Sachbericht
CoMap

▪ Zuwendungsempfänger: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. ▪ Ausführende Stelle: Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE Bereich Netzstabilität und Stromrichtertechnik	Förderkennzeichen: 03EI6080B

▪ Vorhabenbezeichnung:
CoMap – Digitaler Echtzeit-Zwilling für eine Kontinuierliche und Flexible System-Abbildung

▪ Teilvorhabenbezeichnung:
CoMap – Entwicklung der Echtzeit-Modelle und des Messanalysators

▪ Laufzeit des Vorhabens:
01.12.2022 bis 31.05.2025

▪ Autoren/Ansprechpartner:

Jonas Lesen
Christian Bendfeld
Derk Gonschor
Juan Montoya
Florian Füllgraf
Marco Jung

Für den Inhalt dieser Veröffentlichung sind ausschließlich die Autoren verantwortlich.

▪ Projektpartner: MicroNova AG (Koordinator); SWW Wunsiedel GmbH; Es-Geht! Energiesysteme GmbH (Assoziiert)

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie sowie dem Projektträger Jülich für die Förderung des Forschungsprojektes CoMap.

Inhaltsverzeichnis

1 ÜBERBLICK GESAMTVORHABEN 2

2 KURZDARSTELLUNG 3

2.1 AUFGABENSTELLUNG 3

2.2 STAND DER TECHNIK 3

2.3 VORAUSSETZUNGEN, UNTER DENEN DAS VORHABEN DURCHGEFÜHRT WURDE 4

2.4 ÜBERSICHT ÜBER DAS COMAP SYSTEM 5

2.5 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN 5

2.6 PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS 6

3 DARSTELLUNG DER ERZIELTEN WISSENSCHAFTLICHEN/TECHNISCHEN ERGEBNISSE 7

3.1 SPEZIFIKATION, USE-CASES UND ANWENDUNGSFÄLLE FÜR NETZBETREIBER 7

3.1.1 Identifikation der Anwendungsfälle und Use Cases 7

3.1.2 Spezifikation des CoMap Systems 7

3.1.3 Definition der Szenarien für das CoMap-System und mögliche Testfälle 9

3.2 ENTWICKLUNG DES ECHTZEIT-SYSTEMS ZUR NETZBETRIEBSANALYSE 10

3.2.1 Modellbibliothek zur Systemabbildung 12

3.2.2 Echtzeit Modelle zur Systemabbildung 15

3.2.3 Digitaler Zwilling 17

3.2.4 Einbettung Testszenarien 19

3.3 AUFBAU DES MESSANALYSATORS UND DIE REALISIERUNG DER SCHNITTSTELLE ZUR INTEGRATION EXTERNER SYSTEME 20

3.3.1 Übersicht der verfügbaren Messgeräte zur Systemabbildung 21

3.3.2 Konzept, Hardware und Software des entwickelten Messanalysators 24

3.4 LABOR UND FELDVERSUCH 32

3.4.1 Labor: SysTec Fraunhofer IEE 32

3.4.1 Feldversuch: Neusorg SWW 33

4 VERWERTBARKEIT DES ERGEBNISSES UND ERFAHRUNGEN 36

5 WÄHREND DER DURCHFÜHRUNG DES VORHABENS DEM ZUWENDUNGSEMPFÄNGER BEKANNT GEWORDENER FORTSCHRITT AUF DIESEM GEBIET BEI ANDEREN STELLEN 37

6 ERFOLGTE VERÖFFENTLICHUNG DES ERGEBNISSES 38

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK 39

8 REFERENCES 42

1 Überblick Gesamtvorhaben

Durch den weiteren Übergang der Energieversorgung auf Stromnetze mit einem hohen Anteil an dezentralen, regenerativen Energieerzeugern auf der einen Seite und volatilen Lasten auf der anderen Seite müssen Verteilnetzbetreiber zunehmend neue Aufgaben zur Sicherung der Netzstabilität übernehmen. Bei der bisher verwendeten Netzregelung wird die Netzstabilität überwiegend durch Maßnahmen im Übertragungsnetz bzw. in den großen Kraftwerken mit ihren rotierenden Massen gewährleistet. Diese Methodik kommt zunehmend an ihre Grenzen. Die heutigen Netze sind komplexer durch den Ausbau der dezentralen Energieversorgung. Es entsteht ein nichtlineares System aus Energieerzeugern und Lasten, in dem alle Frequenzbänder verkoppelt sind. Nationale, sowie europäische Anforderungen wie Demand Side Management und autonome Energy Communities vergrößern den künftigen Aufwand bei der Netzführung.

Ohne weitere Digitalisierung werden die Netzbetreiber den gestiegenen Anforderungen nicht mehr gerecht werden können. Dazu gehören einerseits die Ausstattung der Betriebsmittel mit digital zugänglichen Messsystemen und modernen digitalen Netzregelungen und andererseits der Einsatz von Netzsimulationssystemen, welche in der Lage sind, die aktuellen Netze mit hinreichender Genauigkeit abzubilden. In der Kombination von Messanalysatoren mit einem digitalen Zwilling, der einen Netzabschnitt in Echtzeit simuliert, wird ein großes Potenzial zur Beurteilung von Netzzuständen gesehen. Hier setzt das Projekt CoMap an. Ein digitaler Echtzeit-Zwilling wird kontinuierlich mit Messwerten aus dem Netz versorgt.

Durch die zusätzliche Einbindung realer Messdaten und Systeminformationen entsteht eine kontinuierliche Momentaufnahme des Netzes, indem auf Basis der Eingangsdaten fehlende nicht gemessene Größen kontinuierlich errechnet werden. Erst dieser Ansatz ermöglicht eine echtzeitfähige Netzüberwachung. Weiter sind durch zusätzliche zeitkontinuierliche Mitsimulationen des Netzabbildes erweiterte Analysen durchführbar.

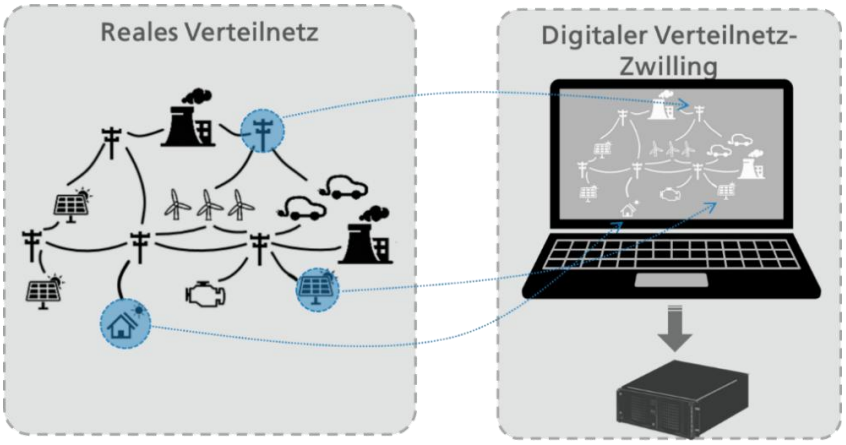

Abbildung 1: Schematische Darstellung des Projektvorhabens CoMap

2 Kurzdarstellung

2.1 Aufgabenstellung

Das Projekt CoMap (Co-Simulation for Real-Time System Mapping) verfolgt das Ziel, einen digitalen Echtzeit-Zwilling von Verteilnetzen zu entwickeln und zu demonstrieren. Damit wurde ein kontinuierliches und hinreichend exaktes digitales Abbild realer Netzsituationen geschaffen, das sowohl aktuelle als auch vergangene und potenziell zukünftige Zustände simulieren kann.

Zentrale Projektziele waren:

- Aufbau eines Echtzeit-Simulationssystems, das reale Verteilnetzabschnitte abbildet
- Nutzung von Messdaten (Echtzeit und historisch) zur Netzsimulation mit hoher Genauigkeit
- Entwicklung eines Control Centers (Benutzeroberfläche des CoMap-Systems) zur Steuerung, Überwachung und Analyse des Netzgeschehens
- Simulation von Netzereignissen zur Prognose, Analyse und Entscheidungsunterstützung für Verteilnetzbetreiber
- Minimierung realer Messaufwände durch virtuelle Messwerte und Simulationsmethoden

Der digitale Zwilling ermöglicht es, ohne flächendeckende Messinfrastruktur ein realistisches Netzabbild zu erzeugen. So können Netzengpässe, Spannungsqualitäten oder Redispatch-Maßnahmen präziser geplant und gesteuert werden.

Als Machbarkeitsnachweis wurde ein Teilnetz der SWW Wunsiedel GmbH digitalisiert und in einen digitalen Zwilling überführt. Der digitale Zwilling wurde auf einem Echtzeitsystem integriert und die Überwachung des Verteilnetzes demonstriert. Ein weiteres Teilmodell wurde im Labornetz SysTec des IEE implementiert.

2.2 Stand der Technik

Aktuelle Leitsysteme sind zwar in der Lage, den gegenwärtigen Netzzustand darzustellen, aber aufgrund fehlender Netzinformationen an Knoten, an denen keine Messgeräte installiert sind, sind ihnen Grenzen gesetzt. Insbesondere basieren aktuelle Netzbetriebsregelungen auf vereinfachten Lastfluss-Berechnungen, welche kontinuierlich neu berechnet werden müssen, um eine Momentaufnahme des Zustands wiederzugeben.

Netzsimulationssysteme arbeiten üblicherweise offline, d. h. es wird ein Szenario konfiguriert und in diesem Kontext ein statischer Lastfluss berechnet oder dynamische Simulationen, wie zum Beispiel die Analyse bei einem Fehlerfall, ausgeführt. Die Einbindung von

realen Messwerten findet in Echtzeitsimulationsumgebungen für Verteilnetze bislang kaum Anwendung.

Echtzeitsimulatoren sind bereits seit langem als Hardware-in-the-Loop (HIL) Simulatoren im Einsatz. Sie sind für Tests und Validierung von elektronischen Steuergeräten insbesondere in der Automobilindustrie und in der Luftfahrt weit verbreitet. Bekannte Anwendungsgebiete bei Energiesystemen sind insbesondere die Simulation von Smart-Grids. Solche Systeme sind bislang sehr komplex und deshalb überwiegend bei Forschungsinstituten und Universitäten im Einsatz.

Das CoMap Projekt soll diese Lücke schließen. Durch die Kombination von Messwertanalysatoren mit einem Echtzeitsimulationssystem und einem intuitiv zu bedienenden Control Center (CoMap Control Center) sollen neue Anwendungen und Nutzergruppen erschlossen werden.

2.3 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Teilvorhaben vom Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE) ist die Entwicklung der Echtzeit-Modelle und des Messanalysators sowie die Erprobung im Labor SysTEc.

Die anderen Projektpartner hatten folgende Schwerpunkte:

- MicroNova AG
    - Konsortialführer des Verbundprojektes CoMap
    - Entwicklung des Echtzeitsimulators für Systemabbildungen
    - Entwicklung der Schnittstellen zu den externen Messstellen sowie zur Serverstruktur
    - Anbindung des CoMap Control Center an die Echtzeitsimulation
    - Entwicklung eines Workflows für
    - Implementierung der Echtzeitmodell für die Echtzeitrechner
- Stadtwerke Wunsiedel SWW
    - Anforderungsdefinition aus Sicht künftiger Anwender
    - Bereitstellung von Netzdaten für das Netzmodell
    - Aufbau des Demonstrators im Netzabschnitt Neusorg
- Es-geht! (Unterauftragnehmer der SWW)
    - Entwicklung des CoMap Control Center, eine WEB-Oberfläche zur Anzeige der Mess- und Simulationsgrößen sowie zur Bedienung des Modells

2.4 Übersicht über das CoMap System

Abbildung 2 gibt einen Überblick über das geplante Gesamtsystem mit den Aufgaben der Projektpartner.

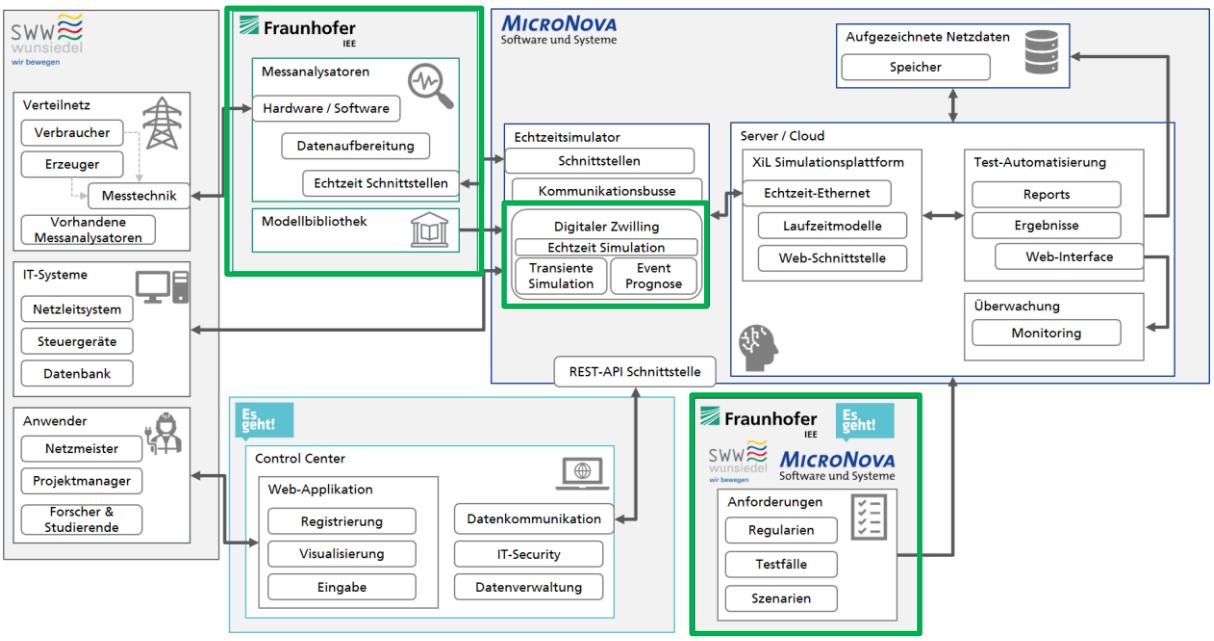

Abbildung 2: Übersicht über das gesamte CoMap System

Dieser Bericht konzentriert sich auf das Teilvorhaben **Entwicklung der Echtzeit-Modelle und des Messanalysators** (Abbildung 2,grün umrandet) des Fraunhofer IEE.

2.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Projektpartner haben in diesem Projekt eng zusammengearbeitet, insbesondere bei der Festlegung von Schnittstellen, der Voraberprobung mit dem Einsatz von Testplattformen und schließlich beim Aufbau des Demonstrators bei den Stadtwerken Wunsiedel.

MicroNova beauftragte Fraunhofer IEE mit der Implementierung das Cigre Low Voltage Benchmarkmodells. Dieses Modell wurde in das Echtzeitsimulationssystem NovaCarts der MicroNova AG eingebunden. Damit wurden Rückschlüsse auf die Performance und schließlich auf die Eignung des NovaCarts Systems zur Echtzeitnetzsimulation gezogen.

Wir bedanken uns außerdem beim Projektträger Jülich für die gute Zusammenarbeit insbesondere für das Feedback und die Unterstützung bei der Neuplanung des Projektes. Damit konnte das Ziel eines Demonstrators bei den Stadtwerken Wunsiedel zum Proof of Concept erreicht werden.

2.6 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde mit folgendem Zeitplan mit einer Laufzeit von 2 Jahren geplant.

ID	Aufgabenname	AP	Anfang	Abschluss
1	Spezifikation Use Cases	AP1	01.12.2022	15.03.2023
2	Echtzeitsystem	AP2	01.03.2023	31.01.2024
3	Schnittstelle zu ext. Systemen	AP3	01.03.2023	28.02.2024
4	Messanalysatoren	AP4	01.05.2023	28.02.2024
5	Anwender Plattform Control Center	AP5	03.07.2023	19.04.2024
6	Demonstrator	AP6	22.04.2024	29.11.2024
7	Projektabschluss		29.11.2024	29.11.2024

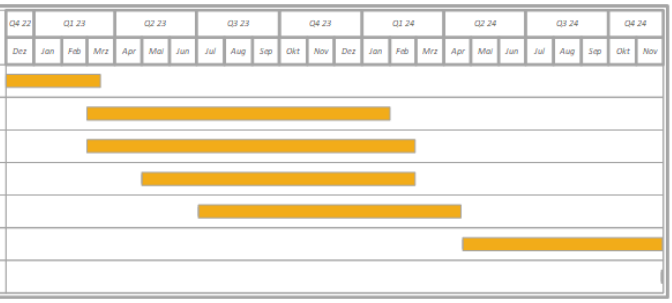

Abbildung 3: Zeitplan des Vorhabens

Nachdem bei der Umsetzung der Netzmodelle vorher nicht bekannte Aufgaben zu lösen waren, wurde die Projektlaufzeit in Abstimmung mit dem Projektträger Jülich bis zum 30.05.25 kostenneutral verlängert. Ab Juni 2024 wurde nach dem folgenden Zeitplan gearbeitet.

ID	Aufgabenname	AP	Anfang	Abschluss
1	Echtzeitsystem	AP2	03.06.2024	03.02.2025
2	Schnittstelle zu ext. Systemen	AP3	12.08.2024	05.09.2024
3	Messanalysatoren	AP4	17.06.2024	09.08.2024
4	Anwender Plattform Control Center	AP5	03.07.2024	11.03.2025
5	Demonstrator	AP6	11.03.2025	30.05.2025
6	Projektabschluss		30.05.2025	30.05.2025

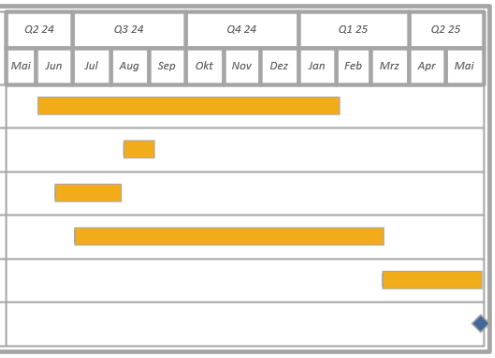

Abbildung 4: Zeitplan ab Juni 20924

3 Darstellung der erzielten wissenschaftlichen/technischen Ergebnisse

3.1 Spezifikation, Use-Cases und Anwendungsfälle für Netzbetreiber

3.1.1 Identifikation der Anwendungsfälle und Use Cases

Im Konsortium wurden, federführend von der SWW und Es-geht!, Umfragen und Interviews durchgeführt, vom Konsortium ausgewertet sowie Anwendungsfälle definiert. Daraus wurden konkrete Use Cases abgeleitet und die Erkenntnisse dienten dem Projekt als Entscheidungsgrundlage.

Im strukturierten Anwender-Interview mit der SWW wurden grundlegende Anforderungen und potenzielle Mehrwerte identifiziert, welche die Szenarien der Projektpartner ergänzten. Der Digitale Zwilling eines Netzgebiets sollte Betrieb und Planung unterstützen; zentrales Element war das CoMap Control Center, eine Web-Applikation zur Visualisierung, Analyse und Optimierung der Netzzustände. Das Interview zeigte, dass damals nur ein Teil der Ortsnetzstationen dauerhaft durch digitale Leistungsmesseinrichtungen (PQMs) überwacht wurde, während andere manuell ausgelesen wurden. Dadurch war eine Echtzeiterfassung des Netzzustands eingeschränkt. Szenarien-Rechnungen und State Estimation lieferten relevante Informationen über nicht direkt messbare Zustände – insbesondere für neue Geschäftsmodelle wie Lastmanagement oder Systemdienstleistungen.

Zentrale Anforderungen umfassen:

- Echtzeitüberwachung der Leitungsauslastung und Spannungswerte
- Szenarien-Rechnungen für die Integration von PV-Anlagen und Ladestationen für Elektrofahrzeuge
- Analyse von Fehlerfällen (Kurzschluss, Betriebsmittelausfall)
- Visualisierung historischer Netzzustände zur Verbesserung der Planungssicherheit
- Alarmfunktionen bei Grenzwertverletzungen (inkl. E-Mail-Benachrichtigung)
- Hohe Benutzerfreundlichkeit der Oberfläche, damit das System vom Netzmeister angenommen und verwendet werden kann.

Das CoMap Control Center wird von den potenziellen Nutzern als hochgradig relevant eingeschätzt. Es verspricht nicht nur eine bessere Transparenz im Netzbetrieb, sondern auch eine vorausschauende Planung durch Simulation und Analyse.

3.1.2 Spezifikation des CoMap Systems

Für das CoMap System wurden daraus folgende Aufgaben und Anforderungen abgeleitet:

1. Netzzustandsanalyse
    - Echtzeit-Darstellung des Netzzustands durch Kombination von Messdaten und Lastflussrechnungen
    - Integration bestehender Messeinheiten z.B. über REST-APIs oder MQTT
    - Darstellung in einer Web-App mit grafischer Netzübersicht und Datentabellen
2. Reduktion und Platzierung von Messpunkten
    - Minimierung der Messstellen zur Kostenersparnis unter Einsatz von State Estimation
3. Alarmfunktionen
    - Frei konfigurierbare Grenzwerte für Netzelemente (z. B. Spannung, Auslastung)
    - Hintergrundprozesse prüfen in Echtzeit auf Regelverletzungen
    - Darstellung in der App sowie per E-Mail-Benachrichtigung und historischer Protokollierung
4. Historisierung
    - Speicherung von Messdaten und Analyseergebnissen in Abrufbarkeit via Web-App; Downloadoptionen als CSV-Datei
    - Speicherung, Anzeige und Löschung von benutzerdefinierten Analysen und Szenarien
5. Szenarien-Rechnungen
    - Integration und Simulation dezentraler Anlagen (v. a. PV)
    - Analyse von Fehlerfällen wie Kurzschlüssen oder Schutzgeräteauslösung
    - Nutzung historischer Zustände zur „Was-wäre-wenn"-Simulationen

Aus diesen Anforderungen wurden die Hardware und Software der CoMap Echtzeitplattform abgeleitet.

- Netzsimulationsmodelle
    - Für die Modellierung werden Phasormodelle eingesetzt, diese werden auf dem Echtzeitsystem mit 1kHz Abtastfrequenz berechnet. Um die Modelle einfach generieren zu können sollen Grundlegende Komponenten angelegt werden und diese in einer Bibliothek zusammengefasst werden.
    - Als Plattform zur Erstellung der Modelle wird MATLAB Simulink verwendet. Die Modelle werden zunächst in MATLAB offline getestet und dann in die Echtzeitsimulation integriert.
- Simulationshardware

    - Es wird ein für das Simulationssystem NovaCarts eingesetzter Echtzeit-PC eingesetzt. Dieser wird auch als Simulation Node bezeichnet. Der Simulation Node kann später auf Anforderung mit FPGA-Boards erweitert werden. Dies wurde im Rahmen des Projektes nicht betrachtet.
- Echtzeitsimulationssoftware
    - Es wird ein System entwickelt, welches auf dem Echtzeitsimulationssystem NovaCarts der MicroNova basiert. NovaCarts ist ein HIL-System, welches überwiegend beim Test von Steuergeräten in der Automobilindustrie eingesetzt wird. Das bestehende System muss für den Einsatz zur Netzbetriebsanalyse erweitert werden, um die Anforderungen der Co-Simulation von Netzabschnitten gerecht zu werden.
- Schnittstellen
    - Zur Einbindung der bestehenden Messanalysatoren im Netz der SWW und zum Einlesen der Messwerte von den Messanalysatoren der IEE werden geeignete Schnittstellen in das NovaCarts System integriert.
    - Für die Anbindung des CoMap Control Centers wird eine REST API verwendet.
- Testautomatisierung
    - Die Ergebnisse der Interviews haben gezeigt, dass die Anwender eine einfache, einheitliche Benutzeroberfläche erwarten, um Szenarien zusammenzustellen und abzuarbeiten. Aus diesem Grunde wurde entschieden, die Testautomatisierung im CoMap Control Center zu integrieren. Eine gesonderte Testautomatisierung, wie sie z.B. bei HIL-Simulatoren und Prüfständen üblich ist, wurde hier nicht weiterverfolgt. Stattdessen wurde die Schnittstelle zwischen der Testautomatisierung und dem CoMap Control Center für die Steuerung von Szenarien erweitert.

3.1.3 Definition der Szenarien für das CoMap-System und mögliche Testfälle

Bei den Szenarien und Testfällen wurde in zwei Kategorien unterschieden: Online- und Offline-Betrieb. Die Testszenarien orientierten sich an diesen Kategorien, weiterhin beschränkte sich ein Testfall nur auf das Labornetz SysTec. Es wurden folgende Testszenarien festgelegt.

1. Normalbetrieb (Online-Betrieb): Die Co-Simulation wird über die Messstellen mit Messdaten versorgt und schätzt über den intern verwendeten digitalen Zwilling Strom und Spannungswerte der restlichen Netzknoten

2. Betrieb mit Veränderung der Sonneneinstrahlung und Lastverläufe (Online-Betrieb, nur Labornetz SysTec): Beim Testverlauf im Labor SysTec des Fraunhofer IEE wurden die prognostizierten PV-Verläufe verändert, um den Einfluss auf das Verhalten der Co-Simulation zu identifizieren
3. Vorausschauenden Lastabwurf (Offline-Betrieb): Zum gewählten Zeitpunkt werden die aktuellen Messdaten der Netzknoten übernommen und anschließend in der Simulation ein Lastabwurf durchgeführt. Anschließend wird das Verhalten der Simulation beobachtet.
4. Vorausschauenden Kurzschluss (Offline-Betrieb): Zum gewählten Zeitpunkt werden die aktuellen Messdaten der Netzknoten übernommen und anschließend in der Simulation ein Kurzschluss eingestellt. Anschließend wird das Verhalten der Simulation beobachtet.

3.2 Entwicklung des Echtzeit-Systems zur Netzbetriebsanalyse

Ein übergeordnetes Ziel des Projektes war die Netzbetriebsanalyse von zwei Standorten und die Generierung eines Benchmark-Modells. Als Netzabschnitte und Benchmark Modell wurden folgende ausgewählt:

- Labornetz SysTec (Abbildung 5) – Niederspannungsnetz im Labor des Fraunhofer IEE

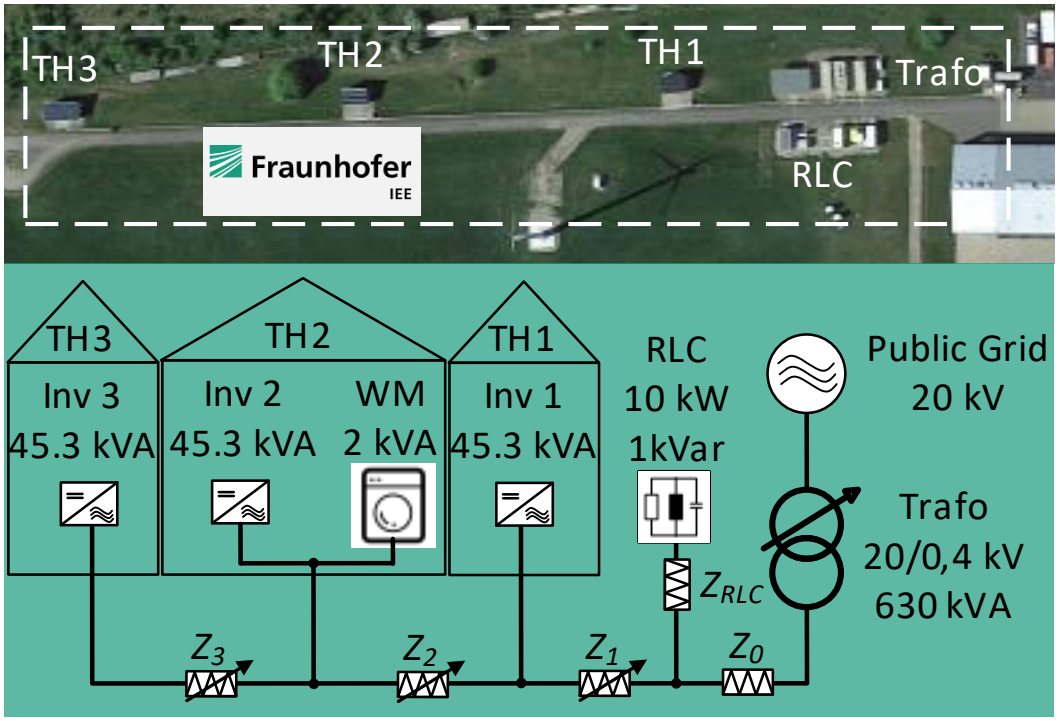

Abbildung 5: Labornetz SysTec am Fraunhofer IEE. [1]

- Verteilnetz Neusorg (Abbildung 6) – Mittelspannungsnetz im Netzgebiet der Stadtwerke Wunsiedel

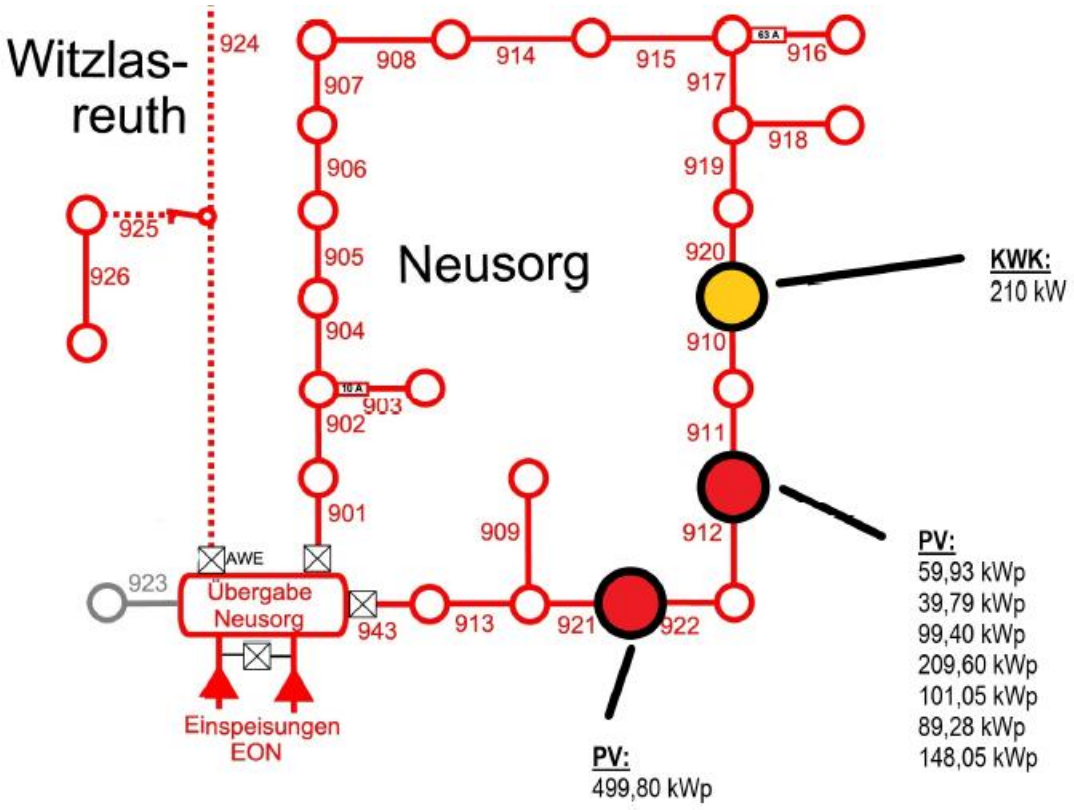

Abbildung 6: Verteilnetz Neusorg aus dem Versorgungsgebiet der SWW

- Cigre-Benchmarknetz (Abbildung 7) – Zur Prüfung des MicroNova Echtzeitsimulator auf die Herausforderungen bei Echtzeitnetzsimulationen

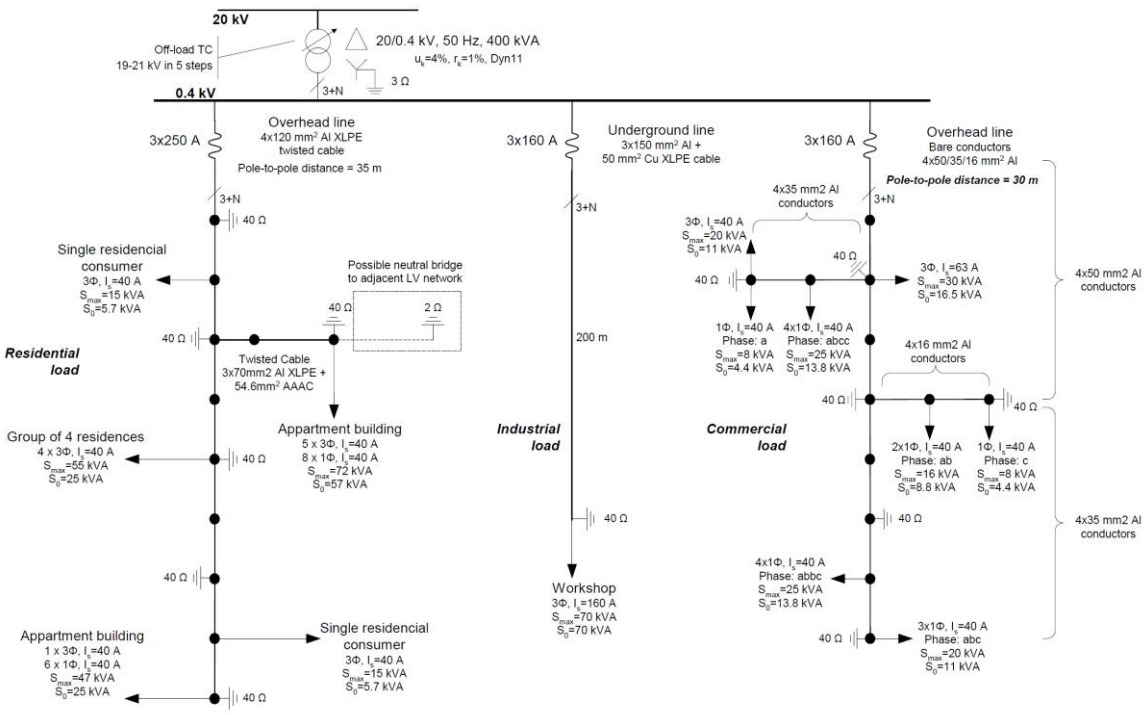

Abbildung 7: Cigre LV Benchmarknetz

Innerhalb des Projekts wurde federführend vom Fraunhofer IEE eine Matlab/Simulink - Bibliothek entwickelt, um die echtzeitfähigen Modelle für den verwendeten MicroNova Echtzeitrechner zu generieren.

3.2.1 Modellbibliothek zur Systemabbildung

Zur Systemabbildung wurde eine Modellbibliothek auf Grundlage von Matlab/Simulink erstellt. Das Fraunhofer IEE konnte hier gezielt die Expertise in der Erstellung von Echtzeitsimulationen und digitalen Zwillingen einbringen, während MicroNova insbesondere bei der Implementierung für das NovaCarts-Echtzeitsystem tätig war. In Systemabbildungen werden häufige ähnliche Komponenten verwendet bzw. haben lediglich eine individuelle Parameterkonfiguration, eine Modellbibliothek ermöglicht es daher, sehr effizient verschiedene Echtzeitabbildungen von verschiedenen Netzausprägungen zu erstellen. Bei der Entwicklung der Komponenten wurde auf eine Kompatibilität von Verteil- und Niederspannungsnetzen geachtet, sodass für beide Systemarten die gleiche Bibliothek und Modellkomponenten verwendet werden können.

Der Anwendungsfall für die Bibliothek lag in der Erstellung von großen Netzen mit vielen Netzknoten, weshalb für die Komponenten als Berechnungsgrundlage die Phasor-Berechnung gewählt wurde. Im Projekt CoMap wurden daher die Berechnungs- und Simulationskomponenten für die Phasor-Simulation optimiert. Die Bibliothekskomponenten können auch für EMT-Simulation verwendet werden, jedoch sind für einen effizienten Betrieb

weitere Optimierungen für EMT-Simulationen durchzuführen. Unter anderem wurden folgende Komponenten in der Modellbibliothek umgesetzt:

- Kabel und Leitungen
- Messblöcke
- Einfache Lasten (wie Haushalte)
- Komplexere Lasten (wie Stromrichter, Maschinen)
- Komplexere Einspeiser (wie Stromrichter, PV-Anlage)
- Messanalysator (Messdaten Einbindung ins Modell)
- Kopplungsmethoden (nötig zur Einspeisung von realen Messwerten in einen digitalen Zwilling)

Das Messanalysator-Modell bildet die Kopplungsmethoden zwischen den realgemessenen Werten zum digitalen Zwilling ab. Weiter werden einfache Messblöcke verwendet, um den Zustand an verschiedenen Netzknoten innerhalb des digitalen Zwillings zu rein simulativ erfassen.

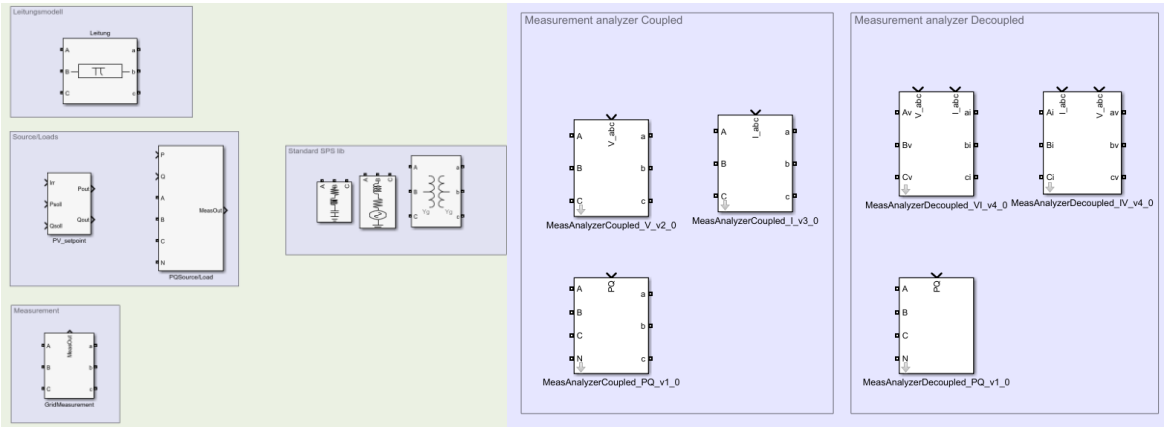

Abbildung 8: Auszug Modellbibliothek mit echtzeitfähigen Netzkomponenten und Kopplungsmethoden für den digitalen Zwilling

Die Abbildung 8 zeigt einen Auszug aus der CoMap Modellbibliothek. Abgebildet sind Simulink-Komponenten zur Modellierung der Systemabbildungen sowie die eingesetzten Kopplungsmethoden. Mit den Bibliothekskomponenten kann nun auf Grundlage eines Netzplans ein echtzeitfähiges Modell für den CoMap-Echtzeitrechner erstellt werden.

Die Abbildung 9 zeigt einen beispielhaften Auszug aus dem Netzplan Neusorg, ausgehend von der Einspeisung des übergeordneten Netzes. Die „Übergabe Neusorg“ symbolisiert die Anbindung an das Übertragungsnetz, die Zahlen (z.B. 901, 943 und etc.) repräsentieren die Kabelnummern, und die Kreise stellen die Netzknoten dar. Die Netzknoten sind unterschiedlich ausgestaltet und können Lasten, Einspeiser oder eine Kombination daraus darstellen. In dem beispielhaften Auszug ist der Netzknoten eine Niederspannungsabzweigung zu der Last „Am Steinbruch“.

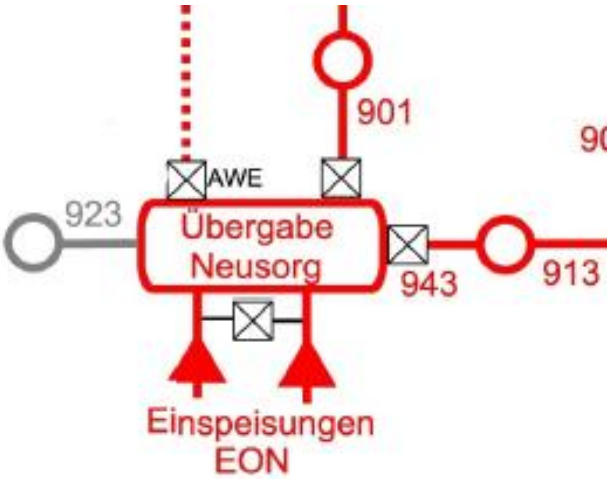

Abbildung 9: Auszug aus dem Netzplan an der Übergabestation Neusorg

Die Abbildung 10 zeigt die Umsetzung des Ausschnittes der Übergabestation „Übergabe Neusorg". Zu sehen sind die Last „Am Steinbruch", das Kabel 943 mit dem entsprechenden Leistungsschalter, ein Messpunkt zur Erfassung von Spannung, Strom und Leistungsdaten aus der Simulation sowie die Einspeisung selbst in Form einer Spannungsquelle.

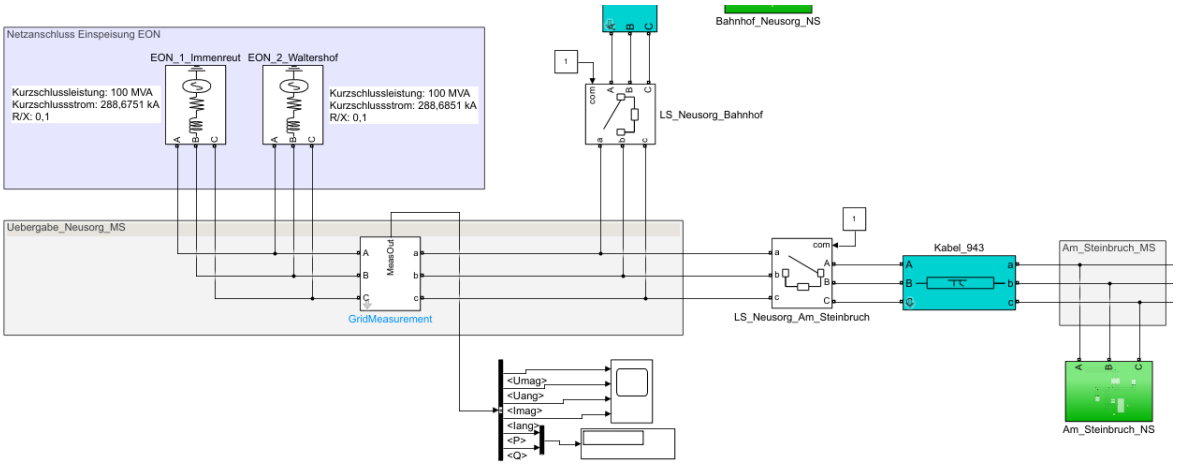

Abbildung 10: Modellierung der Übergabestation Neusorg mit den Bibliothekskomponenten

Die Bibliothekskomponenten werden über Konfigurationsmenüs parametriert. Abbildung 11 stellt das Konfigurationsfenster von Kabel 943 dar, es kann der Kabeltyp sowie Länge des Kabels und die nominale Frequenz ausgewählt werden.

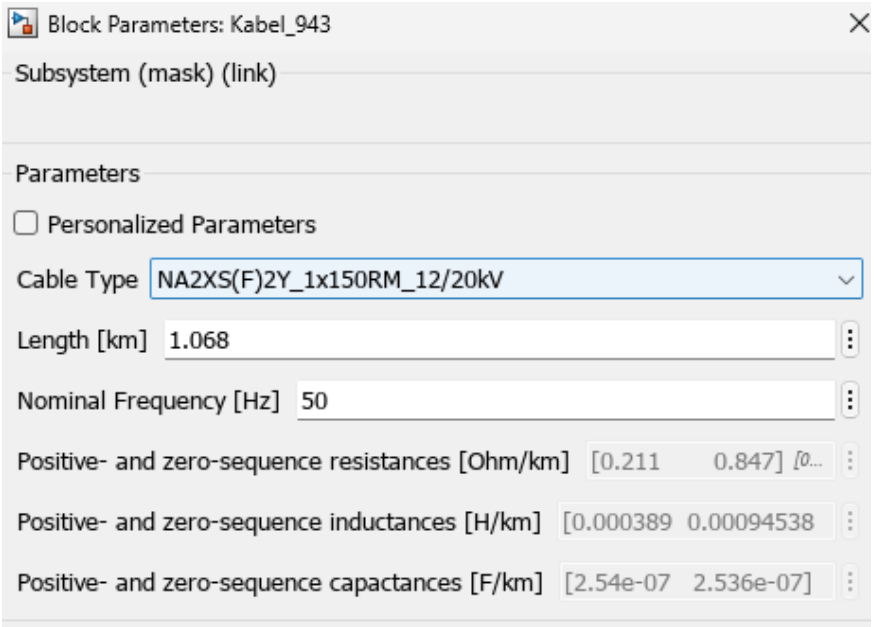

Abbildung 11: Konfigurationsfenster für das Kabel 943

Im Weiteren werden die Bibliothekskomponenten verwendet, um die Echtzeitmodelle zu realisieren.

3.2.2 Echtzeit Modelle zur Systemabbildung

Die Systemabbildung im Projekt wurde in zwei Entwicklungsphasen durchgeführt:

- Vorvalidierung der Simulink-Bibliothek und Systemabbildung der SysTec IEE
- Systemabbildung mit vorvalidierten Modellen der SWW.

Wie in Abbildung 5 dargestellt, sind im Labornetz SysTec des Fraunhofer IEE drei Haushaltsnachbildungen (TH1 bis TH3) über Leitungen mit variierenden Impedanzen (Z_0 bis Z_3) verbunden. Eine zusätzliche RLC-Lastbank ist über eine weitere Leitung (Z_{RLC}) eingebunden. Alle Haushalte verfügen über individuell konfigurierbare PV-Wechselrichter, wobei zur Vereinfachung ein identisches Einstrahlungsprofil angenommen wurde.

Die elektrischen Eigenschaften der Geräte und Leitungen sind in den Tabelle 1 und Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 1: Elektrische Eigenschaften der modellierten Geräte im Testnetz [1]

Gerät	Modelltyp	Elektrische Werte
Öffentliches Netz	Dreiphasige Quelle	U_{Base} = 20 kV L-L $S_{(SC)}$ = 100 MVA X/R Verhältnis = 9
Transformator	Dreiphasig	$U_{Primär}$ = 20 kV $U_{Sekundär}$ = 0,4 kV S_n = 630 kVA

PV-Wechselrichter	I-Quelle mit dq-Regelung und PQ-Vorgaben	S_{max} = 43,5 kVA @ 1000 W/m² Einstrahlungsprofil als Eingabe
RLC-Lastbank	Dreiphasige Serienlast	P = 10 kW Q = 1 kVAr

Tabelle 2: Elektrische Eigenschaften der Kabel im Testnetz [1]

PI-Leitung	**Widerstand (Ω/km)**	**Induktivität (mH/km)**	**Kapazität (nF/km)**
Z_0 (0,1 km)	R_0 = 0,5 / R_1 = 0,125	L_0 = 1,02 / L_1 = 0,254	C_0 = 422 / C_1 = 870
Z_1 (0,3 km)	R_0 = 2,565 / R_1 = 0,642	L_0 = 1,080 / L_1 = 0,270	C_0 = 276 / C_1 = 670
Z_2 (0,6 km)	R_0 = 1,777 / R_1 = 0,444	L_0 = 1,050 / L_1 = 0,270	C_0 = 312 / C_1 = 750
Z_3 (0,6 km)	R_0 = 1,017 / R_1 = 0,254	L_0 = 1,020 / L_1 = 0,256	C_0 = 386 / C_1 = 840
Z_{RLC} (0,2 km)	R_0 = 1,017 / R_1 = 0,254	L_0 = 1,020 / L_1 = 0,256	C_0 = 386 / C_1 = 840

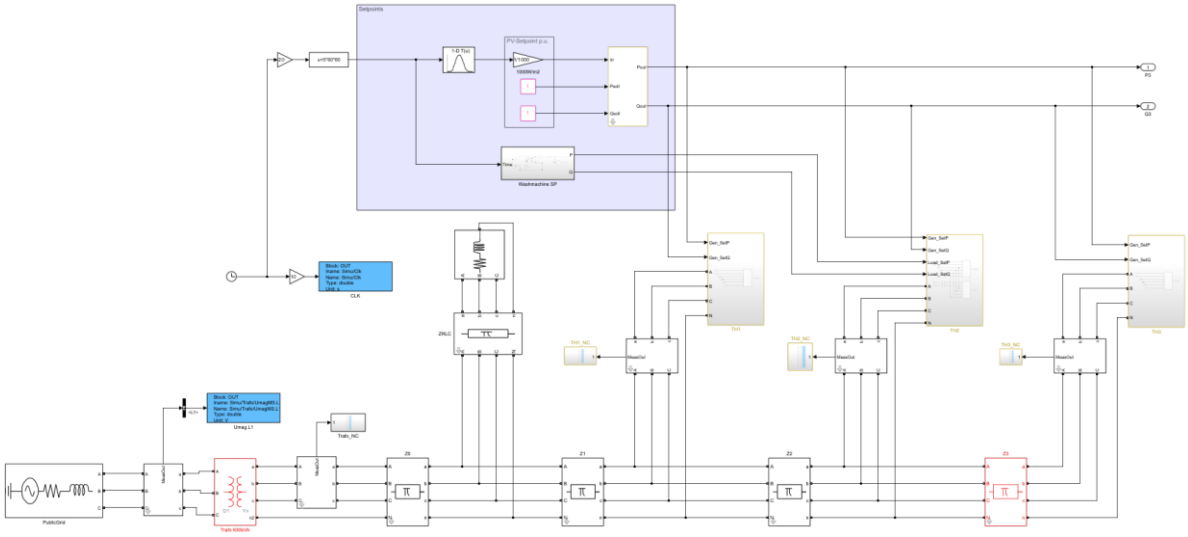

Abbildung 12: Echtzeitmodell des SysTec Fraunhofer IEE

Das beschriebene Netz wurde in Matlab Simulink mithilfe der entwickelten Modellbibliothek abgebildet (siehe Abbildung 12). Die Simulation erfolgt im Phasor-Modus von Simscape Electrical, um komplexe Verteilnetze effizient berechnen zu können. Das simulierte Modell umfasst zudem PV-Erzeugungs- und Lastprofile.

Für das Neusorg-Netz wurde eine PowerFactory-Projektdatei bereitgestellt, in der jeder Netzknoten detailliert überprüft wurde. Auf Grundlage der darin enthaltenen Informationen und mithilfe der Modellbibliothek wurde ein entsprechendes echtzeitfähiges Netz-

modell erstellt (siehe Abbildung 13). Die Parametrierung wurde, um eine konsistente Abbildung zu gewährleisten, aus dem PowerFactory-Modell übernommen und anscvhließend durch ein Plausibilitätscheck ein equivaltens Systemverhalten überprüft.

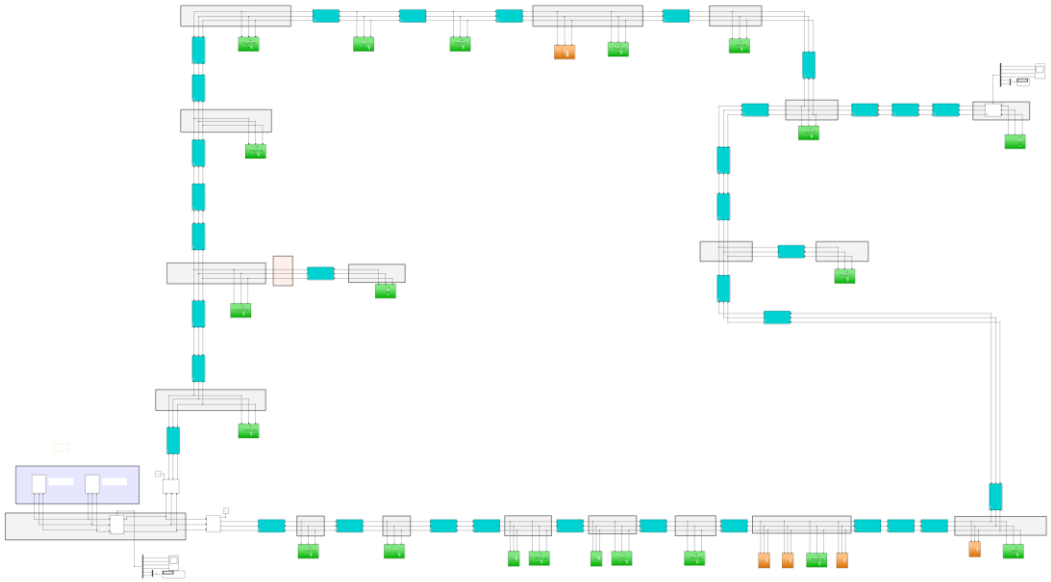

Abbildung 13: Echtzeitmodell des Verteilnetz Neusorg

3.2.3 Digitaler Zwilling

Im Projekt lag ein Fokus auf den Kopplungs- bzw. Schnittstellen-Methoden zur Vernetzung der realen Messdaten und der Simulation. Ab dem Zusammenführen realer Messdaten in die Echtzeitsimulation, wird in diesem Projekt von einem digitalen Zwilling gesprochen. Für die Kopplungsmethoden wurden drei Methoden näher betrachtet:

1. Spannungs-Kopplung: Am Knoten des digitalen Zwillings wird die gemessene Spannung des Messanalysators verwendet.
2. Strom-Kopplung: Am Knoten des digitalen Zwillings wird der gemessene Strom des Messanalysators verwendet.
3. Aktive und reaktive Leistungs-Kopplung: Eine ideale Stromquelle wird mit Betrag und Winkel am Knoten des digitalen Zwillings verwendet, so wird die aktive und reaktive Leistung von der Messung des Messanalysators in die Simulation eingebracht.

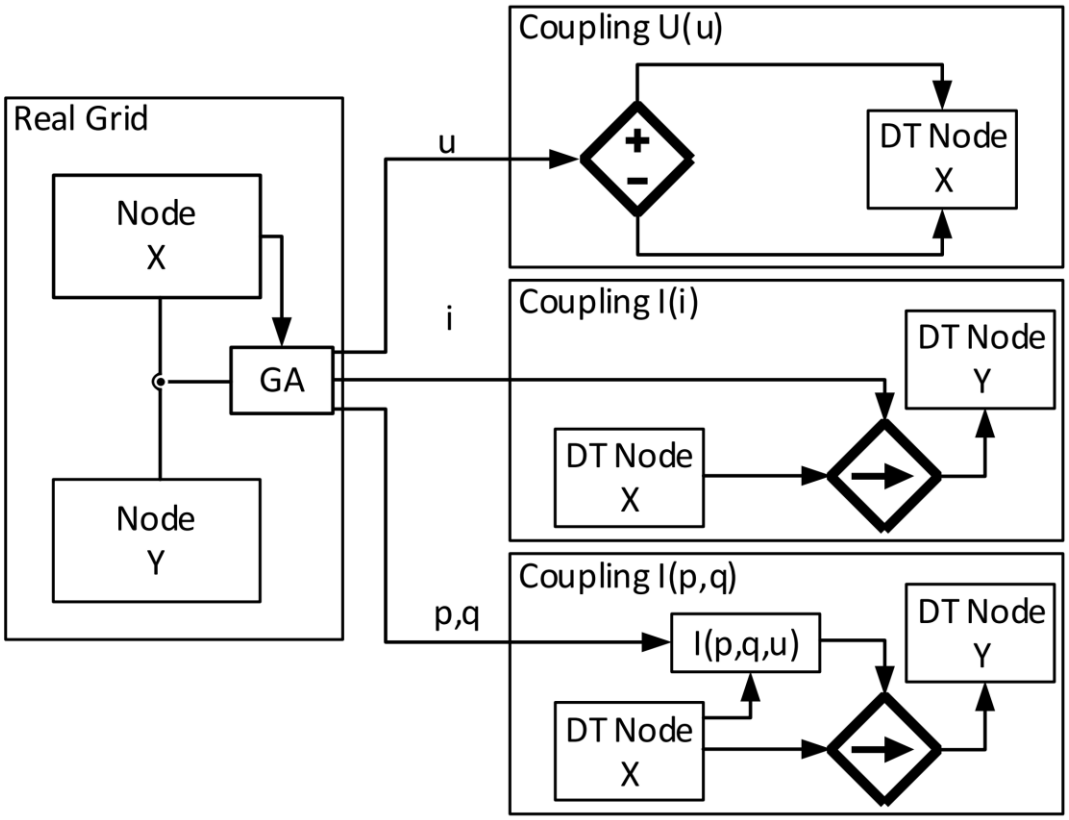

Abbildung 14: Kopplungsmethoden für den digitalen Zwilling [2]

Wie in [1] gezeigt wurde, erwies sich die Kopplung über aktive und reaktive Leistung im Vergleich zu den Spannungs- und Stromkopplungen als eine effektive Methode. Das zugrunde liegende Modell besteht, wie in Abbildung 15 dargestellt, aus zwei Komponenten: dem simulierten Modell (Simu) und dem digitalen Zwilling (DT).

Das Simulationsmodell (Simu) ist, wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben, mit PV-Erzeugungs- und Lastprofilen ausgestattet. Der digitale Zwilling wurde mithilfe der entwickelten Kopplungsmethode zur Integration realer Messdaten realisiert und in das Echtzeitsystem eingebunden (DT).

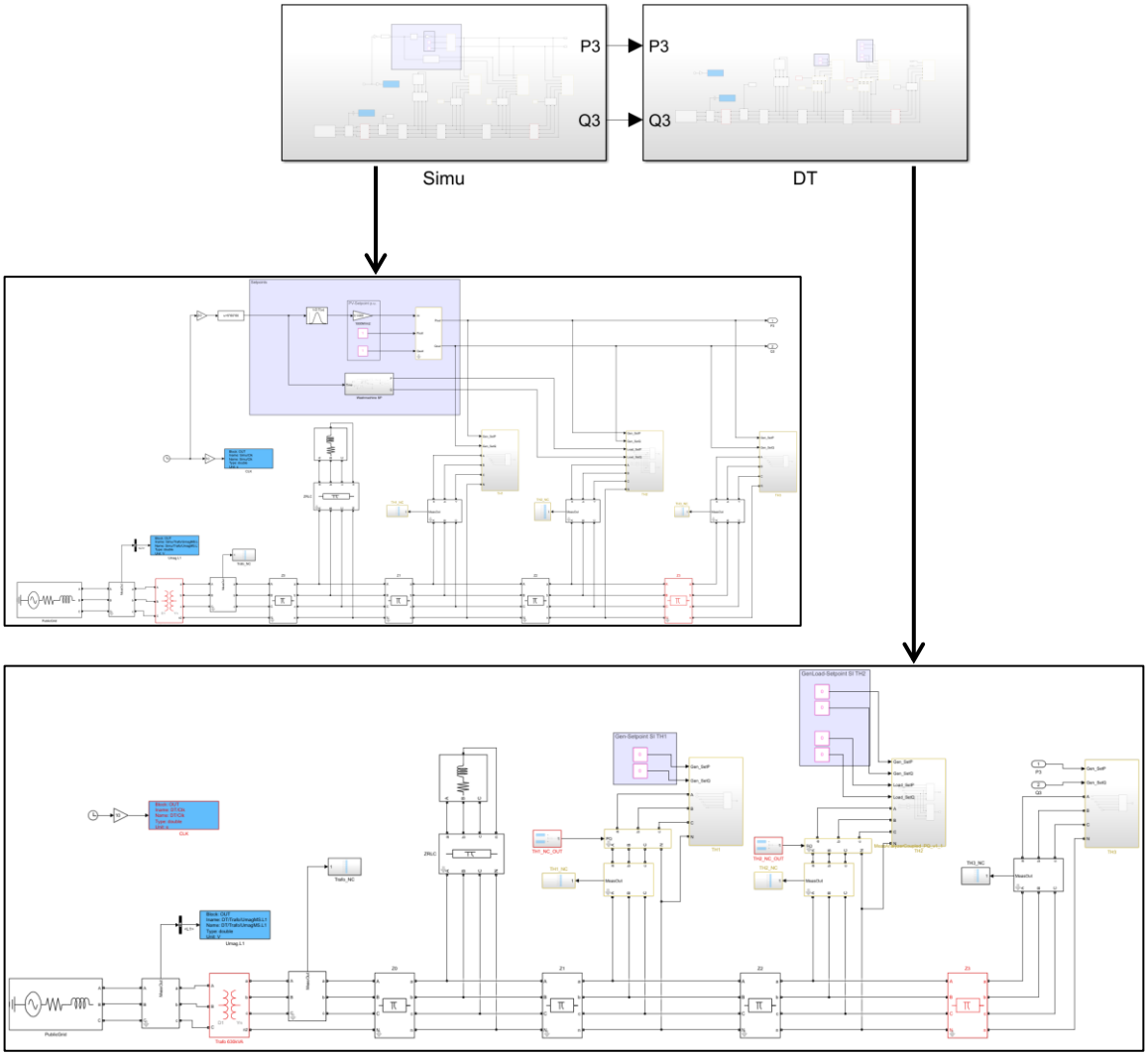

Abbildung 15: Echtzeitmodell (Simu) und digitalem Zwilling (DT) des SysTec Fraunhofer IEE.

Die Umsetzung des digitalen Zwillings für das Netz Neusorg erfolgte bei MicroNova und Es-geht!. Fraunhofer IEE stellte hierfür die erforderliche Modellbibliothek bereit und unterstützte den Prozess durch technischen Support.

3.2.4 Einbettung Testszenarien

Die Testszenarien wurden auf einer höheren Abstraktionsebene im Control Center eingebunden. Die direkte Umsetzung erfolgte dabei nicht im Echtzeitmodell selbst, sondern in der übergeordneten Steuerungsebene.

Seitens Fraunhofer IEE wurde die Integration dieser Funktionalitäten durch die Bereitstellung zweier Modellbausteine (siehe Abbildung 16) innerhalb der Modellbibliothek ermöglicht:

- ein steuerbarer Schalter zur Simulation gezielter Lastabwürfe,

- sowie ein steuerbarer Schalter zur Erzeugung von dreiphasigen Erdschluss-Kurzschlüssen.

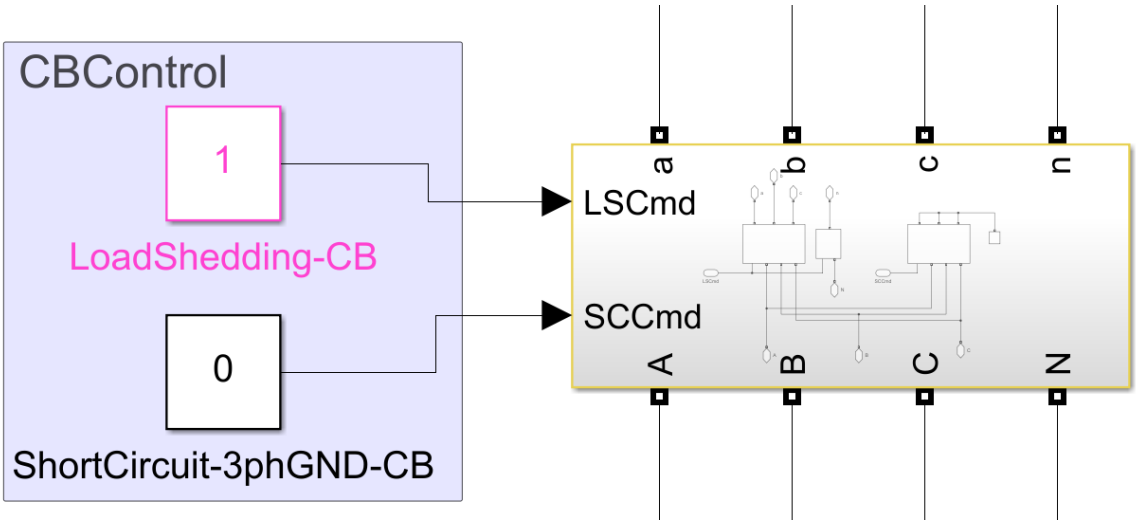

Abbildung 16: Block für steuerbarer Schalter.

3.3 Aufbau des Messanalysators und die Realisierung der Schnittstelle zur Integration externer Systeme

Ein essenzieller Teil eines digitalen Zwillings zur kontinuierlichen und flexiblen Systemabbildung sind die Schnittstellen zur realen Welt (realer Zwilling). In dem Verbundprojekt CoMap hat das Fraunhofer IEE, neben kommerziell verfügbaren Geräten, ein speziell auf diese Anforderung angepasstes Mess- und Analysegerät (Messdatenanalysator) entwickelt. Mit dem digitalen Zwilling sollen Effekte wie Kurzschlüsse, Resonanzen und transiente Stabilitäten untersucht werden. Die Abbildung 17 nach [3] zeigt, dass Abtastzeiten zwischen 1 ms und 1 s für die Phasor-Simulation erforderlich sind. Entsprechend wurde neben dem phasorbasierten digitalen Zwilling auch die Datenerfassung für diese Berechnungsmethode optimiert.

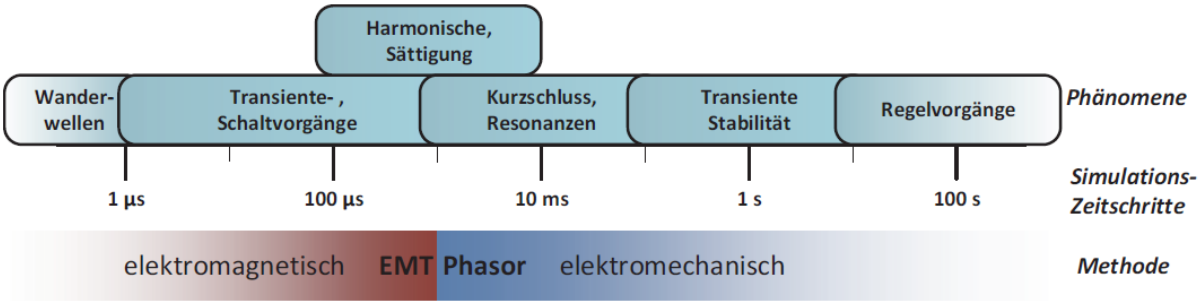

Abbildung 17: Abtastzeiten nach avisierten Stabilitätsphänomen [3]

3.3.1 Übersicht der verfügbaren Messgeräte zur Systemabbildung

Die Auswahl des Messanalysators erforderte die Recherche marktüblicher Messsysteme für Messungen im elektrischen Stromnetz. Dieser Abschnitt zeigt die Ergebnisse der Recherche auf und schafft eine Abgrenzung zwischen den am Markt etablierten Messsystemen und der Notwendigkeit eine Lösung für digitale Zwillinge zur Systemabbildung von Verteilnetzen zu entwickeln.

Aktuelle Messsysteme ermöglichen die kontinuierliche Auswertung und Überwachung zwischen Energieversorger, Netzbetreiber und Kunde bzw. Dienstleister. Weiter dienen sie dazu, Daten zu speichern und auf Abruf direkt am Messsystem oder über eine digitale Schnittstelle bereitzustellen. Produkte wie das Modell „PQI-DA smart" der Firma a-eberle [4] oder der Netzanalysator „UMG 509-PRO" der Firma Janitza [5] haben diese Technologie bereits realisiert und im Markt etabliert. Weiterhin sind die Messsysteme zur Netzdatenanalyse vom ersten Zweig nicht in der Lage für die angestrebte Systemabbildung und dem digitalen Zwilling die nötigen Abtastzeiten von kleiner/gleich 1 ms bereitzustellen.

Während diese Messsysteme meist lokal ins Netz integriert und fest verbaut sind, hat die Recherche einen weiteren Anwendungszweig von Messsystemen aufgezeigt. Diese beziehen sich hauptsächlich auf die Anwendung im Labor und weist eine höhere Bandbreite und Funktionalität auf. Hier sind beispielhaft der „Power Analyzer" von Dewesoft [6], der „WT5000 Precision Power Analyzer" von Yokogawa [7] oder der „GN310B" von HBM – an HBK Company [8] zu erwähnen. Diese Art von Messsytemen weisen umfangreiche Funktionen auf, welche vor allem in der späteren Verwendung zur Systemabbildung nicht benötigt werden. Die Messsysteme unter dem zweiten Zweig bieten einen sehr großen Funktionsumfang und setzen einen besonderen Anspruch auf genaue Messungen. Allerdings sind sie nicht dazu ausgelegt dezentral, z.B. in Ortsnetzstationen, Einsatz zu finden und durch die Kosten je System von mehreren zehntausenden Euro ein flächendeckender wirtschaftlicher Einsatz nicht realisierbar.

Diese zwei Zweige sind im Rahmen von CoMap hinsichtlich ihres Aufbaus und ihrer Funktionen analysiert worden. Die Tabelle 3 zeigt ein Ausschnitt der Recherche zu marktverfügbaren Messsystemen.

Der Vollständigkeit halber wurde ein dritter Zweig durch die Recherche mit dem Internet verbundene Messsystemen identifiziert. Hier zeigt [9] beispielsweise ein mobiles und intelligentes Messsystem, welches in ein Wide Area Monitoring System (WAMS) integriert ist. Dabei sind verschiedene Messgeräte in einen Netzabschnitt eingebunden, welche Spannung und Strom mit einem zugehörigen Zeitsignal aufzeichnen, um die Daten an einen Kontrollraum zu übergeben. Dort werden die Daten weiterverarbeitet und über einen Server global zur Verfügung gestellt. Die Daten können schließlich dezentral über

eine Applikation abgerufen werden [9]. Die Abtastzeiten und Kanäle für Spannung sowie Strom sind so weit begrenzt, dass eine Verwendung für einen digitalen Zwilling nicht zielführend erscheint.

Obwohl die vorgestellten Messsysteme teilweise eine digitale Schnittstelle zu anderen Geräten wie Energie-Management-Systemen oder WAMS aufweisen können, bieten sie keine echtzeitfähige Schnittstelle zu digitalen Zwillingen an. Es konnte am Markt kein System identifiziert werden, dass alle Anforderungen erfüllt. Deshalb wurde ein Messanalysator, spezialisiert auf die Bedürfnisse eines digitalen Zwillings abgestimmt, entwickelt. Auf folgende Punkte wurde wert gelegt:

- Dezentral z.B. in Ortsnetzstationen einsetzbar
- Ausreichende Abtastfrequenzen
- Performante Kommunikation
- Umfangreiche Messkanäle für Strom und Spannung

Im Folgenden wird die Entwicklung des Messanalysators erläutert.

Tabelle 3: Ausschnitt der recherchierten verfügbaren Messsysteme

	Allgemein					
	Modell	Maximale Eingangsspannung	Stromeingänge	Bandbreite	Messintervalle	Genauigkeit
Hersteller	Modell	Wert	Wert	Wert	Wert	Wert
a-eberle	PQ-Box 50	DC 848V = AC 1039V/600V ~	1000 mV für Ministromzangen und 330mV für Rogowski Stromzangen 10 kΩ Impedanz Max. 30V zu PE	ka	1 Sek bis 30 Min	< 0,1%
a-eberle	PQI-DA smart	4 Spannungseingänge Messbereichsendwert: 480V L-N, Genauigkeit < 0,1%	4 Stromeingänge 5 A Nennstrom Messbereichsendwert: 10 A bzw 100 A, je nach Typ Nennstrom: Impuls 1 ms Impedanz: <= 4 mOhm Messwandler, Schutzwandler, Rogowski Spulen, Mini-Stromzangen mit 0,5 VAC	25 Hz...20 kHz		< 0,1%
Fluke	Serie 1770	1000 Veff/1000 V DC	Stromzange: 50 mV/500 mVeff, Scheitelfaktor (CF) 2,8 Rogowski-Spule: 15 mV/150 mVeff bei 50 Hz, 18 mV/180 mVeff bei 60 Hz, Scheitelfaktor (CF) 4 Alle im Nennbereich der Stromzangen 11 kOhm Eingangsimpedanz	- DC bis 30 kHz für Netzqualitätsmessungen, ausgenommen Transienten - bei Spannungstransienten bis 1 MHz	Vom Anwender einstellbar: 1 Sek., 3 Sek., 5 Sek., 10 Sek., 30 Sek., 1 Min., 5 Min., 10 Min., 15 Min., 30 Min.	Integriert: 3 ppm (0,26 s pro Tag, 8 s pro Monat) NTP (Internetzeit): Abhängig von der Internet-Latenz, in der Regel < 0,1 s absolut zu UTC GPS: < 1 ms absolut zu UTC
Janitza	UMG 509-PRO	4 Spannungseingänge Messbereichsendwert: 600 Vrms L-N Genauigkeit: 0,2%	4 Stromeingänge 5 A Nennstrom Messbereichsendwert: 7 Arms Impedanz: 5 mOhm Crestfaktor: 2 (bezogen auf 6 Arms	20 kHz		
HBM / HBK	GN310B	1500 V DC 1000V CAT IV Schutz	maximal 2A			0,015% des Messwertes 0,02% des Bereiches 0,005% des Drehzahlbereiches
YOKOGAWA	WT Serie	Peak voltage of 1.6 kV or RMS of 1.5 kV, whichever is lower	Direct input (5 A element): 5 m/ 10 m/ 20 m/ 50 m/ 100 m / 200 m/ 500 m / 1/ 2/ 5 A (crest factor CF3) External current sensor input - 50 m/ 100 m/ 250 m/ 500 m / 1/ 2.5/ 5/ 10 V (crest factor CF3) Direct input (30 A element): 0.5/ 1/ 2/ 5/ 10/ 20/ 30 A (crest factor CF3) External current sensor input - 50 m/ 100 m/ 250 m/ 500 m / 1/ 2.5/ 5/ 10 V (crest factor CF3)			0,01% of reading 0,02% of range
LTT tasler	LTTsmart	1000 V 2500 VDC galvanische Trennung aller Kanäle				extrem hohe Wirkungsgenauigkeit: 0,015%*Signal 0,015%*Range
DEWESoft	Power Analyzer	Direct input and acquisition of high voltage signals ±2000V, 1600 V DC/CAT II 1000 V/CAT III 600 V with high galvanic channel-to-channel isolation.				0,03%
PCE	PA 8300-1	600 V phase to neutral	bis 1200 A	bis 1 KHz	2 bis 7200 Sekunden	- 0,5 % bei Spannungs- und Strommessung - 1% bei P,Q,S - 2% bei Energie
Schneider Elektrik	METSEPM8214					

3.3.2 Konzept, Hardware und Software des entwickelten Messanalysators

Konzept:
Die Messanalysatoren sollen an mehreren Netzknoten des Verteilnetzes zum Einsatz kommen, um somit die Grundlage für die Datenerfassung des digitalen Zwillings zu bilden. Abbildung 18 skizziert den Aufbau des Messanalysators. Durch Umsetzer sollen die Spannung und der Strom im Verteilnetz auf messbare Größen heruntertransformiert werden. Mithilfe der Messschaltung und der Umwandlung durch Analog-Digital-Wandler werden die Messsignale der Steuerplatine für die weitere Verarbeitung zur Verfügung gestellt. Die Steuerplatine verarbeitet die Messdaten, führt Analysefunktionen aus und stellt diese über die externe Kommunikationsschnittstelle zur Verfügung.

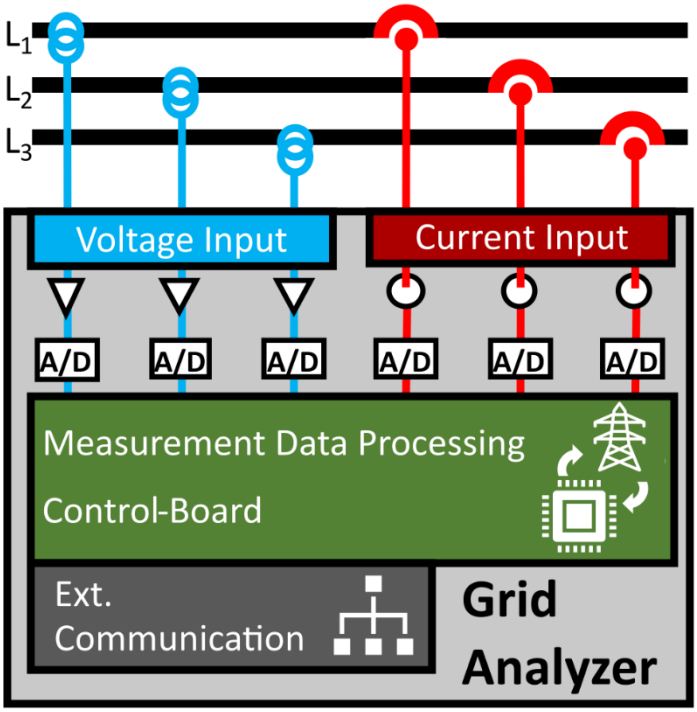

Abbildung 18: Konzept des Messanalysators

Das Messsystem soll unter anderem für den Feldtest im Verteilnetz der SWW eingesetzt werden. Typischerweise werden Verteilnetze mit Spannungen in der Mittelspannungsebene betrieben, weswegen die Spannung- und Strommessungen mittels zusätzlicher Messwandler, sowie galvanisch getrennt zum Messanalysator geführt werden müssen. Die Wandler transformieren die Spannungs- und Stromgrößen aus dem Verteilnetz herunter, damit der Messanalysator diese weiterverarbeiten kann. Für das CoMap System ist die Verwendung von frequenzoptimierten Mittelspannungs-Strom- und Spannungswandlern geplant, bespielhaft sind die Messwandler der Firma MBS AG [10] vorgesehen. Die Wandler setzen Ströme von bis zu 3.000 A proportional in einen Messbereich von maximal 5 A herunter und wandeln Spannungen von 11.000 V proportional in Werte kleiner 110 V um. Zusätzlich sind diese Messwandler in der Lage, Frequenzanteile bis zur 50.

Oberwelle zu übertragen, was umfassende Spektralanalysen der Netzgrößen zum Aufbau eines digitalen Zwillings ermöglicht. Aufgrund der Schnittstelle zu den Messwandlern und der Marktanalyse aus Tabelle 3 wurde folgende Spezifikation für den Messanalysator in Tabelle 4 gewählt.

Tabelle 4: Spezifikation des Messanalysators

Funktion	Spezifikation
Stromkanäle	5 A Nennstrom 4 Stromeingänge mit 10 KHz abgetastet, Genauigkeit 1%, Auflösung 12 Bit
Spannungskanäle	480V L-N Nennspannung 4 Spannungseingänge mit 10 KHz abgetastet, Genauigkeit 1%, Auflösung 12 Bit
Schnittstelle zu Simulationssystem	Minimal 100 Hz (10 ms) bis 1.000Hz (1 ms) Übertragungsgeschwindigkeit - Ethernet basierend
Speicherung von Daten	Mit Übertragungsdatenrate (10ms oder 1ms) auf dem Messanalysator. Manueller Download.
Anbindung an Monitoring-GUI	Anwendung zur Parametrisierung und Datenanalyse
Auswertefunktionen	Messdatenaufnahme und Übertragung des Phasor-Messdaten an das Echtzeitsystem

Kommunikationsinterface:

Im Folgenden werden eine Auswahl an Ethernet-kompatiblen Kommunikationsprotokollen hinsichtlich ihrer Echtzeitfähigkeit analysiert.

1. TCP ist ein verbindungsorientiertes Protokoll, das in Computernetzwerken verwendet wird. Es ist entwickelt worden, um eine zuverlässige und geordnete Datenübertragung zwischen Anwendungen über ein Datennetz zu gewährleisten. Dabei versucht es, eventuelle verlorene Pakete wiederzufinden, was in mehreren Iterationsschleifen resultieren kann. Dies verzögert den Datenaustausch, wodurch es nicht echtzeitfähig ist [11, 12].
2. UDP ähnelt von der Struktur her TCP. Es bietet eine kostengünstige Möglichkeit, Datenpakete zwischen Anwendungen über ein Daten-Netzwerk zu senden. Im Gegensatz zu TCP bietet UDP keine Zuverlässigkeits- oder Ordnungsgarantien, was in einem schnelleren und leichteren Protokoll resultiert. Daher hat dieses Protokoll auch eine höhere Wahrscheinlichkeit, echtzeitfähig zu sein. Jedoch gibt es dafür keine Garantie [11–13].
3. OPC UA (Open Plattform Communications Unified Architecture) ist ein Kommunikationsprotokoll, das in industriellen Automatisierungs- und Steuerungssystemen zum Austausch von Daten zwischen Geräten, Systemen und Anwendungen verwendet wird. Auch wenn es selbst nicht echtzeitfähig ist, kann es in Kombination mit anderen Protokollen Echtzeit-Kommunikation erreichen [11].

4. PROFINET ist ein Echtzeit-Kommunikationsprotokoll, das in industriellen Automatisierungs- und Steuerungssystemen eingesetzt wird. Es wurde entwickelt, um eine schnelle und deterministische Kommunikation zwischen Geräten und Systemen zu ermöglichen. PROFINET unterstützt eine Vielzahl von Kommunikationsmodellen und bietet eine hohe Leistung und Zuverlässigkeit, wodurch es für anspruchsvolle industrielle Anwendungen geeignet ist [14].
5. EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology) wird ebenfalls in der Industrie und Automatisierung verwendet und ermöglicht eine Hochgeschwindigkeitskommunikation zwischen Geräten, Systemen und Anwendungen. EtherCAT verwendet eine "processing on the fly"-Technik, die es ermöglicht, dass Daten von jedem Knoten im Netzwerk verarbeitet werden, während sie es durchlaufen. Dies führt zu einer schnelleren Kommunikation und einer geringeren Latenz. EtherCAT unterstützt verschiedene Echtzeitfunktionen, einschließlich Zykluszeiten von 12,5 Mikrosekunden, wodurch es sich für Anwendungen eignet, die eine leistungsstarke Kommunikation erfordern [15].
6. DNP3 (Distributed Network Protocol 3) wird für die Fernüberwachung und -steuerung von Stromversorgungssystemen verwendet und unterstützt echtzeitfähige Kommunikation zwischen fernsteuerbaren Geräten und Steuerzentralen. DNP3 bietet eine zuverlässige und sichere Kommunikation - auch über große Entfernungen - und eignet sich daher für den Einsatz in Stromversorgungssystemen. Vorteilig bei diesem Protokoll ist zudem, dass es bereits im Stromversorgungssystem etabliert ist [16].

Als Kommunikationsprotokoll wurde UDP ausgewählt, da es ein Kompromiss aus Implementierungsaufwand, Geschwindigkeit und schlankem Protokoll bietet. Der Nachteil, dass das UDP-Protokoll keine Echtzeit garantiert, kann vernachlässigt werden, da im Netzwerk nur wenige und bekannte Teilnehmer kommunizieren.

Hardware:

Aus den Spezifikationen wurde die Ausgestaltung der Hardware des Messanalysators erarbeitet. Das Design sieht ein flexibles Steckkartensystem vor. Es werden Messsteckkarten verwendet, um flexibel auf Randbedingungen reagieren zu können. Die Messkarten werden in eine Trägerkarte eingesteckt. Abbildung 19 zeigt das Design der Träger- und Messkarten.

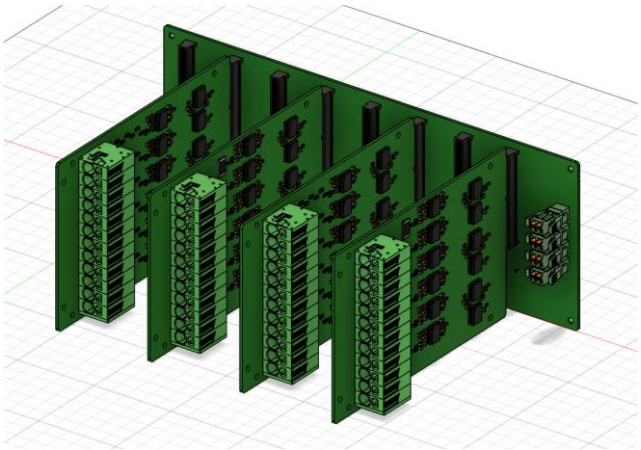

Abbildung 19: Trägerkarte und Messkarten

Die Trägerkarte wird mit der Steuerplatine verbunden. Als Steuerplatine wird, die auf Vorarbeiten des Fraunhofer IEE beruhende Regelungsplatine verwendet. Die Platine ist mit einem System-on-Module (SoM) bestückt. Die Verarbeitung der Signale findet auf der Recheneinheit des SoM statt. Als Recheneinheit wird eine Kombination aus FPGA und ARM-Prozessor eingesetzt. Über Platinen-Steckplätze können individuelle Leiterkarten mit der Regelungsplatine verbunden werden. Die Steuerplatine ist in Abbildung 20 abgebildet.

Abbildung 20: Steuerplatine des CoMap-Messanalysators

Das entwickelte Messsystem ist modular aufgebaut, um flexibel auf Anforderungen in verschiedenen Messapplikationen reagieren zu können. Die flexible Erweiterbarkeit wurde bei der Entwicklung berücksichtigt. Es wurden Messkarteneinschübe für Strom und Spannung realisiert, um die Messaufgaben für CoMap durchführen zu können. Zusätzlich ist der Messaufbau für einen 19-Zoll Baugruppenträger ausgelegt, damit das Gehäuse einfach in eine standardisierte Aufnahme eingebaut werden kann. Die Abbildung 21 zeigt den Laboraufbau zur Vermessung der Spannungsmessgruppe, es sind die Spannungsmesskarte, die Trägerplatine sowie die Anbindung an die Steuereinheit „Regelungsplatine" dargestellt. Beim Laborversuch wurden verschiedene Spannungswerte angelegt und mit Präzisionsmessgeräten geprüft, ob der Aufbau den entsprechenden Spannungswert erfasst.

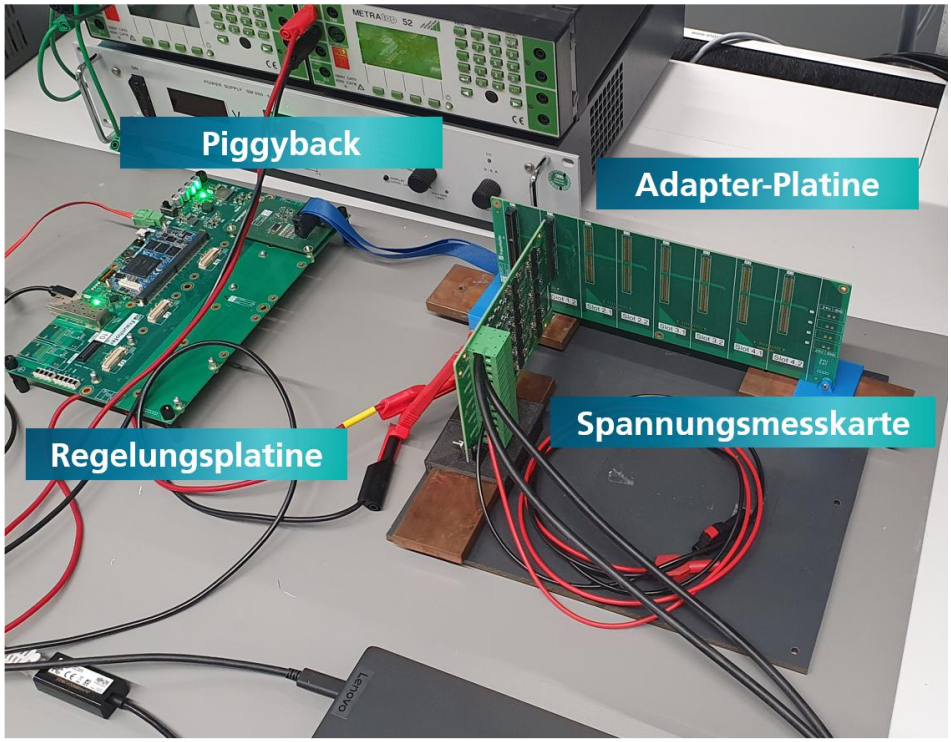

Abbildung 21: Laboraufbau zur Vermessung der Spannungskanäle

Die nachfolgende Abbildung 22 zeigt den Messanalysator im Gehäuse integriert. In dieser Ausbaustufe wurde der Messanalysator im Labornetz SysTec und im Feldtest Neusorg eingesetzt.

Abbildung 22: Foto des CoMap Messanalysators

Software:

Für die Steuereinheit des Messanalysators wurde eine Software von Fraunhofer IEE entwickelt, um zum einen den flexiblen Einsatz mit Steckkarten zu ermöglichen und zum anderen die erhöhten Anforderungen an die Kommunikation abzudecken. Das Softwarekonzept ist in Abbildung 23 dargestellt.

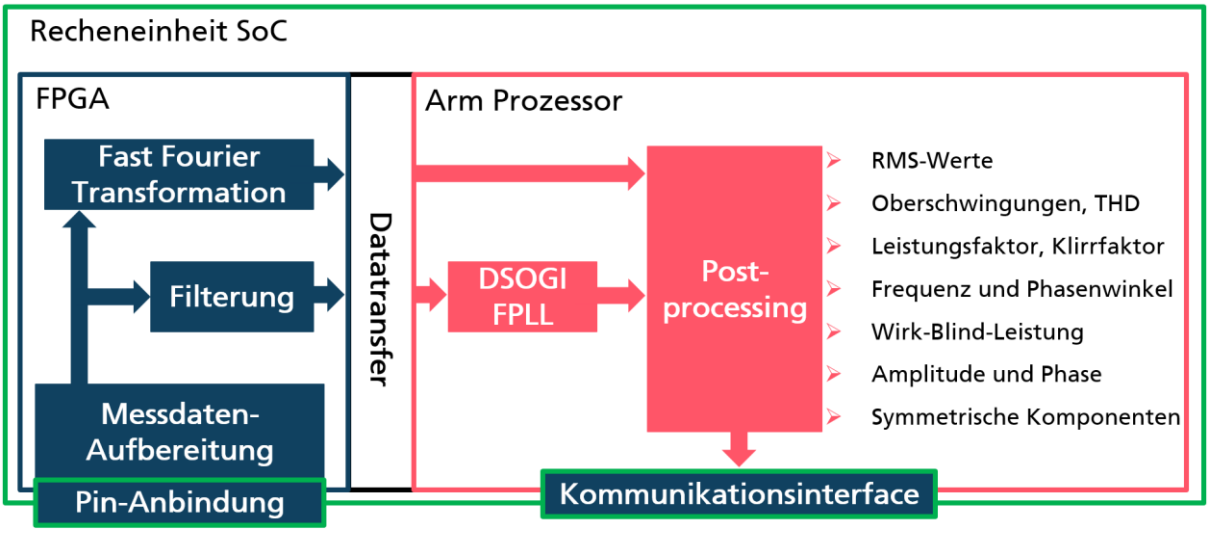

Abbildung 23: Softwarekonzept des Messanalysators

Die Recheneinheit teilt sich in einen FPGA-Part und ARM-Prozessor-Part auf, wobei der FPGA mit einer Abtastfrequenz von 72 kHz und der ARM-Prozessor mit 8 kHz arbeitet. Der FPGA übernimmt dabei die Messdatenaufbereitung sowie das Auslesen und Ansteuern der Analog-Digital-Wandler, weiterhin werden dort die Messdatenfilterung und eine

Fast -Fourier-Transformation (FFT) ausgeführt. Der Datentransfer zwischen FPGA und Prozessor wird über einen gemeinsamen Speicher realisiert, über einen sogenannten Shared Memory lässt sich ein schneller und verlässlicher Datentransfer einfach aufbauen. Der ARM-Prozessor bereitet die Rohdaten auf. Über eine FPLL werden die Frequenz und Phase der Strom- und Spannungswerte erfasst und im Postprocessing einige Analysefunktionen wie z.B. Phasor-Werte (RMS-Werte), Oberschwingungen, Leistungsfaktor, etc. ausgeführt. Der ARM-Prozessor ist direkt mit verschiedenen Kommunikationsschnittstelle verbunden, für das CoMap Projekt wurde die Ethernet-basierte Schnittstelle ausgewählt und ein UDP-Protokoll mit geringem Overhead zur Kommunikation mit dem Echtzeitrechner implementiert.

Inbetriebnahme:

Die Messanalysatoren wurden im Labor des Fraunhofer IEE in Betrieb genommen und die Messkanäle für Strom und Spannung kalibriert. Die Abbildung 24 zeigt den fertig aufgebauten Messanalysator im Teststand zur Kalibrierung.

Abbildung 24: Kalibrierung der Messkanäle des Messanalysator

In der Mitte befindet sich der Messanalysator, rechts davon die Prüfgeräte zur Kontrolle der Messkanäle, und links der Bedien-Laptop mit einer Auslesesoftware zur Darstellung der Messdaten. Auf dem Bildschirm ist die aktuell verwendete Firmware in Matlab/Simulink zu erkennen.

Bei der Inbetriebnahme der Messschaltungen wurde der Messfehler über den Messbereich bei unterschiedlichen Temperaturen ermittelt. Bei einer Temperatur von 60 °C wurde ein

absoluter Messfehler von 1 % für den Strom festgestellt und der absolute Messfehler für die Spannung betrug 0,04 %. Abbildung 25 zeigt das aufgezeichnete Fehlerdiagramm für Spannung und Strom über den Messbereich.

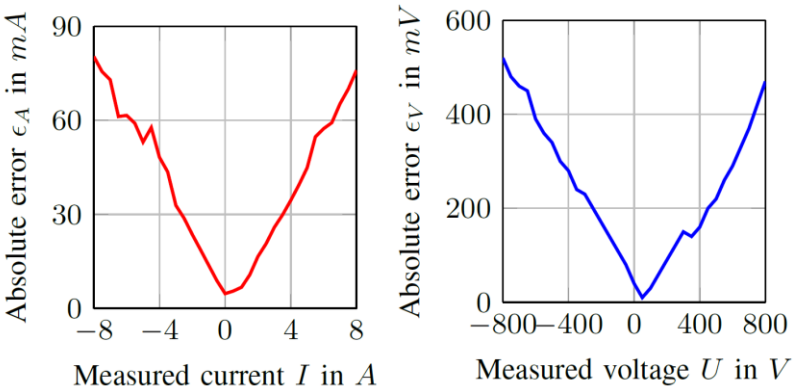

Abbildung 25: Absolute Messfehler der Strom- und Spannungsmessung bei 60 °C

Die erreichten Messfehler entsprechen den spezifizierten Werten, somit kann der Messanalysator für das CoMap Projekt eingesetzt werden. Aufgrund des flexiblen Designs und dem Steckkarten-System muss bei neuen Anforderungen (z.B. höhere Messgenauigkeit) nur die entsprechende Messkarte einem Redesign unterzogen werden. Das Design erlaubt, dass bei neuen Anforderungen die Recheneinheit, die Trägerplatine und das Gehäuse weiterverwendet werden können.

Nach der Kalibrierung wurden die nicht benötigten Anschlüsse versiegelt und zwei Messanalysatoren zur Integration in das Neusorg-Netz vorbereitet sowie zwei Messanalysatoren für den Labortest in dem Labornetz SysTec. Das Foto in Abbildung 26 zeigt den Messanalysator für den Feldtest.

Abbildung 26: Foto des Messanalysators für den Feldtest in Neusorg

Für die Laboruntersuchungen und Feldtest wurden vier Messanalysatoren aufgebaut und in Betrieb genommen.

3.4 Labor und Feldversuch

3.4.1 Labor: SysTec Fraunhofer IEE

Die Testhaushalte TH1 und TH2 wurden mit Messanalysatoren ausgestattet und entsprechend mit den erforderlichen Messwandlern versehen. Eine Abbildung eines Testhaushalts mit Außen- und Innenansicht ist in Abbildung 27 dargestellt.

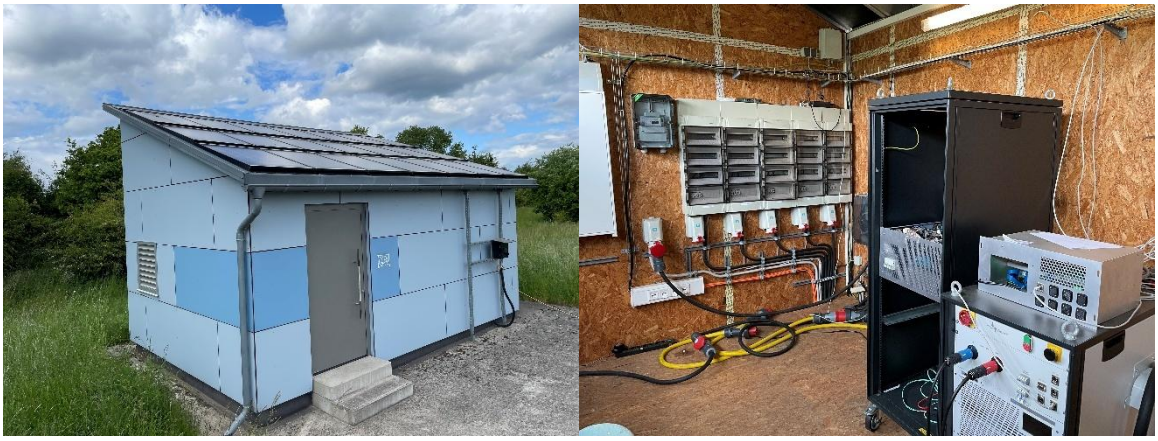

Abbildung 27: Testhaushalt am SysTec Fraunhofer IEE – Außenansicht (links), Innenausstattung (rechts)

Die Verbindung zwischen den Testhaushalten und dem Echtzeitsimulator von MicroNova erfolgt über ein dediziertes Netzwerk. Hochwertige Ethernet-Kabel der Kategorie 7 (Cat.7) sowie Gigabit-Switches gewährleisten eine zuverlässige und leistungsfähige Kommunikation zwischen den Komponenten.

Abbildung 28: Micronova Echtzeitsimulator im Betrieb

In der Softwareumgebung *NovaCarts* von MicroNova wurde ein benutzerdefiniertes Überwachungszentrum eingerichtet, das zur Visualisierung der Variablen im digitalen Zwilling dient. Das verwendete Echtzeitmodell mit digitalem Zwilling (siehe Abschnitt 3.2.3) beinhaltet sowohl das simulierte Netzmodell mit PV-Generatoren und Lastprofilen als auch dessen digitalen Zwilling, der durch die Implementierung der definierten Kopplungsmethoden ermöglicht wurde. Dies dient zum Vergleich und Plausibilitätsprüfung einer reinen Simulation mit Profildaten und dem digitalen Zwilling mit realen Messdaten.

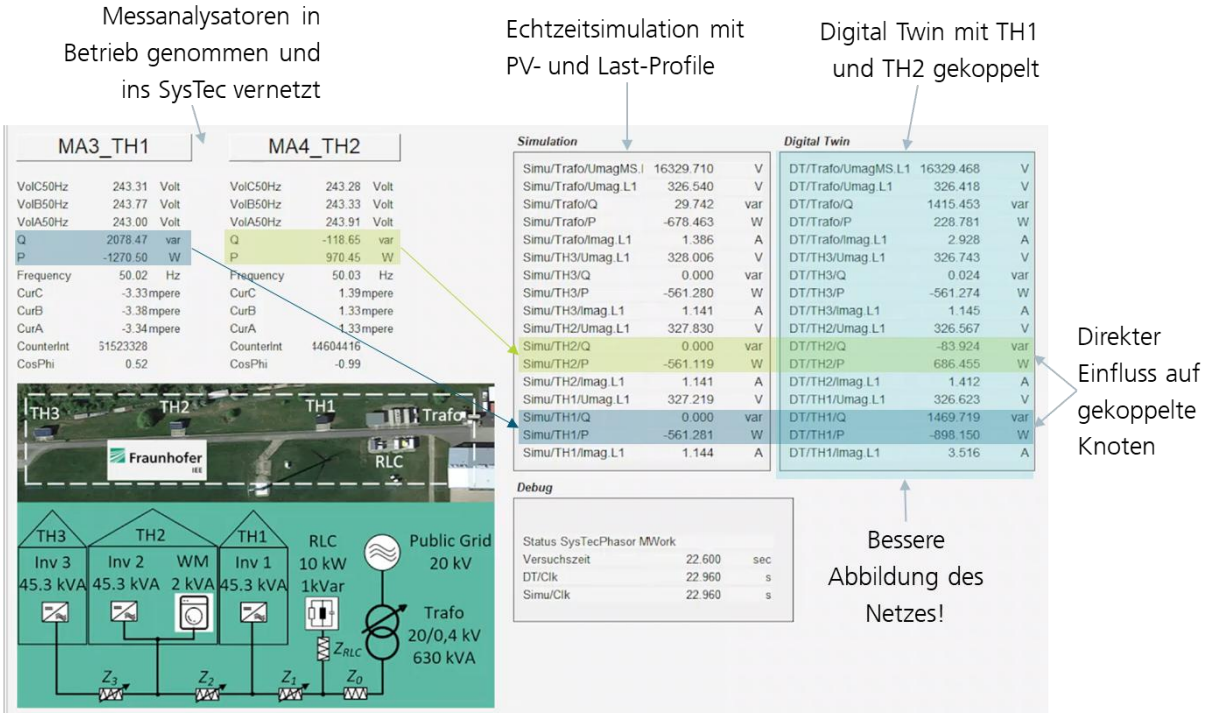

Abbildung 29: Live-Demonstrator mit Hervorhebung der beeinflussten Netzknoten

3.4.1 Feldversuch: Neusorg SWW

Im Rahmen einer internen Analyse in Zusammenarbeit mit der SWW wurden die Knotenpunkte „Übergabestation“ und „WOLF“ (siehe Abbildung 30) als geeignete Standorte identifiziert. Die Auswahl erfolgte auf Basis technischer Kriterien sowie der örtlichen Verfügbarkeit. Daraufhin wurden entsprechende Mittelspannungsstationen ausgewählt, an denen die Installation von zwei Messanalysatoren umgesetzt werden konnte.

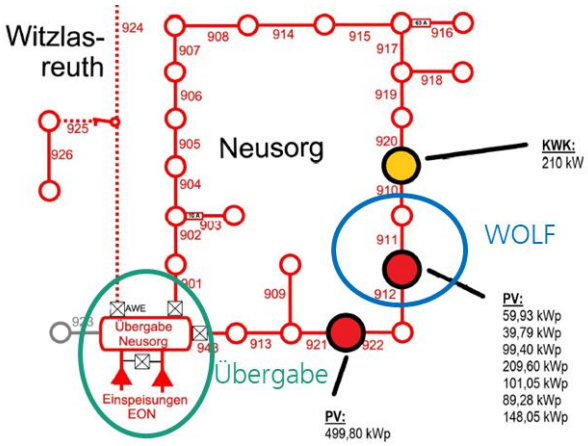

Abbildung 30: Neusorg Netzwerk mit Platzierung der Messanalysatoren.

Die Hardwareinstallation wurde gemeinschaftlich von der SWW, MicroNova und Fraunhofer IEE durchgeführt.

Abbildung 31: Messanalysatoren in den Mittelspannungsstationen – links: WOLF, rechts: Übergabestation.

Im Anschluss erfolgten die Inbetriebnahme sowie die Funktionsprüfung der Schnittstellen zur Anbindung an den digitalen Zwilling.

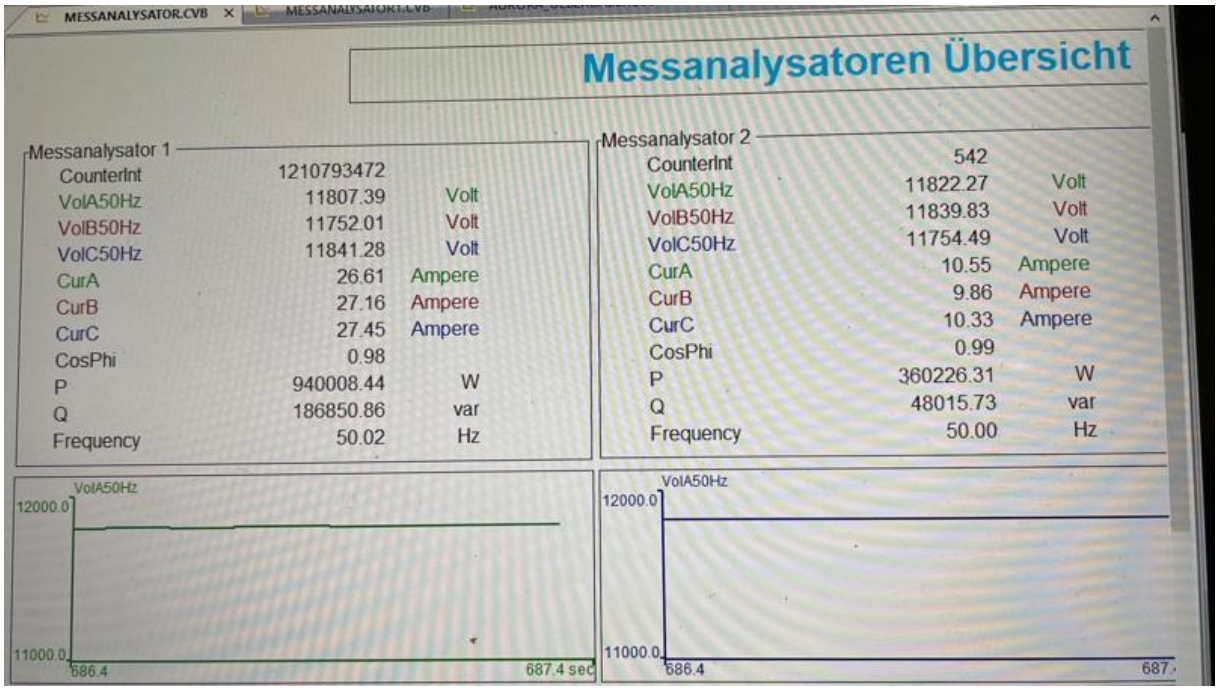

Abbildung 32: Inbetriebnahme und Schnittstellenprüfung im digitalen Zwilling.

Die Durchführung und Auswertung der Feldtests erfolgten federführend von der SWW durchgeführt. Die Ergebnisse sind dem Abschlussbericht des Projektpartners SWW zu entnehmen.

4 Verwertbarkeit des Ergebnisses und Erfahrungen

Durch das Forschungsprojekt CoMap war das Fraunhofer IEE in der Lage, wertvolle Einblicke in die Realisierung von digitalen Zwillingen unter realen Bedingungen zu gewinnen und so den Grundstein für weitere Forschungen auf diesem Gebiet zu legen.

Der entwickelte Messanalysator soll bei weiteren Forschungsprojekten eingesetzt werden, um zum einen ohne Entwicklungsvorlauf schnell Ergebnisse zu erzielen und zum anderen ein geeignetes Messsystem für digitale Zwillinge gewinnbringend in die zukünftige Forschung einzubringen. Weiterhin soll eine Optimierung des Designs vorangetrieben und weitere Messapplikationen ergänzt werden. Das Fraunhofer IEE sieht mittelfristig eine Chance, den Messanalysator über ein Lizensierungsmodell für Unternehmen zugänglich zu machen.

Die erlangten Kenntnisse in der Bearbeitung einer Masterarbeit von einem im Projekt tätigen Studenten fließen aktuell in die Ausarbeitung seiner Dissertation zum Thema digitale Zwillinge ein. Zusätzlich wurden einige der Forschungsergebnisse und Erkenntnisse aus dem Projekt in die Entwicklung eines Hochschulkurses zum Thema „Moderne Entwicklungswerkzeuge" eingebaut, um junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zu qualifizieren.

Die wissenschaftliche Verwertung erfolgte während der Projektlaufzeit durch eine Veröffentlichung im IEEE Open Journal sowie durch zwei Beiträge mit Präsentation und Paper auf international renommierten Konferenzen.

CoMap leistet so einen wichtigen Beitrag für den Forschungsstandort Deutschland.

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

Ein digitaler Zwilling, der in Echtzeit berechnet und mit realen Messgrößen gekoppelt wird, kann einen wesentlichen Beitrag zur Stabilitätsanalyse und Netzregelung leisten. Im Laufe des CoMap Projekts wurden weitere Arbeiten in diese Richtung von anderen Stellen bekannt gegeben. In einer Studie [17] der Universidad de Alcalá (Spanien 2024) untersuchten Forscher die Anwendung von digitalen Zwillingen für die impedanzbasierte online Stabilitätsanalyse in Stromverteilungssystemen.

6 Erfolgte Veröffentlichung des Ergebnisses

Folgende Ergebnisse wurde im Verlauf des Projektes veröffentlicht.

- J. Montoya, C. Bendfeld, J. Steffen, D. Gonschor, D. Naundorf, M. Albrecht, „Co-Map Project: Integration of Grid Analyzers in Digital Twins for Improved Grid Monitoring and Resilience" CIRED Workshop on Resilience of Electric Distribution Systems Chicago, November 7-8, 2024, doi: 10.1049/ICP.2024.2649
- D. Gonschor, J. Steffen, J. A. M. Perez, C. Bendfeld, D. Naundorf, P. Kost, C. Aigner, F. Füllgraf, R. Brandl and M. Jung, "Digital Twin Development of a Testing Grid using a Grid Analyzer" IEEE Open Journal of Power Electronics, doi: 10.1109/OJPEL.2024.3436510.
- D. Gonschor, J. Steffen, J. A. M. Perez and M. Jung, "Software Development of a Grid Analyzer for Digital Twins of Distribution Grids," 2023 8th IEEE Workshop on the Electronic Grid (eGRID), Karlsruhe, Germany, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/eGrid58358.2023.10380921.

Folgende studentische Arbeiten wurden im Verlauf des Projektes angefertigt.

- D. Gonschor; Masterarbeit: Entwicklung der Software eines Messanalysators für digitale Zwillinge von Verteilnetzen
- F. Füllgraf; Bachelorarbeit: Entwicklung, Design und Validierung eines Messsystems für Mittel- und Niederspannungsnetze

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Projektverlauf konnten alle Hauptziele erfolgreich umgesetzt und demonstriert werden:

1. Digitaler Zwilling in Echtzeitbetrieb
   Der entwickelte digitale Zwilling bildet Netzabschnitte wie das SWW-Teilnetz Neusorg und das Labornetz SysTec in Echtzeit ab. Die Netzmodelle wurden vom Fraunhofer IEE in MATLAB Simulink entwickelt. Die Modellierung beider Netze wurde erfolgreich getestet. Das Modell des Netzabschnitts in Neusorg wurde in einen Demonstrator eingebettet und in einem Abschlussmeeting im Einsatz erfolgreich demonstriert.
2. Echtzeitsimulationsplattform

   Auf Basis des Simulationssystems *NovaCarts* der MicroNova wurde eine Echtzeitsimulationsplattform für Verteilnetze entwickelt und anhand des Demonstrators in Neusorg erfolgreich im Einsatz gezeigt.

3. Messanalysatoren und deren Integration

   Fraunhofer IEE entwickelte einen Messanalysator, der speziell für das Zusammenspiel mit einem digitalen Zwilling im Echtzeitbetrieb ausgelegt wurde. Die Schnittstelle zum Messanalysator wurden in die *NovaCarts*-basierte Simulationsplattform integriert und sowohl im Labornetz SysTec des Fraunhofer IEE als auch in Neusorg getestet. Zur Einkopplung der Messwerte in den digitalen Zwilling wurden beim Fraunhofer IEE verschiedene Kopplungsmethoden untersucht und in Bezug auf ihre Eignung bewertet. Es konnte gezeigt werden, dass die Einkopplung realer Messwerte in den digitalen Zwilling die Modellgenauigkeit verbessert. Dies trifft insbesondere bei natürlichen Veränderungen der Randbedingungen zu, wie z.B. von Prognosen abweichende PV-Einstrahlung oder einem abweichenden Lastverhalten.

   Des Weiteren wurden handelsübliche Messsysteme in die *NovaCarts*-basierte Echtzeitsimulationsumgebung eingebunden. Im Netz Neusorg wurde gezeigt, wie über eine Webschnittstelle weitere Messgrößen aus einer Middleware (Aurora) in die Simulationsumgebung integriert werden können.

4. Control Center als WEB-Applikation

   Als Benutzeroberfläche wurde das CoMap Control Center entwickelt. Es besteht aus einem Backend mit Datenbank zur Verwaltung der Metadaten und Messdaten als Zeitreihen. Der Datenaustausch mit der Echtzeitsimulationsplattform erfolgt über dessen REST-API. Über eine Web-Oberfläche wird der Netzabschnitt

mit seinen Messgrößen und Simulationsgrößen übersichtlich dargestellt. Test-Szenarien können definiert und abgearbeitet werden. Des Weiteren werden Grenzwertverletzungen eingeblendet.

Da das CoMap Control Center als reine Web-Anwendung aufgebaut wurde, ist es auch mobil einsetzbar.

5. Feldtest und Proof of Concept
   Im SWW-Netzgebiet Neusorg wurde das System unter realen Bedingungen demonstriert. Messinstrumente und die Aurora-Schnittstelle lieferten Live-Daten. Es wurden Messanalysatoren in der Übergabestation zum Mittelspannungsnetz und in einer weiteren Station installiert und erfolgreich in Betrieb genommen. Die von diesem Messanalysatoren gelieferten Messwerte wurden in den digitalen Zwilling eingekoppelt.
   Über das CoMap Control Center wurden Testszenarien wie Kurzschluss und Lastabwurf im Echtzeitmodell ausgelöst. Die daraus resultierenden Netzreaktionen wurden auf der Bedienoberfläche gezeigt und zur weiteren Beurteilung aufgezeichnet.

Ausblick:

Die hohe Komplexität heutiger Energieverteilnetze mit einem hohen Anteil an dezentralen Energieerzeugern und steigenden Anteilen von Leistungselektronik sowohl auf der Erzeugerseite als auch auf der Lastseite macht die Netzführung und Vorhersage zunehmend schwieriger. Herkömmliche Simulationen stoßen hier an ihre Grenzen, um komplexe Netzereignisse zu bewerten. Es wird notwendig sein, Netze mit hoher Durchdringung von intelligenter Messtechnik mit integrierten Analysefunktionen auszustatten. Im Zusammenspiel zwischen Messanalysatoren und digitalen Zwillingen liegt ein großes Potenzial für die Netzbetriebsoptimierung und der Vermeidung von Störfällen. Typische Betriebsfälle wie PV-Überlast und Lastverschiebungen lassen sich realitätsnah in Echtzeit darstellen. Ein digitaler Echtzeitzwilling für eine kontinuierliche Netzsimulation wird somit ein wichtiges Werkzeug für die weitere Umgestaltung der Energienetze sein.

Aus dem Verbundvorhaben CoMap ergeben sich folgende neue und ergänzende Forschungsfragen:

- Ausweitung der Netzgröße und automatische Integration von Prognosen für das Lastverhalten und Einspeisung von erneuerbaren Energien.
- Einbindung von (KI)-Agenten, die auf Grundlage des aktuellen Netzzustandes Erzeuger und Verbraucher ansteuern, um optimierte Energiebilanzen zu erreichen.
- Eingehende Analyse von weiteren Kopplungsmethoden zur optimalen Einbindung der Messglieder in den digitalen Zwilling.

- Weitere Verwendung des Messanalysator in den Themengebieten Stromrichter, Elektrolyse und erneuerbarer Energien

8 References

[1] D. Gonschor *et al.,* "Digital Twin Development of a Testing Grid Using a Grid Analyzer," *IEEE Open J. Power Electron.*, vol. 5, pp. 1197–1208, 2024, doi: 10.1109/OJPEL.2024.3436510.

[2] J. A. Montoya Perez, C. Bendfeld, J. Steffen, D. Gonschor, D. Naundorf, and M. Albrecht, "CoMap project: integration of grid analyzers in digital twins for improved grid monitoring and resilience," *IET Conf. Proc.*, vol. 2024, no. 27, pp. 418–422, 2025, doi: 10.1049/icp.2024.2649.

[3] R. Brandl, *Entwicklung einer Power Hardware-in-the-Loop-fähigen Echtzeit-Validierungsumgebung zur Stabilitätsuntersuchung von elektrischen Netzen*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2018.

[4] A. Eberle GmbH & Co. KG, *Power Quality Interface für Nieder- und Mittelspannungsnetze – PQI-DA smart: Datenblatt.* [Online]. Available: https://www.a-eberle.de/wp-content/uploads/2022/07/TD_PQI-DAsmart_DE.pdf (accessed: Nov. 2 2025).

[5] Janitza electronics GmbH, *FUNKTIONEN UND FEATURES DES UMG 604-PRO: Netzanalysator.* [Online]. Available: https://www.janitza.de/produkte/netzanalysator-umg-604-pro-merkmale.html (accessed: Nov. 2 2025).

[6] Dewesoft d.o.o., *POWER ANALYZER: SMALLEST HIGH-PRECISION POWER ANALYZER.* [Online]. Available: https://dewesoft.com/applications/electrical-power-analysis (accessed: Nov. 2 2025).

[7] Yokogawa Electric Corporation, *WT5000 Precision Power Analyzer.* [Online]. Available: https://tmi.yokogawa.com/solutions/products/power-analyzers/wt5000/ (accessed: Nov. 2 2025).

[8] HBM - an HBK company, *Eingangskarte für hochgenaue Leistungsmes sungen in Elektroantrieben und Stromnetzen: GN 10B, GN 11B.* [Online]. Available: https://www.hbm.com/de/9261/leistungsanalysator-karte-gn310b-gn311b/ (accessed: Nov. 2 2025).

[9] R. N. Gore, S. Sawai, and H. Kour, "Grid on Tab: IoT based Quick, Mobile and Smart Grid Analyzer," in *2019 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, Vellore, India, 2019, pp. 1–6.

[10] MBS AG, "Frequenzoptimierte Mittelspannungs-Strom- und Spannungswandler bis 36 kV," Accessed: Nov. 2 2025. [Online]. Available: https://mbs-ag.com/produktkategorie/stromwandler-spannungswandler-fuer-mittelspannung/

[11] W. Babel, "IoT, Ethernet TCP/IP, OPC UA und Cloud Computing," in *essentials, Internet of Things und Industrie 4.0*, W. Babel, Ed., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2023, pp. 37–45.

[12] M. Leischner, *Modul : UDP und TCP.* [Online]. Available: https://netlab.inf.hochschule-bonn-rhein-sieg.de/images/Lehre/Netze/Netze08-UDP-TCP.pdf (accessed: Apr. 13 2023).

[13] Davor Antonic, "Ethernet Communication in Microcontroller Systems," 2017.

[14] Siemens, *PROFINET – Echtzeit-Kommunikation im Feld.* [Online]. Available: https://www.siemens.com/de/de/produkte/automatisierung/industrielle-kommunikation/profinet.html (accessed: Nov. 3 2025).

[15] EtherCAT Technology Group, *EtherCAT: The Ethernet Fieldbus.* [Online]. Available: https://www.ethercat.org/default.htm (accessed: Nov. 3 2025).

[16] dnp, *Overview Of DNP Protocol.* [Online]. Available: https://www.dnp.org/About/Overview-of-DNP3-Protocol (accessed: Nov. 3 2025).

[17] S. de Lopez Diz, R. M. Lopez, F. J. Rodriguez Sanchez, and E. J. Bueno Peña, "A Digital Twin Approach for Online Impedance-Based Stability Analysis of Three-Phase AC Systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 71, no. 12, pp. 16845–16856, 2024, doi: 10.1109/TIE.2024.3395755.