

Schwarzstart, Betrieb und Synchronisation eines umrichterbasierten Inselnetzes geführt durch einen netzbildenden Batteriespeicher

Carolin Vogel (*)¹, Anja Ufkes², Rolf Witzmann¹

¹ Technische Universität München, School of Engineering and Design, Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgungsnetze, Arcisstraße 21, D-80333 München, www.epe.ed.tum.de/hsa, 0049 89 289-25090, carolin.vogel@tum.de

² Technische Universität Clausthal, Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme, Leibnizstraße 28, D-38678 Clausthal-Zellerfeld

Kurzfassung: Die Umsetzung eines Konzepts für den Inselnetzbetrieb setzt im Allgemeinen detaillierte Kenntnisse der zugrundeliegenden netzbildenden Regelung voraus. Basiert das Konzept auf dem Betrieb eines netzbildenden Batteriespeichers, ist der Einsatz zusätzlicher Erzeugungseinheiten mit einzuplanen, da der Batteriespeicher nicht unbegrenzt Leistung zur Verfügung stellen kann. Die Regelungen dieser zusätzlichen Erzeugungseinheiten und deren Einfluss auf die netzbildende Regelung des Batteriespeichers sind im Konzept für den Inselnetzbetrieb zu berücksichtigen. Dies gilt sowohl für netzparallel betriebene Anlagen, als auch für weitere netzbildende Einheiten. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse eines Feldversuchs zur Erfassung des Regelverhaltens eines Batteriespeichers mit netzbildender Droop Regelung vorgestellt. Untersucht werden verschiedene Belastungen des Batteriespeichers im netzbildenden Betriebsmodus, die gemeinsame Inselnetzbildung in Kombination mit einem Notstromaggregat und die Synchronisation mit dem öffentlichen Netz. Generell zeigt sich ein stabiles Spannungs- und Frequenzverhalten im Inselnetz entsprechend der eingestellten $f(P)$ - bzw. $U(Q)$ -Statiken, auch bei Belastung des Batteriespeichers über die Nennleistung hinaus. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage für weiterführende Untersuchungen in Form von Simulationen, wobei die erhobenen Messdaten auch zur Validierung vorhandener Modelle (Batteriespeicher und Notstromaggregat im Inselnetzbetrieb) verwendet werden.

Keywords: Netzbildende Umrichter, Droop Regelung, Batteriespeicher, Inselnetzbetrieb, Feldversuche, Synchronisation

1 Einleitung

Im Forschungsprojekt INZELL (Netzstützung und Systemdienstleistungserbringung durch eine Industriezelle mit Inselnetzfähigkeit und Erneuerbaren Energien) wird ein ganzheitliches Konzept für die Weiterversorgung eines industriellen Mittelspannungsnetzes im Falle großflächiger Versorgungsausfälle entwickelt. Ein Batteriespeicher (BESS) mit netzbildender Funktion und die vorhandenen dezentralen Erzeugungsanlagen (DEA, hier z. B. PV- und Windkraftanlagen) bilden hierbei die Grundlage für die Versorgung des Werksnetzes im Inselnetzbetrieb. Der BESS kann den Leistungsbedarf des Netzes nicht immer alleine decken, wodurch die aktive Beteiligung der DEA im Regelungskonzept berücksichtigt werden muss. [1] In welchem Umfang eine zuverlässige Versorgung des Inselnetzes gewährleistet werden kann, hängt dabei maßgeblich von den Belastungsgrenzen des BESS im netzbildenden Betriebsmodus ab. Da sich diese von denen im Netzparallelbetrieb unterscheiden, sind sie im Inselnetz zu erfassen.

Im Rahmen eines ersten Feldversuchs werden entsprechende Messungen in einem vereinfachten Inselnetz-Testaufbau durchgeführt [2]. Der Testaufbau ermöglicht umfangreiche praktische Untersuchungen mit netzbildendem BESS, die in diesem Ausmaß im Werksnetz nicht möglich sind. Die Ziele der Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Erkenntnisgewinn zu den Belastungsgrenzen des netzbildenden BESS und zum Einfluss verschiedener Parameter auf dessen netzbildende Funktion (Droop Regelung).
- Praktische Erprobung von Konzepten für die Netzbildung, den Inselnetzbetrieb und die Synchronisation eines Inselnetzes mit netzbildendem BESS, sowohl alleine als auch im Verbund mit einem Notstromaggregat (NEA, Diesel).
- Validierung und gegebenenfalls Anpassung vorhandener Simulationsmodelle (DIgSILENT PowerFactory, MATLAB/Simulink) anhand der erhobenen Messdaten.

2 Der Inselnetz-Testaufbau

Die im Rahmen des Versuchsaufbaus entworfene Anordnung, bestehend aus BESS, NEA, Asynchronmaschine (ASM), Kondensator (C-Bank) und ohmsch-induktiver Lastbank (GLB), kann sowohl netzparallel als auch im Inselnetz betrieben werden. Die relevanten elektrischen Kenndaten der Komponenten sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Elektrische Kenndaten der Komponenten des Inselnetz-Testaufbaus [3, 4, 5, 6, 7]

	Nennleistung	Nennstrom	Leistungsfaktor **	Spannung	Frequenz
BESS	68,5 kVA	100 A	-1,0 bis 1,0	400 V	50 Hz
NEA	50 kVA	72 A	0,8		
GLB	1.000 kVA *	1,4 kA	0,8 bis 1,0		
ASM	11 kW	23 A	0,84		
C-Bank	35 kvar	51 A	0		

* Wirkleistung per Sollwertvorgabe auf bis zu 1 kW genau einstellbar, Blindleistung über Leistungsfaktor definiert.

** Positiver Leistungsfaktor \triangleq induktivem Verhalten bzw. negativer Leistungsfaktor \triangleq kapazitivem Verhalten.

Im Fokus der Untersuchungen stehen Strategien zur Bildung, Regelung und Synchronisation eines Inselnetzes mit netzbildendem BESS, wobei der BESS die Versorgung der Lasten je nach Anwendungsfall alleine oder gemeinsam mit dem NEA übernimmt. Für Vergleichszwecke werden auch Versuche mit NEA als alleinigem Netzbildner durchgeführt. In Abbildung 1 ist der schematische Aufbau des 0,4 kV Inselnetzes mit netzbildendem BESS dargestellt.

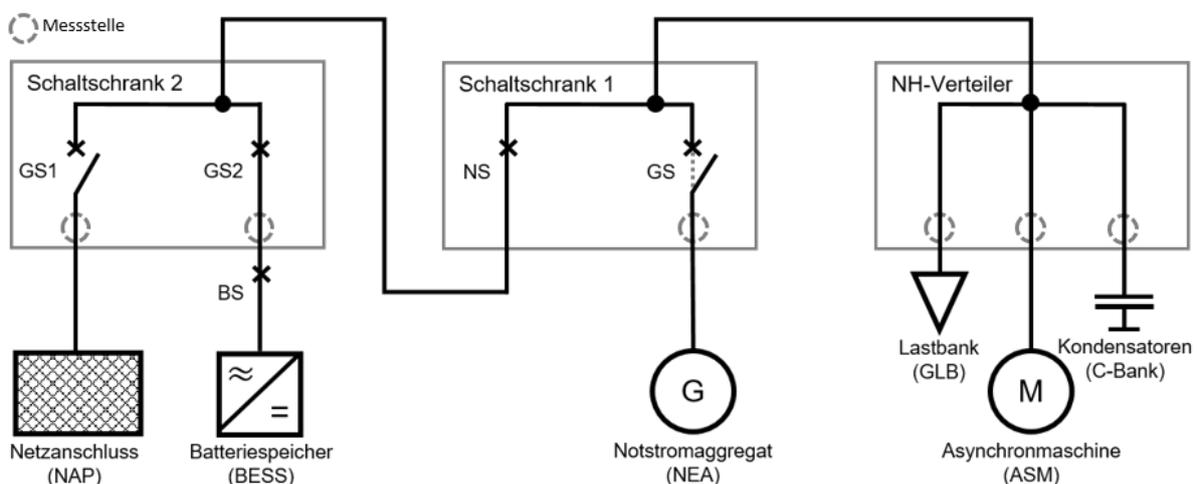


Abbildung 1: Schematische Darstellung des 0,4 kV Inselnetzes für die Betriebsfälle mit netzbildendem BESS

Die Ansteuerung der Komponenten erfolgt über einen zentralen Steuer-PC. Über diesen können die regelbaren Komponenten (BESS, NEA und GLB) zunächst im Standby Modus, also vor der eigentlichen Inselnetzbildung, parametrierbar und anschließend auch im laufenden Inselnetzbetrieb angesteuert werden (Sollwertvorgaben). Die nicht regelbaren Komponenten (ASM und C-Bank) können jederzeit über den Steuer-PC zu oder abgeschaltet werden.

Zur Erfassung der relevanten Messgrößen (Spannungen, Ströme, Leistungen und Frequenz) werden insgesamt sechs Netzanalysatoren der Firma A. Eberle (PQ-Box 300) und der Firma NEO Messtechnik (PQA 8000) verwendet. Diese speichern sowohl die zyklischen Daten der gesamten Versuchsreihe (z. B. PQ-Box: 200 ms-Daten), als auch höher aufgelöste Daten (z. B. PQ-Box: 10 ms-RMS-Daten, Oszilloskop Aufzeichnungen) für definierte Ereignisse (Laständerungen, Frequenzschwankungen etc.). Gemessen und aufgezeichnet wird immer an allen Komponenten, die während einer Versuchsreihe aktiv sind (vgl. Abbildung 1, grau).

3 Inselnetzbildung und -betrieb mit netzbildendem BESS

Die im Folgenden beschriebenen Versuche starten jeweils mit dem Hochfahren des BESS im netzbildenden Betriebsmodus. Dieser prüft zunächst ob bereits ein externes Netz vorhanden ist, auf das er sich gegebenenfalls aufsynchronisieren kann, oder ob er das Netz eigenständig bilden muss (Schwarzstart). Sobald der Hochfahrvorgang abgeschlossen ist, werden alle zu Beginn der Versuchsreihe angeschlossenen Lasten versorgt. Welche Lasten dies sind (GLB, ASM und/oder C-Bank) ist abhängig vom untersuchten Anwendungsfall.

3.1 Parametrierung des netzbildenden Betriebsmodus des BESS

Im netzbildenden Betriebsmodus stellt der BESS Frequenz und Spannung im Inselnetz entsprechend seiner hinterlegten $f(P)$ - bzw. $U(Q)$ -Statiken ein (Umrichter mit Droop Regelung). Die Statiken werden jeweils durch Vorgabe einer Steigung (s_f bzw. s_U) und eines Referenzarbeitspunktes (f_{ref} , P_{ref} bzw. U_{ref} , Q_{ref}) definiert. Je steiler die Statiken eingestellt sind, desto größer ist die resultierende Frequenz- bzw. Spannungsabweichung von den Referenzwerten bei abweichender Belastung des BESS ($P_{ist} \neq P_{ref}$ bzw. $Q_{ist} \neq Q_{ref}$). Die im Inselnetz-Testaufbau verfügbaren Wertebereiche der Parameter zur Einstellung des netzbildenden Betriebsmodus des BESS sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Im Rahmen der Versuchsdurchführung wird der verfügbare Einstellbereich der Parameter vollständig ausgenutzt.

Tabelle 2: Im Inselnetz-Testaufbau verfügbare Parameter für den netzbildenden Betriebsmodus des BESS [3, 8]

	Name	Verfügbarer Einstellbereich *			Im Betrieb veränderbar
		minimal	maximal	default	
Referenzwirkleistung	P_{ref}	-68,5 kW	68,5 kW	0 kW	ja
Referenzblindleistung	Q_{ref}	-68,5 kvar	68,5 kvar	0 kvar	ja
Referenzfrequenz	f_{ref}	47,5 Hz	52,5 Hz	50 Hz	ja
Referenzspannung	U_{ref}	208 V	253 V	230 V	ja
Steigung der $f(P)$-Statik	s_f	0,1 %	2 % **	2 %	nein
Steigung der $U(Q)$-Statik	s_U	2 %	10 %	5 %	nein

* Negative Wirkleistungswerte \triangleq Bezug (Laden) bzw. positive Wirkleistungswerte \triangleq Einspeisung (Entladen).

Negative Blindleistungswerte \triangleq Bezug induktiv bzw. positive Blindleistungswerte \triangleq Einspeisung induktiv.

** Der vom Hersteller vorgesehene Maximalwert für s_f wird für einzelne Versuche von 2 % auf 4 % erhöht.

In Tabelle 3 sind fünf der verwendeten Parametersätze dargestellt, wobei die Steigungen der Statiken nicht direkt eingestellt werden, sondern über Hilfwerte (P_{lim} , f_{delta} bzw. Q_{lim} , U_{delta}).

Tabelle 3: Im Inselnetz-Testaufbau verwendete Parametersätze für den netzbildenden Betriebsmodus des BESS

		S_{std}	$S_{f,min}$	$S_{f,max}$	$S_{u,min}$	$S_{u,max}$
	P_{ref}	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
	Q_{ref}	0 kvar	0 kvar	0 kvar	0 kvar	0 kvar
	f_{ref}	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz
	U_{ref}	230 V	230 V	230 V	230 V	230 V
S_f	P_{lim}	68,5 kW	68,5 kW	68,5 kW	68,5 kW	68,5 kW
	f_{delta}	0,5 Hz	0,05 Hz	1,0 Hz	0,5 Hz	0,5 Hz
S_u	Q_{lim}	68,5 kvar	68,5 kvar	68,5 kvar	68,5 kvar	68,5 kvar
	U_{delta}	5 %	5 %	5 %	2 %	10 %

Im linken Teil der Abbildung 2 ist der Zusammenhang der einzelnen Parameter grafisch am Beispiel der $f(P)$ -Statik dargestellt. Für die Parameter der $U(Q)$ -Statik gilt das gleiche Prinzip.

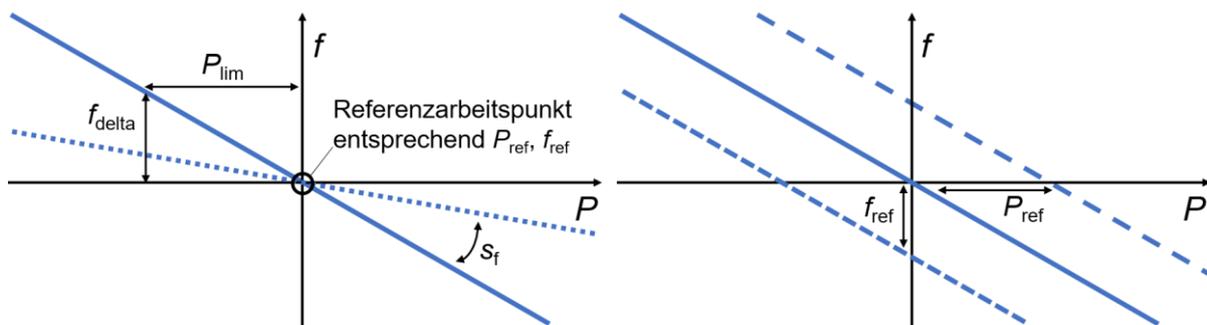


Abbildung 2: Veranschaulichung der Parameter zur Einstellung des netzbildenden Betriebsmodus des BESS
links: Allgemeine Darstellung der $f(P)$ -Statik; rechts: Verschiebung der $f(P)$ -Statik durch Änderung von P_{ref} oder f_{ref}

Während die Steigungen der Statiken im Testaufbau bereits im Standby Modus des BESS eingestellt werden müssen, also noch vor der Bildung des Inselnetzes, ist eine Änderung der Referenzarbeitspunkte und somit eine horizontale oder vertikale Verschiebung der Statiken auch im laufenden Inselnetzbetrieb möglich (vgl. Abbildung 2, rechts). Dadurch kann das netzbildende Verhalten des BESS bei Bedarf angepasst werden (z. B. nach großen Lastsprüngen bzw. Leistungsänderungen, um den BESS zu entlasten und ein vollständiges Auf- oder Entladen zu vermeiden oder zur Netzangleichung während der Synchronisation).

3.2 Symmetrische Belastung des netzbildenden BESS (Entladen)

Zur Erfassung des prinzipiellen netzbildenden Verhaltens des BESS werden zunächst Versuche bei symmetrischer, ohmsch-induktiver Belastung mit der GLB durchgeführt. Dafür werden nacheinander verschiedene Wirkleistungssollwerte ($P_{Last,soll}$) an der GLB eingestellt, wobei sich in Abhängigkeit vom eingestellten Leistungsfaktor auch die bezogene Blindleistung ändert.

In Abbildung 3 sind die zeitlichen Verläufe der am BESS gemessenen 10 ms-RMS-Messwerte für Frequenz und Spannung dargestellt. Gezeigt ist das Verhalten des BESS nach einem Lastsprung ($\Delta P_{Last,soll} = 10$ kW mit $\cos(\varphi) = 0,9$) für drei Parametersätze (vgl. s_{std} , $s_{f,min}$ und $s_{f,max}$). Die Variation der Steigung der $f(P)$ -Statik wirkt sich wie zu erwarten auf den neuen stationären Wert der Frequenz aus. Bei minimaler Steigung der $f(P)$ -Statik stellt sich für den gezeigten

Lastsprung ein Frequenzwert von 49,99 Hz ein, bei der Standardeinstellung sind es 49,93 Hz und bei der maximalen Steigung 49,88 Hz. Auf den im rechten Teil der Abbildung 3 dargestellten Spannungsverlauf wirkt sich die Änderung der $f(P)$ -Statik nicht aus. Analoge Versuche mit Variation der $U(Q)$ -Statik wirken sich wiederum auf die Spannung aus, nicht auf die Frequenz.

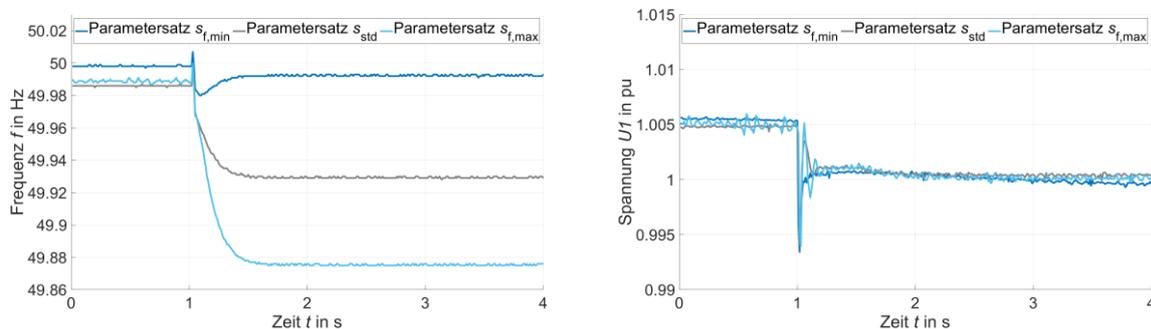


Abbildung 3: Gemessene Zeitverläufe (10 ms-RMS-Daten) bei Belastung ($\Delta P_{Last,soll} = 10$ kW, $\cos(\varphi) = 0,9$) links: Frequenz bei Variation der $f(P)$ -Statik; rechts: Spannung bei Variation der $f(P)$ -Statik

In weiteren Versuchen wird das Verhalten des BESS bei Zuschaltung der ASM untersucht. Die ASM wird jeweils im Leerlauf zugeschaltet. Wobei sich der für die Untersuchung interessante Anlaufstrom ($I_{max,RMS} \approx 200$ A) nicht von dem unter Belastung unterscheidet. In Abbildung 4 sind die am BESS gemessenen 10 ms-RMS-Messwerte von Spannung und Frequenz für die Zuschaltung der ASM ohne Grundlast und mit ohmsch-induktiver Grundlast ($P_{Last,soll} = 60$ kW mit $\cos(\varphi) = 0,9$), also nahe der Nennleistung des BESS ($S_{BESS,nenn} = 68,5$ kVA) dargestellt. Um die Messwerte beider Zuschaltvorgänge vergleichen zu können, sind sie mit einem Zeitversatz von einer Sekunde abgebildet. Der Versuch mit Grundlast zeigt insbesondere bei der Spannung einen starken Einbruch durch die kurzfristige Überlastung des BESS. Trotzdem kann nach wenigen hundert Millisekunden ein neuer stabiler Zustand eingestellt werden.

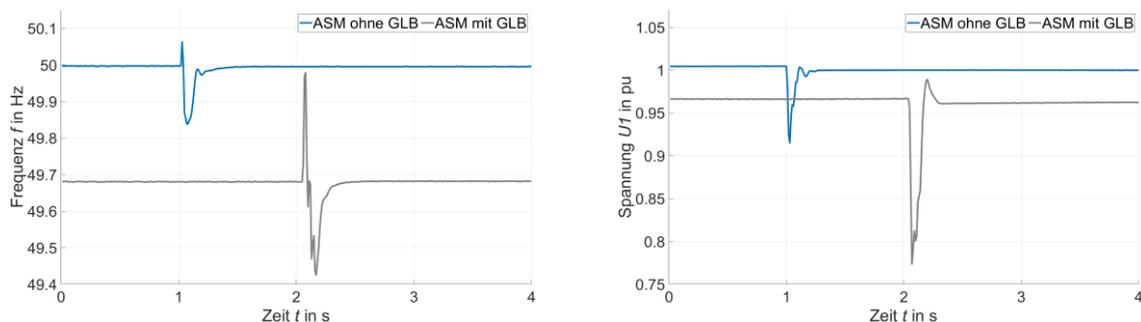


Abbildung 4: Gemessene Zeitverläufe (10 ms-RMS-Daten) bei Belastung des BESS durch den Anlauf der ASM links: Frequenz am BESS; rechts: Spannung am BESS

3.3 Symmetrische Speisung des netzbildenden BESS (Laden)

Über die Vorgabe von Wirkleistungswerten an das NEA ($P_{NEA,soll}$) können vergleichbare Versuche während des Ladens des BESS durchgeführt werden. Hierfür wird das NEA im Netzparallelbetrieb auf das vom BESS gebildete Inselnetz aufsynchronisiert. In Abbildung 5 sind die am BESS gemessenen 10 ms-RMS-Messwerte von Frequenz und Spannung der bereits in den Versuchen mit der GLB verwendeten Parametersätze dargestellt. Gezeigt ist das Verhalten des BESS bei einer Erhöhung der vom NEA eingespeisten Leistung ($\Delta P_{NEA,soll} = 10$ kW mit $\cos(\varphi) = 0,9$), wobei das NEA bereits zu Beginn eine Wirkleistungseinspeisung von 30 kW

aufweist und diese auf 40 kW erhöht. Der deutlich langsamere Anstieg der Frequenz bzw. Spannung lässt sich darauf zurückführen, dass die Leistungsänderung des NEA deutlich langsamer ist als die der GLB. Wie zu erwarten, führt die Variation der $f(P)$ -Statik auch hier zu unterschiedlichen Frequenzwerten, während der Spannungsverlauf nicht beeinflusst wird.

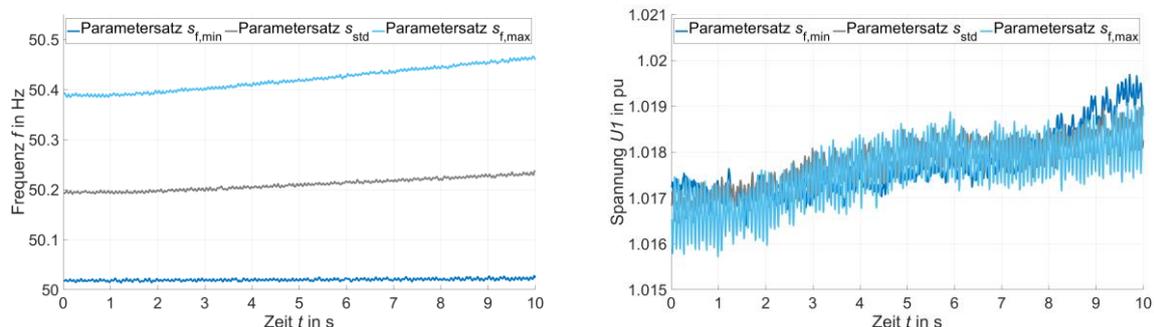


Abbildung 5: Gemessene Zeitverläufe (10 ms-RMS-Daten) bei Speisung ($\Delta P_{NEA,soll} = 10 \text{ kW}$, $\cos(\varphi) = 0,9$)
links: Frequenz bei Variation der $f(P)$ -Statik; rechts: Spannung bei Variation der $f(P)$ -Statik

3.4 Überlastbetrieb des netzbildenden BESS

Eine Besonderheit des im Inselnetz-Testaufbau verwendeten BESS liegt in dessen Überlastfähigkeit. Diese ist abhängig von der Bauart mit bis zu 125 % der Nennleistung für bis zu zehn Minuten bzw. 150 % der Nennleistung für bis zu einer Minute angegeben [3]. Umfangreiche Untersuchungen zur Beanspruchung des BESS innerhalb dieser Grenzen für den Überlastbetrieb liefern Ergebnisse, die mit denen im Normalbetrieb vergleichbar sind. Dies gilt für die Belastung ($S_{Last} > S_{BESS,nenn}$) und für die Speisung ($S_{NEA} > S_{BESS,nenn}$) des BESS. Die Speisung des BESS im Überlastbetrieb wird an einem der drei Umrichter getestet (sonst $S_{NEA} < S_{BESS}$).

3.5 Unsymmetrische Belastung des netzbildenden BESS

Wie sich eine unsymmetrische Belastung auf die eingeprengte Spannung (und Frequenz) auswirkt, wird in Schiefastversuchen mit unsymmetrischer Belastung durch die GLB untersucht. Dieser werden erneut Wirkleistungssollwerte mit einem $\cos(\varphi) = 0,9$ vorgegeben, wobei nur zwei Phasen angeschlossen sind (Phase L2 abgeklemmt). In Abbildung 6 sind die am BESS aufgezeichneten 10 ms-RMS-Messdaten für die Frequenz und die Spannung der drei Phasen für eine zweiphasige Belastung des BESS mit insgesamt 60 kVA dargestellt. Da der Blindleistungsbedarf der GLB fast vollständig an Phase L1 anliegt, reduziert der BESS im Wesentlichen nur die Spannung der Phase L1 entsprechend der hinterlegten $U(Q)$ -Statik (vgl. s_{std}).

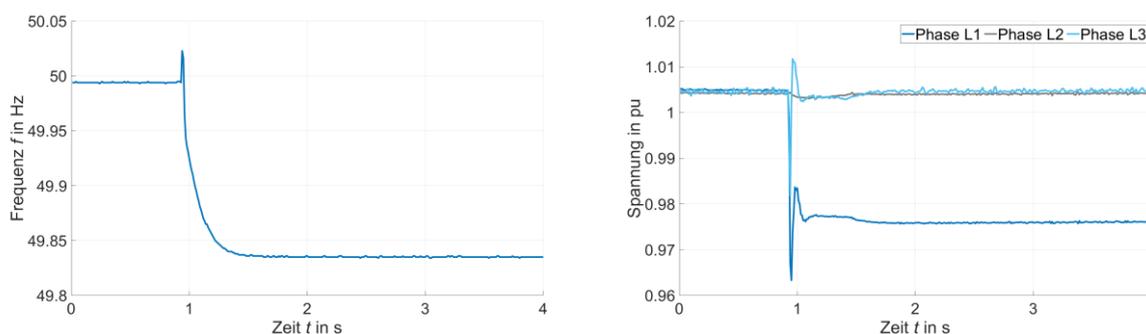


Abbildung 6: Gemessene Zeitverläufe (10 ms-RMS-Daten) bei unsymmetrischer Belastung des BESS
links: Frequenz am BESS; rechts: Spannung am BESS

4 Inselnetzbildung und -betrieb mit zwei netzbildenden Erzeugern

Für die Versuche mit zwei netzbildenden Erzeugern wird das Inselnetz erst mittels NEA gebildet und anschließend der BESS im netzbildenden Betriebsmodus aufsynchronisiert.

Das Zusammenspiel der beiden Netzbildner wird bei ohmsch-induktiver Belastung untersucht. Hierfür wird die Last erneut stufenförmig verändert. In Abbildung 7 sind die gemessenen Zeitverläufe der 10 ms-RMS-Messwerte für einen exemplarischen Lastsprung ($\Delta P_{\text{Last,soll}} = 10 \text{ kW}$ mit $\cos(\varphi) = 0,9$) dargestellt. Gezeigt sind die am BESS gemessenen Werte für Frequenz und Spannung für zwei Parametersätze des BESS (vgl. $s_{f,\text{min}}$ und s_{std}). Im zeitlichen Verlauf der Frequenz ist der Einfluss der Variation der $f(P)$ -Statik deutlich erkennbar. Da, wie bereits bei den Versuchen mit dem BESS als alleinigem Netzbildner, keine zusätzliche Änderung der $U(Q)$ -Statik vorgenommen wird, bleibt der Spannungsverlauf erneut unbeeinflusst.

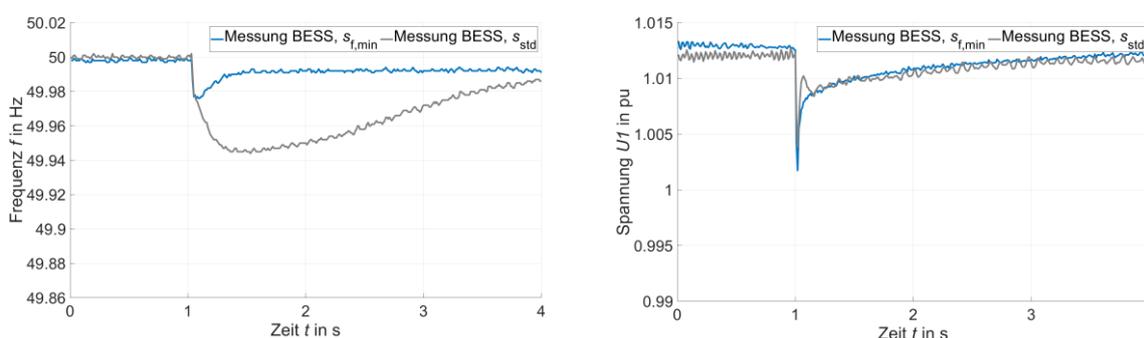


Abbildung 7: Gemessene Zeitverläufe (10 ms-RMS-Daten) bei ohmsch-induktiver Belastung von BESS und NEA links: Frequenz bei Variation der $f(P)$ -Statik; rechts: Spannung bei Variation der $f(P)$ -Statik

Aus den gezeigten zeitlichen Verläufen von Frequenz und Spannung lässt sich bereits ableiten, dass der BESS die Leistungsänderung im ersten Moment alleine ausgleicht und Frequenz und Spannung anhand seiner hinterlegten Statiken einstellt. Das NEA reagiert aufgrund seiner deutlich trägeren Regelung langsamer. Somit hängen die kurzzeitigen Frequenz- und Spannungsabweichungen nach einem Lastsprung maßgeblich von den Statiken des BESS ab. Dies wird auch in den zeitlichen Verläufen der Wirk- und Blindleistung deutlich, die in Abbildung 8 dargestellt sind. Gezeigt sind die 10 ms-RMS-Messdaten der an BESS und NEA gemessenen Leistungen für das Beispiel aus Abbildung 7. Zu erkennen sind die kurzzeitige vollständige Leistungsübernahme durch den BESS und dessen allmähliche Entlastung durch das NEA.

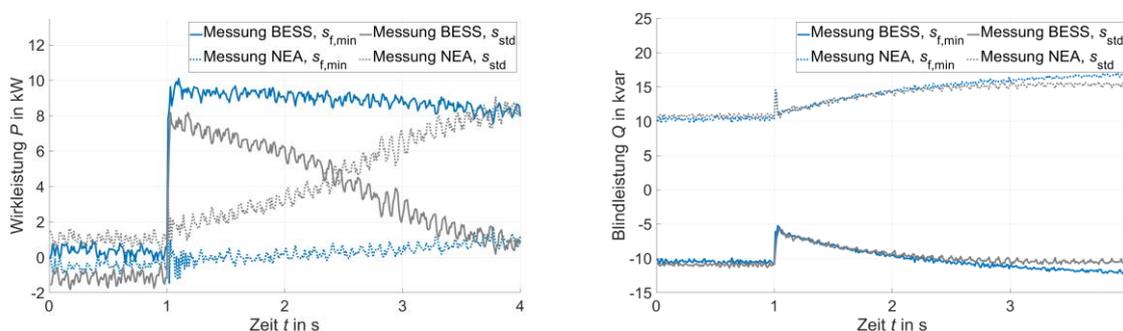


Abbildung 8: Gemessene Zeitverläufe (10 ms-RMS-Daten) bei ohmsch-induktiver Belastung von BESS und NEA links: Wirkleistung bei Variation der $f(P)$ -Statik; rechts: Blindleistung bei Variation der $f(P)$ -Statik

Während der Versuchsdurchführung mit zwei netzbildenden Erzeugern kommt es wiederholt zu Leistungspendelungen zwischen BESS und NEA, insbesondere bei sehr flacher $f(P)$ -Statik

des BESS. Auch im obigen Beispiel treten Leistungspendelungen auf, die besonders in den zyklischen Messdaten der Wirkleistung zu erkennen sind. Im linken Teil der Abbildung 9 sind diese für den Parametersatz $s_{t,min}$ über einen Zeitraum von circa vier Minuten dargestellt. Es ist hervorzuheben, dass das NEA in diesem Fall durchgängig Leistung bereitstellt, also die Last versorgt und den BESS lädt, wobei der Höchstwert der vom NEA eingespeisten Wirkleistung ($P_{NEA,max} = 23 \text{ kW}$ bei $t = 70 \text{ s}$) circa 40 s nach dem Lastsprung auftritt. In einigen anderen Fällen führen die Leistungspendelungen jedoch auch zu einer Rückspeisung ins NEA ($P_{NEA} < 0 \text{ kW}$) und damit zu dessen Abschaltung durch eine Schutzauslösung. Im rechten Teil der Abbildung 9 sind die zyklischen Daten eines Versuchs mit Schutzauslösung gezeigt. Zu sehen sind der negative Lastsprung ($t = 305 \text{ s}$) und die Leistungspendelungen zwischen BESS und NEA sowie die Abschaltung des NEA bei Rückspeisung ($t = 355 \text{ s}$). Nach Abschaltung des NEA bleibt das Inselnetz bestehen, wobei der BESS die alleinige Führung übernimmt.

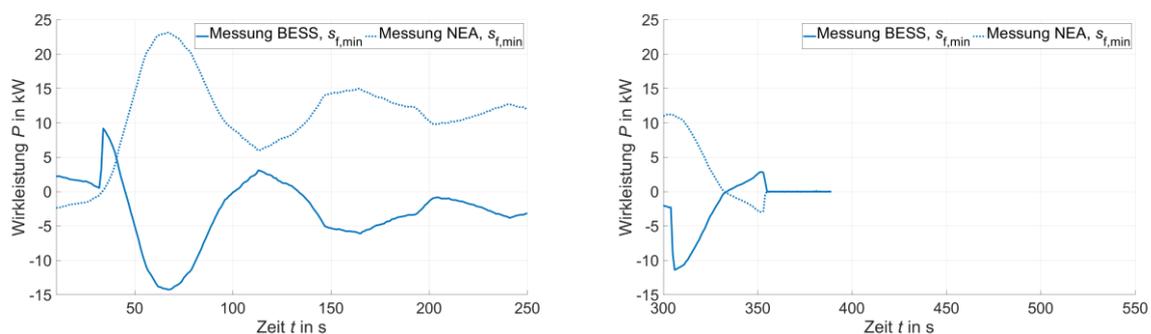


Abbildung 9: Gemessene Wirkleistung (200 ms Daten) bei ohmsch-induktiver Belastung von BESS und NEA links: Leistungspendelungen; rechts: Leistungspendelungen, Rückspeisung und Schutzauslösung

Die gemeinsame Netzbildung mit BESS und NEA ohne detaillierte Abstimmung der Regelungen gelingt im Testaufbau nur in Einzelfällen. Eine zuverlässige Versorgung des Inselnetzes kann dabei ausschließlich für Lastsituationen sichergestellt werden, die innerhalb der Betriebsgrenzen des BESS liegen. Für einen stabilen Inselnetzbetrieb über die Betriebsgrenzen des BESS hinaus, ist es unbedingt nötig, dass alle beteiligten Netzbildner über einstellbare Statiken (oder anderweitig abgestimmte Regelungen) verfügen. Insbesondere bei mehr als zwei Netzbildnern kann nur so eine koordinierte Leistungsaufteilung stattfinden. Da die Regelung des NEA im Testaufbau nicht angepasst werden kann, sind hierzu keine Messungen möglich.

5 Synchronisation des Inselnetzes mit dem öffentlichen Netz

Die bereits beschriebenen Versuche zur Inselnetzbildung mit netzbildendem BESS werden jeweils durch die Synchronisation des Inselnetzes mit dem öffentlichen Netz abgeschlossen. Hierfür wird ein Synchronisationsgerät der Firma KORA Industrie-Elektronik verwendet (KORA-SYN-8). Der allgemeine Ablauf der im Inselnetz-Testaufbau durchgeführten Synchronisationsvorgänge ist in Abbildung 10 anhand der im KORA-SYN-8 implementierten Logik dargestellt. Er beginnt mit der Erteilung des Freigabesignals (Syn-Freigabe) und endet mit dem Schließen des Leistungsschalters (Syn-Impuls). Da das externe Netz während der Versuche jederzeit verfügbar ist (Normalbetrieb, keine Störungen oder Versorgungsausfälle), wird die Freigabe manuell erteilt. So wird eine ungewollte frühzeitige Synchronisation verhindert.

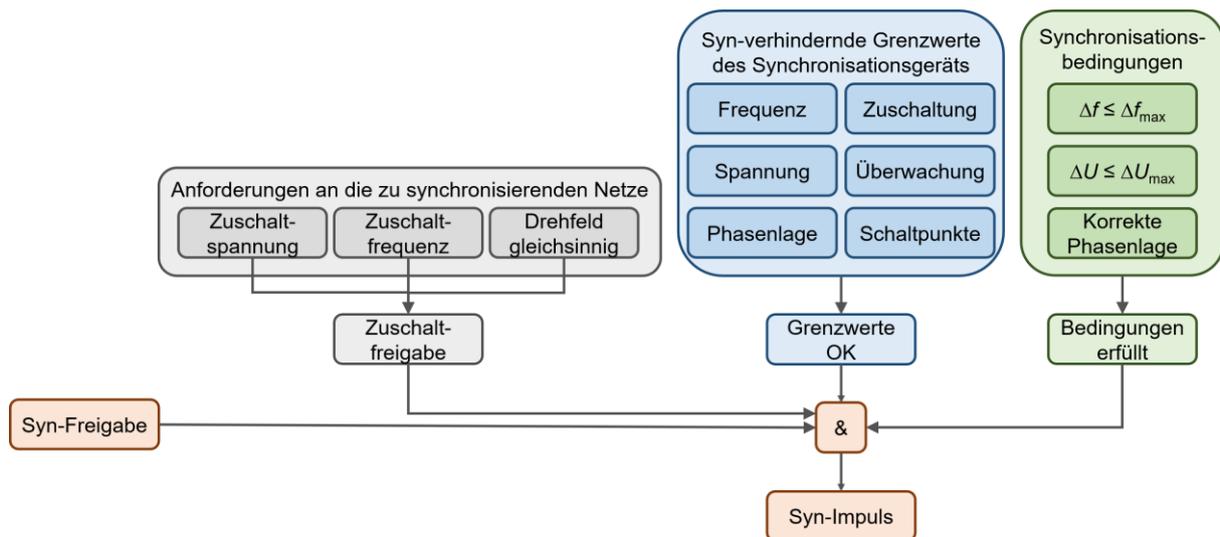


Abbildung 10: Vereinfachte Darstellung der implementierten Synchronisationslogik nach [9]

Im Inselnetz-Testaufbau werden sowohl die aktuell gültigen Synchronisationsbedingungen für die Niederspannung (VDE-AR-N 4105) als auch die für die Mittelspannung (VDE-AR-N 4110) berücksichtigt. Dies ermöglicht einen Vergleich der Bedingungen im Testaufbau mit denen im Werksnetz. Die jeweils erlaubten maximalen Abweichungen von Spannung, Frequenz und Phase der beiden zu synchronisierenden Netze sind in Tabelle 4 gegenübergestellt.

Tabelle 4: Synchronisationsbedingungen für die Mittel- und Niederspannung [10, 11]

	Name	Niederspannung	Mittelspannung
Spannungsabweichung *	ΔU_{\max}	$\pm 10 \%$	$\pm 5 \%$
Frequenzabweichung **	Δf_{\max}	$\pm 500 \text{ mHz}$	$\pm 200 \text{ mHz}$
Phasendifferenz	$\Delta \varphi_{\max}$	$\pm 10^\circ$	$\pm 10^\circ$

* Der laut Anwendungsregel vorgesehene minimale Wert für ΔU_{\max} wird für einzelne Versuche auf 1 % reduziert.

** Der laut Anwendungsregel vorgesehene minimale Wert für Δf_{\max} wird für einzelne Versuche auf 20 mHz reduziert.

Die Versuche im Inselnetz-Testaufbau zeigen, dass der BESS in Kombination mit dem KORA-SYN-8 eine sichere Möglichkeit für die Synchronisation des Inselnetzes mit dem öffentlichen Netz bietet. Der BESS ist sowohl im Leerlauf als auch unter Belastung in der Lage die Netzangleichung durchzuführen und im Anschluss an die Synchronisation wie vorgeschrieben in den Netzparallelmodus zu wechseln. Es zeigt sich jedoch auch, dass die Wahl der Synchronisationsbedingungen und die Parametrierung der Regler zur Nachführung von Spannung und Frequenz einen erheblichen Einfluss auf die Gesamtdauer des Synchronisationsvorgangs haben. Dies führt in Einzelfällen zu einem Abbruch des Synchronisationsvorgangs, da die vom KORA-SYN-8 vorgesehene Maximaldauer überschritten wird. Da im Inselnetz-Testaufbau kein Lastrauschen auftritt, ist die Synchronisation auch bei sehr eng gewählten Toleranzgrenzen (z. B. $\Delta U_{\max} = 1\%$ statt 5 % und $\Delta f_{\max} = 20 \text{ mHz}$ statt 200 mHz) möglich. Damit ist jedoch in größeren Inselnetzen mit schwankender Last- und Erzeugungsleistung nicht mehr zu rechnen, da bereits kleine Spannungs- oder Frequenzschwankungen in einem der beiden Netze dazu führen können, dass das Inselnetz nachgeregelt werden muss.

6 Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse des vorgestellten Inselnetz-Testaufbaus zeigen, dass ein Inselnetzbetrieb mit netzbildendem BESS als alleinigem Netzbildner möglich ist, solange der Leistungsbedarf sich innerhalb dessen Betriebsgrenzen befindet. Dabei kann der BESS kurzzeitige Überlastungen und sprunghafte Leistungsänderungen (z. B. bei einem Ausfall zusätzlicher Erzeugungseinheiten durch Schutzauslösung oder bei der Zuschaltung einer ASM) ebenfalls abfangen. Für die Umsetzung einer verteilten Netzbildung bei kleinen Inselnetzen ist eine Abstimmung der Regelungen aller beteiligten Netzbildner erforderlich. Im Inselnetz-Testaufbau ist dies nicht möglich, wodurch mehrfach Leistungspendelungen zwischen BESS und NEA auftreten. Ein erfolgversprechender Ansatz für einen langfristig stabilen Inselnetzbetrieb unter Berücksichtigung weiterer DEA ist es, den BESS als alleinigen Netzbildner einzusetzen und die anderen Erzeugungsanlagen im Netzparallelbetrieb aufzusynchronisieren. Konzepte zur Abstimmung der netzstützenden Funktionen der Regelungen der DEA und der netzbildenden Regelung des BESS werden basierend auf den vorgestellten Ergebnissen simulativ erprobt.

Danksagung

Der vorgestellte Inselnetz-Testaufbau ist im Rahmen des Projektes INZELL am Campus der OTH Regensburg entstanden. Die Autoren danken der Hochschulleitung der OTH und allen beteiligten Personen für die Unterstützung bei der praktischen Umsetzung vor Ort und für die fachlichen Diskussionen. Besonderer Dank gilt den Projektpartnern INTILION AG und Bredenoord BV, die durch die Bereitstellung des Batteriespeichers, des Notstromaggregats und großer Teile der elektrischen Infrastruktur Versuche in diesem Umfang ermöglicht haben.

Referenzen

- [1] Projektwebsite INZELL, [Online]. <https://forschungsprojekt-industriezelle.de/>
- [2] L. Brey, „Erprobung von Inselnetz-Betriebsstrategien im Outdoor-Leistungslabor am Campus der OTH Regensburg“, 2023. [Online]. <https://forschungsprojekt-industriezelle.de/blog-post/>
- [3] INTILION AG, „Technisches Datenblatt, scalebloc, power boost, 68,5 kVA“
- [4] Bredenoord BV, „Technische Daten, Aggregat 50 kVA Super Silent“
- [5] Bredenoord BV, „Technische Daten, induktiver Lastwiderstand, 1000 kVA“
- [6] Schorch-Werke AG Rheydt, „Typenschild, d3KHC 550/4“
- [7] Condensator Dominit, „Technische Daten, Festkondensator CLMD, 35 kvar“
- [8] INTILION AG, „Betriebsanleitung, scalebloc, power boost, 68,5 kVA“, 2023.
- [9] KORA Industrie-Elektronik, „Handbuch, Synchronisier-Gerät SYN-8“, 2021.
- [10] VDE, „VDE-AR-N 4105 - Anwendungsregel: 2018-11, Erzeugungsanlagen im Niederspannungsnetz“, 2018.
- [11] VDE, „VDE-AR-N 4110 - Anwendungsregel: 2023-09, Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Mittelspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Mittelspannung)“, 2023.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

