

# Technische Bewertung von Betriebsführungen mithilfe einer Echtzeit-Simulationsumgebung, am Beispiel des Verbundforschungsprojektes SysDL2.0<sup>1</sup>

S. Wende – von Berg<sup>1</sup>, F. Marten<sup>1</sup>, B. Requardt<sup>1</sup>, H. Wang<sup>1</sup>, M. Vogt<sup>1</sup>, M. Braun<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer IWES, Königstor 59, 34119 Kassel, +49561-7294 298, [sebastian.wende-von.berg@iwes.fraunhofer.de](mailto:sebastian.wende-von.berg@iwes.fraunhofer.de), <http://www.energiesystemtechnik.iwes.fraunhofer.de>

<sup>2</sup> Fachgebiet Energiemanagement und Betrieb elektrischer Netze, Universität Kassel, Wilhelmshöher Allee 73, 34121 Kassel, +49561-8046201, [www.e2n.uni-kassel.de](http://www.e2n.uni-kassel.de)

## 1. Einleitung

Systemdienstleistungen (SDL) wie z.B. Spannungshaltung, Engpassmanagement oder Blindleistungsbereitstellung, durch dezentrale EE-Anlagen aus dem Verteilnetz, werden immer wichtiger zur Wahrung der Systemstabilität in Verteil- und Übertragungsnetzen. Zur Koordinierung dieser Anlagen sind meist Optimierungsalgorithmen vorgesehen, die Sollwertvorgaben an die Anlagen bestimmen. Bevor diese Algorithmen aber tatsächlich zum Einsatz im Netzbetrieb kommen, werden sie realistischen Tests unterzogen. Die dafür verwendete Testumgebung sollte in der Lage sein, die spätere Betriebsumgebung detailliert nachzubilden. Dazu eignet sich eine Echtzeit-Testumgebung mit standardisierten Schnittstellen und realitätsnahen Anlagenmodellen.

Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten einer solchen Testumgebung sowie der Einsatz zu Test- und Analysezielen beschrieben.

## 2. Einsatz von OpSim<sup>2</sup> im Projekt SysDL2.0

In dem Projekt SysDL2.0 [1] [2] werden die Anwendungsmöglichkeiten einer zentralen Steuerung von dezentralen Energieanlagen in Verteilnetzen untersucht. Die erarbeiteten Methoden und Verfahren sollen abschließend in einem Feldtest bei den beteiligten Netzbetreibern angewendet werden. Um die neuen Verfahren im Vorfeld zu prüfen und validieren, kommt eine simulative Echtzeitumgebung (OpSim [3]) zum Einsatz. Der Weg vom Entwicklungs-PC bis in die Netzleitstelle über

---

<sup>1</sup> Das Projekt „SysDL2.0“ (FKZ 0325744E) wird gefördert durch das BMWi ([www.sysdl20.de](http://www.sysdl20.de))

<sup>2</sup> Das Projekt „OpSim“ (FKZ 0325593A,B) wird gefördert durch das BMWi ([www.opsim.net](http://www.opsim.net))

simulative Test- und Validierungsverfahren soll sicherstellen, dass die entwickelten Methoden korrekt, fehlerresistent und zuverlässig arbeiten.

### **3. Echtzeit-Testumgebung OpSim**

Das Forschungsprojekt OpSim hat eine Co-Simulationsumgebung entwickelt, welche auf drei wichtigen Komponenten basiert:

- Die Simulationsteilnehmer, zum Beispiel: eine Netzberechnung, ein Optimierungsalgorithmus oder eine operative Software von externen Partnern.
- Ein Message Bus, über welchen die Simulationsteilnehmer Informationen austauschen können.
- Eine Client / Proxy Architektur, wodurch sich die Simulationsteilnehmer mit dem Message Bus verbinden.

Der Message Bus basiert auf RabbitMQ<sup>3</sup> und verteilt Informationen zwischen einzelnen Simulationsteilnehmern. Diese Informationen können z.B. simulierte Messwerte der Netzberechnung sein, oder Sollwerte einer Betriebsführung für die Netzsimulation<sup>4</sup>. Somit kann man flexible Setups für unterschiedlichste Simulationen zusammenstellen.

#### **Echtzeit Netzsimulation**

Die Echtzeit Anlagen- und Netzsimulation im Forschungsprojekt SysDL2.0, welche auf den Topologie- und Betriebsdaten, sowie Zeitreihen der beteiligten Netzbetreiber basiert, wurde durch den Netzsimulator OP5600 von OPAL-RT<sup>5</sup> realisiert. Auf diesem Linux-Rechner sind die Echtzeit-Software RT-LAB 11.0.6 und der numerischen Solver ePHASORSim installiert. Somit wird eine symmetrische RMS Netzsimulation realisiert, in der zusätzlich Modelle dezentraler Erzeugungsanlagen (Wind und PV) implementiert sind.

#### **Umwandlung von OPAL-RT Daten in das OpSim Datenmodell**

RT-Lab enthält eigene Namen für Messgrößen wie Spannung, Strom oder Leistung. Diese Namen und zugehörigen Messwerte werden im Proxy und Client auf dem Opal-RT-Bedien-PC in ein OpSim-internes Datenformat umgesetzt, zur

---

<sup>3</sup> <https://www.rabbitmq.com/>

<sup>4</sup> Jeder Simulationsteilnehmer ist durch einen generischen Client und einen individuellen Proxy mit dem Message Bus verbunden, wodurch die Teilnehmer auch untereinander verbunden sind. Dieses Konzept erlaubt es, Teilnehmer über verschiedene, teils standardisierte und teils proprietäre Schnittstellen zum Datenaustausch anzubinden.

<sup>5</sup> <http://www.opal-rt.com/>

Kommunikation über den Message Bus. Andere OpSim-Komponenten, wie z.B. die CIM- und IEC61850-Clients (siehe unten), setzen das interne Datenformat entsprechend in das jeweilige Format um. Diese Kommunikation ermöglicht es, die Netzsimulation durch eine komplett andere Software auszutauschen, ohne die CIM- oder IEC61850-Clients ändern zu müssen. Lediglich ein neuer Netzsimulation-Proxy ist notwendig, der die Simulationsergebnisse in OpSim-Datenpakete umwandelt. Tabelle 1 illustriert, welche Simulationsergebnisse aus RT-Lab in das interne Datenformat übersetzt werden<sup>6</sup>. Ergebnisse und Sollwerte im internen Datenformat werden als JSON-Paket über den Message Bus geschickt.

**Tabelle 1: Übersetzung von RT-Lab Simulationsergebnissen in das OpSim-Datenformat (Sollwerte an RT-Lab werden hier nicht aufgeführt, im Prinzip sind die Namen aber identisch).**

Simulationsergebnis aus RT-Lab	Pin-Name in OPAL-RT	Einheit in OPAL-RT	OpSim Datenpaket	Asset-Name in OpSim-Paket	Einheit in OpSim-Paket
<b>Leitung/Kabel</b>					
Strom From-Seite	Imag0	Per Unit (Netz)	Leitung/Kabel Strom From-Seite	CURRENT	Per Unit (Netz oder Nennstrom)
Stromwinkel From-Seite	lang0	Grad			
Strom To-Seite	Imag1	Per Unit (Netz)	Stromwinkel From Strom To-Seite	CURRENT_ANGLE CURRENT_2	Grad Per Unit (Netz oder Nennstrom)
Stromwinkel To-Seite	lang1	Grad			
			Stromwinkel To	CURRENT_ANGLE_2	Grad
<b>Transformator</b>					
Strom OS-Seite	Imag0	Per Unit (Netz)	Transformator Wirkleistung OS	ACTIVE_POWER	MW
Stromwinkel OS-Seite	lang0	Grad	Blindleistung OS	REACTIVE_POWER	MVar
Strom US-Seite	Imag1	Per Unit (Netz)	Wirkleistung US	ACTIVE_POWER_2	MW
Stromwinkel US-Seite	lang1	Grad	Blindleistung US	REACTIVE_POWER_2	MVar
Stufe OS-Seite	rW1	% (OS-Spannung)	Stufe OS-Seite	TAP_POSITION	ganze Zahl
Stufe US-Seite	rW2	% (US-Spannung)	Stufe US-Seite	TAP_POSITION	ganze Zahl
<b>Knoten</b>					
Spannung	Vmag	Per Unit	Knoten Spannung	VOLTAGE	Per Unit
Spannungswinkel	Vang	Grad	Spannungswinkel	VOLTAGE_ANGLE	Grad
<b>Generator/Last</b>					
Wirkleistung	P	MW	Generator/Last Wirkleistung	ACTIVE_POWER	MW
Blindleistung	Q	MVar	Blindleistung	REACTIVE_POWER	MVar

### 3. Standardisierte Schnittstellen

#### CIM CGMES<sup>7</sup>

Um den Datenfluss im Projekt SysDL2.0 zu simulieren, wurde eine CIM-CGMES Schnittstelle entwickelt und diese in die Simulationsumgebung integriert. Dabei wird ein bestehendes Netz, was über CIM durch „Equipment“- (EQ) und „Topologie“- (TP) Dateien standardisiert dargestellt ist, in die Netzsimulation der OpSim Umgebung abgebildet. Der aktuelle Netzstatus wird gemäß CIM Standard zyklisch über „Steady-State-Hypothese“ und „State-Variables“ Dateien aufgezeichnet. Um Messfehler

<sup>6</sup> Es sei angemerkt, dass die Wahl der Einheit im internen Format (MW, MVar,...) beliebig ist, im Projekt SysDL 2.0 wurden die Einheiten der obigen Tabelle entschieden. Ströme bzw. Leistungen können auch von Transformatoren bzw. Leitungen gemessen werden, die Konvention in der Tabelle wurde nur für die aktuelle Untersuchung gewählt.

<sup>7</sup> <https://www.entsoe.eu/major-projects/common-information-model-cim/cim-for-grid-models-exchange/standards/Pages/default.aspx>

darzustellen, wurde ein eigenes CIM-CGMES Profil abgeleitet. Durch dieses Profil werden die perfekten Messdaten aus der Netzsimulation mit einem konfigurierbaren Rauschen belegt und innerhalb einer Messdatei dargestellt.

Die erstellten CIM Dateien werden im RDF Format ausgegeben und stehen zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung.

#### **IEC 61850 [4]**

Um eine weiträumige Anbindung von Dritt-Software (z.B. einer Leitwarten Software) an OpSim sicherzustellen, wurde eine IEC 61850 Schnittstelle entwickelt. Diese bildet das proprietäre OpSim Datenmodell an das standardisierte IEC 61850 ab. Dazu wird automatisch eine standardgerechte IEC 61850 Konfiguration (ICD) Datei aufgebaut und in einen IEC 61850 Server hinterlegt. Alle Messdaten aus der Netzsimulation werden somit über einen IEC 61850 Server dargestellt und können von einem beliebigen Client abgerufen werden. Des Weiteren können Sollwerte über IEC 61850 an ausgewählte simulierte Anlagen gesendet werden.

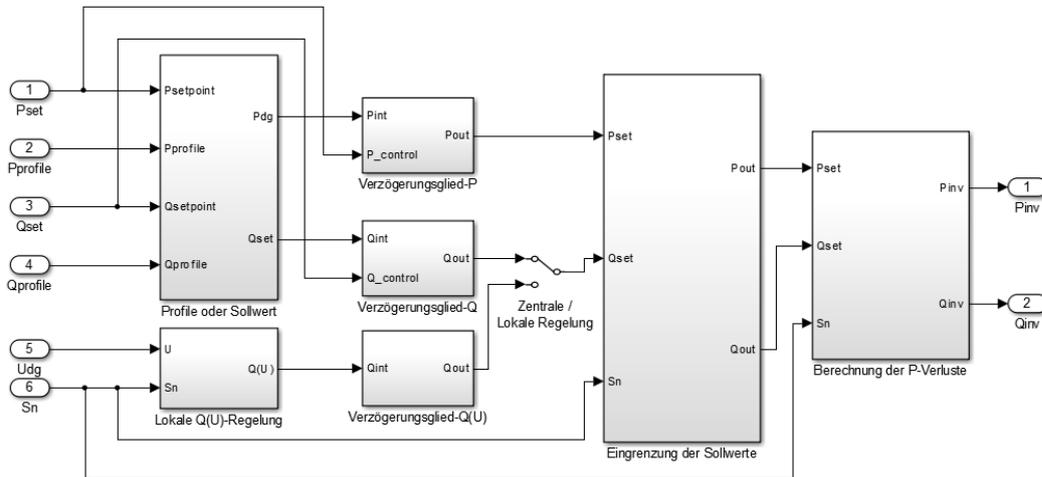
#### **4. Modelle dezentraler Anlagen (Wind und PV)**

Zum realistischen Testen von Betriebsführungen und zur Untersuchung der Effekte der zentralen Regelung auf die Anlagen und auf das Netz, wurde in SysDL 2.0 ein Anlagenmodell konzipiert und realisiert, das die folgenden Eigenschaften beinhaltet:

- Möglichkeit der Vorgabe von PQ-Sollwerten oder Kennlinienparametern
- Automatisches Umschalten zwischen zentraler und lokaler Regelung oder einer Kombination beider
- Berücksichtigung der individuellen Wechselrichterverluste
- Begrenzung von Wirk- und Blindleistung nach Netzanschlussbedingungen
- Zeitverzögerung beim Einstellen der Sollwerte durch Regelmechanismen

Abbildung 1 zeigt das detaillierte Anlagenmodell (Matlab-Simulink). Es überprüft zunächst, ob die zentrale Regelung zurzeit aktiv ist, und ob die empfangenen Sollwerte dafür noch gültig sind. Bei deaktivierter zentraler Regelung oder bei einer Kommunikationsstörung werden die davon betroffenen Anlagen zum Zweck der Spannungshaltung automatisch auf lokale Q(U)-Regelung umgeschaltet. Sollwerte, die fehlerhaft oder unrealistisch sind, werden von dem Modell erkannt und somit nicht berücksichtigt. Überschreitet die resultierende Scheinleistung die vorgegebene

Anlagengröße aufgrund der Q-Bereitstellung, wird die Einspeisung der Anlage entsprechend eingegrenzt. Interne Wechselrichterverluste werden anhand der aktuellen Leistung ermittelt und bei Bestimmung der Ausgabe berücksichtigt. Abschließend simuliert das Anlagenmodell auch ein PT-1 Verhalten, dass für eine verzögerte Einstellung der Sollwerte sorgt und den realen Einstellprozess nachbildet.



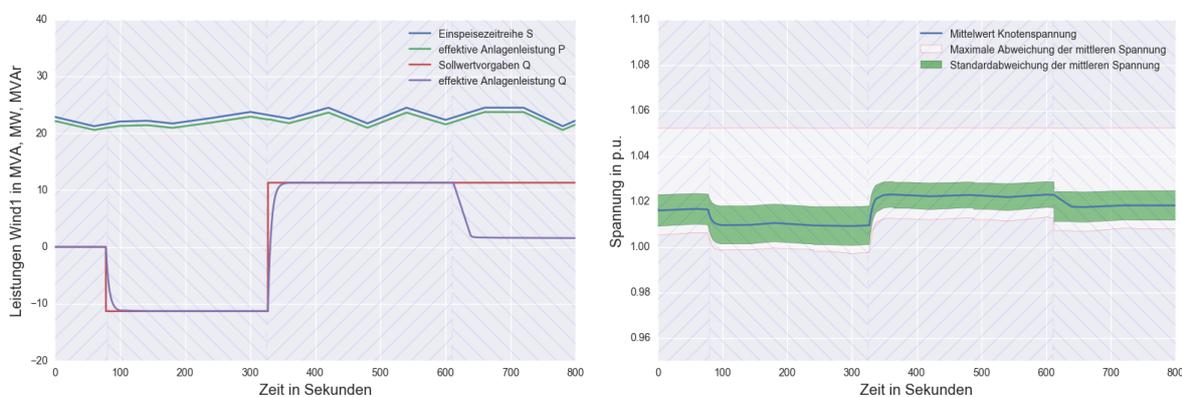
**Abbildung 1: Matlab/Simulink Modell des in OpSim hinterlegten Anlagenmodells.**

## 5. Test von Betriebsführungen

Zum Testen von Betriebsführungen wird als Vergleichs- und Referenzbasis u.a. eine am Fraunhofer IWES entwickelte lineare Optimierung für die zu untersuchenden Betriebsführungen verwendet. Die Referenz-Betriebsführung wird außerdem eingesetzt um Anwendungsfälle und Simulations- sowie Testabläufe zu konzipieren und demonstrieren. Die Betriebsführungen können an die Simulation entweder über generische Schnittstellen wie Python, JAVA oder Matlab angebunden werden, oder durch die standardisierten Schnittstellen der Systemumgebung in der die Betriebsführung implementiert ist. Im Falle von SysDL2.0 ist die Betriebsführung in einem Feldtest-Demonstrator installiert und bezieht ihre Informationen über eine interne Datenbank. Der Demonstrator ist über die CIM-Schnittstelle mit der Simulation verbunden. Die Ergebnisse werden in der Datenbank abgelegt und parallel von der Referenzbetriebsführung über die Python Schnittstelle in die Simulation als Sollwertvorgaben für die Blindleistung der dezentralen Anlagen zurückgegeben. In Abbildung 2 sind die P und Q Werte einer exemplarischen Anlage aus dem Netz, sowie die Knotenspannungen im Netz dargestellt. Die Betriebsführung

wurde so geführt, dass nach Einschalten (Bereich von 0 – 80 Sekunden) im ersten zeitlichen Drittel eine minimale Knotenspannung, im zweiten Drittel eine maximale Knotenspannung und im dritten Drittel eine Spannung um 1.02 p.u eingestellt wurde. Für das letzte Drittel wurde die Verbindung zur Betriebsführung unterbrochen und vorher gesendete Kennlinien in den Anlagen wurden nach einer gewissen Zeit automatisch aktiviert. Der Sollwert der lokalen Spannungshaltung wurde auf 1.02 p.u gesetzt. Man sieht, dass der Sollwert einer Anlage konstant bleibt, der tatsächlich eingestellte Wert sich aber gemäß der Kennlinie ändert.

Bei den vorherigen Sollwertvorgaben an die Anlage kann man beobachten, wie die Anlage mit einer Verzögerung in den Arbeitspunkt fährt. Dieser Übergang ist auch in einem langsamen Einstellen der Knotenspannungen sichtbar.



**Abbildung 2:** Abbildung links zeigt das Verhalten des Generatormodells bei Vorgabe von Q Sollwerten. Abbildung rechts zeigt die mittlere Knotenspannung sowie deren Standard- und Maximalabweichung. Die schraffierten Bereiche markieren Zeiten geänderter Betriebsführung.

## 6. Fazit

Mit der OpSim Test- und Simulationsumgebung können Betriebsführungen als Controller-in-the-Loop getestet werden bevor sie ins Feld gehen.

### Danksagung

Die Veröffentlichung entstand im Rahmen des Verbundprojekts SysDL2.0 „Systemdienstleistungen aus Flächenverteilenetzen (FKZ:0325744E) im Rahmen der Forschungsinitiative „Zukunftsfähige Stromnetze“. Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Förderung aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

### Literaturverzeichnis

- [1] A. Szabo, J. Götz, S. Wende - von Berg, M. Braun, T. Stetz, M. Kreutziger, S. Gehler, N. Bornhorst, W. Becker, J. Schwedler, E. Habermann, U. Schmidt, E. Schneider, H. Hänchen und U. Zickler, „Beiträge von Flächenverteilenetzen zur Erbringung von Systemdienstleistungen - Technische Anwendungsszenarien,“ in 3. *Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien*, Berlin, Deutschland, 2016.
- [2] S. Wende - von Berg, N. Bornhorst, S. Gehler, S. Schneider, H. Hänchen, T. Pilz, K. Seidl, U. Zickler, M. Braun, U. Schmidt, T. Wagner, J. Götz, J. Schwedler und E. Habermann, „SYS DL 2.0 - Systemdienstleistungen aus Flächenverteilenetzen: Methoden und Anwendungen,“ in 14. *Symposium Energieinnovation*, Graz, Österreich, 2016.
- [3] F. Marten und J.-C.-. Töbermann, „OpSim - a smart grid co-simulation environment,“ European User Group Event (RT15), Barcelona, Spain, 2015.
- [4] N. N. a. M. I. Y. Rangelov, „The IEC 61850 standard — Communication networks and automation systems from an electrical engineering point of view,“ in 2016 19th *International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)*, Bourgas, 2016.