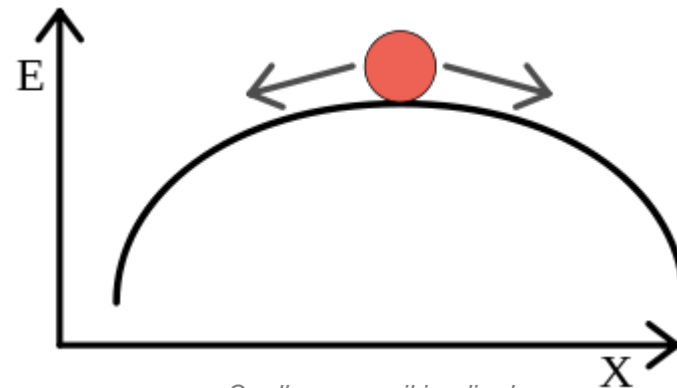


Stabilitätsverhalten von Windenergieanlagen

-

Einfluss von Netzresonanzen & messtechnische Lösungsansätze

- Stabilitätsproblem allgemein:
 - Ein System kehrt nach einer Störung nicht wieder in seinen Ausgangszustand zurück
 - → Ungleichgewicht



Quelle: www.wikipedia.de



Stabilitätsprobleme in Windparks

Onshore



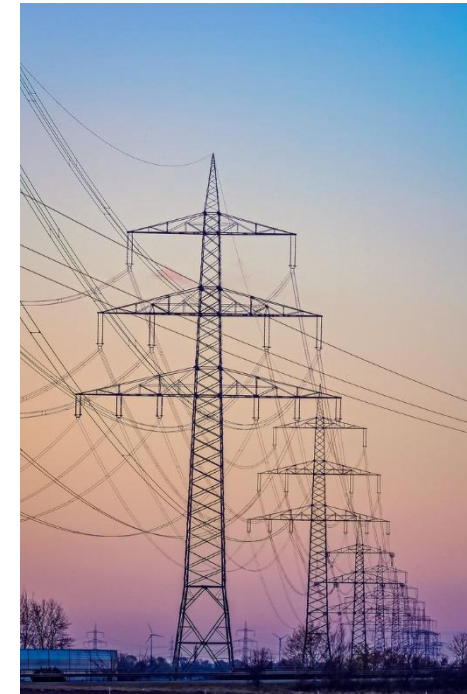
Offshore



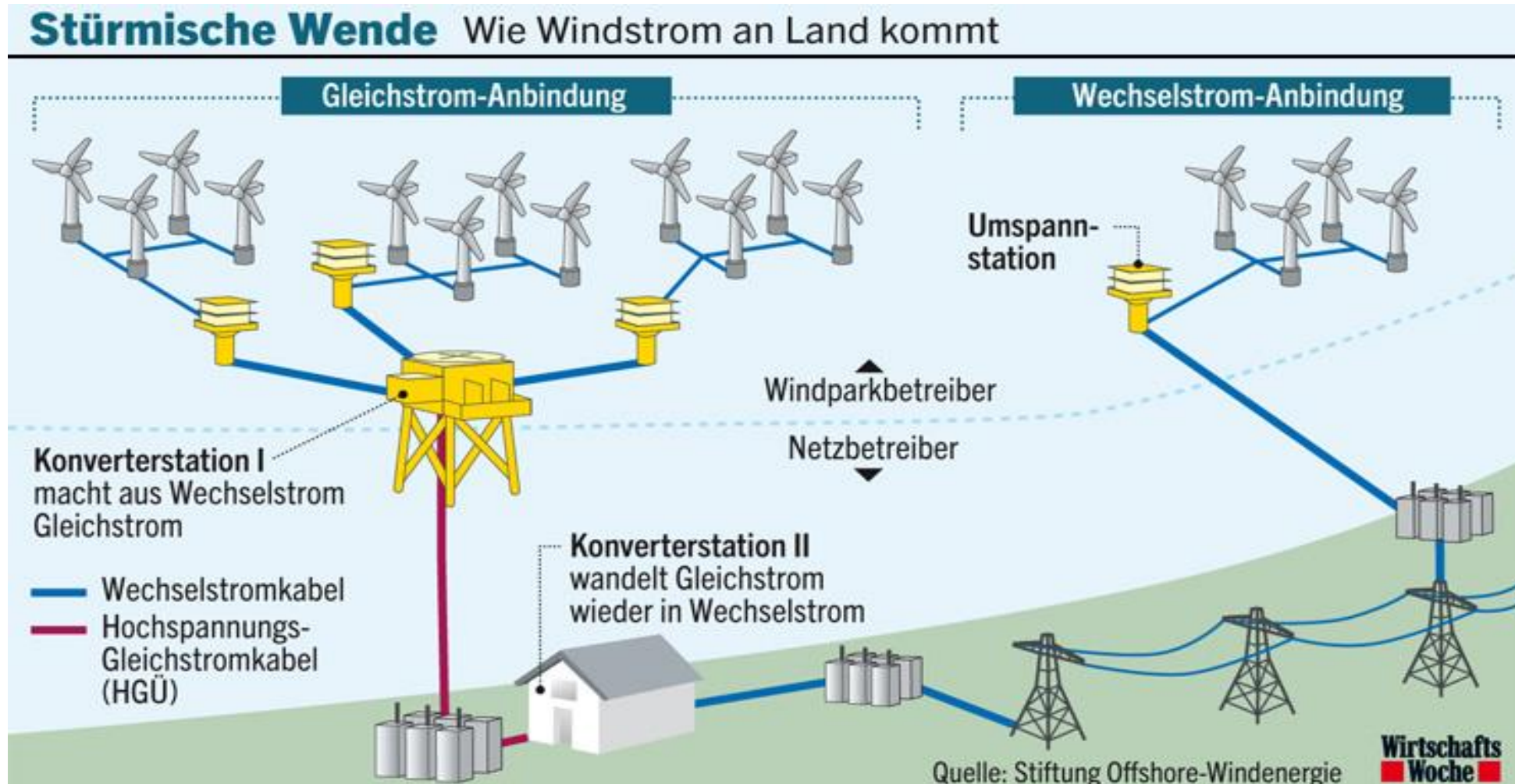
**Stabilitätsprobleme
bei der Einspeisung**



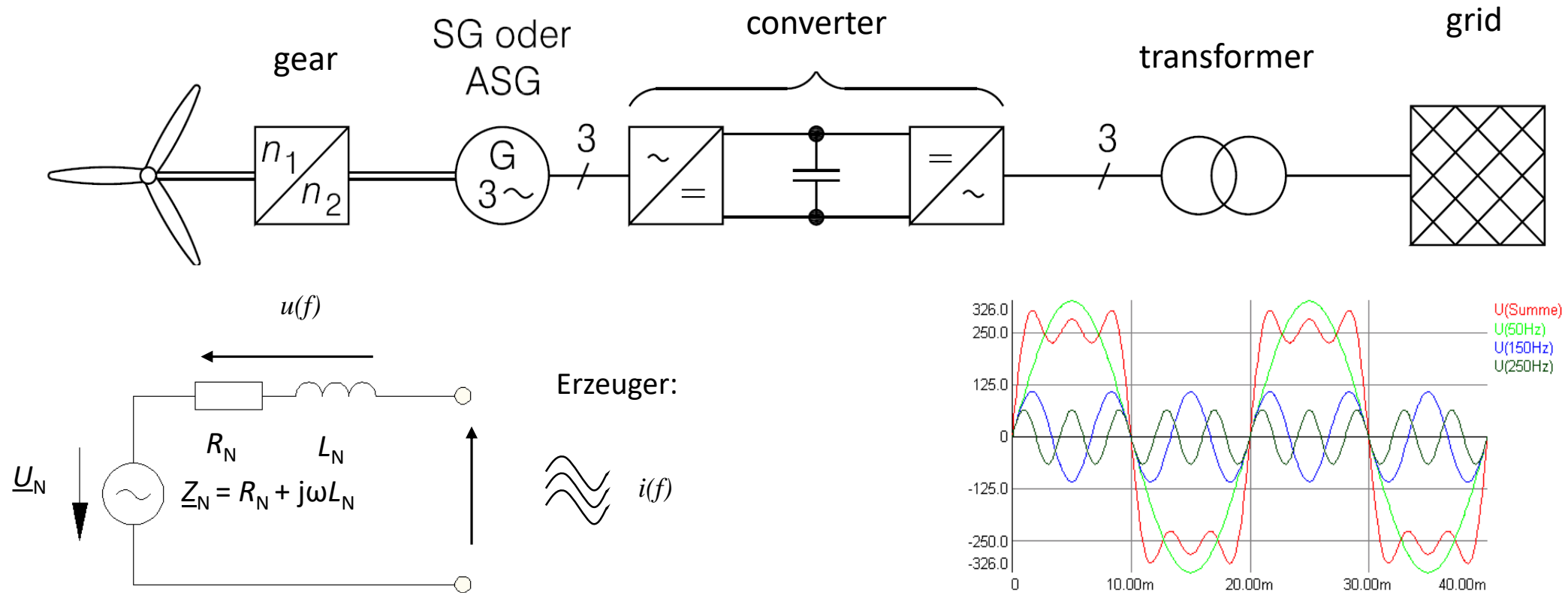
Stromnetz



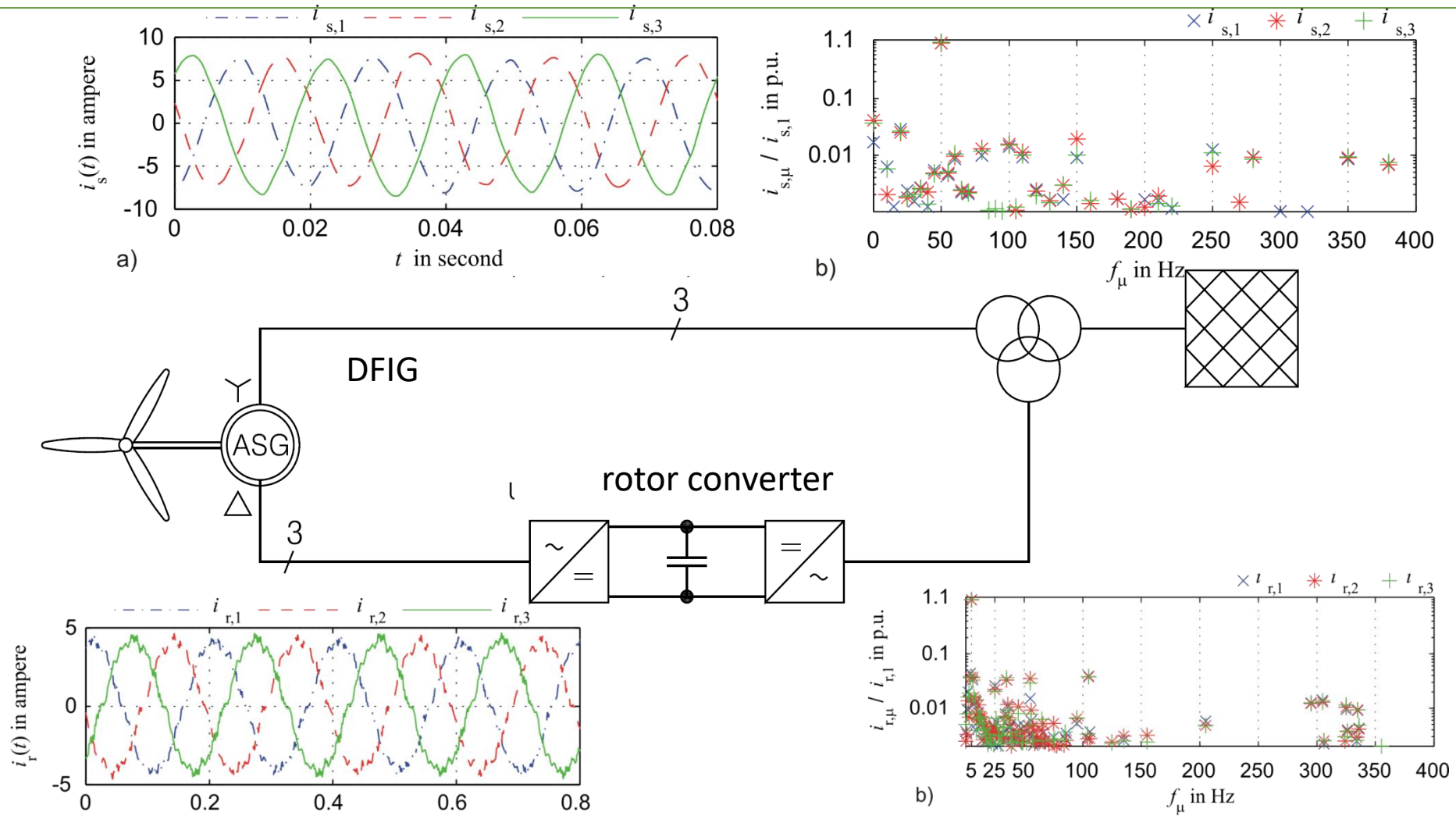
Stabilitätsprobleme in Windparks



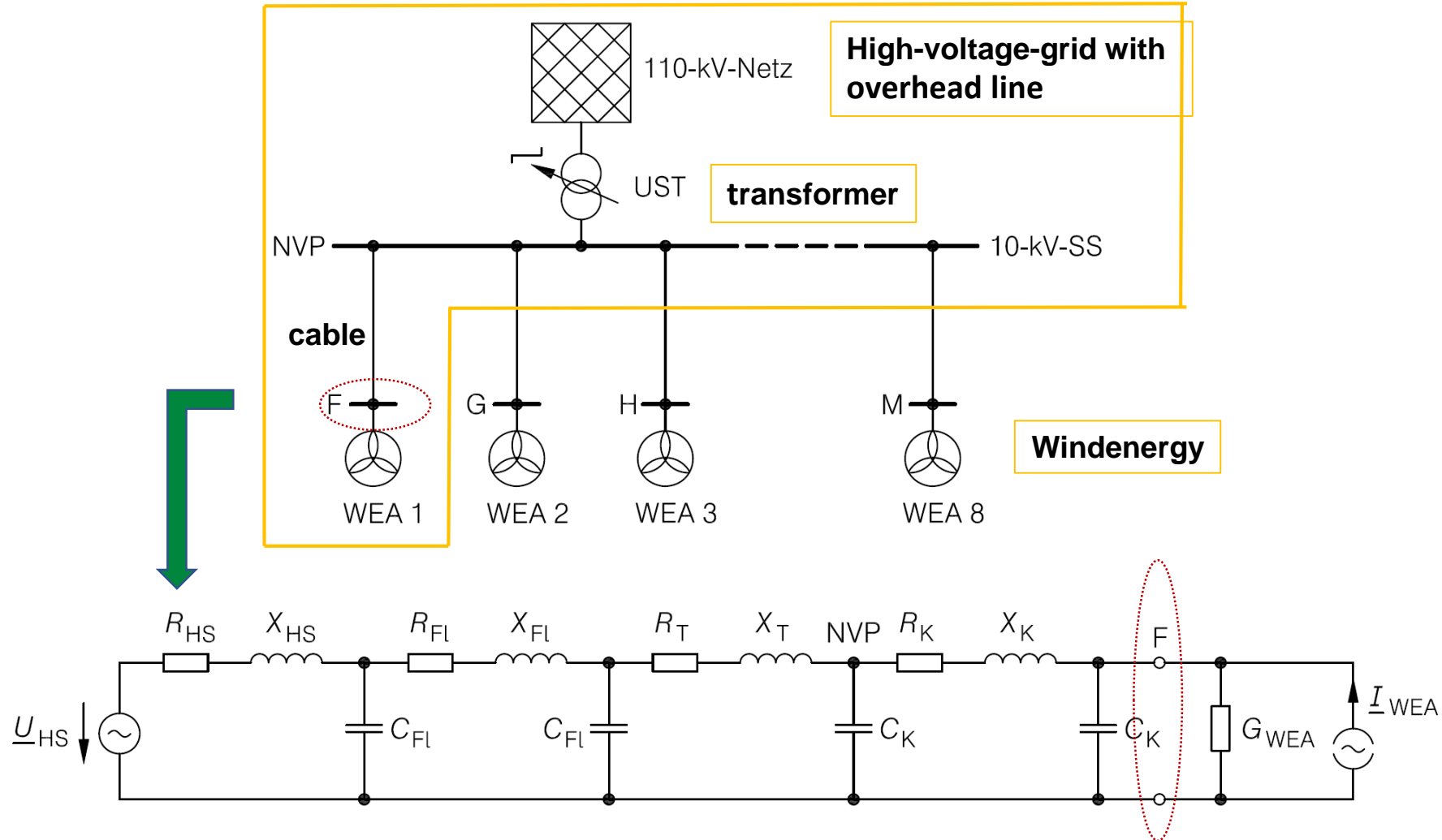
Power quality



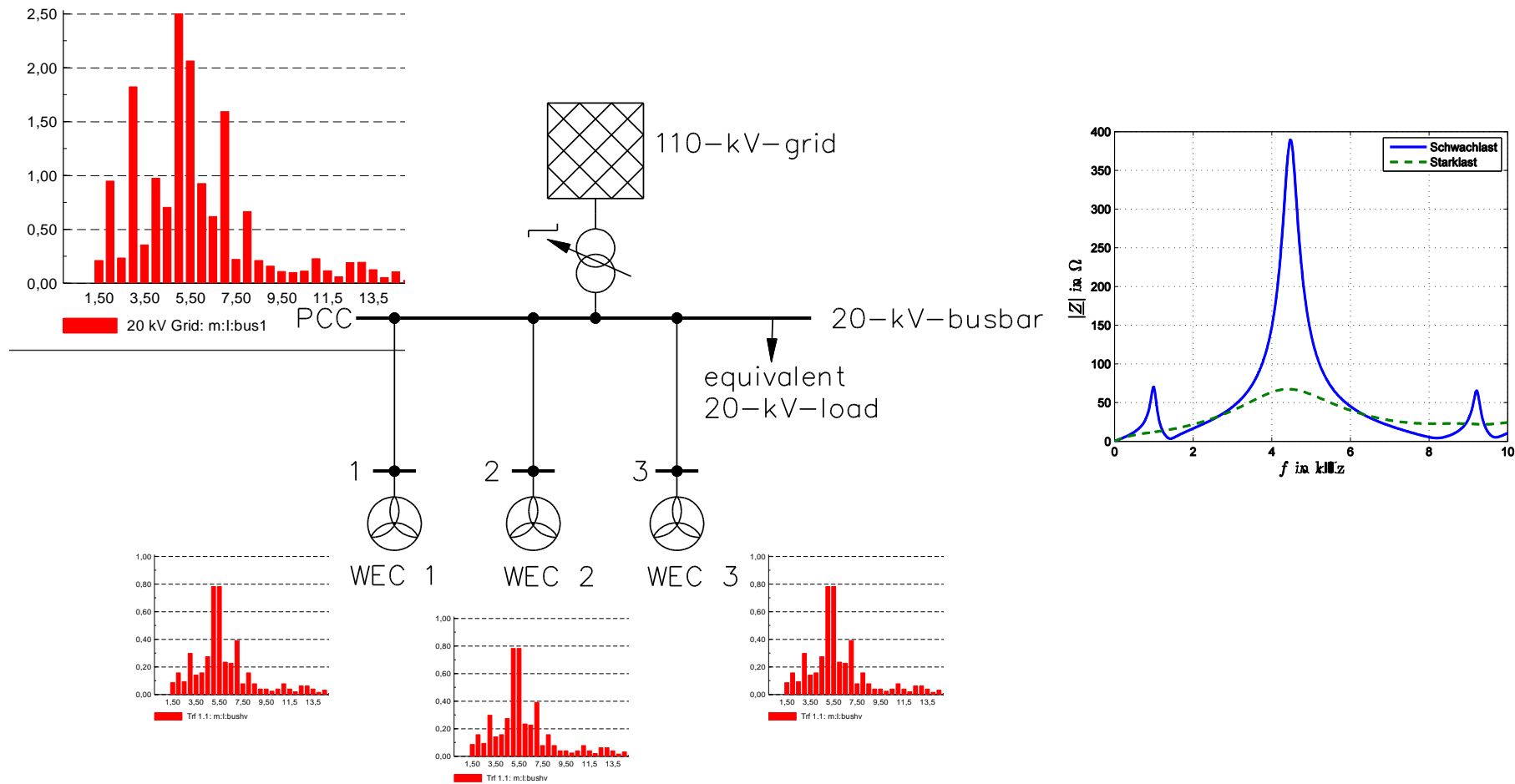
Oberschwingungsquellen



Influence of harmonics to the grid

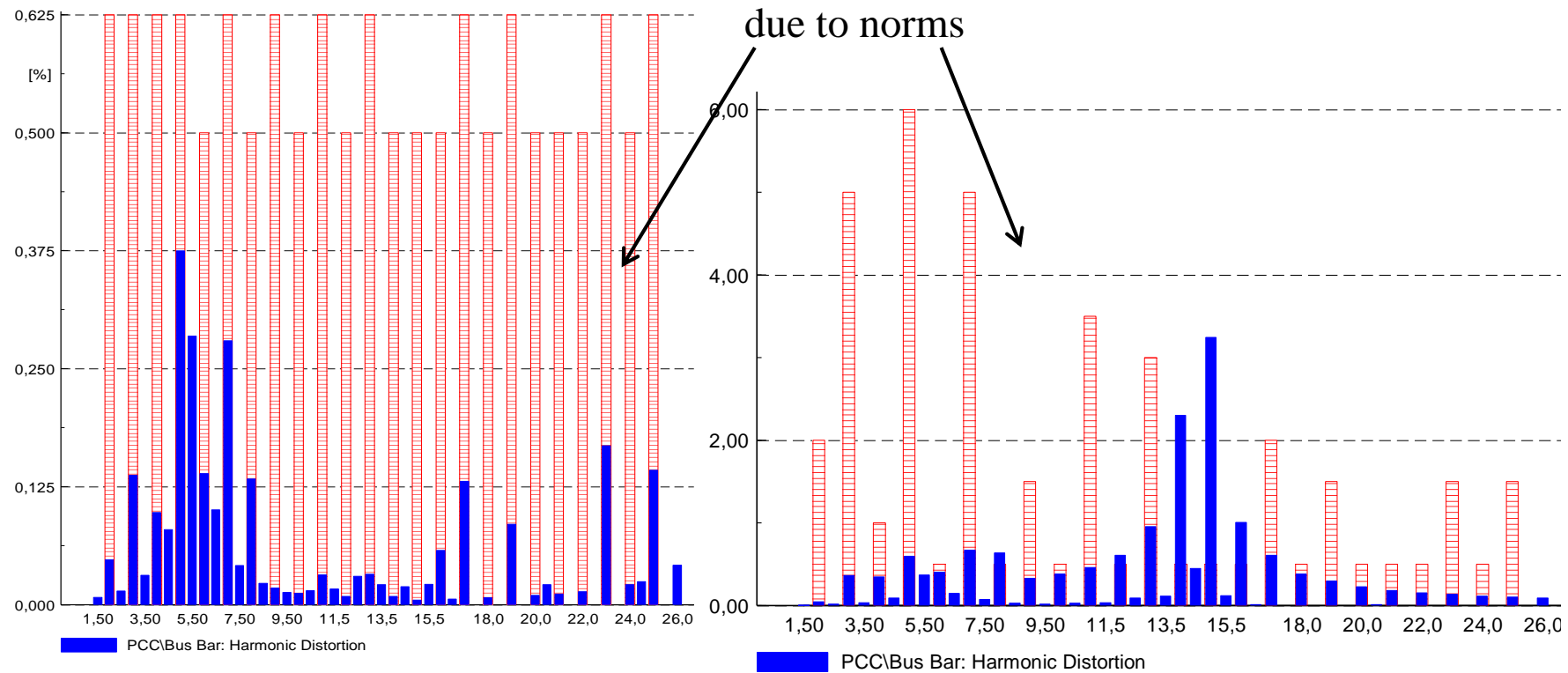


Propagation of harmonics



Propagation of harmonics

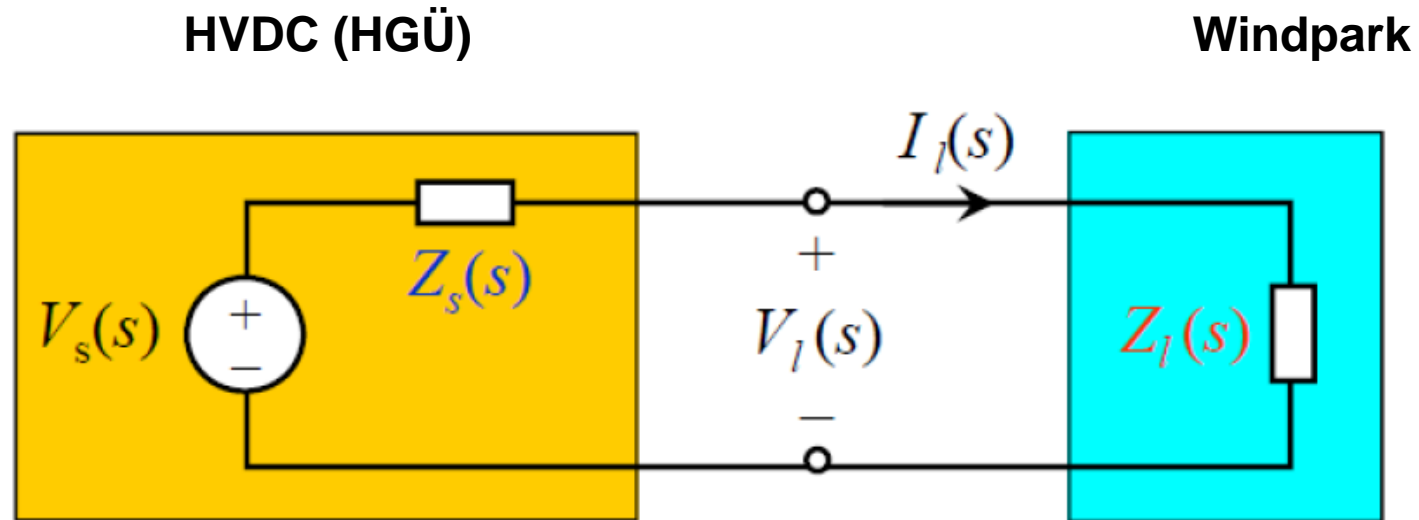
Limitation levels for harmonic voltages



High load situation

Low load situation

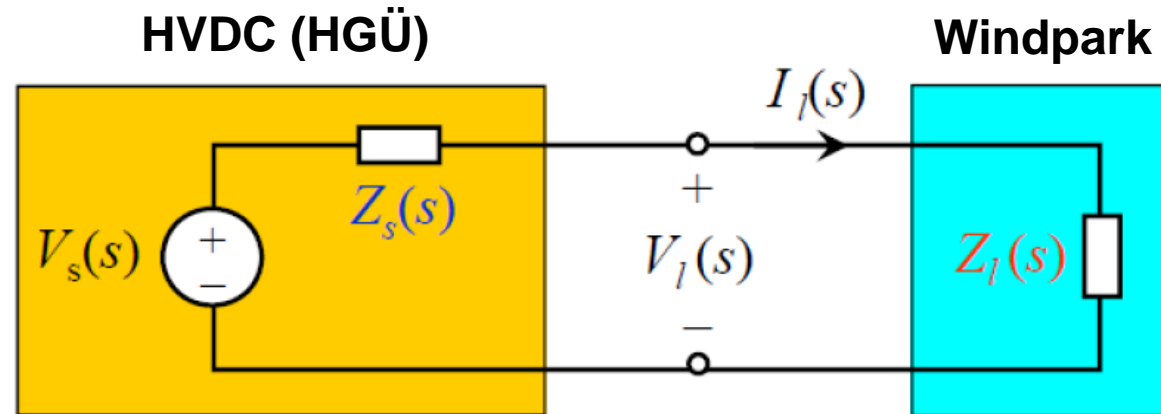
Geschlossener Regelkreis



Quelle: Dr. Jochen Jung, Tennet TSO

- $V_s(s)$... Ausgangsspannung der HVDC-Station
- $Z_s(s)$... Impedanz der HVDC-Station
- $V_l(s)$... Spannung am PCC
- $Z_l(s)$... Impedanz des Windparknetzes

Stabilitätskriterium



Quelle: Dr. Jochen Jung, Tennet TSO

Stabilitätskriterium

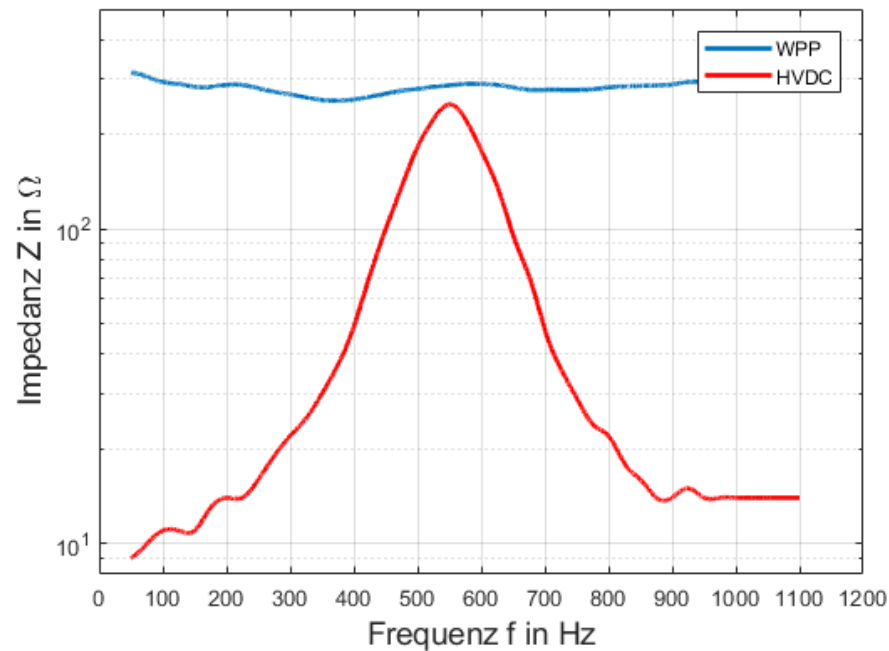


$$I_{\text{wea}} = \frac{V_s(s)}{Z_s(s) + Z_l(s)} = \frac{V_s(s)}{Z_l(s)} \cdot \frac{1}{1 + \frac{Z_s(s)}{Z_l(s)}}$$

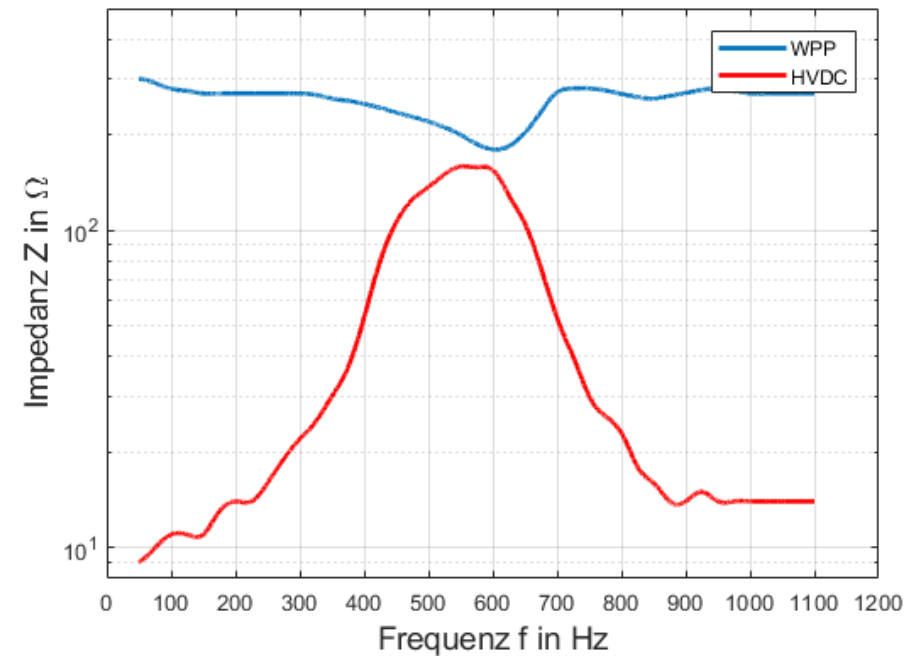
Nenner darf nicht 0 werden

Impedanz HVDC vs Windpark

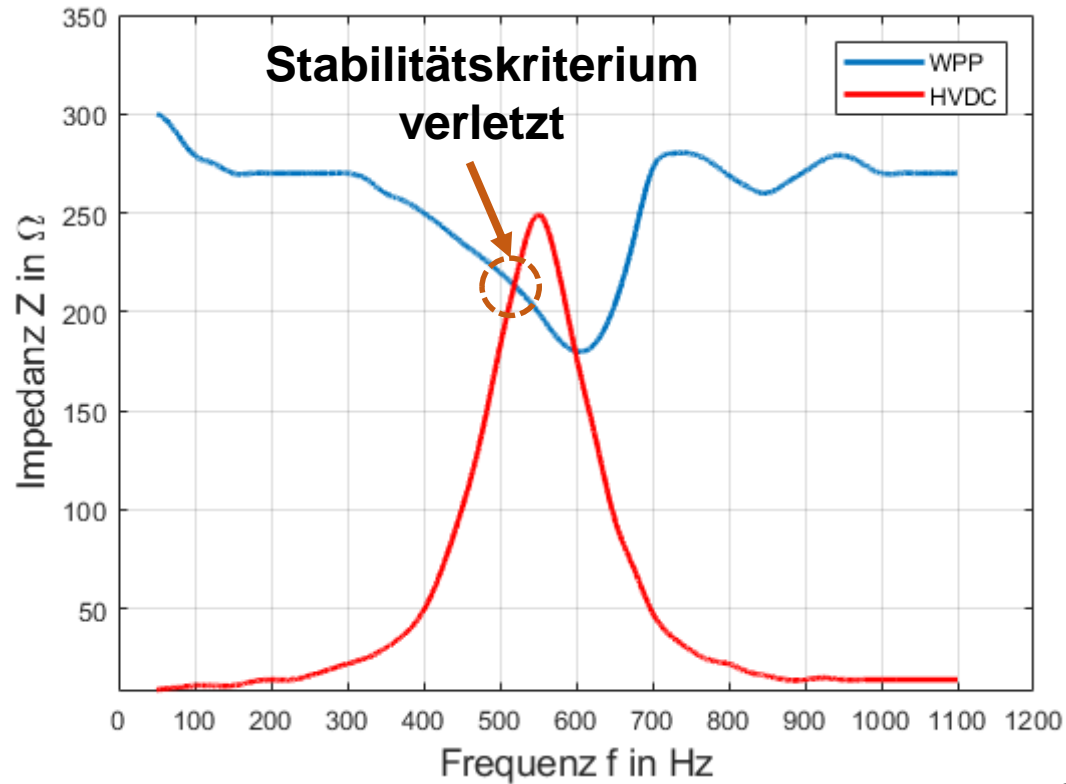
✓ **Stabilitätskriterium erfüllt**



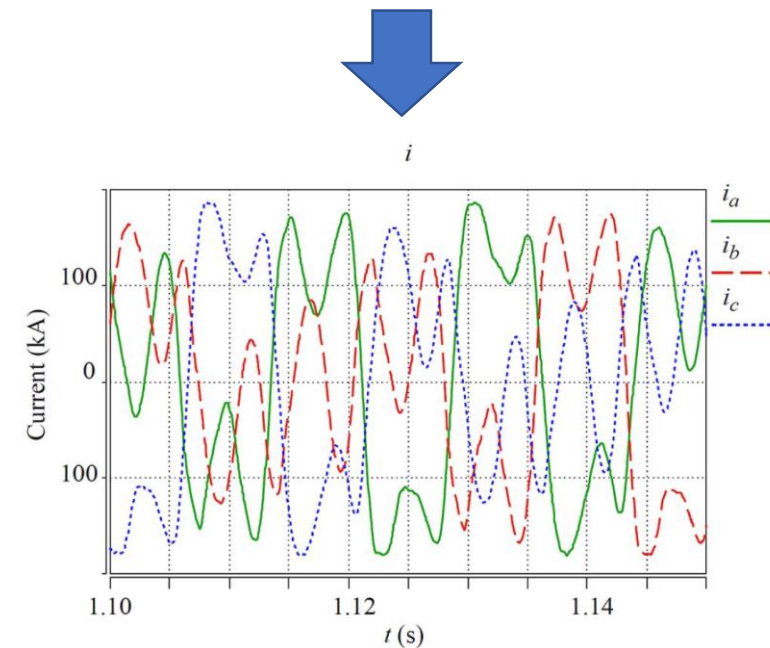
✓ **Stabilitätskriterium erfüllt**



Impedanz HVDC vs Windpark



- Stark verzerrter Strom
- Hohe Oberschwingungen



Quelle: Paper Hachao Liu, Jian Sun, IEEE Journal 12/14

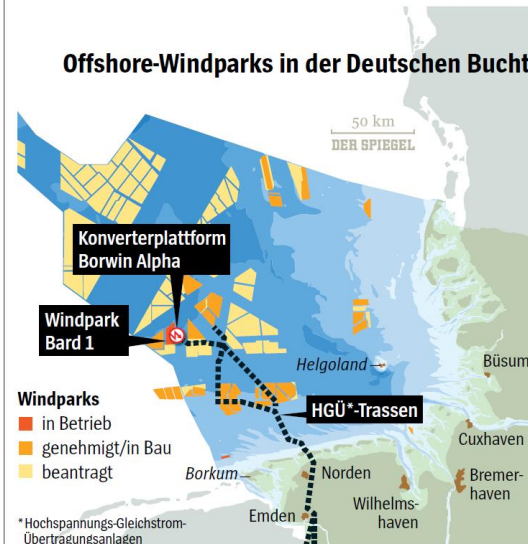
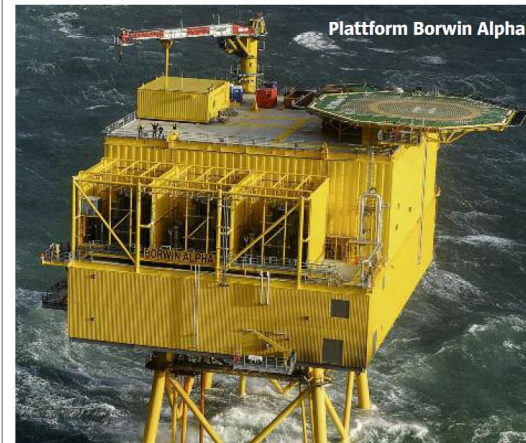
Folgen und Schäden: Bard 1, Borwin alpha

Knall auf hoher See

Ökostrom Elektrotechniker rätseln: Die Konverterstation eines Offshore-Windparks schmort durch. Sind alle im Bau befindlichen Anlagen davon betroffen?

Die Branche hofft, dass es sich bei dem Borwin-Desaster um ein Problem mit der darin verbauten Konvertertechnik handelt. Die gilt als veraltet und wird nicht mehr eingesetzt. Als Fehlerquelle haben die Ingenieure bislang sogenannte Oberschwingungen ausgemacht, die sich in dem Leitungsnetz des Windpark und der Konverterstation aufbauen. Diese tückischen Stromflüsse erzeugen in den Anlagen so heftige Spannungsauslässe, dass die für das Abfangen der Oberschwingungen installierten Filter versagen.

Die Ursache für die Oberschwingungen ist nicht leicht zu identifizieren. „Es gibt womöglich nicht den einzigen Schuldigen, sondern ein fehlerhaftes Funktionieren des Gesamtsystems“, analysiert Hans-Günter Eckel, Professor für Leistungselektronik an der Universität Rostock.



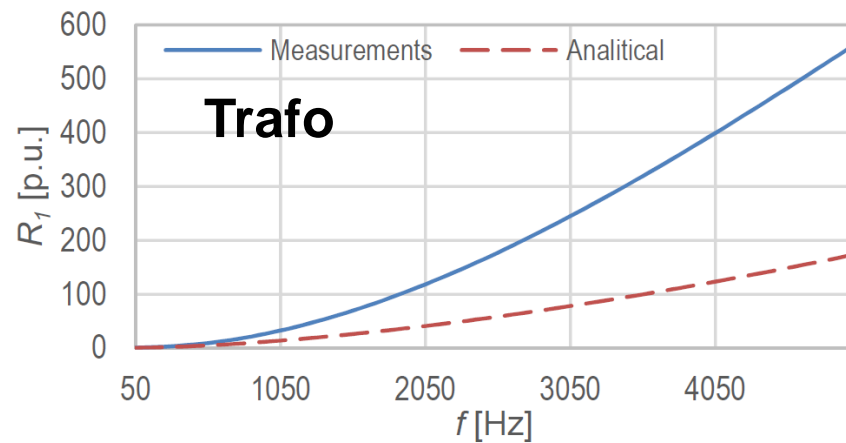
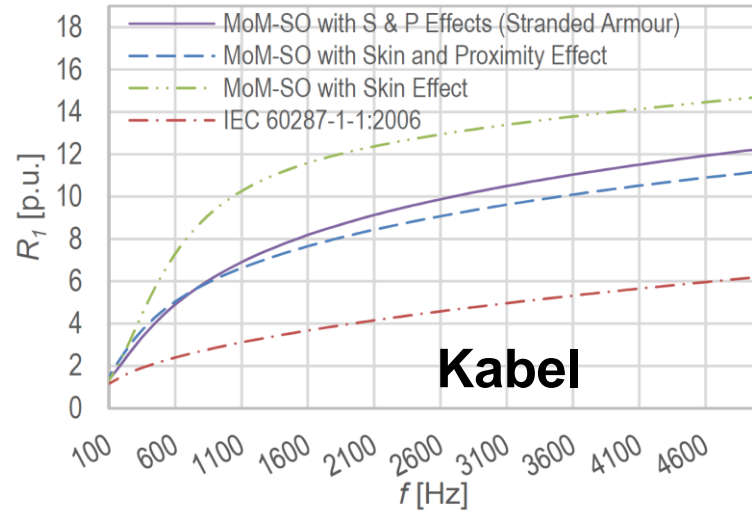
Fakten:

- 80 WEA x 5 MW
- 400 MW installierte Leistung
- 5 Monate Stillstand
- Einnahmeverlust: 1,8 Mio.€/Tag
- **Geschätzt 400 Mio.€ Verluste**

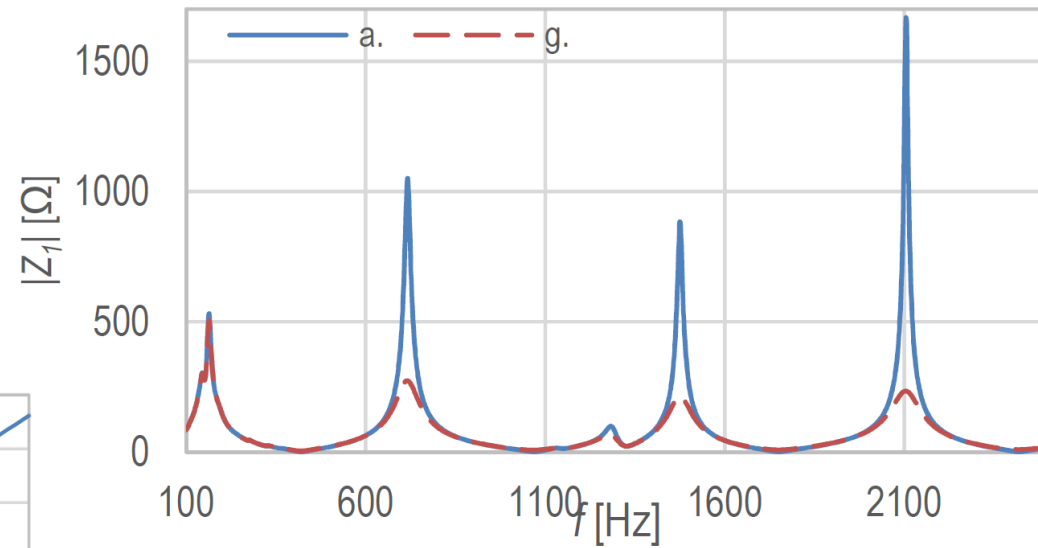
Quelle: der Spiegel

- Numerische Berechnung bzw. Simulation der Resonanzen der HVDC Konverterstation
- Virtuelle Dämpfung der kritischen Resonanzstellen durch Anpassung der Windanlagenregelung
- **Vorsicht:**
 - **Unsicherheiten bei der Modellbildung der Betriebsmittel**

Unsicherheiten bei der Modellbildung



Windpark



Quelle: Kocewiak, Dong Energy Wind Power, Denmark

Neuer Ansatz: Messung der Resonanzen

- **Forderung:**

- Messung von Netz- und Anlagenresonanzen
- Messergebnisse für die anschließende Simulation
- Anpassung der Anlagenregler (WEA, HVDC)
- Anpassung der Filteranlagen
- Verträglichkeitstests bei Oberschwingungen

- **Nutzen:**

- **optimaler und zuverlässiger Betrieb**
- **geringere Ausfallwahrscheinlichkeit**
- **höhere Wirtschaftlichkeit der Projekte**



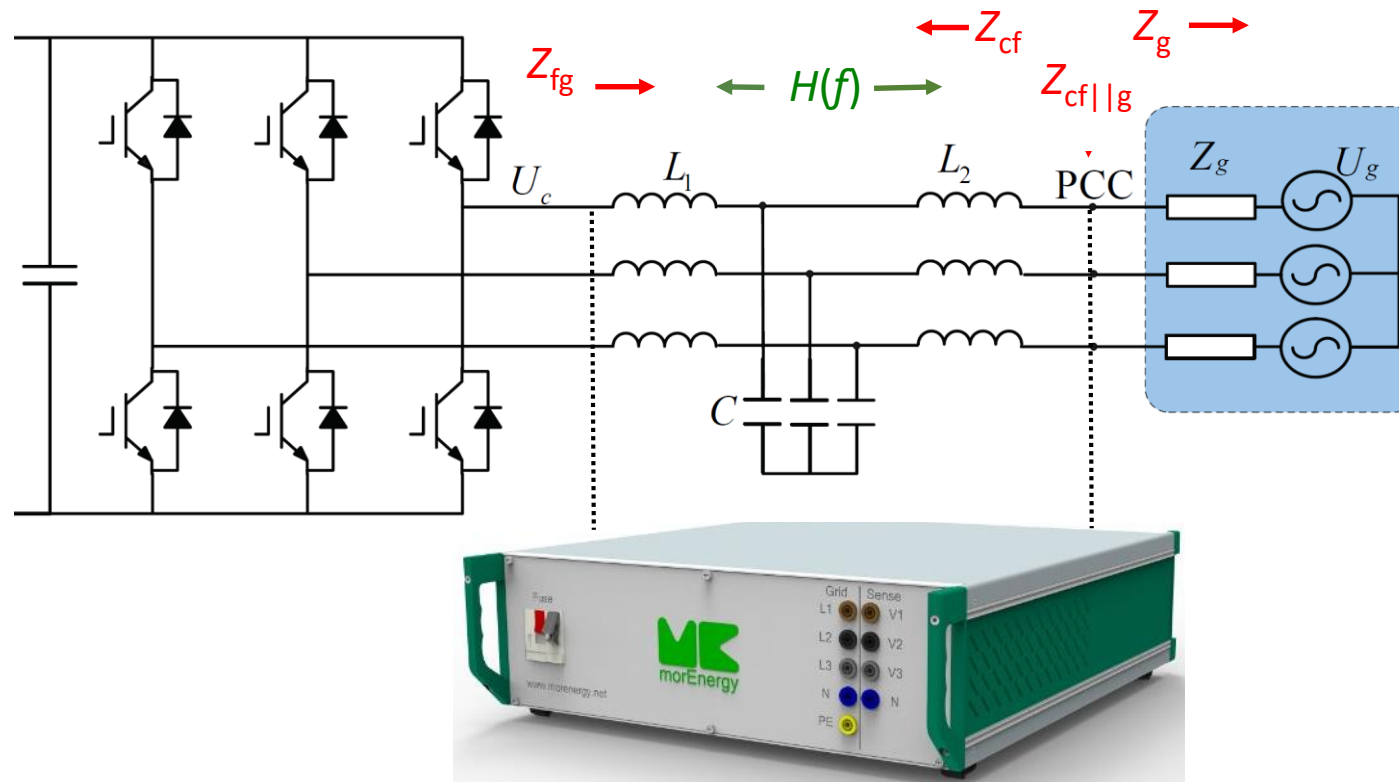
Offshore – Netzanschlussregeln (Entwurf 2017)

4.7.2	Oberschwingungen und Zwischenharmonische.....	34
4.7.3	Flicker	34
4.7.4	Interaktion von EZA mit Netzresonanzen (Oberschwingungsstabilität)	35
4.8	Verhalten der Erzeugungsanlagen bei Störungen	35
4.8.1	Betrieb bei Störungen	35
4.8.2	Allgemeine Vorgaben für das Verhalten bei Störungen	35
4.8.3	Verhalten bei Inselbetrieb	36
4.8.4	Verhalten bei Blockierung des HGÜ-Umrichters	36
4.8.5	Verhalten bei Frequenzabweichungen.....	37

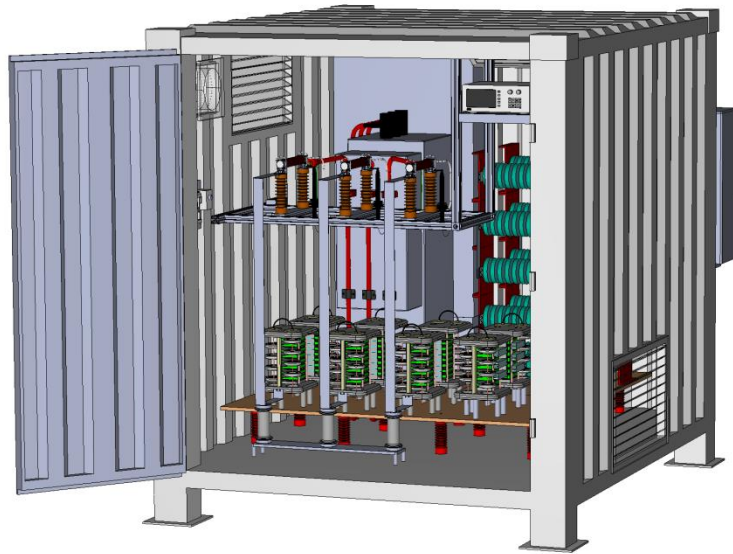
- **Impedanz-Kriterium als Stabilitätskriterium in der Branche akzeptiert**

ONIS-690V Anwendung an WEA-Umrichter

Harmonic impedance and transfer function determination



Mittelspannungsmesseinrichtung



Spezifikation

- Betriebsspannung: 10 kV bis 36 kV
- Leistung: 1 MW
- Hochgenaue Messtechnik
- Frequenzbandbreite: bis 20 kHz

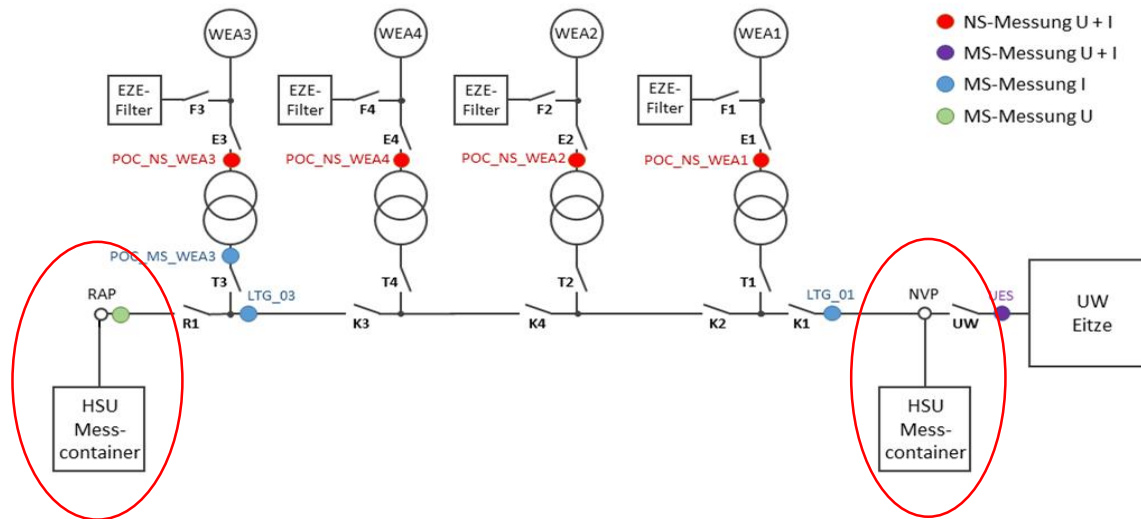
Einsatz vom Netzimpedanzmesssystem

- Einsatz morEnergy Mittelspannungscontainer



Messungen an realen Windparks

4 Anlagen (Enercon E70-E4, 2,0 MW)

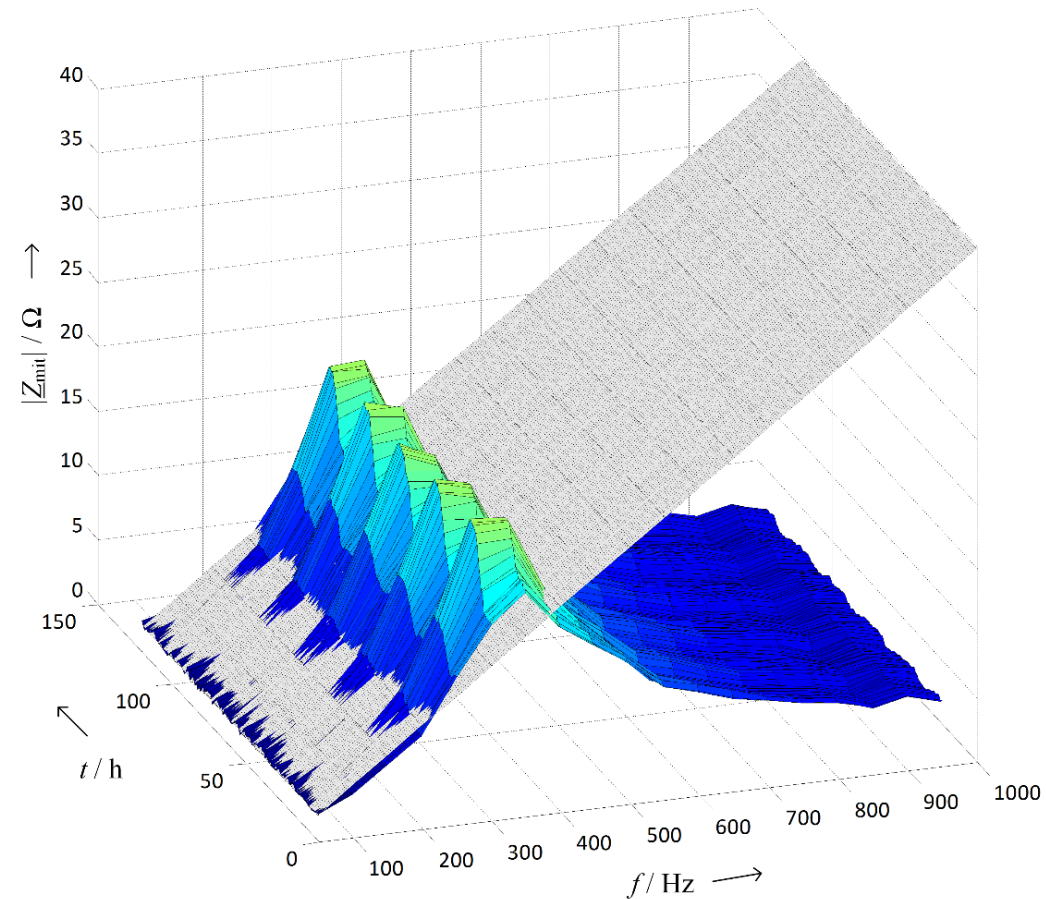


Netz Harmonie



Diskrepanz: Messung und Normimpedanz

Bis 1 kHz gemessen über 5 Tage



- **Instabilität** aufgrund ungünstiger Impedanzverhältnisse
- → Regler werden instabil:
 - starkverzerrte Oberschwingungsströme
- → Überbelastung der Betriebsmitteln
 - Kabel, Transformatoren, Filteranlagen
- Erkennung von Instabilitäten durch Simulation, allerdings ungenau
- Messung der Impedanzen von WEA, Kabel und HVDC
- Erarbeitung von Lösungsvorschlägen

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

