



#016189524 **ORCA**®
#018265372 **DMP**®
#018265380 **KRI**®
#018417183 **DNPS**®



Reg.No. 5,899,472 **ORCA**®
Reg.No. 7,532,392 **DNPS**®

Fette
Competence in Energy

Digital Nonlinear Power Systems

Blackout Spanien/Portugal

Hamburg, Mai 2025

Michael Fette

Fette
Competence in Energy

New Grid Codes are demanding for assets and grids – and create new business opportunities

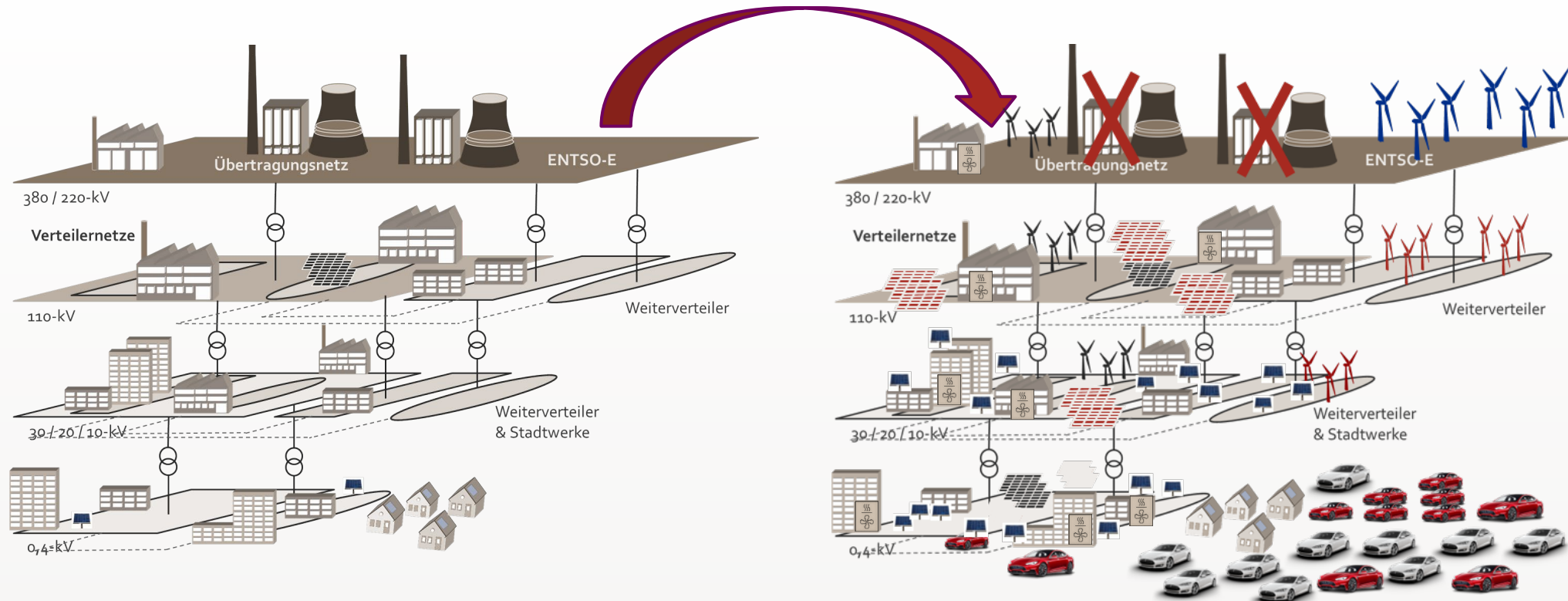
Mai 2025

Michael Fette
Digital Nonlinear Power Systems

2

Fette
Competence in Energy

Fundamental changes in future system require transition with clear vision and new solutions



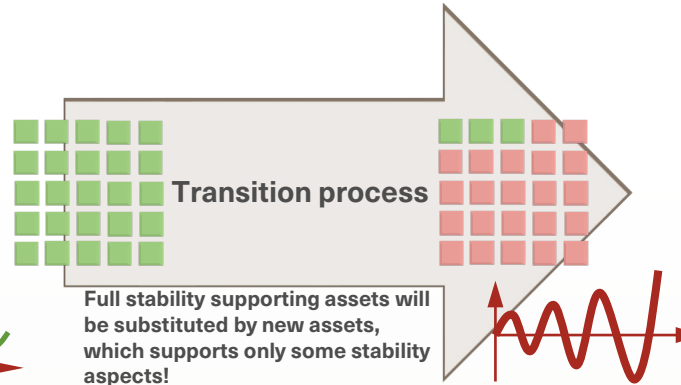
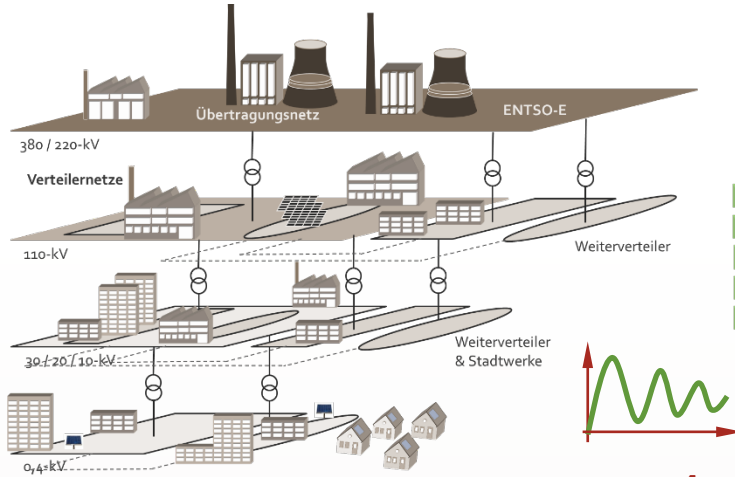
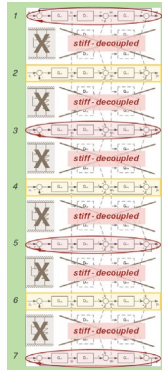
From passive participation to active contributions - at all levels

Mai 2025

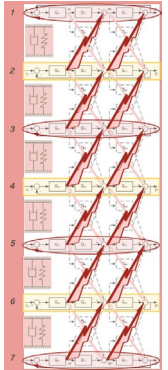
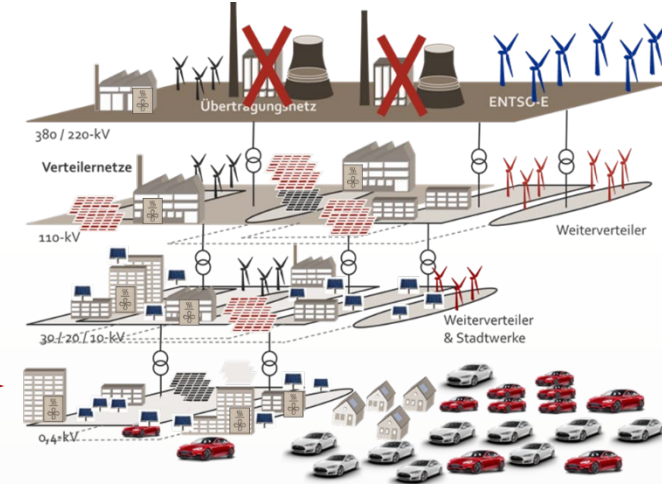
Michael Fette
Digital Nonlinear Power Systems

3

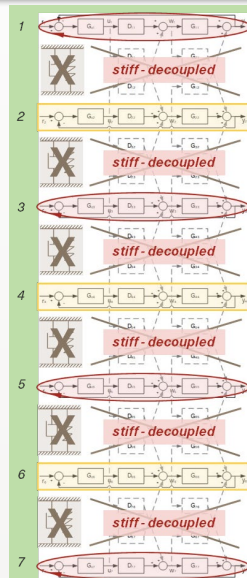
Fette
Competence in Energy



**A substitution of „power blocks“ is not the solution!
The system can not be operated by this!**



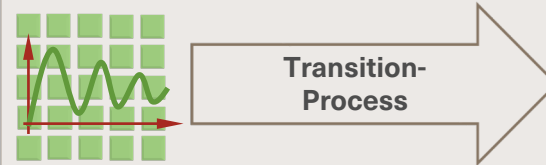
(⊙) It will be an abrupt „non-smooth“ transition



Dynamically **decoupled** system levels

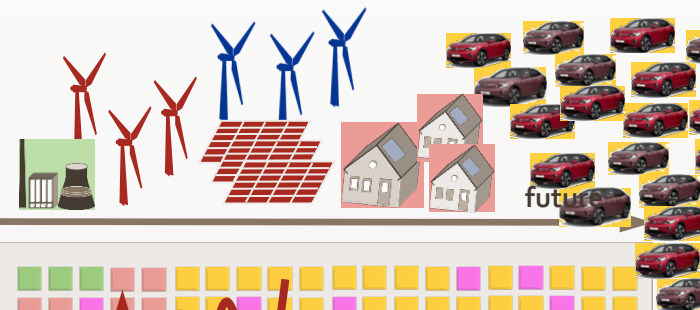


history

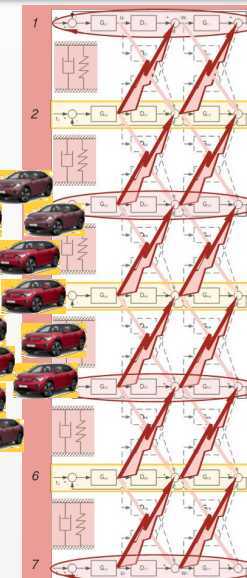
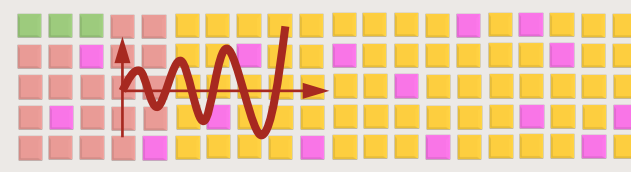


Dynamically **decoupled** system levels

+ Grid forming technologies



future



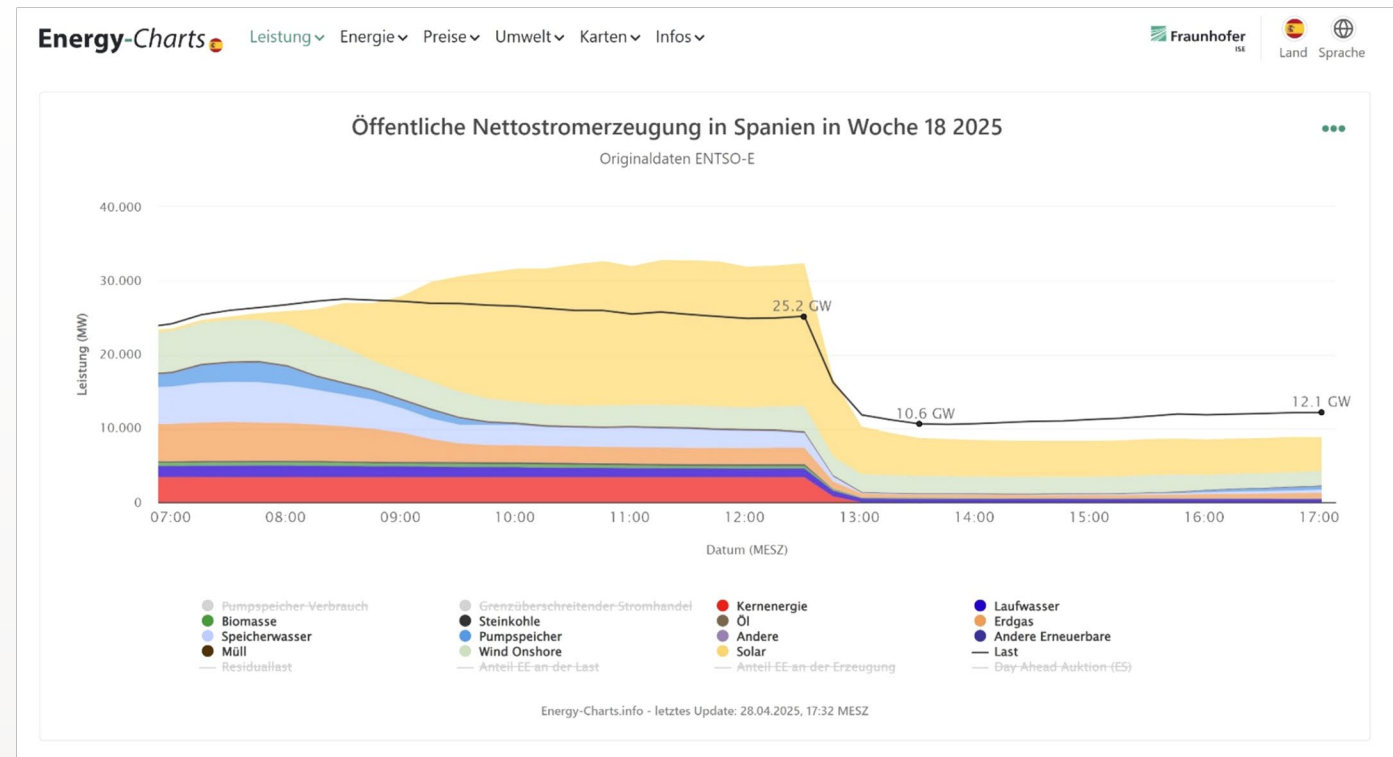
Vom Netz zum System

Leistungsanteile Energiequellen

Mit Hinzunahme der Kategorien

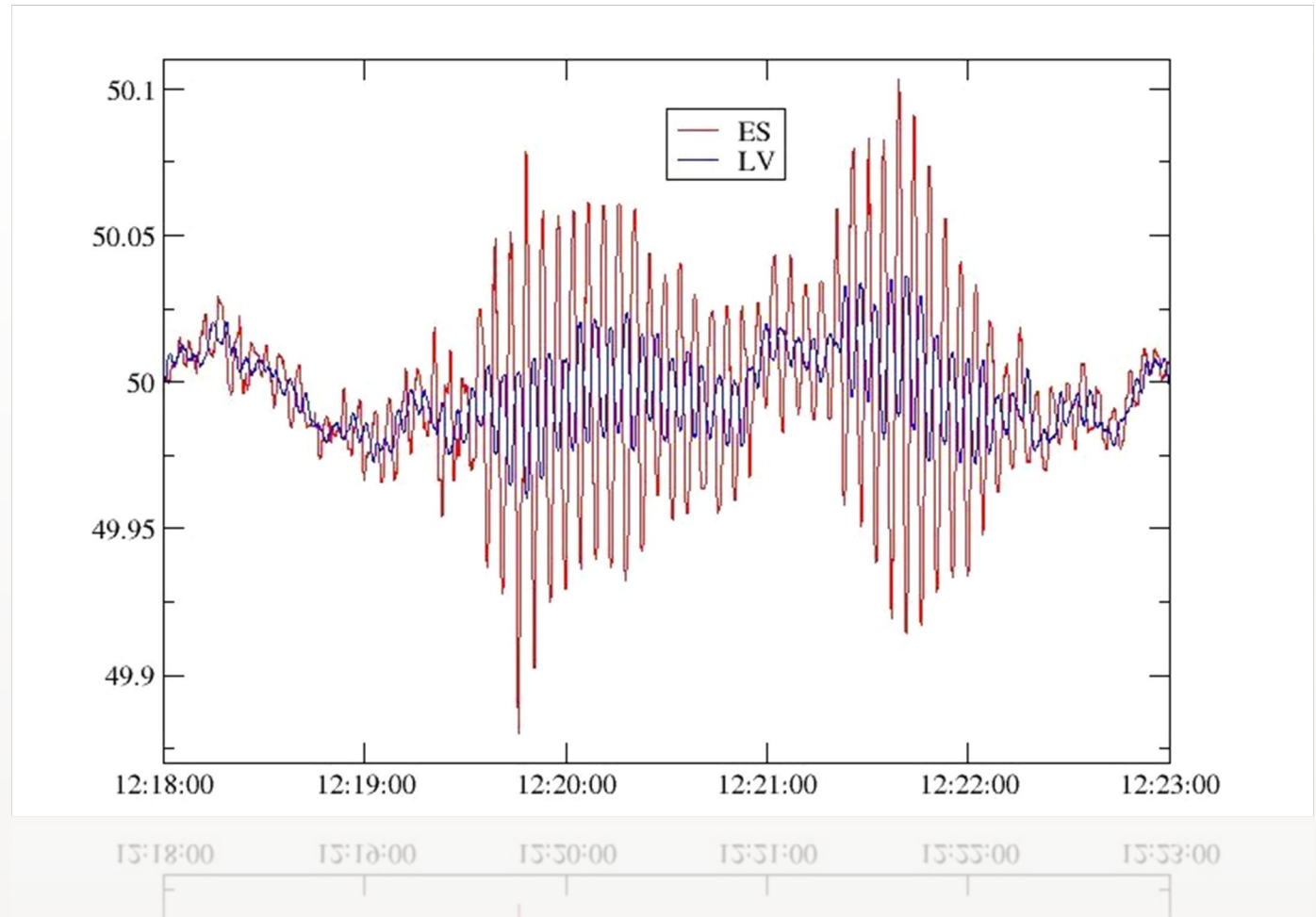
- Pumpspeicher Verbrauch
- Grenzüberschreitender Stromhandel

Ist die Leistungsbilanz ausgeglichen



Oszillationen Spanien / Litauen

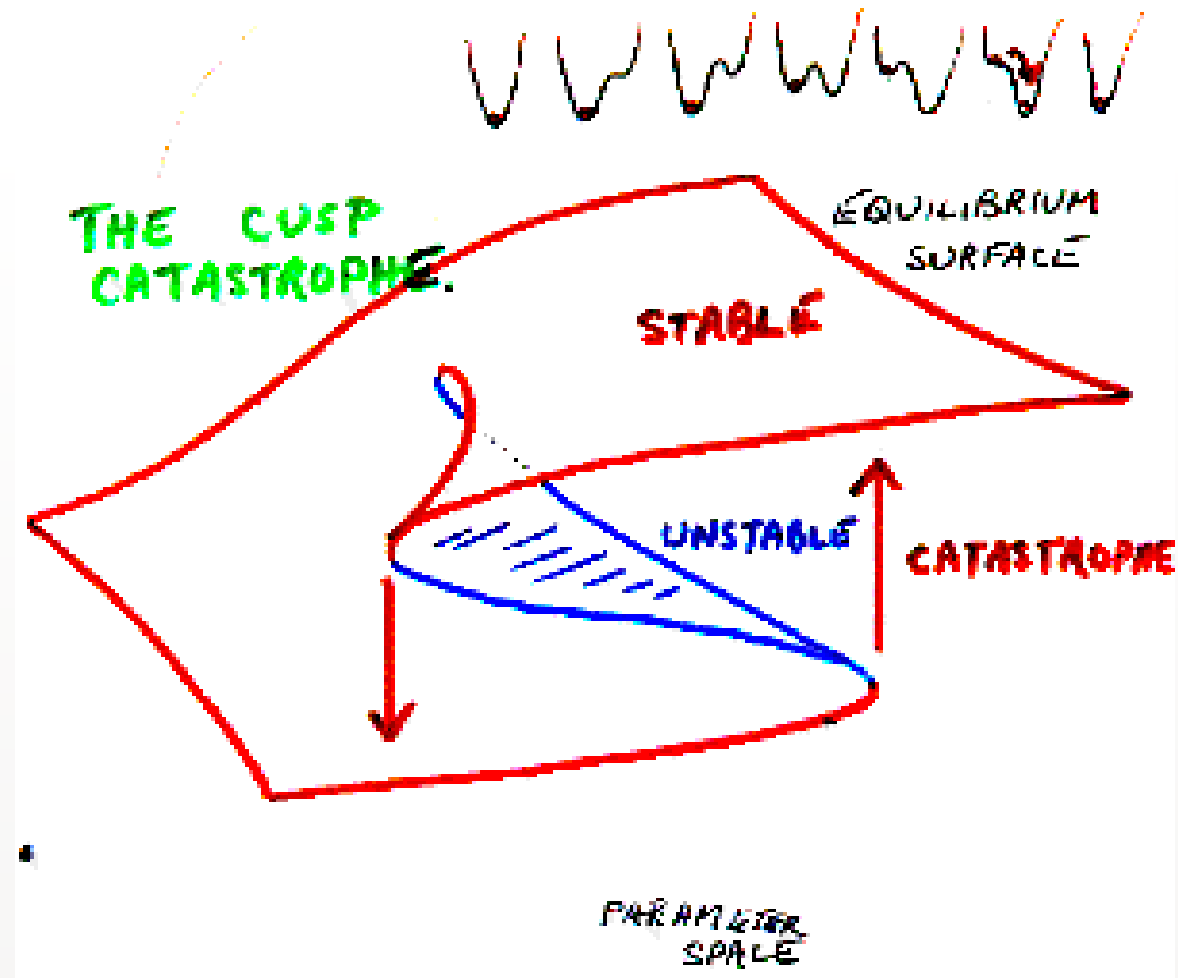
- Quelle LinkedIn
- Bestimmte Frequenz: 0,21 Hz
- In Litauen in Gegenphase



Theoretische Hintergründe – ein Überblick

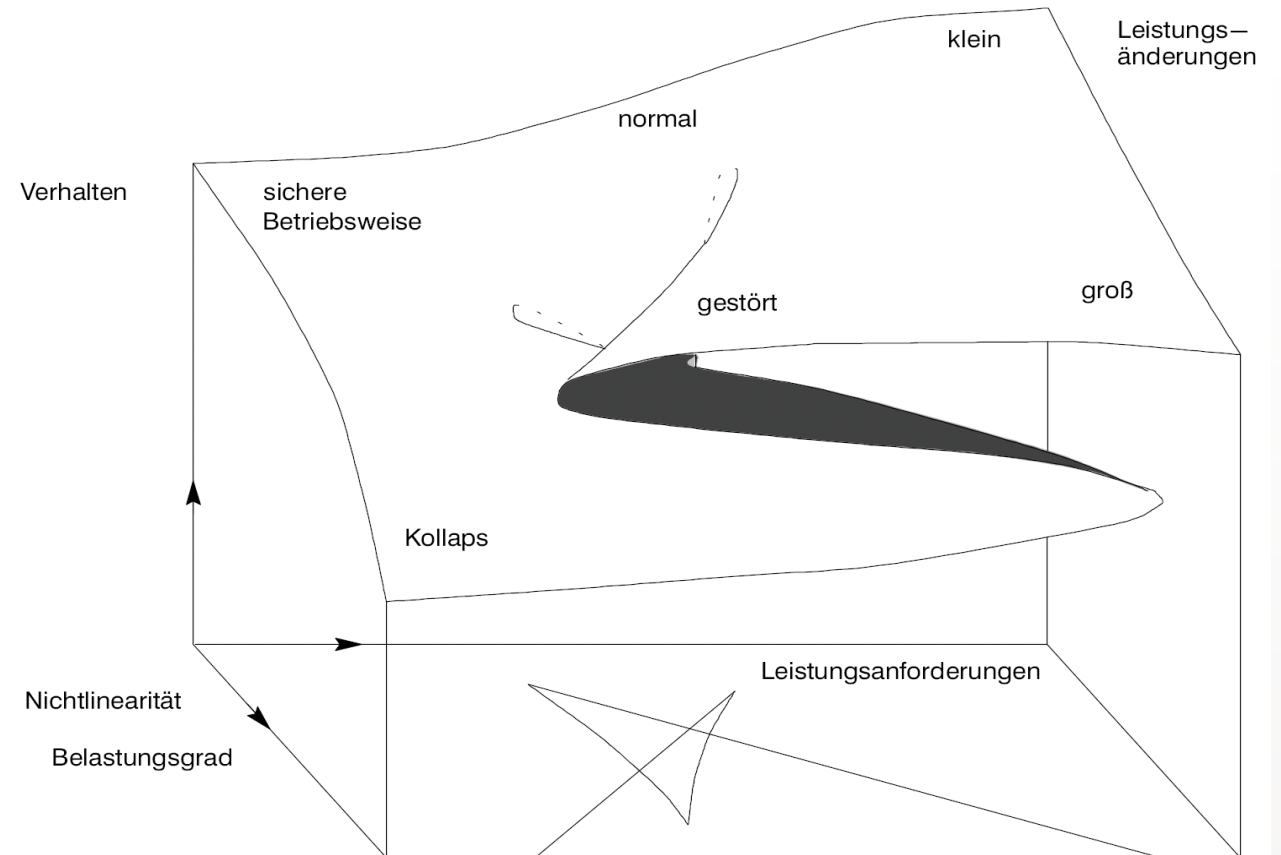
Rene Thom

Handzeichnung zum Verständnis der
Katastrophentheorie



Verhaltensmannigfaltigkeit von Elektroenergiesystemen

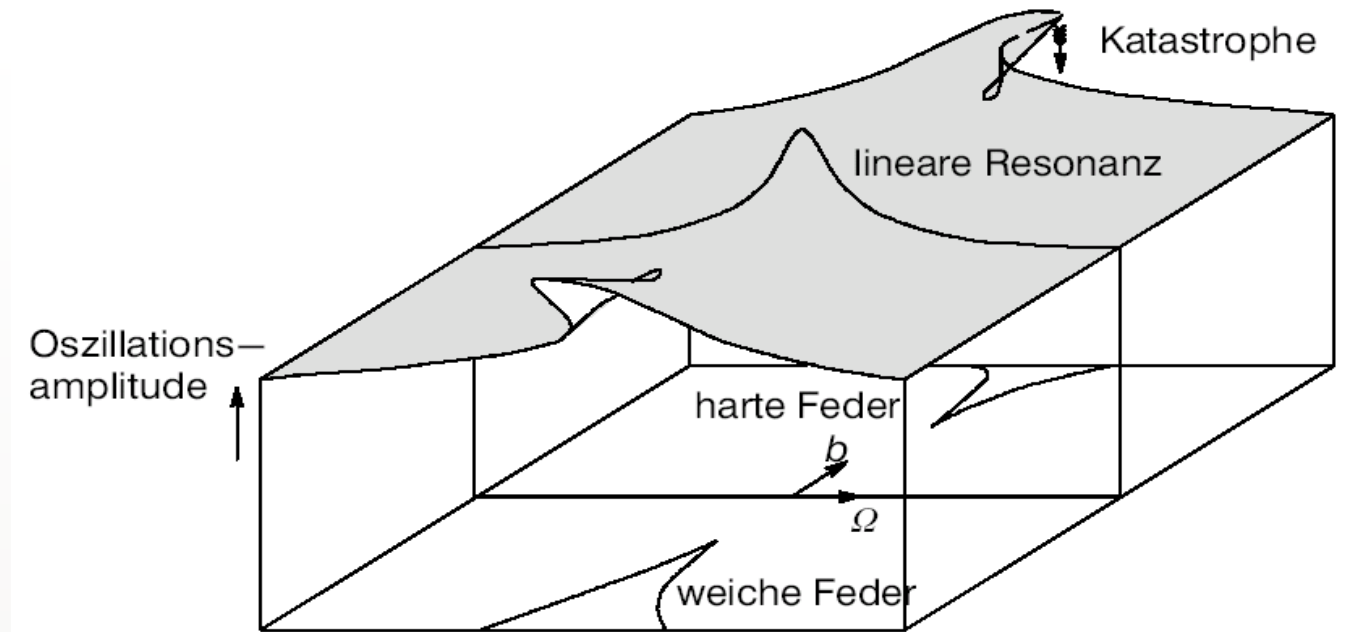
Veränderungsprozesse und deren
Auswirkungen auf Systemdynamiken



Vereinfachtes, aber strukturell korrektes Modell eines Elektroenergiesystems

Mannigfaltigkeit und Kontrollfläche eines
Duffing-Oszillators (1918)

Charakteristisch für alle
elektromechanischen Energiewandler



$$M\ddot{\delta} + D\dot{\delta} + \left(\delta - \frac{\delta^3}{3!}\right) \frac{U_B U_G}{X_d} = P_M$$

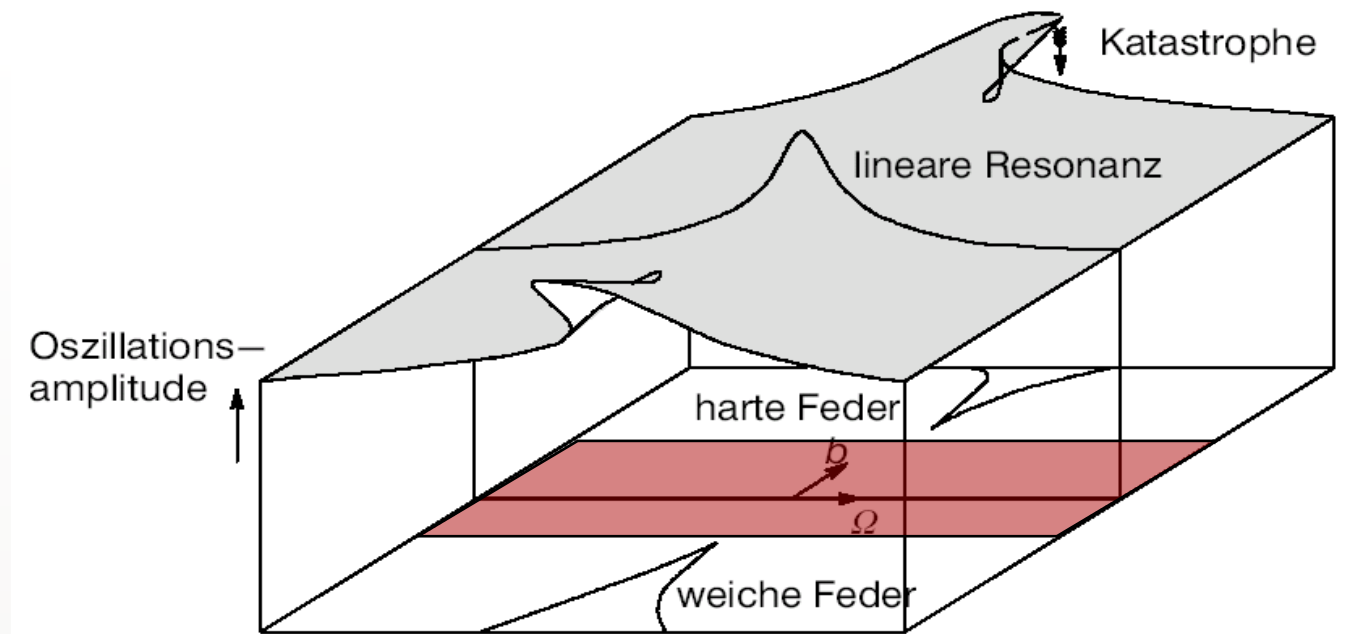
© Dr. Michael Fette - 1996

Vereinfachtes, aber strukturell korrektes Modell eines Elektroenergiesystems

Mannigfaltigkeit und Kontrollfläche eines
Duffing-Oszillators (1918)

Charakteristisch für alle
elektromechanischen Energiewandler

quasi-linearer Bereich



$$M\ddot{\delta} + D\dot{\delta} + \left(\delta - \frac{\delta^3}{3!}\right) \frac{U_B U_G}{X_d} = P_M$$

© Dr. Michael Fette - 1996

Spezieller Fall - Kollapsprozesse

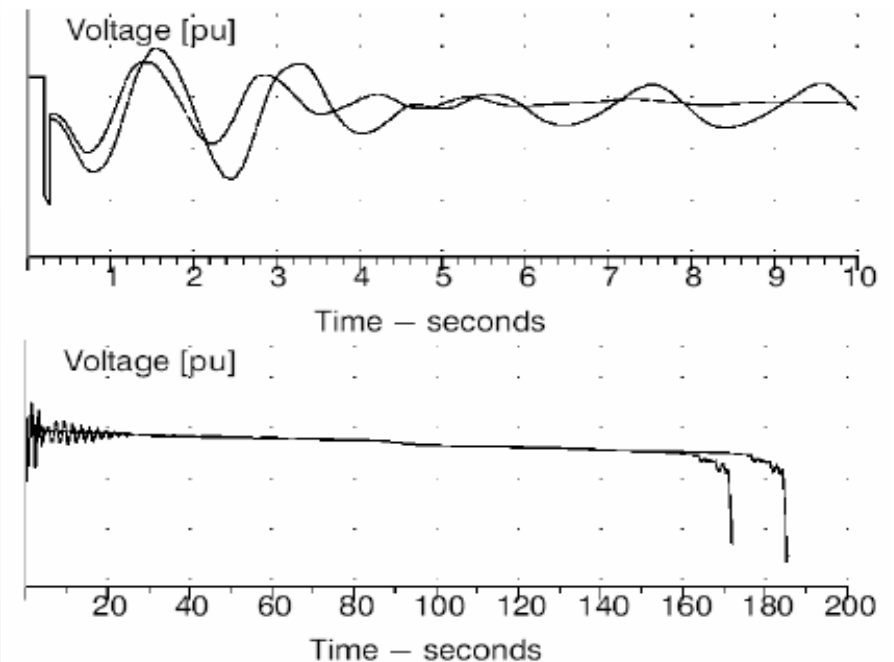
Blackout-Phänomene können in zwei Prozesse zerlegt werden

- ➔ 1. Phase: Oszillationsprozess (schneller Vorgang)
- ➔ 2. Phase: Driftprozess (langsamer Vorgang)

Die beiden Prozesse treten jedoch nicht getrennt voneinander auf.

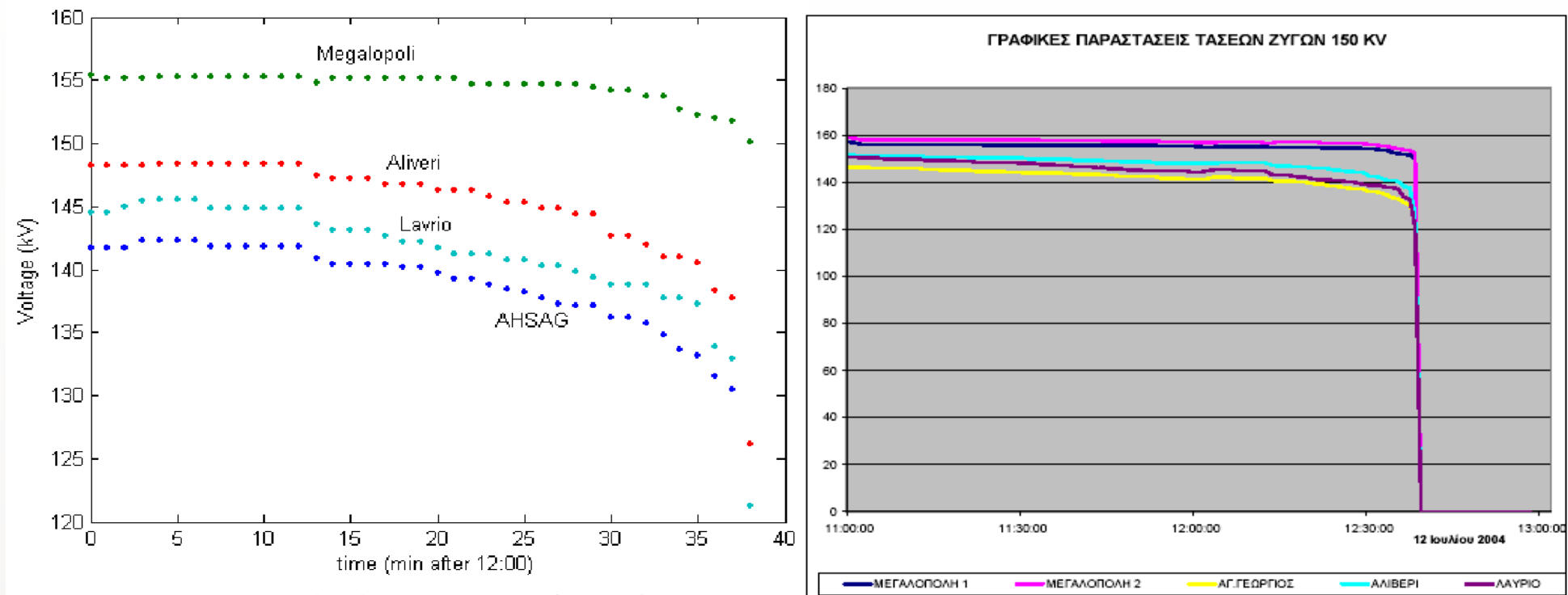
Die Oszillationen überdecken den langsameren Driftprozess, dieser ist „augenscheinlich“ nicht sichtbar.

Quelle: IEEE Report on Voltage Stability 2001



Driftprozess – Messdaten eines Blackouts in Griechenland 2004

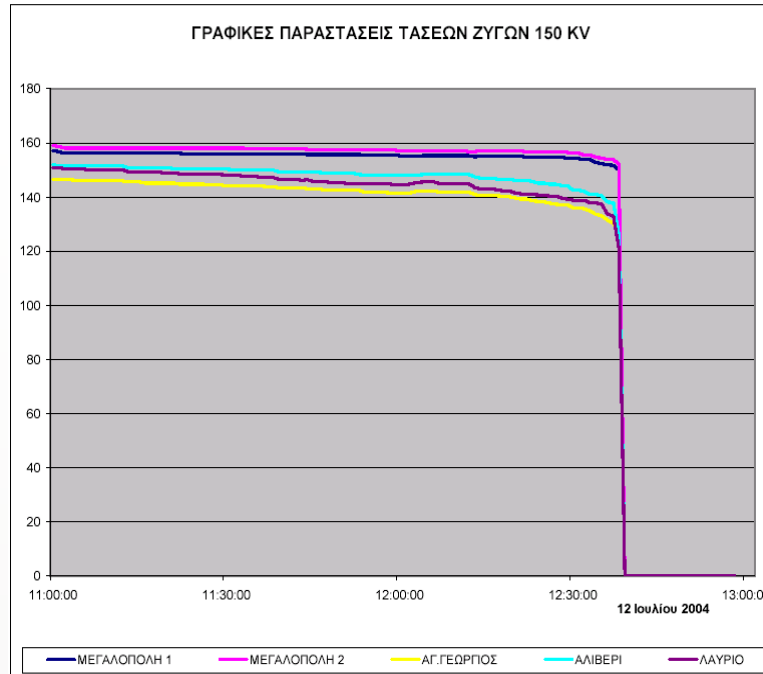
Störungsbeginn: 7:28 Uhr



Quelle: TECHNICAL SUMMARY ON THE ATHENS AND SOUTHERN GREECE BLACKOUT OF JULY 12, 2004

Drift Prozess –

Technical Summary on the Athens and Southern Greece Blackout of July 12, 2004 *)



Quelle: TECHNICAL SUMMARY ON THE ATHENS AND SOUTHERN GREECE BLACKOUT OF JULY 12, 2004 *)

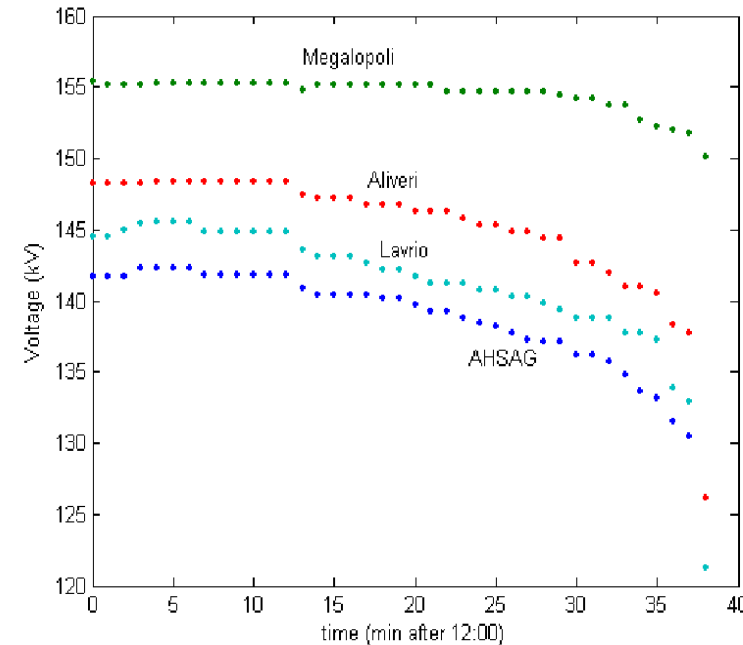


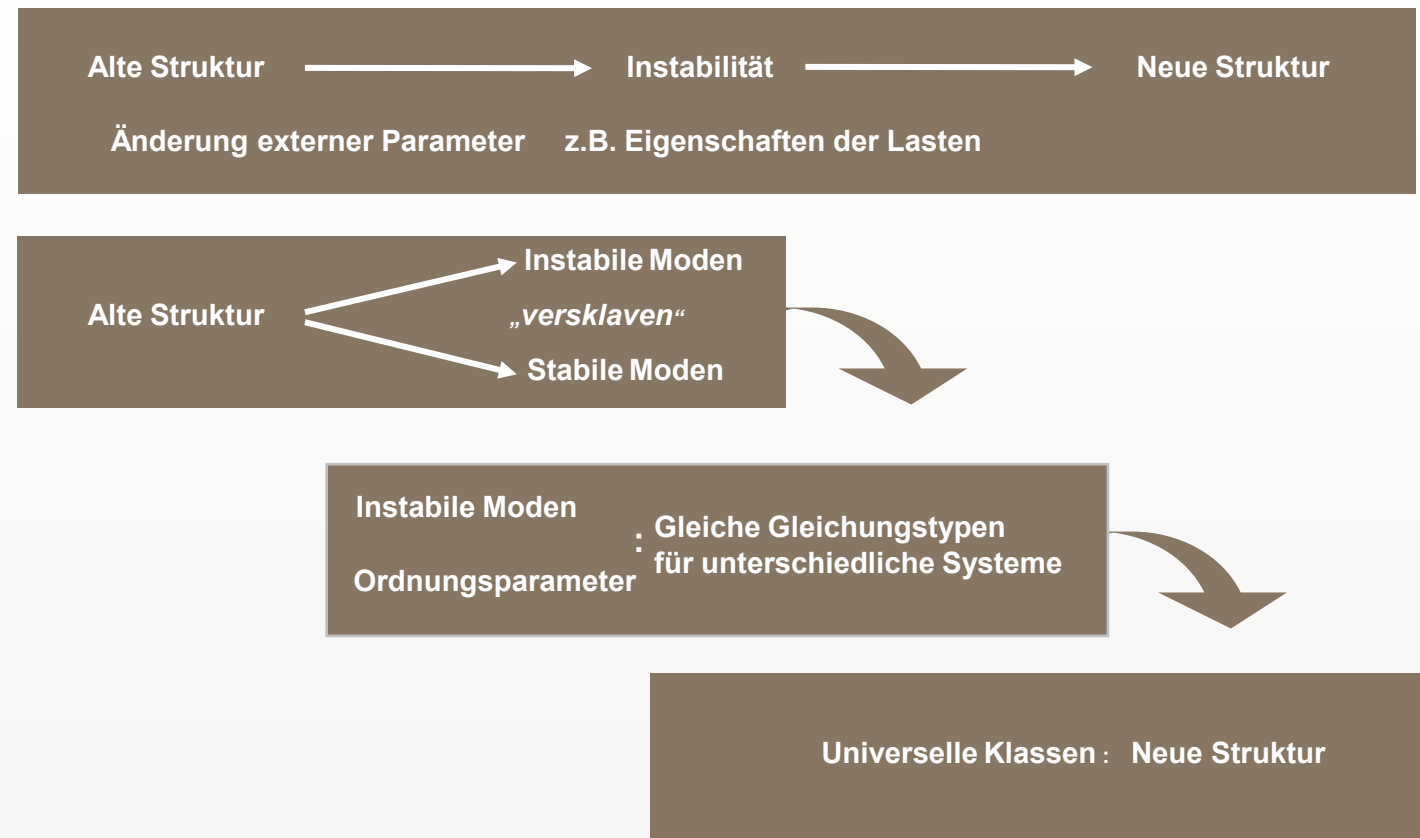
Fig. 1 Measured Voltage at Power Station HV buses

*) Figures are taken from that report

- 7:08 history starts with an auxiliary outage of one generation unit (rated 300 MW)
- 12:01 unit synchronized
- 12:12 unit was lost again
- 12:25 load shedding was requested
- 12:30 disconnection of 80 MW (not enough)
- 12:35 load shedding command of additional 200 MW – not performed
- 12:37 tripping of 1st generation unit (unit 3 at Aliveri power station)
- 12:39 split of the network by under voltage protection of 400-kV North-South lines

Veränderungen der dynamischen Eigenschaften (Synergetik)

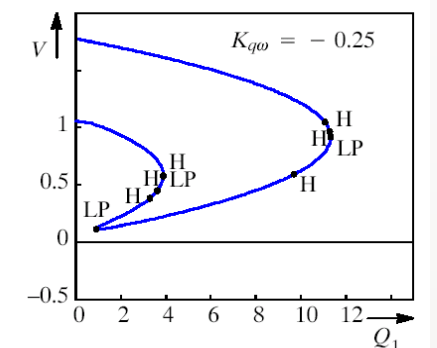
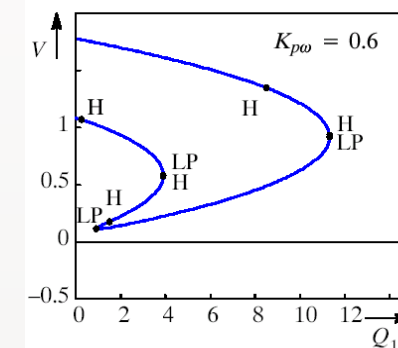
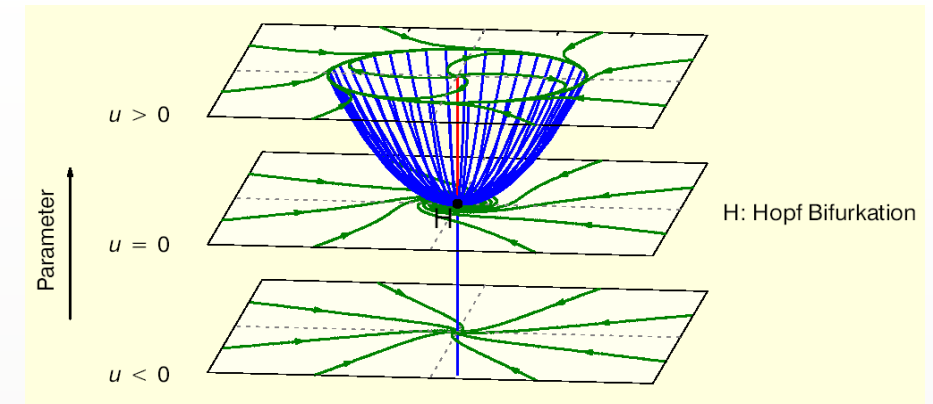
- Modelle müssen für nichtlineare Analysen geeignet sein
- Alle Frequenzbereiche müssen abgebildet sein!
- Die Synergetik nutzt strukturell richtige Ersatzmodelle zur Beschreibung nach Hermann Haken – Bestimmung externer Einflussparameter auf Modelleigenschaften



Analyse der Bifurkationen

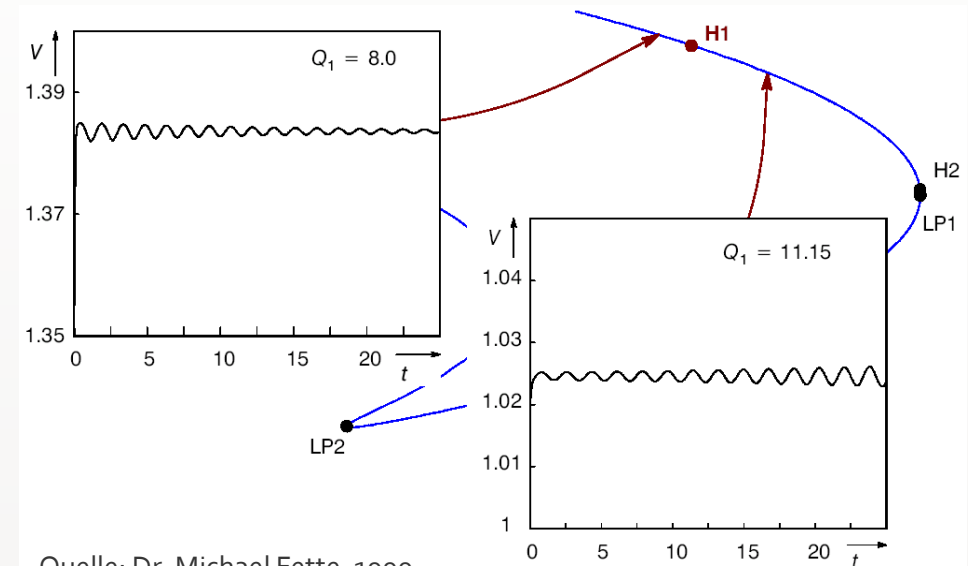
Hopf-Bifurkation

- Instabilität verursacht durch eine Hopf-Bifurkation
 - Ein Bifurkationspunkt ist ein spezieller Punkt, bei dem ein nichtlineares System seine Charakteristiken ändern kann. An einer Hopf-Bifurkation treten zusätzliche Schwingungen auf, die bei Elektroenergiesystemen in der Regel instabil sind.
- Im Bifurkationsdiagramm kann man beobachten:
 - Die Lage des Hopf-Punktes hängt stark von den Lasteigenschaften ab
 - Im Bild rechts sind unterschiedliche Lastcharakteristiken angenommen



Zeitreihen vor und nach einer Hopf-Bifurkation

- ➔ Testfunktionen in der Nähe der Hopf-Punkte
 - ▶ Niedrige Frequenzen können berechnet werden
 - Frequenzen hängen von der Leistungsfähigkeit des Netzes ab
 - Die Lage der Hopf-Punkte (und damit die Frequenz) hängt von den Lastdynamiken ab
 - Charakteristische Frequenzintervalle können berechnet werden
 - ▶ Abhängigkeiten aller Lastparameter mit Fortsetzungsmethoden berechnet



Quelle: Dr. Michael Fette, 1999

Fortsetzung der Hopf-Bifurkation

- Typischerweise existieren mehrere Lösungen
- Alle Lösungsäste haben verschiedene Zeitcharakteristiken, die Frequenzen sind aber alle nahezu gleich.
- Welcher Lösungszweig erreicht werden kann, hängt von Anfangsbedingungen ab.

1. Schritt
Berechnung der
Ruhelagenkurven

2. Schritt
Berechnung der
Hopf-Kurven

Quelle: Dr. Michael Fette, 1999

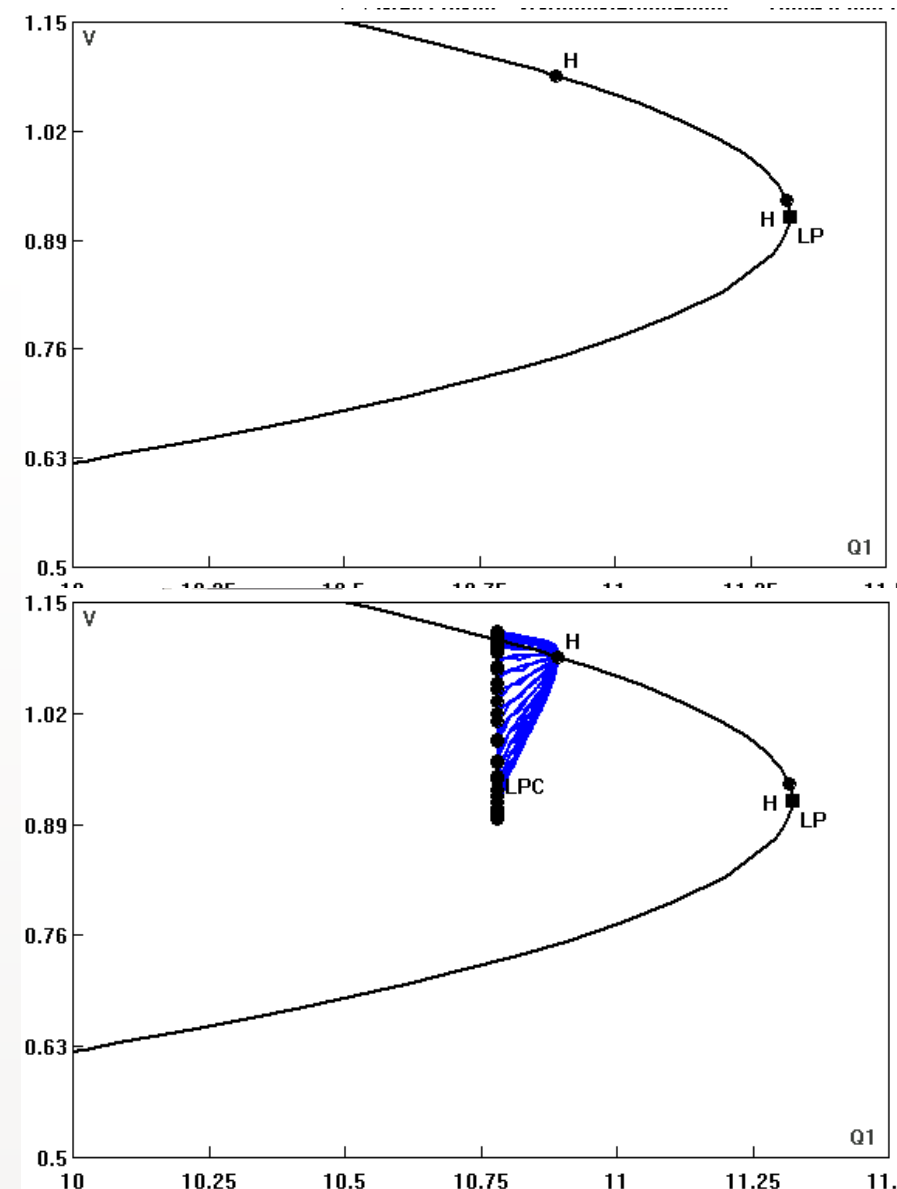
Mai 2025

Michael Fette

Digital Nonlinear Power Systems

17

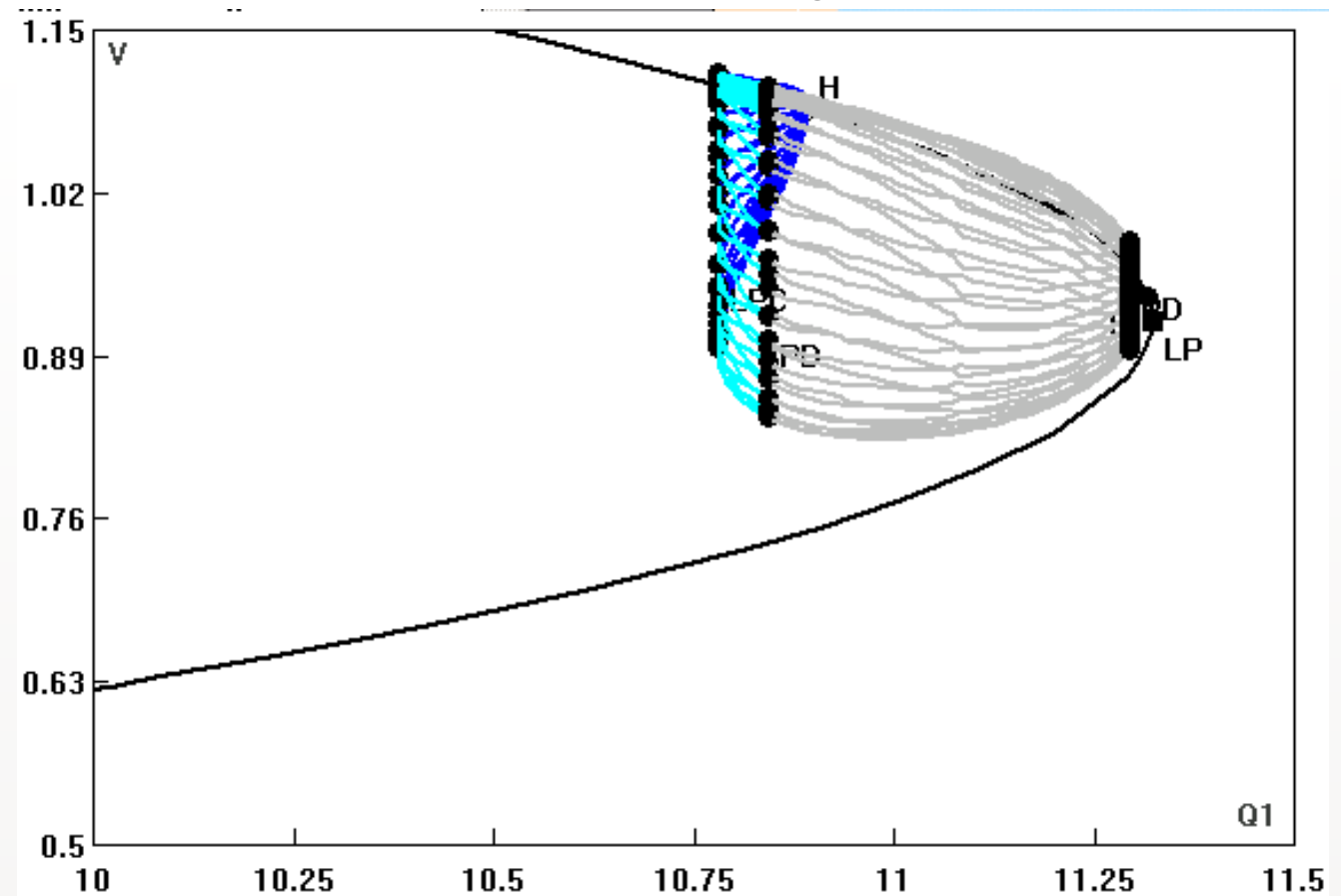
Fette
Competence in Energy



Fortsetzung der Hopf-Bifurkation

- Es existieren viele Lösungen
- Alle Lösungen haben eigene Frequenzcharakteristiken
- Das System verändert sein Dämpfungsverhalten
- Durch Verkleinern der Dämpfung kommt es zu Periodenverdopplungen und Chaos
- Das System kollabiert

2. Schritt
Berechnung der Hopf-Kurven



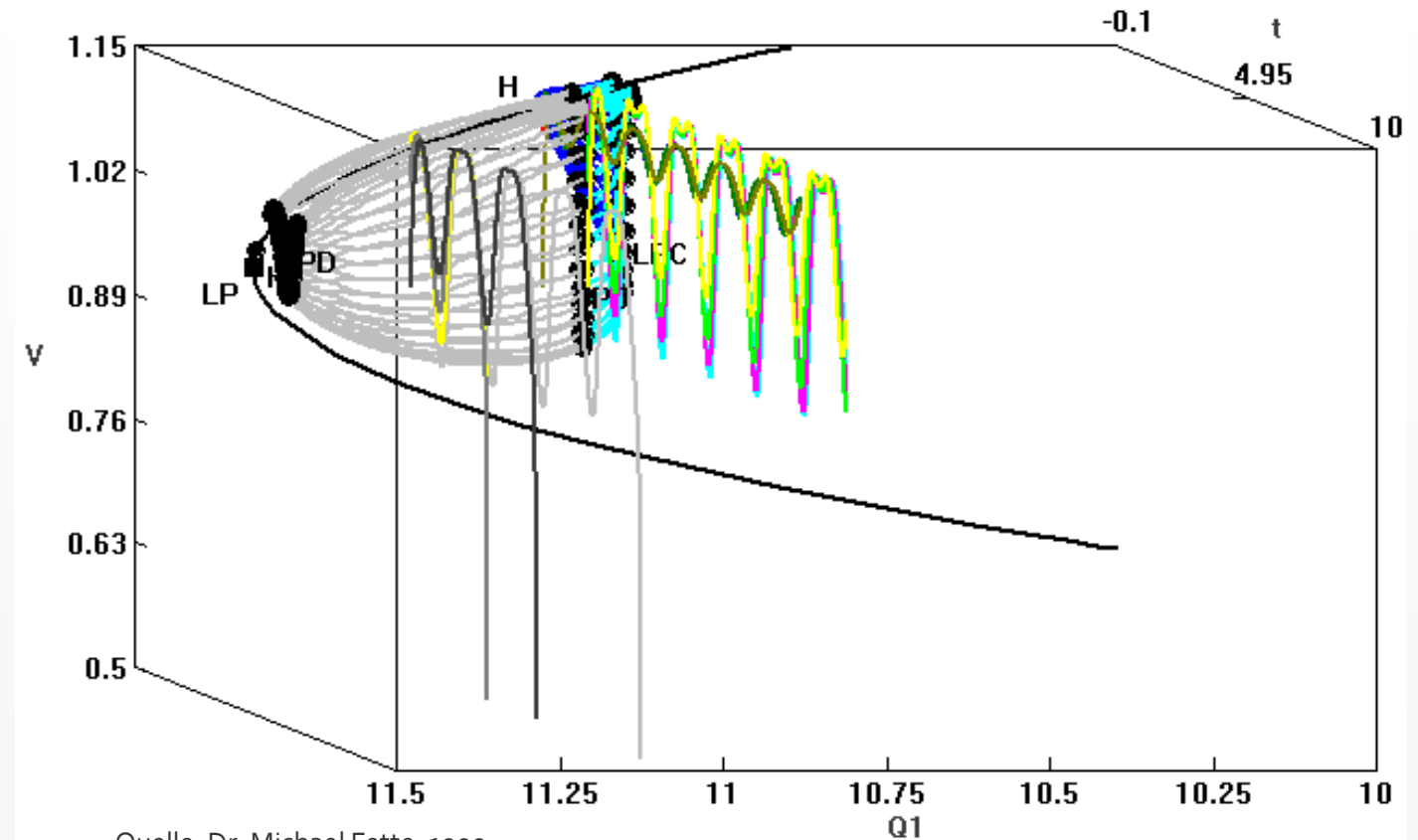
Quelle: Dr. Michael Fette, 1999

Fortsetzung der Hopf-Bifurkation

3. Schritt

Berechnung der zugehörigen
Zeitreihen für unterschiedliche
Startpunkte

(eigentlich überflüssig, da das
Lösungsverhalten bereits prinzipiell
bekannt ist)



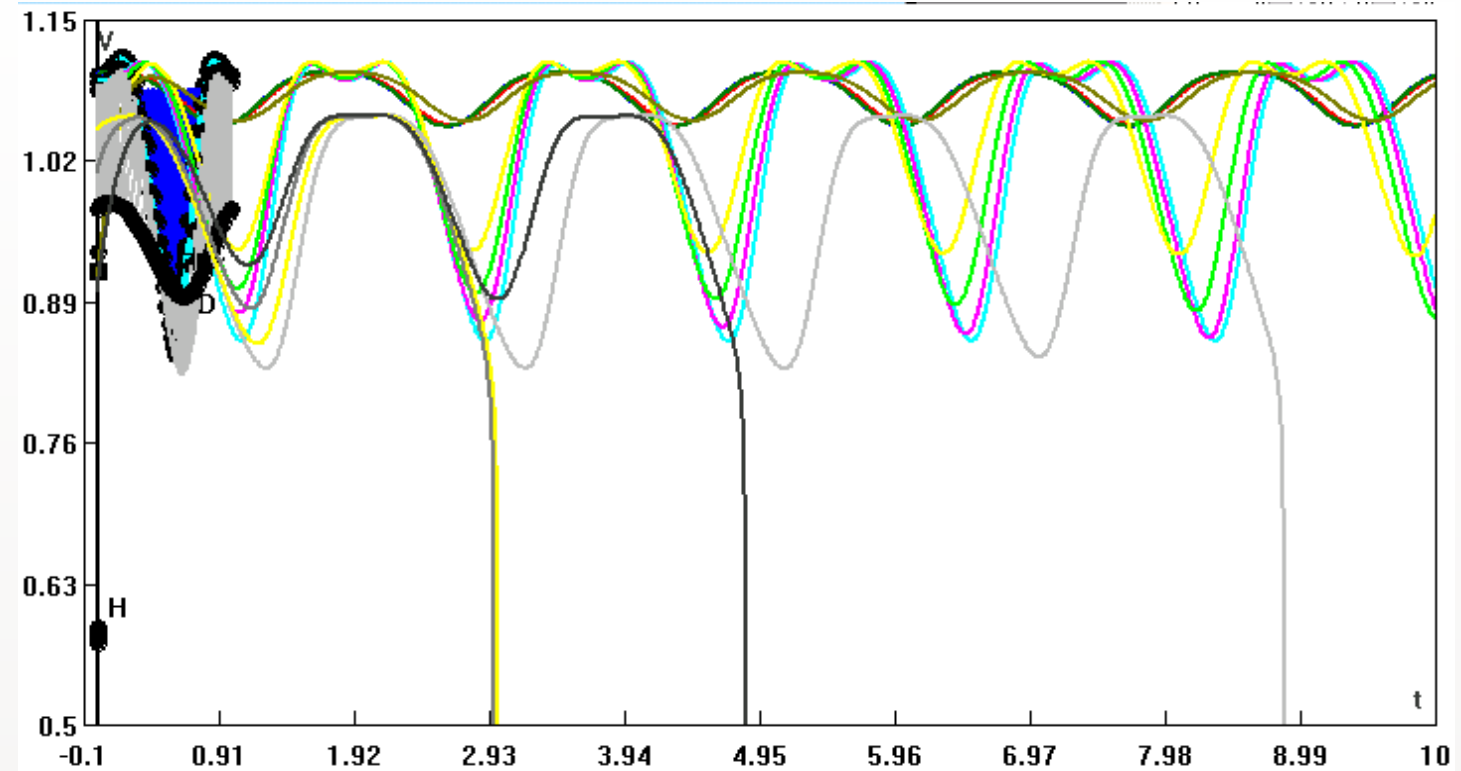
Quelle: Dr. Michael Fette, 1999

Fortsetzung der Hopf-Bifurkation

■ 3. Schritt

Berechnung der zugehörigen
Zeitreihen für unterschiedliche
Startpunkte

(eigentlich überflüssig, da das
Lösungsverhalten bereits prinzipiell
bekannt ist)

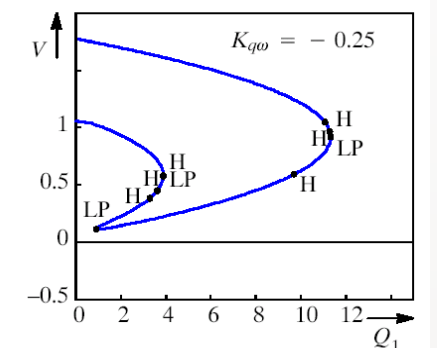
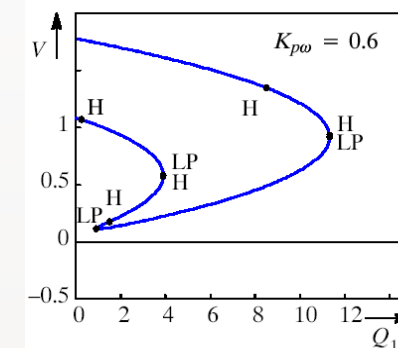
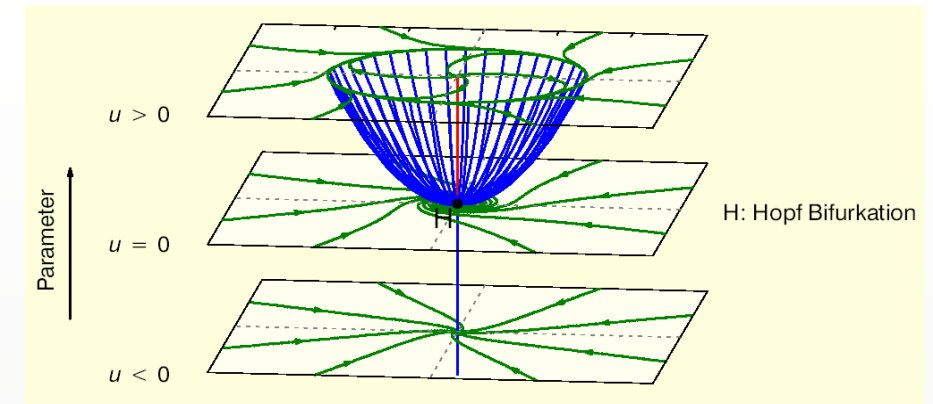


Quelle: Dr. Michael Fette, 1999

Analyse der Bifurkationen

Hopf-Bifurkation

- Instabilität verursacht durch eine Hopf-Bifurkation
 - Ein Bifurkationspunkt ist ein spezieller Punkt, bei dem ein nichtlineares System seine Charakteristiken ändern kann. An einer Hopf-Bifurkation treten zusätzliche Schwingungen auf, die bei Elektroenergiesystemen in der Regel instabil sind.
- Im Bifurkationsdiagramm kann man beobachten:
 - Die Lage des Hopf-Punktes hängt stark von den Lasteigenschaften ab
 - Im Bild rechts sind unterschiedliche Lastcharakteristiken angenommen



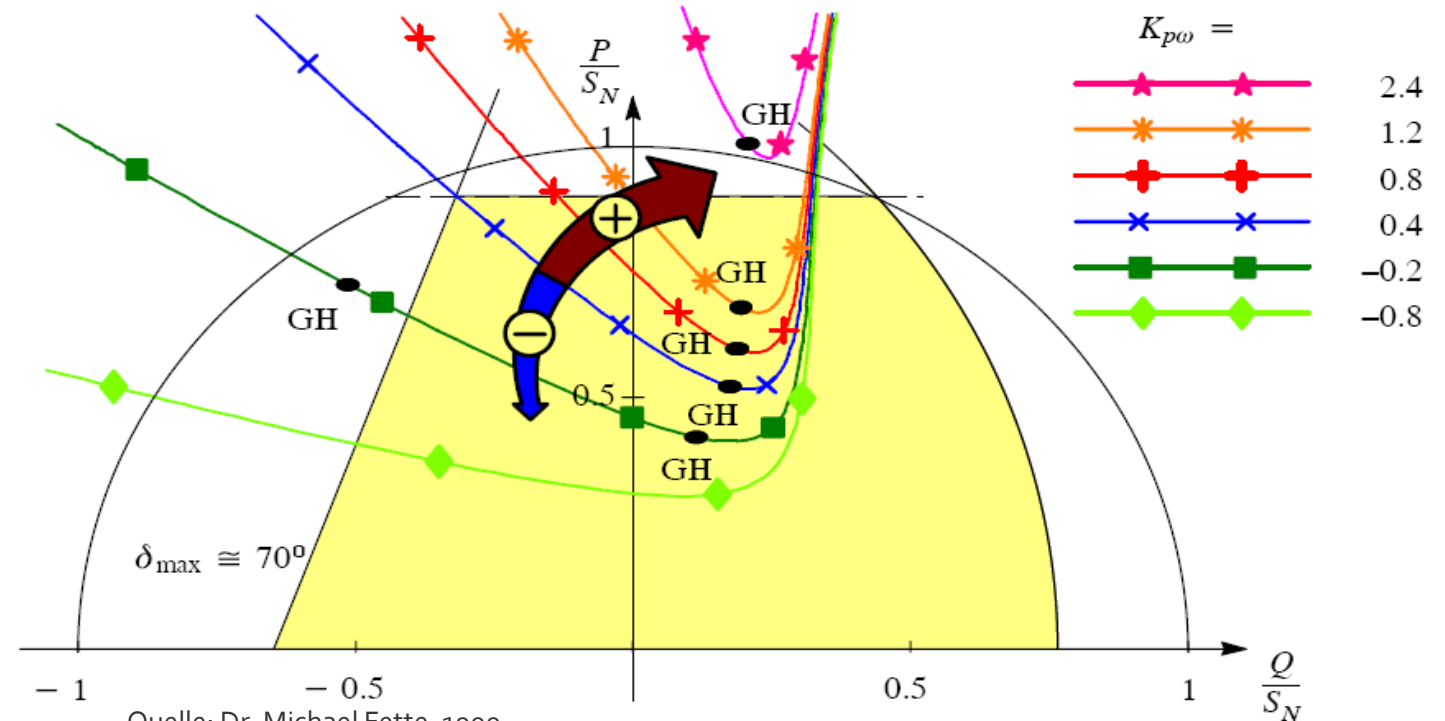
Quelle: Dr. Michael Fette, 1999

Beispiel: Generatorregelung

- Limitierende Bifurkationslinien im Arbeitsbereich in Abhängigkeit von Lastparameter.

D.h., je nach Eigenschaft der Lastcharakteristik sind auch im normalen Arbeitsbereich eines Generators (Fähigkeit der Maschine und des Erregersystems) bestimmt Betriebszustände instabil.

Siehe auch: Liwschitz (1942)



Quelle: Dr. Michael Fette, 1999

Was suchen wir in den verfügbaren Daten?

Mai 2025

Michael Fette
Digital Nonlinear Power Systems

23

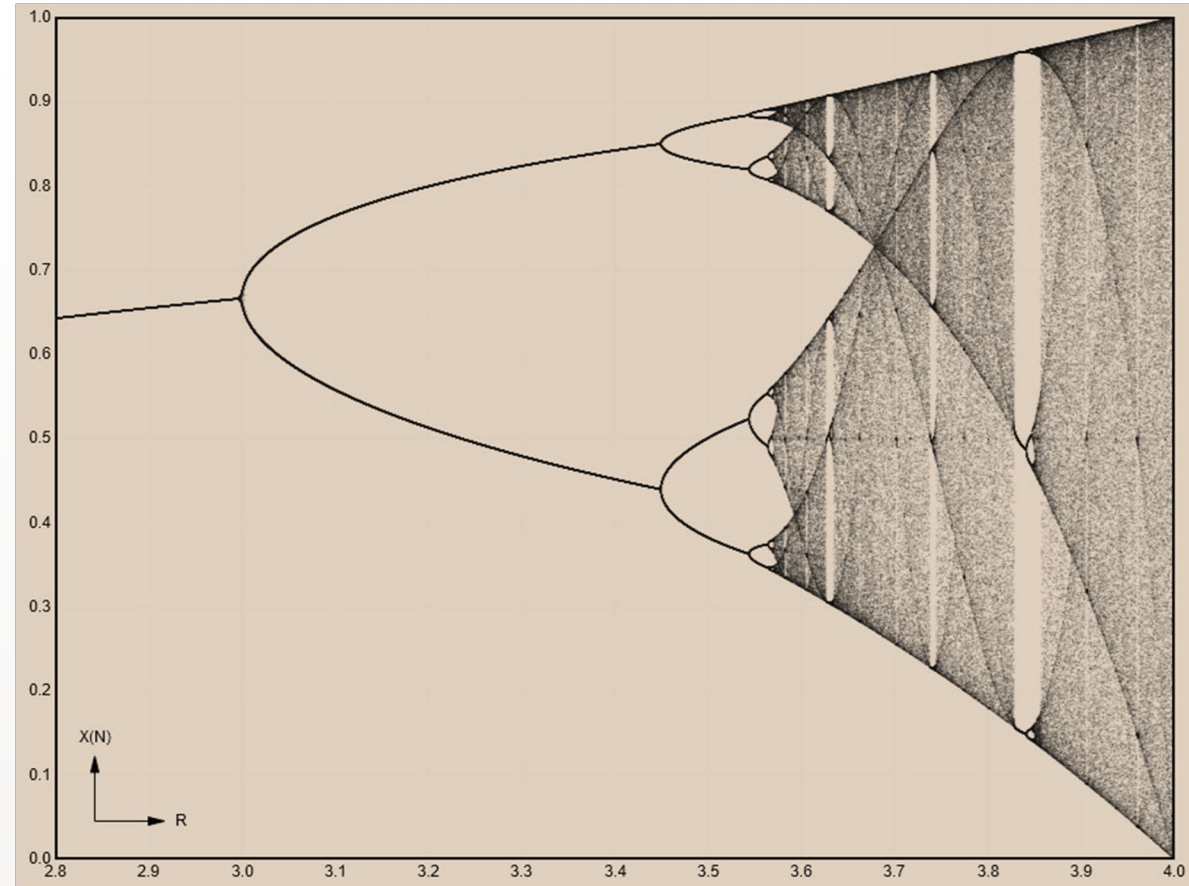
Fette
Competence in Energy

Feigenbaum-Diagramm

Logistische Gleichung in Abhängigkeit
von Parameter-Änderungen

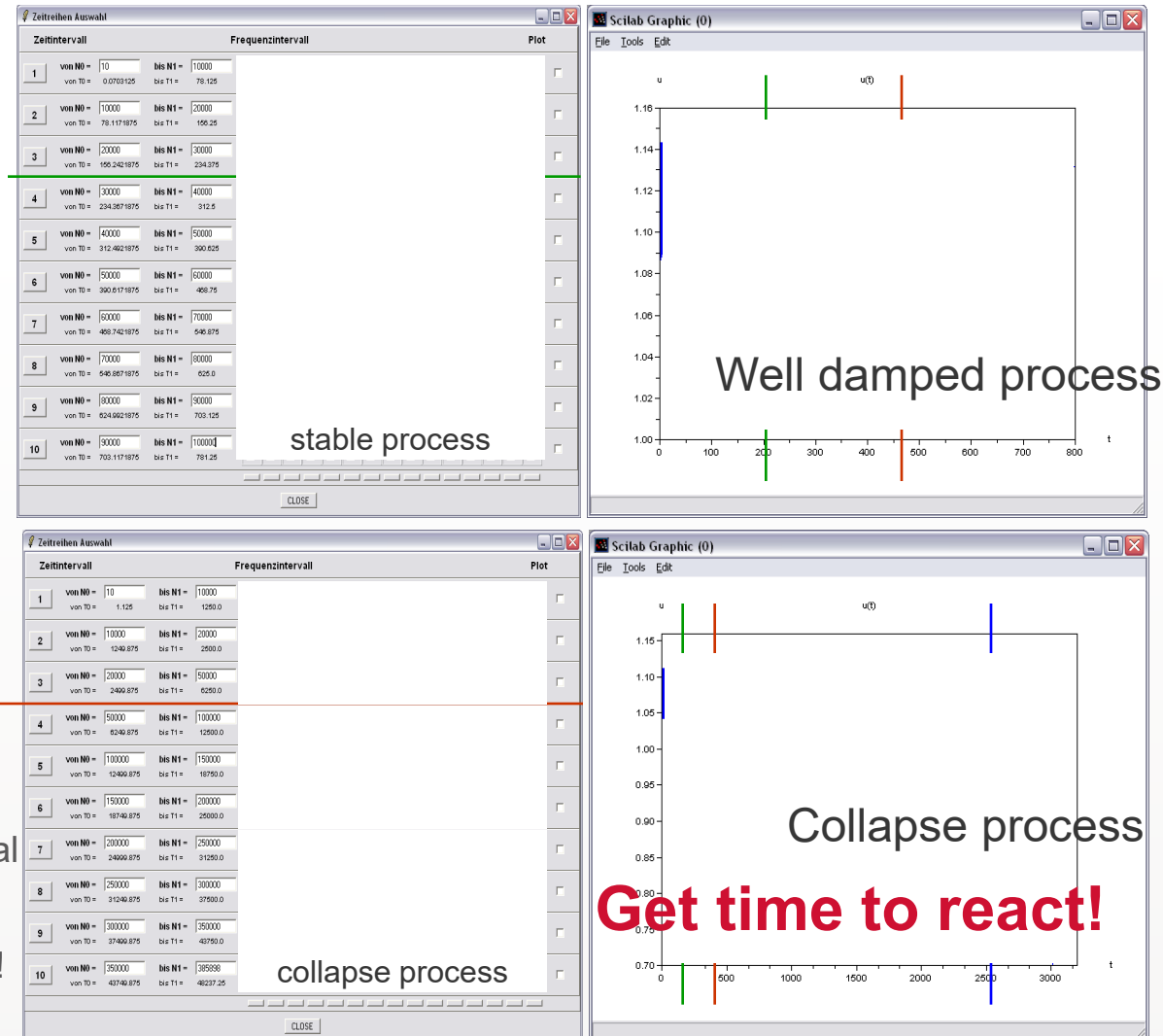
Der Weg ins Chaos über
Periodenverdopplungen

https://de.wikipedia.org/wiki/Logistische_Gleichung



Fingerprint (Basic Ideas) Principle

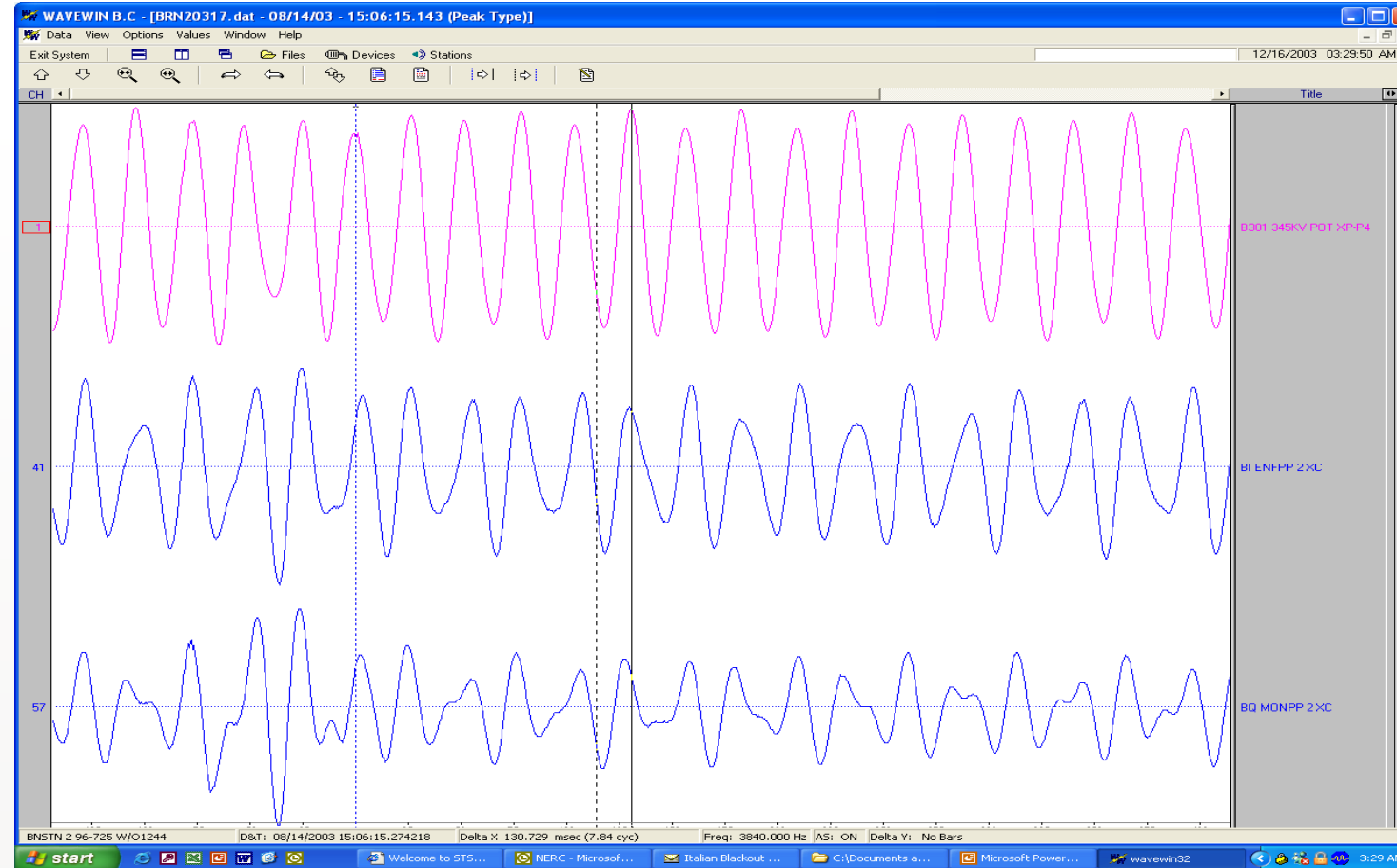
- From left to right:
Frequency intervals
- From top to down:
Development in time
- Upper pictures:
Damped process
- Lower pictures:
Collapse process



- Green line:
Definite detection of a well damped signal
- Red line:
Definite detection of a collapse process
- Blue line:
Working field of classical protection schemes

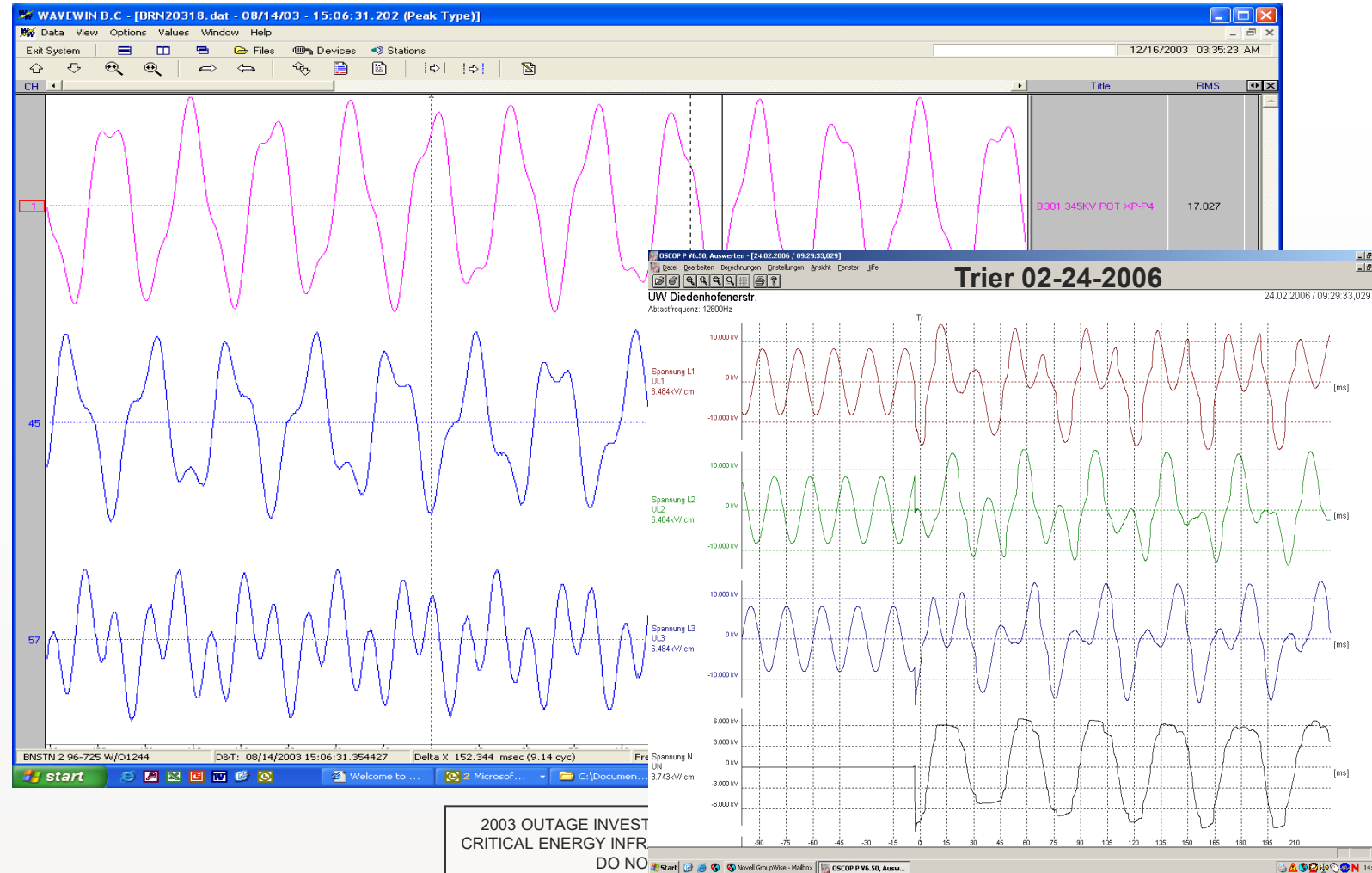
Please note: Not all frequency intervals are plotted in this slide!

Time Series of US Outage 15:06:15 USA 2003



2003 OUTAGE INVESTIGATION – CONFIDENTIAL
CRITICAL ENERGY INFRASTRUCTURE INFORMATION
DO NOT RELEASE

Time Series of US Outage 15:06:31 USA 2003

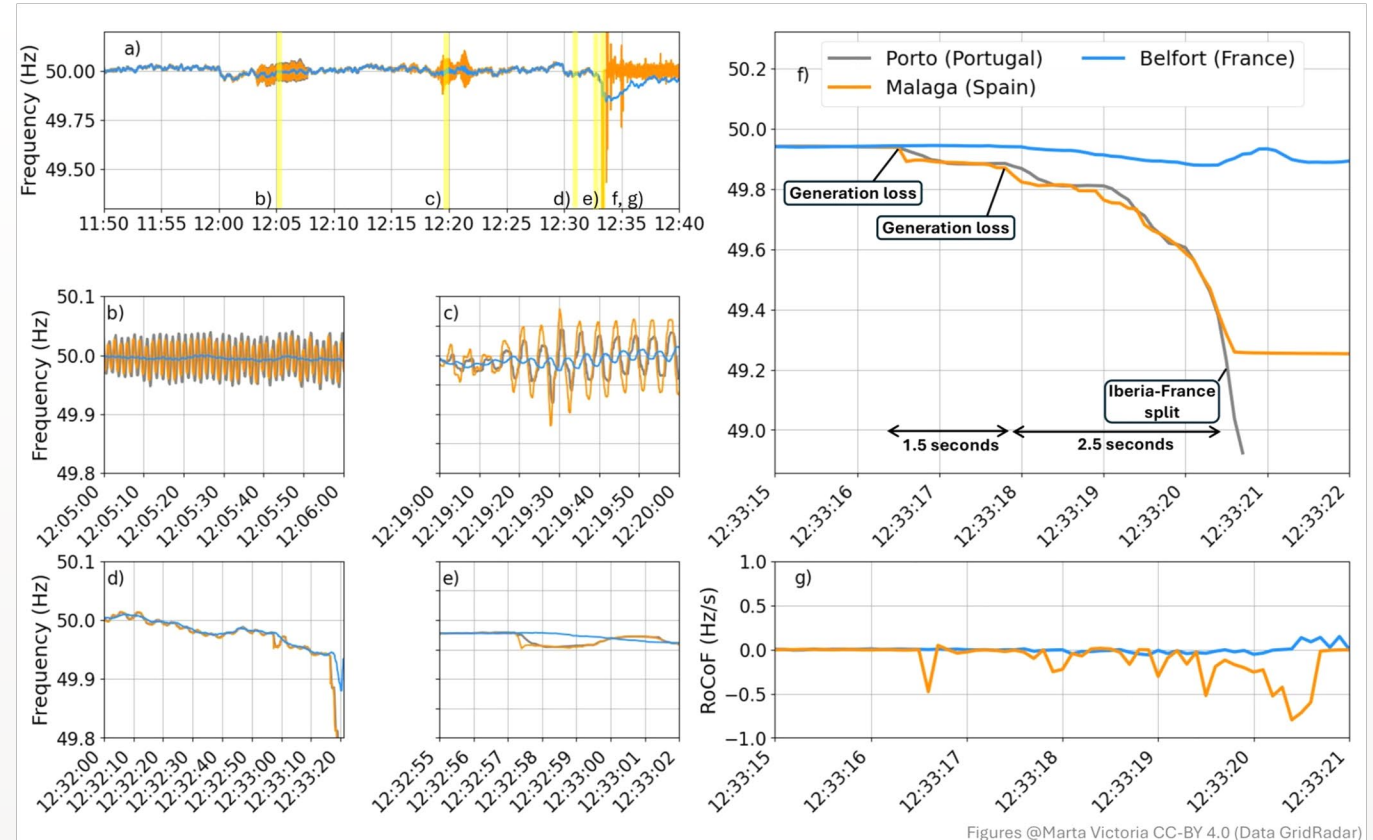


Zusammenstellung der Abläufe in Spanien

Charts zusammengestellt von

- Prof. Marta Victoria, Technical University of Denmark,
- Daten GridRadar

PMU-Werte (100 ms) - Mittelwerte

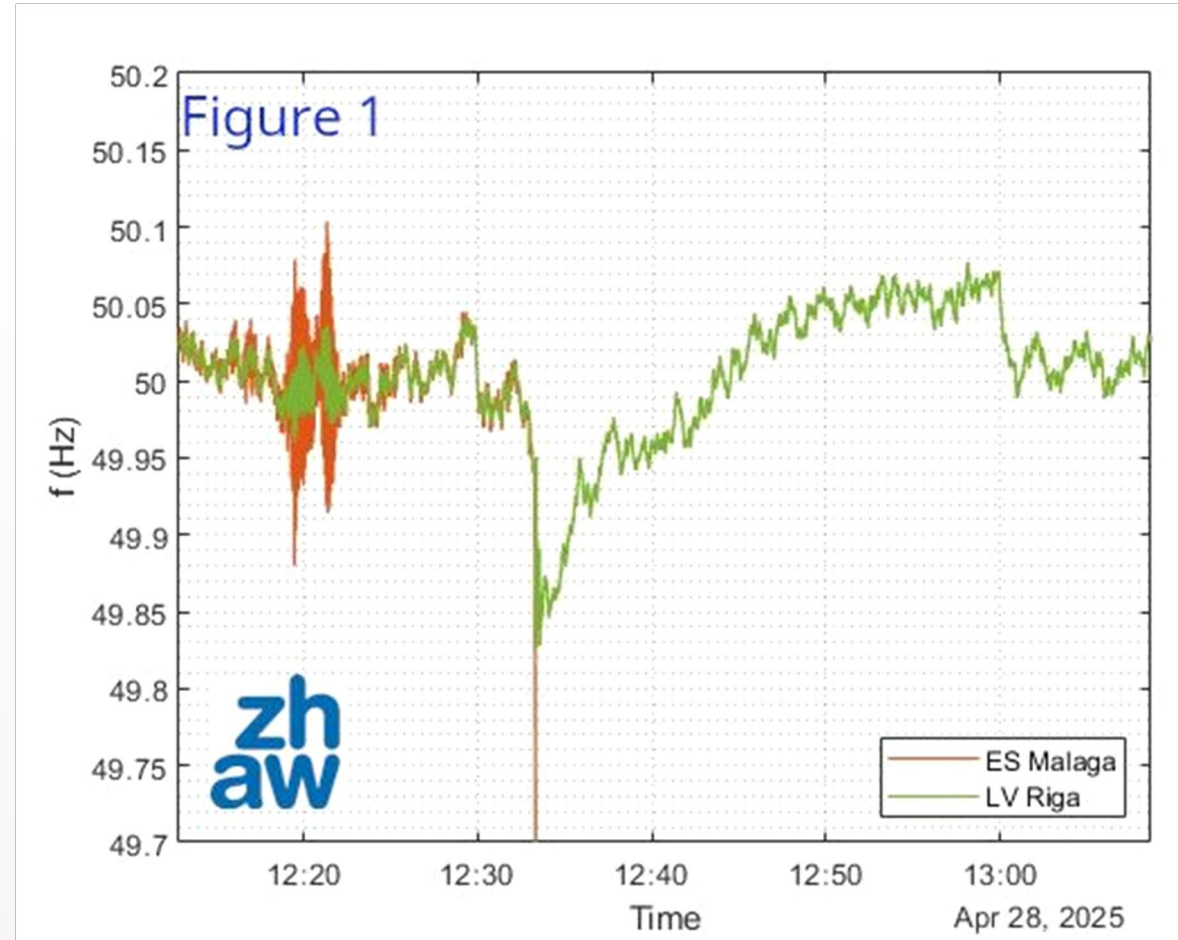


Veröffentlichte Charts von zhaw (Zürich, Schweiz)

Etwas detaillierte Sichtweise

12:15 Uhr – 13:15 Uhr

Kollaps des Netzes

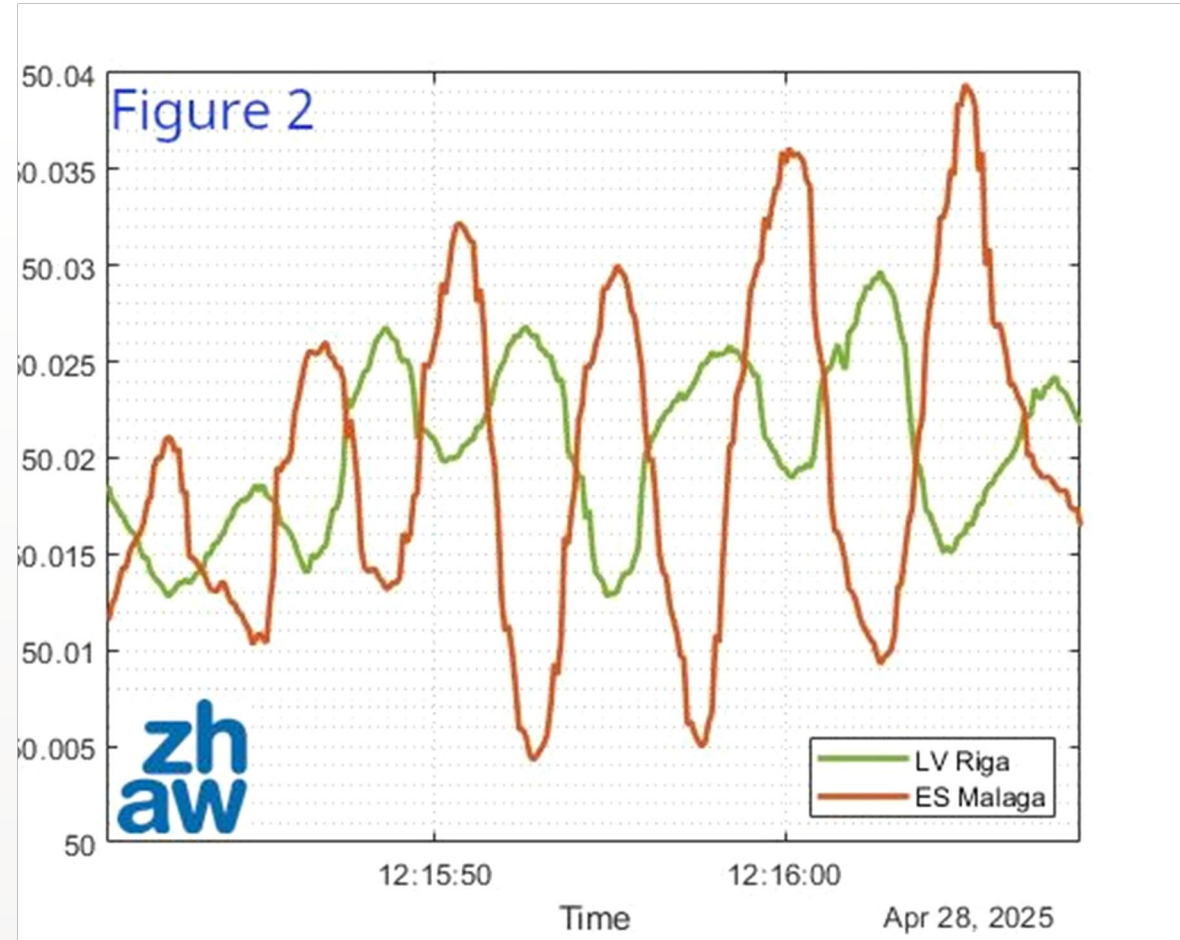


Veröffentlichte Charts von zhaw (Zürich, Schweiz)

Leichte Deformationen erkennbar!

Weitere Frequenzkomponenten
entwickeln sich!

(Emergenzen)

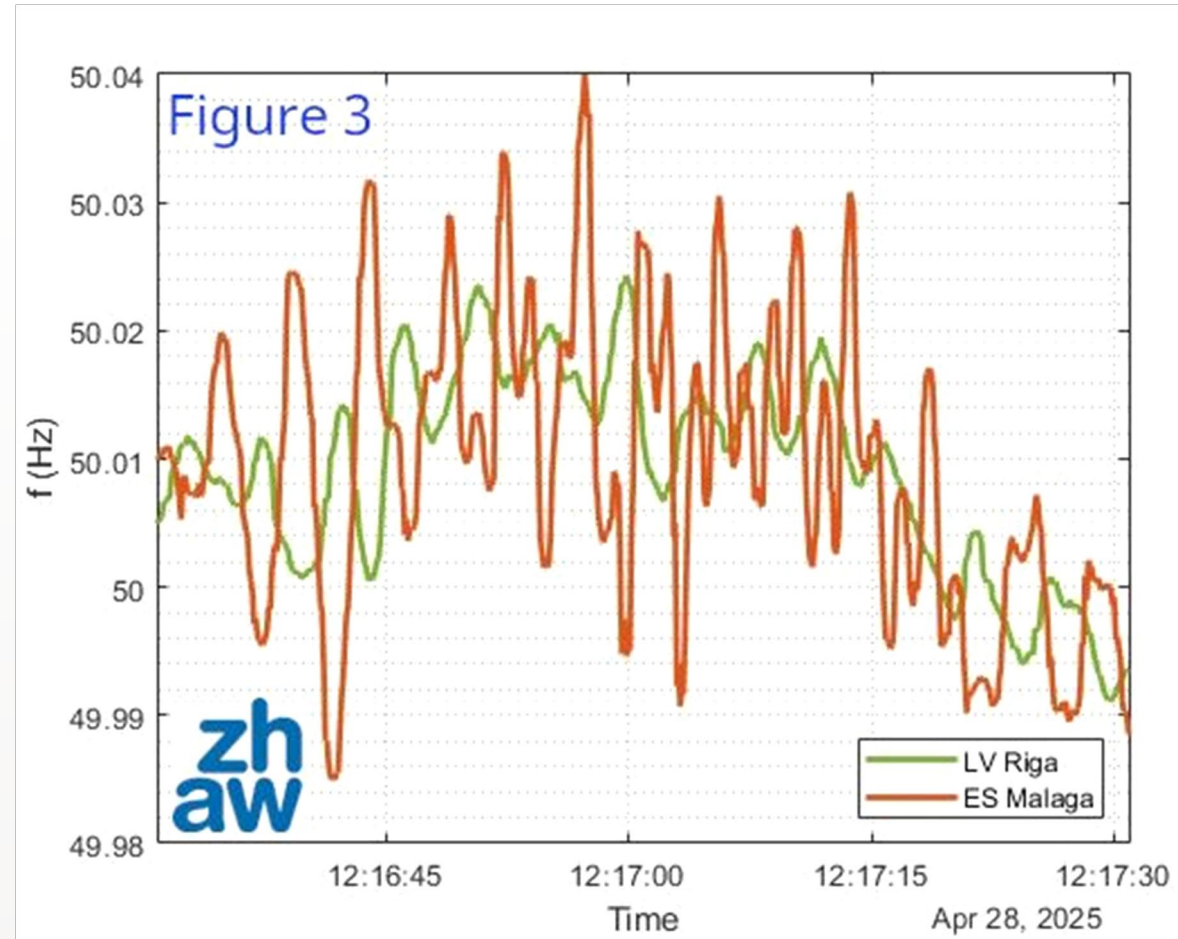


Veröffentlichte Charts von zhaw (Zürich, Schweiz)

Deformierte Oszillationen!

Beide Messstandorte zeigen das!

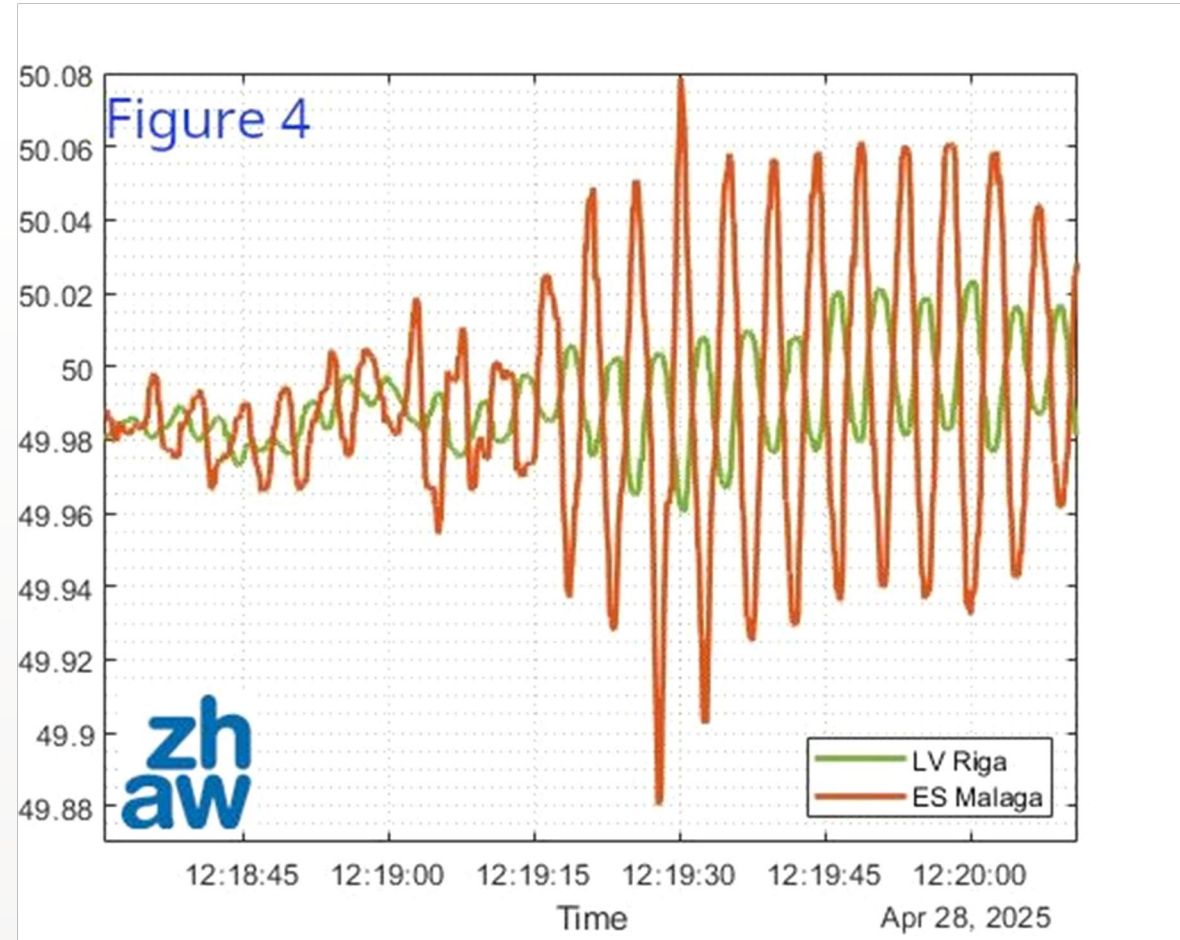
Weitere Frequenzkomponenten
entwickeln sich!



Veröffentlichte Charts von zhaw (Zürich, Schweiz)

Weiteres Aufklingen der Oszillationen

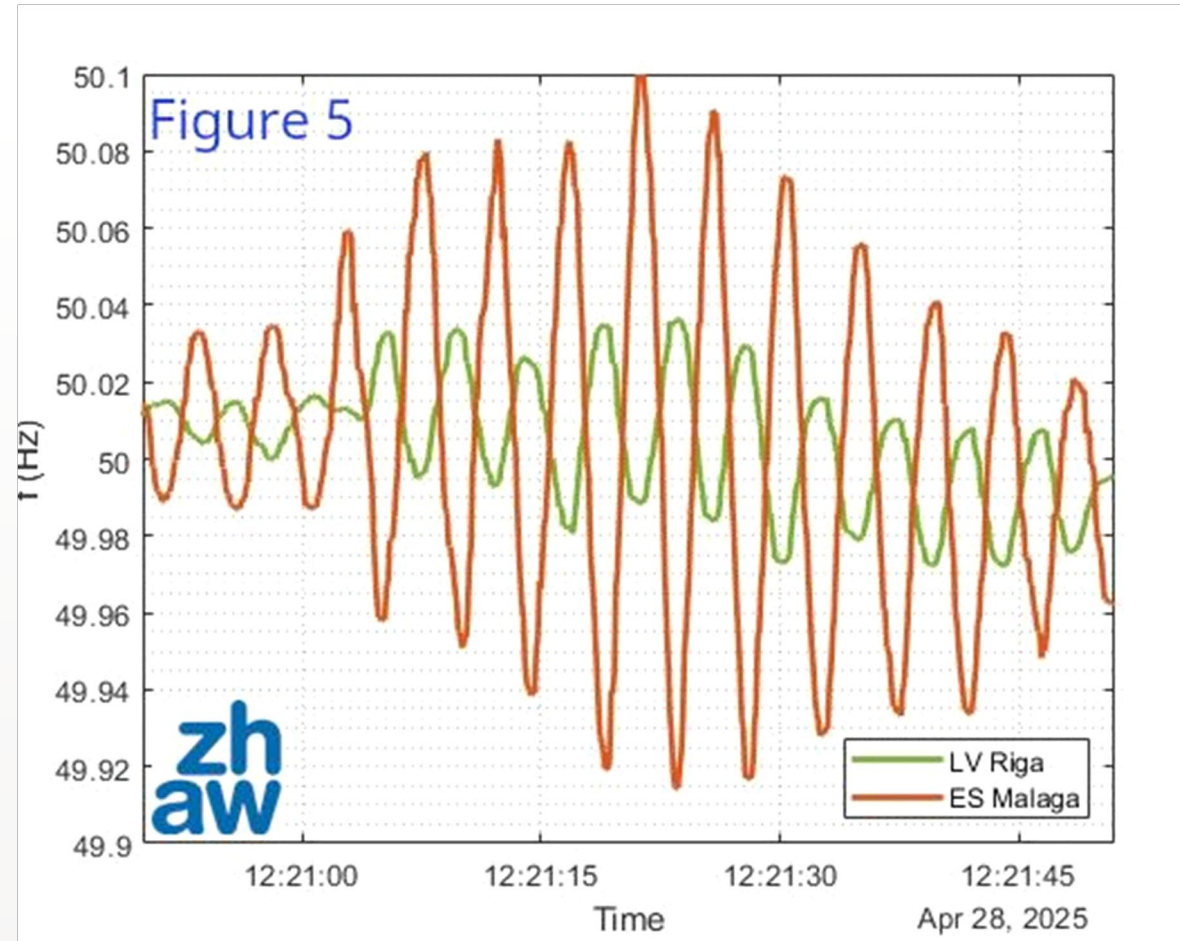
“Einrasten” auf eine Frequenz



Veröffentlichte Charts von zhaw (Zürich, Schweiz)

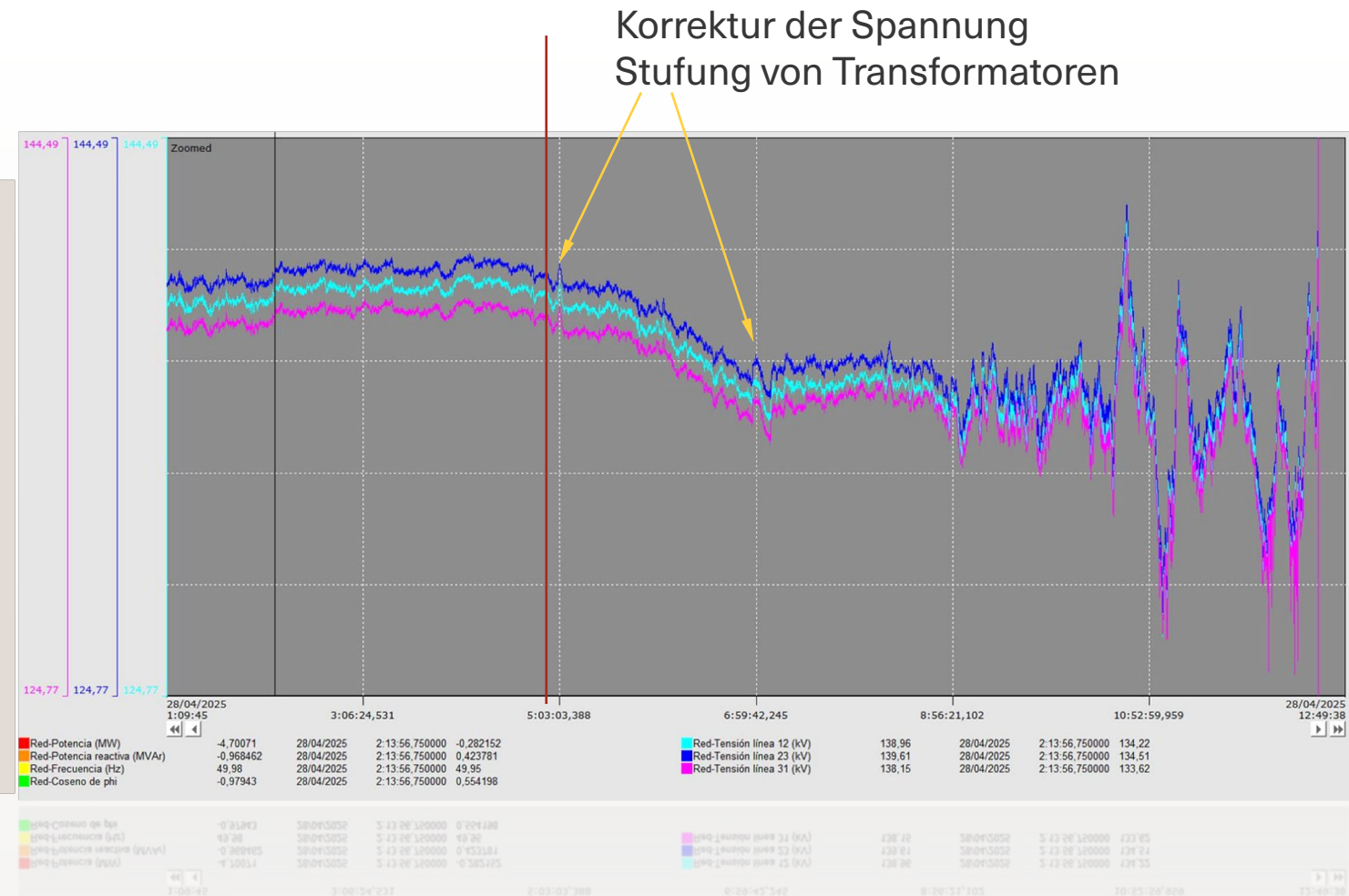
Sehr ausgeprägte Oszillationen

Aber: quasiglatte Kurvenverläufe!



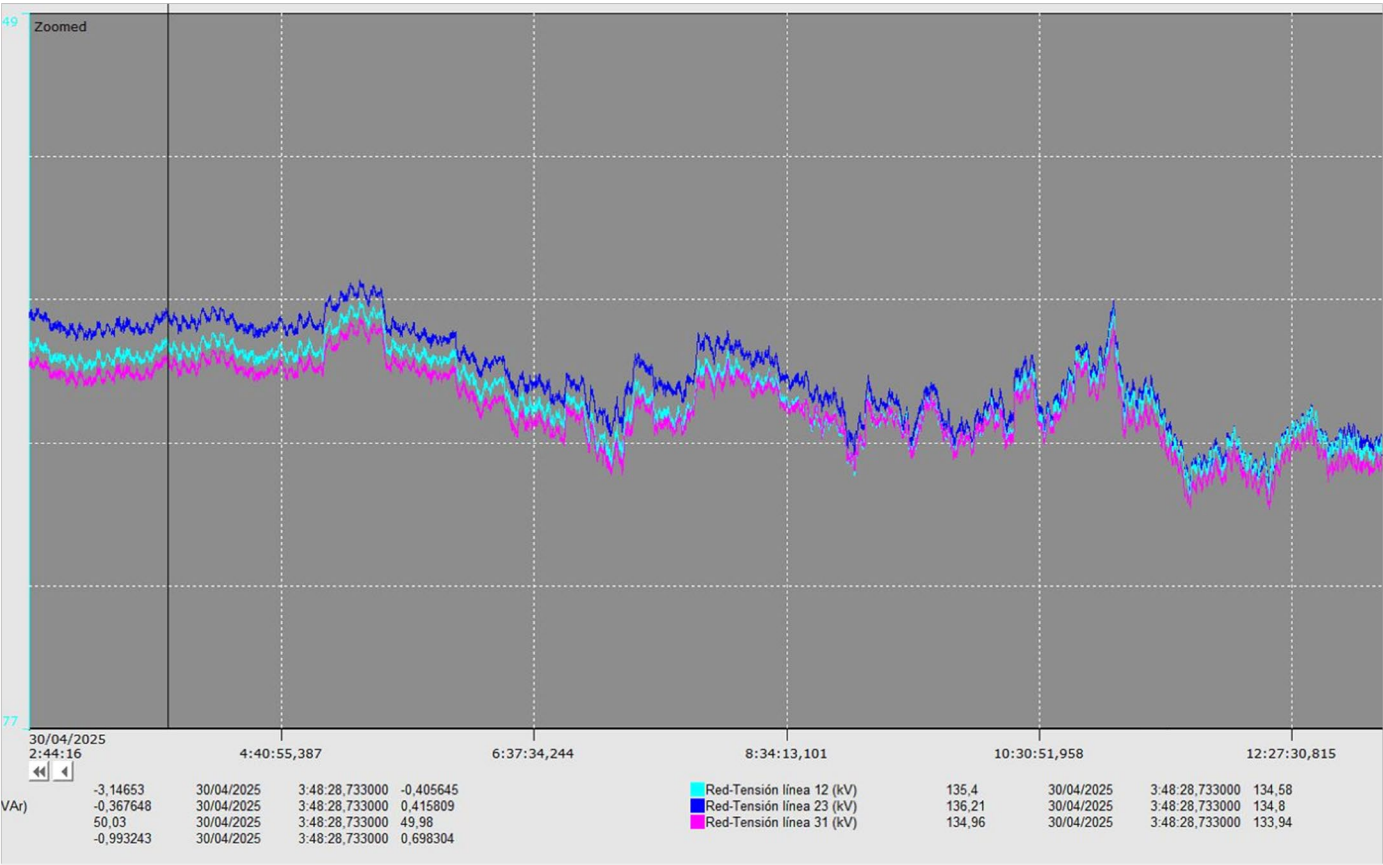
Spannungsverläufe

- Leider keine direkte Messung in der Höchstspannung (aktuell nicht verfügbar!)
- Netzspannungen 12 kV, 23 kV und 31 kV
- Aber:
Klare Tendenz eines Driftprozesses ab ca. 5:03 Uhr



Spannungsverläufe

- Verlauf vom 30.04.2025 zum Vergleich
- Signifikante Ähnlichkeiten erkennbar!



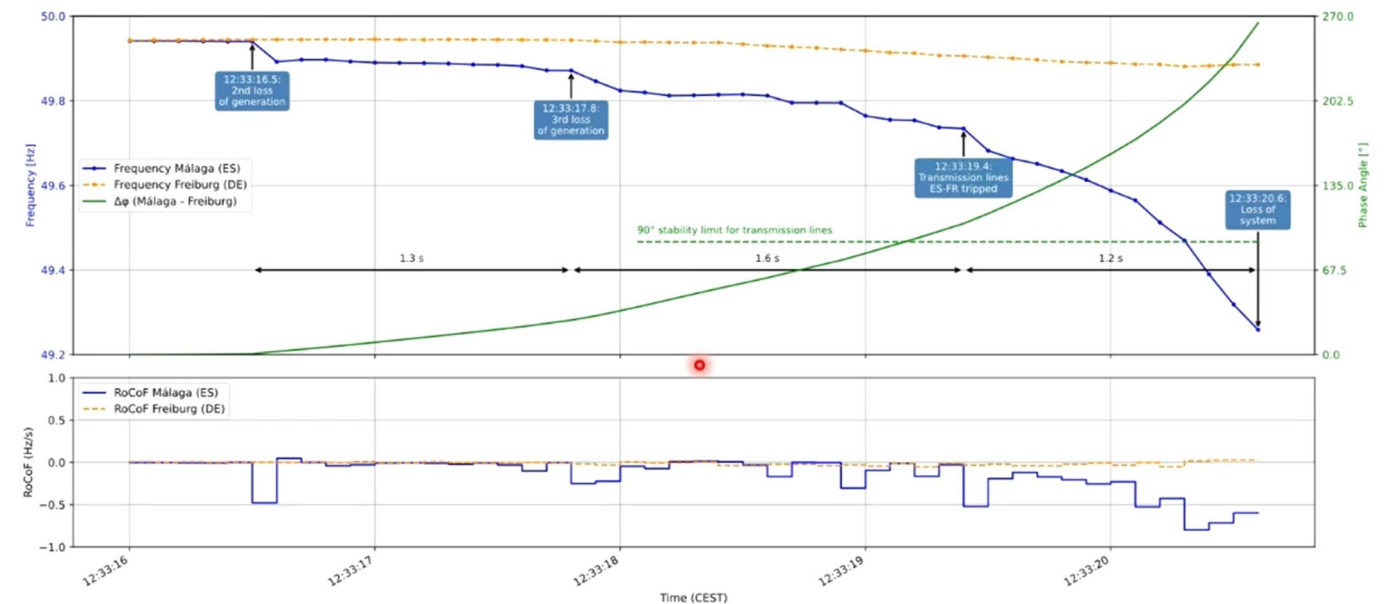
Für wechsellrichterbasierte Anlagen gelten größere Grenzwerte bis zu $\pm 4,0$ Hz/s für eine Dauer von 0,25 s

Analysen zum RoCoF

- RoCoF = Rate of Change of Frequency (Gradient der Frequenz)
- Grenzwert nach TAR 4120 (Typ 1)
 - $\pm 2,0$ Hz/s für eine Dauer von 0,5 s
 - $\pm 1,5$ Hz/s für eine Dauer von 1 s
 - $\pm 1,25$ Hz für eine Dauer von 2 s
 - ± 1 Hz/s für bestimmte Anlagentypen ($P_{\text{inst}} \geq 140$ MW)

Timeline of system break starting at 12:33:16.5 CEST

Max. RoCoF for Málaga: -0.8 Hz/s



10

© Fraunhofer ISE

Quelle: Fraunhofer ISE

Fra

© Fraunhofer ISE

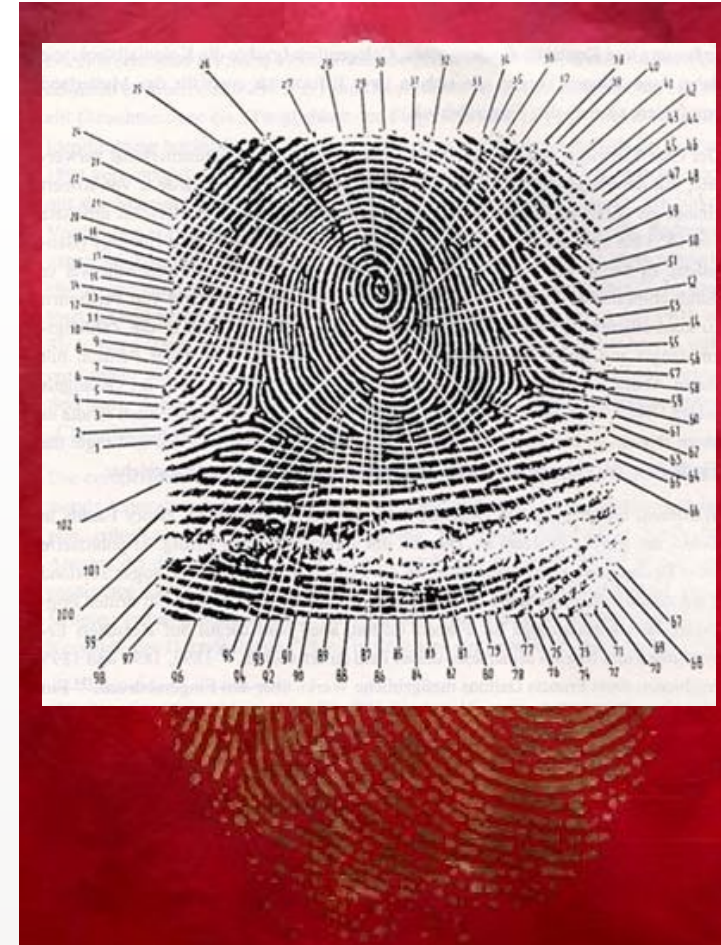
10

Fra

Fingerprint Analysis

More than 100 special characteristics are used to identify/detect a human being based on their finger prints!

This can be done for power systems, also!



Damals: Viele Preise – viel Ehre!
Interesse ???

CPR-D Collapse Prediction Relay



„Overall-Best-Product“
ELECARAMA-2006

Mumbai (Bombay), Indien

ELECARAMA Exhibitions are the largest exhibition of power, electrical, industrial electronics and allied products in the eastern part of the world.

Mai 2025

Michael Fette

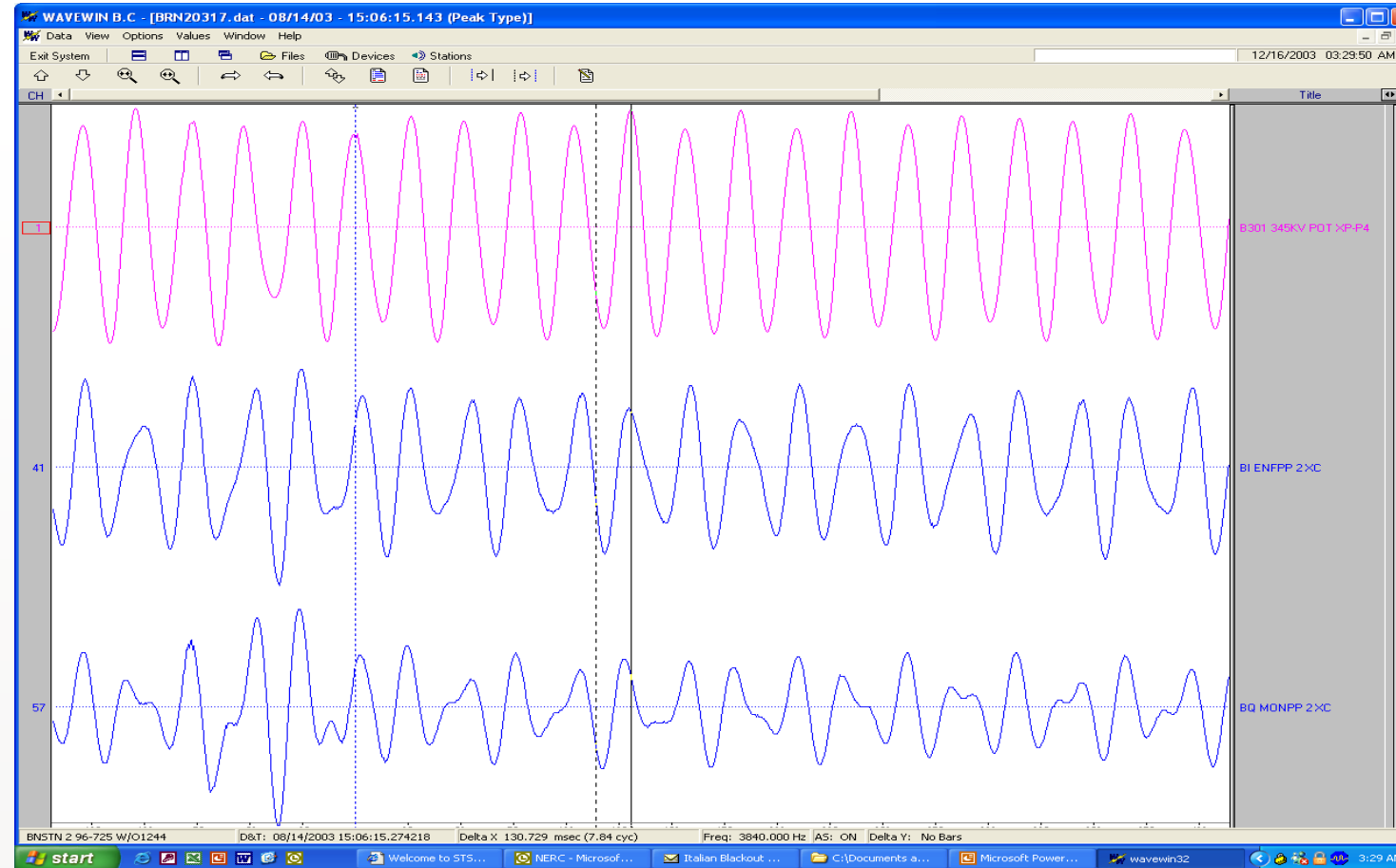
Digital Nonlinear Power Systems

37

Fette
Competence in Energy

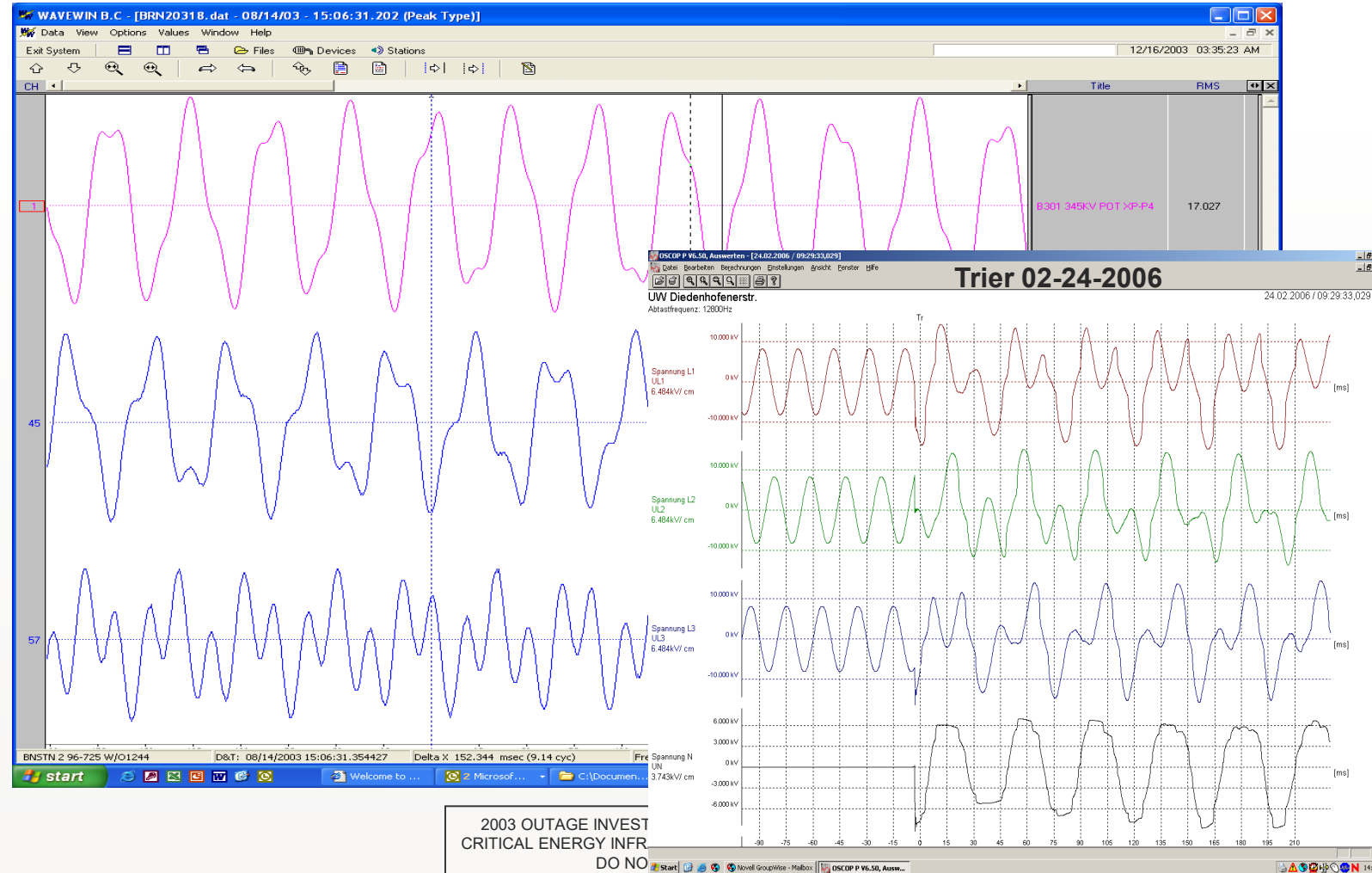


Time Series of US Outage 15:06:15 USA 2003



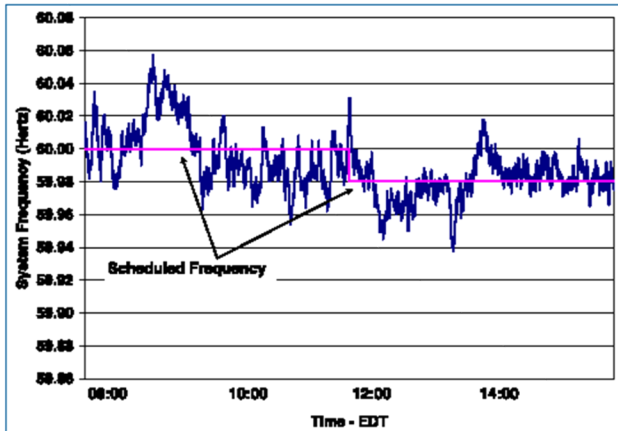
2003 OUTAGE INVESTIGATION – CONFIDENTIAL
CRITICAL ENERGY INFRASTRUCTURE INFORMATION
DO NOT RELEASE

Time Series of US Outage 15:06:31 USA 2003



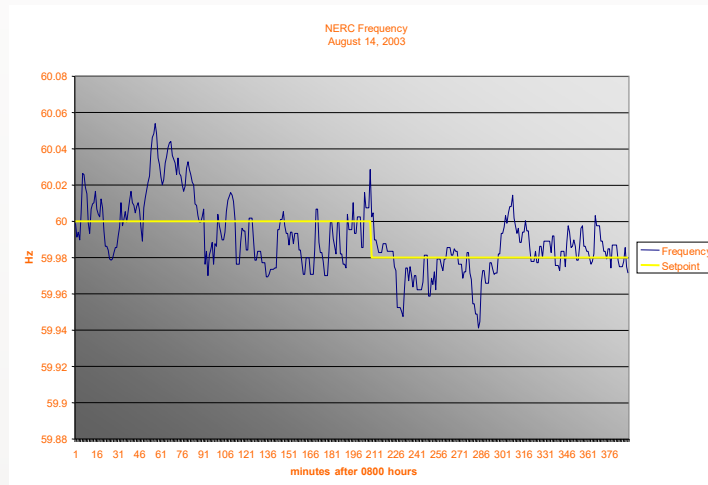
Analysis of the Blackout U.S. August 14, 2003 – OSIsoft – Mr. Russo

Figure 3.4. Frequency on August 14, 2003,
up to 15:31 EDT

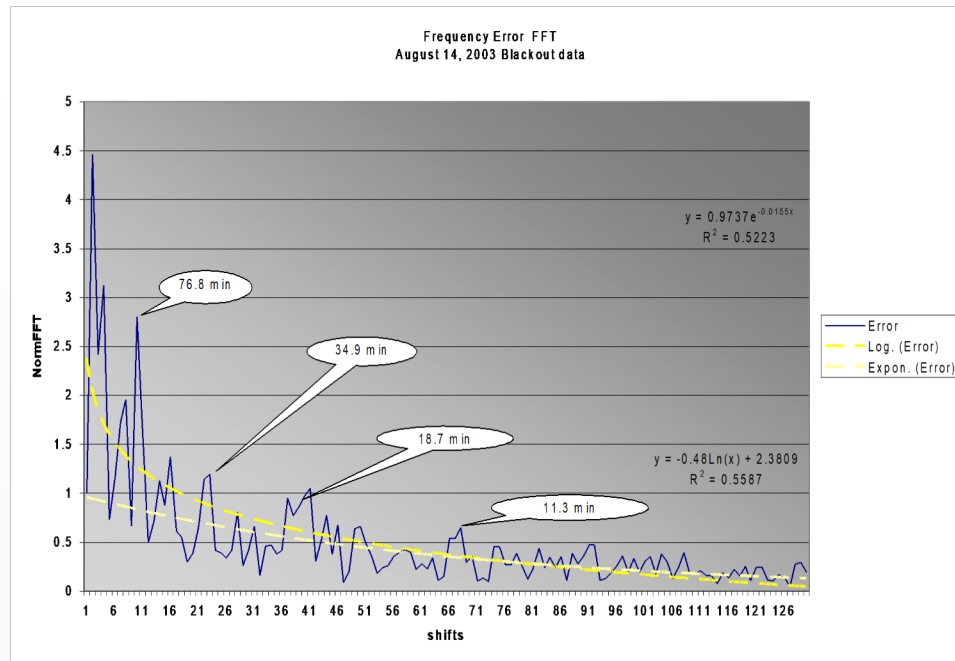


➤ OSIsoft digitized the frequency trend image in Figure 3.4 of the DOE Blackout report "[U.S.-Canada Power System Outage Task Force Interim Report: Causes of the August 14th Blackout in the United States and Canada.](#)" and performed Fourier analyses on these data.

➤ An Excel trend chart of these digitized data is shown on the left hand side. The digitized data match fairly closely to that shown in Figure 3.4. Ideally, this analysis should be done with the actual numeric data; however, these are not available to the public.



Analysis of the Blackout U.S. August 14, 2003 – OSIsoft – Mr. Russo



➤ The August 14, 2003 Blackout has some similarities to the June 12, 1992 Rush Island event [1]. Large power oscillations occurred due to the reconfiguration of the grid as the result of an insulator failure at the Tyson 345 kV substation. This resulted in an unstable operating point and caused voltage collapse after about 38 minutes.

[1] Ilic, M, and John Zaborszky, Dynamics and Control of Large Electric Power Systems, John Wiley and Sons, New York, 2000, p. 507.

Analysis of the Blackout U.S. August 14, 2003 – OSIsoft – Mr. Russo

- „The FFT of a system „in control“ would drop from the initial value of one to near zero in one or two „shifts“ (one shift equals to 90 seconds, that can be directly converted to periods in minutes).“
- „However, significant power oscillations at long periods are exposed.“
- **„This implies significant power being absorbed and released into the grid starting much earlier.“**

Analysis of the Blackout U.S. August 14, 2003 – OSIsoft – Mr. Russo

Resulting Comments by OSIsoft

- Long before the Blackout occurs, swing processes could be detected within the available data
- These oscillations cannot be observed in normal transients
- At a very early state a large amount of power was absorbed and delivered by the net
- It was clear, that the system may come into trouble. Control actions could be initialized at a very early stage
- Similarities to former blackouts could found

Remarks:

- In the official reports no comments or statements could be found about this topic.
- One of the discussed solution for the future are Wide-Area-Protection-Systems, which have in practice the risk, that very different data must be collected together and results must be derived from them.

Störfälle zeigen auf, wie auf Veränderungsprozesse in der Praxis mit geeigneter Messtechnik reagiert werden kann.

Mai 2025

Michael Fette
Digital Nonlinear Power Systems

44

Fette
Competence in Energy

Maßnahmen:

Die Veränderungsprozesse sind messbar und im Verhalten charakterisierbar

- ➔ Analyse des Gesamtnetzes
 - ▶ Gestufte Vorgehensweise – ausgehend von klassischen Analysen
 - ▶ Durchführung von Messungen mit gezielten Netzversuchen
- ➔ Maßnahmenkatalog mit Vorschlagsliste
- ➔ Zukünftig: Integration von Messtechnik und Analyseverfahren
 - ▶ z.B. DMR-D Dynamik Monitor für Verteilnetze von a-eberle GmbH & Co. KG
 - Messung des Dämpfungsverhalten und der Stabilität an wichtigen Netzknoten
 - Analyse des Dämpfungsverhaltens und der Stabilitätsentwicklung
 - Veränderungsprozesse aufzeichnen und beobachten
 - Kriterien für Netzführung und
 - Netzbauplanung ermitteln

**Ursachen klar
erkennbar und
Eigenschaften i.R.
verursachergerecht
zuordbar!**

Zwischenfazit

- Aktuell vorliegende Messdaten weisen auf einen „prototypischen“ Blackout hin, der alle Merkmale der nichtlinearen Theorie zu Kollaps-Vorgängen (Spannungs-Kollaps) erfüllt.
- Das grundlegende Problem wird im Spannungs-/Blindleistungshaushalt des Netzes liegen.
- Abstimmung der diversen Reglereinstellungen / Schutzeinrichtungen müssen verbessert / koordiniert werden. Dämpfungsverhältnisse müssen verbessert werden!
- **Der Störfall ist reproduzierbar!**

Intelligent Nonlinear Systems are our Profession

Preserving the tried and tested – shaping the new!



KRI® die Anwendungen und Algorithmen, die das System benötigt, um das nichtlineare Systemverhalten zu erkennen und zu bewerten, Prozesse anzupassen und Entscheidungen zu treffen, damit das System jetzt und in Zukunft stabil und sicher betrieben werden kann - lokal und global. **KRI**® kodieren mit einer intelligenten Vorverarbeitung die Messdaten so, dass die auszutauschenden Datenmengen auf ein Minimum reduziert und die Relevanz der Information erkannt werden kann. - Komplementär zu bekannten Prozess-KPI.

DMP-EMCP® die EDGE-basierte Hardwareplattform, die die Messgrößen im gesamten Frequenz- und Zeitbereich in Zeit und Frequenz hochaufgelöst erfasst, Indikatoren für Einzelwerte oder komplexe Werte oder für komplexe Netzdynamiken auf Basis nichtlinearer Systeme ermittelt, kann direkt innerhalb von Steuerungs- und Schutzalgorithmen lokal oder in hierarchisch strukturierten Steuerungs- und Schutzkonzepten eingesetzt werden. CyberSecurity-Aspekte können traditionell implementiert werden, oder es können neue duale CyberSecurity-Lösungen durch intelligente Kodierung der Mess- und Auswertgrößen genutzt werden, um eine zukünftig nutzbare "low cost"-Kommunikation sicher und zukunftssicher zu machen.

Basiert auf **XAI** - EXplainable Artificial Intelligence – powered by Synergetics!

Pooling-Algorithmen und Marktplätze können direkt angedockt werden, intelligente Lösungen, bei denen z.B. E-Fahrzeuge auch als Speicher im Verteilnetz mit Dienstleistungen für das Übertragungsnetz eingesetzt werden, können realisiert und betrieben werden.

Der Betreiber von **ORCA**® erhält direkte Unterstützung im Rahmen von Unternehmenswerten mit den Perspektiven: Finanzen, Technik, Sicherheit, Qualität, Recht, Image, Umwelt, Organisation und Effizienz. Die **KRI**® identifizieren Probleme, zeigen Lösungen auf und begründen die Herausforderungen - immer im Sinne aller Unternehmenswerte, ... mit Nachweisen, so dass Klarheit für alle Beteiligten geschaffen wird!

... ein komplettes, streng modulares, hoch automatisiertes Systemmanagement - für

DNPS® Digital Nonlinear Power Systems

Intelligent Nonlinear Systems are our Profession

Preserving the tried and tested – shaping the new!



Fette - Competence in Energy GmbH develops solutions for system management and system operation of energy systems that meet future requirements with predominantly decentralized and converter-based plants.

- 35 years of experience in research and development of nonlinear systems
- Over 800 man-years of development power in IT systems, hardware and software solutions, algorithms, and analysis and evaluation methods - self-funded without third party rights or dependencies
- Over 350 projects in more than 30 countries in industrial, distribution and transmission networks (AC and DC), to determine and assess system dynamics - usually when there have been disturbances or destruction of equipment and networks, identifying causes and proposing solutions – evaluating theory and practice
- For more than 15 years permanent observation of the dynamics and change processes in the systems
- Over 100 projects for the development of customer-specific solutions
- Over 500 consulting projects

Publisher:
Fette – Competence in Energy GmbH
Hohenzollernring 30
22763 Hamburg
Germany
+49 155 588 49 807

Intelligent Nonlinear Systems are our Profession

Preserving the tried and tested – shaping the new!

Fette
Competence in Energy



Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil.

Michael Fette

former Professor for
„Renewable Energy Systems and Automatic Control“
venia legendi in „System theory / System dynamics“

michael.fette@fette-competence-in-energy.com

Hinweis auf Urheberrechte

- Hiermit weisen wir darauf hin, dass die Unterlagen ein technisch/inhaltliches und auch unternehmerisch/organisatorisches Konzept beinhalten, das urheberrechtlich und unter juristischen Aspekten in jeder Hinsicht geschützt ist.
- Eine Weitergabe an „Dritte“ ist ausgeschlossen und kann nur mit unserer verbindlich schriftlichen Zustimmung weitergegeben werden.
- Falls Beteiligungsgesellschaften existieren, die rechtlich eigenständige juristische Personen sind, bitten wir Sorge zu tragen, dass die Gesellschaften Ihnen und uns die Nichtweitergabe der Unterlagen schriftlich bestätigen. Das gilt auch in dem Fall, wenn Sie Unterlagen weiter geben würden.

Vielen Dank!