

Wie man einen Blackout verursacht

Mathias Dalheimer
md@gonium.net — [@gonium](#)

Folien auch unter <https://netzsinn.us/projekt>

TAB 

Studien des Büros für Technikfolgen-Abschätzung
beim Deutschen Bundestag – 33

Thomas Petermann, Harald Bradke,
Arne Lüllmann, Maik Poetzsch,
Ulrich Riehm

Was bei einem Blackout
geschieht

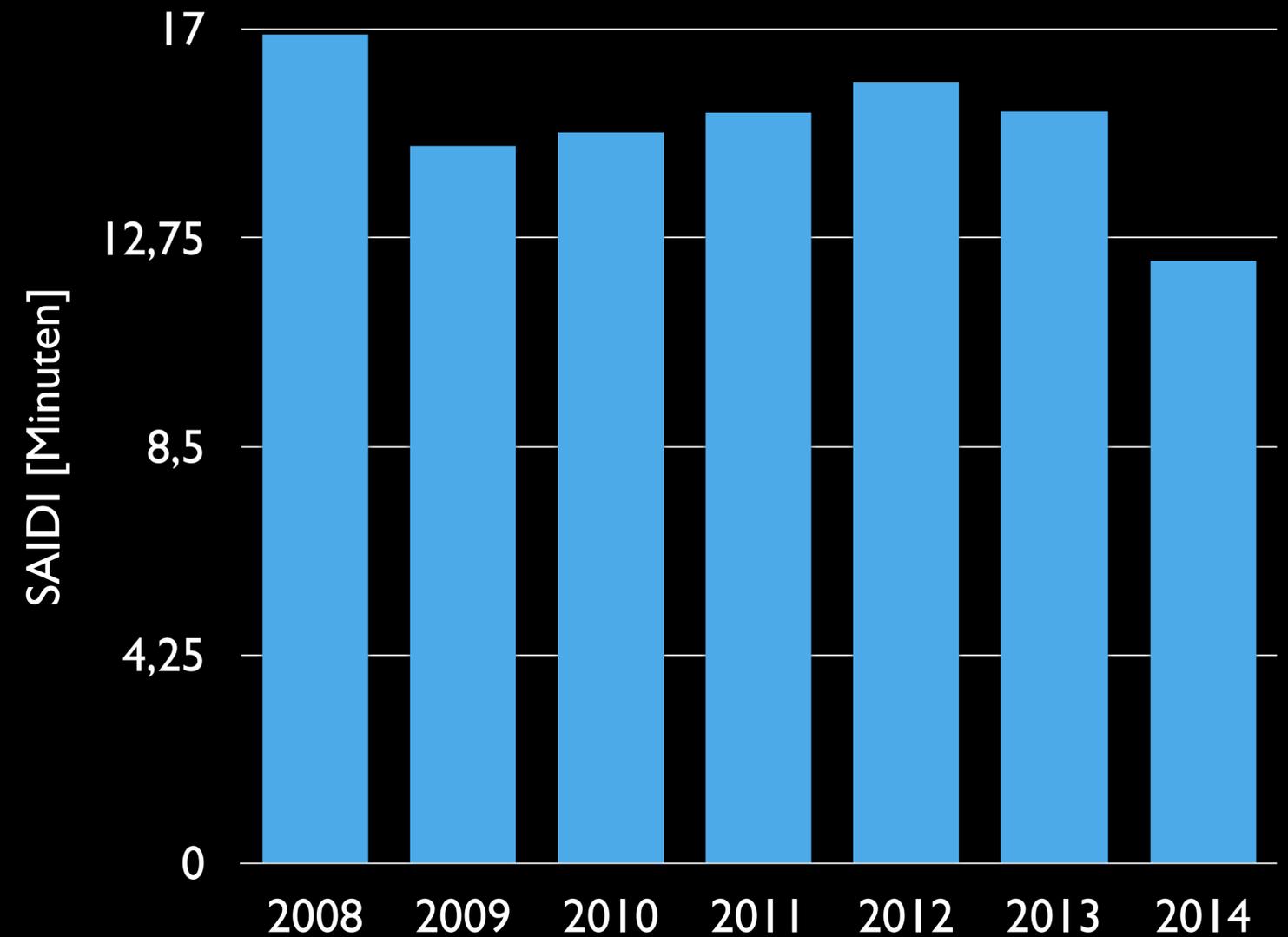
Folgen eines langandauernden
und großräumigen Stromausfalls

System Average Interruption Duration Index

$$SAIDI = \frac{\sum_i U_i N_i}{\sum_i N_i}$$

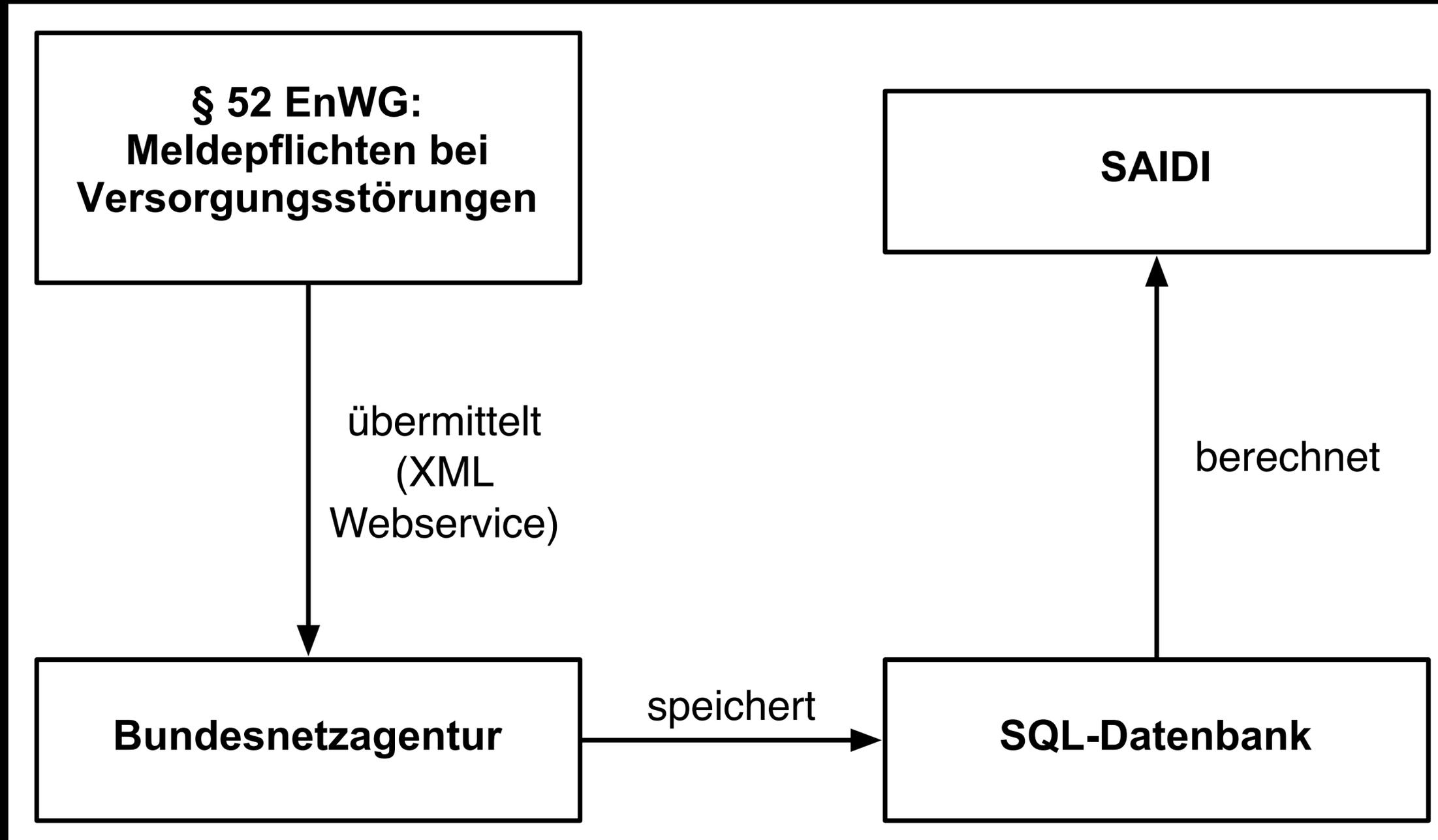
U_i : Unterbrechungsdauer [Minuten]

N_i : Anzahl betroffene Letztverbraucher



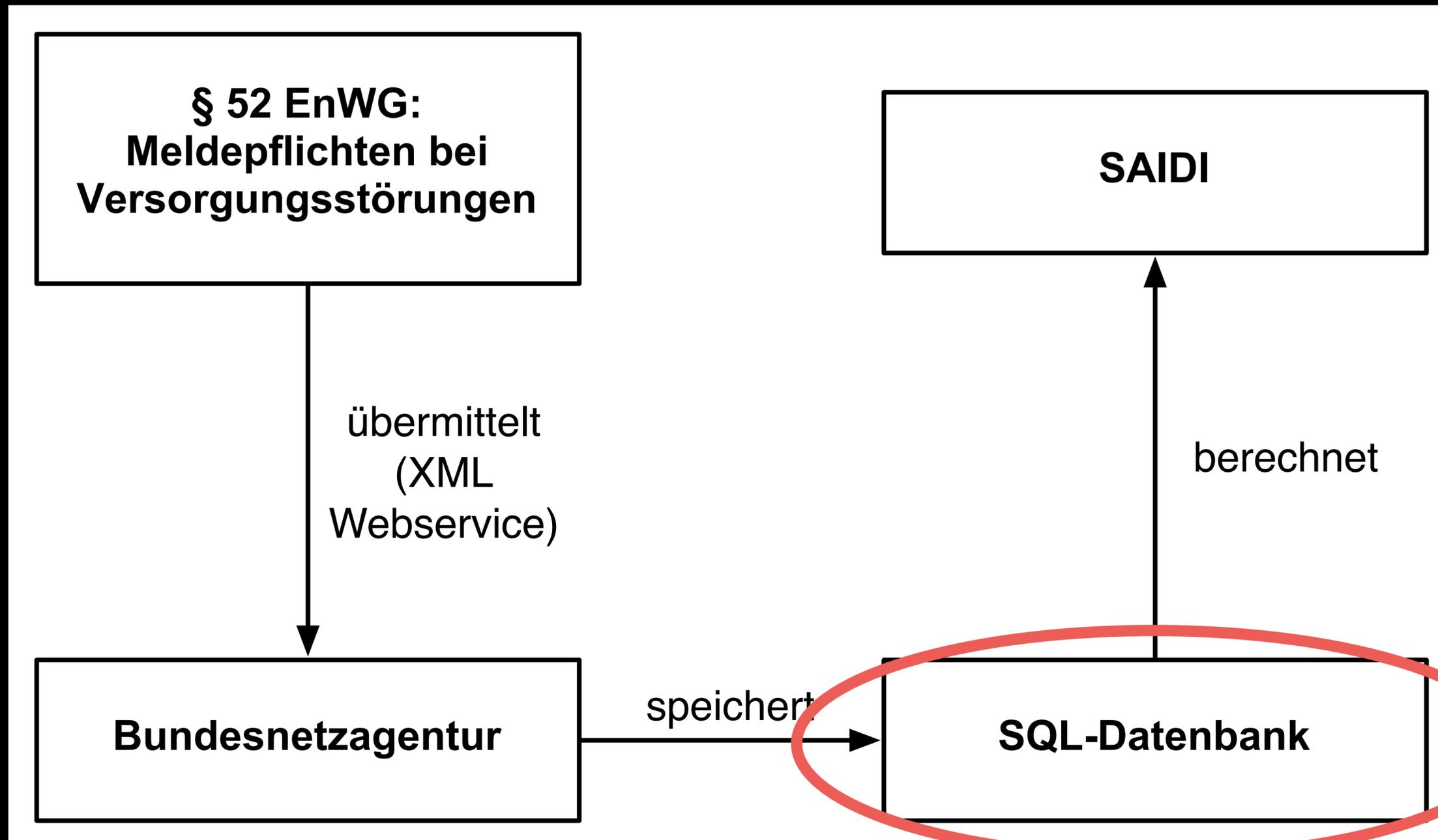
Siehe auch: https://de.wikipedia.org/wiki/System_Average_Interruption_Duration_Index

SAIDI: Berechnet durch BNetzA



Siehe auch:
[http://
www.bundesnetzagentur.de/
clin_1412/DE/Sachgebiete/
ElektrizitaetundGas/
Unternehmen_Institutionen/
Versorgungssicherheit/
Stromnetze/stromnetze-
node.html](http://www.bundesnetzagentur.de/clin_1412/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Stromnetze/stromnetze-node.html)

Deutschland: Berechnet durch BNetzA



Siehe auch:
[http://
www.bundesnetzagentur.de/
chn_1412/DE/Sachgebiete/
ElektrizitaetundGas/
Unternehmen_Institutionen/
Versorgungssicherheit/
Stromnetze/stromnetze-
node.html](http://www.bundesnetzagentur.de/chn_1412/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Stromnetze/stromnetze-node.html)

IFG!

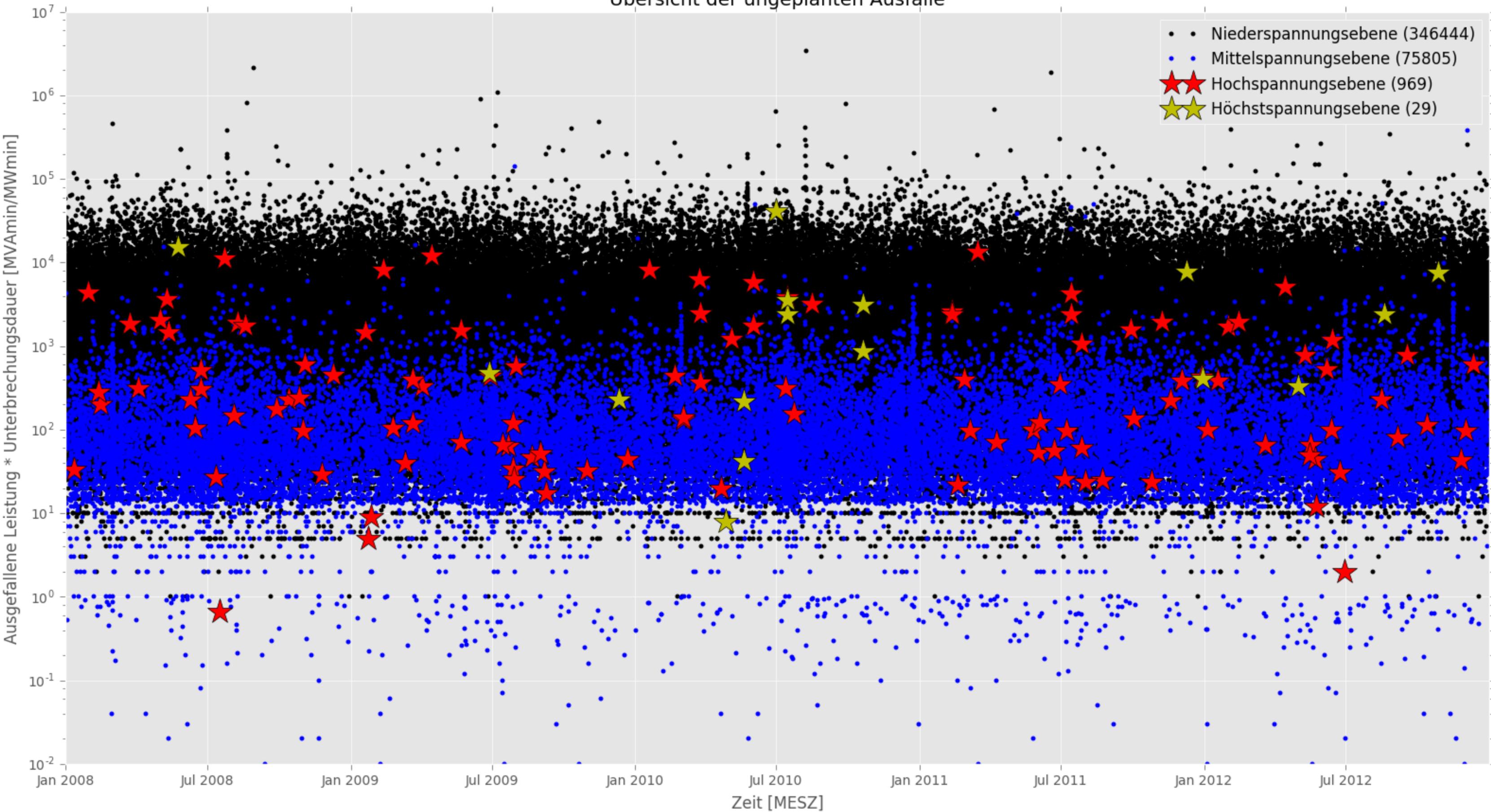
BNetzA: Netzausfalldaten

Erster Ausfall: 2008-01-01 00:00:00, letzter Ausfall: 2013-12-31 23:59:00

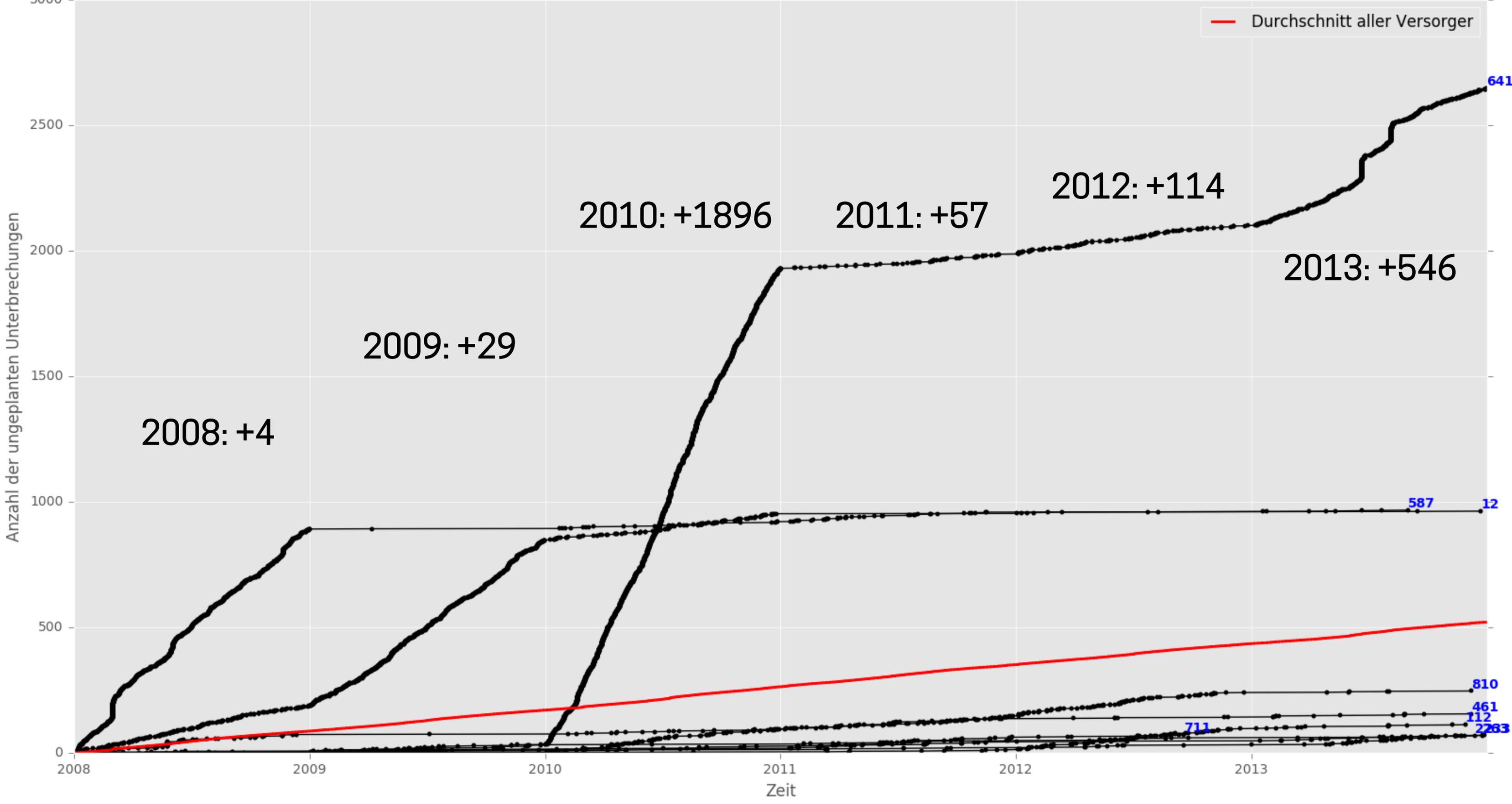
Ausfallursachen

Sonstiges	760878
Zust?ndigkeitsbereich des Netzbetreibers	232180
Einwirkung Dritter	124220
Atmosph?rische Einwirkung	46869
H?here Gewalt	12488
Z?hlerwechsel	8221
R?ckwirkst?rung	7628
-- Bitte w?hlen --	487

Übersicht der ungeplanten Ausfälle



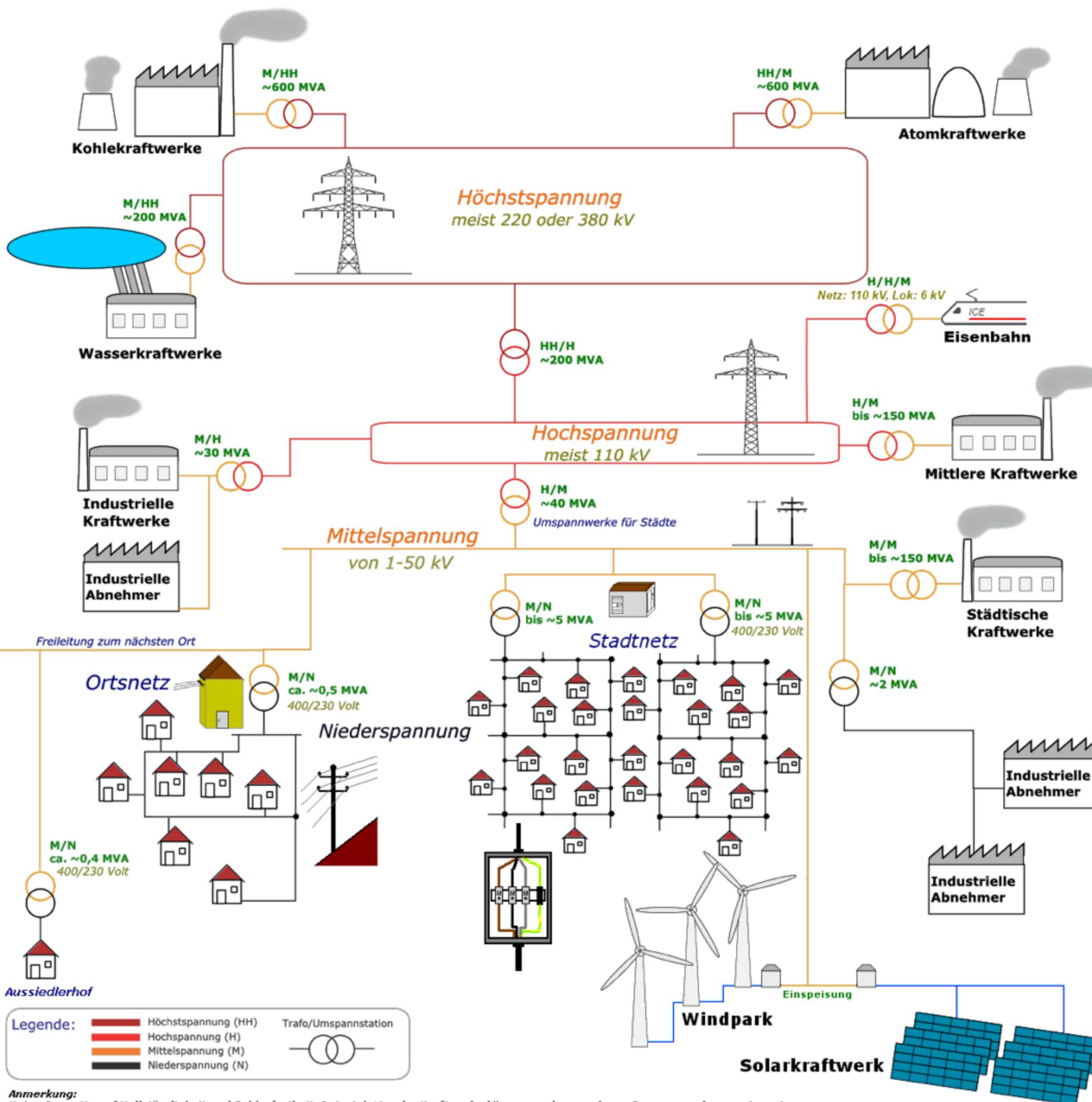
Kummulierte Anzahl der ungeplanten Unterbrechungen, Versorger-ID=[233, 810, 12, 641, 587, 711, 263, 2, 461, 112]



(n-1)-Sicherheit

Fällt von n Betriebsmitteln
eines aus, so muss der Betrieb
dennoch sichergestellt sein.

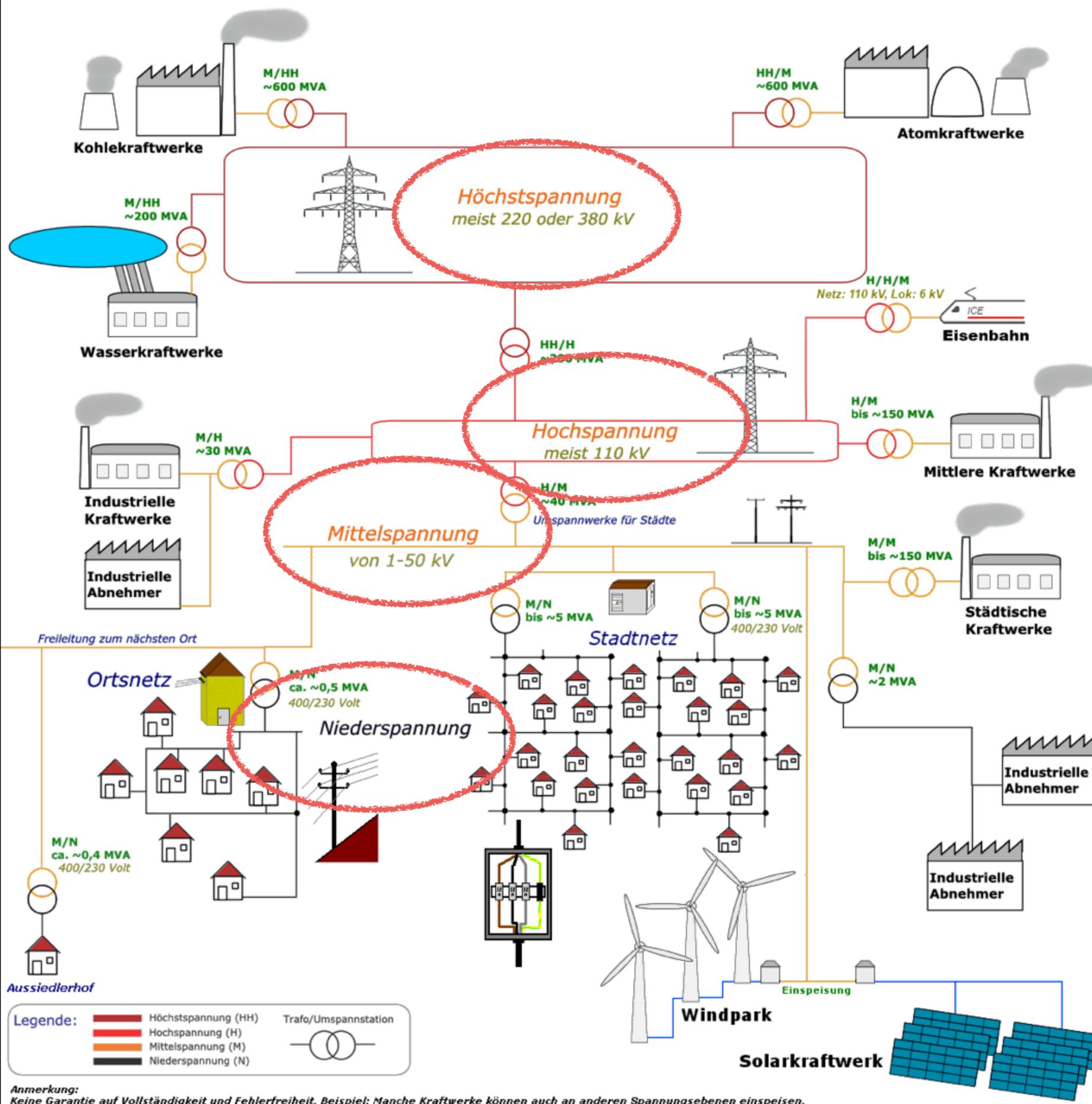
Das Stromversorgungssystem



Quelle: CC-BY-SA Stefan Riepl, <https://de.wikipedia.org/wiki/Stromnetz#mediaviewer/Datei:Stromversorgung.png>

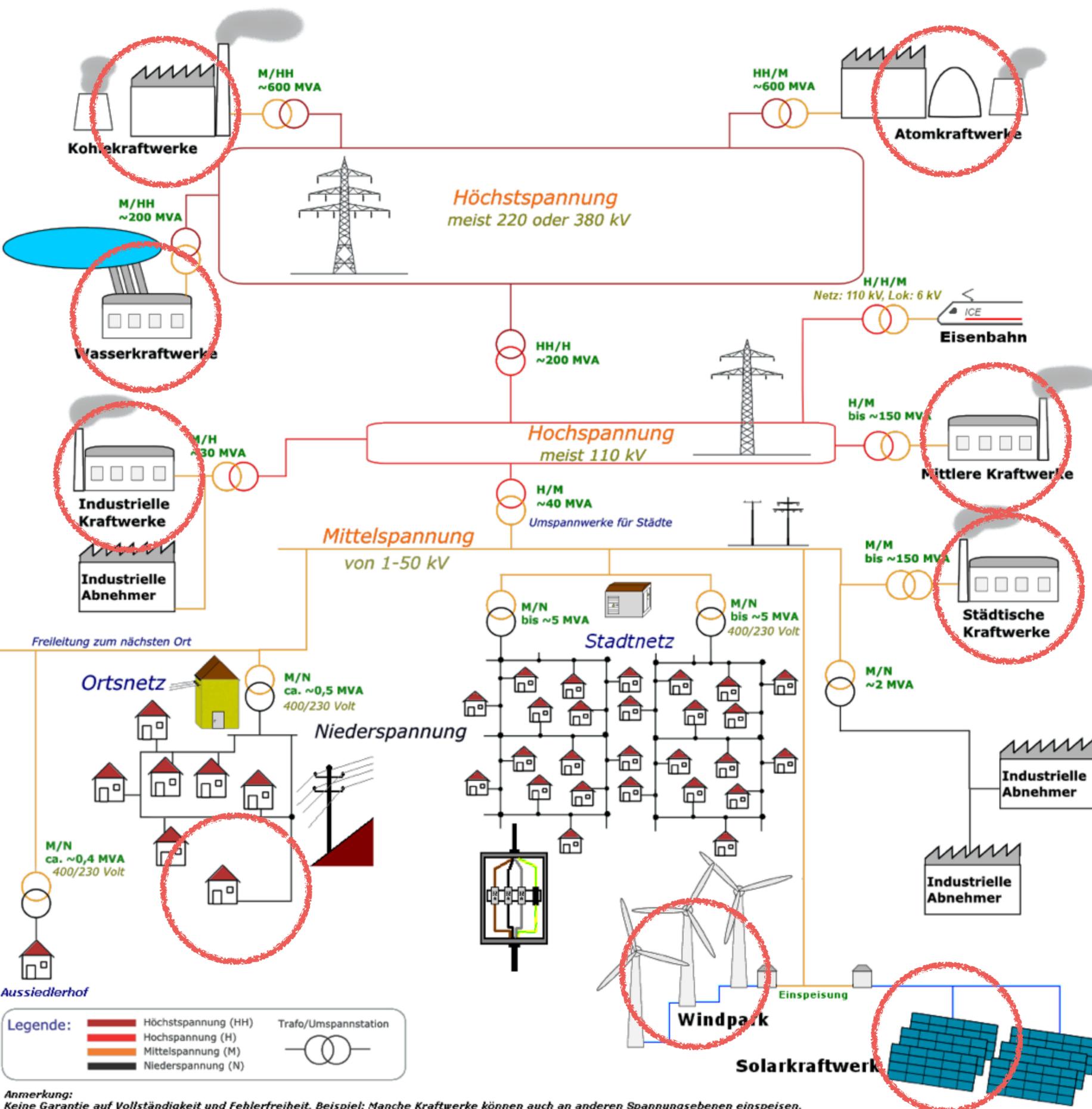
Das Stromnetz: HöS/HS/MS/NS

Netzbetrieb unterliegt
der Regulierung durch
die BNetzA



Quelle: CC-BY-SA Stefan Riepl,
[https://de.wikipedia.org/wiki/
Stromnetz#mediaviewer/
Datei:Stromversorgung.png](https://de.wikipedia.org/wiki/Stromnetz#mediaviewer/Datei:Stromversorgung.png)

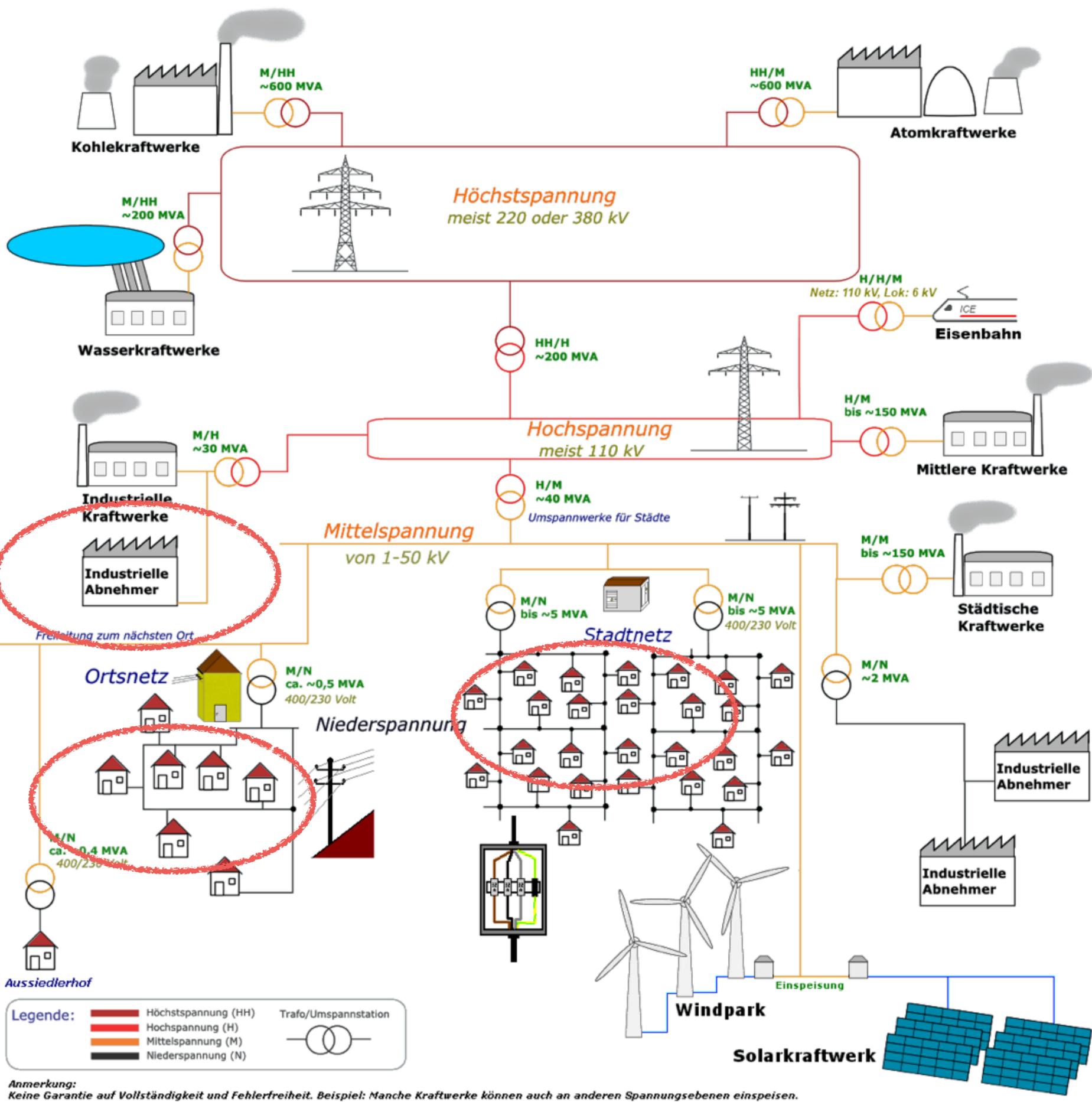
Das Stromversorgungssystem: Erzeuger



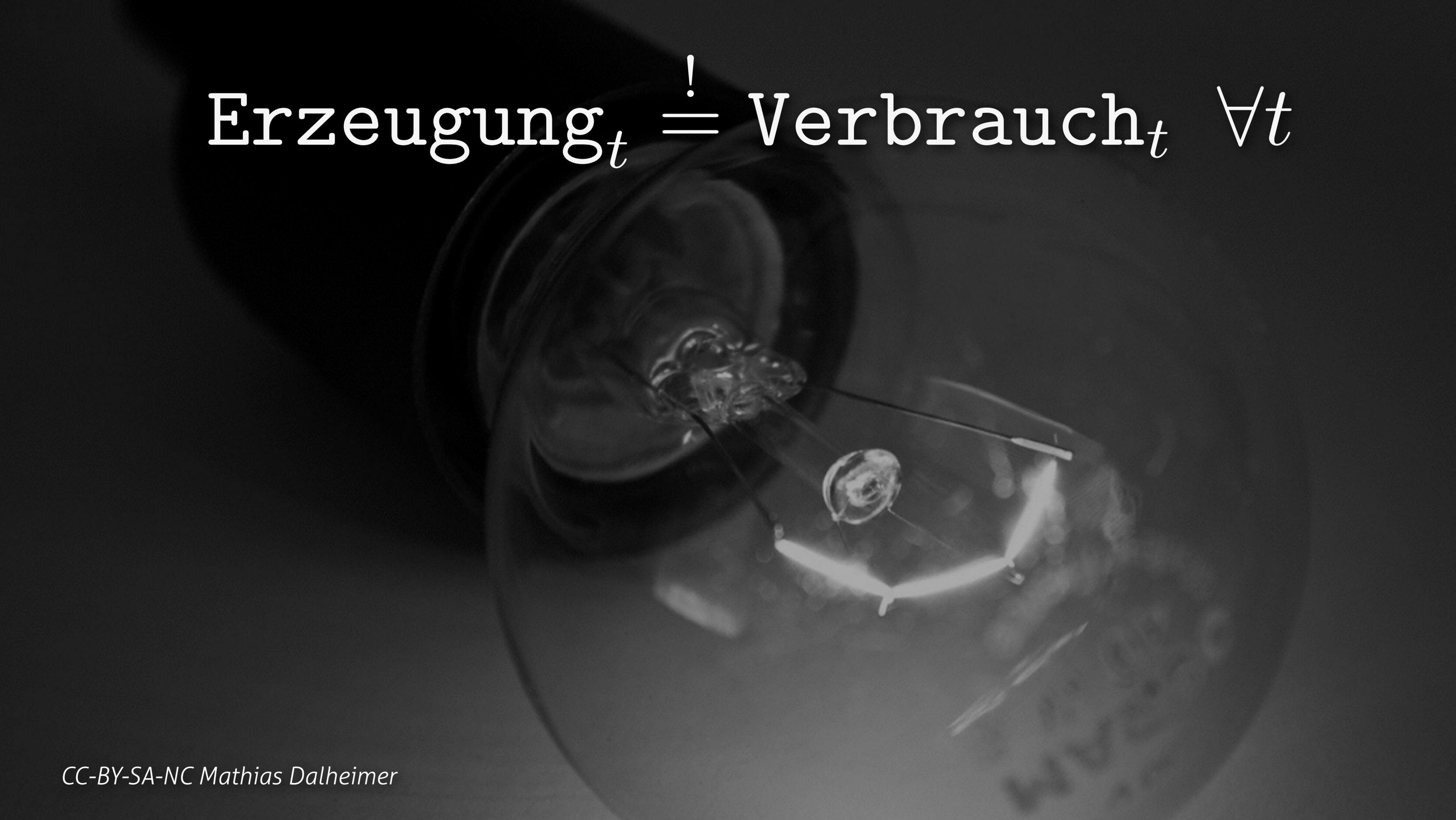
Quelle: CC-BY-SA Stefan Riepl, <https://de.wikipedia.org/wiki/Stromnetz#mediaviewer/Datei:Stromversorgung.png>

Das Stromnetz:

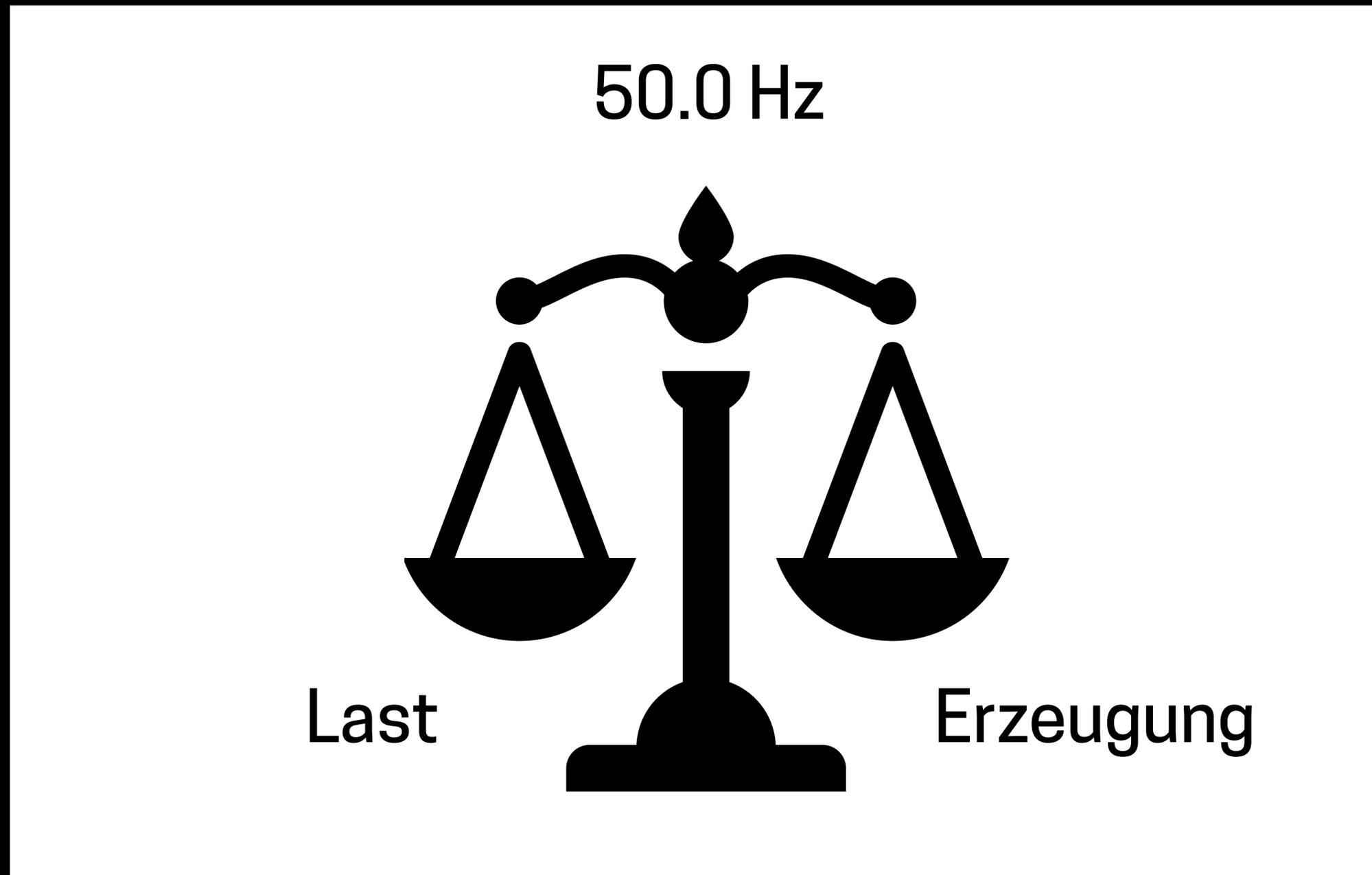
Verbraucher & kleine Erzeuger (Photovoltaik etc.)



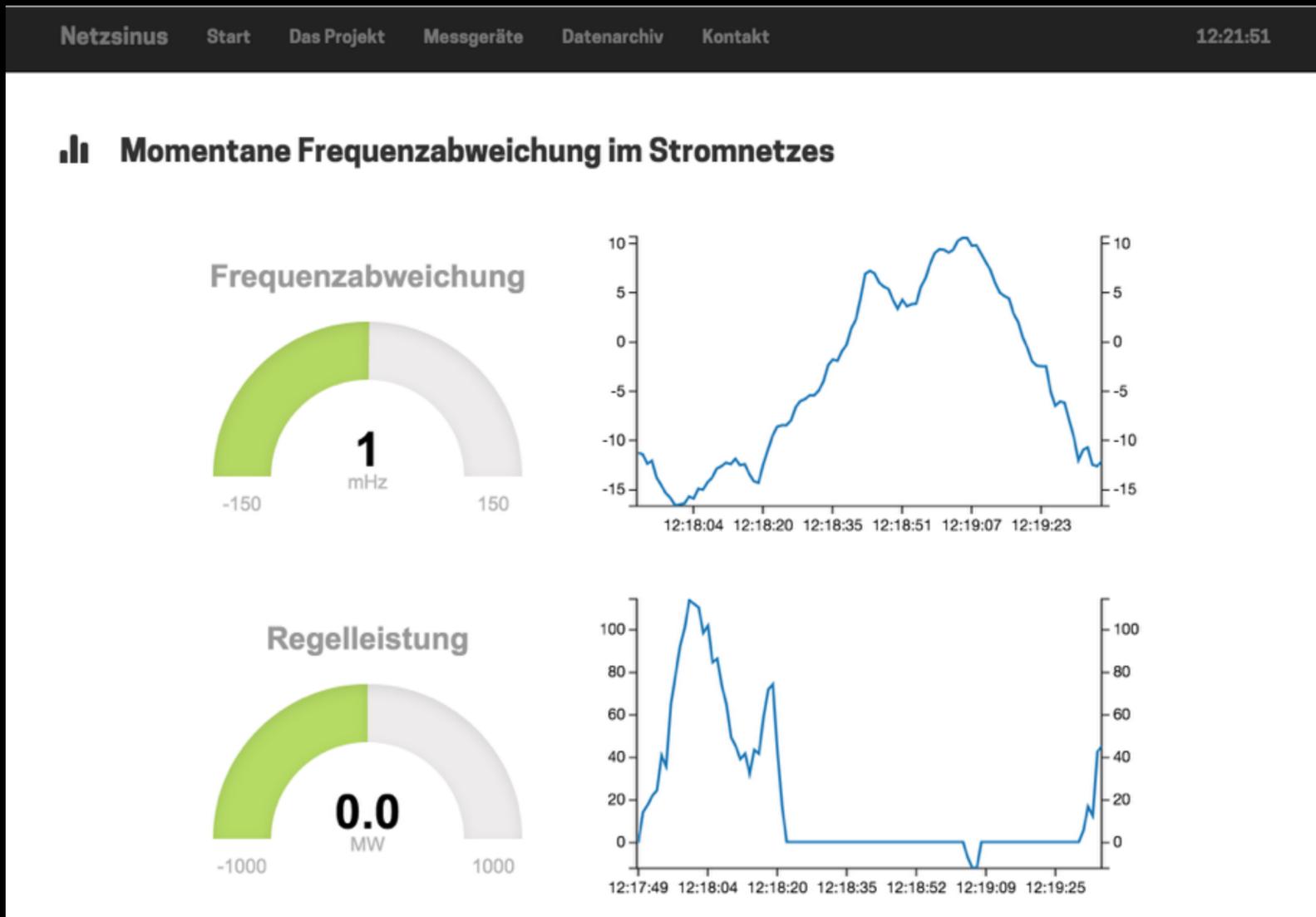
Quelle: CC-BY-SA Stefan Riepl, <https://de.wikipedia.org/wiki/Stromnetz#mediaviewer/Datei:Stromversorgung.png>


$$\text{Erzeugung}_t \stackrel{!}{=} \text{Verbrauch}_t \quad \forall t$$

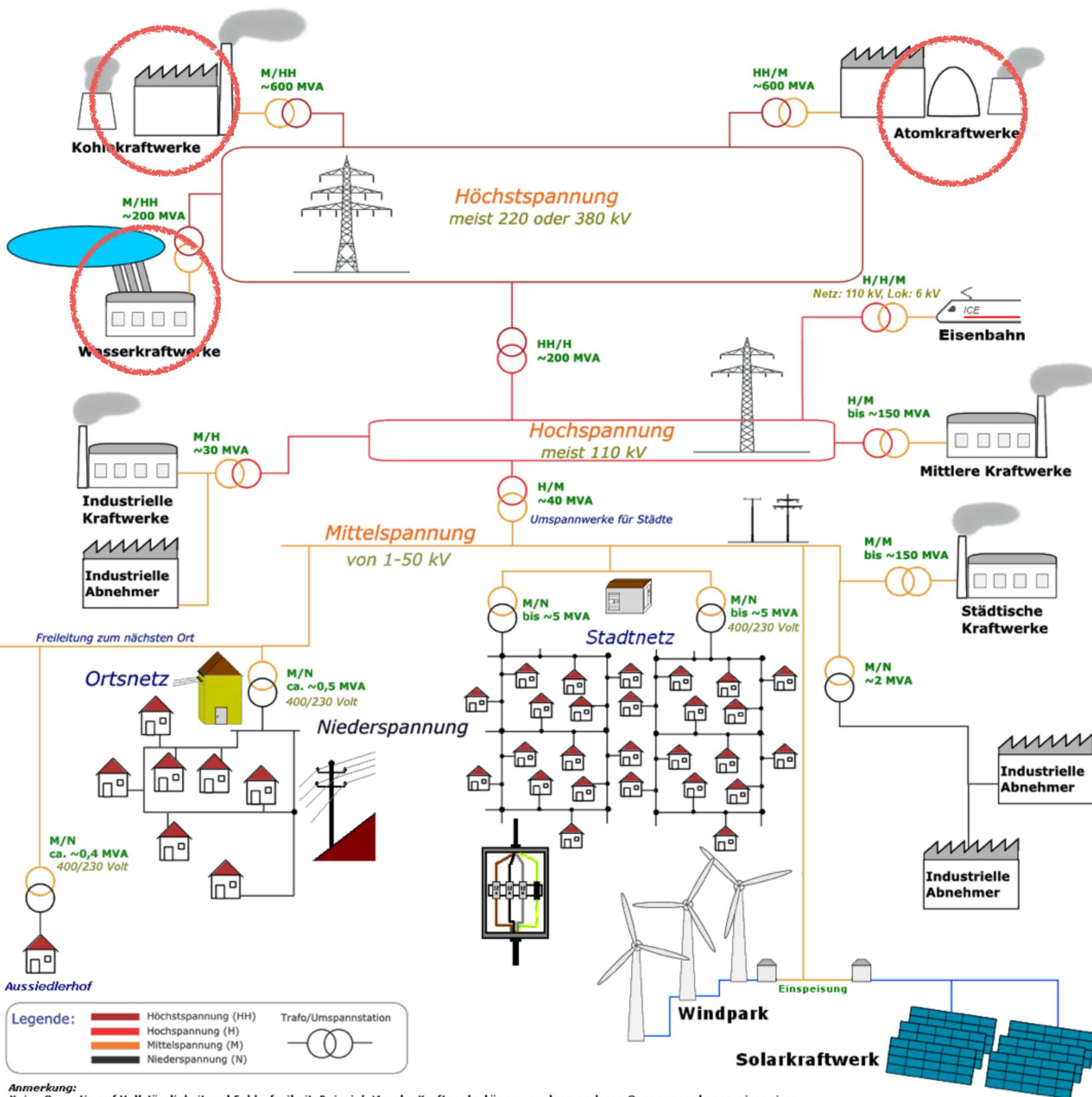
Netzfrequenz: Indikator für Leistungsungleichgewichte



<https://netzsin.us> — Messdaten & -gerät



Szenario 1: Großkraftwerk fällt aus



Quelle: CC-BY-SA Stefan Riepl, <https://de.wikipedia.org/wiki/Stromnetz#mediaviewer/Datei:Stromversorgung.png>

KKW Gundremmingen



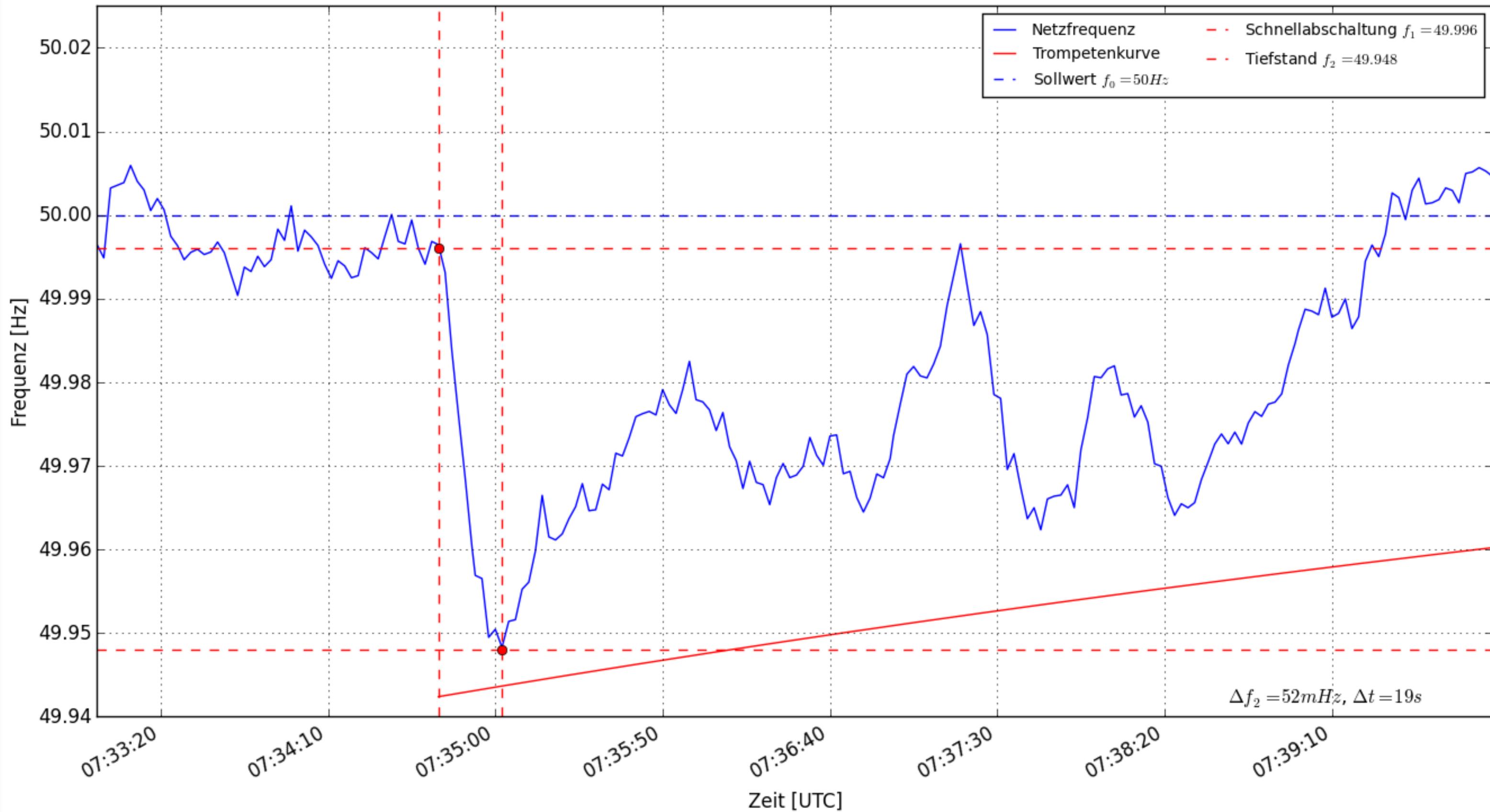
25.3.2015: Schnellabschaltung Block C

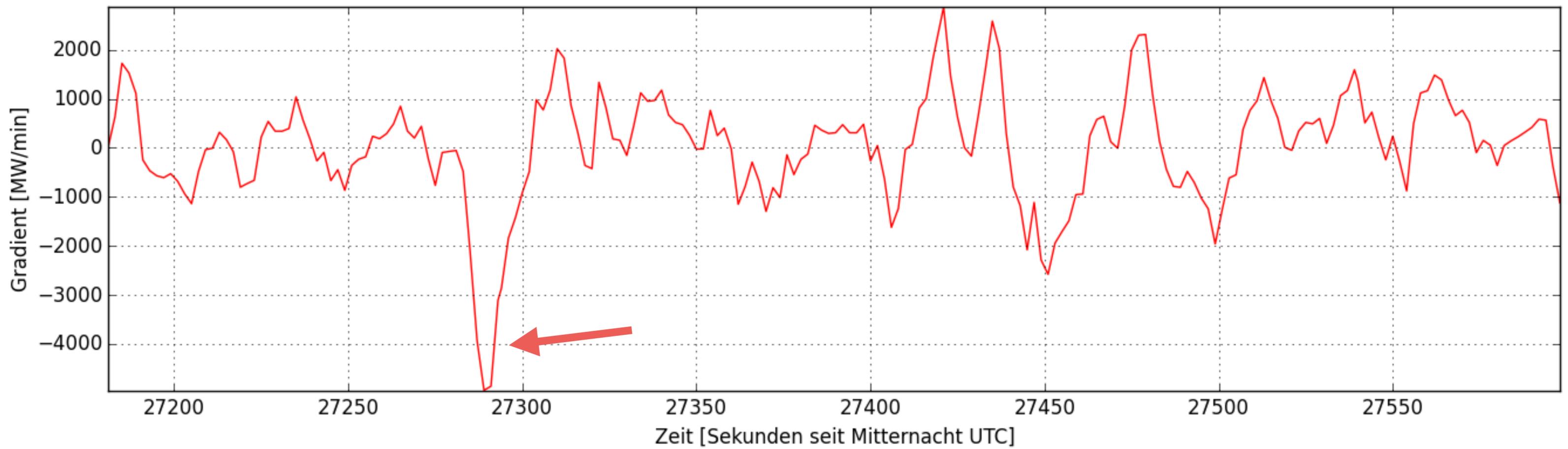
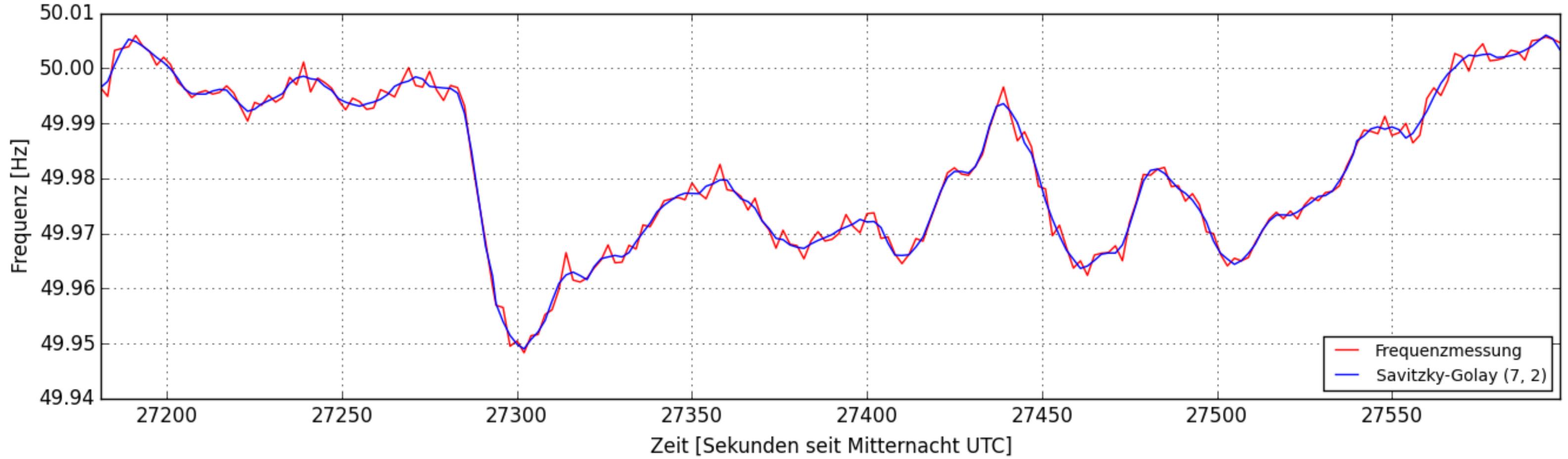
Reaktorblock ^[46]	Reaktortyp	(AEG)KWU-Baulinie	elektrische Nettoleistung	elektrische Bruttoleistung	thermische Reaktorleistung	Baubeginn	Netzsyn-chronisation	Kommerzieller Betrieb
Gundremmingen A (KRB A)	Siedewasserreaktor	1. (AEG) SWR-Generation	237 MW	250 MW	801 MW	12.12.1962	01.12.1966	12.04.1967
Gundremmingen B (KRB B)	Siedewasserreaktor	3. Generation / Baulinie 72	1.284 MW	1.344 MW	3.840 MW	20.07.1976	16.03.1984	19.07.1984
Gundremmingen C (KRB C)	Siedewasserreaktor	3. Generation / Baulinie 72	1.288 MW	1.344 MW	3.840 MW	20.07.1976	02.11.1984	18.01.1985

Wird
gewartet

Ausfall der Druckluft-
versorgung - Schnellabschaltung

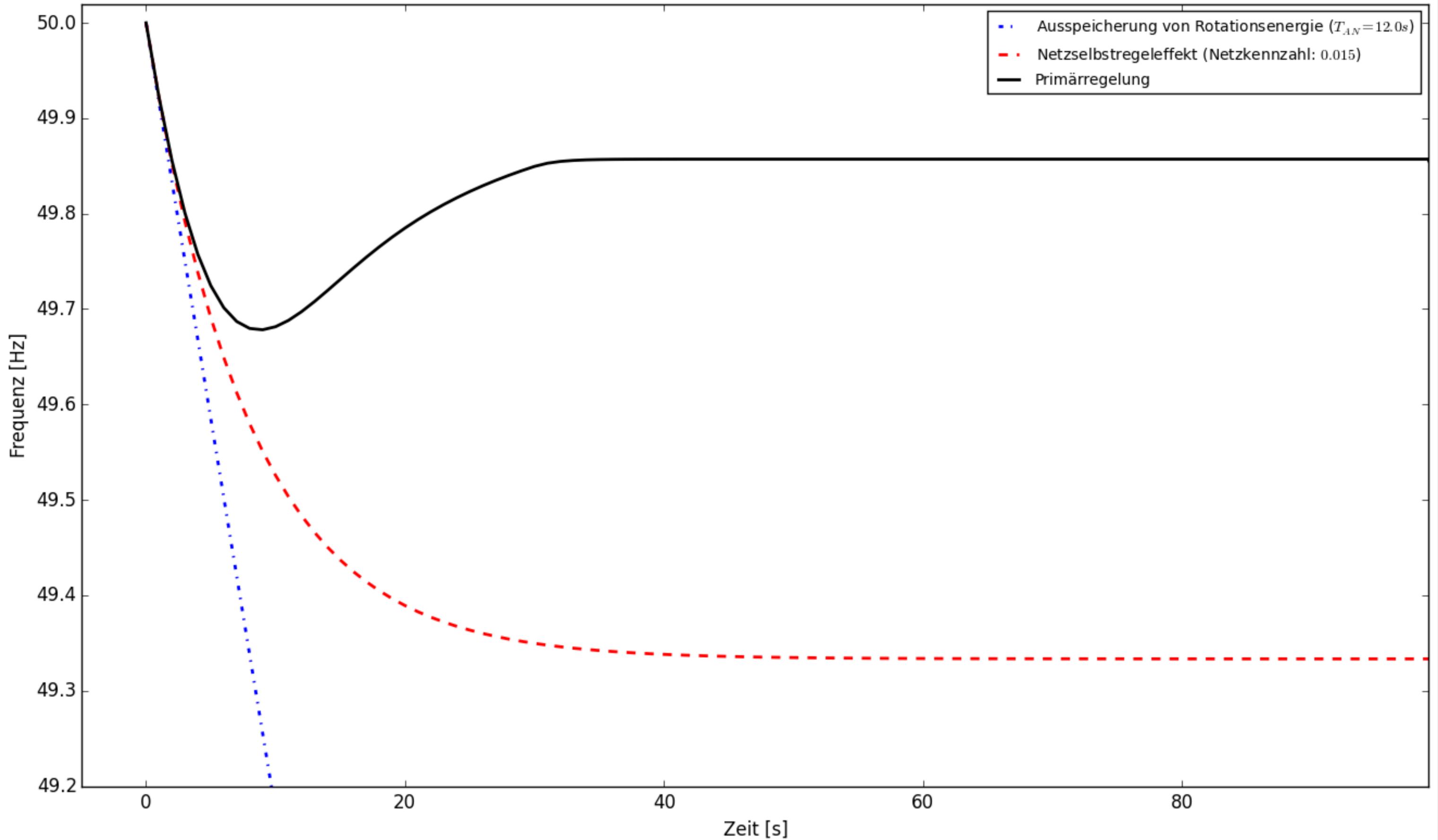
Schnellabschaltung KKW Gundremmingen 25.03.2015, $\Delta P_a = -1290 MW$





Wie funktioniert die
Stabilisierung der
Netzfrequenz?

Netzlast 150.0 GW: Event von -3.00 GW



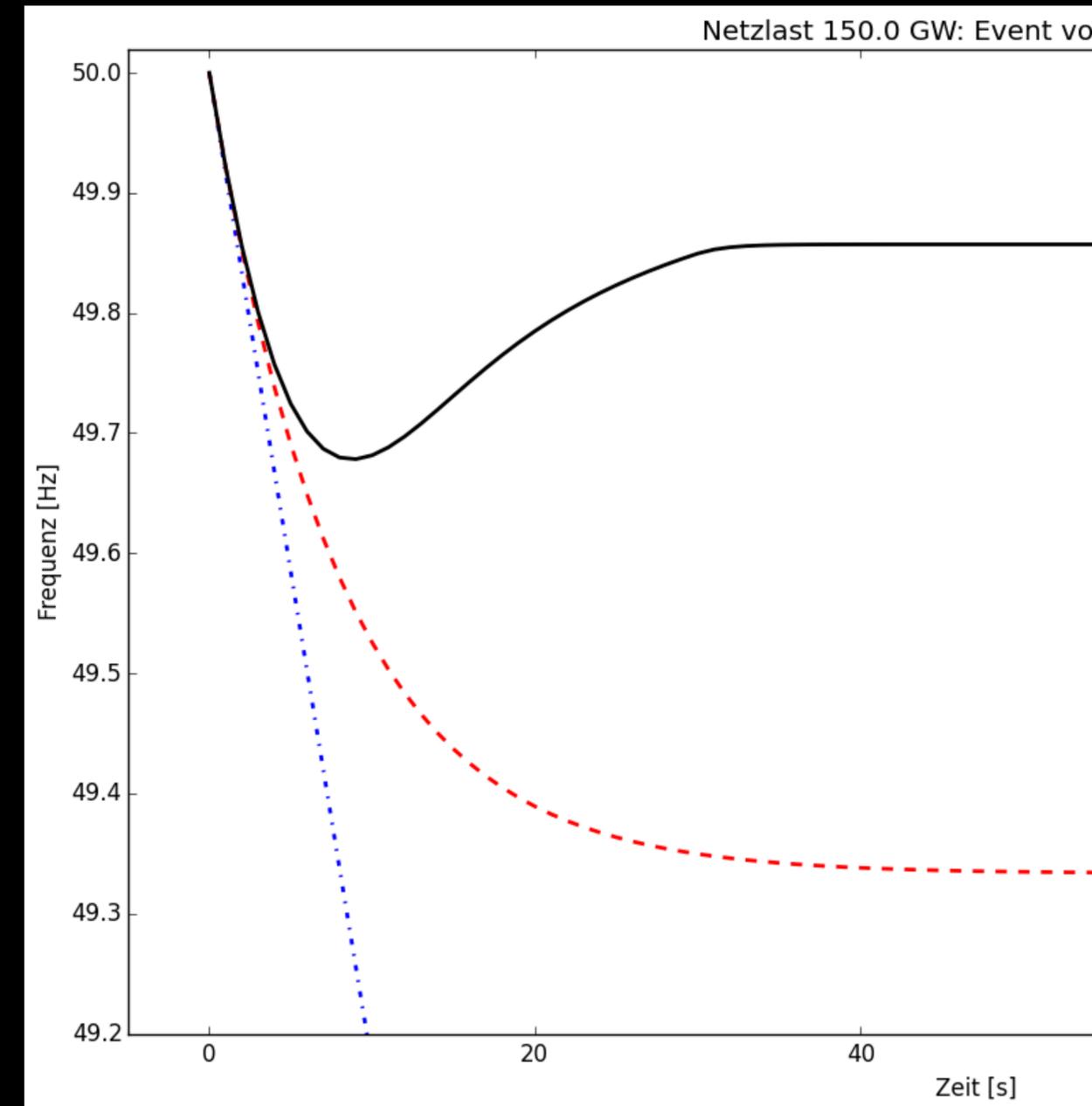


Rotations- energie

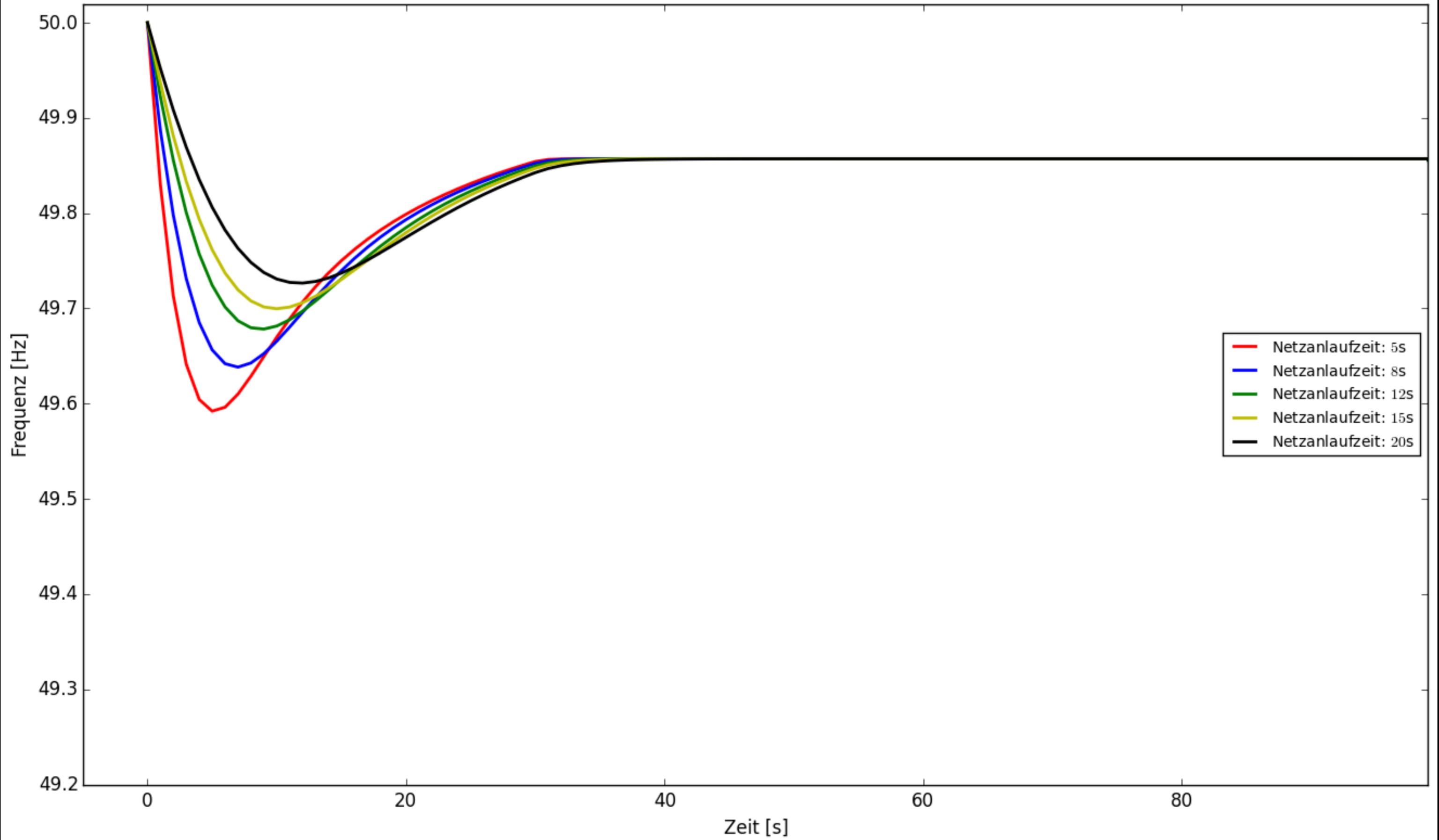
Turbine Block 2
Phillipsburg
190t
25U/s

Momentanreserve: Ausspeichern von Rotationsenergie

- Steigung des initialen Frequenzverlustes (“Netzanlaufzeit”)
- Repräsentiert die Trägheit aller erzeuger- und verbraucherseitigen rotierenden Schwungmassen.
- Auch $P(f)$ -Lasten wie Pumpen, Verdichter etc. “stützen” das Netz
- Siehe <http://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/media/documents/Minimale%20Schwungmasse.pdf> für Herleitung



Netzlast 150.0 GW: Event von -3.00 GW

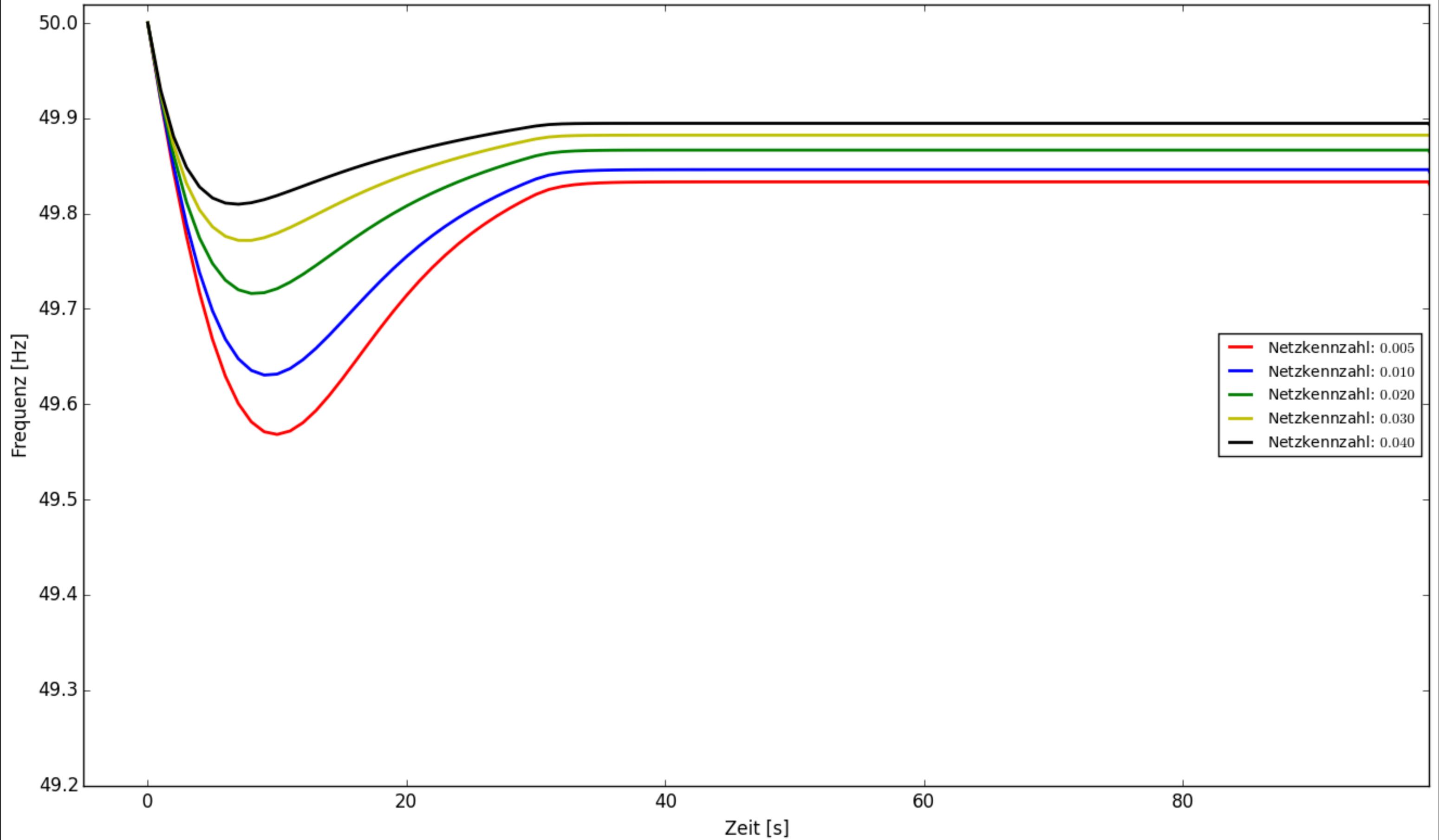


Netzselbstregeleffekt

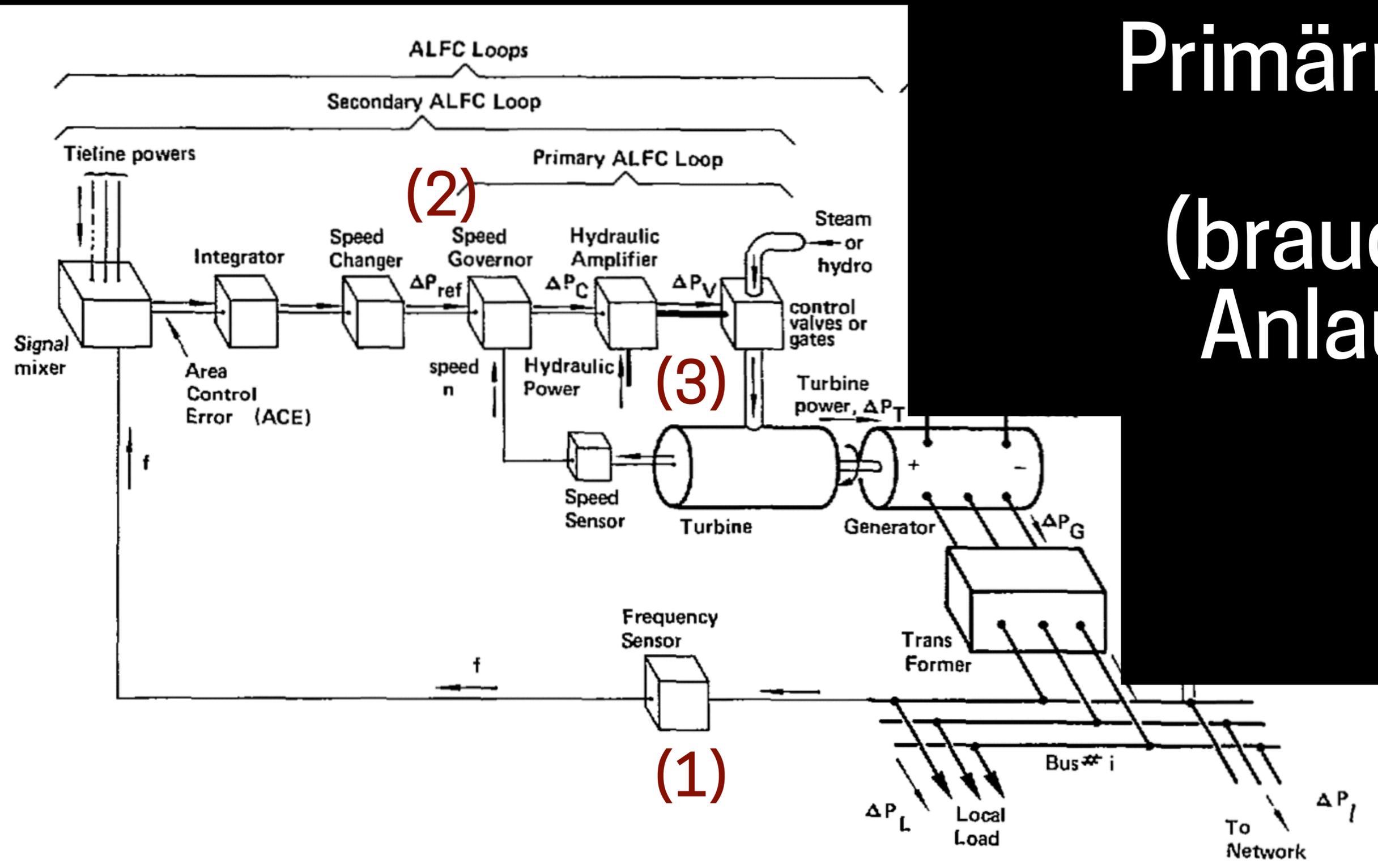
1,5-2%/%

(Prozent Netzlastreduktion
pro Prozent Frequenzverlust)
durch frequenzabhängige
Lasten

Netzlast 150.0 GW: Event von -3.00 GW



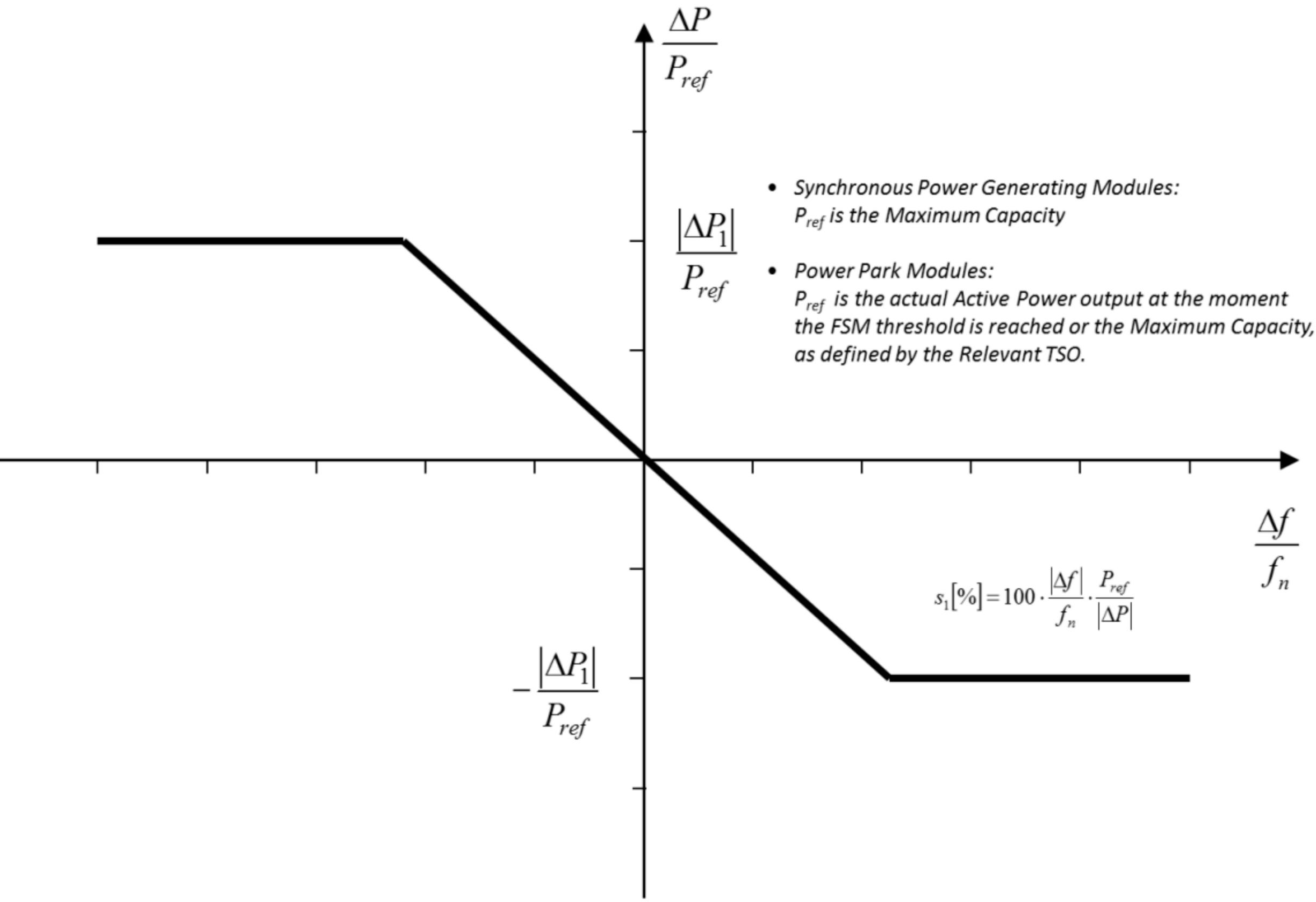
Automatic Load-Frequency Control



Primärregelung

(braucht 30s Anlaufzeit)

Quelle: Olle I. Elgerd,
"Control of Electric Power Systems",
IEEE CSS, 1981

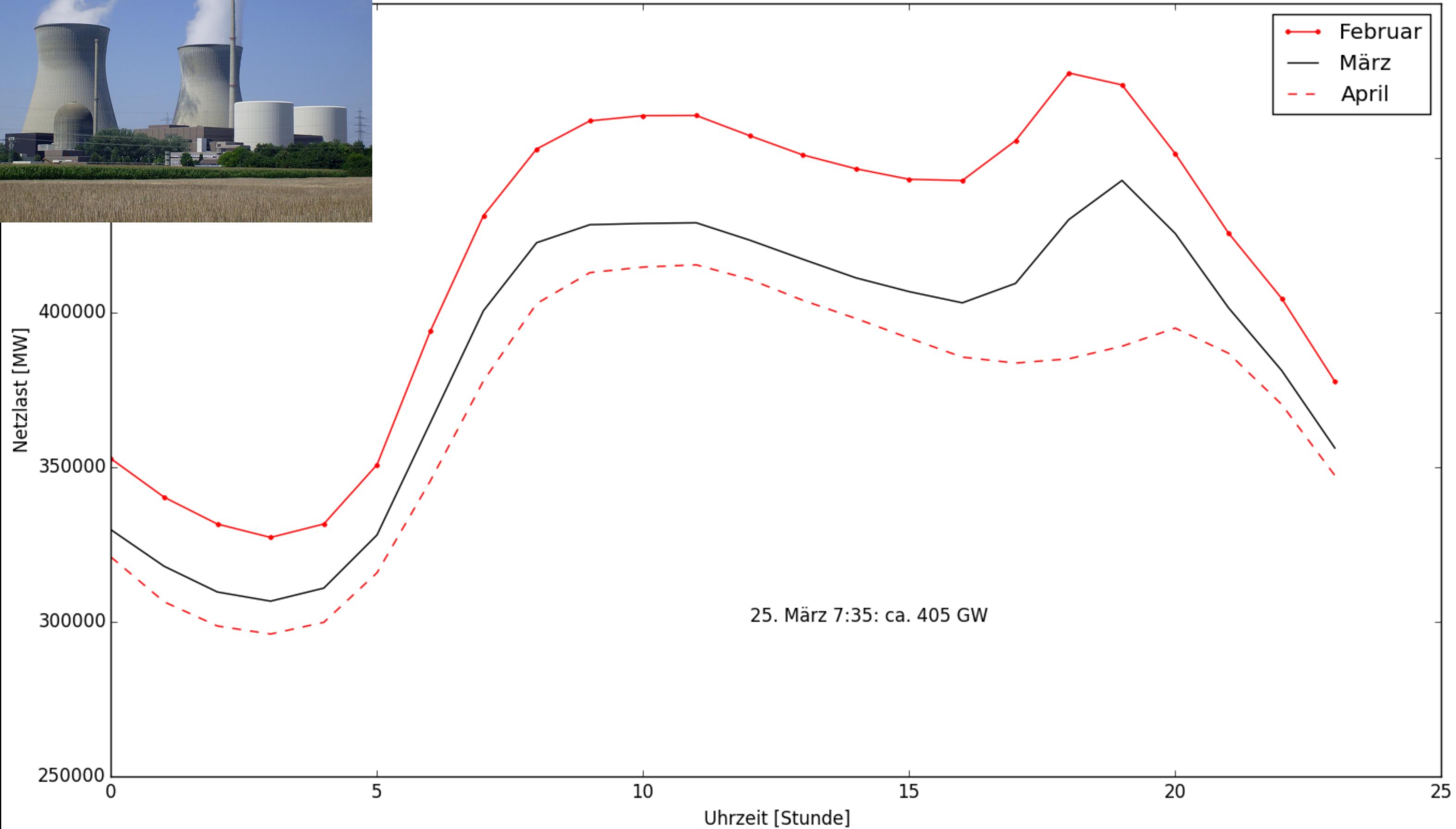


- Synchronous Power Generating Modules:
 P_{ref} is the Maximum Capacity
- Power Park Modules:
 P_{ref} is the actual Active Power output at the moment the FSM threshold is reached or the Maximum Capacity, as defined by the Relevant TSO.

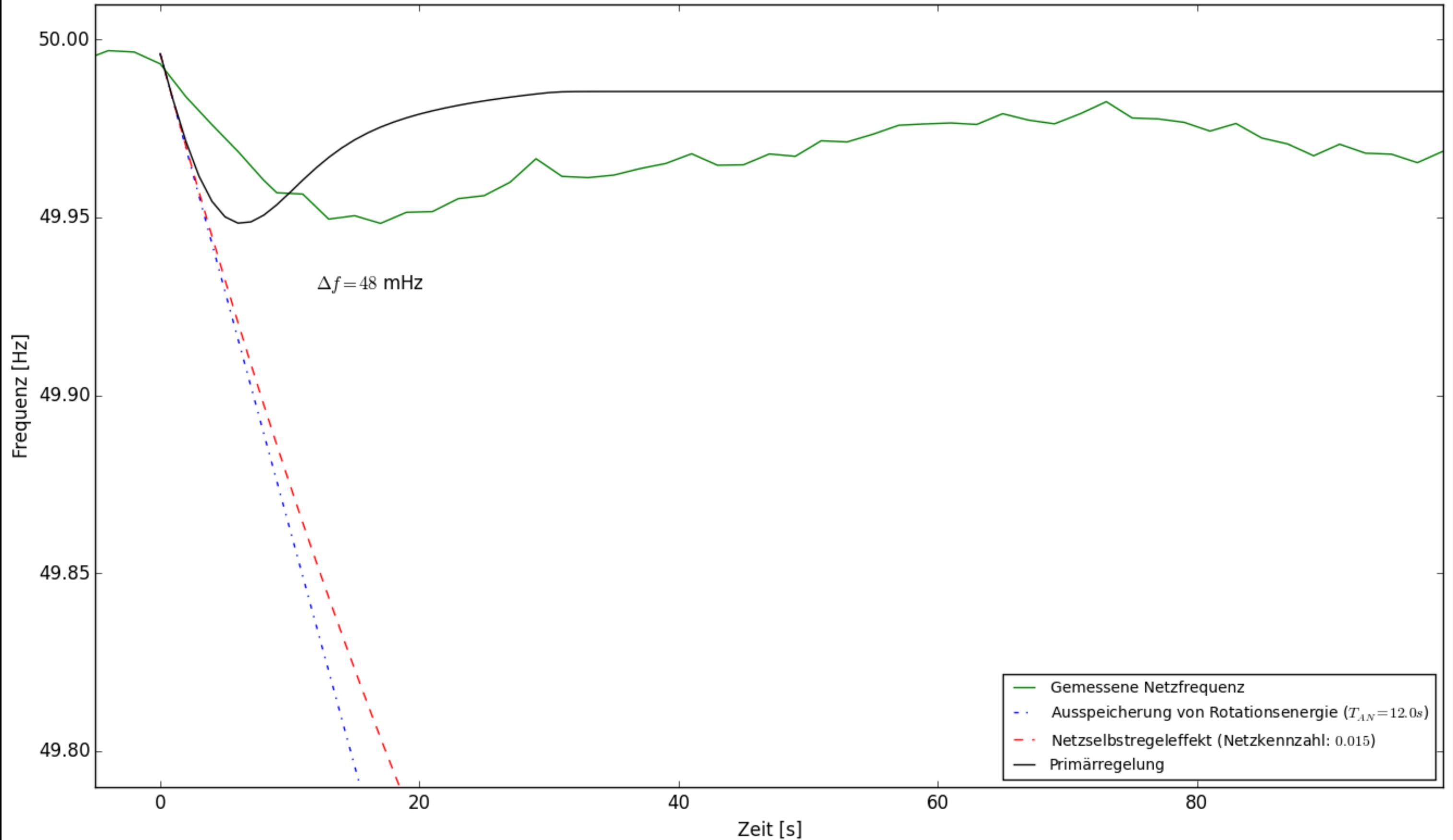
Quelle: COMMISSION REGULATION (EU) of XXX establishing a network code on requirements for grid connection of generators (draft, via ENTSO-E)



ENTSO-ENetzlast 2014



Schnellabschaltung Gundremmingen 23.05.2015
Netzlast 405.0 GW, Ausfall von -1.30 GW

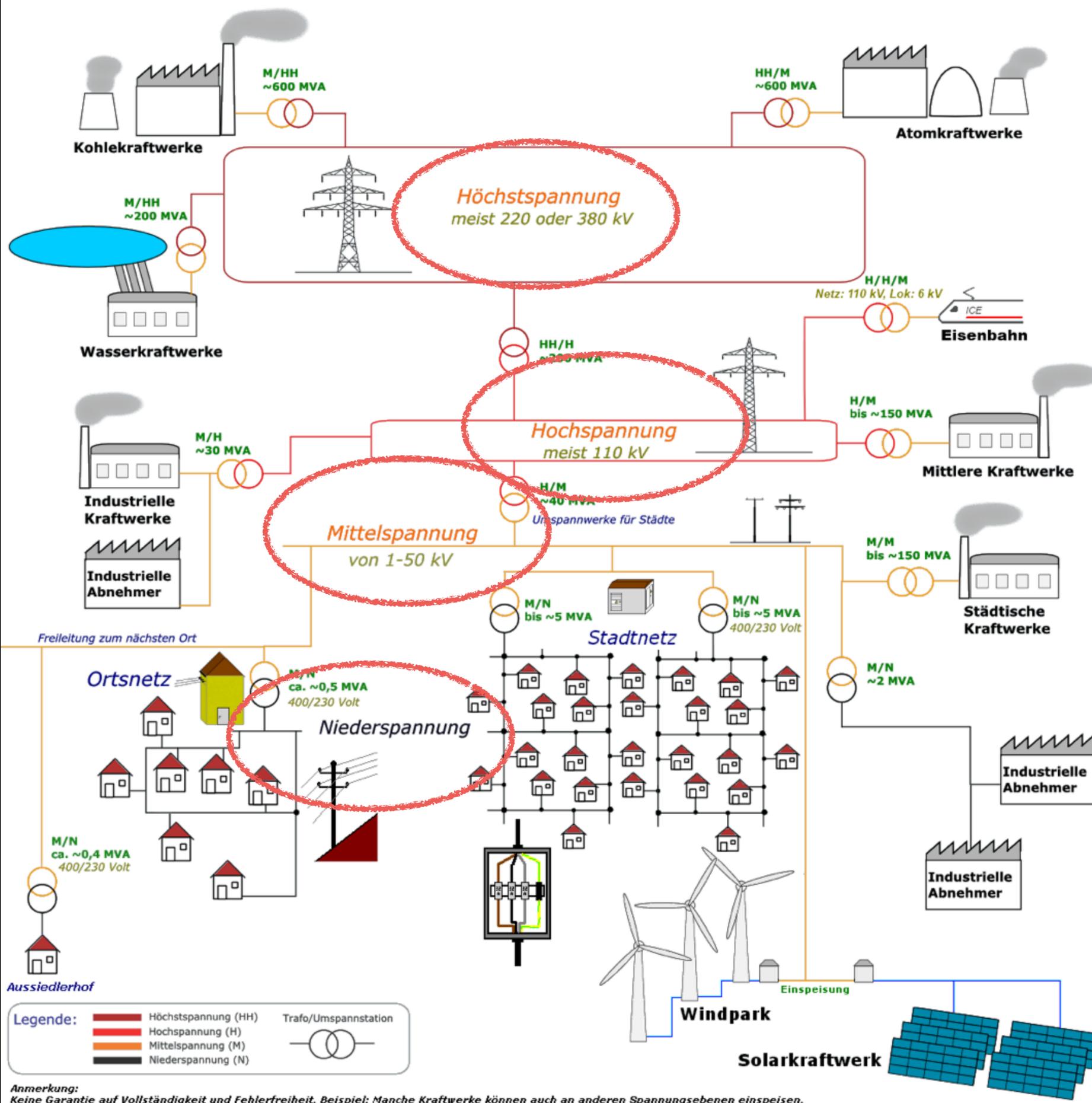


Fazit: Was passiert bei Erzeugerstörungen?

- Physikalische Effekte stabilisieren das Netz in den ersten zehn Sekunden . Dann wirkt die Primärregelung.
- Blackout: Möglichst schneller Sprung der Netzfrequenz notwendig!
- Gilt natürlich analog für Verbraucherausfälle.

Szenario 2:

Übertragungsnetz fällt (teilweise) aus



Quelle: CC-BY-SA Stefan Riepl,
[https://de.wikipedia.org/wiki/
Stromnetz#mediaviewer/
Datei:Stromversorgung.png](https://de.wikipedia.org/wiki/Stromnetz#mediaviewer/Datei:Stromversorgung.png)

Störung 4.11.2006, 22:10

„Norwegian Pearl“, CC-BY-SA OneCyclone





„380-kV-Ems-Freileitungskreuzung IMG0026“
Free Art License: Smial



	Grenzwerte	E.ON (Landesbergen)	RWE (Wehrendorf)
1	Thermischer Grenzwert	2000 A	2000 A
2	Sicherheitsgrenzwert, Alarmwert	2000 A	1795 A (90% von 3)
3	Schutzgrenzwert	2550 A (85% von 4 für max. 1h)	1995 A (95% von 4)
4	Auslösewert/Anregewert	3000 A	2100 A

Tabelle 1: Schutzeinstellungen in Landesbergen und Wehrendorf

Quelle: UCTE-Abschlussbericht

Nr.	Zeit	kV	Leitung
1	22:10:13	380	Wehrendorf-Landesbergen
2	22:10:15	220	Bielefeld/Ost-Spexard
3	22:10:19	380	Bechterdissen-Elsen
4	22:10:22	220	Paderborn/Süd-Bechterdissen/Gütersloh
5	22:10:22	380	Dipperz-Großkrotzenburg 1
6	22:10:25	380	Großkrotzenburg-Dipperz 2
7	22:10:27	380	Oberhaid-Grafenrheinfeld
8	22:10:27	380	Redwitz-Raitersaich
9	22:10:27	380	Redwitz-Oberhaid
10	22:10:27	380	Redwitz-Etzenricht
11	22:10:27	220	Würgau-Redwitz
12	22:10:27	380	Etzenricht-Schwandorf
13	22:10:27	220	Mechlenreuth-Schwandorf
14	22:10:27	380	Schwandorf-Pleinting

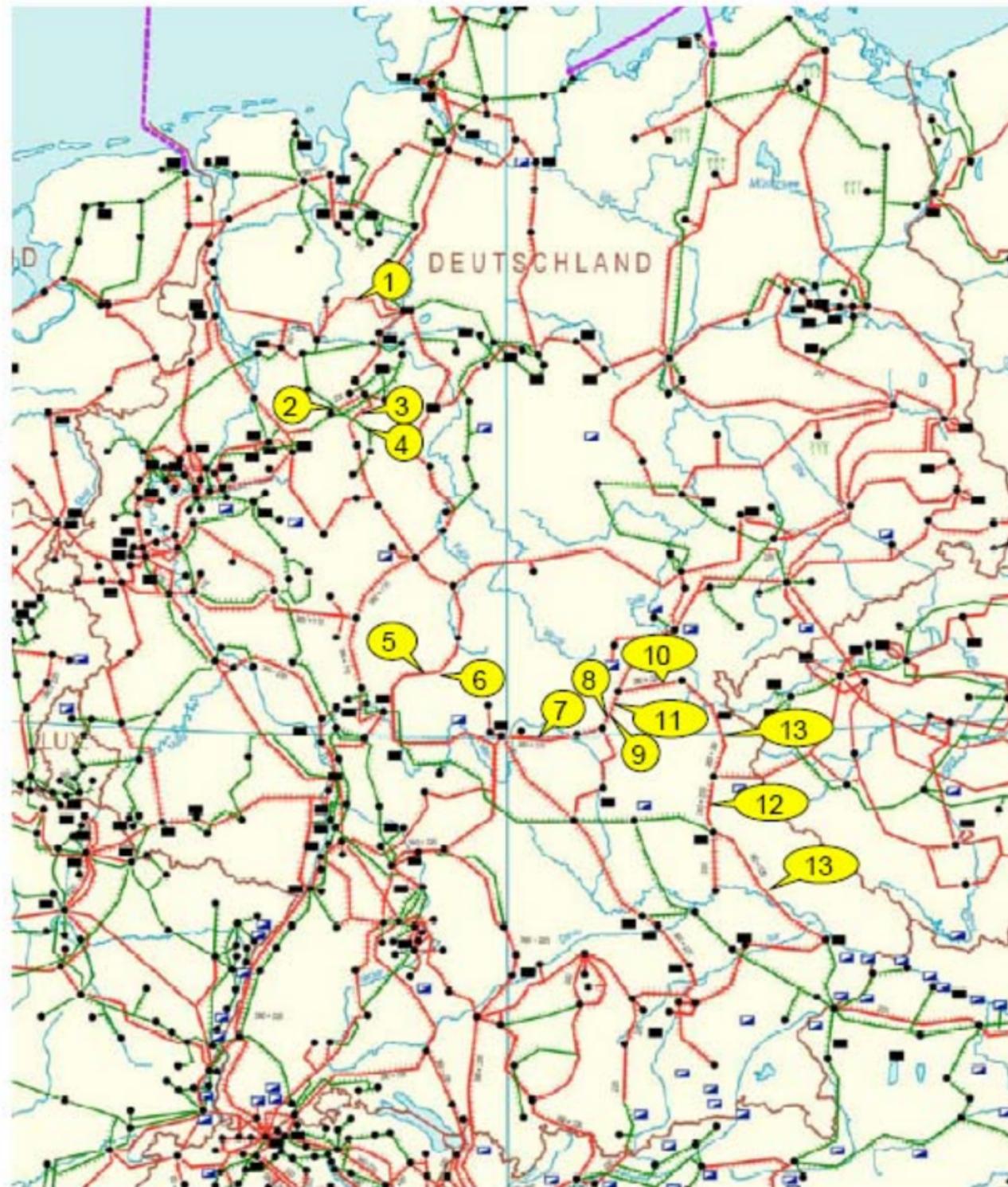


Abbildung 2: Zeiten der automatischen Leitungsabschaltung im Gebiet von E.ON Netz am 4. November 2006

Quelle: E.ON-Bericht zum Stand der Untersuchungen vom 14. November 2006

Quelle: Bericht der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen über die Systemstörung im deutschen und europäischen Verbundsystem am 4. November 2006

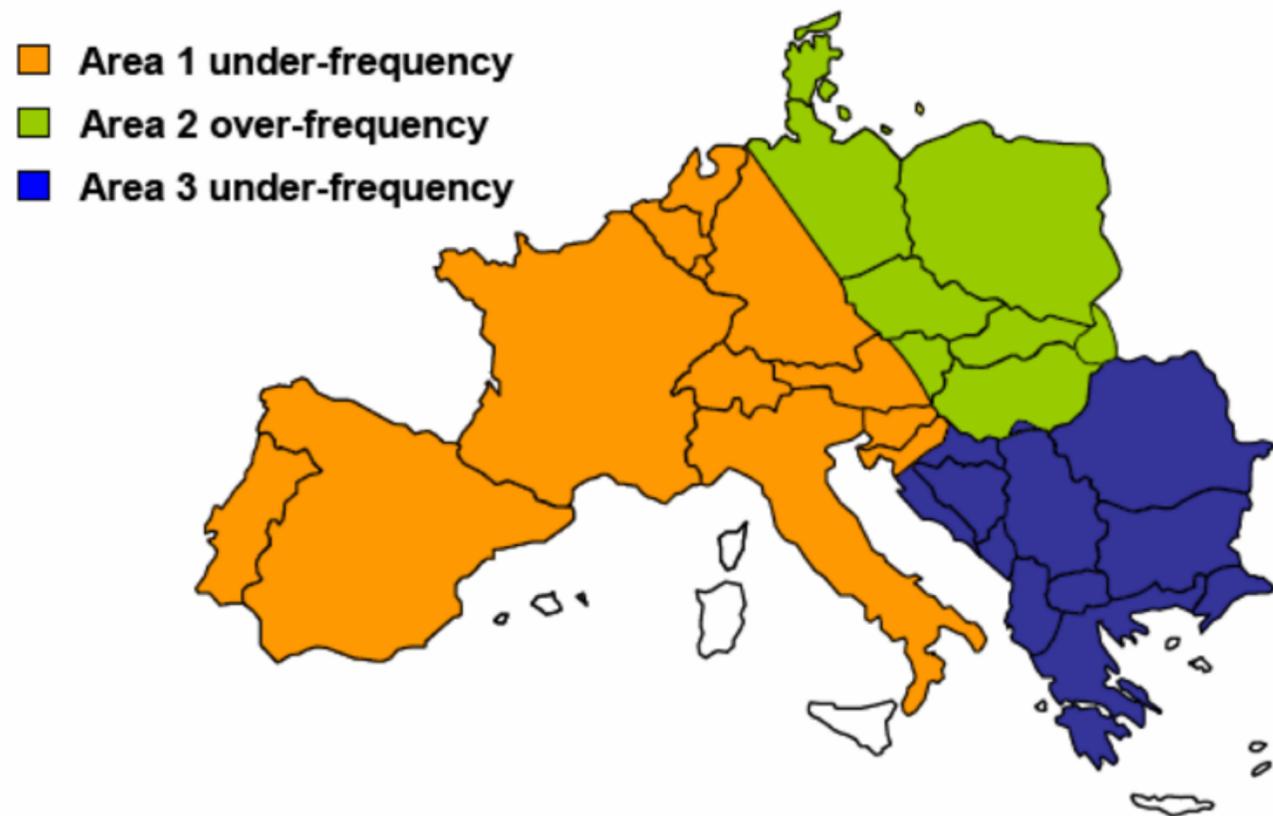


Abbildung 3: Schematische Darstellung des UCTE-Gebietes bei der Teilung in drei Frequenzgebiete

Quelle: UCTE-Abschlussbericht

Quelle: Bericht der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen über die Systemstörung im deutschen und europäischen Verbundsystem am 4. November 2006

Europäisches Verbundnetz zerfällt

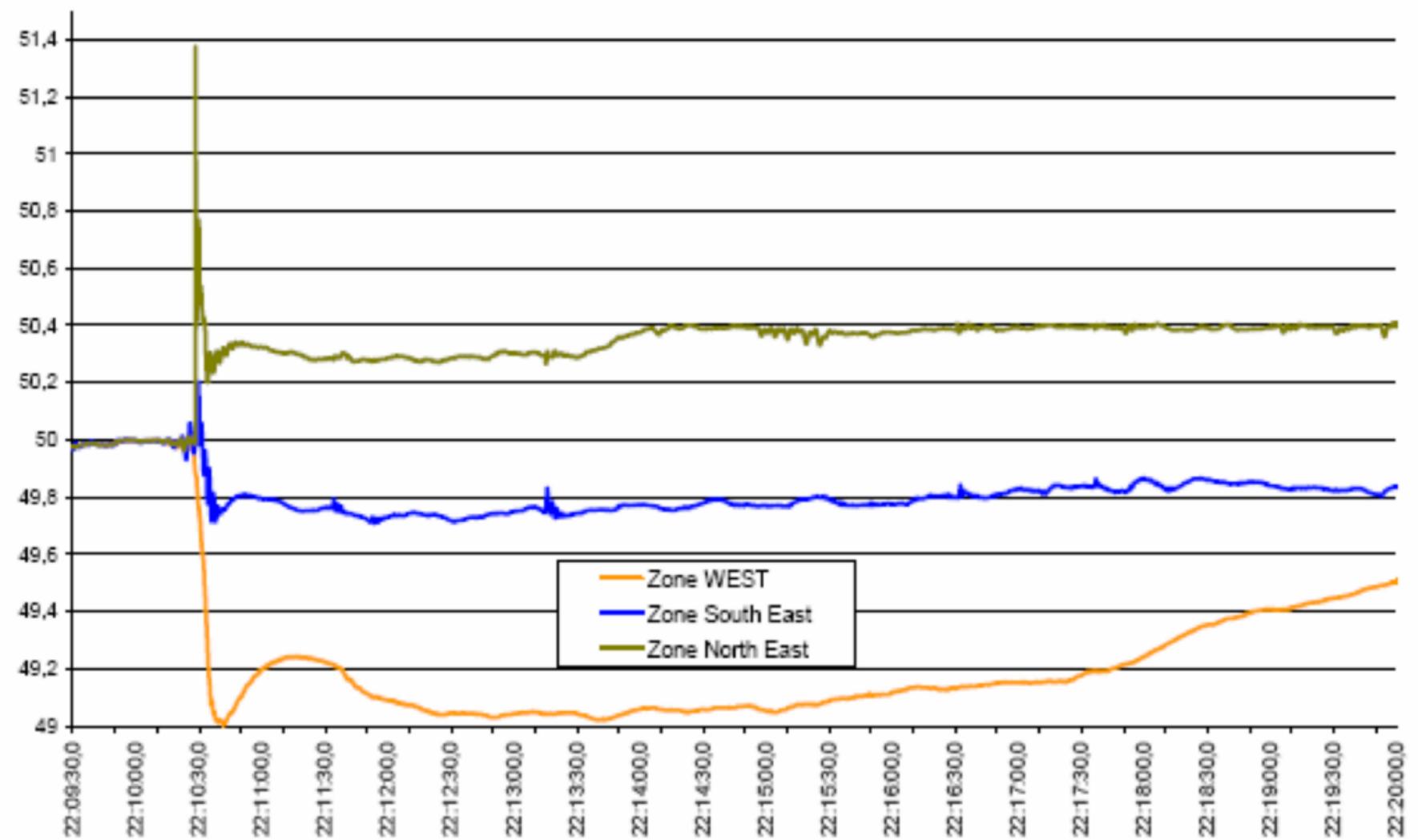
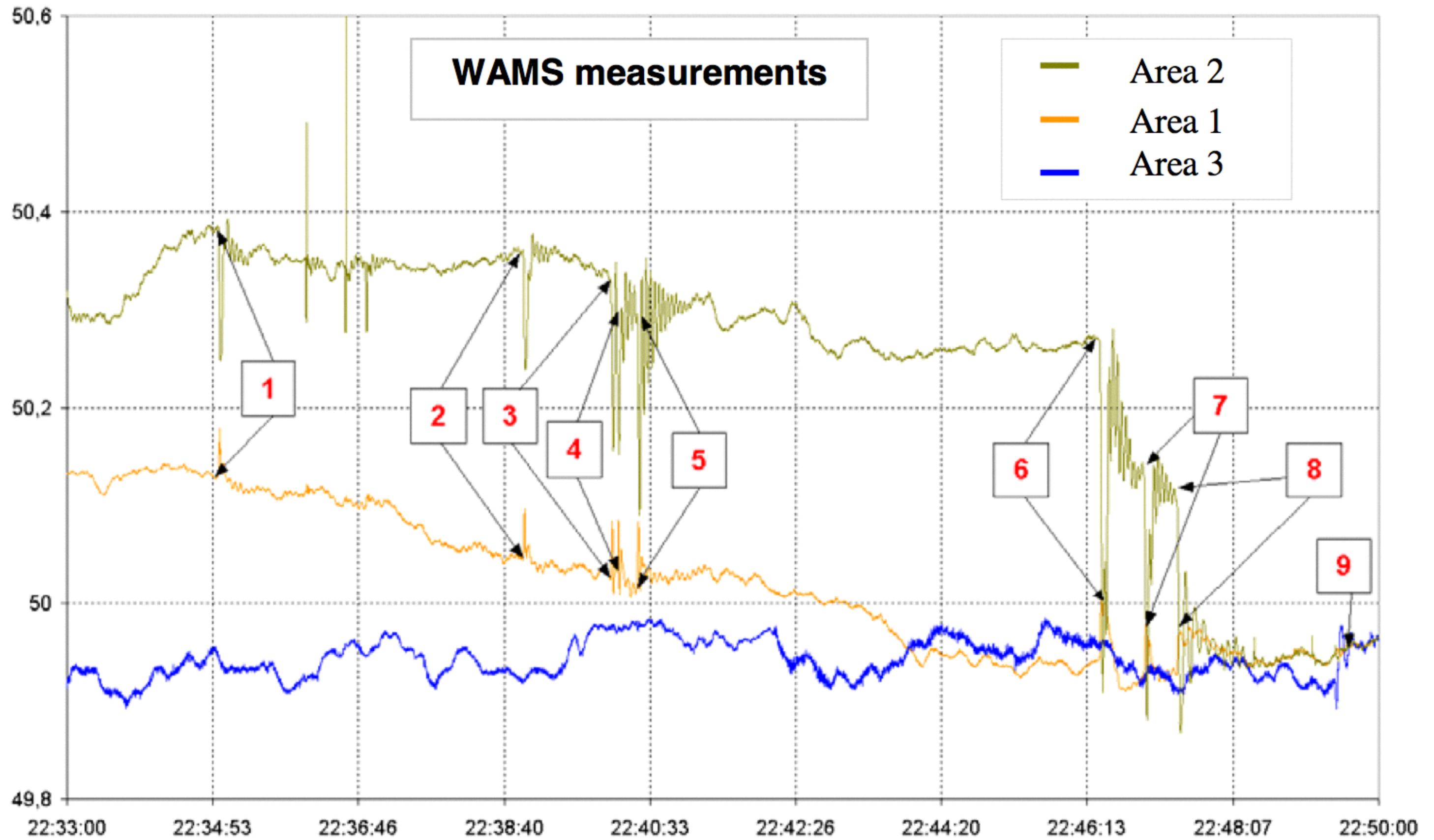
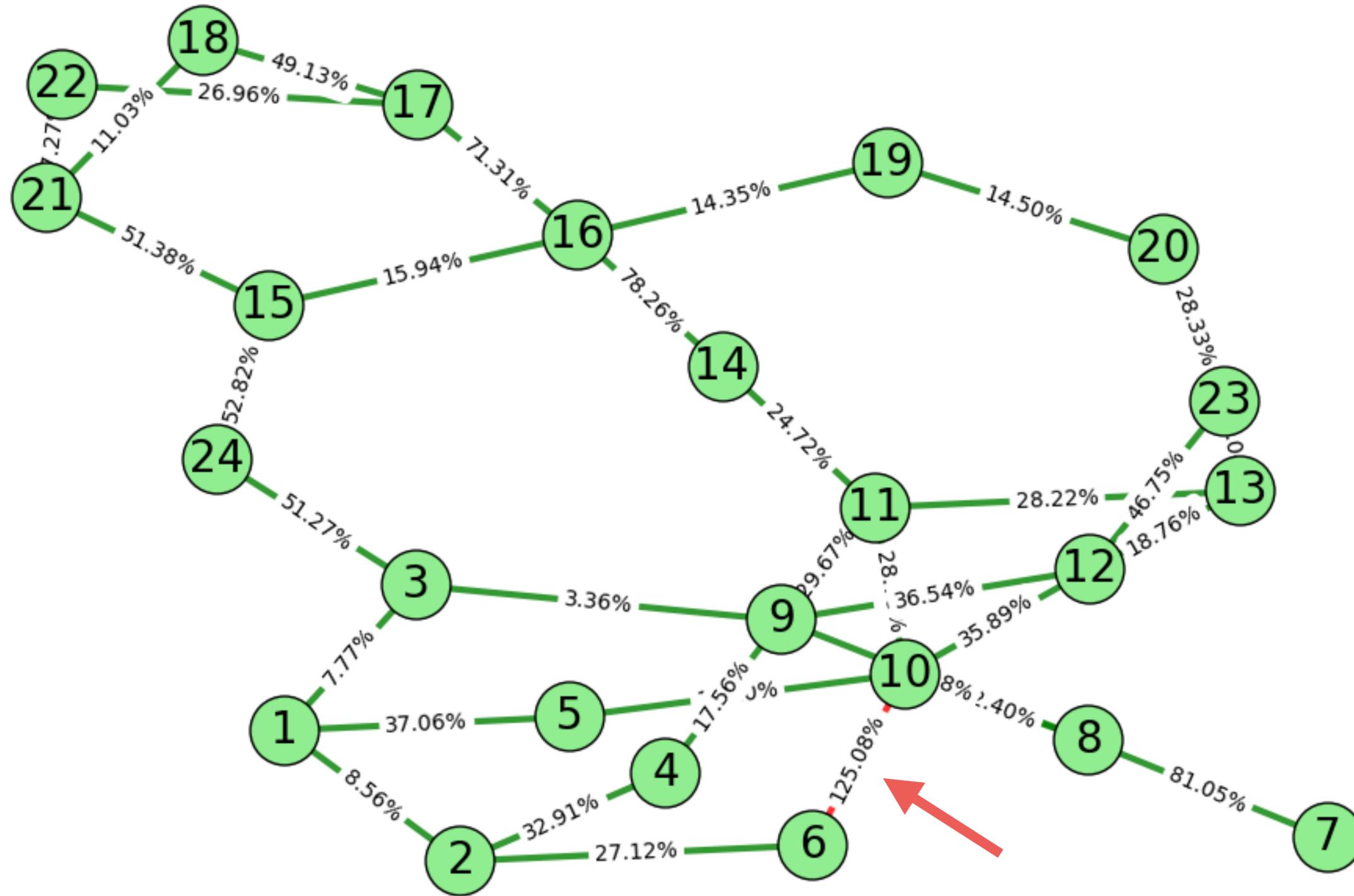


Abbildung 4: Aufzeichnungen der Frequenzen ab der Teilung des UCTE-Verbundnetzes

Quelle: UCTE-Abschlussbericht



Vereinfachtes Szenario!

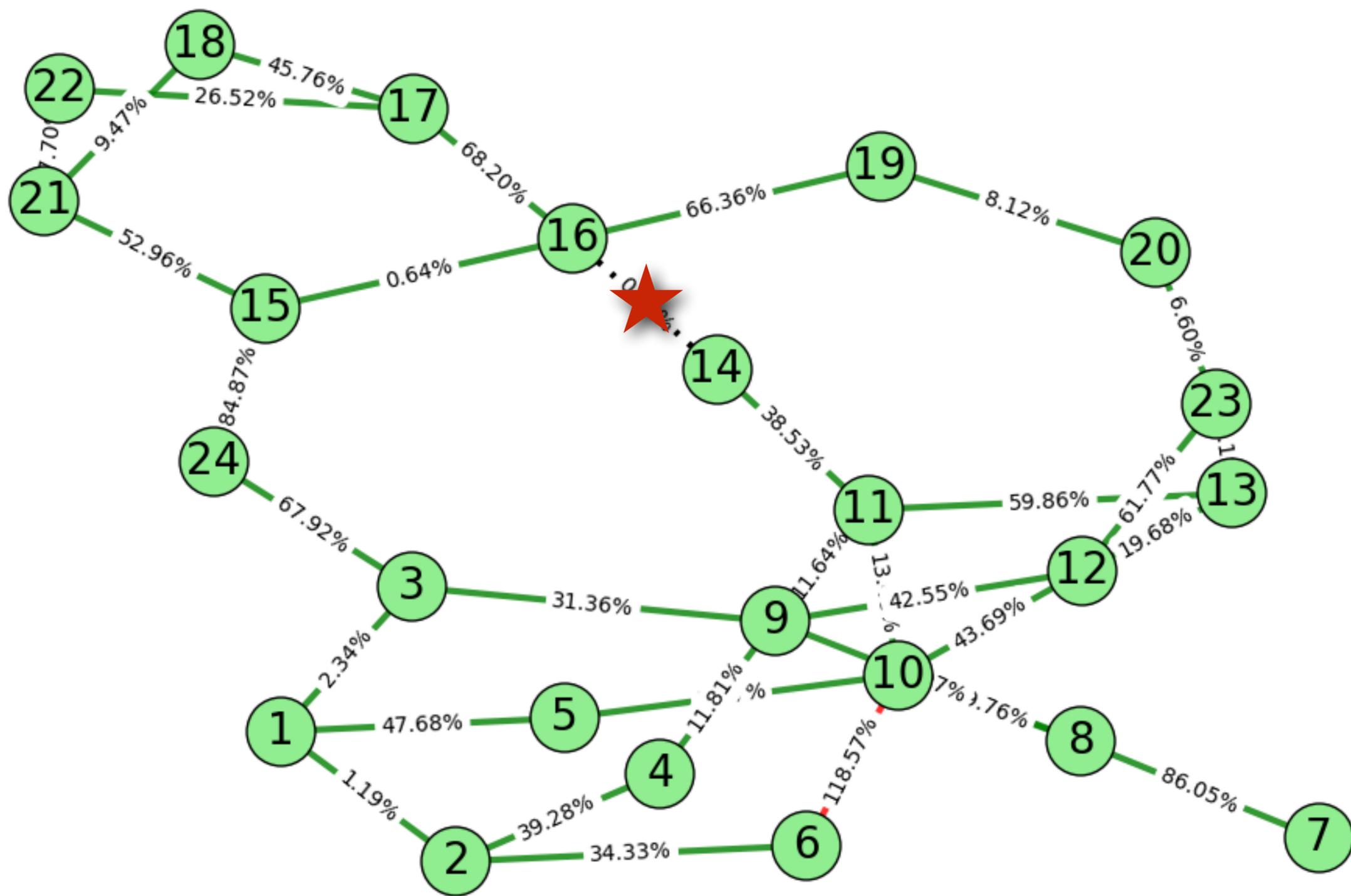


IEEE-24
Reliability
Test System

Generation:
2901.25 MW

Load:
2850.00 MW

Line outages:
None

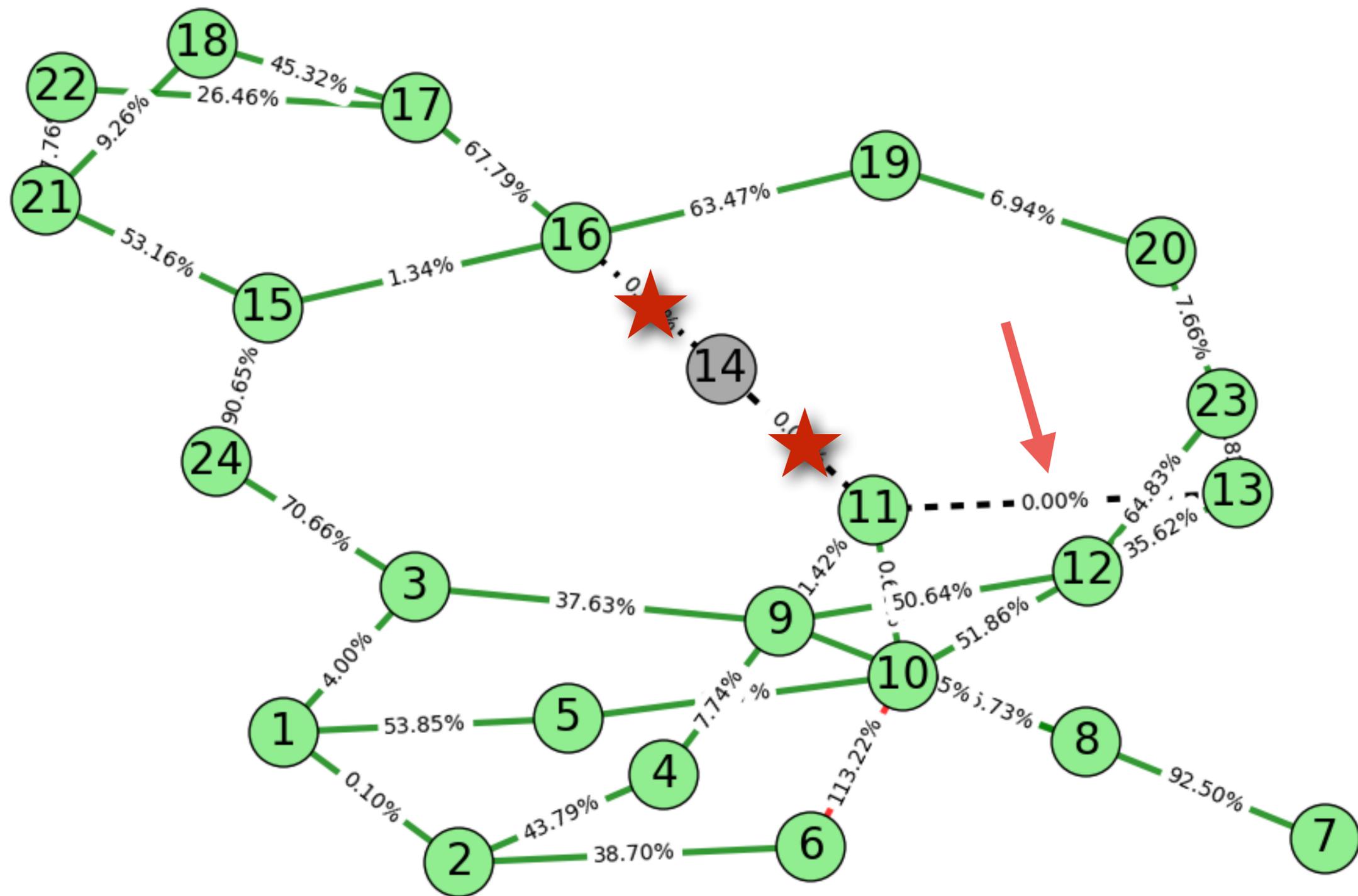


IEEE-24
Reliability
Test System

Generation:
2931.80 MW

Load:
2850.00 MW

Line outages:
(14, 16)

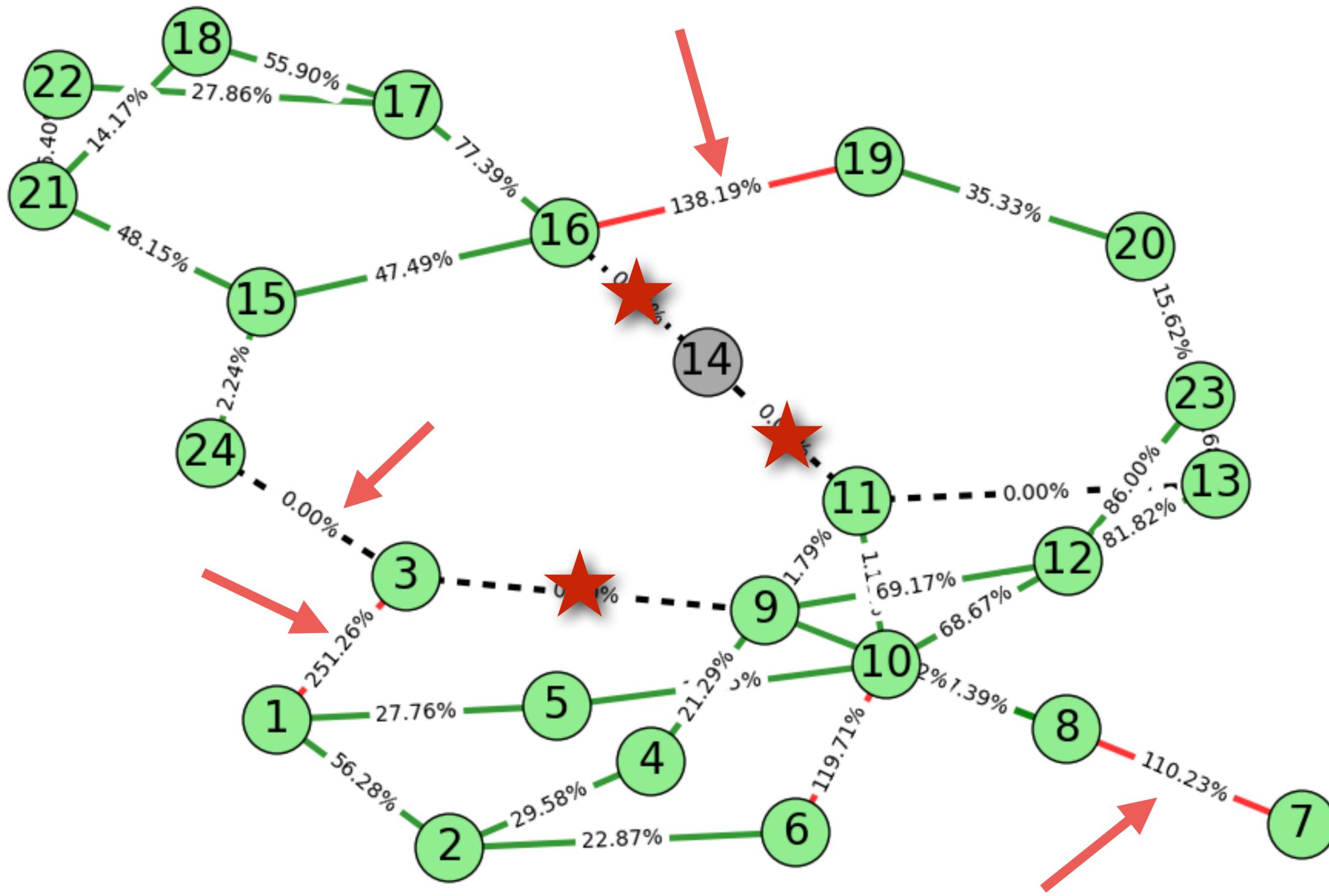


IEEE-24
Reliability
Test System

Generation:
2733.71 MW

Load:
2850.00 MW

Line outages:
(14, 16)
(11, 14)

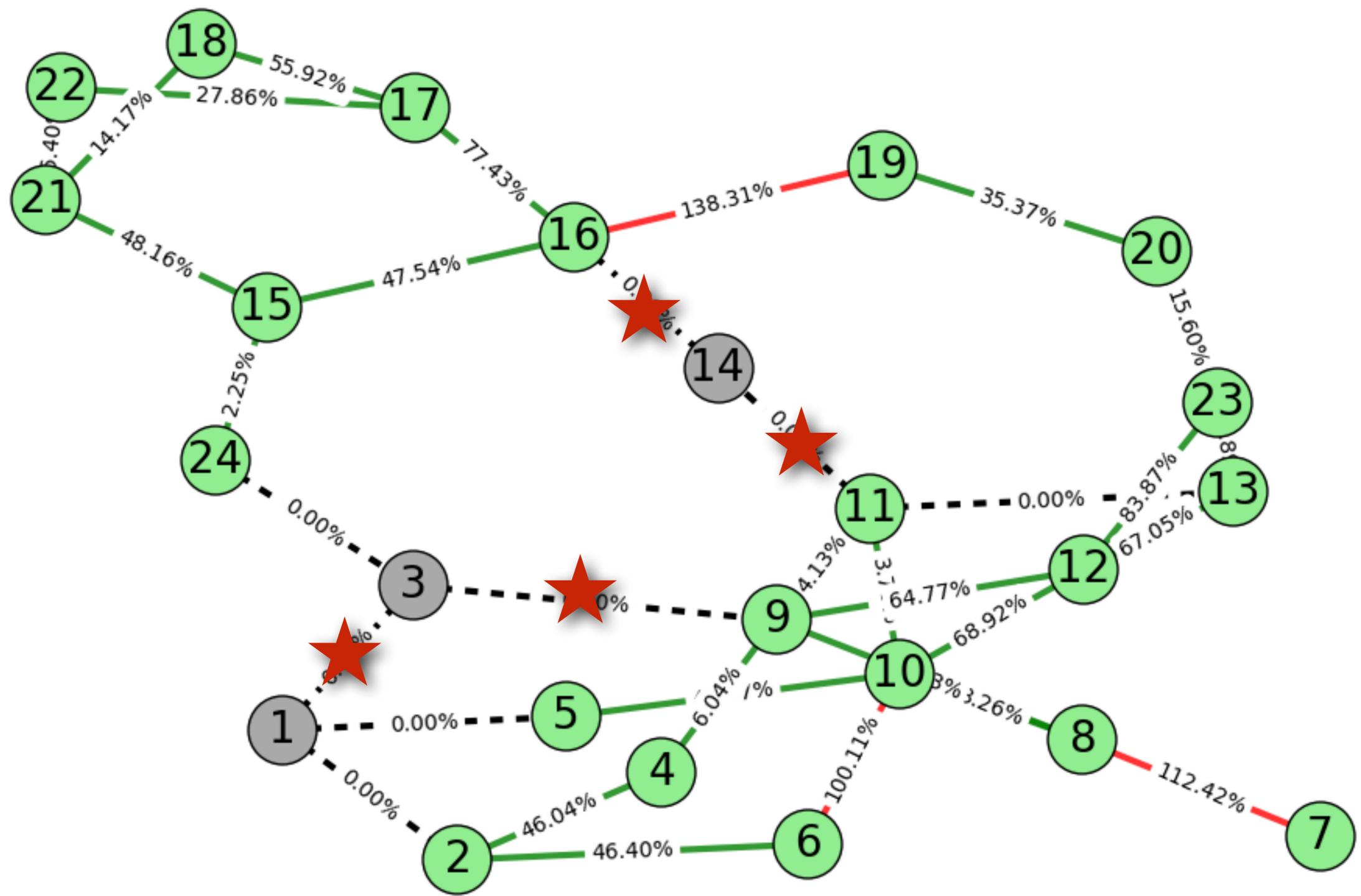


IEEE-24
Reliability
Test System

Generation:
2753.47 MW

Load:
2850.00 MW

Line outages:
(14, 16)
(11, 14)
(3, 9)



IEEE-24
Reliability
Test System

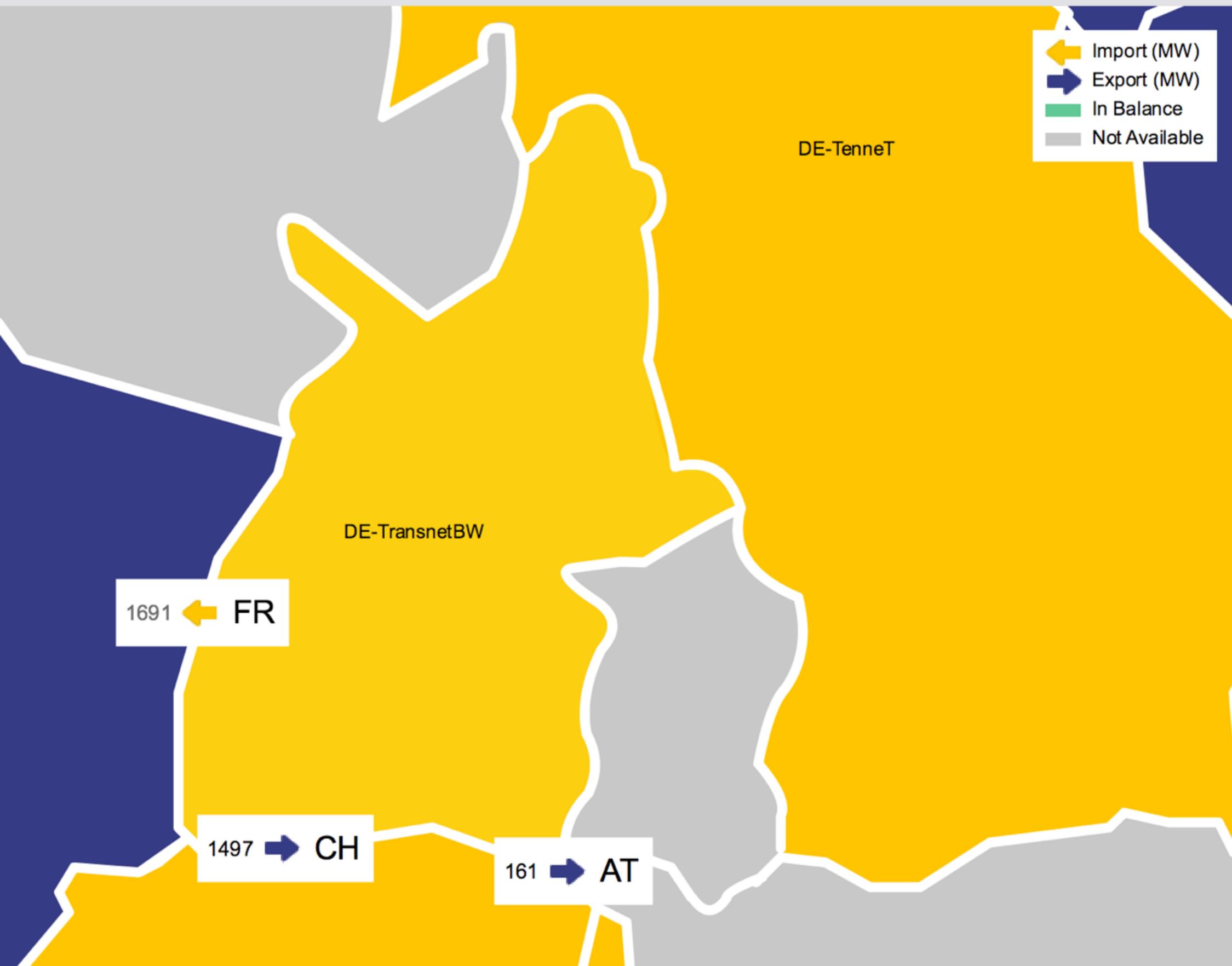
Generation:
2662.78 MW

Load:
2850.00 MW

Line outages:
(14, 16)
(11, 14)
(3, 9)
(1, 3)

Fazit Stromnetz

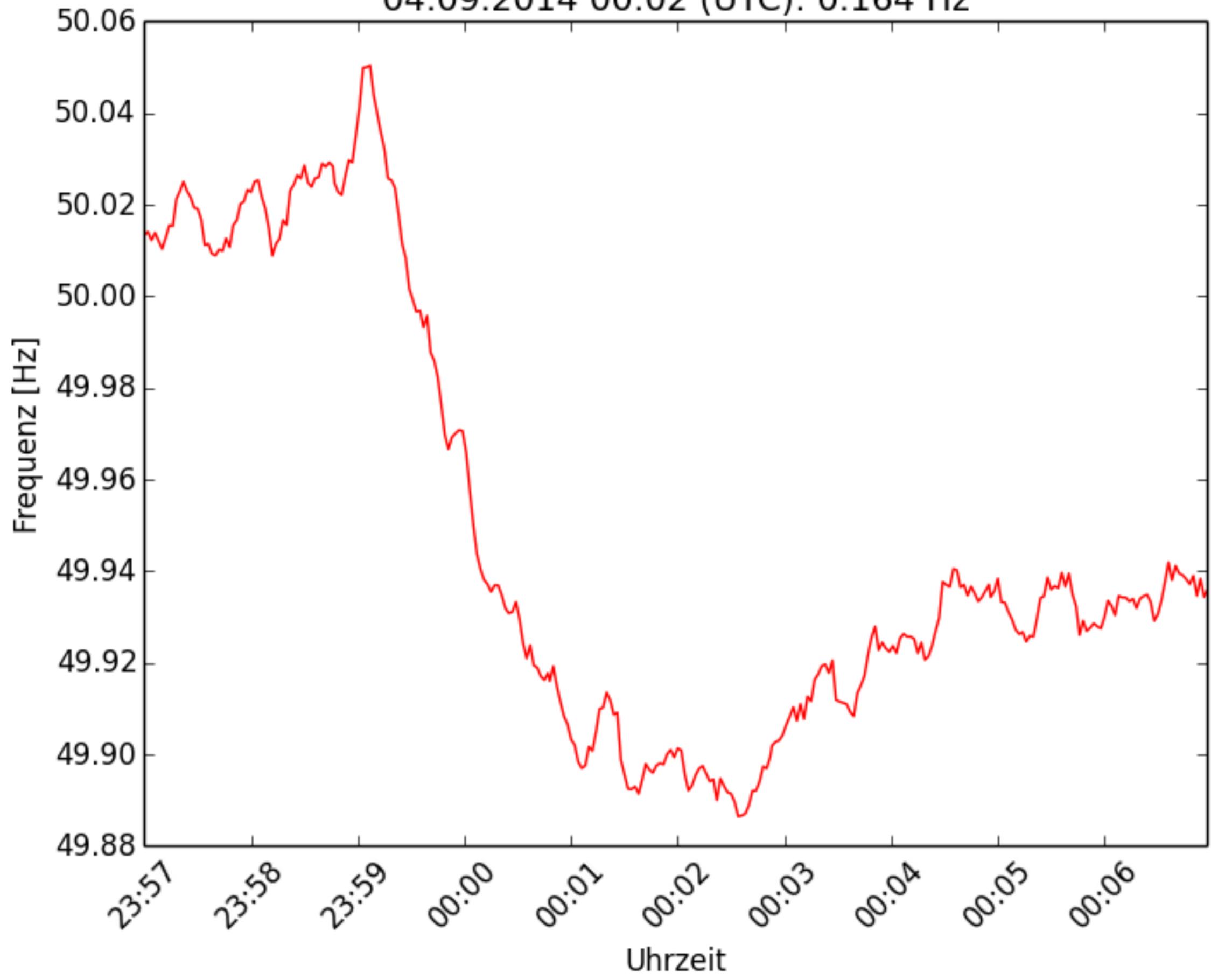
- Netze neigen zu Ausfallkaskaden
- Das Verhalten des Netzes ist unintuitiv



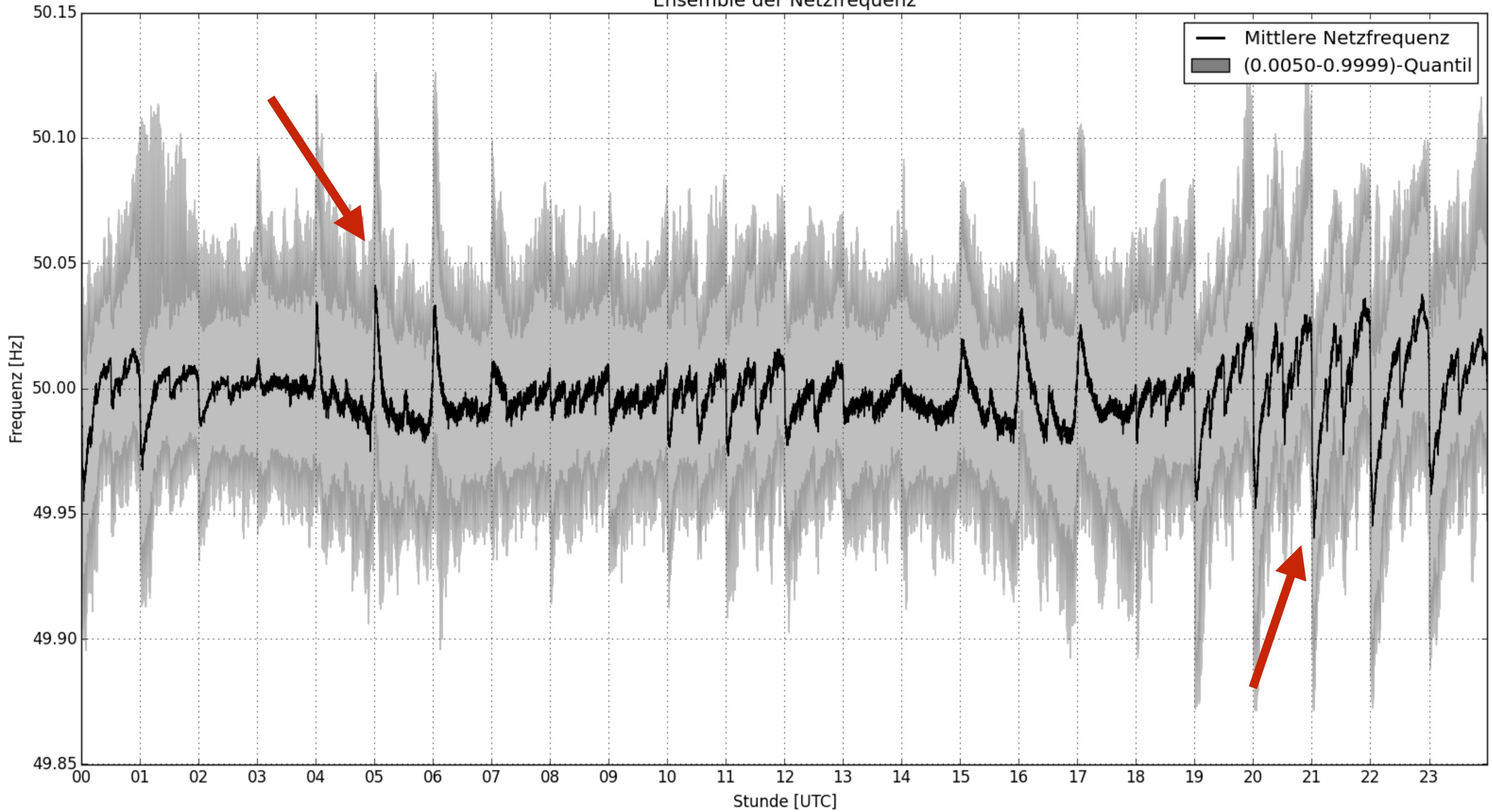
Strom-transport

Netze werden v.a. durch Stromhandel stark belastet (Import/Export von Strom)

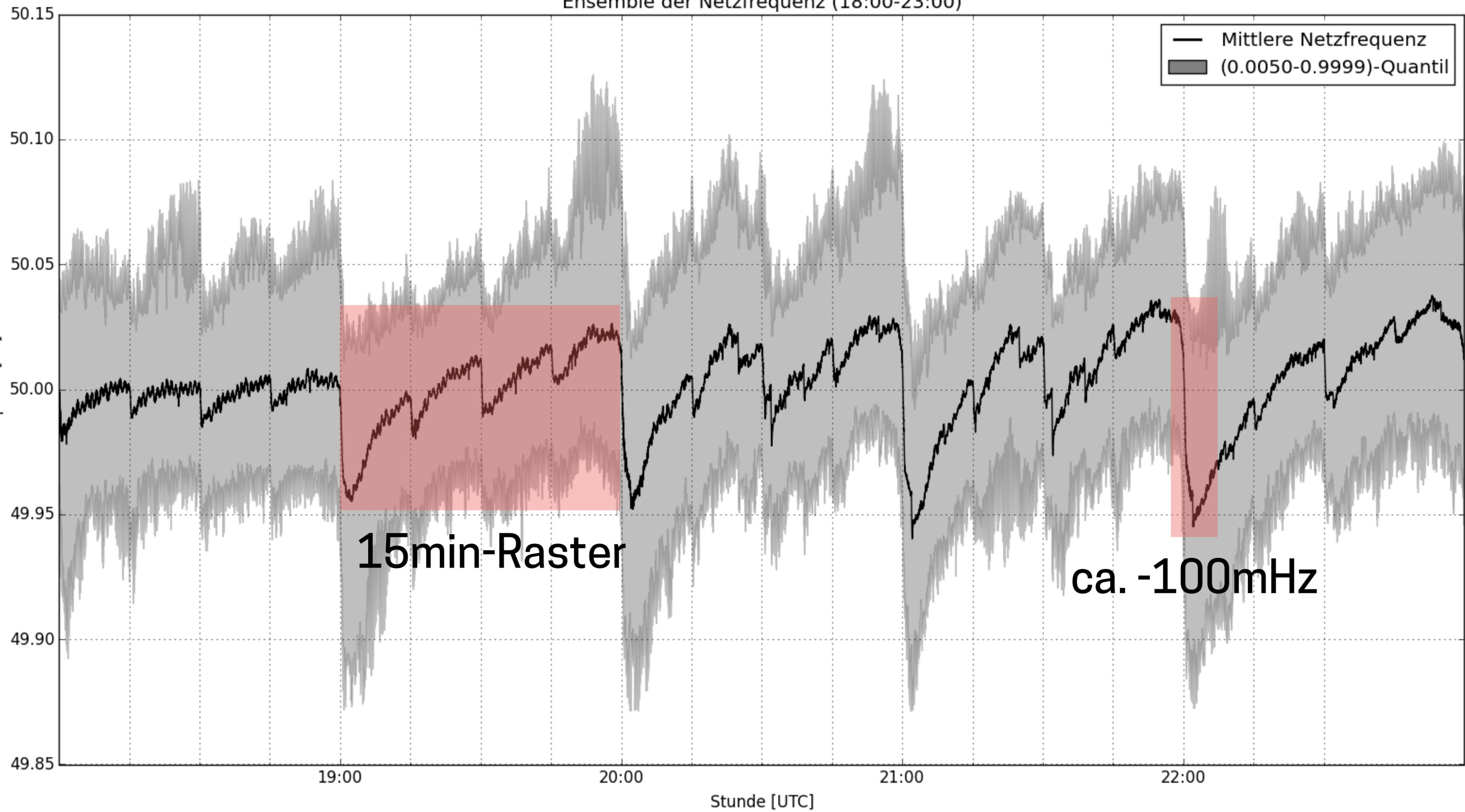
04.09.2014 00:02 (UTC): 0.164 Hz



Ensemble der Netzfrequenz



Ensemble der Netzfrequenz (18:00-23:00)



Blackout durch
Leistungssprung:

Sei schneller als die
Frequenzregelung,
begünstige Ausfallkaskaden.

$$\text{Erzeugung}_t \stackrel{!}{=} \text{Verbrauch}_t \quad \forall t$$

Konkret

- Hohes Windstromaufkommen/
PV-Produktion -> Relativ wenig
konventionelle
Primärregelleistung
- Export z.B. von Frankreich nach
Großbritannien
- Frequenzsprung durch
Stromhandel

&

gezielter,
schneller
Lastsprung

Bericht: Hacker haben Teile des US-Stromnetzes infiltriert

heise online 22.12.2015 17:30 Uhr – Stefan Krempl

vorlesen



Software-
technische
Monokultur der
Leitsysteme:

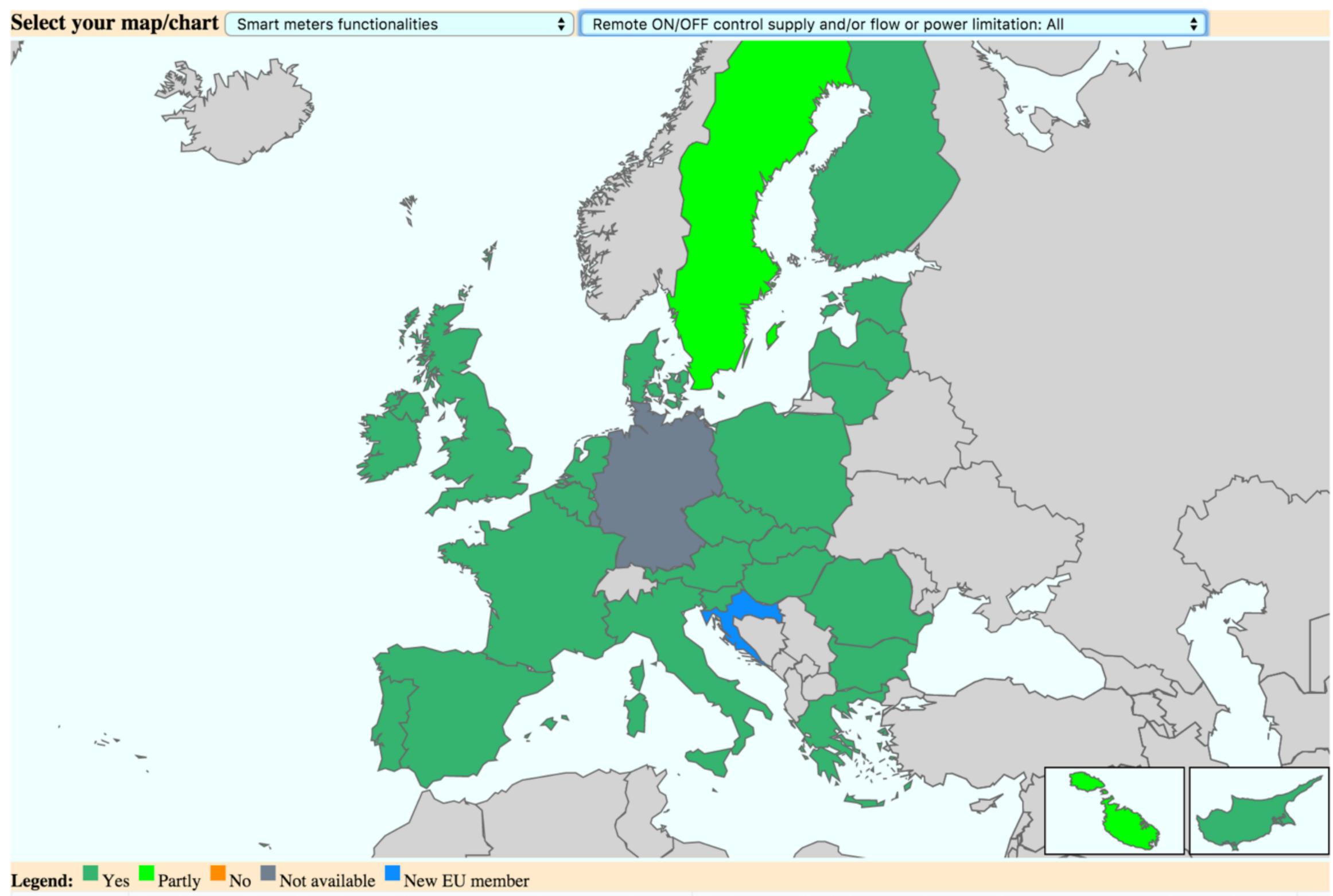
Ca. 300
deutsche
Versorger setzen
“IDS HIGH-LEIT”
ein

In rund zwölf Fällen sollen Cyberangriffe auf Kontrollzentren von Energieversorgern in den USA während der vergangenen zehn Jahre erfolgreich gewesen sein. Der Hack des Anbieters Calpine ging wohl vom Iran aus.

Smart Meter: 100ms, (potentiell) skriptbar



CC-BY-SA EVB Energie AG

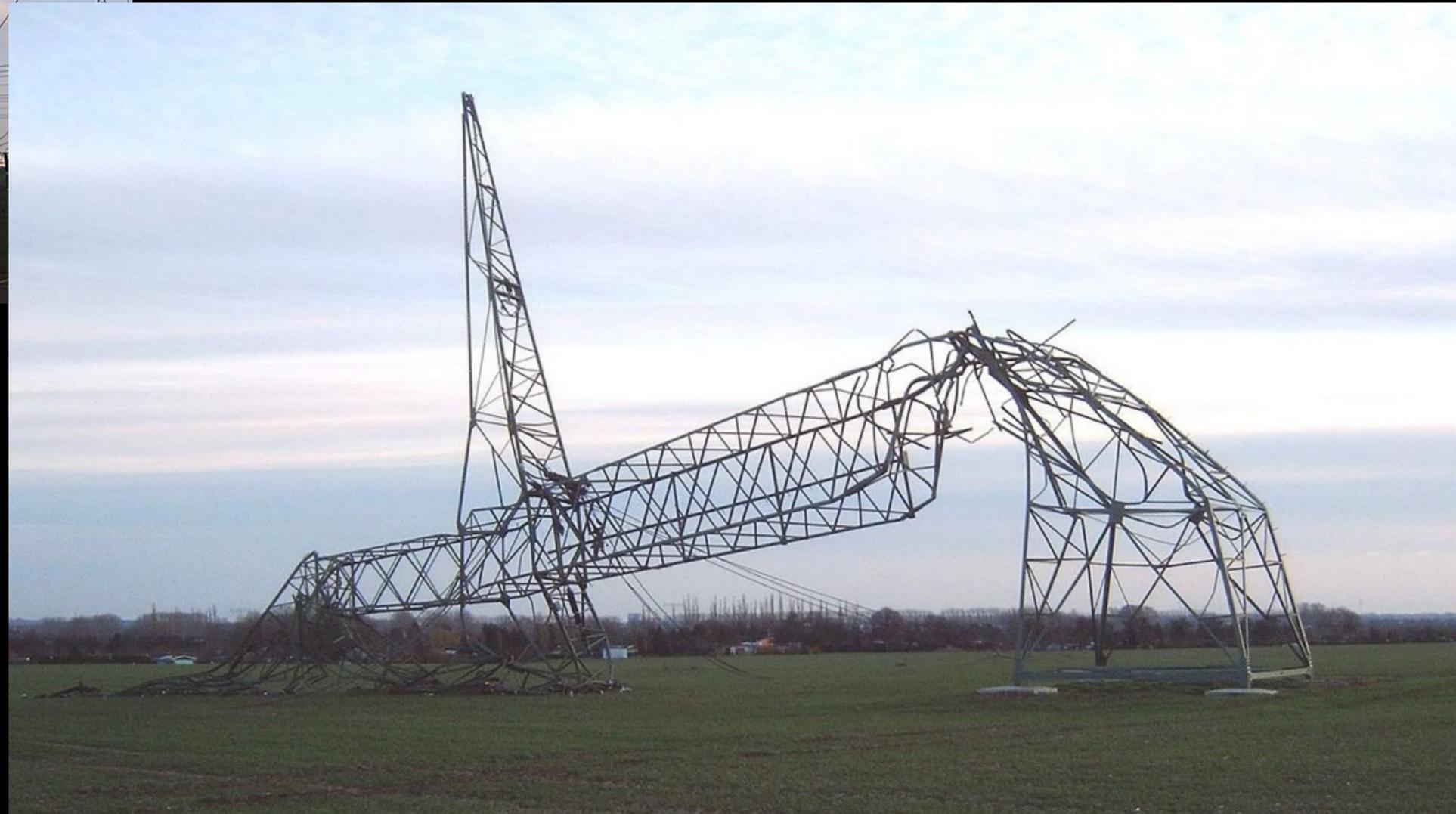


<http://ses.jrc.ec.europa.eu/smart-metering-deployment-european-union>

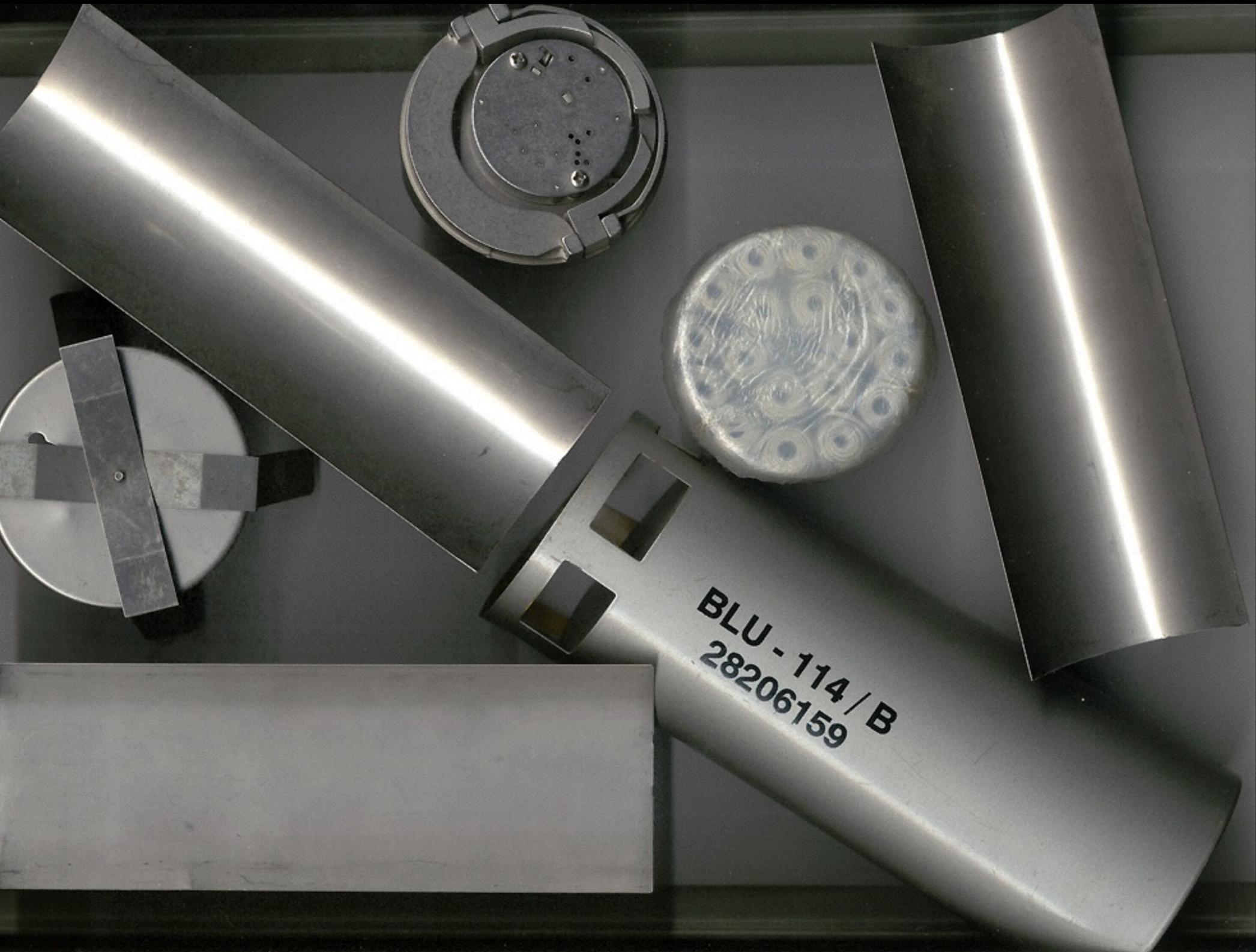
Zeitsynchrone mechanische Manipulation



*„Abspannportal.jpg, © MdE auf Wikimedia Commons,
Lizenz: GFDL 1.2+ oder CC-BY-SA 3.0“*



CC-BY-SA Olaf2 auf Wikimedia Commons



Graphitbombe

- Freisetzung von Graphitstaub/ Kohlenstofffasern
- 2. Golfkrieg 90/91: 85% der irakischen Stromversorgung lahmgelegt
- Kosovokrieg 1999

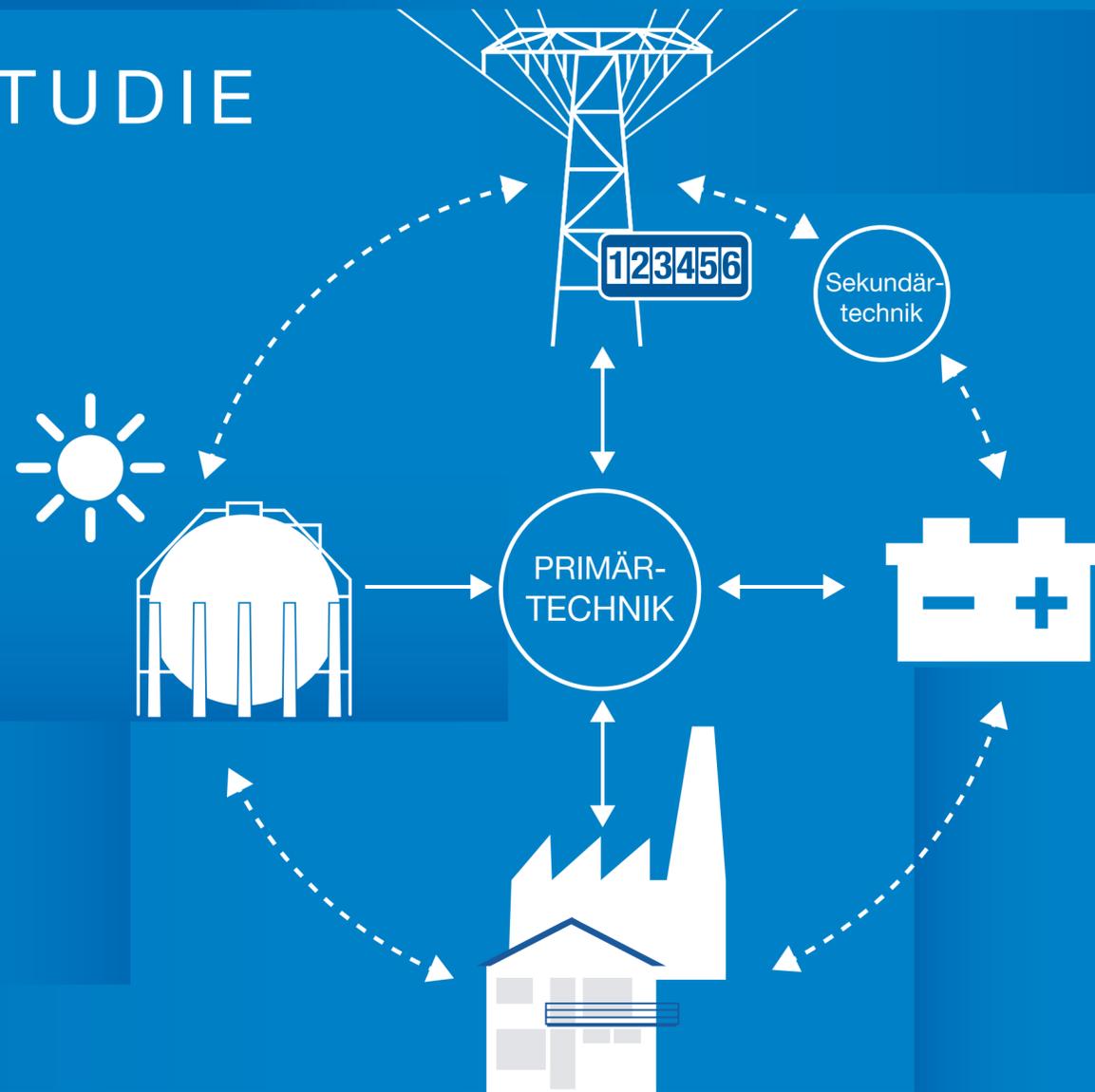
Systemische Schwächen werden beim (n-1)-Kriterium nicht berücksichtigt

- Stromhandel und hohe Netzauslastung begünstigen Lastsprünge
- Kaskadeneffekte bislang wenig untersucht
- Weiterer Effekt: Frequenzpendelungen
 - Needs moar research
 - Brauche mehr außendeutsche Messstandorte



CC-BY-SA Felipe Micaroni Lalli auf Wikimedia Commons

VDE-STUDIE



DER ZELLULARE ANSATZ

DER ZELLULARE ANSATZ

Dezentralisierung
nötig

Netzstabilisierung
auch auf der
Niederspannungs-
Ebene

Autonome Zellen



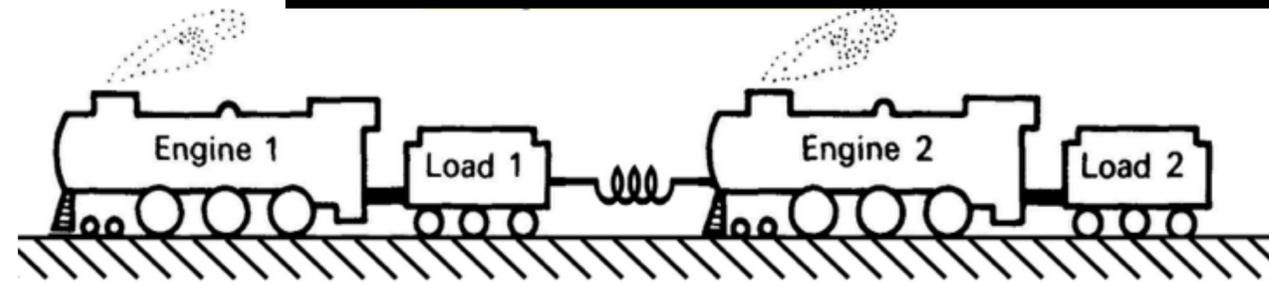
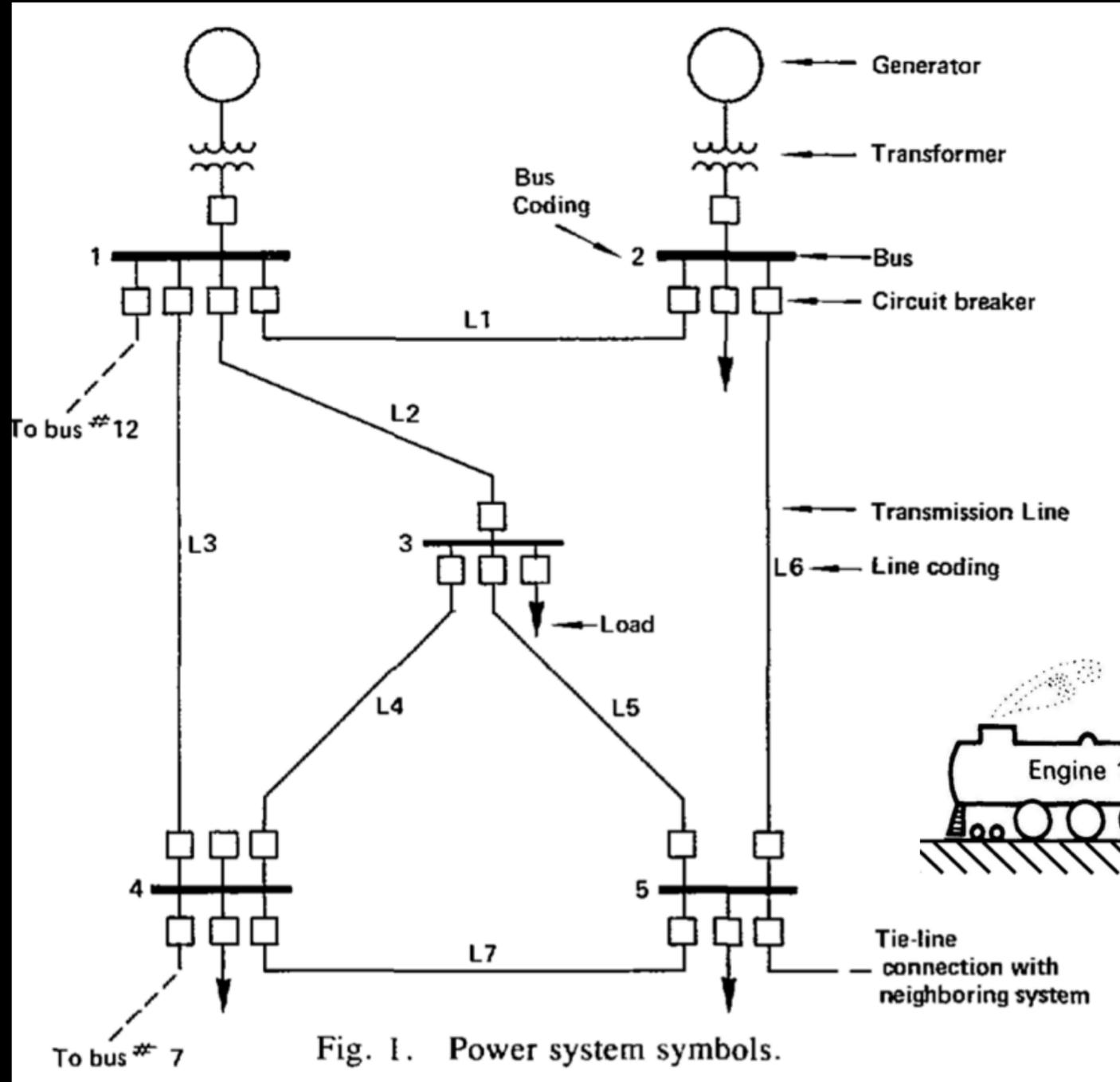
**Vielen Dank für die
vielen Emails!**

<https://netzs.in.us>



Except where otherwise noted, this work is licensed under
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

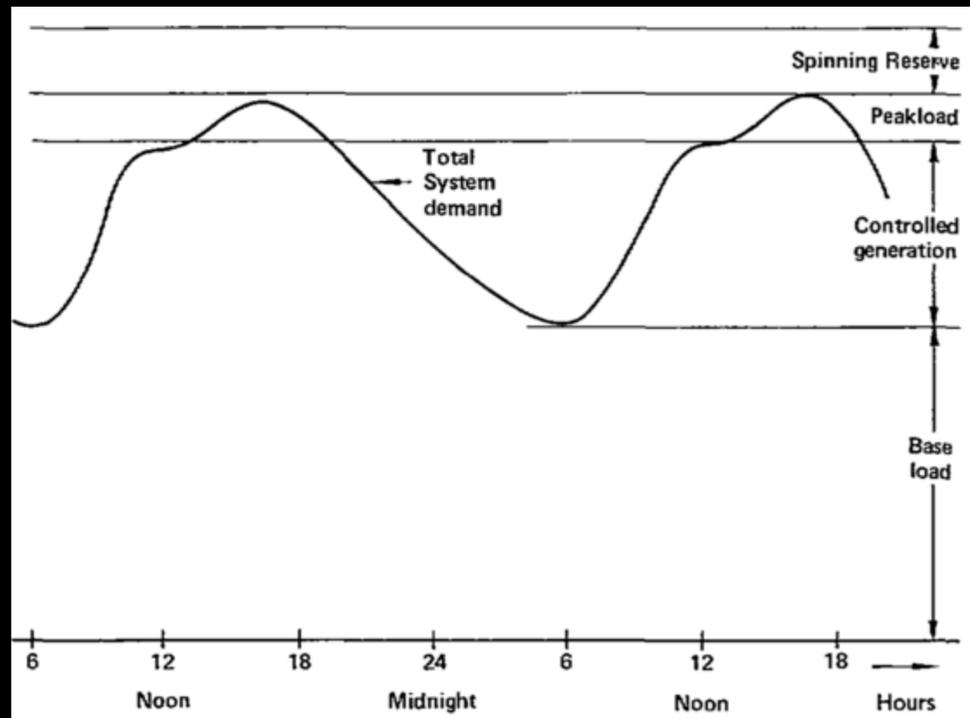
Rückkopplung der Kraftwerke



Quelle: Olle I. Elgerd, „Electric Energy Systems Theory: An Introduction“, 1973

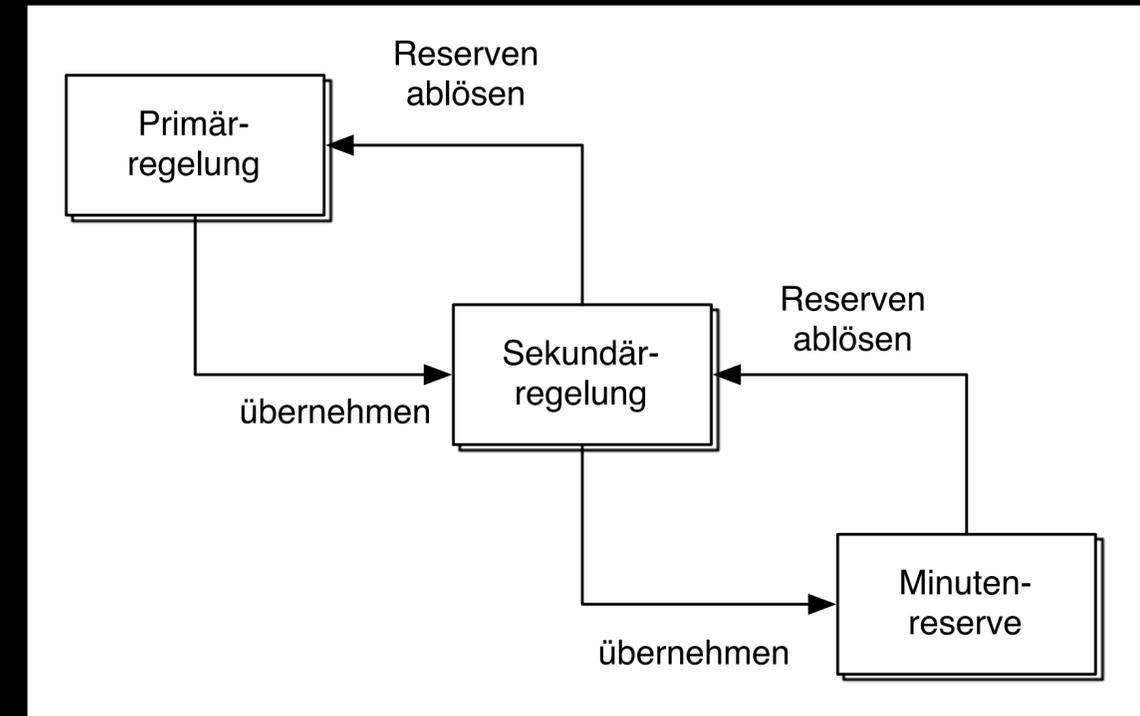
Quelle: Olle I. Elgerd, „Control of Electric Power Systems“, IEEE CSS, 1981

Frequenzregelung



Variable Last
-> Frequenzänderung

Quelle: Olle I. Elgerd, "Control of Electric Power Systems", IEEE CSS, 1981



**Anpassung durch
Leistungsänderung
(und prognostizierter
Fahrplan)**

Quelle: UCTE Handbook, Appendix A
(eigene Darstellung)

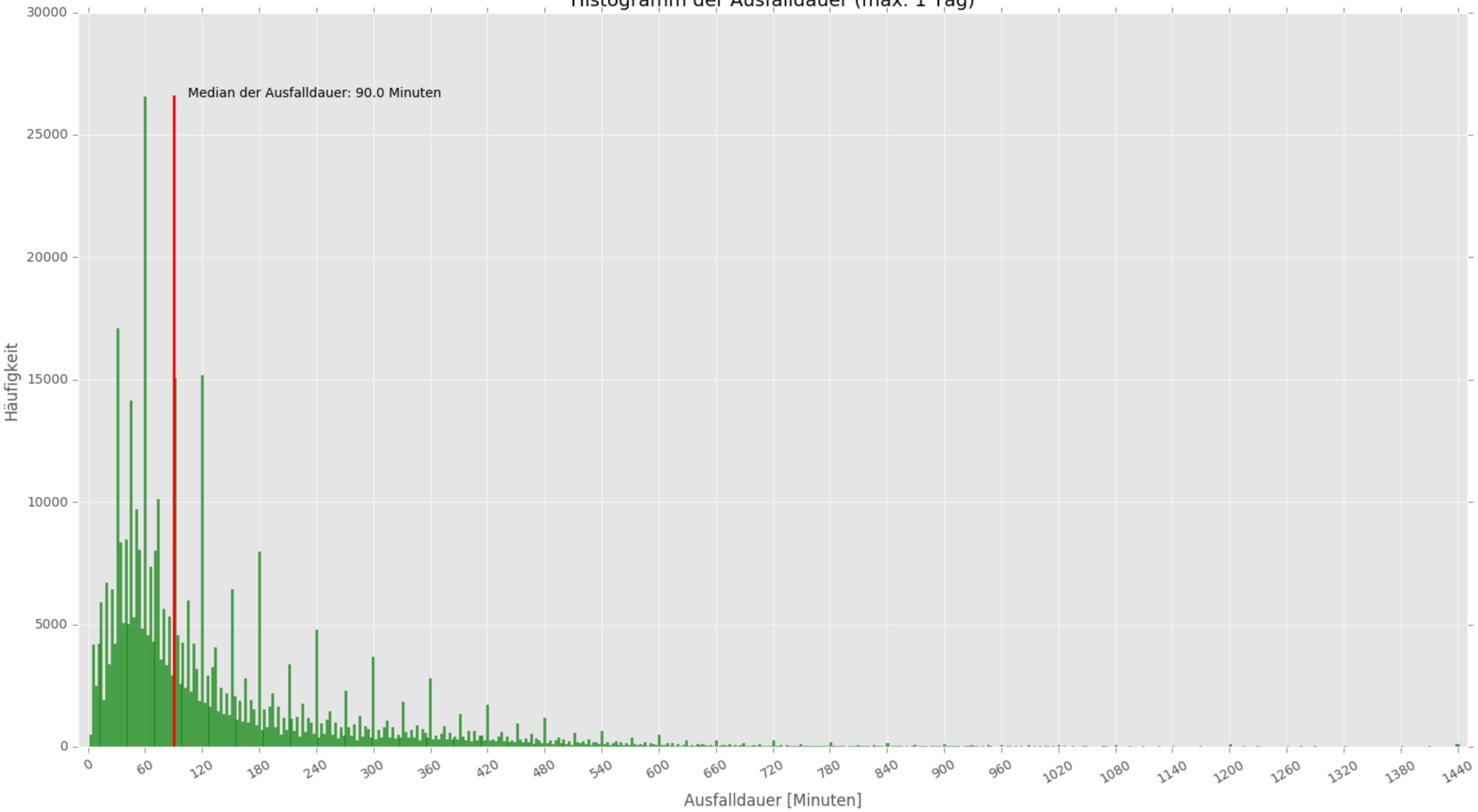
Frequenz Konsequenz

52,00 Hz	Unzulässiger Betriebszustand. Dieser Wert wird z.B. von Netzersatzanlagen gezielt angesteuert, um andere Erzeugungsanlagen (z.B. PV) zu deaktivieren.
51,50 Hz	Alle regelbaren Kraftwerke müssen ihre Stromerzeugung komplett eingestellt haben.
51,00 Hz	Von hier bis 51,50 Hz müssen neue Kraftwerke mind. 90 Minuten einsatzfähig bleiben - ältere Kraftwerke gehen vom Netz.
50,50 Hz	Obere Grenze der im Normalbetrieb geduldeten Frequenzabweichungen. Netzersatzanlagen halten die Frequenz bei 50,5 bis 51 Hz.
50,20 Hz	Von hier bis 51,5 Hz sollen regelbare Erzeugungsanlagen (PV, BHKW, ...) eine frequenzbasierte Leistungsreduktion vornehmen.
50,00 Hz	Grundfrequenz, von der allerdings zur Korrektur der Netzzeit leicht abgewichen werden darf.
49,80 Hz	Stufe 1 der Netzstabilisierung. Der ÜNB kann die Aktivierung von zusätzlicher Erzeugungsleistung anweisen.
49,50 Hz	Untere Grenze der im Normalbetrieb geduldeten Frequenzabweichungen
49,00 Hz	Stufe 2 der Netzstabilisierung aktiviert frequenzabhängigen Lastabwurf von 10 bis 15% der Verbraucher ("Teil-Blackout")
48,70 Hz	Stufe 3 der Netzstabilisierung. Abermals frequenzabhängiger Lastabwurf von 10 bis 15% der Verbraucher
48,40 Hz	Stufe 4 der Netzstabilisierung. Lastabwurf von 10 bis 15% der Verbraucher.
47,50 Hz	Stufe 5 der Netzstabilisierung führt zur gezielten Abtrennung von Netzsegmenten und Kraftwerken — regionaler Blackout.
47,00 Hz	Unterhalb dieser Schranke beginnt im europäischen Netzverbund ein unzulässiger Betriebszustand.

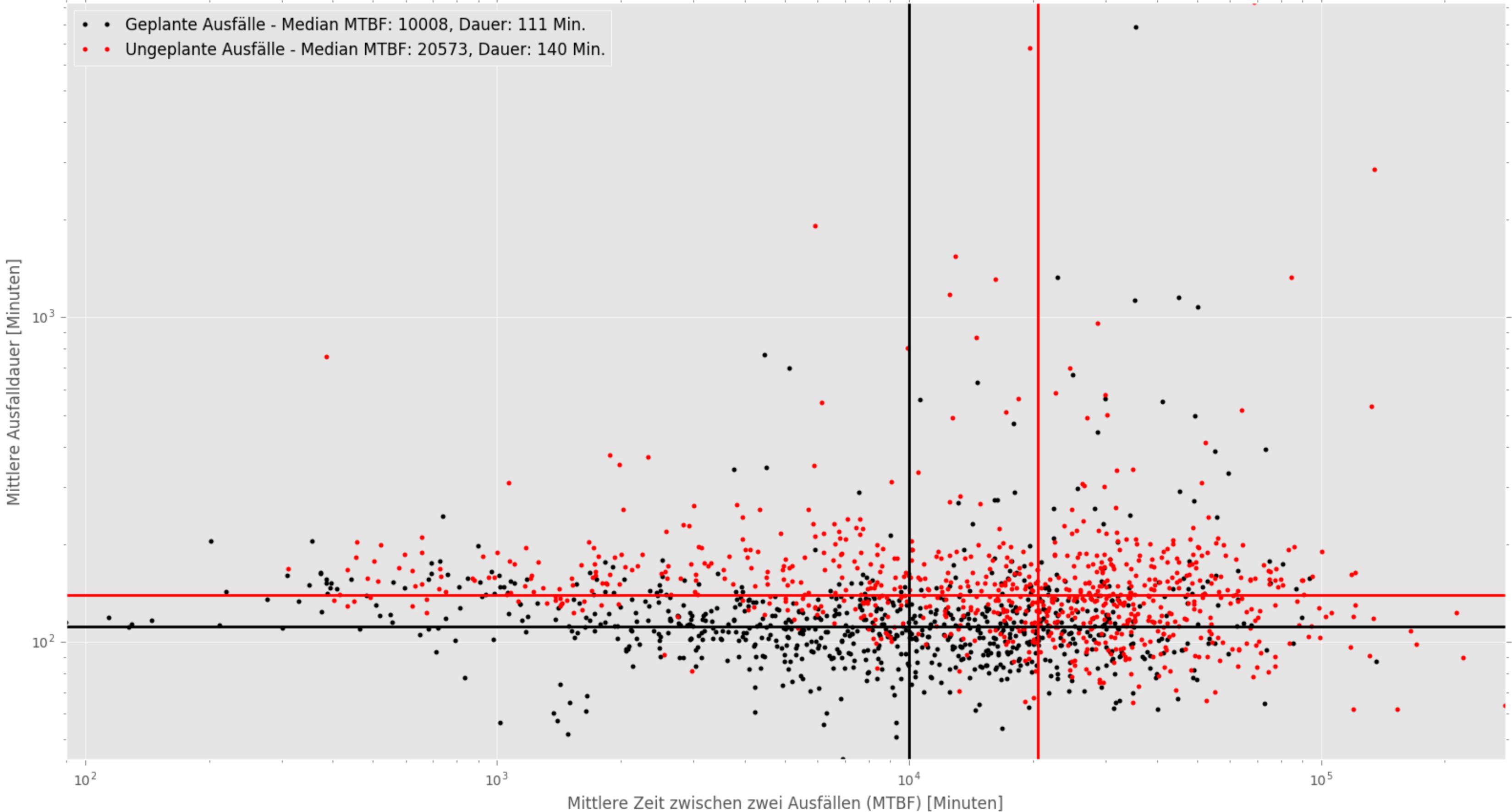
Modellkonstanten (WIP)

```
6
7 # model constants, time is measured in seconds, power in GW
8 scenario = m.Scenario(
9     time_max = 100,           # Simuliere n Sekunden
10    ausfalleistung = -3.0,    # Ausfall von X GW Leistung
11    netzlast = 150.0          # Netzlast (150GW: Schwachlast, 300GW:
12                               # Starklast)
13 )
14
15 # Netzparameter (nach ENTSO-E)
16 network = m.Network(
17    setfreq = 50.0,           # Bezugsnetzfrequenz (50 Hz)
18    max_stat_deviation = -0.2, # Maximale quasistationäre Frequenzabweichung
19    max_ausfalleistung = -3.0, # Maximaler Ausfall: 3GW (Doppelblock)
20    netzanlaufzeit = 12.0,    # Netzanlaufzeitkonstante
21    netzkennzahl = 0.015     # 1.5% für Ausfall von 1% der Netzlast
22 )
23
```

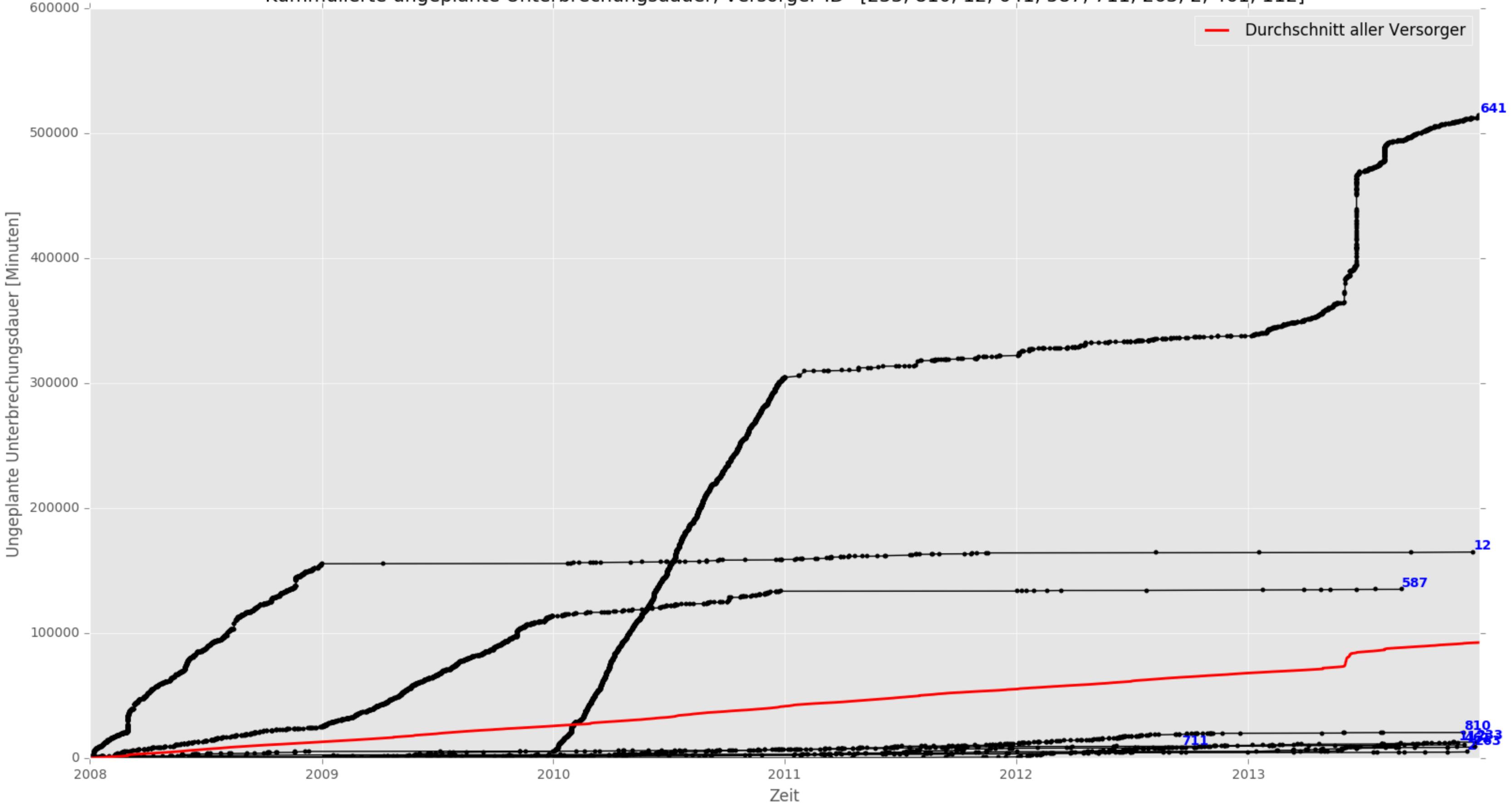
Histogramm der Ausfalldauer (max. 1 Tag)



Ausfälle aller 813 Netzbetreiber 2007-2013



Kummulierte ungeplante Unterbrechungsdauer, Versorger-ID=[233, 810, 12, 641, 587, 711, 263, 2, 461, 112]





Partielle
Sonnen-
finsternis

20.03.2015



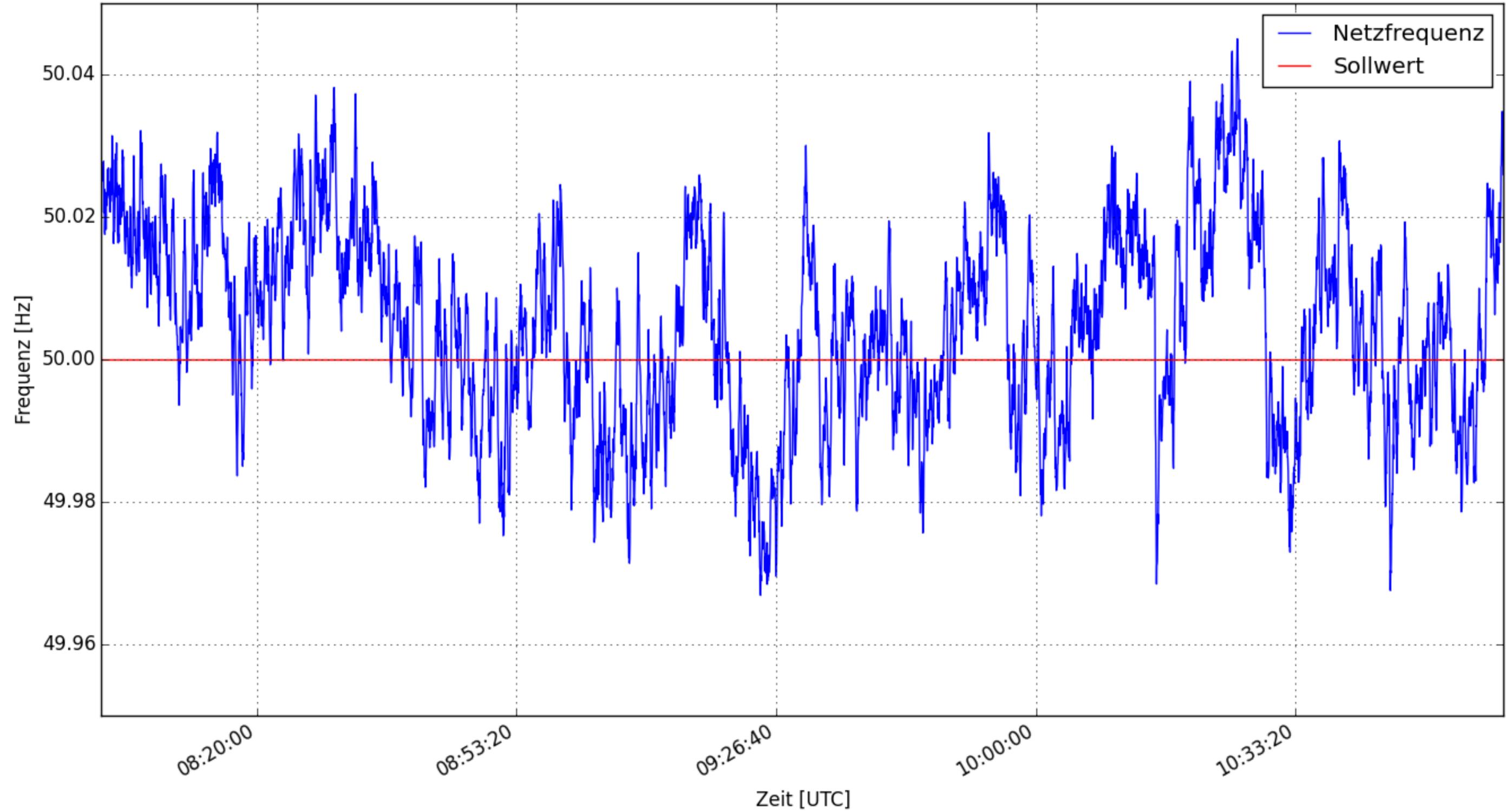
10kWp-Photovoltaikanlage in Kaiserslautern

ENTSO-E: Panik!1!!

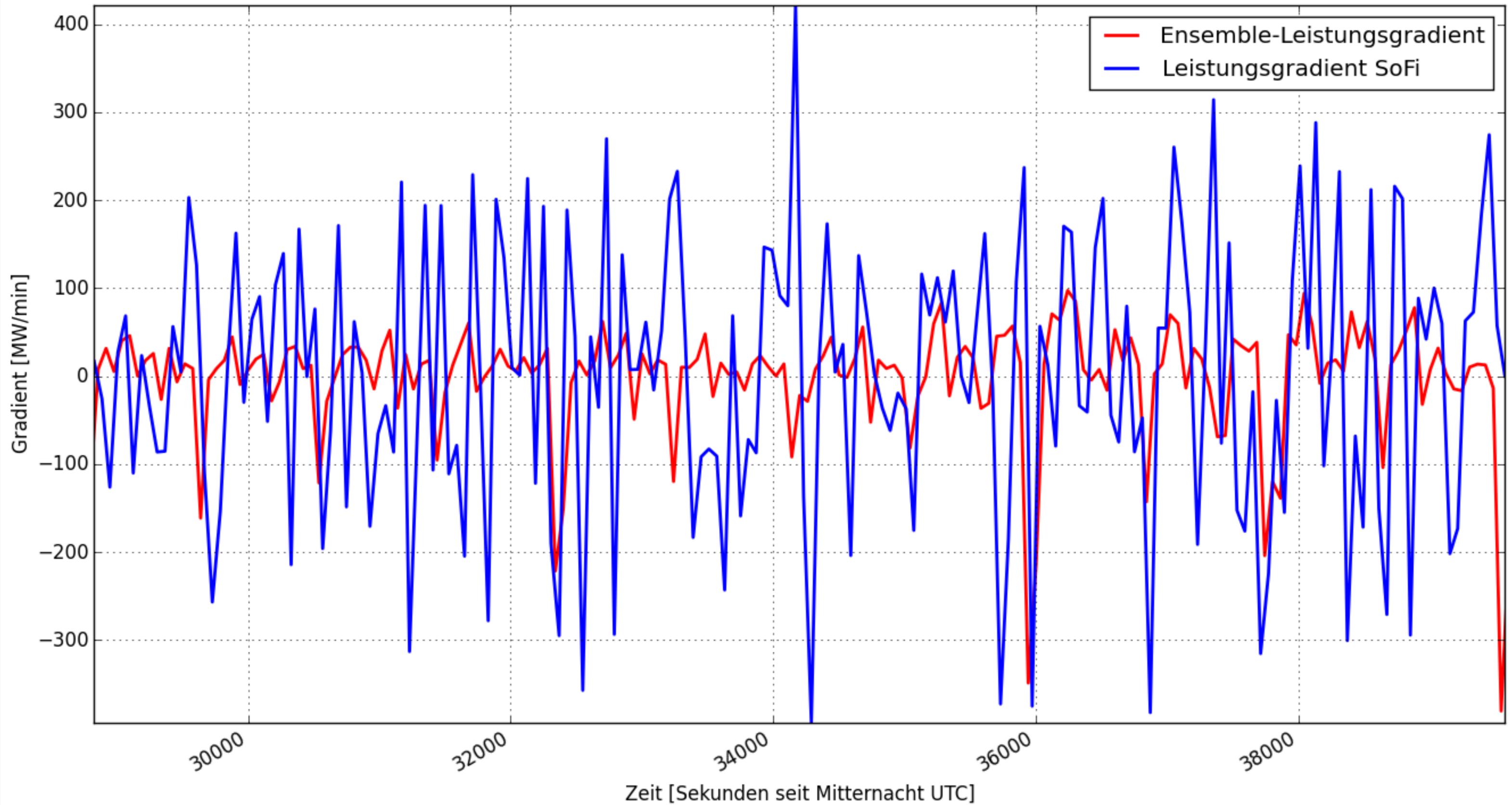
Managing this event on the world's largest interconnected grid is an unprecedented challenge for European TSOs. Solar eclipses have happened before but with the increase of installed photovoltaic energy generation, the risk of an incident could be serious without appropriate countermeasures [...] — [ENTSO-E Pressemitteilung vom 23.02.2015](#)

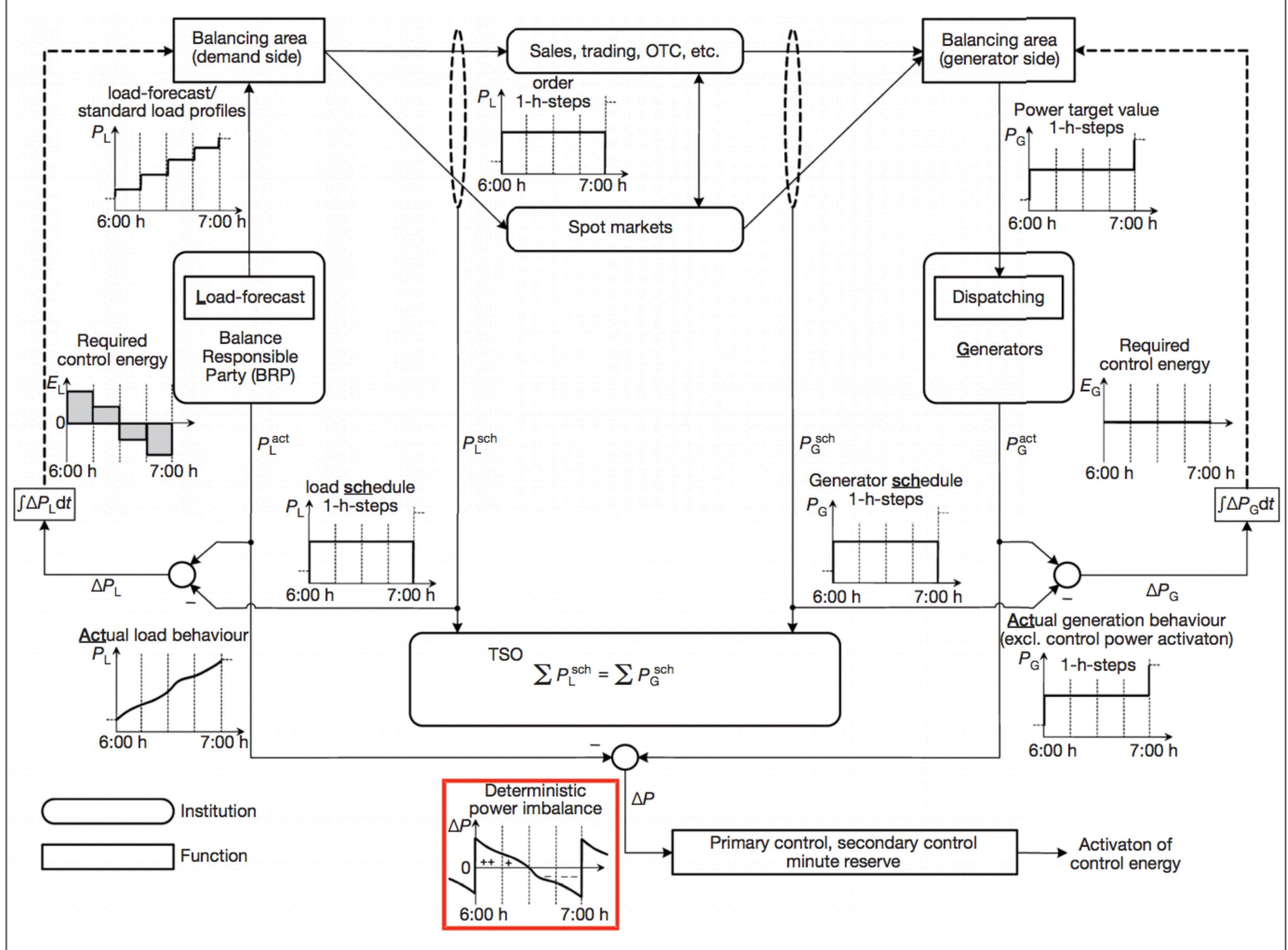
Letztlich: 17GW an “zusätzlicher” Leistung benötigt.

Sonnenfinsternis am 20.03.2015



Sonnenfinsternis am 20.03.2015 - Leistungsgradienten

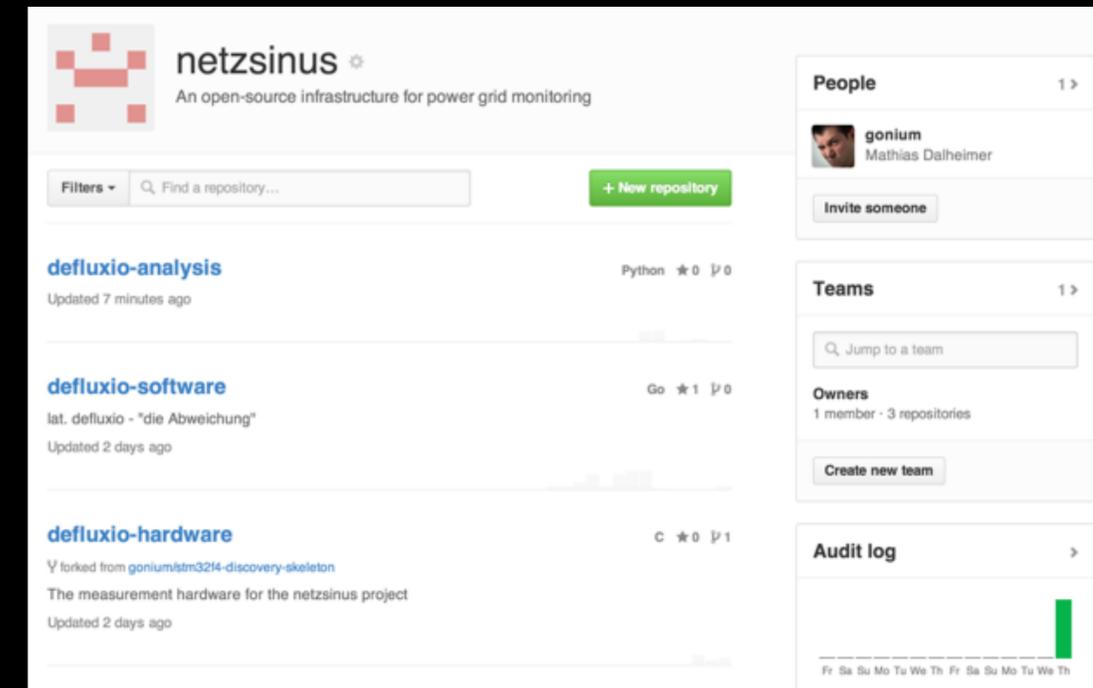




Quelle:
 Weißbach, Welfonder:
 "High Frequency Deviations
 within the European Power
 System - Origins and Proposals
 for Improvement".
 VGB Powertech 6/2009

github.com/netzsinus

- Webseite: Mehr Grafiken, automatische Detektion von Events
- Simpleres Messgerät
- data.netzsin.us (beta)



Netzsinus **Start** Projekt Messgeräte Kontakt

☰ Messgeräte des Projekts

Rang	Name	Standort	Frequenz	Empfangen
0	Prototyp 1	Kaiserslautern, DE	0.000	7:57:21 – 17.8.2015
1	Gonium	Kaiserslautern, DE	49.999	9:28:20 – 5.9.2015
2	Julric	Mainz, DE	49.999	9:28:21 – 5.9.2015
3	Julric	Albi, FR	0.000	7:57:21 – 17.8.2015
10	Testmeter	Irgendwo	0.000	7:57:21 – 17.8.2015