

# KONZEPTE FÜR DEN AUFBAU UND BETRIEB EINES INSELNETZES AUF VERTEILNETZEBENE NACH EINEM BLACKOUT

Maximilian MÜTHERIG<sup>1\*</sup>, Giuseppe PULEO<sup>2</sup>,

Wolfgang KRAUSE<sup>3</sup>, Markus ZDRALLEK<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgungstechnik, Bergische Universität Wuppertal  
Rainer-Gruenter-Str. 21 | 42119 Wuppertal, Deutschland | +49 202 439 1939,  
[muetherig@uni-wuppertal.de](mailto:muetherig@uni-wuppertal.de) | Webauftritt: <https://www.evt.uni-wuppertal.de>

<sup>2</sup> Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgungstechnik, Bergische Universität Wuppertal  
Rainer-Gruenter-Str. 21 | 42119 Wuppertal, Deutschland | +49 202 439 1939,  
[puleo@uni-wuppertal.de](mailto:puleo@uni-wuppertal.de) | Webauftritt: <https://www.evt.uni-wuppertal.de>

<sup>3</sup> AWG Wuppertal, Konzert 15 | 42119 Wuppertal, Deutschland | 0202 4042 500,  
[wolfgang.krause@awg-wuppertal.de](mailto:wolfgang.krause@awg-wuppertal.de) | Webauftritt: [awg-wuppertal.de](http://awg-wuppertal.de)

<sup>4</sup>Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgungstechnik, Bergische Universität Wuppertal  
Rainer-Gruenter-Str. 21 | 42119 Wuppertal, Deutschland | +49 202 439 1976,  
[zdrallek@uni-wuppertal.de](mailto:zdrallek@uni-wuppertal.de) | Webauftritt: <https://www.evt.uni-wuppertal.de>

**Kurzfassung:** Nach einem großflächigen Stromausfall können Kritische Infrastrukturen mithilfe eines Inselnetzes auf Verteilnetzebene wiederversorgt werden [1]. Dabei muss das Inselnetz mithilfe eines schwarzstartfähigen Netzbildners aufgebaut werden, von welchem aus schrittweise Kritische Infrastrukturen zugeschaltet werden, da es ansonsten zu einer Überlastung der Betriebsmittel kommen kann [2]. Ein Netzbildner kann dabei mithilfe eines Generators, oder eines Wechselrichters ein Inselnetz aufbauen. Grundsätzlich besitzen konventionelle Netzbildner auf Verteilnetzebene, wie Wasserkraftwerke oder thermische Abfallbehandlungsanlagen, Generatoren. Durch den zukünftigen Ausbau von Technologien wie Brennstoffzellen oder Batteriespeicher werden sich auch wechselrichterdominierende Technologien auf Verteilnetzebene befinden. Diese können ebenfalls mithilfe eines netzbildenden Wechselrichters ein Inselnetz aufbauen. Dieses Paper zeigt drei Konzepte, wie mithilfe eines schwarzstartfähigen Netzbildners ein Inselnetz aufgebaut werden kann und wie weitere einspeisende Anlagen in das Inselnetz integriert werden können. Beim ersten Konzept baut der Netzbildner mithilfe eines Generators, oder eines Wechselrichters ein Inselnetz auf. Zusätzlich wird er durch weitere, in das Inselnetz einspeisende Anlagen, entlastet. Bei dem zweiten Konzept wird der Aufbau eines Inselnetzes mit einem Droop geregelten Netzbildner und Droop geregelten einspeisenden Anlagen vorgestellt, wodurch keine schwarzfallsichere Kommunikation erforderlich ist. In dem letzten Konzept wird der Aufbau eines Inselnetzes mithilfe eines überlagerten Reglers vorgestellt. Dieser steuert den Netzbildner und alle einspeisenden Anlagen des Inselnetzes. Durch die gezielte Vorgabe der Einspeiseleistung können Anlagen mit einer gesicherten Einspeiseleistung stärker belastet werden als Anlagen mit einer hohen Volatilität.

**Keywords:** Blackout, Inselnetz, Wiederversorgung, Netzaufbau

## 1 Einführung

Die steigende Anzahl volatiler erneuerbarer Energiequellen und der Ausbau leistungsintensiver Verbraucher (z. B. Elektromobilität und Wärmepumpen) führt zu einer dynamischen Belastung des Netzes. Dabei muss der erzeugte Strom direkt von den Verbrauchern abgenommen werden, da das Netz nicht über genügend Speichermöglichkeiten verfügt. Ist das Ungleichgewicht zu groß, kann das Netz in einem großen Gebiet zusammenbrechen. Dieses Phänomen wird auch als "Blackout" bezeichnet [3]. Für den Wiederaufbau eines Netzes gibt es zwei Strategien. Bei der ersten Strategie wird ein benachbartes Netz verwendet, das noch unter Spannung steht. Ist das benachbarte Netz instabil oder selbst zusammengebrochen, wird die zweite Strategie angewandt. In diesem Fall muss das Netz aus eigener Kraft wiederaufgebaut werden. Ausgehend von einer schwarzstartfähigen Anlage oder einem Kraftwerk wird das Netz schrittweise zusammenschaltet [4]. In beiden Ansätzen ist eine koordinierte, schrittweise Zuschaltung der Netzabschnitte entscheidend, um eine Überlastung der Anlagen zu vermeiden. Eine unmittelbare Wiederherstellung der gesamten Netzversorgung mit elektrischer Energie ist daher nicht möglich. Durch die große gesellschaftliche Abhängigkeit von kritischen Infrastrukturen ist es wichtig, dass diese schnellstmöglich wieder mit elektrischer Energie versorgt werden, damit eine Grundversorgung wiederhergestellt werden kann. Damit die Stromversorgung von kritischen Infrastrukturen auch während eines Stromausfalls gewährleistet ist, werden meist Dieselgeneratoren eingesetzt. Diese verfügen allerdings über begrenzte Brennstoffreserven und sind nicht in jeder kritischen Infrastruktur ausreichend vorhanden. Eine weitere Lösung, um kritische Infrastrukturen während eines großflächigen langandauernden Stromausfalls wieder zu versorgen, ist der Aufbau eines Inselnetzes auf Verteilnetzebene.

Im Forschungsprojekt SiSKIN „Großflächiger Stromausfall – Möglichkeiten zur Teilversorgung von kritischen Infrastrukturen“ wird ein Konzept entwickelt, um kritische Infrastrukturen mithilfe eines Inselnetzes nach einem Blackout wieder zu versorgen. Hierbei wird ausgehend von einem schwarzstartfähigen Netzbildner auf Verteilnetzebene ein Inselnetz aufgebaut. Als Netzbildner bieten sich dabei konventionelle Kraftwerke, als auch wechselrichtergesteuerte Anlage an, soweit diese ein Inselnetz aufbauen können. In diesem Paper werden drei Strategien aufgezeigt, wie ein Inselnetz mithilfe eines Netzbildners aufgebaut werden kann und wie weitere einspeisende Anlagen in das Inselnetz integriert werden können.

Im ersten Schritt werden die drei Konzepte vorgestellt. Beginnend mit dem Konzept, bei dem ein Netzbildner mithilfe eines Generators, oder Wechselrichter das Inselnetz aufbaut. Dabei wird aufgezeigt, wie der Netzbildner durch zusätzliche einspeisende Anlagen entlastet werden kann. Bei dem zweiten Konzept wird der Aufbau eines Inselnetzes mit einem Droop geregelten Netzbildner und Droop geregelten einspeisenden Anlagen vorgestellt, wodurch keine schwarzfallsichere Kommunikation erforderlich ist. In dem letzten Konzept wird der Aufbau eines Inselnetzes mithilfe eines überlagerten Reglers vorgestellt. Dieser steuert den Netzbildner und alle einspeisenden Anlagen des Inselnetzes. Durch die gezielte Vorgabe der Einspeiseleistung können Anlagen mit einer gesicherten Einspeiseleistung stärker belastet werden, als Anlagen mit einer hohen Volatilität.

Nachdem die Konzepte vorgestellt wurden, werden diese in einer Simulation validiert. Dabei wird zunächst aufgezeigt, wie die einzelnen Konzepte in eine Software implementiert wurden, um sie sowohl für Simulationen als auch im tatsächlichen Feld nutzen zu können.

Anschließend erfolgt die Erprobung der Konzepte anhand eines Stromnetzes in der Simulationsumgebung.

Nachdem die Konzepte simuliert wurden, werden die Ergebnisse analysiert. Dabei wird auf das dynamische Verhalten des Inselnetzes eingegangen und wie sich die einzelnen Konzepte auf die Frequenz- und Spannungsstabilität auswirken. Nachfolgend werden diese miteinander verglichen. Am Ende erfolgt ein Ausblick auf die praktische Umsetzung der Konzepte.

## **2 Wiederversorgungskonzepte**

### **2.1 Aufbau eines Inselnetzes auf Verteilnetzebene**

Für den schrittweisen Aufbau eines Inselnetzes auf Verteilnetzebene müssen bestimmte Maßnahmen ergriffen werden. Zunächst ist es erforderlich das Inselnetz gemäß der zuvor beschriebenen Methode schrittweise zu aktivieren. Dabei ist die Festlegung einer Prioritätenliste für kritische Infrastrukturen unerlässlich, um diese nach und nach in das Inselnetz einzubinden. Andernfalls könnte eine Zuschaltung zu einer zu starken Belastung des Netzes führen, wodurch das Netz wieder zusammenbricht [2]. Ebenso bedarf es einer Priorisierung der Erzeugungsanlagen, da diese ebenfalls schrittweise integriert werden müssen. Der Netzbildner mit Schwarzstartfähigkeit besitzt dabei die höchste Priorität, da von diesem aus das Inselnetz aufgebaut wird. Anschließend werden weitere Erzeugungsanlagen gemäß der Prioritätenliste hinzugeschaltet, um den Netzbildner zu entlasten. Dies kann beispielsweise notwendig sein, wenn der Netzbildner 80 % seiner Einspeiseleistung erreicht hat.

### **2.2 Schwarzstartfähiger Netzbildner**

Für den Aufbau eines Inselnetzes auf Verteilnetzebene ist ein schwarzstartfähiger Netzbildner von entscheidender Bedeutung. Schwarzstartfähigkeit bedeutet dabei, dass die Anlage unabhängig vom Stromnetz sich selber hochfahren kann [5]. Zusätzlich muss die Anlage fähig sein, die Frequenz und Spannung im Inselnetz zu regeln. Für die Steuerung der Frequenz nutzen konventionelle Kraftwerke wie Gaskraftwerke, oder thermische Abfallbehandlungsanlagen Drehzahlregler. Diese regeln die Drehzahl der Turbine und halten sie konstant. Dadurch, dass die Turbine mit dem Generator gekoppelt ist, entspricht die Drehzahl der Frequenz, mit der der Generator Spannung und Strom in das Netz einspeist. Grundsätzlich liegt die Netzfrequenz in Deutschland bei 50 Hertz. Für die Steuerung der Spannung nutzen Generatoren betriebene Netzbildner Spannungsregler, die über den Erregerstrom die Spannung an den Ausgangsklemmen des Generators regulieren [6]. Diese Spannungsregler spielen eine entscheidende Rolle, um sicherzustellen, dass die erzeugte elektrische Energie innerhalb der festgelegten Grenzen für die Spannung bleibt. Durch den Ausbau von wechselrichterdominierenden Technologien, befinden sich vermehrt Wechselrichter auf Verteilnetzebene. Diese unterscheiden sich in netzgeführte und netzbildende Wechselrichter. Für den Aufbau eines Inselnetzes auf Verteilnetzebene ist dabei ein netzbildender Wechselrichter nötig. Dieser kann, wie ein konventionelles netzbildendes Kraftwerk, auch die Spannung und Frequenz regeln. Die Besonderheit liegt darin, dass ein netzbildender Wechselrichter die Frequenz und Spannung nur mittels Leistungselektronik regelt und nicht durch mechanische Komponenten beeinflusst wird. Dadurch entsteht keine Trägheit, und die Netzfrequenz und Spannung kann sofort angepasst werden.

Im Folgenden werden drei Konzepte vorgestellt, wie Frequenz und Spannung in einem Inselnetz geregelt werden können und wie dabei ein Inselnetz aufgebaut werden kann.

### 2.3 Klassisches Konzept

Beim klassischen Konzept wird das Inselnetz ausgehend von einem schwarzstartfähigen Netzbildner aus hochgefahren. Der Netzbildner muss dabei in der Lage sein seine Frequenz und Spannung selbstständig regeln zu können. Hierbei werden diese beiden Größen wieder auf den Nennwert geregelt. Bei dem Netzbildner kann es sich dabei um einen Netzbildner mit Generator, oder mit Wechselrichter handeln. Die Frequenz und Spannung werden somit alleine von dem Netzbildner aus gesteuert und bei Zuschaltungen wieder auf den Nennwert geregelt. Wenn der Netzbildner entlastet werden soll, wird ein zusätzlicher Einspeiser hinzugeschaltet.

### 2.4 Droop Konzept

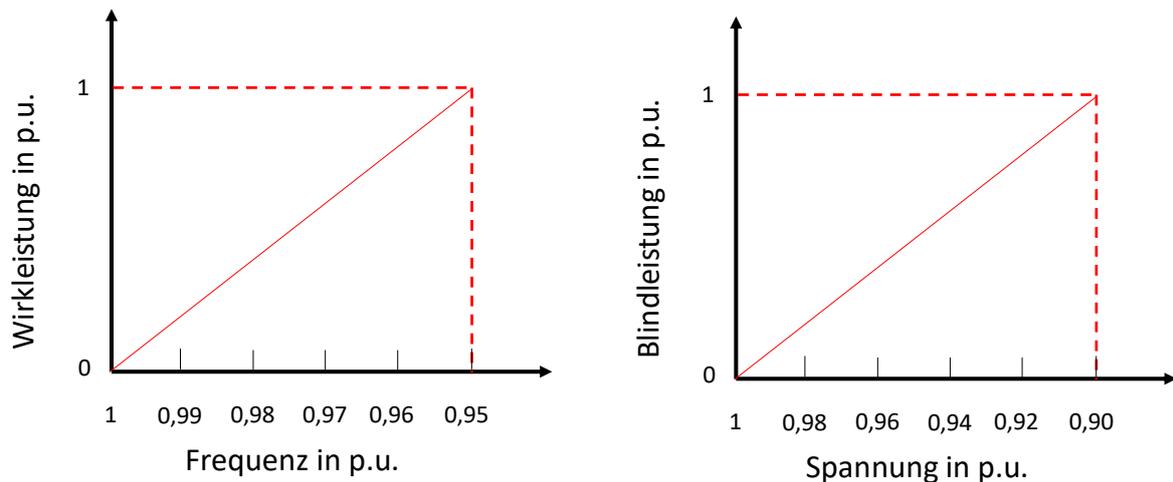
Für die Steuerung der Netzfrequenz nutzen netzbildende Wechselrichter eine  $f(P)$ -Regelung. Dabei wird als Einstellwert eine Statik verwendet, auch als Droop bezeichnet, die die Netzfrequenz in Abhängigkeit von der eingespeisten Wirkleistung des Wechselrichters beschreibt [7]. Die folgende Gleichung beschreibt die Statik für das Frequenz- und Wirkleistungsverhältnis [5]. Wobei  $\Delta f$  Abweichung von der Netzfrequenz,  $f_n$  die Nennfrequenz,  $\Delta P$  die erzeugte Wirkleistung und  $P_n$  die Nennwirkleistung beschreibt.

$$s = \frac{\frac{\Delta f}{f_n}}{\frac{\Delta P}{P_n}} \quad (1)$$

Umso höher die Statik eingestellt wird, umso größer ist  $\Delta f$ , welches sich nach der der Zuschaltung einer Last und der draus resultierenden erzeugten Wirkleistung  $P_n$  ergibt. Parallel zur  $f(P)$ -Regelung nutzen netzbildende Wechselrichter eine  $u(Q)$ -Regelung, die ebenfalls mithilfe einer Statik eingestellt wird. Abhängig von der erzeugten Blindleistung stellt der netzbildende Wechselrichter die Spannung ein. Die folgende Gleichung beschreibt die Statik für das Spannungs- und Blindleistungsverhältnis [8]. Wobei  $\Delta u$  Abweichung von der Spannung,  $u_n$  die Nennspannung,  $\Delta Q$  die erzeugte Blindleistung und  $Q_n$  die Nennblindleistung beschreibt.

$$s = \frac{\frac{\Delta u}{u_n}}{\frac{\Delta Q}{Q_n}} \quad (2)$$

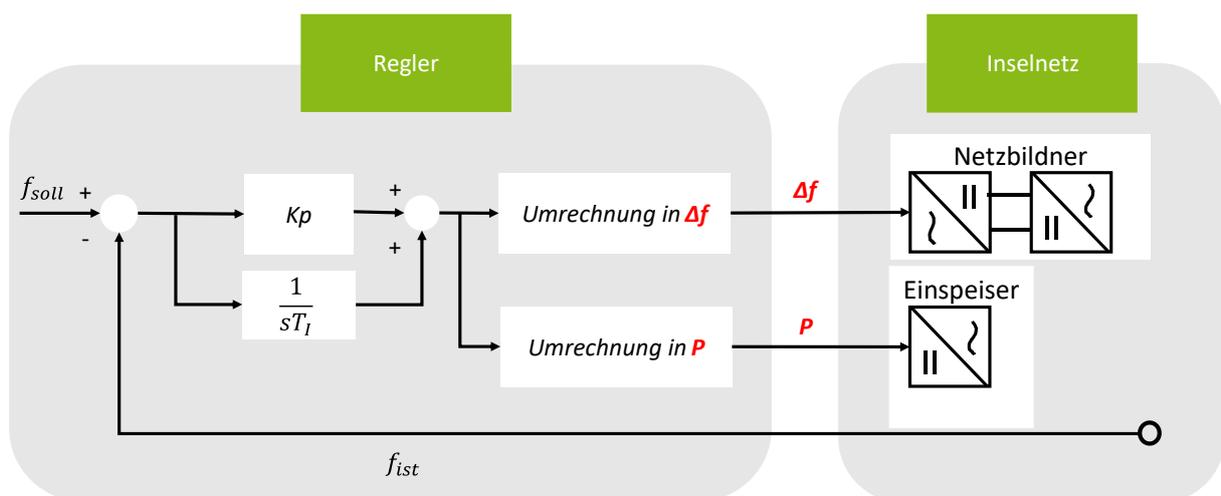
Einige netzgeführte Anlagen können eine  $P(f)$ -Regelung, sowie eine  $Q(u)$ -Regelung nutzen [9]. Hierbei wird die Wirkleistung abhängig von der Netzfrequenz und die Blindleistung abhängig von der Spannung eingespeist. Die Höhe der eingespeisten Wirk- und Blindleistung wird ebenfalls über die Statik festgelegt. Die folgende Abbildung 1 zeigt  $P(f)$ -Regelung mit einer Statik von 5 % und die  $Q(u)$ -Regelung mit einer Statik von 10 %.



**Abbildung 1:** P(f)-Regelung mit einer Statik von 5 % und die Q(u)-Regelung bei einer Statik 10 %

## 2.5 Regler Konzept

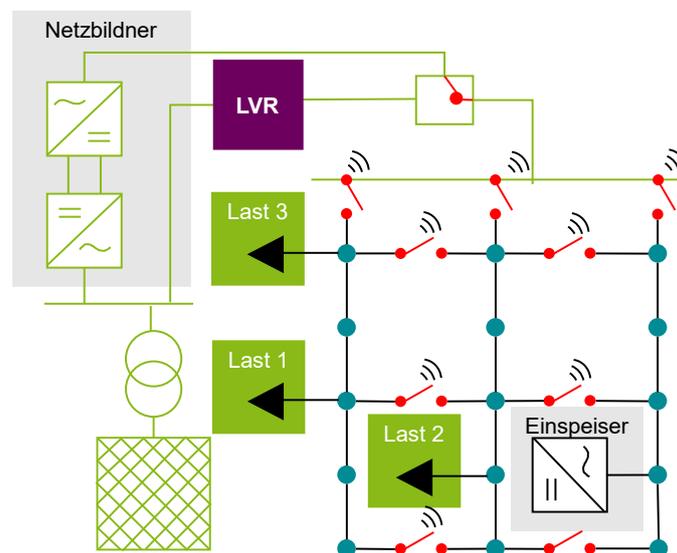
Bei diesem Konzept steuert ein übergeordneter PI-Regler die eingespeiste Wirk- und Blindleistung aller Anlagen im Netz. Dazu ist eine Kommunikationstechnik notwendig, über die die Anlagen gesteuert werden können. Auf Grundlage der Frequenz und Spannungsabweichung sendet der Regler Sollwerte an den Netzbildner und an weitere Einspeiser. Hierbei sendet der Regler an den Netzbildner Sollwerte für  $\Delta f$  und  $\Delta Q$  und an die weiteren Einspeiser Sollwerte für die einzuspeisende Wirkleistung (P) und Blindleistung (Q). Die folgende Abbildung 2 zeigt, wie der Regler auf Grundlage der gemessenen Frequenz Sollwerte an den Netzbildner und weitere Einspeiser sendet. Hierbei beschreibt  $K_p$  das P-Glied und  $\frac{1}{sT_I}$  das I-Glied des PI-Reglers.



**Abbildung 2:** Regler Konzept

### 3 Simulationsumgebung

Für die Simulation der Konzepte wurde ein bestehendes Softwarekonzept verwendet. Dabei kann ein in Simulink entwickelter Regler Sollwerte über eine Python-Schnittstelle an die Simulationssoftware PowerFactory senden [10]. In PowerFactory wird dabei eine RMS (Root Mean Square) Simulation durchgeführt. Damit die Konzepte angewendet werden können, ist in dem SiSKIN-Projekt ein Labortest geplant. Als Netz dient dabei das Smart-Grid-Labor an der Bergischen Universität Wuppertal, welches ein reales Niederspannungsnetz abbildet [11]. Das Netz verfügt über einen netzbildenden Wechselrichter, wodurch alle drei Konzepte umgesetzt werden können. Außerdem befinden sich in dem Netz Umrichter, welche weitere einspeisende Anlagen nachbilden können. Eine weitere Besonderheit sind fernsteuerbare Leistungsschalter, die sich im Smart-Grid-Labor befinden. Da der Aufbau eines Inselnetzes auf Verteilnetzebene schrittweise erfolgen muss, da es ansonsten zu starken Schwingungen kommen kann, können die Leistungsschalter einzeln Lasten, in Form von Lastbänken, zu schalten. Die folgende Abbildung 3 zeigt schematisch den Aufbau des Smart-Grid-Labors.



**Abbildung 3:** Aufbau des Smart-Grid-Labors an der Bergischen Universität Wuppertal

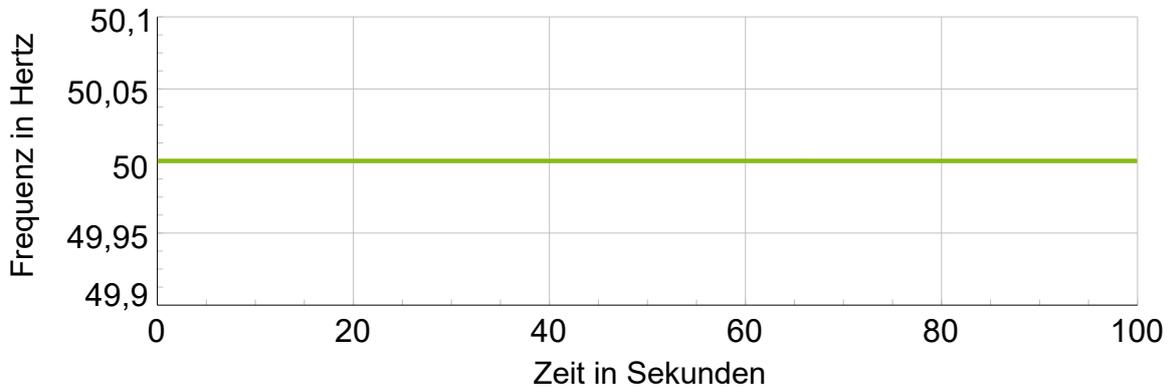
In dem untersuchten Szenario wird zuerst eine Last mit 9 kW und anschließend ein Einspeiser zugeschaltet, um den Netzbildner zu unterstützen und zu entlasten. Anschließend wird eine zweite Last mit 9 kW hinzugeschaltet. Zum Schluss wird eine dritte Last mit einer Wirkleistung von 6,216 MW und einem Blindleistungsanteil von 4,662 Mvar hinzugeschaltet.

### 4 Simulation der Konzepte

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Simulation vorgestellt. Dabei wird das Frequenzverhalten und das Spannungsverhalten analysiert. Die Spannung und Frequenz wurden dabei an dem Netzbildner gemessen.

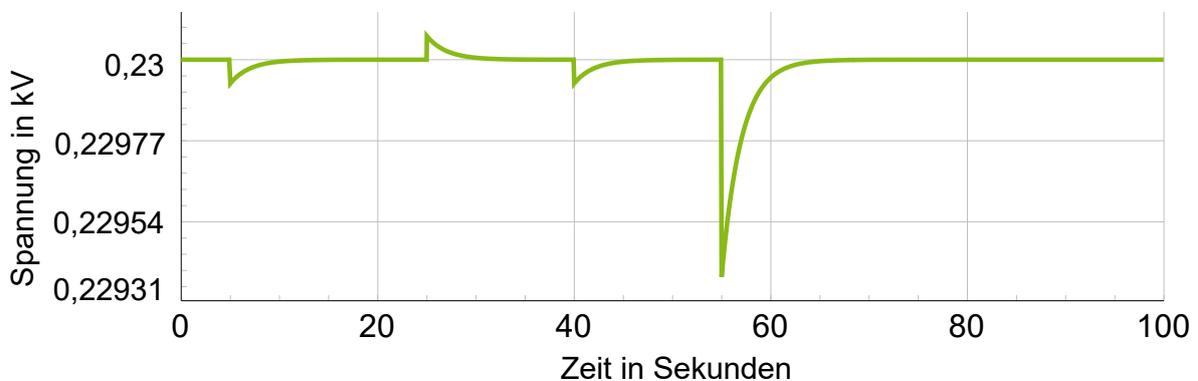
#### 4.1 Klassisches Konzept

Bei dem klassischen Konzept wird die Frequenz mithilfe des internen Frequenzreglers des Netzbildners konstant auf 50 Hertz gehalten. Die folgende Abbildung 4 zeigt die Netzfrequenz im betrachteten Szenario.



**Abbildung 4:** Frequenzverhalten des klassischen Konzepts

Parallel zur Frequenz wird auch die Spannung durch den internen Spannungsregler des Netzbildners konstant bei 230 Volt gehalten. Die nachfolgende Abbildung 5 veranschaulicht das Spannungsverhalten in dem untersuchten Szenario.



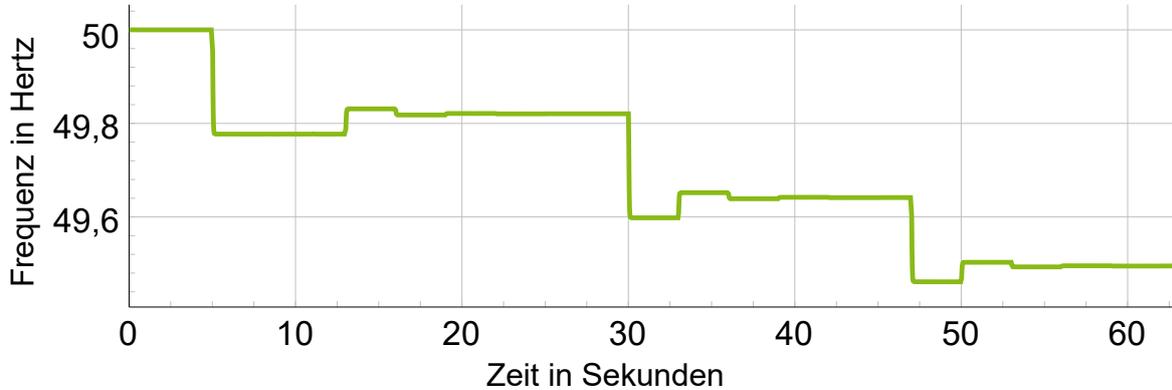
**Abbildung 5:** Spannungsverhalten des klassischen Konzepts

Hierbei sind leichte Einbrüche während den Zuschaltungen erkennbar. Nach 5 Sekunden wird die erste Last zugeschaltet, wobei ein Spannungseinbruch auf 229,943 Volt zu verzeichnen ist. Bei Sekunde 25 wird der Einspeiser hinzugeschaltet, was eine kurzzeitige Erhöhung der Spannung zur Folge hat. Anschließend kommt es zu einem weiteren Spannungseinbruch durch die Zuschaltung der zweiten Last. Zum Schluss wird die Last mit dem Blindleistungsanteil hinzugeschaltet, was zu einem stärkeren Spannungseinbruch führt und die Spannung auf 229,402 Volt absinkt. Anschließend wird die Spannung wieder auf den Sollwert von 230 Volt geregelt.

## 4.2 Droop Konzept

Bei diesem Konzept wurde eine Statik für die  $f(P)$ -Regelung des Netzbildners von 5 % gewählt. Die  $P(f)$ -Regelung des Einspeisers wurde ebenfalls auf 5 % festgelegt.

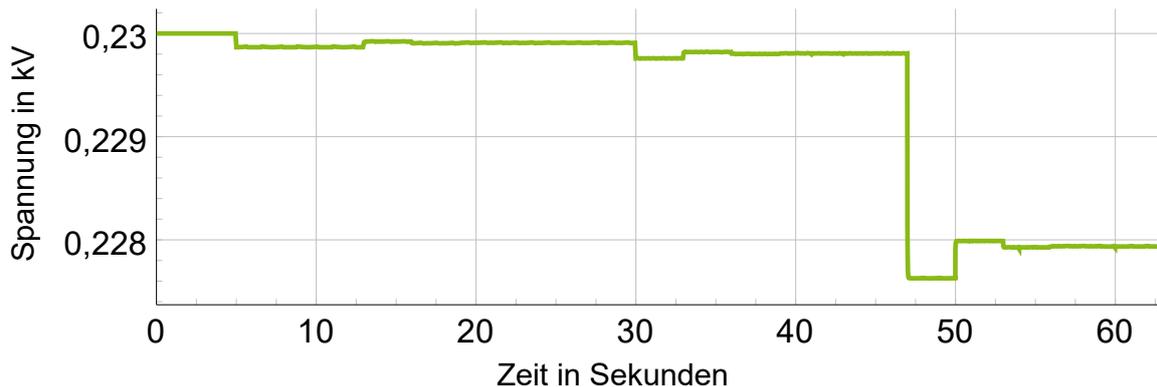
Die folgende Abbildung 6 zeigt das Frequenzverhalten in dem untersuchten Szenario.



**Abbildung 6:** Frequenzverhalten des Droop Konzepts

Nach 5 Sekunden wurde die erste Last mit 9 kW zugeschaltet, was zu einer Senkung der Frequenz auf 49,78 Hertz führte. In Sekunde 13 wurde dann der zusätzliche Einspeiser aktiviert, was zu einer Erhöhung der Netzfrequenz durch die zusätzliche Einspeisung führte. Nach 30 Sekunden wurde die dritte Last hinzugeschaltet, was zu einem Frequenzeinbruch auf 49,6 Hertz führte. Zum Schluss wurde nach 33 Sekunden die letzte Last zugeschaltet, wodurch die Frequenz auf 49,64 Hertz geregelt wurde.

Für die  $u(Q)$ -Regelung des Netzbildners wurde eine Statik von 5 % gewählt. Die  $Q(u)$ -Regelung des Einspeisers wurde mit einer Statik von 12,5 % eingestellt. Die nachfolgende Abbildung 7 veranschaulicht das resultierende Spannungsverhalten im betrachteten Szenario.

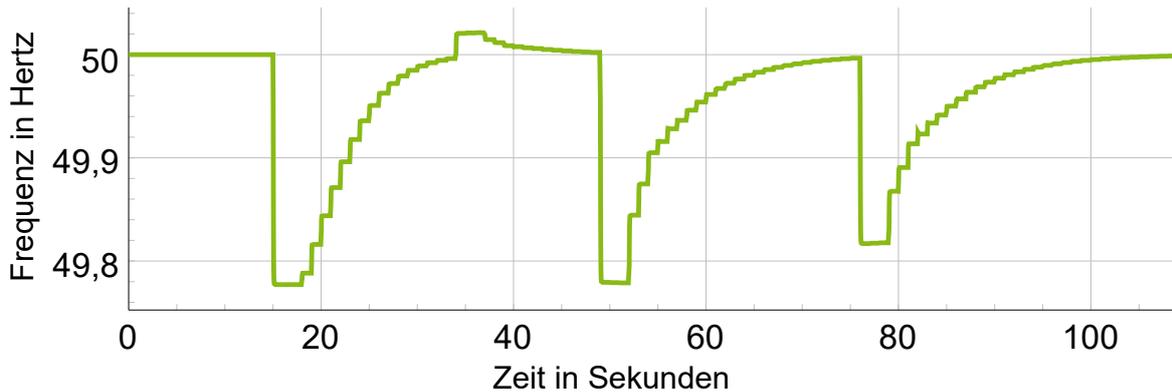


**Abbildung 7:** Spannungsverhalten des Droop Konzepts

Die Spannung sinkt beim ersten Einschalten auf einen Wert von 229,9 Volt. Bei der Aktivierung des Einspeisers steigt die Spannung leicht an. Danach fällt sie bei der zweiten Lastzuschaltung auf 229,8 Volt ab. Bei der letzten Lastzuschaltung sinkt die Spannung stark und erreicht einen Wert von 227,6 Volt. Dies ist auf den Blindleistungsanteil der Last zurückzuführen.

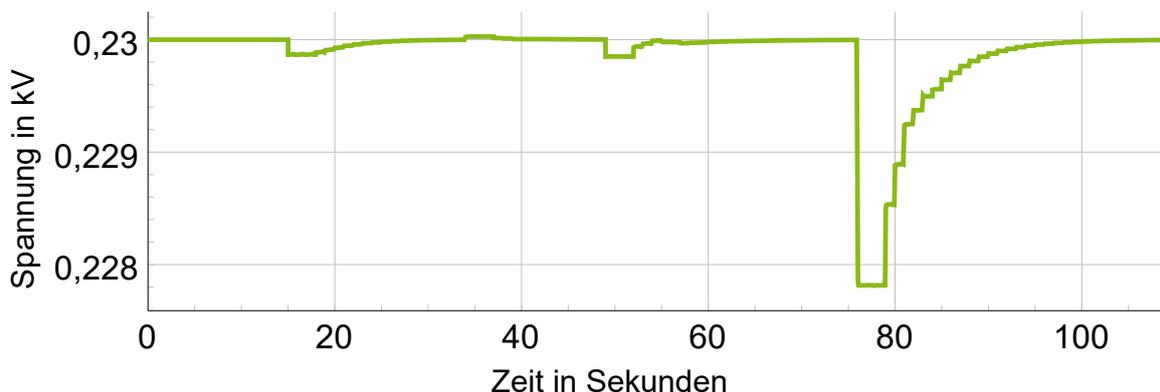
### 4.3 Regler Konzept

Im Regler Konzept wirkt zunächst die Statik des Netzbinders, wodurch die Frequenz nach einer Lastschaltung auf einen festen Wert eingestellt wird. Anschließend übernimmt der Regler die Aufgabe, die Frequenz wieder auf die Nennfrequenz zurückzuführen und die Leistung auf die Anlagen zu verteilen. Die folgende Abbildung 8 zeigt das Frequenzverhalten des Regler Konzepts.



**Abbildung 8:** Frequenzverhalten des Regler Konzepts

In der sechsten Sekunde tritt der erste Frequenzeinbruch auf, verursacht durch das Zuschalten der ersten Last von 9 kW. Nachdem der Regler die Netzfrequenz wieder auf 50 Hertz eingestellt hat, indem er Sollwerte an den netzbildenden Wechselrichter sendet, wird in der 34. Sekunde der einspeisende Umrichter aktiviert. Dies erfolgt durch den Regler, der Sollwerte an den Umrichter sendet. Dabei steigt zunächst die Frequenz und wird anschließend wieder auf 50 Hertz geregelt. Anschließend wird die zweite Last mit 9 kW hinzugeschaltet, wobei die Netzfrequenz über den Regler gesteuert wird, der den Netzbildner und Einspeiser steuert. Zum Schluss wird die letzte Last hinzugeschaltet, und die Netzfrequenz wird erneut auf 50 Hertz geregelt. Die folgende Abbildung 9 zeigt das Spannungsverhalten des Regler Konzepts.



**Abbildung 9:** Spannungsverhalten des Regler Konzepts

Parallel zur Frequenz fällt die Spannung bei der Zuschaltung der ersten Last ab und wird durch den PI-Regler, der Sollwerte für  $\Delta Q$  an den Netzbildner sendet, wieder auf 230 Volt eingestellt.

Anschließend wird der Einspeiser zugeschaltet, wodurch die Spannung leicht angehoben und wieder auf den Sollwert geregelt wird. Nun beteiligen sich der Netzbildner und der Einspeiser an der Spannungsregelung. In der 49. Sekunde wird die zweite Last zugeschaltet, gefolgt von der dritten. Beim Zuschalten der dritten Last ist ein deutlicher Spannungseinbruch erkennbar, welcher durch den Blindleistungsanteil verursacht wird. Anschließend wird die Spannung wieder auf den Sollwert von 230 Volt geregelt.

## 5 Zusammenfassung

Dieses Paper hat gezeigt, wie ein Inselnetz auf Verteilnetzebene aufgebaut werden kann. Dabei wurden drei Konzepte vorgestellt. Bei dem ersten Konzept übernimmt der Netzbildner eigenständig die Regelung von Frequenz und Spannung. Um den Netzbildner zu entlasten, wurde ein zusätzlicher Einspeiser eingeführt. Damit dieser Einspeiser Leistung zuführen kann, muss er über eine Kommunikationsschnittstelle einen Befehl erhalten. In einem Netz erfolgt dies über eine drahtlose Telekommunikation, wodurch nur einzelne Werte vom Einspeiser übertragen werden können, da auch nur einzelne Werte über ein Telefon mitgeteilt werden können. Außerdem kann dabei die Einspeiseleistung der zusätzlichen Einspeiser ohne Abhängigkeit vom aktuellen Frequenzzustand genutzt werden. Die Simulation hat zudem gezeigt, dass die Frequenz und Spannung erfolgreich auf den Sollwert geregelt wurden, wodurch die Netzstabilität erhalten blieb. Dieses Konzept ist auf andere Netze anwendbar, die über einen schwarzstartfähigen Netzbildner ohne Droop-Funktion verfügen.

Das zweite Konzept zeichnet sich durch das Weglassen einer Kommunikationsschnittstelle aus, da die Anlagen direkt über die Frequenz und Spannung miteinander kommunizieren. Damit das Netz stabil bleibt ist es wichtig, dass der Netzbildner, die  $f(P)$ -Regelung und  $u(Q)$ -Regelung beherrscht. Gleichzeitig müssen die Einspeiser die Statik für die  $P(f)$ -Regelung und  $Q(u)$ -Regelung anpassen können, wie es in den technischen Anschlussrichtlinien für Nieder- und Mittelspannung vorgeschrieben ist. Um kritische Situationen bezüglich der Frequenzstabilität im Nieder- und Mittelspannungsnetz zu vermeiden, müssen die angeschlossenen Erzeugungsanlagen ihre Wirkleistungseinspeisung je nach Netzfrequenz anpassen [12]. In der Simulation wurde festgestellt, dass die Frequenz und Spannung nicht auf den gewünschten Wert zurückgeregelt wurden. Dies liegt am Proportionalitätsfaktor der Regelung, der eine bleibende Regeldifferenz verursacht. Dieses Konzept eignet sich besonders gut für Inselnetze, da ohne eine zusätzliche Kommunikationsschnittstelle der Netzzustand übermittelt werden kann und Anlagen dadurch ihre Leistung anpassen können.

Unter Verwendung des Regler-Konzepts wurde zunächst die Frequenz und Spannung allein durch den Netzbildner auf den Sollwert geregelt. Zu diesem Zweck übermittelte der Regler Sollwerte zunächst ausschließlich an den Netzbildner. Nachdem der zusätzliche Einspeiser hinzugeschaltet wurde, beteiligte sich dieser ebenfalls an der Regelung von Frequenz und Spannung. Hierzu übermittelte der Regler ebenso Sollwerte für die einzuspeisende Wirk- und Blindleistung an den Einspeiser. Dieses Konzept erfordert eine Kommunikationsschnittstelle, die die Übermittlung der Sollwerte vom Regler zu dem Netzregler als auch den zusätzlichen Einspeisern ermöglicht. Auf diese Weise kann die einzuspeisende Leistung der Anlagen direkt vom Regler gesteuert werden. Dadurch besteht die Möglichkeit, Anlagen mit einer sichereren Einspeiseleistung stärker zu belasten als solche mit einer weniger sicheren Einspeiseleistung.

## 6 Ausblick

Die Simulationen haben gezeigt, dass die Konzepte theoretisch durchführbar sind und sich für den Aufbau eines Inselnetzes eignen. Nun steht die Umsetzung der Konzepte in einem Labortest an, um die Simulationen in einer realen Umgebung zu überprüfen. Die Erkenntnisse aus dem Labortest werden dann genutzt, um gegebenenfalls Anpassungen an den Konzepten vorzunehmen und die Leistungsfähigkeit des Inselnetzes weiter zu verbessern. Nach erfolgreicher Validierung im Labor wäre eine Implementierung der Konzepte in einem Feldtest wichtig, um die Praxistauglichkeit der Konzepte zu überprüfen.

## 7 Danksagung

Die in dieser Publikation vorgestellten Arbeiten beruhen auf Forschungsaktivitäten, die durch das Land Nordrhein-Westfalen gefördert wurden. Grundlage für die Förderung ist die Richtlinie zur Gewährung von Zuwendungen aus dem "Programm für rationelle Energieverwendung, regenerative Energien und Energiesparen - [progres.nrw](https://www.progres.nrw.de/) - Programmbereich Innovation". Die beschriebenen Themen sind Teil des Forschungsprojektes "SiSKIN": (Referenznummer: EFO 0094A). Für den Inhalt dieses Beitrags sind ausschließlich die Autoren verantwortlich.

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] G. Puleo, et al., "Islanding algorithm for the resupply of critical infrastructures during a prolonged blackout," Proceedings of the International ETG Congress 2023, Kassel, 2023.
- [2] M. Gratza et al., "Methode zur einfachen Abschätzung der maximalen Frequenzabweichung bei Lastsprüngen in Inselnetzen," in 15. Symposium Energieinnovation, Graz, Österreich, 2018.
- [3] T. Petermanne, et al., "Was bei einem Blackout geschieht: Folgen eines langandauernden und großflächigen Stromausfalls," Berlin: Edition Sigma, 2011.
- [4] consentec, "Netzwiederaufbaukonzepte vor dem Hintergrund der Energiewende," 2020.
- [5] A. J. Schwab, "Netzzusammenbrüche," in *Elektroenergiesysteme*, Berlin: Springer, 2022.
- [6] E. Handschin, "Spannungs-Regelung," in *Elektrische Energieübertragungssysteme*, Heidelberg: Hüthig, 1987.
- [7] U. B. Tayab et al., "A review of droop control techniques for microgrid," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Band 76, Seite 717-727, 2017.
- [8] M. Dewadasa et al., "Dynamic response of distributed generators in a hybrid microgrid", IEEE General Meeting Power & Energy Society, Detroit, USA, 2011.
- [9] M. A. Abusara et al., "Improved droop control strategy for grid-connected inverters" Sustainable Energy, Grids and Networks, Band 1, Seite 10-19, 2015.
- [10] M. Mütherig, et al. "Identification of the frequency behaviour of a power plant during a load step in a microgrid", Proceedings of the NEIS Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage, Hamburg, 2023.
- [11] M. Koch et al., "Low Voltage Laboratory Grid for Smart Grid Systems with Bidirectional Power Flows," Proceedings of the International ETG Congress 2023, Kassel, 2023.
- [12] D. Willenberg., "Designfaktoren für den stabilen Inselnetzbetrieb in NS-/MS-Netzen," Ph.D. dissertation, RWTH Aachen, Aachen, 2021.