

# Berichtsblatt BWPLUS

## H2TwinTest – Multifunktionsprüfstände für Wasserstoffanwendungen mit digitalem Zwilling

von

Hans-Joachim Weimar<sup>1</sup>, Florian Frischholz<sup>1</sup>  
Max Cleven<sup>2</sup>, Tobias Burgert<sup>2</sup>,  
Stefan Bürger<sup>2</sup>, Tansu Özel<sup>2</sup>,  
Armin Keßler<sup>2</sup>, Laura Wachter<sup>2</sup>

- 1) IAVF Antriebstechnik GmbH (IAVF)
- 2) Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (Fraunhofer ICT)

Förderkennzeichen: BWZPH222124 und BWZPH222125

Laufzeit: 01.01.22 - 31.07.24

Finanziert aus Landesmitteln, die der Landtag Baden-Württemberg beschlossen hat.

Oktober 2024



## Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

# 1 Kurzbeschreibung der Projektergebnisse

Ziele des Projektes H2TwinTest waren Konzeption, Aufbau, Inbetriebnahme und Validierung von skalierten multifunktionalen Prüfständen für Wasserstoffanwendungen (Brennstoffzellen und Wasserstoffmotoren) inklusive der erforderlichen Infrastruktur zur Lagerung und Verteilung von Wasserstoff ( $H_2$ ) zu den einzelnen Prüfständen. Dazu waren Sicherheitskonzepte zu erarbeiten. Zudem war ein digitaler Zwilling für einen der Prüfstände zu generieren und zu validieren.

## Infrastruktur

Analog zu den Prüfständen wurde bei der IAVF ein  $H_2$ -Lager mit ursprünglich zwei, im weiteren Verlauf mit acht  $H_2$ -Flaschenbündeln errichtet. Zudem wurde ein Elektrolyseursystem mit vier kleinen Elektrolyseurmodulen inklusive einer Verdichterstation aufgebaut und in ein Netz für Forschungsanwendungen bestehend aus Motor- sowie Brennstoffzellenprüfstand, Elektrolyseursystem und  $H_2$ -Lager integriert. Parallel dazu wurde ein großes  $H_2$ -Lager sowie ein  $H_2$ -Verteilungssystem für industrielle Anwendungen errichtet. Bei Projektende sind zwei  $H_2$ -Tanks aufgestellt, abgenommen und in Betrieb, ebenso das Verteilungssystem.

## Sicherheit

Es wurden Sicherheitskonzepte entwickelt, Sicherheitsabschalt-Matrizen definiert und für die Prüfstände umgesetzt. Zudem wurden Betriebs- und Arbeitsanweisungen sowie Gefährdungsbeurteilungen zum Betrieb von  $H_2$ -Prüfständen erstellt.

Für zwei Prüfstände unterschiedlicher Größe wurden vom Fraunhofer ICT bei festgelegten Zu- und Abluftvolumenströmen Ausbreitungs- und Konzentrationsverteilungen von  $H_2$  bei kleiner und großer Leckage simuliert. Diese Simulationen wurden auch für die geeignete Positionierung von  $H_2$ -Sensoren herangezogen. Die Simulationen zeigen den zeitlichen Verzug bei der Detektion von  $H_2$  für beide Leckagefälle und die dadurch ausgelöste Abschaltung der  $H_2$ -Zufuhr. Für die identifizierten Worst Case Szenarien wurde der Druckanstieg für eine räumlich begrenzte Zündung berechnet und die räumlichen Gegebenheiten dahingegen geprüft und ausgelegt.

In Ergänzung zu den  $H_2$ -Sensoren innerhalb des vorgeschriebenen Sicherheitskonzeptes wurden weitere, schnellansprechende und flexibel zu positionierende  $H_2$ -Sensoren ausgewählt und in zwei Prüfständen integriert. Darüber hinaus wurden weitere für  $H_2$ -Motoren taugliche Sensoren ausgewählt und an verschiedenen Stellen des Motors erfolgreich getestet. In einem Anwendungsfall wurde der  $H_2$ -Sensor im Vergleich zu einem Massenspektrometer getestet und hinsichtlich Messwert- und zeitlicher Auflösung als geeignet befunden.

Für Brennstoffzellen- als auch für Wasserstoffmotor-Prüfstände wurde ein Software-Modul „ $H_2$ -Komparator“ entwickelt und im IAVF Prüfstandssteuerungs- und -überwachungssystem integriert. Unabhängig von  $H_2$ -Detektoren werden aus relevanten Betriebsparametern ein berechneter  $H_2$ -Verbrauch oder eine berechnete Leistung mit den jeweils real ermittelten Werten verglichen. Bei zeitlicher oder wertemäßiger Überschreitung eines definierten Limits können automatisiert verschiedene Warn- und Abschaltmaßnahmen eingeleitet werden.

Für einen Brennstoffzellen-Prüfstand wurde von beiden Projektpartnern gemeinschaftlich, von der  $H_2$ -Lagerung bis zum Prüfstand, eine systematische Risikoanalyse, eine sog. HAZOP, durchgeführt.

Vom Fraunhofer ICT wurde sowohl in Simulationen als auch im Real-Experiment nachgewiesen, dass Hochdrucknebellöschanlagen bei Batteriebränden (z.B. bei Pufferbat-

terien) in Brennstoffzellen-Prüfständen eine effektive Maßnahme zum Schutz der umliegenden Komponenten darstellen können.

### Brennstoffzellen-Prüfstände

Bei der IAVF wurden zwei Brennstoffzellen-Prüfstände aufgebaut. Beim ersten wurde als Prüfling ein 6 kW Stack gewählt. Sämtliche Komponenten im Anoden- und Kathodenpfad (wie z.B. Luftreinigung, Befeuchter, Rezirkulationsgebläse, etc.), Pufferbatterie und DC-Senke sowie die erforderliche Messtechnik wurden als modular austauschbare Komponenten ausgewählt. Die vom Hersteller genannte Leistung konnte erreicht werden. Die Validierung des Prüfstandes erfolgte in stationären Betriebspunkten, in Rampen als auch in dynamischen Fahrweisen (unter Integration von Pufferbatterien). Hierbei wurden skalierte Profile von WLTP-Zyklen nachgefahren und z.T. auch mit Hilfe des Simulationstools CarMaker der Fa. IPG unterschiedliche Fahrzeuge, Wegstrecken und Fahrstrategien simuliert.

Auf dem zweiten Brennstoffzellenprüfstand wurde ein 122 kW Brennstoffzellensystem mit vollständigem Anoden- und Kathodenpfad aufgebaut. Zudem wurden Anfahr- und Abschaltprozeduren generiert sowie Anpassungen der Prüfstandssteuerung und -überwachung vorgenommen. Bis zum Projektende konnte die Leistung des Brennstoffzellensystems sukzessive bis nahe an die vom Hersteller angegebene Nennleistung gesteigert werden. In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Fraunhofer ICT wurde an diesem Prüfstand die Hardware für den Digitalen Zwilling inklusive des Remote-Zugriffs in ein Prüfstandsrack integriert. In Optimierungsschleifen erfolgten Abgleiche und Anpassungen am Modell. Es konnten erfolgreich verschiedene Szenarien bzw. Fahrzeugkonfigurationen und Fahrstrecken unter der Prüfstandssteuerung durch den Digitalen Zwilling am realen Prüfling nachgefahren werden.

### Wasserstoffmotor-Prüfstand

Da Wasserstoffmotoren für mobile Anwendungen während des Projektes noch nicht kommerziell verfügbar waren, wurde bei der IAVF als Brückentechnologie ein auf Wasserstoff umgebauter Blockheizkraftwerkmotor mit einer Nennleistung von 85 kW beschafft und aufgebaut. Zur Vermeidung eines explosionsfähigen Gemisches im Kurbelgehäuse durch Blow-by Gase wurde eine Kurbelgehäusebelüftung ergänzt. Ebenso wurde darin mittels eines Ölabscheiders das Öl zurück in das Kurbelgehäuse zurückgeführt. Der Blockheizkraftwerkmotor wurde zur Validierung des Prüfstands im Stationärbetrieb innerhalb des spezifizierten Betriebskennfelds erfolgreich betrieben.

### Digitaler Zwilling

Parallel zum Aufbau des 122 kW Brennstoffzellensystems wurde ein Digitaler Zwilling der Infrastruktur und des Brennstoffzellengesamtsystems in der Software Dymola erstellt. Die Simulation konnte bereits in der Aufbau- und Inbetriebnahmephase genutzt werden, um beispielsweise Druckverluste im Kühlmittelpfad zu minimieren oder die Anordnung einzelner Komponenten im Kathodenpfad zu optimieren. Nach der Validierung des Modells wurde dieses parallel zum Prüfstandsbetrieb in verschiedenen Konfigurationen für ein leichtes Verteilerfahrzeug sowie für ein Schwerlast-Nutzfahrzeug eingesetzt. Verschiedene Betriebsstrategien wurden simuliert und miteinander verglichen.

### Forschungs- und Entwicklungsplattform mit Erprobungsmöglichkeit

Ein Prüfstand zur gezielten Eindosierung der Luftschadstoffe SO<sub>2</sub>, CO, NH<sub>3</sub> in die Kathodenversorgung von Shortstacks konnte erfolgreich aufgebaut, in Betrieb genommen und für die Durchführung einer Parameterstudie genutzt werden. Die Ein-

flüsse dieser Schadstoffe auf die Leistung und Lebensdauer der Stacks und die Regenerationsprozesse in der Zelle konnten mithilfe der elektrischen Impedanzspektroskopie (EIS), der Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie (FTIR) als auch mit der Massenspektroskopie (MS) untersucht werden.

## 2 Durch die Projektergebnisse erzielte Fortschritte

Für die IAVF Antriebstechnik GmbH als Entwicklungsdienstleister im Bereich von Antrieben für stationäre und mobile Anwendungen stellt das Projekt H2TwinTest einen weiteren Baustein bei der Transformation zu einer CO<sub>2</sub>-reduzierten Mobilität dar. Mit der Errichtung der H<sub>2</sub>-Infrastruktur und der erwirkten Betriebserlaubnis können über den Forschungsmaßstab hinaus H<sub>2</sub>-Prüfstände für Brennstoffzellensysteme und H<sub>2</sub>-Motoren in der Technologieregion Karlsruhe bereitgestellt und betrieben werden. Im Verbund mit dem Projektpartner sowie technischen Prüfeinrichtungen konnten H<sub>2</sub> spezifische sicherheitsrelevante Maßnahmen und Methoden entwickelt und umgesetzt werden.

Beim H<sub>2</sub>-Motor konnten aktuelle Entwicklungsschwerpunkte identifiziert werden. Basierend auf dem langjährigen Know-how der IAVF bei Verbrennungsmotoren können diese Entwicklungsschwerpunkte in Kombination mit der bei der IAVF vorhandenen Messtechnik (z.B. Indiziermesstechnik, Verschleißmessung mittels Radionuklidtechnik, usw.) und Analysemöglichkeiten (z.B. Oberflächen- und Materialanalytik, Ölanalytik) zeitnah und zielorientiert bearbeitet werden.

Im Bereich von Brennstoffzellenprüfständen konnte durch Selektion und Integration einzelner Komponenten und Teilsysteme Erfahrung und Know-how für das Gesamtsystem, dessen Betriebsmodi und Regelung erworben werden. Dabei erwies sich die Generierung des Digitalen Zwillings durch den Projektpartner sowie der gemeinschaftliche, iterative Abgleich zwischen Realprüfstand und Digitalem Zwilling als äußerst hilfreich. Der Digitale Zwilling steht auch dann noch für Untersuchungen zur Verfügung, wenn der Prüfstand mit anderen Systemen oder Versuchsträgern neu belegt wird.

Der Schritt zu H<sub>2</sub>-Technologien bedeutet nicht nur eine Erweiterung des Kompetenzfeldes, sondern auch eine Ausdehnung des Netzwerkes in neue Fachbereiche in Industrieunternehmen, aber auch in den wissenschaftlichen Bereich von Forschungseinrichtungen. Zudem kann durch Betreuung von studentischen Arbeiten wie z.B. der Dualen Hochschule Baden-Württemberg (DHBW), des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und der Hochschule Karlsruhe (HS KA) direkt vor Ort, in der Region und darüber hinaus der wissenschaftliche Nachwuchs gefördert werden.

Das Fraunhofer ICT konnte im Projekt H2TwinTest im Bereich der Brennstoffzellenforschung signifikante Fortschritte bei der Identifikation von Schädigungsmechanismen durch Luftschadstoffe auf Stackebene erzielen. Neue Mess- und Analysemethoden ermöglichten einen tieferen Einblick in die Mechanismen der Zelldegeneration und Zellregeneration. Hiervon lassen sich sowohl konstruktive Maßnahmen als auch verbesserte Betriebsstrategien von Brennstoffzellensystemen ableiten.

Im Bereich der Sicherheitsforschung konnte nachgewiesen werden, dass der Einsatz von Hochdrucknebellöschanlagen geeignet ist, um die Temperaturen in unmittelbarer Umgebung eines Batteriebrandes erheblich zu senken und damit angrenzende Komponenten oder Prüfstandsinfrastruktur vor Beschädigung zu schützen.

Entwickelte Simulationsmodelle im Bereich der Wasserstoffausbreitung im Falle einer Leckage sowie eine Monte-Carlo-Simulation von Brennstoffzellengesamtsystemen er-

höhen die Sicherheit beim Aufbau und Betrieb von Wasserstoff-Energiewandlern. Der Aufbau und die Nutzung des Digitalen Zwillings als Grundlage der Hardware-in-the-Loop-Simulationen ermöglichte eine schnellere Fehleridentifikation beim Aufbau als auch die einsatznahe Testung des Brennstoffzellensystems. Vor- und Nachteile verschiedener Betriebsstrategien konnten identifiziert werden.

### 3 Nutzen und praktische Verwertbarkeit der Ergebnisse und Erfahrungen

Mit der bei der IAVF errichteten H<sub>2</sub>-Infrastruktur können Forschungs- und Industrieprojekte bedient werden. Diese Infrastruktur bietet zudem die Möglichkeit zur Erweiterung, um künftige Kundenanforderungen (z.B. in Hinblick auf den H<sub>2</sub>-Versorgungsdruck) zu erfüllen. Zusammen mit dem im Projekt generierten Know-how wurde somit das Test- und Engineering Portfolio der IAVF um neue Themenbereiche erweitert und die Reputation der IAVF nachhaltig untermauert.

Ergebnisse und Erfahrungen sowie entstandene Publikationen werden bei der Akquise von Kunden auf nationaler und internationaler Ebene genutzt. Neben dem Eintritt in Qualifizierungsphasen in der Industrie wurden bereits Kundenprojekte erfolgreich akquiriert und mit hoher Kundenzufriedenheit abgeschlossen.

Die Ergebnisse des Projektes wurden und werden seitens des Fraunhofer ICTs auch wissenschaftlich verwertet. Es wurden drei wissenschaftliche Artikel veröffentlicht, Fachkonferenzen besucht und drei universitäre Abschlussarbeiten bearbeitet. Ein Teil der Ergebnisse kann im Rahmen einer Dissertation genutzt werden. Zudem kann die angeschaffte Infrastruktur und das angeeignete Know-how für weitere Forschungsprojekte und Dienstleistungen für Unternehmen in der Wasserstoffwirtschaft genutzt werden. Dazu gehören insbesondere die Testmöglichkeiten im Bereich des Einflusses von Luftschadstoffen und deren Auswirkungen auf Brennstoffzellenstacks, aber auch der Aufbau und die Berechnung von echtzeitfähigen digitalen Zwillingen hochkomplexer physikalischer Systeme.

### 4 Konzept zum Ergebnistransfer auch in projektfremde Anwendungen und Branchen

Das im Projekt aufgebaute Brennstoffzellengesamtsystem inklusive des Digitalen Zwillings und der Testmethodik kann hervorragend zur Weiterentwicklung einzelner Komponenten genutzt werden. Es können beispielsweise neue Aufladungs- oder Befeuchungskonzepte mithilfe des Digitalen Zwillings bewertet und am bestehenden Referenzsystem validiert werden.

Des Weiteren lässt sich das Echtzeitrechnersystem inklusive der aufgebauten Entwicklungsmethodik ebenfalls für die Simulation anderer physikalischer Systeme nutzen. Beispielsweise können weitere Komponenten elektrischer Antriebsstränge wie z.B. Batterien, Getriebe oder E-Maschinen im Hardware-in-the-Loop-Ansatz getestet und weiterentwickelt werden.

Neben der Anwendung von Brennstoffzellen und H<sub>2</sub>-Motoren in mobilen Anwendungen können letztere auch in stationären Kraft-Wärme-Kopplung Anlagen einen Beitrag zur Energiewende liefern. Kleinere Unternehmen verfügen meist nicht über eigene Testeinrichtungen und können daher die Prüfstände der IAVF bei der Entwicklung und Erprobung ihrer Aggregate nutzen.