

Dynamische Modellierung eines Diesel-Aggregats im Zuge des SORGLOS-Projekts

Dominik Fasthuber*, Michael Chochole, Rainer Schlager

TU Wien / Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe, Gußhausstraße 25/370-1,
1040 Wien, Telefonnr.: +43(0)158801370112, E-Mail: fasthuber@ea.tuwien.ac.at ,
www.ea.tuwien.ac.at

Kurzfassung: Die Erweiterung der Verteilnetze um Smart Grid-Technologien bietet die Chance, mit Hilfe von innovativen Regelstrategien für dezentrale Erzeugungsanlagen die Versorgungssicherheit zu erhöhen. Im Forschungsprojekt SORGLOS werden daher Methoden und Algorithmen entwickelt, um in einzelnen Netzabschnitten (Microgrids) mittels vorhandener dezentraler Erzeuger und Speicher sowie installierter Smart Grid-Technologien Blackout-Festigkeit zu erreichen. Dabei wird Schwarzstartfähigkeit, sichere Netztrennung bei einem Blackout, Regelung von Erzeugung, Beeinflussung von Lasten sowie Speicherbewirtschaftung und Unterstützung beim Netzwiederaufbau untersucht. Der Aufwand mit konventionellen Methoden zur Erreichung der Versorgungssicherheit kann dabei möglicherweise reduziert werden, wodurch zusätzliche Systemkosten vermieden werden. Des Weiteren werden im Projekt SORGLOS auch die rechtlichen Grenzen und Rahmenbedingungen sowie die wirtschaftlichen Möglichkeiten dieser Betriebsmethoden betrachtet.

In einem ersten Schritt werden die einzelnen beteiligten Komponenten des zu untersuchenden Netzes modelliert. Hierzu wird ein dynamisches Modell eines Diesel-Aggregates, welches zur Versorgung des Microgrids dient, erstellt. Nachfolgende Ausführungen beschreiben diesen Vorgang im Detail und geben somit einen Überblick über die Vorgehensweise bei der Modellierung.

Keywords: Smart Grid, Microgrid, Diesel Generator, Dynamische Modellierung

1 Einleitung

Unsere moderne Gesellschaft ist in einem enorm hohen Maß von der Verfügbarkeit elektrischer Energie abhängig. Es sind kaum Prozesse und Tätigkeiten in Wirtschaft, Gewerbe sowie im öffentlichen und privaten Leben ohne elektrische Energie möglich. Aufgrund europäischer und nationaler klima- und energiepolitischer Initiativen kommt es in den nächsten Jahrzehnten zu einem massiven Ausbau erneuerbarer Energieträger. Ein hoher Anteil davon wird dezentral in die Verteilnetze integriert werden und führt somit zu einer größeren Menge an lokal verfügbarer elektrischer Energie. Dies und die Modernisierung der klassischen Verteilnetzstrukturen durch Implementierung von Kommunikationsinfrastruktur, aktiver Betriebsmittel, Elektromobilität und stationärer Speicher ermöglichen eine zunehmende Automatisierung der Verteilnetze und gezielte Beeinflussung von Erzeugungseinheiten und Verbrauchern.

Diese Modernisierung der Verteilnetze kann als Chance gesehen werden, mit Hilfe von innovativen Regelstrategien die Versorgungssicherheit zu erhöhen. Dabei sollen die neuen Funktionalitäten der zukünftigen Smart-Grid Komponenten zielführend eingesetzt werden.

Im Forschungsprojekt SORGLOS werden Methoden und Algorithmen entwickelt um in einzelnen Netzabschnitten (Microgrids) Blackout-Festigkeit zu erreichen, indem sie eine geordnete und sichere Netztrennung vom externen Netz im Falle eines weiträumigen Blackouts sicherstellen, durch Regelung von Erzeugung und Beeinflussung von Lasten sowie Speicherbewirtschaftung¹ eine stabile Notversorgung im Inselbetrieb gewährleisten und Unterstützung beim Wiederaufbau des externen Netzes leisten.

Anhand von repräsentativen Smart-Grid Netzbereichen² mit jeweils charakteristischen Erzeugungsstrukturen³ werden die vorhandenen Möglichkeiten und nötigen Erweiterungen sowie die Skalierbarkeit untersucht.

Die Funktionsweise der im Projekt SORGLOS entworfenen Algorithmen und ermittelten Speichergrößen soll mit realen Daten von Netzabschnitten in einer virtuellen Demonstration simuliert werden. Hier wird auf schon laufende Smart-Grid Projekte mit hoher dezentraler Erzeugung wie das Große Walsertal / VBG und Eberstalzell / OÖ aufgesetzt.



Abbildung 1: Logo des SORGLOS Projekts

Das SORGLOS-Projekt untersucht dabei die Gegebenheiten in zwei unterschiedlichen Spannungsbereichen. Zum einen wird ein ländliches Mittelspannungsnetz betrachtet und zum anderen ein kleinstädtisches Niederspannungsnetz. Diese beiden Netze unterscheiden sich vor allem durch die Möglichkeit der Eigenversorgung bei Ausfall des übergeordneten Netzabschnittes.

Für das ländliche Mittelspannungsnetz wird ein Pumpspeicherkraftwerk mit Francis-Turbine nachgebildet. Dieses Kraftwerk sorgt für die Versorgung bei einem Blackout. Für das kleinstädtische Niederspannungsnetz, welches keine zusätzlichen Kraftwerke besitzt, wurde ein Modell eines Notstrom-Diesel-Aggregates erstellt, welcher die Versorgungssicherheit gewährleisten soll. Dies ist notwendig, da das Netz aufgrund der bereits installierten PV-Anlagen nicht alleine sicher betrieben werden kann. Die Modellierung dieses Diesel-Generators bildet das Kernstück dieser Abhandlung.

Abbildung 2 zeigt die Komponenten und ihre Symbole, welche in den bereits erwähnten Netzabschnitten vorkommen, in einer vereinfachten SINCAL-Netzstruktur.

¹ Stationäre und mobile Speicher (Elektromobilität)

² Ländlich, suburban

³ Erzeugung durch rotierende elektrische Maschinen z.B. bei Kleinwasserkraft, BHKWs oder Diesel-Generatoren, Umrichter gekoppelte Einheiten wie z.B. Photovoltaik, Windkraftanlagen, Speichern

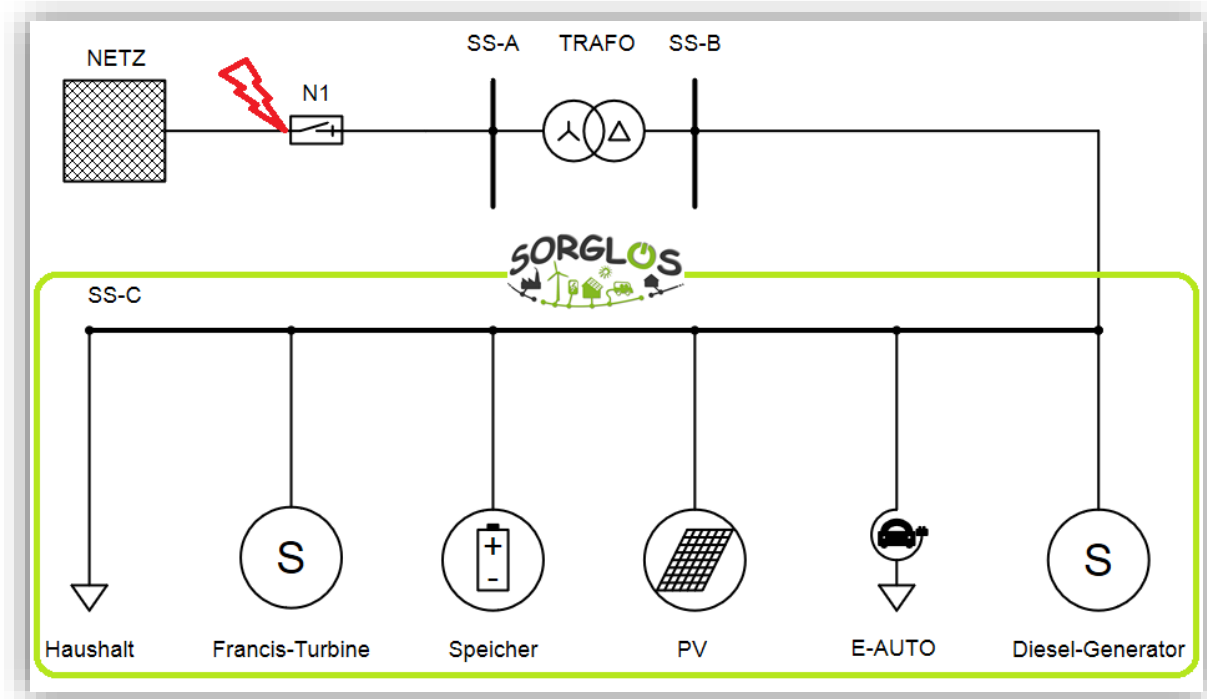


Abbildung 2: Komponenten im SORGLÖS Netz (selbst erstellt)

2 Methodik

Für die Versorgung des kleinstädtischen NS-Netzes (Eberstalzell) stehen neben den PV-Anlagen und dem Verbundnetz keine weiteren Erzeugungsanlagen zur Verfügung. Eine Versorgung über einen ausreichend großen Speicher wäre zwar prinzipiell möglich, stellt aber aus Kostengründen für sich alleine keine Alternative dar. Für den Inselbetrieb muss deshalb eine regelbare Erzeugungseinheit in Form eines Diesel-Aggregates installiert werden, um eine ausgeglichene Wirk- und Blindleistungsbilanz im betrachteten Netzabschnitt erhalten zu können.

Um die Modellierung des Diesel-Generators zu verifizieren, wurde im Vorfeld in Zusammenarbeit mit der Energie AG (jetzt Netze OÖ) ein Messversuch an einem 620kVA Diesel-Aggregat durchgeführt. Zur Identifikation des dynamischen Verhaltens der Generator-Dieseleinheit wurden unterschiedliche Lastsprünge an dem Notstromaggregat gemessen. Dabei wurden die Frequenz- und Spannungszeitverläufe sowie die auftretenden Stromverläufe aufgezeichnet. Hiermit konnten wichtige Parameter (wie Trägheitszeitkonstante des gesamten Maschinensatzes und dergleichen) ermittelt werden.

Diese Nachbildung soll der abschließenden Verifizierung dienen. Der Verlauf der gemessenen Leistung und der Frequenz ist in Abbildung 3 dargestellt. Wie zu erwarten ist, steigt mit der Laständerung auch die Frequenzänderung.

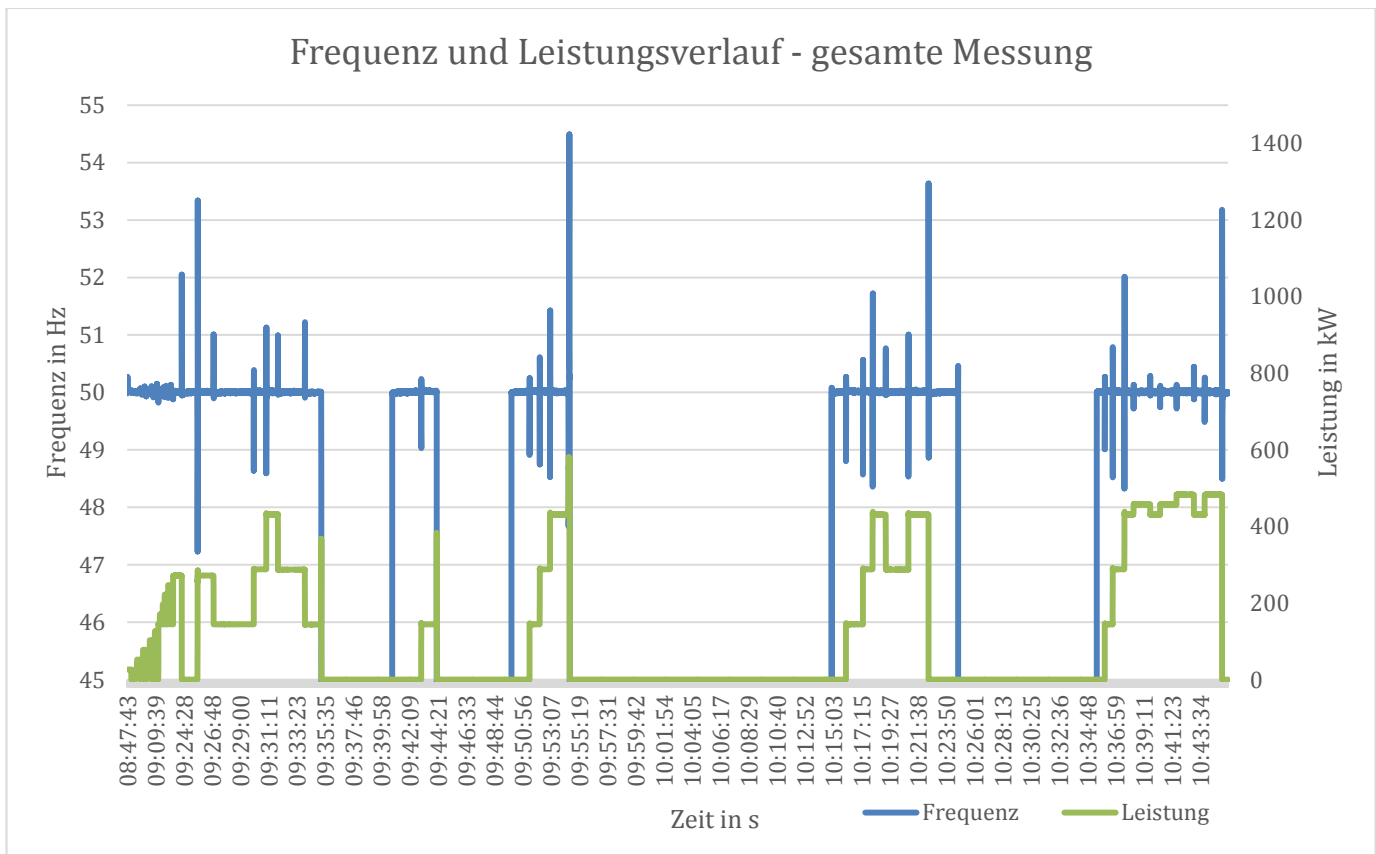


Abbildung 3: Frequenz und Leistungsverlauf der gesamten Messung (selbst erstellt)

Für die Modellierung der Regelung (Drehzahlregler, Aktuator, Motor) des Dieselgenerators wird der Regler DEGOV (Woodward Diesel Governor) aus der SINICAL Programmibliothek „Standard-1“ verwendet. Dieser Regler baut auf Modellen auf, welche in einschlägigen Literaturrecherchen (wie [1], [2], [3] und [4]) gefunden werden können und stellt somit einen gängigen Modellierungsvorgang dar. Letzten Endes besteht die Aufgabe darin, für das gewählte Regelmodell die richtigen Parameter zu wählen, um die real gemessenen Vorgänge im Modell so gut wie möglich wiederzugeben.

Der bereits erwähnte Messversuch wird in PSS/SINICAL rekonstruiert. Die Beschreibung der Dynamik erfolgt in sogenannten BOSL-Files, die den grafischen Symbolen hinterlegt und zugewiesen werden. Die Symbolbibliothek „BOSL“ (Block Oriented Simulation Language) enthält verschiedene Funktionsblöcke. Diese Blöcke können kombiniert werden um jede beliebige offene oder geschlossene Regelstruktur oder logische Einheiten über das grafische Interface zu generieren. Neben sehr einfachen Blöcken, wie PID-Elemente, können auch komplexe „Strukturen“, wie FFT (Fast Fourier Transformation) erfasst werden. Parameterwerte können entweder einzeln eingegeben und bearbeitet, oder es können Standardwerte verwendet werden [5].

Die BOSL-Files werden weiters auch in einem sogenannten BOSL-Macro Skript hinterlegt, welches der eigentlichen Ausführung der Routine dient. Somit ist es möglich unabhängig von der grafischen Erstellung einen Regelalgorithmus zu erstellen. Diese *.mac Files können anschließend durch FORTRAN ähnliche Programmieranweisungen adaptiert bzw. erweitert werden.

3 Modell für ein Notstrom-Diesel-Aggregat

Für die Modellierung der Regelung des Dieselgenerators wurde, wie bereits erwähnt, der Standardregler DEGOV aus der SINICAL Programmibibliothek verwendet. Das zugehörige Blockschaltbild ist in Abbildung 4 bzw. Abbildung 5 zu sehen.

Die ersten beiden Blöcke bzw. der Block G(s) entsprechen der elektronischen Steuereinheit des Reglers (V1 und V2). Diese sogenannte ECB (Electric Control Box) gibt das Steuersignal für die nachfolgende Strecke aus.

Die drei darauffolgenden Regelblöcke geben die Dynamik der Aktuatoren und somit die Mechanik wieder (V3, V4 und V5). Dies beschreibt beispielsweise die Einspritzung des Dieselaggregates.

Abschließend folgt ein Regelblock mit einem Totzeitverhalten welche der zeitlichen Trägheit des Motors entspricht (V6).

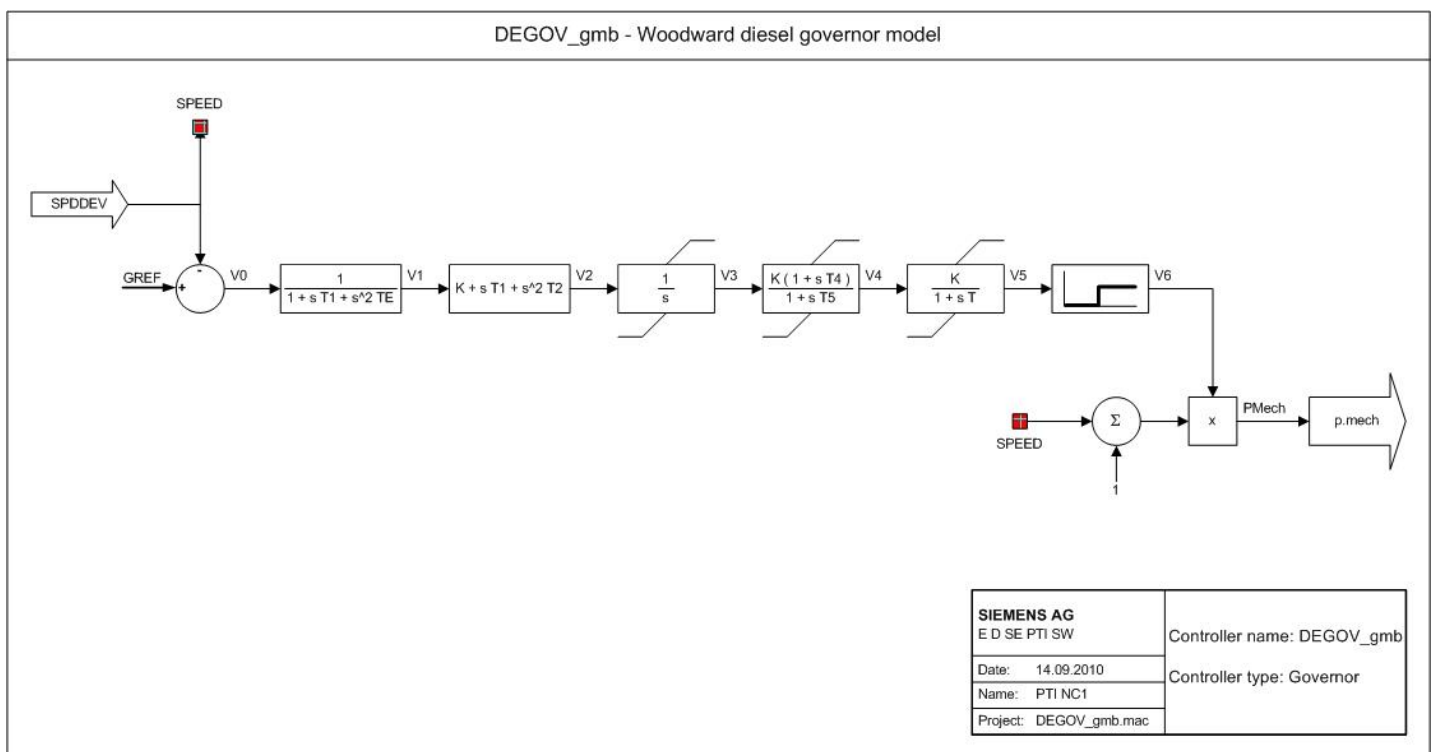


Abbildung 4 Regelmodell des Dieselgenerators (aus SINICAL-Bibliothek [6])

Ein wichtiger Parameter des Aggregates ist die Anlaufzeitkonstante, welche eine wesentliche Eigenschaft des dynamischen Verhaltens widerspiegelt. Sie stellt jene Zeit dar die benötigt wird aus dem Stillstand auf Nenndrehzahl zu kommen. Diese Anlaufzeitkonstante ist definiert als

$$T_A = \frac{\omega_N^2}{S_N} \times J.$$

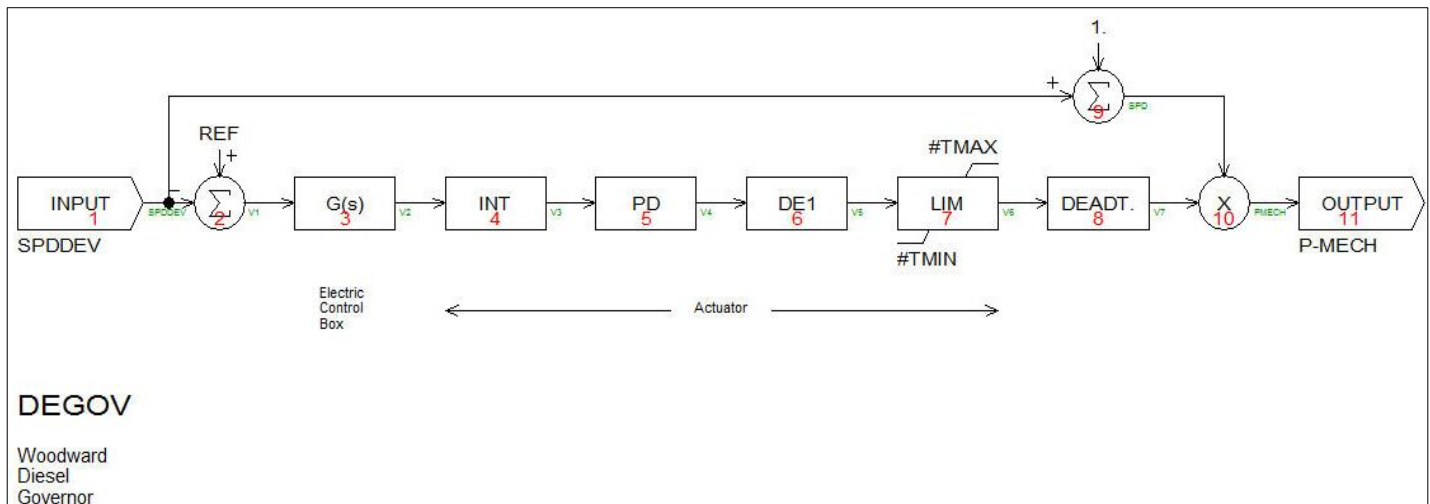


Abbildung 5: Regelstruktur des Woodward Diesel Governors [6]

Aus dem Datenblatt des Generators [7, p. 10] erhält man ein Massenträgheitsmoment von $J = 10,14 \text{ kgm}^2$. Somit ergibt sich eine Anlaufzeitkonstante von

$$T_A = \frac{\omega_N^2}{S_N} \times J = \frac{(2 \times \pi \times 50\text{Hz})^2}{620 \text{ kVA}} \times 10,14 \text{ kgm}^2 = 1,614 \text{ s.}$$

Zusammen mit dem Regelmodell konnten nun die restlichen Parameter (Zeitkonstanten, Verstärkung etc.) identifiziert werden, um den Verläufen aus den Messergebnissen gerecht zu werden.

Der bereits erwähnte Messversuch wurde in PSS/SINCAL rekonstruiert und ist in Abbildung 6 dargestellt. Zu erkennen ist hier die Nachbildung der Messanordnung. Jede Last ist einzeln für sich schaltbar und auch das übergeordnete Netz kann über einen Schalter abgeschaltet werden, wodurch ein Inselbetrieb nachgestellt wird. In dieser Betriebsart werden vier Lasten der Sammelschiene A mit 400V direkt vom Aggregat versorgt. Die Leistung je Element beträgt dabei 135kW. Die restlichen fünf Lasten der Sammelschiene B werden über einen Zwischen-Trafo mit 171V versorgt. Je Element beträgt die Leistung dabei 24,5kW. Mit diesen neun getrennt regelbaren Stufen können die unterschiedlichen Lastsituationen nachgestellt werden.

Diese Nachbildung soll der abschließenden Verifizierung der Modellparameter gegenüber dem gemessenen System dienen. Beispielhaft wurde eine Lasterhöhung der Messung ausgewählt die das Verhalten des Regler-Modells exemplarisch nachbilden soll.

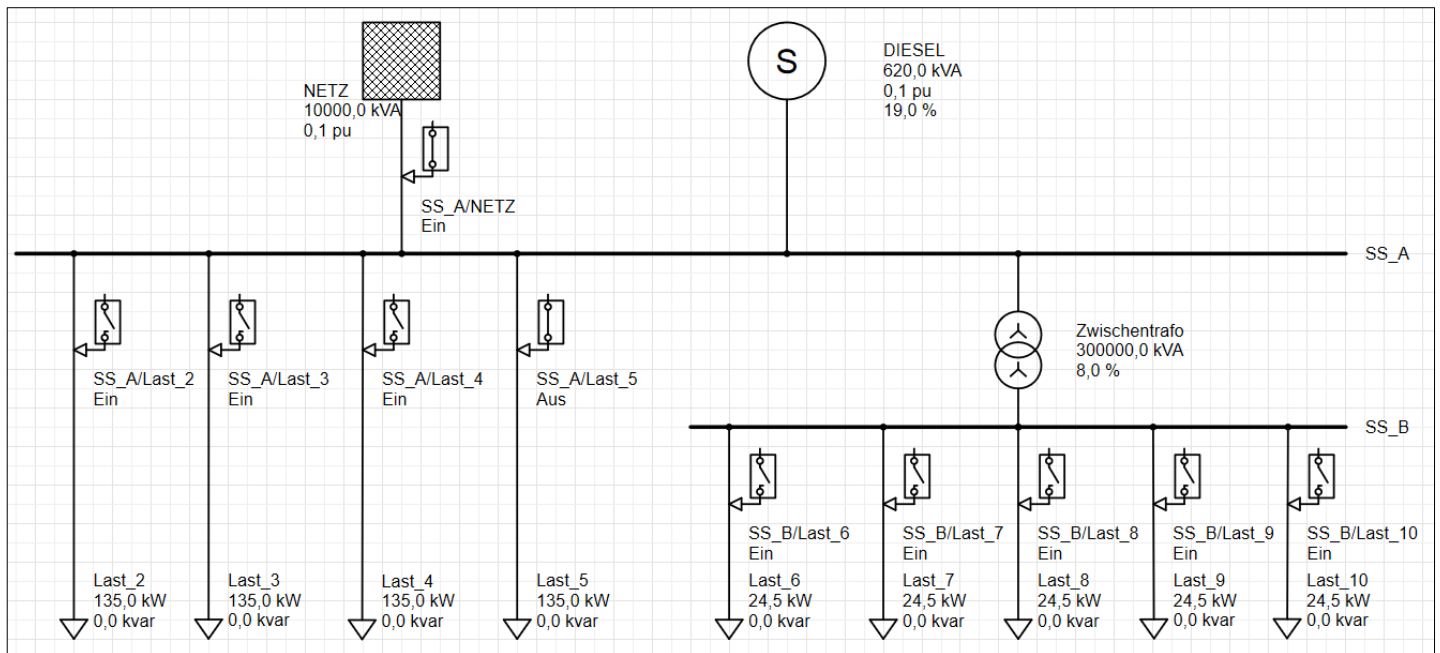


Abbildung 6 Rekonstruierter Messaufbau in SINCAL (selbst erstellt)

4 Ergebnisse

Um die Ergebnisse zu verifizieren wurde beispielhaft eine Lasterhöhung der Messung ausgewählt, die das Verhalten des Regler-Modells gegenüber der Messung darstellt. Der Verlauf der gemessenen Leistung und der Frequenz für diesen einzelnen Lastsprung ist in Abbildung 7 dargestellt.

Bei einem Lastsprung von 135kW – gegenüber der Vorbelastung von 270kW – ist ein Frequenzverlauf zu beobachten, den man versucht, durch Anpassung der Parameter des Regelmodells so gut als möglich anzunähern. Eine exakte Nachbildung ist auf Grund des hohen messtechnischen Aufwandes bezüglich der Parameteridentifikation allerdings nicht sinnvoll. Dafür wäre es notwendig die einzelnen Komponenten des Dieselgenerators (Trägheitsmoment, Anlaufzeitkonstante des Motors und des Generators, Einspritzsystem ...) zu vermessen, was aber in dem gegebenen geschlossenen System nicht mehr so einfach möglich ist.

Dennoch wurden durch Parametervariation zwei Konfigurationen gewonnen, die die Anpassung zeigen sollen. Durch dieses Modell wird eine qualitative Erfassung der Charakteristik des Diesel-Generators sichergestellt.

Frequenz-Anpassung 1 zeigt ein Verhalten das der Dynamik der Messung im Wesentlichen entspricht. Frequenz-Anpassung 2 ist dynamisch gesehen etwas langsamer, verhält sich aber bezüglich der Amplituden eher wie die Messung (Abbildung 8).

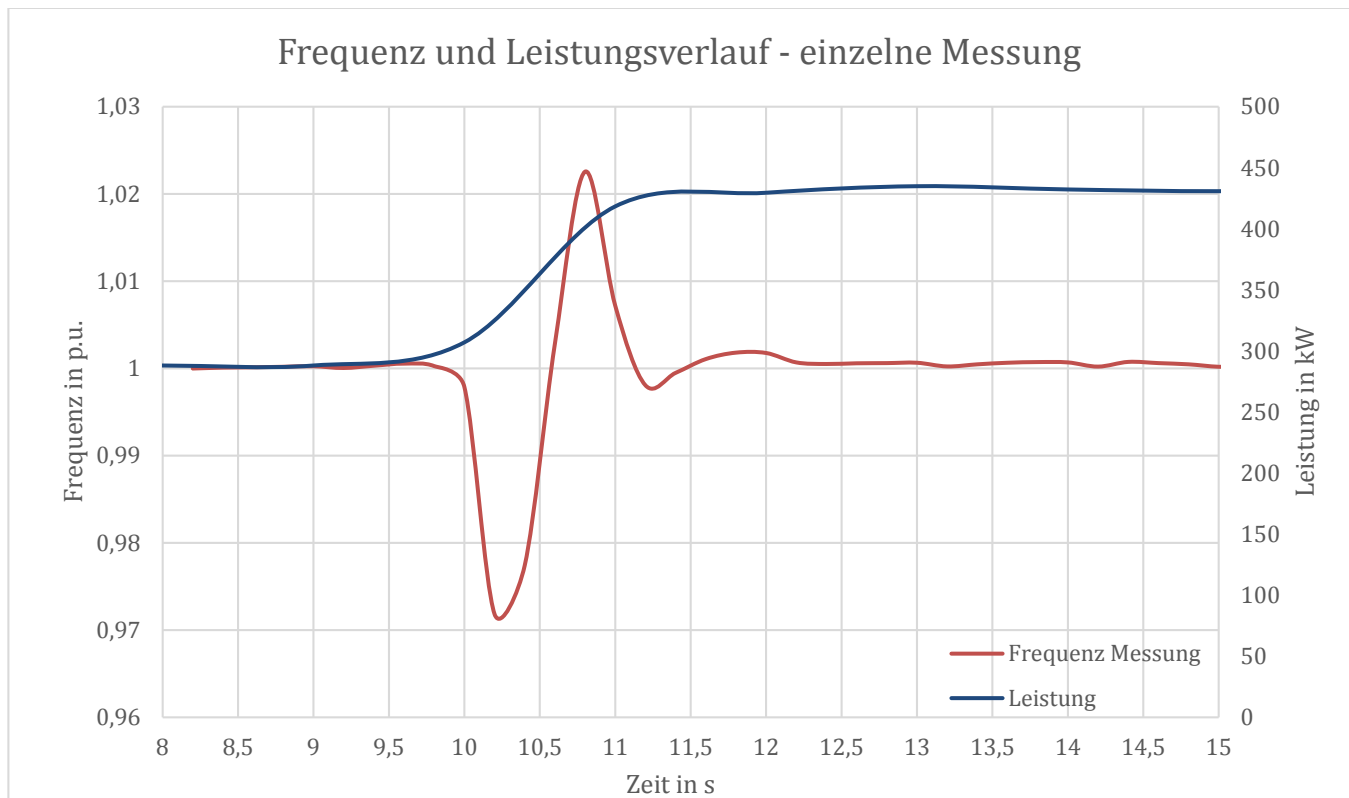


Abbildung 7: Verlauf der Frequenz und Leistung des exemplarisch gewählten Lastsprungs

Mit den gegebenen Einstellgrößen ist es nicht weiter möglich eine exaktere Nachbildung bezüglich Amplitude und Dynamik zu erreichen. Hierfür müssten, wie bereits erwähnt, weitere Messungen durchgeführt werden um die einzelnen Zeitkonstanten und Parameter zu identifizieren.

Durch diese Modellierung konnte jedoch ein ausreichend genaues Abbild eines Diesel-Generators erstellt werden um darauf Aufbauend weitere Analysen im Netz durchzuführen. So können die Auswirkungen auf Veränderungen im Netz durch Lastsprünge und Erzeugungsschwankungen der zusätzlich installierten erneuerbaren Energieversorgungseinheiten, auf das Aggregat untersucht werden. Weiters können Regel-Algorithmen bezüglich der Betriebsführung mit eventuell vorhandenen Speichern im Microgrid entwickelt und getestet werden. Dieser Modellierungsansatz bildet somit die Basis für die weiteren Schritte im SORGLOS Projekt.

Abschließend werden noch in Tabelle 1 die Parameterwerte der beiden Varianten gegenübergestellt.

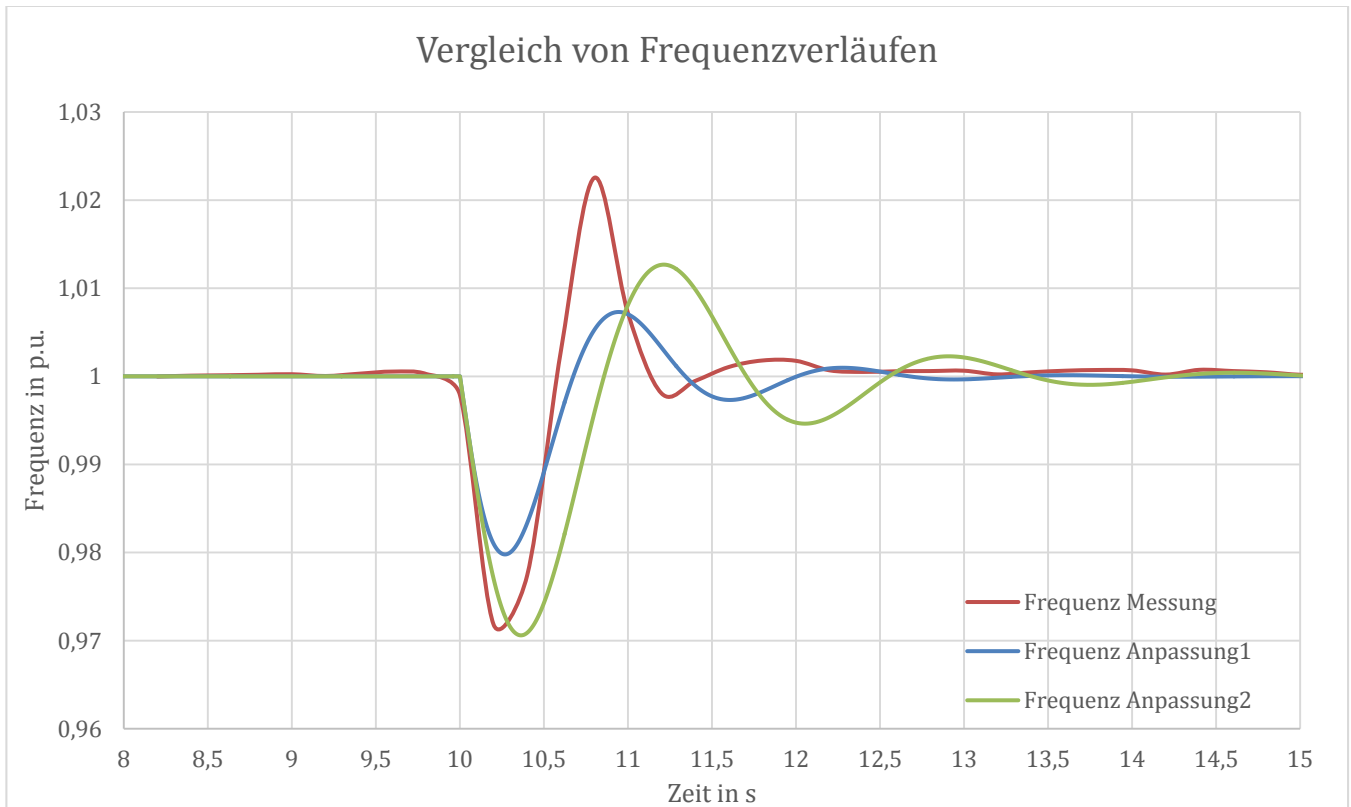


Abbildung 8 Vergleich der Frequenzverläufe zwischen der Messung und dem Verlauf bei angepassten Modellparametern (selbst erstellt)

Tabelle 1: Parameter der verschiedenen Varianten

Parameter	Einheit	Variante 1	Variante 2
T1	s	0,1	0,1
T2	s	0,02	0,02
T3	s	0,2	0,2
K	p.u.	35	20
T4	s	0,025	0,2
T5	s	0,009	0,009
T6	s	0,0384	0,0984
TD	s	0,024	0,024
TMAX	p.u.	1,1	1,1
TMIN	p.u.	0	0

5 Literatur

- [1] L. Wang und P.-Y. Lin, „Analysis of a Commercial Biogas Generation System Using a Gas Engine-Induction Generator Set,“ in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 24, No. 1, 2009.
- [2] K. Yeager und J. Willis, „Modelling of Emergency Diesel Generators in an 800 Megawatt Nuclear Power Plant,“ in *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol. 8, No. 3, 1993.
- [3] L. Hannett, F. de Mello, G. Tyliniski und W. Becker, „Validation of Nuclear Plant Auxiliary Power Supply by Test,“ in *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, No. 9, 1982.
- [4] L. Manio, K. Kameda, J. Dai, H. Iki, K. Katayama und Y. Uriu, „Sequential Motor Dynamic Acceleration and Re-acceleration Simulations: Comparison of ETAP and EMTP-RV Software,“ in *International Conference op Power Systems Transients (IPST2009)*, Kyoto, Japan, June 3-6, 2009.
- [5] SIEMENS AG Energy Sector E D SE PTI, „Dynamische Modellierung mit dem Graphical Model Builder (GMB),“ Erlangen, Germany, 2009.
- [6] SIEMENS PTI, „Dynamic Models Package "Standard-1",“ 2013.
- [7] Moteurs Leroy-Somer, „Low Voltage alternators - 4 pole LSA49.1 - Electrical and mechanical data,“ ANGOULÊME, 2011.