



Notsynchronisierung Ukraine

Dipl.-Ing. Dr. Tahir Kapetanovic, MBA
Leiter Systembetrieb

Energiesysteme im Umbruch, Klagenfurt am Wörthersee, 03.10.2022

Inhalte

- Vorgeschichte und aktuelle Situation
- Monitoring und Systemsicherheit
- Ausblick

Inhalte

- Vorgeschichte und aktuelle Situation
- Monitoring und Systemsicherheit
- Ausblick

Das ukrainische System

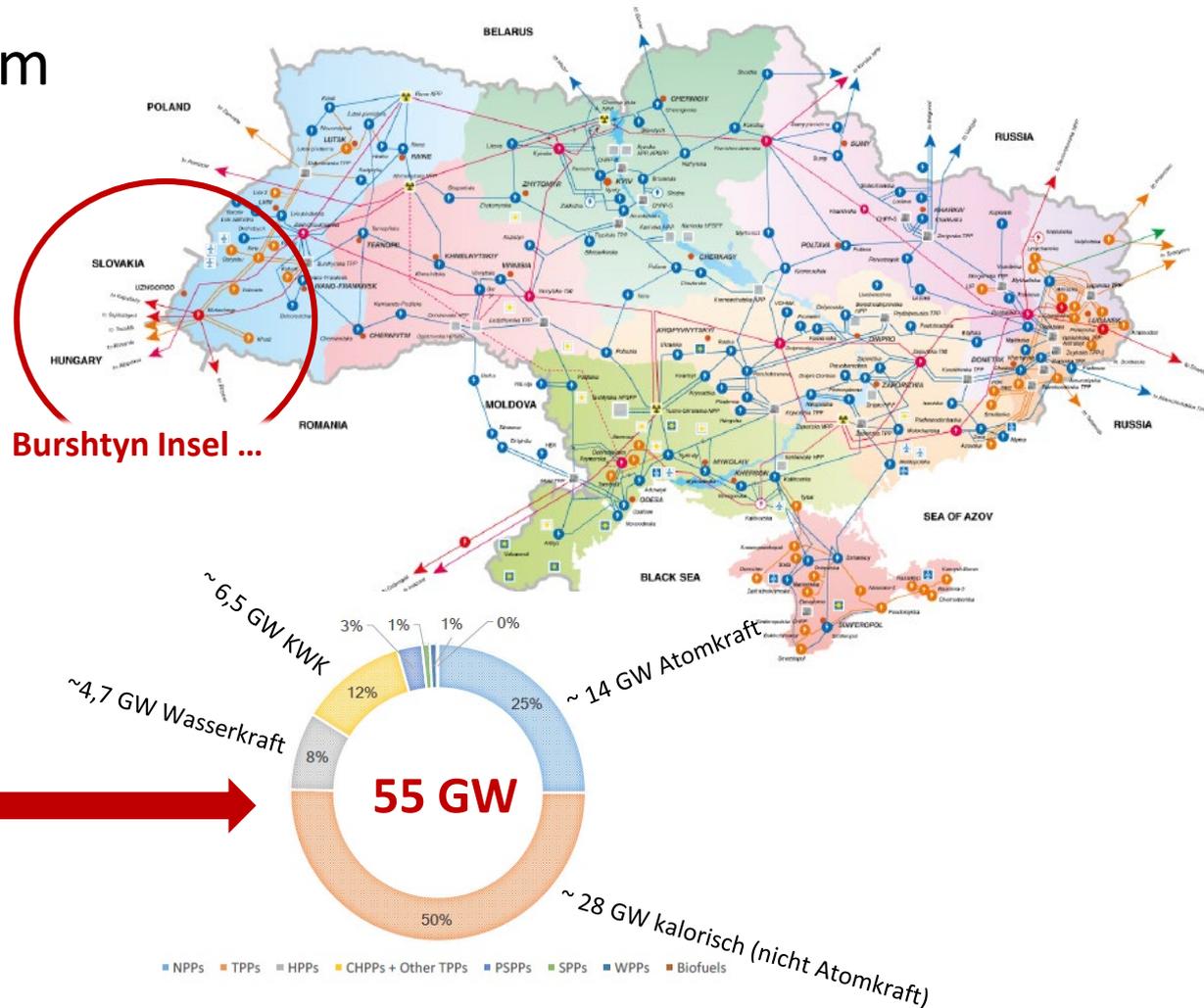
- 137 Umspannwerke
220/330/500/750 kV
- 23.000 km Leitungen
(Systemlänge)

4.200 km 750 kV

14.100 km 330-500 kV

4.700 km 220 kV

- Erzeugungskapazität 
- Spitzenlast = **23,9 GW**



... Burshtyn Insel

- **Richtungsbetrieb mit Synchronzone Kontinentaleuropa seit 01.07.2002**
- Hauptmotivation: Export
- Erzeugungskapazität der Insel: 2,5 GW
 - 2.351 MW Kohlekraftwerk Burshtyn
 - 200 MW KWK Anlage Kaluska
 - 27 MW Wasserkraftwerk Tereblia-Rikska



ENTSO-E (RGCE)* Projekt zur Synchronisierung mit der Ukraine

- Juni 2017: die TSOs der Synchronzone Kontinentaleuropa unterschreiben mit Ukrenergo (Ukraine) und Moldelectrica (Moldau) die Vereinbarung über künftige Synchronisierung und Parallelbetrieb
- Vertragsbasis: Vorerst UCTE* Operation Handbuch, danach Synchronous Area Operational Agreement** gem. EU VO 2017/1485 (System Operation Guideline)
- umfangreiche Maßnahmen, Analysen, Inselbetriebstests vorgesehen einschl. P/f-Regelungsgütetest, Ausfälle der Betriebsmitteln, usw.
- geplantes Projektende ~Q1-Q2/2023 mit Synchronisierung und Parallelbetrieb

* *ENTSO-E = European Network of TSOs – Electricity (ÜNB Verband Europas); RGCE = Regional Group Continental Europe (Synchronzone)
früher UCTE = Union pour Coordination de Transmission de Electricite*

** <https://transparency.entsoe.eu/system-operations-domain/operational-agreements-of-synchronous-areas/show>

Geplante Zusammenschaltung - Leitungen

1. 400 kV V.Kapusany (SK) – Mukacheve (UA)
2. 220 kV Kisvarda (H) – Mukacheve (UA)
3. 220 kV Tiszalok (H) – Mukacheve (UA)
4. 400 kV Szabolcsbaka (H) – Mukacheve (UA)
5. 750 kV Szabolcsbaka (H) – Zakhidnoukrainska (UA)
6. 400 kV Rosiori (RO) – Mukacheve (UA)
7. 400 kV Vulcanesti (MD) – Isaccea (RO)

(* Richtungsbetrieb von KW Dobrovinska nach Polen)

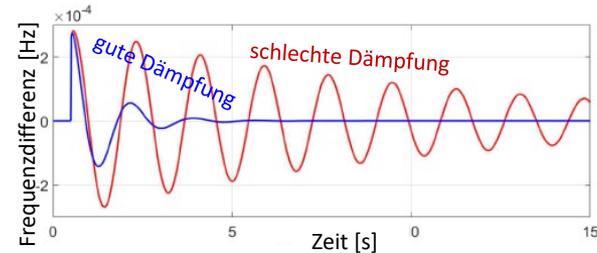
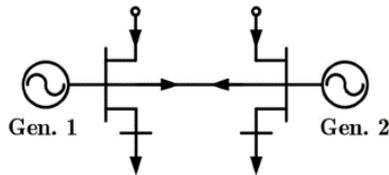


Projektergebnisse bis Februar 2022

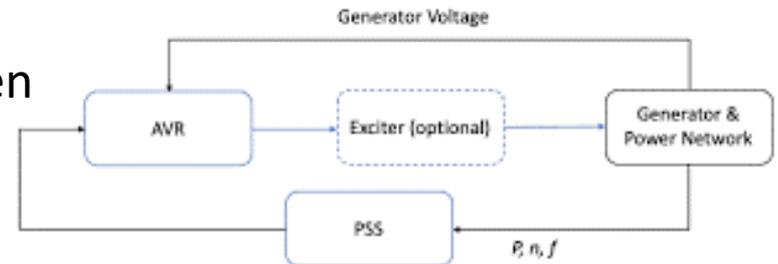
- Studien, Simulationen und Stabilitätsanalysen durchgeführt nach Plan
- Maßnahmen zur **Risikoreduktion weiträumiger niederfrequenten Schwingungen** sollen bis Q1/2023 implementiert werden
 - Pendeldämpfungsgeräte (PSS = Power System Stabilizers) bei mehreren Generatoren
 - Anpassung der automatischen Spannungsregelung (AVR) in einem Kraftwerk
 - Installation statischer Synchronkompensatoren (STATCOMs) in 4 Kraftwerken
- **2 Inselbetriebstests** geplant: Winter (24-26.02.2022) und Sommer (Juni 2022)

Exkurs: weiträumige niederfrequente Schwingungen

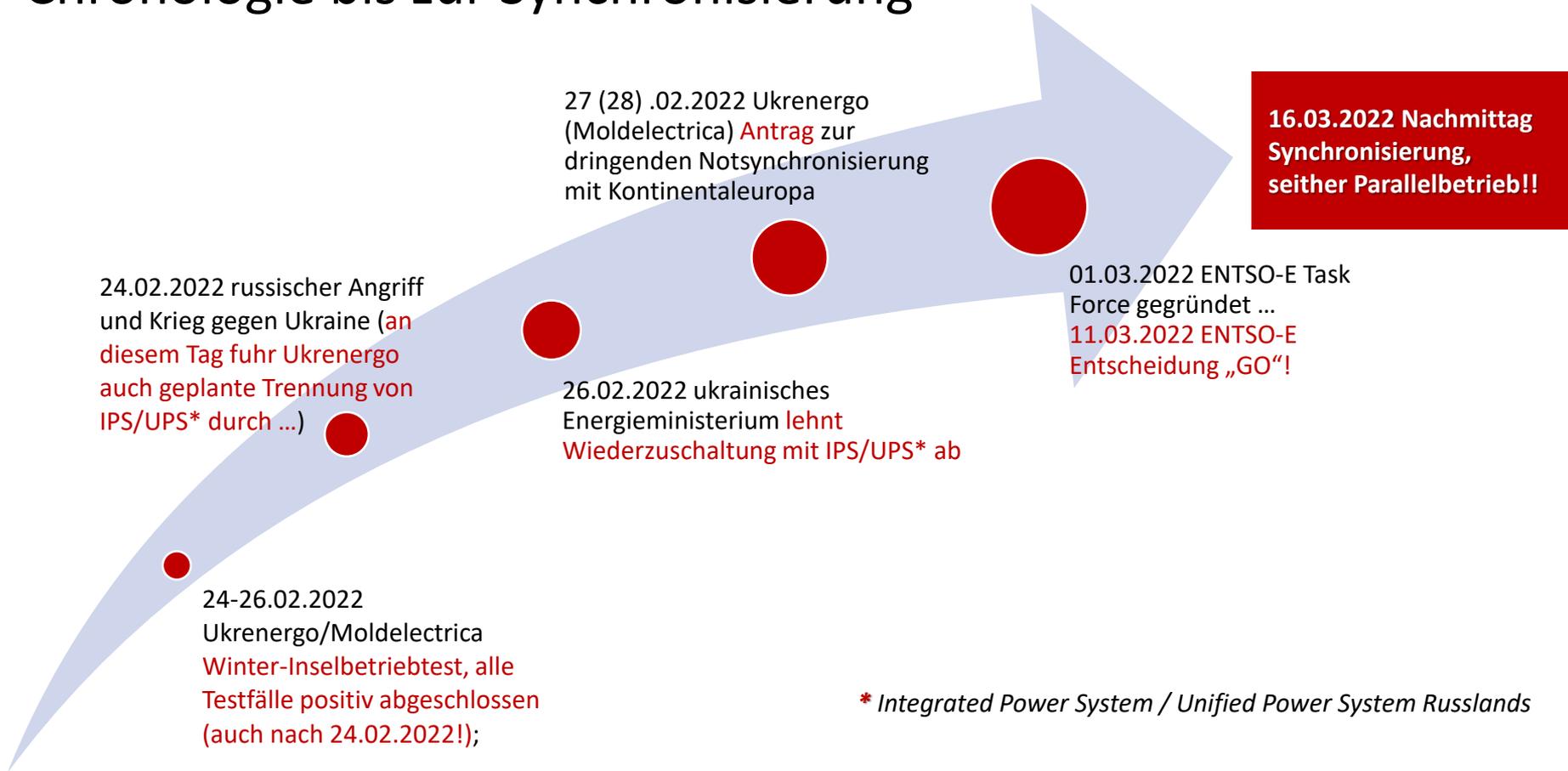
- 0,1-1 Hz Schwingungen können entstehen bei **Laständerung der Generatoren an der Peripherie der großen Synchronzonen mit langen Übertragungsleitungen**, insb. bei Lastflussrichtung Peripherie → Zentrum



- Pendeldämpfungsgeräte (PSS) für Dämpfung der (Polradwinkel)Schwingungen der Generatoren in Kombination mit weiträumigen Messungen (WAMS = Wide Area Monitoring Systems)



Chronologie bis zur Synchronisierung



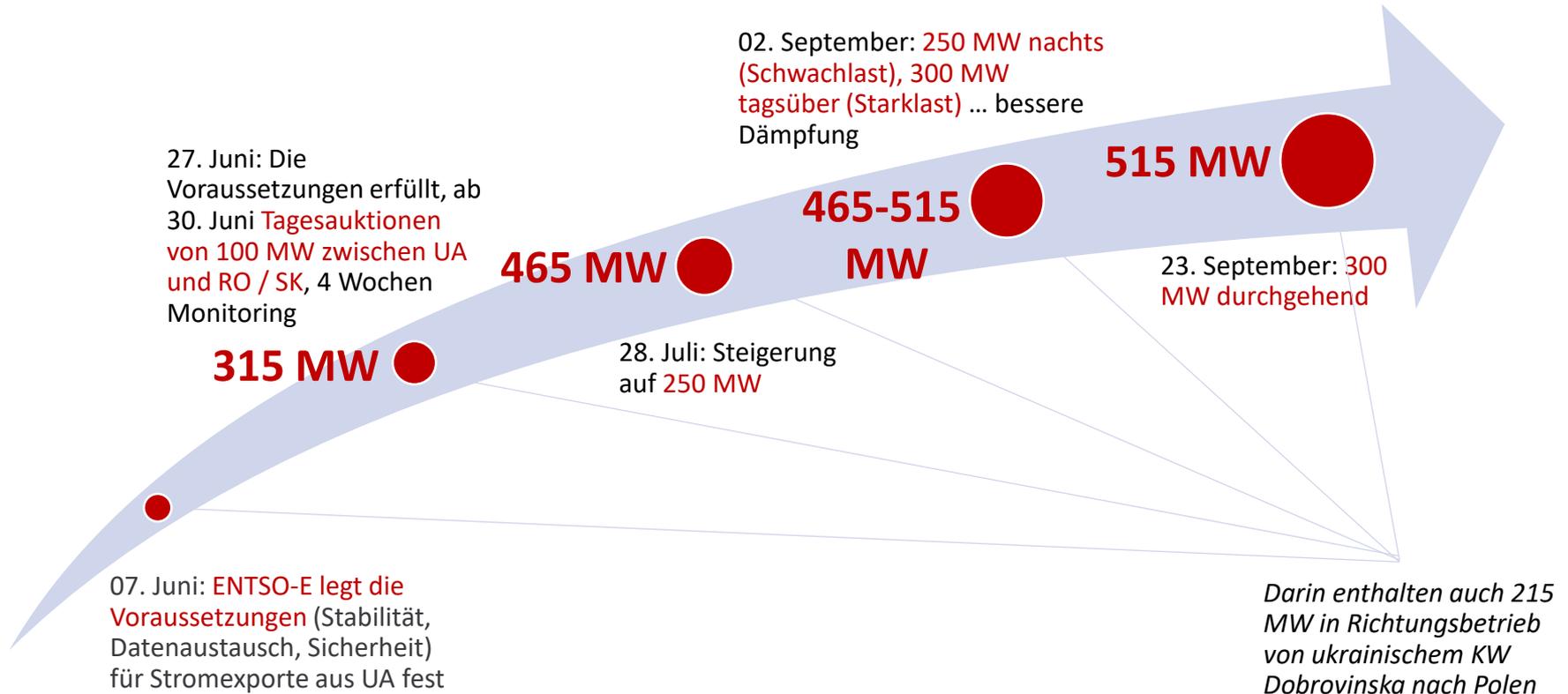
Maßnahmen und Erfahrungen bis Mai 2022 I/II

- Dringende **Notsynchronisierung ist technisch möglich, ohne zusätzlicher Gefahr für Kontinentaleuropa Synchronzone wenn NTC=0** (Net Transfer Capacity), bis zur Umsetzung der Maßnahmen zur Reduktion der weiträumigen niederfrequenten Schwingungen
- Kontinuierliches Monitoring mittels WAMS / PMU (Phasor Monitoring Unit)
- IT Sicherheit ist durch spezifische Lösungen gewährleistet
- Rechtliche und regulatorische Risiken durch Unterstützung der EK reduziert
- vertragliche Bestimmungen für Ukrenergo als ENTSO-E Observer → 04/2022

Maßnahmen und Erfahrungen bis Mai 2022 II/II

- Synchronisierung durchgeführt mit hoher Effektivität und Geschwindigkeit → unterstützt durch das Projekt das bereits seit 2017 läuft
- humanitäre Gründe, Systemsicherheits- und Stabilitätseffekte
- Ukrenergo ist schnell in der Umsetzung der vorgeschriebenen Maßnahmen trotz des Krieges
- Integration in die ENTSO-E / SOC / RGCE Arbeitsgruppen läuft

Stromexporte aus Ukraine I/II



Stromexporte aus Ukraine II/II

Technische Analysen vor Exportbeginn im Juni und vor jeder Steigerung:

- Stabilität (Schwingungen) der Synchronzone Kontinentaleuropa
- Systemsicherheit auch bei hohen Transit/Ringflüssen und Störungen
- Blackoutrisiko in UA/MD sowie Nachbarländer bei Synchronzonentrennung

+ kontinuierliches **Echtzeitmonitoring seit 16.03.2022** (Synchronisierung)

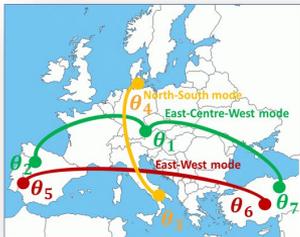
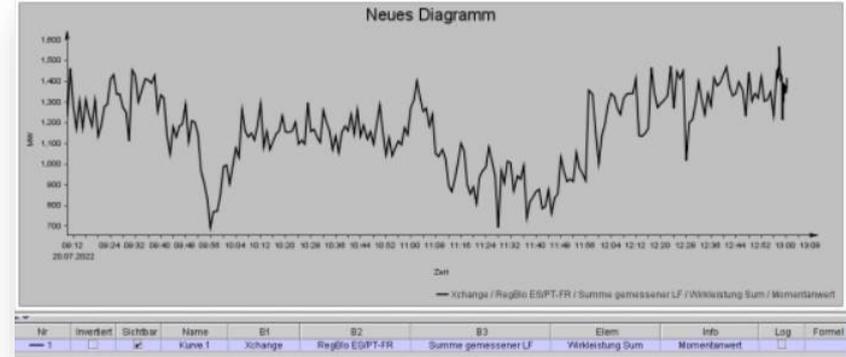
+ Simulationen zur Evaluierung der Stromaustauschkapazität

Inhalte

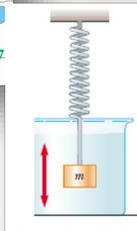
- Vorgeschichte und aktuelle Situation
- **Monitoring und Systemsicherheit**
 - Systemstabilität / Schwingungen
 - Netzsicherheitsanalyse
 - Leistungsfrequenzregelungsqualität
 - Transit- bzw. Ringflüsse
- Ausblick

Schwingungen und Systemstabilität – Details

Die meiste Zeit **stabiler Systembetrieb**,
 Leistungsfrequenzregelung (AGC – Primär- (FCR = Frequency Containment Reserve) und Sekundärregelung (FRR = Frequency Restoration Reserve) in UA funktioniert gut



0.3 Hz
0.2 Hz
0.15 Hz



$$P \propto \sin(\Delta\theta) \quad \Rightarrow \quad K \propto \frac{\cos(\Delta\theta)}{X} \quad \text{Dynamic "spring" effect}$$

$\Delta\theta \propto$ Large power flows between CE "centre" and "periphery"

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + b \cdot \frac{dx}{dt} + k \cdot x \Rightarrow 2 \cdot H \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + b \cdot \frac{dx}{dt} + K \cdot x$$

inertia "spring effect"
 ↓ ↓
 damping contribution

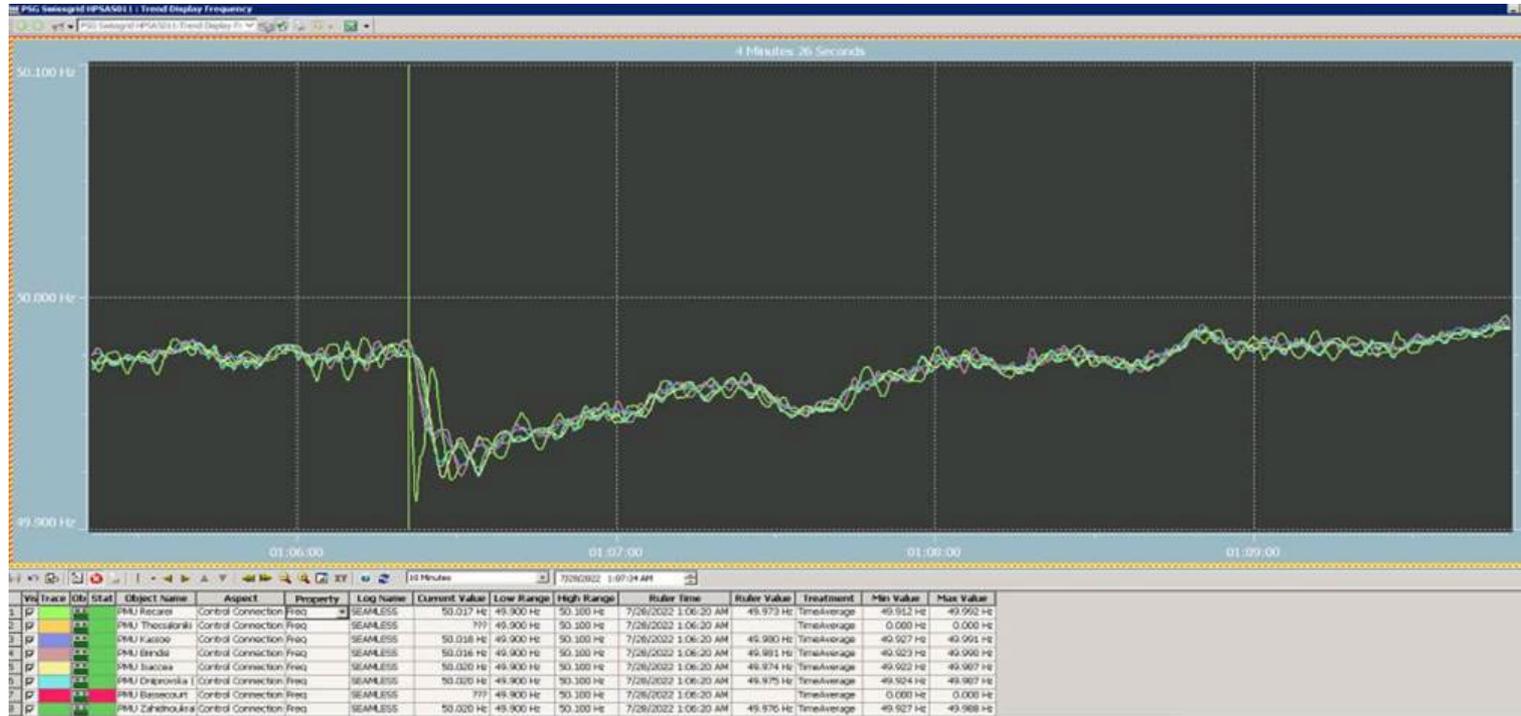
"b" damping contribution depends on: loads, angle spread, operating point and reactance seen by generators

Power absorbed by loads depends by voltage $P \propto V^2$

Dämpfung der Schwingungen ist gut, insb. wegen Lastverhalten in Spanien in Kombination mit gut eingestellten und getesteten PSS für Spanien und Frankreich, sowie **countertrade ("redispatch") zwischen den beiden Länder**

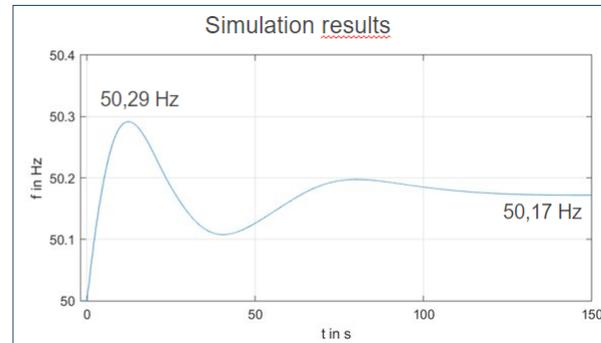
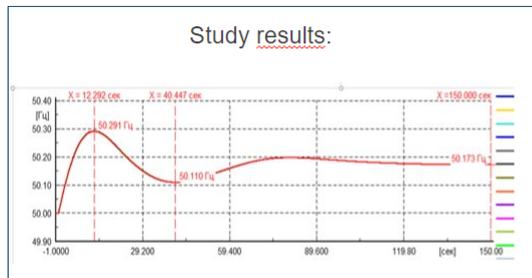
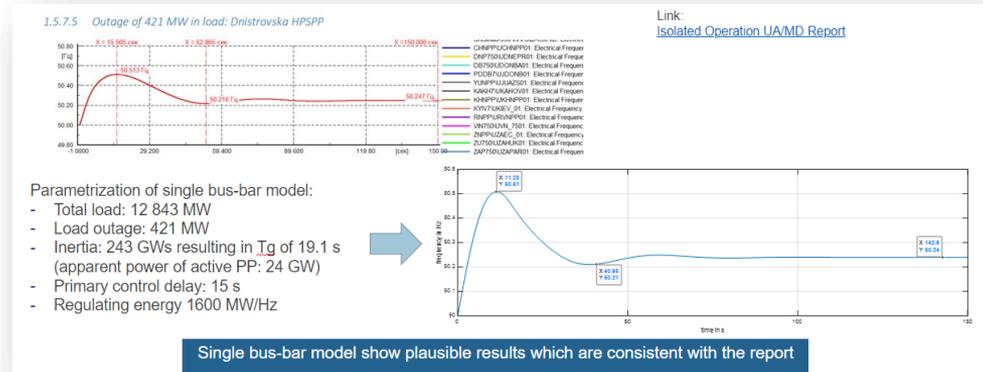
FCR / Primärregelungswirkung in UA

Beispiel: Kraftwerksausfall in Frankreich



Studien / Simulationen bei Exportsteigerungen aus UA I/III

Validierung des Inselbetriebes mit dem gesamten **UA und MD dynamischen Systemmodell** mittels DigSILENT Power Factory



Simulationen in verschiedenen Szenarien in DigSILENT und in 1-Sammelschienenmodell der ENTSO-E

Studien / Simulationen bei Exportsteigerungen aus UA II/III

50.5 Hz ist die Netztrennungsfrequenz der ukrainischen Atomkraftwerke ← der wichtigste Eigenbedarf / interne Last sind die Kühlungspumpen, die als einfache Induktionsmotoren ausgeführt sind und “fallen” daher in Über- oder Untergeschwindigkeit bei Frequenzänderungen → Kühlungsprozess verändert sich mit zweiter oder sogar dritter Potenz bei Frequenzänderungen ...

Scenario Index	1	2	3	4
Scenario Description	- reference scenario used to validate the system balance model against the dynamic PowerFactory model	- "optimistic" scenario: low load, but high inertia, wind infeed providing LFSM-O, realistic primary reserve and regulating energy, high load contribution to inertia	- "worst-case" scenario: low load, only few large inertia (NPP) generators on the grid, no wind infeed providing LFSM-O, reduced amount of regulating loads, reduced primary reserve and regulating energy	- scenario based on the load and NPP dispatch data of 6th and 7th of July 2022 in the morning (2022-07-06, 06:19 CET & 2022-07-07, 06:31 CET)
Result for frequency:				
Comment	- validation complete - reproduces the plot on page 153 of "Isolated Operation Report"	- critical: frequency threshold of 50.5 Hz exceeded for more than 10 s	- critical: frequency threshold of 50.5 Hz exceeded for more than 10 s	- critical: frequency threshold of 50.5 Hz exceeded for more than 10 s

Studien / Simulationen bei Exportsteigerungen aus UA III/III

Zusammenfassung

- 300 MW ist derzeit der höchstmögliche Export aus UA im Parallelbetrieb (d.h. ohne Export in Richtungsbetrieb UA → PL) unter Einhaltung der Systemstabilität und –sicherheit
 - Höhere Exporte ohne zusätzlichen Maßnahmen führen bei Synchronzonentrennung und einem Inselbetrieb von UA/MD zur gefährlichen Frequenzsteigerung die 50,5 Hz erreichen kann und daher zur Netztrennung der Atomkraftwerke führen würde
- ➔ Das **Risiko von Blackout oder Lastabwurf in UA/MD bei Systemtrennung**

Netzsicherheitsanalyse in Betriebsplanung

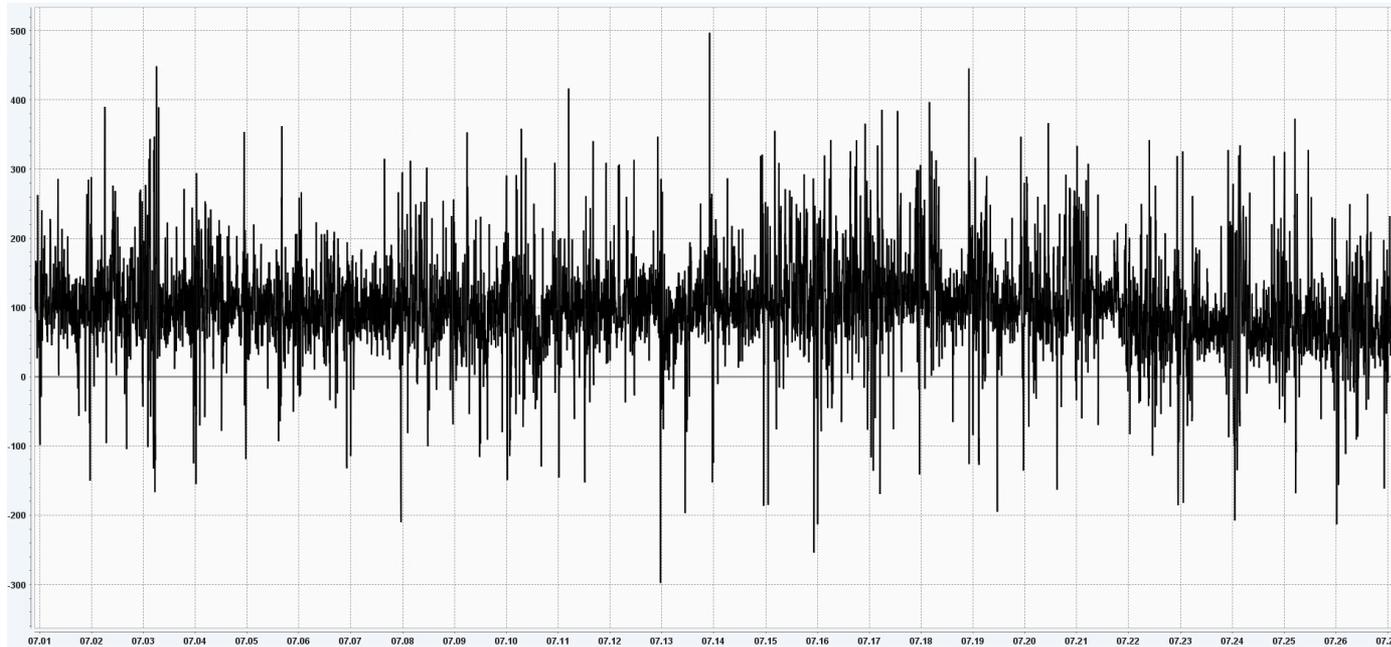
Seit Beginn der Exporte, sind die **UA + MD Netzmodelle** (“Individual Grid Model”) integriert im regionalen Netzsicherheitsanalyseprozess

Alle bisher entstandene Nichtkonvergenzen bei der Lastfluss- und Netzsicherheitsrechnung wurden durch den Regional Coordination Centre TSCNET (das Unternehmen dass auch APG für die Koordination der regionalen Betriebsplanungsdienste nutzt) gelöst

Bisher keine (N-1)-Verletzungen in Kontinentaleuropa durch UA/MD Lastflüsse

Leistungsfrequenzregelungsqualität

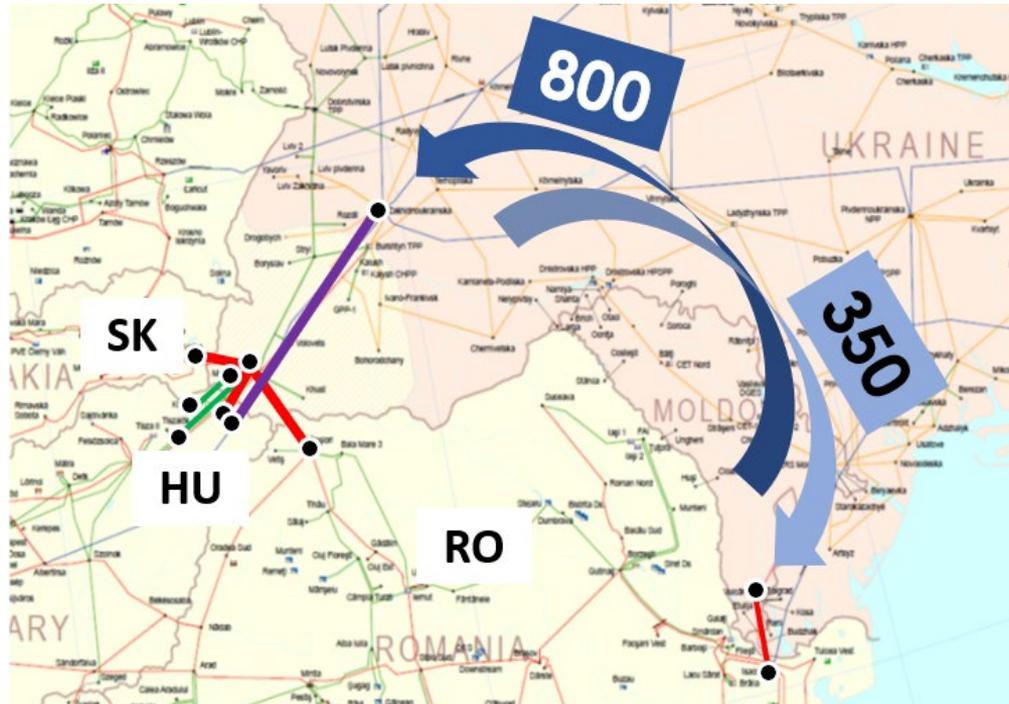
- Die Netposition (Regler) des UA+MD Regelblocks im Juli ist abgebildet unten
- Abweichungen von 100 MW bis 200 MW auf Tagesbasis
- Die größte Abweichung war 450 MW in beiden Richtungen → ~250 MW Lastflussänderung an der Grenze



- Insgesamt kann die **P/f-Regelungsqualität als adäquat** bewertet werden

Transit- bzw. Ringflüsse

Bereits seit der Synchronisierung entstehen volatile **Transit- bzw. Ringflüsse** zwischen 350 MW in Südostrichtung und 800 MW in Nordwestrichtung



Inhalte

- Vorgeschichte und aktuelle Situation
- Monitoring und Systemsicherheit
- **Ausblick**

2022: Systemstabilität, -sicherheit und Infrastruktur

bis Ende Oktober	bis Ende November	Ende 2022
<p><u>Reduktion der Transitlastflüsse</u></p> <p>Austauschkapazitätssteigerung bis 100 MW im Oktober, wenn entsprechende Maßnahmen wirksam sind</p> <p>Voraussetzende Maßnahme: Neue Netztopologie um Überlast des Transformators im UW Szabolcsbáka (Ungarn) zu vermeiden</p>	<p><u>Echtzeit Netzsicherheitsanalysen (ID)</u></p> <p>Austauschkapazitätssteigerung bis 200 MW im November wenn Stabilität eingehalten wird</p> <p>Voraussetzende Maßnahme: Integration von Ukrenergo Echtzeitdaten in die SCADA Systeme der Nachbar-TSOs, sowie koordinierte Kapazitätsberechnung an grenzüberschreitenden Leitungen</p>	<p><u>Wiederinbetriebnahme der (früher 750 kV) Leitung Rzeszów-Khmelnyska zwischen Ukraine und Polen (jetzt auf 400 kV) bis Ende 2022</u></p> <p>Austauschkapazitätssteigerung wird beurteilt in laufenden Studien und Simulationen (bis Ende November)</p> <p>Voraussetzende Maßnahmen: Abschluss der Arbeiten in UW an beiden Leitungsenden, Trafotransport in Polen (alles auch abhängig von der Kriegssituation)</p>

2023 und danach

- Weitere **Integration in die regionale Koordination** einschl.: (i) koordinierte Netzsicherheitsrechnung, (ii) Kapazitätsberechnung, (iii) kurzfristige Lastdeckungsprognose, (iv) Abschaltplanungskoordination
- Erhaltung der guten **Netzmodellqualität** der UA und MD Netze
- Teilnahme **der Ukrenergog an gemeinsamen Trainings und Simulationen** einschl. Netzwiederaufbau und Betrieb in gestörten Zuständen
- Umsetzung weiterer **Rahmenbedingungen für Systembetrieb und Markt**
- Fortsetzung der **Integration in die europäischen Marktprozesse**

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

tahir.kapetanovic@apg.at

