

Peer-Review: 31.01.2022

# Digitaler Zwilling für eine modulare Offshore-Plattform

## Effizienzsteigerung grüner Power-to-X-Produktionsprozesse

Daniel Dittler, Pascal Häbig, Gökhan Demirel, Nikola Mößner, Timo Müller, Nasser Jazdi, Kai Hufendiek, Michael Weyrich, Universität Stuttgart

*Die Produktion von Wasserstoff und Folgeprodukten unter Nutzung erneuerbarer Energien gilt als großer Hoffnungsträger für das Erreichen einer Klimaneutralität. Im Rahmen des Leitprojekts H2Mare soll der Betrieb einer Offshore-Plattform für Power-to-X-Produktionsprozesse erforscht und erprobt werden. Im vorliegenden Beitrag wird zunächst das Projektkonzept einer modularen Offshore-Plattform skizziert. Anschließend werden mit dem Digitalen Zwilling und dem System zur optimalen Betriebsführung zwei Forschungsansätze präsentiert, die zur Effizienzsteigerung dieser Produktionsprozesse beitragen sollen.*

#Digitaler Zwilling #Optimale Betriebsführung #Offshore Plattform #Power-to-X #H2Mare

### Digital twin for a modular offshore platform

Increasing the efficiency of green power-to-X production processes

*The production of hydrogen and downstream products using only renewable sources of energy is considered a promising way to achieve climate neutrality. Within the H<sub>2</sub>Mare project, the operation of an offshore platform for Power-to-X products is to be researched and tested. This article first outlines the underlying project concept of a modular offshore platform. Then, with the Digital Twin and System for Optimal Operation Management, two research approaches are presented that should contribute to increasing the efficiency of these production processes.*

#digital twin #optimal operation management #offshore platform #Power to X #H2Mare

## 1. Einleitung

Als Hoffnungsträger und Lösungsansatz für das Erreichen der Klimaneutralität in den Sektoren Industrie, Verkehr und Gebäude gelten klimaneutral produzierter Wasserstoff sowie Folgeprodukte [1]. Diese ermöglichen die Bereitstellung von Energieträgern mit lokaler Speicherbarkeit, hoher Energiedichte und chemischen Eigenschaften, die insbesondere im Transportbereich oder in verfahrenstechnischen Prozessen eingesetzt werden können.

Zudem entsteht durch deren Nutzung der Vorteil, dass die vorhandene Infrastruktur (z. B. Erdgasversorgungsnetze) und bestehenden Antriebskonzepte (z. B. Verkehrsmittel) nicht oder nur geringfügig angepasst werden müssen. Gegenwärtig werden in diesen Anwendungsbereichen Endenergieträger aus fossiler Herkunft eingesetzt.

So könnte aus Wasser und erneuerbar produziertem Strom mittels Elektrolyse klimaneutraler Wasserstoff hergestellt werden, der dann in weiteren Syntheseprozessen auch zu „einfacher“ handhabbaren chemischen Energieträgern (synthetische Brennstoffe) umgewandelt werden kann. Wird die Produktion direkt mit Offshore-Windenergieanlagen verknüpft, könnte die Notwendigkeit einer Stromnetz-anbindung solcher Anlagen entfallen. Davon wird sich die

weltweite Erschließung windreicher Seegebiete sowie eine Senkung der Produktgestehungskosten versprochen.

Für diesen Zweck soll in H2Mare, einem der drei Wasserstoff-Leitprojekte des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), erforscht werden, wie mithilfe eines solchen neuen Anlagentyps Wasserstoff und Folgeprodukte auf hoher See (*Offshore*) hergestellt werden können.

Das Ziel des Beitrags ist das zugrundeliegende Projektkonzept zu skizzieren. Dazu sollen Mehrwerte und Herausforderungen eines solchen autarken Inselfsystems erläutert werden. Anschließend werden mit dem Digitalen Zwilling und dem System zur optimalen Betriebsführung zwei Forschungsschwerpunkte präsentiert, mit denen einerseits den Herausforderungen eines solchen Anlagentyps begegnet werden kann und andererseits zur Effizienzsteigerung dieser Produktionsprozesse beigetragen werden soll.

Der Beitrag gliedert sich dazu in vier weitere Kapitel. Das nachfolgende Kapitel 2 ordnet die Forschung von *Power-to-X-Produkten* (PtX) in den Kontext ein. In Kapitel 3 werden die Mehrwerte und die Herausforderungen des Projektkonzeptes herausgearbeitet, aber auch die Ausgestaltung der PtX-Produktionsplattform (fortan PtX-Plattform genannt) vorgestellt. Die beiden damit im Zusammenhang stehenden

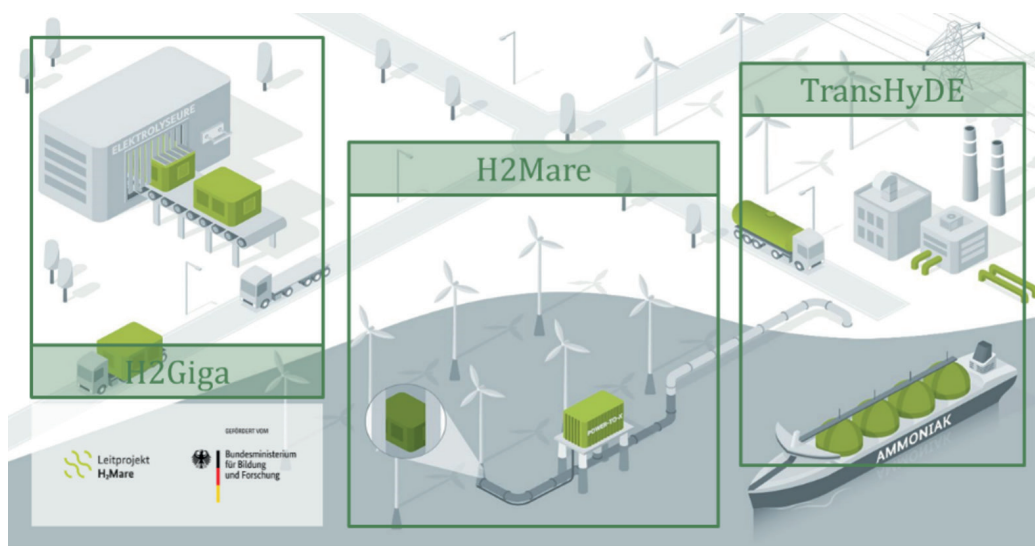


Abbildung 1: Drei Wasserstoff-Leitprojekte H2Giga, H2Mare und TransHyde [4].

Forschungsschwerpunkte werden in Kapitel 4 erläutert. Abschließend wird in Kapitel 5 ein Fazit gezogen.

## 2. Einordnung und Kontext der Power-to-X-Forschung

### 2.1 Leitprojekt H2Mare

Durch die Nationale Wasserstoffstrategie, die im Jahr 2020 erstmals eine konkrete Zielsetzung für die deutsche Wasserstoffwirtschaft ausgegeben hat, soll der gegenwärtige Fokus der PtX-Forschung strukturiert vorangetrieben werden. Bis zum Jahr 2030 sollen insgesamt fünf Gigawatt an Erzeugungsleistung installiert sein.

Zur Umsetzung dieser Zielstellung wurde ein Maßnahmenbündel definiert, zu dem auch die BMBF Forschungsinitiative der drei Wasserstoff-Leitprojekte gehört (vgl. Abbildung 1). In diesen sollen in den kommenden vier Jahren die serienmäßige Herstellung großskaliger Wasserelektrolyseure (H2Giga), die Erzeugung von Wasserstoff und Folgeprodukten auf hoher See (H2Mare) und die Technologien für den Transport von Wasserstoff (TransHyDE) erforscht werden [2–4].

Im weiteren Verlauf wird dieser Beitrag auf das H2Mare-Teilprojekt PtX-Wind (fortan als Forschungsprojekt genannt) eingehen, das die Erzeugung von Wasserstoff und Folgeprodukten auf einer PtX-Plattform auf hoher See untersuchen soll. Mit der Erforschung und Erprobung eines solchen, zunächst als Versuchsplattform ausgestalteten kleinskaligen Produktionssystems soll ein ganzheitliches Konzept für eine generische PtX-Plattform entwickelt werden, und mit Hilfe einer Pilotanlage ein „Proof-of-Concept“ erreicht werden. Neben technischen Innovationen und der Untersuchung vielversprechender Produktionsprozesse müssen insbesondere Methoden zur Prozessführung identifiziert und weiterentwickelt werden. [2]

### 2.2 Wasserstoffproduktion und die Folgeprodukte

Auf Grund seiner chemischen Eigenschaften kommt Wasserstoff in der Natur meist in gebundener Form vor. Ein

etabliertes technisches Verfahren zur Herstellung ist, Wasser mittels Elektrolyse in dessen Bestandteile ( $O_2$ ,  $H_2$ ) zu trennen. Unter Verwendung weiterer Synthesegase ( $CO_2$ ,  $N_2$ ) oder anderer stofflicher Edukte können in nachfolgenden Prozessschritten wasserstoffbasierte Brennstoffe wie Ammoniak ( $NH_3$ ), Kohlenwasserstoffe ( $C_xH_y$ ), Methan ( $CH_4$ ) und Methanol ( $MeOH$ ) hergestellt werden. Die aufgezählten Wasserstoff-Folgeprodukte sind u. a. einfacher transportier-, speicher- und anwendbar.

Für die Produktion dieser Wertschöpfungsprodukte wird Energie („Power“) benötigt, die aus konventionellen oder erneuerbaren Erzeugungsanlagen (z. B. Windenergieanlagen) bereitgestellt werden kann. Klimaneutral ist Wasserstoff als Energieträger nur, wenn dieser nicht unter Abscheidung klimaschädlicher Gase aus Erdgas (grauer Wasserstoff), sondern auf Basis erneuerbarer Energien (grüner Wasserstoff) hergestellt wird.

Die bereitgestellte Energie wird für die Umwandlung in eine Nutzungsart („X“) benötigt, wie bspw. Produkte oder Dienstleistungen. Bei der Umwandlung („- to -“) wird zwischen folgenden drei Umwandlungsarten unterschieden: Chemische Umwandlung (z. B. Elektrolyse), thermische Umwandlung (z. B. Wärmepumpe) und mechanische Umwandlung (z. B. Elektro-Mobilität). Diese Systematik wird auch als *Power-to-X* bezeichnet und in Abbildung 2 zusammenfassend dargestellt. [5]

Im Jahr 2021 lag der Preisindex in Deutschland für einen Kilogramm grünen Wasserstoff durchschnittlich bei rund 6,0 € [7]. Je nachdem welche Annahmen bspw. für die Entwicklung der technischen Reife (z. B. Investitionskosten), für die Stromgestehungskosten (z. B. Volllaststunden) oder für die Elektrolyseart zugrunde gelegt werden, liegen Schätzungen für die Gestehungskosten von grünem Wasserstoff im Jahr 2030 bei circa 4,0 €/kg bzw. sollen bis 2050 auf etwa 3,0 €/kg sinken [8].

Eine Kennzahl, welche den technischen Reifegrad einer Technologie mittels einer Skala zwischen Grundlagenforschung (TRL 1) und Marktreife (TRL 9) bewertet, ist das *TechnologyReadiness Level* (TRL).

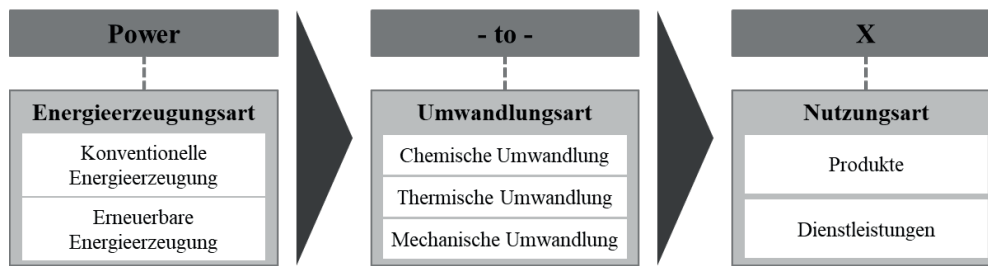


Abbildung 2: Generische Power-to-X-Systematik übernommen von [6].

Die für PtX-Plattform notwendigen Einzeltechnologien befinden sich gegenwärtig in sehr unterschiedlichen Entwicklungsstadien [9]. Für metallische Wabenreaktoren zur Methanisierung wurde bspw. die Funktionstüchtigkeit (TRL 3) nachgewiesen. Die Fischer-Tropsch-Synthese oder die Herstellung von Methanol sind hingegen Verfahren, die in anderem Zusammenhang bereits die kommerzielle industrielle Nutzung (TRL 9) erreicht haben [10]. In der Kombination mit einer maritimen Umwelt sind PtX-Anwendungen im Offshore-Betrieb noch weit von der Marktreife entfernt und ein Etappenziel der PtX-Forschung ist, den Nachweis der technischen Machbarkeit (TRL 3-5) zu erbringen [9].

Im Fokus aktueller Forschungsaktivitäten steht daher, neben der Verbesserung einzelner Teilkomponenten, wie z. B. der Verbesserung des Wirkungsgrads unterschiedlicher Elektrolyseverfahren (z. B. Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse), auch die Entwicklung einer Tauglichkeit von PtX-Anwendungen für die offene See, bspw. die Auswahl von beständigem Material (z. B. Korrosion) oder die Anpassung des Anlagenbetriebs auf den Einfluss durch den Wellengang (z. B. Vibrationen).

### 3. Offshore-PtX-Produktionsplattform

#### 3.1 Mehrwerte einer Offshore-PtX-Produktionsplattform

Die Kernidee des Forschungsprojektes sieht vor, einen Windpark auf hoher See mit einer PtX-Plattform zu kombinieren und als autarkes Inselsystem zu betreiben. Das Ziel des Offshore-Produktionssystems ist, einen durchweg klimaneutralen, einfach speicher- und transportierbaren Energieträger als Endprodukt zu produzieren.

Bei diesem Anlagenkonzept kann sowohl von einem Offshore- als auch von einem Offgrid-Produktionskonzept gesprochen werden. Dieses könnte die weltweite Erschließung abgelegener, bisher ungenutzter und zugleich windreicher Regionen (z. B. küstenferne Standorte mit Hilfe von schwimmenden Systemen) ermöglichen.

Von einem Offgrid-Produktionskonzept wird sich auch eine grundsätzliche Übertragbarkeit von einer maritimen auf eine nicht-maritime Umgebung (z. B. Regenwald, Wüstenregionen) versprochen. Damit soll ein hohes Skalierbarkeitspotenzial erreicht werden.

Die Konfigurationsvariante einer direkten Anbindung von küstenfernen Standorten an das Festlandnetz oder an ein PtX-Produktionssystem an Land gilt als aufwendig und kostenintensiv [9, 11]. Je nach Standort (Nord-/Ostsee) und Übertragungstechnik (Gleich-/Wechselstromkabel-

system) liegen die Kosten zwischen 1,5 und 2,9 Mio. € je verlegtem Kilometer Kabelsystem [9, 12]. Dem Wegfall der Anbindungskosten stehen bei einer ganzheitlichen Betrachtung allerdings mögliche Mehrkosten für die Offshore-Tauglichkeit der Produktionssysteme gegenüber.

Auf Grund der Neuartigkeit des Anlagenkonzepts konnte keine Veröffentlichungen identifiziert werden, die eine Gegenüberstellung durchführen oder eine quantitative Untersuchung der Wirtschaftlichkeit anstellen. Vielmehr werden qualitative Aussagen zu vergleichbare Anlagenkonzepte getroffen [9]. Diese Forschungslücke soll allerdings im Rahmen des Forschungsprojektes geschlossen werden.

Zusammenfassend beruht das Projektkonzept auf der Annahme, dass zum einen auf Grund eines windreicheren Standorts eine höhere Anzahl der Volllaststunden erreicht und damit ein kostendegressiver Effekt der Produktgestehungskosten erreicht werden kann. Zum anderen wird davon ausgegangen, dass die Investitionskosten für eine als Inselsystem betriebene PtX-Plattform mit einer direkten Windparkanbindung geringer ausfallen als ein vergleichbares Anlagenkonzept mit einer Festlandanbindung.

#### 3.2 Herausforderungen des Offshore-Betriebs

Vor der Entwicklung und Anwendung der Offshore-Plattform müssen allerdings zahlreiche Lösungen für folgende Herausforderungen in den nachfolgend aufgezählten Bereichen gefunden werden:

- » Volatilität der Umweltparameter
- » Verfügbarkeit von Zeitfenstern für Wartung und Logistik
- » Gewährleistung einer unterbrechungsfreien Energieversorgung
- » Optimales Energiemanagement und Prozessführung
- » Robustheit und Flexibilität des Anlagenbetriebs
- » Komplexe Anlagen- und Prozessmodellierung

Die Erfahrung mit Offshore-Windparks zeigt, dass die Rahmenbedingungen wie bspw. Wellengang, hohe Windgeschwindigkeiten und salzhaltige Umgebungsluft zu einer Beeinträchtigung oder dem Ausfall eines Teilsystems führen können [9]. Da sich die schwimmende Anlage noch in der Entwicklungsphase befindet, liegen keine zuverlässigen

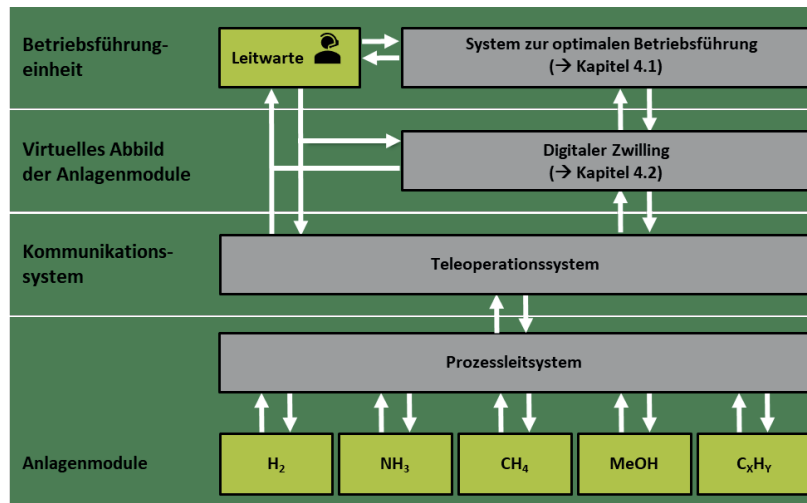


Abbildung 3: Generische Struktur der PtX-Plattform.

Informationen über die Verfügbarkeit und die Dauer der Ausfallzeiten vor [13].

Diese Rahmenbedingungen resultieren in besonderen Anforderungen an die Steuerungs- und Kommunikationstechnik, weil unter anderem ein eingeschränkter Zeitraum für Wartung und Logistik zur Verfügung steht [9]. Insbesondere erhält die Zuverlässigkeit, betriebliche wie auch informationstechnische Sicherheit und die Auswahl der Hardware-Komponenten einen höheren Stellenwert.

Im Gegensatz zur verbrauchsgerechten Energieversorgung durch ein übergeordnetes Energiesystem sind die Charakteristiken der hoch dynamischen und volatilen Erzeugung aus dem Windpark eine zentrale Herausforderung für das PtX-Produktionskonzept im autarken Inselbetrieb. Dieses muss darauf ausgelegt werden, eine möglichst unterbrechungsfreie Energieversorgung zu erzielen.

Eine weitere Herausforderung besteht darin, die entsprechenden Speichermöglichkeiten für die Energie (elektrisch, thermisch) und für die Zwischenprodukte (z. B. entsalztes Wasser) so zu konfigurieren, dass die Steuerung und die Betriebsführung der verfahrenstechnischen Prozesse unter betriebswirtschaftlich optimalen Bedingungen erfolgen kann.

Hierfür ist eine detaillierte Beschreibung der komplexen und dynamischen Prozesse der Verfahrenstechnik notwendig. Entgegen herkömmlicher Charakteristiken des Anlagenbetriebs sollen die Produktionsprozesse entsprechend der zur Verfügung stehenden elektrischen Energie flexibel ausgestaltet werden. Ein flexibler Betrieb geht jedoch mit einer reduzierten Standzeit bzw. mit höheren variablen Betriebskosten der Anlagenmodule einher.

Für Analyse-, Betriebsführungs-, Diagnose-, Dimensionierungs- und Wartungszwecke müssen die Anlagen- und Hilfsmodule der Offshore-Plattform modellbasiert abgebildet werden. Eine bislang ungelöste Fragestellung im Zusammenhang mit dieser Modellierung besteht darin, hoch nichtlineare Produktionsprozesse mit stochastischen Prognoseverfahren bei begrenzt zur Verfügung stehender Rechenleistung zu kombinieren.

### 3.3 Struktur der PtX-Produktionsplattform

Unabhängig vom Entwicklungsstadium der PtX-Plattform

setzt sich die Struktur der Plattform aus den folgenden sechs Systemkomponenten zusammen:

- » Anlagenmodule
- » Prozessleitsystem (PLS)
- » Teleoperationssystem
- » Digitaler Zwilling (DZ)
- » Leitwarte
- » System zur optimalen Betriebsführung

Abbildung 3 zeigt zum einen wie die Systemkomponenten in der generischen Struktur der PtX-Plattform angeordnet sind und verweist zum anderen auf die Kapitel, in denen auf den identifizierten Forschungsbedarf eingegangen werden soll. Unter Anlagenmodulen werden die für den jeweiligen PtX-Prozess benötigten technischen Anlagen mit der dazugehörigen Steuerungseinheit verstanden. Bei der Herstellung von Wasserstoff zählen bspw. die Meerwasserentsalzung und die Elektrolyse dazu, aber auch die Anlagenmodule zum Abwassermanagement oder das redundante System zur Energieversorgung (Hilfsmodul).

Das PLS bindet die einzelnen Anlagenmodule in eine übergeordnete Steuerung ein. Das PLS muss u. a. einen anlagenmodulübergreifenden Austausch von Informationen (z. B. Verfügbarkeiten, Produkt-Qualität, Speicherfüllstände) ermöglichen. Auf diesen Informationen basierend, regeln die Anlagenmodule ihre Produktionsprozesse automatisch. Die Anwendung einer übergeordneten Verriegelungsmatrix, sowie etwaige Notabschaltungen sind ebenfalls Aufgabe des PLS.

Das Monitoring (Fernüberwachung) oder das Ansteuern neuer Betriebspunkte (Fernsteuerung) und die Fehlercodebehebung (Fernwartung) erfolgen über das Teleoperationssystem. Das Teleoperationssystem ermöglicht den ortsunabhängigen Zugriff auf das PLS und stellt das Bindeglied zwischen den Systemkomponenten PLS, DZ und Leitwarte dar. Die innerhalb der OPC-UA-Middleware-Technologie verwen-



deten sowie weitere im IoT-Bereich eingesetzten Kommunikationsprotokolle wie MQTT und COAP können hinsichtlich ihrer Eigenschaften (z. B. Transport-Layer-Protokoll, unterstützte Messaging Patterns) im Kontext der Problemstellung betrachtet werden. Hier sind beispielsweise Abwägungen über Sicherheit, Zuverlässigkeit und Performance im Fokus der Offshore-Anwendung zu treffen [14–16]. Für die Ausprägung des Teleoperationssystems sind auch die räumliche Verortung der Systemkomponenten sowie die Anwendungsfälle relevant. Des Weiteren muss auch das physische Medium der Kommunikationskanäle betrachtet werden. Hierzu wird die Datenübertragung via Glasfaser aber auch eine kabellose Kommunikation (z. B. 4G, 5G, Richtfunk oder Long-Range WiFi) untersucht. Für die interne Vernetzung von Windparks existieren bereits kommerzielle 4G-Anwendungen mit Reichweiten bis zu 40 km [17].

Jedoch ist für die Entscheidungsfindung bezüglich der Anbindung zu bedenken, dass sich die Einsatzumgebung der finalen PtX-Produktionsplattform, die das Gesamtziel von H2Mare darstellt, auch in mehr als 100 km Entfernung zum Festland befinden kann. Außerdem stellt die Entscheidung der Realisierung des Abtransports der Produkte (per Pipeline oder Schiff) zum momentanen Projektstand eine weitere Unbekannte dar.

Für die kabellose Anbindung der Offshore-Plattform werden insbesondere Fernwirkprotokolle die der IEC 60870 entsprechend betrachtet. Zur Vermeidung von Verlusten bei der Übertragung von Alarmen und Informationen, auch im Angesicht von kurzen Unterbrechungen, wird auf die Auswahl eines Fernwirkprotokolls mit der Fähigkeit zur Pufferung von Telegrammen geachtet.

Parallel zu den physischen Anlagenmodulen der PtX-Plattform soll ein virtuelles Abbild in Form eines DZ erstellt werden. Der DZ soll dazu eingesetzt werden, simulative Untersuchungen mit vielfältigen Anlagenkonfigurationen oder virtuelle Experimente durchzuführen. Aber auch für Anwendungen wie Windprognose, Optimierung von Betriebspunkten und eine auf *Hardware-in-the-Loop* (HiL) basierende Inbetriebnahme der Komponenten der Plattform soll der DZ verwendet werden.

Mit dem System zur optimalen Betriebsführung, das sich aus dem Windprognose-Modul und dem Optimierungs-Modul zusammensetzt, wird auf Basis von Wetterdaten die für die Produktion zur Verfügung stehende Leistung sowie Energiemengen aus dem Windpark prognostiziert (Modul: Windprognose). Unter zusätzlicher Berücksichtigung der Betriebszustände der verschiedenen Anlagenmodule wird ein Fahrplan erstellt, der einen optimierten Betrieb des Produktionssystem (z. B. Maximierung Produktoutput, Minimierung Produktionskosten) für einen definierten Zeitraum ermöglicht (Modul: Optimierung).

In der Leitwarte werden die Anlagenmodule überwacht, Statusmeldungen ausgewertet, Alarmzustände geprüft und die Energiebilanzen nachverfolgt. Zudem wird das Hoch- und Herunterfahren nach den Angaben des optimalen Fahrplans durchgeführt.

### 3.4 Entwicklungsstadien der PtX-Produktionsplattform

Die Realisierung des generischen Plattformkonzeptes durch-

läuft im Rahmen des Forschungsprojektes und darüber hinaus sowie differenziert nach dem TRL drei Entwicklungsstadien, die in Abbildung 4 in Form von drei Spalten schematisch dargestellt sind und in den nachfolgenden Absätzen kurz erläutert werden sollen. Die drei Entwicklungsstadien sind:

- » Versuchsplattform mit einem TRL 4-6
- » Forschungsplattform mit einem TRL 7
- » Produktionsplattform mit einem TRL 8-9

Die Versuchsplattform ist eine physische Plattform mit einem oder mehreren ausgewählten PtX-Prozessprozess(en), die zunächst im Technikumsmaßstab (Stufe 1: Energy-Lab) aufgebaut wird, und die grundsätzliche Machbarkeit (*Proof-of-Concept*) zeigen soll. Dafür werden die Anlagen- und Hilfsmodule in das übergeordnete PLS integriert. Dabei stehen alle benötigten Edukte und Prozessenergie ohne Einschränkung zur Verfügung (TRL 4).

Beim Übergang zum nächsten Entwicklungsstadium werden die Edukte über entsprechende Anlagenmodule direkt aus der Umgebung bereitgestellt. Zur Nachbildung der maritimen Umgebung soll der containerbasierte Aufbau auf einer schwimmenden Plattform (Stufe 2: Ponton) zunächst in einem Hafenbecken zu Wasser gelassen und anschließend auf das offene Gewässer gezogen werden (TRL 5-6).

Im Vergleich zur Versuchsplattform stellt die Forschungsplattform einen in der installierten Leistung skalierten Prototypen der PtX-Plattform dar, mit der die Konfiguration und der Betrieb weiterer Produktionsprozesse getestet werden kann (TRL 7). Im Rahmen des derzeitigen Forschungsprojektes soll die Forschungsplattform durch Auslegung und Simulationen vorbereitet werden, die technische Realisierung soll einem möglichen Folgeprojekt vorbehalten bleiben (transparenter Bereich in Abbildung 4).

Aufgrund der in Kapitel 3.2 beschriebenen Herausforderungen im Offshore-Bereich und insbesondere der sicherheitskritischen Natur der Prozessführung werden bewährte Automatisierungsansätze für die Versuchsplattform umgesetzt. Um die Transparenz und die Wandlungsfähigkeit der PtX-Plattform zu erhöhen, wird im Rahmen dieses Forschungsprojektes außerdem der Einsatz innovativer Ansätze wie *NAMUR Open Architecture* (NOA) und *Module Type Package* (MTP) geprüft.

Während der Projektlaufzeit werden die einzelnen Anlagenmodule u. a. hinsichtlich der Automatisierungslevel und des Wirkungsgrades der Technologien weiterentwickelt. Neben den für das PLS relevanten Daten ist es daher notwendig, dem System zur optimalen Betriebsführung und dem DZ weitere Daten (z. B. Energieverbrauch und Temperatur einzelner Komponenten) zur Verfügung zu stellen, um damit die Transparenz und die Basis für eine Optimierung der Prozesse zu schaffen. Dies kann mit Hilfe von NOA adressiert werden, das hierzu den Einsatz eines zweiten unidirektionalen Datenkanals vorschlägt, daher wird eine Anwendung im Rahmen des Projektes untersucht [18].

Wie beschrieben werden der Versuchsplattform über die Projektlaufzeit weitere Anlagenmodule hinzugefügt, wes-

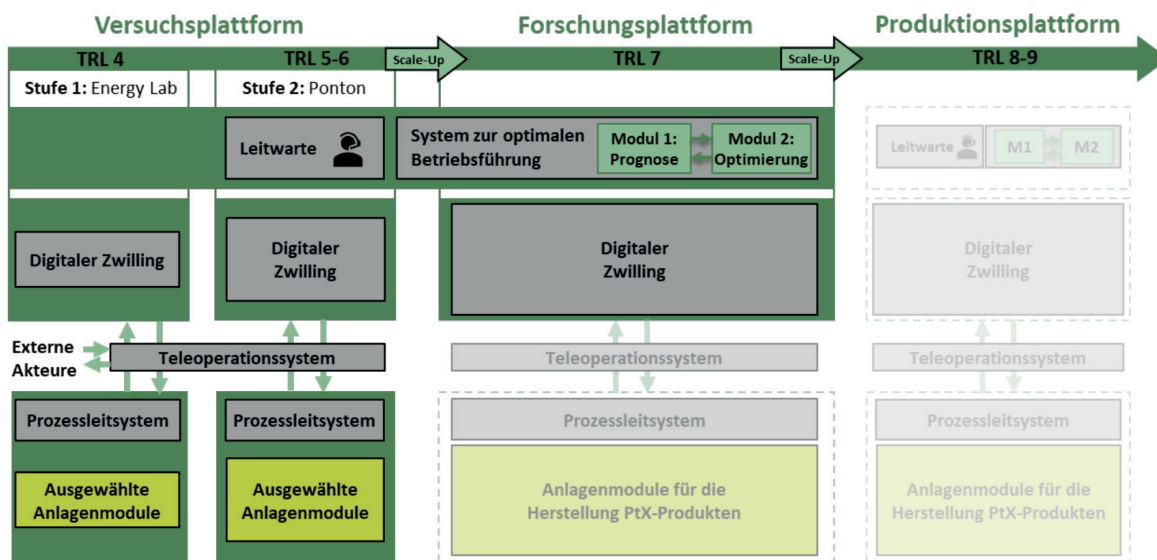


Abbildung 4: Drei Entwicklungsstadien der PtX-Plattform.

halb eine Erweiterbarkeit für die einfache Skalierung gewünscht ist. Außerdem wird insbesondere die Erhöhung der Rekonfigurierbarkeit durch Plug-&Produce-Ansätze in der Offshore-Anwendung für die Forschungs- und Produktionsplattform interessant, um beispielsweise Anlagenmodule effizient warten und austauschen zu können. Auch deshalb ist die Untersuchung der Eignung des MTP-Konzeptes Teil des Forschungsvorhabens [19].

Der für die Versuchsplattform entwickelte DZ (Kapitel 4.2) sowie das System zur optimalen Betriebsführung (Kapitel 4.1), das PLS und das Teleoperationssystem sollen als Blaupause den Grundstein für weitere Entwicklungsschritte über die Projektlaufzeit hinaus legen. Das langfristige Ziel des Forschungsvorhabens ist eine serienreife PtX Plattform im industriellen Maßstab (TRL 8-9).

## 4. Forschungsschwerpunkte

### 4.1 System zur optimalen Betriebsführung

Für einen optimalen Betrieb der PtX-Plattform auf Basis der volatilen Energieversorgung ergeben sich Herausforderungen sowohl hinsichtlich der Windprognose als auch für den optimalen Plattformbetrieb. Der Forschungsschwerpunkt zum System zur optimalen Betriebsführung soll zwei Ziele adressieren:

- » Implementierung einer optimal geeigneten Prognose des Energieangebots eines Offshore-Windparks auf Basis historischer Windparkdaten.
- » Entwicklung eines intelligenten adaptiven Systems zur Betriebsoptimierung der PtX-Produktionsanlagen in maritimer Umgebung unter Berücksichtigung der stochastischen Einflussgrößen (insbesondere Windenergieproduktion).

Dabei werden die hochdynamischen und stochastischen Windenergieerzeugungen mit den komplexen nichtlinearen

verfahrenstechnischen Prozessen, die normalerweise kontinuierlich bei hoher Auslastung betrieben werden, unter Voraussetzung eines sicheren, zuverlässigen und resilienten Betriebs miteinander verknüpft.

Das System zur optimalen Betriebsführung beruht auf intelligenten Algorithmen und Modellierungstechniken, um hoch performante und zukünftig dezentrale PtX-Anlagen unterschiedlicher Konfiguration und Größe mit geringem Adaptionaufwand optimal betreiben zu können. Dabei stehen umfangreiche Ansätze zur prädiktiven Systembetriebsführung im Vordergrund (u. a. auf Basis von stochastischen Optimierungsansätzen und Künstlicher Intelligenz), die eine Verbesserung im Umgang mit den zunehmenden Unsicherheiten und variierenden Betriebscharakteristika für die globale autarke Optimierung erheblich an Bedeutung gewinnen, und zusätzlich die Rechenzeit deutlich reduzieren können.

Die Implementierung bzw. Verbesserung vorhandener Verfahren im Bereich der Prognosetechniken wird anhand historischer Daten umgesetzt, die im DZ hinterlegt sind, sodass die Energieproduktion der integrierten Offshore-Windenergieanlage virtuell prädiziert wird. Dadurch kann zum einen eine möglichst schnelle Regelung der einzelnen Anlagenmodule, die intern autark fungieren, zum anderen auch eine globale Optimierung der gesamten PtX-Plattform erzielt werden. Dabei wird insbesondere auf Erfahrungen in der Betriebsführung von komplexen Anlagenparks in der Stromerzeugung zurückgegriffen [20], bei der die Untersuchung der optimalen Integration der volatilen Windenergie auf Basis stochastischer Optimierungstechniken eingesetzt wurde oder auf dem Einsatz von KI-Methoden, die bereits zur Prognose von Betriebsausfällen von Geothermie-Anlagen erfolgreich implementiert worden sind [21].

Ein Nebenziel umfasst auch, wie in Letzterem beschrieben, die KI-Methoden im Bereich des Systems zur optimalen Betriebsführung spezifisch in die Vorhersagen der dezentralen Energiesysteme wie Windenergieanlagen einzubinden, da diese bisher eine zweitrangige Rolle besitzen und noch nicht

ausgereift sind. Eine Reihe von KI-Methoden wird in [22] vorgestellt, um eine genauere Prognosefähigkeit mit einer bestimmten Unsicherheit im Bereich der Windenergie vorherzusagen. Während in [23] die räumliche und zeitliche Korrelation von Windparks präsentiert wird, versucht [24] das Verhältnis zwischen der erzeugten Windleistung und der Windgeschwindigkeit mithilfe probabilistischer Methoden herzuleiten. Auf diese Weise können langfristige Windprognosen mit Konfidenzmaßen besser skalierbar und effizienter erfasst werden. Das Prognosemodul bezieht verschiedene heterogene und homogene Informationen aus dem DZ, um die intermittierende Stromerzeugungscharakteristik des dezentralen Energiesystems präziser zu bestimmen.

Mittels kurz-, mittel- und langfristigen Windprognosen wird über die Gesamtanlage eine multikriterielle Optimierung nach prädiktiven und simulationsbasierten Ansätzen angestrebt [25]. Die stochastischen Optimierungsansätze aus den beiden Projekten Heat4SmartGrid [26] und DSM Plattform BW 2.0 [27], die mit den HiL-basierten intelligenten Steuerungsansätzen für dezentrale Energiesysteme entwickelt wurden, sollen für die PtX-Plattform weiterentwickelt werden, um der Leitwarte komponentenscharfe Fahrpläne zur Verfügung zu stellen. Diese Optimierungstechniken sind jedoch aufgrund der rechenaufwändigen Anforderungen maßgeblich kontinuierlich weiterzuentwickeln.

#### 4.2 Digitaler Zwilling

Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, müssen aufgrund der Vielzahl an verschiedenen Applikationen (Prognose, Optimierung, HiL) heterogene Modelle (Struktur-, Funktions- und Verhaltensmodelle) in Relation zueinander gesetzt werden können, um eine, insbesondere simulative, Untersuchung zu ermöglichen. Des Weiteren sollen vielfältige Konfigurationsmöglichkeiten in Bezug auf die Module der PtX-Plattform analysiert werden können.

Ein DZ i. A. an [28, 29] adressiert diese Herausforderungen und ist Gegenstand vieler aktueller Forschungsaktivitäten. Den Grundbaustein eines solchen DZ bilden Modelle und deren Relation zueinander, welche ein virtuelles Abbild eines physischen Assets darstellen. Darüber hinaus muss der DZ zusätzlich drei Eigenschaften aufweisen:

- » Die Modelle und ihre Relationen sind mit der Realität synchronisiert, sodass zu jeder Zeit das statische Abbild der Realität repliziert wird.
- » Es muss eine aktive Datenerfassung von der Realität zum DZ erfolgen, damit auch die dynamischen Vorgänge wahrgenommen werden.
- » Das Vorhandensein eines ausführbaren Modells ist notwendig, damit das statische Abbild um die Replikation des dynamischen Verhaltens der Realität bereichert wird.

Des Weiteren müssen die Herausforderungen von Änderungen in der Umgebung des eingesetzten Systems und am System selbst adressiert werden. Diese ergeben sich einerseits aufgrund der geplanten Standortänderung der Versuchsplattform im Rahmen des Projektfortschrittes (vgl. Kapitel

3.4) von einer Onshore- bzw. Ongrid- hin zu einer Offshore- bzw. Offgrid-Umgebung. Andererseits werden im Projektverlauf sowohl die Anlagenmodule von hinzukommenden Modulen ergänzt als auch die Modelle der vorhandenen Anlagenmodule weiterentwickelt. Außerdem wird erwartet, dass sich die Anforderungen der Applikationen an das jeweils benötigte Applikations-spezifische Modell im Laufe des Projekts ändern, da die Applikationsentwicklung Gegenstand projektinterner Forschungsaktivitäten sind. Die genannten Änderungen führen zu einem Modelldrift, der die Realitätstreue des DZ verschlechtert. Dementsprechend wird eine ereignisgetriebene Modelladaption benötigt, die das Konzept des DZ zunächst nicht umfasst.

Der Forschungsschwerpunkt dieses Projektes im Hinblick auf den DZ liegt daher in der Konzeption eines systematischen Modelladaptionsansatzes, um eine manuelle, kostenintensive und fehleranfällige Modellpflege obsolet zu machen. Ein vielversprechendes Rahmenkonzept, das die Integration eines Modelladaptionsansatzes erlaubt, wurde in Form des intelligenten DZ in [28] vorgestellt, die präsentierte Architektur stellt eine Erweiterung des Konzepts des DZ dar.

Da es nicht immer möglich ist jeden relevanten Aspekt in einem einzigen Simulationstool abzubilden [30], rücken Co-Simulationsansätze in den Mittelpunkt der Betrachtung. Insbesondere dann, wenn eine hohe Modellheterogenität vorliegt. Hierzu wurden in [31] existierende Co-Simulationsansätze analysiert und ein Konzept zur dynamischen Co-Simulation vorgestellt, das auf dem Einsatz eines Multi-Agenten-Systems basiert.

Ein zugehöriges Projektziel ist die Konzeption einer Co-Simulationsumgebung für die simulativen Untersuchungen. Konkret ist etwa für die HiL-basierte virtuelle Inbetriebnahme das Anfahren kritischer Betriebspunkte der Prozessschritte zur gefahrlosen Untersuchung des Verhaltens der Prozesse und die möglichen Reaktionen der Steuerung umzusetzen. Insgesamt muss eine realitätsnahe Abbildung des Systems und seiner Umgebung in Form einer Einbindung unterschiedlicher Teilmodelle (Orchestrierung) realisiert werden. Ein Framework für die Co-Simulation kann i. A. an [31] bspw. agenten-basiert entworfen werden.

Da es die genannten Applikationen erfordern, dass jeweils spezifische Modelle aus dem Modellpool des DZs orchestriert werden, soll ein Konzept entwickelt werden, das dem Gedanken des *Model-as-a-Service* (MaaS) folgt. Da über die Projektlaufzeit die Anzahl der einbezogenen Anlagenmodule anwachsen wird, ist es erforderlich, dass unterschiedliche Konfigurationsalternativen der PtX-Plattform untersucht werden können. Dies soll im MaaS-Konzept und in Anlehnung an [25, 32, 33], derart erfolgen, dass die dort beschriebene dynamische, automatisierte Simulationsmodellgenerierung für die Untersuchung der jeweiligen Konfigurationsalternativen aufgegriffen werden soll.

Wie oben beschrieben ist es notwendig, die Relationen zwischen den verschiedenen Modellen des DZs zu kennen. Dabei ist es sowohl bedingt durch die notwendige Modelladaption als auch für deren Umsetzung wichtig, diese Relationen dynamisch managen zu können. Hierzu wurde der Einsatz von Knowledge-Graphen in [34] als ein geeignetes Mittel identifiziert und ein Konzept vorgestellt wie die Architektur des intel-

l intelligenten DZ durch Knowledge-Graphen erweitert werden kann. Obwohl es möglich wäre, die in diesem Kapitel beschriebenen Konzepte ohne einen intelligenten DZ zu implementieren, bietet dieser alle Voraussetzungen, um die Konzepte miteinander zu kombinieren und die gestellten Anforderungen zu erfüllen. Daher dient das Konzept des intelligenten DZ als Ausgangspunkt und soll im Zuge des Projekts weiterentwickelt werden. Dabei ist auch die Fragestellung zu beantworten, ob es einen zentralen DZ geben oder ein Zusammenschluss aus dezentralen DZ präferiert werden soll. Außerdem muss anwendungsfallspezifisch entschieden werden, ob die Ausführung der Simulationsmodelle innerhalb oder außerhalb der Systemgrenze des DZ liegen sollen, wobei dies im Zusammenspiel mit der Beantwortung der vorangegangenen Fragestellung entschieden werden muss.

## 5. Zusammenfassung

Dieser Beitrag präsentiert das Projektkonzept für eine PtX-Plattform auf hoher See zur Herstellung von klimaneutralem Wasserstoff und Folgeprodukten. Im BMBF-Leitprojekt H2Mare soll dieses neuartige Anlagenkonzept erforscht und erprobt

werden. Inhaltliche Schwerpunkte der Forschung sind:

- » Die Untersuchung des Optimierungspotentials der Interdependenz zwischen Windprognose und Betriebsoptimierung der verfahrens-technischen Komponenten.
- » Die Erforschung der Modelladaption mittels intelligentem Digitalen Zwilling, um den Model-as-a-Service Gedanken aufzugreifen und eine adaptive Co-Simulation zu ermöglichen.
- » Zukünftig soll eine geeignete Systemarchitektur entwickelt werden, welche die aus den Forschungsschwerpunkten resultierenden Teilkonzepte zusammenführen soll.

## Danksagung

Dieser Beitrag wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter der Förderkennzeichnung 03HY302R gefördert.

## Referenzen

- [1] Kopernikus-Projekt Ariadne Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK). (2021). *Durchstarten trotz Unsicherheiten: Eckpunkte einer anpassungsfähigen Wasserstoffstrategie*. Abgerufen von: [https://ariadneprojekt.de/media/2021/11/Ariadne\\_Kurzdosier\\_Wasserstoff\\_November2021.pdf](https://ariadneprojekt.de/media/2021/11/Ariadne_Kurzdosier_Wasserstoff_November2021.pdf)
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). (2020). *Die Nationale Wasserstoffstrategie*. Abgerufen von: [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile)
- [3] Nationaler Wasserstoffrat, Deutsche Energie-Agentur GmbH, NOW GmbH. (2021). *Wasserstoff Aktionsplan Deutschland 2021–2025*. Abgerufen von: [https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/2021-07-02\\_NWR-Wasserstoff-Aktionsplan.pdf](https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/2021-07-02_NWR-Wasserstoff-Aktionsplan.pdf)
- [4] Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). *Willkommen bei den Wasserstoff-Leitprojekten*. Abgerufen von: <https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/>
- [5] Drünert, S., Neuling, U., Timmerberg, S., Kaltschmitt, M. (2019). Power-to-X (PtX) aus „Überschussstrom“ in Deutschland – Ökonomische Analyse. *Zeitschrift für Energiewirtschaft*, 43(3), 173-191. doi: 10.1007/s12398-019-00256-7.
- [6] Wulf, C., Zapp, P., Schreiber, A. (2020). Review of power-to-X demonstration projects in Europe. *Frontiers in Energy Research*, 8, 191. doi: 10.3389/fenrg.2020.00191.
- [7] E-Bridge Consulting GmbH. (2022). *Wasserstoff – Preisindex „Hydex“*. Abgerufen von: <https://www.e-bridge.de/#hydexmodal>
- [8] Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages, Ed. (2020). *Kosten der Produktion von grünem Wasserstoff*.
- [9] Ibrahim, O. S., Singlitico, A., Proskovics, R., McDonagh, S., Desmond, C., Murphy, J. D. (2022). Dedicated large-scale floating offshore wind to hydrogen: Assessing design variables in proposed typologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160, 112310. doi: 10.1016/j.rser.2022.112310.
- [10] Norsk e-Fuel AS. (2020). *Norsk e-Fuel is planning Europe's first commercial plant for hydrogen-based renewable aviation fuel in Norway*. Abgerufen von: <https://www.sunfire.de/en/news/detail/norsk-e-fuel-is-planning-europes-first-commercial-plant-for-hydrogen-based-renewable-aviation-fuel-in-norway>
- [11] Kost, C., Shammugan, S., Fluri, V., Peper, D., Memar, A. D., Schlegl, T. (2021). *Stromgestehungskosten erneuerbare Energien*. Abgerufen von: [https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2021\\_ISE\\_Studie\\_Stromgestehungskosten\\_Erneuerbare\\_Energien.pdf](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2021_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf)
- [12] Hill, O. (2020). A review of the technical challenges faced in floating offshore wind turbine deployment. Abgerufen von: <https://pearl.plymouth.ac.uk/>
- [13] Profanter, S., Tekat, A., Dorofeev, K., Rickert, M., Knoll, A. (2019). OPC UA versus ROS, DDS, and MQTT: performance evaluation of industry 4.0 protocols. In *2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)* (pp. 955-962). IEEE.
- [14] Durkop, L., Czybik, B., Jasperneite, J. (2015). Performance evaluation of M2M protocols over cellular networks in a lab environment. In *2015 18th international conference on Intelligence in Next Generation Networks* (pp. 70-75). IEEE.
- [15] Eckhardt, A., Müller, S., Leurs, L. (2018). An evaluation of the applicability of OPC UA Publish Subscribe on factory automation use cases. In *2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)* (Vol. 1, pp. 1071-1074). IEEE.
- [16] Siemens. (2022). *Wind power needs communication*. Abgerufen von: <https://new.siemens.com/global/en/markets/wind/equipment/industrial-communication.html>
- [17] Tauchnitz, T., Ed. (2021). *NAMUR Open Architecture (NOA): Das Konzept zur Öffnung der Prozessautomatisierung, 1st ed.* Vulkan-Verlag, Essen.
- [18] VDI/VDE/NAMUR 2658-1. (2019). *Automatisierungstechnisches Engineering modularer Anlagen in der Prozessindustrie: Allgemeines Konzept und Schnittstellen*. VDI. [www.vdi.de](http://www.vdi.de)
- [19] Barth, R., Brand, H., Meibom, P., Weber, C. (2006). A stochastic unit-commitment model for the evaluation of the impacts of integration of large



- amounts of intermittent wind power. In *2006 international conference on probabilistic methods applied to power systems* (pp. 1-8). IEEE.
- [20] Wendel, F., Schulz, M., Schlegel, P., Blesl, M., Hufendiek, K., Barenth, F. (2020). Zustandsbasierte Prognose von Betriebsausfällen von Geothermieranlagen unter Anwendung künstlicher Intelligenz. Abgerufen von: [https://www.researchgate.net/profile/Maximilian-Schulz-2/publication/346024957\\_Zustandsbasierte\\_Prognose\\_von\\_Betriebsausfaellen\\_von\\_Geothermieranlagen\\_unter\\_Anwendung\\_kuenstlicher\\_Intelligenz/links/5fb69ef9a6fdcc6cc64ac8ff/Zustandsbasierte-Prognose-von-Betriebsausfaellen-von-Geothermieranlagen-unter-Anwendung-kuenstlicher-Intelligenz.pdf?origin=publication\\_detail](https://www.researchgate.net/profile/Maximilian-Schulz-2/publication/346024957_Zustandsbasierte_Prognose_von_Betriebsausfaellen_von_Geothermieranlagen_unter_Anwendung_kuenstlicher_Intelligenz/links/5fb69ef9a6fdcc6cc64ac8ff/Zustandsbasierte-Prognose-von-Betriebsausfaellen-von-Geothermieranlagen-unter-Anwendung-kuenstlicher-Intelligenz.pdf?origin=publication_detail)
- [21] Alkabbani, H., Ahmadian, A., Zhu, Q., Elkamel, A. (2021). Machine learning and metaheuristic methods for renewable power forecasting: a recent review. *Frontiers in Chemical Engineering*, 14. doi: 10.3389/fceng.2021.665415.
- [22] Fu, X., Gao, F., Wu, J., Wei, X., Duan, F. (2019). *Spatiotemporal Attention Networks for Wind Power Forecasting*. Abgerufen von: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1909/1909.07369.pdf>
- [23] Karami, F., Kehtarnavaz, N., Rotea, M. (2021). *Probabilistic Neural Network to Quantify Uncertainty of Wind Power Estimation*. Abgerufen von: <https://dblp.org/rec/journals/corr/abs-2106-04656.bib>
- [24] Müller, T., Lindemann, B., Jung, T., Jazdi, N., Weyrich, M. (2021). Enhancing an Intelligent Digital Twin with a Self-organized Reconfiguration Management based on Adaptive Process Models. *Procedia CIRP*, 104, 786-791.
- [25] Schulz, M., Kemmler, T., Kumm, J., Hufendiek, K., Thomas, B. (2020). A more realistic heat pump control approach by application of an integrated two-part control. *Energies*, 13(11), 2752.
- [26] Schulz, M., Hufendiek, K. (2021). Discussing the actual impact of optimizing cost and GHG emission minimal charging of electric vehicles in distributed energy systems. *Energies*, 14(3), 786. doi: 10.3390/en14030786.
- [27] Talkhestani, B. A., Jung, T., Lindemann, B., Sahlab, N., Jazdi, N., Schloegl, W., Weyrich, M. (2019). An architecture of an intelligent digital twin in a cyber-physical production system. *at-Automatisierungstechnik*, 67(9), 762-782.
- [28] Braun, D., Schloegl, W., Weyrich, M. (2021). Automated data-driven creation of the Digital Twin of a brownfield plant. In *2021 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)* (pp. 1-7). IEEE.
- [29] Jung, T., Jazdi, N., Weyrich, M. (2017). A survey on dynamic simulation of automation systems and components in the Internet of Things. In *2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)* (pp. 1-4). IEEE.
- [30] Jung, T., Shah, P., Weyrich, M. (2018). Dynamic co-simulation of internet-of-things-components using a multi-agent-system. *Procedia CIRP*, 72, 874-879.
- [31] Müller, T., Jazdi, N., Schmidt, J. P., Weyrich, M. (2021). Cyber-Physical Production Systems: enhancement with a self-organized reconfiguration management. *Procedia CIRP*, 99, 549-554.
- [32] Müller, T., Walth, S., Jazdi, N., Weyrich, M. (2021). Identification of Reconfiguration Demand and Generation of Alternative Configurations for Cyber-Physical Production Systems. In *Advances in Automotive Production Technology—Theory and Application* (pp. 63-70). Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.
- [33] Sahlab, N., Kamm, S., Müller, T., Jazdi, N., & Weyrich, M. (2021). Knowledge graphs as enhancers of intelligent digital twins. In *2021 4th IEEE International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)* (pp. 19-24). IEEE.

## AUTOR:INNEN

Daniel Dittler, M.Sc., (geb. 1994) ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme (IAS) der Universität Stuttgart. Hauptforschungsgebiete: Digitaler Zwilling und Modelladaption.

### Kontakt

Universität Stuttgart  
 Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme (IAS)  
 Pfaffenwaldring 47  
 70550 Stuttgart  
 @daniel.dittler@ias.uni-stuttgart.de

Pascal Häbig, M.Sc., (geb. 1989) ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart. Sein Hauptforschungsgebiet sind intelligente dezentrale Energiesysteme.

Nikola Mößner, M.Sc., (geb. 1995) ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am IER. Ihr Hauptforschungsgebiet ist die Modellierung und Identifikation von Synergien in dezentralen Energiesystemen.

Gökhan Demirel, M.Sc., (geb. 1992) ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am IER. Sein Hauptforschungsgebiet ist die Entwicklung von intelligenten Algorithmen zur prädiktiven Betriebsoptimierung mit maschinellem Lernen in dezentralen Energiesystemen.

Timo Müller, M.Sc., (geb. 1990) ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am IAS. Hauptforschungsgebiet ist die Rekonfiguration von cyber-physischen Produktionssystemen.

Dr.-Ing. Nasser Jazdi (geb. 1963) ist akademischer Oberarzt des IAS. Die Hauptforschungsgebiete sind Internet of Things bzw. Lernfähigkeit, Zuverlässigkeit und Sicherheit in der Automatisierungstechnik.

Prof. Dr.-Ing. Kai Hufendiek (geb. 1969) ist Leiter des IER. Seine Hauptforschungsgebiete sind die gesamthafte Energiesystemanalyse und intelligente dezentrale Energiesysteme.

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Michael Weyrich (geb. 1967) ist Leiter des IAS. Seine Hauptforschungsgebiete sind Methoden und Tools zur Komplexitätsreduktion von Software in der Automatisierungstechnik.