

POWER SYSTEM SIMULATOR – EIN DYNAMISCHES SIMULATIONSSYSTEM FÜR DIE HERAUSFORDERUNGEN DER ZUKÜNFTIGEN NETZBETRIEBSFÜHRUNG

Nico BROSE¹, Harald SCHWARZ², Przemyslaw JANIK³, Benjamin BUCKOW⁴

- (1) BTU Cottbus-Senftenberg – Lehrstuhl Energieverteilung und Hochspannungstechnik, Siemens-Halske-Ring 13, 03046 Cottbus, Deutschland, +49 (0) 355 69 26 66, nico.brose@b-tu.de
- (2) BTU Cottbus-Senftenberg – Lehrstuhl Energieverteilung und Hochspannungstechnik, Siemens-Halske-Ring 13, 03046 Cottbus, Deutschland, +49 (0) 355 69 45 02, harald.schwarz@b-tu.de
- (3) Wrocław University of Science and Technology - Department of Electrical Engineering Fundamentals, Faculty of Electrical Engineering, 50-370 Wrocław, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, Poland, przemyslaw.janik@pwr.wroc.pl
- (4) Lausitz Energie Kraftwerke AG (LEAG) – Technisches Kraftwerksmanagement, Vom-Stein-Straße 39, 03050 Cottbus, Deutschland, +49 (0) 355 28873227, benjamin.buckow@leag.de

Kurzfassung: In diesem Beitrag wird ein Trainingssimulationssystem für die Netzbetriebsführung vorgestellt. Das System ist vorrangig für die Simulation des Netzbetriebes im Übertragungs- und Verteilungsnetz entwickelt worden.

In diesem Beitrag wird das Konzept des Systems, das Zusammenspiel zwischen Simulationskern und Visualisierungsoberfläche (Leitsystem) sowie der Einsatzmöglichkeiten des Simulators beschrieben.

Keywords: Netzsimulator, Netzbetriebsführung, Trainingssystem

1 Einleitung

Das elektrische Energiesystem in Europa, speziell in Deutschland, befindet sich seit circa 25 Jahren im Wandel. Das über mehrere Jahrzehnte historisch gewachsene, mit konventionellen Kraftwerken betriebene Versorgungssystem entwickelt sich zu einer liberalisierten Energieversorgung auf Basis von erneuerbaren Energieträgern.

Treibende Kraft hinter dieser Veränderung sind unter anderem technologische Weiterentwicklungen in der Nutzbarmachung von erneuerbaren Energieträgern, sich ändernde politische Rahmenbedingungen und ein gestiegenes Umwelt- und Nachhaltigkeitsbewusstsein innerhalb der Gesellschaft [1, S. 5].

Dies führt zu einer grundlegenden Neustrukturierung der Elektrizitätswirtschaft und ist gekennzeichnet durch eine sukzessive Zunahme des Stromhandels, steigendem Leistungsaustausch mit den benachbarten Stromnetzen sowie einen massiven Ausbau der Windenergie und der Solarenergie in Europa. Weiterhin ist die Neustrukturierung

charakterisiert durch eine stetig zunehmende Integration von Energiespeichern und einer im Aufbau befindlichen Ladeinfrastruktur für die Elektroautomobile. Für Deutschland ist besonders zu berücksichtigen, dass die Kern- und Kohlekraftwerkskapazitäten geplant bis 2022 und 2038 stillgelegt werden sollen [2, § 7(1a); 3, § 13(g); 4, § 2(2)].

Diese technischen sowie wirtschaftlich gestiegenen Herausforderungen und die neuen Anforderungen aus den regulatorischen Rahmenbedingungen müssen auch vom Netzbetriebspersonal umgesetzt werden. Die Übertragungsnetzbetreiber haben hierzu für die Schulung und das Training von Netzbetriebsführern gemeinsame Richtlinien durch die Union für die Koordinierung des Transports von Elektrizität (UCTE) im "Operational Handbook - Policy 8: Operational Training" festgelegt [5]. Der Status der Umsetzung wird regelmäßig durch den Verband Europäischer Übertragungsnetzbetreiber für Elektrizität (ENTSO-E) geprüft, z. B. im "RG CE Compliance Oversight Report 2009" [6] und "RG CE Compliance Oversight Report 2014" [7].

In diesem Zusammenhang ist der jeweilige Netzbetreiber dazu angehalten, gemäß der EU-Verordnung 2017/1485 Artikel 58 seine Mitarbeiter ausreichend auszubilden und zu trainieren [8, Art. 58]. Dies umfasst gemäß EU-Verordnung 2017/1485 Artikel 59 neben einem praktischen Training am Arbeitsplatz ein simulatorgestütztes Training [8, Art. 59], welches das Umfeld und die Funktionalitäten einer Leitwartenumgebung im Echtzeitbetrieb nachempfinden sowie eine ausreichend detaillierte Netzmodellierung umfassen soll.

Die hinreichende, den Anforderungen gerechte Schulung und das Training des Betriebspersonals sollte daher auch die aktuellen und zukünftigen Gegebenheiten in der Simulation des Netzbetriebes widerspiegeln. Dies beinhaltet Forschungstätigkeiten in dem Bereich besserer Funktionalitäten, Modelle und didaktischer Methoden zur angemessenen Schulung in der Netzbetriebsführung. Es muss daher für das simulatorgestützte Training eine Leitwartenumgebung aufgebaut werden, welche die vorgenannten Aspekte abdeckt.

Zusammenfassend beschreibt dieser Beitrag die Entwicklung und den Aufbau eines modernen Trainingssimulators, an dem Netzbetriebsführer und Studenten auf der Grundlage realistischer Szenarien für die Netzbetriebsführung wirksam ausgebildet werden können.

2 Konzept des Trainingssystems

Das in diesem Papier dargestellte Trainingssystem ist für die realistische Darstellung der komplexen Zusammenhänge zwischen Erzeugung, Übertragung und Verbrauch in elektrischen Energieversorgungssystemen konzipiert. Für die Netzleittechnik wird die Software PRINS verwendet, die über einen Fernwirkserver mit dem RMS-Echtzeit-Simulationskern (mit der Software PowerFactory) für dynamische Netzsimulationen gekoppelt ist. Der Simulationskern übernimmt die Berechnung der dynamischen Netzprozesse einschließlich der regelungstechnischen Prozesse in Echtzeit.

2.1 Umgebungsaufbau und Konfiguration des Trainingssystems

Das Konzept und die Konfiguration des Trainingssimulators orientiert sich an der Organisationsstruktur einer Energieversorgung mit mehreren Netzbetreibern und umfasst neun Kontrollstationen, an denen die Trainingsteilnehmer gleichzeitig ausgebildet werden können.

Die räumliche Aufteilung der Leitstände ist in der Abbildung 1 grün dargestellt. Die Trainingsleitstände werden als Netzleitstellen (Netz- oder Kraftwerksbetreiber) betrachtet und simulieren die gewohnte Systemumgebung mit ihren Betriebsfunktionen. In dieser Konfiguration hat jeder Trainingsteilnehmer einen Überblick über seinen Netzbereich und kann nur seinen Bereich durch seine Schaltbefehle und Bedienhandlungen steuern. Darüber hinaus interagieren die Trainingsteilnehmer über das Kommunikationssystem zwischen den Leitzentralen miteinander. Zwei Trainer überwachen die Interaktionen, ermöglichen den Zugriff auf spezielle Funktionen (z. B. das gesamte Netzmodell) und steuern die Trainingssitzungen. Die Trainer-Arbeitsplätze sind in der Abbildung 1 rot markiert [9, S. 61].

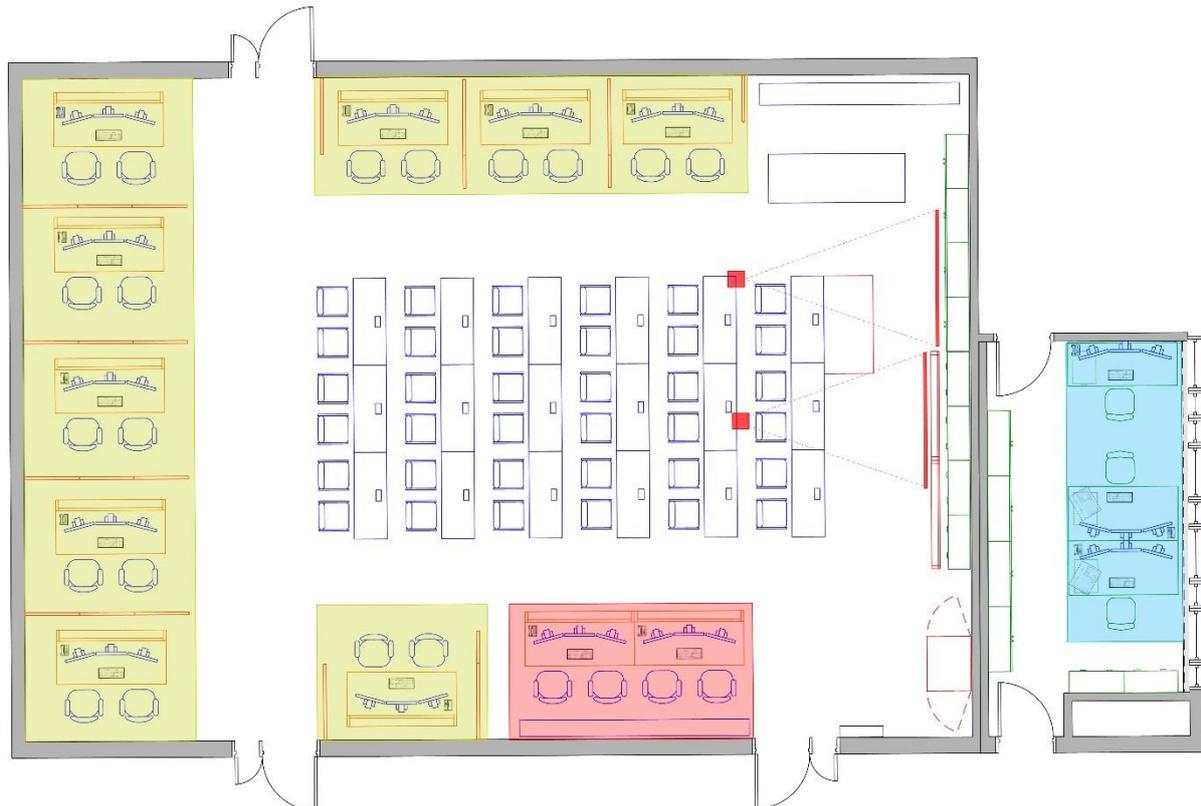


Abbildung 1: Räumliche Aufteilung der Leitstände [9, S. 61]

Die Administratorarbeitsplätze, in der Abbildung 1 blau markiert, befinden sich in einem separaten Raum. Diese Stationen werden für die Projektplanung, die Entwicklung des Systems, die Untersuchung neuer Funktionen, die Überprüfung neuer Trainingsszenarien und deren Integration in das Simulationssystem genutzt [9, S. 61].

Vervollständigt wird der Umgebungsaufbau durch die in der Mitte des Raumes befindlichen weiteren 36 Arbeitsplätze, die für Vor- und Nachbereitung der Szenarien sowie die Evaluation der Trainingssitzungen genutzt werden [9, S. 61].

2.2 Systemtechnik

Die Systemarchitektur des Trainingssimulators, die den Aufbau eines realen Netzleitsystems schematisch wiedergibt, ist in Abbildung 2 dargestellt. Mehrere Human-Machine-Interface (HMI)-Arbeitsstationen mit sechs Großbildvisualisierungen, Datenbank- und Datenserver,

Fernwirkserver und Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)-Server sind an ein Hochleistungsnetzwerk (Gigabit-Netzwerk) angeschlossen und durch eine Firewall von der Außenwelt abgeschirmt. Aufgrund der geringeren Sicherheitsanforderungen im Vergleich zu einem realen Netzleitsystem erfordert das Trainingssystem keine redundanten Strukturen für Netzwerke, Fernwirkarchitekturen, Funktions- oder SCADA-Server. Allerdings benötigt das Netzleitsystem eine externe Hardwareverbindung als Wartungszugang [9, S. 63].

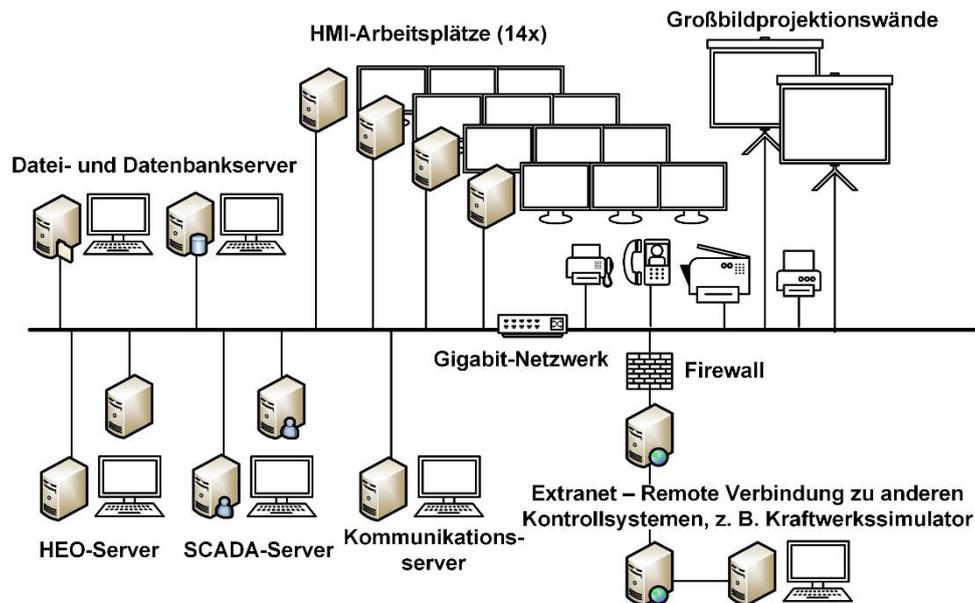


Abbildung 2: Aufbau der Systemtechnik [9, S. 62]

Darüber hinaus kann die Remote-Verbindung auch zur Integration anderer Systeme (für Forschungs- und Entwicklungszwecke oder reale Tests) über den vorhandenen Fernwirkserver oder die Open Platform Communications (OPC)-Schnittstelle genutzt werden. So können z. B. Verbindungen zu anderen Trainingssimulatoren (z. B. einem Kraftwerkssimulator) hergestellt werden [9, S. 63].

2.3 Zusammenspiel der Systemkomponenten

Die Interaktion zwischen dem Netzleitsystem und dem Rechenkern wird nachfolgend beschrieben und in Abbildung 3 schematisch dargestellt. In der dargestellten Struktur ist vorgesehen, dass die Systemsteuerung und das Datenmanagement vollständig im Netzleitsystem (Software PRINS) erfolgen. Die in der Leittechnik erstellten Netzmodelle und Anlagen werden zu Beginn der Simulation durch Initialisierung der Modelle an PowerFactory übertragen. Gleichzeitig wird die OPC-Schnittstelle für den Datenaustausch zwischen PRINS und PowerFactory mit allen Prozessvariablen gefüllt [9, S. 63].

Die in Abbildung 3 blau eingefärbten Komponenten zeigen das Netzleitsystem. Das System besteht aus den Hauptkomponenten, wie den Dialogrechnern, dem Online-Rechner und dem Fernwirksystem. Der Online-Rechner enthält die aktuellen Visualisierungen und Prozessabbilder (Netzmodelle), die an die jeweiligen Dialogrechner gesendet werden. Darüber hinaus verarbeitet der Online-Rechner eingehende Daten von den Rechenkernen und dem

Fernwirkserver und ordnet diese den jeweiligen Datenpunkten und Prozessvariablen im Datenmodell zu. Anschließend werden die Daten zusammengeführt und sofort an alle Dialogrechner gesendet und von diesen visualisiert. Die Dialogrechner erhalten vom Online-Rechner kontinuierlich aktuelle Datenmodelle, Schalterstellungen und Prozessvariablen. Die Dialogrechner übernehmen damit die eigentliche Betriebsführung und Prozessvisualisierung [9, S. 63].

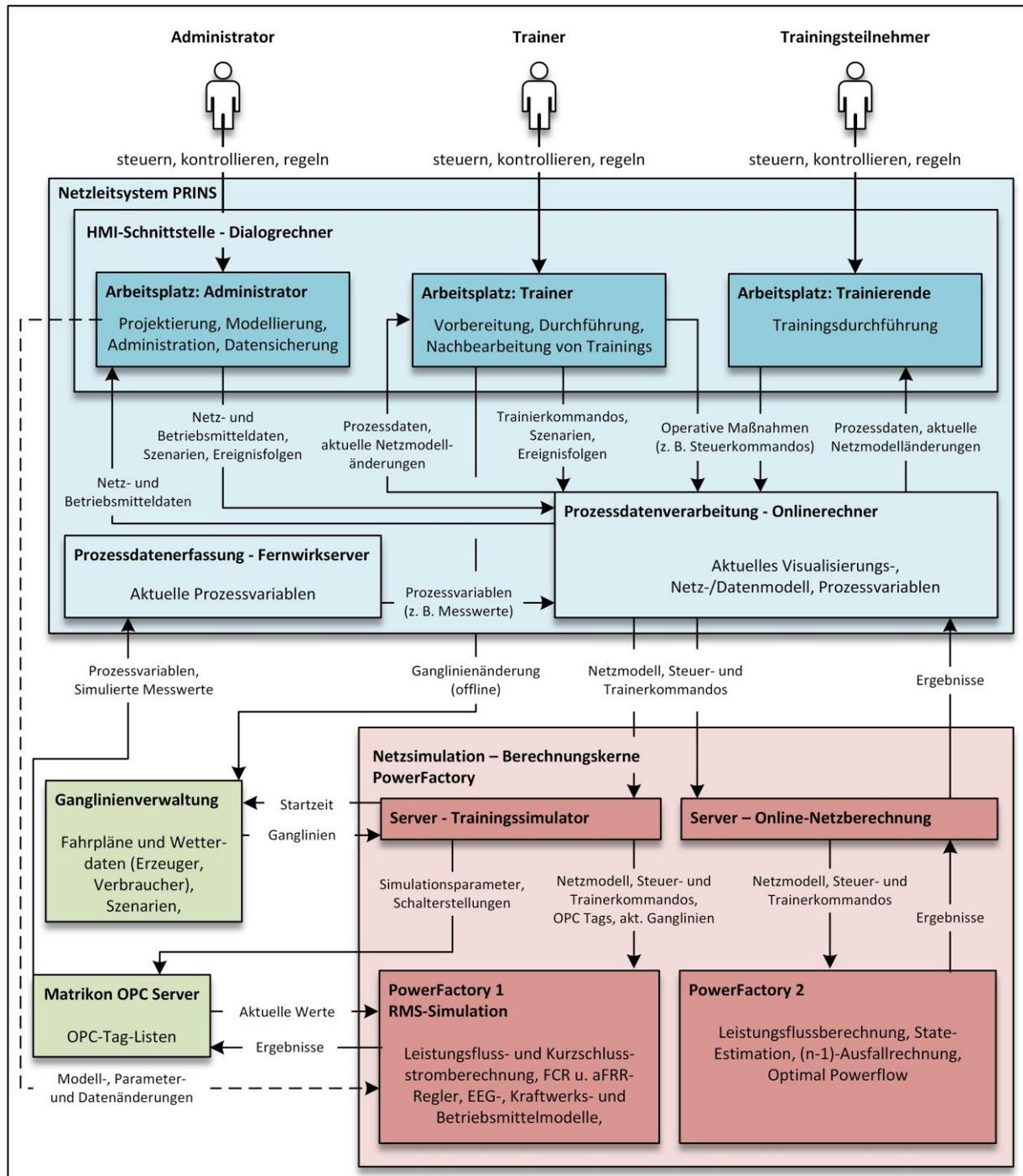


Abbildung 3: Zusammenspiel der Netzeleittechnik und der Simulationskerne [9, S. 64]

Im System sind zwei Onlinerechner mit jeweils unterschiedlichen Netzmodellen aufgebaut. Lediglich einer der beiden Onlinerechner ist für die Simulation jeweils aktiv geschaltet, während an dem anderen weiterprojektiert und -gearbeitet werden kann. Je nach Konfiguration des Benutzerzugangs können verschiedene Funktionen, z. B. Ausgabe von Steuerbefehlen, Konfiguration von Modellen, Erstellung von Szenarien oder der Import von Common Information Model (CIM)-Datensätzen, ausgeführt werden. Die Eingaben und der Status werden wiederum über die Prozessdatenverarbeitung des Onlinerechners an die Berechnungskerne geschickt [9, S. 63].

Die in Abbildung 3 rot dargestellten Simulationskerne bestehen aus vier Teilkomponenten des Netzberechnungsprogramms (Software PowerFactory). Die ersten beiden Komponenten sind die Server für den Trainingssimulator und der Online-Netzberechnung. Diese Server enthalten CIM-Konverter, DGS (DIGSILENT bidirektionale Standardschnittstelle von PowerFactory) und OPC-Schnittstellen zum Import und Export von Datensätzen. Übertragene Daten von Online-Rechnern werden von diesen Servern konvertiert und den jeweiligen Berechnungen in PowerFactory zugeordnet. In der dargestellten Systemarchitektur wird der Online-Netzberechnungsserver durch eine PowerFactory-Simulation zur Berechnung höherer Entscheidungs- und Optimierungsfunktionalitäten (HEO) verstärkt, die für Zustandsabschätzungen und die (n-1)-Ausfallrechnung verwendet werden. Die Simulationsergebnisse werden dann über einen Online-Netzberechnungsserver zurück auf den Onlinerechner übertragen. Der Server-Trainingssimulator bekommt neben den Daten vom Onlinerechner noch die zum Netzmodell und die vom Trainer zum jeweilig vorausgewählten Szenario passenden Ganglinien (Fahrpläne, Wetterdaten etc.) vom externen Ganglinienverwaltungsprogramm, in der Abbildung 3 grün markiert [9, S. 65].

Das Programm zur Verwaltung von Ganglinien enthält verschiedene Szenarien mit Ganglinien aller Erzeuger und Verbraucher. Auf der Grundlage dieser Datensätze sendet der Trainingssimulator-Server Netzmodelle, Trainerbefehle, OPC-Tags und Ganglinien für die RMS-Simulationen im PowerFactory 1 Kern sowie Simulationsparameter und Schaltbefehle an den externen OPC-Server (in Abbildung 3 grün dargestellt). Der OPC-Server enthält die OPC-Tag-Listen von Prozessvariablen aus der RMS-Simulation, die den Fernwirkadressen des Netzleitsystems zugeordnet sind. Die RMS-Simulationen aus dem PowerFactory 1 Kern stellen die kontinuierlichen Netzberechnungen des Trainingssimulationssystems dar [9, S. 65].

Die Ergebnisse der Simulationen werden an die OPC-Schnittstelle gesendet, an den Fernwirkserver und damit über Fernwirkadressen an den Online-Rechner weitergeleitet. Der Einsatz von Fernwirkservern und OPC-Schnittstellen ermöglicht auch die Integration weiterer externer Simulationen oder Geräte in das Trainingssystem.

3 Berechnungsmodule

Zusätzlich zu den Standardfunktionalitäten der Netzleittechnik (SCADA und HEO) wurden weitere Funktionen und Module entwickelt, angepasst und aufgebaut:

- Kraftwerksmodelle (Thermische Kraftwerke, Gaskraftwerke, GuD-Anlagen, Laufwasser- und Pumpspeicherkraftwerke)

- Verschiedene EEG-Modelle auch basierend auf meteorologischen Daten (Wind, Photovoltaik, Biomasse, Speicher)
- Dynamische Verbraucher (Lasten, aggregierte Lasten und Ladeinfrastruktur für Elektromobilität sowie Power-to-X-Technologien)
- Umfassende Randnetzgestaltung
- Frequenzabhängiger Lastabwurf
- Kompensationsanlagen (Drossel- und Kondensatorbänke)
- Ganglinienverwaltungen (z. B. sonnig/windig, Sommer/Werktag)
- Auswertungs- und Analysefunktionen speziell für Schulungen und Trainingssitzungen
- Regelleistungserbringung (FCR, aFRR und mFRR) sowie Einspeisemanagement
- Transformatoren (Zweiwickler, Dreiwickler, in Längs-, Quer- und Schrägregelung mit der Möglichkeit der automatischen Trafostufung)
- Parallelschaltgeräte

Nachfolgend werden hier ausschließlich die Berechnungsmodule kurz beschrieben.

3.1 PowerFactory 1 – RMS-Simulation

Der RMS-Echtzeit-Simulationskern bildet die physikalischen Zusammenhänge des elektrischen Netzes und seiner Bestandteile nach. Dabei wird das dynamische Verhalten von elektromechanischen Betriebsmitteln, Regel- sowie thermischen Einheiten berücksichtigt. Somit sind Simulationen des stationären bzw. dynamischen Netzverhaltens möglich.

Die Berechnung startet mit einer klassischen Lastflussberechnung inkl. vorhandenen Slack-Knoten zur Initialisierung des Systems. Darauf basierend erfolgen die Lastflussberechnungen entlang der Lösungstrajektorien der Zustandsdifferentialgleichungen, die durch die Lastflüsse selbst wieder beeinflusst werden. Daher gibt es im weiteren Verlauf keine(n) Slack-Knoten, da sich die Leistungsflüsse auf Basis der Netzimpedanzen, der generator-elektromagnetischen Felder der Kraftwerksgeneratoren, der eingespeisten Ströme aus Photovoltaik- und Wind-Generatoren sowie der Lastcharakteristiken durch die Kirchhoffschen Regeln ergeben. Die Simulation ist somit 2-fach iterativ mit einer Berechnungsschrittweite von 100-200 ms.

Die hinreichend genaue Modellgültigkeit in der Simulation ist für eine Netzfrequenz von 45-55 Hertz ausgelegt. Dies widerspiegelt den hauptsächlichlichen Bereich in der sich die Netzbetriebsführung abspielt.

Eine **Kurzschlussstromberechnung** kann jederzeit auf der RMS-Simulation aufsetzen. Dabei basiert sie auf einem Snapshot der Simulationsengine zu einem jeweiligen Zeitpunkt. Die Berechnung erfolgt über eine standardisierte Implementierung von PowerFactory und wurde für den Trainingssimulator nicht weiter angepasst.

Die resultierende Kalkulation der Kurzschlussströme kann entweder nach Normen (IEC/DIN) oder nach der „vollständigen Berechnungsmethode“ (ermittelt die Betriebsströme auf Basis der Vorbelastungen und ohne Berücksichtigung von Vereinfachungen) inklusive Berücksichtigung der dynamischen Spannungsstützung durch Einspeiser mit Stromrichtern erfolgen. Es werden hierbei sämtliche Größen nach IEC/DIN Norm, insbesondere die Ausschaltströme, ermittelt. Für die stromgeregelten Einspeiser, z. B. Windenergie- oder PV-

Anlagen, werden iterative Verfahren zur Berechnung des Kurzschlussstrombetrages verwendet.

Über die PowerFactory eigenen Auswertungsfunktionen können Mehrfachfehleranalysen für jede Fehlerart, Fehler zwischen Stromkreisen, individualisierbare Kurzschlussdurchlaufdiagramme, etc. durchgeführt werden. Die Ergebnisse können über die im Programm vorhandenen Schnittstellen exportiert und separat visualisiert werden.

3.2 PowerFactory 2 – HEO-Funktionalitäten

Wie der erste, bekommt der zweite Berechnungskern das gleiche Datenmodell vom Onlinerechner übertragen. Ebenso erhält dieser dieselben Schalterstellungsänderungen, Steuer- und Trainerkommandos sowie Ausgangsdaten (Zeitschritte, Anfangsschalterstellung usw.). Auf Basis dieses Datensatzes führt der zweite Rechenkern von PowerFactory kontinuierlich eine vereinfachte symmetrische Leistungsflussberechnung aus und spielt die Ergebnisse wieder zurück an den Onlinerechner.

Auf Basis dieser Daten erfolgt in der Netzleittechnik PRINS die auslastungsgradabhängige Einfärbung und Warnung vor Grenzwertverletzungen bei Betriebsmitteln.

Weiterhin erfolgt hierüber die Berechnung einer kontinuierlichen State Estimation, welche die Werte an die Visualisierungsumgebung PRINS zurückspielt. Somit können aktuell durch die Trainingsteilnehmer in der Betriebsführungsansicht die sogenannten Prozesswerte aus dem Netz des ersten Berechnungskerns validiert werden.

Als Netzsicherheitsrechnung wird die (n-1)-Ausfallrechnung umgesetzt. Diese wird ebenfalls kontinuierlich durchgeführt mit einer vom Betriebsführer voreingestellten statischen Liste von Betriebsmitteln. Darüber hinaus wird auf Basis eines Rankings des Auslastungsgrades von Betriebsmitteln eine dynamische (n-1)-Ausfallrechnung durchgeführt.

4 Netzmodelle und Szenarien

Das System ermöglicht die Darstellung verschiedener Aspekte der Netzbetriebsführung. Diese lassen sich in zwei Gruppen unterteilen: Zum einen einfache Schalthandlungen und Änderungen von Netzsituationen, bei denen die Auswirkungen von einzelnen Fahrplan- und Netzabbildänderungen auf die Lastflüsse im betrachteten Netz, sowie die Prozessreaktion der Erzeugungs- und Verbraucheranlagen im Vordergrund stehen. Auf der anderen Seite werden komplexe Szenarien, bei denen verschiedene Akteure des Energieversorgungssystems im Rahmen eines Planspiels mit realen historischen oder zukünftigen Netzparametern den Netzbetrieb simulieren, durchgeführt. Zu diesen komplexen Szenarien zählen insbesondere folgende Netzzustände [8, Art. 3(2)]:

Normalzustand: bei einer N-Situation (alle Netzbetriebsmittel sind verfügbar) oder nach einem auf der Ausfallvarianten-Liste verzeichneten Ausfall werden alle betrieblichen Sicherheitsgrenzwerte des Netzes eingehalten, wobei die Auswirkungen der zur Verfügung stehenden Entlastungsmaßnahmen zu berücksichtigen sind.

Gefährdeter Zustand: die betrieblichen Sicherheitsgrenzwerte des Netzes werden eingehalten, aber ein Ausfall auf der Ausfallvarianten-Liste wurde festgestellt, bei dessen

Eintreten die verfügbaren Entlastungsmaßnahmen nicht ausreichen, um den Normalzustand aufrechtzuerhalten.

Notzustand: einer oder mehrere betriebliche Sicherheitsgrenzwerte sind überschritten.

Netzwiederaufbauzustand: das Ziel sämtlicher Tätigkeiten im Übertragungsnetz besteht darin, die Betriebssicherheit nach einem Blackout- oder Notzustand wiederherzustellen.

Dabei wird deutlich, dass je nach Trainingsschwerpunkt unterschiedliche Anforderungen an das Netzmodell gestellt werden müssen. Für die Darstellung der Auswirkungen von einzelnen, einfachen Schalthandlungen muss das Netzmodell sensitiv auf diese reagieren können. Weiterhin muss es übersichtlich und mit konstanten Ganglinien für die Einspeiser und Verbrauchern arbeiten, um eine Änderung des Systemverhaltens auf die jeweilige einzelne Schalthandlung zurückführen zu können. Dementsprechend wurde ein einfaches Netzmodell aus elf Umspannwerken in der Regelzone sowie zwei Umspannwerken im Randnetz aufgebaut. Alle verschiedenen Kraftwerkstypen und Erneuerbare Energieanlagen sind implementiert: Braunkohle-, Steinkohle-, Gasturbinen-, Laufwasser-, Pumpspeicherkraftwerk, einzelne und mehrere Windenergie-, Photovoltaik-, Biomasseverstromungs- und Speichersystem oder -anlagen. Sämtliche Transformatorarten, wie Zwei- oder Dreiwickler in Längs-, Quer oder Schrägregelung mit manueller oder automatischer Transformatorstufung, sind implementiert. Darüber hinaus enthält das Netz verschiedene Spannungsebenen, Leitungsvarianten, Sammelschienenkonstellationen, Blindleistungskompensationsanlagen (Drossel- und Kondensatorbänke) sowie mehrere Verbraucher inkl. Beteiligung am frequenzabhängigen Lastabwurf. Die verwendeten Daten sind real existierenden Kraftwerken und Betriebsmitteln nachempfunden und stellen ein realistisches Abbild der tatsächlichen Stromversorgung dar.

Die komplexen Szenarien hingegen erfordern ein detailliertes Netzabbild mit realitätsnahen Ganglinien, welches auch bei vielen parallelen Schalthandlungen eine stabile Simulation ermöglicht. Dies wurde durch die Modellierung des ostdeutschen Übertragungsnetzes mit unterlagertem Verteilnetz von Berlin realisiert. Das Netzmodell besteht auf der Übertragungsebene aus 71 Umspannwerken mit 235 Transformatoren und etwa 6.100 Schaltelementen sowie rund 6.600 Messwerten. Die Gesamtleitungslänge beträgt rund 9.400 km. Im Verteilnetz der Stadt Berlin sind 99 Umspannwerke implementiert mit 332 Transformatoren und rund 7.000 Schaltelementen sowie etwa 6.500 Messwerten.

In Summe enthält das Netzmodell 324 generatorische Einheiten, bestehend aus Braunkohle-, Steinkohle-, Gasturbinen-, Pumpspeicherkraftwerksblöcken sowie einzelnen Einheiten und Sammeleinspeisungen von Windenergie-, Photovoltaik-, Biomasseverstromungs- und allgemein Speicheranlagen. Weiterhin sind in dem Netz rund 1.000 Einzel- oder Summenverbraucher vorhanden. Abbildung 4 stellt schematisch die Netzmodelle mit der Zuordnung der jeweiligen Szenarien dar.

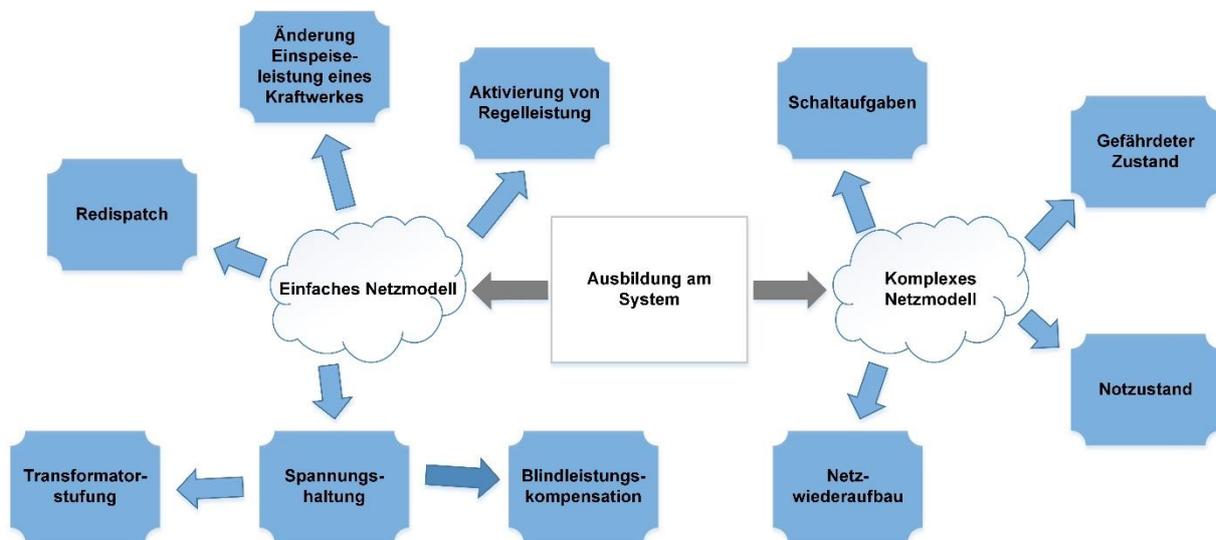


Abbildung 4: Netzmodelle und deren optimiertes Einsatzgebiet [10, S. 83]

5 Trainingsmöglichkeiten und Einsatz des Systems

Das Simulationssystem mit den implementierten Netzmodellen und erstellten Szenarien eignet sich insbesondere für die Qualifizierung von Netzbetriebsführer sowie für ein kontinuierliches Training von Netzbetriebsführern. Vor diesem Hintergrund wurde bereits eine neue Vorlesungsreihe für Studenten unter Einbeziehung des Simulationssystems erarbeitet. Weiterhin besteht ein Konzept, um sowohl in Ausbildung zum Netzbetriebsführer befindliches Personal zusammen mit Studenten und ausgebildeten Netzbetriebsführern zu trainieren. Folgende Trainingsinhalte sind hierbei möglich:

- Grundlagen der Netz- und Systemführung und des Kraftwerksbetriebs
- Wechselwirkung verschiedener konventioneller Kraftwerke mit allen Arten von Anlagen der erneuerbaren Energien
- Netzbetriebsführung des ostdeutschen Stromnetzes in allen Betriebszuständen
- Training von ReDispatch-Maßnahmen in verschiedenen Netzsituationen (z.B. normale oder gestörte Betriebsbedingungen) und die Wiedergabe der Netzreaktionen auf FCR-, aFRR-, mFRR-Aufrufe
- Training von aktuellen und zukünftigen kritischen Netzsituationen
- Zusammenbruch und Synchronisation mehrerer Netzeinseln, Schwarzstart und Netzrekonstruktion

Neben diesen bereits existierenden Konzepten, besteht eine Vielzahl an weiteren Einsatzgebieten in der Forschung und Lehre. In Abbildung 5 ist dieses Potential dargestellt.

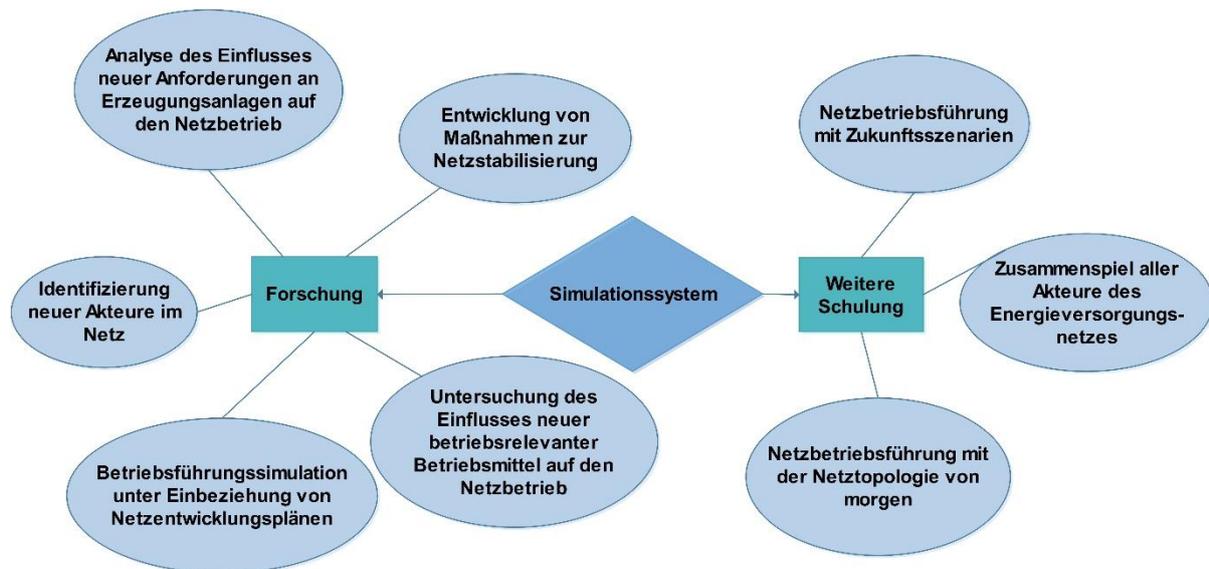


Abbildung 5: Einsatzmöglichkeiten des Simulationssystems für Forschung und Lehre [10, S. 110]

Darüber hinaus eignet sich das Simulationssystem durch die Nutzung einer realen Leittechnik mit der Möglichkeit der eigenständigen Gestaltung von Übersichtsbildern und Netzzuständen für die Öffentlichkeitsarbeit, um auch nichtkundigen Personen die Komplexität des Energieversorgungsnetzes mit den stetig steigenden Herausforderungen, vor allem im Hinblick auf den Atom- sowie Braunkohleausstieg, zu verdeutlichen. Die Abbildung 6 zeigt mögliche Zielgruppen und Seminare im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit.

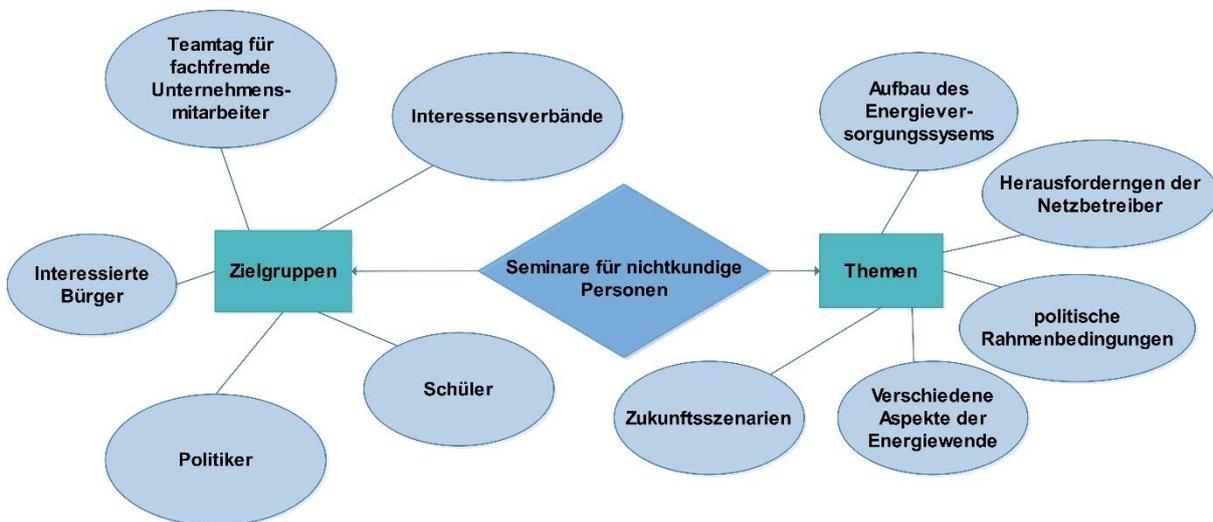


Abbildung 6: Einsatzmöglichkeiten des Simulationssystems für die Öffentlichkeitsarbeit [10, S. 115]

6 Zusammenfassung

Das Trainingssystem kann auf Basis der entwickelten Betriebsmittel- und Netzmodelle die dynamischen Vorgänge für den Netz-Normalbetrieb, wie auch für die anderen Netzbetriebszustände unter Einbeziehung der durch die Netzcodes definierten Kraftwerkseigenschaften betriebsrealistisch simulieren. Damit können die komplexen

Zusammenhänge im Energieversorgungssystem praxisnah für die universitäre Ausbildung und das Training der Netzbetriebsführung umgesetzt werden.

Darüber hinaus kann das System für die Öffentlichkeitsarbeit und verschiedenste Forschungsaufgaben, wie z. B. zukünftiger Netzbetrieb, Analyse von Veränderungen in der Einspeiserstruktur oder das zukünftige Zusammenspiel zwischen ÜNB, VNB und Signifikanten Netznutzern, verwendet werden.

Referenzen

- [1] **Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)** (2010): Energiekonzept – für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, Berlin.
- [2] **Atomgesetz – AtG**: Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren vom 23. Dezember 1959, Neufassung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I 1985, Nr. 41, S. 1565), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2510) geändert worden ist.
- [3] **Energiewirtschaftsgesetz – EnWG**: Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung vom 07.07.2005 (BGBl. I S. 1970, ber. S. 3621), zuletzt geändert durch Gesetz vom 05.12.2019 (BGBl. I S. 2002).
- [4] **Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)** (2019): Referentenentwurf - Gesetz über die Beendigung der Nutzung von Braun- und Steinkohle in Großfeuerungsanlagen, Berlin.
- [5] **Verband Europäischer Übertragungsnetzbetreiber für Elektrizität (ENTSO-E)** (2008): P8 – Policy 8: Operational Training, Brüssel, Belgien.
- [6] **Verband Europäischer Übertragungsnetzbetreiber für Elektrizität (ENTSO-E)** (2010): RG CE Compliance Oversight Report 2009 – Annex 1: Overview of organisation of training at TSOs, Brüssel, Belgien.
- [7] **Verband Europäischer Übertragungsnetzbetreiber für Elektrizität (ENTSO-E)** (2015): ENTSO-E Compliance Oversight Report 2014 - SG CME – RG CE, Brüssel, Belgien.
- [8] **Verordnung zur Festlegung einer Leitlinie für den Übertragungsnetzbetrieb** (2017): VERORDNUNG (EU) 2017/1485 DER KOMMISSION vom 2. August 2017 zur Festlegung einer Leitlinie für den Übertragungsnetzbetrieb (Abl. (EU) L 220 S. 1).
- [9] **Brose, Nico** (2020): Ein Beitrag zur betriebsrealistischen Simulation des Netzbetriebes, Dissertation, Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg.
- [10] **Buckow, Benjamin** (2020): Entwicklung von Modellen und Methoden zur Qualifizierung für die Netzbetriebsführung unter Einbeziehung eines neuartigen dynamischen Netzsimulators, Dissertation, Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg.