

### Physikalische Eigenschaften der elektrischen Energieversorgung:

- Erzeugung und Verbrauch immer im Gleichgewicht
- keine nennenswerten Energiespeicher vorhanden
- aktive Netzregelung von Frequenz, Wirkleistung und Spannung für stabilen Systemzustand notwendig
- Ungleichgewicht führt zu Stromausfällen
- physikalischer Lastfluss anders als gehandelter Lastfluss

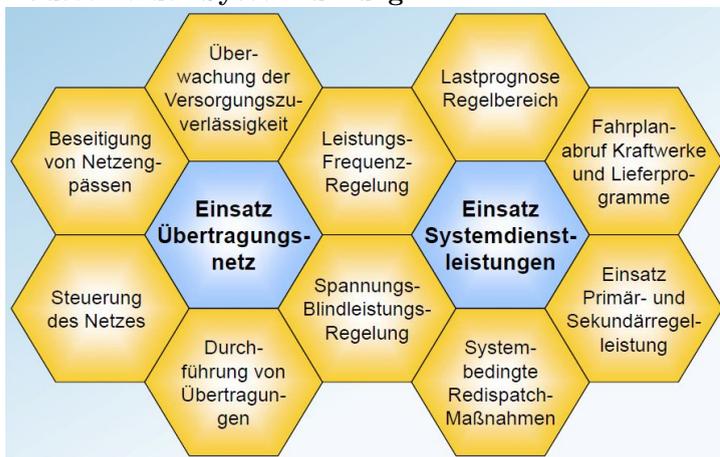
### Übertragungsnetz:

- 380 kV und 220 kV
- Großkraftwerke
- Transite
- internationale Vermaschung
- Ohmsches und Kirchhoffsche Gesetze
- Betrieb in Echtzeit
- EU Gesetzgebung und EnWG/EEG
- TSO trägt Systemverantwortung

### Verteilnetz:

- 110 kV, 20 kV, 10 kV und 0,4 kV
- Stadtwerke, Industrie, Gewerbekunden, Haushalte
- Industriekraftwerke, regenerative Einspeisungen, dezentrale Kraftwerke

### Bausteine der Systemführung:



## 1 Internationaler Verbundbetrieb

### mit dem Grad der Vermaschung steigen:

- Qualität
- Sicherheit
- Wirtschaftlichkeit
- Auslastung
- Energieaustausch

### mit dem Grad der Vermaschung sinken:

- Reservebedarf
- Kosten
- Störanfälligkeit
- Energieträgerabhängigkeit

### Vorteile durch den Verbundbetrieb:

- Ausgleich von konjunkturellen/klimatischen Unsicherheiten
- gemeinsame Reservehaltung
- Ausgleich von Leistungsüberschüssen und -mangel
- kurz- und mittelfristige Stromlieferungen zur Erzeugungsoptimierung

### Synchrone Verbundsysteme in Europa:

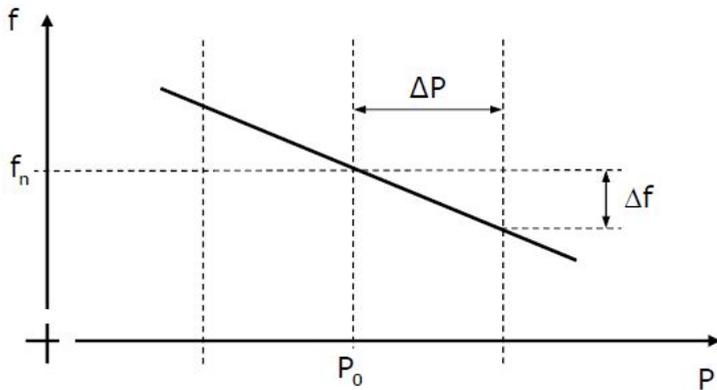
- UCTE (ENTSO-E)
- NORDEL
- IPS/UPS mit Baltikum
- UK
- Island

## 2 Technische Voraussetzungen für den Verbundbetrieb

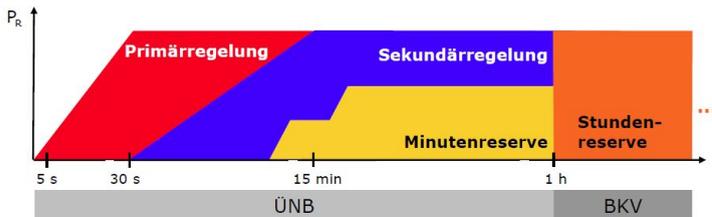
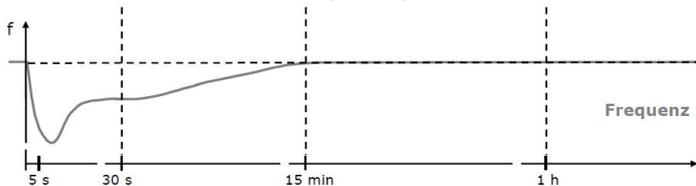
### Netzkennlinie:

für Primärregelung

Netzstatik:  $S_N = -\frac{\frac{\Delta f}{f_n}}{\frac{\Delta P}{P_n}}$  Netzleistungszahl:  $K_N = \frac{P_n}{f_n \cdot S_N} = -\frac{\Delta P}{\Delta f}$



### Primär- und Sekundärregelung, Minuten- und Stundenreserve:



### Primärregelung:

- automatische, dezentrale Wirkleistungsregelung
- 3 GW in UCTE
- 0 bis 30 sec

### Sekundärregelung:

- gebietsbezogene, zentrale, automatische Leistungsregelung
- Einhaltung des geplanten Energieaustausches
- Rückführung der Netzfrequenz auf  $f_n$
- 30 sec bis 15 min

### Minutenreserve:

- langfristige Reserveleistung
- manueller Abruf
- Ablösung oder Ergänzung der Sekundärregelung
- 15 min bis 1 h

### Stundenreserve:

- Ablösung der Minutenreserve
- manueller Abruf
- ab 1 h

## 2.1 Spannungshaltung

### Leitungsbelastung und Spannungsabfall:

- Spannung sinkt am Leitungsende mit zunehmender Belastung stark ab
- Blindleistungsverluste steigen mit zunehmendem Stromfluss stark an
- Wirkleistungsverluste steigen mit zunehmendem Stromfluss an

### Primäre Spannungsregelung:

- AVR an Generatoren
- keine Koordination untereinander

### **Sekundäre Spannungsregelung:**

- an ausgewählten Sammelschienen im Netz
- Spannungen an Sammelschienen als zusätzliche Eingangsgröße für AVR der Generatoren
- Koordinierung innerhalb von Netzbereichen

### **Tertiäre Spannungsregelung:**

- koordinierte Eingangsgrößen für AVR und Stufenschalter
- zentraler Optimierungsalgorithmus
- globale Koordinierung von Spannung und Blindleistung

## **2.2 Winkel- und Spannungsstabilität**

### **Winkelstabilität:**

- kurzzeitig
- ungedämpfte elektromechanische Schwingungen durch kleine Störungen
- Rotorbeschleunigung durch große Störungen:
  - lange Fehlerklärungszeit
  - hohe Impedanzen
  - niedrige Trägheit der rotierenden Massen

### **statische Winkelstabilität:**

- Fähigkeit, synchronen Betriebszustand unter Einfluss kleiner Störungen beizubehalten
- andauernd kleine Störungen: laufend Laständerungen, Schwankung der eingespeisten Leistung

### **transiente Winkelstabilität:**

- Fähigkeit, nach großer Störung synchronen Betrieb beizubehalten/wiederzuerlangen
- große Störung: Kurzschluss
- durch große Leistungsflussänderung Änderung des Polradwinkels der Synchrongeneratoren

### **Generator am starren Netz:**

- abgegebene Leistung:  $P = \frac{3 \cdot U_G \cdot U_N}{X_{ges}} \cdot \sin(\delta)$
- maximal für  $\delta = 90^\circ$
- statische Stabilität bei  $\delta < 90^\circ$
- Maschine fällt bei  $\delta > 90^\circ$  außer Tritt

### **Frequenzstabilität:**

- Erzeugung und Verbrauch unausgeglichen
- ganzes System betroffen

### **Spannungsstabilität:**

- Überschreiten der kritischen Wirkleistung auf der Nasenkurve
- bzw. Unterschreiten der kritischen Spannung auf der Nasenkurve
- nicht blockierende Stufenschalter begünstigen den Spannungskollaps wegen  $P_L = f(V)$

### **Großstörungen/Blackouts:**

- durch Eintreten mehrerer Ereignisse mit geringer Wahrscheinlichkeit
- diese wurden nicht bei der Netzplanung berücksichtigt
- von der Betriebsführung nicht für ein ausgelastetes System erwartet
- Kaskaden von Ausfällen
- führt zu Überlastungen sowie Spannungs- und Frequenzinstabilität durch Teilnetzbildung
- Maßnahmen: Inselnetzbildung, Lastabwurf, Kraftwerksabschaltungen

### **Nasenkurve:**

- $\frac{u_E}{u_A}$  vs.  $\frac{p}{q_{0L}}$
- maximal lieferbare Wirkleistung für verschiedene Leistungsfaktoren
- Kompensation führt zu höherer möglicher Auslastung, aber trügerische Sicherheit
- denn Verschiebung der kritischen Spannung näher an die Betriebsspannung
- Netzausbau schafft Abhilfe

## **3 Fehler im Verbundbetrieb**

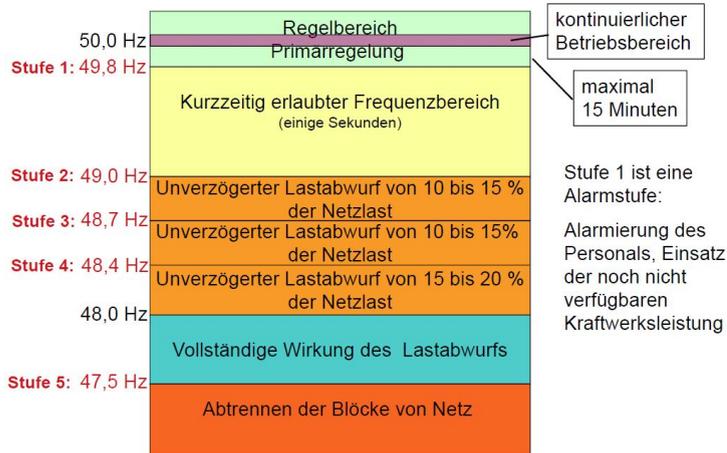
### **Systemzustände:**

- normal: keine Ausfälle, (n-1) Kriterium erfüllt, keine Grenzwertverletzungen
- gefährdet: Ausfall, (n-1) Kriterium ggf. verletzt, keine Grenzwertverletzungen
- kritisch: Grenzwertverletzungen, Versorgungsunterbrechungen, Instabilitäten möglich, 5-Stufenplan
- Blackout: Systemkollaps
- Systemwiederaufbau

### (n-1) Kriterium:

- durch Ausfall nur eines Betriebsmittels kommt es zu keiner Grenzwertverletzung oder Versorgungsunterbrechung
- laufend Ausfallvariantenrechnungen mit aktuellem Systemzustand laut State Estimation
- Beobachtungsbereich: eigenes Netz, Kuppelleitungen, angrenzendes Nachbarnetz
- Überwachungsbereich: eigenes Netz, Kuppelleitungen

### 5-Stufenplan:



## 4 Werkzeuge für die Systemführung

- benötigen extrem hohe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit

### nationale ÜNB Aufgaben von Amprion:

- Systemüberwachung und -führung des Übertragungsnetzes
- Entstörungsmanagement
- präventives und kuratives Engpassmanagement
- Planung und Beschaffung von Systemdienstleistungen
- Leistungs-Frequenz-Regelung der Regelzone Amprion
- Windbewirtschaftung und Netzlastprognose
- Systembilanzierung
- Prozesstechnik und -datenverarbeitung

### nationale Aufgaben von Amprion:

- Abstimmung der Energieaustauschprogramme in Deutschland und mit den ausländischen ÜNB
- Mitglied des Netzregelverbundes (NRV)
- Leistungs-Frequenz-Regelung des Regelblocks Deutschland
- Mengenzuweisung des deutschen Regelblocks

### internationale Aufgaben von Amprion:

- Abstimmung der Energieaustauschprogramme zwischen ENTSO-E Nord und Süd
- Mengenzuweisung des Blocks ENTSO-E Nord
- Engpassprognose (DACF)
- Datensammlung und Abrechnung der Stromtransite
- Hosting und Serverbetrieb:
  - CWE Market Coupling
  - internationale Netzsicherheitsanalysen der TSC Sicherheitsanalyse
  - Security Service Center von Amprion und TenneT

### 4.1 Netzbetriebsführungskonzept

#### Hauptschaltleitung (HSL):

- Netzführung
- Systemplanung
- Systemüberwachung
- Archivierung
- Bereitstellung von Systemdienstleistungen
- Kraftwerkeinsatz für Systemdienstleistungen
- Koordination Verbundbetrieb
- Engpassmanagement

### **zwei Gruppenschaltleitungen (GSL):**

- Überwachen des Netzes
- 110 kV-Leitungen im Verbund führen
- Freigaben zur Verfügung und weiteren Verwendung erteilen
- Fernsteuerung des Übertragungsnetzes
- Erfassen und Bearbeiten von Warn- und Störungsmeldungen

### **Schaltleitungen (SL):**

- 110 kV und Mittelspannung
- Netzführung und Überwachung
- Unterstützung bei der Erbringung von Systemdienstleistungen
- Durchführung von Steuerungen
- Störungsbehebungen

### **Hilfsmittel bei der Führung von Niederspannungsnetzen:**

- manuelle oder mit GDV-Systemen erstellte Netzpläne
  - geographische Umgebung
  - manuell nachgeführter Schaltzustand
  - ggf. mit Kundendaten
- Belastungsmessungen an Betriebsmitteln
- Ermittlung des zeitlichen Belastungsverlaufes
- Einsatz von Mitarbeitern vor Ort mit IT-Unterstützung
- Störungsmeldungen von Kunden

### **Hilfsmittel bei der Führung von Mittelspannungsnetzen:**

- verstärkter Einsatz von Netzleitsystemen
- Informationen zu Einspeisungen aus dem Hochspannungsnetz und aus Schwerpunktanlagen:
  - Messwerte der Abgänge
  - Schalterstellungen
  - Schutzmeldungen
- weite Teile nur nachgeführt
- bei Störungen Detailinformationen erst durch Personal in Anlagen
- moderne Schutzeinrichtungen mit Fehlerortermessung
- DV-technische Hilfsmittel zur Unterstützung des Personaleinsatzes bei Störungen

### **Hilfsmittel bei der Führung von Hochspannungsnetzen:**

- durchgängiger Einsatz von Netzleitsystemen
- umfangreiche Übertragung von online Informationen:
  - Messwerte
  - Schaltzustände
  - Transformatorstufungen
  - Schutzmeldungen
  - Warn- und Störungsmeldungen der Betriebsmittel
- Notbetriebsinformationssysteme vorhanden
- online Netzberechnungsprogramme (State Estimation, Lastflussberechnung, Kurzschlussstromberechnung)

### **Überwachungsumfang leittechnischer Einrichtungen:**

- mit zunehmendem Einsatz der Netzleittechnik
- Warn- und Störungsmeldungen für gezielten Einsatz des Wartungspersonals
- digitaler Schutz
- Stationsleittechnik
- Kommunikationstechnik
- Überwachung von Redundanzkomponenten



### **Grundprinzipien der Messwerterfassung:**

1. Messwandler im Abzweig
2. Messumformer
3. Trennverstärker
4. A/D-Wandler

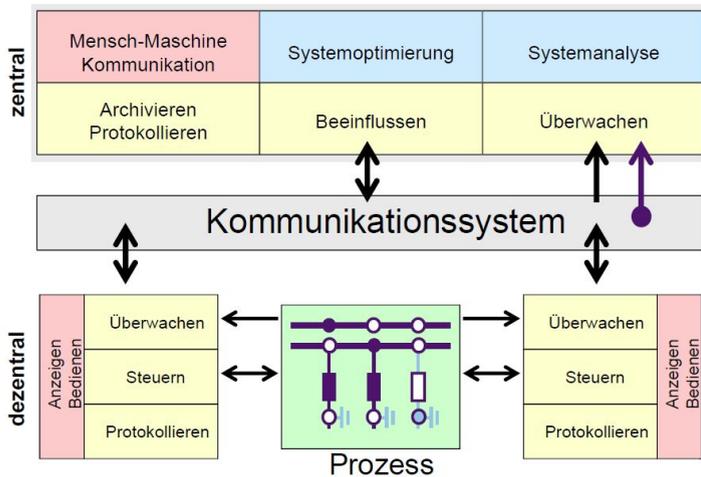
## Anforderungen an das Informationsdargebot:

- Zeitaktualität
- Vollständigkeit
- Präzision
- Zuverlässigkeit
- Aufgabenkonformität

## Anforderungen an die Leittechnik:

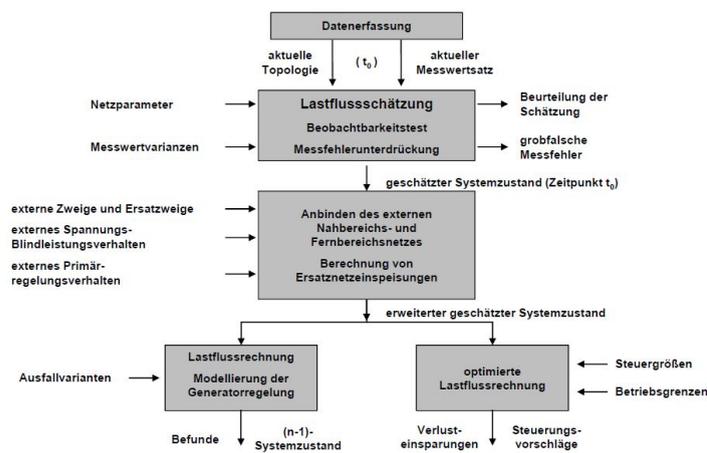
- Echtzeitfähigkeit
- hohe Systemverfügbarkeit
- ausreichende Redundanzen
- absolute Datensicherheit
- Systemflexibilität
- Ergonomie

## Grundstruktur aller Netzleitsysteme:



## 4.2 Netzberechnungsprogramme

### Beurteilung des aktuellen Netzzustandes:



### On-line Netzanalysefunktionen:

- State Estimation
- Sicherheitsrechnung
- Spannungs-Blindleistungs-Optimierung
- Erzeugung off-line Loadflow Dataset
- Unterstützung DACF-Prozess
- Kurzschlussstromberechnung

### State Estimation:

- Erstellung einer vollständigen und konsistenten Datenbasis aus dem aktuellen Systemzustand
- Eingangsgrößen: aktuelle Messwerte und aktuelle Topologie
- Ergebnis:
  - konsistenter und von Messfehlern bereinigter Netzzustand
  - grobfalsche Messwerte
  - Topologiefehler

### mögliche Fehlerquellen in der Datenbereitstellung:

- Ausfall der Fernübertragung
- Auftreten grobfalscher Messwerte
- Netztopologie
- Varianz der Messfehler
- Netzparameter
- nicht zeitgleiche Erfassung aller Informationen

### Day Ahead Congestion Forecast (DACF):

- off-line Netzanalysefunktion
- zur Vermeidung von Netzengpässen im UCTE-Netz
- TSO stellt Partnern sein Teilnetz für den Folgetag zur Verfügung (DACF-Datensatz)
- soweit möglich vollständig automatisiert
- Lastprognose der UCTE-Partner für den Folgetag
- Amprion setzt deutsche Teilnetze zum Gesamtteilnetz des deutschen Regelblocks zusammen
- DACF-Datensätze der Regelblöcke zum UCTE-Datensatz zusammensetzen
- Durchführung der Sicherheitsrechnung

### Überwachungsbereich:

interne Betriebsmittel und Kuppelleitungen auf Grenzwertverletzungen überwachen

### Ausfallvariantenliste:

- Betriebsmittel im internen Netz
- Betriebsmittel im externen Netz mit signifikantem Einfluss auf den Überwachungsbereich

### Beobachtungsbereich:

estimierbarer Netzbereich um die Ausfallvariantenliste berechnen zu können

## 4.3 Grundidee State Estimation

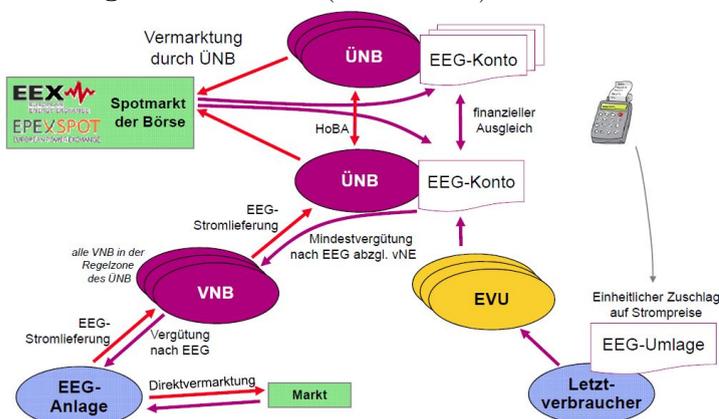
- Messungen immer fehlerbehaftet
- daher Systemgleichungen nicht korrekt erfüllt
- konsistenten Systemzustand  $\hat{x}$  ermitteln
- Weighted Least Squares (WLS) Methode
- Messungen:  $z = \vec{h}(x) + v$
- Messfehler  $v_i$  hat mittelwertfreie Gauß-Verteilung mit Varianz  $\sigma_i^2$
- $\min_x \sum_{i=1}^m \left( \frac{z_i - h_i(x)}{\sigma_i} \right)^2 = \min_x (z - \vec{h}(x))^T \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot (z - \vec{h}(x))$
- bei linearer Funktion  $\vec{h}(x) = \mathbf{A} \cdot x$ :  $\hat{x} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot z$
- Zustandsvektor besteht aus Spannungsbeträgen und -phasenwinkeln der Knoten des Netzes
- Anzahl Messungen  $m \geq n$  Zustandsvariablen
- Kovarianzmatrix  $\mathbf{R} = \text{diag}(\sigma_1^2, \dots, \sigma_m^2)$

## 5 Operative Herausforderungen

### Windenergie:

- installierte Windleistung Deutschland: 25 GW
- volatil
- keine sichere Energieerzeugung
- große Leistungsgradienten
- negative Spotmarktpreise möglich
- Windprognose durch Gewichtung der Daten verschiedener Wetterprognoseanbieter

### Wälzungsmechanismus: (seit 1.1.2010)



### Entgeltanteil für Kosten im Höchstspannungsnetz:

- EEG-Kosten: 27 %
- Regelernergie und sonstige Systemdienstleistungen: 42 %
- Netzinfrastruktur: 21 %
- Netzverluste: 10 %

### Einnahmen EEG-Konto:

- Verkaufserlöse Intra-Day und Day-Ahead von EE-Strom
- prognostizierte EEG-Umlage (für Letztverbraucher)
- Zinserträge aus positivem Kontostand
- Erlöse aus Bilanzabweichungen (Ausgleichsenergie)
- Einnahmen aus der Jahresendabrechnung

### Ausgaben EEG-Konto:

- Vergütungszahlungen an Anlagenbetreiber abzüglich vermiedener Netzentgelte
- Rückzahlungen
- Zinsaufwendungen aus negativem Kontostand
- Kosten für untertägigen Ausgleich
- Kosten aus Abrechnung der Ausgleichsenergie
- Kosten für die Erstellung der Prognosen (Intra-Day und Day-Ahead)

### Differenz EEG-Konto:

Ausgleich über EEG-Umlage des Folgejahres für Letztverbraucher

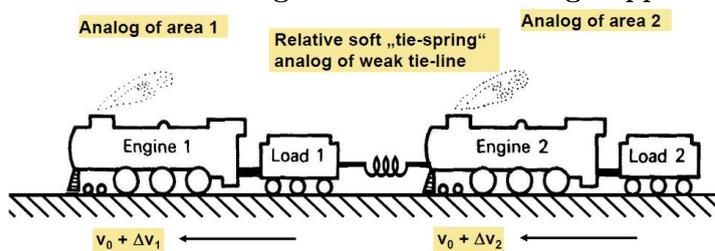
### Vertikale Wälzung auf Lieferanten:

- altes Verfahren
- keine Vermarktung des EE-Stroms durch ÜNB
- Vermarktung als Ökostrom durch EVU

## 6 Technische Sonderprobleme

### 6.1 Inter-Area Oscillations

Mechanisches Analogon für zwei schwach gekoppelte Netzregionen:



bei einem Kraftwerksausfall:

- Messung über Wide Area Measurement System (WAMS)
- Frequenzen an unterschiedlichen Orten im Netz schwingen gegenläufig
- Wirkleistungen auf Leitungen mitten im Netz schwingen sich ein
- Stromflüsse pendeln mit weniger als 1 Hz im Netz

Ursachen für die unzureichende Dämpfung von Netzpendelungen:

- Ausdehnung des Verbundsystems: Nord-Afrika, Türkei, IPS/UPS
- schwache elektrische Kopplung zwischen den einzelnen Teilsystemen
- hohe Übertragungsentfernungen
- ungeeignete Parametereinstellungen in Turbinen- und Spannungsreglern

Risiken bei unzureichender Systemdämpfung:

- Ausfall von Erzeugungseinheiten wegen unzulässiger Spannungsschwankungen
- Ausfall von Leitungen durch Schutzanregung
- Dominoeffekte

Power System Stabilizer (PSS):

mit Parametern aus systemweiter Optimierung

Moden:

- $f < 1$  Hz
- globale
- Nord/Süd
- CENTREL

## 6.2 Leiterseilschwingungen durch Windanregung

### Schwingungen großer Amplitude:

- «Seiltanzen»/ «Galopping»
- niederfrequent
- langanhaltend
- Anregung oft bei Vereisung durch entstehende Unsymmetrie (Halbkreisform)
- Kurzschlussgefahr Phase-Phase
- Gegenmaßnahme: Kunststoffisolatoren zwischen den Seilen

### Wirbelstraße nach Kármán:

- Wirbelbildung
- regt windinduzierte Schwingungen an
- es entstehen Kräfte senkrecht zur Anströmrichtung
- Seil wird auf und ab bewegt
- umgekehrtes Prinzip: schwimmender Fisch

### Schwingungen kleiner Amplitude:

- höhere Frequenz von 5 Hz bis 100 Hz
- Vibrationen / «every day stress»
- führt zu Materialermüdung
- einzelne Drähte brechen
- Tragfähigkeit gefährdet
- Gegenmaßnahme: zusätzliche mechanische, unsymmetrische Dämpfer wie «Stockbridge» oder als Bündelabstandshalter

## 6.3 Hochtemperaturseile

### konventionell:

- Betriebstemperatur  $\leq 150^\circ\text{C}$
- erhöhter Durchhang

### High Temperature Low Sag (HTLS):

- Betriebstemperatur  $> 200^\circ\text{C}$
- geringer Durchhang
- bei höherer Strombelastbarkeit
- hohe Kosten
- ungeklärtes (Alterungs-) Verhalten
- technisch/wirtschaftlich nur in Einzelfällen sinnvoll
- bei genehmigungspflichtigen Mastumbauten ist ein konventioneller Leitungsneubau sinnvoller

## 6.4 Leiterseilmonitoring

- Abbildung der witterungsabhängigen Strombelastbarkeit im Leitsystem
- Messtechnik zur Erfassung der Leiterseiltemperatur:
  - direkte Messung
  - indirekte Messung unter Nutzung von Wetterdaten

### Wärmebilanz Leiterseil:

- Sonnenstrahlung
- Stromverluste
- Abstrahlung
- Konvektion

### Bewertung Leitungsmonitoring:

- wetterabhängige regionale Erhöhung der Übertragungsfähigkeit von Freileitungen
- wegen des stärkeren, kühlenden Windes besonders für Nord-Deutschland geeignet
- aufwändige messtechnische Infrastruktur erforderlich

## 7 Grundlagen der Schutztechnik

z.B. FI-Schutzschalter im Haushalt

### Eigenschaften des Netzschutzes:

- schnell
- sicher
- selektiv

**Hauptschutzbereiche:**

- Generatorschutz
- Transformatorschutz
- Leitungsschutz
- Sammelschienenschutz

**Veränderungen der Messgrößen bei Fehlereintritt:**

- Spannung  $U$  ↓: Unterspannungsschutz
- Strom  $I$  ↑: Überstromschutz
- Impedanz  $Z$  ↓: Distanzschutz
- Stromrichtung  $\curvearrowright$ : Vergleichsschutz
- $\cos(\varphi)$ : winkelabhängige Z-Anregung
- Generatordrehzahl  $n$ : Frequenzschutz
- Unsymmetrie  $U_0, I_0, U_2, I_2$  ↑: Schiefastschutz

**Schutzstaffelung zwecks:**

- Selektivität
- Reserveschutz

**Distanzschutz:**

- Betriebsimpedanz aus Spannung und Strom bestimmen
- bei Fehlereintritt Verschiebung der Impedanz aus dem Last- in den Fehlerbereich
- technische Grenzen:
  - kurze Kabelstrecken
  - starke Zwischeneinspeisungen
  - Stromkreise mit mehreren Enden

**Differentialschutz:**

- Vergleich der Stromzeiger an allen Seiten des Schutzbereiches
- Kommunikationstechnik zwischen allen Seiten des Schutzbereiches

**Sammelschienenschutz:**

Aufsummieren der Ströme der einzelnen Abgänge und Kupplungen