

Voll digitalisiertes Reallabor Wasserstofftankstelle der BAM

Robert Bock, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, Deutschland

robert.bock@bam.de;

Carlo Tiebe, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, Deutschland

carlo.tiebe@bam.de

Finn Lückhoff, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, Deutschland

finn.lueckhoff@bam.de

Georg Mair, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, Deutschland

georg.mair@bam.de

Kurzfassung

Moderne digitale Technologien bieten neue Möglichkeiten für das Sicherheitsmanagement und die Qualitätssicherung von technischen Anlagen. Aus der Initiative QI-Digital hervorgehend zeigt die BAM im Reallabor Wasserstofftankstelle, wie digital gestützte Verfahren und Werkzeuge der Qualitätsinfrastruktur (QI) zu einer effizienteren und transparenteren Qualitätssicherung von technischen Anlagen beitragen. Damit kann die Anlage wirtschaftlicher und verlässlicher betrieben werden. Das Reallabor bildet die gesamte Wasserstoffwertschöpfungskette ab – mit der Anlage wird Wasserstoff erzeugt, gespeichert und an verschiedene Fahrzeugtypen abgegeben.

Abstract

Modern digital technologies offer new opportunities for safety management and quality assurance in technical facilities. As part of the QI-Digital initiative, BAM is demonstrating in its living lab hydrogen refueling station how digitally supported quality infrastructure (QI) processes and tools can contribute to more efficient and transparent quality assurance in technical facilities. This allows such facilities to be operated more economically and reliably. The living lab maps the entire hydrogen value chain – the plant produces hydrogen, stores it, and dispenses it to various types of vehicles.

1 Motivation

Herkömmliche Inspektions- und Wartungsverfahren komplexer technischer Anlagen sind oft aufwändig und führen zu langen oder kurzfristigen Stillstandszeiten. Es ist derzeit kaum möglich, den Zustand der Gesamtanlage oder einzelner Komponenten sowie den Kalibrierstatus der Sensoren umfassend und in Echtzeit zu erfassen und zu dokumentieren. Häufig existieren lediglich asynchrone und oft analoge Sammlungen von qualitäts- und sicherheitsrelevanten Dokumentationen, die umfangreich und unübersichtlich sind. Dies sind nur einige der typischen Herausforderungen der Qualitätssicherung technischer Anlagen.

Am Beispiel einer Wasserstofftankstelle entwickelt, erprobt und demonstriert die BAM Lösungen für eine moderne QI, die den gestiegenen Anforderungen des Betriebs komplexer technischer Anlagen gerecht wird. Neben neuen Überwachungs- und Prüfmethode, Sensortechnologien und digitalen Abbildern, geht es dabei insbesondere um die Entwicklung und Erprobung von grundlegenden Werkzeugen einer digitalen QI, wie maschinenlesbaren Standards, digitalen Prüfberichten und Zertifikaten, und einer übergreifenden IT- und Datenplattform [1].

Die Lösungen und Entwicklungen für eine digitale QI können zur Optimierung von Qualitätssicherungsprozessen an Wasserstofftankstellen beitragen. So kann durch ihre Implementierung der Betrieb zuverlässiger, sicherer und wirtschaftlicher gestaltet und Ressourcen effizienter eingesetzt werden. Dies wirkt sich positiv auf die Akzeptanz von Wasserstoffanwendungen, insbesondere die wasserstoffbasierte Mobilität, aus. Darüber hinaus sind die QI-Werkzeuge, Prozesse und Verfahren so entwickelt, dass diese

grundsätzlich übertragbar sind - auf weitere Wasserstoffanwendungen und technische Anlagen allgemein. Um eine umfassende digitale QI zu ermöglichen, werden die im Reallabor gewonnenen Erkenntnisse in die Weiterentwicklung von technischen Normungs- und Rechtsvorschriften eingebracht.

1.1 Die digitale Abbildung des Gesamtsystems

Ein grundlegender Schritt hin zu einem integrierten Überwachungskonzept technischer Anlagen ist deren digitale Abbildung. Dafür werden Anlagenzustand und Umgebungsbedingungen mithilfe der eingesetzten Sensoren und Aktuatoren charakterisiert und entsprechend implementiert. Kern dessen ist eine moderne Prozessleittechnik (PLT). Sie erfasst die aktuellen Überwachungsdaten aus den Sensornetzwerken und interpretiert, verarbeitet und bewertet diese in einem digitalen Zwilling in Echtzeit für ein modernes Zustandsmanagement und eine vorausschauende Wartung der technischen Anlage.

Im Reallabor Wasserstofftankstelle (Abbildung 1) entwickeln und erproben wir ein PLT- und Sensorsystem prototypisch, das in der Lage ist, alle qualitätsrelevanten Informationen und Nachweise (vom digitalen Konformitätsnachweis (D-CoC) der eingebauten Komponenten bis hin zu Kalibrierzertifikaten (DCC) verwendeter Messsysteme [2]) ins System einzubinden und deren Rückverfolgbarkeit zu gewährleisten. Dies wird auf Basis der sogenannten Verwaltungsschale erprobt, die das Rückgrat der Industrie 4.0 bildet und oft als Digitaler Zwilling bezeichnet wird. Die Verwaltungsschale ist ein branchenneutraler Standard,

der es ermöglicht, dass „Assets“ (Anlagen oder Anlagenteile) auf der ganzen Welt miteinander kommunizieren können.

Diese Informationen können dann relevanten Stakeholdern (z.B. Marktüberwachungs- und Konformitätsbewertungsstellen) auf kontrollierten Zugriffsebenen sicher, datensouverän und adressatenorientiert zur Verfügung gestellt werden. Die Verbindung von Softwarediensten mit den offenen, standardisierten Protokollen und Interaktionssequenzen der Datenräume (Data Spaces) zum Austausch QI-relevanter Assets wird unter dem Arbeitstitel „Quality-X“ behandelt.

1.2 Sensoren und Sensornetzwerke für die digitale QI

In technischen Anlagen sind in großer Zahl sicherheitstechnisch relevante Sensoren verschiedener Art und zunehmend komplexe Sensornetzwerke installiert. Im Reallabor werden Lösungen entwickelt und erprobt, die deren verlässlichen Betrieb und effektives Management mit Hilfe von digitalen QI-Werkzeugen und – Prozessen ermöglichen.

Durch den Einsatz von digitalen Kalibrierscheinen (DCC) und Konformitätsnachweisen (D-CoC) kann die bisher manuelle Integration in die Prozessleittechnik (PLT) in Zukunft digital automatisiert geleistet werden. Dies erleichtert den Aufbau komplexer Sensornetzwerke sowie den automatischen Vergleich von Messwerten und eine kontinuierliche Plausibilitätsprüfung. Der Ausfall einzelner Sensoren kann durch die hohe Informationsdichte eines Sensornetzes kompensiert werden. Eine hohe Sensordichte ermöglicht außerdem Wasserstoffverluste und Fehlfunktionen frühzeitig zu erkennen und zu orten. Dies wird im Reallabor dafür genutzt, ein operationscharakteristisches Leckagedetektions-/Explosionsschutzkonzept zu entwickeln und erproben.

Darüber hinaus entwickeln und erproben wir sensorgestützte Lösungen für die digitale Überwachung der Reinheit des Wasserstoffs auf dem Weg durch die Tankstelle. Entsprechende Qualitätsnachweise sind nicht nur für Kunden bedeutsam, sondern dienen auch dazu Schäden frühzeitig zu erkennen und Verunreinigung des Gases zu vermeiden, durch z.B. innere Undichtigkeiten, Abrieb oder Schmiermittel. Somit können Systemkomponenten zuverlässiger betrieben und einem frühzeitigen Systemausfall entgegengewirkt werden [3].

1.3 Digitale Überwachung von Anlagenkomponenten am Beispiel der H2-Druckbehälter

Eine wesentliche Komponente von Industrieanlagen sind Druckbehälter. Momentan werden solche Druckgasspeicher in stationären Anlagen periodisch geprüft, ohne die Nutzungshistorie zu beachten. Ziel der digitalen QI ist hingegen eine kontinuierliche und betriebsbegleitende Überwachung der Bauteilintegrität. Damit können die Prüf- und Kalibrierfristen von reinen Zeitintervallen in Fristen umgewandelt werden, die von der Belastung und dem Zustand abhängig sind.

Dazu werden neue, digital-gestützte Überwachungsmethoden unter Nutzung von digitalen Zertifikaten entwickelt und erprobt. Auf Basis leistungsstarker zerstörungsfreier Prüfmethode kann in Verbindung mit einer (künstlich) intelligenten Auswertung der aktuelle Zustand kontinuierlich und umfassend bewertet werden. Ein solches KI-unterstütztes Structural Health Monitoring (SHM) erlaubt dann eine laufende Restlebensdauerabschätzung für den relevanten Druckbehälter, im Idealfall sogar nach probabilistischen Aspekten. So kann die Betriebssicherheit und ggf. die Restlebensdauer laufend beurteilt werden. Dafür werden neben den technischen Aspekten auch notwendige Anpassungen von Normung und Gesetzgebung untersucht.

2 Anlagenbeschreibung

Das Reallabor [4] besteht aus Komponenten zur Wasserstoffherzeugung mittels Elektrolyse bzw. Wasserstoffbefüllung über Trailerversorgung. Darüber hinaus werden Mitteldruckspeicher, Verdichter, Hochdruckspeicher, Wärmeübertrager sowie eine Dispensereinheit zum Befüllen von Fahrzeugen über H70 und H35 Leitungen eingesetzt (siehe Abbildung 2).

Der in der Anlage eingesetzte Wasserstoff kann mittels einer eigenen Elektrolyseeinheit (bis zu 24 kg_{H2}/Tag) vor Ort unter Einsatz einer lokalen PV-Anlage erzeugt und direkt bei Mitteldruck (200 bar) gespeichert werden. Alternativ kann dieser Speicher auch von einem Wasserstofftrailer versorgt werden. Mittels Kompressors wird der Wasserstoff im Hochdruckspeicher auf 930 bar weiter verdichtet. Die nachgeschaltete Kühleinheit konditioniert den Wasserstoff derart, dass Fahrzeuge bei 350 und 700 bar über den Dispenser betankt werden können. Das Reallabor ist in modularer Containerbauweise realisiert worden.



Abbildung 1: Betankung des BAM-Wasserstofffahrzeugs im gegenwärtigen Aufbau des Reallabors



Abbildung 2: Hauptkomponenten und Wertschöpfungskette des Reallabors Wasserstofftankstelle.

Die Prozessüberwachung, Dispenser, Elektrolyse, Speicher und Kompressor sind in separaten Containern untergebracht und können damit bedarfsgerecht auf dem Testgelände Technische Sicherheit (TTS) der BAM aufgestellt werden (siehe Abbildung 3).

Der Aufbau und die Komponentenauswahl des Reallabors sind derart gewählt, dass projektspezifische Erweiterungen bzw. Umbauten möglich sind. Damit ergeben sich besondere Ausstattungsmerkmale:

- (H₂-)Sensornetzwerk [5]
- Prozessüberwachung nach Industrie 4.0 [6]
- IT/OT-Infrastruktur für QI-Digital Werkzeuge [6]
- Digitaler Zwilling mit Prozessmodellierung
- Großflächige Aufstellung, baulicher Schutz
- Autarke und grüne Wasserstoffherzeugung
- Gas-Probenahmestellen
- Einbindung weiterer Komponenten möglich

3 Datenmanagement

Die digitale Qualitätsinfrastruktur unterliegt einer umfassenden Datenintegration, Auswertung und Lesbarkeit im Hinblick auf Interoperabilität. Die dafür erforderliche IT/OT-Infrastruktur bildet das Rückgrat für die durchgängige Integration von Sensordaten – von der Feldebene, auf der zuverlässige und echtzeitfähige Operational Technology (OT) eingesetzt wird, bis zur Anwendungsebene (IT), auf der die Daten verwaltet, überwacht und für die Weiterverarbeitung bereitgestellt werden [6].

Die IT-Technologie ist verantwortlich für das Datenmanagement, Anwendungen zur Bewertung der Qualitätsinfrastruktur sowie die Cybersicherheit. Darüber hinaus stellt die IT die Netzwerksicherheit und den Schutz der Komponenten sicher. Die Operational Technology (OT) hingegen ist verantwortlich für die Steuerung der Sensoren und Aktoren im Reallabor sowie für die Betriebssicherheit.

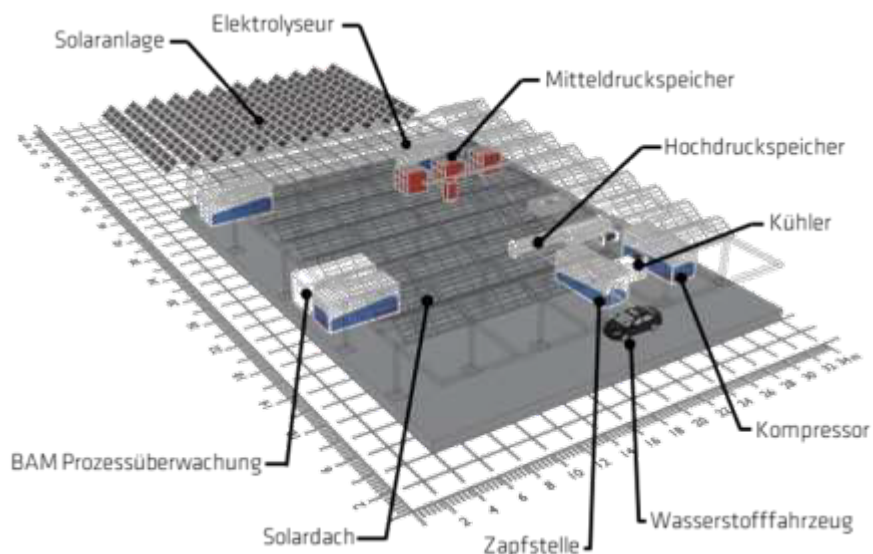


Abbildung 3: Aufbau des Reallabors mit dessen Hauptkomponenten

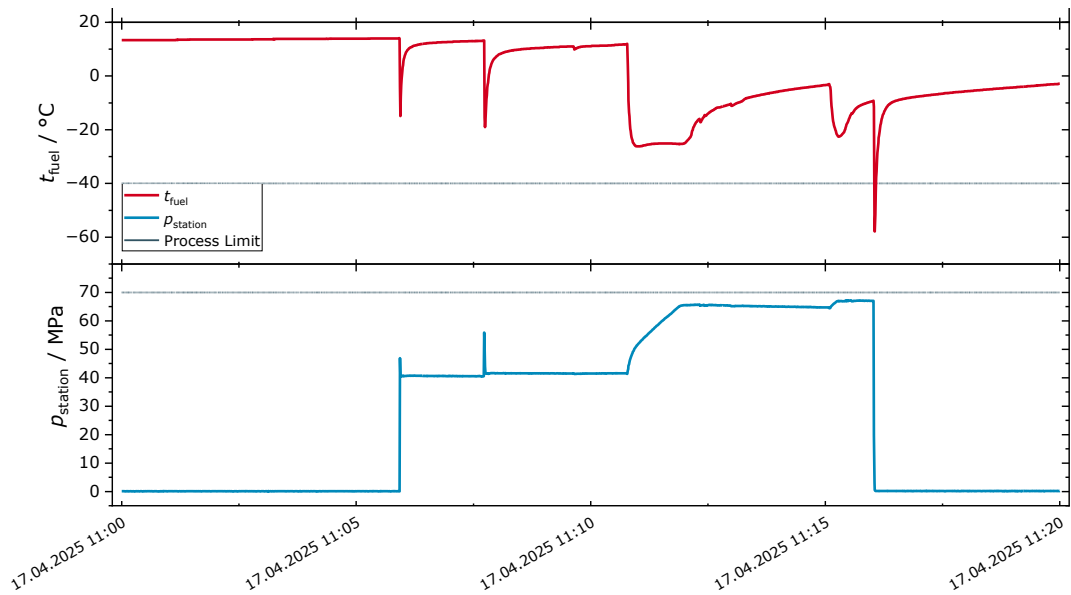


Abbildung 4: Sensordaten eines Betankungsvorgangs, der die gesetzten Prozessgrenzen überschritten hat und abgebrochen wurde. In dieser Darstellung sind die Wasserstoffabgabetemperatur (t_{fuel} / °C) sowie der Gasdruck am Dispenser (p_{station} / MPa) aufgetragen.

Interoperabilität gemäß den Anforderungen von Industrie 4.0 wird durch ein standardisiertes Datenmanagement mit einheitlicher Struktur und Semantik gewährleistet. Durch die Kombination des IT/OT-Backbones mit den oben genannten QI-Digital-Werkzeugen (DCC, D-CoC, VWS) wird eine Echtzeitüberwachung gemäß Industrie 4.0 Standard ermöglicht. Überschreitungen der Prozessgrenzen werden nach industriellem Standard auch im Reallabor schnell erkannt (Abbildung 4), und die Daten darüber hinaus bei Bedarf auch Stakeholdern in Echtzeit zur Verfügung gestellt. Alle relevanten Assets des Reallabors können somit nach diesem Standard abgebildet werden. Mittels REST-API und browserbasiertem Portal ist ein Fernzugriff auf alle Sensordaten möglich. Daraus ergeben sich folgende Besonderheiten der IT/OT:

- Standortübergreifende Konnektivität
- Funktionale Sicherheit des Systems
- Cybersicherheit
- Datenverfügbarkeit und -verfolgbarkeit
- Standardisierter Digitaler Zwilling (Verwaltungsschale VWS)

Die Dateninfrastruktur des Reallabors ermöglicht es einen Digitalen Zwilling der Anlage zu erzeugen. Dieser stellt in einer 3D-Umgebung einen digitalen Zugang zur Gesamtanlage bereit (Abbildung 5). Basierend auf umfangreichen Datensätzen aus dem spezifischen IT/OT-Backbone können somit weitreichende Prozesssimulationen durchgeführt werden.



Abbildung 5: Digitaler Zwilling mit 3D-Umgebung und Prozesssimulation

4 Vision

In Anbetracht der vor uns liegenden Energiewende mit umfangreichen und komplexen Anforderungen an die verschiedenen Energieträger trägt das Reallabor dazu bei, den zukünftigen Energiemarkt zu gestalten. Um dem gerecht zu werden, liegt es nahe, über die Erzeugung, Speicherung und Nutzung von Wasserstoff hinauszugehen und andere Energiespeicherarten (v.a. Batterien) mit einzubeziehen. Die damit entstehende Sektorkopplung im Zusammenspiel mit der digitalen Infrastruktur (IT/OT, Digitaler Zwilling etc.) bietet ein breites Spektrum an Forschungs- und Anwendungsmöglichkeiten. Gemeinsam mit externen Forschungspartnern, der Industrie aber auch KMUs und Start-Ups wollen wir das einzigartige Reallabor weiterentwickeln und nutzen. Damit leisten wir einen entscheidenden Beitrag zu einer sicheren Energieversorgung der Zukunft.

5 Literatur

- [1] Initiative QI-Digital, Pilotprojekt "Verlässliche Wasserstofftankstelle" - eine digitale Qualitätsinfrastruktur (QI) für technische Anlagen *Website* **2025-12-01 (Aufrufdatum)**, <https://www.qi-digital.de/pilotprojekte/verlaessliche-wasserstofftechnologie>.
- [2] N. Brunner, M. Melzer, Digital Certificates: Enabling Automation in Quality Assurance and Metrological Traceability *Sensor Measurement Science International (SMSI 2025)* **2025**, 171–172, <https://doi.org/10.5162/SMSI2025/C6.4>.
- [3] C. Schaad, C. Tiebe, K. M. Groth, A Framework for Transforming Process Control System Data from a Hydrogen Fueling Station into HyCReD Data *Proceedings 35th European Safety and Reliability Conference (ESREL2025) and the 33rd Society for Risk Analysis Europe Conference (SRA-E 2025)* **15.–19.06.2025**, ESREL 2025, Stavanger, Norway, <https://doi.org/10.3850/978-981-94-3281-3-procd>.
- [4] Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Digitale Qualitätsinfrastruktur für Wasserstoff: BAM eröffnet einzigartige Forschungstankstelle *Pressemitteilung* **2025-07-03**, <https://www.bam.de/Content/DE/Pressemitteilung/2025/Energie/2025-07-03-wasserstofftankstelle.html>.
- [5] K. Nattuveetil, C. Liebner, C. Tiebe, Hydrogen safety- Dealing with Closed Spaces *SMSI 2025* **2025**, 167–168, <https://doi.org/10.5162/SMSI2025/C6.2>.
- [6] M. Maiwald, R. Soruco Aloisio, K. Meyer, C. Klaus, Auf dem Weg zu einer digitalen Qualitätsinfrastruktur - Eine Labor-Testplattform für die Integration von Sensoren und Messgeräten *GIT Labor-Fachzeitschrift* **2023**, 67, 9, 20–23, <https://analyticalscience.wiley.com/content/magazine-do/git-labor-fachzeitschrift-09-2023>.