

Abschlussbericht zum Teilvorhaben

zum Vorhaben:

**Robuste und sichere Edge-Elektronik
für Industrieprozesse und kritische Infrastrukturen**

–

Intelligentes Energie- und Lastmanagement

Akronym: **Edge-Power**

Förderkennzeichen: **16ME0577**

Teil I: Kurzbericht

HANZA Tech Solutions GmbH (HTS)

Dr. Sebastian Knausenberger

Dr.-Ing. Christoph Budelmann

Domino Leitold

Aufgabenstellung und Ablauf des Teilvorhabens

Essenzieller Bestandteil vieler heutiger Industrieprozesse ist die bereits vor Ort erfolgende rechenintensive (Vor-)verarbeitung komplexer Daten im Sinne des Edge-Computing. Das Vorhaben Edge-Power sollte Ansätze entwickeln, den dadurch anfallenden erhöhten Energiebedarf durch effiziente und intelligente Steuerung zu minimieren und unter Einsatz erneuerbarer Energiequellen zu decken. Dies wird von neu konzipierten vernetzten Systemkomponenten realisiert, die in einen solchen Prozess integriert werden. Eine dieser Komponenten ist das Energiemodul (EM), das Gegenstand des hier beschriebenen Teilvorhabens war und für die variable Zuführung der Energie aus verschiedenen Quellen an die übrigen Komponenten zuständig ist. Aufgaben des Teilvorhabens waren Ermittlung und Umsetzung der Anforderungen an Hard- und Software des EM in Abstimmung mit den übrigen Projektpartnern, die Auslieferung der komplett lauffähigen Energiemodule an die Projektpartner für die Vernetzung mit den anderen Edge-Power-Komponenten sowie weitere Unterstützung der Projektpartner zum reibungslosen Aufbau fertiger Edge-Power-Systeme. In einem ersten Schritt wurden gemeinsam verfügbare Technologien zur gegenseitigen Kommunikation der Edge-Power-Komponenten evaluiert und dann festgelegt, dass das EM hauptsächlich als OPC-UA-Server fungieren soll, der über eine Ethernet-Schnittstelle erreichbar ist. OPC-UA ist ein Kommunikationsstandard, der im Rahmen eines definierbaren Informationsmodells das Lesen und Schreiben von Werten ermöglicht. Im EM sollen auf diese Art einerseits die Energieflüsse gesteuert und andererseits Messwerte zu Strömen und Spannungen ausgelesen werden können. Die Implementierung des Servers auf dem EM sollte in C mithilfe der frei verfügbaren OPC-UA-Bibliothek open62541 erfolgen.

Hardware

Für die Planung des Hardware-Konzeptes wurden zunächst die möglichen Energieflüsse durch das EM über die vorgesehenen Ein- und Ausgänge spezifiziert. Anschließend wurden geeignete Hardware-Bausteine ausgewählt und auf einer Platine platziert, um die Ströme und Spannungen an den erforderlichen Stellen zu schalten, umzuwandeln und zu messen. Zur Steuerung des EM wurden energiesparende Mikroprozessoren bestimmt, die zusammen mit anderen Komponenten auf eine Platine fertig aufgelötet erhältlich sind und als solche in die Platine des EM integriert werden können. Neben Ethernet wurden noch weitere Schnittstellen zur Kommunikation mit anderen Edge-Power-Komponenten vorgesehen. Zusätzlich wurde ein Gehäuse designet, in das die EM-Platine eingebaut werden kann, wobei bei der Gesamtkonzeptionierung auch der Umgang mit im Betrieb möglicher Wärmeentwicklung beachtet wurde. Die folgenden Abbildungen zeigen Ansichten der fertigen Hardware.



Abbildung 1: CAD-Modell des Energiemoduls



Abbildung 2: Energiemodul-Gehäuse

Software

Es wurde ein Informationsmodell entwickelt, über das der anschließend implementierte auf dem Mikroprozessor lauffähige OPC-UA-Server die Funktionalität des EM zur Verfügung stellt. Dazu wurden die Funktionen (Ein-/ausschalten, Werte messen) nach den vorhandenen Ein- und Ausgängen gruppiert und in einer Hierarchie angeordnet. Dadurch wird bei Verwendung einer grafischen Client-Software eine intuitive Bedienung ermöglicht (in Abbildung 3 zu sehen mit dem Client UAExpert). Bei entsprechendem Anschluss bezieht das EM dabei auch aus Steuergeräten für externe Energiespeicher abgerufene Messdaten mit ein. Die erfassten Messdaten werden außerdem im EM gespeichert und sind dann auch nachträglich als historische Daten im Informationsmodell abrufbar. Da im Kontext von Industrieprozessen abhörsichere Kommunikation eine wichtige Rolle spielt, wurden auch verschlüsselte Verbindungen zum OPC-UA-Server mithilfe im Vorfeld mit den Projektpartnern ausgetauschter SSL-Zertifikate ermöglicht. Zusätzlich wurde eine Anwendung implementiert, die alternativ zum OPC-UA-Server auf dem EM betrieben werden kann und dessen Hauptfunktionalität über die RS485-Schnittstelle mittels eines selbst entwickelten Energieprotokolls anbietet.

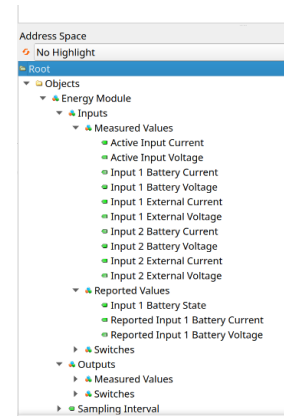


Abbildung 3: Darstellung im OPC-UA-Client

Wesentliche Ergebnisse

Die EM wurden als Platinen mit Gehäuse wie geplant hergestellt und an alle Projektpartner in der jeweils angefragten Menge ausgeliefert, damit sie dort zunächst in unterschiedlichen Anwendungsgebieten getestet werden konnten. Im Austausch mit den Projektpartnern wurden Updates der Software zur Fehlerbehebung und für weitere benötigte Funktionalitäten entwickelt, elektronisch zur Verfügung gestellt und konnten von den Projektpartnern über dafür vorgesehene Schnittstellen selbst auf den EM installiert werden. Die Projektpartner nutzen die EM zusammen mit den übrigen Edge-Power-Komponenten zum Aufbau ihrer Demonstratoren. Damit leisten die EM einen wichtigen Beitrag zum energieautarken und energieeffizienten Edge-Computing.

Abschlussbericht zum Teilvorhaben

zum Vorhaben:

**Robuste und sichere Edge-Elektronik
für Industrieprozesse und kritische Infrastrukturen**

–

Intelligentes Energie- und Lastmanagement

Akronym: **Edge-Power**

Förderkennzeichen: **16ME0577**

**Teil II: Eingehende Darstellung
HANZA Tech Solutions GmbH (HTS)**

Dr. Sebastian Knausenberger

Dr.-Ing. Christoph Budelmann

Domino Leitold

Inhaltsverzeichnis

Inhalte	2
AP 1.1 Modulares und skalierbares Edge-Power-System	2
AP 2.4 Energiemanagement	6
Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	17
Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	18
Darstellung des voraussichtlichen Nutzens sowie der Verwertbarkeit des Ergebnisses	18
Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	19
Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnis	20

Inhalte

AP 1.1 Modulares und skalierbares Edge-Power-System

In AP 1.1 wurden die Hardware-Anforderungen für eine dezentrale und vollständig autarke Vernetzung und Datenverarbeitung auf Anlagenebene erarbeitet und ein entsprechendes Systemkonzept erstellt. Dieses dient als Basis für das Edge-Computing, das KI-Anwendungen, Condition Monitoring, verteilte Massendatenverarbeitung und Prozesssteuerung beinhaltet. **Verschiedene** Rechnerarchitekturen wurden unter dem Aspekt der Energieeffizienz betrachtet und ein Modulkonzept für die bedarfsgerechte Energieverteilung erarbeitet. Im Teilarbeitspaket 1.1.1 wurde zunächst das Systemkonzept für verteilte, energieeffiziente Rechenmodule erarbeitet, bevor in Teilarbeitspaket 1.1.4 die Anforderungen an das Energiemanagement definiert und ein Modulkonzept abgeleitet wurden. Die Umsetzung des Modulkonzepts unter Berücksichtigung des Systemkonzepts war anschließend Teil des Arbeitspakets 2.4 Energiemanagement.

1.1.1 Systemkonzept für verteilte energieeffiziente Rechenmodule des Edge-Computings mit KI-Funktion und der Schnittstellen

Als primäre Hardware- und Software-Schnittstelle zur Kommunikation zwischen den eingesetzten Komponenten (Energimodul, Edge-Gateway, Prozess-Gateways) kommt nach ausführlichen Diskussionen und Abwägungen im Projektkonsortium Ethernet zum Einsatz. Einerseits erlaubt Ethernet hohe Datenraten, andererseits wird Ethernet als ein Standard in der Prozess- und Automatisierungstechnik bereits vielfach eingesetzt. So kann auf eine Vielzahl bestehender Komponenten zurückgegriffen werden und die Wahl von Ethernet wirkt sich auch positiv auf die Energiebilanz des Gesamtsystems aus, da keine zusätzlichen Bus-Umsetzer notwendig sind. In der Regel kommen 1000BASE-T-Komponenten zum Einsatz, die Datenraten bis 1000Mbit/s erlauben. Für einzelne Sensoren oder Komponenten mit geringeren Datenraten oder einfacherer Hardware kann auch 10BASE-T oder 100BASE-T eingesetzt werden mit 10 bzw. 100Mbit/s, da die notwendigen Switche abwärtskompatibel sind.

Durch den Einsatz von Ethernet auf der physikalischen Schicht (Layer 1) und der Data-Link-Schicht (Layer 2) des OSI-Modells (Open Systems Interconnection Modell) ergibt sich unmittelbar der Einsatz des Internet Protokolls IP auf der Internetschicht (Layer 3) sowie TCP (Transmission Control Protocol) und UDP (User Datagram Protocol) auf der Transportschicht (Layer 4) als Standard-Internetprotokollfamilie.

Für den Austausch der Daten im Rahmen des verteilten Rechnens wurden verschiedene Varianten zusammengestellt und hinsichtlich der Implementierungsaufwände, der Skalierbarkeit und des Energie- und Ressourcenverbrauchs qualitativ miteinander verglichen. Nach Abwägung der unterschiedlichen Vor- und Nachteile wurde die Entscheidung gefasst, als Kommunikationsstandard im Edge-Power-Projekt OPC UA einzusetzen. OPC UA nutzt für die Datenübertragung TCP/IP und ermöglicht gleichzeitig, über Informationsmodelle die Daten semantisch und zugleich maschinenlesbar zu beschreiben, was den Implementierungsaufwand minimiert. Neben vielen existierenden Informationsmodellen ist es auch möglich, eigene Informationsmodelle beispielsweise zur Beschreibung der Daten des Energiemoduls zu beschreiben. Da für die Implementierung von OPC UA unterschiedliche Möglichkeiten zur Verfügung stehen (zum Beispiel Binärdaten, XML, MQTT, HTTP+JSON) lassen sich sowohl energie- und ressourcensparende Systeme als auch einfach skalierbare Systeme realisieren. Verschiedene Implementierungen von OPC UA wurden im Rahmen dieses Teilarbeitspaketes untersucht. Der größte Funktionsumfang wurde bei der .NET Standard-Implementierung UA-.NETStandard¹ sowie bei der C-Implementierung open62541² ermittelt. Da OPC UA sowohl auf Mikrocontrollern ohne Betriebssystem (Bare-Metal) als auch auf Mikroprozessoren mit Linux-Betriebssystem einsetzbar sein soll und die Programmierung beider Architekturen in C erfolgt, wurde open62541 als Implementierung ausgewählt. Diese Implementierung besitzt sehr hohe Code-Qualitätsmetriken und wurde seit der Veröffentlichung beständig weiterentwickelt. Gegenüber der ebenfalls sehr umfassenden und guten UA-.NET-Implementierung bestehen heute praktisch keine Unterschiede mehr. Sowohl für iMX8- als auch die etwas energiesparenderen (aber gleichzeitig auch weniger leistungsfähigen) STM32MP1-Prozessoren auf Basis der QBASE3- und QBASE4-Boards des Unternehmens Ka-Ro electronics GmbH wurden Linux-Images und Board-Support-Packages erstellt. Anschließend wurden erste Demo-Implementierungen programmiert und getestet auf dieser Hardware. Als ressourcensparende Alternative zu 10/100/1000BASE-T Ethernet wurde auch Single-Pair-Ethernet (10BASE-T1S, 10BASE-T1L mit Power-Over-Data-Lines) evaluiert, da Single-Pair-Ethernet eine durchgängig IP-basierte Kommunikation vom Sensor oder Aktor bis zur Cloud ermöglicht unter Nutzung eines einheitlichen Protokollstandards. Zudem bietet 10BASE-T1L die Möglichkeit, Energie im Bereich zwischen 0,5W und 50W über die Datenleitungen mitzuübertragen. Single-Pair-

¹ <https://github.com/OPCFoundation/UA-.NETStandard>

² <https://www.open62541.org/>

Ethernet kann so „auf den letzten Metern“ zu einzelnen Sensoren und Aktoren eine kostengünstige Ergänzung zu 100/1000BASE-T-Ethernet darstellen, da anstelle von zwei oder vier Zweidraht-Leitungen nur eine Zweidraht-Leitung benötigt wird. Das für den Datenaustausch vom Konsortium ausgewählte, ebenfalls standardisierte, plattformunabhängige und serviceorientierte OPC UA Protokoll nutzt TCP/IP auf der Transport- und Netzwerk-Schicht und kann somit ohne Abstriche sowohl mit 100/1000BASE-T-Ethernet als auch Single-Pair-Ethernet genutzt werden. Da Single-Pair-Ethernet insbesondere CAN- und RS485-basierte Netzwerke ablösen kann, da bei einem gleichen Verkabelungsaufwand höhere Daten und eine durchgängig TCP/IP-basierte Kommunikation ermöglicht werden können, wurde Single-Pair-Ethernet als Ergänzung zur klassischen 10/100/1000BASE-T-Kommunikationsschnittstelle vorgesehen. Abbildung 1 zeigt zusammenfassend das Systemkonzept mit den Daten- und Energieflüssen. Für die Kommunikation wurde OPC UA als Protokoll gewählt, wobei (Single Pair) Ethernet als Schnittstelle dient. Die Kommunikation zur Außenwelt erfolgt über das Edge-Gateway; aus Ressourcen- und Energiegründen wurde auf eine eigene Schnittstelle des Energiemoduls zur Außenwelt (beispielsweise über ein LTE-Modul) verzichtet. Das Energiemodul versorgt alle Komponenten im System mit Energie und macht die Daten der ein- und ausgehenden Energieflüsse sowie historische Daten für die anderen Komponenten über OPC UA abrufbar.

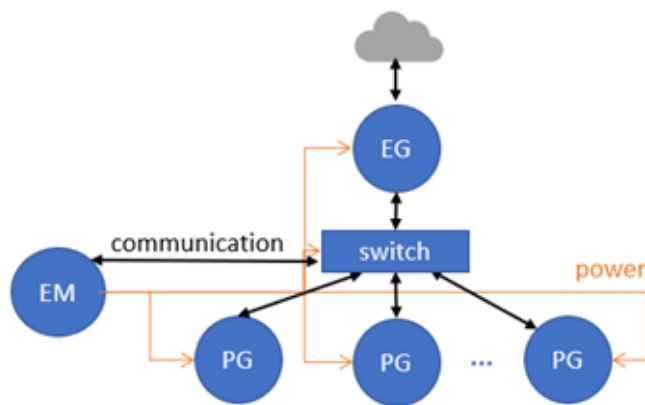


Abbildung 1: Systemkonzept mit Daten- und Energieflüssen (EG = Edge-Gateway, EM = Energiemodul, PG = Process-Gateway)

1.1.4 Modulkonzept für das Energiemanagement

Die elektrischen Parameter der von den Projektpartnern zusammengetragenen Komponenten für Photovoltaik, Wind und Abwärme wurden analysiert und geclustert. Aufgrund der teilweise sehr unterschiedlichen Parameter, insbesondere bei der maximalen Leistungsabgabe und den Leerlaufspannungen, wurde für das Energiemanagement-Konzept beschlossen, das Energiemanagement und die für jede Energiequelle unterschiedlichen DC-DC-

Konverter zu trennen. Die jeweiligen Energiequellen-spezifischen DC-DC-Konverter sind dafür zuständig, eine Zwischenkreisspannung in einem bestimmten Bereich zur Verfügung zu stellen, aus der dann vom Energiemanagement-Modul die finale Versorgungsspannung für die zu versorgende Elektronik generiert wird. Abbildung 2 zeigt das Blockschaltbild des Energiemoduls. Das Energiemodul verfügt über zwei unabhängige Versorgungseingänge sowie sechs Ausgänge für angeschlossene Lasten.

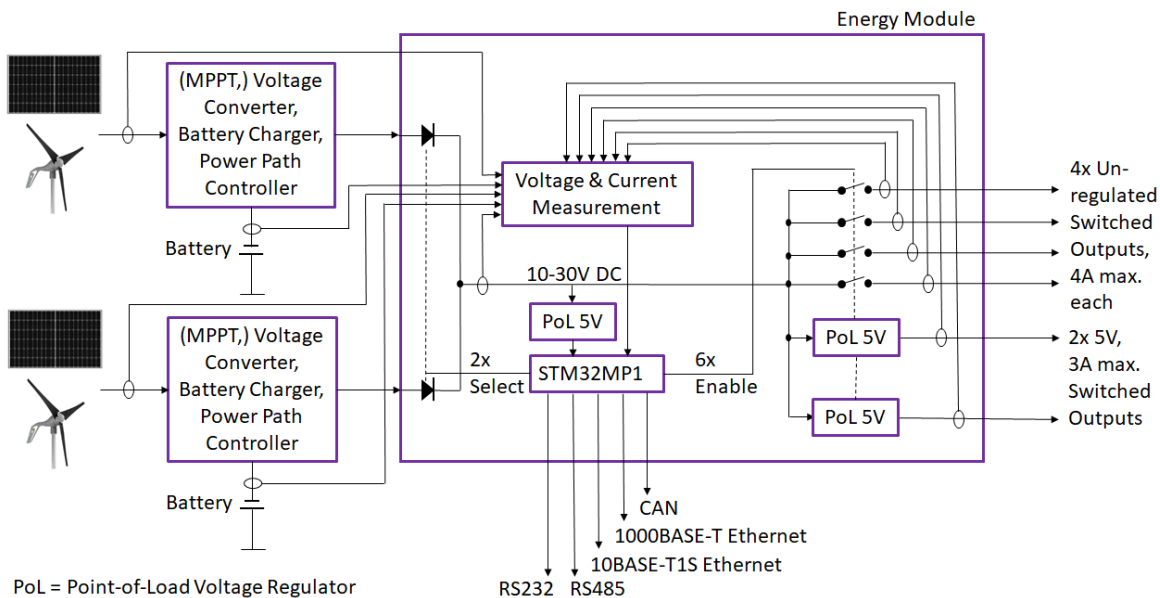


Abbildung 2: Blockdiagramm des Energiemoduls

Bei beiden Eingängen werden der Eingangsstrom und die Eingangsspannung genauso gemessen wie der Strom in und aus einem Batteriespeicher sowie die Batteriespannung. Hierüber kann auch der Ladezustand der Batterie berechnet werden. Alternativ zu den analogen Spannungs- und Strommesseingängen stehen CAN- sowie RS232- und RS485-Schnittstellen zur Verfügung, um digitale Batteriespeicher und Ladeelektroniken auszulesen. Gesteuert vom Mikroprozessor kann automatisch oder durch Benutzerauswahl ein bestimmter Eingang gewählt werden. Die Eingangsspannungen dürfen 10-30V DC betragen, womit die typischen Versorgungsspannungen 12V und 24V für Industrieelektronik abgedeckt wird. Der Mikroprozessor wird über einen eigenen Point-Of-Load-Regler mit 5V und maximal 3A versorgt. Für die Mikroprozessoren wurden die QS-Module von Ka-Ro electronics eingesetzt, die auch schon auf Basis der QBASE-Entwicklungsboards von HANZA und den Projektpartnern verwendet wurden. Die QS-Module sind kleine, quadratische Einlötl-Computermodule mit lediglich 27 mm Kantenlänge. Die QFN-ähnliche Bauform besitzt 100 Anschlüsse im 1mm-Raster. Das zentrale Massepad dient neben EMV-gerechter Signalführung zusätzlich auch zur Wärmeleitung. Besonders energiesparend sind die STM32MP1-Prozessoren von STMicroelectronics, die von Ka-Ro mit bis zu 512MB DDR3L RAM und

4GB eMMC Flash ausgeliefert werden. Die STM32MP1 verfügen über einen Dualcore Cortex-A7 Kern mit einem Cortex-M4-Koprozessor.

Weiterhin wurde geplant, alternativ einige Boards für NXP mit deren hauseigenen i.MX 8M Mini Prozessoren aufzubauen. Ka-Ro liefert diese Prozessoren auf Modulen mit bis zu 1GB DDR3L RAM und 4GB eMMC Flash aus, die nach eigener Angabe pinkompatibel zu den STM32MP1-Modulen sind. Für die Kommunikation mit den Edge- und Prozess-Gateways sind zwei 1000BASE-T-Ethernet- und 10BASE-T1S-Single-Pair-Ethernet-Schnittstellen vorgesehen. Zur Absicherung der OPC-UA-Kommunikation verfügt das Energiemodul über ein Trusted-Platform-Module (TPM), das über I²C an den Mikroprozessor angebunden ist und die Generierung und sichere Verwaltung digitaler Schlüssel erlaubt. Vier Ausgänge sind unreguliert und geben die Eingangsspannung an die angeschlossenen Lasten direkt weiter mit bis zu 4A je Ausgang. Zwei Ausgänge sind auf 5V geregelt und liefern maximal 3A je Ausgang. Alle Ausgänge sind vom Mikroprozessor einzeln ein- und ausschaltbar, je nach verfügbarer Energie. Zudem werden die Spannungen und Ströme von jedem Ausgang erfasst, um die Verbräuche der angeschlossenen Lasten zu bestimmen und zu monitoren. Das Energiemodul fungiert als OPC-UA-Server, über den die Energieflüsse an den Ein- und Ausgängen sowohl umgeschaltet als auch gemessen werden können. Außerdem sollen alle erfassten Messdaten im Mikroprozessor des Energiemoduls gespeichert werden und dann über OPC UA von den Edge- und Prozessgateways als historische Daten abrufbar sein.

AP 2.4 Energiemanagement

Das AP 2.4 umfasst die Entwicklung der Hard- und Software für das Energiemodul zum Einsatz im oben beschriebenen Kontext. In AP 1.1.4 wurde das Modulkonzept für das Energiemanagement spezifiziert. Auf Basis der Spezifikationen wurden Schaltpläne und Layouts des Energiemoduls erstellt. Ein CAD-Modell des Energiemoduls zeigt Abbildung 3.

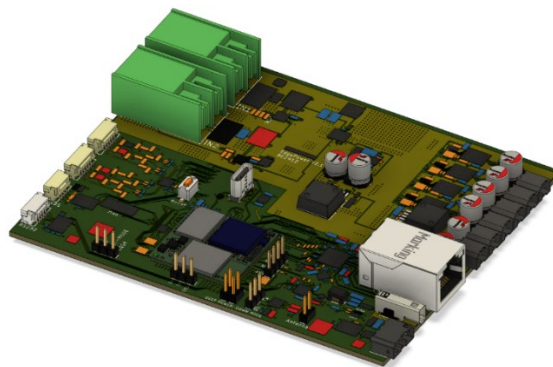


Abbildung 3: CAD-Modell des Energiemoduls

Es wurden nacheinander mehrere Hardware-Revisionen hergestellt, um Schritt für Schritt die ursprüngliche Spezifikation und weitergehende Anforderungen einzelner Projektpartner, die sich im Laufe des Projekts ergeben haben, zu erfüllen. Als Endergebnis wurden zwei Energiemodule mit STM32MP1-Prozessor an den Projektpartner NXP, je drei Energiemo-

dule mit STM32MP1-Prozessor an die übrigen Projektpartner sowie zusätzlich zwei Energiemodule mit i.MX 93-Prozessor an den Projektpartner NXP ausgeliefert. Dieser NXP-Prozessor wurde von NXP letztendlich gegenüber dem älteren, ursprünglich vorgesehenen i.MX 8M Mini für den Einsatz in diesem Projekt bevorzugt. Zu den wichtigsten nicht-standardisierten Anschlussbuchsen wurden passende Gegenstecker mitgeliefert, um den Projektpartnern die Inbetriebnahme in ihrer jeweiligen Einbausituation zu erleichtern. Die Platinen der Energiemodule wurden in passende Gehäuse eingebaut ausgeliefert (siehe Abbildung 4 und Abbildung 5), in denen für die meisten verfügbaren Schnittstellen Aussparungen vorgesehen sind. Für einen Zugriff auf die intern zugänglichen Schnittstellen oder zur Anpassung an spezielle Einbausituationen kann das Gehäuse leicht geöffnet werden.



Abbildung 4: Energiemodul-Gehäuse, Vorderseite



Abbildung 5: Energiemodul-Gehäuse, Rückseite

Wegen der unterschiedlichen Anwendungsgebiete der Energiemodule bei den einzelnen Projektpartnern wurde die verwendete Firmware (bestehend aus Board-Support-Package, Betriebssystem und Softwareanwendung) modular gehalten. Alle Energiemodule mit STM32MP1-Prozessor wurden mit vorinstalliertem zuvor erstellten Board-Support-Package, Linux-Betriebssystem und selbst entwickelter OPC UA-Server-Software ausgeliefert, sodass sie ohne besondere Vorbereitungen direkt wie geplant über das OPC UA-Protokoll gesteuert werden können. Weil sich der Projektpartner ifak alternativ eine Steuerung über die RS485-Schnittstelle gewünscht hat, wurden parallel zu der OPC UA-Server-Software außerdem ein zusätzliches RS485-Energieprotokoll und eine RS485-Server-Software entwickelt und auf elektronischem Wege zur Verfügung gestellt. Alle Energiemodule sind mit den zur (Um-)Programmierung nötigen intern zugänglichen Schnittstellen ausgestattet, sodass ein Austausch einzelner Firmwarekomponenten von den Projektpartnern selbst vorgenommen werden kann. Die Energiemodule mit i.MX 93-Prozessor wurden ohne Firmware ausgeliefert, weil NXP eine Programmierung dieser Module mit einer für ihren Anwendungsfall passenden Firmware eigenverantwortlich durchführt. Bei der Entwicklung des Board-Support-Packages ist es zunächst zu Verzögerungen gekommen, da die eingesetzte

Revision eines der eingesetzten Prozessormodule von Ka-Ro Electronics mit einer ungeeigneten Firmware angeboten wurde. Nach Feststellen der Fehlerursache musste daher eine neue Firmware vom Hersteller angefordert und zuvor entwickelte Firmware daran angepasst werden. Außerdem stellte sich im Laufe der Entwicklung heraus, dass die STM32MP1- und die i.MX 93-Prozessormodule anders als von Ka-Ro Electronics angegeben nicht zu 100% pincompatibel zueinander sind, was eine nachträgliche Änderung des Hardware-Layouts der Leiterplatte erforderlich machte. Dies hat zu weiteren Verzögerungen geführt. Im Zuge der Entwicklung wurde außerdem klar, dass für den Betrieb der vorgesehenen Single Pair-Ethernet (SPE)-Schnittstelle kein passender Treiber verfügbar ist, weswegen zur Nutzung dieser Schnittstelle ein Treiber mit erheblichem Mehraufwand selbst entwickelt werden müsste. Da sich bei den anderen Projektpartnern während der bisherigen Projektlaufzeit kein konkreter Anwendungsfall für diese Schnittstelle ergeben hat, wurde nach einer Kosten-Nutzen-Abwägung die Entscheidung getroffen, das Energiemodul ohne Treiber für die – physisch jedoch verfügbare – SPE-Schnittstelle auszuliefern. Zur Nutzung dieser Schnittstelle kann jederzeit ein passender Treiber über die internen Programmierschnittstellen nachinstalliert werden. Da aktuell herstellerseitig kontinuierlich neue SPE-Komponenten auf den Markt kommen, ist davon auszugehen, dass in Kürze auch ein entsprechender Treiber zur Verfügung steht.

Für die RS232- und CAN-Schnittstellen sind Treiber vorinstalliert und getestet, sodass das Energiemodul hier für zukünftige Erweiterungen vorbereitet ist. Eine Ansteuerung dieser Schnittstellen mit einer von anderen Projektpartnern entwickelten und auf dem Energiemodul installierten Software ist problemlos möglich.

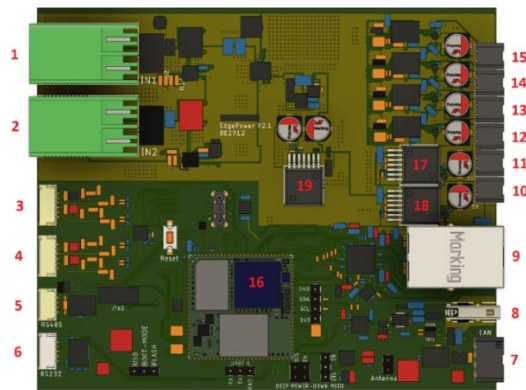


Abbildung 6: Schnittstellen und Funktionsmodule des Energiemoduls

Alle anderen Schnittstellen werden von der verfügbaren Software verwendet. Die einzelnen Schnittstellen und Funktionsmodule des Energiemoduls sind in Abbildung 4 gezeigt sowie in den

Tabellen 1, 2 und 3 im Detail erläutert.

Nr. in Abbildung 6 [Beschriftung auf Gehäuse]	Beschreibung	Pinbelegung (von links nach rechts)	Gegenstecker												
Nr. 1 und 2 [Power In 1 + 2]	Eingänge (10-30V DC) zur Energieversorgung des Energiemoduls selbst und der Verbraucher an den Ausgängen. Priorität der Eingänge kann über OPC UA bestimmt werden	<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>GND</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>10-30V DC</td> </tr> </table>	1	GND	2	10-30V DC	Phoenix Contact LPC 6/ 2-ST-7,62 (mitgeliefert) oder kompatibel								
1	GND														
2	10-30V DC														
Nr. 3 und 4 [Analog In]	Analoge Messeingänge für die Spannungs- und Strommessung durch externe Sensoren. Die Messwerte der am linken Eingang angeschlossenen Sensoren werden dem Eingang Power In 1 zugeordnet, die Messwerte der am rechten Eingang angeschlossenen Sensoren dem Eingang Power In 2.	<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>+3V3 Output</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>External Voltage Input</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>External Current Input</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Battery Voltage Input</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>Battery Current Input</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>GND</td> </tr> </table>	1	+3V3 Output	2	External Voltage Input	3	External Current Input	4	Battery Voltage Input	5	Battery Current Input	6	GND	Zusammenbauen aus Gehäuse JST GHR-06V-S und Crimp-Kontakt SSSL-002T-P0.2 (mitgeliefert) oder kompatibel. Ebenfalls mitgeliefert: 1 Stromsensor zum Anschluss an einen dieser Eingänge.
1	+3V3 Output														
2	External Voltage Input														
3	External Current Input														
4	Battery Voltage Input														
5	Battery Current Input														
6	GND														
Nr. 5 [RS485]	RS485-Schnittstelle zur Kommunikation mit digitalen Batteriemanagement-Systemen oder zur Kommunikation mit anderen Edge-Power-Modulen über das neu entwickelte RS485-Energieprotokoll	<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>+5V</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>RS485-A</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>RS485-B</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>GND</td> </tr> </table>	1	+5V	2	RS485-A	3	RS485-B	4	GND	Zusammenbauen aus Gehäuse JST GHR-04V-S und Crimp-Kontakt SSSL-002T-P0.2 (mitgeliefert) oder kompatibel.				
1	+5V														
2	RS485-A														
3	RS485-B														
4	GND														
Nr. 6 [RS232]	RS232-Schnittstelle zur Kommunikation mit digitalen Batteriemanagement-Systemen (in der bereitgestellten Software nicht verwendet)	<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>GND</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>RS232-CTS</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>RS232-RTS</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>RS232-RX</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>RS232-TX</td> </tr> </table>	1	GND	2	RS232-CTS	3	RS232-RTS	4	RS232-RX	5	RS232-TX	Zusammenbauen aus Gehäuse JST GHR-05V-S und Crimp-Kontakt SSSL-002T-P0.2 (mitgeliefert) oder kompatibel.		
1	GND														
2	RS232-CTS														
3	RS232-RTS														
4	RS232-RX														
5	RS232-TX														

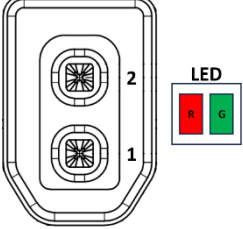
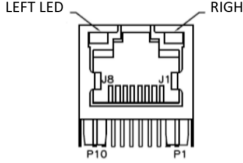
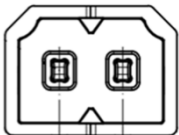
<p>Nr. 7 [CAN]</p>	<p>CAN-Schnittstelle zur Kommunikation mit digitalen Batteriemanagement-Systemen (in der bereitgestellten Software nicht verwendet)</p>	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>+5V</td></tr> <tr><td>2</td><td>CAN High</td></tr> <tr><td>3</td><td>CAN Low</td></tr> <tr><td>4</td><td>GND</td></tr> <tr><td>5</td><td>RS232-TX</td></tr> </table>	1	+5V	2	CAN High	3	CAN Low	4	GND	5	RS232-TX	<p>Phoenix Contact 1778858 oder kompatibel</p>
1	+5V												
2	CAN High												
3	CAN Low												
4	GND												
5	RS232-TX												
<p>Nr. 8 [SPE]</p>	<p>Single-Pair-Ethernet-Schnittstelle (10BASE-T1S) zur Kommunikation mit Edge- und Prozess-Gateways (nur verwendbar nach Einbindung eines passenden Treibers)</p>	 <table border="1"> <tr><td>1</td><td>Positive Data Line</td></tr> <tr><td>2</td><td>Negative Data Line</td></tr> <tr><td>LED G</td><td>Link Status</td></tr> <tr><td>LED R</td><td>Activity Status</td></tr> </table>	1	Positive Data Line	2	Negative Data Line	LED G	Link Status	LED R	Activity Status	<p>Phoenix Contact 1183807 oder kompatibel</p>		
1	Positive Data Line												
2	Negative Data Line												
LED G	Link Status												
LED R	Activity Status												
<p>Nr. 9 [Ethernet]</p>	<p>1000BASE-T, zur Kommunikation mit Edge- und Prozess-Gateways über OPC-UA TCP. IP-Konfig. erfolgt automatisch mit vorinstalliertem DHCP-Client</p>	 <table border="1"> <tr><td>LEFT LED</td><td>Link Status</td></tr> <tr><td>RIGHT LED</td><td>Activity Status</td></tr> </table>	LEFT LED	Link Status	RIGHT LED	Activity Status	<p>RJ45 Netzwerkstecker</p>						
LEFT LED	Link Status												
RIGHT LED	Activity Status												
<p>Nr. 10 und 11 [Power Out 5 + 6]</p>	<p>Schaltbare geregelte Ausgänge (5V DC, Max. 3A) für die direkte Versorgung von Single-Board-Computern</p>		<p>Phoenix Contact 1778832 (mitgeliefert) oder kompatibel</p>										
<p>Nr. 15 – 12 [Power Out 1 – 4]</p>	<p>Schaltbare unregelmäßige Ausgänge (10-30V DC entspr. der Eingangsspannung, Max. 4A) für die Versorgung unterschiedlicher Edge-Power-Komponenten</p>	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>Output</td></tr> <tr><td>2</td><td>GND</td></tr> </table>	1	Output	2	GND							
1	Output												
2	GND												

Tabelle 1: Intern zugängliche Schnittstellen des Energiemoduls

Nr. in Abbildung 6	Bezeichnung und Beschreibung
Nr. 20	USB-C-Buchse (stehend eingebaut) zum Programmieren des Mikroprozessors

Nr. 21	FAN: Schaltbarer geregelter 5V-Ausgang zum Anschluss eines Lüfters, der für Anwendungen mit erhöhter Wärmeentwicklung in das Gehäuse eingebaut werden kann. (s.u.; Lüfter nicht mitgeliefert und Ausgang in bereitgestellter Software nicht verwendet)
Nr. 22	UART A: 3-Pol-Header als Debug-Port (RX, TX, GND) zum Terminal-Zugriff auf den Mikroprozessor
Nr. 23	4-Pol-Header als I2C-Schnittstelle mit Spannungsversorgung (SDA, SCL, +3,3V, GND) zur Anbindung weiterer Systemkomponenten

Tabelle 2: Funktionsmodule des Energiemoduls

Nr. in Abbildung 6	Bezeichnung	Beschreibung
Nr. 16	Prozessormodul	QS-Standard von Ka-Ro Electronics, je nach Ausführung des Energiemoduls STM32MP1 oder i.MX 93
Nr. 17, 18	5V-Schaltregler für Ausgänge	Point-of-Load-Regler, max. 3A.
Nr. 19	5V-Schaltregler für Prozessormodul	Point-of-Load-Regler, max. 3A.

Das Design der Leiterkarte wurde auch einer thermischen Analyse unterzogen. Wie die Wärmebildaufnahme in Abbildung 7 zeigt, kann es vor allem an den geregelten Ausgängen zu hohen Temperaturen kommen, die beim Betrieb im Gehäuse kritisch werden könnten. Aus diesem Grund wurden zusätzlich graphitummantelte Wärmeleitpads in die Gehäuse eingebaut. In Abbildung 8 ist die Platzierung der Platine mit den Wärmeleitpads im Gehäuse zu sehen. Für Anwendungsfälle mit besonders hoher Wärmeentwicklung im Energiemodul ist es zudem möglich, nachträglich einen Lüfter in das Energiemodul einzubauen und an einen dafür vorgesehenen intern zugänglichen Ausgang anzuschließen. Hierfür müssten allerdings entsprechende Lüftungsöffnungen in das vorhandene Gehäuse gefräst und auch die verwendete Software angepasst werden.

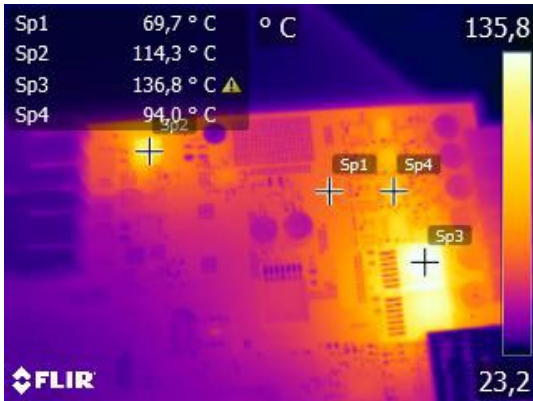


Abbildung 7: Wärmebildaufnahme der unter Voll-
last betriebenen Leiterkarte mit den
Temperaturen der Massefläche
(Sp1), der Mosfets an den Eingängen
(Sp2), der DC/DC-Module an den ge-
regelten Ausgängen (Sp3) und der
High-Side Switches an den ungere-
gelten Ausgängen (Sp4)

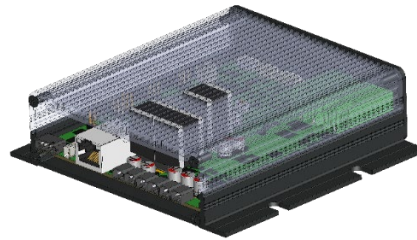


Abbildung 8: CAD-Modell einer Energiemodul-
Platine mit Wärmeleitpads im Ge-
häuse, Oberseite transparent dar-
gestellt

Die wesentlichen Hardware- und Softwarekomponenten des Energiemoduls mit ihren Zusammenhängen sind in Abbildung 9 als UML-Komponentendiagramm dargestellt. Eine gestrichelte Linie mit Pfeil von Komponente A zu Komponente B bedeutet hier, dass B auf A zugreifen kann. Der mögliche Energiefluss durch das Energiemodul von den Eingängen zu den Ausgängen ist durch durchgezogene Linien mit Pfeilen angedeutet. Die unterschiedlichen Grautöne im Diagramm wurden zur besseren Übersicht verwendet.

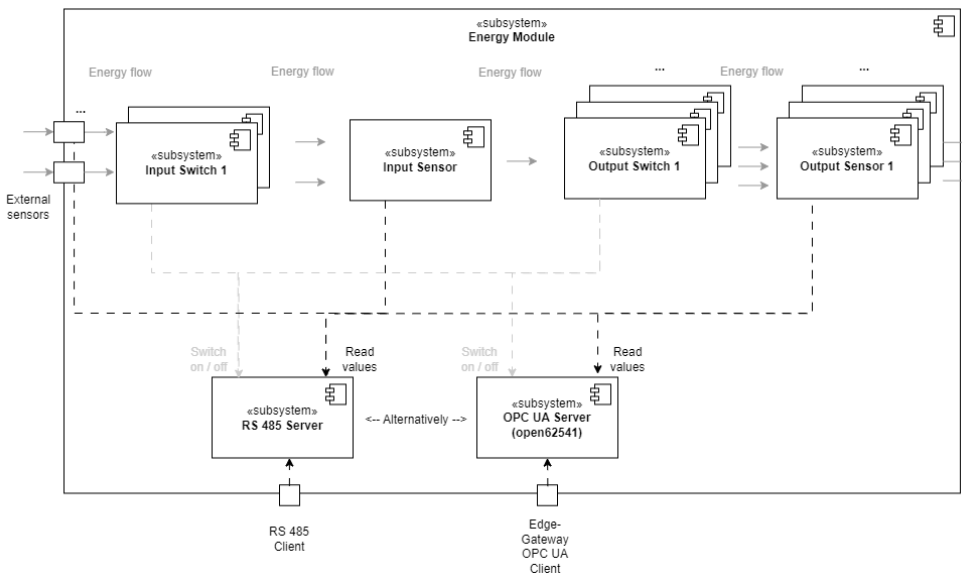


Abbildung 9: Komponentendiagramm des Energiemoduls

In AP 1.1.1 wurde das Systemkonzept für das EdgePower-System definiert, wobei als Standard-Kommunikationsprotokoll OPC UA zum Einsatz kommen soll auf Basis einer TCP/IP basierten Kommunikation. Zur Kommunikation mit dem Energiemodul wurde auf diesem ein OPC UA-Server implementiert, über den Zugriff auf im Folgenden beschriebene Variablen (UAVariable Nodes) möglich ist. Die Variablen sind in die Komponenten (UAObject Nodes) „Inputs“ und „Outputs“ aufgeteilt („hasComponents“-Beziehung), die wiederum Komponenten des UAObject Nodes „Energy Module“ sind. Die Spezifikation der Objekte, Variablen und selbstdefinierten Typen liegt als Nodeset-Datei vor, die teilweise mithilfe der Software „UaModeler“ der Unified Automation GmbH erstellt wurde. Zur Implementierung des Servers wurde die Open Source OPC UA-Implementierung open62541 verwendet, die auch einen Generator zur automatisierten Codeerzeugung aus der Nodeset-Datei bereitstellt. Die Variablen sind im verwendeten OPC UA Information Model hierarchisch organisiert. Manche Variablen existieren jeweils pro Eingang $i = 1, 2$ oder pro Ausgang $j = 1, \dots, 6$ des Energiemoduls.

Inputs

- **Measured Values**

- **Active Input Current** (Datentyp Double, nur Lesezugriff)
Momentan gemessener Strom in A, der das Energiemodul vom momentan aktiven Eingang erreicht, gemessen im Energiemodul
- **Active Input Voltage** (Datentyp Double, nur Lesezugriff)
Momentan gemessene Spannung in V, die durch die Beschaltung des momentan aktiven Eingangs am Energiemodul anliegt, gemessen im Energiemodul
- **Input i External Current** (Datentyp Double, nur Lesezugriff)
Momentan gemessener Strom in A, der von der am jeweiligen Eingang (Power In) extern angeschlossenen Energiequelle kommt, gemessen über den jeweiligen Messeingang (Analog In)
- **Input i External Voltage** (Datentyp Double, nur Lesezugriff)
Momentan gemessene Spannung in V, die an der am jeweiligen Eingang (Power In) extern angeschlossenen Energiequelle anliegt, gemessen über den jeweiligen Messeingang (Analog In)
- **Input i Battery Current** (Datentyp Double, nur Lesezugriff)
Momentan gemessener Strom in A von der zum jeweiligen Eingang (Power In) gehörigen Batterie, gemessen über den jeweiligen Messeingang (Analog In) (positiv, wenn die Batterie entladen wird, und negativ, wenn sie geladen wird)
- **Input i Battery Voltage** (Datentyp Double, nur Lesezugriff)

Momentan gemessene Spannung in V an der zum jeweiligen Eingang (Power In) gehörigen Batterie, gemessen über den jeweiligen Messeingang (Analog In)

- **Reported Values**

Anders als in AP 1.1.1 geplant wird der Ladezustand nicht vom Energiemodul selbst berechnet, weil hierbei in den verschiedenen Anwendungsszenarien der einzelnen Projektpartner aufgrund der eingesetzten höchst unterschiedlichen Energiespeicher individuell vorgegangen werden müsste. Da nur der Projektpartner ifak eine Bereitstellung dieses Wertes seitens des Energiemoduls wünscht, werden hier stattdessen aus den bei ifak eingesetzten Steuergeräten von Victron Energy abgerufene Daten verfügbar gemacht. Wenn ein solches Steuergerät, das sinnvollerweise mit der an Input 1 angeschlossenen Batterie verbunden ist, an die RS 485-Schnittstelle des Energiemoduls angeschlossen ist, dann werden bei jedem Empfang entsprechender Daten über das VE.Direct-Protokoll³ die folgenden Werte aktualisiert:

- **Input 1 Battery State** (Datentyp Double, nur Lesezugriff)
Ladezustand in %, gemeldet über die RS 485-Schnittstelle (mit dem Label "SOC")
- **Reported Input 1 Battery Current** (Datentyp Double, nur Lesezugriff)
Strom in A, gemeldet über die RS 485-Schnittstelle (mit dem Label "I" übertragen als mA-Wert)
- **Reported Input 1 Battery Voltage** (Datentyp Double, nur Lesezugriff)
Spannung in V, gemeldet über die RS 485-Schnittstelle (mit dem Label "V" übertragen als mV-Wert)

- **Switches**

- **Input Mode** (Datentyp InputModeType, Lese- und Schreibzugriff)
Bestimmt, welcher der beiden Eingänge gewählt werden soll. Der selbstdefinierte Typ InputModeType und bietet folgende Optionen, die als Werte vom Typ UInt32 kodiert werden:
 - „Input 1“ (kodiert als 1, Defaultwert): Eingang 1 ist manuell fest gewählt
 - „Input 2“ (kodiert als 2): Eingang 2 ist manuell fest gewählt

³ <https://www.victronenergy.com/upload/documents/VE.Direct-Protocol-3.34.pdf>

- „Auto“ (kodiert als 0): Wählt den Eingang, an dem Spannung anliegt. Wenn an beiden Eingängen Spannung anliegt, wird manchmal Eingang 1 gewählt oder aber die Last wird auf beide Eingänge verteilt.
- **Input i Active** (Datentyp Boolean, nur Lesezugriff)
1, wenn Eingang i aktiv ist, sonst 0.

Outputs

- **Measured Values**
- **Output j Voltage** (Datentyp Double, nur Lesezugriff)
Momentan gemessene Spannung in V, die am Ausgang j anliegt
- **Output j Current** (Datentyp Double, nur Lesezugriff)
Momentan gemessener Strom in A, der über Ausgang j ausgegeben wird
- **Switches**
- **Output j Active** (Datentyp Boolean, Defaultwert false für j = 1...4, Defaultwert true für j = 5...6, Lese- und Schreibzugriff)
Damit können die Ausgänge unabhängig voneinander ein- oder ausgeschaltet werden.

Sampling Interval (Datentyp UInt16, Defaultwert 30, Lese- und Schreibzugriff)

Aufgrund der Anforderungen aus AP 1.1.1 sind über OPC UA auch historische Daten abrufbar. Alle Werte mit Nur-Lesezugriff werden mit dem hier konfigurierten Abstand gesammelt und über OPC UA Historical Access verfügbar gemacht.

Eine typische Interaktion mit dem OPC UA-Server des Energiemoduls wird in Form eines UML-Sequenzdiagramms in Abbildung 10 gezeigt. Im dargestellten Szenario wird zunächst mithilfe einer über “Switches” erreichbaren Variable ein Ein- oder Ausgang umgeschaltet und anschließend mithilfe einer über “Measured Values” erreichbaren Variable ein Sensorwert ausgelesen. Zum Schluss ist vereinfacht dargestellt, wie Sensorwerte vom Server im konfigurierten Abstand “Sampling Interval” periodisch ausgelesen, als historische Daten gespeichert und über die so genannte HistoryRead-Operation gesammelt vom Client abgerufen werden. Es ist jeweils erkennbar, wie die Komponenten des Energiemoduls aus Abbildung 9 miteinander kommunizieren.

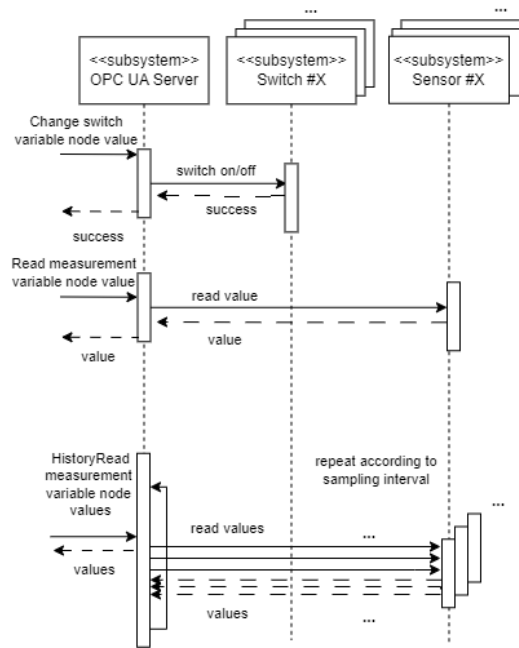


Abbildung 10: Sequenzdiagramm zum Energiemodul

Um die Möglichkeiten zur abhörsicheren Kommunikation in dieser Edge-Power-Komponente zu demonstrieren, akzeptiert der OPC UA-Server auch gemäß OPC UA-Standard mit SSL verschlüsselte Verbindungen von Clients. Hierfür haben alle beteiligten Projektpartner in gegenseitiger Abstimmung Certificate Authorities (CAs) eingerichtet. Für verschlüsselte Verbindungen identifiziert sich der Server mit einem pro Energiemodul individuell ausgestellten von der Hanza-Edge-Power-CA signierten Zertifikat und vertraut auf der Gegenseite allen von den Edge-Power-CAs von NXP, Thorsis und Hanza signierten Zertifikaten. Umgesetzt wurde diese Funktionalität mit den Security-Features von open62541 und der OpenSSL-Bibliothek. Bei Bedarf kann stattdessen über eine zu implementierende Software-Erweiterung auch das hardwareseitig integrierte TPM verwendet werden. Wie bereits erwähnt, ist neben diesem OPC UA-Zugriff auch ein Zugriff über ein RS485-Energieprotokoll mittels einer alternativen Software verfügbar. Dieses Protokoll sieht eine ASCII-Klartext-Kommunikation in Form von an das Energiemodul gestellten Anfragen gefolgt von jeweils einer Antwort vor. So können beispielsweise mit der Anfrage „OUT1?“ Informationen über Ausgang 1 ausgelesen werden. Die Antwort des Energiemoduls hat in diesem Fall die Form „[Active?];[Voltage];[Current]“, wobei „[Active?]“ angibt, ob der Ausgang aktiv ist (0 oder 1),

„[Voltage]“ die Spannung in V und [Current] den Strom in A bedeuten. Auch Zustandsänderungen sind möglich, zum Beispiel das Einschalten von Ausgang 1 mit der Anfrage „OUT1ON“.

Zusammenfassend wurde in AP 2.4 gemäß der Planungen aus AP 1.1.4 und unter Berücksichtigung der weiteren Anforderungen der Projektpartner aus dem späteren Projektverlauf ein Energiemodul hardware- und softwareseitig entwickelt und produziert, das als Schnittstelle zwischen variablen Energiequellen und den weiteren Modulen des Edge-Power-Systems dient. Als Energieprotokoll zur Kommunikation mit weiteren Komponenten im Rahmen des übergeordneten Energiemanagements kommen dabei OPC UA und alternativ ein neu entwickeltes RS485-Kommunikationsprotokoll zum Einsatz. In der abschließenden Bearbeitung des AP 2.4 wurden durch Tests und praktischen Einsatz von den Projektpartnern zurückgemeldete Verbesserungs- und Erweiterungsvorschläge umgesetzt.

Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigste Position des zahlenmäßigen Nachweises sind die Personalkosten. Aufgrund der bereits beschriebenen Verzögerungen bei der Entwicklung des Board-Support-Packages und den daraus resultierenden Verzögerungen aufeinander aufbauenden und voneinander abhängigen Arbeiten, ist unvorhergesehener Mehraufwand angefallen, welcher für die gestiegenen Personalkosten verantwortlich war. Bei den beantragten Reisekosten handelte es sich um einen Erfahrungswert vorangegangener Projekte. Im heutigen Geschäftsleben hat sich die Digitalisierung von Veranstaltungen und Meetings deutlich verstärkt. Die regelmäßig stattfindenden Statusmeetings wurden größtenteils in digitalen Formaten durchgeführt, da die digitale Kommunikation eine effizientere und flexiblere Alternative darstellte. Dies führte zu einem Minderbedarf im Bereich der Reisekosten.

Auch bei den Material- und sonstigen unmittelbaren Vorhabenkosten kam es zu einem Minderbedarf. Gemäß Antrag waren Materialkosten von 5.000 € für die Demoboards für die Evaluierung und Demoprogrammierung sowie 10.000 € für die für das System notwendigen elektronischen Bauteile (Halbleiter, passive Bauteile und Elektromechanik) vorgesehen. Dies ist unter anderem in einer leichten Entspannung der Lage auf dem Halbleitermarkt im Vergleich zur Antragstellung begründet, sodass dies positive Auswirkungen auf sowohl Verfügbarkeit als auch Kosten der benötigten Komponenten hatte.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Arbeiten wurden sorgsam geplant und anschließend entsprechend des Projektplans und der zur Projektlaufzeit festgestellten Anforderungen umgesetzt. Die zugrundeliegenden Technologien und Strategien wurden so gewählt, dass das entwickelte System auch zukünftig noch konkurrenzfähig ist. Alle geleisteten Arbeiten waren angemessen und notwendig, um die Projektziele zu erreichen.

Darstellung des voraussichtlichen Nutzens sowie der Verwertbarkeit des Ergebnisses

Durch die Durchführung des Projekts wurde die vorhandene Expertise in den Bereichen Edge-Computing, Energy-Harvesting, konzeptionelle Datenmodelle sowie ressourcensparende Rechenmodule ausgebaut und die Ergebnisse können in weitere Projekte eingebracht bzw. für Aufträge aus der Industrie genutzt werden. Die Ergebnisse können mittelbar auch in weitere interne wie externe Entwicklungsprojekte eingebracht bzw. für Aufträge aus der Industrie genutzt werden und tragen somit zum innerbetrieblichen Know-How bei. Die **wirtschaftliche Verwertbarkeit des Ergebnisses** orientiert sich neben der technischen Innovationskraft des durchgeführten Projektes auch an der Entwicklung der Zielgruppe für ein im Nachgang des Projektes entstehendes Endprodukt. Dass dieser Markt wirtschaftlich interessant ist, zeigt sich darin, dass die weltweiten Entwicklungen zu Edge-Systemen und KI-Verfahren auch weiterhin als hoch-dynamisch eingeschätzt werden. Dezentrale Sensorik und Edge-Computing sind auch nach Projektabschluss noch als Schlüsselfaktoren für die Prozessoptimierung von Anlagen und Systemen zu sehen. Als einer der wichtigsten Bestandteile hierbei ist die Energieversorgung zu nennen, da nicht überall bereits entsprechende Infrastruktur bereitsteht, aus der die Elektronik versorgt werden kann. Ein intelligentes und modulares Energieversorgungssystem basierend auf Energy-Harvesting bietet somit weiterhin ein sehr großes wirtschaftliches Potential, da solche Systeme universell in der Industrie eingesetzt werden können. Hieran könnte HTS indirekt über die Fertigung der notwendigen Elektronik in 2-4 Jahren nach Projektende partizipieren. Als Teil des HANZA-Konzerns steht HTS dabei eine wachsende Anzahl an Industriekunden zur Verfügung, denen diese neuen Technologien nähergebracht werden können, um aus den gesammelten Erfahrungen den größtmöglichen wirtschaftlichen Nutzen zu ziehen.

Die im Rahmen dieses Projektes demonstrierte Anwendung der entwickelten Technologie in einer Biogasanlage ist dabei bereits für sich genommen ein Thema, das im Kontext der

regenerativen Energiequellen auch in Zukunft große Bedeutung haben wird. Allerdings besitzt die Technologie, auch wenn sie für einen bestimmten Anwendungsbereich entwickelt wurde, darüber hinaus ein hohes Anpassungspotenzial und könnte in modifizierter Form auch in verschiedenen anderen Anwendungsbereichen eingesetzt werden. So ist mittelfristig der nachhaltige Transfer des erworbenen Knowhows auf andere Energy-Harvesting-basierte Entwicklungen, Anwendungen und Forschungsprojekte geplant. Gleiches gilt für die gewonnene Expertise im Bereich der Kommunikationstechnik mit Single-Pair-Ethernet.

Weiterhin wird vor dem Hintergrund wachsender Gefahren durch Cyberkriminalität auch das Thema der Absicherung der Kommunikation innerhalb von Industrieprozessen, zu dem im Zuge dieses Projektes ebenfalls zusätzliche Expertise erlangt wurde, immer wichtiger. So haben Cyberattacken in Deutschland laut Bitkom e.V. bei steigender Tendenz zuletzt (2024) einen jährlichen Schaden von 178,6 Mrd. Euro verursacht⁴. Der größte Anteil (26%) der Cyberattacken auf Unternehmen weltweit war 2024 dabei laut Statista in der Fertigungsbranche zu verzeichnen⁵, in der große vernetzte Industrieanlagen typischerweise breite Anwendung finden. Die Berücksichtigung von Sicherheitsaspekten macht die Entwicklungen im Rahmen dieses Projekts damit für die Wirtschaft zusätzlich attraktiv.

Die Erfolgsaussichten für eine anschließende wirtschaftliche Verwertung sind daher weiterhin als sehr hoch einzustufen. **Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit** ist somit gegeben.

Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die im Rahmen dieses Teilvorhabens entwickelte Komponente ist speziell auf den Zweck des sicheren und energieeffizienten Energiemanagements mit flexiblen Anschlussmöglichkeiten an verschiedenste Energiequellen und Ansteuerung über mehrere standardisierte Schnittstellen zugeschnitten. Da dem Zuwendungsempfänger während der Durchführung des Gesamtvorhabens keine vergleichbaren Entwicklungen oder technologischen Fortschritte auf dem bearbeiteten Gebiet des Vorhabens durch andere Institutionen, Forschungseinrichtungen oder Unternehmen bekannt geworden sind, ist davon auszugehen,

⁴ <https://www.bitkom.org/Bitkom/Publikationen/Studie-Wirtschaftsschutz>

⁵ <https://www.statista.com/statistics/1315805/cyber-attacks-top-industries-worldwide>

dass in der Zwischenzeit auch keinerlei zu diesem Teilvorhaben ähnliche Konzepte entwickelt worden sind.

Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnis

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes können in vielerlei Hinsicht wissenschaftlich-technisch als auch wirtschaftlich genutzt werden. Die wissenschaftliche Verwertung erfolgte im Konsortium gemeinsam durch Veröffentlichungen sowie durch die Teilnahme an verschiedenen digitalen Veranstaltungen sowie Präsenzveranstaltungen zur Vernetzung. Herr Prof. Dr. Christoph Budelmann, damaliger Geschäftsführer von HTS; nahm beispielsweise am 10. Oktober 2022 im Rahmen des Konsortium-KI-Workshops zum maschinellen Lernen mit einem eigenen Vortrag teil. Thema des Vortrags war KI-Hardware, insbesondere die Anforderungen an KI-Implementierungen auf mobilen Geräten und At-The-Edge, spezielle KI-Hardware für ressourcenbegrenzte Anwendungen (Energieaufnahme, Größe, Wärmeentwicklung, Rechenleistung, Speicher) sowie aktuelle Anwendungen von KI auf Systemen mit begrenzten Ressourcen. Mit den Teilnehmer:innen wurden anschließend auch weitergehende Verwertungsmöglichkeiten diskutiert. Am 28.04.2023 sowie am 05.05.2023 wurde das Projekt weiterhin im Zuge interner Vorträge zum Thema Single-Pair-Ethernet vorgestellt.