
ROCOF: THEORIE, HERAUSFORDERUNGEN & CHANCEN

Virtueller ZuPrüVal-Projektworkshop, 17.09.2020

Referent: Dr. Gunter Arnold, Fraunhofer IEE, Kassel



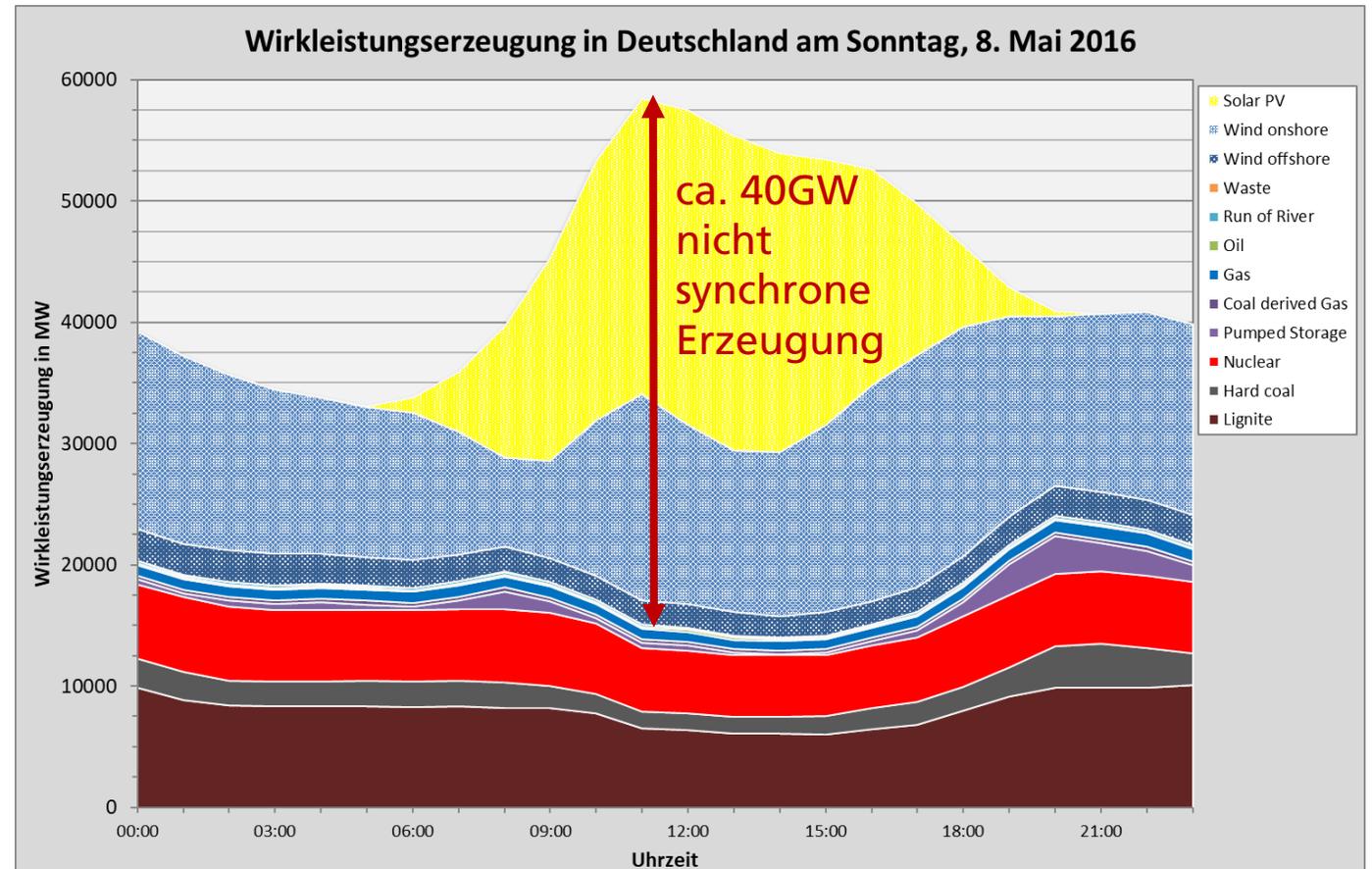
INHALT

- Motivation / Einführung
- Grundlegende physikalische Zusammenhänge rotierender Systeme
- Physikalische Zusammenhänge in AC-Stromversorgungsnetzen
- Einführung zur Frequenzregelung
- RoCoF Definition von ENTSO-E
- Veränderungen der Trägheitsmomente / RoCoF in Zentraleuropa
- Bedeutung der RoCoF-Immunität
- Zusammenfassung und Ausblick

Motivation

Transformation der Stromversorgung in Deutschland und Europa

- Rasante Zunahme dezentraler Erzeugungsanlagen (PV, Wind, etc.) in DE in den letzten 10 Jahren, in allen Spannungsebenen
- Atomausstieg in Deutschland bis Ende 2022
- Klimakonferenz 2015 - COP 21: Reduktion der Treibhausgase und Kohleausstieg in DE bis 2038 (beschlossen im Juli 2020)
- Dezentrale, stromrichtergekoppelte Erzeugungsanlagen werden zukünftig die Stromerzeugung in DE (zumindest zeitweise) dominieren



Grundlegende physikalische Zusammenhänge rotierender Systeme

- **Newtonsche Bewegungsgleichung** eines rotierenden Systems (mit z.B. Antriebsmaschine und elektr. Generator):

$$M_B = M_A - M_L = J \frac{d\omega}{dt} = 2\pi J \frac{dn}{dt}$$

- M_B : Beschleunigungsmoment des rot. Systems ($M_B > 0 \rightarrow$ Beschleunigung, $M_B < 0 \rightarrow$ Abbremsung)
- M_A : Antriebsmoment (z.B. Antriebsmoment einer Kraftwerksturbine)
- M_L : Lastmoment (z.B. elektrisch abgegebenes Moment eines Kraftwerksgenerators)
- J : Trägheitsmoment (der rotierenden Anordnung)
- ω : mech. Kreisfrequenz / Winkelgeschwindigkeit
- n : mech. Drehzahl

- **Drehmoment und mechanische Leistung:**

$$P_m = M * \omega = M * 2\pi * n$$

$$P_m = 2\pi J \frac{dn}{dt} * 2\pi * n = 4\pi^2 * J * n * \frac{dn}{dt}$$

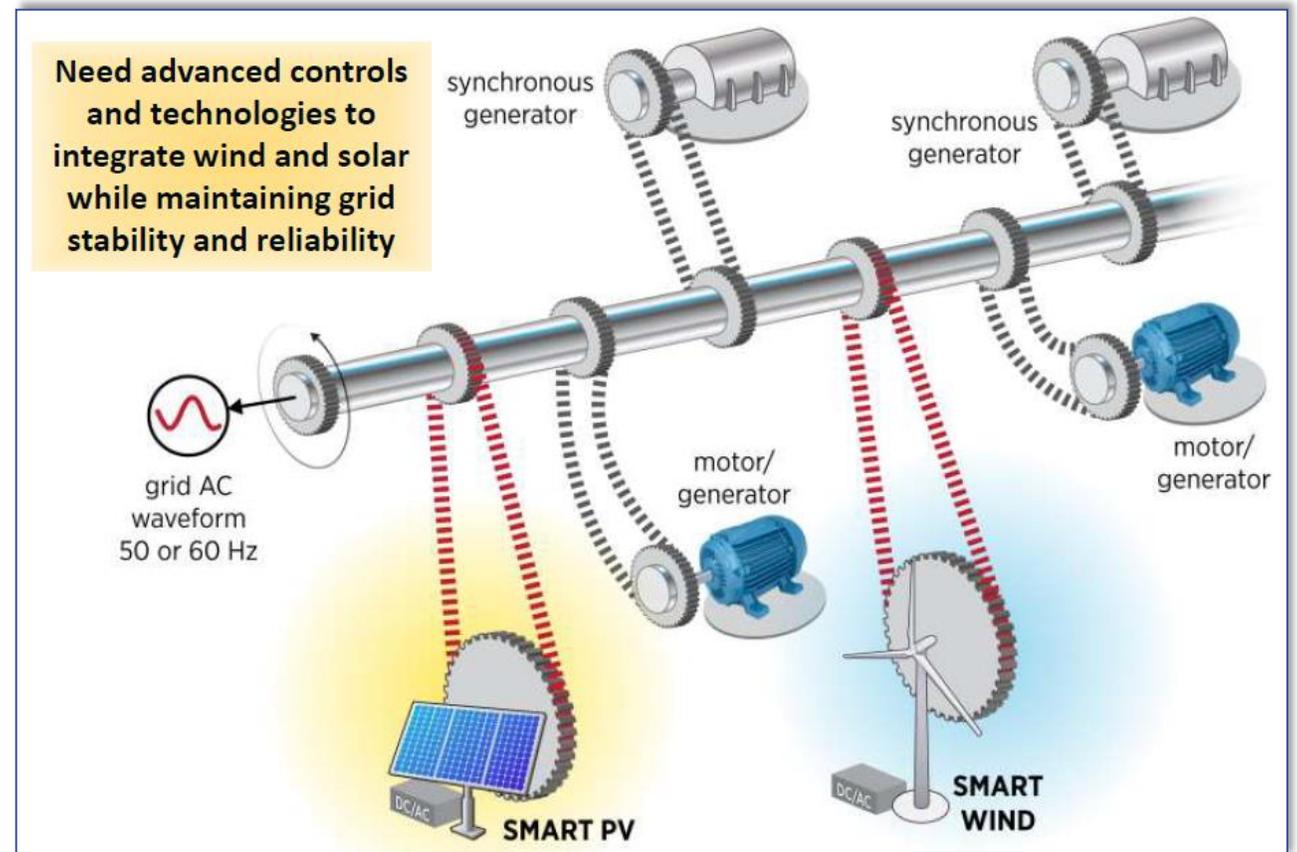
- P_m : Mech. Leistung des rot. Systems
- M : Mech. Moment des rot. Systems
- J : Trägheitsmoment (der rotierenden Anordnung)
- ω : mech. Kreisfrequenz / Winkelgeschwindigkeit
- n : mech. Drehzahl

- **Mech. Leistung und Rotationsenergie:**

$$E_{Rot} = \frac{1}{2} * J * \omega^2$$

Physikalische Zusammenhänge in AC-Stromversorgungsnetzen

- Analoge Zusammenhänge in AC-Stromversorgungsnetzen mit rotierenden Generatoren/Maschinen
 - Synchronmaschinen:
Festes, lastunabhängiges Verhältnis von Synchrondrehzahl und Netzfrequenz
 - Asynchronmaschinen:
Weiche, lastabhängige, Kopplung zwischen Drehzahl und Netzfrequenz
 - EZA mit selbstgeführten Stromrichtern:
Bislang: Generator- und Netzfrequenz entkoppelt, Jetzt: "virtuelle" Kopplung möglich
- Im Normalbetrieb ist gleiche Netzfrequenz im gesamten Versorgungsgebiet vorhanden.



Quelle: Kroposki B., NREL: Integrating Ultra-High Levels of Variable Renewable Energy into Electric Power Systems, EPGC Seminar, Singapore, 2018

Einführung zur Frequenzregelung

- Der Verbrauch und die Erzeugung elektrischer Energie müssen zu jedem Zeitpunkt ausgeglichen werden:

$$P_{\text{Gen}} = P_{\text{Last}}$$

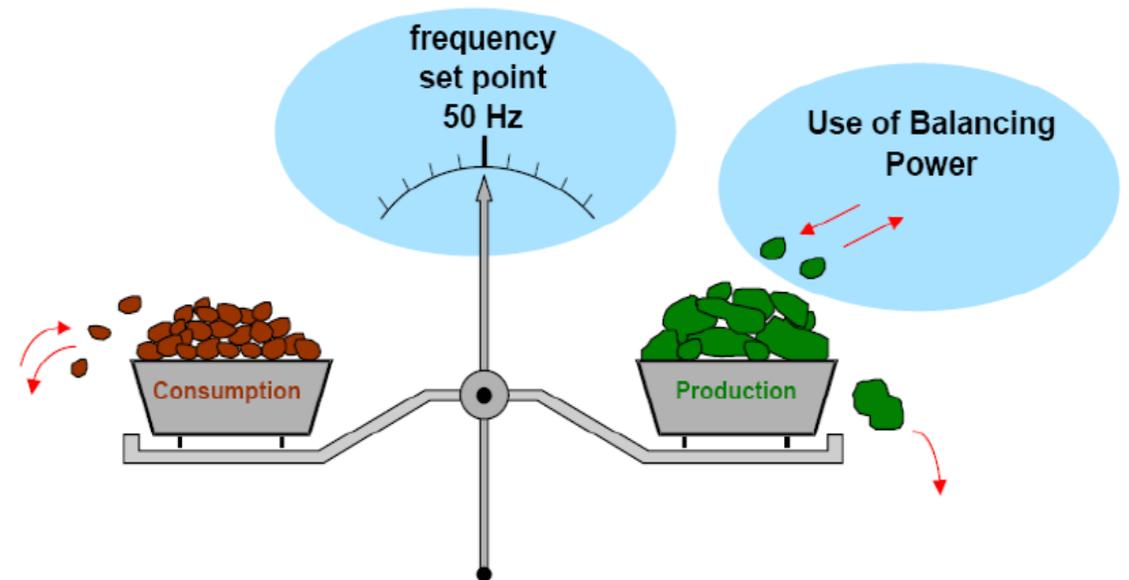
- Ein Wirkleistungs-Ungleichgewicht ($P_{\text{Gen}} \neq P_{\text{Last}}$) hat instantan Auswirkungen auf die Netzfrequenz:

- $P_{\text{Gen}} = P_{\text{Last}} \rightarrow f_{\text{Netz}} = \text{konst.},$
- $P_{\text{Gen}} > P_{\text{Last}} \rightarrow f_{\text{Netz}} = \uparrow$ und
- $P_{\text{Gen}} < P_{\text{Last}} \rightarrow f_{\text{Netz}} = \downarrow$

- Möglichkeiten zur Beeinflussung der Netzfrequenz:

- Wirkleistungserzeugung P_{Gen}
- Wirkleistungsverbrauch (Last) P_{Last}

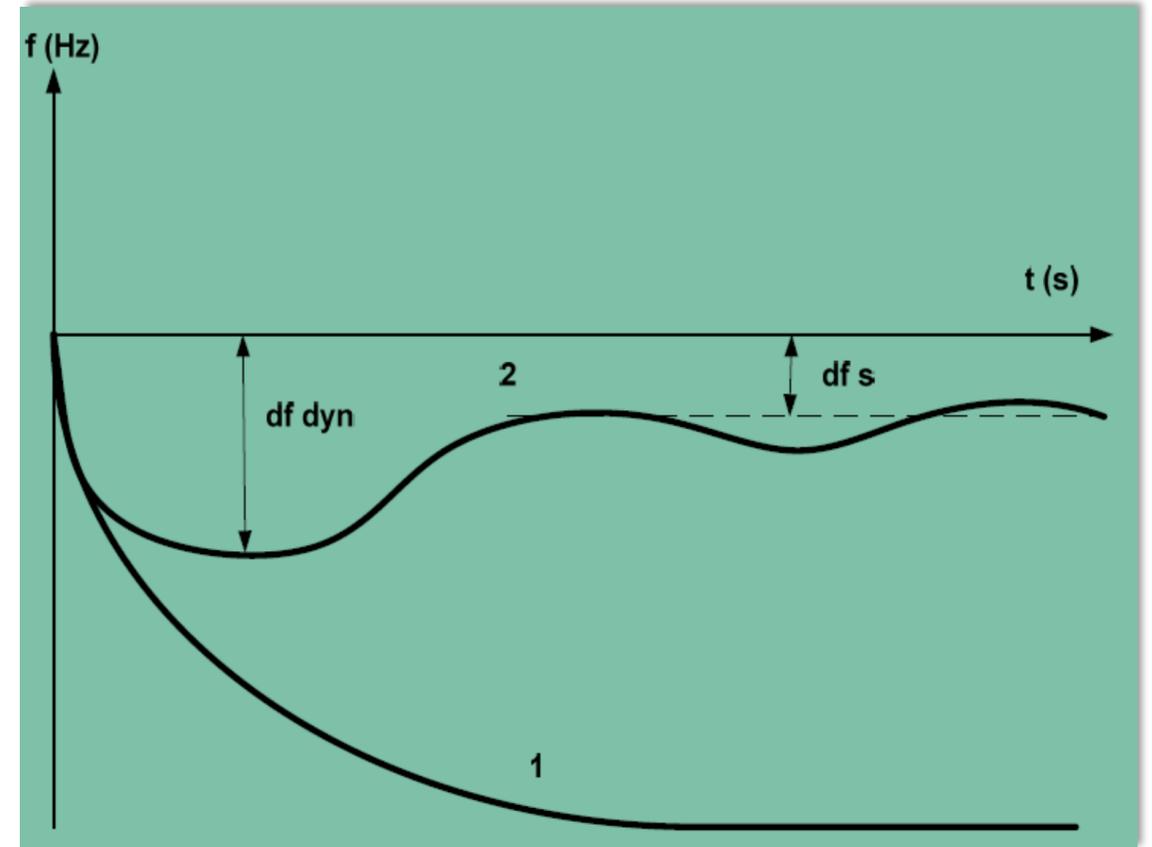
System operation is a **real-time** business that needs to keep the balance between production and consumption at any time.



Quelle: Development of the UCTE network and binding rules of transmission system operation, K. Kleinekorte, UCTE Chairman WG Operations & Security, Presentation, Ostrava, 30.01.2009

Einführung zur Frequenzregelung

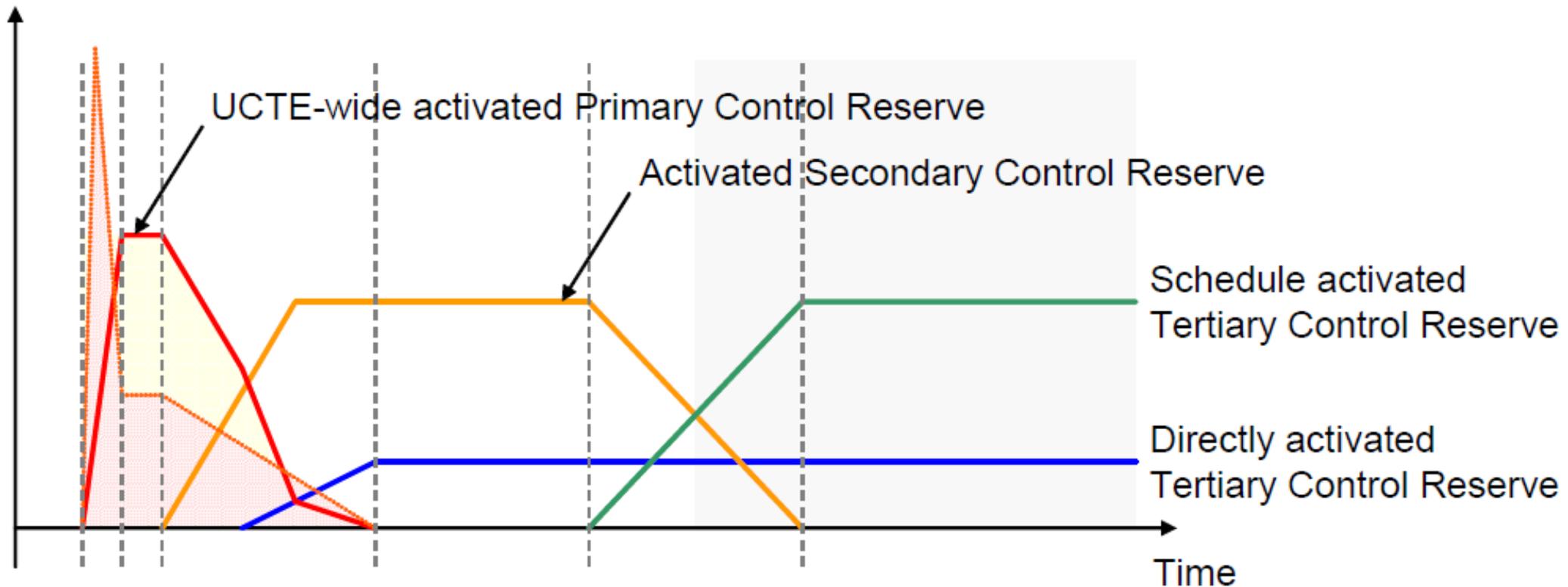
- Zeitlicher Verlauf eines Frequenzabfalls aufgrund eines plötzlichen Wirkleistungsdefizits
 - Linie 1 ohne Eingriff einer Frequenzregelung
 - Linie 2 mit Frequenzregelung
- Für das ENTSO-E Verbundsystem „Zentraleuropa“ gelten dabei folgende Werte:
 - Wirkleistungsausfall: 3000 MW (= 2% der Systemlast)
 - Last-Selbstregelungseffekt: 1%/Hz
 - Max. dyn. Frequenzabweichung: -800 mHz
 - Max. stat. Frequenzabweichung: ± 200 mHz



Quelle: Frequency Control and Regulating Reserves, Asko Vuorinen

Einführung zur Frequenzregelung

Abfolge verschiedener Frequenzregelungsmaßnahmen



Quelle: UCTE Operational Handbook, Appendix P1 – Policy 1: Load-Frequency Control and Performance [C], Brüssel, 2009

RoCoF Definition von ENTSO-E

- Rate of Change of Frequency (RoCoF):
Zeitliche Ableitung der Netzfrequenz
- RoCoF –Wert am größten direkt nach
Frequenzereignis

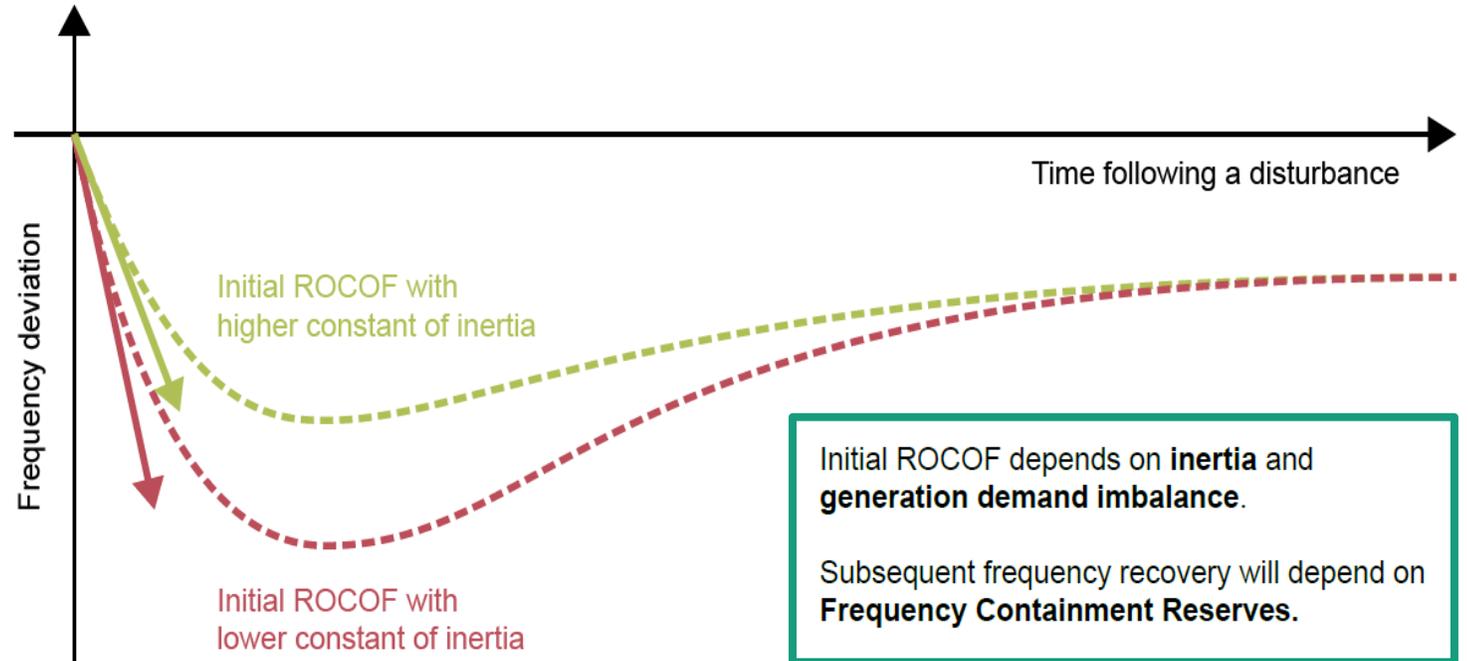
$$RoCoF_{max} = \frac{df_N}{dt_{max}} = \frac{\Delta P}{P_{Last}} * \frac{f_0}{T_N}$$

- Trägheitsmomente aller rot. Generatoren $T_{A,SG}$ sind in der Hochlaufzeitkonstante T_N zusammengefasst:

$$T_N = \frac{\sum_1^n (T_{A,SG,n} * P_{nom,SG,n})}{P_{Last}}$$

- Hochlaufzeitkonstante $T_{A,SG}$ eines rot. Generators errechnet sich wie folgt:

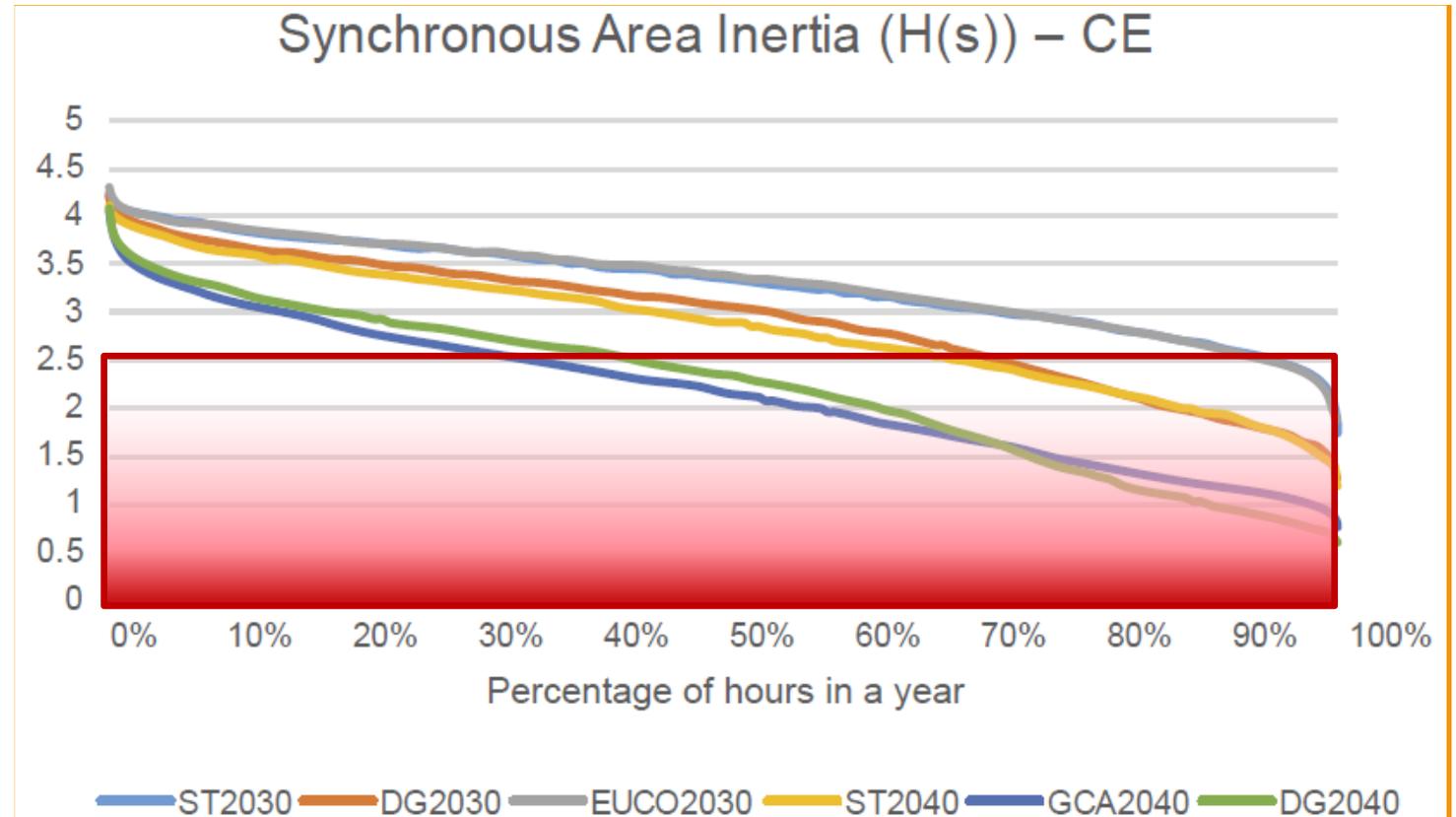
$$T_{A,SG} = \frac{J * \omega^2}{P_{nom,SG}}$$



Quelle: Frequency Stability Evaluation Criteria for the Synchronous Zone of Continental Europe, ENTSO-E, Brüssel, März 2016

Veränderungen der Trägheitsmomente / RoCoF in Zentraleuropa

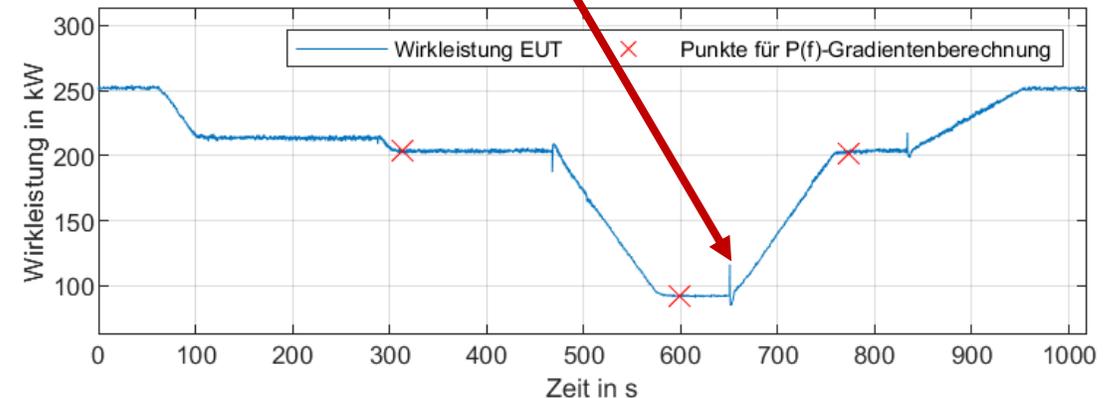
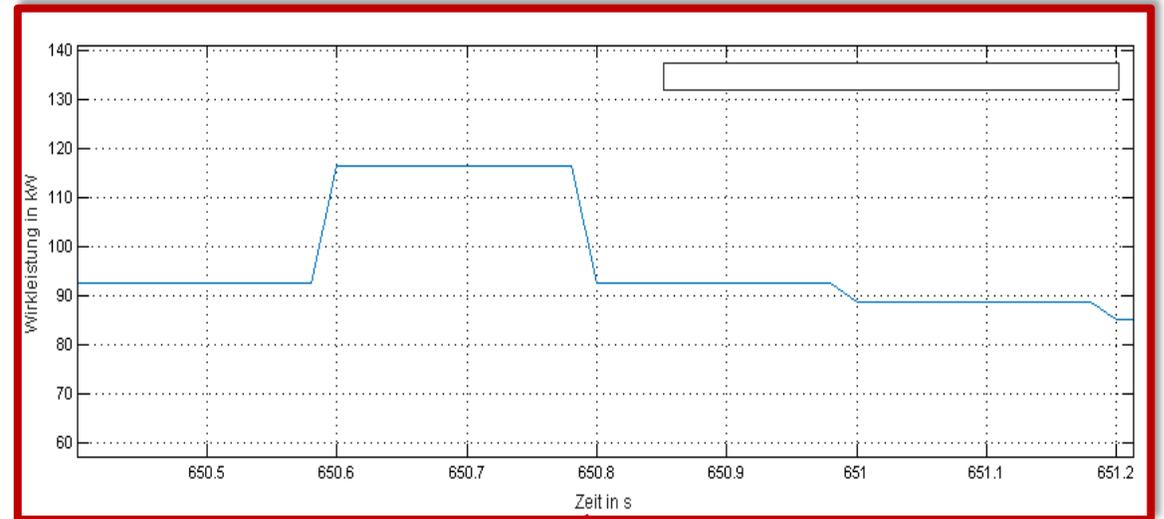
- Hochlaufzeitkonstanten basieren auf TYNDP mit folgenden Szenarien:
 - Sustainable Transition: ST2030, ST2040
 - Distributed Generation: DG2030, DG2040:
 - EU-Commission Policy: EUCO2030
 - Global Climate Action: GCA2040
- Berechnung min. Hochlaufzeitkonstante für einen festgelegten RoCoF-Wert:
 - Mit RoCoF = 2 Hz/s und $\Delta P = 10\%$
→ T_N bzw. $H \geq 2,5s$



Quelle: European Power System 2040 – Completing the Map – The Ten Year Network Development Plan 2018 System Needs Analysis; ENTSO-E, Brüssel, 2018

Bedeutung der RoCoF-Immunität

- Im Normalbetrieb:
Hohe RoCoF Werte führen zu starken Belastungen insb. an rotierenden Generatoren / Motoren durch Abbremsung und Beschleunigung mit Abgabe bzw. Aufnahme von Rotationsenergien.
- Bei Frequenzereignissen:
Wirkleistungsbeiträge aller Erzeugungsanlagen (EZA) für Frequenzstützung wichtig
→ Ausfall von EZA aufgrund mangelnder RoCoF-Immunität oder Schutzauslösung verhindern (Kaskadeneffekt)!
- Bei Teilnetzbildung oder Netzwiederaufbau:
Besonders niedrige Netzträgheitskonstanten
→ Immunität der EZA gegenüber hohen RoCoF-Werten wichtig



Quelle: Eigene Prüfung der Wirkleistungsreduktion bei Überfrequenz an einem Erdgas BHKW

Zusammenfassung und Ausblick

- Die grundlegenden physikalischen Zusammenhänge rotierender Systeme lassen sich auf AC-Stromversorgungssysteme mit rotierenden Generatoren/Maschinen übertragen.
- Der Verbrauch und die Erzeugung elektrischer Energie müssen zu jedem Zeitpunkt ausgeglichen werden. Ein Wirkleistungsungleichgewicht führt instantan zu einer Veränderung der Netzfrequenz.
- Die zeitliche Ableitung (Änderung) der Netzfrequenz (RoCoF) ist zu Beginn der Störung am größten und grundsätzlich abhängig:
 - vom Trägheitsmoment aller rotierenden Maschinen (Hochlaufzeitkonstante des Netzes) und
 - von der prozentualen Größe des Wirkleistungsungleichgewichts
- In den nächsten Jahrzehnten werden die Hochlaufzeitkonstanten in Europa tendenziell sinken.
- Die Immunität von Erzeugungsanlagen (zentral und dezentral) gegenüber hohen RoCoF-Werten ist daher von essentieller Bedeutung.
- Die Beteiligung stromrichtergekoppelter EZA an der Trägheit (synthetic inertia) ist zukünftig wichtig.

PROJEKT „ZUPRÜVAL“ – ERNEUERBARE INTEGRIERT

Vielen Dank!
Haben Sie Fragen?



Smart Grid / Hybridsystem Labor, Fraunhofer IEE
www.iee.fraunhofer.de/mess

Dr. Gunter Arnold
Abt. Systemstabilität und Netzintegration
Fraunhofer IEE, Kassel
gunter.arnold@iee.fraunhofer.de

Das dieser Präsentation zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03TNH027A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages