

Windenergie in Deutschland und Europa

Status quo, Potenziale und Herausforderungen in der Grundversorgung mit Elektrizität

Teil 1: Entwicklungen in Deutschland seit 2010

Thomas Linnemann, Guido S. Vallana



Fakten zur Stromerzeugung, Juni 2017

Fakt: Die Nennleistung sämtlicher Windenergieanlagen in Deutschland hat sich in den letzten 16 Jahren auf ≈ 50.000 MW 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 150 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

Gliederung

- Auswertungen zur Windenergienutzung seit 2010
- Ausgewählte Zeitreihen der Leistungseinspeisungen
- Aufteilung zwischen On- und Offshore-Windenergie
- Energiewirtschaftliche Einordnung und Kenngrößen
- Erklärungsansätze für Minimalleistungen nahe Null
- Effizienz der Windstromproduktion (Ausnutzung)
- Ausnutzung im Vergleich mit anderen Ländern
- Schwachwindphasen und Backup-Bedarf
- Fazit



Illustration: www.kultur-denkmal-merzenich.de

Transparenzdaten für Deutschland

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



Illustration: www.kultur-denkmal-merzenich.de

Hinweis

- 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?

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



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

Offshore

Nordsee

Ostsee

DE

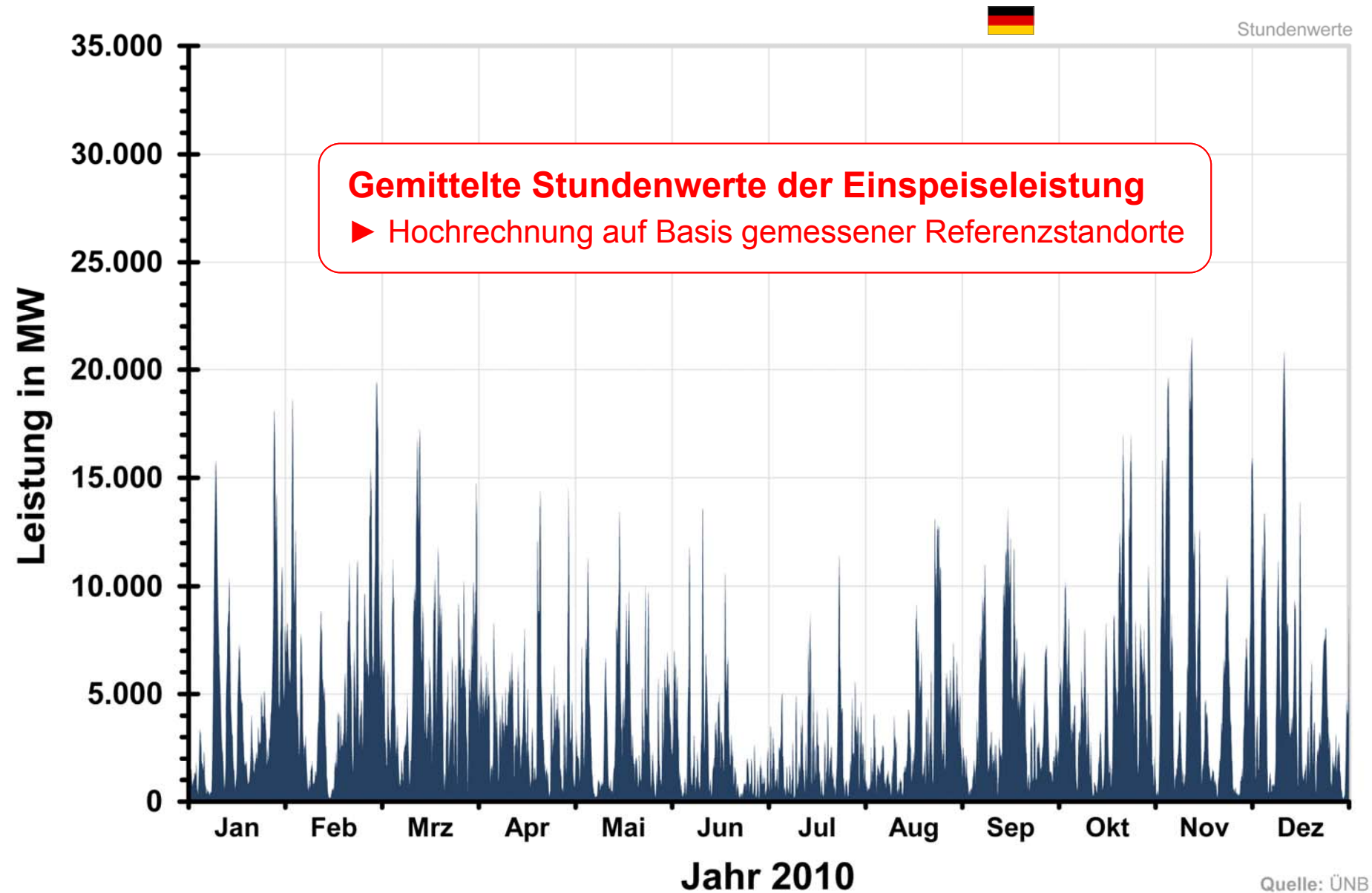
Onshore

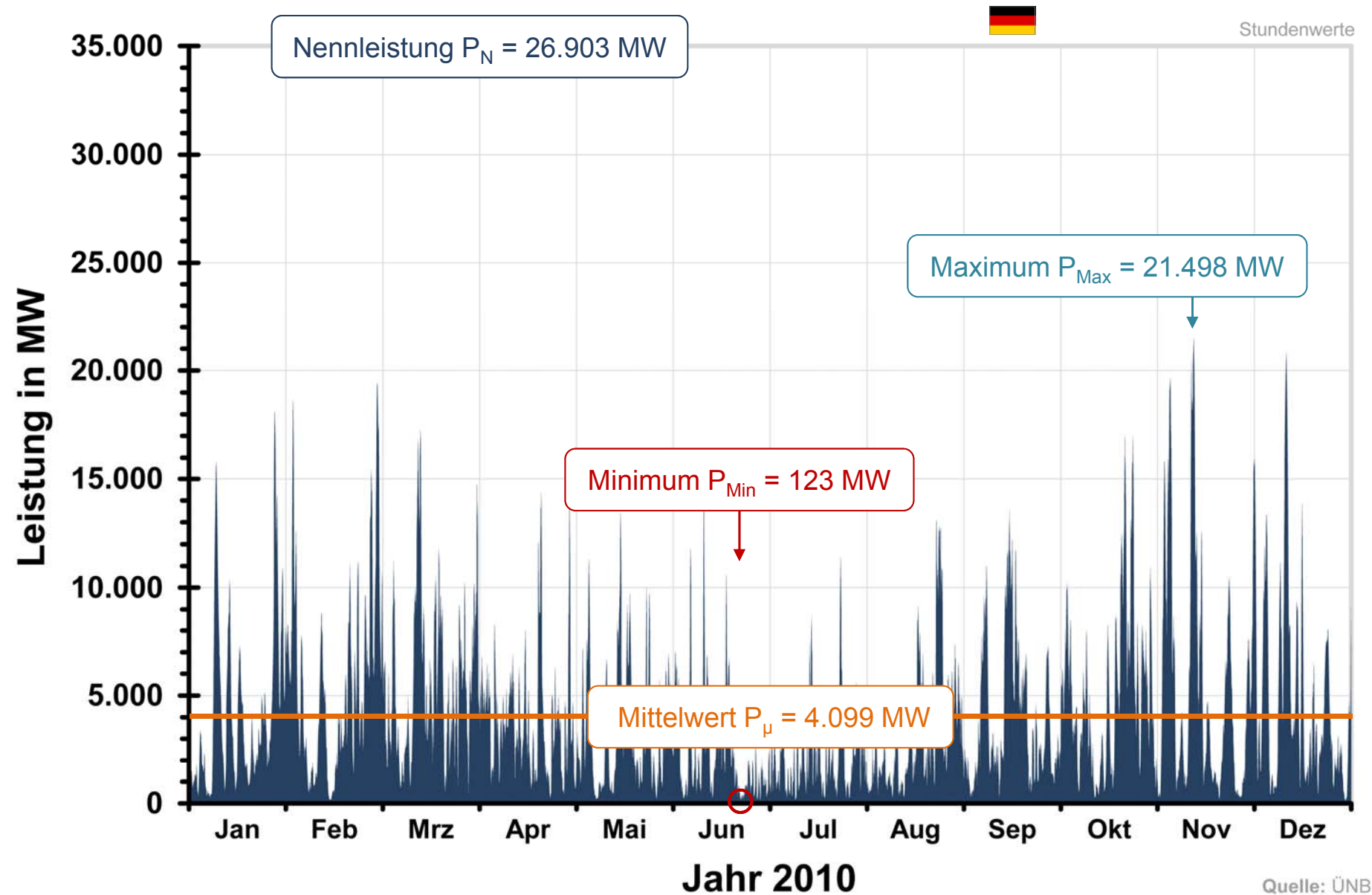
Zeitreihen der Leistung

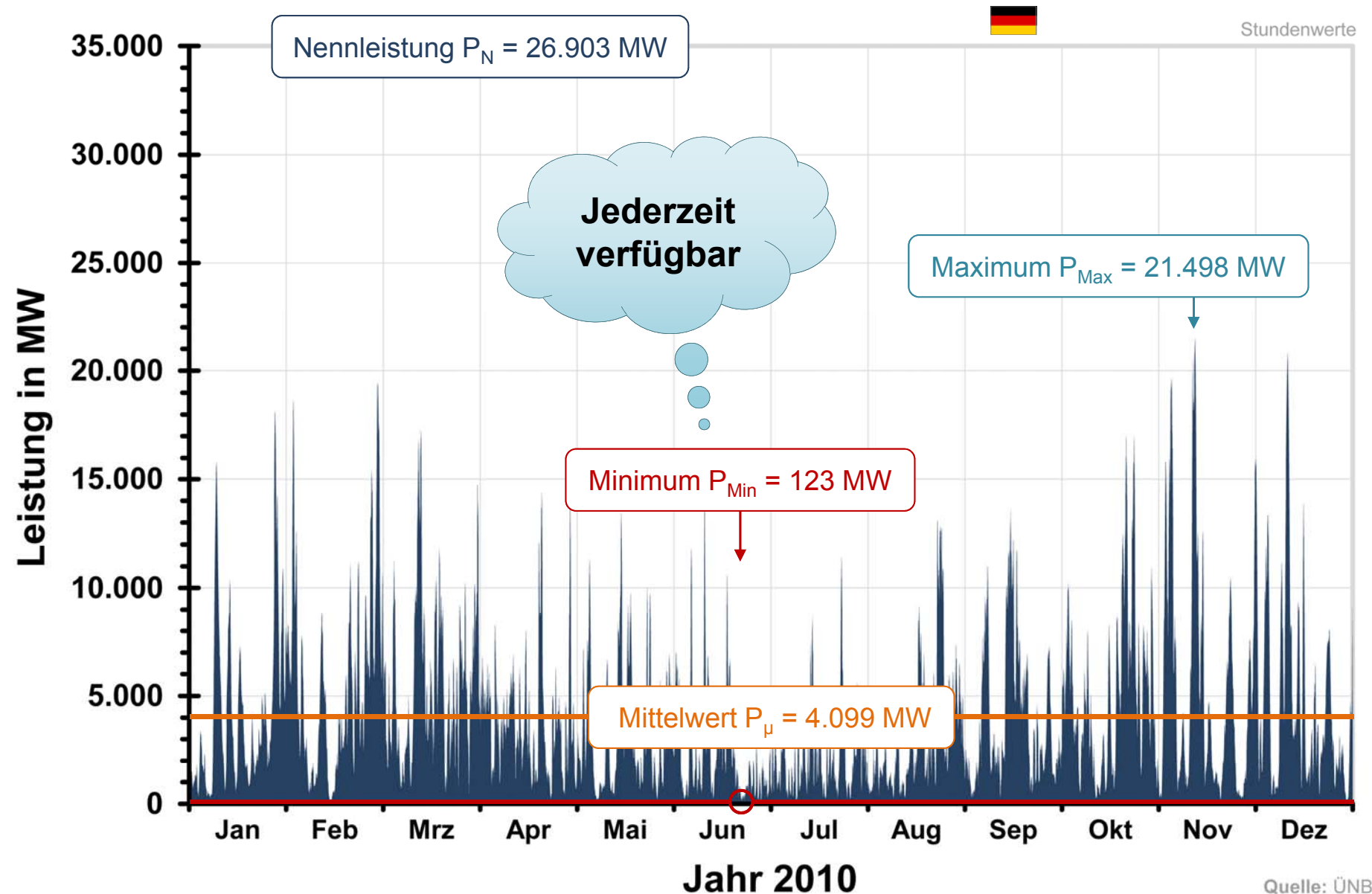
- **ÜNB**
Nationale Übertragungsnetzbetreiber
- **ENTSO-E**
Europäische Übertragungsnetzbetreiber

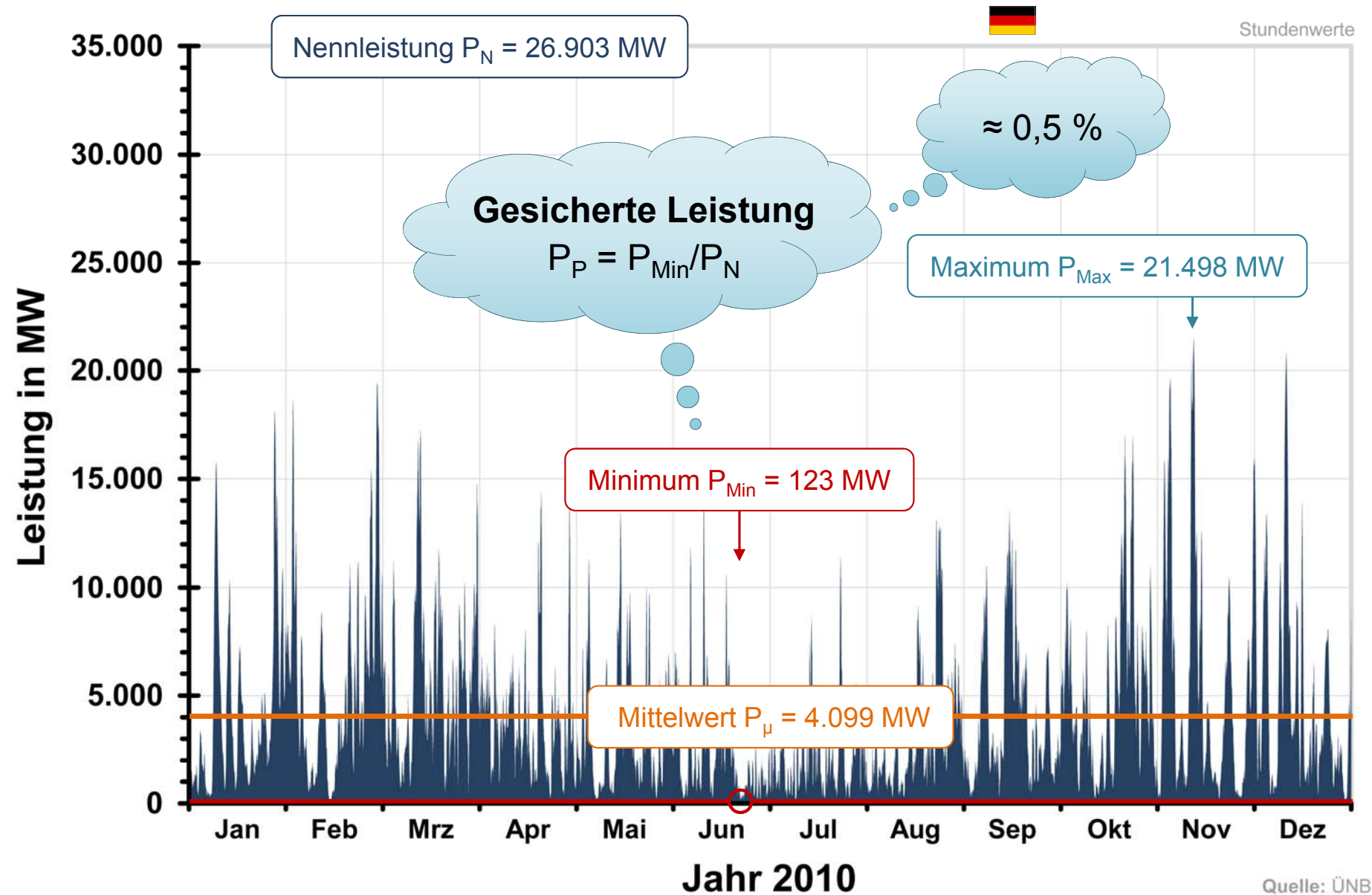
Energiestatistische Daten

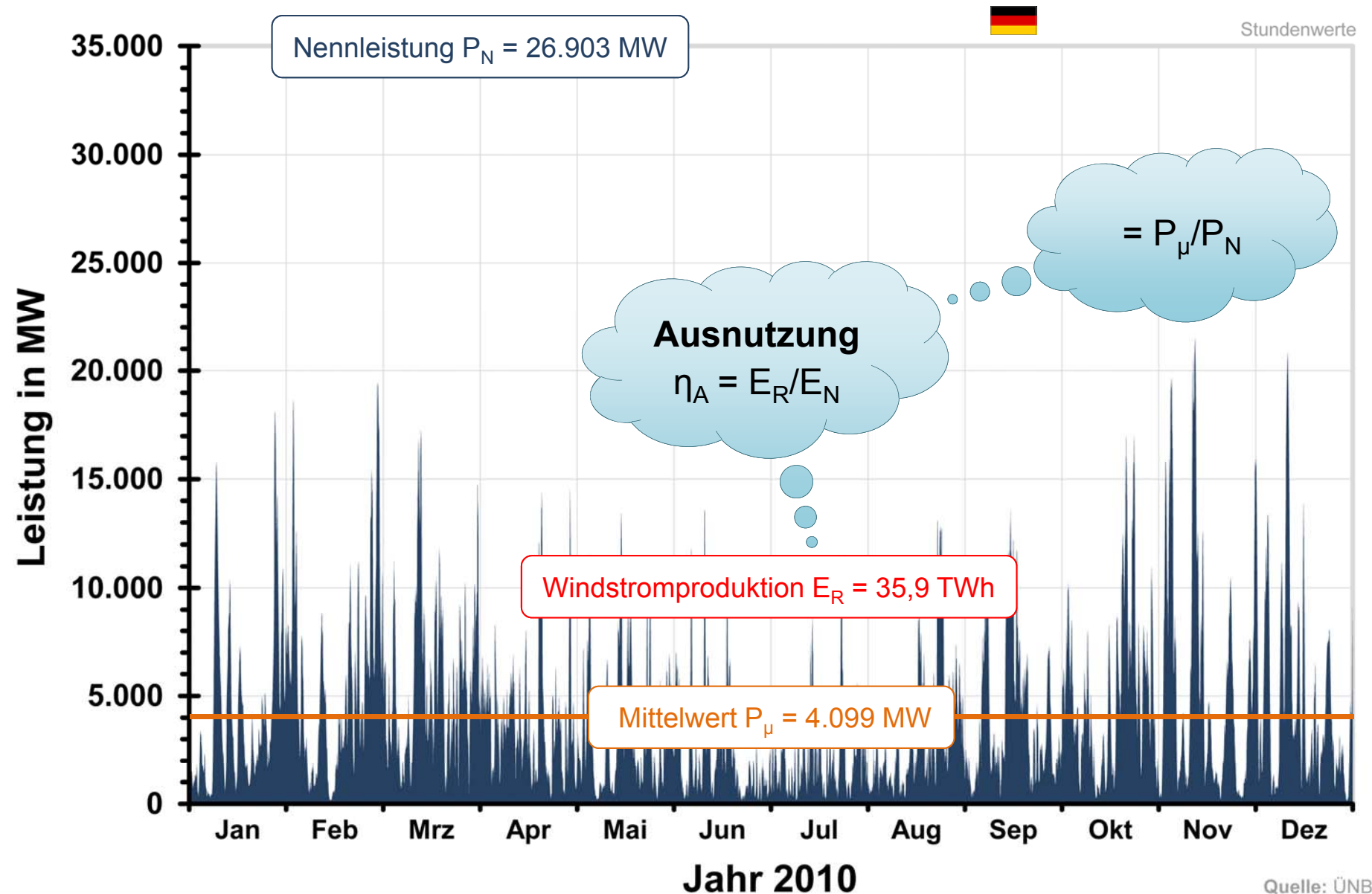
- **AGEB**
Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
- **BDEW**
Bundesverband Energie- und Wasserwirtschaft
- **BMWi**
Bundeswirtschaftsministerium
- **BWE**
Bundesverband Windenergie

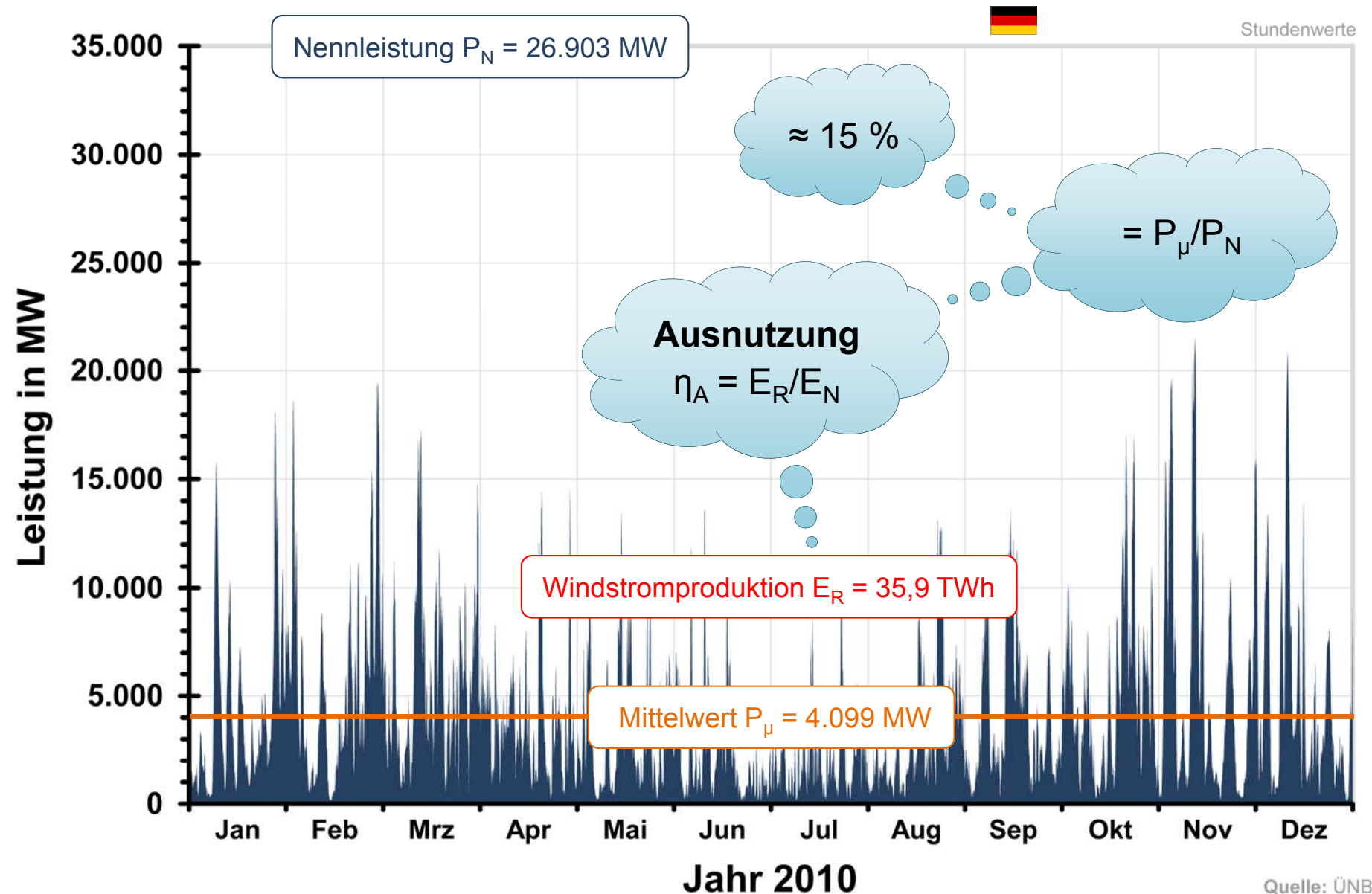


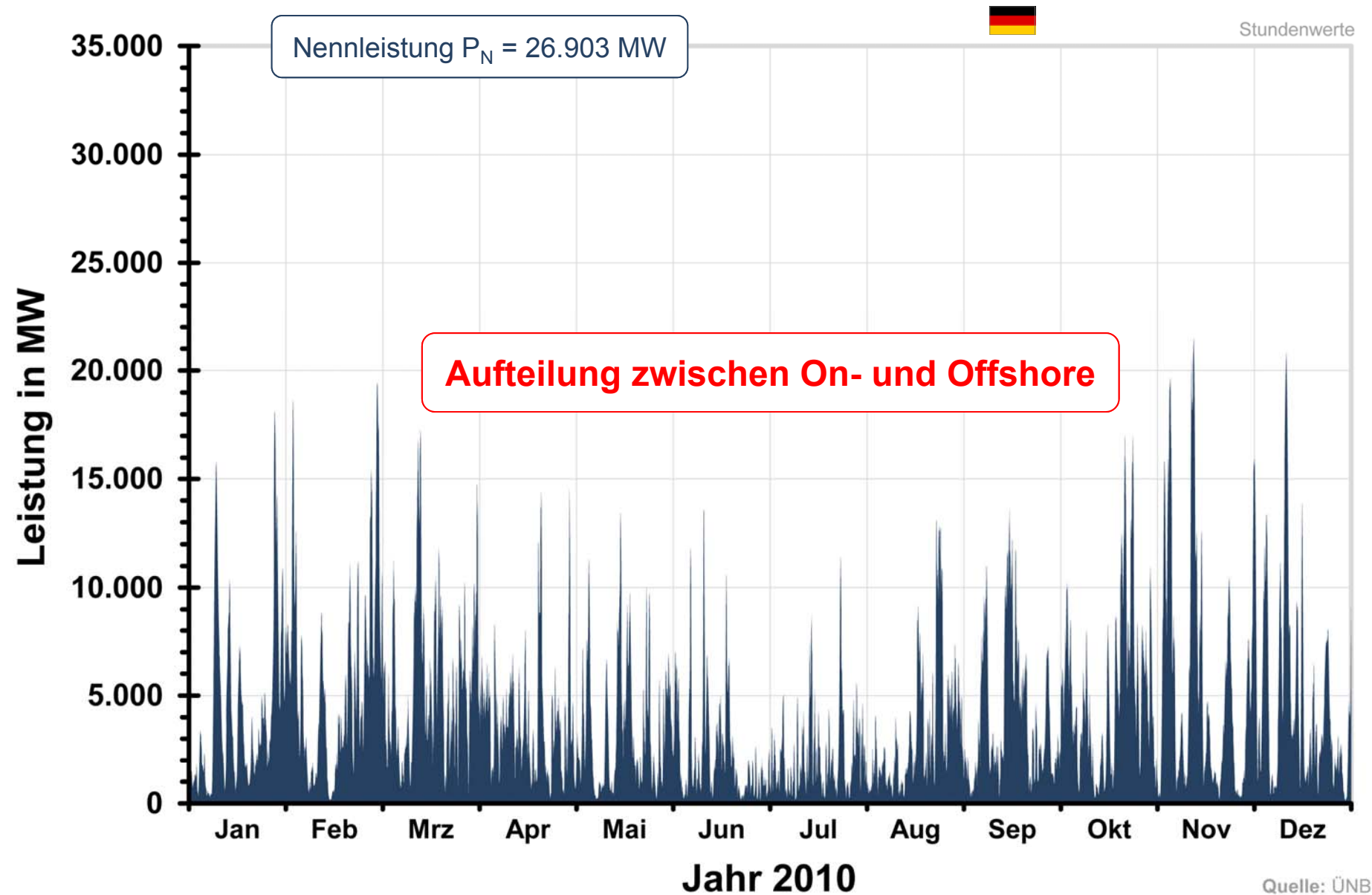


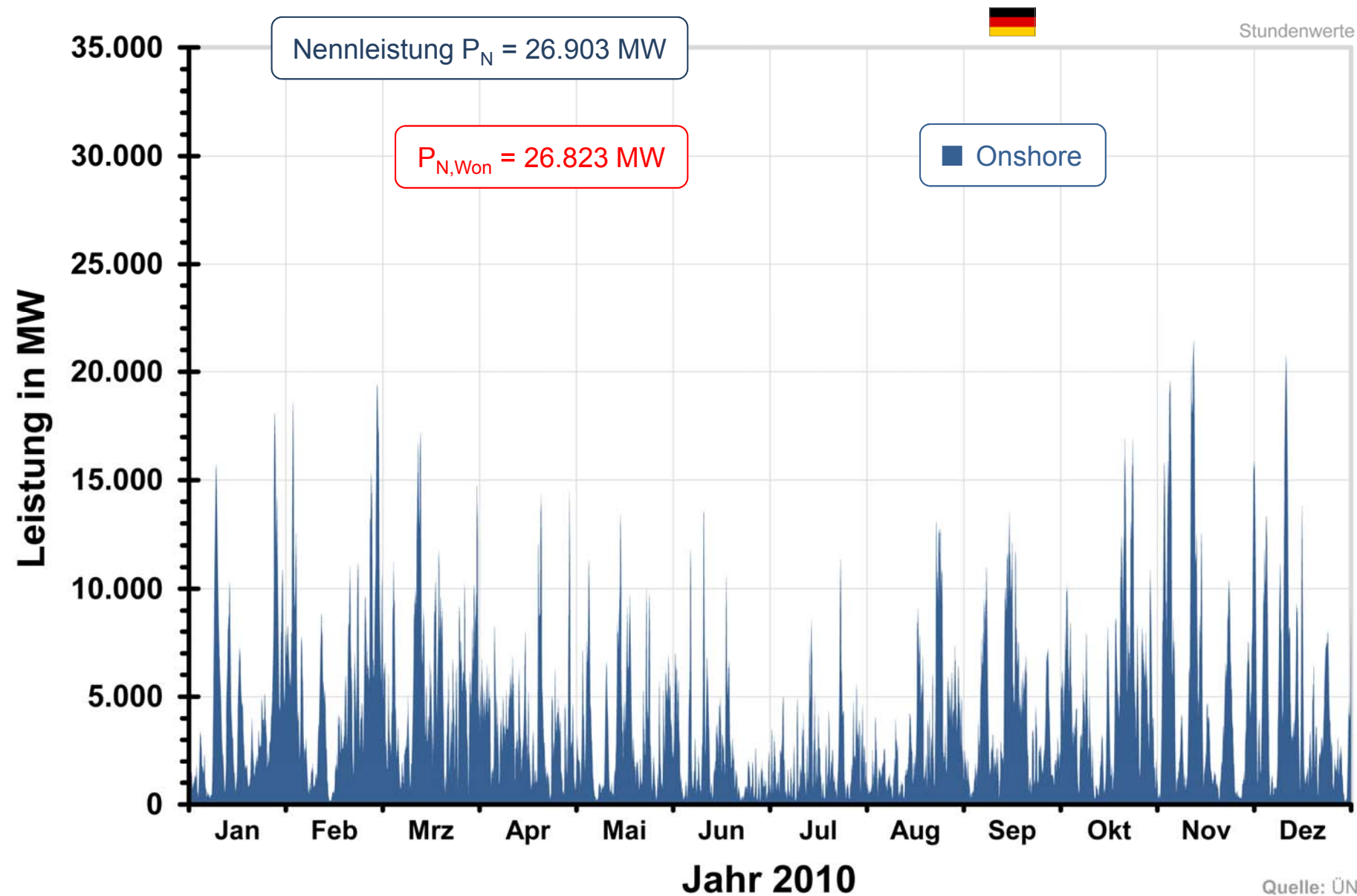


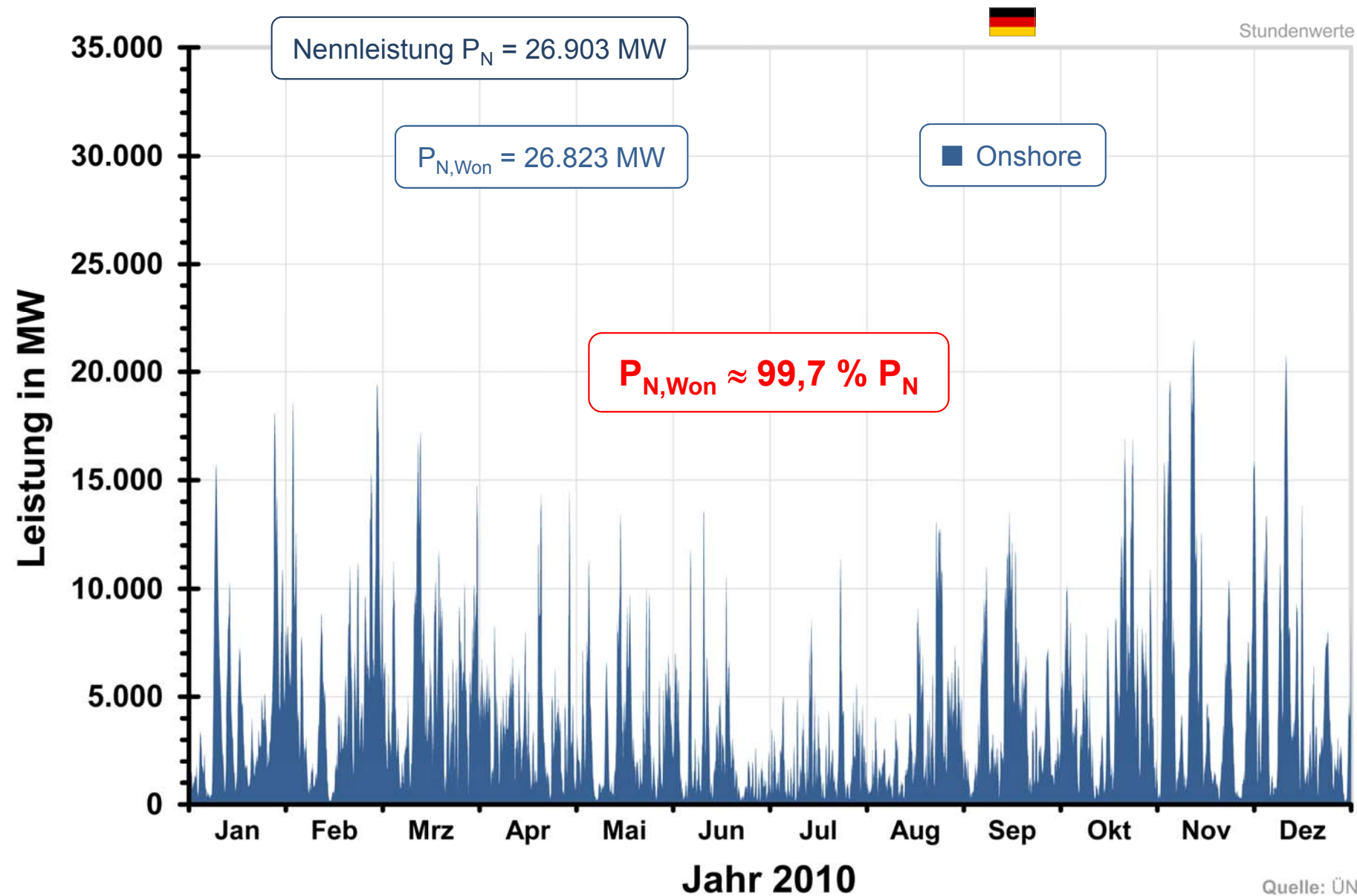


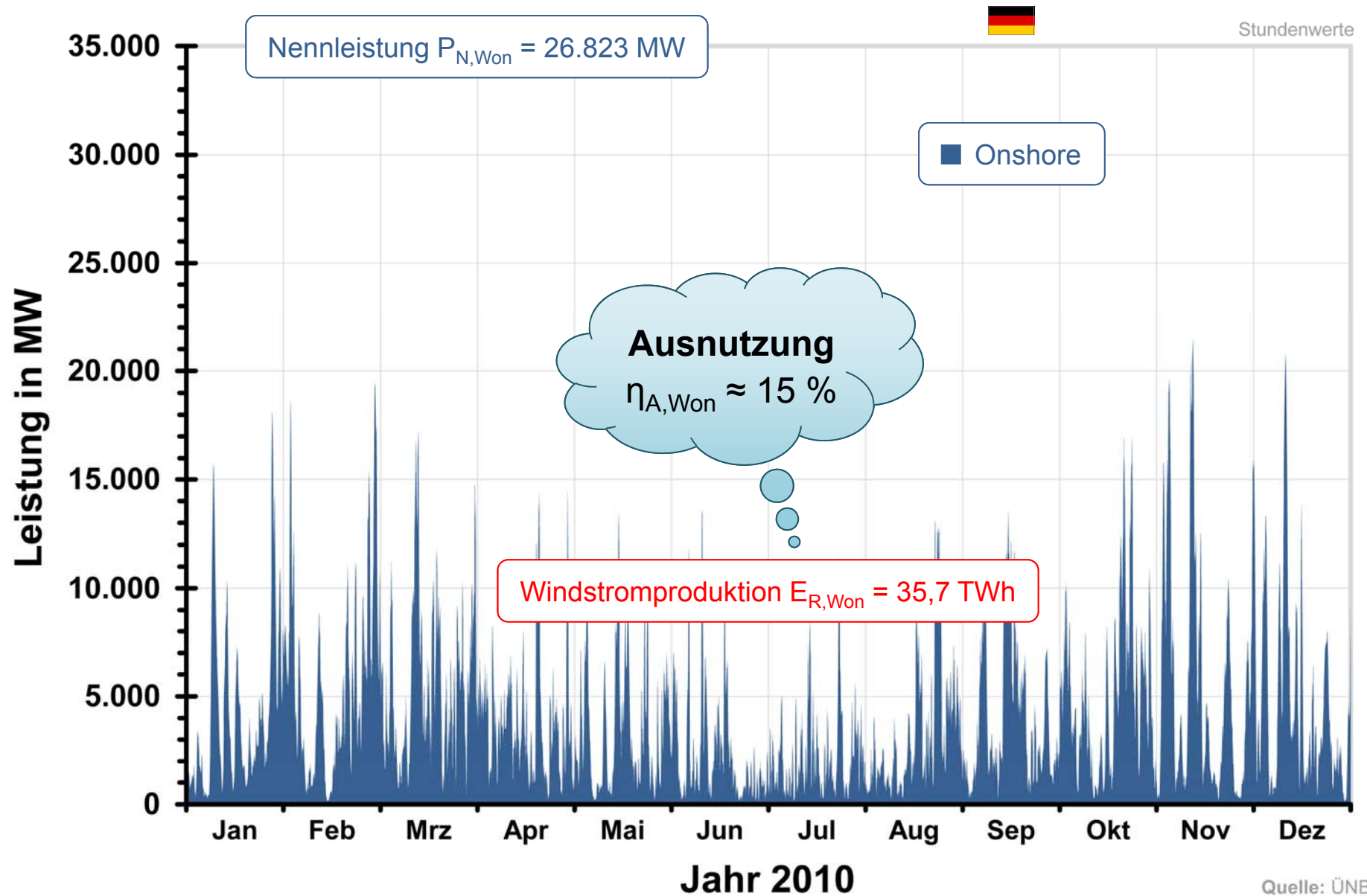


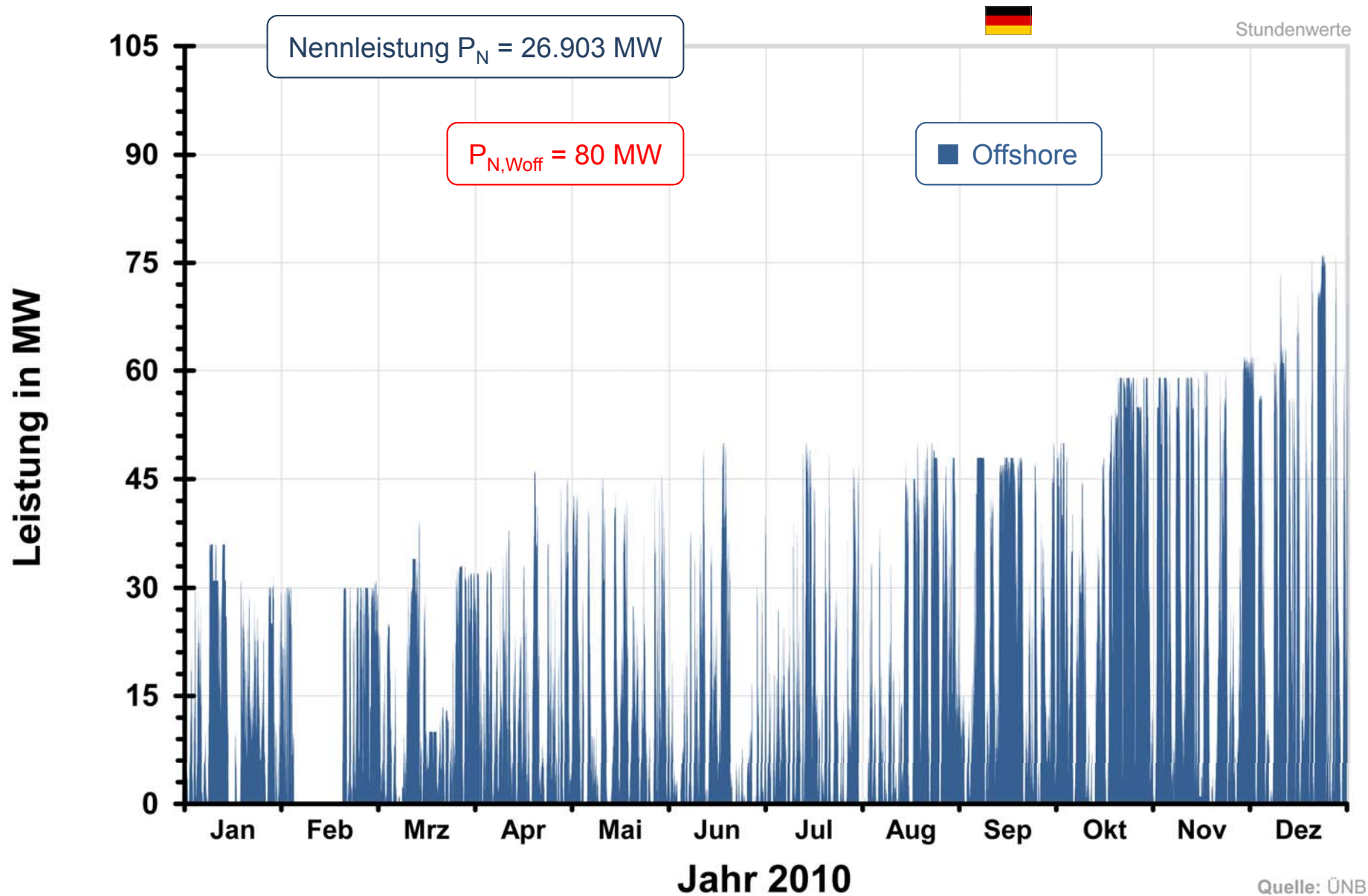


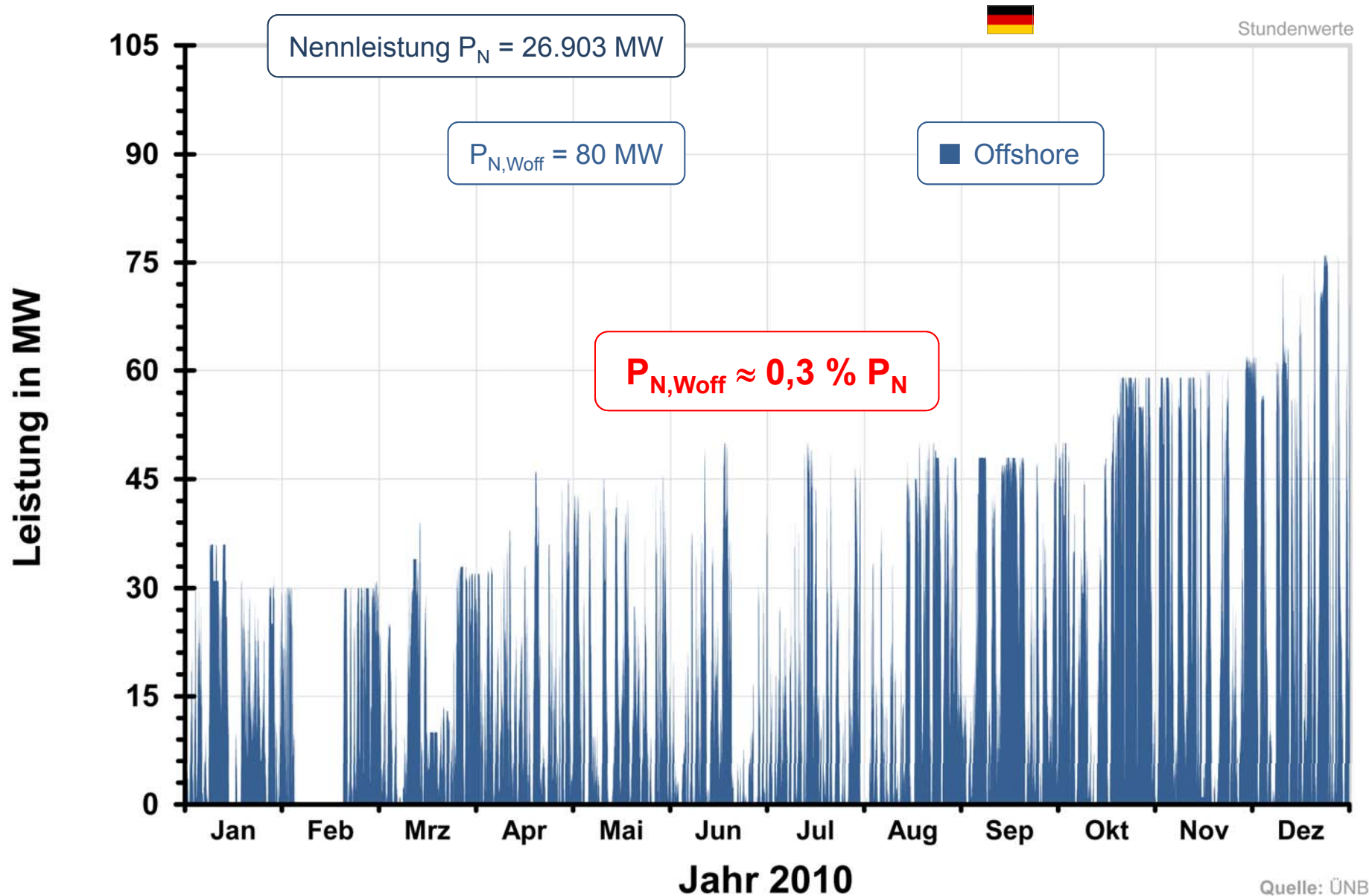


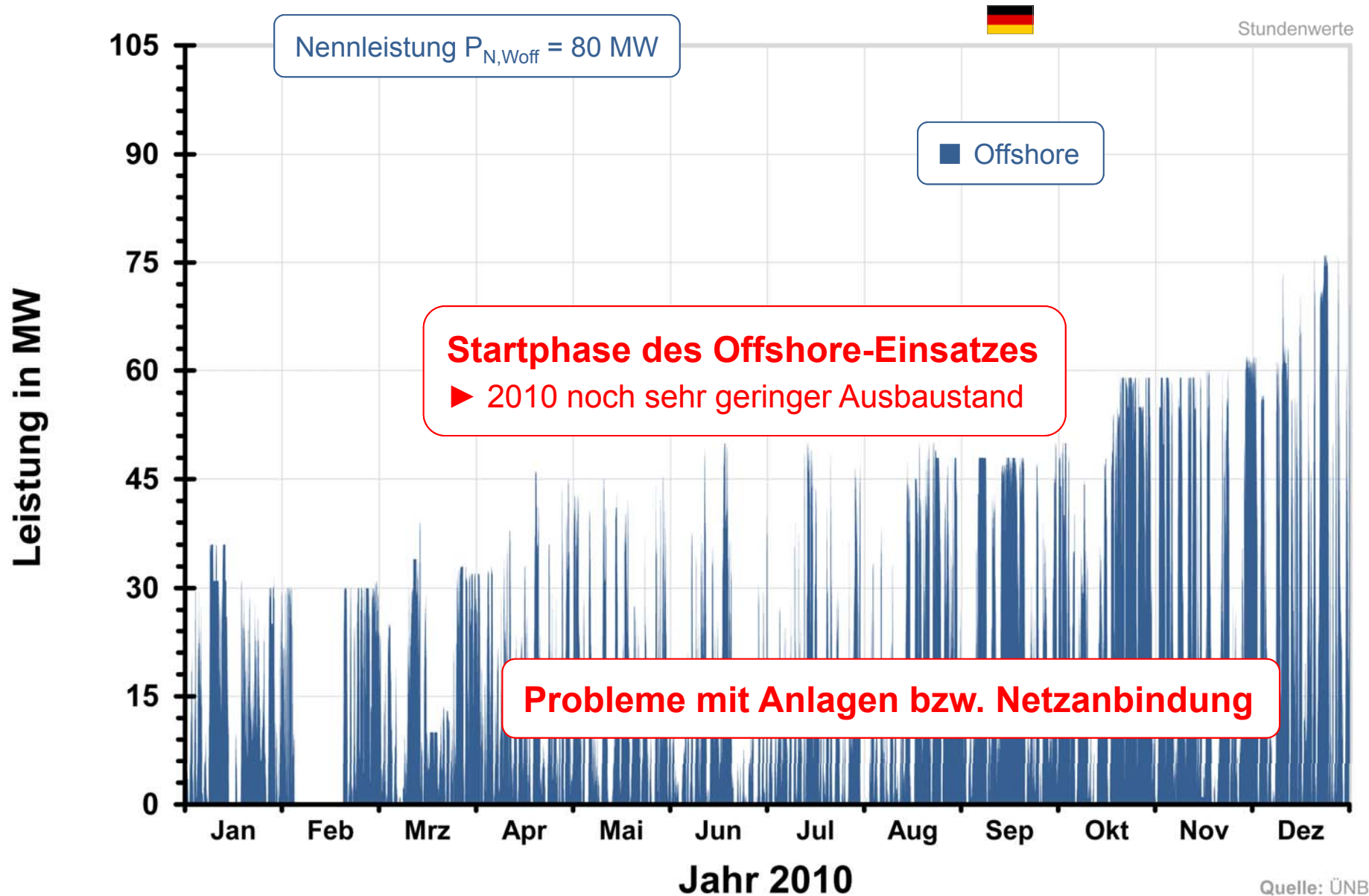


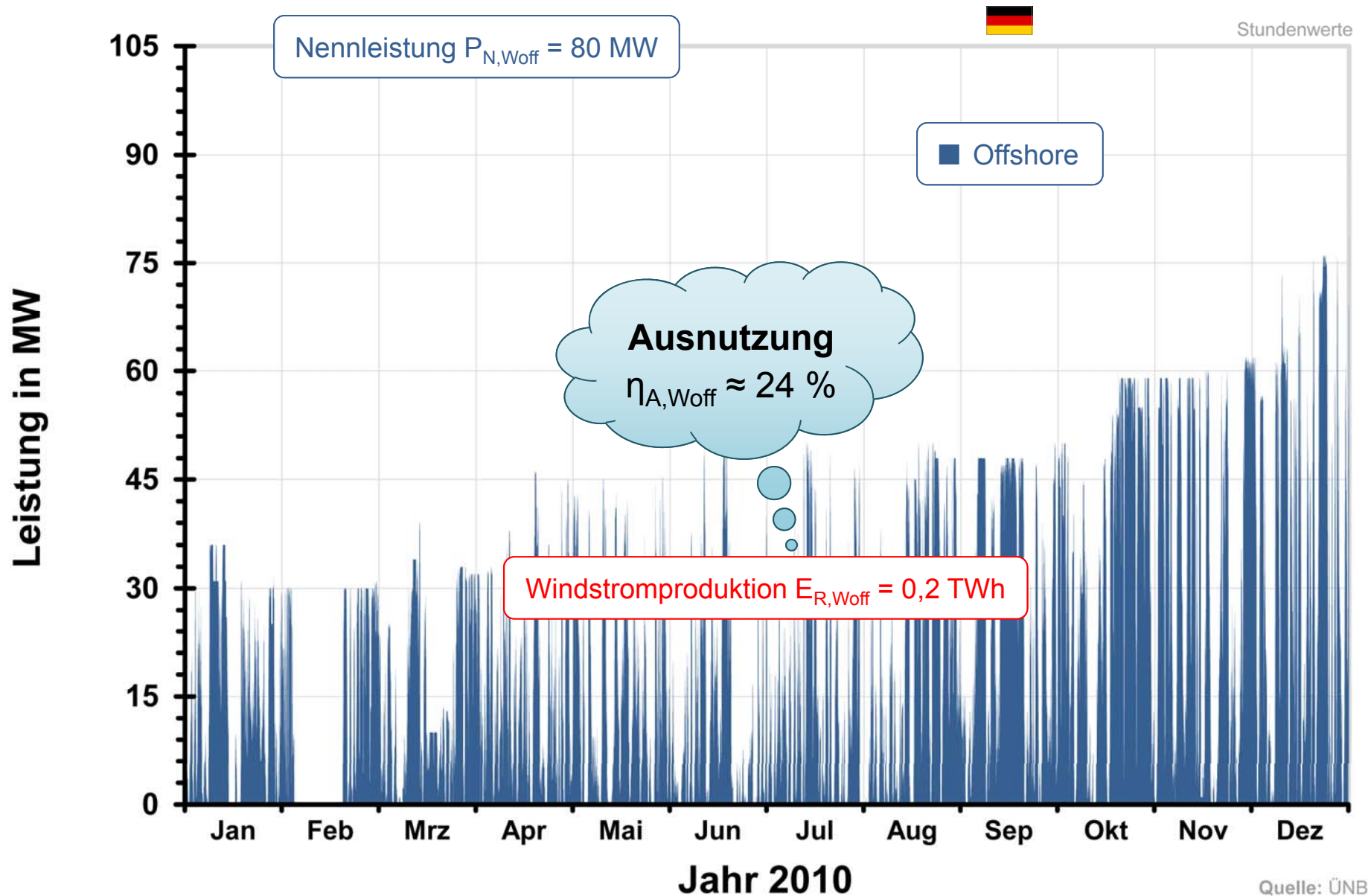


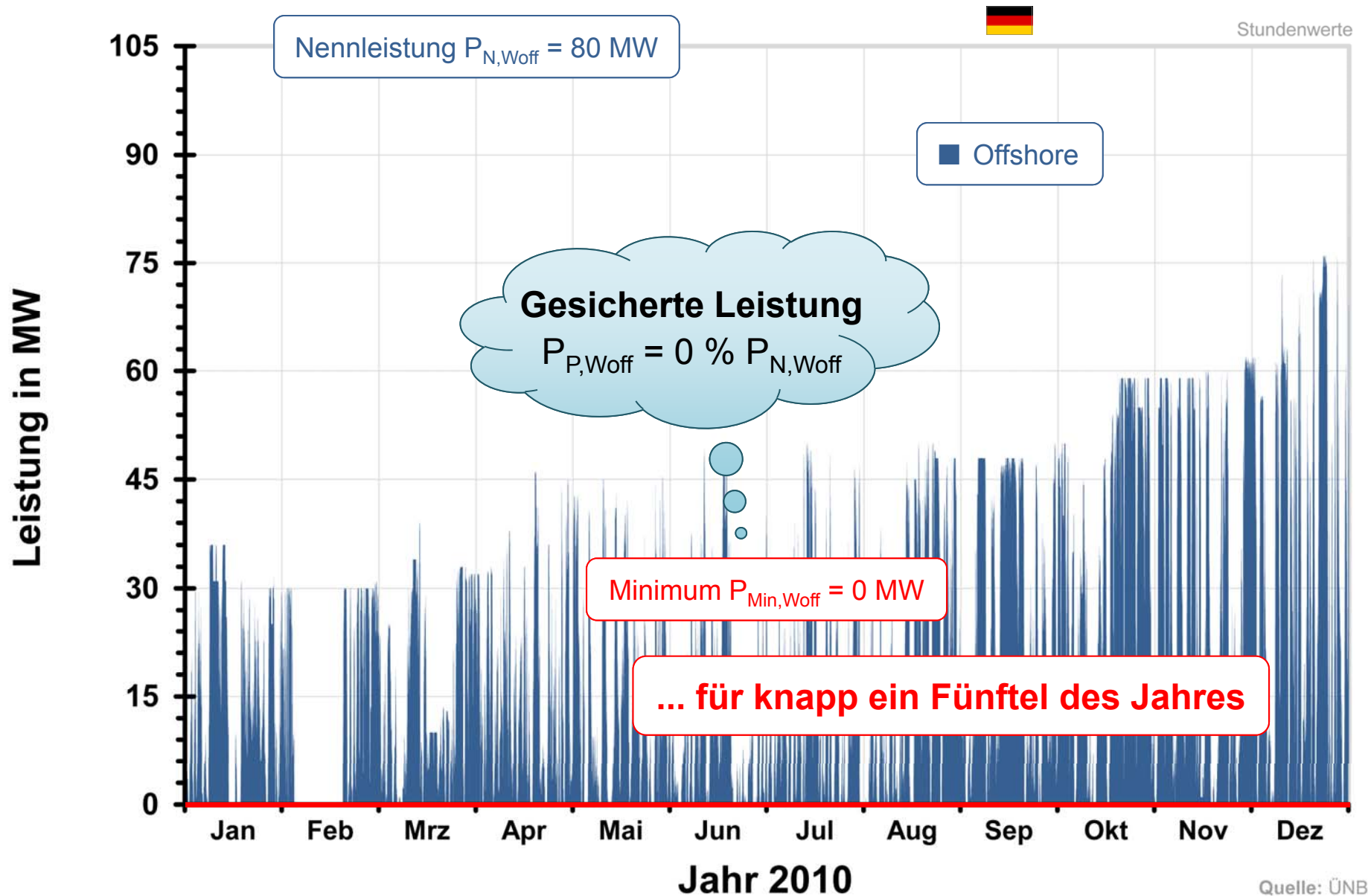


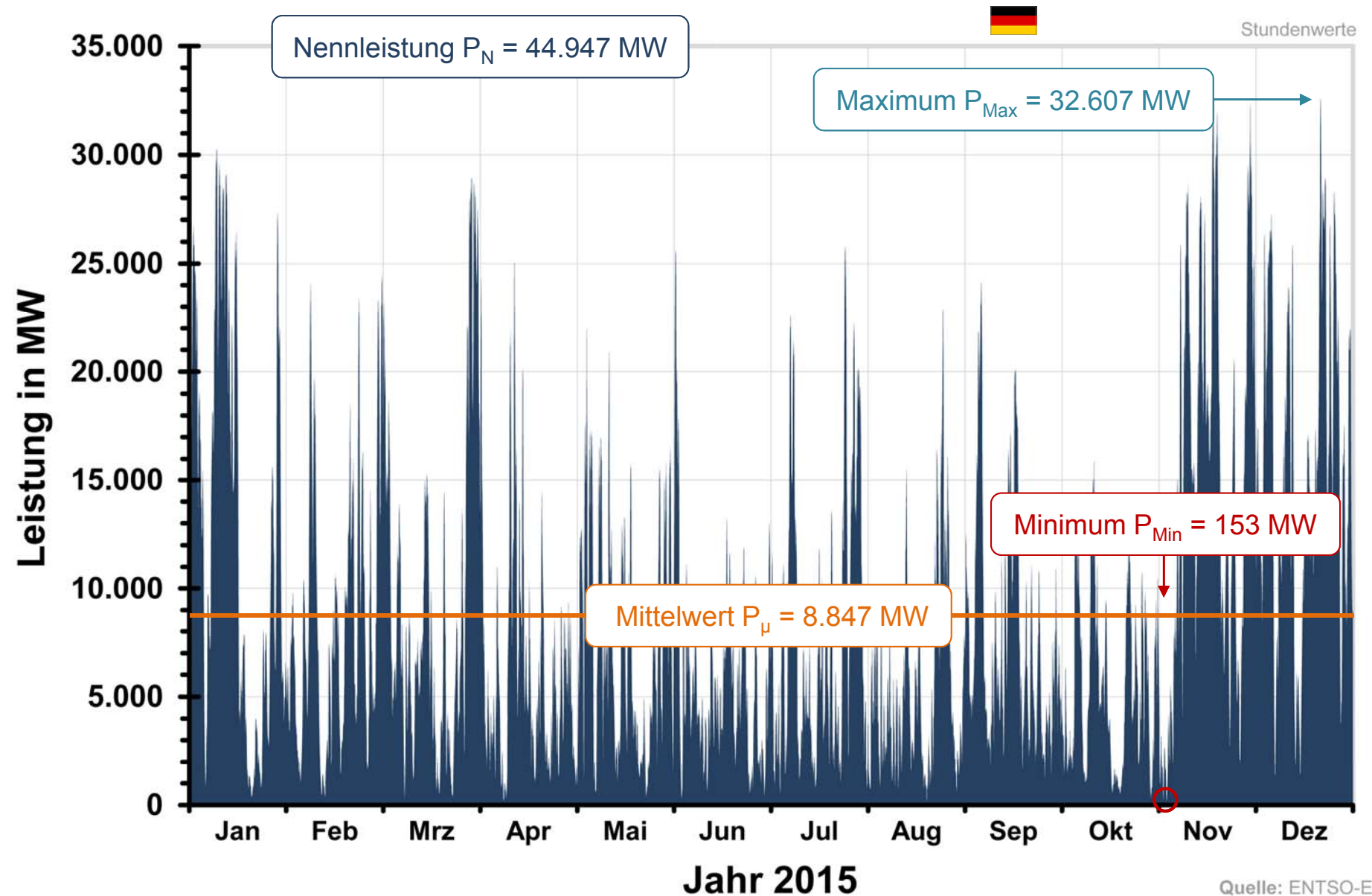


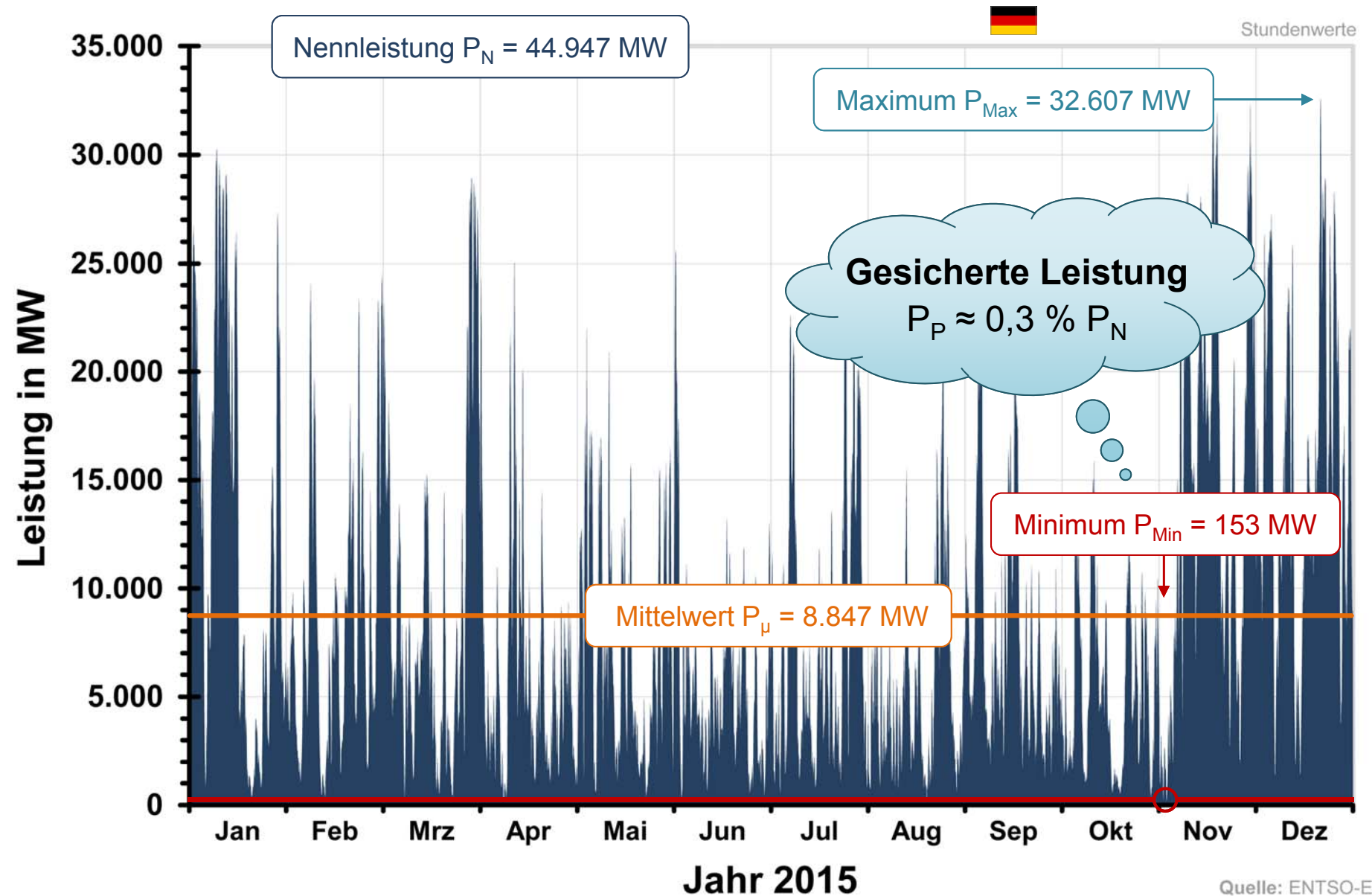


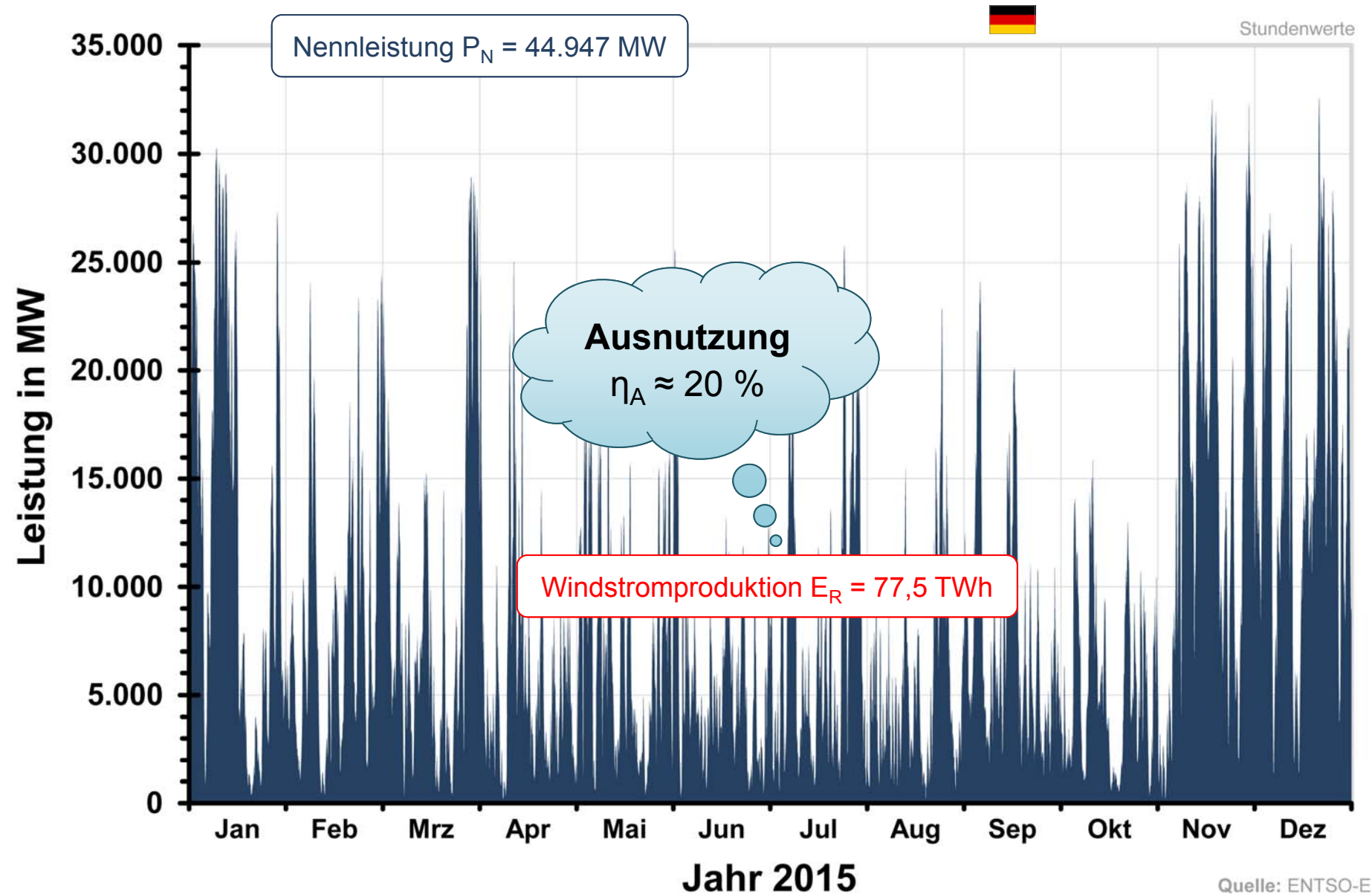


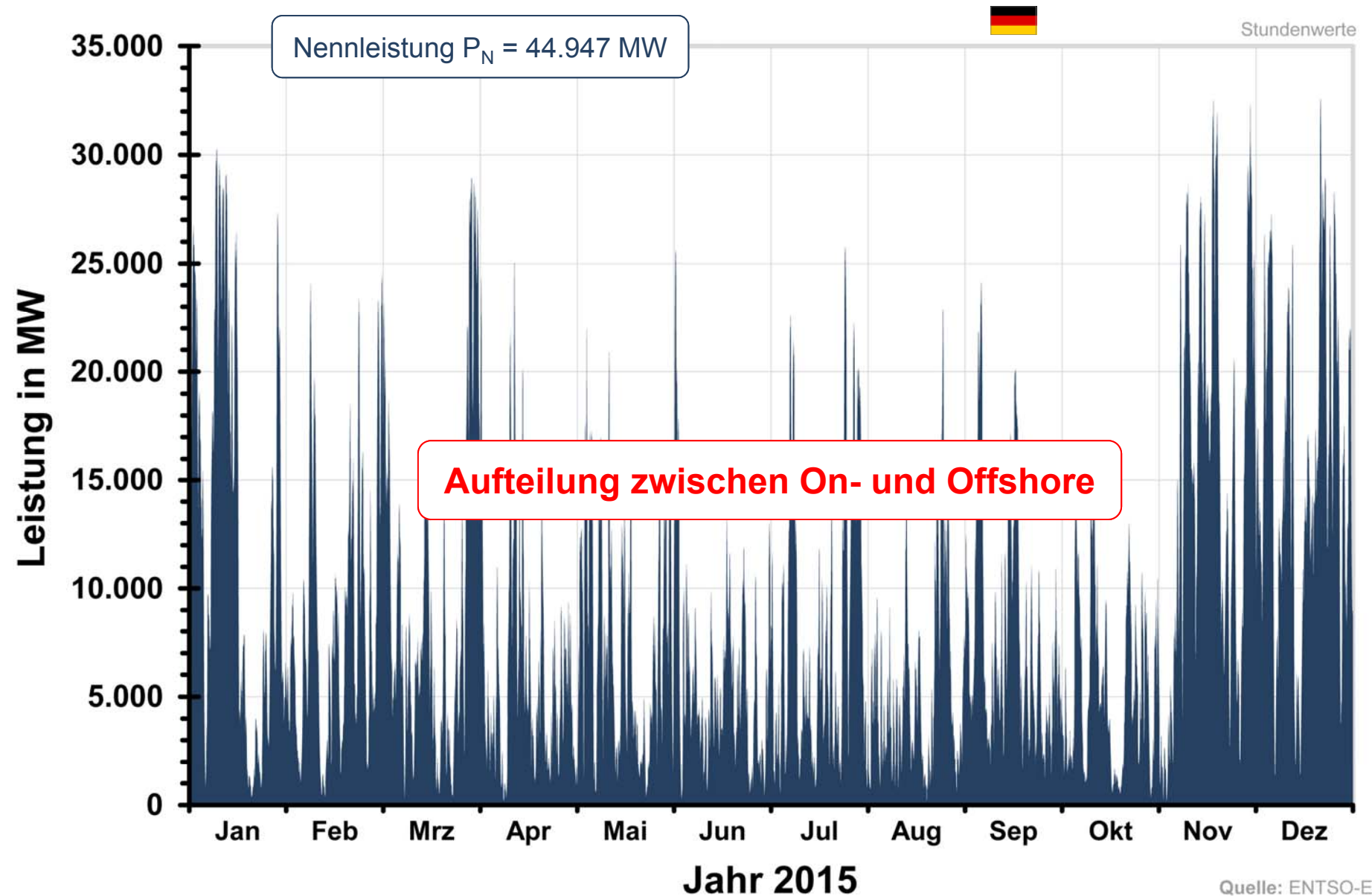


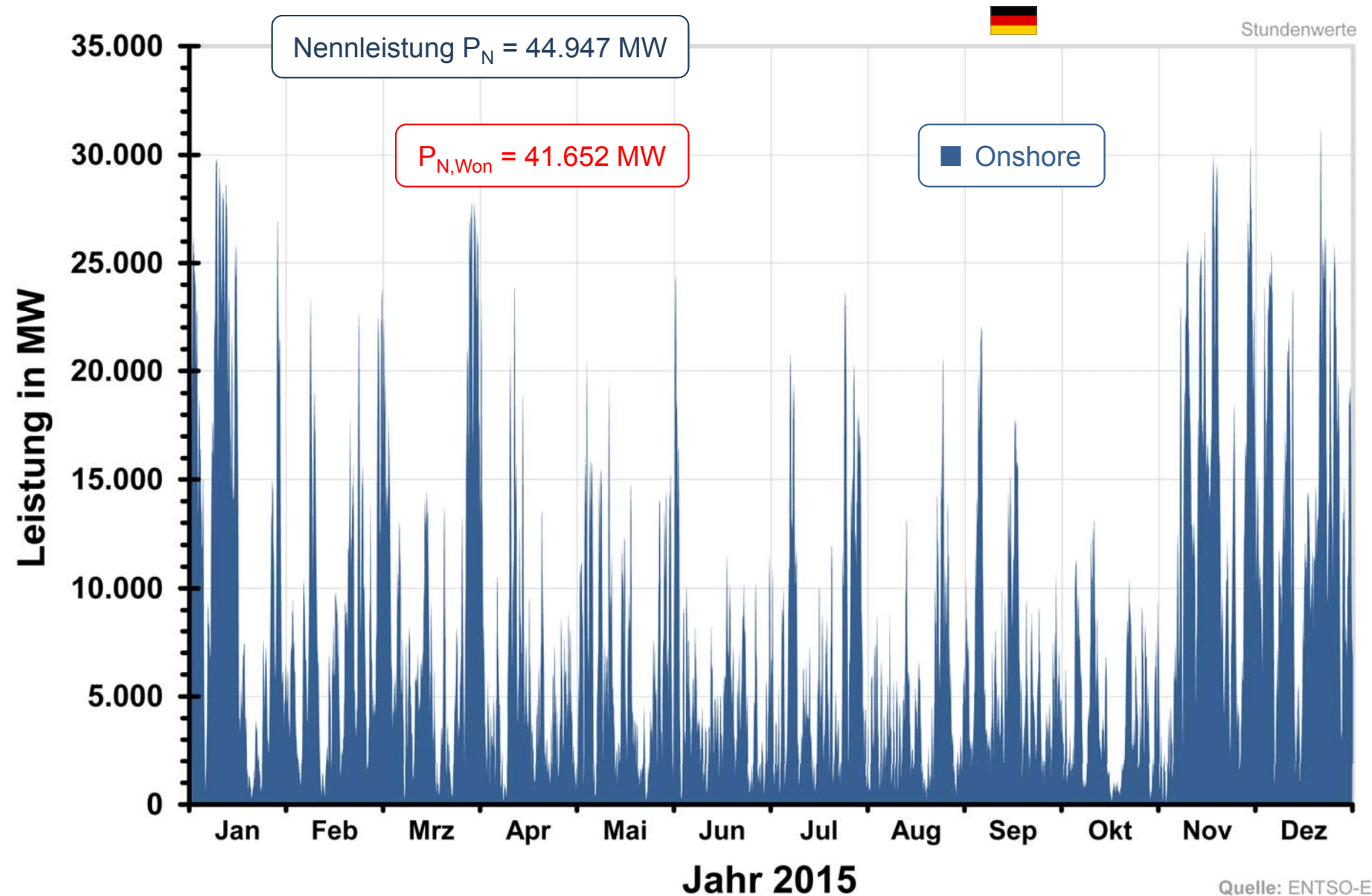


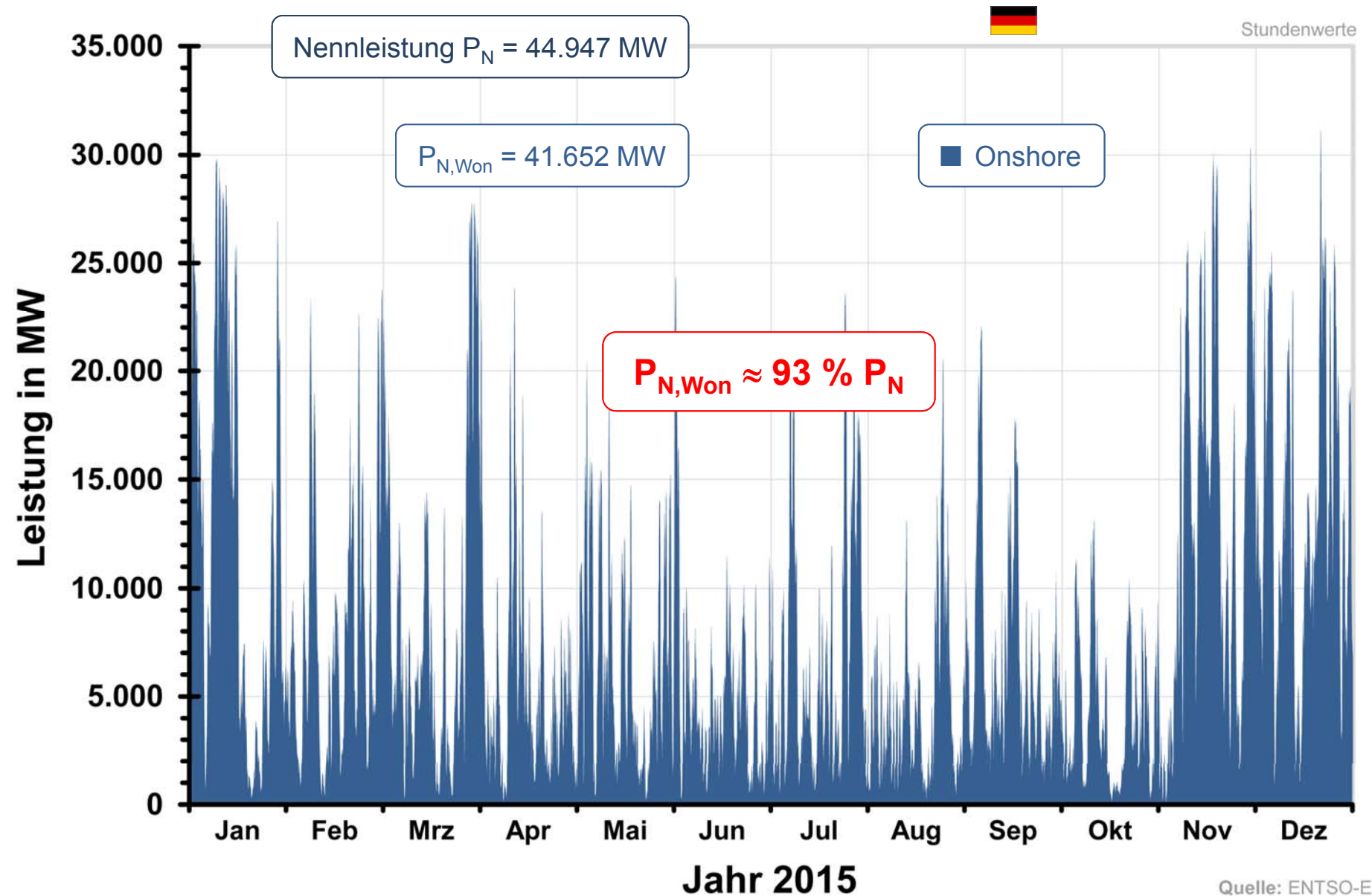


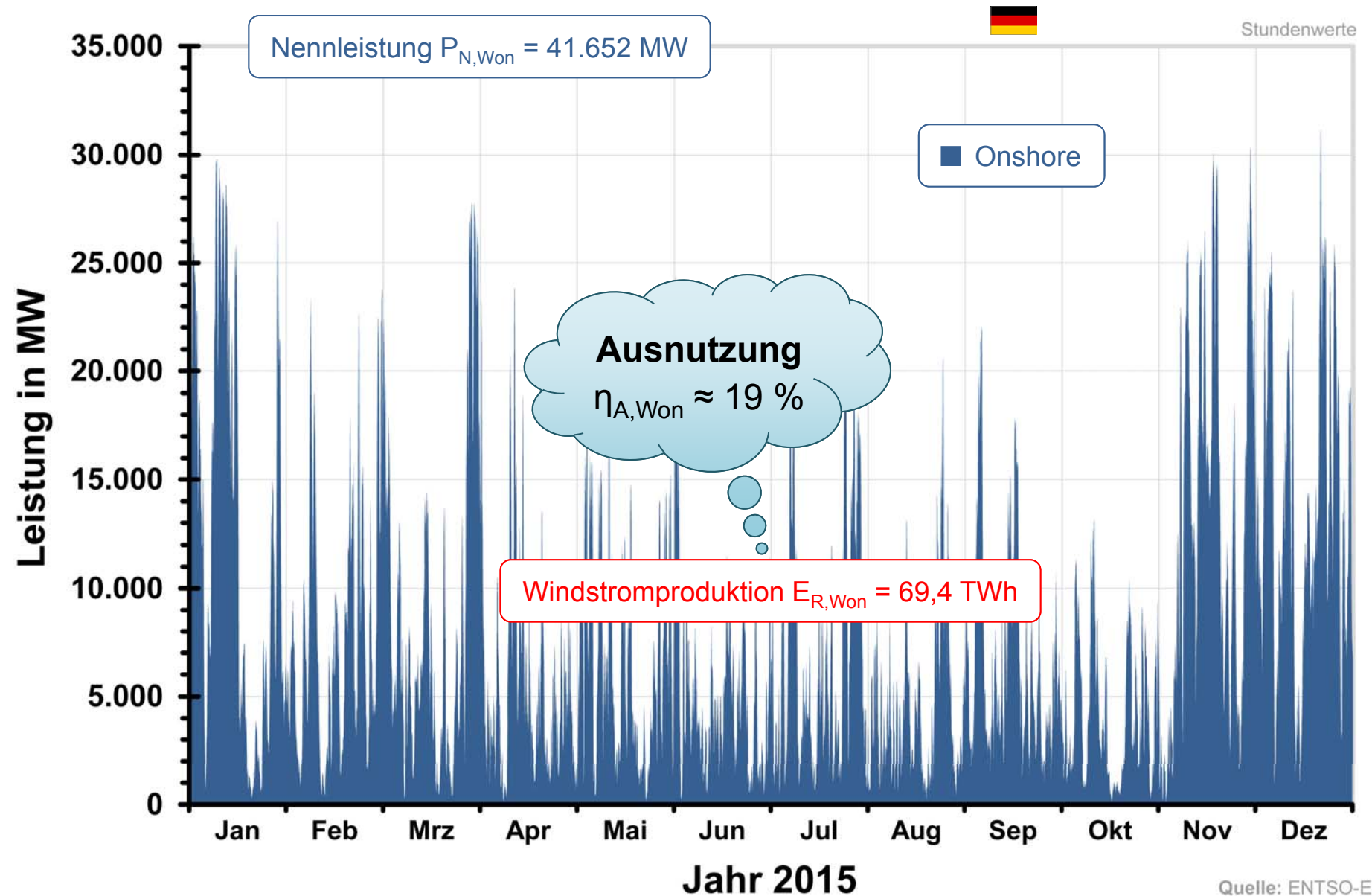


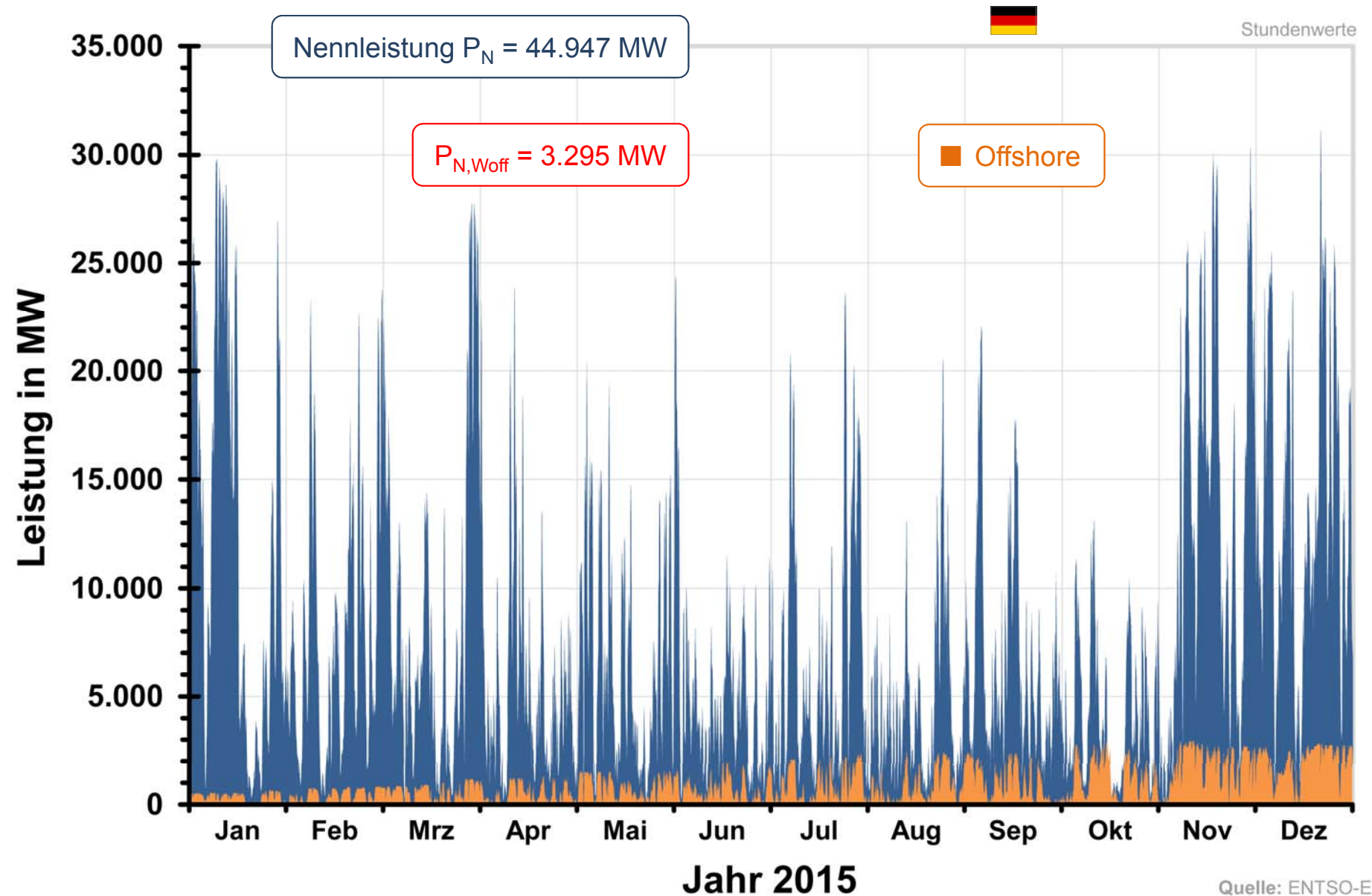


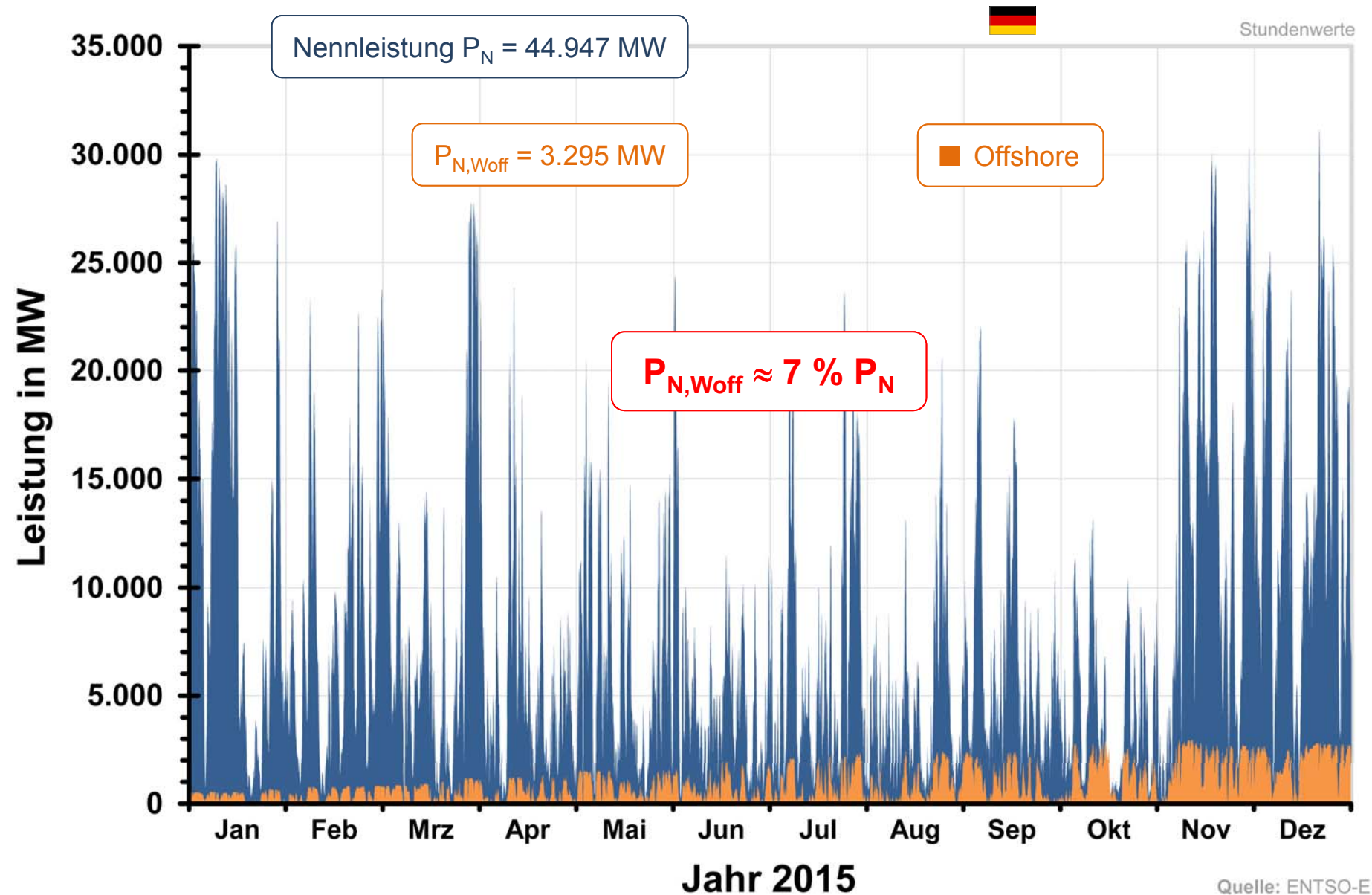


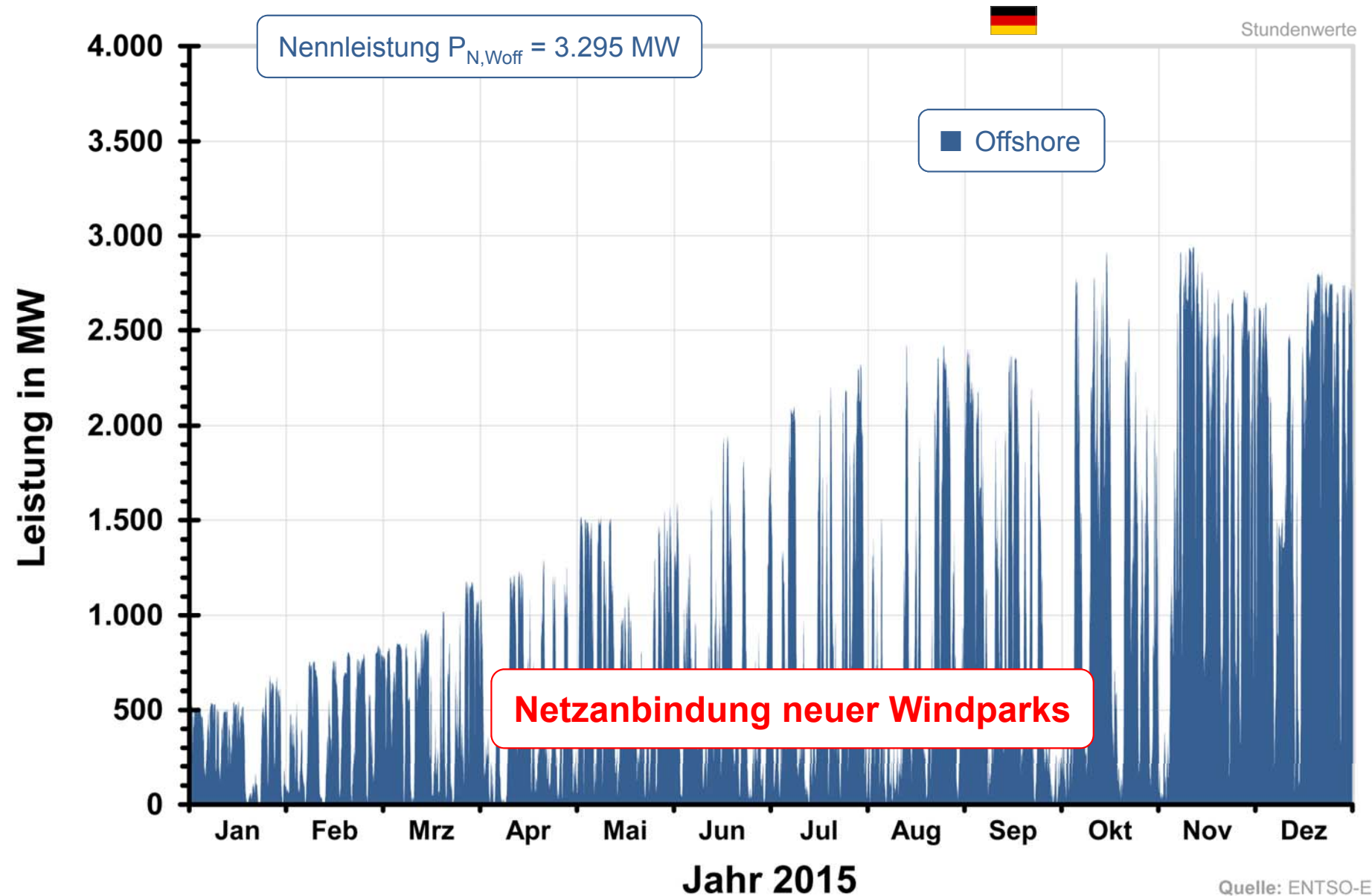


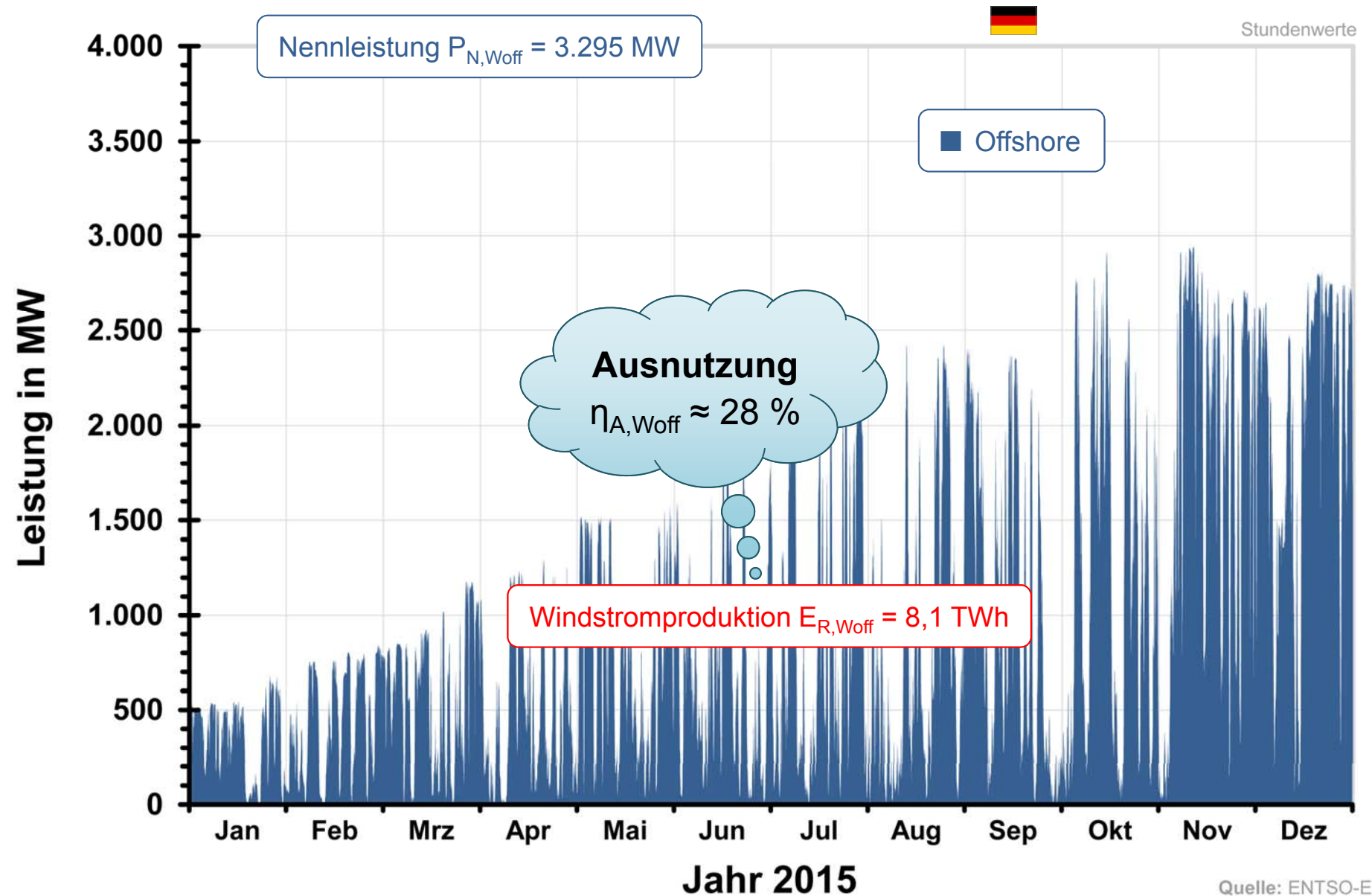


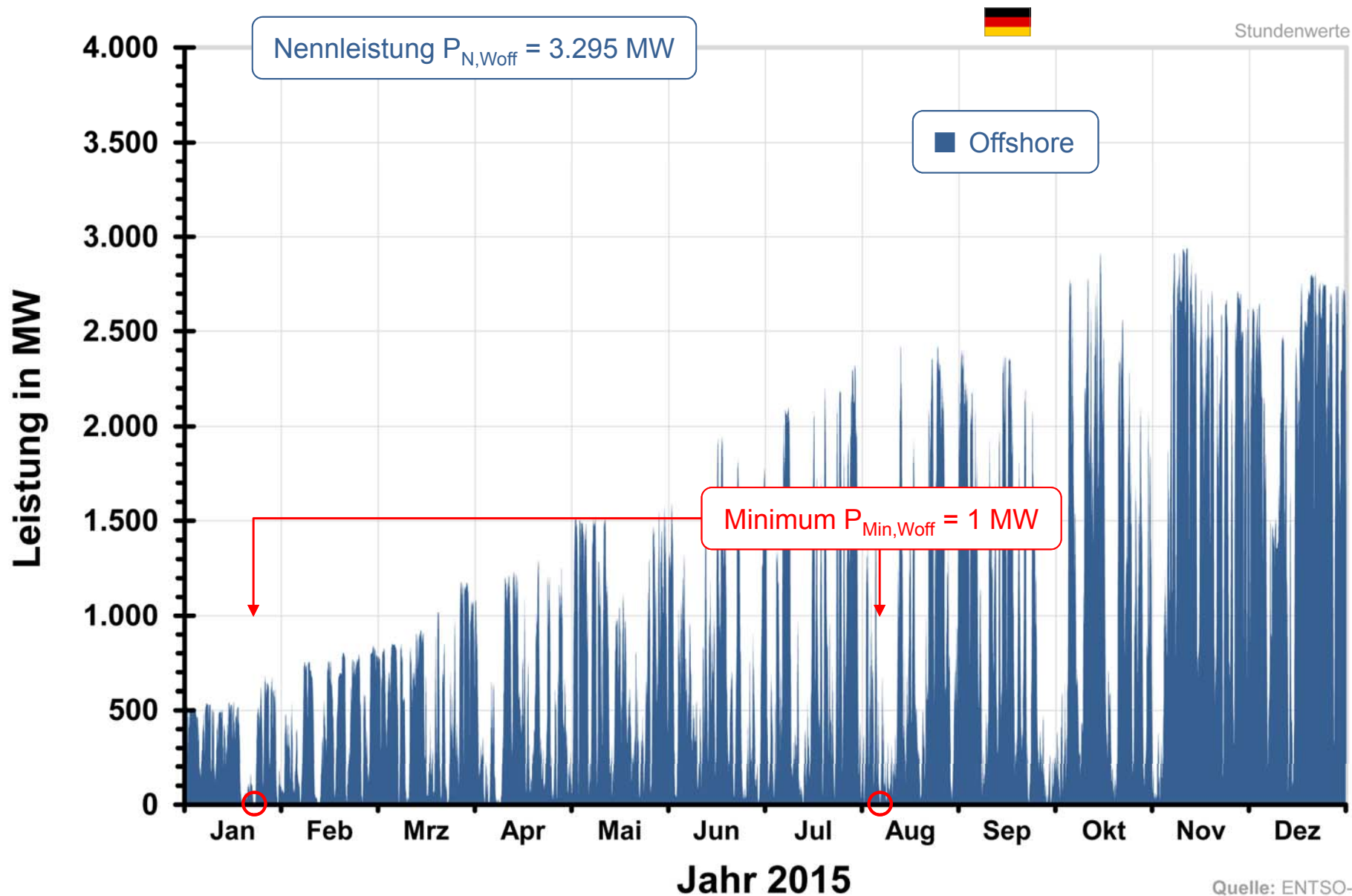


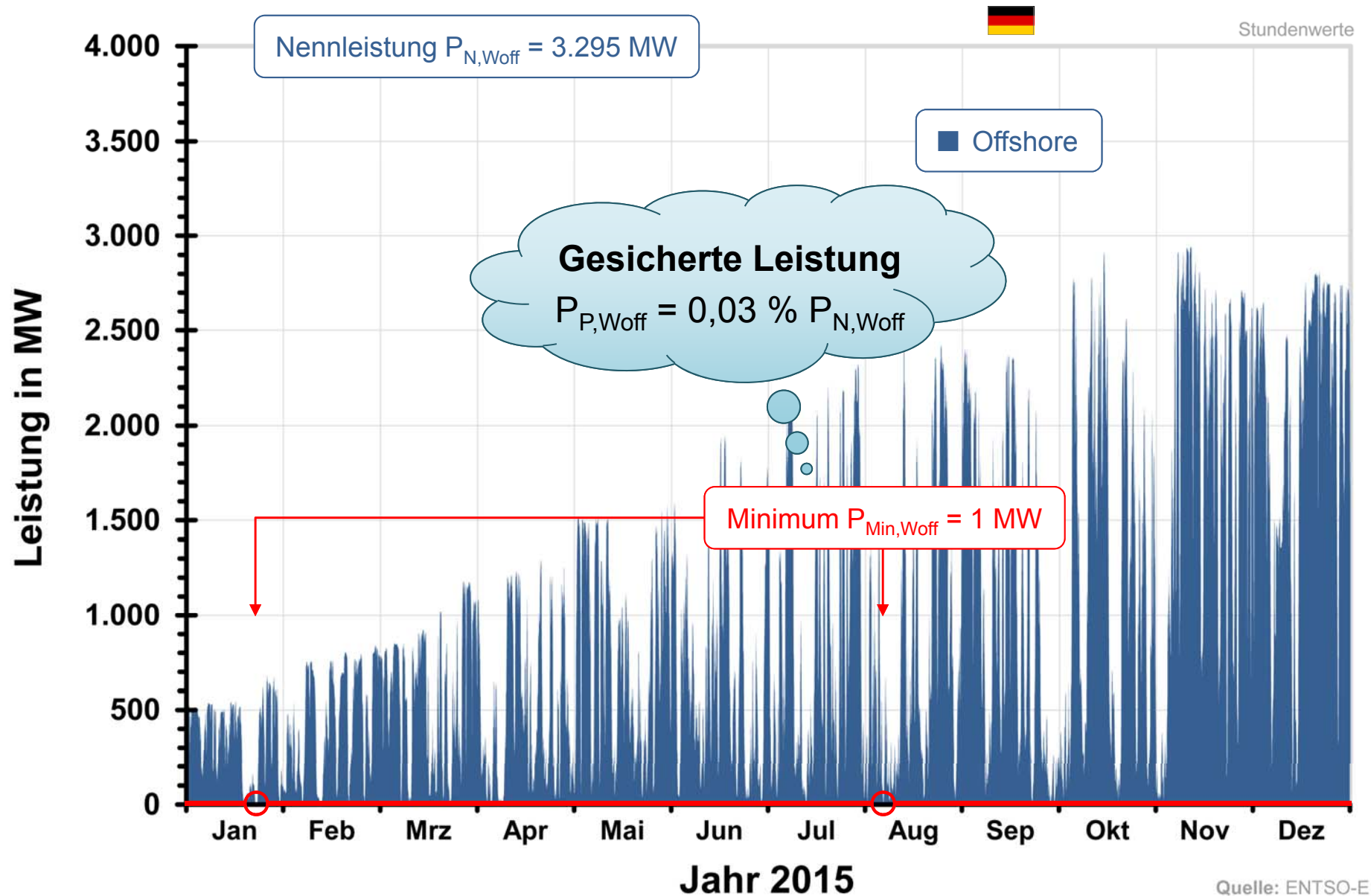


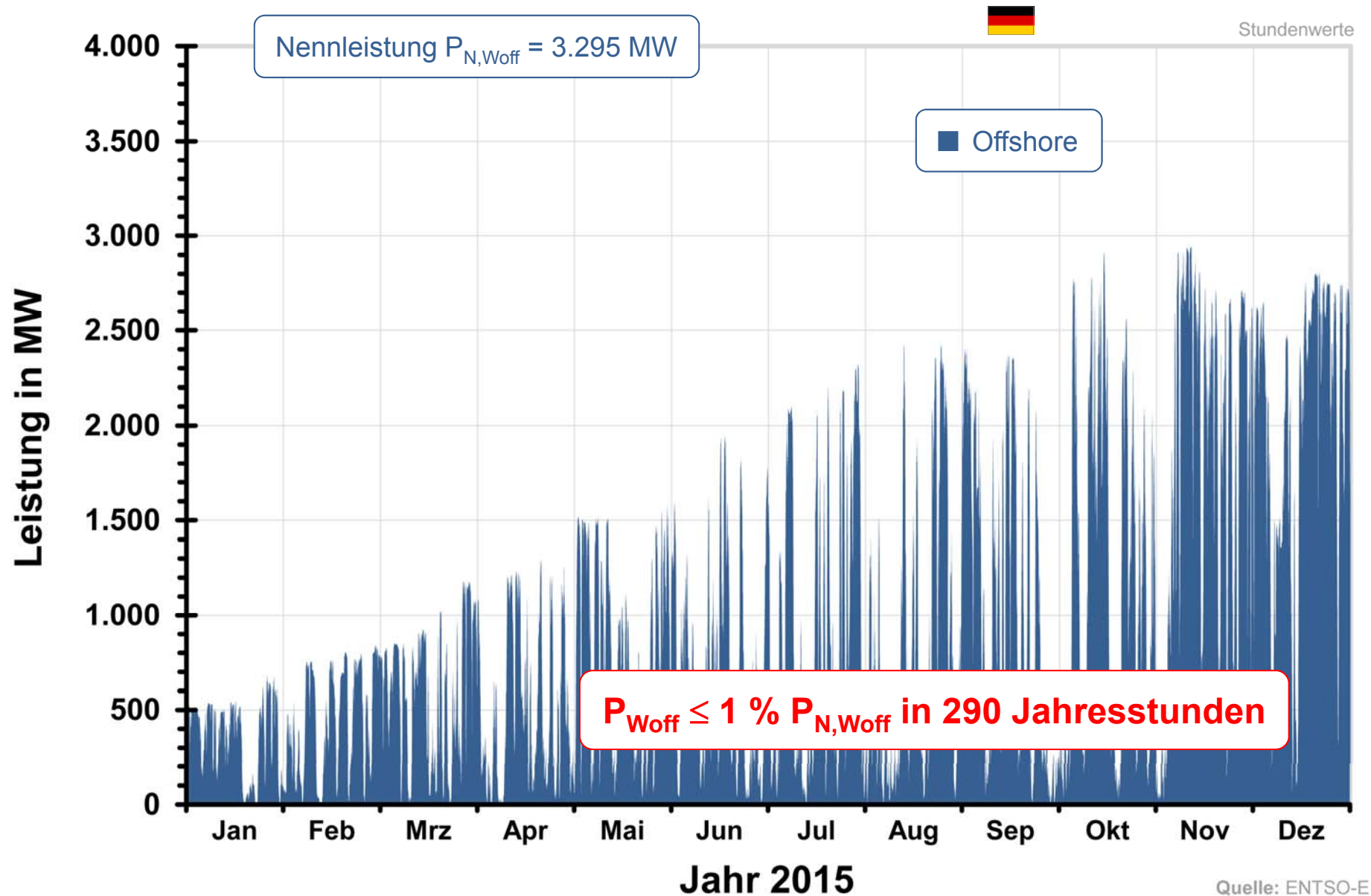




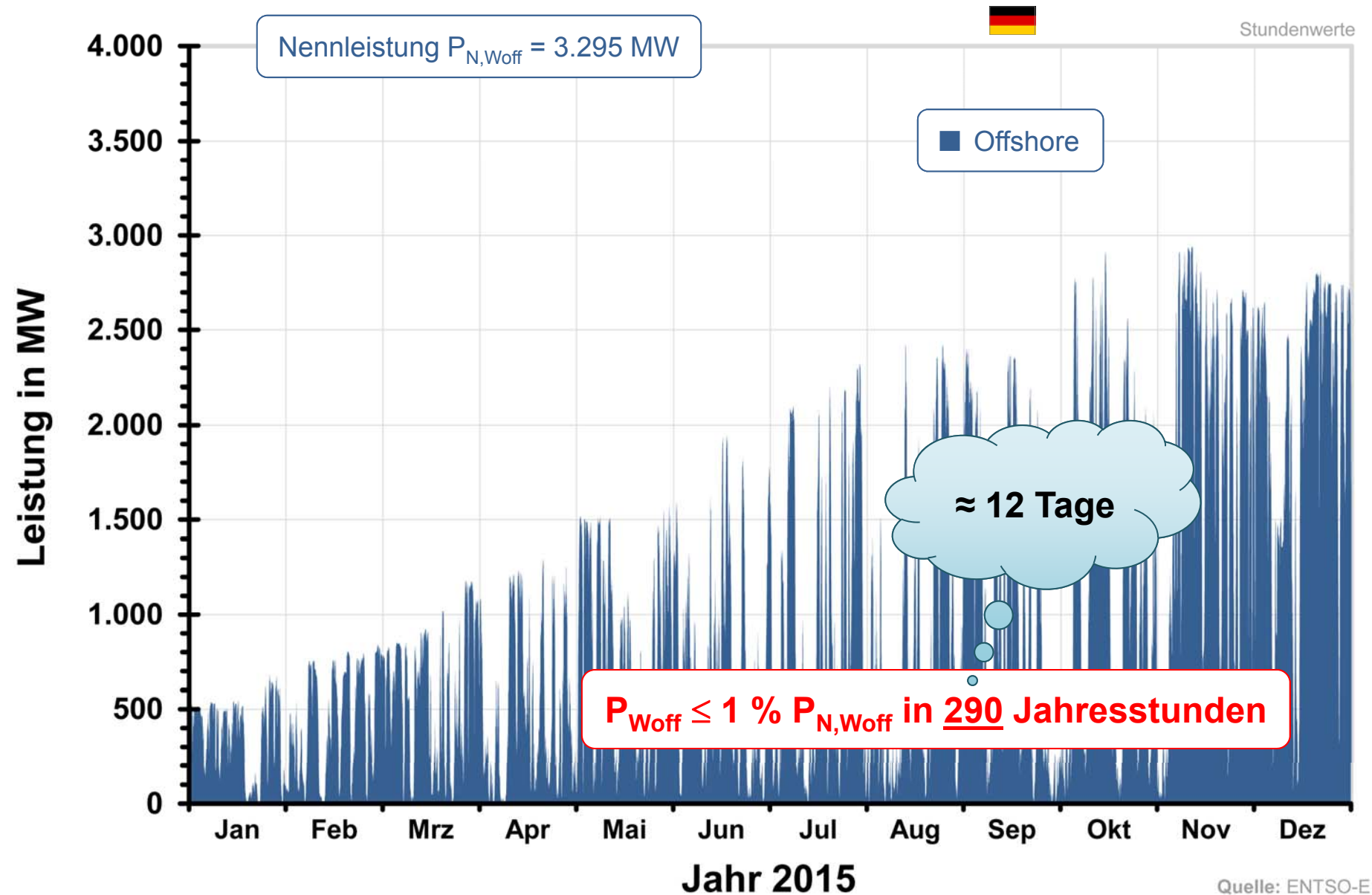


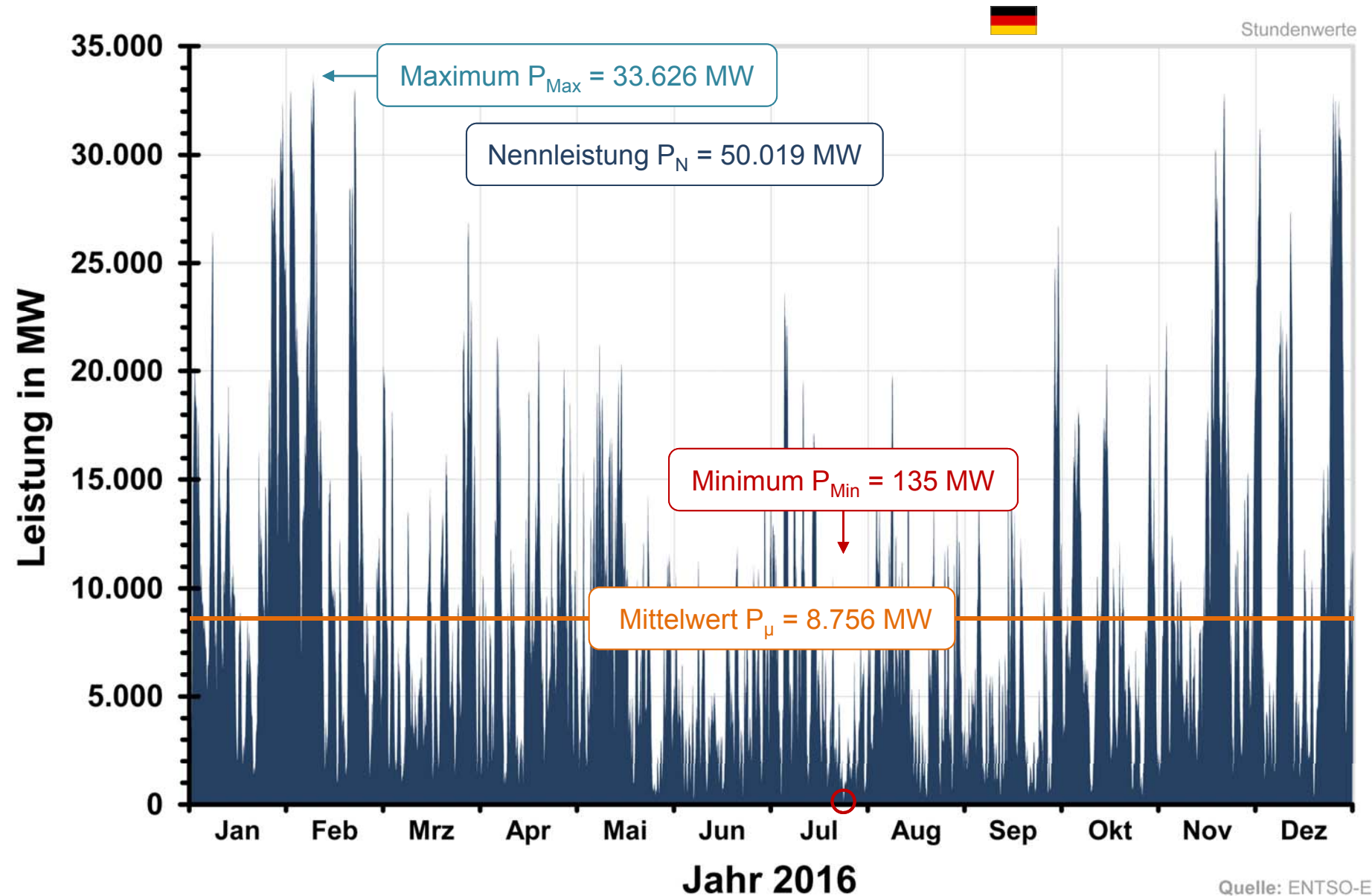


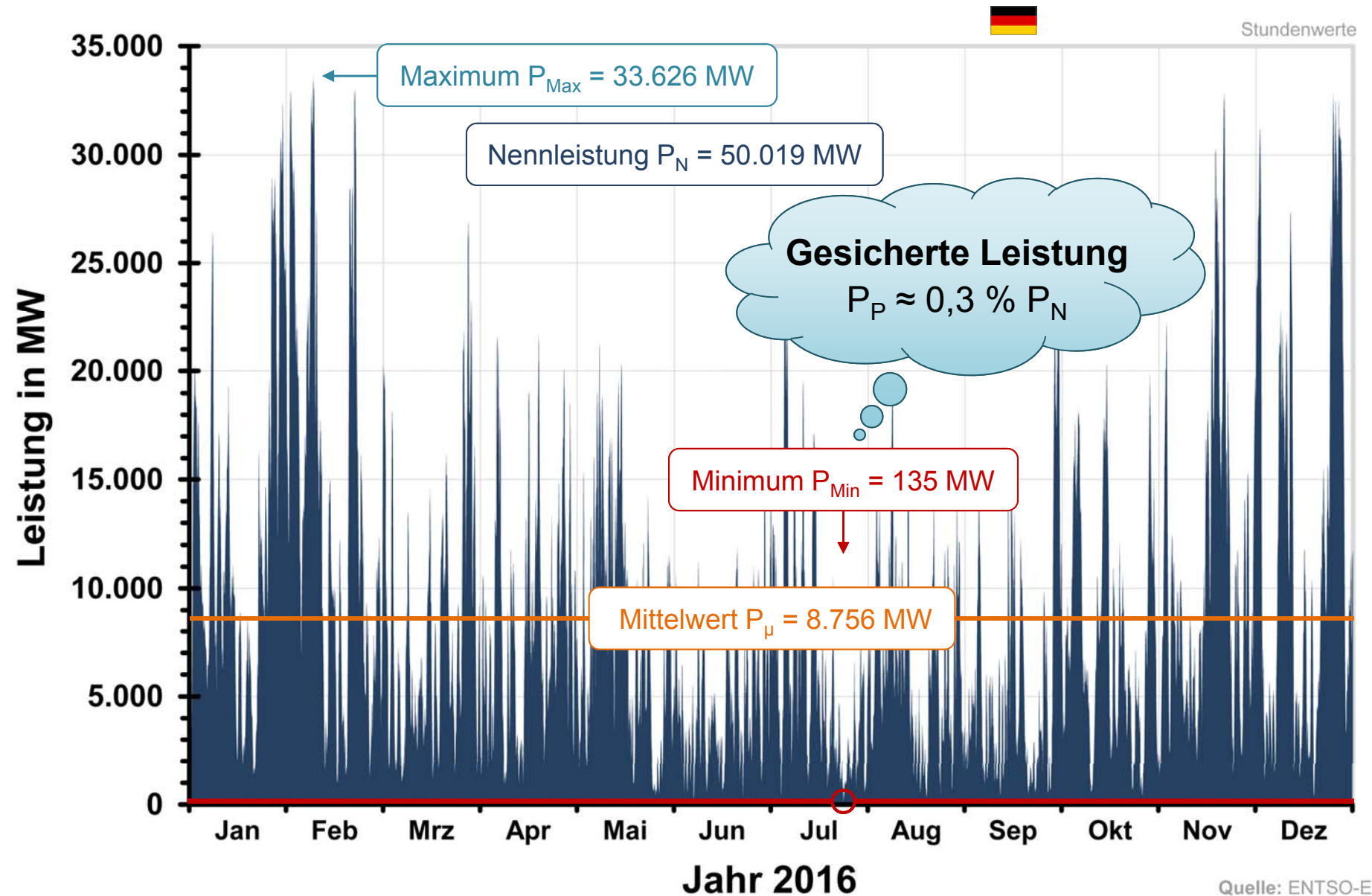


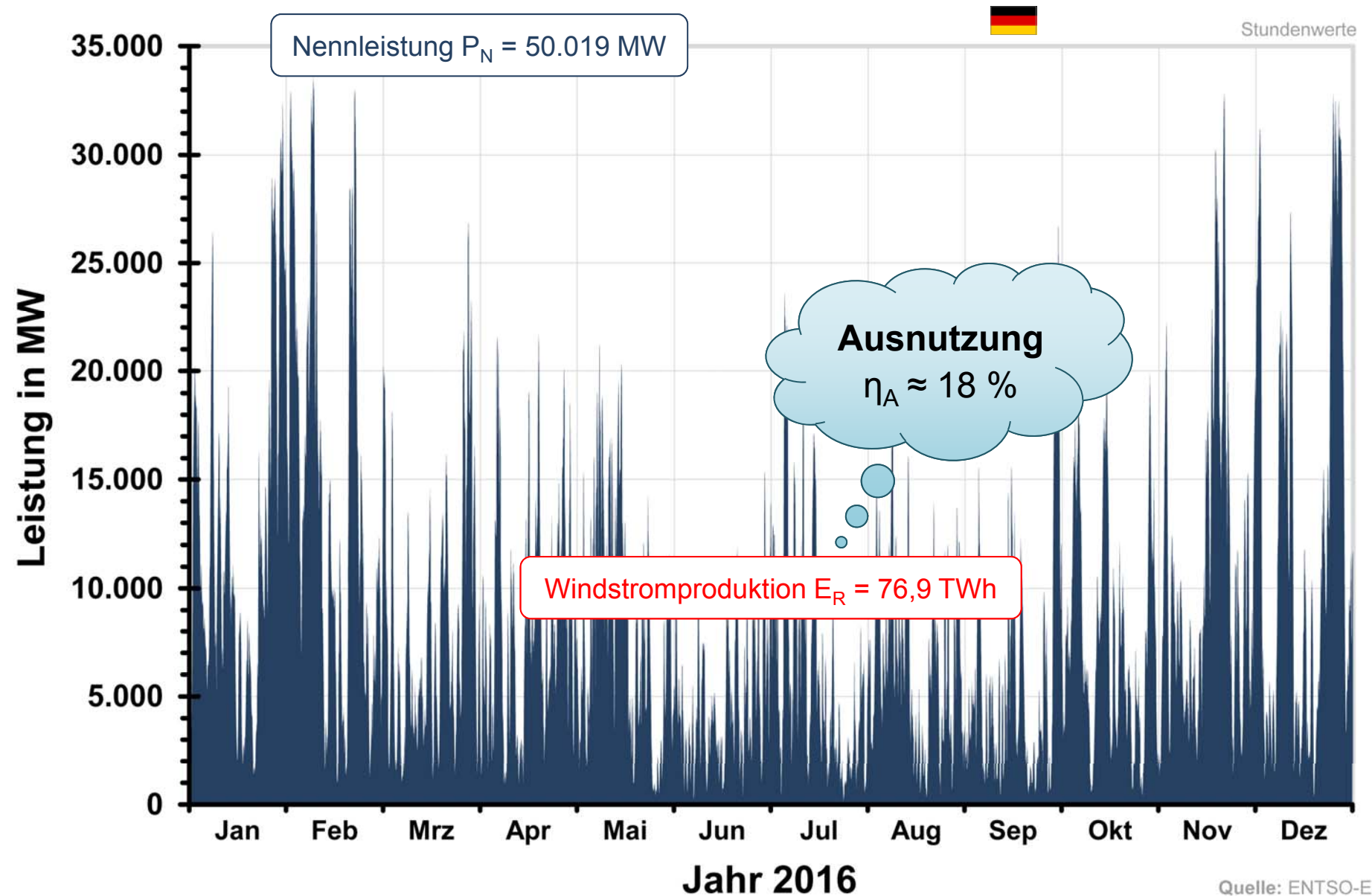


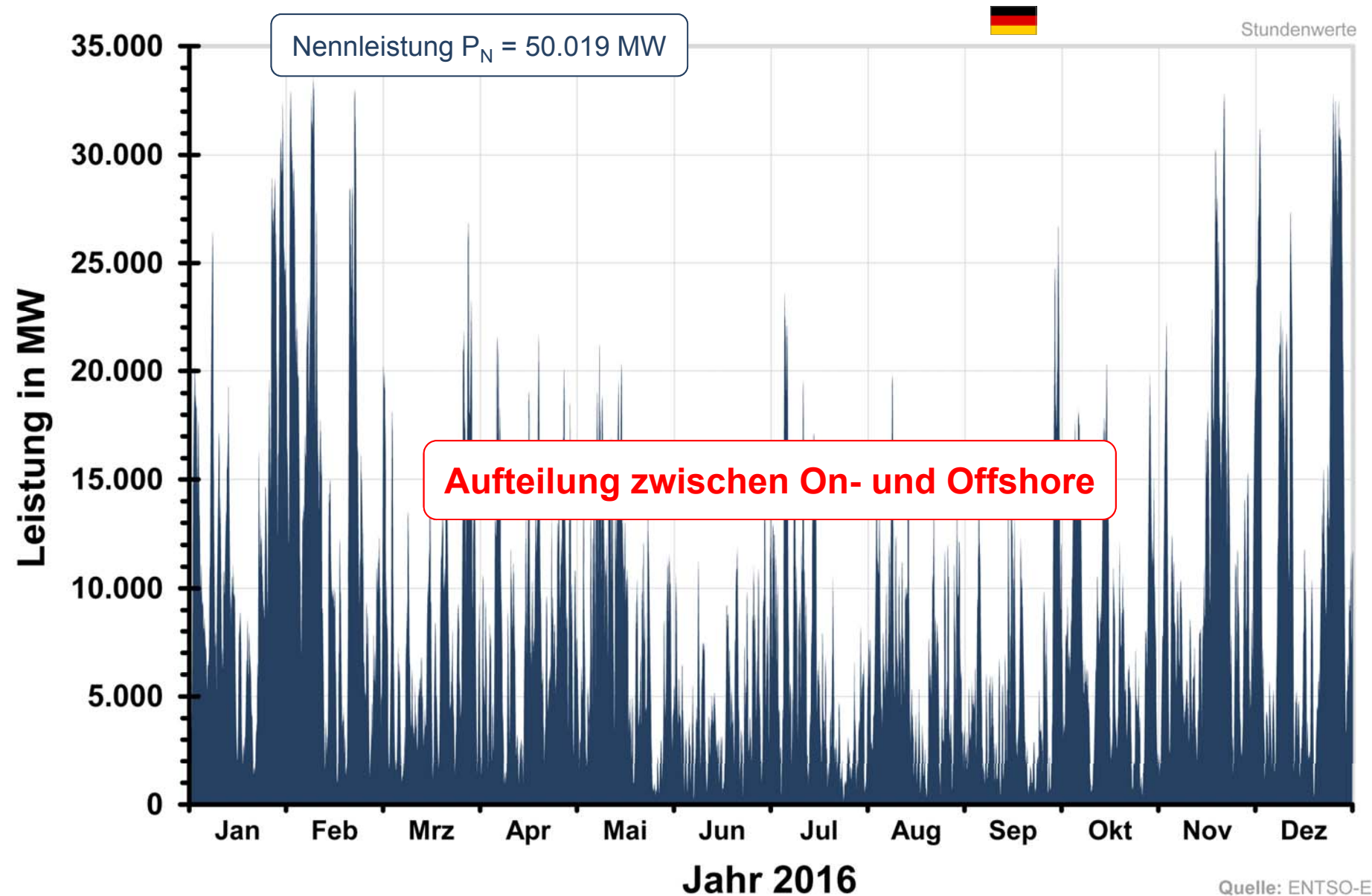
Quelle: ENTSO-E

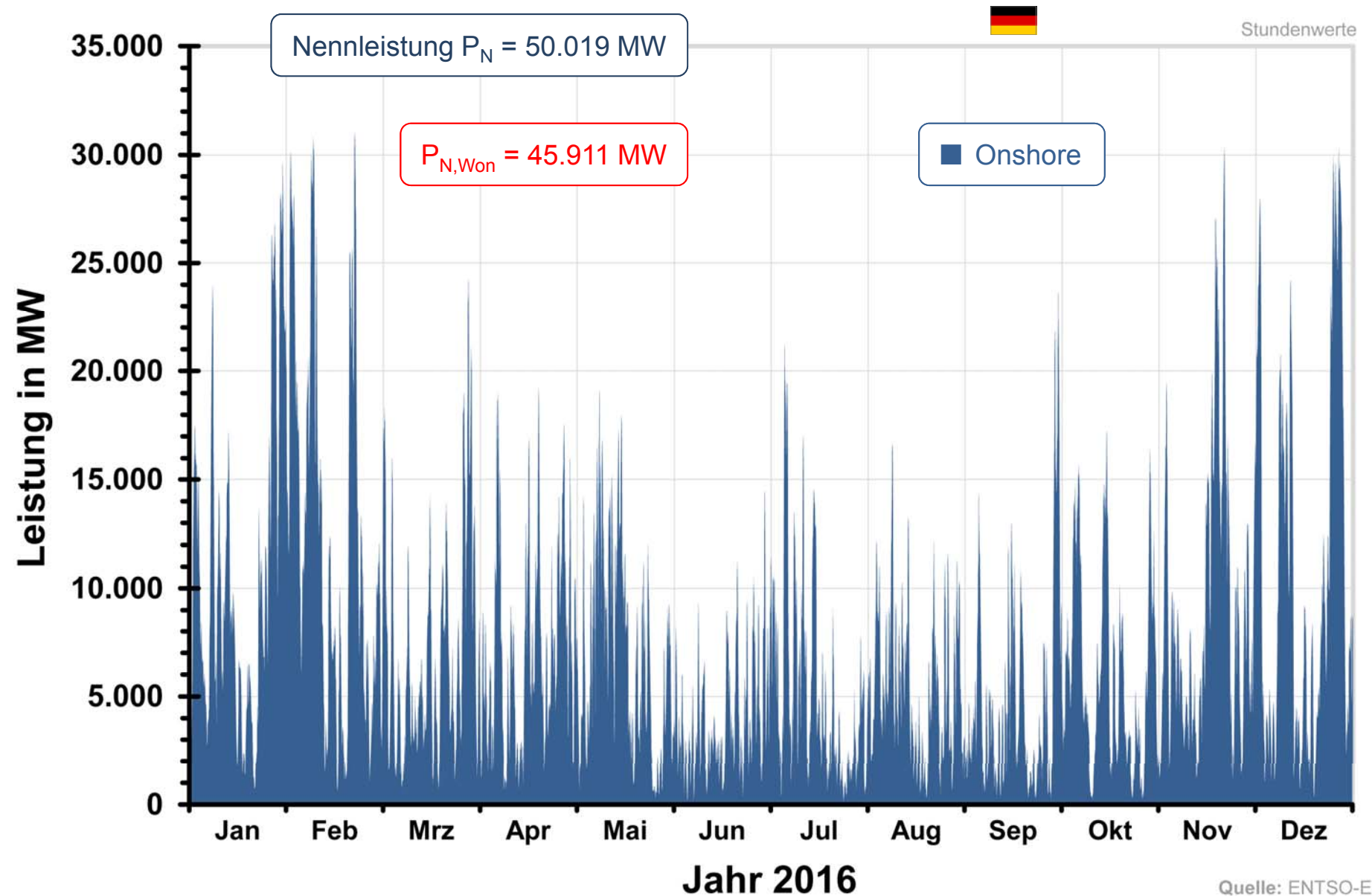


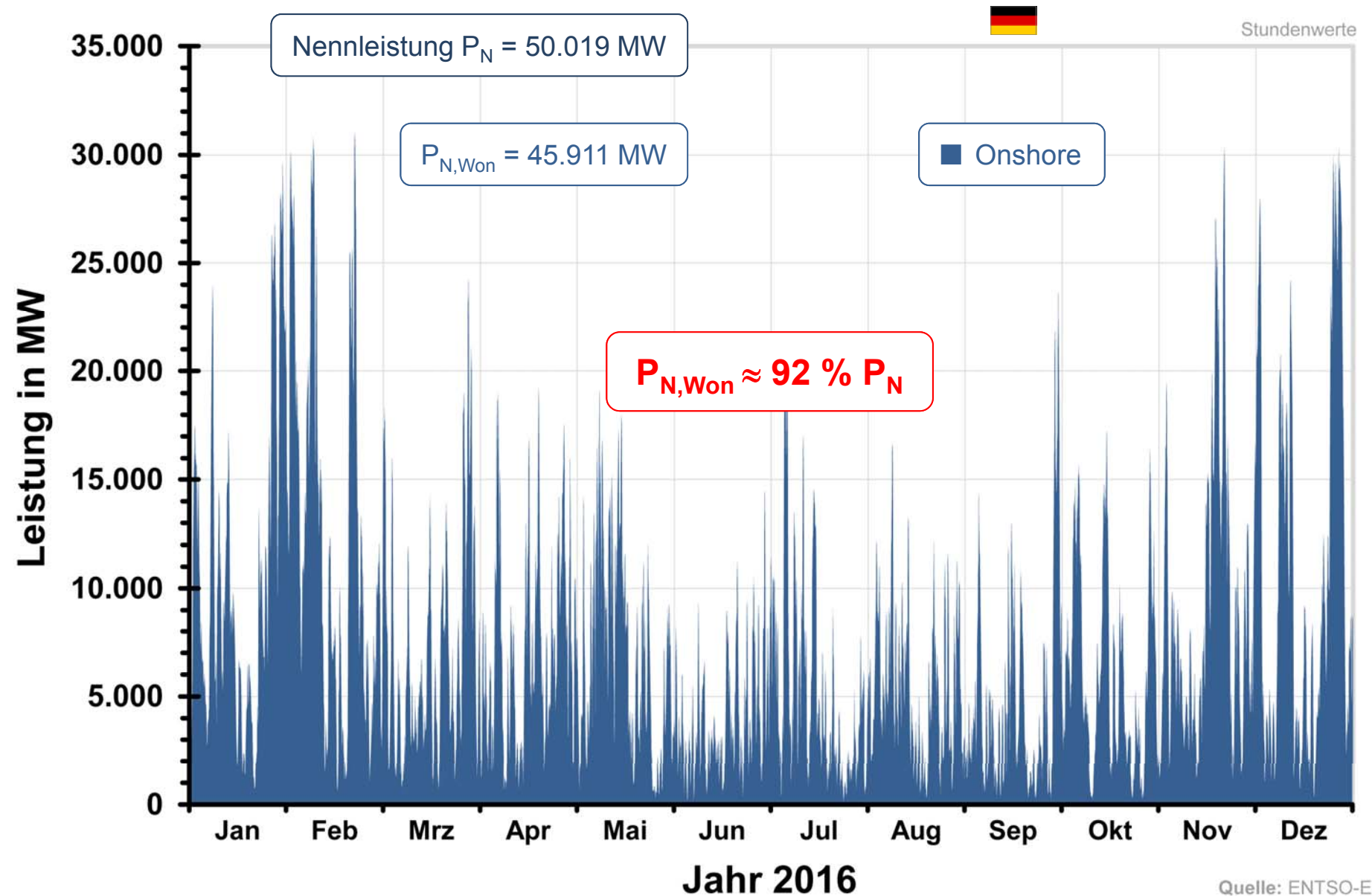


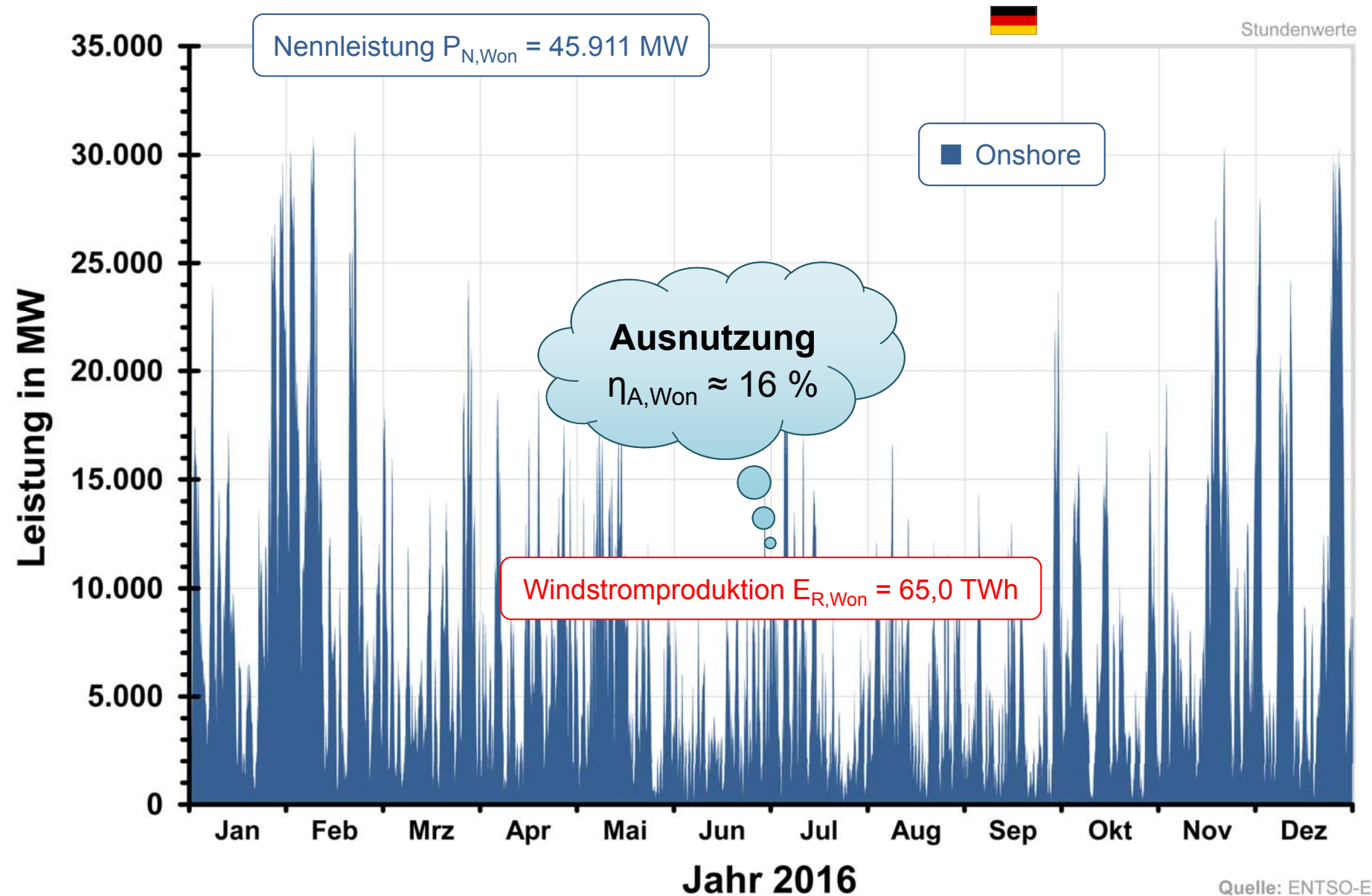


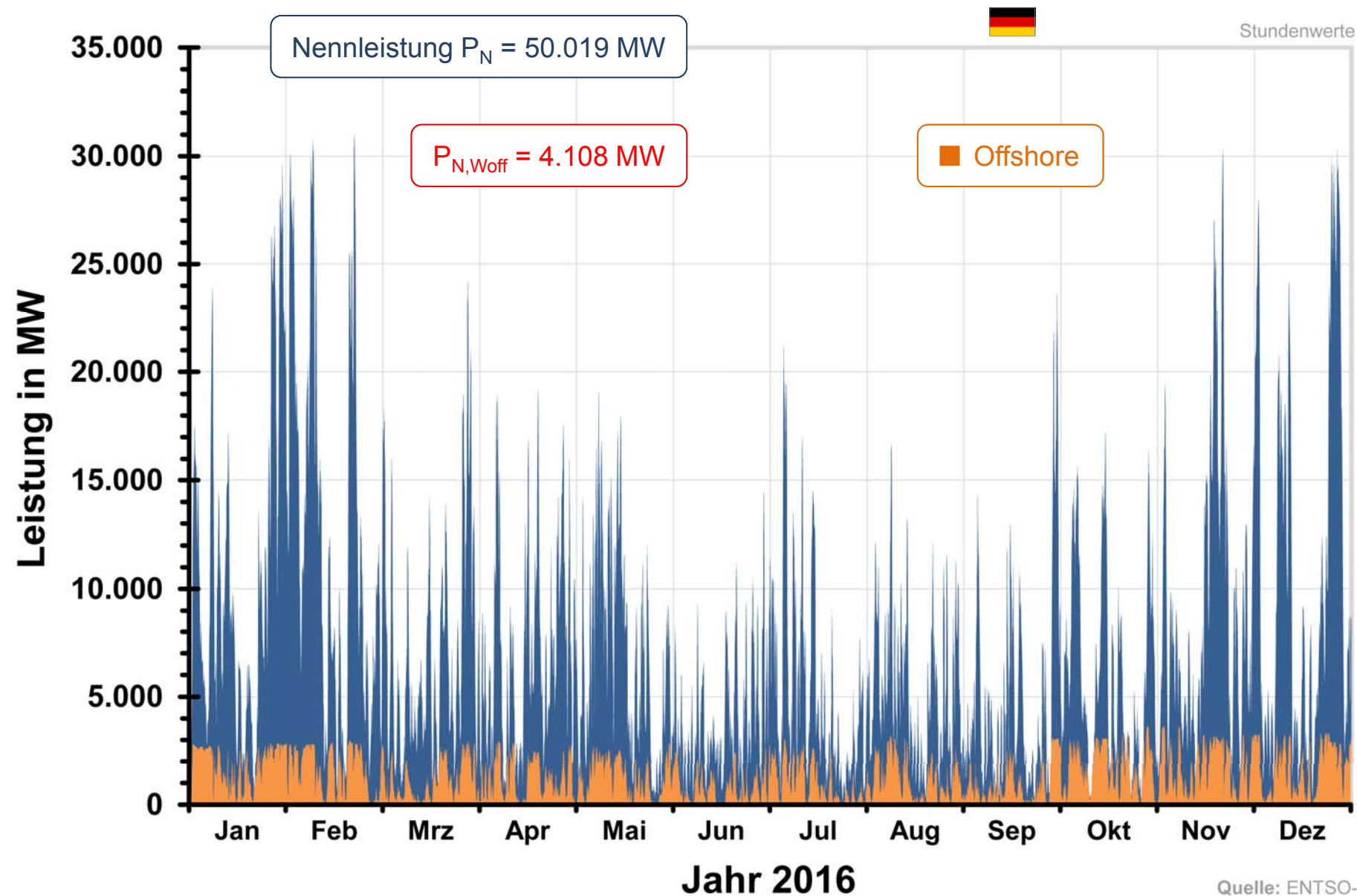


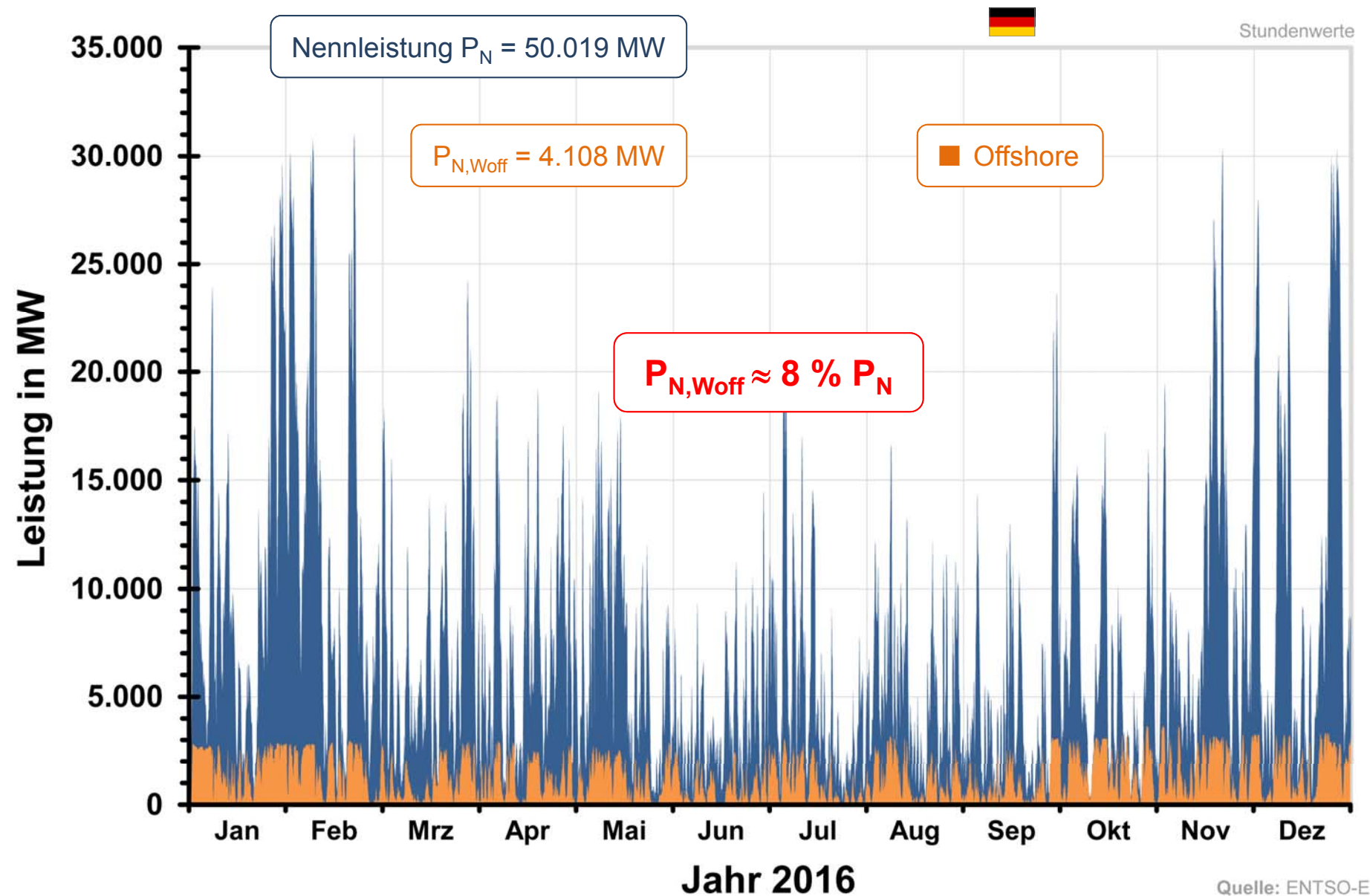


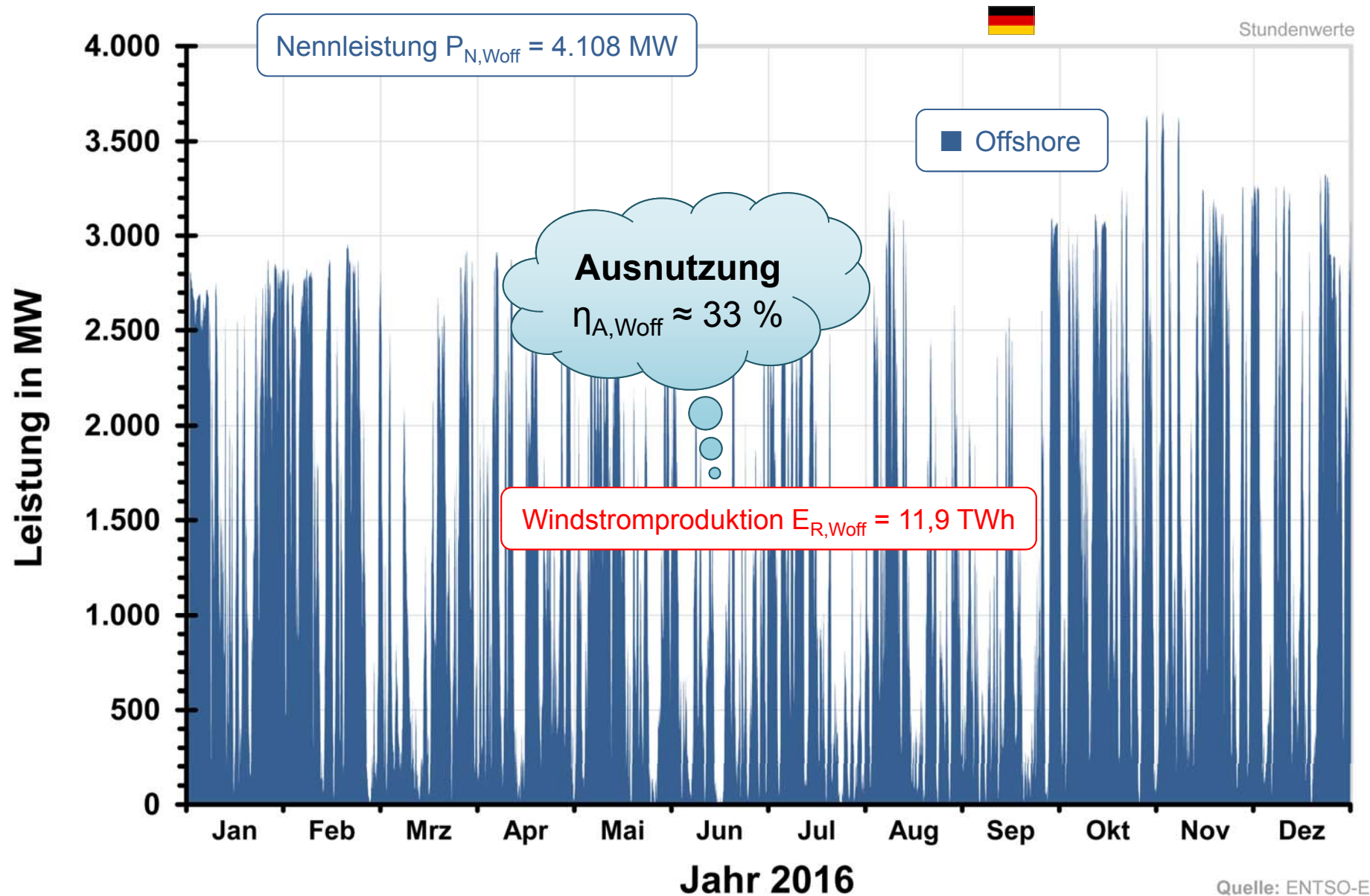


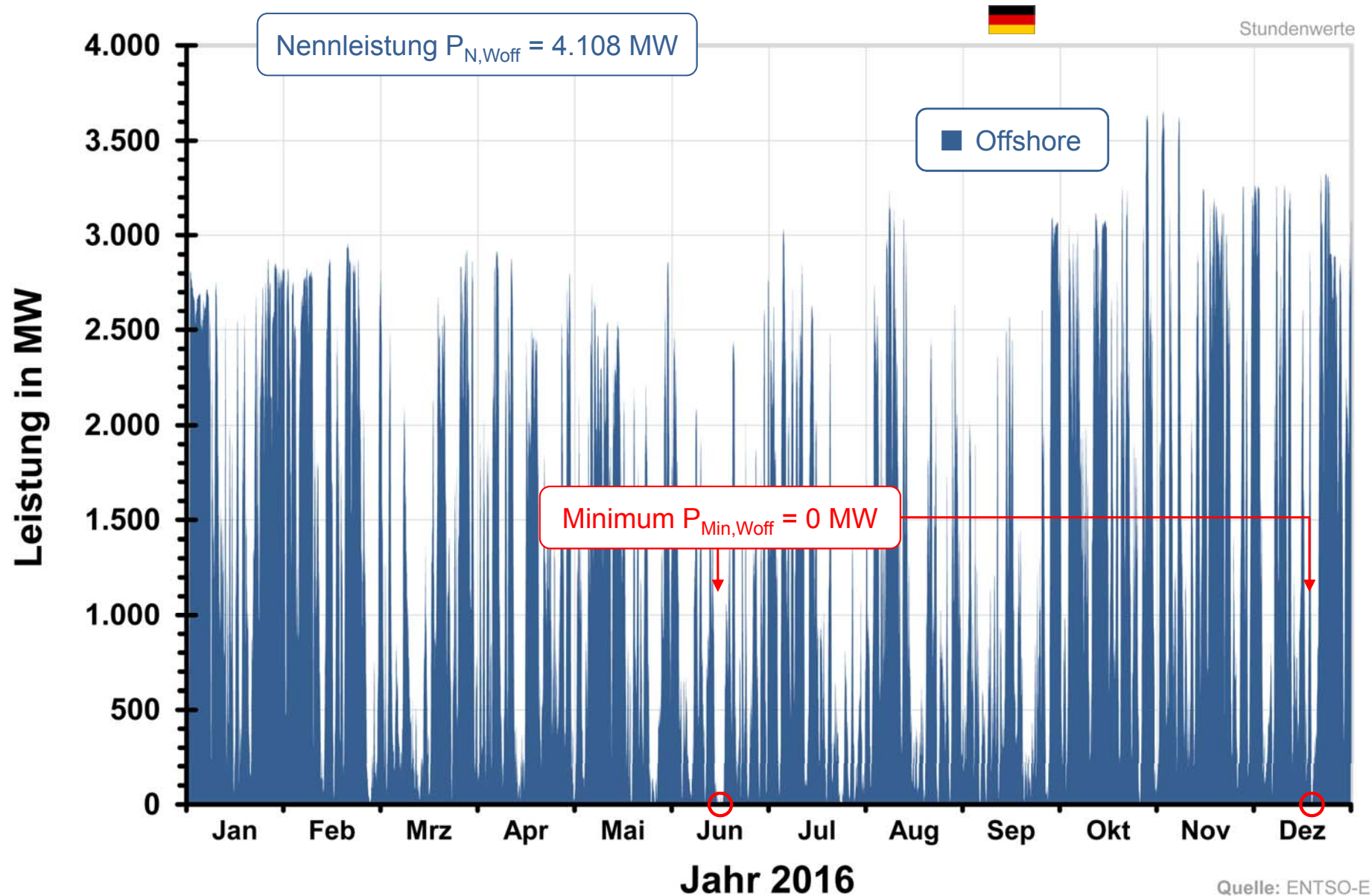


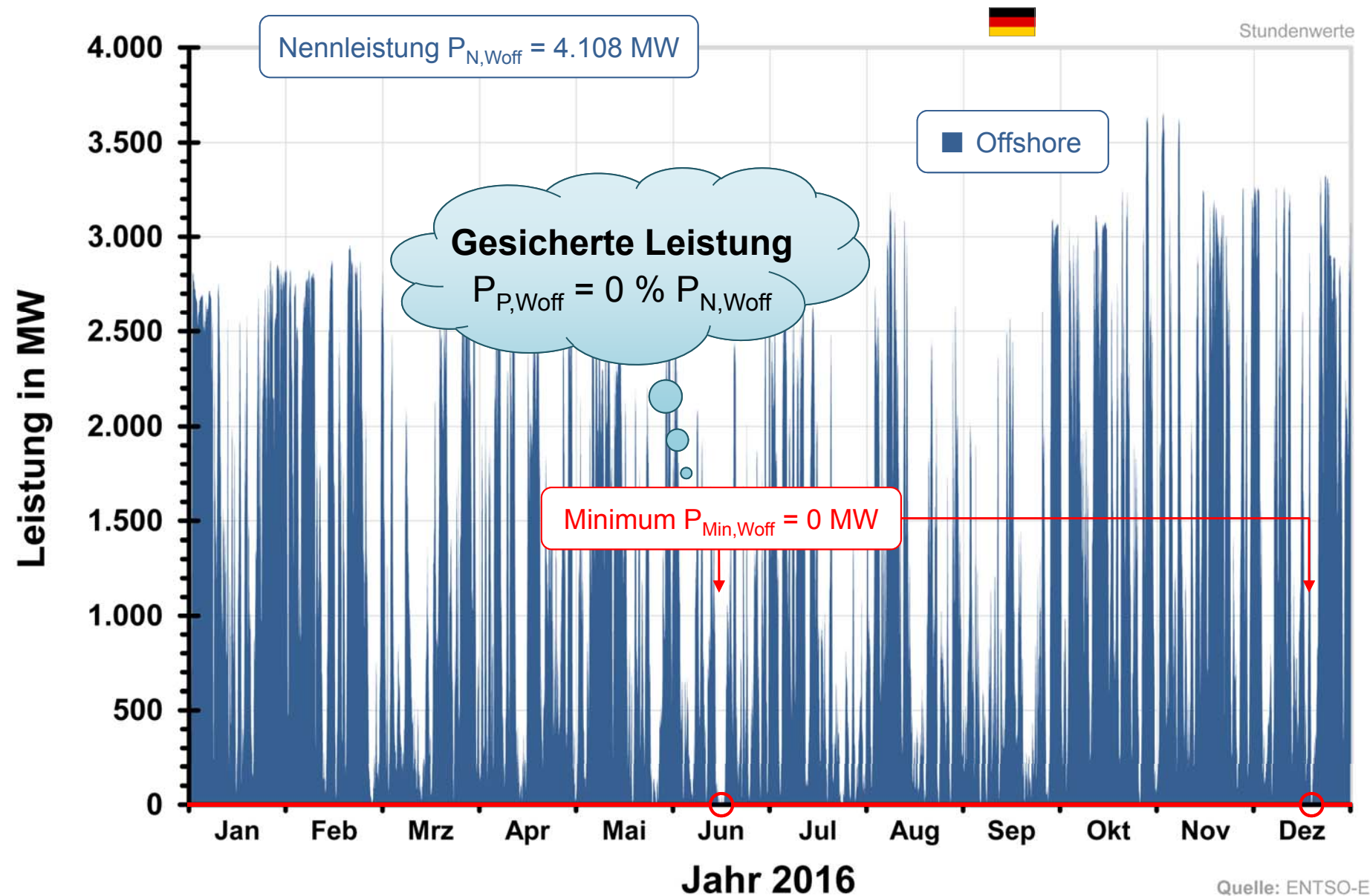


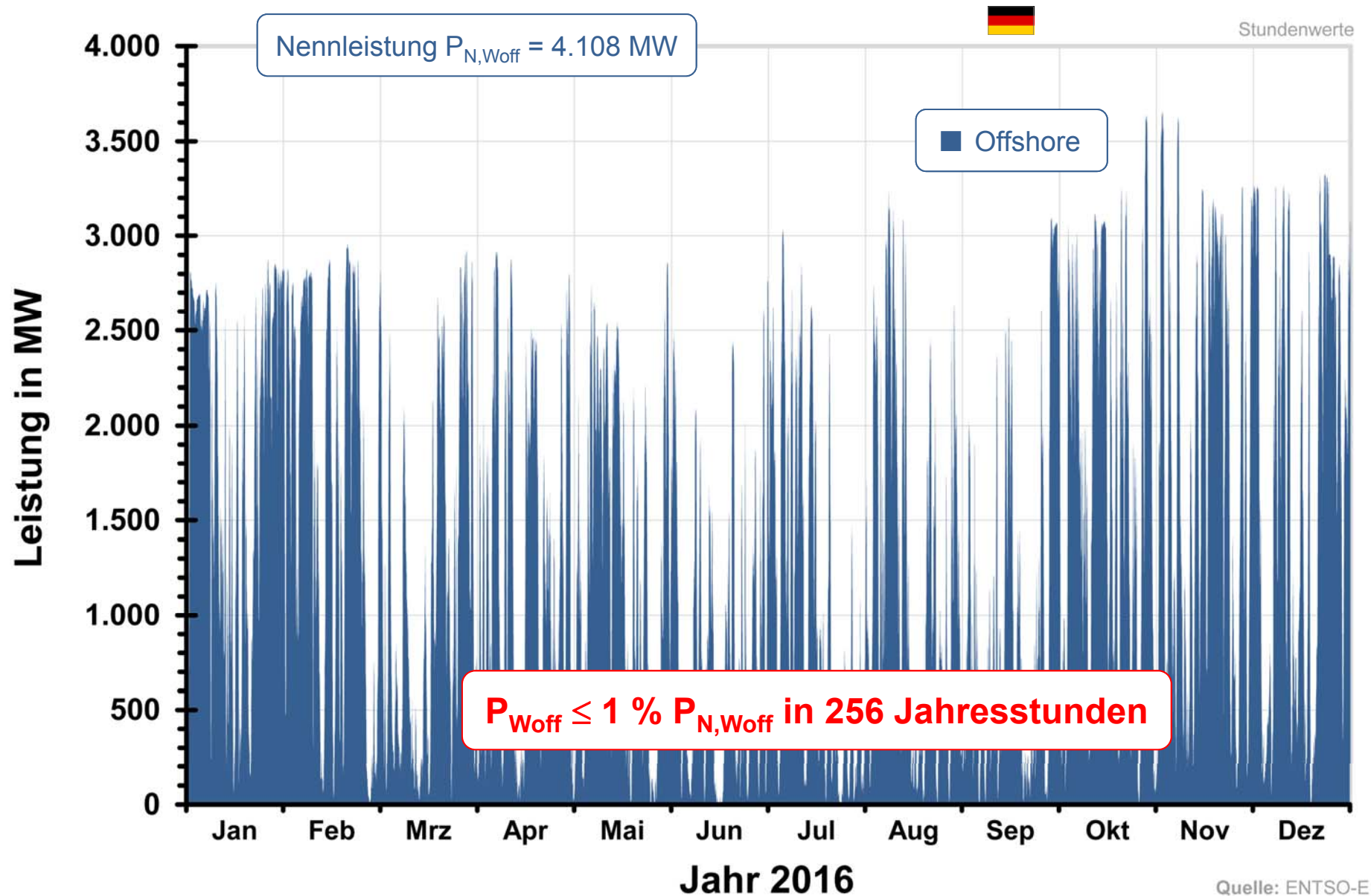


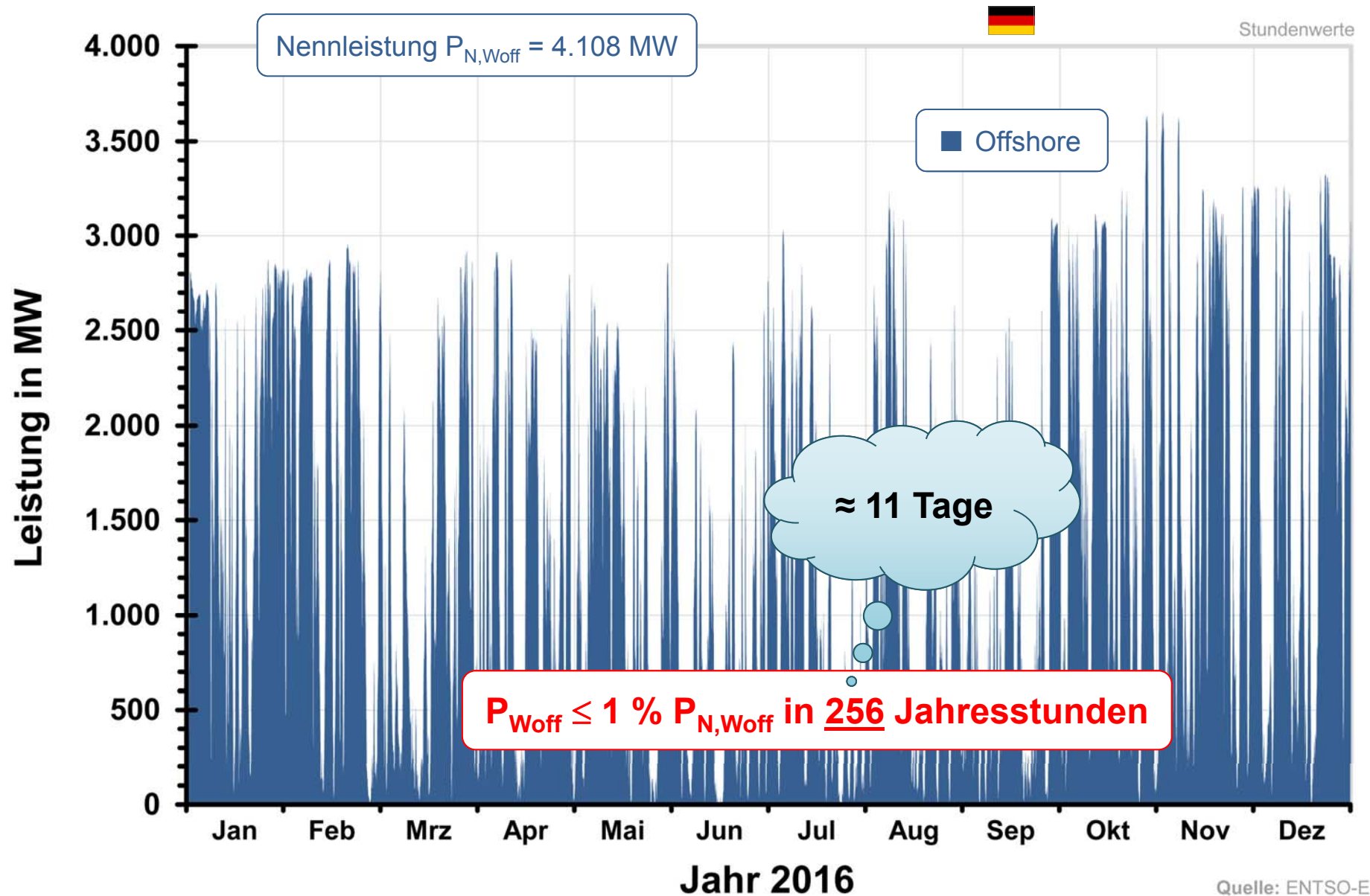


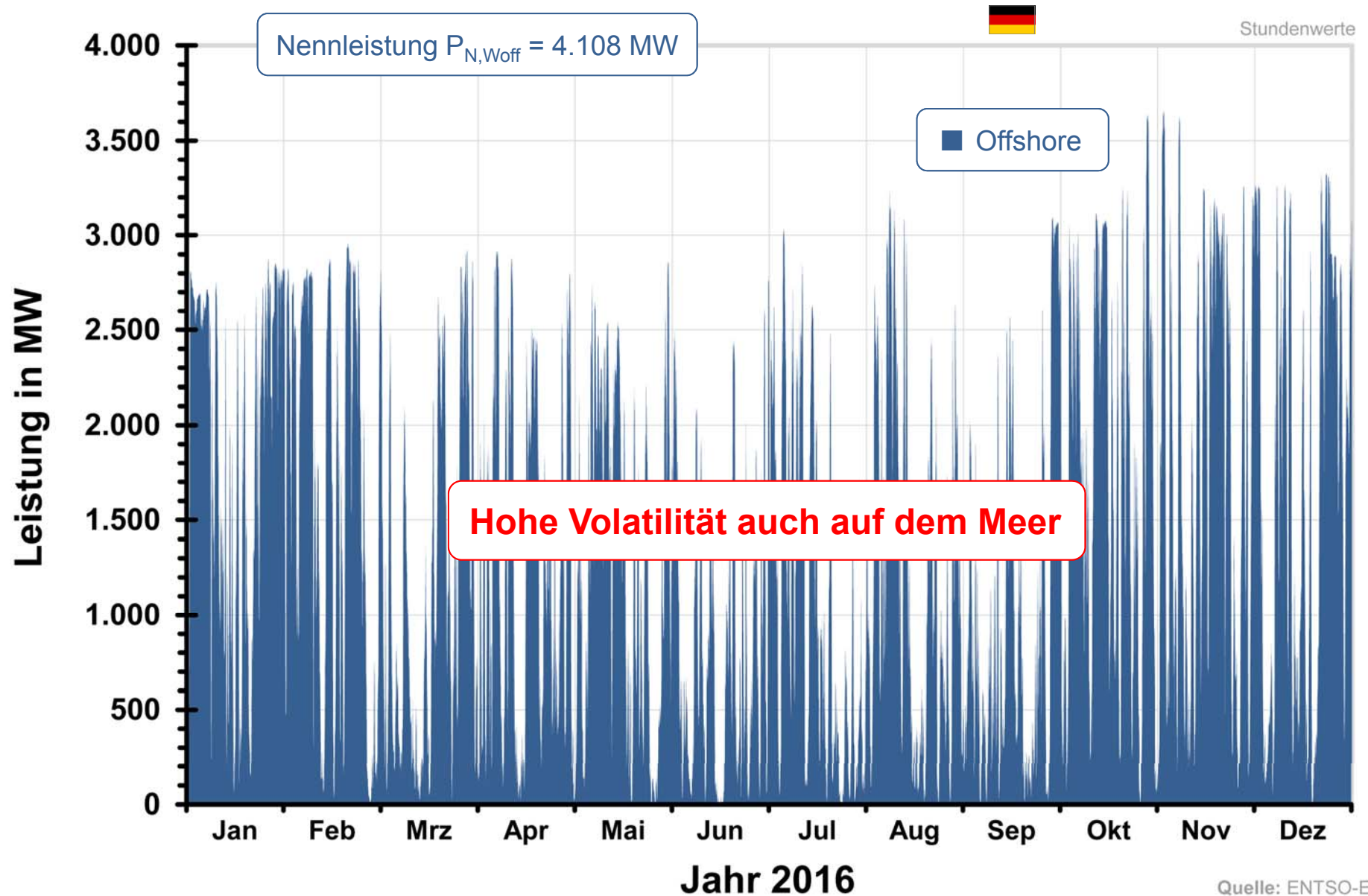


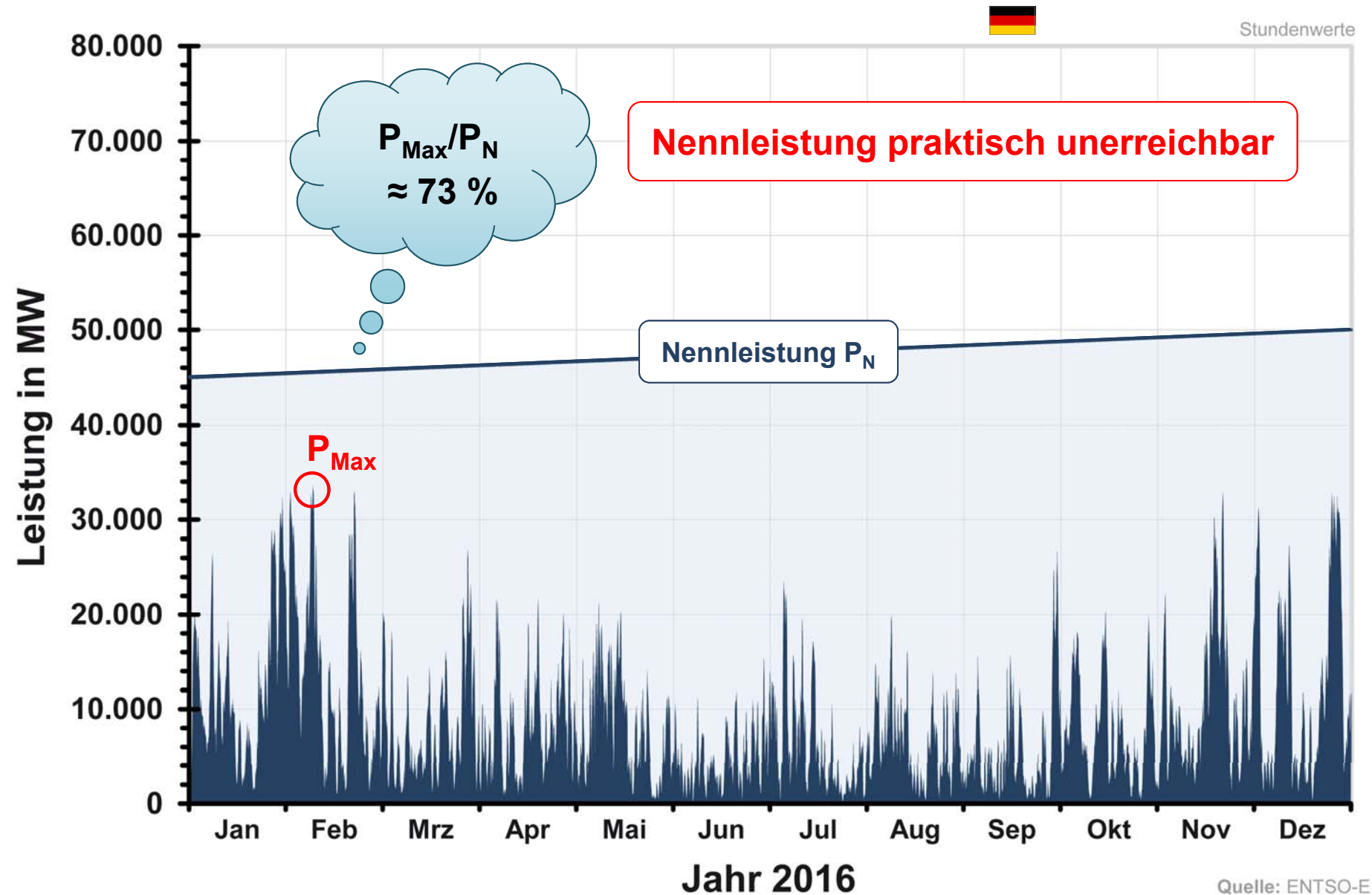


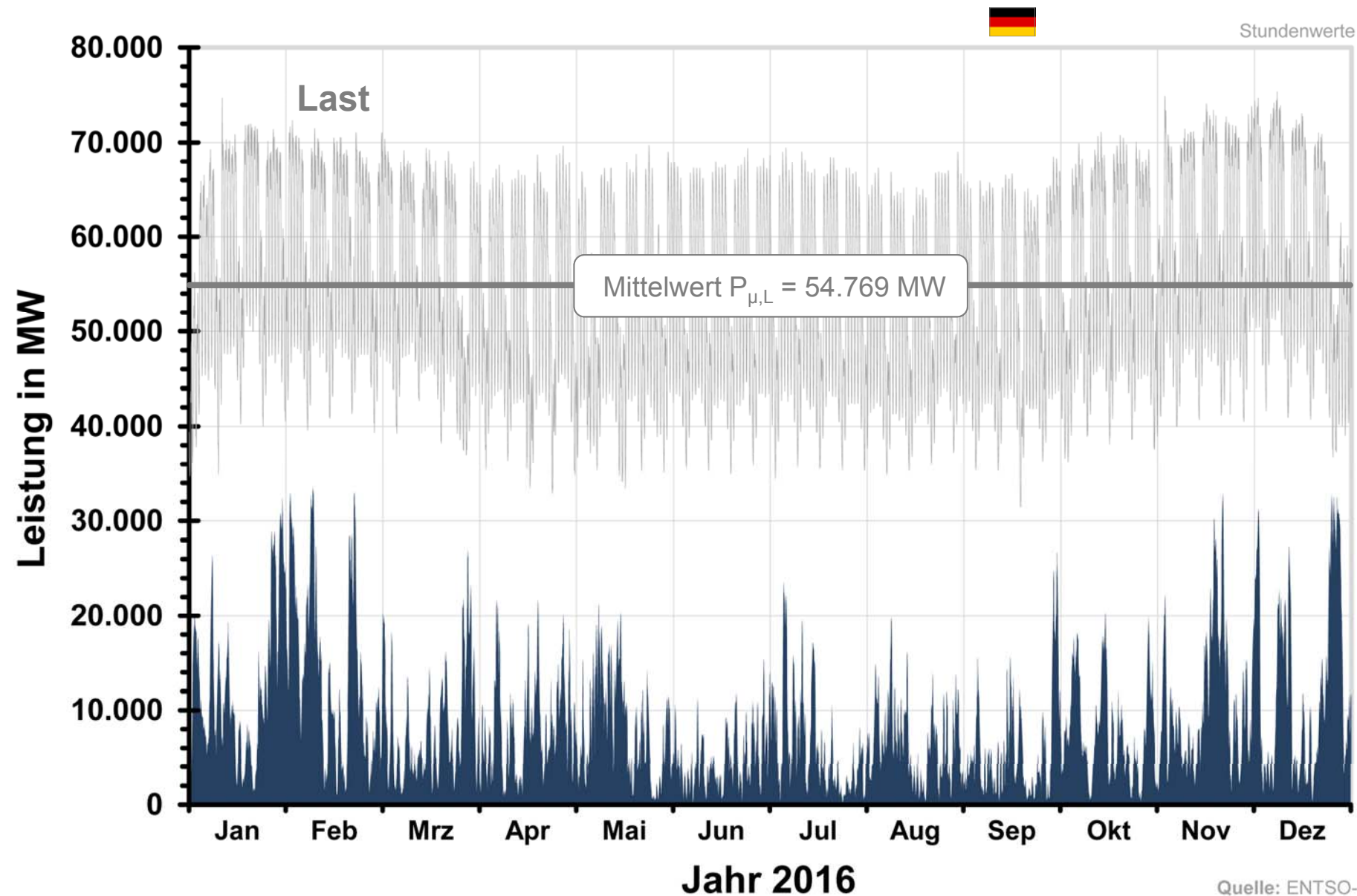


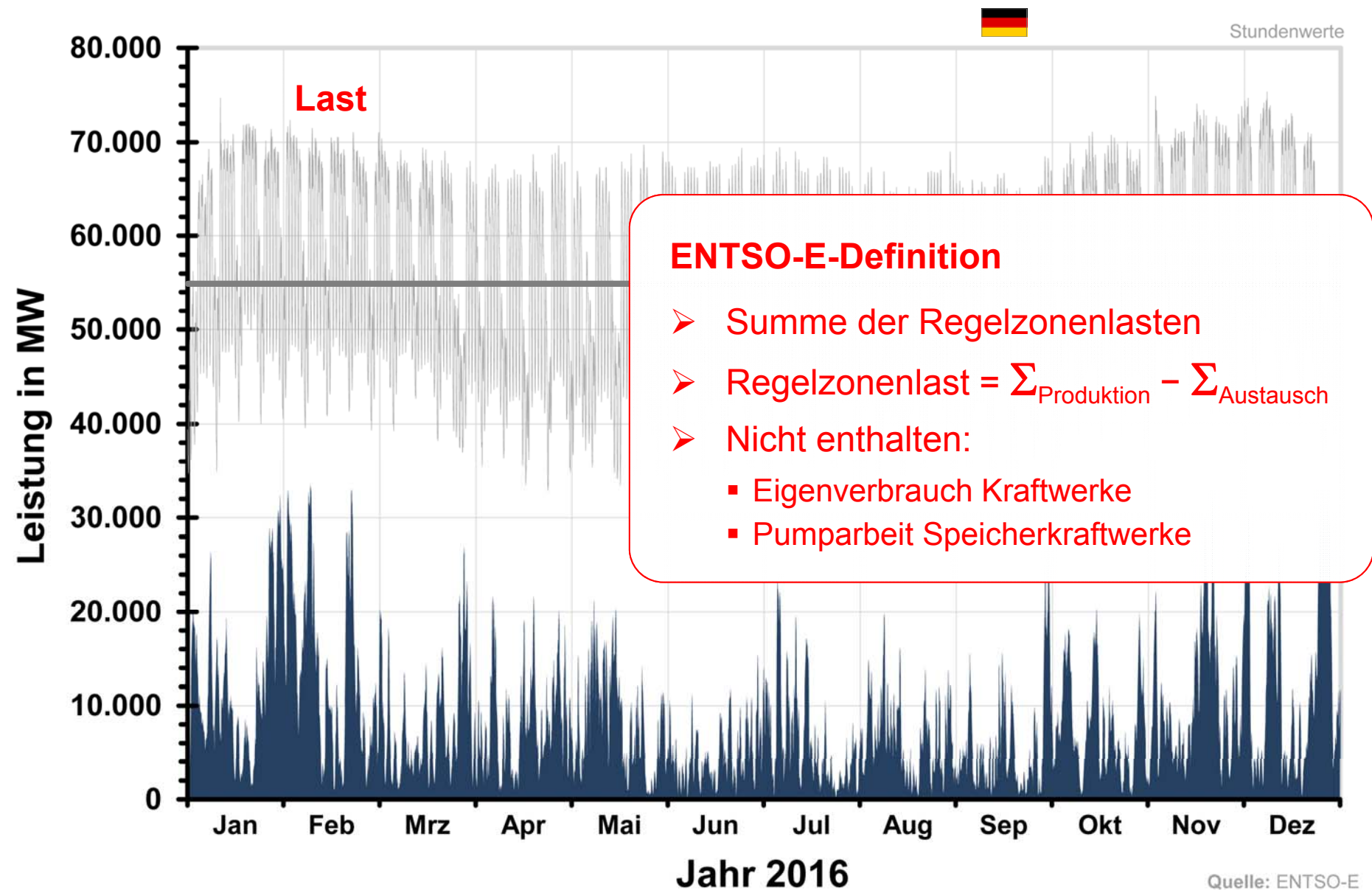


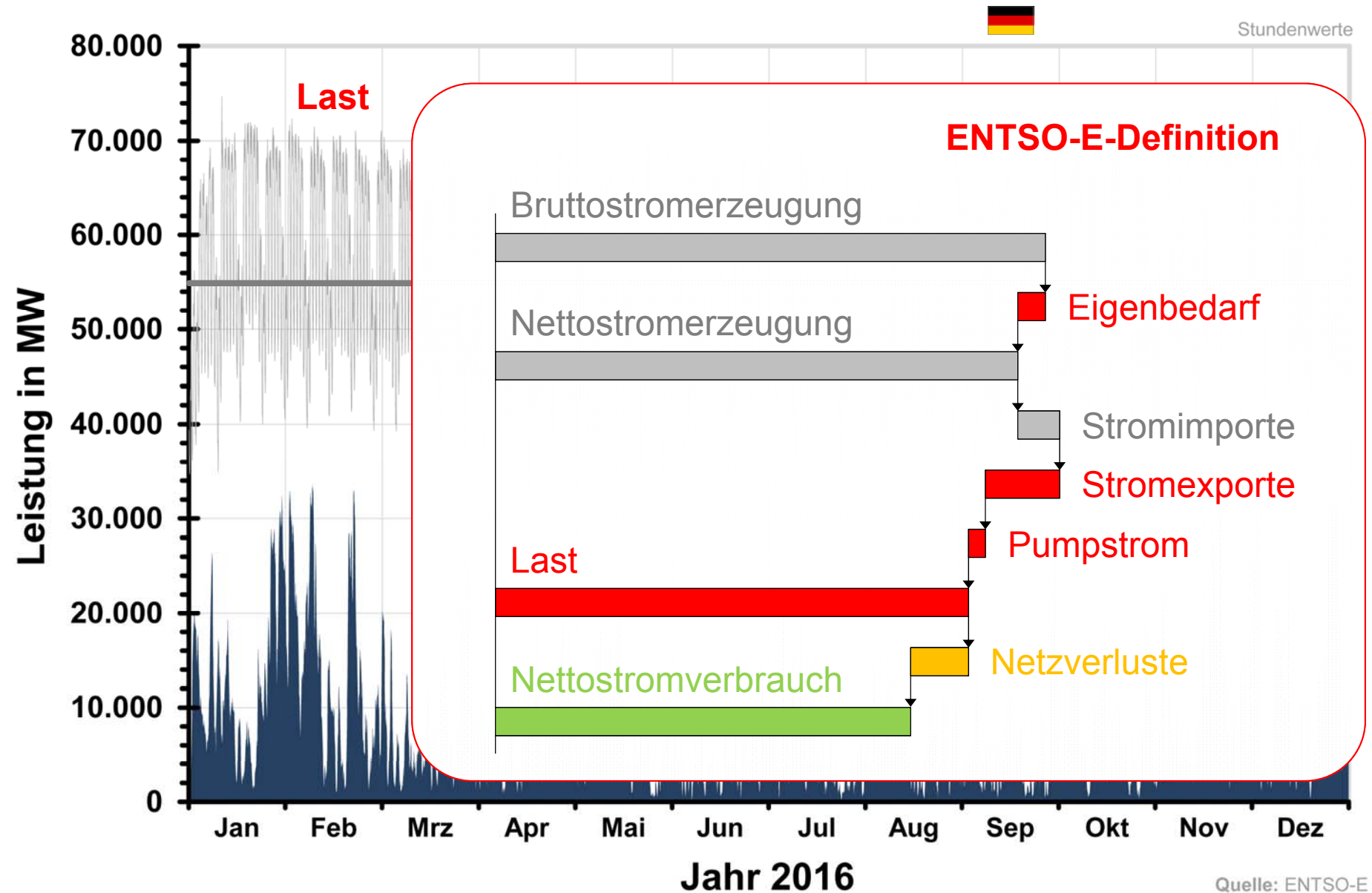


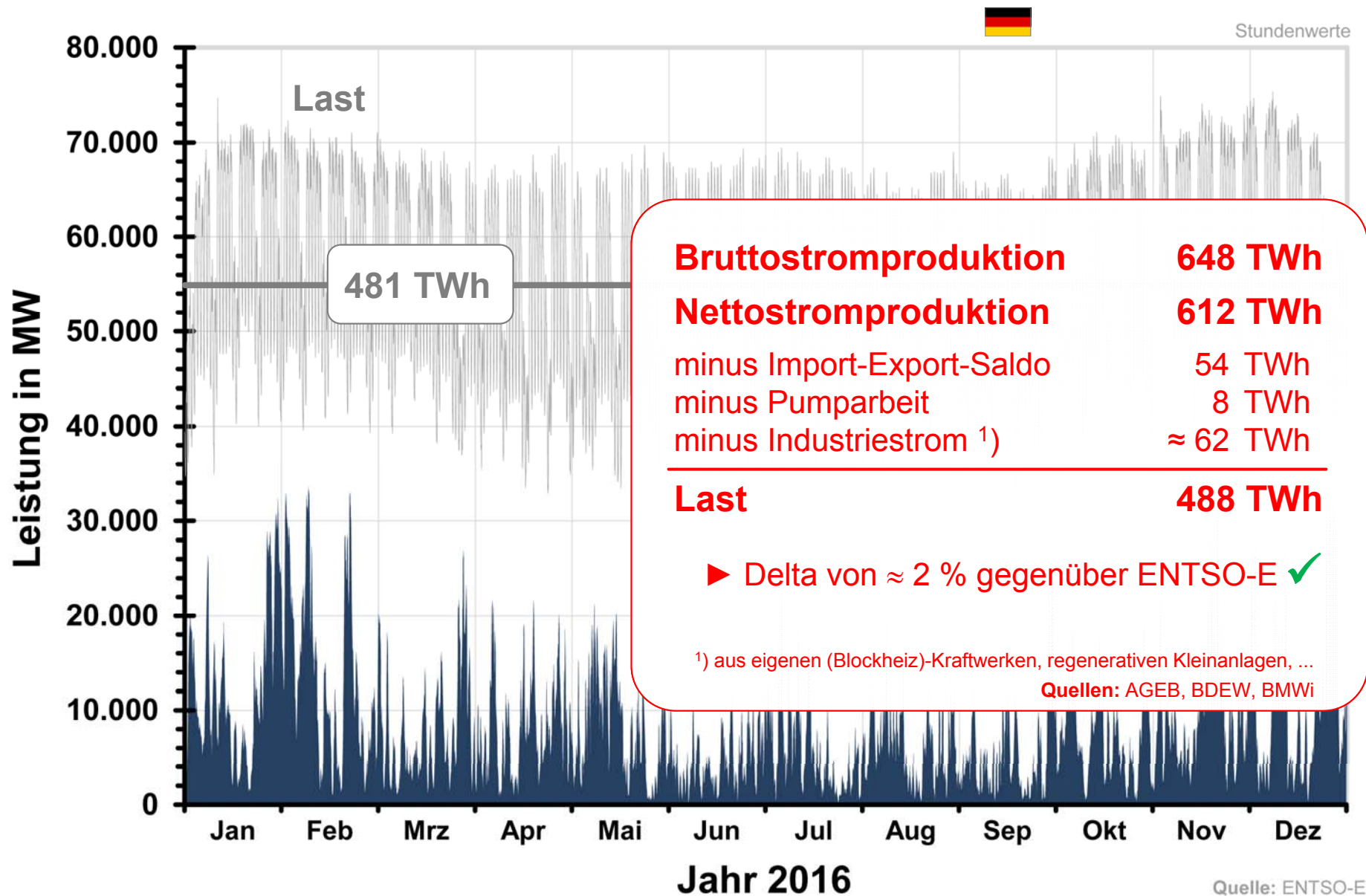


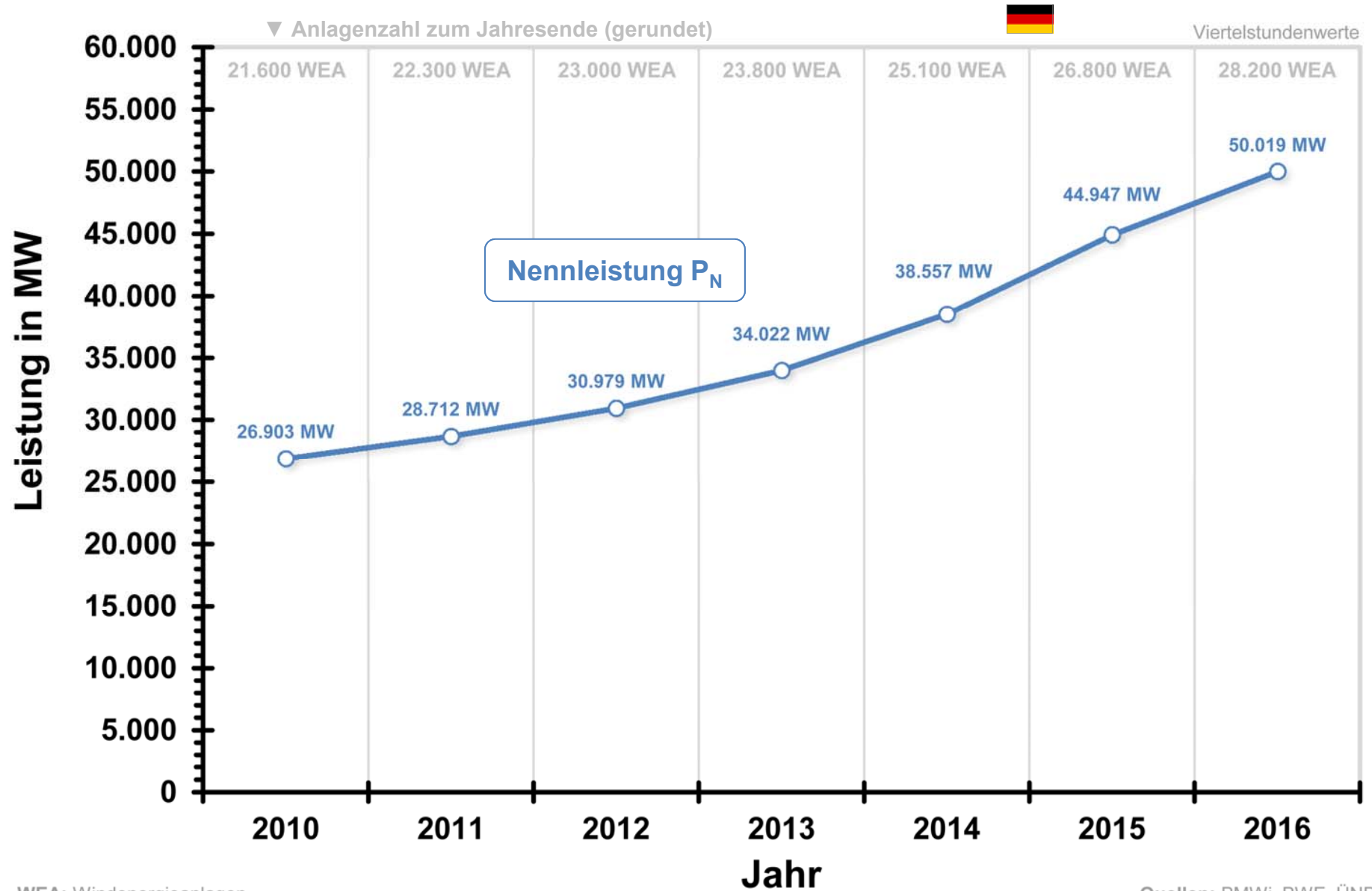


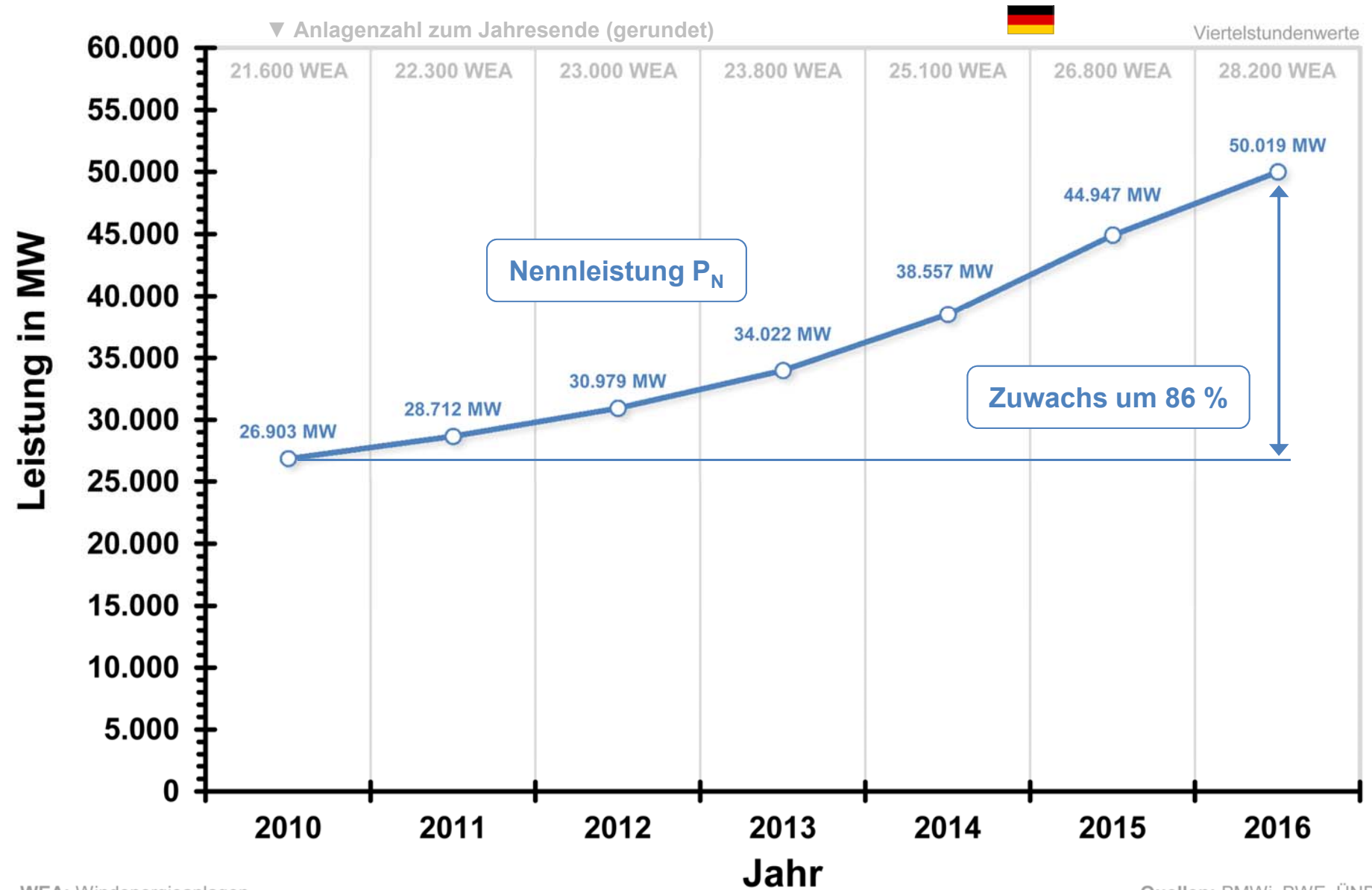




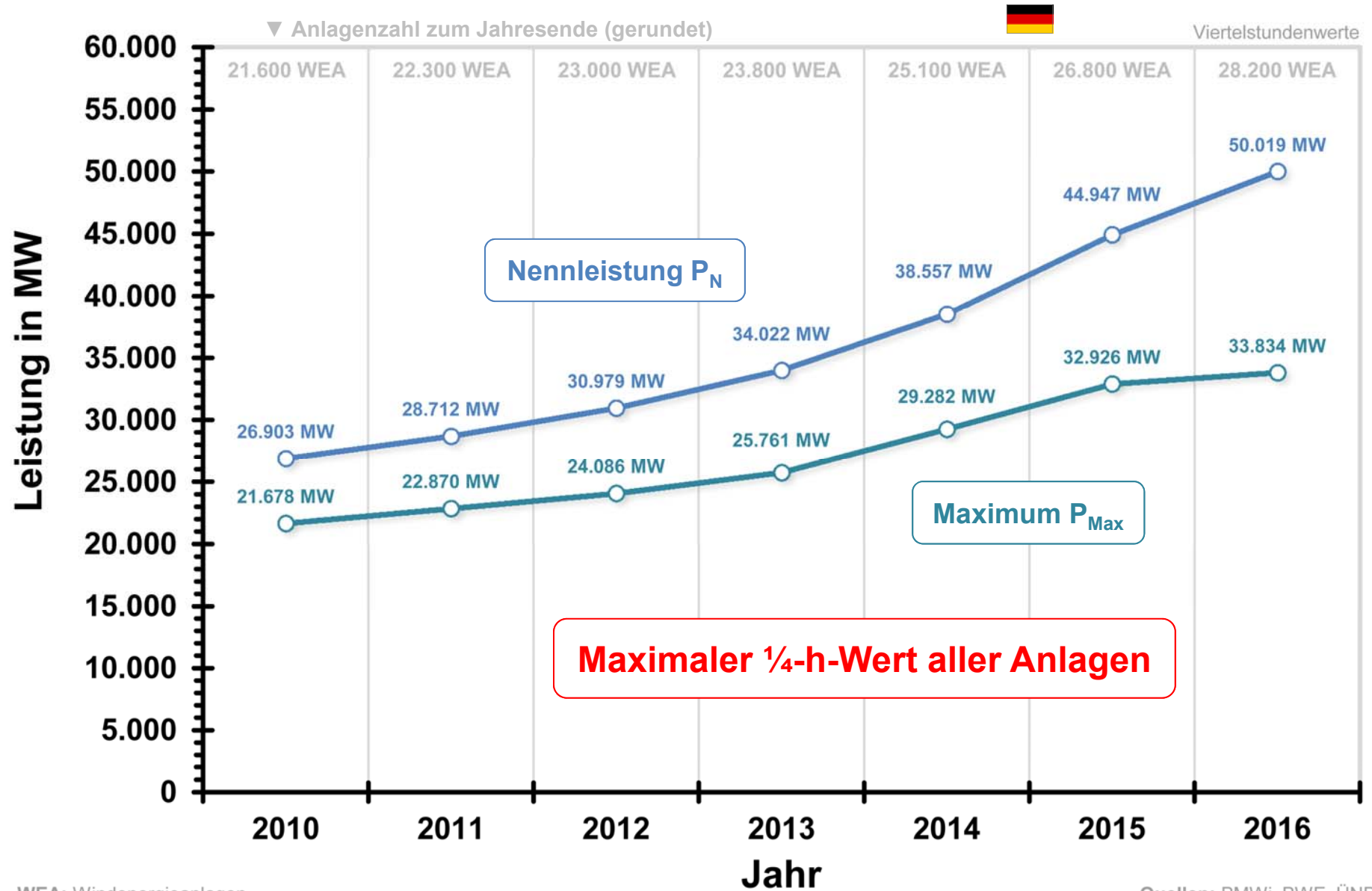


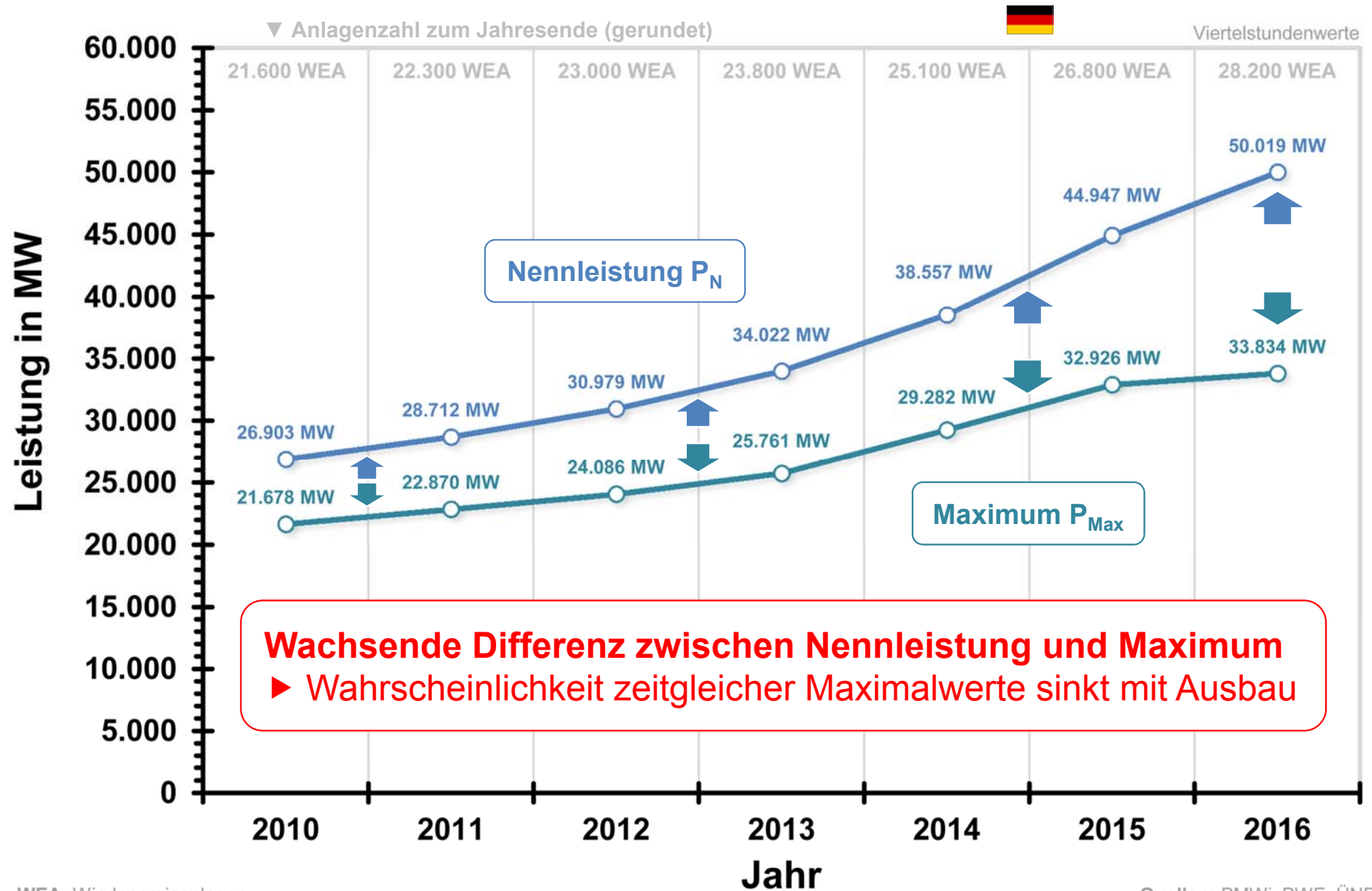




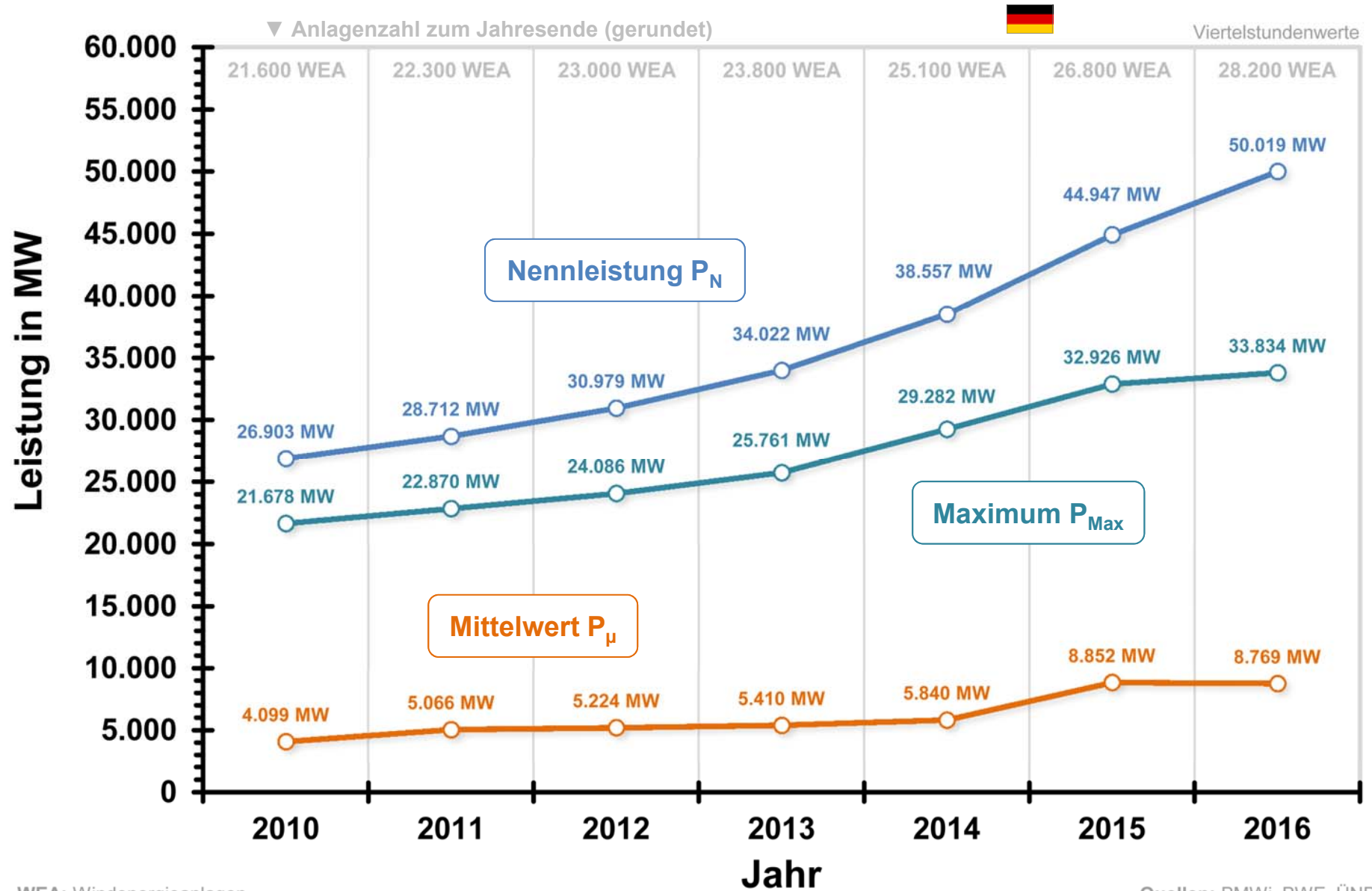


Deutschland: Windstromproduktion von 2010 bis 2016





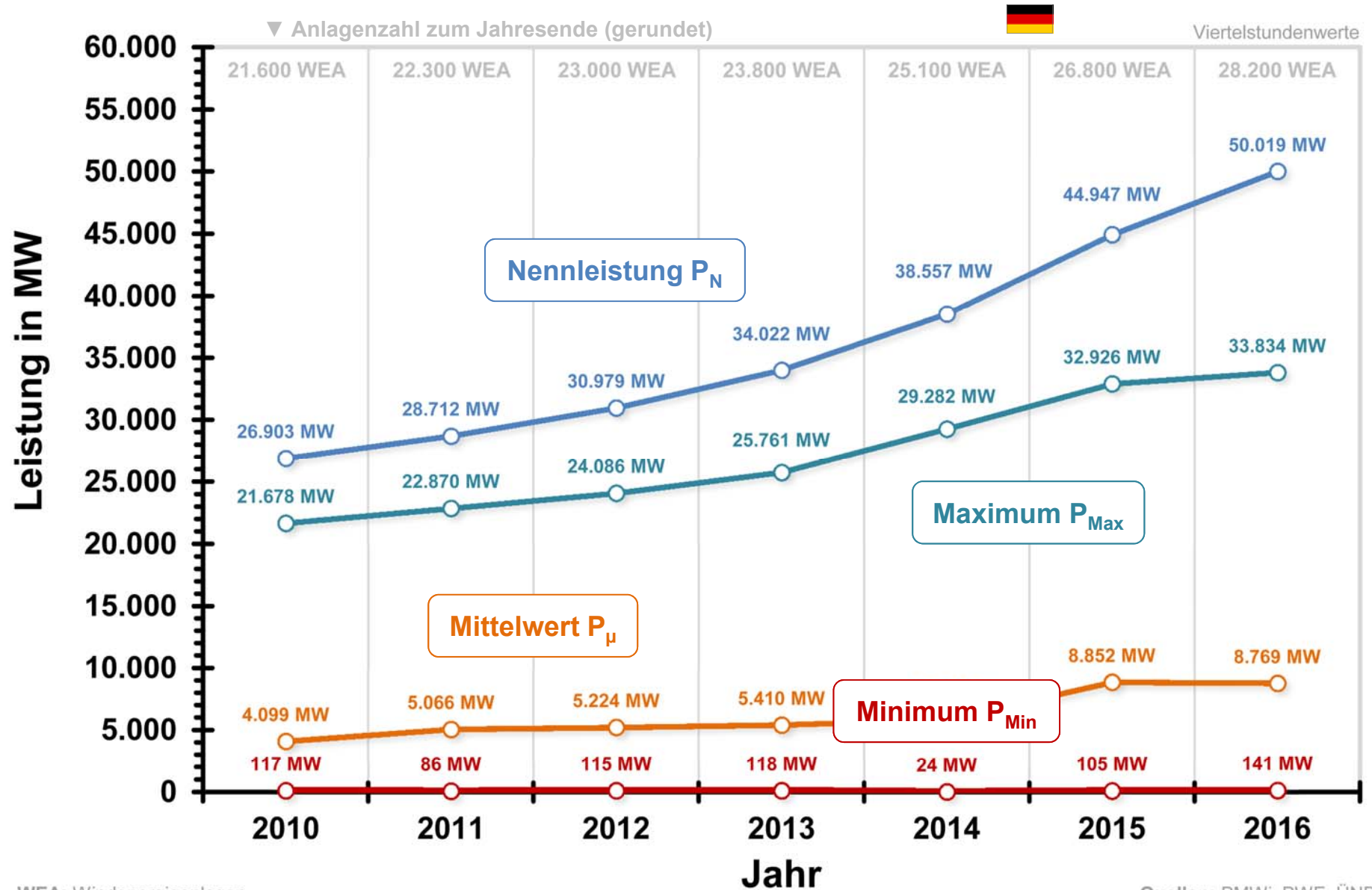
Deutschland: Windstromproduktion von 2010 bis 2016



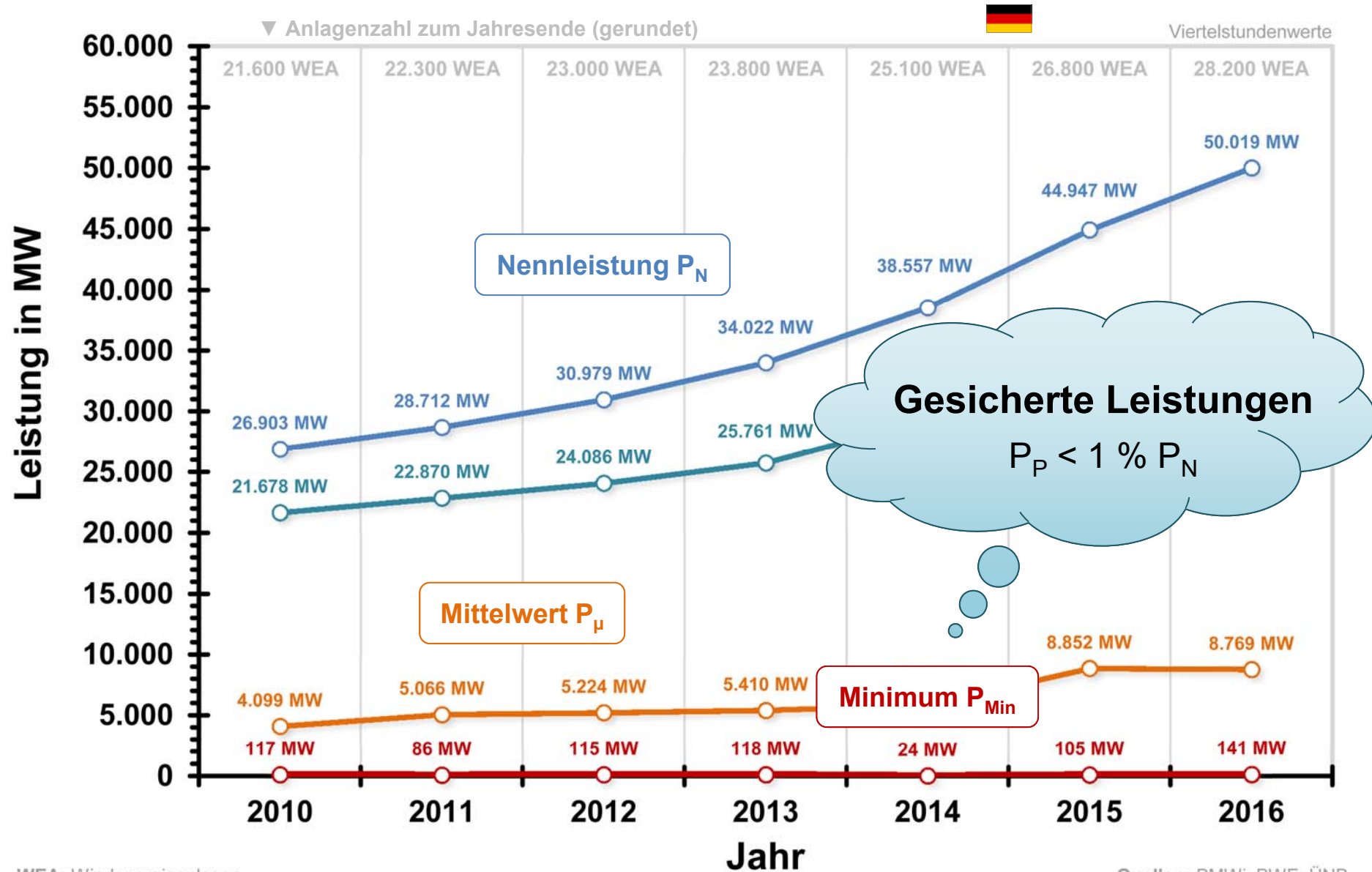
WEA: Windenergieanlagen

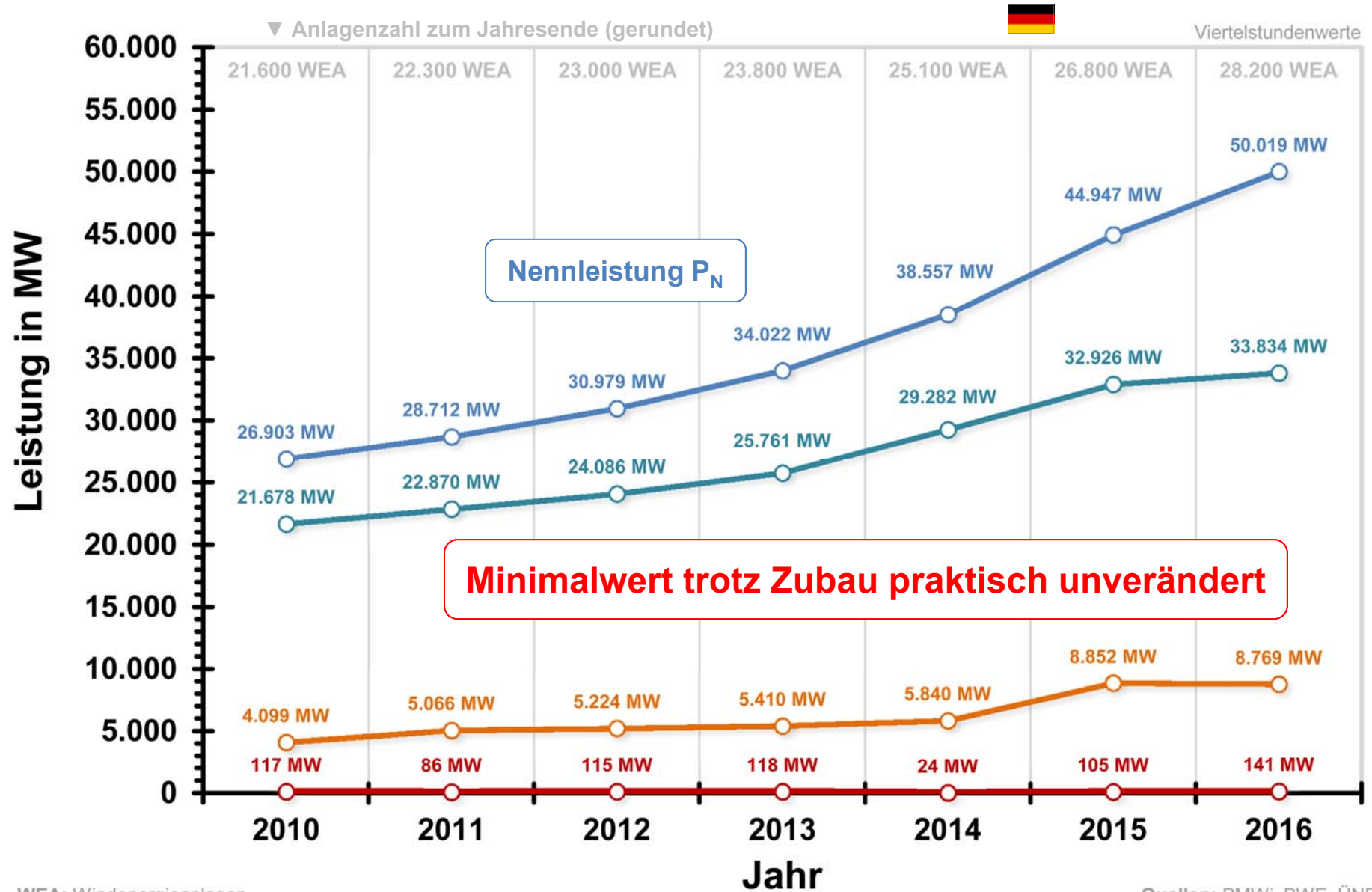
Quellen: BMWi, BWE, ÜNB

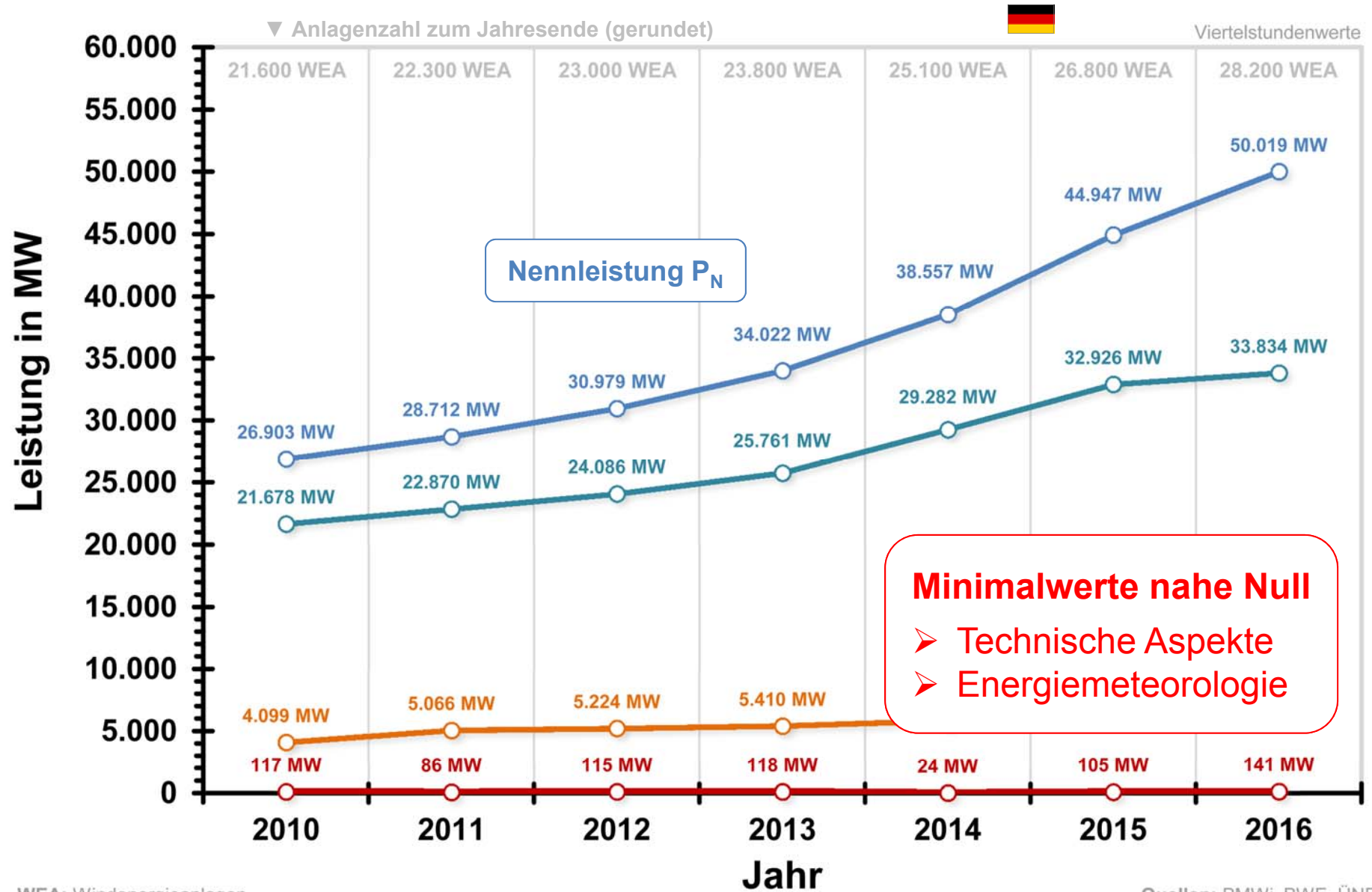
Deutschland: Windstromproduktion von 2010 bis 2016



Deutschland: Windstromproduktion von 2010 bis 2016





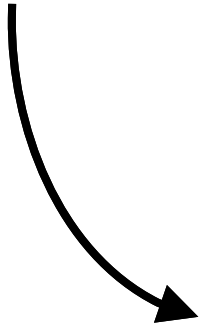


Minimalwerte: Technische Aspekte

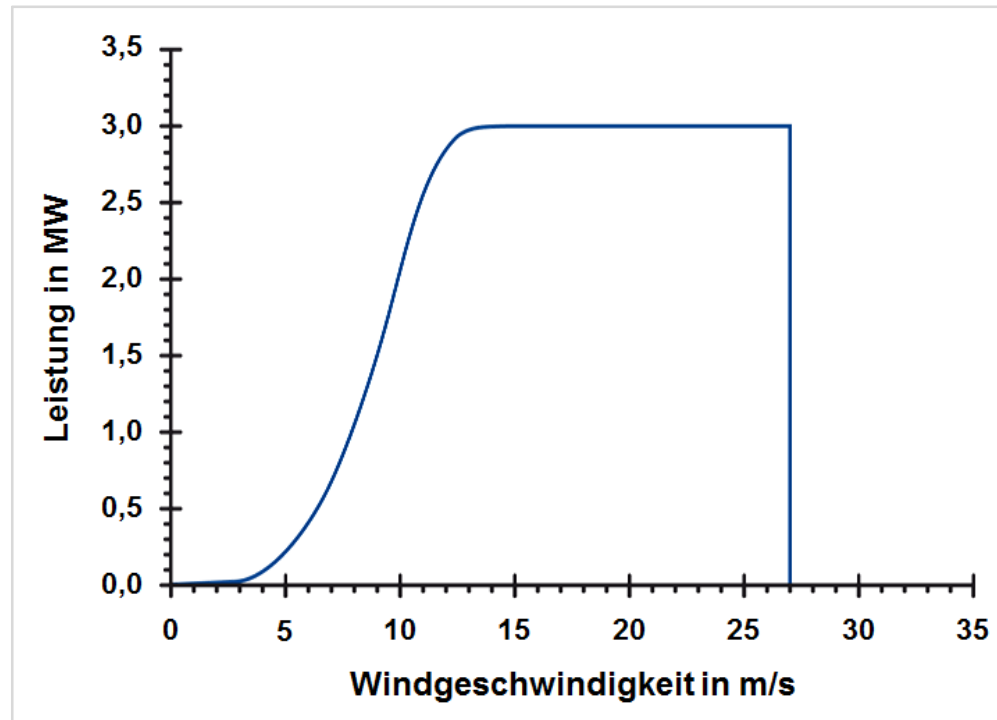
Umwandlung von Luftströmungen in elektrische Leistung:

Annähernd proportional zur dritten Potenz der Windgeschwindigkeit

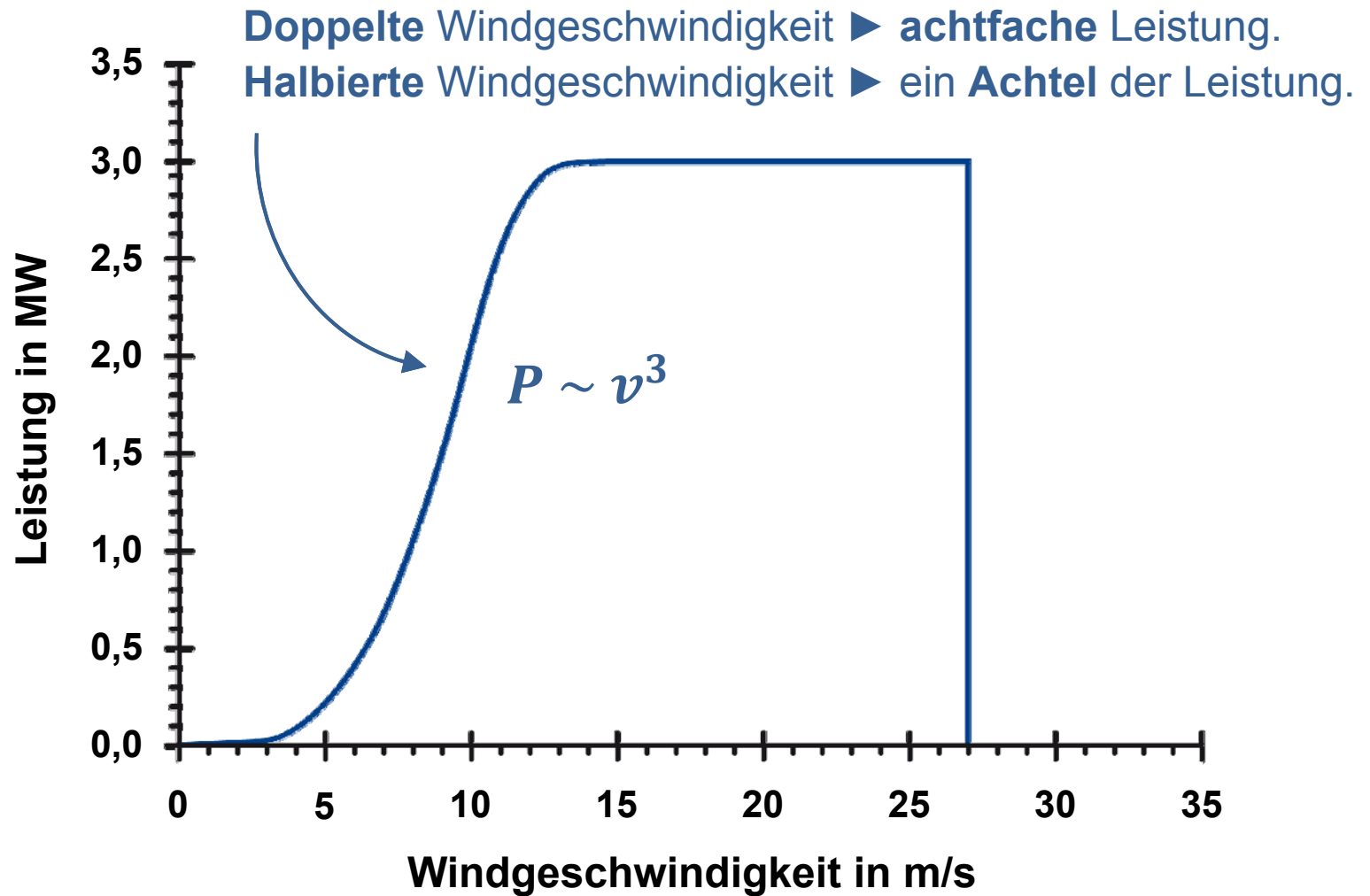
$$P \sim v^3$$

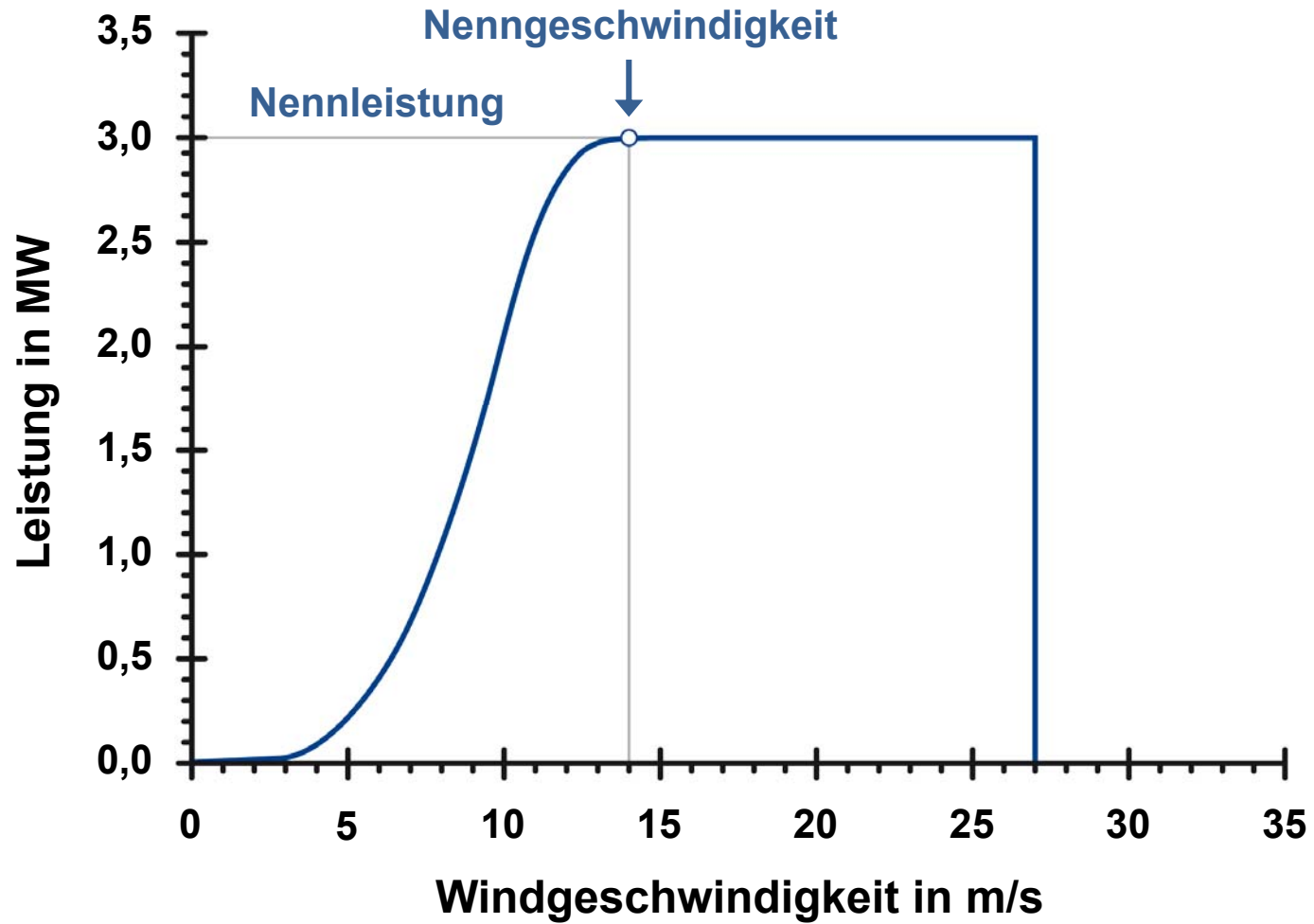


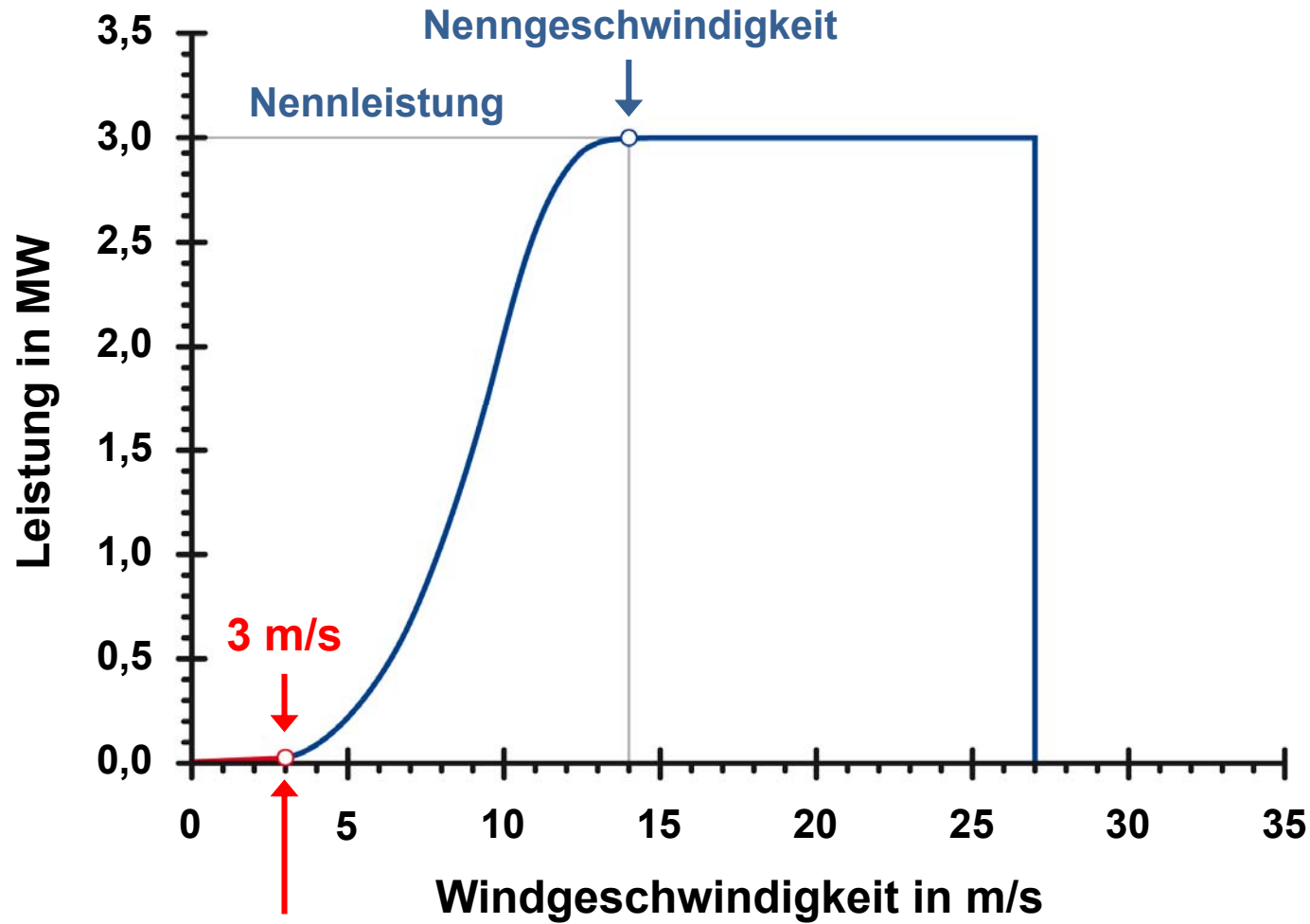
Typische Kennlinie einer modernen Windenergieanlage



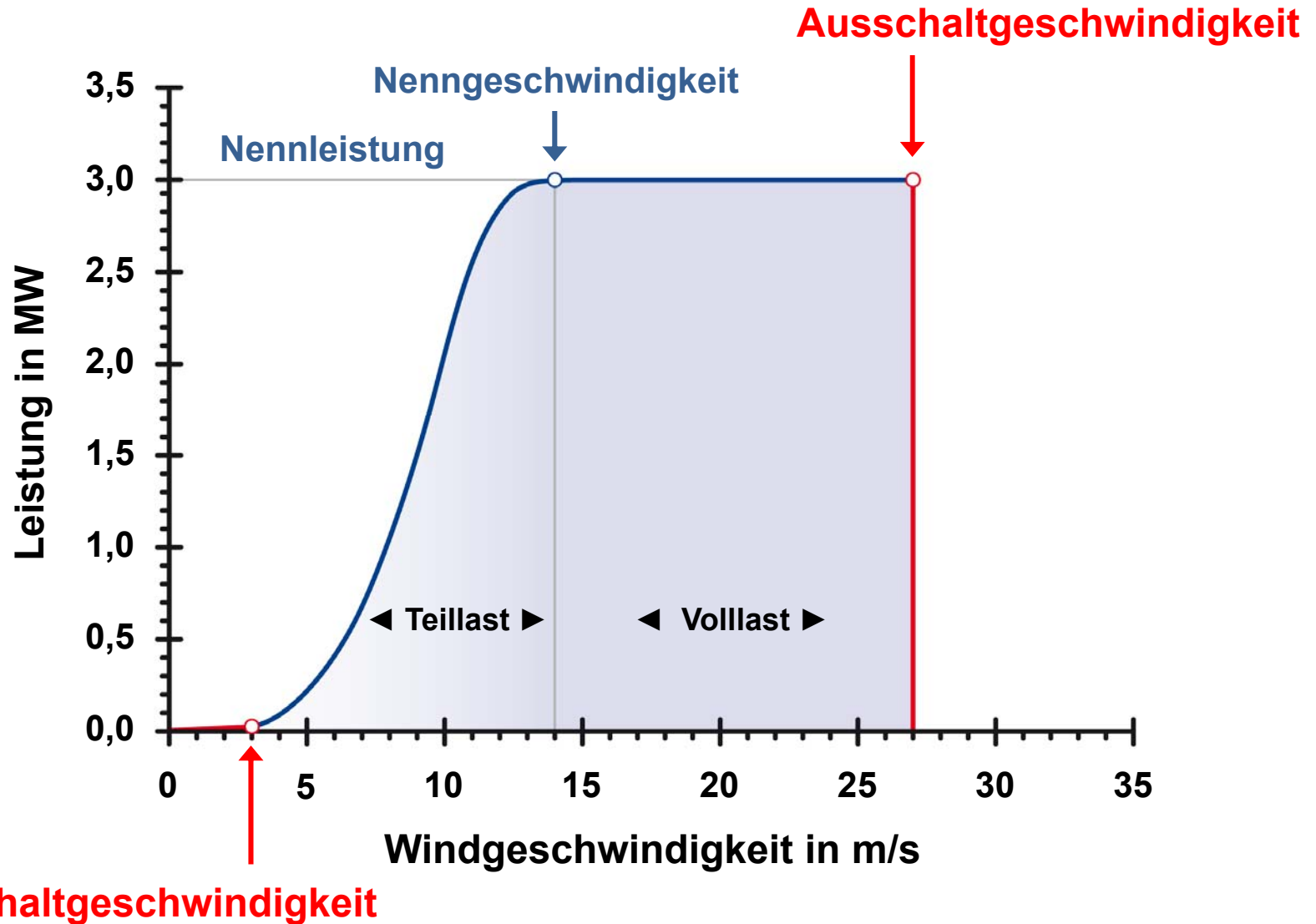
Minimalwerte: Technische Aspekte

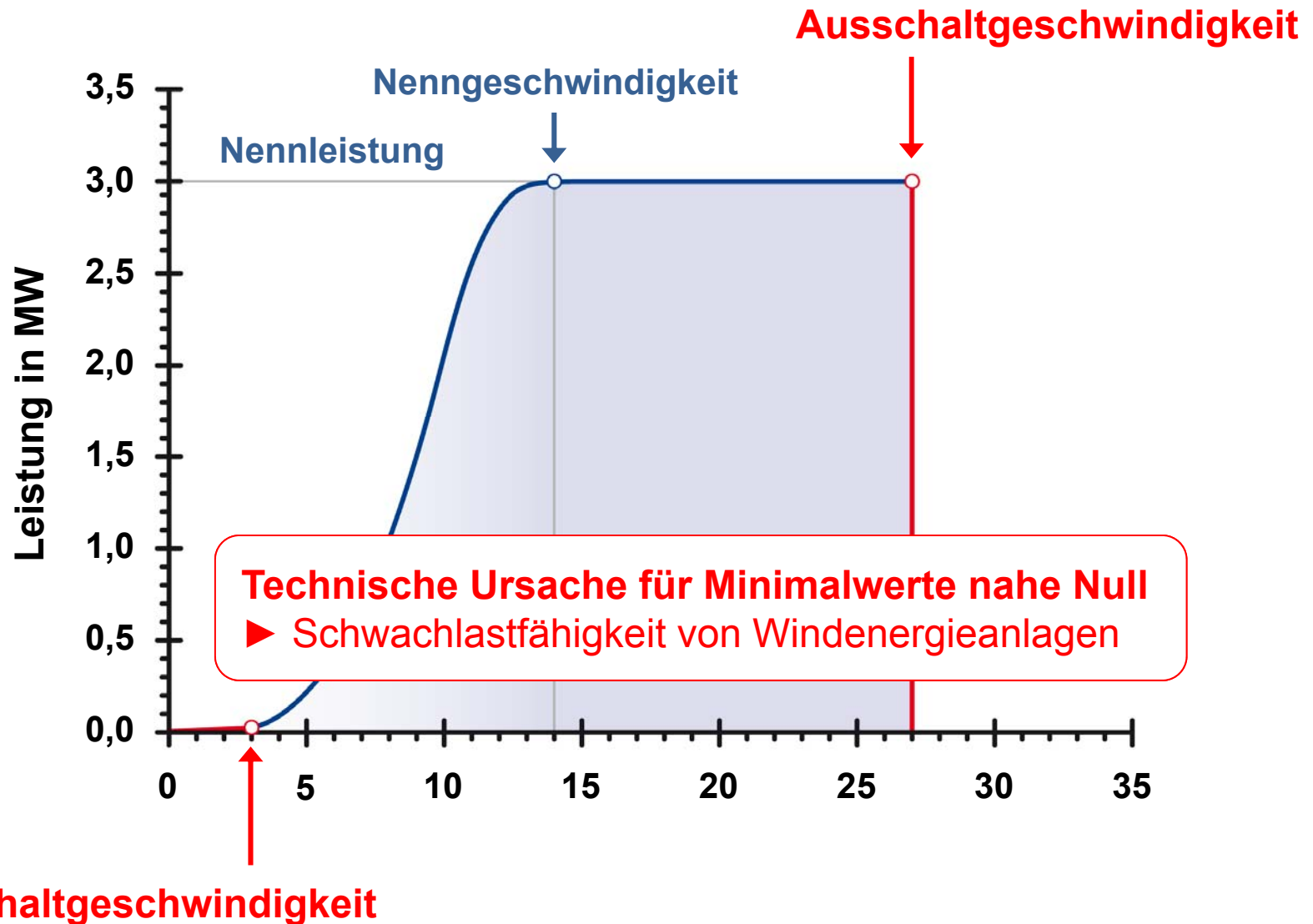


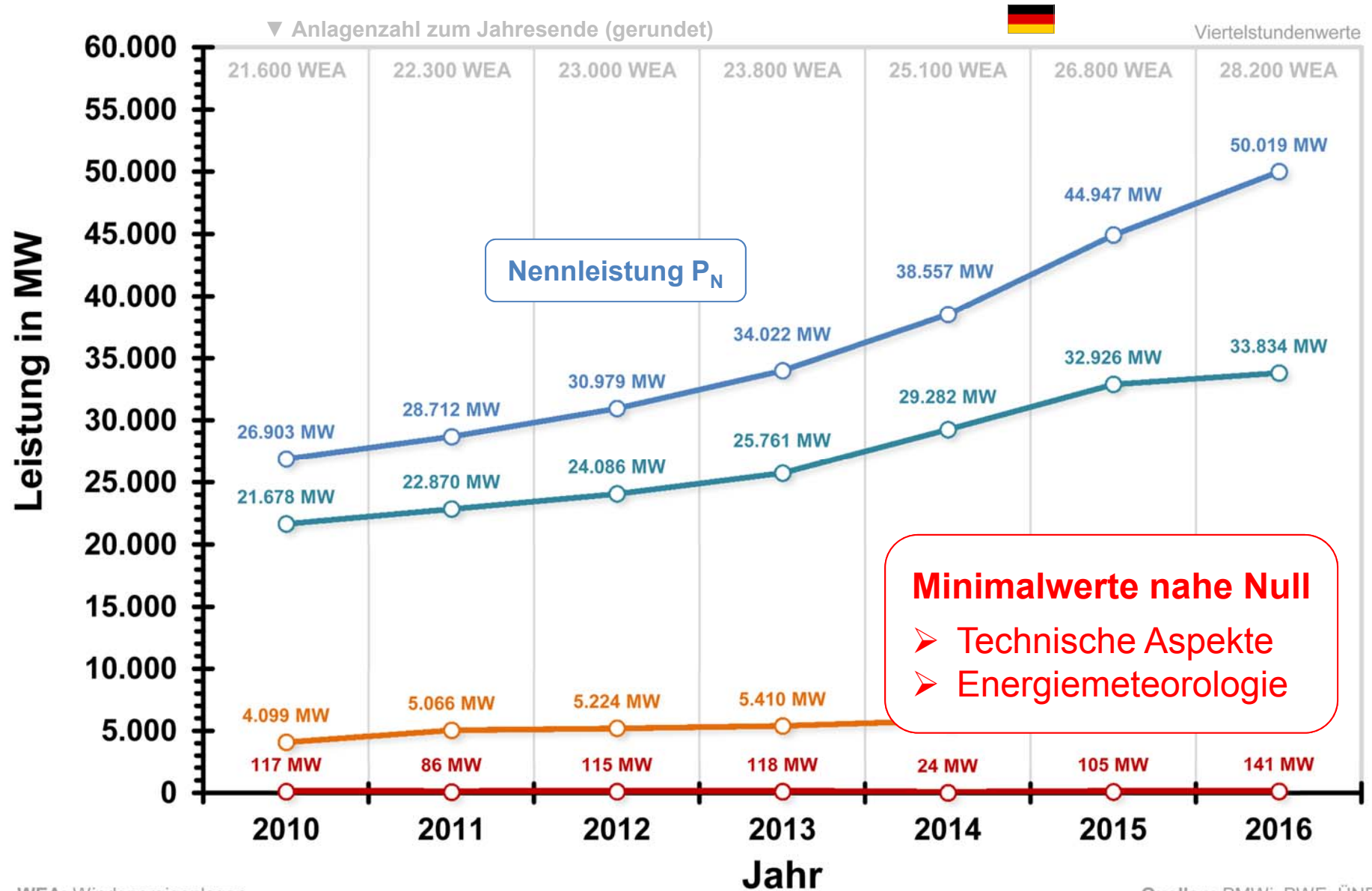




Einschaltgeschwindigkeit









Aktuelles Forschungsfeld der Energiemeteorologie

- Schnittstelle zwischen erneuerbaren Energien und Atmosphärenphysik
- Analysen zur atmosphärischen Turbulenz und zur Physik der Grenzschichten
- Netzintegration verteilter Elektrizitätsbereitstellung aus erneuerbaren Energien

Aktivitäten zur Windenergienutzung

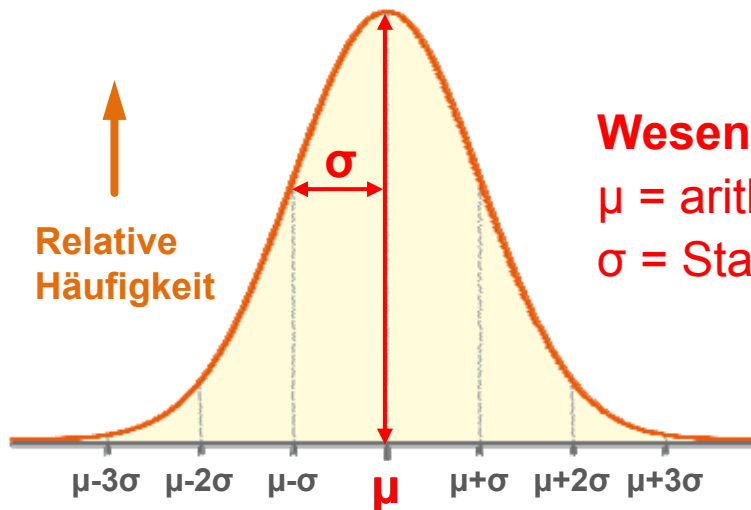
- Meteorologische Aspekte der Windenergienutzung (mehrere Größenskalen)
- Verständnis/Beschreibung der raumzeitlichen Charakteristik von Windfeldern
- Bestimmung der Windverhältnisse an On- und Offshore-Standorten
- Verbesserte Leistungsprognosen für Windenergieanlagen



Bilder: DAPD, Zingst

Häufigkeitsverteilungen von Zufallsvariablen

- Statistisch unabhängige Zufallsvariablen



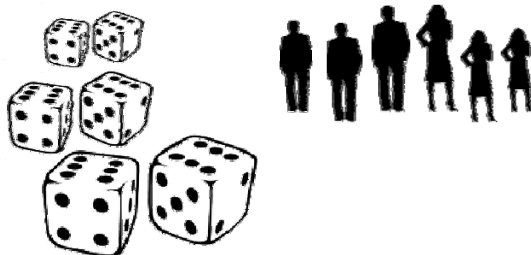
Wesentliche statistische Parameter

μ = arithmetischer Mittelwert der Zufallsvariablen

σ = Standardabweichung (Breite der Verteilung)

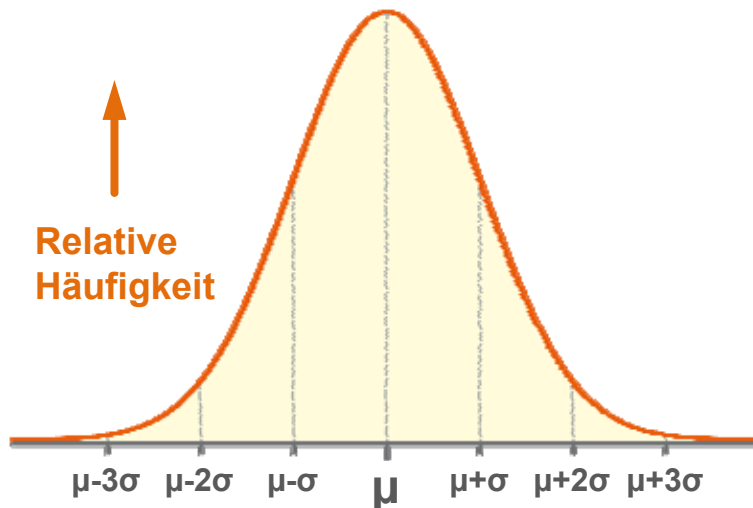
Normalverteilung nach Gauß

Beispiele: Würfeln oder Körpergröße



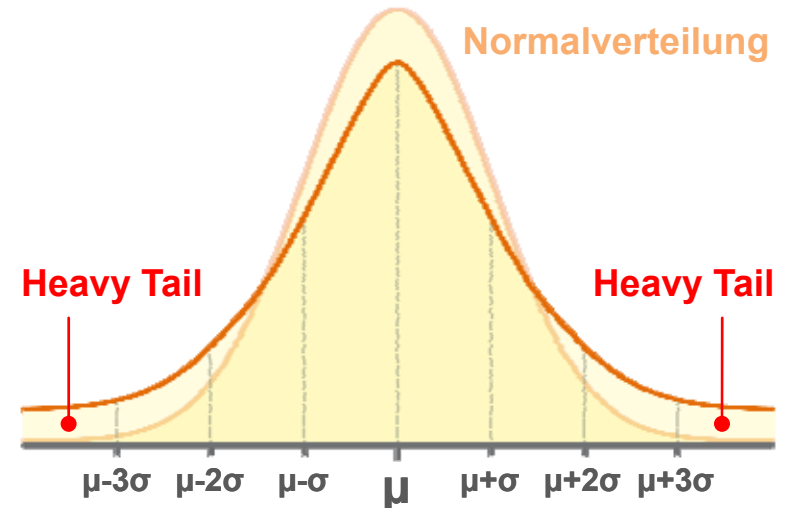
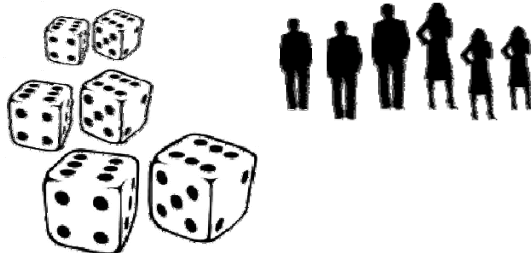
Häufigkeitsverteilungen von Zufallsvariablen

- Statistisch unabhängige Zufallsvariablen
- Statistisch abhängige Zufallsvariablen



Normalverteilung nach Gauß

Beispiele: Würfeln oder Körpergröße



Heavy-Tailed-Verteilung

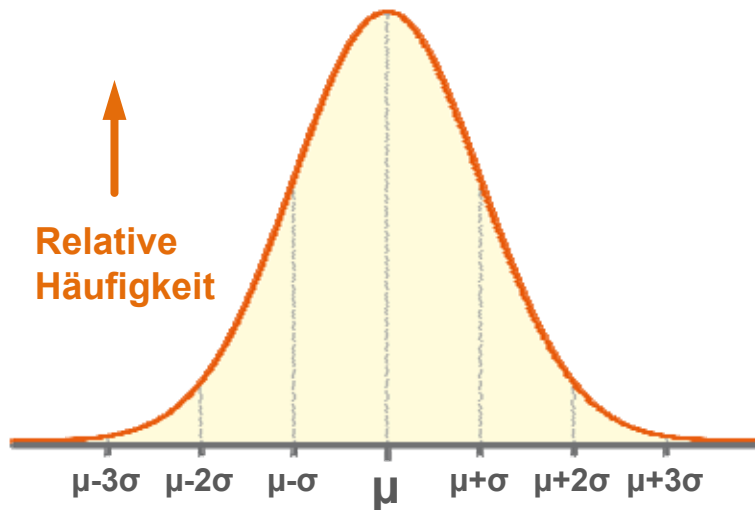
Beispiel: Windenergie

Raum-Zeit-Korrelation

Keine Normalverteilung ► P, ΔP

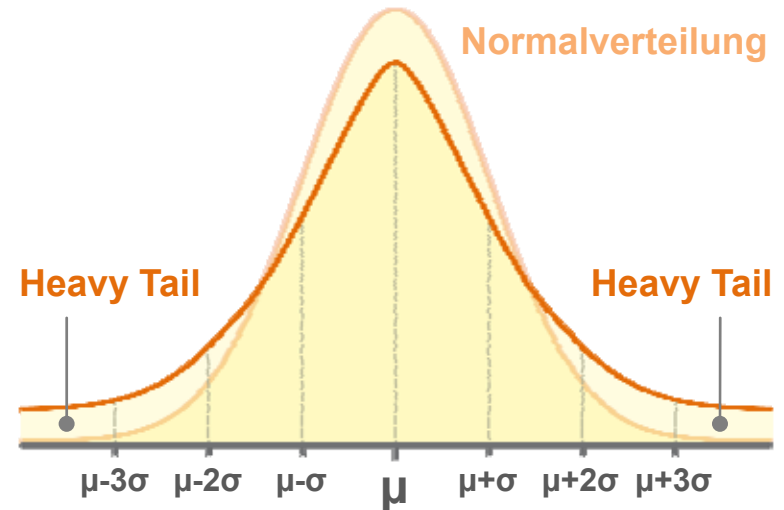
Häufigkeitsverteilungen von Zufallsvariablen

- Statistisch unabhängige Zufallsvariablen
- Statistisch abhängige Zufallsvariablen



Normalverteilung nach Gauß

Beispiele: Würfeln oder Körpergröße

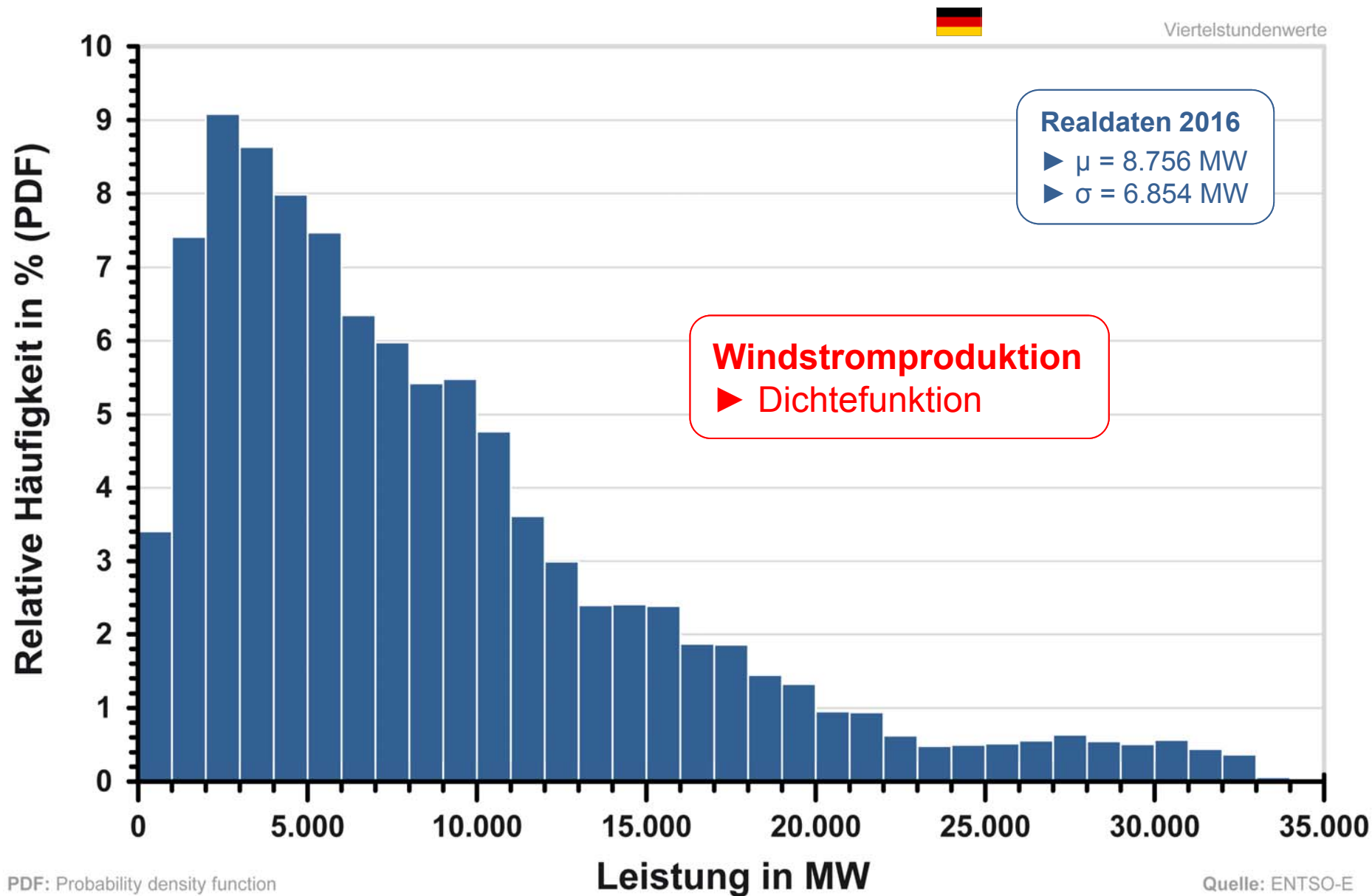


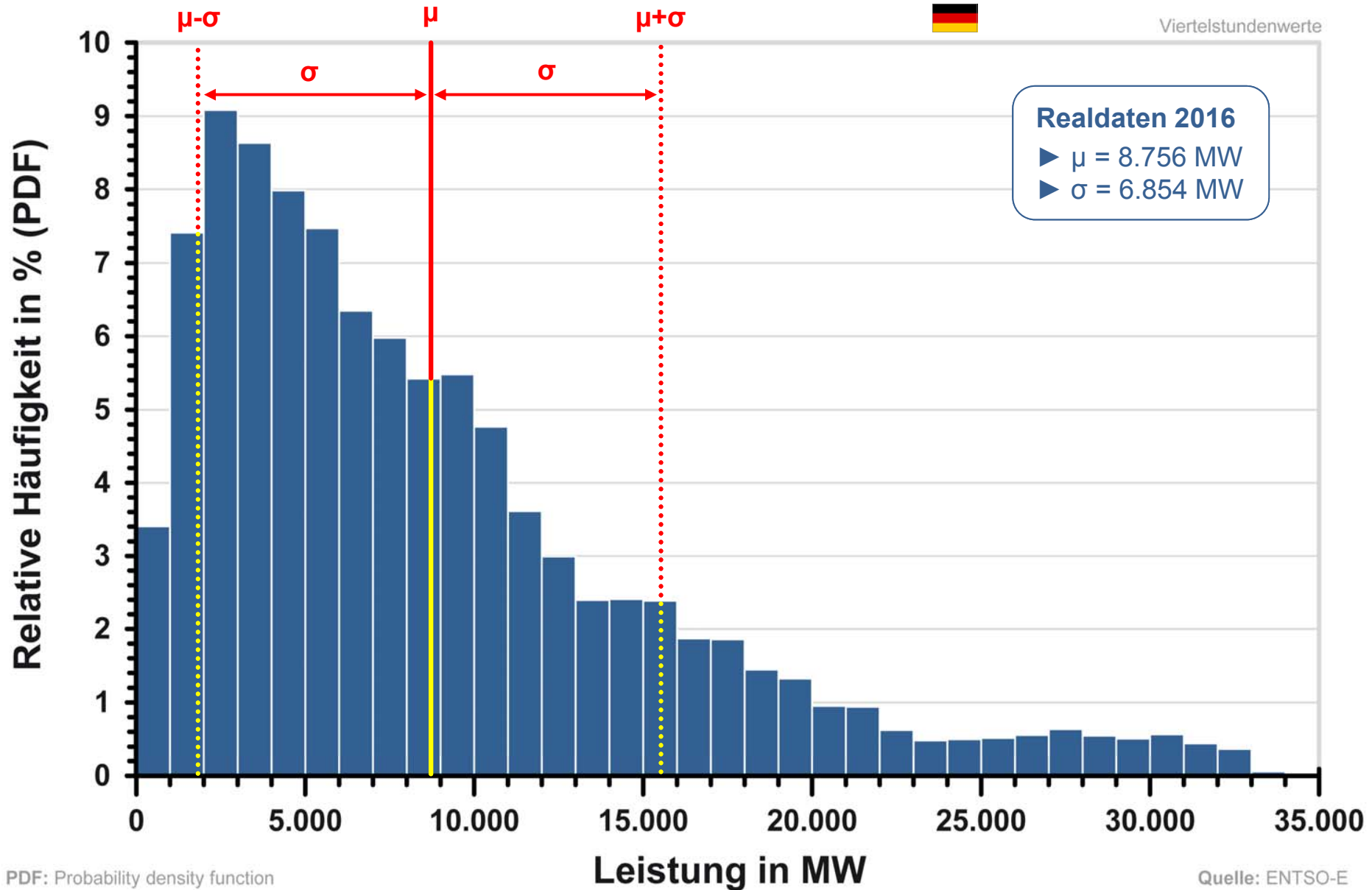
Heavy-Tailed-Verteilung

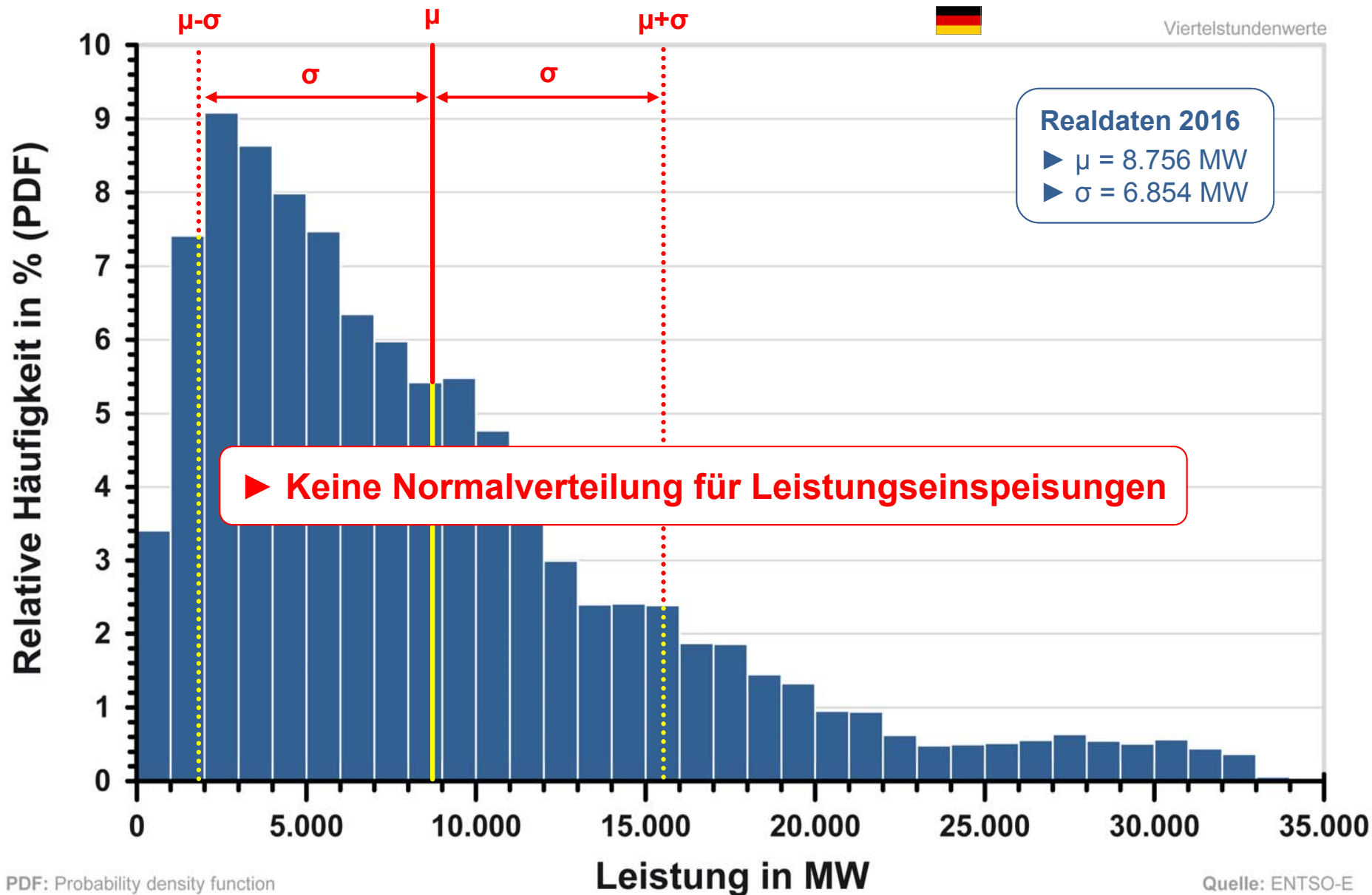
Beispiel: Windenergie

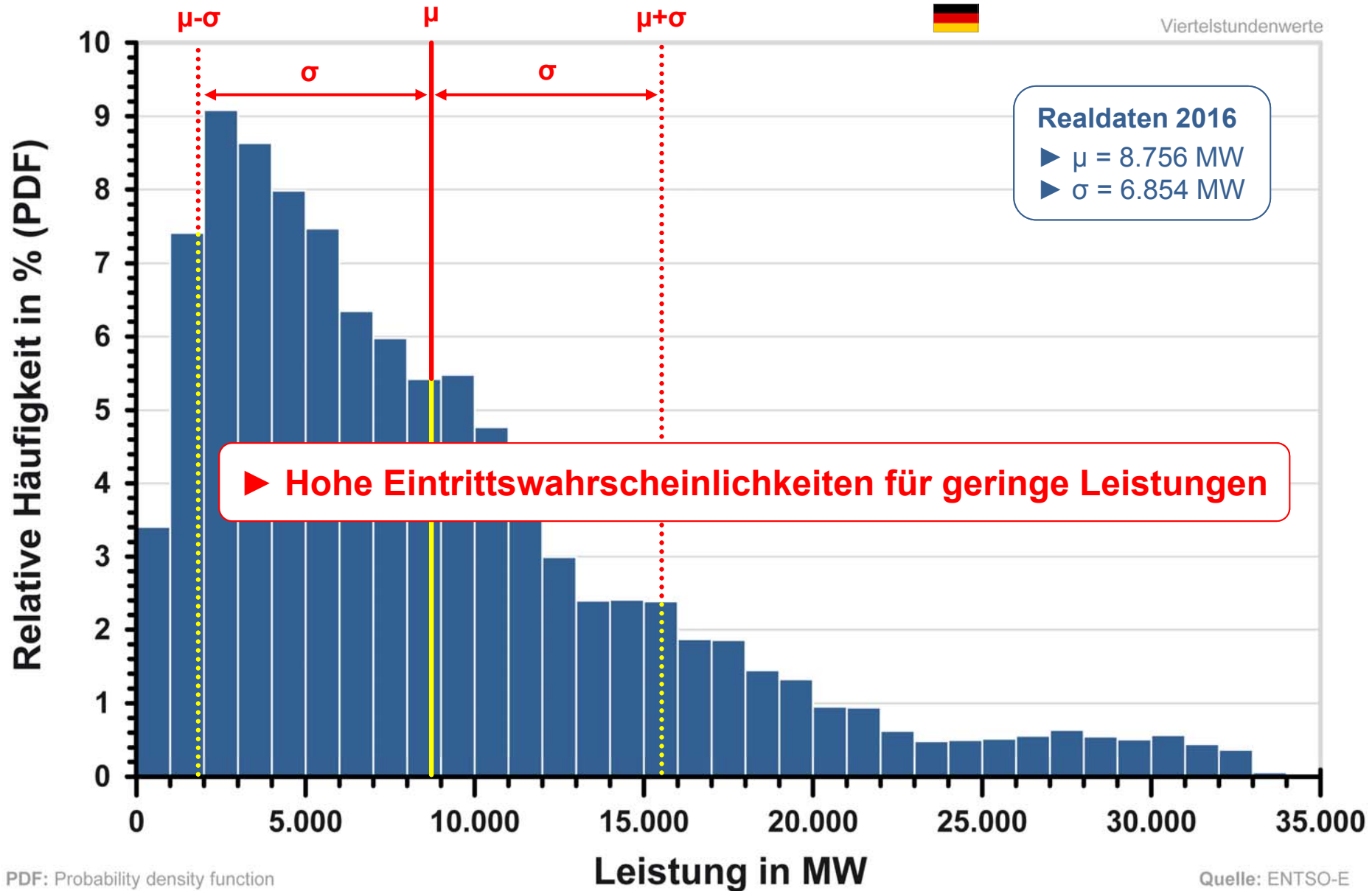
Raum-Zeit-Korrelation

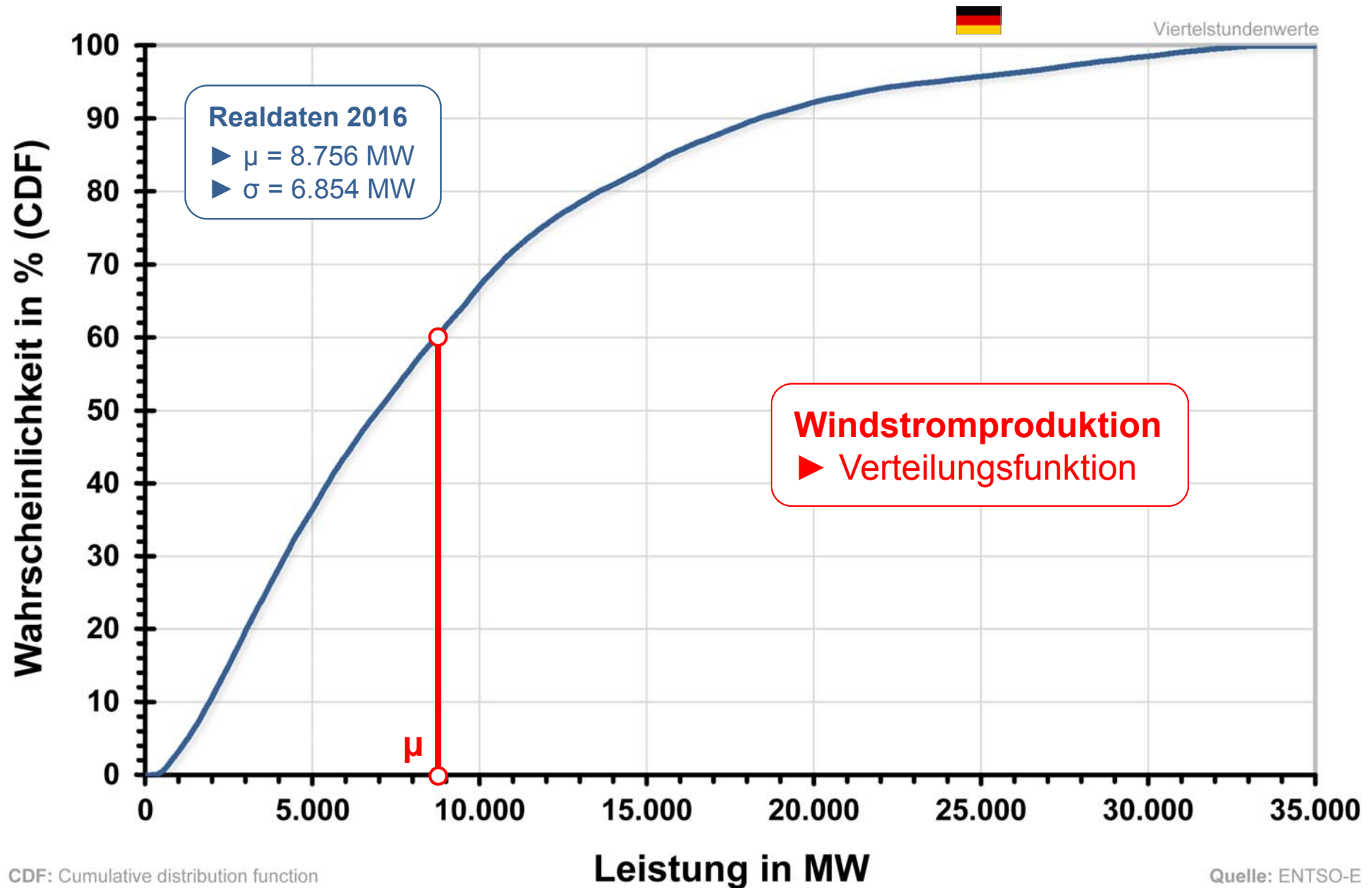
► Häufigkeitsverteilung der Windstromproduktion 2016

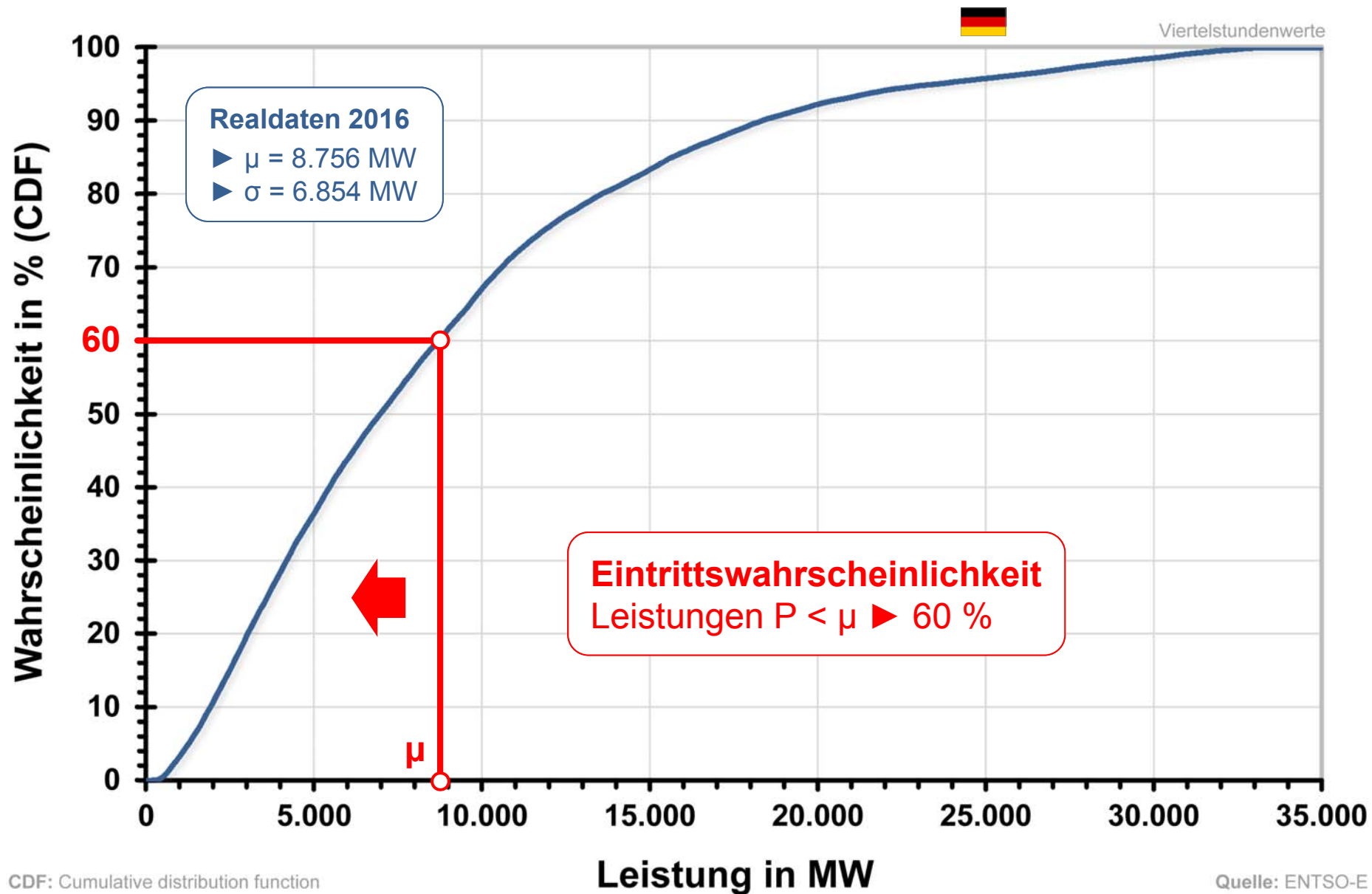


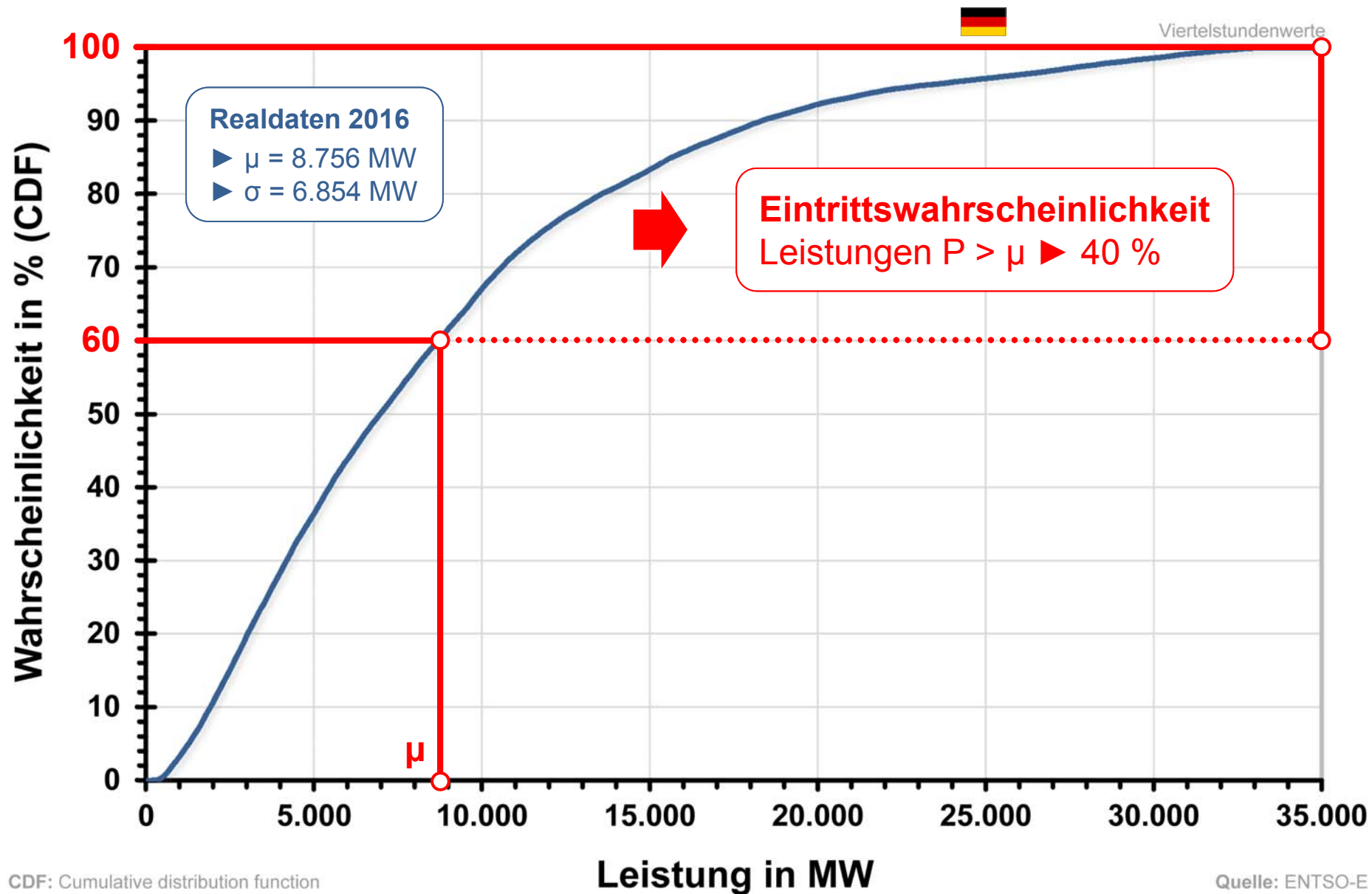


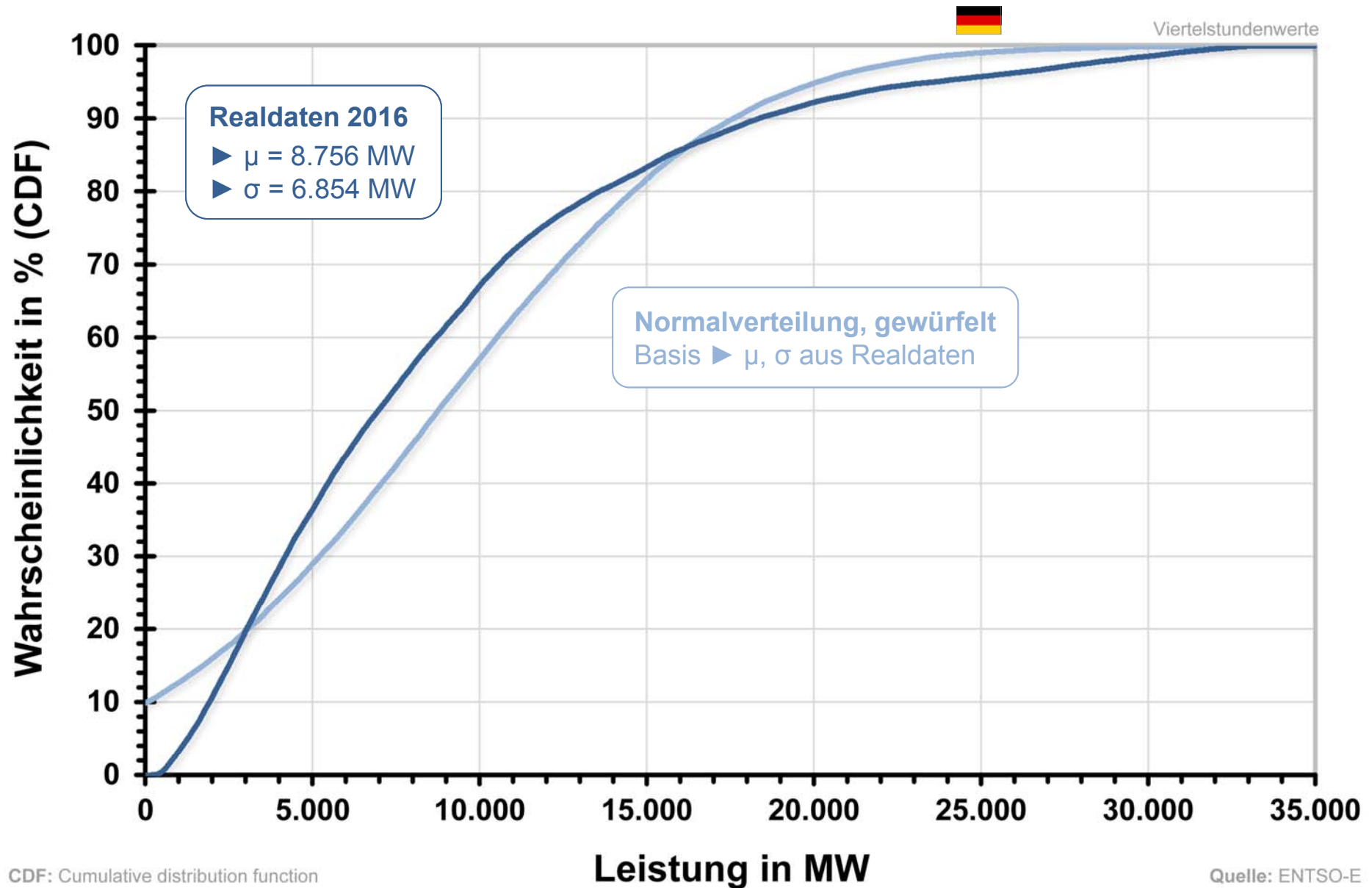


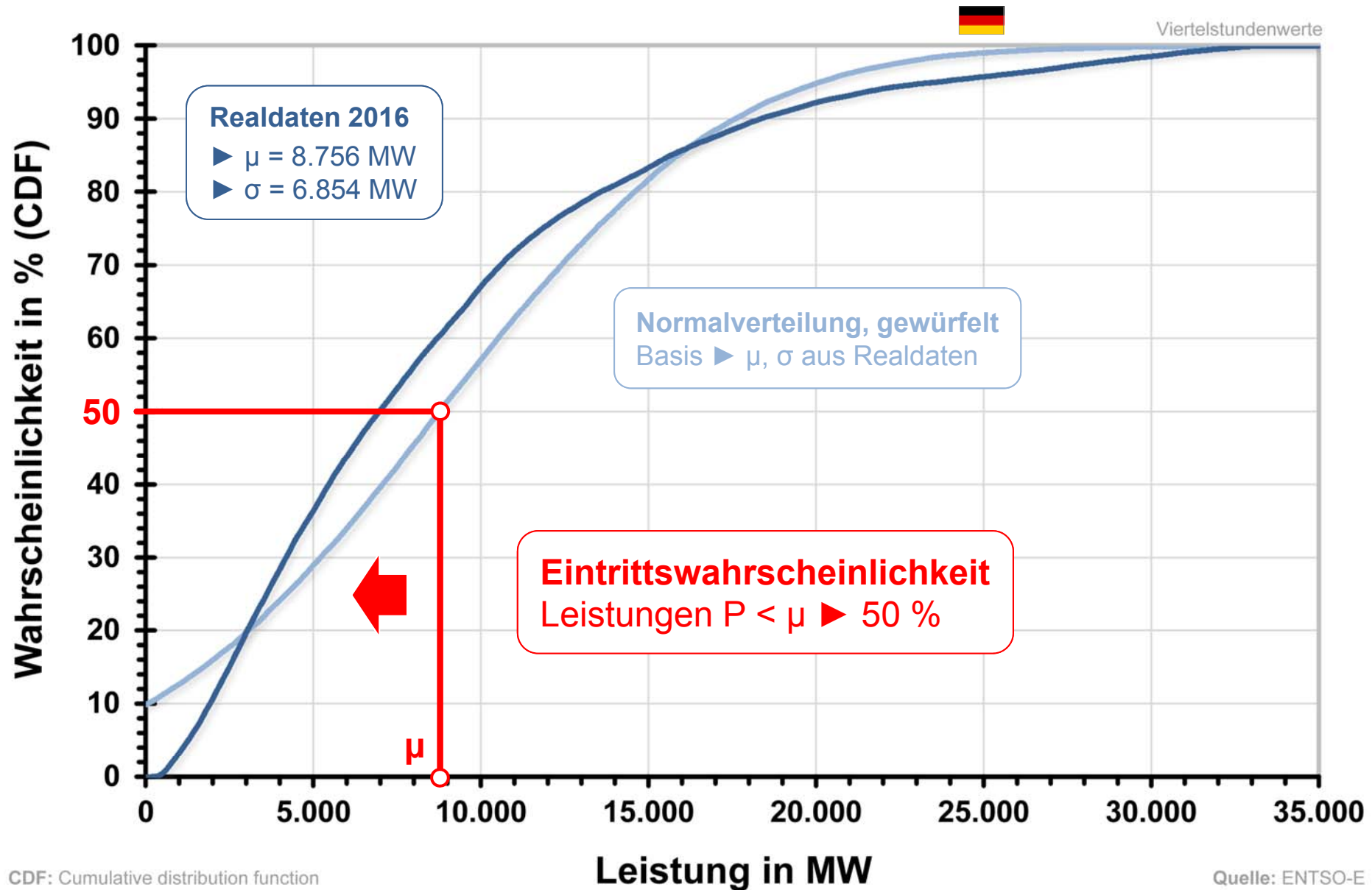


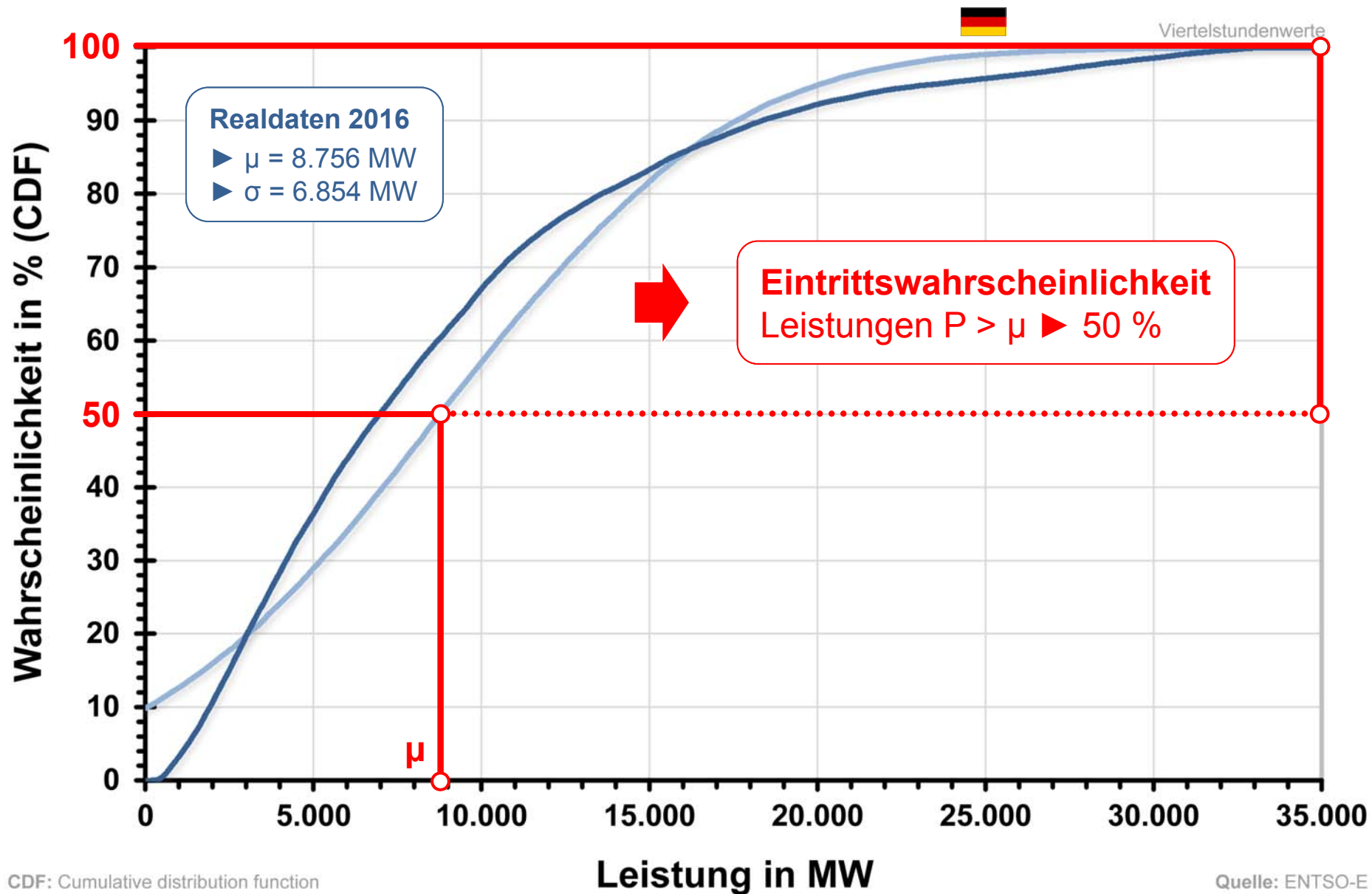


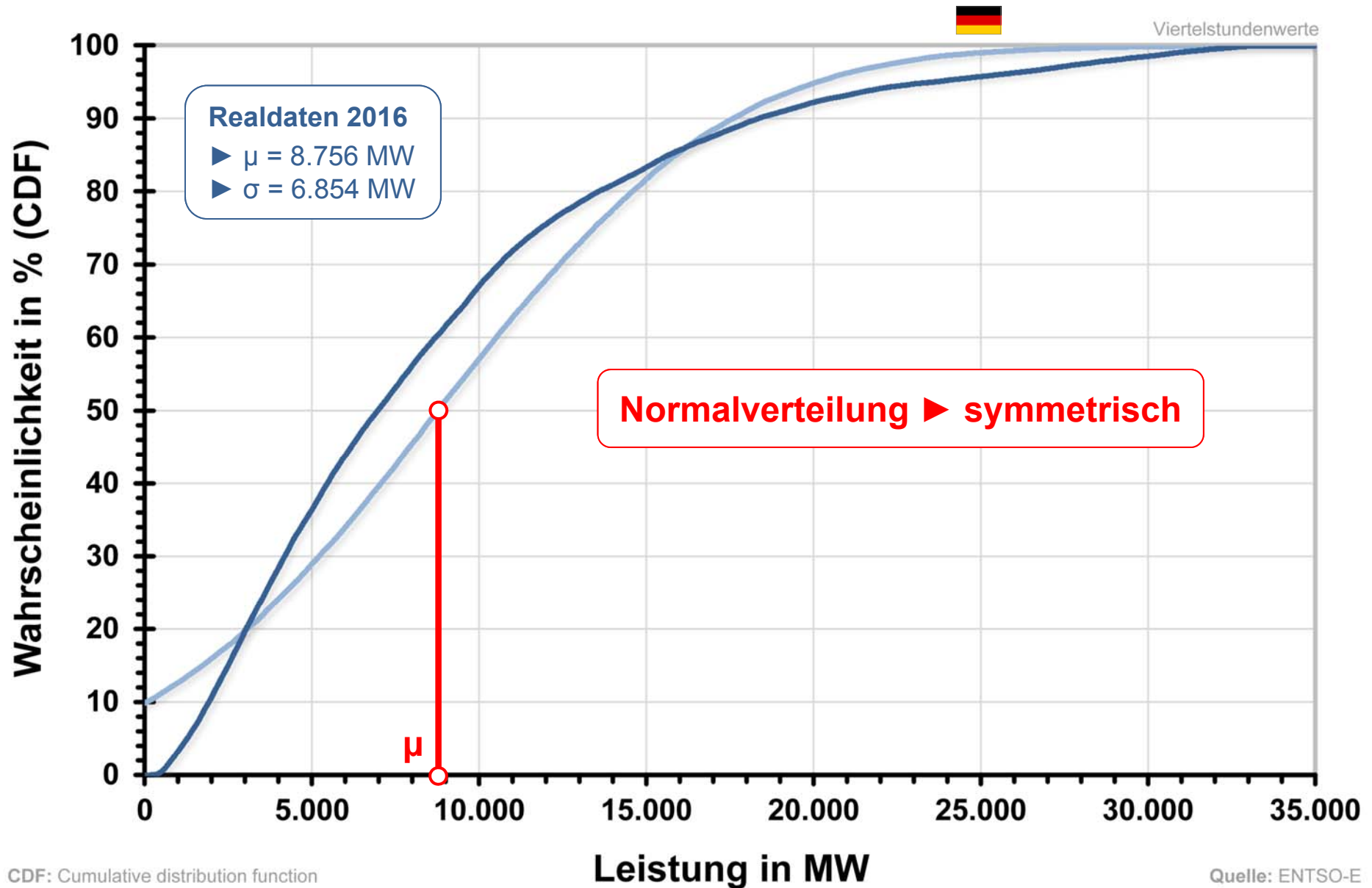


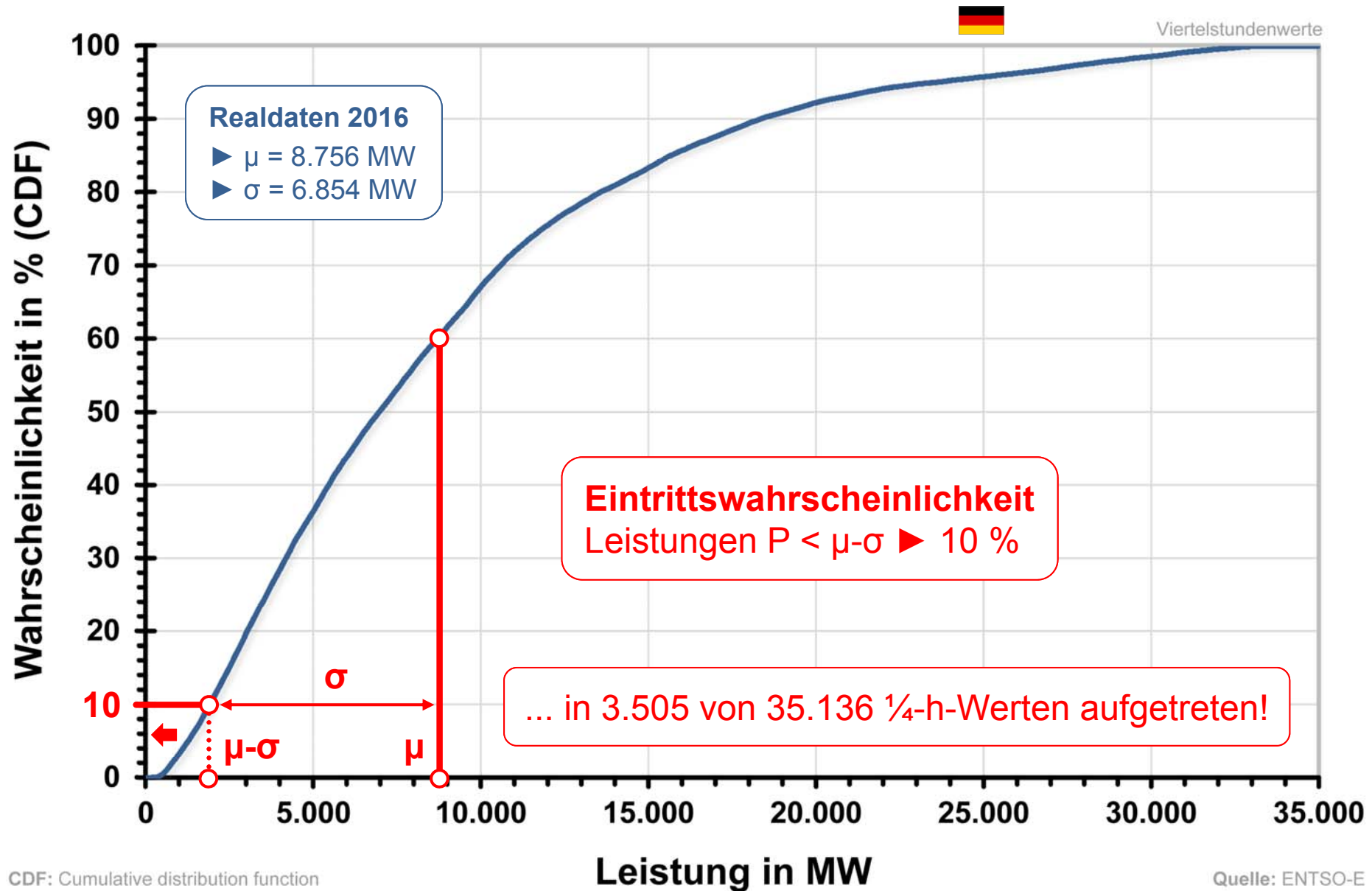


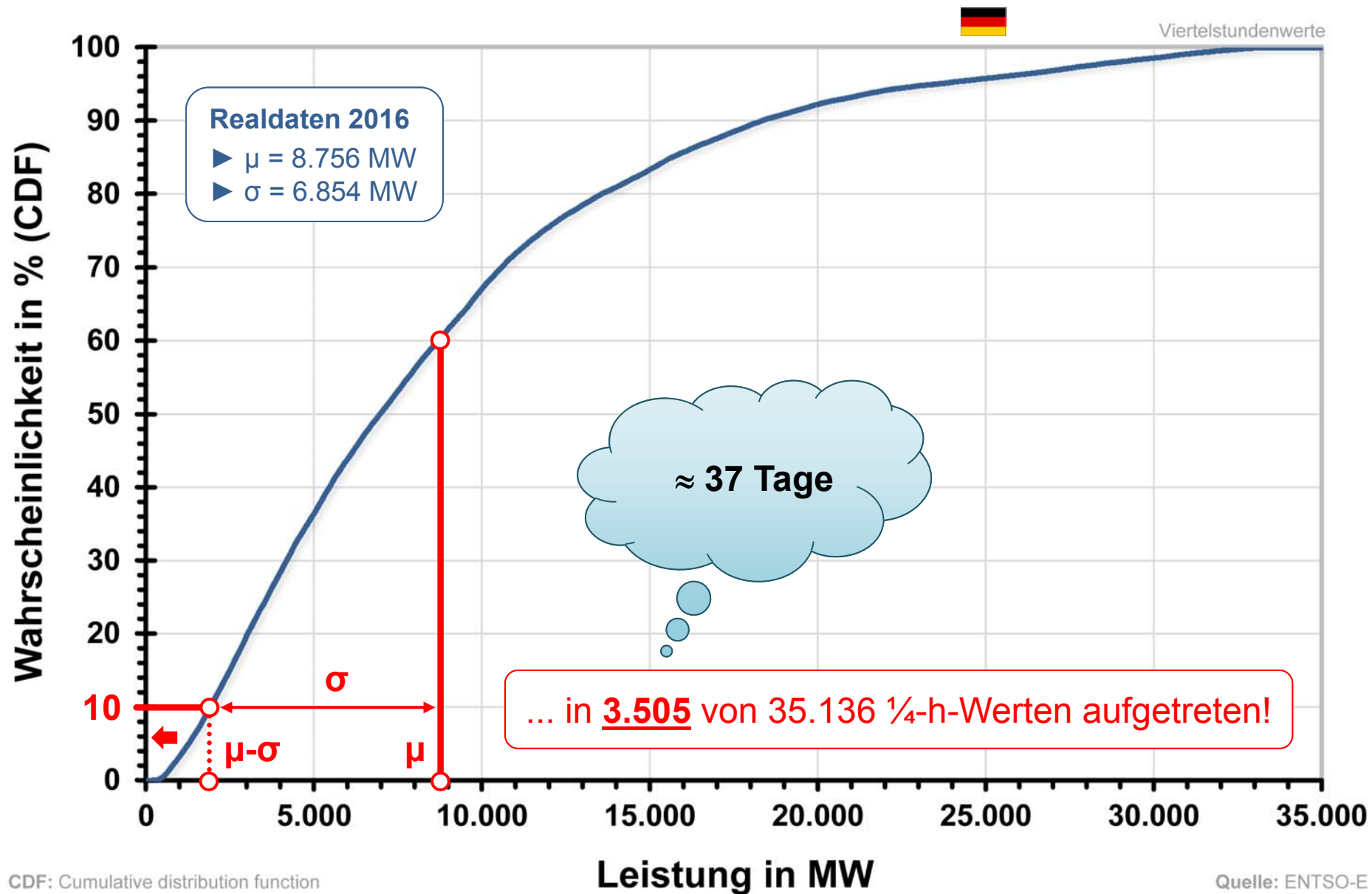




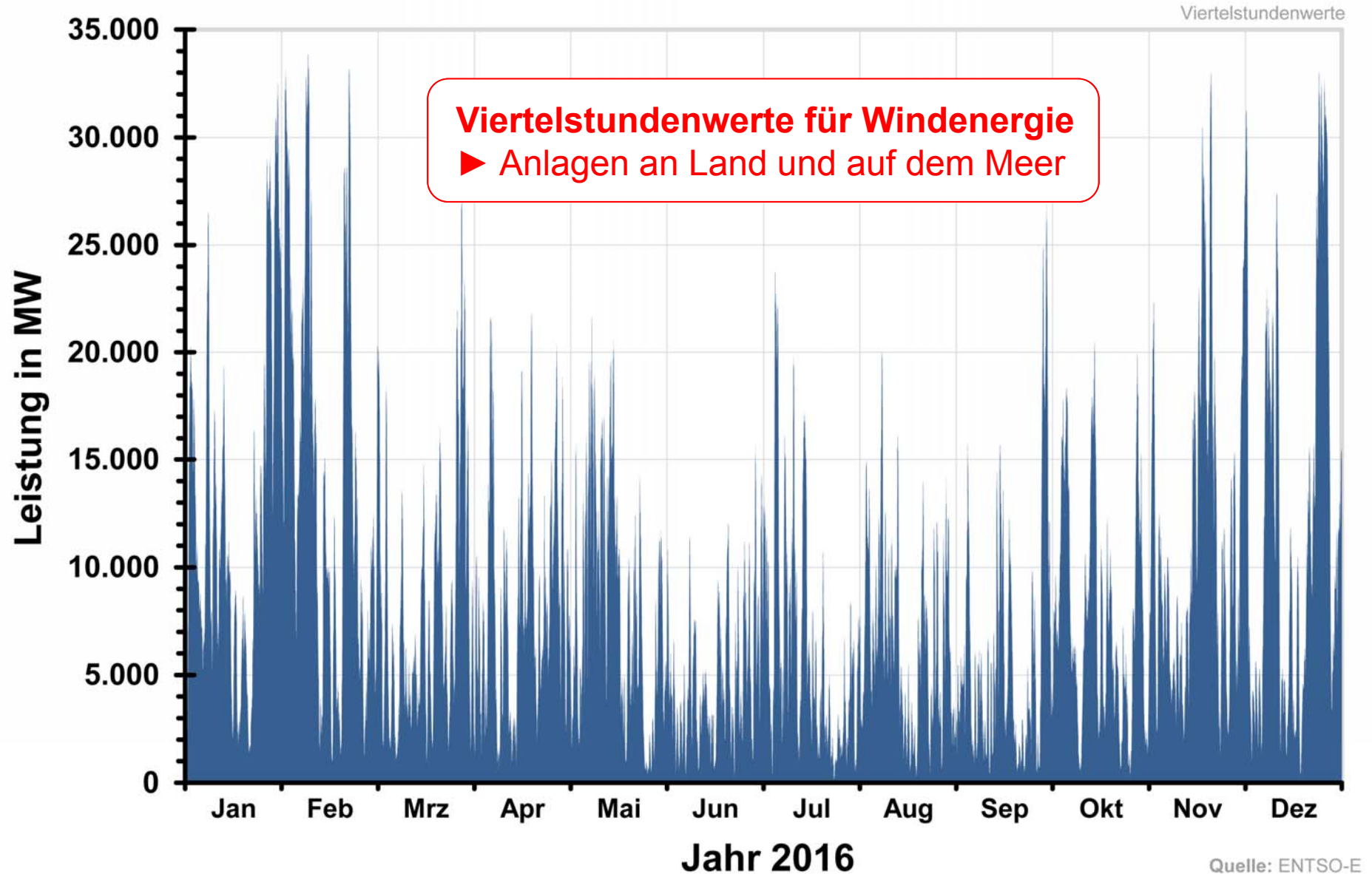


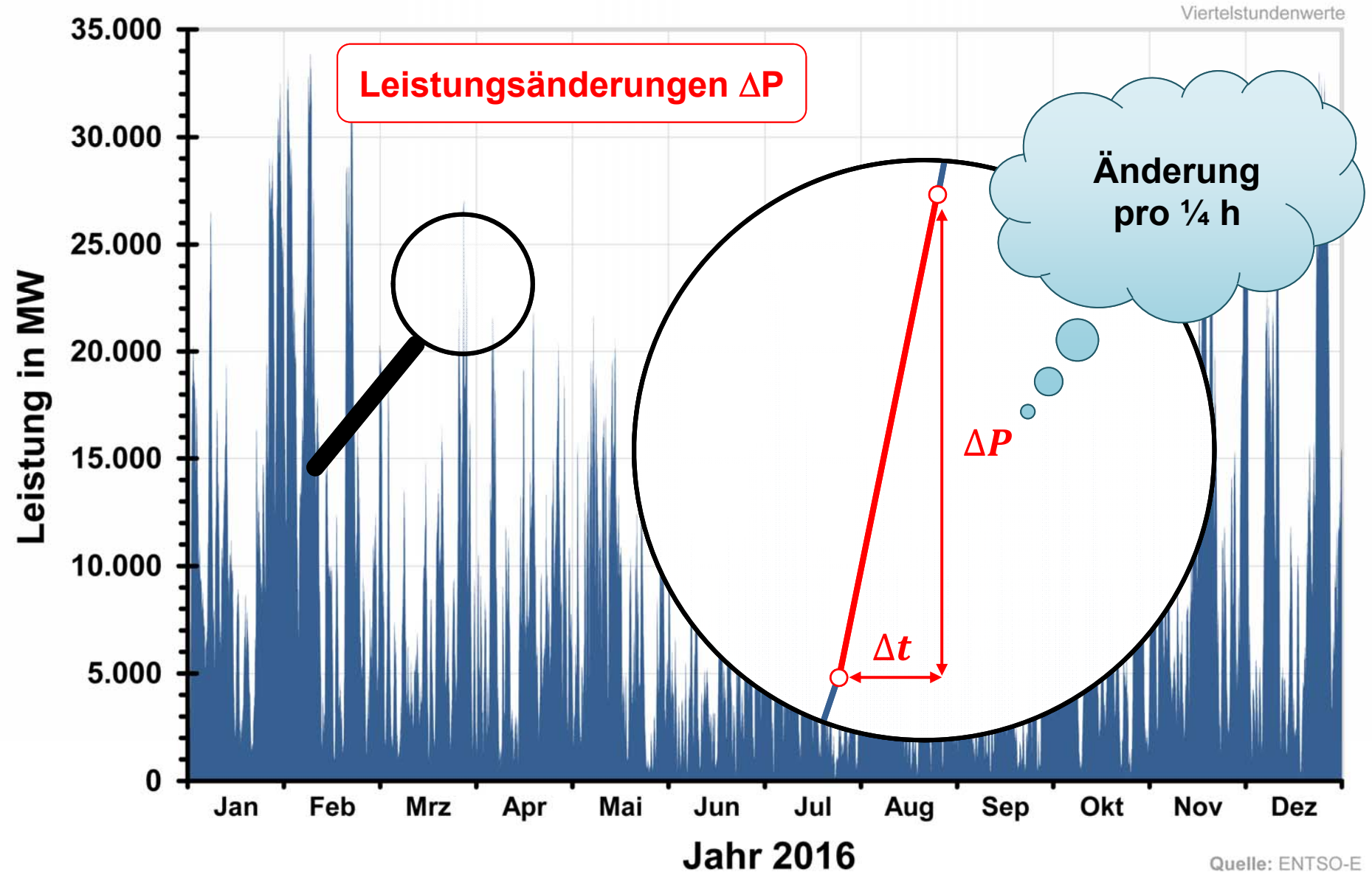


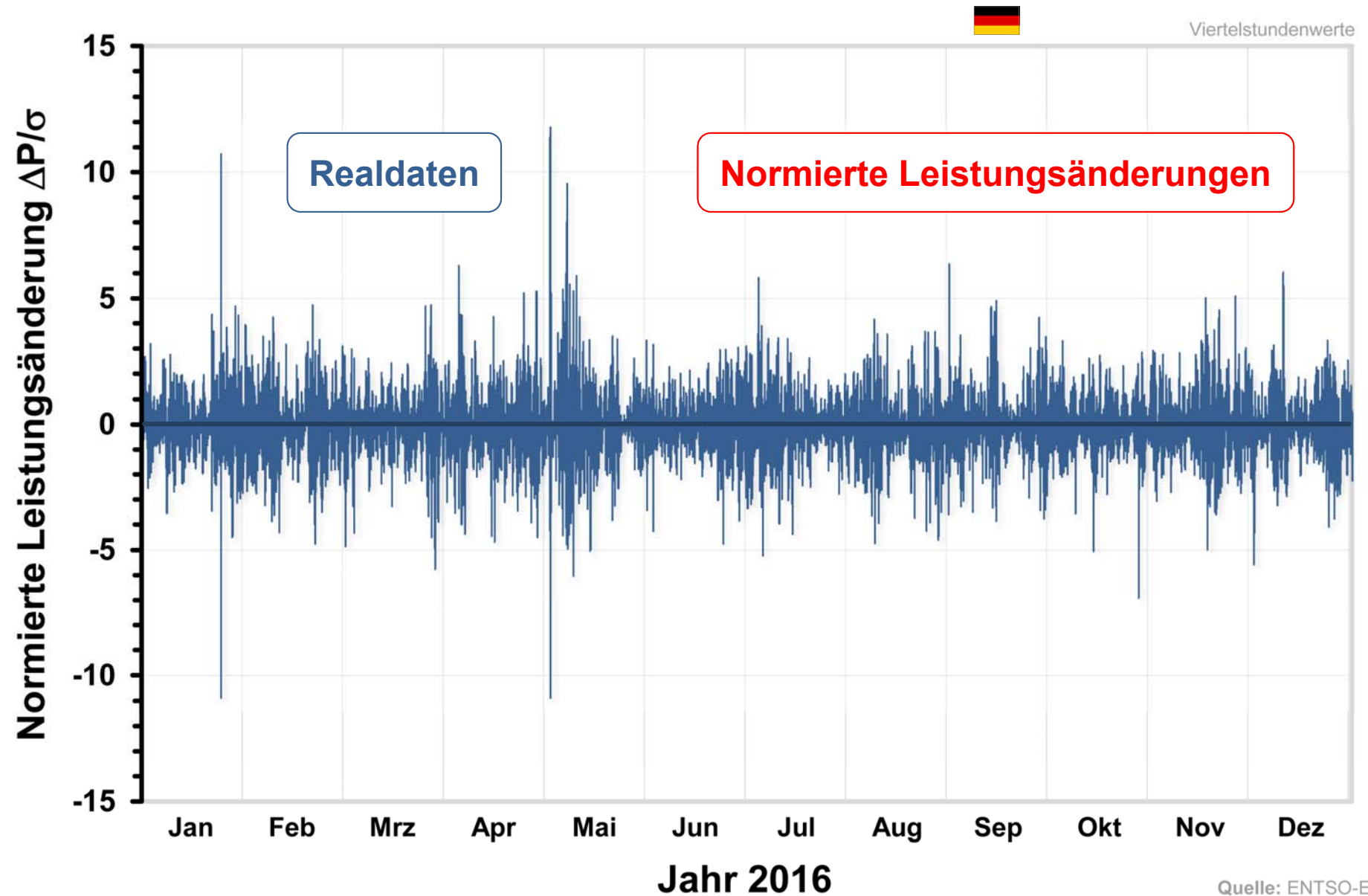


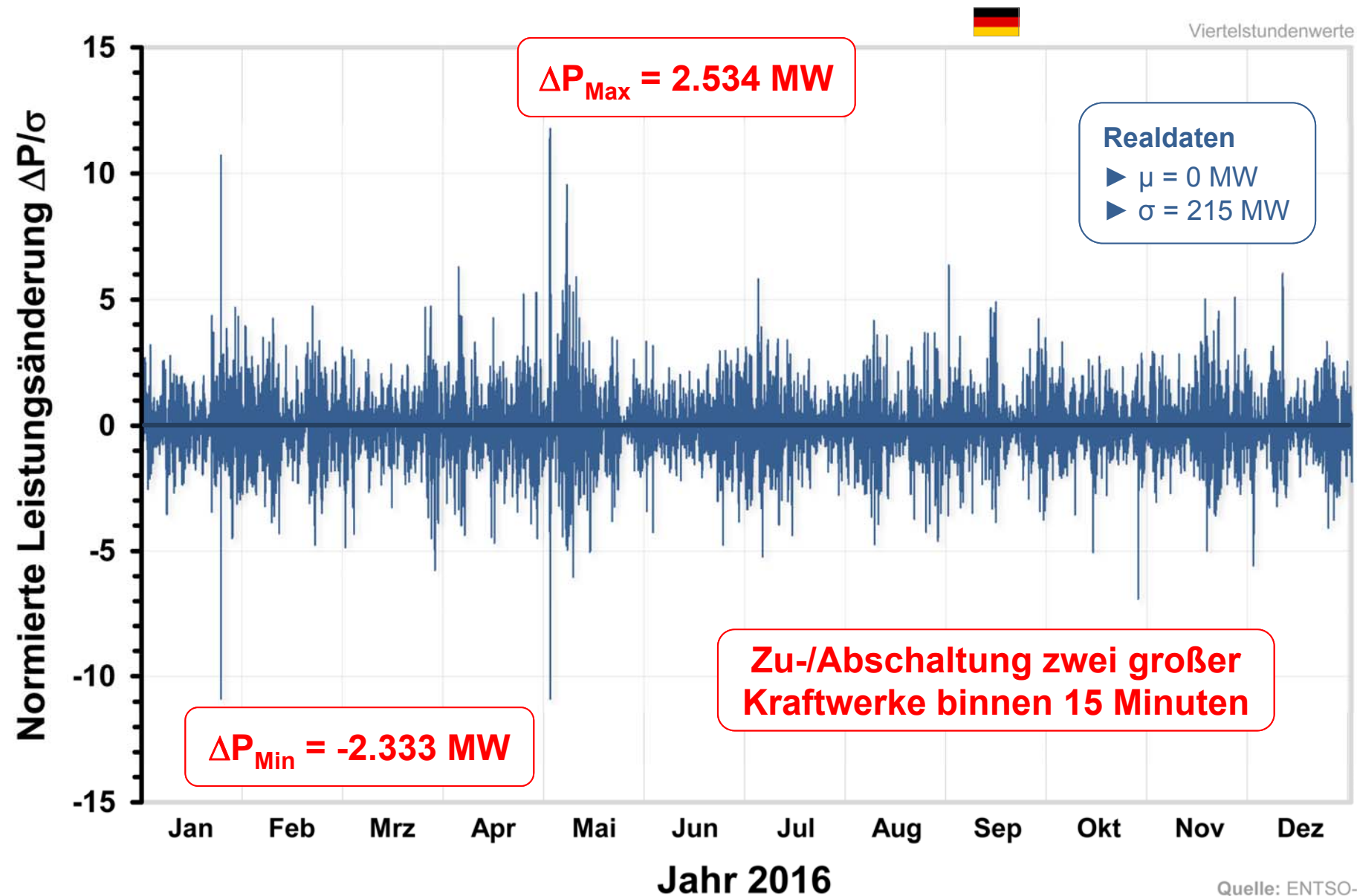


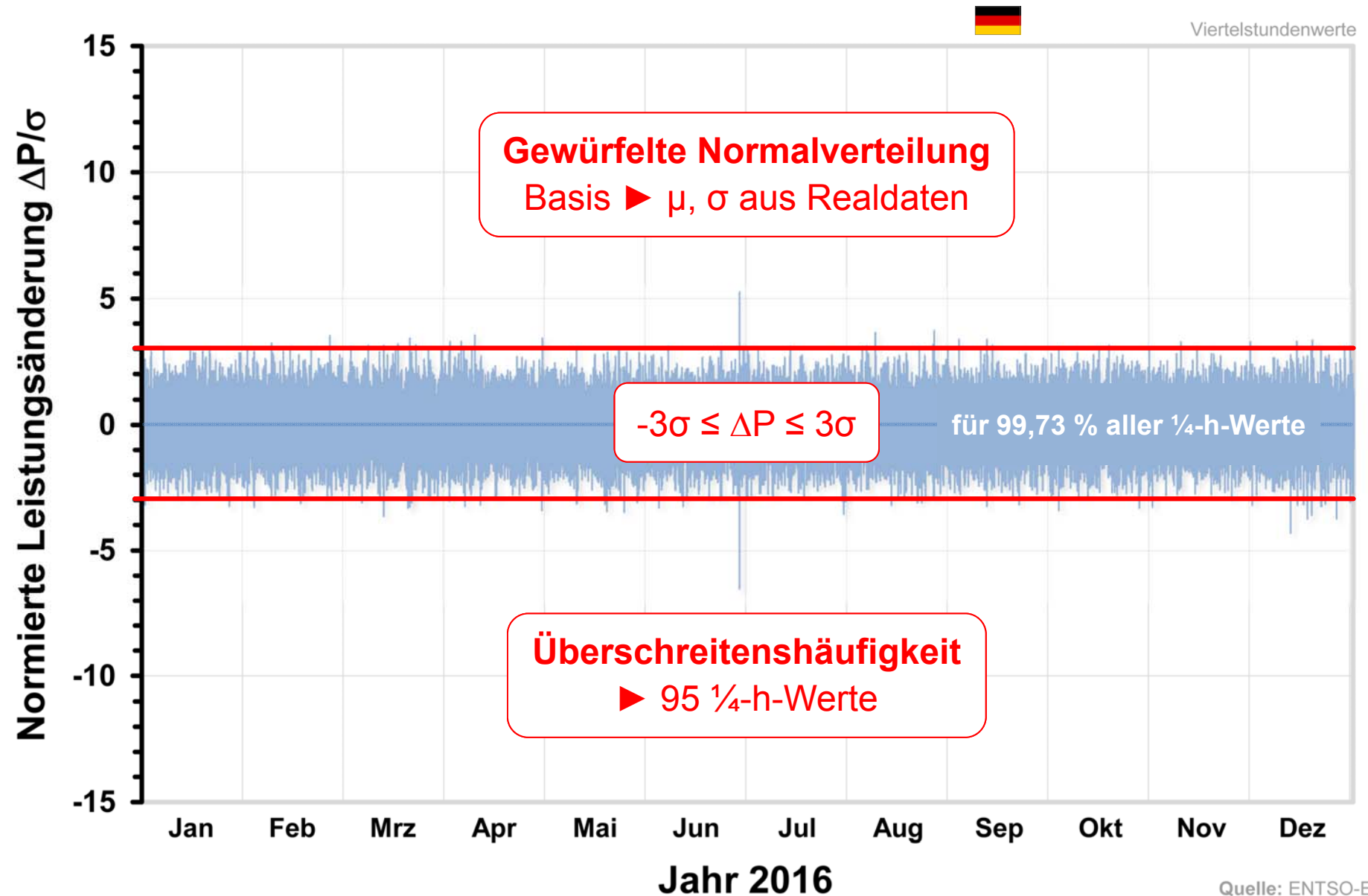
Minimalwerte: Energiemeteorologie

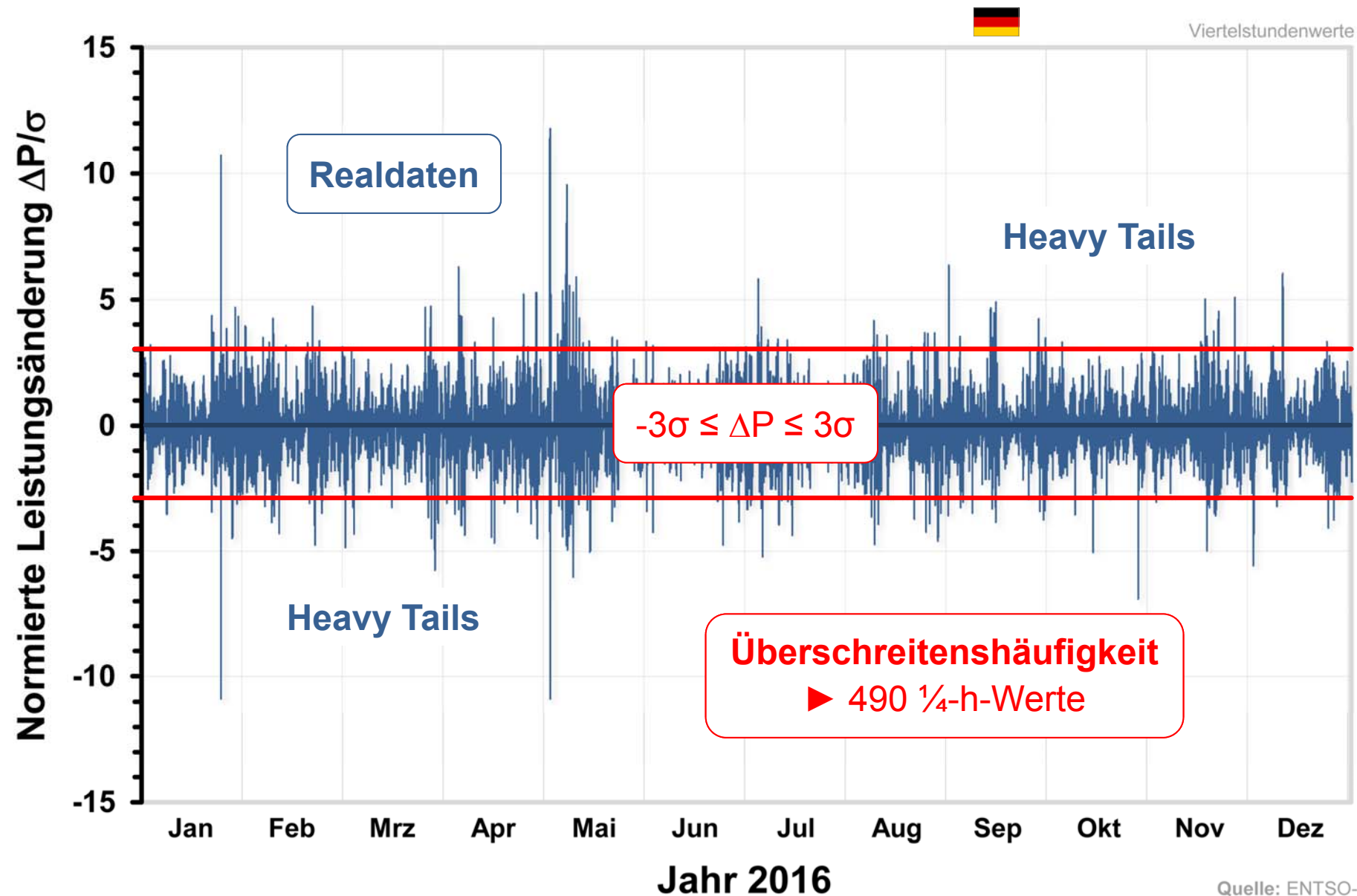


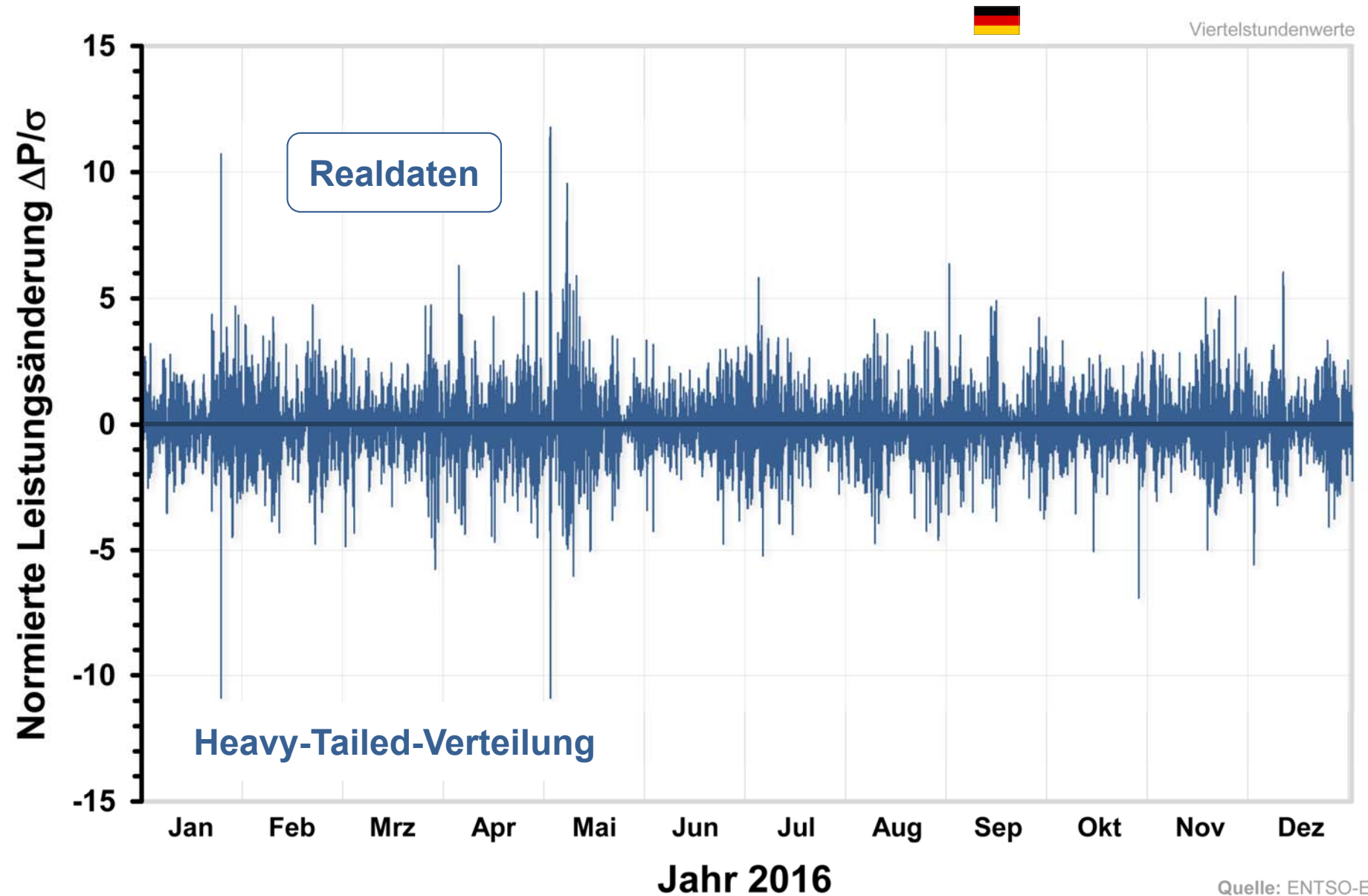


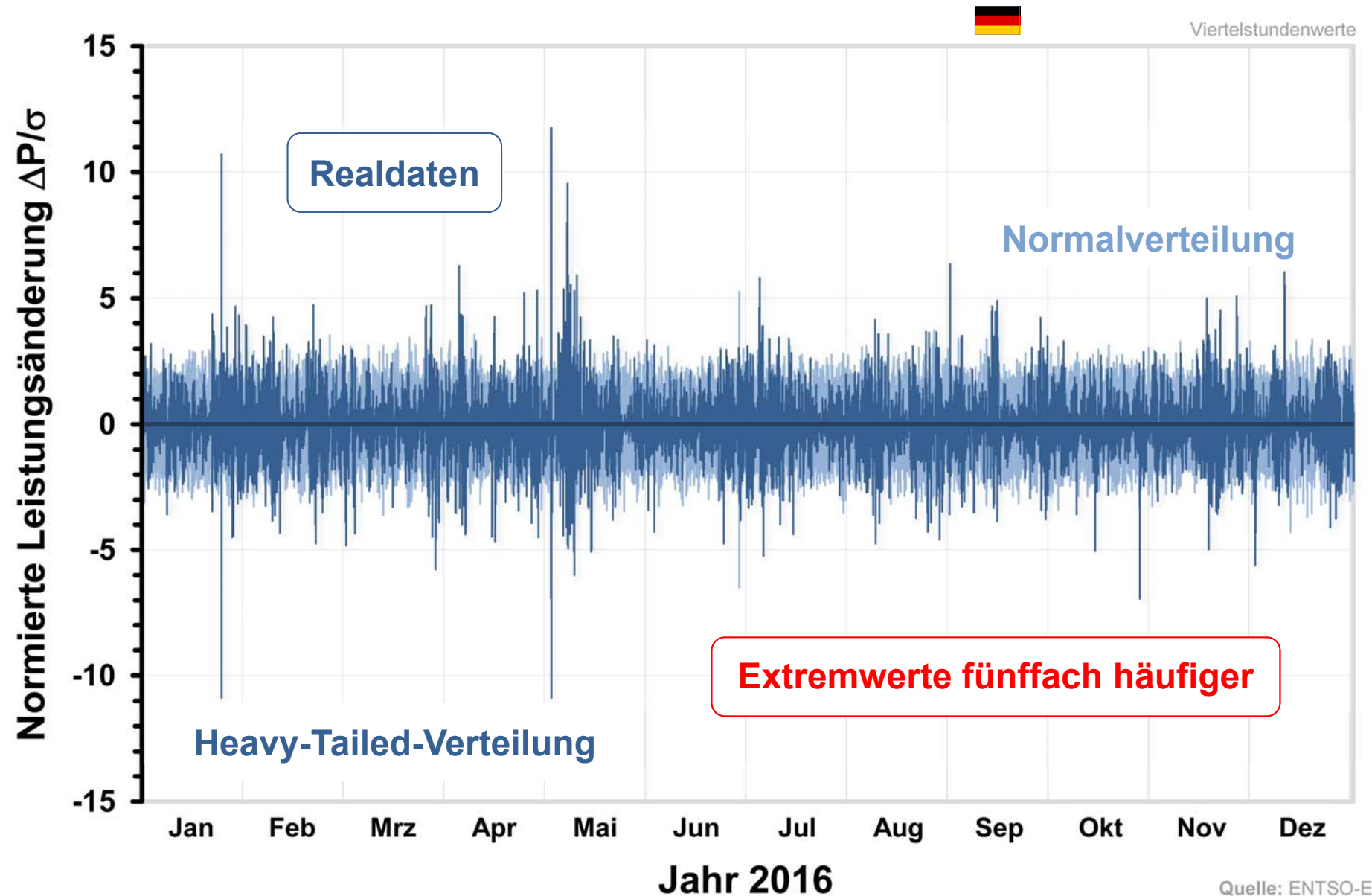


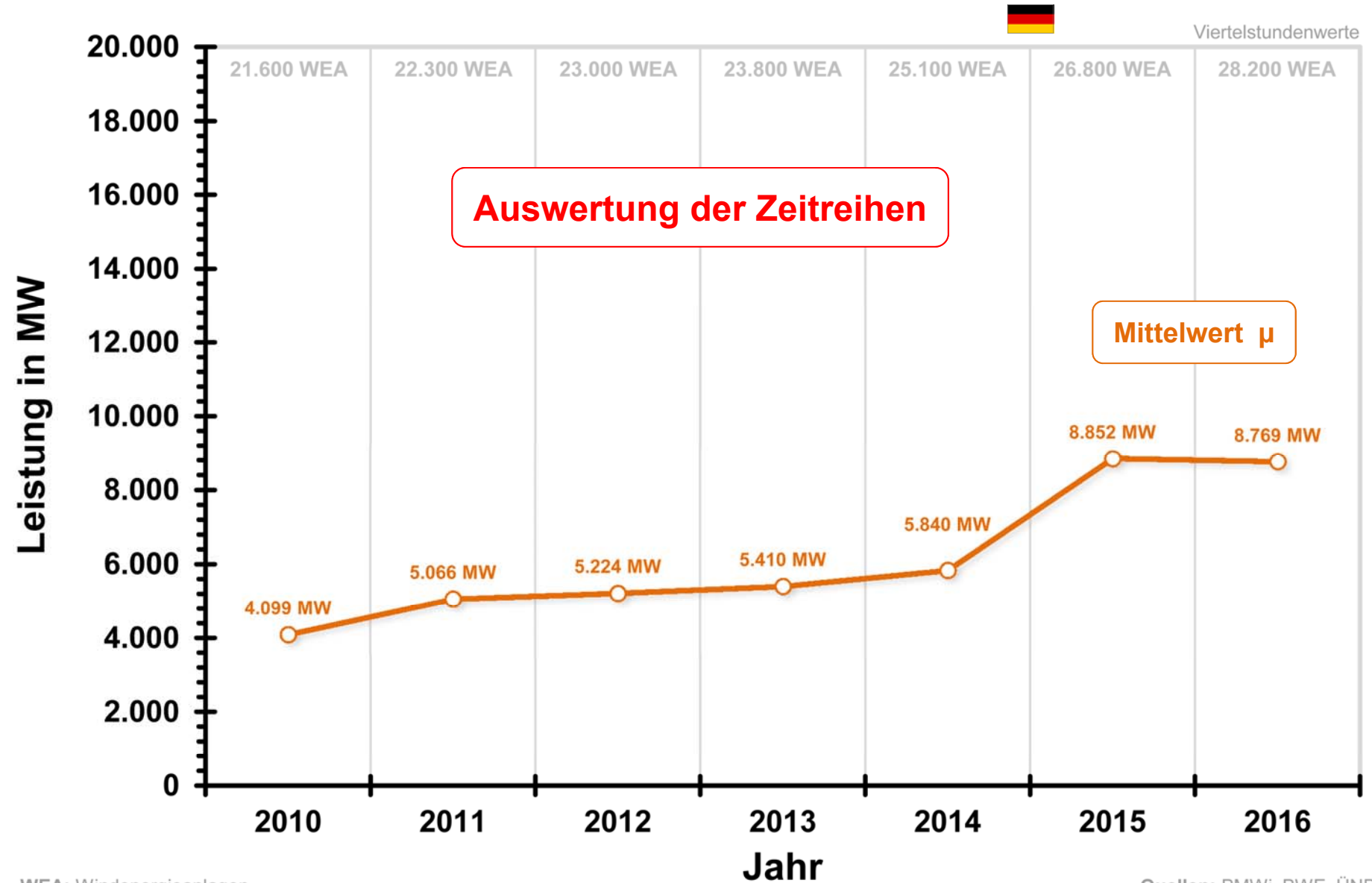


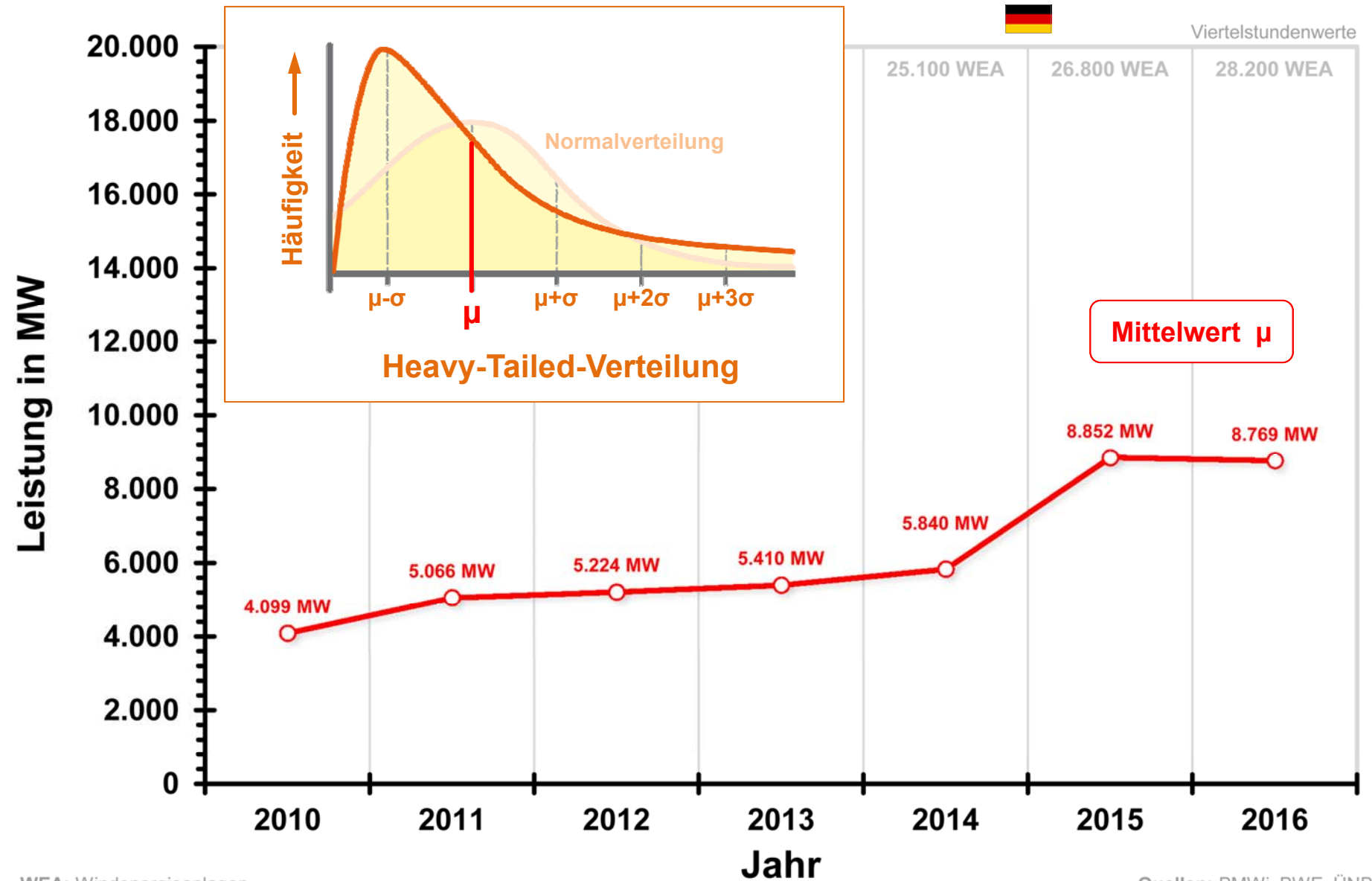






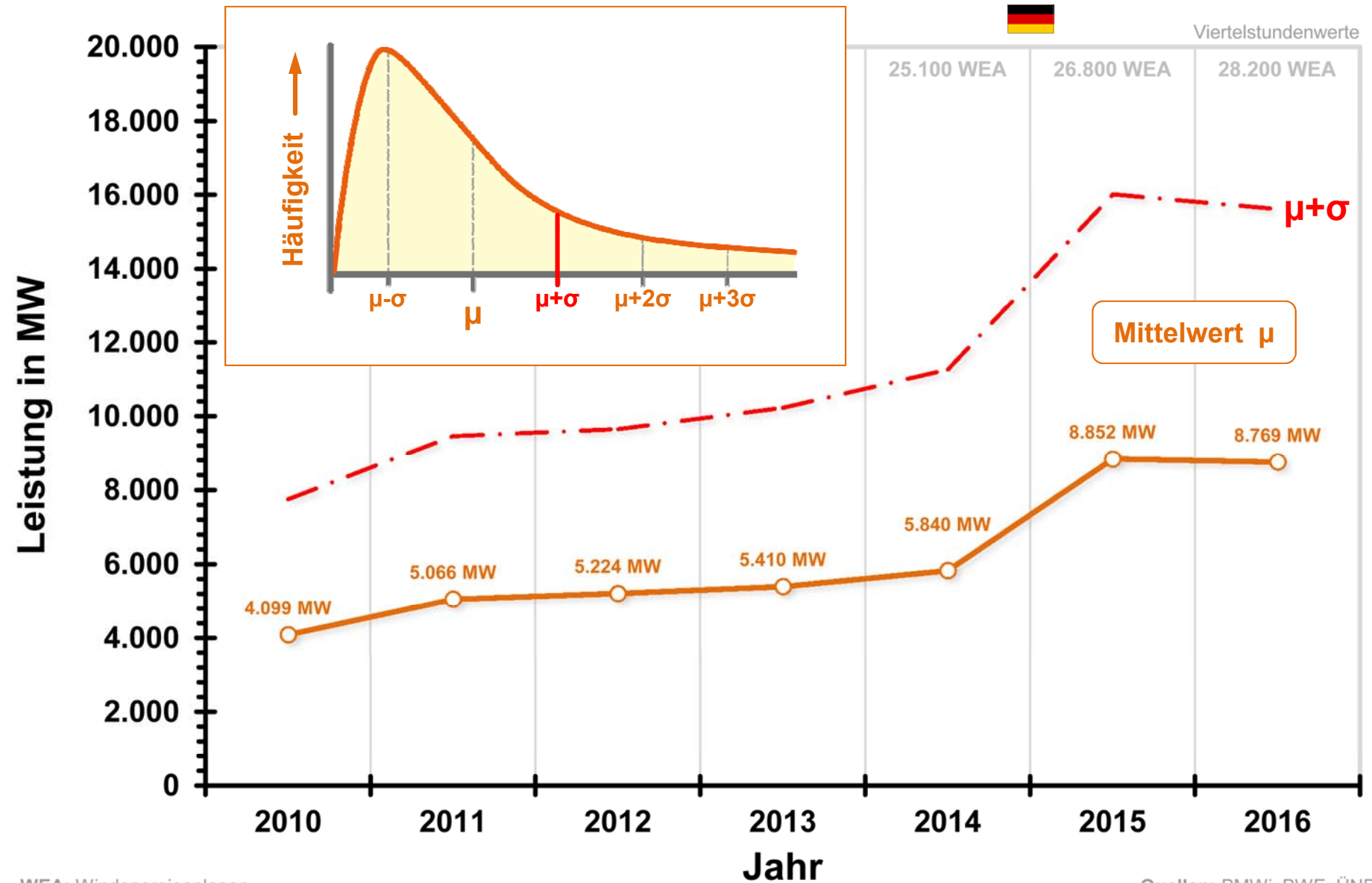


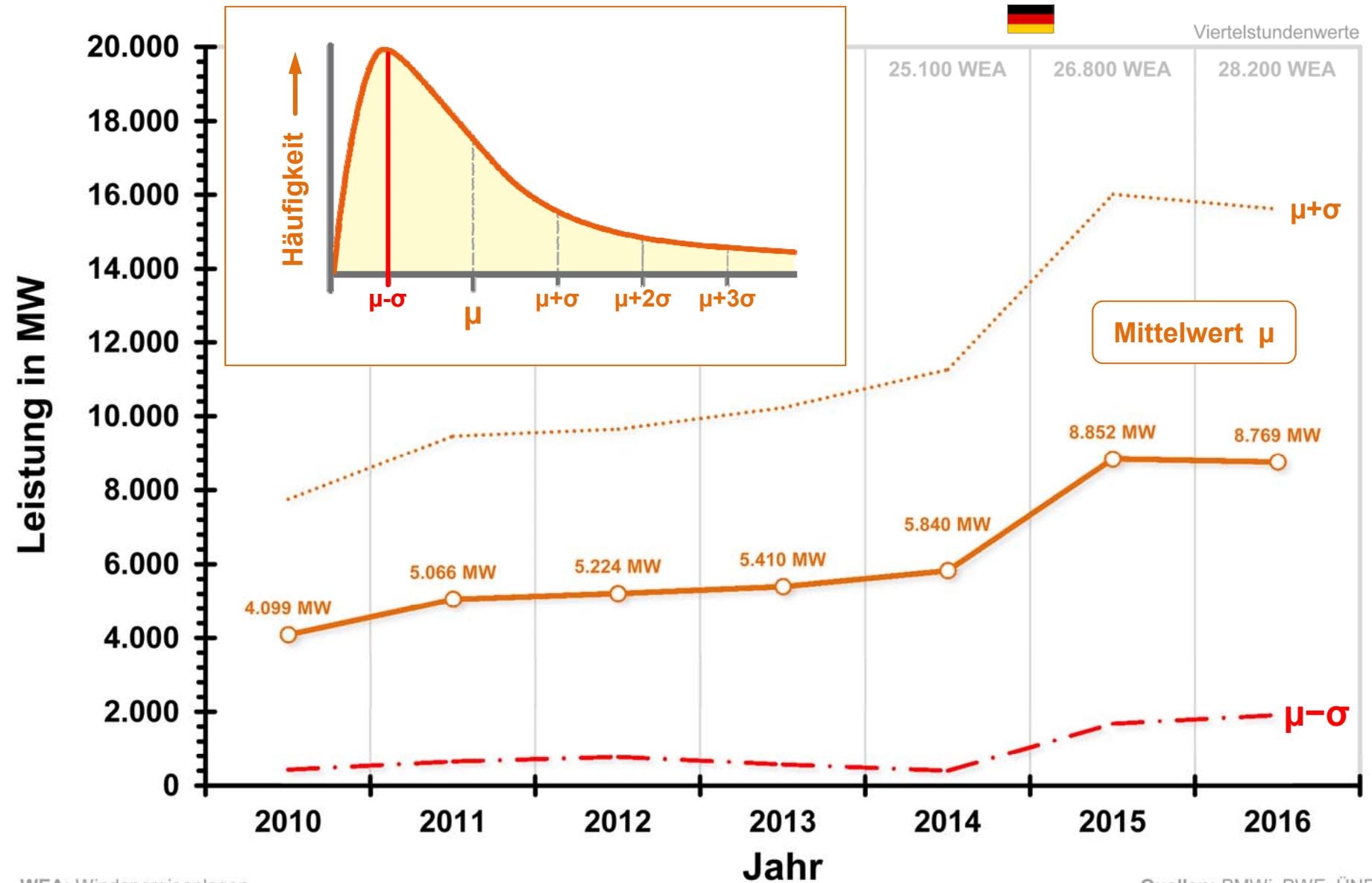


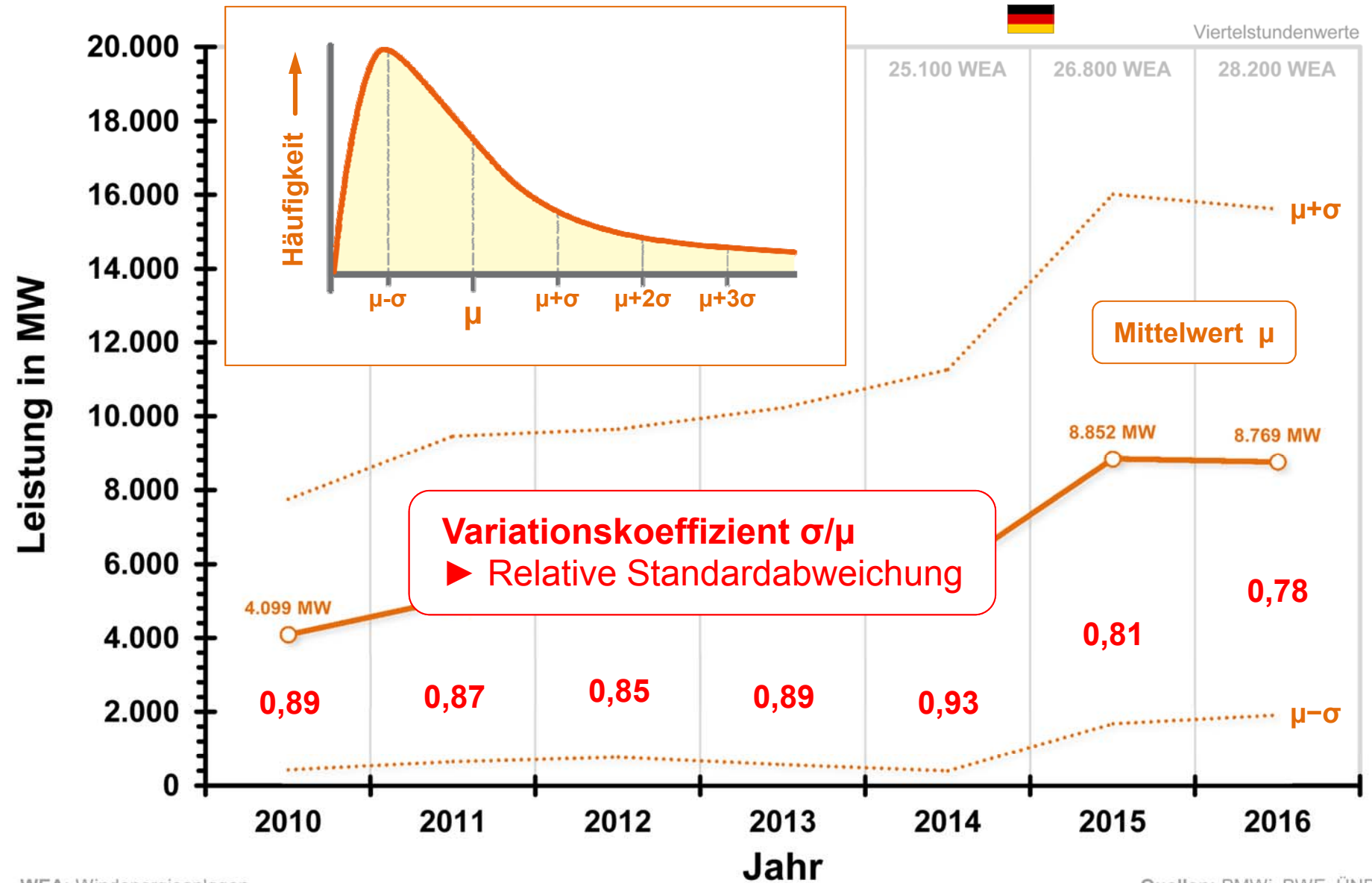


WEA: Windenergieanlagen

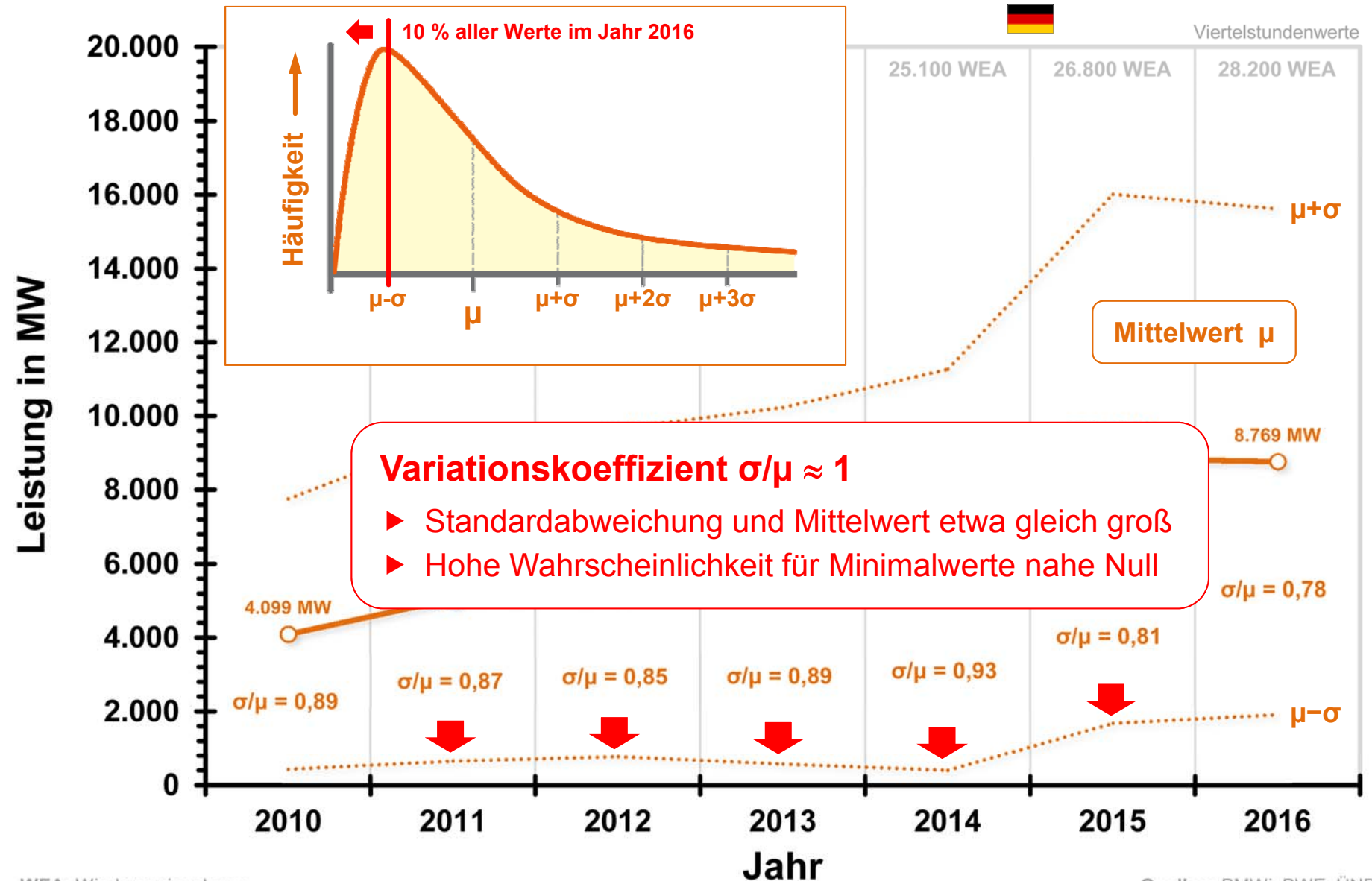
Quellen: BMWi, BWE, ÜNB





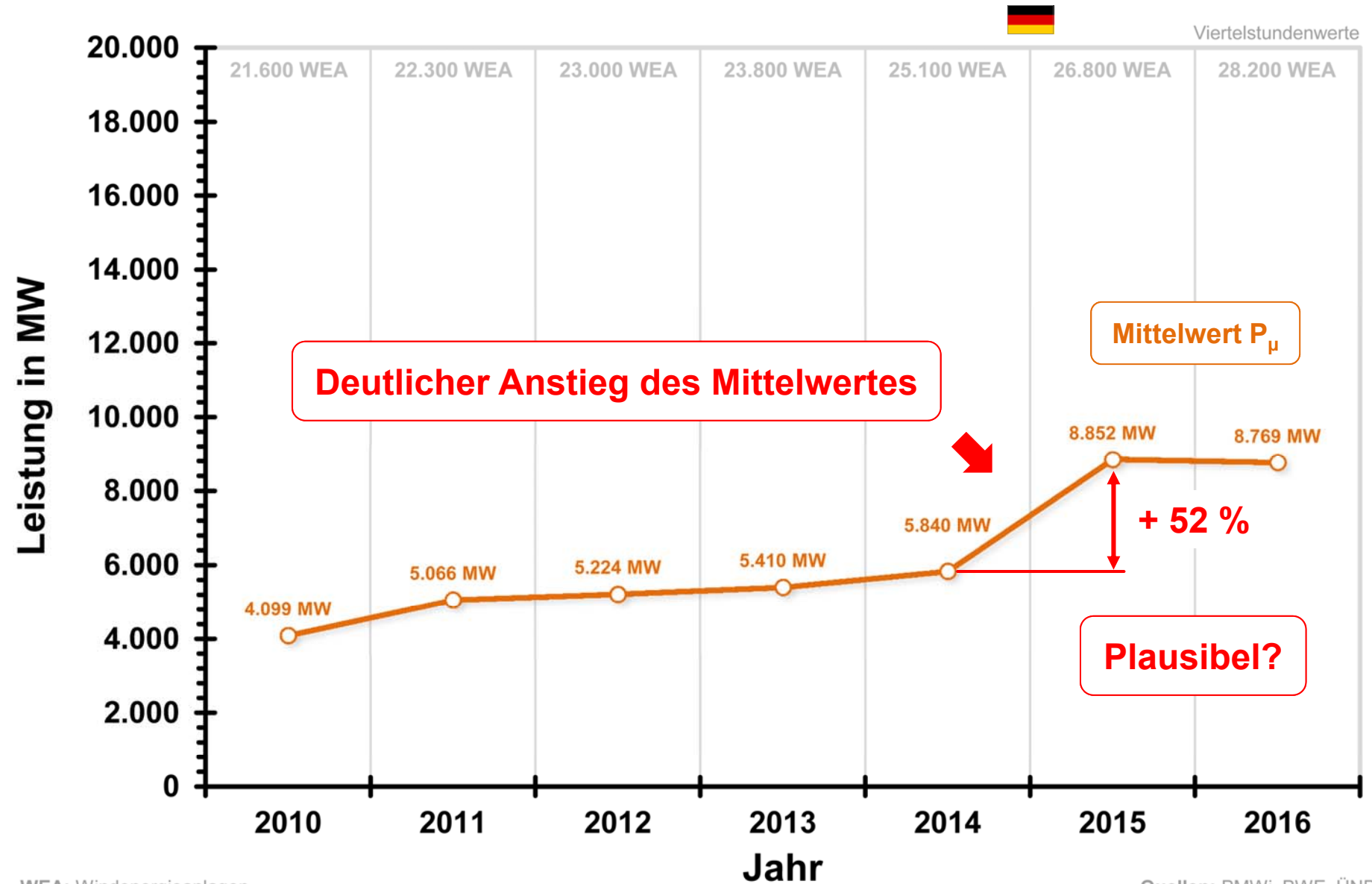


WEA: Windenergieanlagen



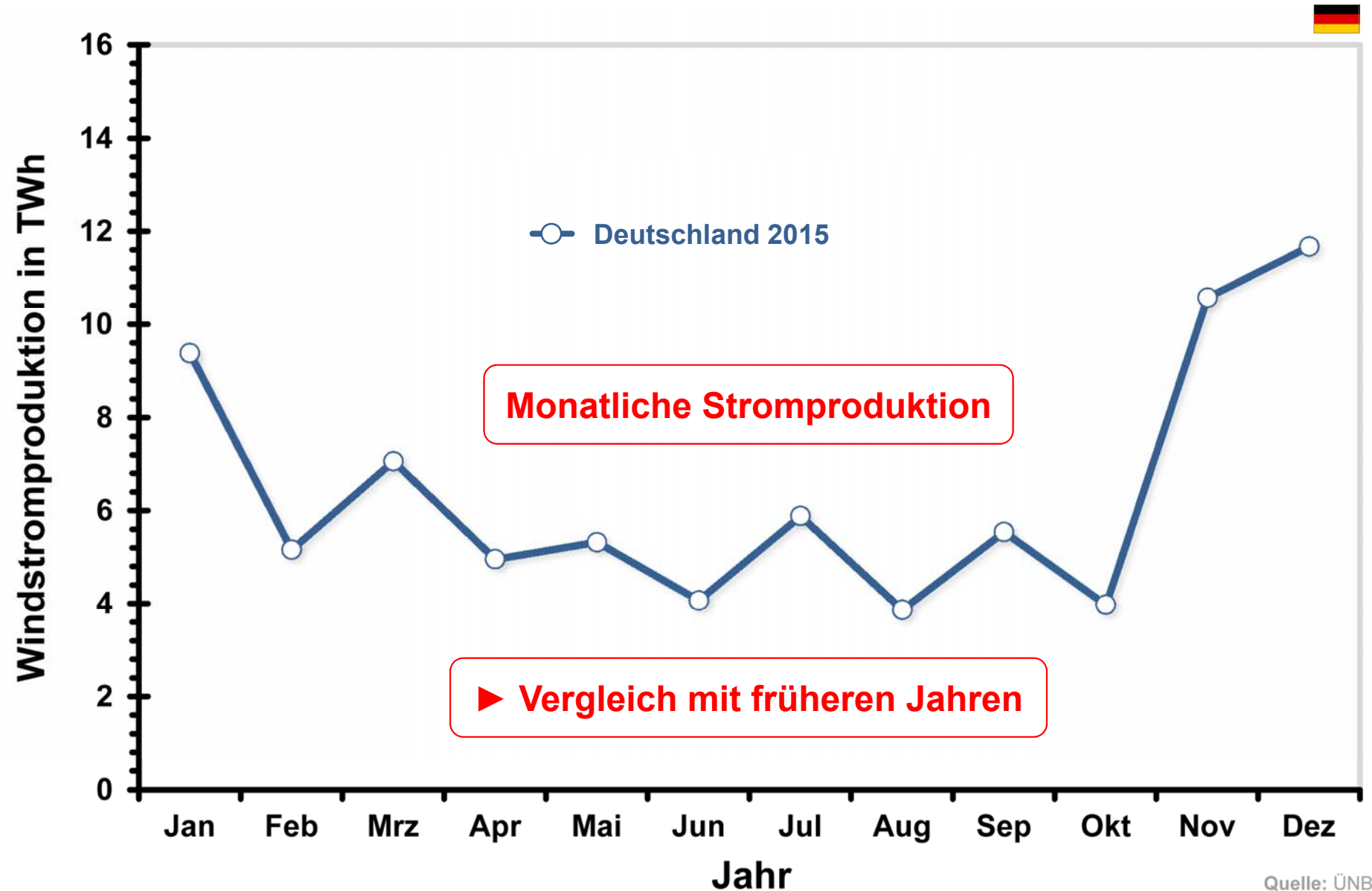
Erkenntnisse

- 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

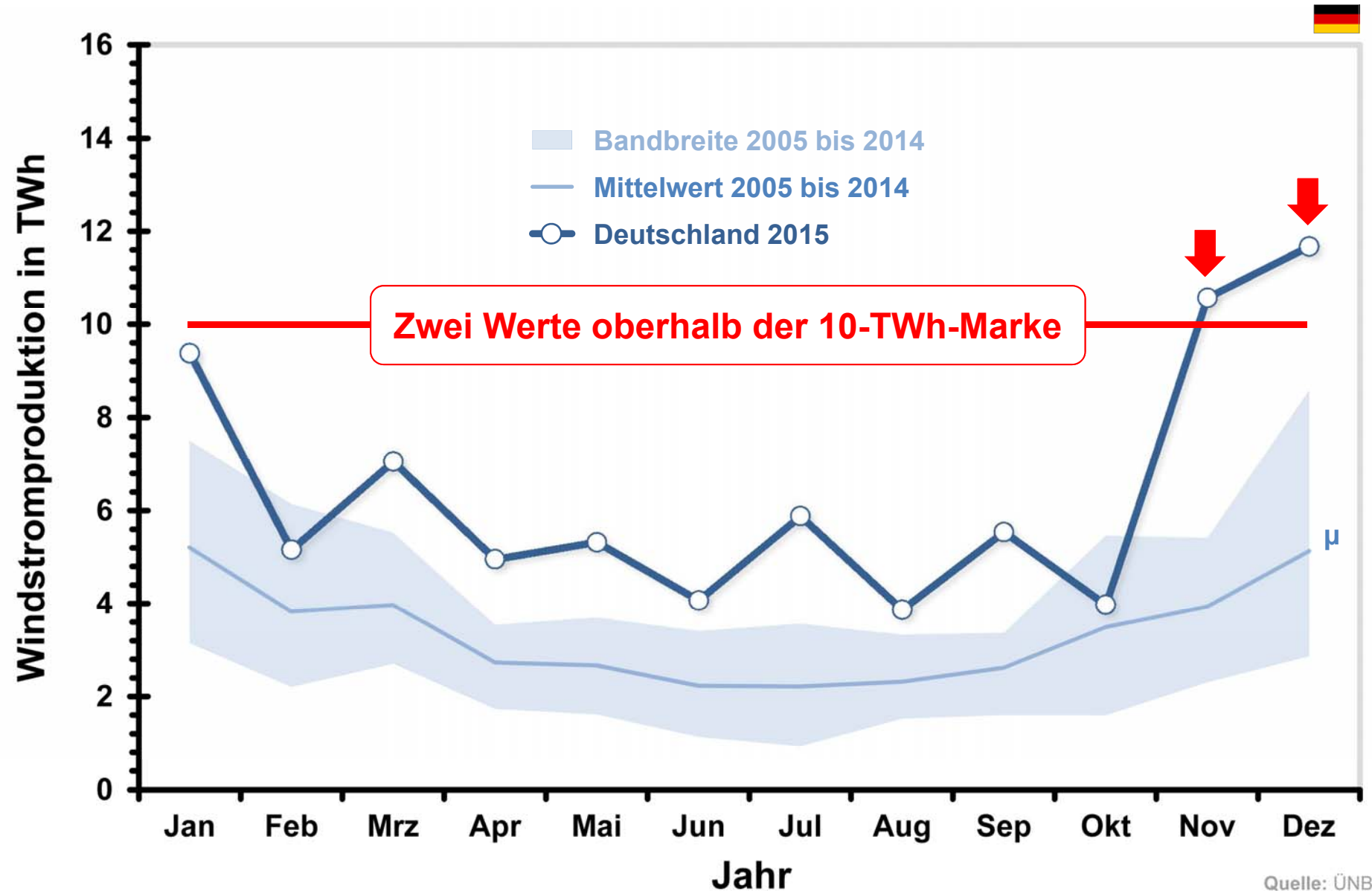


WEA: Windenergieanlagen

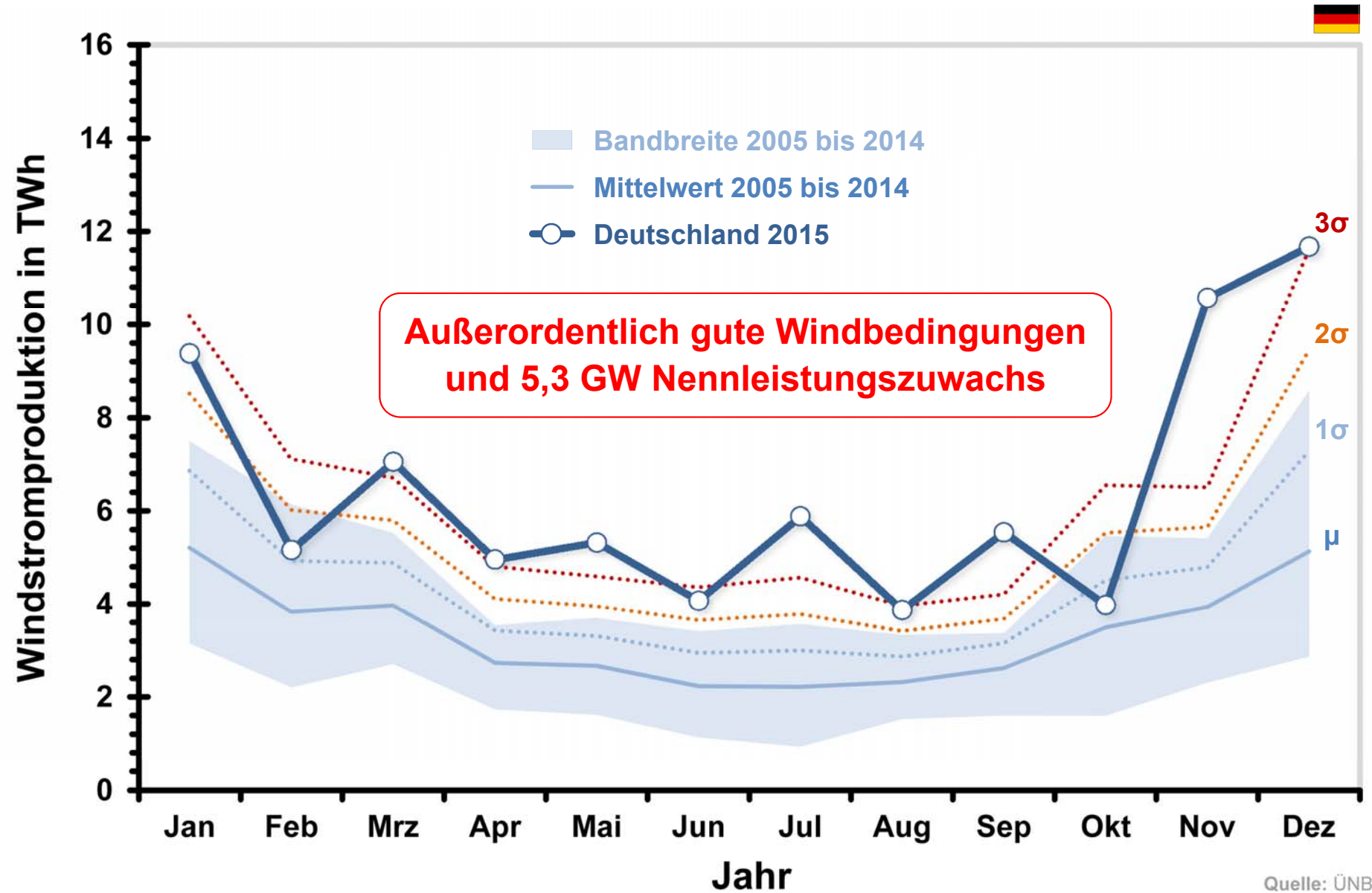
Quellen: BMWi, BWE, ÜNB



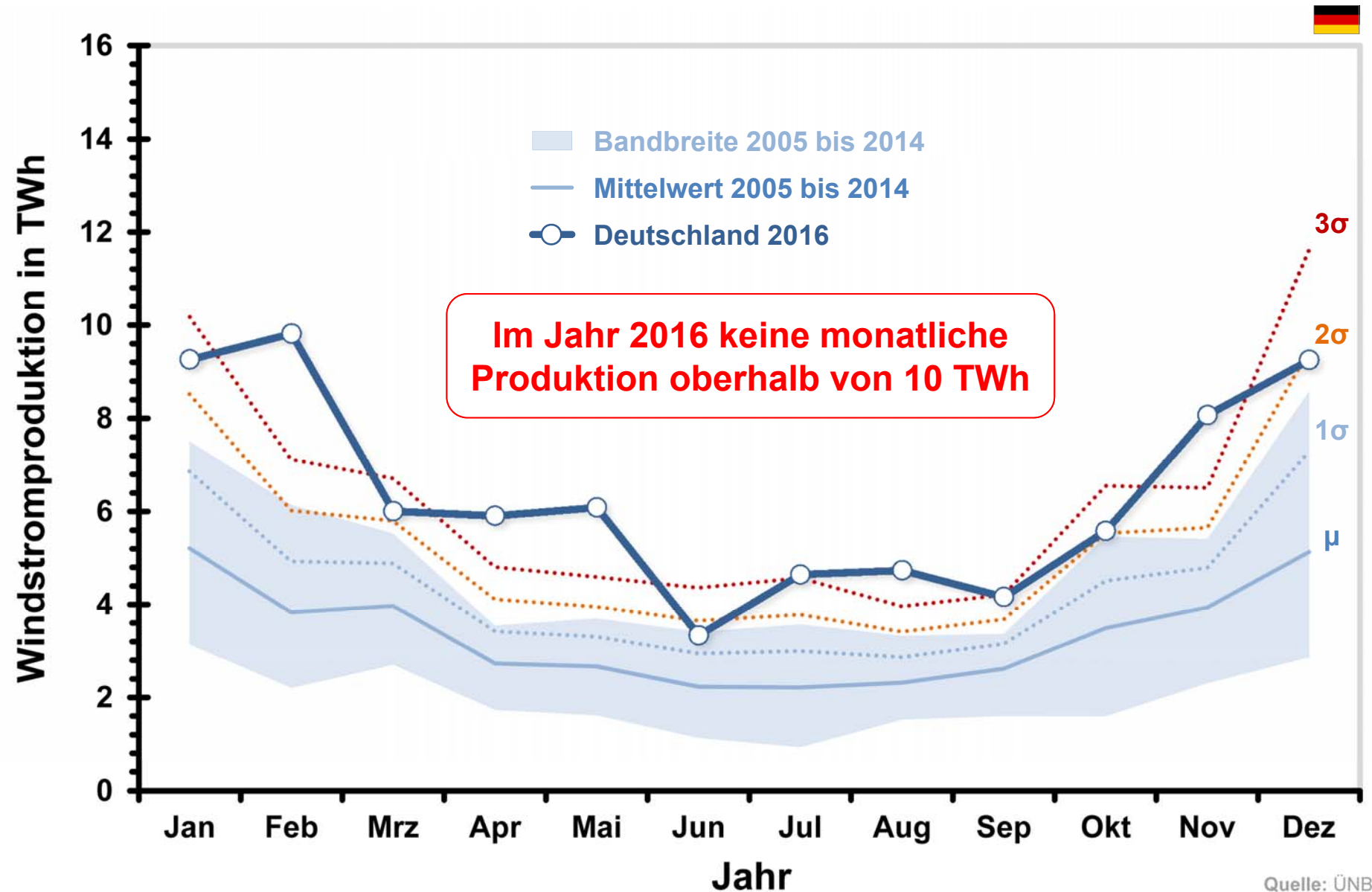
Quelle: ÜNB

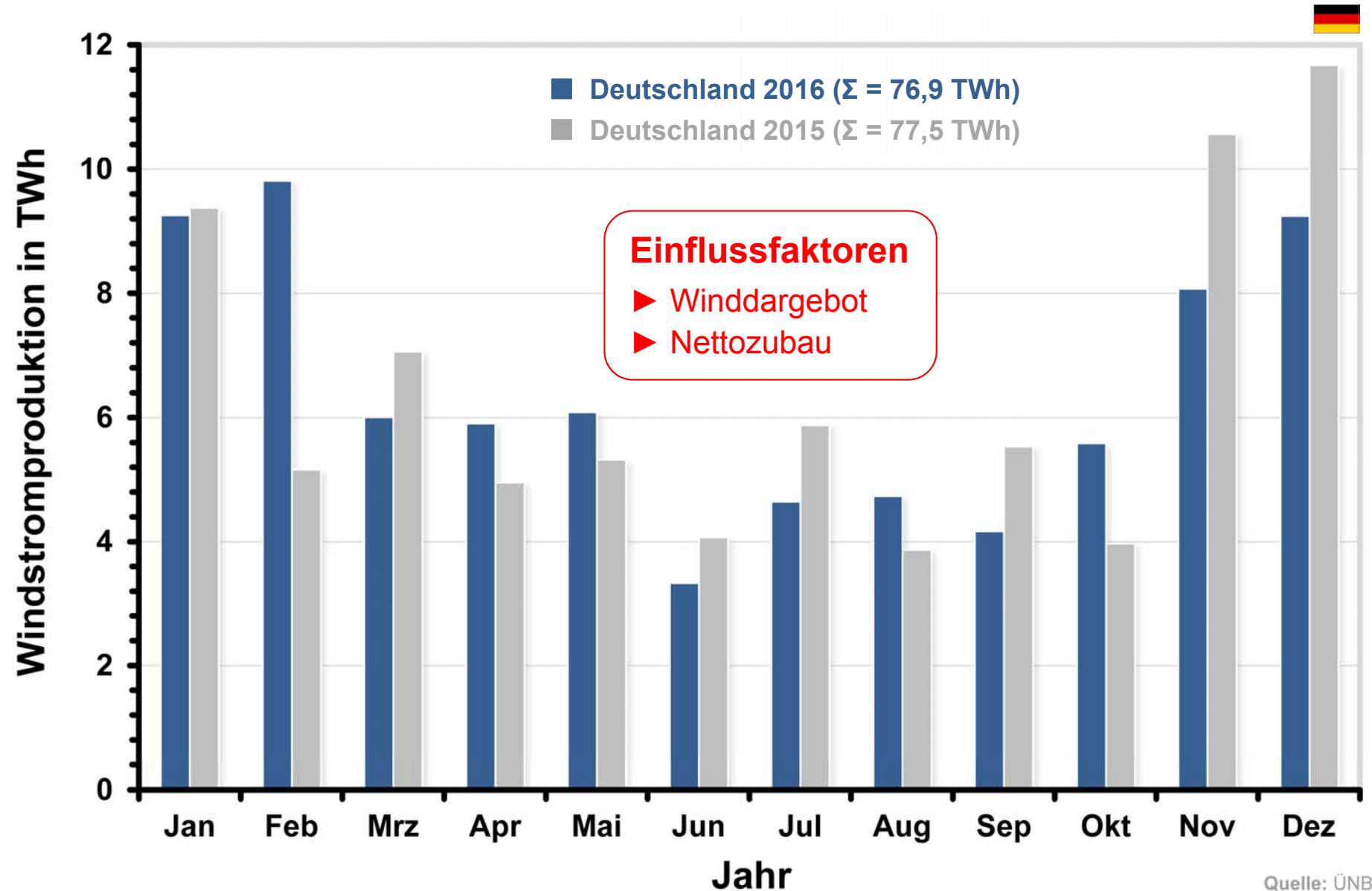


Quelle: ÜNB



Quelle: ÜNB





Erkenntnisse

- Außerordentliches Windjahr 2015 mit ausgeprägter Produktion deutlich über langjährigen Durchschnittswerten (2005 bis 2014)
- Maximalwerte im November und Dezember 2015 (Allzeithoch)
- Im Jahr 2016 keine Maximalwerte oberhalb von 10 TWh

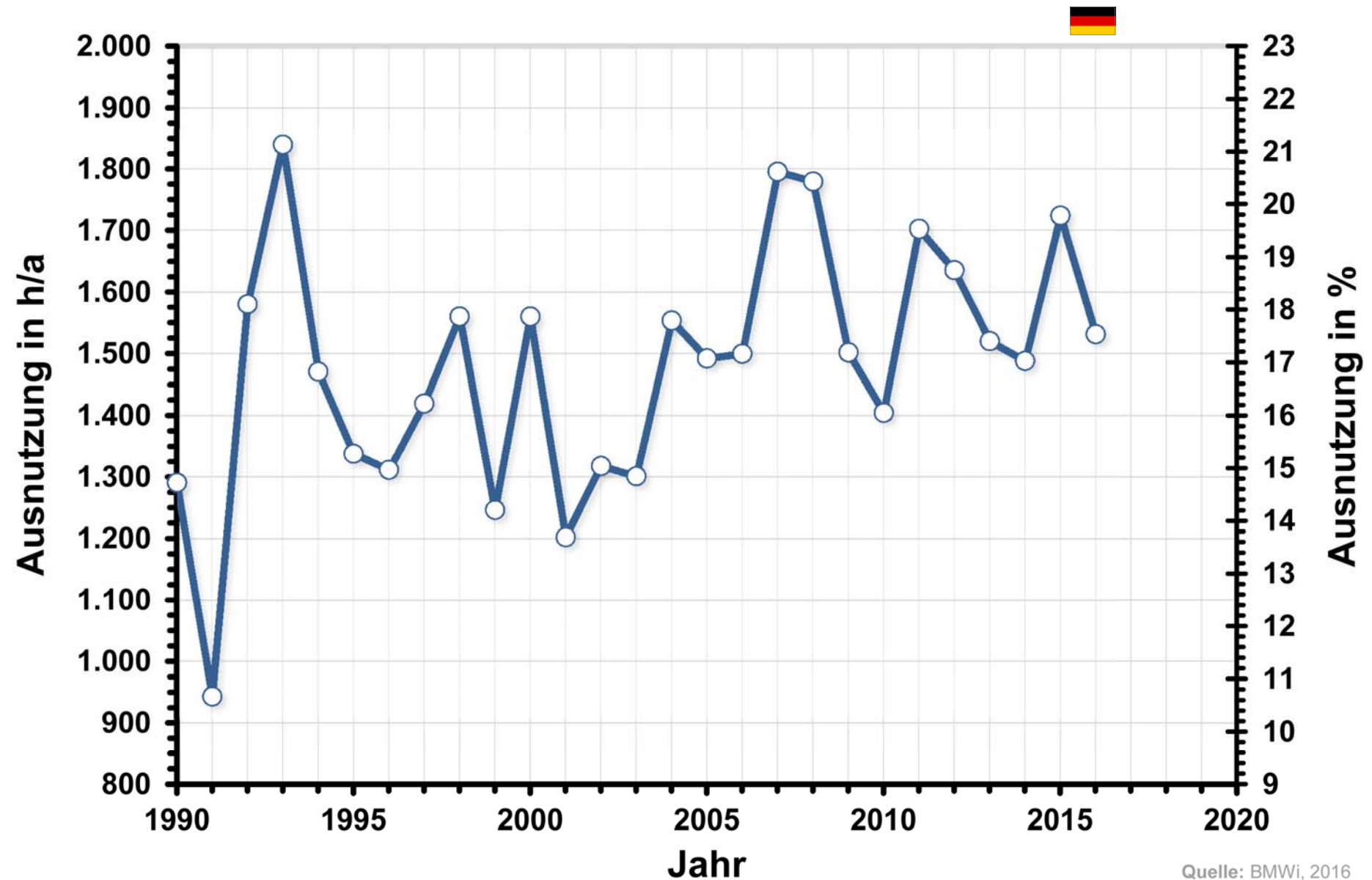
Einflussfaktoren auf monatliche Windstromproduktion

- Winddargebot des betrachteten Jahres (Energiemeteorologie)
- Zubau und Rückbau von Windenergieanlagen im Jahresverlauf

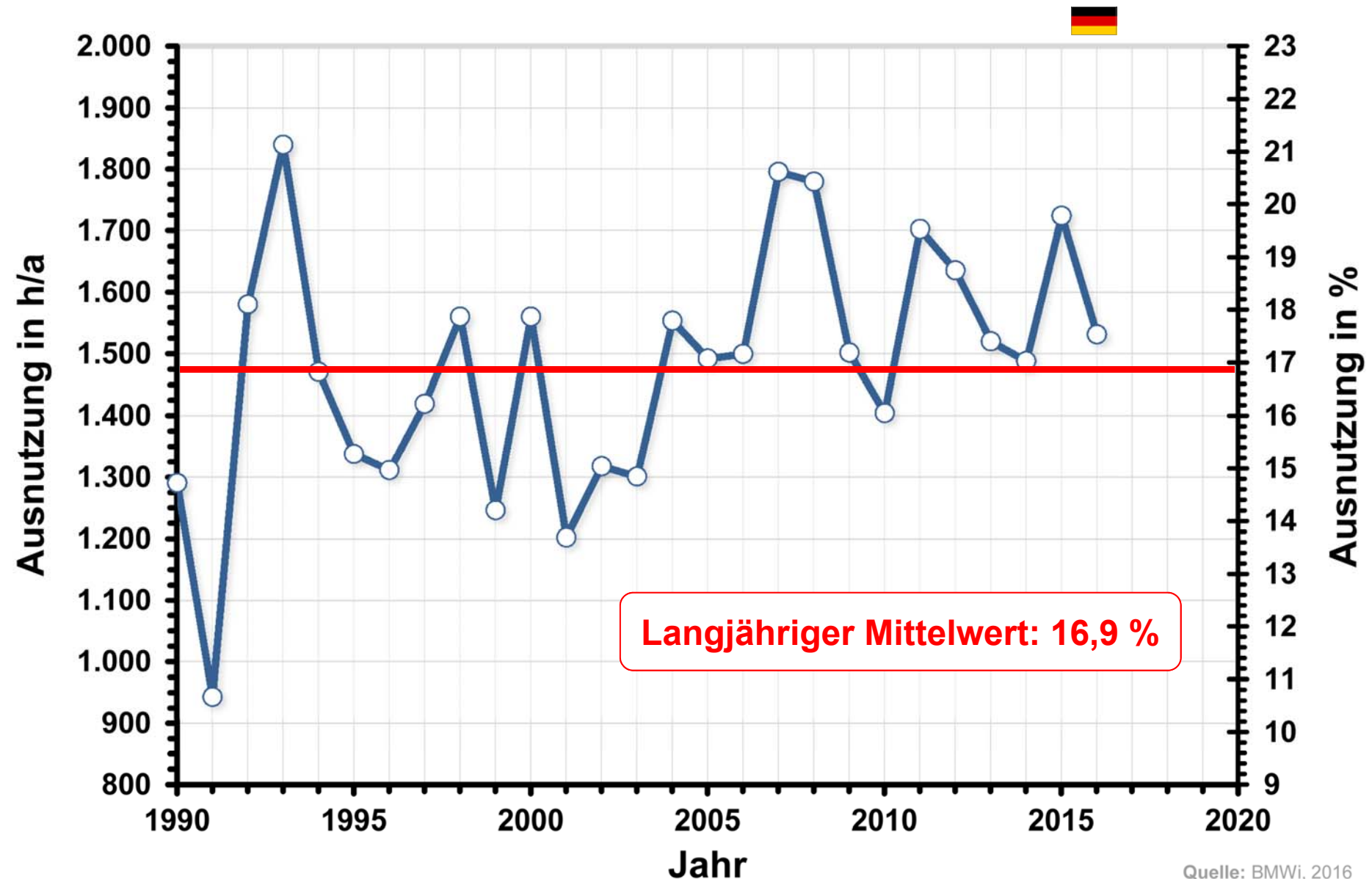
Normierung auf jeweils installierte Nennleistung

- Ausnutzung η_A = Stromproduktion / potenzielle Stromproduktion ¹⁾

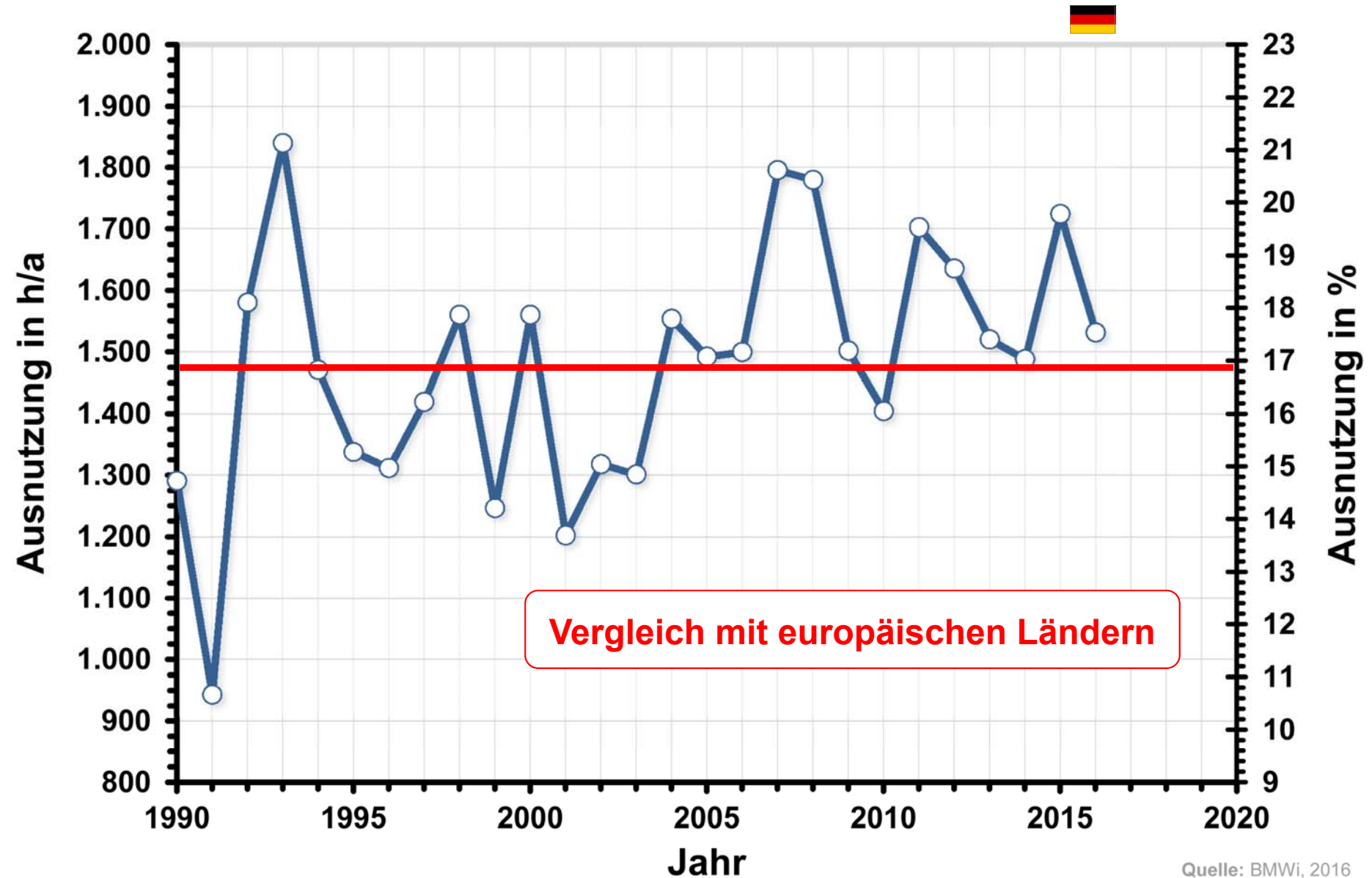
1) bei konstanter Nennleistung über den Betrachtungszeitraum



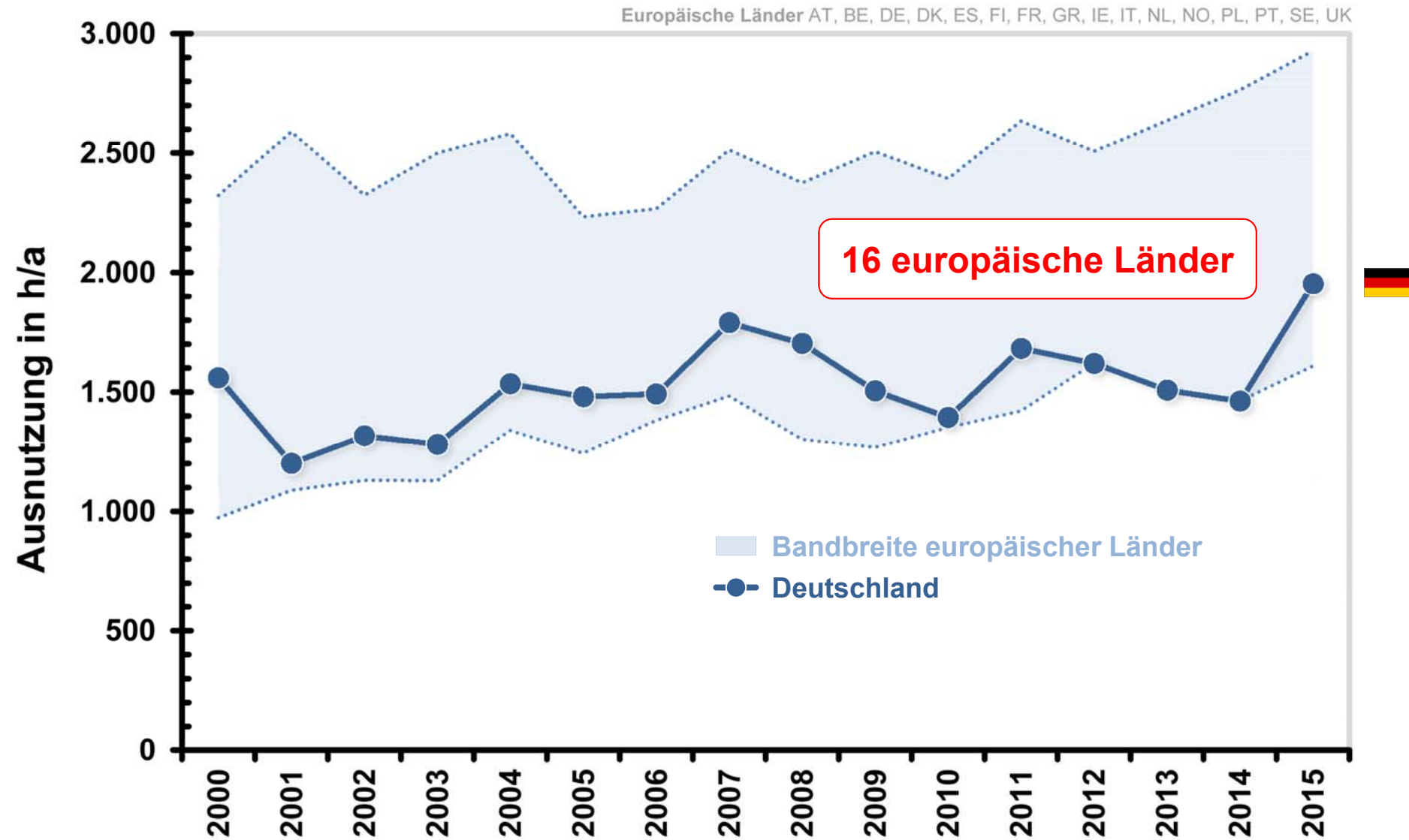
Quelle: BMWi, 2016



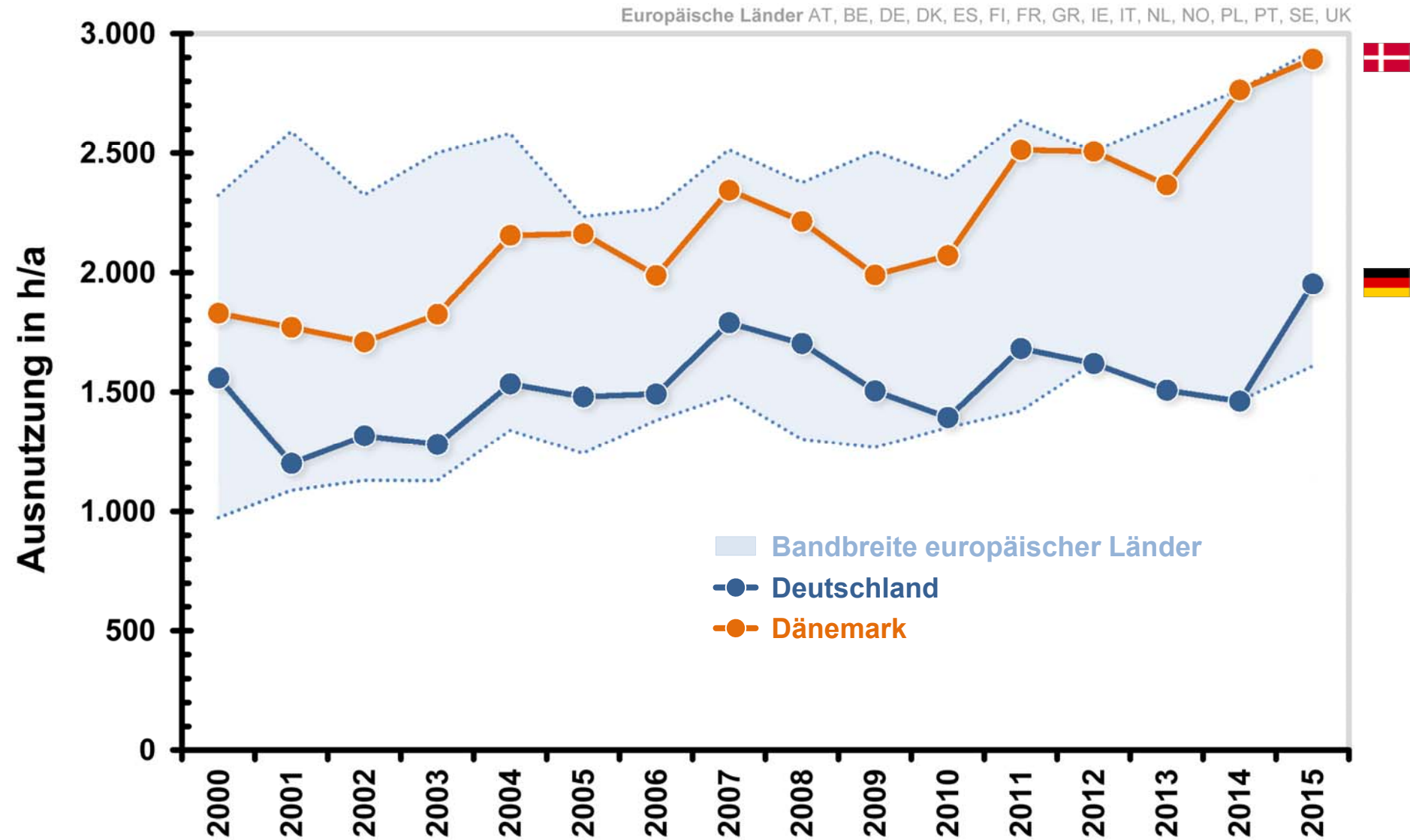
Quelle: BMWi, 2016



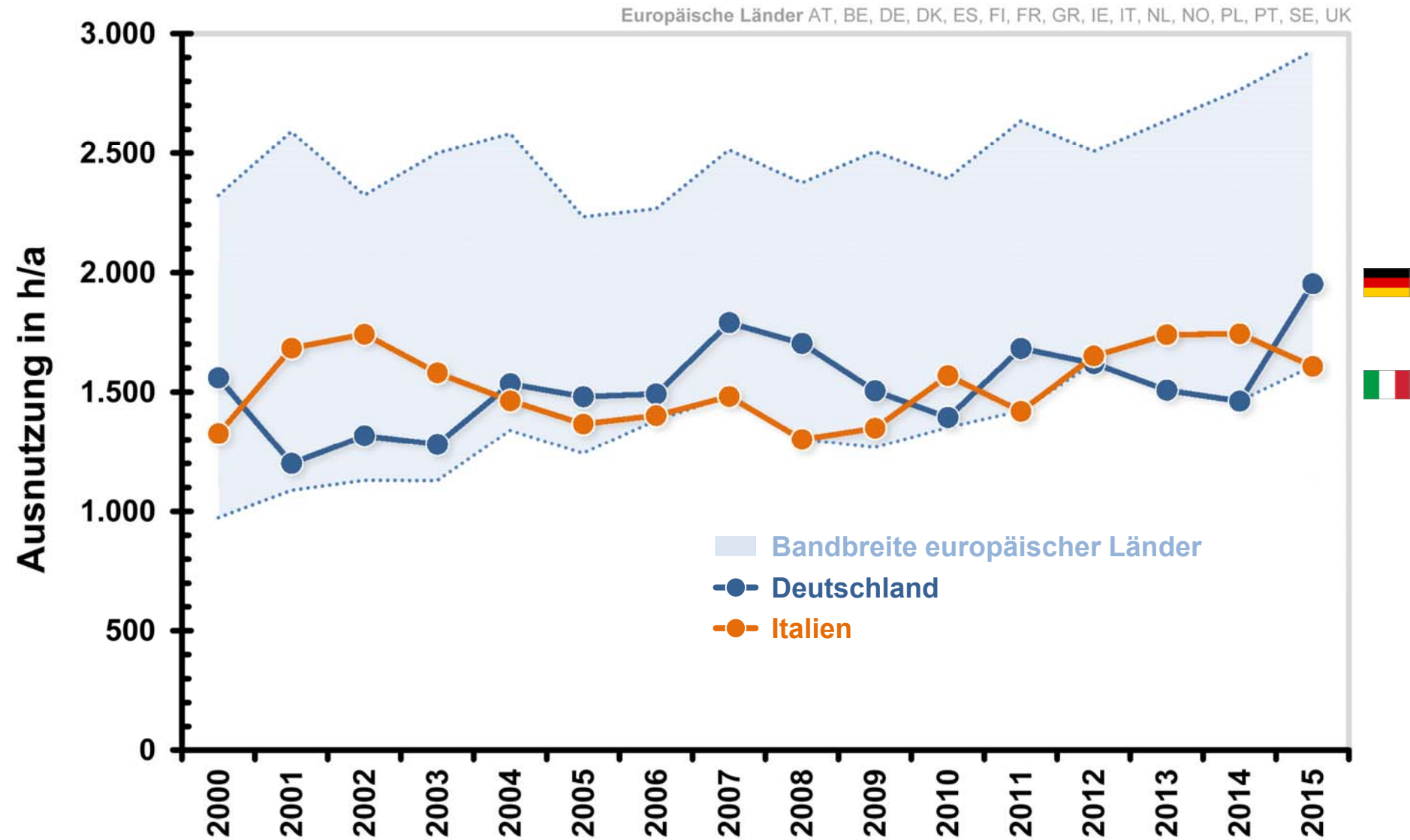
Quelle: BMWi, 2016



Quelle: BP Statistical Review of World Energy, Juni 2016



Quelle: BP Statistical Review of World Energy, Juni 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
 $P_p \leq 1,1 \% P_N$

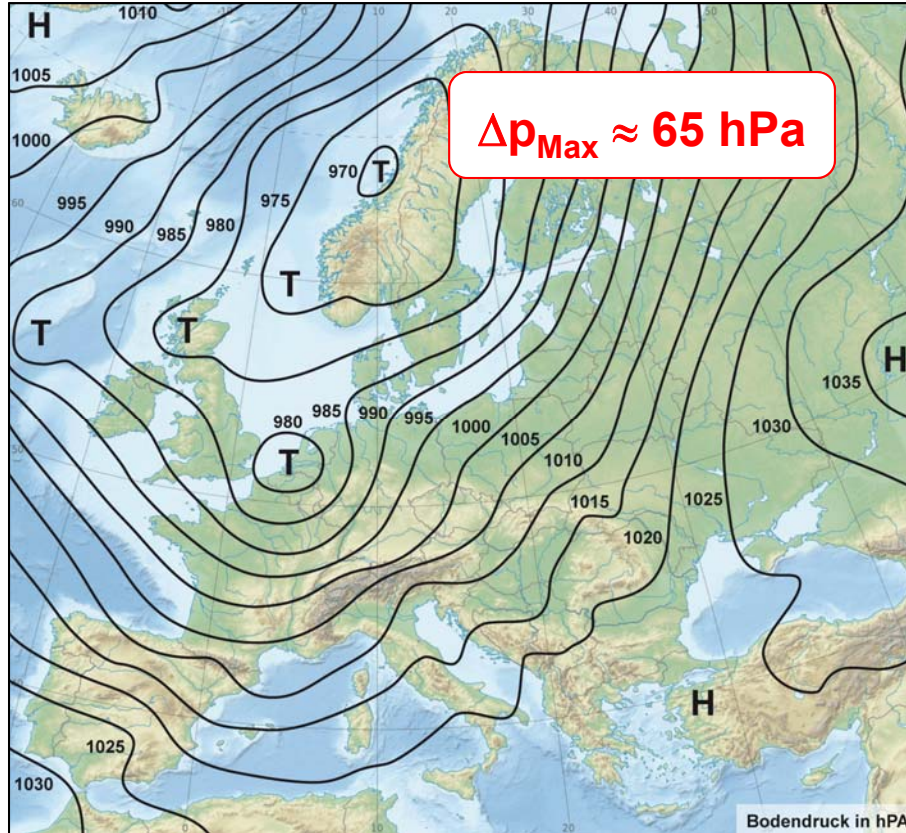
Erkenntnisse

- 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

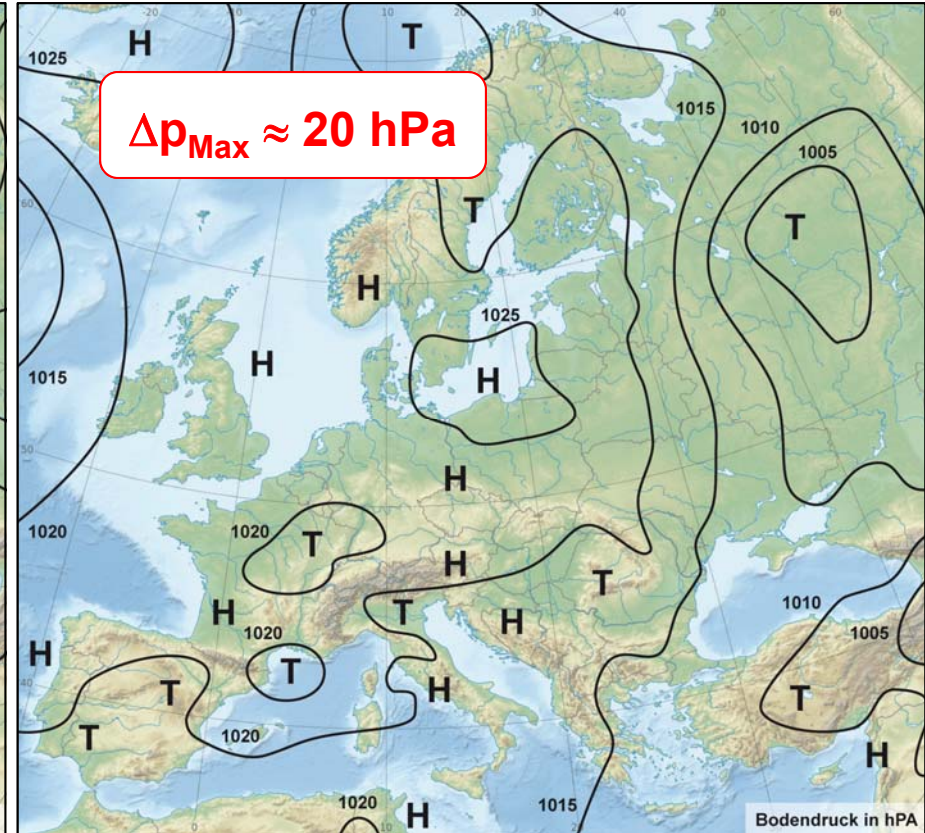
- **Ausnutzung:** Deutlich höhere Werte in vielen anderen Ländern
- **Versorgungssicherheit:** Praktisch kein Unterschied zu Deutschland

Ausgewählte Beispiele für weiträumige Luftdruckunterschiede in Europa



Mittwoch, 8. Februar 2016

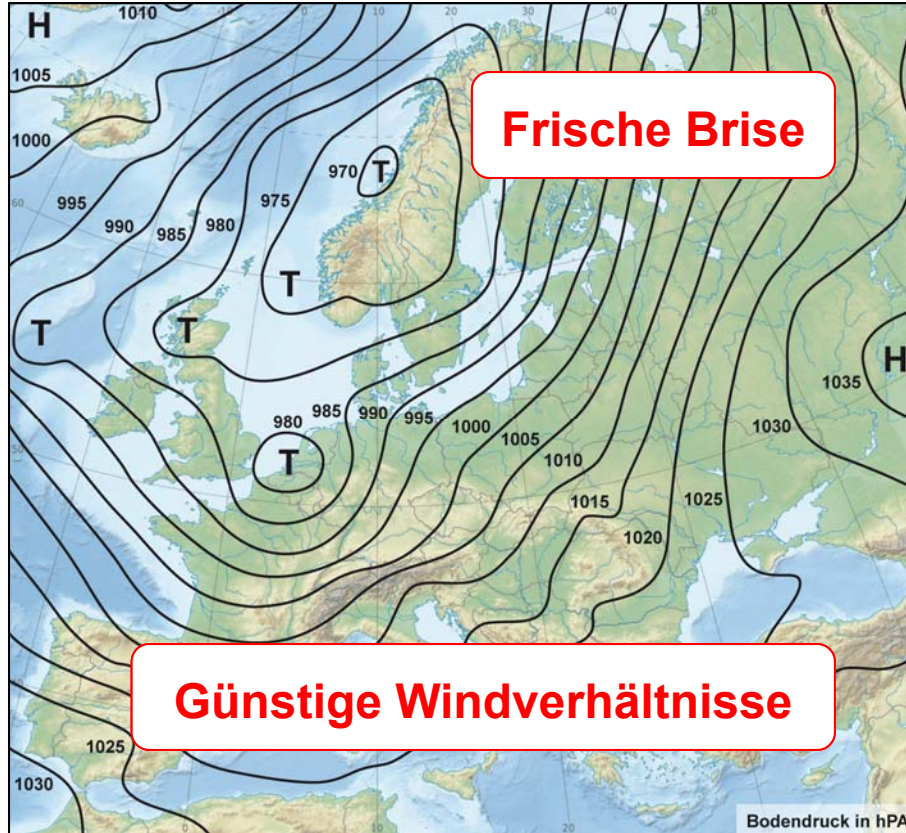
► Kalte Jahreszeit



Mittwoch, 7. Juni 2016

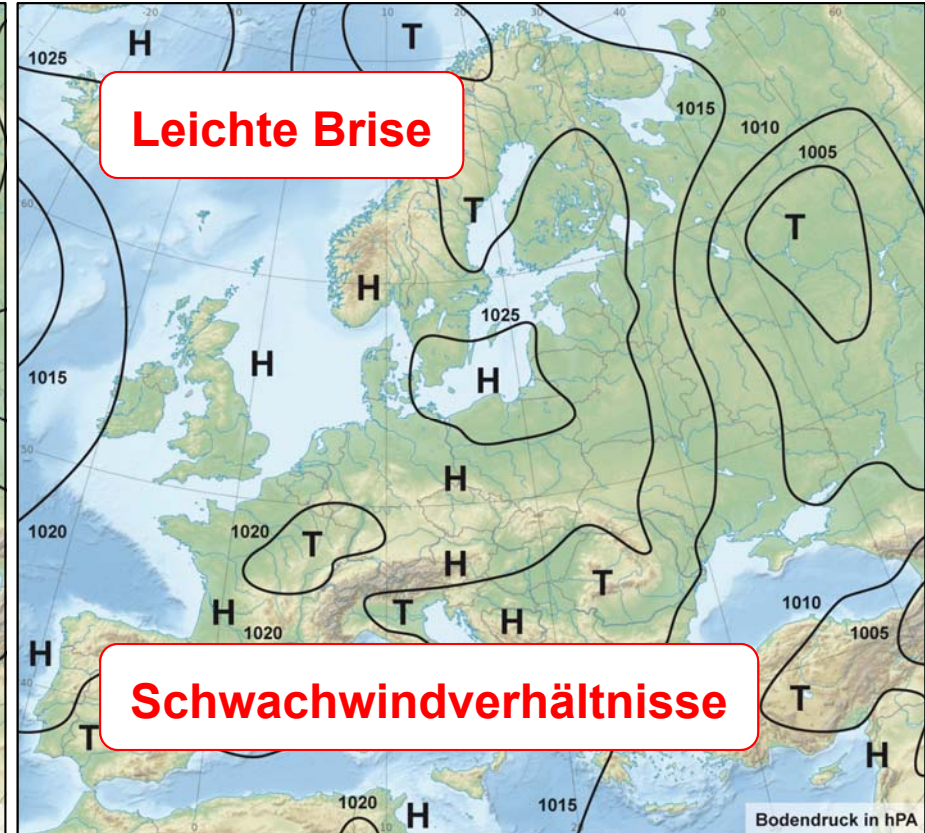
► Warme Jahreszeit

Ausgewählte Beispiele für weiträumige Luftdruckunterschiede in Europa



Mittwoch, 8. Februar 2016

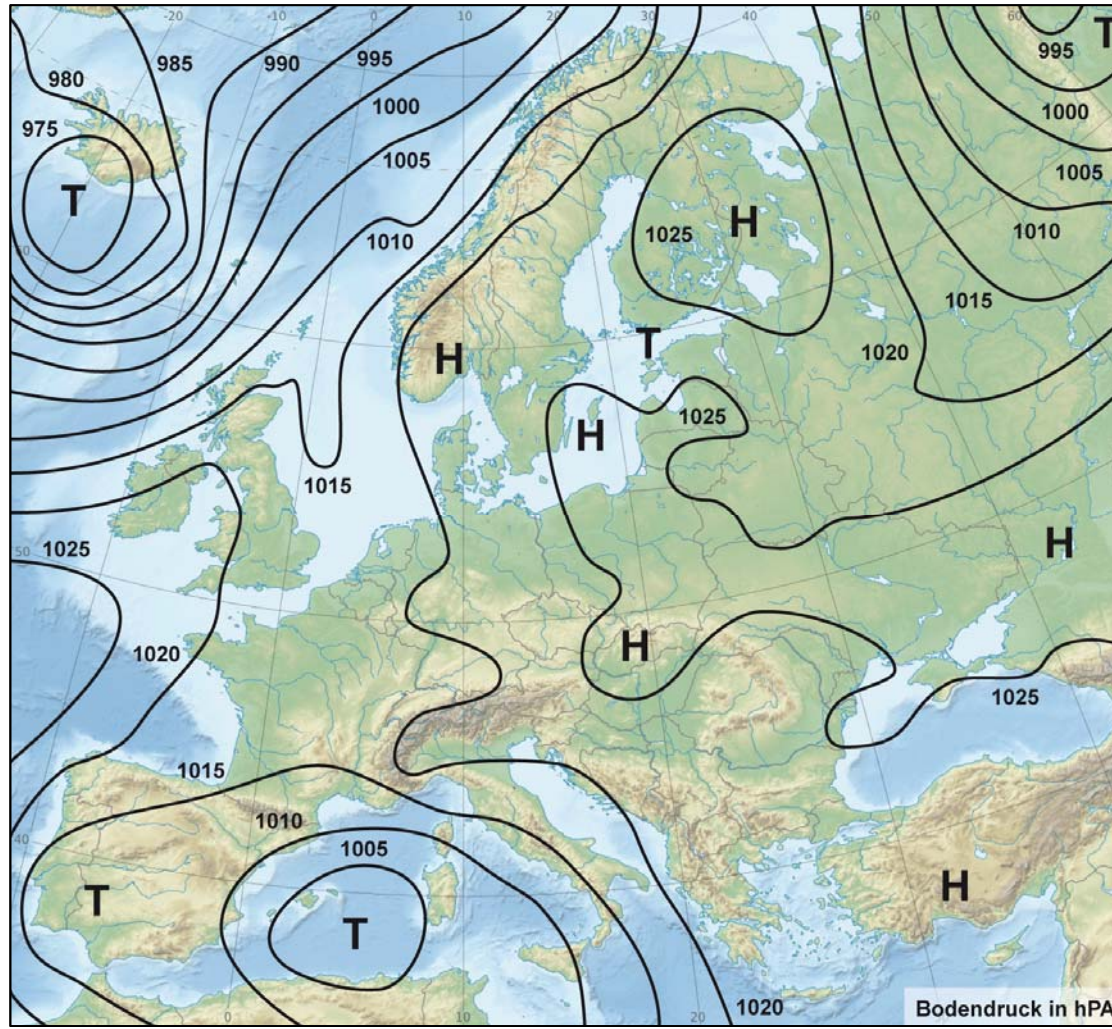
► Kalte Jahreszeit



Mittwoch, 7. Juni 2016

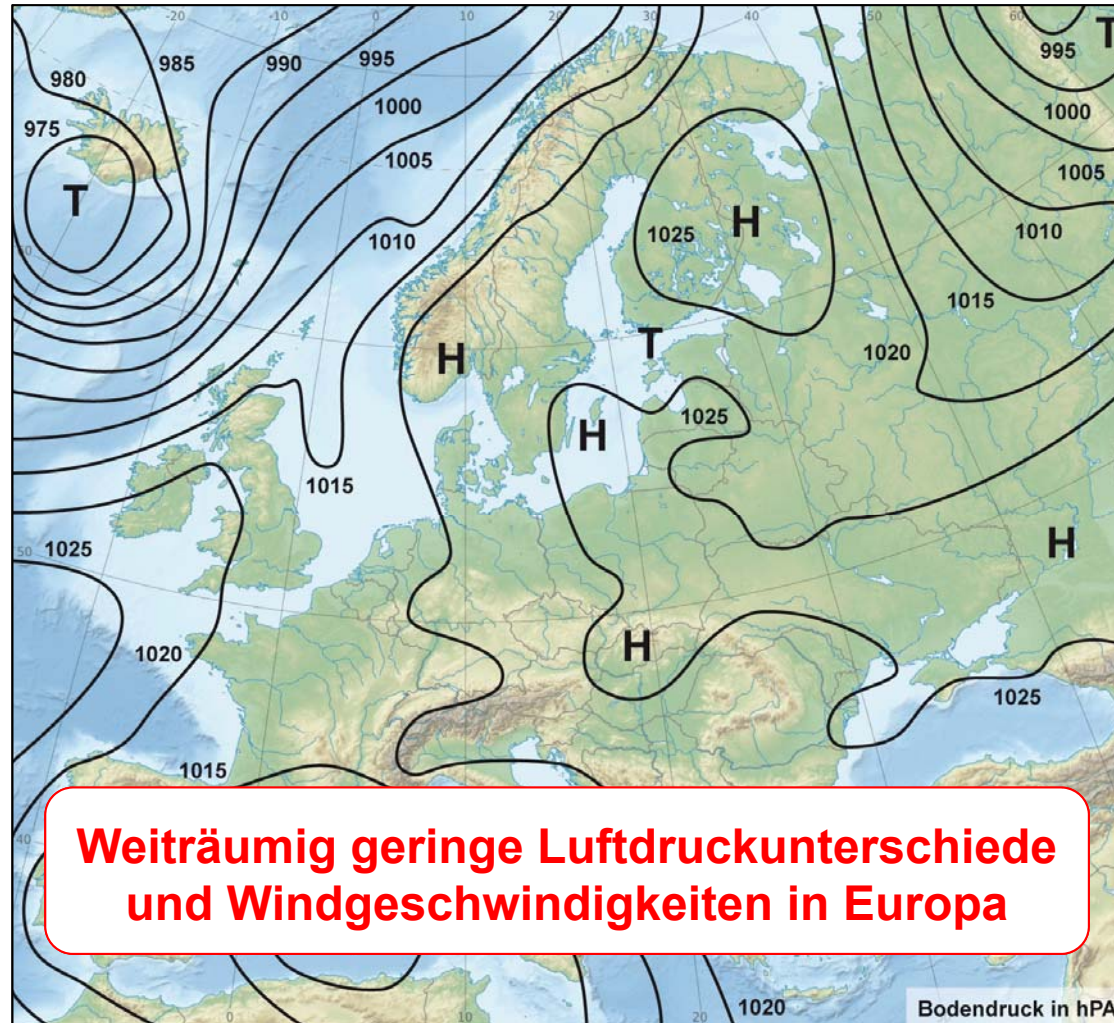
► Warme Jahreszeit

Mehrtägige Großwetterlage im November 2011



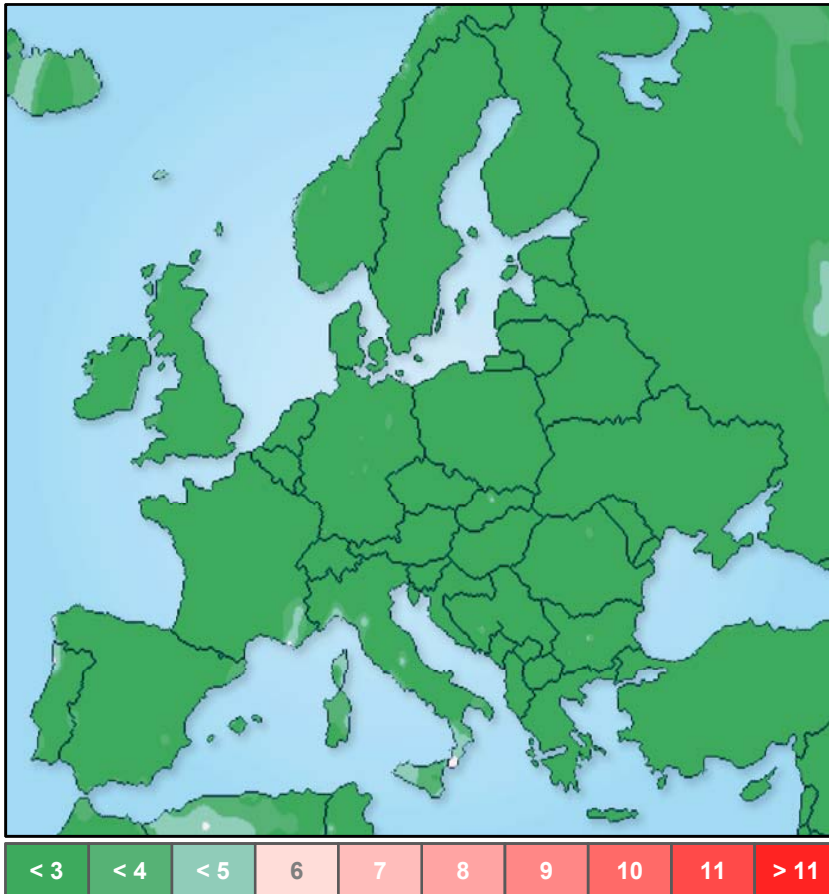
Dienstag, 22. November 2011

Mehrtägige Großwetterlage im November 2011



Dienstag, 22. November 2011

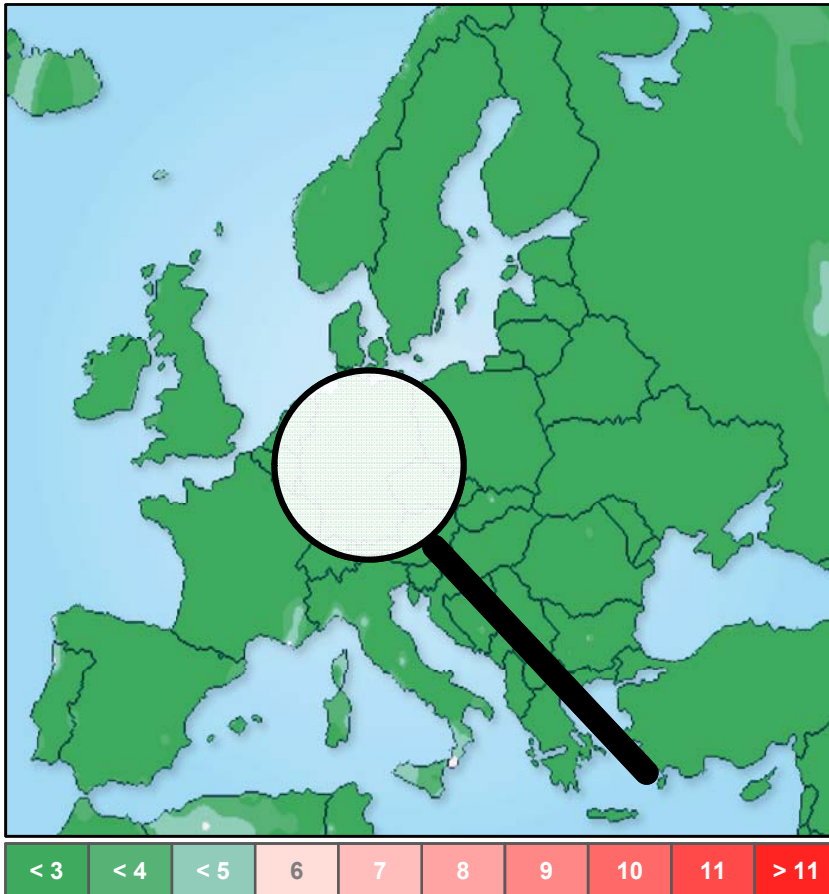
Beispiel: Windstärken am Dienstag, 22. November 2011, 7:00 Uhr



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

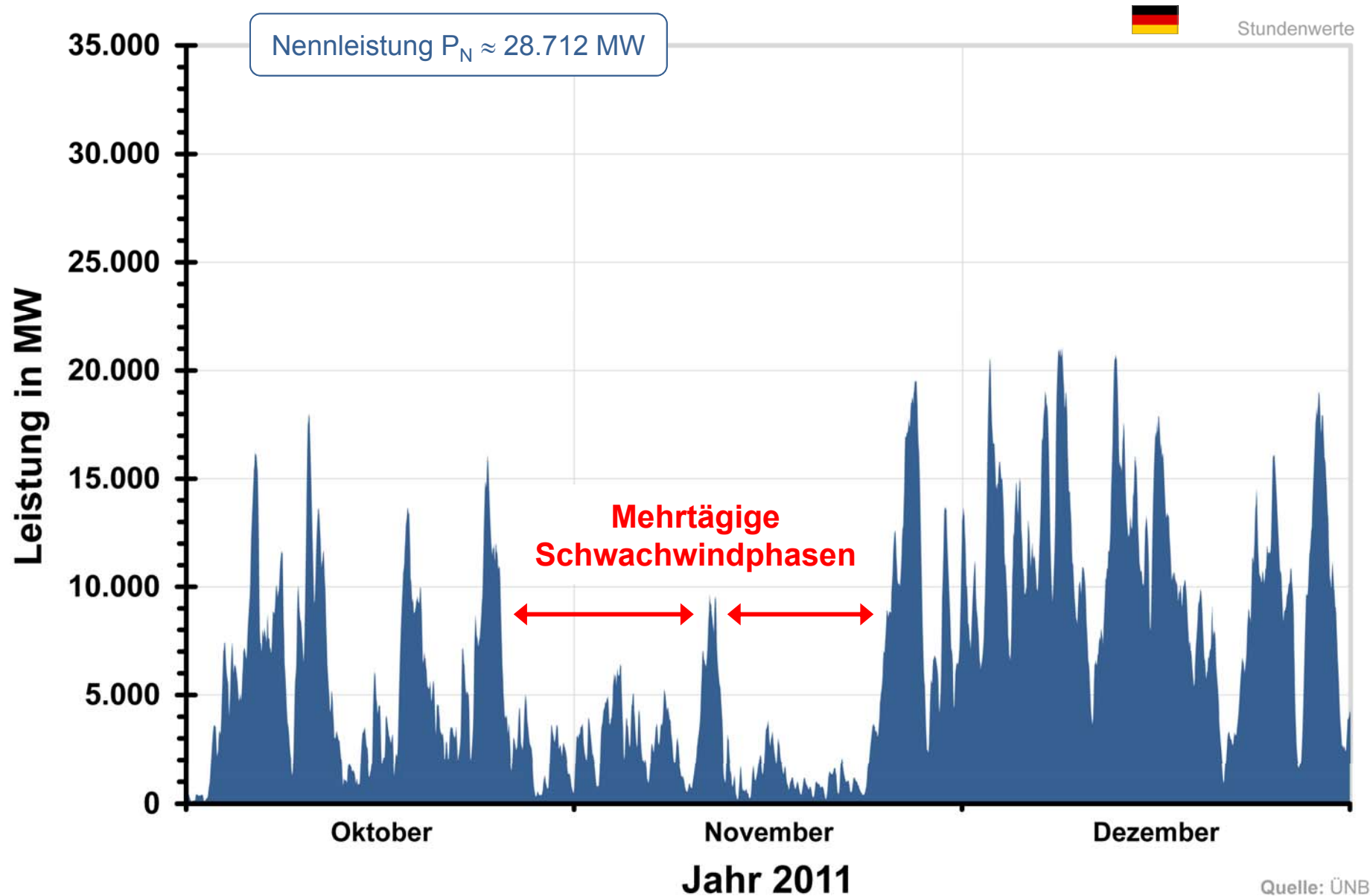
Beispiel: Windstärken am Dienstag, 22. November 2011, 7:00 Uhr

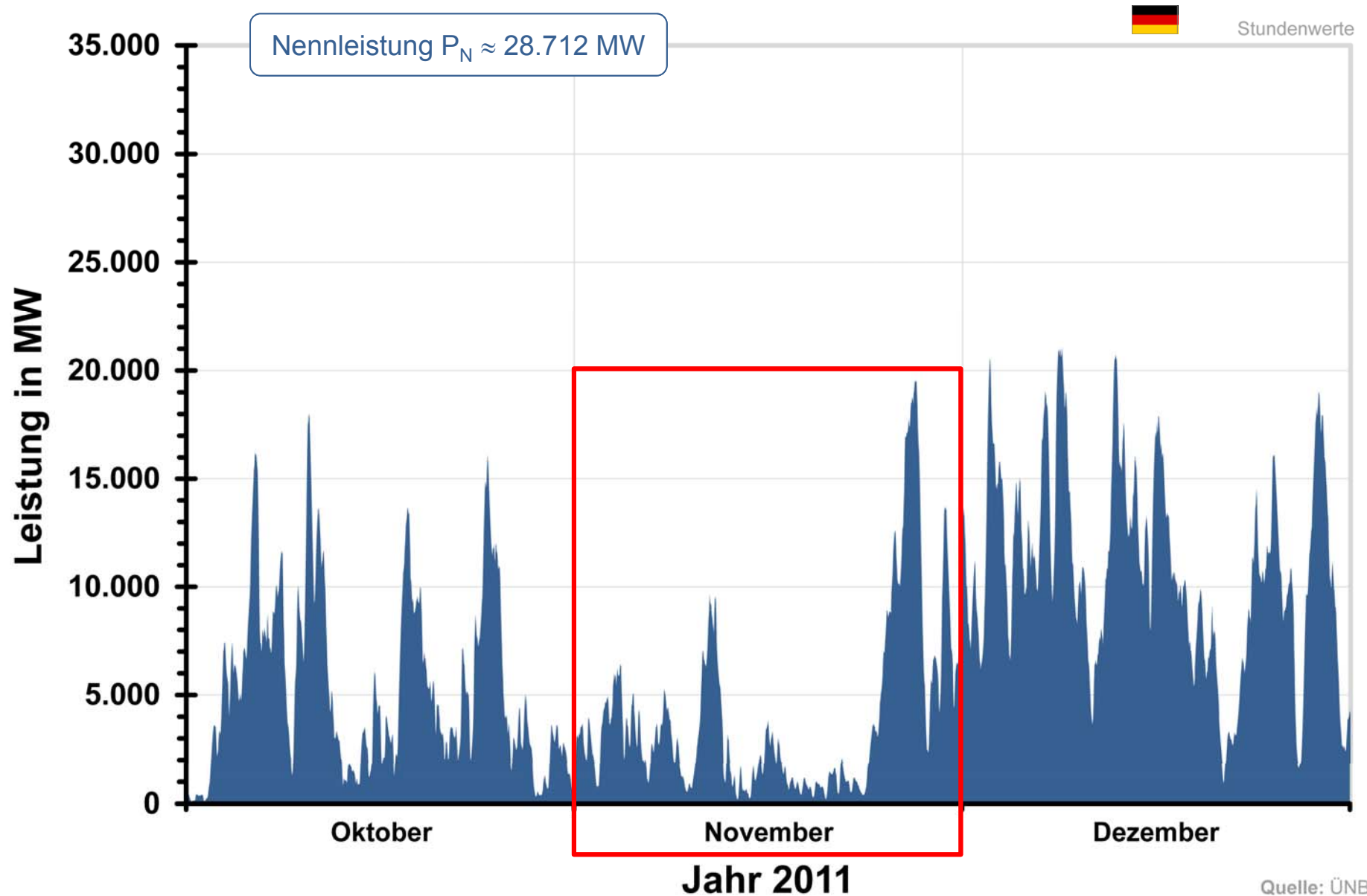


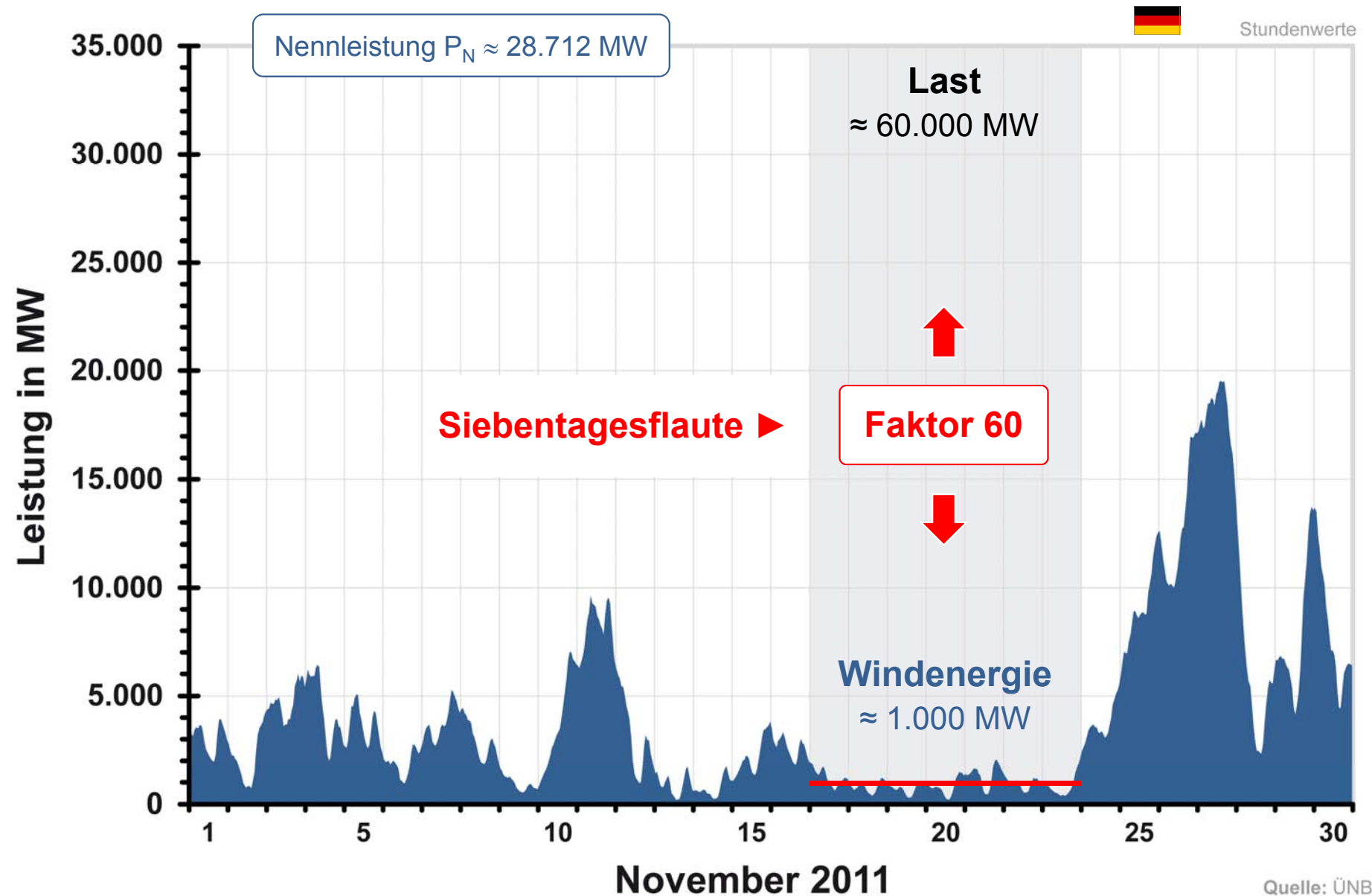
Windstärke in Beaufort (Bft)

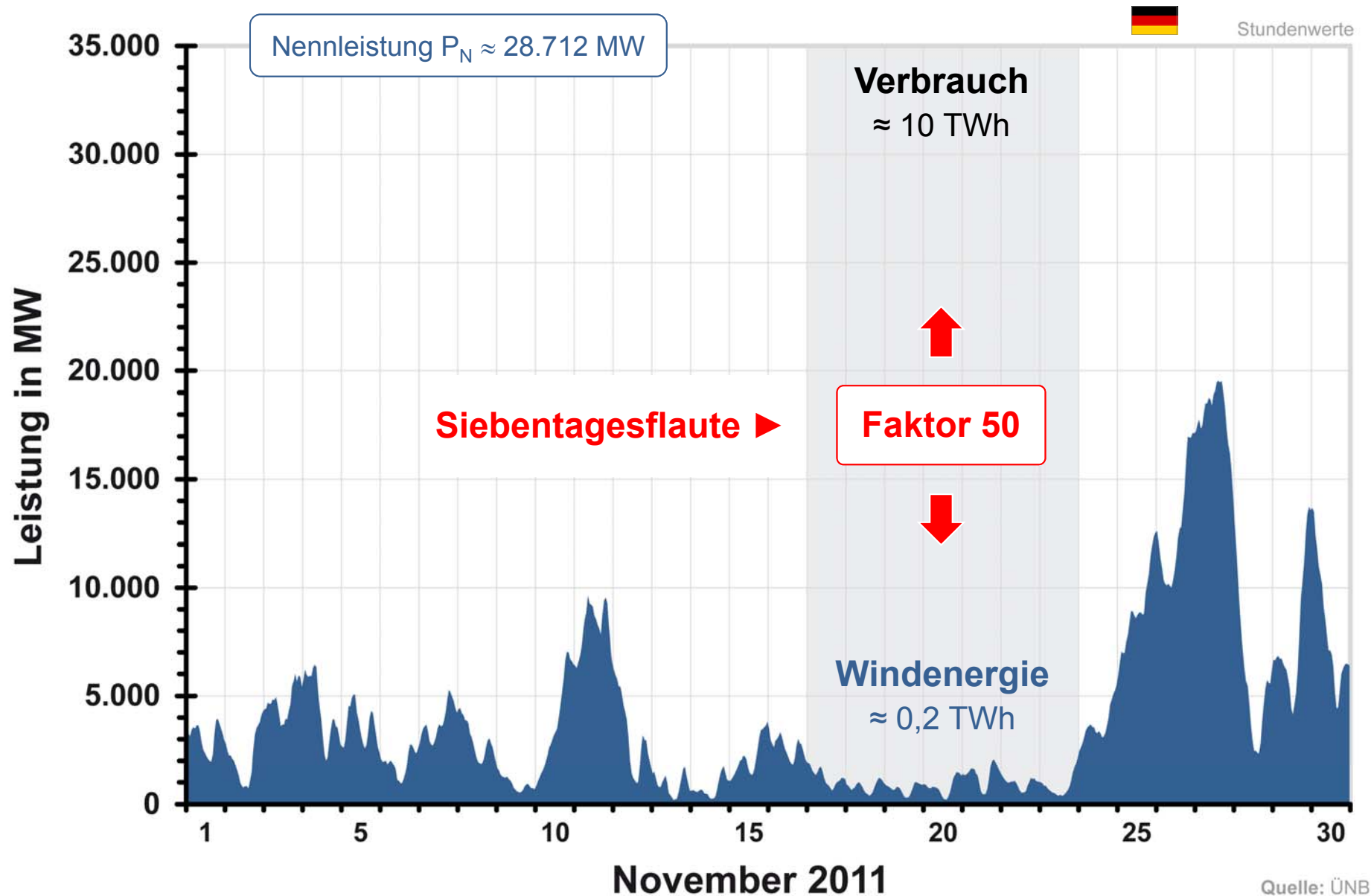
- Weiträumig geringes Winddargebot mit Windstärke 3 oder darunter nach Beaufort-Skala („Schwacher Wind“)
- Resultierende Windgeschwindigkeiten von 3,4 bis 5,4 m/s und darunter
- Europaweit geringe Windstromerträge
- Kein gegenseitiger Austausch möglich
- Regelmäßig ähnliche Wetterlagen

► Blick auf Deutschland

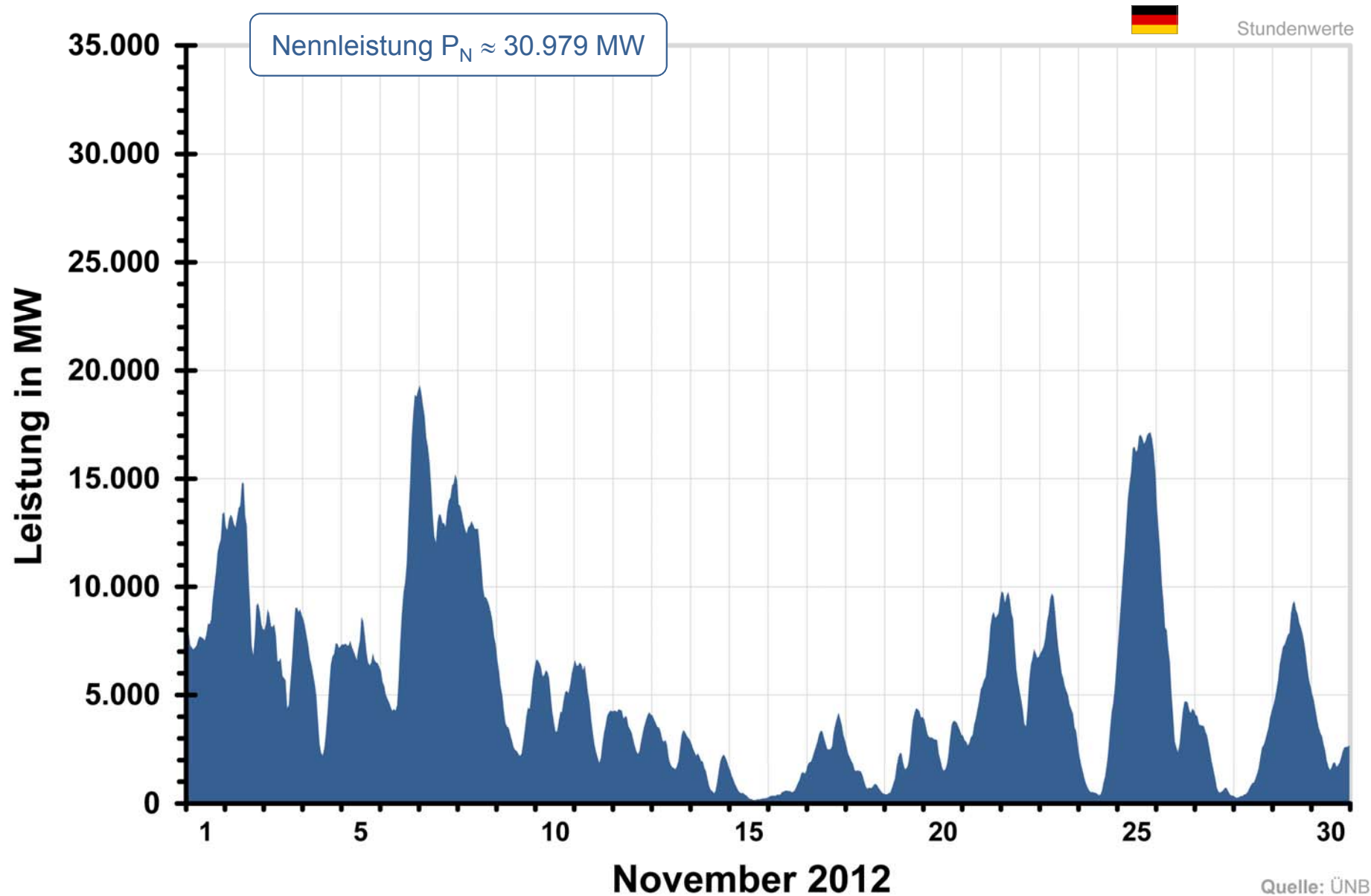


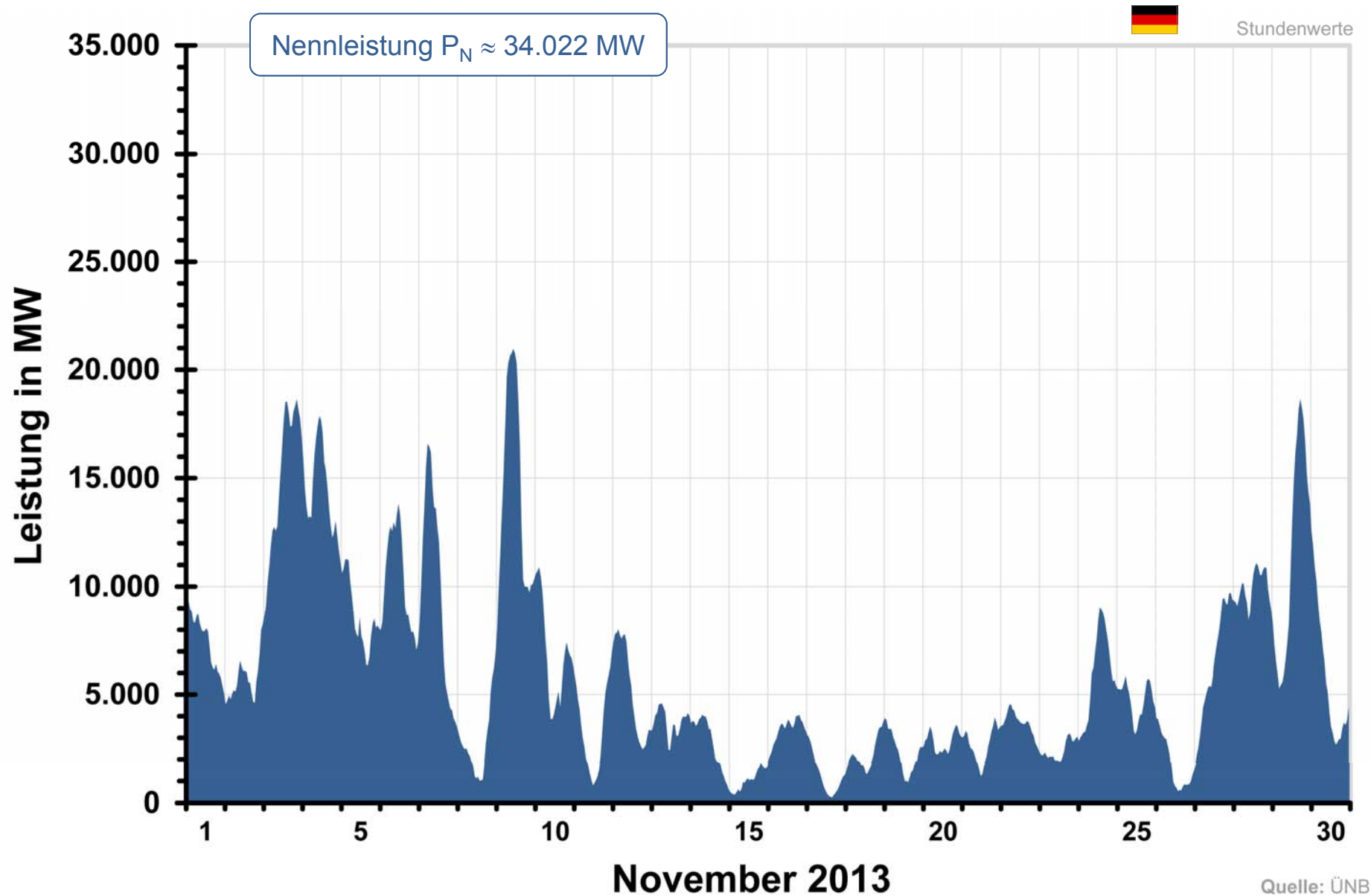


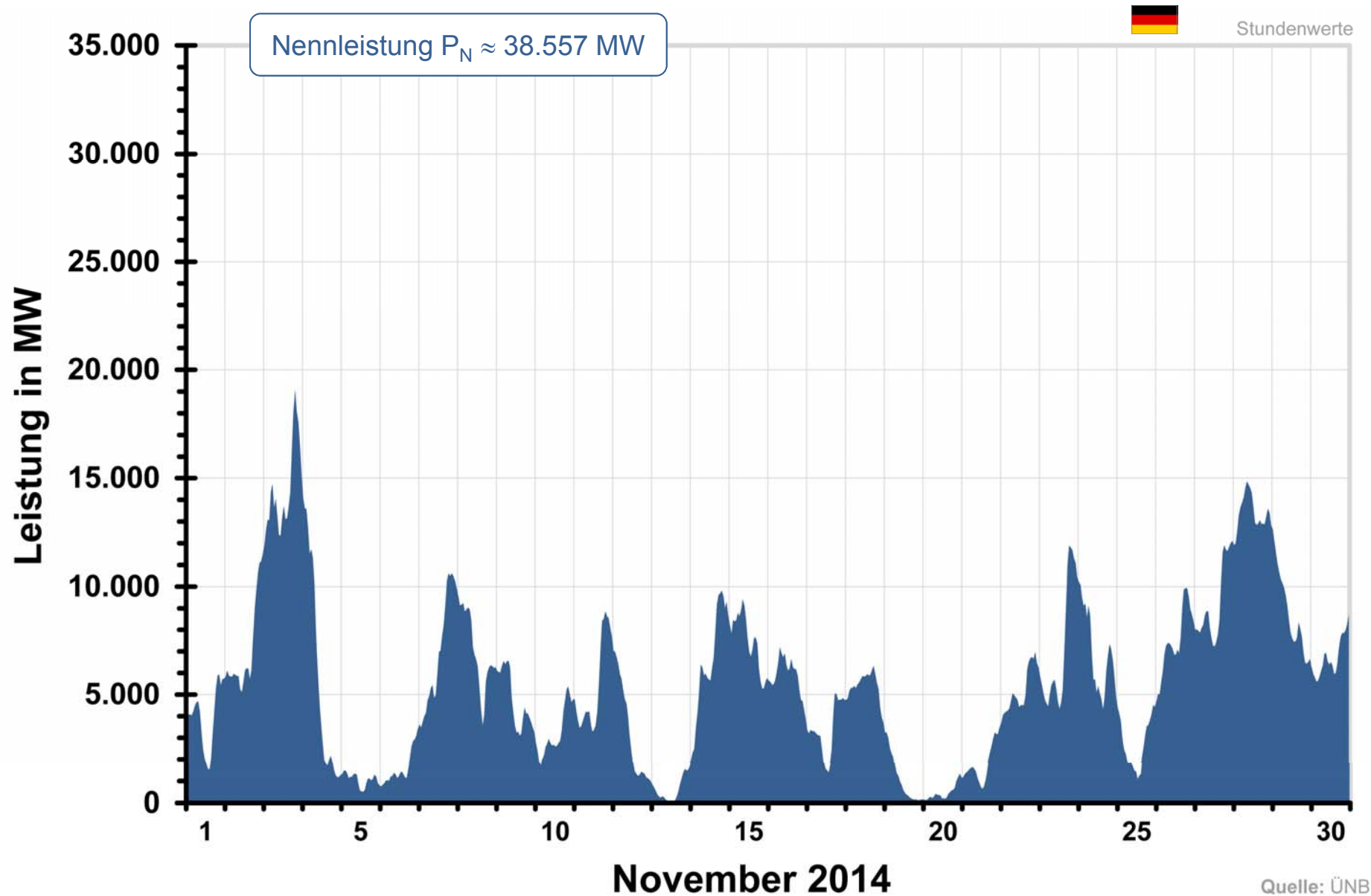


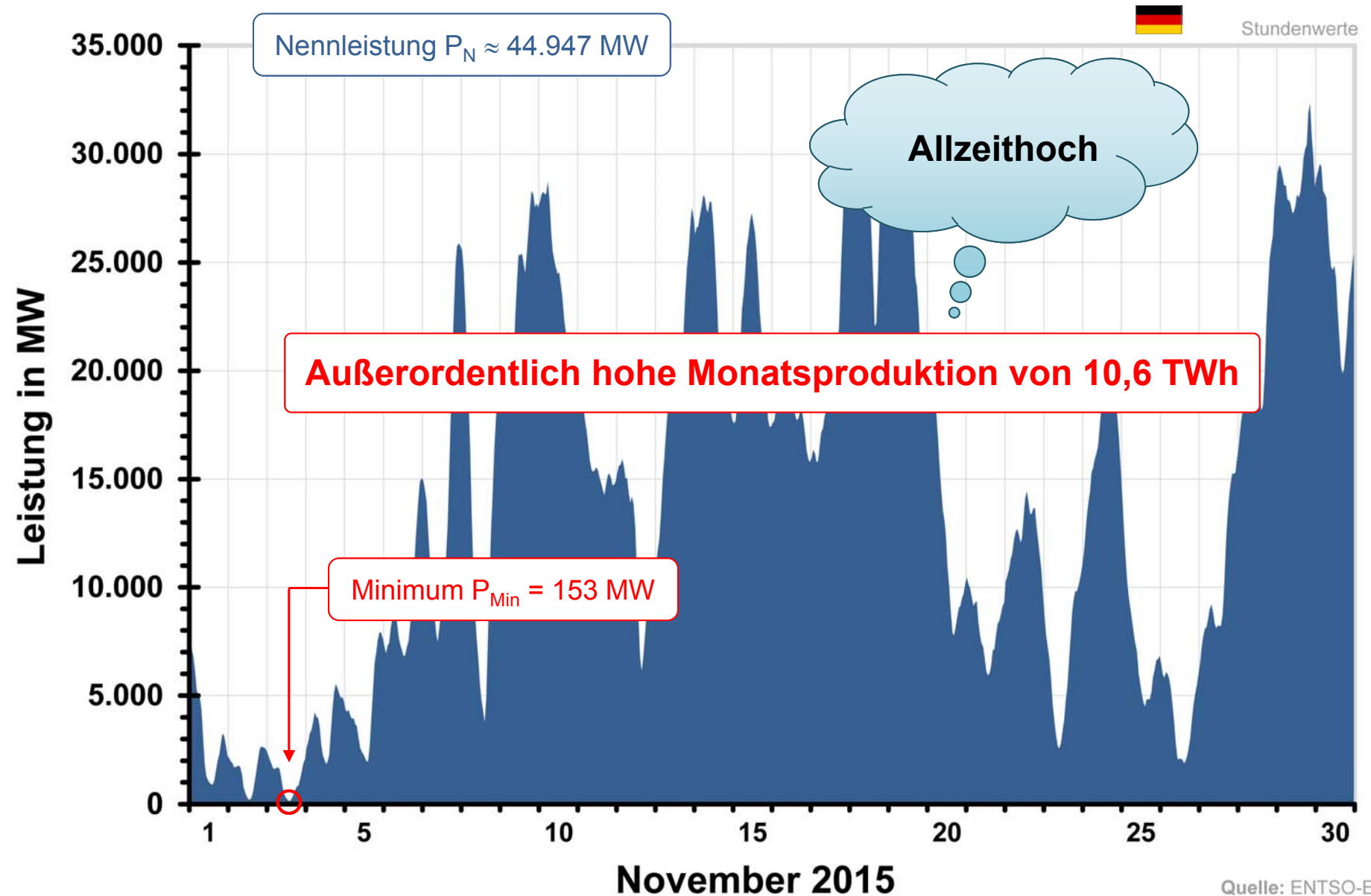


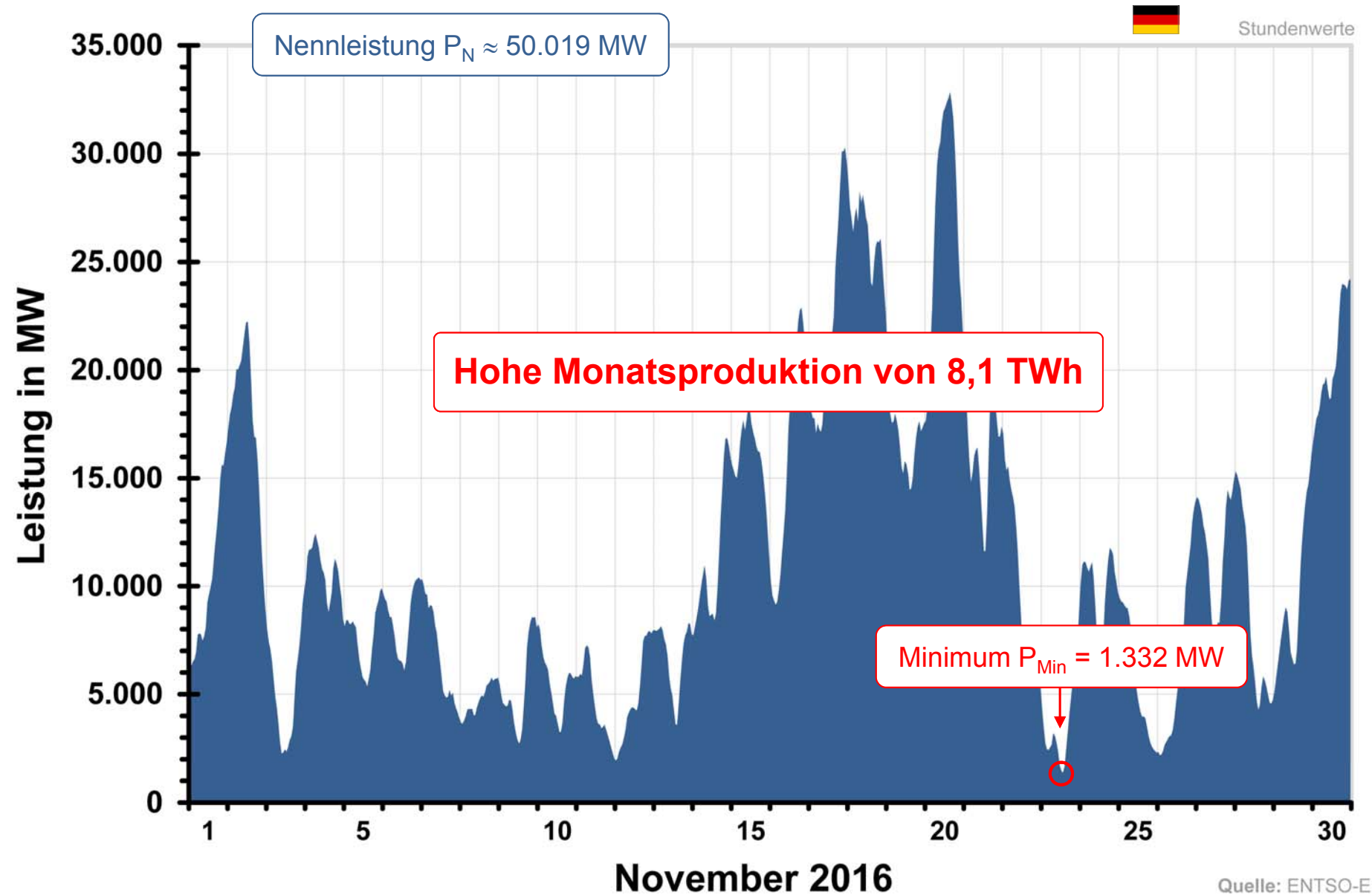


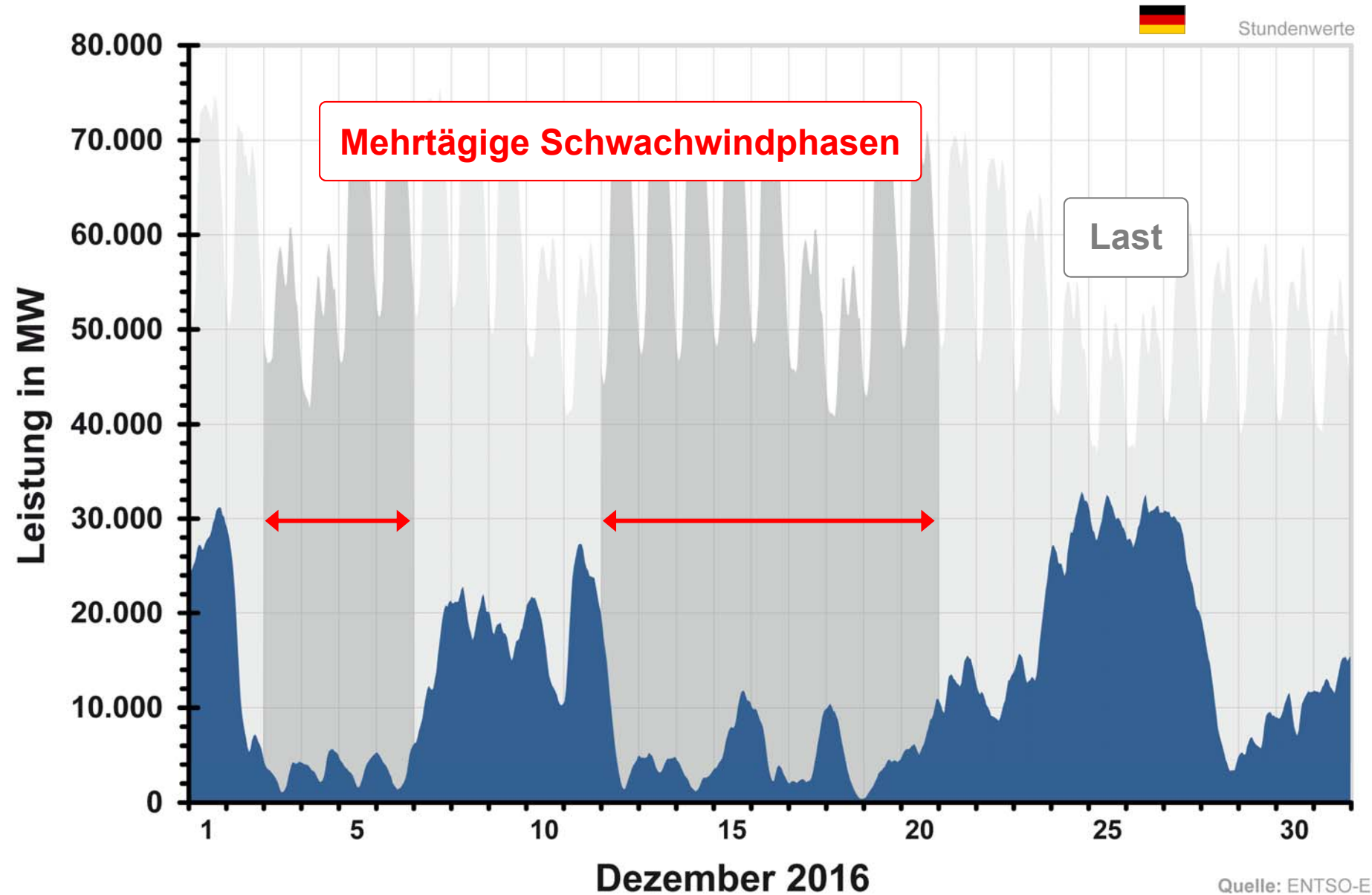


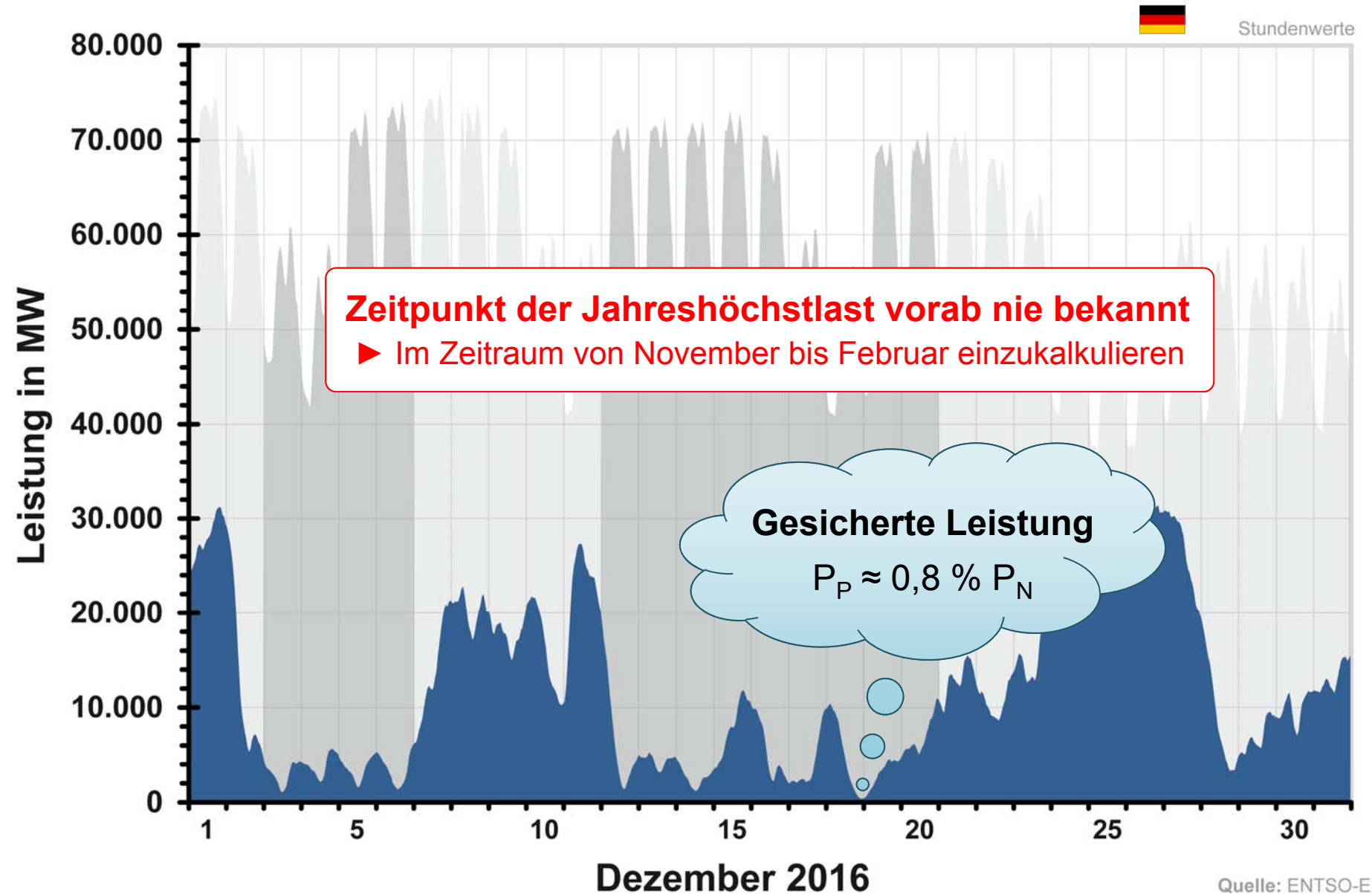


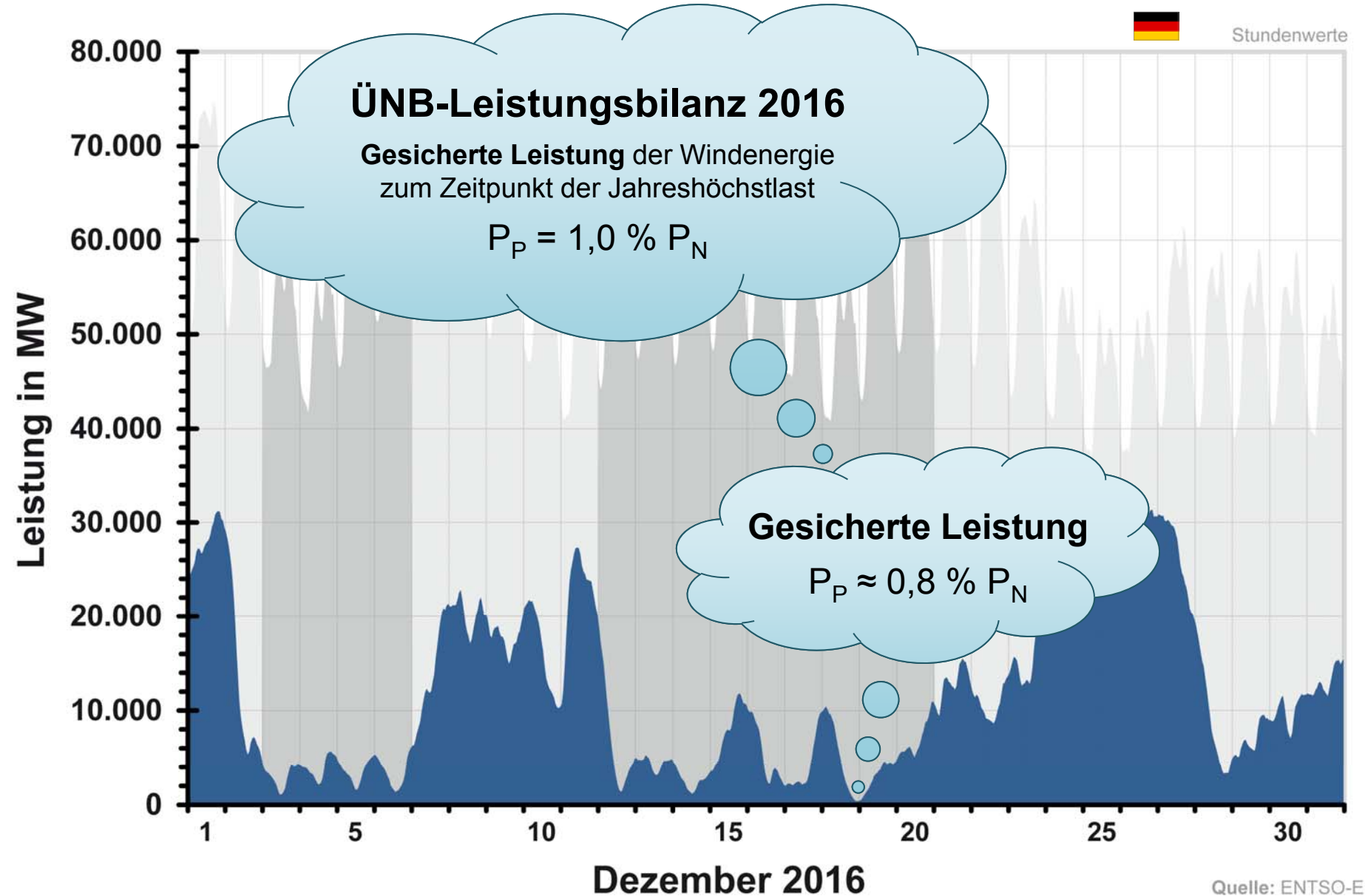






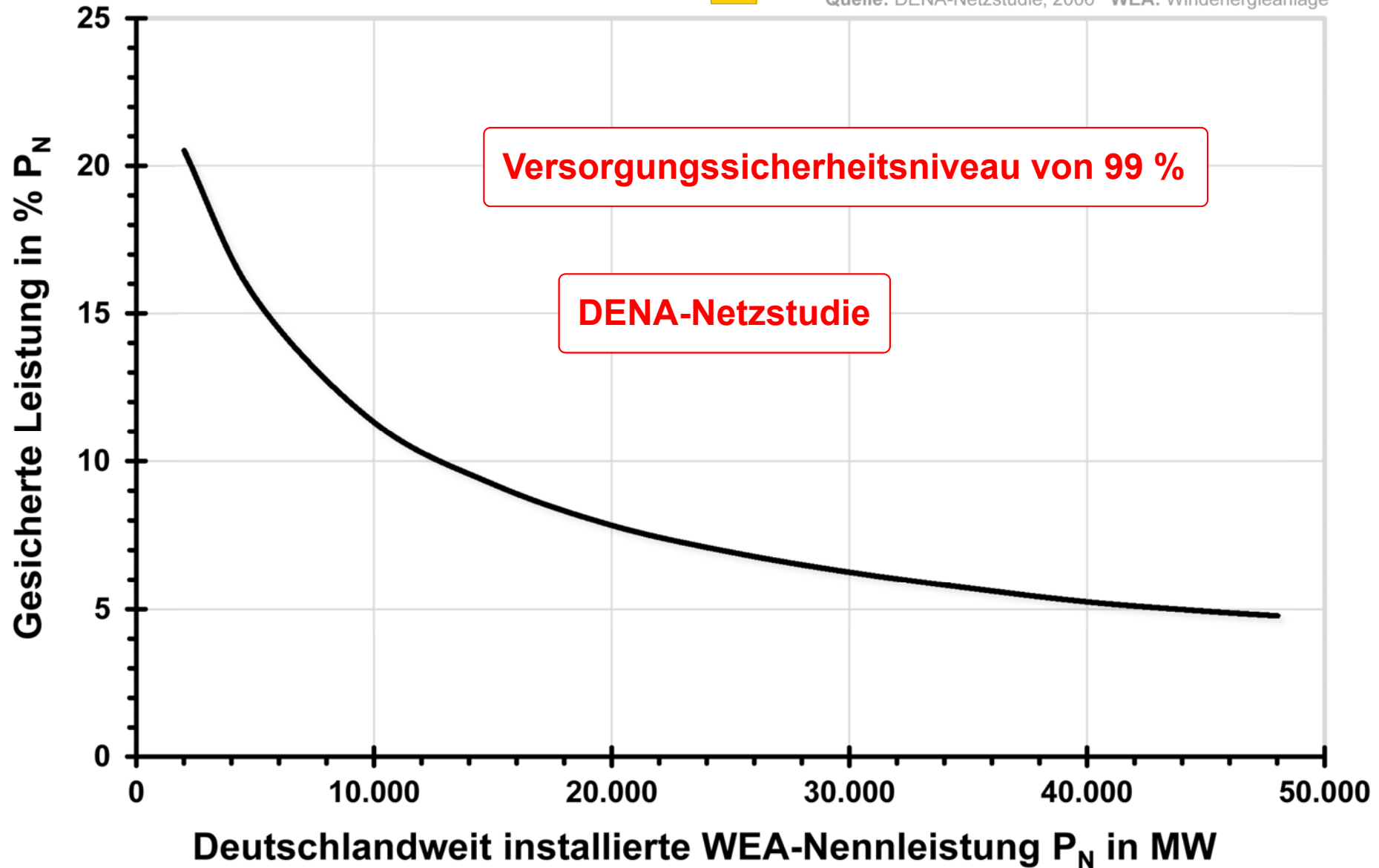






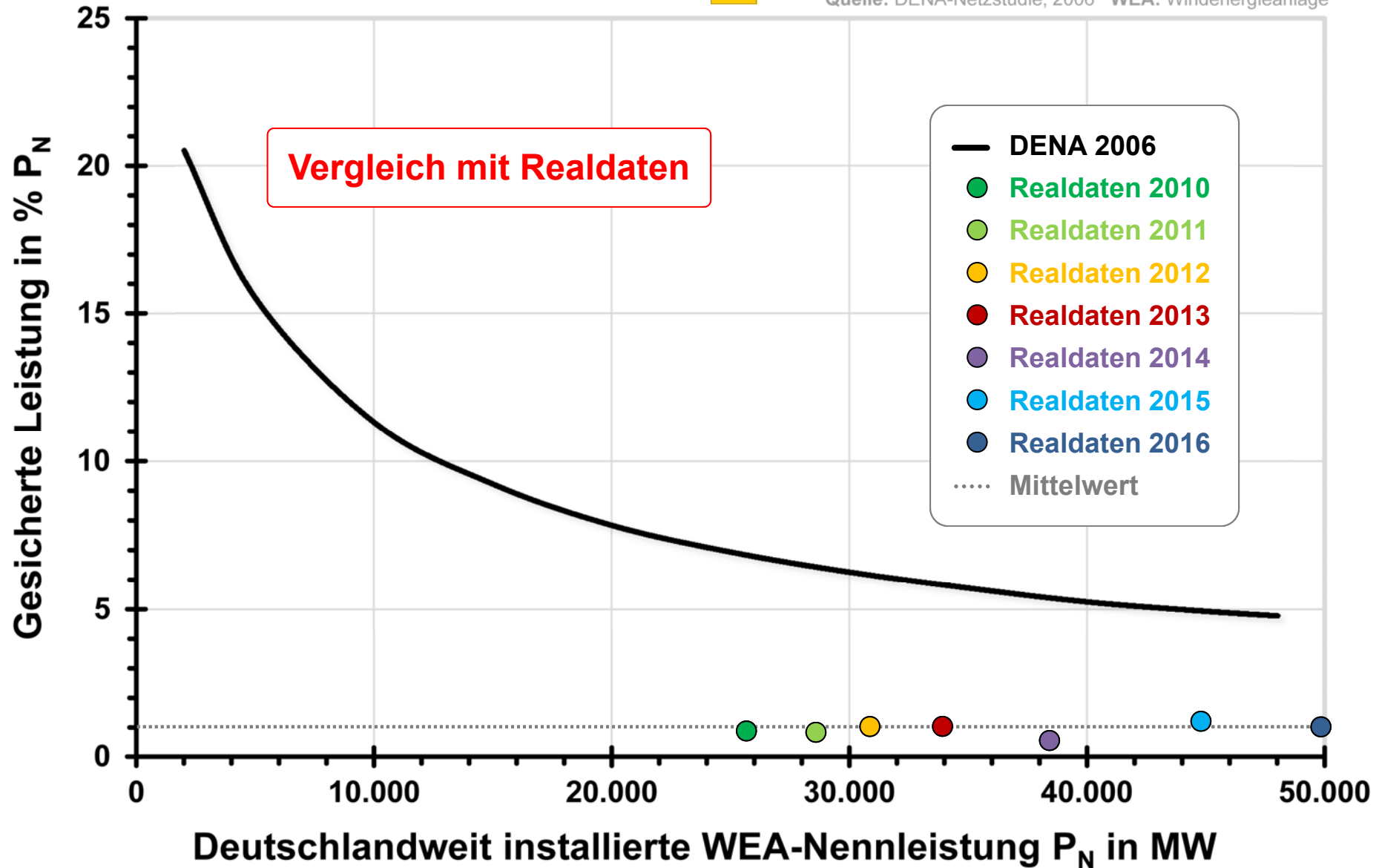


Quelle: DENA-Netzstudie, 2006 WEA: Windenergieanlage



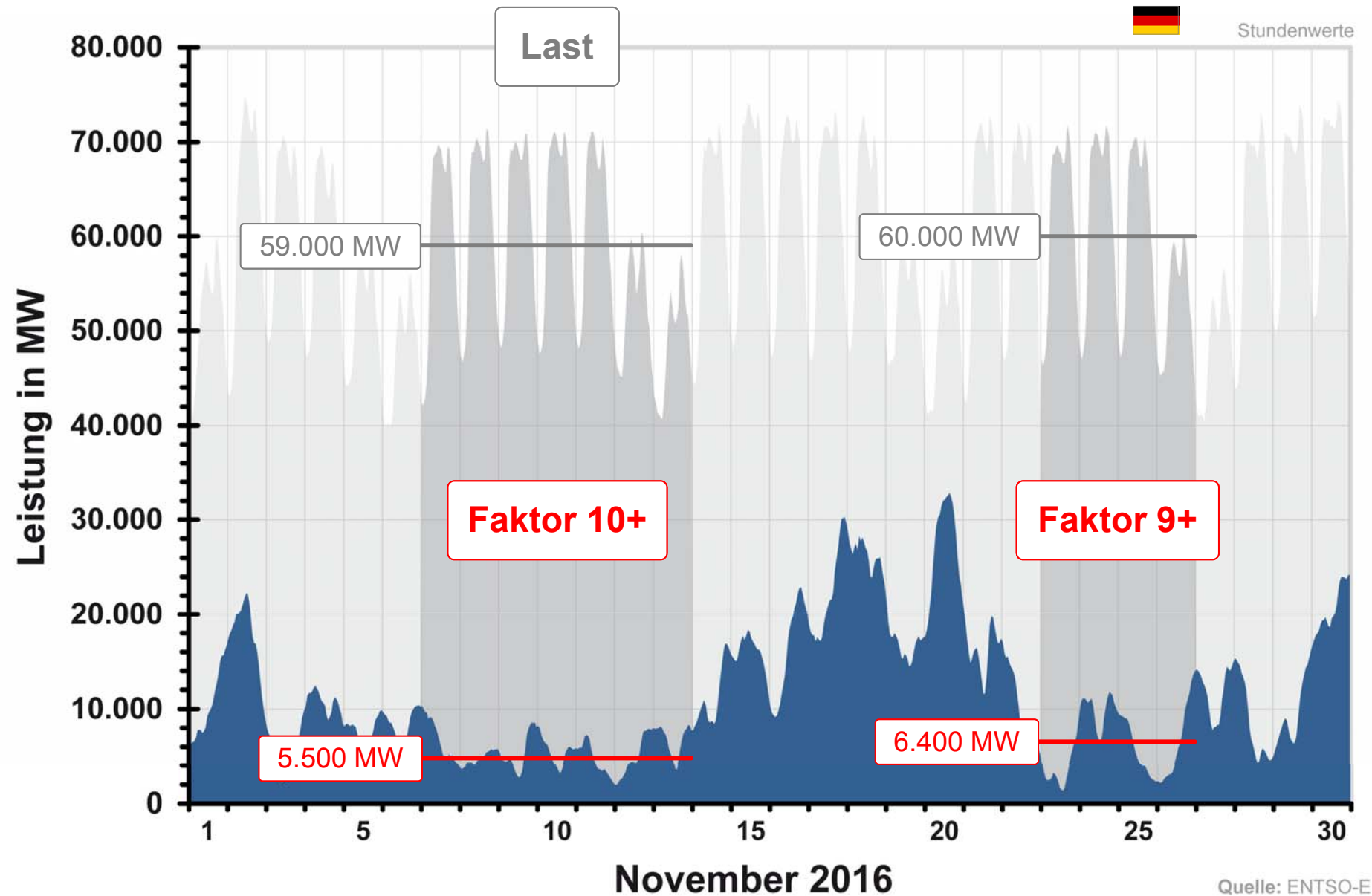


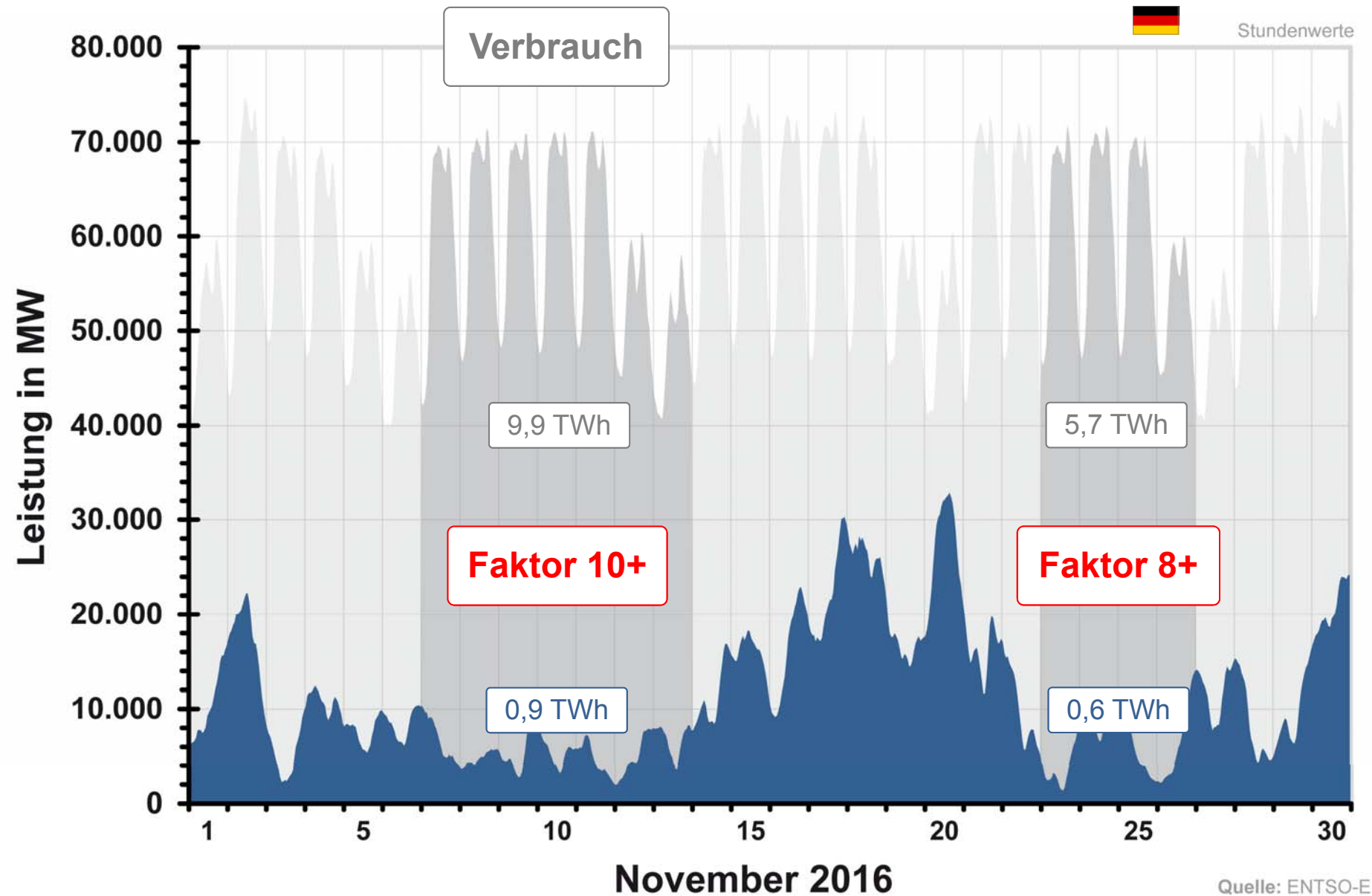
Quelle: DENA-Netzstudie, 2006 WEA: Windenergieanlage

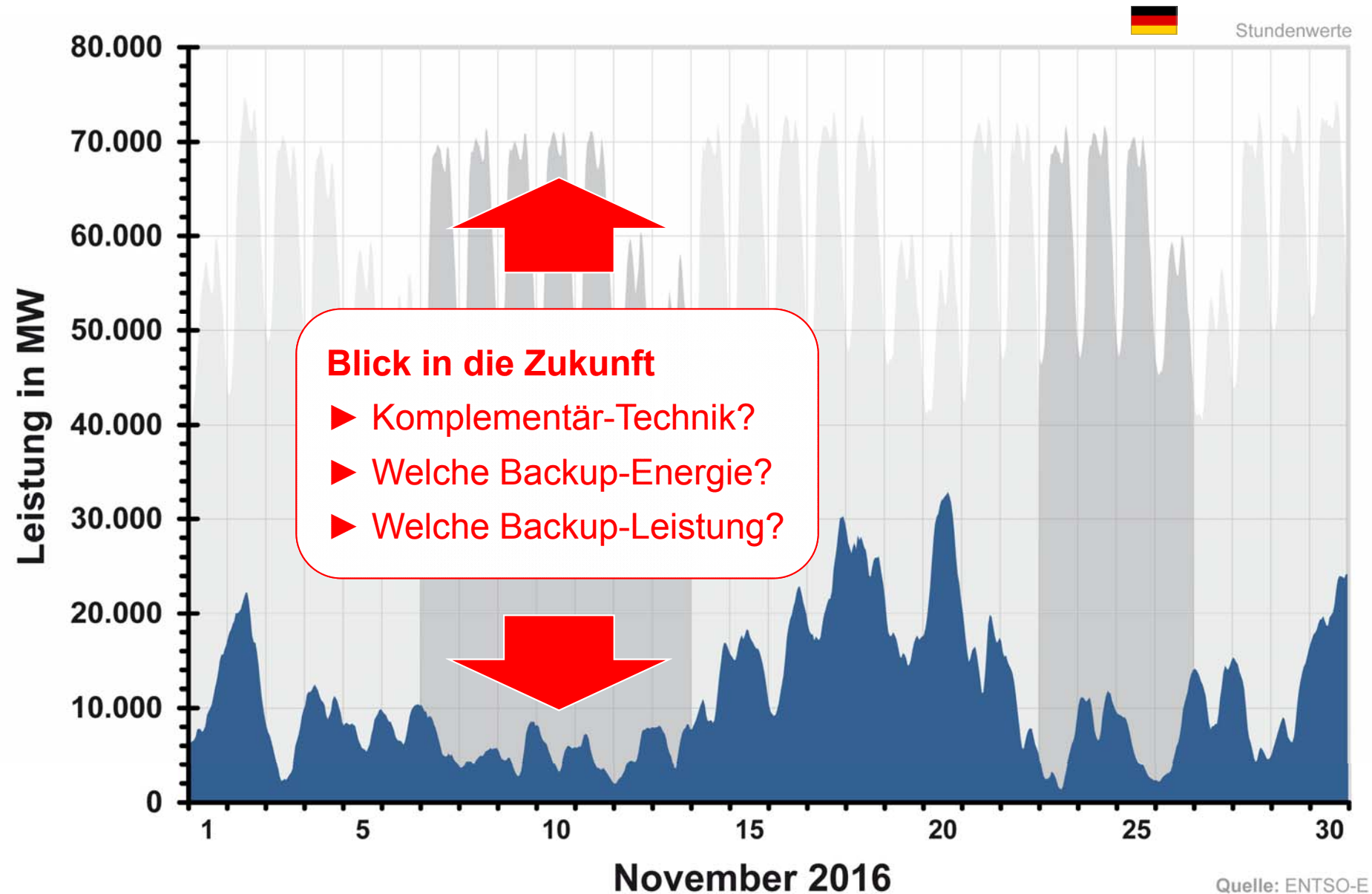


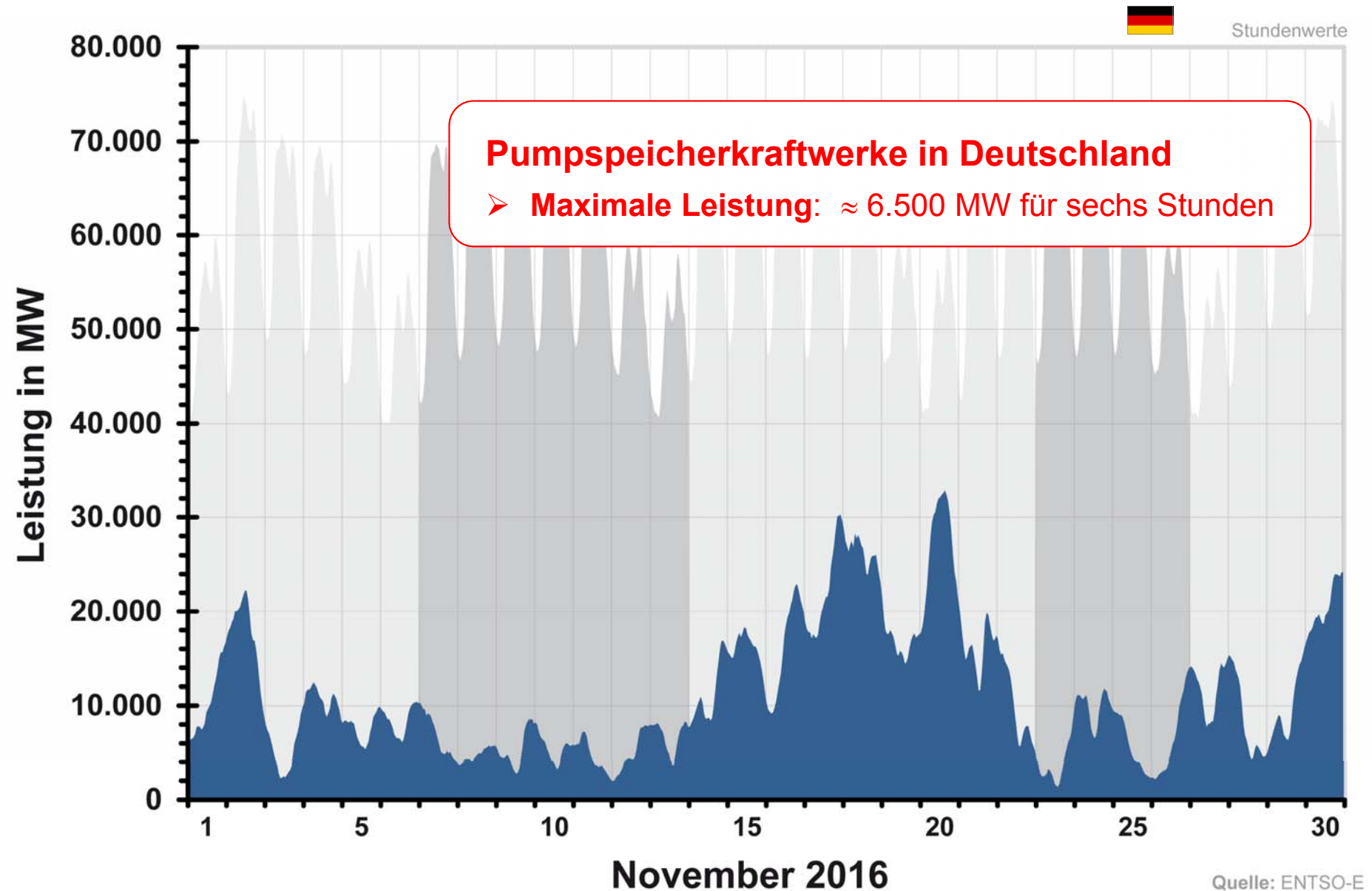
Erkenntnisse

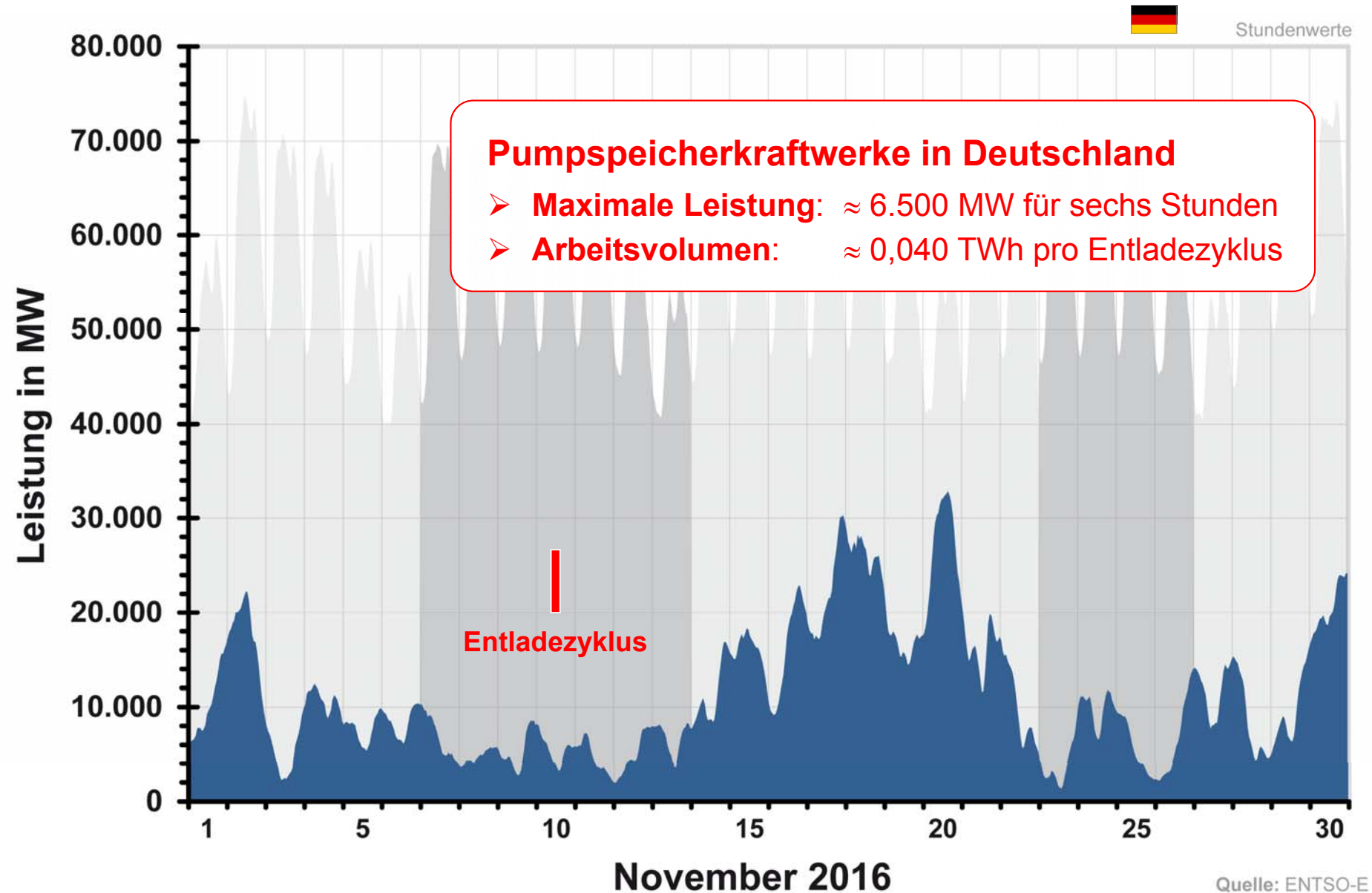
- Mehrtägige Schwachwindphasen mit $P < 5.000$ MW keine Seltenheit
- Seit dem Jahr 2010 rund 160 Fünftagesphasen mit $P < 5.000$ MW (d. h. durchschnittlich alle zwei Wochen zu erwarten)
- Zehn- bis 14-tägige Schwachwindphasen in jedem Jahr seit 2010
- Seit 2010 unveränderte gesicherte Leistung von 1 % der Nennleistung zum Zeitpunkt der Jahreshöchstlast (dargebotsabhängige Energieform)

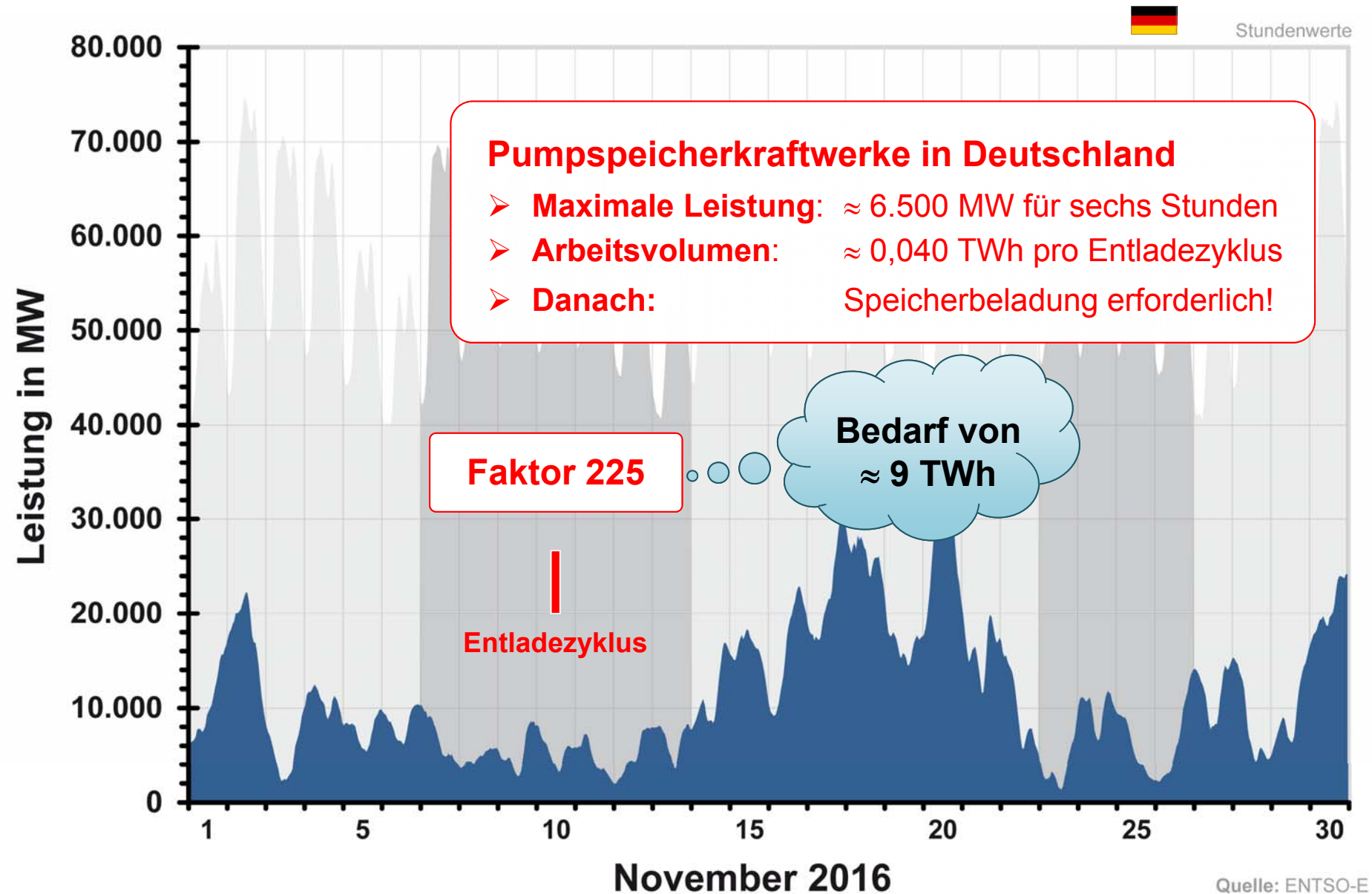


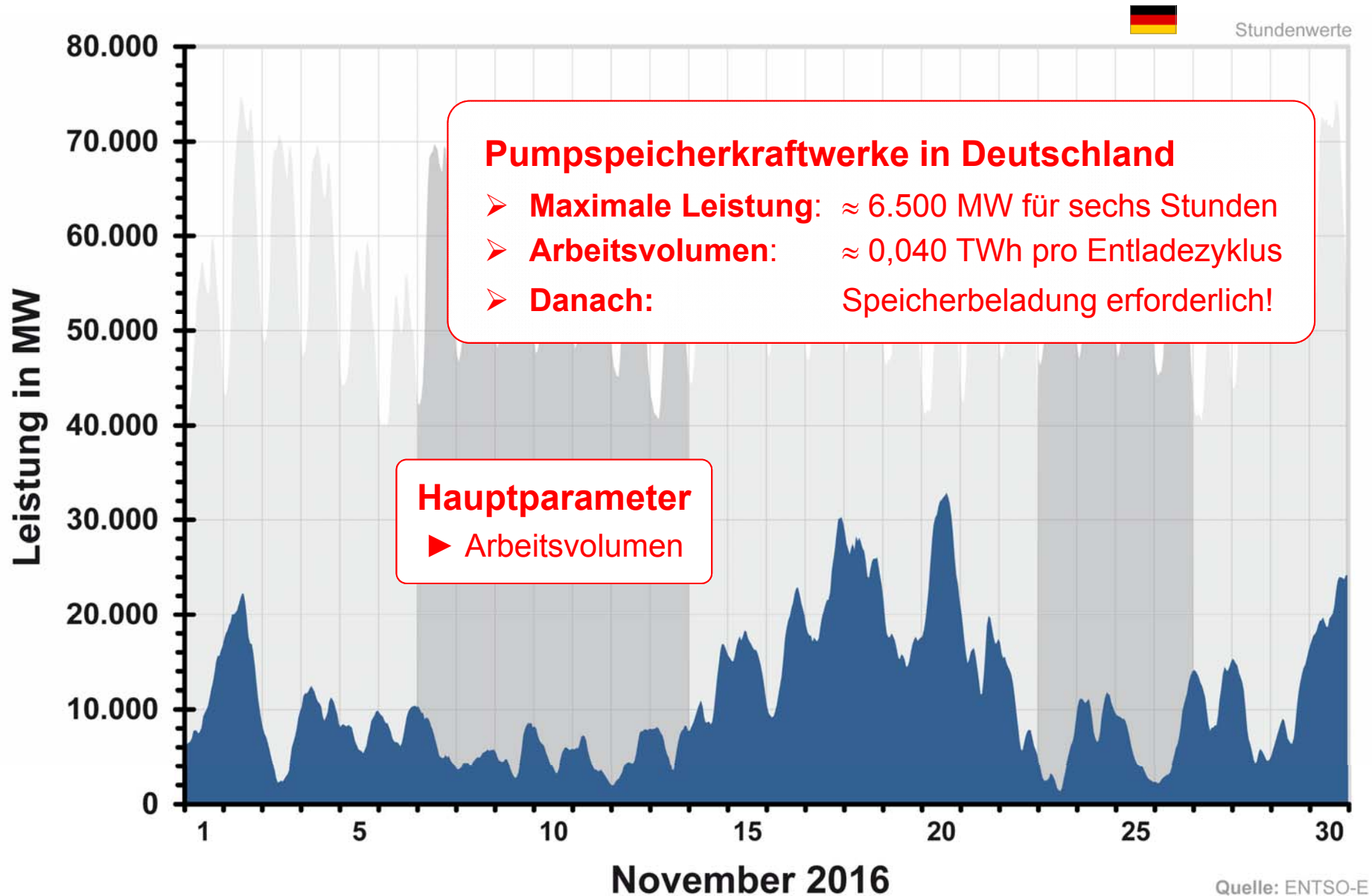












Pumpspeicherkraftwerk Hohenwarte II, Thüringen



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

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

Erkenntnisse

- Pumpspeicherkraftwerke bewährte Technik
- Auf Bedarf konventioneller Kraftwerke ausgerichtet:
 - Vergleichmäßigung der Produktion (Tag-Nacht-Zyklus)
 - Kurzfristiger Ausgleich von untertägigen Spitzenlasten
 - Heutige Maximalleistung von 6.500 MW für sechs Stunden
 - Heutiges Arbeitsvolumen von 0,04 TWh pro Entladezyklus
- Arbeitsvolumen = Speichervolumen im TWh-Bereich erforderlich (d. h. Steigerung um zwei Größenordnungen gegenüber heute)
- Realisierbares Zubaupotenzial von etwa 2 bis 3 TWh in Europa
- **Fazit:** Ausbau wünschenswert, allein jedoch keine Lösung!

Deutschland

- Windstromproduktion von 2010 bis 2016 auf 77 TWh verdoppelt
- Gesamte Nennleistung von 2010 bis 2016 auf 50 GW fast verdoppelt
- Trotz verdoppelter Nennleistung kein Beitrag zur Versorgungssicherheit
- Seit 2010 unveränderte gesicherte Leistung von 1 % der Nennleistung
- Keine Normalverteilung für Leistungseinspeisungen aus Windenergie
- Hohe Volatilität der Leistungseinspeisungen auch auf dem Meer
- Geringere Ausnutzung im Vergleich zu anderen Ländern
- Bedarf an 100 % planbarer Backup-Leistung
- Dringender Bedarf an Speichertechnik

Optionen für eine künftige Grundversorgung mit Strom

- **Kernenergie** Politisch unerwünscht
- **Kohle** Politisch unerwünscht
Gilt auch für CCS-Technologien
- **Gas** Brückentechnologie
Importabhängigkeit
- **Biomasse** Eingeschränkt verfügbar
Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion
- **Wasserkraft** Eingeschränkt verfügbar
Praktisch weitgehend ausgeschöpft
- **Photovoltaik** Allein unzureichend, Komplementärtechnik erforderlich
Beitrag nachts: Null
- **Windenergie** Allein unzureichend, Komplementärtechnik erforderlich
Unstet verfügbar, große Korrelationslängen der Windstromproduktion



Illustration: www.kultur-denkmal-merzenich.de

CCS: Carbon capture and storage

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 150 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 PowerTech e.V.

Thomas Linnemann, Guido Vallana

Deilbachtal 173, 45257 Essen, Germany

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

Vorsitzender des Vorstandes: Dr. Hans Bünting

Geschäftsführer: Erland Christensen

Registergericht: Amtsgericht Essen

Registernummer: VR 1788

www.vgb.org