

„Ulrich Jumar, Christian Diedrich (Hrsg.):  
EKA 2024 - Entwurf komplexer Automatisierungssysteme, 18. Fachtagung“

## Effiziente Integration von Elektrolyseuren in modularen Elektrolyseanlagen

### Einheitliche Schnittstellen zur Wasserstoffherzeugung

Julius Lorenz<sup>1</sup>, Tobias Kock<sup>2</sup>, Lukas Grahl<sup>3</sup>, Vincent Henkel<sup>4</sup>, Lena Scholz<sup>5</sup>, Katharina Stark<sup>6</sup>, Rene Lorenz<sup>7</sup>, Anselm Klose<sup>8</sup>, Leon Urbas<sup>9</sup>

**Abstract:** Die Erzeugung von Wasserstoff mittels Elektrolyse von Wasser bis in den Gigawatt-Maßstab, erfordert Anlagen, die aus einer Vielzahl von Elektrolyseuren modular aufgebaut sind. Für den Betrieb müssen alle prozessrelevanten Module der Anlage für die Prozessführung integriert werden. Eine aufwandsarme Integration mit allen für den Betrieb erforderlichen Informationen bildet die Grundlage für einen schnellen, effizienten Aufbau und spätere Anpassungen von Elektrolyse-Anlagen. Der Beitrag stellt die wesentlichen Integrationsszenarien aus Betreiberperspektive vor. Dafür werden die Anforderungen der Integration bezüglich Information und Funktion abgeleitet. Resultat ist ein herstellerunabhängiges Standardintegrationsprofil. Das Standardintegrationsprofil bildet die Grundlage für die Umsetzung mittels Module Type Package aus der modularen Automation in der Prozessindustrie.

**Keywords:** Modulare Automation, Leitsystem-Integration, Prozessführung, Wasserstoff, Elektrolyse.

<sup>1</sup> Technische Universität Dresden, Chair of Process Control Systems & Group of Process Systems, Dresden, julius.lorenz@tu-dresden.de,  <https://orcid.org/0000-0001-7124-4844>

<sup>2</sup> Technische Universität Dresden, Chair of Process Control Systems & Group of Process Systems, Dresden, tobias.kock@tu-dresden.de

<sup>3</sup> Semodia GmbH, Anschrift, Meißner Str.37, 01445 Radebeul, lukas.grahl@semodia.com,  <https://orcid.org/0000-0002-7335-0971>

<sup>4</sup> Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, Institut für Automatisierungstechnik, vincent.henkel@hsu-hh.de

<sup>5</sup> Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, Institut für Automatisierungstechnik, lena.scholz@hsu-hh.de

<sup>6</sup> ABB AG Forschungszentrum Deutschland, Ladenburg, katharina.stark@de.abb.com

<sup>7</sup> Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart, rene.lorenz@dlr.de,  <https://orcid.org/0000-0002-9539-4182>

<sup>8</sup> Process-to-Order Lab, Technische Universität Dresden, Dresden, anselm.klose@tu-dresden.de,

 <https://orcid.org/0000-0003-3954-7786>

<sup>9</sup> Technische Universität Dresden, Chair of Process Control Systems & Group of Process Systems, Dresden, leon.urbas@tu-dresden.de,  <https://orcid.org/0000-0001-5165-4459>

## 1 Einleitung

Die Erzeugung von grünem Wasserstoff mittels Elektrolyse von Wasser ist eine Schlüsseltechnologie für die Dekarbonisierung schwer elektrifizierbarer Sektoren wie der Chemie- und Schwerindustrie und dem Schwertransport [Sm18]. Um die dafür benötigten Wasserstoffmengen bereitzustellen, müssen die verfügbaren Elektrolýsetechnologien hochskaliert und die Wasserstoffherzeugungskapazität ausgebaut werden. Die Größe einer Elektrolyse-Anlage richtet sich vor allem nach der verfügbaren elektrischen Energie oder dem Bedarf eines Folgeprozesses [La23]. Anlagengrößen im notwendigen Gigawatt-Maßstab sind jedoch noch Stand von Forschung und Entwicklung [La24]. Da die Größe eines einzelnen Elektrolyseurs in der jeweiligen Technologie physikalisch begrenzt ist, muss eine solche Anlage aus mehreren Elektrolyseuren modular aufgebaut werden. Je nach anvisierter Leistung und Art der Anlage ergeben sich dafür unterschiedliche Modularisierungsansätze [Sc22]. Eine Gigawatt-Anlage aus derzeit verfügbaren Elektrolyse-Stacks aufzubauen, erfordert je nach Stackgröße die Integration vieler einzelner Stacks. Nutzt man beispielsweise Druck-Alkali-Elektrolyseure wie den „Sunfire-HyLink Alkaline“ der Sunfire GmbH mit je 10MW Leistung zum Aufbau ergeben sich rechnerisch 100 Stacks für 1GW Elektrolyseleistung [SU23].

Der modulare Aufbau einer Anlage erfordert die Integration der einzelnen Elektrolyseure; aktuell sind herstellerepezifische Beschreibungen und Integrations szenarien der Normalfall. Die Integration einer Vielzahl von Elektrolyseuren mit einem herstellerepezifischen Ansatz resultiert damit in einer spezifischen Integration für jede erstellte Anlage, verbunden mit einer hohen Komplexität und Aufwänden. Diesem durch einheitliche Ansätze zu begegnen ist Zielstellung des in diesem Artikel vorgestellten Standardintegrationsprofils für Elektrolyseure. Gerade die Vielzahl redundanter Elemente mit ähnlichem Informations- und Funktionsumfang macht einen einheitlichen Ansatz im Bereich von Elektrolyseuren attraktiv.

## 2 Vorgehensmodell zur Entwicklung eines Standardintegrationsprofils

Für die Entwicklung eines Standardintegrationsprofils müssen die notwendige Information und die relevanten Funktionen ermittelt, formalisiert sowie verifiziert und validiert werden. In H2Giga-eModule wurde dafür ein sequentielles Vorgehensmodell mit sechs Schritten angewendet (Abbildung 1). Angesichts der klar umreißbaren Aufgabenstellung wurde eine Kombination von Wasserfallmodell [ISO24765] und inkrementellem Modell [ISO24765] für die Informationsmodellierung gewählt.

Im ersten Schritt werden die Integrations szenarien für modulare Elektrolyse-Anlagen auf Basis von Literatur ermittelt. Dies geschieht einerseits mittels einer systematischen Literaturrecherche zu existierenden Beschreibungen von Elektrolyseuren und Elektrolyse-

Systemen und andererseits durch empirische Untersuchungen typischer Aufgaben und dem damit verbundenen Informations- und Funktionsbedarfs aus Betreibersicht. Im zweiten Schritt werden die notwendigen Anforderungen hinsichtlich Information und Funktionen innerhalb der Rahmenbedingungen und Systemgrenzen aus Schritt 1 bestimmt. Die daraus resultierende Informationsmenge und Funktionsumfang werden im dritten Schritt aufbereitet, damit im vierten Schritt das herstellerunabhängige Standardintegrationsprofil entwickelt werden kann. Das Standardintegrationsprofil bildet dann die Grundlage für die Erstellung spezifischer Lösungen. In Schritt 5 wird dies am Beispiel des Module Type Package (MTP) für den Teilaspekt der automatisierungstechnischen Integration gezeigt. Im letzten Schritt erfolgt die Verifikation und Validierung der konkreten Umsetzung auf Basis virtueller und physischer Demonstratoren.

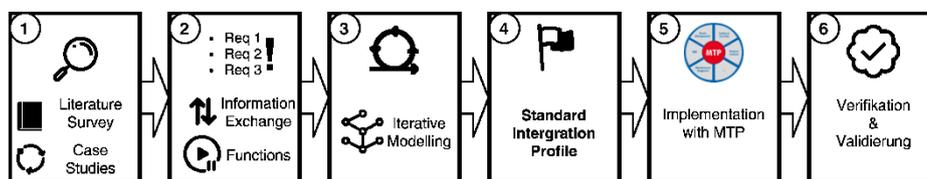


Abb. 1: Vorgehensmodell zur Entwicklung eines Standardintegrationsprofils

### 3 Integrationsszenarien

Eine Integration ist nach [IEEE] „[die] Zusammenführung oder Kombination von zwei oder mehr Elementen einer niedrigeren Ebene zu einem funktionierenden und einheitlichen Element einer höheren Ebene, bei dem die funktionalen und physischen Schnittstellen erfüllt sind.“. Im Anwendungsfall der modularen Elektrolyse-Anlagen ist dies das Einbinden einzelner Module in die Gesamtanlage Anlage zur Erzeugung von Wasserstoff. Hierbei müssen die Schnittstellen eines Moduls auf stofflicher, energetischer und informationstechnischer Ebene verbunden werden. Dies bedeutet, dass diese per Design so gestaltet sein müssen, dass die Kombination konfliktfrei möglich ist. Schwerpunkt der in diesem Artikel durchgeführten Analyse ist die informationstechnische Integration. Diese, im Folgenden kurz als Integration bezeichnet, behandelt den Austausch von Daten und das zielgerichtete Ansteuern der Funktionen der einzelnen Einheiten für den sicheren und wirtschaftlichen Betrieb der Gesamtanlage.

Je nach Integrationsszenario können sich die zu integrierenden Module unterscheiden. Ein wesentliches Kriterium neben anderen wie der Technologie ist die Granularität der Integrationsebene. Bei Elektrolyseanlagen lassen sich zwei wesentliche Arten unterscheiden, wie auch in Abbildung 2 dargestellt:

- A) Integration einzelner Prozesseinheiten v.a. Stacks und Balance-of-Plant (BoP) Komponenten analog zu [Bi22, La24]

- B) Integration mehrerer vorkonfigurierter Elektrolyse-Systeme (intern z.B. gestaltet wie A, aber als Ganzes inklusive anteiligem BoP integriert z.B. als Container)

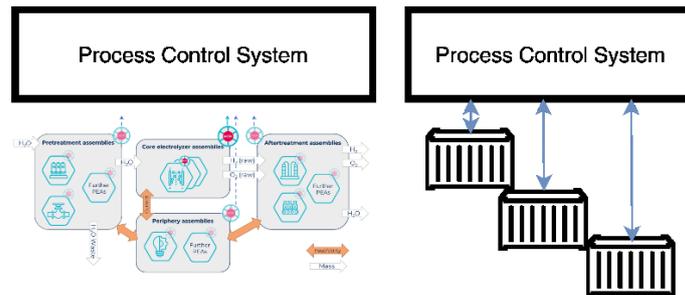


Abb. 2: Referenz-Integrationsszenarien von Elektrolysesystemen

Bei der Integration nach A müssen im Vergleich zu B mehr und auch im Hinblick auf die Energie- und Stoffwandlungsprozesse sehr unterschiedliche Module in das Leitsystem integriert werden. Bemisst man den Integrationsaufwand anhand der Schnittstellenanzahl und Anzahl unterschiedlicher Module ist dieser bei gleicher Produktionskapazität aufgrund der Anzahl der Schnittstellen bei A) höher als bei B). Gleichzeitig bestehen jedoch bei A) im Vergleich zu B) aus Betreibersicht mehr Freiheitsgrade, da durch einzelne Integration auch individuelle Anlagenkonfigurationen möglich sind. Das wesentliche Modul zur Erzeugung von Wasserstoff ist in Szenario A) der Stack. Hinzu kommen die BoP-Module, die ebenfalls über standardisierte informationstechnische Schnittstellen verfügen sollen.

In Szenario B) wird ein vorkonfiguriertes System aus z.B. Containern, die intern eigenständig für die Koordination der in A) genannten Module sorgen, integriert. Der Integrationsaufwand ist reduziert, da deutlich weniger Schnittstellen zwischen Modul und Leitsystem bestehen. Dieser Fall ergibt sich beispielsweise, wenn ein Betreiber seine Produktion auf Wasserstoff umstellen möchte und auf ein oder mehrere schlüsselfertige, vorautomatisierte Systeme zur Bereitstellung des Wasserstoffs setzt.

Mit einheitlichen Schnittstellen könnten zudem Blueprints für Prozessführungskonzepte entwickelt werden. Der Blueprint würde die grundsätzlichen Regeln für die Koordination der Module definieren und müsste für den Betrieb nur hinsichtlich der Anzahl der in einer konkreten Anlage enthaltenen Module mit den jeweiligen Eigenschaften gemäß Standardintegrationsprofil angepasst werden.

Das Standardintegrationsprofil sollte auch Möglichkeiten zur Anpassung und Optimierung bereitstellen. Ein Ansatz ist eine hohe Selbstbeschreibungsfähigkeit [IEEE]. Dies kann entweder durch zusätzliche Indikatoren, die eine bessere Vorgabe von Soll Arbeitspunkten ermöglichen oder von Parametern zur Anpassung des Betriebspunktes an die jeweiligen Einsatzbedingungen, erfolgen.

## 4 Anforderungen an die Modulbeschreibung

Das zu integrierende Modul muss hinreichend bezüglich seiner Schnittstellen, Eigenschaften und des Verhaltens beschrieben sein, um den Betrieb zu ermöglichen. Das Standardintegrationsprofil muss diese Informationen enthalten, um eine einheitliche Integration zu gewährleisten. Der Umfang wird dabei so gewählt, dass eine Eignung für möglichst viele Integrationsszenarien besteht. Aus diesem Grund bezieht sich die Spezifikation auf die Kernfunktionalität der Erzeugung und Bereitstellung von Wasserstoff am Modulausgang, welche die Möglichkeit zur Erweiterung bietet. Die inhaltliche Ausgestaltung und Struktur sollen zudem die Anforderungen der Prozessindustrie nach VDI 2770 „Mindestanforderungen an Herstellerinformationen für die Prozessindustrie“ [VDI20b] erfüllen. Die darin enthaltene funktionale/technische Spezifikation sollte als Teilmenge auch die Beschreibung der automatisierungstechnischen Schnittstelle zur Integration beinhalten. Die Informationen bei einer technischen Umsetzung sollten vorrangig in maschinenlesbaren Formaten vorliegen. Diese Forderung erweitert die Mindestanforderung nach PDF-A in VDI 2770 [VDI20b]. Beispiele für standardisierte Ansätze aus der Prozessindustrie und modularen Automation sind das MTP oder im Kontext der Industrie 4.0 und des Digitalen Zwillings die Verwaltungsschale.

## 5 Erhebung des Informations- und Funktionsbedarfs

Das Integrationsprofil selbst soll die notwendige Information für den Betrieb abbilden. Um die derzeit bereitgestellte Information über einen Elektrolyseur zu berücksichtigen, wurden 20 Spezifikationen verschiedener Elektrolyseure und Elektrolysesysteme hinsichtlich Eigenschaften und Funktionen ausgewertet und zur Identifikation der Kernfunktionalität die Schnittmenge gebildet, wie exemplarisch für zwei Hersteller in Abbildung 3 zu sehen ist.

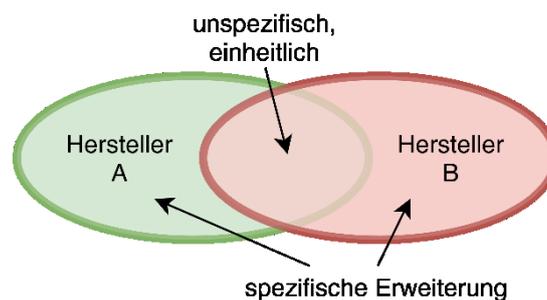


Abb. 2: Venn-Diagramm der Informationen zweier Hersteller

In der Schnittmenge enthalten waren u.a.

- Betriebsbereich,
- Teillastfähigkeit,
- Leistungsaufnahme,
- Wasserverbrauch und -qualität, sowie
- Wasserstoff-Produktionsmenge, -qualität und -druck.

Bei der konkreten Benennung und den Einheiten der Eigenschaften bestanden dabei allerdings Unterschiede. Bei einer nicht standardisierten Integration würde hier zusätzlicher Aufwand entstehen, weswegen an dieser Stelle eine Vereinheitlichung sinnvoll ist.

Betriebliche Funktionen, automatisierungstechnische Schnittstellen und Verhalten waren in den Spezifikationen nur in Einzelfällen vorhanden z.B. in Form von Anfahrzeiten. Aus diesem Grund wurde die Auswertung durch Untersuchung der notwendigen Daten und Funktionen, die im Betrieb bereitgestellt werden müssen, ergänzt. Dies beinhaltet Merkmale zur

- eindeutigen Identifikation der Module,
- des aktuell verfügbaren Funktionsumfangs,
- dem aktuellen Zustand,
- den verfügbaren Schnittstellen (Information, Stoff, Energie) sowie
- Beschreibungen des Sollverhalten (für Planung und Optimierung).

Für jeden dieser Bereiche leiten sich inhaltliche Anforderungen ab. Bei der Identifikation muss das Modul selbst als auch Information über die Elektrolyse-Technologie und Integrationsebene verfügbar sein. Die Bereiche der Funktion und Zustand besitzen eine enge Kopplung, da ein Betreiber mit den verfügbaren Funktionen den Zustand des Moduls steuern kann. Zu diesem Zweck muss bekannt sein, welche Funktion(en) in welchem Zustand zur Verfügung steht und welcher Zustand mit dem Funktionsaufruf erreicht wird. Zusätzlich sollte für Planung und Optimierung des Betriebs ein Modell des realisierten Verhaltens in Bezug auf die stofflichen, energetischen und informationstechnischen Schnittstellen bereitgestellt werden, damit diese bei Design und Ausführung der Prozessführung [Lo23] berücksichtigt werden kann. Diese Beschreibung ist nach heutigem Stand nur in wenigen Fällen in textueller Form, ergänzt durch Änderungsdaten verfügbar. Für einen reduzierten Abstimmungsbedarf, eine automatisierte Integration und die Reduktion manueller Schritte sollten diese und auch die anderen bereits genannten Inhalte in maschinenlesbaren Formaten/Modellen verfügbar sein.

Im Betrieb großskaliger Elektrolyse-Anlagen kann zudem angenommen werden, dass die Bedeutung der Interaktion mit einzelnen Aktoren und individuellen Bedienbildern gering ist, da Szenarien mit 100 oder 1000 Modulen der modularen Anlage in der gleichen Anzahl einzelner Ansichten resultieren würde. Unter der Annahme, dass die Steuerung der Anlage maßgeblich durch Rezepte und Algorithmen realisiert wird, wären Bedienbilder und Einzelsteuerelemente optionale Inhalte des Integrationsprofils, die bei der Inbetriebnahme, einer Fehleranalyse und bei der Instandhaltung genutzt werden.

## 6 Standardintegrationsprofil

Das Standardintegrationsprofil definiert die Mindestanforderungen bezüglich der Information, die für eine harmonisierte Integration der Elektrolyse-Module zur Verfügung gestellt werden sollen. Die technische Spezifikation und betrieblichen Schnittstelle, mit der Definition der Daten und Funktionen, stellt den größten Mehrwert für die effiziente Integration dar. Insgesamt werden im Standardintegrationsprofil 24 Merkmale und 8 Funktionen definiert. Je nach Granularität kann die konkrete inhaltliche Gestaltung des Standardintegrationsprofils unterschiedlich sein. Die damit verbundene Skalierbarkeit wird durch eine freie Angabe der konkreten Werte der Merkmale z.B. der Leistungsaufnahme für die jeweilige Granularität der Integrationsebene erreicht. Da der Großteil der Merkmale die in der Analyse ermittelten Informationen aus der Schnittmenge verschiedener Hersteller abbilden, sind diese für eine Umsetzung mit dem Standardintegrationsprofil bereits verfügbar. Zusatzaufwände entstehen vor allem bei der Vereinheitlichung von Merkmalen die nicht innerhalb der Schnittmenge liegen wie beispielsweise dem Betriebszustand. Die spezifizierten Betriebszustände *Idle*, *Starting (Cold-Start)*, *Production*, *Approaching Hot Standby*, *Hot-Standby*, *Starting (Hot-Start)*, *Cooldown* und *Error* müssen demnach realisiert werden. Bei der Bereitstellung der Schnittstellenbeschreibungen, den Funktionen und Verhaltensmodellen besteht voraussichtlich der größte Aufwand, da diese bisher nicht oder nur individuell realisiert sind. Das Standardintegrationsprofil sieht auch die Berücksichtigung der Funktionen, des Verhaltens und der Struktur nach dem Function-Behavior-Structure Modell [GE90] vor. Die je nach Granularität an der Modulgrenze verfügbaren Schnittstellen werden als Teil der Struktur beschrieben. Funktionen und Verhaltensmodelle referenzieren diese dann. Die Funktionen ändern den Betriebszustand des Moduls z.B. überführt die Funktion „*Start Production*“ das Modul aus dem Zustand *Idle* in *Production*. Gemäß der Beschreibung des Sollverhaltens durch Verhaltensmodelle ändern sich dabei die Prozessgrößen sowie die Stoff- und Energieströme mit Referenz auf die jeweilige Schnittstelle. Für die Planung des Betriebs und der Abstimmung der Schnittstellen mit angrenzenden Modulen ist die Angabe des Verhaltens in den Betriebszuständen zielführend z.B. typischer Temperatur- oder Druckverläufe während *Starting(Cold-Start)*.

Das vollständige Standardintegrationsprofil ist auf GitHub verfügbar (<https://github.com/p2o-lab/H2Giga-eModule-standard-integration-profile>).

## 7 Implementierung mittels Module Type Package

Die Problemstellung von Integration und Betrieb verschiedener Module besitzt bezüglich der Zielstellung eine große Analogie zur modularen Automation in der Prozessindustrie. Das MTP als Schnittstellenbeschreibung für Process Equipment Assemblies (PEAs), dient als einheitliches Metamodell für eine schnelle Integration von PEAs in der Prozessindustrie [VDI22, VDI20a]. Dieses bereits vorhandene und erprobte Konzept aus dem Bereich der Prozessindustrie soll zur Implementierung des Standardintegrationsprofils genutzt werden [Bi22]. Die Elemente eines Elektrolysesystems werden dabei als PEA definiert und realisiert die Automatisierungstechnischen Anforderungen. Dazu muss die Spezifikation des Integrationsprofils mit den MTP-Datenobjekten realisiert werden. Dazu werden die folgenden Regeln zur Repräsentation mittels MTP angewendet:

- Eindeutige Identifizierbarkeit durch das *PeaInformationLabel* mit der *DeviceClass* zur eindeutigen Beschreibung der Art des Elektrolysesystems
- Bereitgestellte Informationen durch *IndicatorElements* und *ProcessValueOuts*
- Eingaben realisiert durch *OperationElements* und *InputElements*
- Wertebeschränkungen realisiert am jeweiligen Objekt
- Betriebszustände realisiert als *Enumeration* im *Text-Set*
- Funktionen realisiert durch *Dienste*
- Optionale Bedienbilder realisiert als Teil des *HMI-Set*
- Optionale Einzelsteuerelemente als *OperationalElements* und *ActiveElements*

Die Transformation der spezifizierten Funktionen auf das Dienste-Modell bietet nochmals eine Erleichterung, da die einzelnen Funktionen auf einen Dienst übertragen werden, der die Funktion der Elektrolyse als „Electrolysis“ bereitstellt. Ein Dienst besitzt mindestens eine Prozedur, welche in diesem Fall kontinuierlich ausgeführt wird. Für die konkrete Ausgestaltung werden die Zustände des Integrationsprofils auf die Zustände des Dienste-Modells gemapped. Da das Dienste-Zustandsmodell bereits in der VDI/VDE/NAMUR 2658-4 Richtlinie standardisiert ist, wird eine herstellerunabhängige Ansteuerung des Dienstes gewährleistet. *Hot Standby* wird auf die Pause Loop des Dienste-Modells abgebildet und die Fehlerbehandlung ist über Konzepte im MTP möglich. Die Funktion der Arbeitspunktvorgabe wird durch ein *ParameterElement* realisiert, welches den Setpoint-Wert an den Dienst „Electrolysis“ übergibt.

Im MTP können nicht alle im Integrationsprofil spezifizierten Informationen enthalten sein, wie Verhaltensmodelle oder Strukturmodelle. Diese können als Attachment-Set ergänzt werden oder auch zukünftig als Teil einer PEA-Dokumentation bereitgestellt werden.

---

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Die effiziente Integration von Elektrolyseuren bildet die Grundlage für den schnellen Aufbau und Rekonfiguration von Elektrolyse-Anlagen. Der Beitrag zeigt, wie die dafür notwendigen Informationen und Funktionen ermittelt werden können. Ergebnis ist ein Vorgehensmodell sowie das resultierende umsetzungsneutrale Standardintegrationsprofil, welches als Metamodell für die konkrete Umsetzung dient, zum Beispiel mittels der Konzepte aus der modularen Automation in der Prozessindustrie. Die konkrete Umsetzung mittels MTP kann für die vereinfachte Integration und Ansteuerung genutzt werden [Lor23]. Im Rahmen des Forschungsprojektes H2Giga-eModule erfolgt als nächster Schritt die Verifikation und Validierung des Integrationsprofils auf einer Demonstratoranlage.

Zukünftig kann das vorgestellte Konzept durch die Verwendung einheitlicher, maschinenlesbarer Formate und Industriestandards für die Dokumentation wie die Verwaltungsschale im Kontext der Industrie 4.0, OPC UA Companion Specification und auch einheitliche Konzepte für Verhaltensmodelle z.B. durch standardisierte Simulationsmodelle verbessert werden. Zudem kann auch die Selbstbeschreibungsfähigkeit der Systemfunktionen z.B. durch die Ergänzung von System-Control Diagram (SCD) [Tk23] weiter verbessert werden. Für die konkrete Umsetzung mit MTP ist eine Erweiterung um noch in Entwicklung befindlicher Aspekte wie Safety, Alarming sowie Diagnose und Maintenance möglich.

## 9 Danksagung

Dem Bundesministerium für Bildung und Forschung sowie dem Projektträger Jülich sei für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Forschungsprojektes eModule (FKZ 03HY116A-E) der Leitplattform H2Giga gedankt.

### Literaturverzeichnis

- [Bi22] Bittorf, L.; Beisswenger, L.; Erdmann, D.; Lorenz, J.; Klose, A.; Lange, H.; Urbas, L.; Markaj, A. and Fay, A.: "Upcoming domains for the MTP and an evaluation of its usability for electrolysis," in 2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Sep. 2022, pp. 1-4. doi: 10.1109/ETFA52439.2022.9921280
- [Ge90] Gero, J. S. (1990). Design Prototypes: A Knowledge Representation Schema for Design. AI Magazine, 11(4), 26. <https://doi.org/10.1609/aimag.v11i4.854>
- [IEEE] "The Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms, Seventh Edition," in IEEE Std 100-2000, vol., no., pp.1-1362, 11 Dec. 2000, doi: 10.1109/IEEESTD.2000.322230.
- [ISO24765] ISO/IEC/IEEE 24765, „System und Software-Engineering – Begriffe“, September 2017

- [La23] Lange, H.; Klose, A.; Lippmann, W. and L. Urbas: "Technical evaluation of the flexibility of water electrolysis systems to increase energy flexibility: A review," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 42, pp. 15 771-15 783, May 2023. [Online]. Available: [10.1016/j.ijhydene.2023.01.044](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.044)
- [La24] Lange, H.; Klose, A.; Beisswenger, L.; Erdmann, D.; & Urbas, L. (2024). Modularization approach for large-scale electrolysis systems: a review. In *Sustainable Energy & Fuels* (Vol. 8, Issue 6, pp. 1208–1224). Royal Society of Chemistry (RSC). <https://doi.org/10.1039/d3se01588b>
- [Lo23] Lorenz, J.; Klose, A.; Lange, H.; Kock, T. and Urbas, L.: "Flexible Process Control for Scalable Electrolysis Systems," 2023 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET), Cape Town, South Africa, 2023, pp. 1-6, doi: [10.1109/ICECET58911.2023.10389401](https://doi.org/10.1109/ICECET58911.2023.10389401).
- [Tk23] Kock, T.; Klose, A.; Ingebringsten, I. P.; Bittorf, L.; Lorenz, J. and Urbas, L.: "Transformation of process functions to the Module Type Package utilizing System Control Diagrams," 2023 IEEE 28th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Sinaia, Romania, 2023, pp. 1-4, doi: [10.1109/ETFA54631.2023.10275331](https://doi.org/10.1109/ETFA54631.2023.10275331).
- [Sc22] Scholz, L.; Markaj, A.; Fay, A.; Erdmann, D.; Beisswenger, L.; Lorenzen, L.; Urbas, L. and Bittorf, L.: "Anforderungen an modulare Elektrolyseanlagen: Erkenntnisse aus dem H2Giga - Projekt eModule", *atp magazin*, vol. 63, no. 6-7, pp. 62-70, Jun. 2022. [Online]. Available: [10.17560/atp.v63i6-7.2611](https://doi.org/10.17560/atp.v63i6-7.2611)
- [Sm18] Smolinka, T.; Wiebe, N.; Sterchele, P.; Palzer, A.; Lehner, F.; Jansen, M.; Kiemel, S.; Miede, R.; Wahren, S. and Zimmermann, F.: "Studie IndWEDe. Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland," 2018. [Online]. Available: <https://publica.fraunhofer.de/handle/publica/2993>
- [SU23] Sunfire GmbH. (Nov. 2023). *DatenBlatt Sunfire HyLink Alkaline*. Sunfire DatenBlatt HyLink Alkaline. Abgerufen am 31. Januar 2024, von [https://www.sunfire.de/files/sunfire/images/content/Produkte\\_Technologie/factsheets/Sunfire-Factsheet-HyLink-Alkaline\\_2023Nov.pdf](https://www.sunfire.de/files/sunfire/images/content/Produkte_Technologie/factsheets/Sunfire-Factsheet-HyLink-Alkaline_2023Nov.pdf)
- [VDI20a] VDI. 2776-1, "Process engineering plants - Modular plants - Fundamentals and planning modular plants," Nov. 2020.
- [VDI20b] VDI 2770-1, „Betrieb verfahrenstechnischer Anlagen - Mindestanforderungen an digitale Herstellerinformationen für die Prozessindustrie – Grundlagen“, Beuth, Apr. 2020
- [VDI22] VDI/VDE/NAMUR. 2658-1, "Automation engineering of modular systems in the process industry - General concept and interfaces," Tech. Rep., Jan. 2022.