Implementierung der Kommunikationsstruktur einer Doppelstrang-Wasserstoffanlage für den Einsatz als Notstromversorgung

Arash Nosrat*, Maximilian Schifferdecker, Dennis Hamann, Detlef Schulz
Professur für Elektrische Energiesysteme
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
Hamburg, Deutschland
*arash.nosrat@hsu-hh.de

***Kurzfassung* – Die Einbindung von Energiewandlern in zukünftig gekoppelte Multi-Energiesysteme benötigt eine koordinierte Steuerungsinfrastruktur, um kritische Netzzustände zu vermeiden. In solchen Steuerungsinfrastrukturen können Anlagen wie das neuartige umschaltbare Brennstoffzellen-Elektrolysesystem aufgrund ihrer Fähigkeit zur Sektorenkopplung eine Schlüsselrolle spielen. Dies erfordert eine robuste gemeinsame Ansteuerung der Anlage. Hierzu werden in diesem Beitrag die grundlegenden Aspekte einer dazu erforderlichen Schnittstelle definiert, beschrieben und untersucht. In diesem Zusammenhang werden die verwendeten Übertragungsprotokolle erläutert und ein Simulationsnetzwerk aufgebaut und untersucht. Definierte Anforderungen an die Ansteuerung solcher Anlagen werden in einem Simulationsszenario getestet. Eine optimale Fahrweise bei unterschiedlichen Anforderungen verschiedener Sektoren wird durch die Implementierung eines Leitrechners realisiert.**

Stichworte – OPC-UA, IEC 60870-5-104, KOF

NOMENKLATUR

API	Application Programming Interface
DENA	Deutsche Energie-Agentur
FNN	Forum Netztechnik/Netzbetrieb
GNH	Gasnetz Hamburg GmbH
GUI	Graphical User Interface
HyReflexS	Wasserstoffbasierte Notstromversorgung mit integriertem Regelkraftwerk mittels flexibler Sektorkopplung und Metallhydridspeichern
KOF	Koordinierungsfunktion
OPC-UA	OPC-Unified Architecture
OSI-Modell	Open Systems Interconnection Model
RTU	Remote Terminal Unit
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SDL	Systemdienstleistungen
SNH	Stromnetz Hamburg GmbH
SOA	Serviceorientierte Architektur
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TSN	Time Sensitive Networking
UBES	Umschaltbares Brennstoffzellen-Elektrolysesystem
VDE e.V.	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.
WAN	Wide Area Network

I. EINLEITUNG

Für die Kopplung von Strom-, Gas- und Wärmenetzen sind sog. Multi-Energiesysteme erforderlich. Diese können prinzipiell uni- oder bidirektional konzipiert werden. Hier soll das Prinzip einer Multistrang-Wasserstoffanlage, d.h. einer örtlich zusammengefassten Parallelschaltung einer Brennstoffzellen- und Elektrolyseanlage mit Speicherung, vorgestellt werden. Wasserstoffanlagen können durch die Ablösung fossiler Brennstoffe einen großen Beitrag zur Dekarbonisierung leisten. Die hier diskutierte Multistrang-Wasserstoffanlage kann nicht nur die Bedarfe der lokalen Betreiber abdecken, sondern auch überschüssige Energie zwischenspeichern und bei Bedarf in das Strom- oder Gasnetz einspeisen. Dadurch haben diese dezentralen Energieerzeugungsanlagen einen großen Einfluss auf die gekoppelten Sektoren und können stabilisierend wirken. Bei ungeeigneter Fahrweise können jedoch auch kritische Netzzustände auftreten. Somit ergeben sich neue Herausforderungen für die Sektoren- und Anlagenbetreiber, sodass neue Maßnahmen auf verschieden Ebene erforderlich sind. Zu diesen zählen unter anderem die optimale Ansteuerung und die Kommunikation zwischen den Anlagen.

Laut der Studie der Deutschen Energie-Agentur (DENA) ist zukünftig eine stärkere Koordination zwischen Erzeugern, Verbrauchern und den Stromnetzbetreibern notwendig [1]. Damit soll ein stabiler und zuverlässiger Netzbetrieb gewährleistet werden. Um die Netzstabilisierung durch erneuerbare Energieerzeuger zu erhöhen, sind sogenannte Systemdienstleistungen (SDL) durch die Netzbetreiber definiert [1]. In diesem Zusammenhang und bezüglich der stetig steigenden Nutzung erneuerbarer Energien, fokussiert sich das Forum Netztechnik/Netzbetrieb (FNN) im VDE e.V. (Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.) auf die Umsetzung einer sicheren technischen Wandlung im Sinne der SDL und der Architektur der Netze

DOI: 10.24405/15208

[2]. Durch das FNN-Konzept „Koordinierungsfunktion (KOF) auf Betriebsebene“ wird eine gemeinsame Steuerungsinfrastruktur definiert, die u.a. die lokalen Netzzustände als Haupteinflussfaktoren berücksichtigt [3]. Neuartige Systeme, wie das umschaltbare Brennstoffzellen-Elektrolysesystem (UBES), welches im Projekt „HyReflexS – Wasserstoffbasierte Notstromversorgung mit integriertem Regelkraftwerk mittels flexibler Sektorkopplung und Metallhydridspeichern“ untersucht wird, können dazu beitragen, sowohl für den Anlagenbetreiber als auch für die angeschlossenen Sektoren die Flexibilität entscheidend zu erhöhen.

Im Forschungsprojekt HyReflexS wird der Einsatz des UBES sowohl als Notstromversorgung für einen Busbetriebshof der Hamburger Hochbahn AG als auch die Eignung für netzdienliche Zwecke der angeschlossenen Verteilnetze der Gasnetz Hamburg GmbH (GNH) und der Stromnetz Hamburg GmbH (SNH) untersucht [4].

Die Kopplung zwischen den Sektoren Strom und Wasserstoff ermöglicht dem UBES, den Einsatze zur Stabilisierung der jeweiligen Verteilnetze. Bezogen auf das Stromnetz können SDL wie Spitzenlastglättung (Peak Shaving) und Blindleistungskompensation umgesetzt werden. Diese Möglichkeiten, neben der Hauptaufgabe als Notstromversorgung, machen das UBES zu einem Multi-Energiesystem, welches die Resilienz in den angeschlossenen Sektoren bedeutend erhöht [5].

Für solche multifunktionalen Anlagen sind verschiedene Fahrweisen realisierbar, die sich aus den verschiedenen Anfragen der drei Projektpartner ableiten lassen. Demzufolge ist eine robuste gemeinsame Ansteuerung durch die beteiligten Betreiber notwendig. Dies resultiert in verschiedenen Anforderungen hinsichtlich Echtzeit, Sicherheit und Redundanz. Um dem gerecht zu werden, ist neben der Betrachtung des UBES als Anlage auch die Berücksichtigung bestimmter Dienstleistungen notwendig. Unterschiedliche Dienstleistungen werden durch das UBES als Betriebsmodi definiert. Aus technischer Sicht müssen die maximalen und minimalen Anforderungen bezüglich der Leistung und der Bereitstellungsdauer definiert sein. Um die verschiedenen Anforderungen, Betriebsmodi und deren Übergangsphasen zu koordinieren eignet sich eine Zustandsmaschine.

Für eine robuste gemeinsame Ansteuerung sind die Kommunikationsstruktur und der Datenaustausch zwischen den beteiligten Betreibern entscheidend. Im Forschungsprojekt HyReflexS erfolgt der Datenaustausch zu den angeschlossenen Projektpartnern bidirektional in unterschiedlichen Übertragungsprotokollen, was zur Notwendigkeit einer zentralen Schnittstelle führt. In diesem Beitrag werden die verschiedenen Aspekte dieser Schnittstelle definiert und untersucht.

II. Konzept

Abbildung 1 zeigt, die aufgebaute Kommunikationsstruktur inklusive der zentralen Schnittstelle. Hierbei sind die wichtigsten zu entwerfenden Aspekten der Schnittstelle der Logikkern, das Kommunikationsszenario und die Benutzeroberfläche. Diese Aspekte stehen in einer engen Abhängigkeit zueinander und werden gemeinsam Entwickelt. Im Nachfolgenden werden die einzelnen Konzepte dargestellt.

A. Logikkern

Der Logikkern dient der Entscheidung zwischen den angeforderten Betriebsmodi. Die genutzte Logik in diesem Beitrag basiert auf einer Priorisierung der unterschiedlichen Anforderungen. Daraus folgt, dass für jede Kombination aus anforderndem Projektpartner und gewünschter Dienstleistung eine Zuweisung der Priorität erfolgen muss. Die Priorisierung kann unter stabilen Netzverhältnissen durch weitere Faktoren wie beispielsweise Wirtschaftlichkeit erweitert werden. Somit kann die Fahrweise auch unter monetären Aspekten für den Betreiber dienlich sein. Die Priorisierung folgt einer dynamischen Logik, welche bei Bedarf auf verschiedene Anwendungsgebiete erweitert und angepasst werden kann.

B. Benutzeroberfläche

Durch eine geeignete Benutzeroberfläche, welche im Projekt entwickelt wird, können der aktuelle Betriebsmodus, Soll- und Messwerte sowie die empfangenen Anfragen eingeblendet und bearbeitet werden. Zusätzlich dient die Benutzeroberfläche zur Ansteuerung des zu untersuchenden UBES.

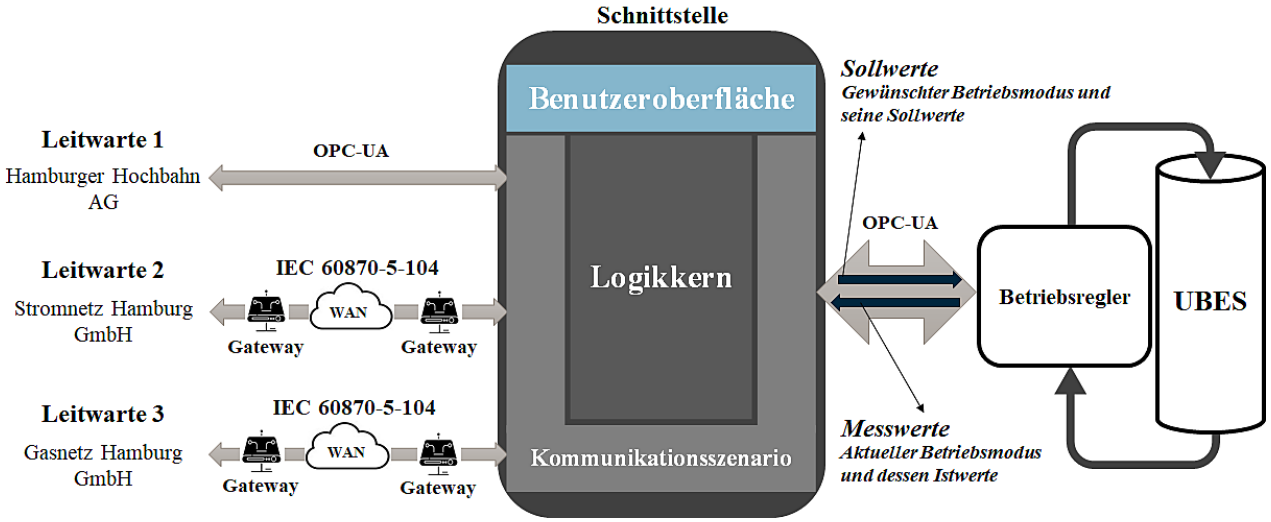

Abbildung 1: Aufbau der Schnittstelle.

C. *Kommunikationsszenario*

Die Kommunikationsszenario, welche die Anforderungen der Projektpartner erfüllen muss basiert auf zwei unterschiedlichen Übertragungsprotokollen. Die Leitwarte der Hochbahn ist durch eine lokale Verbindung über OPC-Unified Architecture (OPC-UA) eingebunden. Die Leitwarten der SNH und GNH sind durch ein Wide Area Network (WAN) über den Kommunikationsstandard IEC 60870-5-104 verbunden. Die interne Kommunikation des UBES ist ebenfalls über OPC-UA realisiert, wodurch der Austausch von Daten ermöglicht wird. Eine wichtige Teilaufgabe der Schnittstelle ist die Koordinierung der Kommunikation bei Verwendung beider Standards.

III. METHODEN

Zur simulativen Untersuchung der Kommunikationsstruktur und des Logikkerns wird ein Versuchsnetzwerk aufgebaut. Die hierfür benötigten Methodiken sowie die verwendeten Soft- und Hardwareelemente werden im Folgenden vorgestellt.

A. *Kommunikationsstandard OPC-UA*

OPC-UA wurde als ein plattformunabhängiger Standard für den sicheren Austausch industrieller Automatisierungsdaten entwickelt. Diese Unabhängigkeit macht OPC-UA vielseitig einsetzbar. Dabei reicht das Einsatzgebiet von Mikrocontrollern bis zu cloudbasierten Infrastrukturen [6, 7].

Bei diesem Kommunikationsprotokoll handelt es sich um eine serviceorientierte Architektur (SOA). Dieser Softwareschnittstellenstandard ermöglicht die Kommunikation zwischen Geräten unterschiedlicher Hersteller [6]. Die Kommunikation dieses Standards kann entweder im Server/Client Modell oder im PubSub Modell implementiert werden. Im Server/Client Modell wird durch den Client eine Verbindung zum Server hergestellt. Nach erfolgreicher Authentifizierung wird eine Sitzung eingerichtet, die dem Client zulässt definierte Dienste vom Server anzufordern. Im PubSub Modell ist der Austausch nicht direkt. In diesem Modell senden Publisher-Komponenten die Nachrichten an eine Middleware. Die Abonnenten können diese Nachrichten abrufen und die gewünschten Daten herausfiltern. Das PubSub Modell ist besonders geeignet für die Anwendungsfälle, bei denen viele Absender ihre Daten übermitteln, ohne dass Informationen vorhanden sind, wer diese als Abnehmer abruft [8].

In diesem Projekt sind drei Projektpartner vorhanden, die bidirektional über eine authentifizierte Kommunikation Werte mit dem UBES austauschen. Für diesen Anwendungsfall ist das Server/Client Modell besonders geeignet.

Der OPC-UA Standard, der als IEC Norm 62541 [9] definiert ist, wird von der OPC Foundation in Zusammenarbeit mit diversen Herstellern und Anwendern koordiniert [6, 9]. OPC-UA ist ein auf dem TCP/IP-Protokoll basierender Standard. Dieser befindet sich auf der dritten bzw. vierten Schicht des OSI-Modells (Open Systems Interconnection Model). Hierbei wird standardmäßig die Ethernet-Schnittstelle verwendet [10, 11]. Diese standardisiert die Bitübertragungs- und Sicherungsschicht, welche die erste und zweite Layer des OSI-Modells beschreibt [10, 11].

B. *Kommunikationsstandard IEC 60870-5-104*

Ein in der Fernwirktechnik zur Datenübertragung und Telemetriesteuerung verwendetes Kommunikationsprotokolle ist der Standard IEC 60870-5-104 [12]. Mit der Entwicklung von Prozessleitsystemen auf der Supervisory Control and Data Acquisition Systemen (SCADA) -Ebene ist die Priorität der Vernetzung verschiedener Automatisierungsgeräte auch über weite Distanzen deutlich gestiegen [13]. Um es den Komponenten verschiedener Hersteller aus der Fernwirktechnik zu ermöglichen miteinander zu kommunizieren, wurde die internationale Normreihe IEC 60870-5 eingeführt [14].

Im Teil 5-101 der Normreihe wird ein Begleitstandard für grundlegende Fernwirkaufgaben festgelegt. Dieser trägt die Bezeichnung 60870-5-101 [15]. Im Abschnitt 60870-5-104 sind die Definition nach IEC 60870-5-101 und die Kommunikation über das TCP/IP-Protokoll kombiniert [12]. Der IEC 104 Standard verwendet ebenfalls das TCP/IP-Protokoll, welches Schicht drei und vier des OSI-Modells standardisiert [16]. Die Schnittstelle ist hierbei ebenfalls durch Ethernet definiert.

C. *Gegenüberstellung der möglichen Kommunikationsstrukturen*

Die beiden vorgestellten Übertragungsprotokolle gleichen sich laut dem OSI-Modell in den ersten vier Schichten. Daraus resultiert im Versuchsaufbau, dass sowohl das TCP/IP-Protokoll als auch die physikalische Schnittstelle Ethernet zum Einsatz kommen. Im Projekt HyReflexS wird sich maßgeblich auf zwei Szenarien konzentriert. In beiden Szenarien kommt dabei ein Protokollkonverter von IEC 104 auf OPC-UA zum Einsatz. In Szenario 1 ist dieser in den Leitrechner implementiert, während der Konverter in Szenario 2 als Hardwarebauteil ausgeführt ist.

ABBILDUNG 2 stellt Szenario 1 schematisch dar. Hierbei wird eine direkte Vernetzung zwischen allen Beteiligten Systemen über Ethernet realisiert. Diese Ausbauvariante zeichnet sich dadurch aus, dass der Leitrechner des UBES beide Kommunikationsserver zur Verfügung stellt, die Logikauswertung realisiert und die Protokollübersetzung durchführt. Zusätzlich wird eine Bedieneroberfläche implementiert. Dieses Szenario soll als Hauptanwendung im Projekt untersucht werden.

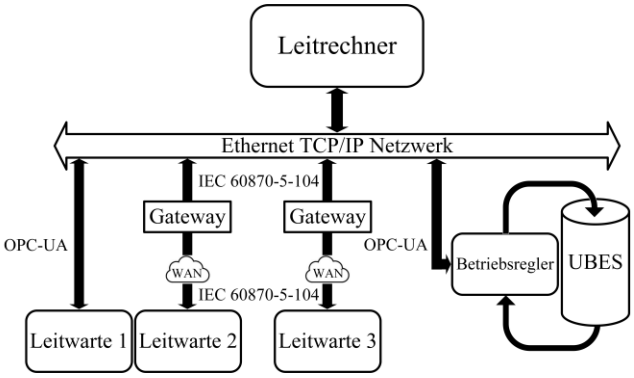

ABBILDUNG 2: KOMMUNIKATIONSSZENARIO 1.

Eine detaillierte Ansicht des Aufbaus des Leitrechners und des zu untersuchenden Netzwerkes ist in ABBILDUNG 3 dargestellt.

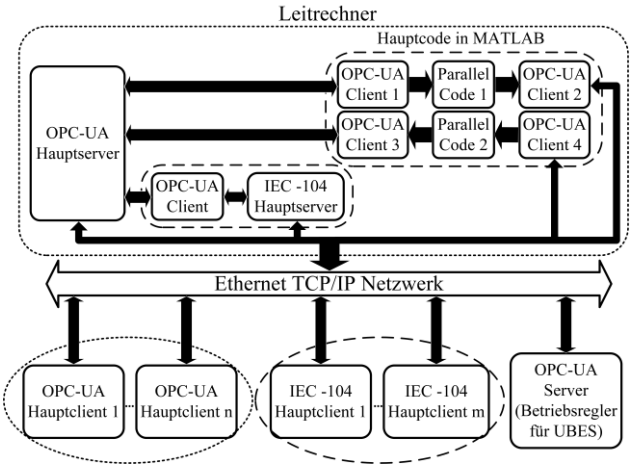

ABBILDUNG 3: DETAILANSICHT KOMMUNIKATIONSSZENARIO1.

Wie der ABBILDUNG 4 zu entnehmen ist, wird in Szenario 2 die Protokollumwandlung vor der Vernetzung und durch dafür vorhandene Hardware Protokollkonverter durchgeführt. Obwohl solche Protokollkonverter auf den ersten Blick den Entwurf einer solchen Schnittstelle vereinfachen können, bringen sie einige Beschränkungen mit sich. Beispielsweise lässt sich die Erweiterbarkeit und die Echtzeitfähigkeit bei einer steigenden Anzahl der Kommunikationspartner nicht ohne erhöhten Auslegungs- und Hardwareaufwand realisieren. Darüber hinaus kann die Protokollumwandlung durch Protokollkonverter nicht mehr konsistent sein, nachdem große Änderungen im Informationsmodell des OPC-UA Hauptserver vorgenommen wurden. Die Projektanforderungen sehen vor, den Leitrechner im fortgeschrittenen Entwicklungsstadium auf einem dezentral einsetzbaren Embedded System umzusetzen. Hierbei sollen alle Hard- und Software Applikationen durch ein System realisiert werden. Dies ist in Szenario 1 besser umsetzbar und somit ein weiterer Vorteil von diesem.

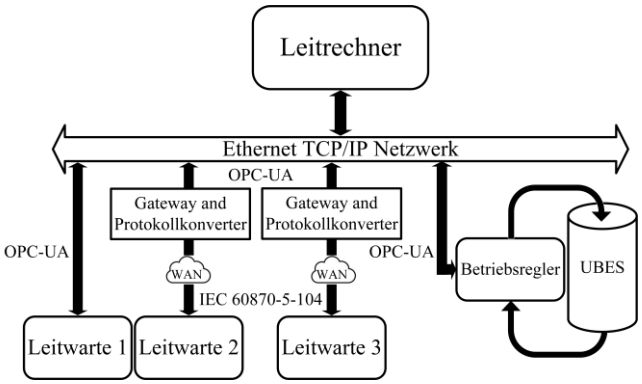

ABBILDUNG 4: KOMMUNIKATIONSSZENARIO 2.

Die Interoperabilität und die integrierten Sicherheitsmaßnahmen wie Verschlüsselung, Authentifikation und das Signieren der Nachrichten macht die Kommunikation über OPC-UA zu einem geeigneten Standard für die Umsetzung im Projekt. Aufgrund der vielfältigen Vorteile von OPC-UA rechtfertigt sich die Protokollumwandlung welche durch die Projektpartner vorgegeben ist. Ebenso bringt die objektorientierte Umsetzungsweise von OPC-UA eine hohe Flexibilität mit sich, um komplexe Automatisierungsprozesse auch schon in der Kommunikationsstruktur zu modellieren.

D. Simulationsumgebung

Nachfolgend werden die zum Einsatz kommenden Softwaretools und Entwicklungsumgebungen vorgestellt.

1) Prosys OPC-UA Simulation Server

Zur Simulation des OPC-UA Servers wird in diesem Beitrag die Software „Prosys OPC-UA Simulation Server“ eingesetzt, die unter Betriebssystemen wie Windows und Linux arbeitet. Dieser simulierte Server bietet die meisten Dienste an, die für das OPC-UA Protokoll definiert sind. In diesem OPC-UA Server können Variablen mit Lese- und Schreibzugriff definiert werden, die die Bedürfnisse der Simulation erfüllen.

2) OPC-UA umgesetzt in Matlab

Der Funktionsumfang „OPC Foundation Core Components“, welche in der „Industrial Communication Toolbox“ von Matlab enthalten ist, ermöglichen die Implementierung eines Clients zur Kommunikation mit einem aktiven OPC-UA Server in einem angeschlossenen Netzwerk. Durch diese Funktionalität können auch mehrere OPC-UA Clients erstellt werden, die sich über TCP/IP an einen OPC-UA Server anbinden und die Daten untereinander austauschen können.

3) Matlab Parallel Computing Toolbox

Wie ABBILDUNG 3 zu entnehmen ist, sind auf dem Leitrechner zwei Programmteile parallel implementiert. Um die gleichzeitige Abarbeitung zu ermöglichen, wird die „Parallel Computing Toolbox“ von Matlab verwendet. Diese ermöglicht es, die Programmteile unabhängig voneinander auf zwei unterschiedlichen Prozessorkernen laufen zu lassen.

4) Free OPC-UA Client

Um die OPC-UA Clients auf Linux-basierten Raspberry Pi 4B zu implementieren, welche zur Simulation der beteiligten Leitwarten eingesetzt werden, wird ein Graphical User Interface (GUI) basierter OPC-UA Client verwendet. Dieser Client wird durch die Software „Free OPC-UA Client“, welche durch das Application Programming Interface (API) Python programmiert ist, realisiert.

5) Leitrechner

Als Leitrechner wird ein auf dem Betriebssystem Windows basierender Rechner verwendet. Hierauf sind die notwendige Softwaretools wie Matlab und „Prosys OPC-UA Simulation Server“ installiert.

6) OPC-UA Kommunikation mit dem UBES

Die Ansteuerung des UBES erfolgt über eine Siemens Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) des Typs S7-1500. Diese ist in den Abbildungen des Beitrags als Betriebsregler dargestellt. Die Funktionalität des OPC-UA Kommunikationsprotokolls ist bei der S7-1500 bereits integriert. Es können sowohl Server als auch Clients implementiert werden [17]. Zur Simulation des in der S7-1500 integrierten OPC-UA Server wird ein Rechner mit Linux-Betriebssystem verwendet. Hierauf ist die Software „Prosys OPC-UA Simulation Server“ und „Free OPC-UA Client“ installiert.

IV. AUFBAU DES SIMULATIONSNETZWERKS

Ein Kernelement stellt der OPC-UA Hauptserver dar, welcher in ABBILDUNG 3 dargestellt ist. Alle verwendeten Übertragungsprotokolle werden durch entsprechende Konverter auf OPC-UA umgewandelt. Aus diesem Grund wird das Simulationsnetzwerk ausschließlich mit dem OPC-

UA Kommunikationsstandard aufgebaut. Wie ABBILDUNG 5 zu entnehmen ist, wurden für das erste Simulationsszenario zwei OPC-UA Hauptclients als Kommunikationspartner definiert. Diese kommunizieren direkt über ein lokales TCP/IP Netzwerk mit dem Hauptserver.

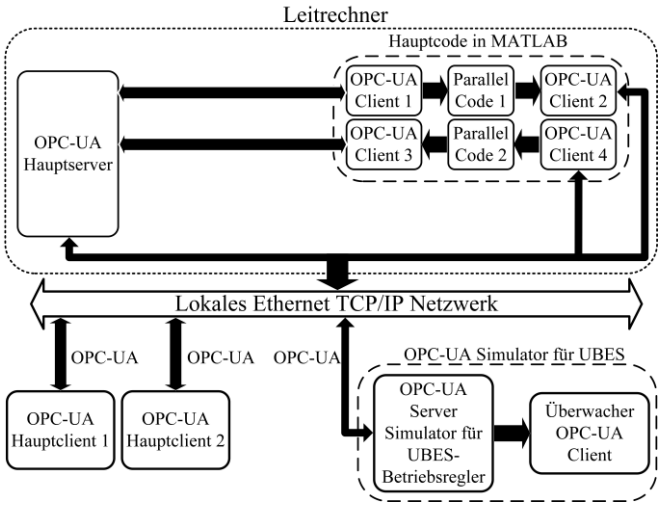

ABBILDUNG 5: SIMULATIONSSZENARIO.

Zur Umsetzung der Logikauswertung wurde eine Prioritätstabelle erstellt. In dieser sind verschiedene Anforderungen als Signalformen definiert. Wie in TABELLE I dargestellt ist, wird jede mögliche Kombination eines OPC-UA Hauptclients und einer Dienstleistung als Beispiel mit entsprechender Priorität von eins bis sechs zugewiesen. Eine Eins stellt hierbei die höchste Priorität dar. Wie in dieser Tabelle vorgestellt ist, können manche Kombinationen unberücksichtigt, unzutreffend oder unerlaubt sein. Dies ist aus einem realen Anwendungsszenario abgeleitet. Beispielsweise kann es der Gasnetz GmbH nicht möglich sein, Blindleistung anzufordern. Die Zuordnungen in TABELLE I wurden zufällig gewählt.

TABELLE I: PRIORITÄTSTABELLE DER SIMULATION.

Dienst-leistung	***Anfor-derungs-befehl***	***Anforderer***	***Gewünschte Amplitude***	***Priorität***
Keine Angabe	0	Alle	N/A	N/A
Sinus	1	OPC-UA Hauptclient 1	1	3
		OPC-UA Hauptclient 2	5	5
Rechteck	2	OPC-UA Hauptclient 1	N/A (unzu-treffend)	N/A (unzu-treffend)
		OPC-UA Hauptclient 2	5	2
Sägezahn	3	OPC-UA Hauptclient 1	1	1
		OPC-UA Hauptclient 2	N/A (unzu-treffend)	N/A (unzu-treffend)
Dreieck	4	OPC-UA Hauptclient 1	1	6
		OPC-UA Hauptclient 2	5	4

Jeder OPC-UA Hauptclient kann seine gewünschte Dienstleistung durch einen bestimmten Dienstanforderungsbefehl von null bis vier anfordern. Um zu unterscheiden, welcher Hauptclient die Anforderung stellt, sind zwei Amplituden definiert. Wird die Dienstleistung von Hauptclient eins bearbeitet, so beträgt die Amplitude 1, andernfalls 5.

Wie in ABBILDUNG 6 dargestellt ist, werden zur Simulation zwei Raspberry Pi 4B als Leitwarten mit OPC-UA eingesetzt. Diese sind als OPC-UA Hauptclient eins und zwei bezeichnet. Zur Implementierung eines lokalen Netzwerks wird jedem Beteiligten eine statische IP-Adresse zugewiesen. Hierdurch wird die Kommunikation über einen vorkonfigurierten Router sichergestellt.

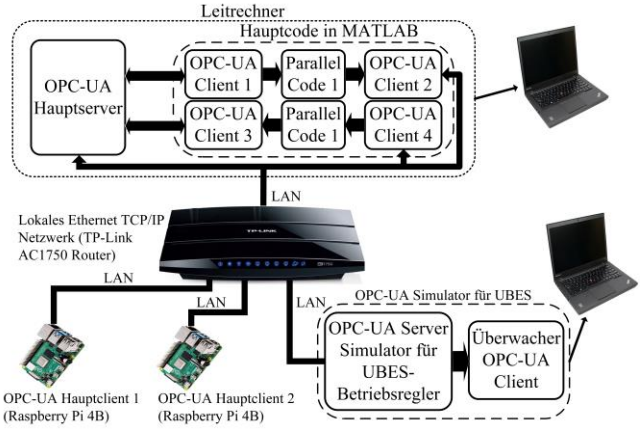

ABBILDUNG 6: AUFBAU DES SIMULATIONSNETZWERKS.

A. *Variablenstruktur des OPC-UA Hauptservers*

Auf dem OPC-UA Hauptserver werden drei Variablen mit Schreib- Lesezugriff definiert. Nach erfolgreicher Anbindung der Hauptclients an den Hauptserver, können die gewünschten Befehle der jeweiligen Clients ausgetauscht werden. Da der Logikkern in Matlab umgesetzt ist, werden vier OPC-UA Clients von Matlab realisiert, von denen sich zwei ebenfalls mit dem Hauptserver verbinden. Durch diese Variablenstruktur ist eine Kommunikation aller Teilnehmer in dem lokalen Netzwerk umsetzbar.

B. *Variablenstruktur des OPC-UA Servers des simulierten UBES*

Auf dem OPC-UA UBES-Server werden zwei Variablen definiert. Hiervon sind beide leseberechtigt und eine zusätzlich schreibberechtigt. Die Variable ohne Schreibberechtigung simuliert die Messwerte, welche durch einen stetig zählenden Zähler dargestellt werden. Die zweite Variable repräsentiert die aktuell ausgeführte Dienstleistung, welche in TABELLE I aufgeführt sind.

C. *Programmcode des Logikkerns in Matlab*

Es werden grundsätzlich zwei Hauptaufgaben parallel von Matlab ausgeführt. Hierbei beschreibt die erste Aufgabe den Austausch der Messwerte des OPC-UA UBES-Servers mit dem Hauptserver. Wie in ABBILDUNG 6 dargestellt übernehmen diese Aufgabe Matlab Client 3 und 4. Parallel hierzu werden die Anforderungen der Hauptclients 1 und 2 an den OPC-UA UBES-Server übertragen. Diese Aufgabe wird durch Matlab Client 1 und 2 durchgeführt.

D. *Simulationsergebnisse*

Wie in TABELLE II definiert, wird die Simulation in sechs Schritten ausgeführt. In jedem Schritt werden verschiedene Anfragen der beiden Hauptclients betrachtet. Damit soll gezeigt werden, dass sowohl die zugewiesene Priorität als auch der Wechsel der angeforderten Dienstleistung durch den

Logikkern abgearbeitet wird und die Kommunikationsstruktur korrekt aufgebaut, parametriert und funktionsfähig ist.

TABELLE II: DEFINITION DER SIMULIERTEN ANFORDERUNGEN.

Schritt	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*
Anforderung des Hauptclients 1	0	0	1	1	3	3
Anforderung des Hauptclients 2	0	1	1	2	2	4
Verarbeitungsergebnis	Siehe Abbildungen 9 – 12					

In ABBILDUNG 7 ist die OPC-UA Server Simulation des UBES dargestellt. Die blaue Grafik zeigt den Verlauf der als Messwert simulierten Zählervariable.

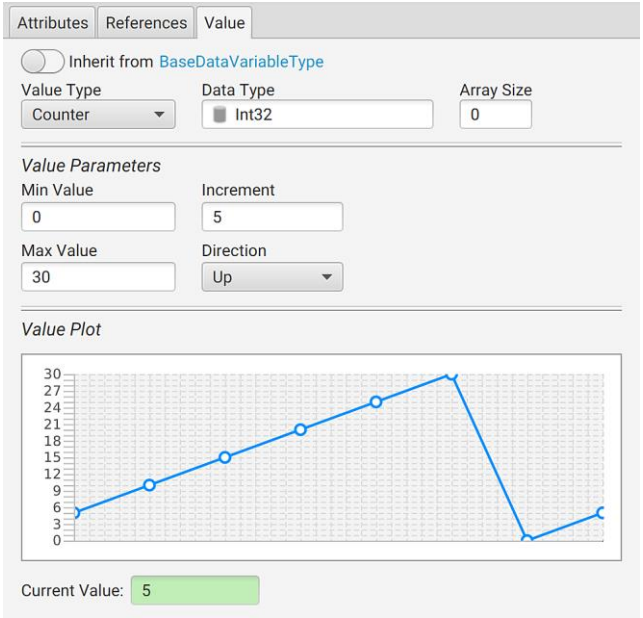

ABBILDUNG 7: AUFBAU DES SIMULIERTEN OPC-UA SERVERS DES UBES.

ABBILDUNG 8 zeigt den korrekt empfangenen Messwert aus Schritt 1 auf dem OPC-UA Hauptclient 1. Der Messwert wird durch Hauptclient 2 ebenfalls empfangen.

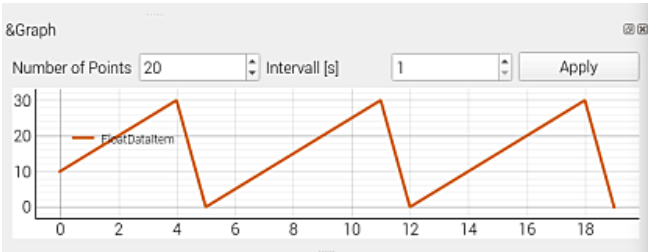

ABBILDUNG 8: AUFBAU DES SIMULIERTEN OPC-UA HAUPTCLIENTS 1.

Wie ABBILDUNG 8 zu entnehmen ist, ist der empfangene Wert auf OPC-UA Hauptclient 1 identisch zu dem gesendeten Wert der Zählervariable in ABBILDUNG 7. Gleiches gilt entsprechend für Hauptclient 2.

In ABBILDUNG 9 ist die Ausgangswellenform von Schritt 2 zum Zeitpunkt des Wechsels der Anforderung der Dienstleistung dargestellt. Hierbei wird von Hauptclient 2 die Dienstanforderung 1 gemäß TABELLE I angefordert. Da keine weiteren Anfragen bestehen, wird die Dienstleistung unverzüglich ausgeführt.

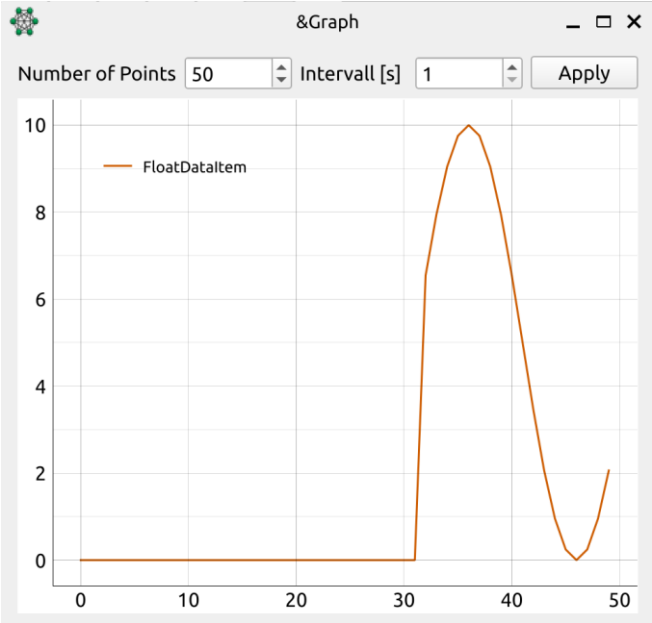

ABBILDUNG 9: SIMULATIONSERGEBNIS VON SCHRITT 2.

In Abbildung 10 ist der Wechsel der Dienstleistung von Schritt 3 abgebildet. Wie erwartet, wechselt die Amplitude von 5 auf 1, da laut TABELLE I Hauptclient 1 die höher priorisierte Anfrage gegenüber Hauptclient 2 aufweist. Der Wechsel wird auch hier unverzüglich durchgeführt.

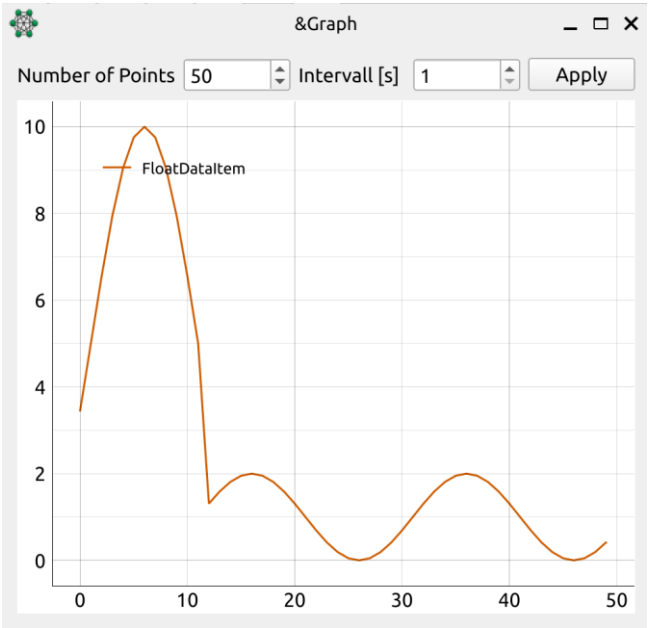

ABBILDUNG 10: SIMULATIONSERGEBNIS VON SCHRITT 3.

Das in ABBILDUNG 11 gezeigte Anfrageszenario resultiert in einem erneuten Wechsel der Dienstleistung. In Schritt 4 fordern beide Hauptclients unterschiedliche Dienstleistung an. Der Vorrang der Anfragen wird laut der Priorisierung nach TABELLE I entschieden. Da die höhere Priorisierung in diesem Szenario bei Hauptclient 2 liegt, ändert sich die Signalform von Sinus zu Rechteck.

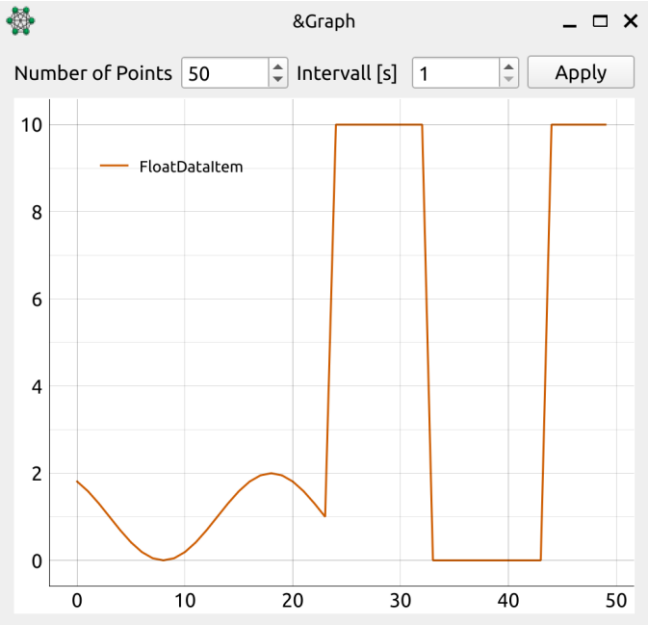

ABBILDUNG 11: SIMULATIONSERGEBNIS VON SCHRITT 4.

In Schritt 5 wird die Anfrage von Hauptclient 1 geändert. Hiermit ergibt sich laut TABELLE I eine höhere Priorität dieser Anfrage, womit sich die Signalform von Rechteck zu Sägezahn ändert. Dies ist in ABBILDUNG 12 dargestellt.

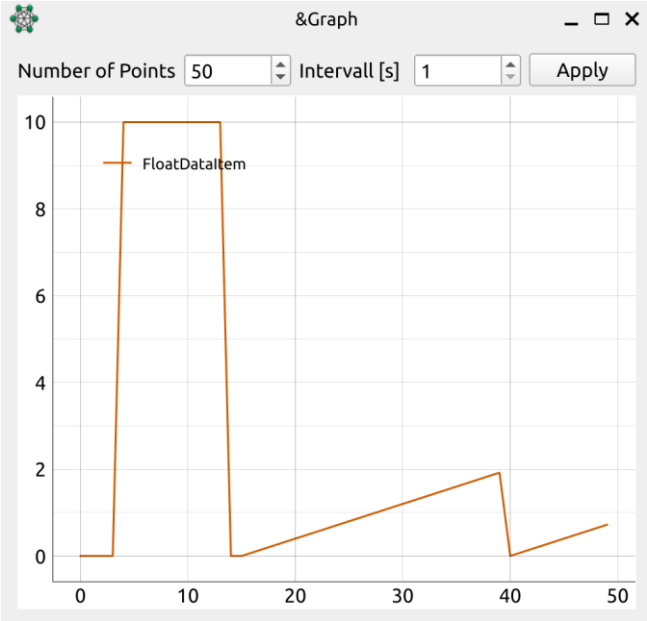

ABBILDUNG 12: SIMULATIONSERGEBNIS VON SCHRITT 5.

In Schritt 6 hat sich erwartungsgemäß nichts verändert, da Hauptclient 1 weiterhin die höchst priorisierte Anfrage stellt.

V. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Es wurde das Prinzip einer Multistrang-Wasserstoffanlage beschrieben, daraus wurden die Erfordernisse für eine Kommunikationsstruktur abgeleitet und simuliert. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass das OPC-UA basierende Kommunikationsszenario und der auf einer Prioritätstabelle basierende Logikkern die Anforderungen erfüllen. Als nächster Schritt soll ein auf das Projekt zugeschnittener OPC-UA Hauptserver implementiert werden. Mit diesem ist die Darstellung eines Informationsmodells bestehend aus Objektvariablen für die von UBES umsetzbaren Dienstleistungen möglich. Darüber hinaus soll eine direkte Umwandlung des IEC 60870-5-104 Standards auf OPC-UA im Leitrechner implementiert und untersucht werden. Weitere Anforderungen an die Schnittstelle stellen die Echtzeitfähigkeit, die IT-Sicherheit und die Redundanz dar. Dazu sind ebenfalls weitere Simulationen erforderlich. Zur Verbesserung der Echtzeit können beispielsweise Maßnahmen wie die Nutzung von Echtzeit-Betriebssysteme für den Leitrechner sowie der Ansatz des Time Sensitive Networking (TSN) berücksichtigt werden.

VI. DANKSAGUNG

Diese Arbeit ist Teil des Projektes „Wasserstoffbasierte Notstromversorgung mit integriertem Regelkraftwerk mittels flexibler Sektorkopplung und Metallhydridspeichern – HyReflexS“ und wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz unter der Förderkennziffer 03EI3020A gefördert.

LITERATUR

[1] S. Mischinger, H. Seidl, E.-L. Limbacher, S. Fasbender und F. Stalleicken, *dena-Innovationsreport Systemdienstleistungen: Aktueller Handlungsbedarf und Roadmap für einen stabilen Betrieb des Stromsystems bis 2030.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9239_Innovationsreport_Systemdienstleistugen.pdf (Zugriff am: 1. November 2023).

[2] Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE, *FNN-Konzept zum koordinierten Steuerzugriff in der Niederspannung über das intelligente Messsystem.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.vde.com/resource/blob/1729258/3cff04828cc9ab5570da1f39ce648b1c/fnn-konzept--koordinierter-steuerzugriff-data.pdf (Zugriff am: 1. November 2023).

[3] Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE, *KOF Koordinierungsfunktion auf Betriebsebene.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.vde.com/resource/blob/1769758/9004a095608f2226ab921769a94869f1/koordinierungsfunktion---hinweis-data.pdf (Zugriff am: 1. November 2023).

[4] D. Apenbrink, D. Hamann, R. Hankers, D. Schulz und S. Micheely, „Wasserstoffbasierte Notstromversorgung mit integriertem Regelkraftwerk mittels flexibler Sektorenkopplung und Metallhydridspeichern“, 2021.

[5] M. Schifferdecker, D. Hamann und D. Schulz, „Brennstoffzellen-Elektrolysesystem für netzdienliche Zwecke“, 2022.

[6] OPC Foundation, *OPC Unified Architecture: Interoperabilität für Industrie 4.0 und das Internet der Dinge.* [Online]. Verfügbar unter: https://opcfoundation.org/wp-content/uploads/2015/04/OPC-UA-Interoperability-For-Industrie4-and-IoT-DE1.pdf (Zugriff am: 1. November 2023).

[7] OPC Foundation, *Unified Architecture.* [Online]. Verfügbar unter: https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/ (Zugriff am: 21. September 2023).

[8] OPC Foundation, *Annex B (informative)Client Server vs. Publish Subscribe.* [Online]. Verfügbar unter: https://reference.opcfoundation.org/Core/Part14/v104/docs/B (Zugriff am: 25. September 2023).

[9] IEC TR 62541-1:2020, OPC Unified Architecture - Part 1:2020 Overview and concepts, VDE.

[10] W. Babel, *Internet of Things und Industrie 4.0.* Wiesbaden: Springer Vieweg, 2023.

[11] I. Halenar, L. Halenarova und P. Tanuska, „Communication Safety of Cybernetic Systems in a Smart Factory Environment“, *Machines*, Jg. 11, Nr. 3, S. 379, 2023, doi: 10.3390/machines11030379.

[12] DIN IEC/TS 62351-100-1 (VDE V 0112-351-100-1): 2020-02, Datenmodelle, Schnittstellen und Informationsaustausch für Planung und Betrieb von Energieversorgungsunternehmen – Daten- und Kommunikationssicherheit, VDE.

[13] S. Sharma, V. Kumar, P. Sharma, S. Gupta und A. Shukla, „SCADA Communication Protocols: Modbus & IEC 60870 – 5“ in *2022 1st International Conference on Sustainable Technology for Power and Energy Systems (STPES)*, SRINAGAR, India, 2022, S. 1–6, doi: 10.1109/STPES54845.2022.10006579.

[14] DIN EN 60870 Beiblatt 14:1995-09, Fernwirkeinrichtungen und -systeme - Teil 1: Allgemeine Betrachtungen; Fachbericht, Hauptabschnitt 4: Grundlegende Gesichtspunkte der Fernwirk-Datenübertragung und Aufbau der Normen der Reihen IEC 60870-5 und IEC 60870-6, VDE.

[15] DIN EN 60870-5-101:2016-11, Fernwirkeinrichtungen und -systeme - Teil 5-101: Übertragungsprotokolle - Anwendungsbezogene Norm für grundlegende Fernwirkaufgaben, VDE.

[16] P. Matoušek, *Description and analysis of IEC 104 Protocol: Technical Report*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.fit.vut.cz/research/publication-file/11570/TR-IEC104.pdf (Zugriff am: 11. September 2023).

[17] Siemens AG, *OPC UA-Methoden für den SIMATIC S7-1500 OPC UA-Server*. [Online]. Verfügbar unter: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/885/109756885/att_1093882/v1/109756885_OpcUa_ServerMethods_DOC_V1_2_de.pdf (Zugriff am: 29. August 2023).