Hochschule Flensburg
University of Applied Sciences

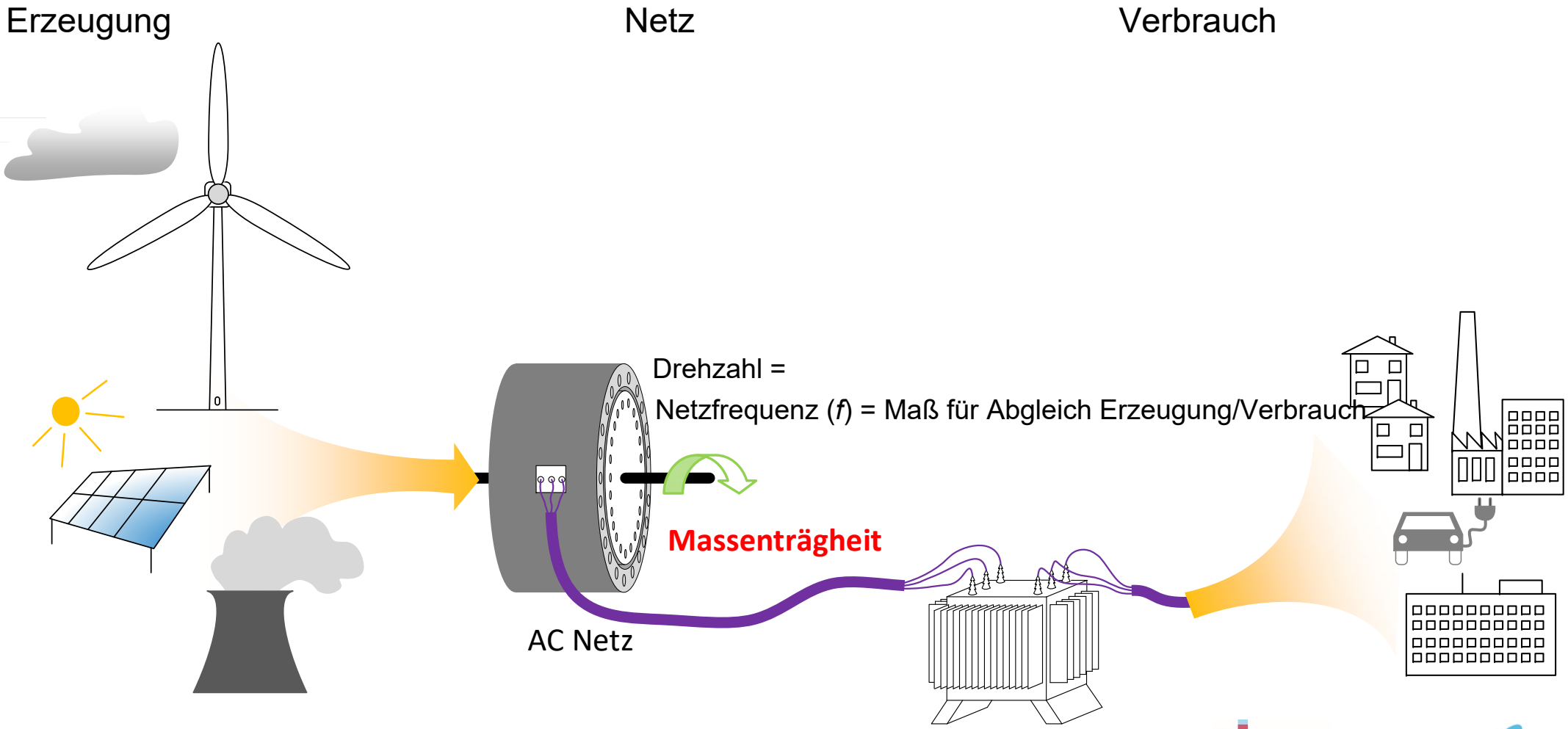
Wind Energy Technology Institute

# Wie können Windenergieanlagen kontinuierlich dem Netz Trägheit zur Verfügung stellen?

Prof. Dr. Clemens Jauch

09.11.2022

# Wechselspannungsnetze = rotierende Maschinen



# Wechselspannungsnetze = rotierende Maschinen

Erzeugung Netz Verbrauch

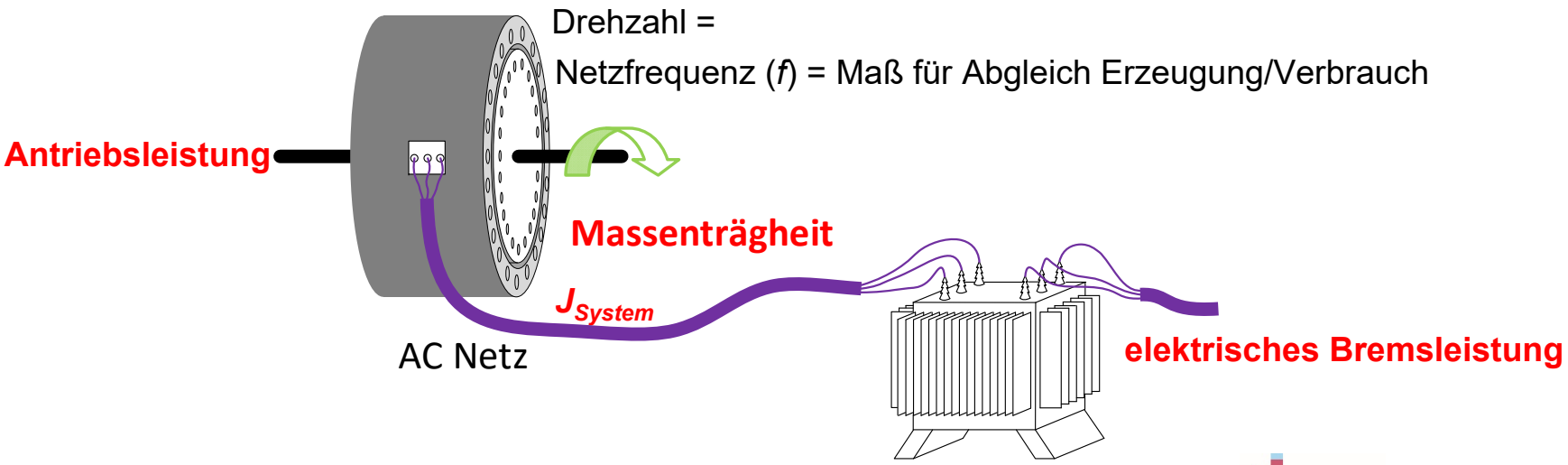
Zeitliche Veränderung der Netzfrequenz = $\frac{\delta f}{\delta t}$ = **R**ate **O**f **C**hange **O**f **F**requency (*ROCOF*)

$$ROCOF = \frac{\delta f}{\delta t} = \frac{P_{Erzeugung} - P_{Verbrauch}}{4 \cdot \pi^2 \cdot f \cdot J_{System}}$$

$P_{Erzeugung} > P_{Verbrauch}$ ➔ Netzfrequenz steigt

$P_{Erzeugung} < P_{Verbrauch}$ ➔ Netzfrequenz fällt

➔ Massenträgheit ist ausschlaggebend für Veränderungs**geschwindigkeit** (*ROCOF*)



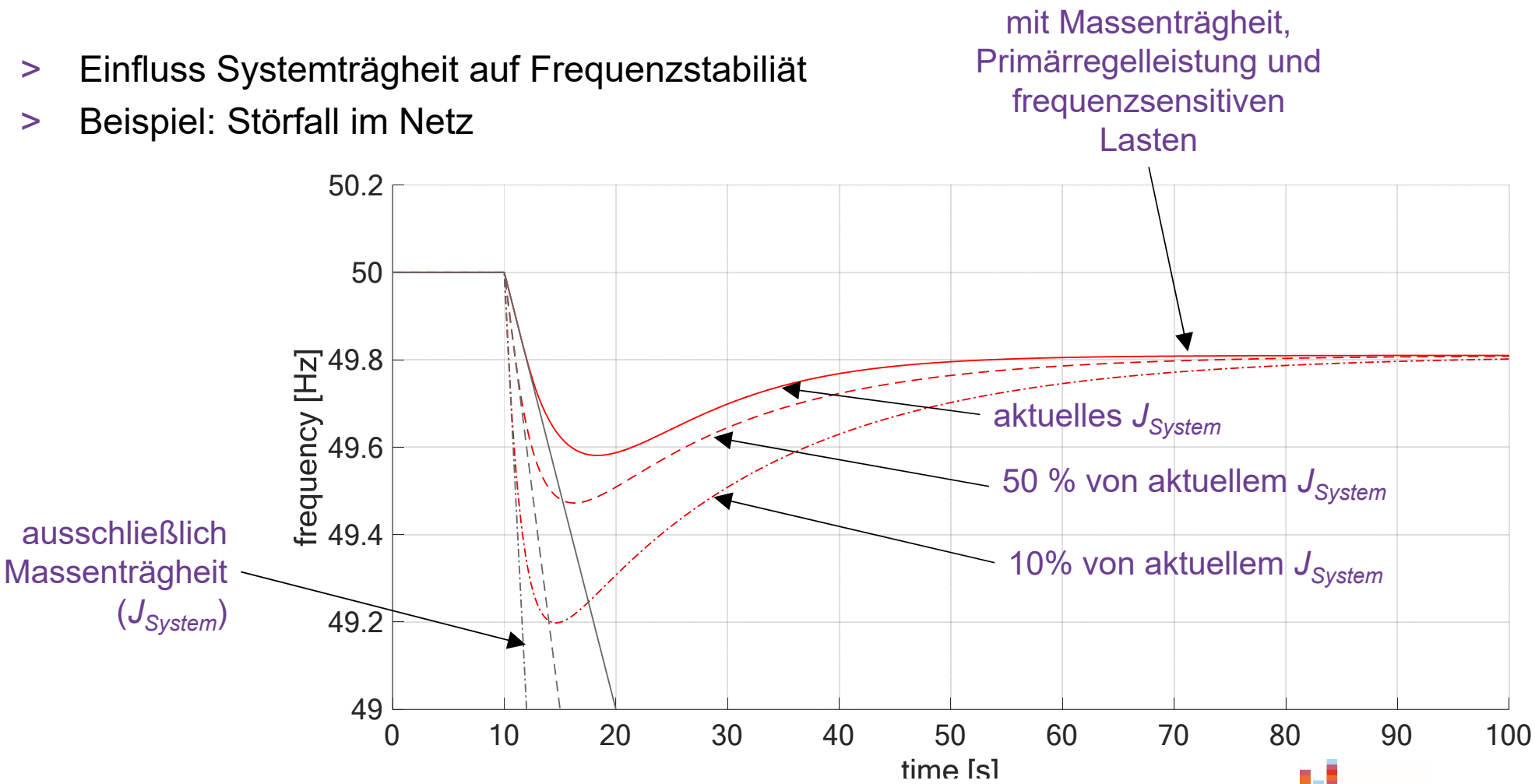



Hochschule Flensburg University of Applied Sciences

Wind Energy Technology Institute

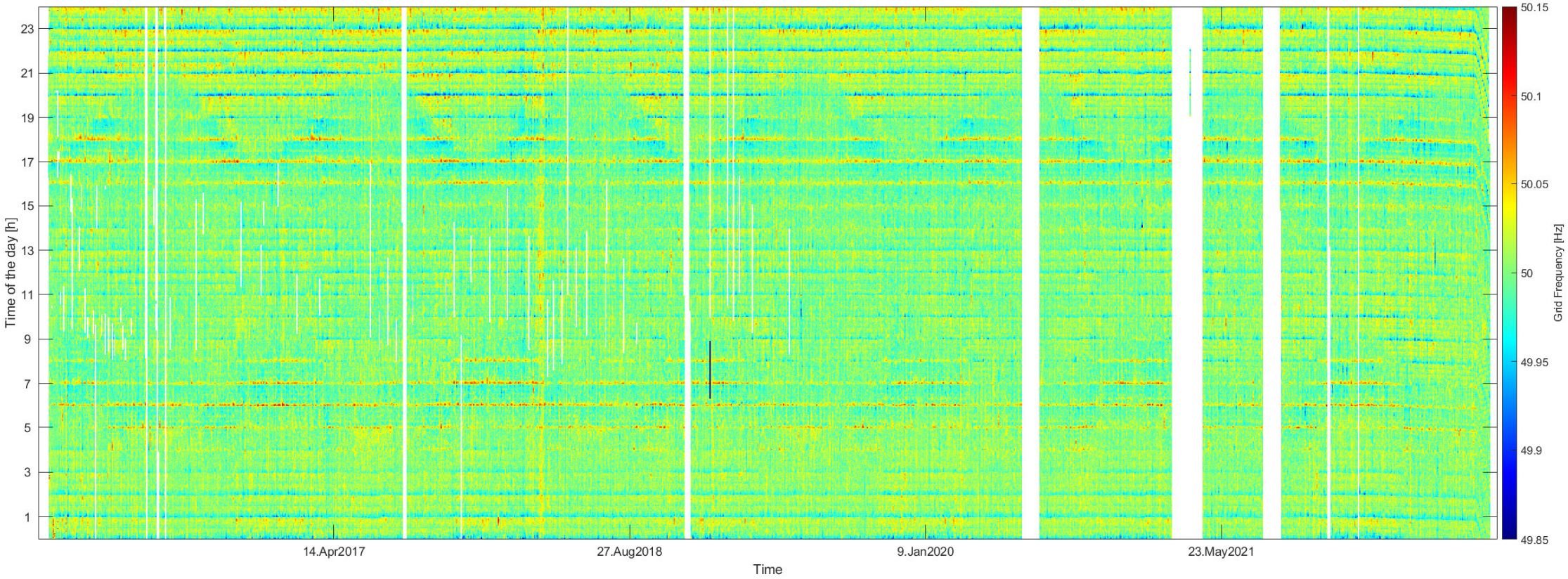
# Wechselspannungsnetze = rotierende Maschinen

> Einfluss Systemträgheit auf Frequenzstabiliät
> Beispiel: Störfall im Netz



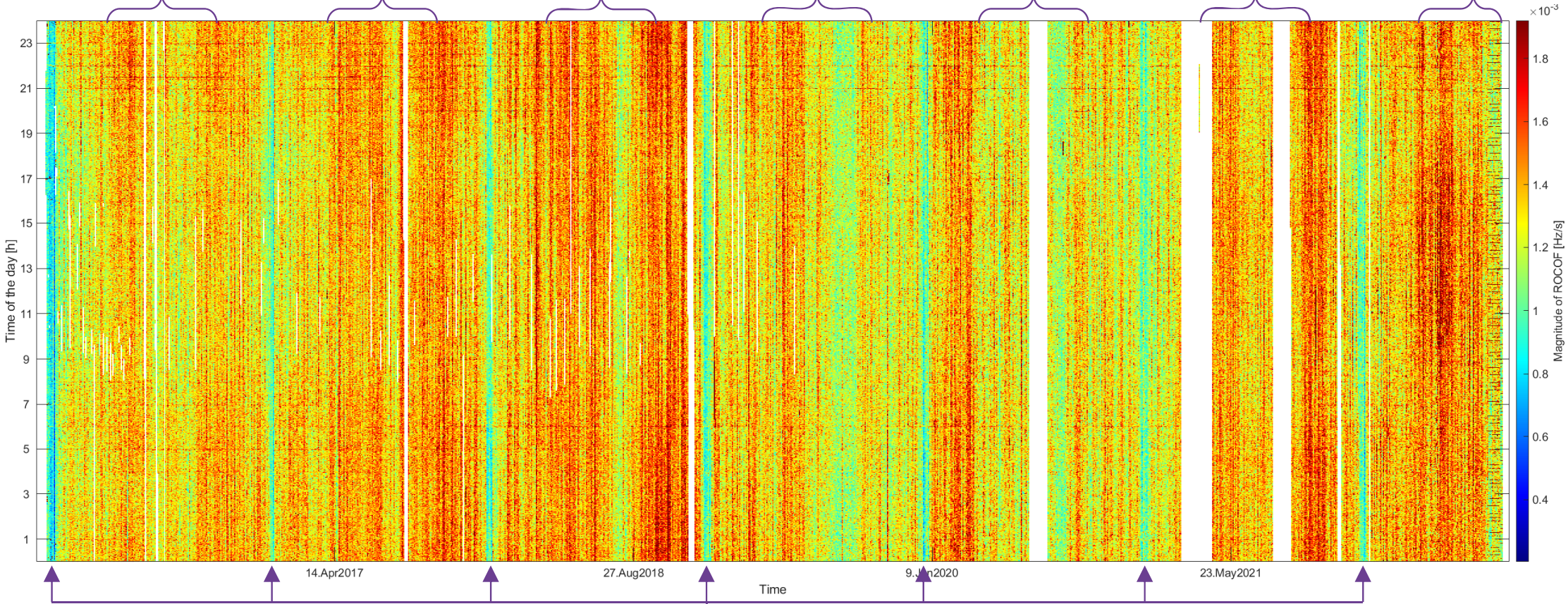
# Frequenz im zentraleuropäischen Netz (gemessen in Flensburg)

> Dezember 2015 bis August 2022



# ROCOF im zentraleuropäischen Netz (gemessen in Flensburg)

Sommerhalbjahre = geringere Netzlast und häufig höherer Anteil an erneuerbaren Energien




Weihnachtsferien

# Systemträgheit

> Trägheit (*J*) wird mit Trägheitskonstante (*H*) quanitfiziert:
> Trägheitskonstanten verschiedener Kraftwerkstypen [1,2]

$$H = \frac{E_{kin}}{S_{nenn}} = \frac{0.5 \cdot J \cdot \omega^2}{S_{nenn}}$$

| **Kraftwerkstyp** | ***H* [s]** |
|---|---|
| Wasserkraftwerke (klein) | 1 |
| Wasserkraftwerke (konventionelle Größe) | 3 – 4,5 |
| Pumpspeicherkraftwerke | 5,5 |
| Kernkraftwerke mit Dampfturbine | 6,3 |
| Gas-und-Dampf-Kombikraftwerke | 2,5 |
| Gasturbinenkraftwerke | 6 – 6,5 |
| Andere thermische Kraftwerke | 4 |
| moderne Windenergieanlagen | ??? |

Systemträgheit = Trägheit aller Netzteilnehmer (1 bis i)

$$H_{System} = \frac{\sum\left(H_i \cdot P_{rated,i}\right)}{\sum P_{rated,i}}$$

inhärent = 0 s

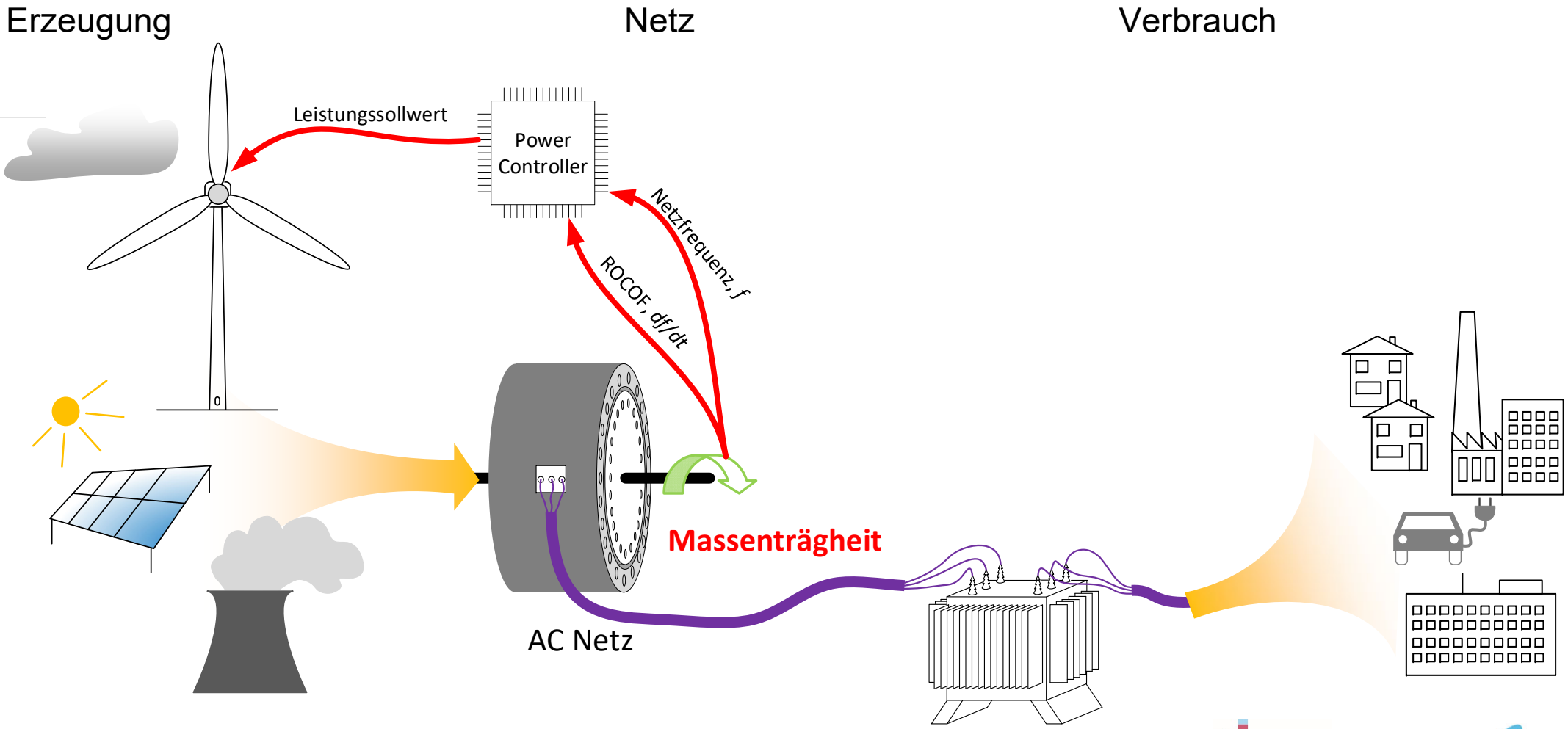
geregelt = synthetisch = frei wählbar

Quellen:
[1] Seneviratne, C.; Ozansoy, C. Frequency response due to a large generator loss with the increasing penetration of wind/PV generation-A literature review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 57, 659–668. DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.051
[2] Ørum, E.; Kuivaniemi, M.; Laasonen, M.; Bruseth, A.I.; Jansson, E.A.; Danell, A.; Elkington, K.; Modig, N. ENTSO-E Report - Future System Inertia, 2015, https://www.statnett.no/globalassets/for-aktorer-i-kraftsystemet/utvikling-av-kraftsystemet/nordisk-frekvensstabilitet/future-system-inertia-phase-1.pdf (verfügbar 31. November 2022)



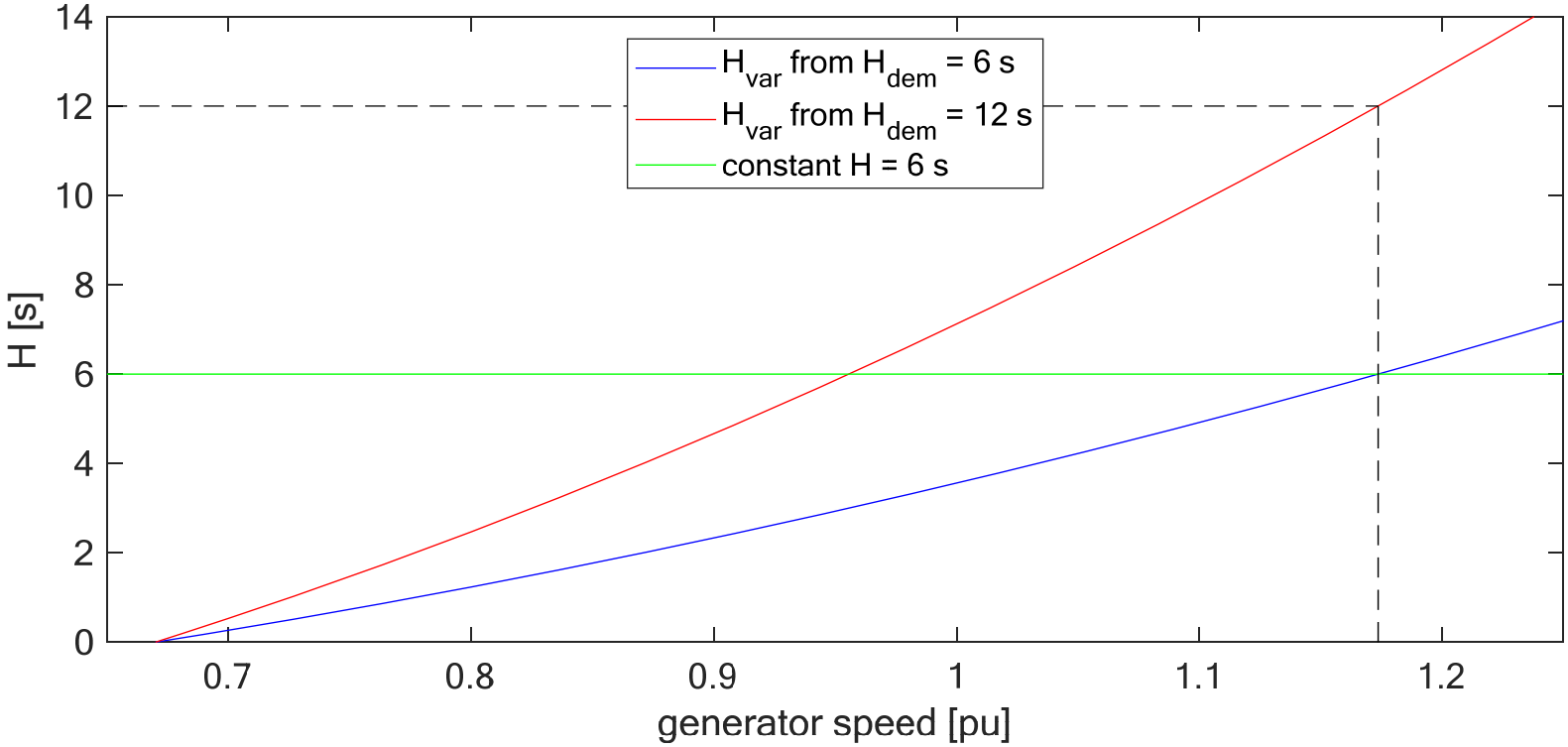
Hochschule Flensburg University of Applied Sciences
Wind Energy Technology Institute

# Synthetische Trägheit



# Synthetische Trägheit

- *Variable* H *Controller*
  - $H_{var} = \frac{\omega^2}{\omega_{rated}^2} \cdot H_{dem}$
  - $H_{dem}$ (von Netzbetreiber) gewünschte Trägheitskonstante (die bei Nennbetrieb erreicht wird)




Quelle:
Jauch, C.; Gloe, A., 'Simultaneous Inertia Contribution and Optimal Grid Utilization with Wind Turbines', Energies 2019, 12(15), 3013; DOI: 10.3390/en12153013

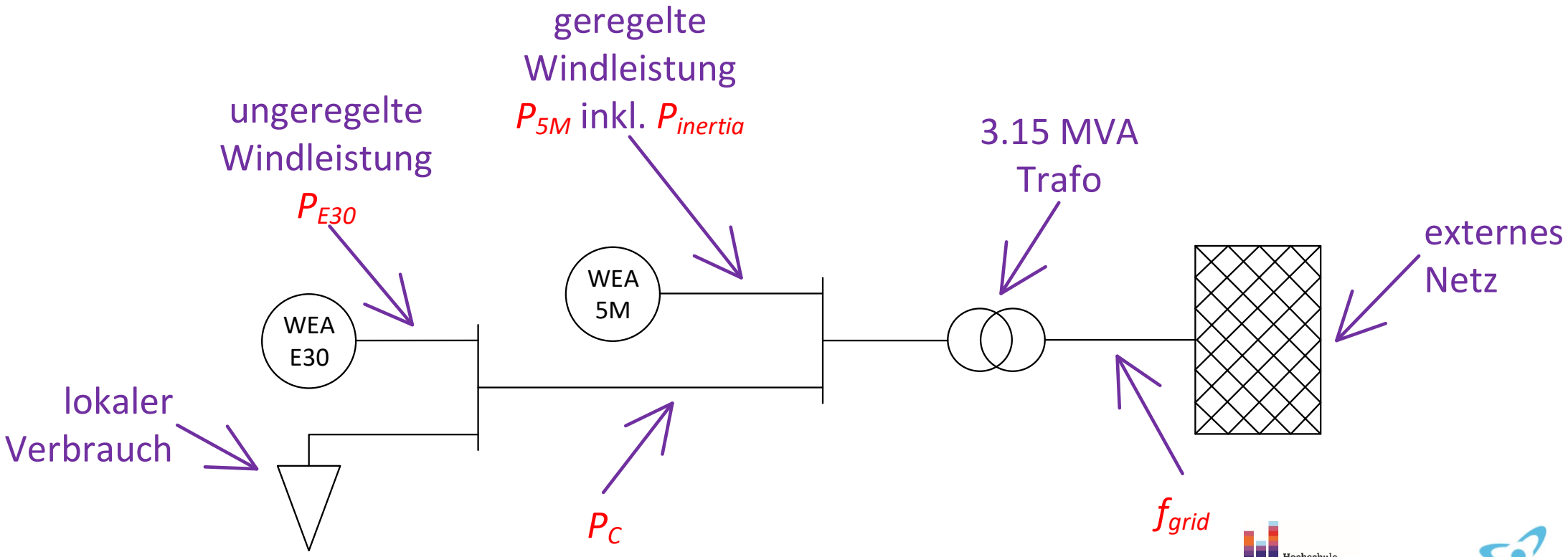
Hochschule Flensburg University of Applied Sciences

Wind Energy Technology Institute

# Synthetische Trägheit – Fallstudie

> Kontinuierliche Trägheitsbereitstellung mit einer Windenergieanlage an schwachem Netzverknüpfungspunkt

> Konstruiertes 24 Stunden Szenario mit Campus Flensburg



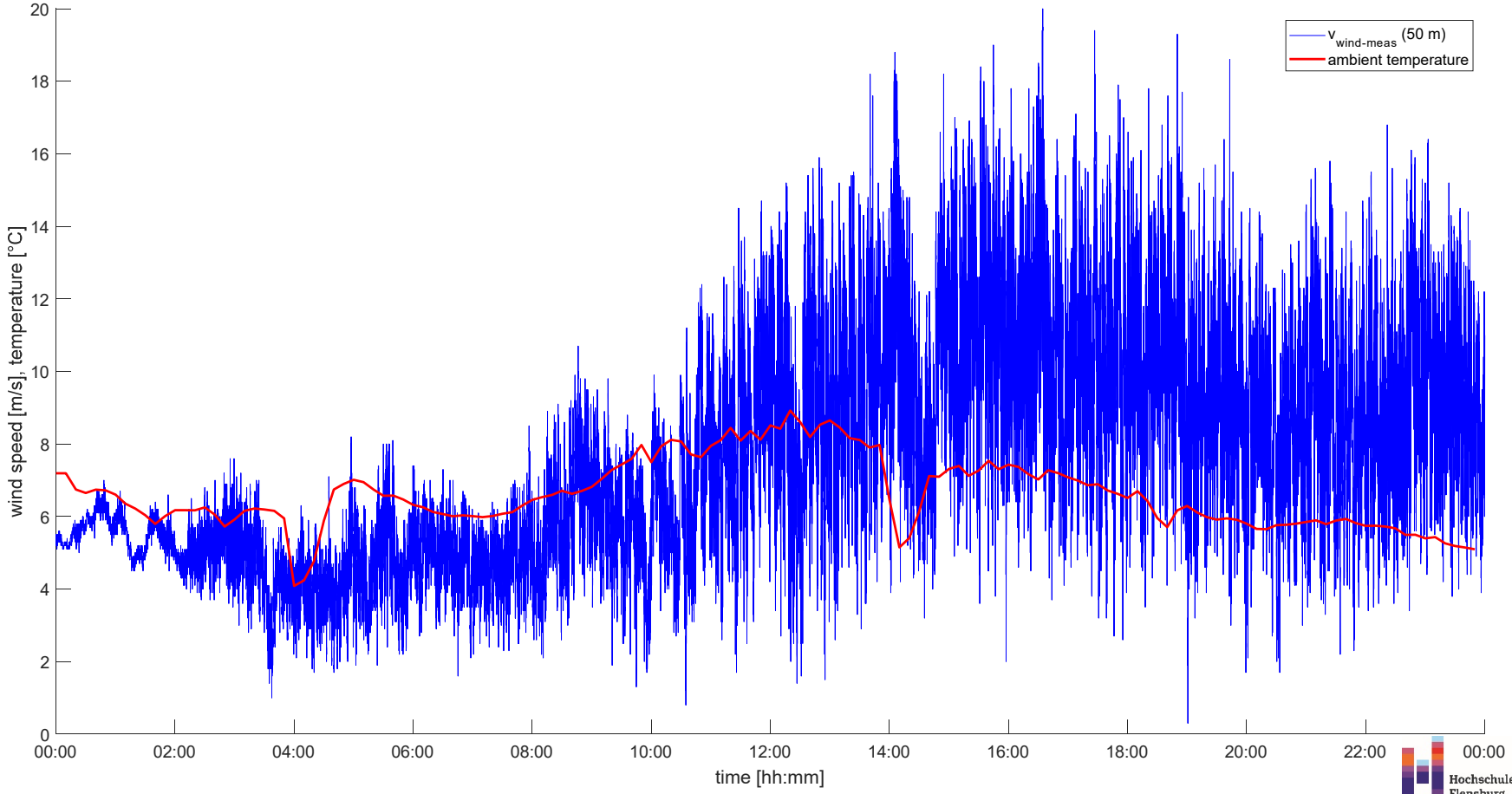



Hochschule Flensburg University of Applied Sciences

Wind Energy Technology Institute

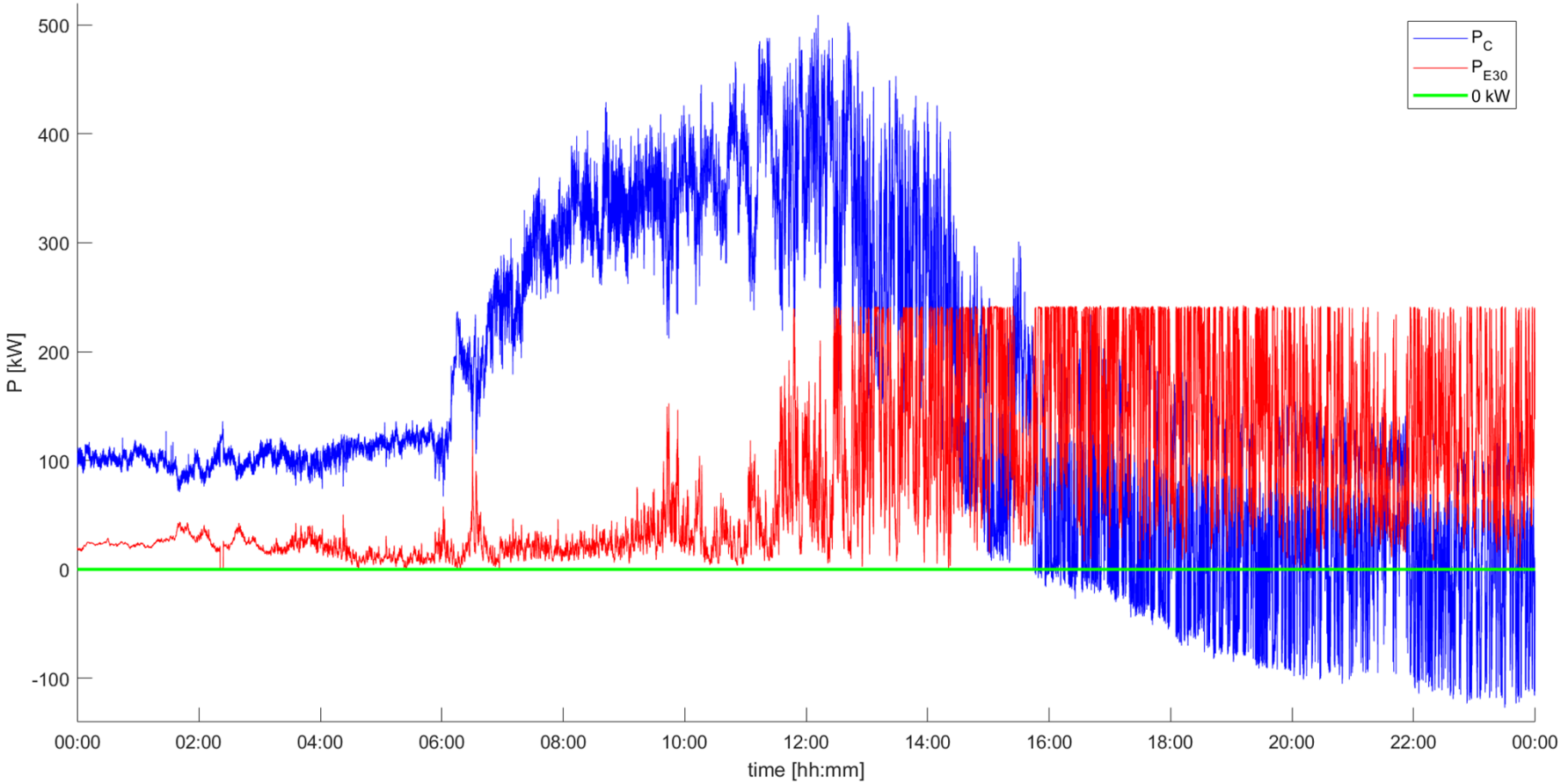
# Synthetische Trägheit – Fallstudie

> Gemessene Windgeschwindigkeit an betrachtetem Tag



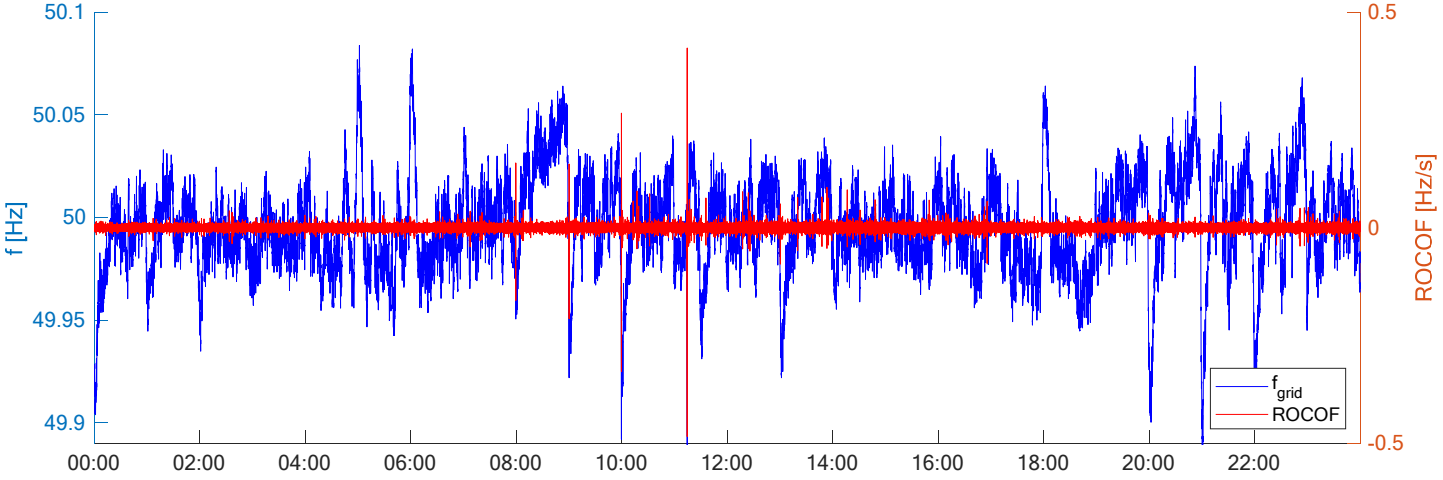
# Synthetische Trägheit – Fallstudie

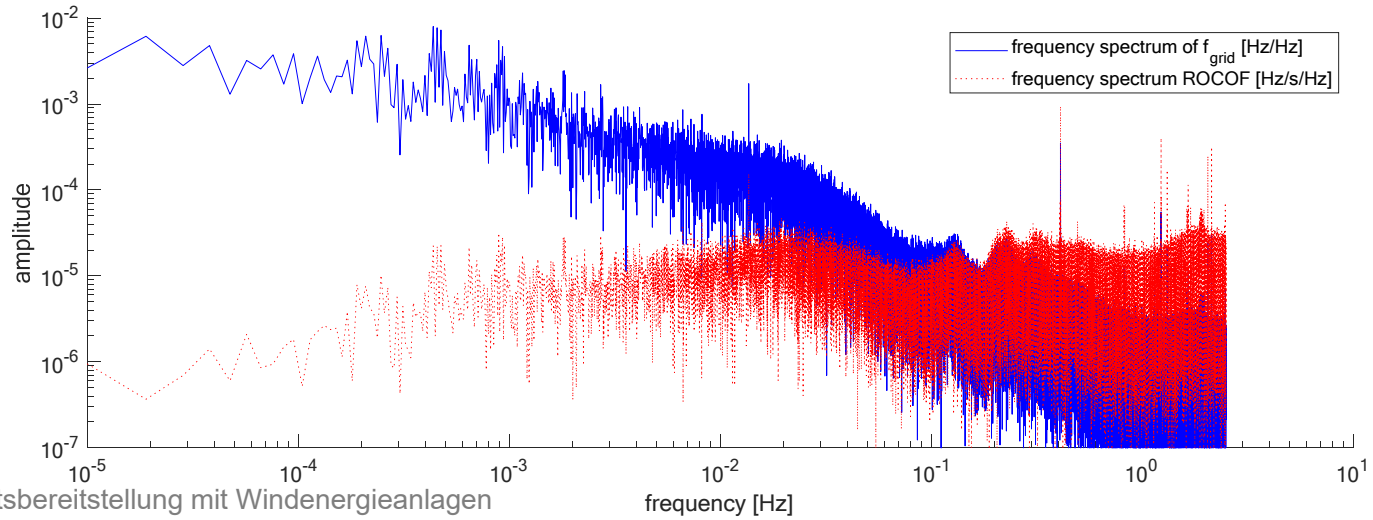
> Gemessene Lokale Leistungen an betrachtetem Tag



# Synthetische Trägheit – Fallstudie

> Gemessene Netzfrequenz und ROCOF an betrachtetem Tag



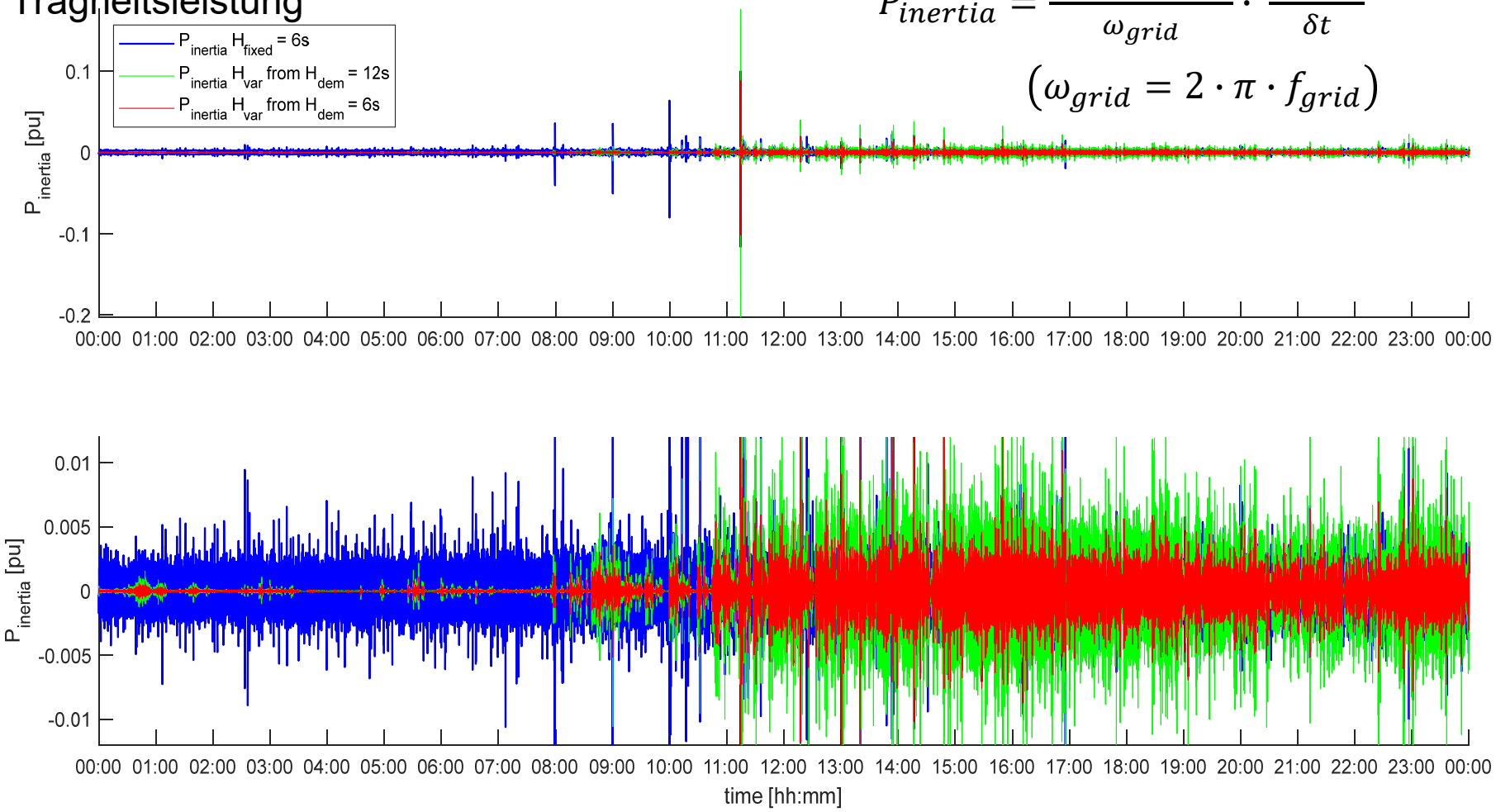



# Synthetische Trägheit – Fallstudie

> Simulierte Trägheitsleistung

$$P_{inertia} = \frac{2 \cdot H_{var} \cdot P_{rated}}{\omega_{grid}} \cdot \frac{\delta \omega_{grid}}{\delta t}$$

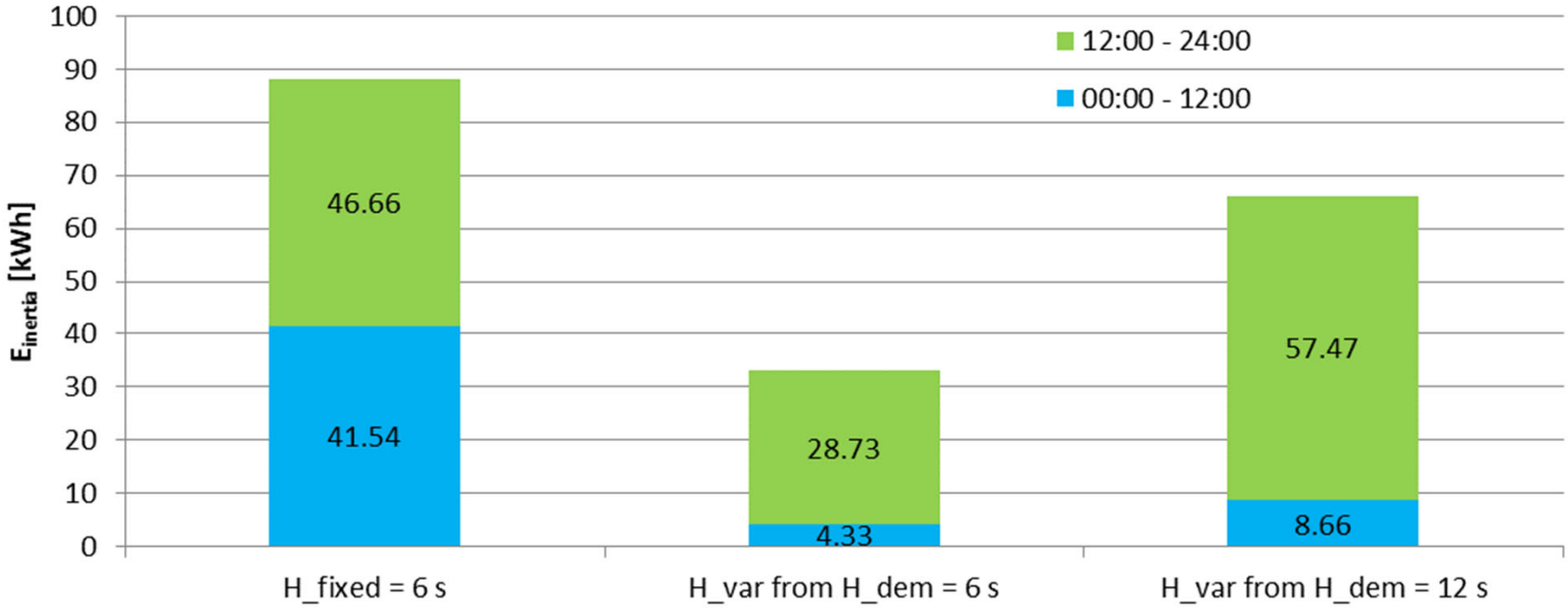
$$\left(\omega_{grid} = 2 \cdot \pi \cdot f_{grid}\right)$$



# Synthetische Trägheit – Fallstudie

> Simulierte Trägheitsenergie

$$E_{inertia} = \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{P_{inertia}{}^2}$$




> Energieertrag verringert sich um 0,006 % (bezogen auf Betrieb ohne Trägheitsbereitstellung)

# Fazit

> Trägheitsbedarf im Netz nimmt zu

> Windenergieanlagen können mit ihren rotierenden Massen Netzträgheit bereitstellen

> $H_{var}$-Regler bedient Bedarf an kinetischer Energie im Netz UND zuverlässigem Betrieb von Windenergieanlagen

Quellen:
Gloe, A.; Jauch, C.; Craciun, B.; Winkelmann, J., 'Continuous provision of synthetic inertia with wind turbines: implications for the wind turbine and for the grid', IET Renewable Power Generation, vol. 13, issue 5, pp. 668 –675, DOI: 10.1049/iet-rpg.2018.5263, 2019

> Trägheitsbereitstellung hat kaum Einfluss auf mechanische Belastung der Windenergieanlagen

Quellen:
Gloe, A.; Jauch, C.; Craciun, B.; Zanter, A.; Winkelmann, J., 'Influence of Continuous Provision of Synthetic Inertia on the Mechanical Loads of a Wind Turbine', Energies 2021, 14, 5185. DOI: 10.3390/en14165185

> Trägheitsbereitstellung beeinträchtigt den Energieertrag nur unwesentlich

Quellen:
Jauch, C.; Gloe, A., 'Simultaneous Inertia Contribution and Optimal Grid Utilization with Wind Turbines', Energies 2019, 12(15), 3013; DOI: 10.3390/en12153013

Hochschule Flensburg
University of Applied Sciences

Wind Energy Technology Institute

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

## Fragen?