

ZUKÜNFTIGE HERAUSFORDERUNGEN UND SYSTEMBEDARFE FÜR EIN STABILES STROMNETZ

HERBSTSITZUNG DER DEUTSCHEN PHYSIKALISCHEN
GESELLSCHAFT, ARBEITSKREIS AKE

BAD HONNEF, 17.10.2024

DR. MORITZ MITTELSTAEDT

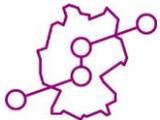
WIR VERBINDEN EUROPA

WAS WIR FÜR DEN EUROPÄISCHEN STROMMARKT LEISTEN



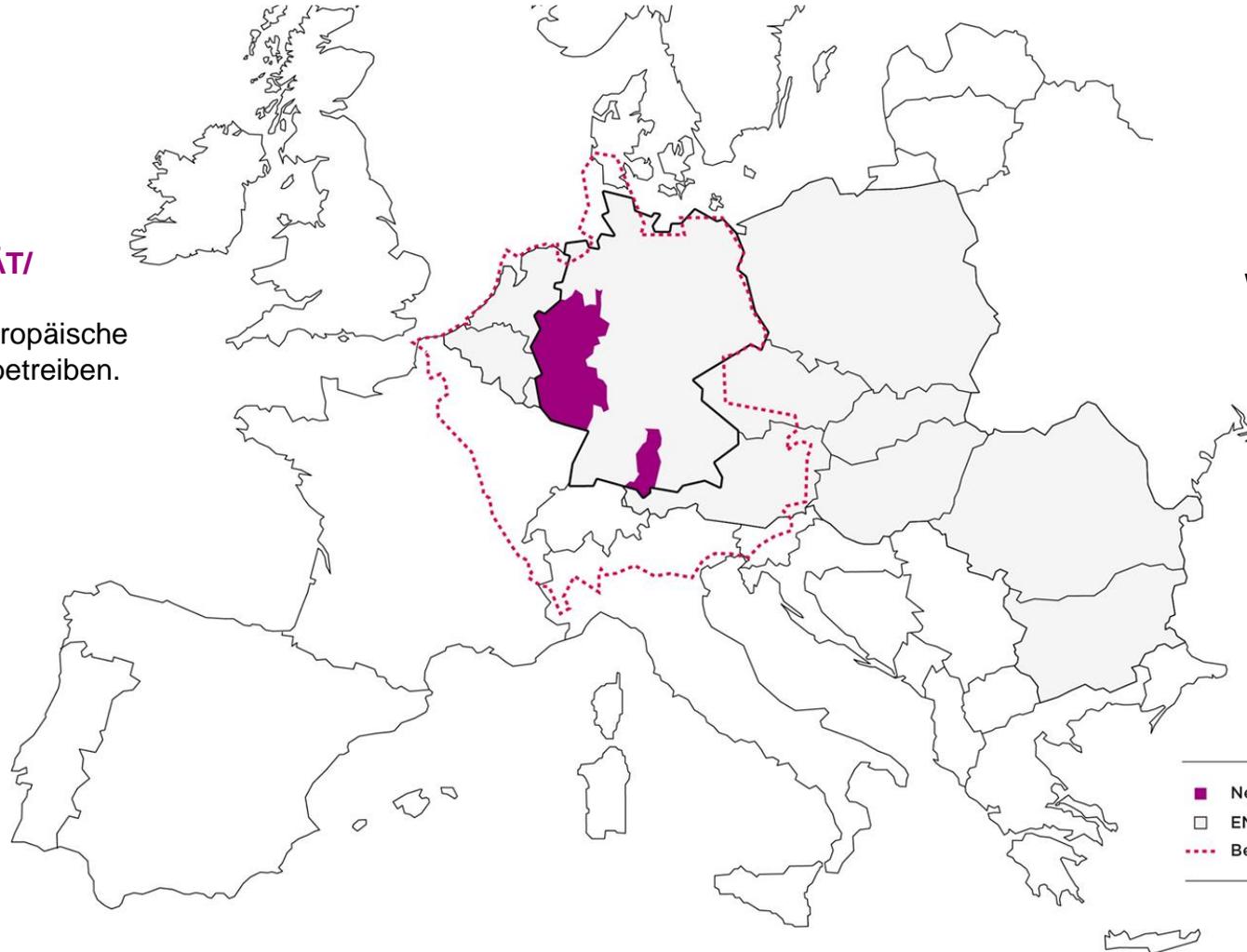
NETZSTABILITÄT/ SICHERHEIT

Wir helfen dabei, das europäische Verbundnetz sicher zu betreiben.



KOORDINATION STROMFLÜSSE

Wir überwachen und koordinieren die Stromflüsse im nördlichen Europa (ENTSO-E NORD).



NETZAUSBAU/ INTERKONNEKTOREN

Wir schaffen Verbindungen zu den Netzen unserer Nachbarländer.



STROMHANDEL

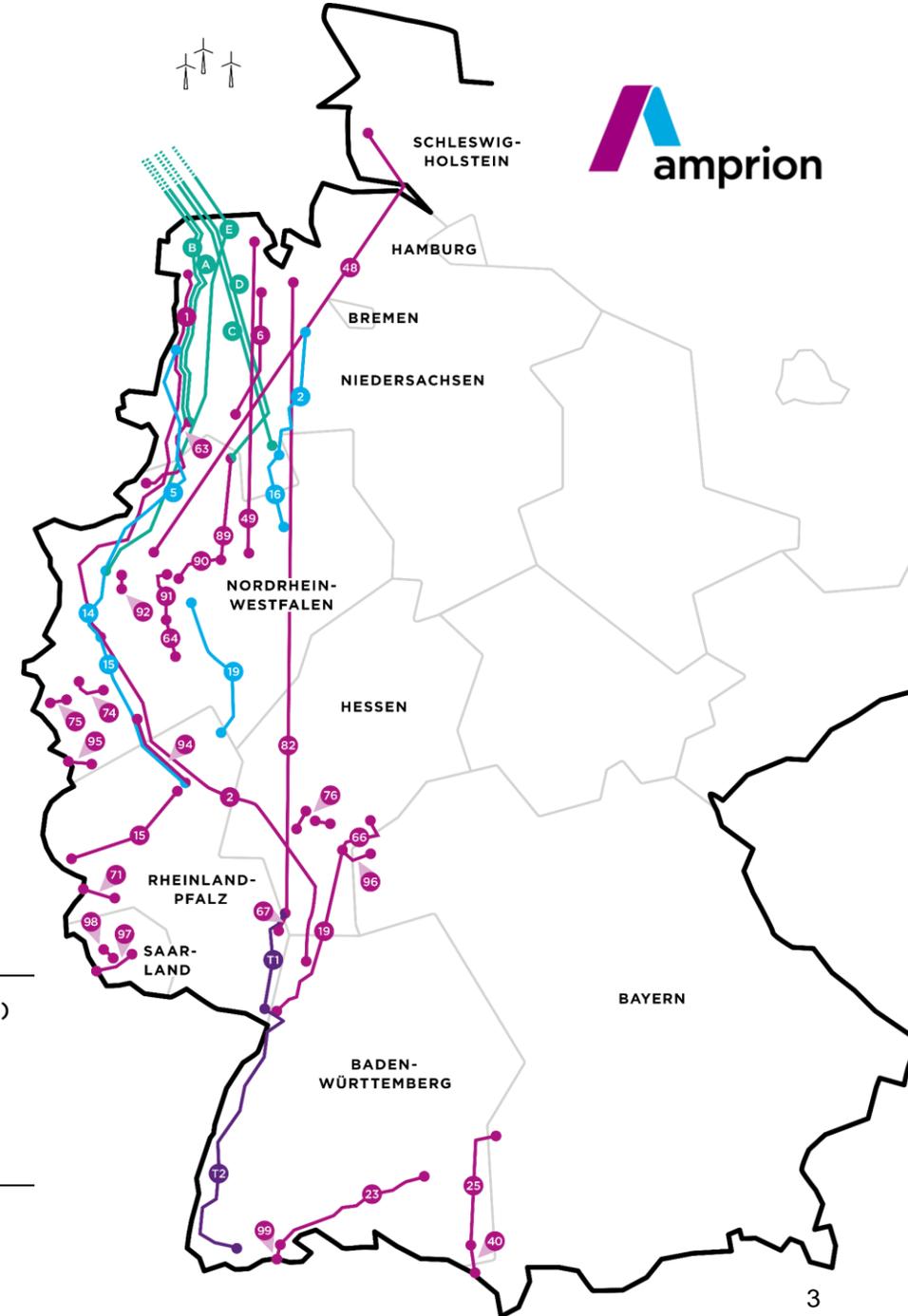
Unser Netz ist eine Drehscheibe für den europäischen Stromhandel.

NETZAUSBAU BEI AMPRION

UNSERE VORHABEN

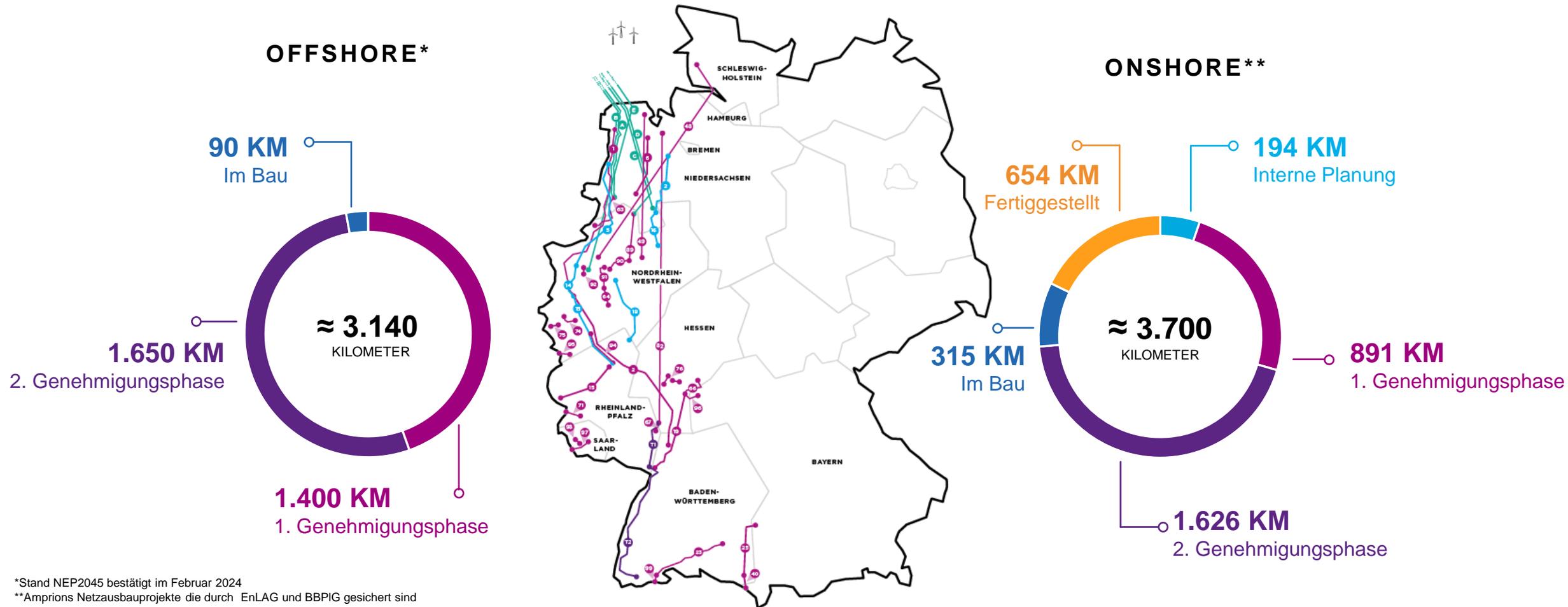
Amprion bereitet den Weg für ein klimaverträgliches Energiesystem und baut sein Netz dafür auf rund 5.500 Kilometern aus. Die gesetzlichen Grundlagen bilden das EnLAG (2009) und das BBPIG (ab 2013). Weitere Vorhaben sind im aktuellen Netzentwicklungsplan enthalten oder werden für Kunden umgesetzt.

- Energieleitungsausbaugesetz (EnLAG)
- Bundesbedarfsplangesetz (BBPIG)
- Offshore-Netzanbindungssysteme
- Netzentwicklungsplan (NEP): P310 Bürstadt - Kühmoos



DER AUSBAU DES NETZES IST ESSENTIELL FÜR EIN KLIMANEUTRALES ENERGIESYSTEM

Netzausbau: Rund 5.800 Kilometer und damit ~ 50% mehr Leitungskilometer als heute (11.000 KM)



*Stand NEP2045 bestätigt im Februar 2024

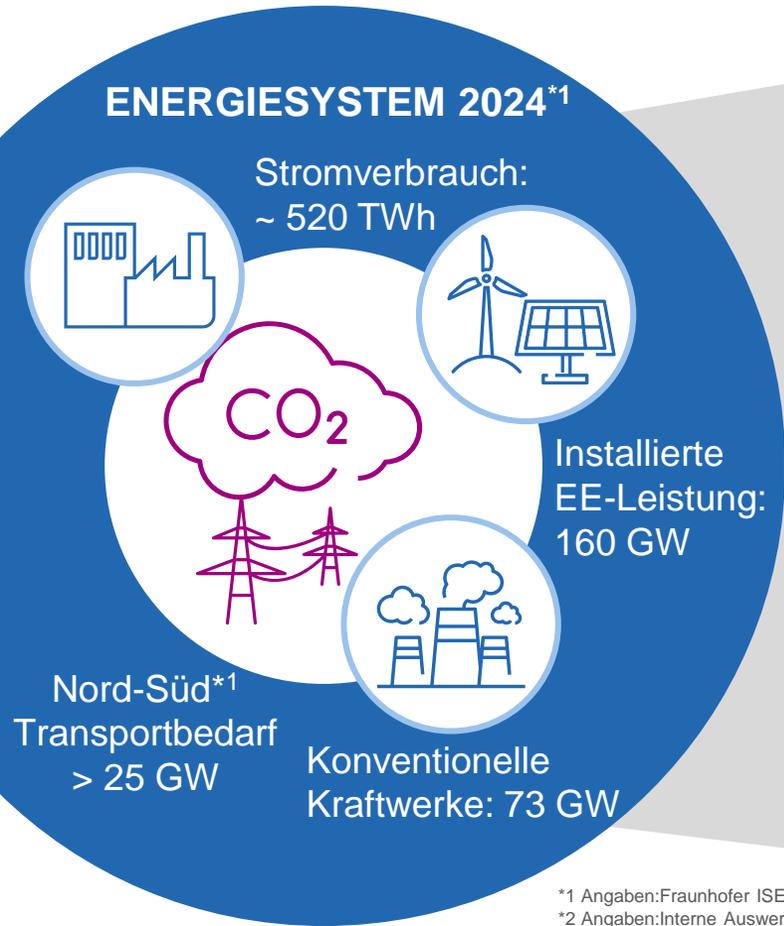
**Amprions Netzausbauprojekte die durch EnLAG und BBPIG gesichert sind

UNSER ENERGIESYSTEM IN DER TRANSFORMATION

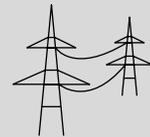
WEG ZUR KLIMANEUTRALITÄT 2045



Stabile Transformation



Aufrechterhaltung der Systemstabilität



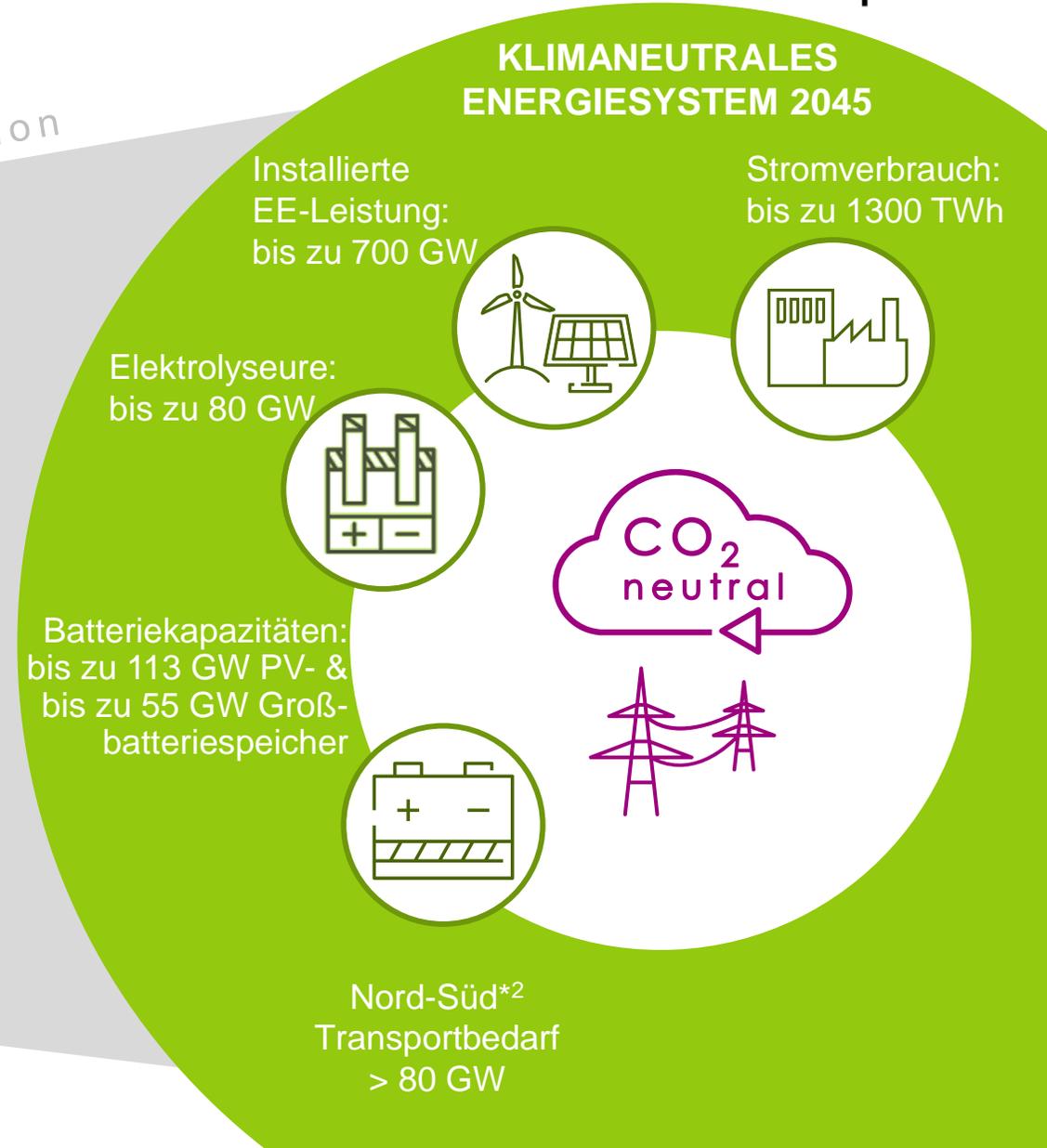
Ausbau der Netzinfrastruktur



Sicherstellung der Finanzierung



Weiterentwicklung der Regulierung



*1 Angaben: Fraunhofer ISE (energy-charts.info)

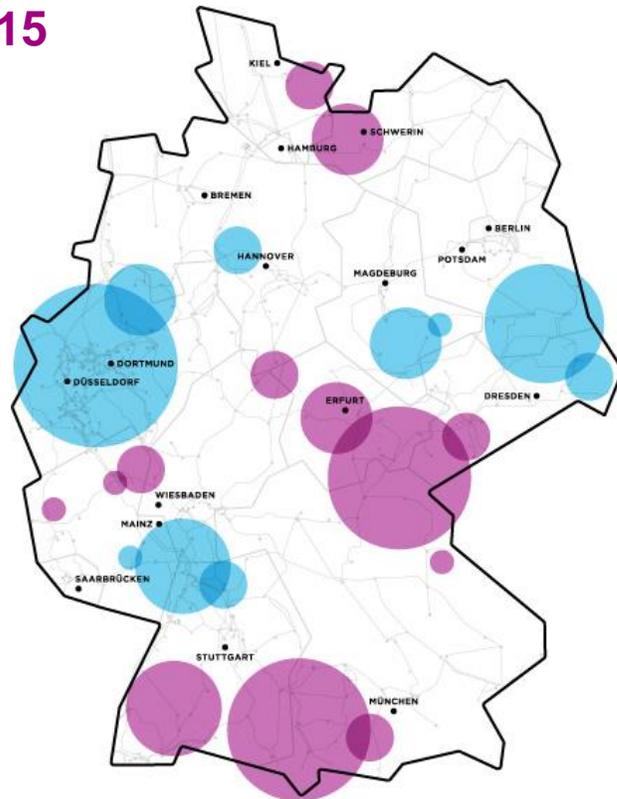
*2 Angaben: Interne Auswertungen verschiedener Szenarien

ENERGIEHUNGER IM SÜDEN UND WESTEN

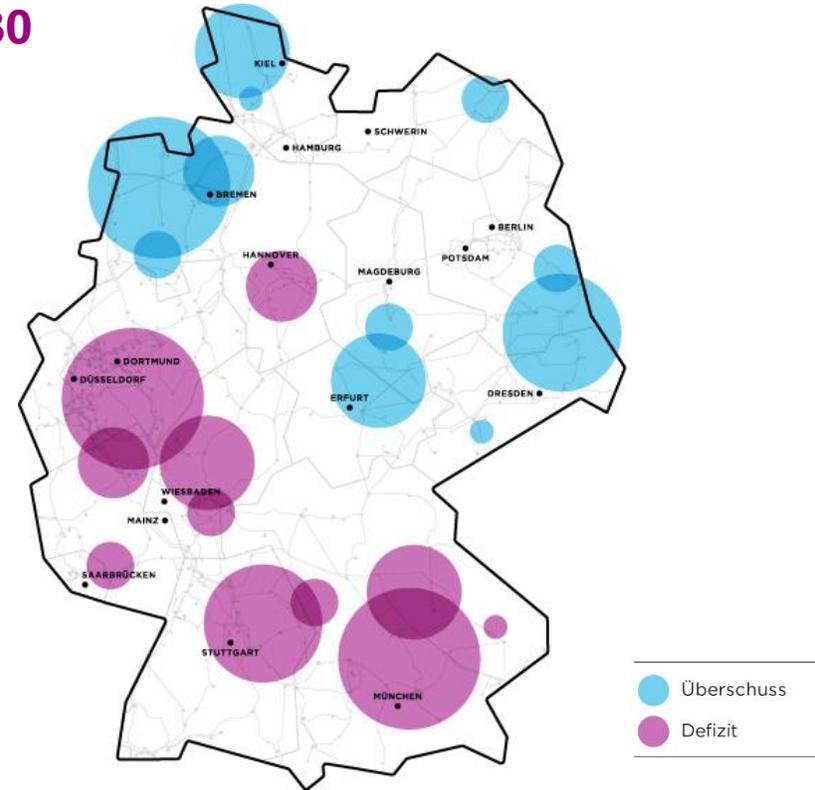
REGIONALE LEISTUNGSBILANZEN 2015 UND 2030

Der Ausbau der erneuerbaren Energien verändert die Energielandschaft grundlegend. Anders als 2015 wird Strom 2030 vor allem dort erzeugt, wo das Wetter dafür günstig ist – und nicht mehr dort, wo der Bedarf am höchsten ist. Stromüberschüsse und -defizite verteilen sich regional neu. Um sie auszugleichen, bauen wir unser Netz aus .

2015



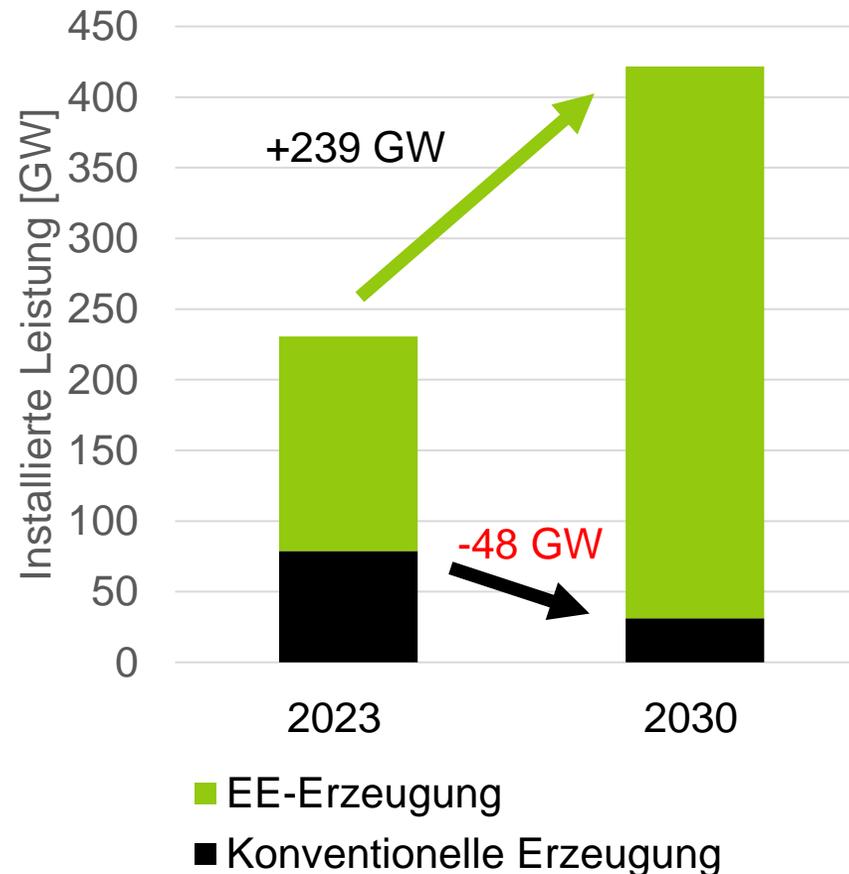
2030



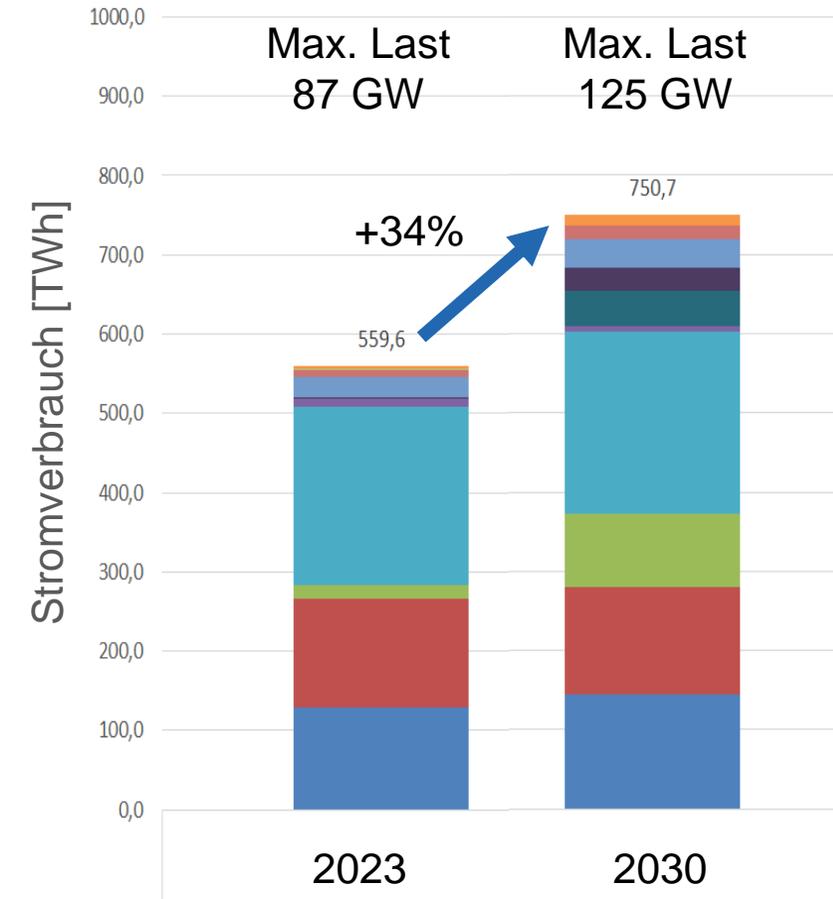
ENTWICKLUNG VON LAST UND ERZEUGUNG

- Installierte EE-Leistung wächst um über 150%
 - Vervierfachung Wind Offshore und PV
 - Verdopplung Wind Onshore
- Konventionelle Leistung sinkt um 60%
 - Vollständiger Kernenergie- und Kohleausstieg
 - Installierte Leistung von Gaskraftwerken auf konstantem Niveau (~30 GW)

Erzeugungspark

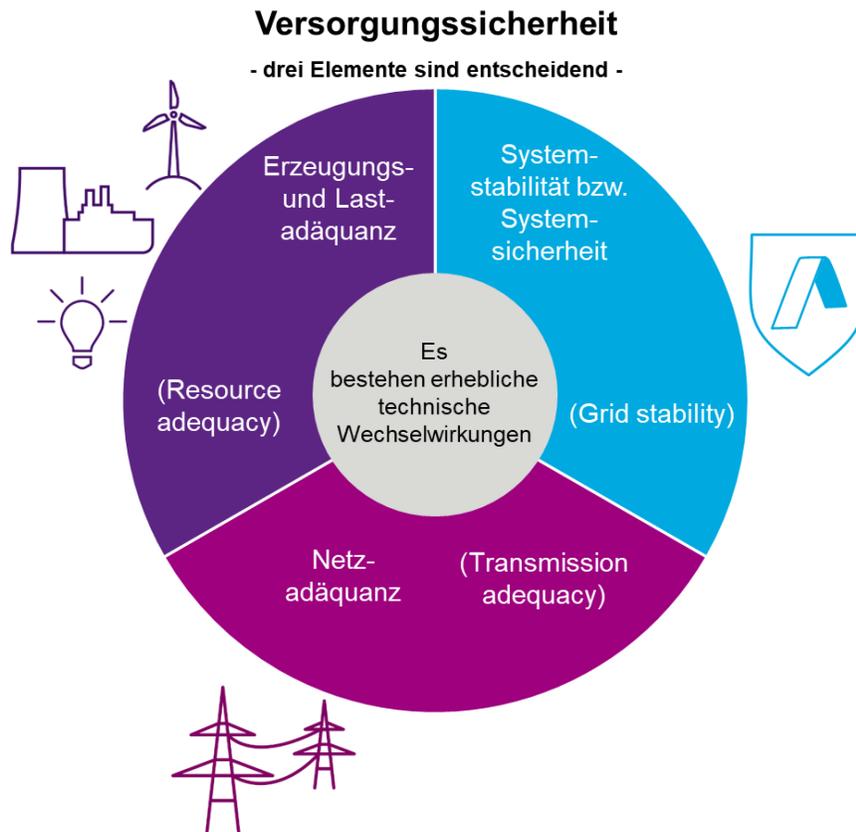


Stromverbrauch



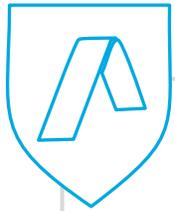
HERAUSFORDERUNGEN DER SYSTEMSTABILITÄT

WAS UMFASST SYSTEMSTABILITÄT UND WAS UMFASST ES NICHT?



- **Systemstabilität** wird fälschlicherweise häufig synonym für viele andere Aspekte der Versorgungssicherheit gebraucht
- **Versorgungssicherheit** allgemein bedeutet die zuverlässige, unterbrechungsfreie und jederzeit vorherrschende Versorgung aller Lasten mit Strom
- **Erzeugungs- und Lastadäquanz**
 - Zu jedem Zeitpunkt steht genau so viel Erzeugung, wie Last zur Verfügung
 - Herausforderung: EE-Anlagen können nicht immer einspeisen („Dunkelflaute“)
- **Netzaquanz**
 - Für jede mögliche Erzeugungs-/Lastsituation muss das Netz ausreichend dimensioniert sein, um die Leistungsflüsse transportieren zu können
- **Systemstabilität**
 - Fähigkeit des Systems auch bei Fehlern (Kurzschlüssen, Ausfällen etc.) wieder in einen stabilen eingeschwungenen Arbeitspunkt zu finden, ohne, dass weitere Betriebsmittel gefährdet werden oder ausfallen
 - Fähigkeit einen stabilen Arbeitspunkt halten zu können

GRENZEN IM NORMALBETRIEB



Aktuelle Herausforderungen

Änderung der Erzeugungsstruktur

Integration neuer Betriebsmittel

Zunahme der Leistungsaustausche sowie höhere grenzüberschreitende Übertragungskapazitäten (MinRAM)

Höherauslastung des Netzes

Volatile Lastflüsse und schnelle Leistungsänderungen

Zustandsgrößen des Netzes

- drei Elemente sind entscheidend -

Frequenz $49,5 \text{ Hz} < f < 51,5 \text{ Hz}$

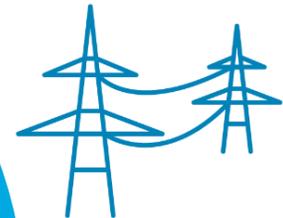


Netzfrequenz (f)

Durch eine ausgeglichene Systembilanz Änderungen der Netzfrequenz vermeiden

Strom (I)

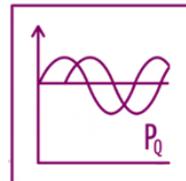
Einhaltung der Stromtragfähigkeit auf allen Betriebsmittel erforderlich



Ströme bis maximal 3.150 bis 4.000 A

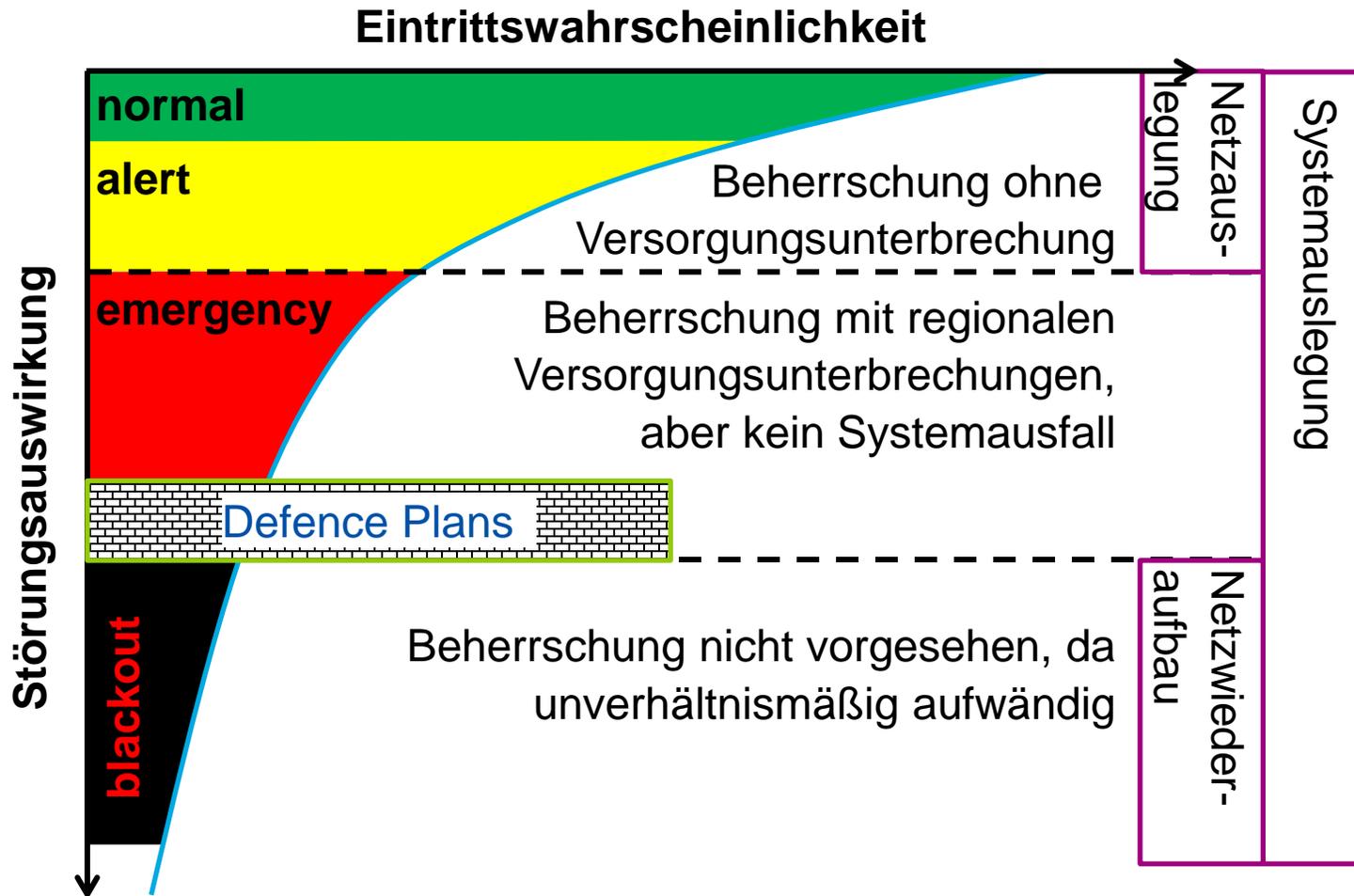
Spannung (U)

An allen Sammelschienen ist ein definiertes Spannungsband einzuhalten



Sollspannung 410 .. 419 kV
Betriebsspannung 390.. 420 kV

DIE NETZ- UND SYSTEMAUSLEGUNG ERFOLGT FÜR UNVORHERSEHBARE STÖREREIGNISSE



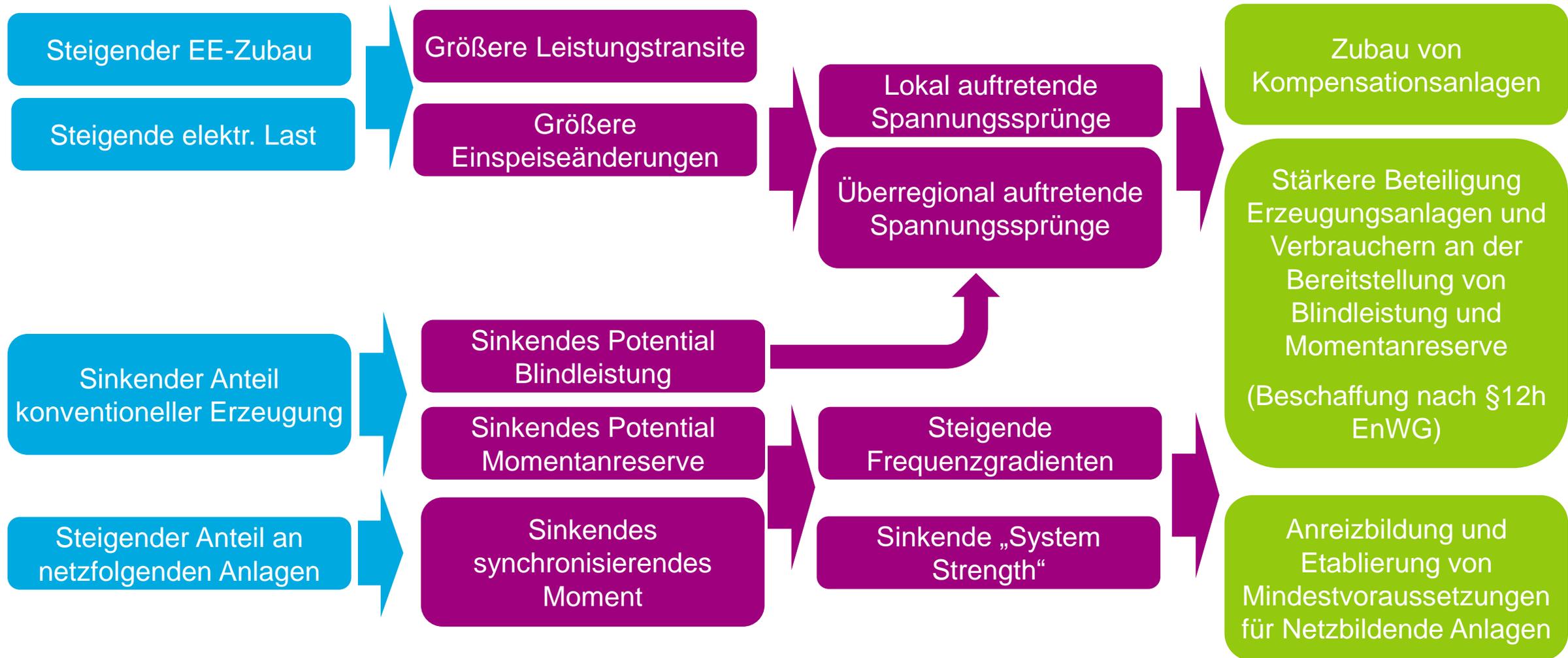
Netzauslegung: hinreichende Übertragungskapazitäten und Reserven bereitstellen

- Ausbau des Übertragungsnetzes

Systemauslegung: Strategien / Maßnahmen zur Beherrschung von Störungen implementieren

- Im Übertragungsnetz
- Bei allen Netznutzern

HERAUSFORDERUNGEN SYSTEMSTABILITÄT

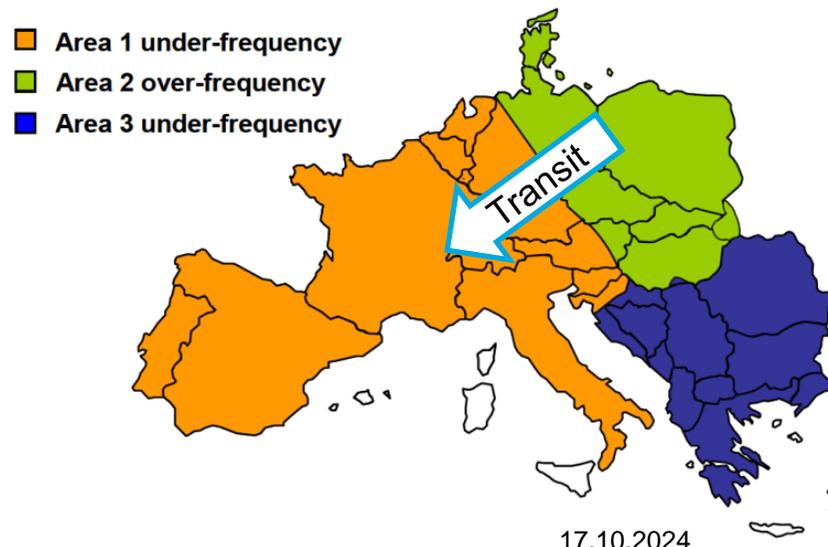


HERAUSFORDERUNGEN FREQUENZSTABILITÄT

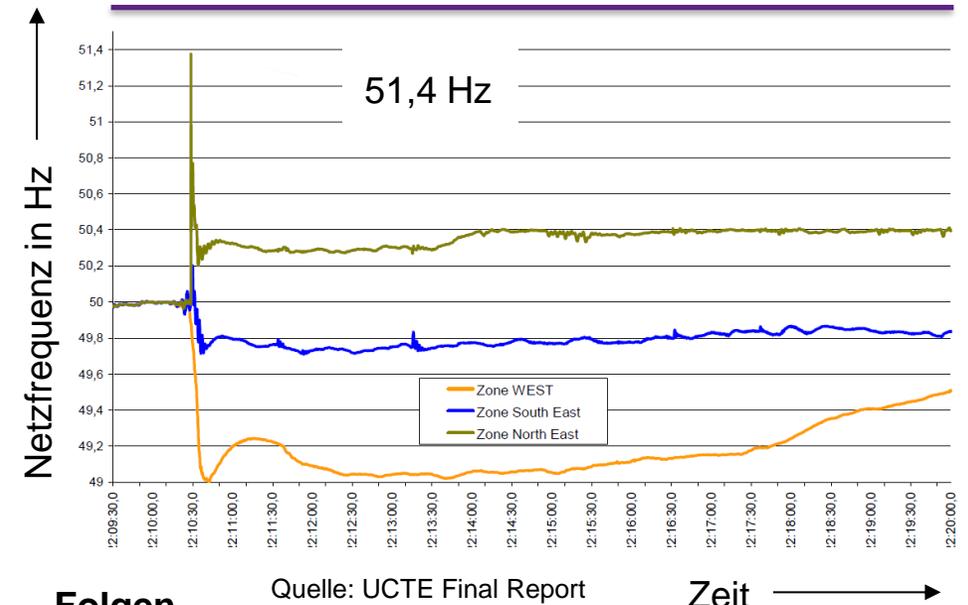
WAS AM 4. NOVEMBER 2006 GESCHAH ... FREQUENZSTABILITÄT

- **Ablauf**

- Planmäßige Abschaltung eines Stromkreises zur Schiffüberfahrt über die Ems
- Unvorhergesehener zusätzlicher Leistungsaustausch über die Parallelleitung
- Schaltmaßnahmen zur Reduzierung des Leistungsaustausches waren nicht ausreichend
- Schutzauslösung am überlasteten Stromkreis
- Kaskadierte Schutzauslösung weiterer Leitungen und Auftrennung des ENTSO-E Gebiets (System Split)



51,5 Hz dürfen nicht überschritten werden

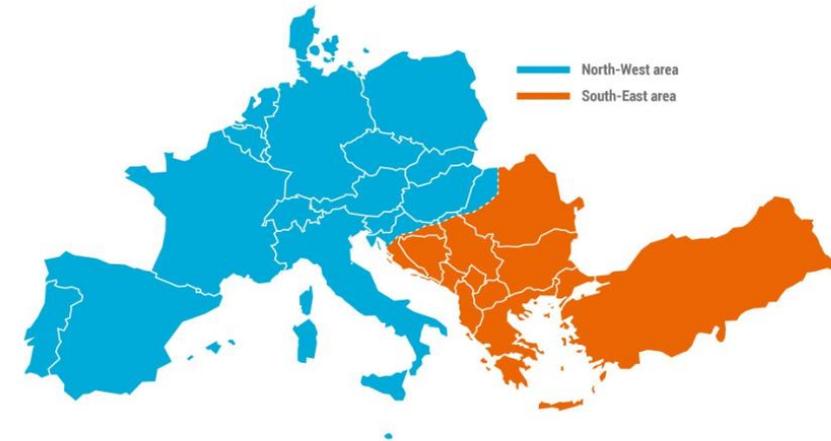


Folgen

- Leistungsungleichgewichte in den Teilsystemen
- Versorgungsunterbrechung bei bis zu 17 Mio. Haushalten
- Zwei Stunden bis zur Wiederherstellung des ordnungsgemäßen Verbundbetriebs

SYSTEMTRENNUNGEN SIND KEINE SELTENHEIT MEHR

- Historische Netzauftrennungen:
 - 04.11.2006 Mittel- und Südosteuropa
 - 08.01.2021 Balkan-Split
 - 24.07.2021 Iberische Halbinsel



[Abbildung 3] Systemauftrennung im europäischen Stromnetz am 8. Januar 2021

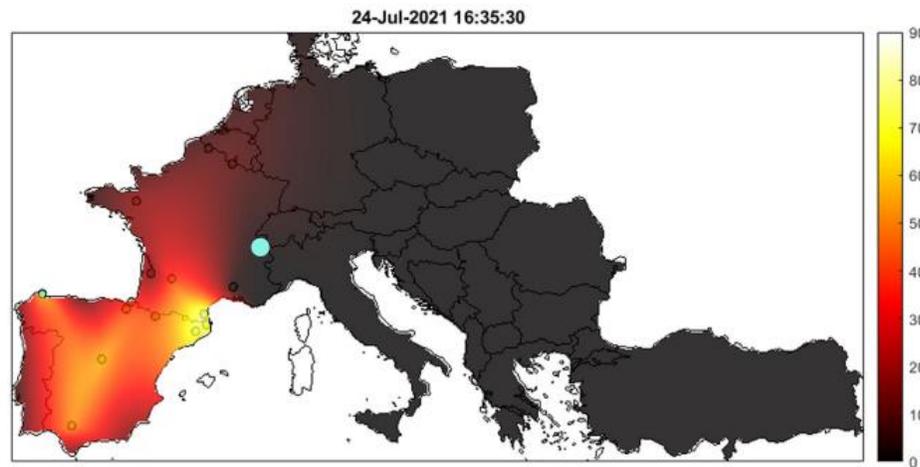
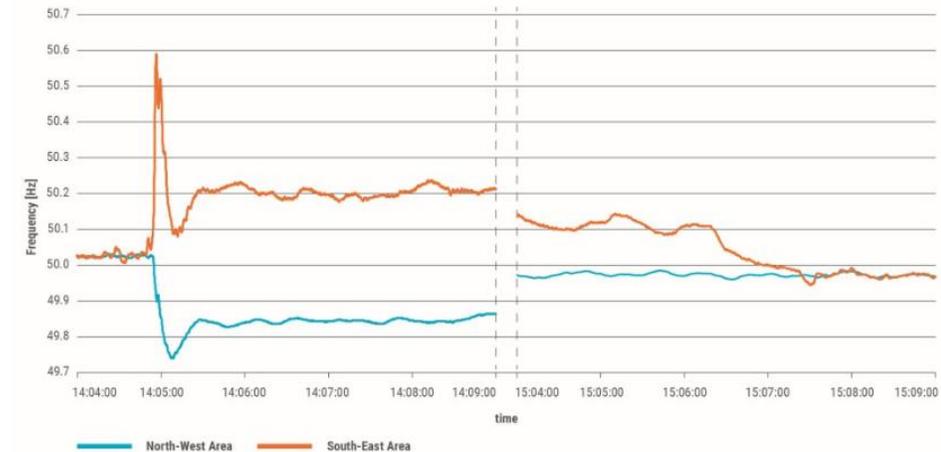


Figure 92: Phase angle heat map between Event #2 and #3.

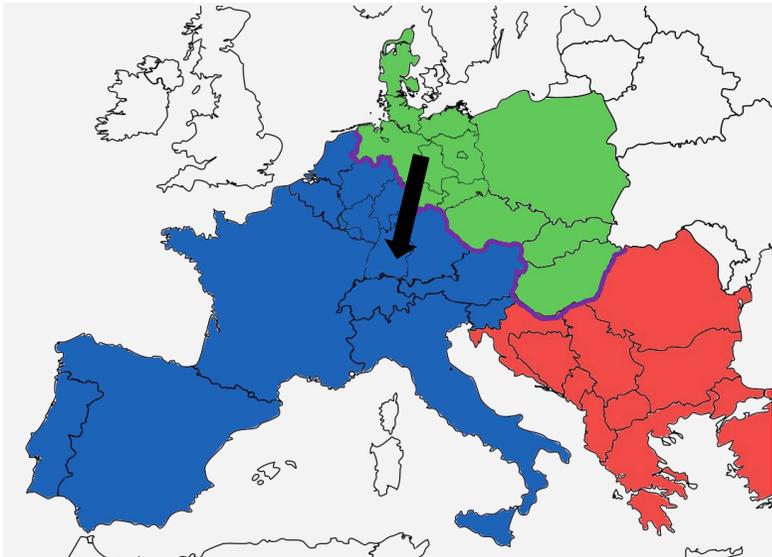
Quelle: Entso-e



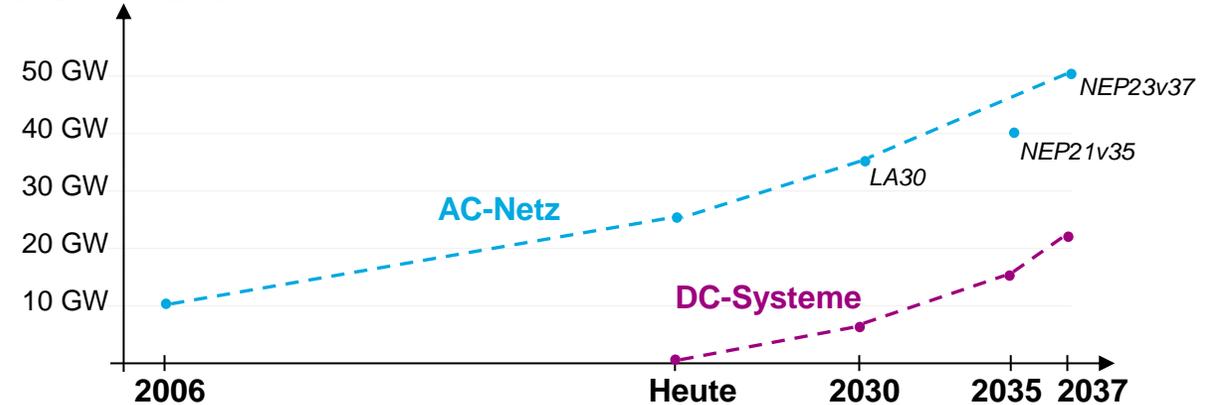
[Abbildung 4] Die Frequenz im europäischen Verbundnetz während der Vorfälle am 8. Januar direkt nach der Störung und kurz vor der Resynchronisierung

ZUKÜNFTIGE SYSTEMBEDARFE AN MOMENTANRESERVE

- Momentanreserve ist eine Leistungsreserve, die auftretende Leistungsungleichgewichte inhärent ausgleicht
- Bei Netzauftrennungen wird der Leistungstransport unterbrochen und es entstehen hohe Leistungsungleichgewichte



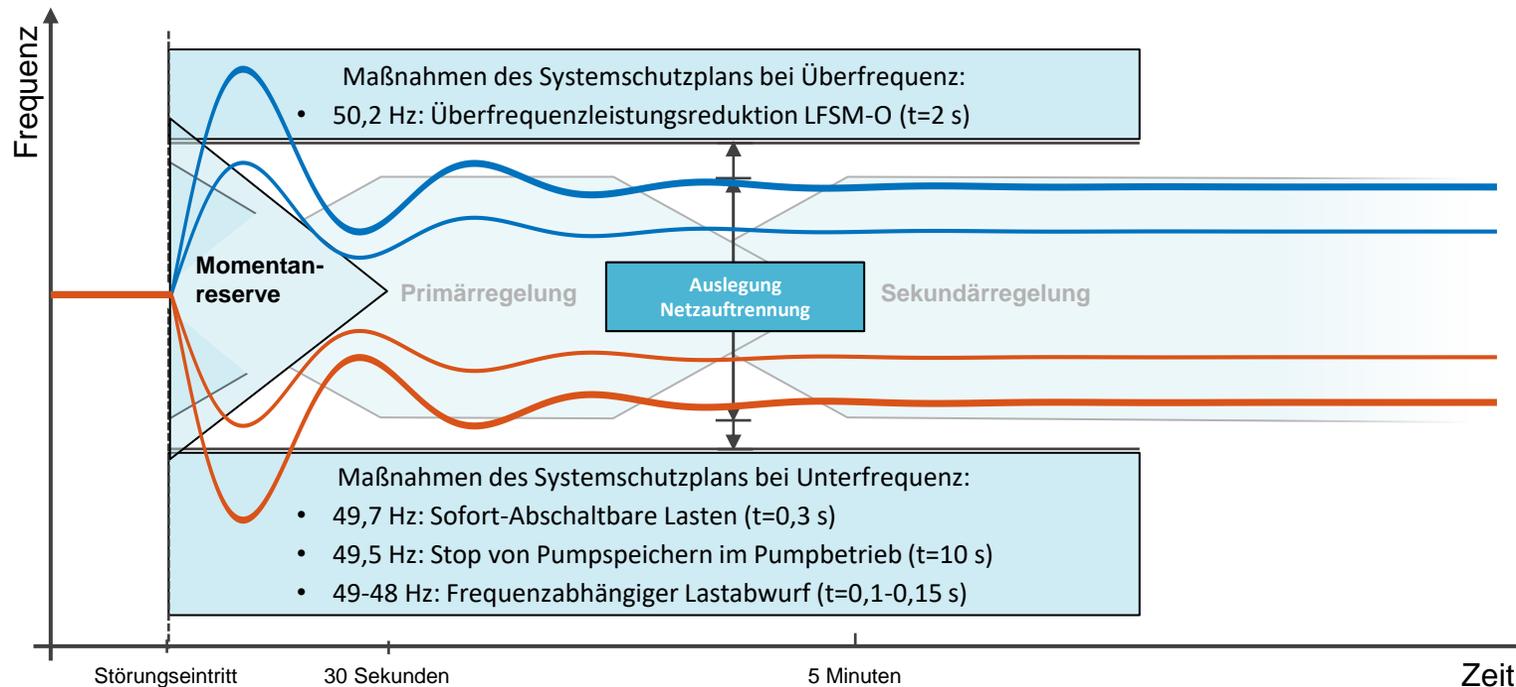
Nord-Süd-Leistungstransport
in Deutschland



- Zukünftige Systembedarfe an Momentanreserve steigen durch folgende Entwicklungen
 - Steigende Leistungstransite durch größer werdende Distanz zwischen Last und Erzeugung sowie Höherauslastung
 - Abschaltung konventioneller Kraftwerke mit Beitrag zur Momentanreserve

MAßNAHMEN ZUR BEHERRSCHUNG VON NETZAUFTRENNUNGEN

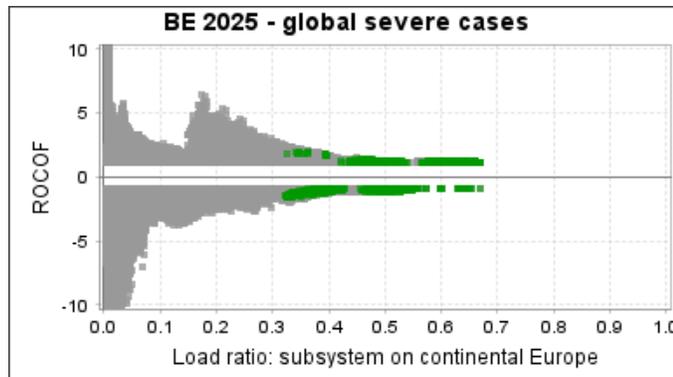
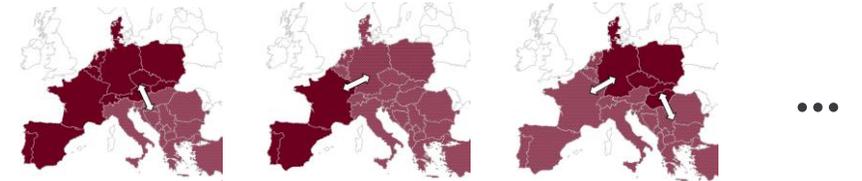
- Die Frequenzstabilität bei Netzauftrennungen wird durch mehrere aufeinander aufbauende Mechanismen sichergestellt
- Momentanreserve ist eine Leistungsreserve und wird in Höhe des auftretenden Leistungsungleichgewichts benötigt
- Die Momentanreserve ist durch nachgelagerte Maßnahmen (Regelleistung, Systemschutzplan) abzulösen



- Beherrschung von Netzauftrennungen erfordert Momentanreserve, einen funktionierenden Systemschutzplan sowie eine Robustheit gegenüber auftretenden Frequenzgradienten

ENTSO-E STUDIE ZU "GLOBAL SEVERE SYSTEM-SPLITS"

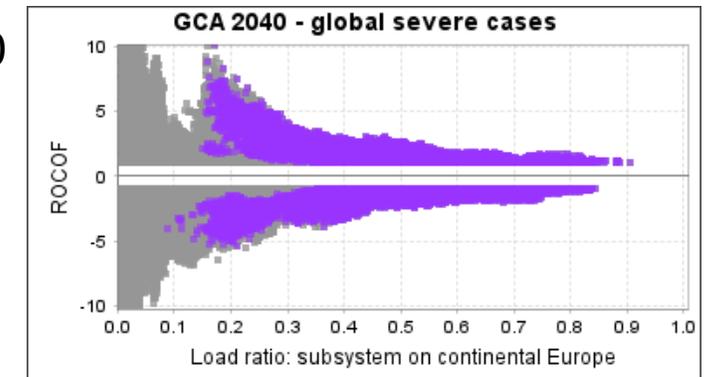
- "Global severe system splits" sind Netzauftrennungen mit einem Frequenzgradienten (RoCoF) von mehr als 1 Hz/s in zwei Teilnetzen
- Die identifizierten Netzauftrennungen werden durch den aktiven Systemschutzplan nicht beherrscht und können zum Blackout führen



2025

- Max. Frequenzgradient steigt
- Teilnetzgröße nimmt ab
- Anzahl kritischer Netznutzungsfälle steigt

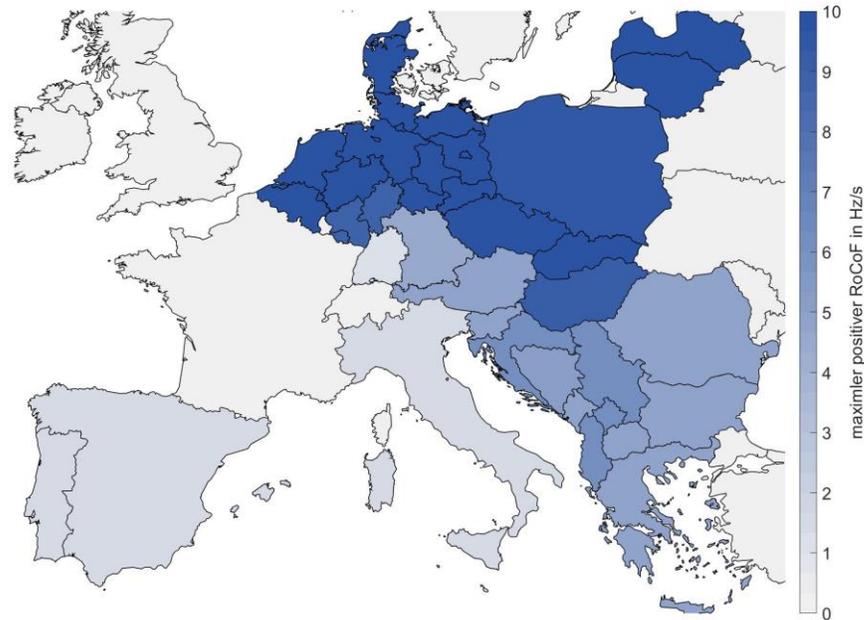
2040



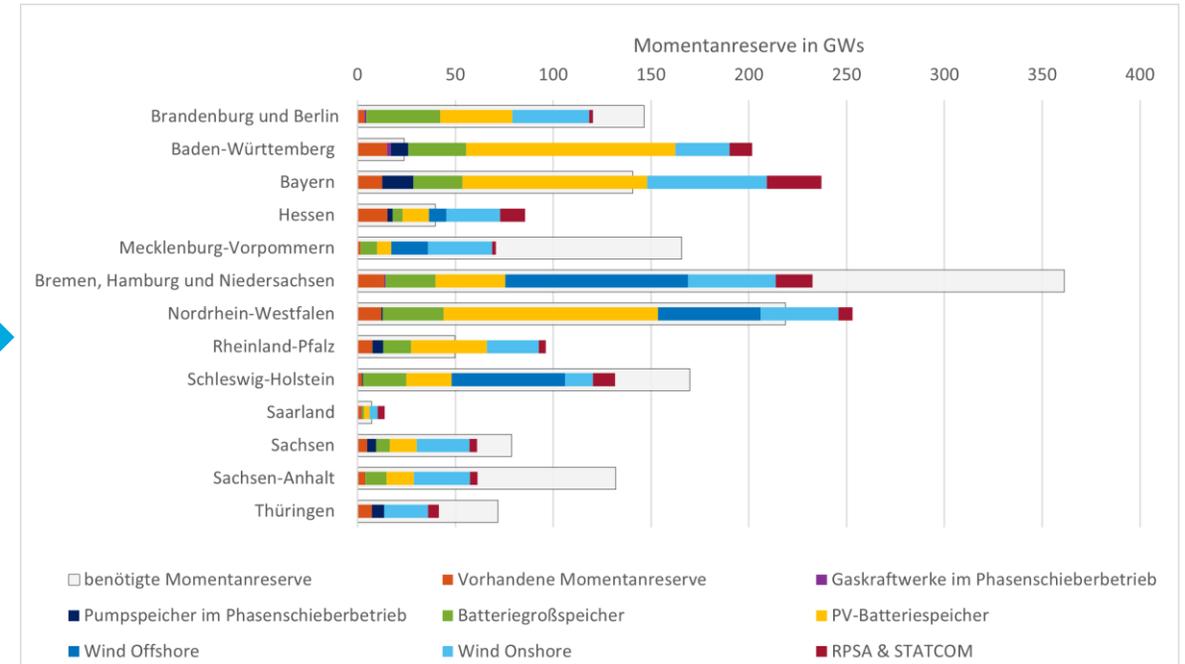
- Zur Beherrschung dieser identifizierten Netzauftrennungen sind Gegenmaßnahmen auf nationaler und europäischer Ebene (z.B. zusätzliche Momentanreserve) erforderlich
- Innerhalb von Ländern können weitere, noch kritischere Netzauftrennungen auftreten (nicht Teil der Studie)

ZUKÜNFTIGE SYSTEMBEDARFE AN MOMENTANRESERVE (NEP37V23)

Maximal auftretende positive Frequenzgradienten



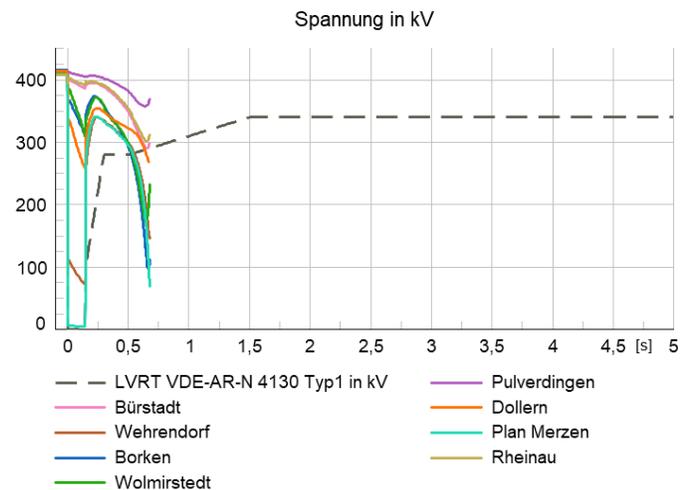
Bedarf und Potential an negativer Momentanreserve



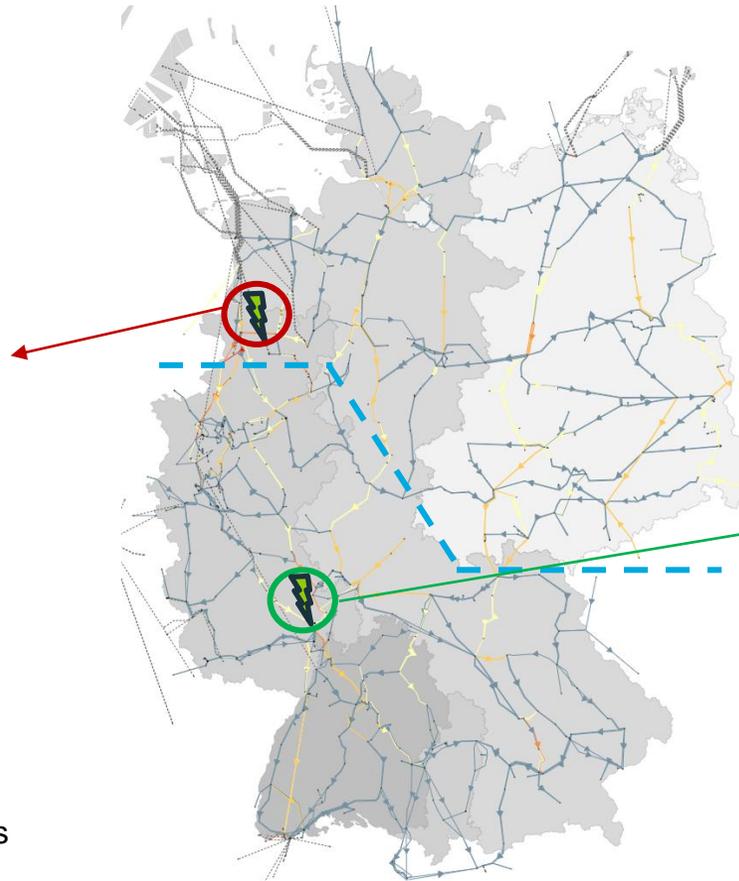
- Große regionale Unterschiede der Bedarfe und Potentiale an Momentanreserve
- Ausgewiesene Potentiale basieren auf optimistischen Annahmen hinsichtlich Einführung und techn. Fähigkeiten
- Spätere Einführung von netzbildenden Eigenschaften führt zu einer unmittelbaren Reduzierung der verfügbaren Potentiale

BERECHNUNGSERGEBNISSE IM BASISZENARIO

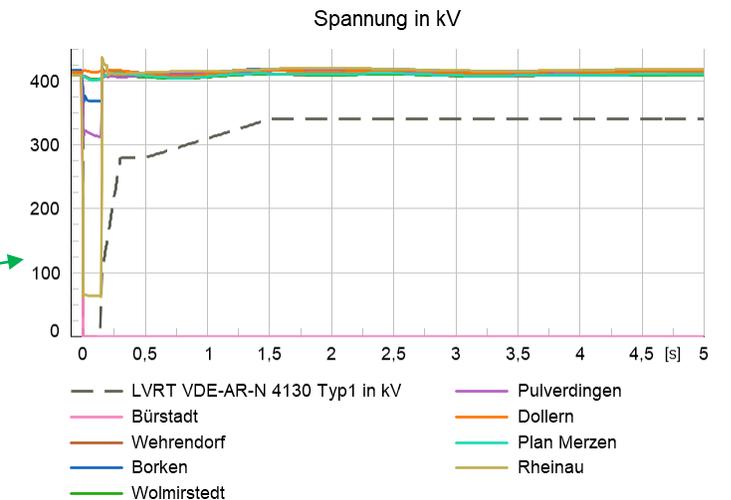
Einige (n-1)-Fehlerfälle mit konzeptgemäßer Fehlerklärungszeit und kritischere Fehler in den nordöstlichen Netzgruppen (oberhalb der Linie) können nicht sicher beherrscht werden



Dreipoliger Kurzschluss nahe Merzen mit Ausfall eines Stromkreises nach Wehrendorf mit konzeptgemäßer Fehlerklärung nach 150 ms.



In den südwestlichen Netzgruppen (unterhalb der Linie) werden (n-1)-Fehler als auch kritischere Fehler (Sammelschienen und Common Mode Fehler) sicher beherrscht

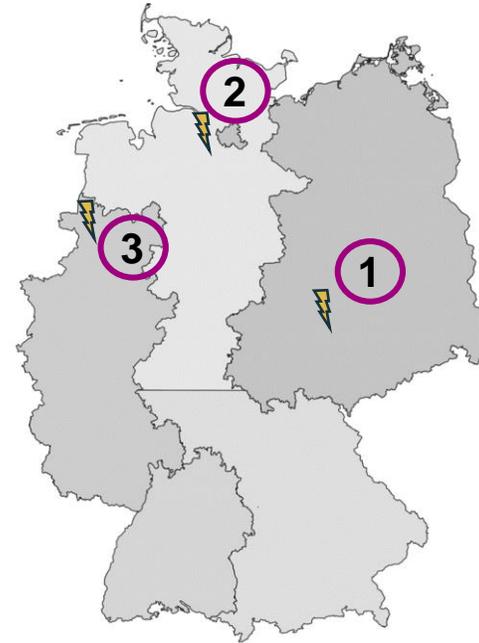
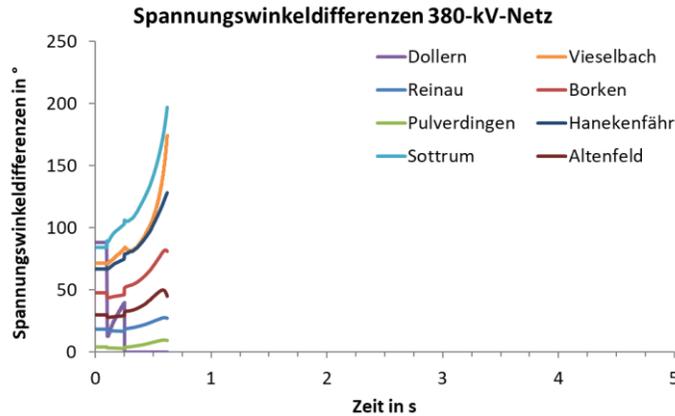


Dreipoliger Kurzschluss auf der Sammelschiene 1 des Umspannwerks Bürstadt mit konzeptgemäßer Fehlerklärung nach 150 ms und Freischaltung der Sammelschiene.

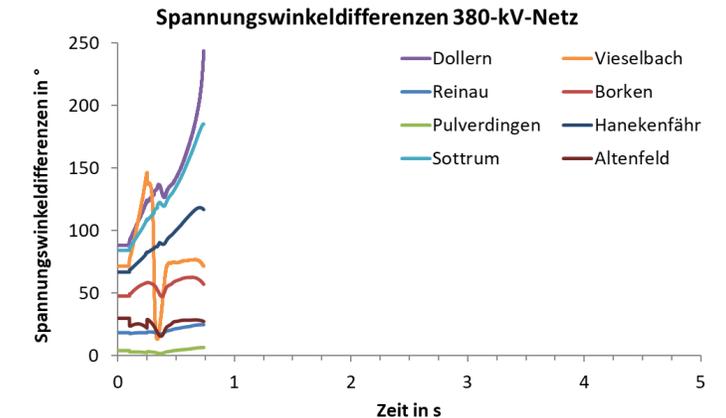
BETRACHTETE FEHLERFÄLLE

BASISFALL

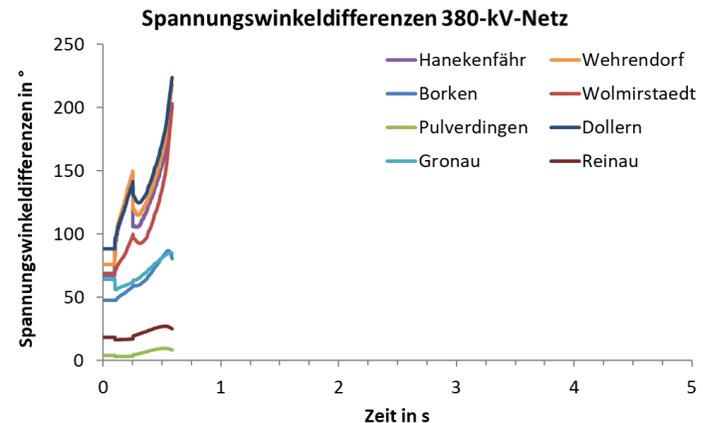
2. Sammelschienenfehler bei Dollern mit konzeptgemäßer Fehlerklärungszeit nach 150 ms und anschließender Freischaltung der Sammelschiene



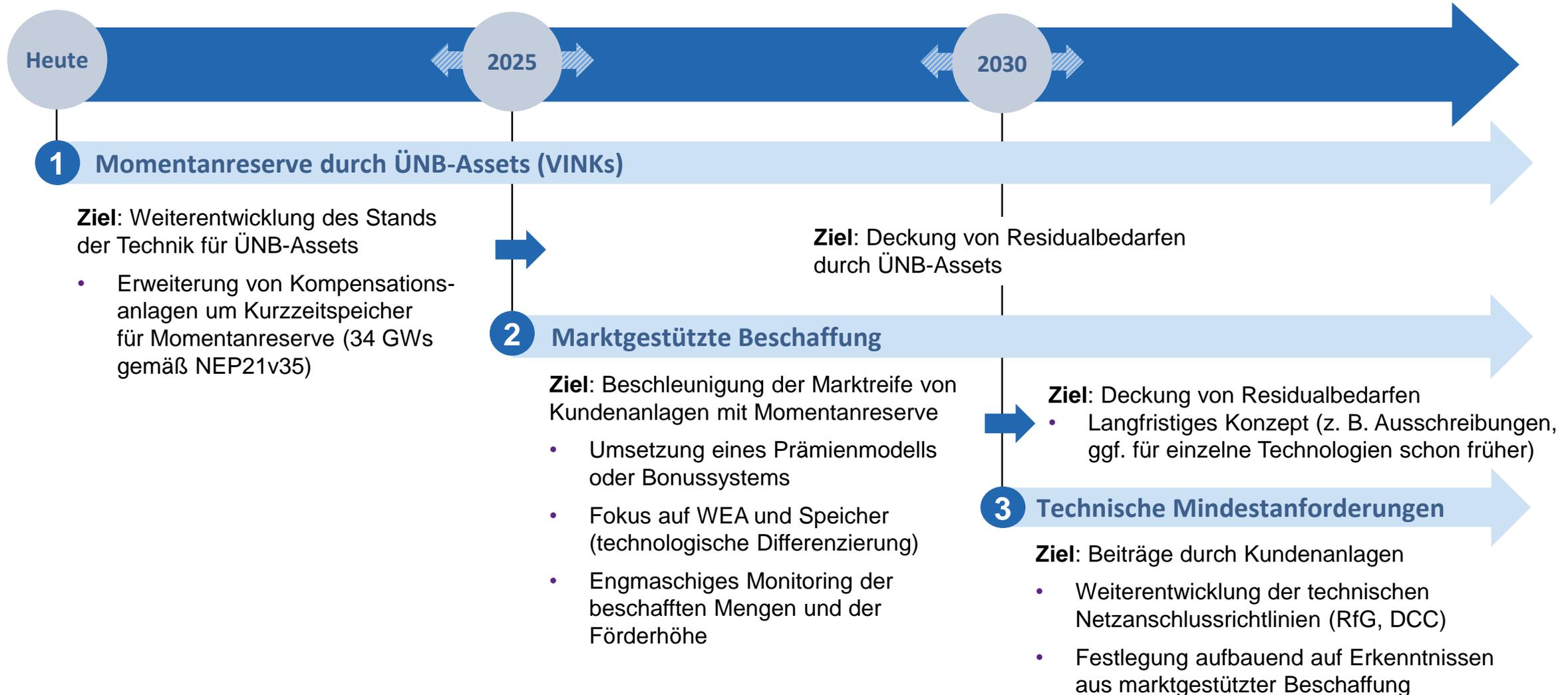
1. (n-1)-Fehler: Dreipoliger Kurzschluss nahe Lauchstädt mit Ausfall eines Stromkreises nach Vieselbach und konzeptgemäßer Fehlerklärungszeit nach 150 ms



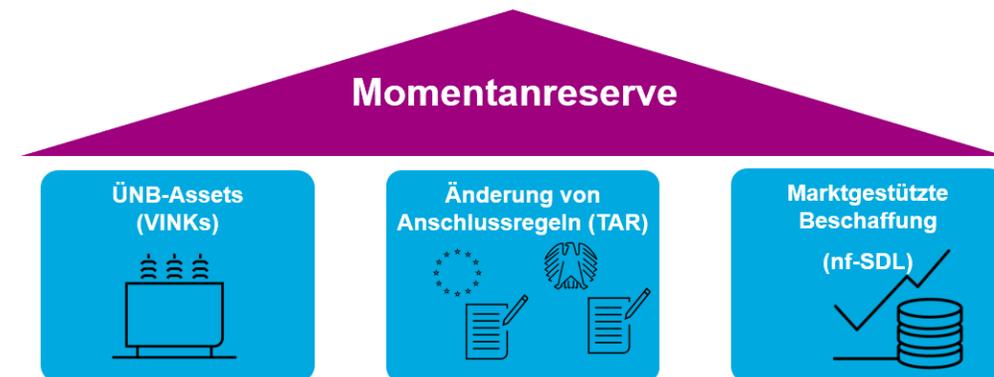
3. Mastumbruch mit Ausfall der Stromkreise Uentrop Nord, Roxel Ost, Hanekenfähr-Gronau und Gronau West mit konzeptgemäßer Fehlerklärungszeit von 150 ms

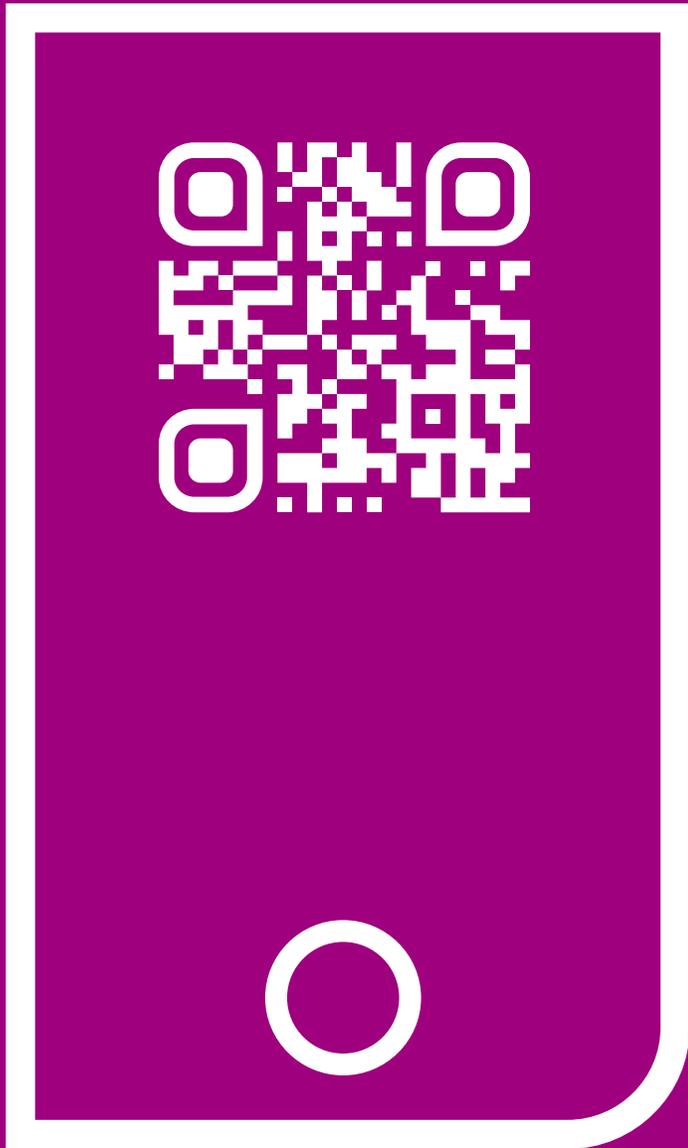


VORSCHLAG ZUR ZUKÜNFTIGEN BESCHAFFUNG VON MOMENTANRESERVE ÜBER 3 SÄULEN



- Die Systemänderungen fordern die Systemstabilität in verschiedenen Bereichen heraus:
 - Frequenzstabilität, weil nicht genug Trägheit im Verhältnis zu Leistungsungleichgewichten vorhanden ist
 - Spannungsstabilität, weil hohe und wechselhafte Ströme über die Leitungen zu extremen und stark schwankenden Bedarfen führen
 - Polradwinkelstabilität, weil nicht ausreichend Trägheit oder ggf. nicht ausreichend Blindleistung vorhanden ist
 - Stromrichterstabilität, weil zu viele „netzgeführte Erzeugungsanlagen“ sich nicht an einem Netz synchronisieren können, wenn es keine Anlagen mehr gibt, die eine „starke/starre“ Netzspannung vorgeben können
- Um den Herausforderungen entgegenzutreten, müssen alle Systemteilnehmer sich einen Beitrag zur Systemstabilität leisten
- Die deutschen Übertragungsnetzbetreiber arbeiten an der Umsetzung eines 3-Säulen Ansatzes:
 - Aufbau eigener Assets (Blindleistungskompensationsanlagen, rotierende Phasenschieber, HGÜs)
 - Änderung von Anforderungen an Erzeugungsanlagen und Verbraucher zur Bereitstellung von Stabilitätsbeiträgen
 - Marktliche Beschaffung (Jeder Anlagenbetreiber, der die Systemstabilität über das Mindestmaß hinaus zusätzlich stützen kann, wird vergütet)





VIELEN DANK FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT!

Sie suchen nach einer verantwortungsvollen Aufgabe und haben Lust, die Energiewende mit uns zu gestalten? **Jetzt bewerben!**