

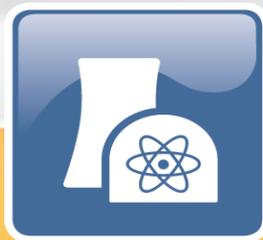
Windenergie in Deutschland und Europa

Status, Potenziale und Herausforderungen in der Grundversorgung mit Elektrizität

Teil 1: Entwicklungen in Deutschland seit 2010

Teil 2: Europäische Situation seit 2015

Thomas Linnemann, Guido S. Vallana



➤ **Vorbemerkungen**

- Struktur der Energieversorgung Deutschlands
- Die turbulenten Eigenschaften der Windenergie
- Grundlegende Netzstabilitätsanforderung

➤ **Teil 1: Entwicklungen in Deutschland seit 2010**

- Kumulierte elektrische Leistungseinspeisungen
- Windstromproduktion an Land und auf dem Meer
- Schwachwindphasen (Flauten)

➤ **Teil 2: Europäische Situation seit 2015**

- Betrachtungen zur räumlichen Korrelation
- Erkenntnisse und Fazit

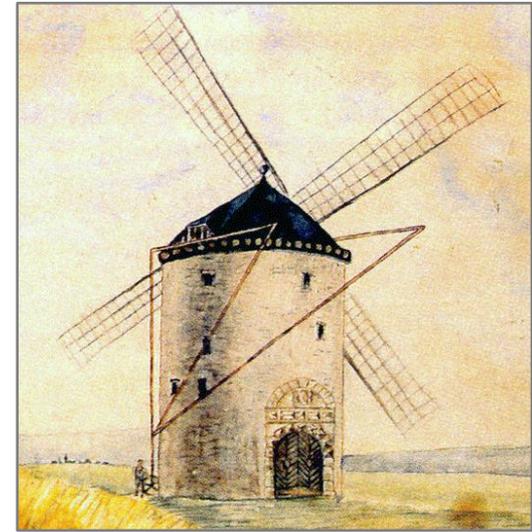


Illustration: www.kultur-denkmal-merzenich.de

➤ **Vorbemerkungen**

- **Struktur der Energieversorgung Deutschlands**
- Die turbulenten Eigenschaften der Windenergie
- Grundlegende Netzstabilitätsanforderung

➤ **Teil 1: Entwicklungen in Deutschland seit 2010**

- Kumulierte elektrische Leistungseinspeisungen
- Windstromproduktion an Land und auf dem Meer
- Schwachwindphasen (Flauten)

➤ **Teil 2: Europäische Situation seit 2015**

- Betrachtungen zur räumlichen Korrelation
- Erkenntnisse und Fazit

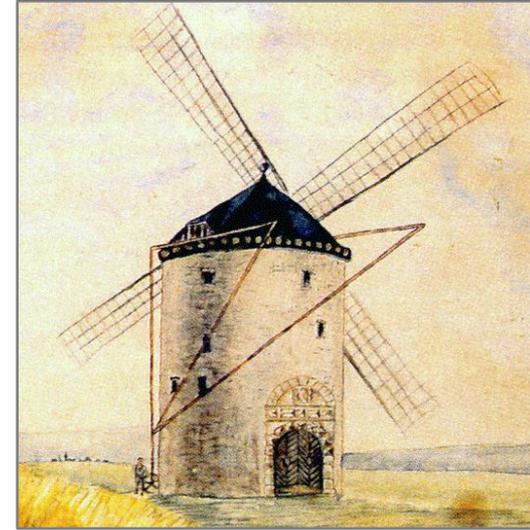
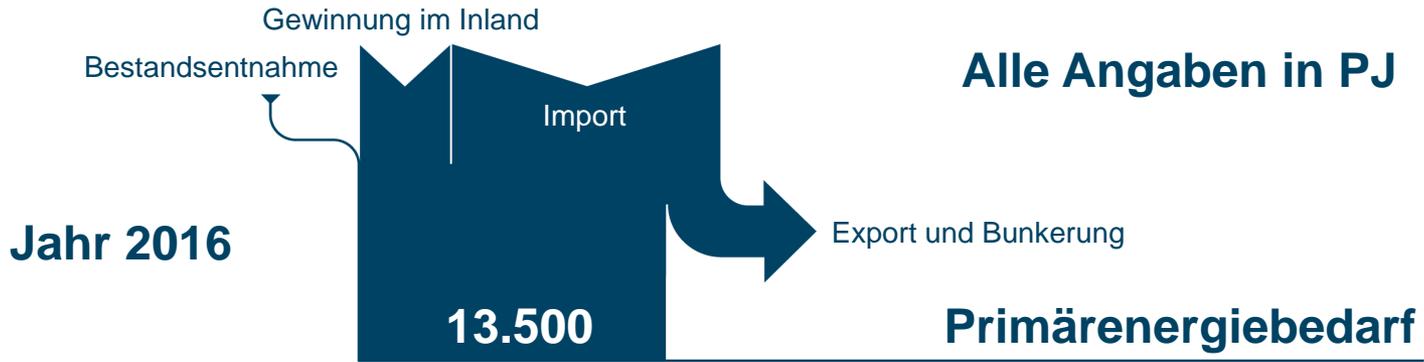


Illustration: www.kultur-denkmal-merzenich.de



≈ 3.800 TWh

Vereinfachtes
Energieflussbild

- 1 kWh ▶ zum Beispiel eine Stunde lang staubsaugen
- 1 TWh ▶ 10^9 kWh
- ▶ 10^9 Personen, die eine Stunde lang staubsaugen



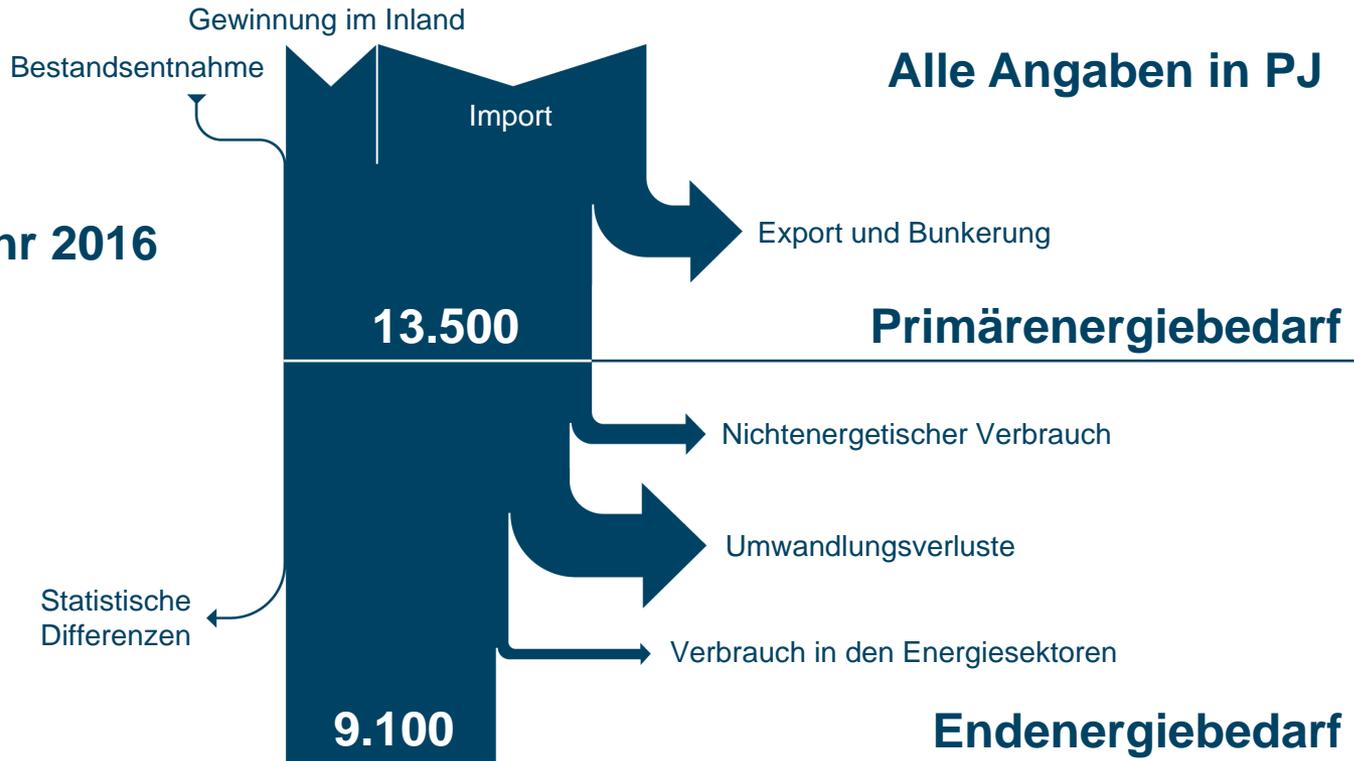
Leistung
1.000 W

Umrechnung: 1 PJ = 10^{15} J und 1 TWh = 3,6 PJ Quelle: AGE B



Alle Angaben in PJ

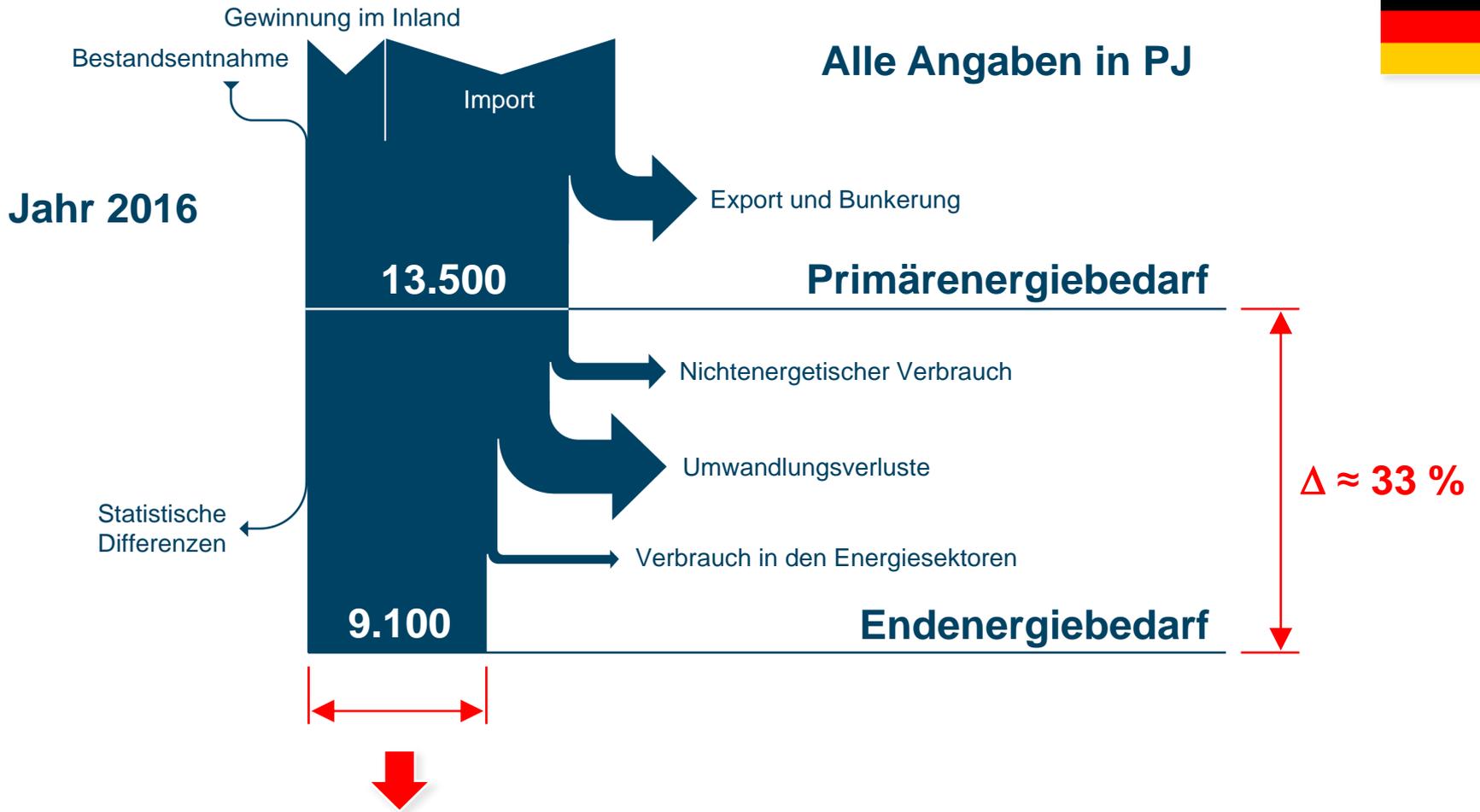
Jahr 2016



≈ 2.500 TWh

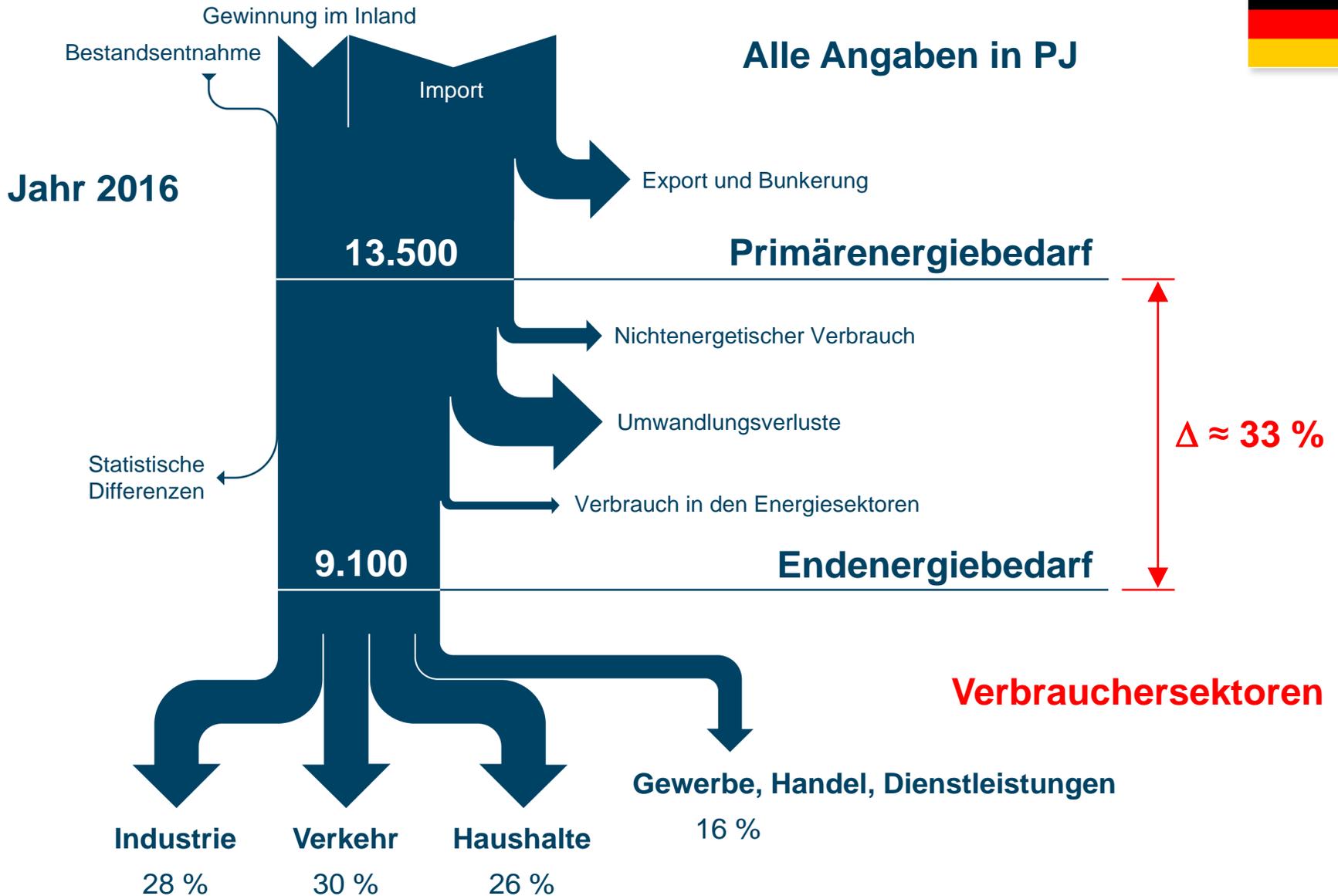
Umrechnung: 1 PJ = 10¹⁵ J und 1 TWh = 3,6 PJ Quelle: AGE B



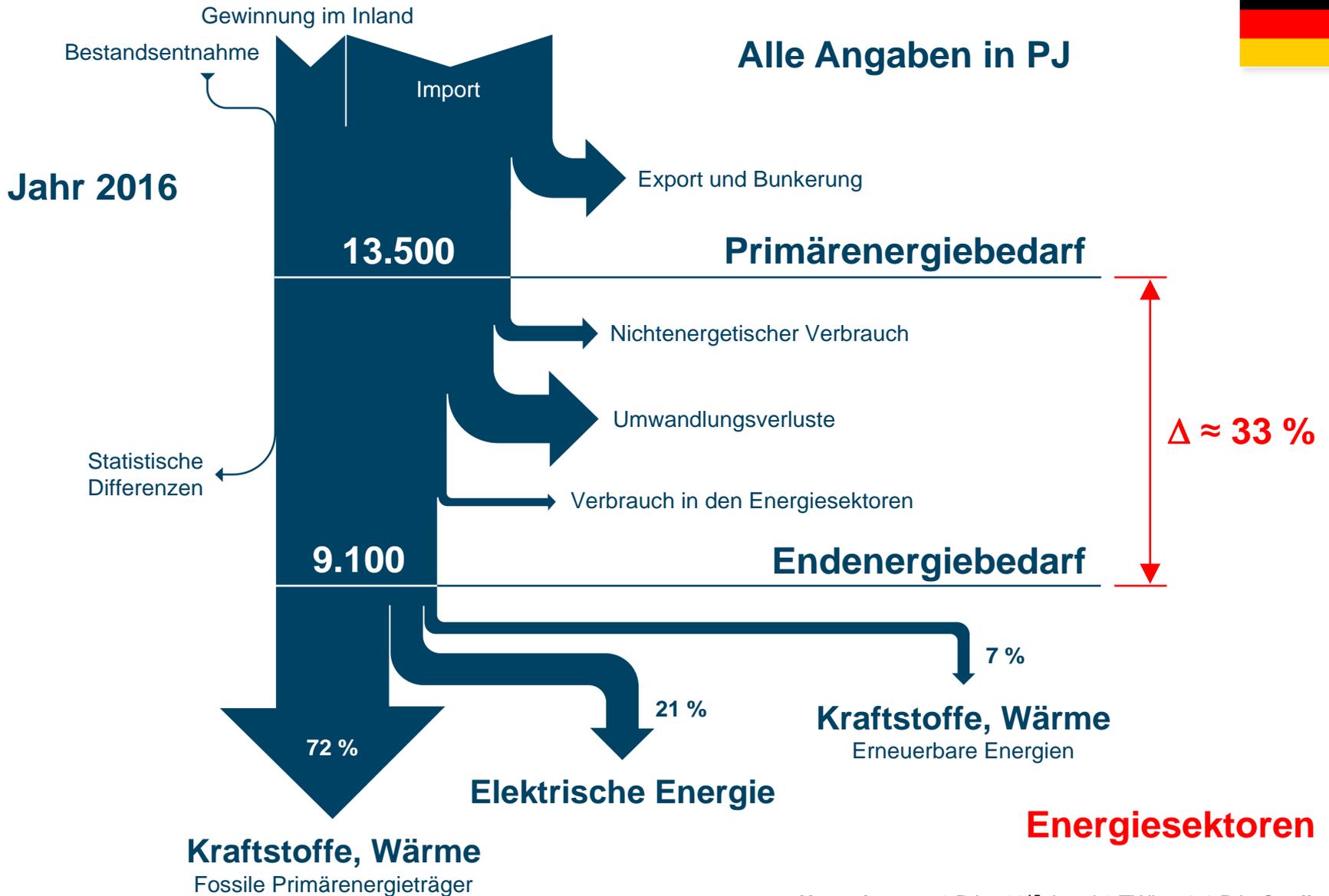


Endenergie \approx zwei Drittel der Primärenergie



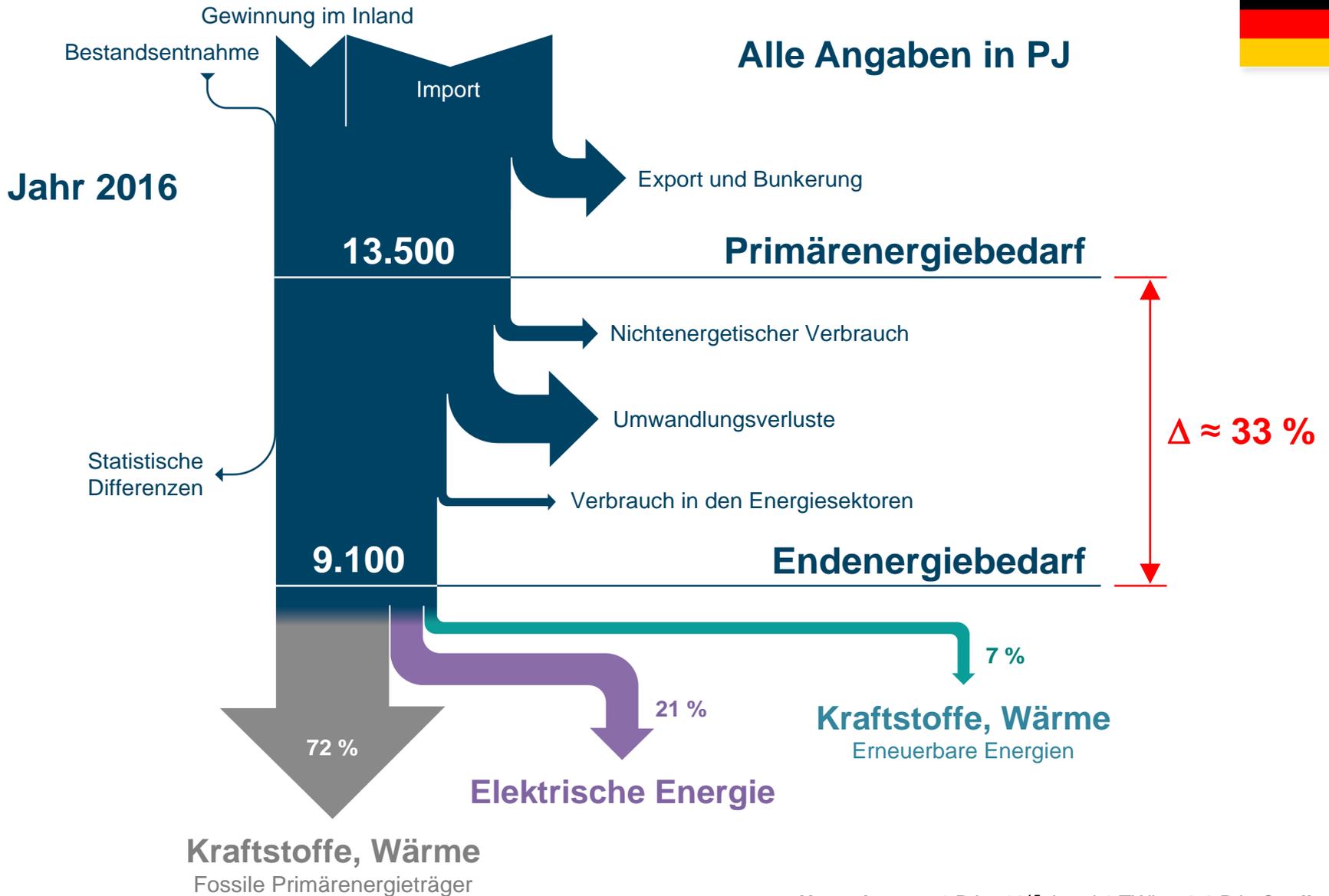


Umrechnung: 1 PJ = 10^{15} J und 1 TWh = 3,6 PJ **Quelle:** AGEB



Umrechnung: 1 PJ = 10^{15} J und 1 TWh = 3,6 PJ Quelle: AGEB





Umrechnung: 1 PJ = 10^{15} J und 1 TWh = 3,6 PJ Quelle: AGEB

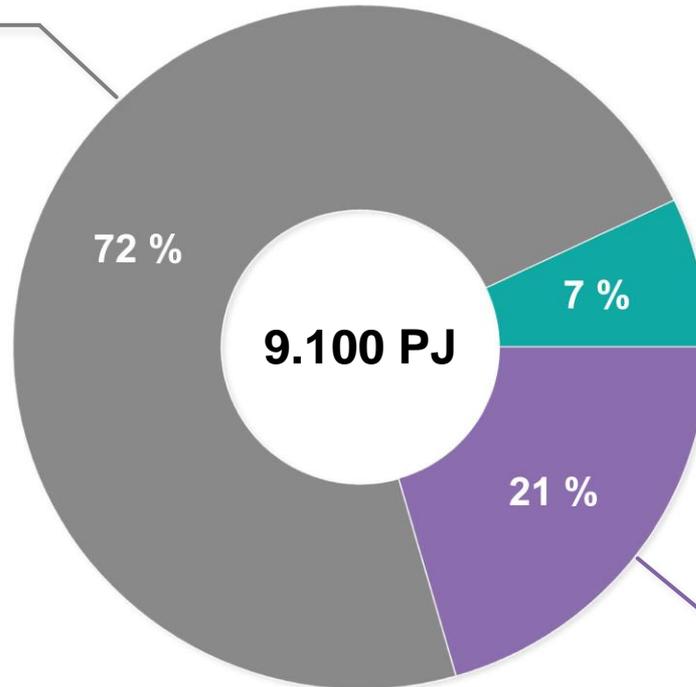




Endenergiebedarf 2016

Fossile Energie

- Gase
- Mineralöle
- Braunkohle
- Steinkohle
- Fernwärme
- Sonstige



Erneuerbare Energie

- Brennstoffe
- Kraftstoffe
- Wärme

Elektrische Energie

- Fossile Brennstoffe ≈ 58 %
- Kernbrennstoffe ≈ 13 %
- Erneuerbare ≈ 29 %

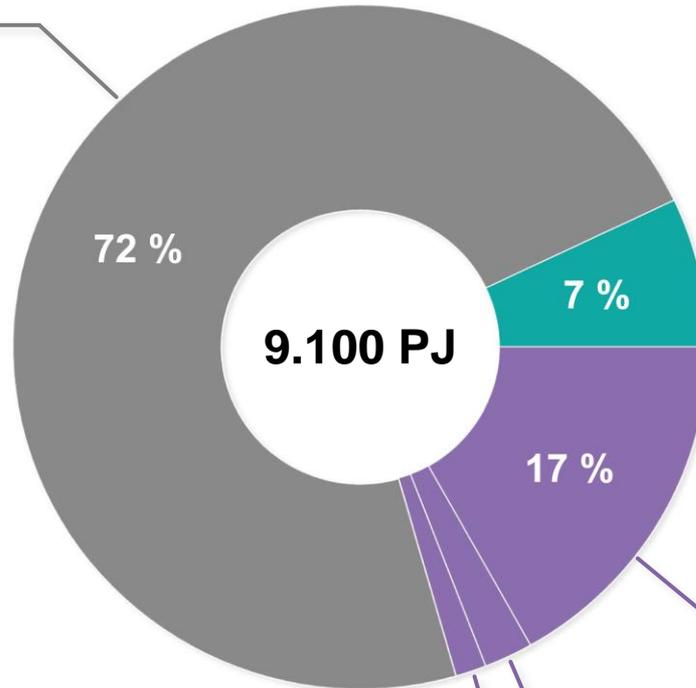
Umrechnung: 1 PJ = 10^{15} J und 1 TWh = 3,6 PJ Quelle: AGEB



Endenergiebedarf 2016

Fossile Energie

- Gase
- Mineralöle
- Braunkohle
- Steinkohle
- Fernwärme
- Sonstige



Erneuerbare Energie

- Brennstoffe
- Kraftstoffe
- Wärme

Elektrische Energie

3,1 % Windenergie

1,5 % Photovoltaik

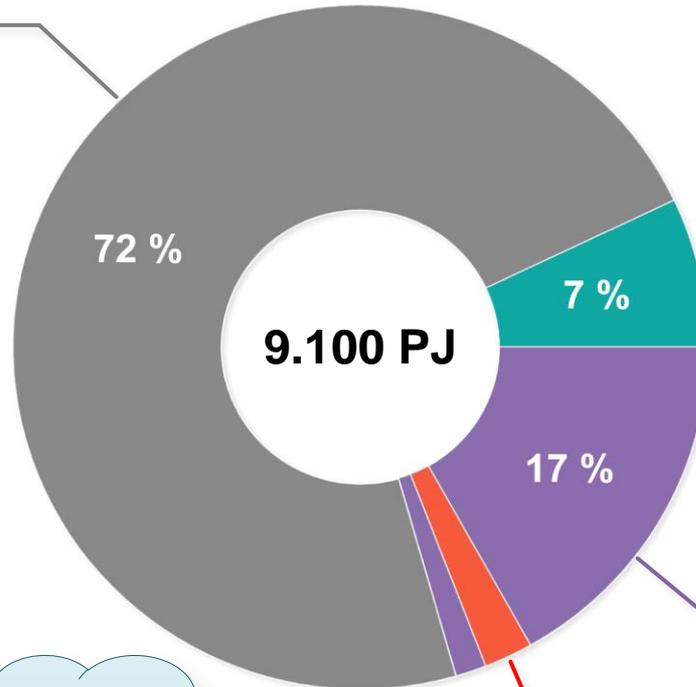
Umrechnung: 1 PJ = 10^{15} J und 1 TWh = 3,6 PJ Quelle: AGEB



Endenergiebedarf 2016

Fossile Energie

- Gase
- Mineralöle
- Braunkohle
- Steinkohle
- Fernwärme
- Sonstige



Erneuerbare Energie

- Brennstoffe
- Kraftstoffe
- Wärme

Elektrische Energie

3,1 % Windenergie

Heutiges
Thema

Umrechnung: 1 PJ = 10^{15} J und 1 TWh = 3,6 PJ Quelle: AGEB

➤ **Vorbemerkungen**

- Struktur der Energieversorgung Deutschlands
- **Die turbulenten Eigenschaften der Windenergie**
- Grundlegende Netzstabilitätsanforderung

➤ **Teil 1: Entwicklungen in Deutschland seit 2010**

- Kumulierte elektrische Leistungseinspeisungen
- Windstromproduktion an Land und auf dem Meer
- Schwachwindphasen (Flauten)

➤ **Teil 2: Europäische Situation seit 2015**

- Betrachtungen zur räumlichen Korrelation
- Erkenntnisse und Fazit

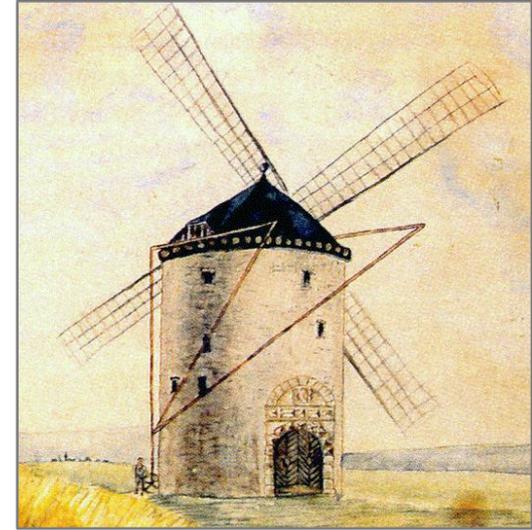
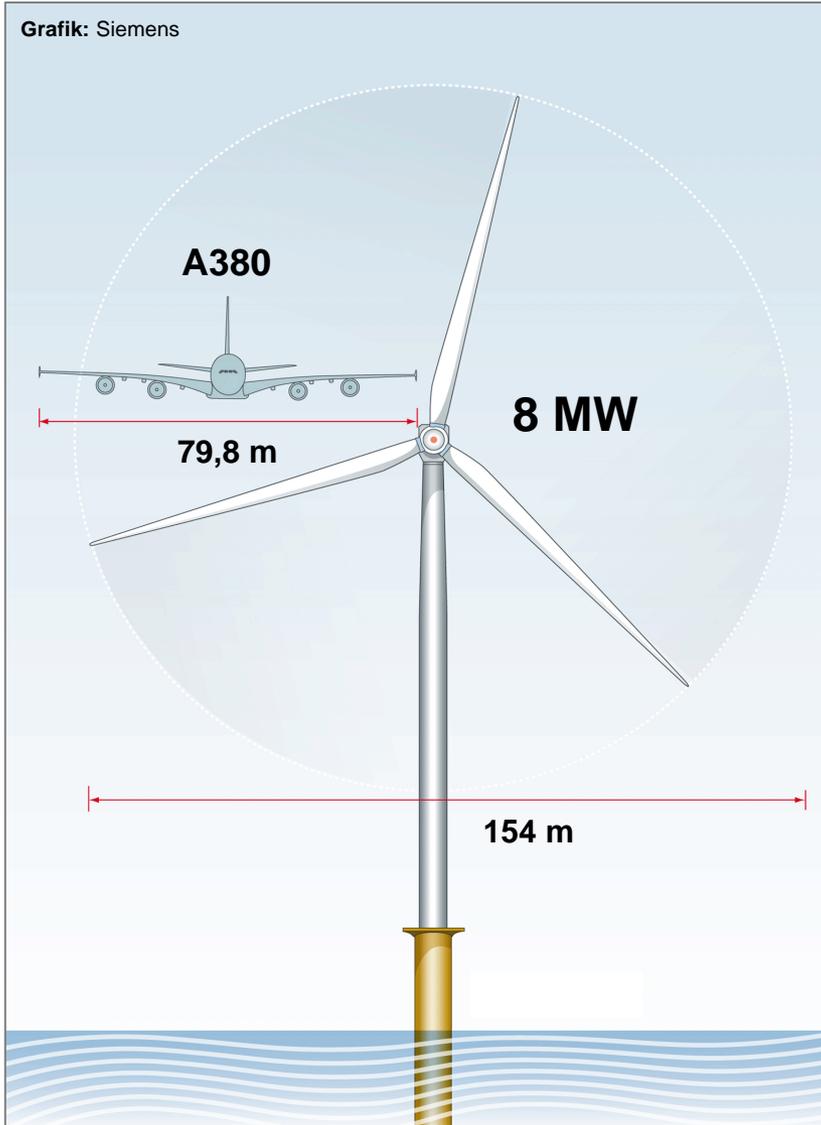
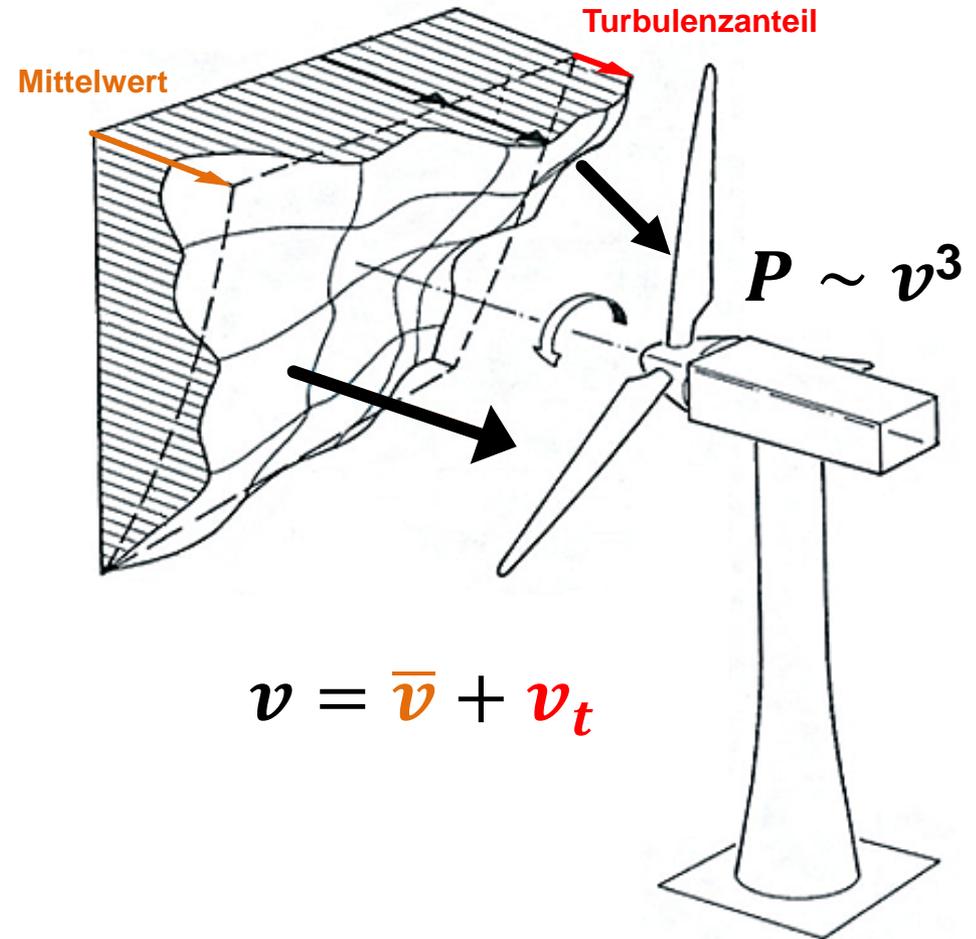


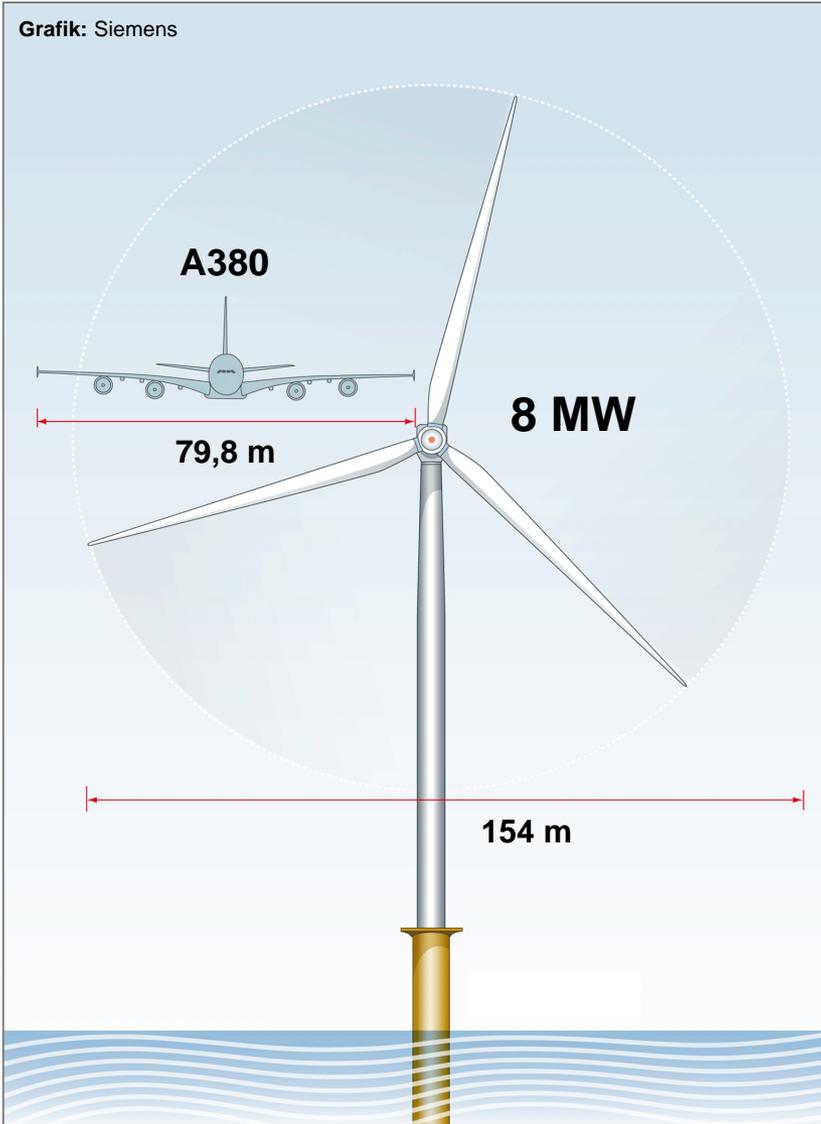
Illustration: www.kultur-denkmal-merzenich.de

Grafik: Siemens

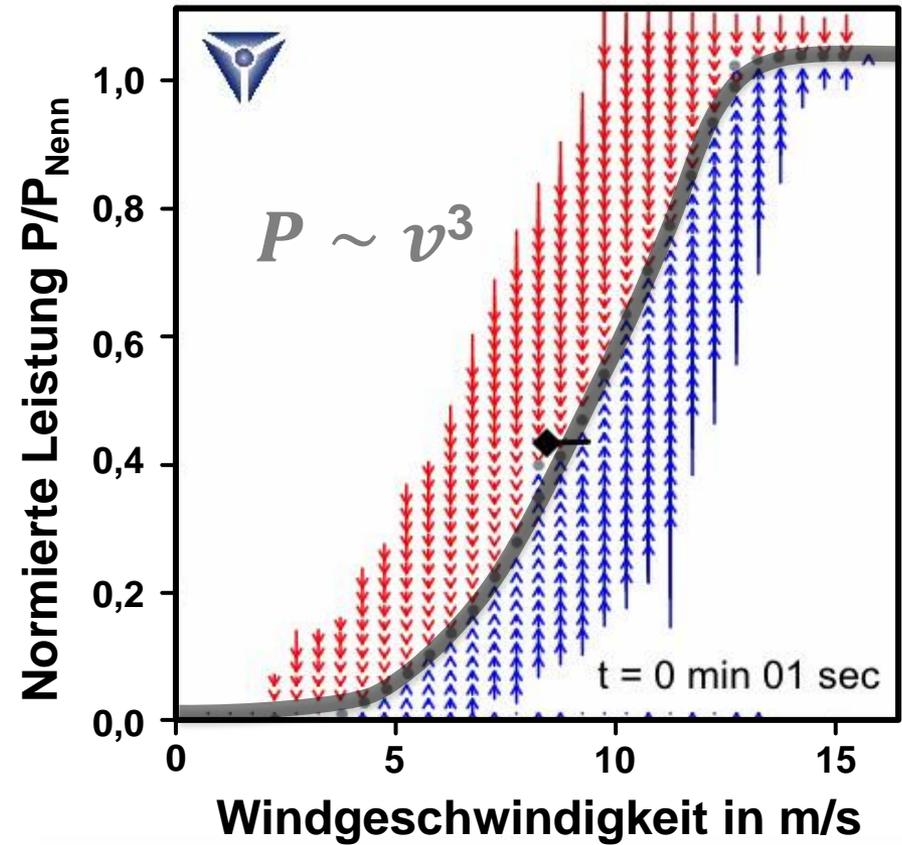


3D-Windgeschwindigkeitsfeld

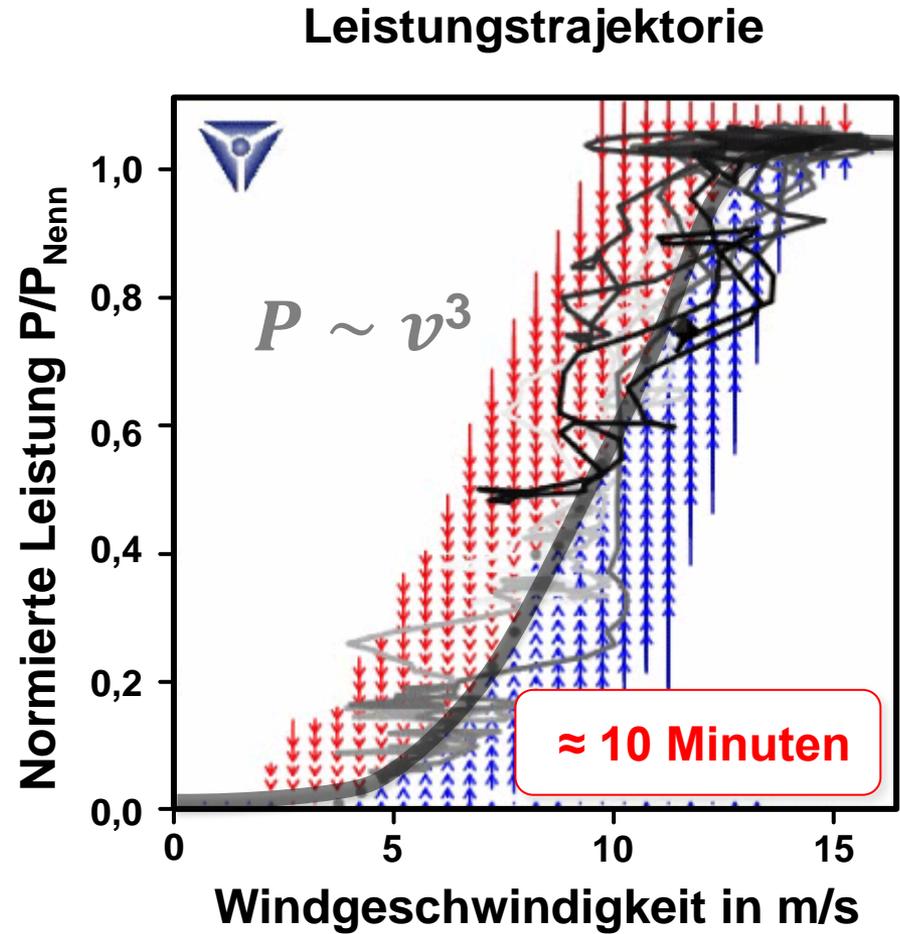




Leistungstrajektorie



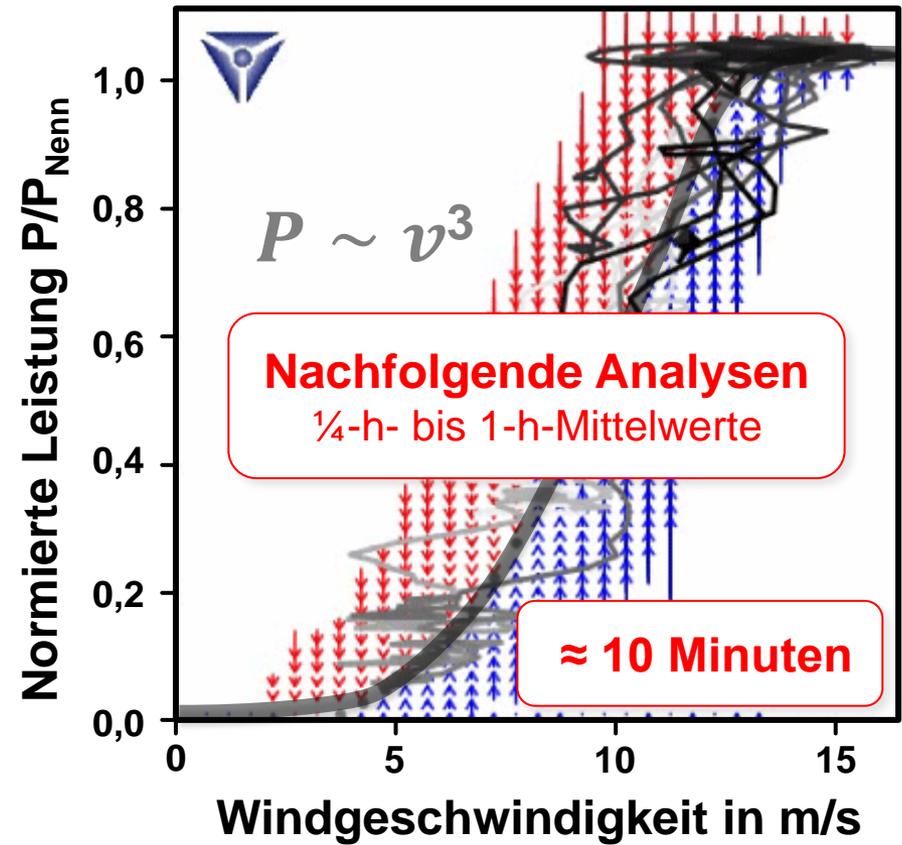
Quelle: Milan, P.; Wächter, M.; Peinke, J.: Turbulent Character of Wind Energy. Physical Review Letters 110, 138701 (2013).



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).

➤ **Vorbemerkungen**

- Struktur der Energieversorgung Deutschlands
- Die turbulenten Eigenschaften der Windenergie
- **Grundlegende Netzstabilitätsanforderung**

➤ **Teil 1: Entwicklungen in Deutschland seit 2010**

- Kumulierte elektrische Leistungseinspeisungen
- Windstromproduktion an Land und auf dem Meer
- Schwachwindphasen (Flauten)

➤ **Teil 2: Europäische Situation seit 2015**

- Betrachtungen zur räumlichen Korrelation
- Erkenntnisse und Fazit

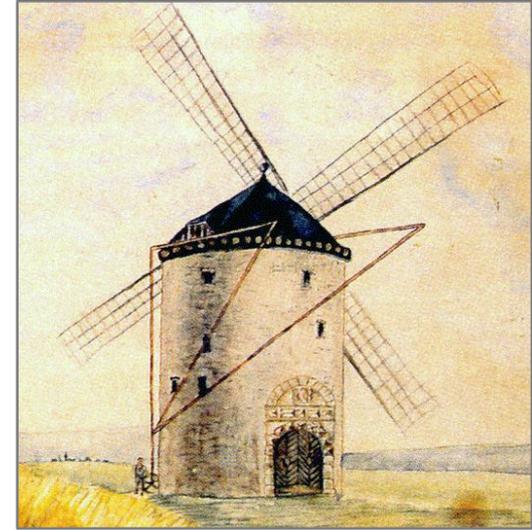
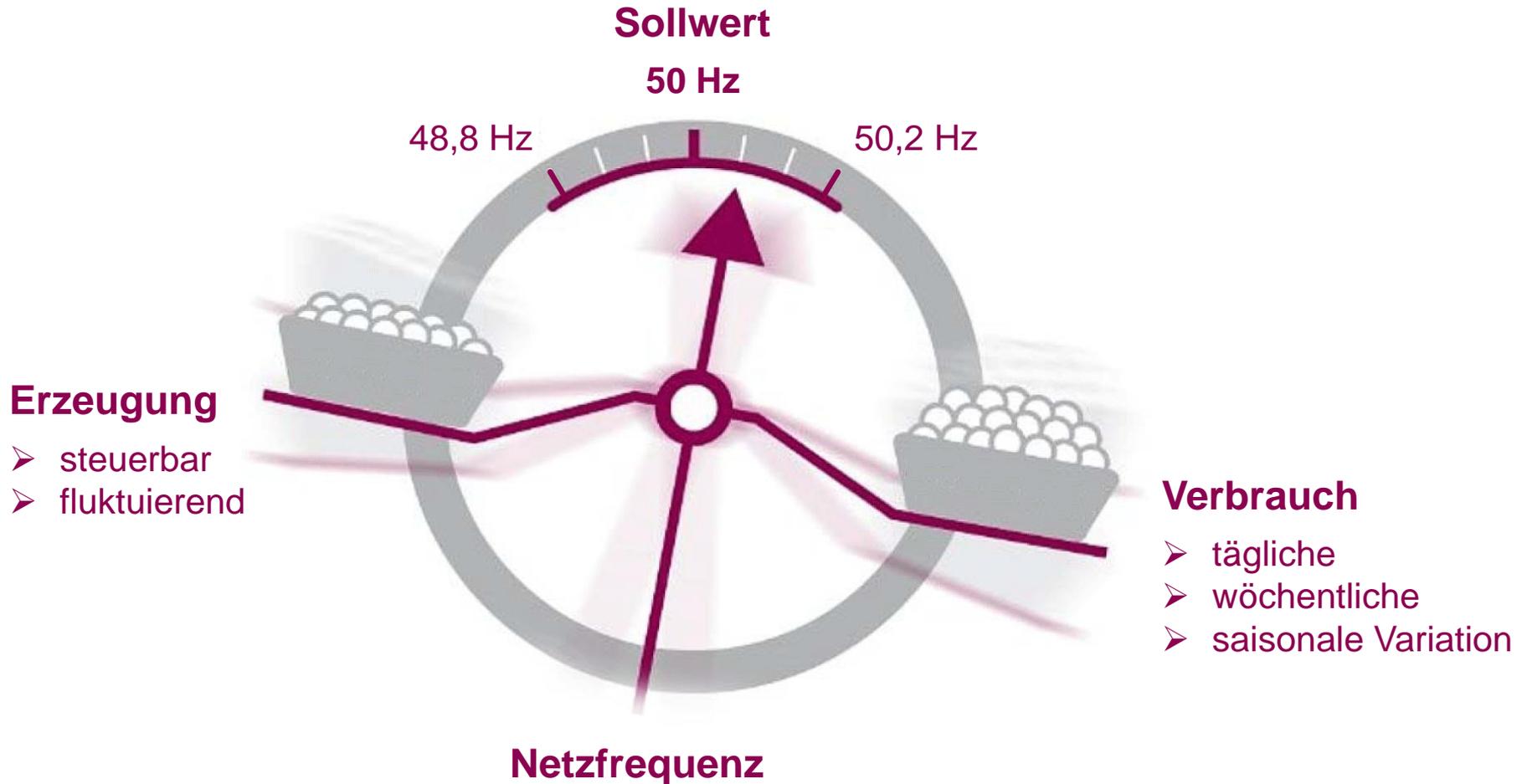


Illustration: www.kultur-denkmal-merzenich.de

Stromerzeugung und Stromverbrauch im Gleichgewicht halten!



Quelle: Energieforschungszentrum Niedersachsen

➤ **Vorbemerkungen**

- Struktur der Energieversorgung Deutschlands
- Die turbulenten Eigenschaften der Windenergie
- Grundlegende Netzstabilitätsanforderung

➤ **Teil 1: Entwicklungen in Deutschland seit 2010**

- Kumulierte elektrische Leistungseinspeisungen
- Windstromproduktion an Land und auf dem Meer
- Schwachwindphasen (Flauten)

➤ **Teil 2: Europäische Situation seit 2015**

- Betrachtungen zur räumlichen Korrelation
- Erkenntnisse und Fazit

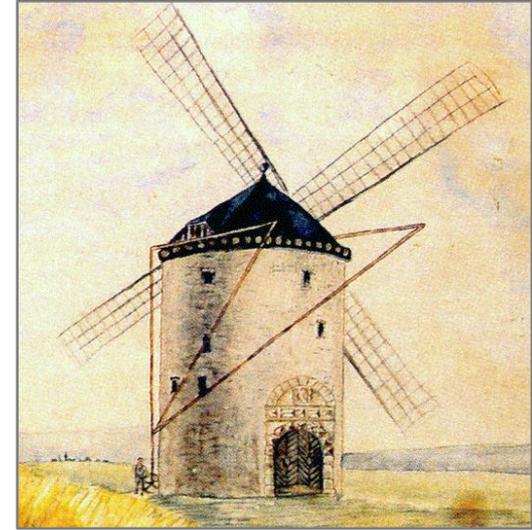


Illustration: www.kultur-denkmal-merzenich.de

2010 bis 2018



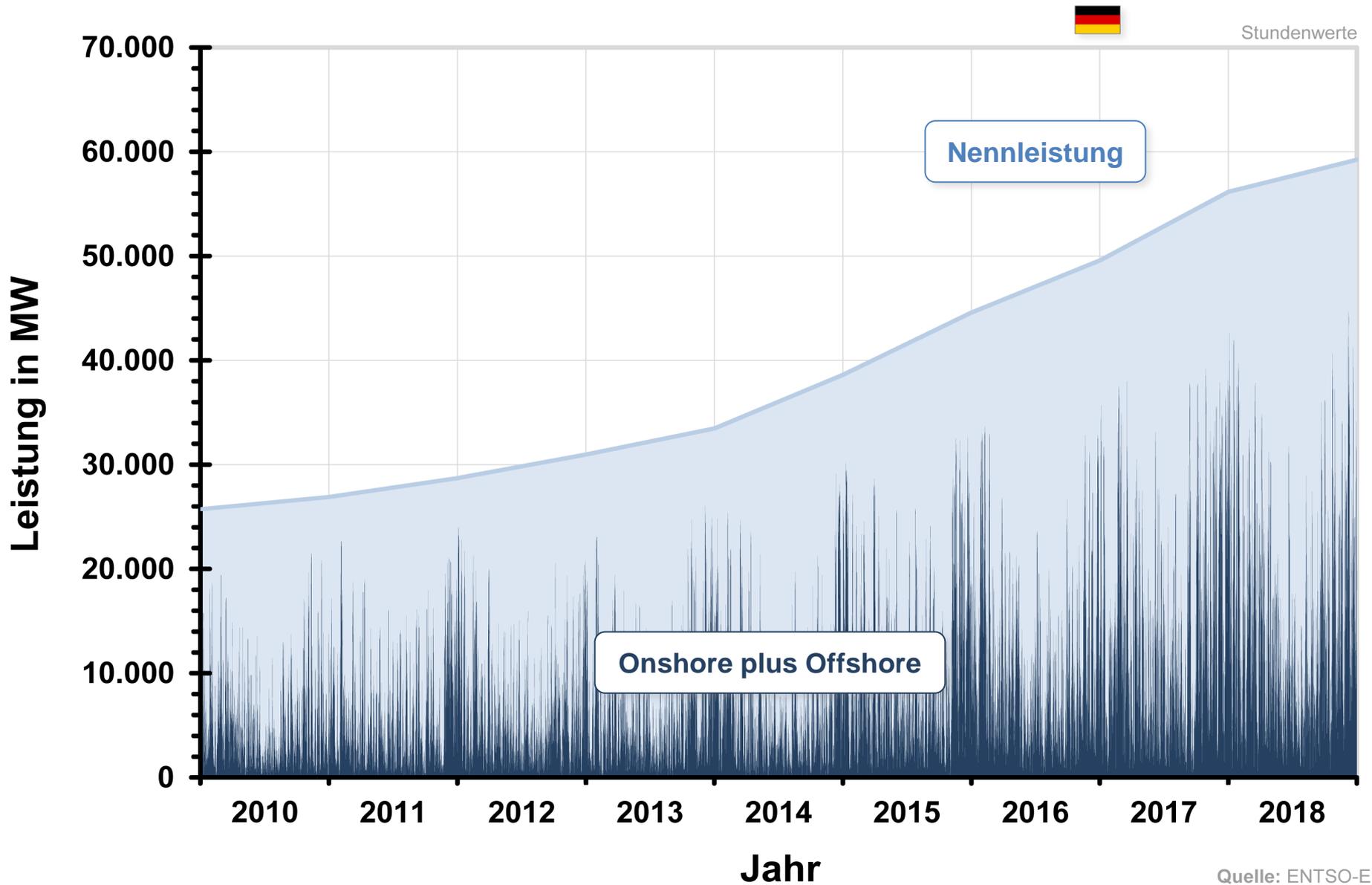
**Weht irgendwo immer Wind für
eine Grundversorgung mit Strom?**

Zeitreihen der Leistung

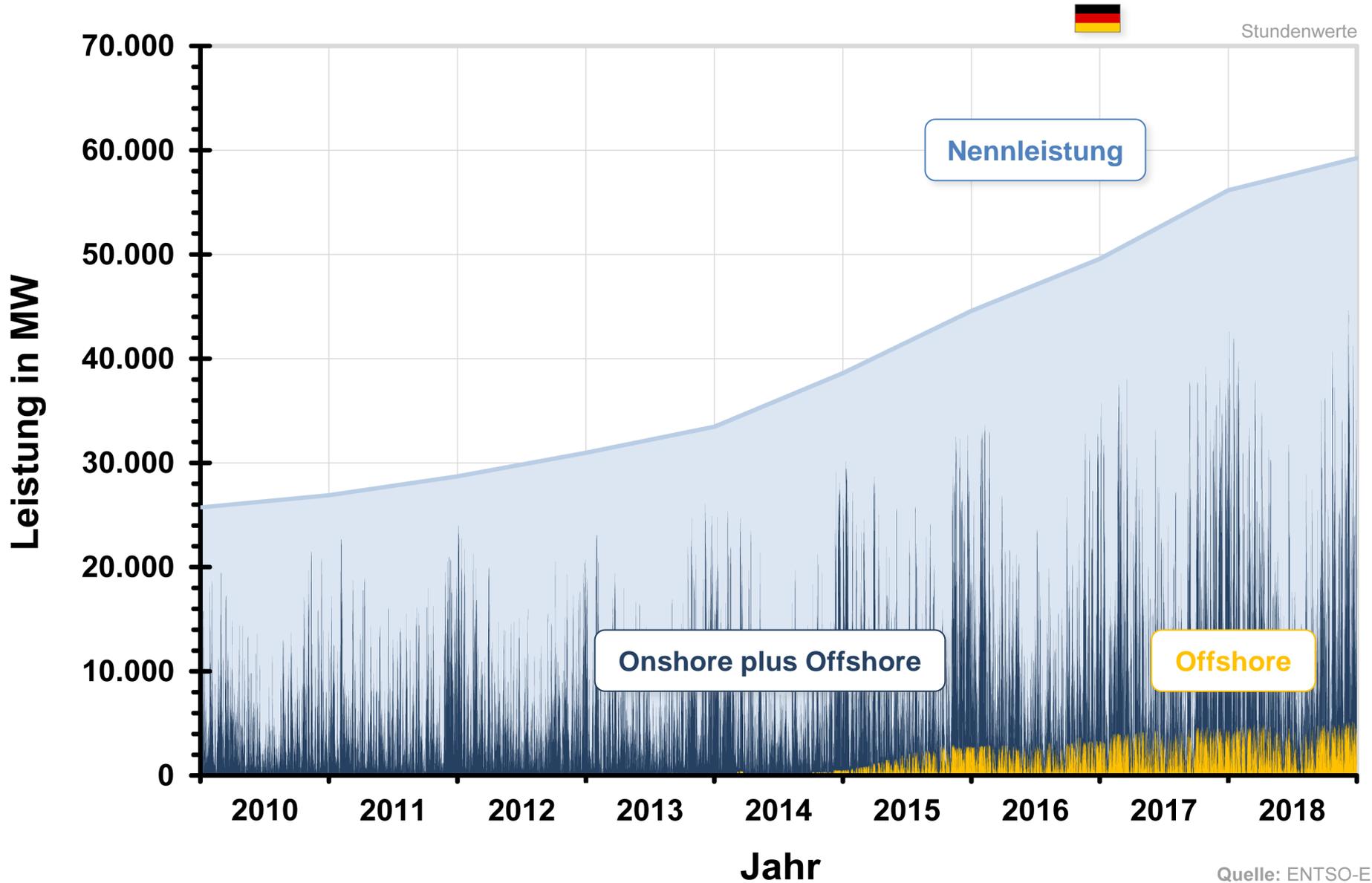
- **ÜNB**
Nationale Übertragungsnetzbetreiber
- **ENTSO-E**
Europäische Übertragungsnetzbetreiber

Energiestatistische Daten

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

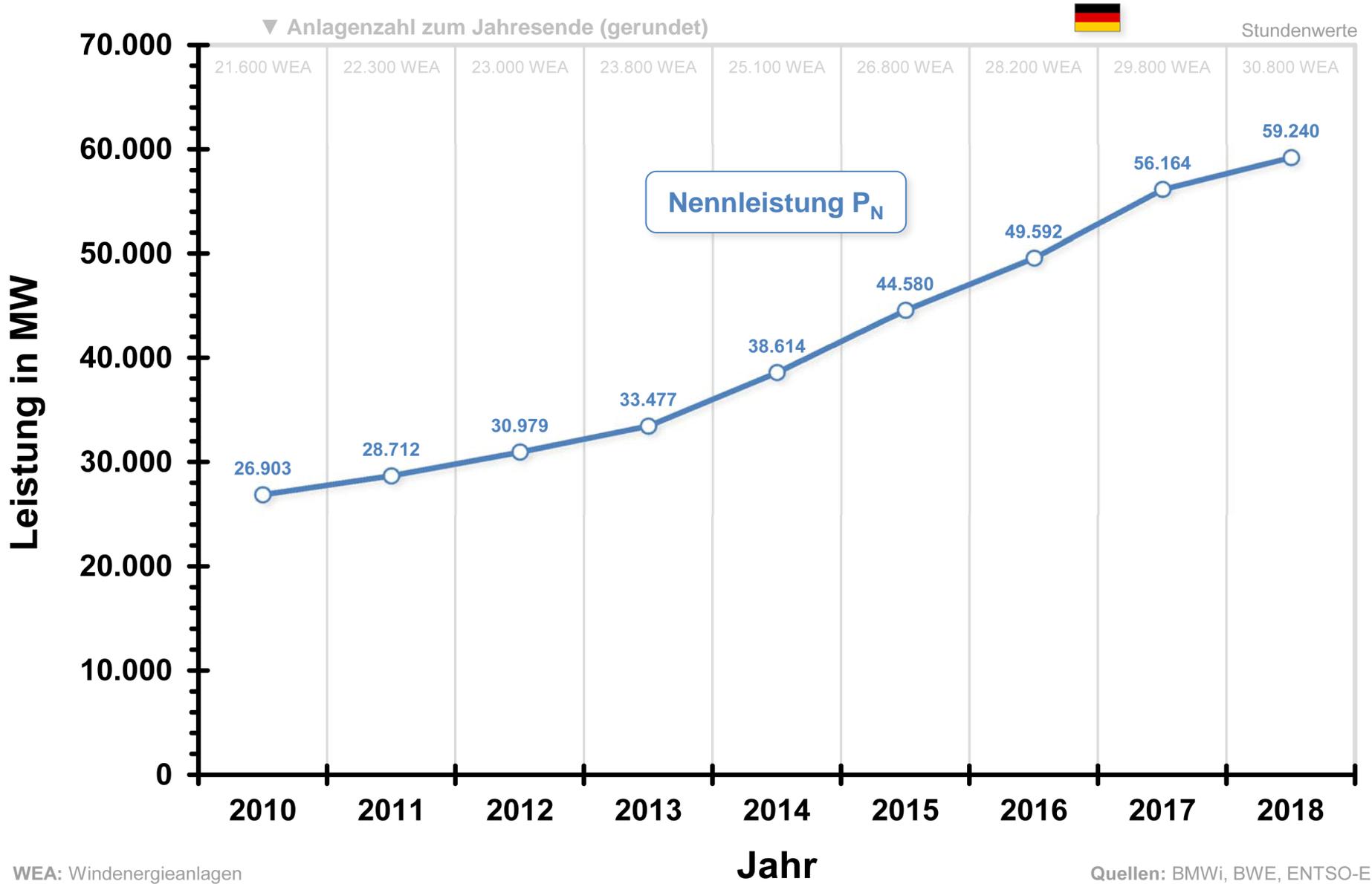


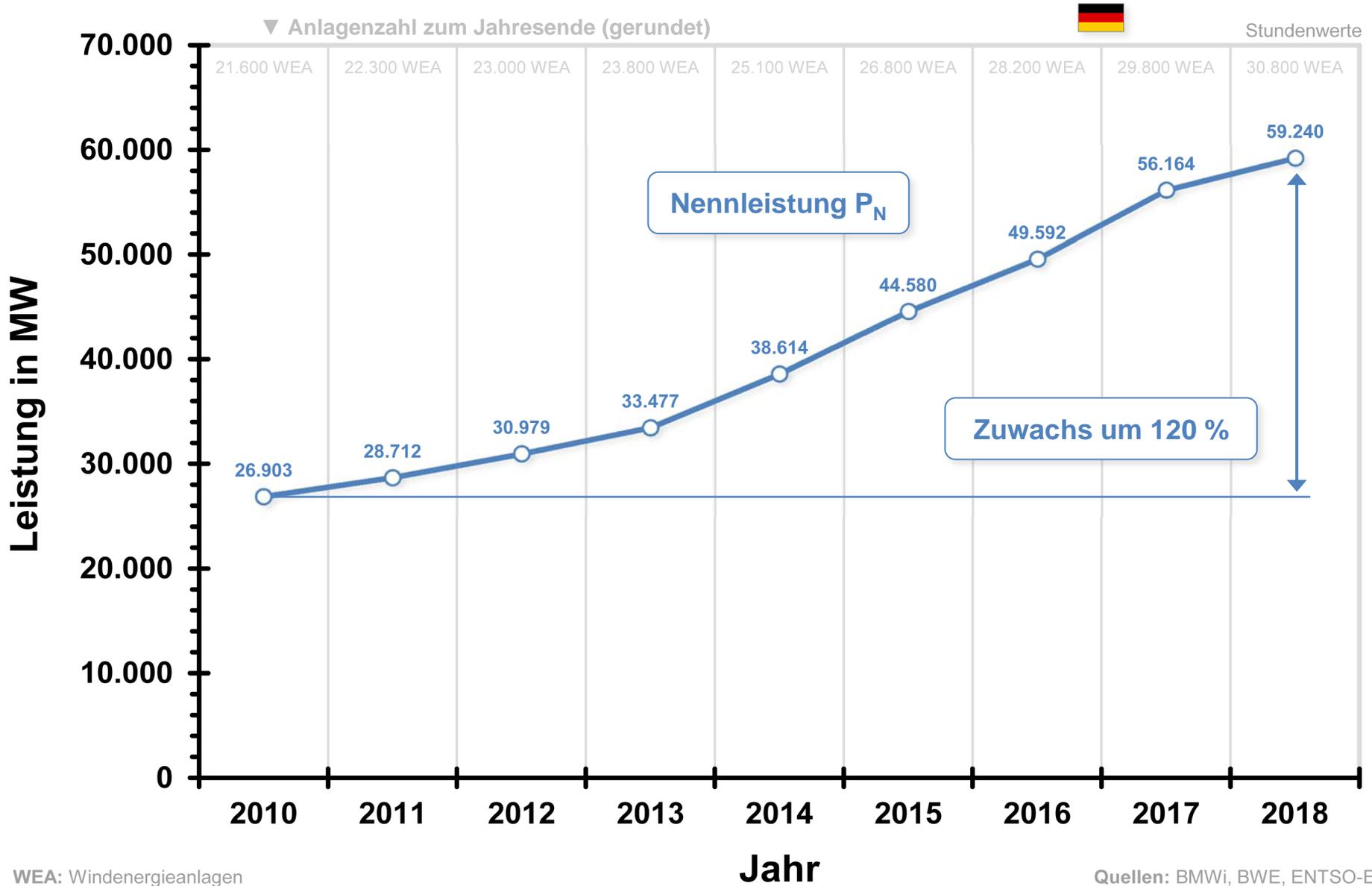
Quelle: ENTSO-E

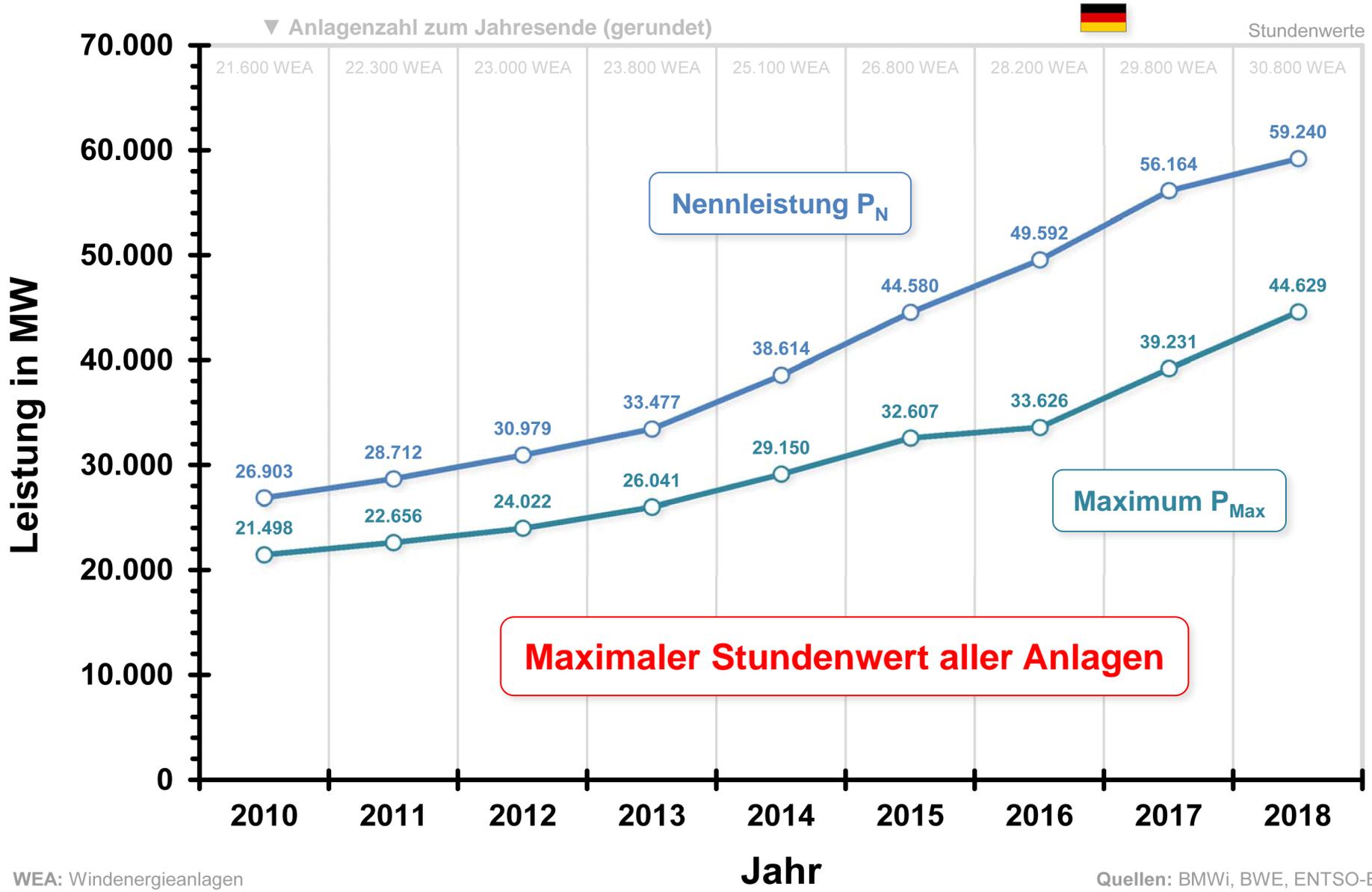


Quelle: ENTSO-E

Deutschland: Windstromproduktion von 2010 bis 2018



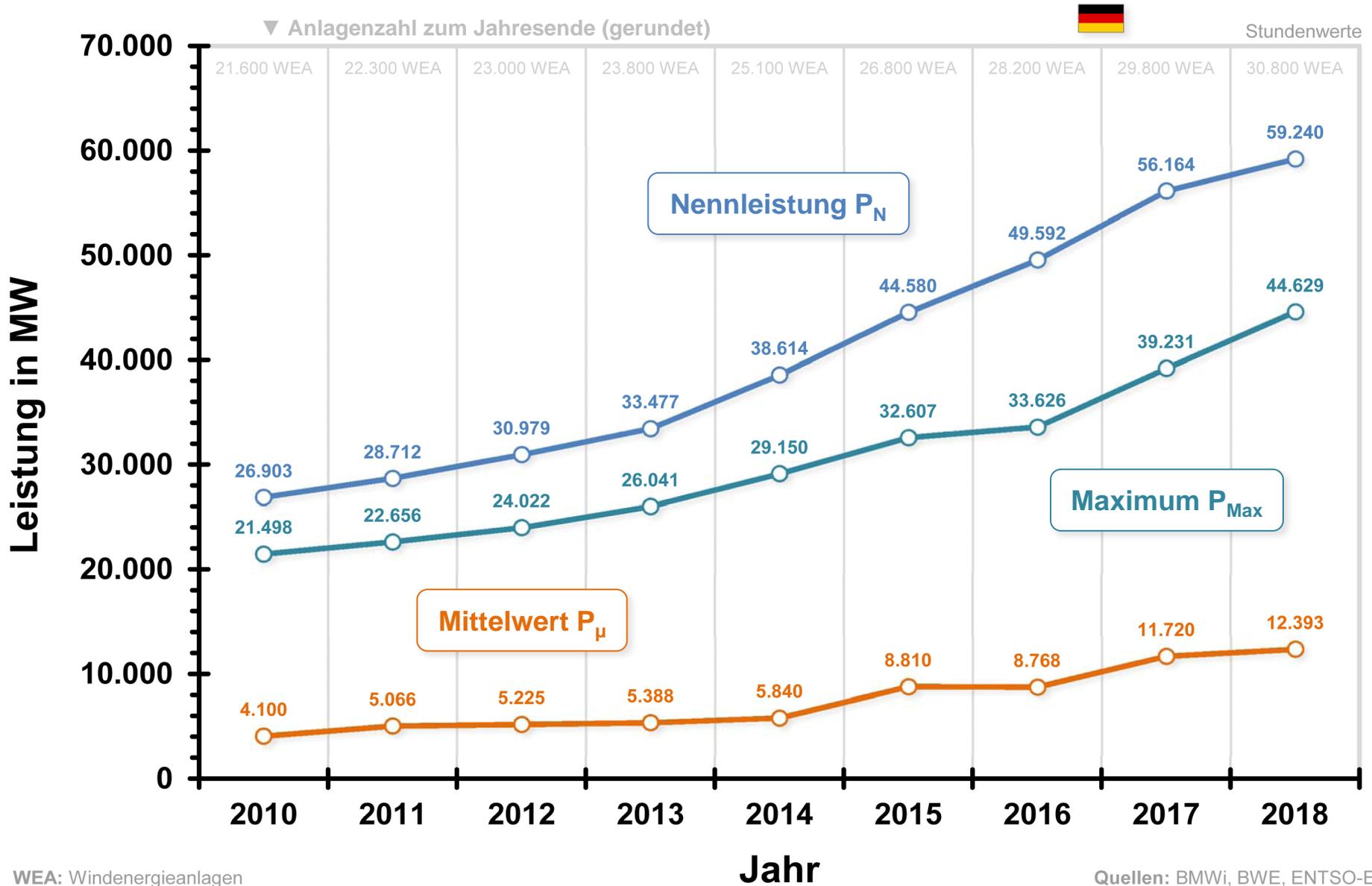


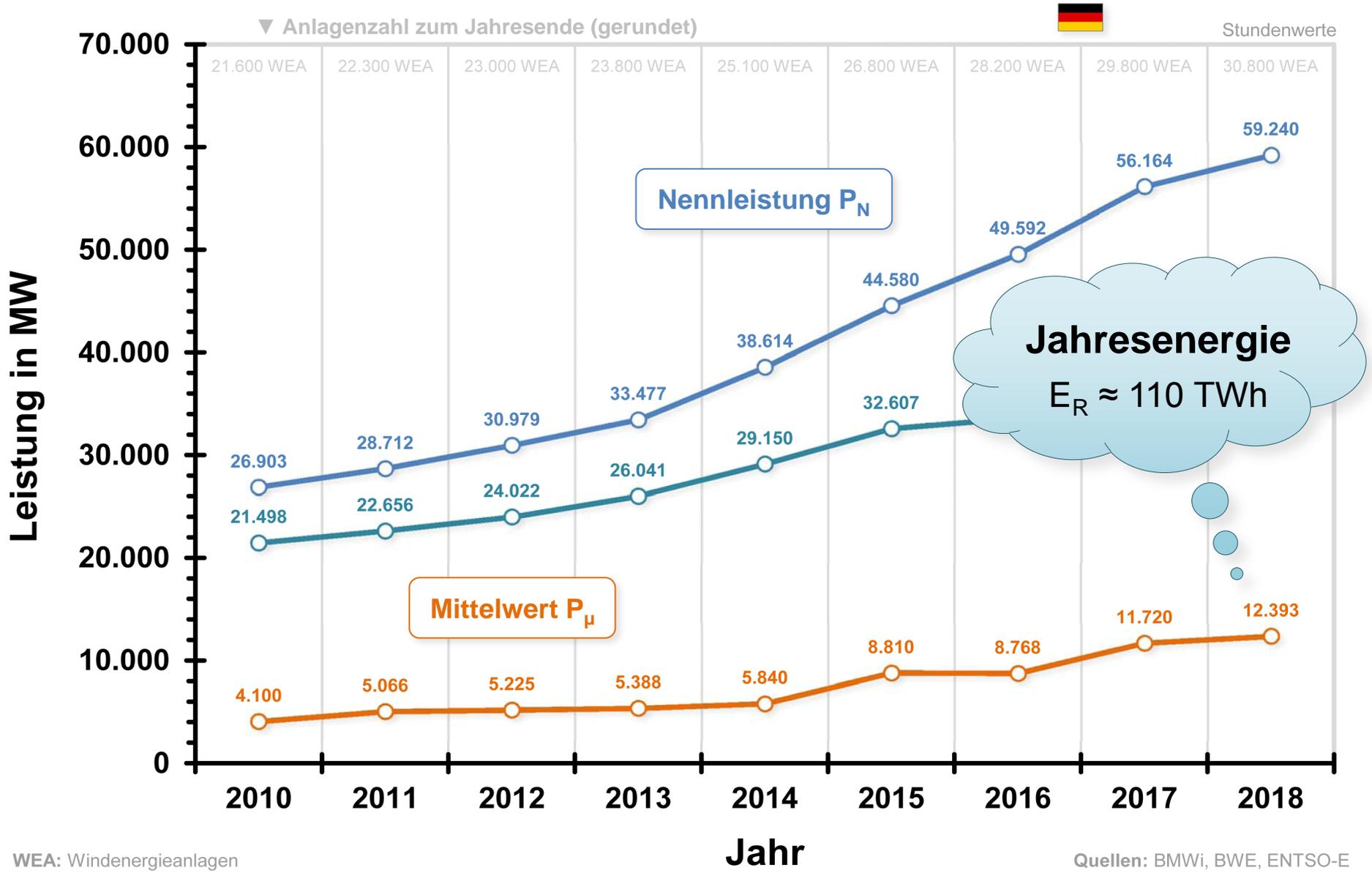


WEA: Windenergieanlagen

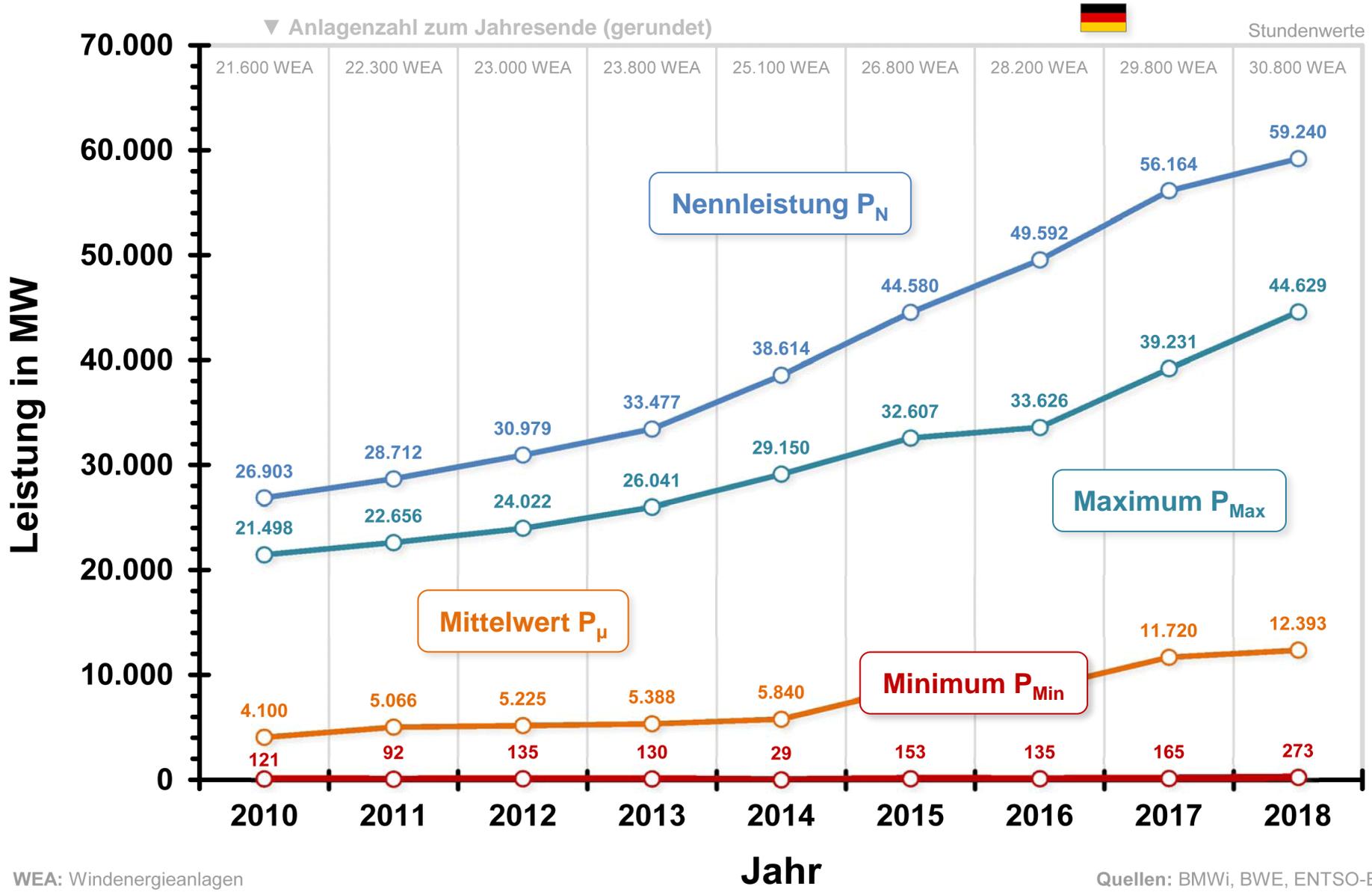
Quellen: BMWi, BWE, ENTSO-E

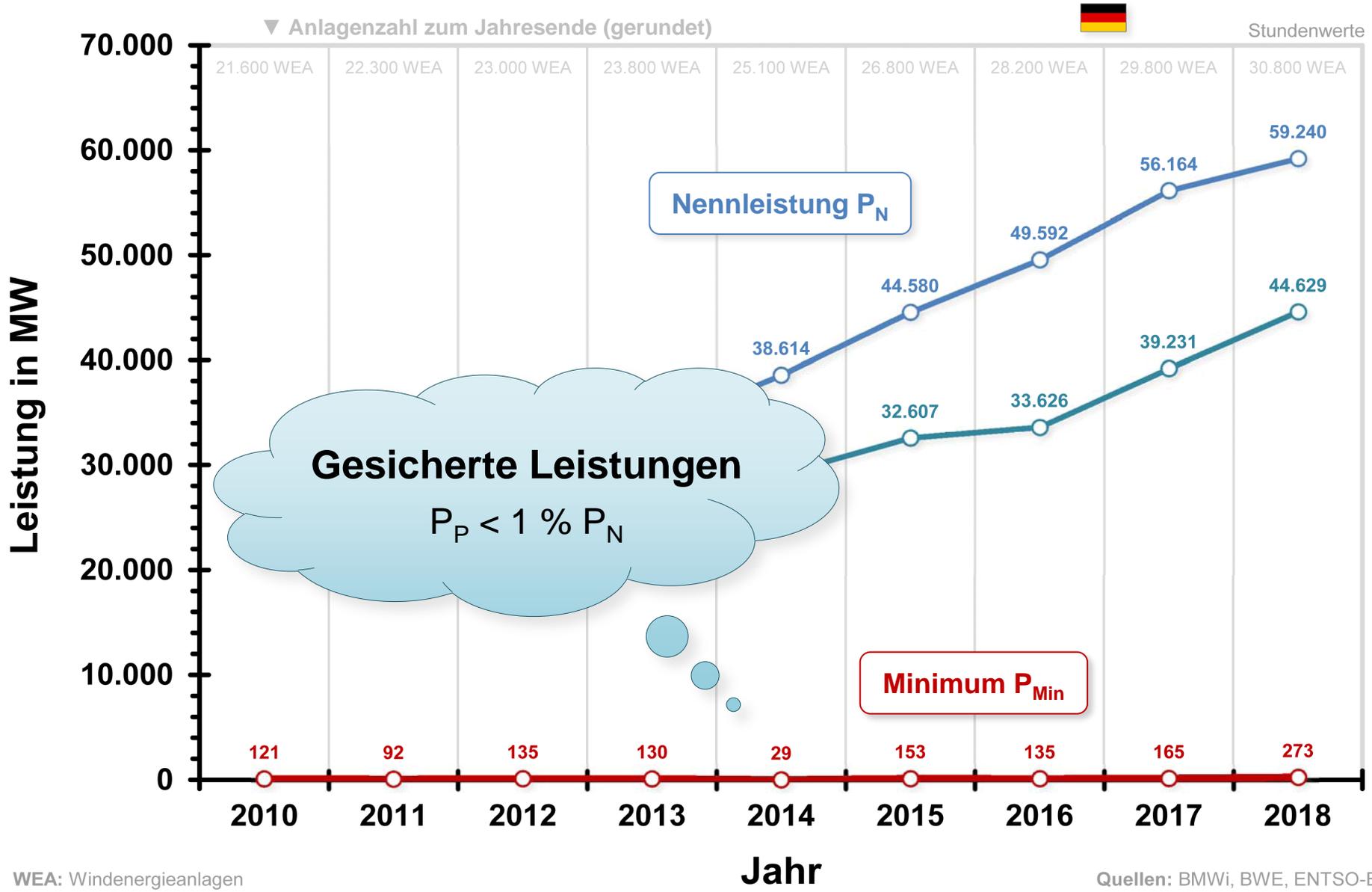
Deutschland: Windstromproduktion von 2010 bis 2018





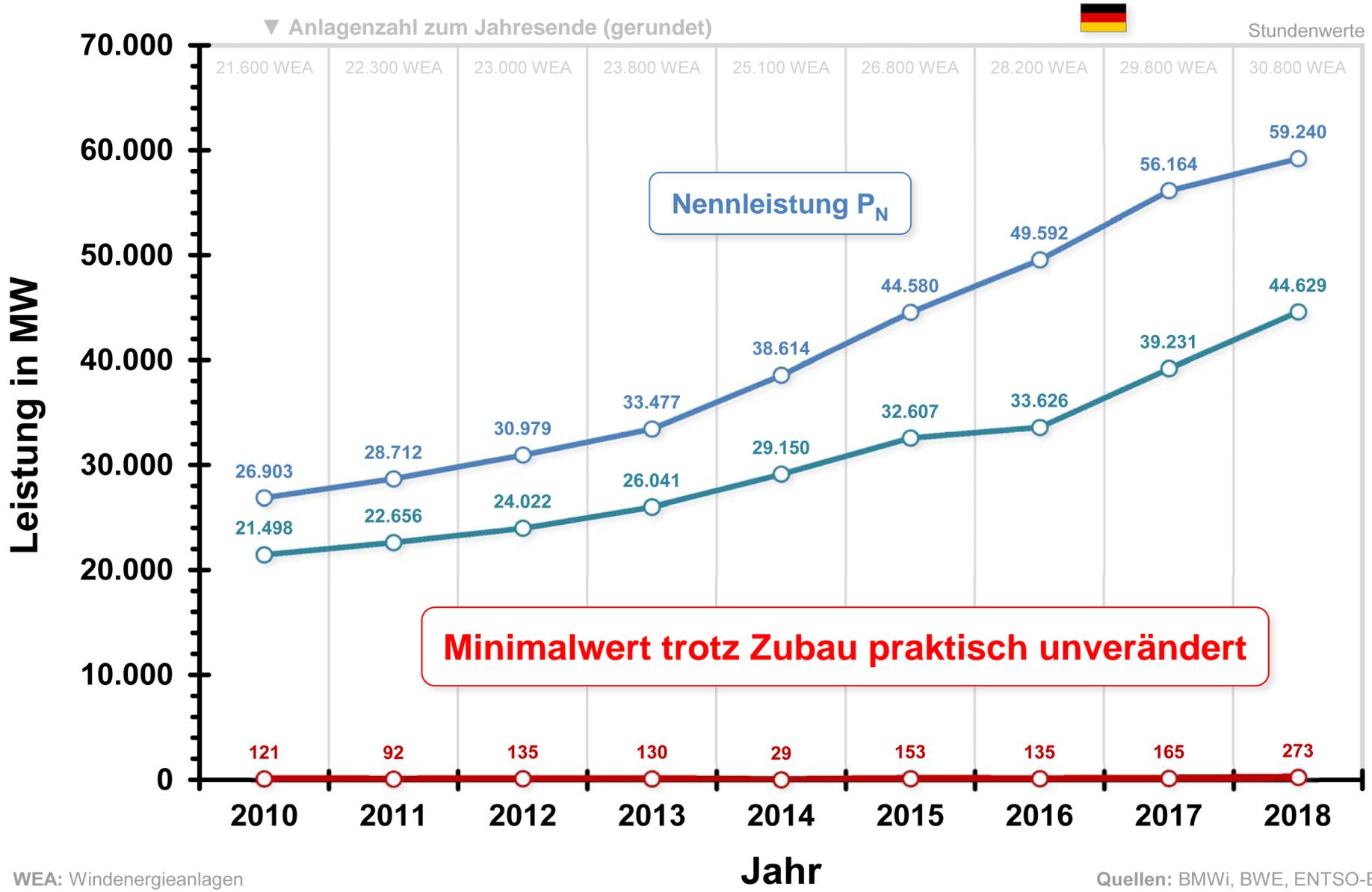
Deutschland: Windstromproduktion von 2010 bis 2018

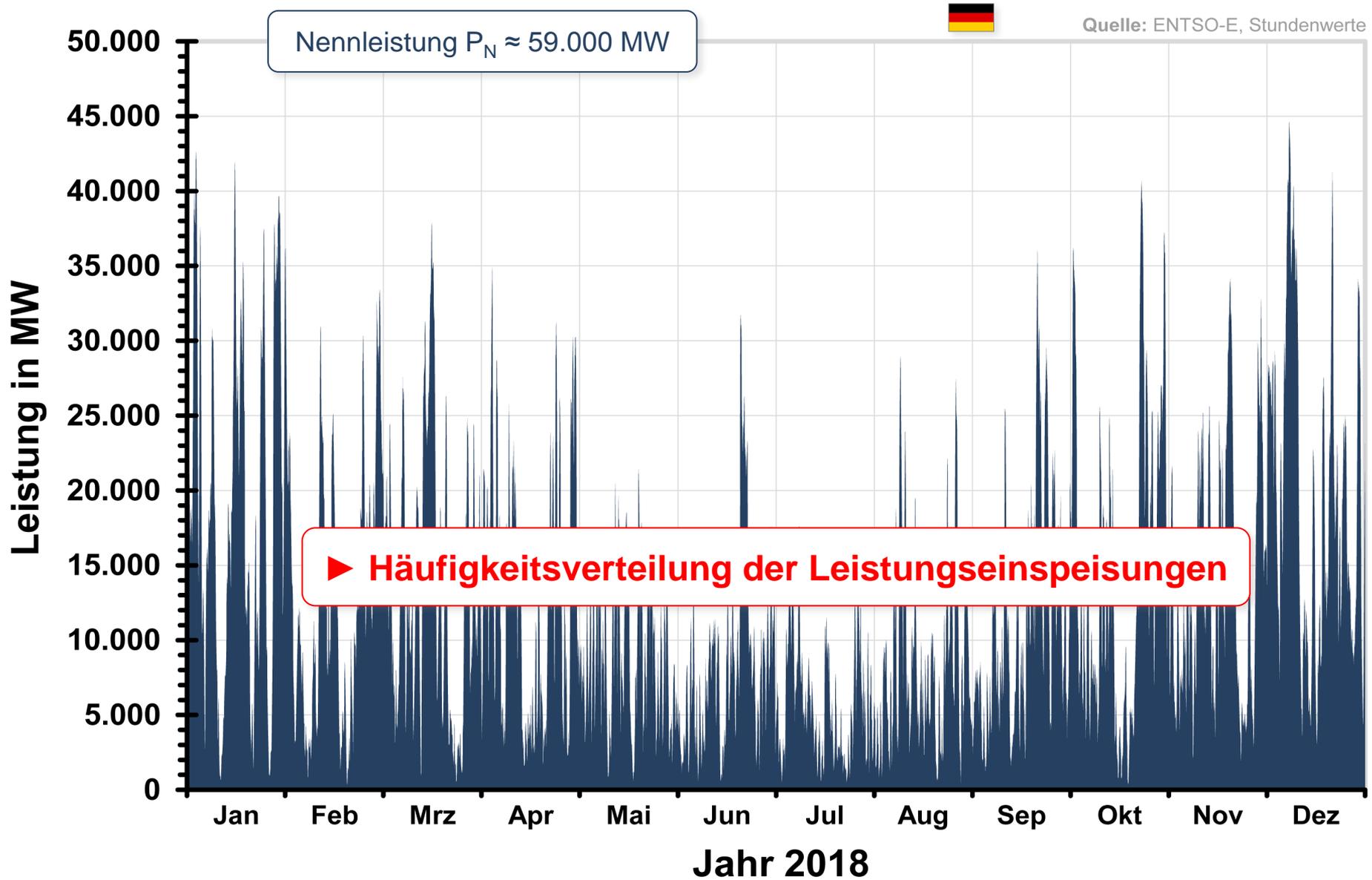




WEA: Windenergieanlagen

Quellen: BMWi, BWE, ENTSO-E





Quelle: ENTSO-E

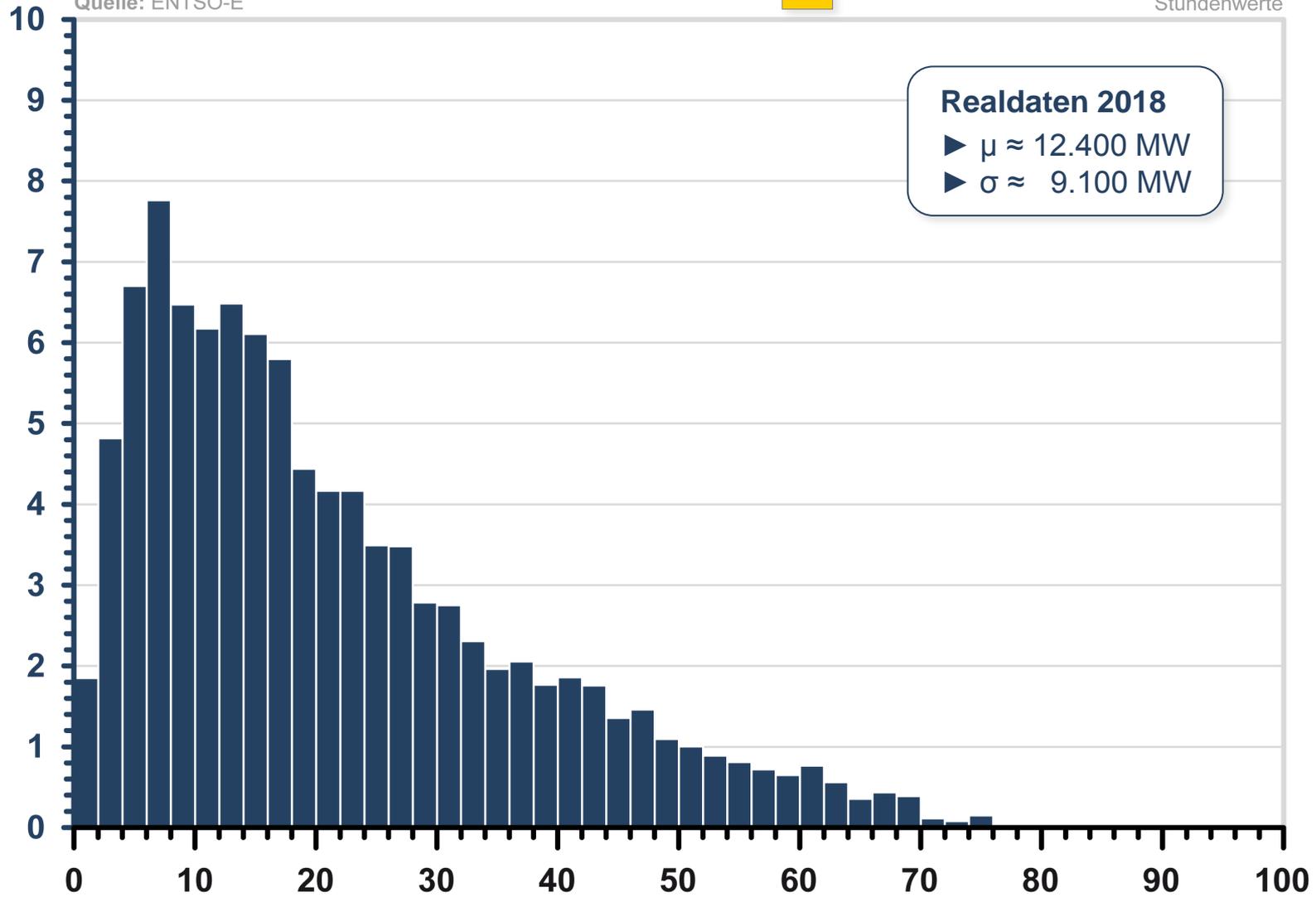


Stundenwerte

Relative Häufigkeit in % (PDF)

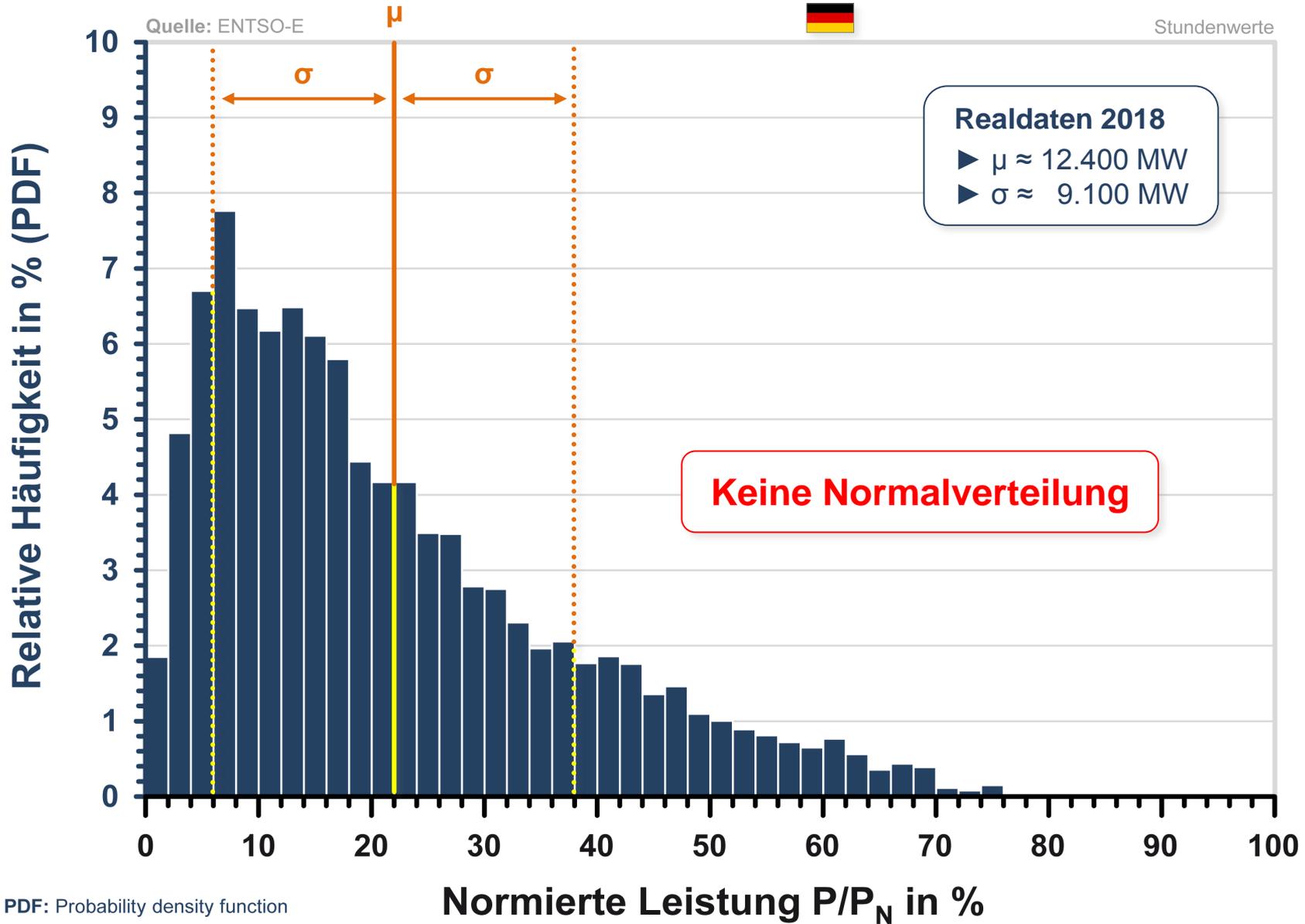
Realdaten 2018

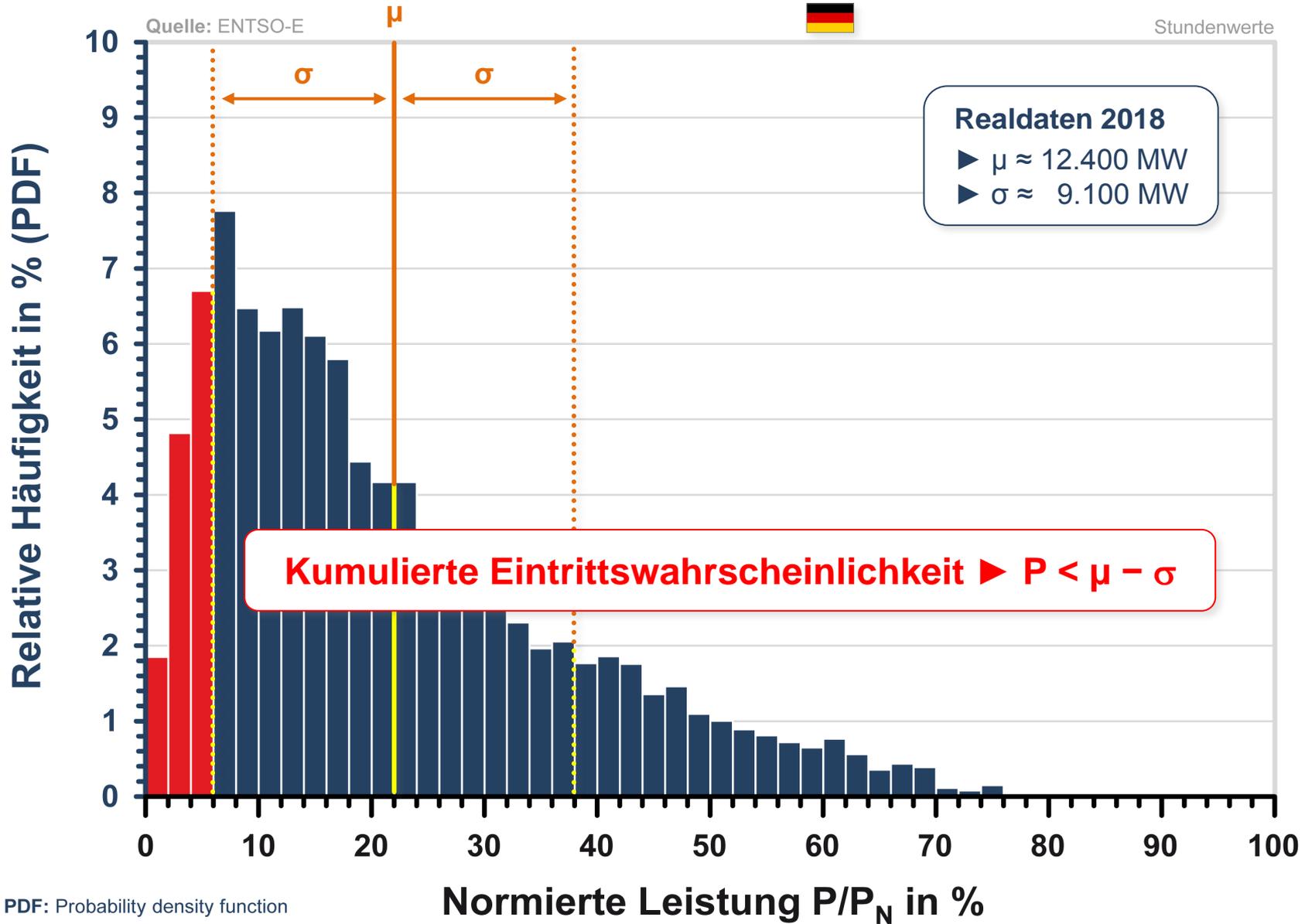
- ▶ $\mu \approx 12.400$ MW
- ▶ $\sigma \approx 9.100$ MW

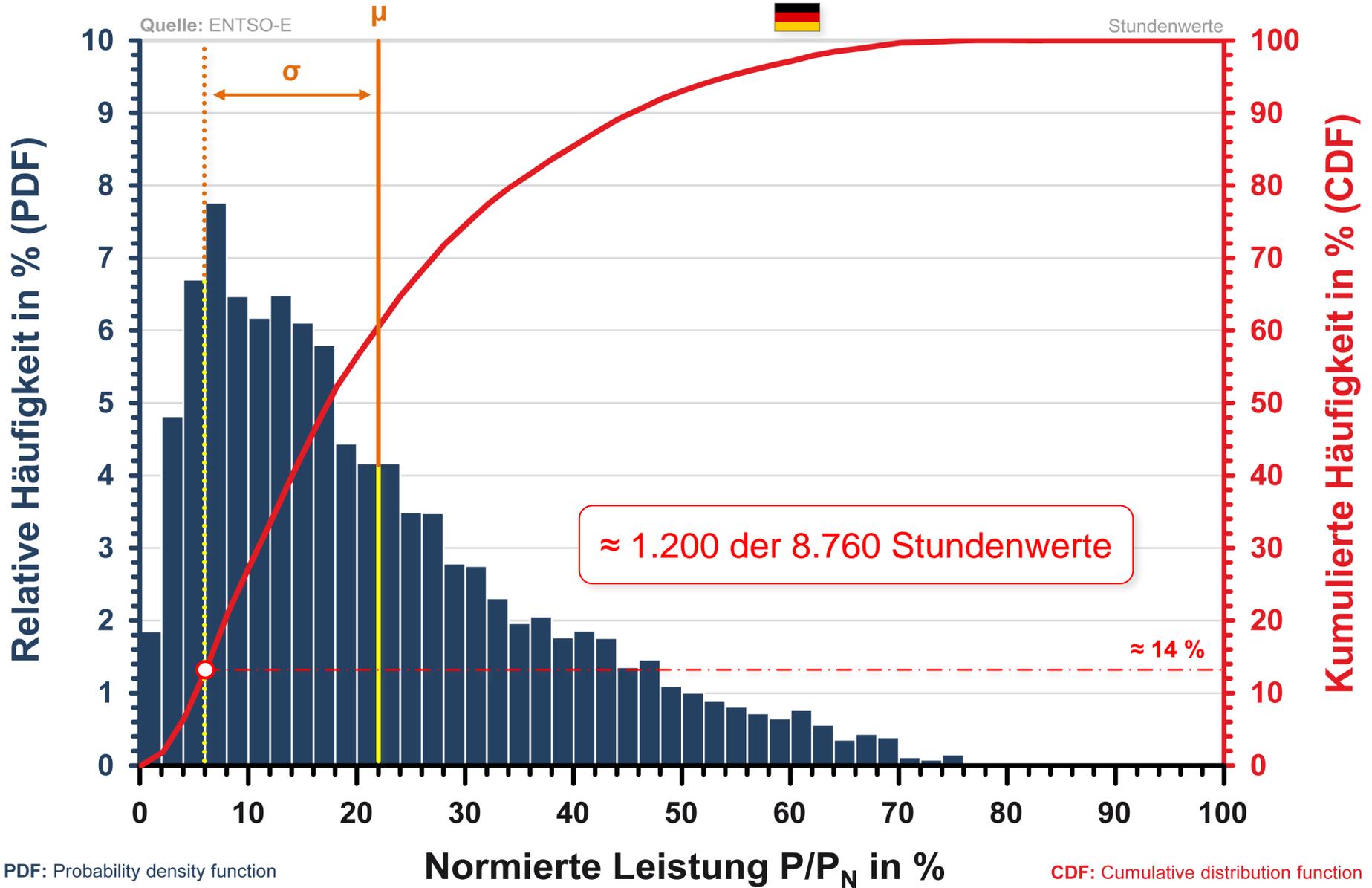


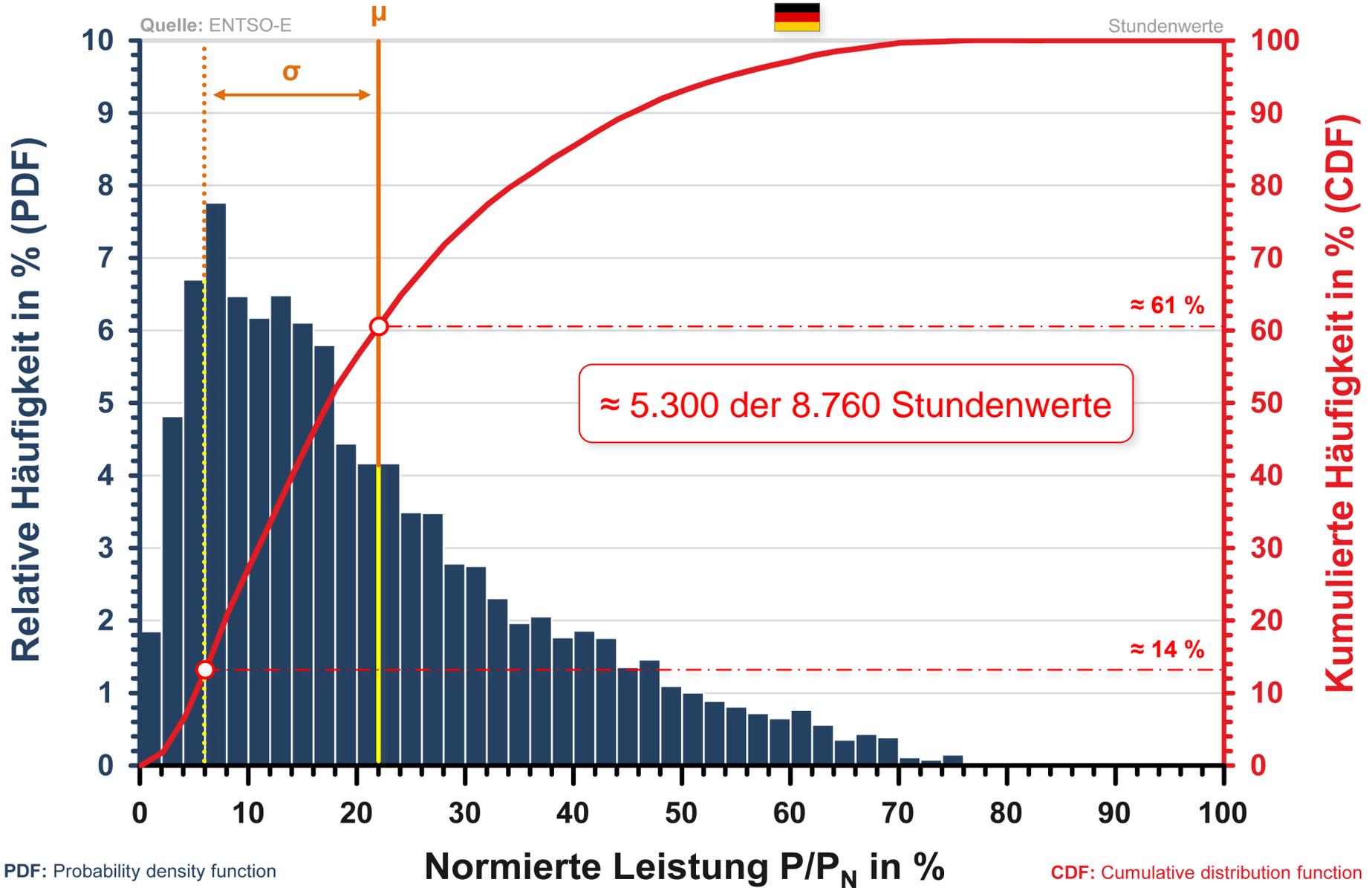
PDF: Probability density function

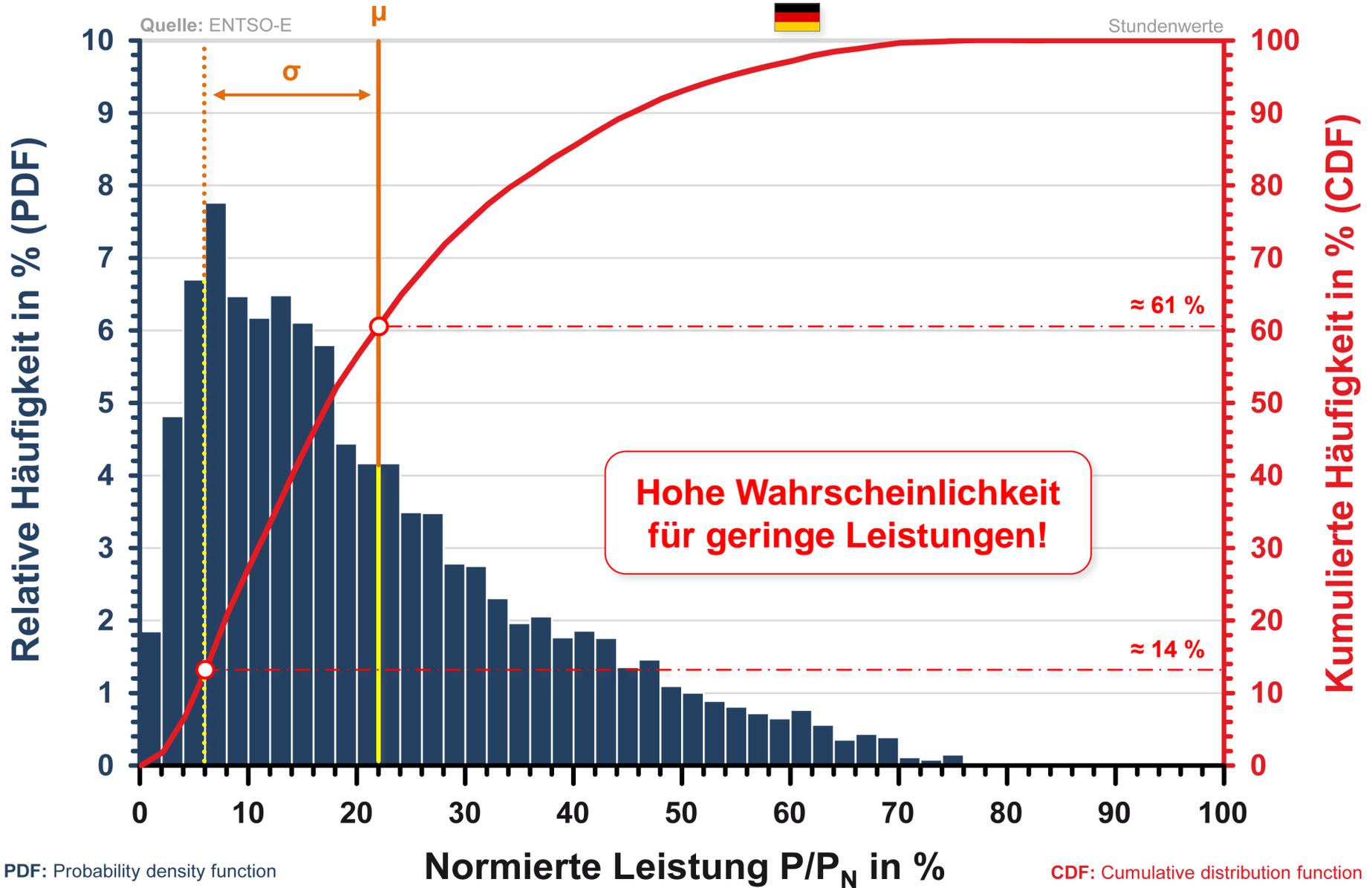
Normierte Leistung P/P_N in %

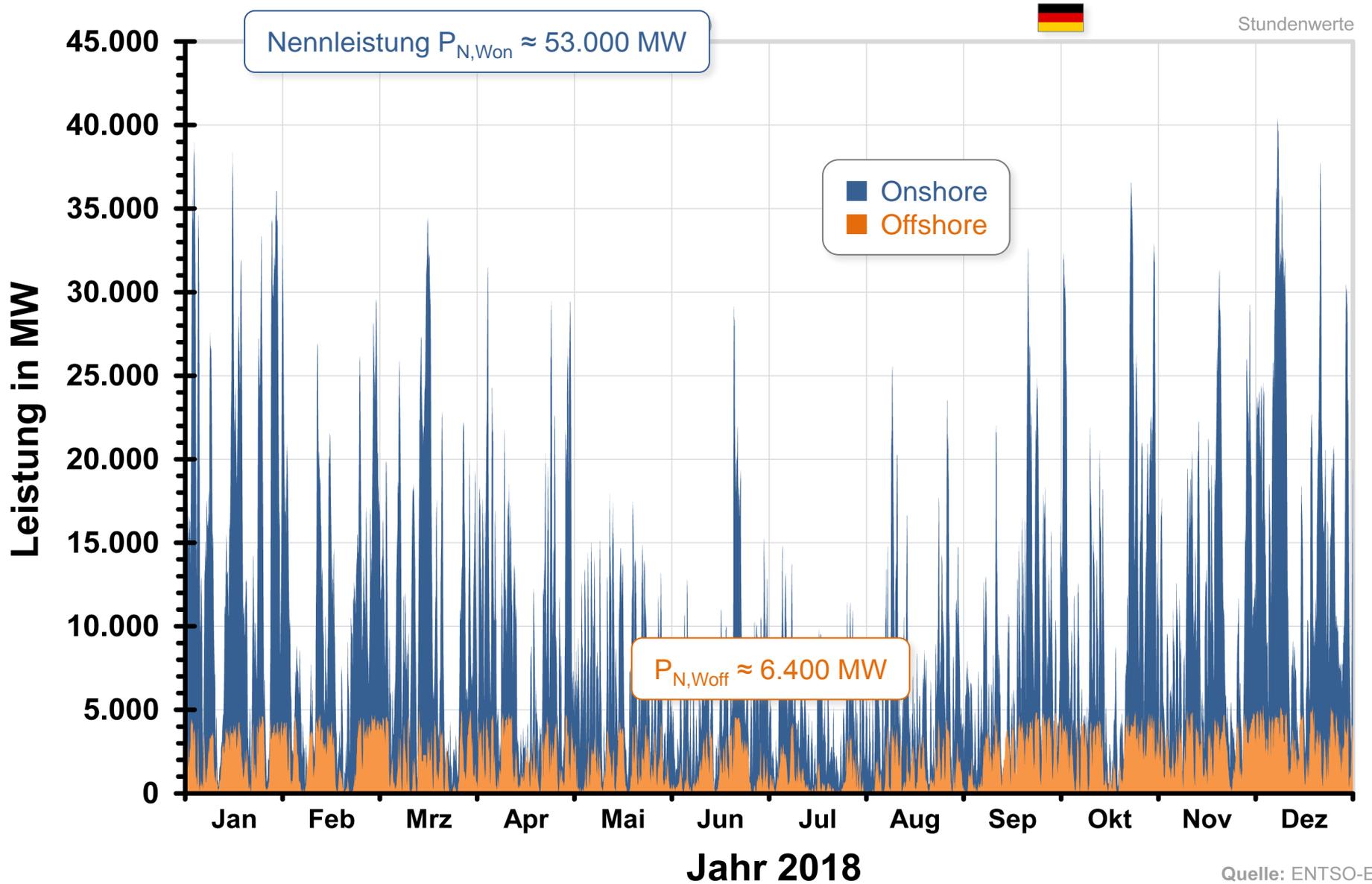


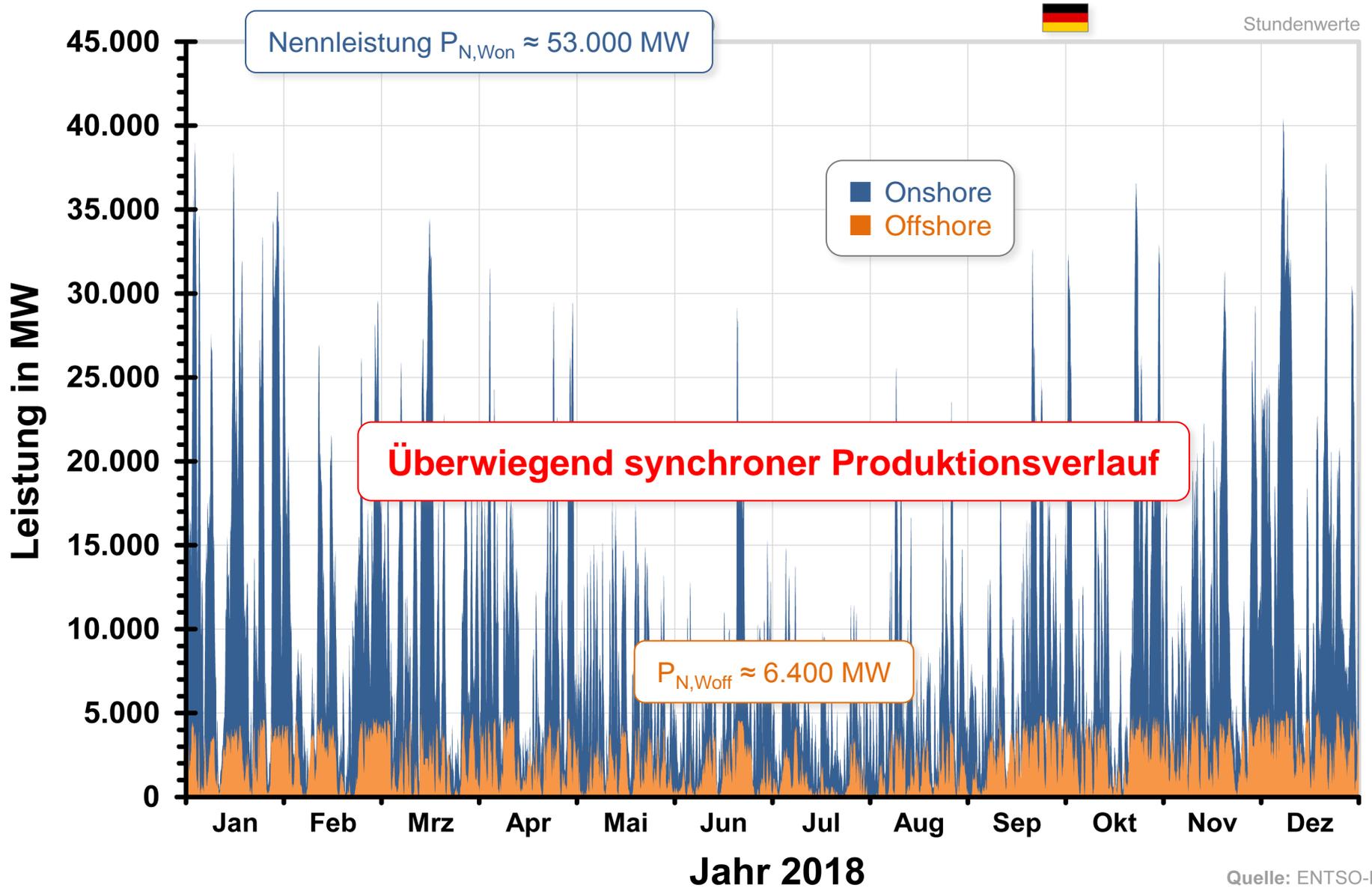


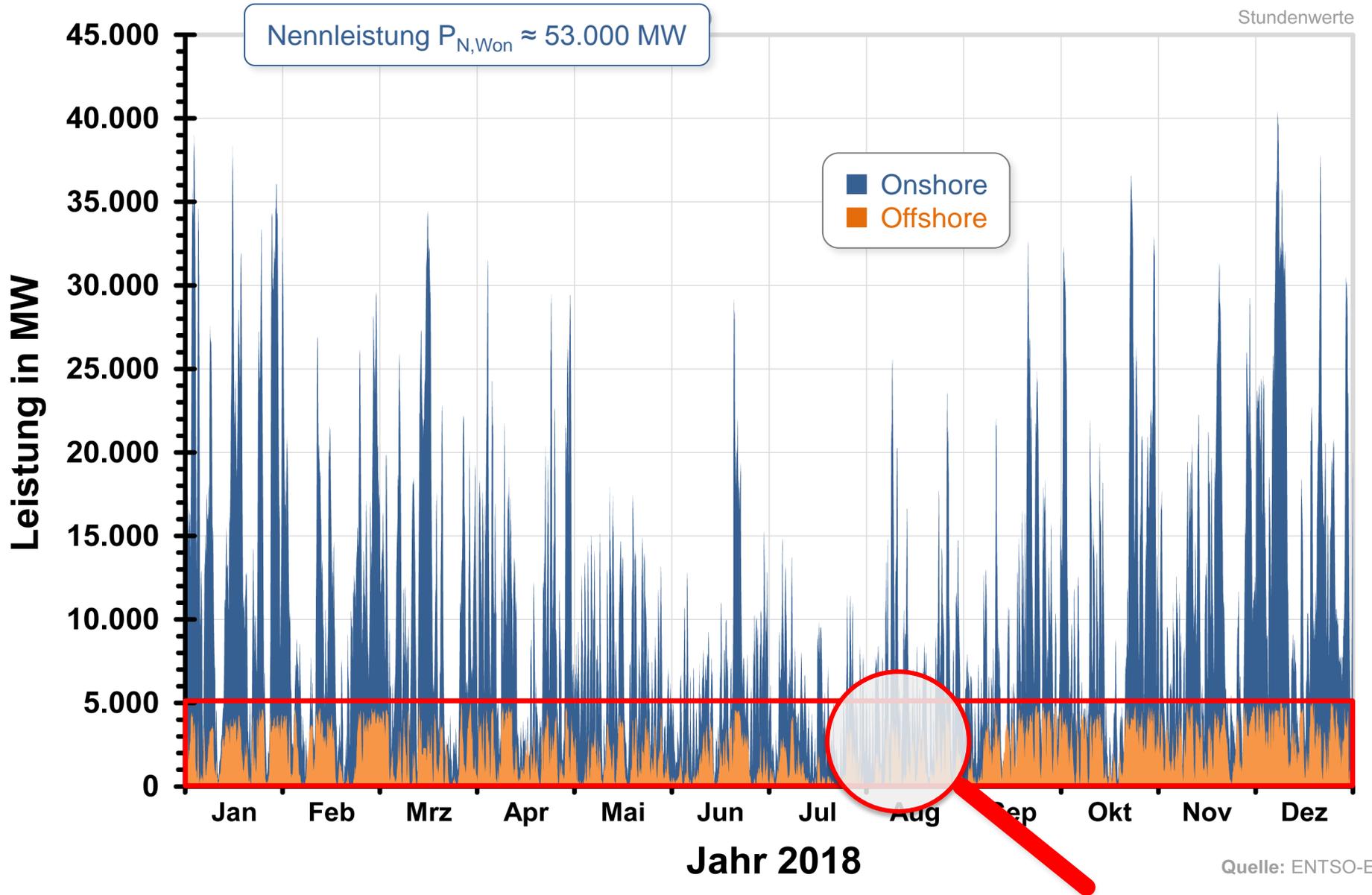


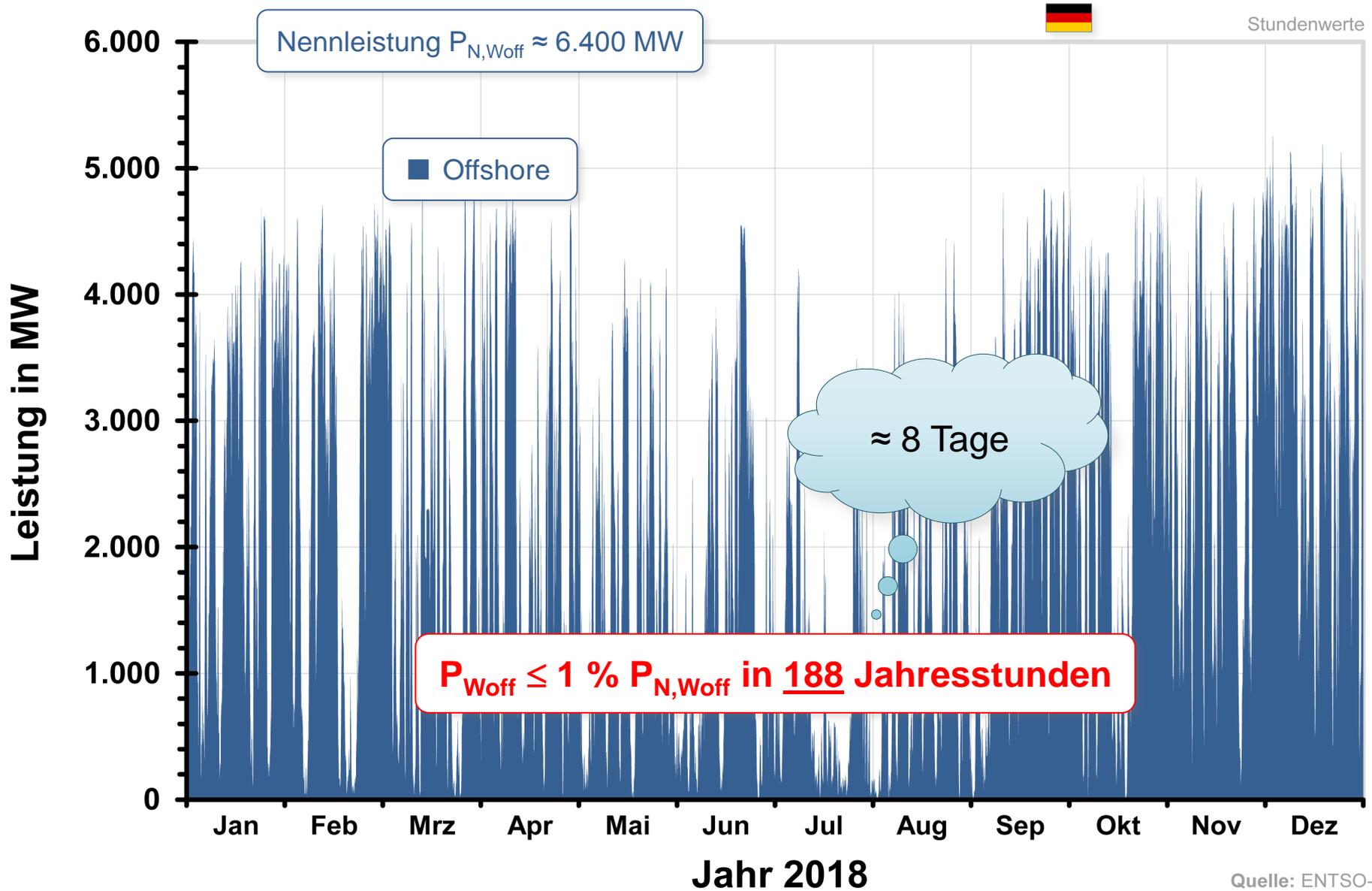




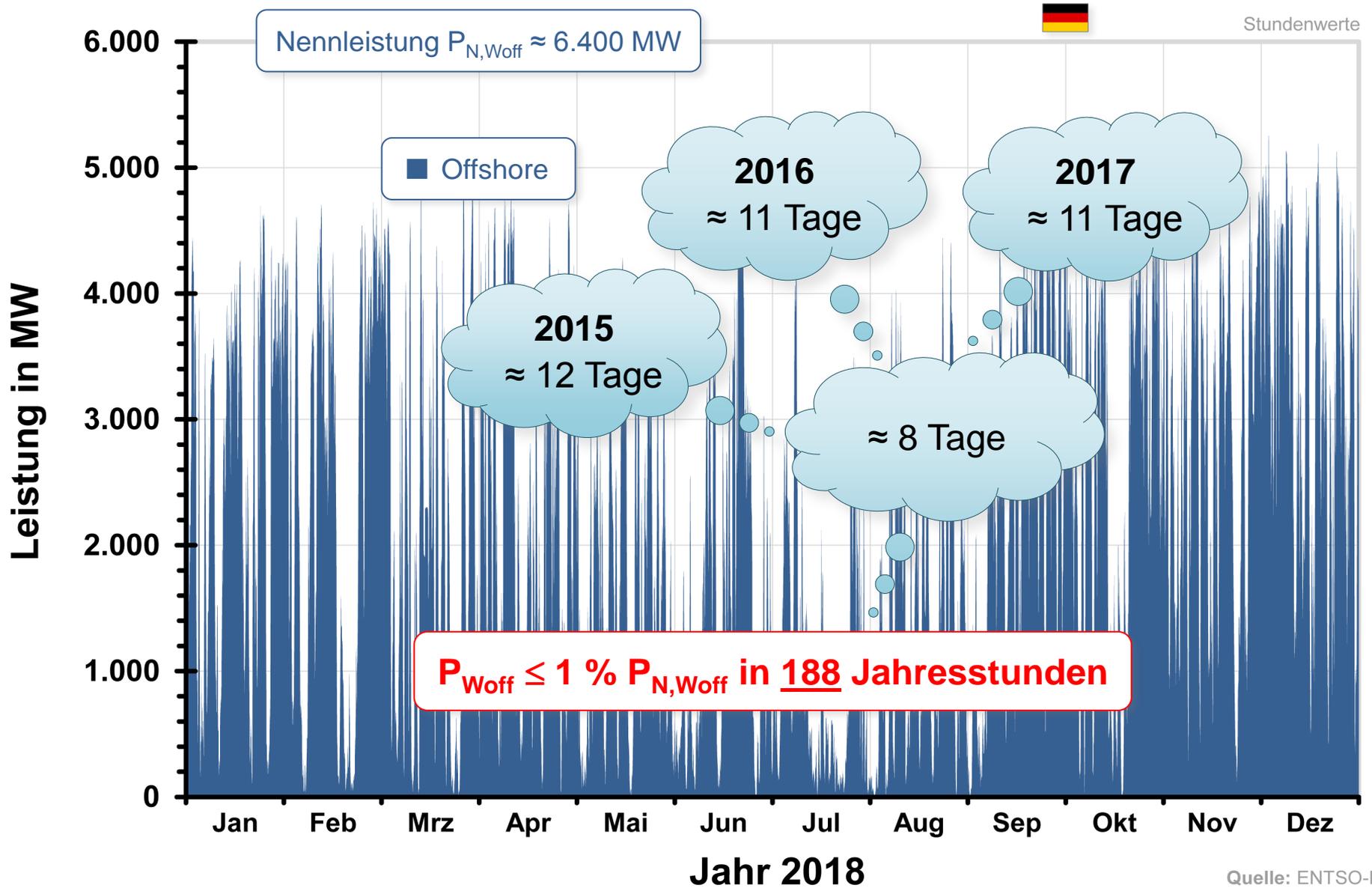


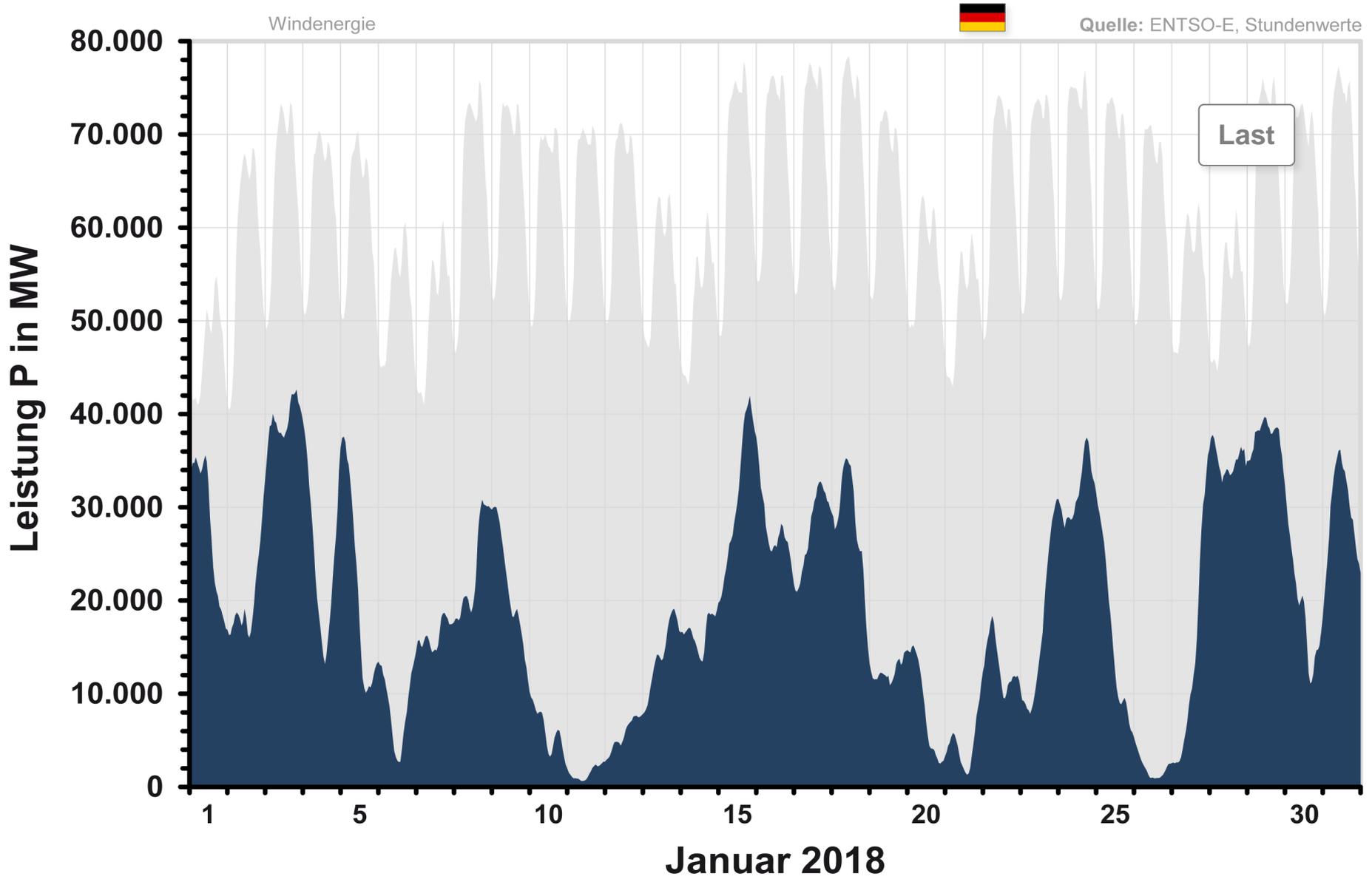


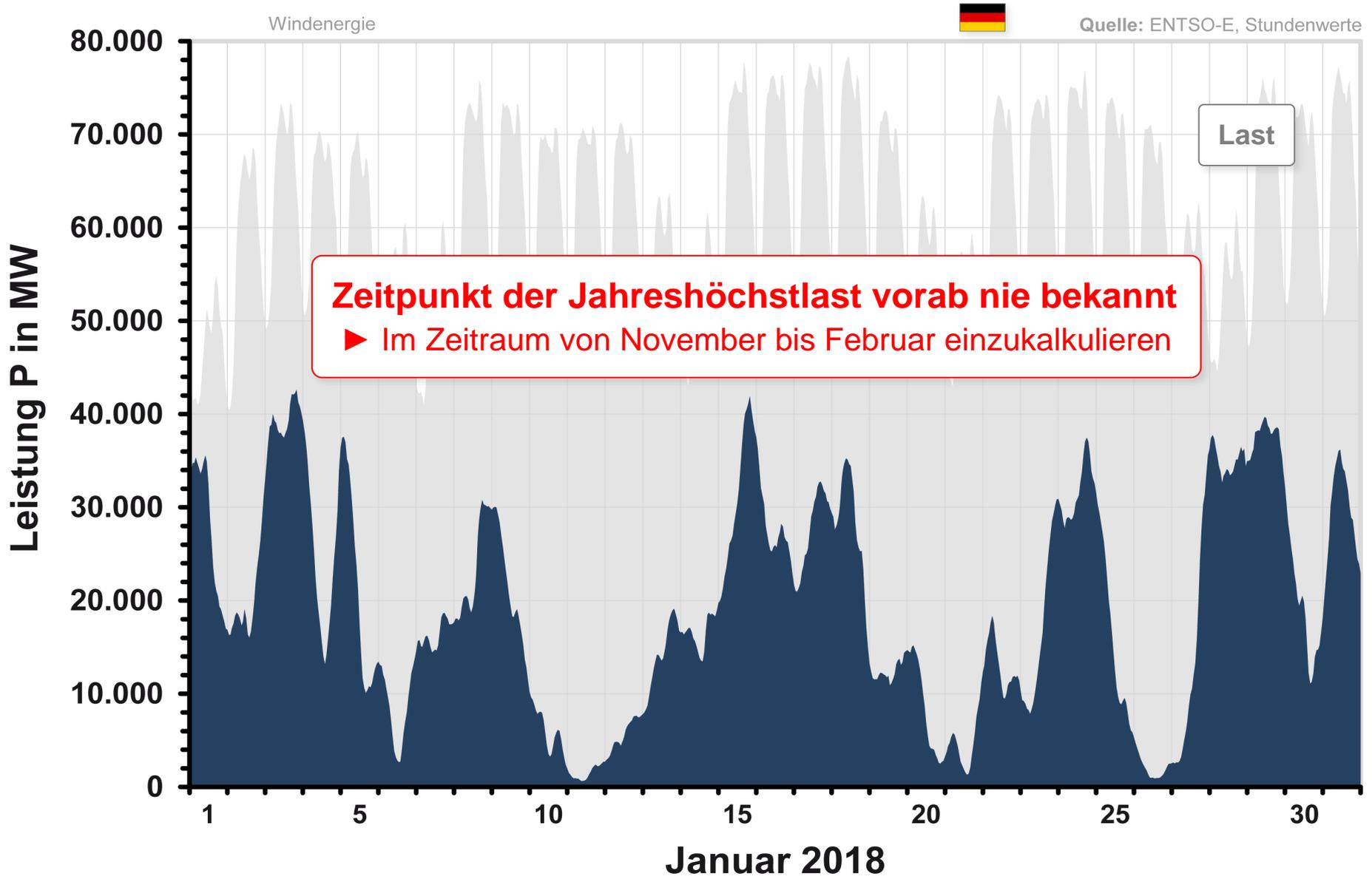


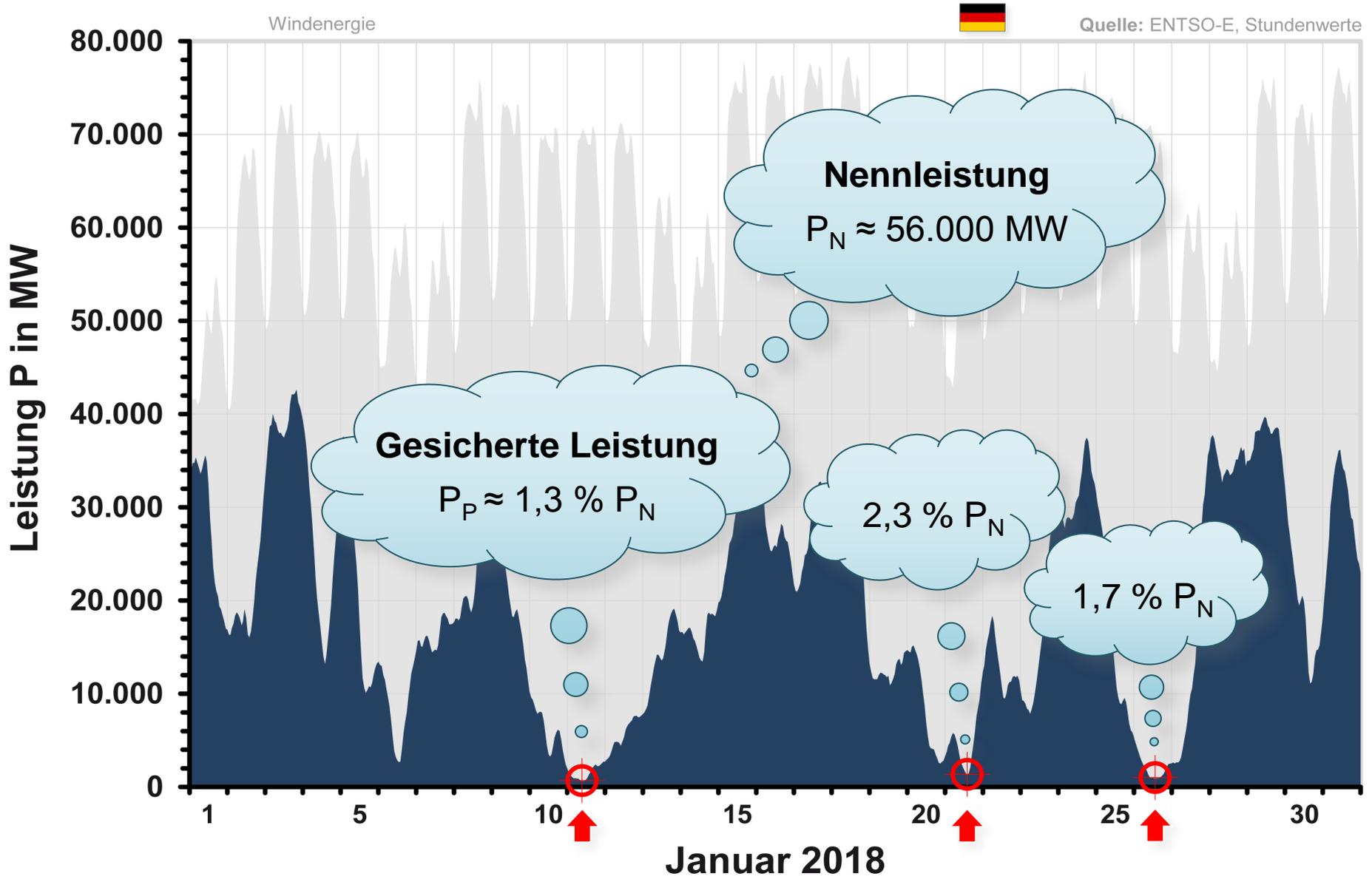


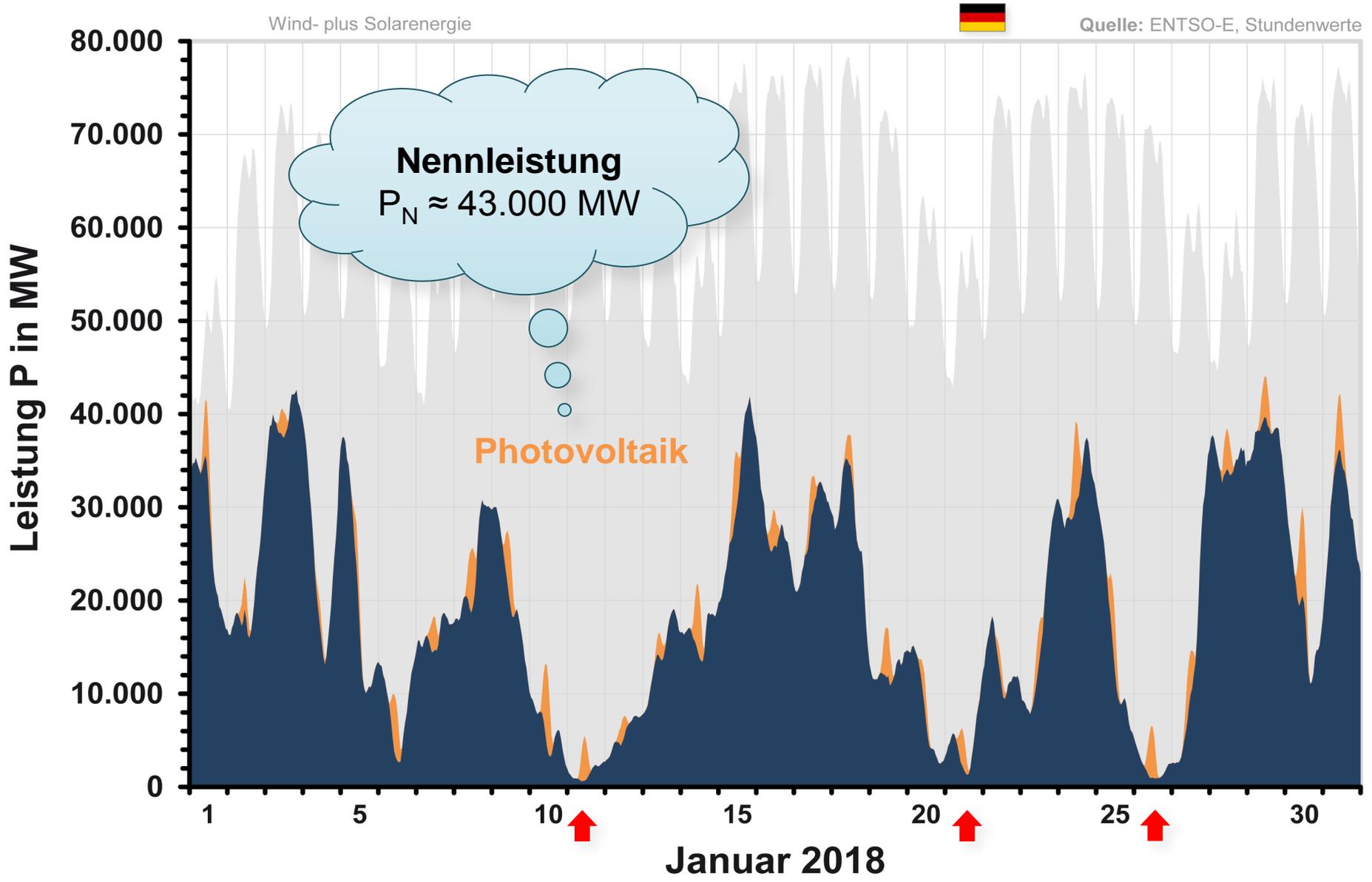
Quelle: ENTSO-E









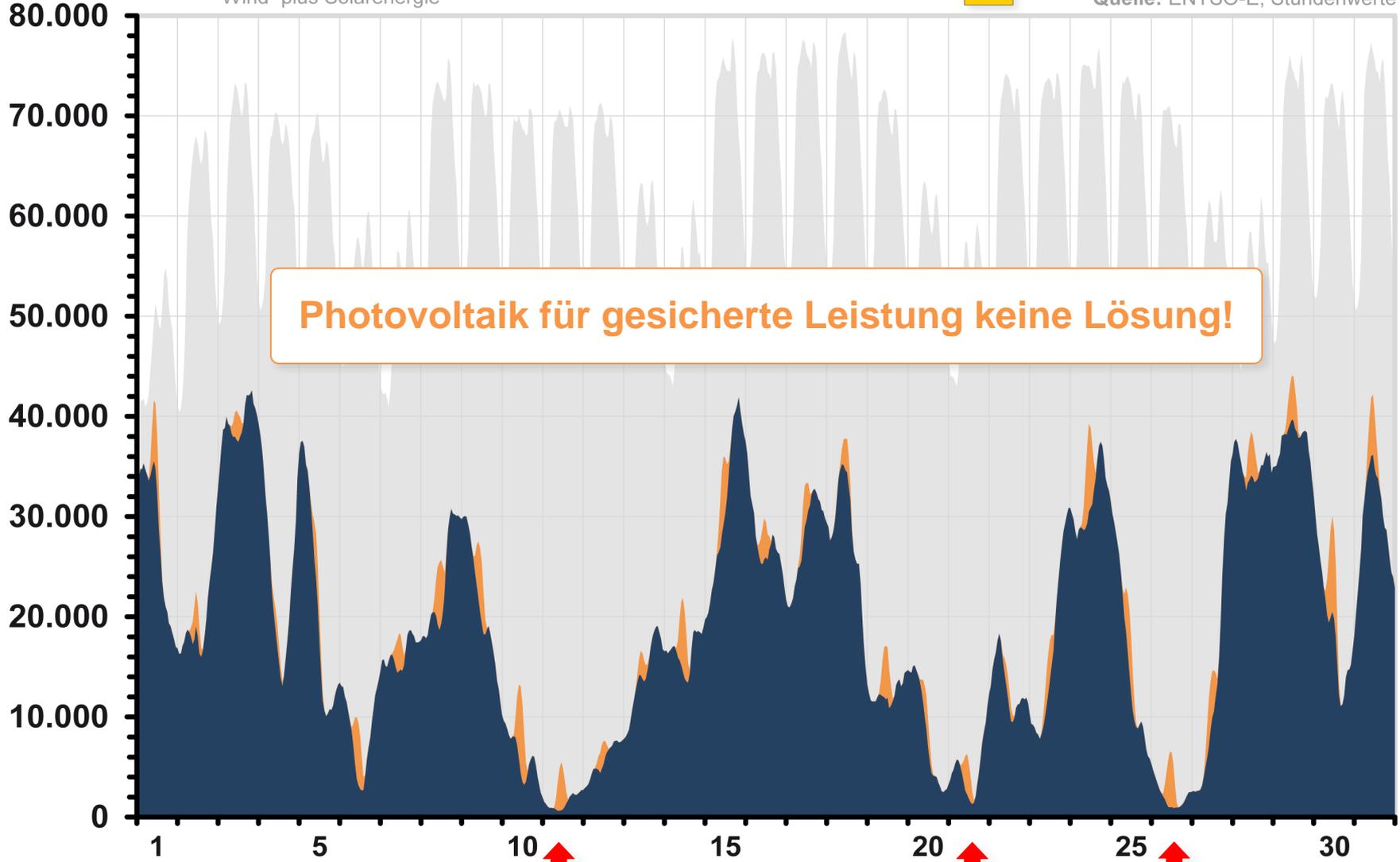


Wind- plus Solarenergie



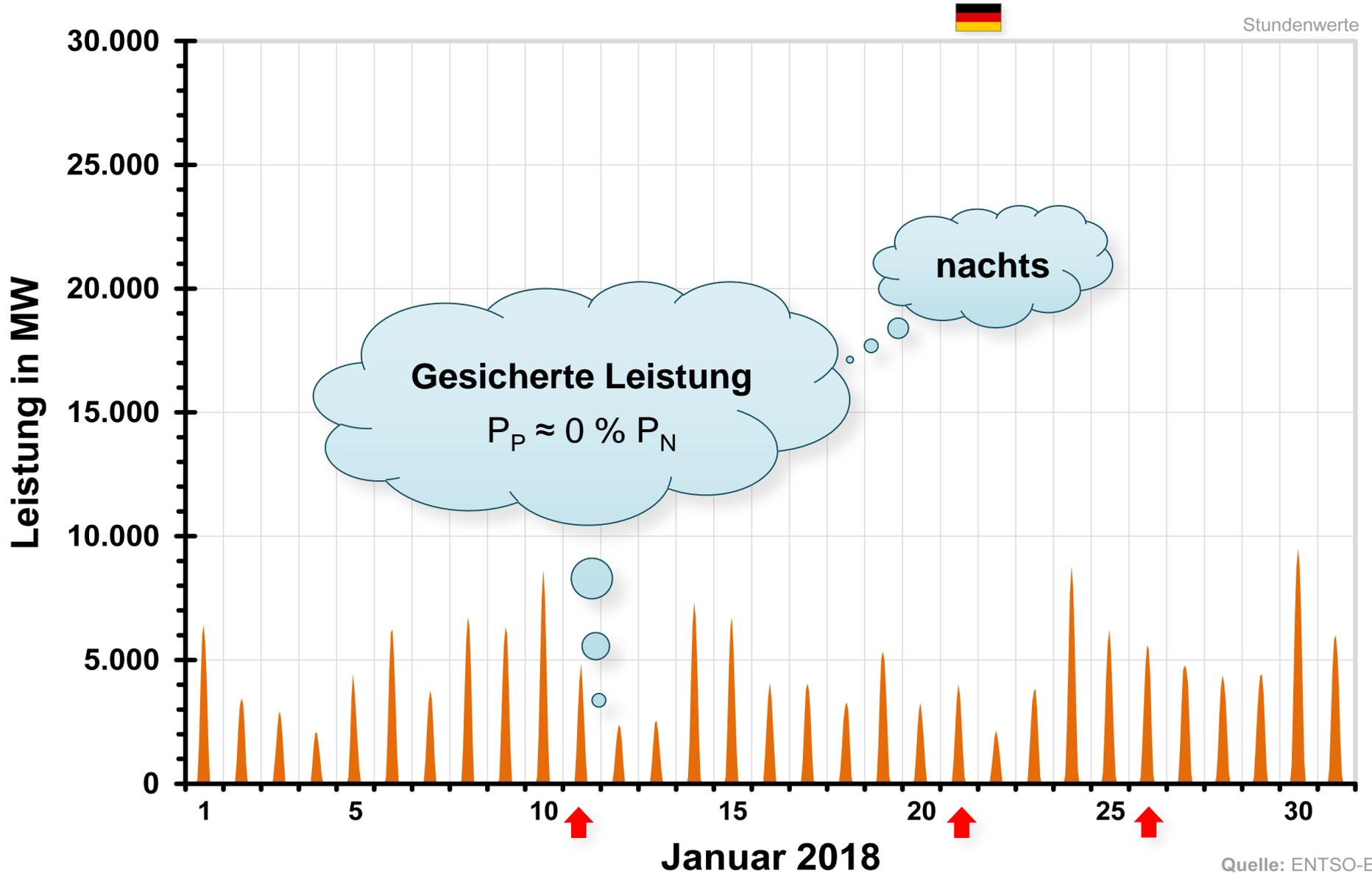
Quelle: ENTSO-E, Stundenwerte

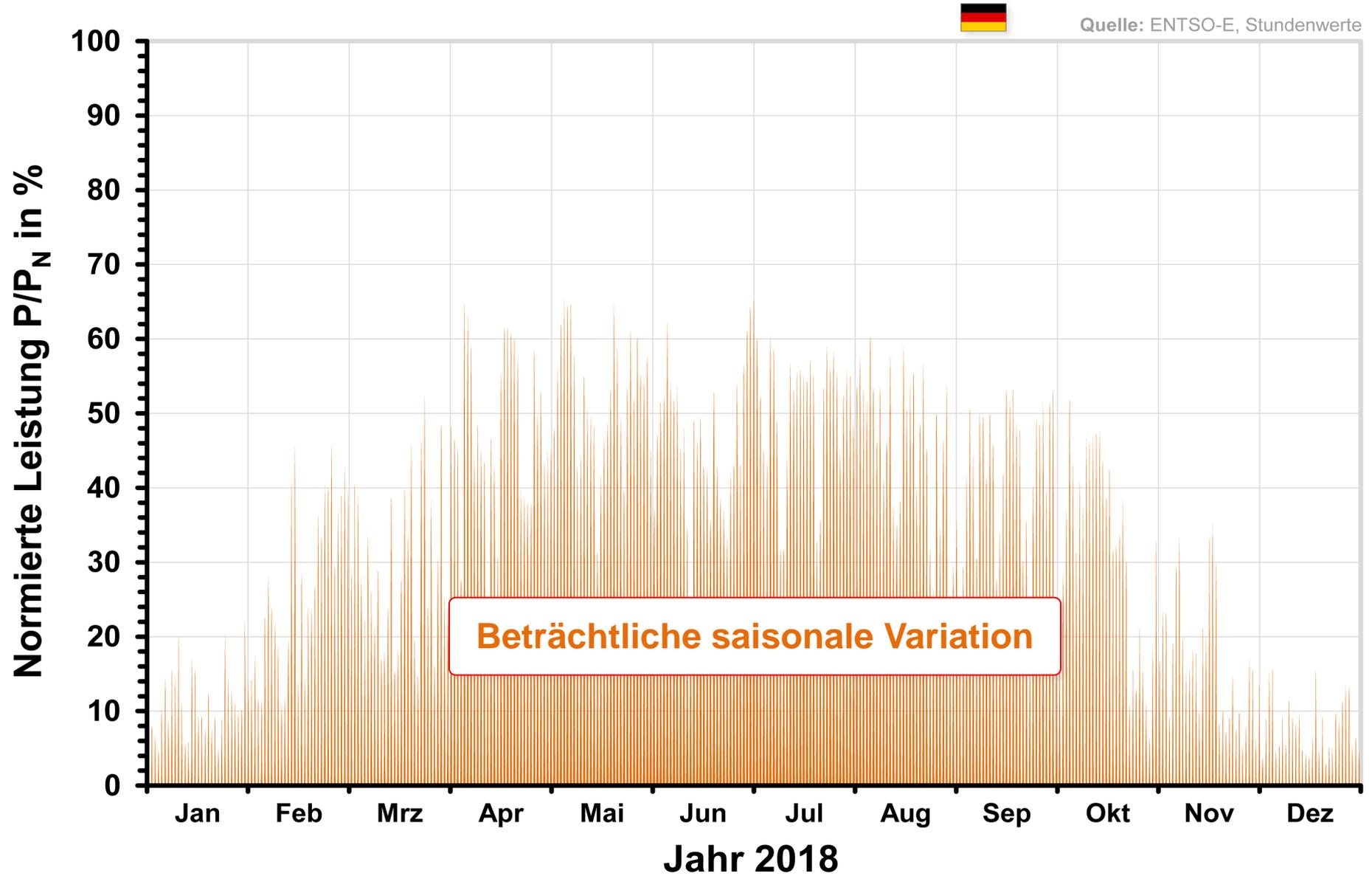
Leistung P in MW

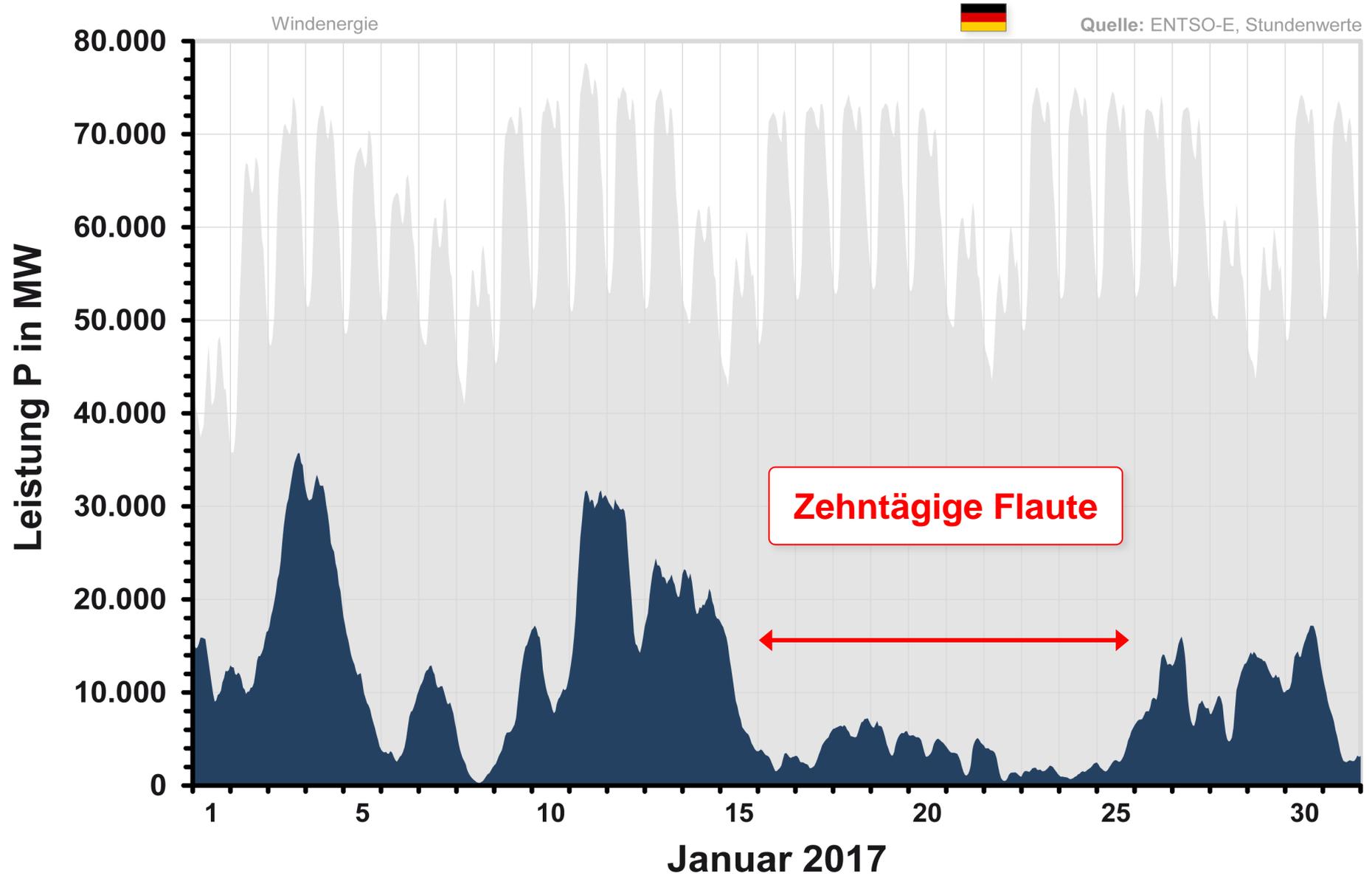


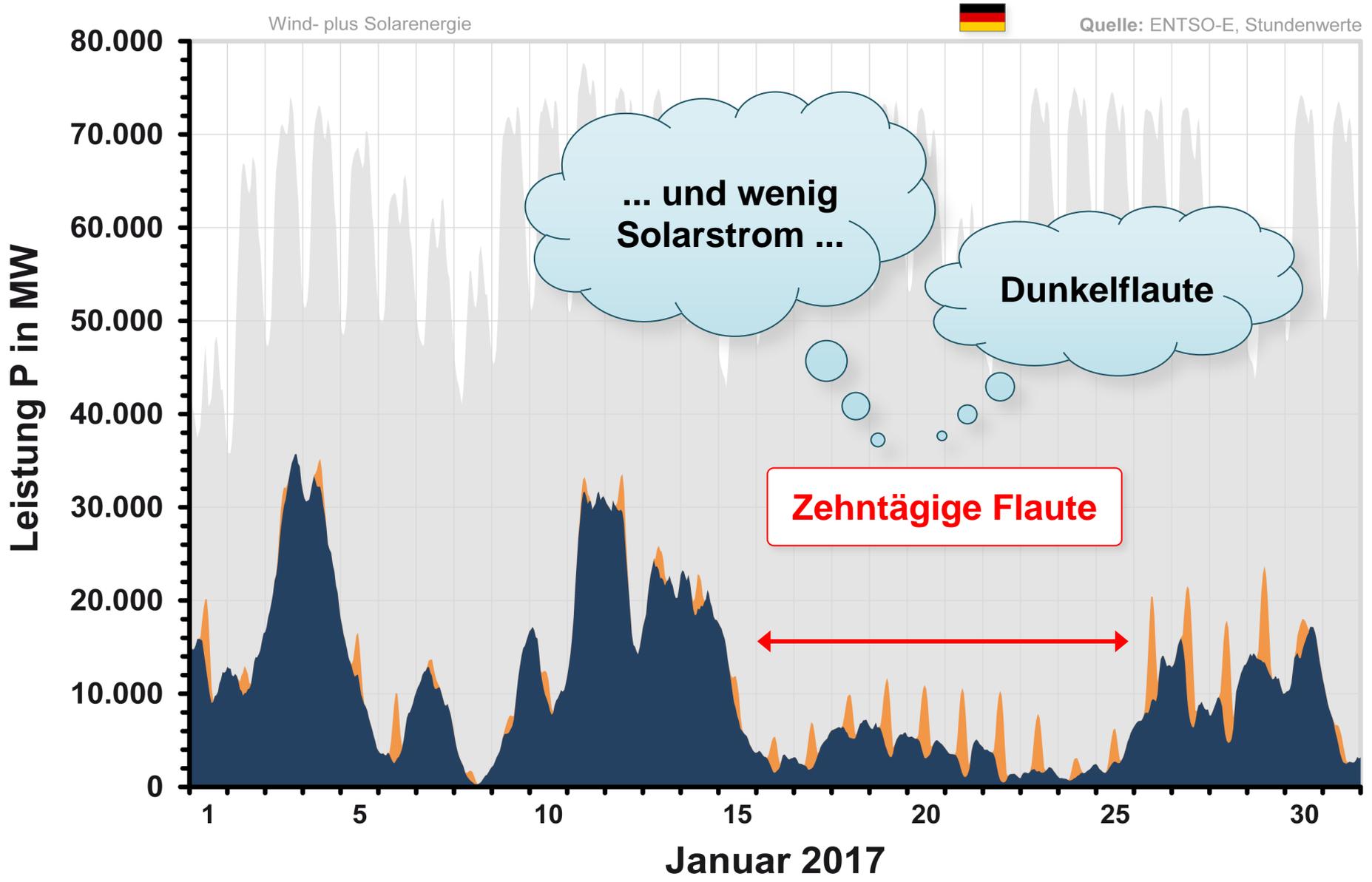
Photovoltaik für gesicherte Leistung keine Lösung!

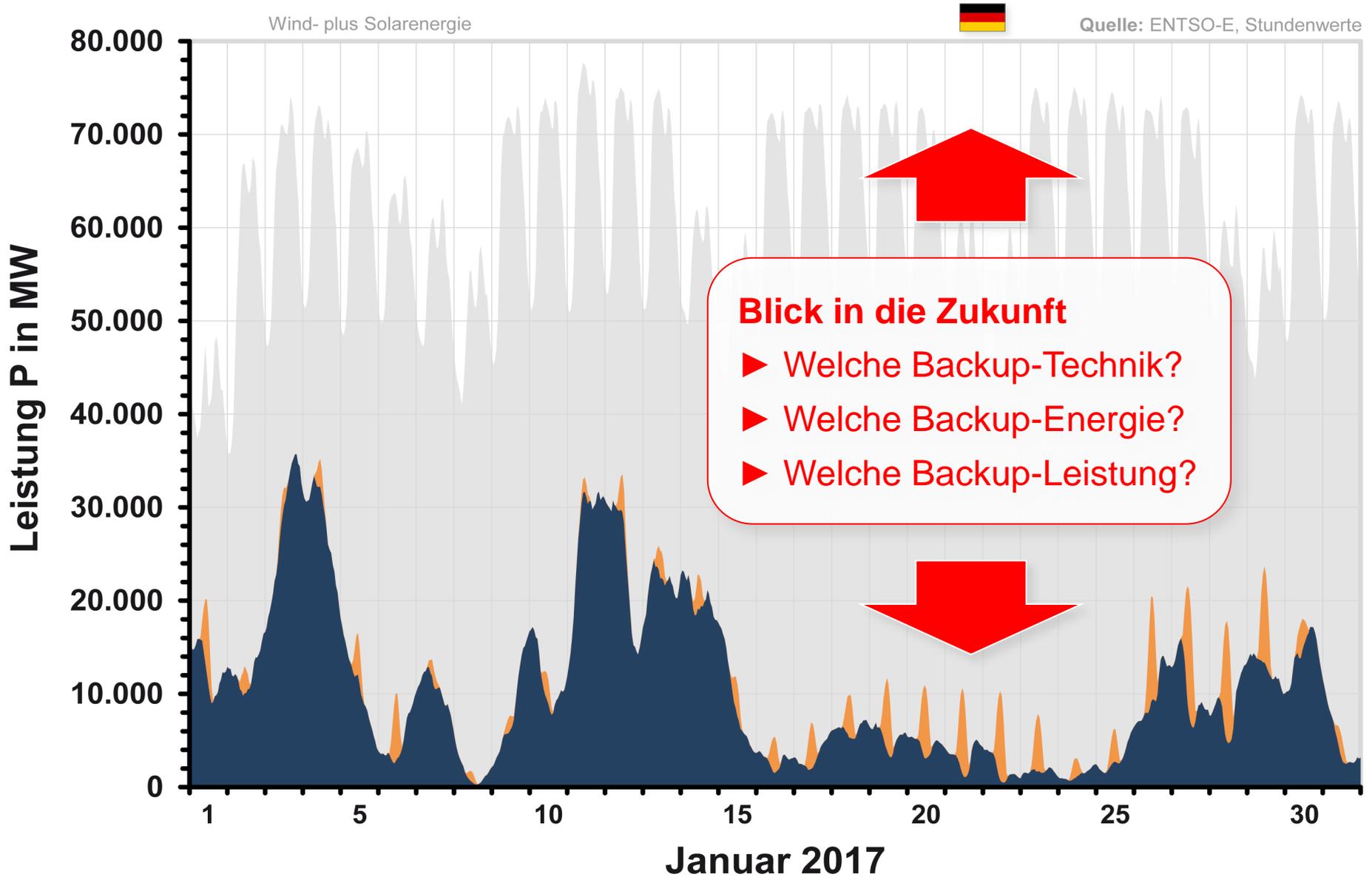
Januar 2018











Zwischenfazit

- Nennleistung seit 2010 auf ≈ 60 GW mehr als verdoppelt
- Windstromproduktion auf ≈ 110 TWh mehr als verdreifacht
- Minimalleistung ($\frac{1}{4}$ -h-Wert) seit 2010 nahezu unverändert
 - 1.) Technik ▶ Schwachlastfähigkeit moderner Windturbinen
 - 2.) Statistik ▶ 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

Kann Europa helfen?

➤ **Vorbemerkungen**

- Struktur der Energieversorgung Deutschlands
- Die turbulenten Eigenschaften der Windenergie
- Grundlegende Netzstabilitätsanforderung

➤ **Teil 1: Entwicklungen in Deutschland seit 2010**

- Kumulierte elektrische Leistungseinspeisungen
- Windstromproduktion an Land und auf dem Meer
- Schwachwindphasen (Flauten)

➤ **Teil 2: Europäische Situation seit 2015**

- Betrachtungen zur räumlichen Korrelation
- Erkenntnisse und Fazit

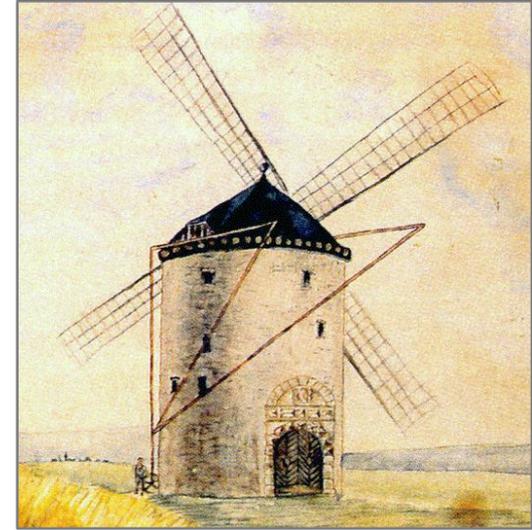
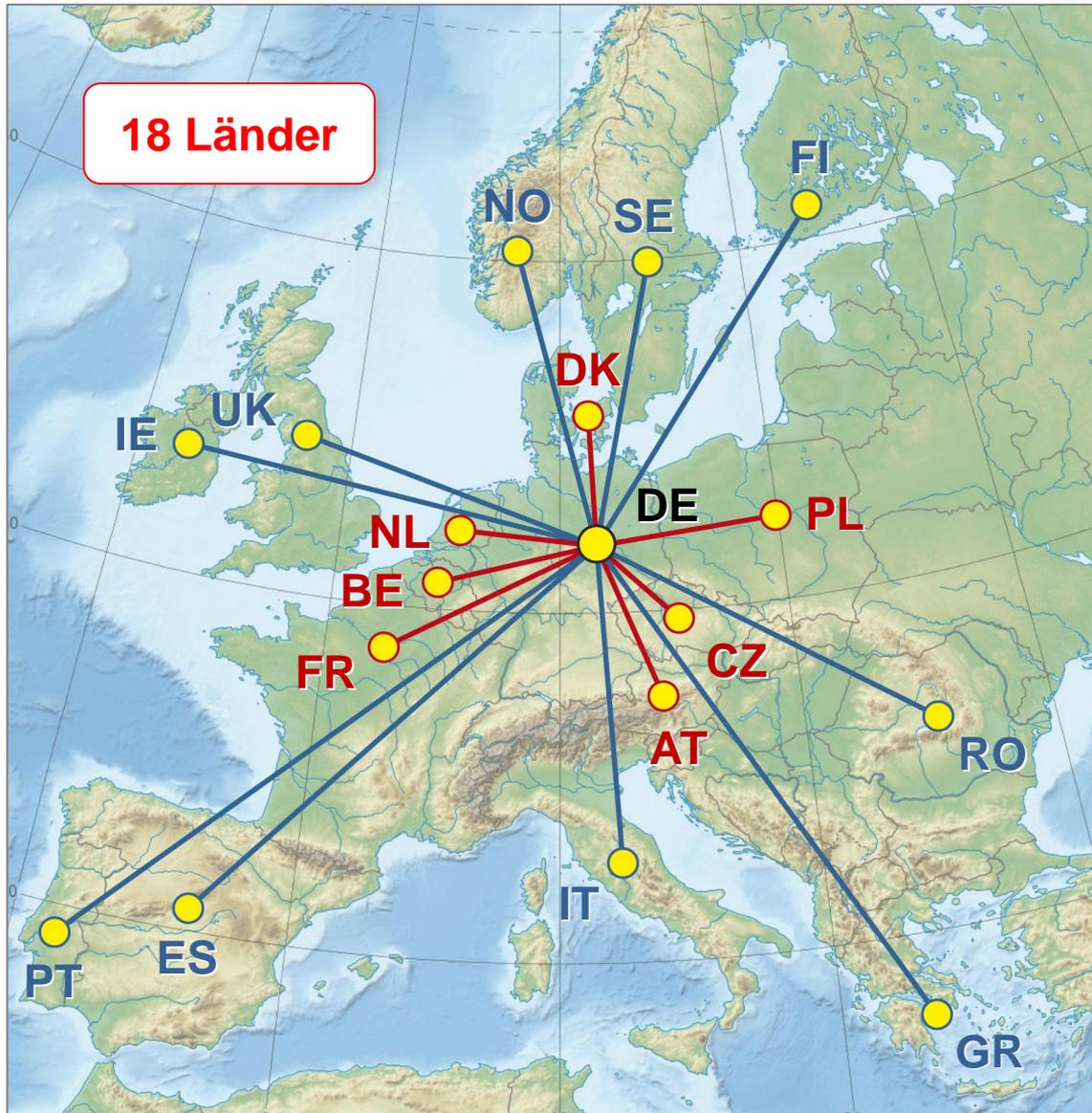
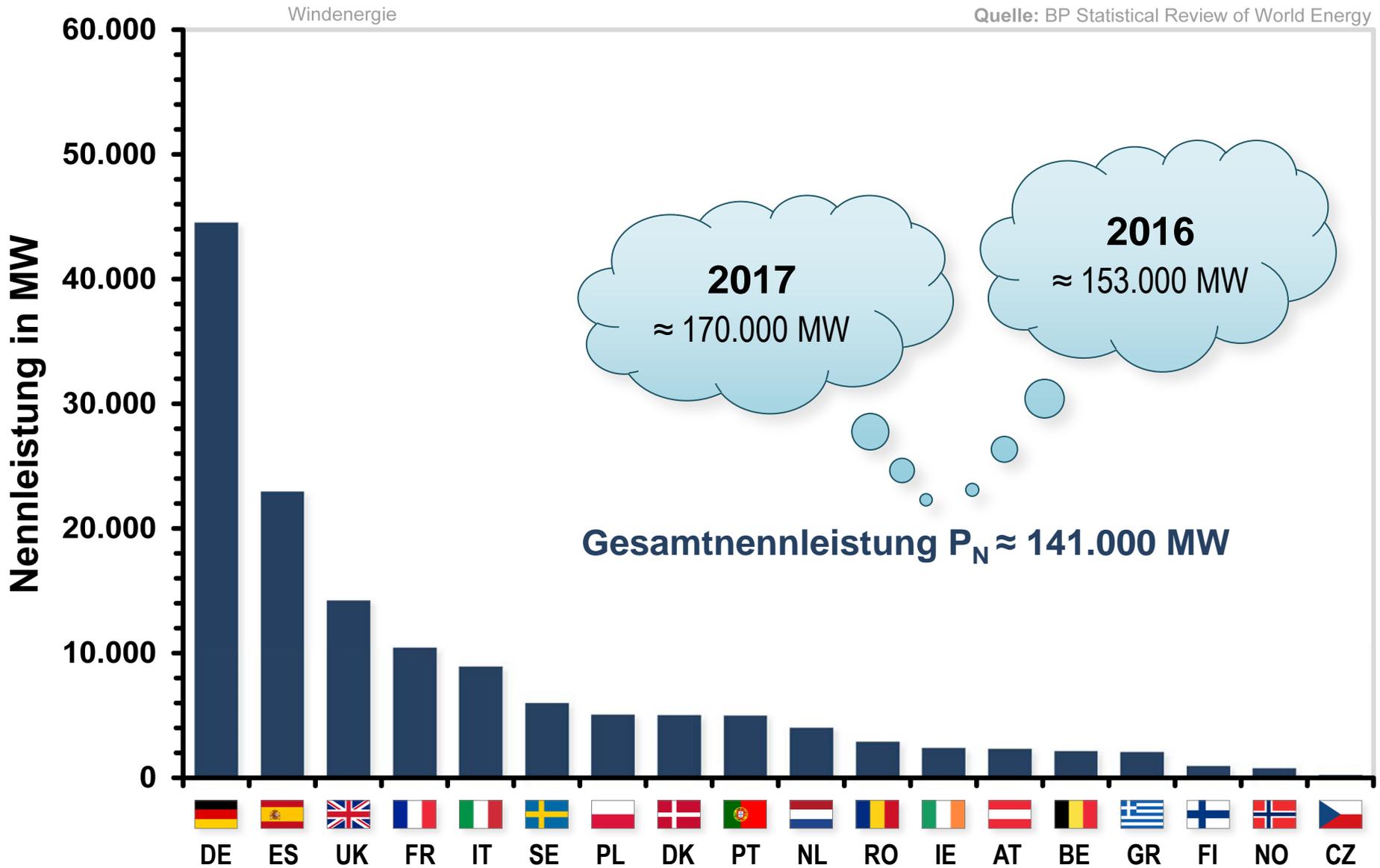
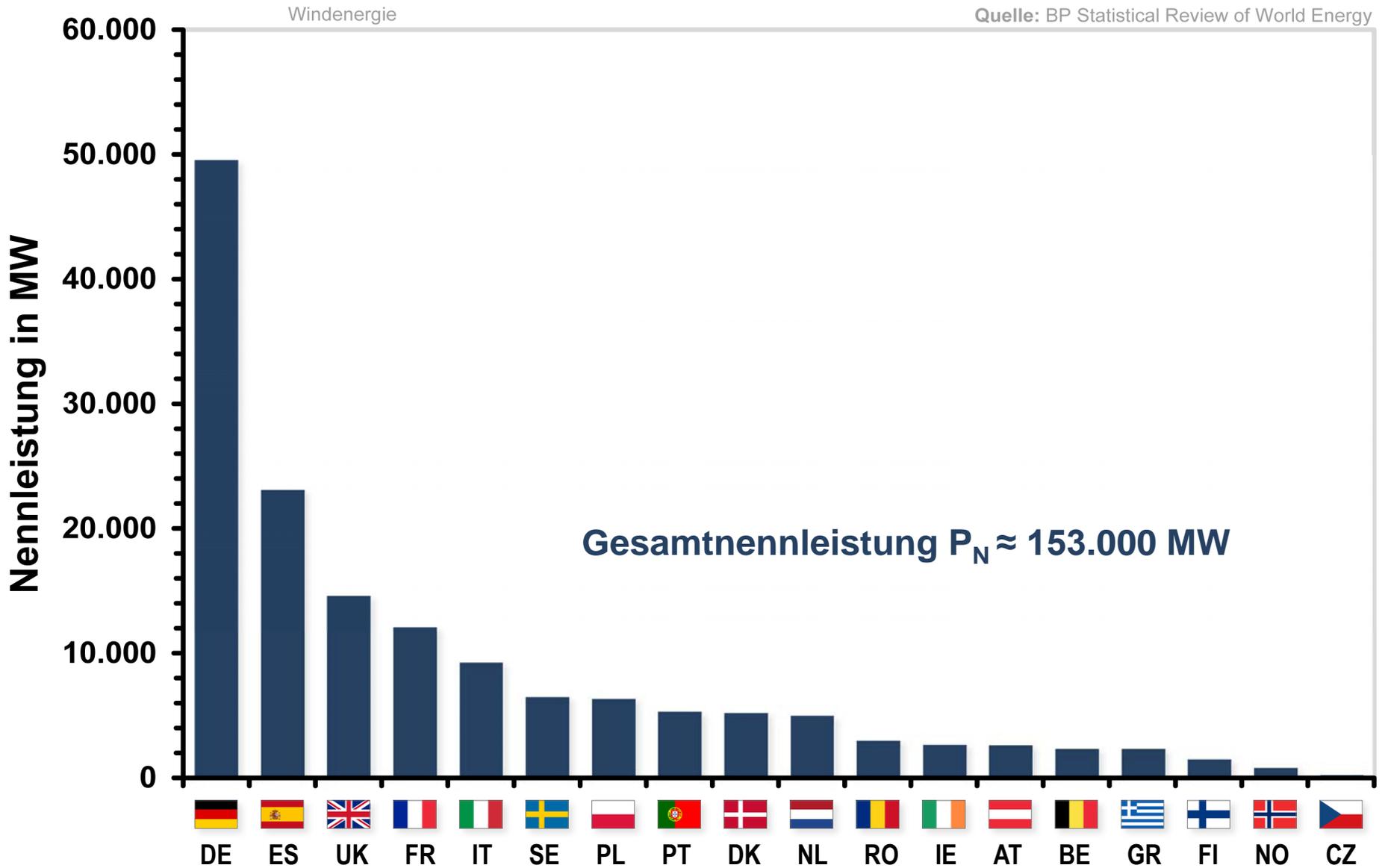


Illustration: www.kultur-denkmal-merzenich.de

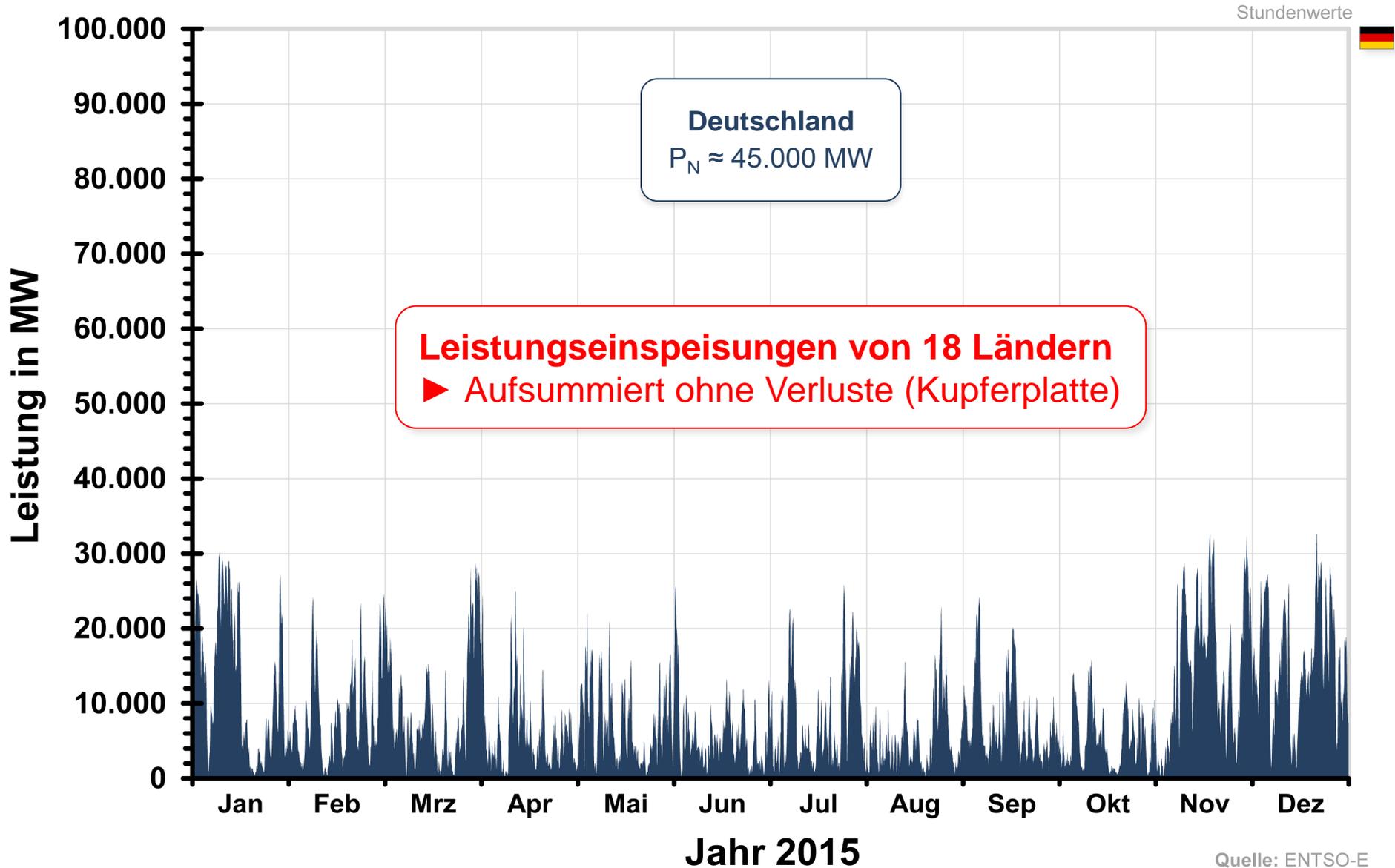


- AT** Österreich
- BE** Belgien
- CZ** Tschechien
- DE** Deutschland
- DK** Dänemark
- ES** Spanien
- FI** Finnland
- FR** Frankreich
- GR** Griechenland
- IE** Irland
- IT** Italien
- NL** Niederlande
- NO** Norwegen
- PO** Polen
- PT** Portugal
- RO** Rumänien
- SE** Schweden
- UK** Großbritannien

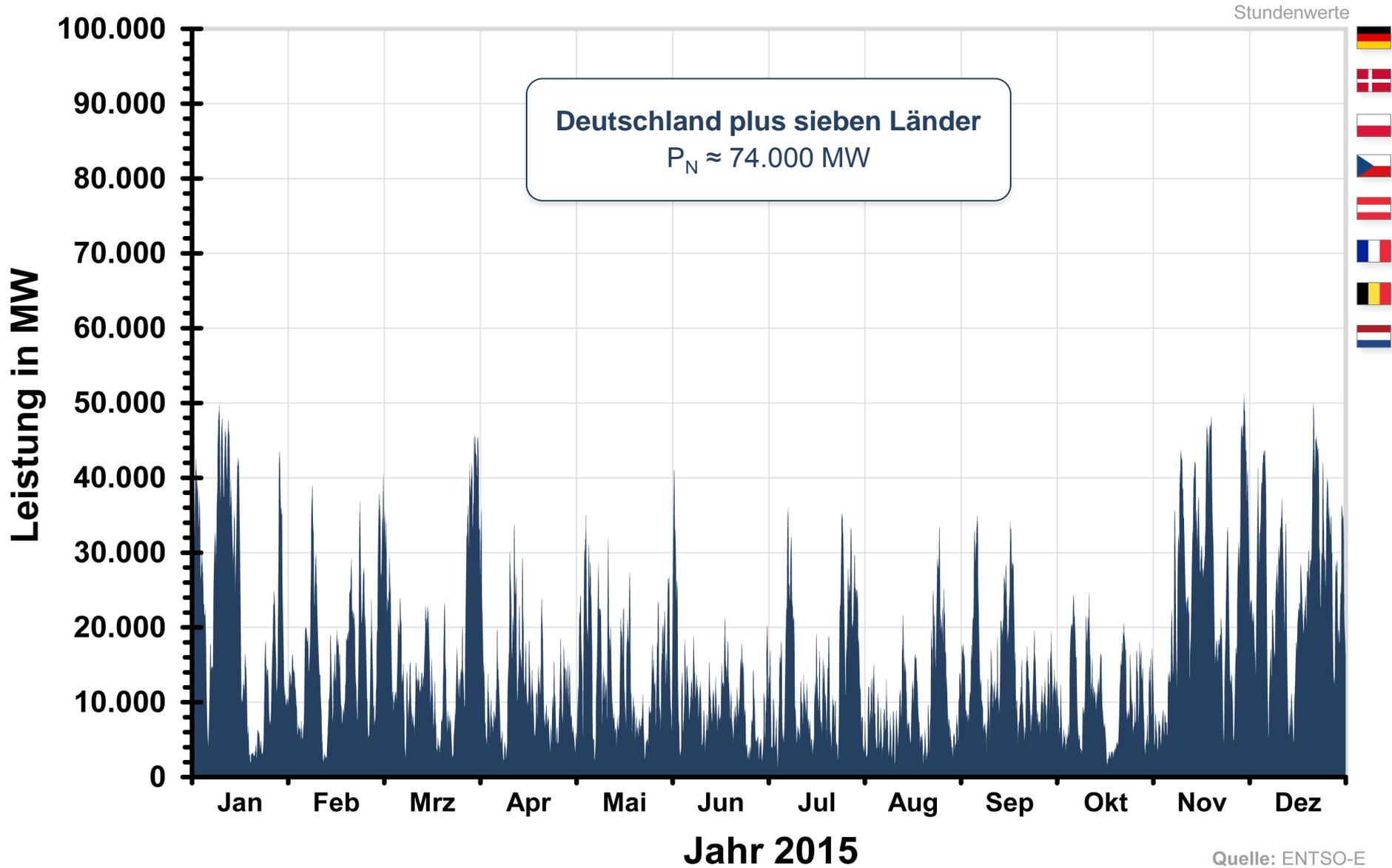


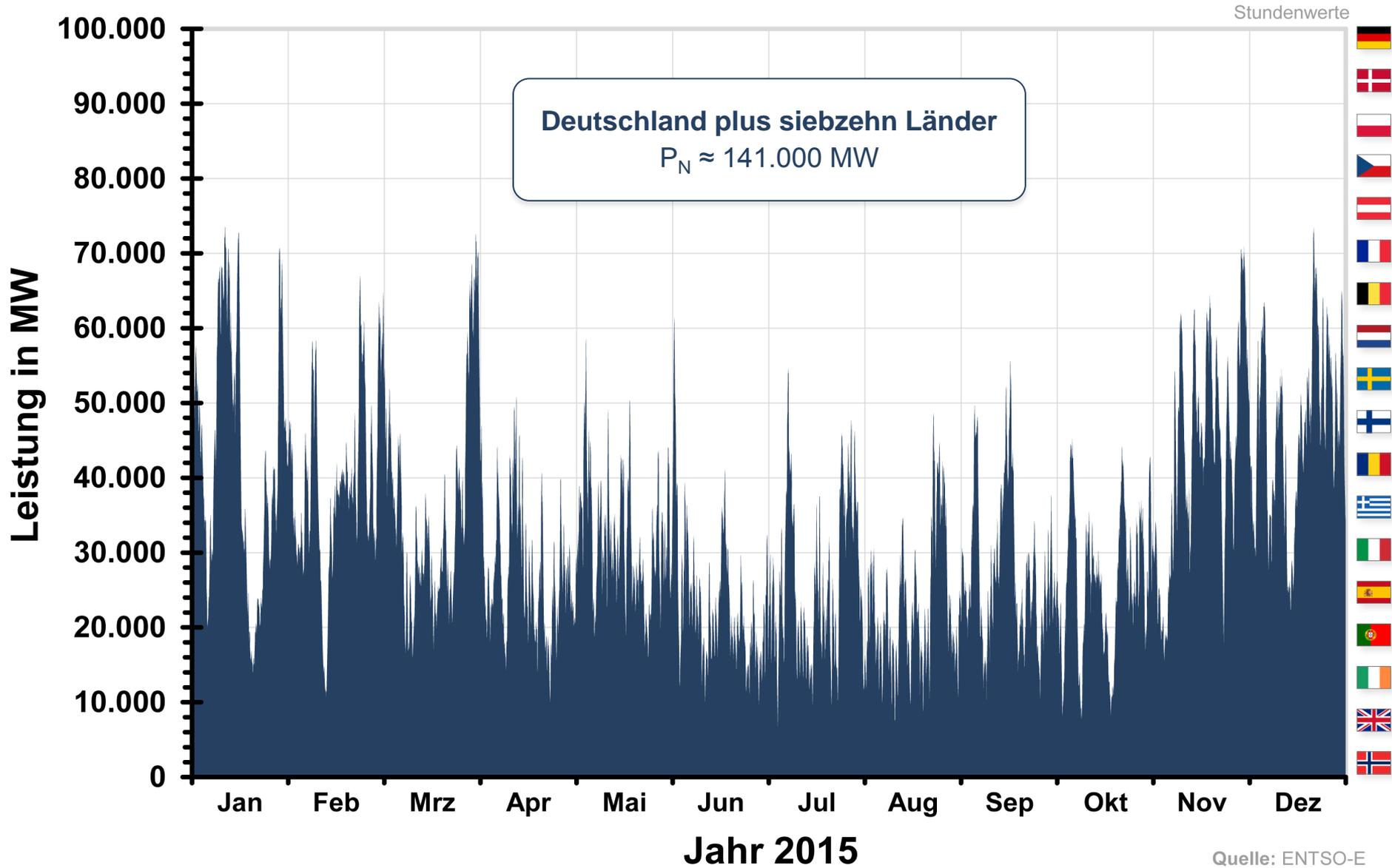


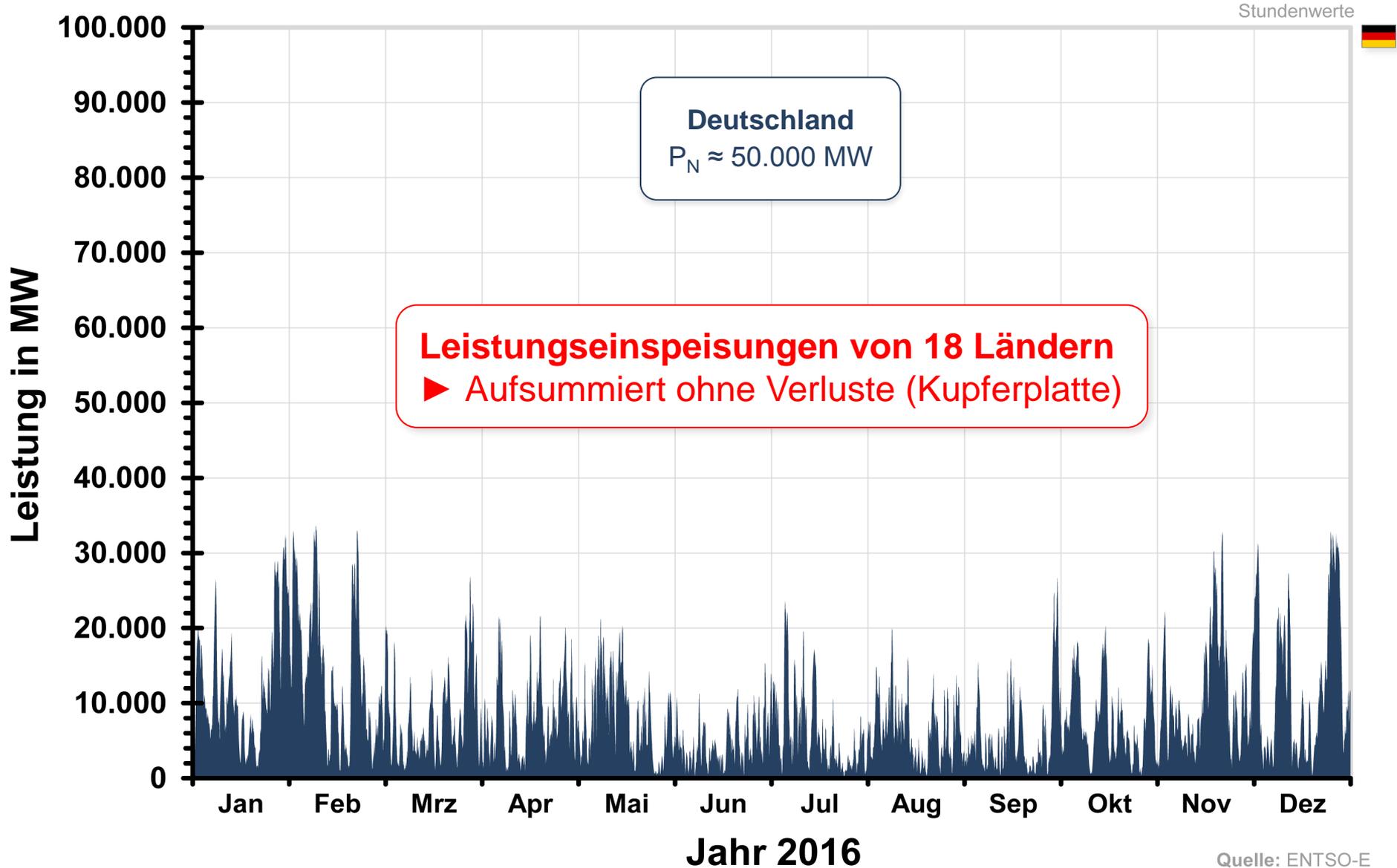




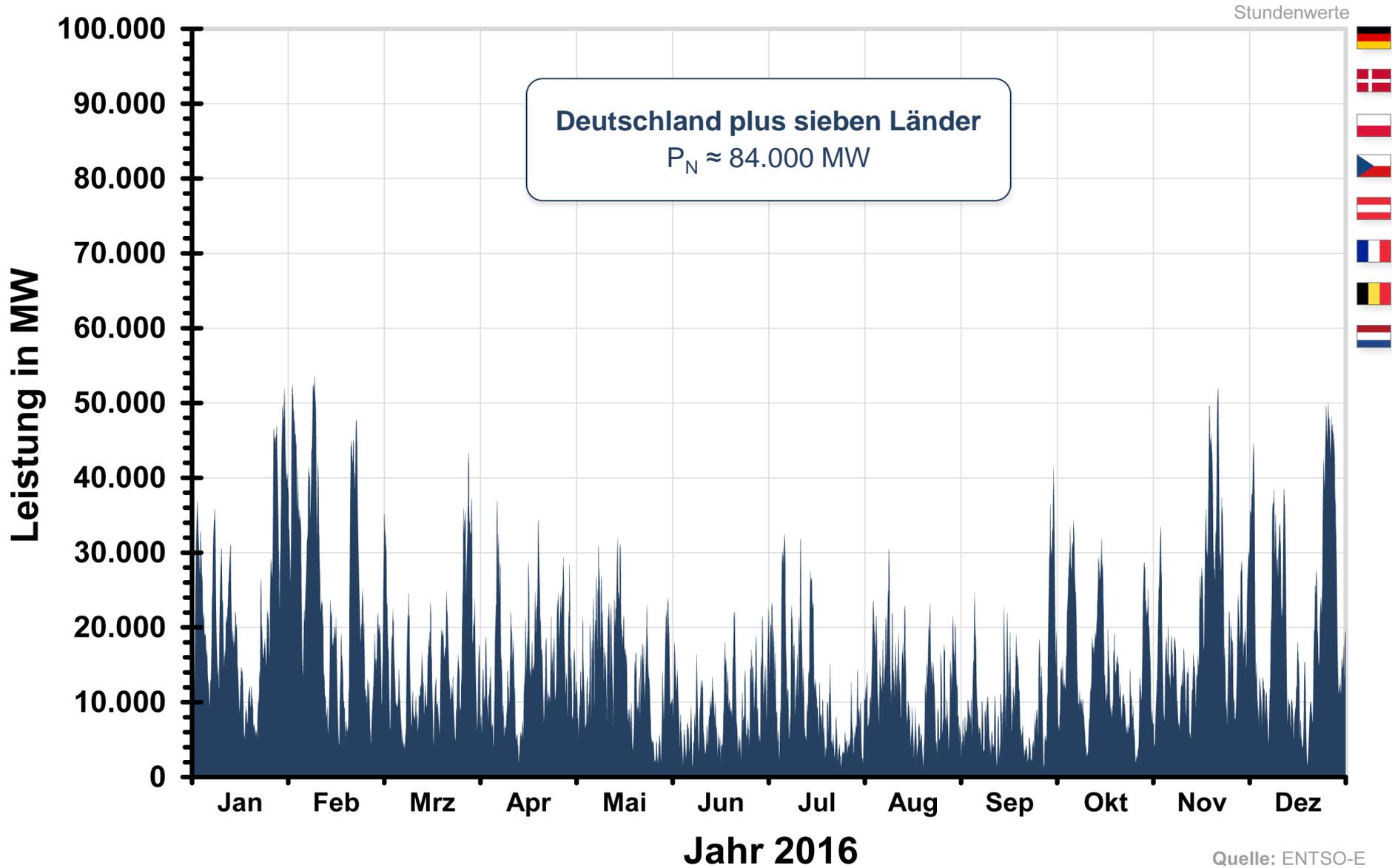
Quelle: ENTSO-E

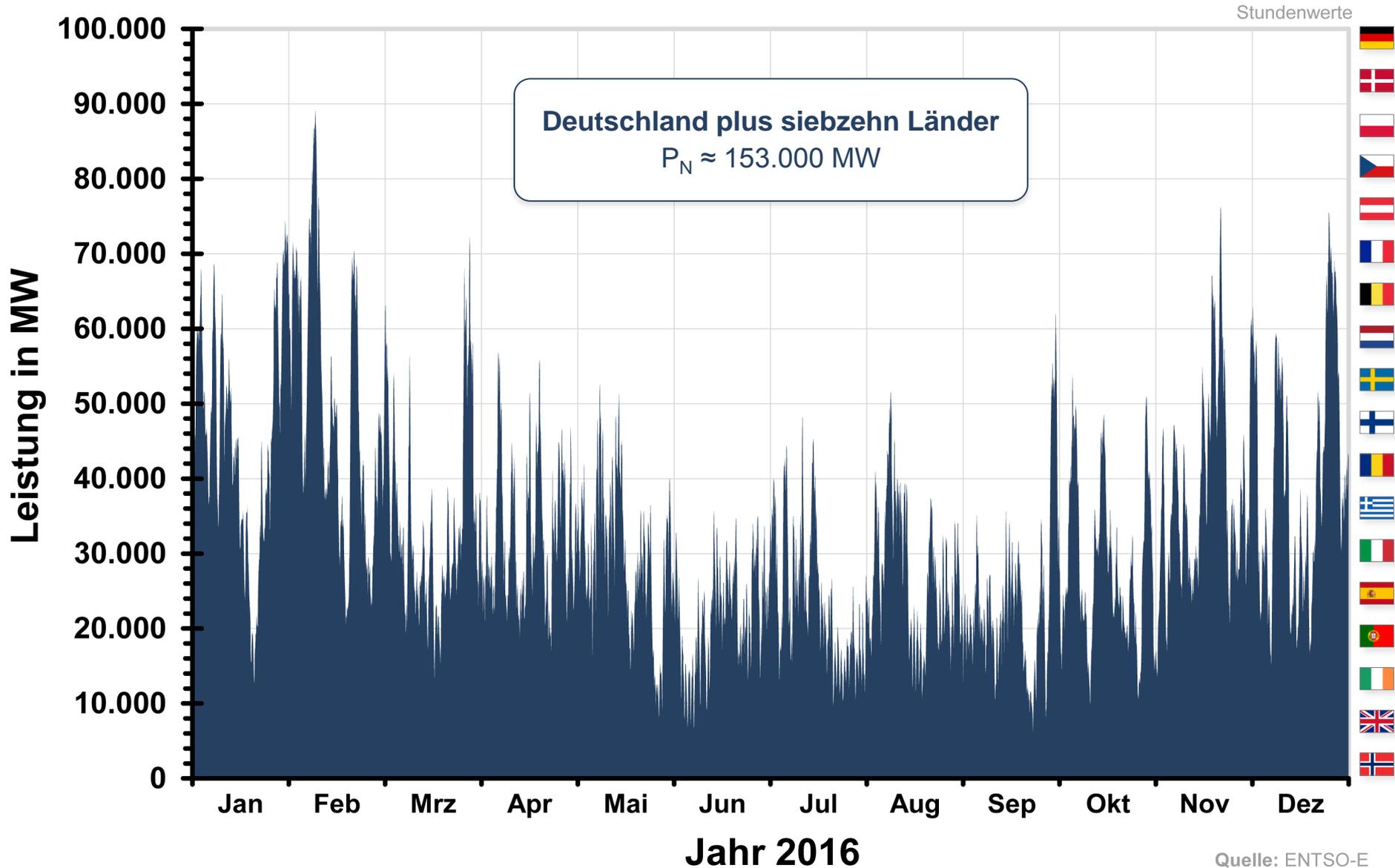


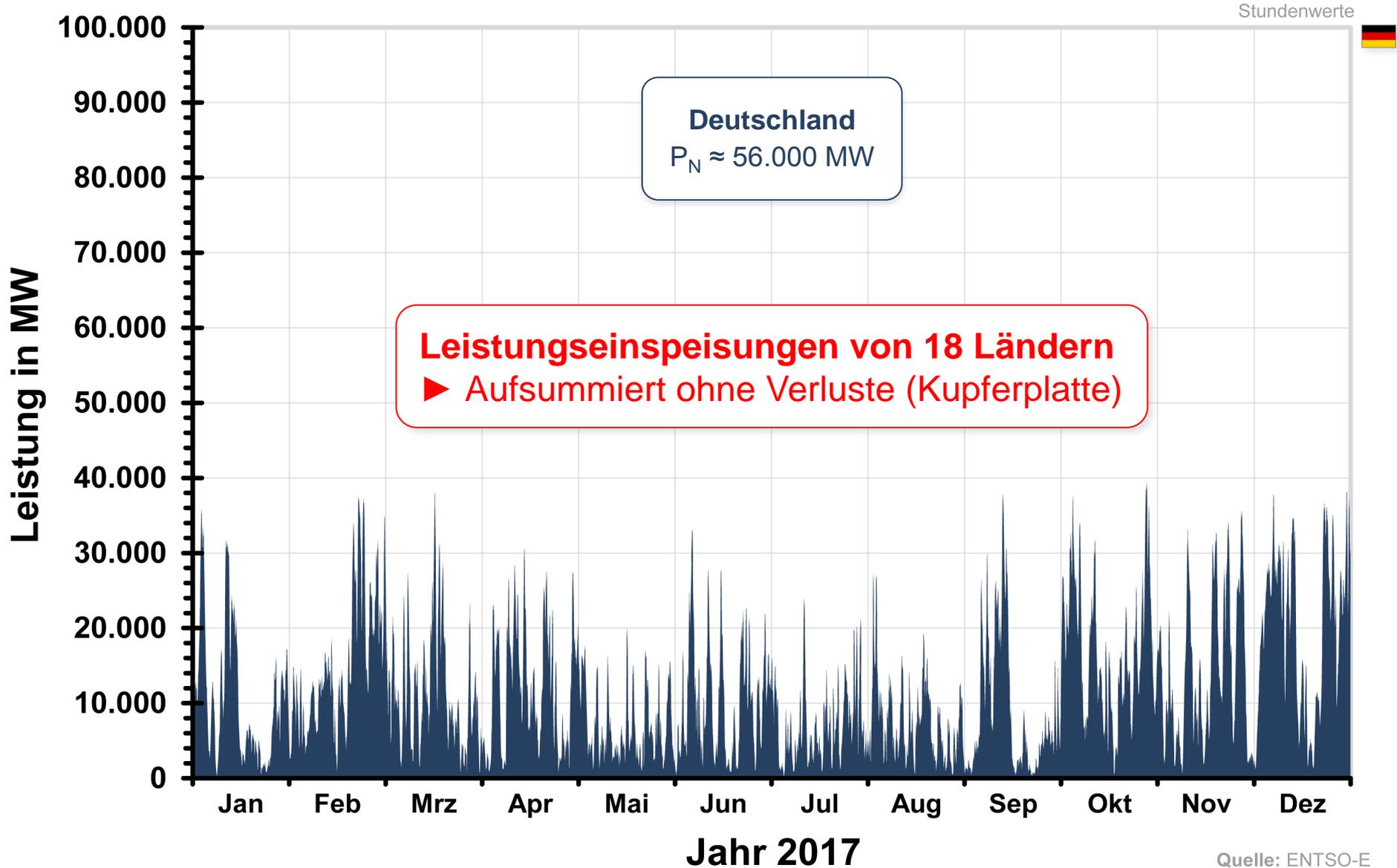




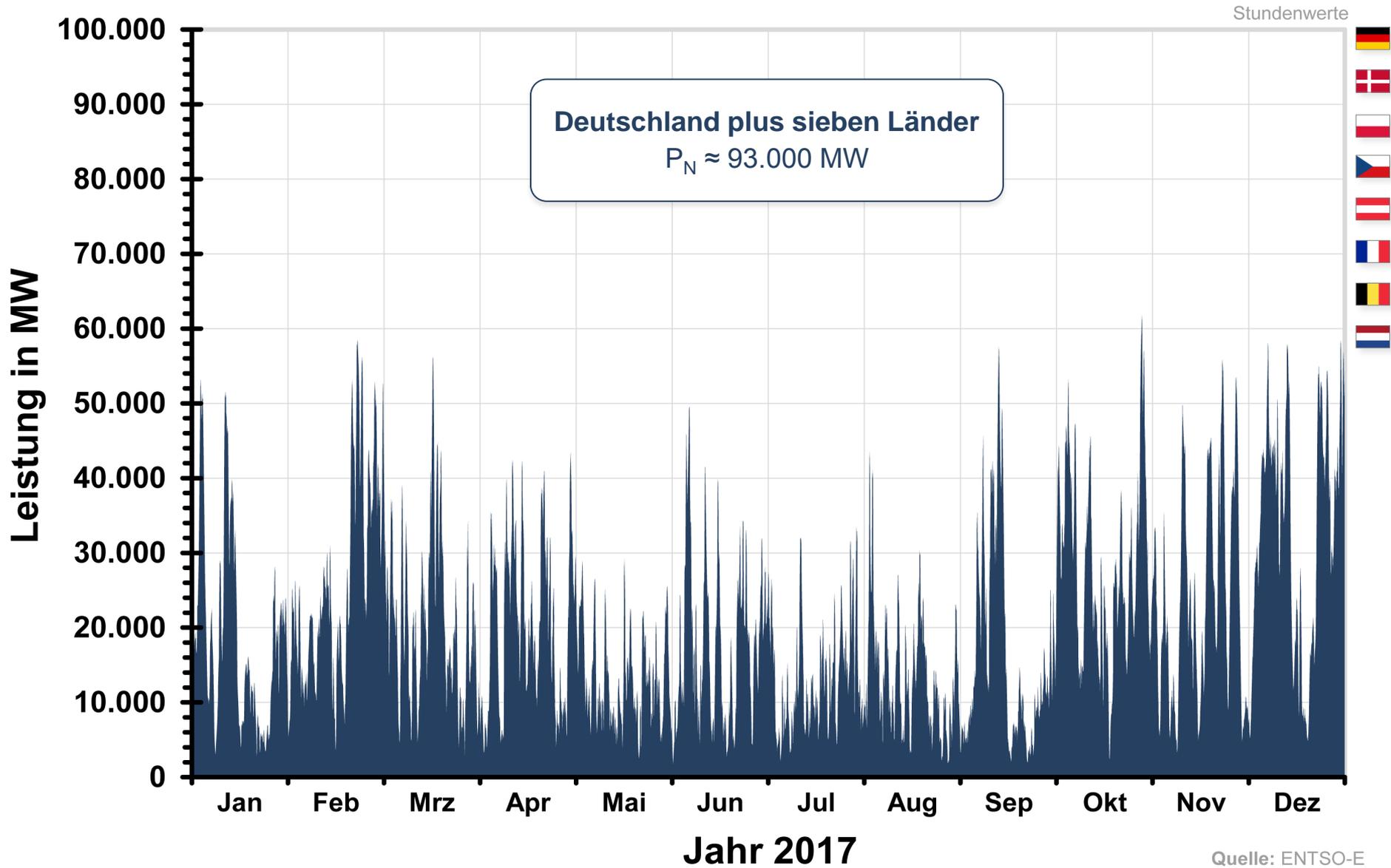
Quelle: ENTSO-E

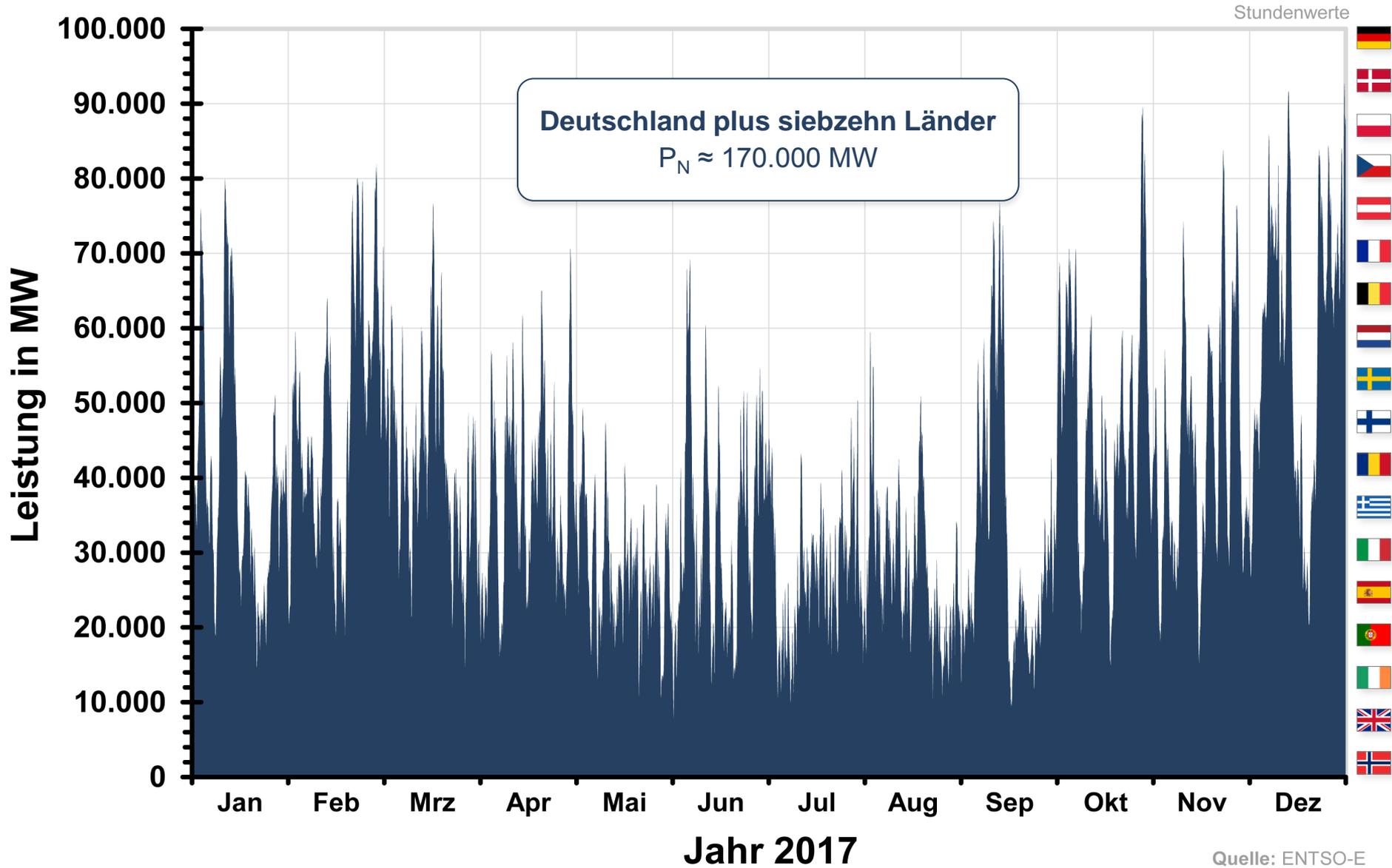


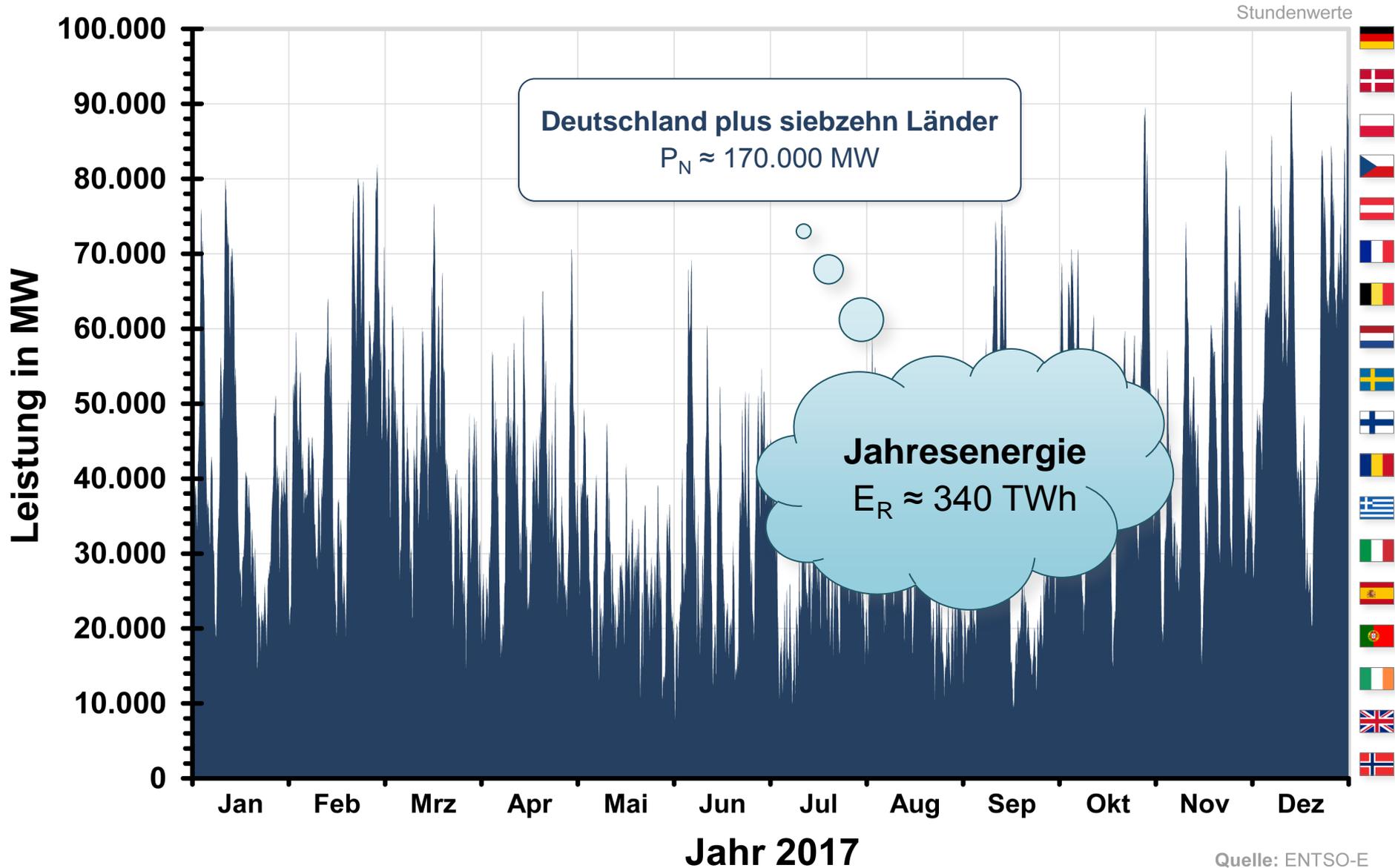


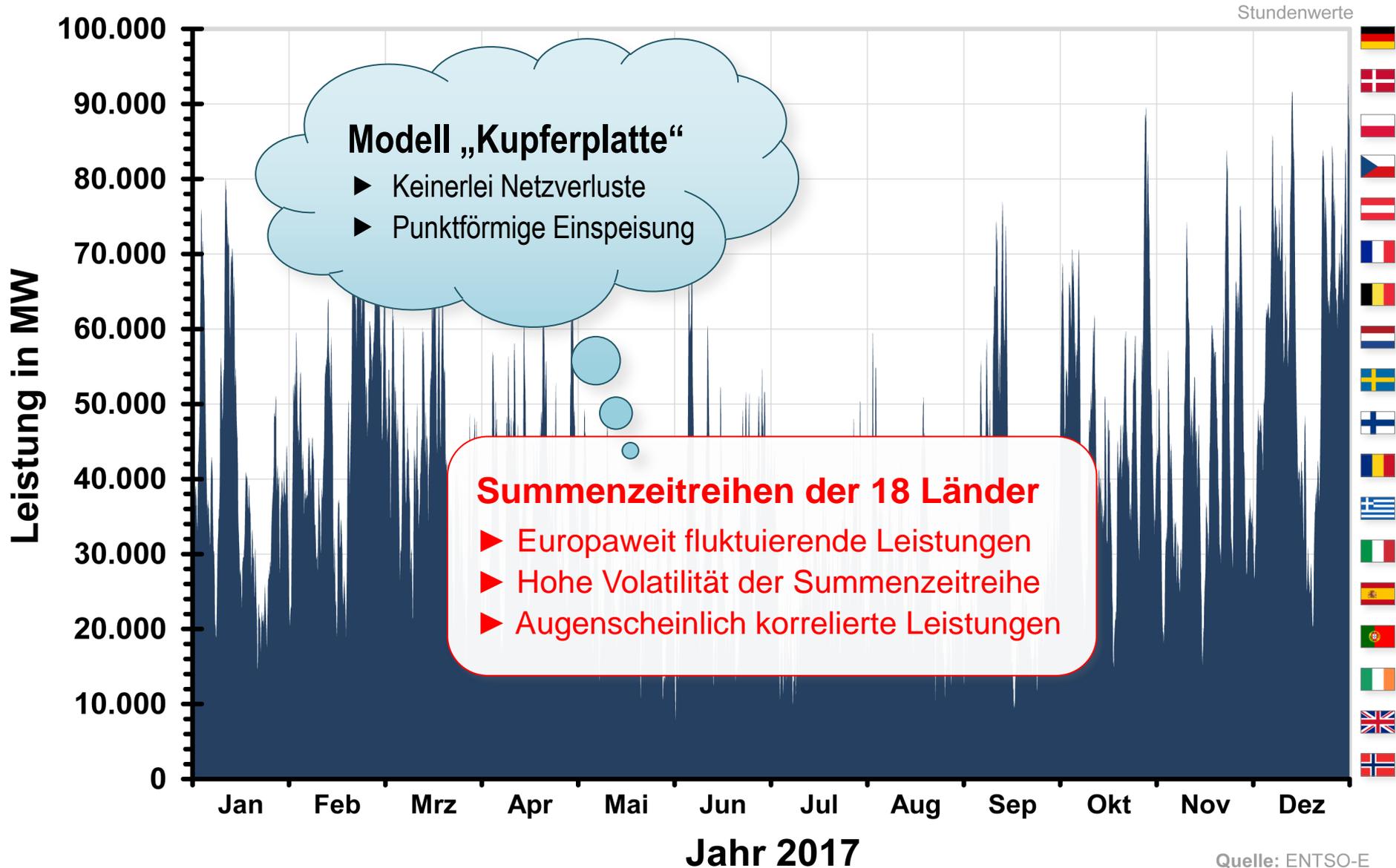


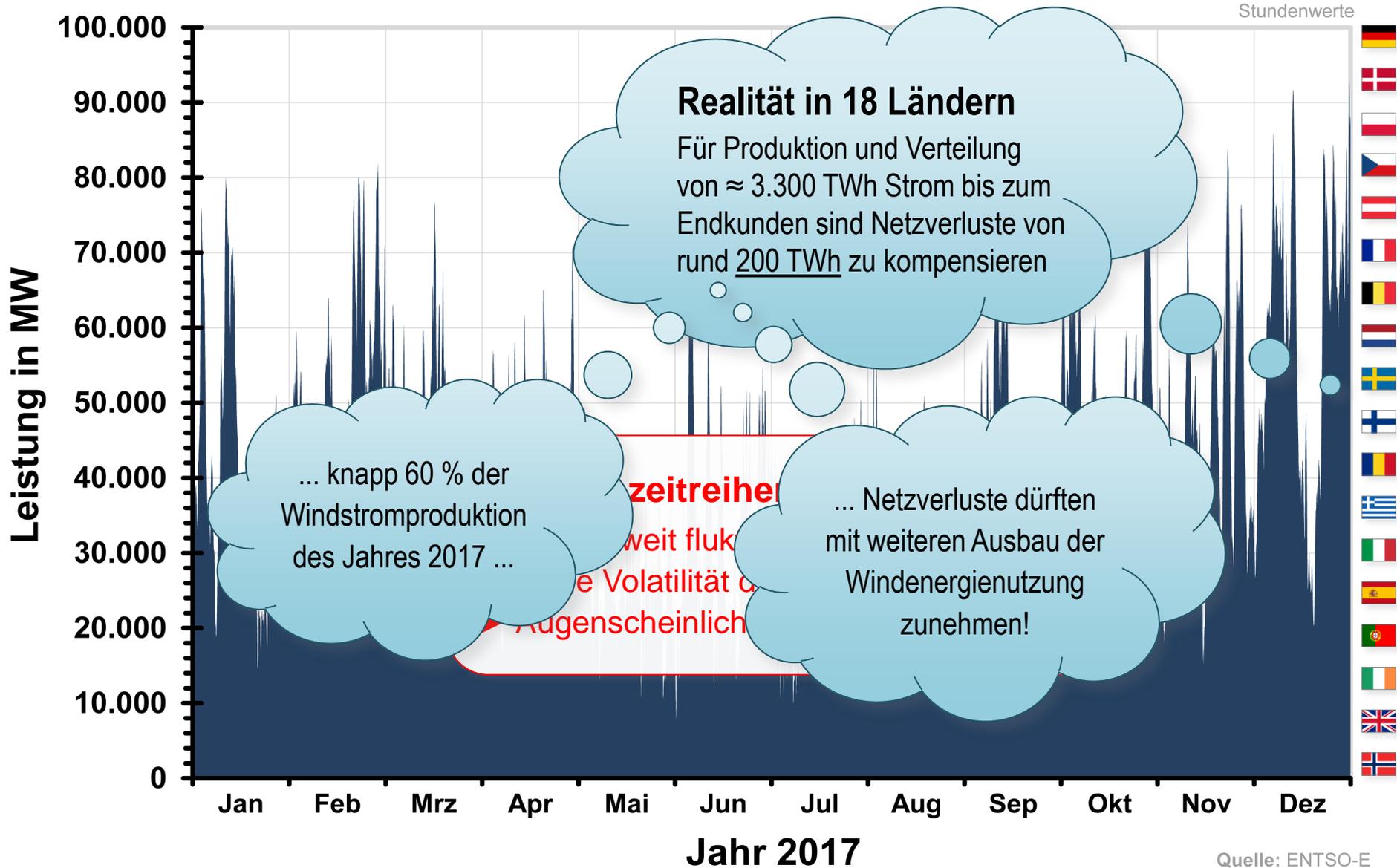
Quelle: ENTSO-E

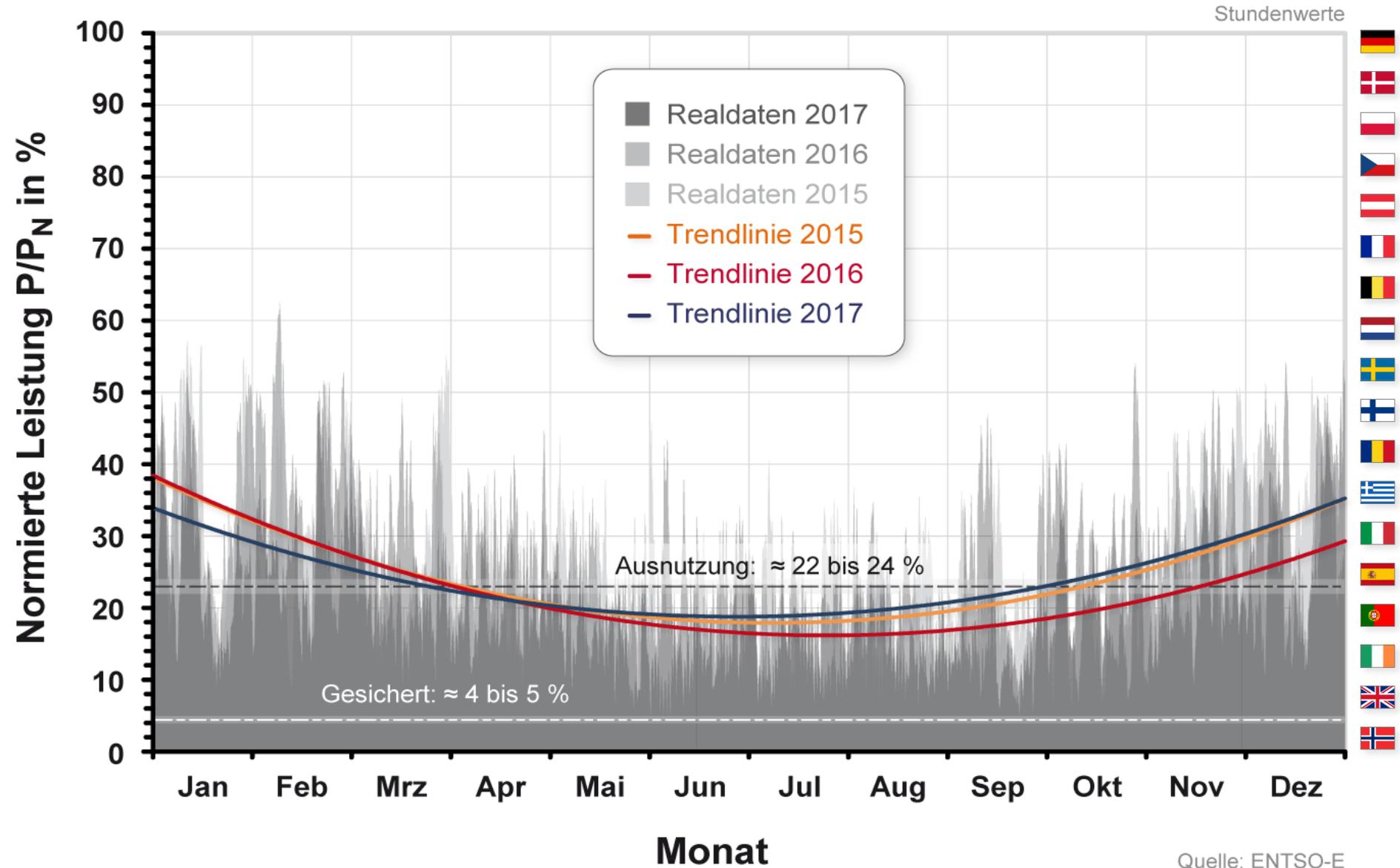


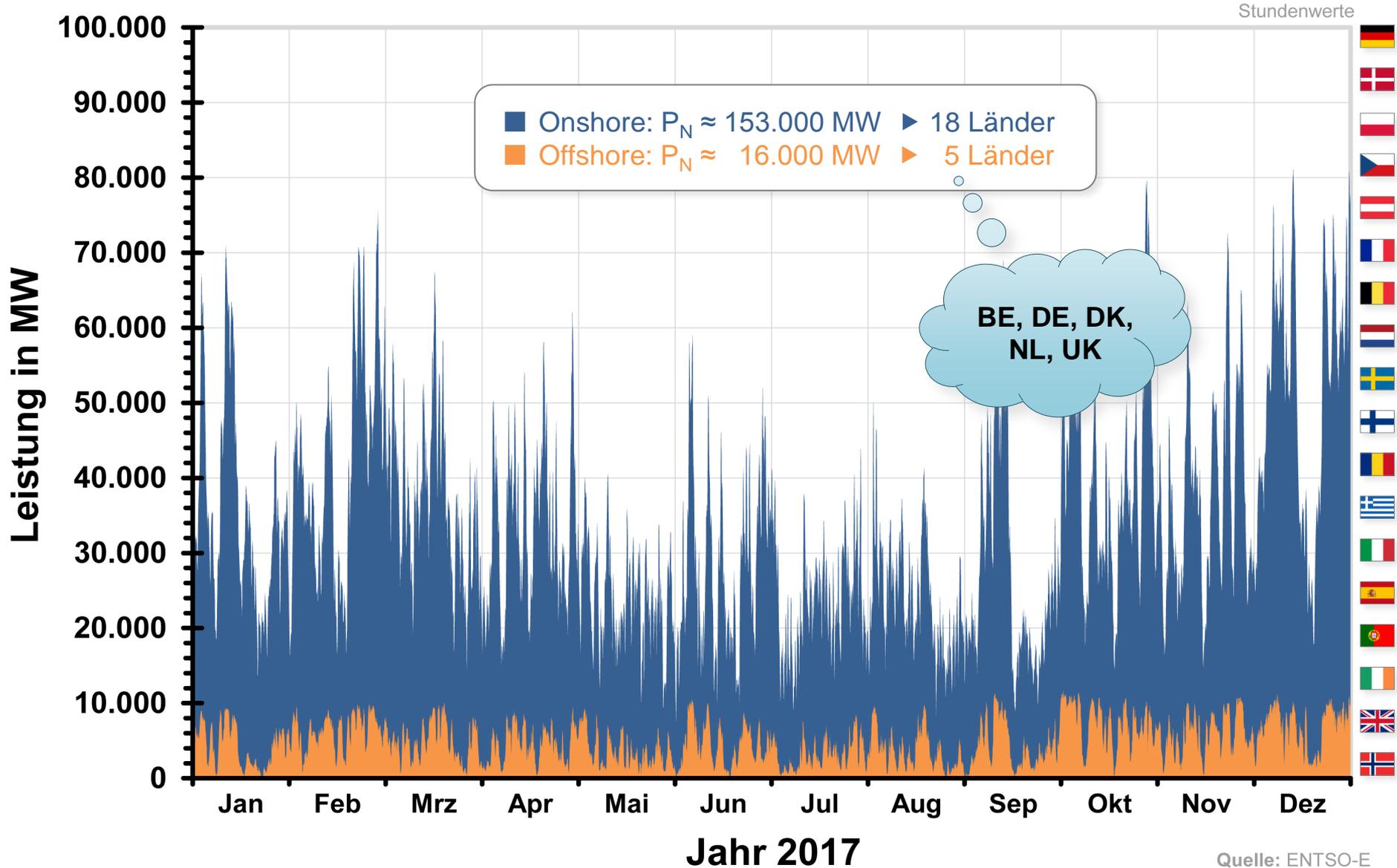


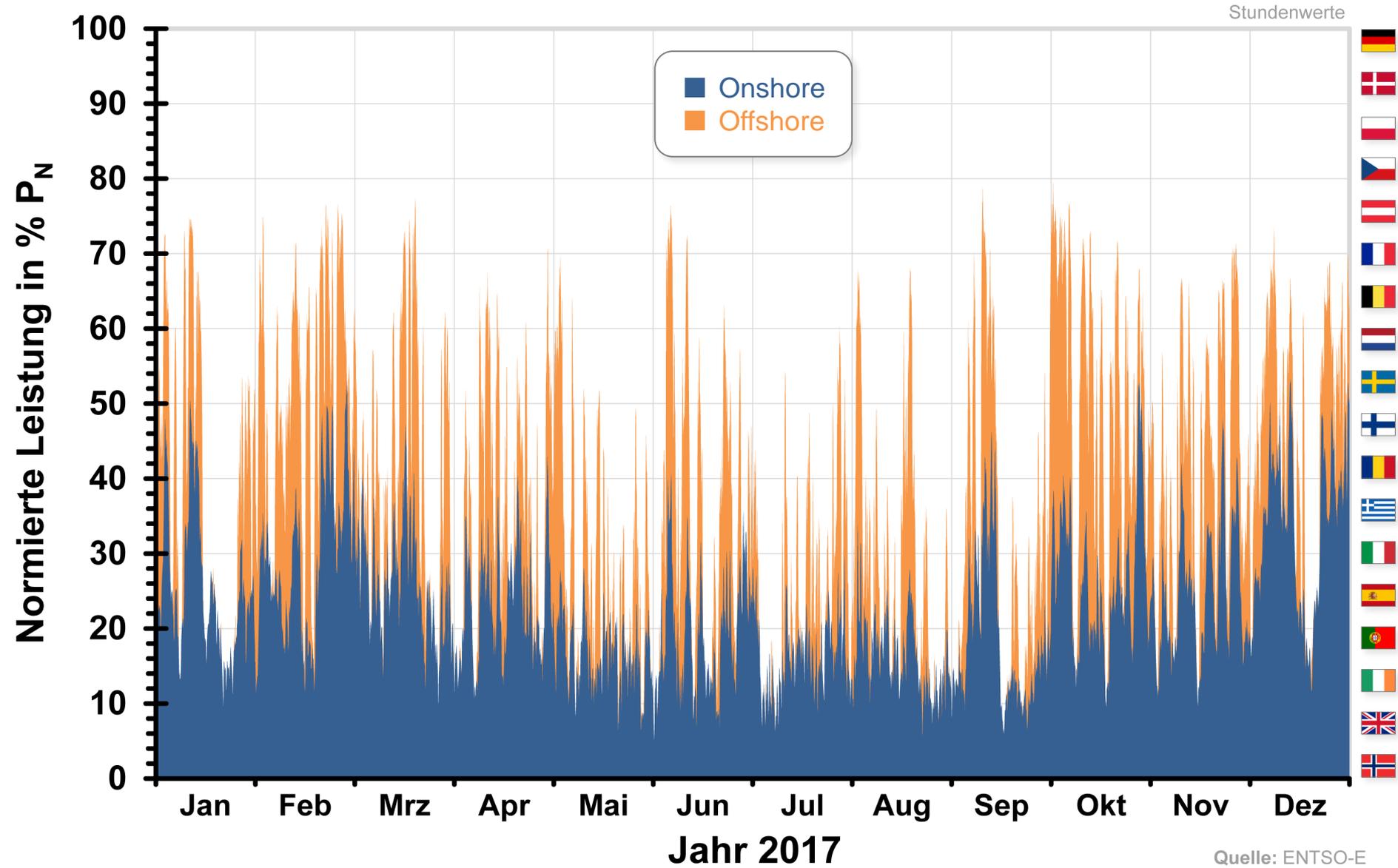


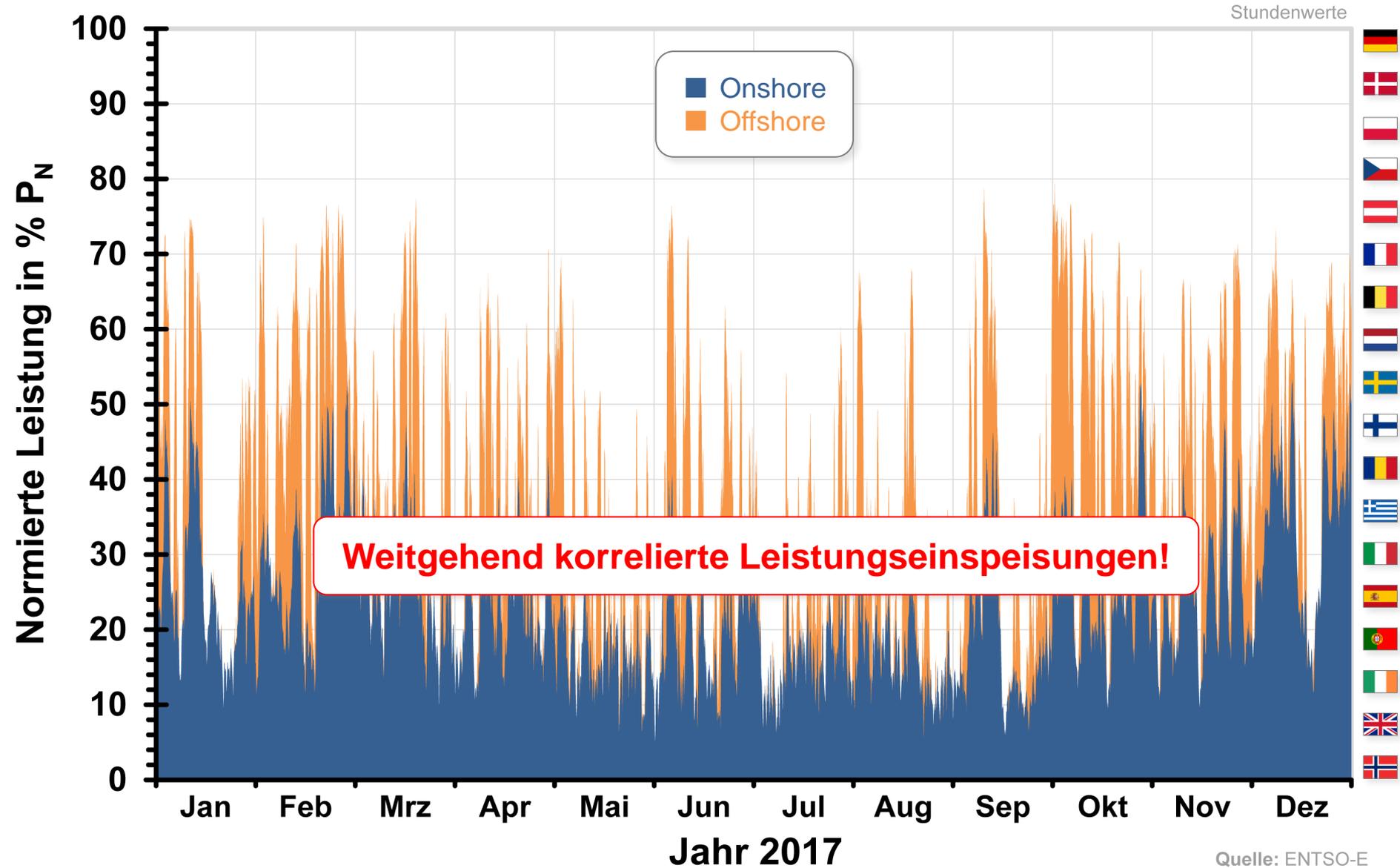


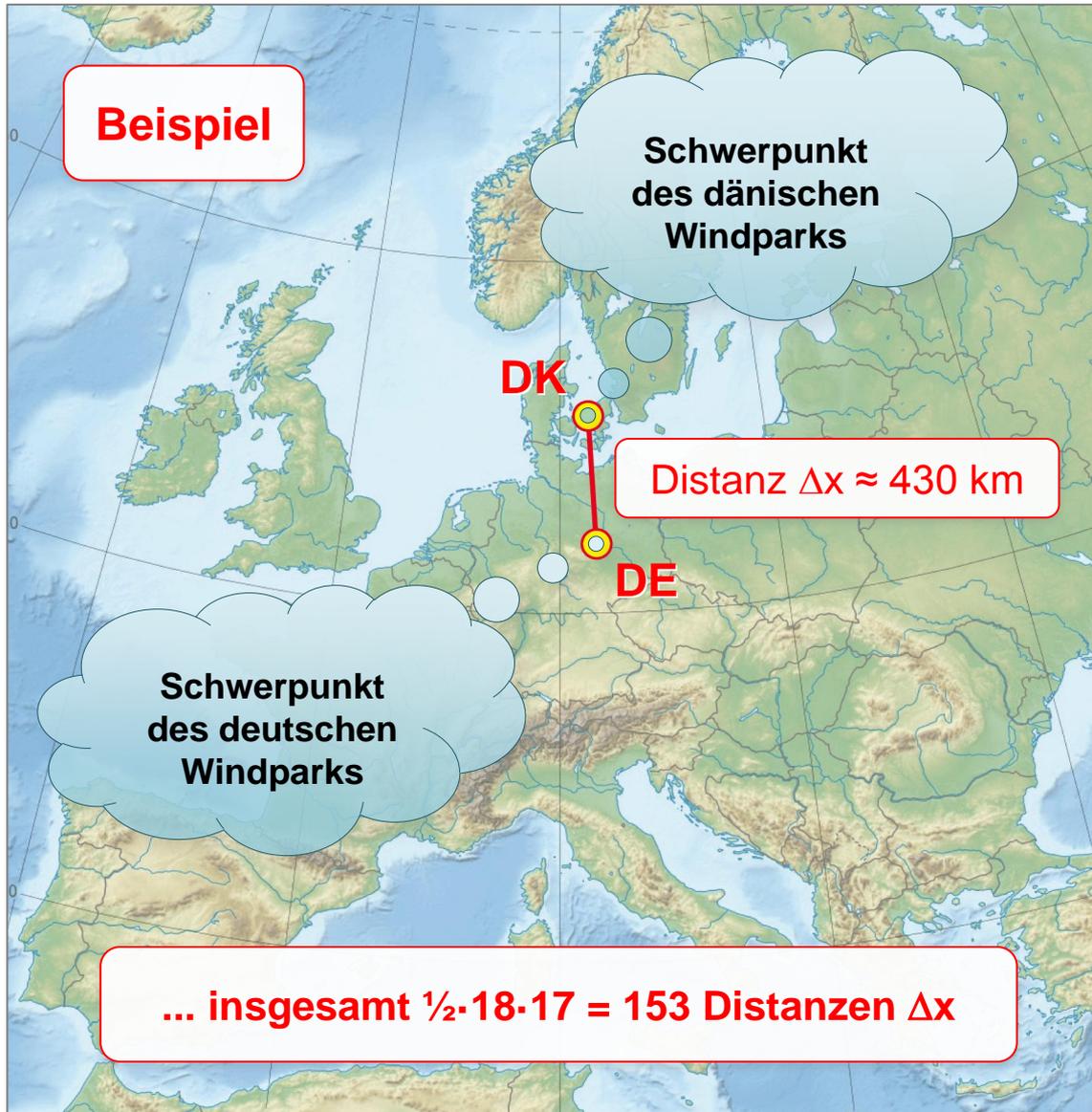












Land	Deutschland	Dänemark
Kürzel	DE	DK
Zeitraum	2016	2016
Schaltjahr	Ja	Ja
Leistung P	Windenergie	Windenergie
01.01.2016 00:00	8.579 MW	1.366 MW
01.01.2016 01:00	8.542 MW	1.232 MW
01.01.2016 02:00	8.443 MW	1.220 MW
01.01.2016 03:00	8.295 MW	1.118 MW
01.01.2016 04:00	7.320 MW	1.049 MW
01.01.2016 05:00	6.575 MW	940 MW
01.01.2016 06:00	5.624 MW	815 MW
01.01.2016 07:00	4.644 MW	622 MW
01.01.2016 08:00	3.734 MW	535 MW
01.01.2016 09:00	2.776 MW	372 MW
01.01.2016 10:00	1.831 MW	234 MW
01.01.2016 11:00	1.288 MW	174 MW
01.01.2016 12:00	790 MW	124 MW
01.01.2016 13:00	496 MW	127 MW
01.01.2016 14:00	405 MW	88 MW

⋮ ⋮ ⋮

Rangkorrelationskoeffizient

$r_s \approx 0,667$

⋮ ⋮ ⋮

31.12.2016 20:00	15.354 MW	3.616 MW
31.12.2016 21:00	14.875 MW	3.587 MW
31.12.2016 22:00	15.163 MW	3.447 MW
31.12.2016 23:00	15.422 MW	3.402 MW

Korrelationsanalyse: Wie hängen je zwei Daten zusammen?

Korrelationskoeffizient r_K

- Maß für Richtung und Stärke einer Korrelation
- Wertebereich: $-1 \leq r_K \leq 1$
- Fallunterscheidung:

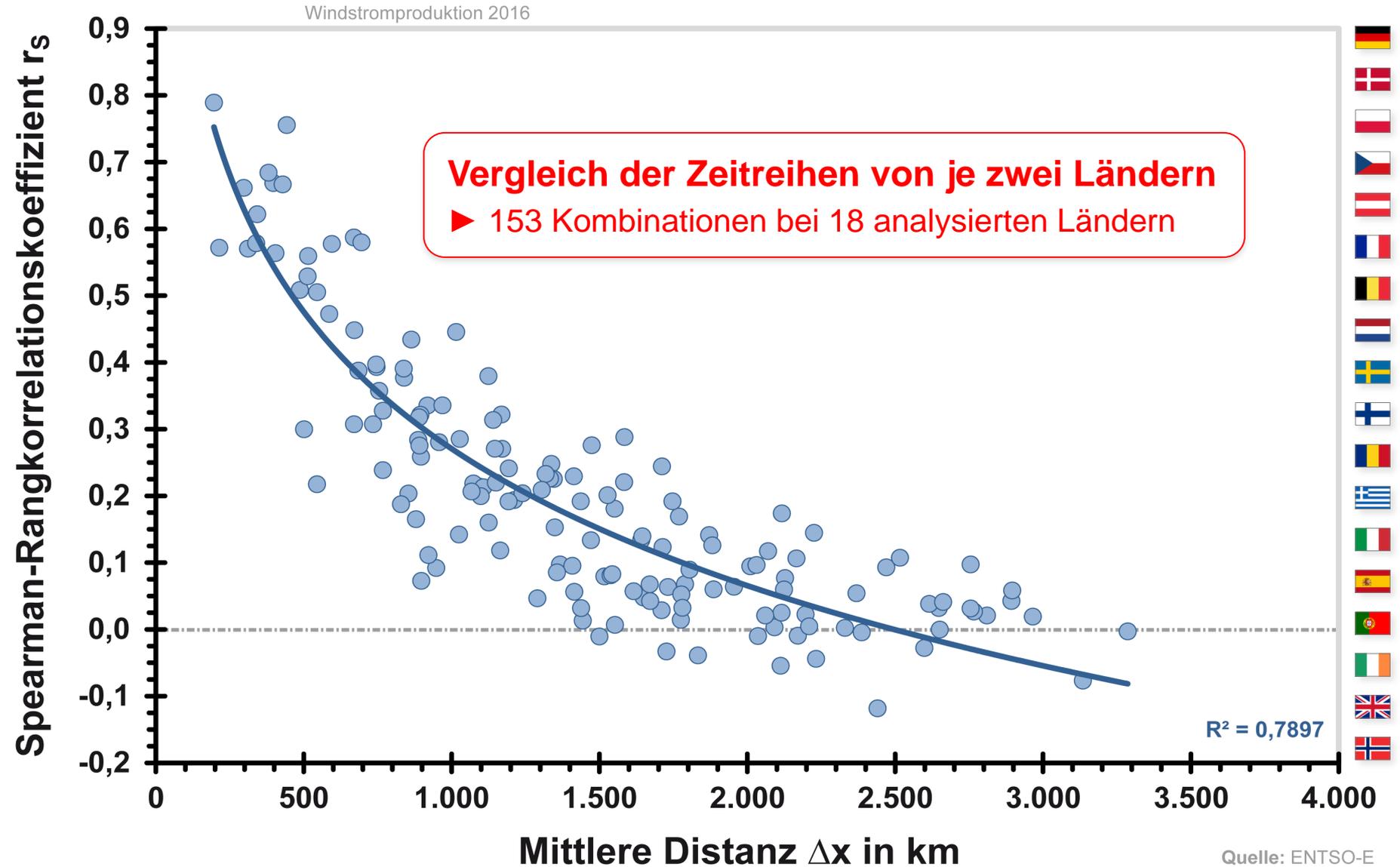
- $r_K \approx 0$ Unkorrelierte Daten
z. B. Hausnummer und Körpergröße
- $r_K > 0$ Positiv korrelierte Daten
z. B. Körper- und Schuhgröße (↑↑)
- $r_K < 0$ Negativ korrelierte Daten
z. B. Außentemperatur und Skiurlauberzahl (↓↑)
- $r_K = \pm 1$ Perfekte positive bzw. negative Korrelation

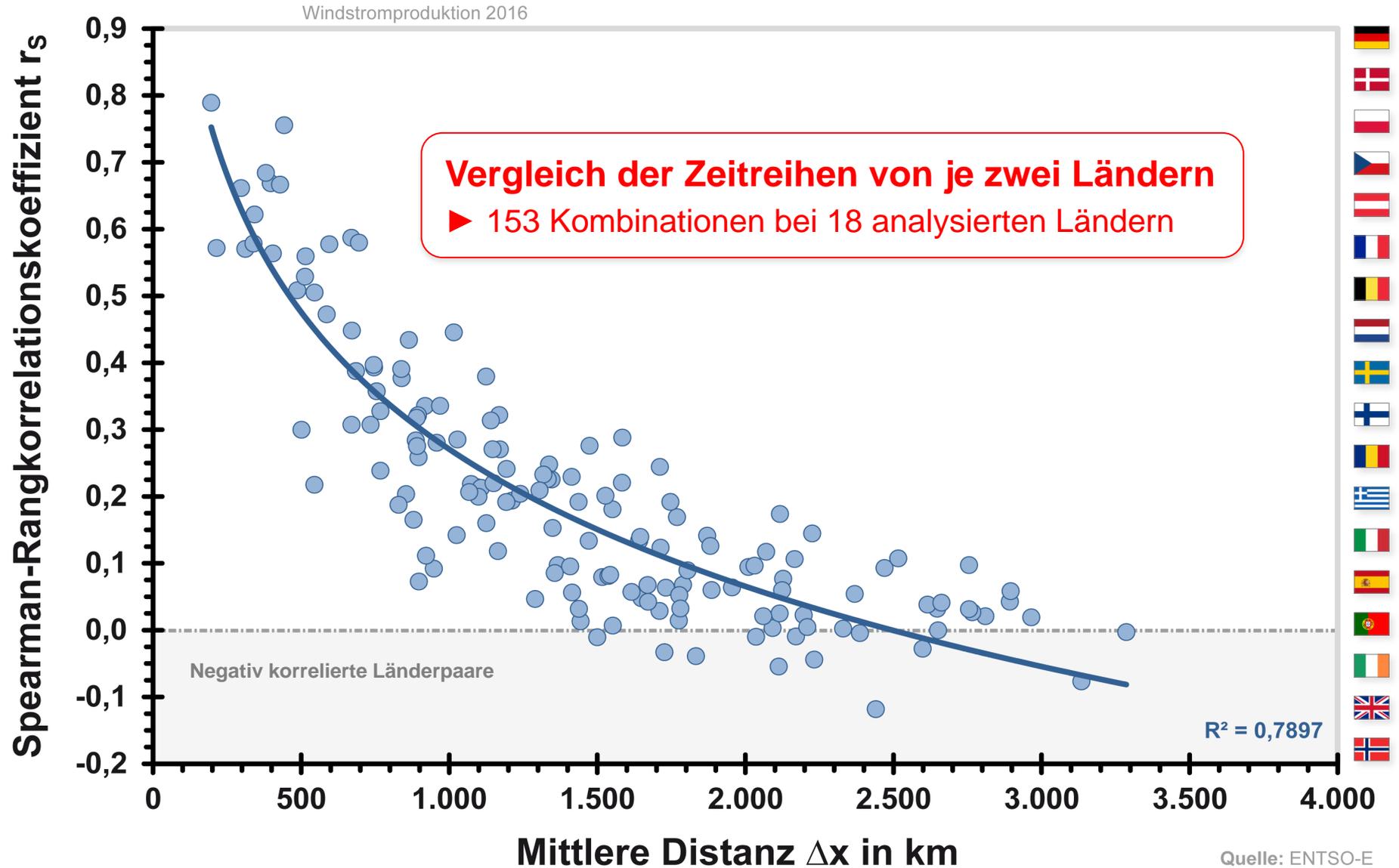
Gewählte Methode

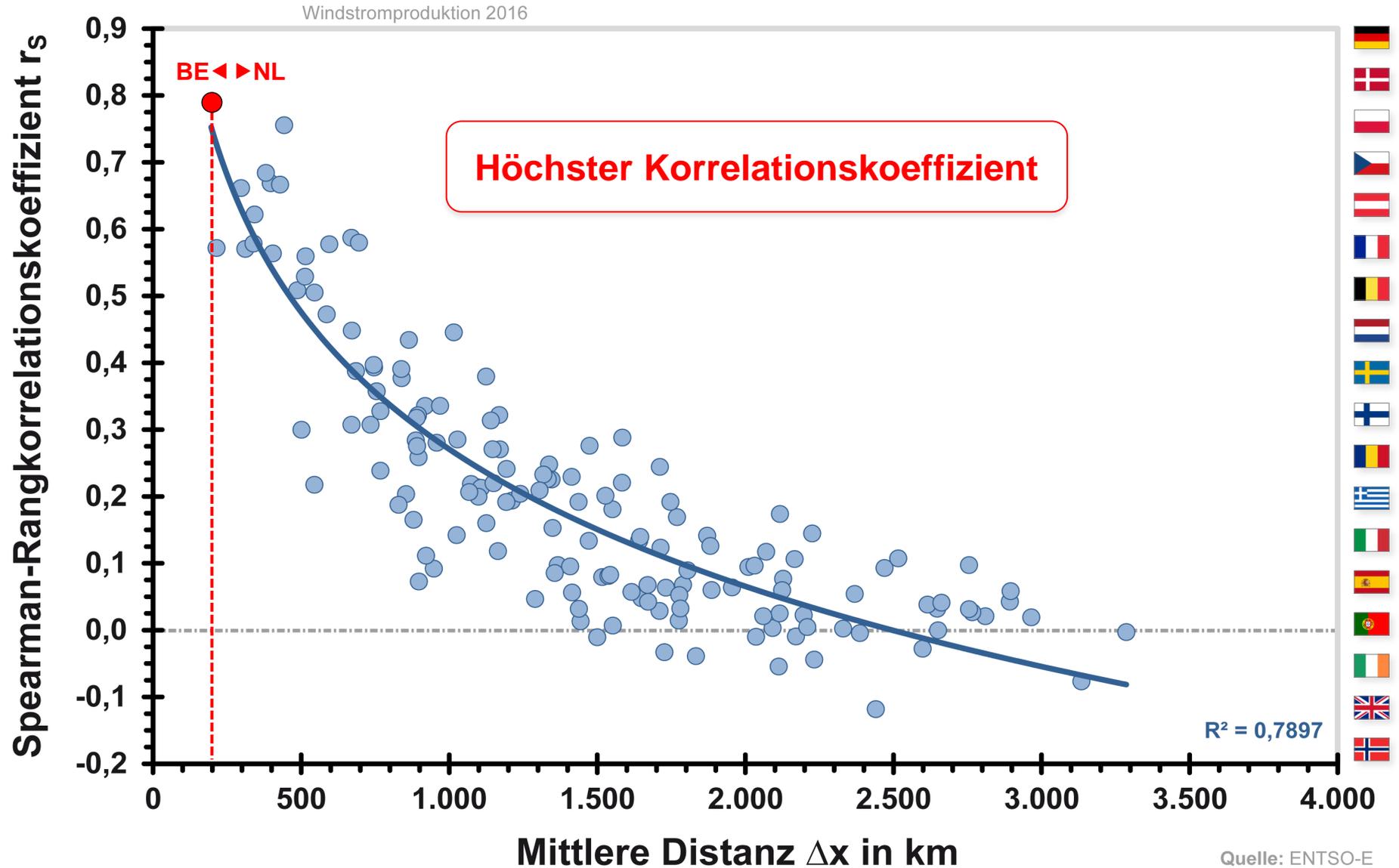
- Rangkorrelationskoeffizient r_S nach Spearman aufgrund nicht normalverteilter Daten (Leistungseinspeisungen)

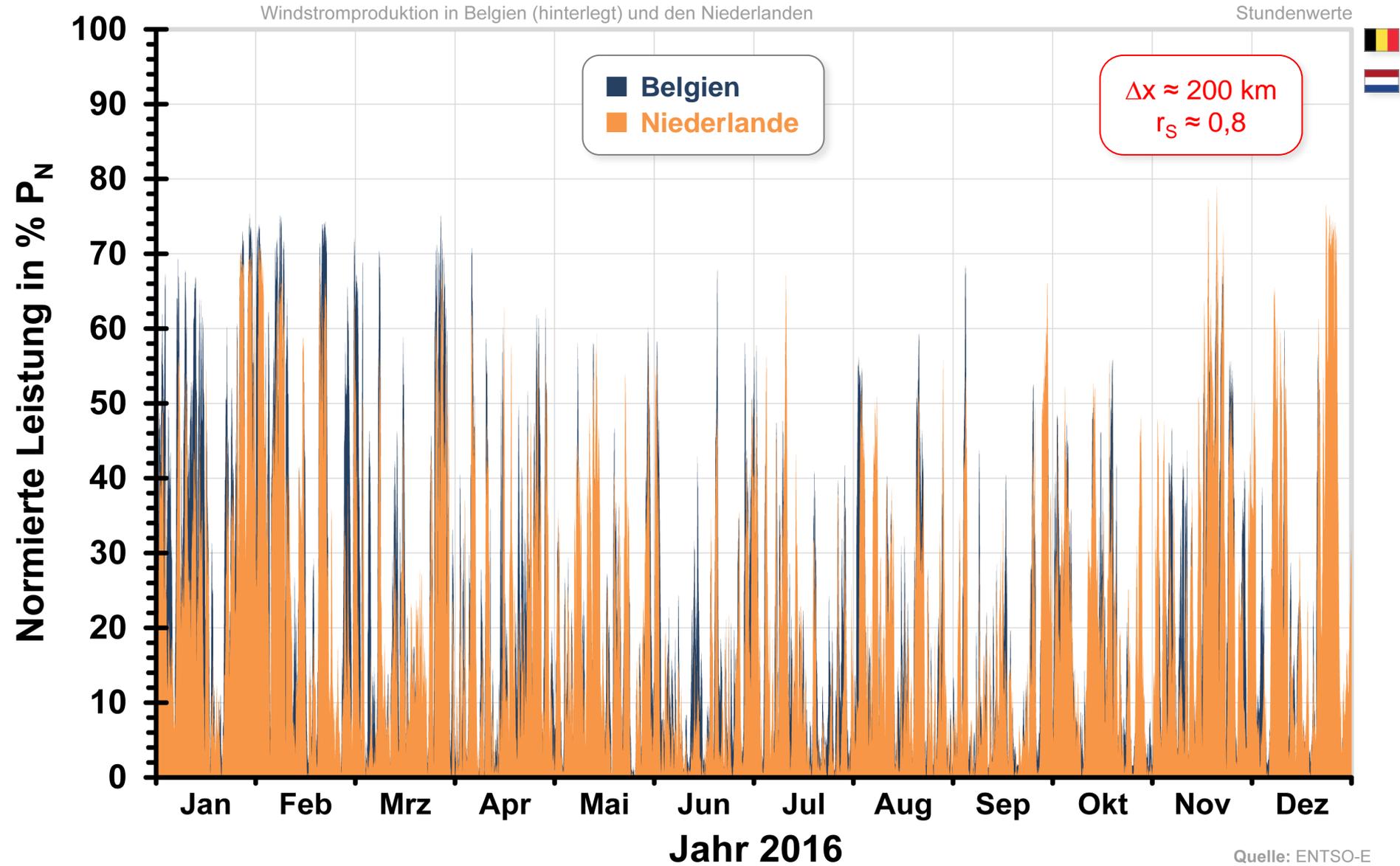
Deutschland	Dänemark
DE	DK
2016	2016
Ja	Ja
ENTSO-E	ENTSO-E
8.579 MW	1.366 MW
8.542 MW	1.232 MW
	0 MW
	3 MW
	9 MW
	0 MW
5.624 MW	815 MW
4.644 MW	622 MW
3.734 MW	535 MW
2.776 MW	372 MW
1.831 MW	234 MW
1.288 MW	174 MW
790 MW	124 MW
496 MW	127 MW
405 MW	88 MW
665 MW	67 MW
1.299 MW	114 MW
2.147 MW	162 MW
3.372 MW	210 MW
4.383 MW	306 MW
5.409 MW	466 MW
6.180 MW	895 MW
6.958 MW	1.142 MW
7.462 MW	1.289 MW
8.763 MW	1.492 MW
10.715 MW	1.929 MW
11.949 MW	2.383 MW
13.452 MW	2.739 MW
14.639 MW	2.916 MW

Beispiel

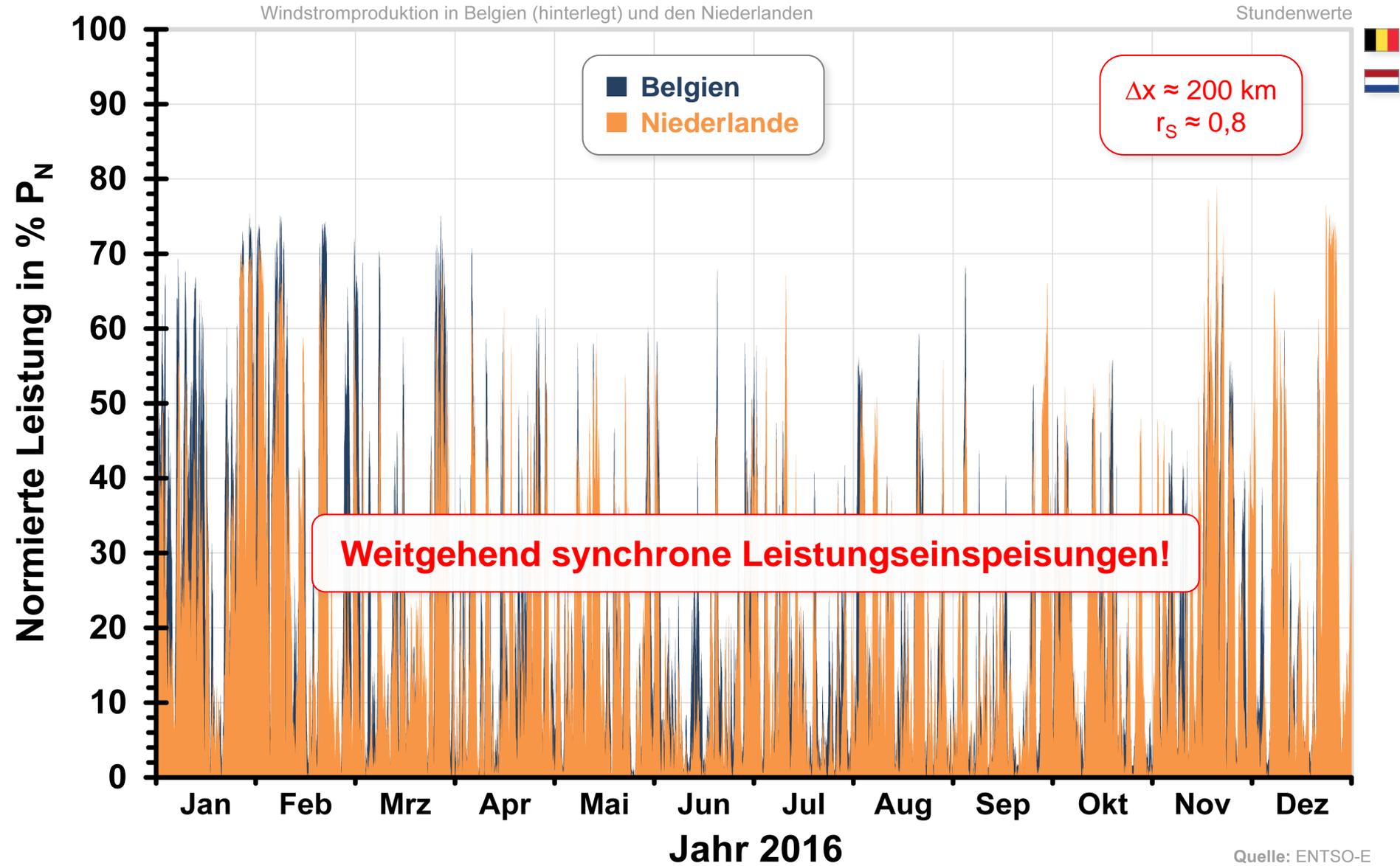


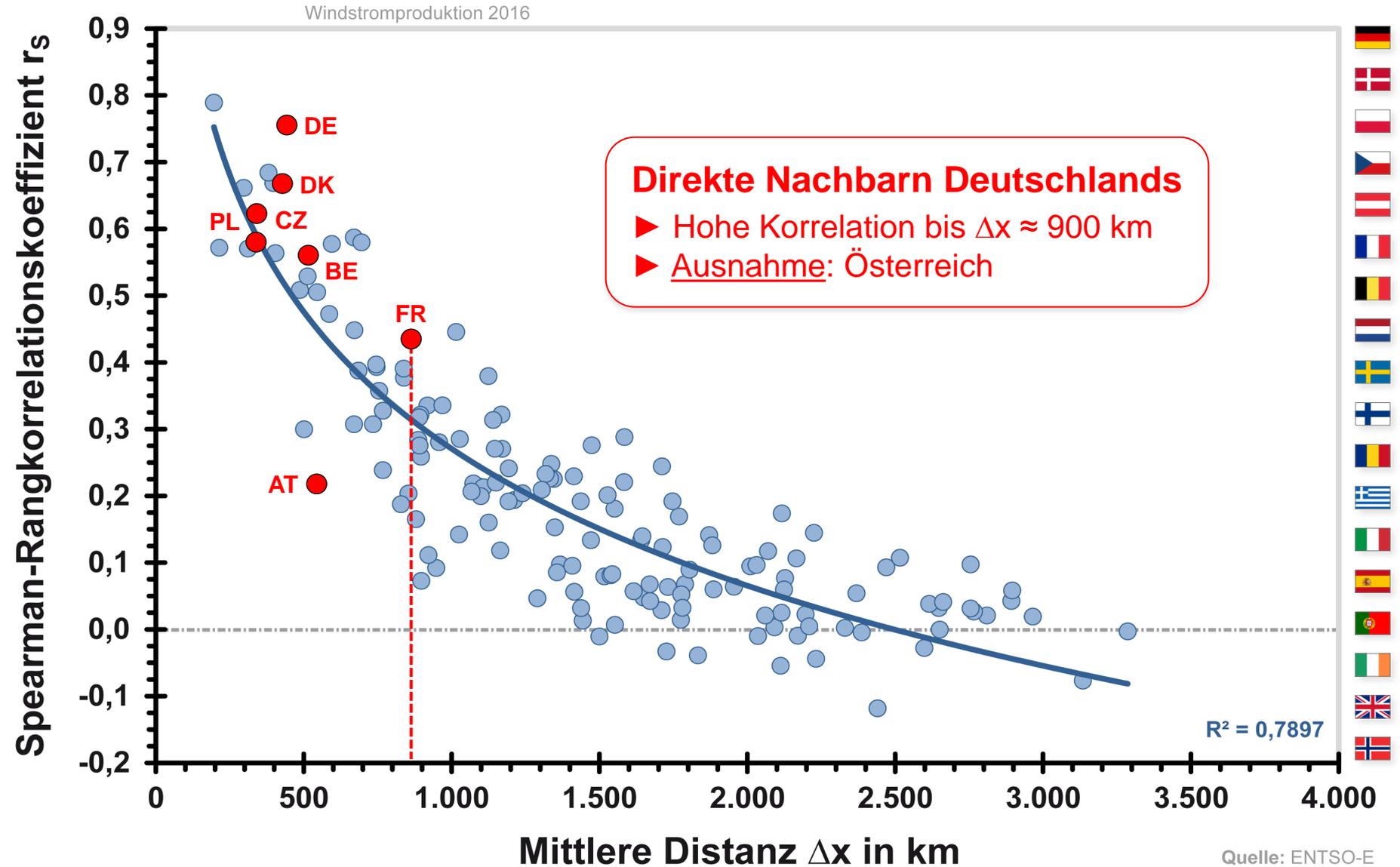


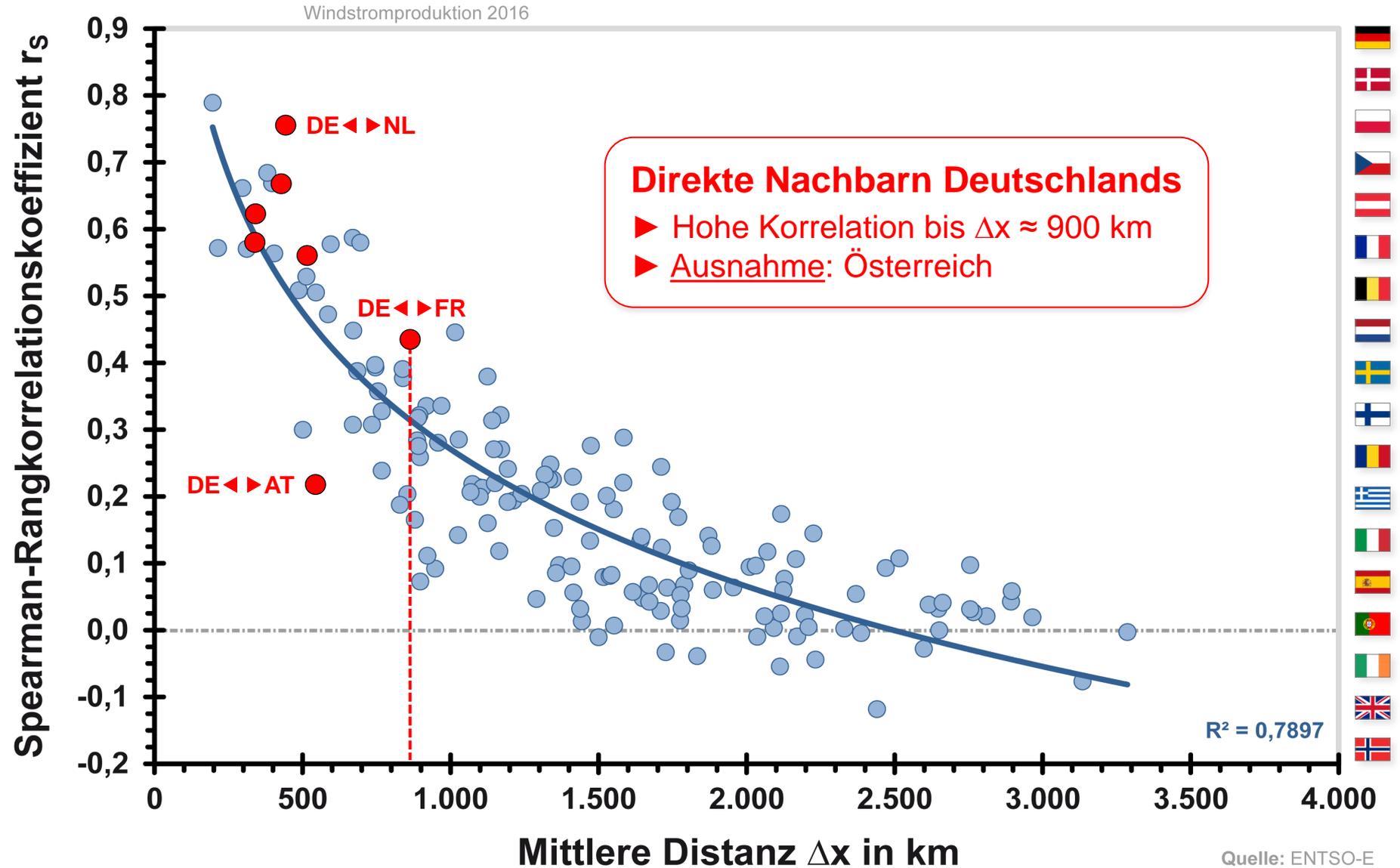


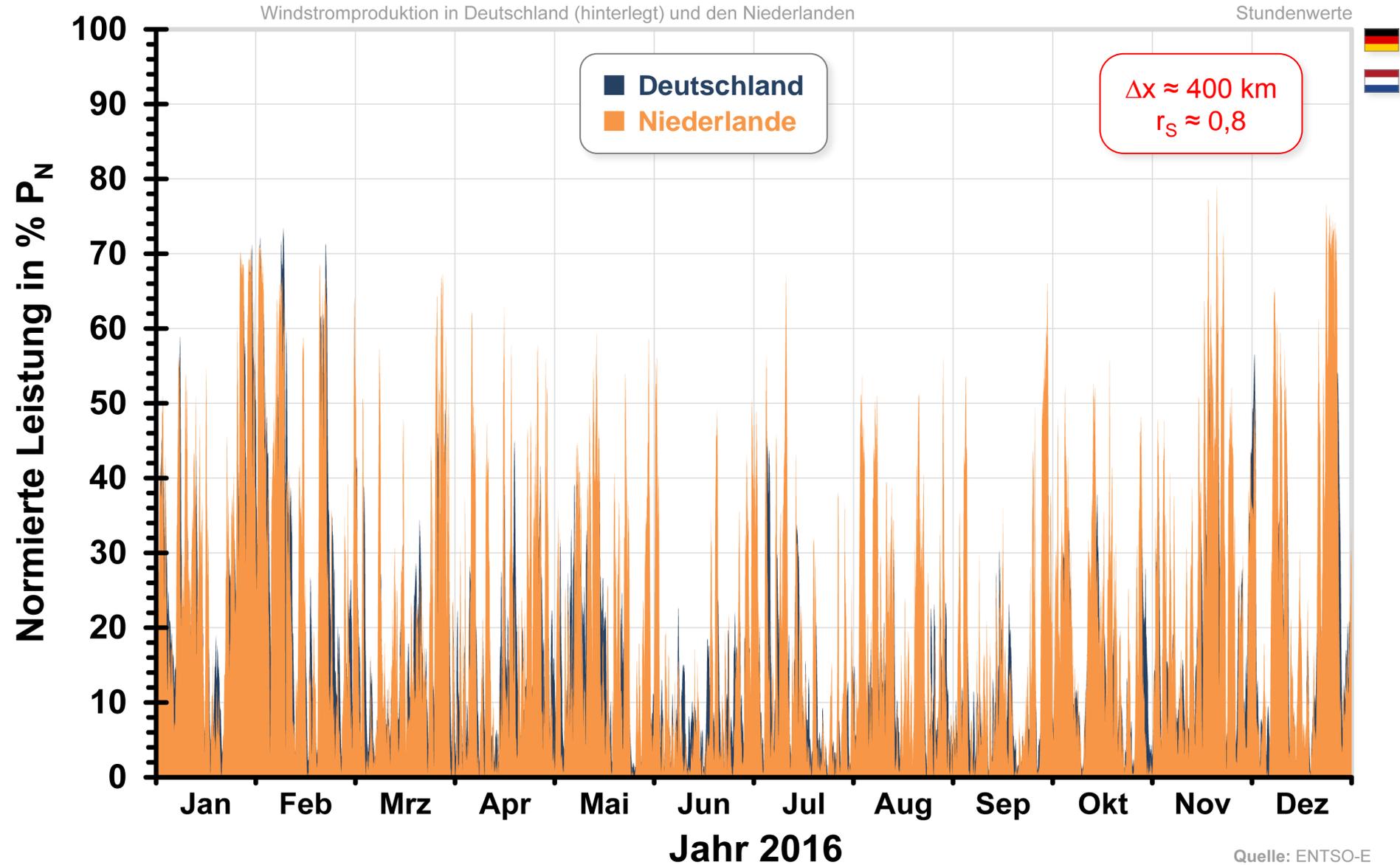


Quelle: ENTSO-E

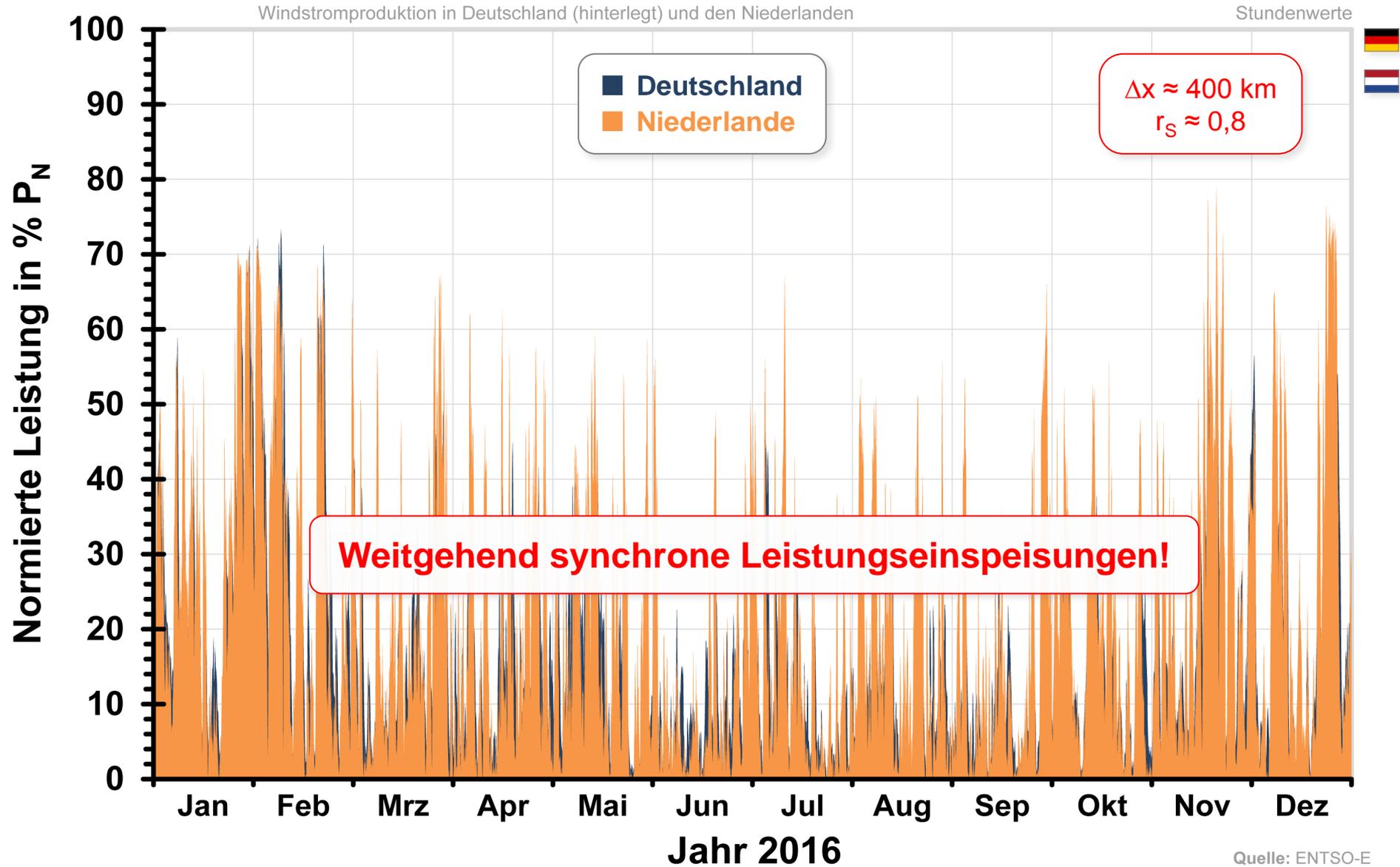


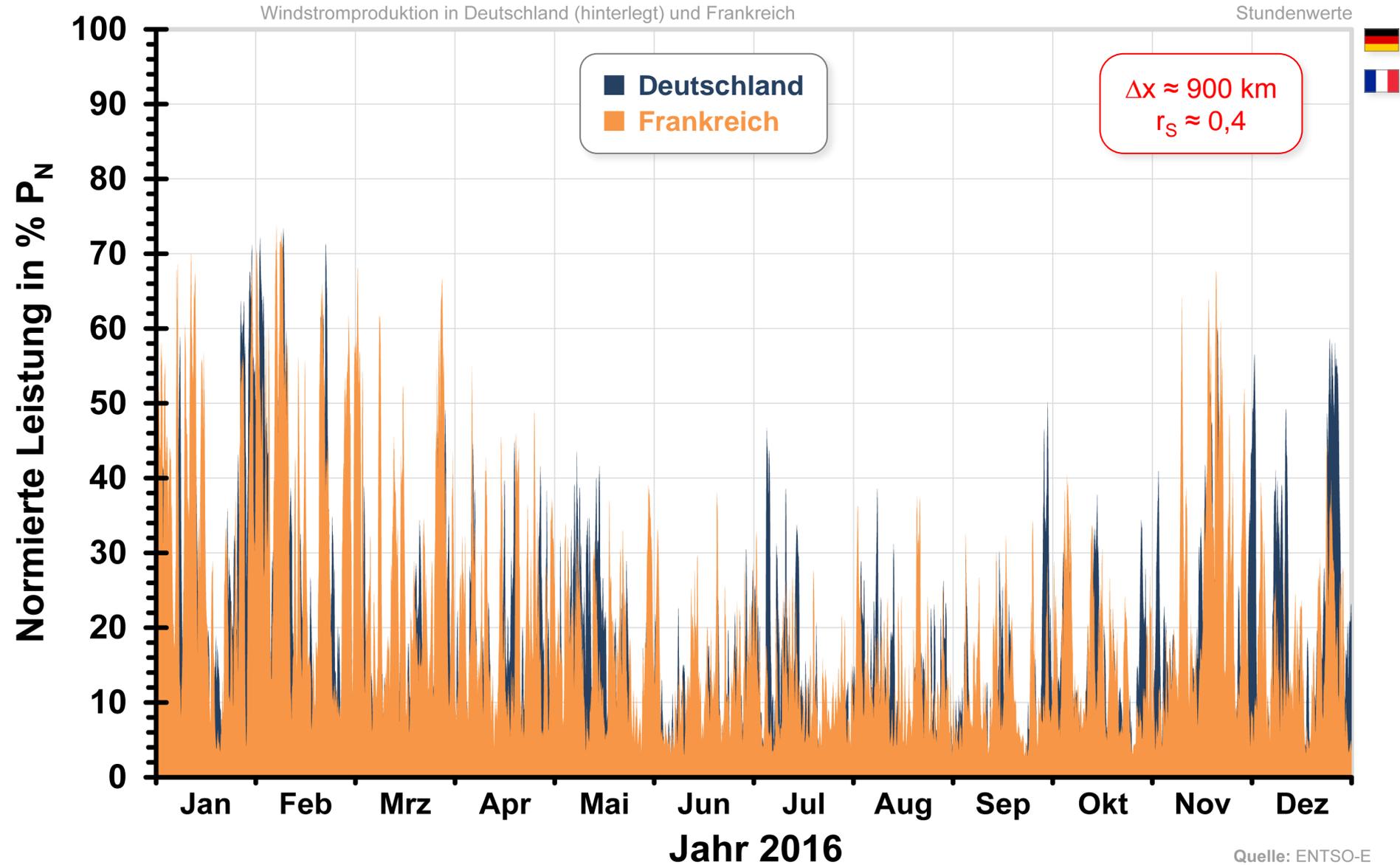




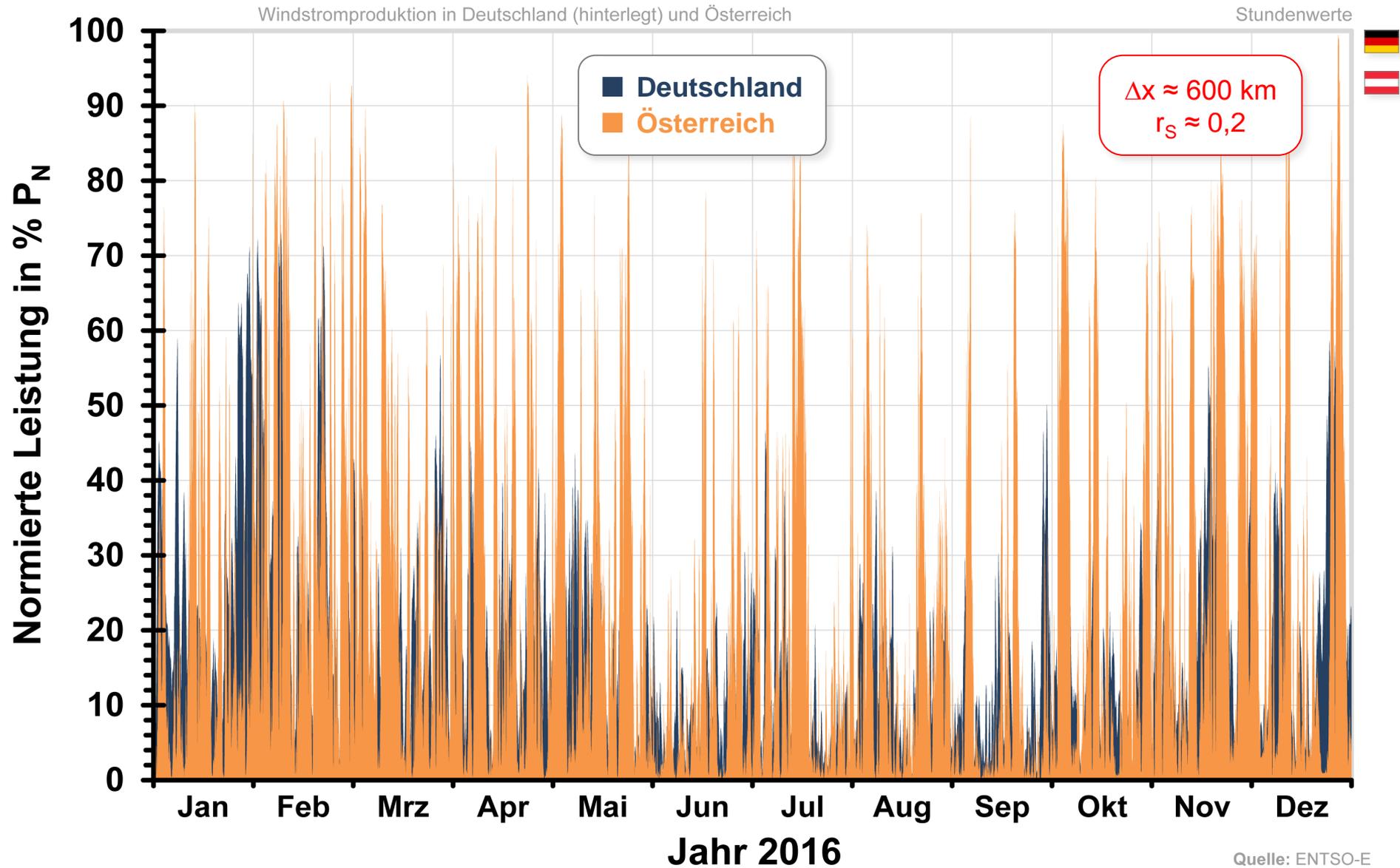


Quelle: ENTSO-E

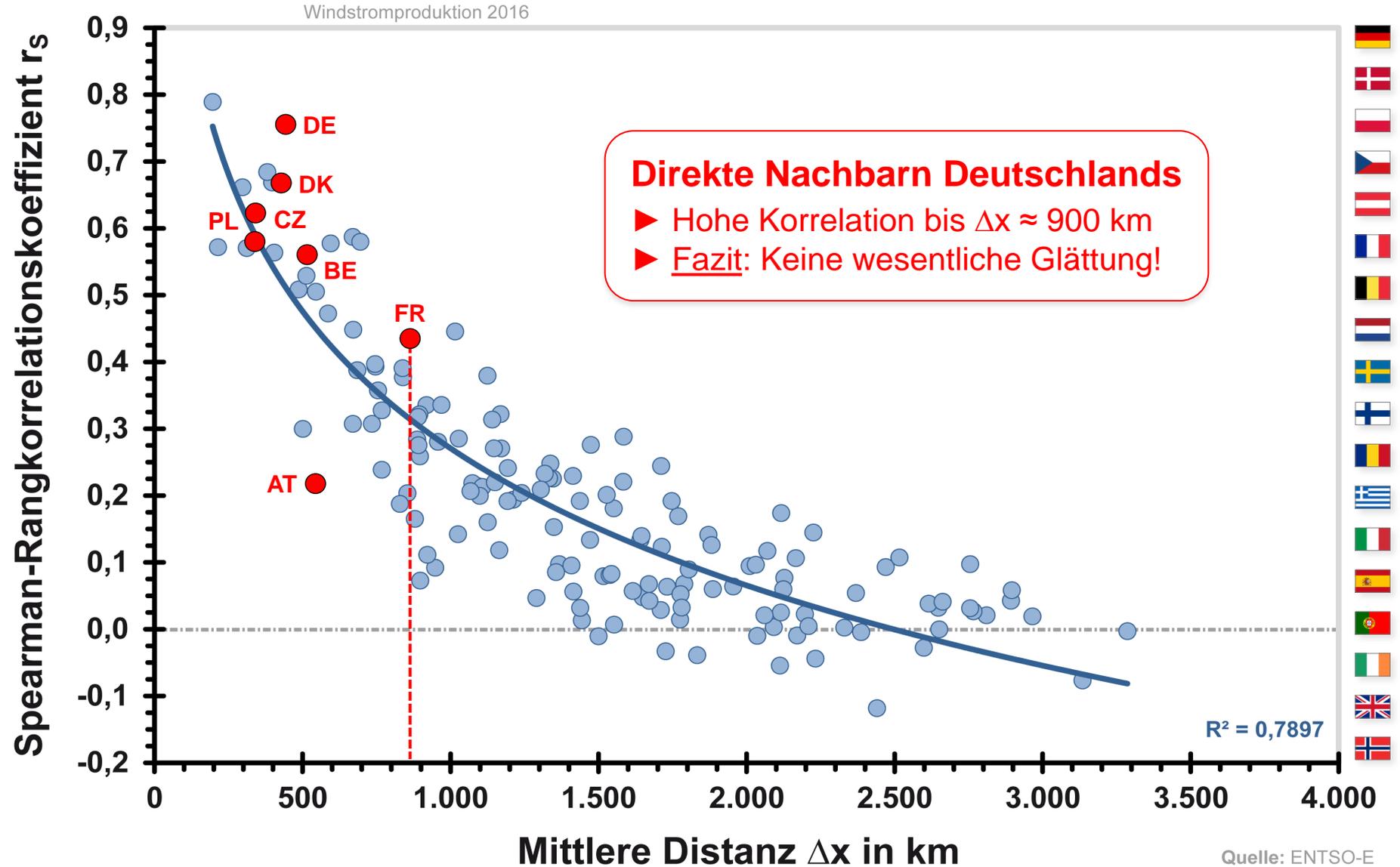


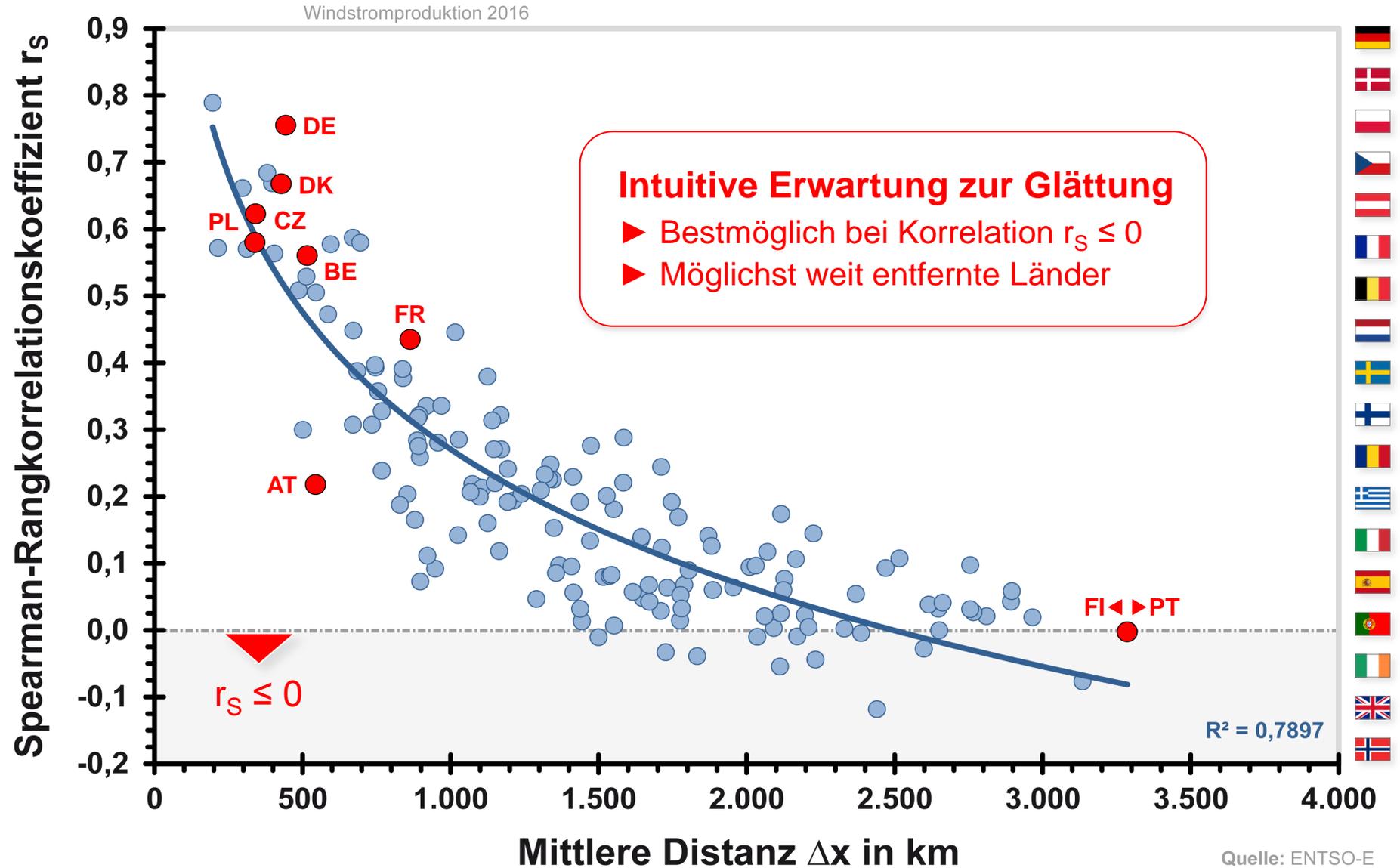


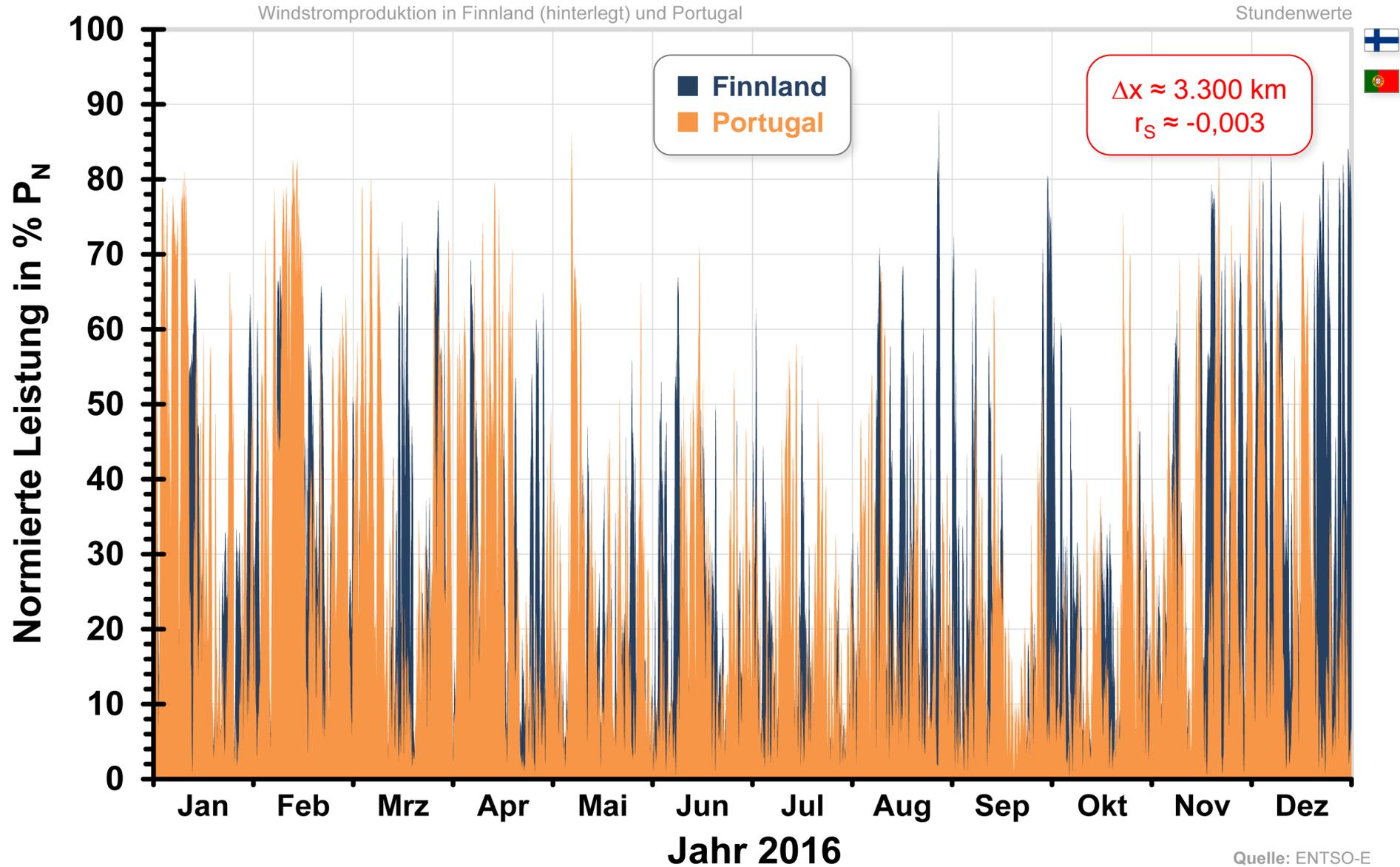
Quelle: ENTSO-E



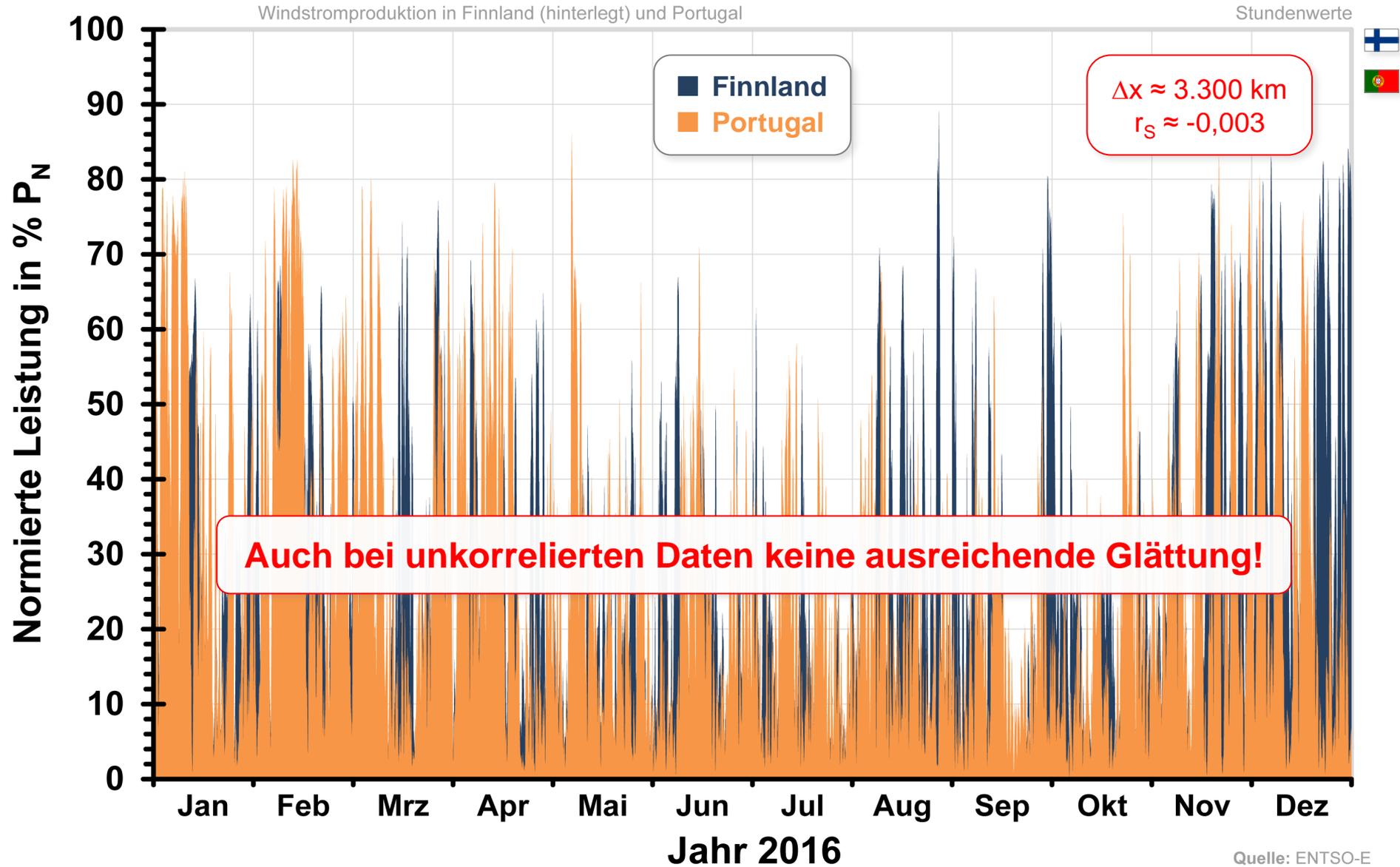
Quelle: ENTSO-E



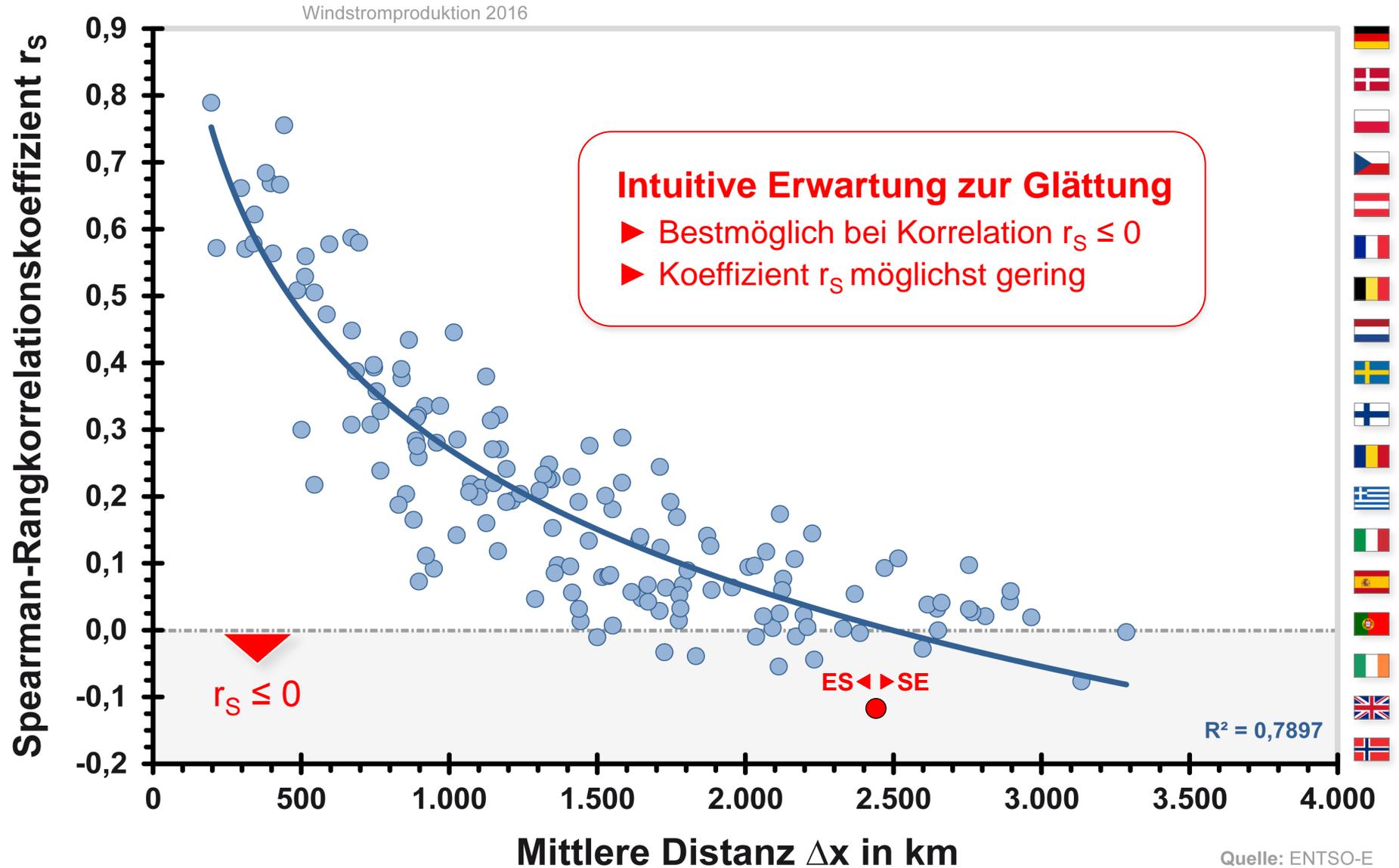


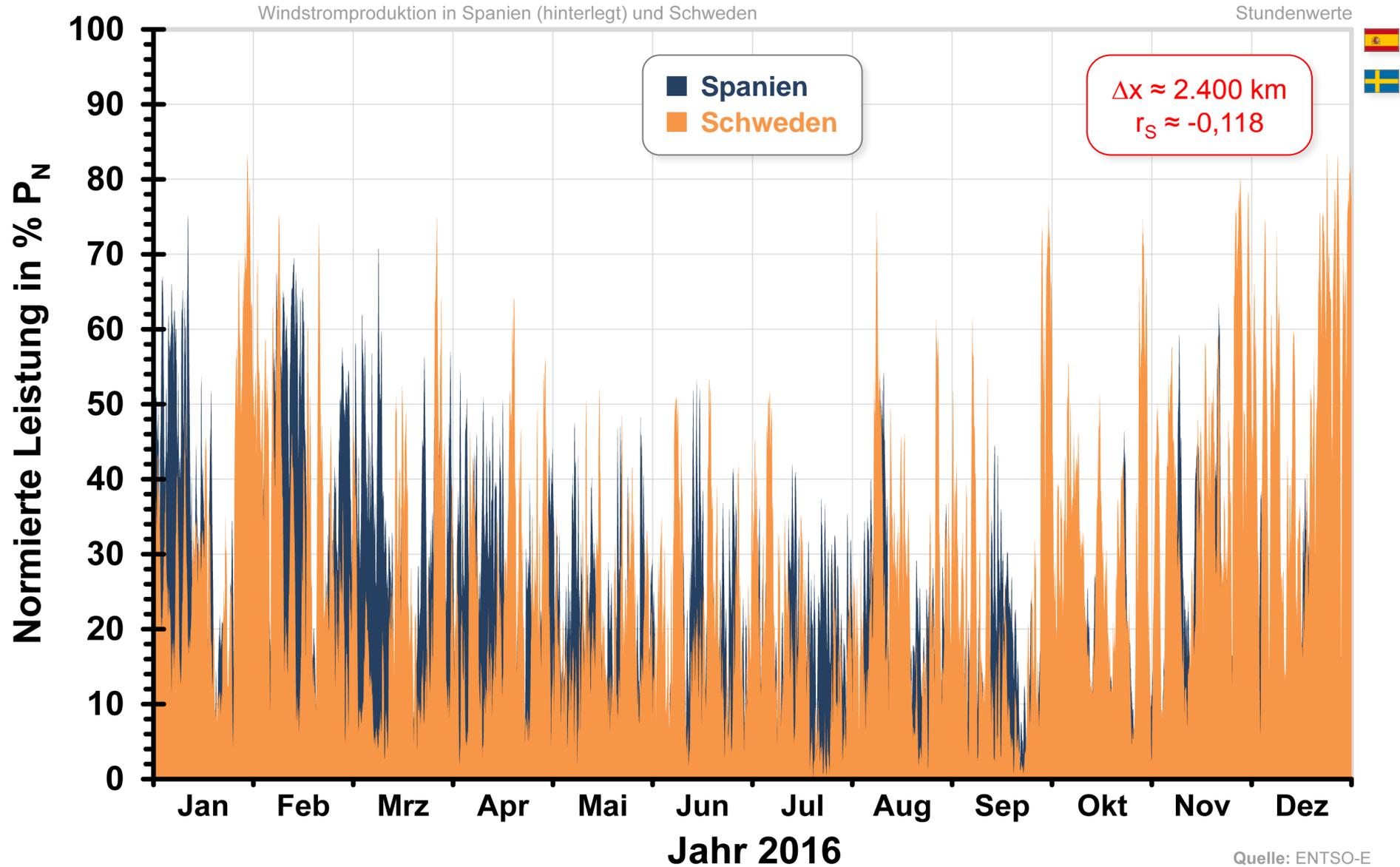


Quelle: ENTSO-E

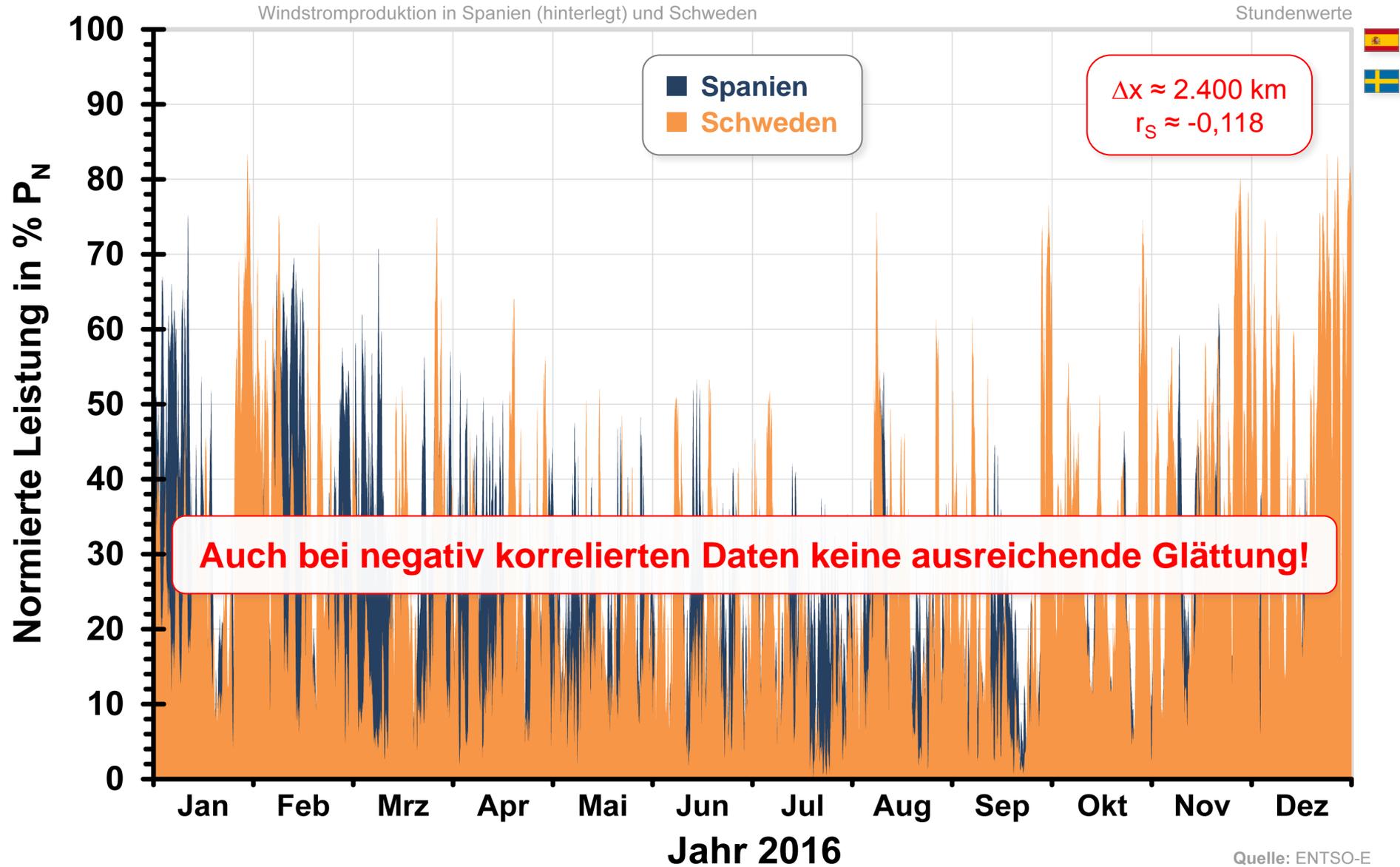


Quelle: ENTSO-E

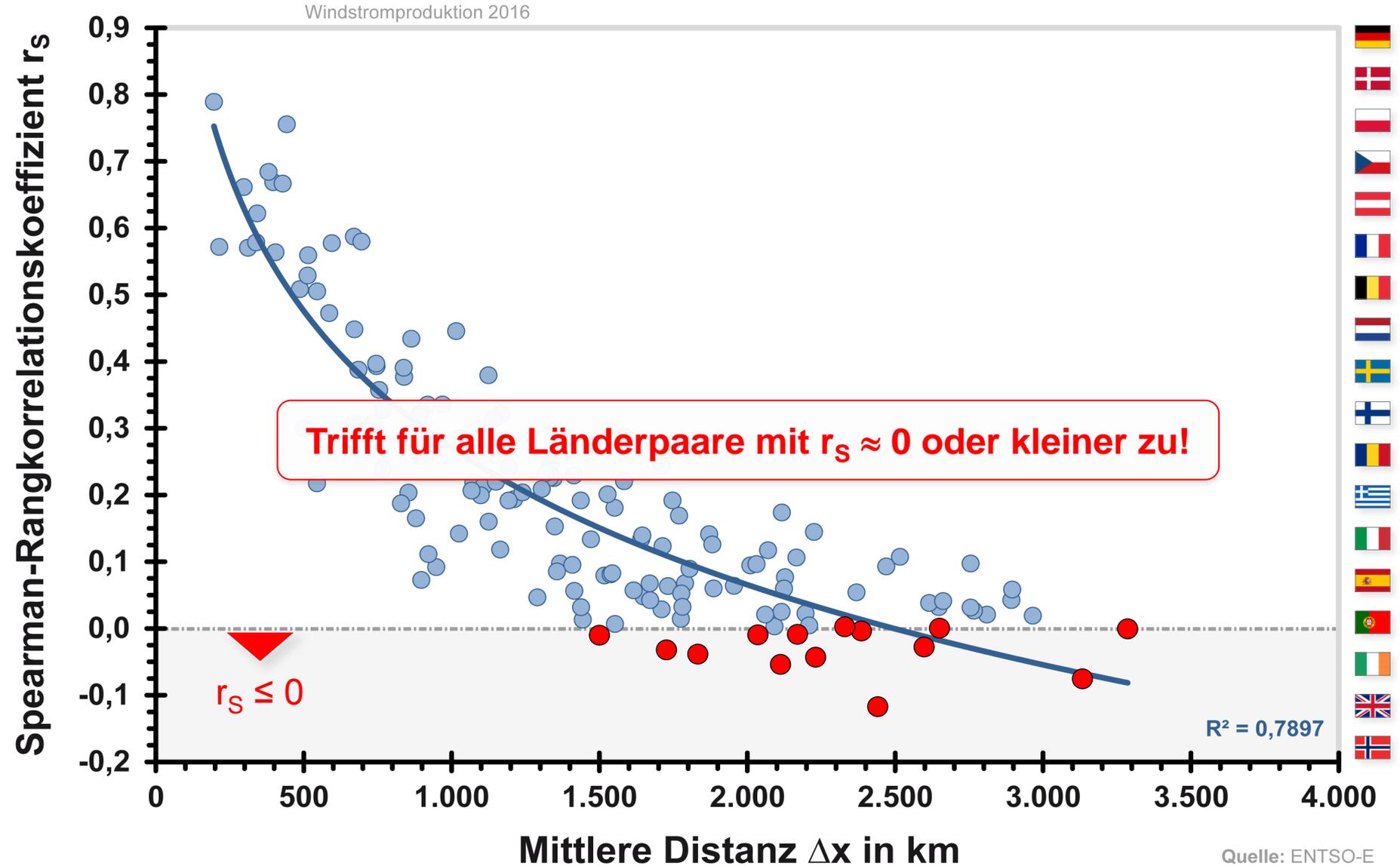


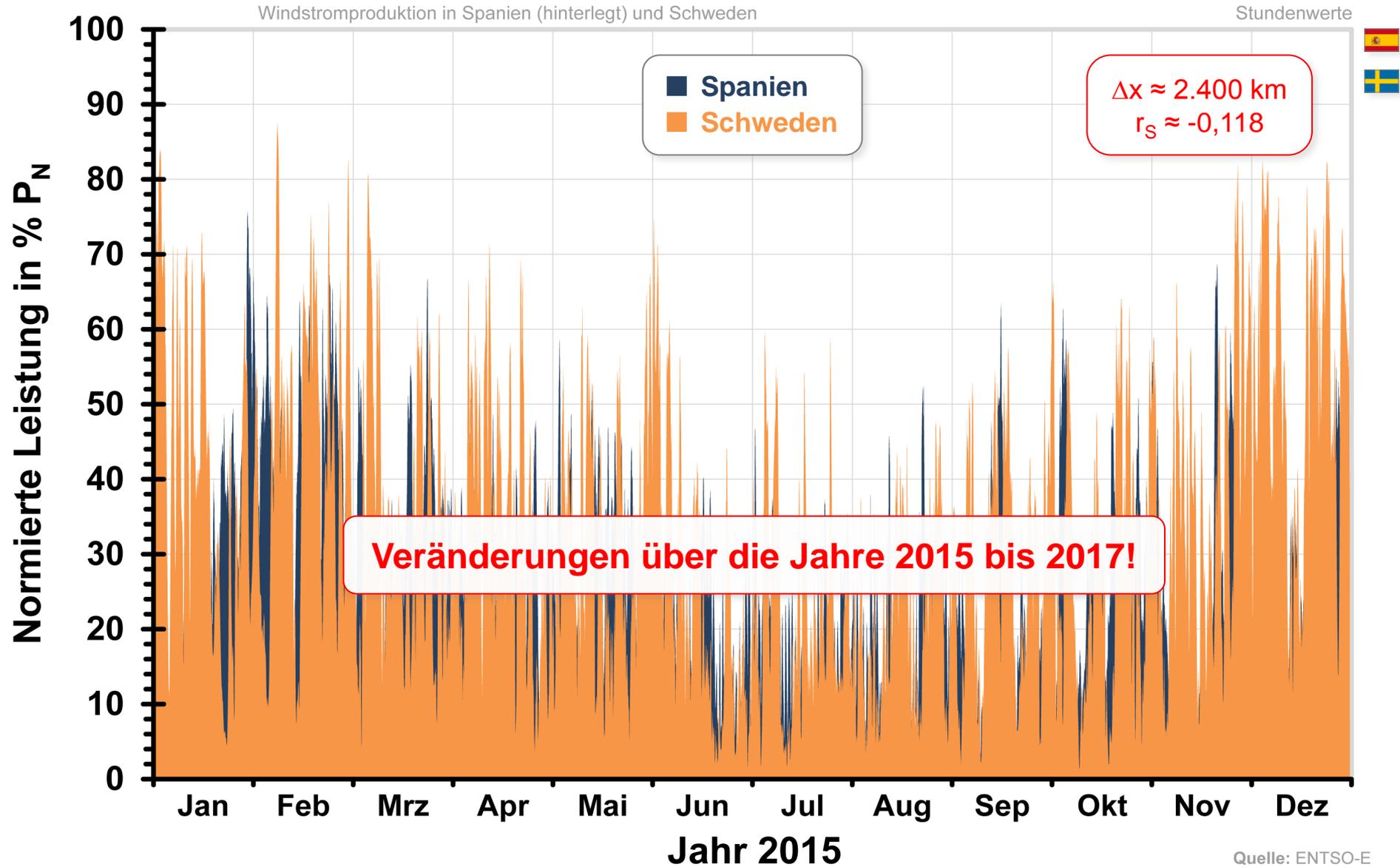


Quelle: ENTSO-E

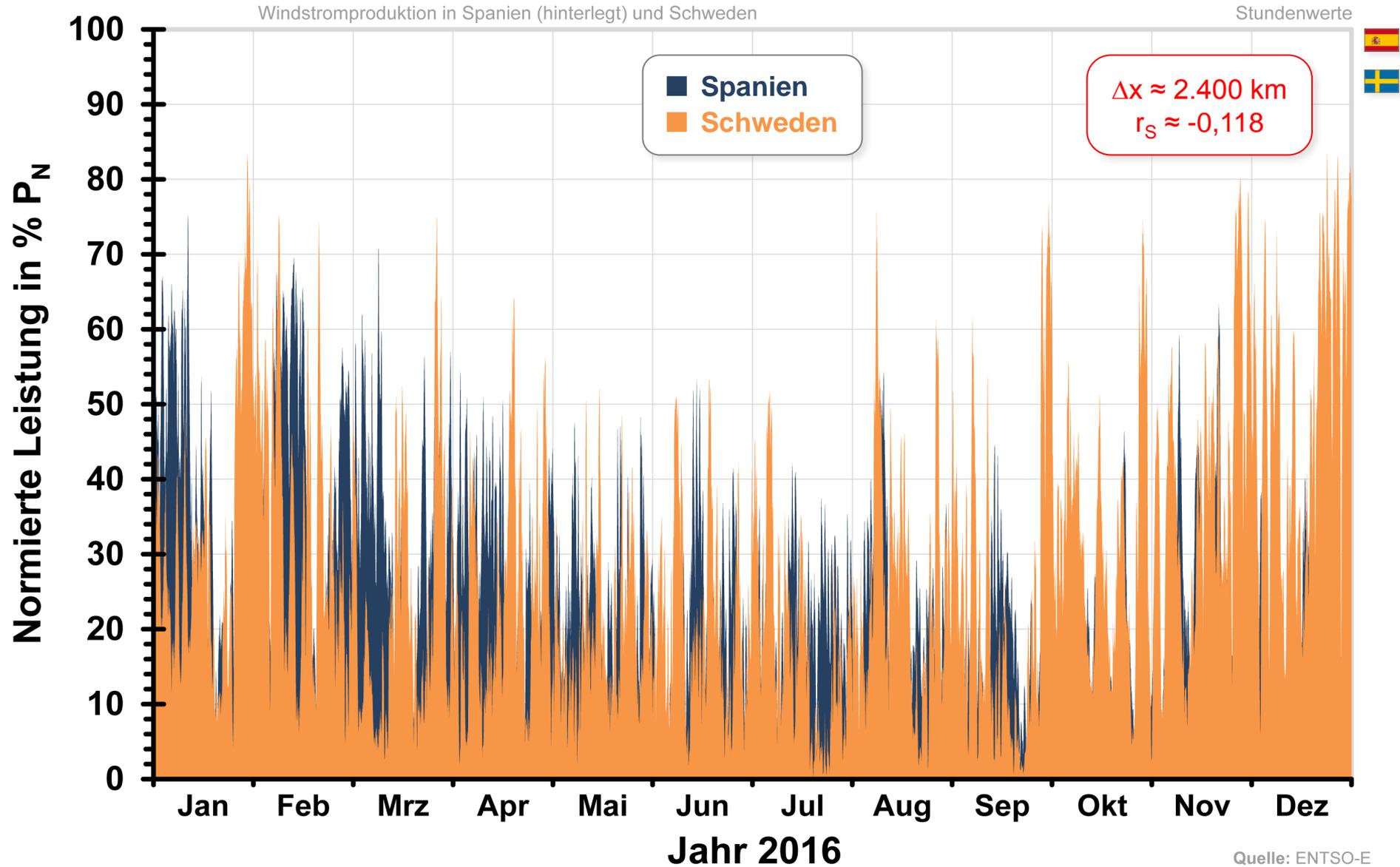


Quelle: ENTSO-E

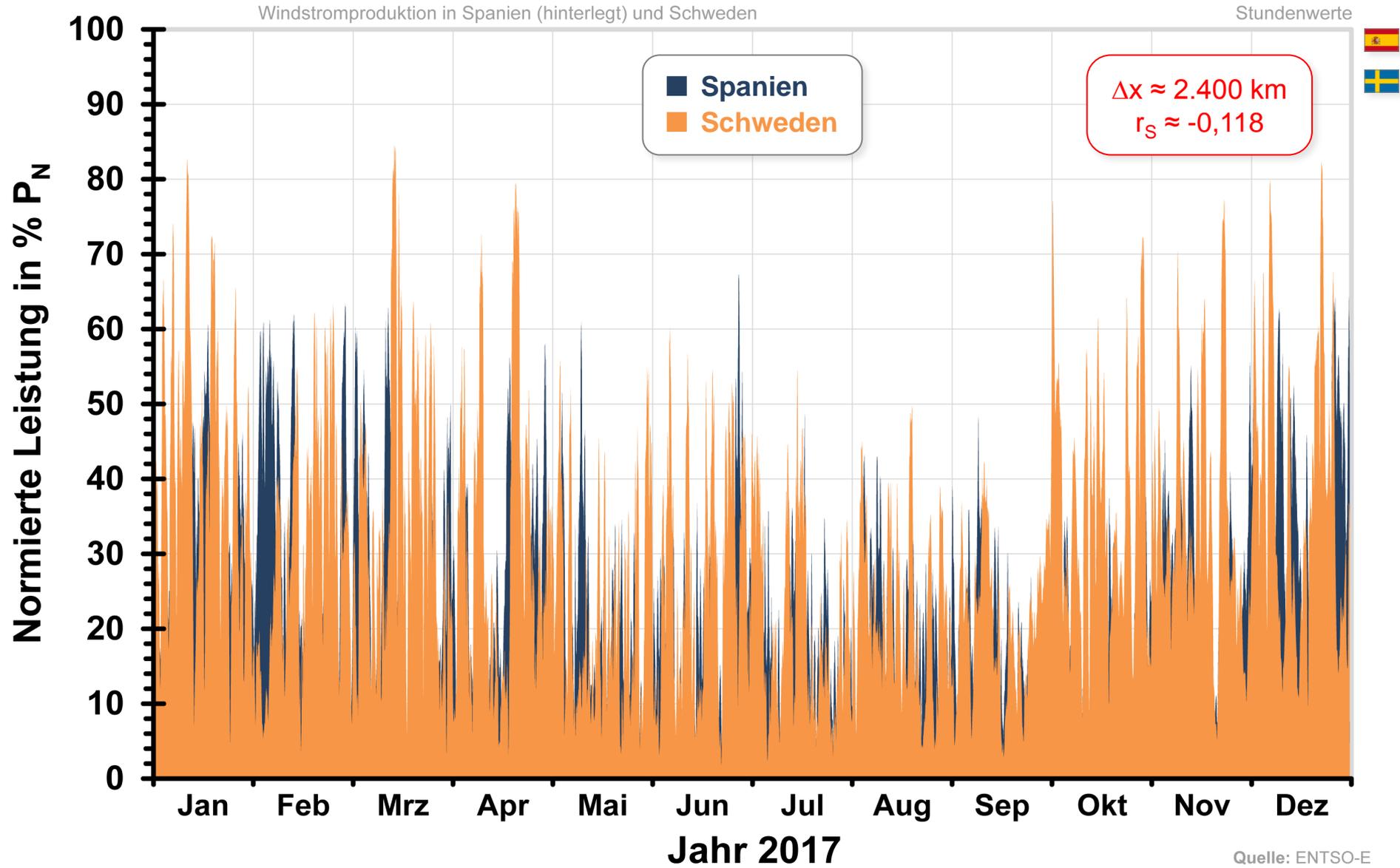


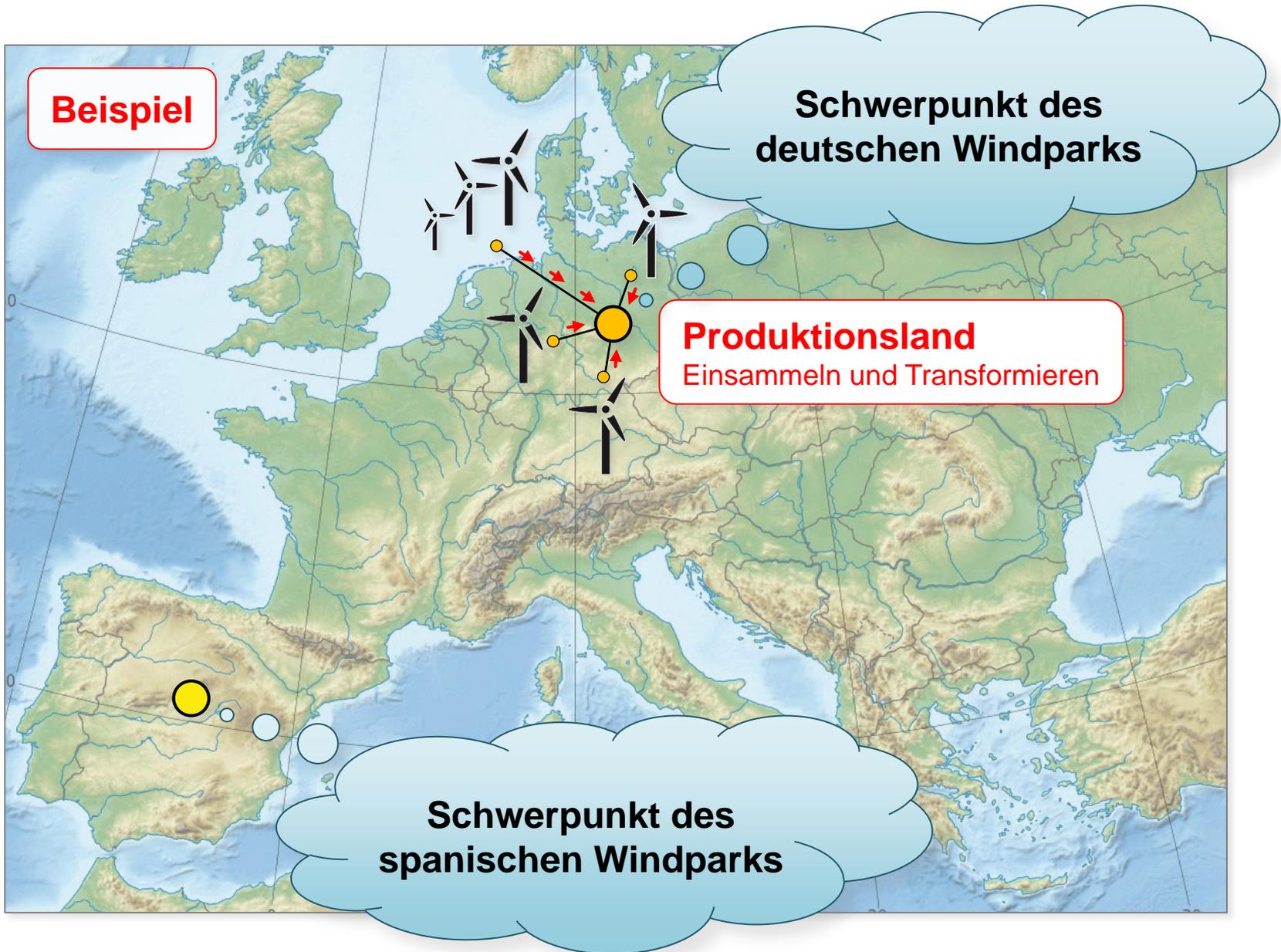


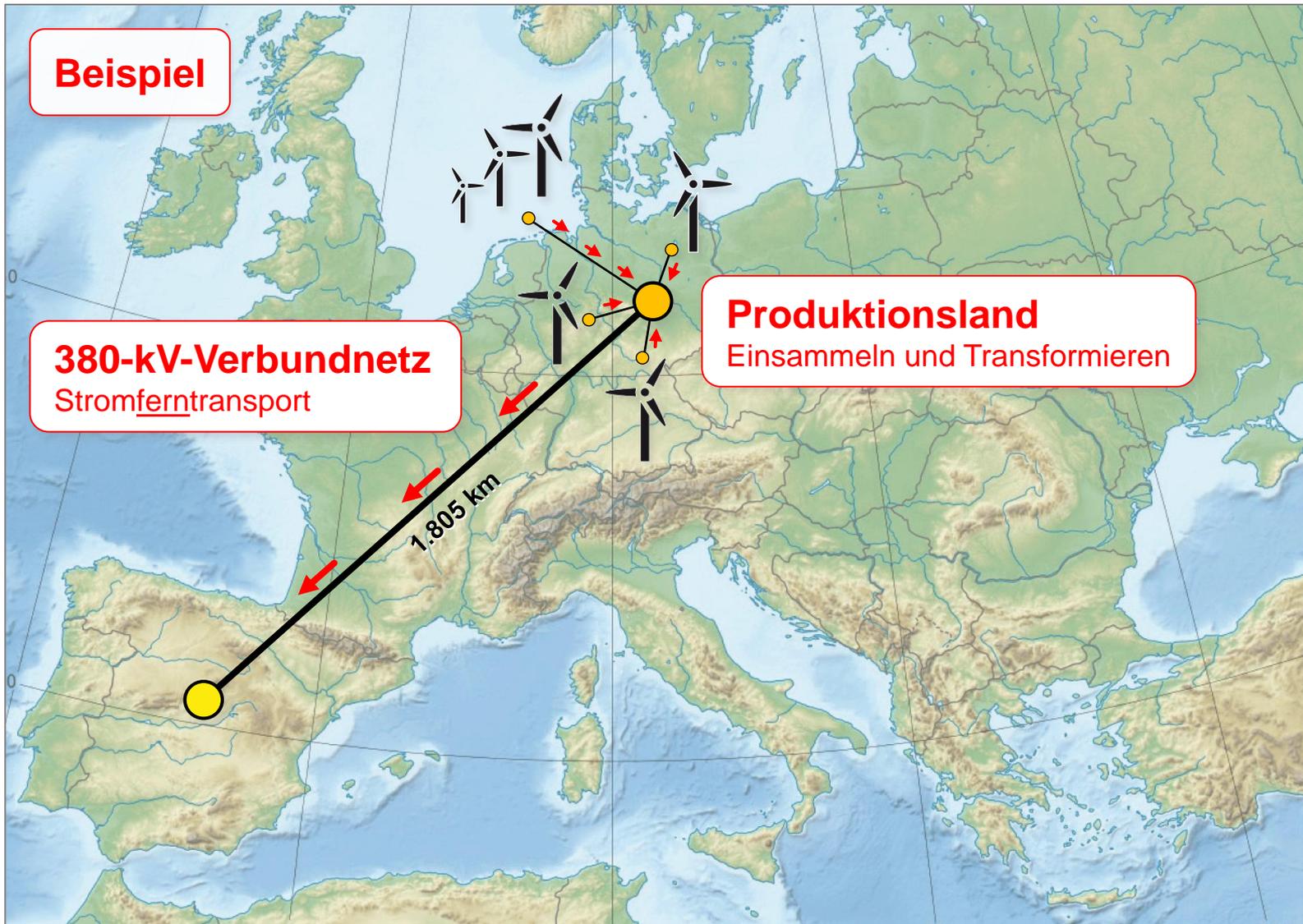
Quelle: ENTSO-E

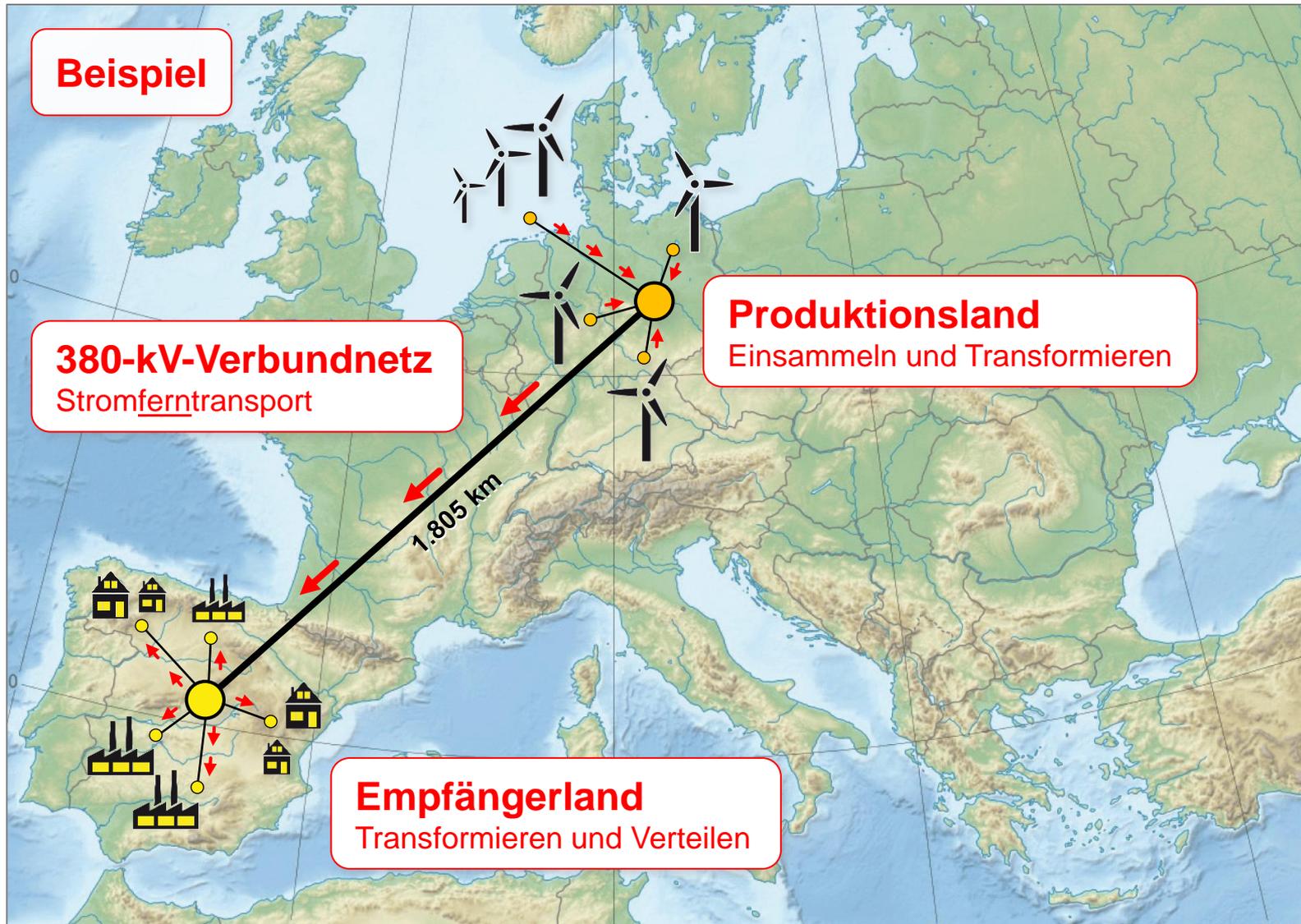


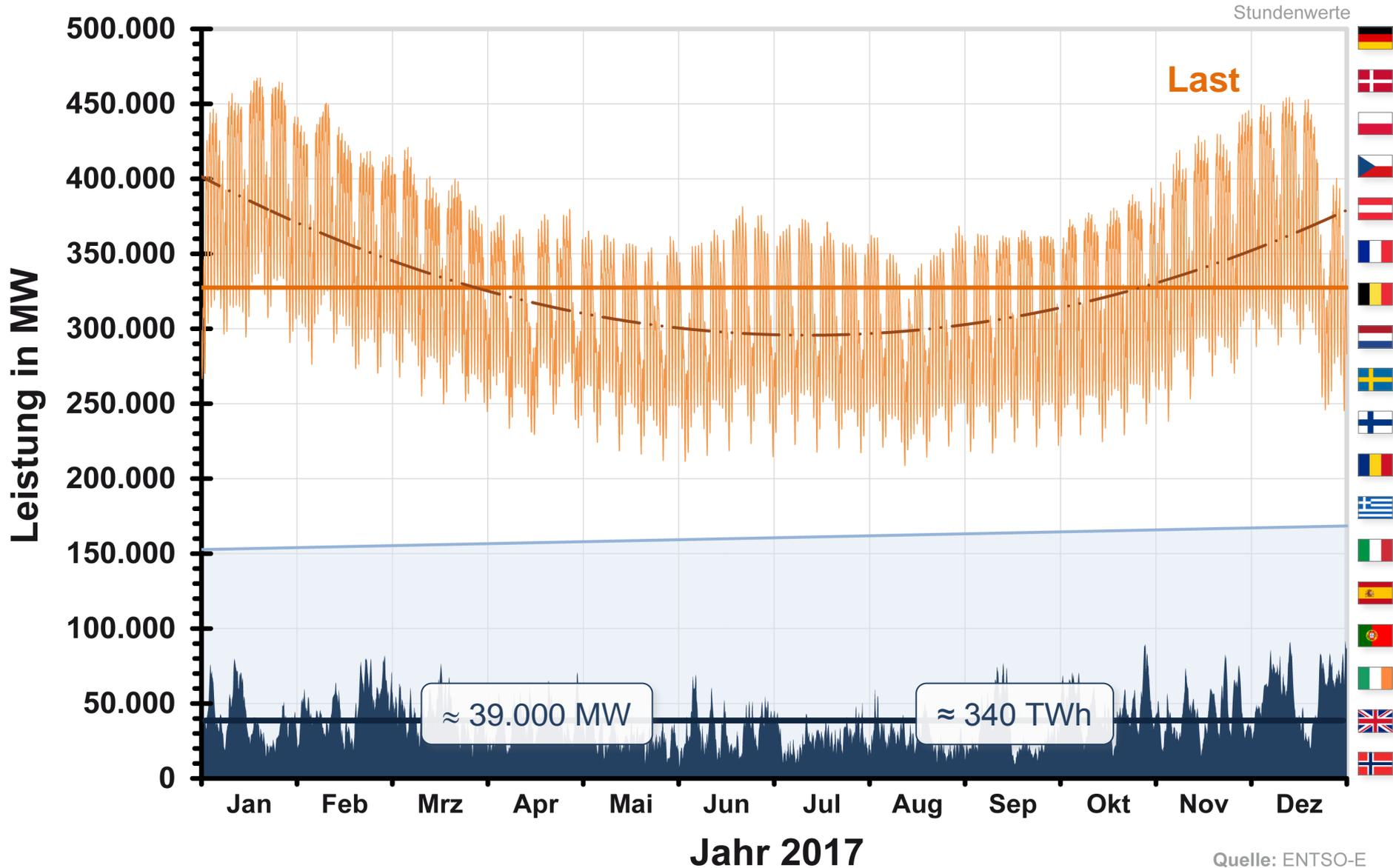
Quelle: ENTSO-E

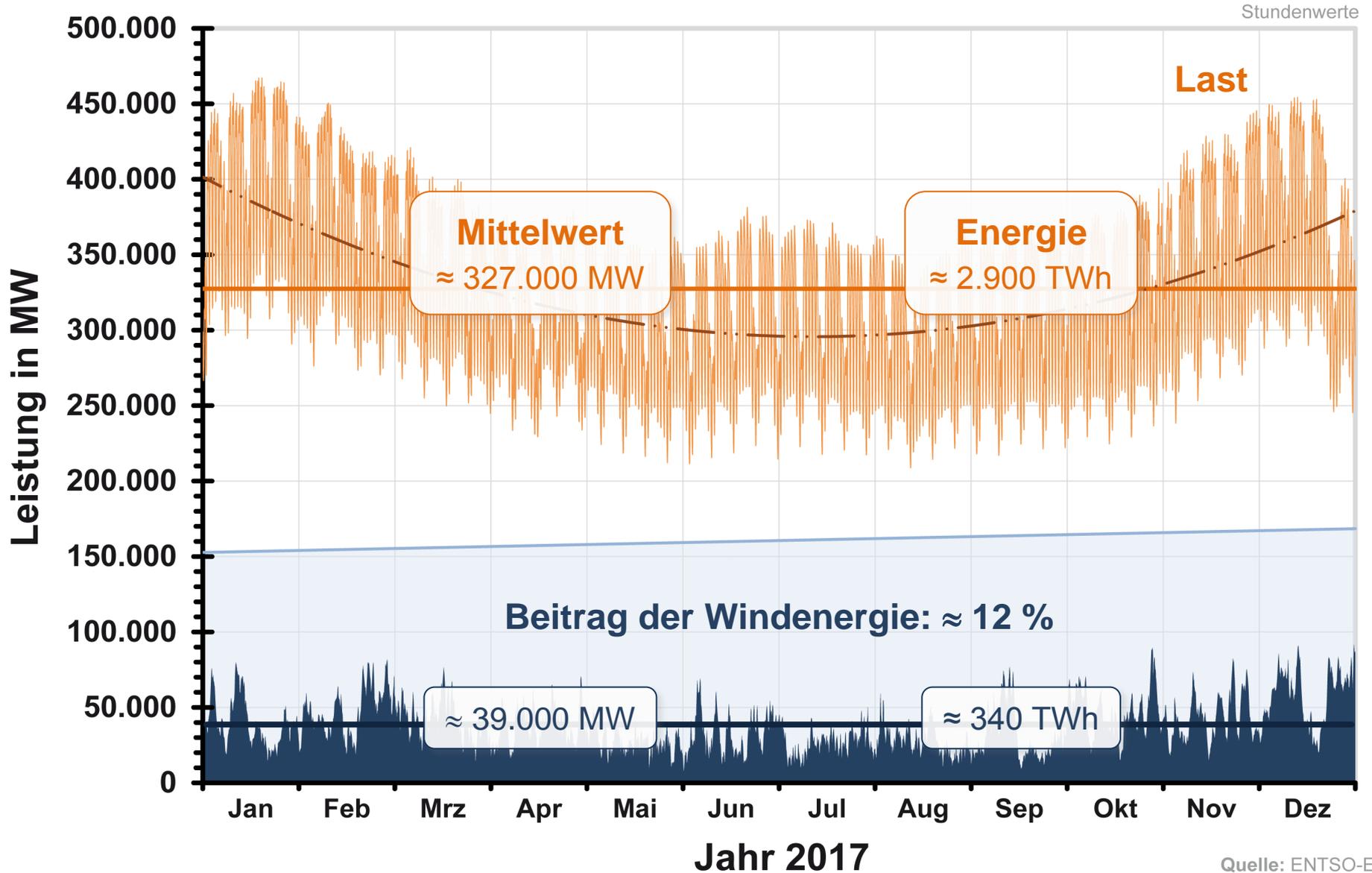












Fazit

- Sehr geringe Glättung der Leistungseinspeisungen aus Windenergie in 18 Ländern (Annahme: Kupferplatte über Europa, keine Verluste)
- Ausgeprägte Raumzeitkorrelation der Windstromproduktion: Kaum Glättungseffekte, selbst bei unkorrelierten Zeitreihen
- Geringfügiger Ausgleich der Summenleistung allenfalls bei sehr weit entfernten (mehr als 3.000 km) Ländern in den Peripherien Europas
- Status quo: Jährliche Netzverluste von 200 TWh für Transport und Verteilung von 3.300 TWh Strom bis zum Endkunden in 18 Ländern
- Erwartung: Zunehmende Netzverluste beim weiteren Ausbau der Windenergienutzung mit verstärktem überregionalen Stromtransport
- Rechnerische gesicherte Leistung von 4 bis 5 % der Nennleistung: Auch in Europa quasi 100 % planbare Backup-Leistung notwendig



Teil 1 über Betriebserfahrungen in Deutschland

- ▶ Fachzeitschrift VGB PowerTech 6 (2017)
- ▶ https://www.vgb.org/studie_windenergie_deutschland_europa_teil1.html

Teil 2 über Betriebserfahrungen in 18 Ländern Europas

- ▶ Fachzeitschrift VGB PowerTech 10 (2018)
- ▶ https://www.vgb.org/studie_windenergie_deutschland_europa_teil2.html

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

VGB PowerTech e.V.

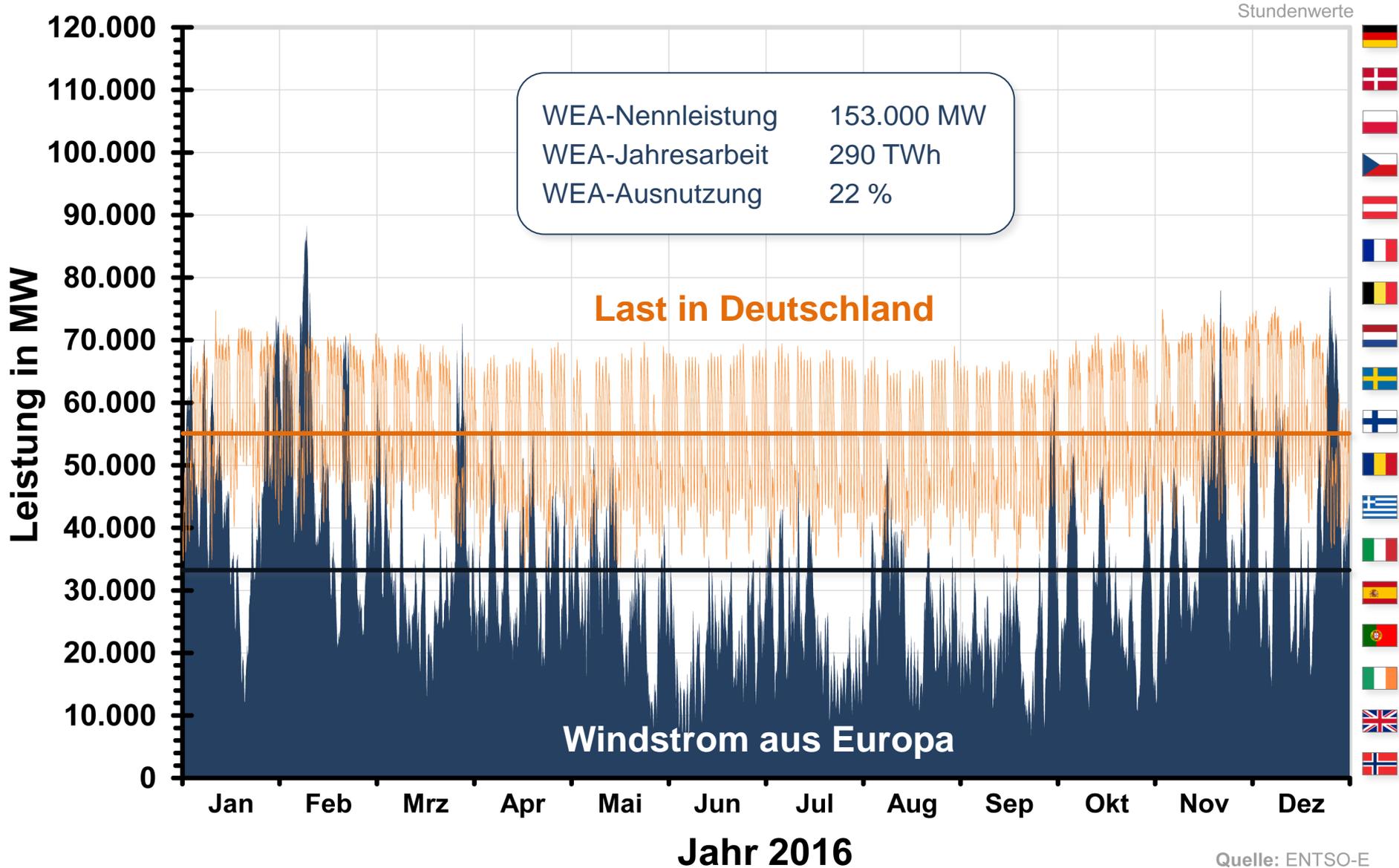
Thomas Linnemann, Guido Vallana
Deilbachtal 173, 45257 Essen, Germany
thomas.linnemann@vgb.org, guido.vallana@gmx.de

Vorsitzender des Vorstandes: Dr. Hans Bünting
Geschäftsführer: Dr. Oliver Then
Registergericht: Amtsgericht Essen
Registernummer: VR 1788

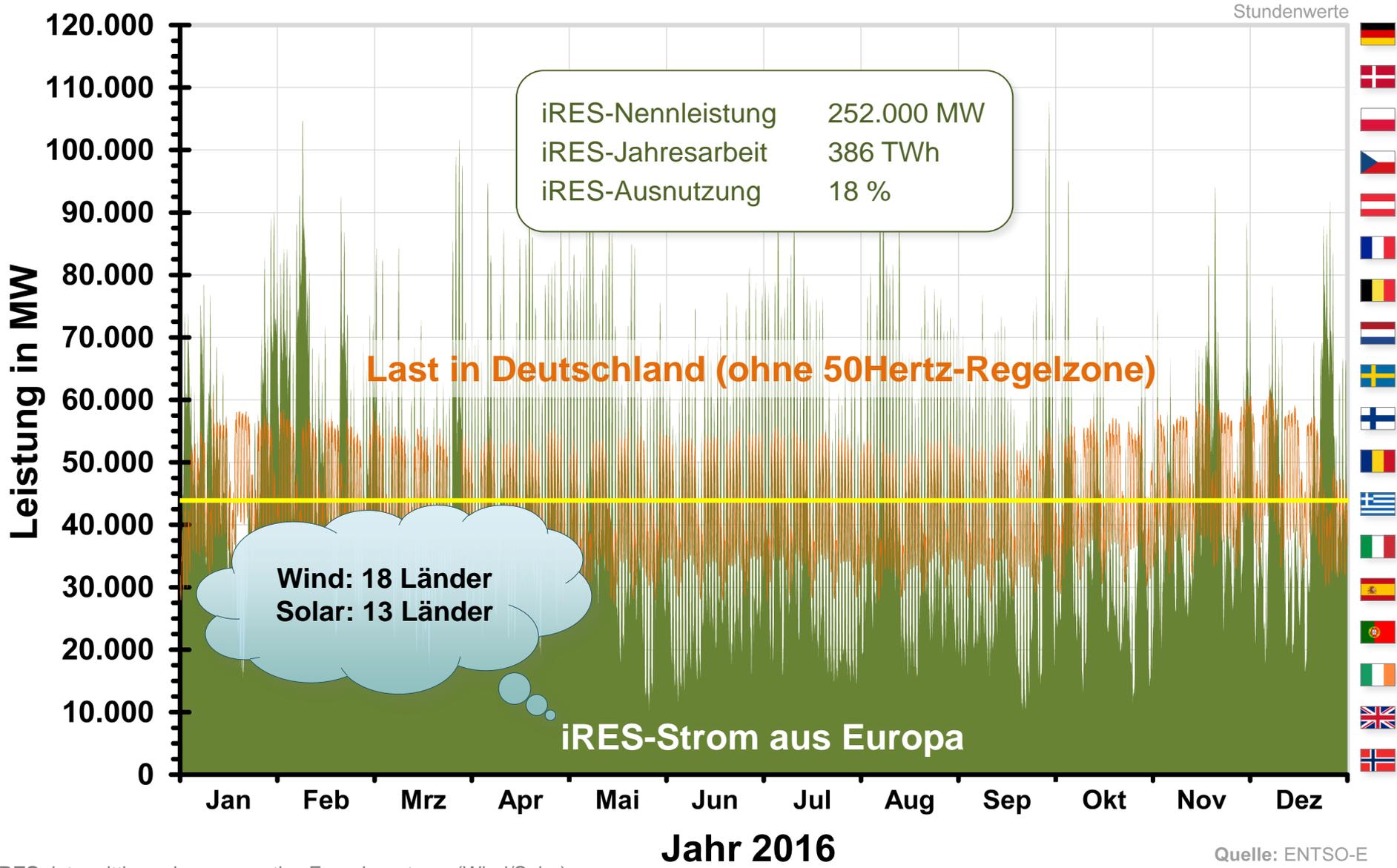
www.vgb.org

Es gilt das gesprochene Wort!

Backup

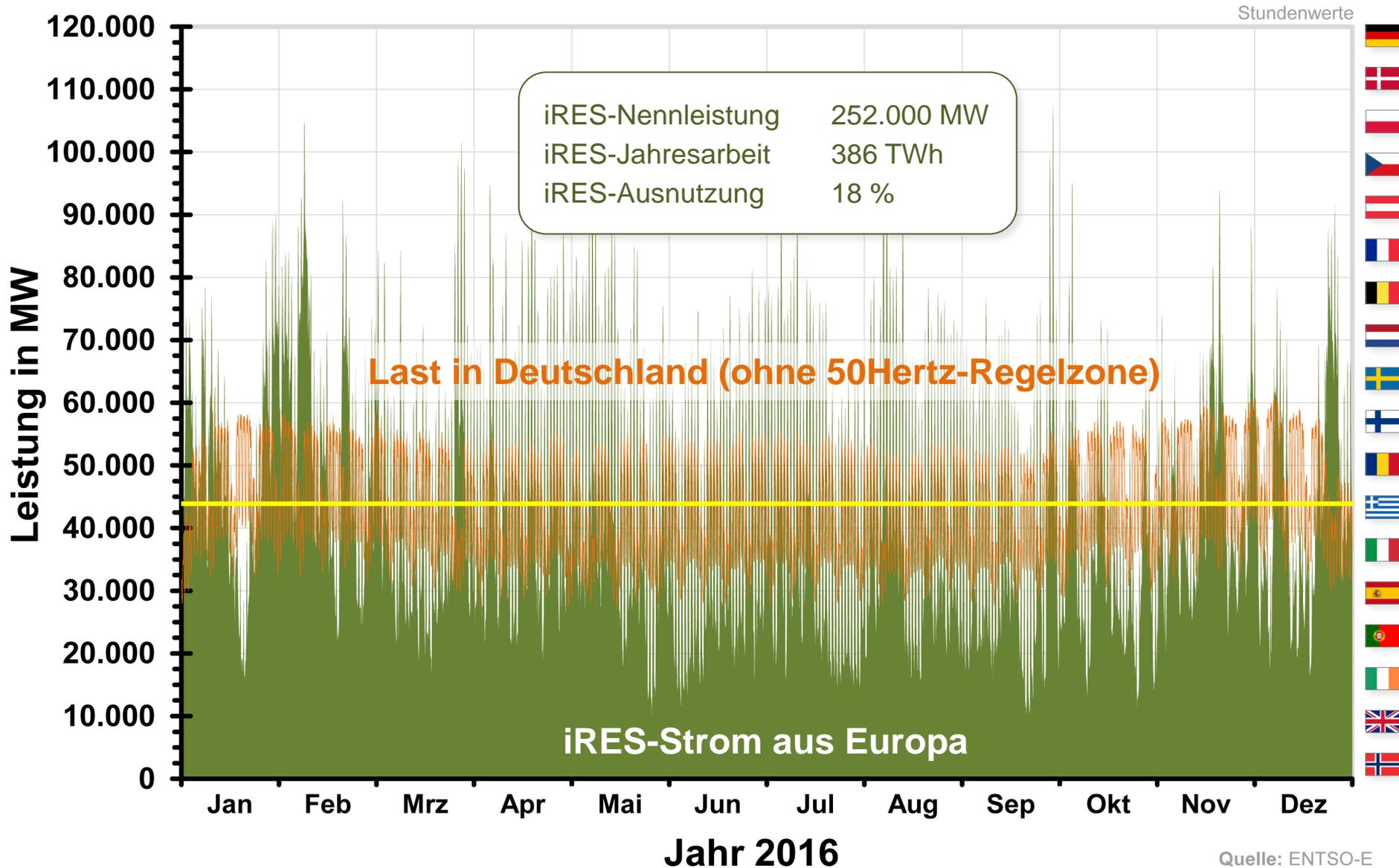


Szenario: Wind- plus Solarstrom aus Europa für Deutschland



iRES: intermittierende regenerative Energiesysteme (Wind/Solar)

Szenario: Wind- plus Solarstrom aus Europa für Deutschland



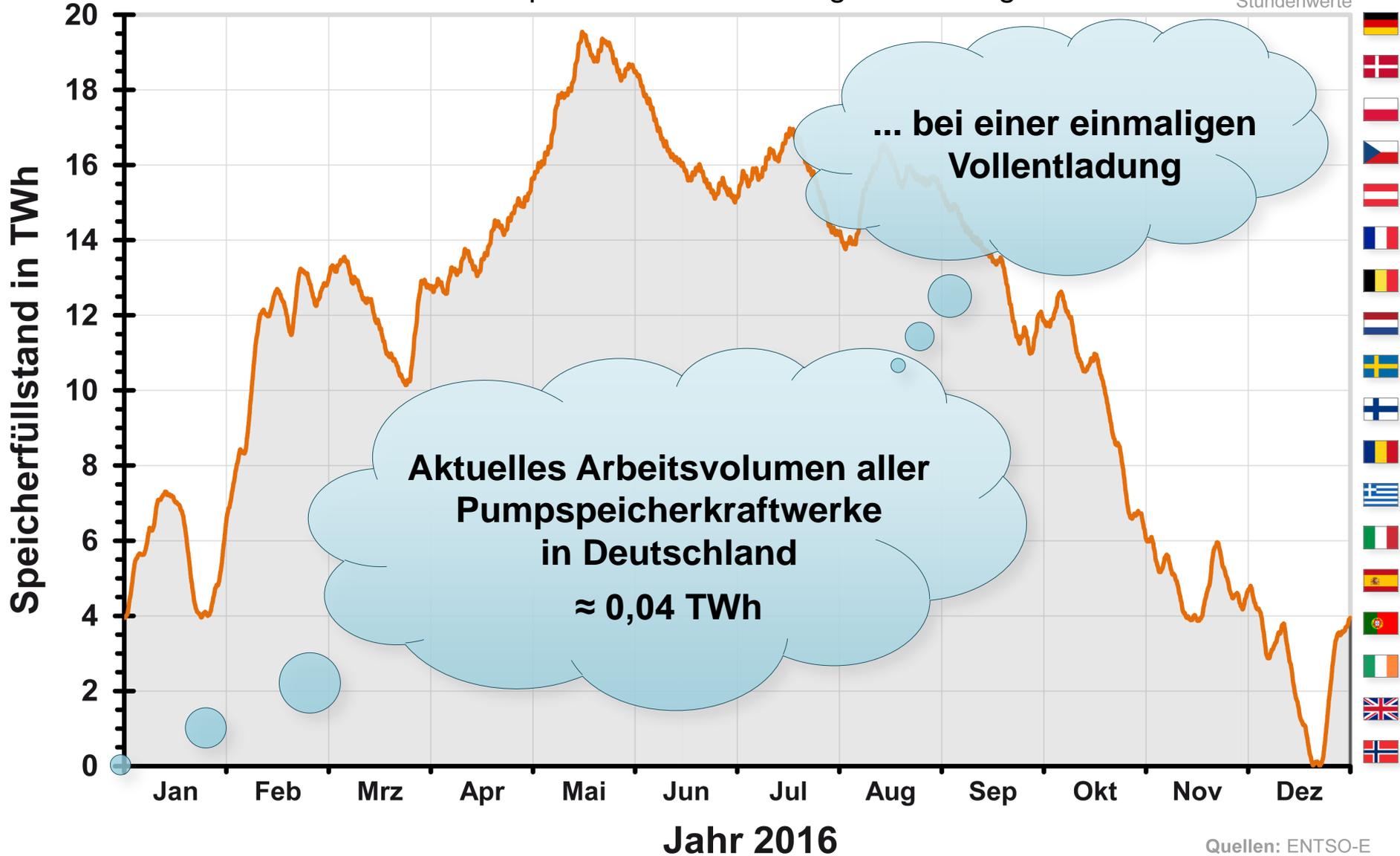
iRES: intermittierende regenerative Energiesysteme (Wind/Solar)

Szenario: Wind- plus Solarstrom aus Europa für Deutschland

Erforderlicher verlustfreier Speicher zur vollständigen Deckung der Last



Erforderlicher verlustfreier Speicher zur vollständigen Deckung der Last



Stromverbrauch in Deutschland $E_L = 550 \text{ TWh}$
iRES-Stromproduktion in Europa $E_{iRES} = 386 \text{ TWh} = 70 \% E_L$

Aufgabe Vollständige Deckung von **70 % E_L** gemäß Lastverlauf mit der iRES-Stromproduktion 18 europäischer Länder

Bedingungen

- ▶ Gleiche Mittelwerte $\langle P_{iRES} \rangle = \langle P_L \rangle = 44.000 \text{ MW}^1$
- ▶ Keine Verluste bei Stromtransport und -verteilung
- ▶ Verlustfreies Backup-System (Stromspeicher)

Ergebnis

- ▶ iRES-Nennleistung $P_{N,iRES} = 252.000 \text{ MW}$
60 % Wind, 40 % Solar

- ▶ Backup-System
 - Maximalleistung $P_{Backup} = 43.000 \text{ MW}$
 - Arbeitsvolumen $E_{Backup} = 20 \text{ TWh}$

Status quo

- ▶ iRES-Nennleistung $P_{N,iRES} = 91.000 \text{ MW}$
55 % Wind, 45 % Solar



iRES: intermittierende regenerative Energiesysteme (Wind/Solar) ¹⁾ Last in Deutschland ohne 50Hertz-Regelzone