 25 Hier werden die sich ergebenden *wahrscheinlichen (sinnvollsten)* und *verdächtigen (alternative mögliche) Lösungen* angegeben.

Ergebnistabelle	
bisher benötigte Zeit: 0:18:34	
Das System kam aufgrund Ihrer Angaben zu dem folgenden Ergebnis:	
Heuristische Lösungen	
Wahrscheinliche Lösungen	
DC/DC Wandler	ⓘ
Wechselrichter	ⓘ
Wasserstoffverbrennungsmotor mit Generator	ⓘ
Nickel-Cadmium	ⓘ
alkaliner Elektrolyseur	ⓘ
Metall-Hydrid-Speicher	ⓘ
Lithium-Ionenakku	ⓘ
Verdächtige Lösungen	
monokristalline PV	ⓘ
Nickel-Metallhydrid	ⓘ

Abb. 25: Ergebnistabelle des Expertensystems

Der Anwender hat nun die Möglichkeit zu entscheiden, ob er den Empfehlungen des Expertensystems folgt oder andere Komponenten vorzieht. Die endgültige Komponentenwahl wird nun vom Benutzer in einem *Pull-down-Menü* der Eingabemaske des Excel-Programms getätigt, Abb. 26. Mit dieser Eingabe ist der erste Schritt des Tools, die Komponentenauswahl, abgeschlossen.



Komponentenauswahl (2 von 2)

Eingabe der vom Expertensystem ausgewählten Komponenten

Regenerative Quelle
PV-Anlage

Wasserstoffspeicher
Metallhydridspeicher

Verstromer
Gasmotor

<- Zurück

Weiter ->

Abb. 26: Auswahl der Komponenten im Excel-Programm

Für die *Dimensionierung*, den zweiten Schritt der Auslegungssoftware, werden nun die Daten über das erwartete Lastprofil sowie über das Solarprofil bzw. Windprofil aus der betrachteten Region benötigt. Diese Daten müssen in den dafür vorgesehenen und dementsprechend beschrifteten Arbeitsblättern (worksheets) auf der Excel-Oberfläche abgelegt werden.

Im Folgenden wird nun Matlab-Simulink gestartet und die Dimensionierung der Komponenten automatisch durchgeführt. Des Weiteren wird überprüft, ob die berechnete Komponentengröße ausreichend ist, um den Betrieb mit der entwickelten und im System hinterlegten Betriebsstrategie, Schritt drei, zu gewährleisten. Dieser Vorgang kann einige Minuten in Anspruch nehmen. Nach Beendigung der Dimensionierung übergibt Matlab die Komponentengrößen an Excel. Die Daten erscheinen sowohl im Arbeitsblatt „Projekt“ als auch in der Oberfläche des VBA-Programms, siehe Abb. 27.

	A	B	C	D	E
1					
2	Projektname	Projektnummer	Jahr	Monat	Datum
3	Projekt A	1	2011	05	19
4					
5		Komponentenauswahl:	Größe:		
6	Regenerative Quelle:	Windkraftanlage	6000 W		
7		PV-Anlage	W		
8	H2-Speicher:	Metallhydridspeicher	1591741.275 Wh		
9	Akkumulator:		300 Wh		
10	Verstromer:	Gasmotor	500 W		
11	Elektrolyseur:		4778.98075 W		
12					
13	Dimensionierung (3 von 3)				
14	Die Systemkomponenten wurden wie folgt dimensioniert:				
15	Reg. Quelle				
16	Windkraftanlage / W: 6000				
17	PV-Anlage / W:				
18	Wasserstoffpfad				
19	Elektrolyseur / W: 4778				
20	Wasserstoffspeicher / Wh: 1591741				
21	Verstromer / W: 500				
22	Kurzzeitspeicher				
23	Akkumulator / Wh: 300				
24	<- Zurück				
25	Weiter ->				
26	Projekt / Lastprofil / Windprofil / Solarprofil / icons				

Abb. 27: Ergebnisseite der Dimensionierung

Die Daten des zeitlichen Verlaufs der Simulation unter Verwendung der Betriebsstrategie wird an Excel übergeben und in Form von Diagrammen dargestellt, siehe Abb. 22.

Nach diesem abschließenden Schritt kann mit der Planung der autarken Anlage begonnen werden.

3 Ergänzende Erläuterungen zum Forschungsvorhaben

3.1 Soll-Ist-Vergleich

Die Forschungsaufgaben der Forschungsstelle 1 umfassten gemäß dem Zeit- und Arbeitsplan den Experimentalaufbau für den Wasserstoffpfad, die Vermessung und Bewertung von Metallhydridspeichern, die Untersuchung von Sicherheitsaspekten sowie die Unterstützung der Forschungsstelle 2 bei der Modellerstellung für den Wasserstoffpfad, der Definition der Regeln für das Expertensystem und der Dokumentation zum Auslegungstool.

Für den Experimentalaufbau des Wasserstoffpfades wurde zunächst ein bestehender Teststand erweitert, um eine umfangreiche Charakterisierung von Metallhydridspeichern zu ermöglichen. Da sich im Verlauf des Projektes herausstellte, dass für die Modellierung eines Metallhydridspeichers deutlich mehr Versuchsdaten benötigt wurden als bei der Projektbeantragung vermutet, musste die Charakterisierung des Speichers erheblich ausgeweitet werden. Damit ist es gelungen, der Forschungsstelle 2 ausreichende Daten für die Erstellung des entsprechenden Speichermodells zur Verfügung zu stellen.

Im zweiten Schritt wurde versucht, ein an der Forschungsstelle 1 verfügbares Elektrolysesystem zu vermessen, um mit diesen Daten ein Elektrolysemodell zu erstellen und zu verifizieren. Es zeigte sich, dass aufgrund der in dem kommerziellen System bereits integrierten Regelung eine für die Modellerstellung aussagekräftige Charakterisierung nicht möglich war. Daraufhin wurde an der Forschungsstelle 1 ein zusätzlicher Teststand aufgebaut, mit dem sich PEM-Elektrolyse-Stacks unter verschiedenen Bedingungen testen lassen.

Ein Teil des Wasserstoffpfades, bestehend aus einem Elektrolyseur bzw. einem Elektrolyseestack und einem Metallhydridspeicher wurde erfolgreich aufgebaut. Da es am ZBT mittlerweile erhebliches Know-how zum Betrieb und zur Modellierung von PEM-Brennstoffzellen gibt, konnte auf die vollständige Demonstration des Wasserstoffpfades verzichtet werden. In Verbindung mit den deutlich ausgeweiteten Versuchen zur Charakterisierung von MH-Speichern sowie mit dem ergänzend aufgebauten Versuchsstand zur Vermessung von Elektrolyseestacks ließen sich so die Projektkosten im beantragten Rahmen halten.

Die Arbeitsschritte der Forschungsstelle 2 erfolgten nahezu vollständig entsprechend dem vorgeschlagenen Arbeitsplan, und das erstellte Auslegungstool entspricht weitestgehend den gestellten Erwartungen. Lediglich die Übergabe der vom Expertensystem vorgeschlagenen Systemkomponenten an die weitere Berechnung zur Dimensionierung und Betriebsführung muss manuell erfolgen, da eine direkte Kopplung wegen des nicht verfügbaren Quellcodes für die verwendete Expertensystem-Shell nicht realisiert werden konnte; diese Übergabe von typischerweise ca. 5 ausgewählten Systemkomponenten wird allerdings durch eine Menüführung unterstützt, so dass die Benutzerfreundlichkeit nicht nennenswert eingeschränkt ist.

3.2 Erläuterungen zum zahlenmäßigen Nachweis

Die von beiden Forschungsstellen geltend gemachten Personalkosten dienen ausschließlich zur Finanzierung der wissenschaftlichen Projektbearbeiter, die für den experimentellen Aufbau, die Versuchsplanung, -durchführung und -auswertung (ZBT) bzw. die Konzeption und Erstellung des Auslegungstools mit seinen verschiedenen Teilsystemen (EAN) zuständig waren. Die Bewertung und Diskussion der Ergebnisse zwischen beiden Forschungsstellen gehörten ebenfalls zum Arbeitsumfang. Des Weiteren wurden von der Fst. 1 die Recherche und Analyse von Normen und Richtlinien insbesondere in Bezug auf die Sicherheit autarker Energiesysteme mit Wasserstoff von den wissenschaftlichen Projektarbeitern durchgeführt.

Mittel für Gerätebeschaffung standen im Rahmen des Projektes bei beiden Forschungsstellen nicht zur Verfügung, Leistungen Dritter wurden ebenfalls nicht beantragt bzw. in Anspruch genommen.

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die an den Forschungsstellen geleistete Arbeit entspricht in großem Umfang dem begutachteten und bewilligten Antrag. Die geleistete Arbeit war für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen.

5 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Die bisher durchgeführten und in nächster Zeit geplanten Transfermaßnahmen sind in der untenstehenden Tabelle zusammengefasst.

Zeitpunkt	Maßnahme	Bemerkung
18.08.2009	PA Sitzung in Duisburg an der Fst. 1 ZBT	8 Teilnehmer aus der Wirtschaft, darunter 5 KMU und 3 nicht-KMU
11.03.2010	PA Sitzung in Duisburg an der Fst. 2	5 Teilnehmer aus der Wirtschaft, darunter 3

Zeitpunkt	Maßnahme	Bemerkung
	EAN	KMU und 2 nicht-KMU
08.12.2010	PA Sitzung in Duisburg an der Fst. 2 EAN	5 Teilnehmer aus der Wirtschaft, darunter 3 KMU und 2 nicht-KMU
19.05.2011	PA Sitzung in Duisburg an der Fst. 1 ZBT	4 Teilnehmer aus der Wirtschaft, alle KMU
22./23.09.2009	Posterpräsentation bei einer Fachtagung der ETG im VDE	Darstellung der Projekthinhalte
24./25.11.2009	Posterpräsentation bei der IRES 2009	Darstellung der Projekthinhalte
04./05.05.2010	Posterpräsentation bei der AiF-Brennstoffzellen Allianz	Darstellung der Projekthinhalte
Nov. 2009	Vortrag	Stark,M.; Hausmann,M.; Krost,G.: Expert System for Component Selection of Decentralized Self-sufficient and Regenerative Electricity Supply Systems; Proc. of "Intelligent Systems Application to Power Systems (ISAP) 2009", Curitiba (Brazil), November 2009
März 2010	Vortrag	Stark,M.; Lemken,D.; Oberschachtsiek,B.; Krost,G.: Self-sufficient and Regenerative Electricity Supply Systems with Hydrogen Based Energy Storage; Conference on Control Methodologies and Technology for Energy Efficiency (CMTEE) 2010, Vilamoura (Portugal)
Mai 2010	Vortrag	Oberschachtsiek,B.; Lemken,D.; Stark,M.; Krost,G.: Tool for Optimal Design and Operation of Hydrogen Storage Based Autonomous Energy Systems; 18th World Hydrogen Energy Conference (WHEC) 2010, Essen (Germany)
April 2011	Vortrag	Stark,M.; Krost,G.: Fuzzy Based Operation of Renewable Energy Based Autonomous Micro-grids with Hydrogen Storage; IEEE Symposium on Computational Intelligence Applications in Smart Grid (CIASG) 2011, Paris (France)
Juni 2011	Vortrag	Stark,M.; Krost,G.; Lemken,D.; Oberschachtsiek,B.: Neural Network Based Modeling of Metal-hydride Bed Storages for Small Self-sustaining Energy Supply Systems; IEEE PowerTech 2011, Trondheim (Norway)
Sept. 2011	Vortrag geplant	Stark,M.; Krost,G.: Design Tool for Isolated Micro-Grids Based on Methods of Computational Intelligence; "Intelligent Systems Application to Power Systems (ISAP) 2011", Hersonissos, Crete (Greece)

Anhang: Übersichten zum eingesetzten Personal

Gesamtübersicht Personalausgaben ZBT		2010												
	Einzelansatz A.1 Wiss.-techn. Personal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Vgl.
Soll	1 Ang.m.abg.wiss.Ausbildung Dr.,Dipl.Ing. Uni, Master o. vglb.	1,2	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	12,6
Ist	1 Ang.m.abg.wiss.Ausbildung Dr.,Dipl.Ing. Uni, Master o. vglb.	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	9,7

Gesamtübersicht Personalausgaben UNI		2010												
	Einzelansatz A.1 Wiss.-techn. Personal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Vgl.
Soll	1 Ang.m.abg.wiss.Ausbildung Dr.,Dipl.Ing. Uni, Master o. vglb.	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	13,2
Ist	1 Ang.m.abg.wiss.Ausbildung Dr.,Dipl.Ing. Uni, Master o. vglb.	1,4	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1	1	1	14

6 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Forschungsergebnisse

Seitens des projektbegleitenden Ausschusses wurden die erzielten Ergebnisse als wichtige Basis für eine weitere Optimierung der Auslegungssoftware gewertet. Erweiterungs- und Verbesserungsbedarf besteht hinsichtlich der implementierten Regeln zur Auswahl der optimalen Komponenten, die auf dem Expertenwissen aus unterschiedlichen Fachrichtungen beruhen. Das Einpflegen dieses Wissens ist sehr leicht durch den zukünftigen Nutzer der Software zu realisieren und ermöglicht so für das jeweilige Unternehmen die systematische Sicherung des im Unternehmen vorhandenen Know-hows. Letztlich kann das Auslegungstool so als Multiplikator für vorhandenes Fachwissen fungieren.

Von verschiedenen Mitgliedern des PA wurde bestätigt, dass in Zukunft der Bedarf autarker Energiesysteme gerade in Regionen mit schwach ausgeprägter Infrastruktur deutlich zunehmen wird und der Einsatz geeigneter Auslegungswerkzeuge sowohl Kostenvorteile in der Planungsphase als auch beim späteren Betrieb der Anlage hervorrufen kann. Durch Simulationen optimal angepasste Komponenten verursachen geringere Anschaffungskosten und führen zu minimierten parasitären Energieverbräuchen während des Betriebs des Systems.