

RESili8

Schlussbericht

Förderkennzeichen: 03EI4051C

Danksagung

Das Forschungsprojekt RESili8 wurde in der Zeit vom 01.05.2022 bis zum 30.04.2025 durch den Projektträger Jülich (PtJ) unter dem Förderkennzeichen 03EI4051C betreut. Die Finanzierung erfolgte aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, wofür wir uns herzlich bedanken.

Gefördert durch:



**aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages**

Hinweis

Das Vorhaben fand im Rahmen des ERA-Net JOINT CALL 2020 DIGITAL TRANSFORMATION FOR GREEN ENERGY TRANSITION (MICALL20) statt und wurde mit folgenden Partnern durchgeführt:

- Austrian Institute of Technology GmbH, Österreich, [AIT]
- Wiener Netze GmbH, Österreich, [WN]
- OFFIS e.V., Deutschland, [OFF]
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Deutschland, [ISE]
- Solandeo GmbH, Deutschland, [SOL]
- KTH Royal Institute of Technology, Schweden, [KTH]
- Dlaboratory Sweden AB, Schweden, [DLAB]
- Eindhoven University of Technology, Niederlande, [TUE]

Der vorliegende Bericht stellt den Schlussbericht des Fraunhofer ISE dar. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Der Projektgesamtschlussbericht wurde vom Gesamtprojektleiter AIT bei ERA-Net eingereicht

This project has received funding in the framework of the joint programming initiative ERA-Net Smart Energy Systems' focus initiative Digital Transformation for the Energy Transition, with support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 883973.





RESili8 - Resilience for Cyber-Physical Energy Systems

Teilvorhaben

Design und Validierung von resilienten Softwareanwendungen für die Smart Meter Gateway Infrastruktur

Autoren: Marco Mittelsdorf, Stefan Wursthorn, Dirk Zimmermann

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
in Freiburg

Förderkennzeichen: 03EI4051C
Berichtszeitraum: 01.05.2022 – 30.04.2025
Projektleitung: Marco Mittelsdorf
marco.mittelsdorf@ise.fraunhofer.de

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Inhalt

Zusammenfassung.....	5
1. Ausgangssituation des Vorhabens	5
1.1 Aufgabenstellung.....	5
1.2 Planung und Ablauf des Vorhabens	6
1.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand	8
1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	8
2. Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens	9
2.1 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse	9
AP 1 Project Coordination and Management	9
AP 2 Dissemination and Knowledge Community Integration	10
AP 3 Concept and Architecture for Resilient Planning and Operation.....	10
AP 4 Resilience Engineering Support.....	10
AP 5 Resilient Applications and Operation.....	11
AP 6 Proof-of-Concept Evaluation.....	12
2.2 Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	14
2.3 Relevante Ergebnisse von dritter Seite	14
2.4 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen	15

Zusammenfassung

Das Projekt „RESili8“ zielte darauf ab, die Resilienz zukünftiger Energiesysteme durch Digitalisierungslösungen zu stärken. Im Fokus des Teilvorhabens stand die Validierung von Softwareanwendungen für Smart Grids, insbesondere im Kontext intelligenter Messsysteme (iMSys).

Im Rahmen von RESili8 wurde das „Automated Cyber-Physical Testing and Validation Framework“ (ACTV) entwickelt und mit einer erweiterten GitLab CI/CD-Entwicklungs-Pipeline verknüpft. Mithilfe dieser Validierungs-Pipeline können Softwareänderungen kontinuierlich getestet und deren Auswirkungen auf verschiedene Netzszenarien geprüft werden. Die Integration erfolgt über Docker-Container, sodass Anwendungen flexibel und reproduzierbar validiert werden können.

Die entwickelten Konzepte und Lösungen wurden anhand eines praxisnahen Szenarios evaluiert. Dabei ging es um die netzorientierte Steuerung einer Ladestation gemäß § 14a EnWG über ein EEBus-basiertes Energiemanagementsystem (EMS). Dazu wurden virtuelle EEBus-Geräte für Steuerbox, EMS und Zähler als Docker-Container implementiert und mit dem ACTV getestet. Die Kommunikation erfolgte per MQTT und EEBus, wobei der eigens entwickelte Open-Source-Stack „jEEBus“ zum Einsatz kam. Mithilfe des Setups konnten sowohl Einzel- als auch Systemtests mit mehreren EMS in unterschiedlichen Netzbereichen durchgeführt werden, inklusive der Simulation kritischer Netzsituationen.

Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass die entwickelte Validation Pipeline und das ACTV den Softwareentwicklungsprozess durch automatisierte, kontinuierliche und realitätsnahe Tests deutlich optimieren. So konnten im Projekt Fehler in den Softwareanwendungen frühzeitig erkannt und behoben werden. Die Ansätze haben sich als praxistauglich erwiesen und sind flexibel erweiterbar.

Aufgrund des fortschreitenden Rollouts von iMSys sowie des beschlossenen Steuerungsrollouts sehen wir weiterhin einen steigenden Bedarf an Prüf- und Testmöglichkeiten, der sich neben Steuerboxen auch auf andere Produktkategorien wie beispielsweise HEMS, Ladestationen, Wechselrichter und Wärmepumpen ausdehnen wird. Die Validation Pipeline und das ACTV sollen daher zukünftig um Flexibilitätsmanagementkonzepte sowie die genannten Produktkategorien erweitert werden. Somit sollen vielseitigere Szenarien validiert werden können.

1. Ausgangssituation des Vorhabens

1.1 Aufgabenstellung

Zukünftige Energiesysteme werden zwangsläufig einen wesentlich höheren Digitalisierungsgrad aufweisen, als dies heute der Fall ist. Dabei ist das Ausrollen von Digitalisierungslösungen der Schlüssel für eine hohe Durchdringung mit Erneuerbare Energien (EE). Gleichzeitig bringen sie weitere Vorteile, indem sie innovative Lösungen für die Sektorenkopplung, in der Netzbetriebsführung, bei der Direktvermarktung von Energie oder in Form von regionalen Energiegemeinschaften ermöglichen. Microgrids, energetische Nachbarschaftsquartiere oder regionale Systemdienstleistungsmärkte sind konkrete Beispiele. Allen Ansätzen ist gemein, dass sie die Betriebsführung von Energienetzen fundamental verändern. Ohne eine starke Durchdringung mit Digitalisierungstechnologien wären sie nicht zu realisieren. Für Netzbetreiber wird die Gesamtsicherheit des Systems stets an höchster Stelle stehen. Insbesondere durch die Notwendigkeit, ihre Netze effizienter zu betreiben, rückt neben dem klassischen Robustheitskonzept die Resilienz des Systems in den Fokus. Wenn Energiesysteme auf allen Netzebenen hochgradig von Digitalisierungstechnologien durchdrungen sind, kann dem Resilienzaspekt nur dann angemessen entsprochen werden, wenn eine cyber-physische Perspektive grundsätzlich bei allen Design-, Betriebs- und Analyseaspekten gewahrt wird.

Das Ziel von RESili8 insgesamt besteht in der Entwicklung eines Lösungspakets, das drei wesentliche Herausforderungen adressiert:

1. **Architektur:** Netzbetreiber stehen häufig vor der Herausforderung, die passende Smart-Grid-Architektur auszuwählen. RESili8 entwickelt dafür ein Toolkit auf Basis des Smart Grid Architecture Models (SGAM), das Netzbetreiber bei der Planung und Bewertung zukünftiger, resilienter Energiesysteme unterstützt. Die Entwicklung dieses Toolkits basiert auf den Erfahrungen der Partner aus dem Vorprojekt LarGo, Erkenntnissen aus der internationalen Standardisierung sowie dem Input externer Stakeholder.
2. **Implementierung und Validierung:** Damit das Gesamtsystem resilient ist, müssen alle Teile entsprechend implementiert sein, was insbesondere Überwachungs- und Kontrollsysteme einschließt. RESili8 entwickelt Lösungen zum schnellen Implementieren von Anwendung und nutzt Rapid-Validation-basierte Konzepte, um deren Resilienz sicherzustellen.
3. **Analyse und resilienter Betrieb:** Heute wird Robustheit durch großzügige Auslegung der Betriebsmittel sichergestellt. Die (statistische) Erfassung der Known Unknowns steht dabei im Zentrum. Die zentrale Strategie liegt hier in der Überversorgung, doch der in Zukunft stärker werdende Druck zur Effizienzsteigerung macht diesen Ansatz zu teuer und zu wenig nachhaltig. RESili8 entwickelt einen Lösungsansatz für die Analyse und den resilienten Betrieb von cyber-physischen Energiesystemen (CPES).

Das Fraunhofer ISE adressiert im Projekt insbesondere die zweite Herausforderung, die Entwicklung und Validierung von resilienten Softwareanwendungen. Hierzu werden folgende Teilaufgaben bearbeitet:

- Entwicklung von Werkzeugen für das Design und die Umsetzung von resilienten Softwareanwendungen im Smart Meter Gateway (SMGW) Kontext.
- Entwicklung eines Testframeworks auf Basis von digitalen Zwillingen zur Validierung der resilienten Anwendungen unter anderem unter Einbeziehung von Netzzustandsdaten sowie Steuersignalen von Steuereinheiten
- Erprobung der entwickelten Werkzeuge und Anwendungen

1.2 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt ist in sechs Arbeitspakete (AP) bzw. Work Packages (WP) gegliedert, die im Folgenden kurz beschrieben werden. Die Struktur der Arbeitspakete ist in Abbildung 1 dargestellt.

Die Arbeitspakete AP1 und AP2 umfassen das übergeordnete Projektmanagement, die Kommunikation und die Einbindung in die ERA-Net Knowledge Community. Dabei stellt AP1 die organisatorische Steuerung, das Berichtswesen sowie alle internen und externen Kommunikations- und Dissemination-Aktivitäten sicher. AP2 ergänzt dies durch die aktive Beteiligung an ERA-Net Knowledge Community-Treffen und die Bereitstellung von Projektergebnissen. Beide Arbeitspakete sorgen gemeinsam für eine strukturierte Projektumsetzung, transparente Berichterstattung und die Verbreitung der Projektergebnisse im internationalen Kontext. Die inhaltliche Projektbearbeitung findet in den Arbeitspaketen AP3 bis AP6 statt. In AP3 werden die Anforderungen an resiliente Architekturen analysiert, ein Gesamtkonzept für das Resilienz-Lösungspaket entwickelt und passende Validierungsszenarien definiert. Diese Konzepte bilden die Grundlage für AP4, in dem bestehende Analyse- und Modellierungsstrategien angepasst, resiliente Planungs- und Steuerungsansätze entwickelt und KI-basierte Auswertungsverfahren sowie modulare Kontrollalgorithmen erarbeitet werden. Daran anschließend adressiert AP5 die Entwicklung von resilienten Softwareanwendungen sowie die Entwicklung des Rapid Validation Frameworks. Abschließend werden in AP6 auf Basis der zuvor entwickelten Konzepte und Werkzeuge Testplattformen aufgebaut, Labor- und Feldtests durchgeführt und eine umfassende Evaluation vorgenommen. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in Empfehlungen für den weiteren Einsatz und zukünftige Forschungsprojekte ein.

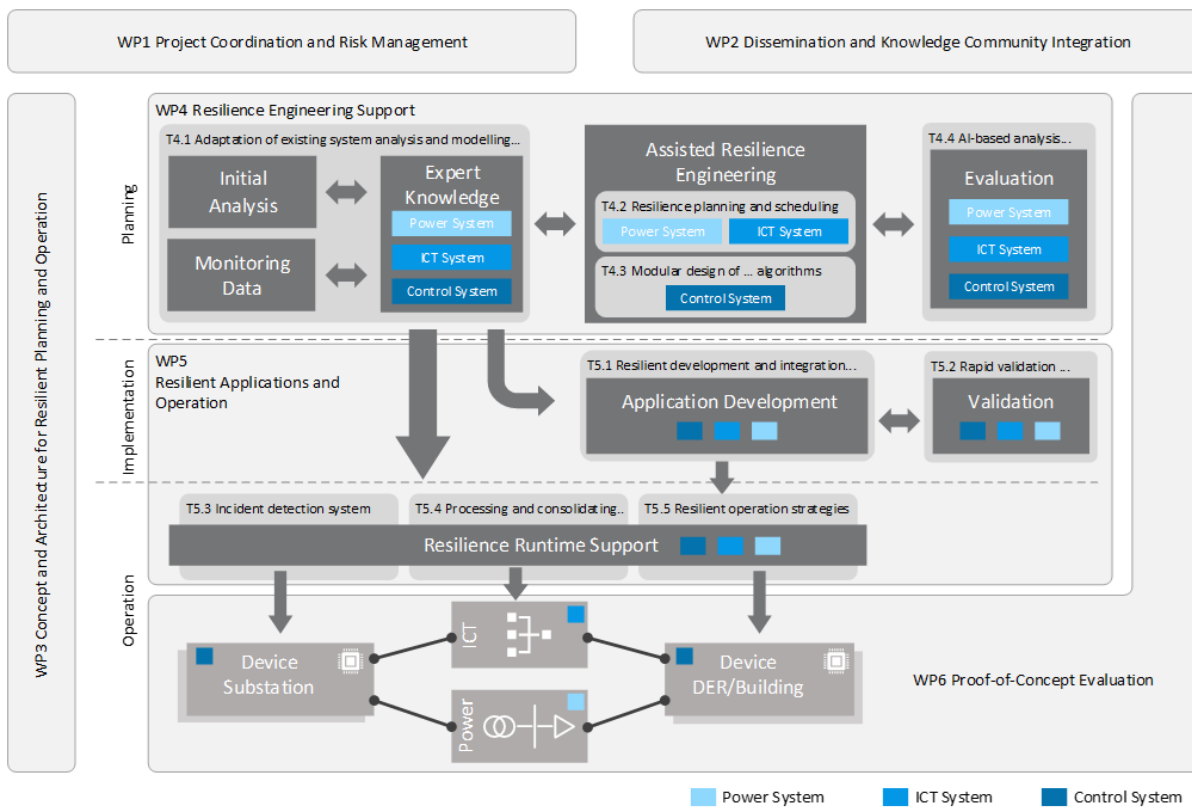


Abbildung 1 Arbeitspaketstruktur

1.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Der verstärkte Einsatz dezentraler Stromerzeuger aus erneuerbaren Energien hat in den letzten Jahren zu einem grundlegenden Wandel in der Planung und im Betrieb von Stromnetzen geführt. Durch die Vielzahl neuer, verteilter Energiequellen ist die Komplexität des Gesamtsystems deutlich gestiegen. Moderne Automatisierungs- und Steuerungssysteme, die auf fortschrittlichen Informations- und Kommunikationstechnologien basieren, werden eingesetzt, um dieser Komplexität zu begegnen. Die Validierung dieser Systeme konzentriert sich bisher jedoch vor allem auf einzelne Komponenten im Offline-Betrieb, wodurch das Zusammenspiel im Gesamtsystem oft unberücksichtigt bleibt.

Ein bedeutender Fortschritt wurde durch den Einsatz von Echtzeit-Digital-Simulatoren (Real-time Digital Simulator RTDS) und Hardware-in-the-Loop-Tests (HIL) erzielt. Diese Technologien, darunter Controller-HIL (C-HIL) und Power-HIL (P-HIL), haben die Lücke zwischen Simulation und realen Laborprototypen deutlich verkleinert und sind heute etablierte Methoden zur Komponentvalidierung. Solche Ansätze sind jedoch bislang nur bedingt für die Validierung großer, verteilter Software-Ökosysteme geeignet, wie sie in modernen, digitalisierten Stromnetzen zunehmend eingesetzt werden.

Mit der zunehmenden Komplexität digitalisierter Stromnetze wird eine hohe Testabdeckung immer schwieriger. Die Zahl der notwendigen Tests und die Menge der zu prüfenden Daten wachsen exponentiell und lassen sich manuell kaum noch bewältigen. Daher besteht Forschungsbedarf in der Weiterentwicklung automatisierter Testprozesse, die eine effiziente und zuverlässige Validierung auch großer, verteilter Systeme ermöglichen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass bislang Methoden und Werkzeuge fehlen, die eine umfassende und systematische Validierung verteilter, digitalisierter Software-Ökosysteme auf Systemebene ermöglichen.

Als Lösungsansatz für diese Problematik wurde gemeinsam mit dem Projektpartner AIT ein automatisiertes Test- und Validierungs-Framework für cyber-physische Systeme entwickelt, das nachfolgend im Arbeitspaket 5 näher beschrieben wird.

1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Dieses Projekt wurde als Verbundprojekt mit folgenden Projektpartnern durchgeführt

Kürzel	Partner	Land
AIT	AIT Austrian Institute of Technology GmbH Das AIT ist Gesamtprojektkoordinator und bringt seine Kompetenzen in den Bereichen Modellierung, Entwurf und Validierung von Energiesystemen sowie der Cyber Security von intelligenten Stromnetzen ein.	Österreich
WN	Wiener Netze GmbH Die Wiener Netze GmbH betreibt das Wiener Stromnetz und verfügt über fundierte Kenntnisse zu Netzplanung, Netzbetrieb sowie zu Anforderungen an die Ausfallsicherheit.	Österreich
OFF	OFFIS e.V. Das OFFIS verfügt über langjährige Erfahrung in der Erforschung, Erweiterung und Anwendung von KI-Methoden auf Basis autonomer Agenten für den ausfallsicheren Betrieb von Stromnetzen.	Deutschland

SOL	Solandeo GmbH Solandeo ist ein wettbewerblicher Messstellenbetreiber und verfügt über einen der größten Datenpools für hochwertige Messdaten aus erneuerbaren Energieanlagen in Deutschland.	Deutschland
KTH	KTH Royal Institute of Technology Das KTH verfügt über mehr als 10 Jahre Erfahrung im Bereich Security für Cyber-physische Systeme. Zu den Kernkompetenzen zählen mathematische Modellierung, Optimierung, State Estimation sowie die Angriffserkennung.	Schweden
DLAB	Dlaboratory Sweden AB DLAB wurde 2010 gegründet und hat eine einzigartige Systemlösung für die Überwachung und Analyse von Stromnetzstörungen entwickelt, die Fehlervermeidung und vorausschauende Wartung ermöglicht.	Schweden
TUE	Eindhoven University of Technology Der Fachbereich Control Systems Technology (CST) der TUE verfügt über ein fundiertes Fachwissen in den Bereichen hybride Energiesysteme, Steuerungsstrategien basierend auf maschinellem Lernen sowie mathematische Modelle technischer Systeme.	Niederlande

2. Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

2.1 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse

Im Folgenden werden die Tätigkeiten innerhalb der einzelnen Arbeitspakete näher beschrieben, die in Abschnitt 1.2 kurz vorgestellt wurden. Die Arbeiten des Fraunhofer ISE konzentrierten sich hierbei insbesondere auf das AP5 „Resiliente Applikationen und Betriebsführung“. Im Rahmen dieses APs wurde gemeinsam mit dem Projektpartner AIT ein Validierungsframework für Smart Grid Anwendungen entwickelt. Am ISE wurde zudem eine Testanwendung implementiert, die EEBus-seitig die netzorientierte Steuerung nach § 14a EnWG umsetzt. Diese konnte in AP6 erfolgreich getestet werden.

AP 1 Project Coordination and Management

Die Leitung dieses APs wurde vom AIT durchgeführt. Im Rahmen von AP1 wurden im gesamten Projektverlauf regelmäßige Konsortialtreffen organisiert, um den Austausch zwischen den Partnern zu gewährleisten und die Projektfortschritte gemeinsam zu steuern. Die Treffen fanden jeweils halbjährlich bei wechselnden Projektpartnern statt (u.a. AIT in Wien, KTH in Stockholm, Fraunhofer ISE in Freiburg, DLAB in Lund, OFFIS in Oldenburg). Im Fokus standen dabei die Abstimmung zu den Arbeitspaketen, die Vorstellung von Zwischenergebnissen sowie die Planung der nächsten Schritte.

Ergänzend zu den Präsenztreffen wurden monatliche Webmeetings mit dem gesamten Konsortium durchgeführt, um einen kontinuierlichen Informationsfluss sicherzustellen.

Aufgrund der engen Verzahnung der Arbeitspakete und Unterarbeitspakete haben sich im Projektverlauf AP-übergreifende Arbeitsgruppen zu den Themen Modellierung, KI-Analyse sowie Rapid Validation etabliert. Das Fraunhofer ISE leitete hierbei die Rapid Validation Gruppe.

Durch die kontinuierliche Abstimmung und das strukturierte Projektmanagement konnte der Projektfortschritt gemäß der ursprünglichen Planung sichergestellt werden.

AP 2 Dissemination and Knowledge Community Integration

Im Rahmen von AP2 wurden unter der Leitung des AIT kontinuierlich Maßnahmen ergriffen, um die Projektergebnisse in die wissenschaftliche und industrielle Fachwelt einzubetten und den Wissenstransfer zu fördern. Zu den zentralen Aktivitäten zählten die Organisation und Durchführung von Stakeholder-Workshops, unter anderem im Rahmen von Fachkonferenzen wie der ComForEn 2023 in Wien sowie ein Workshop beim Konsortialtreffen in Stockholm. Dabei wurden Projektideen, Ziele und erste Ergebnisse externen Expertinnen und Experten vorgestellt und wertvolles Feedback eingeholt.

Ein weiteres Instrument für den Wissenstransfer sind die Deliverables, die einen tieferen Einblick in die Projektarbeit bieten und auf der Projektwebseite veröffentlicht sind: [RESili8 - Deliverables](#). Darüber hinaus wurden mehrere wissenschaftliche Beiträge gemeinsam mit den Projektpartnern erarbeitet und auf internationalen Konferenzen eingereicht. Das Fraunhofer ISE publizierte gemeinsam mit dem AIT die Konzepte und Ergebnisse zum Rapid Validation Environment im Paper *Automated Cyber-Physical Validation Framework for Rapid Development of Smart Grid Controls* für die IECON 2024.

Die Projektergebnisse wurden interessierten Stakeholdern im [RESili8 - Webinar](#) am 22.04.2025 präsentiert. Das Fraunhofer ISE stellte die Ergebnisse zum *Rapid Development and Validation of Smart Grid Applications* vor.

AP 3 Concept and Architecture for Resilient Planning and Operation

Im Arbeitspaket 3 haben die Projektpartner gemeinsam die methodischen und technischen Grundlagen für die resiliente Planung und Betriebsführung in cyber-physischen Energiesystemen erarbeitet. Zu Beginn wurden vom AIT federführend die Anforderungen und Bedarfe an resiliente Smart-Grid-Anwendungen systematisch erhoben und dokumentiert. Die Partner brachten dabei eigene Anwendungsfälle und bestehende Tools ein, um die Ausgangslage umfassend zu analysieren.

Das Fraunhofer ISE hat im Rahmen von AP3 insbesondere seine Expertise im Bereich Smart Meter Gateway (SMGW) Infrastruktur eingebracht sowie eine Literaturrecherche zu Resilienzkonzepten in der Softwareentwicklung durchgeführt. Dabei wurden relevante Softwarepatterns (wie Loose Coupling, Isolation, Latency Control und Supervision) identifiziert.

Ein zentraler Beitrag des ISE war die Entwicklung und Einbringung eines eigenen Anwendungsfalls: die BSI-konforme Steuerung von Elektrofahrzeugen über das SMGW. Dieser Use Case diente als Beispiel für die Ableitung von Anforderungen an resiliente Planung und Betriebsführung und wurde in enger Abstimmung mit den Projektpartnern weiterentwickelt. Die Ergebnisse dieser Arbeiten sind in das Deliverable „D3.1 Resilient Planning and Operation Requirements“ eingeflossen.

Im weiteren Projektverlauf lag der Schwerpunkt auf der Konzeption für das Rapid Validation Environment und der Integration von CI/CD-Pipelines, um automatisierte Systemtests für komplexe Smart-Grid-Anwendungen zu ermöglichen. Das ISE hat hierbei die Schnittstellen und Abläufe für die Einbindung von Docker-basierten Testanwendungen (z.B. Steuerbox, EMS, Meter) in die Netzsimulationsumgebung des AIT konzipiert.

AP 4 Resilience Engineering Support

Im Arbeitspaket 4 wurden methodische und technische Werkzeuge entwickelt, um Netzbetreiber und Softwareentwickler im Bereich Smart Grids bei der Analyse, Planung und Bewertung der Resilienz von cyber-physischen Energiesystemen zu unterstützen. Zentrale Aktivitäten waren die Weiterentwicklung von Systemanalyse- und Modellierungsstrategien, die Entwicklung von KI-basierten Analysewerkzeugen (insbesondere auf Basis der Adversarial Resilience Learning-Methodik, ARL), sowie die Schaffung harmonisierter

Datenformate zur Schwachstellenanalyse. Die Leitung und technische Umsetzung der KI-basierten Werkzeuge lagen federführend bei OFFIS, unterstützt durch KTH, AIT und weitere Partner.

Das ISE war begleitend in AP4 eingebunden und diskutierte mit den Projektpartnern insbesondere die Verwendung von Smart Meter Gateway Messdaten, die als potenzielle Trainingsdaten für die KI-basierten Analysewerkzeuge genutzt werden könnten. Weiterhin wurden Schnittstellen zum Rapid Development and Validation Environment abgestimmt, um Ergebnisse aus AP4 als Input für die Validierungsszenarien in AP6 nutzen zu können.

AP 5 Resilient Applications and Operation

In diesem AP wurde das automatisierte Testframework zur Validierung von Smart Grid Anwendungen entwickelt. Die Kernidee hierbei ist die GitLab CI/CD Entwicklungs-Pipeline für automatisierte Systemtests mit einer Netzsimulation zu koppeln. CI steht für „Continuous Integration“ und bedeutet, dass Codeänderungen regelmäßig in ein zentrales Software Repository integriert und automatisch getestet werden. CD steht für „Continuous Deployment/Delivery“ und bezeichnet das automatisierte Ausrollen erfolgreich getesteter Softwareänderungen in die Produktionsumgebung. Beides sind etablierte Verfahren in der Softwareentwicklung, um Entwicklungsprozesse zu beschleunigen, die Qualität zu erhöhen und Fehler frühzeitig zu erkennen und zu minimieren. Um Smart Grid Anwendungen und den Einfluss ihrer Optimierungsalgorithmen auf bestimmte Netzgebiete und Netzsituationen testen zu können, wurde die CI/CD Pipeline mit dem vom Projektpartner AIT entwickelten Automated Cyber-Physical Testing and Validation Framework, kurz ACTV, gekoppelt. Die erweiterte CI/CD Pipeline wird nachfolgend als Validation Pipeline (VP) bezeichnet.

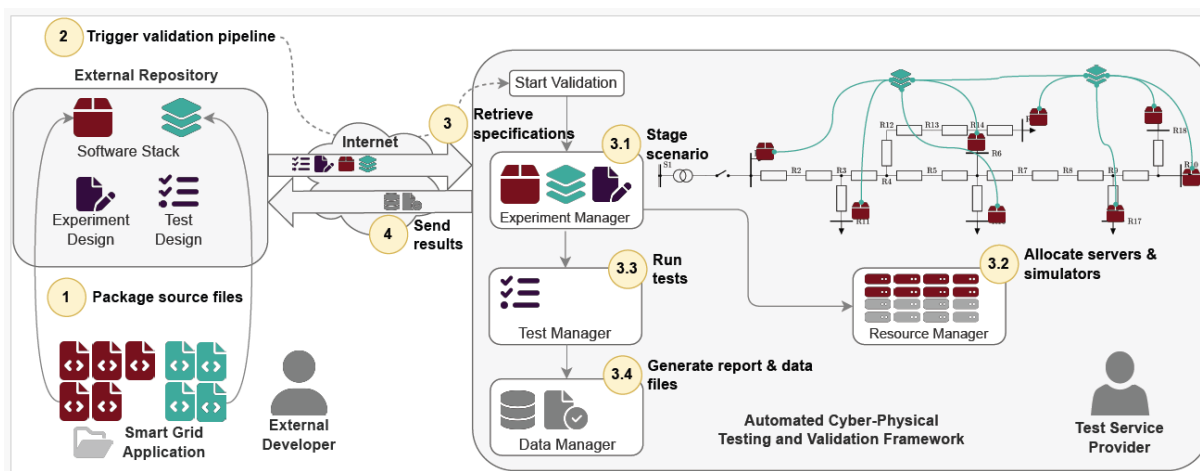


Abbildung 2: Ablauf der Validierung

Das Zusammenspiel von VP and ACTV ist in Abbildung 2 dargestellt. Vereinfacht funktioniert der Ablauf der Validierung wie folgt: Entwickler:innen pushen ihre Softwareänderungen wie gewohnt in das GitLab Repository (1). Zusätzlich stellen sie Konfigurationsdateien für das Experimentdesign (ED) sowie das Testdesign (TD) im Repository bereit. Das ED enthält die Beschreibung des physischen Systems (Netzgebiet, Netzknoten, energietechnische Anlagen), das für die Tests verwendet wird, sowie Details dazu, wie die Testsoftware mit diesem physischen System verbunden werden soll. Das TD enthält Beschreibungen der durchzuführenden Tests. Anschließend wird der Systemtest angestoßen (2) und die Software zusammen mit den Konfigurationsdateien an das ACTV übertragen. Das ACTV liest die Konfigurationsdateien ein und startet die Validierung (3). Hierzu wird zunächst über den Experiment Manager und das ED das Netzgebiet erstellt, die zu testende Software bestimmten Netzknoten zugeordnet und mit der Simulation gekoppelt (3.1). Weiterhin werden entsprechende Ressourcen für die Simulation allokiert (3.2). Nun werden vom Test Manager die im TD hinterlegten Tests durchlaufen (3.3) und im Anschluss wird ein Testreport erstellt (3.4). Die Testergebnisse werden an die VP gesendet und der Validierungsprozess ist abgeschlossen.

Die gesamte Validation Pipeline ist in Abbildung 3 detaillierter dargestellt. Die Schritte von 1 bis 1.4 sind State of the Art und beschreiben die normale Entwicklungs-Pipeline. Ab Schritt 2 beginnen die in RESili8 neuentwickelten Konzepte. Die Einbindung von Softwareanwendungen in das ACTV erfolgt über Docker Images. Dementsprechend werden die Softwareanwendungen automatisiert in Docker Images überführt und über die GitLab Registry bereitgestellt. Das ACTV greift in Schritt 3 auf diese Images zu und integriert sie in das Experimentdesign.

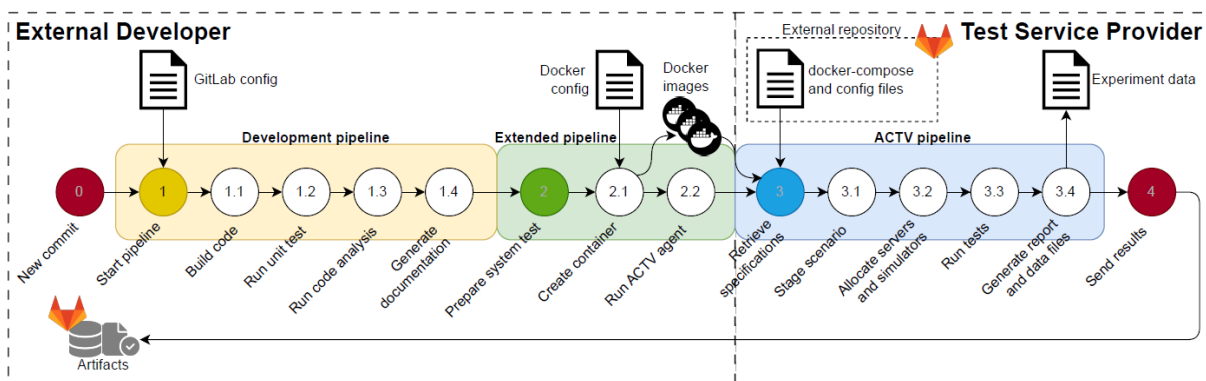


Abbildung 3: Validation Pipeline

AP 6 Proof-of-Concept Evaluation

Für die Evaluierung der Validation Pipeline und des ACTV wurde ein an die netzorientierte Steuerung nach § 14a EnWG angelehntes Szenario ausgewählt. Hierbei steht die Leistungsbegrenzung einer Ladestation über ein EEBus-fähiges Energiemanagementsystem (EMS) im Fokus. Wie in Abbildung 4 zu sehen ist, hängt das EMS von mehreren Eingangsgrößen ab. Um einen Systemtest durchführen zu können müssen alle Eingangsgrößen bereitgestellt werden. Die Herausforderung besteht darin, dass die Ausgangsgrößen (Steuersignale) wiederum einen Einfluss auf die Eingangsgrößen (Messwerte) haben. Daher ist eine komplexe Simulationsumgebung notwendig, die vom ACTV bereitgestellt wird.

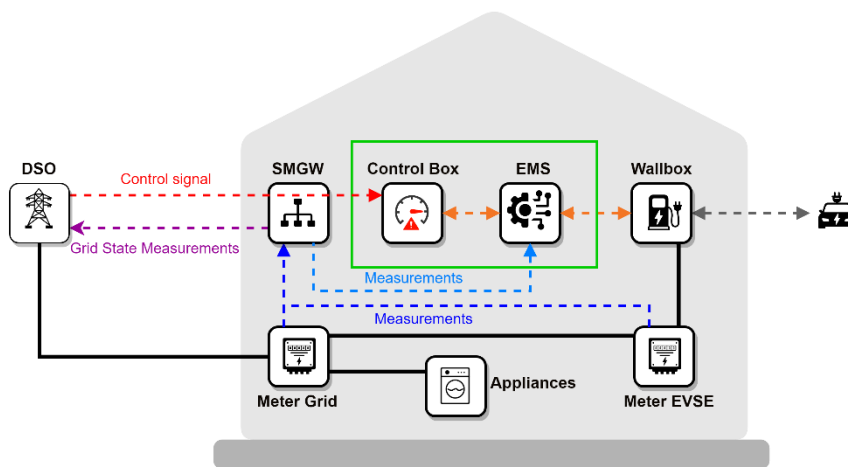


Abbildung 4: Szenario für die Evaluierung

Die konkrete Umsetzung dieses Szenarios ist in Abbildung 5 dargestellt. Das Fraunhofer ISE hat virtuelle EEBus Geräte für die Steuerbox, das EMS sowie den Zähler am Netzanschlusspunkt entwickelt. Diese werden als Docker Container in das ACTV eingebunden. Der Datenaustausch mit dem ACTV erfolgt über MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Die interne Kommunikation zum EMS erfolgt mittels EEBus über den am Fraunhofer ISE entwickelten Software Stack „jEEBus“.

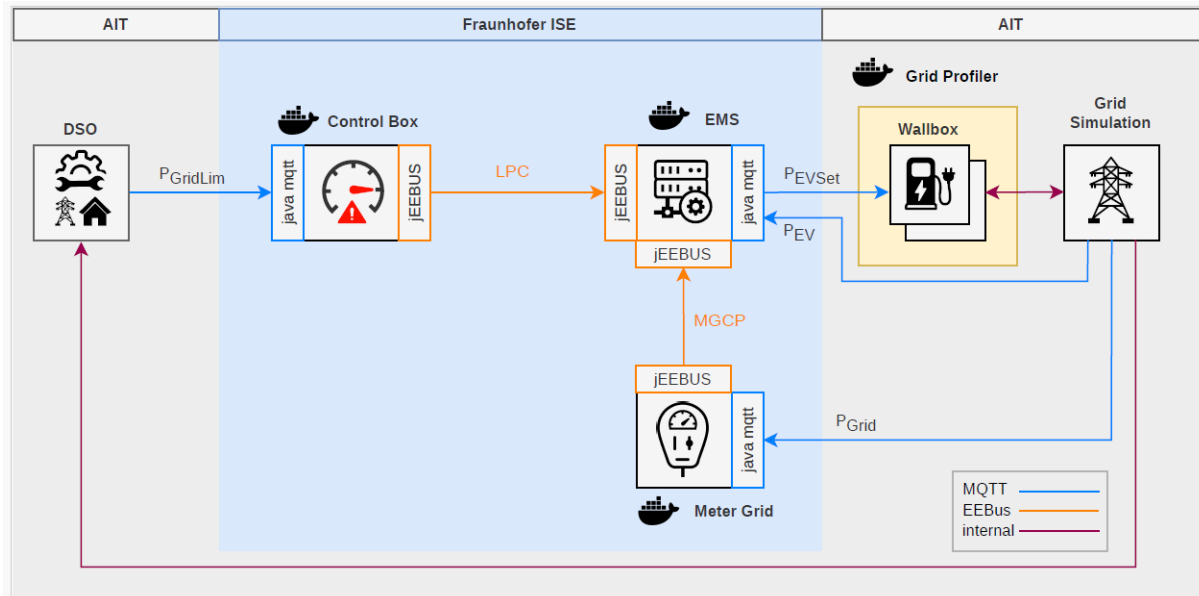


Abbildung 5: EMS-Integration in das ACTV

Das Testszenario wird mit Anfangswerten für die Netzsimulation initialisiert. P_{Grid} stellt die Haushaltslast der nichtsteuerbaren Verbraucher dar, P_{EV} die aktuelle Ladeleistung des Elektrofahrzeugs, $P_{GridLim}$ das aktuelle vom Netzbetreiber gesetzte Leistungslimit und P_{EVSet} die maximale vom EMS vorgegebene Ladeleistung für das Elektrofahrzeug. Dabei können für alle Eingangsgrößen beliebige Profile in der Netzsimulation hinterlegt werden. Das Leistungslimit wird von der Steuerbox über den EEBus Use Case LPC (Limitation of Power Consumption) an das EMS kommuniziert und dort mit der Haushaltslast, die über den Use Case MGCP (Monitoring of Grid Connection Point) kommuniziert wird, abgeglichen. Das EMS berechnet daraufhin einen neuen Sollwert für die Ladestation bzw. das Elektrofahrzeug.

Dieses Setup kann für beliebige Netzknoten im ausgewählten Netz konfiguriert werden. Im Test wurde beispielsweise das CIGRE Referenznetz gewählt und mehrere EMS in unterschiedliche Knoten R_n integriert (siehe Abbildung 6). So können nicht nur Blackbox Tests für ein einzelnes EMS in einer kontrollierten und reproduzierbaren Umgebung durchgeführt werden, sondern auch Systemtests, mit dem sich das Verhalten mehrerer EMS im Netzgebiet prüfen lässt. Das ACTV erlaubt insbesondere auch das Testen von kritischen Zuständen oder Parametersätze in Grenzbereichen der Betriebsführung, die im realen Umfeld nicht oder nur schwierig getestet werden können.

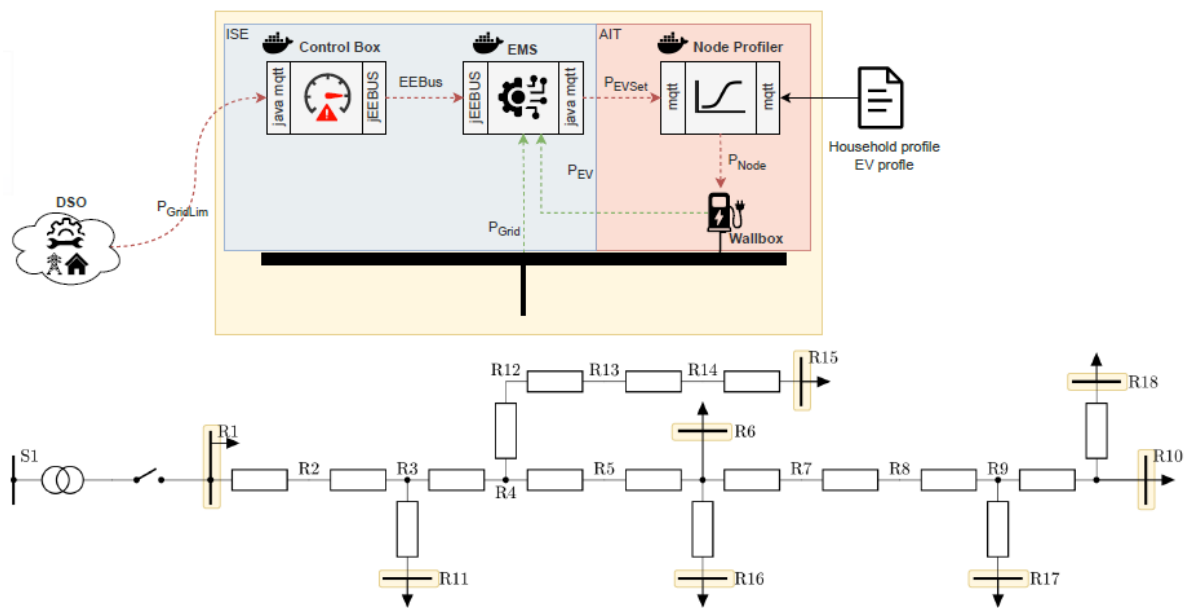


Abbildung 6: Zuordnung des EMS zu mehreren Netzknoten

2.2 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Hervorzuheben ist die Praxistauglichkeit des ACTV. Zum einen ist dieses nahtlos in den alltäglichen Software-Entwicklungsprozess (Continuous Integration) über GitLab eingebunden. Zum anderen bietet das ACTV eine integrierte Netzsimulation und kann beliebige Messdaten sowie Steuerbefehle für das automatisierte Blackbox Testing als auch für automatisierte Systemtests bereitstellen.

Im Rahmen des Projekts hat das Fraunhofer ISE seinen EEBus Stack „jEEBus“ entwickelt und als Open Source Software auf <https://www.openmuc.org/eebus/> veröffentlicht. Basierend auf jEEBus wurden verschiedene EEBus Use Cases (LPC, LPP, MGCP, MPC) gemäß Lastenheft der FNN Steuerbox als auch virtuelle EEBus Geräte umgesetzt. Mit Hilfe des ACTV konnten entwicklungsbegleitend zeitnah mehrere Fehler in der Implementierung aufgedeckt und anschließend behoben werden. Somit konnte die Effektivität der Validation Pipeline und des ACTVs an einem realen Software-Entwicklungsprozess gezeigt werden.

Durch den fortschreitenden Rollout von iMSys sowie dem beschlossenen Steuerungsrollout sehen wir einen steigenden Bedarf an Prüf- und Testmöglichkeiten. Dieser wird sich neben Steuerboxen auch auf andere Produktkategorien wie zum Beispiel HEMS, Ladestationen, Wechselrichter, Wärmepumpen ausdehnen. In einem geplanten Nachfolgerprojekt soll die Validation Pipeline und das ACTV um Flexibilitätsmanagementkonzepte sowie die zuvor genannten Produktkategorien erweitert werden. Dadurch sollen zukünftig vielseitigere Szenarien validiert werden können.

2.3 Relevante Ergebnisse von dritter Seite

Während der gesamten Projektlaufzeit wurden, wie in AP2 beschrieben, mehrere Stakeholder Workshops durchgeführt. Des Weiteren fand ein regelmäßiger Austausch mit der ERA-Net Knowledge Community statt. Über diese Kommunikationskanäle wurde fortlaufend projektrelevantes Feedback eingeholt und die Entwicklung der Anwendungsszenarien entsprechend ausgerichtet. Insbesondere wurde wiederholt die Notwendigkeit automatisierter Systemtests hervorgehoben, um der steigenden Komplexität moderner Energiesysteme begegnen und Innovationszyklen verkürzen zu können.

Durch die aktive Mitarbeit des Fraunhofer ISE in der FNN Projektgruppe „Steuerbox Testfälle“ sowie in Arbeitsgruppen der EEBus Initiative e.V. bestätigt sich dieses Bild nochmals. So arbeitet der EEBus Verein aktuell an einem Test- und Zertifizierungskonzept, um zukünftig die Interoperabilität zwischen EEBus-fähigen Geräten und energietechnischen Anlagen sicherzustellen. Somit wurde mit dem in AP5 und AP6 beschriebenen Szenario eine reale Herausforderung abgebildet und Komponenten entwickelt, die für zukünftige Tests weiterverwendet werden können. Weiterhin konnten die in RESili8 gewonnenen Erfahrungen in die Arbeitsgruppen zurückgespiegelt werden.

2.4 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Die Validation Pipeline sowie das ACTV wurden umfassend im gemeinsam von AIT und ISE verfassten Fachartikel dargestellt, der 2024 vom AIT auf der IECON in Chicago präsentiert wurde. Link zum Paper: [Automated Cyber-Physical Validation Framework for Rapid Development of Smart Grid Controls | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore](#)

Die zusammenfassenden Arbeiten des ISE wurden interessierten Stakeholdern im RESili8 Webinar vom 22.04.2025 im Block drei „Rapid development and validation of smart grid applications“ vorgestellt: Link zum Webinar: [RESili8 - Webinar](#)

Die im Rahmen des Projekts veröffentlichten Deliverables können auf der RESili8 Projektwebseite eingesehen werden: [RESili8 - Deliverables](#)