

Schlussbericht vom 01.11.2023

zu IGF-Vorhaben Nr. 21329 N

Thema

Entwicklung von Energiemanagementschnittstellen für IoT-Technologien (IoT_EnRG)

Berichtszeitraum

01.09.2020 bis 31.05.2023

Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Elektrotechnik beim ZVEI e. V. (FE)

Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung 1: Hochschule Hannover

Fakultät I - Elektro- und Informationstechnik
Fachgebiet Prozessinformatik und Automatisierungstechnik
Ricklinger Stadtweg 120
30459 Hannover

Forschungseinrichtung 2: Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg

Institut für Automatisierungstechnik
Holstenhofweg 85
22043 Hamburg

Hannover, den 01.11.2023 Prof. Dr.
Karl-Heinz Niemann

Hamburg, den 01.11.2023 Prof. Dr.
Alexander Fay

Gefördert durch:

Autoren:

Reiche, Leif-Thore	Helmut-Schmidt-Universität Universität der Bundeswehr Hamburg
Runge, Maxim	Hochschule Hannover
Prof. Dr. Niemann, Karl-Heinz (Projektleiter)	Hochschule Hannover
Prof. Dr. Alexander Fay	Helmut-Schmidt-Universität Universität der Bundeswehr Hamburg

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
1 Zusammenfassung	5
2 Einleitung	6
2.1 Problemstellung	6
2.2 Ziele des Vorhabens	7
3 Organisatorische Rahmenbedingungen	9
3.1 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	9
3.2 Verwendung der Zuwendungen	10
3.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	11
4 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	11
5 Nutzen des Vorhabens für KMU	16
6 Veröffentlichungen und Abschlussarbeiten	18
7 Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse	21
7.1 AP1: Aktualisierung des aktuellen Standes von Forschung und Entwicklung	21
7.1.1 Durchführung der Recherchearbeit	21
7.1.2 Motivation und Grundlagen für die Einführung eines Energiemanagementsystems	
22	
7.1.3 Bereitstellung der Energieinformationen aus der Feldebene	23
7.1.4 Bereitstellung der Energieinformationen zur Energiemanagement-Applikation	25
7.1.5 Bereitstellung von Energiedaten über OPC UA und MQTT	26
7.2 AP2: Erarbeitung eines universellen Energieinformationsmodells	28
7.2.1 Planung des Vorgehens	28
7.2.2 Durchführung der Anforderungsanalyse	30
7.2.3 Analyse und Gegenüberstellung bestehender semantischer Standards	34
7.2.4 Entwicklung des universellen Energieinformationsmodells	36
7.2.5 Implementierung des universellen Energieinformationsmodells auf dem OPC UA Client/Server-Standard	42
7.2.6 Implementierung des universellen Energieinformationsmodells mittels MQTT-Schnittstelle	44
7.2.7 Entwicklung einer Energie-Monitoring-Anwendung	48
7.3 AP3, 4, 5: Energieschnittstellenentwicklung (IO-Link, OPC UA und MQTT)	51
7.4 AP6: Referenzplattform für die Protokolle OPC UA, MQTT und IO-Link	52
7.5 AP7: Demonstrator	53
7.5.1 Entwicklung von Anwendungsfällen	53
7.5.2 Erstellung eines Hardwarekonzepts	55

7.5.3	Komponenten Beschaffung	55
7.5.4	Planung und Aufbau des Demonstrator-Grundrahmens	56
7.5.5	Aufbau der Anwendungsfälle.....	56
7.5.6	Schaltschrankplanung und -aufbau	57
7.5.7	Fertigstellung und Programmierung des Demonstrators.....	59
7.6	AP8: Tests, Review, Anpassungen	61
7.7	AP9: Projektmanagement, Dokumentation und Veröffentlichungen.....	62
8	Schlusswort.....	65
9	Schlusswort von Prof. Dr. Karl-Heinz Niemann und Prof. Dr. Alexander Fay.....	66
10	Abbildungsverzeichnis	66
11	Tabellenverzeichnis	68
12	Anhang	69
13	Literatur	85

1 Zusammenfassung

Aufgrund der klimatischen Veränderungen und steigender Energiepreise hat das nachhaltige und umweltbewusste Handeln in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Um dieses Handeln zu unterstützen, können Unternehmen Energiemanagementsysteme nach dem ISO-Standard 50001 einführen. Diese Systeme ermöglichen es u. a. Energieverbräuche in einem Energie-Monitoring visuell aufzubereiten und auf Basis der Ergebnisse Analysen durchzuführen. Aus den Ergebnissen der Analyse können Energieeffizienzmaßnahmen abgeleitet werden. Nach einer Überprüfung der energetischen Optimierung kann der Zyklus erneut beginnen, sodass eine kontinuierliche Verbesserung der Energieeffizienz erfolgen kann. Im industriellen Umfeld bestehen jedoch noch Hindernisse in Bezug auf eine einheitliche Auswertung von Energiedaten für ein effektives Energiemanagement. Verschiedene semantische Interpretationen von Energiedaten und proprietäre Datenformate erschweren die Einrichtung und Erweiterung von Energiemanagementsystemen. Im Rahmen des IGF-Vorhabens "IoT_EnRG" wurde ein universelles Energieinformationsmodell entwickelt. Dieses Modell ermöglicht es, Energiedaten eine einheitliche Semantik zu geben, damit diese einfacher interpretierbar werden. Durch die Anwendung des Energieinformationsmodells können Energiedaten schneller und mit weniger Engineering-Aufwand in technische Energiemanagementsysteme integriert werden. Diese Integration war bisher erschwert, denn konventionelle Lösungen konnten für die Interpretation der Energiedaten aus unterschiedlichen Quellen der Feldebene verschiedene proprietäre Semantiken unterschiedlicher Kommunikationsprotokolle verwenden. Der Ansatz des universellen Energieinformationsmodells reduziert den Engineering-Aufwand technischer Energiemanagement-Systeme und unterstützt die Industrie bei der Installation von Energiemanagementsystemen für eine sparsame und klimaneutrale Produktion. Die Ergebnisse des Vorhabens wurden der Joint Working Group "Power Consumption Management" [1] übergeben, die sich das Ziel gesetzt hat, einen einheitlichen OPC UA-Standard für Energieinformationen auf Basis des entwickelten Modells in Form einer OPC UA Companion Spezifikation zu erarbeiten. Durch die Übergabe der Forschungsergebnisse in die Joint Working Group konnte eine nachhaltige Nutzung der Forschungsergebnisse sichergestellt werden, die deutlich über den Kreis der Unternehmen im projektbegleitenden Ausschuss hinausgeht. Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

2 Einleitung

Dieses Kapitel dient der Einführung in die wissenschaftliche und technische Ausgangslage, mit der sich das Vorhaben IoT_EnRG über einen Zeitraum von zweieinhalb Jahren beschäftigte. Zu Beginn des Kapitels wird zunächst die wissenschaftliche und technische Ausgangssituation erläutert und aufgezeigt, welche Problemstellung durch das Vorhaben gelöst werden sollte. Abschließend wird dargestellt, welche Ziele für die Bewältigung der Problemstellung des Vorhabens definiert wurden.

2.1 Problemstellung

Vor dem Hintergrund der Energiekrise spielt die Steigerung der Energieeffizienz für kleine, mittlere und große Unternehmen eine bedeutende Rolle, da viele dieser Unternehmen steigenden Energiekosten zu verkraften haben. Durch die Einführung eines Energiemanagementsystems (kurz EnMS) nach dem ISO-Standard 50001 haben diese Unternehmen die Möglichkeit, ihre Energieeffizienz sukzessive zu steigern, indem sie einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess in Bezug auf den Energieverbrauch etablieren und betreiben. Ein Aspekt dieses Prozesses ist das Monitoring und die Auswertung der Energiedaten in den Produktionsstätten der Unternehmen. Durch aus dem Monitoring abgeleitete Energieeffizienzmaßnahmen können nachfolgend dann die Energiebedarfe des Unternehmens gesenkt werden. Die Einführung eines Energiemanagementsystems fordert von dem einführenden Unternehmen sowohl organisatorische als auch technische Maßnahmen. So werden für die Erfassung, Übertragung, Speicherung und Darstellung der Energiedaten verschiedene Soft- und Hardwarekomponenten benötigt, durch die eine Kommunikation der Energiedaten von der Feld- bis in die Betriebsleitebene ermöglicht werden kann. Da in der Feldebene unterschiedliche Kommunikationssysteme und -protokolle (z. B. PROFINET, Sercos III, CIP) für die Kommunikation von Energiedaten eingesetzt werden können, liegen für die Beschreibung von Energiedaten unterschiedliche Semantiken vor. Die Semantiken erlauben, dass die Energiedaten zu Energieinformationen mit Hilfe von sogenannten Energiemanagement-Programmen gewandelt werden können. Das Problem hierbei ist allerdings, dass die Erstellung dieser Energiemanagement-Programme einen hohen Engineering-Aufwand von den Unternehmen fordert. Wird dieser Aufwand nicht erbracht, können Energiedaten nicht oder nur teilweise interpretiert werden und sind somit nicht für das Energiemanagement verwertbar. Es fehlt in diesem Fall eine einheitliche, homogene Informationsbasis in Bezug auf die Energieverbräuche im Unternehmen.

Um einen detaillierteren Einblick in den genannten Engineering-Ablauf zu erlangen, zeigt Abbildung 1 das bisher angewandte (konventionelle) Vorgehen zur Erfassung und Übertragung von Energiedaten.

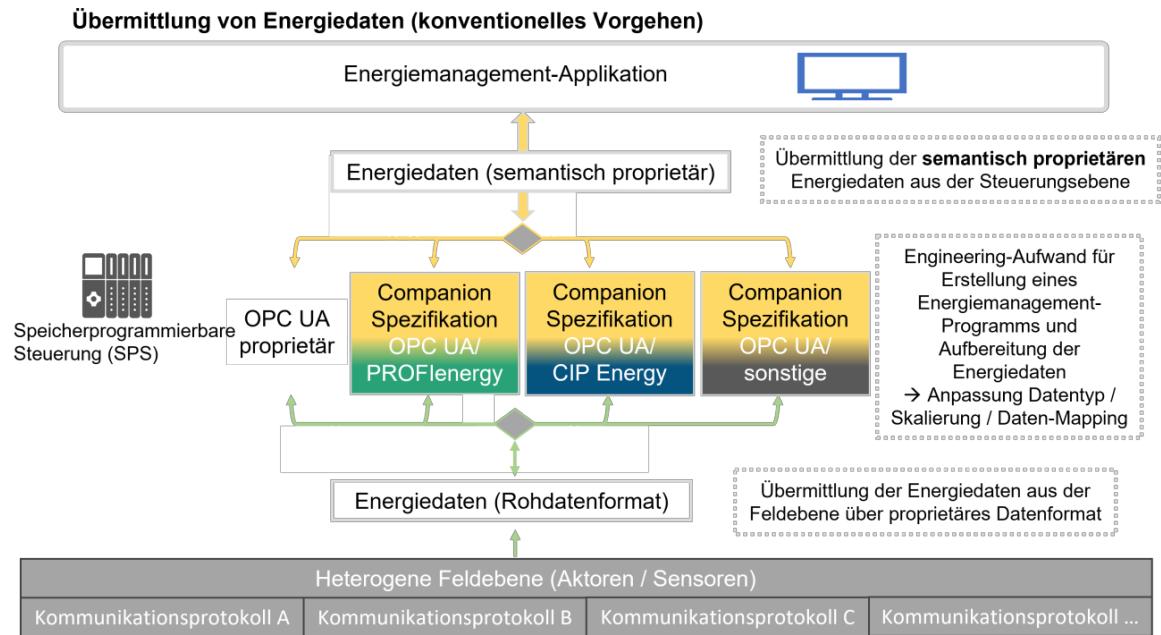


Abbildung 1: Übermittlung von Energiedaten mittels des konventionellen Vorgehens

In der heterogenen Feldebene werden Energiedaten von einer speicherprogrammierbaren Steuerung erfasst. Hierfür kommen unterschiedliche Kommunikationsprotokolle, wie z. B. PROFINET, EtherNet-IP, etc. zum Einsatz. Ein einheitliches Kommunikationsprotokoll wäre anzustreben. Da aber verschiedene Teile der Anlage von verschiedenen Lieferanten geliefert werden, ist diese Heterogenität häufig anzutreffen. Die verschiedenen Busprotokolle bedingen proprietäre Datenformate für Energiedaten durch die Nutzung der verschiedenen Kommunikationssysteme. In der SPS läuft ein Energiemanagement-Programm zur Aufbereitung der Energiedaten (z. B. Anpassung Datentyp, Skalierung Werte, Daten-Mapping). Anschließend erfolgt eine Weitergabe der Energiedaten an die überlagerte Energiemanagement-Applikation. Um diese Aufbereitung zu vereinfachen, werden sogenannte OPC UA Companion Spezifikationen mit eigenen Semantiken für Energiedaten der unterschiedlichen Kommunikationsprotokolle verwendet. Da die Companion-Spezifikationen Energiedaten in unterschiedlichen Formaten abbilden, steht der Anlagenbetreiber vor dem Problem, einen erhöhten Engineering-Aufwand aufzubringen zu müssen, wenn mehrere Companion-Spezifikationen eingebunden oder ggf. noch Energiedaten in proprietären Formaten verarbeitet werden müssen. Durch die Vielfalt der bestehenden Spezifikationen können die Energiedaten von der Steuerungsebene nach dem konventionellen Vorgehen nur in einem semantisch proprietären Datenformat an eine Energiemanagement-Applikation auf der Betriebsleitebene zugeführt werden. Dieser Applikation muss daher in der Lage sein, Energiedaten in unterschiedlichen Formaten und Semantiken entgegenzunehmen. Diese proprietären Formate erschweren das Engineering, da ein Anlagenbetreiber diese Daten in der Energiemanagement-Applikation vereinheitlichen muss, um diese für das Energiemanagement auf der Betriebsleitebene nutzen zu können.

2.2 Ziele des Vorhabens

Auf Basis der in Kapitel 2.1 erläuterten Probleme wurde für das Vorhaben das folgende Ziel definiert:

Es ist ein universelles Energieinformationsmodell zur semantisch einheitlichen Beschreibung von Energiedaten zu entwickeln.

Um aufzeigen zu können, wie die genannten Probleme aus Kapitel 2.1 mit Hilfe eines universellen Energieinformationsmodells (Universal Energy Information Model, kurz UEIM) gelöst werden können, zeigt die nachfolgende Abbildung 2, an welcher Stelle im Automatisierungssystem ein derartiges Modell verortet ist und wie dieses für die Übermittlung von semantisch einheitlichen Energiedaten genutzt werden kann.

Übermittlung von semantisch einheitlichen Energiedaten mithilfe eines universellen Energieinformationsmodells

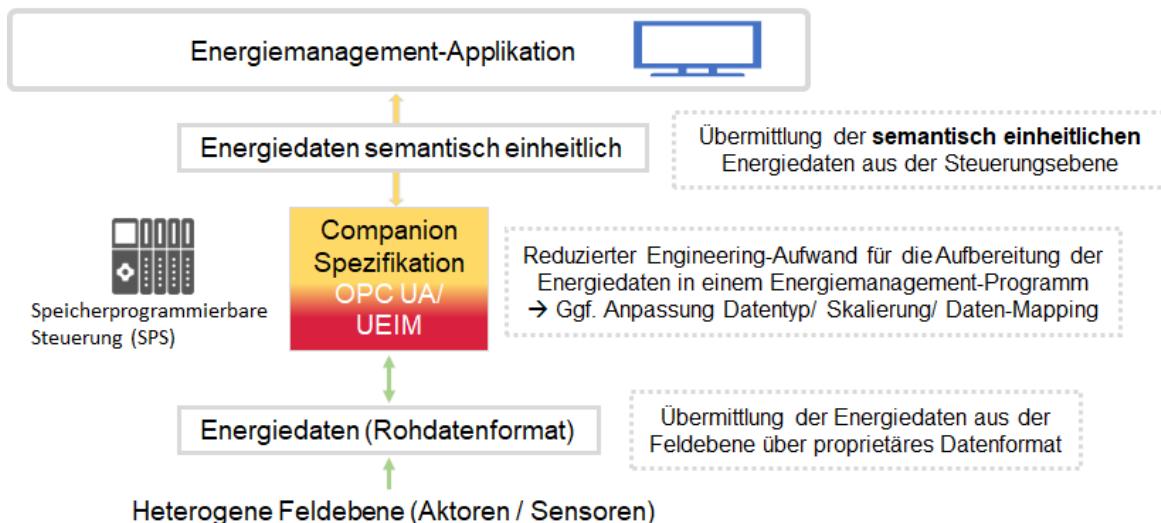


Abbildung 2: Universelles Energieinformationsmodell zur Übertragung von semantisch einheitlichen Energiedaten

Energiedaten aus der heterogenen Feldebene eines Automatisierungssystems können in ihrem proprietären Format an die Steuerungsebene übermittelt werden. Auf der Steuerungsebene wird das Energieinformationsmodell eingebunden und für die semantisch einheitliche Beschreibung der vorher proprietär beschriebenen Energiedaten genutzt. Eintreffende Energiedaten werden in der SPS an das einheitliche Energiedatenmodell angepasst und über eine Kommunikationsprotokoll-unabhängige OPC UA Companion Spezifikation vereinheitlicht und für die Weitergabe aufbereitet. Energiedaten, die anschließend einer Energiemanagement-Applikation auf der Betriebsleitebene zugeführt werden sollen, sind durch das Energieinformationsmodell somit in einem semantisch einheitlichen anstatt in mehreren proprietären Datenformaten verfügbar.

Die Verwendung des Energieinformationsmodells hat den Vorteil, dass der Engineering-Aufwand für die Erstellung von Energiemanagement-Programmen in der Energiemanagement-Applikation reduziert werden kann, da das Anpassen von Datentypen, Datenskalierung und das Daten-Mapping größtenteils entfällt. Somit kann Zeit für das Engineering eingespart werden, und dementsprechend können Kosten bei der Installation eines Energiemanagementsystems vermieden werden.

Für das Vorhaben wurden darüber hinaus weitere Ziele definiert, um die Funktionsfähigkeit des Energieinformationsmodells zu belegen. Die weiteren Ziele waren:

Erprobung des universellen Energieinformationsmodells auf einer Referenzplattform

Die Referenzplattform diente als erste Testumgebung für das entwickelte Energieinformationsmodell. Die Entwicklung und der Betrieb der Referenzplattform werden in Kapitel 7.4 erläutert.

Erstellung eines Demonstrators zur Verbreitung der Ergebnisse des Vorhabens auf öffentlichen Veranstaltungen, wie z. B. Messen.

Neben der Referenzplattform wurde ein Demonstrator entwickelt und aufgebaut, mit dem die Ergebnisse des Vorhabens der Öffentlichkeit bei Vorführungen zugänglich gemacht werden konnten. Die Entwicklung und der Betrieb des Demonstrators werden in Kapitel 7.5 beschrieben.

3 Organisatorische Rahmenbedingungen

Dieses Kapitel beschreibt die organisatorischen Rahmenbedingungen des Vorhabens. Neben Erläuterungen zur Zusammenarbeit mit anderen Stellen wird in den Unterkapiteln beschrieben, wie die Zuwendungen verwendet wurden und ob die geleistete Arbeit angemessen und notwendig war.

3.1 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Während des Vorhabens wurde mit verschiedenen außeruniversitären Stellen zusammengearbeitet. Nachfolgend sind alle Stellen aufgelistet, und es wird erläutert, inwieweit mit diesen Stellen zusammengearbeitet wurde.

Projektbegleitender Ausschuss (PA)

Der projektbegleitende Ausschuss setzt sich aus den Forschungseinrichtungen sowie den am Vorhaben beteiligten Unternehmen zusammen. In halbjährlich stattfindenden Sitzungen wurde den am PA beteiligten Unternehmen der aktuelle Stand des Vorhabens erläutert. Durch Fragen, Anmerkungen und Verbesserungsvorschlägen seitens der Unternehmen konnten die erarbeiteten Inhalte des Vorhabens qualitativ verbessert werden. Am PA beteiligte Unternehmen unterstützten das Vorhaben teilweise mit der Zulieferung von Hardwarekomponenten. Darüber hinaus wurden von den Unternehmen im projektbegleitenden Ausschuss alle relevanten Projektergebnisse einem Review und einer Kommentierung unterzogen.

PROFIBUS Nutzerorganisation (PNO)

Die Zusammenarbeit mit der PROFIBUS Nutzerorganisation erfolgte über die Mitarbeit in den zwei Arbeitskreisen „PROFenergy“ und „Sub-WG OPC UA in I4.0 @ PI“. Den Arbeitskreisen wurde das Vorhaben zunächst in Gänze vorgestellt. Danach wurden durch das Projektteam fortlaufend Arbeitsergebnisse in die Arbeitskreise eingebracht, um Feedback von den Experten zu erhalten. Auch bei dieser Zusammenarbeit konnten durch Fragen, Anmerkungen die erarbeiteten Inhalte des Vorhabens qualitativ verbessert werden.

Deutsche Kommission Elektronik Elektrotechnik Informationstechnik (DKE)

Mit der Deutsche Kommission Elektronik Elektrotechnik Informationstechnik wurden ebenfalls über einen Arbeitskreis (DKE 931.0.10 - Energieeffizienz in der industriellen Automatisierung)

zusammengearbeitet. In diesem Arbeitskreis wurde zum einen das Vorhaben vorgestellt, zum anderen diente der Arbeitskreis dazu über weitere Aktivitäten (z. B. andere Forschungsvorhaben oder Standardisierungsaktivitäten) informiert zu werden, die einen Bezug zu den Inhalten des Vorhabens haben könnten.

International Electrotechnical Commission (IEC)

Die Zusammenarbeit mit der International Electrotechnical Commission erfolgte über den Arbeitskreis TC65 JWG 14 Factory Energy Management System. Das Vorhaben wurde durch das Projektteam in dem Arbeitskreis vorgestellt und überprüft, ob Inhalte des Arbeitskreises mit in die Arbeiten des Vorhabens einfließen konnten. Dieser Arbeitskreis diente ebenfalls der Informationsgewinnung für das Vorhaben.

OPC Foundation (OPC)

Bei Zusammenarbeit mit der OPC Foundation wurde unter anderem ein Podcast [2] aufgezeichnet, der den Inhalt, die Problemstellung und die Zielsetzung des Vorhabens wiedergibt.

Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA)

Die Zusammenarbeit mit dem VDMA begann im letzten Drittel des Vorhabens. Der VDMA hatte eine Arbeitsgruppe (Joint Working Group) aus verschiedenen Verbänden (VDMA, PNO, ODVA, OPC Foundation) initiiert, deren Ziele mit den Zielen dieses Vorhabens in weiten Teilen übereinstimmten. Das Projektteam entschied sich dafür, Kontakt zum VDMA aufzunehmen und das laufende Vorhaben vorzustellen. Aus den Gesprächen ging hervor, dass die Ergebnisse des Vorhabens eine ideale Grundlage für die einberufene Arbeitsgruppe seien. Nach Rücksprache mit dem PA und dem ZVEI wurde entschieden, die Ergebnisse des Vorhabens in die Joint Working Group einzubringen. Hierdurch war es möglich, dass die Ergebnisse des Vorhabens zeitnah in die Entwicklung einer OPC UA Companion-Spezifikation eingebracht werden konnten. Der Entwurf dieser Spezifikation liegt inzwischen vor. Mit einer Veröffentlichung ist im Ende 2023 zu rechnen.

Die Zusammenarbeit mit anderen Stellen kann in jeder Hinsicht als sehr positiv bewertet werden. Durch die Expertise der verschiedenen Stellen konnten die Arbeitsergebnisse des Vorhabens qualitativ verbessert und Defizite frühzeitig erkannt werden. Ohne eine Zusammenarbeit mit anderen Stellen hätte sich nicht die Möglichkeit ergeben, die Arbeitsergebnisse in eine Arbeitsgruppe zu bringen, sodass diese der Standardisierung zugeführt werden kann.

3.2 Verwendung der Zuwendungen

Hochschule Hannover (FE 1)

- Wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)
 - HPA-A: 31 PM
 - HPA-B: 0 PM
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans): keine
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans): keine

Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr (FE 2)

- Wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)
 - HPA-A: 32 PM
 - HPA-B: 0 PM
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans): keine
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans): keine

3.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Zeitraum des Projekts durchgeführten Arbeiten entsprechen den ursprünglich im Projektantrag geplanten Tätigkeiten und waren daher sowohl notwendig als auch angemessen. Alle gesetzten Ziele konnten durch die Arbeiten des Projektteams erreicht werden. Der im Projekt entwickelte Demonstrator ist voll funktionsfähig und konnte/kann dazu verwendet werden die Projektergebnisse im Rahmen von Präsentationen einem breiten öffentlichen Publikum vorzustellen. Durch die Beteiligung des Projektteams an diversen Arbeitskreisen konnte die Verbindung zu einer Joint Working Group aufgebaut werden, die die Projektergebnisse aufgreift und auf Basis dieser Ergebnisse eine Spezifikation erarbeitet, die der Standardisierung für die Industrie zugeführt wird.

4 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Um aufzeigen zu können, wie die Ergebnisse des Vorhabens genutzt werden können, sind in den drei nachfolgenden Tabellen Maßnahmen zum Ergebnistransfer aufgelistet, die während der Laufzeit des Vorhabens und nach Abschluss des Vorhabens erfolgten bzw. noch erfolgen werden.

In der ersten Tabelle 1 wird aufgezeigt, wie der Ergebnistransfer zum PA erfolgte, um diesen über den aktuellen Stand der Erkenntnisse zu informieren.

Tabelle 1 Ergebnistransfer zum PA

Maßnahme	Ziel	FE	Rahmen	Datum
Treffen des projektbegleitenden Ausschusses Kickoff-Meeting 2020	Vorstellung des Projekts sowie des geplanten Projektablaufes	FE 1 + FE 2	Präsentation	22.10.2020
Treffen des projektbegleitenden Ausschusses PA-Sitzung 2021-1	Übersicht über die bisherigen Ergebnisse sowie Vorstellung der Ansätze für das weitere Vorgehen	FE 1 + FE 2	Präsentation	06.05.2021
Treffen des projektbegleitenden Ausschusses PA-Sitzung 2021-2	Übersicht über die bisherigen Ergebnisse sowie Vorstellung der Ansätze für das weitere Vorgehen	FE 1 + FE 2	Präsentation	18.10.2021
Treffen des projektbegleitenden Ausschusses PA-Sitzung 2022-1	Übersicht über die bisherigen Ergebnisse sowie Vorstellung der Ansätze für das weitere Vorgehen	FE 1 + FE 2	Präsentation	02.05.2022
Treffen des projektbegleitenden Ausschusses PA-Sitzung 2022-2	Übersicht über die bisherigen Ergebnisse sowie Vorstellung der Ansätze für das weitere Vorgehen	FE 1 + FE 2	Präsentation	24.10.2022
Treffen des projektbegleitenden Ausschusses PA-Abschlussmeeting	Vorstellung der Projektergebnisse gegenüber dem PA	FE 1 + FE 2	Präsentation	27.04.2023

Neben dem Ergebnistransfer zum PA erfolgten im Zeitraum des Vorhabens weitere Transfermaßnahmen, um auch am Vorhaben unbeteiligte Stellen und Personen über den Stand des Vorhabens zu informieren (siehe dazu Tabelle 2).

Tabelle 2 Umsetzung der Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	FE	Rahmen	Datum
Einrichtung einer Homepage des Vorhabens	Zugriff auf Inhalte des Vorhabens über das Internet und Information interessierter Kreise außerhalb des Projektes. Link: https://www.hs-hannover.de/forschung/forschungsfinder-forschungsprojekte/forschungsfinder/projekt/400/	FE1	Homepage Hochschule Hannover	Januar 2021

Bereitstellung der Ergebnisse des Vorhabens über ein Cloudverzeichnis für die Firmen im projektbegleitenden Ausschuss.	Zugriff auf die Inhalte des Vorhabens ermöglichen	FE1	Erstellung eines Cloud-Verzeichnis	Januar 2021
Abschlussarbeiten zum Vorhaben	Erstellung einer Seminar- und Masterarbeit mit dem Titel „Conception and realization of a semantically standardized energy data acquisition system via the MQTT protocol“	FE1	Seminararbeit / Mastarbeit	November 2022 - Mai 2023
Einbindung in die Lehre	Verwendung der Vorhabens-Ergebnisse im Rahmen von Lehrveranstaltungen, insbesondere in der Veranstaltung „Energieeffizientes Design von Produktionsanlagen“ an der FE1	FE1 + FE2	Lehrveranstaltungen während und nach der Laufzeit	Januar 2022 - Mai 2023
Teilnahme am Arbeitskreis VDI VDE DKE AK 931.0.10	Information über das Vorhaben und Rückmeldung von Fachexperten zu Ergebnissen des Vorhabens	FE 1 + FE 2	Diverse Webmeetings während der Laufzeit	November 2020 - Mai 2023
Teilnahme am Arbeitskreis PNO PROFenergy	Information über das Vorhaben und Rückmeldung von Fachexperten zu Ergebnissen des Vorhabens	FE 1	Diverse Webmeetings während der Laufzeit	November 2020 - Mai 2023
Teilnahme am Arbeitskreis IEC TC65 JWG 14	Information über das Vorhaben und Rückmeldung von Fachexperten zu Ergebnissen des Vorhabens	FE 1 + FE 2	Diverse Webmeetings während der Laufzeit	März 2021 - Mai 2023
Teilnahme am Arbeitskreis Sub-WG OPC UA in I4.0@PI	Information über das Vorhaben und Rückmeldung von Fachexperten zu Ergebnissen des Vorhabens	FE 2	Diverse Webmeetings während der Laufzeit	Oktober 2022 - Februar 2023

Teilnahme an der PNO PI-Konferenz 2023	Vorstellung der Ergebnisse des Vorhabens	FE 1 + FE 2	Präsenztermin	22.03.2023
Teilnahme an der Hannover Messe 2023	Transfer der Inhalte und Ergebnisse des Vorhabens in die Öffentlichkeit durch Ausstellung des Demonstrators auf dem Stand des niedersächsischen Ministeriums für Wissenschaft und Kultur in Halle 2, Stand A40	FE 1 + FE 2	Teilnahme Messe	17.-21.04.2023
Veröffentlichung der Projektergebnisse im Rahmen von Konferenzbeiträgen und Artikeln in Fachzeitschriften	Transfermaßnahme, um Ergebnisse wissenschaftlich zu sichern und zu verbreiten	FE 1 + FE 2	10 Veröffentlichungen. Siehe Literaturliste in Kapitel 6.	Oktober 2020 - Mai 2023

Nach Abschluss des Vorhabens erfolgen weitere Transfermaßnahmen. Diese Maßnahmen sind in der nachfolgenden Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3 Umsetzung der Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens

Maßnahme	Ziel	FE	Rahmen	Datum
VDMA AK	Überführung der Ergebnisse des Vorhabens in das die Joint Working Group „Power Consumption Management“ von VDMA, PROFIBUS Nutzerorganisation, OPC-Foundation und ODVA.	FE 1 + FE 2	Teilnahmen an Sitzungen	28.06.2023 12.07.2023 26.07.2023 09.08.2023
Open Campus FE2	Vorstellung des Demonstrators	FE 2	Öffentliche Veranstaltung auf dem Gelände der FE 2	24.06.2023
PROFIenergy AK	Vorstellung der Ergebnisse des Vorhabens. Ableitung von Handlungsempfehlungen für bestehende Standards	FE 1 + FE 2	Teilnahmen an Sitzungen	19.09.2023
Messe SPS Nürnberg	Vorstellung des Demonstrators auf der SPS-Messe in Nürnberg.	FE 1 + FE 2	Messeexponat	14.11.2023 - 16.11.2023 (Teilnahme Halle 10 Stand 130 bestätigt)
Einsatz in Lehrveranstaltungen	Vermittlung des aktuellen Standes der Wissenschaft, insbesondere in der Veranstaltung „Energieeffizientes Design von Produktionsanlagen“ an der FE1	FE 1 + FE 2	Lehrveranstaltung	fortlaufend
Beteiligung an einem Zeitschriftenartikel	Darstellung der Ergebnisse des Vorhabens in einer Zeitschrift eines Unternehmens des projektbegleitenden Ausschusses	FE 1 + FE 2	Zeitschrift	Oktober 23 (Veröffentlichung zugesagt und bestätigt)
Veröffentlichung des Abschlussberichtes auf dem SERWISS-Server von FE1.	Umfassende Darstellung aller Projektergebnisse	FE1 + FE2	Open Access-Dokument	November 23

Durch die Vorstellung des Demonstrators auf verschiedene Messen und Veranstaltungen können sich KMU und Nicht-KMU über die Ergebnisse des Vorhabens, die technische Umsetzung und die Anwendungsmöglichkeiten informieren. Im Rahmen dieser Gespräche erfolgt auch eine Aufklärung über den aktuellen Stand der Standardisierungsaktivitäten, die einen Bezug zu dem Vorhaben haben.

5 Nutzen des Vorhabens für KMU

Der Nutzen des Vorhabens in Form einer semantisch einheitlichen Beschreibung von Energiedaten hat nicht nur für Großunternehmen und Forschungseinrichtungen eine hohe Relevanz, sondern bietet auch kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) in einer digitalisierten Welt wesentliche Vorteile an der Energiewende zu partizipieren.

Wissenschaftlich-technischer Nutzen für KMU

Die durch das Vorhaben erzielten Ergebnisse ermöglichen es KMU, in der heutigen energiebewussten Welt, Kosten zu senken und ihre Wettbewerbsfähigkeit durch einen vereinfachten Engineering-Prozess zu steigern. Die Ergebnisse des Vorhabens wurden durch die wissenschaftliche Community begutachtet und technisch überprüft. Somit können KMU im Rahmen von Energiemanagement Ihren Energieeffizienz erhöhen und den Ressourceneinsatz reduzieren.

Die im Vorhaben beteiligten Partnerfirmen und KMUs, haben die Integrierbarkeit der gerätespezifischen Energiedaten in das universelle Energieinformationsmodell verifiziert, sodass die universelle Nutzbarkeit nachhaltig gewährleistet ist.

Wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse für KMU

Durch den innovativen Beitrag des Vorhabens können KMU zukünftig den Engineering-Aufwand für die Integration von Energiemesssystemen in Automatisierungssysteme um ein Vielfaches reduzieren und somit Kosten für die Erstellung von klimafreundlichen Anlagen einsparen und sich Wettbewerbsvorteile sichern.

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts ermöglichen insbesondere den KMUs, ihr Know-how im Bereich der Bereitstellung von Energiedaten in ihren Produkten zu verbessern und prototypische Lösungen zu entwickeln. Sie erhalten Erfahrungen bei der Integration ihrer Komponenten in Automatisierungssysteme und künftige IoT-Umgebungen sowie in der Entwicklung von IoT-Technologien. Darüber hinaus können sie Erfahrungen in Bezug auf die Komponentenintegration in das Engineering von Automatisierungssystemen sammeln.

Weiter ergeben sich durch die Ergebnisse des Vorhabens folgenden **industrielle Anwendungsmöglichkeiten** für KMU:

- Beschleunigte Nachrüstung von Energiemesssystemen in Bestandsanlagen: KMU können durch die Ergebnisse des Vorhabens Bestandsanlagen mit Energieressystemen nachrüsten, sodass Energiemanagement mit diesen Anlagen betrieben werden kann.
- Beschleunigte Integration von Energieressystemen in geplante Neuanlagen: In geplanten Neuanlagen lassen sich Energieressysteme beschleunigt integrieren, sodass diese schon ab dem ersten Tag die Möglichkeit bereitstellen Energiemanagement zu betreiben.

Sowohl in Neu- als auch in Bestandsanlagen wird der vorher zeitlich sehr aufwändige Engineering-Aufwand für die Beschreibung von Energiedaten durch die nun verfügbare semantisch einheitliche Beschreibung der Energiedaten gesenkt. KMU müssen sich mit Hilfe der Ergebnisse nicht mehr für ein Kommunikationsprotokoll entscheiden, sondern können Energiedaten aus automatisierungstechnischer Sicht über unterschiedliche Kommunikationsprotokolle aus der Feldebene an die Steuerungsebene übermitteln, ohne einen Zusatzaufwand für das Mapping von Energiedaten liefern zu müssen.

6 Veröffentlichungen und Abschlussarbeiten

In diesem Kapitel werden alle Veröffentlichungen und Abschlussarbeiten aufgeführt, die im Rahmen des Vorhabens IoT_EnRG erarbeitet wurden.

WFCS 2021 – IEEE-Konferenz „International Conference on Factory Communication Systems“

In der Veröffentlichung "Communication of energy data in automation systems" [3] wird resümiert, wie die Bereitstellung von Energiedaten in industriellen Produktionsanlagen erfolgen kann und welche Herausforderungen diesbezüglich mit der Einführung oder Erweiterung eines Energiemanagementsystems einhergehen. Als Lösungskonzept wird der Ansatz eines universellen Energieinformationsmodells vorgestellt. Der Beitrag wurde angenommen und anlässlich der WFCS 2021 (Linz, Österreich) vorgestellt.

ETFA 2021 – IEEE-Konferenz „Emerging Technologies & Factory Automation“

In dem Konferenzbeitrag „Requirements for an energy data information model for a communication-independent device description“ [4] wird herausgestellt, auf welchen Geräten ein universelles Energieinformationsmodell implementiert werden könnte und an welcher Stelle der Automatisierungshierarchie solche Geräte zum Einsatz kommen können. Auf der Basis des vorliegenden Konzepts eines universellen Energieinformationsmodells werden die Ergebnisse der diesbezüglich durchgeföhrten Anforderungsanalyse dargestellt. Der Beitrag wurde angenommen und anlässlich der ETFA 2021 (Västerås, Schweden) vorgestellt.

AALE 2022 – Konferenz zur „Angewandten Automatisierungstechnik in Lehre und Entwicklung“

In der Veröffentlichung „Wie können heterogene Prozessdaten automatisch in einem Energiemanagementsystem zusammengeführt werden?“ [5] werden die Ergebnisse der Anforderungsanalyse für das universelle Energieinformationsmodell für den deutschsprachigen Raum im Detail aufbereitet. Ein besonderer Fokus wird auf die Ergebnisse der Persona-Analyse sowie die funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen gelegt. Der Beitrag wurde angenommen und anlässlich der AALE 2022 (Pforzheim) vorgestellt.

AUTOMATION 2022 – Konferenz des VDI des Bereichs GMA

Der Konferenzbeitrag „Konzeption eines vereinheitlichenden Energieinformationsmodells zur Integration unterschiedlicher Energieprofile“ [6] fasst die Ergebnisse eines Vergleichs zusammen, in dem die Merkmale der Informationsmodelle der Energieprofile PROFIenergy, Sercos Energy und CIP Energy betrachtet werden. Die Untersuchungen werden vor dem Hintergrund vorgenommen, dass die Energieprofil-spezifischen Energieinformationen in dem zu entwickelnden universellen Energieinformationsmodell abbildbar sein sollen. Der Beitrag wurde angenommen und anlässlich des Kongresses AUTOMATION 2022 (Baden-Baden) vorgestellt.

ETFA 2022 - IEEE-Konferenz „Emerging Technologies & Factory Automation“

Im Konferenzbeitrag „Universal energy information model for industrial communication“ [7] wird herausgearbeitet, welche Funktionalitäten das universelle Energieinformationsmodell auf der Grundlage der Anforderungsanalyse und des Vergleichs der Energieprofile unterstützen muss. Das Vorgehen bei der Entwicklung des universellen Energieinformationsmodells wird zusammengefasst. Die zusammenfassende Darstellung des entwickelten universellen Energieinformationsmodells, das anhand von Ausschnitten eines UML-Diagramms erläutert wird, steht im Mittelpunkt des Beitrags. Der Konferenzbeitrag wurde angenommen und anlässlich der ETFA 2022 (Stuttgart) vorgestellt.

KommA 2022 – Konferenz zur „Kommunikation in der Automation“

In der Veröffentlichung „Entwurf eines einheitlichen Energieinformationsmodells für die Übertragung von Energieinformationen auf Basis von industriell genutzten Kommunikationsstandards“ [8] wird das Vorgehen bei der Entwicklung des universellen Energieinformationsmodells für die deutschsprachige Community aufbereitet. Im Rahmen des Beitrags wird die Integration des universellen Energieinformationsmodells in der Praxis thematisiert. Der Beitrag wurde angenommen und anlässlich der KommA 2022 (Lemgo) vorgestellt.

Zukunft Digital 2022 – Magazin Zukunft.Digital

In dem Zeitschriftenartikel „Vereinheitlichung von Energieinformationsmodellen zur Realisierung eines aufwandsarmen Informationszugriffs auf Energiedaten“ [9] wird aufgezeigt, wie das universelle Energieinformationsmodell in der Praxis aufwandsarm auf speicherprogrammierbaren Steuerungen implementiert werden kann. Der Beitrag wurde angenommen und im Rahmen des Fachmagazins Zukunft.Digital 2022 veröffentlicht.

atp 2023 – Magazin Automatisierungstechnische Praxis

In dem Kurzbeitrag mit dem Titel „Universelles Energieinformationsmodell liefert Impulse für anstehende Standardisierung“ [10] werden die Ergebnisse des Vorhabens zusammengefasst. Es wird gegenüber der Community kommuniziert, dass die Arbeitsergebnisse des Vorhabens der Joint Working Group „Power Consumption Management“ zugeführt werden und auf dieser Basis eine einheitliche OPC UA Companion Specification entwickelt wird. Der Beitrag wurde angenommen und im Rahmen des Fachmagazins atm 2023 veröffentlicht.

PI-Konferenz 2023 – Fachkonferenz „PI-Technologien für die digitale Transformation“

Der Konferenzbeitrag „PROFINET, OPC UA und MQTT - Die perfekte Kombination für IIoT“ [11] fasst die Vorteile und Nachteile des Publisher/Subscriber Models von OPC UA im Hinblick auf die Bereitstellung von Energieinformationen via MQTT für Anwendungen im Kontext von Data Analytics zusammen. Der Beitrag wurde angenommen und im Rahmen der PI-Konferenz 2023 im Rahmen eines Vortrags präsentiert.

tec.news 2023 – Harting Technologiemagazin

In dem Magazinartikel mit dem Titel „Energie im Blick haben“ [12] wurden die Ergebnisse des Vorhabens resümiert. In einem angefügten Interview werden die Leser an das im Vorhaben behandelte Themengebiet herangeführt und mit den Inhalten der assoziierten OPC UA Companion Specification Power Consumption Management vertraut gemacht.

OPC Foundation 2022 – Podcast

„Energy efficiency and how OPC UA can help building a unified energy model“ [2] ist ein Podcast, der auf der Website der OPC Foundation veröffentlicht wurde, um über die Problemstellung, Ziele und Lösungen des Vorhabens zu informieren.

OPC Foundation 2022 – News and Views from the OPC Foundation

Die News-Internetseite „Energy Efficiency – Building a Unified Model with OPC UA“ [13] fasst die Tätigkeiten im Vorhaben IoT_EnRG und der Joint Working Group Power Consumption Management zusammen.

Abschlussarbeit 2023 – Masterthesis an der Hochschule Hannover

In der Master Thesis „Conception and realization of a semantically standardized energy data acquisition system via the MQTT protocol“ werden Möglichkeiten der einheitlichen Bereitstellung von Energieinformationen via MQTT untersucht, praktisch erprobt und evaluiert. Die Masterthesis wurde im Rahmen des IoT_EnRG-Vorhabens durchgeführt.

7 Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse im Vorhabens IoT_EnRG dargestellt. Die beschriebenen Inhalte sind dabei an die Arbeitspakete (AP) aus dem Antrag zum Vorhaben angelehnt.

7.1 AP1: Aktualisierung des aktuellen Standes von Forschung und Entwicklung

Durchgeführt durch HsH und HSU.

Im Rahmen des Arbeitspakets 1 wurde eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt, die eine Grundlage für die weiteren Forschungsaktivitäten bildete. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse zusammengefasst dargestellt.

Zur Gliederung der dargestellten Ergebnisse findet eine Aufteilung in untergeordnete Kapitel statt. In Kapitel 7.1.1 wird ein Überblick über die Themengebiete der durchgeführten Recherche gegeben. Nachfolgend werden in 7.1.2 Grundlagen zum Thema Energiemanagement und motivatorische Hintergründe zusammengefasst. Kapitel 7.1.3 beschreibt die Bereitstellung der Energieinformationen ausgehend von der Feldebene. Kapitel 7.1.4 resümiert, wie die Energieinformationen, ausgehend von der Steuerungs- und Feldebene, der Energiemanagement-Applikation bereitgestellt werden. In Kapitel 7.1.5 wird die Verwendung von verschiedenen Kommunikationsschnittstellen zur Übertragung von Energiemanagement-Informationen vergleichend gegenübergestellt.

7.1.1 Durchführung der Recherchearbeit

Durchgeführt durch HsH und HSU.

Durch gezielte Untersuchungen in Bibliothekskatalogen, fachspezifischen Zeitschriften und mithilfe von Internetrecherchen konnten wissensreiche Literaturquellen identifiziert und zusammengetragen werden. Diese Literaturbasis bildete die Grundlage für die weiteren Arbeitspakete und ermöglichte es, fundierte Erkenntnisse in den relevanten Forschungsbereichen zu gewinnen.

Im Folgenden werden die untersuchten Themengebiete genannt und die wichtigsten Quellen exemplarisch angeführt.

- Motivation zur Einführung eines Energiemanagementsystems [14] [15]
- Organisatorisches und technisches Energiemanagement in der industriellen Produktion [16]
- Energie Monitoring [17]
- Standby- und Lastmanagement [18]
- Industrielle Kommunikationssysteme
 - Energieprofile (z. B. PROFenergy [19]) und assoziierte OPC UA Companion Specifications (z. B. OPC UA for Energy Management [20])
 - Industrial Ethernet [21]
 - Nicht TCP-basierte Kommunikationssysteme (z. B. IO-Link [22])
 - Middleware (z. B. OPC UA [23], MQTT [24])
- Normen und Richtlinien
 - Begriffsdefinitionen [25]
 - Anforderungen an Energiemanagementsysteme und praktische Anwendung [26]
 - Energie-Auditierung [27]
 - Bewertung der Energieeffizienz [28]
- Ontologien [29] [30]
- Industrie 4.0 [31]
- Anforderungsanalyse [32]
- Informationsmodellierung
 - Grundlagen [33]
 - Meta-Modelle [30]
 - Modellierung mit UML [34]

7.1.2 Motivation und Grundlagen für die Einführung eines Energiemanagementsystems

Durchgeführt durch HsU.

Die Implementierung eines Energiemanagementsystems (EnMS) gemäß des Standards ISO 50001 [26] in einem industriellen Produktionsbetrieb kann dazu führen, dass die Energieeffizienz kontinuierlich verbessert wird. Mittels des in dem ISO-Standard beschriebenen „Plan-Do-Check-Act-Zyklus“ werden Energieeffizienzmaßnahmen geplant, umgesetzt, die Auswirkungen erfasst und dokumentiert und entsprechend der erzielten Ergebnisse Maßnahmen abgeleitet, um Energiebedarfe effizienter einzusetzen. Die technischen Komponenten, die für den Betrieb eines EnMS benötigt werden, werden als technisches Energiemanagement (tEnMS) bezeichnet [35]. Diese Komponenten ermöglichen das Sammeln, Übertragen, Speichern, Auswerten und Anzeigen von energiebezogenen Messdaten, die beispielsweise für die Überwachung verwendet werden können. Das tEnMS umfasst auch Funktionen, die mittels Lastmanagementfunktionen Verbraucher in energiesparende Betriebszustände versetzen können (Pausen-Management). Um Energieüberwachung und Lastmanagement-Funktionen umzusetzen, ist ein Austausch von Energiedaten zwischen den Feldgeräten und den Applikationen des Energiemanagementsystems erforderlich. Im Rahmen des tEnMS können verschiedene Arten von Feldgeräten Energiedaten bereitstellen. Einige Feldgeräte, wie zum Beispiel OPC UA-fähige Geräte aus dem Industrial Internet of Things (IIoT), ermöglichen eine direkte Kommunikation mit einer Energiemanagement-Applikation. Andere etablierte Gerätetypen stellen Energiedaten für das Energiemanagement über Feldbussysteme, Industrial-Ethernet-Systeme, Punkt-zu-Punkt-Verbindungen wie IO-Link oder andere

Kommunikationssysteme bereit. Diese Energiedaten werden von der Feldebene an ein Edge-Device oder eine SPS übertragen und müssen möglicherweise durch Energiemanagement-Programme im Datenformat angepasst, skaliert und auf eine geeignete Kommunikationsschnittstelle (z. B. eine OPC UA-Schnittstelle) abgebildet werden, um von einer Energiemanagement-Applikation verarbeitet werden zu können. Die Erstellung solcher Energiemanagement-Programme ist laut [36] mit einem erheblichen Engineering-Aufwand verbunden, da die Feldgeräte in der heterogenen Feldebene Energiedaten nicht in einer standardisierten Form bereitstellen. Bei der Erstellung des Energiemanagement-Programms müssen die Ingenieure über Wissen der spezifischen Kommunikationssysteme und -protokolle verfügen (beschrieben in individuellen Gerätehandbüchern), um die Bedeutung der Energiedaten in den Rohdaten auf dem Edge-Device oder der SPS verstehen zu können. Basierend auf diesen Kenntnissen müssen die entsprechenden Verarbeitungsschritte ermittelt und ausgearbeitet werden, um die Energiedaten in die Energiemanagement-Applikation zu interpretieren zu können.

7.1.3 Bereitstellung der Energieinformationen aus der Feldebene

Durchgeführt durch HsH.

Zur Realisierung von Energie-, Monitoring-, Standby- oder Lastmanagementfunktionen können tEnMS parallel oder integriert zum bestehenden Automatisierungssystem ausgeführt sein [35]. Abbildung 3 zeigt die Unterschiede der beiden Ausführungen des tEnMS auf. Beim parallelen tEnMS werden zusätzliche Geräte eingebrochen, die ausschließlich für die Umsetzung von Energiemanagement-Funktionen vorgesehen sind. Der Ansatz eines integrierten tEnMS beinhaltet die Nutzung von Messgeräten, Steuerungseinrichtungen und Kommunikationsinfrastruktur, die bereits in dem Automatisierungssystem vorhanden und für den Betrieb der Produktionsanlage genutzt werden.

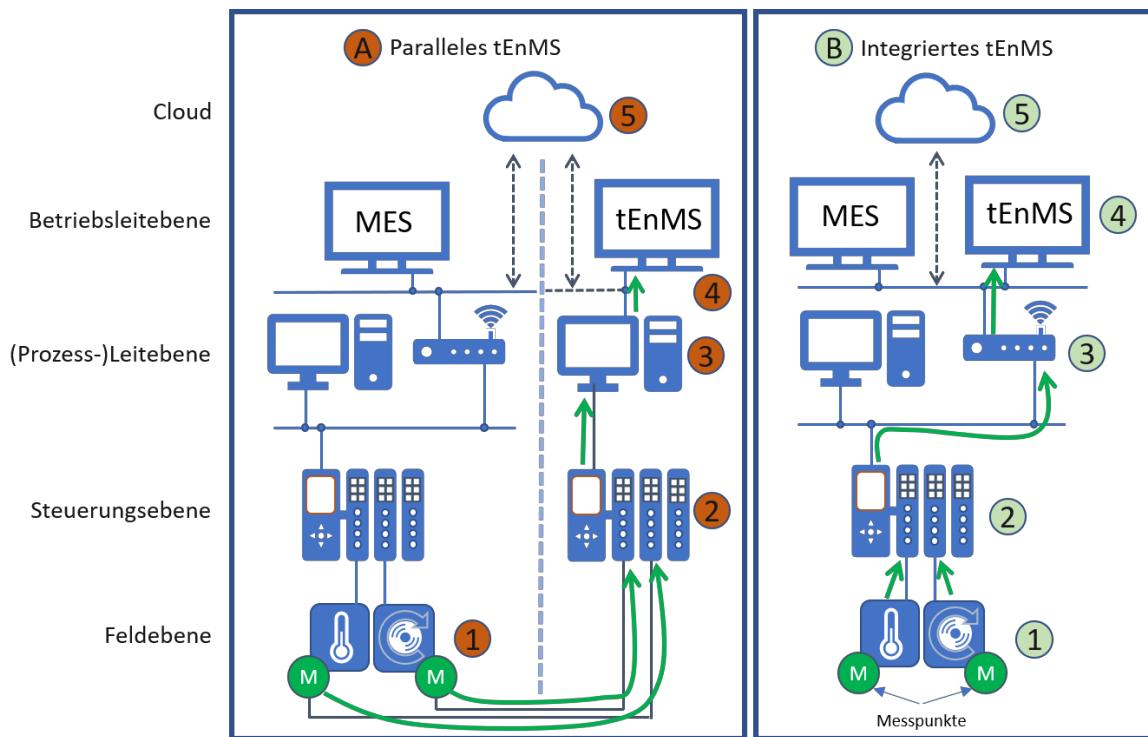


Abbildung 3: Ausführungen des technischen Energiemanagements, basierend auf [35]

Wie in Abbildung 4 dargestellt, kann sich die die Feldebene (1) aus heterogenen Systemen zusammensetzen, da verschiedene Arten von Feldgeräten mit unterschiedlichen TCP-basierten oder nicht-TCP-basierten Kommunikationsschnittstellen (2) verwendet werden können, um Energiedaten an die Steuerungsebene (3) zu übertragen.

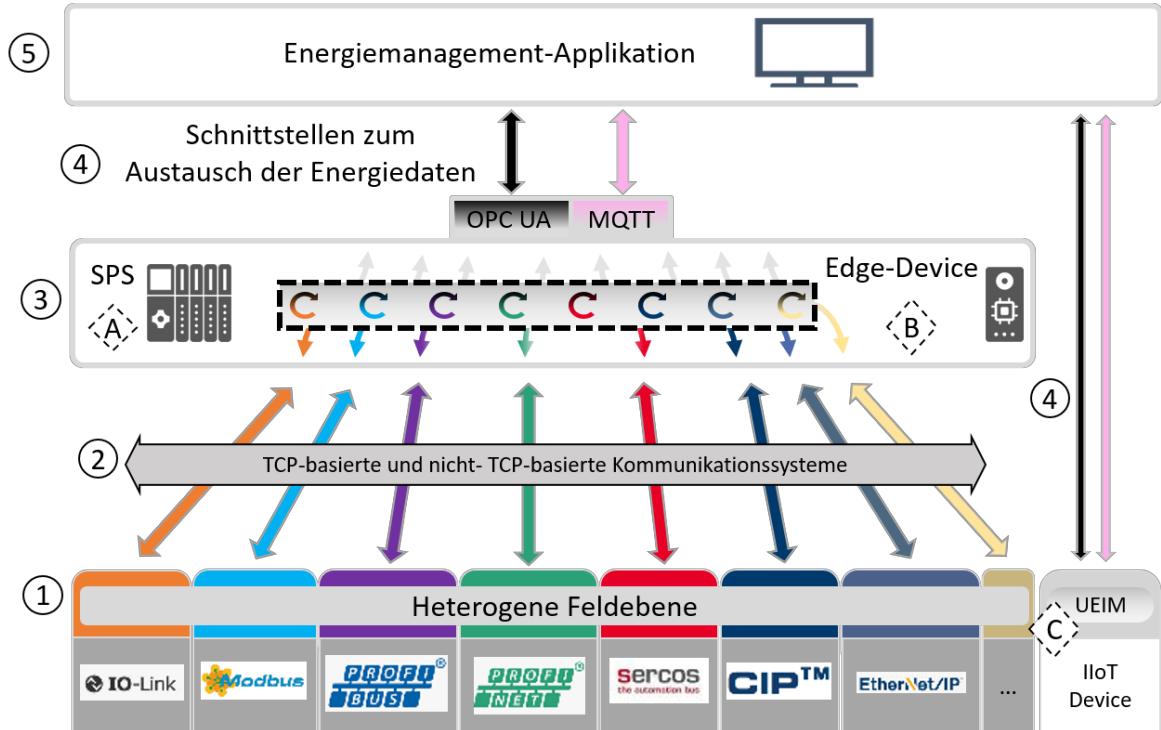


Abbildung 4: Bereitstellung der Energieinformationen aus der Feldebene, basierend auf [7]

Beispiele für nicht-TCP-basierte Gerätetypen sind IO-Link-Geräte [22] wie Stromüberwachungsrelais oder auf PROFIBUS DP basierende Frequenzumrichter [37], die Energiedaten bereitstellen können, die für die Energieüberwachung relevant sind (z. B. Strom, Spannung, Leistungsfaktor oder Energiezählerwerte). TCP-basierte Gerätetypen unterstützen Kommunikationsschnittstellen wie Modbus TCP [38] oder PROFINET [21]. Einige TCP-basierte Gerätetypen unterstützen sogenannte Energieprofile, die es ermöglichen eine standardisierte Semantik für die Energiedaten bereitzustellen. Diese Energieprofile sind jeweils eigenen spezifischen Kommunikationsprotokollen zugeordnet. Beispiele solcher Energieprofile sind PROFIdirect [19] für PROFINET, sercos Energy [39] für sercos III oder CIP Energy [40] für DeviceNet und EtherNet/IP. Durch die Verwendung der Energieprofile können die Energiedaten basierend auf den jeweiligen Energieprofilspezifikationen in einem standardisierten Format von einer SPS (3A) oder einem Edge-Device (3B) an überlagerte Systeme kommuniziert werden. Die Energiedaten der zuvor beschriebenen TCP-basierten und nicht-TCP-basierten Gerätetypen sind auf dem Edge-Device oder der SPS je nach verwendetem Kommunikationsprotokoll in unterschiedlichen Semantiken zugänglich. Durch Energiemanagement-Programme können diese Daten über geeignete Schnittstellen (4) wie OPC UA an die Energiemanagement-Applikation (5) kommuniziert und in diesen weiterverarbeitet werden. Neben der OPC UA Schnittstelle verfügen neuste IIoT-Geräte (1C) parallel dazu über geeignete Kommunikationsschnittstellen (z. B. MQTT), um die Energiedaten direkt an die Energiemanagement-Applikation übermitteln zu können.

7.1.4 Bereitstellung der Energieinformationen zur Energiemanagement-Applikation

Durchgeführt durch HsH.

Um die Energiemanagement-Informationen (EnMi) basierend auf individuellen Informationsmodellen an die Energiemanagement-Anwendung bereitzustellen, müssen die EnMi mit unterschiedlichen Semantiken von der Feldebene (z. B. proprietär oder Energieprofil-spezifisch) auf der Steuerungsebene verarbeitet werden. Diese Verarbeitung der EnMi auf der Steuerungsebene und der Austausch der EnMi mit der Energiemanagement-Anwendung werden in Abbildung 5 näher beschrieben.

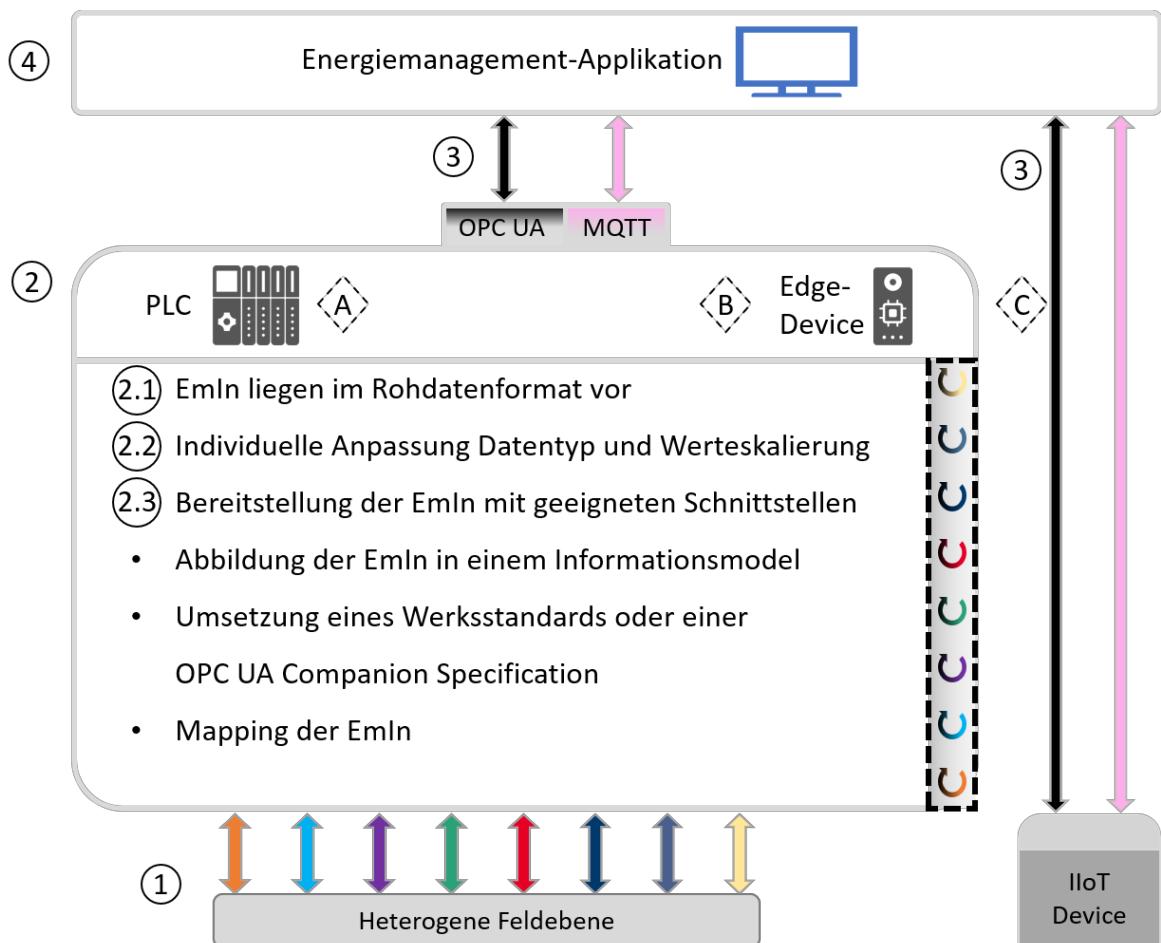


Abbildung 5: Bereitstellung der Energiemanagement-Informationen an die Energiemanagement-Applikation, basierend auf [7]

Die EnMi aus der heterogenen Feldebene (1) liegen im Rohdatenformat auf der SPS (2A) oder dem Edge-Gerät (2B) vor. Anschließend wird den Rohdaten ein Datentyp zugewiesen und die gemessenen Werte werden gegebenenfalls skaliert und in Variablen gespeichert. Im nächsten Schritt werden die EnMi in Variablenstrukturen übertragen, die auf eine geeignete Kommunikationsschnittstelle wie eine OPC UA- oder MQTT-Schnittstelle abgebildet sind. Bei der Erstellung der Schnittstellen können unterschiedliche Konzepte in Bezug auf die semantische

Verarbeitung der EnMi berücksichtigt werden. Einerseits können OPC UA- oder MQTT-Variablen manuell erstellt werden, um die EnMi bereitzustellen. Die Variablennamen sowie die zugewiesenen Datentypen können auf einem unternehmensinternen Standard oder auf der individuellen Entscheidung der Programmierenden basieren. Bei diesem Ansatz werden die EnMi in nicht-standardisierter Semantik über die jeweilige Schnittstelle (3) an die Energiemanagement-Applikation (4) bereitgestellt. Auf der Ebene der Energiemanagement-Applikation müssen die Semantik der EnMi bestimmt und entsprechend berechnet werden, damit sie in das Programm integriert werden können. Andererseits können die EnMi gemäß einer sogenannten OPC UA Companion Specification [41] in standardisierter Semantik bereitgestellt werden. Mit OPC UA Companion Specifications werden auf Basis von Energieprofilen entsprechende Informationsmodelle mit standardisierten OPC UA-Elementen im Format des OPC UA-Adressraummodells [42] dargestellt. In der Entwicklungsumgebung der SPS oder des Edge-Device kann das jeweilige Informationsmodell in Form einer sogenannten NodeSet-Datei importiert werden, damit einzelne Knoten (z. B. zur Bereitstellung eines Messwerts) in standardisierter Semantik instanziert werden können. Bei diesem Ansatz werden die EnMi auf die entsprechenden Instanzen abgebildet und können über die OPC UA-Schnittstelle (3) an die Energiemanagement-Applikation (4) bereitgestellt werden. IIoT Devices wie im Fall (C) können die EnMi direkt über integrierte OPC UA- oder MQTT-Schnittstellen (4) an die Energiemanagement-Anwendung bereitstellen. Zur Unterstützung einer standardisierten Semantik der EnMi auf IIoT Devices (3C) ist eine OPC UA Companion Specification anwendbar.

7.1.5 Bereitstellung von Energiedaten über OPC UA und MQTT

Durchgeführt durch HsH.

Für die Bereitstellung von Energiedaten an eine Energiemanagement-Applikation können unterschiedliche Kommunikationssysteme und -protokolle verwendet werden, die jeweils spezifische Vor- und Nachteile aufweisen. Im Rahmen des Vorhabens wurden Kommunikationssysteme auf Basis von Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) und Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA) in Bezug auf die Bereitstellung von Energiedaten untersucht.

OPC UA ist ein plattformunabhängiger Standard, der es einer Vielzahl von Systemen und Geräten ermöglicht, miteinander zu kommunizieren. Dies erfolgt durch den Austausch von Nachrichten zwischen Clients und Servern über verschiedene Netzwerktypen [43]. Die Plattform bietet eine robuste und sichere Kommunikation, verifiziert die Identitäten von Clients und Servern und ist gegen Cyber-Angriffe geschützt. OPC UA definiert eine Reihe von Diensten, die von Servern bereitgestellt werden können. Dabei gibt jeder Server an, welche Dienste für Clients verfügbar sind. Die Übertragung von Informationen erfolgt mithilfe von Datentypen, die von OPC UA und den Standardisierungsgliedern definiert sind. Die Server stellen Objektmodelle zur Verfügung, die von den Clients dynamisch ermittelt werden können. OPC UA Server bieten Zugriff auf aktuelle und historische Daten sowie auf Alarne und Ereignisse, um die Clients über bedeutende Veränderungen zu informieren. OPC UA ist ein Standard gemäß IEC 62541 [18] für den Datenaustausch basierend auf einer plattformunabhängigen, serviceorientierten, Client-Server-basierten Architektur. Beispielsweise können Energiedaten auf einem Edge-Gerät (Server) bereitgestellt und in der Energiemanagement-Applikation (Client) für die Energieüberwachung verwendet werden. Der Schwerpunkt des Kommunikationssystems OPC UA liegt auf der Bereitstellung einer semantisch standardisierten Datenübertragung unter Verwendung eines Informationsmodells. Auf der Serverseite wird objektorientierte Datenmodellierung unterstützt.

Eine OPC UA-Schnittstelle hat eine hierarchische Struktur, bei der ein Server um untergeordnete Variablen und Objekte erweitert wird. In Bezug auf die Energiedaten werden die Semantiken von Variablen und Objekten in OPC UA Companion Specifications definiert. Mit OPC UA Companion Specifications für Energiedaten können entsprechende Teile des Informationsmodells z. B. in der SPS-Programmierumgebung instanziert werden und somit in standardisierter Form einzelne Geräte oder ganze Anlagen aus Energiesicht darstellen. [44] [45]

Die heute bestehenden OPC UA Companion Specifications im Zusammenhang mit der Bereitstellung von Energiedaten orientieren sich an Energieprofilen wie PROFIenergy, sercos Energy oder CIP Energy. Für PROFIenergy wurde bereits eine OPC Companion Specification [20] veröffentlicht. Im Fall des Sercos Energy-Profils wurde eine allgemeine OPC UA Companion Specification veröffentlicht [46], die für das Sercos III-Bussystem ausgelegt ist. Für das CIP-Kommunikationssystem wurde die Entwicklung einer allgemeinen OPC UA Companion Specification angekündigt, die auch eine Abdeckung der CIP-Objekte gewährleistet [47]. Die Semantiken der OPC UA Companion Specifications basieren auf den Semantiken des jeweiligen Energieprofils. Die semantische Darstellung eines Energiemesswertes in drei verschiedenen Energieprofilen wird in Abbildung 6 gegenübergestellt.

OPC UA Companion Spezifikation des Energieprofils:			
Name des Messwerts:	Active Energy Import/ Export	Supplied / Consumed Energy Odometer	Generated / Consumed Energy Odometer
Datentyp:	(optional) Signed Integer / Float32 / Float64	FLOAT64	Struct

Abbildung 6: Vergleich der Semantiken der Energieprofile, basierend auf [7]

Im untersuchten Beispiel wird die Realisierung der Energiemesswerte in den Energieprofil-Spezifikationen PROFIenergy [19], Sercos Energy [39] und CIP Energy [40] verglichen. Die Messgrößen unterscheiden sich in der Bezeichnung und im Datentyp, der dem Energiemesswert zugeordnet ist. Im Fall von PROFIenergy stehen drei optionale Datentypen zur Auswahl, um die Datentypen der Quellgeräte beizubehalten. Datentypen wie Float32 oder Int32 werden auch von einfachen Geräten unterstützt. Datentypen wie Float64 können Gleitkommazahlen in einem größeren Wertebereich darstellen. Im Fall von Sercos Energy wird der Datentyp Float64 unterstützt, da Sercos III-fähige Geräte wie Frequenzumrichter solche großen Datentypen bereitstellen können. In CIP Energy kann ein großer Wertebereich von 0 kWh bis 999.999.999.999 kWh mithilfe eines strukturierten Datentyps dargestellt werden. Das vorliegende Beispiel bestätigt, dass die drei Energieprofil-spezifischen Darstellungen der Energiewerte heterogen charakterisiert sind. Um die Energiedaten über eine OPC UA-Schnittstelle bereitzustellen, werden somit unterschiedliche OPC UA Companion Specifications benötigt, die den jeweiligen Energiemesswert mit den zugehörigen Datentypen abbilden können.

Für OPC UA wurde ebenfalls ein Publish-Subscribe-Nachrichten-Pattern spezifiziert [48], das optional auch in Kombination mit MQTT verwendet werden kann. Das MQTT-Kommunikationsprotokoll wurde für eine effiziente Datenübertragung als „lightweight protocol“ spezifiziert. Darüber hinaus ist das Protokoll für die sichere Datenübertragung bei geringer Netzwerkqualität mit Verbindungsabbrüchen, geringer Netzwerkbandbreite oder hoher Latenz ausgelegt. Das Kommunikationsprotokoll MQTT ist durch die Organization for the Advancement of Structured Information Standards (OASIS) [24] standardisiert und wurde um zusätzliche Funktionen speziell für den Einsatz in IoT-Anwendungen erweitert. MQTT ist ein client-server-basiertes Transportprotokoll, das das Publish-Subscribe-Pattern unterstützt. Beispielsweise können bei der Kommunikation in einem Netzwerk Messgeräte (Publisher) Energiedaten für eine Energiemanagement-Applikation (Subscriber) bereitstellen. Publisher und Subscriber werden beide als Clients betrachtet und kommunizieren nicht direkt miteinander. Stattdessen wird ein sogenannter MQTT-Broker (Server) verwendet, um die Energiedaten aller Clients zu speichern und die Übertragung der Energiedaten an die Subscriber zu verwalten. Clients wie Messgeräte können Energiedaten in Form hierarchisch strukturierter Topics veröffentlichen, z. B. Fabrikhalle1/Fertigungsstraße2/Förderband1/Strom. Clients können sich für diese Topics anmelden (subscribe), um den themenbezogenen aktuellen Messwert über den Broker zu empfangen. In MQTT wird keine semantische Standardisierung festgelegt, und es liegt im Ermessen des Entwicklers, welcher Inhalt im Payload übertragen wird. Um von der standardisierten Semantik des OPC UA-Kommunikationssystems zu profitieren, gibt es den Ansatz, eine sogenannte MQTT-OPC-UA-Bridge [49] zu verwenden. Mit einer MQTT-OPC-UA-Bridge können abonnierte MQTT-Nachrichten auf den OPC UA Client/Server-Adressraum abgebildet werden. Hierfür ist die Übertragung der semantischen Informationen im MQTT-Payload erforderlich. [50] [45]

7.2 AP2: Erarbeitung eines universellen

Energieinformationsmodells

Durchgeführt durch HsH und HSU.

In diesem Kapitel wird die schrittweise Entwicklung des universellen Energieinformationsmodells (UEIM) beschrieben. In Kapitel 5.2.1 wird das Vorgehen zur Entwicklung des UEIM erläutert. Im Anschluss folgt in Kapitel 5.2.2 die Durchführung der Anforderungsanalyse für das UEIM. In Kapitel 5.2.3 werden bestehende semantische Standards im Bereich der Bereitstellung von Energiemanagement-Informationen analysiert und miteinander verglichen. Das darauffolgende Kapitel 5.2.4 beschäftigt sich mit der Entwicklung des UEIM. Im Kapitel 5.2.5 wird beschrieben, wie das UEIM auf dem OPC UA Client/Server-Standard implementiert werden kann. In Kapitel 5.2.6 wird die Implementierung des universellen Energieinformationsmodells mittels MQTT-Schnittstelle behandelt. Abschließend wird in Kapitel 5.2.7 die Anwendung des universellen Energieinformationsmodells in der Praxis betrachtet.

7.2.1 Planung des Vorgehens

Durchgeführt durch HsH und HSU.

Um das universelle Energieinformationsmodell (UEIM) zu entwickeln und Messinformationen mit standardisierter Semantik bereitzustellen, wird ein schrittweises Verfahren angewendet. Abbildung 7 zeigt das schrittweise Verfahren, das zur Entwicklung des UEIM angewendet wurde.

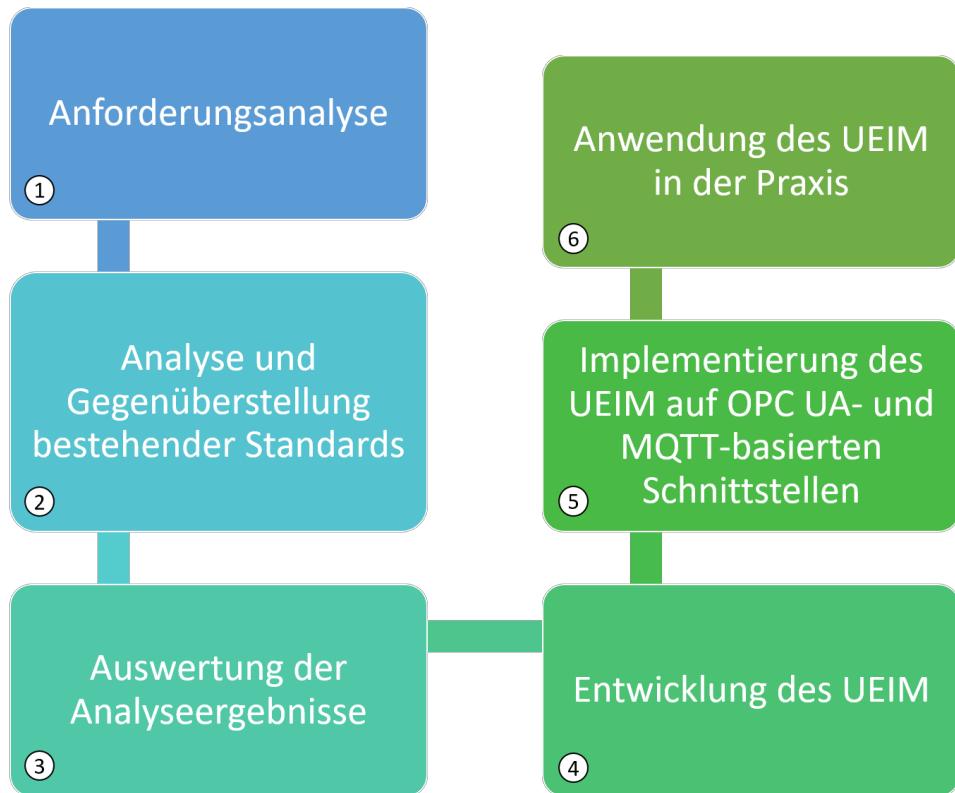


Abbildung 7: Vorgehen bei der Entwicklung des UEIM

Im ersten Schritt wurde eine Anforderungsanalyse durchgeführt. Auf Basis einer Persona-Analyse wurden Stakeholder erfasst, die in direktem Bezug zu einem UEIM stehen oder von dessen Einsatz potentiell profitieren. Auf dieser Grundlage wurden funktionale und nicht-funktionale Anforderungen an ein UEIM definiert.

Der zweite Schritt beinhaltete die Analyse und den Vergleich von bestehenden Standards, die einen Bezug zum Thema Energiemanagement und insbesondere zum Thema Kommunikation von Energiedaten haben. Im Rahmen dieser Analyse wurden die Energieprofile PROFenergy [19], Sercos Energy [39] und CIP Energy [40] analysiert und gegenüberstellt, um einen Überblick über die unterstützten Energiemanagementfunktionen, die Semantik der Messdatenbereitstellung und die zugehörigen Informationseigenschaften des Modells zu erhalten. Zusätzlich wurden die OPC UA Companion Specifications für das entsprechende Energieprofil analysiert und die Semantik der Messfunktionen berücksichtigt und markante Eigenschaften, wie beispielsweise das Monitoring von Energiedaten, herausgearbeitet.

Auf der Grundlage der Analyse der Standards aus Schritt 2 erfolgt in Schritt 3 eine Bewertung der identifizierten Eigenschaften der Informationsmodelle. Als Ergebnis von Schritt 3 standen die vom UEIM zu unterstützenden Messfunktionen fest, da eine zentrale Anforderung an das UEIM die Unterstützung bestehender Energieprofile war. In diesem Rahmen konnten diverse Vor- und Nachteile der bestehenden Standards identifiziert werden. Außerdem wurden die markanten Eigenschaften der bestehenden Standards zusammengefasst, da diese in jedem Fall in dem zu entwickelnden Energieinformationsmodell integriert werden mussten. Den Abschluss des zweiten Schritts bildete die Definition einer Ausgangsbasis von Eigenschaften, Informationen und Funktionalitäten, die durch das Energieinformationsmodell dargestellt werden mussten.

Schritt 4 wurde dazu genutzt, um das Energieinformationsmodell zu entwickeln. Dafür wurde zunächst ein Klassendiagramm angelegt und dieses mit den aus Schritt zwei identifizierten Eigenschaften, Funktionen und Informationen gefüllt. Während der Erstellung wurde darauf geachtet, dass formulierte Anforderungen grundsätzlich beachtet und eingehalten wurden. Durch dieses Vorgehen konnte sichergestellt werden, dass das entwickelte Energieinformationsmodell bestehenden Standards nicht konträr ist. Außerdem konnten mit Hilfe der Rückmeldungen von Experten aus diversen Arbeitskreisen die Qualität des Energieinformationsmodells schrittweise optimiert werden, da so Expertenwissen mit in das Informationsmodell eingearbeitet werden konnte. Die extern eingebrachte Fachexpertise ermöglichte es, dass so auch frühzeitig Schwächen im Konzept identifiziert und ausgeräumt werden konnten.

Anschließend werden in Schritt 5 Konzepte für die Implementierung des UEIM auf OPC UA- und MQTT-basierten Schnittstellen entwickelt und in Schritt 6 die Anwendung in der Praxis verifiziert.

7.2.2 Durchführung der Anforderungsanalyse

Durchgeführt durch HsH und HSU.

Um Anforderungen an das UEIM basierend auf dem Stand der Technik abzuleiten, werden sogenannte Persona-Profile [32] entworfen, um die Bedürfnisse der Stakeholder in tabellarischer Form zu erfassen. Die erstellten Personas geraten in ihrer Tätigkeit potentiell mit den bereitgestellten EnMi und der Semantik des UEIM in Kontakt oder würden von dem Einsatz eines UEIM potentiell profitieren. Ein Beispiel für eines der entworfenen Persona-Profile wird in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Persona-Profil Systemkonfigurator für Prozessleitebene und MES

Arbeitsrolle	Systemkonfigurator für Prozessleitebene und MES
Kenntnisse	<ul style="list-style-type: none">– Erfahrung im Umgang mit den eingesetzten Entwicklungsumgebungen– Kenntnisse über Diagrammtypen wie Sankey-Diagramme– Kenntnisse über die Erstellung von Diagrammen und die Einbindung von Energiemanagement-Informationen– Kenntnisse über die Semantik eingesetzter Energieprofil-basierter OPC UA Companion Specifications
Ziele	<ul style="list-style-type: none">– Energie-Monitoring-Systeme soll die Anforderungen erfüllen, die im Lastenheft des Auftraggebers festgehalten sind– Effiziente Programmerstellung
Arbeitsprozesse	<ul style="list-style-type: none">– Ermittlung der in dem Energie-Monitoring-System darzustellenden Energiedaten an den zur Verfügung stehenden Schnittstellen– Anlegen von Anlagenübersichten und Zuordnung der korrekten Messstellen– Verstehen des semantischen Aufbaus der Energiedaten mit Hilfe der proprietären oder Energieprofil-basierten Dokumentationen– Erstellung von Diagrammen und Verknüpfung der jeweiligen Energiedaten

	<ul style="list-style-type: none"> – Anlegen von Alarmmeldungen – Inbetriebnahme des Energie-Monitoring-Systems – Prüfen der Validität der angezeigten Energiedaten – Umsetzung von Änderungen im Energie-Monitoring-System
Wünsche	<ul style="list-style-type: none"> – Reduzierung des erforderlichen Engineering-Aufwandes zur Entwicklung des Energie-Monitoring-Systems – Zugriff auf möglichst wenige Geräte-Dokumentationen und -Handbücher zur Planung/ Umsetzung – Einheitliche Semantik der Energiedaten

Ergänzend zu dem in Tabelle 4 vorgestellten Beispiel wurden weitere Persona-Profile identifiziert und dessen Priorität in Bezug auf das UEIM eingeschätzt. Die gesamten Persona-Profile sind im Anhang aufgeführt. Tabelle 5 zeigt eine Übersicht über die priorisierten Personas.

Tabelle 5: Gruppierung der Personas, übernommen aus [5]

Persona-Gruppe	Persona Nr.	Persona-Bezeichnung	Priorität
Geräteentwicklung	1	– Gerätehersteller für Feldgeräte	Hoch
	2	– Gerätehersteller für Edge-Devices und SPSen	Hoch
Anlagenerrichtung und Inbetriebnahme	3	– Entwicklungingenieur*in für Produktionsanlagen	Hoch
	4	– Programm-Entwickler*in für Edge-Devices und SPSen	Hoch
	5	– Systemkonfigurator*in für Prozessleitebene und MES	Hoch
Prozessleitebene	6	– Personal in der Leitwarte	Mittel
Betrieb	7	– Betriebsleiter*in	Mittel
	8	– Anlagenbediener*in	Gering
	9	– Energiemanager*in	Hoch
Einkauf	10	– Einkäufer*in für Energie	Mittel
	11	– Einkäufer*in (Maschinen und Einzelkomponenten)	Mittel
Instandhaltung und Optimierung	12	– Instandhalter*in	Mittel
Management	13	– Geschäftsführung	Mittel
Dienstleister Energiemanagement-Sektor (betriebsextern)	14	– Programm-Entwickler*in für Edge-Devices und SPSen (extern)	Hoch
	15	– Systemkonfigurator*in für Prozessleitebene und MES (extern)	Hoch
	16	– Instandhalter*in (extern)	Mittel

Die Persona-Analyse hat gezeigt, dass viele Stakeholder direkt mit einem UEIM in Kontakt kommen. Hierzu zählen die Gerätehersteller (1 und 2). Diese könnten die Energiedaten ihrer IIoT-Devices oder ihrer anderweitigen Messgeräte im Format des UEIM bereitstellen. Des Weiteren sind insbesondere Stakeholder relevant, die eine Zwischenverarbeitung der Energiedaten vornehmen müssen, um diese einer Energiemanagement-Applikation bereitzustellen oder direkt als Systemkonfigurator*in für Prozessleitebene und MES die Entwicklung von Energie-Monitoring-Anwendungen durchführen. Auch betriebsexterne Arbeitskräfte könnten potentiell von der Implementierung eines UEIM profitieren, da diese keine Kenntnisse über eventuelle Betriebsinterne Standards haben.

Die erhobenen Anforderungen können nach Abbildung 8 in drei Gruppen unterteilt werden, um eine Übersichtlichkeit zu gewährleisten:

- Spezifische Anforderungen für das UEIM (1).
- Anforderungen an die Schnittstellen zum Abrufen der Energiedaten von der heterogenen Feldebene und zur Bereitstellung an Energiemanagement-Applikationen (2).
- Allgemeine Anforderungen an das UEIM (3).

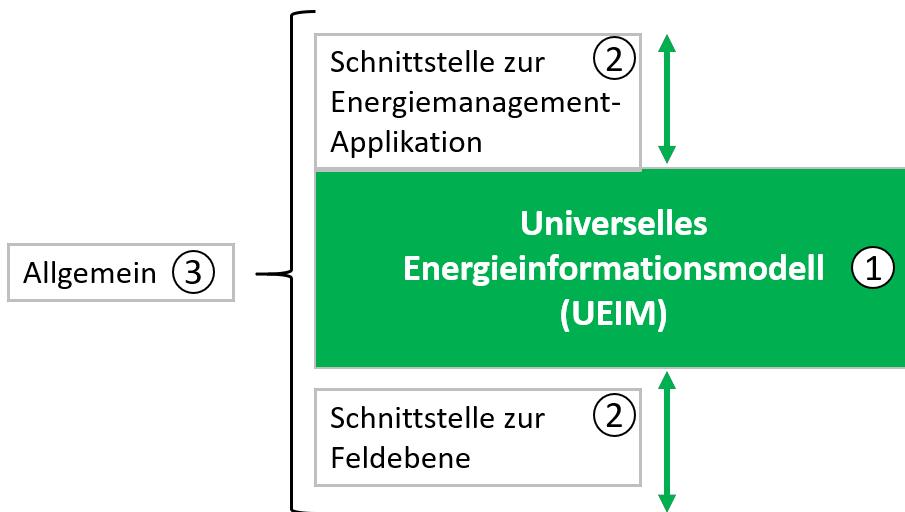


Abbildung 8: Gruppierung der Anforderungen an ein UEIM, basierend auf [4]

Basierend auf den Persona-Profilen wurden die Anforderungen an das UEIM definiert. Tabelle 6 zeigt die Anforderungen unterteilt in funktionale und nicht-funktionale Anforderungen. Zusätzlich erfolgt eine Zuordnung zu den in Tabelle 5 definierten Personas und den in Abbildung 8 dargestellten Anforderungsgruppen.

Tabelle 6: Anforderungen an ein UEIM, basierend auf [4]

Anforderungsgruppe	Zugeordnete Personas	Funktionale (f) und nicht-funktionale (nf) Anforderungen
Interne Strukturierung der Energiedaten im UEIM	1, 2, 3, 4, 5, 14, 15	Standardisierte Semantik der Energiedaten (f): Die Energiedaten sollen im UEIM in standardisierter Semantik dargestellt werden, um einen einheitlichen Zugriff auf diese Energiedaten zu ermöglichen. Im

		Rahmen der Modellierung des UEIM sollen Ontologien einbezogen werden, um Energiedaten in Form von einheitlichen Terminologien darzustellen [51]. Das UEIM muss die eindeutige Definition eines Messpunkttyps (Zuordnung von Bezeichnung, Datentyp, Maßeinheit, zulässigem Wertebereich z. B. anhand einer ID wie in [52] dargestellt) enthalten.
	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16	Unterstützung von etablierten tEnMS-Funktionalitäten (f): Die etablierten tEnMS-Funktionalitäten der bestehenden Energieprofile [53] [54] [40] sollten unterstützt werden.
	1, 2, 3, 4, 14	Verwendung der vorhandenen OPC UA Companion Spezifikationen (f): Bei der Verwendung des UEIM muss sichergestellt werden, dass die etablierten OPC UA Companion Spezifikationen [20] [46] [47] unterstützt werden, sofern die Quelle der Energiedaten ein Energieprofil unterstützendes Gerät ist.
	1	Integration von IIoT-Technologien (nf): Das UEIM sollte auf IIoT-Geräten ausführbar sein, damit diese Energiedaten an die Energiemanagement-Applikation liefern können, wie in [55] gefordert.
Schnittstellen zu Energiedaten der Feldebene und Energiemanagement-Applikation	1, 2, 3, 4, 14	Austausch von Energiedaten mit der Feldebene (f): Die Energiedaten von nicht-Ethernet-basierten (z. B. IO-Link) und Ethernet-basierten Feldgeräten (z. B. Modbus TCP oder PROFINET) sollten im UEIM darstellbar sein (siehe Unterkapitel 2.1).
	1, 2, 4, 5, 14, 15	Kompatibilität mit etablierten Kommunikationsschnittstellen (nf): Die im UEIM dargestellten Energiedaten sollten über die etablierten OPC-UA- oder MQTT-Kommunikationsschnittstellen bereitgestellt werden, um die jeweiligen Vorteile der Kommunikationssysteme zu nutzen, wie in Unterkapitel 7.1.5 beschrieben.
Allgemein	1, 3, 4, 5, 7, 13, 14, 15	Reduktion des Engineering-Aufwands (nf): Die Erstellung von Edge-Device oder SPS-Programmen, die primär die Bereitstellung der Energiedaten realisieren, ist mit einem hohen Engineering-Aufwand verbunden [36]. Die Gestaltung des UEIM soll darauf abzielen,

		diesen Engineering-Aufwand zu reduzieren. Die standardisierte Semantik soll die Anwendung von Codegeneratoren zur automatischen Generierung von Edge-Device- oder SPS-Programmen, die zur Bereitstellung von Energiedaten dienen, begünstigen (vgl. [16]).
	2, 4, 5, 14, 15	Verarbeitungszeit auf SPSen oder Edge-Devices (nf): Wenn EnMi zwischen der Feldebene und übergeordneten Ebenen des Automatisierungssystems übertragen werden, muss sich die Zykluszeit bei Verwendung des UEIM an branchenüblichen Zykluszeiten orientieren, die mit vergleichbaren Programmen (unter Verwendung der OPC UA Companion Spezifikation [20]) erreicht werden.
	1, 2, 3, 4, 5, 14, 15	Modularität des UEIM (nf): Die Energiemanagementfunktionalitäten sollen einzeln aus dem tEnMS aktiviert oder deaktiviert werden können [56]. Im UEIM müssen daher die Funktionalitätsmodule (Messwerterfassung oder Stand-by-Management-Funktionen aus den festgelegten Energieprofilen) getrennt voneinander konzipiert werden, damit sie unabhängig voneinander sind.

7.2.3 Analyse und Gegenüberstellung bestehender semantischer Standards

Durchgeführt durch HSU.

Um einen Überblick über die Eigenschaften, Gemeinsamkeiten und Abweichungen der bestehenden Energieprofile zu bekommen, wurde eine Analyse durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Tabelle 7 dargestellt. Auf Basis der Analyse konnten Informationen abgeleitet werden, die im Energieinformationsmodell hinterlegt werden mussten.

Tabelle 7: Vergleich der Energieprofile

Beschreibung der Eigenschaft	Energieprofil			Abgeleitete Ergebnisse für die Entwicklung des UEIM
	PROFIenergy	Sercos Energy	CIP Energy	
Unterstützung von elektrischen Messgrößen	✓	✓	✓	Das UEIM muss sowohl elektrische als auch nicht elektrische Messgrößen unterstützen.
Unterstützung von nicht-elektrischen Messgrößen	X	X	✓	
Anzahl der unterstützten elektrischen Messgrößen	40	2	39	Alle identifizierten elektrischen und nicht elektrischen Messgrößen müssen durch das UEIM unterstützt werden.
Anzahl der unterstützten nicht-elektrischen Messgrößen	0	0	12	
Identifikation einer Messung	Spezifische Measurement ID	Spezifische parameter number	Spezifische Attribute ID	Messungen sollen über eine Identifikationsnummer eindeutig zugeordnet werden können.
Einheitliche Benennung der Messung	X	X	X	Das UEIM muss eine einheitlichen Benennung der Messungen aufweisen.
Einheitliche Datentypen für Messungen	X	X	X	Die flexible Auswahl für Datentypen wird aus der PROFIenergy-Spezifikation übernommen, wenn nötig werden weitere Datentypen ergänzt.
Zusätzliche Merkmale aus verwandten OPC UA Companion Spezifikationen	Für die Angabe von Maßeinheiten wird eine EU-weite Empfehlung der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE) herangezogen[57]. Die OPC Foundation stellt eine Mapping-Tabelle für ein standardisiertes Datenmapping zur Verfügung.	Parameter des Energieprofils können über die OPC UA Companion Specification [46] abgerufen werden. (1:1-Zuordnung).	Die OPC UA Companion Specification ist noch nicht veröffentlicht worden.	Verwendung des UNECE-Codes wird im UEIM berücksichtigt

Verwendete Messgenauigkeitsstandards	✓	X	X	Im UEIM wird für die Messgenauigkeiten die in PROFenergy verwendet Spezifikation verwendet, da diese den breitesten Umfang bietet
	Optional Verwendung möglich	Keine Informationen über Messgenauigkeiten	Relative Abweichung des aktuellen Messwerts zum Messbereichsendwert	

7.2.4 Entwicklung des universellen Energieinformationsmodells

Durchgeführt durch HSU.

Die Entwicklung des universellen Energieinformationsmodells (UEIM) wurde auf Basis der Analyse der bestehenden Standards (siehe Kapitel 7.2.3) durchgeführt. Wie schon erwähnt, erfolgte die Darstellung des UEIM in einem Klassendiagramm. Dieses Klassendiagramm ist in Abbildung 9 im Kontext einer industriellen Fertigungsmaschine [60] dargestellt und wird nachfolgend beschrieben.

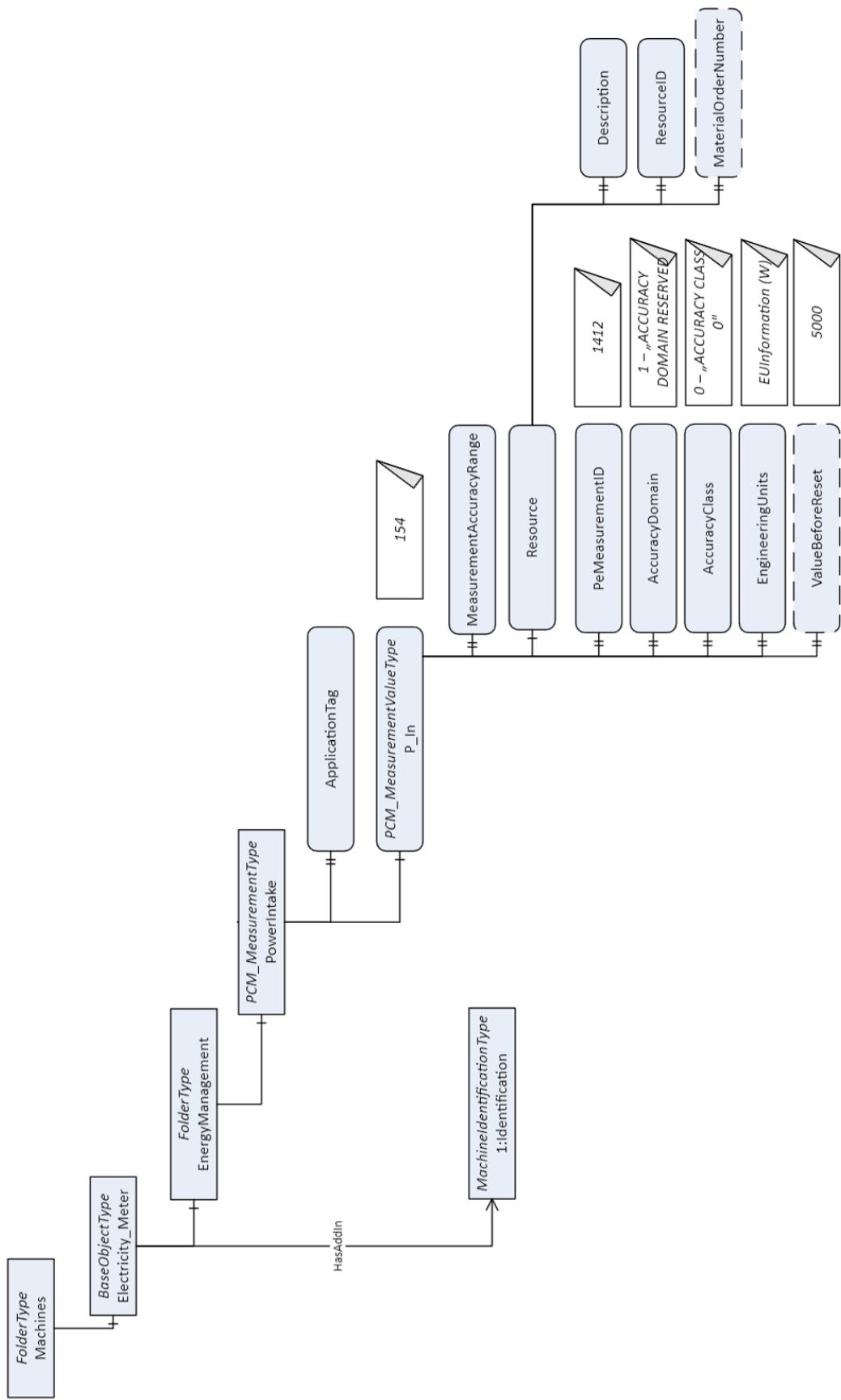


Abbildung 9: Modellierung des universellen Energieinformationsmodells

Im OPC UA-Standard zum Adressraummodell [61] werden Notationsregeln für die Modellierung eines Klassendiagramms aufgezeigt. Diese Notationsregeln wurden bei der Entwicklung des UEIM angewendet. Die gestrichelten Rahmen kennzeichnen optionale Elemente des Informationsmodells.

Über die Klasse *FolderType* können Maschinen in einer Anlage beschrieben werden. Die untergeordnete, beispielhafte Klasseninstanz *Electricity_Meter* beschreibt ein Energiemessgerät der Maschine vom Typ *BaseObjectType*. Die Energiemessgeräte dienen dem „*Energiemanagement*“ und können über eine spezifische *Identification* eindeutig identifiziert werden [60]. Der Klasse Energiemanagement vom Typ *FolderType* ist eine Messung untergeordnet. Die Messung wiederum besitzt einen *ApplicationTag* zur eindeutigen Identifikation der Messinstanz und gibt Auskunft über den Messwert. Ein Messwert setzt sich wiederum aus mehreren Klassen zusammen. Mit diesen Klassen wird eine Beschreibung der Messgenauigkeit, der Messressource (*Resource*), der Maßeinheit (*EngineeringUnits*) und der Identifikation der Messgröße (*MeasurementID*) realisiert. Mittels *ValueBeforeReset* können Energiezählerwerte abgerufen werden, die vor dem Zurücksetzen des Energiezählers bestanden haben.

Mit der *MeasurementID* wurde ein Container für Messgrößenkennungen definiert. In einer erarbeiteten Tabelle wurden jeder *MeasurementID* weitere Merkmale zugeordnet, um Messungen eindeutig beschreiben zu können. In Tabelle 8 ist das Format der Tabelle mit den standardisierten *MeasurementIDs* angegeben. Auf der Grundlage der Analyse der bestehenden Standards (siehe Kapitel 7.2.3) wurden circa 200 voneinander abzugrenzende *MeasurementIDs* angelegt.

Tabelle 8: Aufbau des Containers für Messgrößenerkennungen

MeasurementID	Bezeichnung Messgröße	Einheit	Phase	Messdauer und Messverfahren	Ergänzende Erläuterung

Zur Differenzierung der Ressourcen wurde auf Grundlage von [40] eine Ressourcenliste erarbeitet. Die Ressourcen können durch eine zugeordnete *RessourceID* eindeutig beschrieben und identifiziert werden. Das Merkmal „*Description*“ beschreibt die Ressource zusätzlich in menschenlesbarer Form. Beim Beispiel eines elektrischen Energiemessgeräts wird an dieser Stelle *Electricity* eingetragen. Eine *MaterialOrderNumber* steht optional für die betriebsinterne Zuordnung von Bestellnummern zur Verfügung.

Mit Hilfe dieses Klassendiagramms können Messungen semantisch einheitlich beschrieben werden. Um in industriellen Anlagen den Engineering-Aufwand weiter reduzieren zu können, besteht die Möglichkeit sogenannte Interfaces zu verwenden.

Interfaces spielen eine entscheidende Rolle bei der effizienten Modellierung von Energieinformationen verschiedener Messgerätetypen, wie beispielsweise Durchflussmessgeräten, z. B. mithilfe von OPC UA. Durch den Einsatz von Interfaces kann der Aufwand für die Modellierung erheblich reduziert. Ein wesentlicher Vorteil von Interfaces besteht darin, dass diese das automatische Anlegen von Messwertknoten ermöglichen und zwar sowohl für einen einzelnen Messwert als auch für mehrere Messwerte, falls erforderlich. Dies erleichtert das Anlegen und die Strukturierung der Energievariablen erheblich. Des Weiteren ermöglichen Interfaces auch das automatische Anlegen der entsprechenden Einheiten und *MeasurementIDs*. Diese dienen der einheitlichen Identifikation der Messgrößen und tragen zu einer konsistenten und eindeutigen Darstellung bei. Dadurch wird die Kommunikation und der Austausch von Energiedaten zwischen verschiedenen Systemen und Geräten erleichtert. Die Möglichkeit der Nutzung von Interfaces konnte aus dem Standard [20] übernommen werden. In Abbildung 10 werden drei Interfaces exemplarisch aufgeführt.

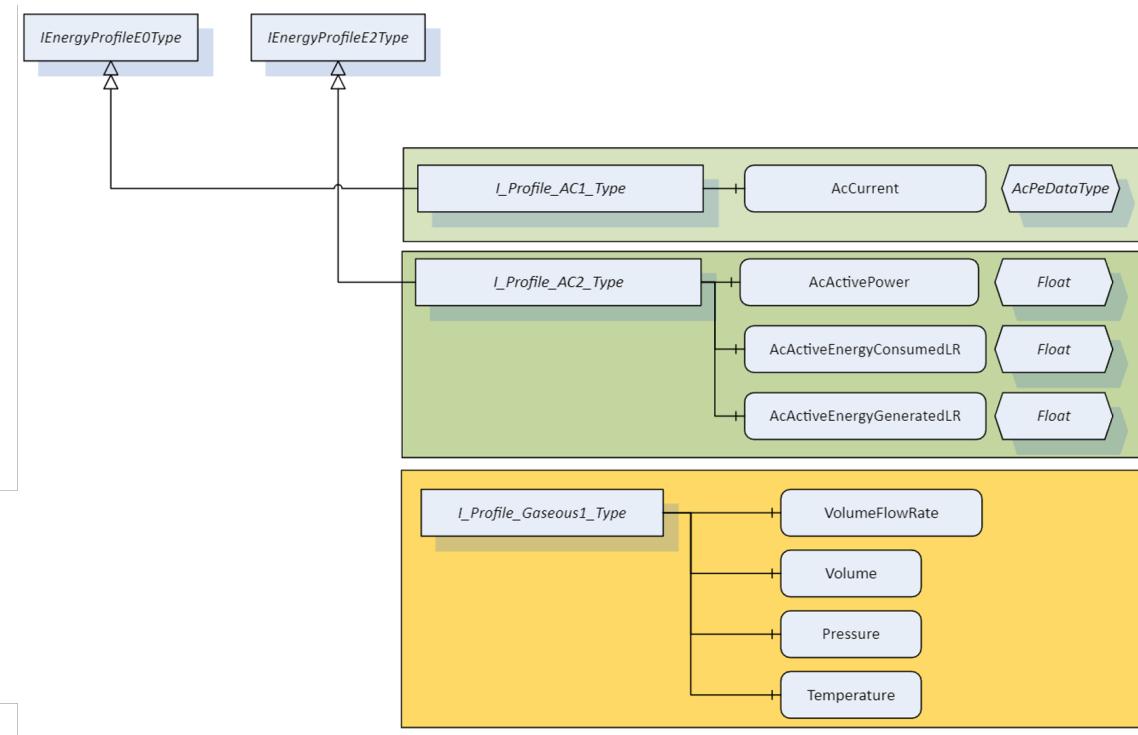


Abbildung 10: Modellierung von Interfaces

Um nicht-elektrische Messgrößen bereitzustellen, wurden weitere Interfaces definiert. Diese Interfaces werden in Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Definition von Interfaces

Resource	Profile E0	Profile E1	Profile E2	Profile E3	...
Electricity AC	AcCurrent	ActivePowerTotal	ActivePowerTotal	ActivePower	
			ActiveEnergyTotalImport	ReactivePower	
			ActiveEnergyTotalExport	ActiveEnergyTotalImport	
				ActiveEnergyTotalExport	
				ReactiveEnergyTotalImport	
				
				VoltagePe	
				VoltagePp	
				Current	
				PowerFactor	
Liquids	Volume flow rate	Volume flow rate	Volume flow rate	Volume flow rate	
		Volume(totalizer)	Volume(totalizer)	Volume(totalizer)	
			Mass flow rate	Mass flow rate	
			Mass flow rate (totalizer)	Mass flow rate (totalizer)	
				Temperature	
				Conductivity	
				Concentration	
				Density	
Steam	Volume flow rate	Volume flow rate	Volume flow rate	Volume flow rate	
		Volume(totalizer)	Volume(totalizer)	Volume(totalizer)	
				Temperature	
				Pressure	
				Energy flow rate	
				Energy	
				Steam Quality	
Gas	Volume flow rate	Volume flow rate	Volume flow rate	Volume flow rate	
		Volume(totalizer)	Volume(totalizer)	Volume(totalizer)	
			Corrected volume flow rate	Corrected volume flow rate	
			Mass flow rate	Mass flow rate	
			Mass flow rate (totalizer)	Mass flow rate (totalizer)	
				Temperature	
				Energy flow rate	
				Energy	
Solid	Weight	Weight			
		Weight (totalizer)			

Diese Tabelle teilt die Messgrößen in drei Aggregatzustände ein, um eine gezielte und übersichtliche Zuordnung zu ermöglichen. Dadurch wird eine klarere Struktur geschaffen und die Verwaltung der verschiedenen Messgrößen wird vereinfacht. Es ist wichtig anzumerken, dass nicht alle Messgrößen, die durch ein Interface bereitgestellt werden, zwangsläufig verwendet werden müssen. Je nach den Anforderungen und Bedürfnissen eines Systems oder einer Anwendung kann selektiv ausgewählt werden, welche Messgrößen relevant sind und verwendet werden sollen. Dies ermöglicht eine flexible Anpassung und Nutzung der verfügbaren Energiedaten.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Interfaces eine effiziente Möglichkeit bieten, Energieinformationen von Messgerätetypen zu modellieren. Sie ermöglichen das automatische Anlegen von Messwertknoten, Einheiten und „*MeasurementIDs*“. Durch die Einteilung der nicht-elektrischen Messgrößen in Aggregatzustandsgruppierungen und die Möglichkeit der selektiven Verwendung wird eine flexible und bedarfsgerechte Nutzung gewährleistet. Interfaces sind somit ein wertvolles Werkzeug zur Vereinfachung und Optimierung der Handhabung von Energieinformationen.

7.2.5 Implementierung des universellen Energieinformationsmodells auf dem OPC UA Client/Server-Standard

Durchgeführt durch HsH.

Im Rahmen der Entwicklungsumgebungen für SPSEN und Edge-Geräte stehen spezifische Tools zur Verfügung, um OPC UA-Variablen zu erstellen. Abbildung 11 veranschaulicht den schrittweisen Prozess anhand einer Beispielanwendung im OPC UA Modeling Editor (kurz SiOME) [62].

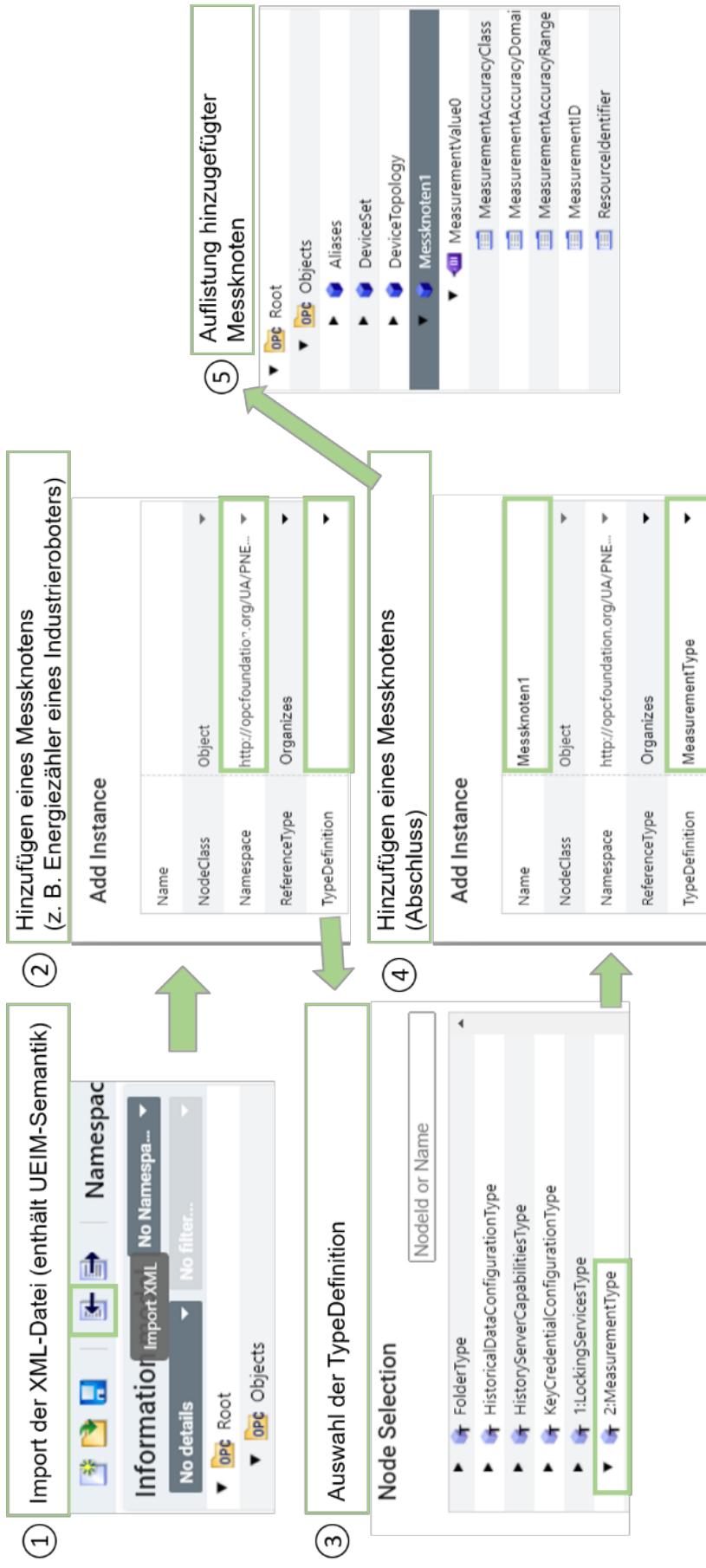


Abbildung 11: Anwendung der UEM OPC UA Companion Specification in SiOME, übernommen aus [63]

In Schritt ① ist der Import einer OPC UA Companion Specification XML-NodeSet-Datei erforderlich, die die semantischen Informationen des entsprechenden Standards enthält (dargestellt durch grünes Rahmensymbol und Tooltip „Import XML“). In Schritt ② wird ein Messknoten unter dem Ordnersymbol "Objects" hinzugefügt (Rechtsklick auf "Objects" → "Instanz hinzufügen"). Um den hinzuzufügenden Messknoten zu konfigurieren, wird der dem UEIM zugeordnete Namespace ausgewählt, und die *TypeDefinition* wird festgelegt, die zur Abbildung eines Messknotens geeignet ist (siehe Schritt ③ *MeasurementType*). In Schritt ④ erhält der Messknoten einen eindeutigen Namen, um ihn einem Gerät zuzuordnen. Hierfür kann beispielsweise eine Betriebsmittelkennzeichnung mit dem Namen verknüpft werden. Nachdem der Messknoten hinzugefügt wurde, wird er in Schritt ⑤ unter "Objects" aufgelistet.

Die gemäß UEIM standardisierten hierarchisch untergeordneten Eigenschaften müssen anschließend auf Variablen eines SPS-Energiemanagement-Programms abgebildet werden. Dieser Vorgang kann ebenfalls, wie in Abbildung 12 dargestellt, mit Hilfe der Software „SiOme“ durchgeführt werden. Nach dem durchgeführten Mapping erfolgt eine automatische Überprüfung der Datentypen auf Übereinstimmung. Durch diese Überprüfung wird festgestellt, ob der Datentyp der Variable des SPS-Energiemanagement-Programms dem Datentyp des im Mapping assoziierten Merkmals des OPC UA-Informationsmodells übereinstimmt. Stimmt der Datentyp der Variable des Funktionsblocks mit dem Datentyp des importierten Merkmals der XML-NodeSet-Datei überein, wird dies durch ein grünes Kreissymbol angezeigt. Sind die Datentypen möglicherweise inkompatibel, wird ein oranges Kreissymbol angezeigt. Die Kompatibilität muss in diesem Fall manuell überprüft werden, da im Rahmen der OPC UA Spezifikation zusätzliche Datentypen definiert wurden und im Kontext der SPS-Programmentwicklung meist primitive Datentypen zur Anwendung kommen. Zum Beispiel enthält der Datentyp „Number“ aus der OPC UA Spezifikation eine Menge von Datentypen, die auch einen Integer-Datentyp wie er SPS-Programmen verwendet wird. Das Mapping würde in diesem Fall als zu überprüfen (orange) gekennzeichnet werden, obwohl eine Kompatibilität gegeben ist. Eindeutig inkompatible Datentypen werden rot gekennzeichnet.

Die im Rahmen des Vorhabens entwickelte XML-NodeSet-Datei beinhaltet die Semantik des UEIM und kann für einen aufwandsarmen Import in entsprechende Engineering-Umgebungen wie „SiOme“ genutzt werden. Die Energiedaten der Messstellen, die auf proprietären oder Energieprofil-basierten Semantiken beruhen, können im Mapping auf die UEIM-basierte OPC UA-Schnittstelle übertragen werden. Die Kompatibilität der Datentypen konnte mit Hilfe der Software „SiOme“ sowie zusätzlich manuell sichergestellt werden.

7.2.6 Implementierung des universellen Energieinformationsmodells mittels MQTT-Schnittstelle

Durchgeführt durch HsH.

Im Gegensatz zum Kommunikationssystem OPC UA Client/Server verfügt MQTT von Natur aus nicht über eine standardisierte Semantik. Wenn beispielsweise Geräte wie Energiezähler nur über eine MQTT-Schnittstelle verfügen, muss eine Lösung gefunden werden, um diese spezifischen Energiedaten auch im UEIM-Format bereitzustellen. Zur Lösung dieses Problems, kann eine sogenannte MQTT-to-OPC UA-Bridge [49] zur Anwendung kommen. Die Implementierung dieses Ansatzes wird in Abbildung 13 dargestellt.



Abbildung 12: Mapping der Energiedaten von einem SPS-Funktionsbaustein auf eine OPC UA-Schnittstelle in SiOme

Der Einsatz einer MQTT-to-OPC UA-Bridge kann die Bereitstellung von Energiedaten mit der Semantik des UEIM von MQTT-Geräten an Energiemanagement-Applikationen ermöglichen. Die Energiedaten, die von einem IIoT-Gerät (1) bereitgestellt werden, werden über die MQTT-Schnittstelle via publish-Befehl einem MQTT-Broker (2) zur Verfügung gestellt. Dieser übermittelt das Energiedaten-Telegramm zur MQTT-to-OPC-UA-Bridge (3), da dieser das entsprechende Topic mit einem subscribe-Befehl abonniert. Die übertragenen Messdaten im Payload müssen zusätzlich mit den semantischen Informationen des UEIM angereichert werden. Auf der MQTT-to-OPC-UA-Bridge (3) können die empfangenen semantischen Informationen verarbeitet werden, um die eingehenden Messinformationen im UEIM-Format auf eine OPC-UA-Schnittstelle abzubilden. Dadurch können die Energiedaten einer Energiemanagement-Applikation (5) zur Verfügung gestellt werden.

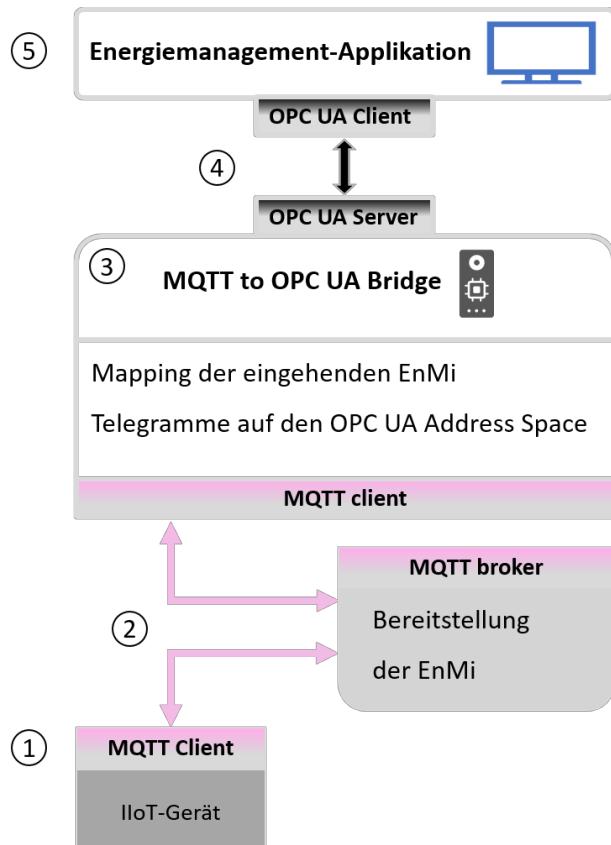


Abbildung 13: MQTT-to-OPC UA-Bridge, basierend auf [7]

Das Prinzip der MQTT-to-OPC-UA-Bridge wurde auf der Referenzplattform (siehe Kapitel 7.4) umgesetzt. Der Hardwareaufbau geht aus Abbildung 14 hervor. Die EnMi wurden ausgehend von einem Windows 11-PC via publish im JSON-Format einem Broker (Industrial Raspberry Pi „RevPi“) bereitgestellt. Die EnMi wurden dabei in Meta- und Nutzdaten-Telegramme aufgeteilt, sodass diese unabhängig voneinander versendet werden konnten. Die Umsetzung der MQTT-to-OPC-UA-Bridge erfolgte mittels einer handelsüblichen SPS „Siemens ET200SP“.

Zur automatischen Übertragung der EnMi aus den Meta- und Nutzdaten-Telegrammen auf die OPC UA-Schnittstelle wurde ein SPS-Programm entwickelt. Im SPS-Programm werden die Energiedaten mittels subscribe-Befehl vom Broker abgerufen, in Form eines BYTE-Arrays übertragen und anschließend verarbeitet. Dieser Verarbeitungsprozess wird in Abbildung 15 beschrieben und umfasst die Phasen: Filtern, Konvertieren, Extrahieren und Übertragen. In der Phase Filtern werden zunächst für die Interpretation der Energiedaten nicht relevante Telegrammbestandteile herausgefiltert, damit eine effiziente Verarbeitung stattfinden kann und die Zykluszeit der SPS möglichst gering gehalten werden kann. In der zweiten Phase „Konvertieren“ müssen die in dem Byte-Array enthaltenen Symbole in ein Zeichenkettenformat konvertiert werden, damit diese von den zeichenkettenverarbeitenden Funktionen als Parameter aufgenommen werden können. In Phase drei „Extrahieren“ werden die einzelnen Energiedaten extrahiert und entsprechenden Variablen zugewiesen. In der Phase „Übertragen“ werden die extrahierten Energiedaten dieser Variablen automatisch auf eine OPC UA-Schnittstelle übertragen, die nach der Semantik des universellen Informationsmodells aufgebaut ist. Die Realisierung des Verfahrens wurde anhand einer Gegenüberstellung der bereitgestellten MQTT-Telegramme und der auf der OPC UA-Schnittstelle abgebildeten EnMi erfolgreich verifiziert.

Zusammenfassend kann die Anwendung des Ansatzes einer MQTT-to-OPC-UA-Bridge mit einer SPS als umsetzbar betrachtet werden. Bei langen Metadaten-Telegrammen sind Filterfunktionen notwendig, da die Zykluszeit der SPS im Hinblick auf Zeichenkettenverarbeitung zu groß werden kann. Der Hintergrund ist, dass entsprechende Funktionen, die der Schlüsselwortsuche dienen, in der Entwicklungsumgebung in einer Schleife separat alle Symbole der MQTT-Telegramme betrachten. Dieser Suchprozess konnte, je nach Algorithmus, die Zykluszeit signifikant anwachsen lassen.

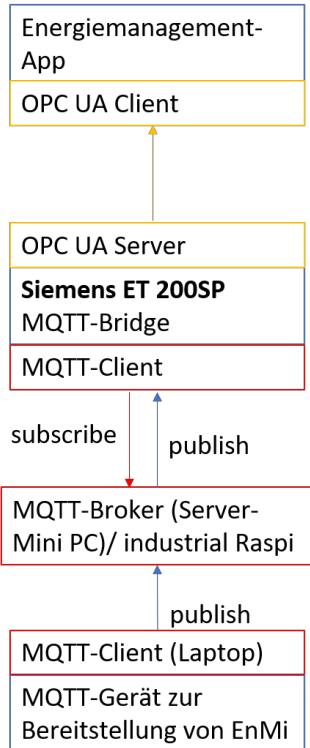


Abbildung 14: Umsetzung einer MQTT-to-OPC UA-Bridge auf der Referenzplattform

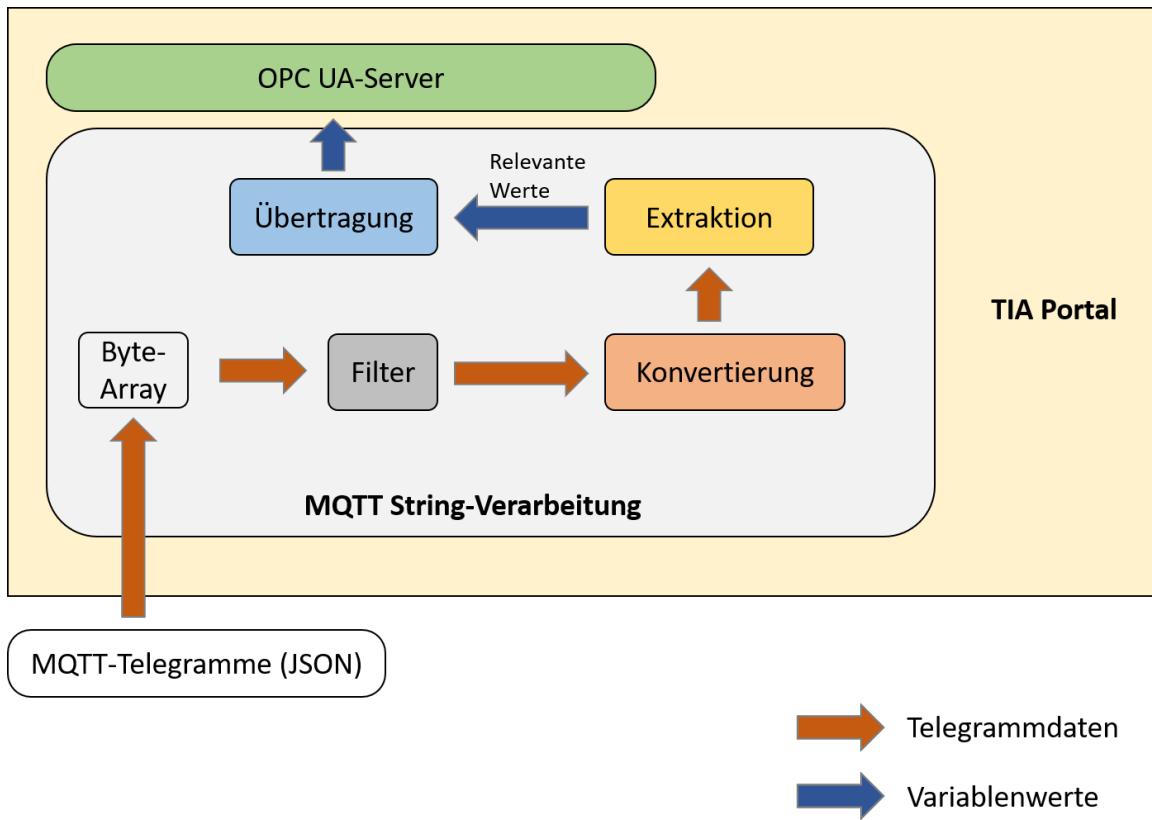


Abbildung 15: Analyse und Verarbeitung der Energiedaten im SPS-Programm

7.2.7 Entwicklung einer Energie-Monitoring-Anwendung

Durchgeführt durch HsH und HSU.

In Abbildung 16 Messknotenbeschreibung in OPC UA ist beispielhaft die semantisch einheitliche Beschreibung von Energiedaten von verschiedene Messknoten aufgezeigt. Es ist eindeutig zu erkennen, dass jede Messung die einheitliche Semantik des UEIM aufweist.

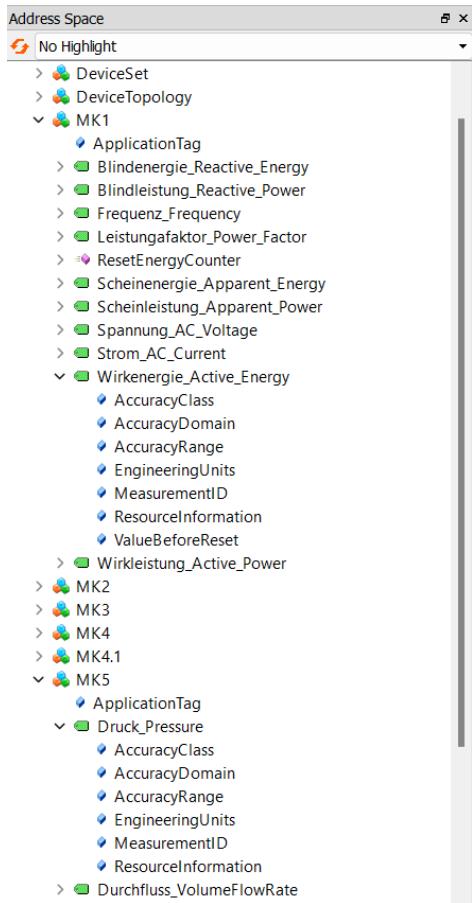


Abbildung 16 Messknotenbeschreibung in OPC UA

Um gemessene Energiedaten darstellen zu können, wurde die Energiemanagement-Applikation GridVis 9 [64] genutzt. In Abbildung 17 ist die Oberfläche von GridVis abgebildet. Die vier Graphen zeigen Energiedaten von zwei unterschiedlichen Messknoten. Durch die semantisch einheitliche Beschreibung ist es möglich in der Energiemanagement-Applikation den Engineering-Aufwand zu vermeiden, da eindeutige Informationen von den jeweiligen Messknoten vorliegen.

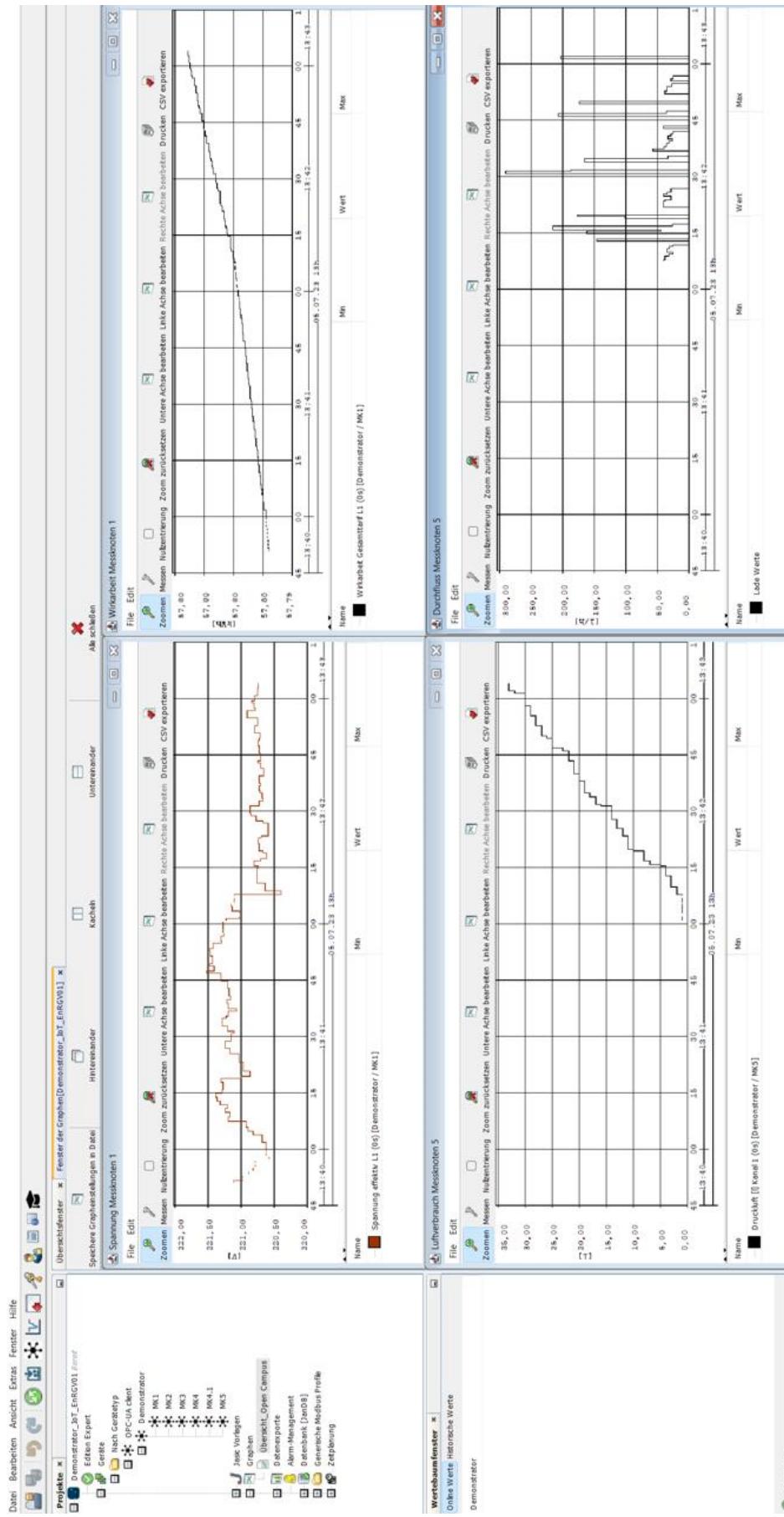


Abbildung 17: Graphische Darstellung der Messergebnisse

7.3 AP3, 4, 5: Energieschnittstellenentwicklung (IO-Link, OPC UA und MQTT)

Durchgeführt durch HsH und HSU.

In AP3, 4 und 5 sollten Schnittstellen für die IoT-Technologien IO-Link, OPC UA und MQTT entwickelt werden. Durch diese Schnittstellen sollte die Möglichkeit geschaffen werden, Energiedaten über ausgewählte IoT-Technologien zu übertragen.

Um diese Arbeitspakete erfolgreich abschließen zu können, wurde im Zeitraum des Vorhabens der Ansatz gewählt ein universelles Energieinformationsmodell zu entwickeln. Dieses Informationsmodell ermöglicht es, dass die Energiedaten verschiedener IoT-Technologien semantisch eindeutig interpretiert werden können, unabhängig davon welchen Ursprung diese Daten in einer industriellen Anlage haben. Durch das universelle Energieinformationsmodell können die geplanten Schnittstellen erschaffen werden. In Abbildung 18 wird aufgezeigt, wo die Schnittstellen verortet sind (rote gestrichelte Markierung) und wie diese durch das Energieinformationsmodell im industriellen Kommunikationsumfeld repräsentiert werden können.

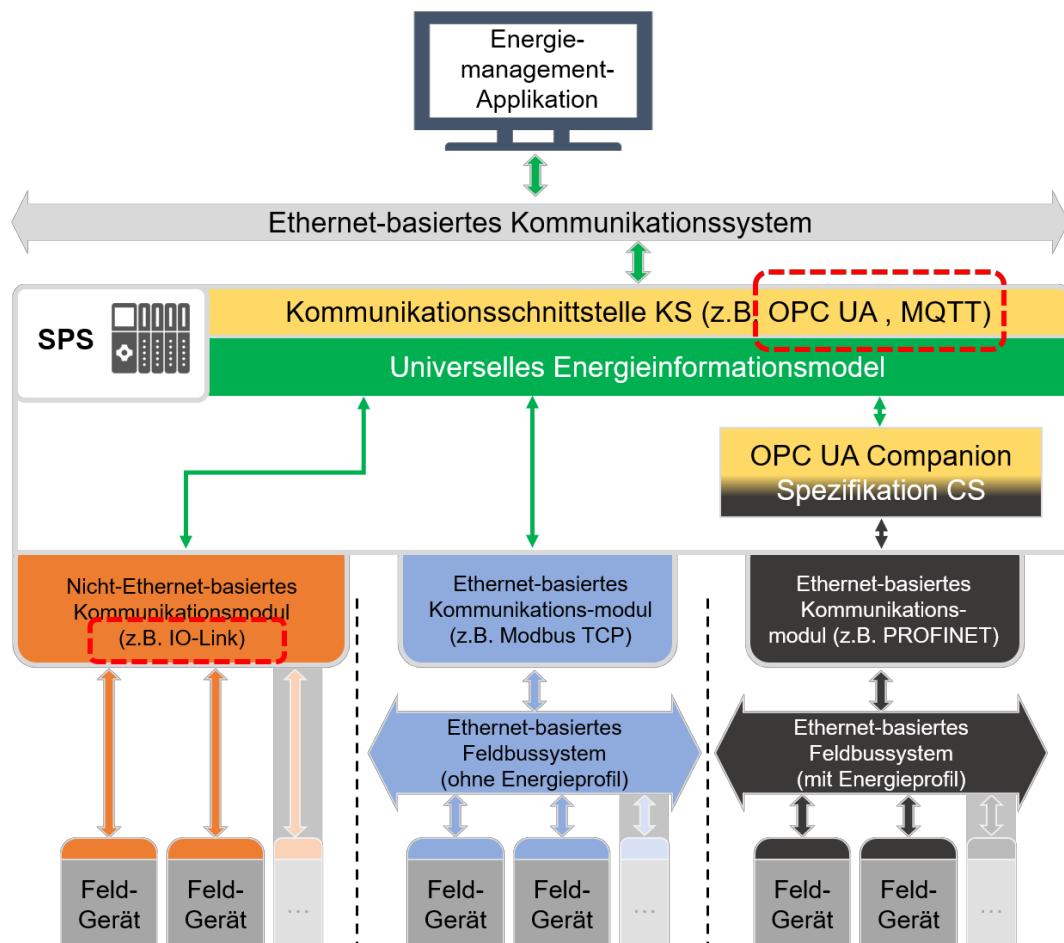


Abbildung 18 Energieinformationsmodell im industriellen Kommunikationsumfeld

Das Energieinformationsmodell ermöglicht, dass Energiedaten der Feldebene von Feldgeräten über die Schnittstelle IO-Link an die Steuerungsebene (SPS) übermittelt werden können. Von der

Steuerungsebenen können die Energiedaten über die IoT-Technologien OPC UA und MQTT an die überlagerte Betriebsleitebene gesendet werden, auf der die Energiemanagementapplikation zu finden ist.

7.4 AP6: Referenzplattform für die Protokolle OPC UA, MQTT und IO-Link

Durchgeführt durch HsH.

Für die praktische Erprobung und Validierung des entwickelten Energieinformationsmodells wurde eine Referenzplattform geplant und aufgebaut. Der Vorteil dabei ist, dass die Referenzplattform aus Teilelementen des geplanten Demonstrators besteht und somit die Übertragung der Ergebnisse von der Referenzplattform auf den Demonstrator wesentlich beschleunigt werden konnte. Zur Referenzplattform gehören zwei Mini-PCs (1) (2), ein Ethernet-Switch (3), eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) (4), ein Industrial Raspberry Pi (5) und ein intelligentes Netzteil (6) zur Bereitstellung von Energieinformationen. Diese Komponenten wurden auf einem Lochblech-Aufbau montiert, verdrahtet und über den Ethernet-Netzwerk-Switch (3) verbunden. Die Referenzplattform ist in Abbildung 19 dargestellt. Nach der Installation der Komponenten wurden diese in Betrieb genommen und eine erste Überprüfung des Energieinformationsmodells durchgeführt.

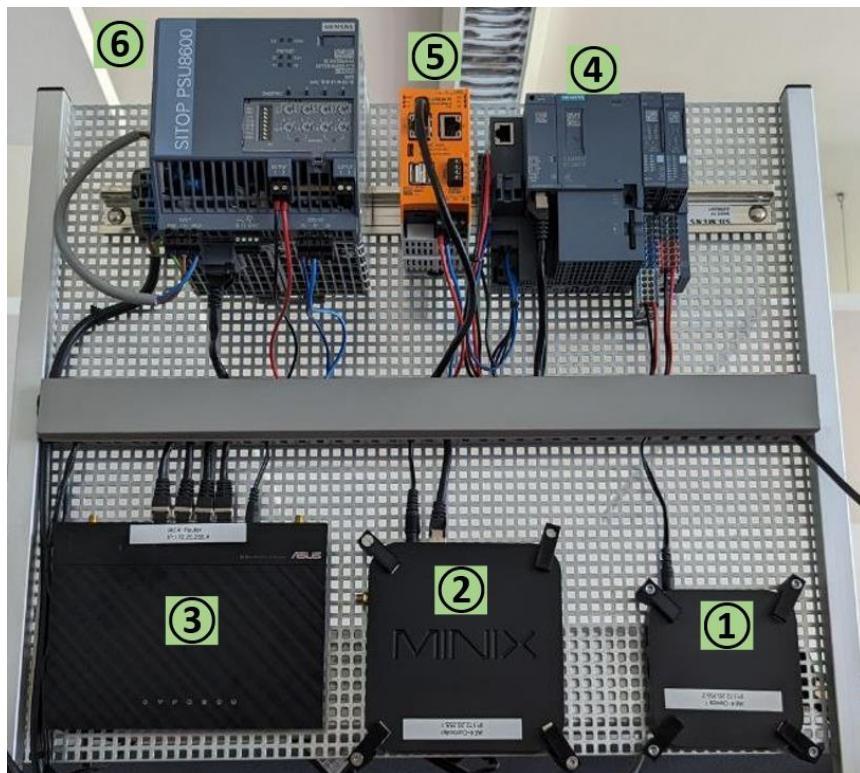


Abbildung 19 Aufbau der Referenzplattform

Test des Use Cases Ref1:

Übertragung von MQTT-basierten Energiedaten auf eine OPC UA-Schnittstelle

Um die Semantik des Energieinformationsmodells automatisch auf die Konfigurationsschnittstelle der OPC UA-Schnittstelle der SPS ④ zu übertragen, wurde eine NodeSet-Schema-Datei entwickelt und in das Konfigurationswerkzeug "SiOme" [62] der Firma Siemens importiert. Verschiedene Konfigurationen von Energieinformationen wurden zur Überprüfung angelegt. Auf der SPS wurden Literal-basierte Energieinformationen wie Ströme, Spannungen und Energiezählwerte angelegt, die automatisch auf die konfigurierte Schnittstelle des OPC UA-Servers der SPS übertragen werden konnten. Die bereitgestellten Energieinformationen konnten anschließend über den OPC UA-Client "UaExpert" [65] auf einem Windows 11-basierten Laptop ausgelesen und dargestellt werden. Weitere Informationen können Kapitel 7.2.6 entnommen werden.

Test des Use Cases Ref1:

Übertragung von Energiedaten auf einer SPS in ein MQTT-Telegramm

Zur direkten Bereitstellung von Energieinformationen über die MQTT-Schnittstelle der SPS ④ wurde zusätzlich ein SPS-Programm entwickelt, das die SPS befähigt, Energiemesswerttelegramme als MQTT-Client zu veröffentlichen (publish). Diese Telegramme wurden über den Broker (Industrial Raspberry Pi ⑤) an den als MQTT-Client fungierenden Mini-PC ② weitergeleitet und hinsichtlich der korrekten Abbildung der Semantik des entwickelten Energieinformationsmodells ausgewertet.

Der OPC UA-basierte Testaufbau bestätigte die automatische Anwendung der Semantik des entwickelten Energieinformationsmodells. Die Energieinformationen wurden in der erwarteten und standardisierten Semantik für den OPC UA-Client bereitgestellt. Es besteht auch die Möglichkeit, die Semantik des Modells auf Energie-MQTT-Telegramme anzuwenden. Von Seiten der Energiemanagement-Applikationen kann einfach und effizient auf die Energieinformationen zugegriffen werden, da sie immer in derselben Semantik vorliegen und schnell und eindeutig identifiziert werden können. Weitere Informationen können Kapitel 7.2.6 entnommen werden.

7.5 AP7: Demonstrator

Durchgeführt durch HsH und HSU.

Für die Möglichkeit der öffentlichen Darstellung der Ergebnisse des Vorhabens wurde im Zeitraum des Vorhabens ein Demonstrator geplant, konstruiert und aufgebaut. Der Aufbau des Demonstrators erfolgte in verschiedenen Schritten sukzessiv. Die nachfolgenden Unterkapitel geben einen Einblick von der Idee bis hin zum fertigen Demonstrator.

7.5.1 Entwicklung von Anwendungsfällen

Durchgeführt durch HsH und HSU.

Zum Beginn der Demonstrator-Planung wurde durch das Projektteam Anwendungsfälle erarbeitet, die sich dazu eignen Fachexperten und Interessierten die Problematik des Vorhabens auf einfache Art und Weise an einem Exponat näher zu bringen. Im Rahmen dieser Arbeiten wurden verschiedene Anwendungsfälle ausgearbeitet, von denen durch das Projektteam drei ausgewählt wurden. Als Auswahlkriterien dienten hierfür:

- Optik: Die Anwendungsfälle sollten schnell verständlich sein und durch optische Signale auf den Demonstrator aufmerksam machen.

- Haptik: Durch ein haptisches Erlebnis sollte der Besuch des Demonstrators einen bleibenden Eindruck hinterlassen und dem Besuchenden die Möglichkeit geben auf den Demonstrator einwirken zu können.
- Akustik: Mit Hilfe von akustischen Signalen sollte einerseits auf den Demonstrator aufmerksam gemacht werden und andererseits der individuelle Anwendungsfall hervorgehoben werden.
- Komplexität: Jeder Anwendungsfall sollte eine unterschiedliche Komplexität aufweisen, die aber innerhalb einer kurzen Einführung für den Besuchenden verständlich ist.
- Sicherheit: Jeder Anwendungsfall sollte die Sicherheit des Besuchenden nicht gefährden. Die Absicherung des Anwendungsfall sollte so einfach wie möglich sein.
- Energiebedarf: Jeder Anwendungsfall muss einen unterschiedlichen Energiebedarf haben, der durch technische Komponenten erfasst werden kann.

Mit Hilfe der oben genannten Kriterien wurden folgende Anwendungsfälle ausgewählt:

Anwendungsfall 1 (AW1) Antrieb mit Frequenzumrichter: Der erste Anwendungsfall wird durch einen Drehstromasynchronmotor mit Frequenzumrichter repräsentiert. Bei diesem Anwendungsfall wird eine mit einer Scheibenbremse versehene Achse durch den Elektromotor angetrieben und kann über eine handbetätigte Fahrradbremse gebremst werden. Durch das Bremsmoment steigt die Last auf den Motor, der somit mehr Energie zum Antreiben der Achse benötigt.

Anwendungsfall 2 (AW2) Linearantrieb mit Servoregler: Bei diesem Anwendungsfall wird ein elektrischer Linearmotor durch einen Servoregler in zwei Richtungen abwechselnd beschleunigt. Dieser Anwendungsfall zeichnet sich dadurch aus, dass der Energiebedarf des Antriebs nicht konstant ist, sondern sich mit der Beschleunigungsrichtung des Antriebs ändert.

Anwendungsfall 3 (AW3) Nicht-Elektrische Aktoren: Da im industriellen Umfeld neben den elektrischen Aktoren auch viele nicht-elektrische Aktoren eingesetzt werden, sollte der dritte Anwendungsfall nicht-elektrische Komponenten hervorheben. Durch die Verwendung von pneumatischen Antrieben bot dieser Anwendungsfall die Möglichkeit Energiebedarfe von verschiedenen nicht-elektrischen Aktoren aufzeigen zu können.

In Abbildung 20 sind die einzelnen Anwendungsfälle beispielhaft dargestellt.



Abbildung 20: Beispielhafte Darstellung der Anwendungsfälle

7.5.2 Erstellung eines Hardwarekonzepts

Durchgeführt durch HsH und HSU.

Nach der Auswahl der Anwendungsfälle wurde durch das Projektteam ein mögliches Hardwarekonzept erarbeitet. Das Hardwarekonzept diente einerseits dazu einen Überblick über nötige Hardware zu erlangen und wie diese in einem Netzwerk miteinander verschaltet ist. Andererseits konnte so die Bestellung der Komponenten des Demonstrators unterstützt werden. Darüber hinaus konnten durch das Hardwarekonzept die Schnittstellen der einzelnen Komponenten einfacher dargestellt werden.

In Abbildung 21 ist beispielhaft ein Stand des Hardwarekonzepts dargestellt.

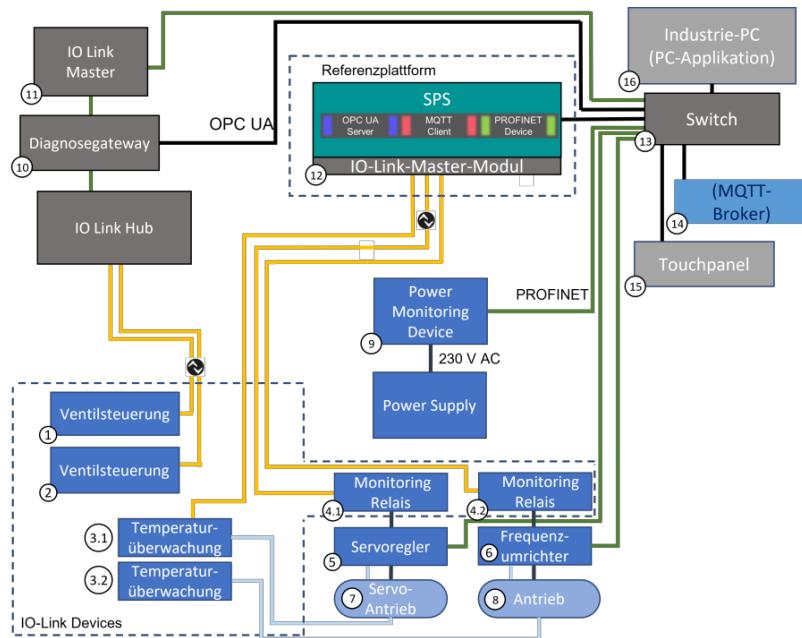


Abbildung 21: Hardwarekonzept

7.5.3 Komponenten Beschaffung

Durchgeführt durch HsH und HSU.

Auf Basis der Anwendungsfälle und dem Hardwarekonzept, konnte mit der Beschaffung der Komponenten für den Demonstrator begonnen werden. Teilweise wurden Komponenten durch

Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses bereitgestellt, die im Demonstrator verbaut werden konnten. Das Projektteam dankt an dieser Stelle den Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses für die großzügige Überlassung der Komponenten. Weiterhin wurden Komponenten am Markt beschafft.

Durch die angespannte Situation der Lieferketten im Zeitraum des Vorhabens kam es zu Verzögerung der Lieferung einzelner Komponenten. Das Projektteam informierte den projektbegleitenden Ausschuss frühzeitig über die Verzögerungen, um im Falle einer nicht lieferbaren Komponente eine vergleichbare Komponente beschaffen zu können oder eine Ausweichlösung zu erarbeiten.

7.5.4 Planung und Aufbau des Demonstrator-Grundrahmens

Durchgeführt durch HSU.

Nach Auslösung der Bestellung wurde mit der Planung und dem Aufbau des Demonstrator-Grundrahmens begonnen. Um den Demonstrator an verschiedenen Standorten zeigen zu können, musste dieser zum einen beweglich sein und zum anderen die Abmessungen von handelsüblichen Türen nicht überschreiten. Durch diese Anforderungen konnte eine erste Skizze des Grundrahmens angefertigt werden, die dann ausgearbeitet wurde. In Abbildung 22 ist die finale Skizze des Grundrahmens dargestellt. Nach Abschluss der Konstruktionsarbeiten wurde in der mechanischen Werkstatt der FE2 damit begonnen den Grundrahmen für den Demonstrator aufzubauen und diesen mit geeigneten Rollen zu versehen. Dieser erste Aufbau ist ebenfalls in Abbildung 22 dargestellt. Um mit der Platzierung der Komponenten beginnen zu können, wurden provisorische Holzplatten am Grundrahmen angebracht, an denen einzelne Komponenten festgeschraubt werden konnten.

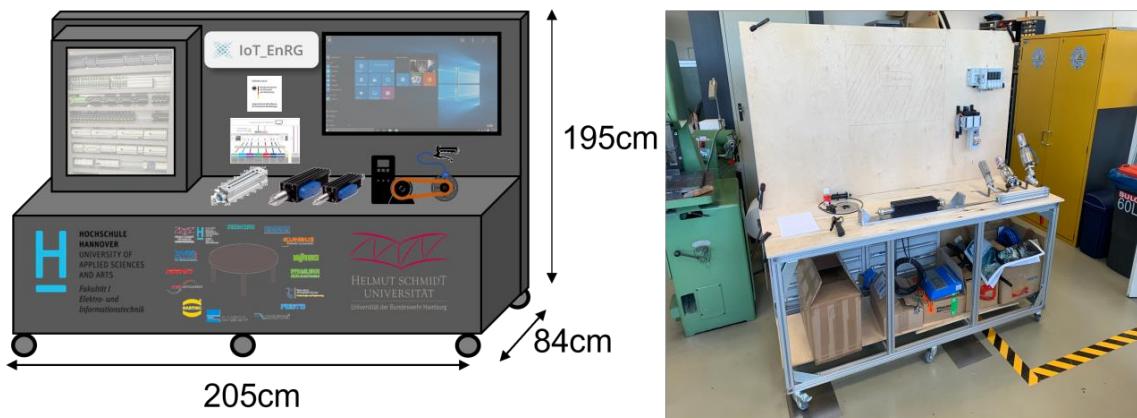


Abbildung 22: Aufbau des Demonstrator-Grundrahmens

7.5.5 Aufbau der Anwendungsfälle

Durchgeführt durch HsH und HSU.

Neben dem Grundrahmen wurde durch die mechanische Werkstatt der FE2 damit begonnen die einzelnen Anwendungsfälle aufzubauen. Im Rahmen der Konstruktionsarbeiten wurden für jeden Anwendungsfall ebenfalls erst Skizzen erstellt, die anschließend als Basis der zu fertigenden technischen Ausführungen dienten. In der nachfolgenden Abbildung 23 sind erste Stände der technischen Ausführungen der Anwendungsfälle 1, 2 und 3 ersichtlich.

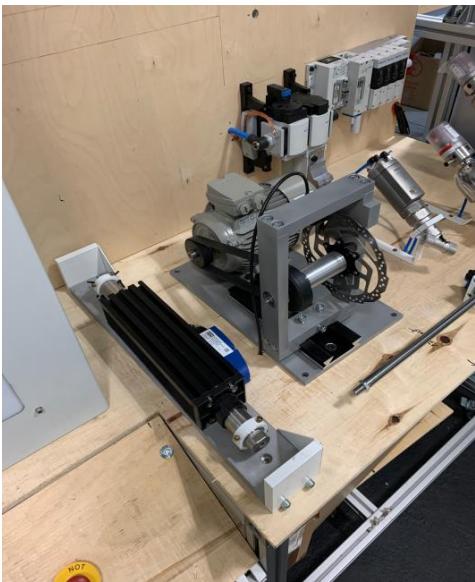


Abbildung 23: Aufbau der Anwendungsfälle 1 und 2

7.5.6 Schaltschrankplanung und -aufbau

Durchgeführt durch HsH und HSU.

Da der Demonstrator nicht nur mechanische Komponenten, sondern auch einen Großteil elektrischer Komponenten beinhaltet, musste für den Demonstrator ein Schaltschrank geplant und aufgebaut werden. Durch das Projektteam wurde zuerst damit begonnen ein Schaltschranklayout zu entwerfen, welches alle nötigen Schaltschrankkomponenten berücksichtigt. In diesem Layout wurden die elektrischen Komponenten und deren Abmessungen, sowie weitere Zusatzkomponenten (z. B. Kabelkanäle, Hutschienen) eingetragen, um die Dimensionen des benötigten Schaltschranks bestimmen zu können. Auf Basis dieser Planung konnte für den Schaltschrank ebenfalls eine Beschaffung ausgelöst werden. Nachdem die Schaltschrankkomponenten (Montageplatte/Schaltschrankgehäuse) eingetroffen waren, wurde mit dem Aufbau des Schaltschranks begonnen. Auf der Montageplatte des Schaltschranks wurden zuerst alle elektrischen Komponenten sowie die Zusatzkomponenten positioniert und anschließend verschraubt. Im nächsten Schritt wurde mit der schaltschrankinternen Verdrahtung begonnen. Neben den Montagearbeiten auf der Montageplatte musste das Schaltschrankgehäuse mit diversen Bohrungen zur Durchführung von Kabeln versehen werden. Außerdem wurde in die Schaltschranktür ein Ausbruch gefräst, der mit einer Kunststoffscheibe versehen wurde, um die Sicht auf die elektrischen Komponenten im Demonstrator gewährleisten zu können.

In Abbildung 24 ist der erste Entwurf des Schaltschranks zu sehen. Abbildung 25 zeigt, die ersten Positionierungsarbeiten der elektrischen Komponenten auf der Montageplatte des Schaltschranks.

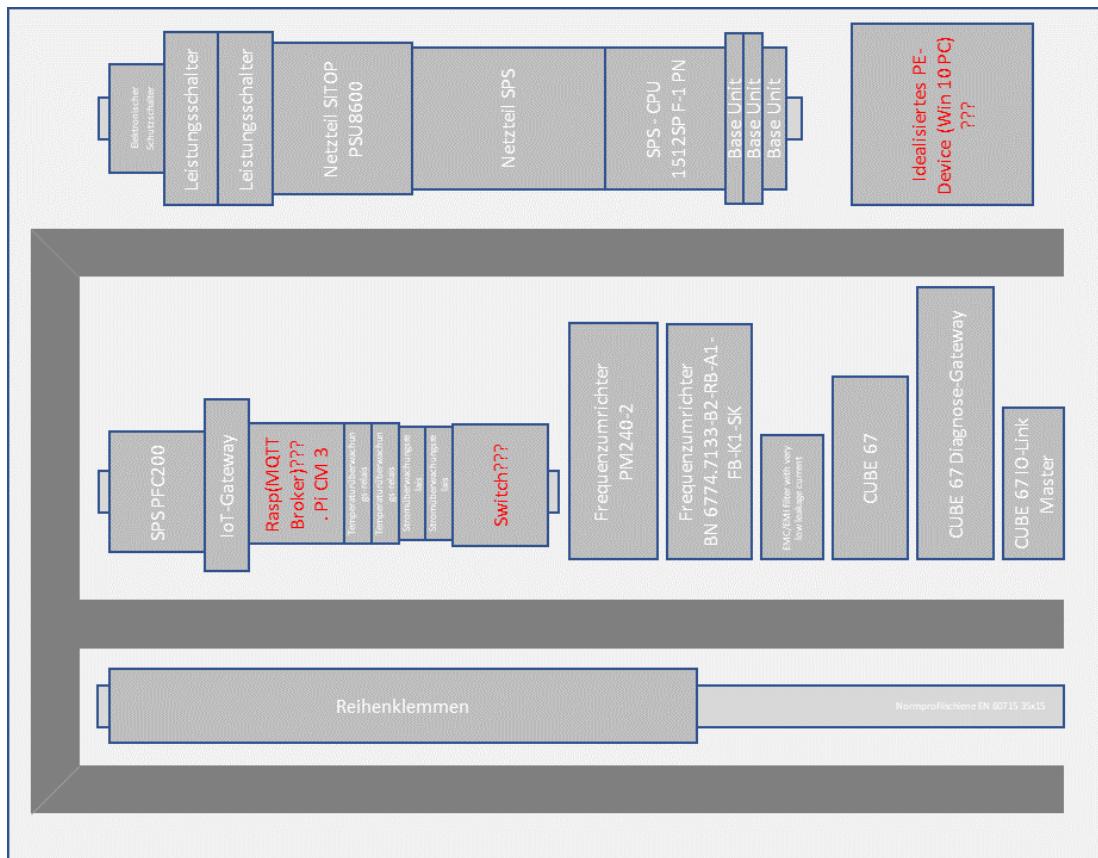


Abbildung 24 Planung und Aufbau des Schaltschranks



Abbildung 25 Aufbau der Schaltschrank-Montageplatte

7.5.7 Fertigstellung und Programmierung des Demonstrators

Durchgeführt durch HsH und HSU.

Die vorangegangenen Tätigkeiten bildeten die Basis für die Fertigstellung und die Programmierung des Demonstrators. Um den Zeitrahmen für den Aufbau des Demonstrators nicht zu überschreiten, erfolgte die Verkleidung des Gestells parallel zur Programmierung der Demonstrator-Komponenten in einer Testumgebung.

Testumgebung zur Programmierung

Damit mit der Programmierung des Demonstrators begonnen werden konnte, wurden die fertiggestellte Montageplatte des Schaltschranks und die sich darauf befindlichen elektrischen Komponenten mit den Anwendungsfällen in Form einer Testumgebung verdrahtet. Durch diesen Aufbau war es möglich die einzelne Anwendungsfälle und Komponenten des Schaltschranks auf ihre Funktionsfähigkeit hin zu testen und mit der Programmierung zu beginnen. Durch das Projektteam wurde die nötige Engineering-Software installiert und das Programm für den Betrieb des Demonstrators erstellt. In Abbildung 26 ist die aufgebaute Testumgebung zu sehen.

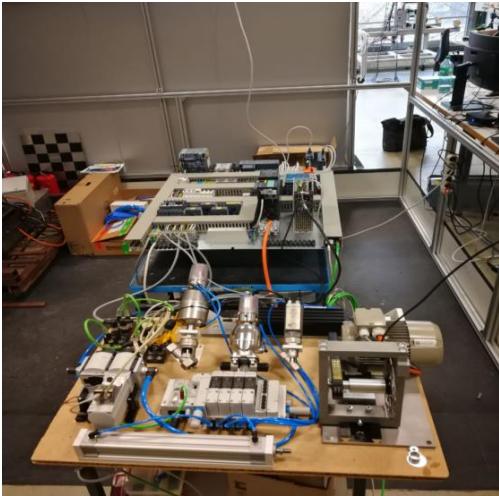


Abbildung 26 Aufbau der Demonstrator-Testumgebung

Verkleidung des Demonstrator-Gestells

Für die Arbeiten an der Verkleidung des Demonstrators wurde in der hausinternen Tischlerei der FE2 das Verkleidungsmaterial ausgewählt und die Ausführung der Demonstrator-Verkleidung mit den Mitarbeitern abgestimmt.

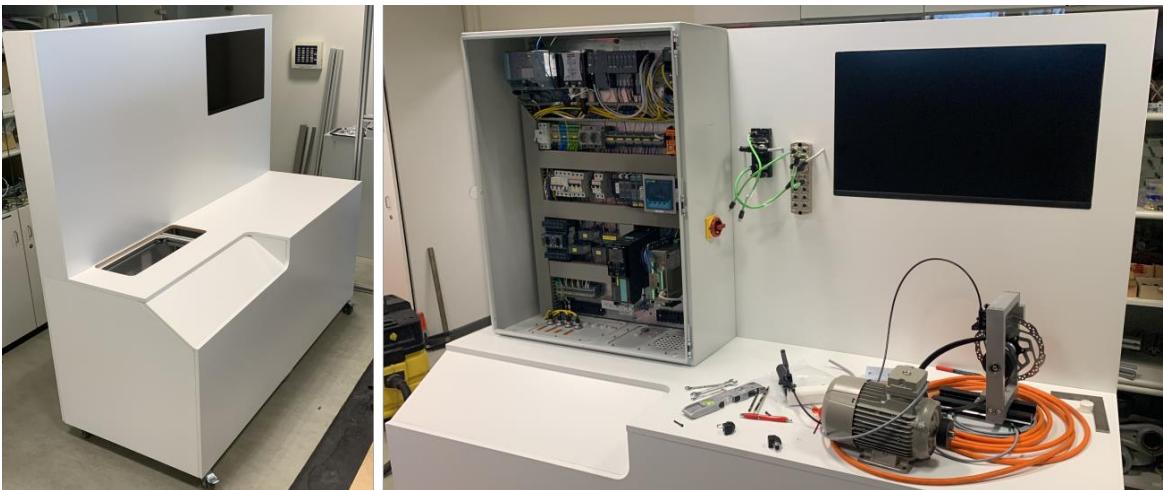


Abbildung 27 Verkleidetes Demonstrator-Gestell (links) und Befestigung erster Komponenten am Demonstrator (rechts)

Nach Fertigstellung der Demonstrator-Verkleidung (siehe Abbildung 27) wurde damit begonnen den Schaltschrank zu komplettieren, indem das Schaltschrankgehäuse auf dem Demonstrator befestigt und anschließend die Montageplatte in dem Gehäuse verschraubt wurde. Darüber hinaus wurden die technischen Ausführungen der Anwendungsfälle auf dem Demonstrator platziert, positioniert und ebenfalls verschraubt. Im nächsten Schritt wurde damit begonnen, die Anwendungsfälle nacheinander mit den Komponenten des Schaltschranks zu verdrahten. Neben diesen Tätigkeiten wurde zusätzlich noch ein Touchpanel in die Oberfläche eingelassen und mit dem Schaltschrank verbunden. Dieses Touchpanel kann als Mensch-Maschine-Schnittstelle genutzt werden und bietet die Möglichkeit den Demonstrator per Handbedienung zu steuern.

Nachdem diese Arbeiten abgeschlossen waren, wurde das Dashboard für die Darstellung der Energiedaten auf dem Bildschirm des Demonstrators erstellt. Da das Dashboard den aktuellen Energiebedarf darstellen soll, war es wichtig ein passendes und leicht verständliches Design auszuwählen.

Der letzte Schritt der Fertigstellung bestand darin, die Oberflächen passend zu gestalten. Durch das Projektteam wurden daher Aufkleber ausgewählt, durch die es ersichtlich ist, dass der Demonstrator das Produkt eines öffentlich geförderten Vorhabens ist und mehrere Unternehmen sowie Forschungseinrichtungen an dem Vorhaben beteiligt waren.

Der voll funktionsfähige Demonstrator zeigt, dass das Arbeitspaket 8 erfolgreich abgeschlossen werden konnte. In der nachfolgenden Abbildung 28 ist der funktionsfähige Demonstrator in Gänze dargestellt.

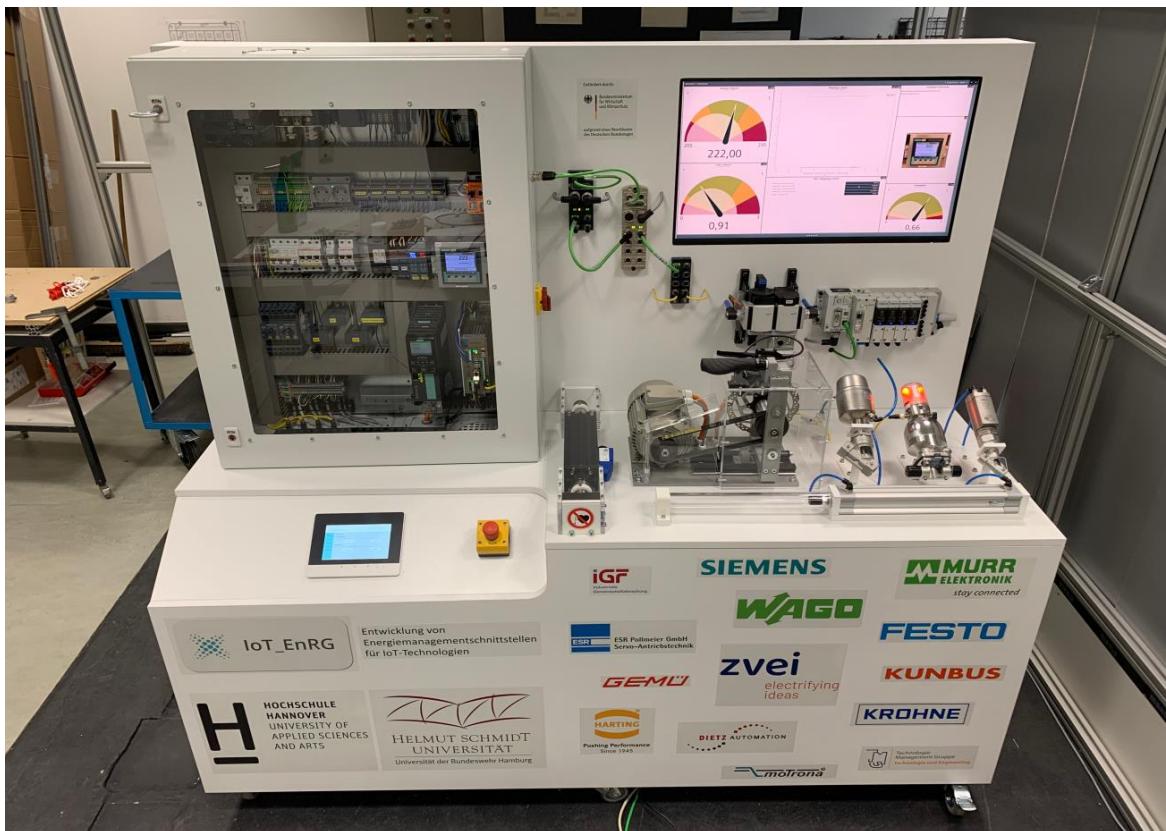


Abbildung 28 Funktionsfähiger Demonstrator kurz vor dem Versand zur Hannover-Messe 2023

7.6 AP8: Tests, Review, Anpassungen

Durchgeführt durch HsH und HSU.

Das Arbeitspaket 8 "Tests, Review, Anpassungen" beschreibt die iterative Verifikation und Anpassung des universellen Energieinformationsmodells im Vorhaben. In diesem Kontext werden die Funktionalität, die Qualität und die erbrachte Leistung im Vorhaben überprüft und sichergestellt.

Das Hauptziel von Arbeitspaket 8 bestand darin, umfangreiche Tests durchzuführen, um die Leistungsfähigkeit, Stabilität und Benutzerfreundlichkeit des Projekts zu überprüfen. Darüber hinaus wurden Reviews von Experten aus themenspezifischen Arbeitskreisen, dem projektbegleitenden Ausschuss und weiteren Stakeholdern durchgeführt, um wertvolles Feedback zu erhalten. Basierend auf den Testergebnissen und dem Feedback wurden anschließend Anpassungen und Optimierungen vorgenommen, um die Qualität und Anwendbarkeit des universellen Energieinformationsmodells zu verbessern.

Es wurden umfangreiche Tests durchgeführt, um verschiedene Aspekte des universellen Energieinformationsmodells zu überprüfen. Dies umfasst funktionale Tests und Benutzerfreundlichkeitstests. Die gesammelten Testergebnisse wurden analysiert und bewertet. Es wurden sowohl die erreichten Erfolge als auch eventuell aufgetretene Probleme, Fehler oder Verbesserungspotenziale identifiziert. Diese Bewertung diente als Grundlage für die weiteren Schritte und Anpassungen. Die Ergebnisse der Tests wurden dokumentiert, um eine genaue Auswertung und Bewertung zu ermöglichen und gemeinsam mit Experten für festgestellte Mängel oder Verbesserungspotenziale einen Optimierungsvorschlag zu erarbeiten.

Basierend auf den Testergebnissen und dem erhaltenen Feedback wurden Anpassungen und Optimierungen am universellen Energieinformationsmodell vorgenommen. Dies umfasste die Behebung von Fehlern, die Implementierung von Verbesserungsvorschlägen und die Optimierung der Benutzererfahrung. Alle vorgenommenen Anpassungen wurden dokumentiert.

Das Arbeitspaket 8 führte zu wichtigen Ergebnissen für das Vorhaben. Die durchgeföhrten Anpassungen haben dazu beigetragen, die Qualität der Projektergebnisse zu verbessern. Zusammenfassend liefert Arbeitspaket 8 wertvolle Ergebnisse wie umfangreiche Testergebnisse, eine Bewertung der Leistungsfähigkeit, der Anwendbarkeit in der Praxis und der Benutzerfreundlichkeit sowie eine kontinuierliche Überwachung und Optimierung der Entwicklungsarbeiten am universellen Energieinformationsmodell. Die vorgenommenen Anpassungen und Optimierungen haben dazu beigetragen, die Qualität und Effektivität des Projekts weiter zu steigern.

7.7 AP9: Projektmanagement, Dokumentation und Veröffentlichungen

Durchgeführt durch HsH und HSU.

Das Arbeitspaket 9 "Dokumentation und Veröffentlichung" ist ein elementarer Bestandteil des Vorhabens und dient dazu, die Ergebnisse und Erkenntnisse angemessen zu dokumentieren und diese den teilnehmenden Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses zu Verfügung zu stellen. Darüber hinaus dienten Veröffentlichungen dazu die Ergebnisse und Erkenntnisse des Vorhabens der Öffentlichkeit zugänglich zu machen. In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Aktivitäten und Maßnahmen beschrieben, die im Rahmen dieses Arbeitspaketes durchgeführt wurden.

Es wurde eine kontinuierliche Dokumentation der Arbeitsfortschritte in Form von regelmäßigen Statusberichten, Protokollen und Arbeitsnotizen durchgeführt. Diese Dokumente enthalten Informationen über die erreichten Meilensteine, die erzielten Ergebnisse, auftretende Herausforderungen und die ergriffenen Maßnahmen zur Lösung dieser Herausforderungen.

Um einen Überblick über die Arbeitspakete, die Meilensteine und den Verlauf des Vorhabens zu erlangen, wurde den teilnehmenden Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses mit jeder Sitzung ein Arbeitsdiagramm in Form eines Gantt-Diagramms ausgehändigt. Das Arbeitsdiagramm wurde fortlaufend aktualisiert, um immer auf dem neusten Stand zu sein. In Abbildung 29 ist das Arbeitsdiagramm zum Abschluss des Vorhabens dargestellt. Trotz Verzögerungen im Projekt (z. B. verspätete Bauteilverfügbarkeit) konnten alle Meilensteine im Zeitraum des Vorhabens erreicht werden.

Arbeitsdiagramm zum Forschungsvorhaben IoT EnRG

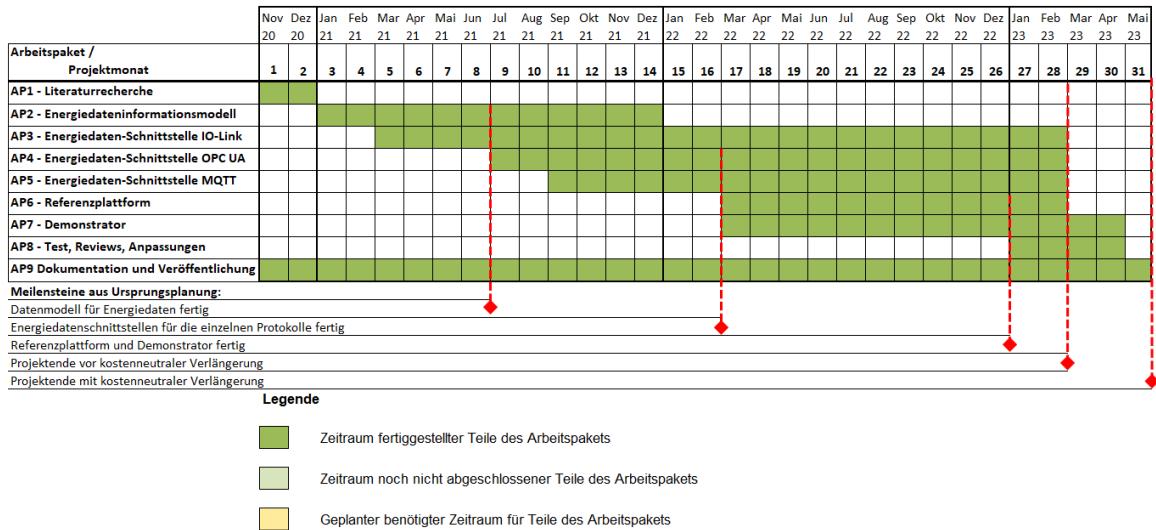


Abbildung 29 Arbeitsdiagramm zum Projektabschluss

Die gesammelten Informationen und Fortschritte des Vorhabens wurde in einer umfassenden Projektdokumentation festgehalten. Die Dokumentation wurde in einem Cloudverzeichnis gespeichert und den Unternehmen im PBA zur Verfügung gestellt. Die Dokumentation umfasst eine detaillierte Beschreibung des Projekthintergrunds, der Ziele, der Methodik, der verwendeten Ressourcen, der erreichten Ergebnisse und der gewonnenen Erkenntnisse. Sie bietet einen umfassenden Überblick über den gesamten Projektablauf und stellt sicher, dass alle wichtigen Informationen für zukünftige Referenz und Nutzung dokumentiert sind. Durch die Nutzung einer Cloud konnte sichergestellt werden, dass alle Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses einen permanenten Zugang zu der Dokumentation hatten.

Qualitätssicherung der Projektdokumentation: Um sicherzustellen, dass die erstellte Projektdokumentation von hoher Qualität ist, wurden interne Überprüfungen, Überarbeitungen und Korrekturen im Rahmen eines Review-Prozesses von FE1 und FE2 durchgeführt. Es wurden Feedback und Inputs von verschiedenen Teammitgliedern eingeholt, um sicherzustellen, dass alle relevanten Aspekte des Projekts angemessen abgedeckt sind und die Dokumentation präzise und verständlich ist.

Veröffentlichung: Die dokumentierten Ergebnisse des Vorhabens wurden durch Veröffentlichung wissenschaftlichen Experten und der breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht (siehe Abschnitt 6). Es wurden geeignete Plattformen, wie z. B. eine Projektwebsite, Fachzeitschriften, Konferenzen und Messeauftritte identifiziert, um die Dokumentation einem breiteren Publikum zugänglich zu machen. Die Veröffentlichungen erfolgten sowohl in gedruckter Form als auch in

digitaler Form, um eine maximale Reichweite und Zugänglichkeit zu gewährleisten. Durch die Veröffentlichungen hatten externe Experten die Möglichkeit Feedback zu den Projekterkenntnissen zu geben umso den Wert der Ergebnisse weiter zu verbessern.

Die Dokumentation des Vorhabens dient als wertvolles Nachschlagewerk für zukünftige Vorhaben und ermöglicht anderen Fachleuten und Interessierten, von den gemachten Erfahrungen zu lernen und die erzielten Fortschritte zu verstehen.

8 Schlusswort

Trotz der Herausforderungen durch die Beeinträchtigungen der Corona Pandemie und verzögerten Bauteillieferungen konnte das Vorhaben IoT_EnRG in Summe erfolgreich abgeschlossen werden. Mit Hilfe der Referenzplattform und des Demonstrators können die Ergebnisse des Vorhabens der Öffentlichkeit an verschiedenen Standorten (Hannover, Hamburg) vorgeführt werden. Durch Aushändigung der Ergebnisse des Vorhabens an die Joint Working Group „Power Consumption Management“ werden diese der Standardisierung zugeführt und können somit in Zukunft auch in industriellen Anwendungen genutzt werden. Die Forschungseinrichtungen danken den Unternehmen des PBA für die Unterstützung der Arbeiten durch Reviews und durch die Bereitstellung von zahlreichen Komponenten für den Demonstrator.

9 Schlusswort von Prof. Dr. Karl-Heinz Niemann und Prof. Dr. Alexander Fay

Im Jahr 2018 haben wir gemeinsam diskutiert, dass eine einfache und aufwandsarme Erfassung von Energiedaten in Produktionsanlagen der Schlüssel zu einer verbesserten Energieeffizienz sein wird. Mitte 2018 haben wir die Idee dann erstmalig der Forschungsgemeinschaft Automation des ZVEI vorgestellt und sind sofort auf eine positive Resonanz gestoßen. Es hat dann noch bis zum 01.09.2020 gedauert, bis das Projekt mit zwei Mitarbeitern, einer in Hannover und einer in Hamburg, starten konnte. Die Corona-Krise und der damit verbundene Mangel an Komponenten hat das Projekt stark behindert. Umso erfreulicher war es für uns, dass auf der Hannover Messe 2023 das Projektergebnis in Form eines Demonstrators der Öffentlichkeit vorgestellt werden konnte. Die Verwertung der Ergebnisse nach Projektende ist allen Forschenden immer ein besonderes Anliegen. Das ist in diesem Projekt sehr gut gelungen. Gegen Ende des Projektes, im Herbst 2022, bildete sich eine Joint-Working-Group (JWG) „Energy Consumption“ mit Vertretern aus VDMA, OPC Foundation, PROFIBUS Nutzerorganisation und ODVA. Schnell wurde klar, dass diese Arbeitsgruppe genau die Ziele verfolgte, welche in unserem Projekt IoT_EnRG adressiert und schon weitestgehend bearbeitet wurden. Daher konnten wir die Ergebnisse unseres Projektes in die Arbeit dieser Gruppe zeitnah einspeisen. Innerhalb eines sehr kurzen Zeitraums ist dann auf der Basis der Vorarbeiten in der JWG der Entwurf einer OPC UA Companion Spezifikation entstanden. Nur bei wenigen Forschungsprojekten gelingt es, dass die Ergebnisse zum rechten Zeitpunkt passgenau auf den Bedarf der Industrie treffen. Es freut uns, dass wir mit den beteiligten Mitarbeitern und mit der Unterstützung der Firmen im projektbegleitenden Ausschuss und der FG-Automation einen Beitrag für eine aufwandsarme Energiedatenerfassung leisten konnten.

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übermittlung von Energiedaten mittels des konventionellen Vorgehens	7
Abbildung 2: Universelles Energieinformationsmodell zur Übertragung von semantisch einheitlichen Energiedaten	8
Abbildung 3: Ausführungen des technischen Energiemanagements, basierend auf [34]	23
Abbildung 4: Bereitstellung der Energieinformationen aus der Feldebene, basierend auf [7]....	24
Abbildung 5: Bereitstellung der Energiemanagement-Informationen an die Energiemanagement-Applikation, basierend auf [7]	25
Abbildung 6: Vergleich der Semantiken der Energieprofile, basierend auf [7].....	27
Abbildung 7: Vorgehen bei der Entwicklung des UEIM.....	29
Abbildung 8: Gruppierung der Anforderungen an ein UEIM, basierend auf [4].....	32
Abbildung 9: Modellierung des universellen Energieinformationsmodells	37
Abbildung 10: Modellierung von Interfaces	40
Abbildung 11: Anwendung der UEIM OPC UA Companion Specification in SiOME, übernommen aus [62]	43
Abbildung 12: Mapping der Energiedaten von einem SPS-Funktionsbaustein auf eine OPC UA-Schnittstelle in SiOme	45
Abbildung 13: MQTT-to-OPC UA-Bridge, basierend auf [7].....	46
Abbildung 14: Umsetzung einer MQTT-to-OPC UA-Bridge auf der Referenzplattform.....	47
Abbildung 15: Analyse und Verarbeitung der Energiedaten im SPS-Programm	48

Abbildung 16 Messknotenbeschreibung in OPC UA.....	49
Abbildung 17: Graphische Darstellung der Messergebnisse.....	50
Abbildung 18 Energieinformationsmodell im industriellen Kommunikationsumfeld	51
Abbildung 19 Aufbau der Referenzplattform	52
Abbildung 20: Beispielhafte Darstellung der Anwendungsfälle	55
Abbildung 21: Hardwarekonzept.....	55
Abbildung 22: Aufbau des Demonstrator Grundrahmens.....	56
Abbildung 23: Aufbau der Anwendungsfälle 1 und 2	57
Abbildung 24 Planung und Aufbau des Schaltschranks.....	58
Abbildung 25 Aufbau der Schaltschrank-Montageplatte	59
Abbildung 26 Aufbau der Demonstrator-Testumgebung	60
Abbildung 27 Verkleidetes Demonstrator-Gestell (links) und Befestigung erster Komponenten am Demonstrator (links)	60
Abbildung 28 Funktionsfähiger Demonstrator kurz vor dem Versand zur Hannover-Messe 2023	61
Abbildung 29 Arbeitsdiagramm zum Projektabschluss	63

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Ergebnistransfer zum PA	12
Tabelle 2 Umsetzung der Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit	12
Tabelle 3 Umsetzung der Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens	15
Tabelle 4: Persona-Profil Systemkonfigurator für Prozessleitebene und MES	30
Tabelle 5: Gruppierung der Personas, übernommen aus [5]	31
Tabelle 6: Anforderungen an ein UEIM, basierend auf [4]	32
Tabelle 7: Vergleich der Energieprofile	35
Tabelle 8: Aufbau des Containers für Messgrößenerkennungen	39
Tabelle 9: Definition von Interfaces	41

12 Anhang

Persona-Profile:

Arbeitsrolle	Gerätehersteller*i für Feldgeräte
Kenntnisse	<ul style="list-style-type: none">• Normen und Richtlinien• Kenntnisse über die eigenen Gerätschaften (Geräte aus dem Bereich der Aktorik/ Sensorik wie z. B. Frequenzumrichter, Motorschutzschalter mit integrierter Strommessung)• Eigene Energiebedarfe (Nennbedarfe der Geräte)• Implementierung der genutzten Kommunikationsschnittstellen (Protokolle und Energieprofile)
Ziele	<ul style="list-style-type: none">• Möglichst geringer Engineering-Aufwand bei der Inbetriebnahme/ Wartung des Geräts• Einfache Handhabung für den Kunden• Bevorzugt die Orientierung an bestehenden Standards (Energieprofile, Companion Specifications, etc.)
Arbeitsprozesse	<ul style="list-style-type: none">• Konzeption und Entwurf des Geräts• Produktion des Geräts• Geräteprüfung (Qualitätsmanagement)• Erstellung und Herausgabe einer Betriebsanleitung• Einbringen/ implementieren von bestehenden Normen und Standards in die eigene Entwicklung
Wünsche	<ul style="list-style-type: none">• Anforderungen der Kunden erfüllen• Innovative Produkte liefern• Produktionskosten senken• Herstellung eines qualitativ hochwertigen Produkts

Arbeitsrolle	Entwicklungsingenieur*in für Produktionsanlagen
Kenntnisse	<ul style="list-style-type: none">• Infrastruktur einer Produktionsanlage• Kommunikationsschnittstellen der eingesetzten Geräte (Protokolle und Energieprofile)• Bestehende und am Markt etablierte Standards (Energieprofile, Companion Specifications, etc.)
Ziele	<ul style="list-style-type: none">• Planung einer effizienten Produktionsanlage• Sicherstellung der Kompatibilität der Geräte und Systeme
Arbeitsprozesse	<ul style="list-style-type: none">• Planung von zu errichtenden Anlagen• Erweiterung und/ oder Erneuerung von Bestandsanlagen• Auswahl der neu in die Anlage einzubringenden Geräte und Komponenten
Wünsche	<ul style="list-style-type: none">• Reduzierter Implementierungsaufwand bei der Anlagenneuerrichtung/ -erweiterung• Aufwandsarme Produktrecherche• Zugriff auf möglichst wenige Dokumentationen zur Planung

Arbeitsrolle	Programm-Entwickler*in für Edge-Devices und SPSen
Kenntnisse	<ul style="list-style-type: none"> • Erfahrung im Umgang mit den eingesetzten Entwicklungsumgebungen • Kenntnisse bei der Implementierung von Kommunikationsbausteinen zur Geräteanbindung (z. B. mittels Anwendung von Energieprofilen) • Edge-Device-/ SPS-Programmentwicklung • Hardwarekonfiguration • EnMi-Mapping auf dem Edge-Device/ auf der SPS
Ziele	<ul style="list-style-type: none"> • Edge-Device- oder SPS-Programm soll die Anforderungen erfüllen, die im Lastenheftes des Auftraggebers festgehalten sind • Effiziente Programmerstellung
Arbeitsprozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Erstellung von Edge-Device- oder SPS-Programmen • Änderung von Edge-Device- oder SPS-Programmen • Inbetriebnahme • Fehlersuche und Diagnose
Wünsche	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzierung des zu erbringenden Engineering-Aufwandes • Zugriff auf möglichst wenige Geräte-Dokumentationen und -Handbücher zur Planung/ Umsetzung

Arbeitsrolle	Systemkonfigurator*in für Prozessleitebene und MES
Kenntnisse	<ul style="list-style-type: none"> • Erfahrung im Umgang mit den eingesetzten Entwicklungsumgebungen • Kenntnisse über Diagrammtypen wie Sankey-Diagramme • Kenntnisse über die Erstellung von Diagrammen und die Einbindung von Energiemanagement-Informationen • Kenntnisse über die Semantik eingesetzter Energieprofil-basierter OPC UA Companion Specifications
Ziele	<ul style="list-style-type: none"> • Energie-Monitoring-Systeme soll die Anforderungen erfüllen, die im Lastenheftes des Auftraggebers festgehalten sind • Effiziente Programmerstellung
Arbeitsprozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Ermittlung der in dem Energie-Monitoring-System darzustellenden EnMi an den zur Verfügung stehenden Schnittstellen • Anlegen von Anlagenübersichten und Zuordnung der korrekten Messstellen • Verstehen des semantischen Aufbaus der EnMi mit Hilfe der proprietären oder Energieprofil-basierten Dokumentationen • Erstellung von Diagrammen und Verknüpfung der jeweiligen EnMi • Anlegen von Alarmmeldungen • Inbetriebnahme des Energie-Monitoring-Systems • Prüfen der Validität der angezeigten EnMi • Umsetzung von Änderungen im Energie-Monitoring-System
Wünsche	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzierung des erforderlichen Engineering-Aufwandes zur Entwicklung des Energie-Monitoring-Systems • Zugriff auf möglichst wenige Geräte-Dokumentationen und -Handbücher zur Planung/ Umsetzung • Einheitliche Semantik der EnMi

Arbeitsrolle	Systemkonfigurator*in für Prozessleitebene und MES
Kenntnisse	<ul style="list-style-type: none"> • Erfahrungen im Umgang mit dem HMI-, SCADA- und MES-Engineering • Erfahrung im Umgang mit den eingesetzten PLS-Entwicklungsumgebungen • Überblick über energiebezogene KPIs
Ziele	<ul style="list-style-type: none"> • Visualisierungen sollen die Anforderungen erfüllen, die im Lastenheftes des Auftraggebers festgehalten sind • PLS-Programm soll die Anforderungen erfüllen, die im Lastenheftes des Auftraggebers festgehalten sind • Einbindung der Energiedaten aus der Steuerungsebene • Übersichtliche Darstellung auf Visualisierungen • Sicherstellung einer möglichst benutzerfreundlichen Bedienoberfläche
Arbeitsprozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Erstellung und Test von Visualisierungsoberflächen • Zugriff auf Datenbanken • Zugriff auf Datenschnittstellen aus der Steuerungsebene • Erstellung von PLS-Programmen • Änderung von PLS-Programmen • Inbetriebnahme
Wünsche	<ul style="list-style-type: none"> • Einfacher und Aufwandsarmer Zugriff auf die Daten aus der Feld- oder Steuerungsebene • Zugriff auf Energiedaten aus der Steuerungsebene in möglichst einheitlicher Form • Reduzierung des zu erbringenden Engineering-Aufwandes

Arbeitsrolle	Prozessleiter
Kenntnisse	<ul style="list-style-type: none">• Örtliche Gegebenheiten und Prozess• Prozesskennzahlen (KPIs)• Erkennung von Störungen
Ziele	<ul style="list-style-type: none">• Überwachung des Prozesses
Arbeitsprozesse	<ul style="list-style-type: none">• Sichtung und Überprüfung der Prozesskennzahlen (KPIs)
Wünsche	<ul style="list-style-type: none">• Übersichtliche und benutzerzentrierte Darstellung des Prozesses in der Benutzeroberfläche

Arbeitsrolle	Betriebsleiter*in
Kenntnisse	<ul style="list-style-type: none">• Überprüfung der Wirtschaftlichkeit des Produktionsunternehmens• Sichtung und Überprüfung der Unternehmenskennzahlen (KPIs)
Ziele	<ul style="list-style-type: none">• Erhaltung eines reibungslosen Betriebsablaufs• Umsetzung der Aufträge der Geschäftsführung• Kosten beim Betrieb der Anlage reduzieren/ geringhalten• Kosten bei Neuerrichtung/ Erweiterung einer Anlage reduzieren/ geringhalten
Arbeitsprozesse	<ul style="list-style-type: none">• Leitung des Betriebs• Delegieren von Aufgaben an das Personal• Allokation und Freigabe von Geldern für Projekte der Anlagenneuerrichtung/ Anlagenerweiterung
Wünsche	<ul style="list-style-type: none">• Senkung der Kosten für die Produktion• Senkung der Kosten für Projektrealisierungen• Einfache Ermittlung von Einsparpotentialen• Aufwandsreduzierung bei der Berichterstellung

Arbeitsrolle	Anlagenbediener*in
Kenntnisse	<ul style="list-style-type: none">• Erfahrung im Umgang mit der täglich zu bedienenden Anlage• Kenntnisse über sich wiederholende Störungsmuster• Kenntnisse über Anlagenzustände (z. B. aktive Energiesparmodi)• Bedienung der Benutzeroberfläche der Anlage (z. B. Eingabe von voraussichtlichen Pausenzeiten)
Ziele	<ul style="list-style-type: none">• Betriebsbereitschaft der Anlage aufrechterhalten• Einfache Anlagenbedienung
Arbeitsprozesse	<ul style="list-style-type: none">• Anlagenbedienung (z. B. Ein- und Ausschalten der Anlage)• Beobachtung der Anlage, Störungserkennung und Kontaktierung der Instandsetzung• Beheben von kleineren Störungen
Wünsche	<ul style="list-style-type: none">• Vereinfachung der Arbeitsprozesse

Arbeitsrolle	Energiemanager*in
Kenntnisse	<ul style="list-style-type: none"> Umsetzung von Normen aus dem Themengebiet Energiemanagement (z. B. ISO 50001) Kenntnisse über die Durchführung von Energieaudits nach DIN 16247 Auswertung und Überprüfung der von Energiespezifischen KPIs Auswertung und Überprüfung der Effizienzgrößen auf verschiedenen Skalierungsebenen (z. B. auf Maschinen- Anlagen- oder Produktionslinienebene) Kenntnisse über das organisatorische und technische Energiemanagementsystem
Ziele	<ul style="list-style-type: none"> Steigerung der allgemeinen Energieeffizienz Delegieren von Aufgaben an das Personal Durchführung von Management-Aufgaben Kontrolle des Ressourcenbedarfs Erstellung von Energie-Berichten
Arbeitsprozesse	<ul style="list-style-type: none"> Durchführung/ Verwaltung des Energiemanagements Realisierung Energieaudits Verwaltung der etablierten Normen Durchführung eines PDCA-Zyklus (basierend auf Normen wie IEC 50001) Auswertung und Überprüfung der von Energiespezifischen KPIs
Wünsche	<ul style="list-style-type: none"> Braucht möglichst genau Energiedaten und abgeleitete KPIs Energieeinsatztransparenz - Bereitstellung eines Energiemonitorings für alle verschiedenen Skalierungsebenen (z. B. auf Maschinen- Anlagen- oder Produktionslinienebene)

Arbeitsrolle	Einkäufer*in für Energie
Kenntnisse	<ul style="list-style-type: none">Kenntnisse aus dem Gebiet der BetriebswirtschaftFachwissen (Energie-spezifisch)
Ziele	<ul style="list-style-type: none">Kostengünstiger RessourcenerwerbGenaue Abschätzung der voraussichtlichen Energiebedarfe
Arbeitsprozesse	<ul style="list-style-type: none">EnergieeinkaufÜberblick über die Situation im entsprechenden Energiemarkt erlangenAufstellen von PreisvergleichenPreisverhandlungen
Wünsche	<ul style="list-style-type: none">Genau vorhersage der Energiebedarfe aufgrund von historischen und aktuellen Daten (Planungssicherheit)Automatisierte Entscheidung über Einspeisung ins Netz/ Nutzung der Energie für den Anlagenbetrieb ausgehend von Energiequellen (z. B. Solaranlage)

Arbeitsrolle	Einkäufer*in (Maschinen und Einzelkomponenten)
Kenntnisse	<ul style="list-style-type: none">Kenntnisse aus dem Gebiet der BetriebswirtschaftFachwissen (Energie-spezifisch)Technisches Verständnis für im Betrieb eingesetzte Geräte und Einzelkomponenten (Gerätekatalog und Lagerhaltung)
Ziele	<ul style="list-style-type: none">Kostengünstiger Geräte- und KomponentenerwerbErmittlung des günstigsten Produkts am Markt, das den Vorgaben der Anforderungen entspricht
Arbeitsprozesse	<ul style="list-style-type: none">Geräte- und KomponenteneinkaufFachwissen für die technischen Geräte und Komponenten am MarktAufstellen von PreisvergleichenPreisverhandlungen
Wünsche	<ul style="list-style-type: none">Produkte kostengünstig erwerbenZugriff auf ein breites, den Anforderungen entsprechendes Produktportfolio

Arbeitsrolle	Instandhalter*in
Kenntnisse	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanische und elektrische Instandhaltungsarbeiten • Erfahrung im Umgang mit den eingesetzten SPS-Entwicklungsumgebungen • Kenntnisse bei der Implementierung von Kommunikationsbausteinen zur Geräteanbindung (z. B. mittels Anwendung von Energieprofilen) • SPS-Programmentwicklung • Hardwarekonfiguration • SPS-internes Energiedaten-Mapping
Ziele	<ul style="list-style-type: none"> • Wartung und Instandhaltung der Geräte und Maschinen • Schnelle Reparatur der Anlage im Störungsfall (Störung mechanischen, elektrischen oder Software-technischen Ursprungs) • Schnelle Reparatur der Anlage nach dem Auftreten von defekten Bauteilen, z. B. Sensoren wie Näherungssensoren oder Endschalter
Arbeitsprozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanische Störungsbeseitigung • Elektrische Störungsbeseitigung • Ermittlung und Analyse von Störungsbildern im SPS-Programm (live-Diagnose) • Schmieren von mechanischen Komponenten • Auswechseln von Verschleißteilen
Wünsche	<ul style="list-style-type: none"> • Schnelle Störungsbeseitigung • Zugriff auf möglichst wenige Dokumentation bei der Störungsbeseitigung

Arbeitsrolle	Geschäftsführung
Kenntnisse	<ul style="list-style-type: none">• Führung der Mitarbeiter
Ziele	<ul style="list-style-type: none">• Leitung des Unternehmens• Verbesserung der Wirtschaftlichkeit• Motivation der Mitarbeiter• Förderung des grünen Images
Arbeitsprozesse	<ul style="list-style-type: none">• Festlegung der Unternehmensziele• Weitergabe von Aufgaben an die untergeordnete Management-Instanz
Wünsche	<ul style="list-style-type: none">• Aufbesserung des Firmenimages• Zugriff auf KPI-Daten mit geringem Aufwand

Arbeitsrolle	Programm-Entwickler*in für Edge-Devices und SPSen (extern)
Kenntnisse	<ul style="list-style-type: none"> • Erfahrung im Umgang mit den eingesetzten SPS-Entwicklungsumgebungen • Kenntnisse bei der Implementierung von Kommunikationsbausteinen zur Geräteanbindung (z. B. mittels Anwendung von Energieprofilen) • SPS-Programmentwicklung • Hardwarekonfiguration • SPS-internes Energiedaten-Mapping auf Basis von Standards wie Companion Spec. OPC UA • Keine betriebsinternen Kenntnisse (eigene Energiedatenmodelle)
Ziele	<ul style="list-style-type: none"> • SPS-Programm soll die Anforderungen erfüllen, die im Lastenheftes des Auftraggebers festgehalten sind • Effiziente Programmerstellung
Arbeitsprozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Erstellung von SPS-Programmen • Änderung von SPS-Programmen • Inbetriebnahme • Fehlersuche und Diagnose
Wünsche	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzierung des zu erbringenden Engineering-Aufwandes • Zugriff auf möglichst wenige Dokumentationen zur Planung/ Umsetzung • Möchte beim Energiedaten-Mapping auf standardisierte Schnittstellenstrukturen zurückgreifen (z. B. OPC UA Companion Spec. PROFIenergy)

Arbeitsrolle	Systemkonfigurator*in für Prozessleitebene und MES (extern)
Kenntnisse	<ul style="list-style-type: none"> • Erfahrungen im Umgang mit dem HMI-, SCADA- und MES-Engineering • Erfahrung im Umgang mit den eingesetzten PLS-Entwicklungsumgebungen • Überblick über energiebezogene KPIs • Keine betriebsinternen Kenntnisse (eigene Energiedatenmodelle)
Ziele	<ul style="list-style-type: none"> • Visualisierungen sollen die Anforderungen erfüllen, die im Lastenheftes des Auftraggebers festgehalten sind • PLS-Programm soll die Anforderungen erfüllen, die im Lastenheftes des Auftraggebers festgehalten sind • Einbindung der Energiedaten aus der Steuerungsebene • Übersichtliche Darstellung auf Visualisierungen • Sicherstellung einer möglichst benutzerfreundlichen Bedienoberfläche
Arbeitsprozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Erstellung und Test von Visualisierungsoberflächen • Zugriff auf Datenbanken • Zugriff auf Datenschnittstellen aus der Steuerungsebene • Erstellung von PLS-Programmen • Änderung von PLS-Programmen • Inbetriebnahme
Wünsche	<ul style="list-style-type: none"> • Einfacher und Aufwandsarmer Zugriff auf die Daten aus der Steuerungsebene • Zugriff auf Energiedaten aus der Steuerungsebene in möglichst einheitlicher Form • Reduzierung des zu erbringenden Engineering-Aufwandes • Möchte beim Zugriff auf Energiedaten aus der Steuerungsebene auf eine einheitliche Datenstruktur zurückgreifen (z. B. nach OPC UA Companion Spec. PROFenergy)

Arbeitsrolle	Instandhalter*in (extern)
Kenntnisse	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanische und elektrische Instandhaltungsarbeiten • Erfahrung im Umgang mit den eingesetzten SPS-Entwicklungsumgebungen • Kenntnisse bei der Implementierung von Kommunikationsbausteinen zur Geräteanbindung (z. B. mittels Anwendung von Energieprofilen) • SPS-Programmentwicklung • Hardwarekonfiguration • SPS-internes Energiedaten-Mapping auf Basis von Standards wie Companion Spec. OPC UA • Keine betriebsinternen Kenntnisse (eigene Energiedatenmodelle)
Ziele	<ul style="list-style-type: none"> • Wartung und Instandhaltung der Geräte und Maschinen • Schnelle Reparatur der Anlage im Störungsfall (Störung mechanischen, elektrischen oder Software-technischen Ursprungs) • Schnelle Reparatur der Anlage nach dem Auftreten von defekten Bauteilen, z. B. Sensoren wie Näherungssensoren oder Endschalter
Arbeitsprozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanische Störungsbeseitigung • Elektrische Störungsbeseitigung • Ermittlung und Analyse von Störungsbildern im SPS-Programm (live-Diagnose) • Schmieren von mechanischen Komponenten • Auswechseln von Verschleißteilen
Wünsche	<ul style="list-style-type: none"> • Schnelle Störungsbeseitigung • Zugriff auf möglichst wenige Dokumentation bei der Störungsbeseitigung • Möchte beim Energiedaten-Mapping auf standardisierte Schnittstellenstrukturen zurückgreifen (z. B. OPC UA Companion Spec. PROFIenergy)

13 Literatur

- [1] OPC Foundation, *Joint Consortium Standardizes Common “Power Consumption Management” for the Shop Floor.* [Online]. Verfügbar unter: <https://opcfoundation.org/news/press-releases/joint-consortium-standardizes-common-power-consumption-management-for-the-shop-floor/> (Zugriff am: 17. Juli 2023).
- [2] K.-H. Niemann, *Energy efficiency and how OPC UA can help building a unified energy model.* [Online]. Verfügbar unter: <https://opcfoundation.org/resources/podcast/>.
- [3] L.-T. Reiche, M. Runge, A. Fay und K.-H. Niemann, „Communication of energy data in automation systems“ in *17th IEEE International Conference on Factory Communication Systems (WFCS)*, Linz, 2021, doi: 10.1109/WFCS46889.2021.9483607.
- [4] M. Runge, L.-T. Reiche, K.-H. Niemann, A. Fay und A. Würger, „Requirements for an energy data information model for a communication-independent device description“ in *26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Västeras, 2021, doi: 10.1109/ETFA45728.2021.9613401.
- [5] M. Runge, L.-T. Reiche, K.-H. Niemann und A. Fay, „Wie können heterogene Prozessdaten automatisch in einem Energiemanagementsystem zusammengeführt werden?“ in *18. Fachkonferenz Angewandte Automatisierungs-technik in Lehre und Entwicklung (AALE)*, Pforzheim, 2022, doi: 10.33968/2022.16.
- [6] L.-T. Reiche, M. Runge, A. Fay und K.-H. Niemann, „Konzeption eines vereinheitlichenden Energieinformationsmodells zur Integration unterschiedlicher Energieprofile: Noch nicht erschienen“ in *Automation 2022*, 23. VDI-Kongress AUTOMATION – Leitkongress der Mess- und Automatisierungstechnik, Hg., Baden-Baden, 2022.
- [7] M. Runge, L.-T. Reiche, K.-H. Niemann und A. Fay, „Universal energy information model for industrial communication“ in *IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Stuttgart, 2022, doi: 10.1109/ETFA52439.2022.9921557.
- [8] L.-T. Reiche, M. Runge, K.-H. Niemann und A. Fay, „Entwurf eines einheitlichen Energieinformationsmodells für die Übertragung von Energieinformationen auf Basis von industriell genutzten Kommunikationsstandards“ in *14. Jahrestreffen Kommunikation in der Automation (KommA)*, Lemgo, 2022.
- [9] M. Runge und K.-H. Niemann, „Energieinformationsmodell für einen aufwandsarmen Zugriff auf Energiedaten“ in *Zukunft.Digital Ausgabe 02/2022: Digitalisierung von der Idee zur Umsetzung*, Mittelstand-Digital Zentrum Hannover, Hg., 2022.
- [10] L.-T. Reiche, M. Runge, K.-H. Niemann und A. Fay, „Universelles Energieinformationsmodell liefert Impulse für anstehende Standardisierung“ in *Magazin Automatisierungstechnische Praxis (atp)*, 2023.
- [11] G. Lessmann, L.-T. Reiche und M. Runge, „PROFINET, OPC UA und MQTT - Die perfekte Kombination für IIoT: PI-Technologien für die digitale Transformation“. Frankfurt am Main, 23. März 2023.
- [12] L. T. Reiche und M. Runge, „Energie im Blick haben“ in *tec.news: Harting Technologiemagazin*, Harting Technologiegruppe, Hg., 2023, S. 22–23.
- [13] K.-H. Niemann, *Energy Efficiency – Building a Unified Model with OPC UA.* [Online]. Verfügbar unter: <https://opcconnect.opcfoundation.org/2022/12/energy-efficiency-building-a-unified-model-with-opc-ua/> (Zugriff am: 17. Juli 2023).
- [14] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Hg., „Energieeffizienz in Zahlen: Entwicklungen und Trends in Deutschland 2018“, 11019 Berlin, Aug. 2018. [Online]. Verfügbar unter:

- https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-2018.pdf?__blob=publicationFile&v=14. Zugriff am: 6. Juni 2019.
- [15] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, *Klimaschutzbericht 2018 zum Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 der Bundesregierung*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzbericht_2018_bf.pdf (Zugriff am: 26. März 2020).
- [16] A. Würger, K.-H. Niemann, A. Fay, M. Gienke und M. Paulick, „Integriertes Anlagenengineering zur Erhöhung der Energieeffizienz“, *atp Edition*.
- [17] E. Abele, N. Panten und B. Menz, „Data Collection for Energy Monitoring Purposes and Energy Control of Production Machines“ in *The 22nd CIRP conference on Life Cycle Engineering*, 2015, S. 299–304, doi: 10.1016/j.procir.2015.01.035.
- [18] M. Bartsch und K. H. Niemann, „Energie- und Lastmanagement in Automatisierungssystemen: Anforderungen und Bausteine für zukünftige Systeme“, *atp Edition*, 11/2016, S. 46–54.
- [19] Profibus Nutzerorganisation e. V., Hg., „Common Application Profile PROFIenergy“, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.profibus.com/download/profienergy/>. Zugriff am: 20. März 2022.
- [20] Profibus Nutzerorganisation e. V., *OPC UA for Energy Management*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.profibus.com/downloads/opc-ua-for-energy-management-companion-specification> (Zugriff am: 1. Juni 2021).
- [21] Profibus Nutzerorganisation e. V., *PROFINET Specification*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.profibus.com/download/profinet-specification> (Zugriff am: 20. März 2022).
- [22] IO-Link Community, *IO-Link Interface and System*. [Online]. Verfügbar unter: https://iolink.com/share/Downloads/Package-2020/IOL-Interface-Spec_10002_V113_Jun19.pdf (Zugriff am: 20. März 2022).
- [23] M. Schleipen, Hg., *Praxisbuch OPC UA : Grundlagen, Implementierung, Nachrüstung, Praxisbeispiele*. Würzburg: Vogel Business Media, 2018.
- [24] Edited by Andrew Banks, Ed Briggs, Ken Borgendale, and Rahul Gupta, *MQTT Version 5.0: OASIS Standard*. [Online]. Verfügbar unter: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html> (Zugriff am: 20. März 2022).
- [25] *Energiemanagement Grundlagen*, VDI 4602 Blatt 1, Verein deutscher Ingenieure e. V., Berlin, Apr. 2018.
- [26] *ISO 50001:2018-08 - Energy management systems - Requirements with guidance for use*, International Organization for Standardization, 2018.
- [27] *Energieaudits - Teil 1: Allgemeine Anforderungen*, DIN 16247-1, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Nov. 2022.
- [28] *Automation systems and integration - Evaluating energy efficiency and other factors of manufacturing systems that influence the environment - Part 5: Environmental performance evaluation data*, ISO 20140-5, International Standards Organization, Schweiz, Apr. 2017.
- [29] L. Christiansen, T. Linnenberg, A. Fay, C. Seitz und A. W. Müller, „Energieeffizienz in der Fertigung bewerten: Ontologiebasierte Beschreibung und Simulation“, *atp Edition*, 07-08/2013, S. 70–77, doi: 10.17560/atp.v55i07-08.262.
- [30] F. Ahlemann, F. Teuteberg und G. Brune, *Ontologie-basierte Attributierung von Informationsmodellen: Grundlagen und Anwendungsgebiete*. Osnabrück: Univ, 2006.
- [31] A. Würger und K.-H. Niemann, „Einfluss von Industrie 4.0 auf die Anwendbarkeit von Lastmanagement in der industriellen Produktion“ in *Tagungsband AALE 2018*, Köln, 01. - 02.03.2018, S. 55–66.

- [32] L. Nielsen, *Personas - User Focused Design*, 2013.
- [33] S. Berner, *Informationsmodellierung: Durch Verstehen zu besserer Software*. Zürich: vdf, 2016.
- [34] C. Rupp und S. Queins, *UML 2 glasklar: Praxiswissen für die UML-Modellierung*, 4. Aufl. München: Hanser, 2012.
- [35] A. Würger, K.-H. Niemann und A. Fay, „Concept for an Energy Data Aggregation Layer for Production Sites: A combination of AutomationML and OPC UA“ in *IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies And Factory Automation (ETFA)*, Funchal, 2018, S. 1051–1055, doi: 10.1109/ETFA.2018.8502531.
- [36] A. Würger, „Automatisierte Generierung von Energiemanagementfunktionen auf der Basis des PROFINET-Energieprofils: Dissertation“, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, 2020.
- [37] PROFIBUS Nutzerorganisation e.V., *PROFIBUS System Description: Technology and Application*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.profibus.com/index.php?eID=download&t=f&f=52380&token=4868812e468cd5e71d2a07c7b3da955b47a8e10d> (Zugriff am: 20. März 2022).
- [38] R. Pereira, J. Figueiredo, R. Melicio, V. Mendes, J. Martins und J. C. Quadrado, „Consumer energy management system with integration of smart meters“, *Energy Reports*, Jg. 1, S. 22–29, 2015, doi: 10.1016/j.egyr.2014.10.001.
- [39] SERCOS International e.V., *Sercos Energy specification release*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sercos.org/news-events/newsdetail/the-specification-of-the-energy-profile-for-sercos-iii-is-now-released/> (Zugriff am: 20. März 2022).
- [40] ODVA, *CIP Energy*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.odva.org/technology-standards/distinct-cip-services/cip-energy/> (Zugriff am: 20. März 2022).
- [41] OPC Foundation, *UA Companion Specifications*. [Online]. Verfügbar unter: <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/ua-companion-specifications/> (Zugriff am: 20. März 2022).
- [42] IEC 62541-3:2020 - *OPC Unified Architecture - Part 3: Address Space Model*, 62541-3, International Electrotechnical Commission, 2015.
- [43] *OPC Unified Architecture – Teil 1: Übersicht und Konzepte*, 62541-1, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Jul. 2011.
- [44] M. Silveira Rocha, G. Serpa Sestito, A. Luis Dias, A. Celso Turcato und D. Brandao, „Performance Comparison Between OPC UA and MQTT for Data Exchange“ in *2018 Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT*, Brescia, 2018, S. 175–179, doi: 10.1109/METROI4.2018.8428342.
- [45] S. Profanter, A. Tekat, K. Dorofeev, M. Rickert und A. Knoll, „OPC UA versus ROS, DDS, and MQTT: Performance Evaluation of Industry 4.0 Protocols“ in *2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Melbourne, 2/13/2019 - 2/15/2019, S. 955–962, doi: 10.1109/ICIT.2019.8755050.
- [46] OPC Foundation, *OPC Unified Architecture for Sercos Devices*. [Online]. Verfügbar unter: <https://opcfoundation.org/developer-tools/specifications-opc-ua-information-models/opc-unified-architecture-for-sercos-devices/> (Zugriff am: 2. Dezember 2021).
- [47] ODVA, *OPC UA Companion Specification to Be Developed for CIP*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.odva.org/news/opc-ua-companion-specification-to-be-developed-for-cip/> (Zugriff am: 27. Juni 2023).
- [48] *OPC Unified Architecture - Part 1: Overview and concepts*, IEC TR 62541-1:2020, IEC, Nov. 2020.

- [49] M. Bartholet und C. Überall, „Multi-protocol bridge generation for M2M communication using MQTT“, *J. Phys.: Conf. Ser.*, Jg. 1634, Nr. 1, S. 12115, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1634/1/012115.
- [50] E. Riedel, „MQTT protocol for SME foundries: potential as an entry point into industry 4.0, process transparency and sustainability“, *22ND CIRP CONFERENCE ON LIFE CYCLE ENGINEERING*, Jg. 105, S. 601–606, 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.02.100.
- [51] T. Linnenberg, A. W. Mueller, L. J. Christiansen, C. W. Seitz und A. Fay, „Ontoenergy - A lightweight ontology for supporting energy-efficiency tasks: Enabling generic evaluation of energy efficiency in the engineering phase of automated manufacturing plants“ in *5th International Conference on Knowledge Engineering and Ontology Development (KEOD)*, Vilamoura, 2013, S. 337–344.
- [52] Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie, Hg., „NAMUR Open Architecture - NOA Informationsmodell“. NE 176, 2021.
- [53] PROFIBUS Nutzerorganisation e. V., Hg., „Common Application Profile PROFIenergy“, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.profibus.com/download/profienergy/>. Zugriff am: 1. Juni 2021.
- [54] SERCOS International e.V., *Energy Profile*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sercos.de/news-events/newsdetail/sercos-energy-spezifikation-des-energieprofils-fuer-sercos-iii-verfuegbar/> (Zugriff am: 20. März 2022).
- [55] K. Al-Gumaei *et al.*, „A Survey of Internet of Things and Big Data Integrated Solutions for Industrie 4.0“ in *IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies And Factory Automation (ETFA)*, Funchal, 2018, S. 1417–1424.
- [56] T. Javied, S. Huprich und J. Franke, „Cloud based Energy Management System Compatible with the Industry 4.0 Requirements“, *IFAC-PapersOnLine*, Jg. 52, Nr. 10, S. 171–175, 2019.
- [57] OPC Foundation, *Mapping of the UNECE codes to OPC UA*. [Online]. Verfügbar unter: http://www.opcfoundation.org/UA/EngineeringUnits/UNECE/UNECE_to_OPCUA.csv (Zugriff am: 13. April 2022).
- [58] *Elektrizitätszähler - Teil 3: Besondere Anforderungen - Elektronische Wechselstrom Wirkverbrauchszähler der Genauigkeitsklassen A, B und C*, 50470-3*VDE 0418-0-3, Mai. 2023.
- [59] *Elektrische Sicherheit in Niederspannungsnetzen bis AC 1000 V und DC 1500 V - Geräte zum Prüfen, Messen oder Überwachen von Schutzmaßnahmen - Teil 12: Geräte zur Energiemessung und -überwachung (PMD)*, 61557-12, Jan. 2022.
- [60] OPC Foundation, *OPC UA for Machinery: Standard for the entire mechanical engineering sector*. [Online]. Verfügbar unter: <https://opcfoundation.org/markets-collaboration/opc-ua-for-machinery/> (Zugriff am: 7. Juli 2023).
- [61] *OPC Unified Architecture – Teil 3: Adressraummodell*, IEC 62541-3, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Jan. 2020.
- [62] Siemens AG, *Siemens OPC UA Modeling Editor SiOme*. [Online]. Verfügbar unter: [https://support.industry.siemens.com/cs/document/109755133/siemens-opc-ua-modeling-editor-\(siome\)?dti=0&lc=de-AT](https://support.industry.siemens.com/cs/document/109755133/siemens-opc-ua-modeling-editor-(siome)?dti=0&lc=de-AT) (Zugriff am: 5. Juli 2023).
- [63] Mittelstand-Digital Zentrum Hannover, Hg., *Zukunft.Digital Ausgabe 02/2022: Digitalisierung von der Idee zur Umsetzung*, 2022.
- [64] Janitza electronics GmbH, *Energiemanagement-Applikation GridVis 9*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.janitza.de/produkte/gridvis.html#weitereinformationen> (Zugriff am: 7. Juli 2023).
- [65] *UaExpert Version 1.5.1 331. 1.5.1*. Unified Automation GmbH, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.unified-automation.com/>