

# Analyse eines Verfahrens zum Unterfrequenz-Lastabwurf basierend auf Reinforcement Learning

Systemresilienz 2030+

19. Symposium Energieinnovation 2026, Graz

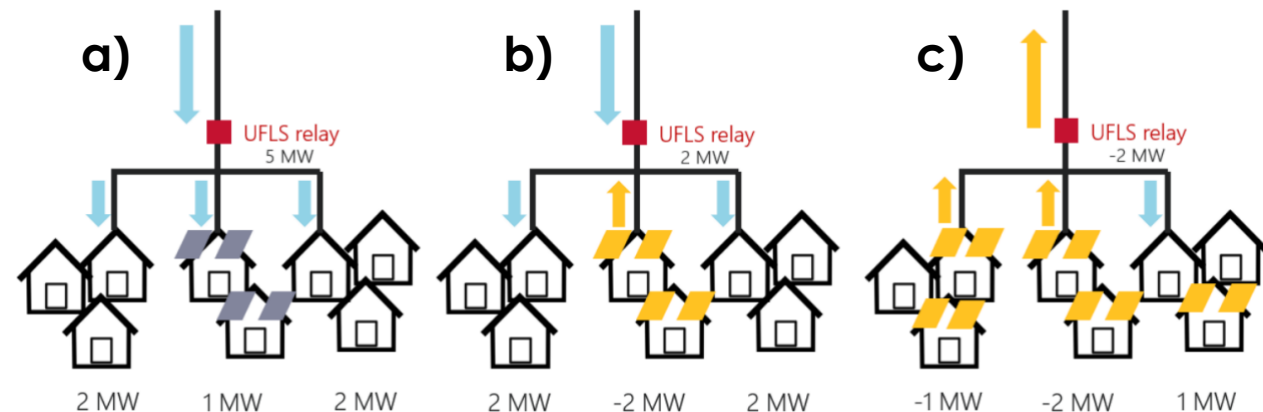
Marbod Kollnig, MSc MSc

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.sc.techn. Bernd Klöckl

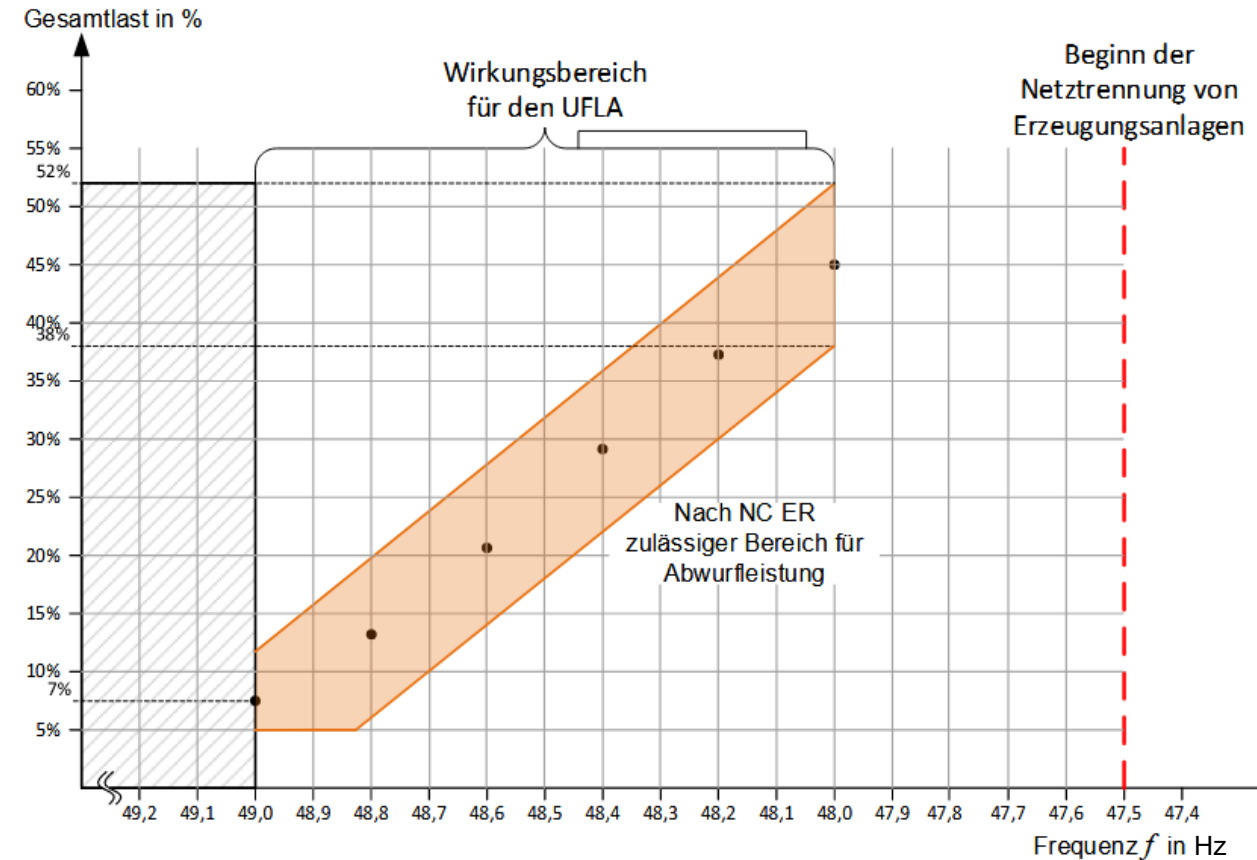
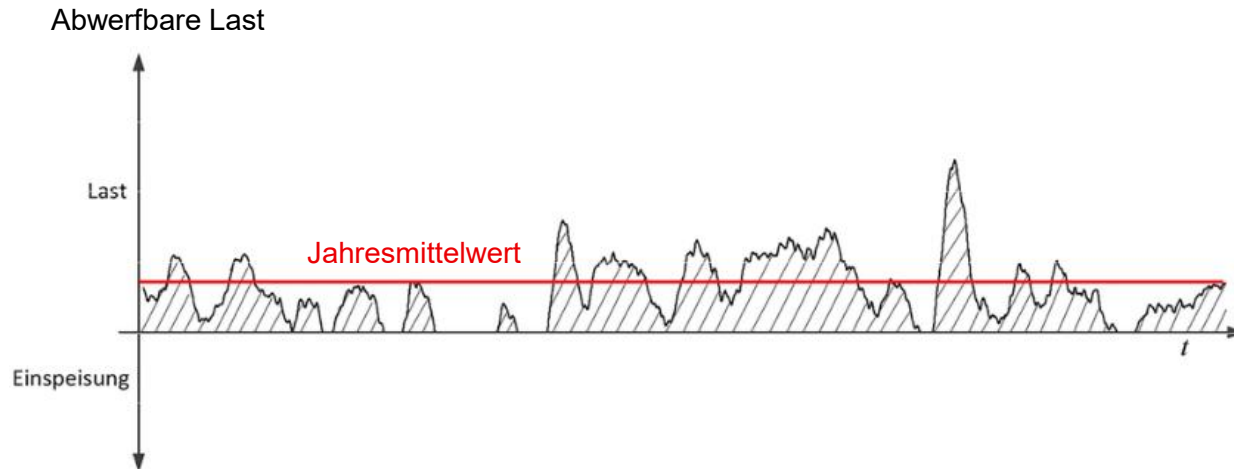
12.02.2026

- Sicherer Systembetrieb für Resilienz
- Unterfrequenz-Lastabwurf (UFLA) als essentieller Teil des Systemschutzplans
- Zunehmende Integration dezentraler Erzeugungsanlagen
  - Reduzierte verfügbare UFLA-Potentiale
  - Sinkende Systemträgheit
  - Erhöhte Frequenzgradienten und schwerere Frequenzstörungen
- Funktionalität von UFLA-Relais bei höherem ROCOF und Netzurückwirkungen

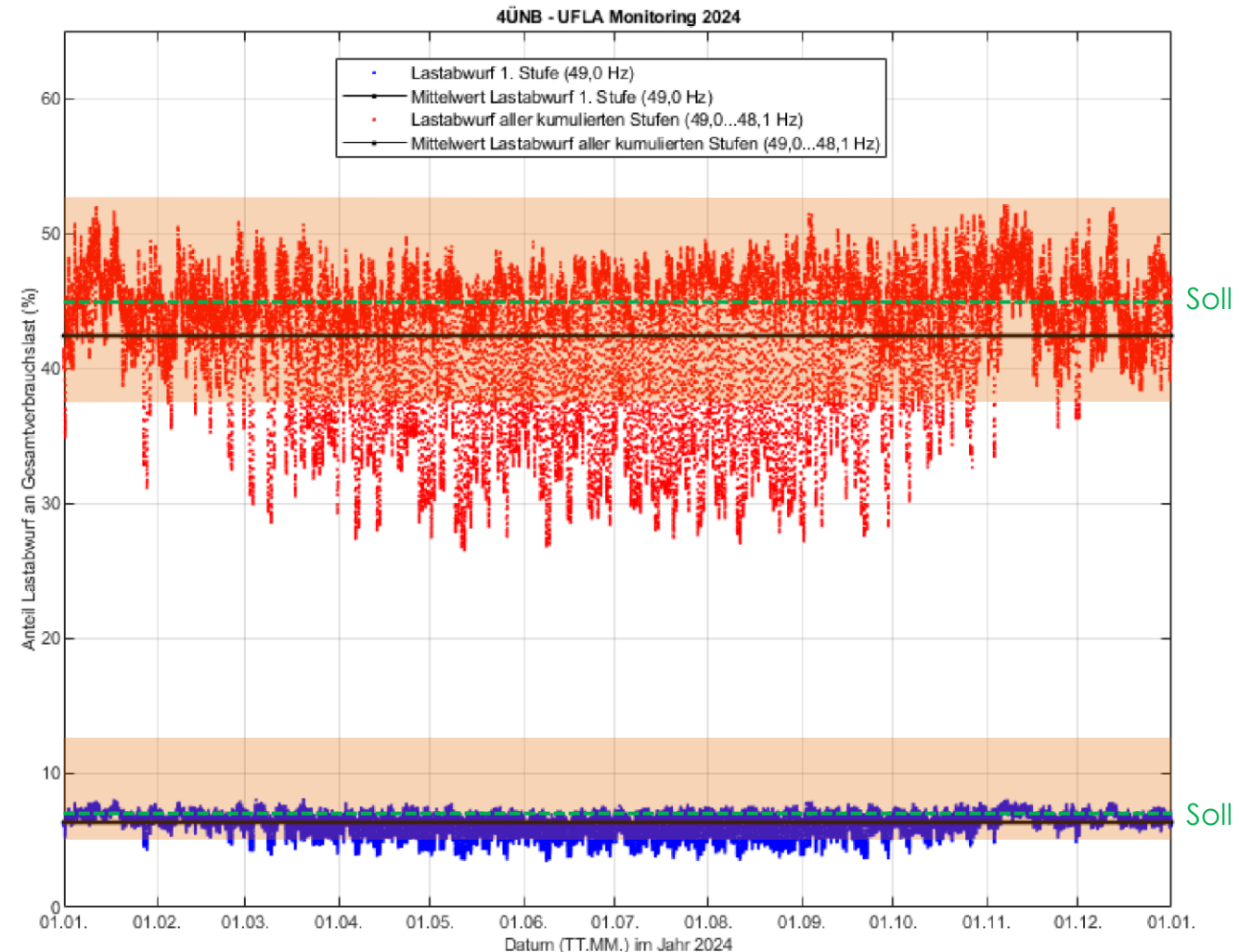
- a) Reine Last**
  - UFLA voll wirksam
- b) Reduzierte Nettolast**
  - UFLA eingeschränkt
- c) Wirkleistungsrückspeisung**
  - Abwurf: kontraproduktiv, dann erhöhtes Erzeugungsdefizit
  - Blockierung der Relais



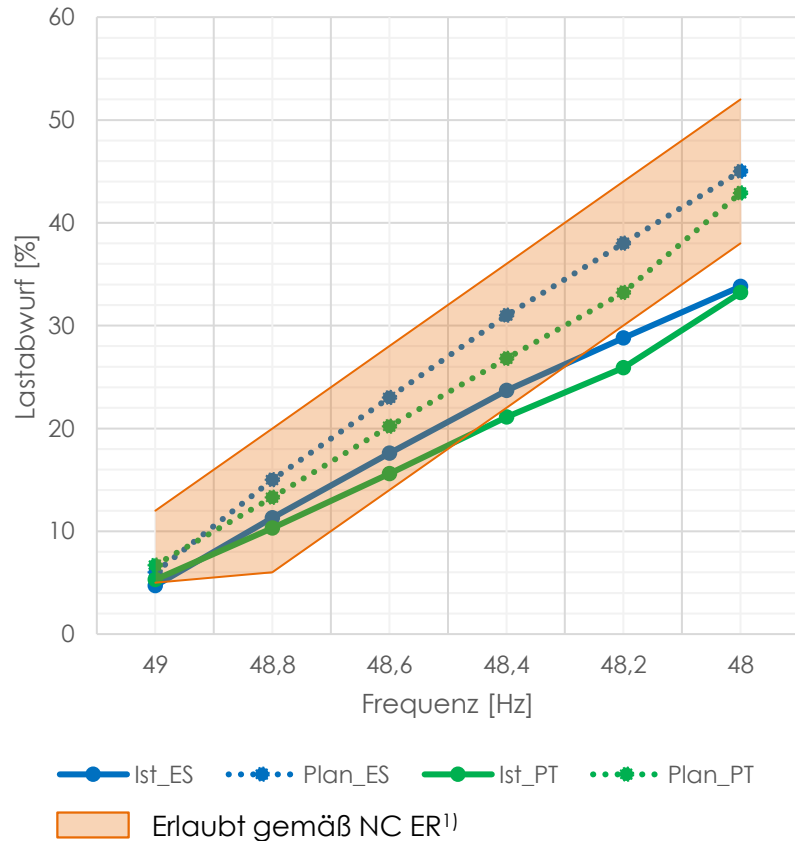
- Stufenweise Reaktion auf Frequenzabfälle
- UFLA ausgelegt nach Jahresmittelwert der Gesamtlast
- Lastsituation variiert über den Tag, saisonal und zwischen Jahren



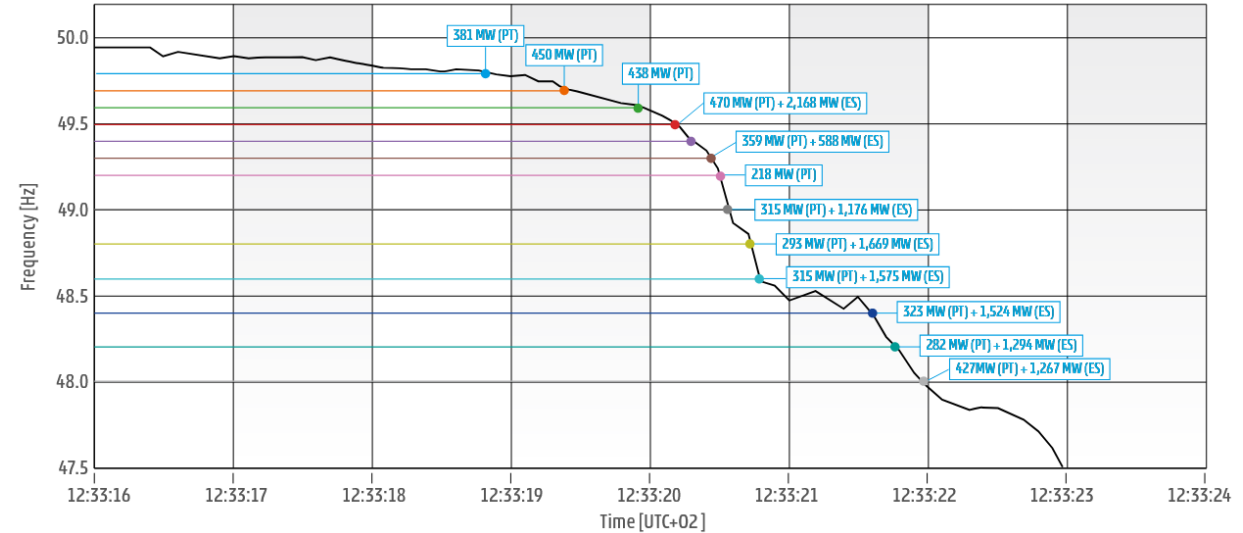
- Beträchtliche Schwankungen, Abweichung zu erwarteter Abwurfleistung
  - Effekt u. a. infolge dezentraler Einspeisung
  - Zu wenig/zu viel Last verfügbar
- Verfügbare Abwurfleistung unzureichend in einigen Zeiten
- UFLA-Wirksamkeit zur Systemstabilisierung fraglich
- Maßnahmen zur Gewährleistung des sicheren Systembetriebs erforderlich



## UFLA-Plan und tatsächlicher Lastabwurf



## Frequenzabfall & Abfolge des Lastabwurfs



- Tatsächlicher Lastabwurf stets geringer als Soll in beiden Ländern
  - Spanien (ES): kumuliert 33.8 % (Soll: 45 %)
  - Portugal (PT): kumuliert 33.3 % (Soll: 42.9 %)
  - Jeweils auch unter dem Mindestwert von 38 %
- Dabei womöglich auch dezentrale Erzeugung vom Netz getrennt
- Bei zwei spanischen Verteilnetzbetreibern Relais noch nicht an UFLA-Konzept angepasst, sondern noch bei 48,7 Hz programmiert/aktiviert

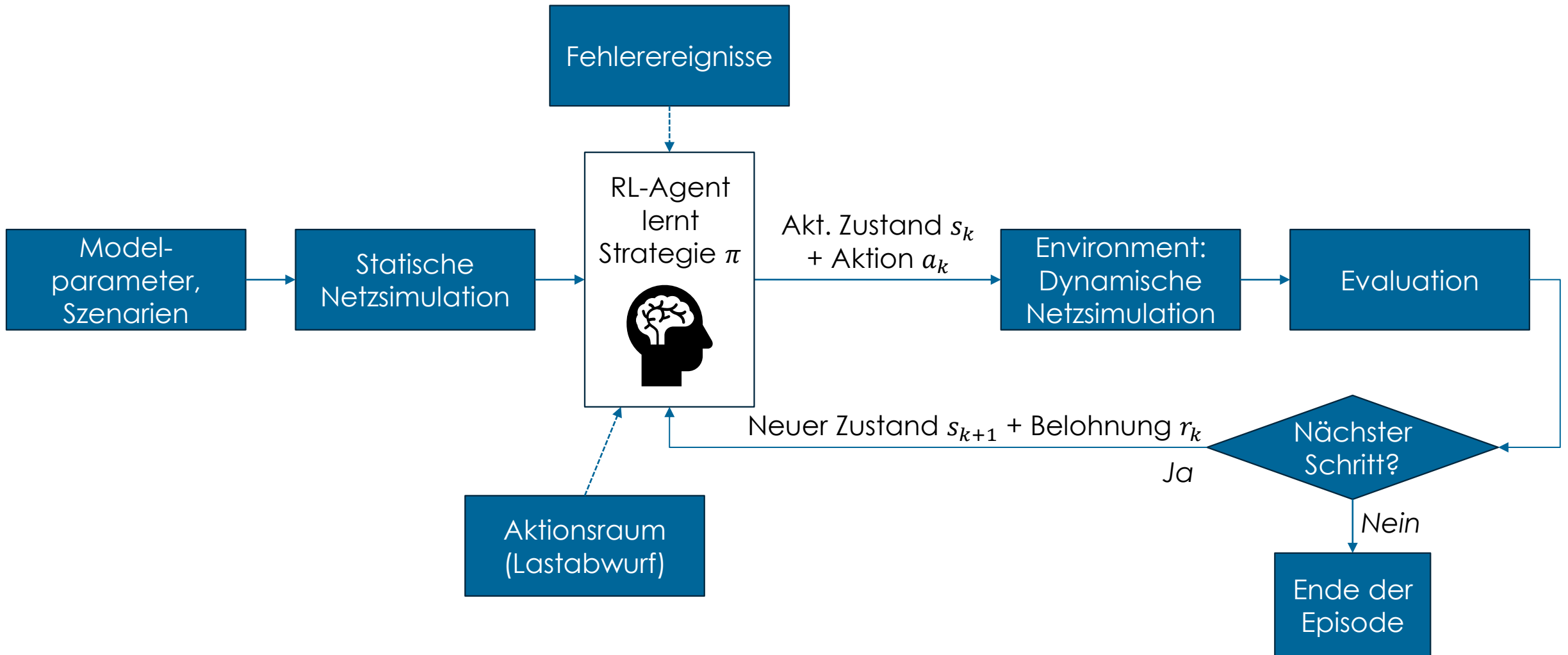
## Mit derzeitiger Systematik

- Erhöhung der Anzahl der Abwurfpunkte
- Verlagerung der Abwurforte zu MS/NS<sup>1)</sup>
- Einbeziehung von Industriekunden mit interner eigener Erzeugung
- Anpassungen mit Blick auf Laständerung durch Sektorenkopplung
- Fernsteuerbarkeit von Relais

## Adaptive UFLA-Konzepte

- Z. B. basierend auf ROCOF
- Kontinuierlicher Abwurf statt stufig
- Proaktiv statt reaktiv
- Zentrales vs. dezentrales Management
- Einsatz von Machine-Learning-Methoden zur Verarbeitung großer Datenmengen

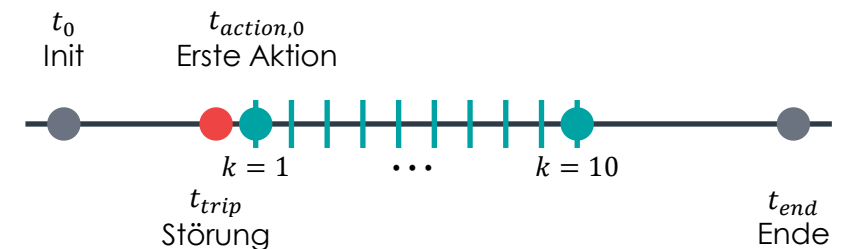
Entwicklung eines adaptiven, datengestützten Verfahrens zur effektiven Auswahl der Abwurfmenge und -punkte unter Berücksichtigung der Lastsituation mit hohem Anteil dez. Erzeugungsanlagen  
→ Zu welchem Maße ist damit ein effektiverer Systemschutz zu erreichen, wobei  
Netzsicherheitsgrenzen eingehalten werden?



- ANDES als Simulationskern/Environment:
  - Dynamische Netzsimulation mit Frequenzmodellierung
  - Open-Source Python-basiertes Framework für DAE<sup>1)</sup>-Modelle
  - Aktivierung von Ereignissen (Betriebsmittelausfall, Lastsprünge, dreiphasiger Fehler, ...)
  - Änderung an Betriebsmitteln während der Simulation
  - Möglichkeit der Parallelisierung
  - Schnelligkeit (auch für größere Netze) und gute Integrierbarkeit für RL-Training
- Open AI Gym mit Stable-Baselines3
  - Standard Machine Learning Libraries in Python
  - DDPG<sup>2)</sup> als RL-Algorithmus



- ANDES-Initialisierung:
  - Netz laden und statische Leistungsflussberechnung für den Steady State
  - Störungen planen
  - Dynamische Simulation initialisieren
  - Dynamische Simulation bis zur ersten Aktion (nach Störung + kleine Verzögerung)
- Simulation unterteilt in Aktionszeitpunkte/Steps. Pro Step  $k$ :
  - Aktion  $a_k$  als Lastabwurf anwenden
  - Dynamische Simulation in kleinen Schritten bis zur nächsten Aktion fortfahren
  - Zustand  $s_{k+1}$  aus aktuellem Netzzustand berechnen
  - Reward  $r_k$  berechnen
  - Beendet bei Instabilität oder Episodenende
- Reinforcement Learning über mehrere Episoden



## Zustand $s_k$

- Wirkleistung an Knoten  $P_{i,k}$
- Frequenzen an lokalen Netzknoten  $f_{i,k}$
- Frequenzgradienten  $RoCoF_{i,k}$
- Kumulierte abgeworfene Last  $P_{total,k}^{shed}$
- Skaliert für stabileres Reinforcement Learning

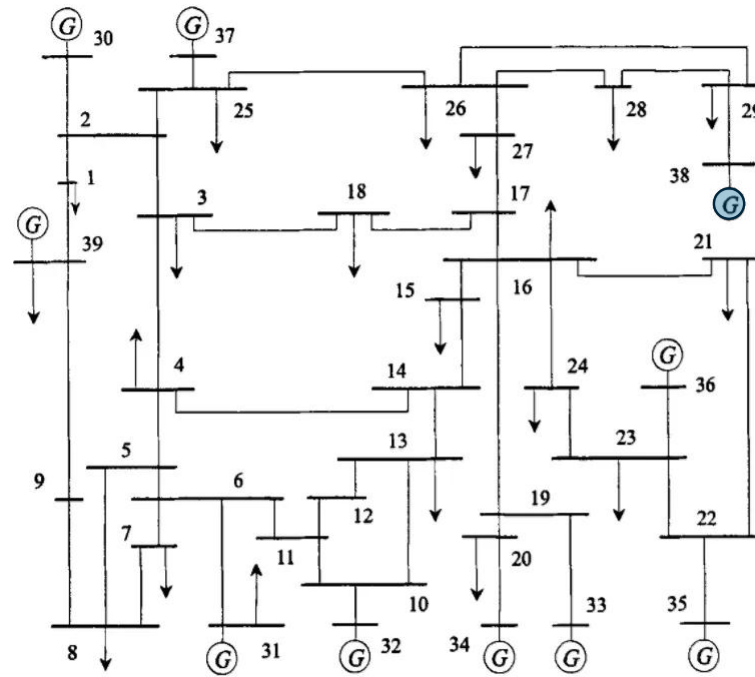
## Aktion $a_k$

- Lastabwurfentscheidung
- Kontinuierlicher prozentualer Wert  $a_{i,k} \in [0, a_{max}]$  je PQ-Last
- Bestimmt Anteil der abzuwerfenden Last
- Lastabwurf ist unidirektional/monoton

## Reward $r_k$

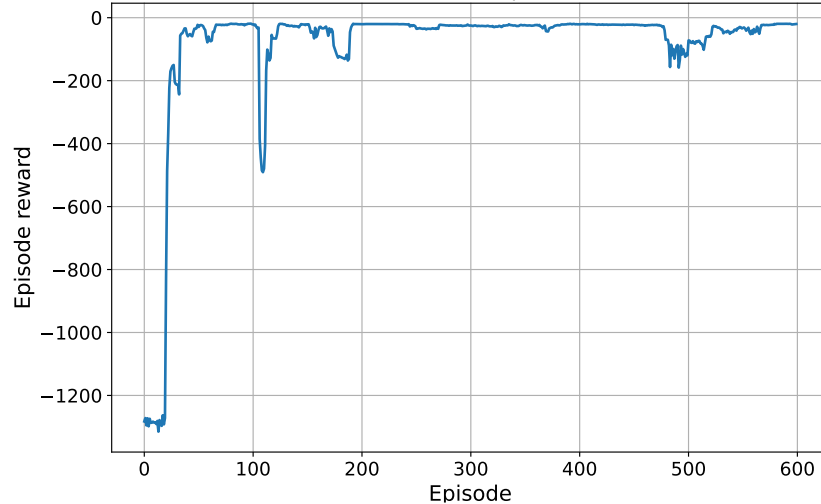
- Reward-Funktion:  
$$r_k = -w_f \cdot (f_{nom} - f_k)^2 - w_l \cdot P_k^{shed} - w_s \cdot \mathbf{1}(\text{System instabil})$$
- Strafe für Frequenzabweichung von nominaler Frequenz
- Strafe für Lastabwurf: so wenig Last wie möglich abwerfen
- Sehr große Strafe für Instabilität

- IEEE 39 Bus System
- Ausfall des größten Generators als Störereignis
- Untersuchung der Frequenzdynamik und -auswirkungen der Lastabwurfentscheidungen

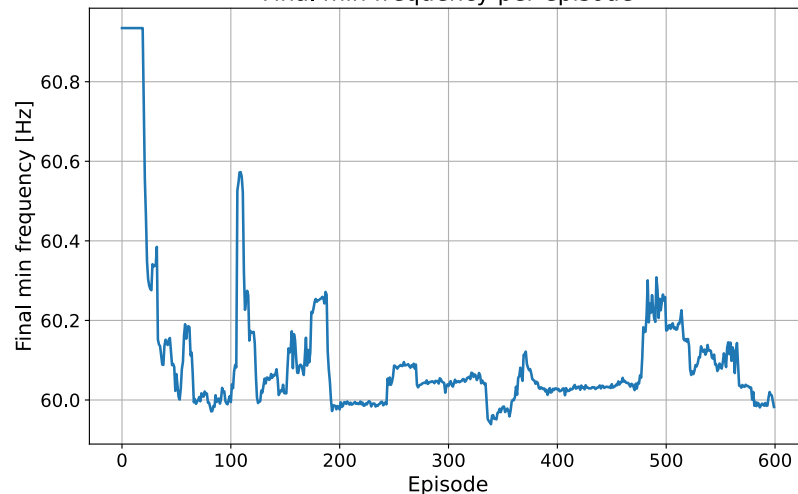


## Trainingsablauf

Reward over episodes

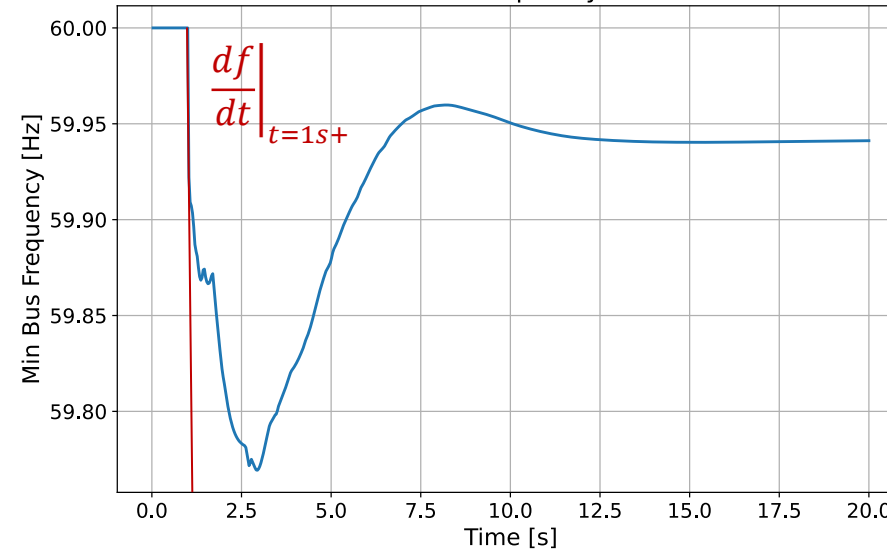


Final min frequency per episode



## Testepisode: zeitlicher Verlauf der minimalen Frequenz

Minimum bus frequency over time



Die Simulation mit dem konventionellen UFLA-Schema führt dagegen zur Systeminstabilität.

→ Die Ergebnisse zeigen, dass der RL-Agent eine UFLA-Strategie effektiv erlernen kann, die den Frequenzabfall frühzeitig abdämpft und das System stabilisiert

Safety Layers integrieren

Spannungstabilität berücksichtigen

Benchmarking gegen Ansätze aus Literatur

Testen und Validieren mit Echtzeitsimulator

- T. Skrjanc, R. Mihalic, und U. Rudez, „A systematic literature review on under-frequency load shedding protection using clustering methods“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 180, S. 113294, Juli 2023, doi: [10.1016/j.rser.2023.113294](https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113294).
- I. Manamperi, I. Ahmad, D. Habibi, und A. Aziz, „Assessing the Effects of Low Load on Under-Frequency Load Shedding Schemes and Exploring Potential Solutions: A Review“, in *2023 International Conference on Sustainable Technology and Engineering (i-COSTE)*, Dez. 2023, S. 1–6. doi: [10.1109/i-COSTE60462.2023.10500774](https://doi.org/10.1109/i-COSTE60462.2023.10500774).
- P. Favre-Perrod, W. Fromm, W. Sattinger, und B. Wartmann, „Frequenzmessung beim Lastabwurf“, *bulletin.ch = Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse und VSE = Bulletin SEV/AES : revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse et AES*, Dez. 2020, Zugegriffen: 14. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://arodes.hes-so.ch/record/6697>
- European Network of Transmission System Operators for Electricity, „Inertia and Rate of Change of Frequency (RoFoF). Version 17“. 16. Dezember 2020.
- A. Derviškadić, Y. Zuo, G. Frigo, und M. Paolone, „Under Frequency Load Shedding based on PMU Estimates of Frequency and ROCOF“, 2. Mai 2018, *arXiv*: arXiv:1805.00744. doi: [10.48550/arXiv.1805.00744](https://doi.org/10.48550/arXiv.1805.00744).
- K. Máslo, P. Toman, und J. Koudelka, „Comparison of decentralised and centralised under-frequency load shedding“, in *CIGRE 2019 Conference*, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.34890/972>.
- C. Li u. a., „Continuous Under-Frequency Load Shedding Scheme for Power System Adaptive Frequency Control“, *IEEE Transactions on Power Systems*, Bd. 35, Nr. 2, Sep. 2019, doi: [10.1109/tpwrs.2019.2943150](https://doi.org/10.1109/tpwrs.2019.2943150).
- G. Paramo, A. Bretas, und N. Bretas, „Proactive and Automatic Underfrequency Load Shedding via PMUs and Particle Filters“, 10. Januar 2023, *arXiv*: arXiv:2301.04113. doi: [10.48550/arXiv.2301.04113](https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.04113).
- A. B. Kilembe und P. N. Papadopoulos, „Deep reinforcement learning adaptive under-frequency load shedding for frequency control under extreme events“, in *14th Mediterranean Conference on Power Generation Transmission, Distribution and Energy Conversion (MEDPOWER 2024)*, Nov. 2024, S. 424–429. doi: [10.1049/icp.2024.4697](https://doi.org/10.1049/icp.2024.4697).
- G. Justin und S. Paternain, „Data-driven Under Frequency Load Shedding Using Reinforcement Learning“, 6. Oktober 2024, *arXiv*: arXiv:2410.04316. doi: [10.48550/arXiv.2410.04316](https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.04316).
- D. Zhang u. a., „A machine learning-based load shedding method for improving resilience of power system“, *AIP Advances*, Bd. 15, Nr. 2, S. 025029, Feb. 2025, doi: [10.1063/5.0235821](https://doi.org/10.1063/5.0235821).
- H. Chen, J. Zhuang, G. Zhou, Y. Wang, Z. Sun, und Y. Levron, „Emergency load shedding strategy for high renewable energy penetrated power systems based on deep reinforcement learning“, *Energy Reports*, Bd. 9, S. 434–443, Apr. 2023, doi: [10.1016/j.egyr.2023.03.027](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.03.027).
- H. Cui und Y. Zhang, „Andes\_gym: A Versatile Environment for Deep Reinforcement Learning in Power Systems“, 2. März 2022, *arXiv*: arXiv:2203.01292. doi: [10.48550/arXiv.2203.01292](https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.01292).
- G. Brockman u. a., „OpenAI Gym“, 5. Juni 2016, *arXiv*: arXiv:1606.01540. doi: [10.48550/arXiv.1606.01540](https://doi.org/10.48550/arXiv.1606.01540).
- H. Cui, F. Li, und K. Tomsovic, „Hybrid Symbolic-Numeric Framework for Power System Modeling and Analysis“, *IEEE Transactions on Power Systems*, Bd. 36, Nr. 2, S. 1373–1384, März 2021, doi: [10.1109/TPWRS.2020.3017019](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.3017019).

- 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, Tennet TSO GmbH, und TransnetBW GmbH, „UFLA Monitoring 2024 gemäß VDE-AR-N 4142. Zusammenfassung auf nationaler Ebene“. 17. Dezember 2025. Zugegriffen: 27. Januar 2026. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.netztransparenz.de/xspproxy/api/staticfiles/ntp-relaunch/dokumente/strommarktdesign/er-verordnung/ufla-reporting-monitoring/abschlussbericht\\_ufla\\_monitoring\\_2024.pdf](https://www.netztransparenz.de/xspproxy/api/staticfiles/ntp-relaunch/dokumente/strommarktdesign/er-verordnung/ufla-reporting-monitoring/abschlussbericht_ufla_monitoring_2024.pdf)
- 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, Tennet TSO GmbH, und TransnetBW GmbH, „UFLA Monitoring 2020 gemäß VDE-AR-N 4142. Zusammenfassung auf nationaler Ebene“. 17. Dezember 2021. Zugegriffen: 18. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.netztransparenz.de/xspproxy/api/staticfiles/ntp-relaunch/dokumente/zuordnung\\_unklar/ufla-reporting-monitoring/abschlussbericht\\_ufla\\_monitoring\\_2020\\_4uenb.pdf](https://www.netztransparenz.de/xspproxy/api/staticfiles/ntp-relaunch/dokumente/zuordnung_unklar/ufla-reporting-monitoring/abschlussbericht_ufla_monitoring_2020_4uenb.pdf)
- Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., *Automatische Letztmaßnahmen zur Vermeidung von Systemzusammenbrüchen*, VDE-AR-N 4142:2020-04, Berlin., 1. April 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vde-verlag.de/normen/0100567/vde-ar-n-4142-anwendungsregel-2020-04.html>
- Europäische Kommission, *VERORDNUNG (EU) 2017/2196 DER KOMMISSION vom 24. November 2017 zur Festlegung eines Netzkodex über den Notzustand und den Netzwiederaufbau des Übertragungsnetzes*. 2017.
- Europäische Kommission, *VERORDNUNG (EU) 2017/1485 DER KOMMISSION vom 2. August 2017 zur Festlegung einer Leitlinie für den Übertragungsnetzbetrieb*.
- Österreichs E-Wirtschaft, „Systemschutzplan Österreich: Technische Maßnahmen zur Vermeidung von Großstörungen und Begrenzung ihrer Auswirkungen“, 2021.
- E-Control, *Technische und organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen. TOR Stromerzeugungsanlagen: Anschluss und Parallelbetrieb von Stromerzeugungsanlagen des Typs D*. 2024.
- R. Frost, L. Zieland, D. Sharafi, und J. Susanto, „Impact of Reverse Power Flow in Distribution Feeders on Under-Frequency Load Shedding Schemes“, in *2020 International Conference on Smart Grids and Energy Systems (SGES)*, Nov. 2020, S. 100–104. doi: [10.1109/SGES51519.2020.00025](https://doi.org/10.1109/SGES51519.2020.00025).
- Australian Energy Market Operator, Hrsg., „Under Frequency Load Shedding: Exploring dynamic arming options for adapting to distributed PV“. Oktober 2023. Zugegriffen: 16. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://aemo.com.au/-/media/files/initiatives/der/2023/dynamic-arming-options-for-ufls.pdf?la=en&hash=F6B7A015C8EB872C83513BA9C95EFE5B>
- R. Willis, „Distributed PV Integration: Impacts on Under Frequency Load Shedding“, ESIG. Zugegriffen: 10. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.esig.energy/distributed-pv-integration-impacts-on-under-frequency-load-shedding/>
- A. Richter und I. Hauer, „Lastabwurfkonzept auf Basis von Jahresmittelwerten“, in *IEEE Power and Energy Student Summit 2015*, A. Kubis, C. Rehtanz, A. Shapovalov, D. Hilbrich, und E. Plota, Hrsg., Technische Universität Dortmund, Jan. 2015. doi: [10.17877/DE290R-7681](https://doi.org/10.17877/DE290R-7681).
- S. Bustamante, J. W. gonzález, G. J. López, und H. A. Cardona, „UFLS and Smart Load for Frequency Regulation in Electrical Power System: A Review“, *IEEE Access*, Bd. 11, S. 110967–110984, 2023, doi: [10.1109/ACCESS.2023.3321865](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3321865).
- A. A. koosha und T. Amraee, „Under Frequency Load Shedding Against Severe Generation Outages in Low Inertia Power Grids“, in *2020 15th International Conference on Protection and Automation of Power Systems (IPAPS)*, Dez. 2020, S. 108–114. doi: [10.1109/IPAPS52181.2020.9375600](https://doi.org/10.1109/IPAPS52181.2020.9375600).

Vielen Dank  
für Ihre Aufmerksamkeit!

Diskussion und Fragen?



**Marbod Kollnig, M.Sc. M.Sc.**

Universitätsassistent

Technische Universität Wien

Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe

Forschungsbereich Energiesysteme und Netze (E370-01)

Gußhausstraße 25 | 1040 Wien | Österreich

Tel: +43 1 58801 370 134

[marbod.kollnig@tuwien.ac.at](mailto:marbod.kollnig@tuwien.ac.at)