

# Windenergie in Deutschland und Europa

## Status, 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**



## Teil 1 – Entwicklungen in Deutschland seit 2010

### ➤ **Vorbemerkungen**

- Die turbulenten Eigenschaften der Windenergie

### ➤ **Betriebserfahrungen**

- Parameter und Begriffsdefinitionen
- Kumulierte elektrische Leistungseinspeisungen
- Langjährige Entwicklung der Ausnutzungsgrade
- Windstromproduktion an Land und auf dem Meer
- Häufigkeitsverteilung der Leistungseinspeisungen
- Schwachwindphasen (Flauten)

### ➤ **Zwischenfazit**

### ➤ **Teil 2 – Europäische Situation im Jahr 2016**

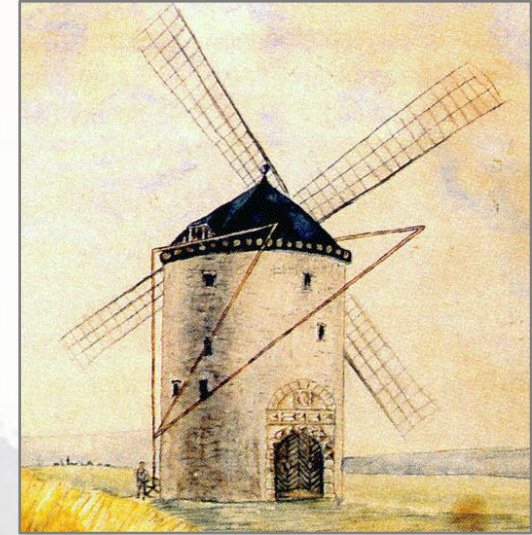
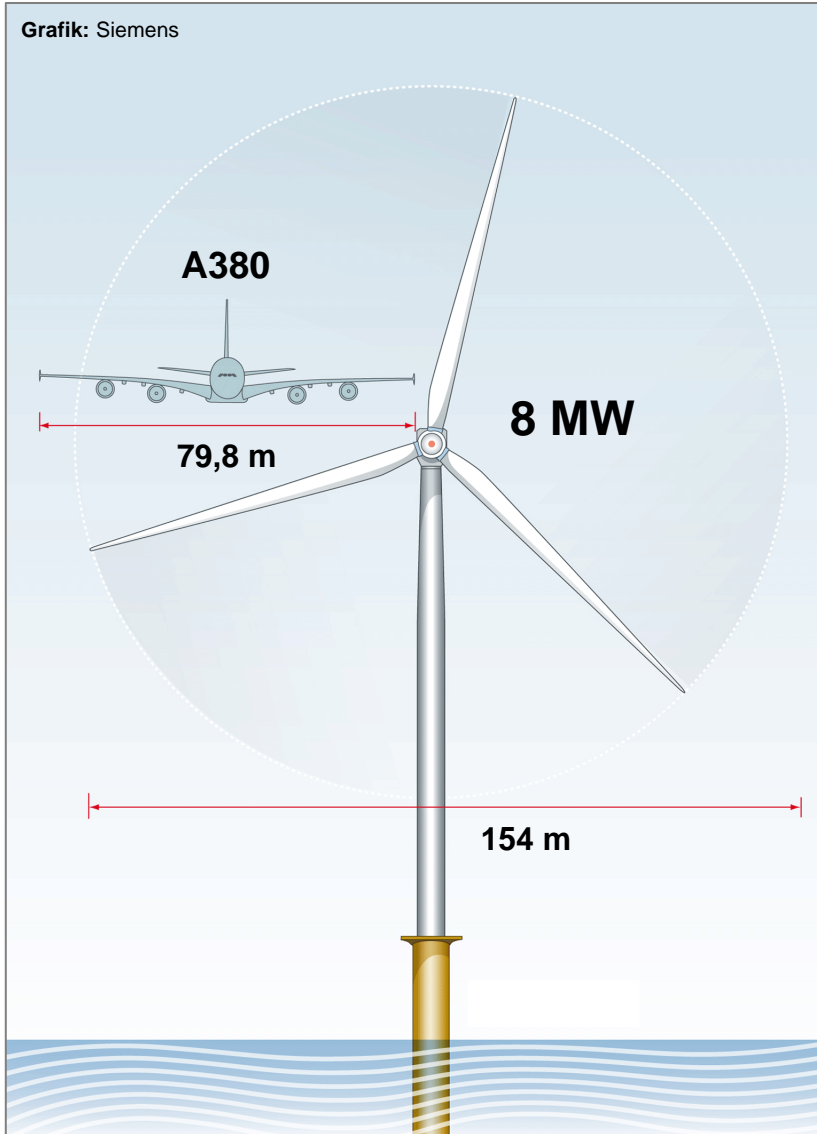
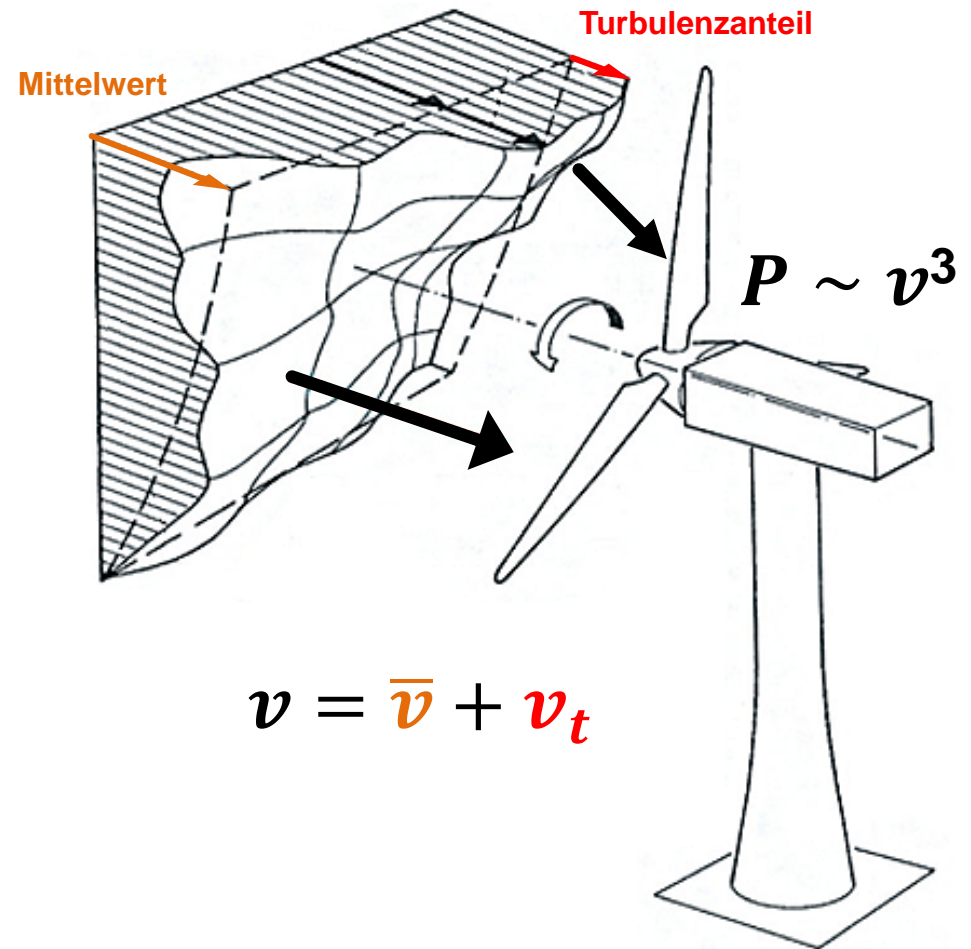


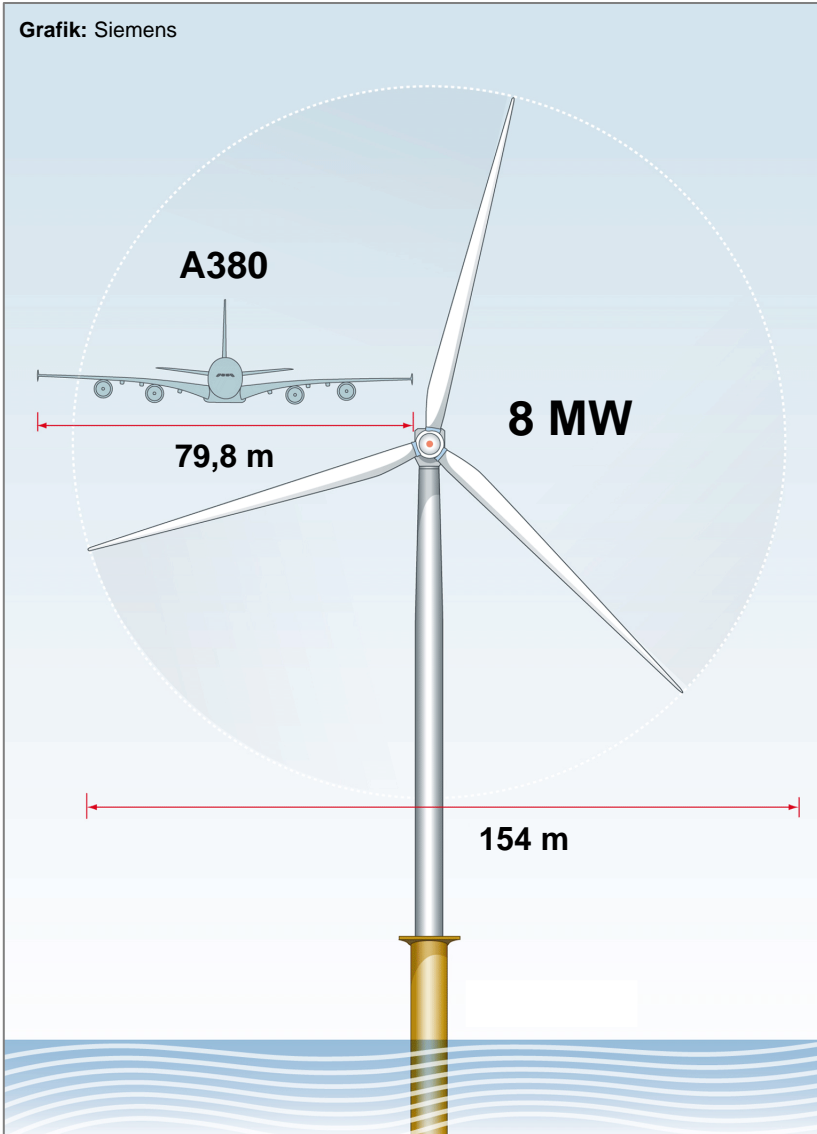
Illustration: [www.kultur-denkmal-merzenich.de](http://www.kultur-denkmal-merzenich.de)

Grafik: Siemens

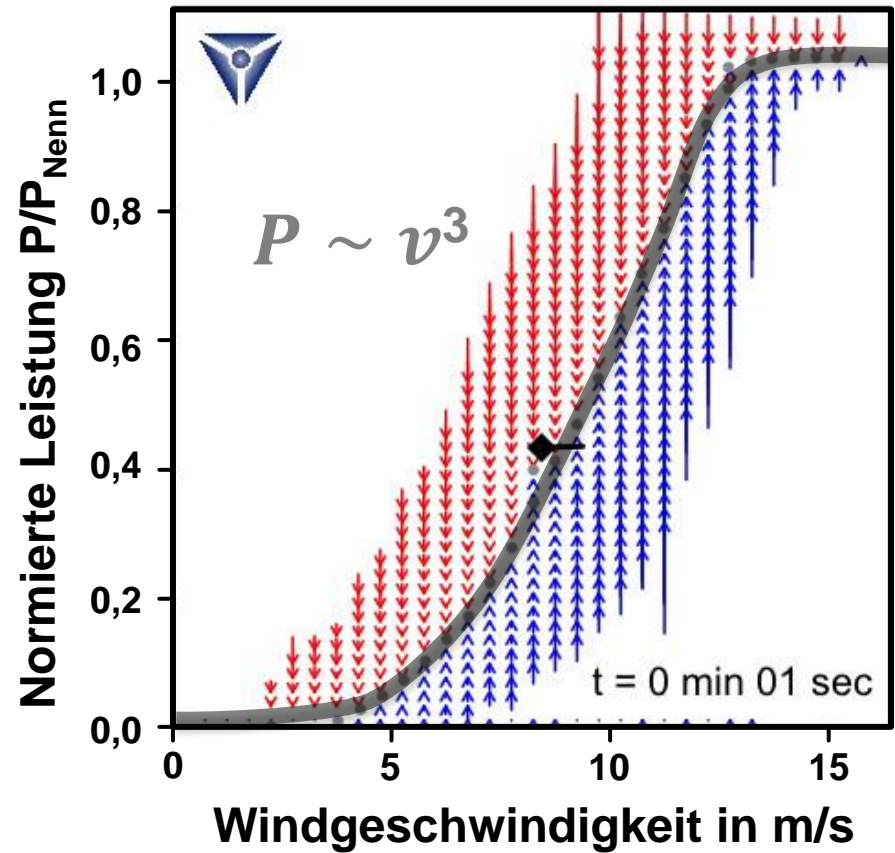


## 3D-Windgeschwindigkeitsfeld



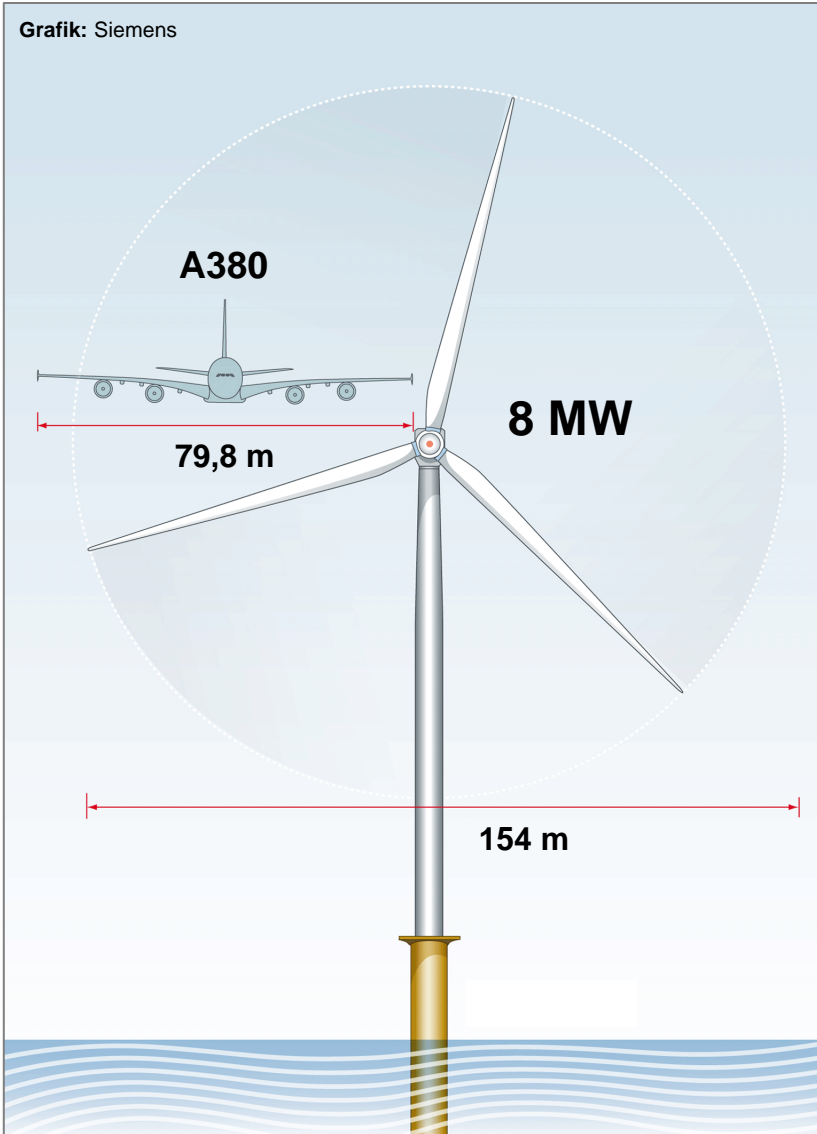


## Leistungstrajektorie

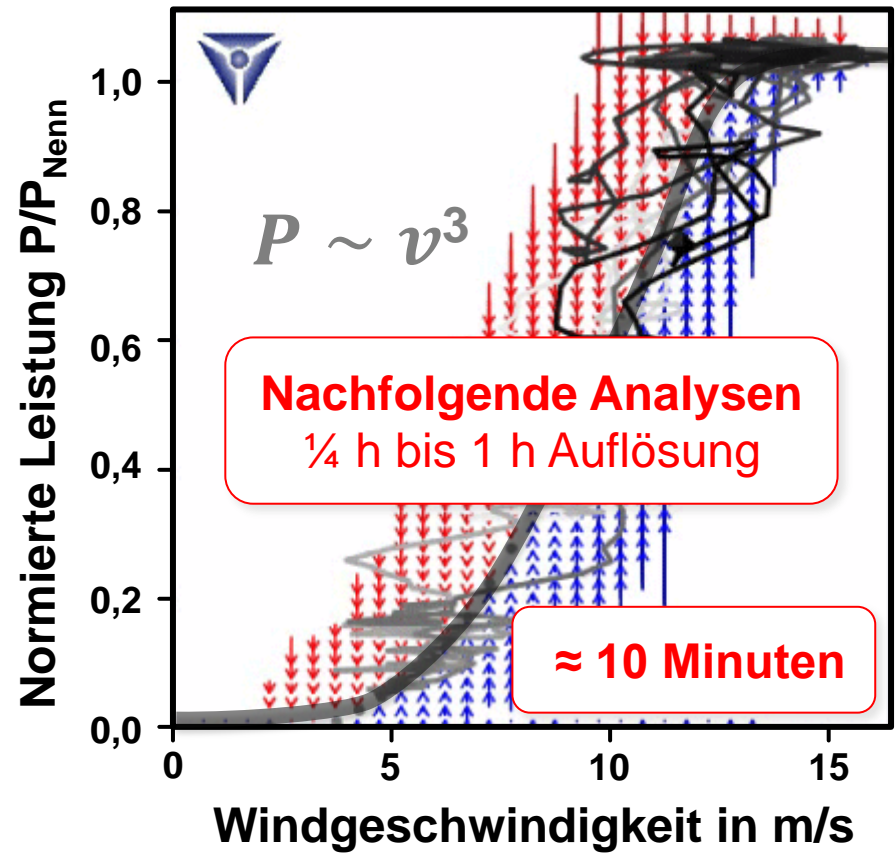


Quelle: Milan, P.; Wächter, M.; Peinke, J.: Turbulent Character of Wind Energy. Physical Review Letters 110, 138701 (2013).





## Leistungstrajektorie



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

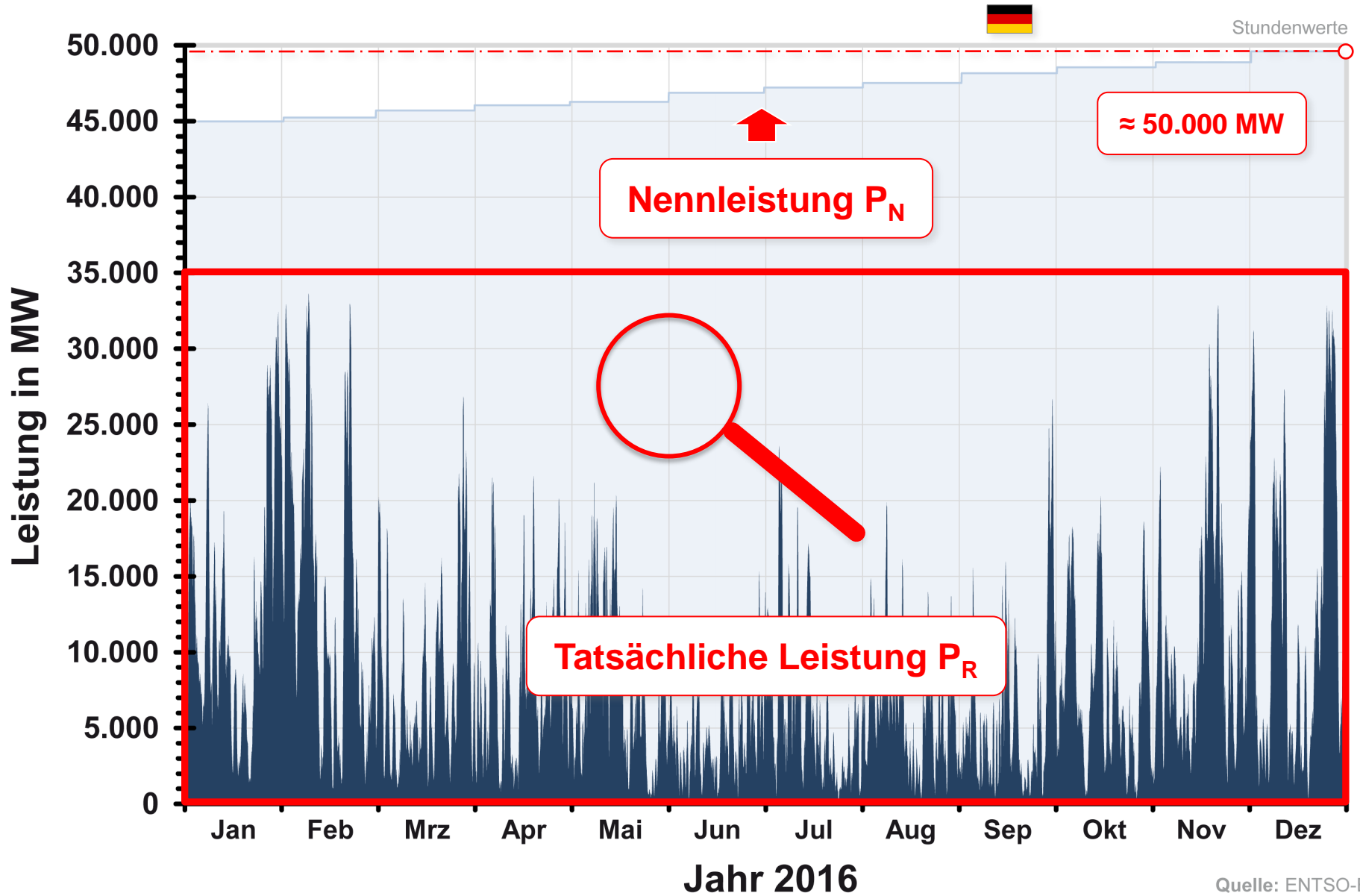


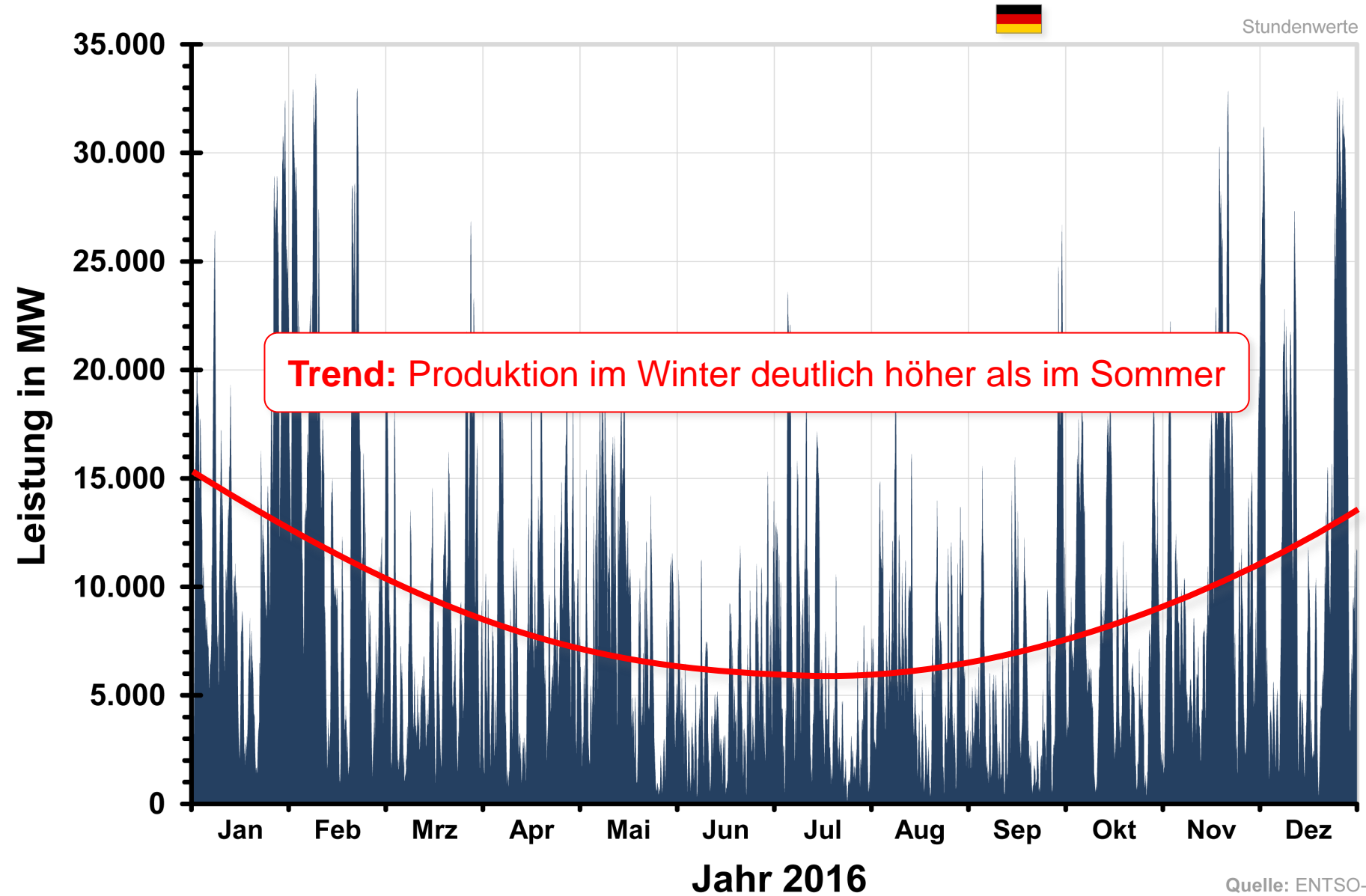
## Zeitreihen der Leistung

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

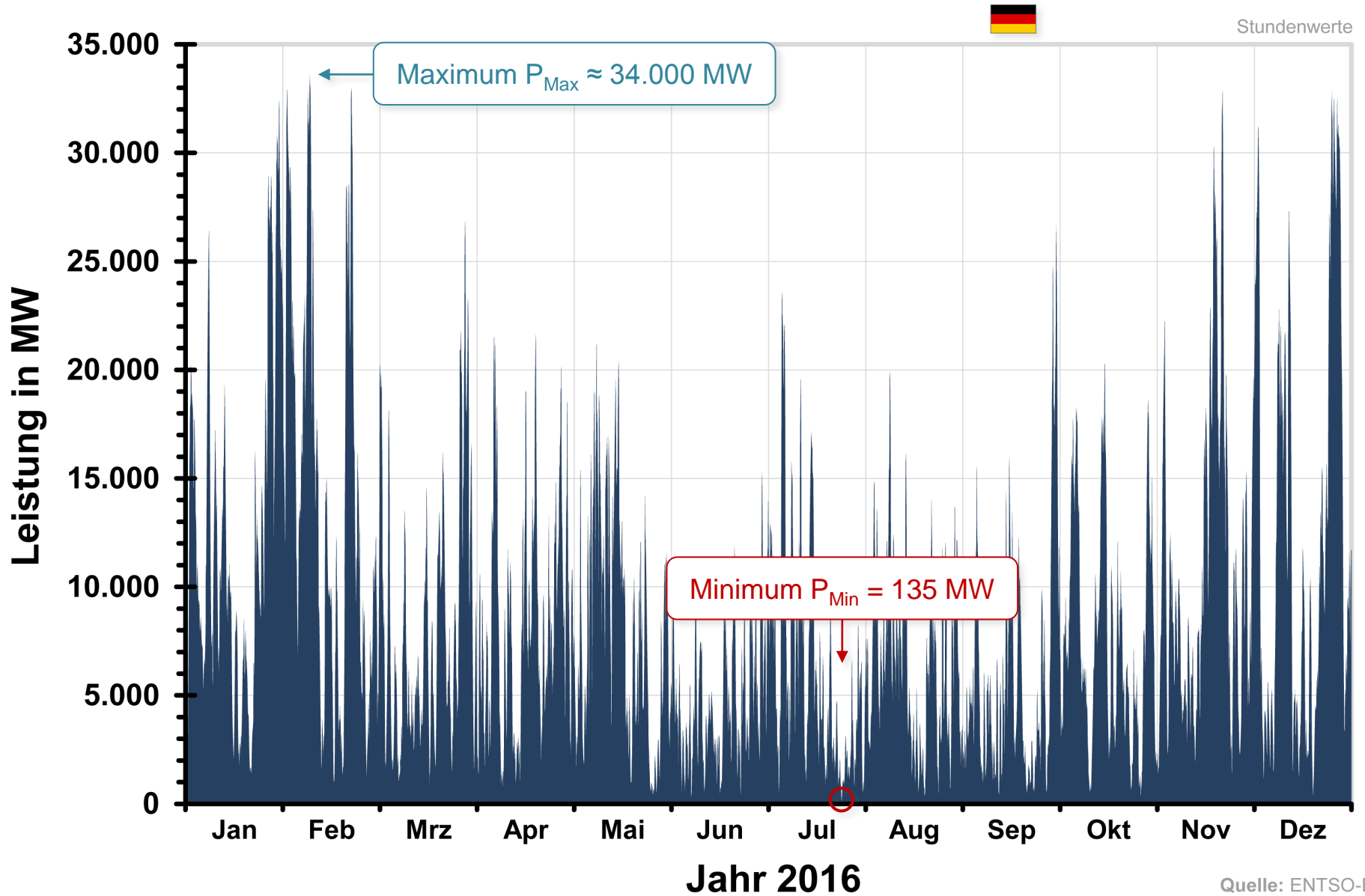
## Energiestatistische Daten

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

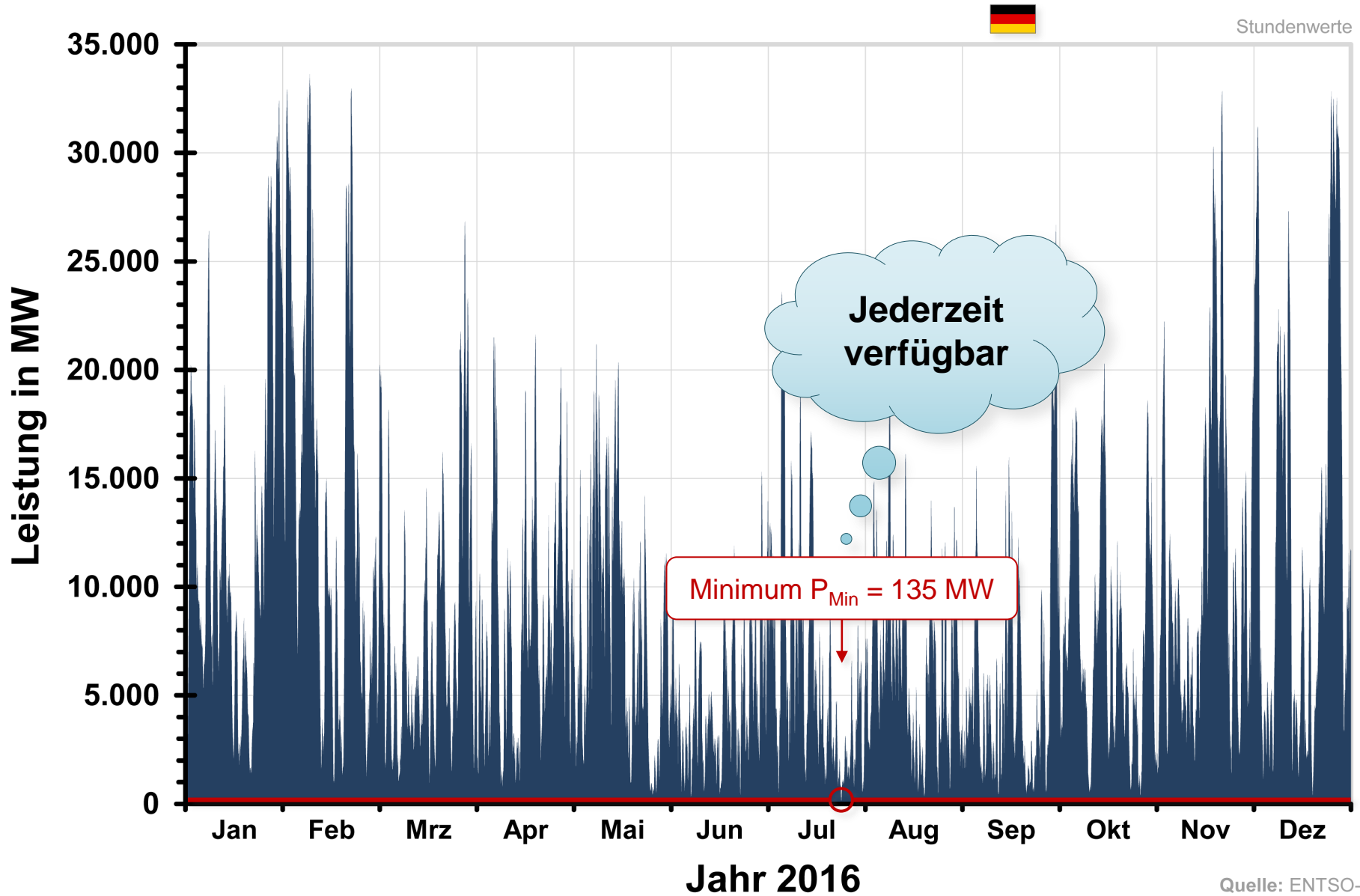




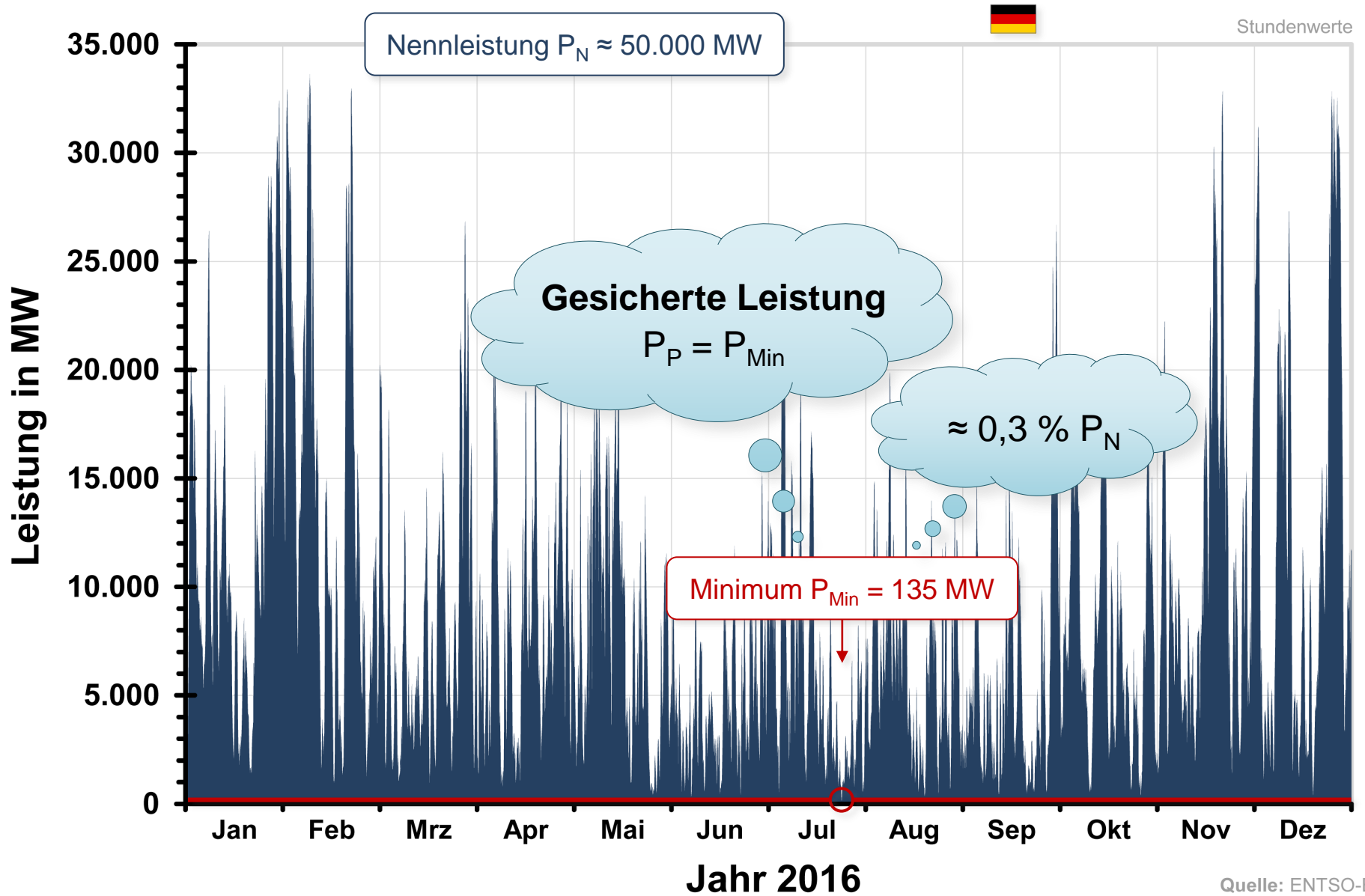
Quelle: ENTSO-E



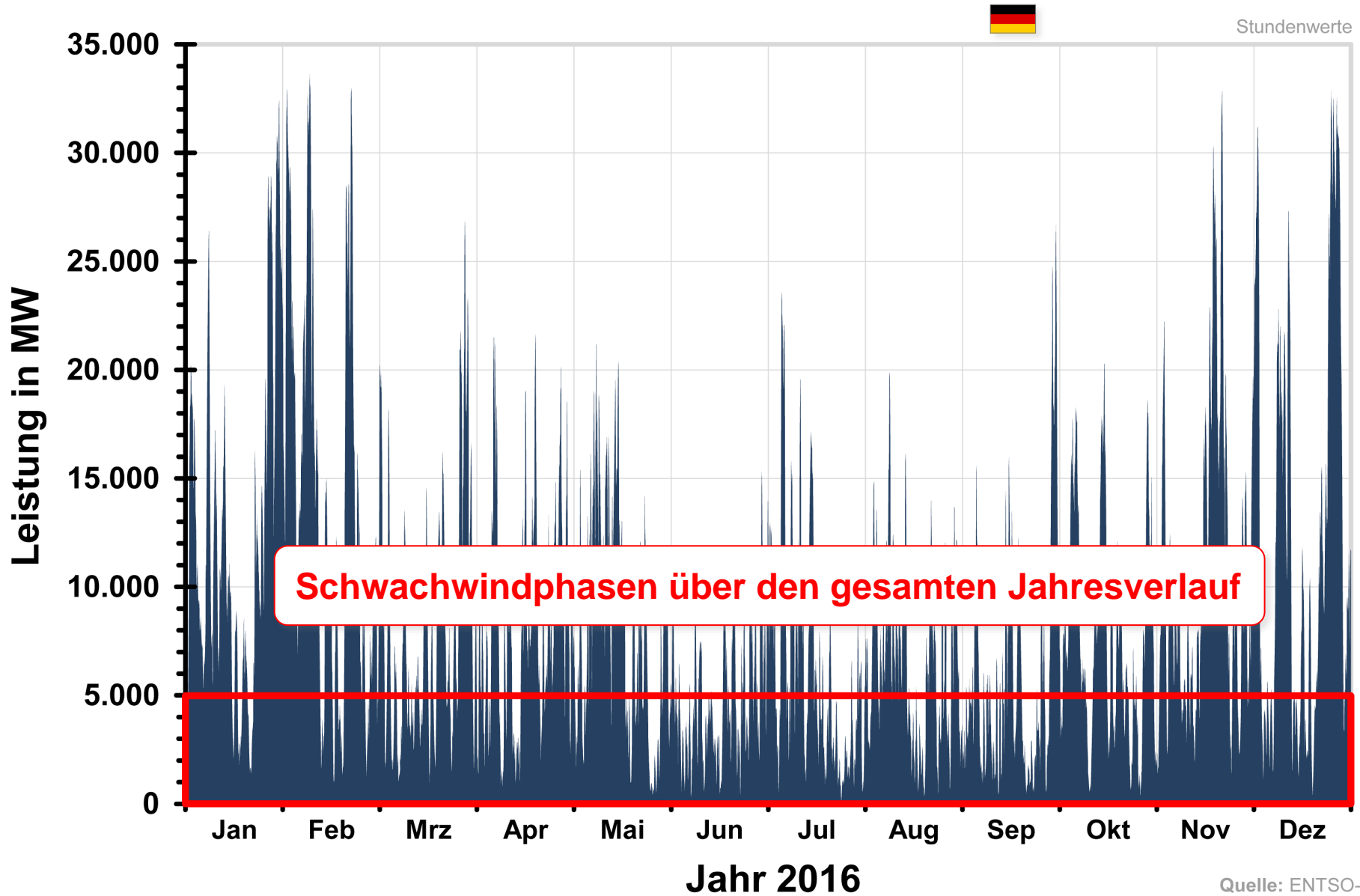


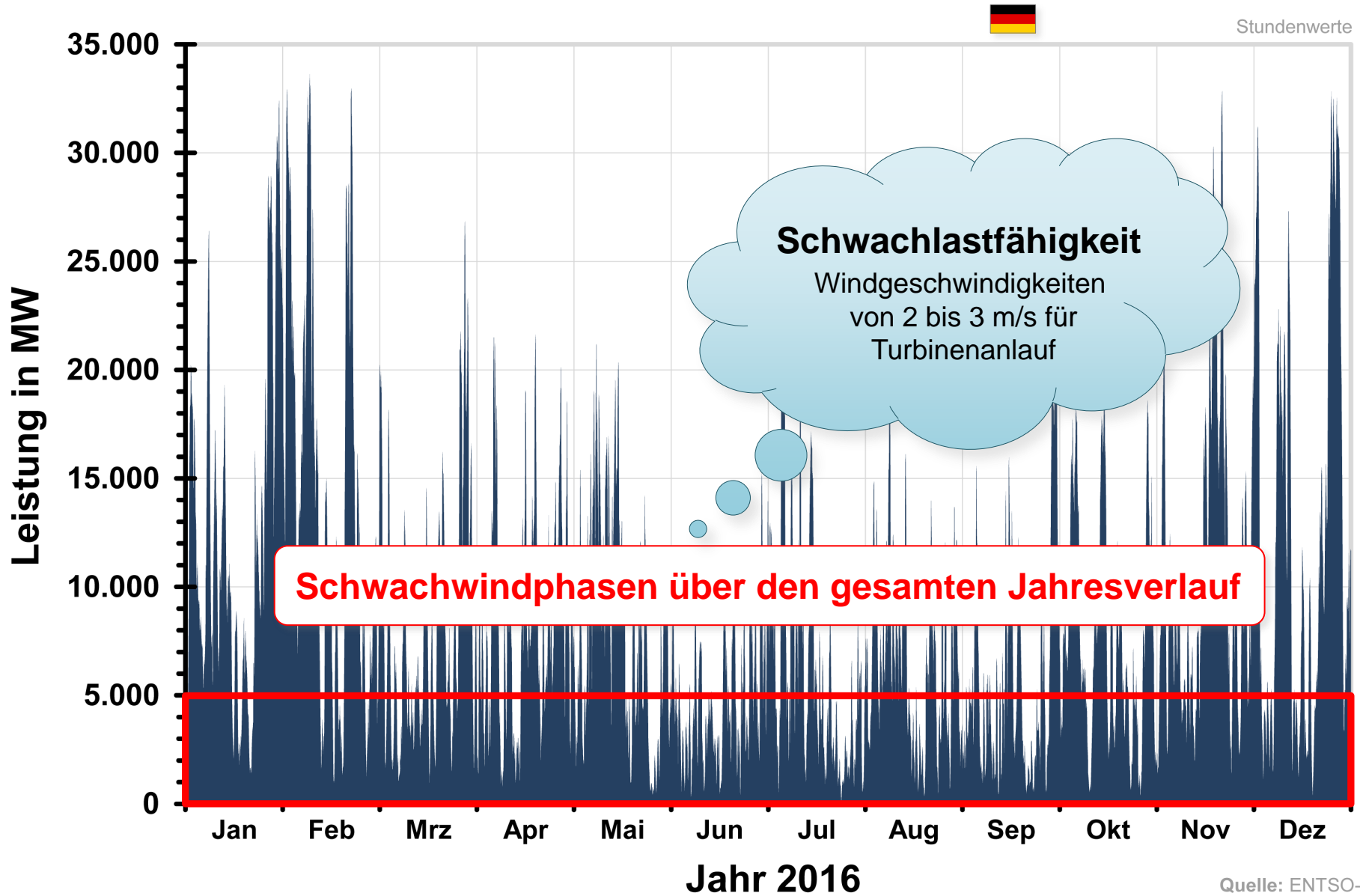


Quelle: ENTSO-E

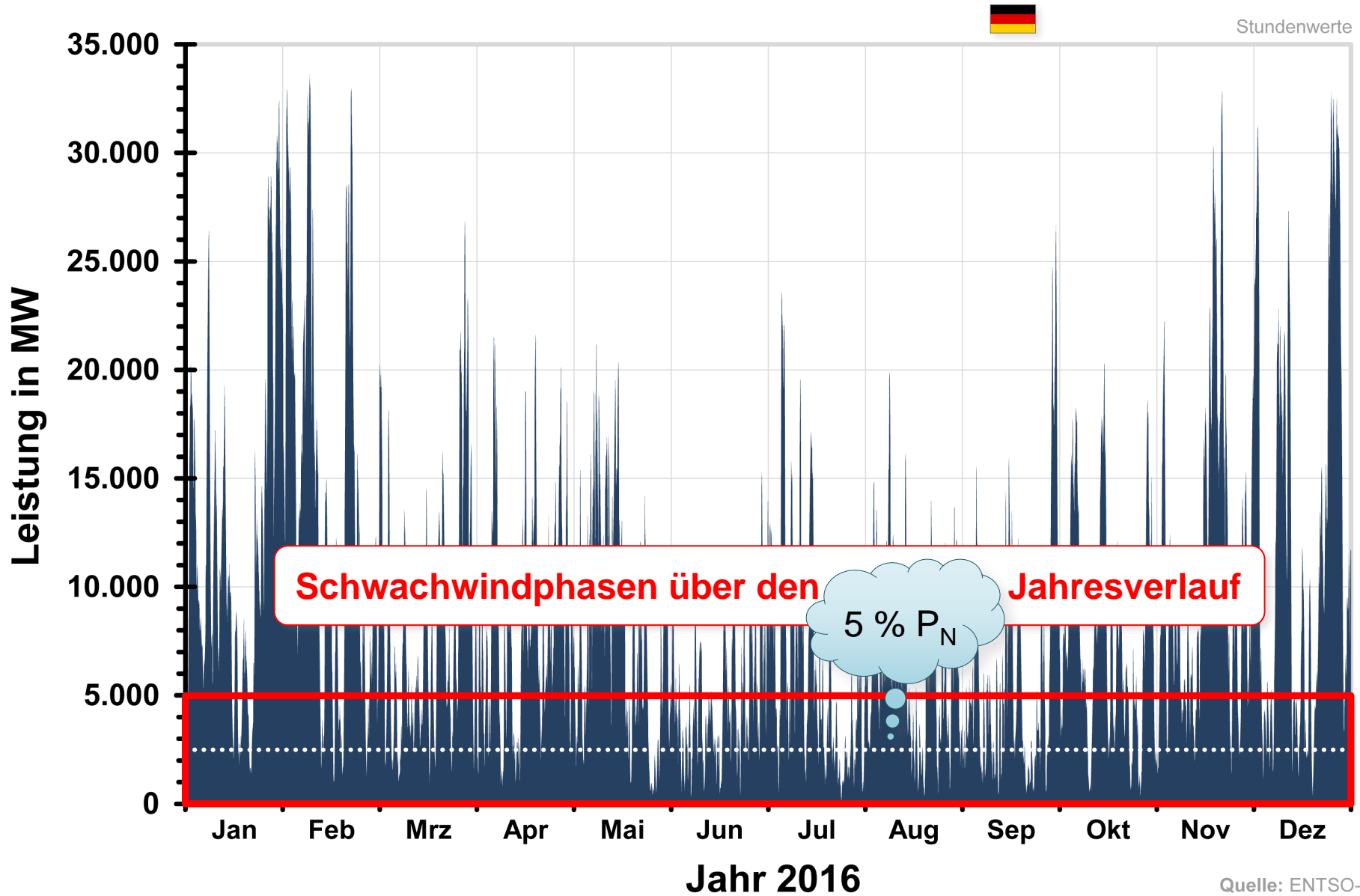


Quelle: ENTSO-E

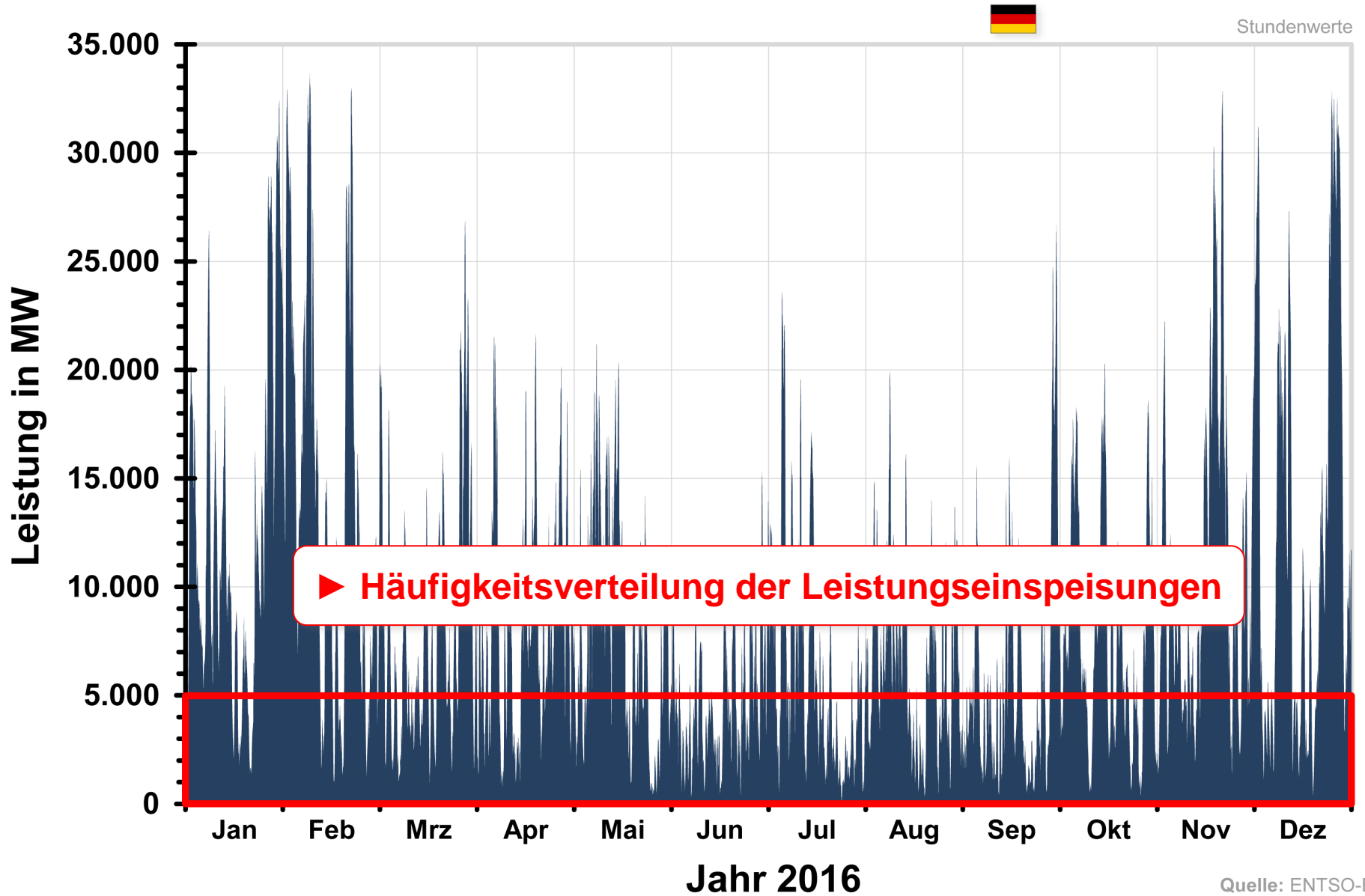




Quelle: ENTSO-E



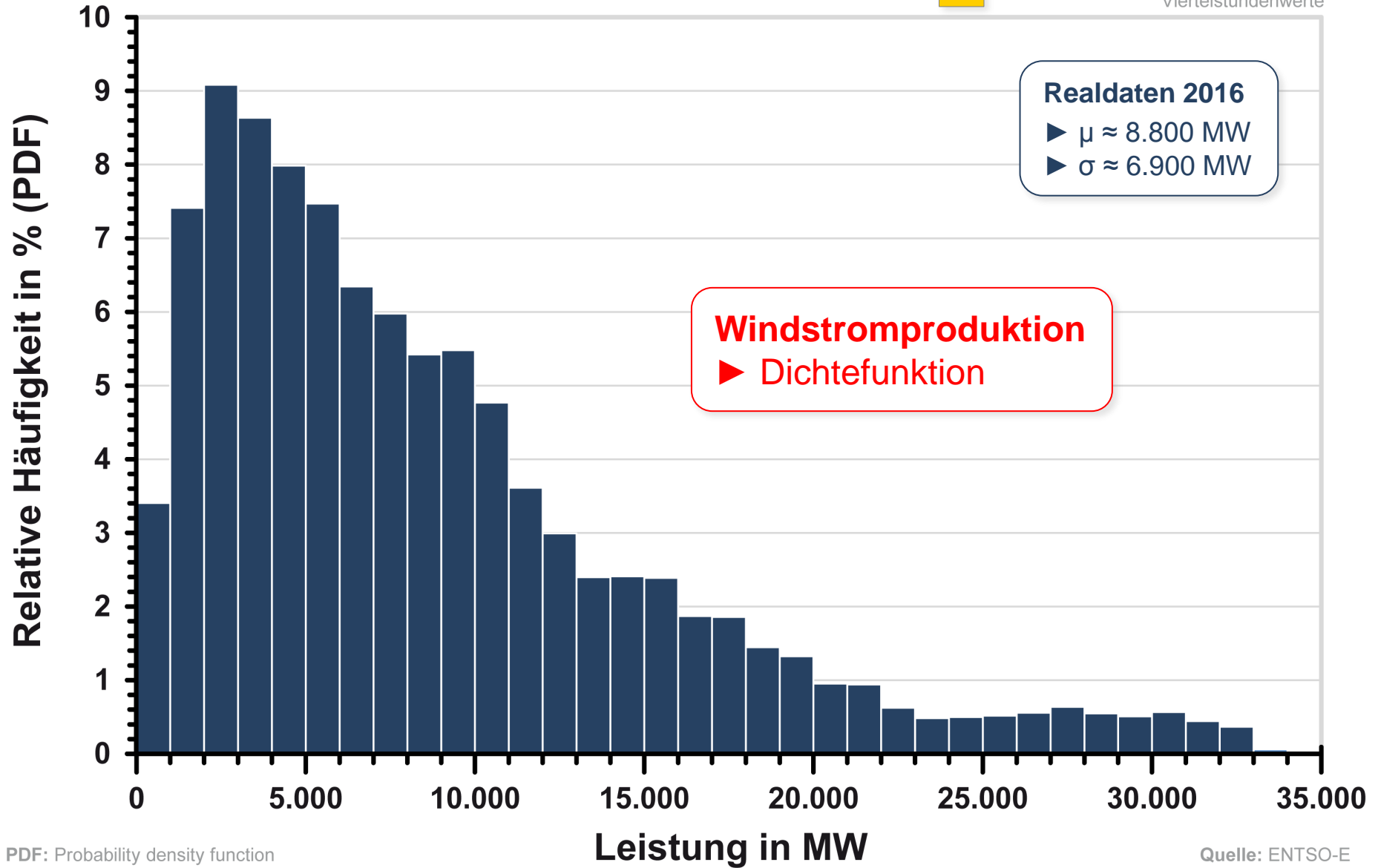




Quelle: ENTSO-E

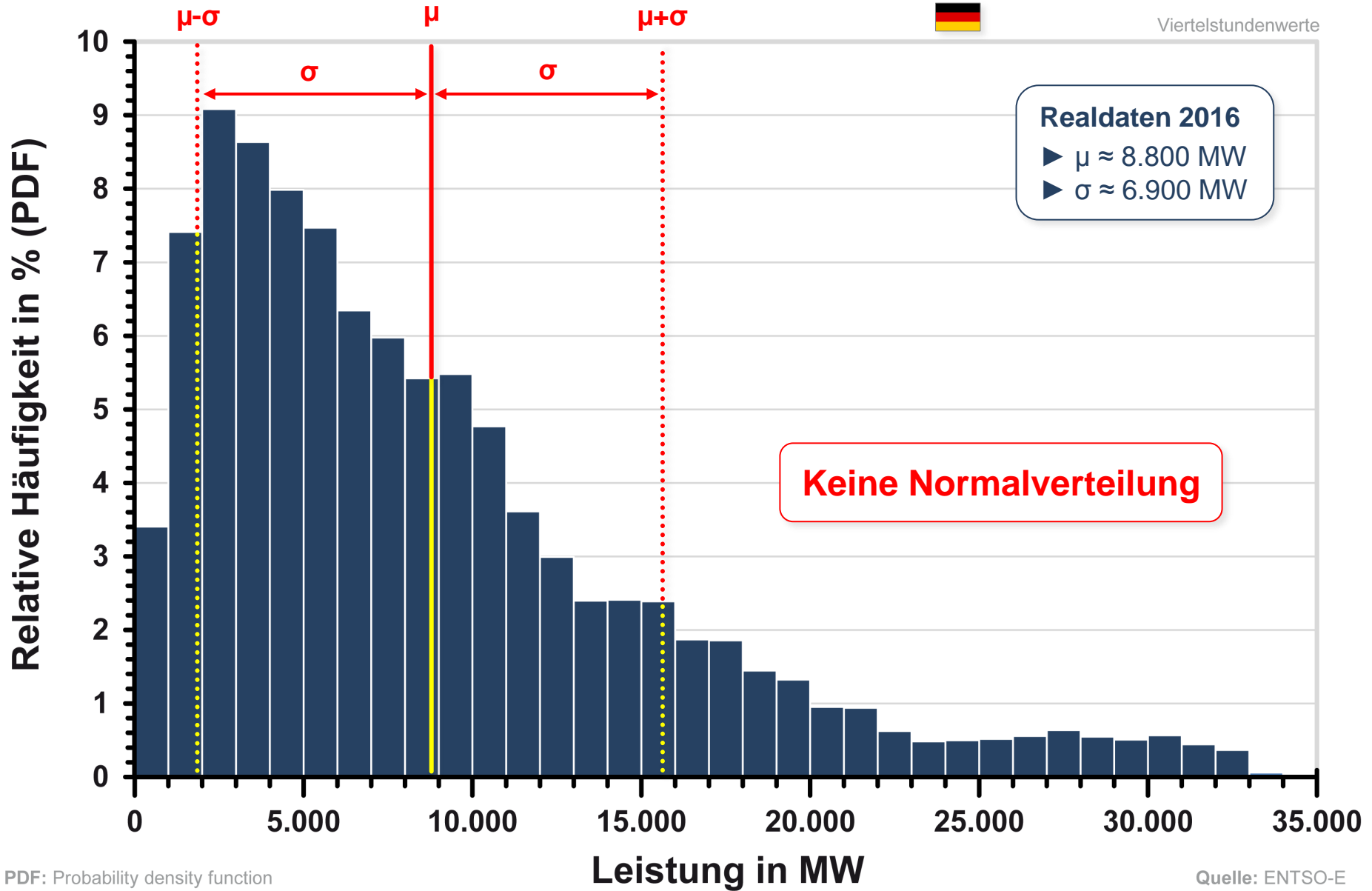


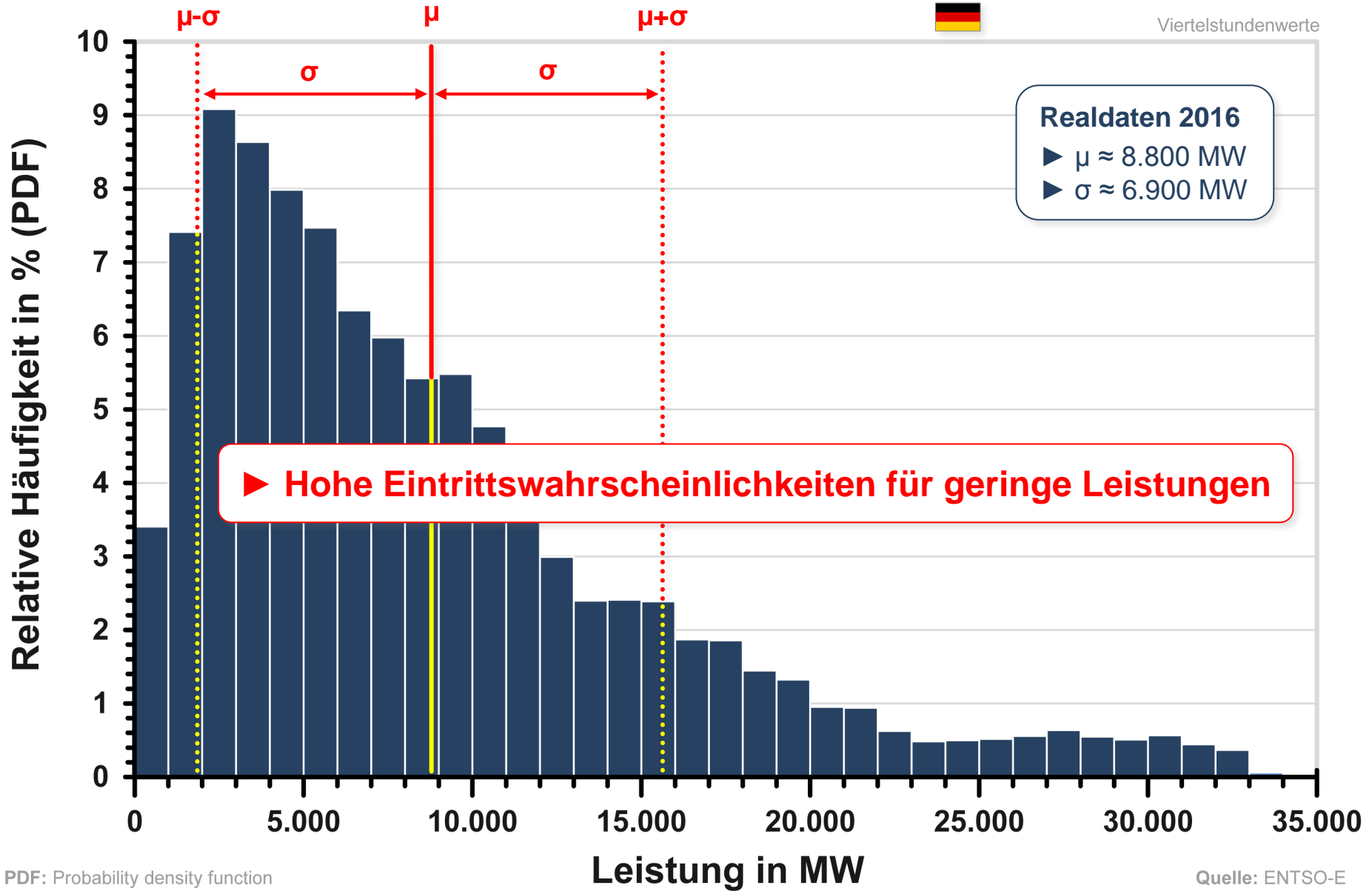
Viertelstundenwerte

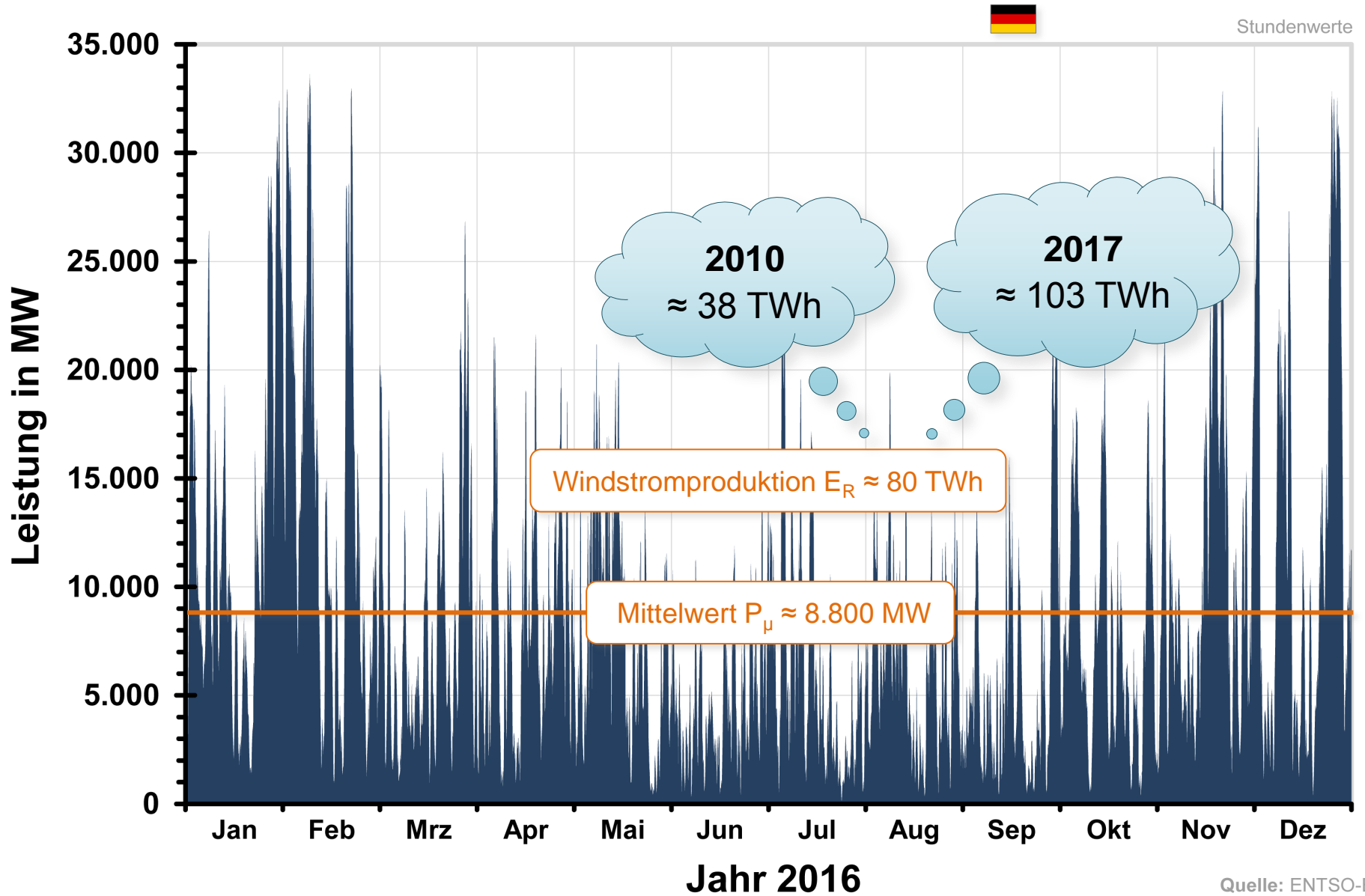


PDF: Probability density function

Quelle: ENTSO-E

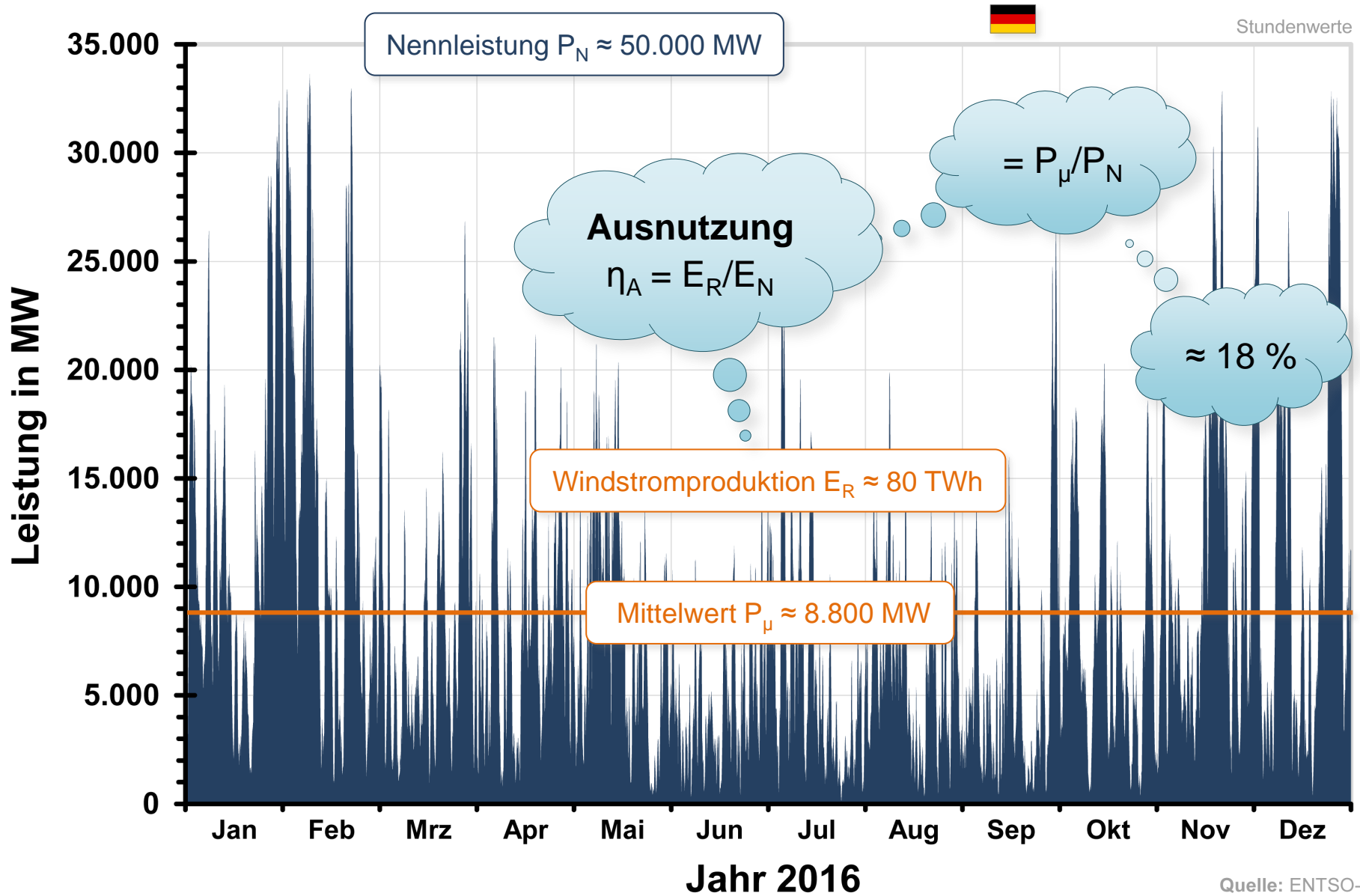




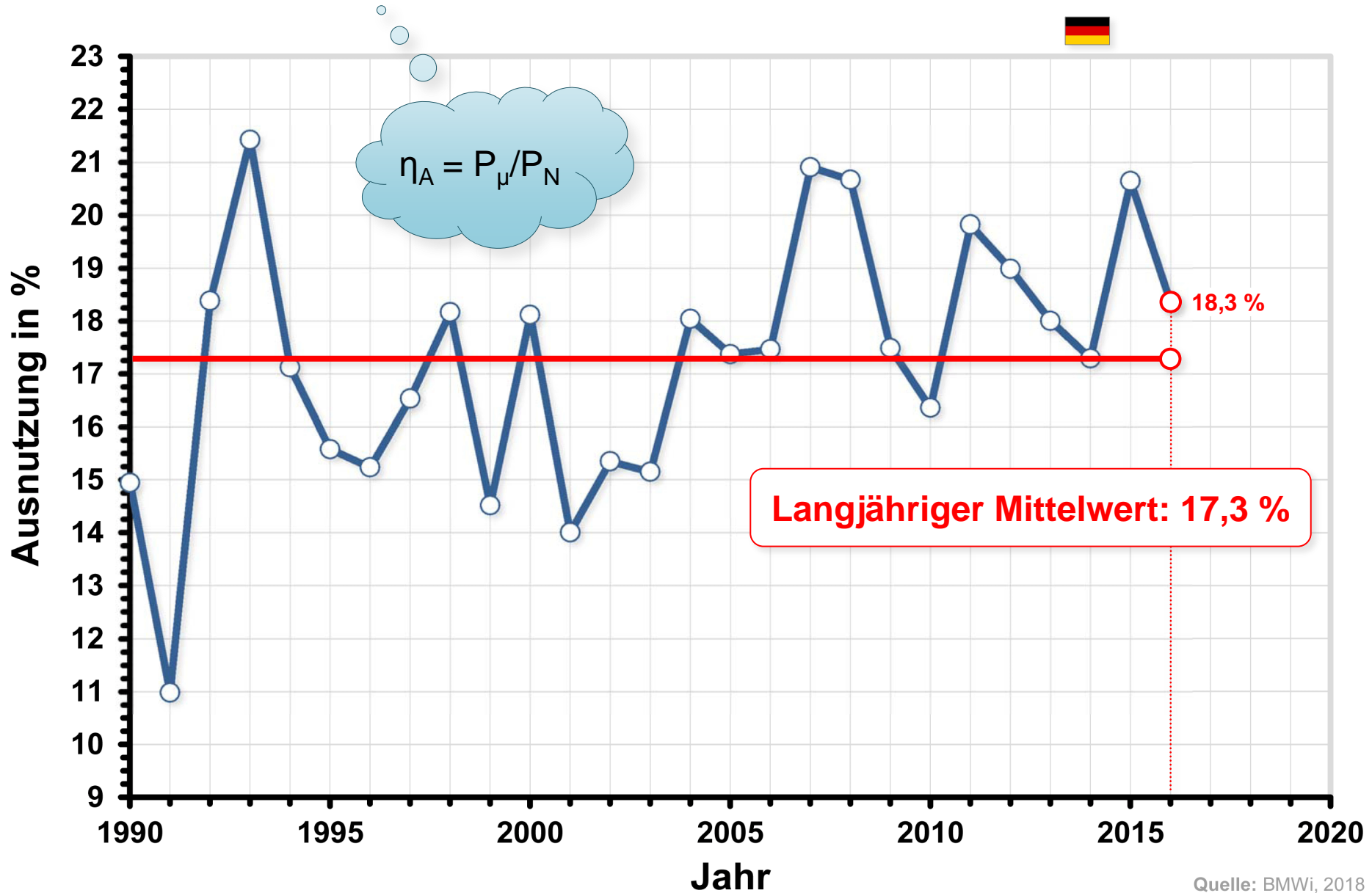


Quelle: ENTSO-E

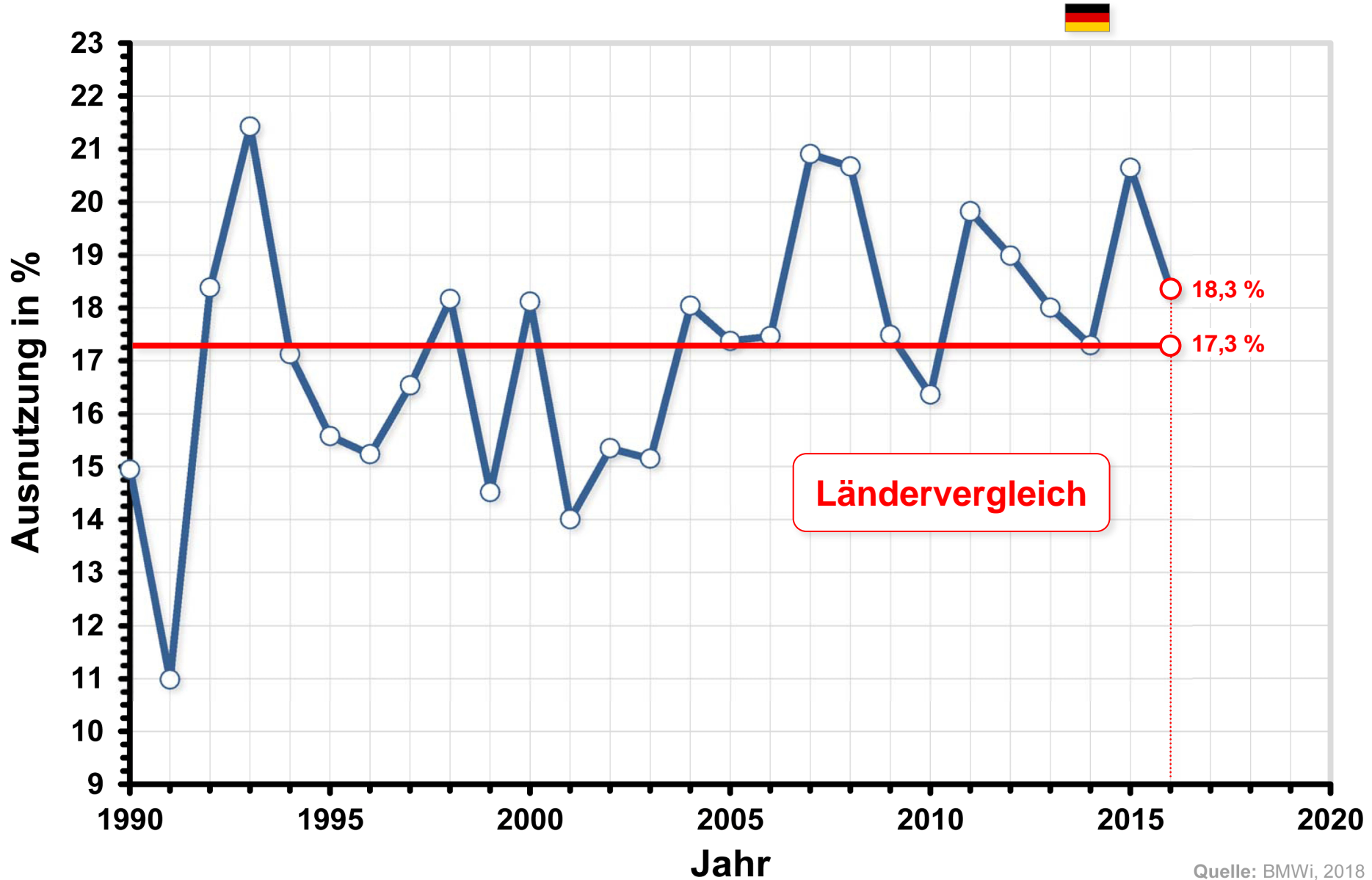




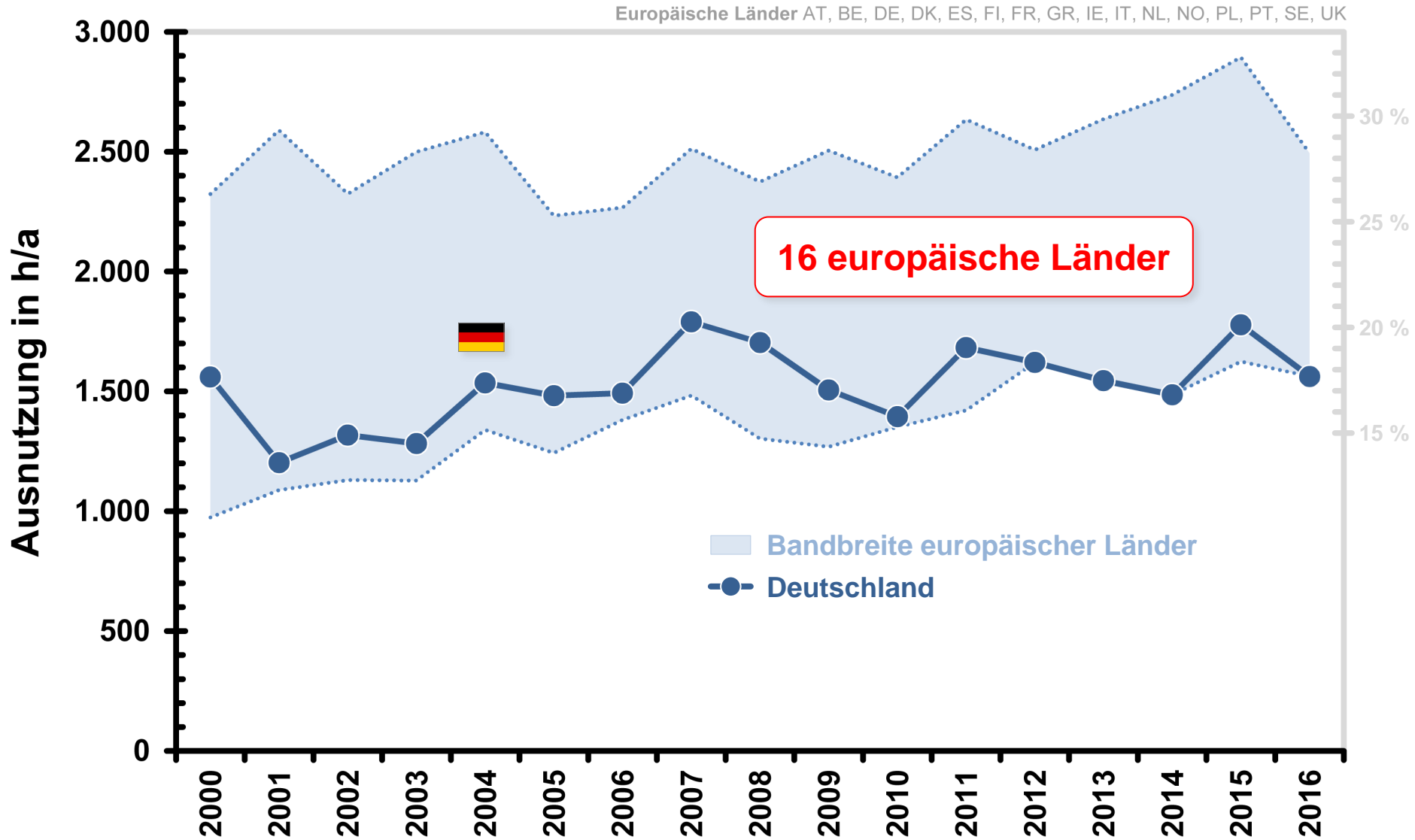
Quelle: ENTSO-E



Quelle: BMWi, 2018



Quelle: BMWi, 2018



Quelle: BP Statistical Review of World Energy, Juni 2017

## Erkenntnisse

- Signifikant höhere Ausnutzung des Winddargebotes in vielen anderen Ländern im Vergleich zu Deutschland im Zeitraum von 2000 bis 2016:

Land	Ausnutzung $\eta_{A,\emptyset}$
<b>Deutschland</b>	<b>1.526 h/a</b>
Irland	2.262 h/a (+ 48 %)
Großbritannien	2.209 h/a (+ 45 %)
Dänemark	2.207 h/a (+ 45 %)
Norwegen	2.205 h/a (+ 45 %)
Griechenland	2.145 h/a (+ 41 %)
Spanien	2.064 h/a (+ 35 %)
Portugal	2.026 h/a (+ 33 %)
Finnland	1.902 h/a (+ 25 %)



**Vergleich zu  
Deutschland**



## Erkenntnisse

- Signifikant höhere Ausnutzung des Winddargebotes in vielen anderen Ländern im Vergleich zu Deutschland im Zeitraum von 2000 bis 2016:

Land	Ausnutzung $\eta_{A,\emptyset}$	Gesicherte Leistung $P_p$
<b>Deutschland</b>	<b>1.526 h/a</b>	<b>0,3 % <math>P_N</math></b>
Irland	2.262 h/a (+ 48 %)	0,0 % $P_N$
Großbritannien	2.209 h/a (+ 45 %)	2,2 % $P_N$
Dänemark	2.207 h/a (+ 45 %)	0,3 % $P_N$
Norwegen	2.205 h/a (+ 45 %)	1,1 % $P_N$
Griechenland	2.145 h/a (+ 41 %)	0,0 % $P_N$
Spanien	2.064 h/a (+ 35 %)	1,1 % $P_N$
Portugal	2.026 h/a (+ 33 %)	0,3 % $P_N$
Finnland	1.902 h/a (+ 25 %)	0,4 % $P_N$

**Zeitreihen 2016**

## Erkenntnisse

- Signifikant höhere Ausnutzung des Winddargebotes in vielen anderen Ländern im Vergleich zu Deutschland im Zeitraum von 2000 bis 2016:

Land	Ausnutzung $\eta_{A,\emptyset}$	Gesicherte Leistung $P_p$
<b>Deutschland</b>	<b>1.526 h/a</b>	<b>0,3 % <math>P_N</math></b>
Irland	2.262 h/a (+ 48 %)	0,0 % $P_N$
Großbritannien	2.209 h/a (+ 45 %)	2,2 % $P_N$
Dänemark	2.207 h/a (+ 45 %)	0,3 % $P_N$
Norwegen	2.205 h/a (+ 45 %)	1,1 % $P_N$
Griechenland	2.145 h/a (+ 41 %)	0,0 % $P_N$
Spanien	2.064 h/a (+ 35 %)	1,1 % $P_N$
Portugal	2.026 h/a (+ 33 %)	0,3 % $P_N$
Finnland	1.902 h/a (+ 25 %)	0,4 % $P_N$

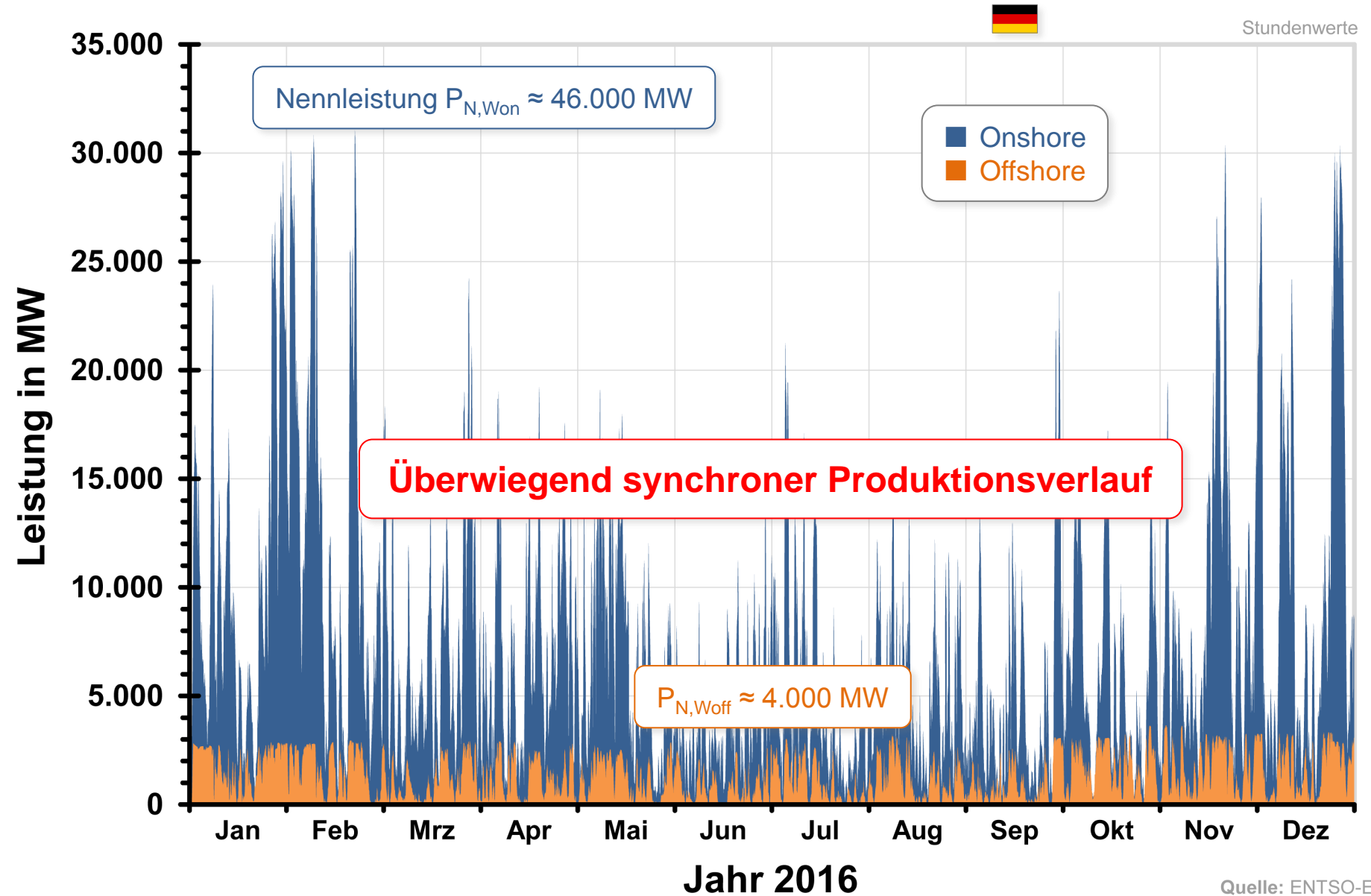
**Alle Werte**  
 $P_p \leq 2,2 \% P_N$

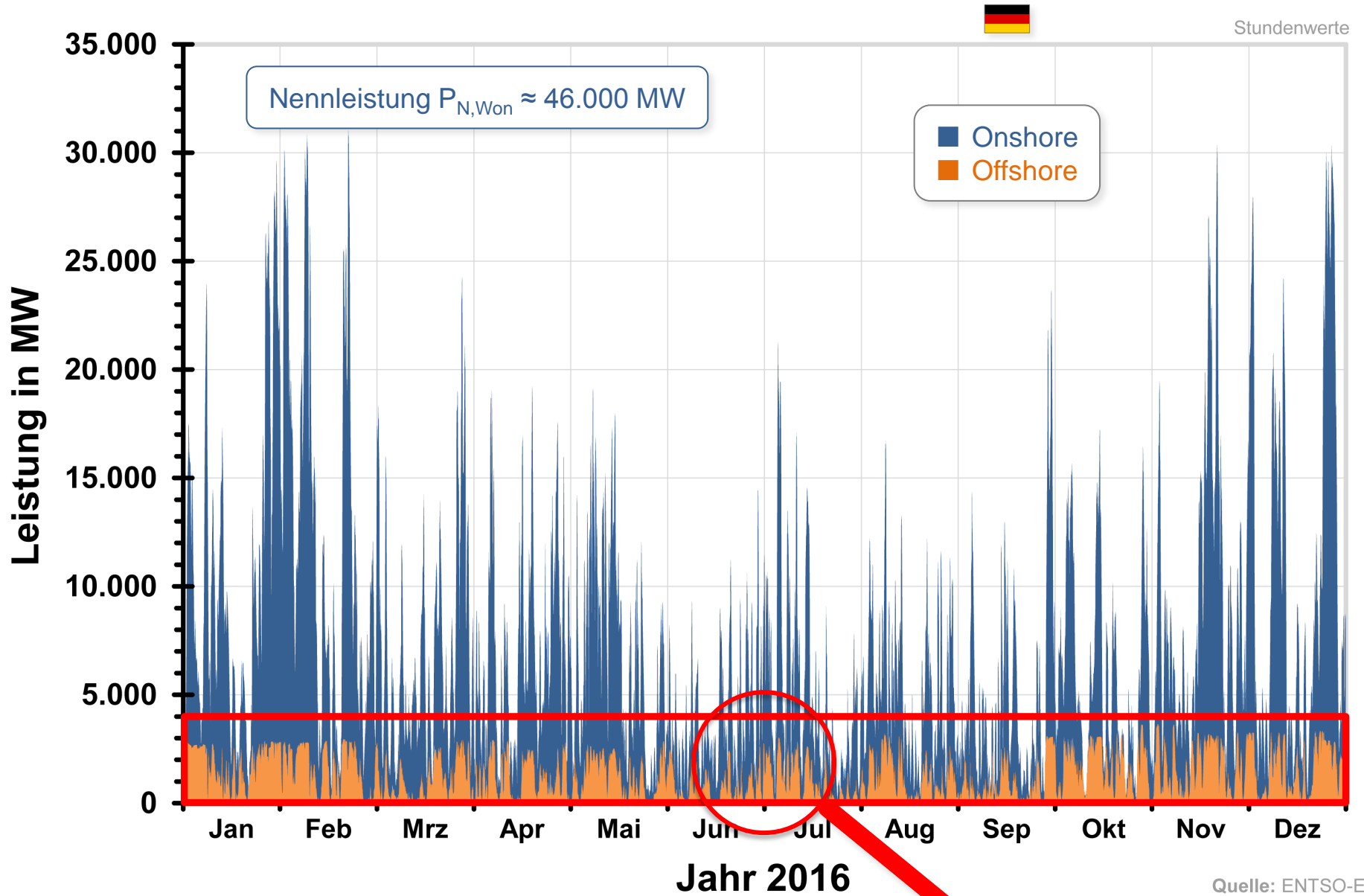
## Erkenntnisse

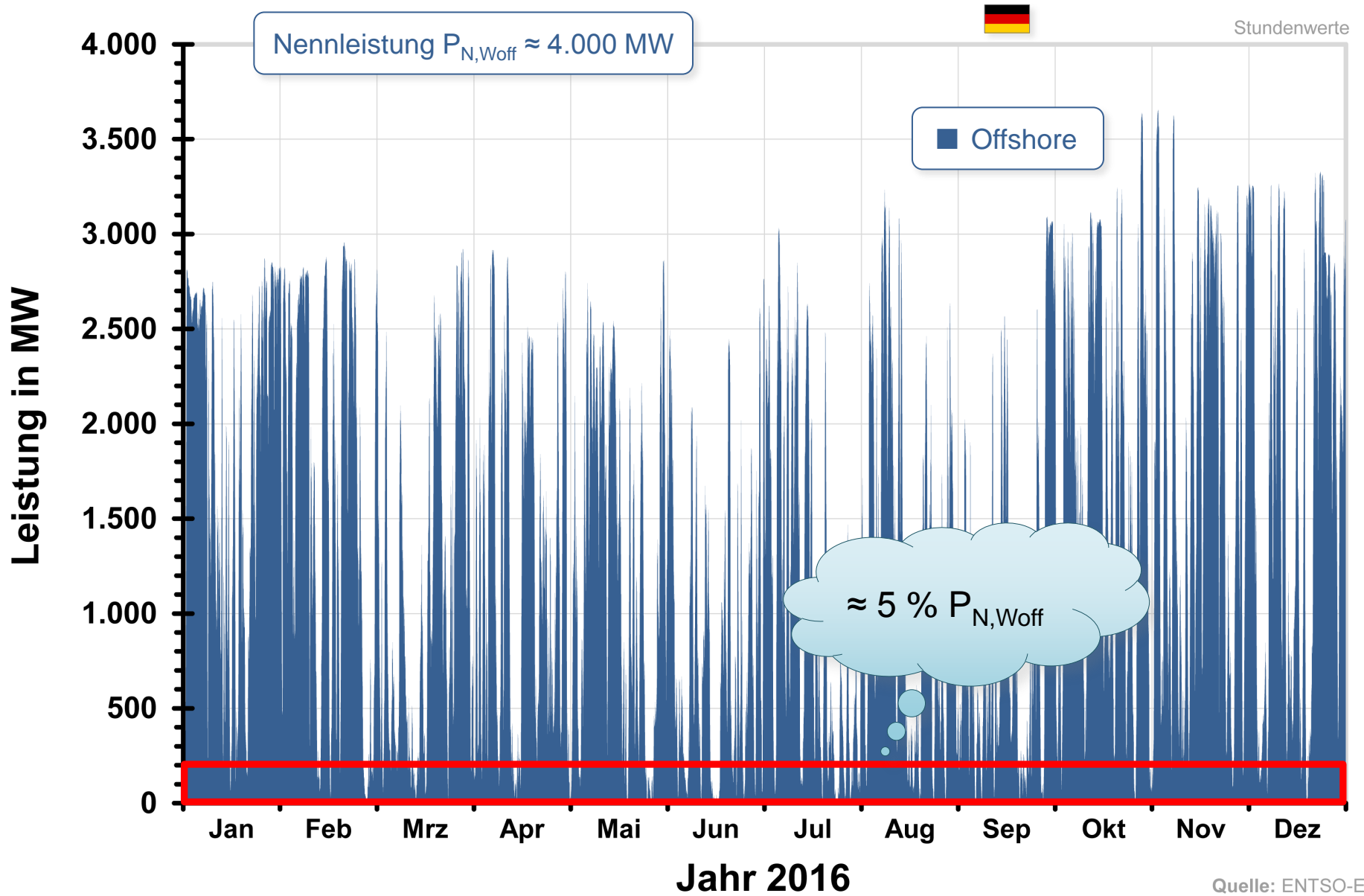
- Signifikant höhere Ausnutzung des Winddargebotes in vielen anderen Ländern im Vergleich zu Deutschland im Zeitraum von 2000 bis 2016:

Land	Ausnutzung $\eta_{A,\emptyset}$	Gesicherte Leistung $P_p$
<b>Deutschland</b>	<b>1.526 h/a</b>	<b>0,3 % <math>P_N</math></b>
Irland	2.262 h/a (+ 48 %)	0,0 % $P_N$
Großbritannien	2.209 h/a (+ 45 %)	2,2 % $P_N$
Dänemark	2.207 h/a (+ 45 %)	0,3 % $P_N$
Norwegen	2.205 h/a (+ 45 %)	1,1 % $P_N$
Griechenland	2.145 h/a (+ 41 %)	0,0 % $P_N$
Spanien	2.064 h/a (+ 35 %)	1,1 % $P_N$
Portugal	2.026 h/a (+ 33 %)	0,3 % $P_N$
Finnland	1.902 h/a (+ 25 %)	0,4 % $P_N$

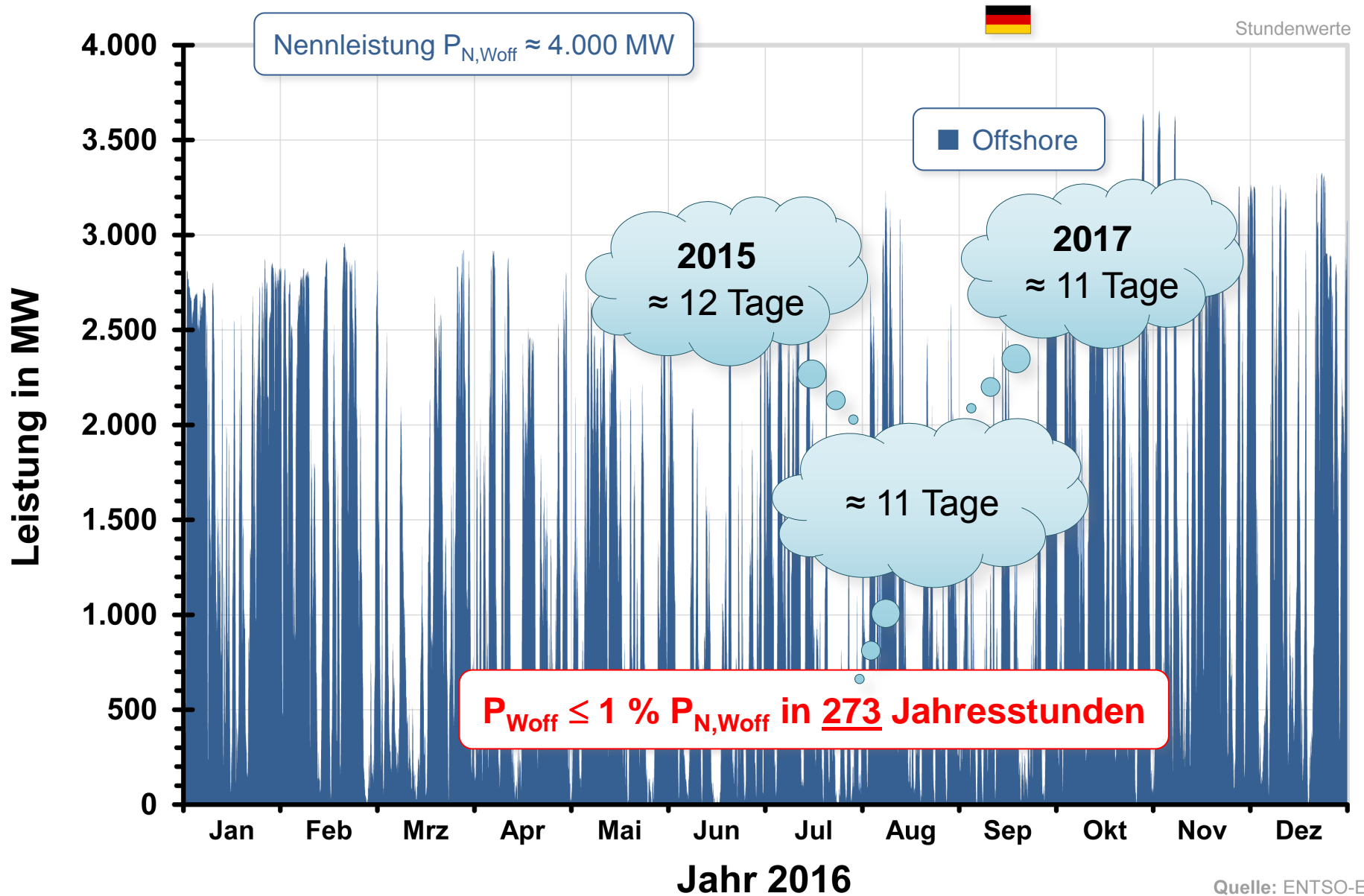
- **Versorgungssicherheit:** Praktisch kein Unterschied zu Deutschland



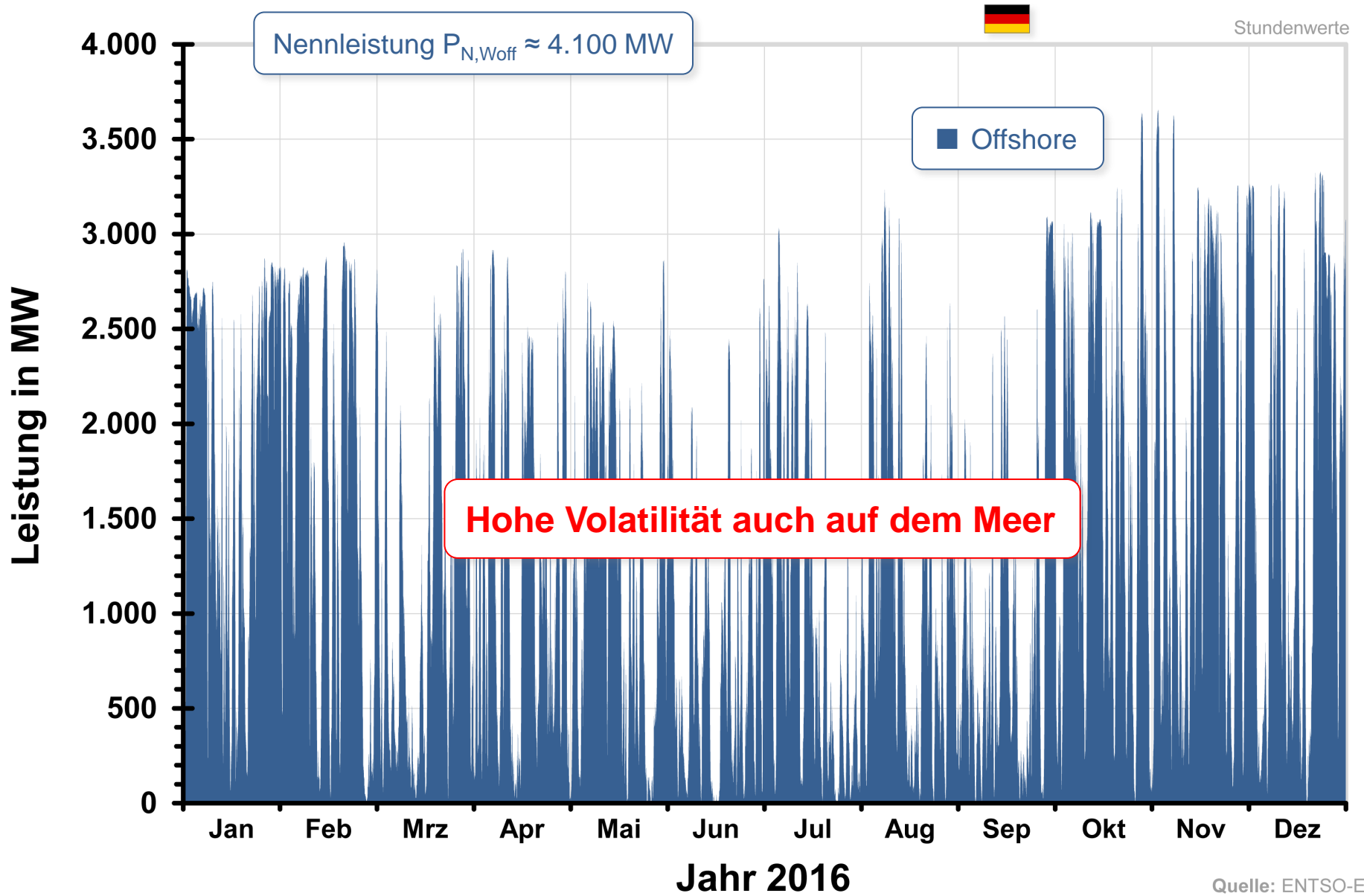




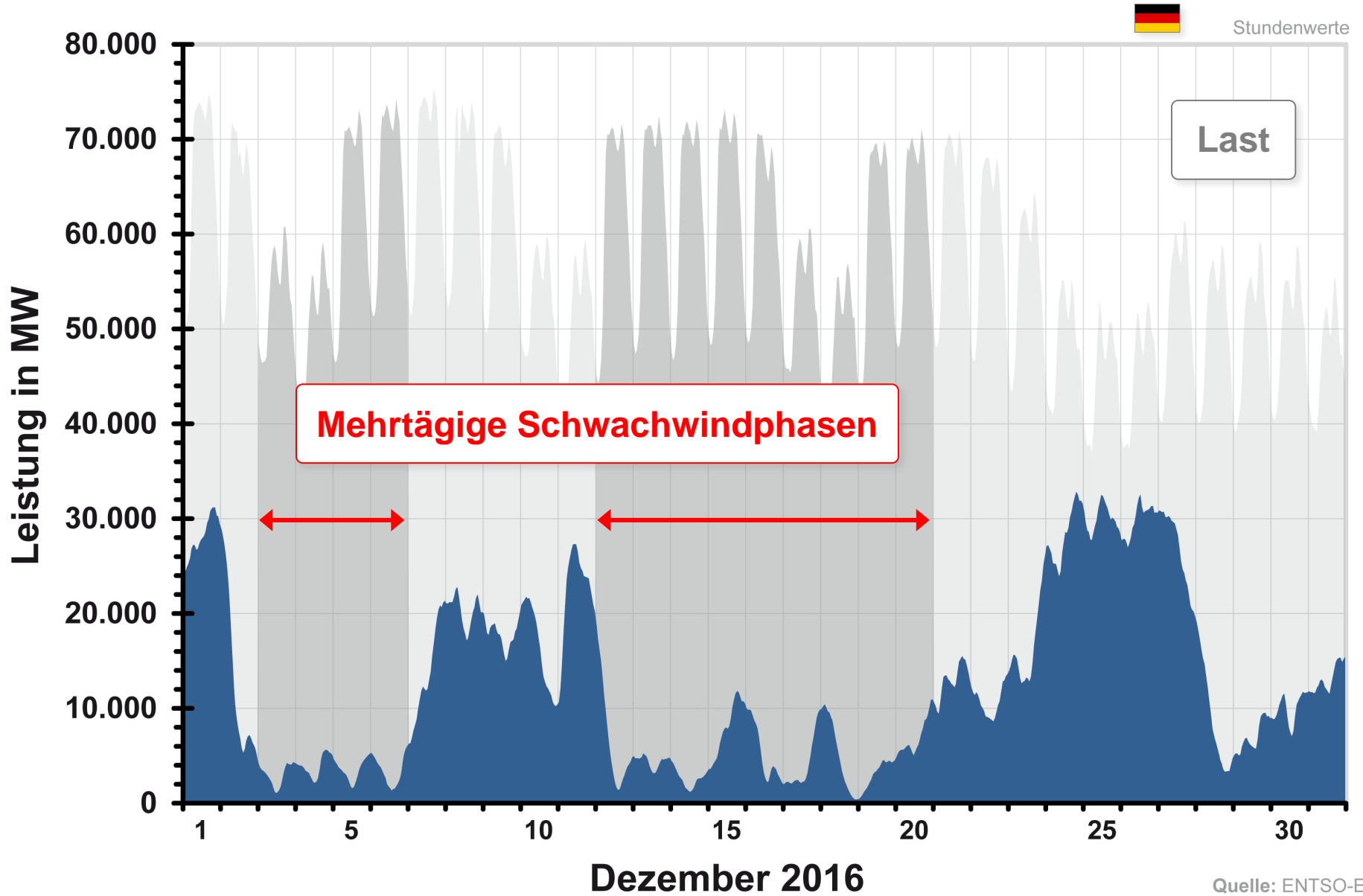
Quelle: ENTSO-E



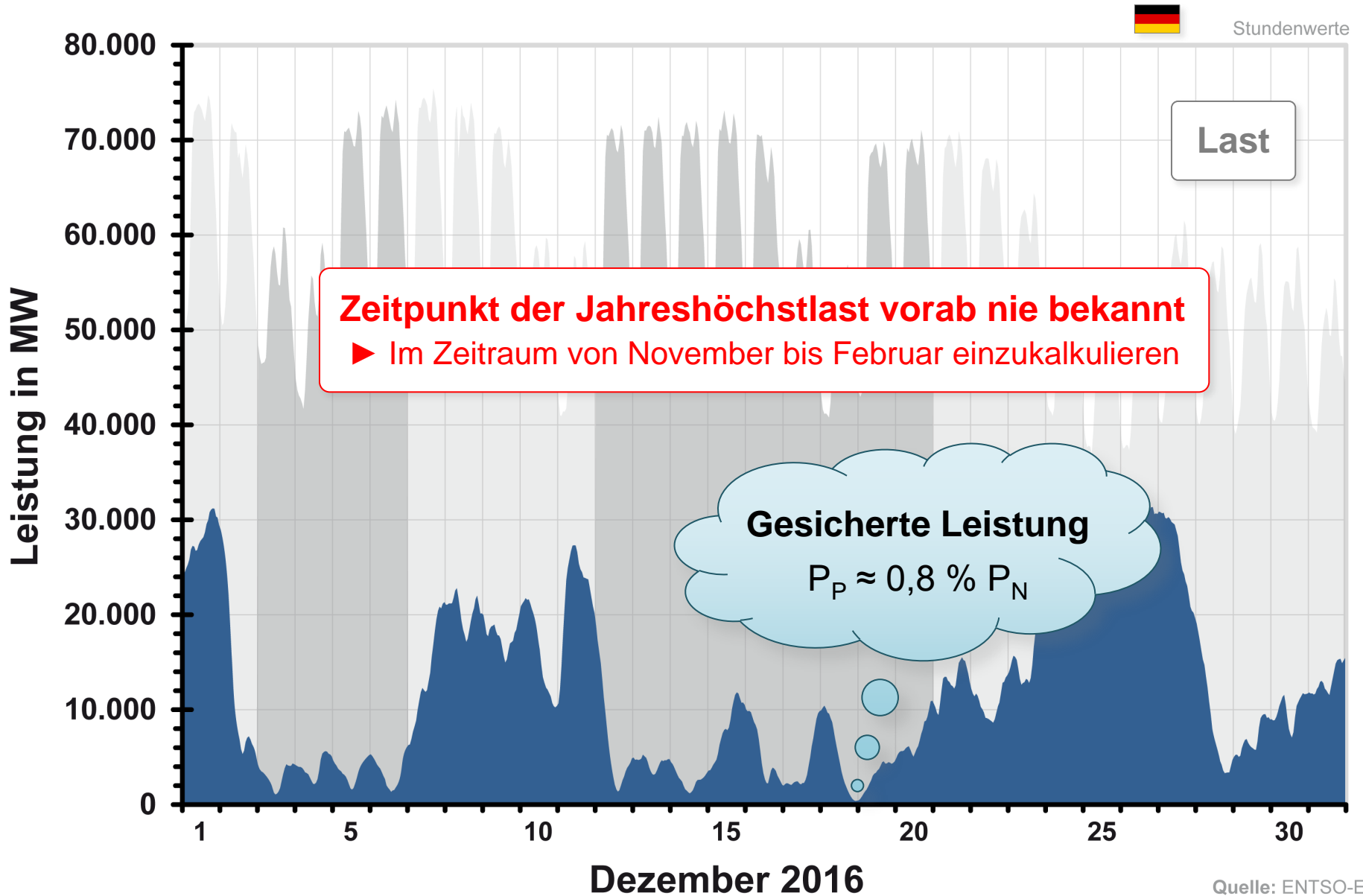
Quelle: ENTSO-E



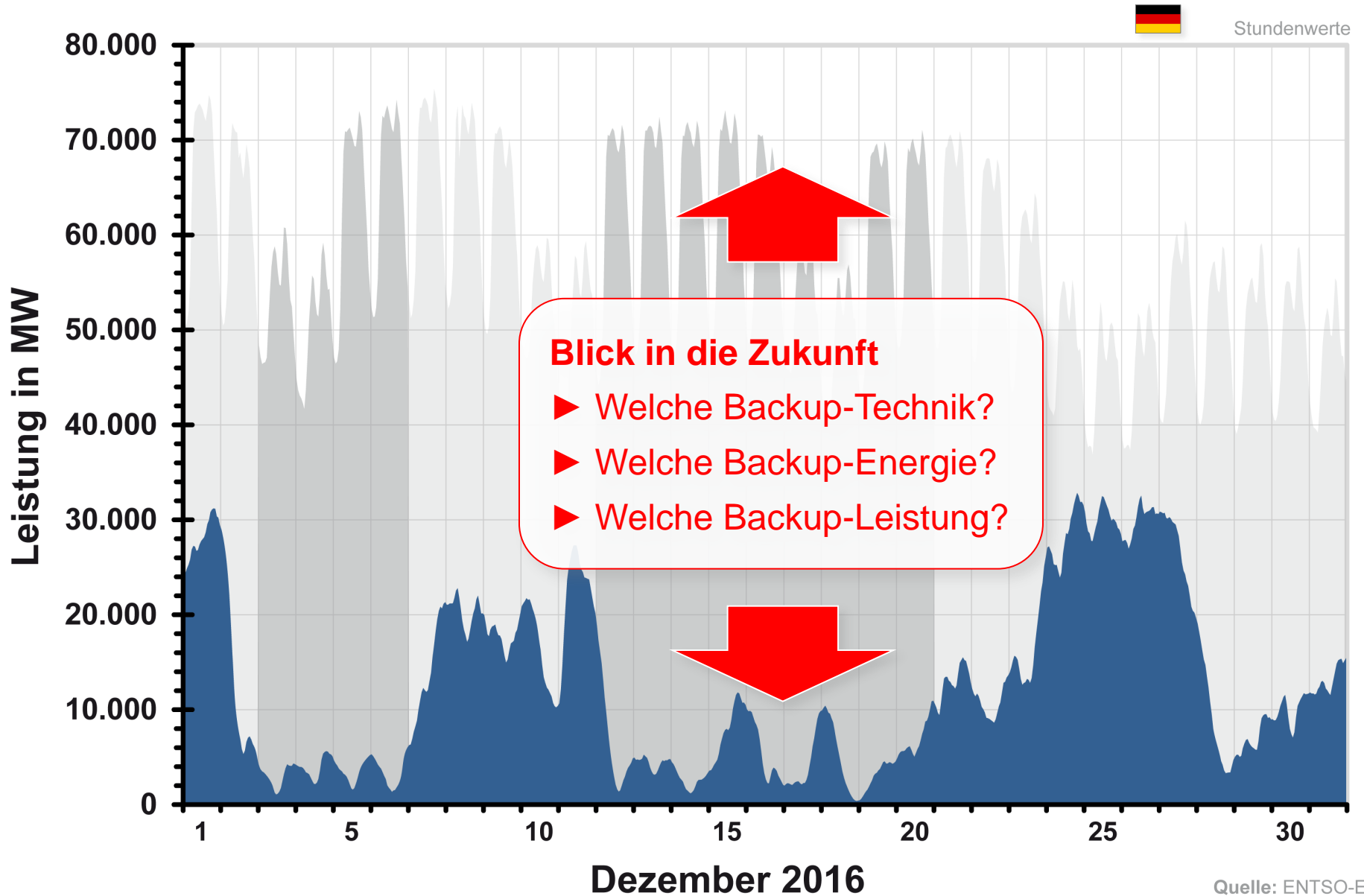


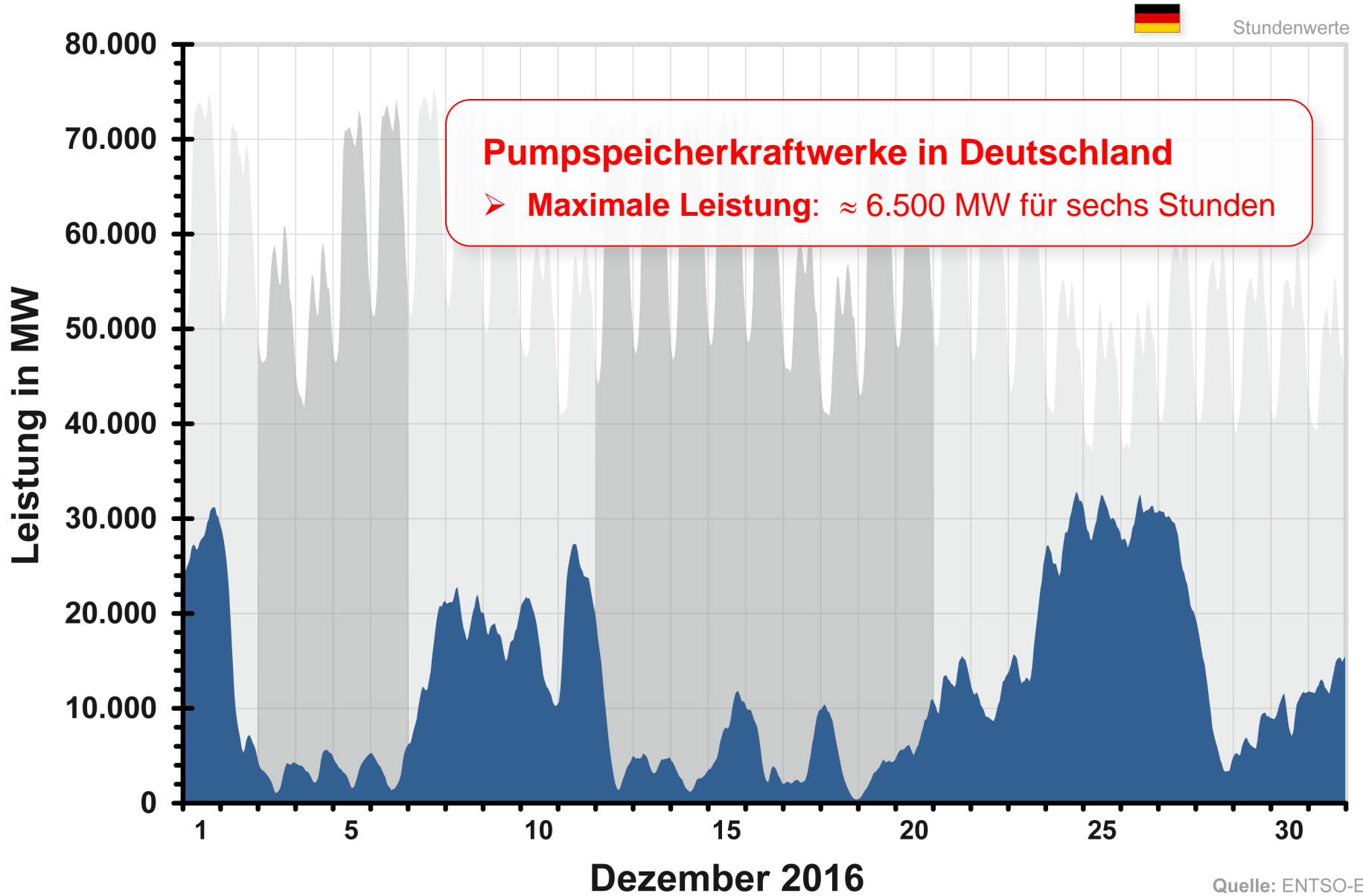


Quelle: ENTSO-E

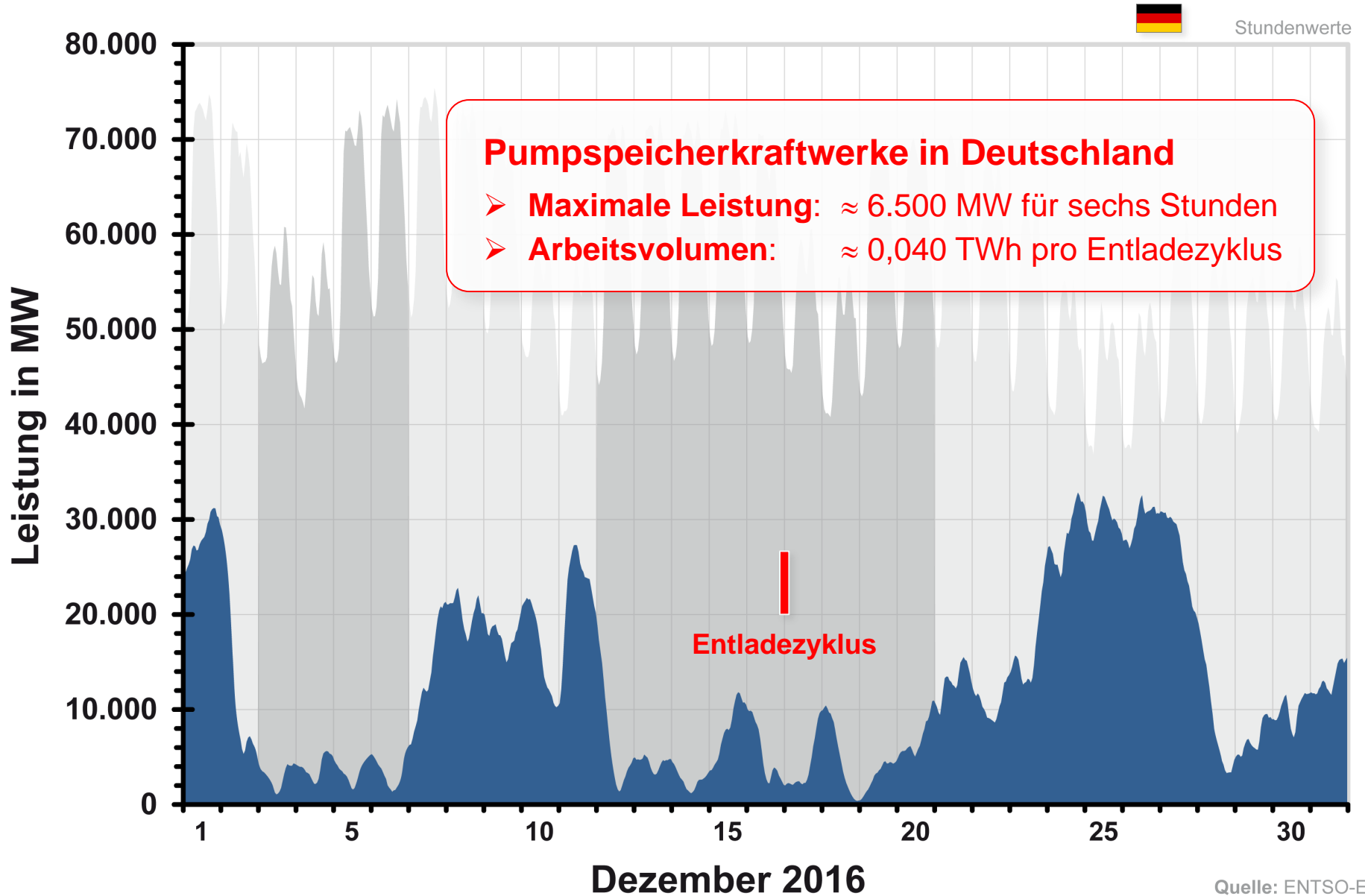


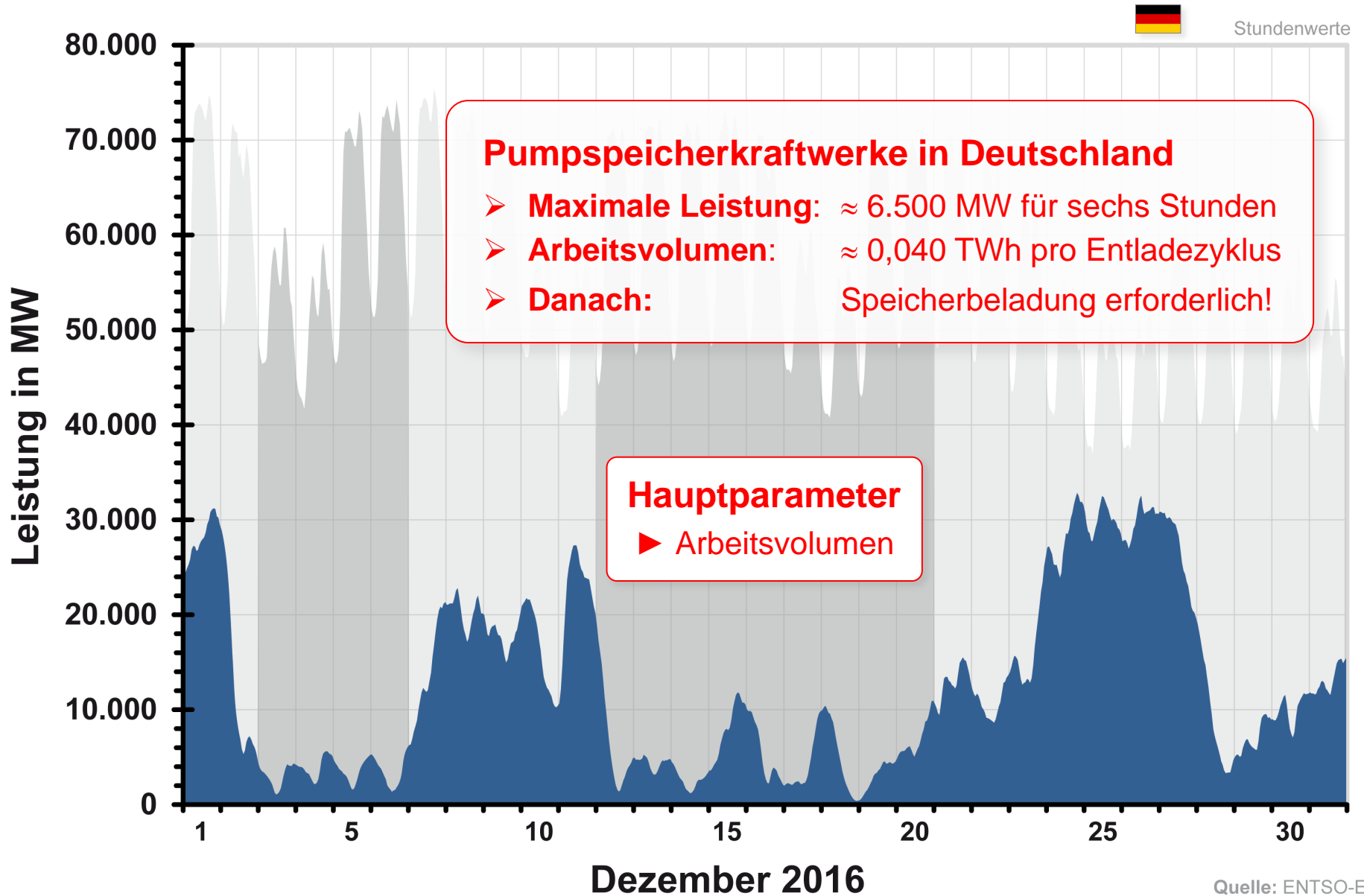
Quelle: ENTSO-E





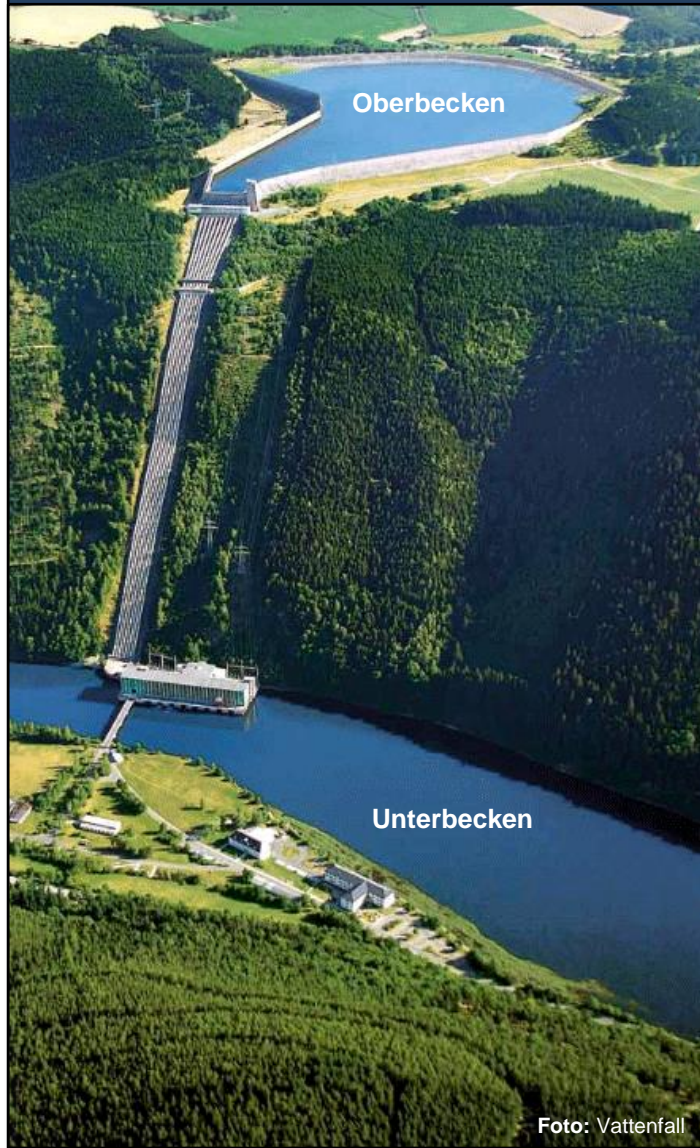
Quelle: ENTSO-E





Quelle: ENTSO-E

Pumpspeicherkraftwerk Hohenwarte II, Thüringen



## Herausforderungen der Energiespeicherung

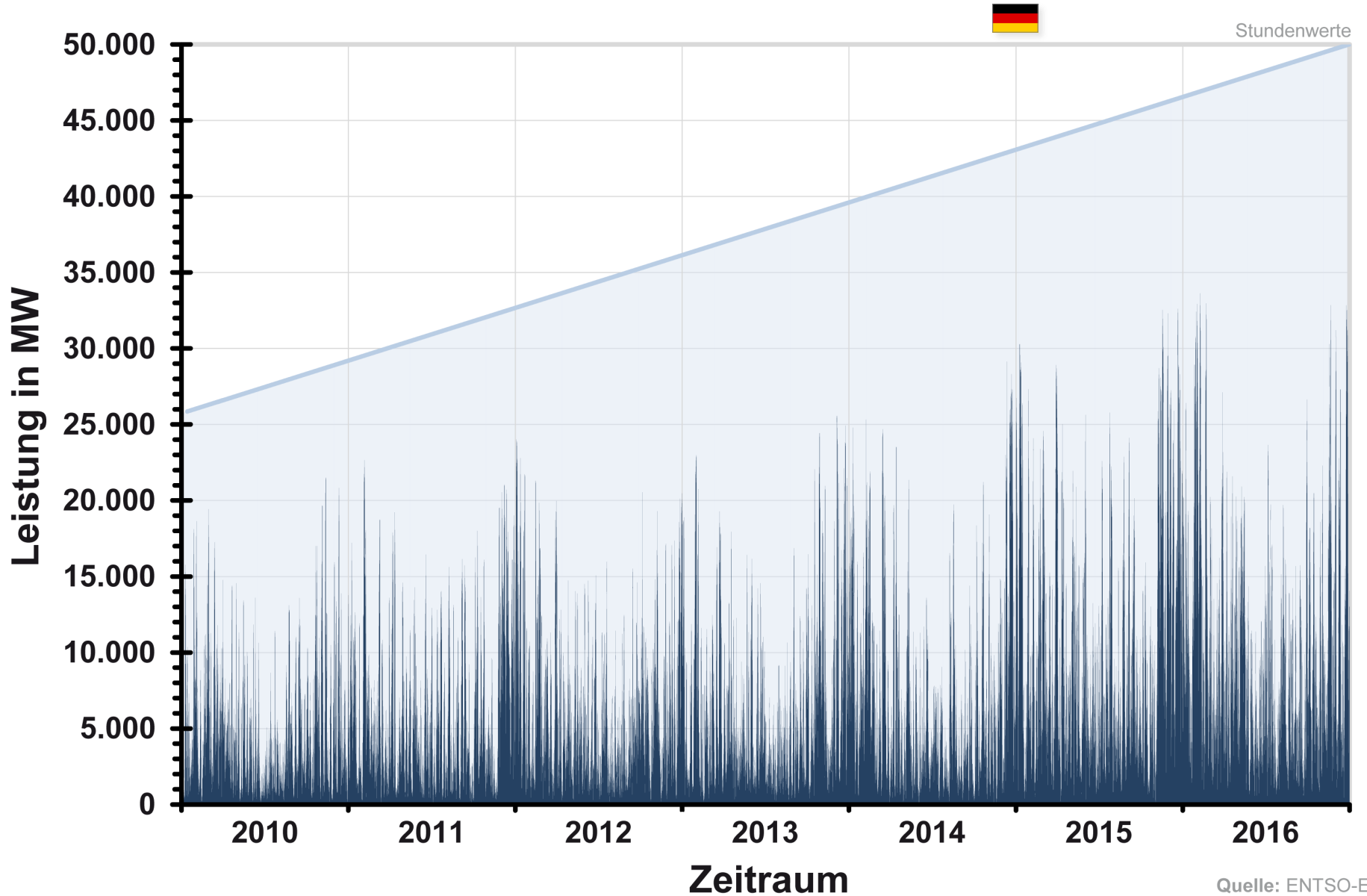
- Zweiwöchige Schwachwindphase im Winterhalbjahr
- Durchschnittlicher Tagesstrombedarf: 1,5 TWh
- Gesamtbedarf in zwei Wochen: 21 TWh

## Pumpspeicherkraftwerk Hohenwarte II

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

**Anzahl solcher Pumpspeicherkraftwerke zur Überbrückung einer 14-tägigen Dunkelflaute**

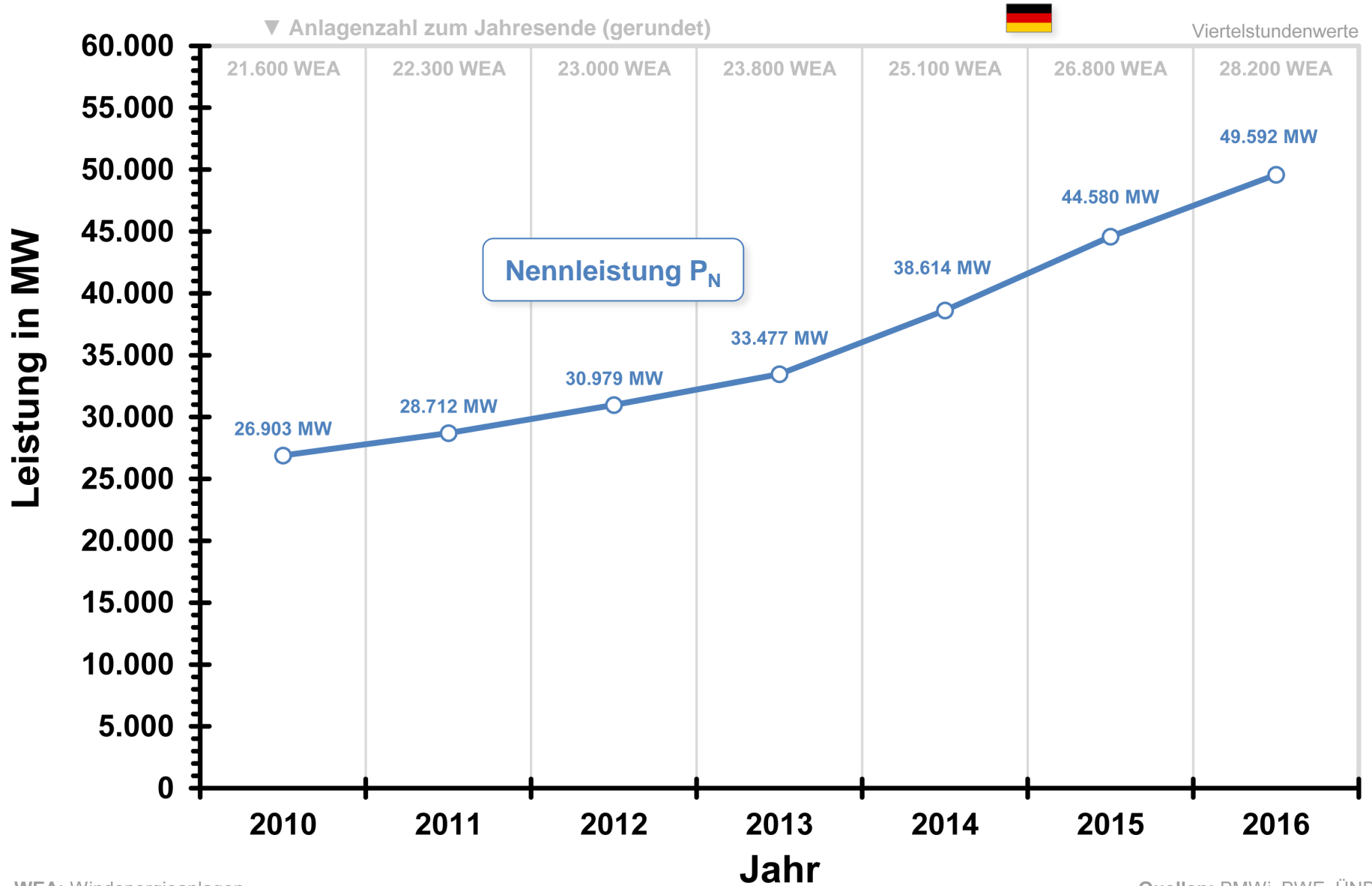
$$n = 21 \text{ TWh} / 0,0021 \text{ TWh} = \underline{\underline{10.000 \text{ Kraftwerke}}}$$



Quelle: ENTSO-E

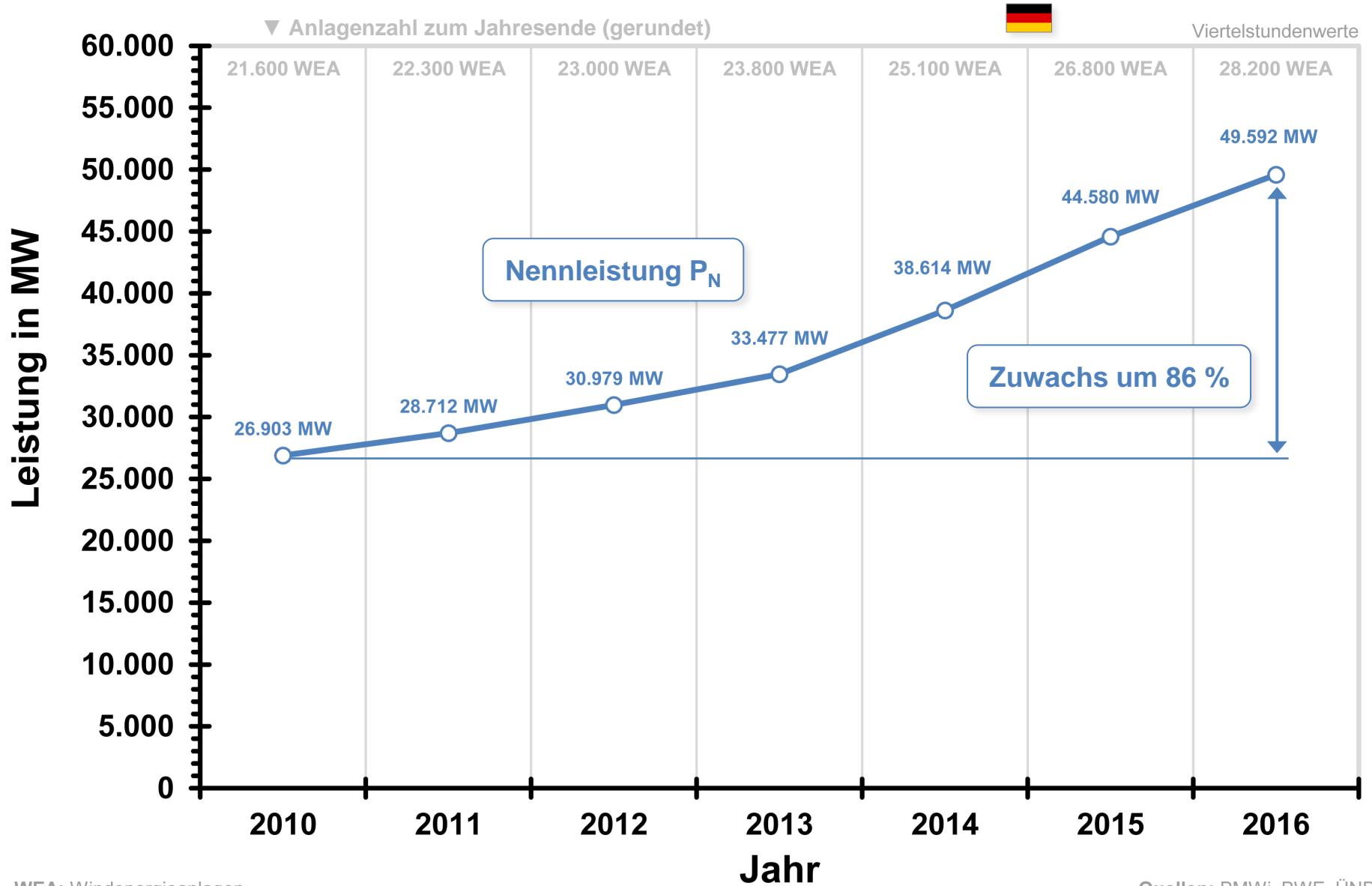


# Deutschland: Windstromproduktion von 2010 bis 2016



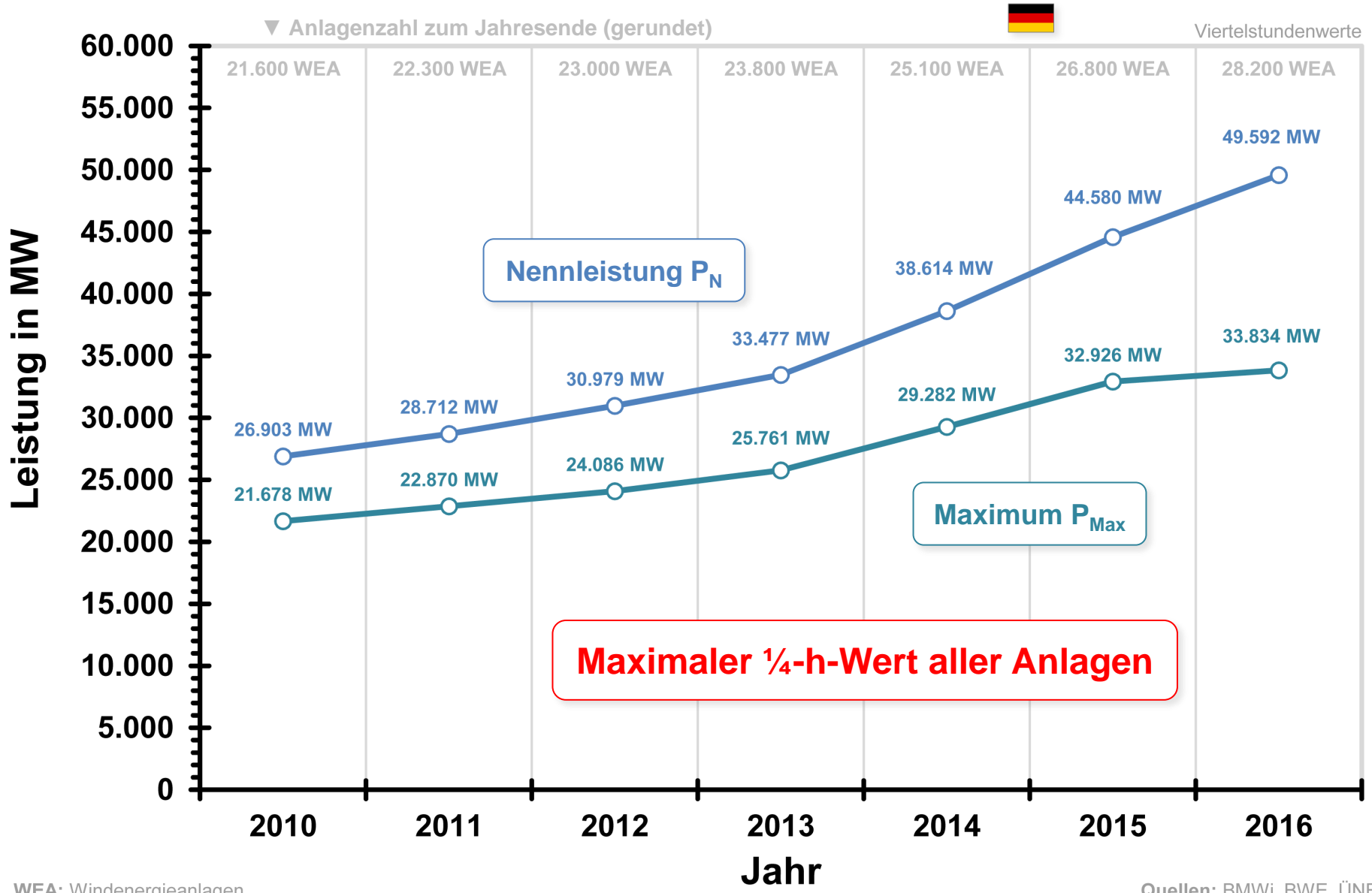
WEA: Windenergieanlagen

Quellen: BMWi, BWE, ÜNB

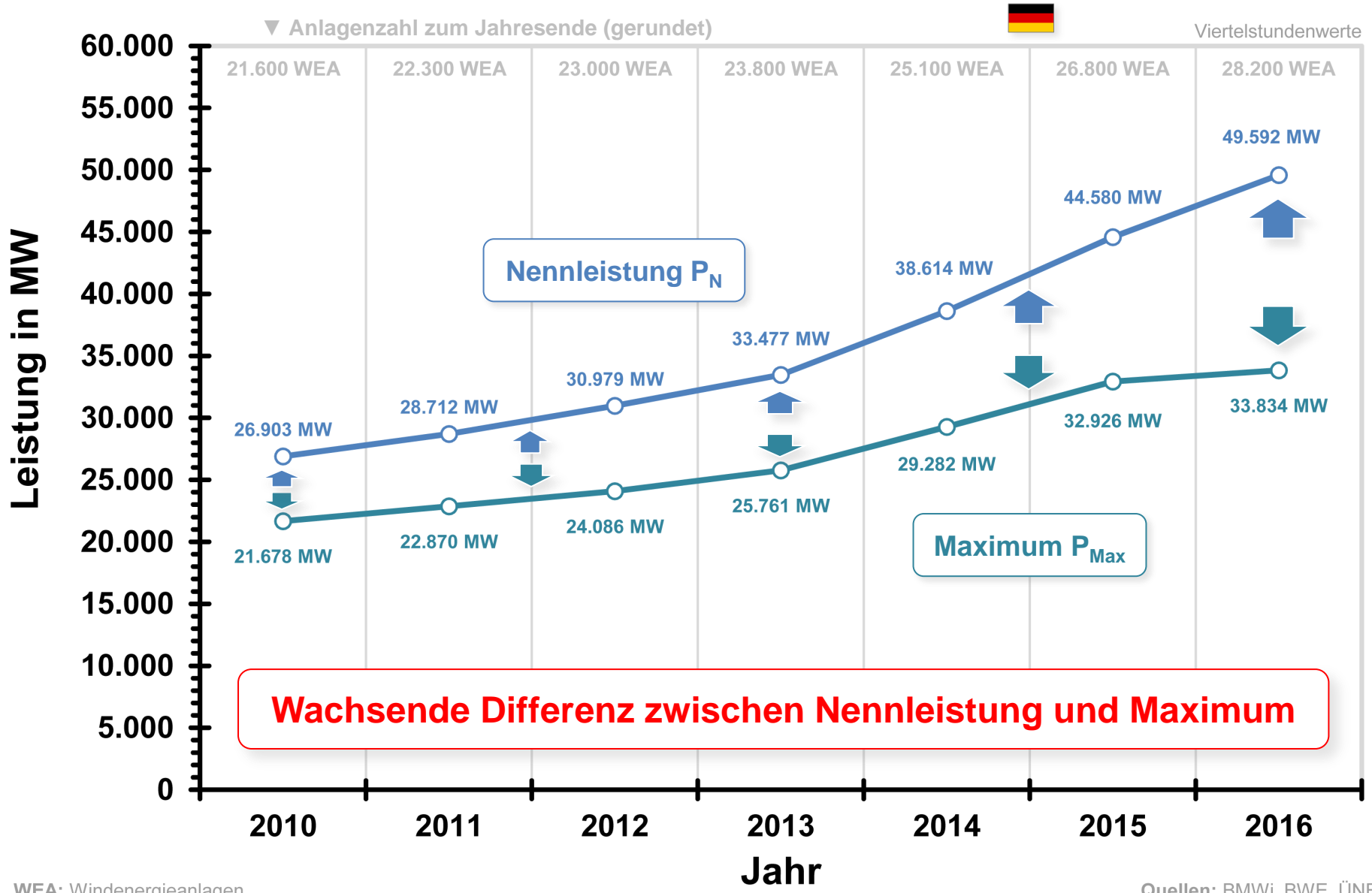


WEA: Windenergieanlagen

Quellen: BMWi, BWE, ÜNB



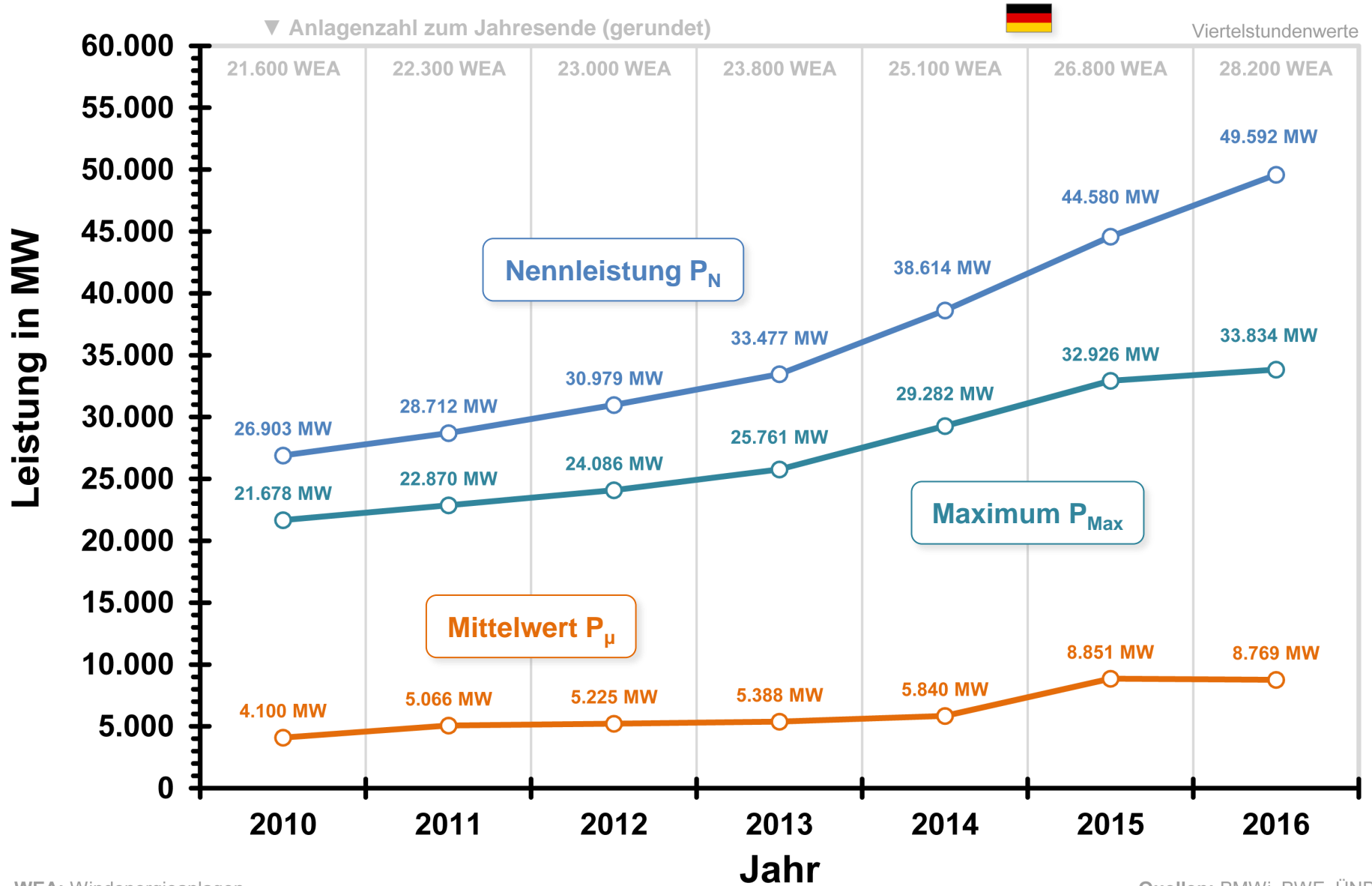
WEA: Windenergieanlagen



WEA: Windenergieanlagen

Quellen: BMWi, BWE, ÜNB

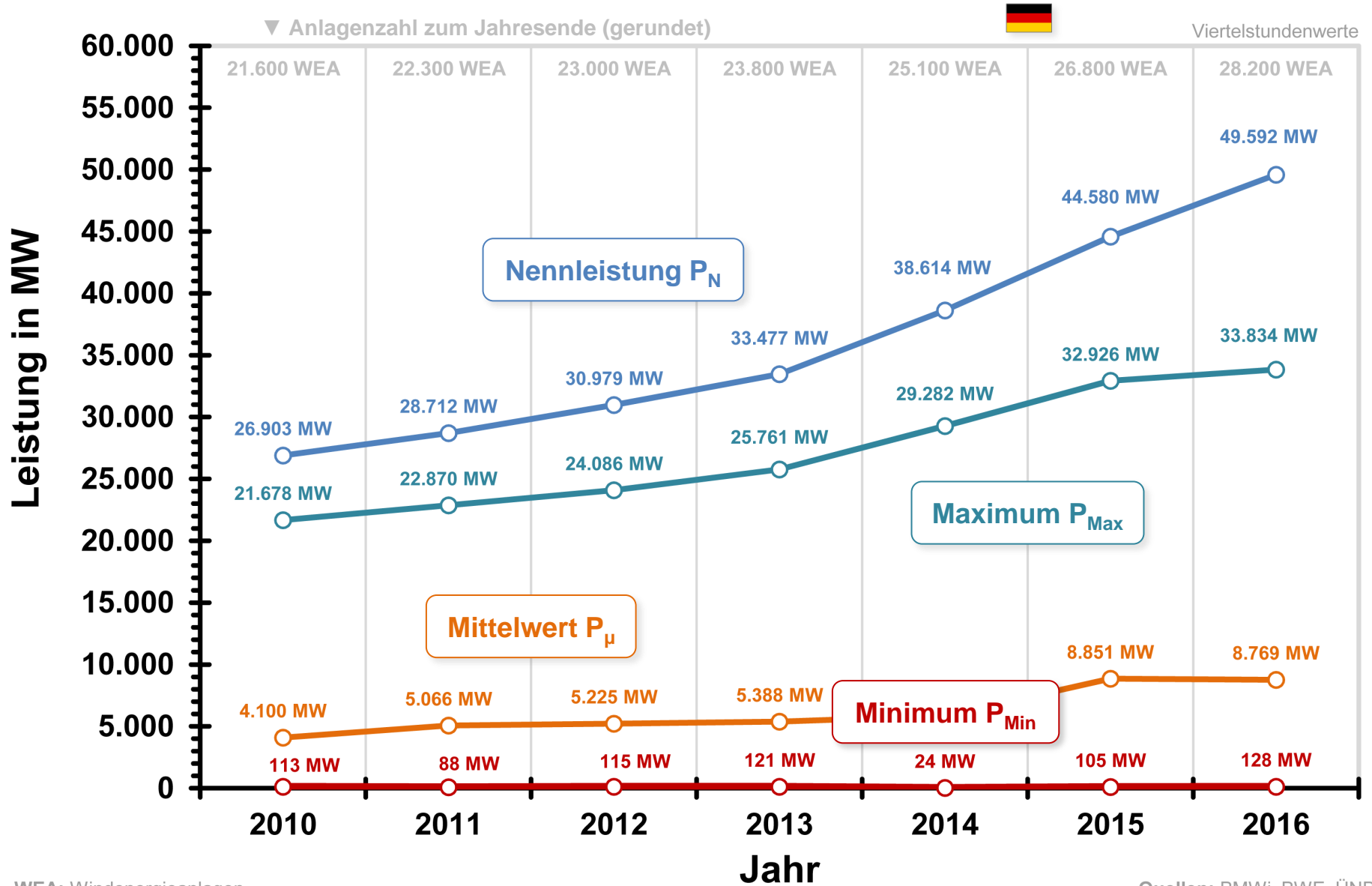
# Deutschland: Windstromproduktion von 2010 bis 2016



WEA: Windenergieanlagen

Quellen: BMWi, BWE, ÜNB

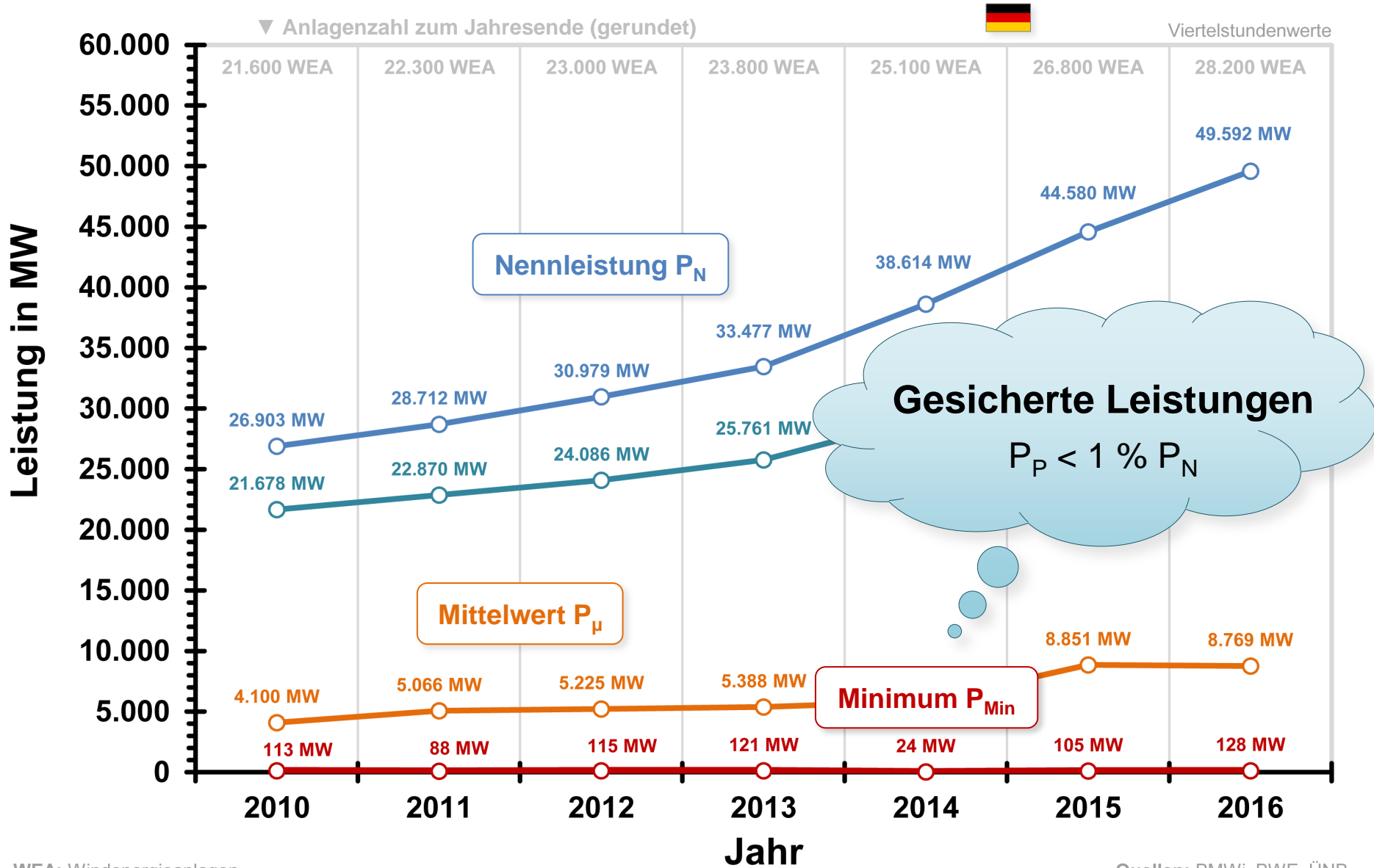
# Deutschland: Windstromproduktion von 2010 bis 2016



WEA: Windenergieanlagen

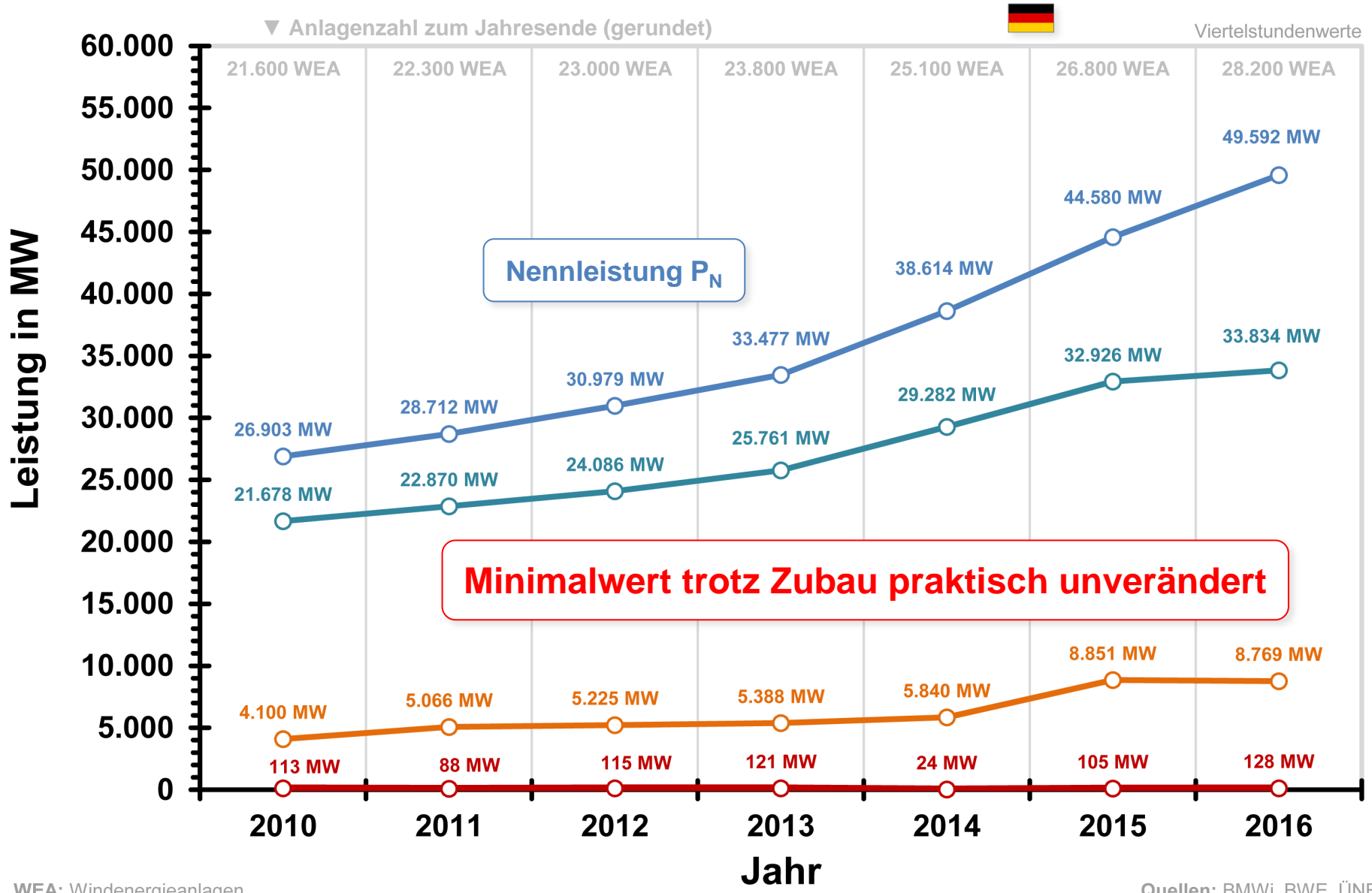
Quellen: BMWi, BWE, ÜNB

# Deutschland: Windstromproduktion von 2010 bis 2016



WEA: Windenergieanlagen

Quellen: BMWi, BWE, ÜNB

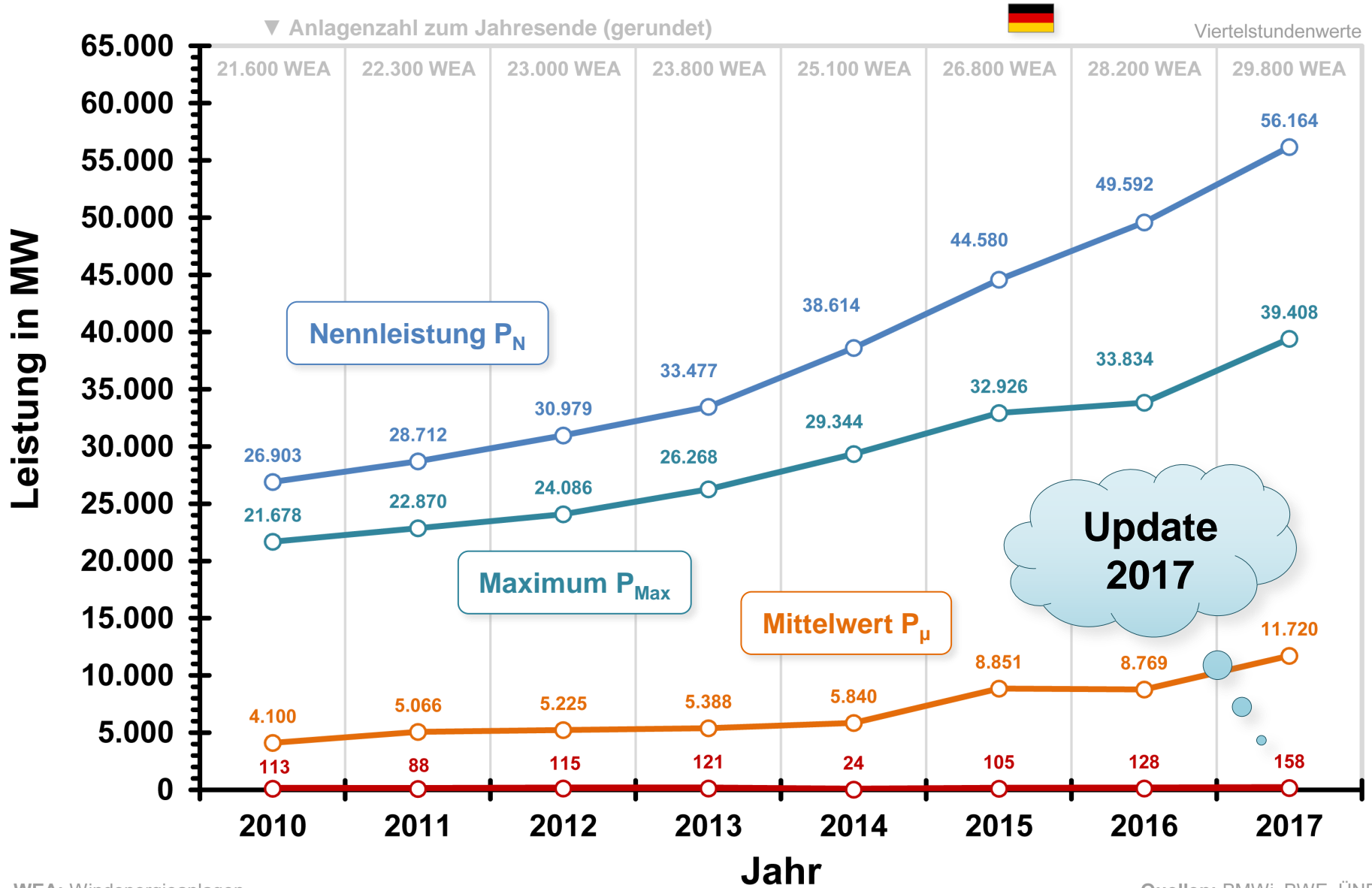


WEA: Windenergieanlagen

Quellen: BMWi, BWE, ÜNB



# Deutschland: Windstromproduktion von 2010 bis 2017



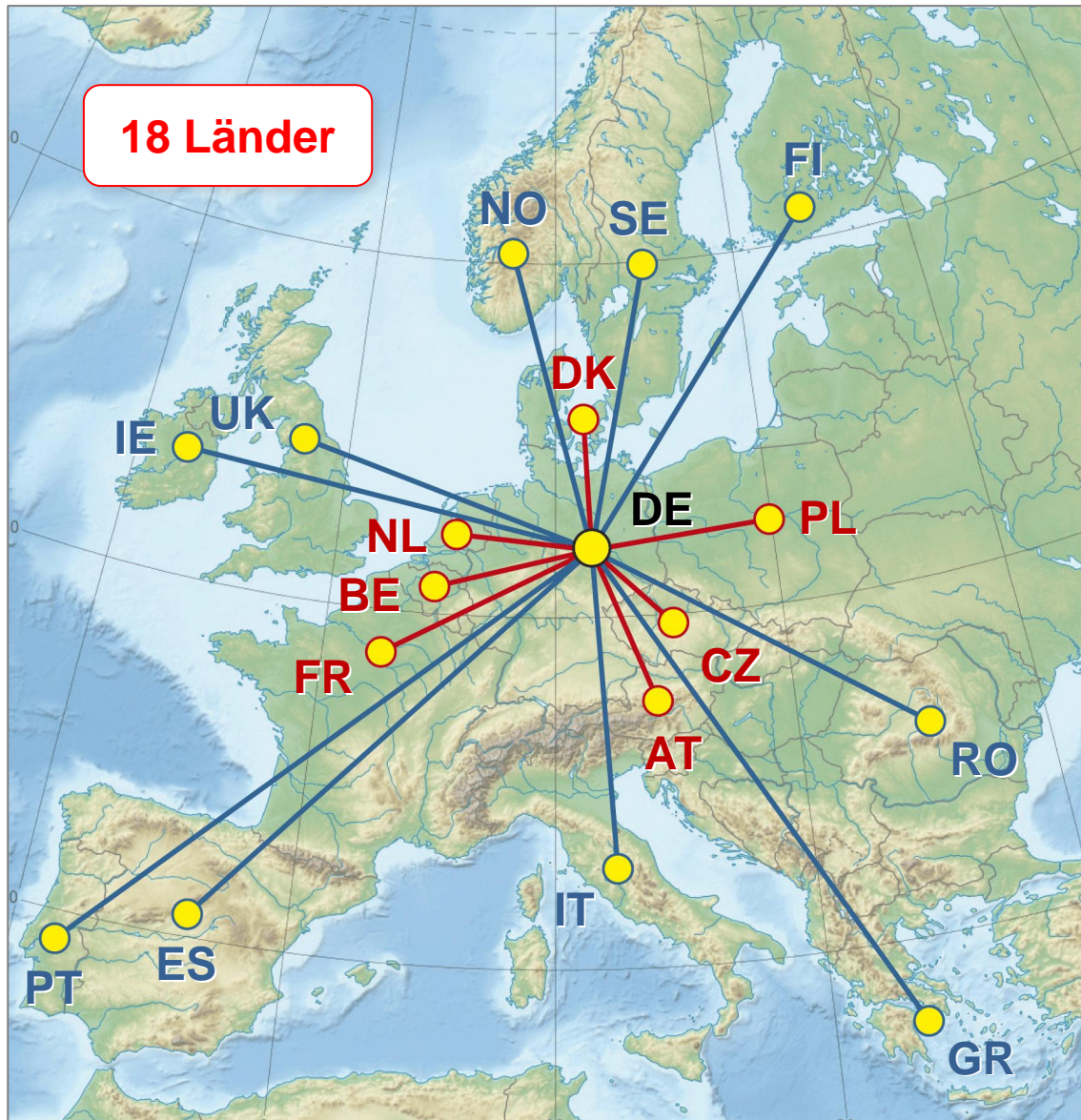
WEA: Windenergieanlagen

Quellen: BMWi, BWE, ÜNB

## Zwischenfazit

- Nennleistung seit 2010 auf  $\approx 50$  GW nahezu verdoppelt
- Windstromproduktion auf  $\approx 80$  TWh mehr als verdoppelt
- Minimalleistung ( $\frac{1}{4}$ -h-Wert) seit 2010 nahezu unverändert
  - 1.) Technik ▶ Schwachlastfähigkeit moderner 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

**Kann Europa helfen?**



- 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

## Teil 2 – Europäische Situation im Jahr 2016

- **Windstromproduktion der 18 Länder**
- **Typische Windverhältnisse in Europa**
- **Räumliche Korrelationskoeffizienten**
  - Nachbarländer Deutschlands
  - Möglichst weit entfernte Länder
  - Null- und Negativkorrelationen
- **Intuitiv erwartete und reale Glättungseffekte**
- **Windstromproduktion versus Verbraucherlast**
  - Europa
  - Europa versus Deutschland
- **Erkenntnisse, Fazit und Ausblick**

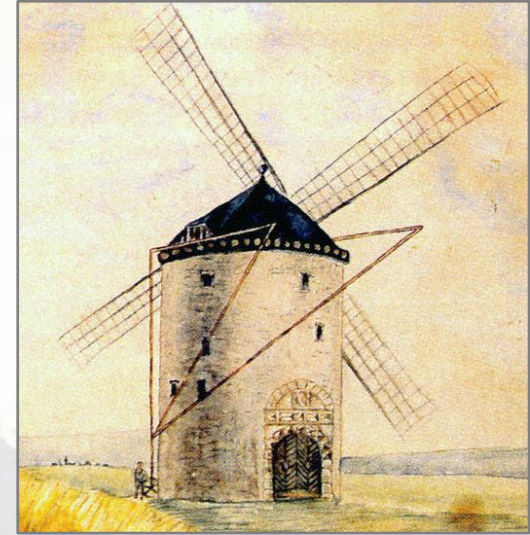
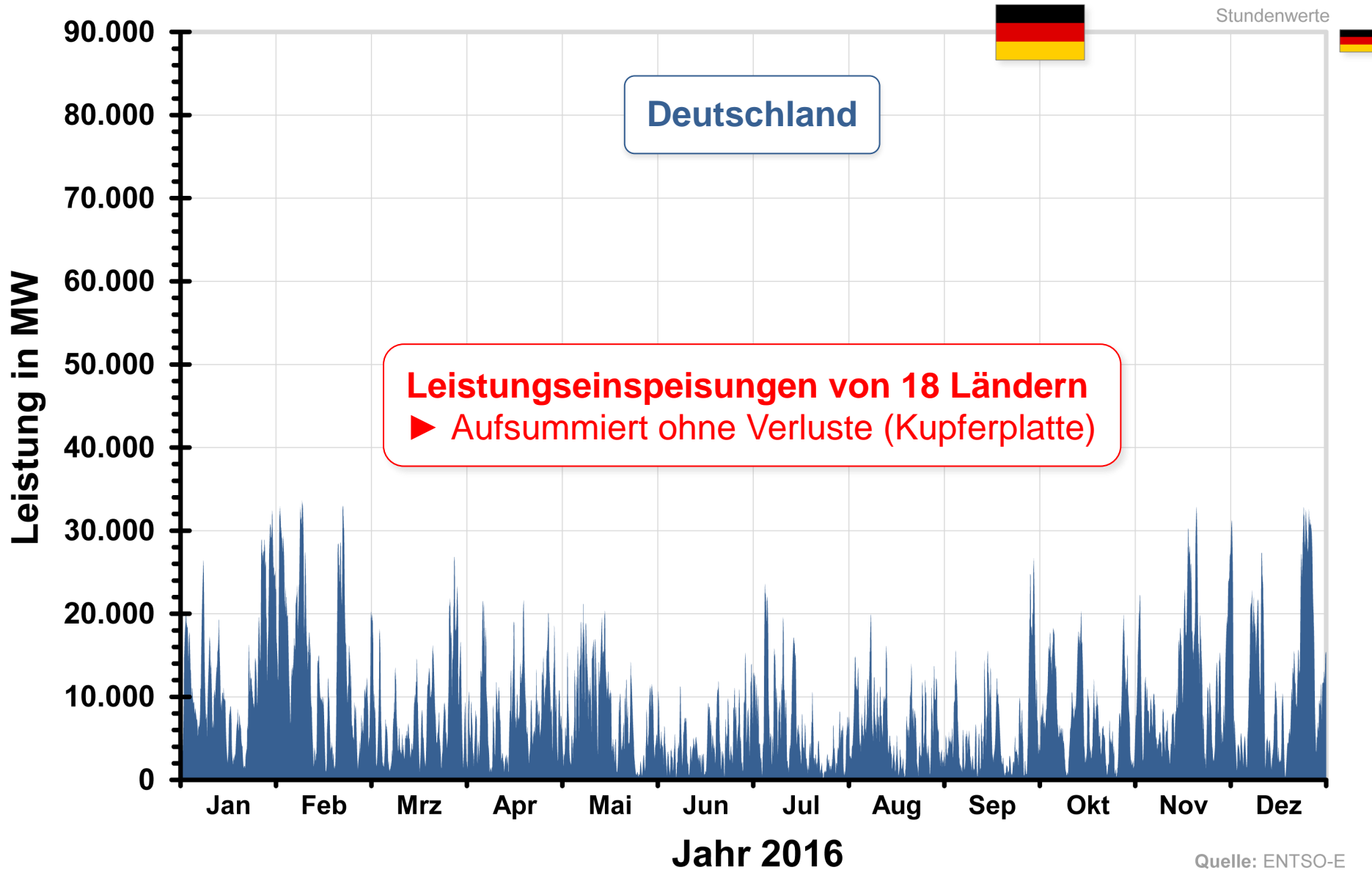
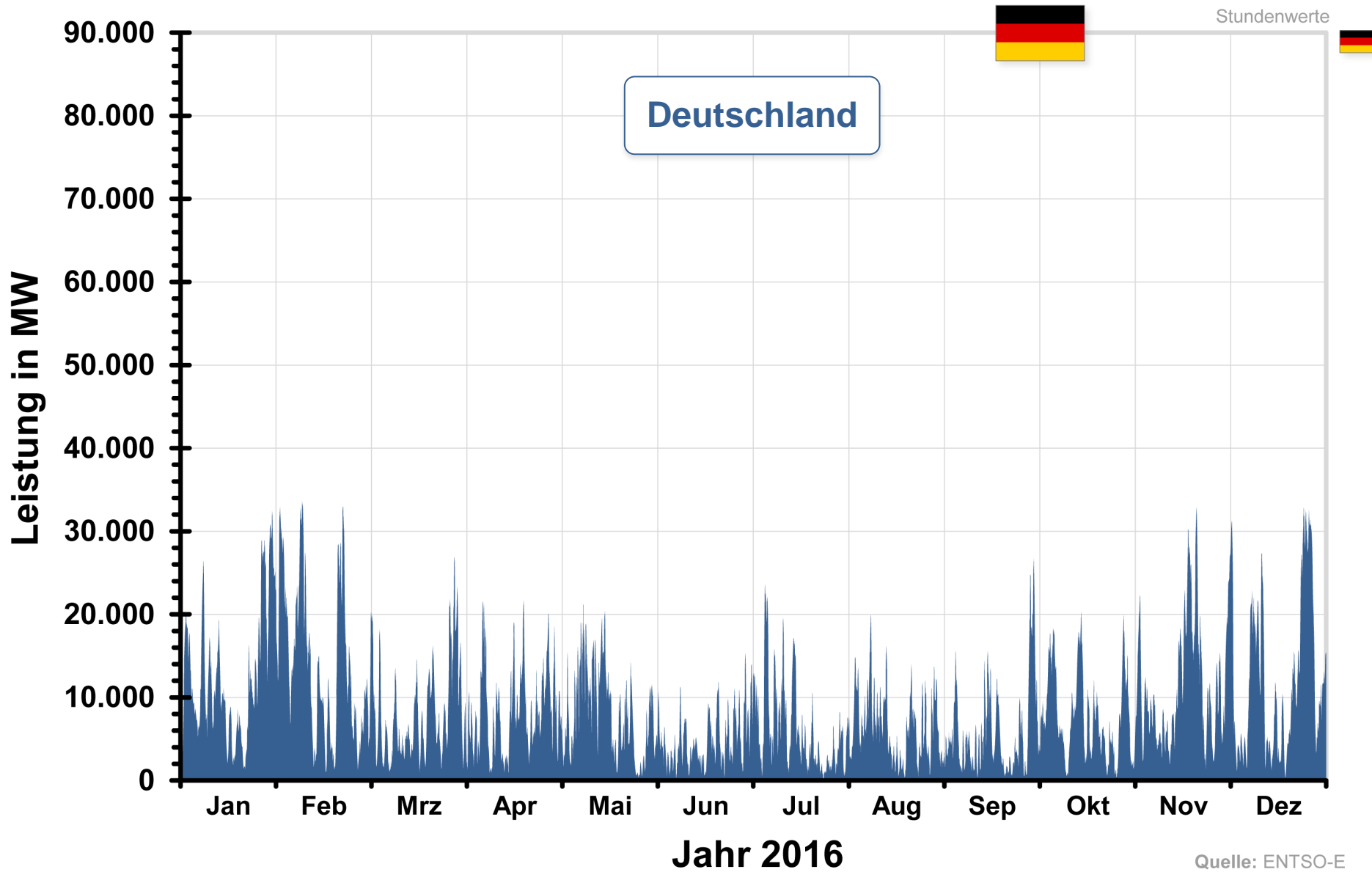


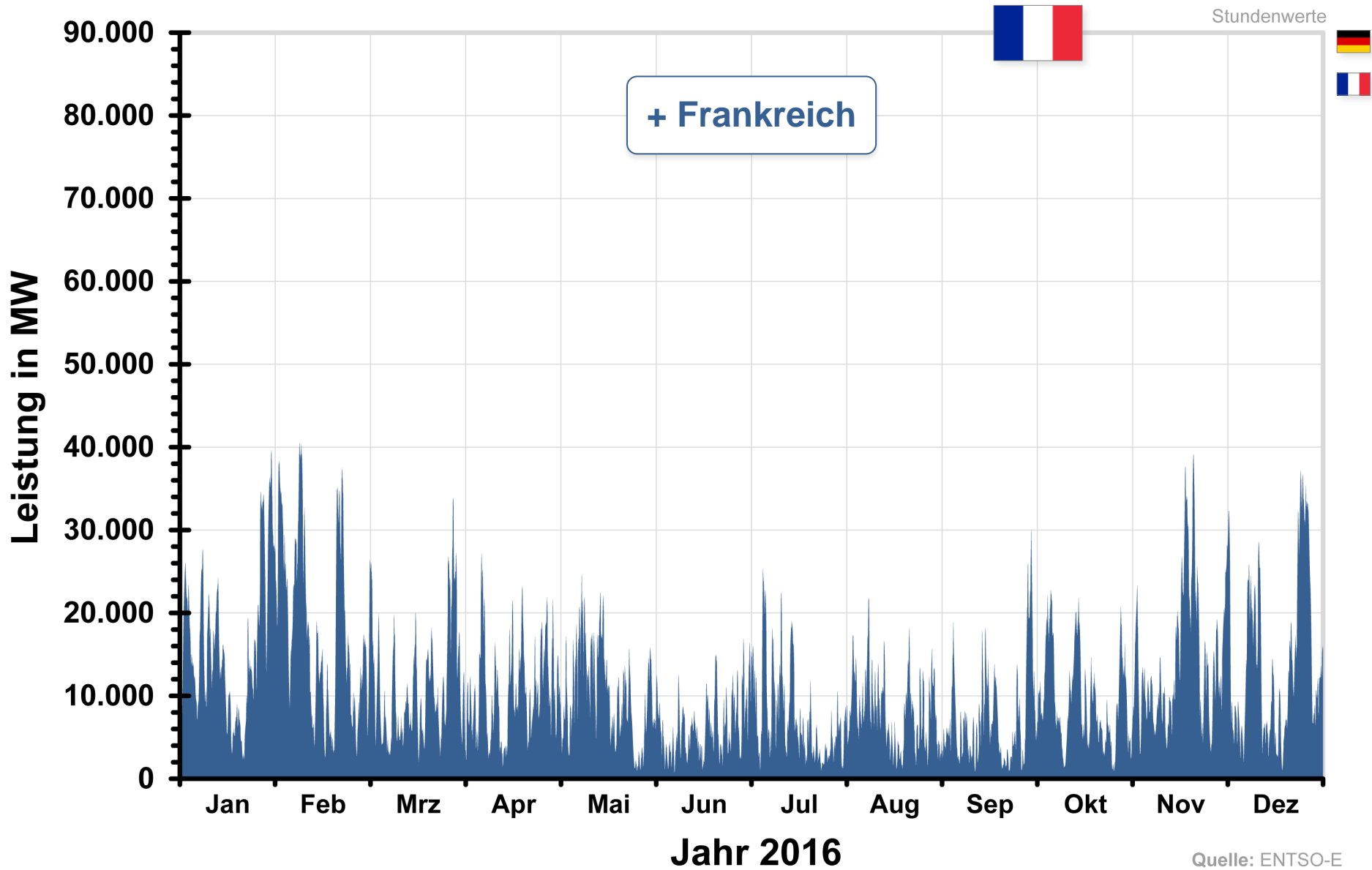
Illustration: [www.kultur-denkmal-merzenich.de](http://www.kultur-denkmal-merzenich.de)

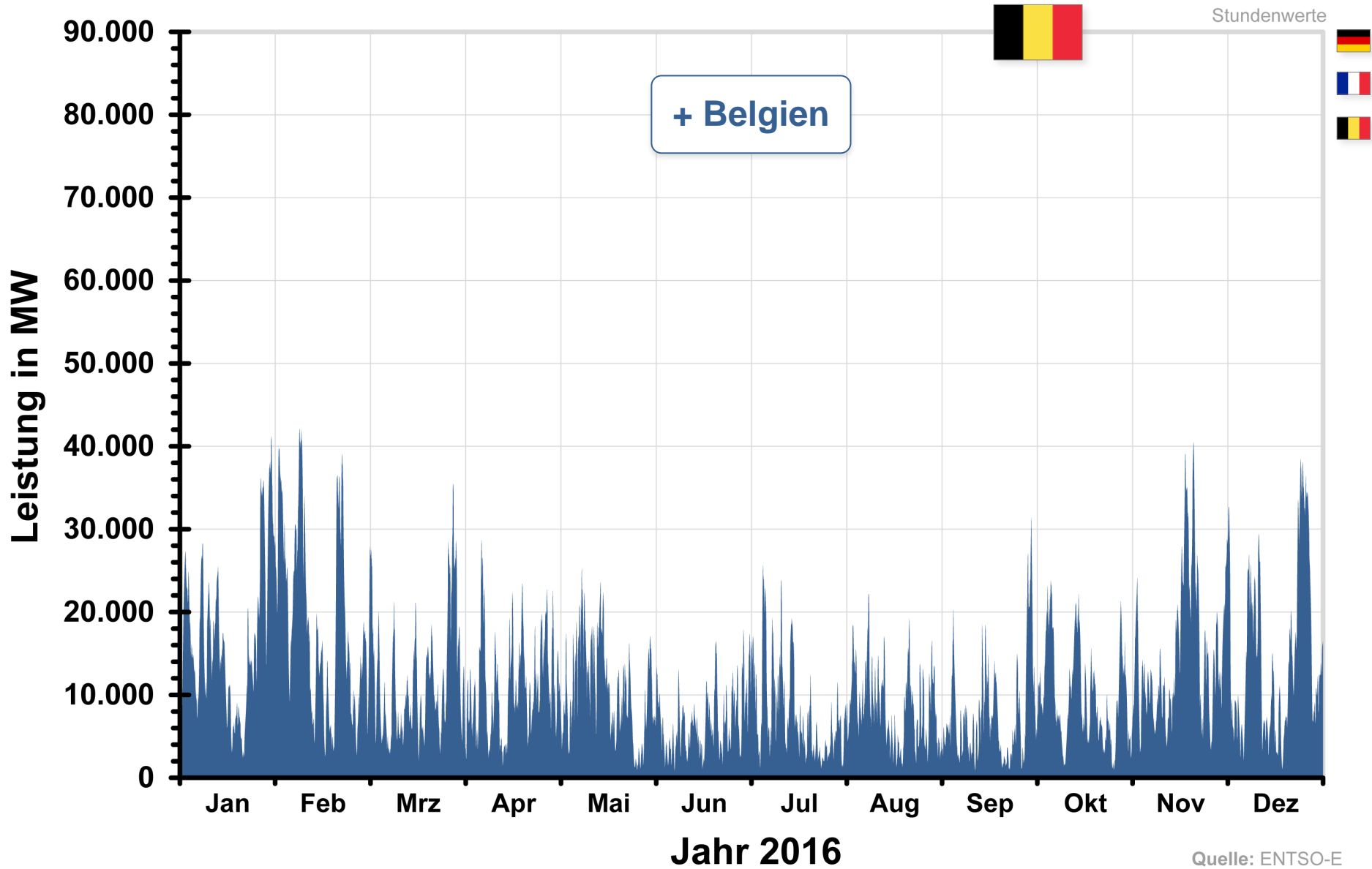




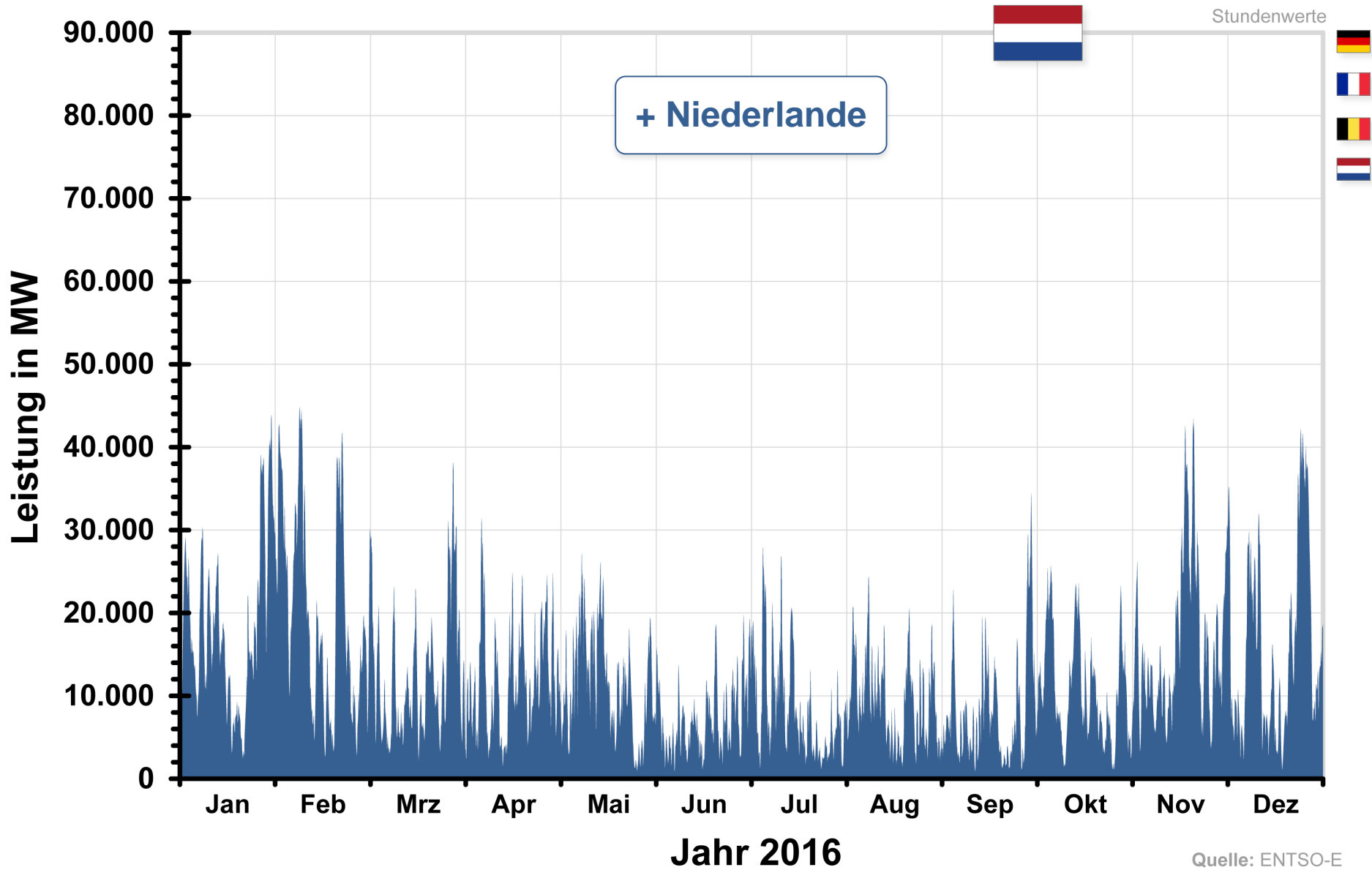


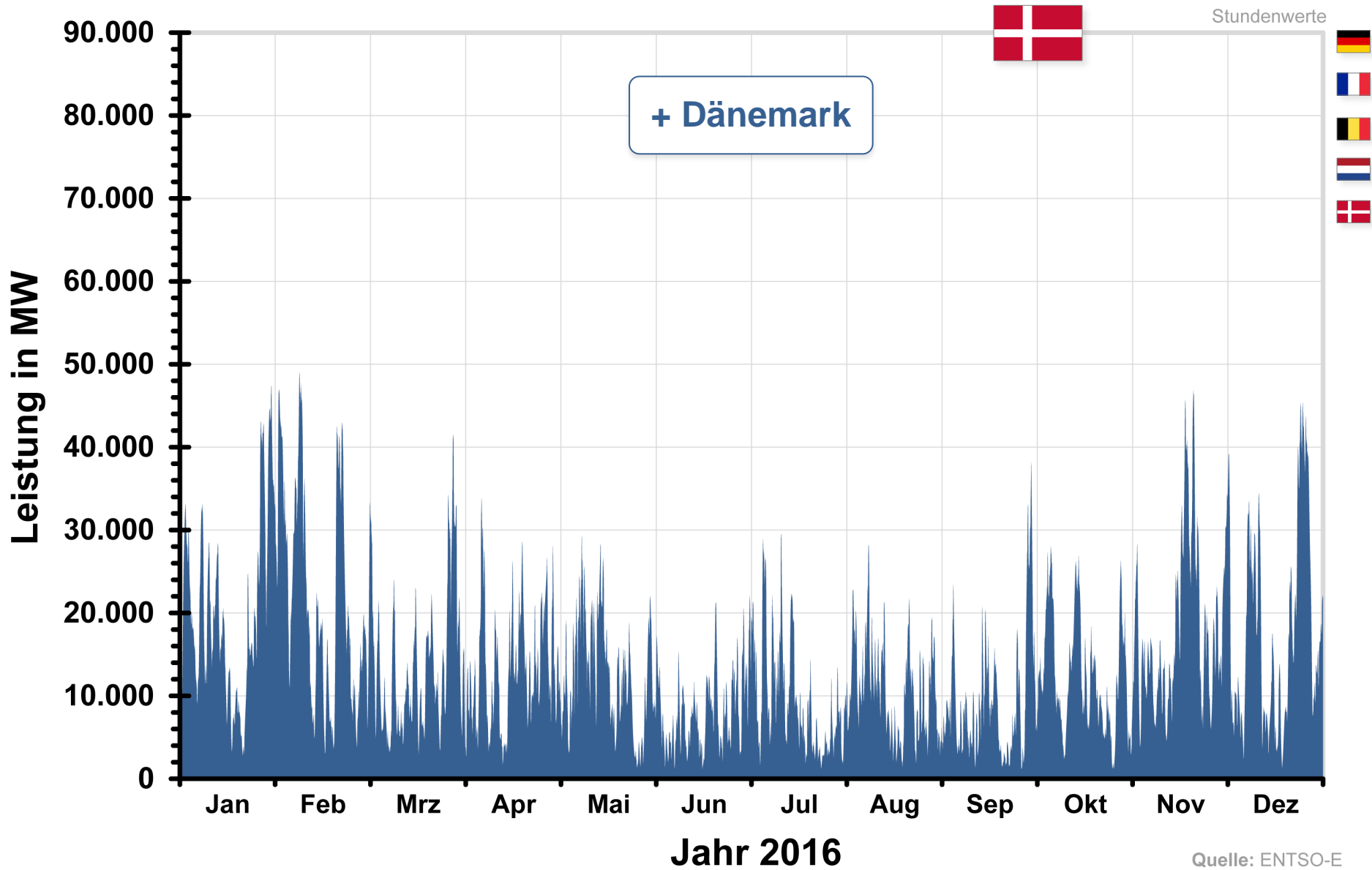
Quelle: ENTSO-E

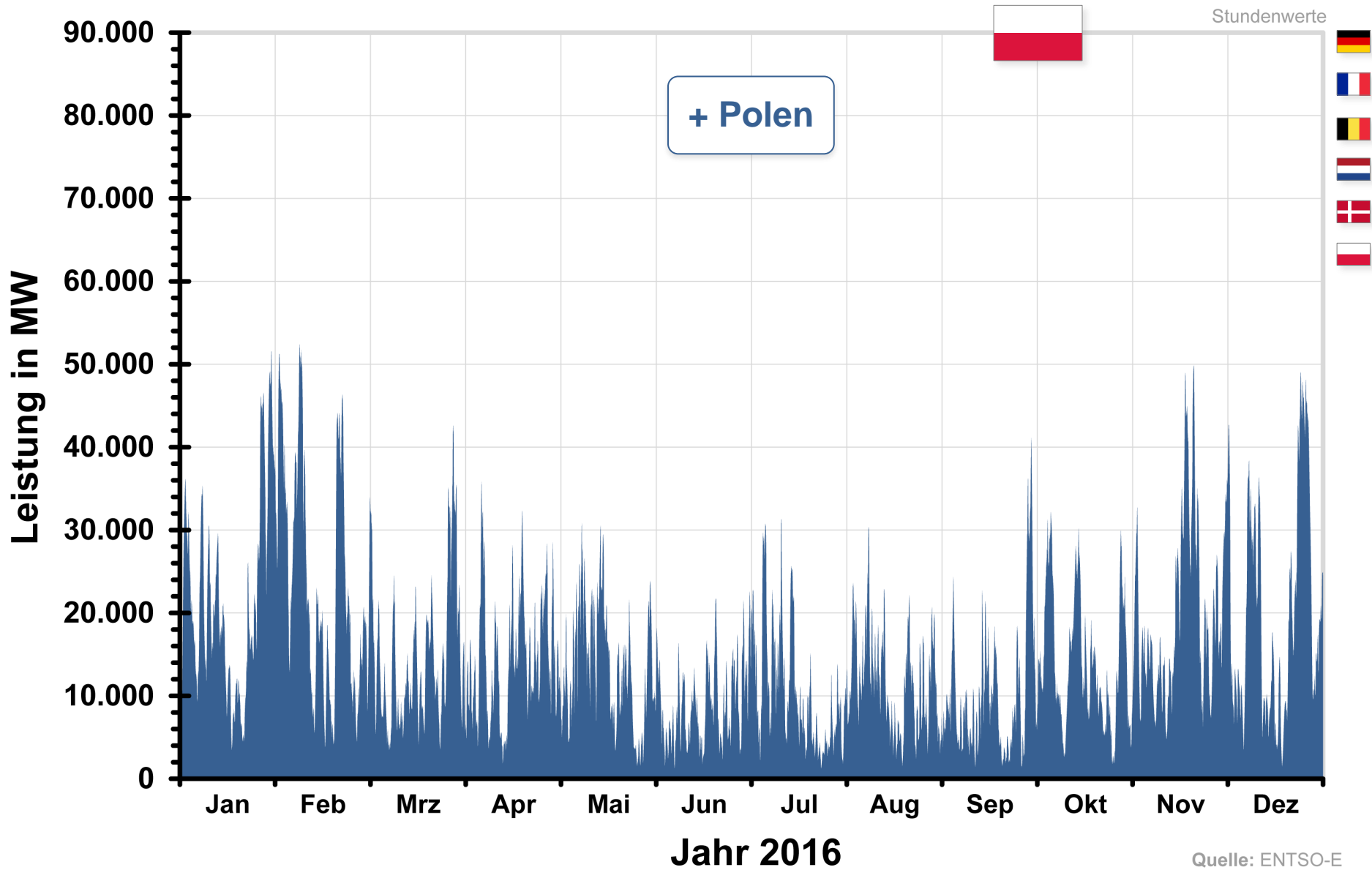


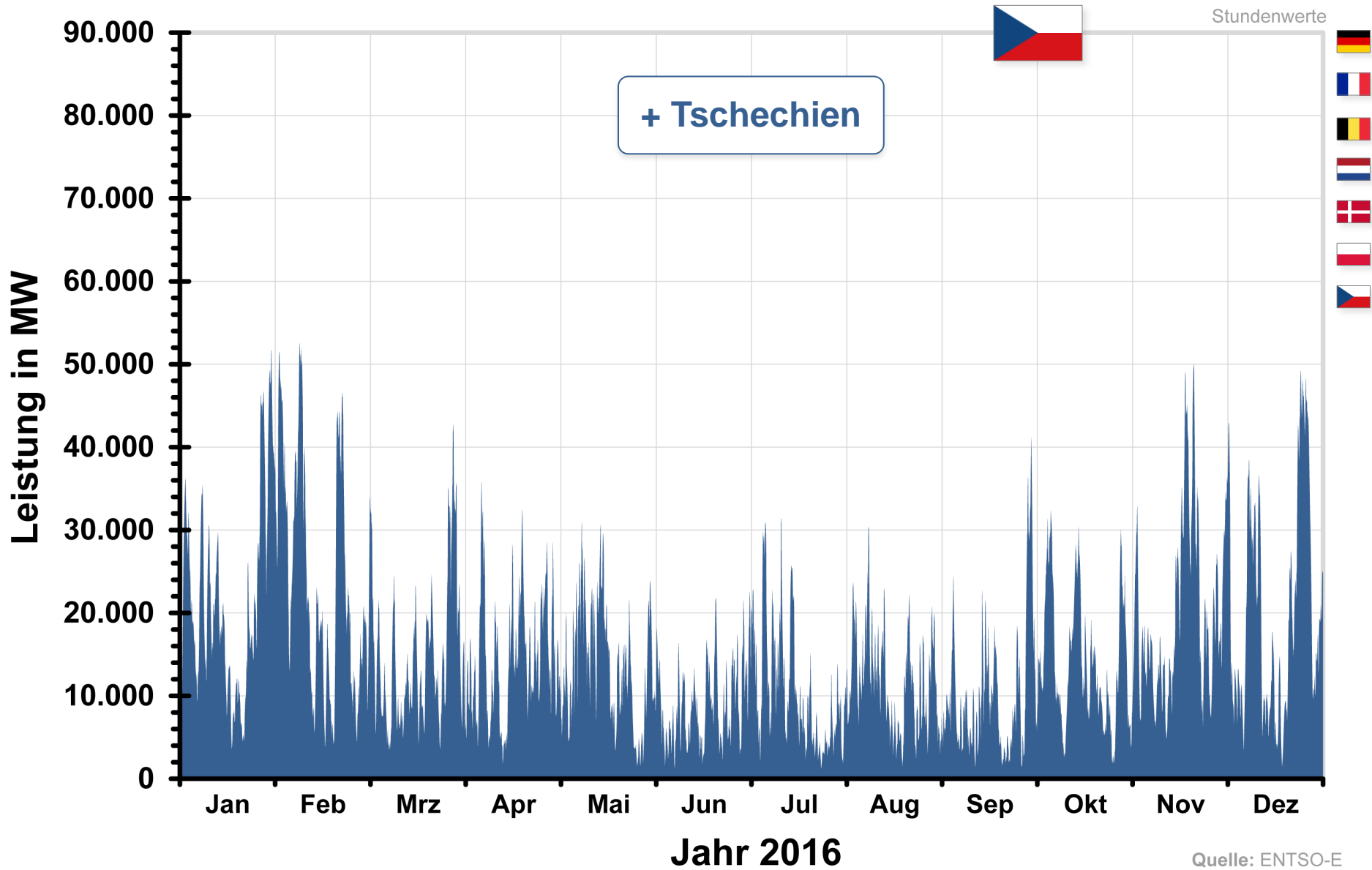


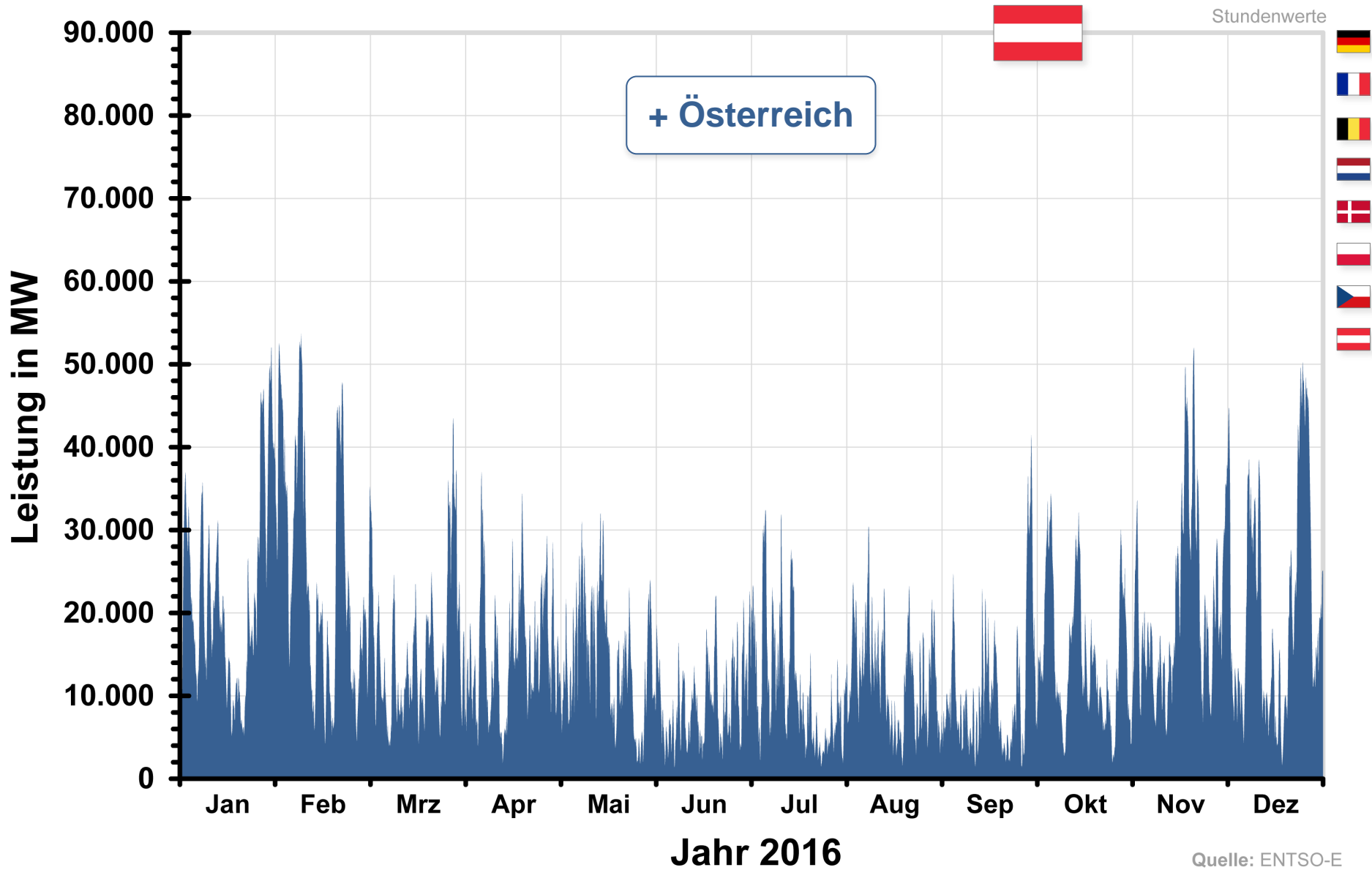


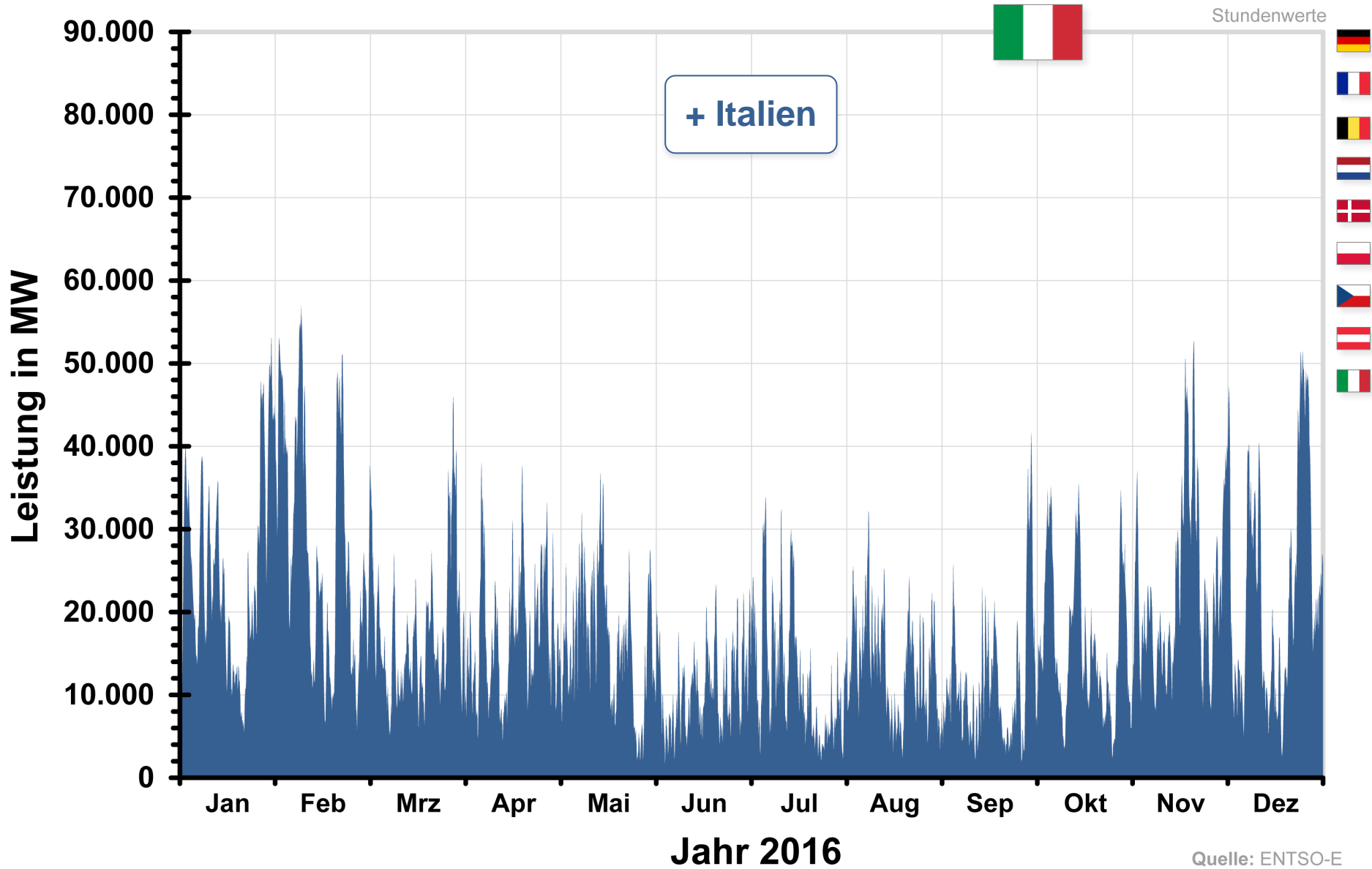




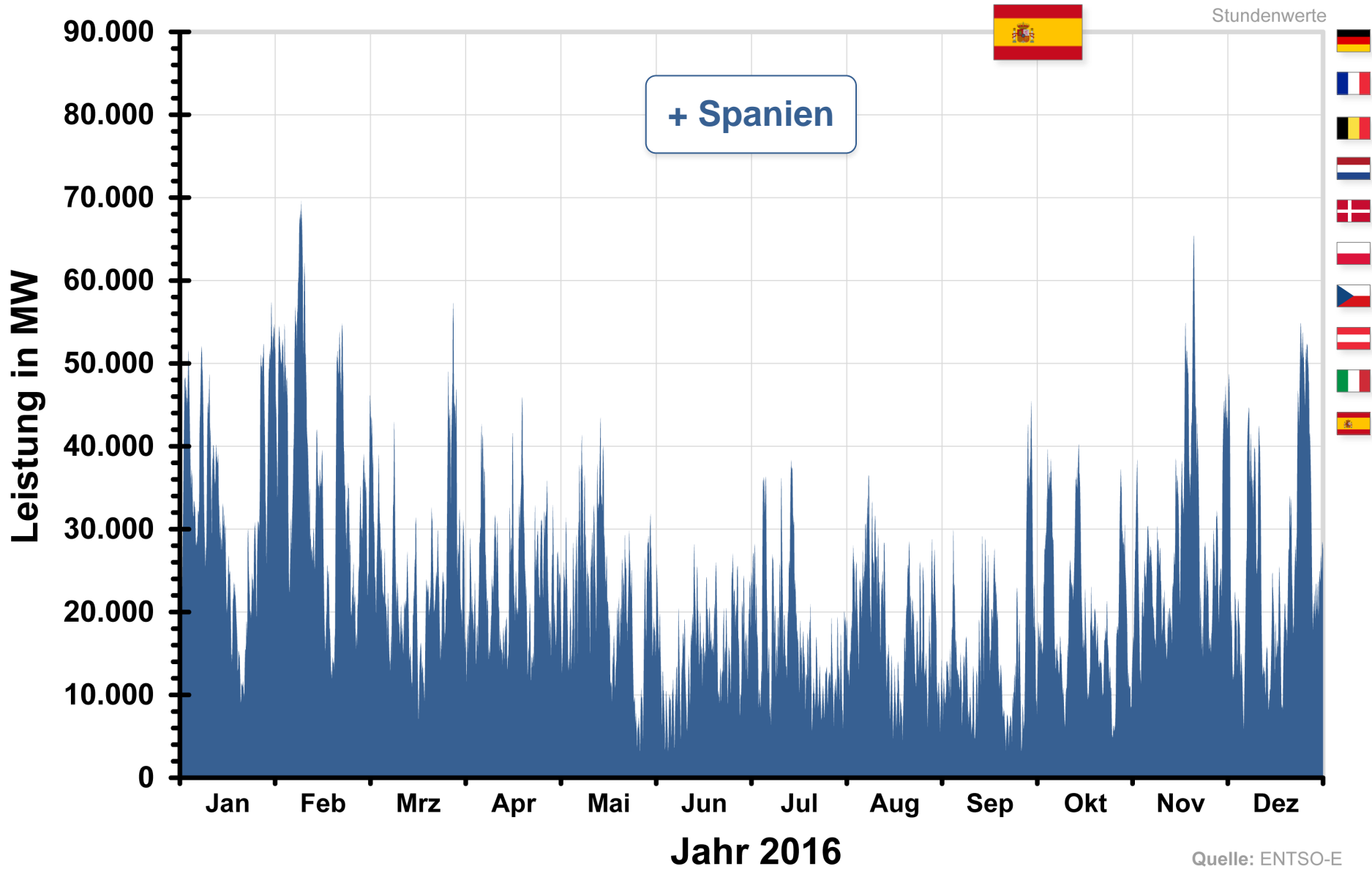


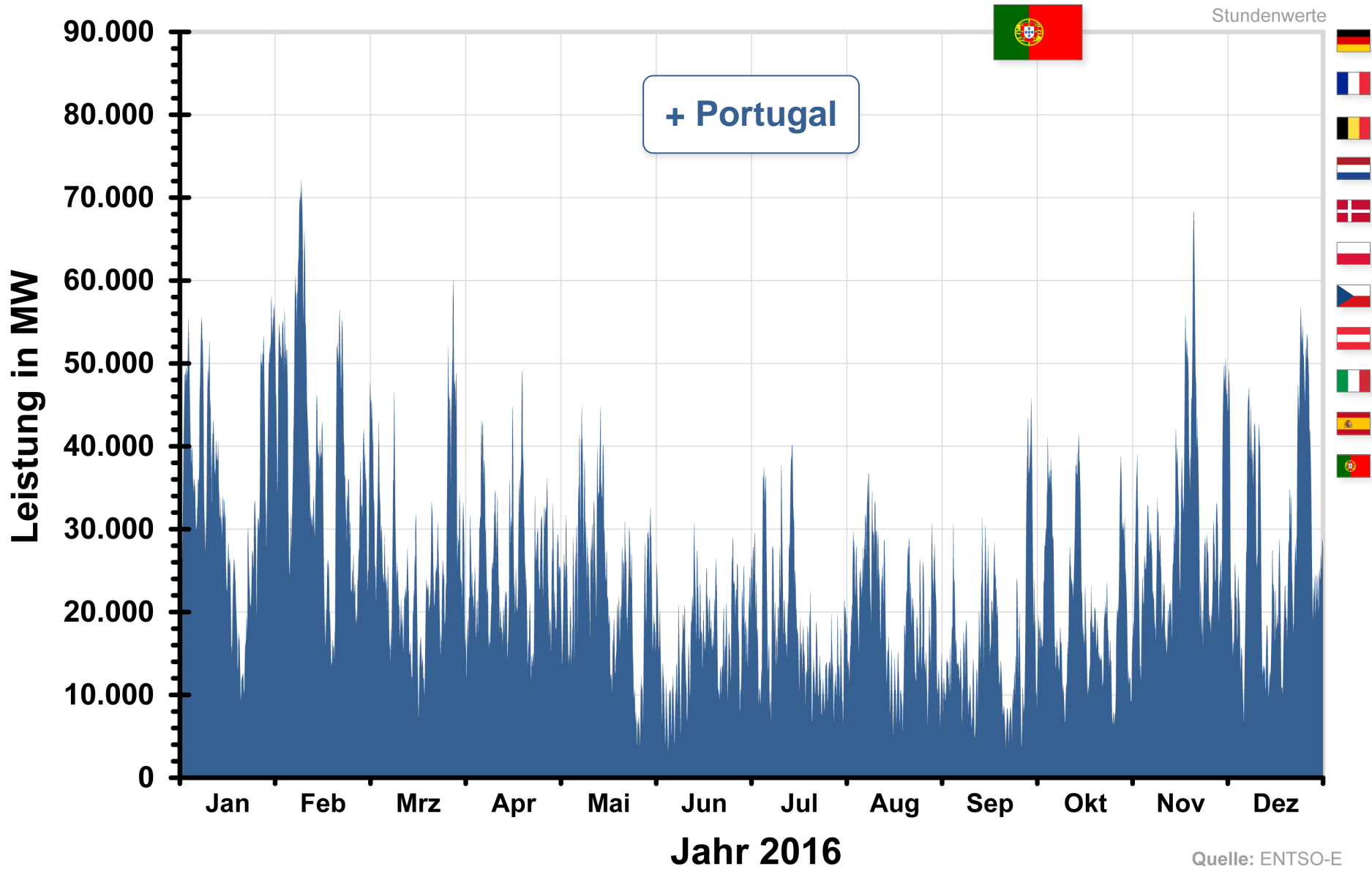




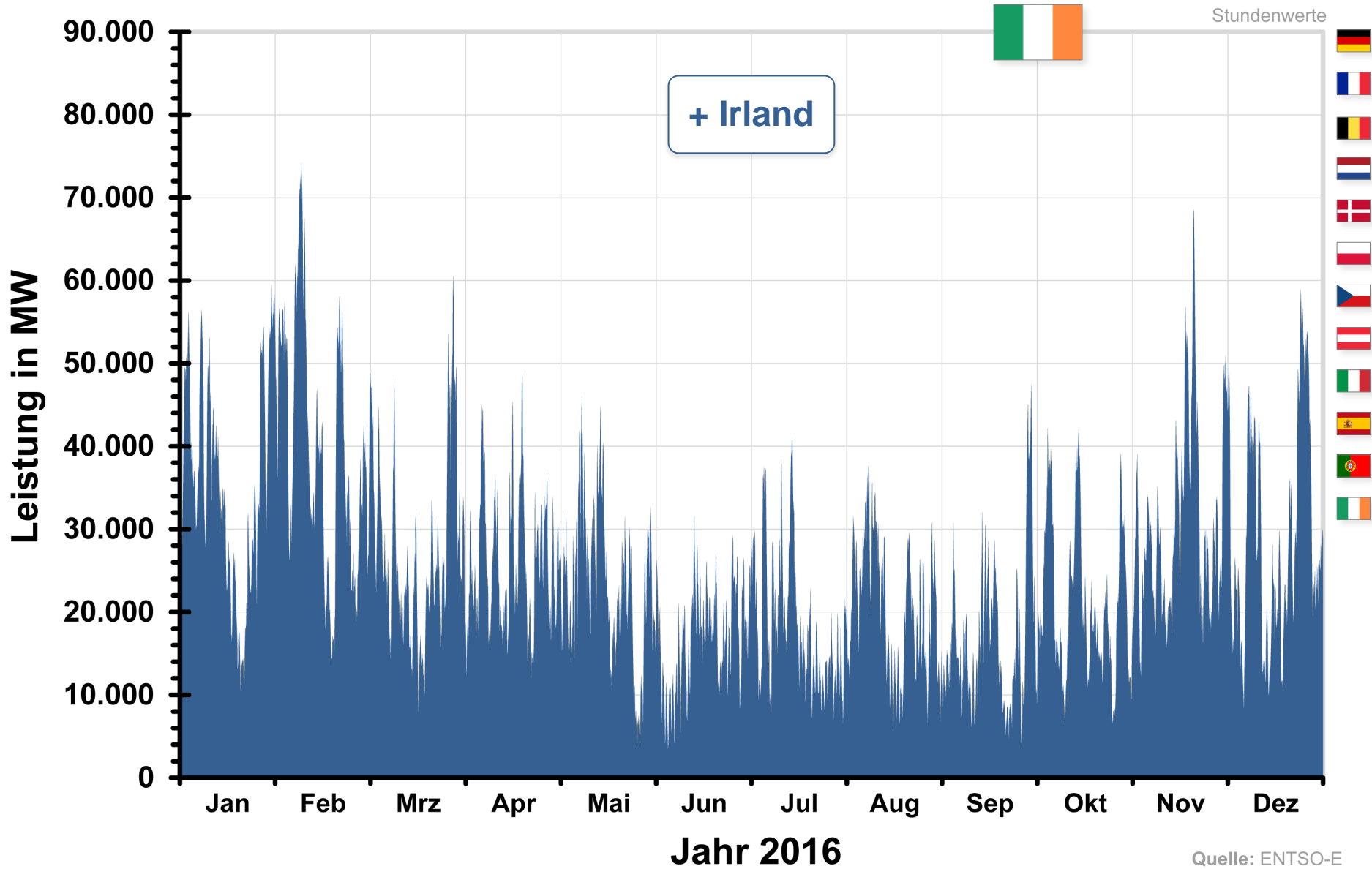


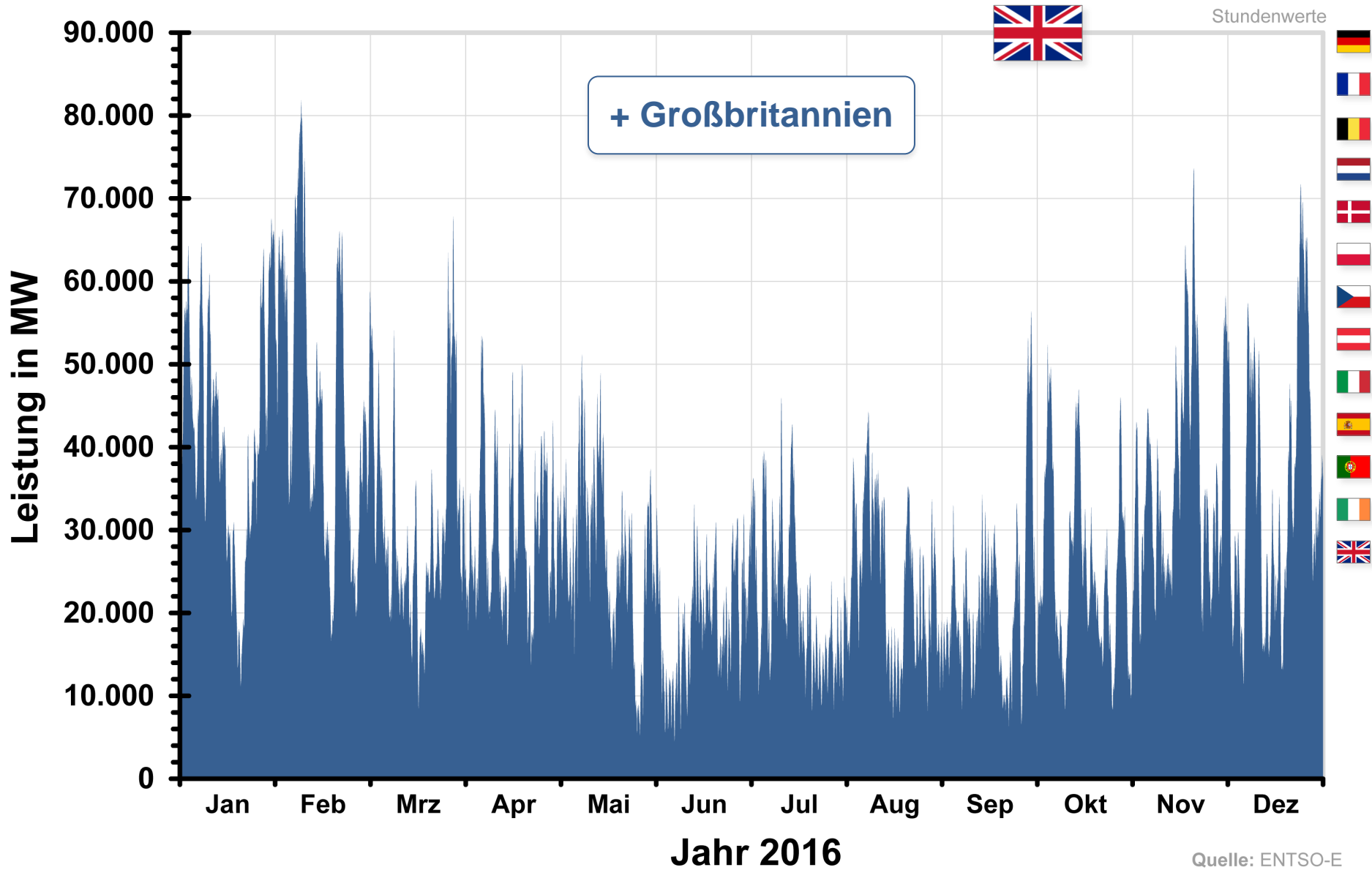
Quelle: ENTSO-E

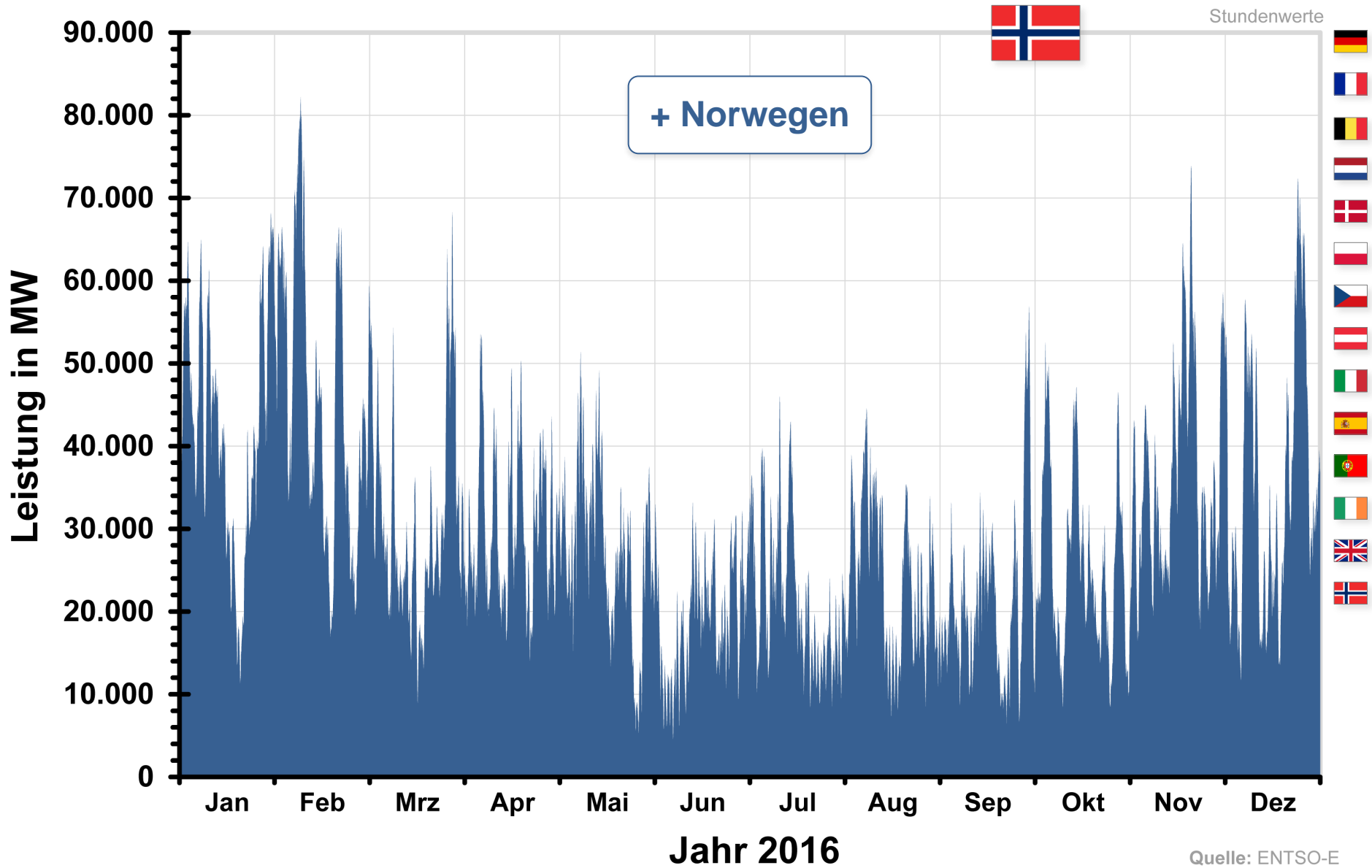


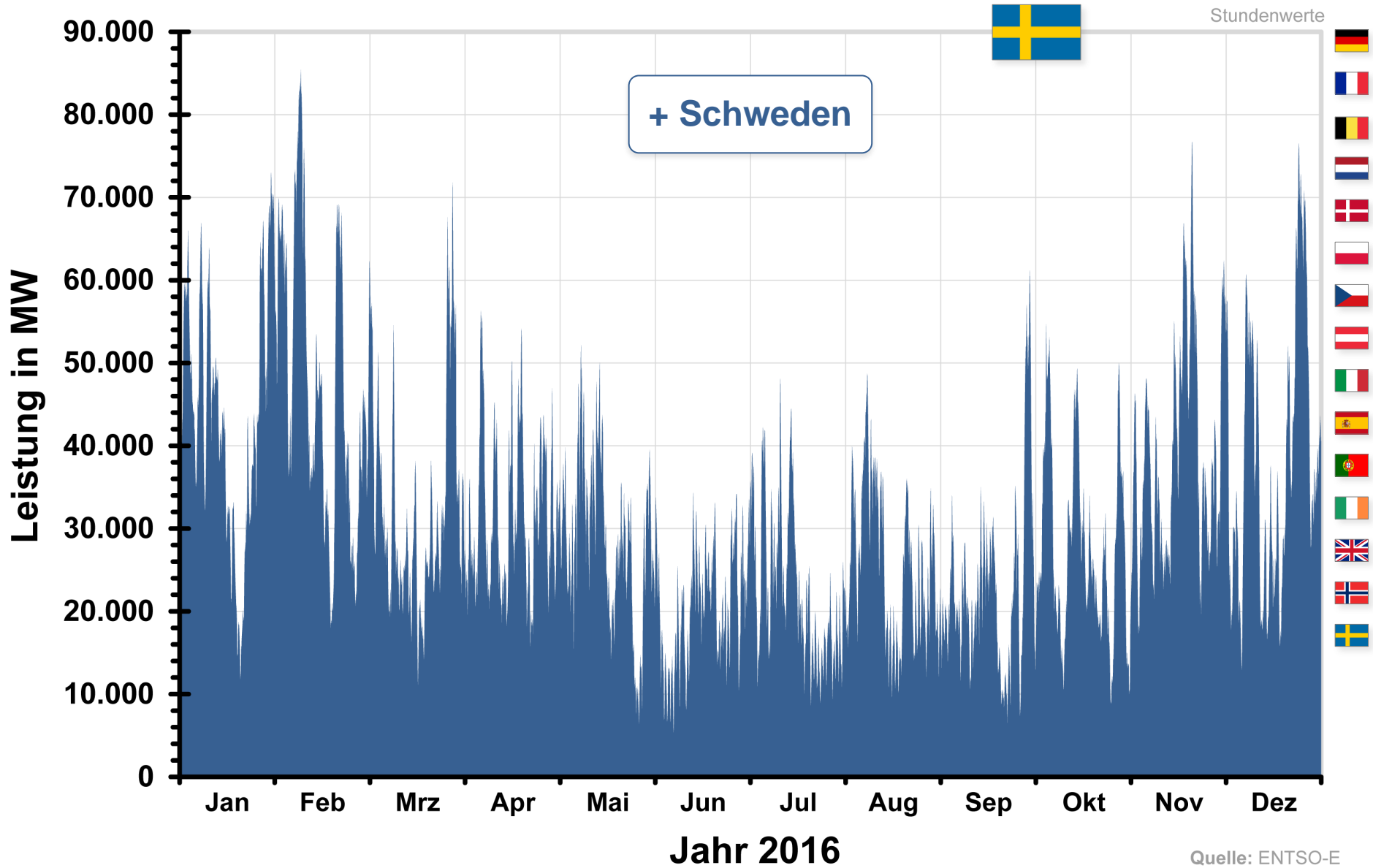


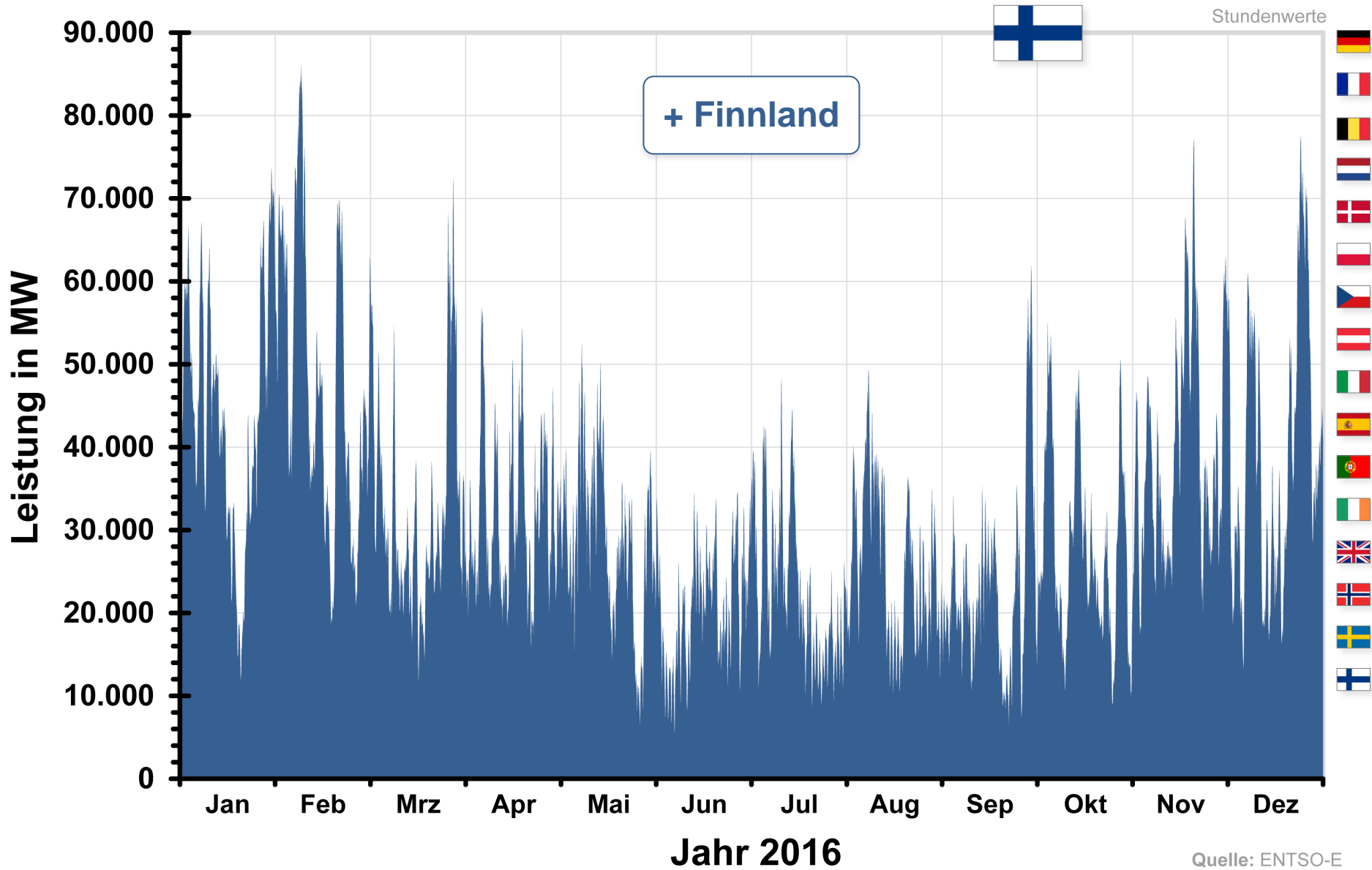




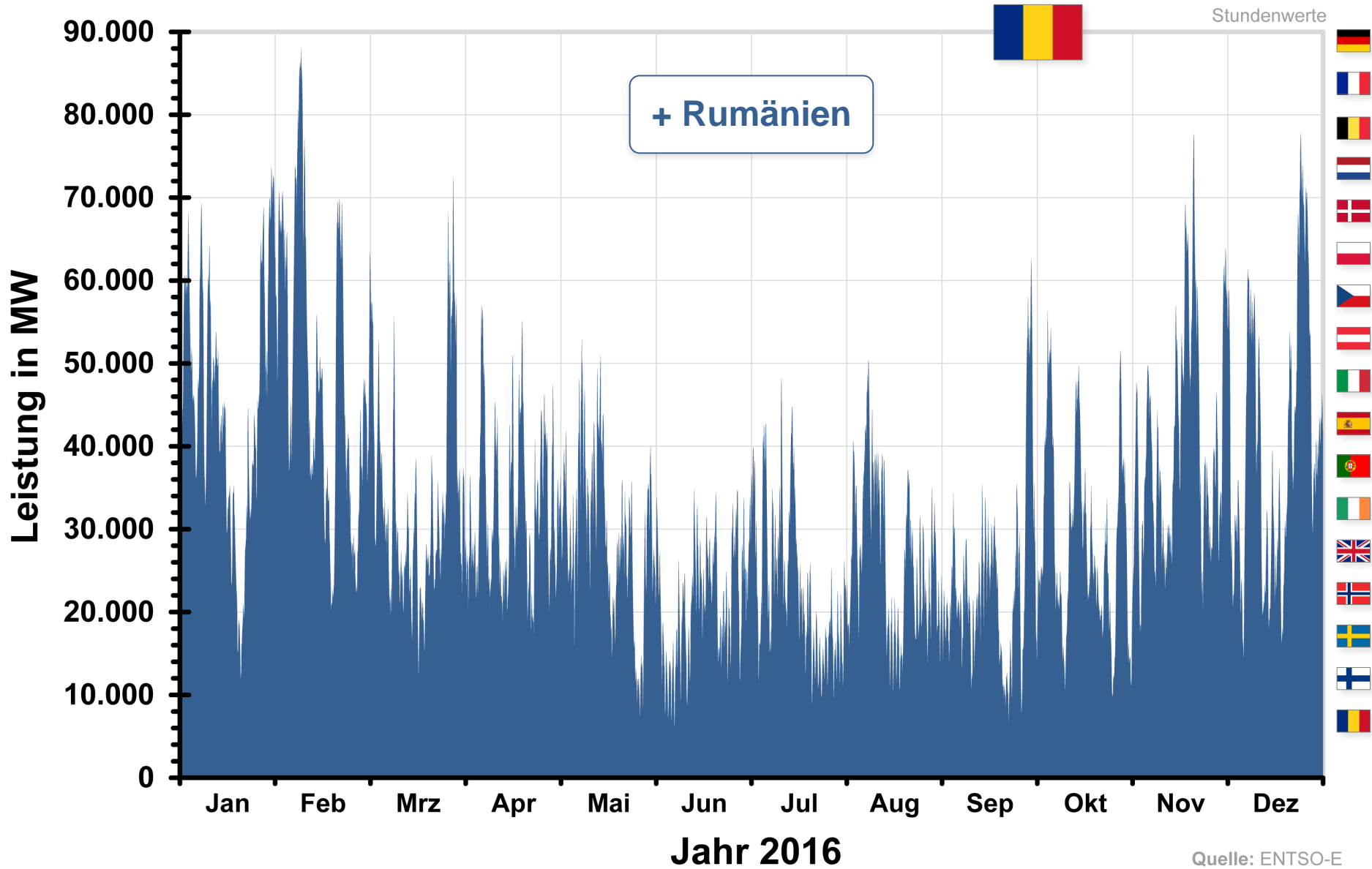


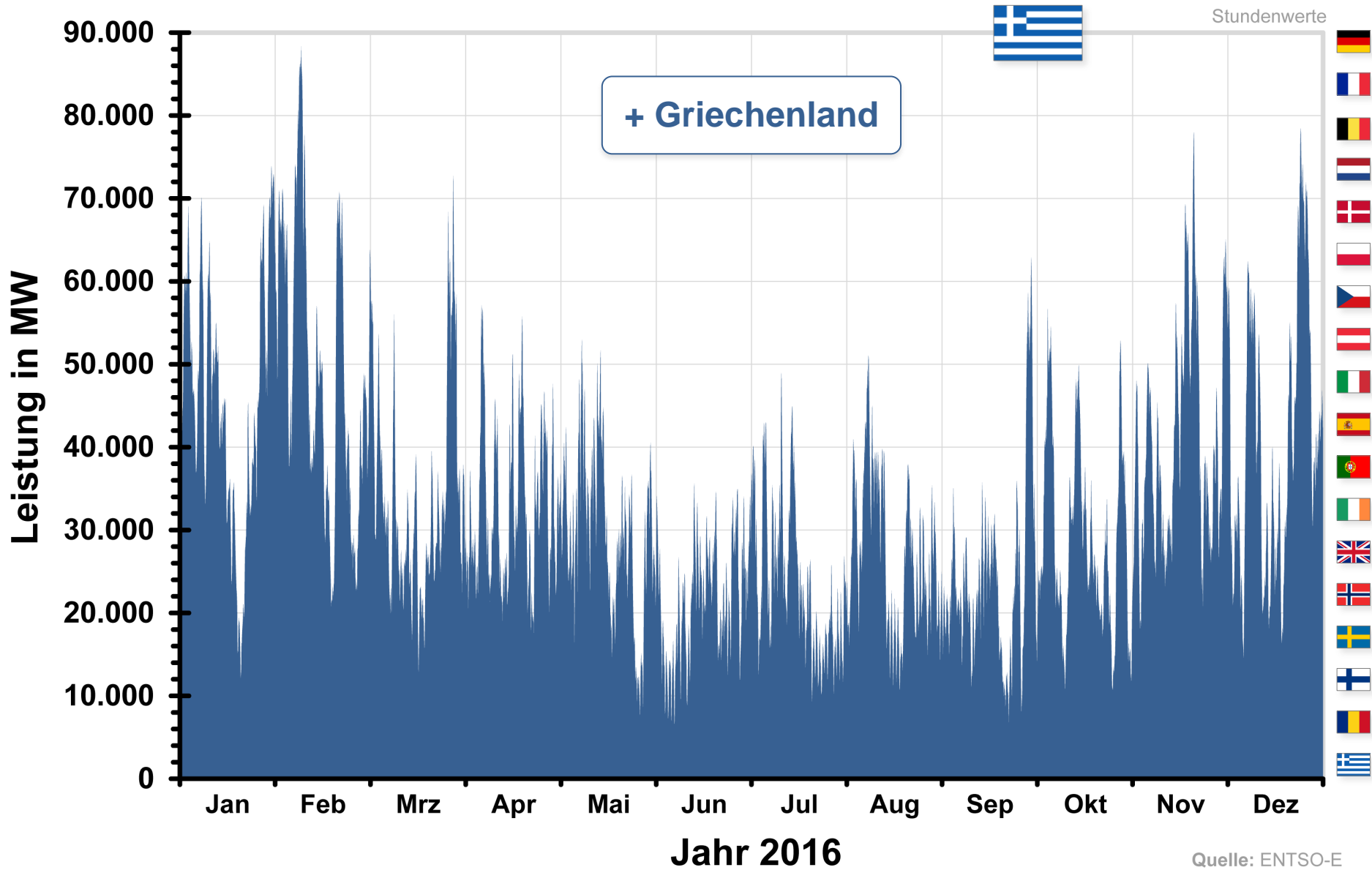


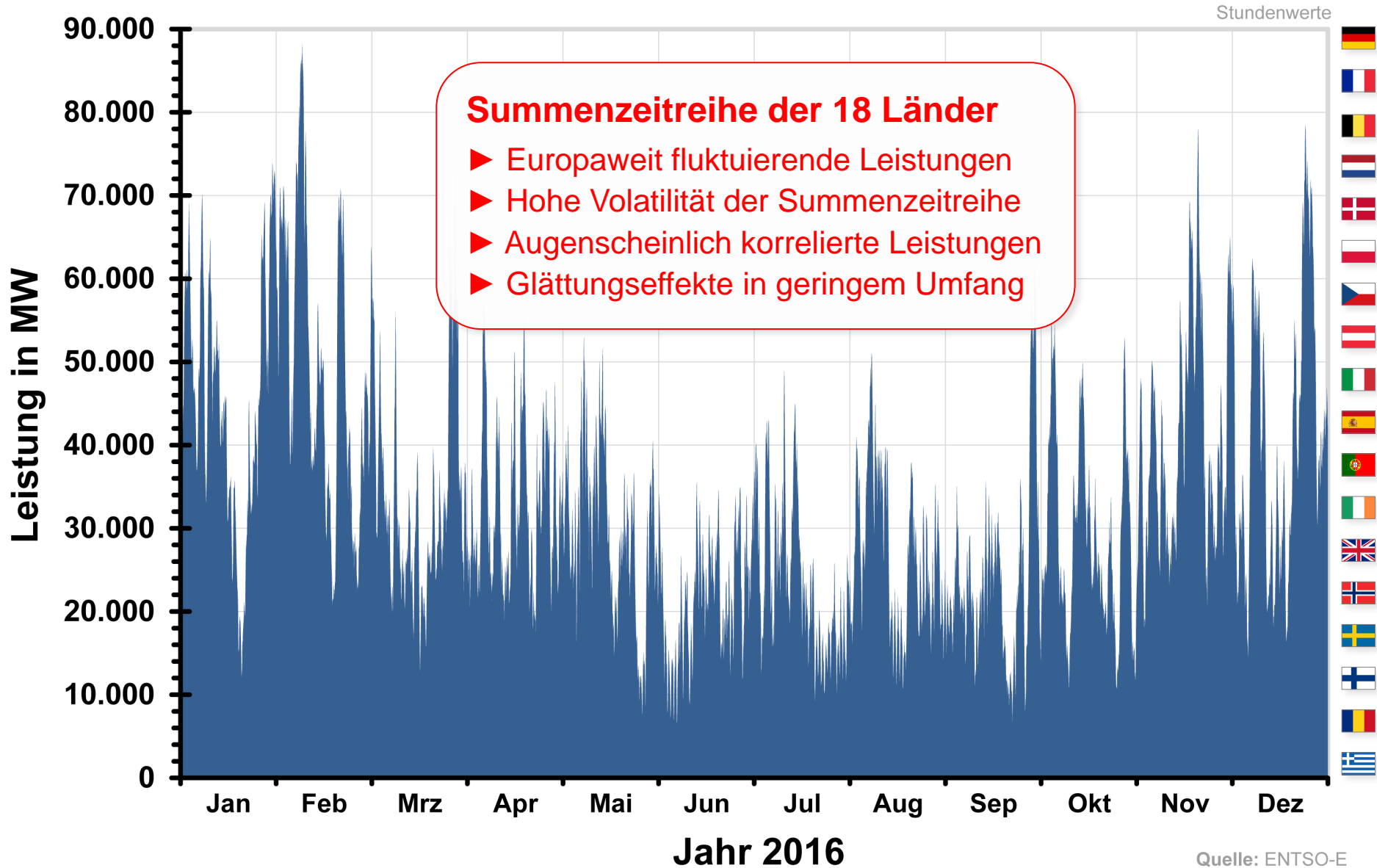




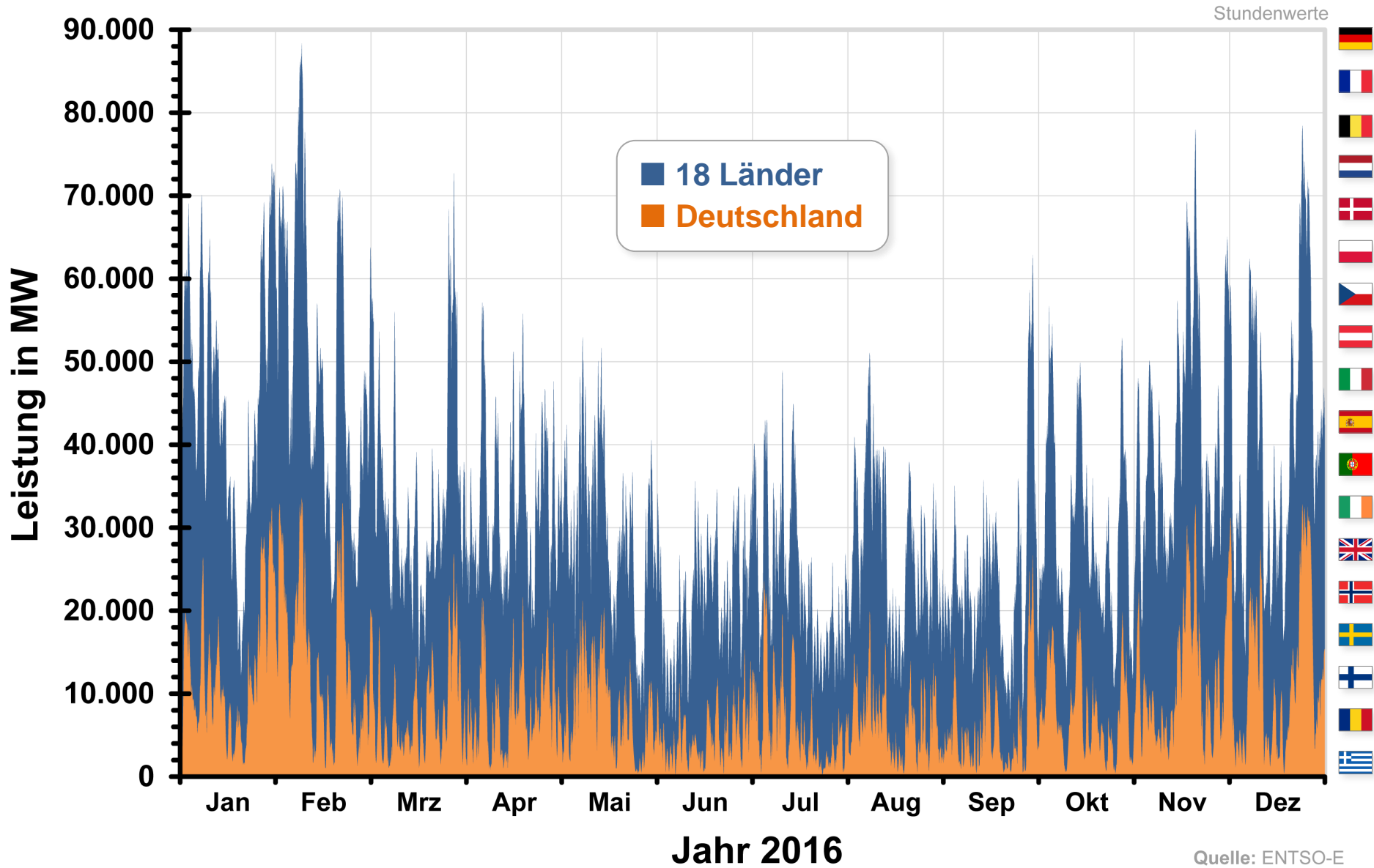
Quelle: ENTSO-E

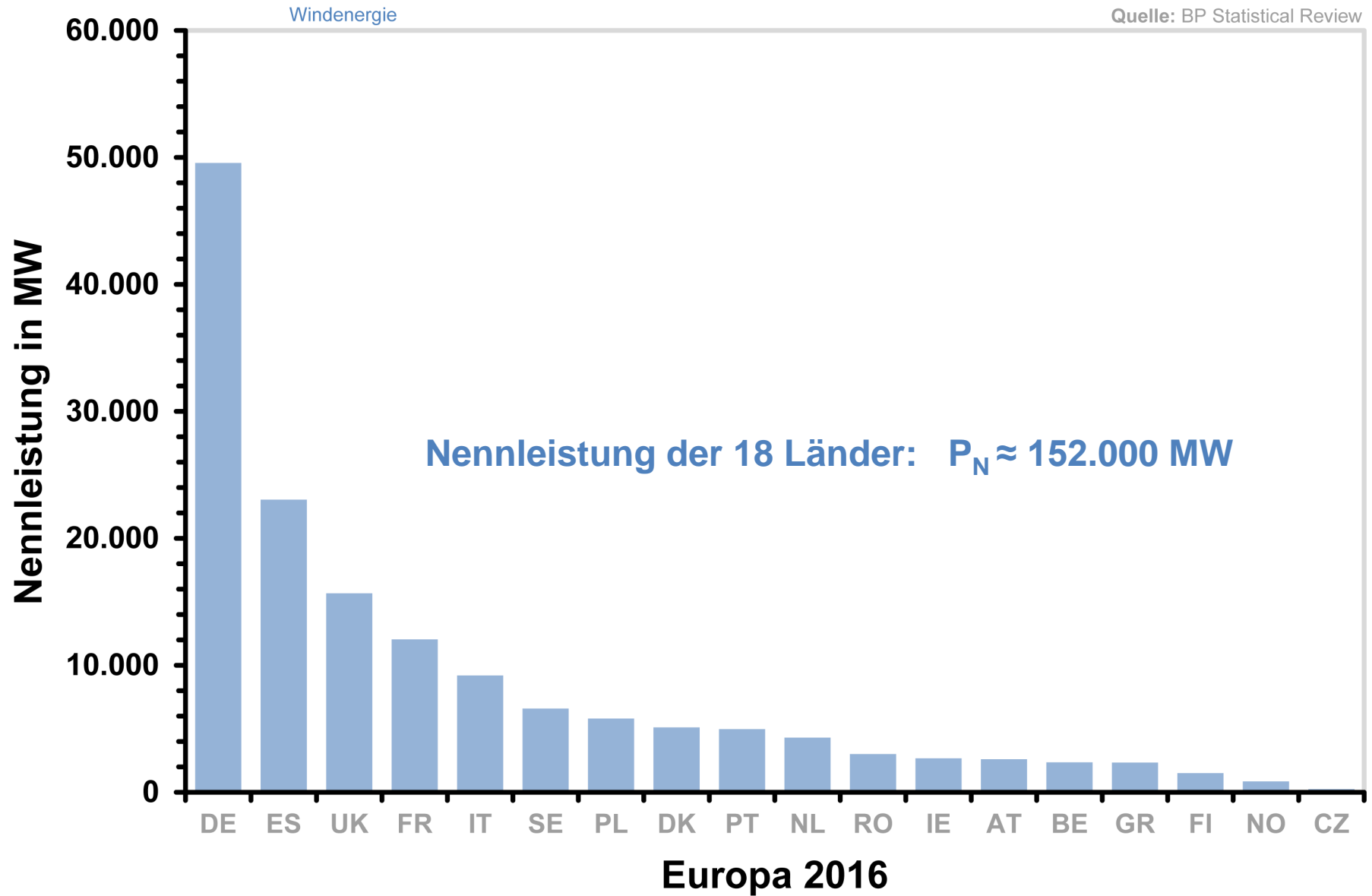


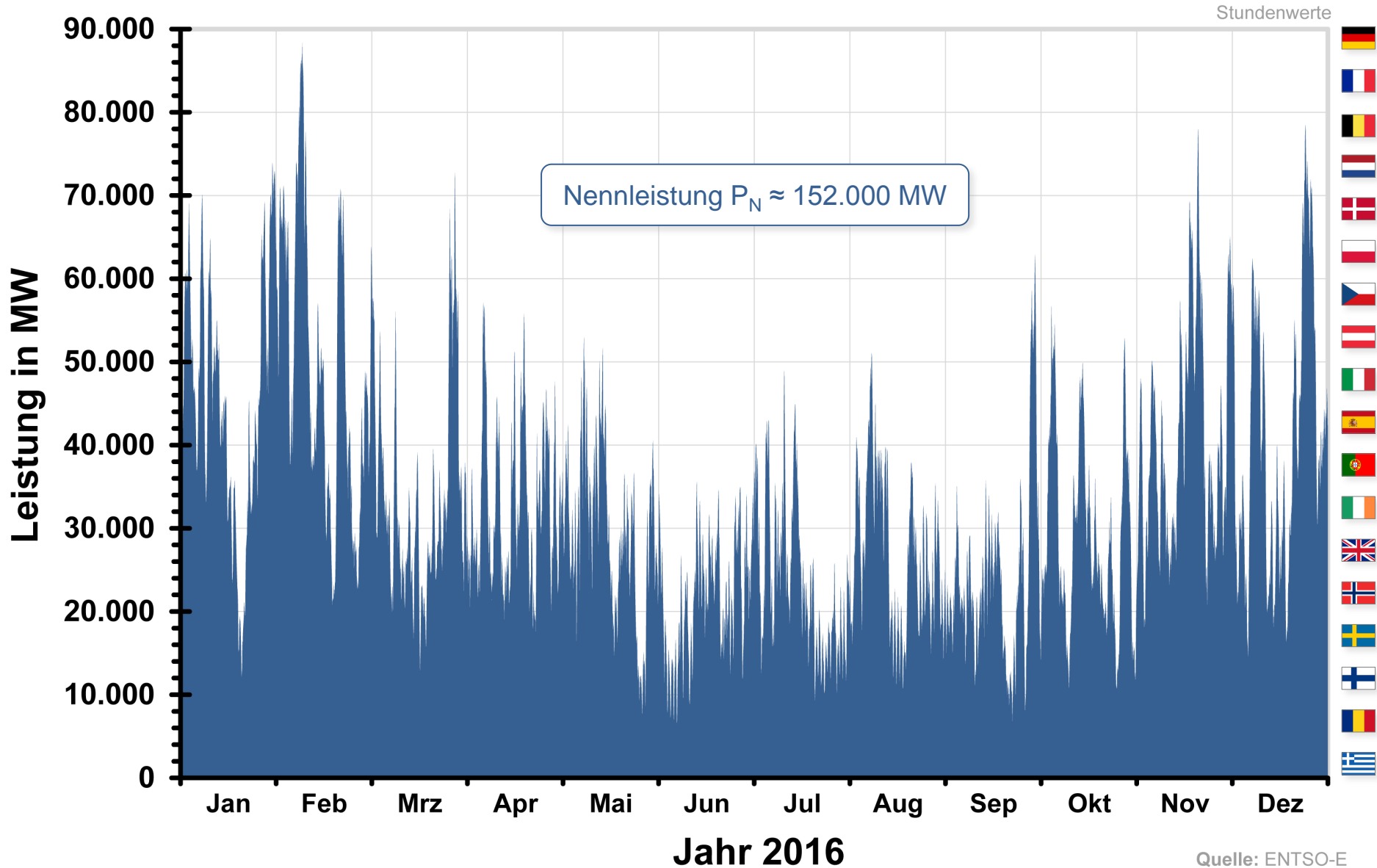


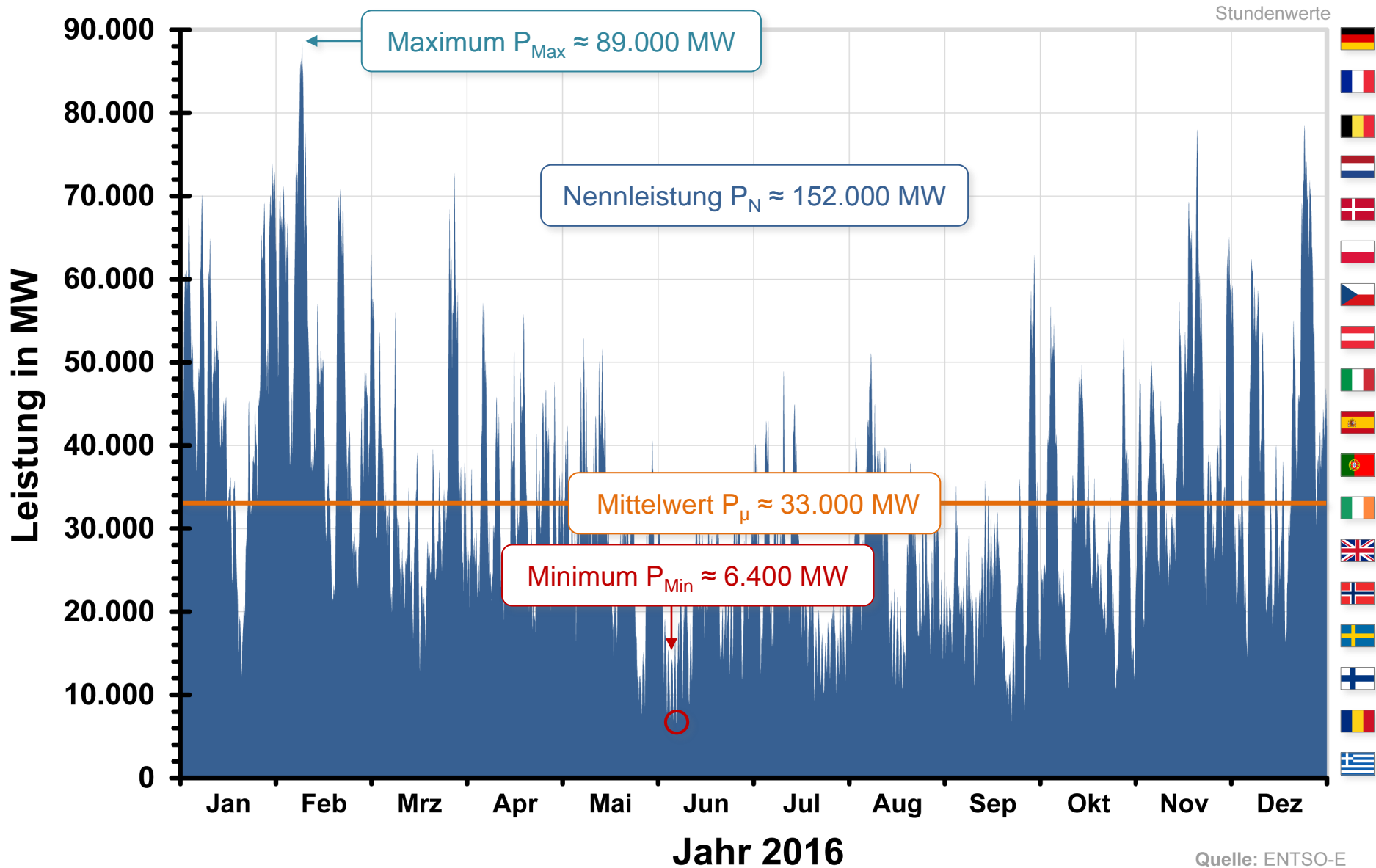


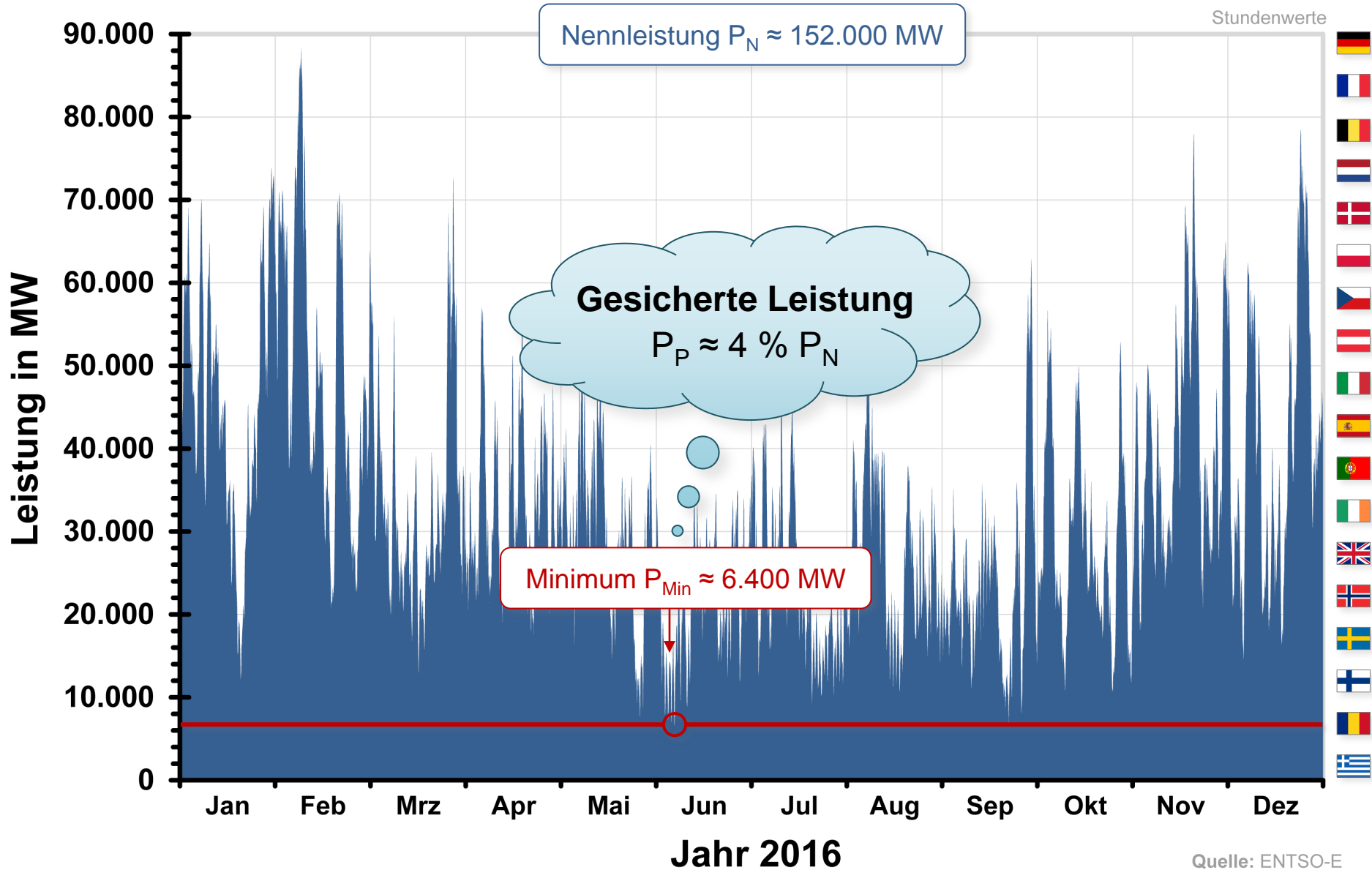


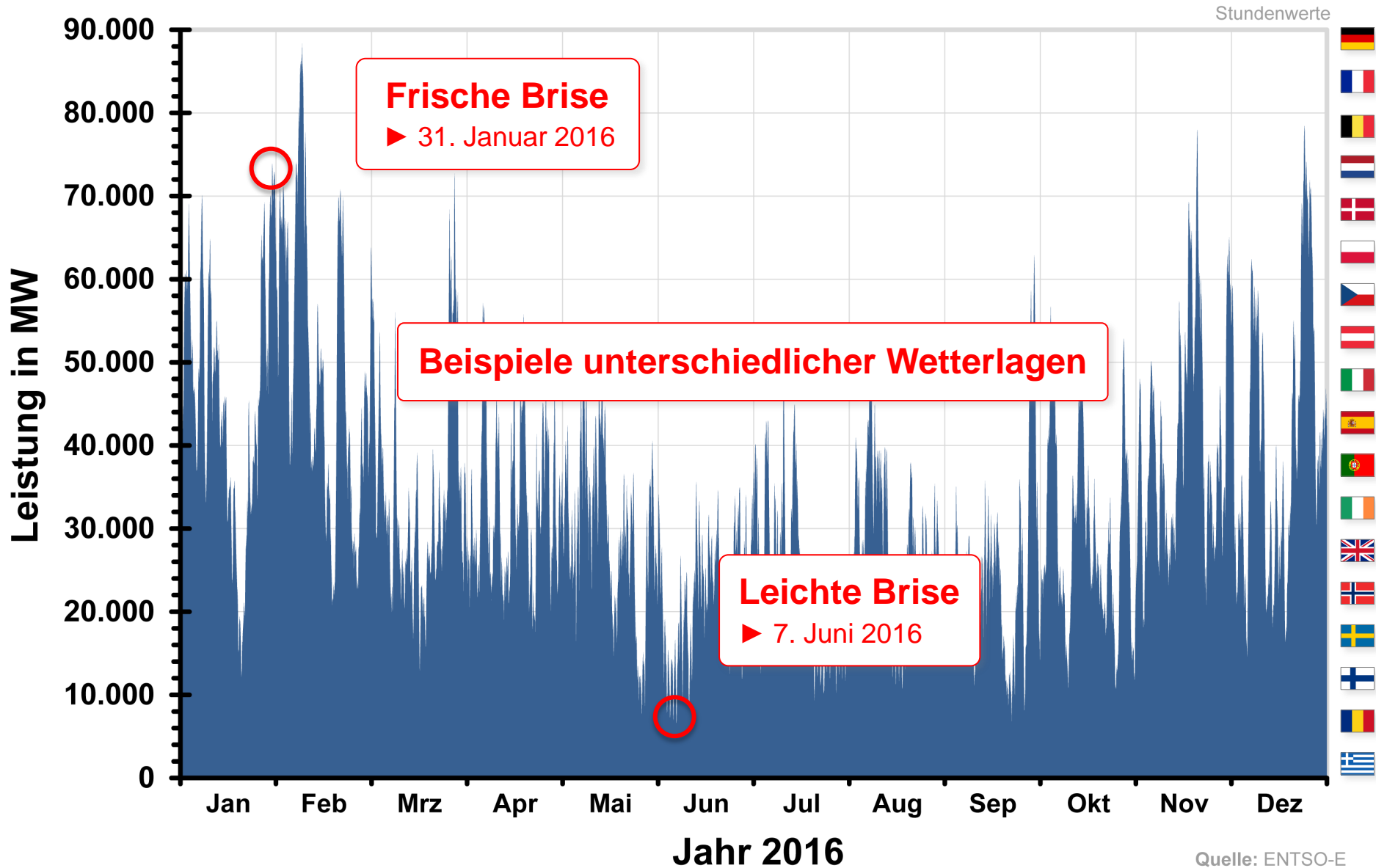




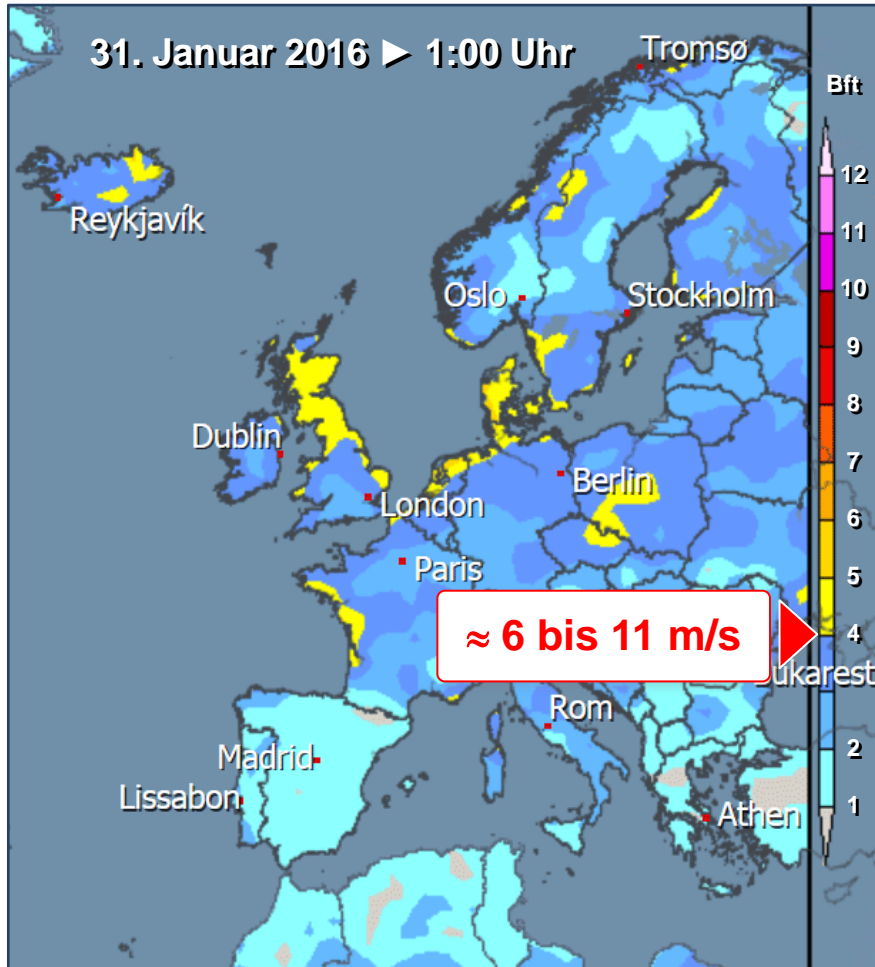






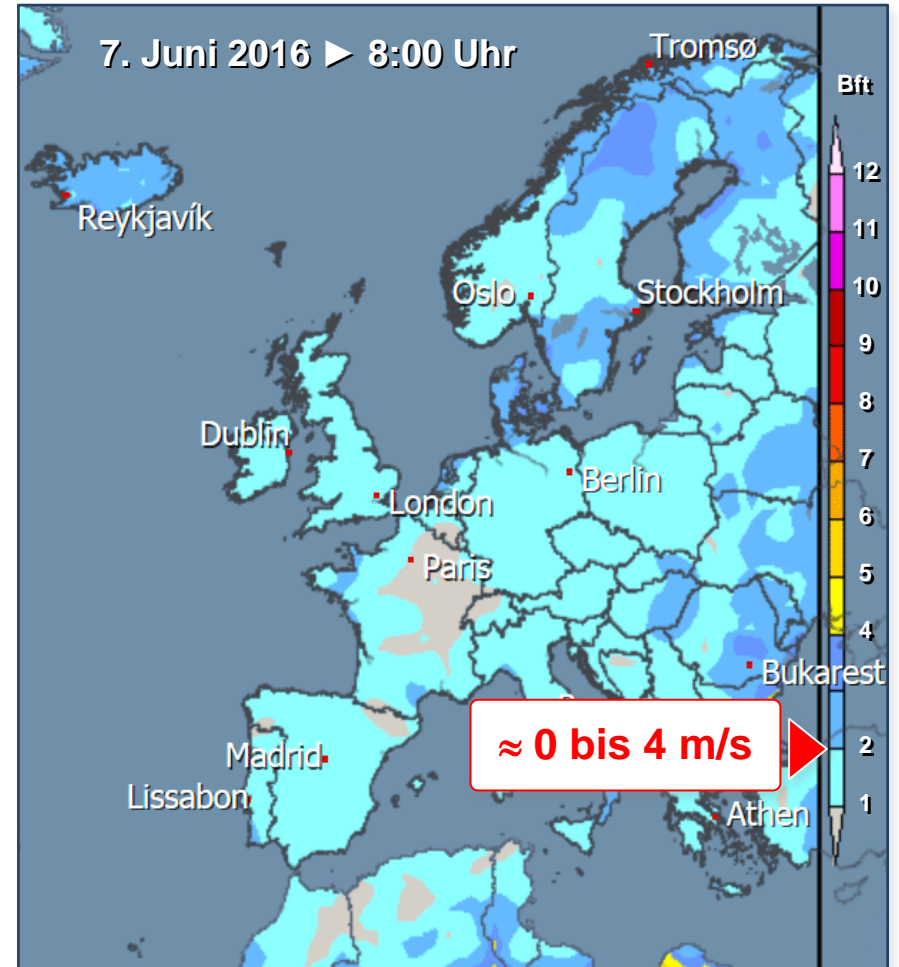


## Frische Brise



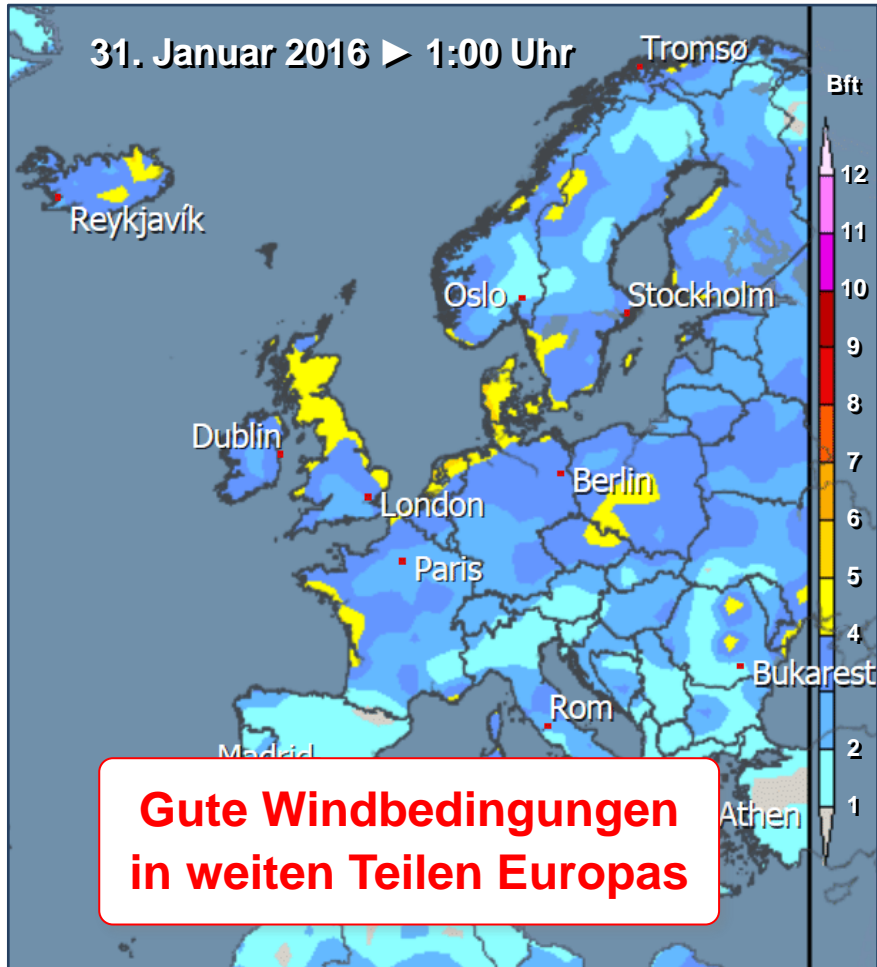
Quelle: www.wetter.info

## Leichte Brise



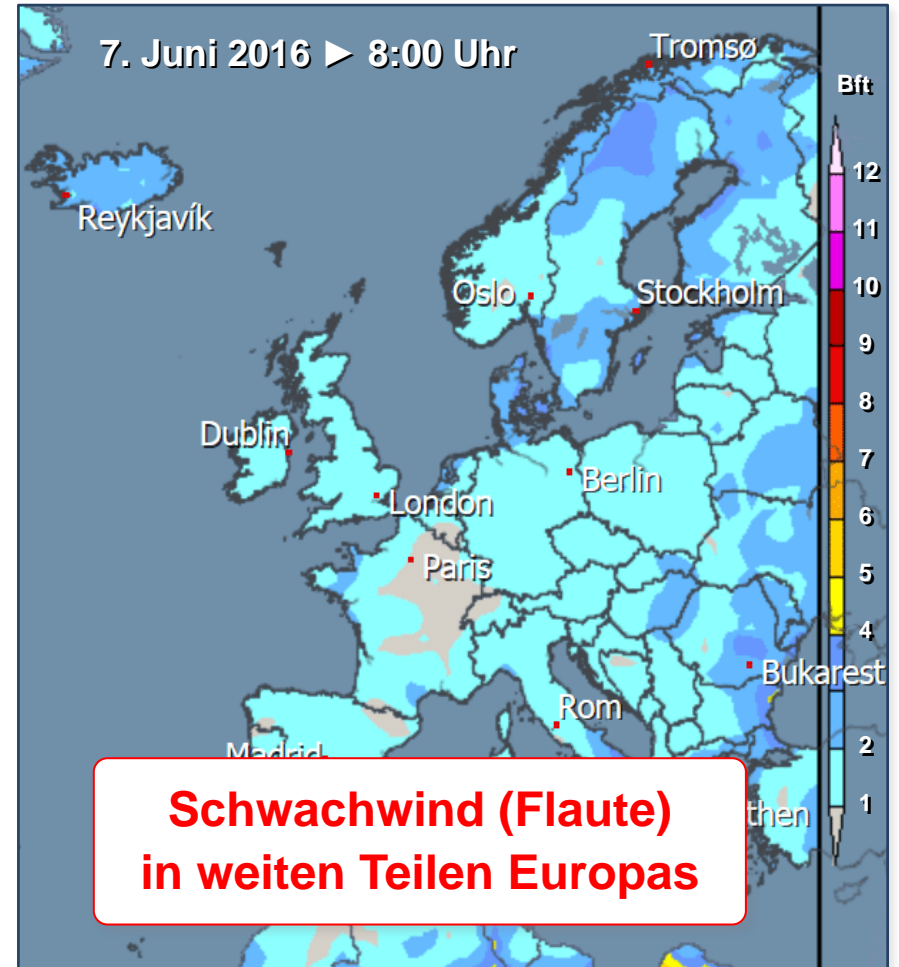
Quelle: www.wetter.info

## FrISCHE Brise



Quelle: [www.wetter.info](http://www.wetter.info)

## Leichte Brise



Quelle: [www.wetter.info](http://www.wetter.info)



## 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**

**Aufgabe:** Berechnung des Korrelationskoeffizienten  $r_S$  und der mittleren Distanz  $\Delta x$  zwischen zwei Ländern

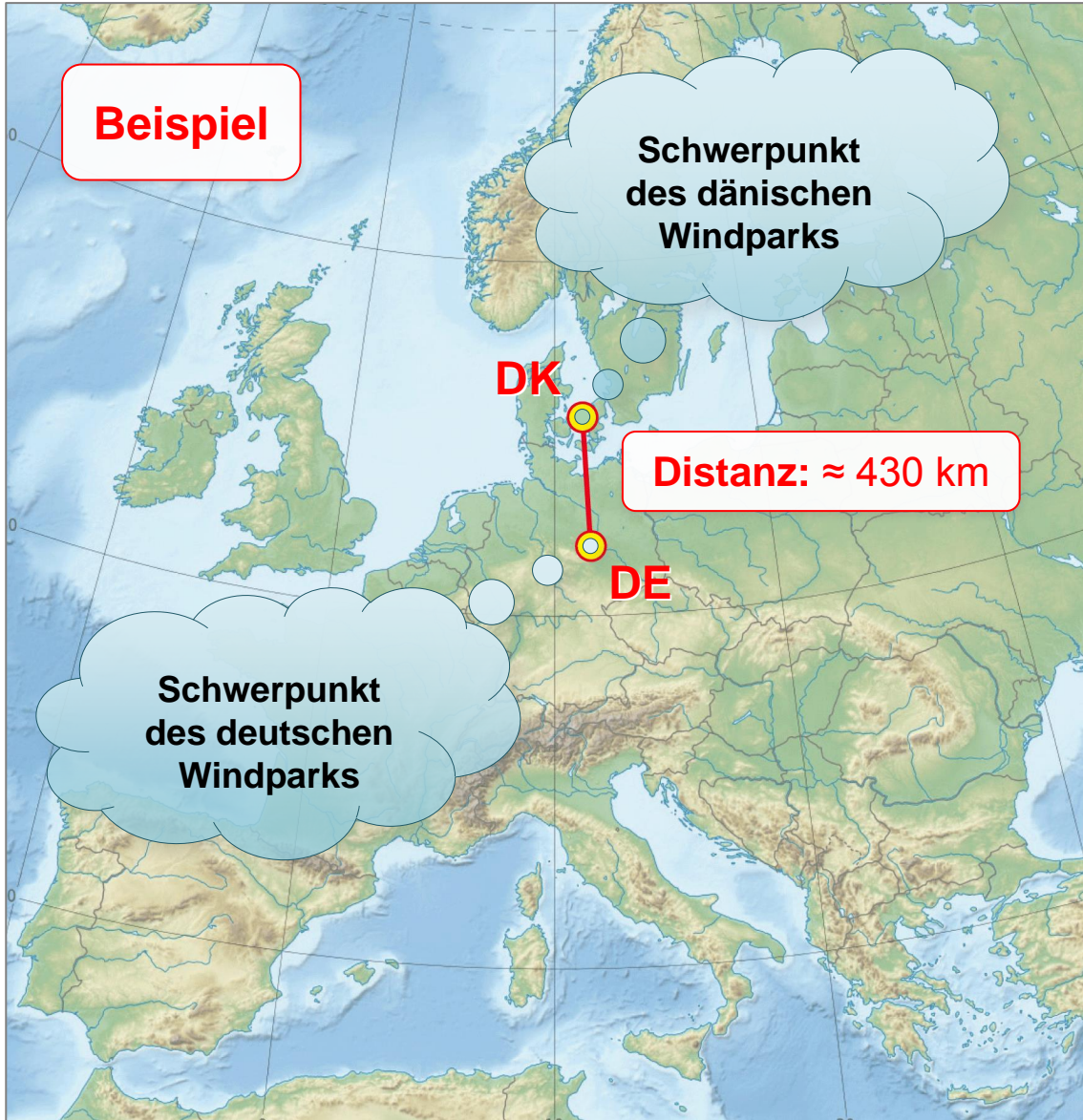
## Vorgehensweise

- Vergleich der Zeitreihen aller 18 Länder untereinander
- Anzahl N an Kombinationen bei  $k = 18$  Ländern:  

$$N = \frac{1}{2} \cdot k \cdot (k-1) = \underline{153}$$
- Berechnung der Schwerpunktkoordinaten jedes Landes auf Basis der Koordinaten der größten Windpark-Cluster
- Berechnung von 153 mittleren Distanzen  $\Delta x$
- Berechnung von 153 Korrelationskoeffizienten  $r_S$
- Darstellung des funktionalen Zusammenhangs zwischen Korrelationskoeffizienten  $r_S$  und mittleren Distanzen  $\Delta x$

Deutschland	Dänemark
DE	DK
2016	2016
Ja	Ja
ENTSO-E	ENTSO-E
8.579 MW	1.366 MW
8.542 MW	1.232 MW
8.505 MW	1.100 MW
8.468 MW	968 MW
8.431 MW	836 MW
8.394 MW	704 MW
8.357 MW	572 MW
8.320 MW	440 MW
8.283 MW	308 MW
8.246 MW	176 MW
8.209 MW	40 MW
8.172 MW	0 MW
8.135 MW	0 MW
8.098 MW	0 MW
8.061 MW	0 MW
8.024 MW	0 MW
7.987 MW	0 MW
7.950 MW	0 MW
7.913 MW	0 MW
7.876 MW	0 MW
7.839 MW	0 MW
7.802 MW	0 MW
7.765 MW	0 MW
7.728 MW	0 MW
7.691 MW	0 MW
7.654 MW	0 MW
7.617 MW	0 MW
7.580 MW	0 MW
7.543 MW	0 MW
7.506 MW	0 MW
7.469 MW	0 MW
7.432 MW	0 MW
7.395 MW	0 MW
7.358 MW	0 MW
7.321 MW	0 MW
7.284 MW	0 MW
7.247 MW	0 MW
7.210 MW	0 MW
7.173 MW	0 MW
7.136 MW	0 MW
7.099 MW	0 MW
7.062 MW	0 MW
7.025 MW	0 MW
6.988 MW	0 MW
6.951 MW	0 MW
6.914 MW	0 MW
6.877 MW	0 MW
6.840 MW	0 MW
6.803 MW	0 MW
6.766 MW	0 MW
6.729 MW	0 MW
6.692 MW	0 MW
6.655 MW	0 MW
6.618 MW	0 MW
6.581 MW	0 MW
6.544 MW	0 MW
6.507 MW	0 MW
6.470 MW	0 MW
6.433 MW	0 MW
6.396 MW	0 MW
6.359 MW	0 MW
6.322 MW	0 MW
6.285 MW	0 MW
6.248 MW	0 MW
6.211 MW	0 MW
6.174 MW	0 MW
6.137 MW	0 MW
6.100 MW	0 MW
6.063 MW	0 MW
6.026 MW	0 MW
5.989 MW	0 MW
5.952 MW	0 MW
5.915 MW	0 MW
5.878 MW	0 MW
5.841 MW	0 MW
5.804 MW	0 MW
5.767 MW	0 MW
5.730 MW	0 MW
5.693 MW	0 MW
5.656 MW	0 MW
5.619 MW	0 MW
5.582 MW	0 MW
5.545 MW	0 MW
5.508 MW	0 MW
5.471 MW	0 MW
5.434 MW	0 MW
5.397 MW	0 MW
5.360 MW	0 MW
5.323 MW	0 MW
5.286 MW	0 MW
5.249 MW	0 MW
5.212 MW	0 MW
5.175 MW	0 MW
5.138 MW	0 MW
5.101 MW	0 MW
5.064 MW	0 MW
5.027 MW	0 MW
4.990 MW	0 MW
4.953 MW	0 MW
4.916 MW	0 MW
4.879 MW	0 MW
4.842 MW	0 MW
4.805 MW	0 MW
4.768 MW	0 MW
4.731 MW	0 MW
4.694 MW	0 MW
4.657 MW	0 MW
4.620 MW	0 MW
4.583 MW	0 MW
4.546 MW	0 MW
4.509 MW	0 MW
4.472 MW	0 MW
4.435 MW	0 MW
4.398 MW	0 MW
4.361 MW	0 MW
4.324 MW	0 MW
4.287 MW	0 MW
4.250 MW	0 MW
4.213 MW	0 MW
4.176 MW	0 MW
4.139 MW	0 MW
4.102 MW	0 MW
4.065 MW	0 MW
4.028 MW	0 MW
3.991 MW	0 MW
3.954 MW	0 MW
3.917 MW	0 MW
3.880 MW	0 MW
3.843 MW	0 MW
3.806 MW	0 MW
3.769 MW	0 MW
3.732 MW	0 MW
3.695 MW	0 MW
3.658 MW	0 MW
3.621 MW	0 MW
3.584 MW	0 MW
3.547 MW	0 MW
3.510 MW	0 MW
3.473 MW	0 MW
3.436 MW	0 MW
3.399 MW	0 MW
3.362 MW	0 MW
3.325 MW	0 MW
3.288 MW	0 MW
3.251 MW	0 MW
3.214 MW	0 MW
3.177 MW	0 MW
3.140 MW	0 MW
3.103 MW	0 MW
3.066 MW	0 MW
3.029 MW	0 MW
2.992 MW	0 MW
2.955 MW	0 MW
2.918 MW	0 MW
2.881 MW	0 MW
2.844 MW	0 MW
2.807 MW	0 MW
2.770 MW	0 MW
2.733 MW	0 MW
2.696 MW	0 MW
2.659 MW	0 MW
2.622 MW	0 MW
2.585 MW	0 MW
2.548 MW	0 MW
2.511 MW	0 MW
2.474 MW	0 MW
2.437 MW	0 MW
2.400 MW	0 MW
2.363 MW	0 MW
2.326 MW	0 MW
2.289 MW	0 MW
2.252 MW	0 MW
2.215 MW	0 MW
2.178 MW	0 MW
2.141 MW	0 MW
2.104 MW	0 MW
2.067 MW	0 MW
2.030 MW	0 MW
1.993 MW	0 MW
1.956 MW	0 MW
1.919 MW	0 MW
1.882 MW	0 MW
1.845 MW	0 MW
1.808 MW	0 MW
1.771 MW	0 MW
1.734 MW	0 MW
1.697 MW	0 MW
1.660 MW	0 MW
1.623 MW	0 MW
1.586 MW	0 MW
1.549 MW	0 MW
1.512 MW	0 MW
1.475 MW	0 MW
1.438 MW	0 MW
1.401 MW	0 MW
1.364 MW	0 MW
1.327 MW	0 MW
1.290 MW	0 MW
1.253 MW	0 MW
1.216 MW	0 MW
1.179 MW	0 MW
1.142 MW	0 MW
1.105 MW	0 MW
1.068 MW	0 MW
1.031 MW	0 MW
994 MW	0 MW
957 MW	0 MW
920 MW	0 MW
883 MW	0 MW
846 MW	0 MW
809 MW	0 MW
772 MW	0 MW
735 MW	0 MW
698 MW	0 MW
661 MW	0 MW
624 MW	0 MW
587 MW	0 MW
550 MW	0 MW
513 MW	0 MW
476 MW	0 MW
439 MW	0 MW
402 MW	0 MW
365 MW	0 MW
328 MW	0 MW
291 MW	0 MW
254 MW	0 MW
217 MW	0 MW
180 MW	0 MW
143 MW	0 MW
106 MW	0 MW
69 MW	0 MW
32 MW	0 MW
0 MW	0 MW

**Beispiel**



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

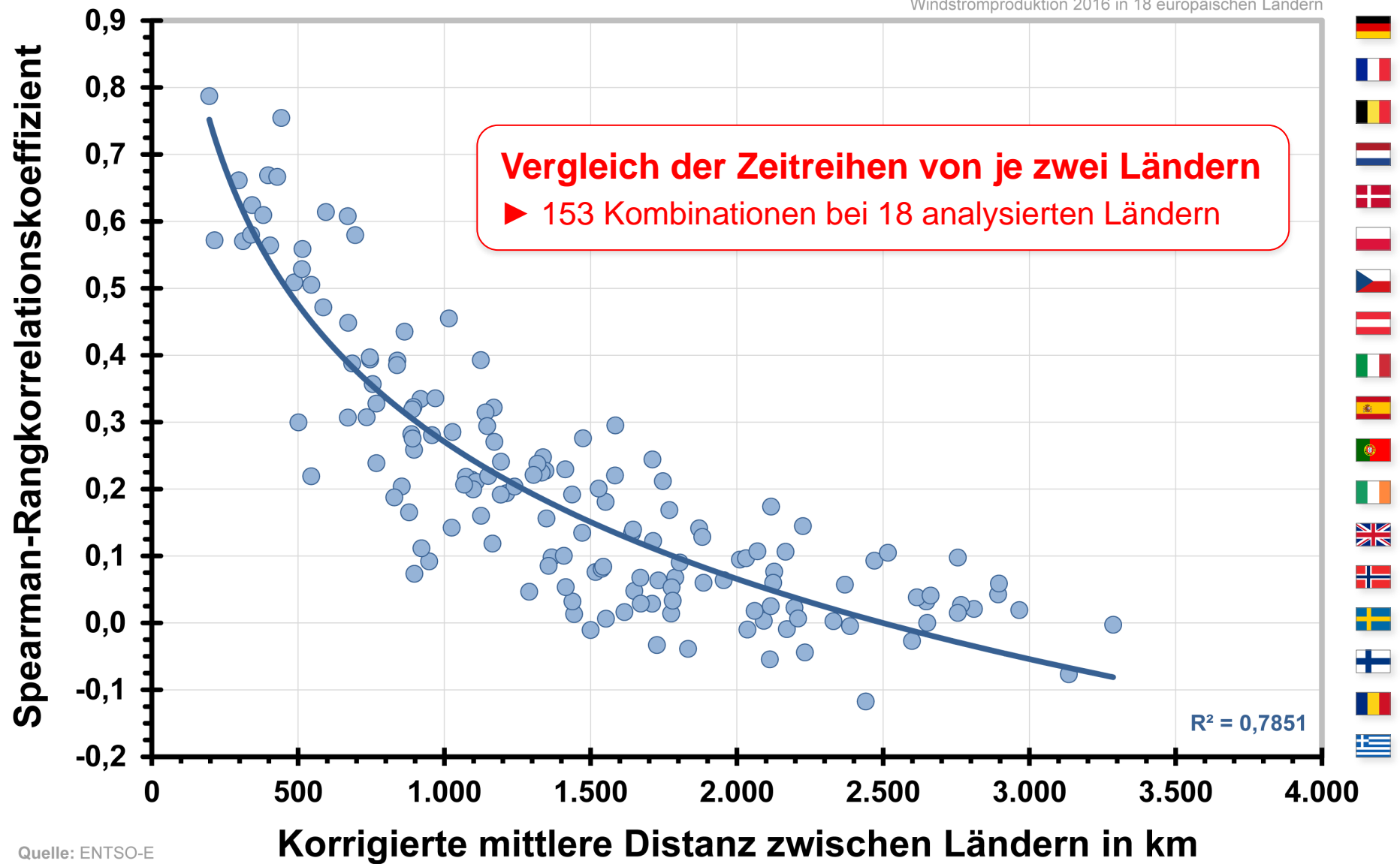
⋮ ⋮ ⋮

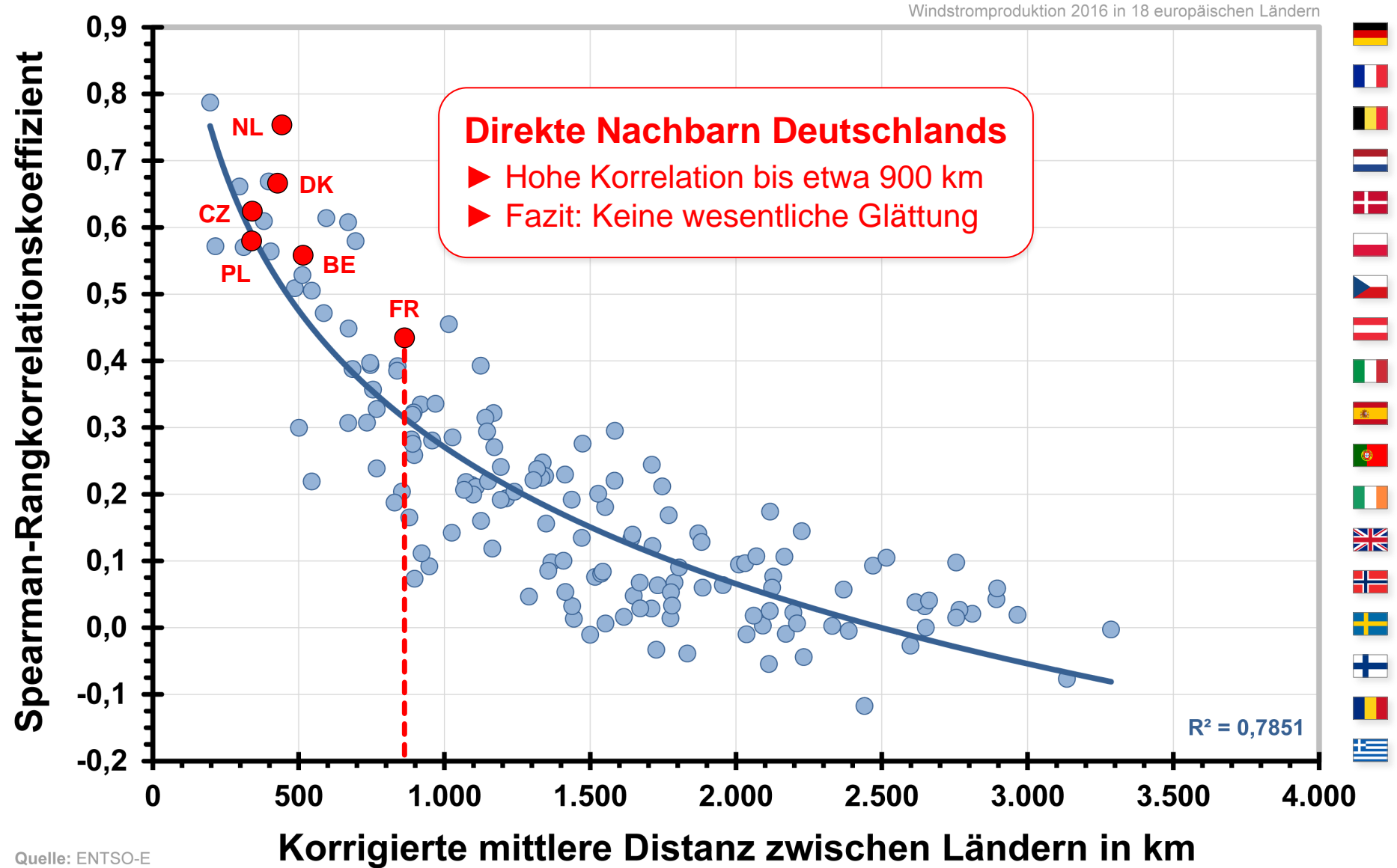
**Rangkorrelationskoeffizient**

$$r_s \approx 0,667$$

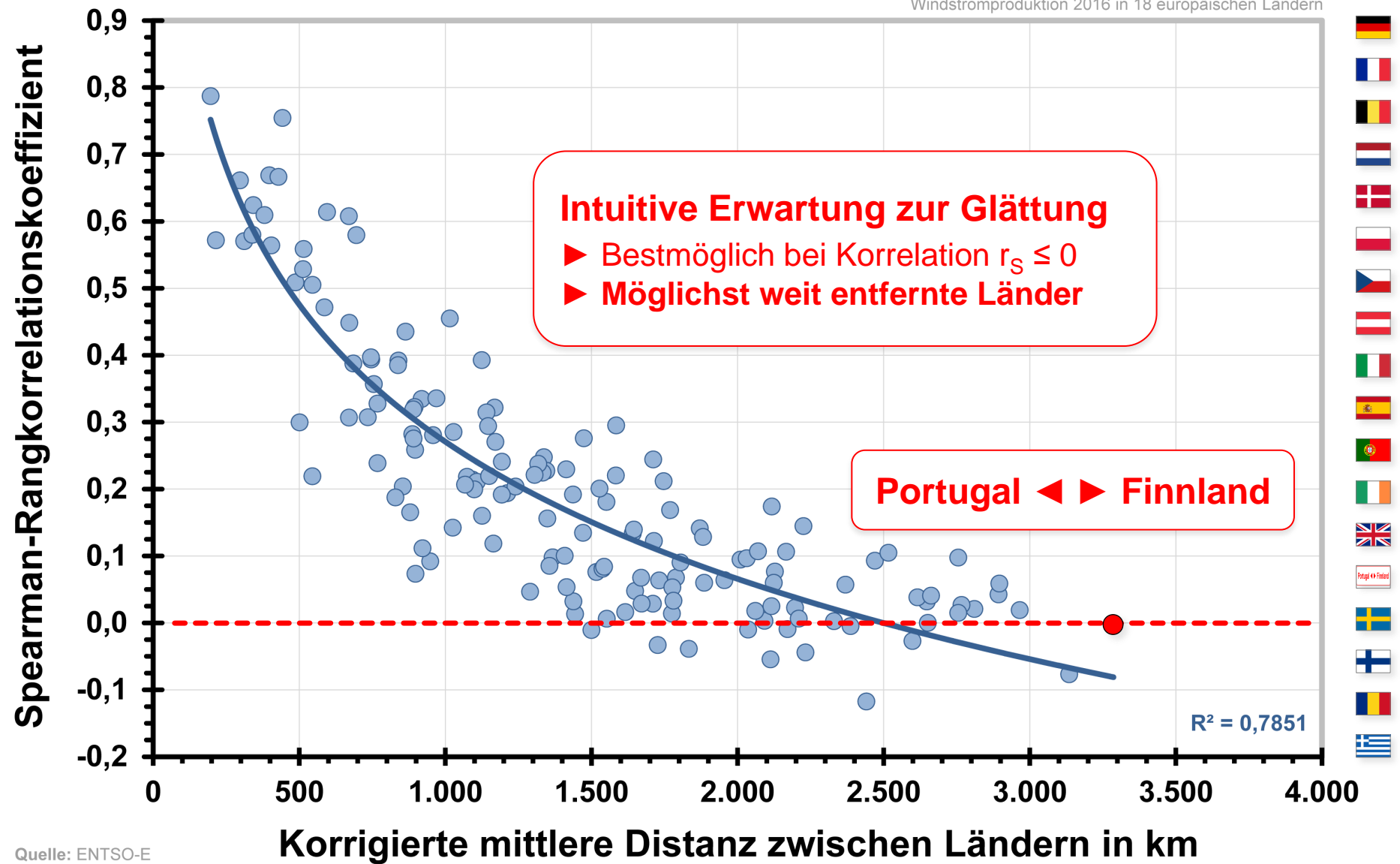
⋮ ⋮ ⋮

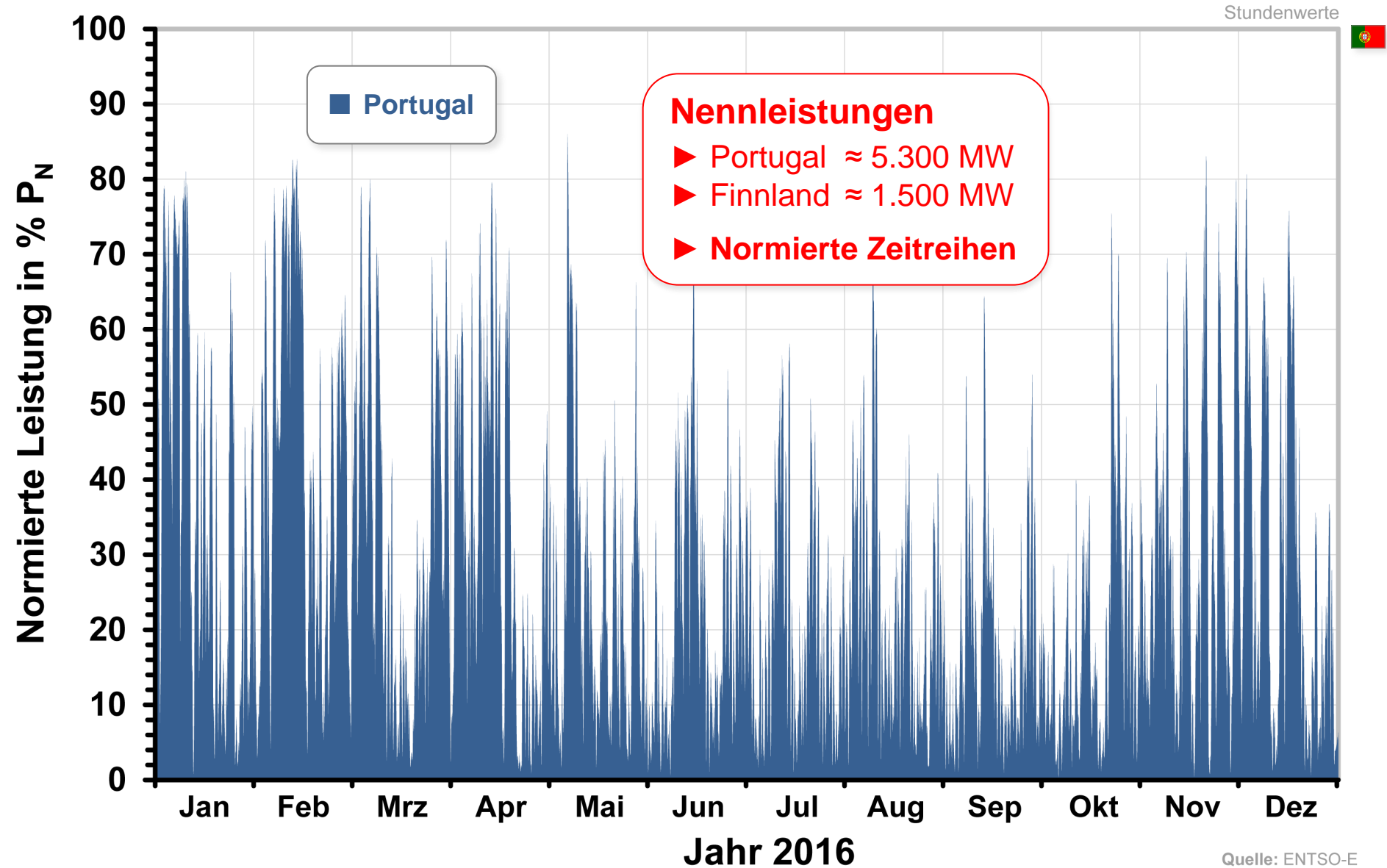
31.12.2016 20:00	15.354 MW	3.616 MW
31.12.2016 21:00	14.875 MW	3.587 MW
31.12.2016 22:00	15.163 MW	3.447 MW
31.12.2016 23:00	15.422 MW	3.402 MW



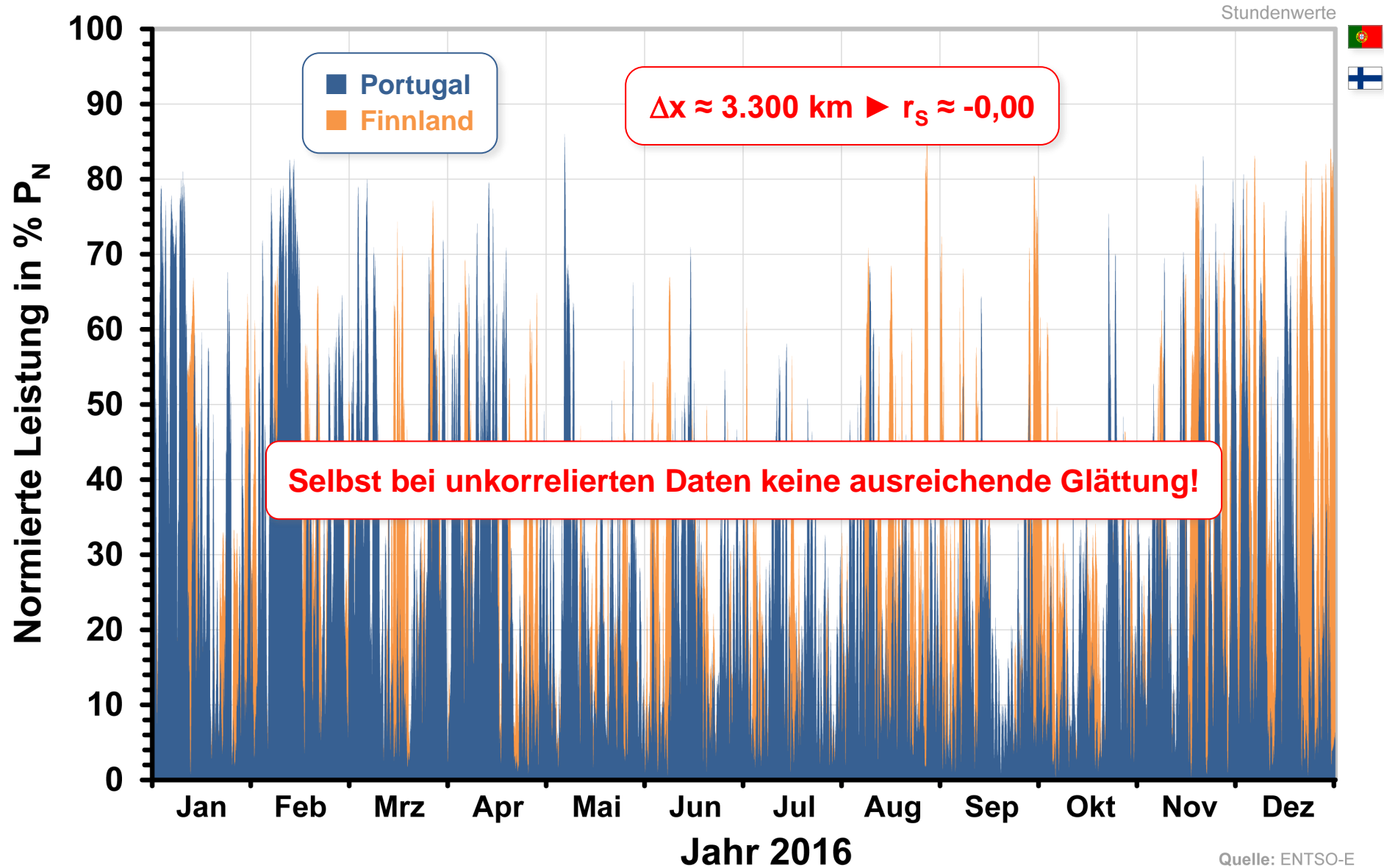




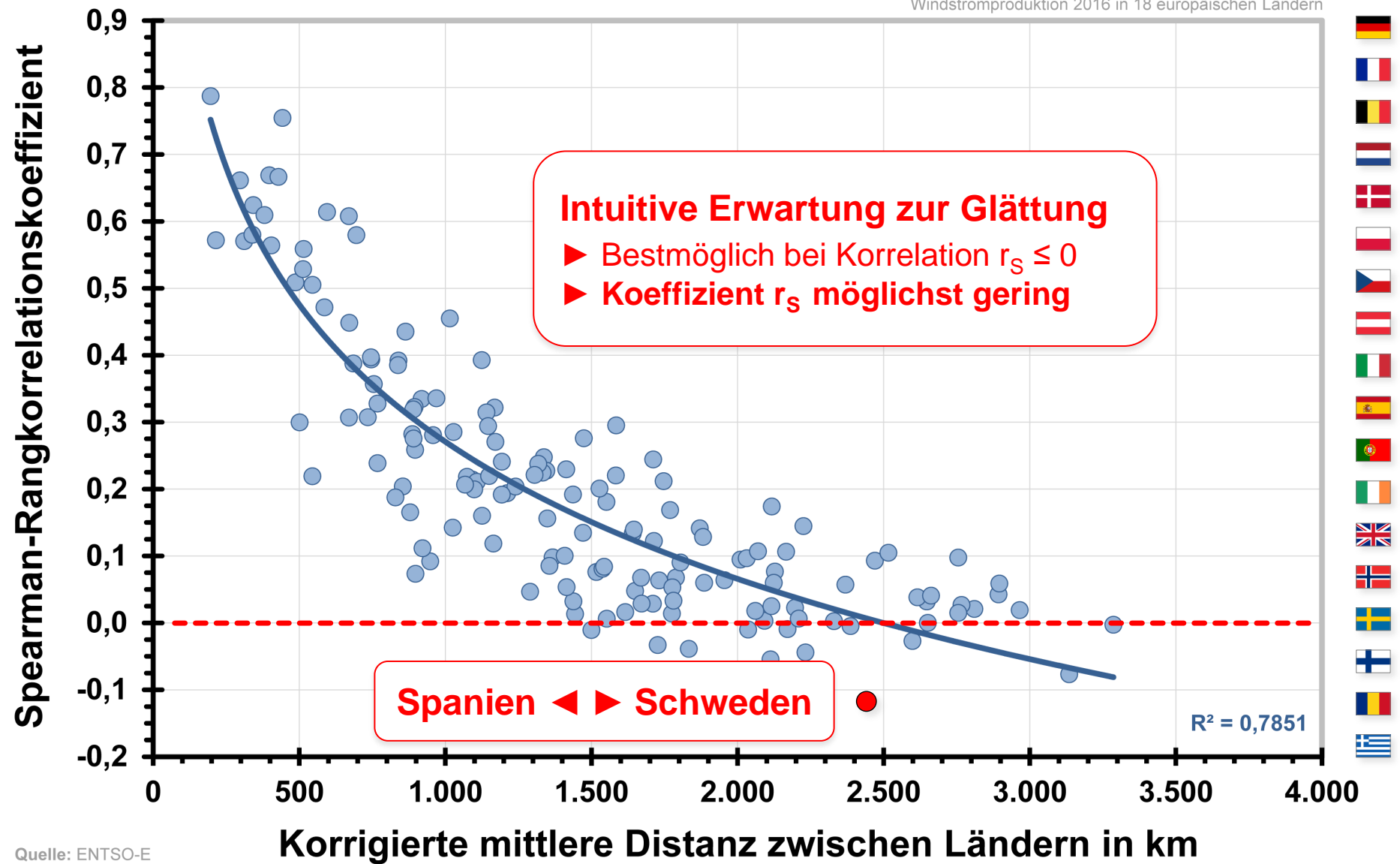


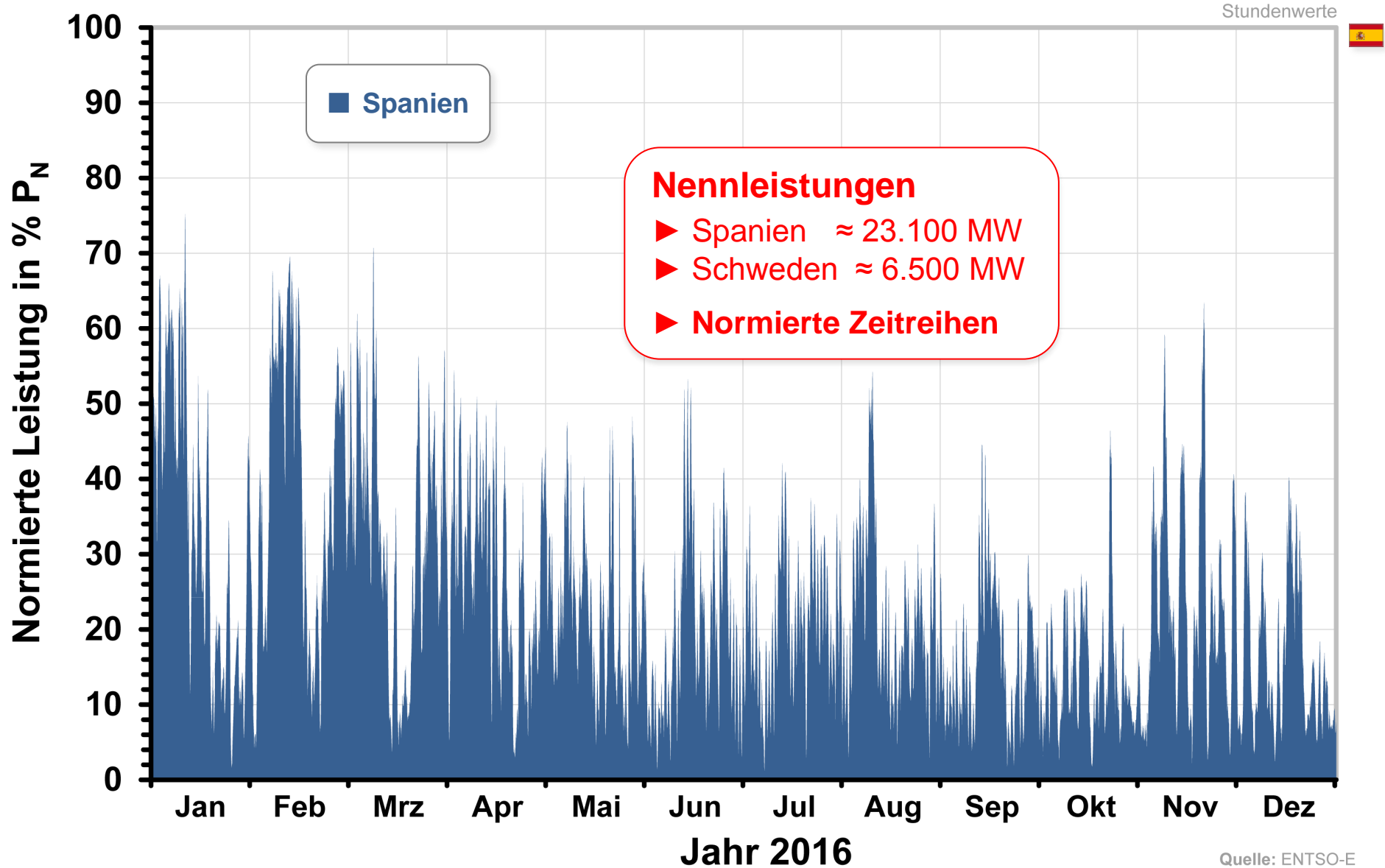


Quelle: ENTSO-E

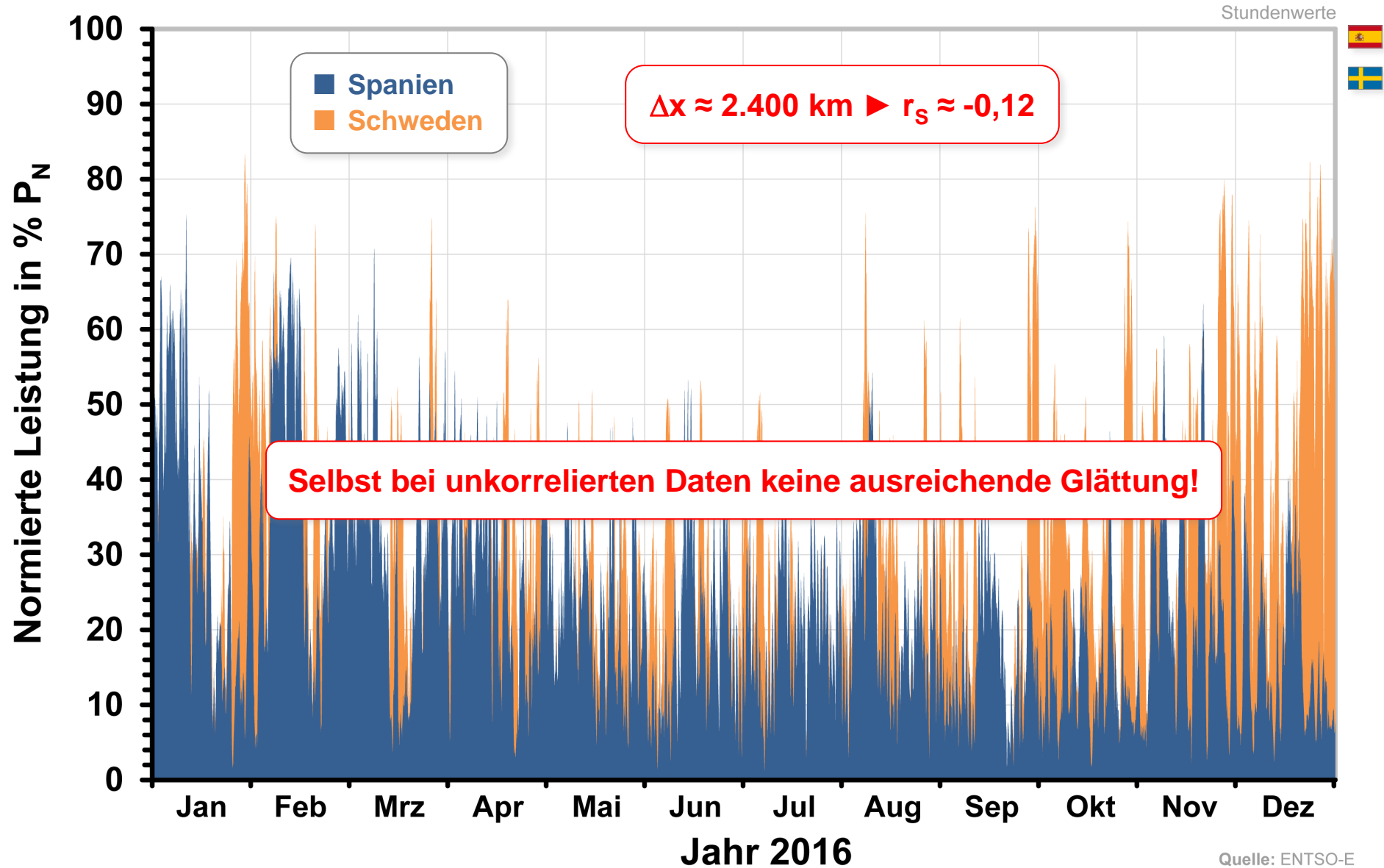


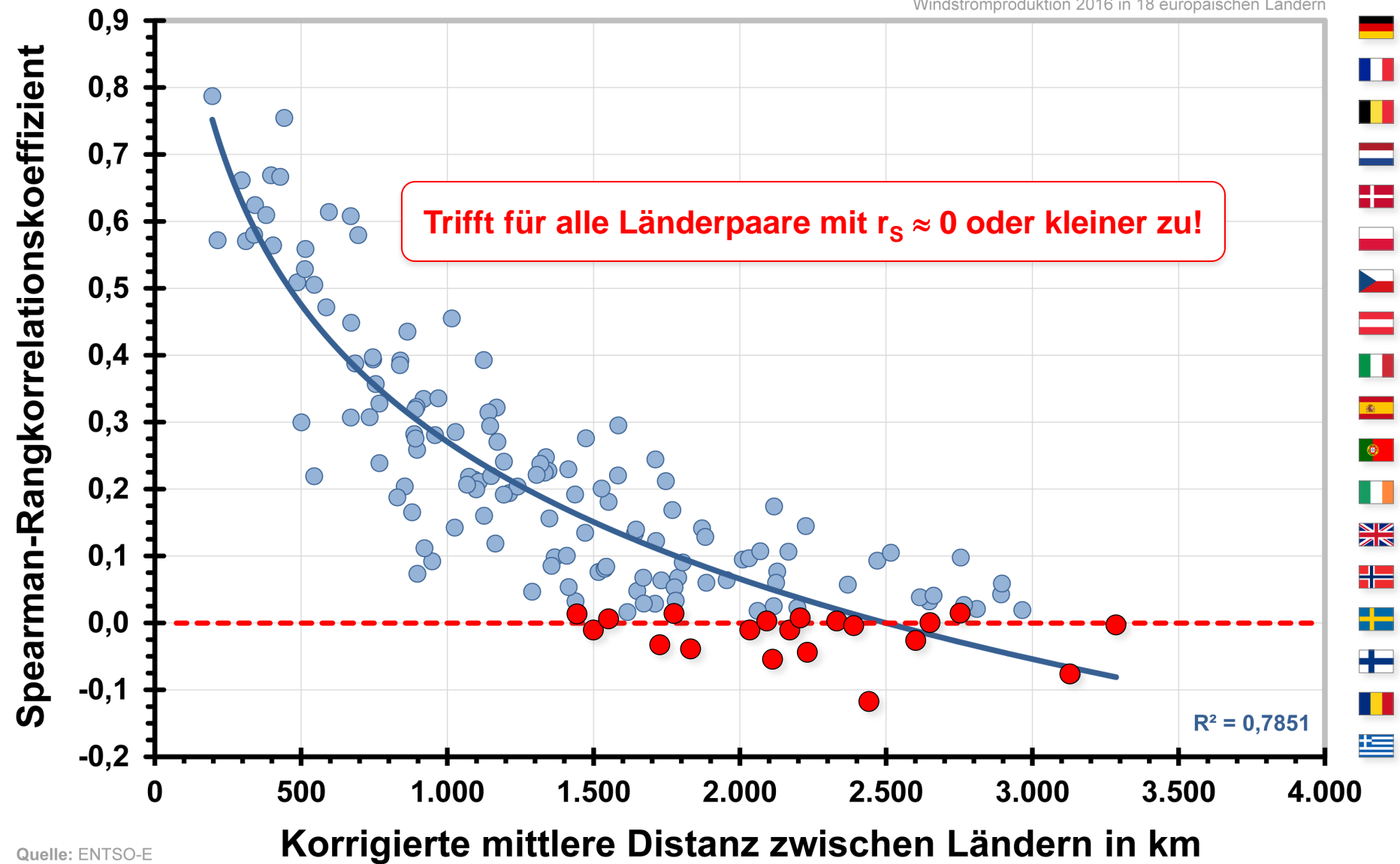


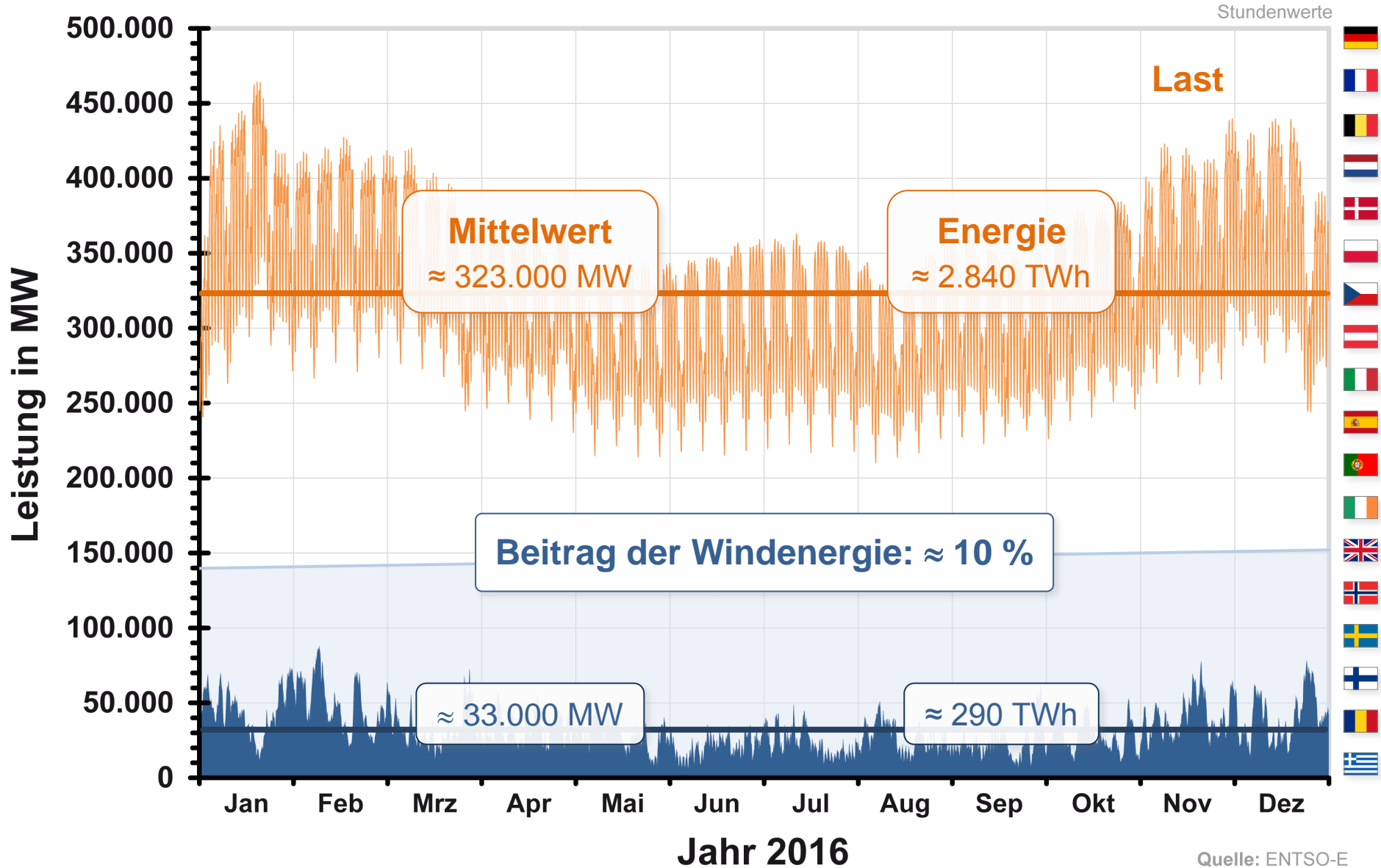




Quelle: ENTSO-E

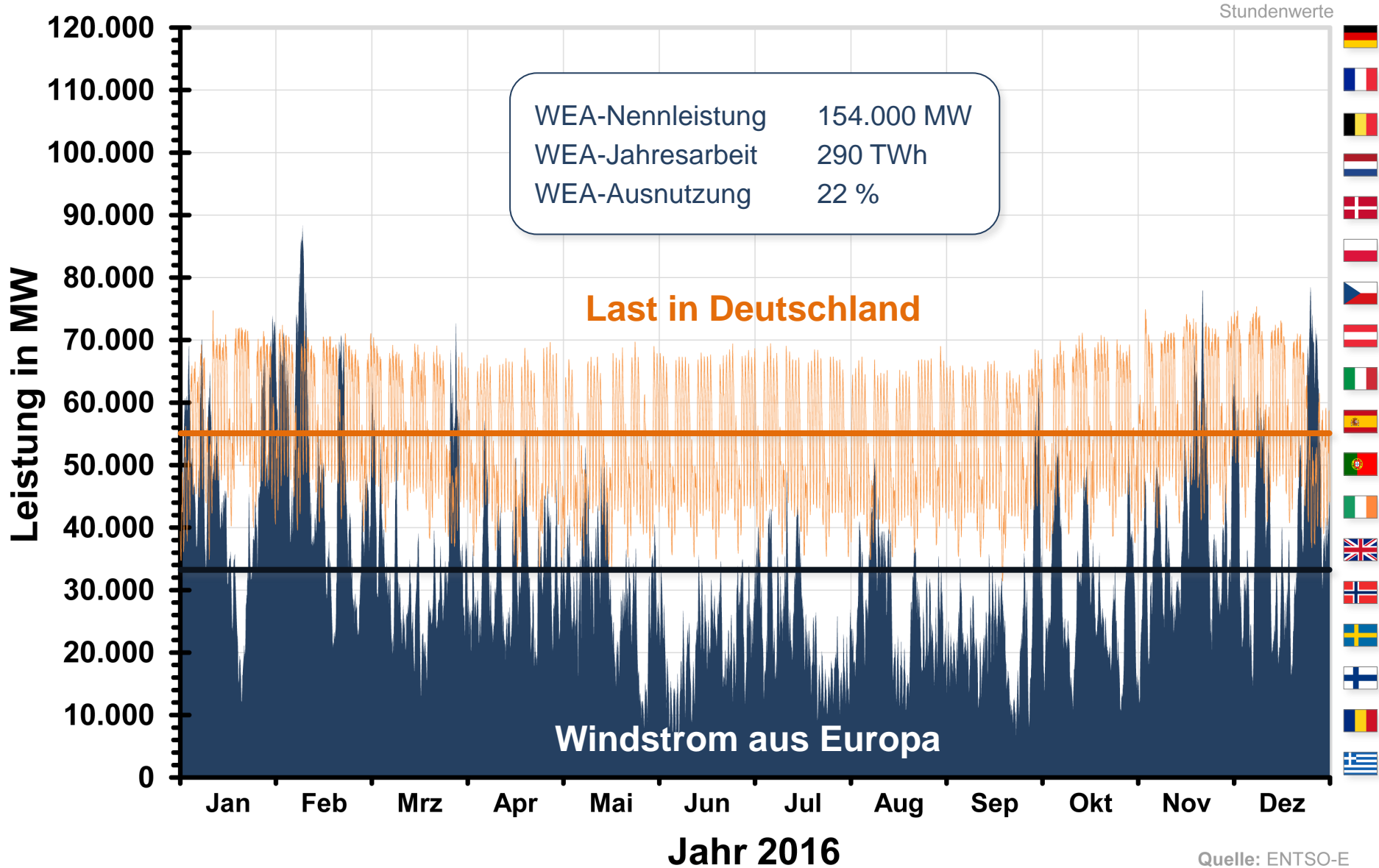






## Erkenntnisse

- Sehr geringe Glättung der Leistungseinspeisungen aus Windenergie in 18 Ländern (Annahme: Kupferplatte über Europa, keine Verluste)
- Ausgeprägte Raumzeitkorrelation der Windstromproduktion: Kaum Glättungseffekte bei räumlich unkorrelierten Daten
- Gesicherte Leistung von etwa 4 % der Nennleistung: Fast 100 % planbare Backup-Leistung notwendig

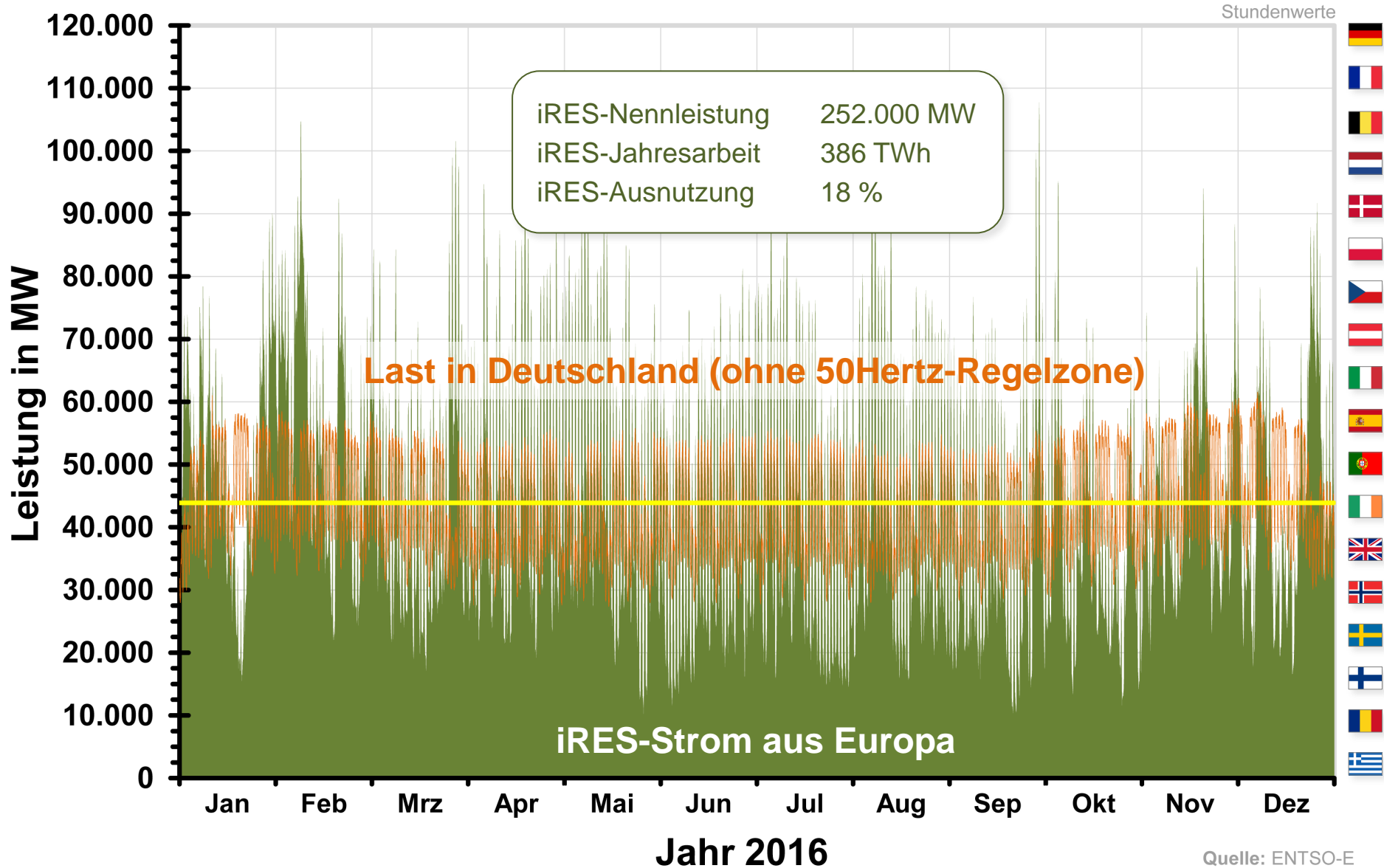


Quelle: ENTSO-E





# Szenario: Wind- plus Solarstrom aus Europa für Deutschland



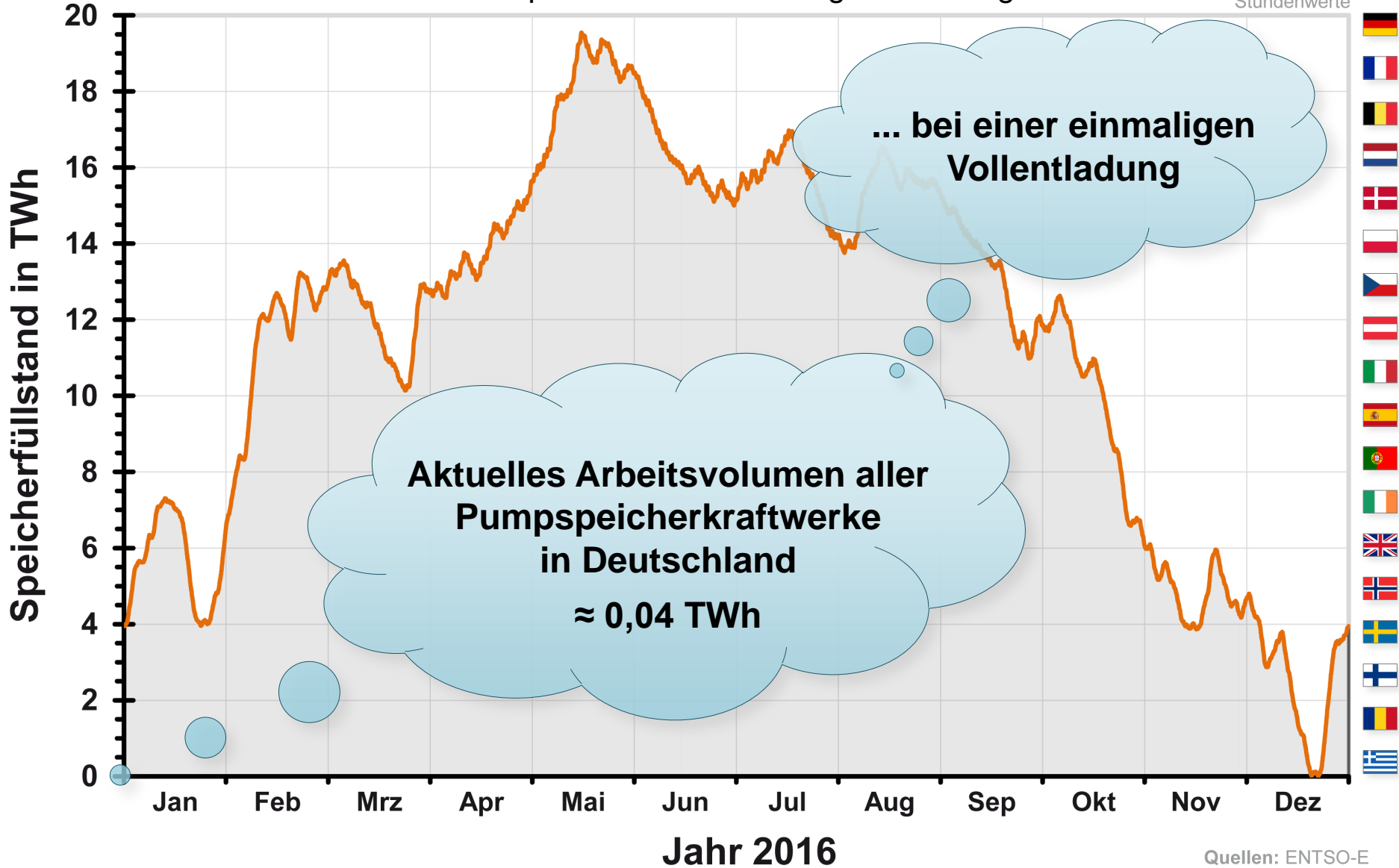
Quelle: ENTSO-E

iRES: intermittierende regenerative Energiesysteme (Wind/Solar)

## 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



**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: Erland Christensen / Dr. Oliver Then**

**Registergericht: Amtsgericht Essen**

**Registernummer: VR 1788**

**[www.vgb.org](http://www.vgb.org)**

# **Es gilt das gesprochene Wort!**