



Friedrich-Alexander-Universität
Lehrstuhl für
Elektrische Energiesysteme



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Luther
Cauerstr. 4 | Haus 1
91058 Erlangen

Versorgungsunterbrechung und Netzwiederaufbau auf der iberischen Halbinsel am 28. und 29. April 2025

Faktenanalyse auf Basis öffentlich verfügbarer Daten und Informationen

M.Sc. Simon Linnert

M.Sc. Ilya Burlakin

M.Sc. Georg Kordowich

Dr.-Ing. Gert Mehlmann

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Luther

Erlangen, 12. Mai 2025

(aktualisiert am 16. Mai 2025)

Vorwort

Am 28. April 2025 ereignete sich eine der bisher folgenschwersten Störungen im kontinentaleuropäischen Übertragungsnetz, die zu einem großflächigen Stromausfall auf der iberischen Halbinsel führte. Die Ursachen der Großstörung, der detaillierte Ablauf der Ereignisse sowie der anschließende Netzwiederaufbau werden aktuell von den beteiligten Übertragungsnetzbetreibern und dem *European Network of Transmission System Operators* (ENTSO-E) detailliert untersucht.

Der vorliegende Bericht fasst den aktuellen Stand der verfügbaren Informationen zu den Ereignissen zusammen und bietet eine systemorientierte Analyse zur Abfolge und den Konsequenzen der Störung. Alle Angaben wurden sorgfältig recherchiert, überprüft und mit den entsprechenden Quellen dokumentiert. Dennoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich im weiteren Verlauf der Untersuchungen einzelne bereits veröffentlichte Informationen als unzutreffend erweisen.

In einem abschließenden Fazit werden wesentliche Aspekte und Maßnahmen zusammengefasst, um die zukünftige Versorgungs- und Systemsicherheit im europäischen Übertragungsnetz zu gewährleisten und die Resilienz der Systeme nachhaltig zu erhöhen.

Empfohlene Zitierweise:

S. Linnert, I. Burlakin, G. Kordowich, G. Mehlmann, M. Luther, „*Blackout and system restoration on the Iberian Peninsula on April 28 and 29, 2025 - factual analysis based on publicly available data and information*“, Report, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), May 12, 2025

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Stellungnahmen der Übertragungsnetzbetreiber	5
2.1	European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E)	5
2.2	Red Eléctrica de España (REE)	5
2.3	Redes Energéticas Nacionais (REN).....	5
2.4	Réseau de Transport d'Electricité (RTE).....	6
3	Einordnung der Datengrundlage	7
4	Ausgangssituation: Leistungsbilanzen und grenzüberschreitende Stromflüsse	8
5	Störungseintritt und -folgen	10
6	Netz- und Versorgungswiederaufbau	15
7	Fazit und Handlungsempfehlungen.....	17
	Danksagung.....	20
	Literaturverzeichnis	21

1 Einleitung

Am 28. April 2025 um 12:33 MESZ ereignete sich eine Großstörung im elektrischen Energieversorgungssystem der iberischen Halbinsel. Insgesamt waren etwa 60 Millionen Menschen von dem Ausfall der Stromversorgung betroffen. Der spanische Premierminister Sánchez berichtete von einem Verlust von 15 GW Stromerzeugung binnen 5 Sekunden, was etwa 60 % des Bedarfs zu diesem Zeitpunkt entsprach [1]. Die publizierten Daten des spanischen Übertragungsnetzbetreibers (ÜNB) Red Eléctrica de España (REE) zeigen einen Planbedarf von ca. 25 GW vor der Störung um 12:30 Uhr MESZ, wohingegen die tatsächliche Erzeugung um 12:35 Uhr MESZ bei 12,7 GW lag [2]. Um 12:38 Uhr MESZ hat sich das iberische Netz vom kontinentaleuropäischen Netz getrennt [3]. Am 29.04 um 07:00 Uhr war die Versorgung wieder nahezu vollständig hergestellt, wobei Gas- und Wasserkraftwerke sowie die Kuppelleitungen zwischen Frankreich, Spanien und Marokko entscheidend für den Netzwiederaufbau waren [3-5].

Die bisher verfügbaren Berichte deuten darauf hin, dass der Zusammenbruch des Stromnetzes durch plötzliche und massive Erzeugungsverluste ausgelöst wurde. Dies führte zu einem Frequenzabfall auf der iberischen Halbinsel und der Trennung vom kontinentaleuropäischen Verbundnetz. Derzeit liegen keine Informationen zur automatisierten Lastabwürfen vor. Für eine erfolgreiche Primärregelung war der Frequenzgradient zu hoch. Nach den europäischen Network Codes liegt die Aktivierung der Primärregelleistung unter 2 Sekunden. Bis zur vollständigen Bereitstellung kann es hingegen bis zu 30 Sekunden dauern [6]. Die genauen Ursachen für den Ausfall der Erzeugung sind zum jetzigen Zeitpunkt nicht bekannt. Der portugiesische Übertragungsnetzbetreiber Redes Energéticas Nacionais (REN) gab als Ursache für die Abschaltung der Erzeuger in Portugal signifikante Spannungsschwankungen in Spanien an [4]. Darüber hinaus wird in [7] von überregionalen Netzpendelungen (engl.: Inter-Area-Oscillations) berichtet.

Die spanischen und portugiesischen Behörden sowie REN weisen die in den Medien verbreiteten Behauptungen entschieden zurück, ein atmosphärisches Phänomen habe den Ausfall verursacht. Ebenso schließt REE einen Cyberangriff aus [8]. Am 29. April 2025 eröffnete das zentrale Ermittlungsgericht Nr. 4 der Audiencia Nacional ein Verfahren um zu klären ob der landesweite Stromausfall durch einen Cyberangriff auf kritische Infrastrukturen verursacht wurde. Ein solcher Vorfall könnte nach Artikel 573 des spanischen Strafgesetzbuches als terroristischer Akt eingestuft werden. Der Richter ordnete an, dass sowohl das Nationale Kryptologische Zentrum (CCN) als auch Red Eléctrica innerhalb von zehn Tagen technische Berichte über die Ursachen des Ausfalls vorlegen müssen. Jedoch betonen die Ermittler, dass es nach aktuellem Stand keine dahingehenden Hinweise gibt [9-11].

2 Stellungnahmen der Übertragungsnetzbetreiber

Noch am Tag der Großstörung bezogen die mittelbar und unmittelbar betroffenen ÜNBs Spaniens (REE), Portugals (REN) und Frankreichs (RTE) sowie der Verbund europäischer Übertragungsnetzbetreiber (ENTSO-E) Stellung zu den Vorgängen. Nachfolgend wird ein Überblick dieser ersten Einordnungen gegeben.

2.1 European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E)

ENTSO-E gab noch am 28.04.2025 bekannt, dass „kurz nach 12.30 Uhr MESZ ein größerer Zwischenfall in den Stromnetzen Spaniens und Portugals aufgetreten ist“. Dieser führte zu Stromausfällen in beiden Ländern und kurzzeitig auch in den nahegelegenen französischen Grenzgebieten. Laut ENTSO-E wurden umgehend die im Rahmen der Netzwiederaufbaukonzepte vorgesehenen Prozesse eingeleitet. Dabei koordinierten die spanischen und portugiesischen ÜNBs die Wiederherstellung der Energieversorgung mit Hilfe von Wasserkraftwerken und Unterstützung der Nachbarländer Frankreich und Marokko [12].

2.2 Red Eléctrica de España (REE)

Spaniens ÜNB verkündete gegen 16:00 Uhr MESZ einen nationalen „cero energético“, den vollständigen Systemzusammenbruch der elektrischen Energieversorgung. Gegen 17:00 Uhr MESZ teilte REE über die sozialen Netzwerke mit, dass die Stromversorgung in Katalonien, Aragonien, dem Baskenland, Galicien, La Rioja, Asturien, Navarra, Kastilien und León, Extremadura und Andalusien bereits wiederhergestellt sei. Etwa eine Stunde später meldete die REE, dass weitere Gebiete in Madrid, Valencia, Murcia und Kastilien-La Mancha hinzukamen. Gegen 04:00 Uhr morgens am Folgetag wurden 100 % der Umspannwerke des Übertragungsnetzes wieder versorgt. Um 07:00 Uhr MESZ konnte 99,95 % des Verbrauchs gedeckt werden [13].

2.3 Redes Energéticas Nacionais (REN)

Kurze Zeit nach Störungseintritt bestätigte der portugiesische ÜNB den „corte maciço“, den vollständigen Zusammenbruch der elektrischen Energieversorgung der iberischen Halbinsel ab 12:33 Uhr MESZ. Gleichzeitig verkündete REN die Aktivierung aller Netzwiederaufbaupläne in Kooperation mit den Erzeugern und europäischen Akteuren sowie den Beginn der Ermittlung der Ursachen [14].

Die kommunizierten Netzwiederaufbaumaßnahmen umfassten den Schwarzstart des 990-MW-Gaskraftwerks „Tapada do Outeiro“ für den Versorgungswiederaufbau im Norden Portugals. Für den Versorgungswiederaufbau des Südens wurden das 159-MW-

Wasserkraftwerk „Castelo de Bode“ sowie die spanisch-portugiesischen Verbundkupplungen eingesetzt [4, 5, 15].

Im Laufe des Tages gab REN auch erste Erkenntnisse zu der technischen Ursache der Störung bekannt. So führte eine „signifikante Spannungszillation“ im spanischen Netz zur Anregung der Regler und Auslösung der Schutzsysteme portugiesischer Erzeugungsanlagen. Dies führte zu deren Ausfall und letztlich dem vollständigen Blackout [4]. Darüber hinaus stellte REN klar, nicht an Spekulationen beteiligt gewesen zu sein, dass die Netzstörung von einem atmosphärischen Phänomen ausgelöst worden sei [8].

2.4 Réseau de Transport d'Electricité (RTE)

Der französische Übertragungsnetzbetreiber RTE stützte das spanische Netz durch die Bereitstellung von bis zu 2 GW über die grenzüberschreitenden Kuppelleitungen. Nachdem sich das iberische Netz um 12:38 Uhr MESZ vom kontinentaleuropäischen Netz abspaltete, wurde um 13:30 Uhr MESZ die 400-kV-Verbindung zwischen Frankreich und Katalonien wieder in Betrieb genommen. Die französisch-spanischen Kuppelleitungen ermöglichten die Versorgung der iberischen Halbinsel nach und nach wiederherzustellen. Die Versorgungsunterbrechungen im Südwesten Frankreichs und im Baskenland beschränkten sich auf einige Minuten [3].

3 Einordnung der Datengrundlage

In den nachfolgenden Kapiteln 4-6 wurden öffentlich verfügbare Daten der Transparency Plattform der ENTSO-E verwendet [16]. Dies betrifft die Abbildungen 1, 2 und 6 – 9. Hierbei handelt es sich um von den Übertragungsnetzbetreibern gemeldete Werte in einem 1-h Intervall. Darüber hinaus sind in [16] die Transite nach Marokko nicht erfasst, da Marokko kein ENTSO-E Mitglied ist und damit nicht zur Datenbereitstellung nach EU-Verordnung Nr. 543/2013 verpflichtet ist. Insbesondere bei Störungseintritt können diese Daten daher von den tatsächlichen Leistungsdaten abweichen. Dennoch liefern die Daten wichtige Hinweise, insbesondere zum Netzwiederaufbau.

Hochaufgelöste Messdaten liegen derzeit nicht vor, sodass die nachfolgenden Darstellungen als eine erste Bestandsaufnahme zu verstehen sind.

4 Ausgangssituation: Leistungsbilanzen und grenzüberschreitende Stromflüsse

Die installierten Erzeugungskapazitäten Spaniens spiegeln den Wandel der Erzeugungslandschaft hin zu einer stärkeren Nutzung erneuerbarer Energien wider. Neben Erzeugungsanlagen aus fossilen Primärenergieträgern, wie Gas, Kohle und Kernenergie, spielen insbesondere Wind- und Photovoltaikanlagen eine zunehmende Rolle. Abbildung 1 verdeutlicht, dass im Jahr 2025 bereits 65,9 % der installierten Erzeugungskapazitäten von Solaranlagen, Wind Onshore sowie Wasserkraftwerken bereitgestellt wurden.

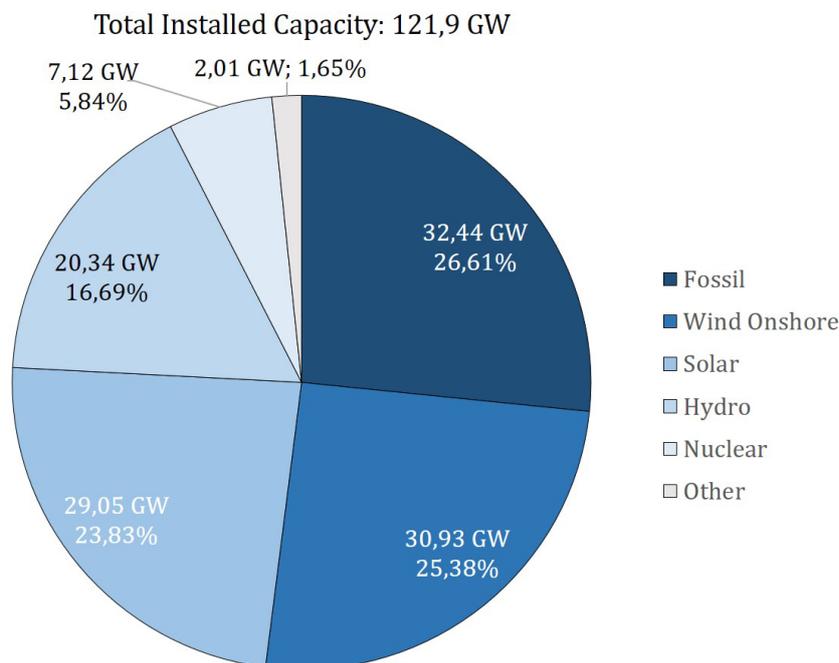


Abbildung 1: Installierte Erzeugungskapazitäten in Spanien (April 2025)

Die Stromerzeugung in Spanien war vor dem Fehlereintritt überwiegend von erneuerbaren Energien geprägt. Laut Angaben der REE entfielen beim Eintritt der Störung 59,8 % der Lastdeckung auf Photovoltaik, 10,6 % auf Windenergie sowie 10,5 % auf Kernenergie [17]. Vor Eintritt der Störung waren vier der sieben Kernkraftwerke in Betrieb [18]. Abbildung 2 zeigt die grenzüberschreitenden physikalischen Stromflüsse zwischen Spanien (ES) und dessen Nachbarländern Frankreich (FR) und Portugal (PT). Vor dem Störfall ist ein deutlicher Export aufgrund der hohen Photovoltaik-Erzeugung erkennbar.

Der sehr hohe Anteil erneuerbarer Energien führte zu einer geringen Massenträgheit des spanischen Energieversorgungssystems. Dies liegt daran, dass hierdurch der Anteil konventioneller Erzeuger mit Synchrongeneratoren, was den rotierenden Massen entspricht, sehr gering ist.

Date	28.04.2025	
Time	11:00 – 12:00 (CEST)	18:00 – 19:00 (CEST)
		
ES-FR	1303,7 MW	
FR-ES		1637,5 MW
ES-PT	2308,1 MW	
PT-ES		0,43 MW
ES-MAR	769,84 MW	
MAR-ES		17,92 MW

Abbildung 2: Grenzüberschreitende physikalische Stromflüsse

5 Störungseintritt und -folgen

Abbildung 3 zeigt den Frequenzverlauf in Kontinentaleuropa, gemessen in Spanien, Portugal, Lettland und Deutschland. Die Daten von Spanien, Portugal und Lettland wurden freundlicherweise von GRIDRADAR bereitgestellt, für Deutschland wurden die Aufzeichnungen der Messstation des Lehrstuhls für Elektrische Energiesysteme herangezogen. Bereits vor dem Erzeugungsausfall sind Oszillationen zu erkennen, wobei sich diese zunächst auf Spanien und Portugal beschränken. Zwischen 12:18 und 12:22 Uhr MESZ sind dann Inter-Area-Oscillations, überregionale Leistungs- und Frequenzpendelungen, zu erkennen. Die Oszillationen in Erlangen und Riga sind hierbei gegenphasig zu jenen in Porto und Malaga. Der Frequenzeinbruch ereignete sich allerdings erst um 12:33 Uhr MESZ aufgrund eines Erzeugungsausfalls. Nach Aussagen von REE ist hierfür der Ausfall von zwei Erzeugungsanlagen im Südwesten Spaniens, vermutlich von Photovoltaik-Anlagen, in einem zeitlichen Abstand von etwa 1,5 Sekunden verantwortlich [19, 20]. Abbildung 4 zeigt Frequenzen zum Zeitpunkt des Netzzusammenbruchs. Anhand der verfügbaren Messdaten sind zu diesem Zeitpunkt keine Inter-Area-Oscillations erkennbar, so dass die genaue Ursache nicht geklärt ist. In [21] wird von einem weiteren „Ereignis“ 19 Sekunden vor dem Netzzusammenbruch berichtet. Die Abbildung 5 bestätigt diese Meldung.

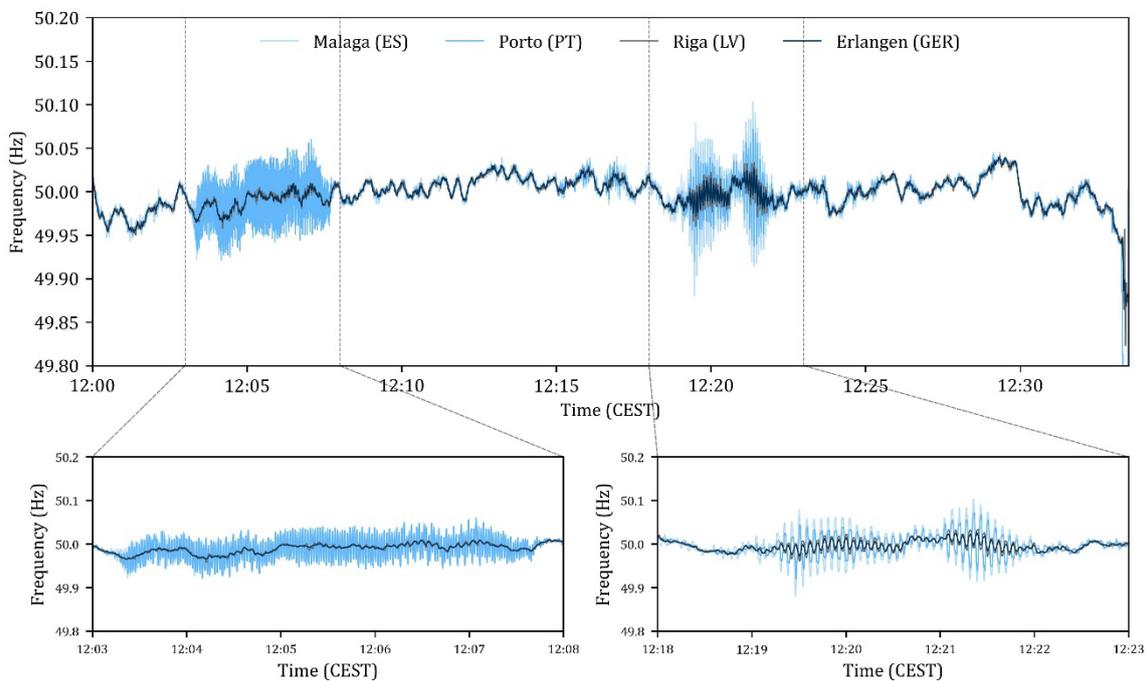


Abbildung 3: Oszillationen in den Frequenzgängen vor der Netzstörung

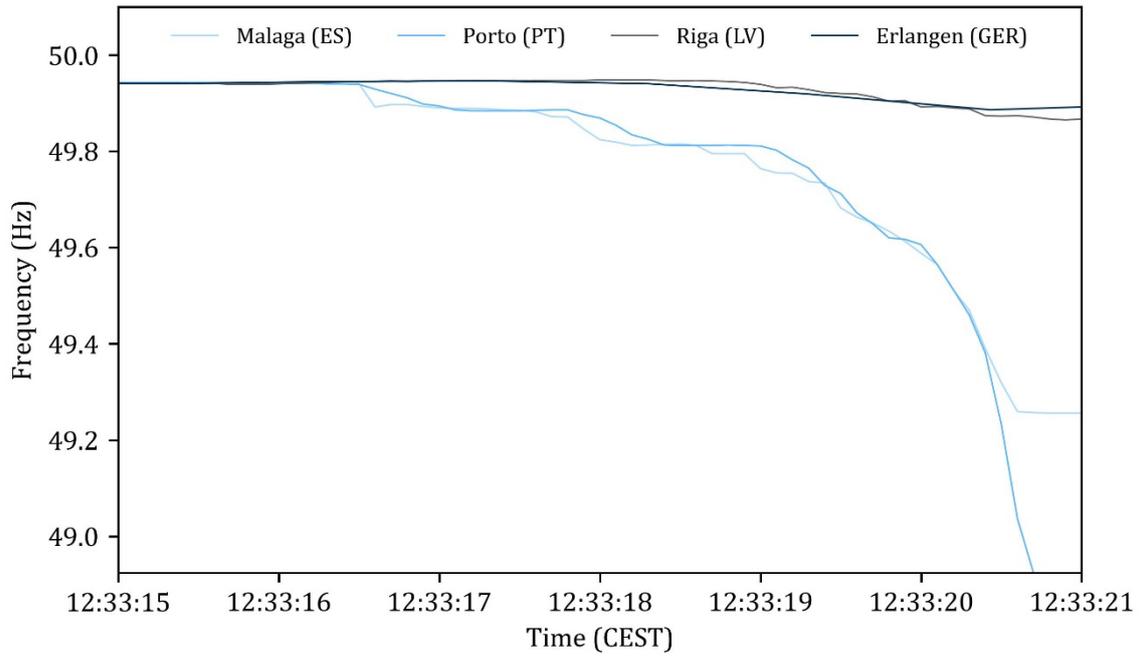


Abbildung 4: Frequenzgänge während der Netzstörung

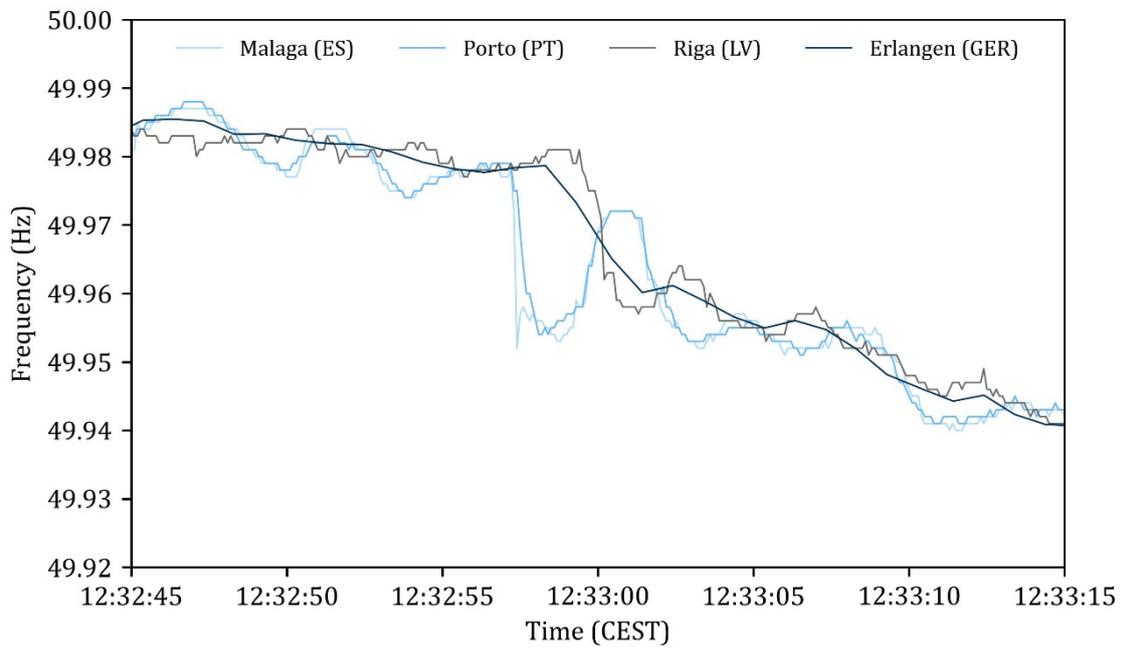


Abbildung 5: Frequenzgänge 30 Sekunden vor der Netzstörung

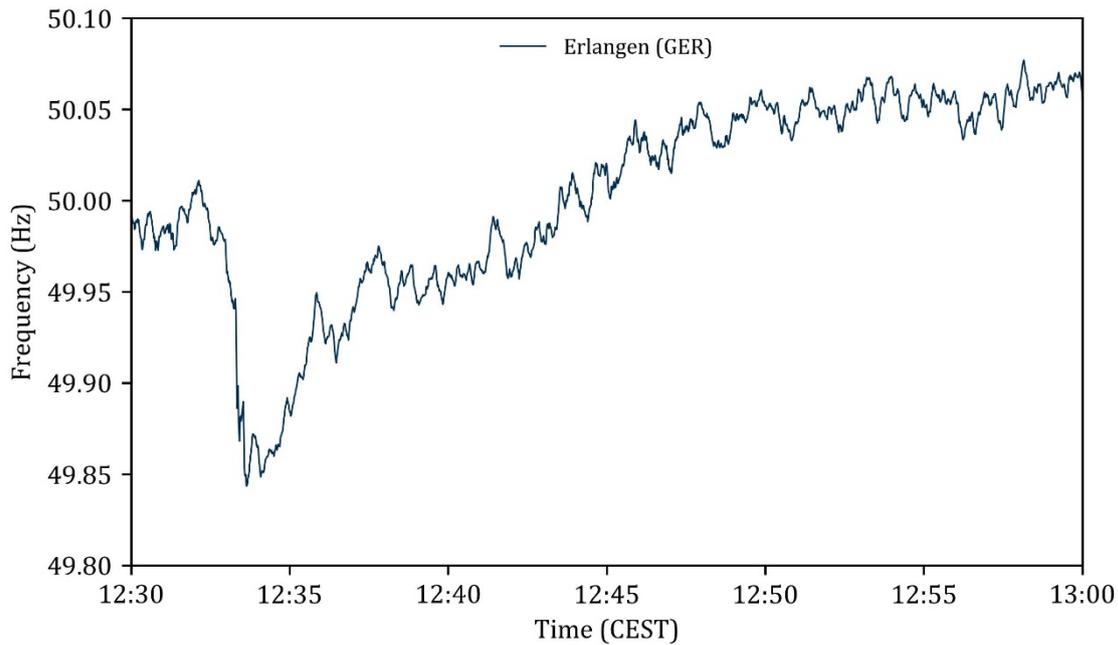


Abbildung 6: Frequenzgang in Deutschland in Folge der iberischen Netzstörung

Nach Angaben von REE und REN wurden durch die Netztrennung alle grenzüberschreitenden Stromflüsse eingestellt. Die Verbindungen mit Frankreich (mehrere 400-kV-Drehstromverbindungen, darunter zwei Ostkorridore bei Katalonien, Westverbindungen über das baskische Stromnetz sowie die HGÜ-Verbindung Baixas – Santa Llogaia) und die AC-Verbindung Ceuta-Algeciras zwischen Spanien und Marokko ging umgehend außer Betrieb. Das restliche kontinentaleuropäische Netz blieb hierdurch von der Störung weitgehend unbeeinträchtigt.

Auch Erzeugungsanlagen in Frankreich waren von dem Ereignis betroffen. Um 12:33 Uhr MESZ fiel zunächst das Pumpspeicherkraftwerk Montézic 2 und 3, mit einer Erzeugungskapazität von insgesamt 454 MW aus [22, 23]. Im Nachgang des Netzzusammenbruchs auf der iberischen Halbinsel, um 12:40 Uhr MESZ, trennte sich auch Reaktor 1 des Kernkraftwerks Golfech mit einer Erzeugungskapazität von 1.310 MW ungeplant vom Netz [24]. Die Ausfallmeldungen des Betreibers Électricité de France (EDF) erfolgten minutenscharf. Deshalb ist bislang nicht zu beurteilen, ob der Ausfall von Montézic 2 und 3 ebenfalls zum Stromausfall auf der iberischen Halbinsel beigetragen hat, oder wie Golfech 1 lediglich dessen Folge war. Am 9. Mai 2025 hat ENTSO-E anlässlich der Bekanntgabe der Mitglieder der Untersuchungskommission [25] eine ähnliche Abfolge der Ereignisse bestätigt.

Abbildung 6 zeigt die Verläufe der prognostizierten (Day Ahead, Intraday, Current) sowie gemessenen PV-Erzeugung (Actual), die im Folgenden zusammenfasst werden sollen [16]:

- *Day-Ahead Forecast*: Prognose der Erzeugung des Folgetags. Die Prognose wird um 18:00 Uhr MESZ am Vortag veröffentlicht und nachträglich nicht aktualisiert.
- *Intraday Forecast*: Die Prognose wird um 8:00 Uhr MESZ am Liefertag veröffentlicht und nachträglich nicht aktualisiert.
- *Current Forecast*: Stellt die aktuelle verfügbare Prognose dar und wird regelmäßig aktualisiert.
- *Actual Values*: Tatsächlich gemessene Einspeisung von Wind- und Solarstrom, die nach dem Lieferzeitraum veröffentlicht wird.

Vor dem Störfall stimmte die gemessene PV-Erzeugung mit den Prognosen nahezu überein. Kurz nach dem Ereignis kann ein PV-Erzeugungseinbruch um 15 GW festgestellt werden. Noch am Tag nach der Netzstörung, am 29.04.2025 um 12:00 Uhr, wurde nur etwa 50 % der prognostizierten Day-Ahead-Leistung der Photovoltaik erbracht.

In Abbildung 8 ist insgesamt ein Erzeugungsdefizit von ca. 15 GW zu erkennen. Trotz des Blackouts ist im spanischen Netzgebiet eine Last von ca. 10 GW gemeldet worden. Eine eindeutige Erklärung hierfür ist aus den bisherigen Recherchen nicht ersichtlich. Die Wiederversorgung der Endkunden erstreckte sich nach Abbildung 8 auf etwa 18 Stunden. Die Aussagen der REE [13] konnten mithilfe der erhobenen Daten bestätigt werden.

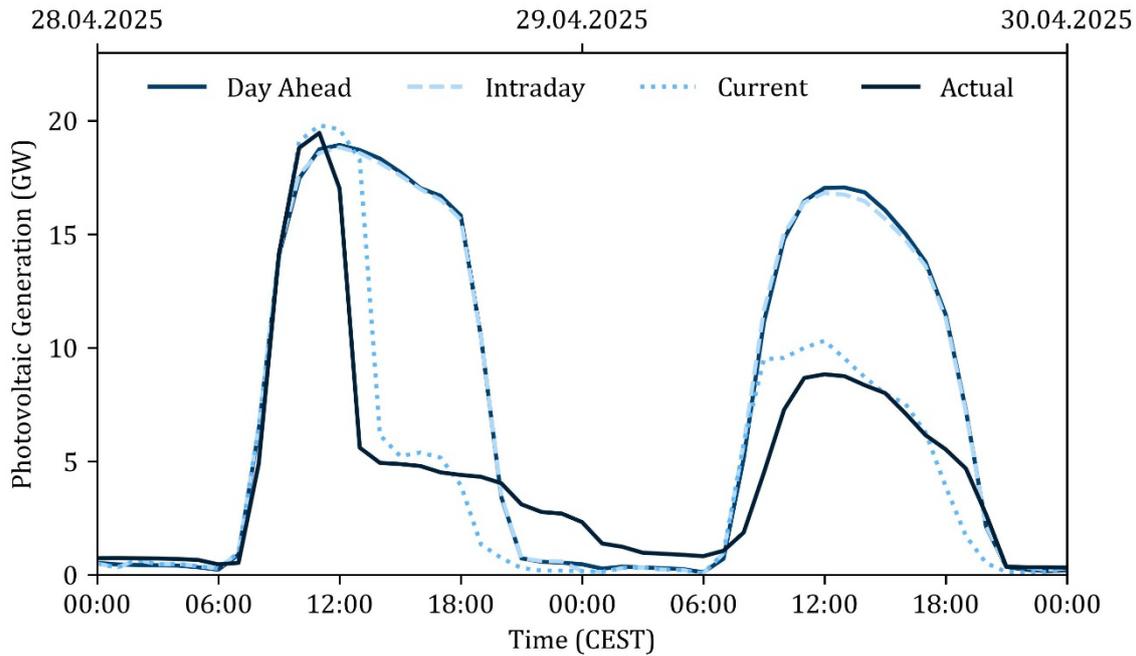


Abbildung 7: Photovoltaik Prognose und Erzeugung in Spanien

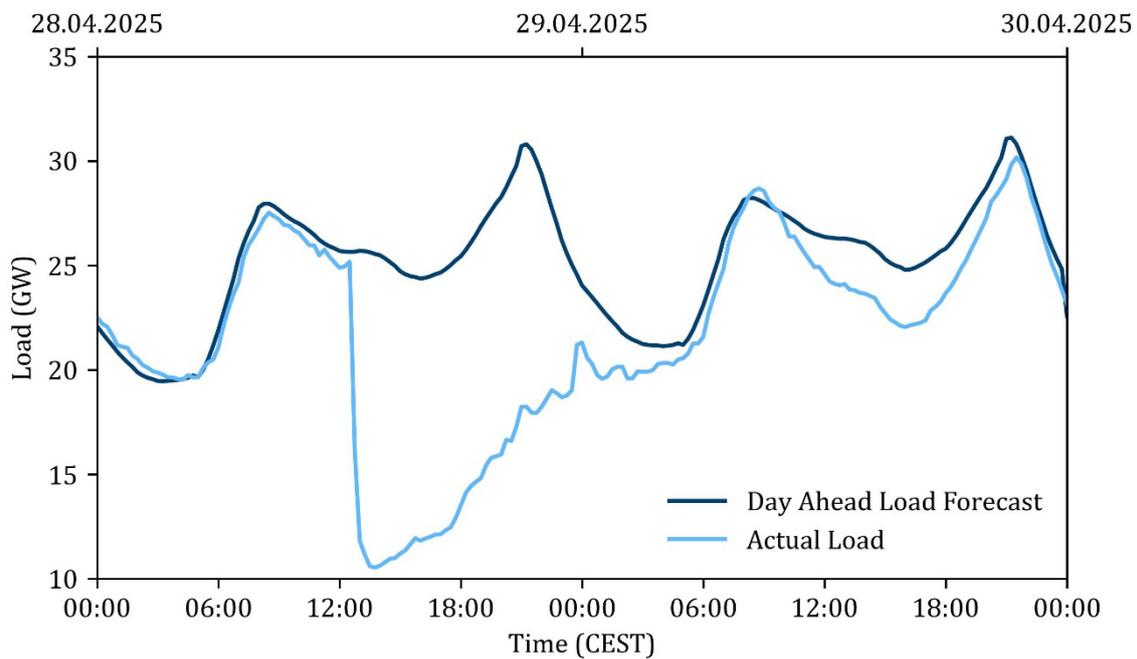


Abbildung 8: Lastprognose und Lastgang in Spanien

6 Netz- und Versorgungswiederaufbau

Für die Umsetzung des Netz- und Versorgungswiederaufbau wurden Schwarzstartprozesse eingeleitet. Diese umfassten im Wesentlichen die Aktivierung schwarzstartfähiger Kraftwerke, Unterstützung durch angrenzende Übertragungsnetze und die Notstromversorgung kritischer Infrastrukturen, unter Koordination von REE und REN. Dabei wurden zunächst Gas- und Wasserkraftwerke wieder in Betrieb genommen und externe Unterstützung angefordert.

Abbildung 9 zeigt, dass sich Kernkraftwerke nicht am Netzwiederaufbau beteiligt haben. Zuvor waren alle vier während des Störungseintritts in Betrieb befindlichen spanischen Kernkraftwerke mit einer Erzeugungsleistung von knapp 3,4 GW sicher abgeschaltet worden. Der Betrieb der Kühlsysteme wurde durch Notstromaggregate sichergestellt [2].

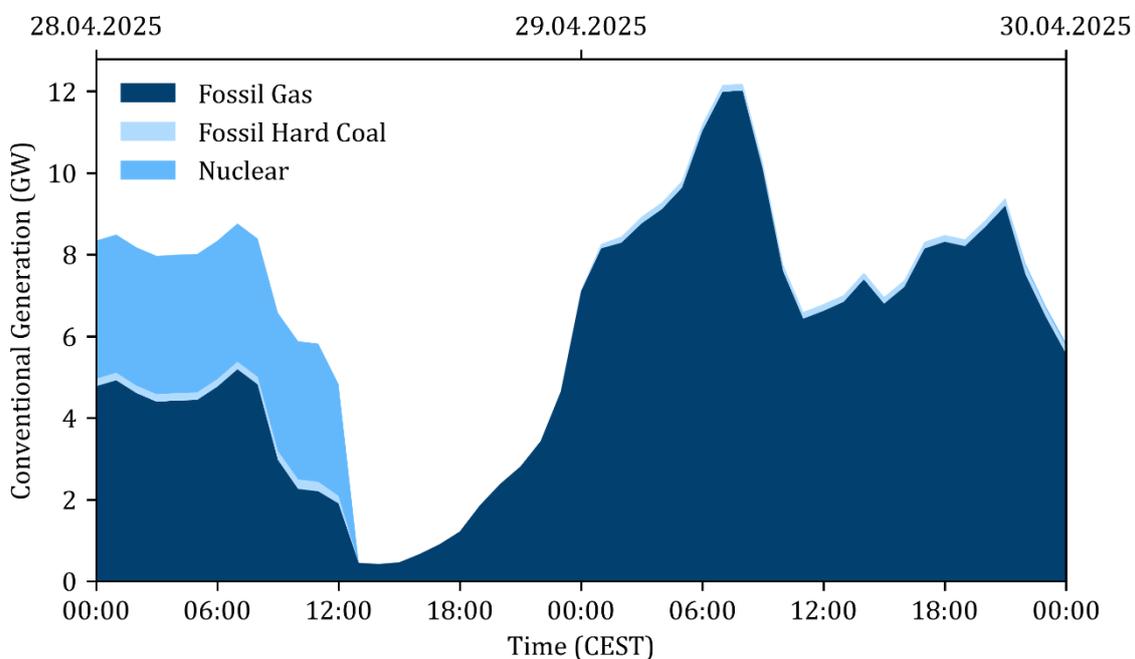


Abbildung 9: Fossile und nukleare Stromerzeugung in Spanien

Da Kernkraftwerke nicht für den Netzwiederaufbau eingesetzt werden konnten, wurde die Erzeugung aus Gaskraftwerken von rund 5 GW vor dem Störfall auf etwa 12 GW gesteigert. Gaskraftwerke stellten damit die wesentliche fossile Erzeugungsquelle dar, die aktiv zum Netzwiederaufbau beitrug.

Die Wasserkrafterzeugung trug ebenfalls einen wichtigen Beitrag zum Netzwiederaufbau bei. Das Erzeugungsprofil der spanischen Wasserkraftwerke in Abbildung 10 verdeutlicht, dass Pumpspeicher- und Stauanlagen gezielt für den Netzwiederaufbau eingesetzt wurden. Die Erzeugung aus Laufwasserkraftwerken hingegen blieb technologiebedingt weitgehend konstant.

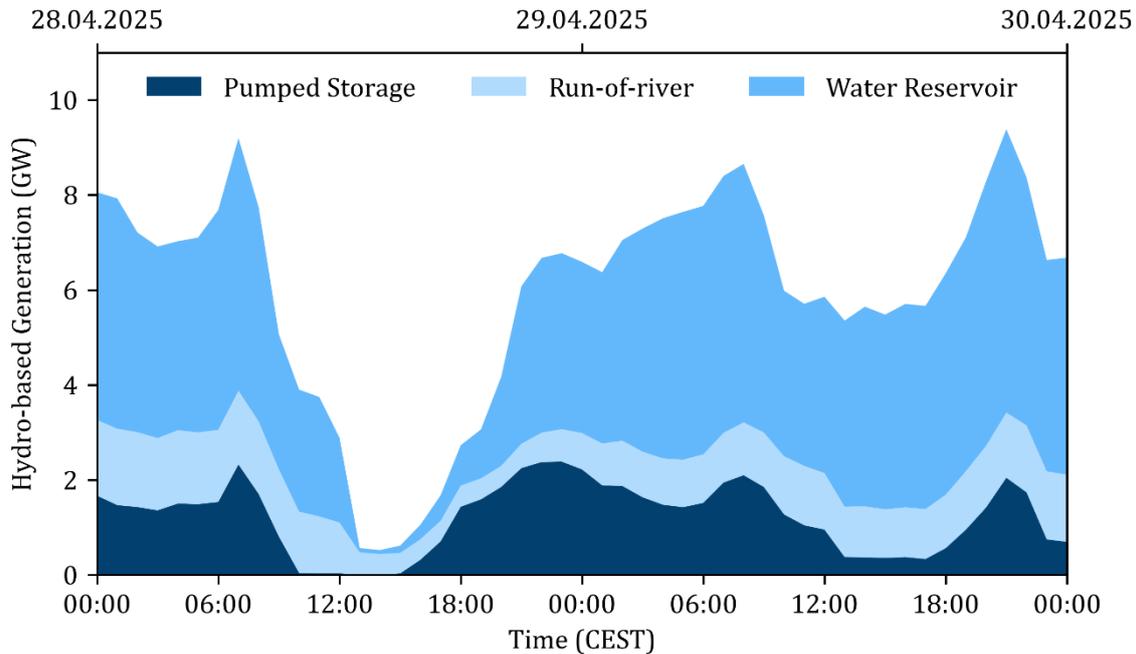


Abbildung 10: Energieerzeugung aus Wasserkraft in Spanien

Neben Gas- und Wasserkraftwerken profitierte der Wiederaufbau des spanischen Netzes auch von signifikanter externer Unterstützung. Marokko stellte 900 MW über die 400-kV-AC-Verbindung Tarifa-Fardioua bereit und auch Frankreich unterstützte den Versorgungswiederaufbau Spaniens über Verbundkuppelleitungen. Hierzu wurden schrittweise ab 13:30 Uhr MESZ Kuppelleitungen wieder in Betrieb genommen, zunächst zwischen Frankreich und Katalonien. Binnen weniger Minuten konnte RTE 700 MW über die Verbundkuppelleitungen bereitstellen und steigerte die Leistungsübertragung bis auf 2 GW [3, 26]. Die genauen Zeitpunkte der Inbetriebnahme einzelner Kuppelleitungen sind nicht veröffentlicht.

Gegen 23:00 Uhr war etwa 51 % des spanischen Bedarfs gedeckt (12,8 GW) und 70 % der Umspannwerke des Übertragungsnetzes unter Spannung. Um 07:00 des 29. Aprils berichtete REE, dass die Versorgung zu 99,95 % (25.794 MW) wiederhergestellt ist und alle 680 Umspannwerke des Übertragungsnetzes unter Spannung sind [2].

Zuvor hatte REN bereits gemeldet, dass das portugiesische Netz bereits um 23:30 Uhr Ortszeit bzw. 00:30 Uhr MESZ „vollständig stabilisiert“ wurde [27]. In Portugal erfolgte der Netzwiederaufbau ausschließlich mit Gas- und Wasserkraftwerken. Wichtig war hierbei der erfolgreiche Schwarzstart des Gaskraftwerks „Tapada do Outeiro“ (990 MW), um Nordportugal wieder mit Strom zu versorgen. Das Gaskraftwerk „Tapada do Outeiro“ wurde ohne kommerzielle Marktaktivität betrieben und dient ausschließlich als Reservekraftwerk. Für die Versorgung im Süden Portugals war das Wasserkraftwerk „Castelo de Bode“ (159 MW, Speicherkraftwerk mit Durchflussbetrieb) mit Unterstützung eines Interkonnektors nach Spanien entscheidend [4, 5].

7 Fazit und Handlungsempfehlungen

Der vorliegende Bericht stellt eine Bestandsaufnahme der aktuell bekannten Fakten zu den Ereignissen der Großstörung im kontinentaleuropäischen Übertragungsnetz am 28. April 2025 und dem anschließenden Netzwiederaufbau dar. Eine detaillierte Ursachenforschung und Analyse der Großstörung obliegt den beteiligten Übertragungsnetzbetreibern und der ENTSO-E.

Auch wenn die Ursachen und die einzelnen Abläufe der Großstörung bislang nicht im Detail geklärt sind, deuten die bisherigen Untersuchungen auf eine Aneinanderreihung ungeplanter Ereignisse hin. Aus dem resultierenden Systemverhalten ist die Überlagerung einzelner Stabilitätsphänomene erkennbar, die im Ergebnis zur Abtrennung der Übertragungsnetze der iberischen Halbinsel vom übrigen europäischen Synchronverbund geführt haben. Resultierend lassen sich hieraus eine Reihe von systemrelevanten Handlungsempfehlungen ableiten, um die Versorgungssicherheit in Europa auch zukünftig sicherzustellen.

Die Integration erneuerbarer Energieanlagen in allen Spannungsebenen führt in einem ersten Schritt zur Substitution thermischer Kraftwerke. Hieraus resultiert ein zusätzlicher Bedarf an Systemdienstleistungen, die bisher mehrheitlich von den Synchrongeneratoren in konventionellen Kraftwerken erbracht wurden. Zusätzlich muss die Regel- und Steuerbarkeit von erneuerbaren Energieanlagen in Übertragungs- und Verteilnetzen signifikant erhöht werden.

Die Folge der Ereignisse unterstreicht die übergeordnete Bedeutung der Systemstabilität für elektrische Energiesysteme, die zunehmend auf der Stromerzeugung aus Photovoltaik- und Windenergieanlagen basieren: Im Detail und mit Blick auf die Interoperabilität des Gesamtsystems sind die nachfolgend genannten Aspekte sowohl als Einzelmaßnahmen als auch in Kombination zu berücksichtigen und mit deutlich höherer Geschwindigkeit als bisher umzusetzen:

Forcierung von Netzausbaumaßnahmen

Netzausbau, insbesondere der gezielte Ausbau von Kuppelleitungen, sowohl mittels Drehstrom- als auch HGÜ-Systemen liefern einen wesentlichen Beitrag zu Systemstabilität. Zusätzlich kann der Aufbau eines HGÜ-Overlay-Netzes in Europa neben gezielter Leistungsflusssteuerung Systemdienstleistungen bereitstellen und kritischen Netzsituationen entgegenwirken.

Erhöhung der Momentanreserve durch rotierende Massen und netzbildende Umrichter

Photovoltaik- und Windenergieanlagen werden systembedingt durch leistungselektronische Umrichter in das Stromnetz integriert. Der Ersatz von Synchrongeneratoren durch Umrichter-dominierte Stromerzeugungsanlagen führt zu einem Rückgang der Momentanreserve im Stromnetz. Eine reduzierte Momentanreserve erhöht den Frequenzgradienten (engl.: Rate of Change of Frequency - RoCoF) bei einem

plötzlichen Ungleichgewicht zwischen Erzeugung und Last und erschwert Gegenmaßnahmen wie Primärregelung oder Lastabwurf.

Netzbildende leistungselektronische Umrichter in Kombination mit Speichern können durch die Bereitstellung von synthetischer Trägheit die Systemstabilität deutlich verbessern. Darüber hinaus können rotierende Phasenschieber sowohl Momentanreserve bereitstellen als auch durch Blindleistungsregelung zur Erhöhung der Spannungsstabilität beitragen.

Erhöhung der Systemdämpfung

Vor der Netzabtrennung wurden wiederholt Oszillationen in der Netzfrequenz beobachtet. Inwieweit die damit einhergehenden Leistungspendelungen weitere Ausgleichsvorgänge ausgelöst haben, die in Zusammenhang mit der Störung stehen, müssen weitere Untersuchungen zeigen.

Üblicherweise werden in konventionellen Kraftwerken Pendeldämpfungsgeräte (engl.: Power System Stabilizer - PSS) eingesetzt, um sowohl lokale als auch überregionale Leistungspendelungen zu dämpfen. Die Aktivierung im Kraftwerk erfolgt über eine Zusatzeinrichtung im Spannungsregler. Durch die Anpassung der Parameter und Platzierung können PSS Leistungspendelungen dämpfen. Die Dämpfung von Leistungspendelungen mit einer Frequenz zwischen 0,1 – 1-Hz bedarf klassisch einer speziellen Erweiterung der Turbinenregler in Kraftwerken.

Da der Kraftwerkseinsatz marktbasierend nach dem Merit Order Prinzip erfolgt, sind die o.g. Dämpfungsmaßnahmen zwangsläufig nicht mehr vorhanden oder nur noch eingeschränkt umsetzbar. Um die Anforderungen einer adaptiven Parametrierung der zukünftigen aktiven Regeleinrichtungen festzulegen sind auf europäischer Ebene eingehende Systemstudien notwendig.

Zusätzlich können umrichterbasierte Erzeugungsanlagen durch ihre Regelung aktiv zur Dämpfung von Leistungspendelungen beitragen. Diese Funktionalitäten erfordern Anpassungen an den Anlagen und sind mit höheren Investitionskosten verbunden. Photovoltaikanlagen können im Gegensatz zu Windenergieanlagen im Fehlerfall kurzfristig keine Wirkleistung zur Verfügung stellen. Daher können insbesondere große Photovoltaikparks zur Dämpfung von Leistungspendelungen mit Speichern zu sogenannten Hybridkraftwerken erweitert werden, um auf diese Weise Wirkleistung aktiv vorzuhalten.

Erweiterte Regelfähigkeit von Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungen und Flexiblen-Drehstrom-Übertragungssystemen

HGÜ-Systeme auf Basis selbstgeführter Umrichter müssen konsequent mit erweiterten und herstellerunabhängigen Regelstrategien ausgestattet werden. Hierzu gehören Einrichtungen zur Leistungsdämpfung (engl.: Power Oscillation Damping - POD), Frequenzstützung oder der netzbildende Betrieb von Umrichtern. Ebenso können Flexible-Drehstrom-Übertragungssysteme (engl.: Flexible AC Transmission Systems - FACTS) wie

Static Var Compensator (SVC) und Static Synchronous Compensator (STATCOM) für eine schnelle Spannungsregelung und Dämpfung von Leistungspendelungen eingesetzt werden. Als sog. eSTATCOM können sie zudem synthetische Trägheit bereitstellen.

Dynamische Netzsicherheitsrechnungen

Mit der zunehmenden Integration erneuerbarer Energieanlagen, höherer Auslastung der Betriebsmittel und Tendenzen zur Umsetzung von kurativen Systemführungsstrategien gewinnen dynamische Netzsicherheitsrechnungen zunehmend an Bedeutung. Bislang stützt sich die Mehrzahl der europäischen Übertragungsnetzbetreiber primär auf stationäre Netzsicherheitsrechnungen auf der Basis von Leistungsflussrechnungen. Werkzeuge für eine dynamische Zustandsbewertung (engl.: Dynamic Security Assessment - DSA) sind im operativen Betrieb in Europa bisher nur vereinzelt im Einsatz. Zukünftig ist hierzu insbesondere die Abstimmung zwischen stationärer und dynamischer Netzmodellierung und zu erweiterten Netzsicherheitsrechnungen zu verbessern.

Berücksichtigung der Schutzkonzepte für dynamische Untersuchungen

Die Schutzkonzepte müssen bei allen Anpassungen und Änderungen berücksichtigt werden, sowohl auf Relais- als auch auf Systemebene. Hierzu empfiehlt es sich, insbesondere bei Stabilitätsuntersuchungen, den Netzschutz zu modellieren, um unbeabsichtigte Schutzauslösungen, mangelnde Selektivität oder mögliche Kaskaden zu vermeiden. Insbesondere das dynamische, maßgeblich durch die Regelungstechnik bestimmte Einspeiseverhalten von Umrichtern muss für ein sicheres und selektives Auslöseverhalten des Schutzes bedacht werden. Protection Security Assessment (PSA) Systeme können hierbei unterstützen.

Entwicklung von Werkzeugen für Modalanalysen in großräumigen Netzstrukturen

Zur Bewertung des überregionalen Schwingungsverhaltens des kontinentaleuropäischen Übertragungsnetzes sind umfangreiche Modalanalyse-Werkzeuge für leistungselektronisch-dominierte Netze zu etablieren. Diese ermöglichen eine gezielte Identifikation kritischer Eigenfrequenzen sowie deren zugehörige Dämpfungsmaßnahmen. Die Modalanalyse liefert damit systemspezifische Hinweise für die Platzierung und Parametrierung wirkungsvoller Maßnahmen zur Dämpfung überregionaler Leistungspendelungen (engl.: Inter-Area-Oscillations).

Der Ablauf der Ereignisse vor und während der Großstörung belegen die Komplexität der Zusammenhänge und die Bedeutung der Systemstabilität für die Versorgungssicherheit in Europa. Zur Erreichung der ambitionierten Klimaziele und eines vermehrt auf erneuerbaren Energien basierenden Stromversorgungssystems besteht weitreichender Forschungs- und Handlungsbedarf, der dringlicher denn je auf europäischer Ebene zu harmonisieren und umzusetzen ist.

Danksagung

Die Autoren danken insbesondere Herrn Professor Dr. Tobias Veith von GRIDRADAR für die Bereitstellung der gemessenen Frequenzdaten. Darüber hinaus danken wir Herrn Professor Dr.-Ing. Johann Jäger und Dr.-Ing. Dieter Braisch für den fachlichen Austausch.

Literaturverzeichnis

- [1] Reuters, „Power begins to return after huge outage hits Spain and Portugal. 29.04.2025“, online: <https://www.reuters.com/world/europe/large-parts-spain-portugal-hit-by-power-outage-2025-04-28/>, zuletzt aufgerufen am 09.05.2025
- [2] Climatica, „Cronología del apagón eléctrico inédito en la España peninsular“, 28.04.2025, online: <https://climatica.coop/la-espana-peninsular-sufre-un-apagon-electrico/>, zuletzt aufgerufen am 09.05.2025
- [3] RTE, „[Information presse] Incident électrique en Espagne et au Portugal : la situation est rétablie“, 28.04.2024, online: <https://www.rte-france.com/actualites/information-presse-incident-electrique-espagne-portugal-situation-est-retablie>, zuletzt aufgerufen am 09.05.2025
- [4] REN, „Restabelecido abastecimento na zona norte do Grande Porto e na região de Santarém“, 28.04.2025, online: <https://www.ren.pt/pt-pt/media/noticias/restabelecido-abastecimento-na-zona-norte-do-grande-porto-e-na-regiao-de-santarem>, zuletzt aufgerufen am 09.05.2025
- [5] Portugal news, „Blackout demonstrated the "essential role" of the Tapada do Outeiro plant“, 29.04.2025, online: <https://www.portugalpulse.com/blackout-demonstrated-the-essential-role-of-the-tapada-do-outeiro-plant/>, zuletzt aufgerufen am 09.05.2025
- [6] „VERORDNUNG (EU) 2016/631 DER KOMMISSION vom 14. April 2016 zur Festlegung eines Netzkodex mit Netzanschlussbestimmungen für Stromerzeuger, online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016R0631&from=EN>, zuletzt aufgerufen am 09.05.2025
- [7] Decripto, „Blackout in Spagna, cause tecniche legate all’energia solare. Un ingegnere lanciò l’allarme a marzo: “Non siamo preparati“, online: <https://decripto.org/blackout-in-spagna-cause-tecniche-legate-allenergia-solare-un-ingegnere-lancio-lallarme-a-marzo-non-siamo-preparati/>, zuletzt aufgerufen am 09.05.2025
- [8] Spain in English, „Portugal’s REN denies claiming Iberian blackout caused by ‘rare atmospheric phenomenon“, online: <https://www.spainenglish.com/2025/04/29/portugal-ren-denies-claiming-iberian-blackout-caused-by-rare-atmospheric-phenomenon/>, zuletzt aufgerufen am 09.05.2025
- [9] Red seguridad, „Red Eléctrica excluye el ciberataque como causa del apagón“, online: https://www.redseguridad.com/actualidad/red-electrica-ciberataque-no-causa-apagon_20250429.html, zuletzt aufgerufen am 09.05.2025
- [10] CONFILEGAL, „La Audiencia Nacional abre una investigación por posible ciberataque terrorista tras el apagón eléctrico“, online: https://confilegal.com/20250429-la-audiencia-nacional-abre-una-investigacion-por-posible-ciberataque-terrorista-tras-el-apagon-electrico/?utm_source=chatgpt.com, zuletzt aufgerufen am 09.05.2025
- [11] Euronews, „Após apagão geral, rede elétrica "está perfeitamente estabilizada", afirma REN“, 29.04.2025, online: <https://pt.euronews.com/my-europe/2025/04/29/apos-apagao-geral-rede-eletrica-esta-perfeitamente-estabilizada-afirma-ren>, zuletzt aufgerufen am 09.05.2025
- [12] ENTSO-E, „Incident in the power systems of Spain and Portugal“, 28.04.2025, online: <https://www.entsoe.eu/news/2025/04/28/grid-incident-in-the-power-systems-of-spain-and-portugal/#:~:text=On%2028%20April%202025%20soon,systems%20of%20Spain%20and%20Portugal>, zuletzt aufgerufen am 02.05.2025

- [13] Red Electrica, „Actuación de Red Eléctrica ante el cero energético“ 28.04.2025 online: <https://www.ree.es/es/sala-de-prensa/actualidad/nota-de-prensa/2025/04/proceso-de-recuperacion-de-la-tension-en-el-sistema-electrico-peninsular>, zuletzt aufgerufen am 09.05.2025
- [14] SAPO, „REN confirma corte de eletricidade na Península Ibérica e parte de França.“ online: https://www.sapo.pt/noticias/economia/ren-confirma-corte-de-eletricidade-na_680f6ee48a54295af8ffd155, zuletzt aufgerufen am 09.05.2025
- [15] Wikipedia, „List of power stations in Portugal“, online: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_power_stations_in_Portugal, zuletzt aufgerufen am 09.05.2025
- [16] ENTSO-E, „Transparency platform“, 28.04.2025, online: <https://newtransparency.entsoe.eu/>, zuletzt aufgerufen am 09.05.2025
- [17] Reuters, „What caused the power outage in Spain and Portugal?“, 29.04.2025, online: <https://www.reuters.com/world/europe/what-could-be-behind-iberian-power-outage-2025-04-29/>, zuletzt aufgerufen am 09.05.2025
- [18] Reuters, „Spain's nuclear lobby urges review of phase-out plan following blackout“, 06.05.2025, online: <https://www.reuters.com/sustainability/boards-policy-regulation/spains-nuclear-lobby-urges-review-phase-out-plan-following-blackout-2025-05-06/>, zuletzt aufgerufen am 09.05.2025
- [19] Reuters, „Spain, Portugal switch back on, seek answers after biggest ever blackout“, 29.05.2025, online: <https://www.reuters.com/world/europe/spains-power-generation-nearly-back-normal-after-monday-blackout-says-grid-2025-04-29/>, zuletzt aufgerufen am 09.05.2025
- [20] The Pinnacle Gazette, „Spain Faces Power Crisis After Massive Blackout“, 06.05.2025, online: <https://evrimagaci.org/tpg/spain-faces-power-crisis-after-massive-blackout-343642>, zuletzt aufgerufen am 09.05.2025
- [21] EL PAÍS, „Agesen revela que la red eléctrica sufrió un tercer incidente 19 segundos antes del apagón“, online: <https://elpais.com/economia/2025-05-05/aagesen-revela-que-la-red-electrica-sufrio-un-tercer-incidente-19-segundos-antes-del-apagon.html>, zuletzt aufgerufen am 09.05.2025
- [22] EDF, „List of outages and messages: 05470_EDF_H_00115191“, online: <https://doaat.edf.fr/en/indisponibilite/05470-edf-h-00115191>, zuletzt aufgerufen am 09.05.2025
- [23] EDF, „List of outages and messages: 05470_EDF_H_00115195“, online: <https://doaat.edf.fr/en/indisponibilite/05470-edf-h-00115195>, zuletzt aufgerufen am 09.05.2025
- [24] EDF, „List of outages and messages: 05470_EDF_H_00217455“, online: <https://doaat.edf.fr/en/indisponibilite/05470-edf-t-00217455>, zuletzt aufgerufen am 09.05.2025
- [25] ENTSO-E, „ENTSO-E expert panel initiates the investigation into the causes of Iberian blackout“, online: <https://www.entsoe.eu/news/2025/05/09/entso-e-expert-panel-initiates-the-investigation-into-the-causes-of-iberian-blackout/>, in der Aktualisierung vom 16.05.2025 ergänzt
- [26] BBC, „How Spain powered back to life from unprecedented national blackout“, 29.04.2025, online: <https://www.bbc.com/news/articles/c175ykvjxyeo>, zuletzt aufgerufen am 09.05.2025
- [27] REN, „National grid stabilised“, 29.04.2025, online: <https://www.ren.pt/en-gb/media/news/national-grid-stabilised>, zuletzt aufgerufen 09.05.2025