

Windenergie in Deutschland und Europa Potenziale und Herausforderungen in der Grundversorgung mit Strom

Teil 1: Entwicklungen in Deutschland seit 2010

Teil 2: Europäische Situation im Jahr 2016

Thomas Linnemann, Guido S. Vallana



Fakt: Die Nennleistung sämtlicher Windenergieanlagen in Deutschland hat sich in den letzten 17 Jahren auf ≈ 54.000 MW mehr als verachtfacht.

Wussten Sie, dass

- 1) ... die Leistungseinspeisungen aller Windenergieanlagen stark fluktuieren?
- 2) ... die Nennleistung sämtlicher Windenergieanlagen niemals erreicht wird?
- 3) ... die Minimalwerte seit Jahren fast unverändert kleiner als 160 MW sind?
- 4) ... Offshore-Windenergie ebenfalls stark schwankende Leistungen liefert?
- 5) ... die Leistungseinspeisungen aus Windenergie nicht normalverteilt sind?
- 6) ... die intuitiv vermutete Glättung nur in geringfügigem Maße eintritt?
- 7) ... Windenergie praktisch nicht zur Versorgungssicherheit beiträgt?
- 8) ... Windenergie fast 100 % planbare Backup-Technik erfordert?

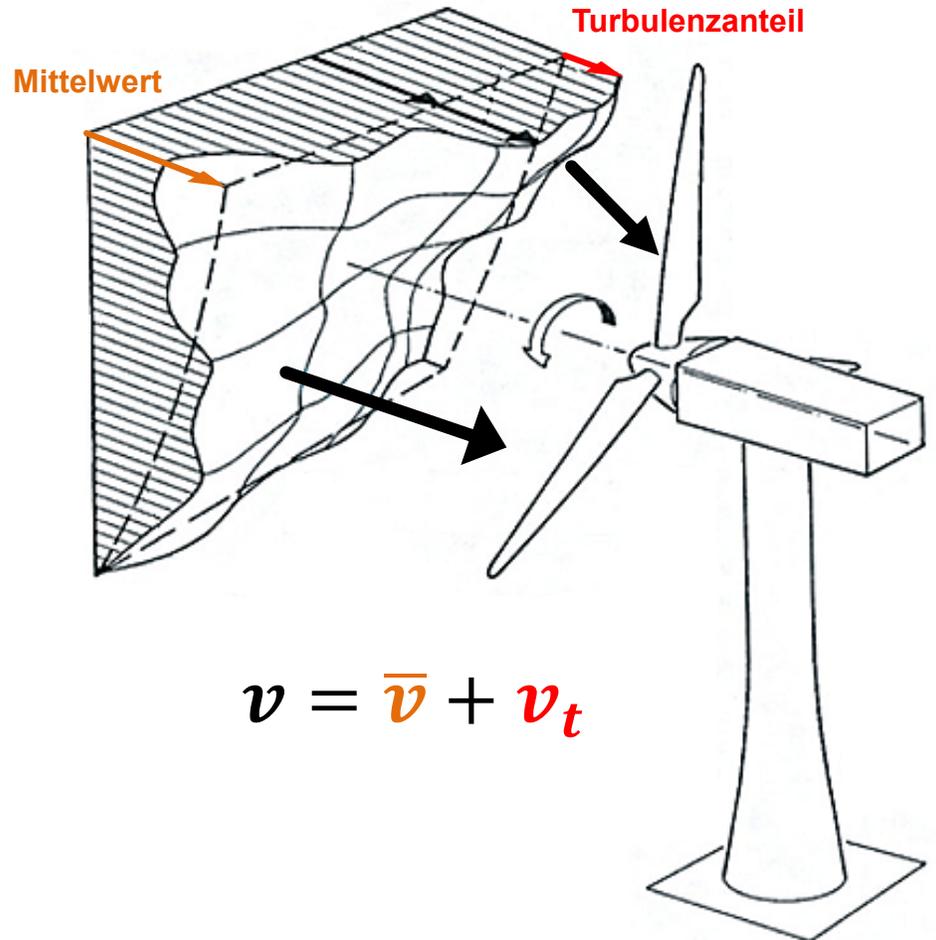
VGB-Faktencheck ► Plausibilitätsnachweise

Die turbulenten Eigenschaften der Windenergie

Grafik: Siemens

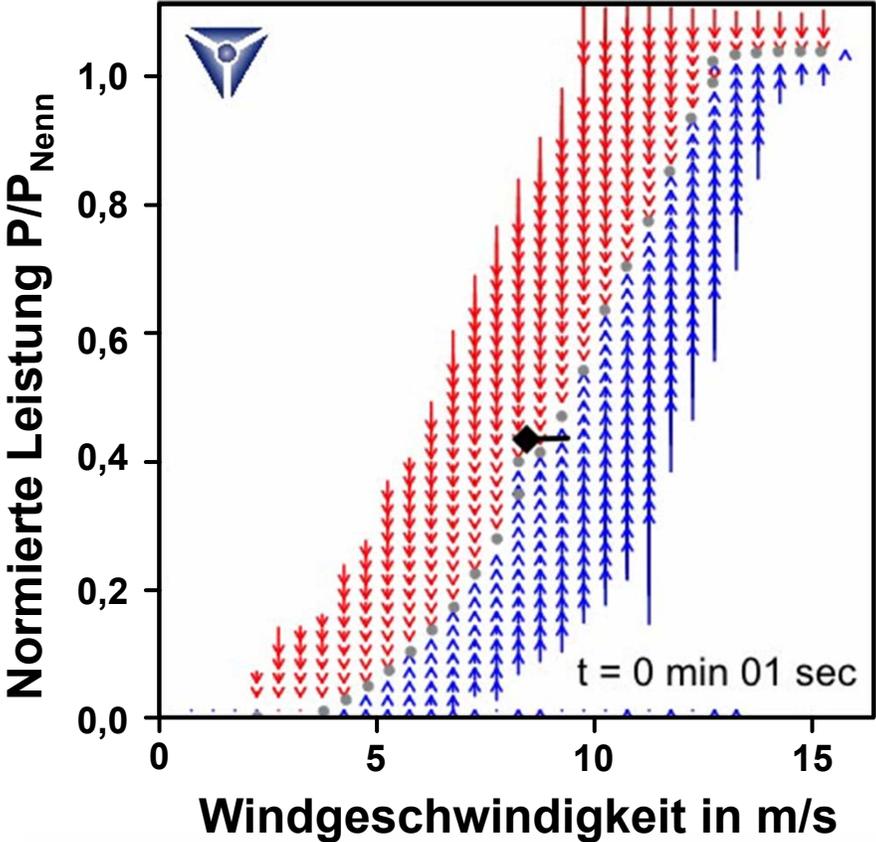


3D-Geschwindigkeitsfeld





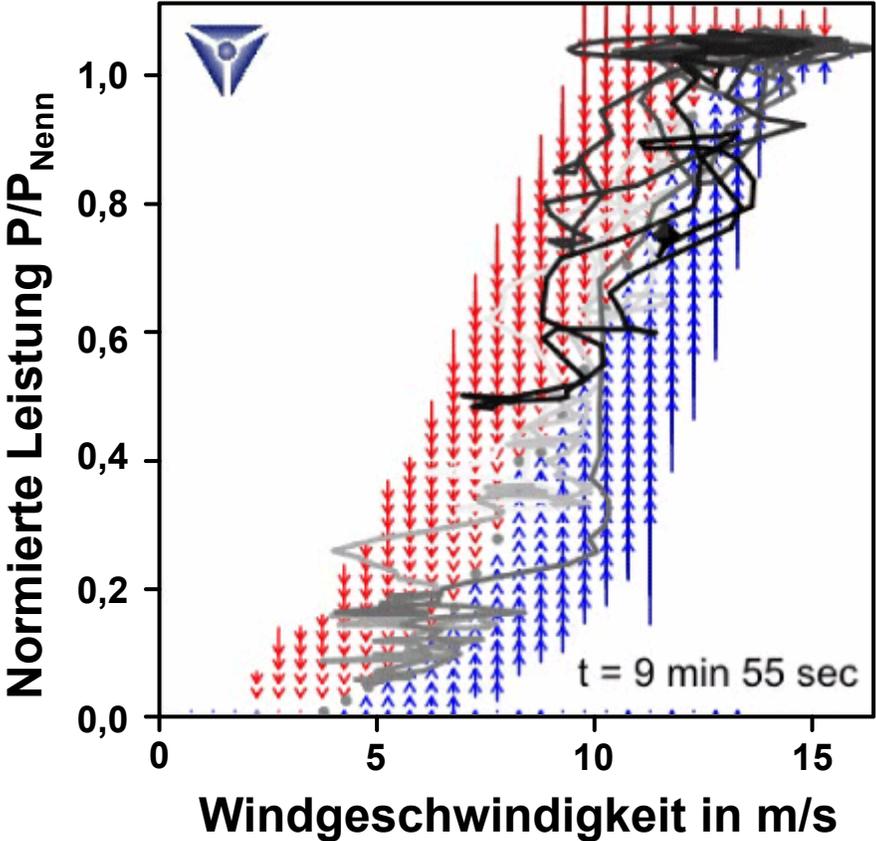
Leistungstrajektorie



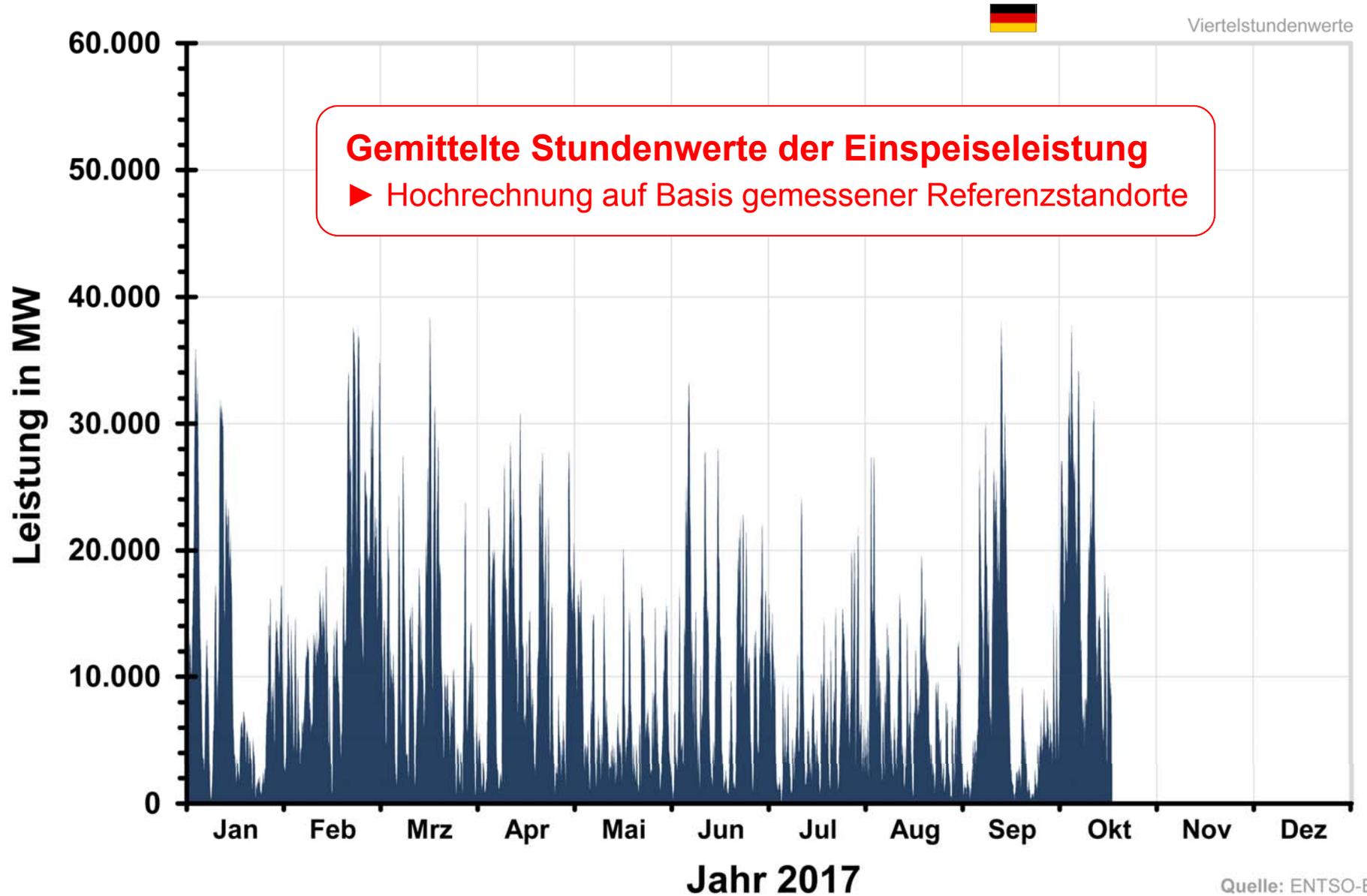
Quelle: Milan, P.; Wächter, M.; Peinke, J.: Turbulent Character of Wind Energy. Physical Review Letters 110, 138701 (2013).



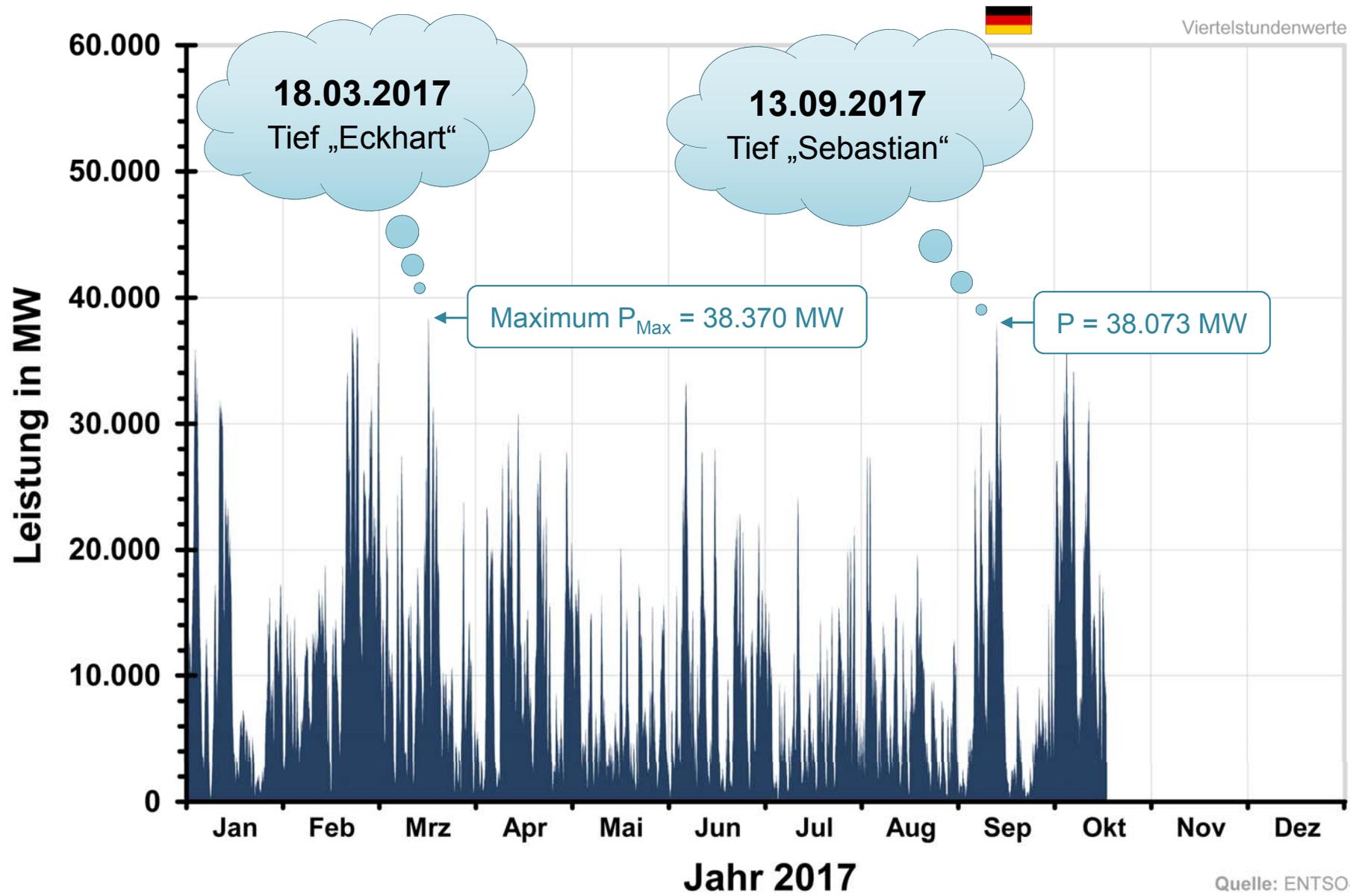
Leistungstrajektorie



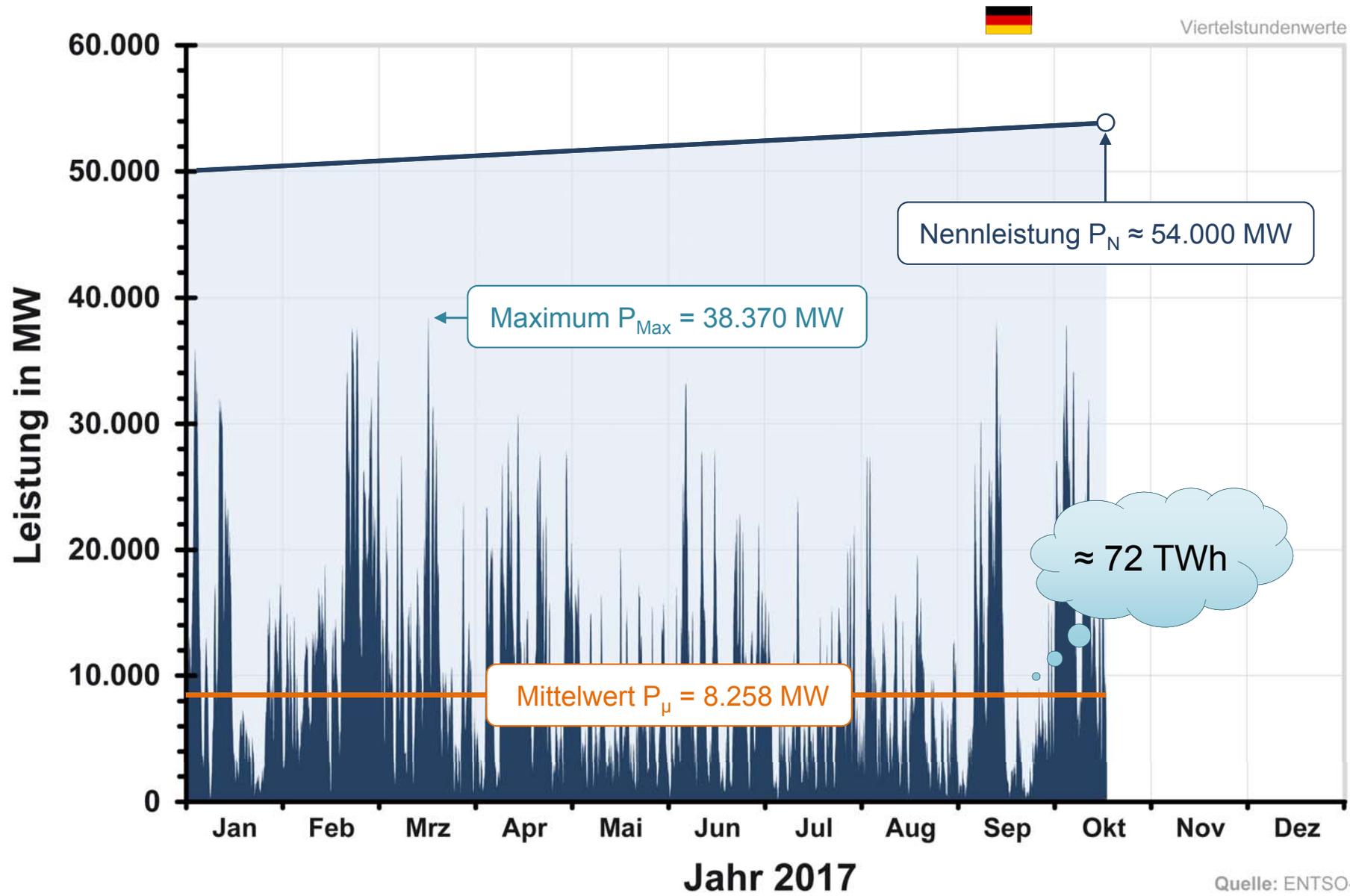
Quelle: Milan, P.; Wächter, M.; Peinke, J.: Turbulent Character of Wind Energy. Physical Review Letters 110, 138701 (2013).



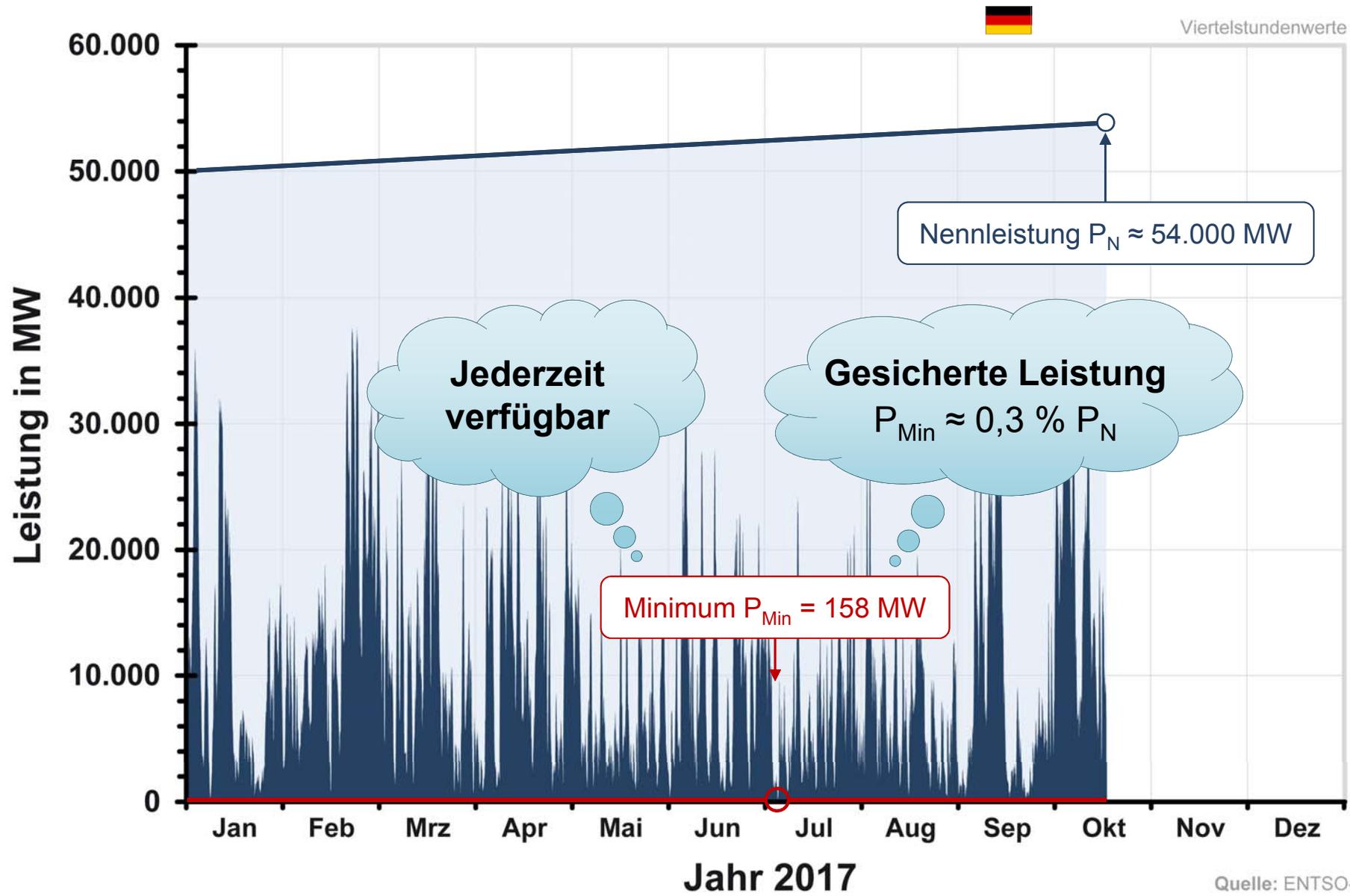
Quelle: ENTSO-E



Quelle: ENTSO-E



Quelle: ENTSO-E



Transparenzdaten für Deutschland

- Zeitreihen zur Stromversorgung
- Auflösung in Viertelstundenwerten
- Nennleistung der Windenergieanlagen
- Gesamtleistung der Windenergieanlagen
- Gesamtleistung der Verbraucher (Last)

Hinweise

- Keine eigene Daten, sondern Plausibilitätsüberprüfung zeitlich synchronisierter Transparenzdaten (UTC: koordinierte Weltzeit)
- Lineare Interpolation bei Datenlücken
- Verifizierung interpolierter Werte auf Basis weiterer Datenquellen

Kernfrage

- Weht irgendwo immer Wind für eine Grundversorgung mit Strom?



Illustration: www.kultur-denkmal-merzenich.de

Betriebserfahrungen von 2010 bis 2016

DE

▶ Aufteilung zwischen On- und Offshore

Zeitreihen der Leistung

➤ ÜNB

Nationale Übertragungsnetzbetreiber

➤ ENTSO-E

Europäische Übertragungsnetzbetreiber

Energiestatistische Daten

➤ AGEB

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen

➤ BDEW

Bundesverband Energie- und Wasserwirtschaft

➤ BMWi

Bundeswirtschaftsministerium

➤ BWE

Bundesverband Windenergie

Betriebserfahrungen von 2010 bis 2016

DE

Onshore

Zeitreihen der Leistung

- **ÜNB**
Nationale Übertragungsnetzbetreiber
- **ENTSO-E**
Europäische Übertragungsnetzbetreiber

Energiestatistische Daten

- **AGEB**
Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
- **BDEW**
Bundesverband Energie- und Wasserwirtschaft
- **BMWi**
Bundeswirtschaftsministerium
- **BWE**
Bundesverband Windenergie

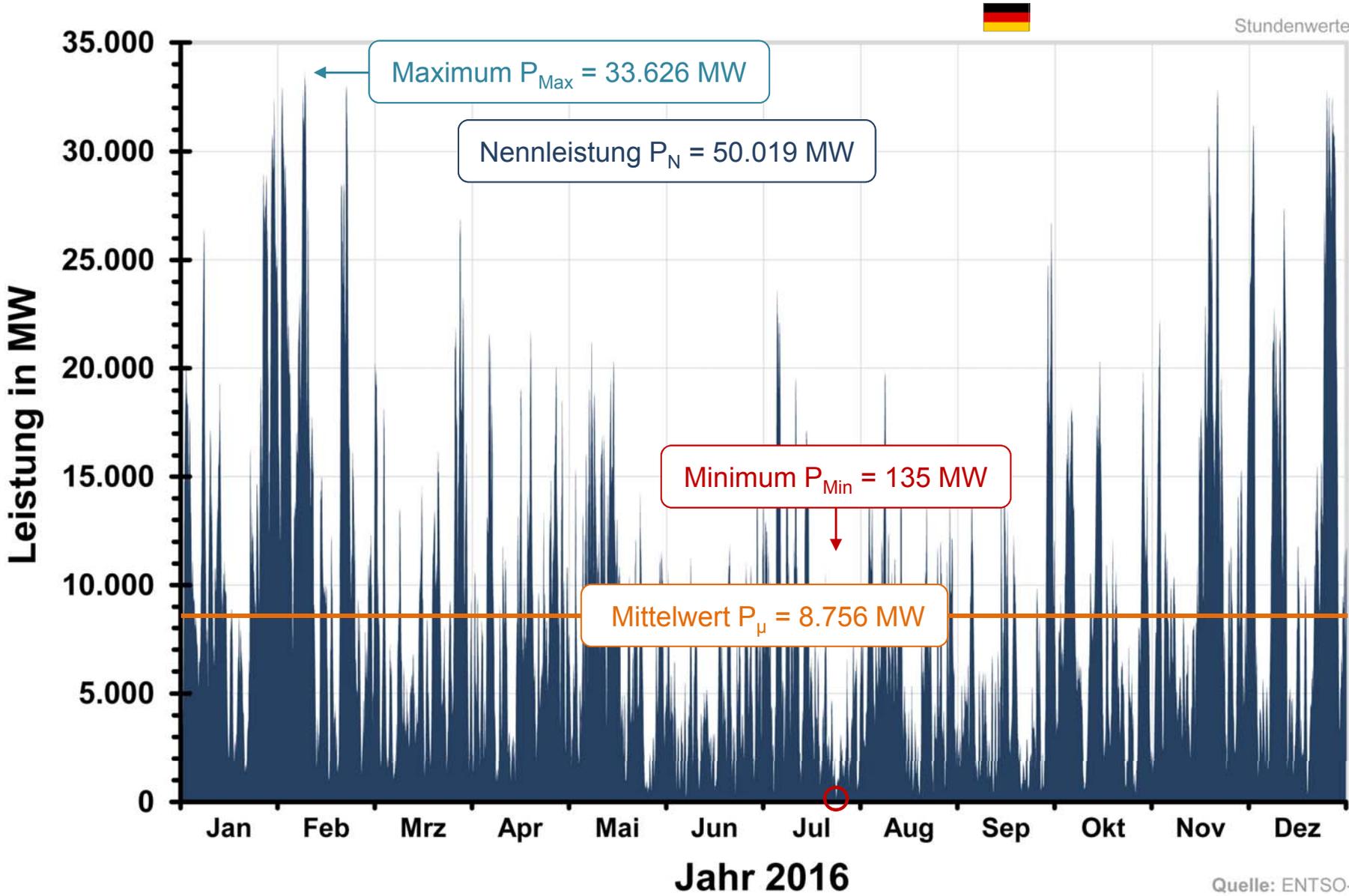


Zeitreihen der Leistung

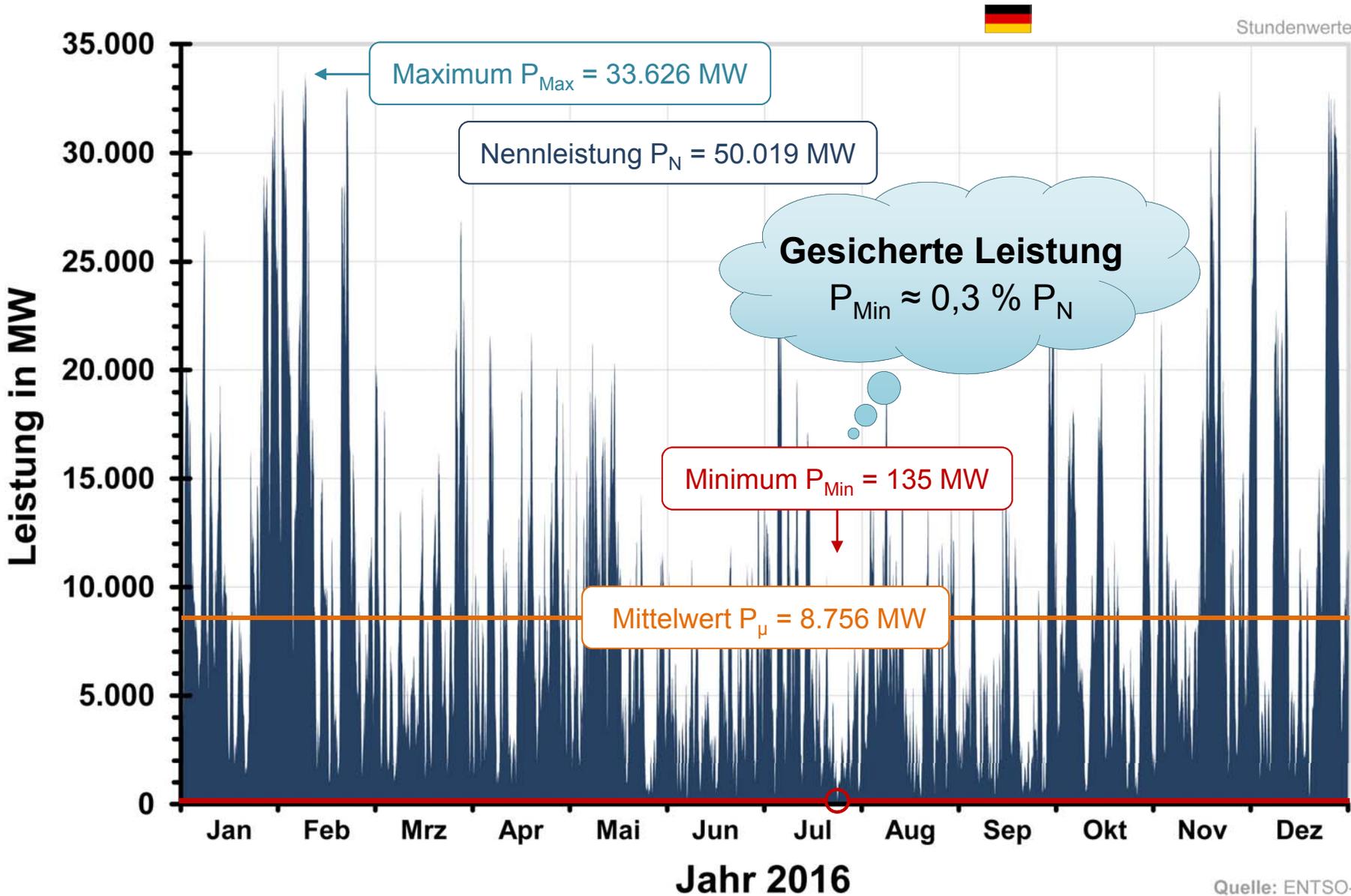
- **ÜNB**
Nationale Übertragungsnetzbetreiber
- **ENTSO-E**
Europäische Übertragungsnetzbetreiber

Energiestatistische Daten

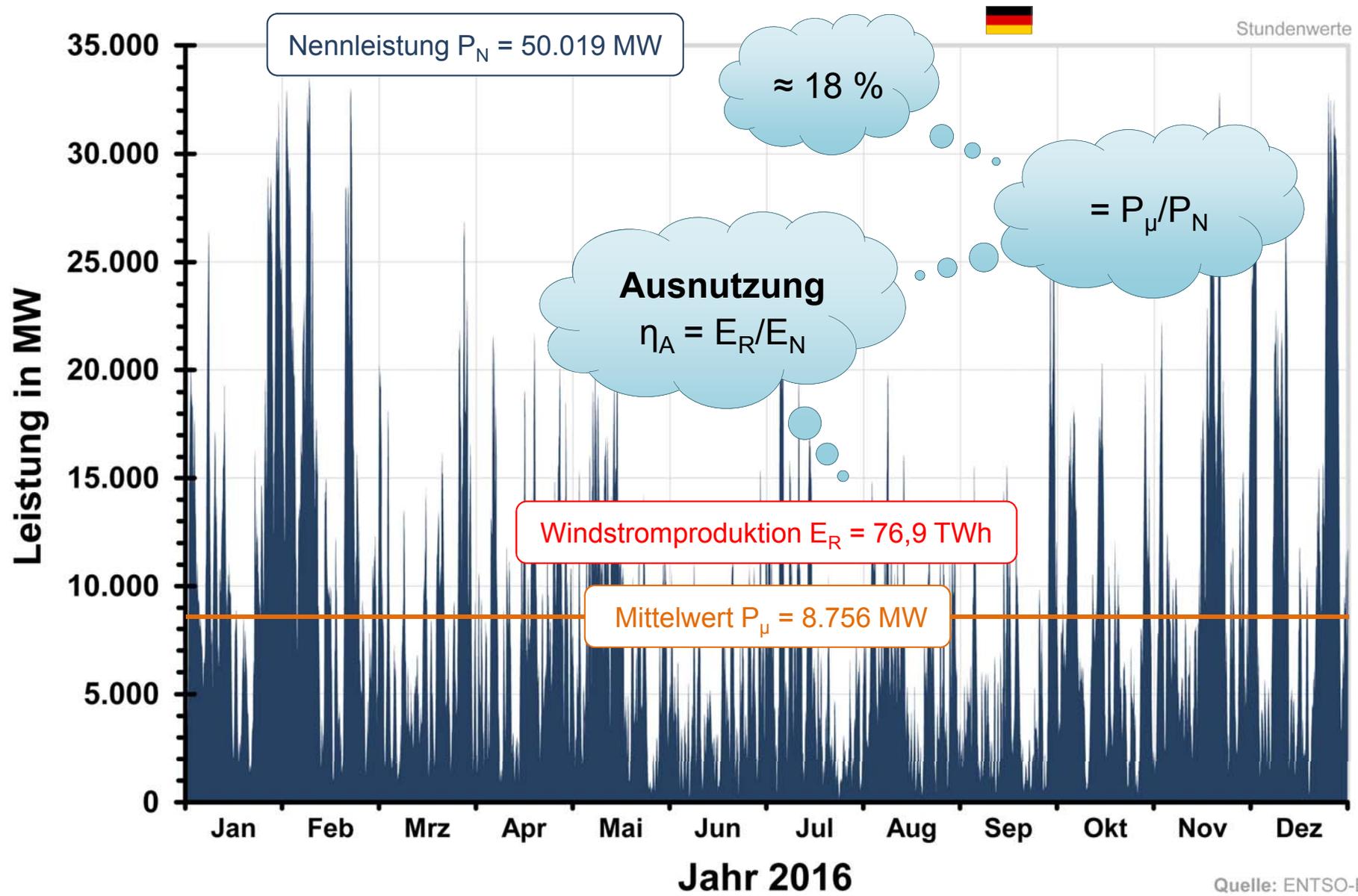
- **AGEB**
Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
- **BDEW**
Bundesverband Energie- und Wasserwirtschaft
- **BMWi**
Bundeswirtschaftsministerium
- **BWE**
Bundesverband Windenergie



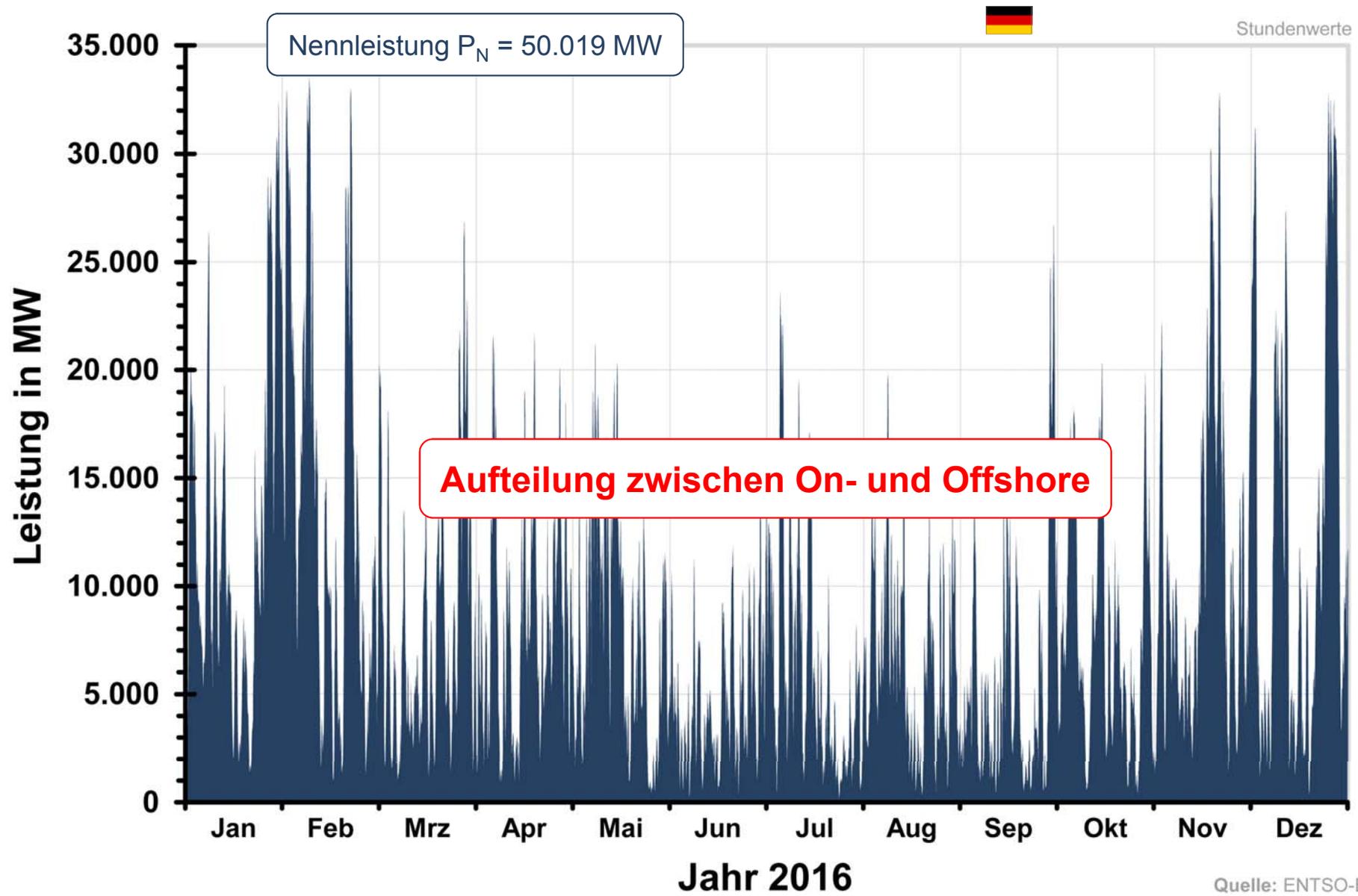
Quelle: ENTSO-E



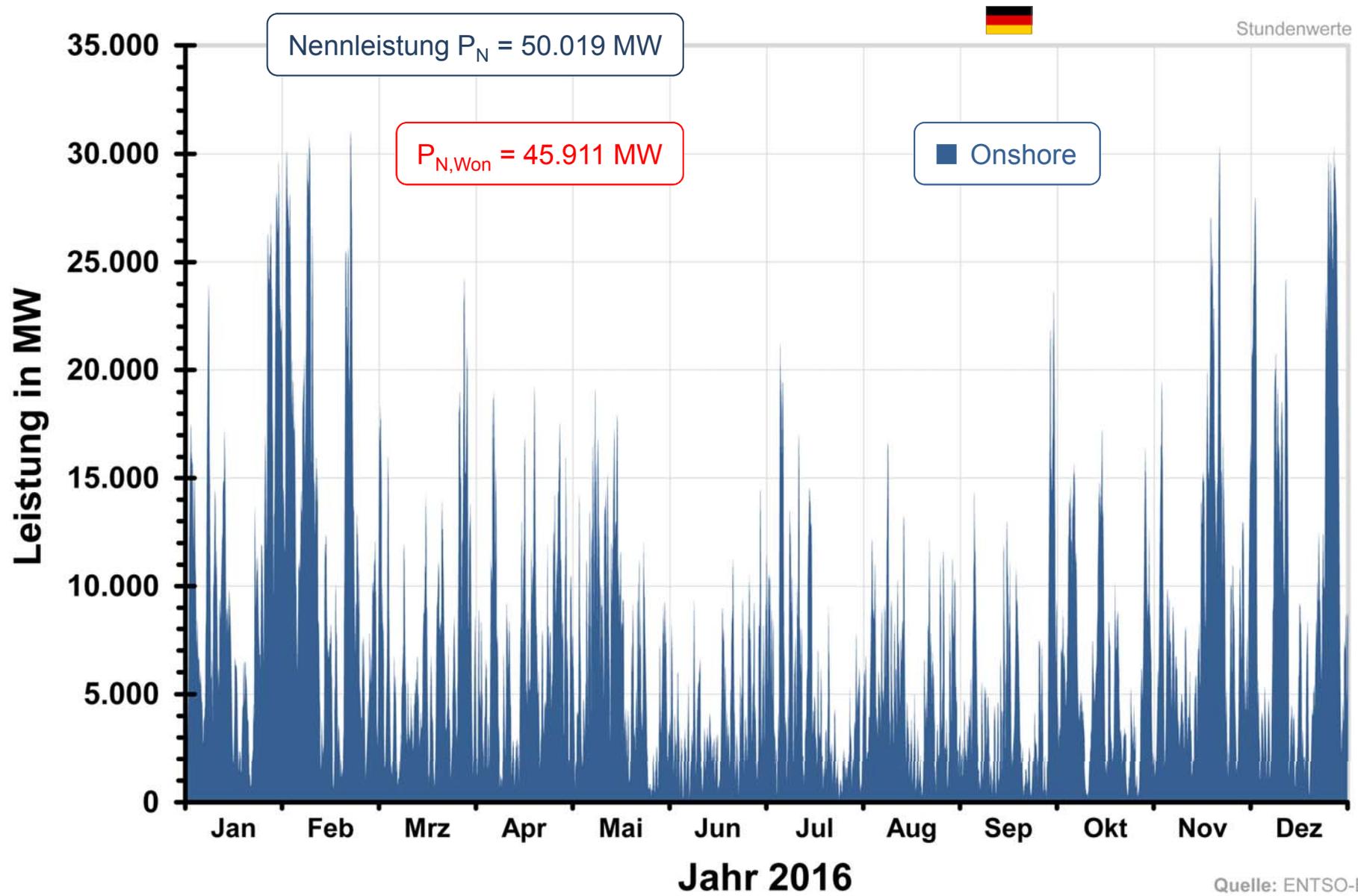
Quelle: ENTSO-E



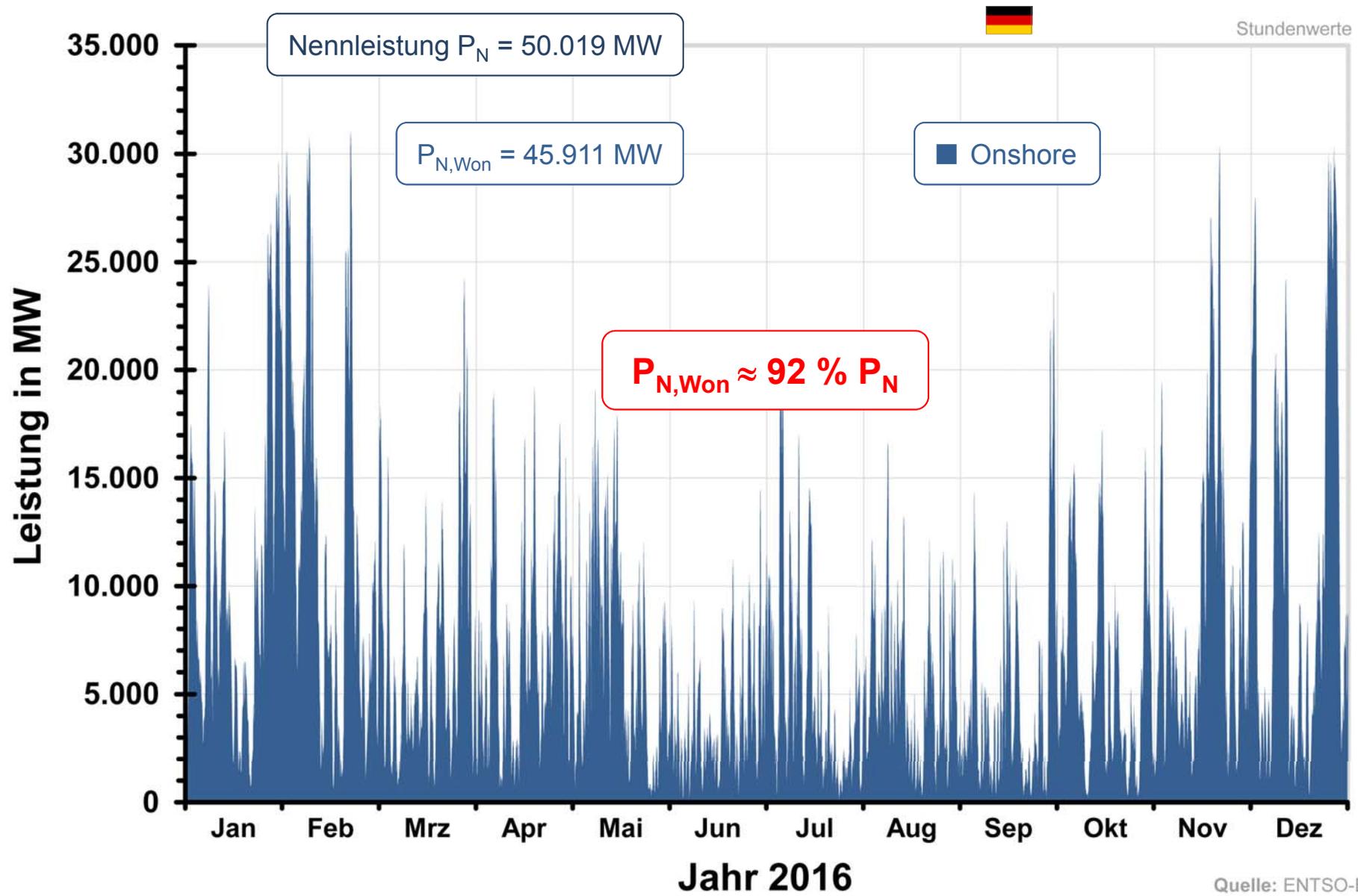
Quelle: ENTSO-E



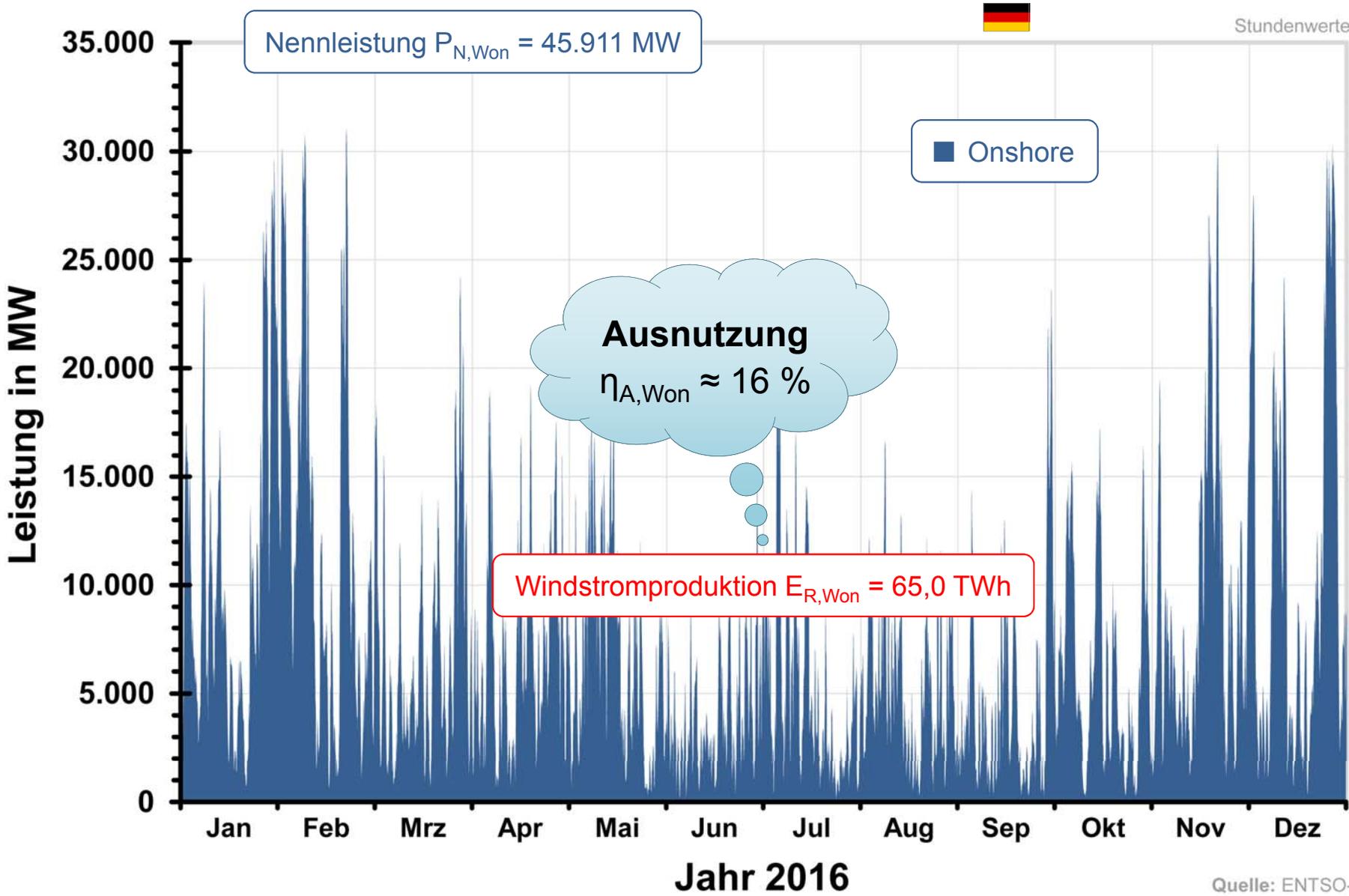
Quelle: ENTSO-E



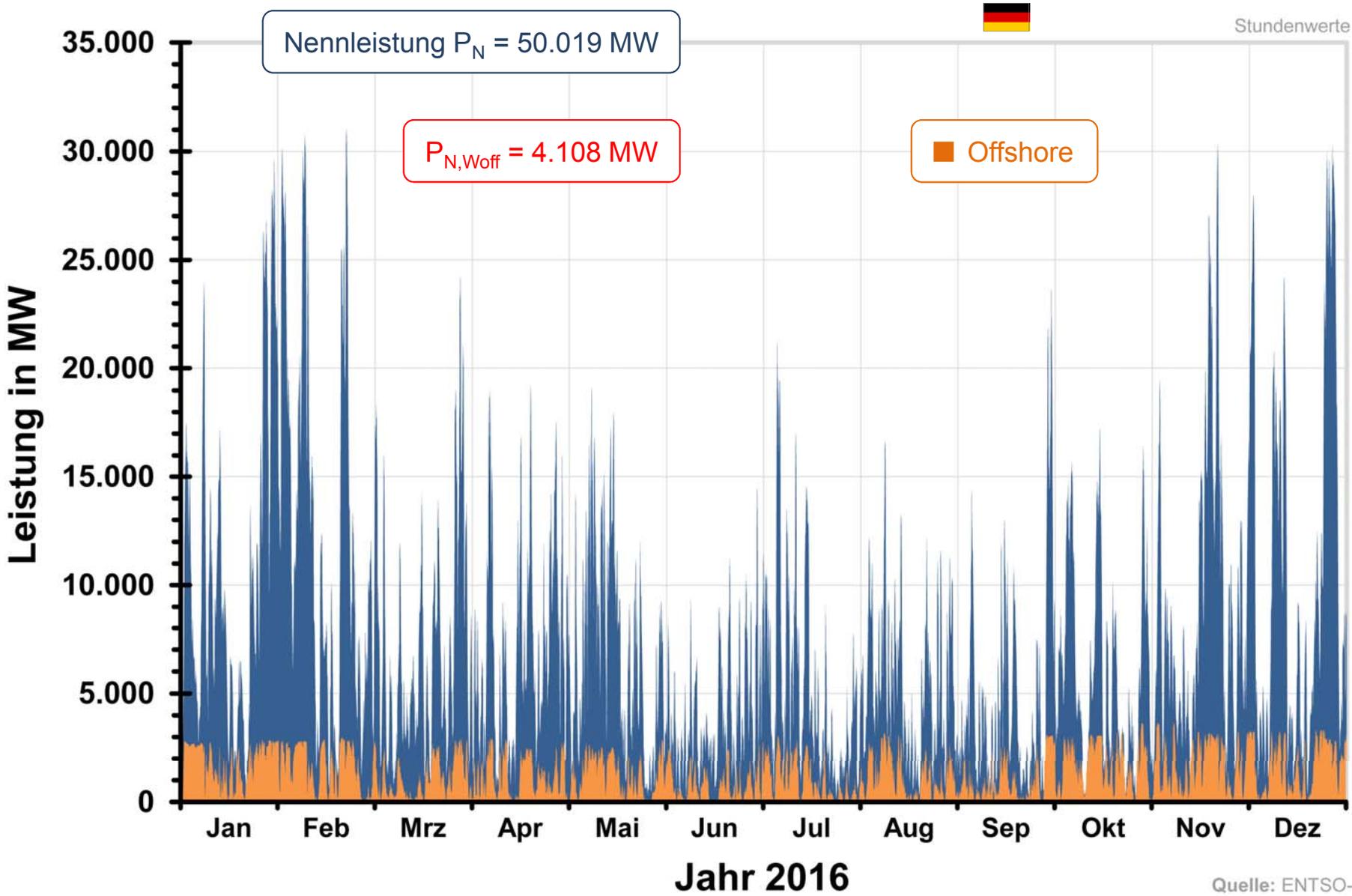
Quelle: ENTSO-E

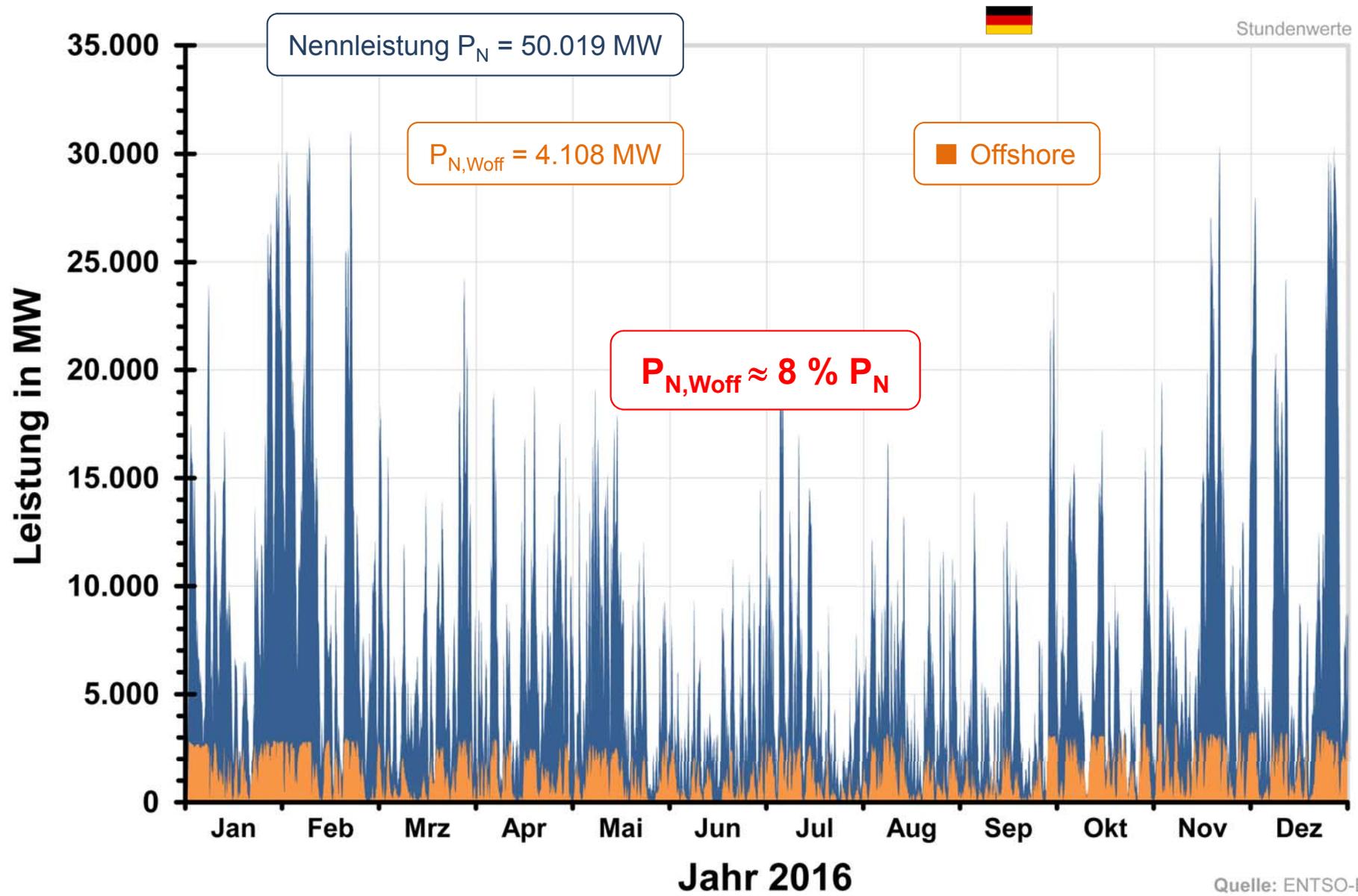


Quelle: ENTSO-E

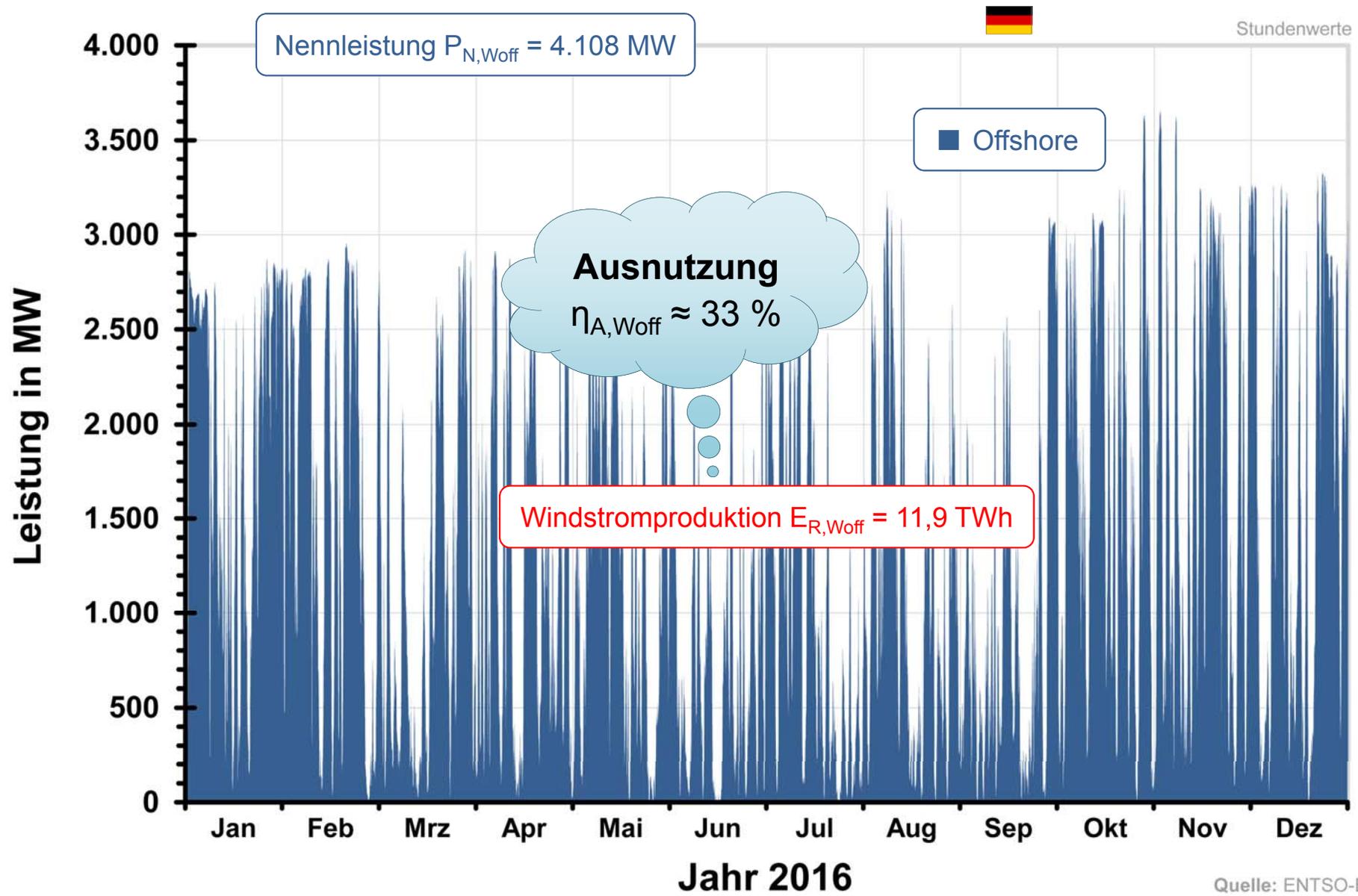


Quelle: ENTSO-E

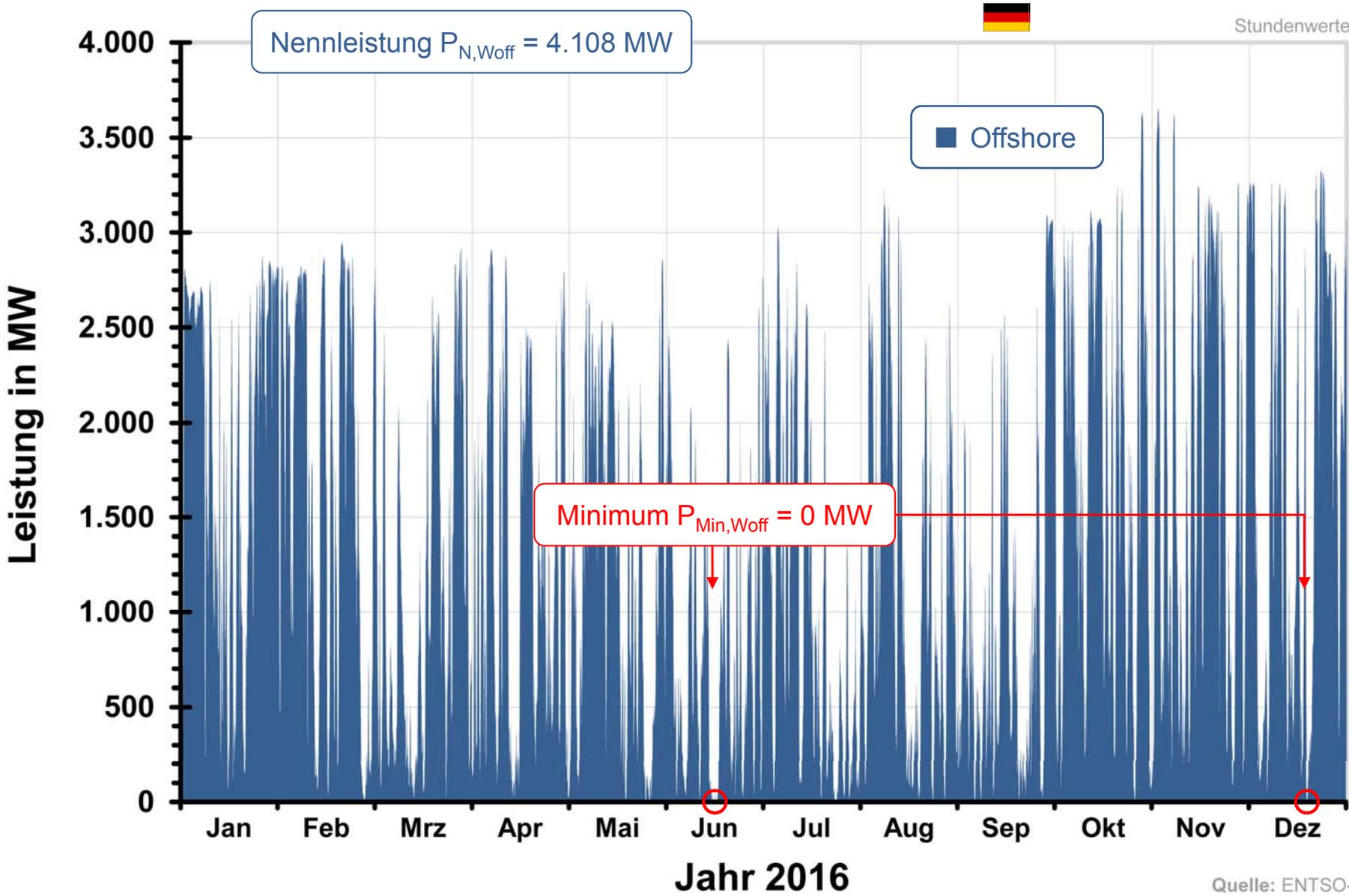




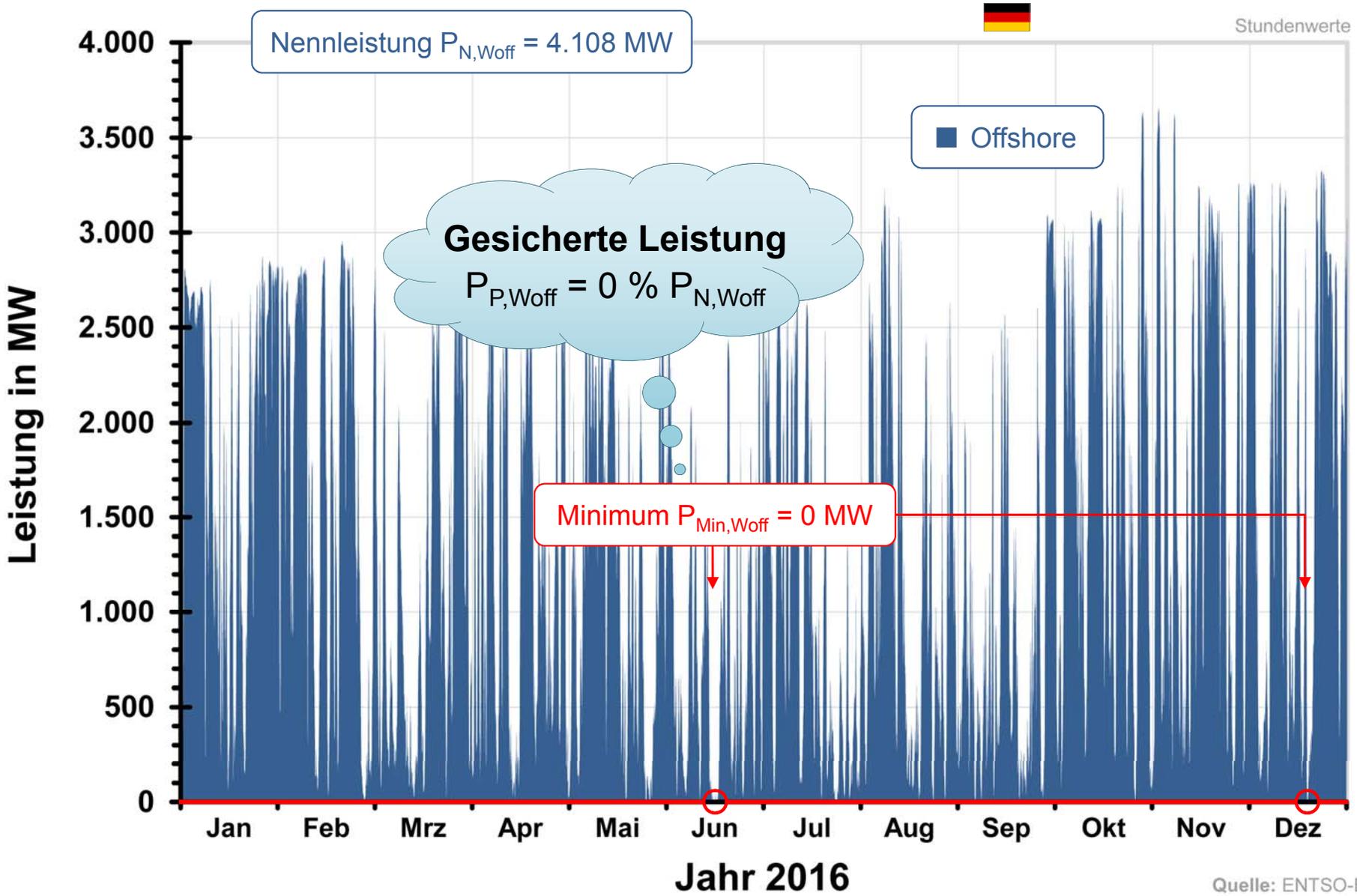
Quelle: ENTSO-E

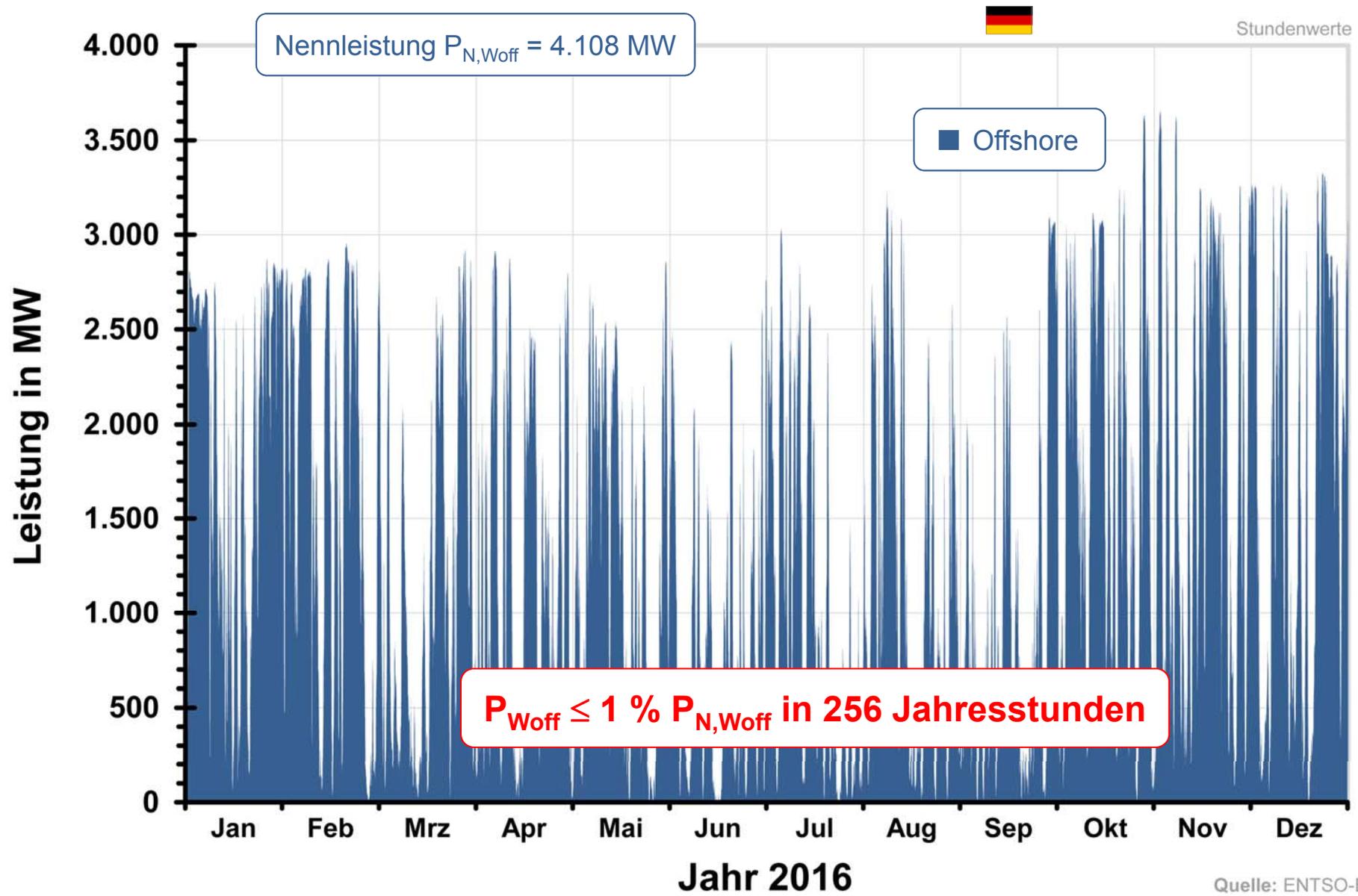


Quelle: ENTSO-E

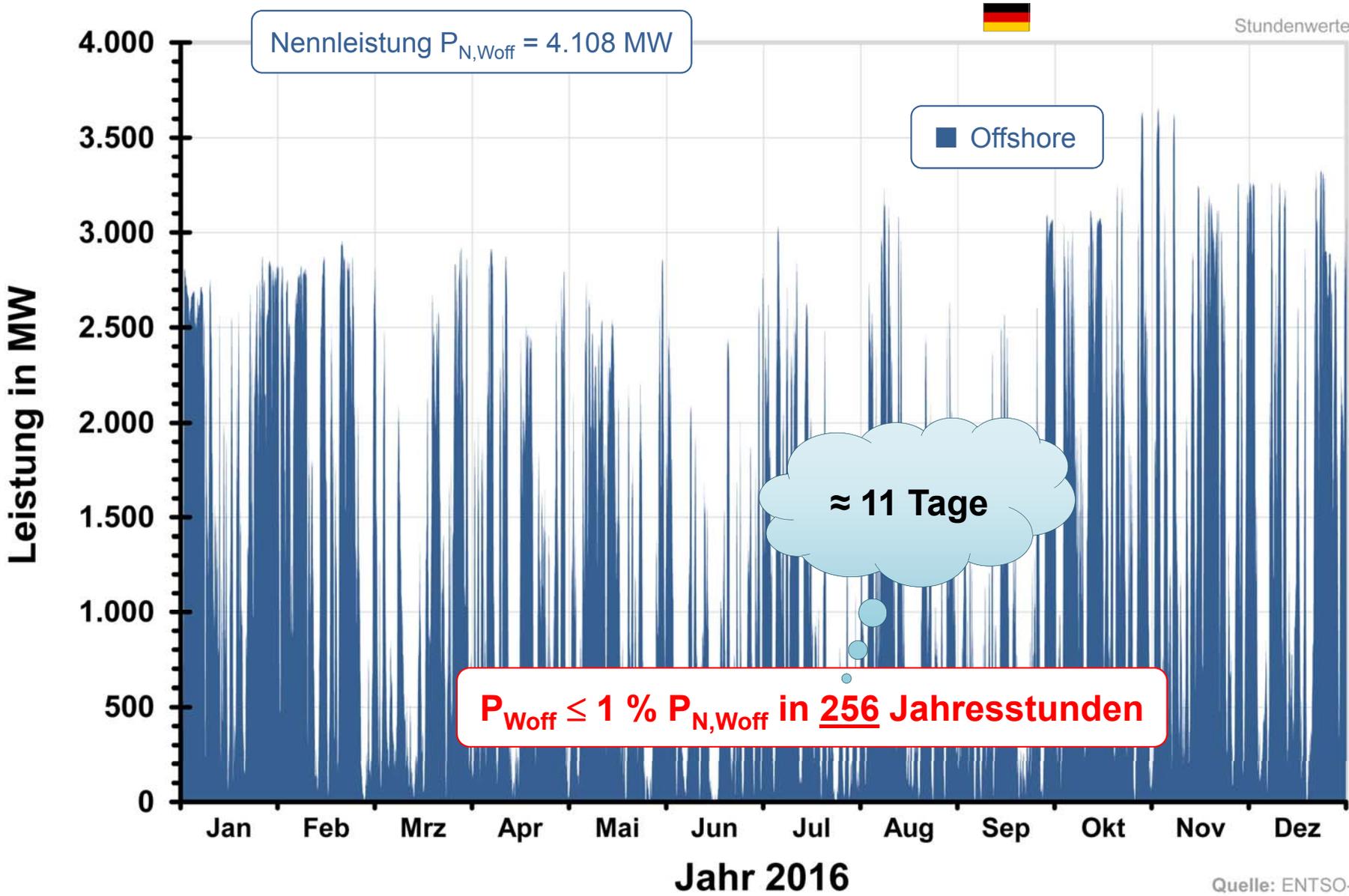


Quelle: ENTSO-E

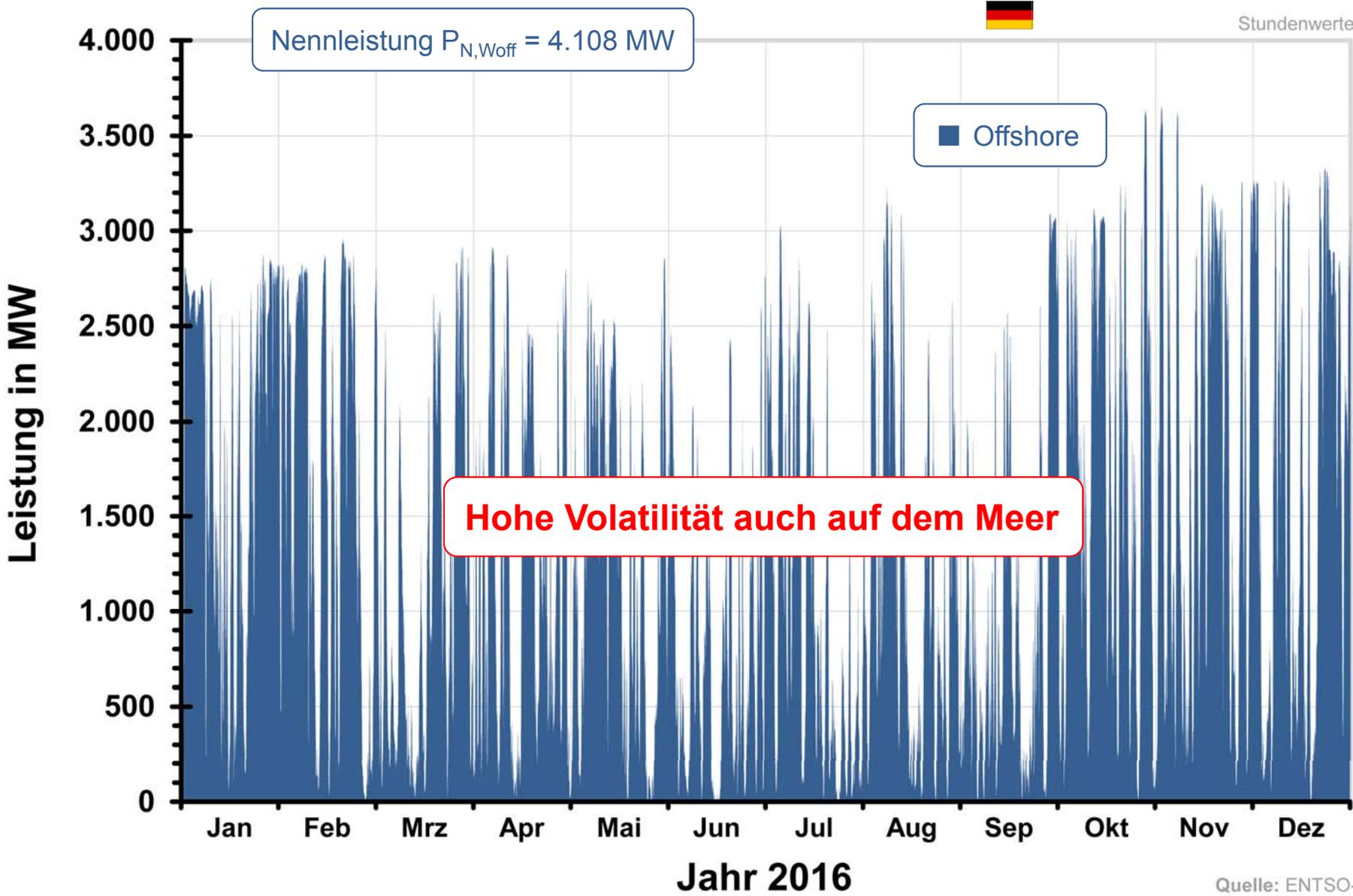




Quelle: ENTSO-E

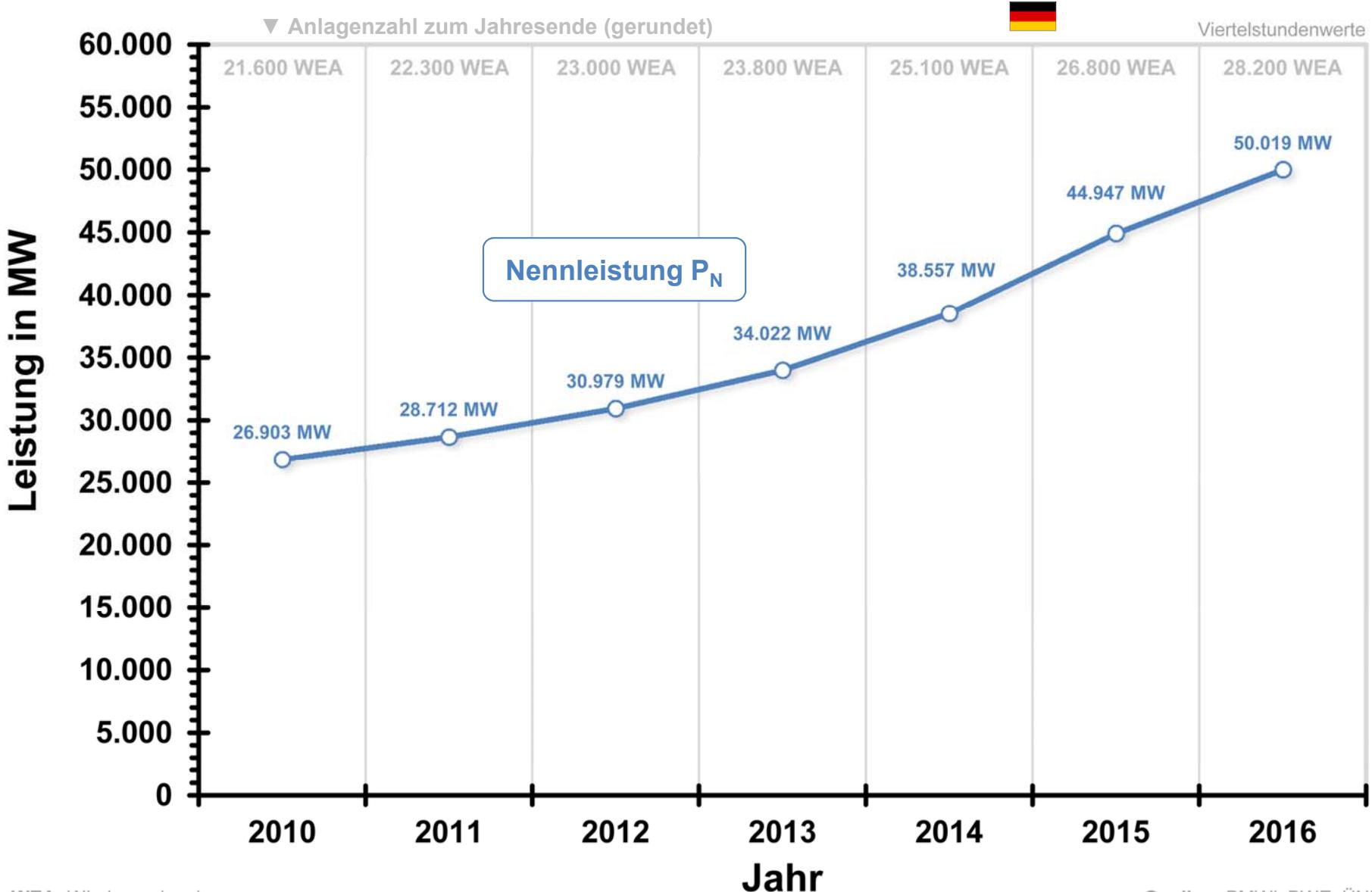


Quelle: ENTSO-E



Quelle: ENTSO-E

Deutschland: Windstromproduktion von 2010 bis 2016

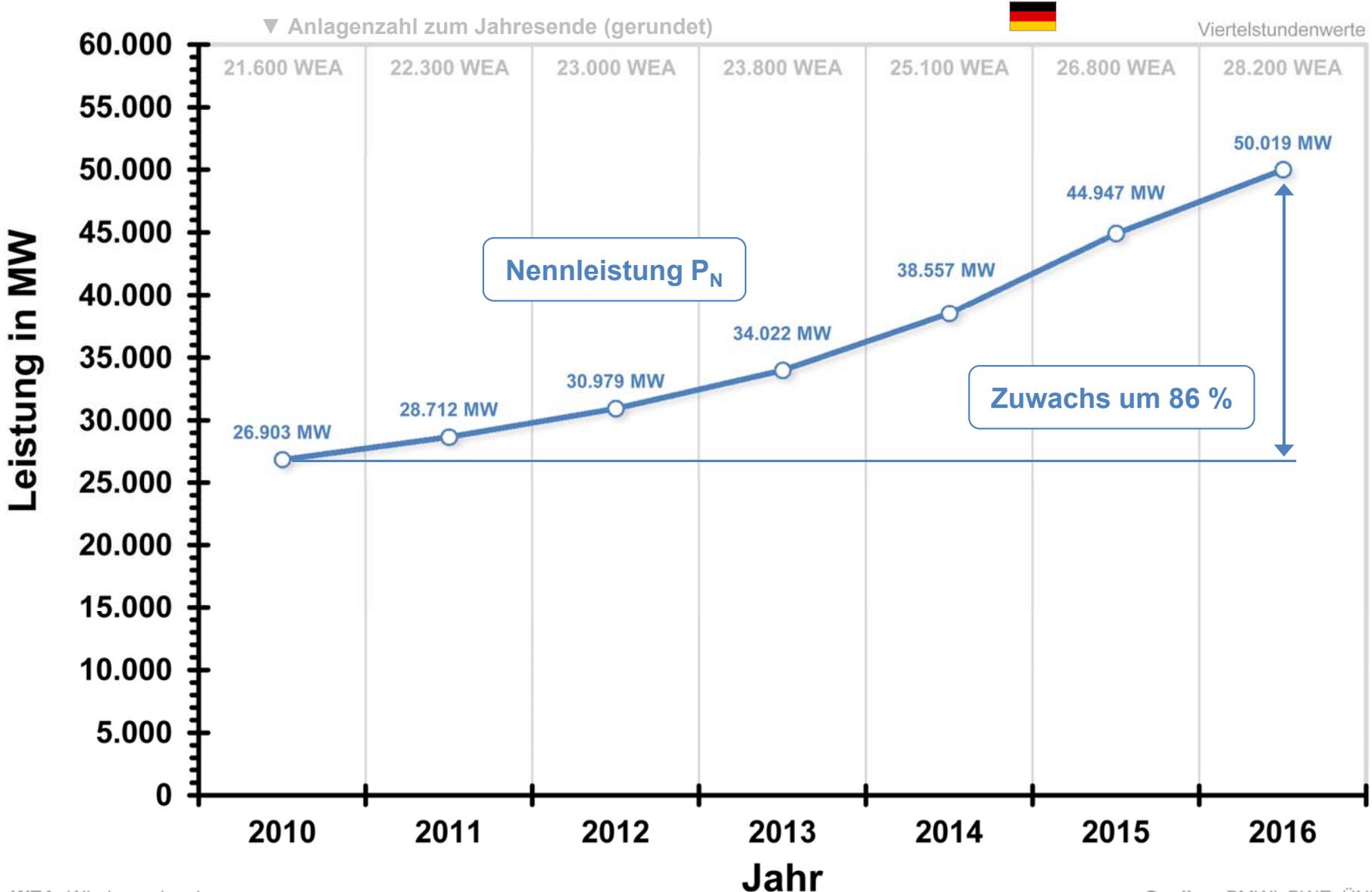


WEA: Windenergieanlagen

Quellen: BMWi, BWE, ÜNB



Deutschland: Windstromproduktion von 2010 bis 2016

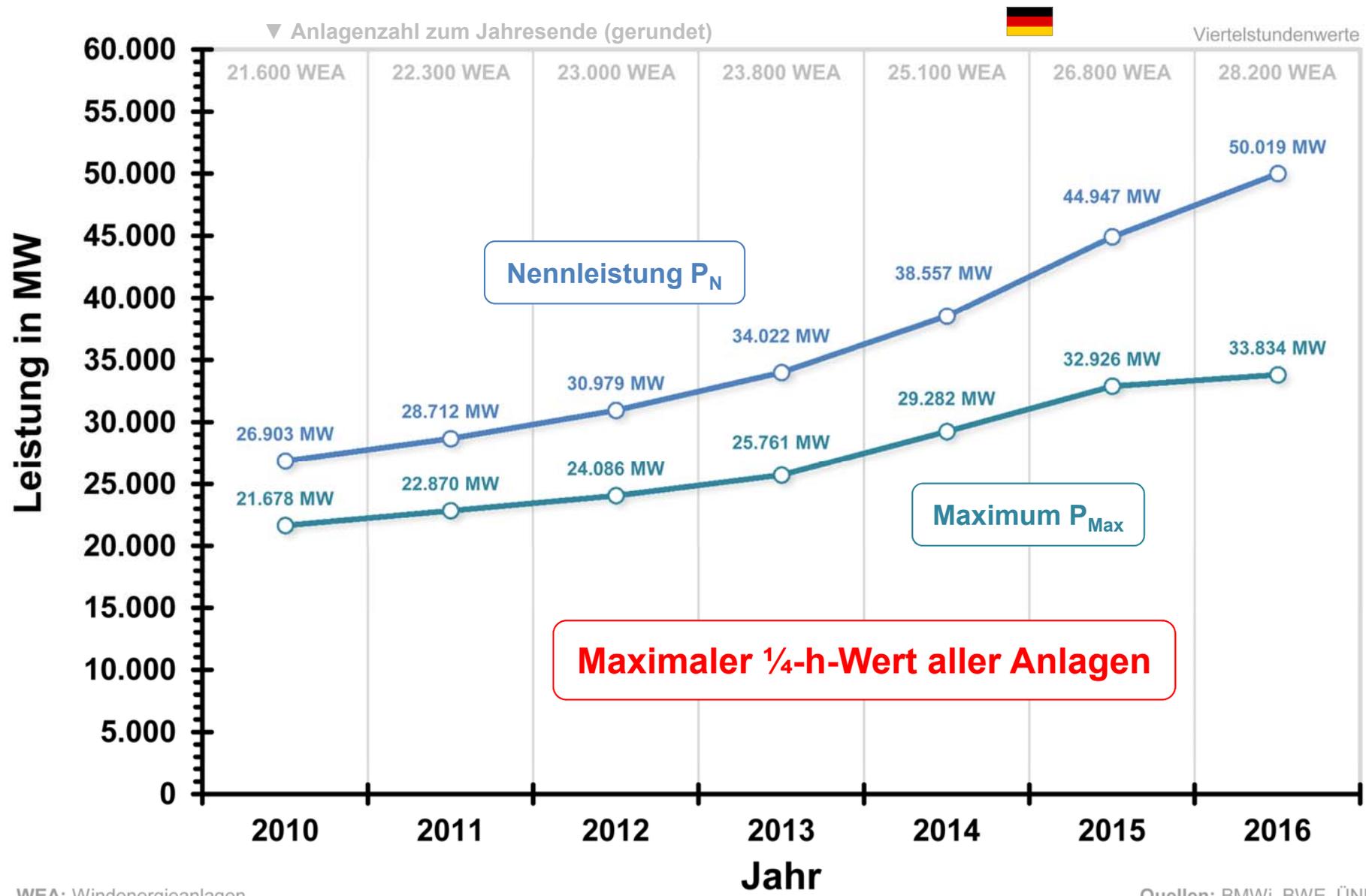


WEA: Windenergieanlagen

Quellen: BMWi, BWE, ÜNB



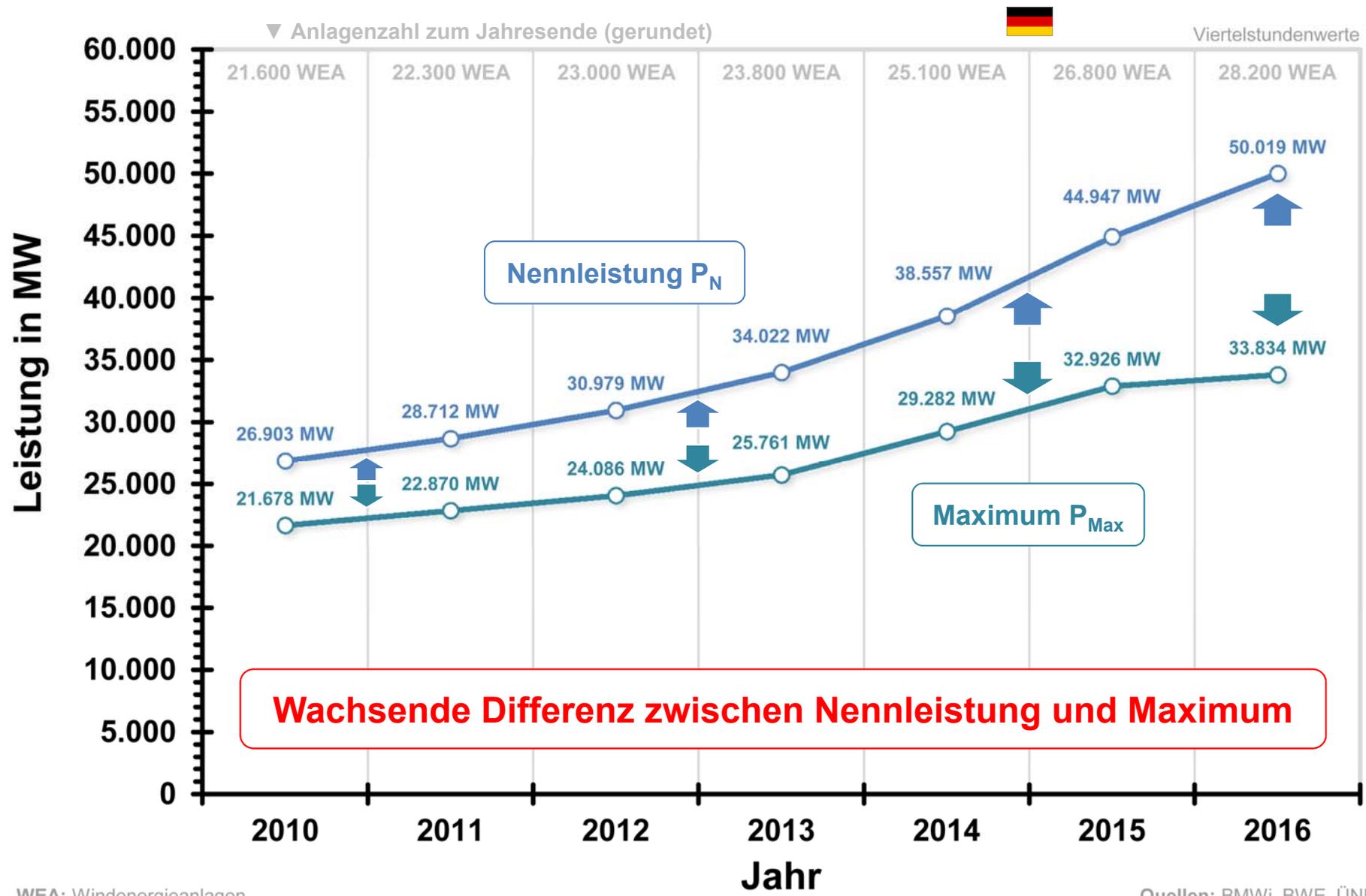
Deutschland: Windstromproduktion von 2010 bis 2016



WEA: Windenergieanlagen

Quellen: BMWi, BWE, ÜNB

Deutschland: Windstromproduktion von 2010 bis 2016

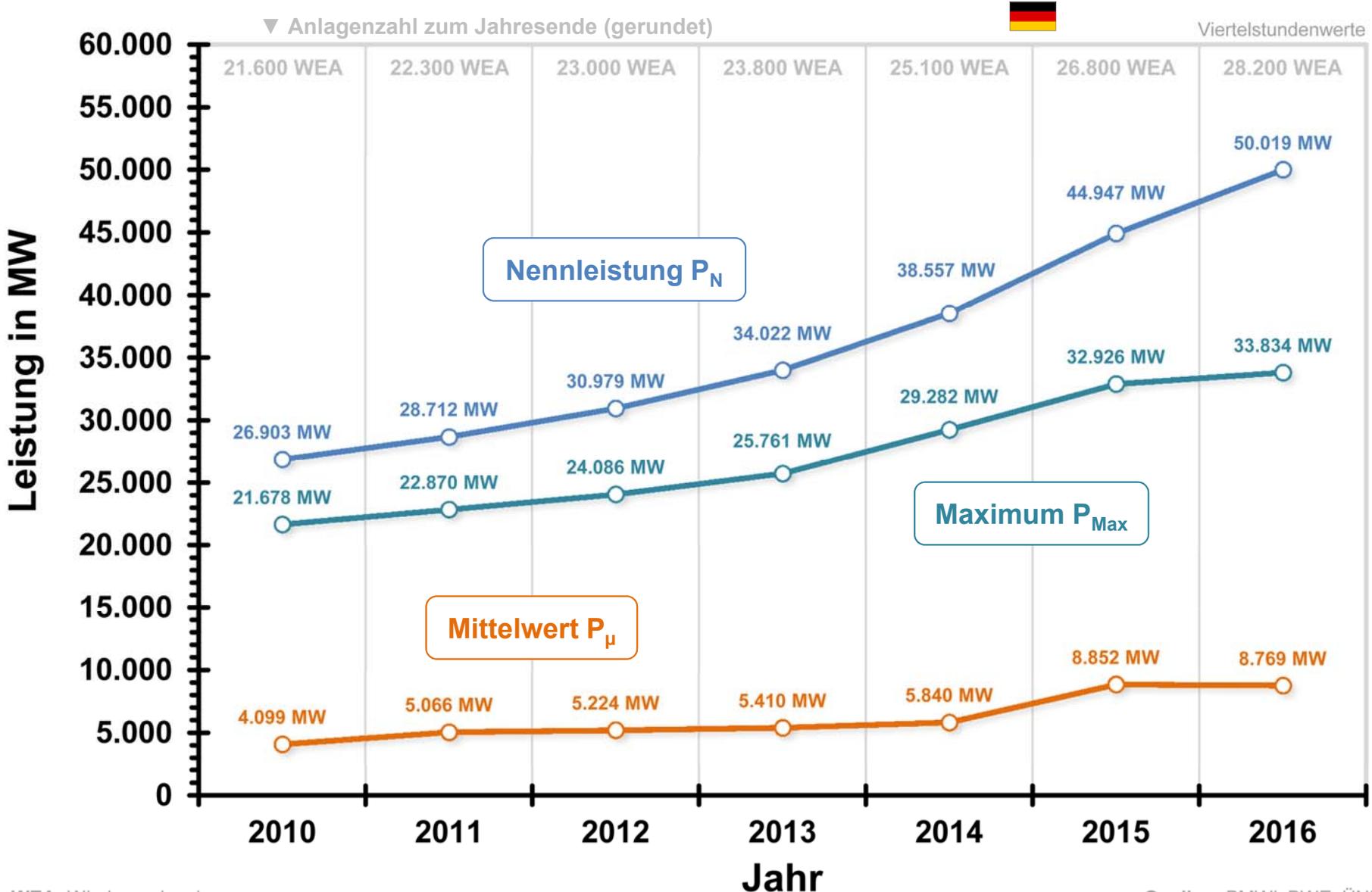


WEA: Windenergieanlagen

Quellen: BMWi, BWE, ÜNB



Deutschland: Windstromproduktion von 2010 bis 2016

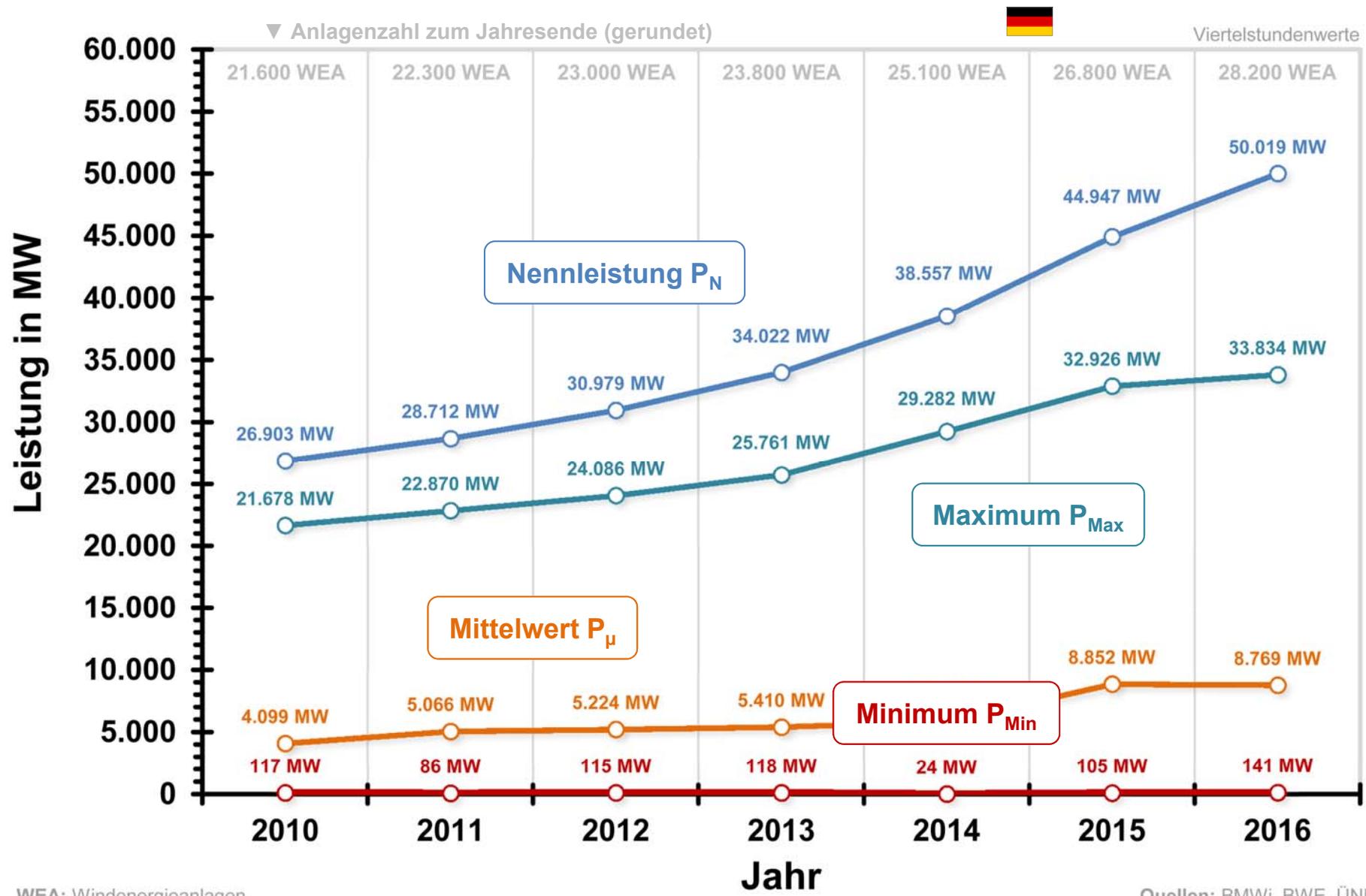


WEA: Windenergieanlagen

Quellen: BMWi, BWE, ÜNB



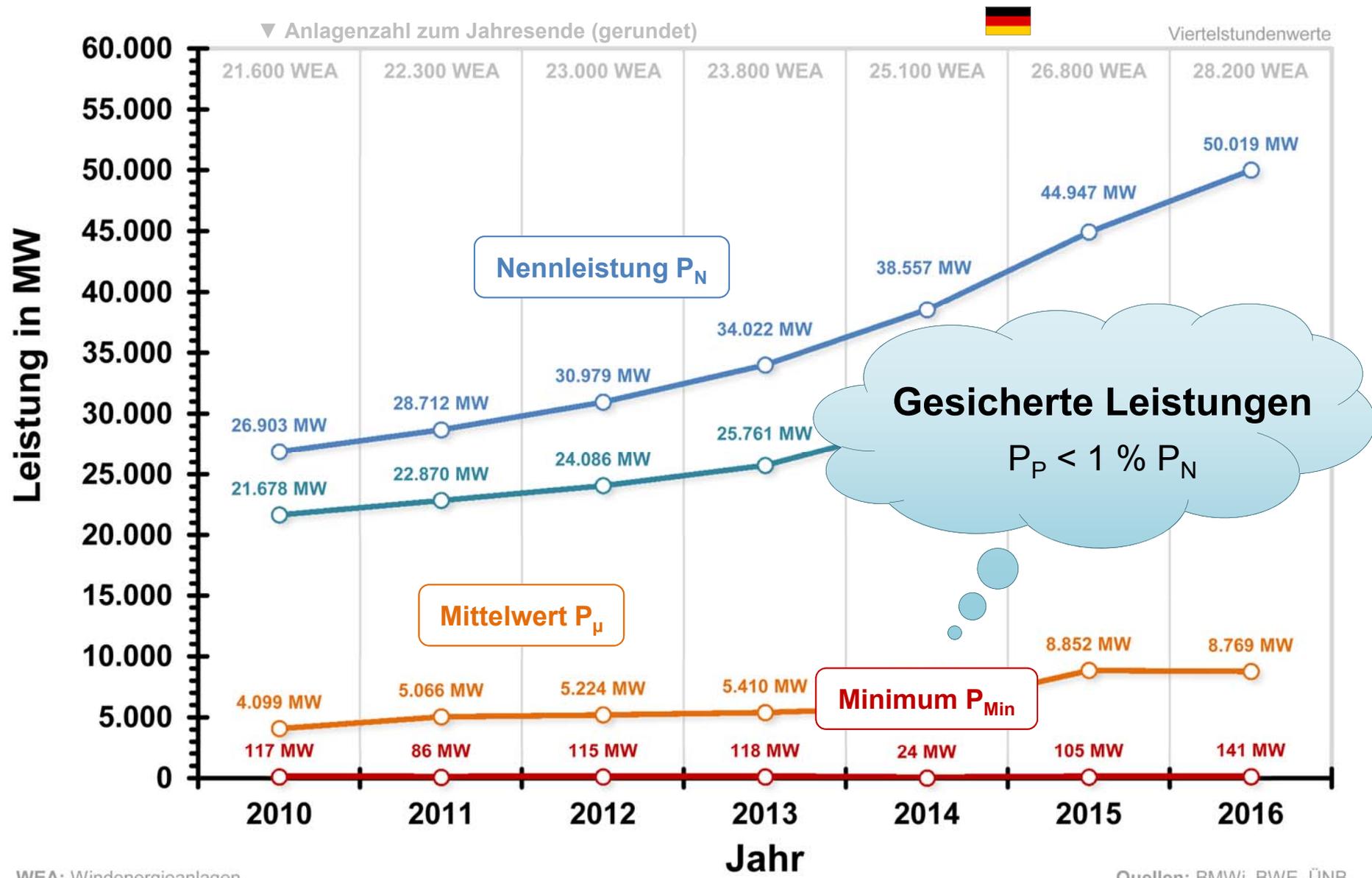
Deutschland: Windstromproduktion von 2010 bis 2016



WEA: Windenergieanlagen

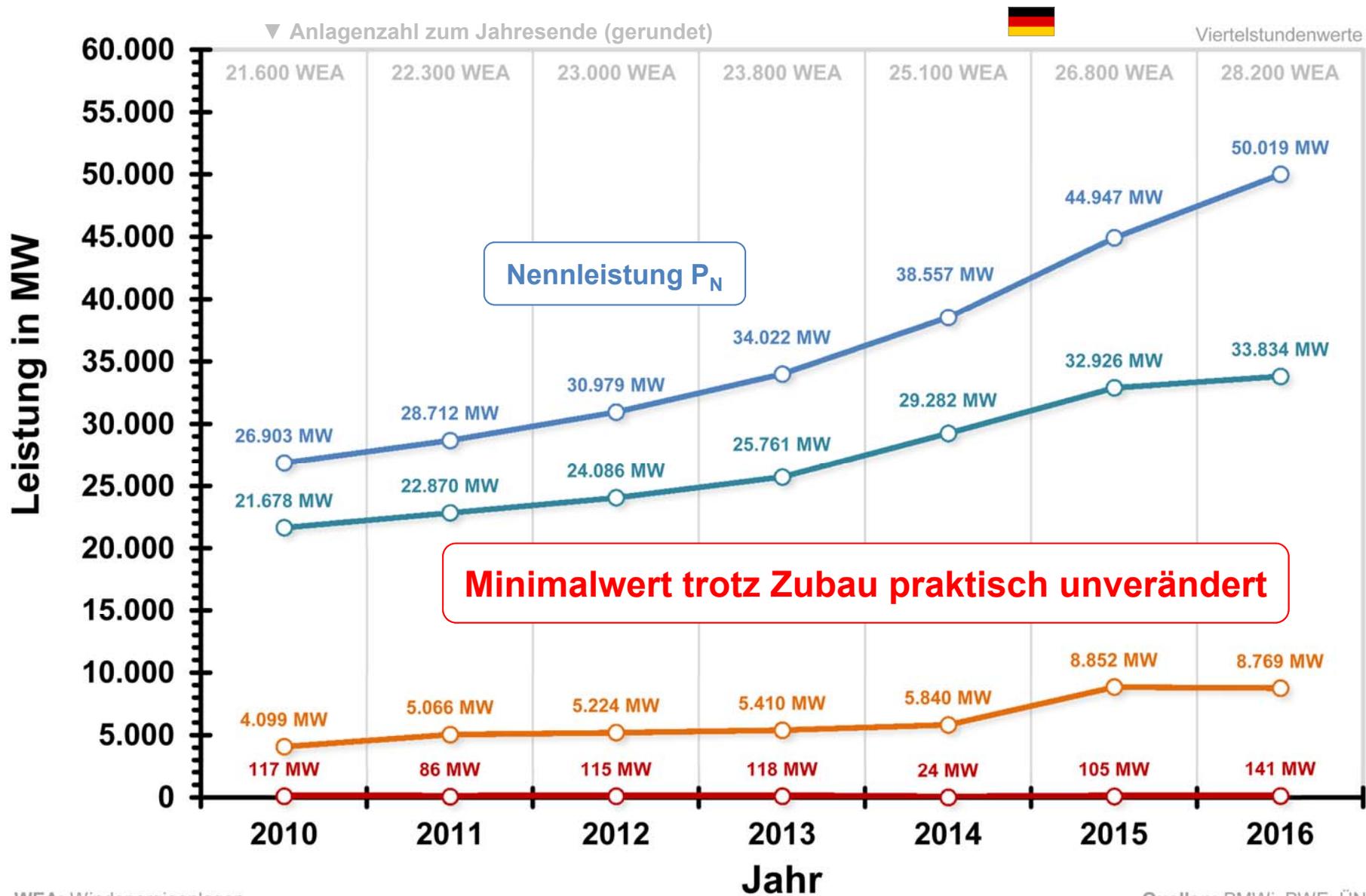
Quellen: BMWi, BWE, ÜNB

Deutschland: Windstromproduktion von 2010 bis 2016



WEA: Windenergieanlagen

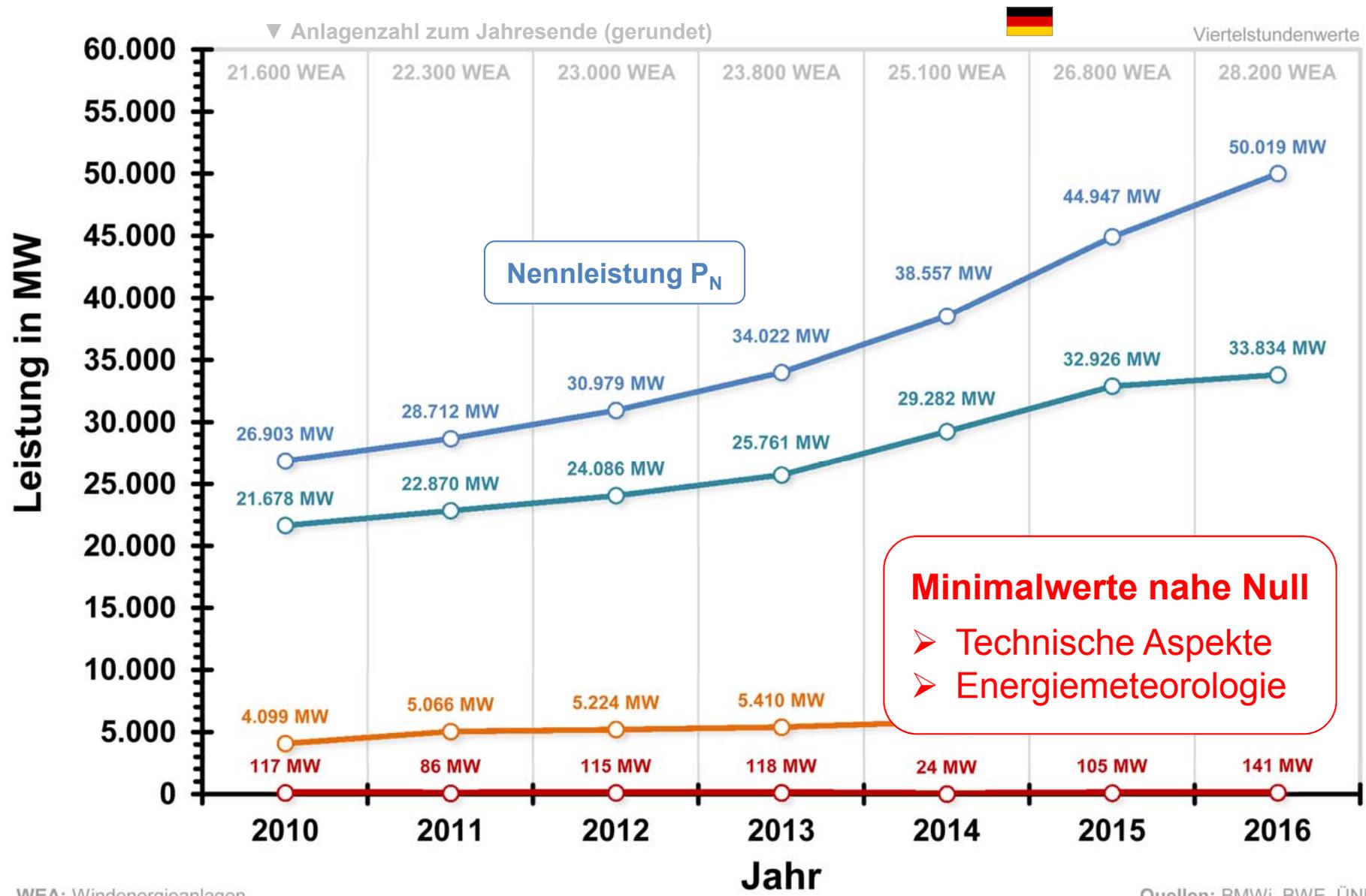
Quellen: BMWi, BWE, ÜNB



WEA: Windenergieanlagen

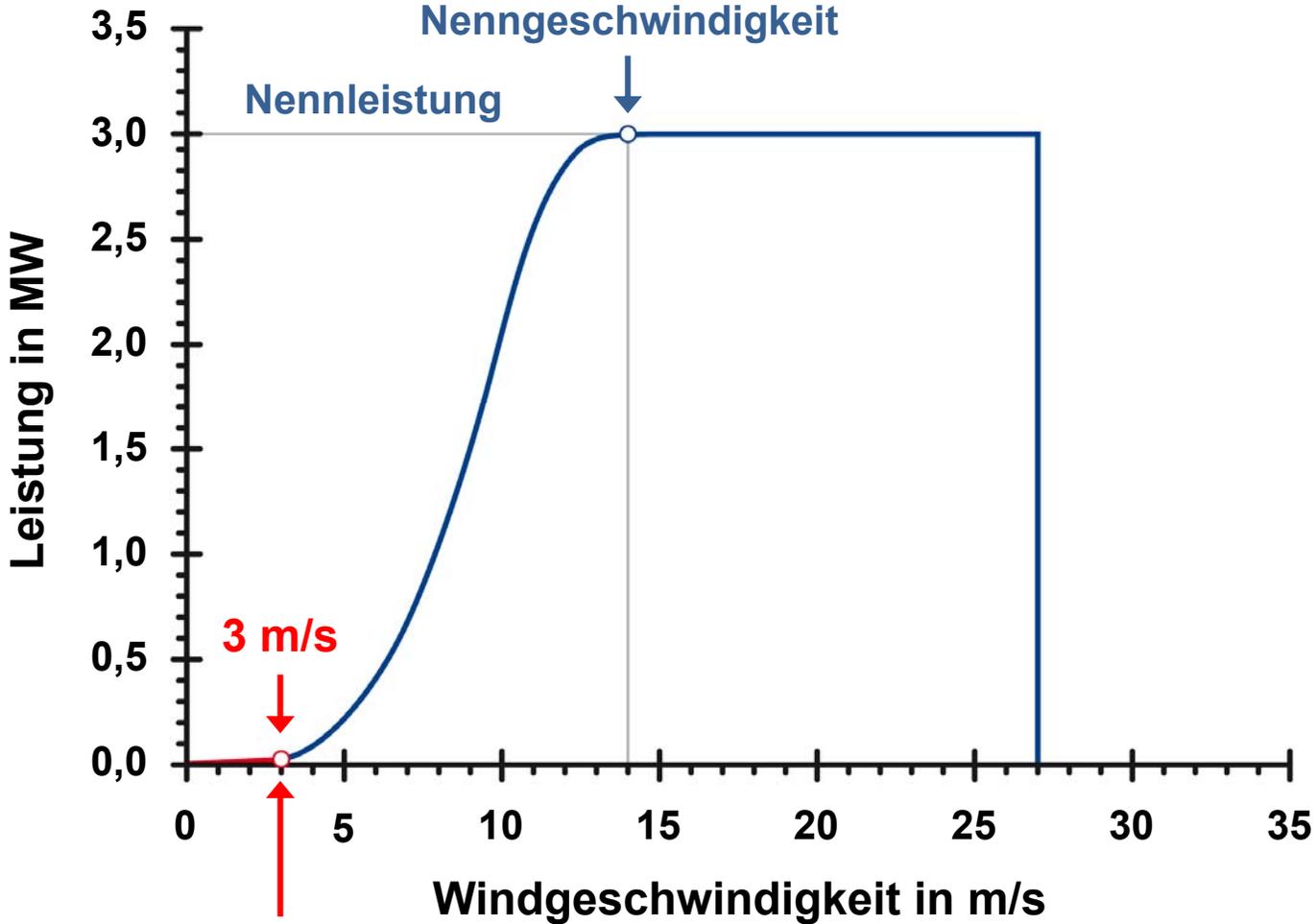
Quellen: BMWi, BWE, ÜNB

Deutschland: Windstromproduktion von 2010 bis 2016

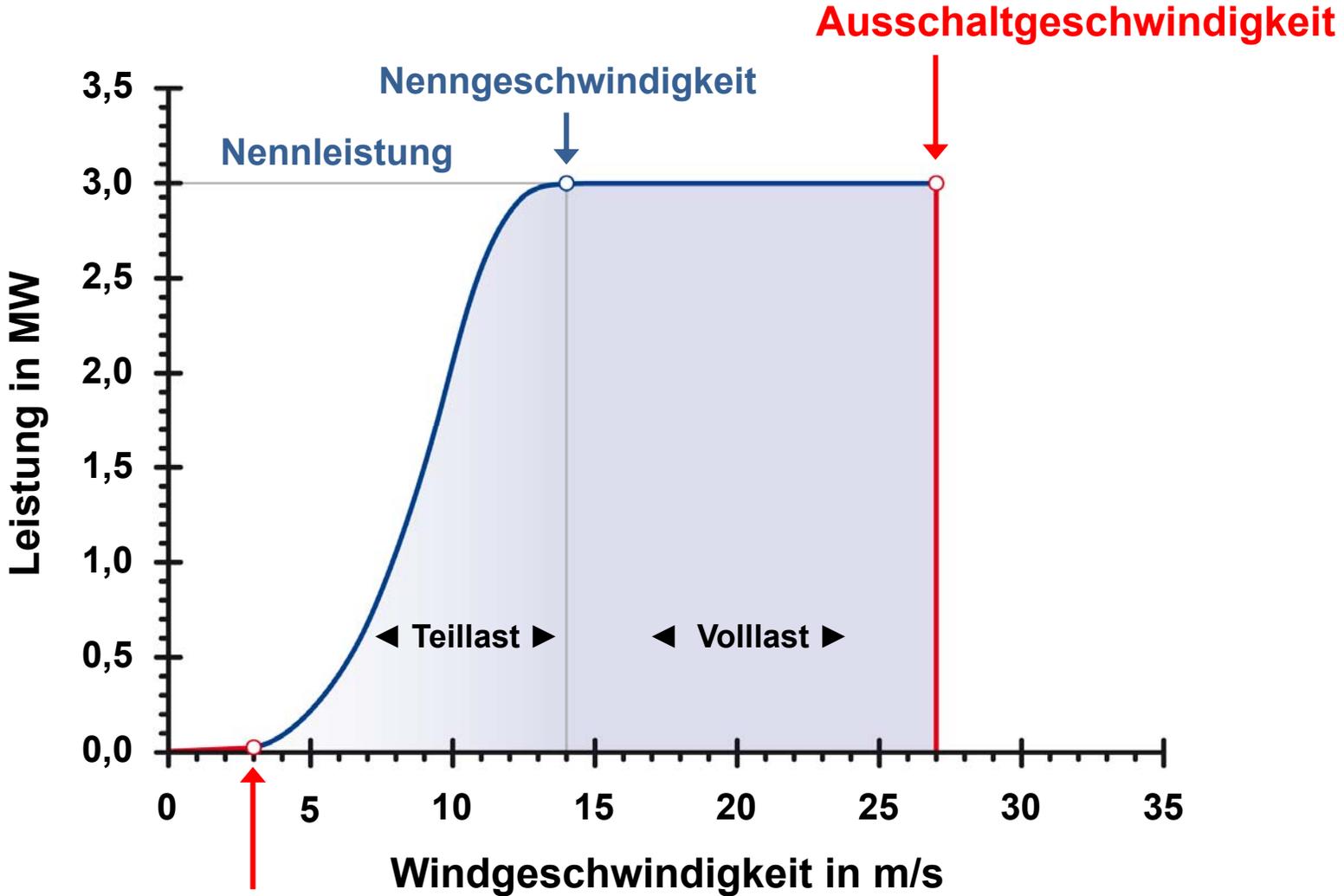


WEA: Windenergieanlagen

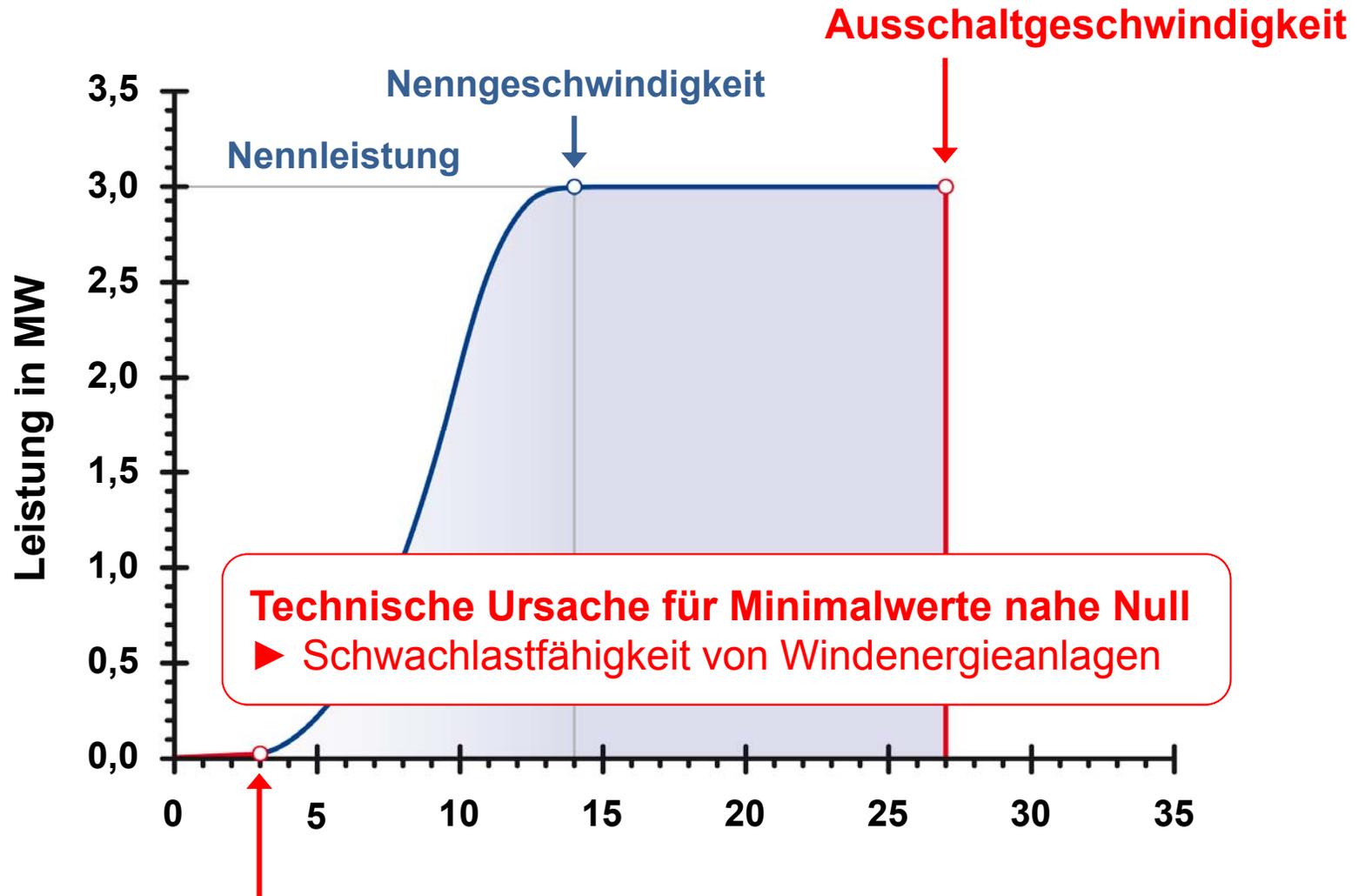
Quellen: BMWi, BWE, ÜNB



Einschaltgeschwindigkeit

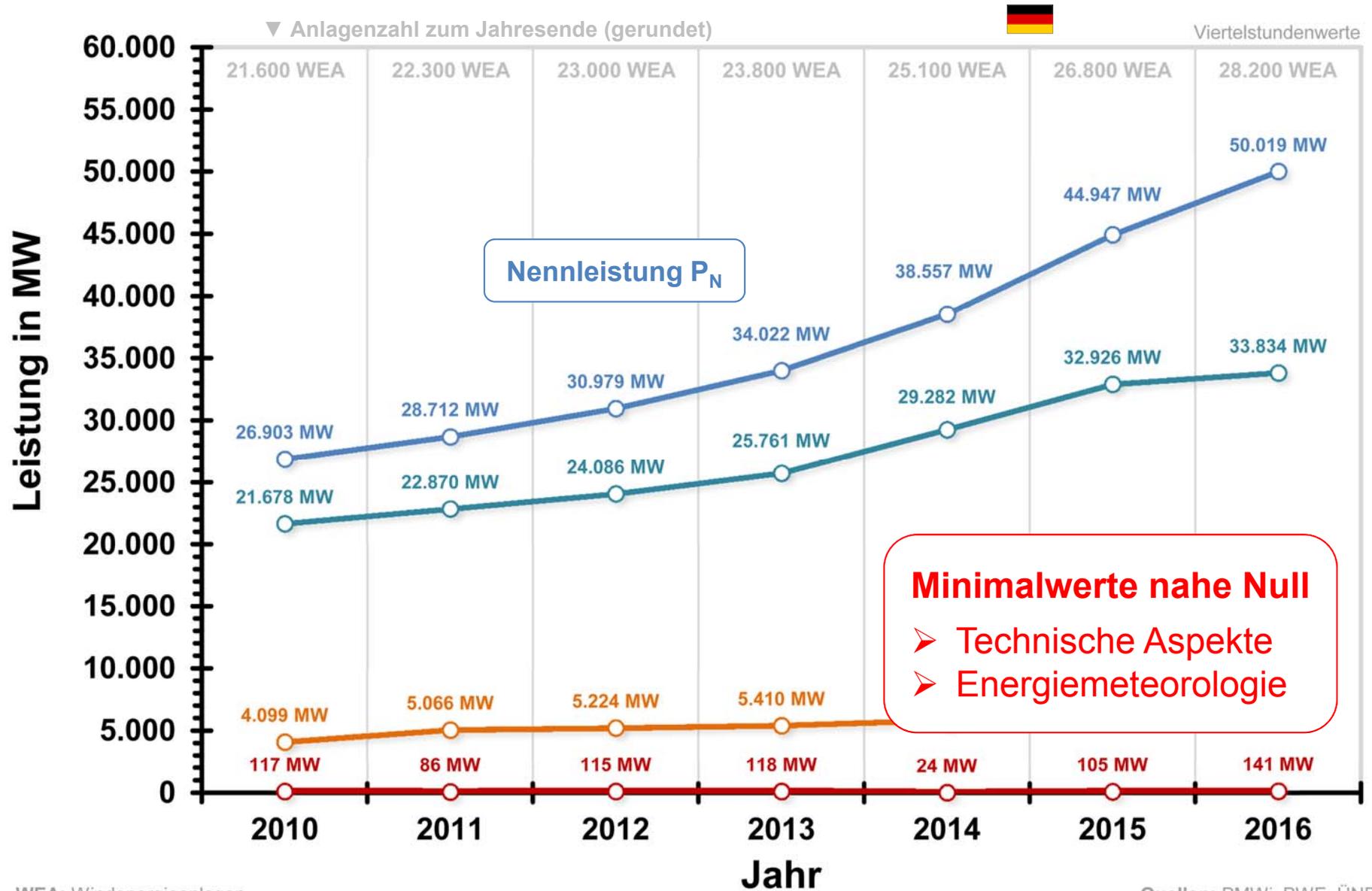


Einschaltgeschwindigkeit



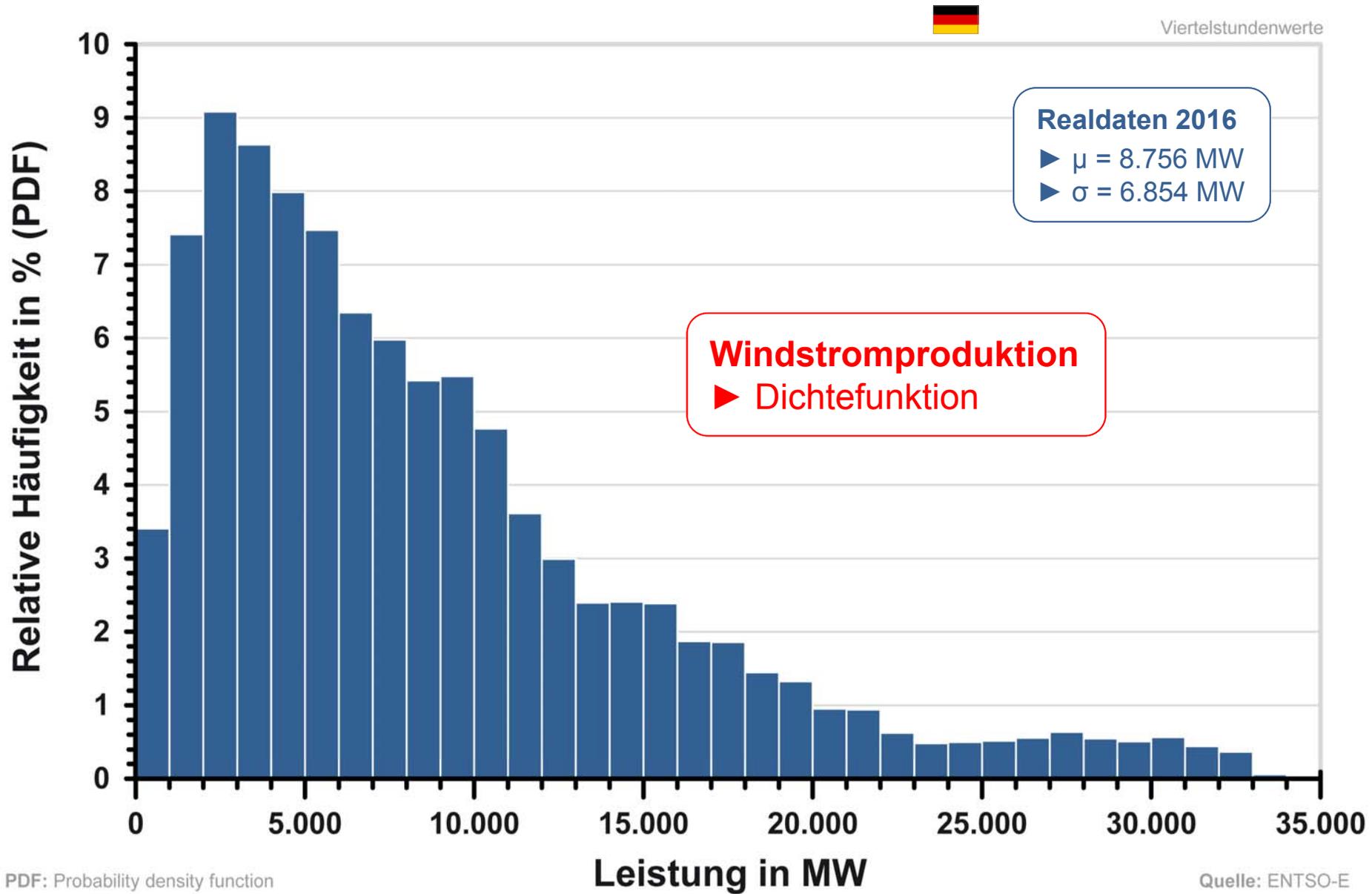
Einschaltgeschwindigkeit

Minimalwerte: Technische Aspekte

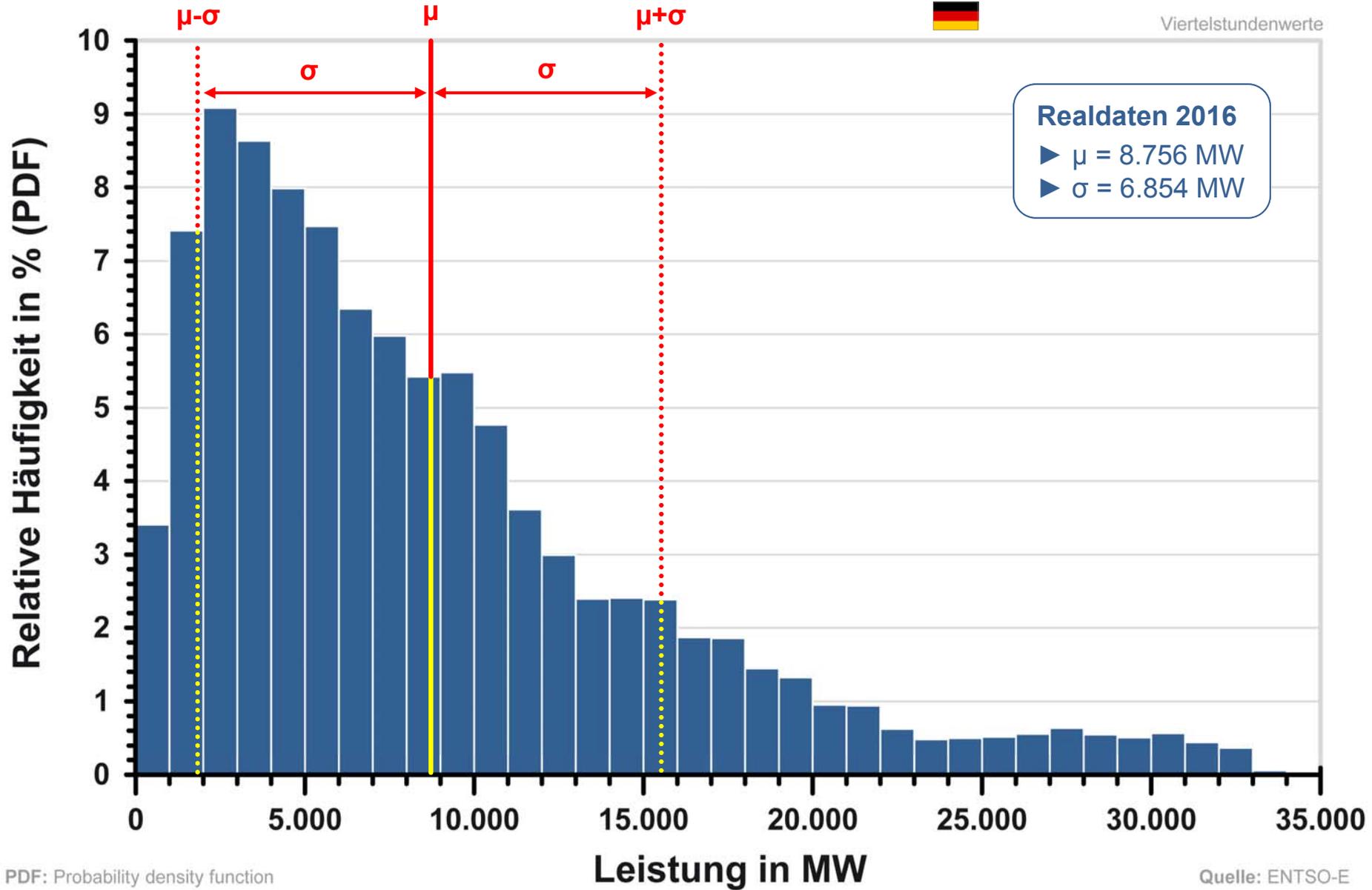


WEA: Windenergieanlagen

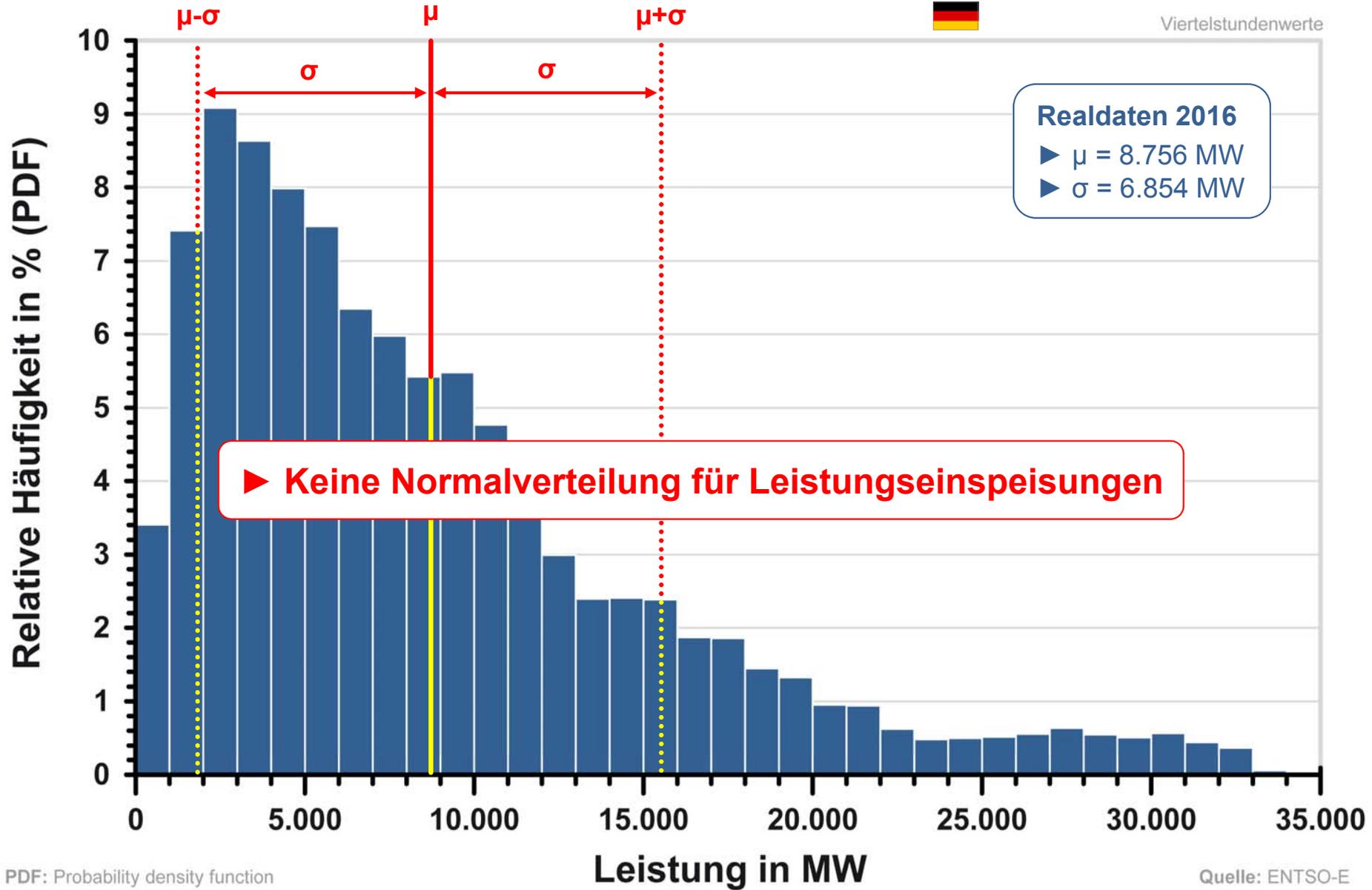
Quellen: BMWi, BWE, ÜNB



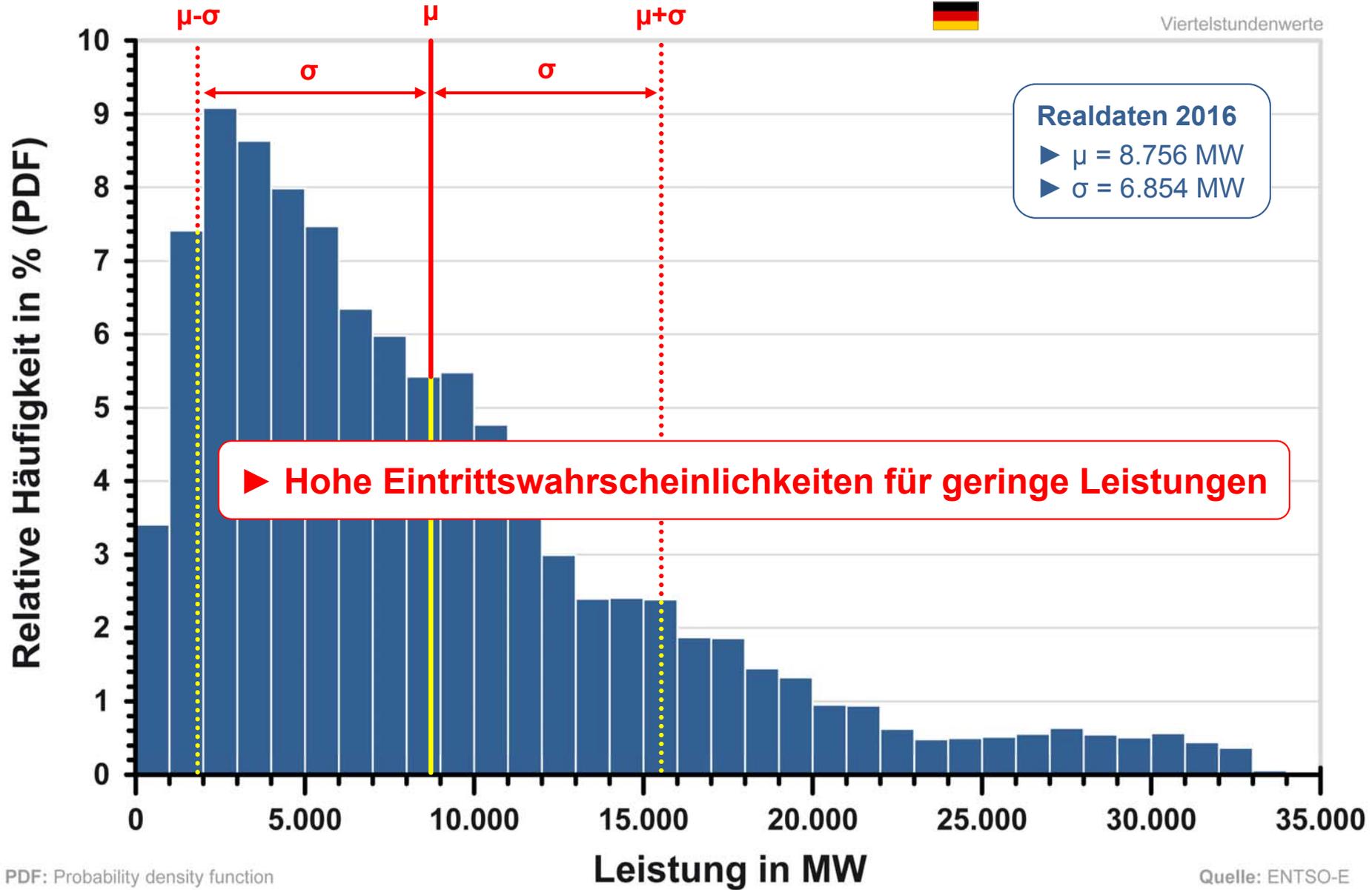
Minimalwerte: Energiemeteorologie



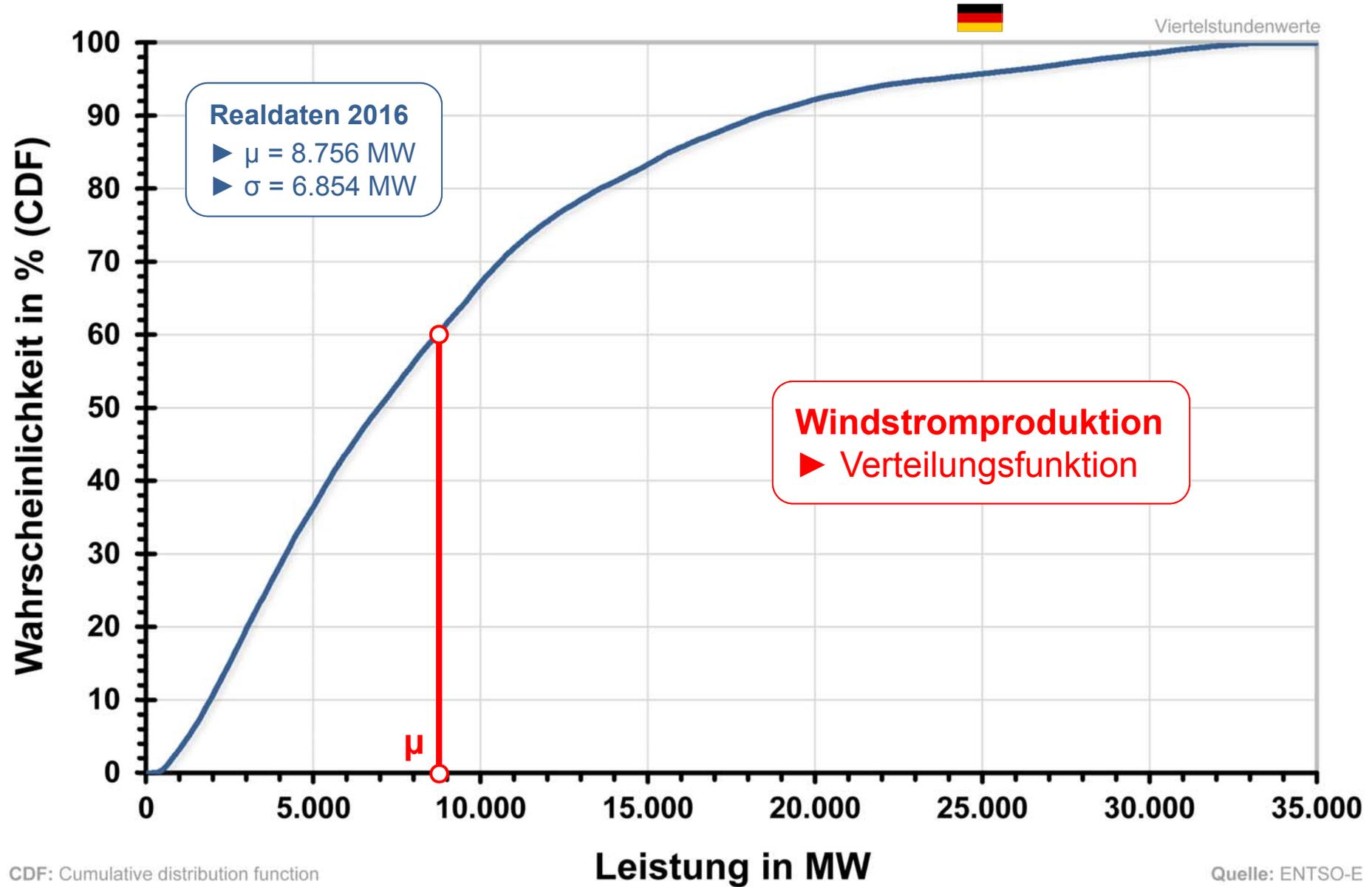
Minimalwerte: Energiemeteorologie

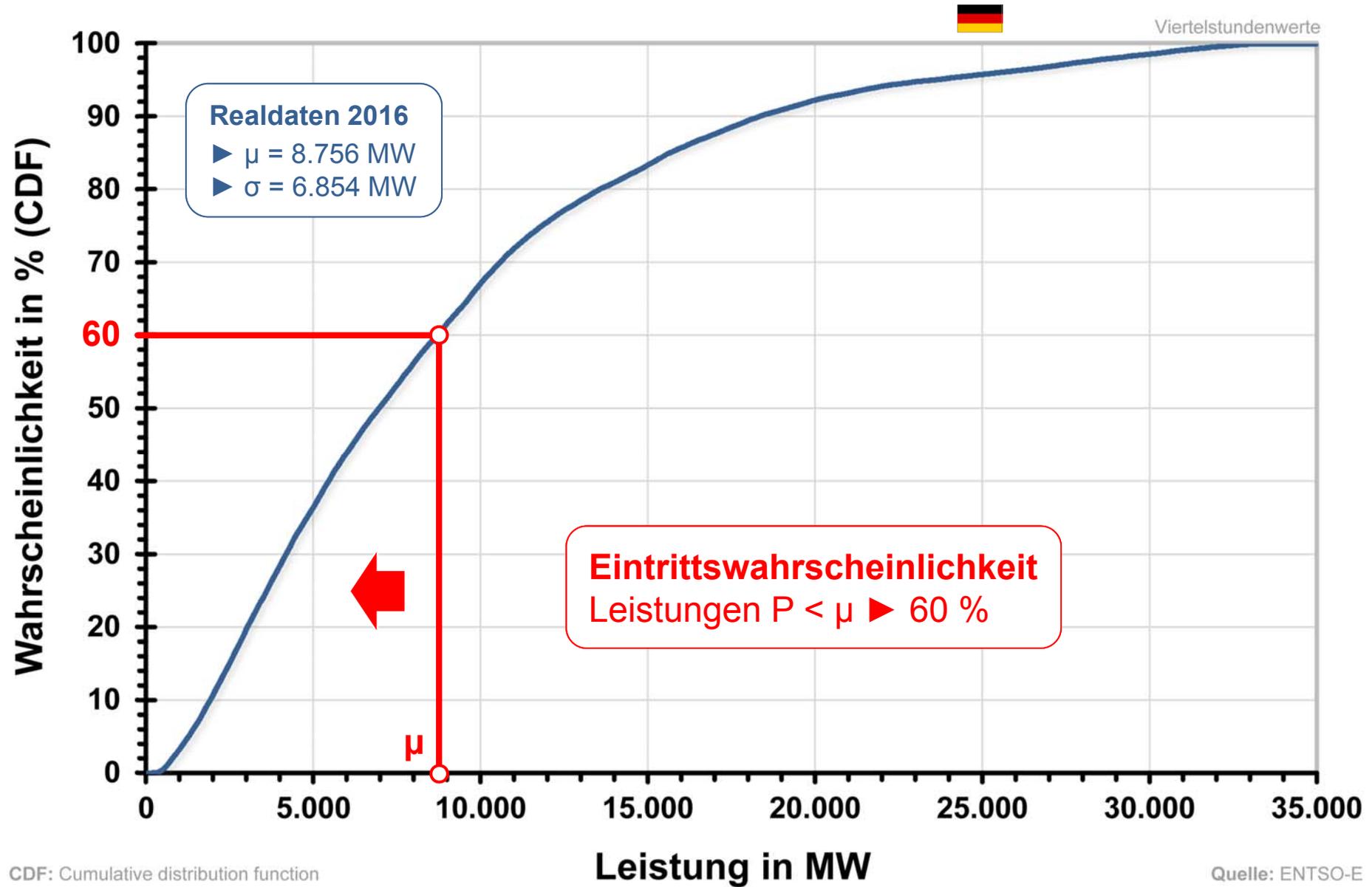


Minimalwerte: Energiemeteorologie



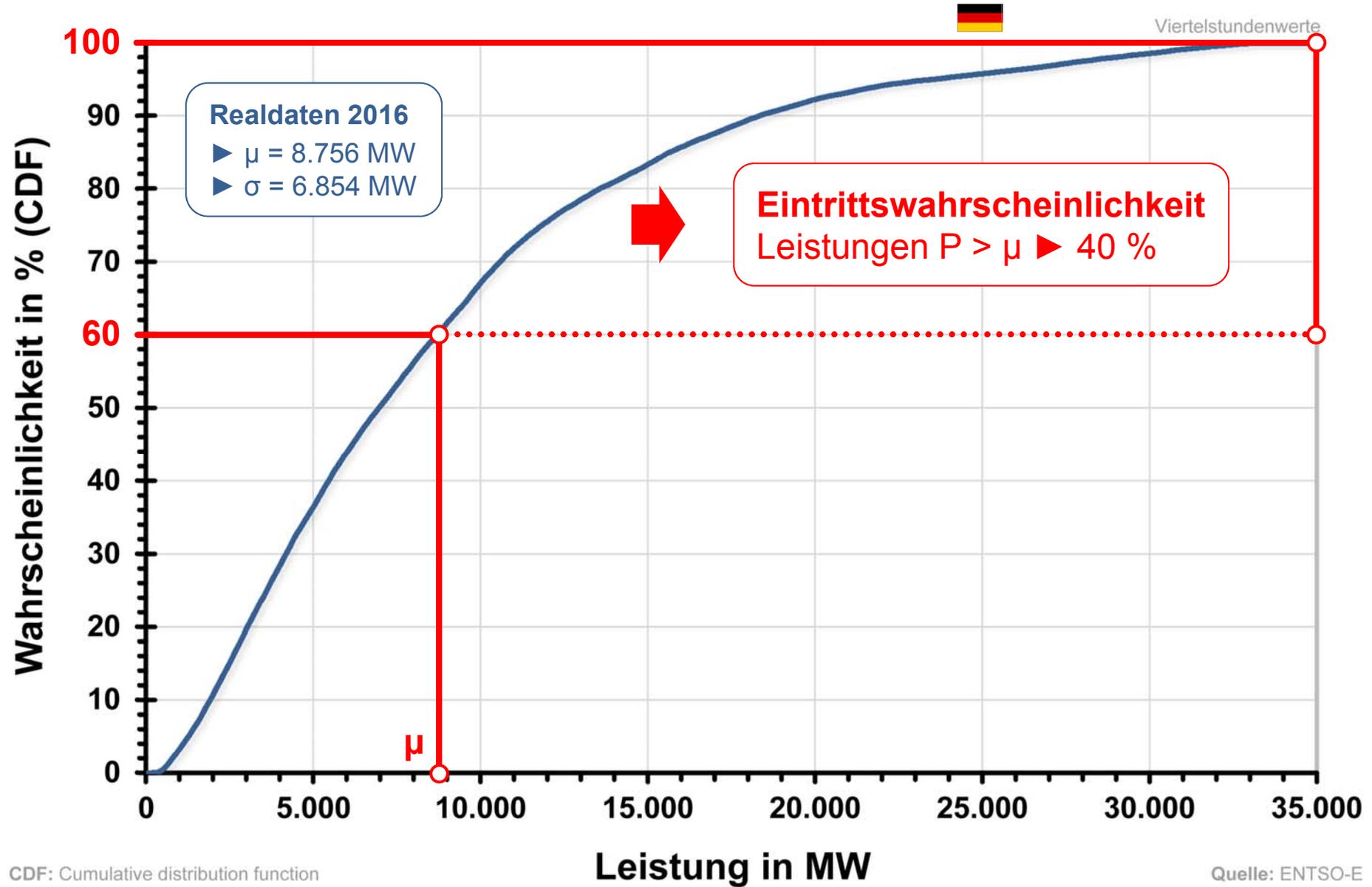
Minimalwerte: Energiemeteorologie



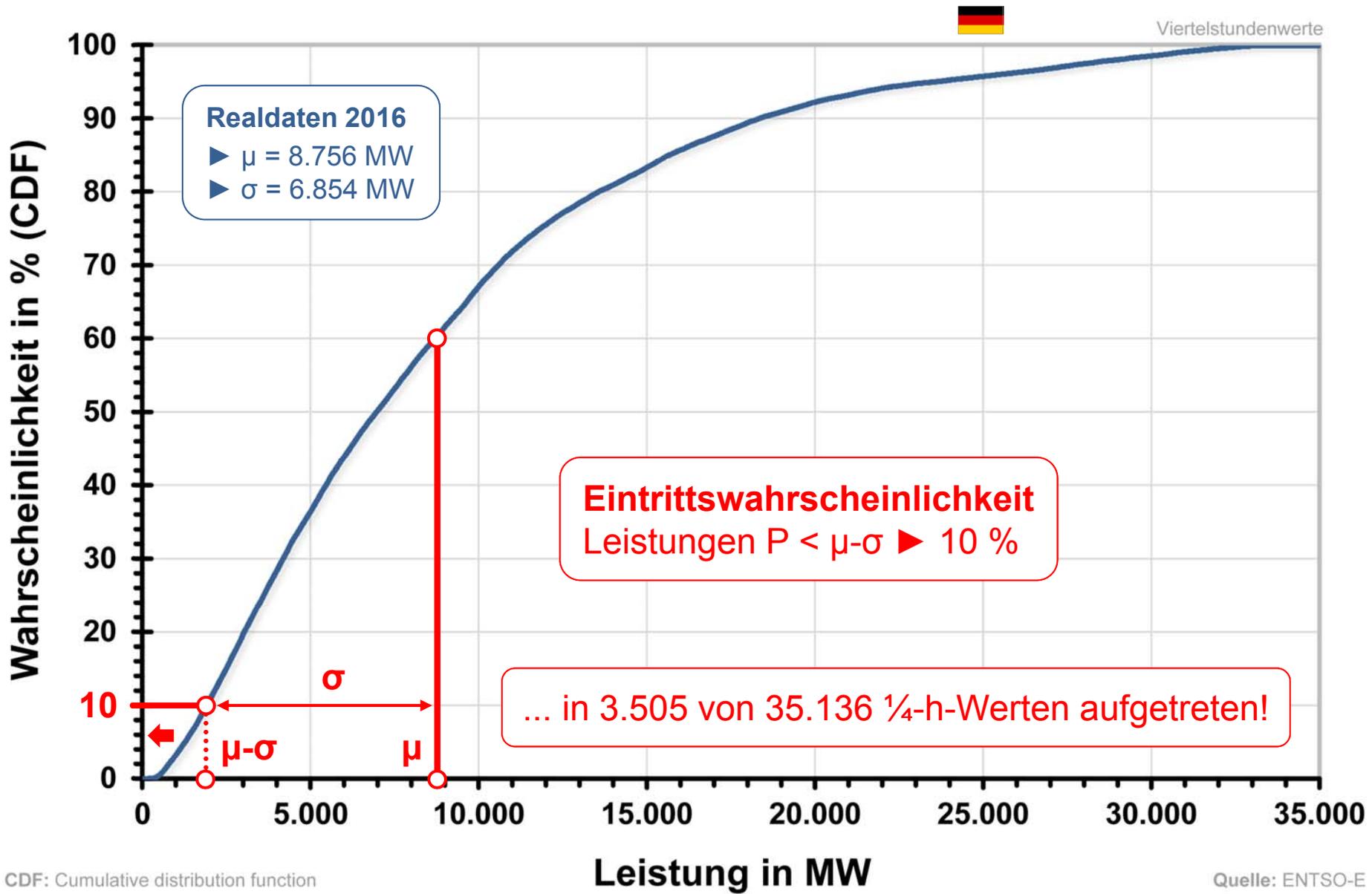


CDF: Cumulative distribution function

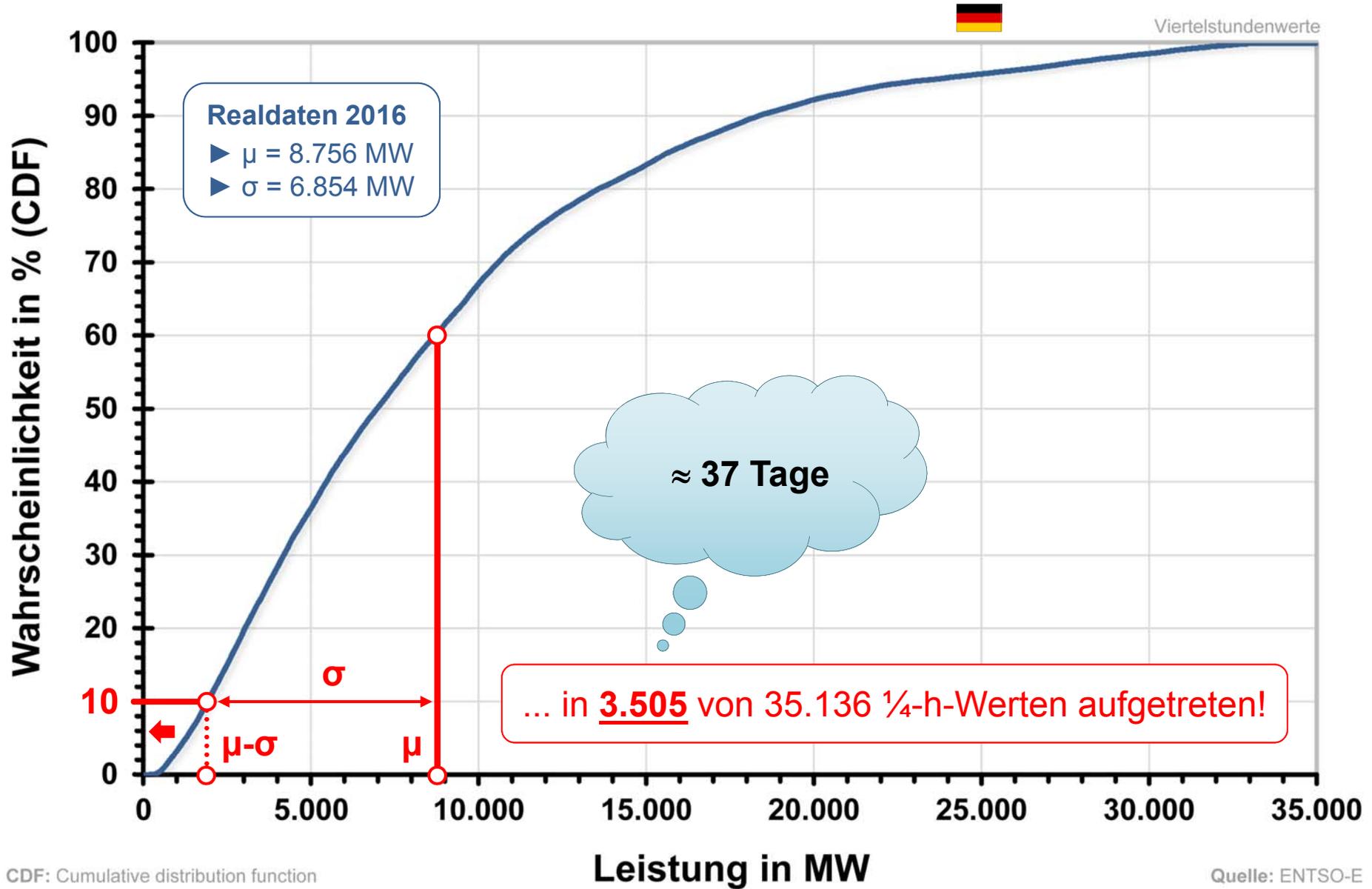
Minimalwerte: Energiemeteorologie



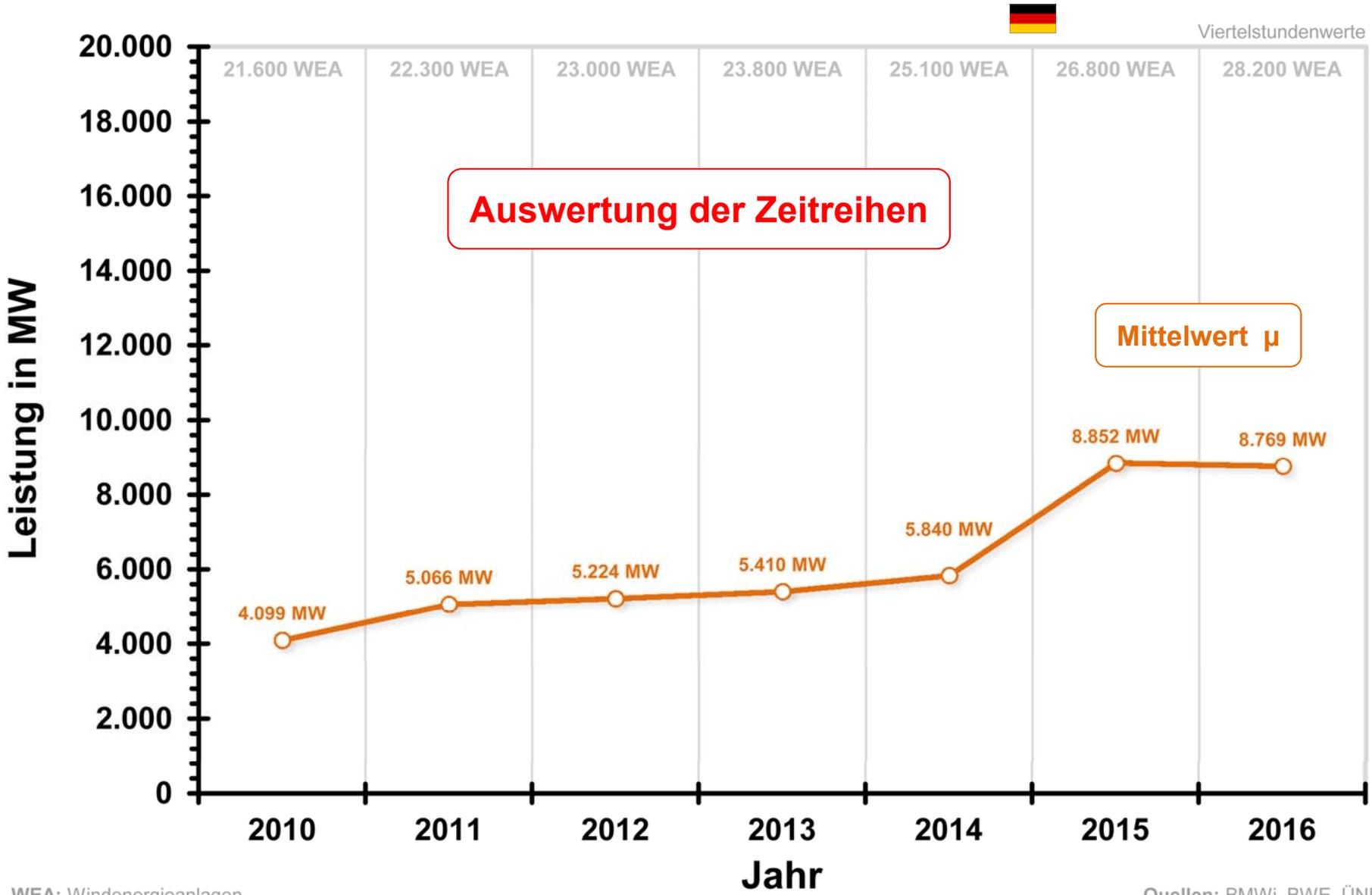
Minimalwerte: Energiemeteorologie



Minimalwerte: Energiemeteorologie



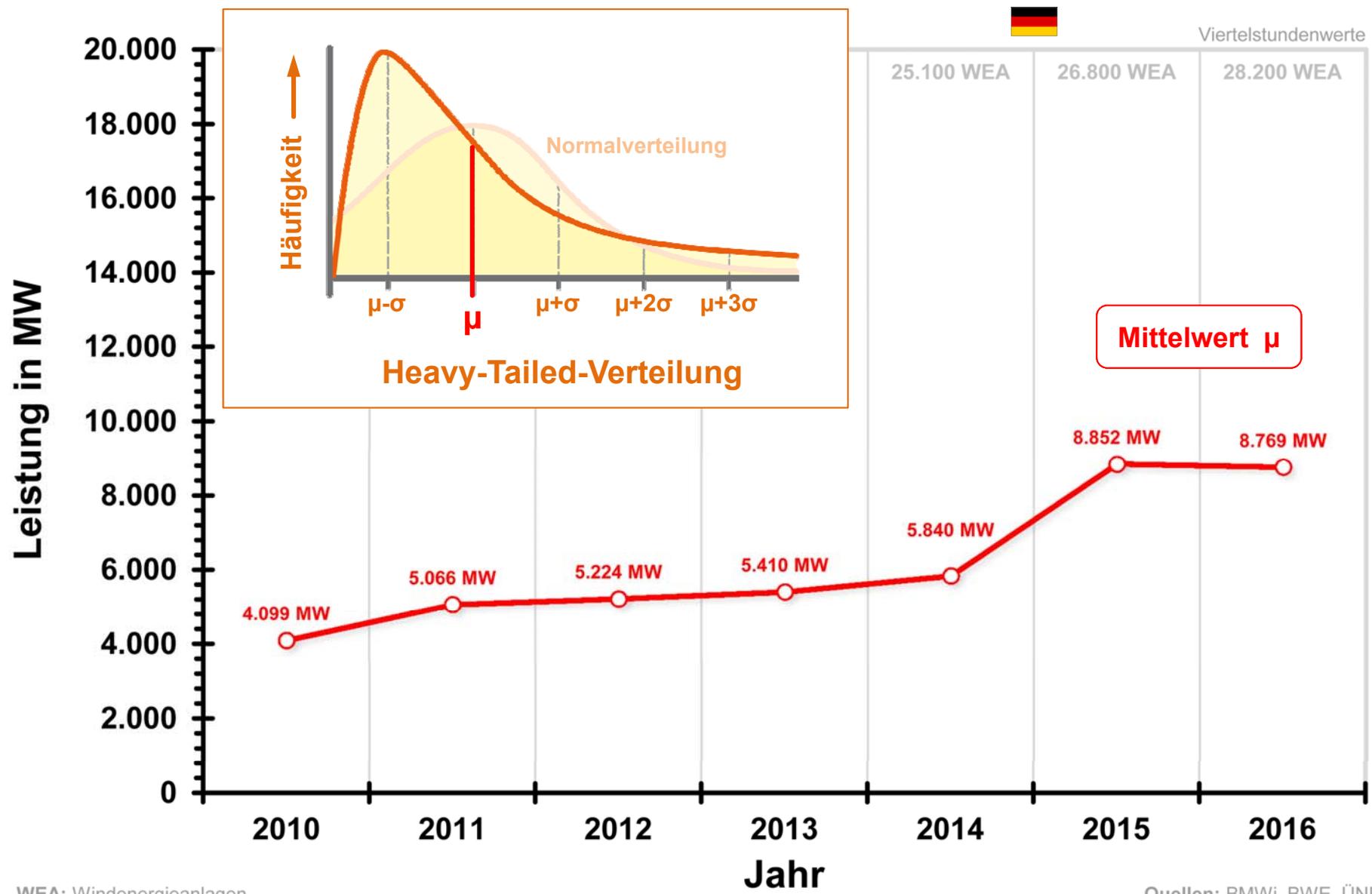
Quelle: ENTSO-E



WEA: Windenergieanlagen

Quellen: BMWi, BWE, ÜNB

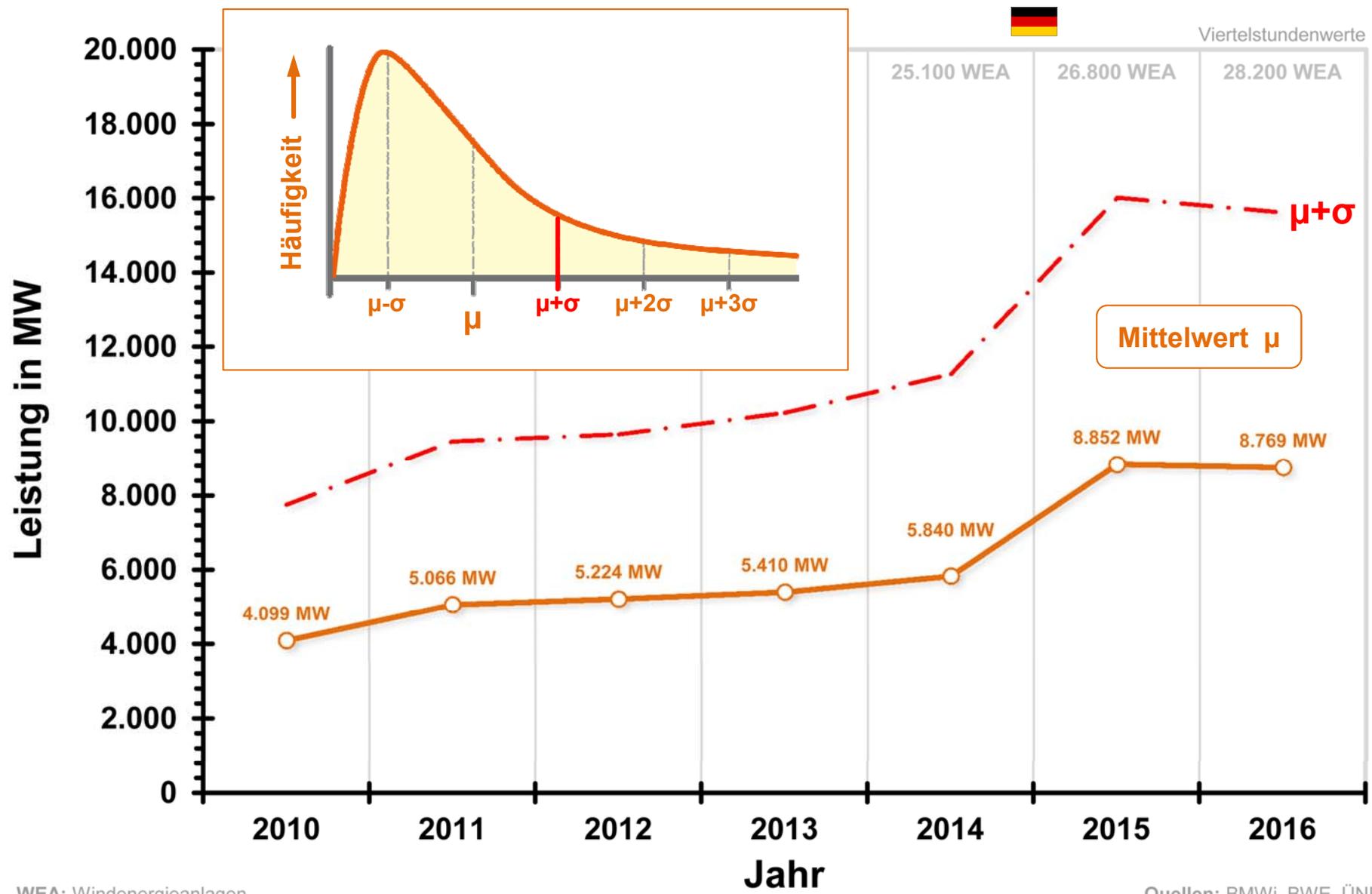




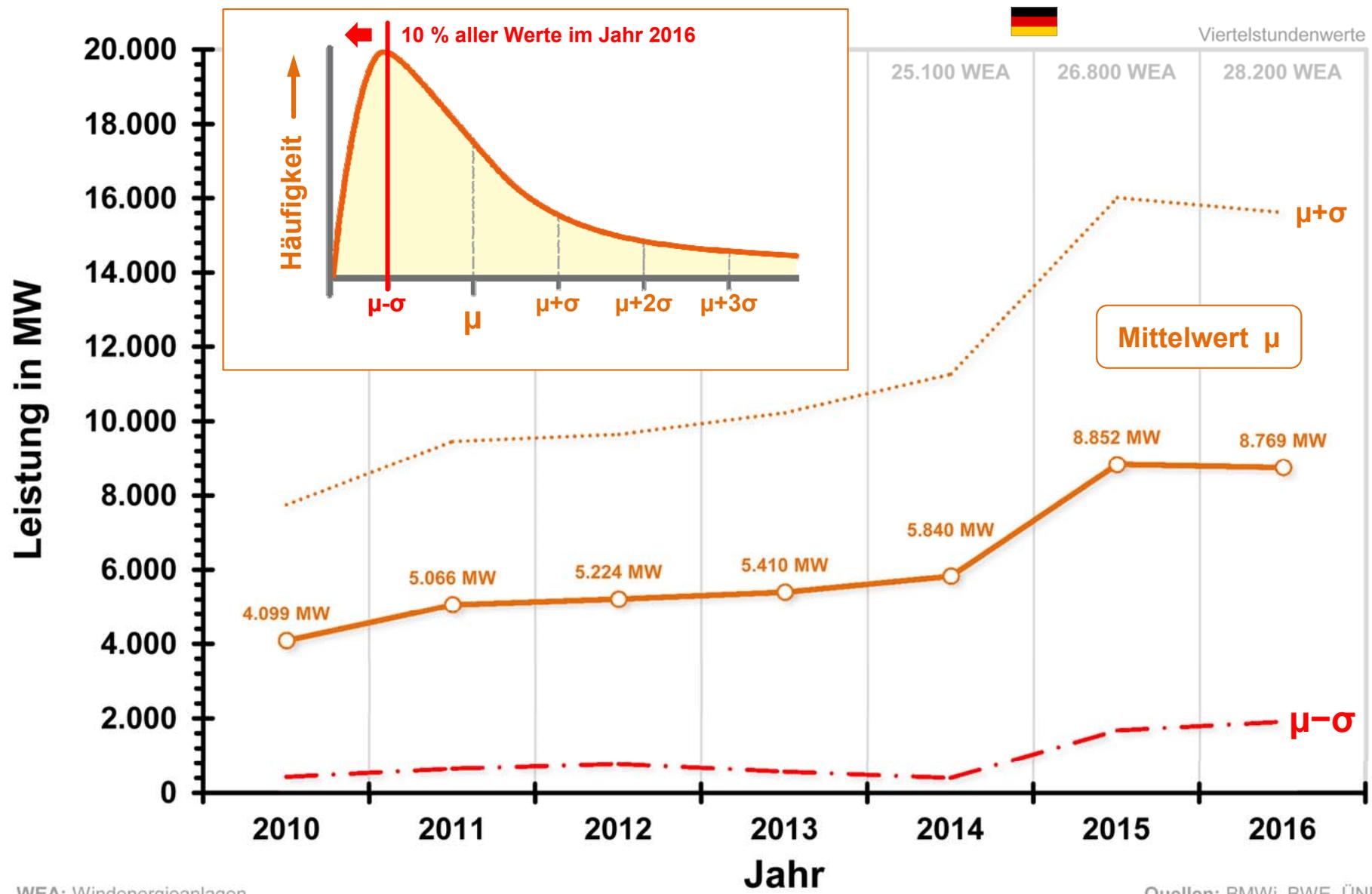
WEA: Windenergieanlagen

Quellen: BMWi, BWE, ÜNB

Deutschland: Windstromproduktion von 2010 bis 2016



Deutschland: Windstromproduktion von 2010 bis 2016

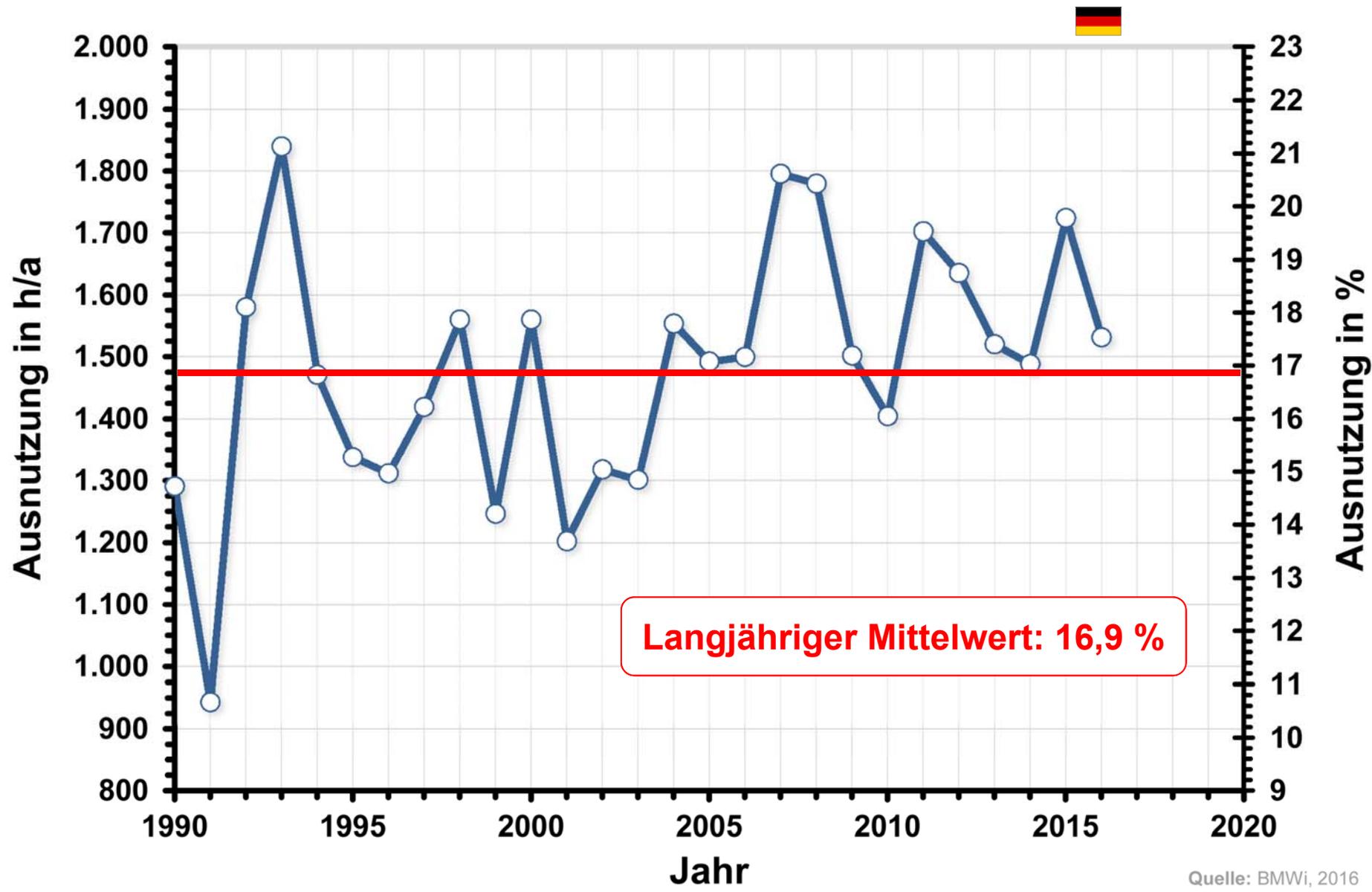


WEA: Windenergieanlagen

Quellen: BMWi, BWE, ÜNB

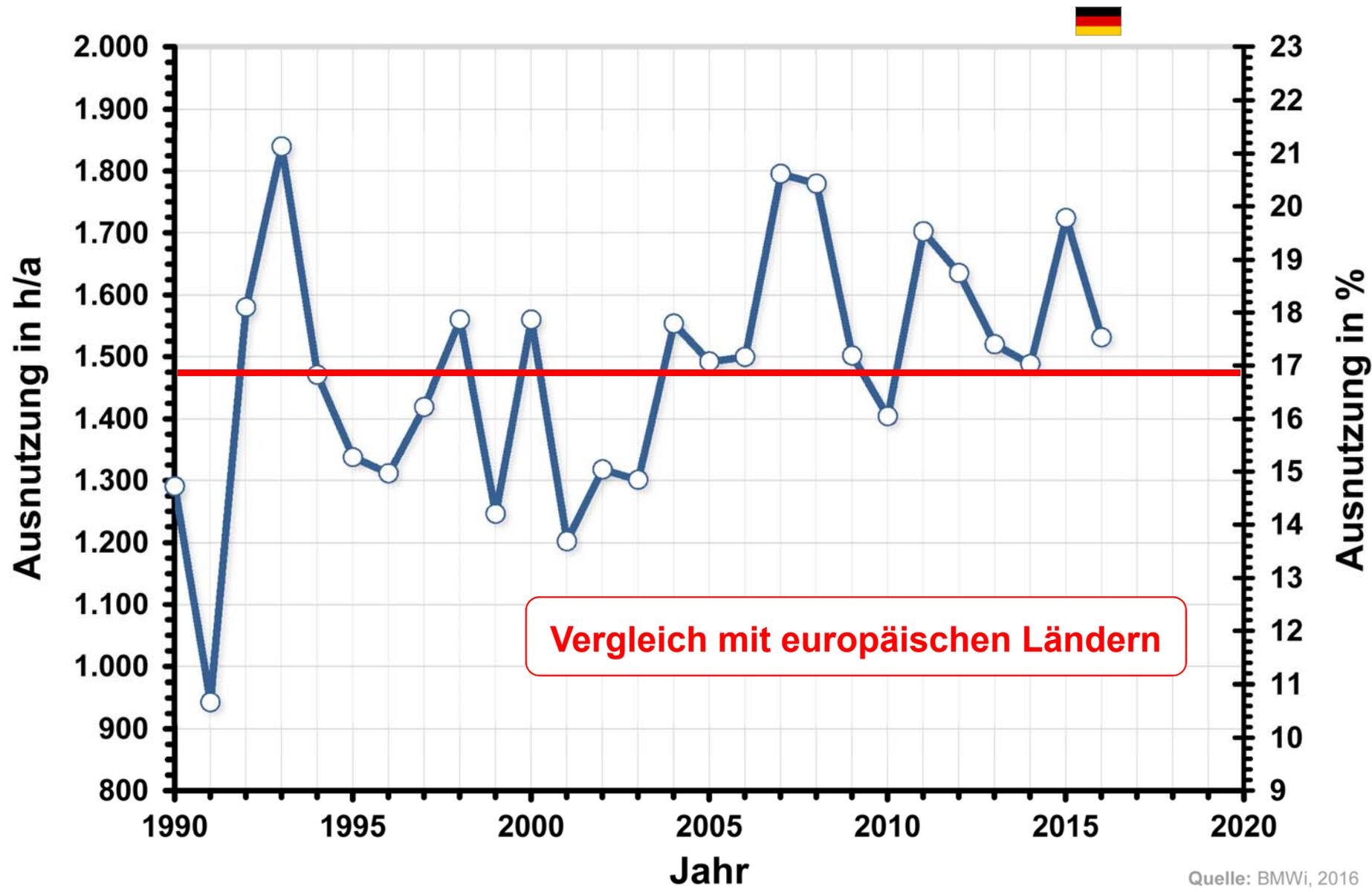
Erkenntnisse

- Nennleistung seit 2010 nahezu auf 50 GW verdoppelt
- Windstromproduktion auf 77 TWh mehr als verdoppelt
- Kein Anstieg der Minimalleistung ($\frac{1}{4}$ -h-Wert) seit 2010
 - 1.) Technik ▶ Schwachlastfähigkeit großer Windturbinen
 - 2.) Statistik ▶ Leistungseinspeisungen nicht normalverteilt
 - ▶ Hohe Wahrscheinlichkeit für niedrige Werte
- Gesicherte Leistung kleiner als 1 % der Nennleistung
- Hohe Volatilität der Leistungen auch auf dem Meer
- Bedarf an 100 % planbarer Backup-Leistung

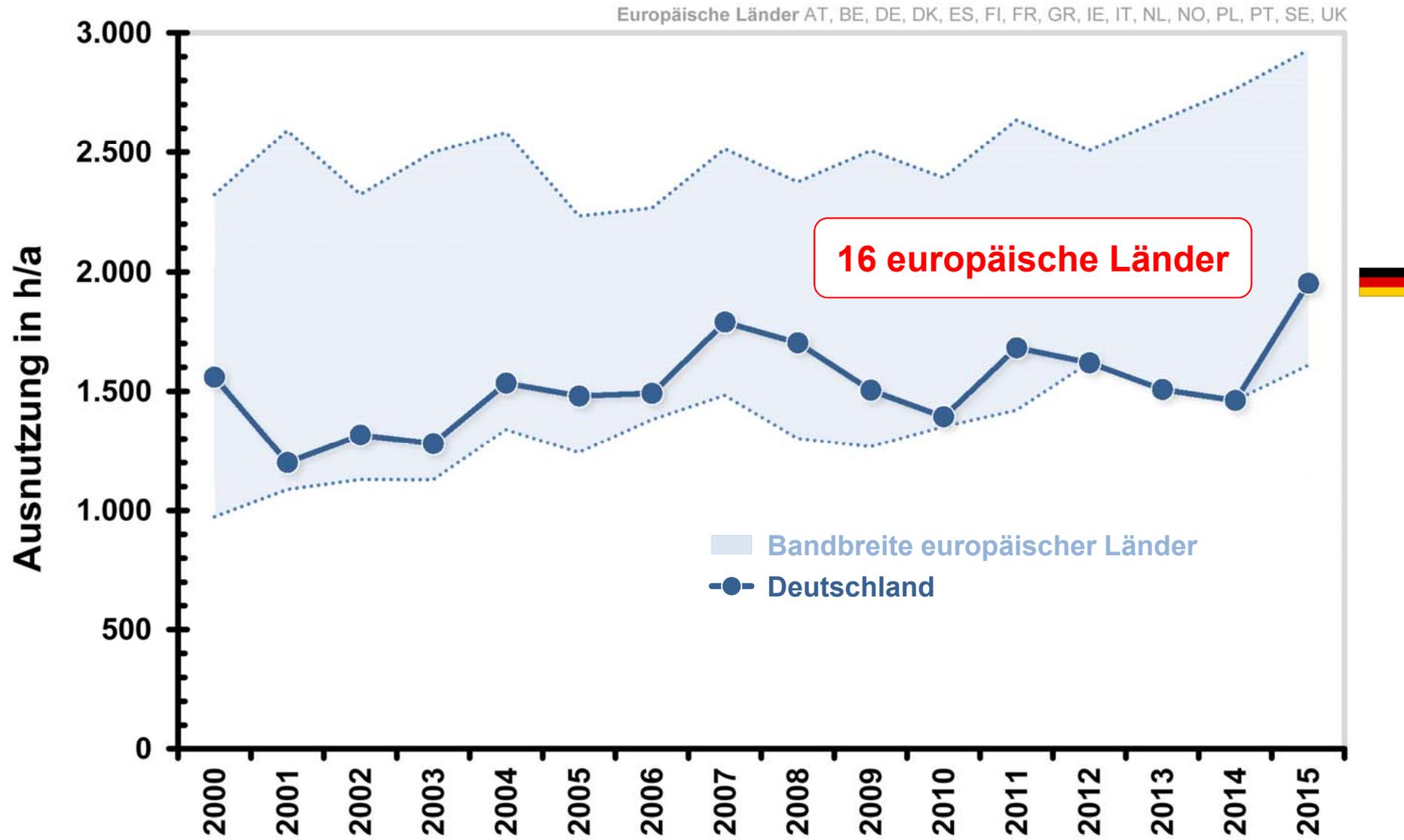


Langjähriger Mittelwert: 16,9 %

Quelle: BMWi, 2016



Quelle: BMWi, 2016



Quelle: BP Statistical Review of World Energy, Juni 2016

Erkenntnisse

- Signifikant höhere Ausnutzung des Winddargebotes in vielen anderen Ländern im Vergleich zu Deutschland im Zeitraum von 2000 bis 2015:

Land	Ausnutzung $\eta_{A,\emptyset}$
Deutschland	1.531 h/a
Irland	2.264 h/a (+ 48 %)
Großbritannien	2.200 h/a (+ 44 %)
Dänemark	2.195 h/a (+ 43 %)
Spanien	2.060 h/a (+ 35 %)
Portugal	1.996 h/a (+ 30 %)
Schweden	1.856 h/a (+ 21 %)
Niederlande	1.836 h/a (+ 20 %)
Polen	1.766 h/a (+ 12 %)



**Vergleich zu
Deutschland**

Erkenntnisse

- Signifikant höhere Ausnutzung des Winddargebotes in vielen anderen Ländern im Vergleich zu Deutschland im Zeitraum von 2000 bis 2015:

Land	Ausnutzung $\eta_{A,\emptyset}$	Gesicherte Leistung P_p
Deutschland	1.531 h/a	0,3 % P_N
Irland	2.264 h/a (+ 48 %)	0,0 % P_N
Großbritannien	2.200 h/a (+ 44 %)	0,0 % P_N
Dänemark	2.195 h/a (+ 43 %)	0,3 % P_N
Spanien	2.060 h/a (+ 35 %)	1,1 % P_N
Portugal	1.996 h/a (+ 30 %)	0,3 % P_N
Schweden	1.856 h/a (+ 21 %)	0,3 % P_N
Niederlande	1.836 h/a (+ 20 %)	0,0 % P_N
Polen	1.766 h/a (+ 12 %)	0,3 % P_N

Zeitreihen 2016

Erkenntnisse

- Signifikant höhere Ausnutzung des Winddargebotes in vielen anderen Ländern im Vergleich zu Deutschland im Zeitraum von 2000 bis 2015:

Land	Ausnutzung $\eta_{A,\emptyset}$	Gesicherte Leistung P_p
Deutschland	1.531 h/a	0,3 % P_N
Irland	2.264 h/a (+ 48 %)	0,0 % P_N
Großbritannien	2.200 h/a (+ 44 %)	0,0 % P_N
Dänemark	2.195 h/a (+ 43 %)	0,3 % P_N
Spanien	2.060 h/a (+ 35 %)	1,1 % P_N
Portugal	1.996 h/a (+ 30 %)	0,3 % P_N
Schweden	1.856 h/a (+ 21 %)	0,3 % P_N
Niederlande	1.836 h/a (+ 20 %)	0,0 % P_N
Polen	1.766 h/a (+ 12 %)	0,3 % P_N

Alle Werte
 $P_p \leq 1,1 \% P_N$

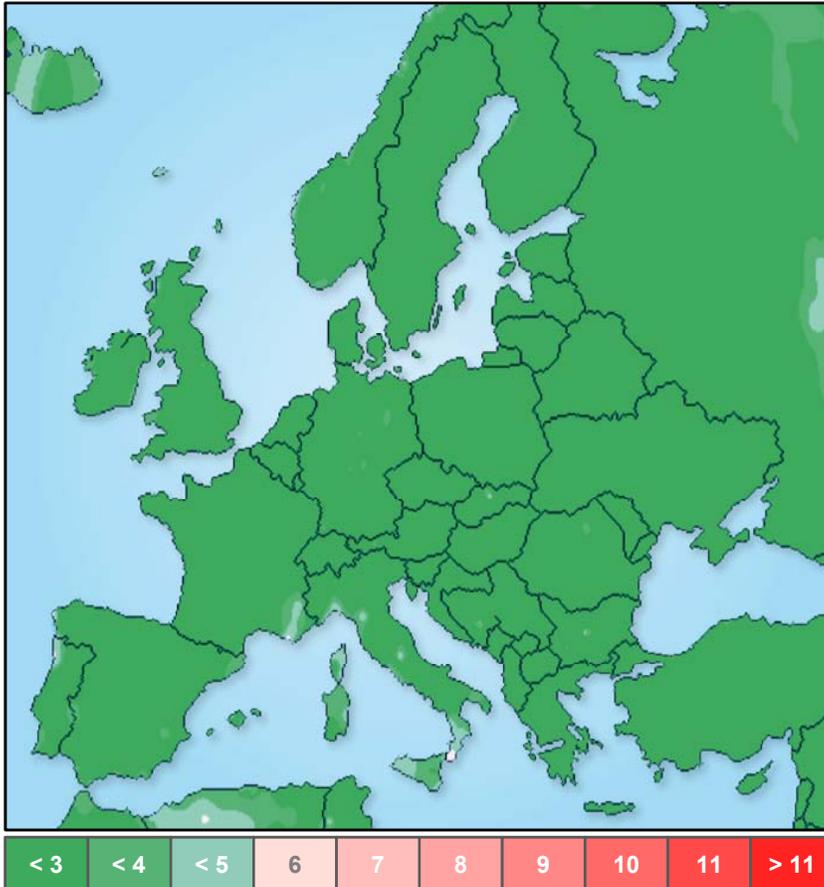
Erkenntnisse

- Signifikant höhere Ausnutzung des Winddargebotes in vielen anderen Ländern im Vergleich zu Deutschland im Zeitraum von 2000 bis 2015:

Land	Ausnutzung $\eta_{A,\emptyset}$	Gesicherte Leistung P_p
Deutschland	1.531 h/a	0,3 % P_N
Irland	2.264 h/a (+ 48 %)	0,0 % P_N
Großbritannien	2.200 h/a (+ 44 %)	0,0 % P_N
Dänemark	2.195 h/a (+ 43 %)	0,3 % P_N
Spanien	2.060 h/a (+ 35 %)	1,1 % P_N
Portugal	1.996 h/a (+ 30 %)	0,3 % P_N
Schweden	1.856 h/a (+ 21 %)	0,3 % P_N
Niederlande	1.836 h/a (+ 20 %)	0,0 % P_N
Polen	1.766 h/a (+ 12 %)	0,3 % P_N

- **Ausnutzung:** Deutlich höhere Werte in vielen anderen Ländern
- **Versorgungssicherheit:** Praktisch kein Unterschied zu Deutschland

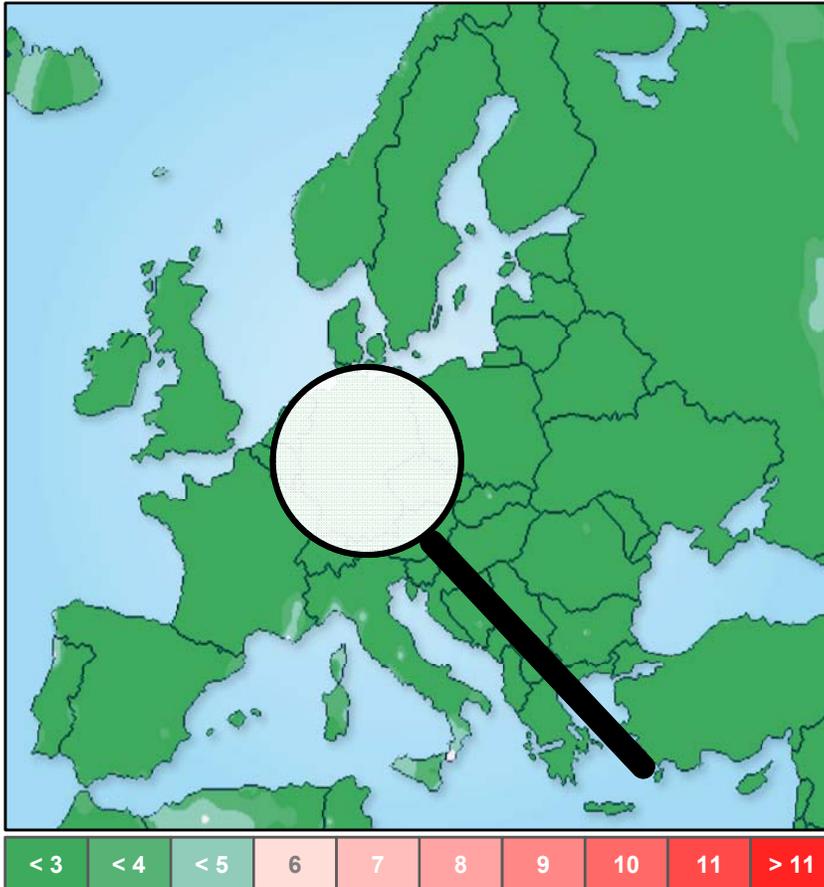
Beispiel: Windstärken am Dienstag, 22. November 2011, 7:00 Uhr



Windstärke in Beaufort (Bft)

- Weiträumig geringes Winddargebot mit Windstärke 3 oder darunter nach Beaufort-Skala („Schwacher Wind“)
- Resultierende Windgeschwindigkeiten von 3,4 bis 5,4 m/s und darunter
- Europaweit geringe Windstromerträge
- Kein gegenseitiger Austausch möglich
- Regelmäßig ähnliche Wetterlagen

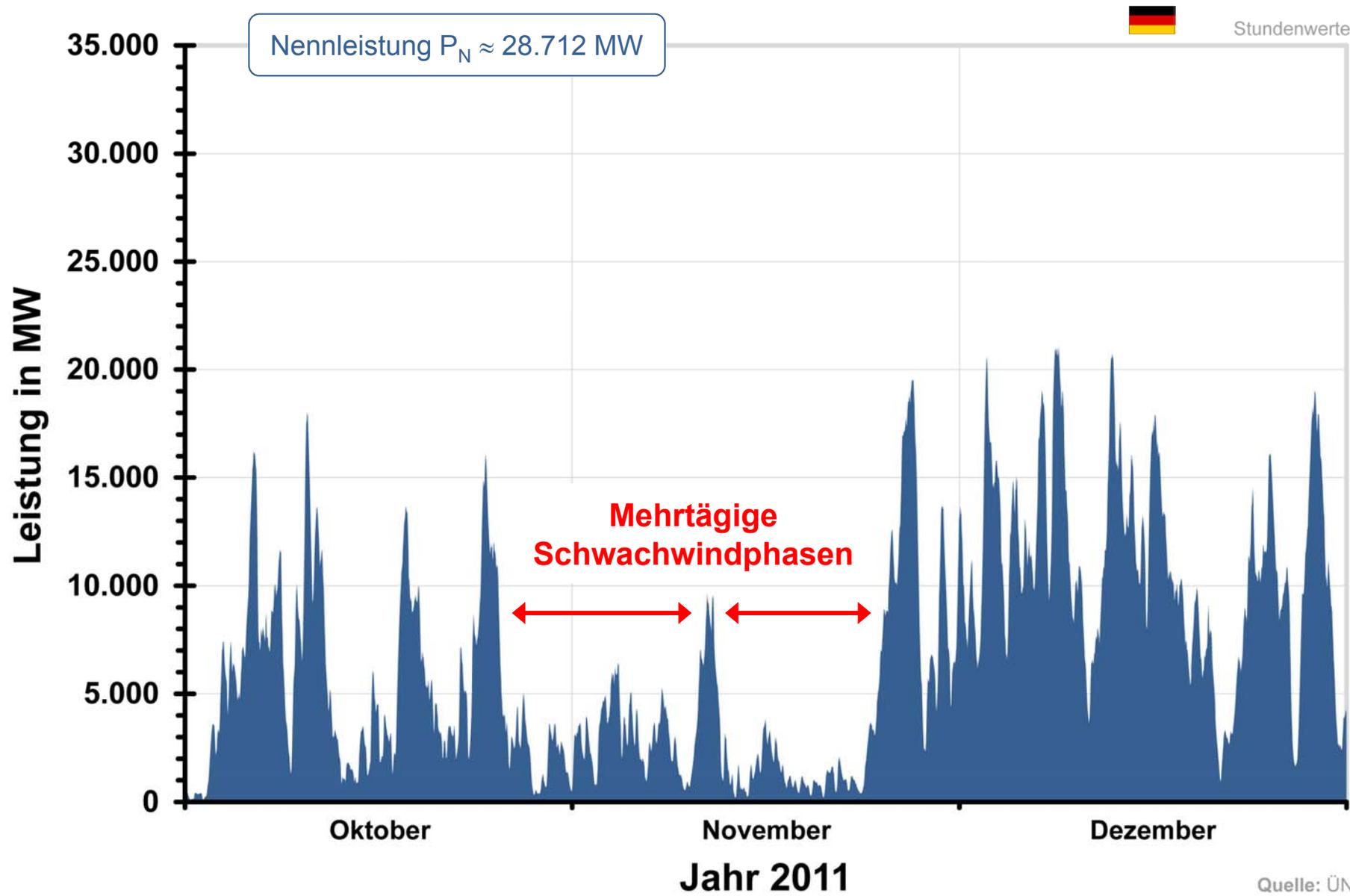
Beispiel: Windstärken am Dienstag, 22. November 2011, 7:00 Uhr

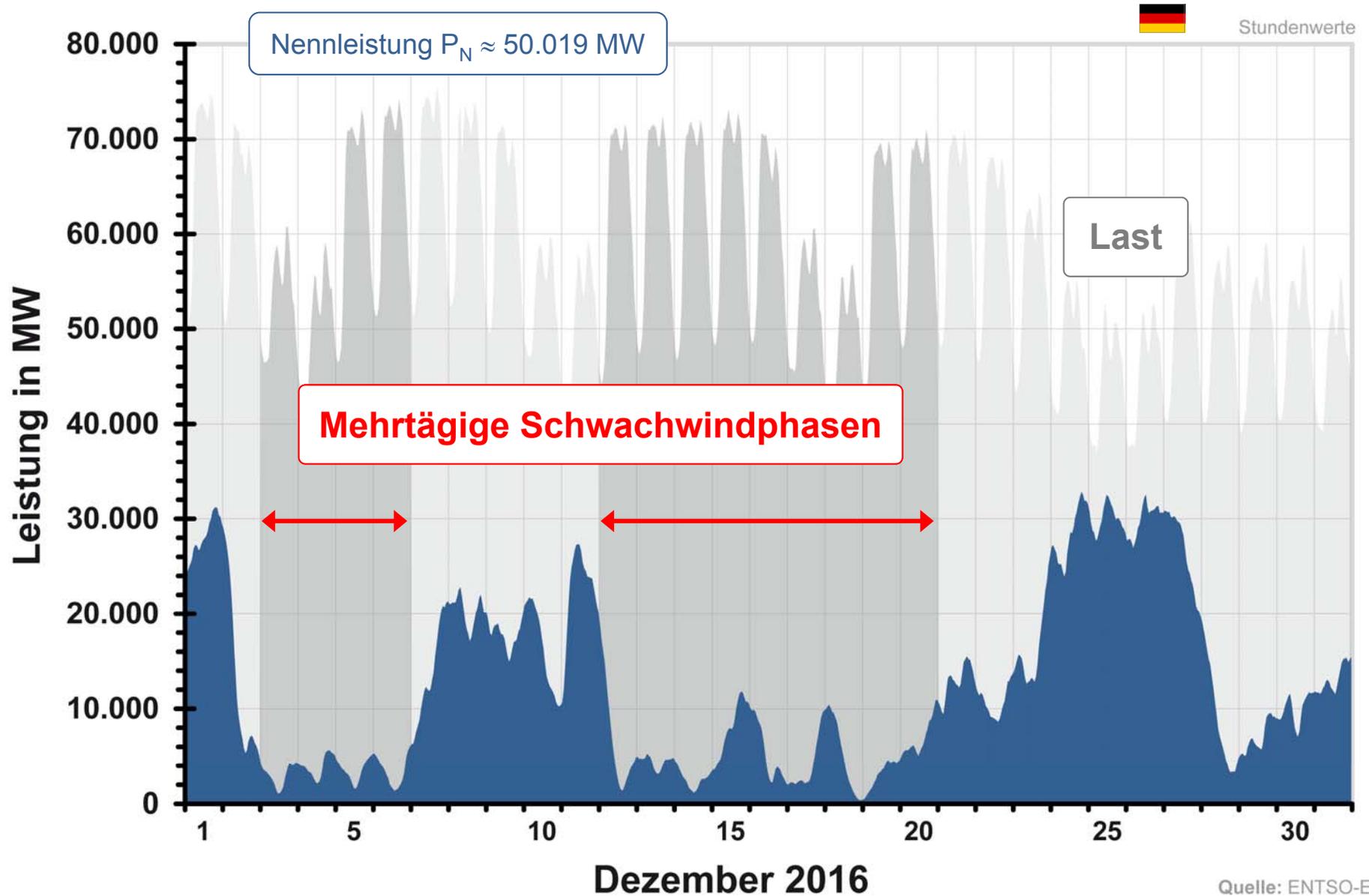


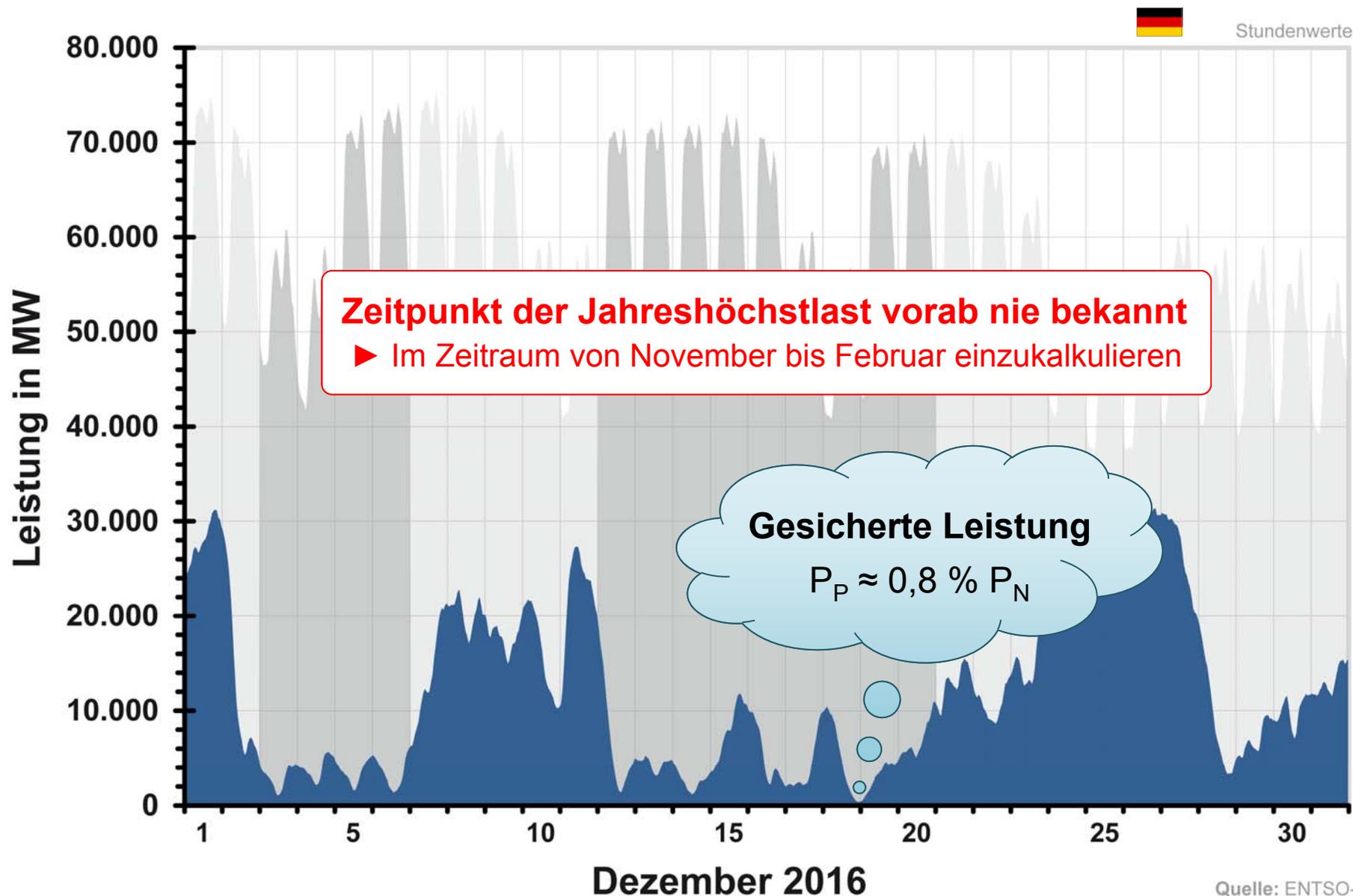
Windstärke in Beaufort (Bft)

- Weiträumig geringes Winddargebot mit Windstärke 3 oder darunter nach Beaufort-Skala („Schwacher Wind“)
- Resultierende Windgeschwindigkeiten von 3,4 bis 5,4 m/s und darunter
- Europaweit geringe Windstromerträge
- Kein gegenseitiger Austausch möglich
- Regelmäßig ähnliche Wetterlagen

▶ **Blick auf Deutschland**

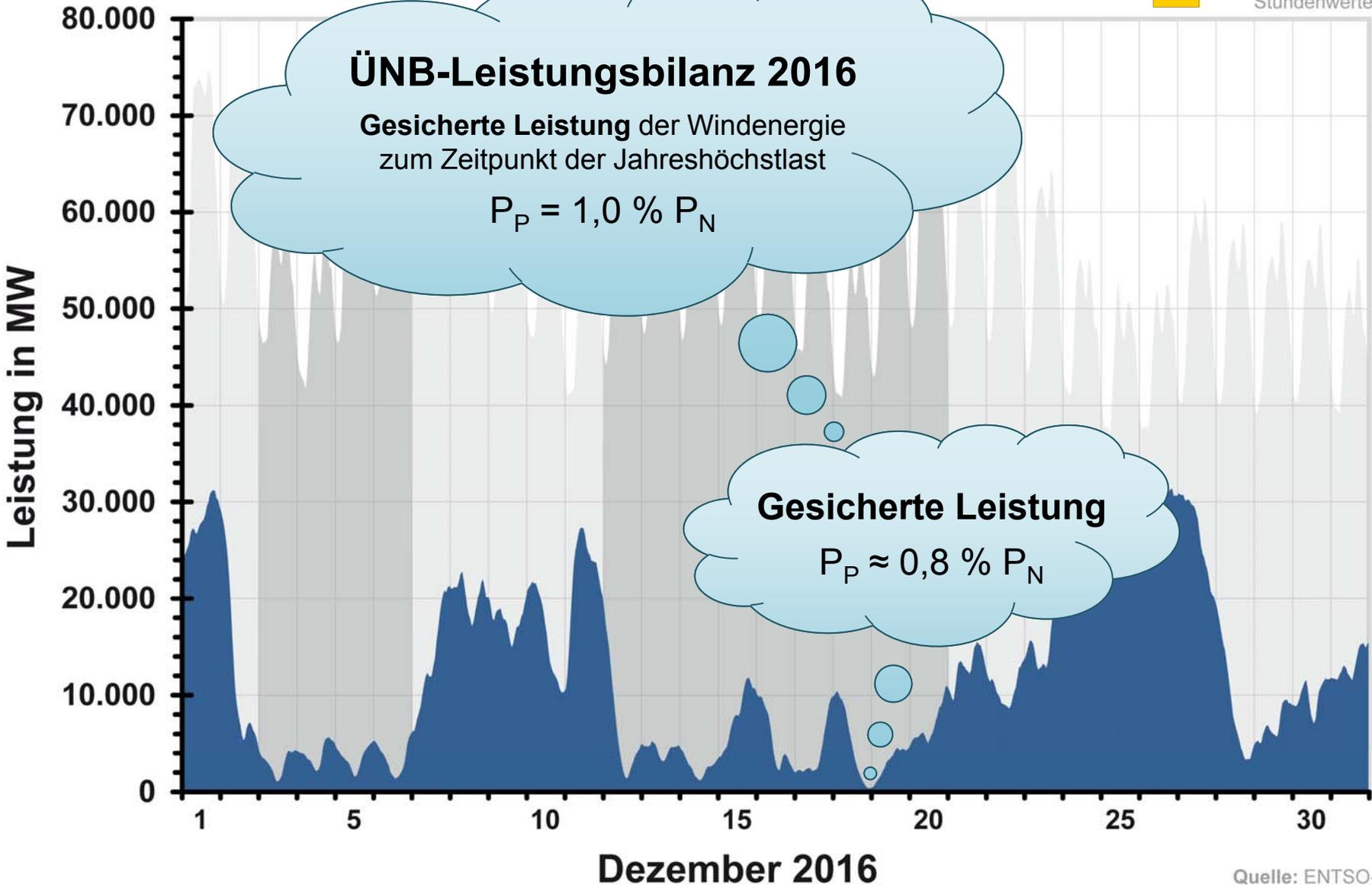




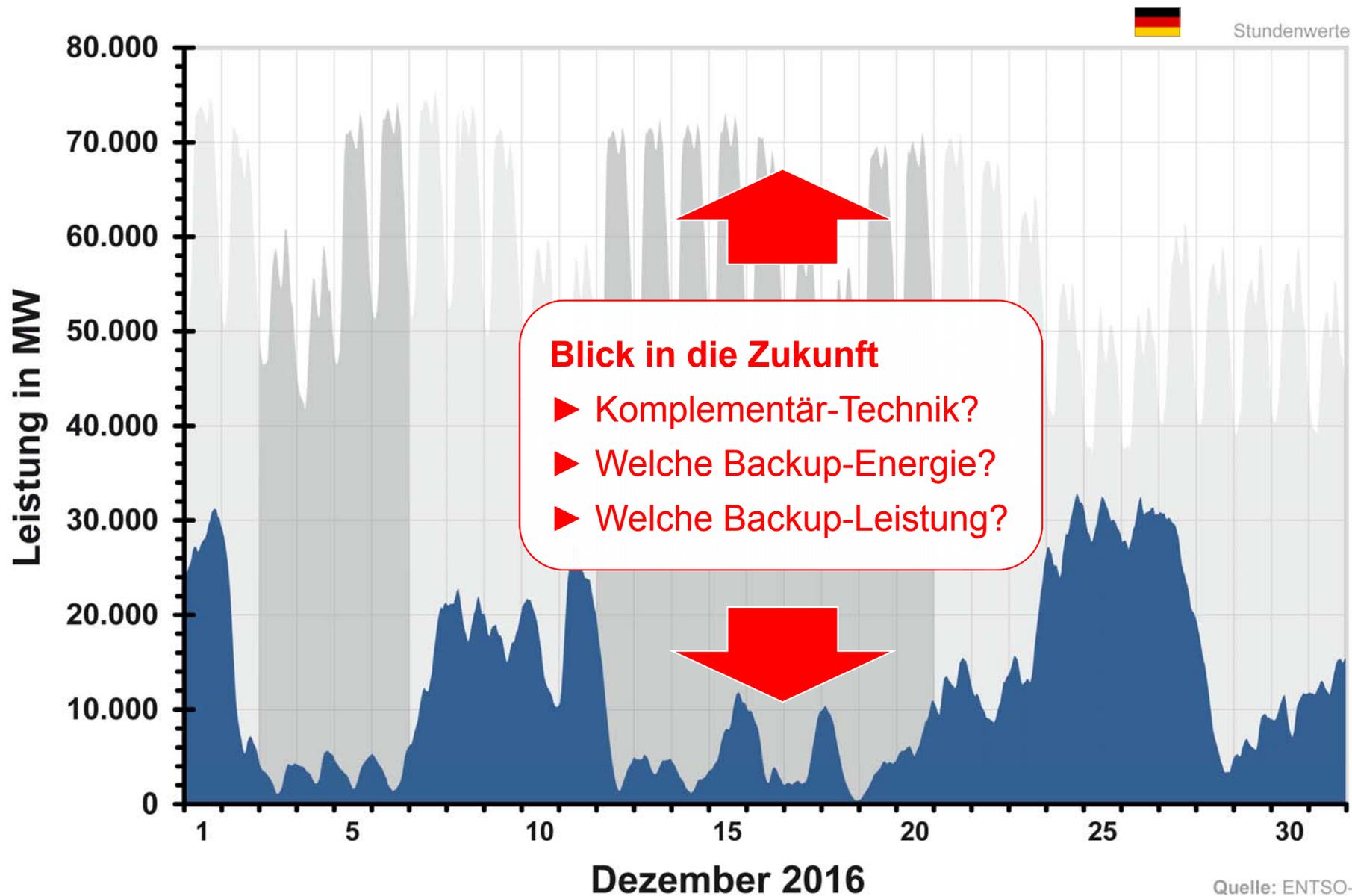


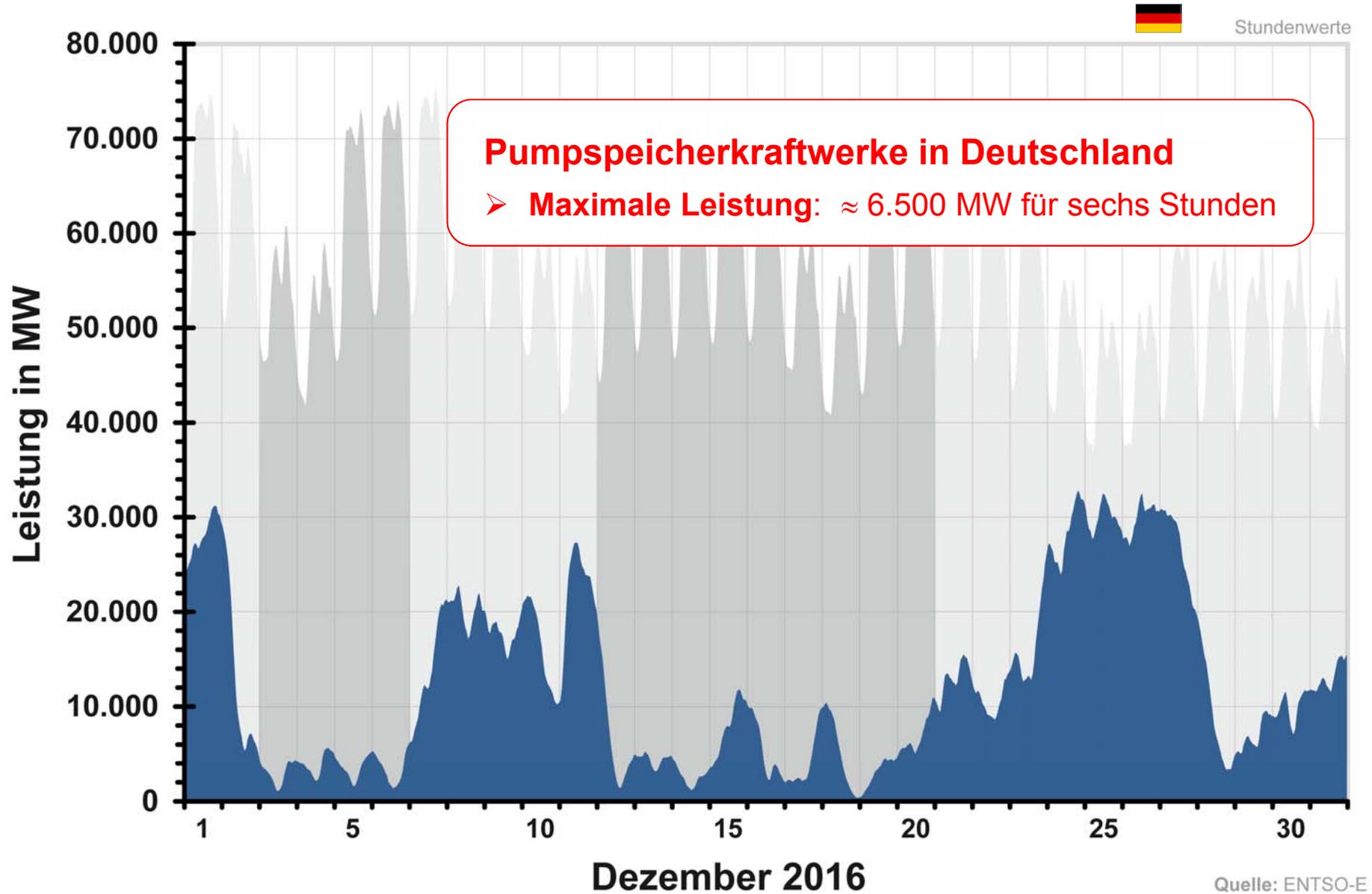


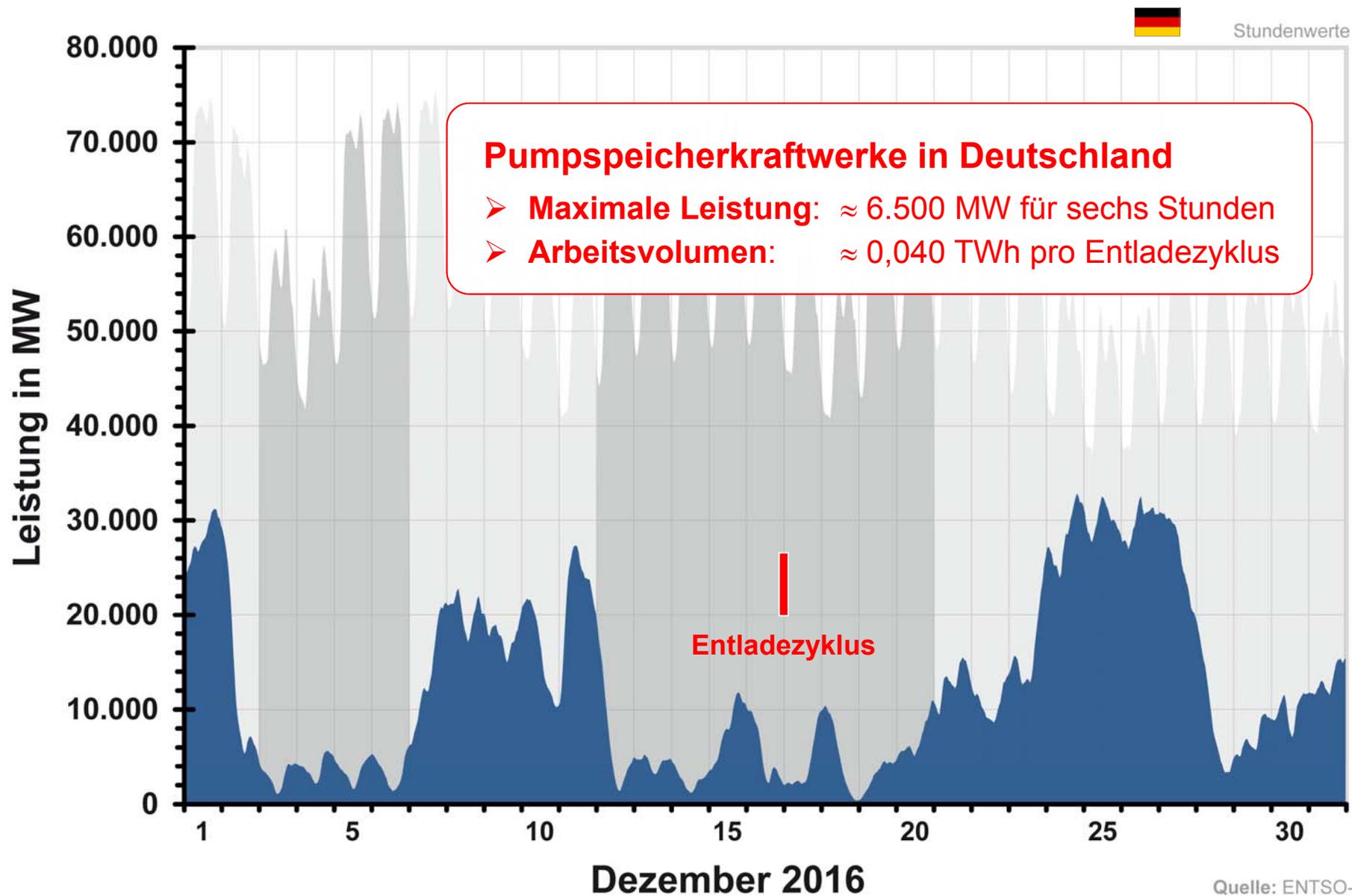
Stundenwerte

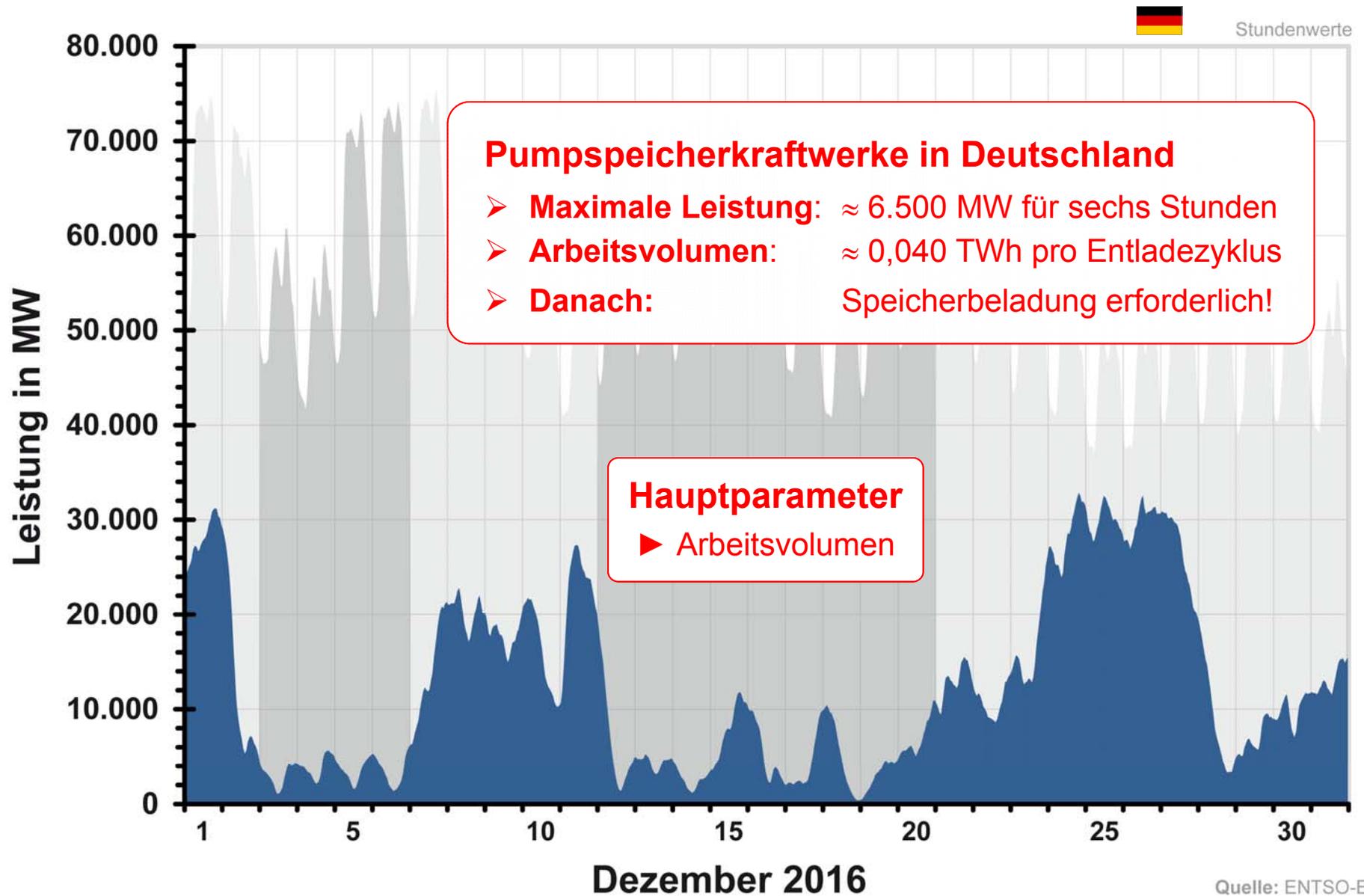


Quelle: ENTSO-E

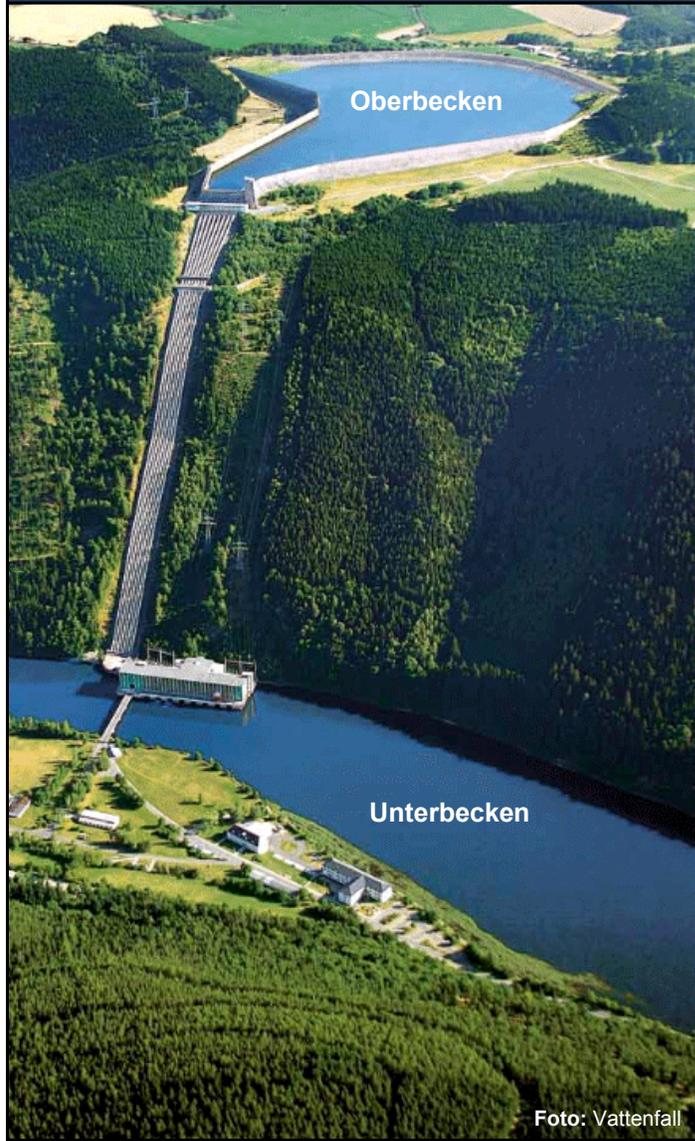








Pumpspeicherkraftwerk Hohenwarte II, Thüringen



Herausforderungen der Energiespeicherung

- Zweiwöchige Schwachwindphase im Winterhalbjahr
- Durchschnittlicher Tagesstrombedarf: 1,5 TWh
- Gesamtbedarf in zwei Wochen: 21 TWh

Pumpspeicherkraftwerk Hohenwarte II

- Elektrische Leistung (Turbinenbetrieb): 320 MW
- Elektrische Arbeit (je Entladezyklus): 0,0021 TWh

Anzahl solcher Pumpspeicherkraftwerke zur Überbrückung einer 14-tägigen Dunkelflaute

$$n = 21 \text{ TWh} / 0,0021 \text{ TWh} = \underline{\underline{10.000 \text{ Kraftwerke}}}$$

VGB-Faktencheck: Zusammenfassung

- 1) Die Leistungseinspeisungen aller Windenergieanlagen fluktuieren stark. ✓
- 2) Die Nennleistung sämtlicher Windenergieanlagen wird niemals erreicht. ✓
- 3) Die Minimalwerte sind seit Jahren fast unverändert kleiner als 160 MW. ✓
- 4) Offshore-Windenergie liefert ebenfalls stark schwankende Leistungen. ✓
- 5) Die Leistungseinspeisungen aus Windenergie sind nicht normalverteilt. ✓
- 6) Die intuitiv vermutete Glättung tritt nur in geringfügigem Maße ein. ✓
- 7) Windenergie trägt praktisch nicht zur Versorgungssicherheit bei. ✓
- 8) Windenergie erfordert fast 100 % planbare Backup-Technik. ✓

VGB-Faktencheck ► Plausibilitätsnachweise erbracht

VGB-Windstudie 2017, Teil 1, Fachaufsatz und Foliensatz

https://www.vgb.org/studie_windenergie_deutschland_europa_teil1.html

VGB PowerTech e.V.

Thomas Linnemann, Guido Vallana

Deilbachtal 173, 45257 Essen, Germany

thomas.linnemann@vgb.org, guido.vallana@vgb.org

Vorsitzender des Vorstandes: Dr. Hans Bünting

Geschäftsführer: Erland Christensen

Registergericht: Amtsgericht Essen

Registernummer: VR 1788

www.vgb.org