

ENTWICKLUNG EINES DUNKELFLAUTEFILTERS UND ANWENDUNG AUF ERAA 24-BERECHNUNGEN

Nikolaus KELNREITER^{1*}, Katharina GRUBER², Simon SCHRAMM^{3*}, Felix GLASER⁴

Einführung

Als österreichischer Übertragungsnetzbetreiber ist APG gesetzlich beauftragt, zur Versorgungssicherheit beizutragen [1]. Um diese zu gewährleisten, wird die Lastdeckung („Resource Adequacy“, „RA“) im europäischen Rahmen über das *European Resource Adequacy Assessment* (ERAA) und über einen Zeitraum von zehn Jahren bewertet. Im Zuge der Transformation des Energiesystems hin zu einem Erzeugungspark, den volatile, wetterabhängige Quellen dominieren, rücken Extremwetterereignisse – insbesondere Dunkelflauten – zunehmend in den Fokus dieser Analysen.

Dunkelflauten zeichnen sich durch eine geringe erneuerbare Einspeisung aufgrund fehlender Wind- und Sonneneinstrahlung aus. Besonders herausfordernd für das Stromsystem sind „kalte Dunkelflauten“, bei denen unter anderem niedrige Temperaturen zusätzlich zu einer erhöhten Stromnachfrage führen. Häufig wird „kalte Dunkelflauge“ auch nur mit „Dunkelflauge“ wiedergegeben, so auch in weiterer Folge in diesem Beitrag. Solche Perioden haben die höchsten Residuallasten und sind typischerweise die kritischsten Stunden in RA-Analysen. Tatsächlich werden Dunkelflauten auch häufig über die Residuallast identifiziert [1]. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist ihre geografische Situierung: Dunkelflauten betreffen oft größere Gebiete, teils sogar mehrere Länder gleichzeitig. Dadurch kann man sich im Falle einer Dunkelflauge nicht immer auf Importe von Nachbarländern – sonst ein adäquates Mittel zur Vermeidung kritischer Situationen – verlassen. Deshalb ist es sinnvoll, die Identifizierung von Dunkelflauten großflächig durchzuführen und deren Auswirkungen im Gesamtsystem zu untersuchen.

Der vorliegende Beitrag stellt eine Methodik vor, mit der Dunkelflauten im Rahmen der ERAA-Analyse erkannt und – falls gewünscht – so adaptiert werden, dass sie die vorher definierten Charakteristika besonders kritischer Perioden erfüllen: Einen sogenannten „Dunkelflautefilter.“ Der Fokus liegt dabei bewusst auf meteorologischen Bedingungen und ihren Auswirkungen auf die PV- und Windkraft-Erzeugung. Andere infrastrukturelle Probleme, die bei Kälte auch auftreten können (z.B.: Vereisung von Windrädern) werden nicht explizit adressiert.

Damit schafft der Dunkelflautefilter eine belastbare Grundlage, um die Auswirkungen seltener, aber systemrelevanter Extremsituationen in RA-Analysen präziser zu untersuchen und die Versorgungssicherheit in einem zunehmend erneuerbaren Energiesystem besser zu bewerten.

Methodik

Zur Identifikation von Dunkelflauten und der Entwicklung eines Dunkelflautefilters für die ERAA-Modellierungen wurden folgende Schritte durchgeführt:

- Definition der Dauer
- Detektion einer kritischen Periode
- Definition des geografischen Ausmaßes
- Definition der Grenzwerte

¹ Austrian Power Grid AG (APG), Wagramerstraße 19, 1220 Wien, +43 664 887 80 262,
nikolaus.kelnreiter@apg.at, <https://www.apg.at>

² Austrian Power Grid AG (APG), Wagramerstraße 19, 1220 Wien, +43 664 883 42 946,
katharina.gruber@apg.at, <https://www.apg.at>

³ Austrian Power Grid AG (APG), Wagramerstraße 19, 1220 Wien, +43 664 883 42 993,
simon.schramm@apg.at, <https://www.apg.at>

⁴ Austrian Power Grid AG (APG), Wagramerstraße 19, 1220 Wien, +43 664 783 57 530,
felix.glaser@apg.at, <https://www.apg.at>

Definition der Dauer

Zuerst wurde die Dauer der relevanten Periode bestimmt. In der Literatur finden sich Werte von „mehr als 24 h“ über sechs Tage bis zwei Wochen [2-4]. Um im ENTSO-E-Kontext konsistent zu bleiben, wurde der TYNDP als Quelle verwendet und die Dunkelflautenperiode auf zwei Wochen festgelegt [4].

Detektion einer kritischen Periode

Dunkelflauten können auf unterschiedliche Arten identifiziert werden: Über die Kapazitätsfaktoren von Wind und PV [2], die Residuallast [5] oder über andere, statistisch umfassendere Methoden [6]. Diese drei Methoden wurden bereits von anderen evaluiert, wobei Residuallast als bester Proxy für die Detektion von Dunkelflauten identifiziert wurde [1]. Dementsprechend wurde in diesem Ansatz ebenfalls die Residuallast als Maß für Dunkelflauten verwendet.

Definition des geografischen Ausmaßes

Das geografische Ausmaß von Dunkelflauten musste ebenso festgelegt werden. Meteorologische Events beschränken sich schließlich typischerweise nicht auf Landesgrenzen. Daher wurde die Gleichzeitigkeit von Unterdeckungsevents in Österreich und Nachbarländern, die maßgeblich von Dunkelflauten ausgelöst werden, in den Modellrechnungen des ERAA 24 überprüft (Grenzwert: 1 MW). Dabei zeigte sich mit Deutschland, Tschechien und Ungarn eine sehr hohe (>75%) und mit der Slowakei eine hohe (>60%) Gleichzeitigkeit von Unterdeckung. Diese Länder wurden in der Folge als relevantes Gebiet ausgewählt.

Definition und Anwendung der Grenzwerte

Nach der Detektion der kritischen Periode wurde untersucht, ob eine weitere Anpassung auf Basis eines statistischen Schwellenwerts durchgeführt werden kann. Diese Grenzwerte betragen 50% des Langjahresmittels (1991-2020) für Wind und 75% des Langjahresmittels für PV für die gesamten zwei Wochen basierend auf einer Analyse einer historischen Dunkelflaute in Deutschland im November 2024 [3]. Für jedes betroffene Land wurde daher geprüft: „Ist die Produktion in den zwei kritischen Wochen insgesamt jeweils unter 50% (Wind) bzw. 75% (PV) des Langjahresmittels?“ Wenn das der Fall war, wurde keine Anpassung getroffen, ansonsten wurde die Erneuerbaren-Erzeugung auf diesen Grenzwert skaliert. Zusätzlich wurde ein „Peak Day“ eingebaut, an welchem die Wind-Produktion um 100% und die PV-Produktion um 50% reduziert wurde.

Datensatz und weitere Annahmen

Als Datensatz wurden die im ERAA 24 verwendeten Klimajahre PECD 4.1) und Modellrechnungen (36 Klimajahre und 15 Ausfallszenarien) verwendet [7]. Dabei wurden die Inputdaten für Österreich mit den neuesten ERAA 25-Daten aktualisiert [8]. Für die Modellrechnungen des ERAA 24 gelten weitere Annahmen, die im Detail im ERAA 24 beschrieben sind [7]. Diese beinhalten unter anderem perfekte Voraussicht im Modell, keine Abbildung von Netzen innerhalb Österreichs oder die technologiescharfe Modellierung des Dispatchs.

Ergebnisse

Der Dunkelflautefilter wurde dann auf die ERAA24 Modellrechnungen angewandt. Dabei erwiesen sich die zwei Wochen von 7.12 bis 21.12 des Klimajahres WS32 (entspricht SSP 2.4.5 im Klimamodell MEHR und Wetterjahr 2032) des ERAA-PECD-Datensatzes als die kritischste Periode. Hier gab es einige relevante Beobachtungen. Trotz der Auswahl von 14 Tagen zeigten sich nur an fünf (aufeinanderfolgenden) dieser Tage tatsächliche Unterdeckung. Im Vergleich mit anderen, nicht-Dunkelflauten-betroffenen Wochen zeigten sich außerdem signifikante Unterschiede: Unter anderem ist die Import-/Export-Bilanz von Strom in Österreich in der kritischsten Phase der Dunkelflauten ausgeglichen. In der Erzeugung zeigt sich, dass Pumpspeicher-Kraftwerke am Wochenende pumpen, um dann unter der Woche praktisch durchgehend Strom produzieren, während normalerweise Arbitrage mit Morgen- und Abendspitzenstunden betrieben wird.

Die Ergebnisse liefern wertvolle Hinweise für die Systemplanung, indem sie zeigen, welche Systemzustände auf mögliche kritische Situationen (besonders in Hinblick auf Unterdeckung) hinweisen können. Zusätzlich wird das Verständnis zu Auswirkungen von „Worst-Case“-Dunkelflauten auf das Stromsystem erweitert, was hilft, sich auf tatsächliche Dunkelflauten vorzubereiten.

Referenzen

- [1] B. Biewald, Bastien Cozian, L. Dubus, W. Zappa, and L. Stoop, "Evaluation of 'Dunkelflaute' event detection methods considering grid operators' needs," *Environmental Research Energy*, vol. 2, no. 2, Apr. 2025, doi: <https://doi.org/10.1088/2753-3751/adcf29>.
- [2] B. Li, S. Basu, S. J. Watson, and H. W. J. Russchenberg, "A Brief Climatology of Dunkelflaute Events over and Surrounding the North and Baltic Sea Areas," *Energies*, vol. 14, no. 20, p. 6508, Oct. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/en14206508>.
- [3] F. Kaspar, F. Bär, J. Drücke, P. James, J. Ostermöller, and M. Zepperitz, "Klimatologische Einordnung der „Dunkelflaute“ im November 2024," Dec. 2024. Available: https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/verschiedenes/20241217_Dunkelflaute_im_November.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- [4] ENTSOE and ENTSOG, "TYNDP 2022. Scenario Building Guideline," Apr. 2022. Available: https://2022.entsos-tyndp-scenarios.eu/wp-content/uploads/2022/04/TYNDP_2022_Scenario_Building_Guidelines_Version_April_2022.pdf
- [5] N. Otero, O. Martius, S. Allen, H. Bloomfield, and B. Schaeffli, "A copula-based assessment of renewable energy droughts across Europe," *Renewable Energy*, vol. 201, no. 1, Nov. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.10.091>.
- [6] L. P. Stoop, Karin, W. Zappa, A. Haverkamp, Ad Feelders, and van, "The climatological renewable energy deviation index (CREDI)," *Environmental Research Letters*, vol. 19, no. 3, Feb. 2024, doi: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad27b9>.
- [7] ENTSO-E, "ERAA 2024 Downloads," *Entsoe.eu*, 2024. <https://www.entsoe.eu/eraa/2024/downloads/> (accessed Nov. 26, 2025).
- [8] ENTSO-E, "ERAA 2025 Call-for-Evidence on Preliminary Input Data," *Entsoe.eu*, 2025. <https://consultations.entsoe.eu/system-development/eraa2025-call-for-evidence-preliminary-data/> (accessed Nov. 26, 2025).