

Forschungszentrum  
Energie und Umwelt

14. Symposium Energieinnovationen  
10. -12. Februar 2016, Graz / Austria  
B2 Windkraft, Do. 11.2.2016, 8:00 – 10:00 h, i11.



# Dezentrale Windintegration bei Berücksichtigung von Anlagen- und Netzkosten

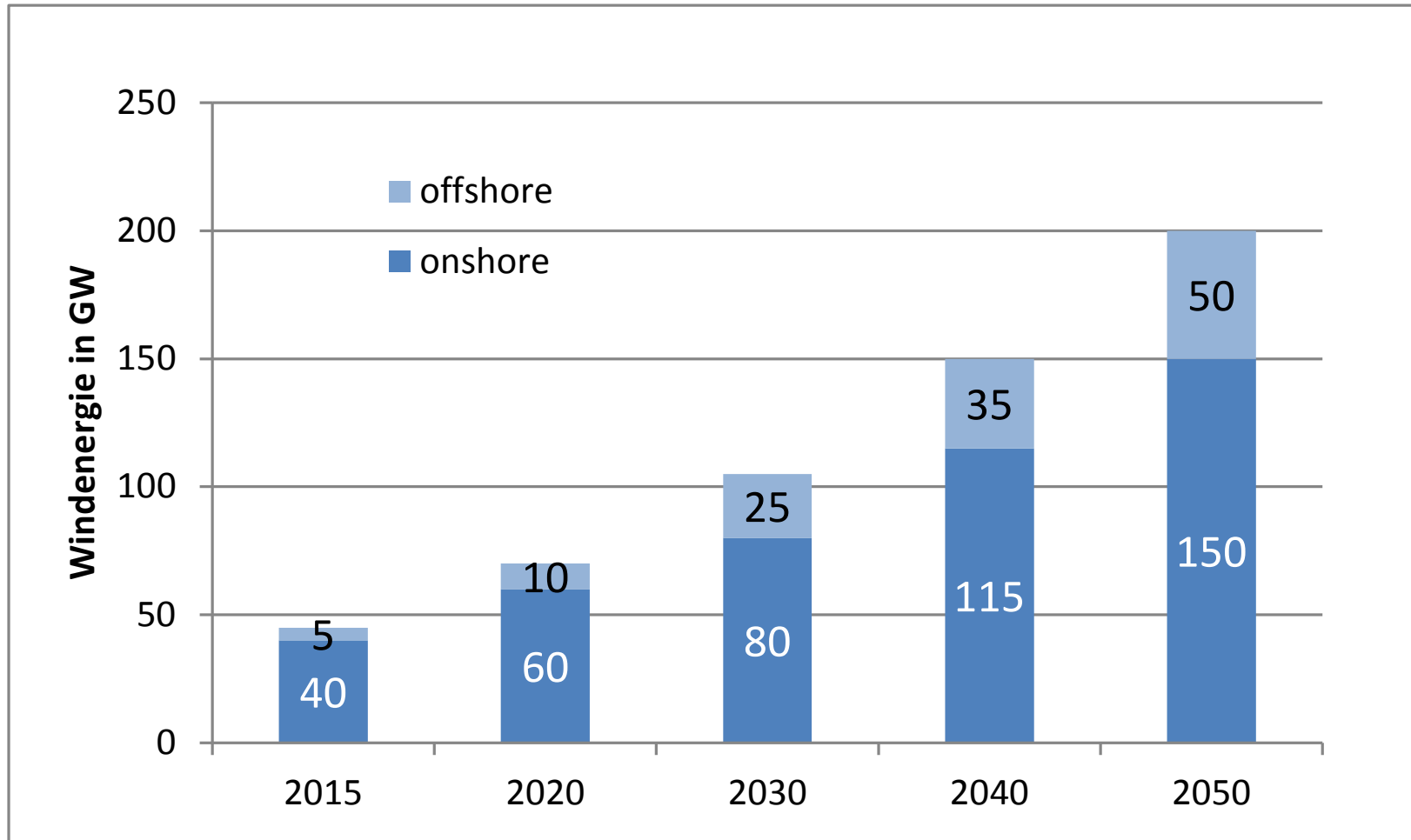
Günther Brauner, TU Wien



# Inhalt

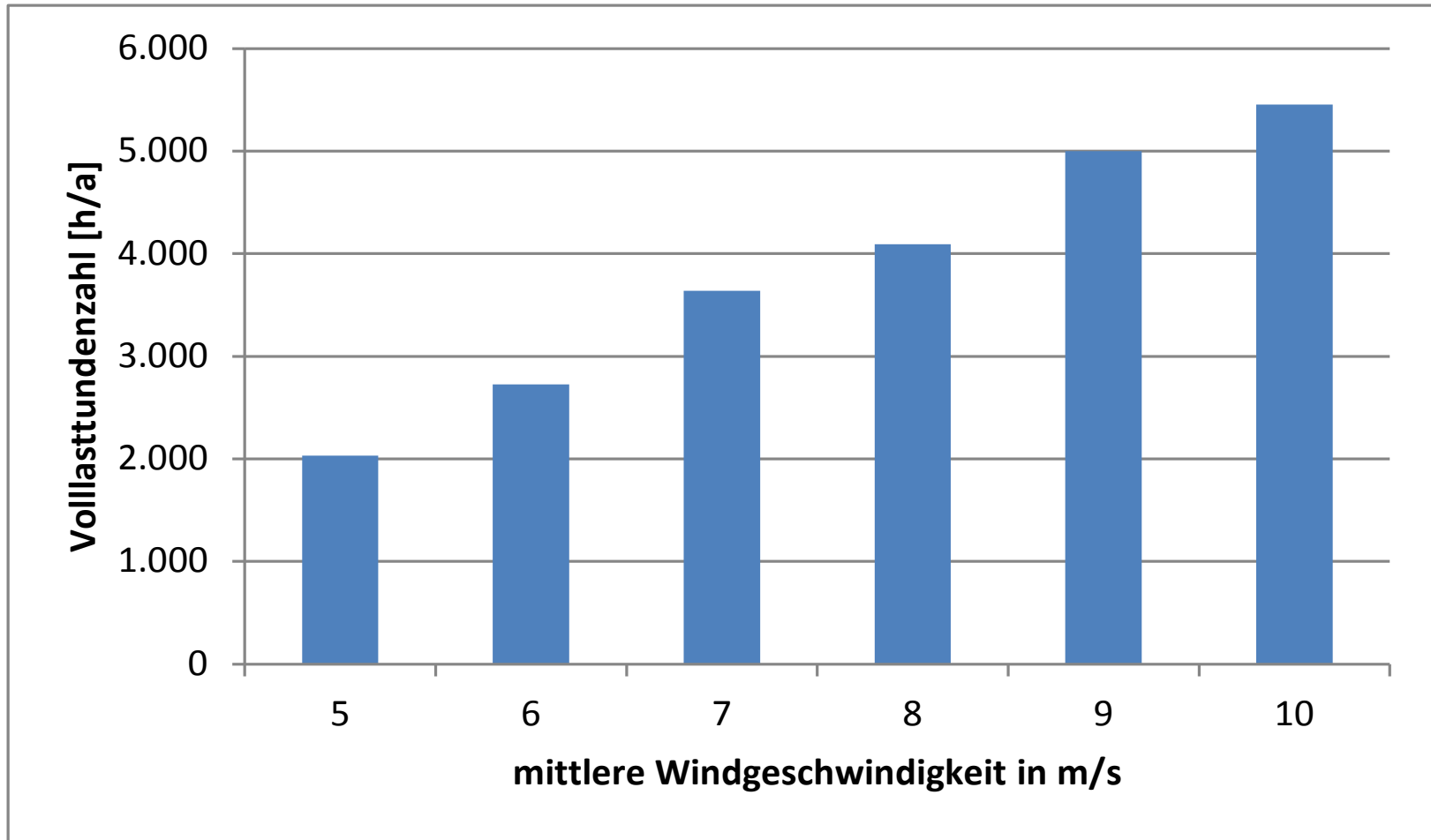
- Entwicklung der Windenergie bis 2050
- Netzdienstleistungen durch regenerative Quellen
  - Frequenzregelung
  - Spannungsregelung
  - Kombinierte Frequenz- und Spannungsregelung mit Batterie im Zwischenkreis
- Anforderungen an das Design neuer WEA
- Erzeugungskosten aus Anlagen- und Netzkosten

# Entwicklung der Windenergie in Deutschland bis 2050

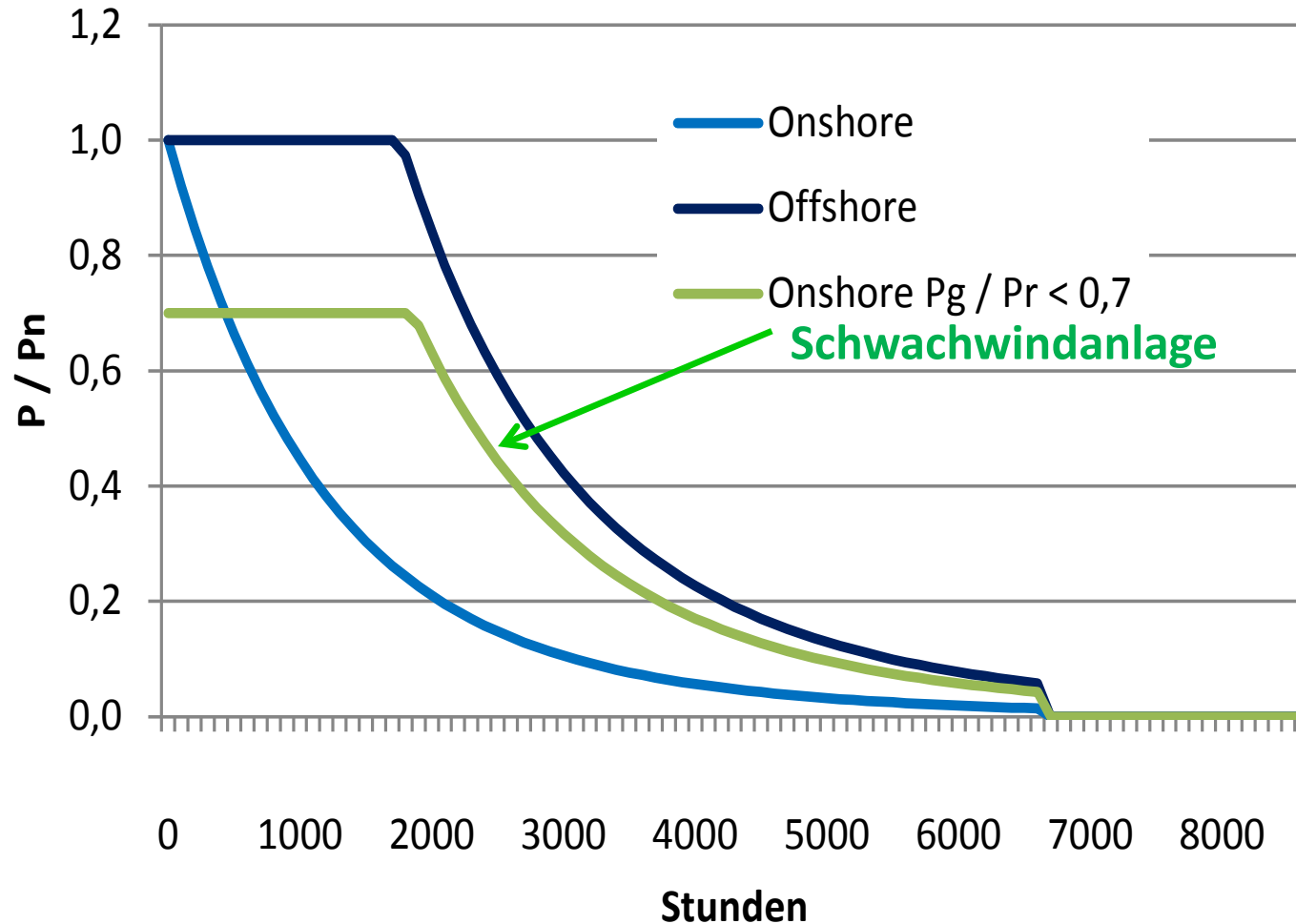


# Ertrag in kWh/kW in Abhängigkeit von der mittleren Windgeschwindigkeit

Rotordurchmesser 130 m, Generator 3,3 MW



# Windenergie der Zukunft: große Rotoren - kleine Generatoren 3.000 Volllaststunden im Binnenland



Quelle: Brauner, G.: Energiesysteme: regenerativ und dezentral. Springer Verlag 2016

EnIn 2016 B2 Windenergie Brauner

# Zukünftige Anforderungen Windenergieanlagen

- *Ausbau der Netze und der Langzeitspeicher ist derzeit das größte Hindernis für den Ausbau der EE*
- Dezentraler Ansatz: Windenergieanlagen nahe an den Siedlungen für geringe Transportreichweite.
- Entwicklung von Schwachwindenergie-Anlagen
  - Verhältnis von Rotor- zu Generatorleistung vergrößern
  - ergibt höhere Volllaststunden kWh/kW
  - ergibt geringeren Bedarf zum Ausbau der Netze & Speicher
- Teilnahme an Netzdienstleistungen
  - Frequenzregelung
  - Spannungsregelung

# Zukünftige Netzdienstleistungen durch Windenergie

## Operational:

- Frequenzregelung durch pitch control
- Frequenz- und Spannungsregelung durch 4q-Umrichter mit Batteriespeicher im Zwischenkreis
- Spannungsregelung durch Umrichter

## Konstruktiv:

- Engpassvermeidung durch Schwachwindanlagen

# Frequenzregelung mit Windenergieanlagen

- Schwungmassen gehen bis 2050 zurück, da Umrichter bei Windenergie und PV eingesetzt werden.
- Thermische Kraftwerke werden zeitweilig durch EE verdrängt.
- EE muss sich an Netzdienstleistungen beteiligen:
  - Frequenzregelung
  - Spannungsregelung
  - Kombinierte Frequenz- und Spannungsregelung



# Erzeugungsszenarien EU bis 2050

## Europa ohne NO, SE, Fi, GB, Cy

Erzeugung	2013 in GW	2050 in GW	rel. zur Spitzenleistung 2050
nuklear	130	50	5 %
fossil	450	250	25 %
hydraulisch	180	250	25 %
Wind	90	600	60 %
PV	60	400	40 %
andere	5	10	1 %
Gesamtleistung Erz.	915	1.560	156 %
Spitzenleistung Netz	522	1.000	100 %

2050: im Mittel nur 20 - 25% der Erzeuger mit Schwungasse aktiv

# Einfluss der Ausregelzeit

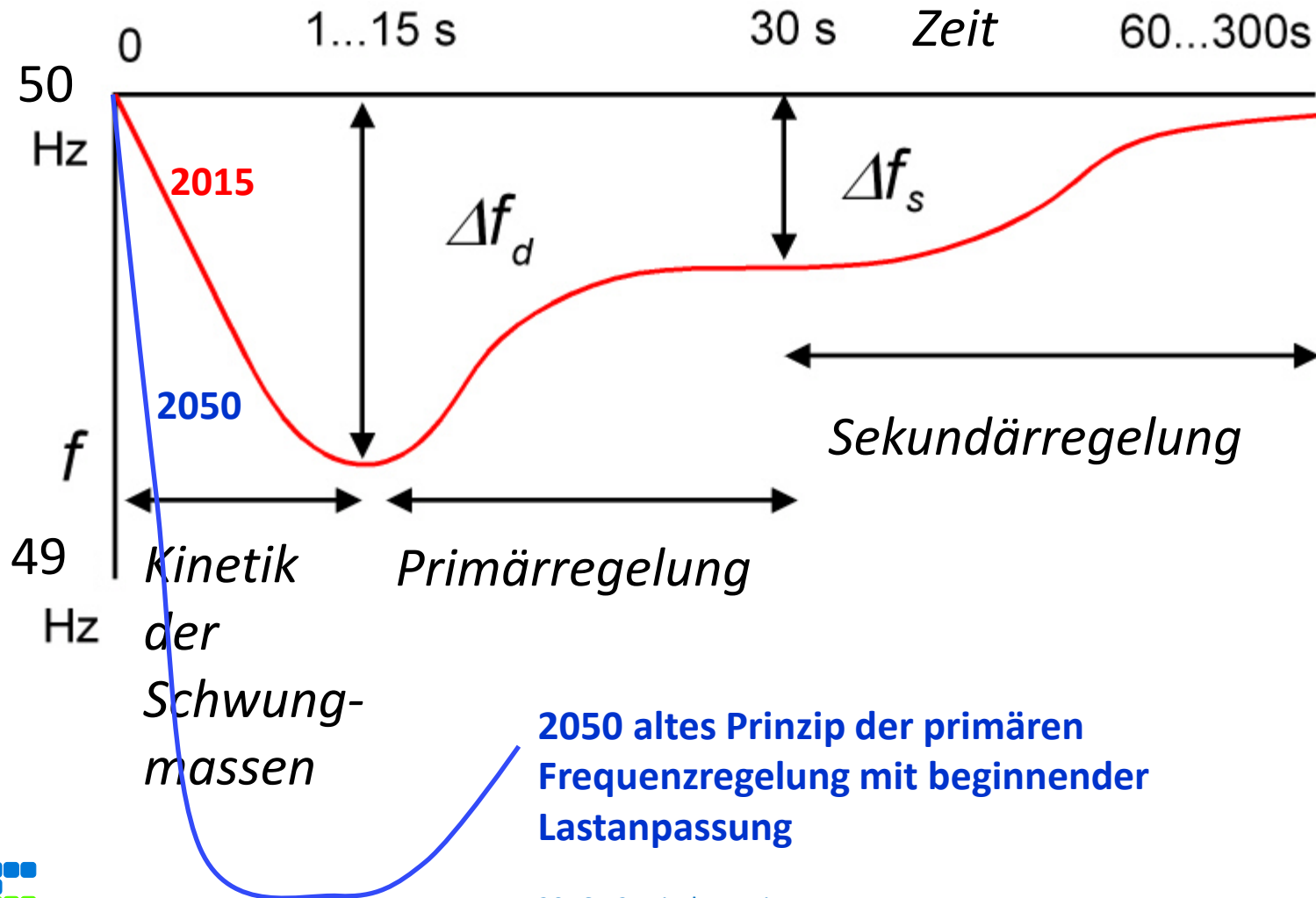
## heutiges Regelungskonzept nicht geeignet

Defizit	Anlaufzeit- konstante	Anteil Schwung- massen	Ausregel- zeit	Dynamisches Frequenz- minimum
700 MW	10 s	100 %	10 s	-0,21 Hz
700 MW	7 s	20 %	10 s	-1,56 Hz <b>(48,44 Hz)</b>
700 MW	7 s	20 %	3 s	-0,47 Hz
700 MW	7 s	20 %	2 s	-0,31 Hz
700 MW	7 s	20 %	0,5 s	-0,08 Hz

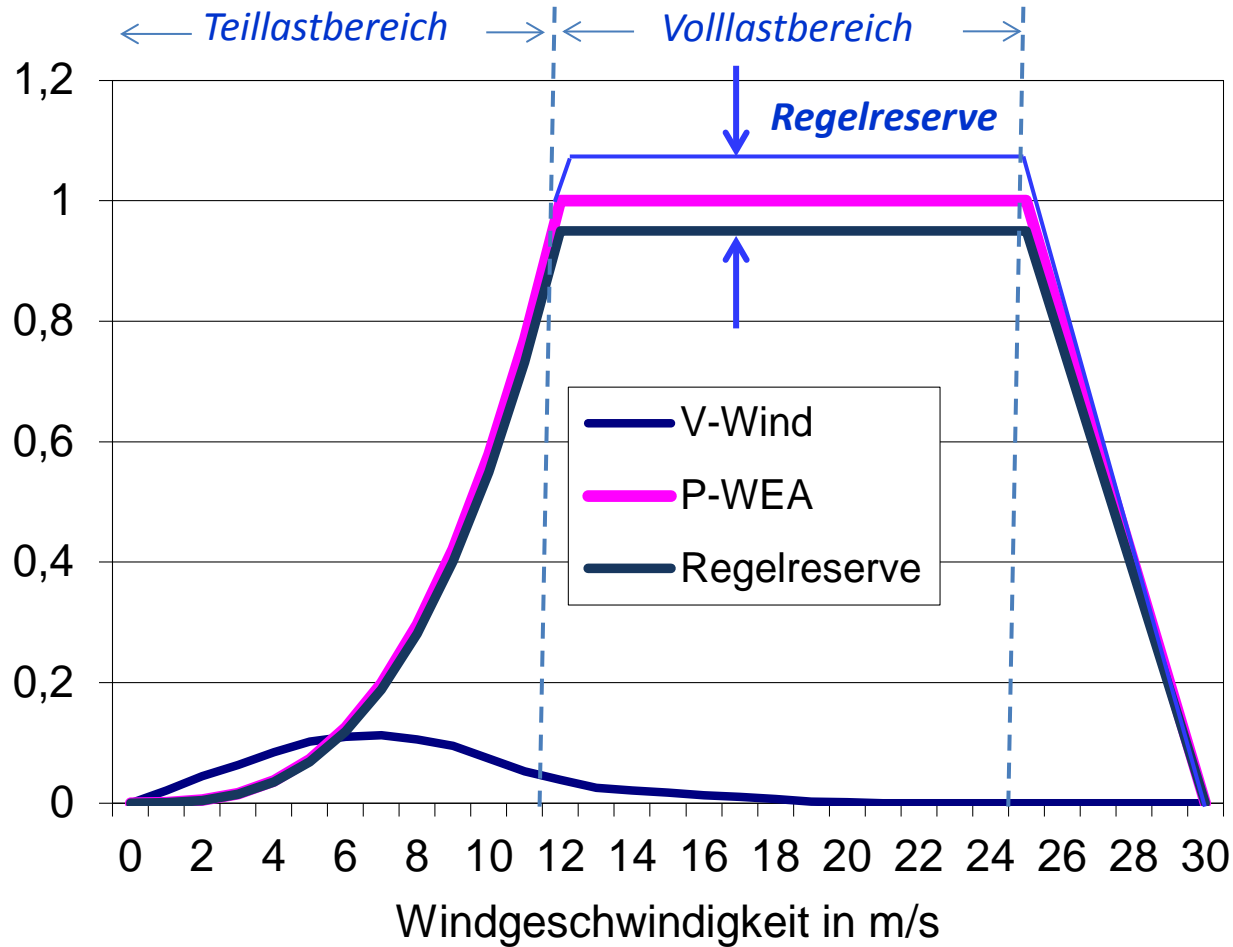
Altes  
Regelungs-  
prinzip  
←

# Zeitbereiche der Frequenzregelung

2050: nur noch 20 % Schwungmassen



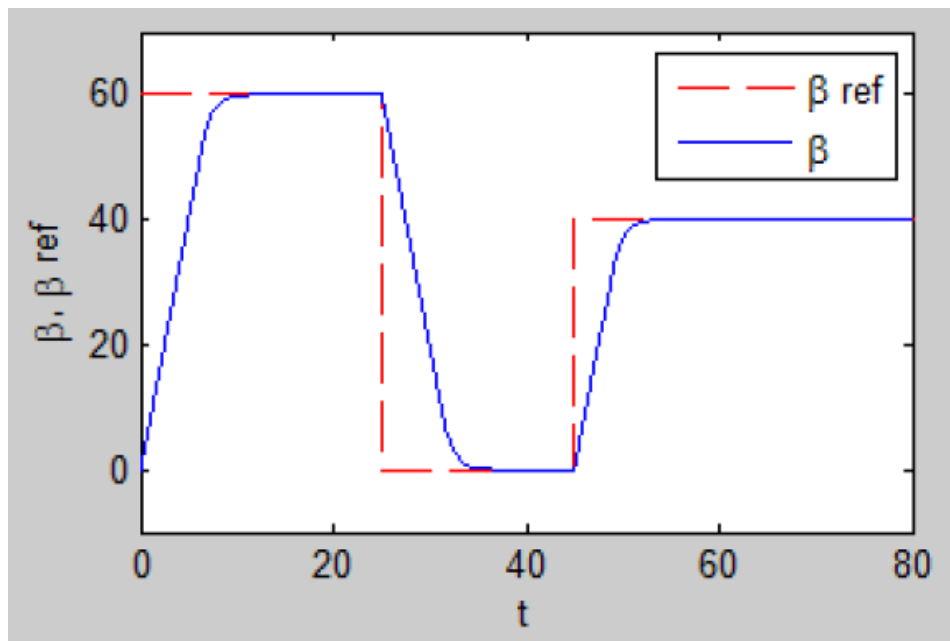
# Frequenzregelung durch Pitch Control



Quelle: Brauner, G.: Energiesysteme: regenerativ und dezentral. Springer Verlag 2016

# Regelgeschwindigkeit von WEA

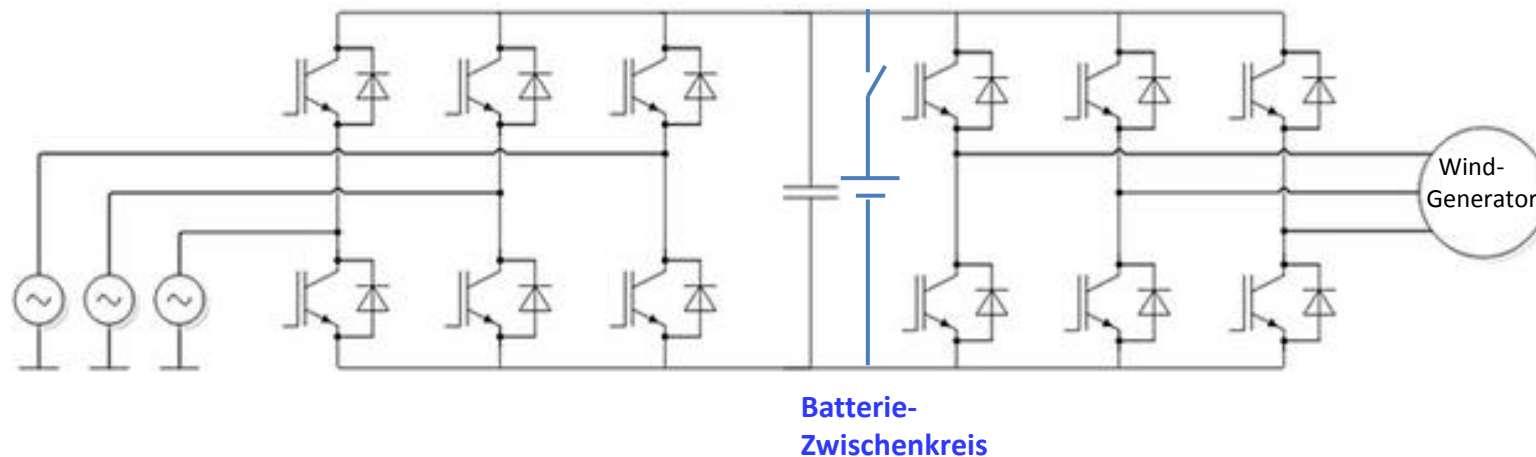
- Pitch-Control erfolgt durch unabhängige Antriebe je Rotorblatt
- Für  $\pm 5\%$  Leistungsänderung ist nur Stellgröße von  $\pm 3^\circ$  Pitch-Winkel erforderlich
- Stellzeit ca. 2 sec., zukünftig 1 sec möglich, ausreichend für Primärregelung



*Stellgeschwindigkeit  
des Pitch-Winkels  
von WEA*

*A.K. Sethi*

# Spannungsregelung durch 4Q-Umrichter mit Batterie im Zwischenkreis

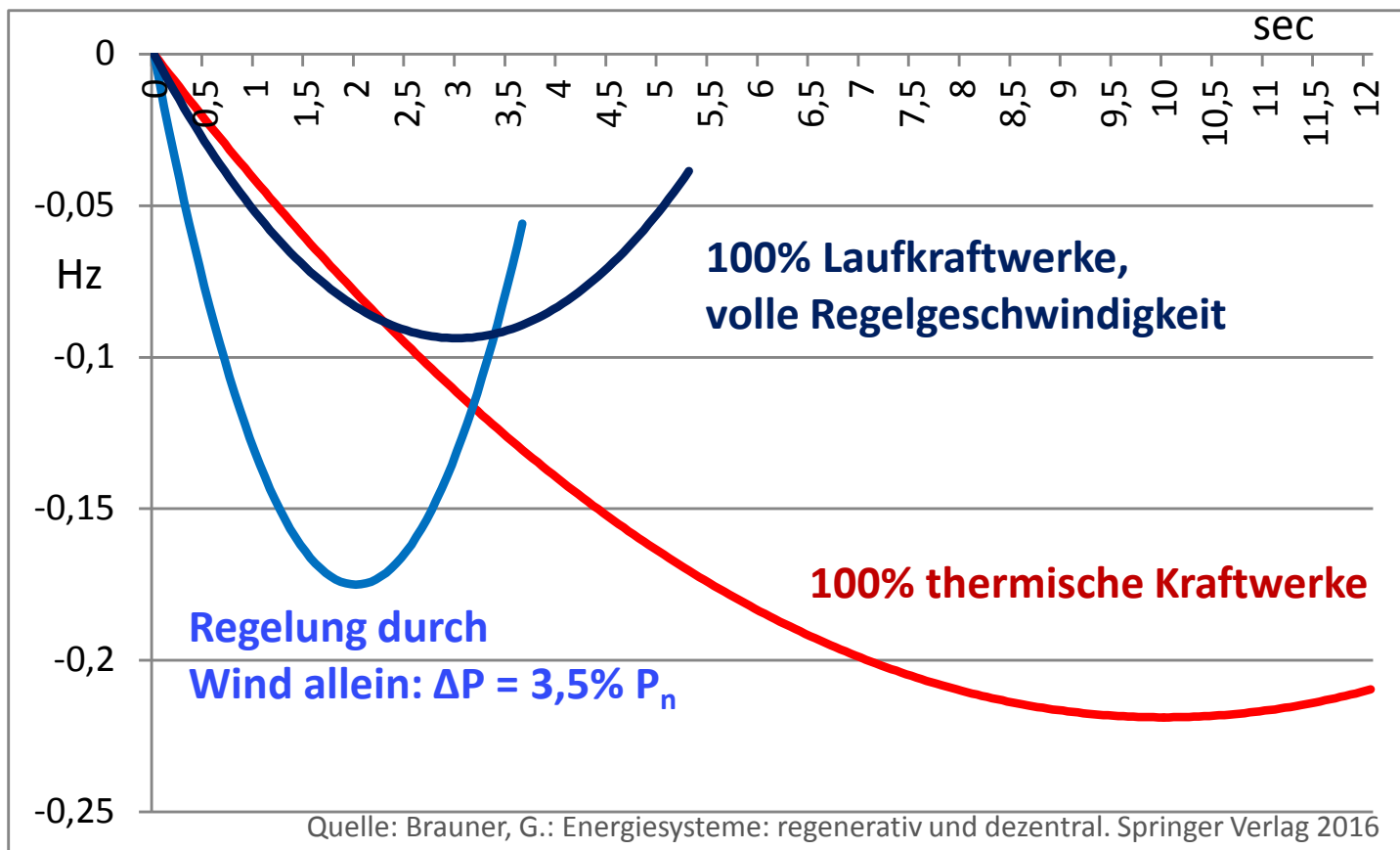


mit Batterie im Zwischenkreis ist bei abgeschalteten Windgenerator eine 4-Quadranten-Betrieb zur gleichzeitigen Frequenz- und Spannungsregelung möglich für Netzdienstleistungen.

# Vergleich: Primärregelung mit thermischen Kraftwerken oder Windenergieanlagen

Erzeugung und Last 80 GW, Inselbetrieb, Defizit 2x350 MW, (2 Kraftwerke)

- a) 100% thermische Kraftwerke: Ausregelzeit 10 s
- b) 25% th. KW ohne Regelung, 80% Wind mit Regelung, Ausregelzeit 2 s
- c) 100% Laufkraftwerke, Ausregelzeit 3 s



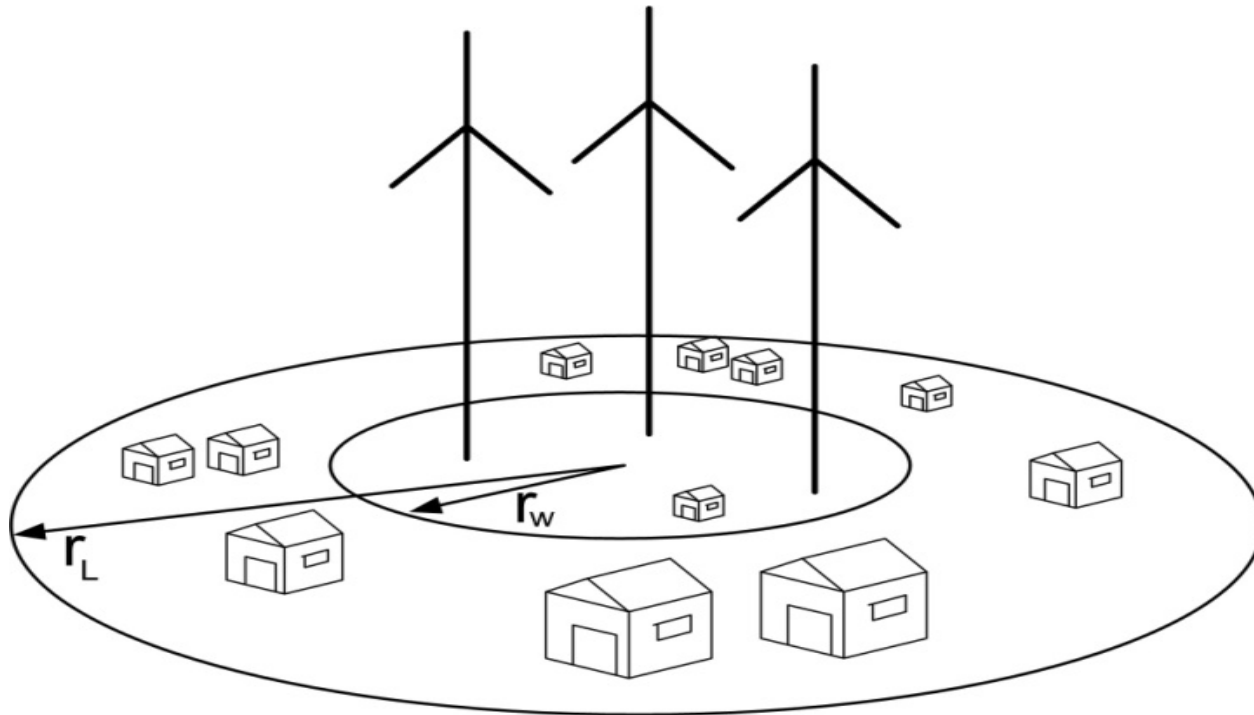
# Netzintegration

## Dezentrales Energieversorgungskonzept:

- Energiezellen mit Vorbilanzierung zur Minderung des Netzausbaubedarfs
- Windenergieanlagen für Siedlungen
- Hohe Eigennutzung bei geringer Transportentfernung  
neues Entwicklungsziel
- **Stromgestehungskosten = Erzeugungs- & Netzkosten**



# Das Flächengesetz der dezentralen Windenergie



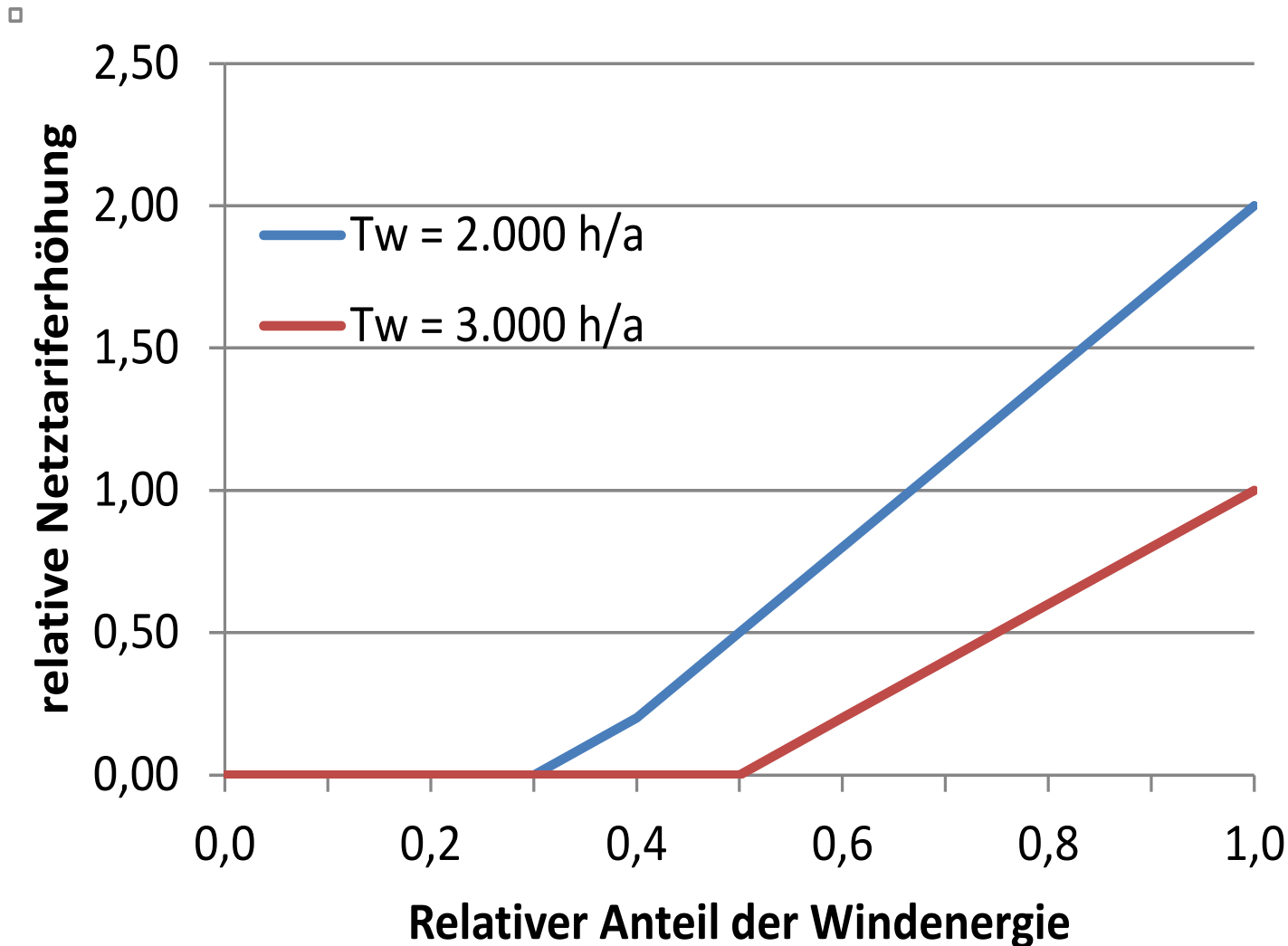
Quelle: Brauner, G.: Energiesysteme: regenerativ und dezentral. Springer Verlag 2016

# Das Flächengesetz der dezentralen Windenergie

## Modellansatz

- Wind-Erzeugungsfläche mit Radius  $r_W$  und Erzeugungsleistungsdichte in  $\text{MW}/\text{km}^2$
- Lastfläche mit Radius  $r_L$  und Lastdichte in  $\text{MW}/\text{km}^2$
- max. Transportreichweite Wind ohne Speicher bei max. Windleistung und kleinster Last.
- Netzauslegung mit Reserve n-1 als Voraussetzung, kann durch Wind ohne Ausbau genutzt werden.
- Danach Netzausbau nach Wind-Spitzenleistung zu Standard-Netztarifen.

# Relative Erhöhung der Netzkosten zur Windintegration aufgrund des Energieanteils



Quelle: Brauner, G.: Energiesysteme: regenerativ und dezentral. Springer Verlag 2016

EnIn 2016 B2 Windenergie Brauner

# Ergebnis Schwachwindanlagen

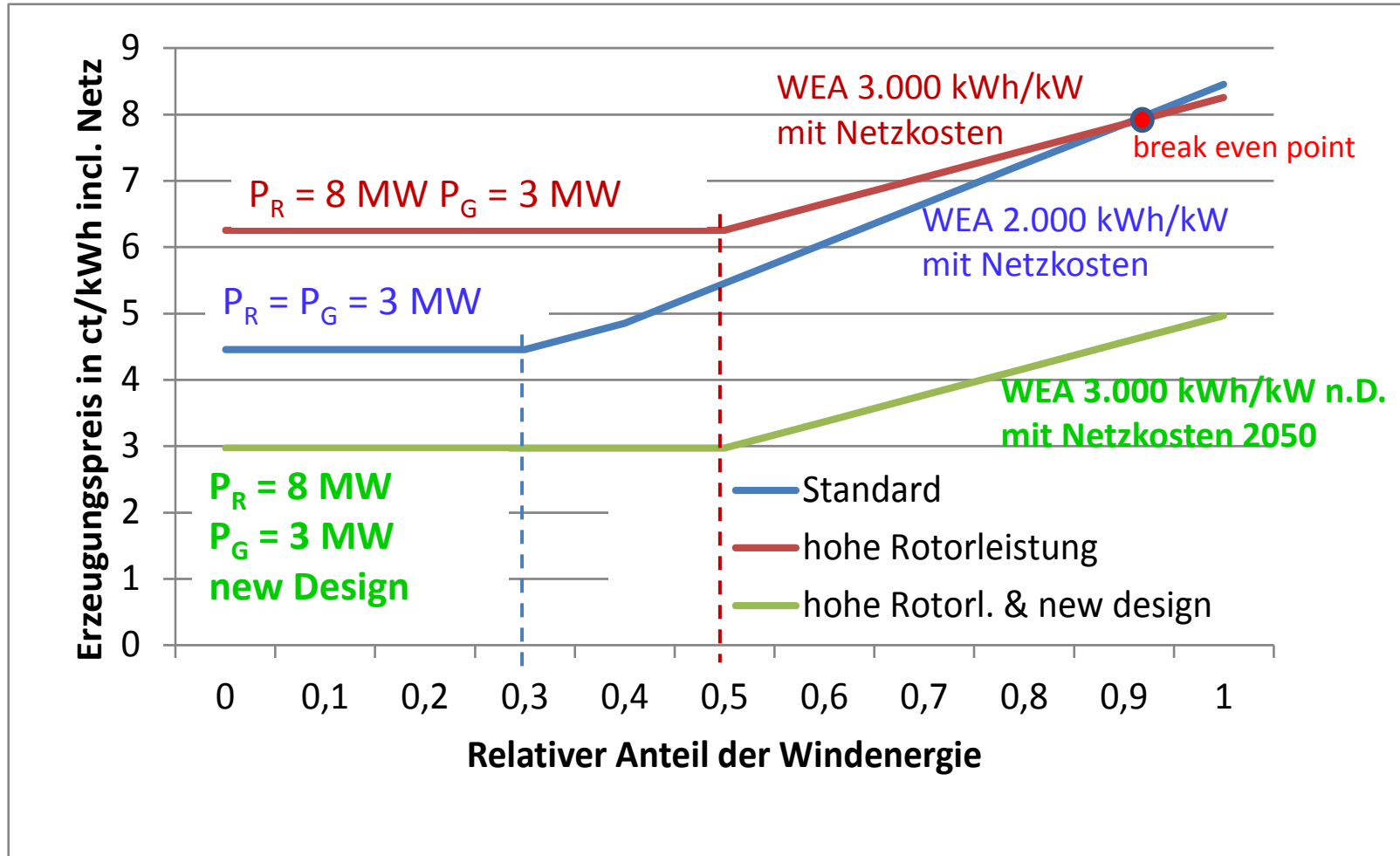
- Schwachwindanlagen haben durch kleinere Leistung bei höheren Volllaststunden kleinere Transportreichweite und benötigen weniger Speicher.
- Netze benötigen erst ab 50% Wind-Energieanteil Netzausbau und die Netzkosten steigen mit kleineren Gradienten über der Leistung.
- Normale Auslegung von Windenergieanlagen (Rotor = Generator) benötigt bereits ab 30% Anteil Ausbau.
- Schwachwindanlagen für dezentrale Versorgung.
- Schwachwindanlagen heute noch teurer als bei Standardauslegung.
  
- Zukunft: Kostengünstige Schwachwindanlagen.

# Kennwerte der untersuchten Windenergieanlagen

	Dimension	konventionell	Schwachwind	Schwachwind & new design
Rotorleistung	kW	3.000	8.000	8.000
Generatorleistung	kW	3.000	3.000	3.000
Nabenhöhe	m	100	135	135
Hauptinvestitionen	€/kW <sub>el</sub>	1.000	2.300	1.000
Nebeninvestitionen				
Netzanbindung	€/kW <sub>el</sub>	120	120	120
Fundament	€/kW <sub>el</sub>	55	140	55
Erschließung	€/kW <sub>el</sub>	33	40	33
Planung	€/kW <sub>el</sub>	40	60	40
Sonstiges	€/kW <sub>el</sub>	50	50	50
Summe Nebeninv.	€/kW <sub>el</sub>	287	410	287
O & M / Ges.Invest.	p.u.	0,03	0,03	0,03
Zinssatz	%	3,0	3,0	3,0
Nutzungsdauer	a	20	20	20
Volllaststunden	h/a	2.000	3.000	3.000
Erzeugungskosten	€/kWh	0,0446	0,0625	0,0297

Quelle: Brauner, G.: Energiesysteme: regenerativ und dezentral. Springer Verlag 2016

# Entwicklung der Wind- und Netz- Erzeugungskosten



Quelle: Brauner, G.: Energiesysteme: regenerativ und dezentral. Springer Verlag 2016

# Strategien Wind 2050

## *Windenergie und Netz*

- Windenergie und Netzausbau gemeinsam betrachten
- Dezentrale Windenergieanlagen: verbrauchsnahe und bedarfsgerecht ausgelegt

## *Technologie der Windenergieanlagen*

- Schwachwindanlagen mit 3.000 kWh/kW
- Leichtbauweise ist gefragt: geringere Kosten bei Lagern, Fundamenten und Türmen
- Neue Fertigungsverfahren für preisgünstige Rotorblätter
- Neues Design: Schwachwindenergieanlagen haben gleiche Investitionskosten wie bei heutiger Auslegung

# Danke für Ihre Aufmerksamkeit !

em. Univ.-Prof. Dr. Günther Brauner

TU Wien, Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe

Gusshausstrasse 25/370-1, 1040 Wien

Tel.: +43 1 58801 3701, Fax: +43 1 58801 370199

e-mail: [guenther.brauner@tuwien.ac.at](mailto:guenther.brauner@tuwien.ac.at)