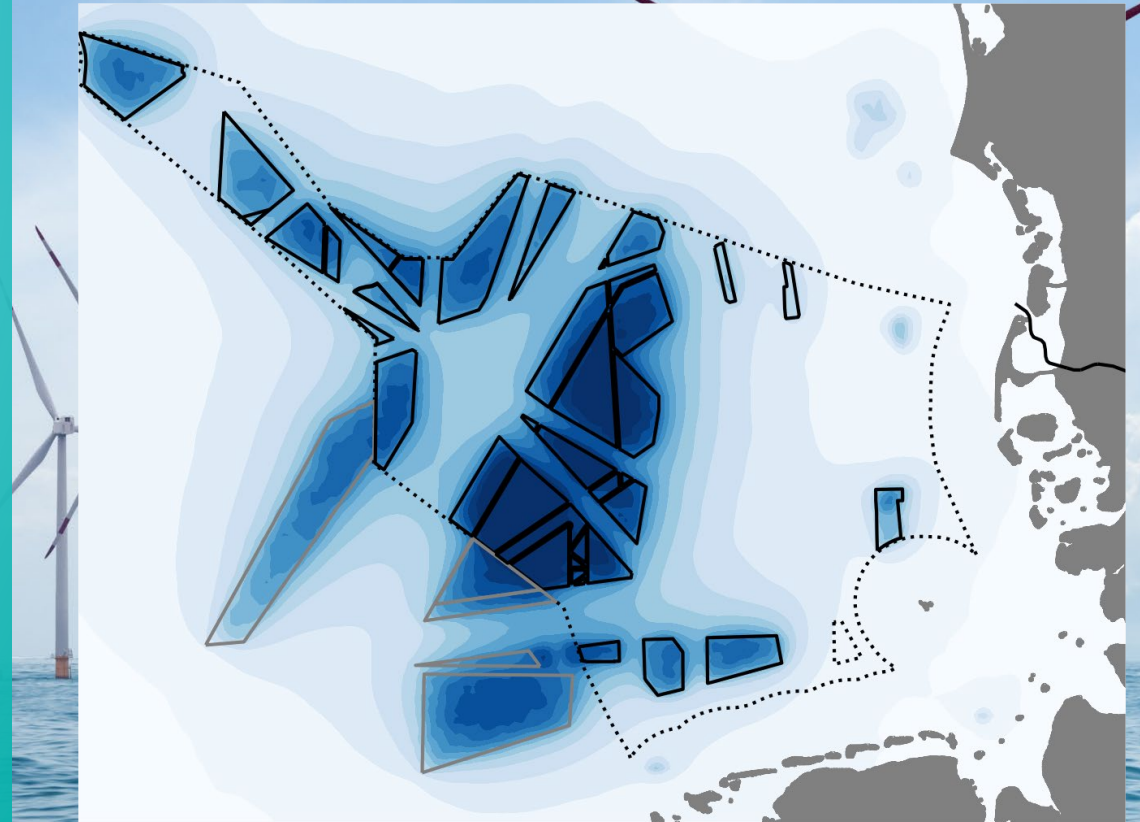


BWO – Expertise – 13.02.2025

# Abschattungseffekte und die Effizienz der Energieerzeugung Offshore

Dr. Lukas Vollmer, Dr. Martin Dörenkämper

*Fraunhofer Institut für Windenergiesysteme (IWES)*



# Abschattungseffekte und die Effizienz der Energieerzeugung Offshore

## Agenda

---

1. Übersicht über Projekte und Methoden des Fraunhofer IWES
2. Von Leistungsdichte zu Volllaststunden
3. Optimierungspotenziale

# Projekte und Methoden

## Beratung des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)

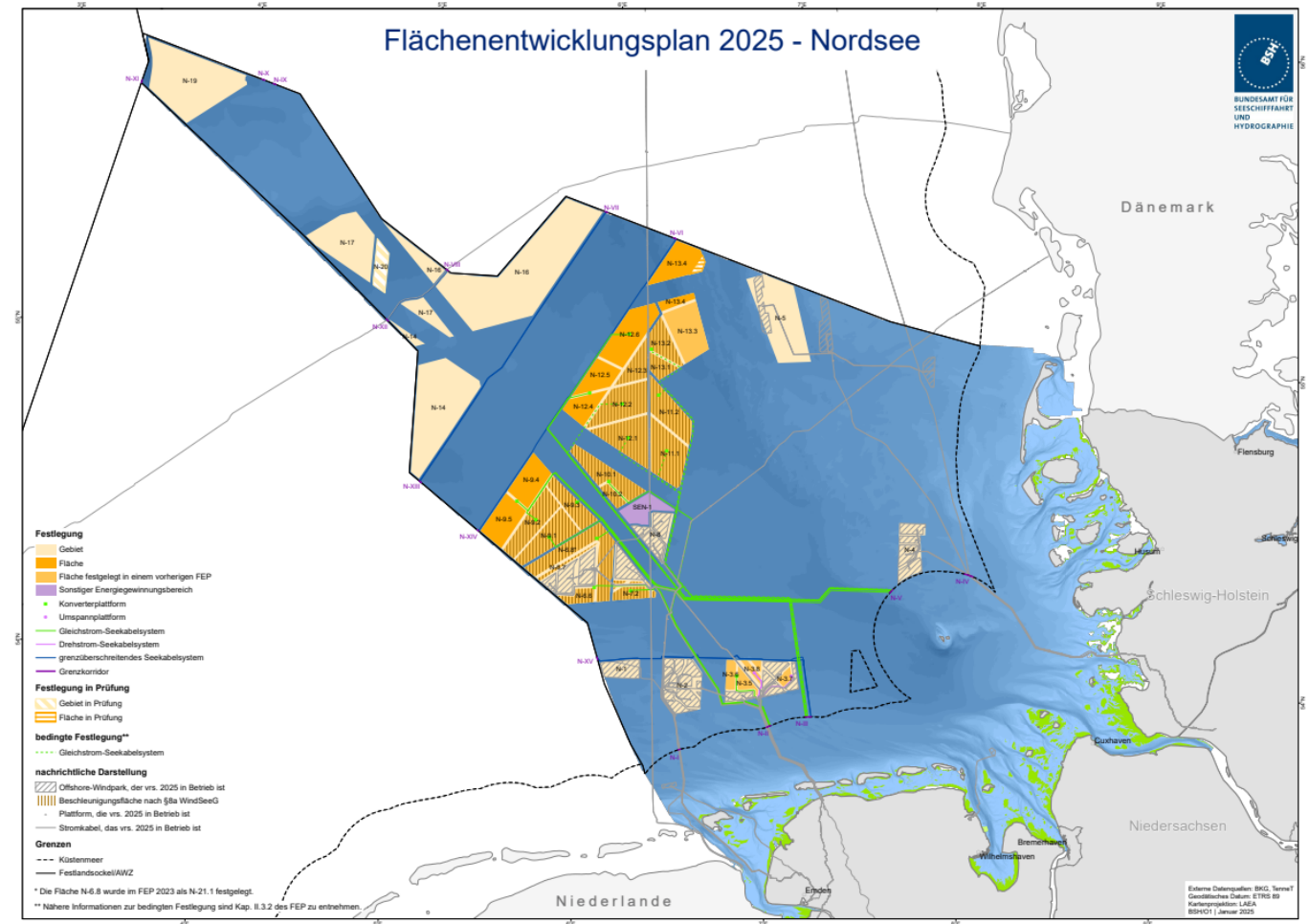
### Ausbauziele in Deutschland:

- Installierte Kapazität (2. HJ 2024): 8.9 GW
- Ausbauziel: mindestens 70 GW

### Anfrage des BSH:

- Abschätzung des Energieertrags von verschiedenen Ausbauszenarien als Grundlage / Feedback zu getroffenen Festsetzungen
- Einfluss von Leistungsdichte und Turbinentechnologie auf den Energieertrag
- Verwendung von Modellierungsmethoden, die ein realistisches Bild zukünftiger Abschätzungsverluste liefern können (Mehr Infos dazu: [\[2\]](#))

► Beratungsprojekt seit September 2021 [\[2,3,4,5\]](#)



# Projekte und Methoden

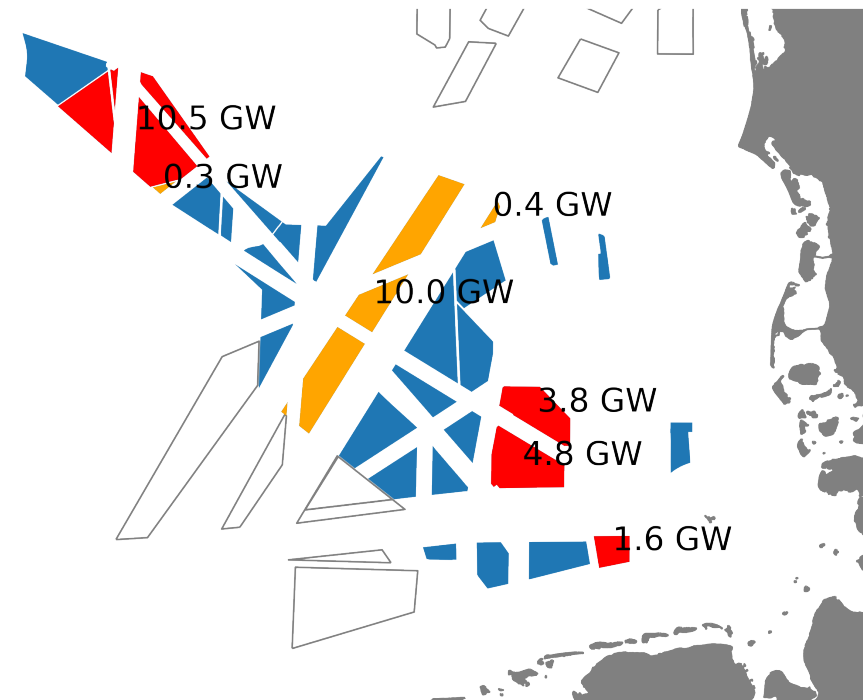
## Offshore-Flächenpotenziale 2050 (BWO, 2022) [6]

### Co-Nutzungspotenzial

- Untersuchung von Szenarien zum Ertragspotenzial in der Deutschen Bucht mit und ohne Co-Nutzung

### Ergebnisse:

- Co-Nutzungs-Szenarien zeigen Ausbaumöglichkeit von über 70 GW bei gleichzeitig über 3600 Volllaststunden im Mittel
- Bei hohem Co-Nutzungsanteil ließen sich über 290 TWh mittlerer Jahresenergieertrag realisieren
- Methodik wurde in weiteren nicht-öffentlichen Studien mit diversen Projektpartner angewendet und wird in laufenden Forschungsprojekten weiterentwickelt



# Methoden

## Simulationsszenario zur Berechnung des Jahresenergieertrags (AEP)

### Annahmen

#### Windenergietechnologie

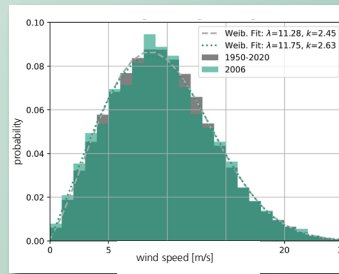
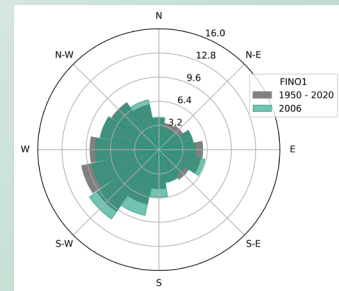
Zwei Ausbauschnitte

Jahre	P	D	HH
2026–2030	15 MW	240 m	150 m
2031–2045	22 MW	290 m	175 m

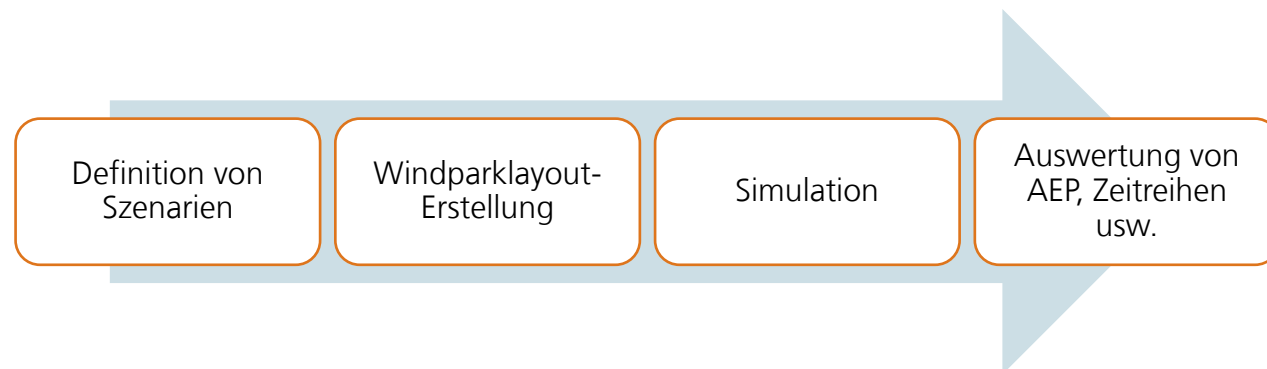


#### Windbedingungen

Referenzjahr (hier: 2006)



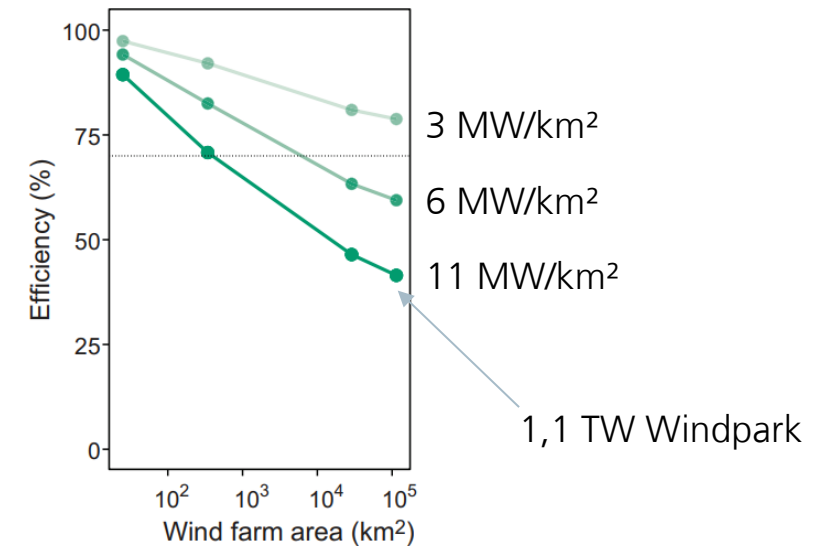
### Ablauf



# Von Leistungsdichte zu Volllaststunden

## Theorie

- Leistungsdichte = Installierte Leistung pro Fläche (MW/km<sup>2</sup>)
- Volllaststunden = Jahresenergieertrag pro installierter Leistung (GWh/GW = h pro Jahr)
- Effizienz / Parkwirkgrad = Ertrag mit Abschattung / Bruttoertrag (%)
  
- Volllaststunden abhängig von
  1. Lage / Windbedingungen
  2. Leistungsdichte
  3. Größe
  4. Technologie, Nabenhöhe



Einfluss der Windparkgröße und Leistungsdichte eines fiktiven Offshorewindparks auf den Parkwirkgrad [7]

Disclaimer: Die Ertragszahlen berücksichtigen keinerlei weitere Verluste (Verfügbarkeit, elektrisch, Abregelung, etc.)

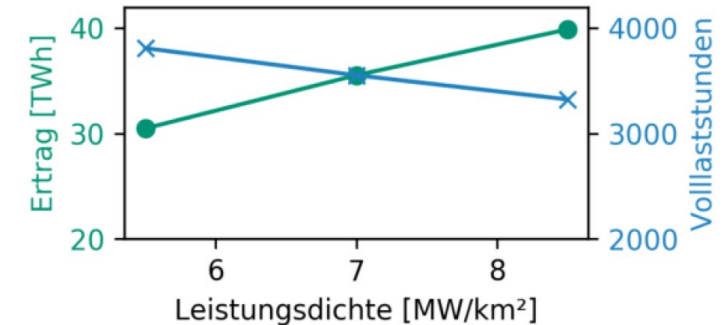


# Von Leistungsdichte zu Volllaststunden

## Theorie

- Leistungsdichte = Installierte Leistung pro Fläche (MW/km<sup>2</sup>)
- Volllaststunden = Jahresenergieertrag pro installierter Leistung (GWh/GW = h pro Jahr)
- Effizienz / Parkwirkgrad = Ertrag mit Abschattung / Bruttoertrag (%)
  
- Volllaststunden abhängig von
  1. Lage / Windbedingungen
  2. Leistungsdichte
  3. Größe
  4. Technologie, Nabenhöhe
  
- Energieertrag (GWh)
  - Mit jeder installierten Anlage steigt der Energieertrag

Disclaimer: Die Ertragszahlen berücksichtigen keinerlei weitere Verluste (Verfügbarkeit, Elektrisch, Abregelung, etc.)

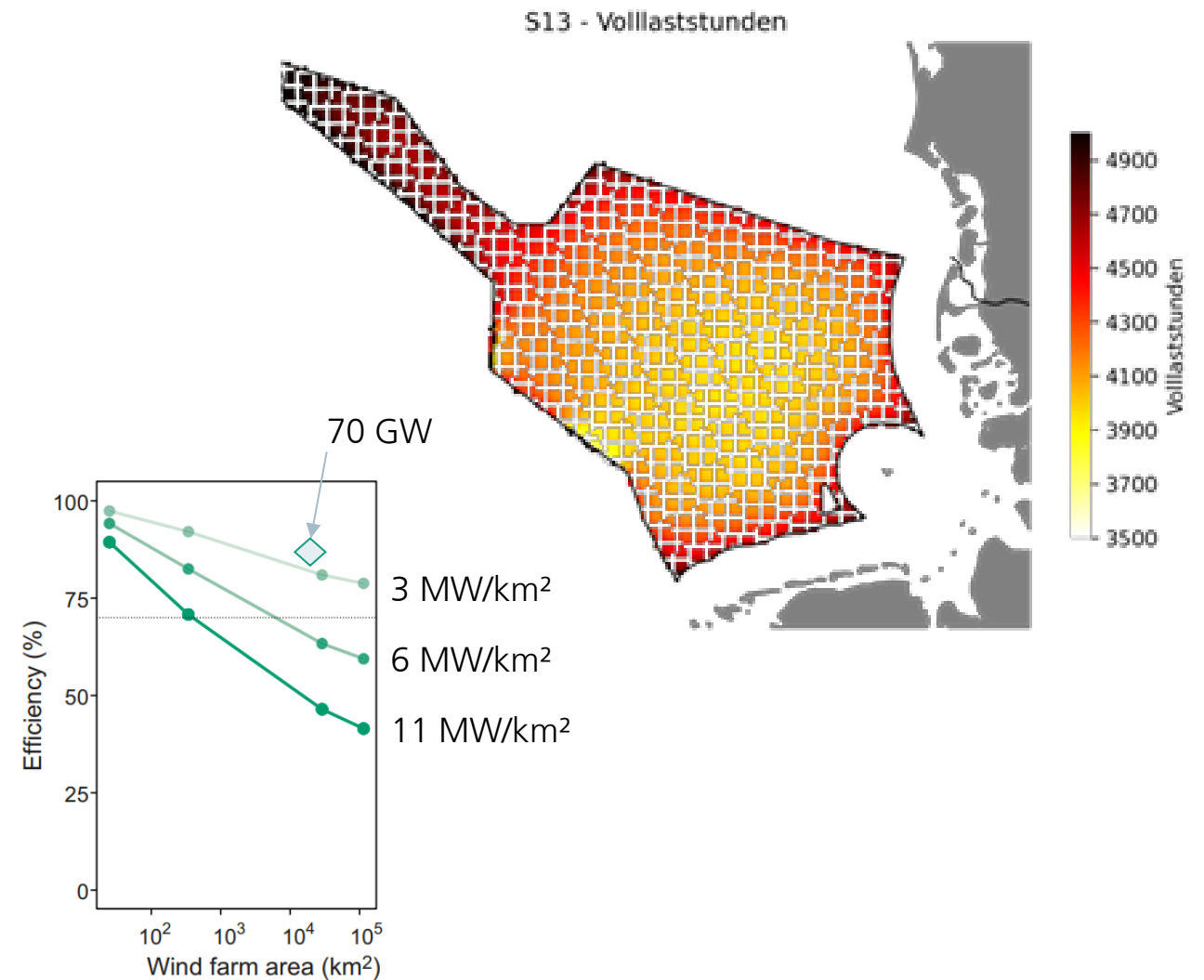


Einfluss der Änderung der Leistungsdichte im Cluster aus N-11, N-12, N-13 [2]

# Von Leistungsdichte zu Volllaststunden

## Deutsche Nordsee

- Hypothetisches Szenario [2] – gleichmäßige Verteilung von 70 GW auf die Nordsee
  - Leistungsdichte = 2,4 MW/km<sup>2</sup>
  - Gesamtertrag = 300 TWh
  - Mittlere Volllaststunden = 4300 h
  - Effizienz = 83 %

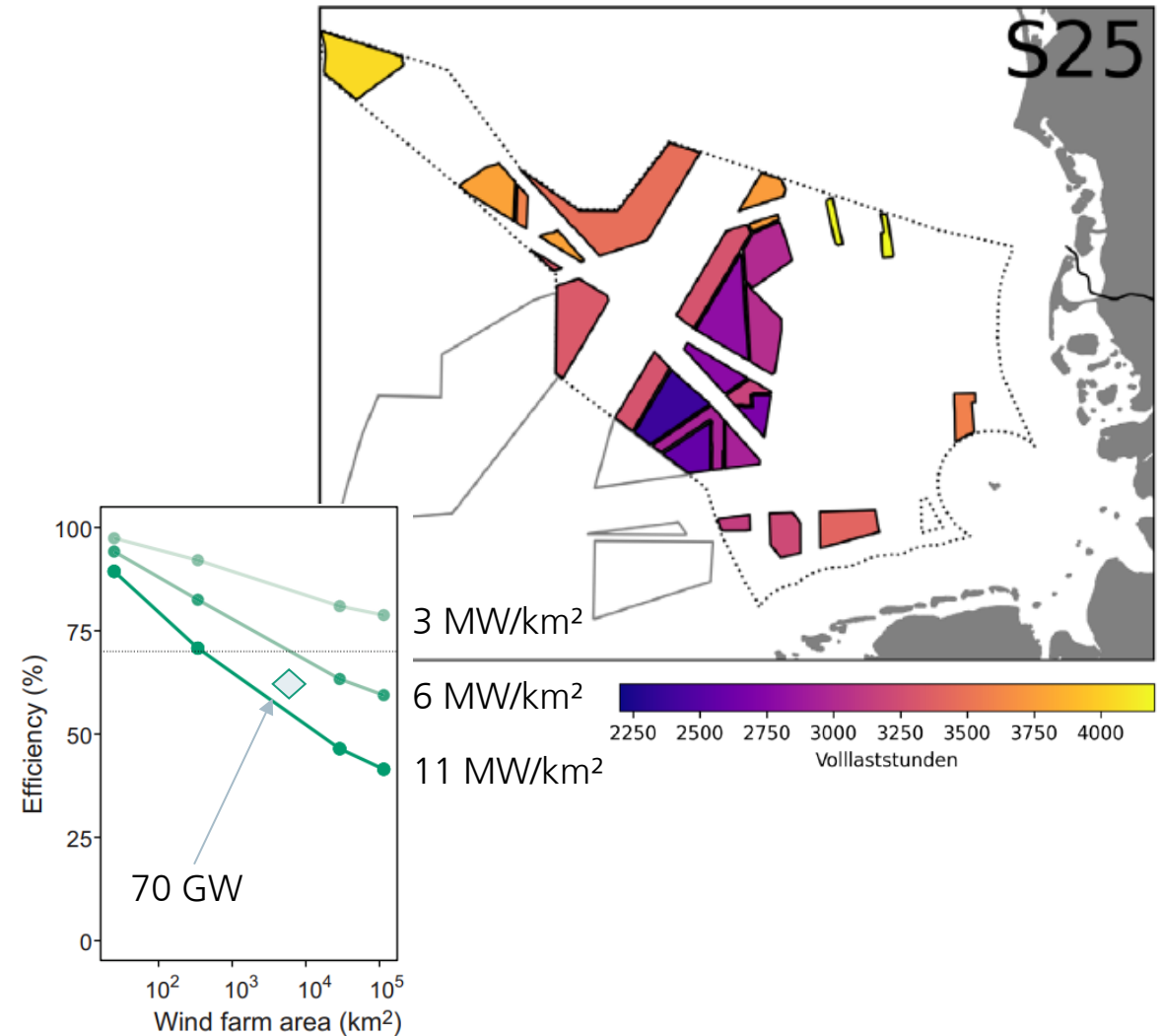




# Von Leistungsdichte zu Volllaststunden

## Deutsche Nordsee

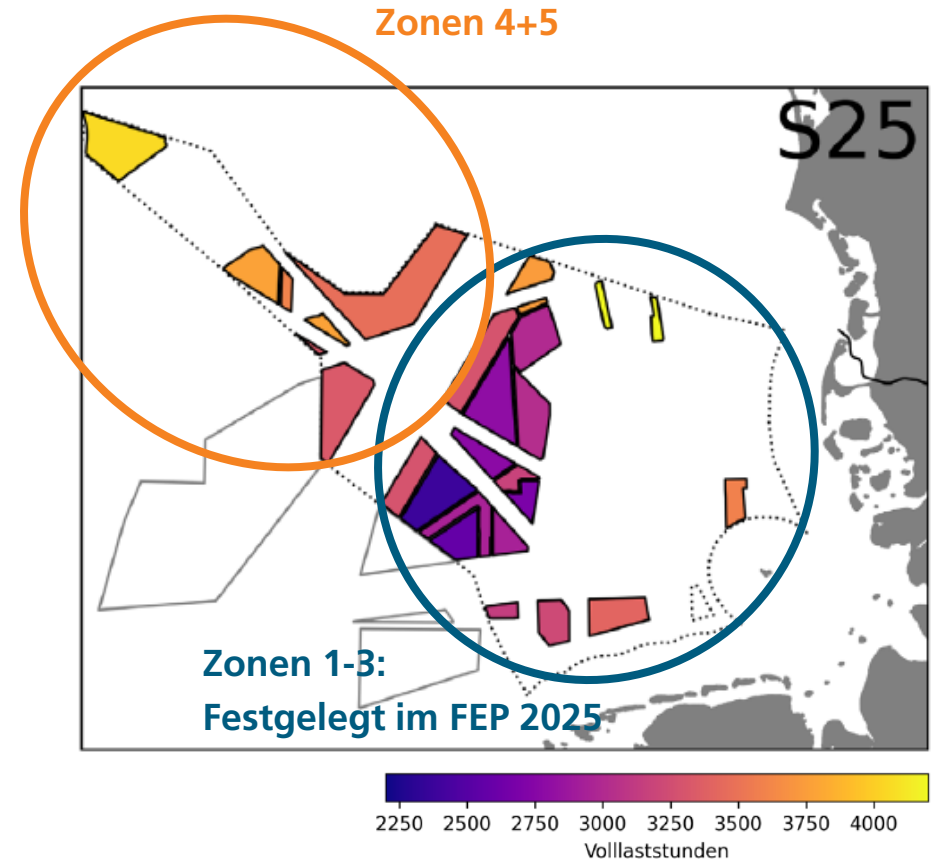
- Szenario 25 [5] – Verteilung von 70 GW auf die Nordsee in vorhandene Flächen
  - Leistungsdichte = 9,2 MW/km<sup>2</sup>
  - Gesamtertrag = 225 TWh
  - Mittlere Volllaststunden = 3250 h
  - Effizienz = 63 %
- Etwa 45% des aktuellen Strombedarfs Deutschlands
- Kombination aus Ertrag und Volllaststunden der Windparks an keinem Onshore-Standort erreichbar



# Optimierungspotenziale

## Erhöhung der Leistungsdichte vs. Gebietserweiterung

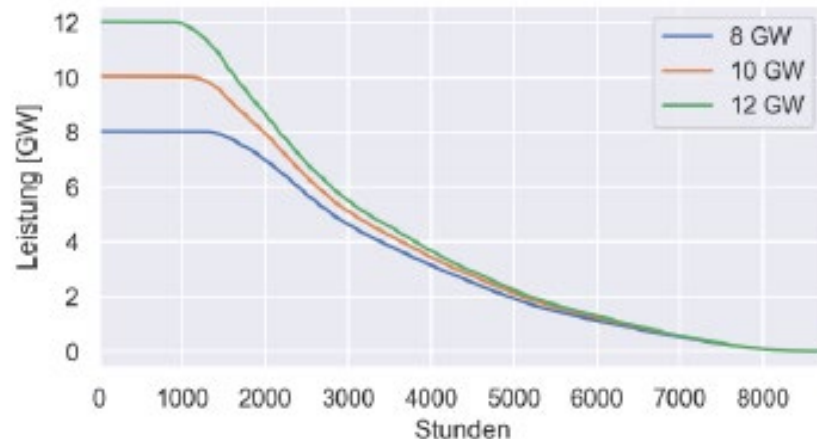
- Festlegung nach FEP 2025
  - Zu installierende Leistung in den Zonen 1-3 bereits festgelegt (40 GW)
  - Optimierungspotenzial nur in Zonen 4 + 5 (mindestens 30 GW)
- Optimierungsstrategien
  - Erhöhung der Leistungsdichte
    - Reduktion der Volllaststunden
  - Reduktion der Leistungsdichte
    - Weniger Energieertrag
  - Erweiterung auf weitere Gebiete
    - Höhere Volllaststunden in Zonen 4 + 5



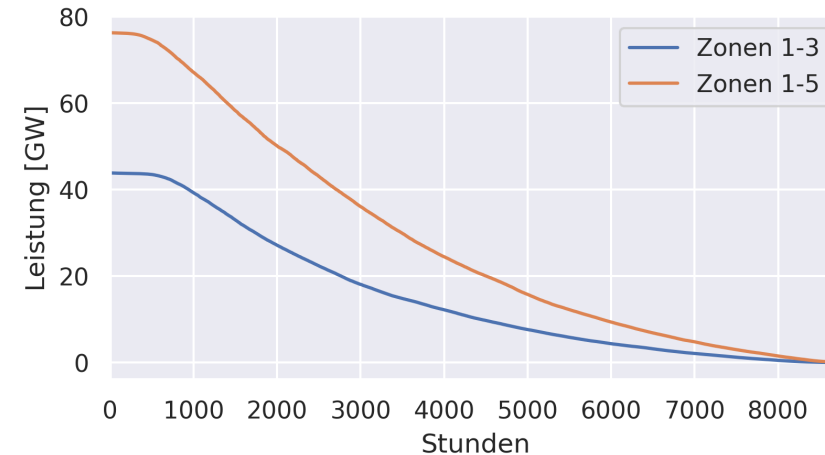
# Optimierungspotenziale

## Erhöhung der Leistungsdichte vs. Gebietserweiterung

- Zeitabhängigkeit des Mehrertrags
  - Erhöhung der Leistungsdichte
    - Mehrertrag in erster Linie bei Erreichen von Nennleistung
  - Erweiterung auf weitere Gebiete
    - Signifikanter Mehrertrag bei allen Windgeschwindigkeiten
    - Stabilisierung des Offshore-Windertrags



Jahresdauerlinien zu: Einfluss der Änderung der Leistungsdichte im Cluster aus N-11, N-12, N-13 [2]

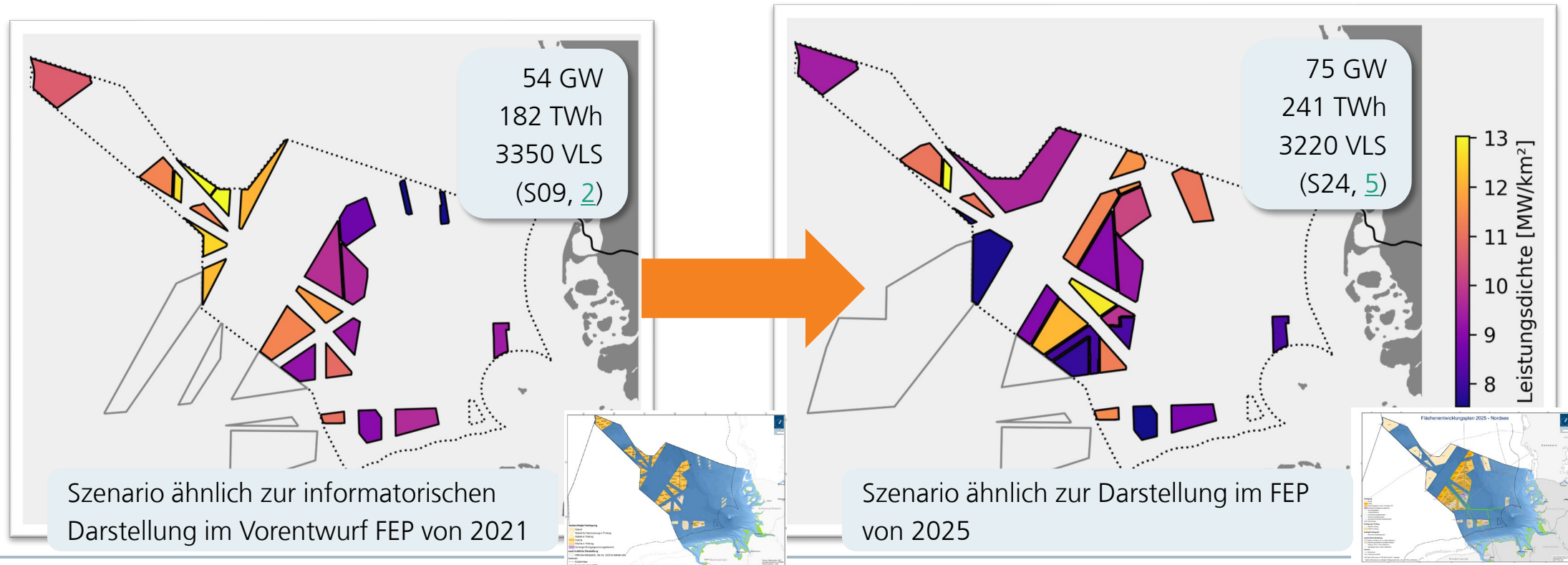


Jahresdauerlinien zu: Einfluss der Erweiterung der installierten Leistung auf die Zonen 4+5 [auf Basis von 5]

# Optimierungspotenziale

## Erhöhung der Leistungsdichte vs. Gebietserweiterung

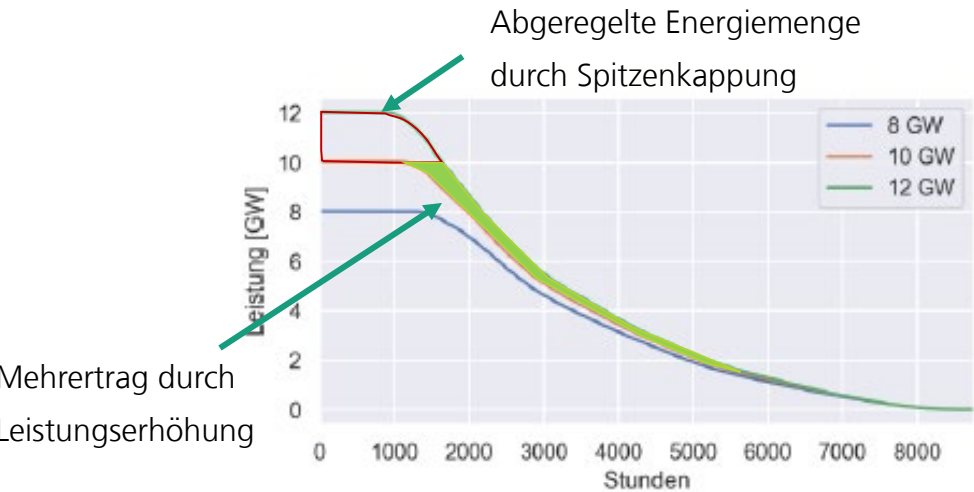
- Gebietserweiterung seit FEP 2020
  - Erweiterung der installierten Leistung um 20 GW durch Gebietserweiterung



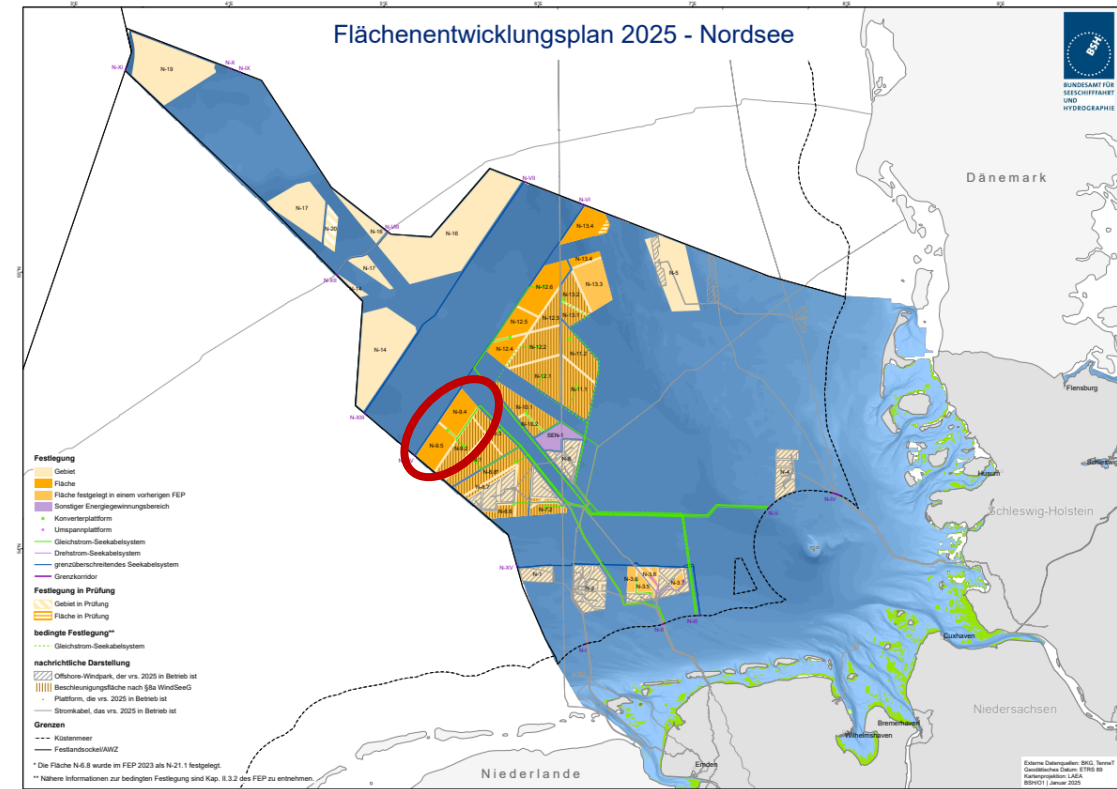
# Optimierungspotenziale

## Aktueller Ansatz BSH im FEP 2025 - Reduktion ONAS durch Spitzenkappung

- Kosteneinsparung durch Reduktion von Offshore-Netzanbindungssystemen (ONAS)
  - Mehr installierte Windparkleistung als installierte Netzleistung
  - Erstmals geplant im FEP 2025 für die Flächen N-9.4, N-9.5 (120%)
    - Mehrertrag von 660 GWh (10%) durch Leistungserhöhung
    - Abregelung von 610 GWh durch Spitzenkappung [5]



Beispielhafter Einfluss der Spitzenkappung auf den Energieertrag aus dem Cluster aus N-11, N-12, N-13 [2]



# Abschattungseffekte und die Effizienz der Energieerzeugung Offshore

## Zusammenfassung

---

### Theorie zu Leistungsdichte und Volllaststunden

- Jede zusätzliche Windenergieanlage in der Nordsee erhöht den Energieertrag
- Bei Erhöhung der Leistungsdichte sinken die Volllaststunden
- Erweiterung der Gebiete aus Effizienzgründen vorteilhafter gegenüber Erhöhung der Leistungsdichte

### Offshore Windenergie in Deutschland

- Fortschreibung des FEP zeigt die erfolgreiche Erweiterung der nutzbaren Gebiete zum Erreichen der Zukunftssicherung der Stromversorgung
- Ausbau in Zonen 4+5 aus mehreren Gesichtspunkten wichtig (Volllaststunden, zeitlich stabile Versorgung)
- Spitzenkappung reduziert Strommenge in Zeiten hoher Einspeisung

### Ausblick

- Zeitreihen aus den BSH-Szenarien ermöglichen weitere Nutzungsbetrachtungen, z.B. Spitzenkappung, Speicherbedarfe, Netzausbau



# Kontakt

---

**Dr. Lukas Vollmer**  
**Numerische Ertrags- und Standortanalyse**  
Fraunhofer Institute for Wind Energy Systems IWES  
Küpkersweg 70  
26129 Oldenburg, Germany

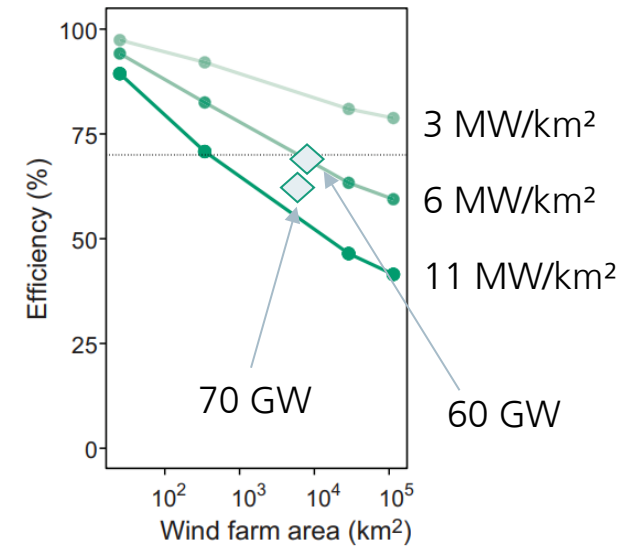
**Phone +49 441 798-5013**  
**[lukas.vollmer@iwes.fraunhofer.de](mailto:lukas.vollmer@iwes.fraunhofer.de)**



# Von Leistungsdichte zu Volllaststunden

## Deutsche Nordsee – Variation der installierten Leistung

- Gedankenexperiment – Erreichung des selben Ertrags mit reduzierter Leistung
  - **60 GW** installierte Leistung
    - Zu erzielender Gesamtertrag = **225 TWh**
    - Resultierende Volllaststunden = 3750 h (72%)
    - Notwendige Leistungsdichte = ca. 6 MW/km<sup>2</sup>
    - Notwendige Fläche = **50% mehr Fläche**



# Von Leistungsdichte zu Volllaststunden

## Deutsche Nordsee – Variation der installierten Leistung

- Gedankenexperiment – Erreichung des selben Ertrags mit reduzierter Leistung
  - **60 GW** installierte Leistung
    - Zu erzielender Gesamtertrag = **225 TWh**
    - Resultierende Volllaststunden = 3750 h (72%)
    - Notwendige Leistungsdichte = ca. 6 MW/km<sup>2</sup>
    - Notwendige Fläche = **50% mehr Fläche**
  - **50 GW** installierte Leistung
    - Zu erzielender Gesamtertrag = **225 TWh**
    - Resultierende Volllaststunden = 4500 h (87%)
    - Notwendige Leistungsdichte = < 3 MW/km<sup>2</sup>
    - Notwendige Fläche = **Fläche der kompletten AWZ**

