

INTEGRATION KURATIVER MAßNAHMEN IN DAS ENGPASSMANAGEMENT IM DEUTSCHEN ÜBERTRAGUNGSNETZ

Tobias VAN LEEUWEN, Ann-Kathrin MEINERZHAGEN, Stephan RATHS,
Andreas ROEHDER

Amprion GmbH, Robert-Schuman-Straße 7, 44263 Dortmund,
tobias.vanleeuwen@amprion.net, www.amprion.net

Kurzfassung: Innovative Ansätze im Netzbetrieb stehen im Fokus der energiepolitischen Debatte um das Engpassmanagement und die Höherauslastung der Stromnetze. Ein vielfach diskutierter Ansatz ist die sogenannte kurative Netzbetriebsführung. Dieser werden hohe Potentiale zur Senkung von Kosten für die Engpassbehebung zugesprochen. Eine sachgerechte Potentialabschätzung macht jedoch die Berücksichtigung von netzbetrieblichen Randbedingungen sowie Aspekten der Systemstabilität und Schutztechnik erforderlich. Dieser Beitrag diskutiert notwendige Randbedingungen für eine Integration von kurativen Maßnahmen in die Systemführung aus Sicht eines Übertragungsnetzbetreibers.

Keywords: Übertragungsnetzbetrieb, Systemführung, präventives und kuratives Engpassmanagement, Remedial Actions, Systemintegration, (n-1)-Kriterium, Netzbooster

1 Einleitung

Die Aufwendungen für die Engpassbehebung im deutschen Übertragungsnetz sind in den letzten Jahren deutlich angestiegen. So sind im Jahr 2018 Kosten in Höhe von über 1,4 Mrd. € für den Einsatz von Redispatch, Einspeisemanagement und Netzreserve angefallen [1]. Untersuchungen zeigen, dass infolge von Akzeptanzhemmnissen beim Netzausbau, der Integration europäischer Märkte sowie des weiteren Ausbaus von Erneuerbaren Energien auch mittelfristig nicht mit einer Entlastung der Netze zu rechnen ist [2,3].

Um die Kosten für die Engpassbehebung zu reduzieren, rücken daher zunehmend sogenannte „innovative Ansätze“ im Netzbetrieb in den Fokus der energiepolitischen Debatte. So prognostiziert der von BMWi und BNetzA initiierte und von dena moderierte „Stakeholderprozess“ Einsparpotentiale beim Engpassmanagement in Höhe von 200 Mio. € pro Jahr durch eine Höherauslastung des Bestandsnetzes [3].

Ein im Kontext der Höherauslastung und innovativer Technologien vielfach diskutierter Ansatz ist die sogenannte kurative Netzbetriebsführung. Hierbei wird unterstellt, dass Netzbetriebsmittel unter Ausnutzung der thermischen Trägheit für kurze Zeitspannen höher ausgelastet werden können ohne dabei einen Schaden zu erleiden. Ausreichend schnelle und sicher verfügbare Maßnahmen würden somit erst im Nachgang einer Störung ausgelöst, um die Ströme der höher belasteten Netzbetriebsmittel auf ein dauerhaft zulässiges Maß zu begrenzen [5,6].

Verschiedene Studien und Abschätzungen zeigen ein erhebliches Potential der kurativen Netzbetriebsführung [7]. Beispielsweise wird von einem Beratungsunternehmen eine Reduzierung des Redispatchvolumens um über 60 % bei der Positionierung von Batteriespeichersystemen mit einer Gesamtleistung von 6 GW im exemplarisch betrachteten Szenario angegeben [6]. Die genannten Potentiale sind theoretische Potentiale, da

wesentliche Randbedingungen des realen Netzbetriebs stark vereinfacht abgebildet oder vernachlässigt werden. Insbesondere Aspekte der Systemstabilität, der Schutztechnik sowie der prozessualen Planung und Umsetzung kurativer Maßnahmen sind weitgehend offene und unbeantwortete Fragestellungen, die im Forschungsprojekt "Innovationen in der Systemführung bis 2030 (InnoSys 2030)" adressiert werden [8]. Dieser Beitrag fokussiert auf die beiden letztgenannten Randbedingungen des Netzbetriebs – die Integration kurativer Maßnahmen in die prozessuale Planung und Umsetzung in der operativen Engpassbehebung.

2 Operative Engpassbehebung im Übertragungsnetzbetrieb

2.1 Gewährleistung des sicheren Netzbetriebs

Gemäß deutscher und europäischer Gesetzgebung sind Übertragungsnetzbetreiber für einen sicheren und zuverlässigen Systembetrieb verantwortlich [9,10]. Ein zentraler Aspekt ist dabei die Gewährleistung der Netzsicherheit. Über einheitliche betriebliche Regeln, wie das (n-1)-Kriterium, sollen insbesondere das Risiko von Versorgungsunterbrechungen bei Störungen, z. B. infolge kaskadierender Störungsausweitungen, minimiert werden.

Betrieblich erfolgt die Anwendung des (n-1)-Kriteriums durch Einhaltung von Grenzwerten sowohl im ungestörten Betrieb als auch in Ausfallsituationen. Limitierend sind dabei neben Spannungsgrenzwerten dauerhaft tolerierbare Strombelastungen (PATL¹) von Netzbetriebsmitteln. Eine Überschreitung kann in einer irreversiblen Schädigung von Netzbetriebsmitteln oder in der Auslösung eines Betriebsmittel- oder Anlagenschutzes resultieren. Um dies zu vermeiden, werden in rollierend durchgeführten Netzsicherheitsberechnungen potentielle Verletzungen des (n-1)-Kriteriums prognostiziert und, falls erforderlich, unter Zuhilfenahme von Optimierungsalgorithmen geeignete Maßnahmen zur Entlastung des Netzes ermittelt (siehe dazu 2.3). Hierzu zählen neben netztopologischen Schaltmaßnahmen typischerweise der Redispatch konventioneller Kraftwerke sowie die Stufung von Phasenschiebertransformatoren.

2.2 Kurative Netzbetriebsführung

Die eigentliche Anweisung und Umsetzung der ermittelten entlastenden Maßnahmen erfolgt im deutschen Übertragungsnetz heute in aller Regel präventiv, d. h. vor einem möglichen Ausfall eines Netzbetriebsmittels, welcher eine Grenzwertverletzung hervorrufen würde. Durch die präventive Umsetzung der Maßnahme reduziert sich die Grundfall-Auslastung der betroffenen Betriebsmittel.

Die dauerhaft tolerierbare Strombelastbarkeit einer Leitung (PATL) kann unendlich lange anliegen, ohne die Leitung thermisch zu überlasten. Wenn Leitungen im ungestörten Betrieb (n-0 Zustand) mit einem geringeren Strom belastet sind, erlaubt ihre thermische Trägheit eine temporäre Überschreitung des PATL ohne eine thermische Überlastung hervorzurufen. Die dann temporär tolerierbare Strombelastung (TATL²) ist abhängig von der Vorbelastung $I_{Ltg,0}$ einer Leitung, der Zeitspanne t_{TATL} , in der der temporäre Strom anliegt, sowie von Witterungsverhältnissen. In der Praxis ist sowohl die temporär als auch die dauerhaft

¹ Permanent Admissible Transmission Loading (PATL)

² Temporary Admissible Transmission Loading (TATL)

tolerierbare Strombelastung durch weitere Restriktionen, z.B. Schutz- und Stabilitätsgrenzwerte, limitiert und darüber hinaus bei Verwendung von Freileitungsmonitoring von den Witterungsbedingungen abhängig und somit im zeitlichen Verlauf veränderlich.

Temporäre Stromgrenzwerte (TATL) beziehen sich immer auf eine bestimmte Zeitspanne, über die der erhöhte Strom auf ein Betriebsmittel einwirken darf. Je höher die Einwirkdauer, desto geringer fällt der Stromgrenzwert aus. Die Einwirkdauer wird maßgeblich bestimmt durch die Aktivierungszeiten der dem Systemführer zur Verfügung stehenden (kurativen) Entlastungsmaßnahmen. Nach vollständiger Umsetzung der kurativen Maßnahmen muss der Strom wieder auf den PATL zurückgeführt sein, um thermische Überlastungen zu vermeiden. Abbildung 2-1 zeigt dieses Prinzip exemplarisch anhand des Stromverlaufes (I_{ltg}) und der Leiterseiltemperatur (T_{ltg}) einer fiktiven Freileitung sowie der Leistungseinspeisung einer kurativen Maßnahme ($P_{Maßkur}$), die nach der Reaktionszeit (t_{reakt}) umgesetzt wird.

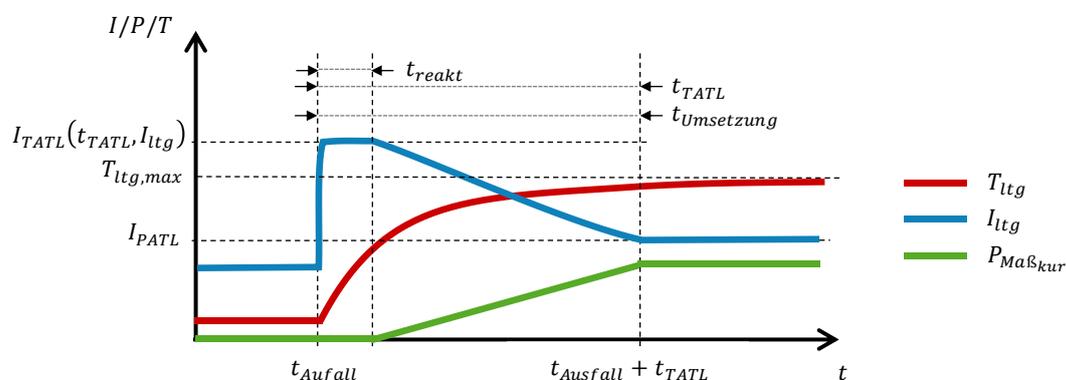


Abbildung 2-1: Vereinfacht abgebildeter, quasistationärer Verlauf der Leiterseiltemperatur (T_{ltg}) in Abhängigkeit von Leiterstrom I_{ltg} und eingepprägter Leistung einer kurativen Maßnahme $P_{Maßkur}$

Für die kurative Behebung von Netzengpässen kommen grundsätzlich verschiedene Maßnahmen in Frage. Entscheidend sind geringe Umsetzungszeiten innerhalb der für den TATL definierten Zeitspanne sowie eine hohe Verfügbarkeit, gute Steuerbarkeit und die Effektivität der Maßnahme auf den betrachteten Netzengpass selbst. Denkbar sind u. a. kurative Einsätze von

- Topologie-Schaltmaßnahmen
- leistungsflusssteuernden Betriebsmitteln (z.B. HGÜ³, PST⁴ und TCSC⁵),
- Batteriespeichersystemen („Netzbooster“), sowie
- thermischen Kraftwerken und Erneuerbaren Energien (insb. Großanlagen).

Die aufgeführten Maßnahmen unterscheiden sich teils signifikant hinsichtlich ihrer Reaktions- und Umsetzungszeiten, Verfügbarkeit und netztechnischen Wirkung. Dennoch können und müssen sie durch geeignete Berechnungswerkzeuge gemeinsam geplant und kombiniert umgesetzt werden, u. a. für eine bilanzielle Ausgeglichenheit und eine sichere Ablösung zeitlich begrenzt wirksamer Maßnahmen.

³ Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ)

⁴ Phasenschieber-Transformator (PST)

⁵ Thyristorgesteuerte Serienkompensation (Thyristor Controlled Series Compensation – TCSC)

Da kurative Maßnahmen erst dann eingesetzt werden, wenn ein Betriebsmittelausfall bereits eingetreten ist und daher nur sehr wenig Zeit für aktive Handlungen des Systemführers bleibt, ist jegliche nicht planmäßige Wirkung potentiell systemgefährdend. Aus diesem Grund stellt die Umsetzung eines kurativen Netzbetriebs höchste Anforderungen an die Prozesse, Berechnungswerkzeuge und Kommunikationswege.

2.3 Operatives Engpassmanagement der deutschen ÜNB

Betreiber von Übertragungsnetzen sind gesetzlich zur Gewährleistung der Netz- und Systemsicherheit verpflichtet. Um dies zu ermöglichen, stehen ihnen nach §13 EnWG verschiedene Maßnahmen zur Verfügung [9]. Diese Maßnahmen umfassen

- netzbezogene Maßnahmen, insb. Netzschaltungen,
- marktbezogene Maßnahmen (Redispatch, ab-/ zuschaltbare Lasten, Regelleistung) sowie
- zusätzliche Reserven (Netzreserve und Kapazitätsreserve).

Solche Maßnahmen werden entsprechend ihrer regulatorischen Einsatzreihenfolge in den Betriebsplanungsprozessen zum operativen Engpassmanagement geplant und im Echtzeit-Systembetrieb umgesetzt. Aufgrund des hohen Koordinationsaufwands bei der Umsetzung von großen Redispatch-Volumina sowie betrieblichen und technischen Restriktionen der Maßnahmen selbst, wie etwa Vorlaufzeiten, wird beim operativen Engpassmanagement zwischen Betriebsplanung und dem Echtzeit-Systembetrieb unterschieden.



Abbildung 2-2: Zeitliche Einordnung der Aufgabenfelder im operativen Engpassmanagement

Wie Abbildung 2-2 zeigt, hat die Betriebsplanung eine Vorschauzeit von bis zu sieben Tagen bis kurz vor Echtzeit. Das Ziel der Betriebsplanung ist die Vorbereitung des eigentlichen Echtzeit-Systembetriebs u. a. mit der Planung und teilweisen Durchführung von Entlastungsmaßnahmen (vgl. Abschnitt 2.3.1). Der Echtzeit-Systembetrieb überwacht und steuert das Netz auf Basis aktueller Messwerte und setzt im kurzfristigen Zeitbereich noch zur Verfügung stehende Maßnahmen um, sollte es zu Netzengpässen kommen (vgl. Abschnitt 2.3.2).

2.3.1 Betriebsplanung

Aufgrund von Unsicherheiten und teils langen Vorlaufzeiten, insbesondere bei Kraftwerksanfahrten, erfolgt die Betriebsplanung im deutschen Übertragungsnetz innerhalb mehrerer konsekutiver Prozesse (vgl. Abbildung 2-3). Die Prozesse unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Zielstellung sowie der verfügbaren Informationen über die sich einstellenden Leistungsflüsse und Netzengpässe. So liegt der Fokus im WAPP⁶- und pRD1⁷-Prozess auf der Sicherung von Redispatchpotentialen, welche durch Anfahrten von Kraftwerksleistung

⁶ Week-Ahead-Planning-Process (WAPP)

⁷ Präventiver Redispatch (pRD)

vorgehalten werden können. Die nachfolgenden Prozesse pRD2/DACF⁸ sowie der untertägige IDCF⁹-Prozess fokussieren auf die Arbeitspunktanpassung am Netz befindlicher Kraftwerke, die Koordination leistungsflusssteuernder Betriebsmittel sowie die Durchführung von Schalthandlungen.



Abbildung 2-3: Betriebsplanungsprozesse im Engpassmanagement der deutschen Übertragungsnetzbetreiber

Innerhalb dieser Prozesse werden Optimierungsalgorithmen genutzt, die auf Basis von Prognosen der Netznutzung potentielle Engpässe sowie mögliche Entlastungsmaßnahmen ermitteln. Abhängig von ihren Vorlaufzeiten und dem Bedarf zur Entlastung des Netzes, werden diese Maßnahmen im Anschluss umgesetzt oder für eine spätere Umsetzung vorgemerkt. Alle Betriebsplanungsprozesse basieren auf Prognosen (für EE-Einspeisung, Last, Netztopologie, Kraftwerkseinspeisung, etc.), die laufend aktualisiert werden. Durch den chronologischen Ablauf der Prozesse ergeben sich in jedem Prozess im Vergleich zu den vorhergehenden Prozessen unterschiedliche prognostizierte Netzsituationen, die eine Anpassung der zuvor bestimmten Maßnahmen zur Behebung von möglichen Netzengpässen erfordern können. Die Veränderlichkeit der der Maßnahmenauswahl zugrundeliegenden Information sowie die mit der Zeit abnehmende Unsicherheit gegenüber der sich tatsächlich ergebenden Netzsituation stellen grundlegend andere Anforderungen an die Umsetzung und Bewertung der kurativen Maßnahmen als Betrachtungen unter der Annahme perfekter Voraussicht des Systemzustands [7].

Für die Umsetzung der zuvor beschriebenen Prozesse entwickeln die vier deutschen Übertragungsnetzbetreiber den sogenannten Redispatch-Ermittlungs-Server (RES). In diesem sind die zugehörigen Optimierungsprobleme als AC-SCOPF¹⁰ formuliert. Somit ermöglicht der RES die Dimensionierung aller vorhandenen kontinuierlichen und diskreten Stellgrößen im Übertragungsnetz im Lichte der jeweils prognostizierten Netzsituation unter Berücksichtigung vorliegender Unsicherheiten. Aufgrund der Problemgröße mit vielen tausend Netzknoten, Maßnahmen, Betriebsmitteln und Ausfallsituationen liegt ein besonderer Fokus auf der Problemreduzierung bzw. der im Prozess vertretbaren Rechenzeiten. Zur Umsetzung einer kurativen Netzbetriebsführung müssen die Planungswerkzeuge (wie z. B. der RES) dahingehend erweitert werden, dass temporär tolerierbare Strombelastungen (TATL) und die zugehörigen kurativen Maßnahmen korrekt abgebildet werden können (vgl. Kapitel 3) [12].

2.3.2 Echtzeit-Systembetrieb

Nachgelagert zur Betriebsplanung erfolgt der Echtzeit-Systembetrieb, der die Netzführung (Überwachung und Steuerung der Netzbetriebsmittel) sowie die Überwachung der Systembilanz und die Marktinteraktion umfasst. Das Engpassmanagement stellt einen operativen Schwerpunkt der Überwachung der Netzbetriebsmittel dar. Auftretende Engpässe

⁸ Präventiver Redispatch im Day-Ahead Congestion Forecast (DACF)

⁹ Intraday Congestion Forecast (IDCF)

¹⁰ Alternating Current – Security Constrained Optimal Power Flow (AC-SCOPF)

werden entsprechend der Vorgaben des §13 EnWG mit netz- oder marktbezogenen Maßnahmen behoben [9]. Kernaufgabe der Systemführer im Echtzeit-Systembetrieb ist es, das System jederzeit in einem sicheren Zustand zu betreiben.

Die in der Betriebsplanung bestimmten und noch nicht umgesetzten präventiven Maßnahmen zur Gewährleistung des sicheren Systembetriebs werden im Echtzeit-Systembetrieb angewiesen. Hierzu steht die Betriebsplanung mit der Systemführung in einem engen Austausch. Untertägige Anpassungen der präventiv bestimmten Maßnahmen werden ebenfalls im Echtzeit-Systembetrieb umgesetzt. Zur Überwachung der Verfügbarkeit und Wirksamkeit von Maßnahmen zur Engpassbehebung werden Ausfallvarianten der Netzbetriebsmittel kontinuierlich in der aktuellen Netzsituation, die bereits umgesetzte präventive Maßnahmen einschließt, durch Leistungsflussrechnungen auf Basis der State Estimation überprüft. Die Netzsicherheitsrechnung stellt eine wesentliche Informationsquelle für den Systemführer dar, anhand derer kurzfristige Entscheidungen zur Umsetzung weiterer entlastender Maßnahmen getroffen werden.

3 Integration kurativer Maßnahmen in das operative Engpassmanagement

Zur Integration einer kurativen Netzbetriebsführung müssen robuste und in der Praxis handhabbare Maßnahmen ermittelt werden, um die Kompetenz des Systemführers als elementaren Bestandteil des sicheren Netzbetriebs zu unterstützen. Eine mit der kurativen Netzbetriebsführung einhergehende höhere Netzauslastung darf dabei nicht zu einer Reduktion der Systemsicherheit führen. Daher muss die Gewährleistung der Systemsicherheit weiterhin oberste Priorität bei der Weiterentwicklung des operativen Engpassmanagements – auch unter Berücksichtigung kurativer Maßnahmen – haben.

Neben der Systemsicherheit ist die Effizienz des Netzbetriebs ein zentraler Aspekt des Engpassmanagements. Maßnahmen müssen aus Effizienzperspektive kostenminimal unter Berücksichtigung der regulatorischen Einsatzreihenfolge ausgewählt werden. Zur Auflösung des vermeintlichen Widerspruchs zwischen Systemsicherheit und (Kosten-)Effizienz wird im Folgenden aufgezeigt, wie eine sachgerechte Integration von kurativen Maßnahmen in die bestehenden Prozesse und Systeme des operative Engpassmanagements ausgestaltet werden kann. Dabei wird wiederum zwischen Betriebsplanung und Echtzeit-Systembetrieb unterschieden.

3.1 Ermittlung und Einsatzplanung von kurativen Maßnahmen

Wie zuvor beschrieben, werden in den bestehenden Betriebsplanungsprozessen Maßnahmen zur Engpassbehebung derart geplant, dass der prognostizierte Netzbetrieb innerhalb sicherer Betriebsgrenzen stattfinden kann. Die Maßnahmen werden dabei so ermittelt, dass die Einhaltung der sicheren Betriebsgrenzen sichergestellt ist, ohne dass eine weitere Reaktion des Systemführers notwendig ist. Die bestehenden Berechnungsroutinen und Optimierungsalgorithmen müssen dafür um die Abbildung von temporär tolerierbaren Strombelastungen (TATL) und die Berechnung von kurativen Maßnahmen erweitert werden. Zusätzliche Anforderungen ergeben sich aus kleiner werdenden Sicherheitsmargen, kürzeren

Reaktionszeiten und somit einer höheren Kritikalität für die Systemsicherheit, welche bei der Ermittlung und Einsatzplanung von kurativen Maßnahmen berücksichtigt werden müssen.

Berücksichtigung von temporär tolerierbaren Strombelastungen

Eine exakte Prognose von TATL ist nur sehr schwer möglich. Dies liegt daran, dass TATL von diversen Einflussgrößen, wie der Belastung im ungestörten Betrieb sowie von Witterungsverhältnissen abhängig ist, und somit Prognoseungenauigkeiten unterliegt. Daher ist innerhalb der Betriebsplanungsprozesse eine Abschätzung der TATL hin zur sicheren Seite erforderlich, um Schädigungen von Betriebsmitteln oder unzulässige Durchhänge zu vermeiden. Um die Praxistauglichkeit der ermittelten kurativen Maßnahmen zu gewährleisten und den zusätzlichen Berechnungsaufwand zu begrenzen, erscheint es außerdem sinnvoll, die Anzahl der Umsetzungszeitspannen zu begrenzen. Eine Ausnutzung des vollen theoretischen Potentials der temporären Höherauslastung ist unter diesen Gesichtspunkten nur eingeschränkt möglich.

Gemeinschaftliche Planung von präventiven und kurativen Maßnahmen

Die Ermittlung und Einsatzplanung von kurativen Maßnahmen erfolgt auf Basis der berechneten Grenzwerte (PATL und TATL), verfügbarer Potentiale und der prognostizierten Netzsituation. Dabei sind Wechselwirkungen sämtlicher Stellpotentiale, unabhängig von ihrer präventiven oder kurativen Umsetzung, entsprechend abzubilden. Nur eine geschlossene Betrachtung aller zur Verfügung stehender Maßnahmen führt zu einem gesamtoptimierten Maßnahmenereinsatz, welcher aus Effizienzgesichtspunkten anzustreben ist.

Die geschlossene Betrachtung bedeutet, dass eine mögliche kurative Maßnahmenumsetzung entlang der gesamten Prozesskette von WAPP bis kurz vor Echtzeit (vgl. Abschnitt 2.3) berücksichtigt werden und rollierend aktualisiert werden sollte. Hierbei sind Prognosefehler und Unsicherheiten geeignet zu adressieren, z.B. durch Einplanung von Sicherheitsmargen. So ist sichergestellt, dass bei unzureichenden kurativen Stellpotentialen präventive Maßnahmen mit teils langen Vorlaufzeiten bereitstehen, und Situationen mit unzureichenden Gegenmaßnahmen vermieden werden können.

Darüber hinaus sind innerhalb jedes Optimierungslaufes die präventive und die kurative Maßnahmenumsetzung geschlossen zu betrachten, da nur so Wechselwirkungen zwischen kurativen und präventiven Maßnahmen sachgerecht abgebildet werden können. Diese müssen derart aufeinander abgestimmt werden, dass TATL nicht überschritten werden und kurative Maßnahmen in der definierten Zeitspanne ihre vollständige Wirkung entfalten. Sollten die zur Verfügung stehenden kurativen Maßnahmen zur Behebung eines Engpasses nicht ausreichend sein, müssten zusätzlich auch präventive Engpassbehebungsmaßnahmen (z. B. Redispatch) angewiesen werden.

Die Fixierung einer kurativen Maßnahme sollte erst dann erfolgen, wenn die notwendige Vorlaufzeit dies erfordert. Dies gilt im weiteren Sinne auch für präventive Maßnahmen. So können neue Prognosen dazu genutzt werden, das geplante präventive und kurative Maßnahmen-Set entsprechend zu aktualisieren. Die Scharfstellung sollte dabei so ausgestaltet werden, dass auf Basis eines Triggers (z.B. externes Signal nach einem Betriebsmittelausfall) die für jeden Betriebsmittelausfall hinterlegte(n) kurative(n) Maßnahme(n) unverzüglich ausgelöst werden (siehe Abschnitt 3.2).

Redundante Planung von kurativen Maßnahmen

Da kurative Maßnahmen erst dann ausgelöst werden, wenn ein Betriebsmittelausfall bereits eingetreten ist, und daher nur sehr wenig Zeit für aktive Handlungen des Systemführers bleibt, ist jegliche nicht planmäßige Wirkung potentiell systemgefährdend und muss unmittelbar kompensiert werden. Unsicherheiten wie eine unerwartete Nichtverfügbarkeit, z.B. infolge einer fehlerhaften Kommunikationsstrecke, oder eine unzureichende Wirksamkeit der kurativen Maßnahme, müssen mittels redundanter Maßnahmen besichert werden. Die notwendige Aktivierungs- und Auslösezeit für die Redundanzmaßnahmen ist entsprechend zu berücksichtigen. Eine Besicherung kann beispielsweise durch die Planung einer zusätzlich kurativen Maßnahme erfolgen, welche den Ausfall einer anderen geplanten kurativen Maßnahme besichert.

Zeitlich begrenzt wirksame kurative Maßnahmen erfordern die Vorhaltung von Ablösemaßnahmen, die auch in längeren Ausfallsituationen eine sichere Behebung der Netzengpässe ermöglichen. Entsprechend müssen derartige Ablösemaßnahmen in den Betriebsplanungsprozessen bereits mit geplant werden, um ihre Verfügbarkeit in bzw. kurz nach der Ausfallsituation zu gewährleisten. Sollten sich die für die Behebung von Netzengpässen zur Verfügung stehenden Flexibilitäten bzw. Maßnahmen durch zukünftige Entwicklungen reduzieren, muss die kurative Netzbetriebsführung zusätzliche Maßnahmen zur Rückführung in den (n-1)-sicheren Zustand („Restoring“) einplanen, damit der Systemführer die Möglichkeit hat, das System möglichst schnell nach einem Betriebsmittelausfall wieder in einem (n-1)-sicheren Betriebszustand zurückzuführen.

Eine Besicherung von geplanten Maßnahmen und eine Vorhaltung von Ablösemaßnahmen – mit entsprechender Vergütung – führt bei konzeptgemäßer Funktionsweise der kurativen Maßnahme zu einzuplanenden Redundanzen und schmälert das Potential der kurativen Netzbetriebsführung. Zur Gewährleistung der Systemsicherheit ist diese besicherte Planung jedoch unabdingbar.

Berücksichtigung von Stabilitätsaspekten

Eine tendenziell höhere Auslastung von Netzbetriebsmitteln geht mit höheren Blindleistungsbedarfen sowie höheren Winkeldifferenzen bei Ausfall und/oder Zuschaltung einher und führt das System näher an Stabilitätsgrenzen. Damit steigen durch die kurative Netzbetriebsführung Anforderungen an eine dynamische Blindleistungsbereitstellung einerseits und eine Stabilitätsbewertung andererseits, welche sowohl planerisch als auch betrieblich erfüllt werden müssen.

Fazit

Die beschriebenen Anforderungen zur Integration kurativer Maßnahmen in die Betriebsplanungsprozesse des operativen Engpassmanagements stellen somit hohe Anforderungen an die bestehenden Systeme sowie die betriebliche Umsetzung. Die Erweiterung von Optimierungsproblemen um derartige Anforderungen ist bereits Stand der Forschung [7,11,13] und stellt vergleichsweise geringe zusätzliche algorithmische Herausforderungen dar. Die Überführung in den Stand der Technik steht jedoch noch aus. Neben den algorithmischen Anpassungen erfordert die Umsetzung innerhalb der operativen Betriebsplanungswerkzeuge, z.B. im RES, eine hohe Robustheit und Ergebnisgüte der ermittelten Maßnahmen in einer für den Systemführer nachvollziehbaren Weise. Neben den

Berechnungsroutinen betrifft die Robustheit insbesondere auch Eingangsdaten und verwendete Modelle. So muss stets sichergestellt sein, dass die ermittelten kurativen Maßnahmen unter den gegebenen Randbedingungen tatsächlich so umsetzbar sind und bestehende Engpässe tatsächlich auch beheben können.

3.2 Überwachung und Auslösung von kurativen Maßnahmen

Innerhalb der heutigen Systemführung erfolgt die Überprüfung der Verfügbarkeit, des Abrufs sowie die Überwachung der Wirksamkeit von Maßnahmen durch den Systemführer. Dieser wird durch Funktionalitäten im Leitsystem, wie kontinuierliche Sicherheitsrechnungen, unterstützt und hat stets die Möglichkeit, bei Bedarf weitere Maßnahmen umzusetzen. Eine zeitkritische und (teil-)automatisierte Umsetzung von Maßnahmen unmittelbar nach einem Betriebsmittelausfall stellt somit einen Paradigmenwechsel in der Systemführung dar. Daraus ergeben sich nochmals hohe Anforderungen an die Umsetzung von kurativen Maßnahmen, um die Netzsicherheit auf hohem Niveau gewährleisten zu können. Dies betrifft neben der zuverlässigen Auslösung einer Maßnahme im Fehlerfall auch das erweiterte Monitoring ihrer Verfügbarkeit und Wirksamkeit, welches somit in die Assistenzsysteme der Echtzeit-Systemführung integriert werden muss.

In der Betriebsplanung ermittelte kurativ umzusetzende Maßnahmen müssen aus prozessualer Sicht eine eindeutige Zuordnung zu einem Betriebsmittelausfall aufweisen. Damit können diese innerhalb der Sicherheitsrechnung im Leitsystem Berücksichtigung finden, indem zu jeder betrachteten Ausfallvariante das zugeordnete Maßnahmenet in der Leistungsflussrechnung aktiviert wird. Sollten trotz einer derartigen Berücksichtigung von kurativen Maßnahmen Befunde im Leitsystem auftreten, also in einer Ausfallvariante Betriebsgrenzen (PATL bzw. TATL) des sicheren Systembetriebs verletzt werden, muss der Systemführer reagieren und unmittelbar redundant geplante Maßnahmen umsetzen. Bei Befundfreiheit, d. h. es tritt in einer Ausfallvariante mit wirksamer kurativer Maßnahme keine Verletzung von Grenzwerten auf, kann eine kurative Maßnahme im Leitsystem oder im SCADA-System scharfgeschaltet werden.

Kommt es zu einem Betriebsmittelausfall, wird durch ein externes Signal eine Auslösung getriggert. Die automatisierte Auslösung kurativer Maßnahmen mit besonders kurzen Aktivierungs- und Reaktionszeiten kann die Systemführer im Echtzeit-Systembetrieb entlasten. Die Information über die Auslösung und Wirksamkeit der kurativen Maßnahme muss wiederum in den Assistenzsystemen der Systemführung gut und unmittelbar erkennbar sein. Andere kurative Maßnahmen können mittels manueller Bestätigung ausgelöst werden und so dem Systemführer im Echtzeit-Systembetrieb die Möglichkeit lassen, aktualisierte Kenntnisse über die Netzsituation zu berücksichtigen oder zusätzliche, z.B. stabilitätsfördernde, Maßnahmen umzusetzen.

Für den sicheren Netzbetrieb ist es zudem unerlässlich, das System nach der Ausfallsituation mit Auslösung der kurativen Maßnahme geeignet in den (n-1)-sicheren Zustand zurückzuführen („Restoring“) sowie nur temporär verfügbare kurative Maßnahmen abzulösen.

4 Fazit

Die kurative Netzbetriebsführung bietet vielversprechende Möglichkeiten, die Kosten für das Engpassmanagement zu reduzieren und die Systemführer als elementaren Bestandteil des sicheren Netzbetriebs zu unterstützen. Aspekte der Systemsicherheit sind jedoch weiterhin von höchster Priorität und stellen entsprechende Randbedingungen für die Umsetzung und Implementierung einer kurativen Netzbetriebsführung. Mit der Berücksichtigung dieser Randbedingungen sind teils große Herausforderungen verbunden, die es in den kommenden Jahren durch Netzbetreiber, Anlagenbetreiber und Leittechnikhersteller zu bewältigen gilt.

Darüber hinaus müssen theoretische Potentiale der kurativen Netzbetriebsführung zur Senkung der Kosten des Engpassmanagements unter Berücksichtigung realer netzbetrieblicher Randbedingungen in ein technisches umsetzbares Potential überführt werden, um eine realitätsnahe Einschätzung der möglichen Höherauslastung des Bestandsnetzes sowie der Kostensenkung zu ermöglichen. Die Ermittlung dieses technischen Potentials unter den Randbedingungen des Netzbetriebes steht heute noch aus. Im Forschungsprojekt "Innovationen in der Systemführung bis 2030 (InnoSys2030)" soll durch umfangreiche Simulationen des Einsatzes kurativer Maßnahmen sowie verschiedene Demonstratoren und Feldtests eine realitätsnähere Einschätzung des technisch umsetzbaren Potentials kurativer Maßnahmen ermöglicht werden [8,11].

5 Referenzen

- [1] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen: *Quartalsbericht zu Netz- und Systemsicherheitsmaßnahmen Gesamtjahr und Viertes Quartal 2018*, 2019
- [2] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen: *Feststellung des Bedarfs an Netzreserve für den Winter 2019/2020 sowie das Jahr 2022/2023*, 2019
- [3] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), BET Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH: *Höhere Auslastung des Stromnetzes. Maßnahmen zur höheren Auslastung des Bestandsnetzes durch heute verfügbare Technologien*, 2017
- [4] 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH, TransnetBW GmbH: *Netzentwicklungsplan Strom 2030, 1. Entwurf, Version 2019*
- [5] Consentec GmbH, TenneT TSO GmbH: *Netzstresstest*, 2016
- [6] Consentec GmbH: *Berücksichtigung betrieblicher Flexibilität in der Netzentwicklung*, Forum Netzplanung beim Wissenschaftsdialog 2018 der BNetzA, 2018
- [7] T. van Leeuwen: *Einfluss von Unsicherheiten und Flexibilität im deutschen Übertragungsnetzbetrieb*, Aachener Beiträge zur Energieversorgung, 2018
- [8] InnoSys 2030: *Projektwebsite*, <https://innosys2030.de>, 2020
- [9] Bundesrepublik Deutschland: *EnWG - Energiewirtschaftsgesetz vom 7. Juli 2005 (BGBl. I S. 1970, 3621), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 5. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2002) geändert worden ist*, Berlin, 2005
- [10] Europäische Kommission: *Verordnung (EU) 2017/1485 der Kommission vom 2. August 2017 zur Festlegung einer Leitlinie für den Übertragungsnetzbetrieb*, Brüssel, 2017
- [11] K. Kollenda et al.: *Planungsorientierte Simulation kurativer Maßnahmen im Deutschen Übertragungsnetz*, 16. Symposium Energieinnovation, Graz, 2020
- [12] O. Scheufeld et al.: *Der Redispatch-Ermittlungs-Server (RES): Ein innovatives Werkzeug für die Betriebsplanung*, Internationaler ETG-Kongress, 2019
- [13] UMBRELLA Konsortium: *Umbrella D3.2: Report on EOPF considering uncertainties*, www.e-umbrella.eu, 2014

6 Förderhinweis

Dieser Beitrag wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) der Bundesrepublik Deutschland innerhalb des Forschungsprojektes "Innovationen in der Systemführung bis 2030 (InnoSys2030)" gefördert (FKZ: 0350036).