

Zusätzliche Anmerkungen zum „Erlaubten Arbeitsbereich“, „Gefährdeten Zustand“ und „Reservebetrieb“¹

Zusammenfassung und Fazit

Für arbeitsvermögenbegrenzte Einheiten gibt es einen **erlaubten Arbeitsbereich**, dessen Grenzen sich an dem **Speicherverhältnis**, also der Relation zwischen vermarkteter Leistung und Speicherkapazität, orientieren. Dieser erlaubte Arbeitsbereich darf nur verlassen werden, falls ein **gefährdeter Zustand** eintritt, der über Szenarien in der Frequenzabweichung gem. Art. 3 (2) Nr. 17 der Commission Regulation (EU) 2017/1485 definiert ist. Nach Ende des gefährdeten Zustands muss vom Anbieter so schnell wie möglich, spätestens aber innerhalb von **zwei Stunden**, sichergestellt werden, dass der Speicherstand der Einheit wieder den erlaubten Arbeitsbereich erreicht. Dies gilt für den Fall, dass der erlaubte Arbeitsbereich im gefährdeten Zustand verlassen worden ist. Bei länger anhaltendem gefährdeten Zustand kann der Speicherstand an die Randbereiche des gesamten Arbeitsvermögens gelangen. Damit der Regelleistungsbeitrag nicht komplett erlischt, ist eine Grenze definiert, bei deren Überschreitung die Einheit in den **Reservebetrieb** wechselt. Während dieses (in Deutschland **fünf-minütigen**) Übergangs vom Normal- in den Reservebetrieb geht die für die Aktivierung von FCR durch die Einheit **ausschlaggebende Frequenzabweichung** von der **real gemessenen** Frequenzabweichung im Netz linear in die **Abweichung von einer neuen Referenzfrequenz** über. Die neue Referenzfrequenz mittelt dabei in dynamischer Weise die letzten fünf Minuten im Frequenzverlauf. Die angepasste Erbringung durch die Einheit im Reservebetrieb erlaubt es ihr, den Speicher nicht maßgeblich weiter zu erschöpfen, zugleich weiterhin zur Systemstabilität beizutragen und sich innerhalb neu definierter erlaubter Erbringungsgrenzen zu bewegen.

Das Konzept des Reservebetriebs für arbeitsvermögenbegrenzte Einheiten bringt systemseitig vorteilhafte Eigenschaften mit sich:

Anbieter können nach Erreichen der jeweiligen Ober- oder Untergrenze für den Reservebetrieb durch die Reaktion auf die Abweichung von der neuen Referenzfrequenz ihre Einheit mit einer zuvor im Rahmen des Präqualifikationsverfahrens festgelegten Maximalleistung ent- bzw. nachladen. Das Gesamtsystem profitiert insofern vom Reservebetrieb, dass bei wachsender Frequenzabweichung auch arbeitsvermögenbegrenzte Einheiten im Reservebetrieb noch zur Systemstabilität beitragen, indem sie den dynamischen Anteil der Frequenzabweichung ausregeln.

Erlaubter Arbeitsbereich und Speicherverhältnis

Das erste wichtige Paar von Begrenzungen innerhalb des Arbeitsvermögens stellen dabei die Grenzen des **erlaubten Arbeitsbereiches** dar. Durch diese soll gewährleistet werden, dass die Einheit zu jedem Zeitpunkt noch für mindestens 15 Minuten die gesamte vermarktete Leistung erbringen kann (in Anlehnung an Art. 156(9) der Commission Regulation (EU) 2017/1485, bevor ein fünf-minütiges Speichervermögen für den Übergang in den Reservebetrieb (vgl. Erklärung

¹ In Anlehnung an die regulatorischen Grundlagen des „Synchronous Area Framework Agreement II“ (SAFA II) sowie die „Additional Properties for FCR“ in Übereinstimmung mit Art. 154(2) der Commission Regulation (EU) 2017/1485

Berlin, Bayreuth, Dortmund, Stuttgart, 30.11.2023 | Seite 2 von 11

später) verbleibt. Intuitiverweise sind also die untere und obere Grenze für diesen Bereich als Relativangabe zum vollen Speicherstand wie folgt gegeben:

$$C_{uG}^A = 20 \text{ min} \cdot \frac{P_{VL}}{E_{\text{nutzbar}}} = \frac{1}{3} \text{ h} \cdot \frac{P_{VL}}{E_{\text{nutzbar}}}$$

$$C_{oG}^A = 1 - C_{uG}^A$$

Dabei ist: E_{nutzbar} : Nutzbares Arbeitsvermögen
 P_{VL} : Vermarktete Leistung

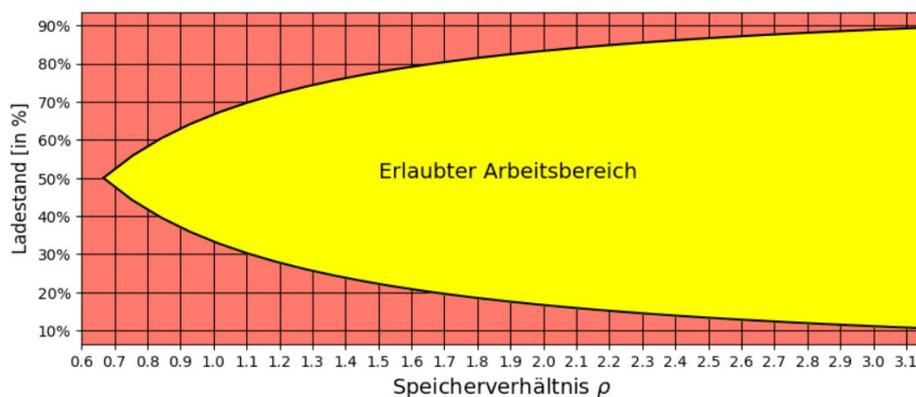
Eine weitere wichtige Größe, anhand derer die obigen Grenzen oft bemessen und angegeben werden, ist das **Speicherverhältnis**, welches angibt, wie lange eine Einheit aufgrund ihres begrenzten Arbeitsvermögens die vermarktete Leistung maximal ohne Speichermanagement-Maßnahmen erbringen kann. Es lässt sich leicht mittels der Formel

$$\rho = \frac{E_{\text{nutzbar}}}{P_{VL}}$$

bestimmen. Mithilfe dieses Speicherverhältnisses ergeben sich die Zusammenhänge

$$C_{uG}^A = \frac{1h}{3\rho} \quad \text{und} \quad C_{oG}^A = 1 - C_{uG}^A = \frac{3\rho - 1h}{3\rho}$$

für die obere und untere Grenze des erlaubten Arbeitsbereichs einer Einheit und dieser lässt sich dadurch wie folgt grafisch darstellen:



Insbesondere ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass es sich bei den oben verwendeten Kennzahlen der Einheit um dynamische Größen handelt, die von der jeweiligen **Vermarktungssituation der Einheit** abhängen. Das **nutzbare Arbeitsvermögen** umfasst dabei lediglich den Anteil der physischen Gesamtkapazität der Einheit, der zur Vermarktung in der Primärregelleistung verwendet wird. Außerdem kann sich die allokierte Vorhalteleistung einer speicherbegrenzten Einheitsach innerhalb eines Vier-Stunden-Zeitraums ändern. Dies hat wiederum Auswirkungen auf das

Berlin, Bayreuth, Dortmund, Stuttgart, 30.11.2023 | Seite 3 von 11

Speicherverhältnis und die jeweiligen Grenzen des erlaubten Arbeitsbereichs für diese spezielle Vermarktungssituation der Einheit.

Zu jedem Zeitpunkt am Markt bestimmt also das Verhältnis zwischen aktuell vermarkteter Leistung und nutzbarem Arbeitsvermögen einer Einheit maßgeblich den erlaubten Arbeitsbereich und damit den Spielraum für geeignete Speichermanagementmaßnahmen während der Erbringung. Während des Präqualifikationsverfahrens ist in diesem Zusammenhang die vermarktete Leistung gleich der maximalen vermarkteten Leistung im Sinne der Präqualifikation zu setzen und die Speichergrenzen entsprechend anzupassen.

Gefährdeter Zustand

Der Anbieter muss grundsätzlich dafür sorgen, dass der Speicherstand der Einheit den erlaubten Arbeitsbereich nicht verlässt. **Grundsätzlich** heißt dabei, dass dies immer der Fall sein muss, außer es tritt ein sogenannter **gefährdeter Zustand** ein. Ein gefährdeter Zustand ist gegeben, sobald eines der folgenden drei Szenarien einer Frequenzabweichung auftritt:

- mindestens ± 200 mHz einmalig
- mindestens ± 100 mHz dauerhaft für mindestens fünf Minuten
- mindestens ± 50 mHz dauerhaft für mindestens 15 Minuten

Der gefährdete Zustand **endet**, sobald die Frequenzabweichung wieder betragsmäßig kleiner als 50 mHz ist. Bei Eintreten eines gefährdeten Zustands ist es den arbeitsvermögenbegrenzten Einheiten gestattet, den erlaubten Arbeitsbereich zu verlassen, um weiterhin zur Frequenzhaltung beitragen zu können. Gleichzeitig müssen Anbieter versuchen, durch Speichermanagementmaßnahmen wieder den erlaubten Arbeitsbereich zu erreichen. Dies muss so bald wie möglich, spätestens aber **zwei Stunden nach Ende des gefährdeten Zustands** geschehen sein.

In dem Fall, dass eine Einheit aufgrund eines gefährdeten Zustands den erlaubten Arbeitsbereich verlässt, muss dennoch sichergestellt werden, dass das Arbeitsvermögen der Einheit (sowohl in positive als auch in negative Richtung) nicht vollständig erschöpft wird. Aus diesem Grund werden außerhalb des erlaubten Arbeitsbereiches erweiterte Grenzen des Speicherstands definiert, die den Übergang zum später erläuterten Reservebetrieb initiieren sollen.

Diese erweiterten Grenzen sind so dimensioniert, dass die Einheit noch mindestens so lange die vermarktete Leistung vollständig erbringen kann, bis die volle Aktivierungszeit für aFRR (in Deutschland fünf Minuten) abgelaufen ist. Aus diesem Grund ergeben sich die Grenzen wie folgt:

$$C_{uG}^R = \frac{\Delta t_{FAT} \cdot P_{VL}}{E_{nutzbar}} = \frac{\Delta t_{FAT}}{\rho} \left(= \frac{1h}{12\rho} \right)$$
$$C_{oG}^R = 1 - C_{uG}^R$$

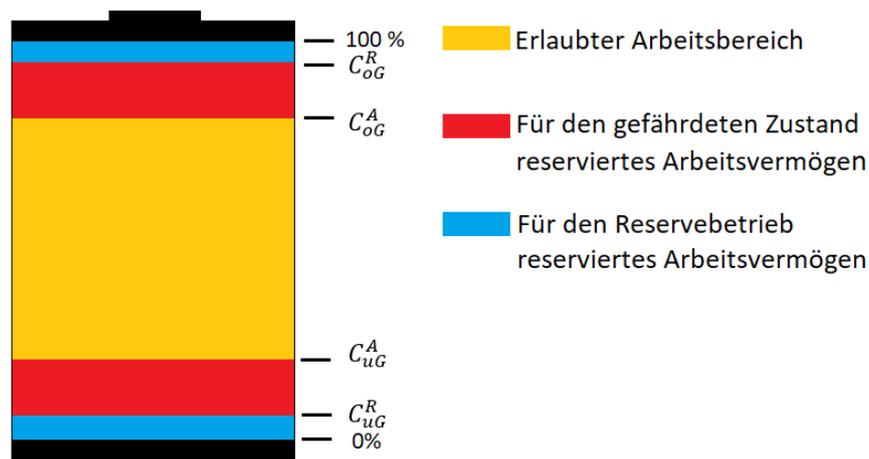
Dabei ist:

$E_{nutzbar}$:	Nutzbares Arbeitsvermögen
P_{VL} :	Vermarktete Leistung
Δt_{FAT} :	Aktivierungszeit (Full Activation Time) aFRR (in DE fünf Minuten)

Auch an dieser Stelle ist anzumerken, dass es sich bei den oben verwendeten Kennzahlen um dynamische Größen handelt, die von der Vermarktungssituation der Einheit abhängen. Somit können auch die Grenzen für den Reservebetrieb von Produktzeitscheibe zu Produktzeitscheibe unterschiedliche Werte annehmen.

Zusammenfassung der Grenzen innerhalb des Arbeitsvermögens

Bevor nun erläutert wird, wie sich die arbeitsvermögenbegrenzte Einheit im Reservebetrieb verhalten muss und wie der Übergang in diesen definiert ist, fassen wir anhand der folgenden Abbildung die verschiedenen Grenzen und zugehörigen Bereiche innerhalb des vollen Arbeitsvermögens einer Einheit zusammen:



Erbringung von Regelleistung im Reservebetrieb

Bei Eintreten eines gefährdeten Zustands und einem möglichen Verlassen des erlaubten Arbeitsbereichs durch eine arbeitsvermögenbegrenzte technische Einheit kann es durch die darauffolgende weitere Erbringung dazu kommen, dass das Arbeitsvermögen auch die oben definierte untere bzw. obere Grenze für den Reservebetrieb erreicht.

Bevor der Übergang in den Reservebetrieb erläutert wird, wird zunächst erklärt, inwiefern die Einheit in dem Reservebetrieb auf Frequenzabweichungen reagieren und die dadurch verbundene Regelleistung erbringen muss.

Im Reservebetrieb muss die Einheit gemäß der Abweichung auf die über die letzten fünf Minuten gemittelten neuen Referenzfrequenz reagieren. Diese Abweichung wird zum Zeitpunkt t (in Sekunden) mit $\Delta f_0(t)$ bezeichnet und lässt sich mithilfe der **real gemessenen Frequenzabweichungen** $\Delta f(t)$ der letzten fünf Minuten wie folgt ausdrücken:

$$\Delta f_0(t) = \Delta f(t) - \frac{1}{\Delta t_{FAT}} \sum_{i=0}^{\Delta t_{FAT}-1} \Delta f(t-i)$$

Dabei ist: $\Delta f(t)$: Real gemessene Frequenzabweichung zur Zeit t
 Δt_{FAT} : Aktivierungszeit (Full Activation Time) aFRR (in DE fünf Minuten), hier in Sekunden für Mittelwertbildung

Berlin, Bayreuth, Dortmund, Stuttgart, 30.11.2023 | Seite 5 von 11

Später wird noch anhand simulierter Szenarien darauf eingegangen, inwiefern sich die Abweichung von der neuen Referenzfrequenz von der realen gemessenen Frequenzabweichung unterscheidet und wie sich in Folge dessen die zu erbringende Regelleistung verhält. Grundsätzlich lässt sich aber sagen, dass letztere deutlich niedriger (oder sogar entgegengesetzt) ist, was es den Anbietern ermöglicht, deutlich länger netzstabilisierend zu agieren.

Erreicht das Arbeitsvermögen wieder die Grenze für den Reservebetrieb in Richtung des für den gefährdeten Zustands reservierten Bereichs (roter Bereich in obiger Zeichnung) und es ist kein gefährdeter Zustand mehr gegeben, so muss die Einheit wieder in den Normalbetrieb zurückkehren. In diesem muss dann auch wieder Regelleistung anhand der realen Frequenzabweichung $\Delta f(t)$ erbracht werden.

Gewichtungsfunktion zur Bestimmung der ausschlaggebenden Frequenzabweichung

Sobald eine der beiden Grenzen für den Übergang in den Reservebetrieb erreicht worden ist, beginnt ein Δt_{FAT} langes Zeitfenster für eben diesen. In dieser Zeitspanne bewegt sich die Frequenzabweichung, gemäß der die Einheit Regelleistung zum Zeitpunkt t erbringen muss, ($\Delta f_{reaction}(t)$) **linear** von der realen Frequenzabweichung $\Delta f(t)$ hin zur Abweichung von der neuen Referenzfrequenz $\Delta f_0(t)$.

Um diesen Prozess geeignet darzustellen, führen wir zwei weitere Variablen ein, die vom Systemzustand zum jeweiligen Zeitpunkt abhängen. Zum einen wird der **Zeitpunkt, zu dem der Wechsel** in den Reservebetrieb (oder wieder zurück in den Normalbetrieb) **initiiert wird**, mit t_{switch} bezeichnet. Diese Variable wird bei jedem Wechsel zwischen den beiden Betrieben neu auf den Zeitpunkt des jeweils aktuellen Wechselvorgangs gesetzt. Zum anderen beschreibt die **Statusvariable** R , in welchen Betrieb die Einheit gerade wechseln will. Sie nimmt die diskreten Werte 0 und 1 an, wobei 0 für „Reservebetrieb aus“ und 1 für „Reservebetrieb an“ steht.

Bevor auf eine Übergangsfunktion zwischen den Frequenzabweichungen für den jeweiligen Betrieb eingegangen wird, wird zunächst die Rolle der obigen Variablen anhand eines kurzen Beispiels verdeutlicht.

Zu Beginn des Szenarios befindet sich die Einheit im Normalbetrieb, d.h. t_{switch} hat noch keinen Wert zugewiesen und es gilt $R = 0$. Aufgrund des gefährdeten Zustands entleert sich die Batterie nun bis zur unteren Grenze für den Reservebetrieb. Das initiiert einen Wechsel in den Reservebetrieb, t_{switch} wird auf den jeweiligen Zeitpunkt und R auf 1 gesetzt. Während des Wechsels in den Reservebetrieb behebt sich nun allerdings der gefährdete Zustand und das Speichervermögen der Einheit erreicht wieder die Grenze für den Reservebetrieb – diesmal in Richtung des erlaubten Arbeitsbereiches. Dies initiiert einen Wechsel zurück in den Normalbetrieb, t_{switch} nimmt also diesen neuen Zeitpunkt als Wert an und R wieder auf 0 gesetzt.

Das Verhalten dieser beiden Variablen beeinflusst maßgeblich die Definition der entsprechenden Gewichtungsfunktion für die oben eingeführten Frequenzabweichungen. Dafür wird zunächst die **Übergangsfunktion** T_{trans} wie folgt definiert:

$$T_{trans}(t) = T_{trans}(t_{switch}) - \frac{(-1)^R}{\Delta t_{FAT}}(t - t_{switch}) \quad , \text{wobei} \quad T_{trans}(0) = 0.$$

Berlin, Bayreuth, Dortmund, Stuttgart, 30.11.2023 | Seite 6 von 11

Dabei ist:

t_{switch} :	Zeitpunkt des Systemübergangs
R :	Statusvariable für Betrieb der Einheit
Δt_{FAT} :	Aktivierungszeit (Full Activation Time) aFRR (in DE fünf Minuten) , in der selben Einheit wie die Zeit t

Man erkennt sofort, dass die Übergangsfunktion direkt mit dem aktuellen Wert des Übergangszeitpunkts t_{switch} und der Statusvariable R zusammenhängt. Dabei gibt t_{switch} vor, von welchem Zeitpunkt aus der jeweilige Übergang modelliert wird und R beeinflusst das Vorzeichen des hinteren Terms. Für $R = 1$, also den Wechsel in den Reservebetrieb, wächst die Funktion mit fester Steigung, während sie für $R = 0$, also den Wechsel in den Normalbetrieb, betragsmäßig gleich fällt. Der Anfangswert von T_{trans} ist auf Null gesetzt, weil man zu Beginn der Betrachtung von einem Normalzustand des Systems ausgeht und die rekursive Definition einen Anfangswert verlangt.

Mithilfe der obigen Übergangsfunktion kann man nun eine **Gewichtungsfunktion** definieren, die später benutzt wird, um den Zustand von System und Einheit richtig in der ausschlaggebenden Frequenzabweichung widerzuspiegeln. Sie ist gegeben durch folgende Formel:

$$T(t) = \begin{cases} 0 & , \text{ falls } T_{trans}(t) \leq 0 \\ T_{trans}(t) & , \text{ falls } 0 < T_{trans}(t) < 1 \\ 1 & , \text{ falls } T_{trans}(t) \geq 1 \end{cases}$$

Die ausschlaggebende Frequenzabweichung während des Übergangs in den Reservebetrieb ist dann gegeben durch die folgende Kombination der real gemessenen Frequenzabweichung und der Abweichung von der neuen Referenzfrequenz:

$$\Delta f_{reaction}(t) = T(t) \cdot \Delta f_0(t) + (1 - T(t)) \cdot \Delta f(t)$$

Anders ausgedrückt lässt sich der Anteil, zu dem die gemittelte Frequenzabweichung „herausgerechnet“ wird direkt mithilfe der Übergangsfunktion T skalieren. Dies ergibt die alternative Formel:

$$\Delta f_{reaction}(t) = \Delta f(t) - \frac{T(t)}{\Delta t_{FAT}} \sum_{i=0}^{\Delta t_{FAT}-1} \Delta f(t - i)$$

Übergang vom Normalbetrieb in den Reservebetrieb

Im Normalbetrieb bzw. zu Beginn des Übergangs in den Reservebetrieb ist die Übergangsfunktion $T_{trans}(t)$ und damit auch die Gewichtungsfunktion $T(t) = 0$, die ausschlaggebende Frequenzabweichung $\Delta f_{reaction}(t)$ entspricht also der realen Frequenzabweichung $\Delta f(t)$. Während des Übergangs nimmt die Gewichtungsfunktion T und damit auch der Anteil der Abweichung von der neuen Referenzfrequenz $\Delta f_0(t)$ linear zu. Am Ende des Übergangsbereichs und im darauffolgenden Reservebetrieb ist $T(t) = 1$, was bedeutet, dass die ausschlaggebende Frequenzabweichung $\Delta f_{reaction}(t)$ mit der Abweichung von der neuen Referenzfrequenz $\Delta f_0(t)$ übereinstimmt.

Übergang vom Reservebetrieb in den Normalbetrieb

Sobald die arbeitsvermögenbegrenzte Einheit die jeweilige Ober- bzw. Untergrenze für den Reservebetrieb in Richtung des für den gefährdeten Zustand reservierten Arbeitsvermögens (d.h. von C_{UG}^R aufwärts bzw. von C_{OG}^R abwärts) wieder erreicht hat und kein gefährdeter Zustand mehr besteht, muss die Einheit über den Zeitraum von Δt_{FAT} (in Deutschland also fünf Minuten) wieder linear in den Normalbetrieb wechseln.

Dieser Übergang ist insbesondere schon in obiger Formulierung mit inbegriffen. Durch die sich je nach Szenario ändernde Statusvariable R wird auch der Übergang zurück in den Normalbetrieb mit modelliert.

Die ausschlaggebende Frequenzabweichung ergibt sich wieder gemäß der oben angegebenen Formeln für die Kombination von real gemessener Frequenzabweichung und der Abweichung von der neuen Referenzfrequenz. Die Interpretation dieser ist direkt mit dem intuitiven Verständnis des linearen Übergangs zurück in den Normalbetrieb vereinbar:

Vor dem Zeitpunkt t_{switch} , also dem Startzeitpunkt des Übergangs in den Normalbetrieb, ist die Übergangsfunktion $T(t) = 1$, die ausschlaggebende Frequenzabweichung $\Delta f_{reaction}(t)$ entspricht also der Abweichung von der neuen Referenzfrequenz $\Delta f_0(t)$. Während des Übergangs nimmt die Übergangsfunktion T und damit auch der Anteil von $\Delta f_0(t)$ linear ab. Am Ende des Übergangsbereichs und im darauffolgenden Reservebetrieb ist $T(t) = 0$, was bedeutet, dass die ausschlaggebende Frequenzabweichung $\Delta f_{reaction}(t)$ mit der realen Frequenzabweichung $\Delta f(t)$ übereinstimmt.

Ist die Einheit dann wieder im Normalbetrieb angekommen, muss der Anbieter sicherstellen, dass sich das Arbeitsvermögen schnellstmöglich wieder in den erlaubten Arbeitsbereich begibt. Ab Ende des (letzten) gefährdeten Zustands hat er dafür **maximal zwei Stunden** Zeit.

Beispielszenario zum Nachweis des Reservebetriebs zur Präqualifikation

Nun werden die oben beleuchteten Szenarien und Prinzipien bezüglich gefährdetem Zustand, Reservebetrieb und entsprechend korrekter Erbringung anhand eines Simulationsbeispiels erklärt. Der zugehörige Frequenzverlauf wird auch im Rahmen der Prüfung des Reservebetriebs für die Präqualifikation arbeitsvermögenbegrenzter Einheiten in der Primärregelung als Prüfbeispiel zur Verfügung gestellt und soll vom Reserveanbieter simuliert werden.

Für die Simulation werden in diesem Rahmen die folgenden Parameter festgesetzt:

$$\Delta t_{FAT} = 300 \text{ s}, \quad P_{VL} = 1 \text{ MW}, \quad E_{nutzbar} = 1 \text{ MWh}$$

Damit ergibt sich ein Speicherverhältnis von $\rho = 1 \text{ h}$ sowie eine obere und untere Grenze für den erlaubten Arbeitsbereich der Einheit von

$$C_{UG}^A = \frac{1}{3} \approx 33,3\% \quad \text{und} \quad C_{OG}^A = \frac{2}{3} \approx 66,7\%.$$

Der Reservebetrieb soll ab den Vermögensgrenzen

$$C_{UG}^R = \frac{1}{12} \approx 8,3\% \quad \text{bzw.} \quad C_{OG}^R = \frac{11}{12} \approx 91,7\%$$

aktiviert bzw. wieder deaktiviert werden.

Im Rahmen der Simulation wird weiterhin die Annahme getroffen, dass die Batterie ohne interne und netzbedingte Verluste lädt und erbringt, d.h. sämtliche Energie, die nachgeladen oder durch PRL erbracht wird, beeinflusst zu 100% den Ladezustand der Batterie. Außerdem wird auch das Erbringungsverhalten der Batterie insofern als idealisiert angenommen, dass sie unmittelbar auf Frequenzabweichungen reagiert (Reaktionszeit 0s) und perfekt linear zwischen 0 und 200mHz Frequenzabweichung erbringt (kein Totband und 100% Erbringung + Sättigung bei 200mHz). Außerdem wird davon ausgegangen, dass die Batterie aufgrund der angespannten Situation über die ganze Zeit hinweg konstant mit 0,25MW nachlädt.

Der zugrundeliegende Frequenzverlauf soll das Szenario eines System-Splits wie am 25.11.2021 nachstellen, als die automatische Abschaltung eines 400kV-Sammelschienenkupplers in der kroatischen Umspannanlage Ernestinovo zu einem erheblichen Systemungleichgewicht und dadurch zu einer Frequenzabweichung von bis zu -260mHz im nordwestlichen Teil des europäischen Verbundnetzes führte.

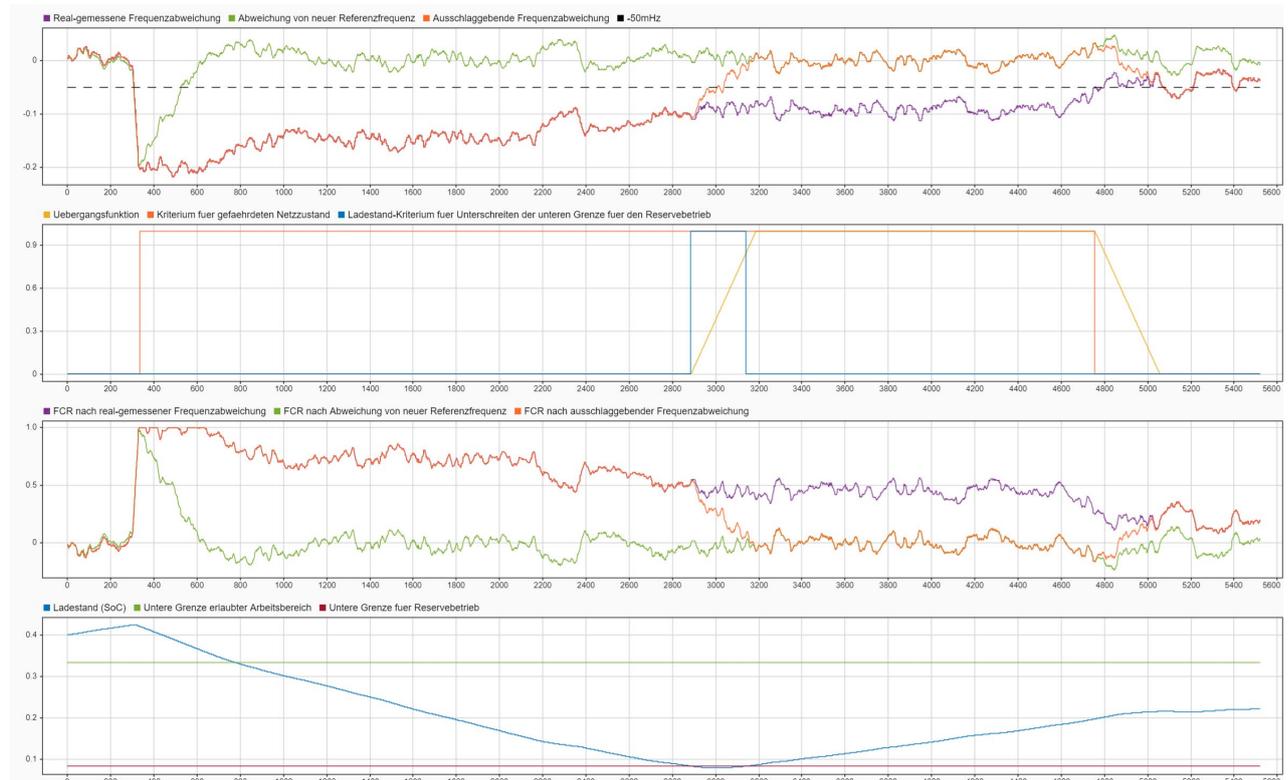


Abbildung 1: Zeitlicher Verlauf maßgeblicher Größen entlang der vorgegebenen Frequenzabweichung. Beschreibung der Größen und deren Verlauf im Volltext (s.u.).

Die Simulationsergebnisse sind in Abbildung 1 zusammengefasst, um die zeitlichen Zusammenhänge zwischen Frequenzabweichung, Kriterien für den Reservebetrieb, Wechsel in diesen, Erbringung von PRL und Speicherstand der Batterie übersichtlich darstellen zu können. Im ersten Teilbild kann die real-gemessene Frequenzabweichung (lila), die Abweichung von der neuen Referenzfrequenz (grün) und die für die tatsächliche Erbringung ausschlaggebende

Berlin, Bayreuth, Dortmund, Stuttgart, 30.11.2023 | Seite 9 von 11

Frequenzabweichung (orange) nachvollzogen werden. Nach Farben assoziiert finden sich im dritten Bild die jeweiligen Werte für eine PRL-Erbringung gemäß der entsprechenden Frequenzabweichung. Im zweiten Bild zeigt sich, ob zu einem Zeitpunkt das Kriterium für den gefährdeten Netzzustand (rot) oder einen kritischen Ladezustand (blau) erfüllt sind. Zusätzlich ist der Wert der Übergangsfunktion in den Reservebetrieb (orange) abgebildet, die die real-gemessene Frequenzabweichung und die Abweichung von der neuen Referenzfrequenz gewichtet. Im untersten Bild findet sich der Graph für den Speicherstand der Batterie (blau) zusammen mit den unteren Grenzen für den erlaubten Arbeitsbereich (grün) und den Reservebetrieb (rot).

Der zeitliche Verlauf der dargestellten Größen folgt den Prinzipien, die im Laufe des Dokuments eingeführt und erklärt worden sind: Nach der initialen 200mHz Frequenzabweichung tritt sofort der gefährdete Zustand ein und selbst das andauernd aktive Nachlademanagement der Batterie kann einer Entladung über die Grenze des erlaubten Arbeitsbereiches hinaus nicht entgegenwirken. Die Entladung der Batterie läuft weiter bis schließlich auch – trotz abnehmender Frequenzabweichung – die untere Grenze für den Reservebetrieb erreicht ist. Zu diesem Zeitpunkt sind sowohl das Kriterium für den gefährdeten Netzzustand als auch das für einen kritischen Ladezustand der Batterie erfüllt, was bedeutet, dass die Batterie nun innerhalb von fünf Minuten in den Reservebetrieb wechseln muss. Dies leitet den Anstieg der Übergangsfunktion von 0 auf 1 in diesem Zeitfenster ein und dadurch weicht erstmals auch die ausschlaggebende Frequenzabweichung von der real-gemessenen ab.

Insbesondere erholt sich bereits während der Übergangsphase der Speicherstand der Batterie wieder über die untere Grenze des Reservebetriebs hinaus, weshalb auch das entsprechende Kriterium nicht mehr zutrifft. Dennoch muss die Batterie bis Ende des gefährdeten Zustandes noch im Reservebetrieb bleiben. Der gefährdete Zustand endet, sobald die Frequenzabweichung betragsmäßig erstmals wieder unter 50mHz fällt, was durch das Abfallen der orangenen Linie im zweiten Teilbild von Abbildung 1 signalisiert wird. Ab diesem Zeitpunkt sind also beide für die Aktivierung des Reservebetriebs ausschlaggebenden Kriterien nicht mehr aktiv und die Einheit muss wieder zurück in den Normalbetrieb wechseln. Infolgedessen nimmt die Übergangsfunktion innerhalb von fünf Minuten wieder linear von 1 auf 0 ab, was sich insbesondere auf die ausschlaggebende Frequenzabweichung auswirkt. Diese gleicht sich innerhalb dieses Zeitfensters wieder der real-gemessenen Frequenzabweichung an, was auch die Erbringung der Batterie im Normalbetrieb zur Folge hat. Obwohl der Reservebetrieb nun keine Rolle mehr für das Erbringungsverhalten der Einheit spielt, muss die Batterie trotzdem noch weiter nachgeladen werden, bis zumindest wieder die untere Grenze des erlaubten Arbeitsbereiches erreicht ist. Dies muss spätestens zwei Stunden nach Ende des gefährdeten Zustands der Fall sein.

Wie bereits oben angemerkt entspricht der hier beschriebene Frequenzverlauf auch dem, der für den Test im Rahmen einer Präqualifikation und den Nachweis des Reservebetriebs relevant ist. Für den entsprechenden Test liegt eine Excel-Vorlage vor, die gemäß der jeweiligen Simulationsdaten ausgefüllt werden soll, um das Verständnis des Konzepts des Reservebetriebs nachzuweisen. Für die jeweiligen zu präqualifizierenden Einheiten muss zusätzlich im PQ-Portal per Häkchen angegeben werden, ob der Reservebetrieb implementiert worden ist.

Häufig gestellte Fragen

Frage: Wie lange muss eine Einheit nach Eintreten eines gefährdeten Zustands voll erbringen, bis sie in den Reservebetrieb wechseln darf?

Berlin, Bayreuth, Dortmund, Stuttgart, 30.11.2023 | Seite 10 von 11

Antwort: Die Definition der obigen Speichergrenzen ermöglicht es, dass mindestens 15 Minuten lang verpflichtend weiterhin die volle vermarktete Leistung erbracht wird. In dem Fall, dass die auftretenden Frequenzabweichungen kleiner sind als ± 200 mHz, ist dies mindestens für einen entsprechend längeren Zeitraum möglich und notwendig. Der Wechsel in den Reservebetrieb soll stattfinden, sobald der Speicherstand die jeweilige Grenze seines Arbeitsvermögens für den Reservebetrieb (C_{uG}^R bzw. C_{oG}^R) erreicht.

Frage: Wie lange darf die Einheit dann im Reservebetrieb bleiben?

Antwort: Für den Verbleib im Reservebetrieb sind nicht nur der Speicherstand der Einheit und die zugehörigen Grenzen für den Reservebetrieb, sondern auch das Bestehen eines gefährdeten Zustands ausschlaggebend. Der Anbieter hat nach Ende des gefährdeten Zustands dafür zu sorgen, dass das Arbeitsvermögen durch entsprechende Speichermanagementmaßnahmen schnellstmöglich wieder in den erlaubten Bereich geführt wird und hat dafür maximal zwei Stunden Zeit. Daher können diese zwei Stunden auch als obere Schranke für den Verbleib im Reservebetrieb angesehen werden, umfassen aber insbesondere auch das Nachladen des für den gefährdeten Zustand reservierten Arbeitsvermögens. Solange aber weiterhin ein gefährdeter Zustand besteht, so soll die Einheit auch weiterhin im Reservebetrieb verbleiben. Sobald sich der Speicherstand wieder innerhalb der Grenzen für den Reservebetrieb (d.h. von C_{uG}^R aufwärts bzw. von C_{oG}^R abwärts) befindet und kein gefährdeter Zustand mehr besteht, muss die Einheit zurück in den Normalbetrieb wechseln.

Frage: Die Frequenzabweichung ist betragsmäßig wieder kleiner als 50 mHz. Was bedeutet das für das Erbringungsverhalten der Einheit?

Antwort: Ab diesem Zeitpunkt hat die Einheit zwei Stunden Zeit, um ihren Ladestand wieder in den erlaubten Arbeitsbereich zu bringen. Der Ladezustand ist jedoch verpflichtend schnellstmöglich wieder herzustellen, o.g. zwei Stunden gelten in diesem Zusammenhang als Obergrenze der möglichen Zeitdauer. Sobald der notwendige Ladezustand in Richtung des für den gefährdeten Zustand reservierten Arbeitsvermögens (d.h. von C_{uG}^R aufwärts bzw. von C_{oG}^R abwärts) wiederhergestellt worden ist, hat die speicherbegrenzte Einheit in den Normalbetrieb zu wechseln.

Glossar

C_{uG}^A	Untere Grenze des erlaubten Arbeitsbereichs
C_{oG}^A	Obere Grenze des erlaubten Arbeitsbereich
$E_{nutzbar}$	Nutzbare Arbeitsvermögen (= Gesamtkapazität)
P_{VL}	Vermarktete Leistung
ρ	Speicherverhältnis zwischen Leistung und Kapazität
C_{uG}^R	Untere Grenze für Übergang in den Reservebetrieb
C_{oG}^R	Obere Grenze für Übergang in den Reservebetrieb
Δt_{FAT}	Aktivierungszeit (Full Activation Time) aFRR (in DE fünf Minuten)
$\Delta f_0(t)$	Null-Mittel-Frequenzabweichung zum Zeitpunkt t
$\Delta f(t)$	Real gemessene Frequenzabweichung zum Zeitpunkt t
t_{switch}	Zeitpunkt des Systemübergangs

Berlin, Bayreuth, Dortmund, Stuttgart, 30.11.2023 | Seite 11 von 11

R	Statusvariable für den Reservebetrieb
T_{trans}	Übergangsfunktion
T	Gewichtungsfunktion
$\Delta f_{reaction}(t)$	Ausschlaggebende Frequenzabweichung zum Zeitpunkt t
Normalzustand	Bezeichnet den Netzzustand analog Art. 3 (2) Nr. 5 der System Operation Guideline
Gefährdeter Zustand	Bezeichnet den Netzzustand analog Art. 3 (2) Nr. 17 der System Operation Guideline
Normalbetrieb	Betrieb einer FCR-Einheit, im Rahmen dessen in Anlaogie zu den Anforderungen der kontinentaleuropäischen Übertragungsnetzbetreiber auf die absolute Frequenzabweichung zur Normalfrequenz reagiert wird.
Reservebetrieb	Betriebsweise einer FCR-Einheit, im Rahmen dessen ausschließlich auf eine Null-Mittel-Frequenzabweichung reagiert wird.