



Schlussbericht zum Forschungsprojekt

VideKIS

„Integrierter virtueller Kraftwerksverbund aus dezentralen Kleinanlagen zur KI gestützten Erbringung von Systemdienstleistungen“

Teilvorhaben:

Entwicklung, Integration und Validierung einer Steuereinheit zur Anbindung dezentraler Kleinanlagen

Projektlaufzeit: 01.09.2021 – 28.02.2025

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

Ansprechpartner:

Martin Hölscher

mhoelscher@hstech.de

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03EI6058A gefördert.

Dortmund, 18.09.2025

Inhalt

1	Projektbeschreibung.....	1
1.1	Aufgabenstellung	2
1.2	Bisherige Arbeiten von H&S.....	3
1.3	Beitrag zu den förderpolitischen Zielen.....	4
1.4	Planung und Ablauf des Vorhabens (Ablaufplan).....	5
1.5	Stand der Wissenschaft und Technik	7
1.6	Zusammenarbeit	8
1.6.1	Technische Universität Dortmund (ie3).....	9
1.6.2	adesso SE	10
1.6.3	com2m GmbH.....	10
1.6.4	urban energy	11
1.6.5	Mainzer Stadtwerke / Pionext GmbH	11
2	Projektergebnisse.....	13
2.1	Technische und wissenschaftliche Ergebnisse.....	13
2.1.1	Steuereinheit.....	13
2.1.2	Validierung der Steuereinheit in Praxisversuchen	20
2.1.3	Entwicklung und Inbetriebnahme einer Hardware-Simulation verschiedener Erzeugungsanlagen als Teil des Gesamtsystem-Demonstrators	27
2.1.4	Zusammenfassung und tabellarischer Vergleich von Zielen und Ergebnissen	36
2.2	Verwendung der Zuwendung	37
2.3	Verwertbarkeit.....	37
2.4	Fortschritt anderer Stellen	38
2.5	Veröffentlichungen und Öffentlichkeitsarbeit	38
3	Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	39
4	Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten	40
5	Abbildungs- und Tabellenverzeichnisse	42
6	Literaturverzeichnis	43

1 Projektbeschreibung

Für einen zuverlässigen und sicheren Netzbetrieb in zukünftigen dekarbonisierten Energieversorgungssystemen müssen Systemdienstleistungen auch von dezentralen Erzeugungsanlagen wie Windkraftanlagen und Wasserkraftwerken erbracht werden. Systemdienstleistungen wie z.B. Spannungs- und Frequenzhaltung werden bisher fast ausschließlich durch konventionelle Kraftwerke bereitgestellt, deren Einsatzzeiten jedoch zum einen durch den bereits eingeleiteten Atomausstieg, aber auch den bevorstehenden Kohleausstieg stark abnehmen werden. Durch den enormen regelungstechnischen und administrativen Aufwand, nicht zuletzt aber auch durch die aktuellen Anforderungen an die Systemdienstleistungsbereitstellungsausschreibung gemäß § 6 (2) Strom NZV ist eine Teilnahme kleiner Anlagen nicht realisierbar. Diese Probleme werden durch eine Aggregation mehrerer kleinerer Anlagen zu einem virtuellen Kraftwerk heute schon adressiert.

Ziel dieses Vorhabens ist die Entwicklung eines Systems, welches über eine einfache Aggregation hinausgeht und die unterschiedlichen Fähigkeiten der neuen Akteure optimal ausnutzt, um vornehmlich (Primär-)Regelleistung zu erbringen. Dieses zu entwickelnde virtuelle Kraftwerkverbundsystem soll dabei dezentrale Regler in Erzeugungsanlagen, welche auf Verteilnetz- bzw. Niederspannungsebene angeschlossen sind, in Abhängigkeit von wetter- und anlagenspezifischen Daten parametrieren und ansteuern. Weiterhin sollen dabei bisher ungenutzte Kapazitäten wie die Trägheit von Oberwassergräben von kleinen Laufwasserkraftwerken oder Batterien von E-Fahrzeugen ausgenutzt werden. Dies führt zu einer optimalen Ressourcenausnutzung und einem wirtschaftlicheren und zuverlässigeren Netzbetrieb. Dazu werden die Mainzer Stadtwerke (bzw. das Tochterunternehmen Pionext) als Teil des Konsortiums sowohl als Betreiber von 12 mittelgroßen Wasserkraftwerken, welche sich Großteils an der Oberen Ruhr befinden, aber auch mit der Expertise als Netzbetreiber einen maßgeblichen Beitrag zu einer realitätsnahen Lösung leisten. Dabei werden in diesem Vorhaben besonders die praktischen Aspekte einer solchen Umsetzung berücksichtigt, indem die entwickelten Regler in Feldtests in einzelnen Anlagen und im virtuellen Verbund untersucht werden. Dieses virtuelle Kraftwerkverbundsystem gibt somit kleinen Erzeugern den Anreiz, neben der normalen Einspeisung netzdienlich zu wirken und somit zusätzliche Erlöse zu erzielen. Besonders für Wasserkraftwerke und PV-Anlagen, die in den nächsten Jahren aus der EEG fallen, ist dies von hohem Interesse. Damit leisten sie einen Beitrag zur Sicherung des stabilen Netzbetriebs und erhöhen das Potential für den Anschluss volatilerer regenerativer Einspeiser ohne einen zusätzlichen Netzausbau. Komplementär zu der Ansteuerung der kleinen Anlagen, muss auch die optimale Verteilung der Leistung über die Anlagen erfolgen. Hierzu wird ein Leitsystem entwickelt, welches auf Basis von Wetterprognosen, der aktuellen Einspeisesituation und weiteren Zuständen der Teilnehmer, eine optimale Parametrierung der Regler durchführt. Dabei gilt es sowohl die entsprechend notwendigen Kommunikationskanäle aber auch die internen und externen Abrechnungsvorgänge automatisiert im Leitsystem umzusetzen. Das hier entwickelte virtuelle Kraftwerkverbundsystem ist somit ein Produkt für eine sichere und grüne Zukunft des Energiesystems.

1.1 Aufgabenstellung

In Abbildung 1 wird der angestrebte Aufbau des integrierten virtuellen Kraftwerkverbunds dargestellt.

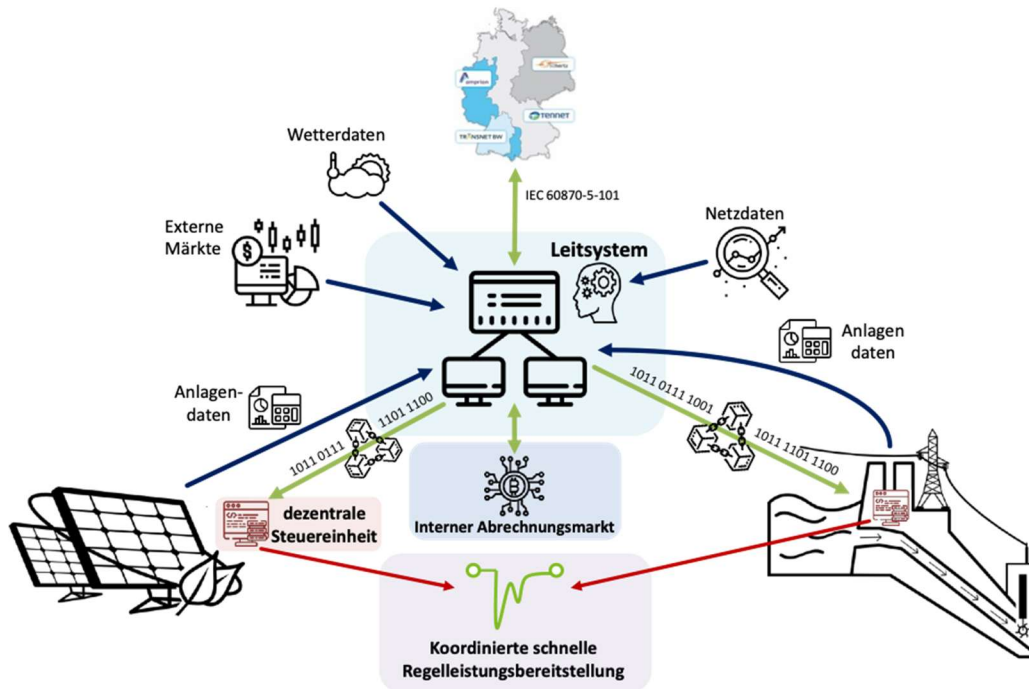


Abbildung 1 Übersicht des integrierten virtuellen Kraftwerksverbundsystems

In den Erzeugungseinheiten wird jeweils eine dezentrale Steuereinheit eingebunden. In der Abbildung ist es exemplarisch für eine Photovoltaikanlage und ein Wasserkraftwerk dargestellt. Diese dezentrale Steuereinheit wird im Rahmen dieses Projektvorhabens entwickelt und beinhaltet einen Regler, der für Frequenzhaltungsmaßnahmen innerhalb der Erbringung von (Primär-) Regelleistung ausgelegt ist. Die dezentrale Steuereinheit adaptiert sich an den jeweiligen Prozess der Erzeugungseinheit. Auf der Steuereinheit werden Prozessdaten eingelesen, gespeichert und weiterverarbeitet. Zusätzlich beinhaltet die Steuereinheit ein Kommunikationsmodul, um die erfassten Daten an das Leitsystem zu melden und gleichzeitig, um Befehle vom Leitsystem zu erhalten. Die Herausforderung ist es, die dezentrale Steuereinheit so zu konzipieren und zu designen, dass sie in jeden Typ von Erzeugungseinheit eingebaut werden kann. Die Typisierung der Steuereinheit soll lediglich über die Parametrierung vorgenommen werden. Daraus folgend ergibt sich das nächste wissenschaftliche und technische Arbeitsziel, dass die Kommunikation zwischen dezentraler Steuereinheit und Leitsystem über ein einheitliches Datenmodell erfolgen soll. Mit diesem Anspruch wird eine Art Standardisierung innerhalb des Projektes durchgeführt, um einen übersichtlichen und einheitlichen Prozess zu entwickeln. Das Leitsystem wird zum Dreh- und Angelpunkt in diesem Projekt. Dort wird mit KI-gestützten Algorithmen ein Portfoliomanagement entwickelt, das die bestmögliche Poolzusammensetzung in Abhängigkeit von technischen und wirtschaftlichen (interner Abrechnungsmarkt) Aspekten herleitet, um mit dem virtuellen Kraftwerksverbund netzdienlich in Form von Erbringung von Regelleistung zu wirken. Für H&S ist das Arbeitsziel an dieser Stelle aus technischer und wissenschaftlicher Sicht die dezentralen Steuereinheiten anzubinden und Konzepte für ein

geeignetes Poolmanagement zu entwickeln. Wie in der Abbildung dargestellt erhält das Leitsystem nicht nur die Informationen aus den dezentralen Steuereinheiten, sondern auch von externen Diensten, wie Wetterdaten, Netzdaten oder Marktdaten. Diese Schnittstellen sollen die KI unterstützen, um bestmögliche Poolzusammensetzungen zukunftsorientiert zu erzeugen. Gleichzeitig ist das Leitsystem die Schnittstelle zum externen Markt. Über eine Verbindung zum jeweiligen ÜNB entsteht der Informationsaustausch über erbrachte Leistungen.

Neben der Erbringung von (Primär-) Regelleistung mit dem virtuellen Kraftwerksverbund werden in diesem Projekt weitere potentiell netzstützende Maßnahmen erforscht und berücksichtigt. Mit den installierten Reglern in den dezentralen Steuereinheiten ist es möglich, durch Parametrierung weitere Märkte zu adressieren. Durch den Austausch mit externen Institutionen, wie der Bundesnetzagentur, ist es möglich Konzepte für neue Märkte zu entwickeln, die für gepoolte Erzeugungseinheiten interessant sind.

Ein weiteres Arbeitsziel für H&S ist der Ideenaustausch mit den beteiligten Projektpartnern zu den unterschiedlichen Komponenten. Somit besteht die Möglichkeit den Wissenshorizont zu erweitern und in laufende wie zukünftige Projekte mit einzubeziehen.

1.2 Bisherige Arbeiten von H&S

Als mittelständisches Systemhaus liegen die Arbeitsschwerpunkte von H&S in der Projektierung und Montage der Sekundärtechnik in Höchst- und Hochspannungsschaltanlagen, in der Entwicklung und Integration elektronischer Komponenten und Softwarelösungen sowie in der Revision und Automatisierung von Wasserkraftanlagen. Dabei zählt H&S Übertragungsnetzbetreiber und Stromerzeuger zu seinen Kunden. Gerade im Bereich der Stromerzeuger sind dies nicht nur Versorgungsunternehmen wie z.B. die Energie Waldeck-Frankenberg GmbH (EWF), sondern eine Vielzahl privater Betreiber von Wasserkraftanlagen. Hierbei liegt die typische Leistungsklasse zwischen 50 und 500 kW. In diesen Anlagen ist H&S nicht nur mit der Elektrotechnik und Automatisierungstechnik vertraut, sondern besitzt auch tiefgreifende Kenntnisse und Erfahrung in Konstruktion und Revision des maschinenbaulichen Teils dieser Anlagen. Diese Kenntnisse sind dem vorliegenden Projekt notwendig, um die Auswirkungen der Anlagenreglung auf die Abnutzung der mechanischen Komponenten untersuchen und beurteilen zu können.

Darüber hinaus kann H&S, bei der hier geplanten Regelentwicklung auf seine langjährige Erfahrung in der Entwicklung elektronischer Baugruppen zurückgreifen. Z.B. wurde in der Vergangenheit im Kundenauftrag ein Heizungsregler für Rohrbegleitheizungen entwickelt oder ein Zellspannungsüberwachung für Elektrolyseanlagen. Ergänzt wird diese Kompetenz durch das Know-how auf dem Gebiet verschiedener industrieller Kommunikationsprotokolle. Besonders im Bereich der IEC 61850 hat H&S ausgeprägte Kenntnisse. Dabei können die Teile IEC 61850-7-410 (Wasserkraftwerke-Kommunikation für Überwachung und Steuerung) und IEC 61850-7-420 (Kommunikationssystem für die dezentrale Energieerzeugung) in diesem Projekt zur Erprobung und Anwendung kommen.

1.3 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen

Dieses Projekt steht im Kontext des 7. Energieforschungsprogramms (EFP) sowie mehrerer wesentlicher Strategien der Bundesregierung, insbesondere der Systemintegration und der Energieerzeugung aus EE-Anlagen und der Entwicklung intelligenter Stromnetze, bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der Versorgungsqualität, sowie der KI-Strategie. Darüber hinaus nimmt das Forschungsvorhaben insbesondere Bezug auf den Förderaufruf „Optimierter Netzbetrieb im Übertragungs- und Verteilnetz (OptiNet I)“, indem es einen wichtigen Beitrag zu einem netzdienlichen Einsatz von dezentralen Erzeugungsanlagen durch die Bereitstellung von Systemdienstleistungen leistet.

Die Beteiligung dezentraler Kleinanlagen und Stromspeicher an der Erbringung von Systemdienstleistungen ist ein elementarer Bestandteil des stabilen und sicheren Netzbetriebs von den zukünftig durch dezentrale Versorgungsstrukturen geprägten europäischen Energienetzen. Die Bereitstellung von Regelleistung aus dezentral verteilten kleinen Erzeugungsanlagen birgt die Gefahr von wechselseitigen Abhängigkeiten und Interaktionen, wie z.B. Frequenzpendelungen. Dies könnte in einem Netz mit steigender Komplexität zu Instabilitäten führen und die Resilienz des Netzes schwächen. Daher ist eine koordinierte Bereitstellung und Distribution der Regelleistung notwendig, um sowohl die u.a. im 7. EFP definierten Anforderungen an eine Systemintegration und Energieerzeugung aus EE-Anlagen in das deutsche Energiesystem mit der gewohnten hohen Versorgungsqualität zu erfüllen, als auch die internationale Wettbewerbsfähigkeit des Industrie- und Wirtschaftsstandorts Deutschlands sicherzustellen.

Der in diesem Vorhaben verfolgte Ansatz für die optimale Distribution der Regelleistungserbringung, mit einer zentralen Koordination der Steuerung von neu entwickelten Reglern für kleine EE-Anlagen und Speicher, berücksichtigt die entsprechenden Umgebungsbedingungen und nutzt somit die Fluktuationen und bisher ungenutzte Freiheitsgrade dieser Anlagen optimal aus. Dazu wird ein Leitsystem entwickelt, welches mithilfe von künstlicher Intelligenz sowohl die aktuellen Wetter- und Marktbedingungen als auch die individuellen Gegebenheiten bei den Teilnehmern berücksichtigt.

Dies sorgt durch den verfolgten automatisierten KI-Ansatz des Leitsystems ebenfalls für einen wirtschaftlicheren Betrieb dieser Anlagen und schafft, durch die dadurch minierten administrativen Kosten und der Vermeidung von Vergütungsausfällen innerhalb des Systems, wirtschaftliche Anreize am z.B. Regelleistungsmarkt teilzunehmen. Da fluktuierende Anlagen, welche am Regelleistungsmarkt teilnehmen wollen, hauptsächlich durch Abregelung z.B. positive Primärregelleistung vorhalten können, wird dies mit dem hier verfolgten Ansatz durch die Kombination mehrerer Anlagen optimiert.

Weiterhin kann dieses System ebenfalls zu einer höheren Auslastung der Erneuerbaren Energieanlagen führen, da das System, zusammen mit möglichen Speichereinheiten, ein aktives Management der Anlagen betreibt und somit für eine maximale Ressourcenausnutzung steht. Dadurch erreicht dieses Konzept einen großen Nutzen für das Gesamtsystem, in dem in Situationen mit hoher EE-Einspeisung weiterhin ein stabiler Netzbetrieb gewährleistet werden kann und die Anlagen am Netz bleiben können.

Weitere Investitionskosten von ÜNBs und VNBs können hiermit ebenfalls eingespart werden da das System zum einen den Ausbau teurer Energiespeicher, welche nur für die Regelleistungserbringung dienen, deutlich verringern wird.

1.4 Planung und Ablauf des Vorhabens (Ablaufplan)

Die geplante Gesamtdauer von VideKIS betrug 36 Monat mit dem Start im September 2021. Aufgrund einer strukturellen Veränderung seitens des Konsortialpartners com2m (100% Integration in die adesso SE) kam es zu einer Verzögerung von sechs Monaten, sodass sich das Projektende in den Februar 2025 zog. Damit betrug die gesamte Laufzeit 42 Monate.

Die Arbeitspaketverantwortlichkeiten liegen bei H&S in den Arbeitspaketen 3, 6, 7, 8 und 9. Bei den weiteren Arbeitspaketen 1, 2, 4 und 5 ist H&S an den Arbeitsergebnissen beteiligt.

Der Projektablaufplan ist in Abbildung 2 dargestellt. Während der Projektlaufzeit ist es zu zeitlichen Abweichungen gekommen, die ebenfalls der Abbildung zu entnehmen sind.

AP	2021				2022					2023					2024															
	Q4/22		Q1/22		Q2/22		Q3/22		Q4/22		Q1/23		Q2/23		Q3/23		Q4/23		Q1/24		Q2/24		Q3/24		Q4/24		Q1/25			
	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F
AP1																														
AP1 (Ist)																														
AP2																														
AP2 (Ist)																														
AP3																														
AP3 (Ist)																														
AP4																														
AP4 (Ist)																														
AP5																														
AP5 (Ist)																														
AP6																														
AP6 (Ist)																														
AP7																														
AP7 (Ist)																														
AP8																														
AP8 (Ist)																														
AP9																														
AP9 (Ist)																														

Abbildung 2: Ablaufplan Soll und Ist Vergleich

Ziel dieses Teilvorhabens ist die Entwicklung verschiedener Komponenten, die im Zusammenschluss ein virtuelles Kraftwerkverbundsystem ergeben, welches Klein- und Kleinstanlagen den Anreiz bietet, neben ihrer gängigen Einspeisung netzdienlich zu wirken und somit zusätzliche Erlöse zu erzielen. Dabei werden die unterschiedlichen Fähigkeiten der teilnehmenden Anlagen im virtuellen Kraftwerksverbund optimal eingesetzt, um an neuen Märkten teilnehmen zu können. Vornehmlich wird in diesem Projektvorhaben der Systemdienstleistungsmarkt (Primär-)Regelleistung adressiert.

Dazu wird im ersten Schritt dieses Teilvorhabens unter der Führung der TU Dortmund und zusammen mit der Pionext und adesso SE eine Anforderungsanalyse an eine koordinierte Regelung von virtuellen Kraftwerkssystemen zur Erbringung von Systemdienstleistungen erstellt. Dazu bringt sich H&S bei der Festlegung von Schnittstellen und dem Validieren von potenziellen Regelungsarten mit ein. Durch das Know-how im Bereich Wasserkraft fließt der Input von bestehenden Regelungen in Wasserkraftwerke mit ein. Davon abgeleitet können

Anforderungen an Laufwasserkraftwerke (LWK) im virtuellen Verbund zur Erbringung von Systemdienstleistungen definiert werden.

Im Anschluss werden simulative Untersuchungen und Entwicklungen eines virtuellen Kraftwerksverbundes zur koordinierten Bereitstellung von Frequenzhaltungsmaßnahmen durchgeführt. Dieses wird im zweiten Arbeitspaket des Vorhabens abgebildet. In diesem Arbeitspaket unterstützt H&S die TU Dortmund als Arbeitspaket Leitung und den beteiligten Partner Pionext durch das Einbringen an Expertise zum Regelverhalten von LWKs. Gleichzeitig werden im Rahmen dieses Arbeitspakets Modellierungen einer dezentralen Steuereinheit mit integriertem Regler abgebildet und mit der Zusammenarbeit aller Partner in diesem Arbeitspaket simuliert.

Anknüpfend ist das Ziel des Arbeitspakets 3 ein System zur Regelung eines virtuellen Kraftwerksverbundes zu entwickeln. Dieses Arbeitspaket wird von H&S geleitet und alle Partner des Projektkonsortiums sind beteiligt. Das Ziel ist es eine dezentrale Steuereinheit zu entwickeln, die in der Lage ist, jeden teilnehmenden Anlagentyp im virtuellen Kraftwerksverbund zu regeln. Dadurch erfolgt eine Art hardwareseitige Vereinheitlichung der Steuereinheit, die in jedem Anlagentyp eingesetzt werden kann, und lediglich über eine Parametrierung auf den jeweiligen Anlagentyp angepasst wird. Dazu ist das Ziel in diesem Arbeitspaket zusammen mit den beteiligten Partnern ein Leitsystem zu entwickeln, an welches die einzelnen Steuereinheiten in den unterschiedlichen Anlagen angebunden werden können. Dieses Leitsystem erhält Daten über die Steuereinheiten der Anlagen. Somit ergibt sich ein virtueller Kraftwerksverbund. In das Leitsystem wird ein KI-gestütztes Portfoliomanagement integriert. Das Portfoliomanagement erstellt automatisiert die optimale Poolzusammensetzung, um den Kraftwerksverbund netzdienlich an unterschiedlichen Märkten, vornehmlich den Systemdienstleistungsmarkt für (Primär-)Regelleistung, zu integrieren. Damit die angebundenen Anlagen über die jeweilige Steuereinheit mit dem Leitsystem kommunizieren können, wird ein Kommunikationsdatenmodell für die Kommunikation innerhalb des virtuellen Kraftwerkverbundes erstellt und in die Komponenten implementiert. Gleichzeitig werden Kommunikationsschnittstellen im Leitsystem erstellt, um die Kommunikation zu externen Partnern sicherzustellen.

Durch den Verbund von unterschiedlichen Anlagen zu einem virtuellen Kraftwerk müssen Verträge und Abrechnungen zwischen den beteiligten Akteuren geschlossen und verwaltet werden. Dazu wird mit dem Arbeitspaket 4 ein KI-gestützter Markt entworfen. Unter der Arbeitspaketleitung von adesso SE und allen beteiligten Partnern verfolgt H&S hier das Ziel durch Know-how-Austausch das Erstellen einer solchen internen Marktform zu unterstützen.

Neben dem internen Markt und der technischen Entwicklung des virtuellen Kraftwerksverbundes ist zu untersuchen an welchen Märkten der virtuelle Kraftwerksverbund eingesetzt werden kann. Dieses erfolgt im 5. Arbeitspaket und wird von adesso SE geleitet. Die beteiligten Partner neben H&S sind die TU Dortmund und urbanEnergy. Das von H&S verfolgte Ziel in diesem Arbeitspaket ist die Konzepterstellung von technischen und wirtschaftlichen Vertriebsmodellen des virtuellen Kraftwerksverbundes, um an unterschiedlichen Märkten teilnehmen zu können. Zusätzlich unterstützt H&S die Partner durch den Austausch vorhandener Expertise.

Aufbauend auf dem im Arbeitspaket 3 erstellten System zur Regelung eines virtuellen Kraftwerksverbunds werden mit dem Arbeitspaket 6, welches von H&S geleitet wird und die Zusammenarbeit aller Partner beinhaltet, die entwickelten Komponenten in Form von Funktionsmustern in Test- und Entwicklungsumgebungen, sowie in realen Erzeugungseinheiten, erprobt. Das Ziel von H&S ist in diesem Arbeitspaket eine geeignete Test- und Entwicklungsumgebung mit der Unterstützung der beteiligten Partner zu konzipieren und zu erstellen. Dazu werden Praxisversuche aufgebaut und die dezentralen Steuereinheiten in Anlagen installiert. Die Steuereinheiten werden auf ihre Funktionsweise geprüft und die Kommunikation zum Leitsystem wird aufgebaut. Gemeinsam mit allen Partnern des Projektes wird anschließend ein in Arbeitspaket 7 beschriebener Demonstrator des virtuellen Kraftwerksverbundes mit automatisierten integrierten Marktstrategien erstellt. H&S ist in der Leitung dieses Arbeitspakets und verfolgt das Ziel das Konzept für den Demonstrator mit Unterstützung der Partner zu erstellen. Zusätzlich wird geprüft, ob die Dateninterpretation im Leitsystem mit den in den Anlagen bestehenden Informationen übereinstimmt. Somit wird sichergestellt, dass die Kommunikationsstrecke fehlerfrei funktioniert. Durch die im Demonstrator befindlichen simulativen und realen Anlagen ist es nun möglich die Funktionsweise des virtuellen Kraftwerksverbunds mit unterschiedlichen Parametern darzustellen.

Darüber hinaus werden im Rahmen des Projektes mögliche wirtschaftliche Geschäftsmodelle für den entwickelten virtuellen Kraftwerksverbund analysiert und konzipiert. Das erfolgt im 8. Arbeitspaket, welches von H&S geführt wird und die Beteiligung von allen Partnern umfasst. Das Ziel ist mögliche Geschäftsmodelle für das virtuelle Kraftwerk zu konzipieren und zu analysieren in welchem Umfang das virtuelle Kraftwerk bestehende Geschäftsmodelle bedienen kann. Des Weiteren ist das Ziel von H&S bestehenden Klein- und Kleinstanlagen die Möglichkeit aufzuzeigen sich durch die Teilnahme in einem virtuellen Kraftwerksverbund netzdienlich einzusetzen und weitere Erlöse zu erzielen.

Den Rahmen um das Projekt bilden das in Arbeitspaket 9 definierte Projektmanagement und der Wissenstransfer zu externen Institutionen und Regulatoren. H&S leitet als Konsortialführer des Projekts dieses Arbeitspaket. Das Ziel ist es, durch die Führung und Koordinierung, den Zeitplan und die definierten Meilensteine einzuhalten und so das Vorhaben erfolgreich umzusetzen.

1.5 Stand der Wissenschaft und Technik

An das Energieversorgungsnetz werden zukünftig immer mehr Ansprüche gestellt. Getrieben durch die Energiewende und neue Anforderungen folgen Herausforderungen an die gängigen Frequenzhaltungsmaßnahmen. Die Energie der Vielzahl von Klein- und Kleinsterzeugern wird derzeit aufgrund ihrer geringen Einspeisekraft nicht für netzdienliche Maßnahmen in Betracht gezogen. Durch den in diesem Projektvorhaben verfolgten Ansatz eines Poolings der Vielzahl von Klein- und Kleinsterzeugern zu einem virtuellen Kraftwerksverbund ergibt sich die Chance diese Erzeuger netzdienlich zu nutzen.

Zum heutigen Stand der Technik ist ein Pooling regulatorisch und technisch möglich. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes soll ein Pooling von Klein- und Kleinstanlagen zur Bereitstellung von netzdienlichen Systemdienstleistungen aufgebaut werden.

Auf Basis heutiger Komponenten aus Regelungstechnik, Kommunikationstechnik und Rechnerstrukturen mit künstlicher Intelligenz soll im Rahmen dieses Projektes die Idee geprüft werden, dass ein Zusammensetzen dieser Komponenten erfolgen kann, welches es ermöglicht, Klein- und Kleinstherzeuger zu poolen und für netzdienliche Zwecke einzusetzen. Für diesen Aufbau eines virtuellen Kraftwerksverbunds müssen mehrere Komponenten zusammengesetzt werden, die beim heutigen Stand der Technik teilweise nur getrennt voneinander genutzt werden. Dazu ist zu gewährleisten, dass sich bei der Zusammensetzung der unterschiedlichen Komponenten die jeweiligen Funktionen nicht gegenseitig beeinträchtigen.

Im Rahmen dieses Projektes soll es möglich sein, eine dezentrale Steuereinheit mit integriertem Regler in Erzeugungseinheiten zu implementieren, die den bestehenden Prozess nicht beeinflusst, sondern um die gewünschten Funktionen erweitert. Der Anspruch ist es heutige Komponenten so zusammensetzen, dass sie hardwareseitig in allen Erzeugungseinheiten des virtuellen Kraftwerksverbundes installiert werden können und lediglich über eine Parametrierung auf den Typen der Erzeugungseinheit angepasst werden. Damit entsteht eine Art hardwareseitige Vereinheitlichung. Zusätzlich wird ein Leitsystem erstellt, zu dem die dezentralen Steuereinheiten ihre Informationen senden. Dazu ist ein geeignetes Kommunikationsdatenmodell zu entwerfen. In diesem Projekt ist zu prüfen, inwiefern so ein Kommunikationsdatenmodell vereinheitlicht werden kann, um unabhängig vom jeweiligen Typen der Erzeugungseinheit einen Datenaustausch zum Leitsystem herzustellen. Es sollen heutige KI-Algorithmen geprüft und bearbeitet werden, um ein geeignetes Portfoliomanagement im Leitsystem abzubilden, das eine ideale Poolzusammensetzung generiert.

Dieses Projekt bietet die Möglichkeit heutige Komponenten zu benutzen und zusammensetzen, um einen nahezu vereinheitlichten Systemaufbau zu erzeugen. Das Gesamtsystem soll zudem Schnittstellen aufweisen, die ein vereinfachtes Adaptieren an externe Partner ermöglichen.

1.6 Zusammenarbeit

Das in Abbildung 3 dargestellte Projektkonsortium bringt durch bereits geleistete Arbeiten Kenntnisse in das Projekt ein, die den Projekterfolg sicherstellen und eine effiziente Umsetzung möglich machen.



Abbildung 3: Projektkonsortium

Eine Zusammenarbeit der Partner wurde durch folgende Maßnahmen gefördert:

- Regelmäßiger Austausch im Rahmen von Konsortialtreffen
- Regelmäßiger Austausch zu arbeitspaketspezifischen Arbeitsgruppen
- Regelmäßiger Austausch in Form von Jour-Fixe Terminen zur Abstimmung der Projektkoordination

Die Konsortialpartner zeichnen sich insbesondere durch die in den folgenden Unterabschnitten beschriebenen Vorarbeiten und Qualifikationen aus.

1.6.1 Technische Universität Dortmund (ie3)

Das Institut für Energiesysteme, Energieeffizienz und Energiewirtschaft (ie³) ist eines der führenden deutschen Hochschulinstitute im Bereich der elektrischen Netze, der Systemintegration erneuerbarer Energien sowie der sich daraus ergebenden technischen und wirtschaftlichen Fragestellungen. Forschungen und Studien des Instituts lösen Fragestellungen für ein technisch lauffähiges und nachhaltiges Elektrizitätssystem der Zukunft mit dem Ziel eine gleichbleibende Versorgungssicherheit gewährleisten zu können. Die Forschungsthemen umfassen die Bereiche der flexiblen elektrischen Transport- und Verteilnetze, der Systemintegration erneuerbarer Energiequellen und Speicher, der effiziente Energieanwendung und der Elektrizitätswirtschaft und -märkte als auch die Systemanalyse hinsichtlich von Netzdynamik und -stabilität.

Bereits in mehreren Forschungsprojekten und Studien hat das ie³ Systemdienstleistungserbringung und Flexibilität von EE-Anlagen erforscht und seine Kompetenzen aufgebaut. Dies geschah unter anderem in der dena Systemdienstleistungsstudie, wo bereits ein maßgeblicher Beitrag zu der Untersuchung zur Entwicklung der zukünftigen Systemdienstleistungssituation in Deutschland und Europa geleistet wurde. Weiterhin werden die Kompetenzen für dynamische Netzbetrachtungen unter anderem in Bezug auf Systemdienstleistungserbringung aus EE-Anlagen im DFG Projekt „Spannungsstabilität“ und dem Kopernikus Projekt ENSURE angewendet und erweitert. Darüber hinaus wird in dem Projekt IDEAL die Flexibilität aus dem Verteilnetz für die überlagerten Netzebenen erforscht. Hierbei steht die Untersuchung der Flexibilitätspotentiale von EE-Anlagen im Verteilnetz im Vordergrund. Im Projekt MathEnergy wird dahingegen untersucht wie durch innovative mathematische Schlüsseltechnologien eine schnelle Regelung von EE-Anlagen im Übertragungsnetz erfolgen kann. Weiterhin ist die TU Dortmund mit dem Smart Grid Technology Lab ebenfalls in der praxisnahen Forschung in mehreren Projekten vertreten und bietet durch die umfassende Ausstattung des Labors die optimale Test- und Entwicklungsumgebung für ein Steuer- und Regeleinheiten unter Berücksichtigung von Netzeinflüssen.

1.6.2 adesso SE

adesso ist einer der führenden unabhängigen IT-Dienstleister im deutschsprachigen Raum und konzentriert sich mit Beratung sowie individueller Softwareentwicklung auf die Kerngeschäftsprozesse von Unternehmen.

Die Strategie von adesso beruht auf drei Säulen: einem umfassenden Branchen-Know-how der Mitarbeiter, einer breiten, herstellerneutralen Technologiekompetenz und erprobten Methoden bei der Umsetzung von Software-Projekten. Das Ergebnis sind IT-Lösungen, mit denen Unternehmen wettbewerbsfähiger werden. Zu unseren Kernbranchen zählen Versicherungen/Rückversicherungen, Banken und Finanzdienstleister, Gesundheitswesen, Lotterie, Telekommunikation, Energieversorgung, Automotive, Manufacturing Industry und Öffentliche Verwaltung. adesso wurde 1997 gegründet.

Dank der ausgeprägten Branchenkompetenz verstehen wir uns nicht als reiner Umsetzungsdienstleister, sondern als Beratungspartner auf Augenhöhe. Gemeinsam mit unseren Kunden entwickeln wir Geschäftsmodelle und -strategien und erarbeiten hierfür belastbare Businesspläne. Über die anschließende Prozessmodellierung gewährleisten wir die Praxistauglichkeit und Umsetzbarkeit der strategischen Überlegungen.

Bereits in vorgegangenen Projekten, wurde diese ausgeprägte Branchenkompetenz gerade im Hinblick auf Virtuelle Kraftwerke unter Beweis gestellt und ein fundiertes Fachwissen innerhalb des dedizierten Competence Centers aufgebaut. Besonders hervorhebenswert sind dabei zum einen ein Projekt bei der Hamburg Energie GmbH, in welchem das Competence Center für die Versorgungswirtschaft die vollständige Anforderungsanalyse und das Management dieser Anforderungen rund um die Vernetzung einer großen Anzahl dezentraler Erzeugungsanlagen, wie Windenergie-, Photovoltaik- oder Biogasanlagen, über das Internet übernahm. Zum anderen wandte die adesso das fundierte Know-How bzgl. Virtuellen Kraftwerken in dem Projekt „Architekturbewertung der Plattform für virtuelle Kraftwerke“ bei der Trianel GmbH an. adesso zeigte im Ergebnis auf, welche Anforderungen aktuell von der Software erfüllt werden und wie hoch der Entwicklungsaufwand ist, um alle notwendigen Anforderungen abzudecken. Des Weiteren wurde eine tiefgehende Bewertung der aktuellen Software-Architektur mithilfe von unterschiedlichen Methoden herangezogen.

Weiterhin hat adesso neben Individual-Software-Entwicklung auf Basis verschiedener Technologien und Plattformen ein breites sowie tiefgehendes technologisches Know-How in neueren Bereichen wie KI und Blockchain etabliert. Hierbei sind neben verschiedenen Kundenprojekten mit dem Ziel der KI-gestützten Geschäftsoptimierung die Beteiligung an den Forschungsprojekten ON4OFF, Einsatz von KI im Handel, sowie 5GAIN mit der Umsetzung von Smart Contracts auf Basis von Blockchain zu nennen.

1.6.3 com2m GmbH

Als Teil der adesso Gruppe bietet die com2m GmbH ganzheitliche IoT-Lösungen an. Beginnend bei der Konnektierung von Maschinen zu einer eigenen Cloud-basierten IoT-Plattform über Service-Portallösungen, mit Remote Diagnostik Funktion, bis hin zur Auswertung der Daten, z.B. Predictive Maintenance, kann das gesamte Spektrum abgedeckt werden. Die Plattform ist dabei als Baukasten für den Aufbau einer individuellen IoT-Lösung

zu sehen. Kernfeatures der com2m IoT-Plattform sind die Benutzer-, Geräte- und Dokumentenverwaltung, Datenbanken für die effiziente Speicherung von Zeitreihendaten oder Schnittstellen für Data Analytics. Durch ein offenes Schnittstellenkonzept kann die Plattform leicht erweitert oder in bestehende Systeme integriert werden.

Durch die Integration der com2m GmbH in die adesso SE im September 2022 wurden die Arbeiten des Teilprojekts unter der adesso SE im Bereich Manufacturing Industry weitergeführt.

1.6.4 urban energy

Die urban energy GmbH entwickelt ein cloud- und KI-basiertes Energiemanagementsystem, welches auf einem Energy Data Hub basiert, zur optimierten Nutzung von Energie in zellularen Quartieren. urban energy bündelt Know-how in den Bereichen KI, intelligente Algorithmen, Data Science, Energiewirtschaft, Elektromobilität, Data Hub sowie IoT und kann auf die langjährige Erfahrung der Firmengründer in Softwareprojekten in den Bereichen Elektromobilität und Energiewirtschaft zurückgreifen.

Das urban energy DataHub ist bereits bei mehreren Kunden der Energiewirtschaft und Immobilien-Projektentwicklung im Einsatz, wie der Wista Berlin und der DEW21. Die urban energy GmbH übernimmt in diesem Forschungsprojekt hauptsächlich die KI-Entwicklung für das Leitsystem.

1.6.5 Mainzer Stadtwerke / Pionext GmbH

Die Mainzer Stadtwerke und ihre Tochtergesellschaft Pionext setzen stark auf den Ausbau erneuerbarer Energien, insbesondere in den Bereichen Solar-, Wind- und Wasserkraft. Sie bringen ihre Expertise und Daten im Betrieb und der Instandhaltung von Kraftwerken in das Forschungsprojekt ein. Zusätzlich werden die Stadtwerke zwei Laufwasserkraftanlagen für die praktische Validierung von Modellen zur Verfügung stellen.

2 Projektergebnisse

2.1 Technische und wissenschaftliche Ergebnisse

Die technischen und wissenschaftlichen Ergebnisse dieses Projekts werden in den folgenden Unterabschnitten präsentiert.

2.1.1 Steuereinheit

Die dezentrale Steuereinheit stellt die Verbindung zwischen den Erneuerbare-Energien-Anlagen und dem Leitsystem her. Die entwickelte Steuereinheit wird mit allen Eigenschaften und Funktionen in diesem Abschnitt genauer beschrieben.

2.1.1.1 Auswahl der Hardware

In Industrieanlagen hat sich für die Umsetzung einer Vielzahl von Steuerungs- und Regelprozessen eine Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) nach DIN EN 61131 etabliert. Eine SPS besitzt mehrere analoge oder digitale Ein- und Ausgänge und kann zumeist mit Hilfe von Erweiterungsgruppen um zusätzliche Anschlüsse und/oder andere Funktionalitäten ergänzt werden. Üblicherweise werden solche Erweiterungsgruppen nur vom Originalhersteller einer SPS angeboten, womit zwar eine uneingeschränkte Kompatibilität innerhalb der Baugruppen gewährleistet, jedoch im gleichen Zuge auch eine Abhängigkeit von einem konkreten Hersteller gegeben ist. Eine SPS kann über eine Schnittstelle mit einer vom Anwender programmierten Funktionalität ausgestattet werden. Aufgrund ihrer Konzeption für Industrieprozesse gelten SPS gemeinhin als sehr zuverlässige und robuste Steuer- bzw. Regelungsmodule.

Eine alternative Möglichkeit zur Umsetzung einer Regelung besteht aus der Nutzung eines Mikrocontrollers oder Einplatinencomputers in Verbindung mit einer offenen Programmiersprache, wie beispielsweise Python. Im Vergleich zur Verwendung einer SPS ist die erforderliche Hardware üblicherweise wesentlich günstiger und durch offene Schnittstellen leichter erweiterbar, ohne dass der Anwender auf Komponenten eines bestimmten Herstellers angewiesen ist. Zudem können defekte Mikrocontroller leicht und schnell durch baugleiche Mikrocontroller ersetzt werden. Bei der Nutzung einer offenen Programmiersprache wie Python ist ein weiterer Vorteil, dass die programmierte Regelung, im Unterschied zur Programmierung auf einer SPS, unabhängig von der Hardware auf Mikrocontrollern und auch Linux- bzw. Windowssystemen verschiedener Hersteller ausführbar ist. Zudem ist für Python eine Vielzahl von Bibliotheken erhältlich, mit denen die Programmierung der Funktionalitäten vereinfacht wird.

Infolge der genannten Vorteile der Nutzung einer offenen Programmierumgebung wird die in dieser Arbeit zu entwickelnde Steuer- und Kommunikationseinheit für dezentrale Energieerzeugungsanlagen in der Programmiersprache Python umgesetzt. Diese wird zunächst auf einem Einplatinencomputer vom Typ Raspberry Pi 4 Model B implementiert. Dieser bietet mit einem 64-Bit Vierkernprozessor und 4 GB Arbeitsspeicher genügend Leistung für die umzusetzenden Regelungsaufgaben und überzeugt durch eine geringe Leistungsaufnahme und kompakte Produktabmessungen. Neben einem klassischen

Ethernetanschluss verfügt dieses Modell ebenfalls über 2.4 GHz und 5.0 GHz WLAN und unterstützt Bluetooth 5.0. Weiterhin bietet das Modell 40 GPIO-Pins, die als Ein- bzw. Ausgänge genutzt werden können. Diese können zusätzlich mit Hilfe von Erweiterungskarten um weitere analoge und digitale Ein- und Ausgänge nachgerüstet werden, sodass eine Vielzahl von Ein- und Ausgangsgrößen nutzbar ist.

2.1.1.2 Anlagenspezifische Gegebenheiten

Wasserkraftwerke

Bei einem WKW wird zusätzlich zur Anlagenleistung auch die korrespondierende Leitapparätöffnung als Eingangsgröße benötigt, da nur diese durch die Steuereinheit zu beeinflussen ist. Um eine breitbandige Anbindung an verschiedene WKW zu gewährleisten, welche häufig mit älteren Anlagensteuerungen ohne digitale Ein- und Ausgänge ausgestattet sind, ist nicht nur eine analoge Erfassung der Messwerte, sondern auch eine analoge Ausgabe von Steuersignalen nötig, die beispielsweise direkt die Ventile zum Auf- und Zufahren des Leitapparats ansteuern. Zusätzlich ist der Pegelstand im Oberwasserbecken zu berücksichtigen. Dieser wird der installierten Anlagensteuerung üblicherweise als analoges 4 ... 20 mA respektive 0 ... 10 V Signal zugeführt und kann der entwickelten Steuereinheit – je nach vor Ort vorhandener Anlagentechnik – entweder über einen Signaldoppler als ebenfalls analoges Eingangssignal übergeben werden oder über eine digitale Schnittstelle aus der Anlagensteuerung ausgelesen werden. Zusätzlich gilt es bei WKW den erhöhten Verschleiß der mechanischen Bauteile bei einem zu häufigen Verfahren des Leitapparats zu berücksichtigen. Wie die Ergebnisse einer vorhergehenden in Kooperation mit H&S an der TU Dortmund angefertigten Abschlussarbeit zeigen, lässt sich die erhöhte Beanspruchung der mechanischen und hydraulischen Bauteile frühzeitig in einer steigenden Temperatur des Hydrauliköls erkennen (Messler, 2019). Aus diesem Grund sind ebenfalls die Temperaturen des Hydrauliköls zu erfassen.

Blockheizkraftwerke / Biogasanlagen

Ein BHKW wird üblicherweise wärmegeführt betrieben. Häufig sichert der Anlagenbetreiber hierbei über Kontrakte die Lieferung von Wärmemengen an externe Abnehmer zu. Um diese vertraglichen Verpflichtungen nicht zu verletzen, muss der meist mindestens 24 Stunden im Voraus bekannte Wärmebedarf bei der Bereitstellung von Regelleistung berücksichtigt werden. Damit einhergehend muss auch der Füllstand bzw. die Temperatur des üblicherweise an den Anlagen vorhandenen Wärmespeichers beachtet werden. Die Biogasproduktion bzw. der Füllstand des gegebenenfalls vorhandenen Gasspeichers ist hingegen für die Erbringung von PRL weitgehend irrelevant. Dies liegt darin begründet, dass aus Untersuchungen historischer Netzfrequenzdaten im Rahmen einer vorhergehenden an der TU Dortmund angefertigten Abschlussarbeit hervorgeht, dass die PRL-Erbringung über einen mittleren Zeitraum betrachtet symmetrisch erfolgt, womit sich der zusätzliche Verbrauch während des Abrufs positiver PRL in anschließenden Phasen des negativen PRL-Abrufs ausgleicht (Messler, 2019). Von einem ähnlichen Verhältnis positiv und negativ zu erbringender PRL ist auch in Zukunft auszugehen. Eine weitere Besonderheit bei BHKW ist, dass diese zumeist erst ab einer Auslastung von mehr als 50 % der Nennleistung einen hinreichend guten Wirkungsgrad erreichen und nicht häufiger als zwei bis drei Mal pro Tag gestartet und

gestoppt werden sollten, um einen übermäßigen Verschleiß der Bauteile zu verhindern. Die hierdurch ansonsten verursachten erhöhten Wartungskosten könnten die Bereitschaft der Anlagenbetreiber zur Teilnahme an der PRL-Erbringung verringern.

Photovoltaikanlagen

Photovoltaikanlagen weisen die Besonderheit auf, dass ältere Bestandsanlagen zumeist nicht über einen externen Energiespeicher verfügen und somit ein dauerhaftes künstliches Absenken der maximalen Anlagenleistung, um die Erbringung von positiver Primärregelleistung gewährleisten zu können, aufgrund der entgangenen Einspeiseeinnahmen für den Anlagenbetreiber unwirtschaftlich erscheint. Angesichts sinkender Einspeisevergütungen gemäß Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) für neuere Anlagen und steigender Strompreise werden modernere PV-Anlagen vermehrt mit einem Energiespeicher ausgerüstet, sodass sich diese Anlagen an einer PRL-Erbringung beteiligen könnten, ohne auf Einspeiseeinnahmen zu verzichten. In jedem Fall können PV-Anlagen an der Erbringung von PRL innerhalb eines virtuellen Kraftwerks partizipieren, indem ihre Einspeiseleistung im Falle einer erhöhten Netzfrequenz gemäß den Regularien zur PRL-Erbringung reduziert wird.

2.1.1.3 Regelkriterien

Aus den Präqualifikationsbedingungen zur Erbringung von Primärregelleistung ergeben sich die grundlegenden Regelkriterien für die im Rahmen dieses Forschungsprojekts zu entwickelnde Steuereinheit. Grundsätzlich erfolgt die PRL-Erbringung nur bei einer Frequenzabweichung außerhalb eines Totbands von $\pm 10 \text{ mHz}$ von der Sollfrequenz $f_{\text{Soll}} = 50 \text{ Hz}$. Dies liegt darin begründet, dass die Netzfrequenz aufgrund kleinerer Abweichungen vom Leistungsgleichgewicht durchgehend um ihre Sollfrequenz schwankt und es somit zu einer massiv erhöhten Belastung der PRL anbietenden Erzeugungsanlagen kommen würde, ohne einen adäquaten Vorteil für die Netzstabilität zu erlangen. Außerhalb des Totbands und bis zu einer maximalen Frequenzabweichung von $\pm 200 \text{ mHz}$ erfolgt die PRL-Erbringung proportional zur Frequenzabweichung. Die zu erbringende Regelleistung wird dabei in Abhängigkeit von der maximal zur Verfügung gestellten Primärregelleistung erbracht. Bei einer Frequenzabweichung $\Delta f \leq -200 \text{ mHz}$ respektive $\Delta f \geq 200 \text{ mHz}$ ist die angebotene Regelleistung vollumfänglich zu erbringen. Die in den drei Frequenzbereichen zu erbringende Primärregelleistung ist in Abbildung 4 dargestellt.

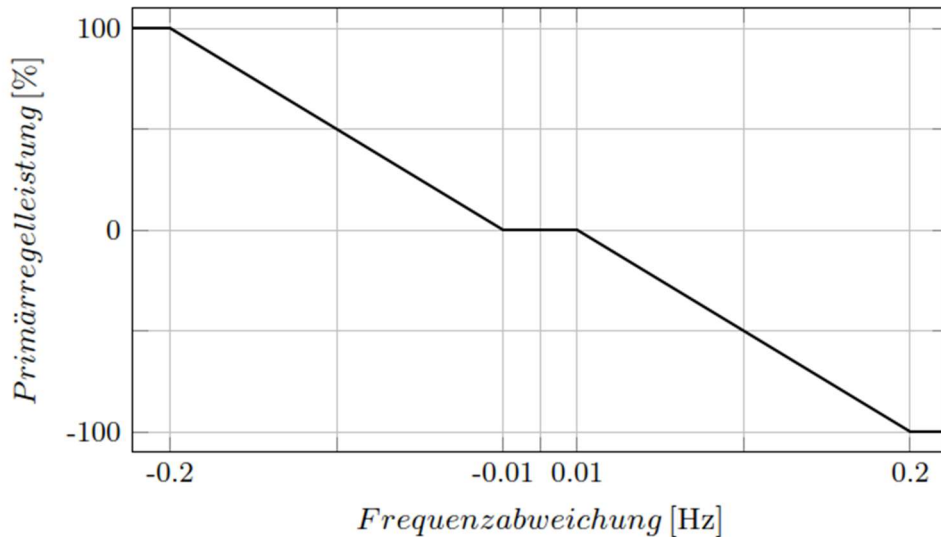


Abbildung 4 Statik der Primärregelleistungserbringung

Neben der reinen Frequenzabweichung ist außerdem als zweites Regelkriterium die Dauer der Frequenzabweichung zu berücksichtigen. Die angebotene PRL muss bei einer Frequenzabweichung grundsätzlich nur für eine Dauer von maximal 15 Minuten erbracht werden. Für den Fall, dass die Frequenzabweichung zu einem Zeitpunkt innerhalb des zuvor definierten Frequenztotbands liegt, bevor sie ihn wieder verlässt, wird von einer neuen Frequenzabweichung ausgegangen, sodass die 15-minütige Zeitdauer erneut beginnt. In der Praxis zeigt sich, dass die Frequenz dauerhaft um die Sollfrequenz f_{soll} schwankt und es somit per Definition immer wieder zu neuen Frequenzabweichungen kommt, was in einer nahezu dauerhaft zu erbringenden Primärregelleistung während des Bereitstellungszeitraums resultiert. Lediglich in Ausnahmefällen, bei größeren Systemstörungen ist von einem Erreichen der maximalen Zeitdauer von 15 Minuten innerhalb einer Frequenzabweichung auszugehen.

2.1.1.4 Bedienoberfläche

Mit Hilfe der entwickelten Bedienoberfläche erfolgt die Konfiguration der Steuereinheit und die Überwachung der Erzeugungsanlage. Die gesamte Softwarelösung ist auf allen Ebenen durch einen Authentifizierungsschutz und individuell einstellbare Benutzerrechte gesichert.

Die Konfiguration der Steuereinheit erfolgt über die in Abbildung 5 dargestellte Oberfläche. Neben Angaben zur Anlage selbst werden auch Infos zu den eingebauten SPS-Komponenten sowie Parameter zur PRL-Erbringung, wie beispielsweise die maximal zu erbringende Primärregelleistung, eingegeben. Alle hinterlegten Werte werden in einer Konfigurationsdatei gespeichert und sind so auch bei einem Stromausfall o.ä. dauerhaft auf der Steuereinheit verfügbar.

H&S

Ausloggen

Admin Login

Konfigurations Editor

Name:	Simulator
Abkürzung:	sim
ID:	12
Typ:	wkw
Vendor:	Test
Modell:	S1200
P Inst:	77778
PRL Max:	4,0
P Max:	40,0
P Min:	0,2
Firmware:	2
Protokoll:	modbusTCP

Speichern

Abbildung 5 Konfigurations-Editor

Die einzelnen Bestandteile der Bedienoberfläche werden in Docker-Containern (Open Source) bereitgestellt. Hierbei werden alle Abhängigkeiten innerhalb des Containers verwaltet, so dass diese simpel auf den Endgeräten installiert und gewartet werden können. Die Messwerte, die durch die Anlage an die dezentrale Steuerung übermittelt worden sind, werden mithilfe einer InfluxDB-Datenbank verwaltet. Die Daten werden in sogenannten *Buckets* gespeichert und hochgeladen. Durch das Anlegen dieser *Buckets* erfolgt eine strukturierte Sortierung nach den Themen, wie *Datenpunkte* und *Fehlermeldungen*. Dadurch und durch die Weboberfläche von InfluxDB ist eine Filterung und Isolierung einzelner Daten einfach und effizient möglich. Das Hochladen der Daten geschieht über einen API-Key, der bei Bedarf ebenfalls verschlüsselt abgelegt werden kann. InfluxDB ist ebenfalls Open-Source und kann durch kommerzielle Angebote im Bedarfsfall flexibel skaliert werden.

Zur Überwachung der Anlage werden die aktuellen und vergangenen Messwerte mit Hilfe eines Grafana-Dashboards visualisiert. Das Dashboard greift auf die InfluxDB-Datenbank über einen API-Key zu und enthält ebenfalls ein Fehlerlogbuch, das bei Absturz der Datenübertragung zur Fehlerlokalisierung genutzt werden kann. Auf dem Dashboard werden die momentane Frequenz, die momentane Leistung sowie der Fehlerlog angezeigt. Zusätzlich

werden die historische Frequenz und die vergangene Leistung über eine Zeitreihe visualisiert, so dass der Benutzer einen Überblick über die Anlagenfunktion erhält und alle wichtigen Statusinformationen in einer Ansicht erfassen kann.

2.1.1.5 Struktur der Steuereinheit

Mit Hilfe der über die Weboberfläche eingegebenen und anschließend in einer Konfigurationsdatei gespeicherten Anlagen- und Steuerungsparameter wird nach dem in Abbildung 6 dargestellten Schema eine Instanz der DEA-Klasse erstellt. Dabei wird zunächst mit der Angabe des Anlagentyps (Auswahl aus WKW, BHKW, Biogas- oder PV-Anlage und Batteriespeicher) eine Instanz der Typ-Klasse generiert. Aus der Benutzerauswahl des Herstellers, der Modellbezeichnung und der in der Anlagensteuerung verwendeten Firmware wird eine Instanz der Anlagenkommunikation (*Comm-Objekt*) erstellt, die auf den hinterlegten Kommunikationseinstellungen beruht.

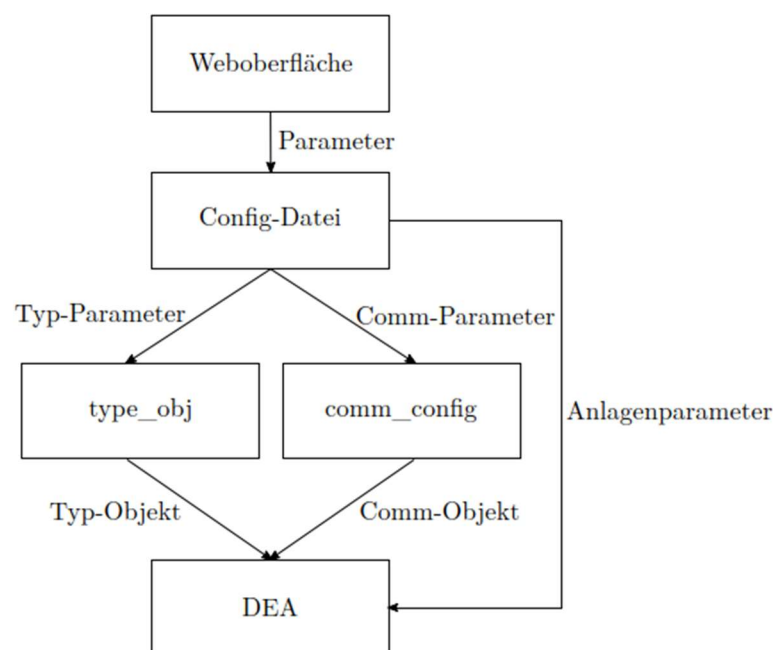


Abbildung 6 Software-Struktur der Steuereinheit

2.1.1.6 Kommunikation zwischen Anlagensteuerung und Steuereinheit

Zur Ermittlung der durch die Steuereinheit nutzbaren Schnittstellen an den unterschiedlichen Anlagensteuerungen erfolgten eine Recherche in öffentlich verfügbaren Anlagendokumentationen und Anfragen bei verschiedenen Anlagenherstellern. Hierdurch wurde ein breites Bild an nutzbaren Schnittstellen und verwendeten Kommunikationsprotokollen gewonnen.

Gemäß der analysierten Datenblätter weisen nahezu alle betrachteten Anlagen eine Ethernetschnittstelle auf und unterstützen eine Kommunikation über Modbus RTU/TCP und im Falle von Siemens SPS zusätzlich über ein S7-Kommunikationsprotokoll. Zusätzlich wird häufig eine drahtgebundene Anbindung über Hardwarekontakte ermöglicht. Aufgrund der universellen Implementierungsmöglichkeiten einer Kommunikation über Modbus RTU oder

TCP wird diese von der entwickelten Steuereinheit bevorzugt unterstützt. Zudem wird eine Anbindung über Hardwarekontakte ermöglicht. Die Kommunikationsprotokolle Profinet bzw. Profibus werden zunächst nicht in das Kommunikationskonzept der Steuereinheit eingebunden, da nahezu alle betrachteten Anlagen, die Profinet oder Profibus unterstützen, auch eine Kommunikation über Modbus TCP ermöglichen. Aufgrund der universellen Umsetzung der Speicherung und Verarbeitung von Kommunikationseinstellungen ist eine einfache Adaptierung an ebenfalls über Ethernet angebundene Kommunikationsprotokolle, welche durch die Verwendung von Registern Nutzdaten austauschen, bei Bedarf sichergestellt. Darüber hinaus ist hierdurch die Verwendung der dezentralen Steuereinheit in Verbindung mit weiteren Anlagentypen leicht umsetzbar. Hierbei ist beispielsweise die Anbindung von Windkraftanlagen, flexiblen Lasten wie Elektrofahrzeug-Ladesäulen und Wärmepumpen bzw. ganzen Energiemanagementsystemen denkbar.

Für den Fall eines Kommunikationsausfalls zwischen Anlagensteuerung und Steuereinheit ist eine Überwachung der Kommunikationsstrecke integriert. Sollte die Verbindung unterbrochen werden, erkennen dies sowohl die Steuereinheit als auch die Anlagensteuerung. Die Steuereinheit meldet den Ausfall dem Leitsystem. Die Anlagensteuerung wechselt eigenständig in die vor der Regelleistungserbringung aktive Regelung und kann somit trotz Kommunikationsausfalls weiterhin nach Fahrplan Energie erzeugen.

2.1.1.7 Kommunikation zwischen Steuereinheit und Leitsystem

Das Leitsystem berücksichtigt umfassende Sicherheitsaspekte, die nicht nur für den Betrieb selbst, sondern auch für die Kommunikation mit den Clients (also den Steuereinheiten) von großer Bedeutung sind. Diese Sicherheitsmaßnahmen gewährleisten, dass alle Daten sicher übertragen und gespeichert werden, und dass nur autorisierte Benutzer Zugriff auf das System haben. So werden die Integrität und Vertraulichkeit der Kommunikation zwischen dem Leitsystem und den Clients sichergestellt. Aus Sicht der Steuereinheit kann von einer dauerhaften Erreichbarkeit des Leitsystems ausgegangen werden. Trotzdem wurde auch auf Seite der Steuereinheit der Weiterbetrieb ohne Kommunikation zum Leitsystem sichergestellt. Entsprechend der PQ-Bedingungen und den Mindestanforderungen an die Informationstechnik des Reservenbieters zur Erbringung von Regelreserve (ÜNB, 2022) kann die Steuereinheit auch ohne die Kommunikation zum Leitsystem eigenständig Regelleistung erbringen. Zusätzlich liegt für die Direktvermarktung immer der letzte vom Leitsystem bereitgestellte Fahrplan auf Clientseite vor.

Bei der Kommunikation zwischen Steuereinheit und Leitsystem, wird eine MQTT-Verbindung eingesetzt. Der Client baut die Verbindung auf und muss sich authentifizieren. Der Datenaustausch ist nur über die bestehende verschlüsselte Verbindung möglich, die über das mobile Netz erfolgt.

Es ist wichtig zu erwähnen, dass das System nicht produktiv eingesetzt wird. Weitergehende Sicherheitsaspekte werden eher konzeptionell betrachtet, aber aus Kostengründen nicht immer vollständig dauerhaft umgesetzt.

In einer echten Produktivumgebung würden weitere Ausbaustufen an die Sicherheit, wie in den PQ-Bedingungen und vom BSI gefordert, erfolgen. Diese würden in Richtung Redundanz

der Verbindung und geschlossene Netzinfrastruktur zu Kommunikation gehen. Es wäre denkbar, neben Mobilfunk auch einen weiteren Kanal, wie eine feste Internetleitung, einzurichten. Bei einem Problem auf einem Kanal, würde ein weiterer Backupkanal zur Verfügung stehen.

Die mobile Verbindung würde über ein Access Point Name (APN) erfolgen. Ein APN ist eine Einstellung auf Mobilgeräten, die den Zugangspunkt für eine geschlossene Benutzergruppe definiert, über den das Gerät eine Verbindung herstellt (ÜNB, 2023). Der APN bestimmt, welche IP-Adressen und Sicherheitsmethoden verwendet werden und wie das Gerät mit dem Netzwerk des Mobilfunkanbieters kommuniziert. Dabei erfolgt die Kommunikation getrennt von anderen Mobilfunknutzern.

Die Authentifizierung wird von Basisauthentifizierung auf zertifikatsbasierte Authentifizierung umgestellt. Bei der zertifikatsbasierten Authentifizierung wird ein digitales Zertifikat verwendet, um die Identität des Clients zu bestätigen. Dies erhöht die Sicherheit, da das Zertifikat schwerer zu fälschen ist als ein einfaches Passwort. Der Client muss das Zertifikat vorlegen, das von einer vertrauenswürdigen Zertifizierungsstelle ausgestellt wurde, um Zugang zum System zu erhalten.

Bereits jetzt wird berücksichtigt, dass bei einem Verbindungsabbruch oder Auffälligkeiten ein Kraftwerk aus dem Verbund genommen wird und das Monitoring im Leitsystem weitere Fehlermeldungen triggert und behandelt. Darüber hinaus erfolgt auch ein Monitoring der Anwendung auf Anwendungs- und Infrastrukturebene. Dies stellt sicher, dass potentielle Probleme schnell erkannt und behoben werden können, um die Stabilität und Sicherheit des Gesamtsystems zu gewährleisten.

2.1.2 Validierung der Steuereinheit in Praxisversuchen

In mehrstufig angelegten Praxisversuchen erfolgt die Validierung der entwickelten Steuereinheit.

2.1.2.1 Laborversuch mit einem Redox-Flow-Speicher

Ein abschließender Labortest im Smart Grid Technology Labor (SGTL) der TU Dortmund konnte aufgrund der Verzögerung in der Bearbeitung und nicht verschiebbarer Umbaumaßnahmen im Labor nicht durchgeführt werden. Allerdings konnte während der Projektlaufzeit mit einem frühen Prototypen der Steuereinheit bereits ein Laborversuch absolviert werden. Mit diesem war die Erbringung von PRL durch einen Redox-Flow-Batteriespeicher möglich.

2.1.2.1.1 Versuchsumgebung

Zur Durchführung des Versuchs wird die entwickelte Steuereinheit in der in Abbildung 7 dargestellten Laborumgebung verifiziert. Der Versuchsaufbau besteht aus einem bereits ins Labornetz integrierten Raspberry Pi, auf den der programmierte Regelalgorithmus übertragen wird, einem Redox-Flow-Speicher, einem Echtzeitsimulator, der die Frequenzverläufe simuliert, zwei Leistungsverstärkern, die die simulierten Frequenzverläufe im Labornetz umsetzen, und einem Frequenzmessgerät, das die Netzfrequenz an der Sammelschiene misst.

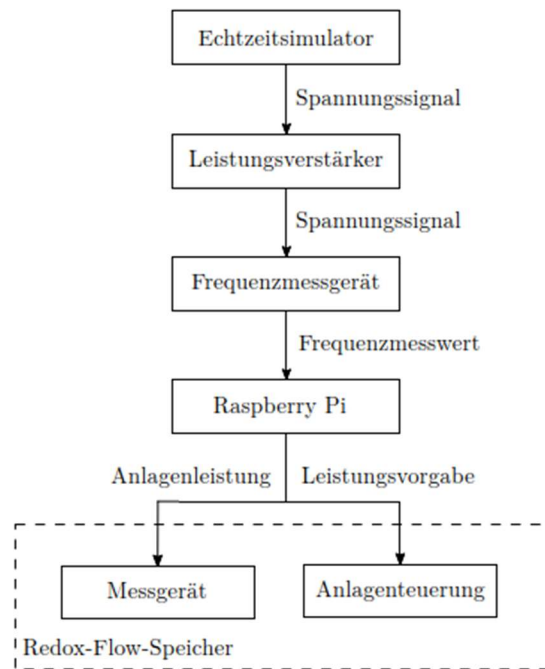


Abbildung 7 Versuchsaufbau in der Laborumgebung

Der in diesem Versuchsaufbau genutzte Redox-Flow-Speicher der Firma SCHMID weist eine maximale Leistung $P_{max} = 30 \text{ kW}_{DC}$ und eine nutzbare Energie von 120 kWh_{AC} auf. Dieser beinhaltet insgesamt sechs Stacks, die auf zwei Gruppen aufgeteilt sind. Jede Gruppe ist mit einem eigenen Wechselrichter mit dem Labornetz verbunden.

Die Kommunikation zwischen dem Raspberry Pi und der Anlagensteuerung bzw. dem integrierten Messgerät des Redox-Flow-Speichers, mit welchem beispielsweise die (Ent-)Ladeleistung gemessen werden kann, erfolgt über eine Modbus TCP Verbindung. Das an der Sammelschiene angeschlossene Frequenzmessgerät wird über eine serielle Verbindung angebunden. Die Echtzeitsimulation des Unterfrequenzereignisses wird mit Hilfe der Simulationsumgebung RT-Lab des Unternehmens OPAL-RT umgesetzt. In die Echtzeitsimulation wird das Simulink-Modell eines Energieübertragungsnetzes integriert. Die von der Echtzeitsimulation berechneten Netzfrequenzen werden über ein Spannungssignal an zwei Leistungsverstärker, die jeweils eine Leistung von 100 kVA aufweisen, übergeben. Diese verstärken das Signal und beeinflussen dadurch die an der Sammelschiene vorherrschende Netzfrequenz.

2.1.2.1.2 Versuchsdurchführung

Innerhalb des Versuchs wird der implementierte Regelalgorithmus mit Hilfe eines beispielhaften Unterfrequenzverlaufs, welcher dem Auslegungsfall zur Erbringung von PRL im ENTSO-E-Netzgebiet Kontinentaleuropa entspricht, verifiziert. Hierbei wird der Ausfall der größten am Netz befindlichen Erzeugungseinheit bzw. der größten an einer Sammelschiene angeschlossenen Erzeugungsleistung in Höhe von $P = 3.000 \text{ MW}$ simuliert. (ENTSO-E, 2022)

Die vom Redox-Flow-Speicher maximal zu erbringende Leistung wurde auf $P_{max} = \pm 15.000 \text{ W}$ festgelegt, da es bei der Durchführung vorheriger Laborversuche bei einer zu hohen Belastung zu Fehlfunktionen von einem der beiden Wechselrichtern, mit denen der Redox-Flow-Speicher an das Netz angeschlossen ist, abhängig von den

Umgebungsbedingungen gekommen ist. Zu Beginn eines jeden Versuchsdurchlaufs beträgt die Leistung des Redox-Flow-Speichers $P_{start} = 0 \text{ W}$.

Zusätzlich ist bei dem verwendeten Redox-Flow-Speicher zu beachten, dass die Leistungsvorgaben bei Entladevorgängen des Speichers den DC-Werten, aber bei Ladevorgängen den AC-Werten entsprechen. Die aus den Modbusregistern ausgelesene Anlagenleistung entspricht ebenfalls den AC-Werten, wodurch in den folgenden Betrachtungen stets eine Differenz zwischen Leistungsvorgabe und realer Anlagenleistung zu beobachten ist. Die Differenz ist durch Umwandlungsverluste zu erklären und wird zusätzlich nichtlinear durch äußere Einflüsse, wie beispielsweise die Temperaturen der Elektrolytflüssigkeiten beeinflusst.

PRL-Erbringung mit einem Basis-Reglerkonzept

Zunächst erfolgt ein Versuchsdurchlauf mit einem Basis-Reglerkonzept zur Regelleistungserbringung ohne zusätzliche Funktionen. Die vom Regelalgorithmus berechnete Anlagenleistung wird direkt an die Anlagensteuerung des Redox-Flow-Speichers übergeben. In Abbildung 8 sind die im Redox-Flow-Speicher hinterlegte Leistungsvorgabe, die tatsächliche Anlagenleistung und der Frequenzverlauf dargestellt.

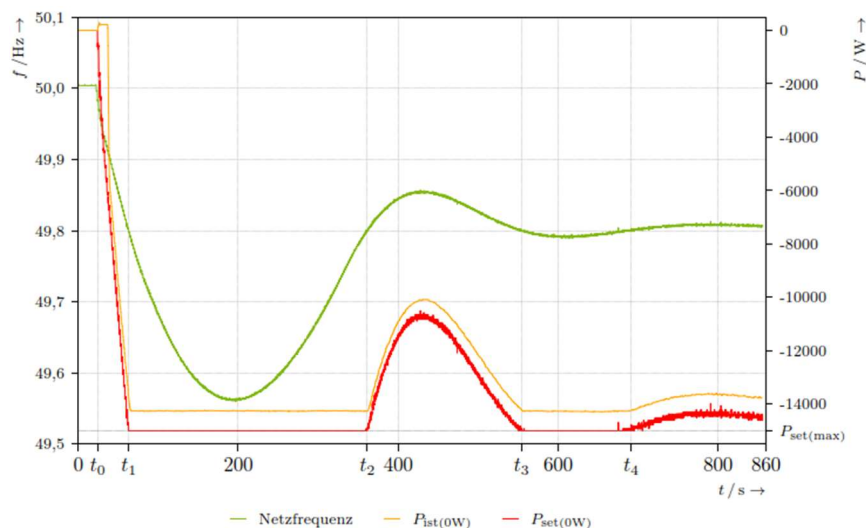


Abbildung 8: Ergebnisse des Basis-Reglerkonzepts

Sobald die Netzfrequenz zum Zeitpunkt $t_0 \approx 24 \text{ s}$ das Frequenztotband verlässt, also die Netzfrequenz $f_{Netz} < 49,99 \text{ Hz}$ beträgt, werden die berechneten Leistungsvorgaben an die Anlagensteuerung übergeben. Mit einer Verzögerung verändert sich auch die gemessene Anlagenleistung P_{ist} . Die Verzögerung ist maßgeblich auf die stattfindenden chemischen und mechanischen Prozesse, wie die Mischung der Elektrolytflüssigkeiten und den erforderlichen Start der Pumpen für die Elektrolytflüssigkeiten zurückzuführen. Zusätzlich wird sie von der Dauer des Schreibvorgangs der Sollwertvorgabe in der Anlagenleistung beeinflusst. Gleichzeitig ist der Abbildung zu entnehmen, dass sich die Anlagenleistung zunächst entgegengesetzt der Leistungsvorgabe verändert, bevor sie sich dieser mit einer zeitlichen Verzögerung anpasst. Dies ist auf eine Leistungsaufnahme der Pumpen für die Elektrolytflüssigkeiten zurückzuführen, welche zunächst aktiviert werden. Der zeitliche Unterschied zwischen Soll- und Ist-Leistung ist zu Beginn der Leistungsanforderung

ausgeprägter als im Zeitpunkt in dem die maximale Anlagenleistung $P_{max} = 15.000 W_{DC}$ erreicht wird. Im weiteren zeitlichen Verlauf ist ersichtlich, dass die Anlage der Leistungsvorgabe grundsätzlich folgen kann, die Anlagenleistung bei einer Änderung der Leistungsvorgabe jedoch erst mit einer gewissen Verzögerung angepasst wird. Dies ist ebenfalls auf die bereits erwähnten, in der Anlage stattfindenden chemischen und mechanischen Prozesse, sowie die Dauer des Schreibvorgangs der neuen Leistungsvorgabe zurückzuführen. Bei der hier gezeigten Implementierung des Basis-Reglerkonzepts wird jede berechnete Leistungsvorgabe an die Anlagensteuerung übergeben. Während der Simulationszeit werden insgesamt 4836 Leistungsvorgaben in das entsprechende Modbusregister geschrieben. Dies hat innerhalb der Versuchsdurchführung zu keinerlei Fehlersituationen geführt. Allgemein ist es jedoch nicht auszuschließen, dass es bei anderen Anlagen infolge dieser Frequenz an Schreibvorgängen von Leistungsvorgaben zu Fehlern kommt, was zu unerwünschten Verhaltensweisen der Anlage führen könnte. Zusätzlich sind die chemischen und mechanischen Prozesse innerhalb eines Redox-Flow-Speichers zu berücksichtigen, deren Komponenten durch die erhöhte Anzahl an Leistungsänderungen einem steigenden Verschleißrisiko ausgesetzt sind.

Um Kommunikationsprobleme und einen erhöhten Verschleiß an der Anlage zu vermeiden, wird der Regelungsalgorithmus für weitere Versuche mit zwei Optionen erweitert. Dies ist zum einen die Implementierung eines Leistungstotbands, bei dem der Algorithmus die neu berechnete Leistungsvorgabe mit der letzten ins Modbusregister der Anlage geschriebenen Leistungsvorgabe vergleicht und anschließend die neue Leistungsvorgabe lediglich bei einer ausreichend großen Differenz übermittelt. Zum anderen wird eine zeitliche Verzögerung genutzt, bei der nur nach einer bestimmten Zeitdauer eine neue Leistungsvorgabe übermittelt wird.

Ergebnisse des Laborversuchs

Zusammenfassend zeigt sich, dass das Basis-Reglerkonzept kleinste, auch kurzfristige Frequenzabweichungen in veränderte Leistungsvorgaben umsetzt, sodass eine durchweg proportionale Regelleistungserbringung gewährleistet wird. Allerdings kommt es innerhalb des Proportionalregelbereichs zu einer sehr hohen Frequenz von Leistungsänderungen. Zudem betragen die Leistungsänderungen im Vergleich zum gesamten Leistungsbereich der Anlage häufig nur wenige Promille, wodurch eine Umsetzung der Leistungsänderungen durch die Anlage mindestens fragwürdig erscheint. Die konkrete Umsetzungsmöglichkeit ist in jedem Fall von der spezifischen Anlage abhängig. Bei Anlagen, die mechanische oder hydraulische Komponenten zur Einstellung eines Betriebspunkts benutzen, wie es beispielsweise bei WKW der Fall ist, sind derart geringe Änderungen der Leistungsvorgabe technisch nicht umsetzbar. Allerdings kommt es trotzdem zu einer dauerhaften Belastung der mechanischen und hydraulischen Komponenten, wodurch ein erhöhter Verschleiß zu erwarten ist. Auch bei Anlagen, die eine Änderung der Leistungsvorgabe mit Hilfe eines Wechselrichters umsetzen, kann es durch eine dauerhaft hohe Frequenz von Leistungsänderungen zu Fehlfunktionen kommen, da die Anlagensteuerungen mit der hohen Anzahl an Leistungsvorgaben überfordert sind. Bei der Verwendung eines Leistungstotbands sind im Vergleich zum Basis-Reglerkonzept lediglich geringfügige Abweichungen der

Leistungsvorgaben feststellbar. Zugleich wird die Anzahl der übermittelten Leistungsvorgaben sowohl im Proportional-, als auch im Maximalregelbereich deutlich reduziert.

Die Implementierung eines Zeittotbands kann im Vergleich weitgehend ähnliche Ergebnisse erzielen. Gemäß der aktuell gültigen Präqualifikationsbedingungen ist zwar eine künstliche Verzögerung der PRL-Aktivierung nicht zulässig; jedoch eine nicht-künstliche Verzögerung von bis zu zwei Sekunden (PQ-Bedingungen, 2022). Dementsprechend kann die Implementierung eines Zeittotbands für hinreichend schnell aktivierbare Anlagen eine Option darstellen, insofern die Gesamtdauer der PRL-Aktivierung weniger als zwei Sekunden beträgt und die Präqualifikationsbedingungen dahingehend angepasst werden.

2.1.2.2 Feldversuche Marsberg

Zur Beurteilung der einzelnen Komponenten in der Praxis wurden mehrere Feldtests in einem Wasserkraftwerk des Konsortialpartners PIONEXT Service GmbH & Co. KG in Marsberg durchgeführt. Hierbei galt es insbesondere mögliche zusätzliche technische Beschränkungen in einem realen Wasserkraftwerk zu identifizieren

2.1.2.2.1 Versuchsaufbau

Das Wasserkraftwerk verfügt über zwei Synchrongeneratoren mit einer Gesamtnennleistung von $P_r = 360 \text{ kW}$. Das Totband im Leistungsregler des Kraftwerks ist standardmäßig auf 1 % der Basis-Wirkleistung P_{Basis} eingestellt. Zusätzlich verfügt das Wasserkraftwerk über ein Wehr, das den Wasserzufluss Z in das Oberwasserbecken regelt. Die für das Wasserkraftwerk verwendete Leistungsregelung kann einen starken Einfluss auf die Qualität der PRL haben. Die Leistungsregelung dieses Wasserkraftwerks beruht auf einem PI-Regler mit einer vergleichsweise hohen Integrationszeitkonstante τ_p , um eine häufige Anpassung des Leitapparats während des Normalbetriebs zu vermeiden. Der Versuchsaufbau für jede Maschine ist in Abbildung 9 dargestellt.

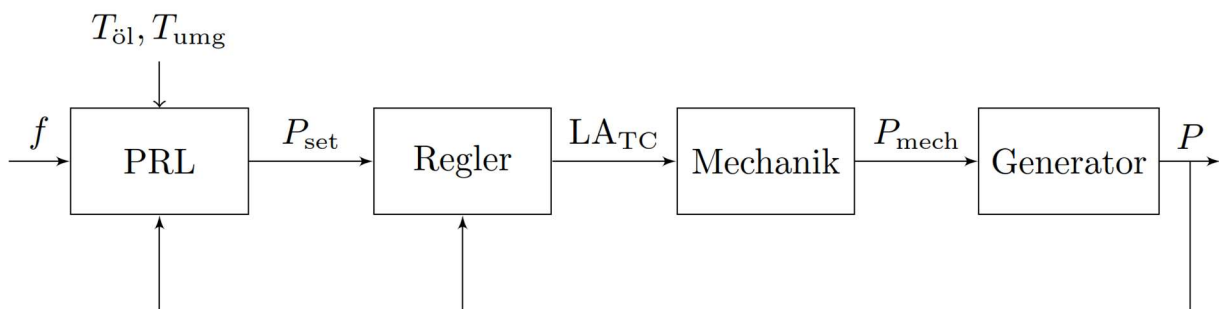


Abbildung 9: Versuchsaufbau Feldtest Marsberg

Der PRL-Regler berechnet für jede Maschine einen Leistungssollwert P_{set} auf Grundlage der Basisleistung P_{Basis} zum Eintritt des PRL-Ereignisses und der Frequenzabweichung Δf . Der Leistungssollwert wird an den Systemregler übertragen. Als Reaktion auf den geänderten Leistungssollwert wird der Leitapparat vom Systemregler mithilfe eines Umschaltbefehls (TC) geregelt. Die Leistung P wird gemessen und an den PRL-Regler übertragen. Zudem wird die Einhaltung der Pegelgrenzwerte kontinuierlich überwacht. Die Netzfrequenz wird mit einem Frequenzmessgerät mit einer Genauigkeit von $\pm 1 \text{ mHz}$ aufgezeichnet. Zusätzlich wird in einem weiteren Praxisversuch getestet, ob eine vermutete erhöhte Belastung der Mechanik

des Leitapparats und der Ölhdraulikeinheit des Wasserkraftwerks mit Temperaturmessungen ermittelt werden kann (vgl. Abschnitt 2.1.2.2.3). Es werden hierbei sowohl die Hydrauliköltemperatur $T_{\text{Öl}}$ als auch die Umgebungstemperatur T_{Umgebung} gemessen. Letztere in einem Abstand von < 1 m zur Ölhdraulikeinheit.

2.1.2.2.2 Test der Steuereinheit

In einem ersten Praxisversuch wird das Zusammenspiel zwischen der Anlage (bzw. der Anlagensteuerung) und der entwickelten Steuereinheit getestet. Zunächst wird die Kommunikation zwischen der Anlagensteuerung und der Steuereinheit überprüft. Die Kommunikation erfolgt dabei mit Hilfe des Siemens-internen S7-Protokolls. Dieses über die Ethernetschnittstelle der SPS laufende Kommunikationsprotokoll wird verwendet, da die Anlagensteuerung in der Bestandsanlage ohne zusätzliche Module keine Modbus-Verbindung unterstützt. Die Kommunikation zwischen Anlagensteuerung und Steuereinheit funktioniert vollständig. Aufgrund der im Systemregler voreingestellten Totbänder und der zuvor benannten hohen Integrationszeitkonstante τ_p treten systematische Abweichungen zwischen der Ist- und Soll-Leistung auf. Die Totbänder werden in weiteren Versuchen angepasst, um die Abweichungen zu reduzieren bzw. zu eliminieren. Zudem ist ein leichtes Schwanken der Ist-Leistung um $\Delta P \approx 1 \text{ kW}$ zu beobachten. Dies ist auf den sich in einem Laufwasserkraftwerk durchgehend minimal ändernden Pegelstand zurückzuführen.

2.1.2.2.3 Gesamtsystemtest mit erweitertem Testumfang

In einem weiteren Praxisversuch erfolgt eine mehrstündige dauerhafte PRL-Erbringung. Hierbei wird die gesamte Kommunikationsstrecke von der Anlagensteuerung über die Steuereinheit bis zum Leitsystem getestet. Die Kommunikationsverbindung zwischen Steuereinheit und Leitsystem erfolgt via MQTT über eine Mobilfunkverbindung. So werden die aufgezeichneten Versuchsdaten an das Leitsystem übermittelt und das Leitsystem übergibt Leistungsvorgaben für die Direktvermarktung an das Wasserkraftwerk. Die Berechnung der von der Frequenzabweichung abhängigen Primärregelleistung erfolgt gemäß den PQ-Bedingungen durchgehend lokal in der Steuereinheit.

Während dieses Feldtests ist das Leistungstotband des Systemreglers ausgeschaltet. Abbildung 10 zeigt den Sollwert $P_{\text{set},2}$, den gemessenen Leistungswert P_2 und die entsprechende Leitapparatöffnung LA für einen exemplarischen Zeitraum von 3600 s während des Felddauertests. Auffallend ist die kontinuierliche leichte Abweichung zwischen P_2 und $P_{\text{set},2}$ ohne Anpassung der Leitapparatöffnung. Beide Temperaturen steigen um $\Delta T \approx 0,5 \text{ K}$ auf $T_{\text{Öl,Ende}} = 25,88 \text{ °C}$ und $T_{\text{Umgebung,Ende}} = 26,06 \text{ °C}$. Während des gesamten Felddauertests nimmt der Wasserpegel um $\Delta h = 2 \text{ cm}$ zu. Im Prinzip hängt P_2 von $P_{\text{set},2}$ und Δf entsprechend ab. Die Abweichungen $\Delta P_2 = 1..2 \text{ kW}$ liegen innerhalb der zulässigen Wertintervalle. Es ist zu vermuten, dass Messungenauigkeiten sowie ein leicht schwankender Oberwasserpegel die Ursache dafür sind. In den aufgezeichneten Messwerten ist keine deutlich erhöhte Belastung der mechanischen bzw. hydraulischen Komponenten des Leitapparats erkennbar, die sich in einer erhöhten Hydrauliköltemperatur niederschlagen würde. Die Abweichung des Oberwasserpegels blieb trotz starker Frequenzschwankungen während des Feldversuchs innerhalb von Δh_{max} . Der Einfluss der PRL-Bereitstellung auf den Oberwasserpegel erscheint somit unkritisch.

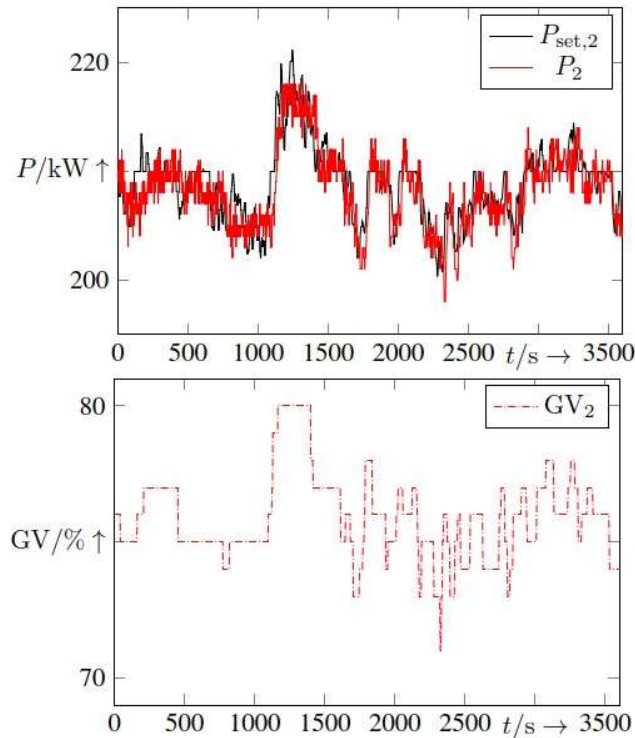


Abbildung 10: Ergebnisse des Felddauertests

Ergebnisse der Praxisversuche

Die ermittelten Ergebnisse zeigen, dass der vorhandene Leistungsregler und die spezifischen Maschinenparameter einen erheblichen Einfluss auf die Fähigkeit eines kleinen Laufwasserkraftwerks haben, erfolgreich PRL zu erbringen.

Die relevanteste Grenze für die PRL-Bereitstellung, die in den beschriebenen Versuchen festgestellt wurde, war die vergleichsweise langsame Reaktion der Anlage auf die Änderung der Leistungsvorgabe und eine Abweichung zwischen Leistungsvorgabe und tatsächlicher Wirkleistung im Feldtest, die durch den in der Anlage verbauten Leistungsregler verursacht wurde. Geringere Einschränkungen ergeben sich durch wasserrechtliche Vorgaben des Pegelstands: der Pegelstand h variiert in geringem Maße kontinuierlich auf natürliche Weise, was in einer leicht schwankenden Leistung P_j resultiert. Auch die nichtlineare Turbinenwirkleistung führt in der Praxis nur zu unwesentlichen Einschränkungen. Unkritisch in den durchgeführten Versuchen war die mechanische Beanspruchung der Stellglieder, gemessen an der Öltemperatur. Insgesamt lässt sich eine Eignung von Laufwasserkraftwerken zur Erbringung von (Primär-)Regelleistung feststellen.

Potentielle Optimierungsmöglichkeiten der PRL-Bereitstellung durch Laufwasserkraftwerke sind eine Erhöhung der Verstärkung K_p und eine Verringerung der Integrationszeitkonstante τ_p des PI-Reglers in der Leistungsregelung der Anlagen. Die in den Versuchen festgestellte geringe systematische Abweichung zwischen P_j und $P_{set,j}$ könnte zusätzlich durch die Schrittweite der Leitapparat-Regelung verursacht werden.

2.1.3 Entwicklung und Inbetriebnahme einer Hardware-Simulation verschiedener Erzeugungsanlagen als Teil des Gesamtsystem-Demonstrators

Im Rahmen von Arbeitspaket 7 wird ein komponentenbasierter Demonstrator zur Veranschaulichung der Funktionen des virtuellen Kraftwerks konstruiert, bei dem die Komponenten sowohl einzeln auch gemeinsam präsentiert werden können. Dieser besteht maßgeblich aus drei Komponenten:

- Hardwaresimulator (H&S)
- Frontend (Adesso)
- Leitsystem (Adesso / urban energy)

Die Komponenten wurden getestet und sind funktionsfähig. Im Nachfolgenden wird der im Rahmen dieses Teilprojekts entwickelte Hardwaresimulator eingehend beschrieben.

Von Seiten H&S wird hierzu zunächst ein Konzept entwickelt, welches eine Simulation der unterschiedlichen Erzeugungssysteme, wie Wasserkraft, PV, Batterie oder Biomasse/BHKW darstellt. Dabei wird der primärtechnische Prozess der jeweiligen Anlagentypen abgebildet, um Steuerungssysteme mit ihren Funktionen gegen das simulierte Modell prüfen zu können. Damit können unterschiedliche Betriebsweisen und Anlagenverhalten simuliert werden, um die Reaktion der Steuereinheit und des Leitsystems zu prüfen und zu bewerten. Darüber hinaus wird die Simulation benutzt, um eine oder mehrere Anlagentypen abzubilden, damit die in VideKIS entwickelten dezentralen Steuereinheiten Daten mit dem überlagerten Leitsystem austauschen. Dadurch kann das Zusammenspiel zwischen Anlage, dezentraler Steuereinheit und Leitsystem realitätsnah simuliert werden.

Im Anschluss erfolgt die Umsetzung des Konzepts in einen praxistauglichen Hardwaresimulator.

2.1.3.1 Anforderungen an den Signalumfang

Für die Simulation werden Anforderungen definiert, die beschreiben, welche Funktionen die Simulation eines primärtechnischen Prozesses der Anlagentypen abbilden soll. Dabei wird der Signalumfang für die Prozesse Wasserkraft, Photovoltaik, Batterie und Biomasse/BHKW ermittelt, welcher mit der Simulation darzustellen ist.

Tabelle 1 ist der für jeden Anlagentyp gleichbleibende allgemeine Signalumfang zu entnehmen. Die Tabellen 2-5 enthalten die typspezifischen Signale für Wasserkraftwerke, Photovoltaikanlagen, Batteriespeicher und BHKW bzw. Biogasanlagen.

Tabelle 1 Signalumfang Allgemein

Eingang (Steuerung → Simulator)	Ausgang (Simulator → Steuerung)
Wirkleistungsvorgabe (in kW)	Spannungen
Leistungsschalter (Ein-/Ausschaltbefehl)	Ströme
	Wirkleistung
	Blindleistung
	Frequenz
	Betriebszustand (Aus, am Netz, fährt an, fährt ab etc.)
	Anlagenstörung
	Leistungsschalter (Status)

Tabelle 2 Signalumfang Wasserkraft

Eingang (Steuerung → Simulator)	Ausgang (Simulator → Steuerung)
Leitapparatöffnung	Leitapparatöffnung
Laufgradöffnung	Laufgradöffnung
Ansteuerung Hydraulik	Pegel Oberwasser
Ansteuerung Generator	Pegel Unterwasser (optional)
	Hydrauliktemperatur
	Turbinentemperatur
	Generatortemperatur
	Drehzahl Generator

Tabelle 3 Signalumfang Photovoltaik

Eingang (Steuerung → Simulator)	Ausgang (Simulator → Steuerung)
<i>Wechselrichterwirkleistung [%] über Umrechnung aus Allgemein - Wirkleistungsvorgabe</i>	Wechselrichterwirkleistung [%] <i>Umrechnung in Allgemein – Wirkleistung zur Anzeige am HMI</i>
	Sonneneinstrahlung
	Wechselrichtertemperatur

Tabelle 4 Signalumfang Batterie

Eingang (Steuerung → Simulator)	Ausgang (Simulator → Steuerung)
<i>Sollwert Ladeleistung entspricht Allgemein - Wirkleistungsvorgabe</i>	State of Charge [%]
	State of Health [%]
	Modus (Beladen/Entladen)
	Ladeleistung
	Ladezyklen
	Batterietemperatur

Tabelle 5 Signalumfang Biomasse / BHKW

Eingang (Steuerung → Simulator)	Ausgang (Simulator → Steuerung)
<i>Sollwert Wirkleistung entspricht Allgemein - Wirkleistungsvorgabe</i>	Gasspeicherfüllstand
	Wärmebedarf (24h)
	Maximale Starts am Tag
	Wärmespeichertemperatur

2.1.3.2 Anforderung an Hard- und Software der Simulation

Die unterschiedlichen Signale der verschiedenen Prozesse werden mit einer Simulation dargestellt. Die Simulation stellt analoge und digitale Werte zur Verfügung und nimmt ebenso analoge und digitale Werte, die von einer angeschlossenen Steuerung publiziert werden, entgegen und wertet diese aus. Ein Simulationsaufbau spiegelt dabei nur einen Anlagentyp wider an dem die anlagentypspezifische Steuerung angeschlossen wird. Über eine Softwareumschaltung ist es möglich sein, zwischen den Simulationen der unterschiedlichen Anlagentypen umzuschalten. Durch das softwareseitige Umschalten des Simulationsprogrammes ändert sich der Signalumfang der Simulation, was zu einer Änderung der verwendeten analogen und digitalen Ein- und Ausgänge führt. Dazu wird eine Steckerschnittstelle entwickelt, welche es ermöglicht die unterschiedlichen Steuerungen der Anlagentypen mit der Simulation zu verbinden.

Neben der ausgeführten Steckerschnittstelle zur Adaption unterschiedlicher Steuerungseinheiten wird über ein HMI-Panel der derzeitige simulierte Prozess visualisiert. Über dieses Panel kann der Nutzende zudem Simulationsparameter einsehen und ändern.

2.1.3.3 Hardwareaufbau

Die Simulations-Hardware wird auf zwei Module (Prozesssimulation und Anlagensteuerung), die über eine Steckerschnittstelle miteinander verbunden werden können, montiert. Dies vereinfacht zum einen den Transport der Simulation, da jedes Modul die Maße 96x51x93 cm (BxTxH) aufweist. Zum anderen wird durch die Verwendung von zwei Modulen auch eine optische Trennung zwischen der reinen Prozesssimulation und der simulierten Anlagensteuerung vollzogen. In Abbildung 11 ist das Modul *Anlagensteuerung* dargestellt.

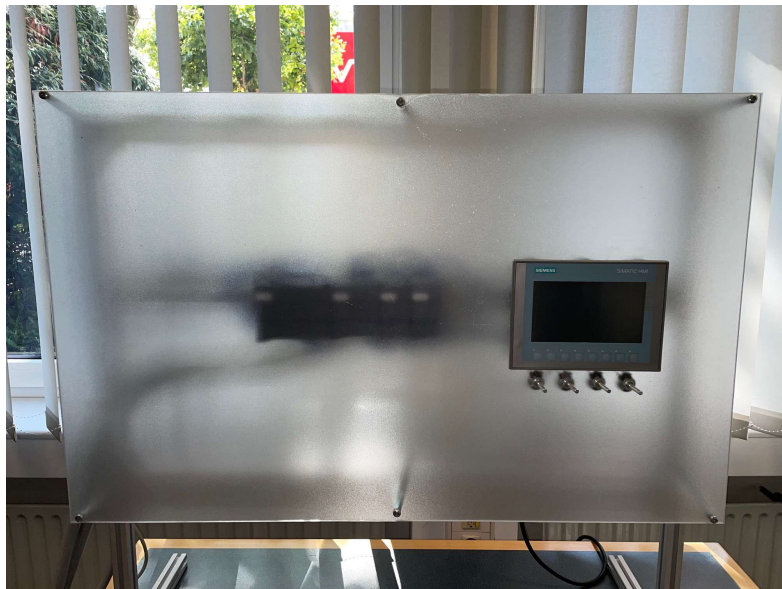


Abbildung 11: Simulator-Modul (Anlagensteuerung)

Die Module können auf einem Tisch präsentiert werden. Der Rahmen der Module besteht aus Alu-Trägern, auf die Hutschienen zur Montage der SPS- und weiteren Komponenten angebracht sind. Als Simulationshardware werden Siemens S7 SPS-Komponenten mit analogen und digitalen Eingängen verwendet. Zur Bedienung der Prozesssimulation und der

Anlagensteuerung sind in die Plexiglasscheiben HMI-Panels eingelassen. Zudem sind alle Simulationskomponenten mit einem Fernsteuerungsgateway des Herstellers MB Connect verbunden. Dies ermöglicht den Fernzugriff über einen VPN-Tunnel auf alle Hardwarekomponenten, um eine Verbindung zu den anderen Komponenten des Gesamtsystem-Demonstrators auch ohne räumliche Nähe herstellen zu können. Die zuvor im Rahmen des Projekts entwickelte Steuereinheit wird mit der Anlagensteuerung und dem Frequenzmessgerät verbunden und kommuniziert mit beiden via Modbus TCP. Die für die PRL-Erbringung nötige Frequenzmessung erfolgt durch ein MIBTEC FCOUNT050A Frequenzmessgerät. Der schematische Aufbau des Hardware-Simulators ist in Abbildung 12 dargestellt.

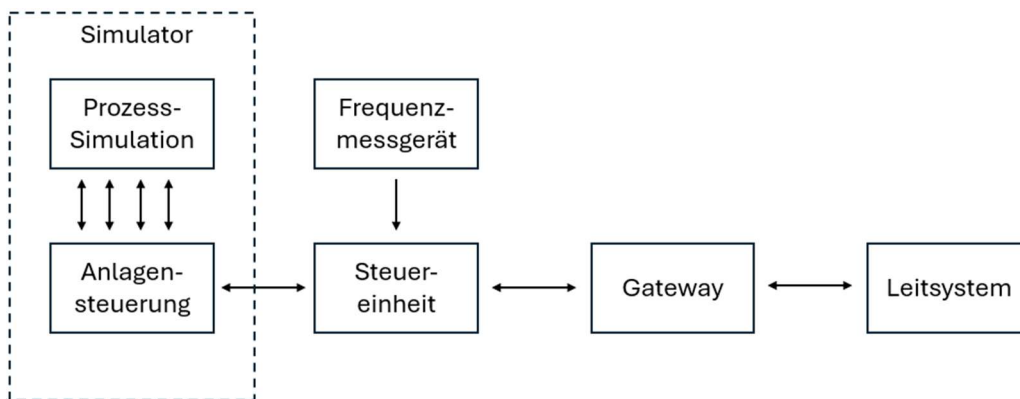


Abbildung 12: Aufbau des Hardware-Simulators (schematisch)

2.1.3.4 Programmierung der Simulationssoftware

Auf der Visualisierung des Prozesssimulation werden die Anlagensimulationsprogramme dargestellt. Über eine Startseite werden, wie in Abbildung 13 dargestellt, die unterschiedlichen Programme ausgewählt.

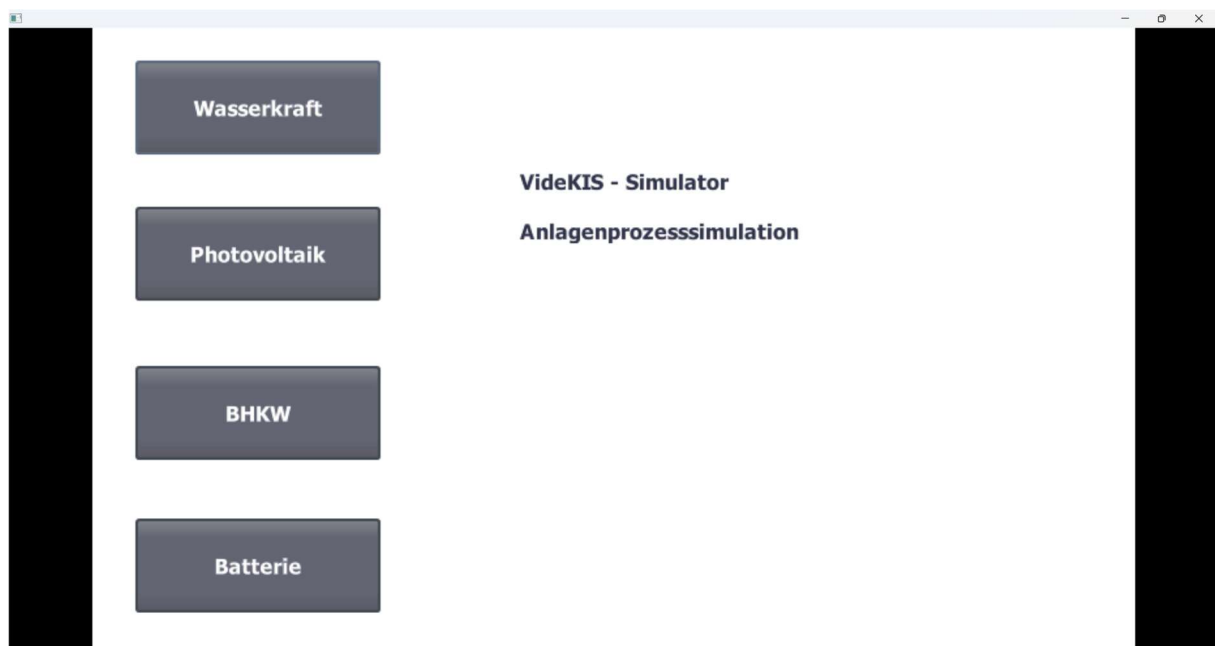


Abbildung 13: Startseite der Anlagenprozesssimulation

Mit der Anwahl eines Programmes werden die programmspezifischen Attribute dargestellt und der Nutzende kann auf dieser Seite Parametrierungen oder Umschaltungen vornehmen.

Beispielsweise wird für ein Wasserkraftwerk der Oberwasserpegel so simuliert, dass dieser in Abhängigkeit der Sollwert-Leitapparatöffnung und eines simulierten Wasserzuflusses größer oder kleiner wird. Je nach Größe des Sollwertes nimmt der Oberwasserpegel schneller oder langsamer ab. Für einen Photovoltaikprozess wird ein Sonnenverlauf und daraus die resultierende dynamische Wechselrichterwirkleistung abgebildet. Analoge Szenarien sind in den Simulationen des BHKW und des Batteriespeichers verfügbar. Unabhängig vom ausgewählten Modus kann immer nur eine Anlagensimulation aktiv sein.

2.1.3.4.1 Wasserkraft

Die simulierte Anlagensteuerung basiert auf einer realen Anlagensteuerung eines Wasserkraftwerks. Die Anlagensteuerung verfügt sowohl über eine Stellungs- als auch eine Pegelregelung. Der Startbildschirm der Anlagensteuerung ist in Abbildung 14 dargestellt. Es können nahezu alle Einstellungen einer realen Anlage vorgenommen werden.

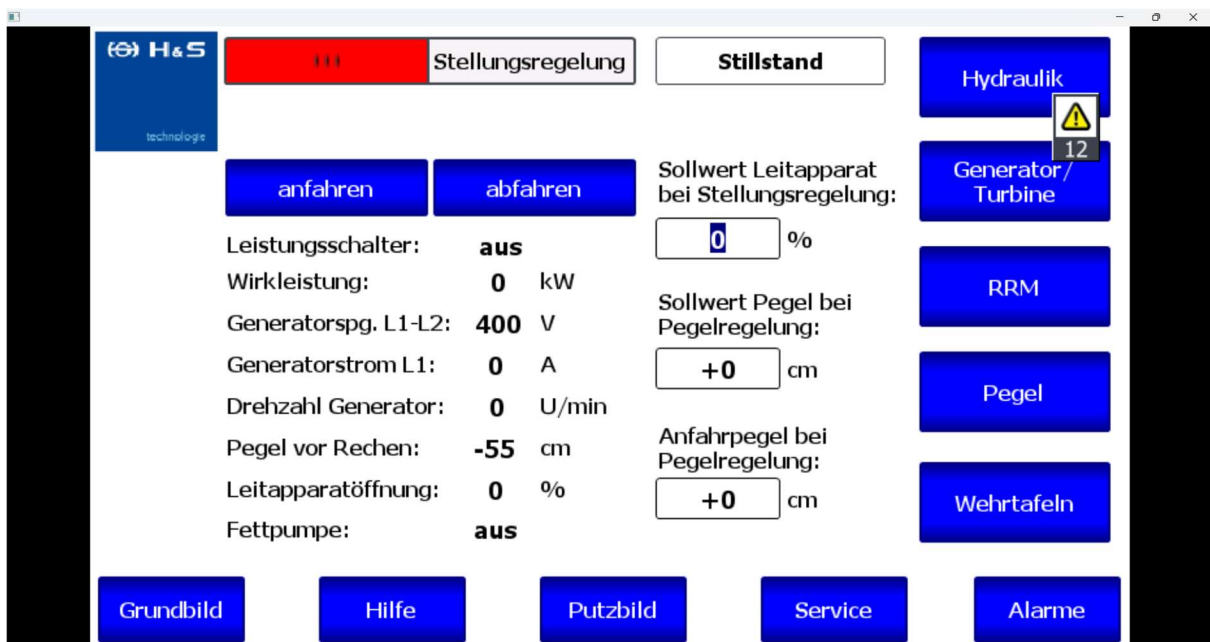


Abbildung 14: Startbildschirm der Anlagensteuerung des Wasserkraftwerks

Teil der umfangreich modellierten Wasserkraftwerkssimulation ist auch das An- und Abfahren des Wasserkraftwerks. So wird beispielsweise simuliert, wie sich beim Anfahren die Drehzahl erhöht und im passenden Moment der Leistungsschalter geschaltet wird, so dass das Wasserkraftwerk „ans Netz“ geht.

Zusätzlich zur reinen Prozesssimulation beinhaltet die Simulation verschiedene typische Fehler, die innerhalb eines Wasserkraftwerks auftreten. Diese können, wie in Abbildung 15 dargestellt, über einen Knopfdruck in der Prozesssimulation getriggert werden und verursachen in der Anlagensteuerung einen Alarm.



Abbildung 15: Wasserkraftprozess: Einstellmöglichkeiten

Hierdurch besteht die Möglichkeit die Reaktionen der Steuereinheit und des Leitsystems auf Fehlerereignisse zu testen. In Abbildung 16 sind die beispielhaft ausgelösten Fehlermeldungen abgebildet.



Abbildung 16: Fehlerereignisse in der Wasserkraftwerkssteuerung

Wie in Abbildung 17 dargestellt, ist auf der Übersichtsseite der Simulation Wasserkraft einsehbar, welches Simulationsprogramm derzeit läuft und in welchem Modus sich die Simulation befindet.



Abbildung 17: Übersichtsseite Wasserkraftprozess

Abbildung 18 zeigt weitere Simulationsattribute, die so jederzeit vom Nutzenden eingesehen werden können.

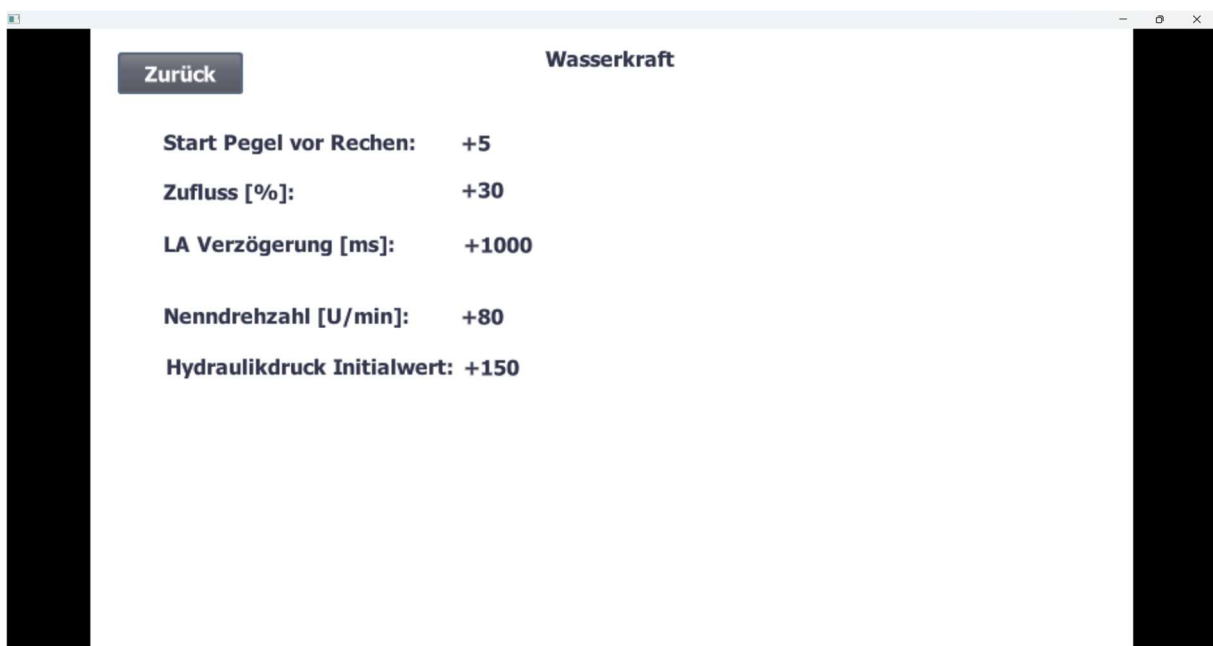


Abbildung 18: Wasserkraftprozess: Einstellmöglichkeiten 2

Der Simulation des Wasserkraftprozesses besteht aus einem Zusammenspiel verschiedener Module, von denen die wichtigsten nachfolgend erläutert werden:

Das Modul *Pegelsimulation* simuliert anhand der aktuellen Leitapparatöffnung einen Wasserabfluss aus dem Oberbecken. Zusammen mit einem einstellbaren Wasserzufluss ergibt sich so ein variierender Pegelstand. Zudem wird das Verhalten einer realen Pegelsonde simuliert, indem der Pegelwert minimal um wenige Millimeter schwankt.

Innerhalb der *Leitapparatsimulation* wird die Leitapparatöffnung zeitverzögert in Abhängigkeit des von der Anlagensteuerung übermittelten Sollwerts verfahren. Das heißt beispielsweise ein Sollwert 50 % und ein Istwert von 45% führen zu einer Anpassung der Leitapparatöffnung von 45% +1%/s

Mit Hilfe von Potentiometern können im Modul *Temperatursimulation* unter anderem die Temperaturen für die Generatorwicklung vorgegeben werden. Diese werden in die entsprechenden Analogwerte umgerechnet, welche die Anlagensteuerung erwartet. Die Temperaturen sind dann manuell veränderbar. Die Anlagensteuerung wertet die Vorgabe anschließend aus.

Die *Leistungssimulation* simuliert umfassend die aus der Leitapparatöffnung und weiteren Parametern resultierende Anlagenleistung. Zusätzlich werden auch Ströme und Spannungen je Phase berechnet, die für die Anlagensteuerung relevant sind. Beim An- und Abfahren des Wasserkraftwerks wird das Schalten des Leistungsschalters im passenden Moment simuliert.

Grundsätzlich werden alle eingestellten Parameter über Analogausgänge in dem Format ausgegeben, wie die angeschlossene Anlagensteuerung diese erwartet. Dies bedeutet, dass die Temperaturwerte sowie der Pegelstand als analoge Signale an die Anlagensteuerung übergeben werden.

2.1.3.4.2 Photovoltaik

Auf der Übersichtsseite des Photovoltaikprozesses können, wie in Abbildung 19 dargestellt, diverse Anlagen- und Simulationsparameter eingestellt werden. Zudem kann eine hinterlegte Bewölkungssimulation ein- und ausgeschaltet werden. Diese verändert die Ist-Leistung in Abhängigkeit der simulierten Bewölkung dynamisch.



Abbildung 19: Übersichtsseite Photovoltaikprozess

2.1.3.4.3 Blockheizkraftwerk

Der Prozess eines Blockheizkraftwerks wird vereinfacht nach dem in Abbildung 20 dargestellten Modell simuliert.

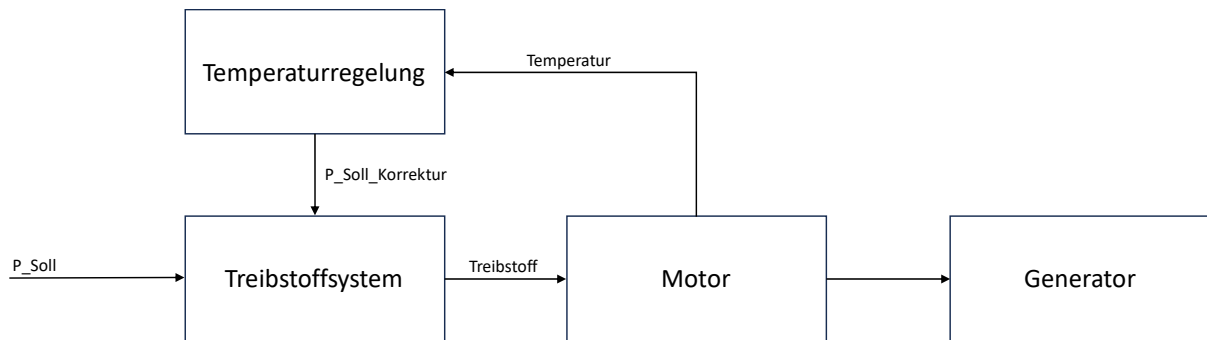


Abbildung 20: Modell des Blockheizkraftwerks (vereinfacht)

Der BHKW-Prozesssimulation wird durch die Steuereinheit eine Sollwirkleistung P_{soll} übergeben. Innerhalb des Moduls *Treibstoffsystem* wird die für die umzusetzende Soll-Leistung benötigte Treibstoffzufuhr berechnet. Im Modul *Motor* wird in Abhängigkeit der Treibstoffzufuhr und der aktuellen Motortemperatur eine Ist-Leistung simuliert. Zusätzlich wird die simulierte Motortemperatur an das Modul *Temperaturregelung* zurückgeführt. Bei steigender Motortemperatur ist P_{soll} zu verringern, um den Motor nicht zu beschädigen.

Auf der Übersichtsseite der BHKW-Simulation kann, wie in Abbildung 21 dargestellt, über zwei Taster die Simulation gestartet und gestoppt werden. Darüber hinaus können die sich unter den Start und Stopp Buttons platzierten wichtigsten Parameterwerte des Simulationsprozesses vorgegeben oder im Betrieb händisch verändert werden.



Abbildung 21: Übersichtsseite BHKW-Prozess

2.1.3.4.4 Batteriespeicher

Die Simulation Batteriespeicher basiert auf der Einstellung der Startparameter State of Charge (SoC), State of Health (SoH), Ladezyklen, Batterietemperatur und maximal mögliche (Ent-)Ladeleistung. Die Ladeleistung wird anhand des von der Steuereinheit übermittelten Leistungssollwert angepasst. Unter Berücksichtigung der Ladeleistung wird der SoC verändert.

Auf der Übersichtsseite des Batterieprozesses kann, wie in Abbildung 22 dargestellt, über zwei Taster die Simulation gestartet und gestoppt werden. Zudem werden die relevantesten Simulationsparameter wie die Soll- und Ist-Leistung, sowie der State of Charge, der State of Health und die Batteriekapazität angezeigt.



Abbildung 22: Übersichtsseite Batterieprozess

2.1.4 Zusammenfassung und tabellarischer Vergleich von Zielen und Ergebnissen

Ziele	Ergebnisse
Steuereinheit zur Erbringung von PRL durch EE-Anlagen	Entwicklung und Implementierung einer eigenständigen, dezentralen Steuereinheit, die möglichst breitbandig an unterschiedliche EE-Anlagen angekoppelt werden kann.
Hardware-Simulator	Entwicklung einer Hardware-Simulation von verschiedenen Erzeugungsanlagen als Teil des Gesamtsystem-Demonstrators zur Veranschaulichung der Funktionen des in VideKIS entwickelten virtuellen Kraftwerks

2.2 Verwendung der Zuwendung

Die im Projektverlauf bewilligten Zuwendungen wurden für die Erfüllung der im Projekt geplanten und durchgeführten Entwicklungstätigkeiten verwendet. Dies betrifft die im Folgenden aufgeführten Entwicklungstätigkeiten:

- Steuereinheit zur Erbringung von Primärregelleistung aus EE-Anlagen
- Prozess- und Steuerungssimulation als Teil des Gesamt-Demonstrators des virtuellen Kraftwerks

Zur Erfüllung des Zuwendungszwecks wurden Gegenstände beschafft. Eine Auflistung der beschafften Gegenstände ist der Anlage „*Beschaffte Gegenstände*“ zu entnehmen.

2.3 Verwertbarkeit

Im Rahmen des Projekts wurde ein vielfältiges Know-How im Bereich der Vermarktung von Strom und Regelleistung aufgebaut. Zudem konnte das Wissen in Bezug auf die Prozesse und Steuerungen anderer EE-Anlagen als Wasserkraft insofern gesteigert werden, als das ein zukünftiges Engagement von H&S in diesen Bereichen möglich ist. Das erlangte Know-How wird bereits in optimierten und erweiterten Kunden-Dienstleistungen eingesetzt und wird mittelfristig das Dienstleistungsportfolio erweitern.

Zu Projektbeginn wurde zur Verwertung der Projektergebnisse der Betrieb eines virtuellen Kraftwerks zur Erbringung von Primärregelleistung in einer Unternehmensausgründung angestrebt. Hierbei hätten alle Erzeugungsanlagen mit der von H&S entwickelten Steuereinheit ausgerüstet werden sollen. Im Rahmen des Projektverlaufs zeigte sich, dass die reine Vermarktung von Primärregelleistung zum aktuellen Zeitpunkt nicht rentabel wäre. Dies ist in den deutlich gesunkenen Preisen für Primärregelleistung aufgrund eines Überangebots durch Batteriespeicher begründet. Die von den Projektpartnern durchgeführten Untersuchungen zeigen eine mögliche Profitabilität des virtuellen Kraftwerks, wenn neben Primärregelleistung auch eine Direktvermarktung des erzeugten Stroms erfolgt. Allerdings zeigt eine Marktrecherche einen bereits gesättigten Markt von Direktvermarktern. Allgemein sind zudem sowohl die regulatorischen als auch monetären Anforderungen für den Betrieb eines virtuellen Kraftwerks enorm hoch. Daher muss zum aktuellen Zeitpunkt trotz der technisch einwandfrei funktionierenden Komponenten aus wirtschaftlichen Gründen vom Betrieb eines virtuellen Kraftwerks abgesehen werden. Ein Betrieb des virtuellen Kraftwerks wäre aber nach einer Erweiterung des aktuellen Kundenstamms weiterhin denkbar und wird im Rahmen des Verwertungsplans weiter geprüft. Nichtsdestotrotz ist allein die entwickelte Steuereinheit aufgrund ihrer universellen Adaptierbarkeit an die unterschiedlichsten Anlagentypen ein Gewinn dieses Projekts. Zum aktuellen Zeitpunkt wird der Einsatz der Steuereinheit als Monitoringwerkzeug für Anlagenbetreiber geprüft. Diese ermöglicht die präventive Wartung kritischer Anlagenkomponenten und bietet so einen Mehrwert für Anlagenbetreiber.

Unabhängig von den beschriebenen Hardware-Entwicklungen ergibt sich aus den Erkenntnissen des Forschungsprojekts eine Grundlage zur Standardisierung von Hard- und Softwarelösungen für das Engineering von Wasserkraftanlagen.

Zudem wurden durch das Forschungsprojekt und den Austausch mit Arbeitsgemeinschaften von Wasserkraftwerksbetreibern viele Kontakte geknüpft, von denen bereits Kunden für die Dienstleistungen von H&S gewonnen werden konnten.

Perspektivisch ist auch der Einsatz der Steuereinheit in einem neuen Markt denkbar, bei dem der Ausgleich von erzeugter Energie nicht im Höchstspannungsnetz erfolgt, sondern die vielen Kleinstanlagen in den untersten Spannungsebenen gegenseitig ihre Energieungleichgewichte egalisieren und so die höheren Spannungsebenen entlasten, was zu einer Reduzierung des erforderlichen Netzausbaus führen würde.

2.4 Fortschritt anderer Stellen

Innerhalb der Projektlaufzeit wurde ein kontinuierlicher Abgleich mit dem Stand der Wissenschaft durchgeführt. Bei verschiedensten Möglichkeiten wie z.B. Konferenzen, Forschungsaustausch, Diskussionen mit Industrievertretern, Fachvorträgen, Patentrecherchen usw. wurden keine relevanten Fortschritte im Themengebiet des Forschungsvorhabens festgestellt.

2.5 Veröffentlichungen und Öffentlichkeitsarbeit

Zur Projektlaufzeit sind von den Projektpartnern verschiedene Veröffentlichungen entstanden, die die Projektergebnisse zusammenfassend widerspiegeln. Somit wurde ein fachlicher Austausch ermöglicht als auch Feedback zu den aktuellen Projektergebnissen sowohl aus dem wissenschaftlichen Umfeld als auch direkt von Industriepartnern eingeholt.

Seitens H&S sind mehrere Veröffentlichungen erfolgt. Eine Auflistung ist in Tabelle 6 dargestellt. Zudem wurde eine Masterarbeit in Zusammenarbeit mit der TU Dortmund angefertigt.

Tabelle 6 Veröffentlichungen

Vorträge zum Forschungsprojekt bei Verbänden von Wasserkraftwerksbetreibern (<i>AHW</i> in Hessen und <i>ATW</i> in Thüringen)	2023
Projektzwischenstandsbericht in den Zeitschriften <i>Wassertriebwerk</i> sowie <i>Wasserkraft & Energie</i>	2024
Wissenschaftliches Paper „Identification of Technical Limits of Mini Run-of-River Hydro Power Plants During Frequency Containment Reserve Provision“ (<i>ISGT Europe 2024</i>) in Zusammenarbeit mit Simon Uhlenbrock (TU Dortmund)	2024
Projektabschlussbericht in der Zeitschrift <i>Wasserkraft & Energie</i> in Zusammenarbeit mit Simon Uhlenbrock (TU Dortmund)	2025

3 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Laufe des Vorhabens hat sich gezeigt, dass keine in anderen Projekten oder Anwendungen nutzbaren Komponenten benötigt wurden. Sie sind einzig für den Hardware-Simulator und die Steuereinheiten verwendet worden.

Die geplanten Personalkosten wurden eingehalten.

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten

Das Forschungsprojekt VideKIS adressiert zentrale Herausforderungen der Energiewirtschaft, die sich im Zuge der Energiewende und der steigenden Anforderungen an das Energieversorgungsnetz ergeben.

Herausforderungen und Problemstellung

Die Energiewirtschaft steht vor zahlreichen Herausforderungen, insbesondere im Hinblick auf die Integration von Kleinanlagen und die Nutzung von Post-EEG-Anlagen:

1. Eintrittsbarrieren für Kleinanlagenbetreiber: Aufgrund komplexer regulatorischer Vorgaben und hoher technischer Anforderungen haben Kleinanlagenbetreiber Schwierigkeiten, am Energiemarkt teilzunehmen.
2. Mangelnde Wirtschaftlichkeit von Post-EEG-Anlagen: Nach dem Auslaufen der EEG-Förderung kämpfen viele Anlagen mit wirtschaftlichen Defiziten, da die Direktvermarktung oft keine ausreichenden Erlöse bietet.
3. Fehlende Alternativen zur Direktvermarktung: Aktuell existieren kaum sinnvolle Alternativen zur Direktvermarktung, was den Betrieb vieler Kleinanlagen erschwert.
4. Fehlende Nutzung von Prognosen: Prognosen zur Einspeisung von EEG-Anlagen werden derzeit nicht standardmäßig verwendet, wodurch das Potenzial zur Netzstabilisierung ungenutzt bleibt.
5. Aufwändige Eingliederung in die Energiewirtschaft: Die Integration von EEG-Anlagen in bestehende Systeme ist komplex und ressourcenintensiv.

Innovativer Ansatz im Projekt VideKIS

Im Projekt VideKIS wird ein neuartiger Ansatz verfolgt, der die genannten Herausforderungen adressiert. Durch die Bündelung einer Vielzahl von Kleinerzeugern zu einem virtuellen Kraftwerksverbund wird eine effiziente Nutzung der vorhandenen Kapazitäten angestrebt. Dabei spielen insbesondere Laufwasserkraftanlagen eine zentrale Rolle. Das virtuelle Kraftwerk fungiert nicht nur als Aggregator, sondern als intelligentes Gesamtsystem, das externe Einflüsse und dynamische Veränderungen aktiv berücksichtigt.

Ein zentraler Aspekt des Projekts ist der Einsatz von künstlicher Intelligenz (KI), um die Regelungs-, Kommunikations- und Rechnerstrukturen optimal zu gestalten. Die KI ermöglicht eine präzise und adaptive Steuerung der Anlagen im Verbund, um netzdienliche Aufgaben wie die Frequenzhaltung effizient zu unterstützen.

Optimale Koordination und Nutzung erneuerbarer Ressourcen

Das System zielt darauf ab, bislang ungenutzte Ressourcen und unterschiedliche erneuerbare Erzeugungsanlagen optimal zu koordinieren. Insbesondere volatile Erzeuger, die unter bestimmten Bedingungen bereits als geeignet für die Bereitstellung von Regelenergie identifiziert wurden, sollen zur Netzstabilität beitragen.

Die zentrale Fragestellung des Projekts lautet, ob sich durch die Kombination von Regelungstechnik, Kommunikationstechnik und künstlicher Intelligenz ein intelligentes Gesamtsystem entwickeln lässt, das Kleinst- und Kleinsterzeugern eine effektive Nutzung ihrer Kapazitäten für netzdienliche Zwecke ermöglicht. Dabei steht die Erforschung der Frequenzstabilität im Fokus, insbesondere im Hinblick auf die schnelle Bereitstellung von Regelenergie aus mehreren vernetzten Anlagen.

5 Abbildungs- und Tabellenverzeichnisse

Abbildung 1 Übersicht des integrierten virtuellen Kraftwerksverbundsystems	2
Abbildung 2: Ablaufplan Soll und Ist Vergleich	5
Abbildung 3: Projektkonsortium.....	8
Abbildung 4 Statik der Primärregelleistungserbringung	16
Abbildung 5 Konfigurations-Editor	17
Abbildung 6 Software-Struktur der Steuereinheit	18
Abbildung 7 Versuchsaufbau in der Laborumgebung.....	21
Abbildung 8: Ergebnisse des Basis-Reglerkonzepts	22
Abbildung 9: Versuchsaufbau Feldtest Marsberg	24
Abbildung 10: Ergebnisse des Felddauertests	26
Abbildung 11: Simulator-Modul (Anlagensteuerung).....	29
Abbildung 12: Aufbau des Hardware-Simulators (schematisch).....	30
Abbildung 13: Startseite der Anlagenprozesssimulation	30
Abbildung 14: Startbildschirm der Anlagensteuerung des Wasserkraftwerks.....	31
Abbildung 15: Wasserkraftprozess: Einstellmöglichkeiten.....	32
Abbildung 16: Fehlerereignisse in der Wasserkraftwerkssteuerung	32
Abbildung 17: Übersichtsseite Wasserkraftprozess.....	33
Abbildung 18: Wasserkraftprozess: Einstellmöglichkeiten 2	33
Abbildung 19: Übersichtsseite Photovoltaikprozess	34
Abbildung 20: Modell des Blockheizkraftwerks (vereinfacht)	35
Abbildung 21: Übersichtsseite BHKW-Prozess	35
Abbildung 22: Übersichtsseite Batterieprozess	36
Tabelle 1 Signalumfang Allgemein.....	28
Tabelle 2 Signalumfang Wasserkraft	28
Tabelle 3 Signalumfang Photovoltaik	28
Tabelle 4 Signalumfang Batterie	28
Tabelle 5 Signalumfang Biomasse / BHKW	28
Tabelle 6 Veröffentlichungen	38
Tabelle 7 Beschaffte Gegenstände.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.

6 Literaturverzeichnis

- ENTSO-E. (2022). *Policy 1: Load-Frequency Control and Performance*. ENTSO-E. Abgerufen am 06. 05 2022 von https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/pre2015/publications/entsoe/Operation_Handbook/Policy_1_final.pdf
- Messler, N. (2019). *Analyse und Bewertung der Fähigkeit von Wasserkraftwerken zur Primärregelungsbereitstellung in einem Verbund (in Kooperation mit der H&S Hard- & Software Technologie GmbH & Co. KG)*. Dortmund.
- PQ-Bedingungen. (2022). *Präqualifikationsverfahren für Regelreserveanbieter (FCR, aFRR, mFRR) in Deutschland*. Deutschland: 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH, Transnet BW. Von [https://www.regelleistung.net/xspproxy/api/staticfiles/regelleistung/pqbedingungen\(stand03.06.2022\).pdf](https://www.regelleistung.net/xspproxy/api/staticfiles/regelleistung/pqbedingungen(stand03.06.2022).pdf) abgerufen
- ÜNB. (2022). *Mindestanforderungen an die Informationstechnik des Reservenabbieters zur Erbringung von Regelreserve*. 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH, Transnet BW. Von https://www.regelleistung.net/Portals/1/downloads/it_anforderungen/01__IT_Mindestanforderungen.pdf?ver=mK1n1A0F5hCHALU4ntqMyw%3D%3D abgerufen
- ÜNB. (2023). *Anforderungen an geschlossene Benutzergruppen*. 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH, TransnetBW. Abgerufen am 2023 von https://www.regelleistung.net/xspproxy/api/StaticFiles/Regelleistung/Infos_f%C3%BCr_Anbieter/Wie_werde_ich_Regelenergieanbieter_Pr%C3%A4qualifikation/IT-Anforderungen_FCR_aFRR_mFRR/03_IT_Anforderungen_geschlossene_Benutzergruppen.pdf