



SDL-Zukunft: Mittel- und langfristige Entwicklung des Netz- und Versorgungswiederaufbaus

Ergebnispapier

Im Auftrag des

Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie

SDL-Zukunft: Mittel- und langfristige Entwicklung des Netz- und Versorgungswiederaufbaus

Ergebnispapier zum Vorhaben „SDL-Zukunft“

Fassung vom: 11.05.2022

Autoren:

Dr.-Ing. Christian Wagner (ef.Ruhr), Hendrik Kramer (HEMF),
Dr. Michael Bucksteeg (HEMF), Christoph Strunck (ef.Ruhr)

Inhaltliche Bearbeitung durch:

ef.Ruhr:	Dr.-Ing. Christian Wagner Dr.-Ing. Marco Greve Christoph Strunck
HEMF:	Prof. Dr. Christoph Weber Dr. Michael Bucksteeg Hendrik Kramer
Neon:	Dr. Ingmar Schlecht Prof. Dr. Lion Hirth
BBH:	Dr. Wieland Lehnert
RE-xpertise:	Dr.-Ing. Karsten Burges

Projektleitung SDL-Zukunft

Dr.-Ing. Christian Wagner und Dr.-Ing. Marco Greve (ef.Ruhr)

Projektpartner

ef.Ruhr GmbH

Dr.-Ing. Marco Greve
Emil-Figge-Str. 76
44227 Dortmund



RE-xpertise

Dr.-Ing. Karsten Burges
Baltzerstraße 13
15569 Woltersdorf



Neon Neue Energieökonomik GmbH

Prof. Dr. Lion Hirth
Karl-Marx-Platz 12
12043 Berlin



House of Energy Markets and Finance Universität Duisburg-Essen

Prof. Dr. Christoph Weber
Universitätsstraße 12
45141 Essen



BBH

Becker Büttner Held PartGmbH

Dr. Wieland Lehnert
Magazinstraße 15-16
10179 Berlin



Impressum

ef.Ruhr GmbH
Emil-Figge-Str. 76
44227 Dortmund



Ansprechpartner:
Dr.-Ing. Marco Greve
Tel.: +49 (0)231 9742-5521
Mail: marco.greve@efruhr.de
Web: www.efruhr.de

Dortmund, 11.05.2022

Kurzfassung

Hintergrund. Die Richtlinie (EU) 2019/944 (StrommarktRL) schreibt die marktgestützte, transparente und diskriminierungsfreie Beschaffung von nicht-frequenzgebundenen Systemdienstleistungen (NF-SDL) vor, sofern die Effizienz der marktlichen Beschaffung nicht ausgeschlossen werden kann. Die Gutachter sind in vorherigen Untersuchungen zu dem Ergebnis gekommen, dass die kurzfristige Effizienz für die NF-SDL Inselbetriebsfähigkeit ausgeschlossen und für die Schwarzstartfähigkeit nicht ausgeschlossen werden kann. Daher wurde für die Schwarzstartfähigkeit ein Beschaffungskonzept vorgeschlagen, welches insbesondere die Transparenz, der bereits heute praktizierten marktlichen Beschaffung steigern soll. Bei den Untersuchungen wurde jedoch deutlich, dass mittel- und langfristig ein gesamtheitlicher Ansatz zur Bewertung und Gestaltung des zukünftigen Netz- und Versorgungswiederaufbaus zielführend ist. Der Bericht adressiert daher Entwicklungen und Herausforderungen für den zukünftigen Netz- und Versorgungswiederaufbau, sortierte diese in die heutigen Konzepte sowie den Hintergrund der StrommarktRL ein und zeigt Handlungs- und Anpassungsbedarfe auf.

Herausforderungen. Der Umbau des Energiesystems geht mit verschiedenen Entwicklungen einher, welche eine Weiterentwicklung des heutigen Netz- und Versorgungswiederaufbaus bedingen. Der Rückgang an konventioneller Erzeugung vor allem durch die beschlossenen Ausstiegspläne ist mit einem erheblichen Rückgang an steuerbaren und zentralen Anlagen verbunden. Neue Anwendungen, wie z.B. Elektromobilität oder elektrische Wärmepumpen, sind mit einer zunehmenden Elektrifizierung des Energiesystems verbunden. In Verbindung mit der volatilen Einspeisung aus erneuerbaren Energien erschwert dies das Zuschalten von „Lasten aus dem Verteilnetz“ und somit den Versorgungswiederaufbau. Folglich erfordert der Netz- und Versorgungswiederaufbau zukünftig eine verbesserte Prognose und Steuerung von (dezentralen) Erzeugungspotentialen und Lasten. Die Steuerbarkeit wiederum erfordert eine schwarzfallfeste bzw. schwarzfall-robuste Kommunikationsinfrastruktur. Neben abgestimmten Plänen und der Etablierung geeigneter Kommunikationssysteme sind bei der steigenden Komplexität schließlich klar abgegrenzte Verantwortungsbereiche und Kompetenzen entscheidend für die Organisation des Netz- und Versorgungswiederaufbaus.

Heutiger Netz- und Versorgungswiederaufbau. In Folge eines großflächigen Blackouts erfolgt eine Wiederversorgung der Lasten in zwei von den Übertragungsnetzbetreibern (ÜNB) koordinierten Phasen. Zunächst wird beim Netzwiederaufbau (NWA) das Netz des ÜNBs, ausgehend von schwarzstartfähigen (SSF) Kraftwerken, wiederaufgebaut und Erzeuger unter Spannung gesetzt. Für eine ausreichende Belastung der Erzeuger werden schon in dieser Phase erste Lasten zugeschaltet. Anschließend erfolgt der Versorgungswiederaufbau (VWA) mit dem Ziel die Lasten möglichst schnell und zuverlässig wieder zu versorgen. Methodisch wird grundsätzlich zwischen einem Top-Down NWA, bei dem mindestens ein benachbarter ÜNB zur Synchronisation bereitsteht, und einem Bottom-Up Ansatz – wo dies nicht der Fall ist – unterschieden. Bei letzterem wird ohne fremde Hilfe das Netz, ausgehend von SSF Kraftwerken oder von Kraftwerken, die sich während der Störung im Inselnetzbetrieb gefangen haben, wieder aufgebaut. Schwarzstartfähigkeit wird heute von Wasser- und Gaskraftwerken bereitgestellt. Die notwendige Inselbetriebsfähigkeit zur Stützung und Ausdehnung der Netzinselfähigkeit wird überwiegend durch konventionelle Kraftwerke bereitgestellt.

Handlungs- und Anpassungsbedarf. Der Umbau des Energiesystems, insbesondere der Rückgang der konventionellen Erzeugung, die steigende Elektrifizierung und Dezentralisierung, führen zu Herausforderungen beim zukünftigen Netz- und Versorgungswiederaufbau. Um diesen zu begegnen sind mittel- und langfristig unterschiedliche Maßnahmen notwendig, die jedoch bereits teilweise kurzfristig einzuleiten sind. Der folgende 6-Punkte Plan gibt eine nicht abschließende Übersicht über Maßnahmen, die aus unserer Sicht zeitnah umgesetzt, angegangen oder weiter untersucht werden sollten. Dabei sind die Punkte der Dringlichkeit nach sortiert, wobei die Reihenfolge keine zeitliche Abfolge implizieren soll.

- 1. Unterstützendes Verhalten von Lasten im Netzwiederaufbau.** Anschlussanforderungen bzw. Standards zum Verhalten von „smarte/intelligente“ Lasten bei Spannungswiederkehr sollten umgehend umgesetzt, bzw. angepasst werden. Ziel ist es, dass diese sich bei Spannungswiederkehr nicht unter Volllast zuschalten. Die Anforderung sollte mind. für neue (intelligente) Lasten wie Ladeinfrastruktur und Wärmepumpen (aktuell im Hochlauf) aber auch für bspw. Elektrolyseure gelten. Bei geringen Anpassungskosten sollten ausgewählt auch Bestandsanlagen umgerüstet werden. Dieses Verhalten ist bereits bei Erzeugungsanlagen nahezu ohne Zusatzkosten umgesetzt, sodass hier Best-

Practice-Erfahrungen vorhanden sind und eine Umsetzung mit geringen Risiken verbunden ist.

- 2. Netzbildende Umrichter im Besitz von Netzbetreibern und Multi-Use-Anwendungen von Netzbetriebsmitteln ermöglichen.** Für die Trägheit der lokalen Netzstabilität werden zukünftig netzbildende Umrichter im Besitz der Netzbetreiber eingesetzt. Durch Multi-Use können diese Anlagen kostengünstig für Inselbetrieb und Netzwiederaufbau benutzt werden.
- 3. Komplexitätsreduktion des operativen Netz- und Versorgungswiederaufbaus.** Für die Netzbetreiber (ÜNB, wie auch Verteilnetzbetreiber (VNB)) müssen die Prozesse unter Nutzung von steuerbaren Anlagen handhabbar sein. Die Prozesse sollten daher im Wesentlichen auf steuerbare und ausgewählte Einzelanlagen verteilt werden. Zudem muss eine standardisierte Kommunikation zwischen den beteiligten Akteuren (ÜNB, VNB) in Zukunft weiter ausgebaut werden, um einen zielgerichteten Informationsaustausch zu gewährleisten. Hierbei erleichtert eine Verknüpfung der Leitstellensysteme der Netzbetreibern sowie entsprechende Automatisierungen den Austausch. Zudem wird entscheidungsunterstützende Software notwendig sein, um Risiken während der einzelnen Zuschaltsschritte zu reduzieren.
- 4. Entwicklung beobachten und frühzeitig reagieren.** Die Verteilung und Netzanschlussebene von steuerbarer Erzeugung bzw. Anlagen, die Inselbetriebsfähigkeit und weitere notwendige Systemdienstleistungen heute bereitstellen, bedarf eines Monitorings. Potenzielle Lücken müssen frühzeitig identifiziert werden und entsprechende Kompensationsmaßnahmen initialisiert werden. So sind kurzfristig Kompensationsmaßnahmen für den beschlossenen Kohleausstieg bis zum Jahr 2030 in Einklang mit den Netzwiederaufbauplänen und -varianten zu finden. Hierbei sind die Ertüchtigung eigener Netzbetriebsmittel, technische Anforderungen an Netznutzer, sowie marktliche Elemente zu prüfen. Unser 6-Punkte-Plan (sowie die weiteren Ergebnisprotokolle des Vorhabens SDL-Zukunft, u.a. [1], [2] und [3]) gibt eine Übersicht der von uns vorgeschlagenen Maßnahmen.
- 5. Einbindung von erneuerbaren Energien.** Sofern mittel- und/oder langfristig genügend steuerbare Erzeugungsanlagen verfügbar sind (bleiben oder werden), sollten (dezentralen) erneuerbaren Energien keine pauschalen kostspieligen Mindestanforderungen zur Bereitstellung von Inselbetriebsfähigkeit auferlegt werden. Zur Verbesserung der Handhabbarkeit im Netz- und Versorgungswiederaufbau sollten Mindestanforderungen, wenn nicht pauschal, sondern in Abhängigkeit der Leistungsklassen vorgegeben werden. Diese Differenzierung kann zudem auch hinsichtlich der Kommunikation erfolgen. So könnten beispielsweise kleinere Anlagen zukünftig mit Rundsteuersignalen

(in Teilen analog zur heutigen Abregelung, Infrastruktur vorhanden) beeinflusst werden, um ihre Einspeiseleistung während des Netz- und Versorgungswiederaufbaus zusätzlich zu reduzieren bzw. deren Zuschaltung zu unterbinden.

6. **Zyklische Überprüfung einer marktlichen Beschaffung.** Schwarzstartfähigkeit sollte zukünftig weiterhin marktlich beschafft werden (siehe auch Vorschlag der Gutachter zur marktlichen Beschaffung von Schwarzstartfähigkeit [2]). Die potenzielle marktliche Beschaffung von Inselbetriebsfähigkeit gilt es zyklisch zu überprüfen. Sofern im System ausreichend Erzeuger angeschlossen sind, die schon heute inhärent Inselbetriebsfähigkeit aufweisen, erscheint eine marktliche Beschaffung nicht effizient. Dem Rückgang konventioneller Erzeugungsanlagen steht ein zunehmender Anteil von Netzbetriebsmitteln mit potenziellen Multi-Use-Eigenschaft (STATCOMs mit Speichern, HGÜ-Konverter) gegenüber, sodass die Effizienz einer marktlichen Beschaffung von Inselbetriebsfähigkeit im Wesentlichen durch einen potenziellen verbleibenden Bedarf determiniert wird.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
Inhaltsverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	10
1. Hintergrund und Ziele	11
1.1. Herausforderungen.....	11
1.2. Gesamtheitlicher Ansatz und Effizienz der marktlichen Beschaffung	13
1.3. Ziele und Berichtsstruktur	14
2. Heutiger Netz- und Versorgungswiederaufbau	15
2.1. Strategien.....	16
2.1.1. Phasen.....	19
2.1.2. Zuständigkeiten	24
2.2. Wichtige Voraussetzungen	26
2.3. Einordnung Schwarzstartfähigkeit und Inselbetriebsfähigkeit.....	29
3. Handlungs- und Anpassungsbedarf	31
4. 6-Punkte Plan.....	44
5. Literaturverzeichnis	46

Abkürzungsverzeichnis

BHKW	Blockheizkraftwerk
HGÜ	Hochspannungsgleichspannungsübertragung
HS/HöS	Hochspannungs- und Höchstspannungsebene
NC RfG	Network Code Requirements for Generators: Verordnung (EU) 2016/631 der Kommission vom 14. April 2016 zur Festlegung eines Netzkodex mit Netzanschlussbestimmungen für Stromerzeuger
NC ER	Network Code Emergency and Restoration: Verordnung (EU) 2017/2196 der Kommission vom 24. November 2017 zur Festlegung eines Netzkodex über den Notzustand und den Netzwiederaufbau des Übertragungsnetzes
NF-SDL	Nicht-frequenzgebundene Systemdienstleistung
NWA	Netzwiederaufbau
NWAP	Netzwiederaufbaupläne
P-f-Regelung	Leistungs-Frequenz-Regelung
PV	Photovoltaik
SDL	Systemdienstleistung
SSF	Schwarzstartfähig
StrommarktRL	Strommarktrichtlinie: Richtlinie (EU) 2019/944 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. Juni 2019 mit gemeinsamen Vorschriften für den Elektrizitätsbinnenmarkt
TAR	Technische Anschlussregeln (VDE-AR-N)
ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
VNB	Verteilnetzbetreiber
VWA	Versorgungswiederaufbau

1. Hintergrund und Ziele

In diesem Kapitel werden die Hintergründe und Herausforderungen der Weiterentwicklung des Netzwiederaufbaus (NWA) und Versorgungswiederaufbaus (VWA) dargestellt und nachfolgend im Kontext einer marktlichen Beschaffung diskutiert. Anschließend werden die Ziele des Berichts beschrieben.

1.1. Herausforderungen

Rückgang konventioneller Erzeugung. Die beschlossenen Ausstiegspläne aus Kernenergie und Kohle gehen mit einem erheblichen Rückgang an steuerbaren und zentralen Anlagen einher. Gleichwohl führt der Ausbau von erneuerbaren Energien zu einer Zunahme dezentraler dargebotsabhängiger Einheiten, insbes. auf der 110 kV-Ebene und darunter. Zum einen kann die Reduzierung von stoßfesten Anlagen zu erhöhten Stabilitätsproblemen führen. Zum anderen erschwert die volatile Einspeisung aus erneuerbaren Energien das Zuschalten von „Lasten aus dem Verteilnetz“ und somit den Versorgungswiederaufbau. Herausforderungen dabei sind insb. schnelle und nicht genau prognostizierbare Änderungen von Last und Erzeugung nach dem Schwarzfall, der Rückgang von direkt steuerbarer Leistung zur Spannungs- und Frequenzregelung sowie eine geringe Trägheit der Teilnetze. Zudem steigt der Koordinationsaufwand deutlich mit dem Übergang von wenigen zentralen Einheiten mit großer Leistung hin zu vielen kleineren Einheiten mit geringerer Leistung.

Zunehmende Elektrifizierung. Neue Anwendungen, wie z.B. Elektromobilität oder elektrische Wärmepumpen, sind mit einer zunehmenden Elektrifizierung des Energiesystems verbunden. Ein weiterer wichtiger Treiber des Strombedarfs ist die Wasserstoffelektrolyse. In all diesen Bereichen sind mittel- bis langfristig ambitionierte Ziele vorgesehen, die insgesamt zu einer höheren Last im Elektrizitätssystem führen. Im Kontext des Netz- und Versorgungswiederaufbaus stellt insb. die mögliche sofortige Zuschaltung entsprechender Lasten eine große Herausforderung dar.

Dezentrale Regelungen und Kommunikation. Der Rückgang konventioneller Erzeugung zusammen mit dem Zubau von Erneuerbaren sowie die zunehmende Elektrifizierung verändern die Höhe und Volatilität von Einspeisungen und Lasten und damit die Struktur der

Residuallast. Darüber hinaus ist von einer verstärkten Dezentralisierung von Einspeisungen und Lasten auszugehen, wodurch die Komplexität und damit die Anforderungen an den Netz- und Versorgungswiederaufbau zunehmen. Eine dezentrale Regelung geht insb. mit einem verstärkten Austausch von Daten bzgl. Prognosen, Netzzustandsinformationen, Steuersignalen und Systemdienstleistungen einher und erfordert geeignete und schwarzfallfeste Kommunikationssysteme zwischen den einzelnen Akteuren.

Prognose, Überwachbarkeit und Steuerbarkeit. Vor dem Hintergrund des Umbaus des Energiesystems erfordert der Netz- und Versorgungswiederaufbau zukünftig eine verbesserte Prognose und Steuerung von (dezentralen) Erzeugungspotentialen und Lasten. Der verbesserten Prognose steht die Vorgabe von Anschluss- bzw. Wiedereinschaltbedingungen durch den Netzbetreiber mit dem Ziel der Vorhersehbarkeit des Anlagenverhaltens (ergänzend) gegenüber. Zentraler Aspekt des zukünftigen Netz- und Versorgungswiederaufbaus neben der Prognostizierbarkeit des Anlagenverhaltens ist eine schwarzfallfeste bzw. schwarzfall-robuste Kommunikationsinfrastruktur zur Gewährleistung der Steuerbarkeit bei einem Blackout. Darüber hinaus erfordert die Einbindung neuer Anwendungen und Technologien in die Wiederaufbaupläne eine Analyse der Informationsbedarfe (bspw. Verortung von Anlagen, Einspeise- und Lastpotentiale, technische Eigenschaften von Anlagen, etc.), um geeignete Konzepte entwickeln zu können.

Verantwortungsbereiche und Kompetenzen. Grundsätzlich ist der Netzbetreiber für den Netz- und Versorgungswiederaufbau verantwortlich. Folglich kann die Koordination auch nur durch diesen erfolgen. Dabei sind die Aufgaben des Wiederaufbaus eng mit der zugrundeliegenden Situation und Strategie verbunden. Ist eine Spannungsvorgabe aus benachbarten Übertragungsnetzen nicht möglich, erfolgt der Wiederaufbau der Netze aus eigener Kraft (Bottom-Up). Hierzu bedarf es schwarzstartfähiger (SSF) Anlagen und entsprechend abgestimmten Plänen zur Wiederherstellung von Standardprozessen und Märkten. Sind nur einzelne Teile des Übertragungsnetzes ausgefallen, werden diese mithilfe benachbarter (spannungsführender) Netze aufgebaut (Top-Down). Auch hier sind abgestimmte Pläne zwischen den relevanten Netzbetreibern erforderlich. Bedingt durch die zunehmende Dezentralisierung gewinnt jedoch zunehmend eine Einbindung unterlagerter Verteilnetzbetreiber (VNB) an Bedeutung.

Neben abgestimmten Plänen und der Etablierung geeigneter Kommunikationssysteme sind bei der steigenden Komplexität klar abgegrenzte Verantwortungsbereiche und Kompetenzen entscheidend für die schnelle Durchführung des Netz- und Versorgungswiederaufbaus.

1.2. Gesamtheitlicher Ansatz und Effizienz der marktlichen Beschaffung

Schwarzstartfähigkeit von Anlagen wird für den Netzwiederaufbau nach einem Schwarzfall des Verbundsystems oder eines Teils davon benötigt. Aktuell sind durch die deutschen Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) 26 Anlagen mit insgesamt ca. 5 GW Leistung kontrahiert. Weitere Anlagen sind durch die VNB in Absprache mit den ÜNB kontrahiert. Die Leistung bei den VNB ist jedoch vergleichsweise gering. Schwarzstartfähigkeit wird hauptsächlich von Wasserkraft und Gas-kraftwerken vorgehalten und wird bereits heute durch die ÜNB über individuelle Verträge auf Basis von bilateralen Verhandlungen marktlich beschafft (vgl. auch Gutachten zur Effizienzprüfung [1]).

Inselbetriebsfähigkeit bezieht sich auf die Fähigkeit zur Regelung von Spannung und Frequenz in einem vom Verbundnetz isolierten, unabhängigen Betrieb. In Deutschland wird die Inselbetriebsfähigkeit heute überwiegend von konventionellen Erzeugern im Hoch- und Höchstspannungsnetz bereitgestellt, die gemäß technischen Anschlussrichtlinien (TAR) hierzu verpflichtet sind. Während aus heutiger Sicht kein zusätzlicher Bedarf besteht und eine marktliche Beschaffung nicht effizient ist, können sich zukünftig durch den Umbau des Energiesystems und Wegfall von konventionellen Erzeugungsanlagen neue Bedarfe ergeben. Hieraus können sich dann Potenziale der Effizienzsteigerung durch eine marktliche Beschaffung ergeben. Insbesondere weil die Ausstattung bzw. Umrüstung alternativer Erbringer von Inselbetriebsfähigkeit wie bspw. Windenergieanlagen mit höheren Zusatzkosten im Vergleich zu konventionellen Kraftwerken verbunden ist und eine marktliche Beschaffung entsprechend die Aufdeckung effizienter Optionen unterstützen könnte (vgl. auch Effizienzprüfung [1]).

Synergiepotenziale durch gesamtheitlichen Ansatz. Beide nicht-frequenzgebundenen Systemdienstleistungen (NF-SDL) Schwarzstart- und Inselbetriebsfähigkeit sind für den Netz- und Versorgungswiederaufbau relevant. Ist eine Spannungsvorgabe aus

benachbarten Übertragungsnetzen nicht möglich und der Wiederaufbau muss aus eigener Kraft (Bottom-Up) erfolgen, bedarf es SSF Anlagen, die eine Netzinsel eröffnen können. Ein gesamtheitlicher Ansatz bietet dann den Vorteil, dass Anlagen, die sowohl schwarzstart- als auch inselnetzbetriebsfähig sind in einem Verfahren beschafft werden können. Grundsätzlich können beide beim Netz- und Versorgungswiederaufbau benötigten NF-SDL auch aus unterschiedlichen Anlagen erbracht werden. Auch in diesem Fall ermöglicht ein gesamtheitlicher Ansatz das Heben von Synergiepotenzialen.

1.3. Ziele und Berichtsstruktur

Vor dem Hintergrund der zuvor skizzierten Herausforderungen des zukünftigen Netz- und Versorgungswiederaufbaus vertieft dieser Bericht wesentliche Aspekte und Maßnahmen der Weiterentwicklung heutiger Wiederaufbaupläne. Hierzu wird der Netz- und Versorgungswiederaufbau zunächst aus heutiger Sicht beschrieben (siehe Kapitel 2). Anschließend werden zentrale Handlungsfelder und Anpassungsbedarfe in Kapitel 3 identifiziert und diskutiert. Maßgeblich dabei sind die Vorgaben zur marktlichen Beschaffung von NF-SDL, sofern dies effizient ist. Abschließend werden die Handlungs- und Anpassungsbedarfe in einem 6-Punkte Plan zusammengefasst.

2. Heutiger Netz- und Versorgungswiederaufbau

Durch die Verordnung zur Festlegung eines Netzkodex über den Notzustand und den Netzwiederaufbau des Übertragungsnetzes (NC ER) sind die ÜNB verpflichtet, in einem Systemschutzplan definierte Maßnahmen entsprechend vorzuhalten und diese bei Bedarf zur Vermeidung eines Netzzusammenbruches durchzuführen. Sollte es aber trotz der Anwendung von Gegenmaßnahmen zu einem teilweise oder vollständigen Netzzusammenbruch kommen, so muss der Netzwiederaufbau koordiniert zwischen den Partnern auf den unterschiedlichen Ebenen (z.B. ÜNB-ÜNB, ÜNB-Kraftwerke, ÜNB-VNB) ablaufen. Hierzu sind von den ÜNB Netzwiederaufbaupläne (NWAP) zu erstellen. Der Netzwiederaufbau erfordert abhängig von der jeweiligen Strategie (Bottom-Up und/oder Top-Down) eine koordinierte Vorgehensweise der beteiligten Partner.

Nach NC ER sind die ÜNB darüber hinaus verpflichtet, für den jeweiligen Verantwortungsbereich einen Netzwiederaufbauplan zur Wiederherstellung der Energieversorgung aufzustellen. Die ÜNB koordinieren hierzu im Rahmen der Systemverantwortung den Netzwiederaufbau in Zusammenarbeit mit den jeweils benachbarten ÜNB und den unterlagerten VNB sowie Betreibern von Erzeugungseinheiten in ihrer Regelzone.

Für den betroffenen ÜNB hat der Netzwiederaufbau des Übertragungsnetzes, die Spannungsvorgabe für die VNB sowie die Wiederherstellung der Einspeisemöglichkeit für die Kraftwerke die höchste Priorität. Hierzu ist die Verfügbarkeit der netzführenden Stellen und der Schaltanlagen, insbesondere hinsichtlich ihrer Eigenbedarfsversorgung, und wichtiger Dienste wie z. B. die Kommunikation unter den Beteiligten, die Funktionsfähigkeit der Fernsteuerung und Datenübertragung und die Funktion der Schutzeinrichtungen unabdingbar. Um einen erfolgreichen Netzwiederaufbau zu gewährleisten, müssen darüber hinaus auch grundsätzliche organisatorische (z.B. personelle Besetzung von für den Netzwiederaufbau relevanten, Schaltanlagen) und technische (z.B. Sicherstellung der Verfügbarkeit der Sprach- und Datenkommunikation) Voraussetzungen und Grundanforderungen durch den ÜNB sowie die für den Netzwiederaufbau relevanten

weiteren Partner (z.B. VNB oder Erzeugungseinheiten) erfüllt werden [4]. Die Art, der Umfang und die Auswirkungen von Großstörungen sind dabei nicht vorhersehbar. Folglich beschreiben die Konzepte und Varianten für den Netzwiederaufbau in der Regel ausschließlich die erforderlichen Rahmenbedingungen, Voraussetzungen und prinzipielle Vorgehensweisen für das gemeinsame Handeln der beteiligten Stellen [4]. Trotz dieser großen Heterogenität können auf übergeordneter Ebene grob vier grundsätzliche Störungstypen unterschieden werden, wobei diese in der Praxis in unterschiedlichen Varianten auftreten können, die Übergänge fließend sind und auch Kombinationen möglich sind. Die nachfolgende Auflistung ist daher nur als Übersicht zu verstehen:

- Regionale Spannungslosigkeit
- Teilnetzbildung
- Blackout mit Wiederaufbau aus eigener Kraft mit Hilfe des intakten Nachbarnetz (Top-Down)
- Blackout mit Wiederaufbau aus eigener Kraft ohne unmittelbar verfügbare Hilfe aus dem Nachbarnetz (Bottom-Up)

Ein weiteres Ziel ist die Wiederversorgung der durch den Netzzusammenbruch betroffenen Netznutzer (Versorgungswiederaufbau). Der Versorgungswiederaufbau erfordert jedoch im Regelfall zunächst die Stabilisierung des Übertragungsnetzes (Netzwiederaufbau). Deshalb ist zwischen den einzelnen Schritten und Maßnahmen des Netzwiederaufbaus und des Versorgungswiederaufbaus, die an der Schnittstelle überlappend bzw. nicht eindeutig getrennt sein können, zu unterscheiden. Wichtig ist, dass der Netz- und Versorgungsaufbau in allen Zeitschritten möglich sein muss, d.h. auch in der Nacht, zu Stark- oder Schwachlastzeiten sowie zu Zeitpunkten mit sehr hoher bzw. geringer Einspeisung von fluktuierenden Erzeugern.

2.1. Strategien

Bei einem vollständigen Netzzusammenbruch von mindestens einer Regelzone erfolgt der Netzwiederaufbau entweder mittels einer Top-Down-Strategie oder mittels einer Bottom-Up-Strategie. Die heutige Bottom-Up-Strategie ist dabei nicht mit den in der Wissenschaft diskutierten Ansätzen – den Netzwiederaufbau auch aus den unteren Spannungsebenen des Verteilnetzes heraus durchzuführen – gleichzusetzen. Vielmehr beschreibt diese Strategie allgemein den Ansatz,

das Netz aus einzelnen Startnetzen bzw. durch einzelne SSF Kraftwerke wieder aufzubauen. Heute sind dies jedoch keine Mittel- und Niederspannungsnetze bzw. Netzbetreiber, sondern in der Höchst- und Hochspannungsebene angeschlossene SSF Kraftwerke bzw. Einheiten, die sich im Eigenbedarfsinselbetrieb „gefangen“ haben. Dabei werden sukzessive Netzbereiche des zuvor spannungslosen Übertragungsnetzes oder einzelne Netzelemente zum Nachbarnetz zugeschaltet und unter Spannung gesetzt.

Der **Top-Down-Ansatz** wird genutzt, wenn mindestens an einem Randknoten eines benachbarten ÜNB eine hinreichend stabile Spannung anliegt und das benachbarte Netz hinreichende Reserven zur Unterstützung aufweist. Der NWA erfolgt dann in Abstimmung durch die Unterstützung des benachbarten ÜNB. Die Auswahl der zugeschalteten Teilnetze sind dabei im Vorfeld eng mit dem unterstützenden ÜNB und weiteren Akteuren (bspw. relevante Kraftwerksbetreiber, aber auch Netznutzer des zugeschalteten Teilnetzes) abzustimmen. Zunächst werden dabei Erzeugungsanlagen, die sich im Eigenbedarfsinselbetrieb „gefangen“ haben oder SSF sind, mit dem benachbarten Netz synchronisiert, sukzessive zugeschaltet und mit zugeschalteten Lasten aus den unterlagerten Verteilnetzen belastet. Die Zuschaltung von Erzeugung und Last erfolgt dabei stückweise und möglichst ausgeglichen, um die Verbindungsleitungen zum unterstützenden ÜNB nicht zu überlasten und/oder das System zu destabilisieren. Bei der Zuschaltung neuer Lasten und Erzeuger ist unbedingt darauf zu achten, dass die hierdurch auftretenden Leistungsungleichgewichte die Regelfähigkeit der bereits aktiven Kraftwerke (und Anlagen) nicht übersteigen. Die Größe bzw. Regelfähigkeit des bereits unter Spannungen stehenden Netzes begrenzt somit die maximal mögliche Zuschaltleistung je Schritt.

Kann nicht auf eine stabile Spannung bei einem benachbarten Regelzone zurückgegriffen werden, bspw. bei einem vollständigen Netzzusammenbruch wird der NWA Bottom-Up ausgehend von SSF oder sich im Eigenbedarfsinselbetrieb gefangenen Kraftwerken durchgeführt. Der NWA muss folglich ohne externe Spannungsvorgabe erfolgen, sodass SSF Anlagen benötigt werden, welche per Definition ohne externe Spannungsvorgabe hochfahren können. Heute sind diese Anlagen ausschließlich im Höchst- und Hochspannungsnetz angeschlossen. Technisch handelt es sich dabei gegenwärtig um

Pumpspeicher-, Laufwasser- und Gaskraftwerke, welche teilweise auch durch Dieselgeneratoren unterstützend gestartet werden.

Bezogen auf den Prozess des NWA hinsichtlich der Spannungsebenen erfolgt auch der **Bottom-Up-Ansatz** nach dem Top-Down-Prinzip. Auch hier wird das spannungslose Netz ausgehend vom Übertragungsnetz erneut unter Spannung gesetzt. Dieser Prozess erfolgt in der Regel parallel an unterschiedlichen Stellen um Netz, sodass sich mehrere Startnetze ergeben, die dann im weiteren Verlauf des NWA miteinander synchronisiert werden. Der Ausgangspunkt aus dem Übertragungsnetz ist ein wesentlicher Unterschied zu den in der Wissenschaft unter Bottom-Up diskutierten Konzepten für den zukünftigen Netz- und teilweise auch Versorgungswiederaufbau.

Vergleich der Ansätze. Grundsätzlich ist der Top-Down-Ansatz zu präferieren bzw. wird nur dann nicht gewählt, wenn dieser nicht möglich ist. Bei der Anwendung des Top-Down Ansatzes ist es Voraussetzung, dass es sich bei dem benachbarten Netz um einen ausgedehnten Netzbereich in einem stabilen Betriebszustand handelt, der über die entsprechende Stoßfestigkeit, Spannungs- und Frequenzregelung sowie Trägheit verfügt und als Referenz für den Netzwiederaufbau genutzt werden kann. Hierdurch wird das Risiko eines erneuten Netzzusammenbruchs deutlich reduziert bzw. es können größere Leistungsklassen sukzessive zugeschaltet werden. Ursache hierfür ist, dass die sprunghafte Änderung der Last und Erzeugung bei der Zuschaltung nur einen geringen Anteil an der Gesamtleistung im aktiven Netzbereich ausmacht. Bei einem Bottom-Up Netzwiederaufbau müssen die Lastzuschaltungen entsprechend auf die zulässigen Lastsprünge der SSF Kraftwerke abgestimmt werden. Darüber hinaus muss zur Deckung des Energiebedarfs schnellstmöglich Erzeugung hinzugeschaltet werden. Auch hier ist eine Beachtung der Reaktionszeiten der Schwarzstarteinheiten zu berücksichtigen. Dies resultiert auch in einem höheren erwarteten Zeitaufwand bis zum Abschluss der vollständigen Wiederversorgung gegenüber dem Top-Down-Ansatz.

Da nicht gewährleistet ist, dass bei einem Nachbar-ÜNB ein stabiler Netzzustand vorliegt, kann eine – grundsätzlich vorteilhafte – Top-Down-Strategie beim NWA jedoch nicht immer verfolgt werden, weshalb die Netzwiederaufbaupläne der ÜNB beide Strategien abdecken müssen, [4]. Die Bottom-Up-Strategie stellt damit die wesentliche und zwingend notwendige Voraussetzung dafür dar, dass das Stromnetz

nach dessen Ausfall wieder in Betrieb genommen werden kann und im Anschluss die Wiederversorgung der Netzkunden möglich ist.

2.1.1. Phasen

Die erforderlichen Maßnahmen im Netz- und Versorgungswiederaufbau können übergeordnet in die drei Phasen

- Netzwiederaufbau
- Versorgungswiederaufbau
- Lastfolgebetrieb

eingeteilt werden, die sich zeitlich bis zu einem gewissen Grad überschneiden können. Abbildung 2-1 gibt eine Übersicht der typischen Phasen sowie ihrer Teilprozesse bzw. -phasen.

Netzwiederaufbau. In der ersten Phase steht der Netzwiederaufbau im Fokus. Diese Phase gilt als abgeschlossen, sobald das Übertragungsnetz wieder unter Spannung steht und als gesichert angesehen werden kann. Je nachdem ob der Netzwiederaufbau Bottom-Up oder Top-Down erfolgt ist, wird dabei das Startnetz zuerst eigenständig aufzubauen bzw. kann durch die Unterstützung benachbarter ÜNB erfolgen. Die Übersicht zeigt dabei die Teilphasen auch beim Bottom-Up-Ansatz auf.

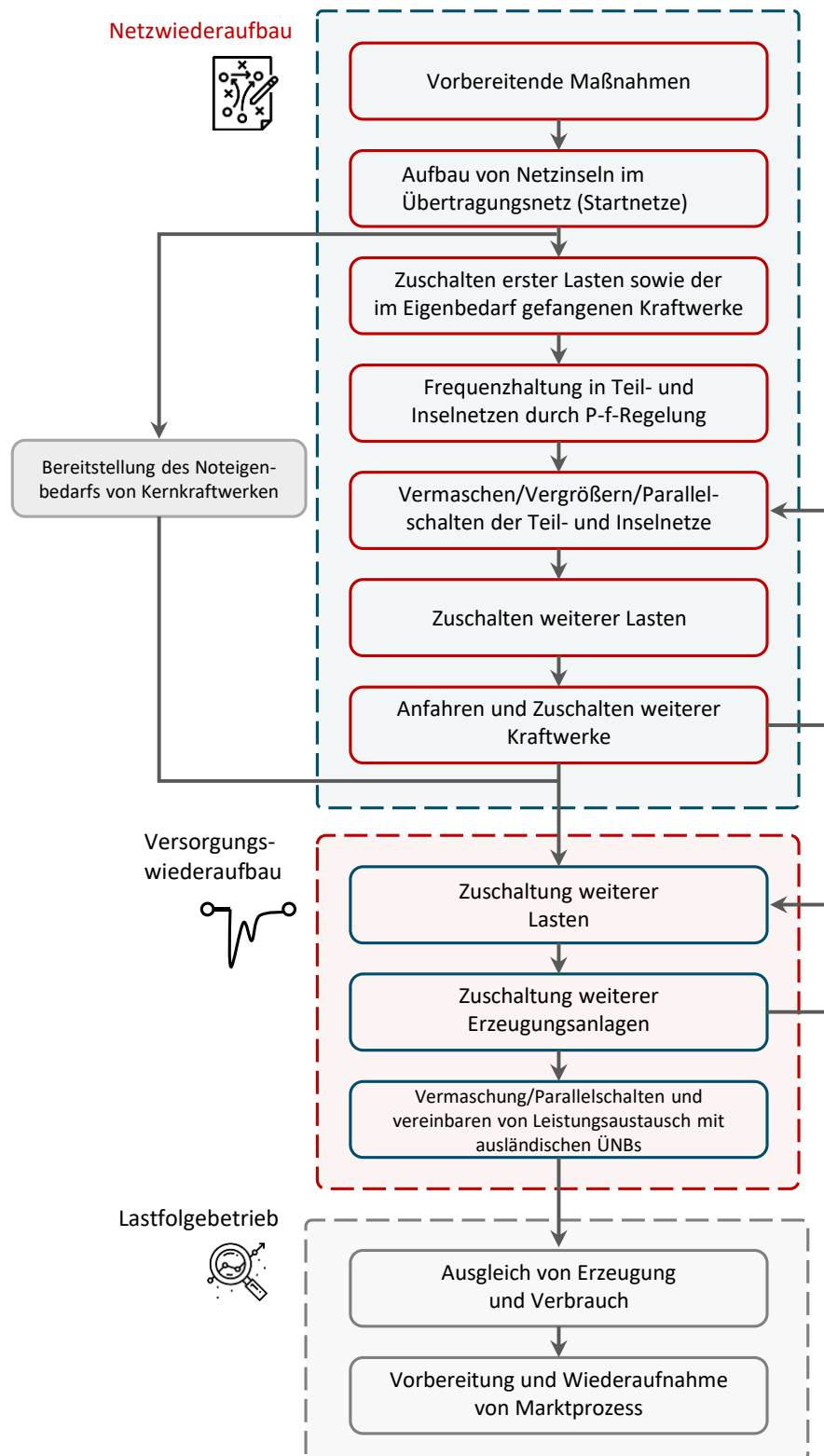


Abbildung 2-1: Typische Phasen des Netz- und Versorgungswiederaufbaus

Vorbereitende Maßnahmen werden unmittelbar nach Störungseintritt eingeleitet bzw. sind teilweise inhärent in den Netzwiederaufbauplänen hinterlegt. Zu letzteren gehört bspw. die vorgesehene Aufteilung des Netzes bzw. der Netzbereiche in Teilnetze für den Netzwiederaufbau. Zu den einzuleitenden Maßnahmen gehört das Heraustrennen des im Verantwortungsbereich des ÜNB liegenden Netzbereichs und danach die operative Auftrennung des Übertragungsnetzes in die definierten Teilnetze für den Netzwiederaufbau entsprechend des praktizierten Ansatzes. Zudem werden bei einem Netzzusammenbruch die Marktaktivitäten des Fahrplan- sowie Regelenenergiemarktes während des Netz- und Versorgungswiederaufbau ausgesetzt. Analog zur Vorbereitung des Übertragungsnetzes müssen auch die Verteilnetze bzw. die dort angeschlossenen Lasten und dezentralen Erzeugungsanlagen vorbereitet werden. Dies geschieht in enger Absprache zwischen ÜNB und VNB. Hierzu wird das Verteilnetz in Teilbereiche getrennt, sodass die Last kleinteiliger und kontrolliert zugeschaltet werden kann. Die Teilbereiche sind dabei ebenfalls von dem praktizierten Ansatz abhängig.

Nachfolgend werden Netzinseln im Übertragungsnetz sog. *Startnetze* aufgebaut. Dies erfolgt im Bottom-Up-Ansatz mittels der NF-SDL Schwarzstartfähigkeit bzw. im Top-Down-Ansatz auch durch die Spannungsvorgabe eines benachbarten ÜNB. Die Mindestanforderungen für SSF Kraftwerke sind in den Modalitäten für Anbieter von Systemdienstleistungen zum Netzwiederaufbau genannt [5]. Heute sind diese Anlagen ausschließlich im Hoch- und Höchstspannungsnetz angeschlossen und verfügen leistungsbedingt über die Fähigkeit und Stoßfestigkeit um „größere“ Leistungssprünge auszuregeln.

Im nächsten Schritt erfolgt die *Zuschaltung erster Lasten* sowie die *Eigenbedarfsdeckung von Kraftwerken*, die sich im Inselbetrieb gefangen haben. Höchste Priorität hat dabei die *Eigenbedarfsdeckung von Kernkraftwerken*, um deren Sicherheit jederzeit garantieren zu können. Bei der Zuschaltung wird auf ein ausgeglichenes Verhältnis aus Last und Erzeugung geachtet. Der Umfang der Leistungszuschaltung hängt dabei von der Netzgröße bzw. der bereits wieder im Netz aktiven Erzeugungsleistung ab. Ziel ist es nur einen geringen Anteil der bereits Aktiven Last zuzuschalten, um ausreichende Spannungs- und Frequenzregelfähigkeit sicherzustellen und das Netz nicht zu destabilisieren. Operativ erfolgt die Zuschaltung durch den VNB auf Anweisung des ÜNB. Gerade zu Beginn des

Netzwiederaufbau ist es von Vorteil schwankungsarme Lasten hinzuschalten. Auch muss darauf geachtet werden, dass dargebotsabhängige Erzeuger sich aufgrund der wiederkehrenden Spannung und Frequenz nur in dem Maße zuschalten, dass deren Schwankungen, durch die bereits wieder am Netz befindlichen regelbaren Kraftwerke ausgeglichen werden kann. Die rasche Zuschaltung von sich im Inselbetrieb gefangenen Kraftwerken hat hierbei eine stabilisierende Wirkung und erfolgt daher parallel und frühzeitig.

Die *Wiederaufnahme der Leistungs-Frequenz-Regelung* (P-f-Regelung) in den Teilnetzen erfolgt sukzessive in Abhängigkeit vom gewählten Ansatz (Bottom-Up oder Top-Down) auch zur Entlastung des Betriebspersonals. Diese technische Regelung ist nicht mit der marktlich organisierten Regelleistung zu vergleichen. Während des NWA werden alle Anlagen, die technisch in der Lage sind, zur Teilnahme verpflichtet. Beim Top-Down-Ansatz erfolgt die Aktivierung der P-f-Regelung in der Regel früher als beim Bottom-Up Ansatz nach Rücksprache mit dem Frequenzkoordinator, also praktisch mit dem unterstützenden ÜNB. Bei Bottom-Up-Ansatz erfolgt die Aktivierung dann, wenn die Teilnetze ausreichend groß sind, sodass ausreichend viele regelfähige Einheiten aktiv sind.

Die Bildung von Teilnetzen erfolgt in der Regel parallel an mehreren Stellen. Die *Teilnetzinseln sind dann sukzessive zusammenschalten* und der Vermaschungsgrad und die Robustheit des resultierenden Teilnetzes sind zu erhöhen. Das Zusammenschalten von zwei oder mehreren Teilnetzen kann beim Bottom-Up-Ansatz auch der Auslöser zur Aktivierung der P-f-Regelung sein.

Dieser Vorgang wird dann fortgesetzt, bis das gesamte Übertragungsnetz unter Spannung gesetzt wurde. Hierzu werden abwechselnd *Lasten zugeschaltet, Erzeuger hochgefahren und ebenfalls zugeschaltet*. Mit steigender Teilnetzgröße sinkt die Gefahr eines erneuten teilweise oder vollständigen Zusammenbruchs des Übertragungsnetzes, da die Spannungs- und Frequenzregelfähigkeit des Teilnetzes zunimmt, die verfügbare Trägheit bzw. Momentanreserve steigt und die zugeschalteten Lasten relativ gesehen einen kleiner werdenden Anteil der Netzlast ausmachen. Am Ende des NWA ist (nahezu) das gesamte Übertragungsnetz wieder unter Spannung gesetzt und in einem stabilen Betriebszustand.

Versorgungswiederaufbau. In der zweiten Phase steht der Versorgungswiederaufbau im Fokus. Hierzu ist eine hinreichende Wiederversorgung des Übertragungsnetz erforderlich, sodass die beiden Phasen zwar grundsätzlich aufeinander folgen, sich jedoch auch überlappen. Wie beschrieben, werden während des Netzwiederaufbaus auch bereits erste Verbraucher wiederversorgt und schrittweise zugeschaltet. Ebenfalls kann auch lokal in Abhängigkeit der Netzwiederaufbaupläne bereits mit der Zuschaltung weiterer Verbraucher fortgefahren werden, bevor das vollständige Übertragungsnetz wieder unter Spannung gesetzt ist. Die Teilphasen sind dabei analog zu den Späteren des Netzwiederaufbaus, d.h. es werden sukzessive *weitere Lasten und Erzeuger zugeschaltet*, wodurch die Überlappung bzw. der fließende Übergang deutlich wird. Dabei wird weiterhin darauf geachtet, dass die Zuschaltung möglichst ausgeglichen zwischen Last und Erzeugung erfolgt. Während des NWA werden primär regelfähige Anlagen hinzugeschaltet, wohingegen im VWA überwiegend die Anlagen des Verteilnetzes und damit zumeist dargebotsabhängige Anlagen hinzugeschaltet werden. Insbesondere ist dabei darauf zu achten, ob ein zugeschaltetes Verteilnetz zum Zeitpunkt der Zuschaltung sich als Last oder Einspeisung charakterisiert. Beim NWA im Bottom-Up-Ansatz können die jeweiligen ÜNB, wenngleich der NWA in Deutschland eng koordiniert zwischen den vier ÜNB in erfolgt, nur auf die Erzeugungsleistung ihrer Regelzone gesichert zurückgreifen. Deren Verfügbarkeit definiert somit den Grad der möglichen Wiederversorgung bevor die einzelnen Regelzonen bzw. das deutsche Netz mit dem Verbundnetz synchronisiert werden. Heute stehen in der Regel ausreichend regelfähige Kraftwerke zur Verfügung, sodass davon auszugehen ist, dass eine vollständige Wiederversorgung möglich ist. Der Rückgang der gesichteten Leistung ist daher in zukünftigen Netz- und Versorgungswiederaufbaukonzepten zu berücksichtigen.

Die weitere Vermaschung, Parallelschaltung und Synchronisation der deutschen Regelzonen untereinander und mit den ausländischen ÜNB sowie die Vereinbarung von Leistungsaustausch stellen den letzten Schritt des VWA dar. Dabei kann es sinnvoll sein, bereits während des NWA bzw. während frühen Phasen des VWA Teilnetze (auch regelzonen- und länderübergreifend) zu resynchronisieren. Dies ist jedoch von der konkreten Störung abhängig. Das abschließende Ziel des VWA ist die Rückkehr zum Normalzustand, d.h. die

Versorgung aller Netzkunden sowie die Rückkehr in den stabilen Netzverbundbetrieb.

Lastfolgebetrieb. In der dritten Phase umfasst den Lastfolgebetrieb. Dieser umfasst die Maßnahmen nach der Wiederversorgung bis hin zur Wiederaufnahme der regulären Marktaktivität, die aufgrund der Großstörung ausgesetzt wurde. Im Wesentlichen koordinieren die ÜNB während dieser Zeit den Einsatz von verfügbaren Erzeugungsanlagen und organisieren nach Können und Vermögen den *Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch* innerhalb ihrer Regelzonen unter Nutzung von verfügbaren Erzeugungspotentialen benachbarter ÜNB auf nationaler wie europäischer Ebene. Grundlage für den Einsatz der Erzeugungsanlagen sind dabei Lastverläufe und Lastprognosen, die die Netzbetreiber ermitteln bzw. erstellen. Spätestens mit der Aufnahme des Lastfolgebetriebs beginnen die Netzbetreiber mit den *Vorbereitungen für die Wiederaufnahme des Marktes*. [6]

2.1.2.Zuständigkeiten

Den Übertragungsnetzbetreibern kommt bei der Durchführung des Netz- und Versorgungswiederaufbaus eine hervorgehobene Rolle aufgrund ihrer Systemverantwortung zu. Um dieser gerecht werden zu können ist die Sicherung der Handlungsfähigkeit der Netzbetreiber unerlässlich. Für die Überwachung und Steuerung des Netzes verfügen die ÜNB an allen relevanten Stellen über Notstromanlagen, die für eine zeitlich begrenzte Dauer die benötigte Energie bereitstellen. Diese Energie wird auch als Eigenbedarf bezeichnet. Aufgrund der endlichen Kapazität der Energiespeicher bzw. lokal vorgehaltener Brennstoffe sind die ÜNB jedoch darauf angewiesen, die Versorgung aus den Notstromanlagen durch eine permanent verfügbare Leistungsbereitstellung abzulösen. Dies erfolgt heute dadurch, dass wie zuvor beschrieben, Stromkreise und Transformatoren durch Erzeugungsanlagen am Hoch- bzw. Höchstspannungsnetz unter Spannung gesetzt werden. Aus den Tertiärwicklungen der Transformatoren erfolgt anschließend die Versorgung des Eigenbedarfs der Anlagen des ÜNB analog dem ungestörten Netzbetrieb. [6]

Konkret obliegt dem ÜNB die Koordinationsaufgabe und Verantwortung für den Netz- und Versorgungswiederaufbau in seiner Regelzone. Hierzu koordiniert er das Vorgehen mit den benachbarten ÜNB, nachgelagerten VNB sowie Erzeugern in seinem Netzgebiet. Ihm obliegt hierbei die Entscheidungshoheit, d.h. Maßnahmen des Netz-

und Versorgungswiederaufbaus durch andere Akteure sind nur auf seine Anweisung hindurchzuführen. So kann er Erzeugern und Lasten, die direkt im Höchstspannungsnetz angeschlossen sind, Anweisungen zu deren Betriebsverhalten geben. Vergleichbare Anweisungen für Netznutzer im Hochspannungsnetz erfolgen üblicherweise in Koordination mit dem VNB bzw. durch den VNB wiederum auf Anweisung des ÜNB. Da nur wenige Lasten direkt im Übertragungsnetz angeschlossen sind, ist es dem ÜNB i.d.R. nicht möglich Lasten definierte Lastscheiben nach Höhe und Zeitpunkt zuzuschalten. Diese Aufgabe übernimmt der VNB.

Der Verteilnetzbetreiber hat den Anweisungen des ÜNB während des Netz- und Versorgungswiederaufbaus Folge zu leisten. Hierzu muss er eigenverantwortlich seine Handlungsfähigkeit sicherstellen, sodass es auch notwendig ist, dass er entsprechend der Netzwiederaufbaupläne und -Varianten kritische Schaltanlagen durch Personal besetzt. Die primäre Aufgabe der VNB beim NWA besteht darin, auf Anforderung der ÜNB Lastzuschaltungen durchzuführen und hierbei die vom ÜNB angeforderte Lasthöhe und den Zeitpunkt der Lastzuschaltung zu erfüllen. Hierzu müssen VNB entsprechende Konzepte in Zusammenarbeit mit dem zuständigen ÜNB im Vorfeld erarbeiten, die einerseits eine geeignete Aufteilung des Verteilungsnetzes in Teilnetze vorsehen und andererseits müssen hinreichend robuste Prognosen der Lasten, ggf. unter Berücksichtigung des Einflusses von dezentralen Erzeugungsanlagen, umfassen. Beim Zuschalten der Last müssen VNB nach Möglichkeit sicherstellen, dass dezentrale Erzeugungsanlagen keine negativen Rückwirkungen auf den NWA haben. Hierzu sind ggf. auch Abregelungsmaßnahmen notwendig.

Auch alle **Erzeugungsanlagen** müssen während des Netz- und Versorgungswiederaufbaus den Anweisungen des ÜNB (unabhängig ob direkt oder indirekt über den VNB) Folge leisten. Dies betrifft insbesondere den Betriebspunkt der Erzeuger. Hierbei gilt, dass alle Erzeuger den regulatorischen und technischen Regelungen (TAR des VDE, NC RfG, etc.) unterliegen diese entsprechend erfüllen müssen. Die Anforderungen sind dabei unterschiedlich nach Netzanschluss-ebene und Primärenergieträger. Für den Netz- und Versorgungswiederaufbau besonders wirkungsvolle Eigenschaften werden durch die NF-SDL Schwarzstartfähigkeit und Inselbetriebsfähigkeit definiert (siehe hierzu die Definitionen der Eigenschaften, sowie die weiteren

Veröffentlichungen im Projekt SDL-Zukunft, u.a. [1]). Diese Eigenschaften werden heute ausschließlich von Erzeugern der Hoch- und Höchstspannung gefordert und bereitgestellt. Die Rolle der Erzeuger im Netz- und Versorgungsaufbau wird daher im Vorfeld mit den Betreibern besprochen, sowie trainiert.

Weitere (Markt-)akteure sind praktisch nicht in den Netz- und Versorgungswiederaufbau eingebunden. In dieser Zeit sind die Marktaktivitäten ausgesetzt und der Kraftwerkseinsatz erfolgt nicht entsprechend Angebot und Nachfrage, sondern auf Anweisungen des ÜNB. Dies gilt insbesondere auch für den Lastfolgebetrieb.

2.2. Wichtige Voraussetzungen

Der Ausfall des Stromnetzes ist ein Extremfall, der mit vielen Unwägbarkeiten, unbekanntem Situationen und einem hohen kognitiven Stresslevel verbunden ist. Damit der Netzwiederaufbau (und auch der Versorgungswiederaufbau) unter diesen extremen Umständen möglichst schnell und erfolgreich verlaufen kann, sind Voraussetzungen zu schaffen. Die wesentlichen Notwendigkeiten werden im Folgenden dargestellt. Diese dienen auch als Grundlage um in Kapitel 3 Handlungsempfehlungen und Anpassungsbedarfe abzuleiten um den in Kapitel 1 beschriebenen Herausforderungen in zukünftigen Netz- und Versorgungswiederaufbaukonzepten und -Varianten begegnen zu können.

- **Handlungsfähigkeit aller relevanten Akteure.** Für den erfolgreichen Netz- und Versorgungswiederaufbau ist die Handlungsfähigkeit der relevanten Akteure (ÜNB, VNB, Erzeugungsanlagen) von zentraler Bedeutung. Der Wiederaufbau bedarf ein hohes Maß an Abstimmung und Koordination, bei dem jeder Akteure seine Rolle und Aufgaben übernehmen muss (vgl. Unterkapitel 2.1). Die konkreten Anforderungen an die Akteure, um handlungsfähig zu bleiben sind dabei unterschiedlich und sind in Unterkapitel 2.1 diskutiert bzw. werden in den folgenden Punkten reflektiert.
- **Ausreichend verfügbare schwarzstartfähige Einheiten.** ÜNB sind auf das Vorhandensein und die Verfügbarkeit von SSF Kraftwerken bzw. Einheiten angewiesen, um jederzeit mit der Sicherung der Infrastruktur und der anschließenden Wiederversorgung beginnen zu können. Diese sind essenziell für den NWA. Die Anzahl und Platzierung der Einheiten sind mit den Netzwiederaufbaukonzepten abzustimmen. Hierbei gibt es jedoch eine gewisse

Flexibilität bzw. auch die Notwendigkeit dieser Flexibilität aufgrund der sich ändernden Rahmenbedingungen (vgl. Kapitel 1).

Direkt betroffene NF-SDL:

- **NF-SDL: Schwarzstartfähigkeit**

- **Gesicherte und regelbare Leistung für spätere Teilphasen.** Über die SSF Erzeuger hinaus ist der ÜNB auch darauf angewiesen während des fortschreitenden Netzwiederaufbaus zusätzliche auf gesicherte und regelbare Leistung zurückgreifen zu können. Hierbei steht nicht der Erbringer als solches, sondern die notwendigen Eigenschaften im Fokus. Diese Leistung wird benötigt, um die Versorgung und Sicherung der eigenen Netzinfrastruktur über die Eigenbedarfsversorgung aus Notstromanlagen des ÜNB und die Energiebevorratung innerhalb der SSF Kraftwerke hinaus zu gewährleisten [6]. Zudem wird die zusätzliche Leistung benötigt, um das Netz schrittweise weiter aufzubauen und zusätzliche Lasten hinzuschalten zu können. Dies steigert die Stabilität und ermöglicht den sukzessiven Fortschritt des Netzwiederaufbaus. Auch kann durch diese zusätzliche Leistung der Netzwiederaufbau benachbarter Teilnetze, die über keine weiteren Leistungsreserven verfügen, unterstützt werden. Heute erfüllen diese Aufgabe primär Großkraftwerke mit Inselbetriebsfähigkeit.

Direkt betroffene NF-SDL:

- **NF-SDL: Inselbetriebsfähigkeit**

- **Ausreichende Systemdienstleistungen.** Für den Netzwiederaufbau müssen zudem in allen Teilnetzen ausreichend Systemdienstleistungen erbracht werden, um das Netz stabil zu halten. Dies ist herausfordernd, auch wenn während des Netzwiederaufbaus nicht die Grenzwerte des regulären Netzbetriebs anzusetzen sind. Die notwendigen Systemdienstleistungen umfassen sowohl die zur Frequenzstützung/-haltung notwendige Schwungmasse bzw. Trägheit der lokalen Netzstabilität, Primärregelleistung, als auch die zur statischen und dynamischen Spannungshaltung notwendige Blind- und Kurzschlussleistung. Hierbei muss bedacht werden, dass gerade zu Beginn die Netzs Inseln klein sind und ein regelzonenübergreifender Austausch nicht unmittelbar möglich ist. Folglich liegt ein regional differenzierter Bedarf in allen Regelzonen vor, den es entsprechend mit und in den Netzwiederaufbauplänen abzustimmen gilt. Dies gilt insbesondere auch für die Blind- und Kurzschlussleistung, die lokal erbracht werden muss, um eine ausreichende Spannungsqualität zu gewährleisten, sowie die Sicherstellung der Schutzanregung und -auslösung zu garantieren. Analog zu der notwendigen gesicherten Leistung kann auch ein Mehrbeitrag zur Unterstützung

benachbarter Teilnetze genutzt werden. Heute erfüllen diese Aufgabe primär Großkraftwerke.

Direkt betroffene NF-SDL:

- **NF-SDL: Inselbetriebsfähigkeit**
 - **NF-SDL: Dienstleistung zur Spannungsregelung**
 - **NF-SDL: Trägheit der lokalen Netzstabilität**
 - **NF-SDL: Kurzschlussstrom**
-
- **Verantwortung, Abstimmung und Koordination.** Für einen erfolgreichen NWA müssen die Verantwortlichkeiten und die jeweils von den Akteuren zu übernehmenden Rollen bzw. Aufgaben klar definiert sein. Diese werden in dem NC ER vorgegeben und durch die AR-N 4141-1 des VDE hinsichtlich des Zusammenarbeitens zwischen ÜNB und VNB national spezifiziert. Dabei steht der Systemgedanke im Fokus, d.h. jeder Akteur muss seine Maßnahmen so umsetzen bzw. den Anweisungen Folge leisten, damit der Wiederaufbau schnellstmögliches und sicher vonstattengehen kann. Die Interessen einzelner Netznutzer sind dabei entsprechend nachrangig. Der Systemfokus gilt während des Netz- und Versorgungswiederaufbaus, jedoch insbesondere auch für alle vorbereitenden Maßnahmen. So kann der ÜNB bspw. Anforderungen an die Kommunikationstechnik definieren, die dann entsprechend vom VNB umzusetzen bzw. einzuhalten ist. Aus Basis dieses regulatorischen Rahmens entwickelt der ÜNB die Netzwiederaufbaupläne und gestaltet dabei die Anforderungen und Schnittstellen zwischen den Akteuren aus.
 - **Schwarzfallfeste Kommunikation.** Für den Netzwiederaufbau ist die Koordination und Abstimmung der relevanten Akteure unerlässlich. Daher muss auch in einer solchen Stresssituation eine verlässlich Sprach- und Datenkommunikation verfügbar sein, da davon auszugehen ist, dass das öffentliche Telekommunikationsnetz in diesen Fällen nicht oder nur eingeschränkt zur Verfügung steht. Dies geht mit einer ausreichenden Redundanz und Notfallstromversorgung einher. Zu den wichtigsten technischen Anforderungen gehört die im NC ER vorgeschriebene Sicherstellung der Verfüg- und Ansteuerbarkeit von kritischen IT-Systemen und Anlagen. Die ÜNB planen hierbei, aktuell eine Verfügbarkeit von 72 Stunden nach Ausfall der Stromversorgung umzusetzen. Die ÜNB folgen damit einer Empfehlung des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe für Betreiber kritischer Infrastrukturen, wozu das Übertragungsnetz zählt. Entsprechend sehen die ÜNB auch eine geeignete Ausstattung wichtiger

Kommunikations- und Schaltelemente bei SSF Anlagen sowie bei VNB vor. [4]

- **Geschultes Personal und Training.** Gemäß dem NC ER ist die Durchführung regelmäßiger Trainings für alle relevanten Akteure verpflichtend und praktisch notwendig. Der NWA ist eine komplexe Maßnahme, die unter großer Unsicherheit und Stress bestmöglich gelingen muss. Hierzu ist das Proben des „Ernstfalls“ unerlässlich. Dies umfasst regelzoneninterne aber auch regelzonen- und länderübergreifende Trainings auch unter Einbezug der VNB, (SSF) Kraftwerken und des entsprechenden Betriebspersonals. Hierbei werden verschiedene Szenarien trainiert und einzelne Maßnahmen sowie die Kommunikation zwischen den Akteuren erprobt. Ergänzt werden diese Trainings von realen Betriebsversuchen in denen ausgehend von SSF Anlagen einzelne Netzabschnitte unter Spannung gesetzt werden.
- **Robuste Netzwiederaufbaupläne.** Robuste Netzwiederaufbaupläne sind die Grundvoraussetzung für den erfolgreichen NWA und müssen die zuvor genannten Punkte gebündelt berücksichtigen. Da Art, der Umfang und die Auswirkungen von Großstörungen ex ante nicht vorhersehbar sind, müssen die Konzepte und Varianten für den Netzwiederaufbau die erforderlichen Rahmenbedingungen, Voraussetzungen und prinzipielle Vorgehensweisen für das gemeinsame Handeln der beteiligten Stellen definieren. Diese gilt es auch zu trainieren. Die NWAP und -varianten sollen dabei möglichst konkret sein, sodass diese in der Praxis gut umzusetzen sind. Zeitgleich müssen sie jedoch das Spektrum der möglichen Ausprägungen und Unsicherheiten abdecken, sodass auf alle Situationen reagiert werden kann. Kurzum, die Pläne müssen robust sein. Es ist daher unerlässlich, dass die o.g. Voraussetzungen erfüllt sind. Dies betrifft insbesondere ausreichend verfügbare SSF Einheiten, die schwarzfallfeste Kommunikation, ausregend regelfähige Leistung und Systemdienstleistungen, sowie die Möglichkeit Lasten in definierten Schritten zuzuschalten.

2.3. Einordnung Schwarzstartfähigkeit und Inselbetriebsfähigkeit

Für den Netz- und Versorgungswiederaufbau sind alle SDL in unterschiedlichen Phasen erforderlich. Dies betrifft insbesondere auch solche NF-SDL, die für den Verbundbetrieb notwendig sind. Einen besonderen Stellenwert nehmen die NF-SDL *Schwarzstartfähigkeit* und *Inselbetriebsfähigkeit* ein, die explizit für den Netz- und Versorgungswiederaufbau relevant sind und im stationären Verbundbetrieb des Systems nur eine untergeordnete Rolle spielen. Wie bereits zuvor

beschrieben wird die Schwarzstartfähigkeit heute durch Pumpspeicher-, Laufwasser- und Gaskraftwerke, welche teilweise auch durch Dieselgeneratoren unterstützt/gestartet werden, erbracht. Hierbei gehört unter anderen die autarke Eigenbedarfsversorgung zu den Anforderungen an diese Anlagen. Schwarzstartfähigkeit kontrahieren die ÜNB im Vorfeld von den entsprechenden Anlagen bereits heute in einem marktlichen Beschaffungsverfahren. Zur Steigerung der Transparenz dieser Beschaffung haben die Gutachter im Zuge der ersten Projektphase von SDL-Zukunft ein marktliches Beschaffungskonzept für Schwarzstartfähigkeit (siehe [2]) vorgeschlagen, welches bei der Konzeptentwicklung durch die Bundesnetzagentur als Grundlage dienen kann.

Eine Erzeugungsanlage stellt Inselbetriebsfähigkeit bereit, wenn sie Frequenz und Spannung eines isolierten Teilnetzes über einen längeren Zeitraum innerhalb der für diesen Betriebszustand geltenden Grenzwerte stabil halten kann. Diese Fähigkeit ist insbesondere zu Beginn des NWA und besonders beim Bottom-Up Ansatz von wesentlicher Bedeutung. Für Kraftwerke, die in der Hoch- und Höchstspannung angeschlossen sind, ist diese Eigenschaft gemäß den TAR verbindlich vorgeschrieben. Für Erzeuger in der Mittel- und Niederspannung gibt es aktuell keine entsprechenden Vorgaben in den TAR. Zudem werden diese Erzeuger im Status-quo nicht aktiv in den NWA eingebunden. Eine marktliche Beschaffung der Inselbetriebsfähigkeit findet heute nicht statt. Die Prüfung der Effizienz einer solchen marktlichen Beschaffung von Inselbetriebsfähigkeit in der kurzen Frist durch die Gutachter führte aufgrund des aktuell fehlenden zusätzlichen Bedarfs dieser NF-SDL und höherer Zusatzkosten von alternativen Erbringern zu keinem Effizienzgewinn. Langfristig ist jedoch durch den Umbau des Energiesystems und dem Rückgang konventioneller Erzeugungsanlagen mit einer Bedarfslücke zu rechnen, sodass sich aus einer Neubewertung Handlungs- bzw. Anpassungsbedarfe ergeben können.

3. Handlungs- und Anpassungsbedarf

Aus den oben genannten Herausforderungen ergeben sich notwendige Schritte, um einen zuverlässigen Netz- und Versorgungswiederaufbau auch zukünftig bzw. langfristig zu gewährleisten. Die steigende Dezentralität im elektrischen Energiesystem erhöht den Bedarf an verbesserten Prognosen, geeigneten Kommunikationssystemen und in Abhängigkeit der Wiederaufbaustrategie klar abgegrenzten Verantwortlichkeiten. Im folgenden Kapitel werden daher Handlungsfelder aufgezeigt, in welchem die Gutachter Potentiale für einen eine bedarfsgerechte Weiterentwicklung des Netz- und Versorgungswiederaufbaus sehen.

Wichtig ist zu betonen, dass im Folgenden keine detaillierte Bewertung der Effizienz einer marktlichen Beschaffung von Inselbetriebsfähigkeit in der langen Frist erfolgt. Diese Bewertung wäre mit großen Unsicherheiten behaftet und ist daher für die lange Frist nicht belastbar möglich. Vielmehr werden basierend aus der Einsortierung der zuvor geschilderten Herausforderungen in den bestehenden Netz- und Versorgungswiederaufbau Handlungs- und Anpassungsbedarfe identifiziert, die frühzeitig adressiert werden sollten, um auch mittel- und langfristig einen stabilen und robusten Netz- und Versorgungswiederaufbau zu ermöglichen. Zwischen möglichen Maßnahmen erscheint eine Abwägung zwischen Aufwand und Nutzen notwendig, um Anpassungen mit vergleichsweise geringen Kosten und großem Effekt priorisieren zu können. Z.B. erscheint die Umrüstung von bereits installierten Einrichtungen durch Softwareupdates kostengünstig, wohingegen Hardware-Erweiterungen wie Speichervergrößerungen oder (schwarzfallfeste) Kommunikation deutlich aufwändiger zu realisieren sind. Sofern Anpassungen zu geringen Kosten möglich sind, empfehlen die Gutachter deren Umsetzung.

Einige der Empfehlungen sind grundsätzlich erst perspektivisch notwendig, bedürfen jedoch einer längeren Vorlaufzeit (z.B. Ausstattung mit netzbildenden Umrichtern) und sollten auch daher frühzeitig angegangen werden.

Grundsätzlich ist die marktliche Beschaffung der NF-SDL Inselbetriebsfähigkeit parallel zur Schwarzstartfähigkeit möglich. Nach

aktueller Informationslage scheint aber auch die – zumindest teilweise – gezielte verpflichtende Bereitstellung einzelner Netznutzer über TAR (entsprechen dem Status quo) auch für die Zukunft als geeignet. Hauptgründe hierfür sind einerseits der hohe und lokal differenzierte Bedarf, die fehlende Möglichkeit den Bedarf eindeutig quantifizieren zu können, sowie andererseits eine zumindest in Teilen erwartete homogene Kostenstruktur der Netznutzer in vergleichbaren Leistungsklassen. Vor diesem Hintergrund scheint die Forderung über Anschlussrichtlinien grundsätzlich effizienter als die marktliche Allokation. Dies gilt es jedoch im Rahmen der kontinuierlichen Effizienzbewertung zu überprüfen. Zudem sollten Potenziale von ohnehin geplanten Netzbetriebsmitteln (Stichwort Multi-Use) auch gewinnbringend für den Netz- und Versorgungswiederaufbau genutzt werden. So können bspw. Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ)-Konverterstationen bei entsprechender Auslegung Inselbetriebsfähigkeit bereitstellen ohne, dass hierfür hohe Zusatzkosten anfallen.

Neben dem aktiven Beitrag durch die Erbringung von Schwarzstartfähigkeit und insbesondere Inselbetriebsfähigkeit können Netznutzer auch passiv einen Beitrag zur Netz- und Versorgungswiederaufbau leisten, wenn diese sich eben nicht systemschädlich verhalten und bspw. keine hohe Lastsprünge verursachen.

Die Frage einer genauen notwendigen Menge an aktiver am Netz-wiederaufbau beteiligten Einheiten kann nicht exakt festgelegt werden, da dem Netzbetreiber ausreichend Flexibilität für den Netz-wiederaufbau zugestanden werden muss. Jedem Netzausfall geht ein Netzfehler voraus, der sehr unterschiedlich ausfallen und den Wiederaufbau deutlich erschweren kann. Zwar existieren Aufbaupläne, um die Arbeitsbelastung in diesem Netzzustand zu reduzieren, jedoch bedarf es eines ausreichenden Spielraums, um auch alternative Möglichkeiten abrufen zu können, wenn notwendige Netzelemente nicht zur Verfügung stehen.

Im Falle einer Überdeckung des Bedarfs an SSF Einheiten – entsprechend dem heutigen Systemdesign – kann mittels marktlicher Ansätze, d.h. bilateraler Verträge oder periodischer Ausschreibungen, eine Teilmenge der möglichen Anlagen kontrahiert werden. Diese marktliche Beschaffung ermöglicht eine Einnahmequelle für die Bereitsteller und wirkt dementsprechend als Anreiz zur Bereitstellung von Schwarzstartfähigkeit. In der Zukunft ergibt sich jedoch

Handlungsbedarf, da die heute genutzten Einheiten nicht mehr (gesichert) zur Verfügung stehen werden und – Stand heute – keine alternativen Beschaffungstechnologien etabliert sind. Vor diesem Hintergrund ergibt sich die Notwendigkeit der Nutzung aller möglichen Optionen, sofern sie mit begrenzten Kosten umsetzbar sind. Eine systemdienliche Steuerung von Anlagen kann gegebenenfalls mit erhöhten Kosten verbunden sein, ist jedoch vor dem Hintergrund der Systemsicherheit prinzipiell zu rechtfertigen. Eine Abwägung zwischen restriktiven Anschlussbedingungen zugunsten der Systemsicherheit, welche die Marktdurchdringung neuer Technologien hindert, und systemkritischem Verhalten aufgrund der zunehmenden Menge an Einheiten ist hierfür essenziell.

Unabhängig des zukünftigen Beschaffungsmechanismus, empfehlen die Gutachter kostengünstige Maßnahmen, die den Netz- und Versorgungswiederaufbau aktiv ermöglichen, bzw. fördern, sowie auch passive Maßnahmen, die den Wiederaufbau nicht erschweren umzusetzen. Auf mögliche Ansatzpunkte wird in den folgenden Abschnitten eingegangen.

Erhöhung der Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit

Für einen erfolgreichen NWA mit anschließendem VWA ist die Beobachtbarkeit des Netzzustandes und die (Fern-)**Steuerbarkeit** der Erzeugungsanlagen und Betriebsmittel wie Leistungsschalter Grundvoraussetzung. Besonders die Steuerbarkeit der EE-Anlagen wird zukünftig eine große Rolle spielen, wenn diese den Wegfall konventioneller Einheiten substituieren sollen. Für eine zielgerichtete Einbindung der Anlagen müssen diese vom Netzbetreiber geeignet gesteuert werden können. Sofern dies nicht oder nur eingeschränkt möglich ist, ist die **Vorhersehbarkeit** des Anlageverhaltens bedeutend. Dies kann marktlich angereizt werden oder durch entsprechende technische Anschlussrichtlinien erfolgen, welche für diese Anlagen zukünftig mit Hinblick auf den NWA und VWA erweitert werden müssten. Dies ist besonders vor dem Hintergrund der zunehmenden Durchdringung von EE-Anlagen im Verteilnetz entscheidend. Verteilnetze werden aktuell als die notwendigen Laststufen für die Schwarzstartanlagen genutzt und entsprechend zugeschaltet. Hierbei ist es wichtig zu wissen, dass sich das Verteilnetz dann tatsächlich als Last verhält. Für den Fall, dass es zu Rückspeisungen aus dem Verteilnetz kommt, können die Kraftwerke im NWA nicht ausreichend belastet und hochgefahren werden und es kann zu erneuten Störungen

führen. Diese würden den Netzaufbau weiter verzögern oder sogar zu einem erneuten Zusammenbruch des bereits wiederaufgebauten Teilnetzes führen. Zukünftig muss es daher eine entsprechende Prognose der Last- bzw. Einspeisesituation an den einzelnen VNB-Strängen geben. Mit der Möglichkeit diese Stränge auch auf der Mittelspannungsebene separat zuzuschalten, können die Last- bzw. Einspeisestränge kleinschrittiger und gezielter hinzugezogen werden. Dies könnte zum einen sicherstellen, dass SSF Kraftwerke entsprechend der Vorgaben belastet werden und EE-Anlagen aus dem Verteilnetz nicht frühzeitig hinzugeschaltet werden. Auf der anderen Seite könnten diese EE-Anlagen auch gezielt zur Entlastung der Kraftwerke im Hoch- und Höchstspannungsnetz (HS/HöS) während des Netz- und Versorgungswiederaufbaus hinzugenommen werden. Hierzu werden zukünftig detailliertere Modelle für Wetterprognosen und Lastprognosen erforderlich sein, die neben den bisherigen Verbrauchern auch neue Lasten wie Elektrofahrzeuge und Wärmepumpen berücksichtigen. Zudem muss eine geeignete Abschätzung der Einspeiseleistung aus EE-Anlagen erfolgen. Dabei ist eine Unterscheidung zwischen Anlagen, die sich gemäß den technischen Anschlussrichtlinien verhalten und solche die vom Netzbetreiber steuerbar sind erforderlich. Anlagen, die sich wie bspw. PV-Dachanlagen in ihrem Verhalten durch die Vorgaben aus den TAR auszeichnen, müssen dabei als unbeeinflussbare Größe angenommen werden. Zudem bedarf es einer Abschätzung des Cold Load Pickup-Effekts, d.h. die Erhöhung der Last durch verstärkte Kühlung und Heizung nach einer Nicht-Versorgung. Es kann ein Szenario entstehen, in dem eine Verteilnetzzuschaltung im ersten Schritt als gewünschter Lastsprung dient, durch das Hochfahren der EE-Anlagen sich dieses Verhalten dann aber innerhalb von 10 bis 15 Minuten nach Zuschaltung umkehrt. Gemäß der TAR für die Mittel- und Hochspannung fahren die EE-Anlagen mit 10 % ihrer Nennleistung pro Minute hoch, sobald sich die Systemgrößen Frequenz und Spannung für mindestens eine Minute im zulässigen Bereich liegen. Für eine bessere Aufteilung der Last- und Einspeisesammelschienen ist zudem eine größere Automatisierung der Leistungsschalter im auf Hochspannungs- und Mittelspannungsebene anzustreben. Dies ist besonders vorteilhaft da die Lastsprünge reduziert und EE-Anlagen gezielter zugeschaltet werden können. Darüber hinaus kann dies für zukünftige teilautomatisierte NWA Konzepte helfen.

Diese Schätzungen muss der entsprechende VNB dem überlagerten ÜNB sicher übermitteln können. Dabei wird es zukünftig nicht mehr ausreichen, dass die Kommunikation über Telefon erfolgt. Vielmehr müssen die ÜNBs die Schätzungen der VNBs in ihrem **Leitsystem integrieren**. Hier müssen besonders auf Seiten der VNBs die Leitstellen weiter ausgebaut und softwareseitig modernisiert werden. Dies beinhaltet ebenfalls Netzzustandsschätzungen und entsprechende Ausfallberechnungen zumindest für die 110 kV-Ebene. Dabei sollten zunächst große Erzeugungsanlagen und Speichersysteme auf der Mittelspannungsebene und alle Anlagen auf der Hochspannungsebene berücksichtigt werden. Eine Betrachtung bis in die Niederspannung scheint aktuell nicht sinnvoll. Die Kommunikation zwischen VNBs und ÜNBs muss hierbei zwingend **schwarzfallfest** sein. Die VNBs sollten neben den prognostizierten Last- und Einspeisedaten auch eine Übersicht der Erzeugungsanlagen und der Speicher liefern. Dies kann der ÜNB dann für eine optimale Zuschaltreihenfolge verwenden und auch gezielt Verteilnetze mit größerer Trägheit zuschalten.

Darüber hinaus muss eine zuverlässige Kommunikation zu den steuerbaren Erzeugungsanlagen bestehen. Durch die hohe Integration an EE-Anlagen im Verteilnetz, werden diese zukünftig, spätestens mit der Abschaltung der Kohlekraftwerke, besonders im VWA weitere Aufgaben übernehmen müssen. Dies ist jedoch unter der Berücksichtigung der aktuellen Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit der Verteilnetze nur begrenzt möglich.

Notwendigkeit „systemfreundlicher“ lokaler Regelungen

Durch den Trend der Elektrifizierung wird sich die Last im elektrischen Energiesystem erhöhen. Insbesondere Elektrofahrzeuge und Wärmeanwendungen steigern zukünftig den Energiebedarf und stellen bereits auf Verteilnetzebene eine planerisch relevante Leistung dar. Außerdem nimmt die Anzahl an Photovoltaik-Anlagen und Photovoltaik-Speicher-Kombinationen kontinuierlich zu. Derzeit existieren keine Standards, wie sich diese Speichereinheiten nach einer Versorgungsunterbrechung verhalten müssen, sodass eine für den Versorgungswiederaufbau hinderliche Ladesteuerung implementiert sein könnte. Praxiserfahrungen zeigen, dass z.B. heutige Heimspeicher nach Spannungswiederkehr nach einem Stromausfall

unverzögert mit der vollen Leistung Energie vom Netz beziehen. Wallboxen, bidirektionale PV-Heimspeicher und Wärmepumpen weisen in diesen Situationen sehr hohe Ladeleistungen auf. Auch hier sind keine verbindlichen Regelungen festgelegt, wie die Fahrzeuge sich nach einer Versorgungslücke Energie vom Netz beziehen, sodass von einer sofortigen hohen Zuschaltung ausgegangen werden muss, welche den Versorgungsaufbau erschwert. Auch für Elektrolyseure existieren heute noch keine Regelung für deren Betriebsverhalten nach einer erfolgreichen Wiederversorgung. Deshalb existiert **Änderungsbedarf bzw. Standardisierungsbedarf beim Betriebsverhalten von „smarten“ Verbrauchern** nach der Spannungswiederversorgung. Es ist nicht davon auszugehen, dass diesen Einheiten eine aktive Rolle beim VWA zugeschrieben wird, da die Integrationen vieler kleiner Anlagen den NWA-Prozess verkompliziert und jede Anlage über eine schwarzfallsichere Kommunikationseinrichtung verfügen muss, was mit hohen Kosten verbunden wäre. Zudem muss die Komplexität berücksichtigt werden, die die Koordinationen einer so großen Anzahl von Einheiten mit - im Kontext des NWA geringer Leistung – bedeuten würde. Diese Komplexität wäre in einer „unübersichtlichen“ und „stressintensiven“ Situation wie der Wiederversorgung praktisch kaum leistbar für die verantwortlichen Akteure. Wir empfehlen daher, diesen Netznutzern eine indirekte Rolle zukommen zu lassen, sodass sich diese nicht schädlich für den Netz- und Versorgungswiederaufbau verhalten. Durch dieses passive Verhalten würde bereits ein aktiver Beitrag zum erfolgreichen Wiederaufbau geleistet werden.

Sofern Anlagen nicht vom Netzbetreiber steuerbar sind, müssen **Standards** implementiert sein. Dies bedeutet konkret, dass die Anlagen nicht auf Volllast zuschalten dürfen, um einen unvorhersehbaren Lastsprung zu vermeiden. Möglichkeiten einer Implementierung wären z.B. eine verstetigte Leistungsaufnahme oder eine zeitliche Staffelung der Zuschaltung, welche mit unterschiedlichen Wartezeiten verbunden ist. Weitere zu beachtende Aspekte in diesem Kontext sind der Umgang mit erhöhten Frequenzschwankungen im Zeitraum des VWA, sowie der sich durch Spannungsschwankungen ändernde Verbrauch im Verteilnetz.

Für dezentrale Erzeugungseinheiten, wie Photovoltaik-Anlagen, sind bereits **maximale Leistungsgradienten** (10 % der Nennleistung je Minute, VDE-AR-N 4110) definiert, um den Netzwiederaufbau

handhabbar zu machen. Die Anpassung der entsprechenden Normen und deren nationaler Umsetzung (TAR in Deutschland) für ein geändertes Verhalten von Neuanlagen wird daher als sinnvoll erachtet. Neu installierte Anlagen verhalten sich so auch im Prozess des VWA netzfreundlich. Eine Umrüstung von Bestandsanlagen wird als kostenintensiver angesehen, könnte jedoch ggf. im Rahmen von Wartungsintervallen geschehen. Wichtig ist hierbei zudem die zeitliche Komponente. Anders als bei der Photovoltaik ist der Hochlauf der Elektromobilität und die Durchdringung von Wärmepumpen noch im Anfangsstadium bezogen auf die Ziele der Bundesregierung. Daher empfehlen wir die zeitnahe Implementierung eines Standards für diese Netznutzer, um eine entsprechend hohe Durchdringung zu erreichen.

Ebenso kann es zukünftig sinnvoll sein, nicht steuerbare EE Erzeuger wie PV Anlagen über ein Rundsteuersignal zu beeinflussen. Dabei kann auf bestehende Infrastruktur zur Abregelung dieser Anlagen zurückgegriffen werden. So können in Zeiten von hoher PV Einspeisung Anlagen nach Zuschaltung der entsprechenden Netzbereiche abgeregelt oder abgeschaltet werden, um die Sicherheit während des Netz- und Versorgungswiederaufbaus zu gewährleisten und etwaige große Leistungssprünge durch (Frequenz-)Schutzabschaltungen dieser Anlagen vermeiden.

Überprüfung dezentraler Konzepte

Aufgrund der sich ändernden Einspeisestruktur, bei der heute bereits ca. 60 % der installierten EE-Leistung in den Verteilnetzen angeschlossen ist, sollten dezentrale Erzeugungsanlagen im Verteilnetz in zukünftige Konzepte eingebunden und berücksichtigt werden. [7]Dieser Anteil wird in Zukunft noch weiter steigen. Besonders in Folge großflächiger Blackouts, bei denen kein Top-Down NWA möglich ist, können Verteilnetze mit einer hohen Durchdringung von EE-Anlagen und entsprechenden SSF Blockheizkraftwerke (BHKW) bzw. Kleinkraftwerken ihr Netz wieder aufbauen. Bei einem NWA aus dem Verteilnetz wird zwischen Build-Up und Build-Together unterschieden. Beim Build-Up Ansatz geht der NWA vom Verteilnetz aus. Build-Together meint eine Unterstützung der Verteilnetze für den vom ÜNB koordinierten Bottom-Up NWA. Dieser Build-Together Ansatz erfordert eine besonders hohe **Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit** der jeweiligen Netzabschnitte. Mithilfe der schwarzgestarteten Verteilnetze kann ein entsprechender VWA deutlich schneller ablaufen.

Darüber hinaus können diese Netze zukünftig den NWA unterstützen und mit definierten Leistungsbändern für Wirk- und Blindleistung netzstützende Aufgaben wie z.B. Spannungshaltung übernehmen. Die Wiederversorgung der Kunden erfolgt mit solch dezentralen Konzepten unter Umständen deutlich schneller und der gesamtwirtschaftliche Schaden wird begrenzt. Es ist davon auszugehen, dass es wirtschaftlich nicht für alle Verteilnetze sinnvoll ist, schwarzstartfähig zu werden und auch technisch nicht möglich sein wird. Dennoch sollten die VNBs in Zukunft mehr Verantwortung übertragen bekommen und das Recht erhalten ihr Netz in Einklang mit den Netzwiederaufbauplänen auf ÜNB-Ebene wiederaufzubauen. Hierbei ist grundsätzlich sicherzustellen, dass dezentral wiederaufgebaute Verteilnetze den globalen NWA unterstützen und nicht stören bzw. verkomplizieren. Der Koordinationsbedarf steigt mit dezentral wiederaufgebauten Netzen und eine Kommunikation zwischen den ÜNBs und VNBs muss entsprechend sichergestellt werden.

Die grundsätzliche **Verantwortung** sollte daher weiterhin beim ÜNB liegen, der die Gesamtsystemführung übernimmt und die entsprechenden VNB hinzuschaltet und **koordiniert**. Diese Koordination wird bei Build-Together Ansätzen besonders wichtig jedoch auch herausfordernder. Auch eine Kopplung von mehreren Teilnetzen auf Verteilnetzebene ist grundsätzlich möglich, bevor die Kopplung mit dem Übertragungsnetz erfolgt. Dies ist jedoch in den Netzwiederaufbauplänen und -varianten entsprechend zu berücksichtigen und zu integrieren. Anderenfalls ist die Kopplung von Teilnetzen auf Verteilnetzebene nicht zielführend, sondern ggf. sogar kontraproduktiv. Unter Berücksichtigung der aktuellen Kommunikationsinfrastrukturen zwischen VNB/VNB und ÜNB/VNB, ist dies heutzutage nicht adäquat umsetzbar. Eine schwarzfallfeste Kommunikation und Einbindung dieser in die Leitsysteme der Netzbetreiber ist zwingend erforderlich. Diese Kommunikation sollte standardisiert sein. Die hohe Komplexität eines NWA kann durch entsprechende Supporttools mit geeigneten Visualisierungen und Cockpits signifikant verringert werden.

Darüber hinaus müssen die VNBs für eine Synchronisation von Teilnetzen, also ein Top-Down NWA auf Verteilnetzebene, Synchronisationseinrichtungen an den entsprechenden Kopplungsstellen verfügbar haben. Ein großflächiger Netz- und Versorgungswiederaufbau auf Verteilnetzebene ist jedoch nur bis zu einer bestimmten Dimension sinnvoll und handhabbar. Zudem sind die Grenzen zwischen

dem Netz- und Versorgungswiederaufbau rein auf Verteilnetzebene noch deutlich stärker verschmolzen, was entsprechende Herausforderungen (Koordination der Lastzuschaltung, Leistungssprünge, etc.) mit sich bringt. Vielmehr können diese dezentral wiederaufgebauten Netzeinseln vom ÜNB genutzt werden, um den globalen NWA zu beschleunigen und zu unterstützen. Dazu bedarf es einer definierten Vorgabe welche Daten ausgetauscht und vorgegeben werden können. Eine Möglichkeit sind Leistungsbänder, die die VNBs einhalten müssen. Dabei liegt die Regelung und Steuerung der Anlagen im Verteilnetz bei den jeweiligen VNBs.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil dezentraler Konzepte ist die schnelle Wiederversorgung kritischer Infrastrukturen. Schon heute haben VNBs während eines großflächigen Blackouts die Möglichkeit geschaffen bspw. Wasserwerke in einem Inselnetzbetrieb zu versorgen. Kritische Infrastrukturen wie Krankenhäuser und Finanz- bzw. IT-Infrastrukturen haben häufig eine Notstromversorgung. Diese basieren jedoch häufig auf Batteriespeicher bzw. Dieselgeneratoren und sind in ihrer Einsatzzeit begrenzt. Weitere kritische Infrastrukturen ohne Notstromaggregate können durch dezentrale Konzepte schneller wiederversorgt werden. Zudem gilt es zu prüfen, ob die bisherigen Notstromversorgungen gewinnbringend in solche Konzepte integriert werden könnten.

Gemeinsam mit der Erhöhung von Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit sowie der Kommunikation zwischen VNBs und ÜNBs, könnten dezentrale Konzepte zukünftig einen großen Vorteil für den globalen NWA darstellen. Neben einer deutlich schnelleren Wiederversorgung können VNBs mit kleinen dezentralen Anlagen netzdienliche Aufgaben während des NWA übernehmen. Gleichzeitig profitieren Kunden und kritische Infrastrukturen auf Mittel- und Niederspannungsebene. Auf der anderen Seite geht die Umsetzung solcher Konzepte mit vielen Detailfragen und einem erhöhten Koordinationsaufwand einher. Prozesse müssen automatisiert und Datenschnittstellen sowie Kommunikationswege geschaffen werden. Wir empfehlen daher frühzeitig Erfahrungen zu sammeln, Konzepte zu Erproben und die notwendigen Entwicklungen voranzutreiben, sodass diese ausreichend erprobt werden können, ohne dass bereits eine systemische Notwendigkeit für diese Konzepte besteht.

Integration von netzbildenden Umrichtern

Netzbildende Steuerungen von Umrichtern bieten die Möglichkeit, die Frequenz in einem (Teil-)Netz vorzugeben und das Leistungsgleichgewicht auszugleichen. Dies unterscheidet sie von netzstützenden Regelkonzepten, welche auf eine externe Netzfrequenz angewiesen sind. Derzeit werden netzbildende Steuerungen z.B. in Batteriespeichersystemen erforscht und Prototypen zeigen deren Fähigkeit zur Erbringung von Systemdienstleistungen auf.

Da die Durchdringung von erneuerbaren Erzeugungsquellen zunimmt und die Menge konventionellen Kraftwerken abnimmt, sinkt auch die sich auf Netzfrequenz drehende Masse (Momentanreserve) in Generatoren, was im Fehlerfall zu steileren Frequenzgradienten und kritischeren Frequenzwerten führen wird. Netzbildende Umrichter insbesondere in Verbindung mit Energiespeichern können einen Beitrag dazu leisten, starke Frequenzgradienten zu verringern. Der Energiespeicher kann dabei auch einseitig sein, d.h. bspw. eine Reduktion der Einspeiseleistung oder Last. Basierend auf einer Leistungseinspeisung, die sich nicht ausschließlich auf gemessene Werte stützt, sondern auch den Netzzustand einige Augenblicke vor Fehlerertritt beachtet, kann mittels unangepassten Spannungsquellenverhalten im Fehlerfall inhärent Leistung bereitstellen oder reduzieren, sofern Leistungsgrenzen nicht überschritten werden.

Unterschiedliche Akteure haben sich bereits für die Integration von netzbildenden Umrichtern in das Energiesystem ausgesprochen, um auch zukünftig Frequenzschwankungen begrenzt zu halten. Sofern netzbildende Umrichter zur Erhöhung der Trägheit der lokalen Netzstabilität installiert werden, sollten sie ebenfalls im anderen Systemzustand für den NWA und VWA genutzt werden. Für die Nutzung dieser Technologie in dem Systemzustand des Netz- und Versorgungswiederaufbaus besteht weiterhin **Forschungsbedarf**. Zu adressierende Themenfelder sind hier der Betrieb dieser Anlagen in Teilnetzen, die ein deutlich anderes Frequenz- und Lastverhalten aufweisen, als dies im Verbundnetz der Fall ist. Zudem sind die Kombination und Koordination aus vielen dezentralen Regelungen grundsätzlich herausfordernd. So gilt es sicherzustellen, dass diese aufeinander abgestimmt sind und zu keinem instabilen Systemverhalten führen.

Noch existieren keine **Anforderungen und Standards** an netzbildende Anlagen bezüglich deren Beitrag zu Trägheit von lokaler Netzstabilität oder zum Versorgungsaufbau. De facto sind sie daher

gemäß heutigen Anschlussrichtlinien noch nicht für den Feldbetrieb zugelassen. Anschlussbedingungen können keine bestimmten Regelalgorithmen vorgeschrieben, sondern lediglich Output-Eigenschaften können verlangt werden. Eine **Verpflichtung** der netzbildenden Eigenschaft inklusive deren Erbringung von Dienstleistungen für den Netz- und Versorgungsaufbau erscheint sinnvoll, sofern die notwendige Technologiereife erreicht ist. Der Empfehlung einer verpflichtenden Bereitstellung liegt keine ausführliche Effizienzprüfung unter zukünftigen Gegebenheiten zu Grunde, da diese mit zu vielen Unsicherheiten behaftet wäre. Es ist jedoch abzusehen, dass der Bedarf insbesondere an Trägheit zukünftig signifikant steigen wird, weshalb dieses Potenzial (die technische Reife vorausgesetzt) erschlossen werden sollte. Es ist auch zu erwarten, dass die gesamte, oder große Teile der zukünftigen Umrichterleistung für die Trägheitsbereitstellung benötigt werden. Im Kontext von Multi-Use würden die netzbildenden Umrichter dann neben der Trägheit lokaler Netzstabilität zum Versorgungswiederaufbau beitragen können und den Bedarf an der NF-SDL Inselbetriebsfähigkeit entsprechend reduzieren. Für den verbleibenden Bedarf gilt es dann grundsätzlich zu prüfen, ob eine marktliche Beschaffung effizient wäre und eine Allokationswirkung entfalten kann. Die Frage nach einer potenziellen Vergütung für diese netzbildende Multi-Use-Eigenschaft bleibt davon unberührt.

Multi-Use von netzbildenden Umrichtern. Vor dem Hintergrund der abnehmenden Trägheit der lokalen Netzstabilität haben sich die Netzbetreiber dafür ausgesprochen vertikal integrierte Betriebsmittel mit netzbildenden Umrichtern zukünftig auszustatten. Dies ist nachvollziehbar, da die Durchdringung von netzbildenden Umrichtern in Erzeugungseinheiten voraussichtlich einige Zeit in Anspruch nehmen wird. Veränderte Anschlussbedingungen und/oder ein Beschaffungsmodell sind erforderlich. Erzeugungstechnologien weisen eine Lebensdauer mehr als 20 Jahren auf und ein Umrüstprozess ist nur langsam möglich. Folglich werden netzbildende Umrichter im Besitz der Netzbetreiber zeitlich eher zur Verfügung stehen. Ein **Multi-Use**-Anwendungsfall von diesen Anlagen für die Systemdienstleistungsbereitstellung im Netzwiederaufbau bietet die Option, kostengünstig und schnell den Netzwiederaufbau zu unterstützen und sollte daher ermöglicht werden. Voraussetzung hierfür ist, dass die Anlagen ohnehin gebaut werden, um eine primäre SDL (z.B. Blindleistung) bereitzustellen und der Zusatznutzen durch vergleichsweise geringe Investitionen erzielt werden kann (vgl. Kurzpapier der Gutachter zum

Thema Multi-Use von Netzbetriebsmitteln und dessen ökonomische und regulatorische Einordnung für Details, noch nicht veröffentlicht). Dennoch sollte beachtet werden, dass diese ggf. nur temporär notwendige zusätzliche Nutzung von Netzbetriebsmitteln den Anreiz netzbildende Umrichter bei Erzeugungseinheiten zu Nutzen reduziert und damit die Durchdringung von netzbildenden Umrichtern bei Erzeugern verlangsamen könnte. In einem hypothetischen Zielsystem, indem alle Erzeuger mit netzbildenden Umrichtern ausgerüstet wären, wäre Trägheit aus netzbildenden Umrichtern im Besitz der Netzbetreiber ggf. nicht mehr notwendig und der Zusatzaufwand folglich nicht mehr notwendig.

Automatisierung des Netz- und Versorgungswiederaufbaus

Ein weiterer wichtiger Handlungsbedarf wird im Hinblick auf die **Automatisierung** des Netz- und Versorgungswiederaufbaus gelegt. Durch Abschaltung konventioneller Erzeugungsanlagen und die damit einhergehend abnehmende Schwungmasse wird der NWA und VWA vor vielen neuen Herausforderungen gestellt, welche die **Komplexität** dieser ohnehin aufwendigen Prozesse weiter erhöht. Die Startnetze werden zukünftig weiterhin durch die SSF Wasser- oder Gaskraftwerke aufgebaut. Jedoch ist die **Lastübernahme** durch bspw. Kohlekraftwerke nicht mehr gegeben. In Abhängigkeit der Wetersituation können bspw. Windparks einen großen Teil dieser Leistung bereitstellen. Die Volatilität und die heute nicht vorhandene Schwungmasse dieser Einspeiser führt jedoch zu weiterem Handlungsbedarf. Somit müssen voraussichtlich kleinere Lastzuschaltungen erfolgen, die mit der Wetersituation abgestimmt sind. Zusätzlich kann die Leistung aus den Verteilnetzen notwendig sein, um ein Leistungsgleichgewicht herzustellen. Hierbei muss beachtet werden, dass die Leistung aus den Verteilnetzen erst nach der Zuschaltung dieser zur Verfügung stehen kann. Verhalten die Anlagen sich nach den heute gültigen technischen Anschlussrichtlinien setzt der Anfahrprozess erst eine Minute, nachdem alle Systemgrößen in den zulässigen Bereich zurückgekehrt sind, ein. Mit diesen Verzögerungen und der starken Wetterabhängigkeit dieser Erzeugungsleistung muss gerechnet werden. Ein weiterer kritischer Aspekt ist die Schwungmasse. In Zukunft wird ein Großteil der Schwungmasse im Verteilnetz verortet sein. Hierzu gehören besonders kleinere Wasserkraftwerke und BHKWs. Somit sollte der VNB seinen erwarteten Kraftwerkspark an den ÜNB kommunizieren, um eine möglichst schnelle Zuschaltung

dieser Schwungmasse zu erzielen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Herausforderungen während eines NWA und VWA in der Zukunft vielschichtiger werden. Die Anzahl an Eingangswerte und Randbedingungen für Entscheidungen steigt um ein Vielfaches. Somit muss das Personal in der Systemführung neben den notwendigen Informationen auch **Unterstützung** für die **Entscheidungsfindung** erhalten. Zukünftig sollten und müssen für einen NWA und VWA teilautomatisierte Prozesse implementiert werden. Hier wäre z.B. ein Supporttool für das Personal der Netzbetriebsführung denkbar, welches die Möglichkeiten der Zuschaltungen bewertet und visualisiert. Erst mit einer solchen Automatisierung kann die Koordination zwischen dem agierenden Personal in den Leitwarten geschehen. Ein Informationsaustausch bezüglich möglicher VNB-ÜNB-Austauschbänder unter Einbeziehung der vielen (Klein-)Anlagen unter den sich ständig ändernden Randbedingungen ist in Zukunft per Telefonverbindung nicht bewältigbar.

Durch eine Automatisierung können die ausgewählten Verteilnetze schrittweise mit einem geringeren Risiko von Stabilitätsproblemen hinzugeschaltet werden. Diese (Teil-)Automatisierung muss dabei **robust und zuverlässig** sein. Um transiente Vorgänge im Netz zu vermeiden ist es daher notwendig parallele Robustheitsuntersuchungen anzustoßen und die Schalthandlungen mit genügend Zeit zum Ausklingen etwaiger Schwingungen durchzuführen. Diese Untersuchungen müssen sowohl in Echtzeit als auch im Vorfeld bei der Erstellung und Erprobung der Netzaufbaupläne durchgeführt und berücksichtigt werden. Auch dies kann von einem im Leitsystem implementierten System analysiert werden. Darüber hinaus können durch eine Anbindung der Leistungsschalter in ein solches (teil-)automatisches System, zu Beginn eines NWAs definierte Schaltzustände hergestellt werden. In einem teilautomatisierten System, in dem die wichtigsten Leistungsschalter schwarzfallfeste Kommunikation besitzen und auf Verteilnetzebene zwei bis drei Schaltungen mit Notstrom durchführen können, hat der Netzbetreiber die Möglichkeit einen definierten Netzzustand herzustellen und damit die Vorgaben des ÜNB zielgerichteter durchzuführen. Allerdings wäre dies auch für dezentrale Wiederaufbaukonzepte notwendig.

4. 6-Punkte Plan

Der Umbau des Energiesystems, insbesondere der Rückgang der konventionellen Erzeugung, die steigende Elektrifizierung und Dezentralisierung, führen zu Herausforderungen beim zukünftigen Netz- und Versorgungswiederaufbau (NWA und VWA). Um diesen zu begegnen sind mittel- und langfristig unterschiedliche Maßnahmen notwendig, die jedoch bereits teilweise kurzfristig einzuleiten sind. Der folgende 6-Punkte Plan gibt eine nicht abschließende Übersicht über Maßnahmen, die aus unserer Sicht zeitnah umgesetzt, angegangen oder weiter untersucht werden sollten. Dabei sind die Punkte der Dringlichkeit nach sortiert, wobei die Reihenfolge keine zeitliche Abfolge implizieren soll.

- 1. Unterstützendes Verhalten von Lasten im Netzwiederaufbau.** Anschlussanforderungen bzw. Standards zum Verhalten von „smarte/intelligente“ Lasten bei Spannungswiederkehr sollten umgehend umgesetzt, bzw. angepasst werden. Ziel ist es, dass diese sich bei Spannungswiederkehr nicht unter Volllast zuschalten. Die Anforderung sollte mind. für neue (intelligente) Lasten wie Ladeinfrastruktur und Wärmepumpen (aktuell im Hochlauf) aber auch für bspw. Elektrolyseure gelten. Bei geringen Anpassungskosten sollten ausgewählt auch Bestandsanlagen umgerüstet werden. Dieses Verhalten ist bereits bei Erzeugungsanlagen nahezu ohne Zusatzkosten umgesetzt, sodass hier Best-Practice-Erfahrungen vorhanden sind und eine Umsetzung mit geringen Risiken verbunden ist.
- 2. Netzbildende Umrichter im Besitz von Netzbetreibern und Multi-Use-Anwendungen von Netzbetriebsmitteln ermöglichen.** Für die Trägheit der lokalen Netzstabilität werden zukünftig netzbildende Umrichter im Besitz der Netzbetreiber eingesetzt. Durch Multi-Use können diese Anlagen kostengünstig für Inselbetrieb und Netzwiederaufbau benutzt werden.
- 3. Komplexitätsreduktion des operativen Netz- und Versorgungswiederaufbaus.** Für die Netzbetreiber (Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB), wie auch Verteilnetzbetreiber(VNB)) müssen die Prozesse unter Nutzung von steuerbaren Anlagen handhabbar sein. Die Prozesse sollten daher im Wesentlichen auf steuerbare und ausgewählte Einzelanlagen verteilt werden. Zudem muss eine standardisierte Kommunikation zwischen den beteiligten Akteuren (ÜNB, VNB) in Zukunft weiter ausgebaut werden, um einen zielgerichteten Informationsaustausch zu gewährleisten. Hierbei erleichtert eine Verknüpfung der Leitstellen-systeme der Netzbetreibern sowie entsprechende

Automatisierungen den Austausch. Zudem wird entscheidungsunterstützende Software notwendig sein, um Risiken während der einzelnen Zuschaltsschritte zu reduzieren.

4. **Entwicklung beobachten und frühzeitig reagieren.** Die Verteilung und Netzanschlussebene von steuerbarer Erzeugung bzw. Anlagen, die Inselbetriebsfähigkeit und weitere notwendige Systemdienstleistungen heute bereitstellen, bedarf eines Monitorings. Potenzielle Lücken müssen frühzeitig identifiziert werden und entsprechende Kompensationsmaßnahmen initialisiert werden. So sind kurzfristig Kompensationsmaßnahmen für den beschlossenen Kohleausstieg bis zum Jahr 2030 in Einklang mit den Netzwiederaufbauplänen und -varianten zu finden. Hierbei sind die Ertüchtigung eigener Netzbetriebsmittel, technische Anforderungen an Netznutzer, sowie marktliche Elemente zu prüfen. Unser 6-Punkte-Plan (sowie die weiteren Ergebnispapiere des Vorhabens SDL-Zukunft, u.a. [1], [2] und [3]) gibt eine Übersicht der von uns vorgeschlagenen Maßnahmen.
5. **Einbindung von erneuerbaren Energien.** Sofern mittel- und/oder langfristig genügend steuerbare Erzeugungsanlagen verfügbar sind (bleiben oder werden), sollten (dezentralen) erneuerbaren Energien keine pauschalen kostspieligen Mindestanforderungen zur Bereitstellung von Inselbetriebsfähigkeit auferlegt werden. Zur Verbesserung der Handhabbarkeit im Netz- und Versorgungswiederaufbau sollten Mindestanforderungen, wenn nicht pauschal, sondern in Abhängigkeit der Leistungsklassen vorgegeben werden. Diese Differenzierung kann zudem auch hinsichtlich der Kommunikation erfolgen. So könnten beispielsweise kleinere Anlagen zukünftig mit Rundsteuersignalen (in Teilen analog zur heutigen Abregelung, Infrastruktur vorhanden) beeinflusst werden, um ihre Einspeiseleistung während des Netz- und Versorgungswiederaufbaus zusätzlich zu reduzieren bzw. deren Zuschaltung zu unterbinden.
6. **Zyklische Überprüfung einer marktlichen Beschaffung.** Schwarzstartfähigkeit sollte zukünftig weiterhin marktlich beschafft werden (siehe auch Vorschlag der Gutachter zur marktlichen Beschaffung von Schwarzstartfähigkeit [2]). Die potenzielle marktliche Beschaffung von Inselbetriebsfähigkeit gilt es zyklisch zu überprüfen. Sofern im System ausreichend Erzeuger angeschlossen sind, die schon heute inhärent Inselbetriebsfähigkeit aufweisen, erscheint eine marktliche Beschaffung nicht effizient. Dem Rückgang konventioneller Erzeugungsanlagen steht ein zunehmender Anteil von Netzbetriebsmitteln mit potenziellen Multi-Use-Eigenschaft (STATCOMs mit Speichern, HGÜ-Konverter) gegenüber, sodass die Effizienz einer marktlichen Beschaffung von Inselbetriebsfähigkeit im Wesentlichen durch einen potenziellen verbleibenden Bedarf determiniert wird.

5. Literaturverzeichnis

- [1] I. Schlecht, C. Wagner, W. Lehnert, M. Bucksteeg, A. Schinkenndza und N. Voß, „Effizienzprüfung marktgestützter Beschaffung von nicht-frequenzgebundenen Systemdienstleistungen (NF-SDL) - Bericht im Auftrag des BMWi,“ Berlin, 2020.
- [2] C. Wagner, I. Schlecht und M. Bucksteeg, „Marktgestützte Beschaffung von Schwarzstartfähigkeit - Bericht im Vorhaben SDL-Zukunft,“ Berlin, 2021.
- [3] G. Blumberg, C. Wagner, W. Lehnert, M. Bucksteeg und M. Greve, „Marktgestützte Beschaffung von Blindleistung - Bericht im Vorhaben SDL-Zukunft,“ Berlin, 2021.
- [4] consentec GmbH, „Netzwiederaufbaukonzepte vor dem Hintergrund der Energiewende,“ Berlin, 2020.
- [5] Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB), „Modalitäten für Anbieter von Systemdienstleistungen zum Netzwiederaufbau,“ 50Hertz, Amprion, Tennet und Transnet BW, Durch BNetzA genehmigter Vorschlag vom 28.04.202.
- [6] Vier deutsche Übertragungsnetzbetreiber: 50Hertz, Amprion, Tennet, Transnet BW, „Bericht der deutschen Übertragungsnetzbetreiber gem. § 34 (1) KVBG,“ 2020.
- [7] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahn (BNetzA), „EEG in Zahlen 2019,“ Bonn, 2020.