

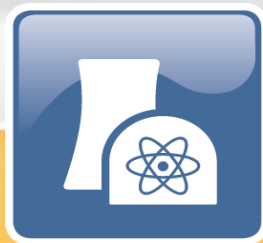
# Windenergie in Deutschland und Europa

## 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

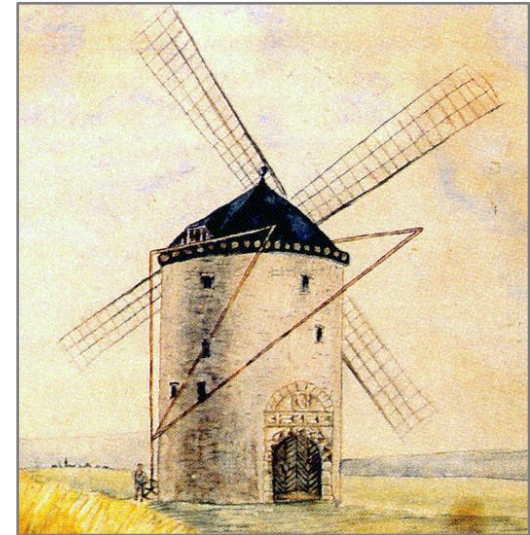


Illustration: [www.kultur-denkmal-merzenich.de](http://www.kultur-denkmal-merzenich.de)

## ➤ **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

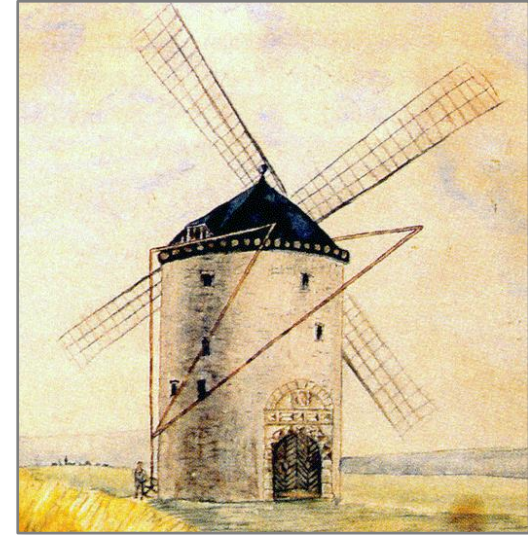
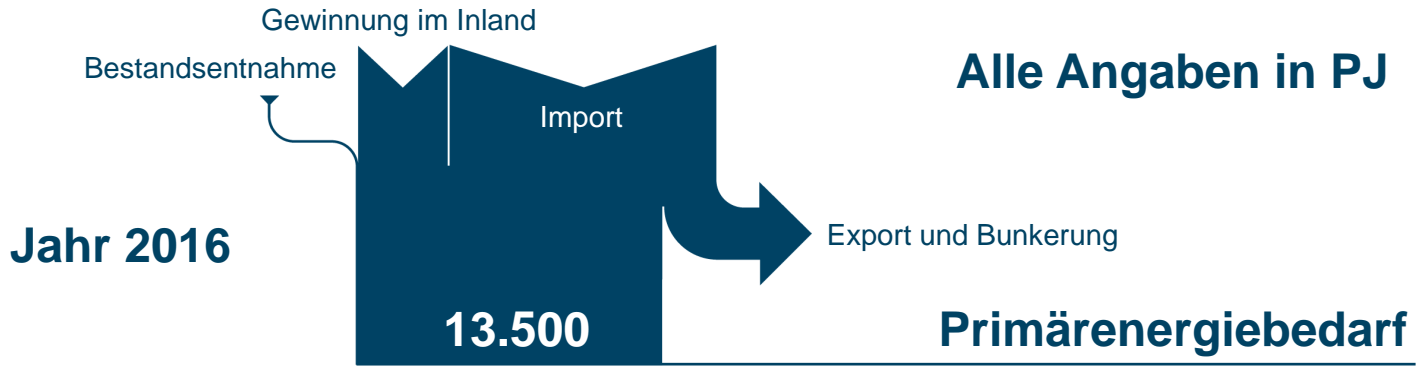


Illustration: [www.kultur-denkmal-merzenich.de](http://www.kultur-denkmal-merzenich.de)



≈ 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

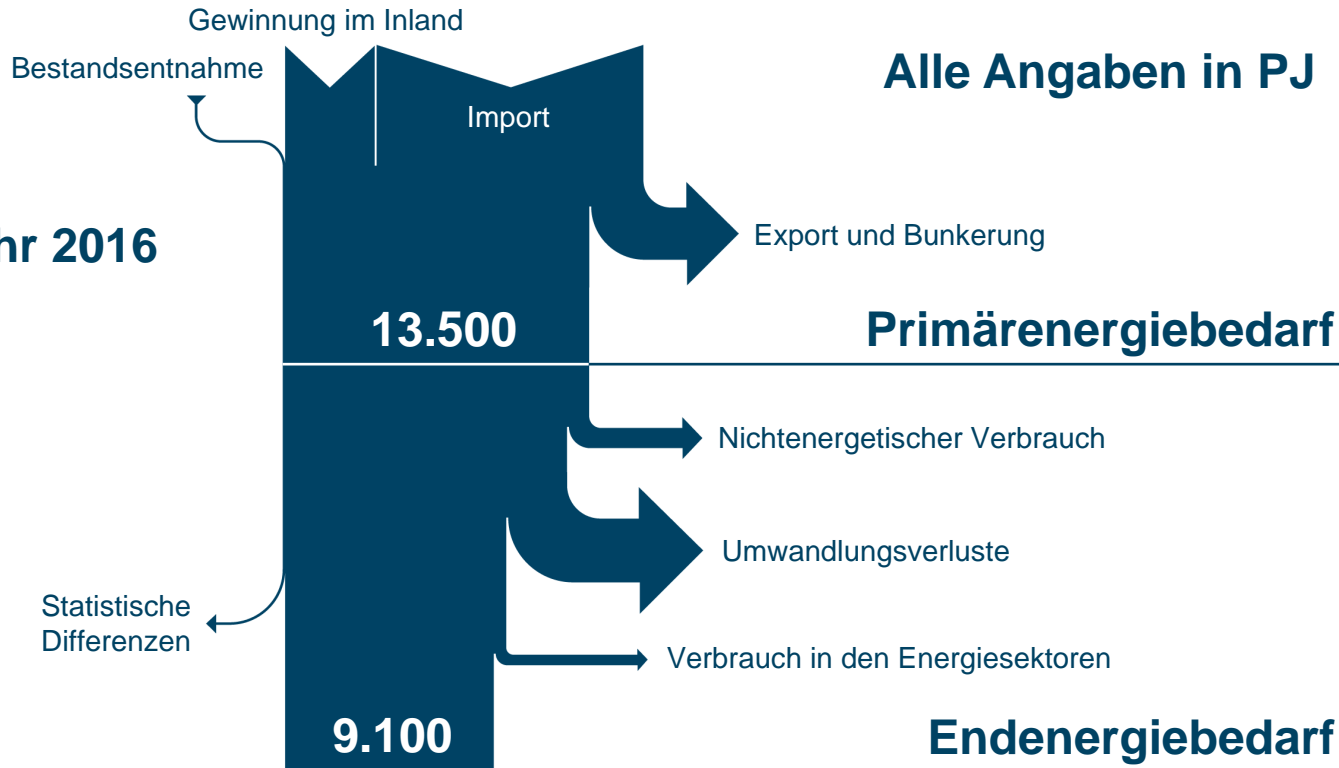
Umrechnung: 1 PJ =  $10^{15}$  J und 1 TWh = 3,6 PJ Quelle: AGEB





Alle Angaben in PJ

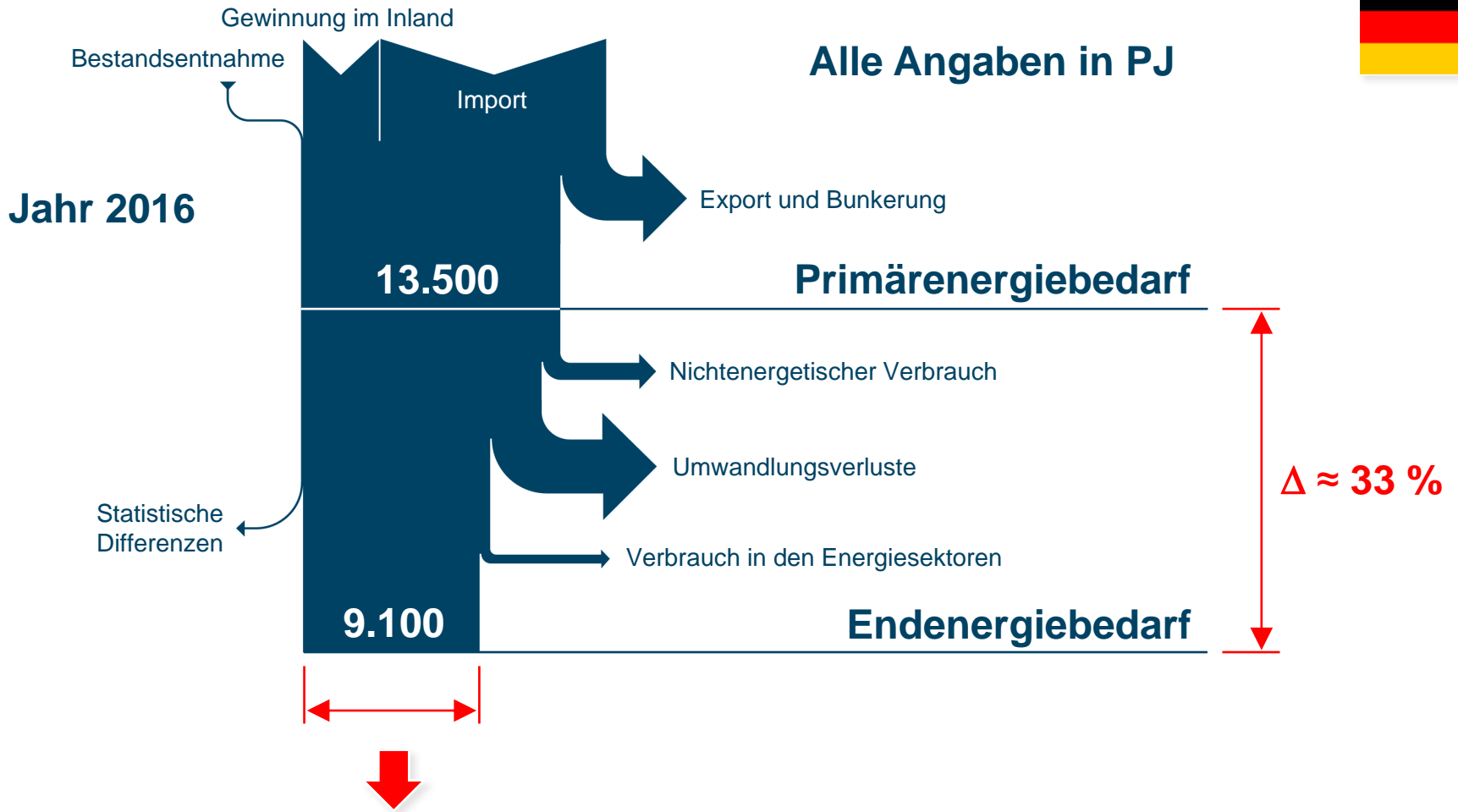
Jahr 2016



≈ 2.500 TWh

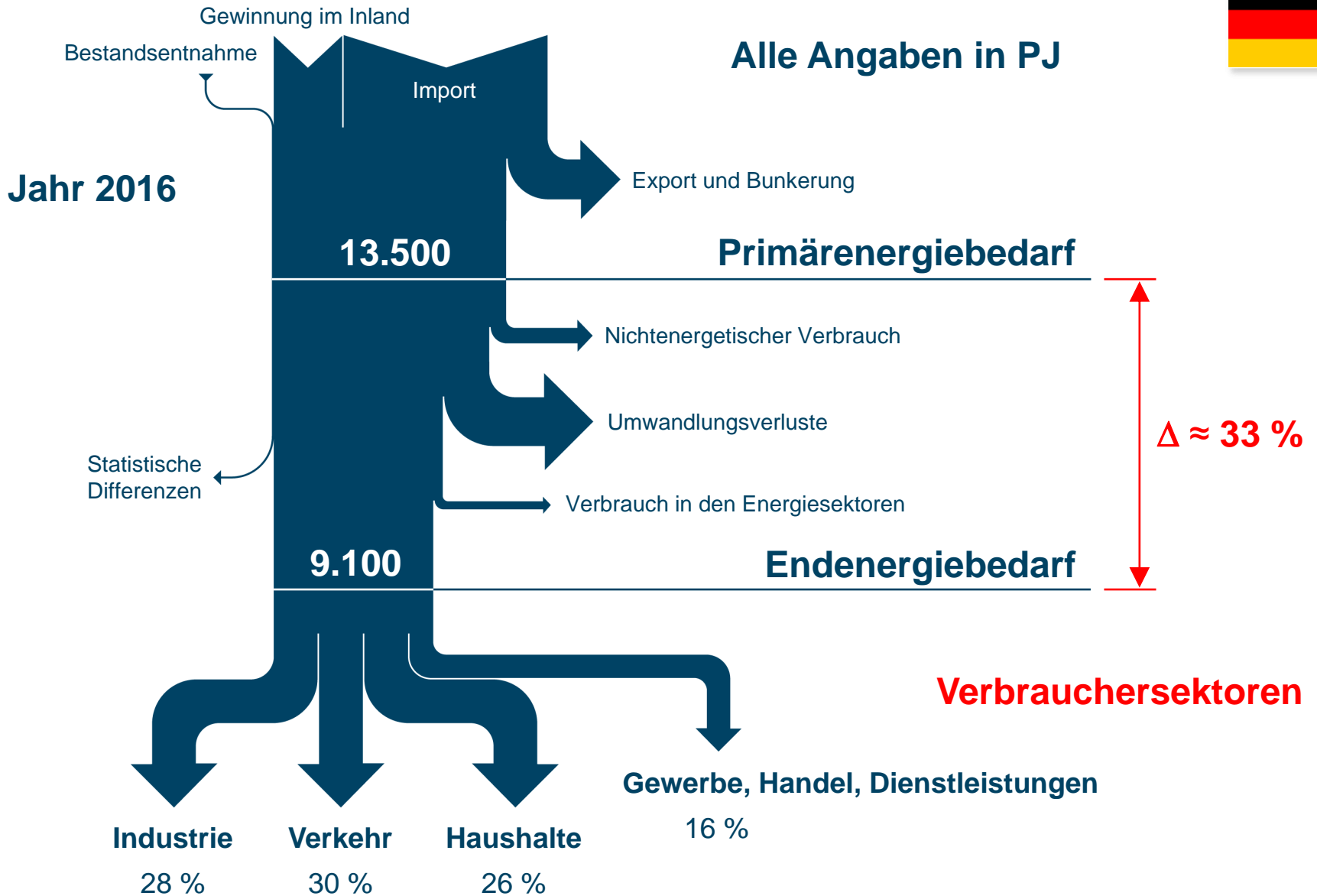
Umrechnung: 1 PJ =  $10^{15}$  J und 1 TWh = 3,6 PJ Quelle: AGE B



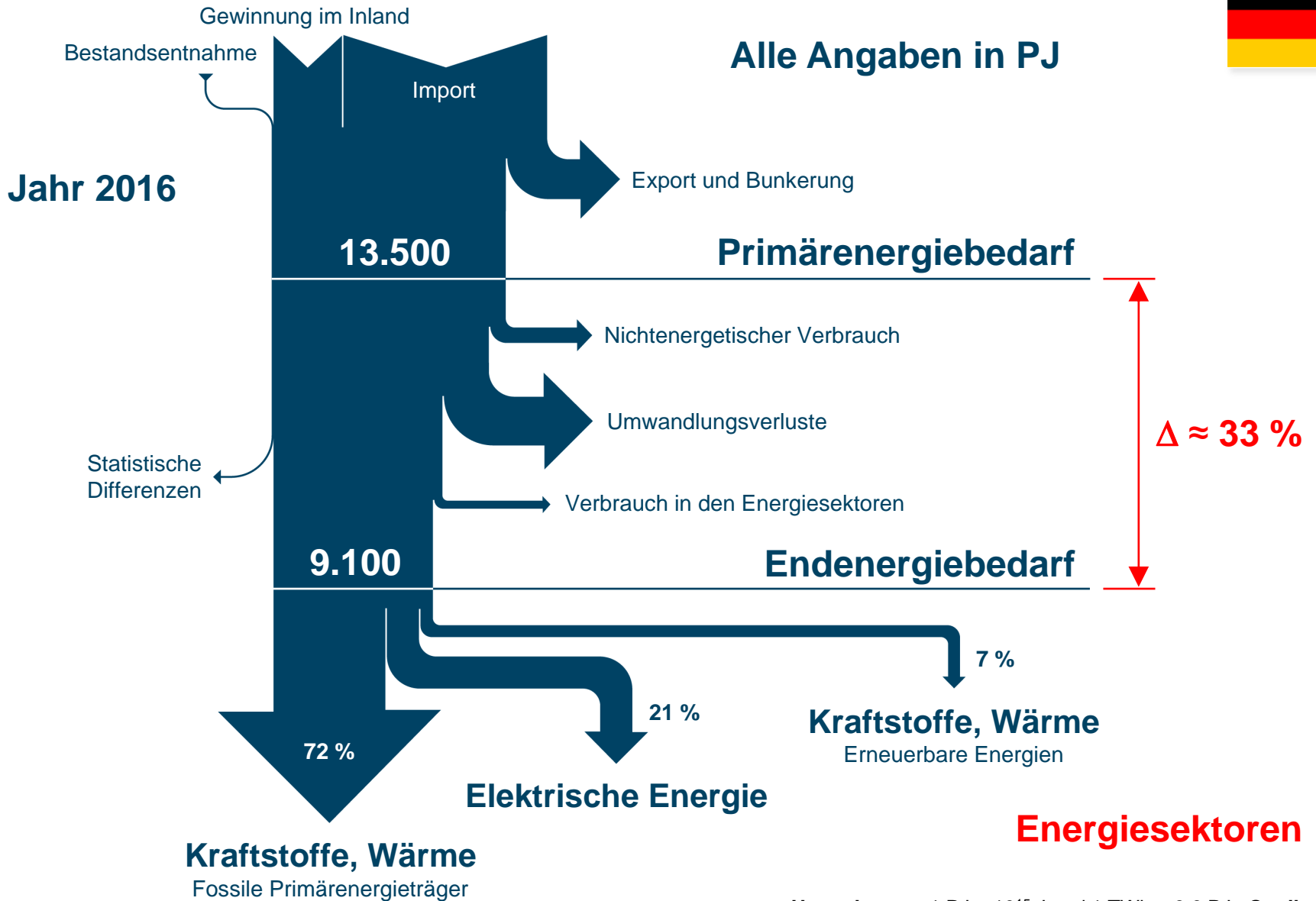


**Endenergie  $\approx$  zwei Drittel der Primärenergie**

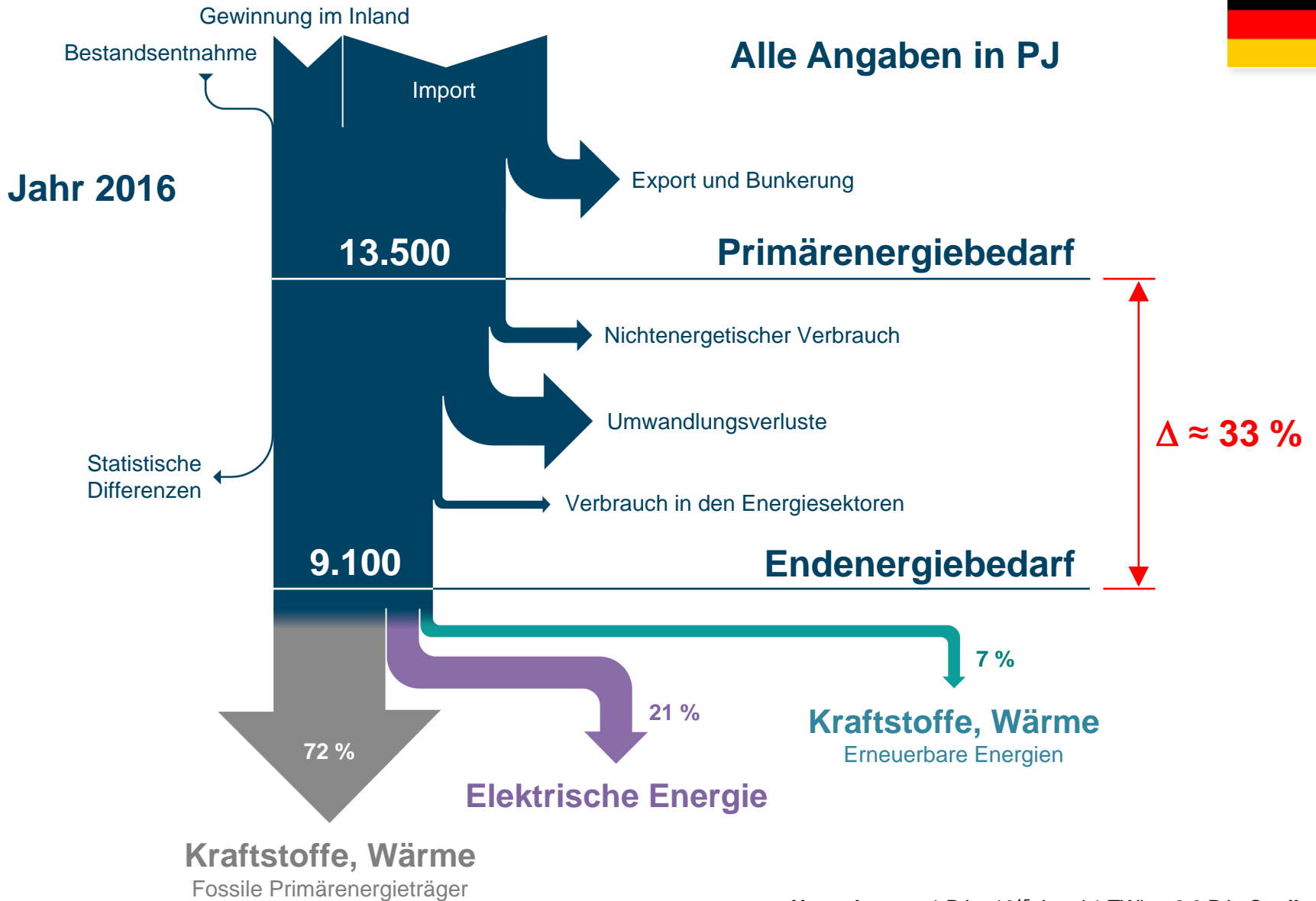




Umrechnung: 1 PJ =  $10^{15}$  J und 1 TWh = 3,6 PJ Quelle: AGEB



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

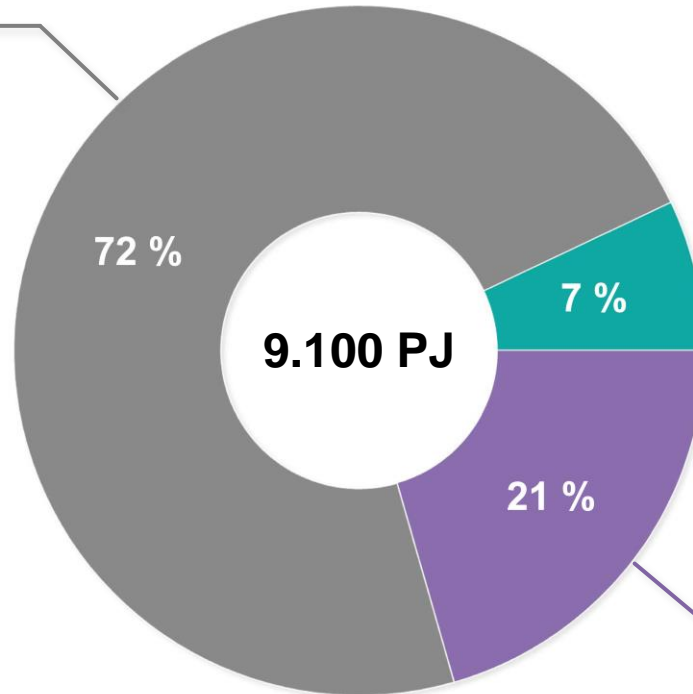




## Endenergiebedarf 2016

### Fossile Energie

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



### Erneuerbare Energie

- Brennstoffe
- Kraftstoffe
- Wärme

### Elektrische Energie

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

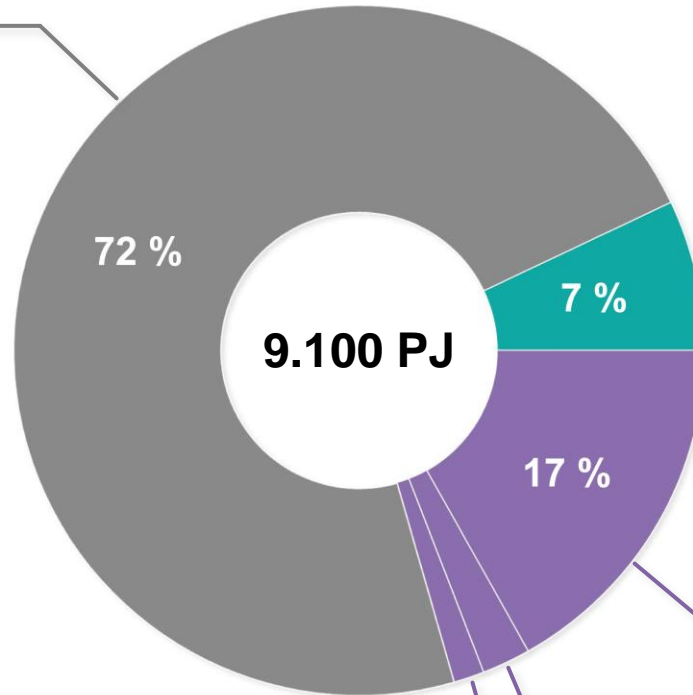
Umrechnung: 1 PJ =  $10^{15}$  J und 1 TWh = 3,6 PJ Quelle: AGEB



## 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

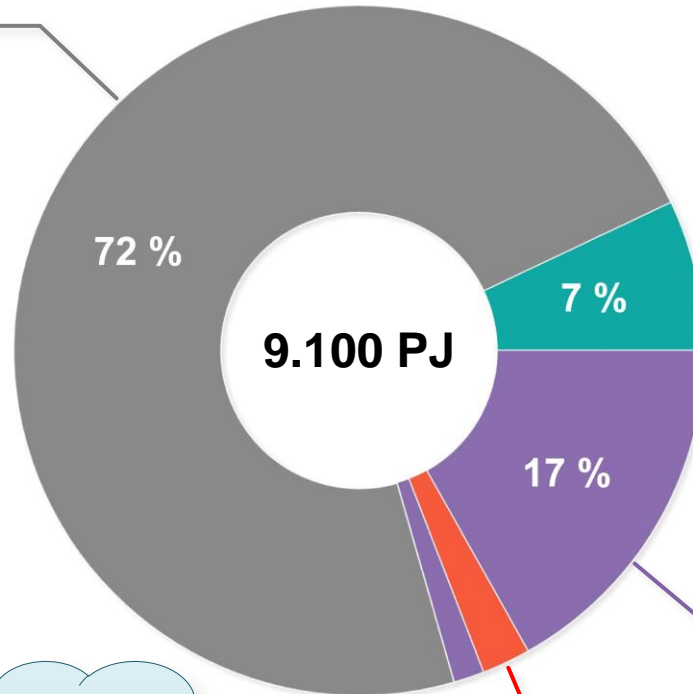




## Endenergiebedarf 2016

### 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

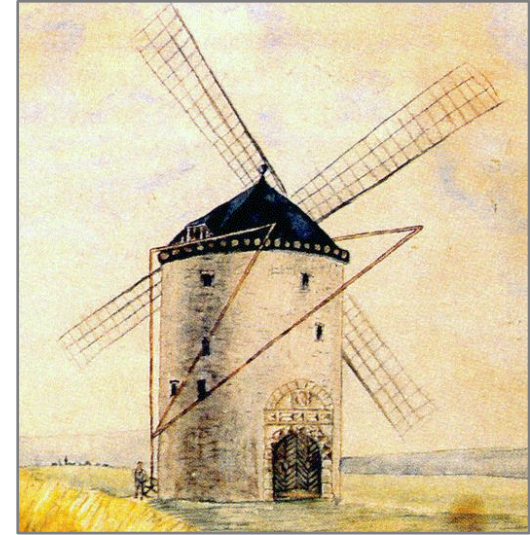
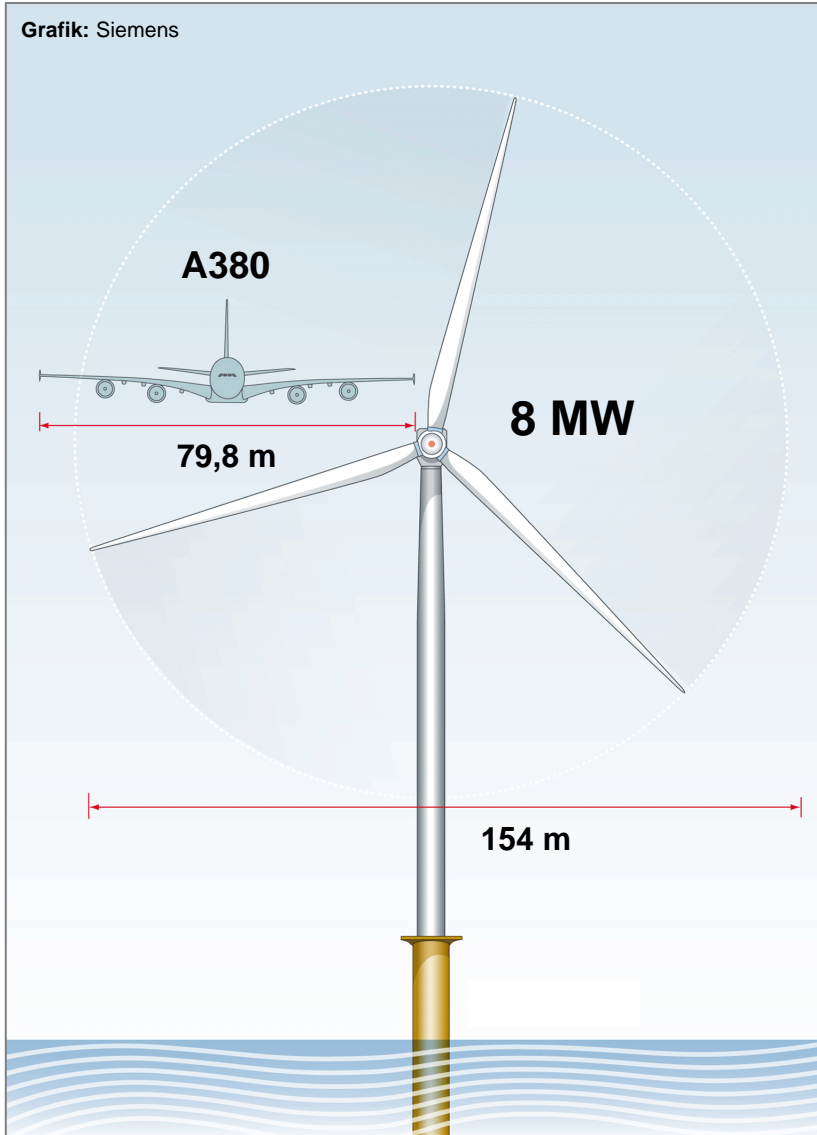
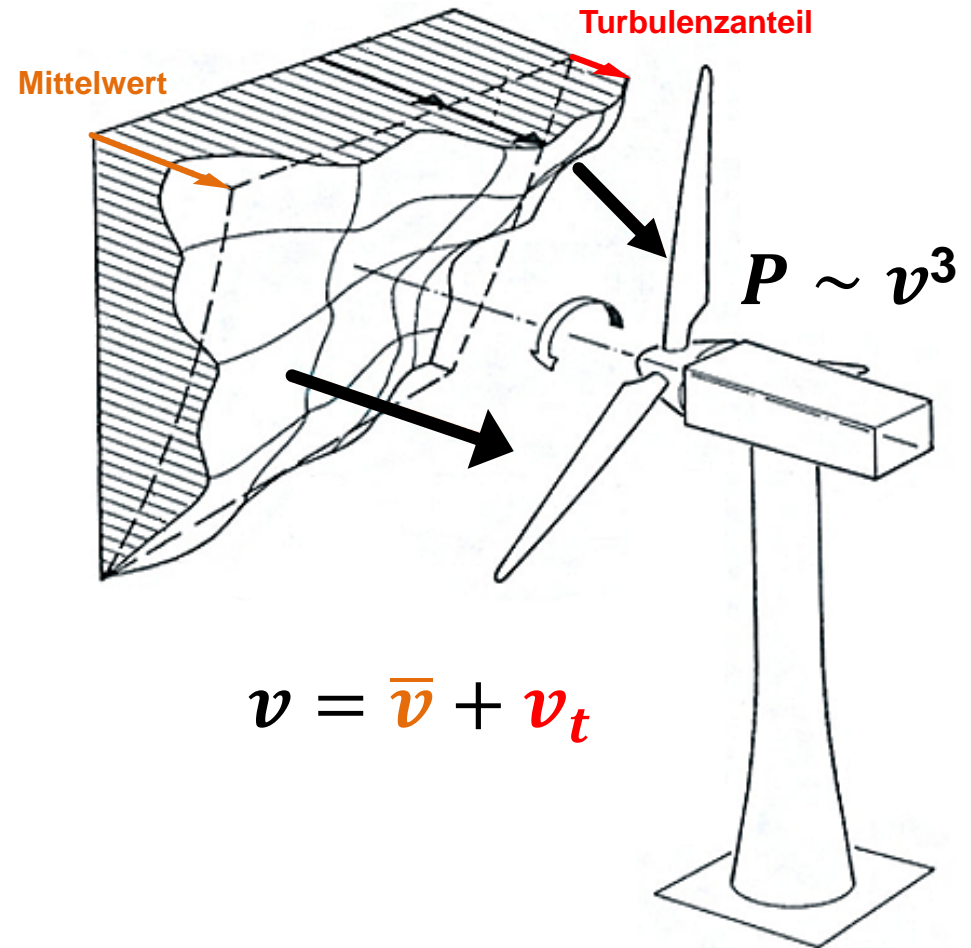


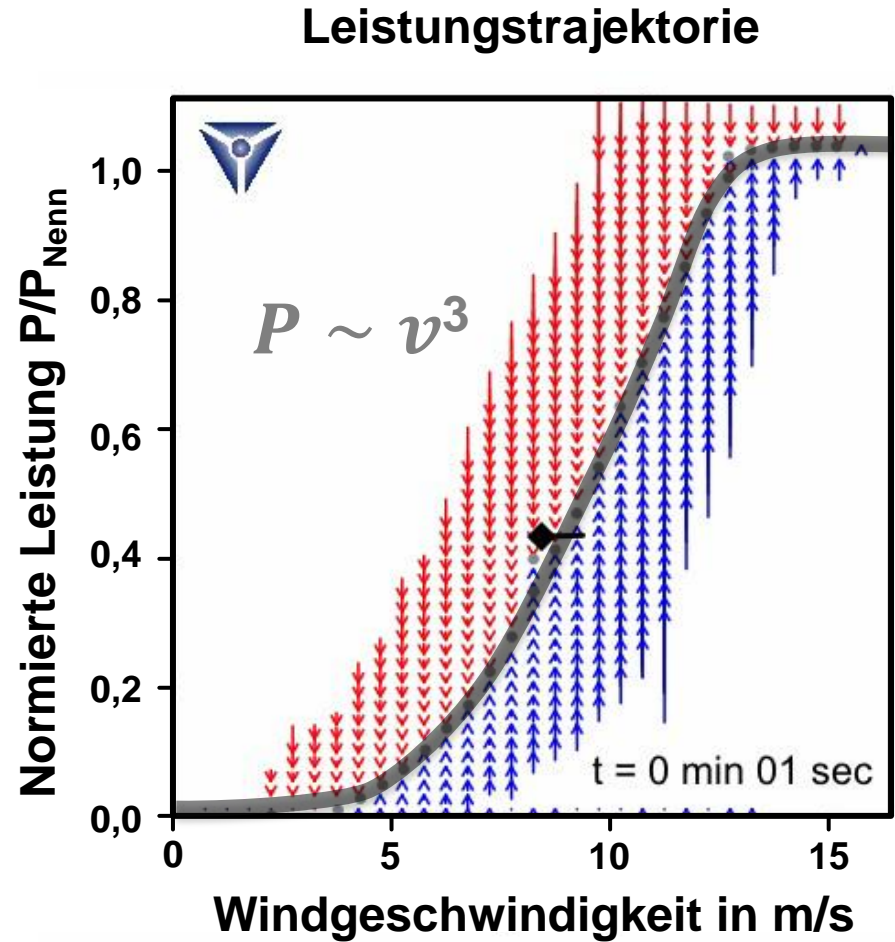
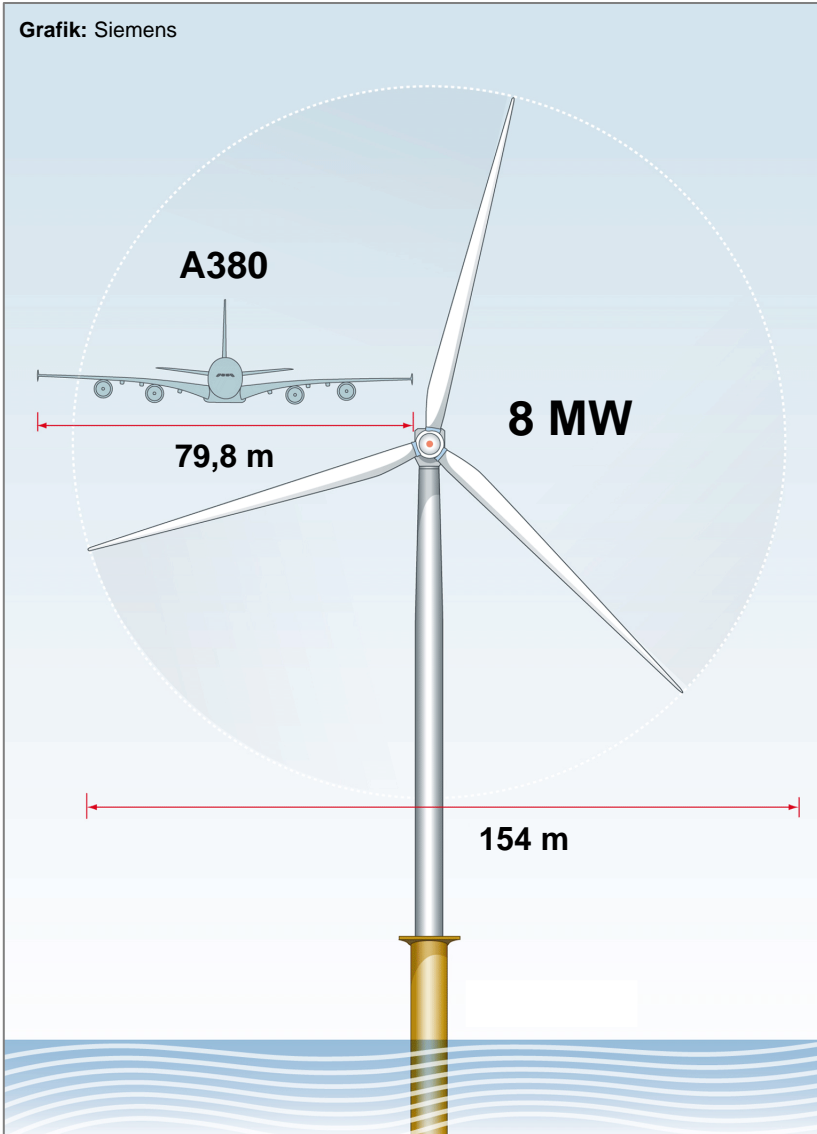
Illustration: [www.kultur-denkmal-merzenich.de](http://www.kultur-denkmal-merzenich.de)

Grafik: Siemens

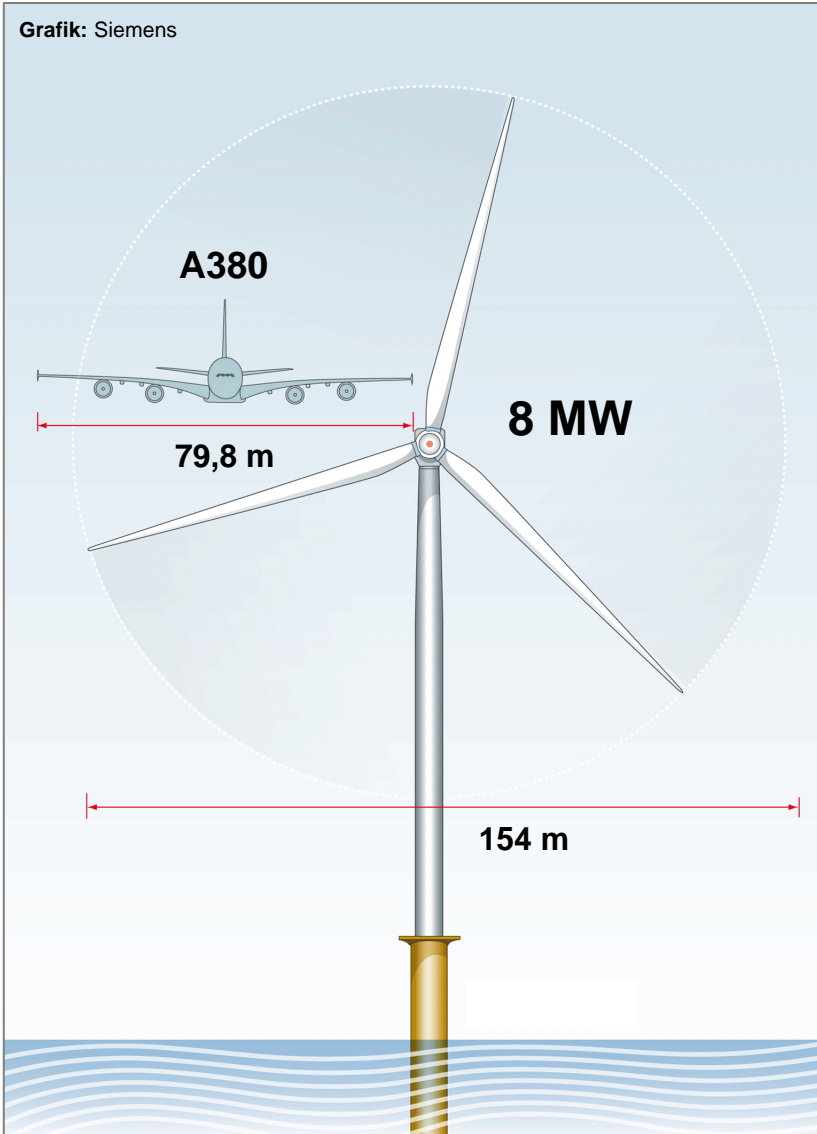


## 3D-Windgeschwindigkeitsfeld

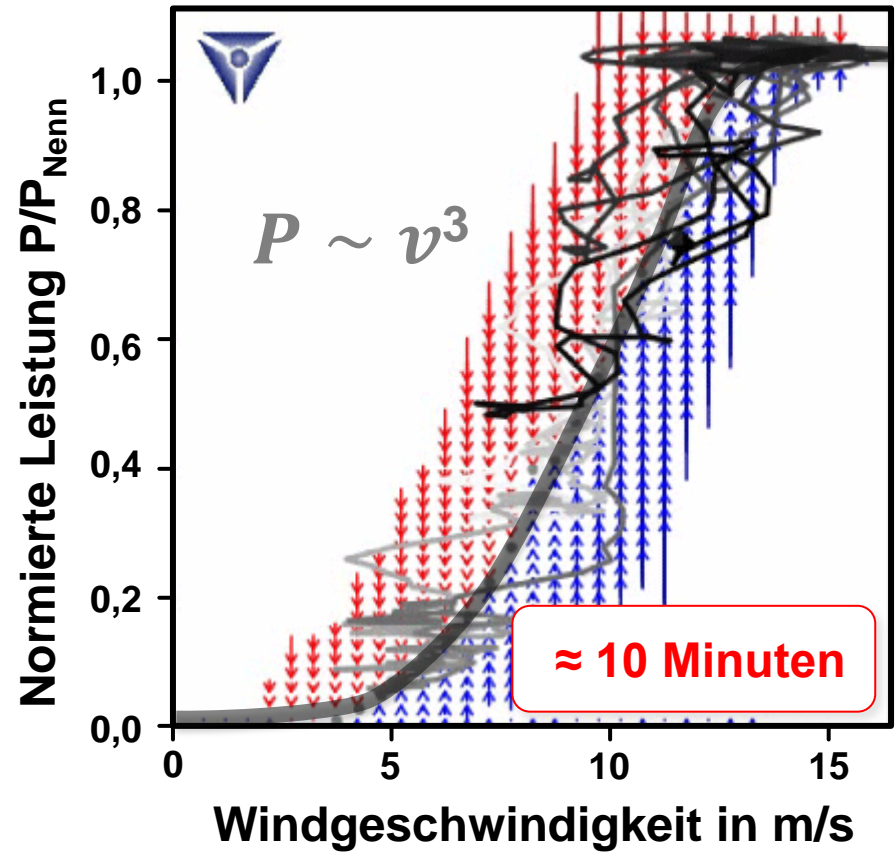




Quelle: Milan, P.; Wächter, M.; Peinke, J.: Turbulent Character of Wind Energy. Physical Review Letters 110, 138701 (2013).

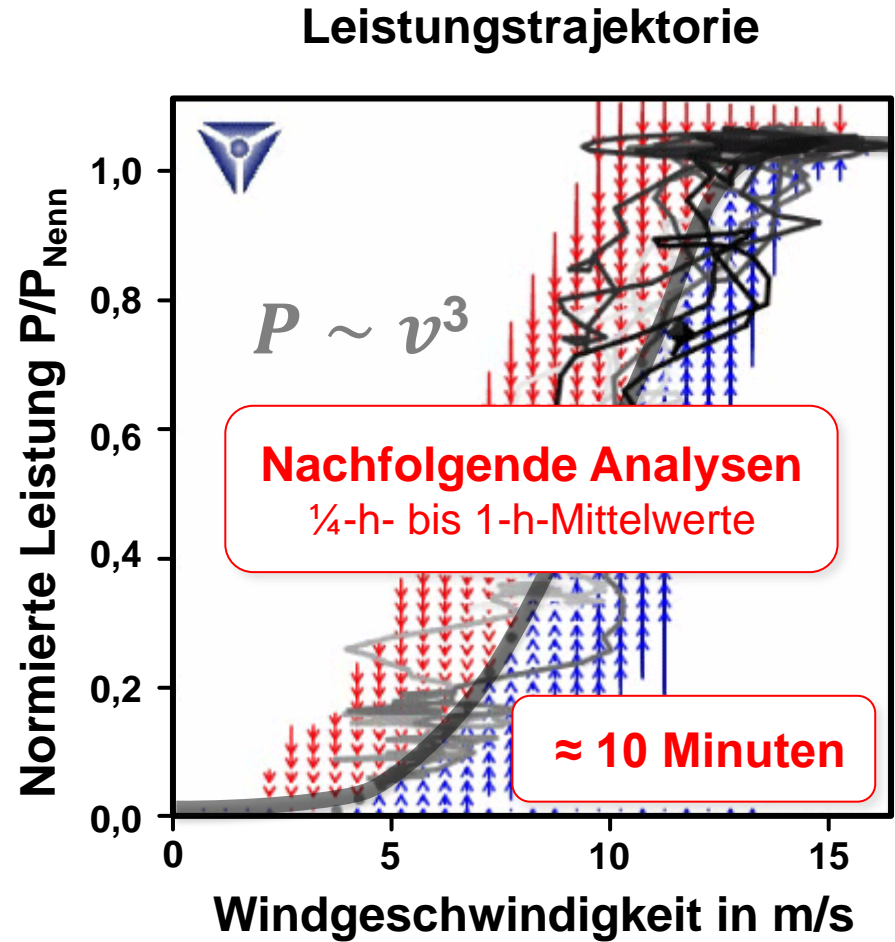
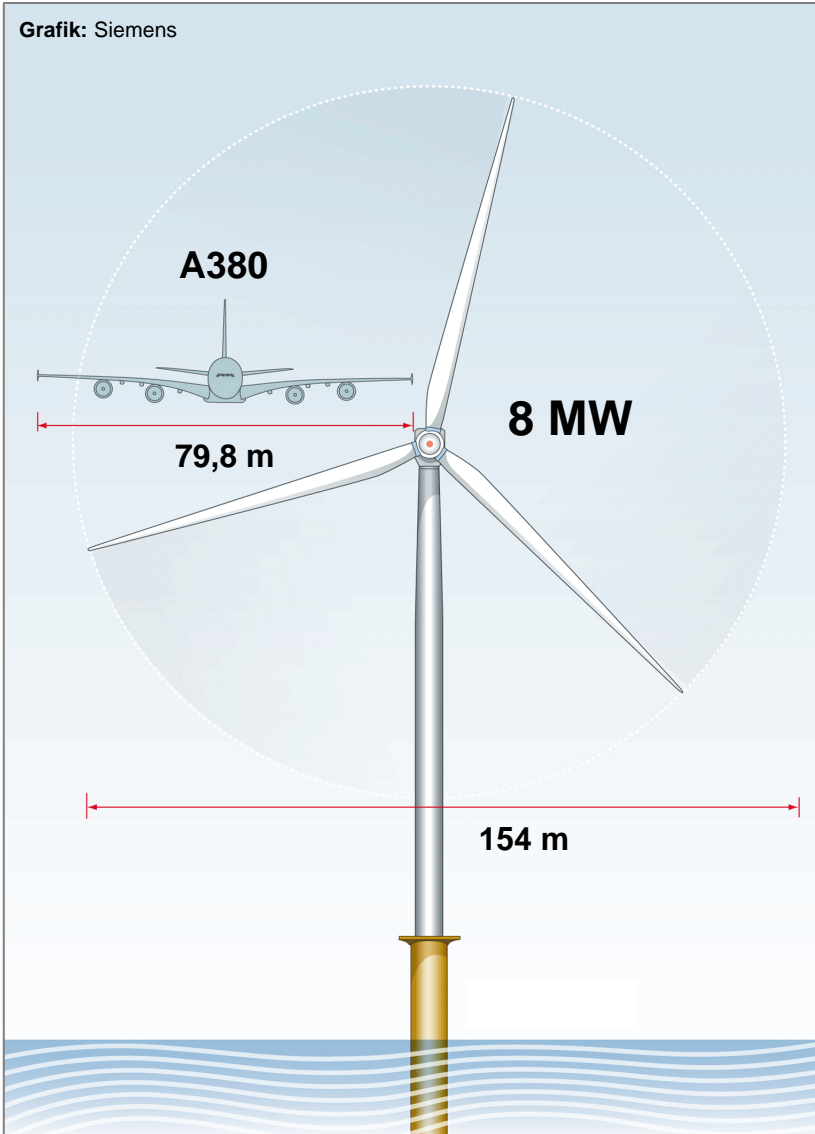


## Leistungstrajektorie



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





Quelle: 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

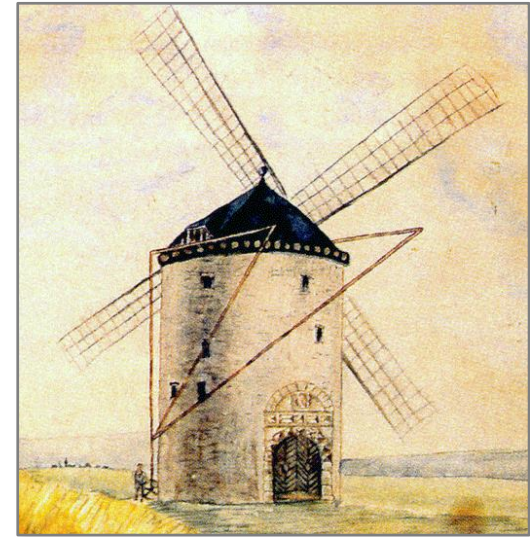
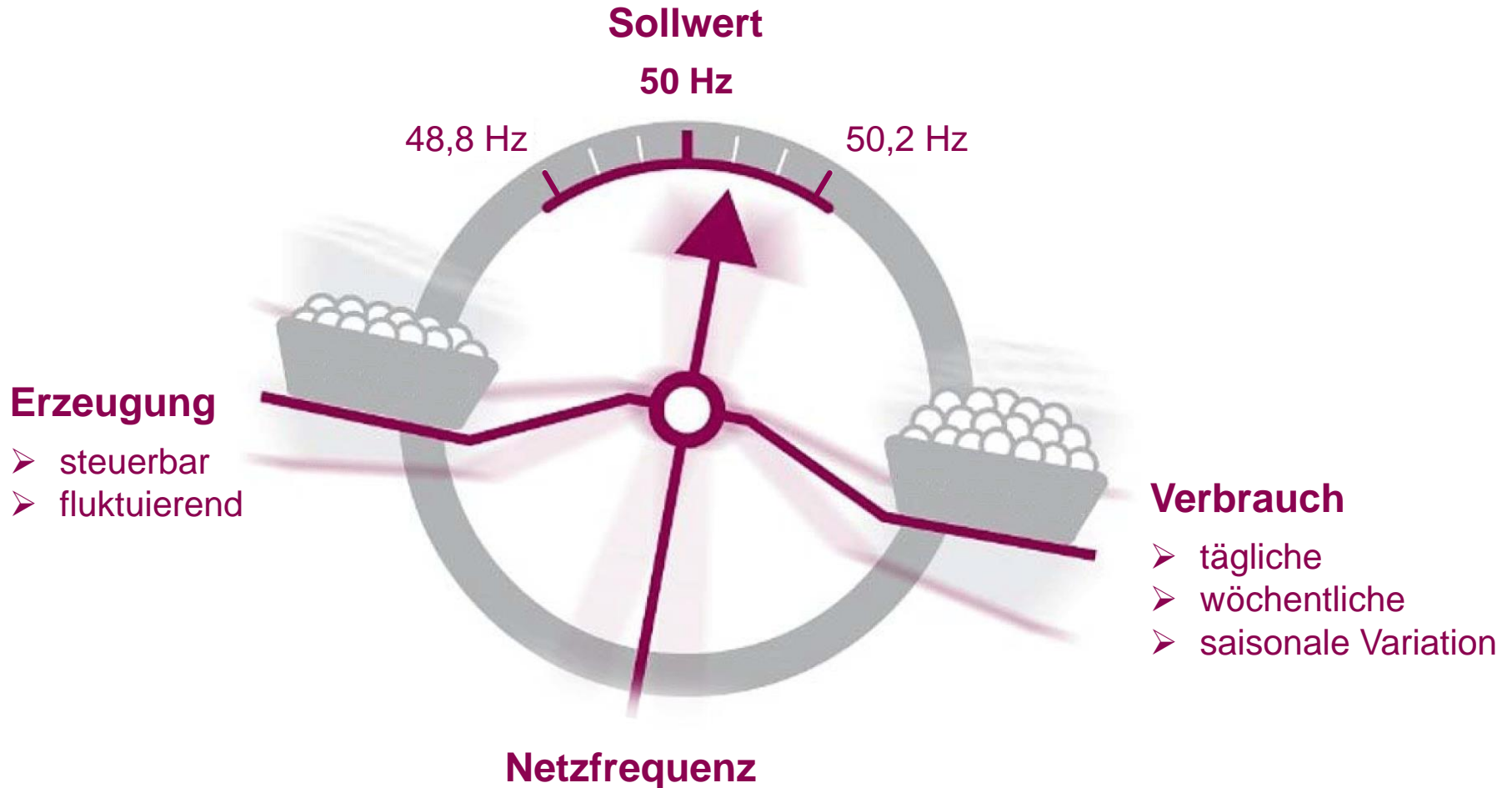


Illustration: [www.kultur-denkmal-merzenich.de](http://www.kultur-denkmal-merzenich.de)



## 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

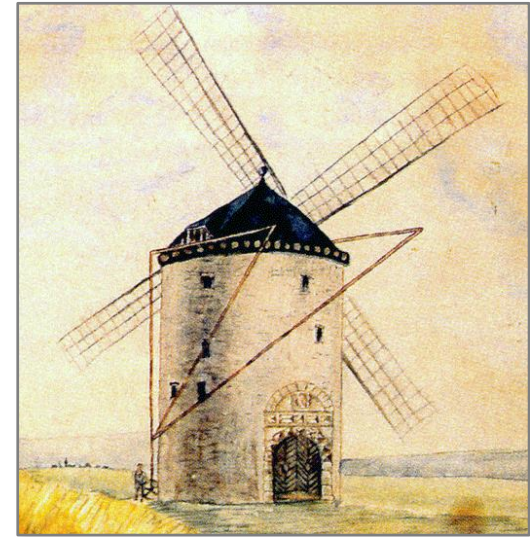


Illustration: [www.kultur-denkmal-merzenich.de](http://www.kultur-denkmal-merzenich.de)

**2010 bis 2018**



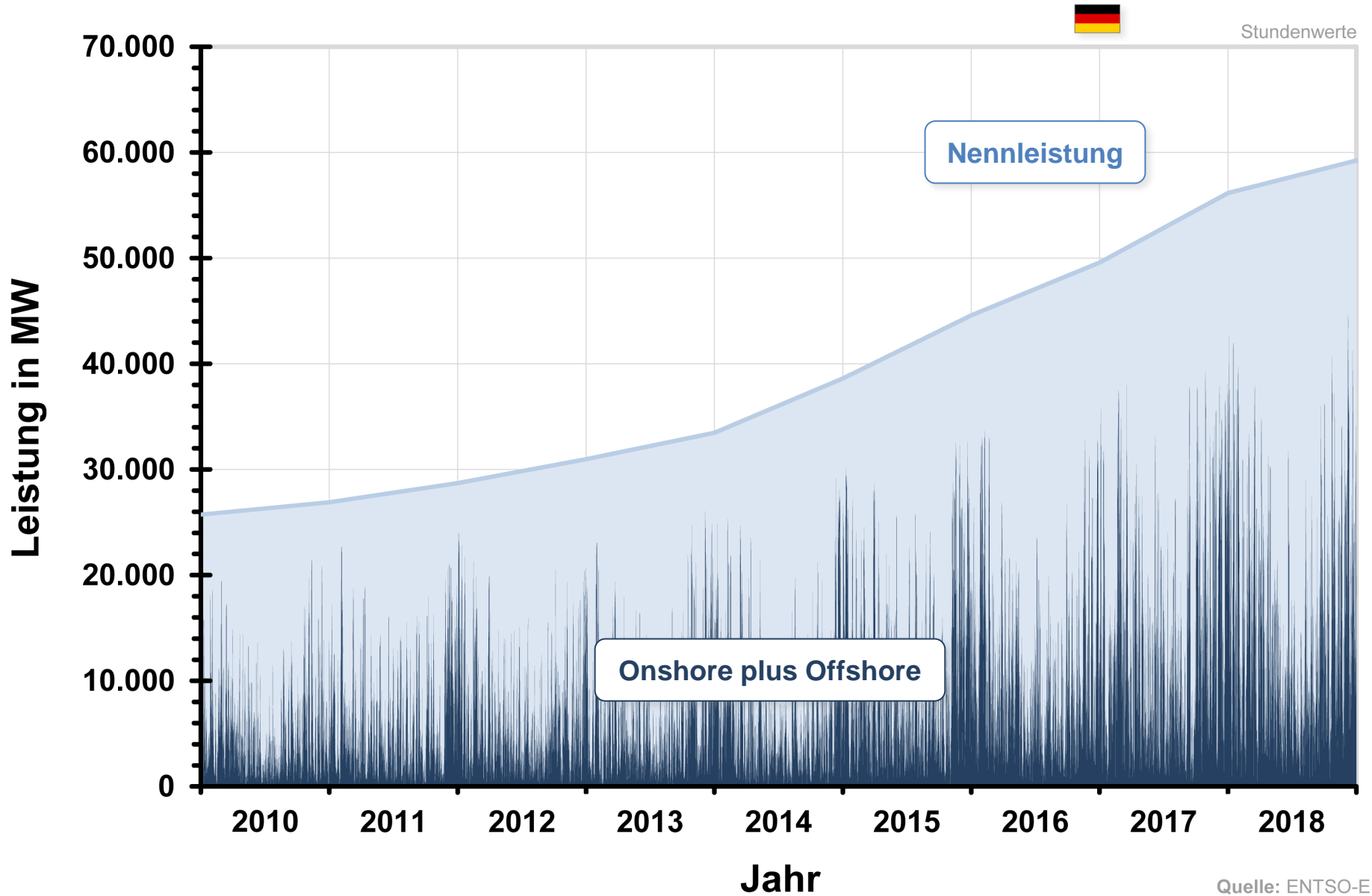
**Weht irgendwo immer Wind für eine Grundversorgung mit Strom?**

## Zeitreihen der Leistung

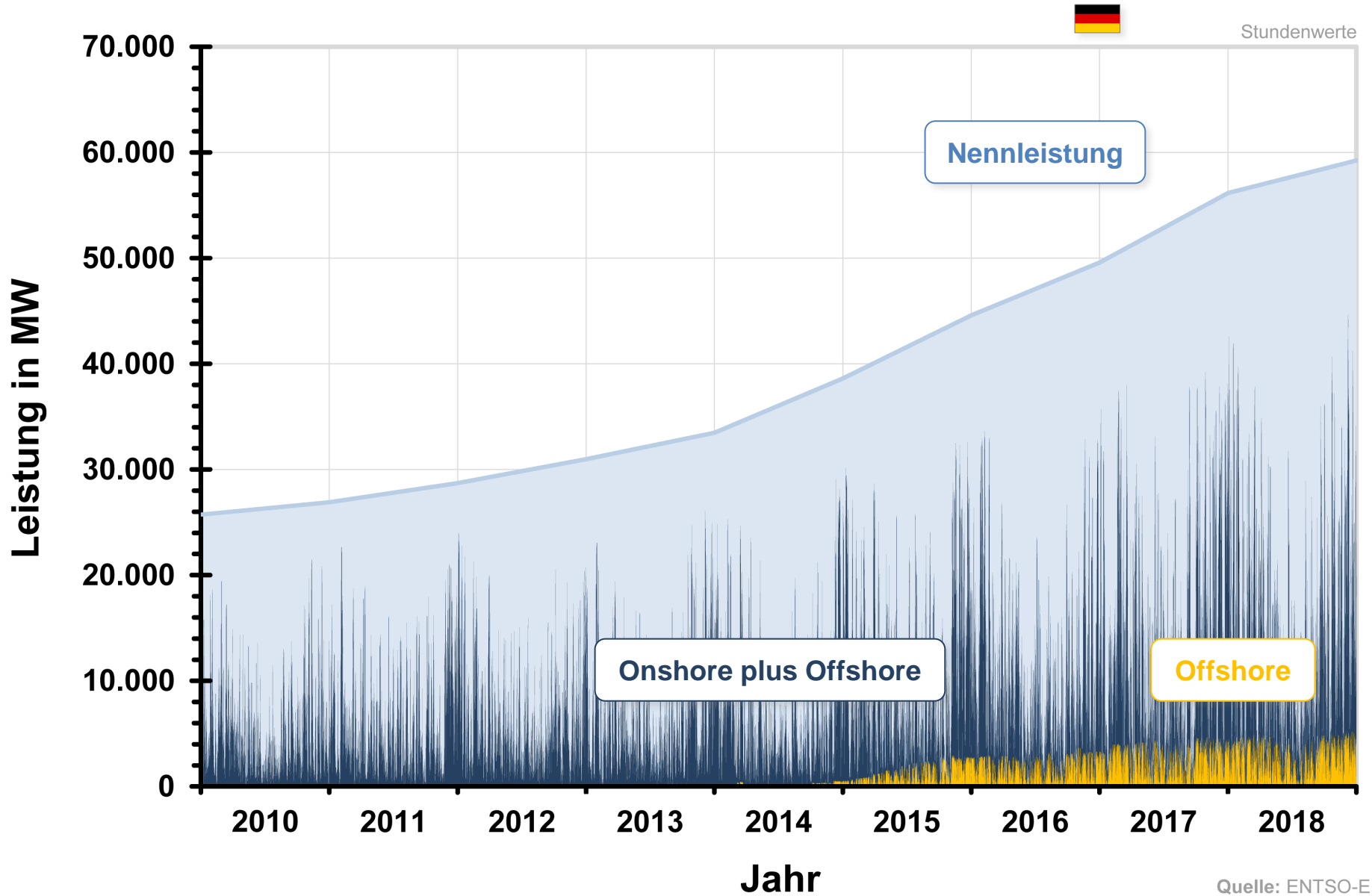
- **ÜNB**  
Nationale Übertragungsnetzbetreiber
- **ENTSO-E**  
Europäische Übertragungsnetzbetreiber

## Energiestatistische Daten

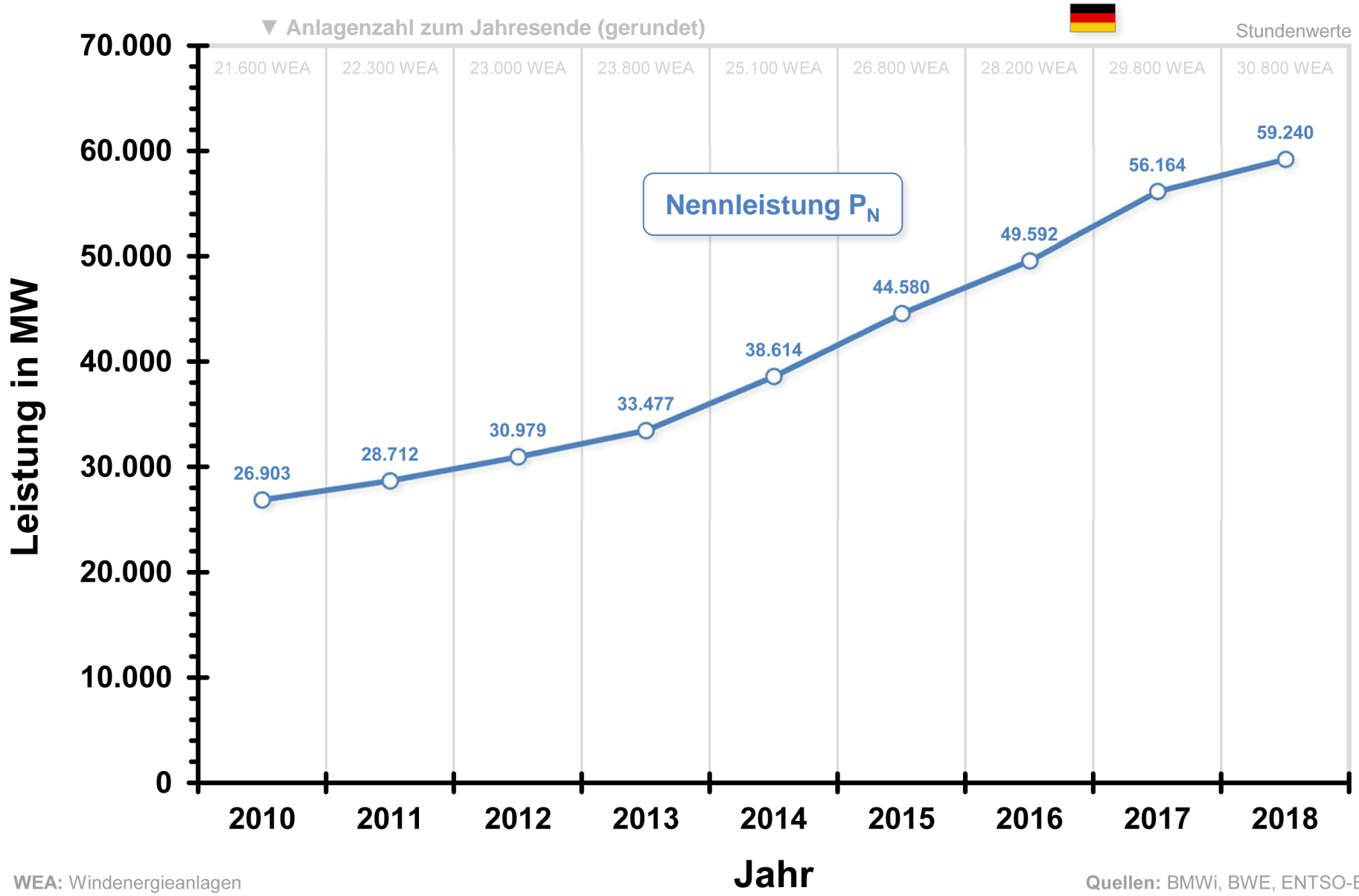
- **AGEB**  
Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
- **BDEW**  
Bundesverband Energie- und Wasserwirtschaft
- **BMWi**  
Bundeswirtschaftsministerium
- **BWE**  
Bundesverband Windenergie



Quelle: ENTSO-E

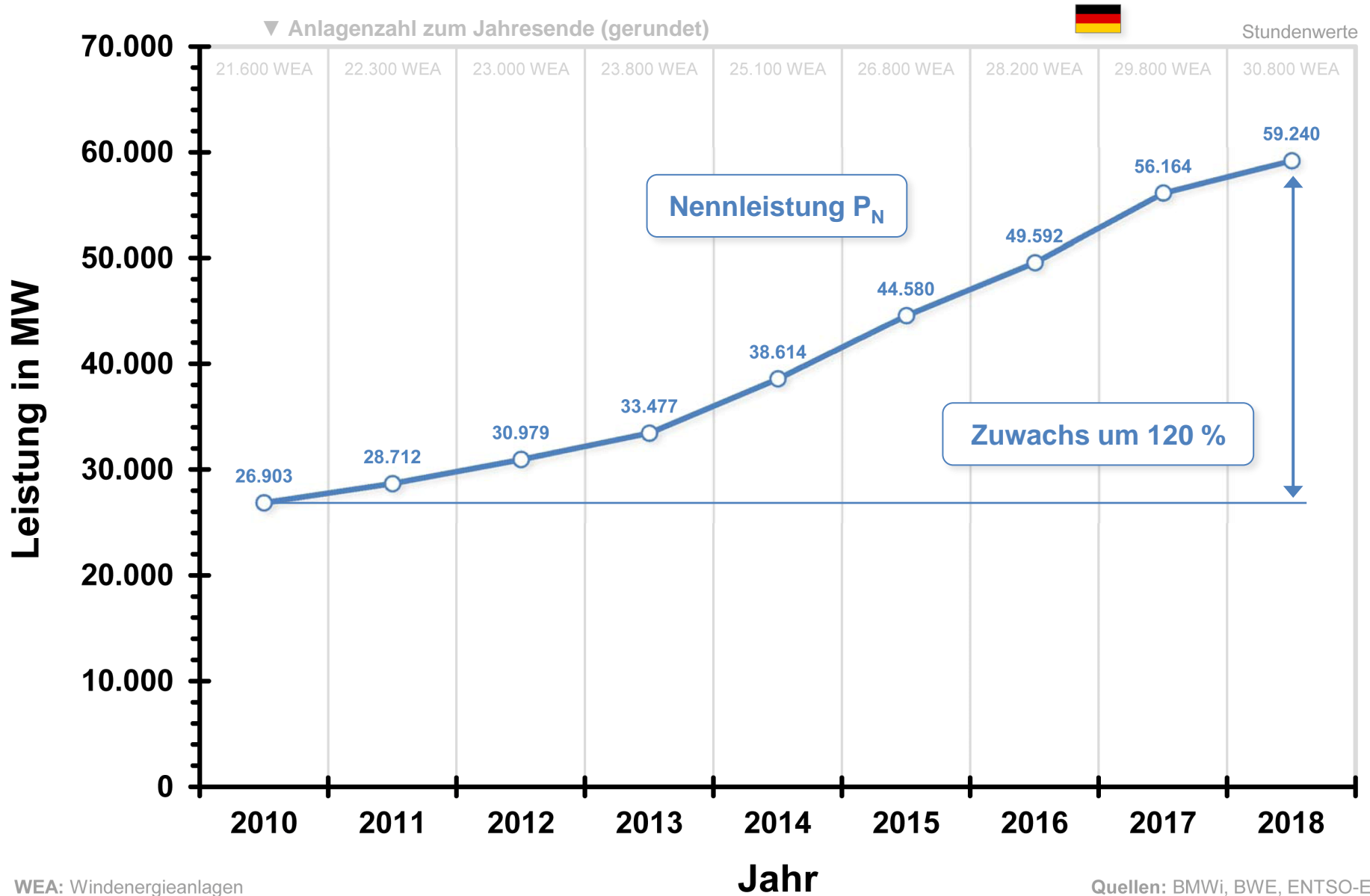


Quelle: ENTSO-E

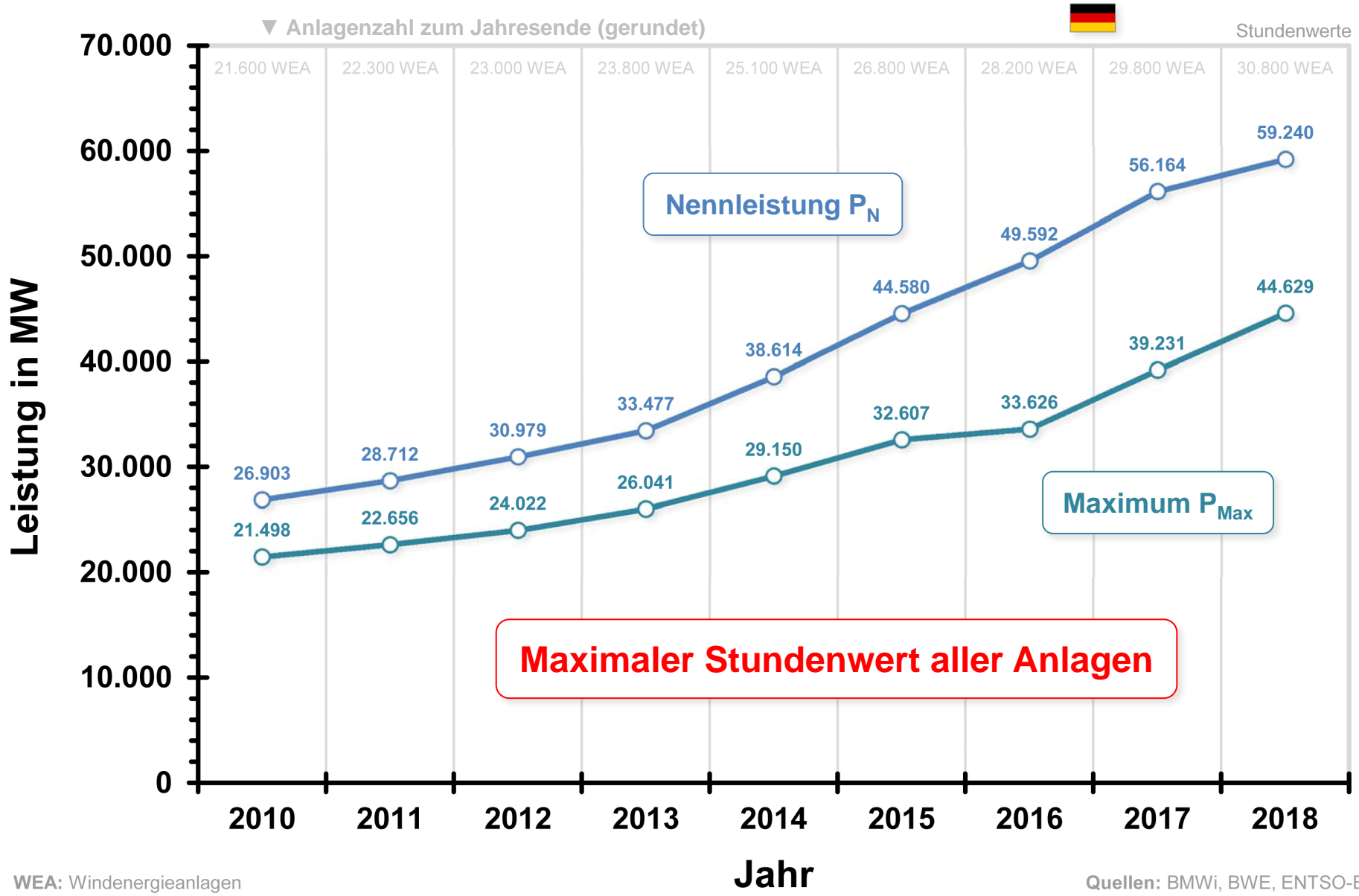




# Deutschland: Windstromproduktion von 2010 bis 2018



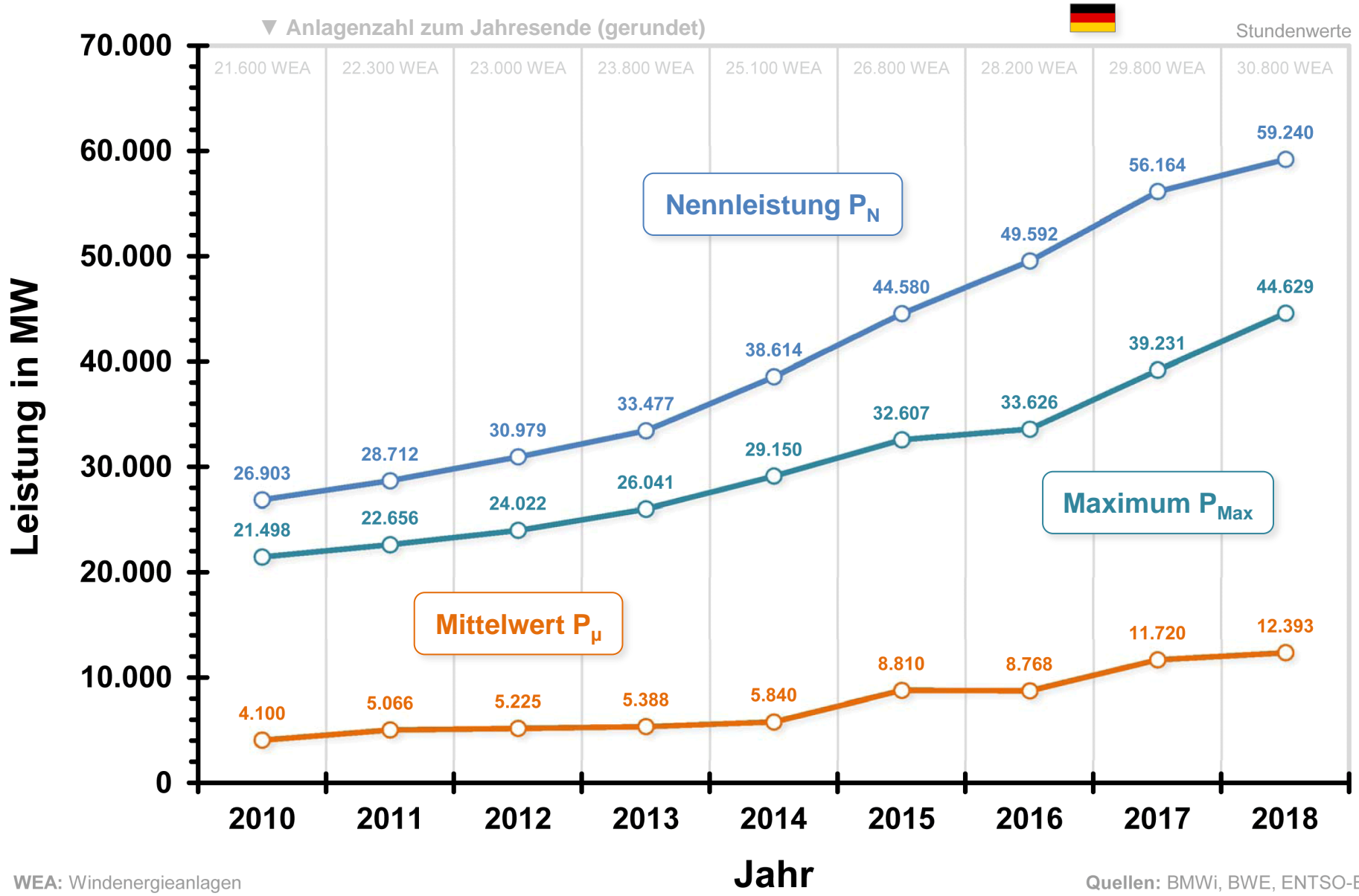




WEA: Windenergieanlagen

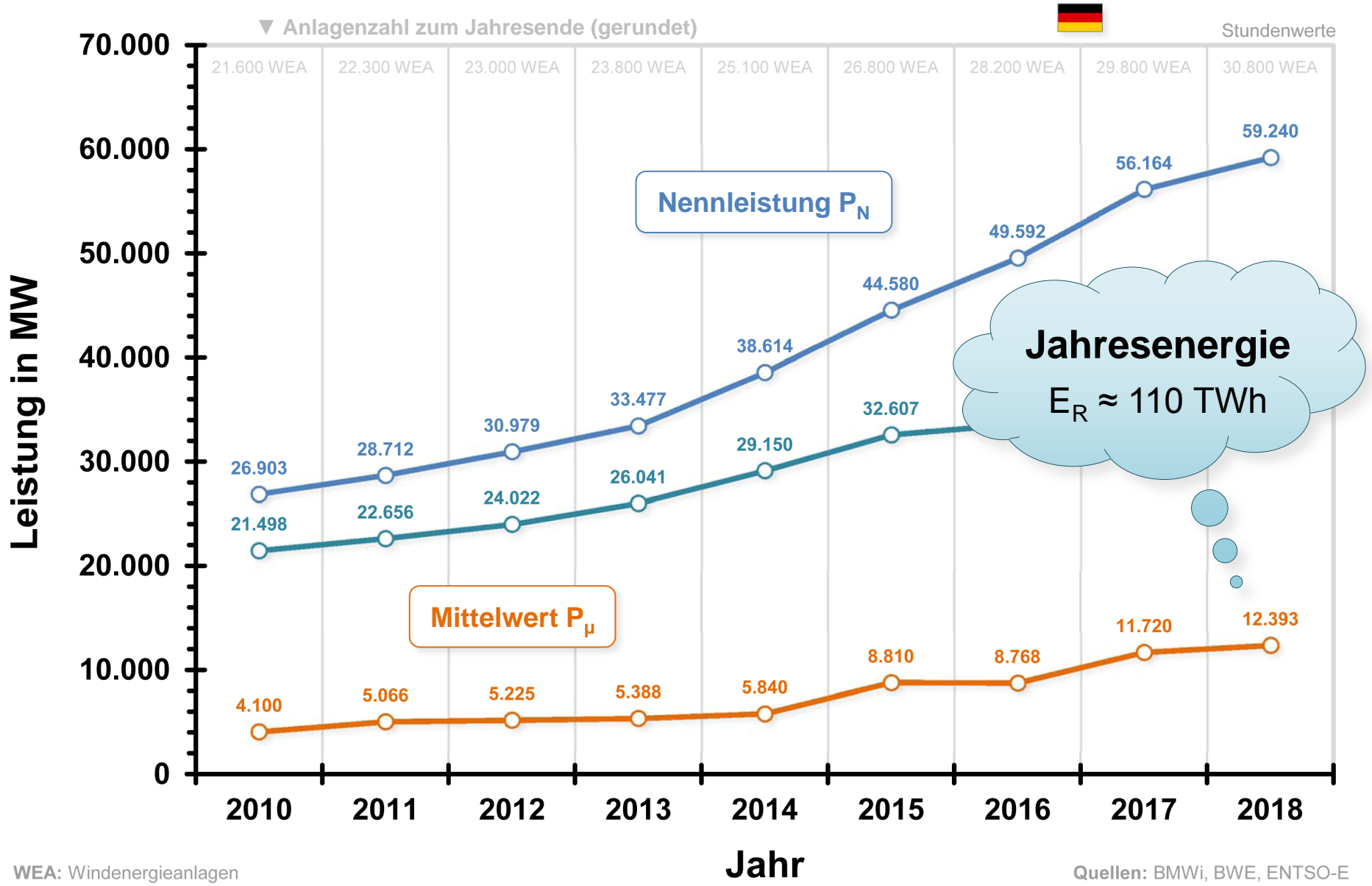
Quellen: BMWi, BWE, ENTSO-E

# Deutschland: Windstromproduktion von 2010 bis 2018

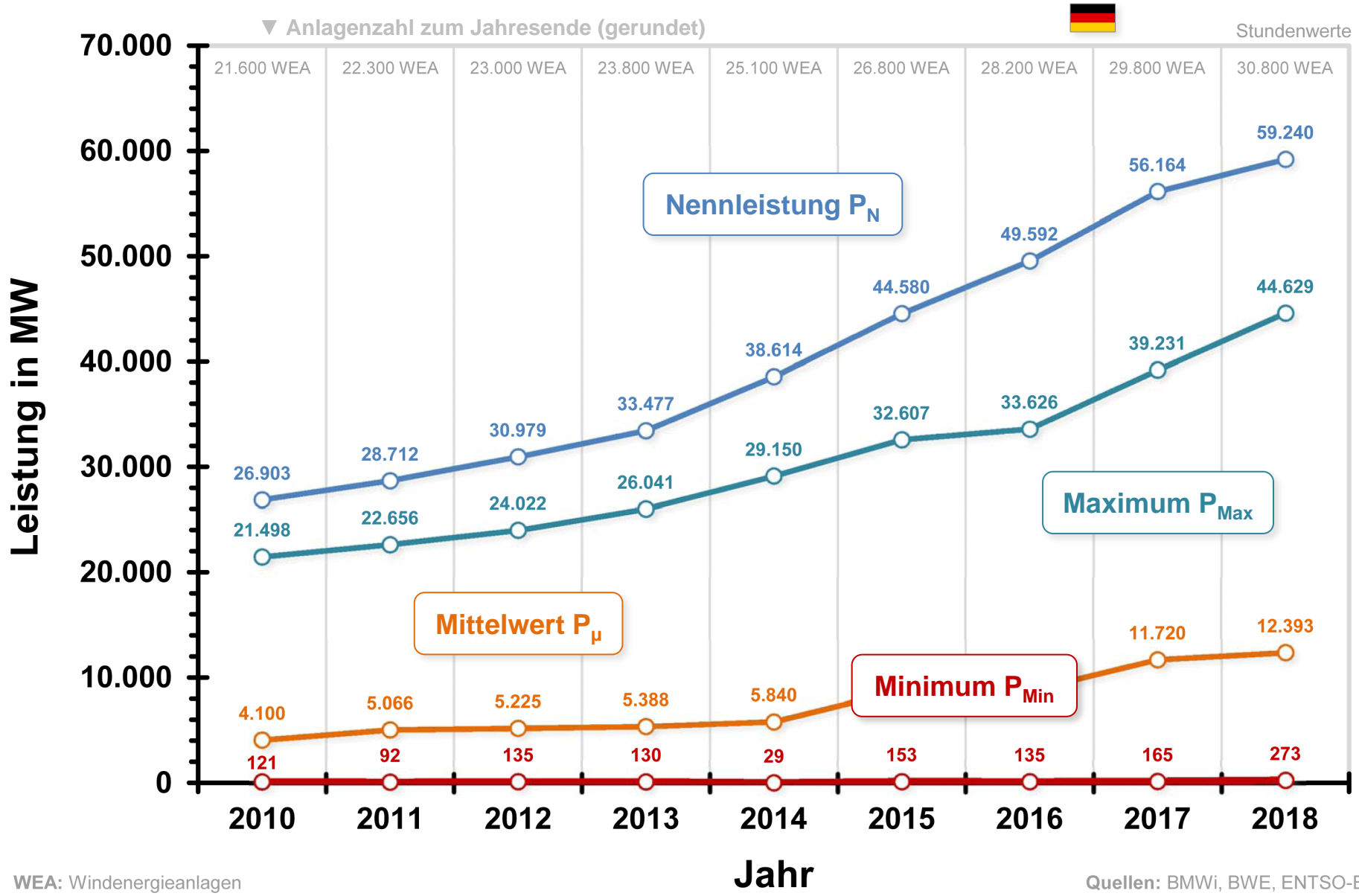


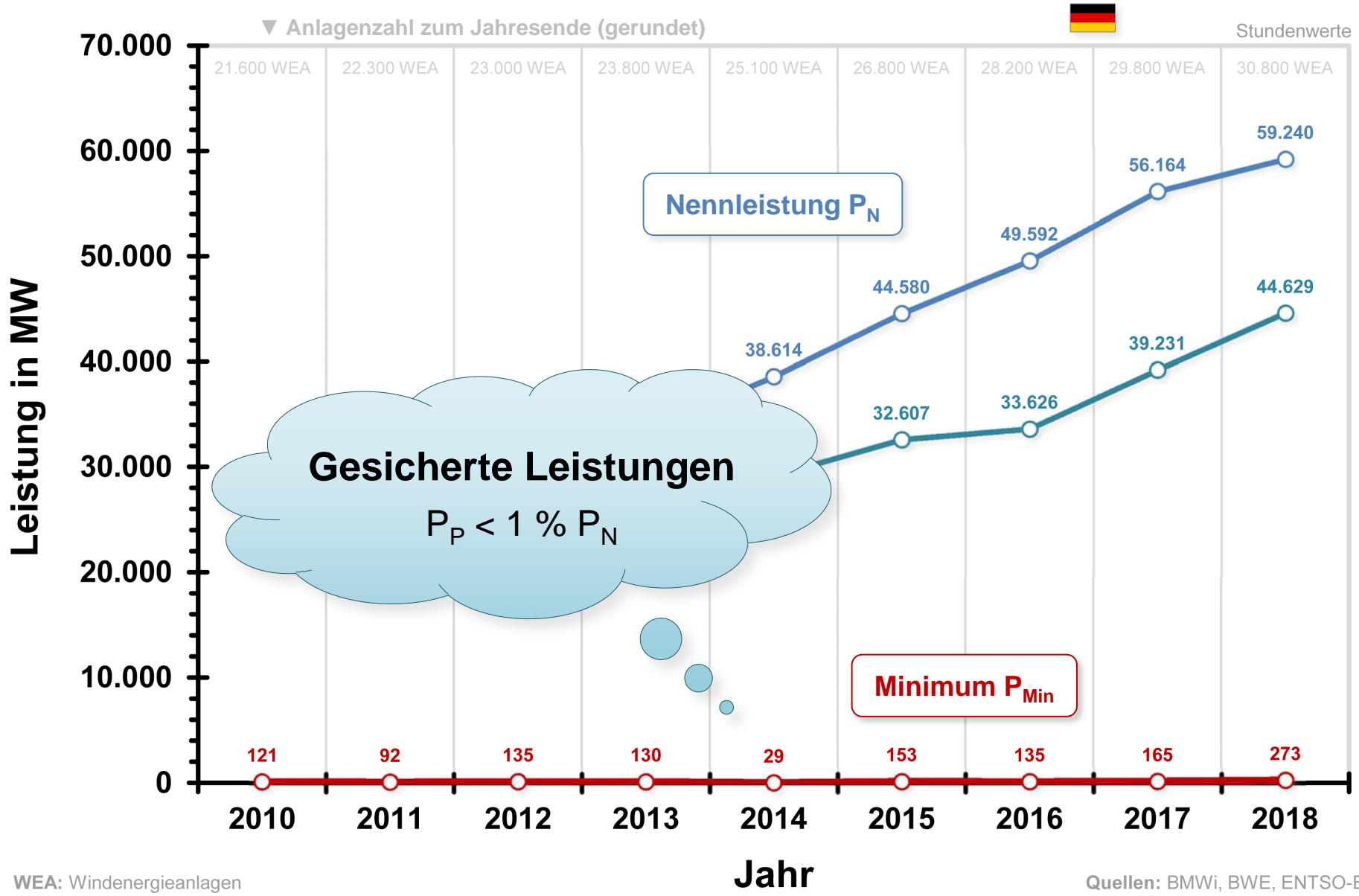
WEA: Windenergieanlagen

Quellen: BMWi, BWE, ENTSO-E



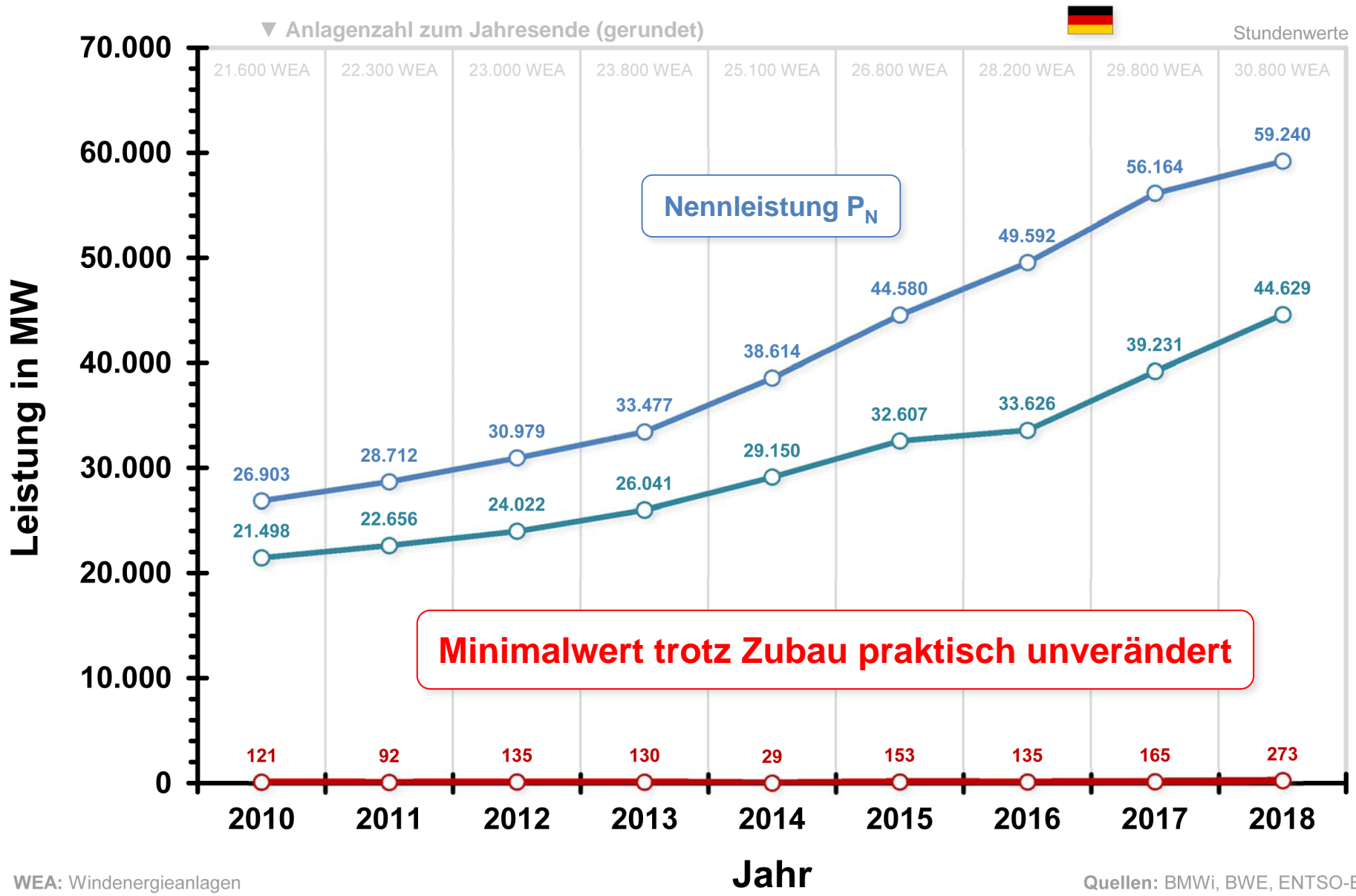
# Deutschland: Windstromproduktion von 2010 bis 2018

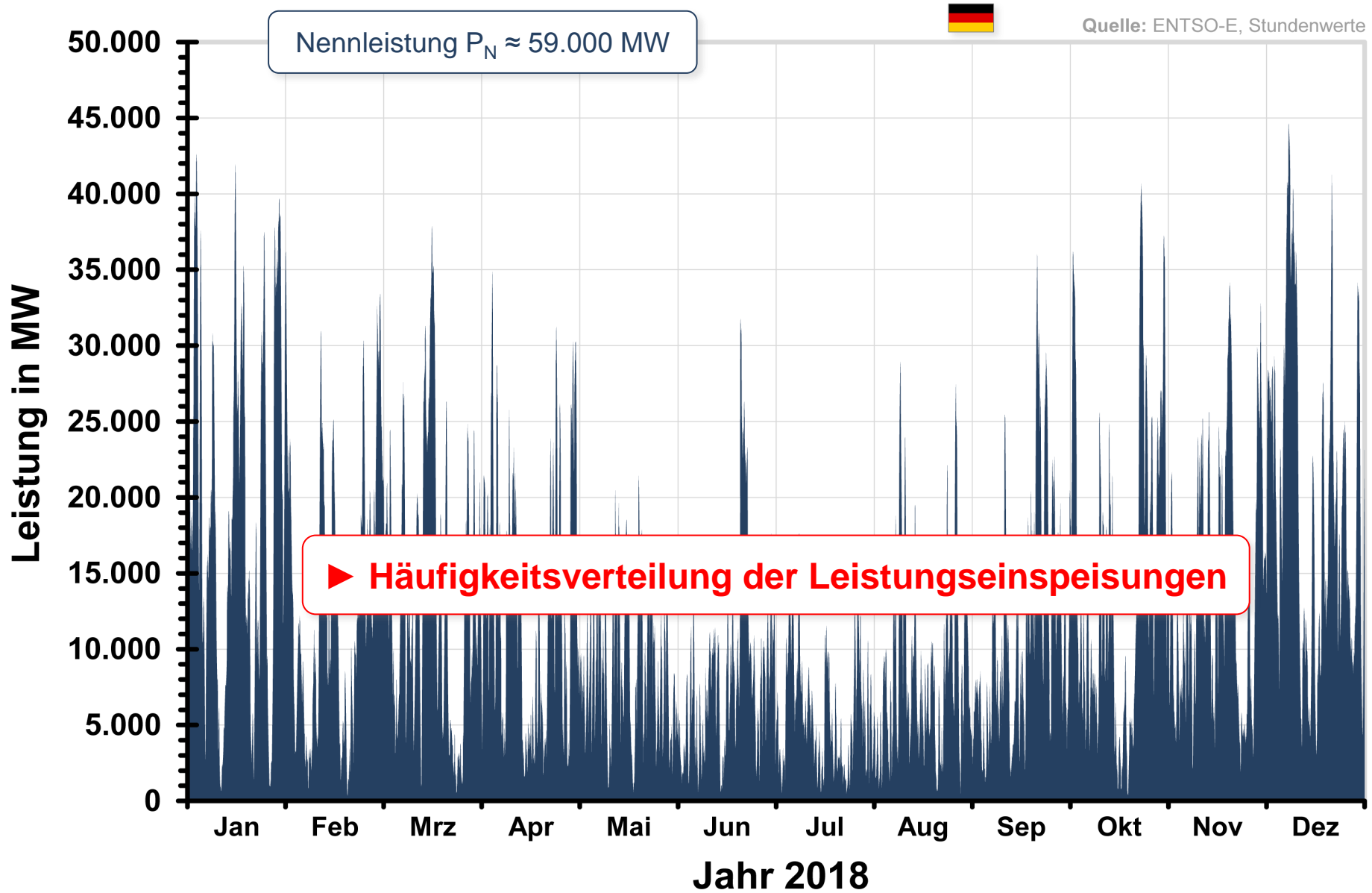




WEA: Windenergieanlagen

Quellen: BMWi, BWE, ENTSO-E







Quelle: ENTSO-E



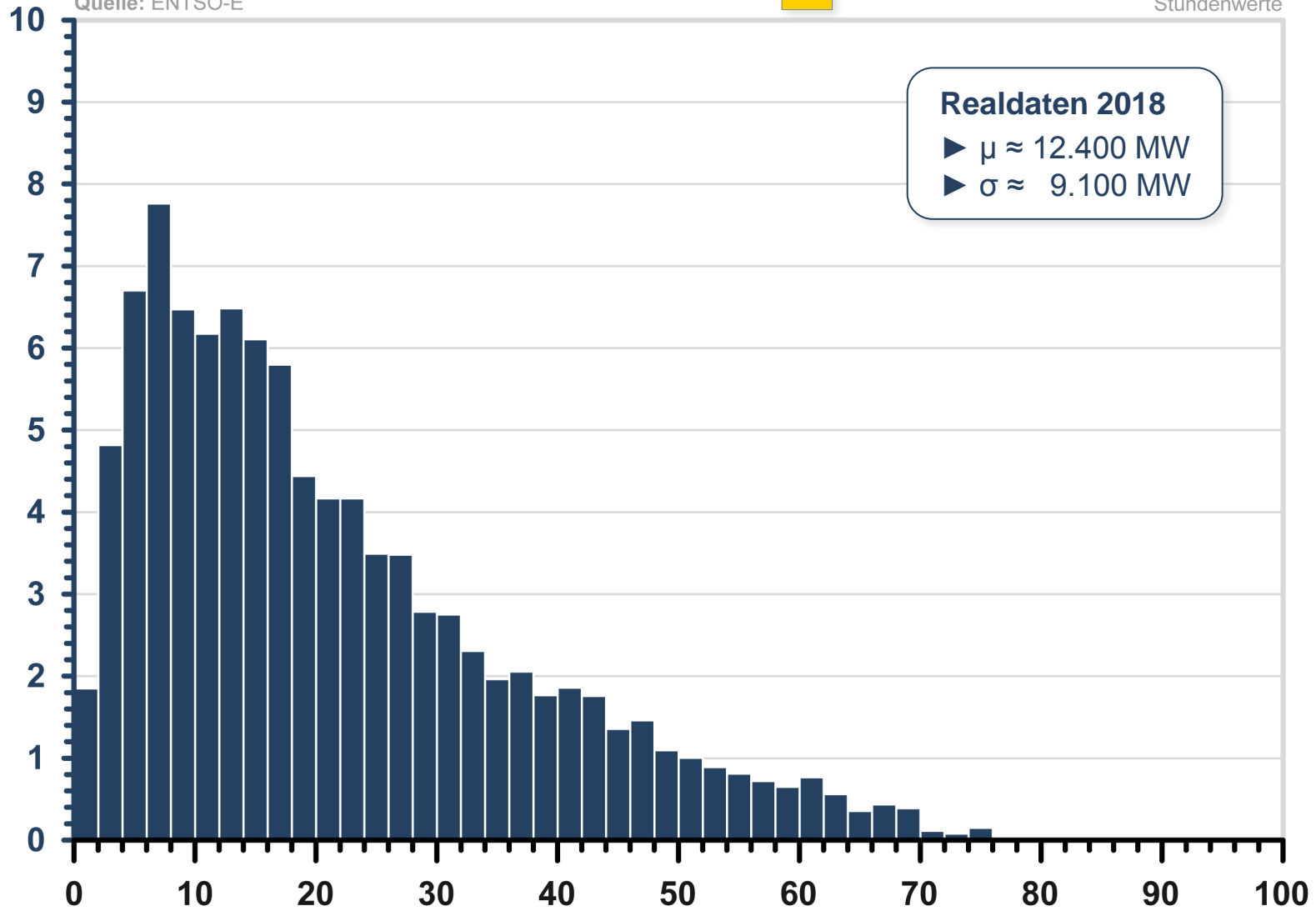
Stundenwerte

Relative Häufigkeit in % (PDF)

Realdaten 2018

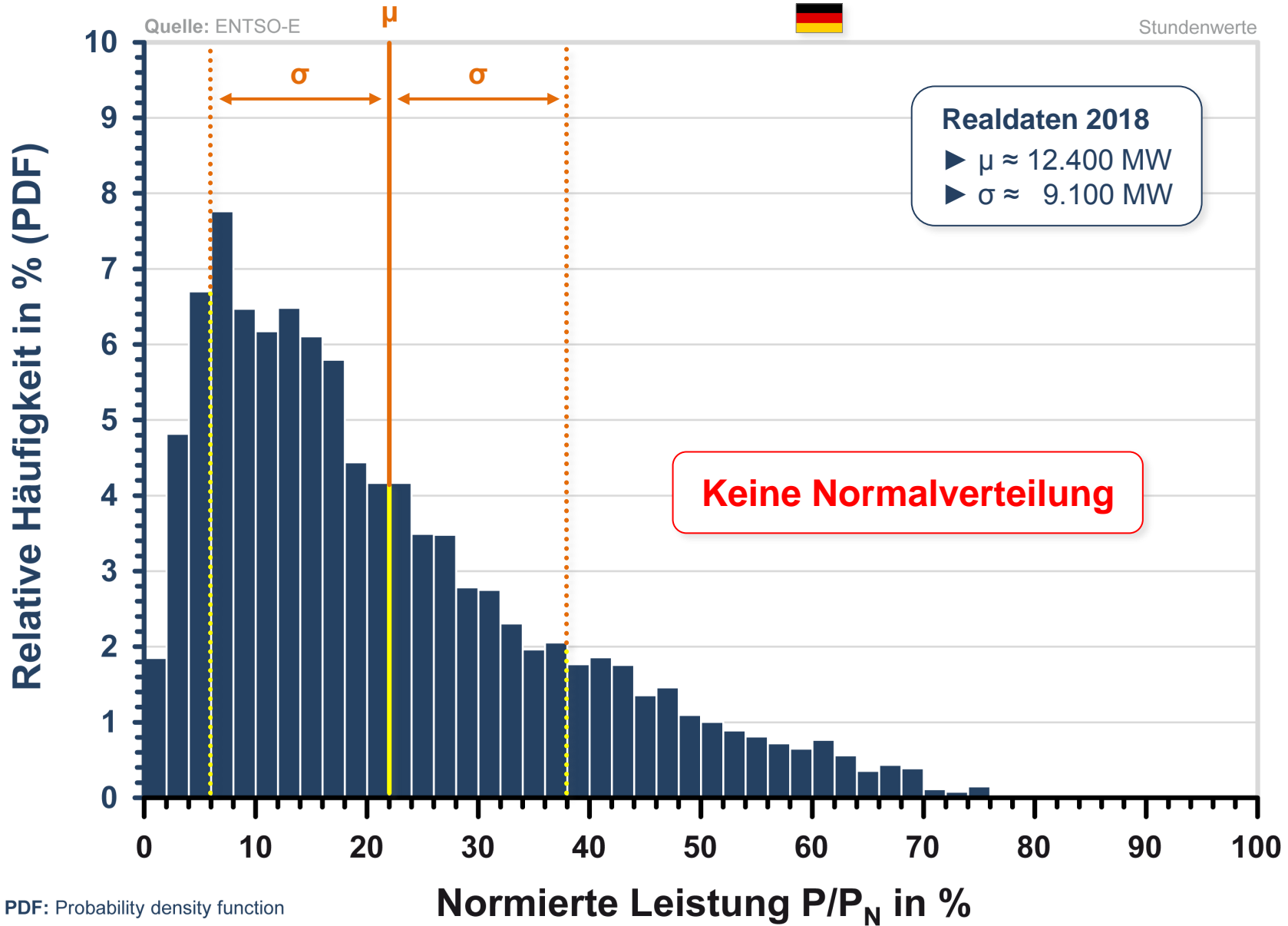
▶  $\mu \approx 12.400$  MW

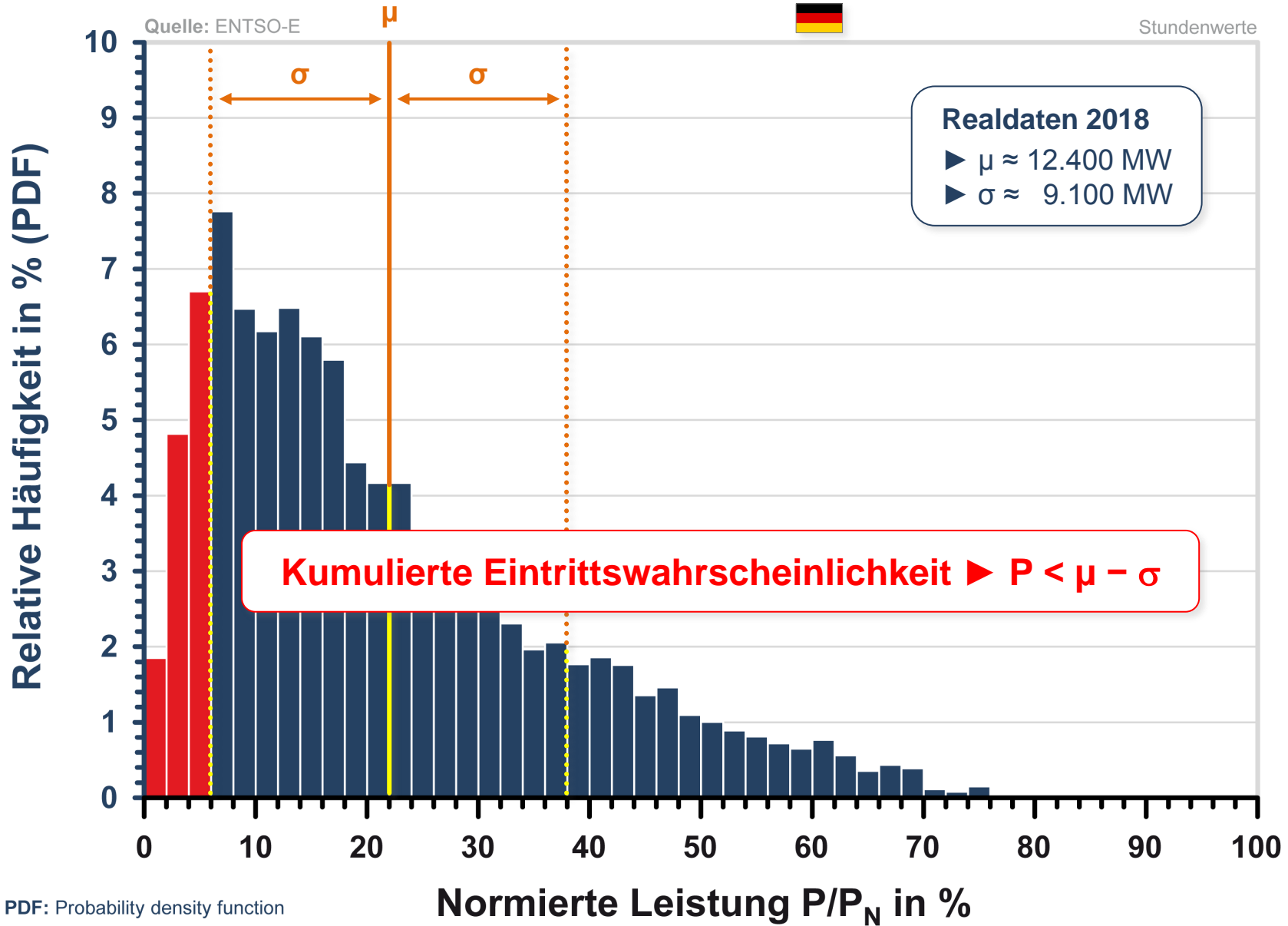
▶  $\sigma \approx 9.100$  MW

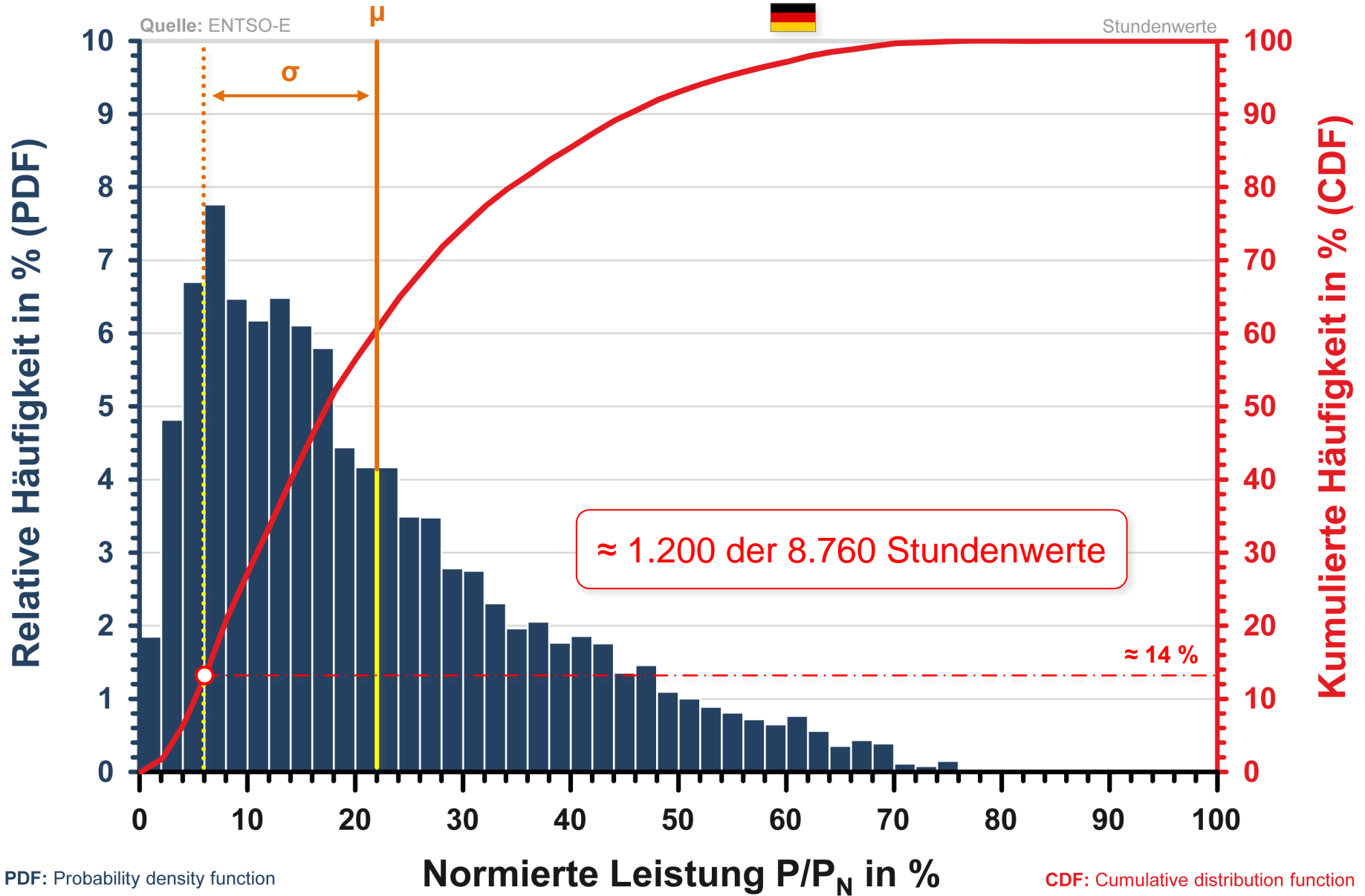


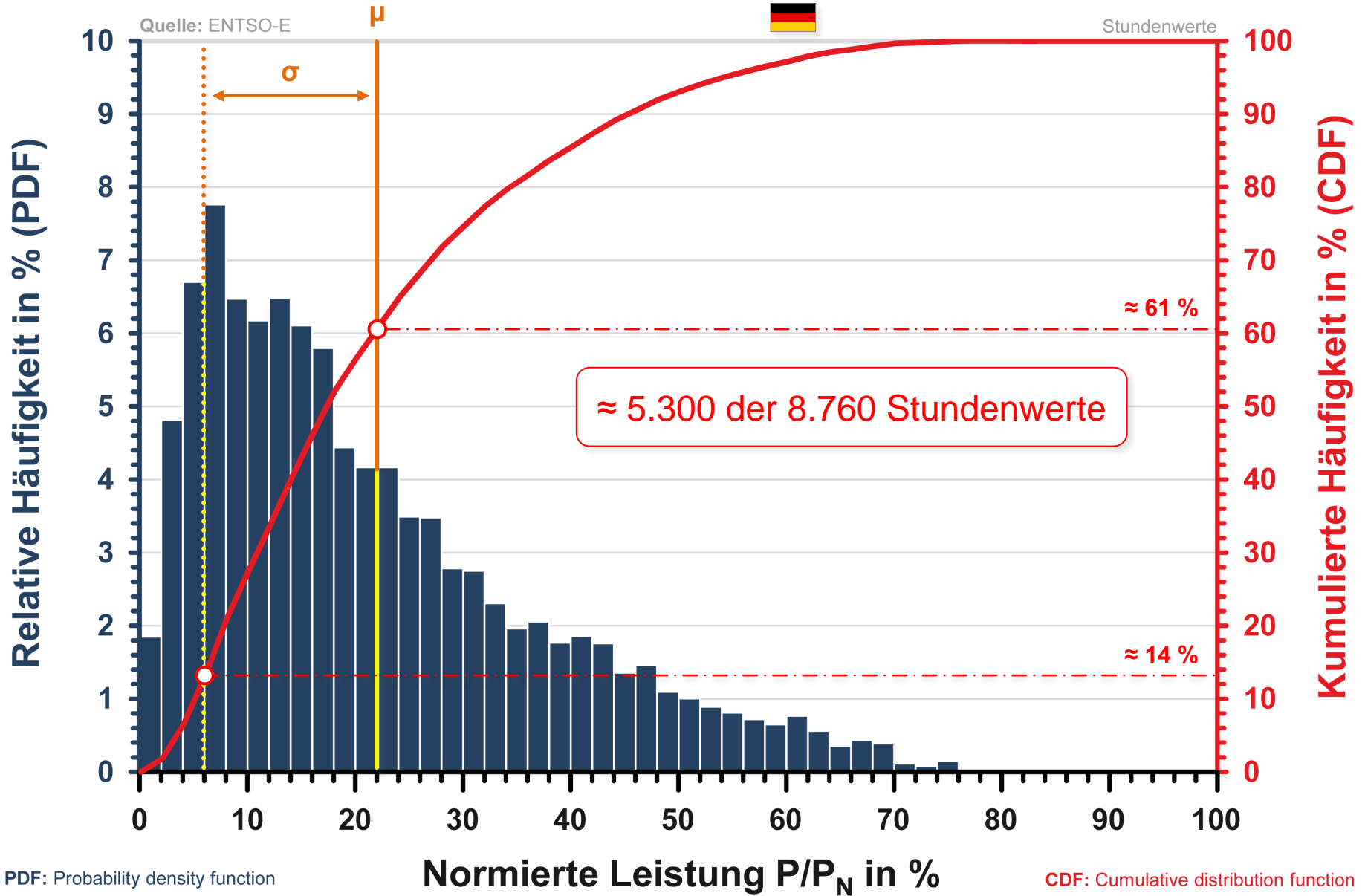
PDF: Probability density function

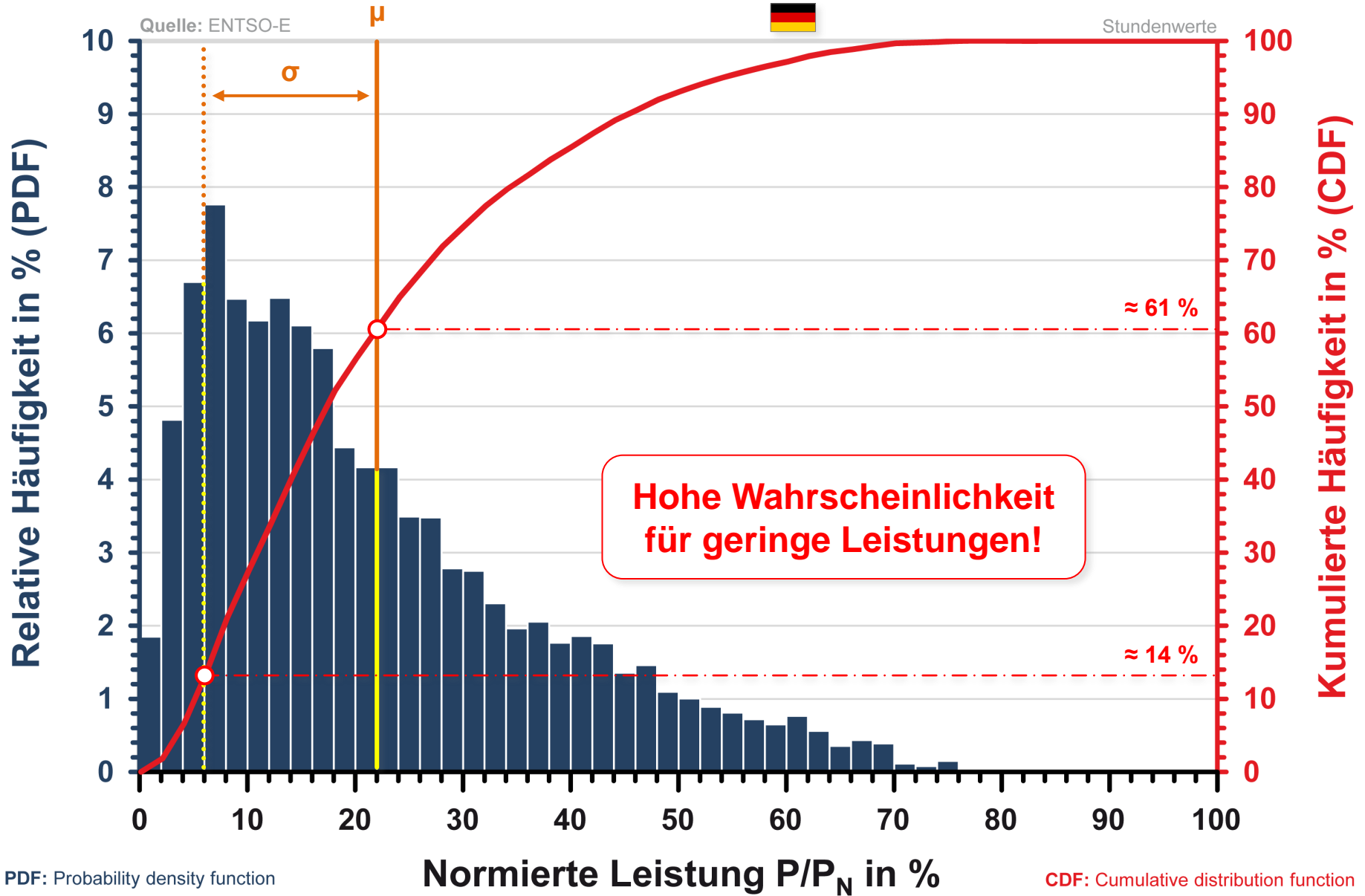
Normierte Leistung P/P<sub>N</sub> in %

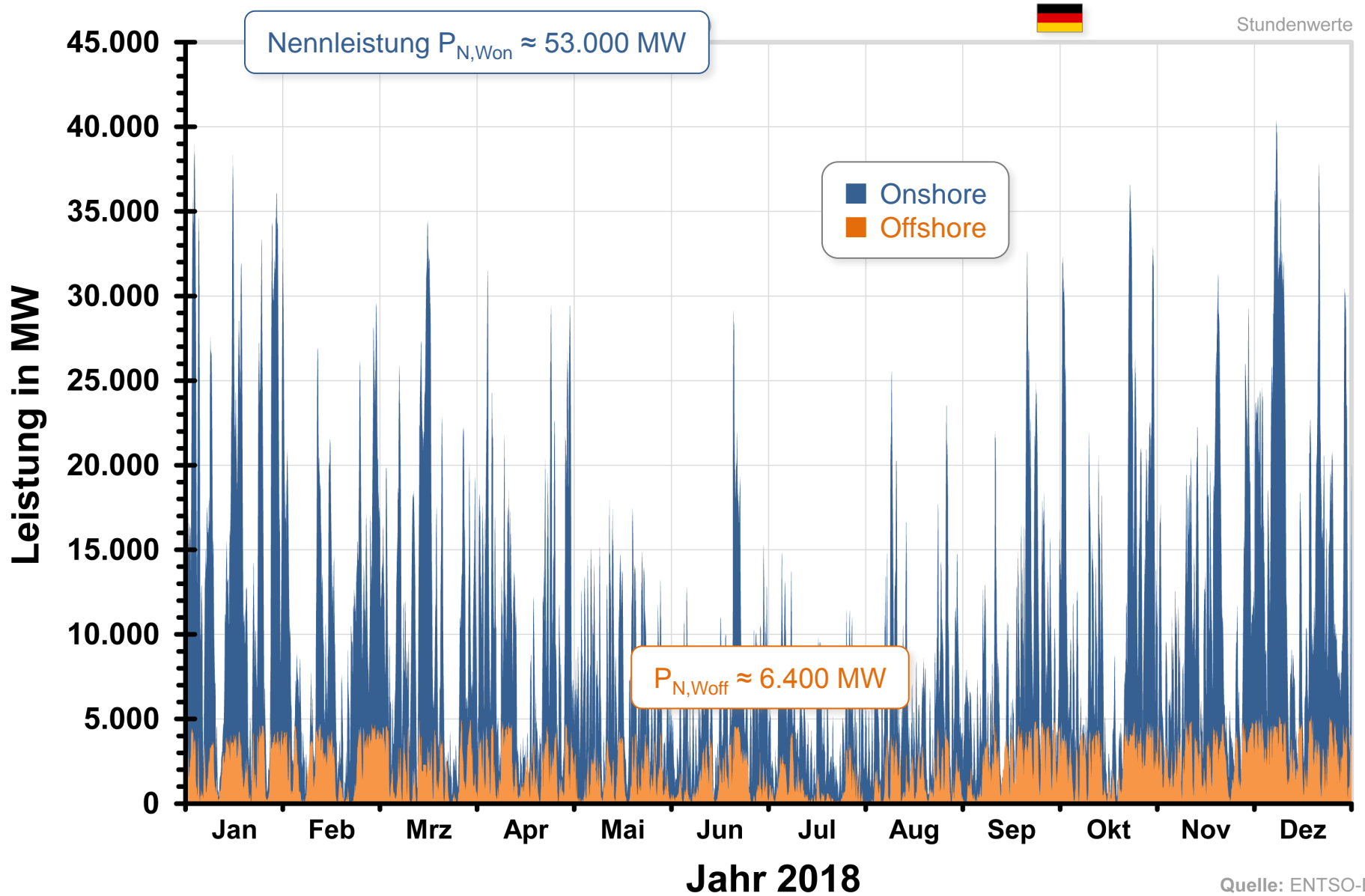


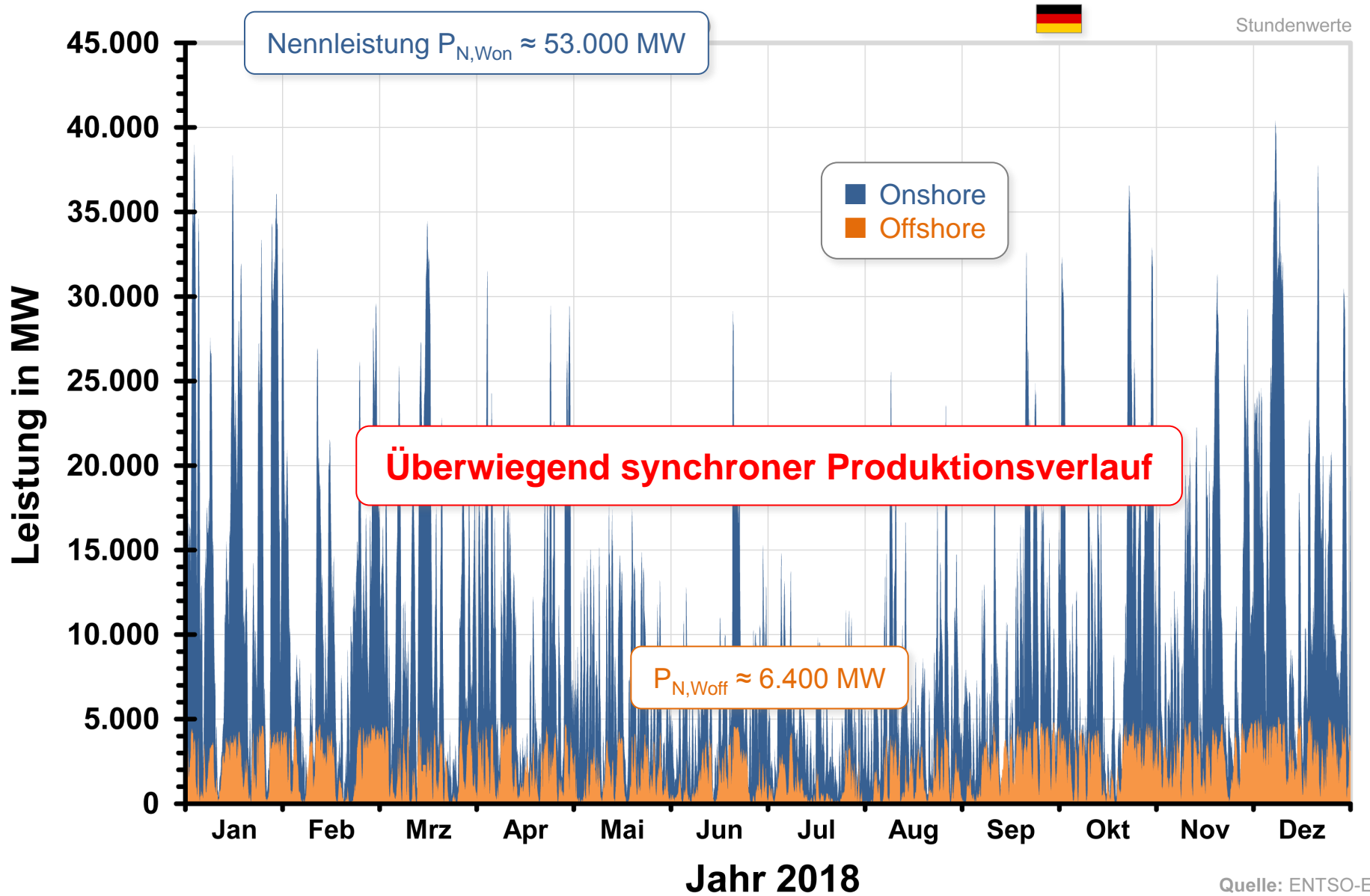






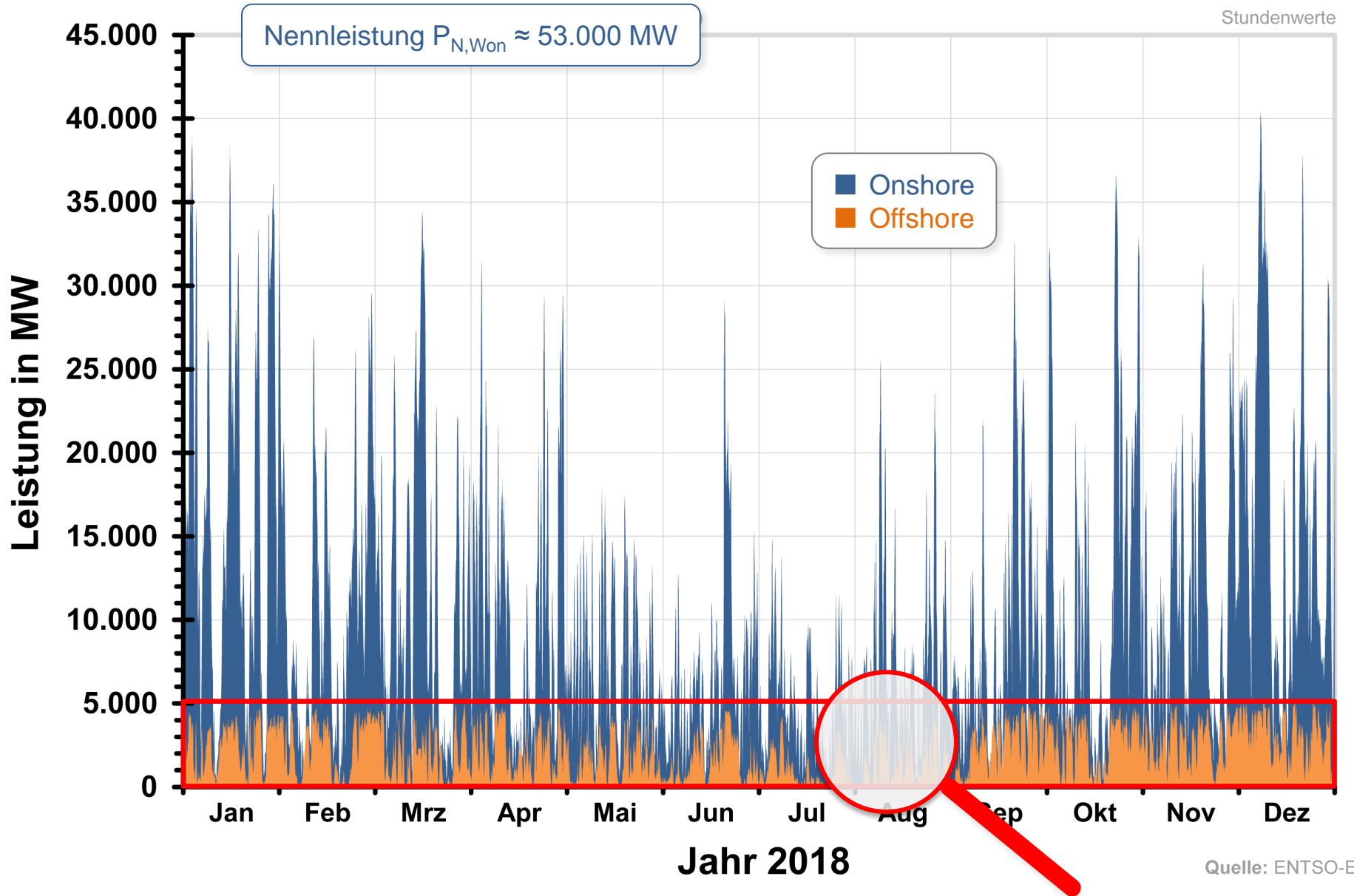


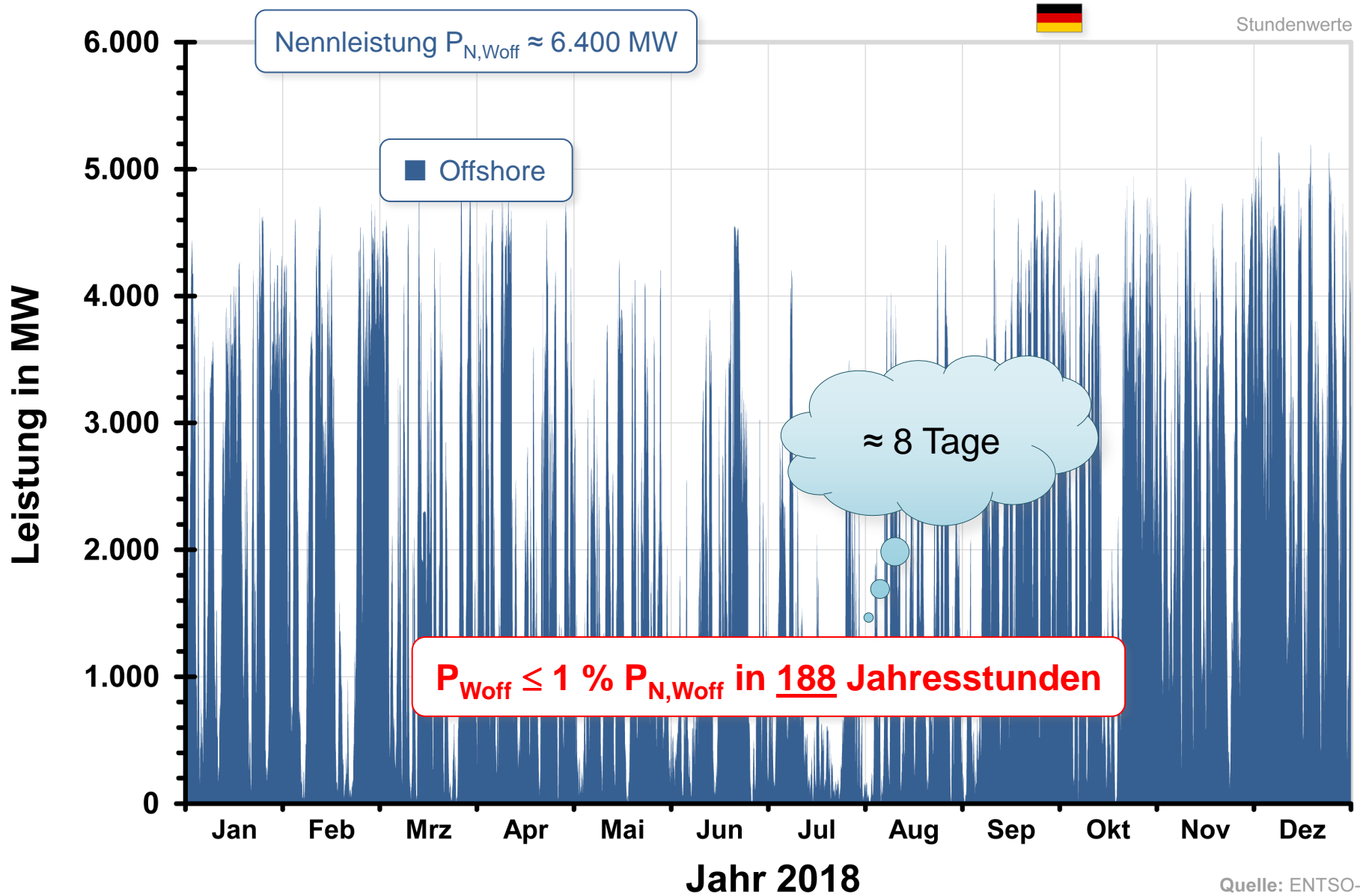




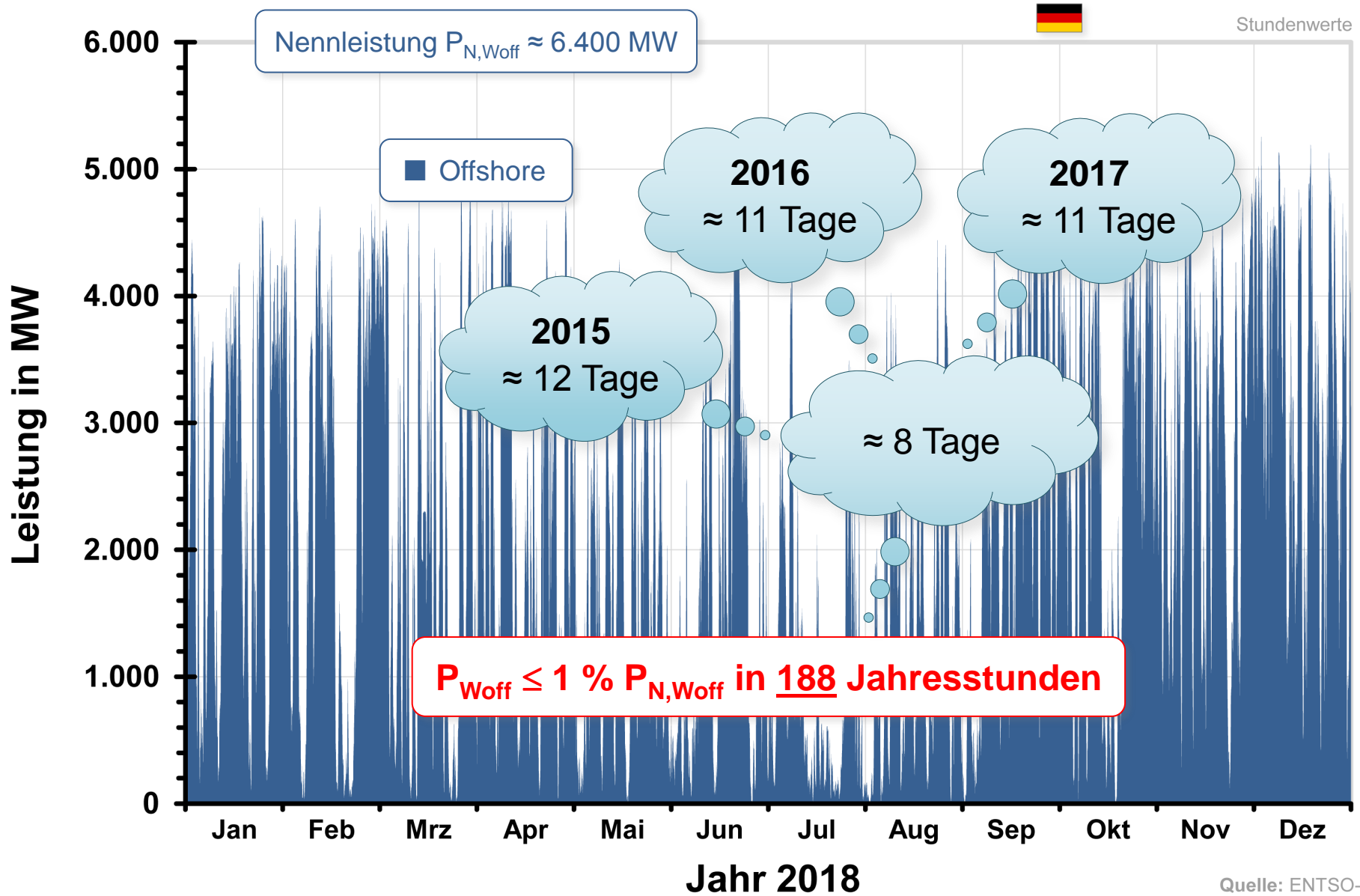
Quelle: ENTSO-E



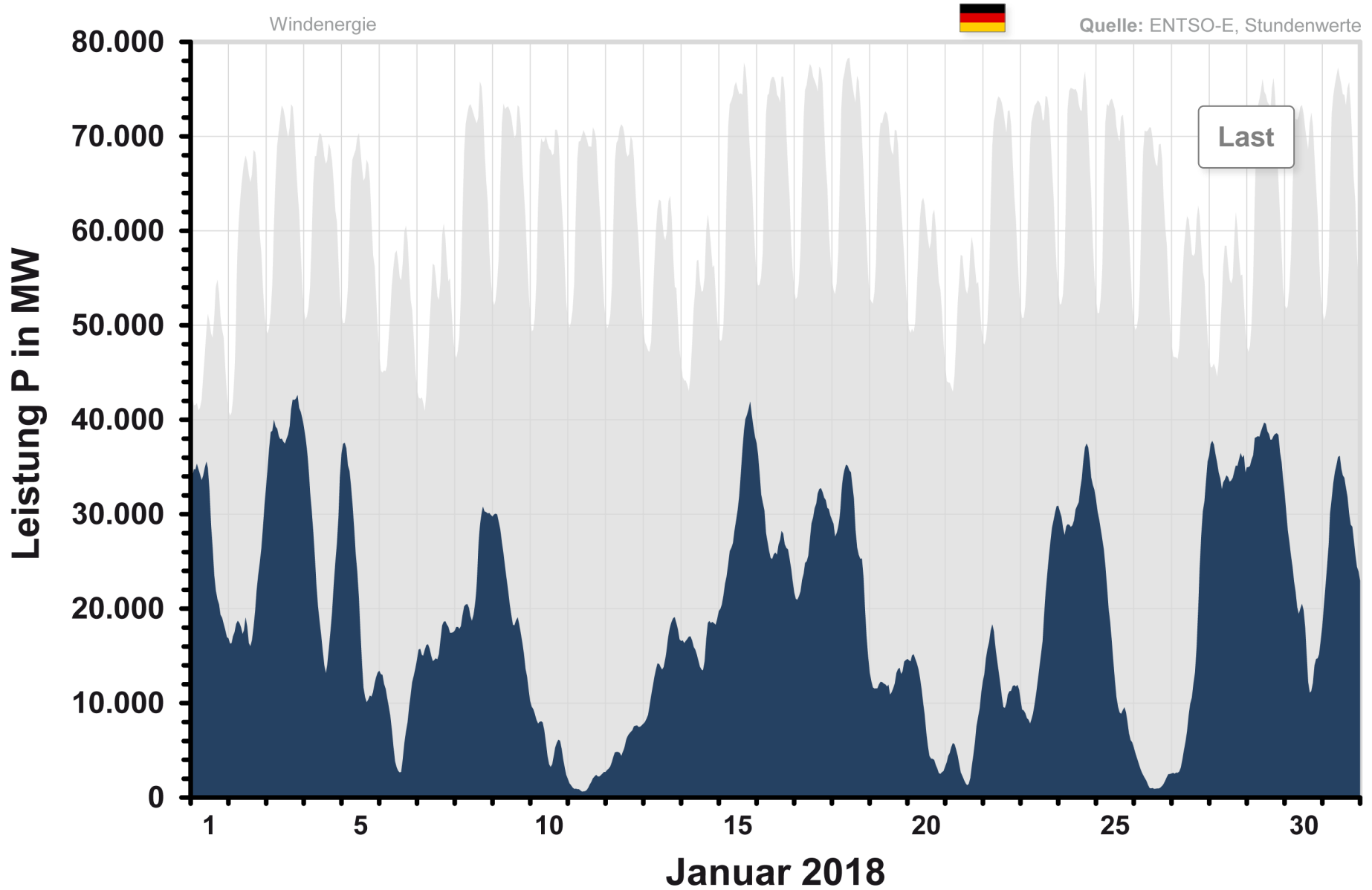


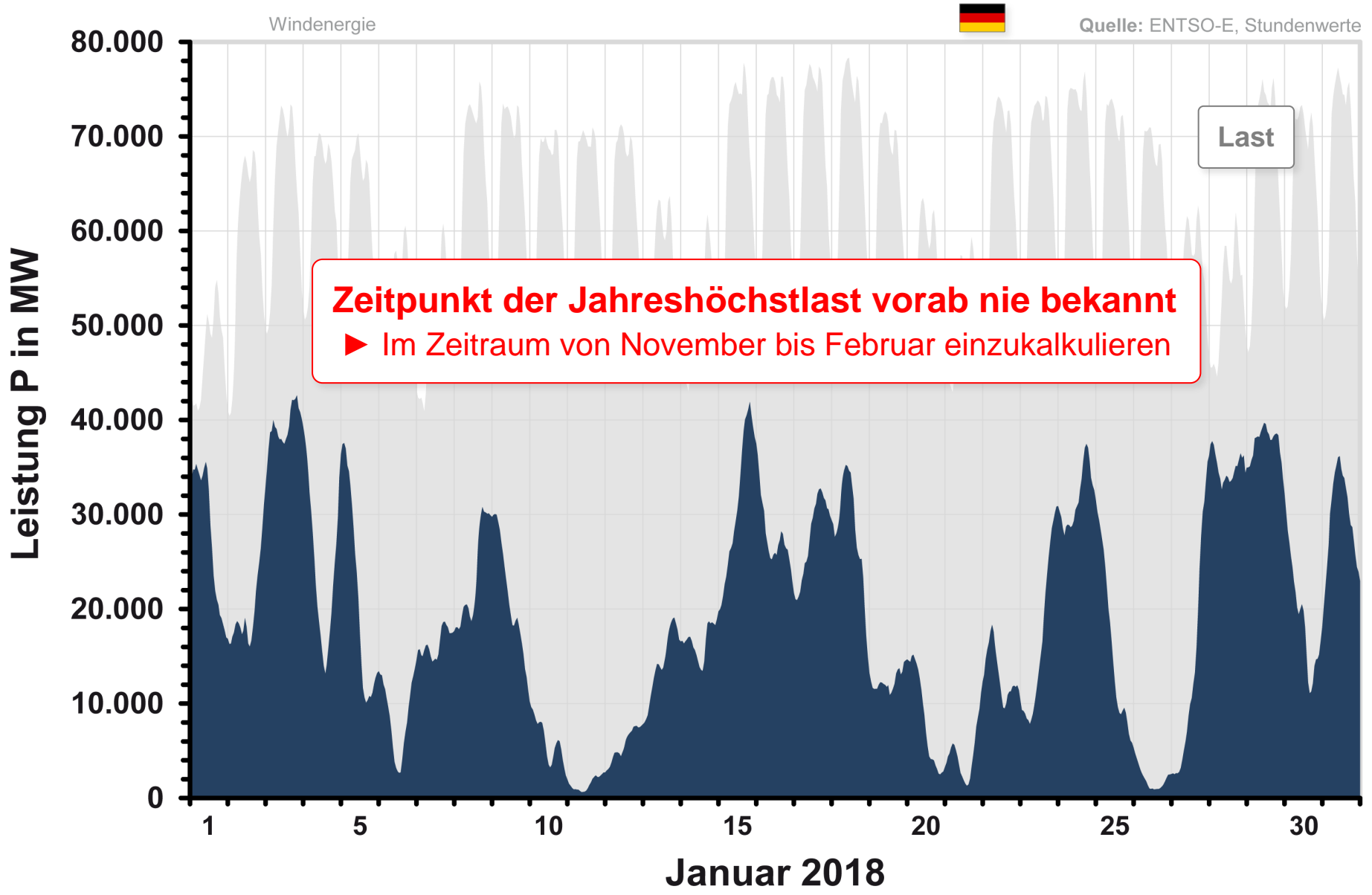


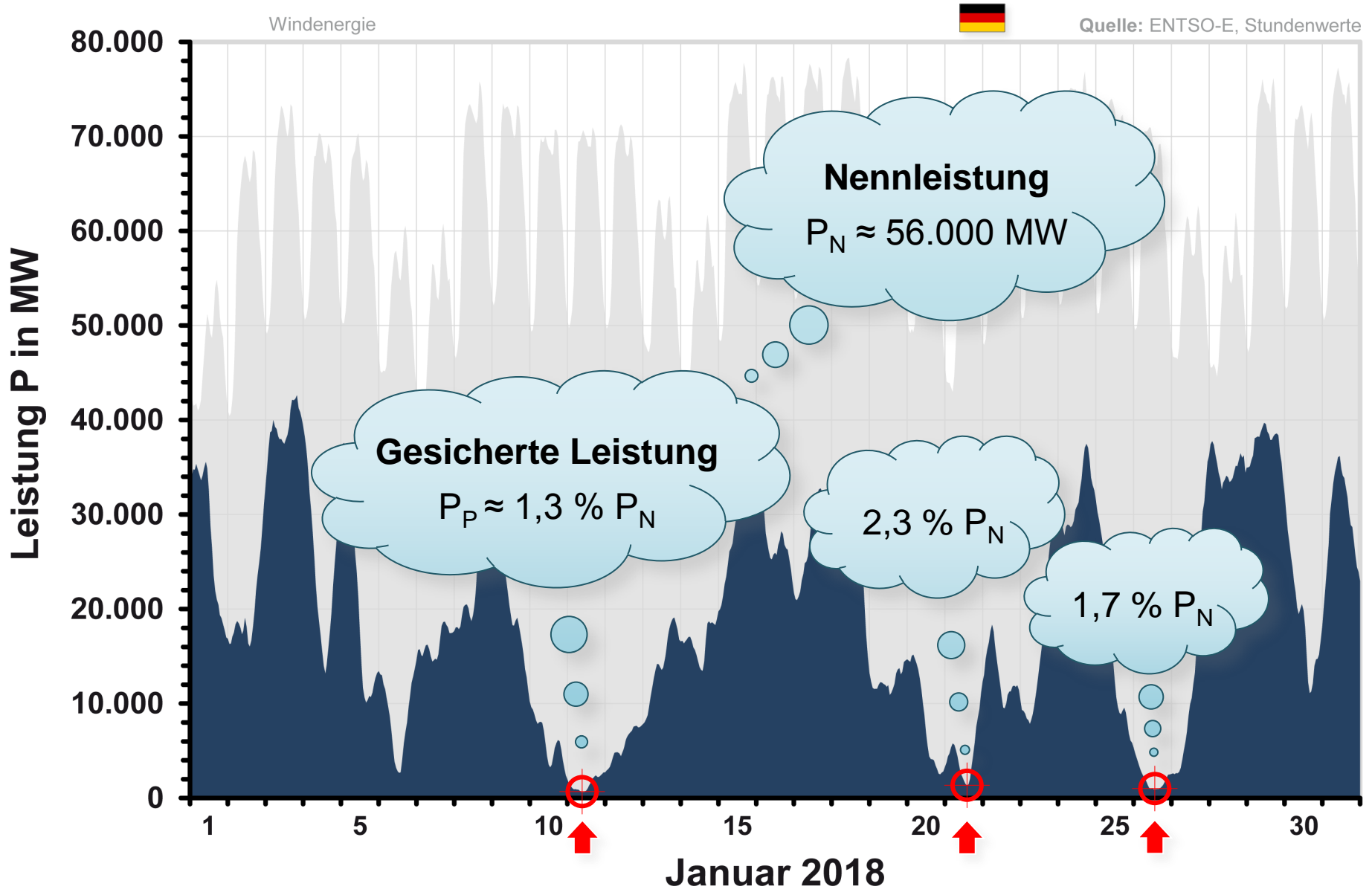
Quelle: ENTSO-E

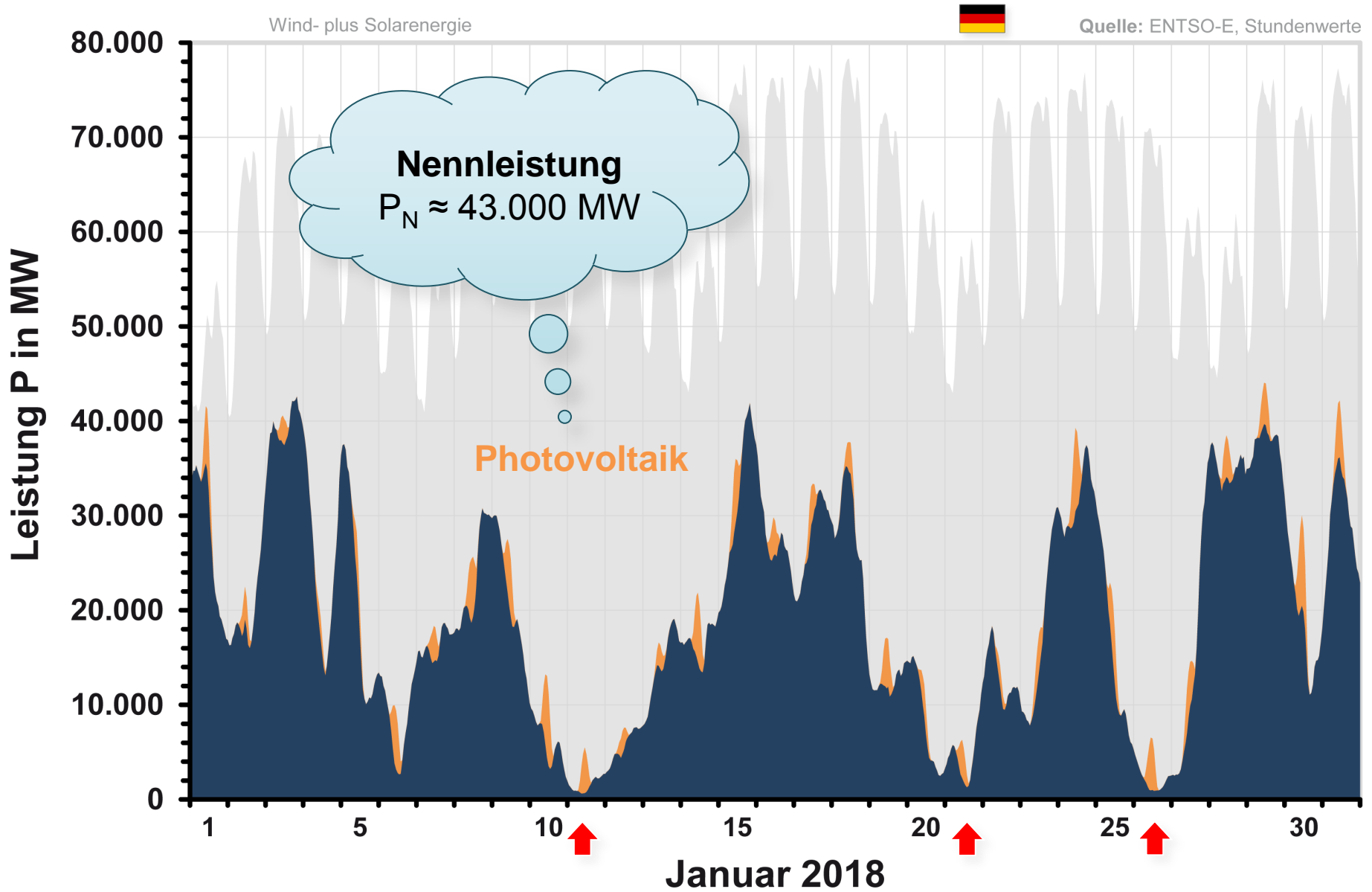


Quelle: ENTSO-E

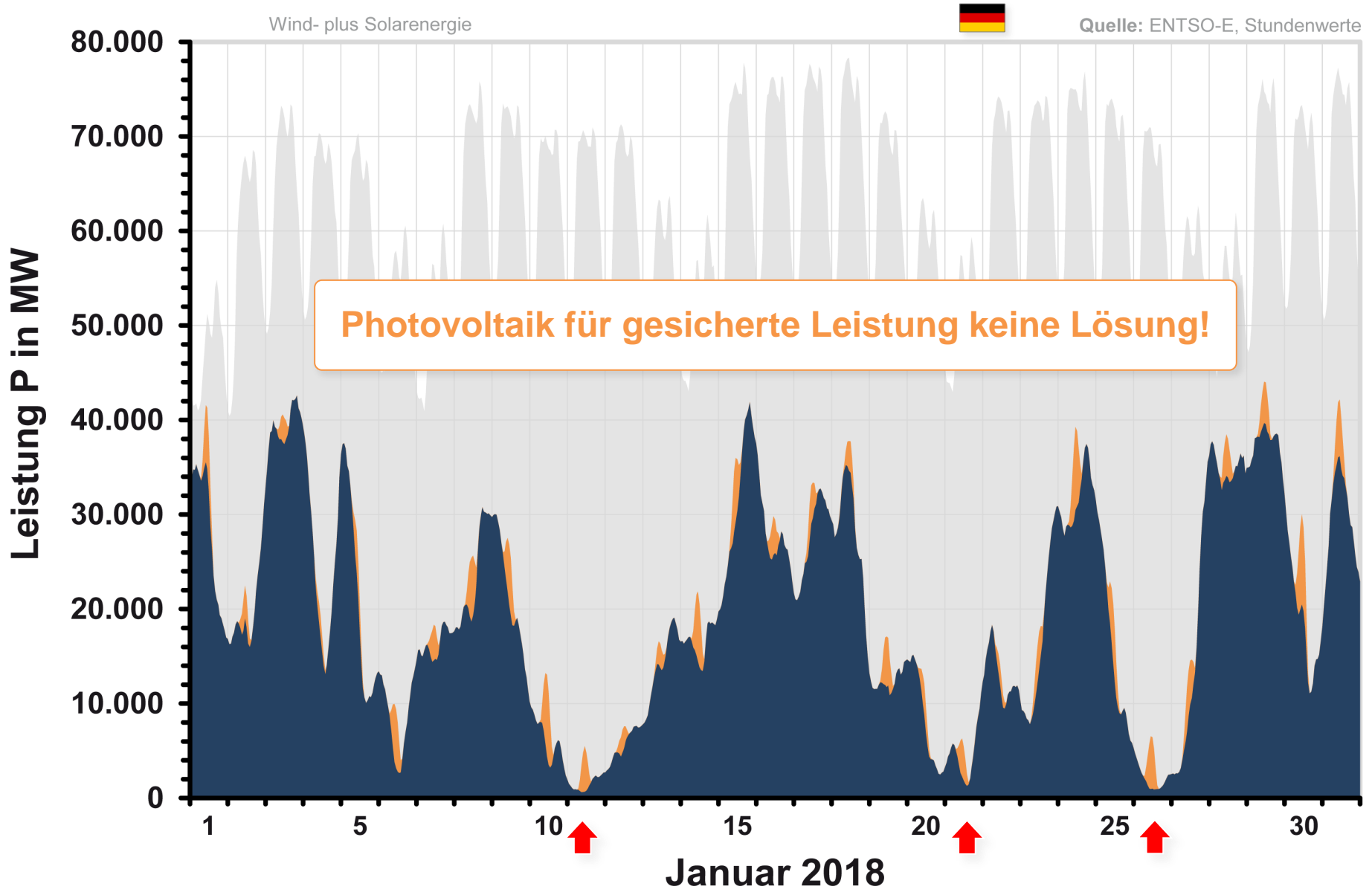


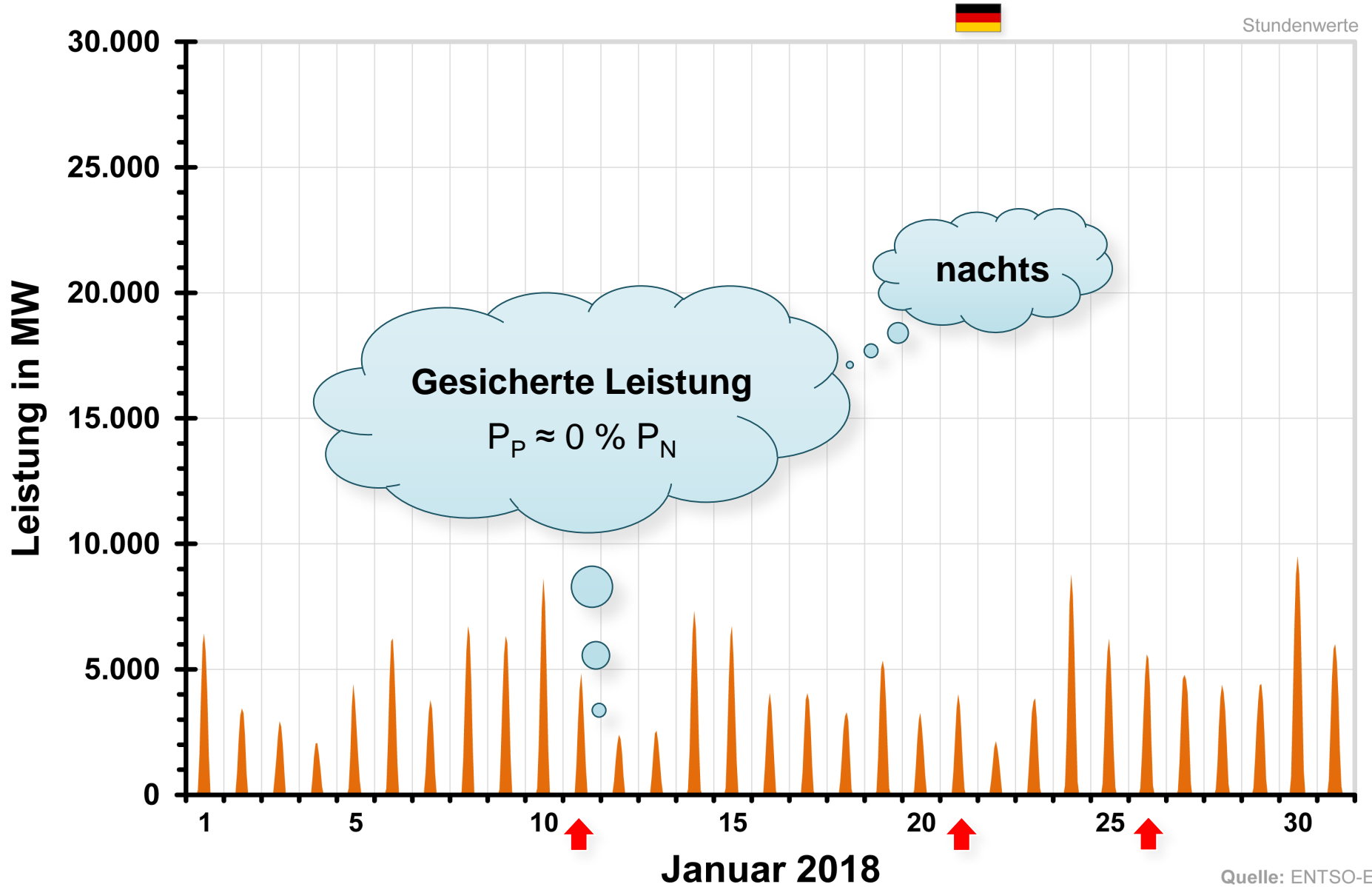


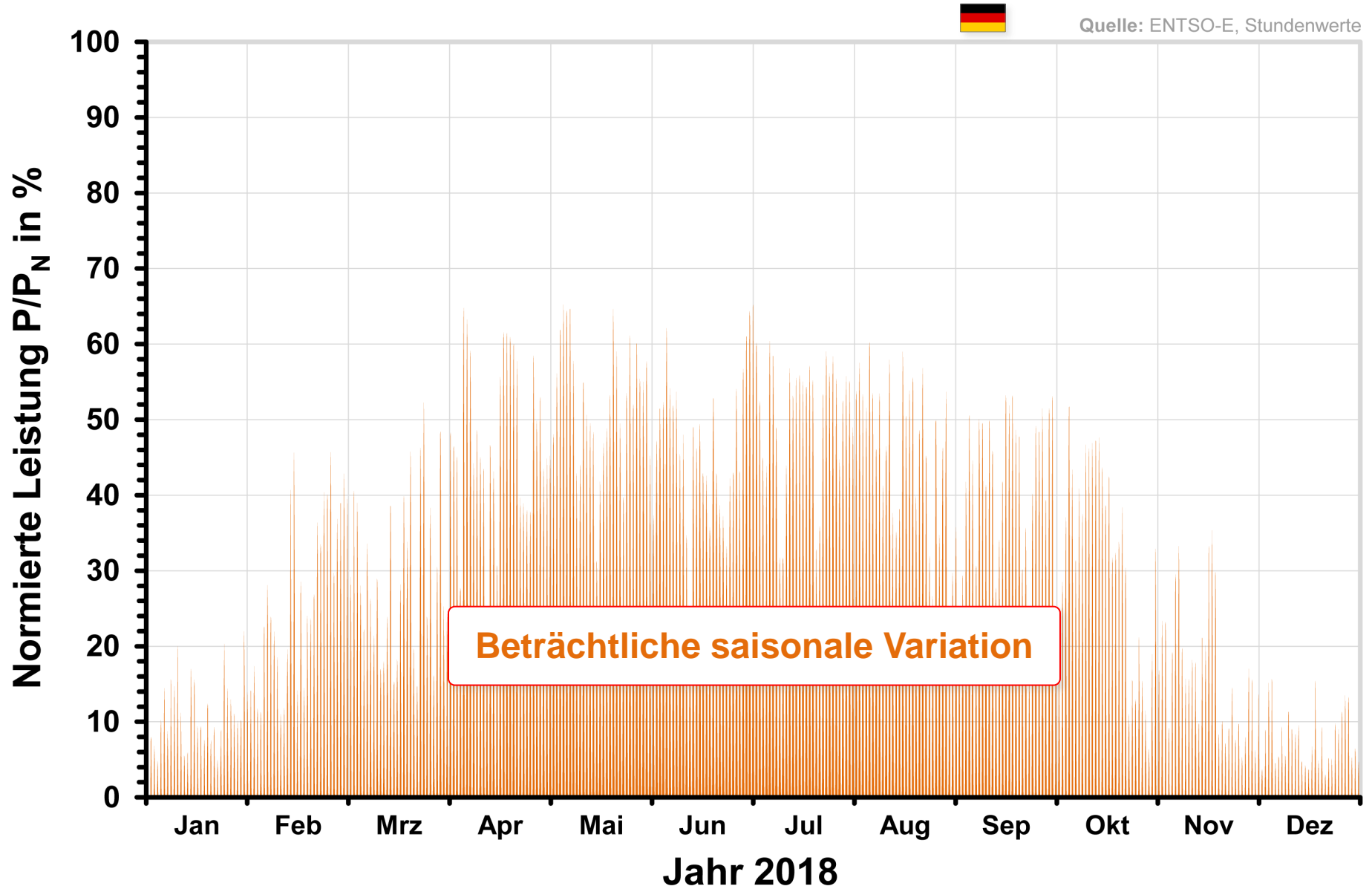


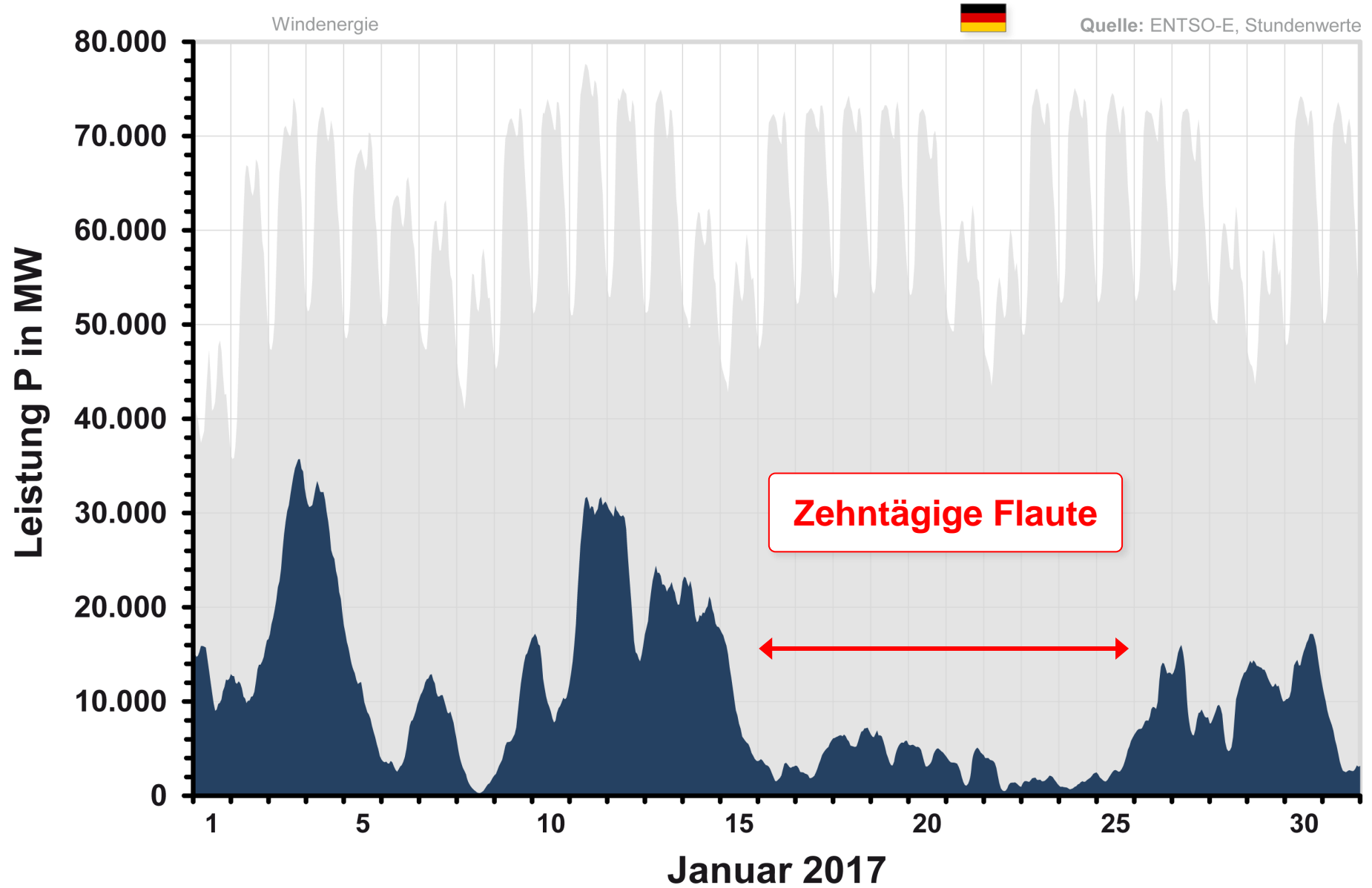


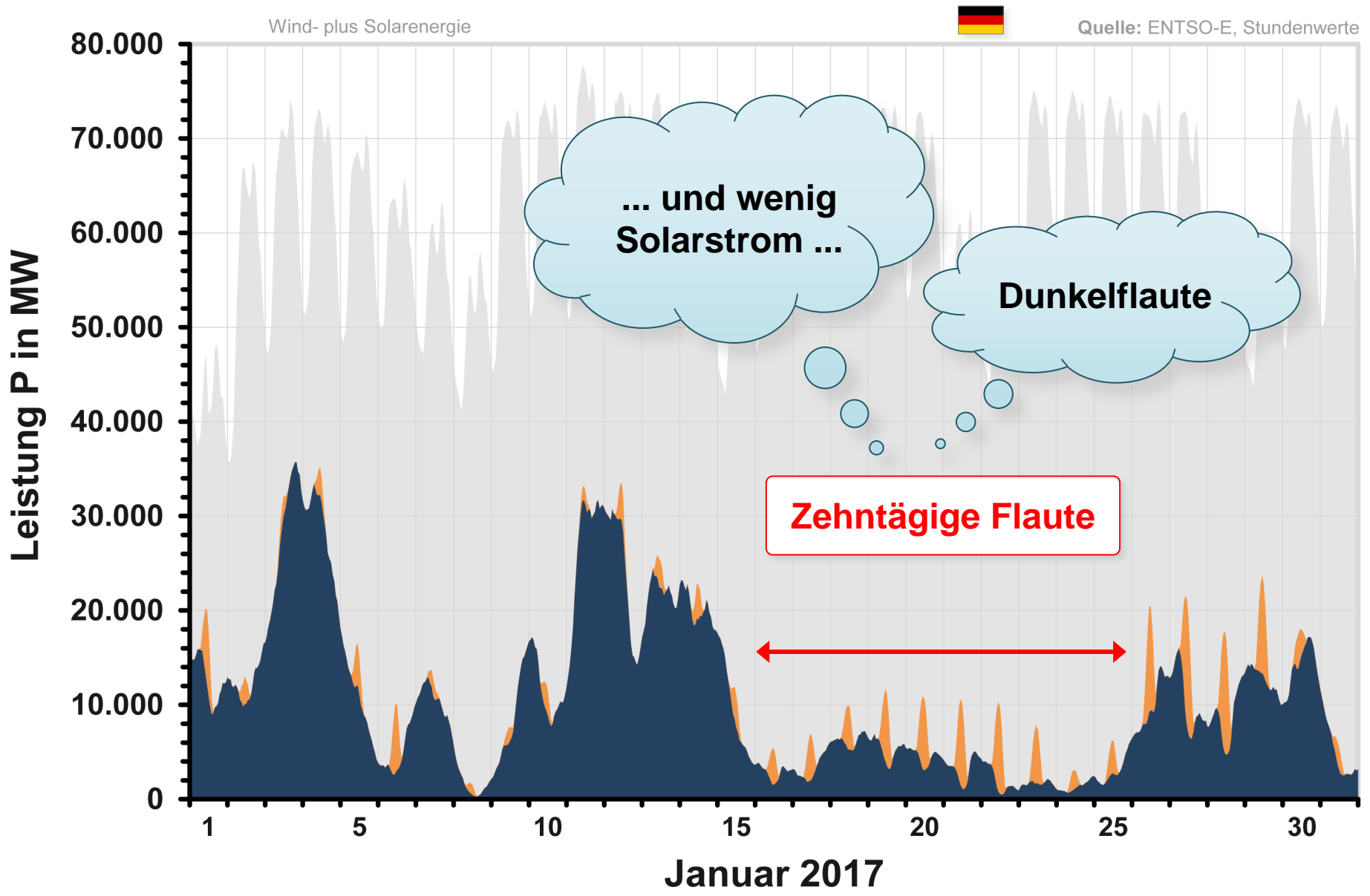


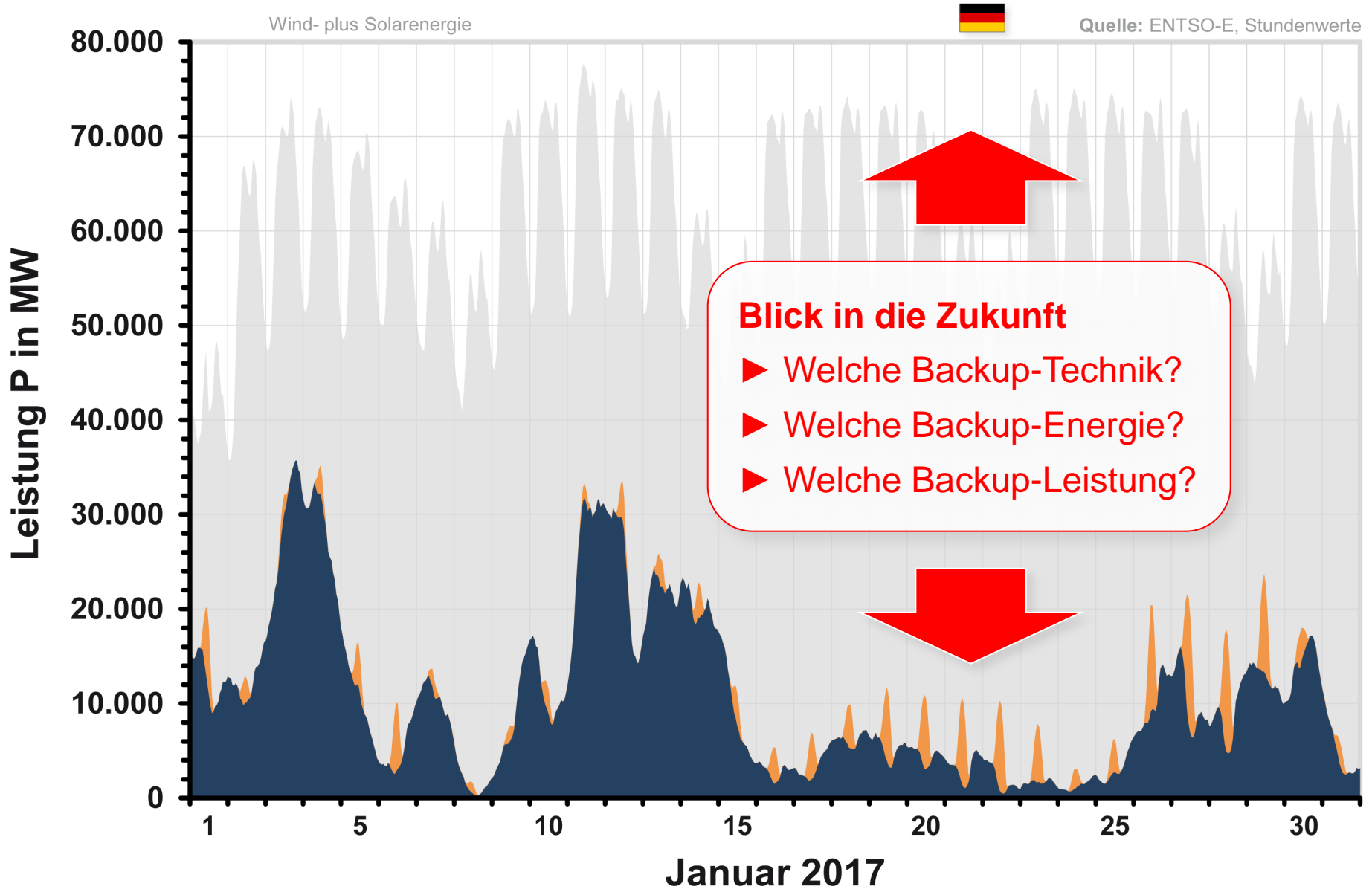












## Zwischenfazit

- Nennleistung seit 2010 auf  $\approx 60$  GW mehr als verdoppelt
- Windstromproduktion auf  $\approx 110$  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

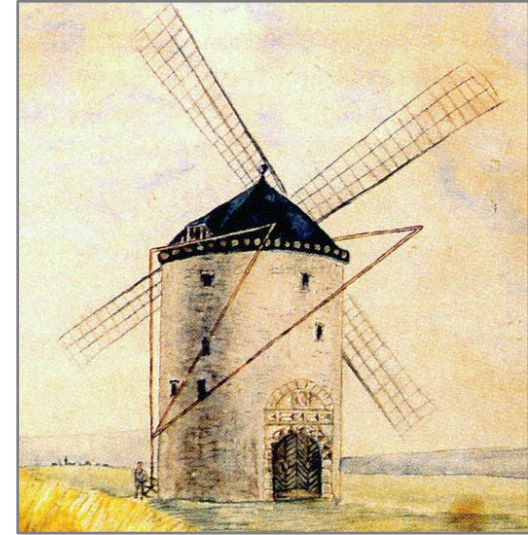
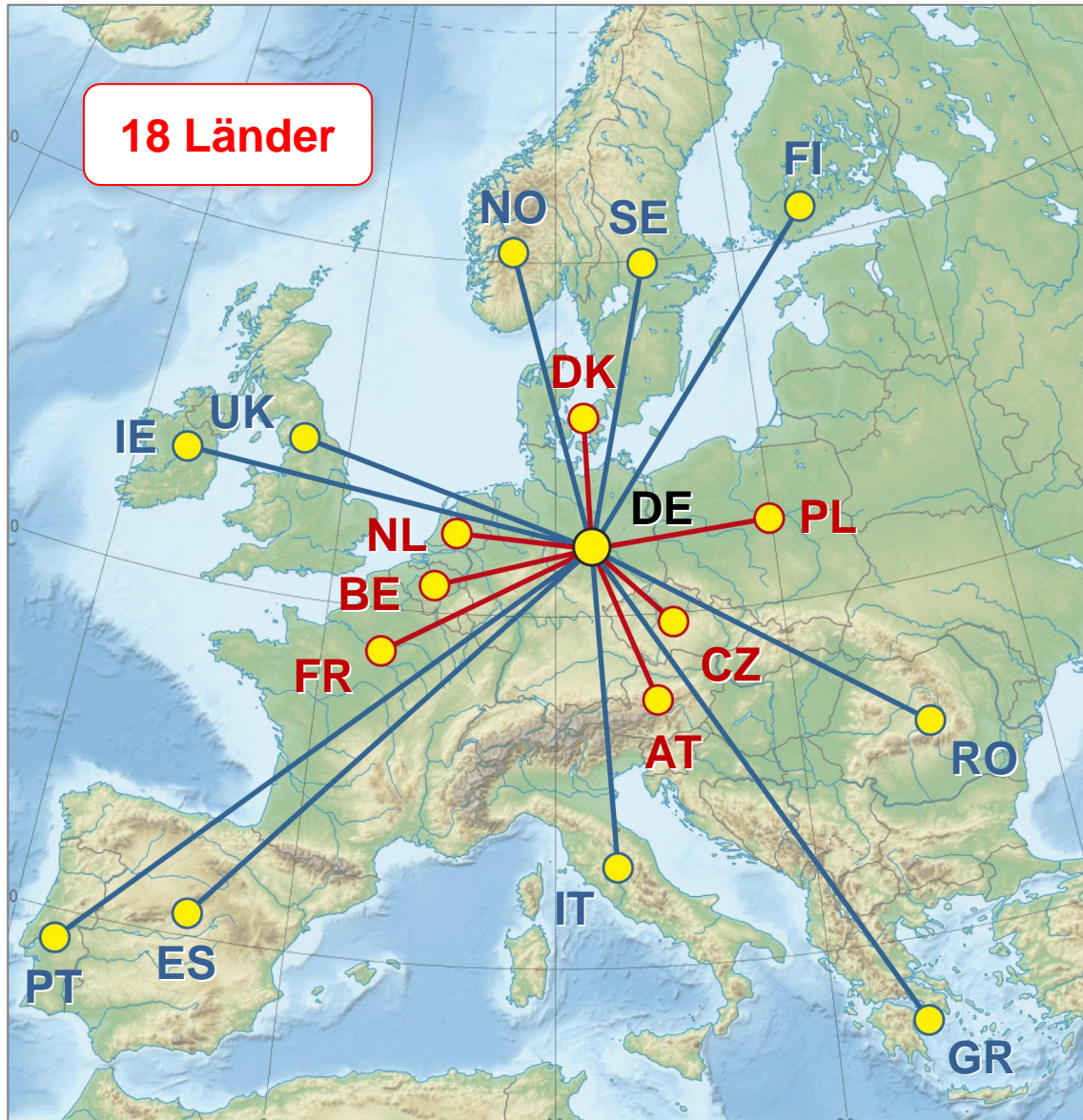
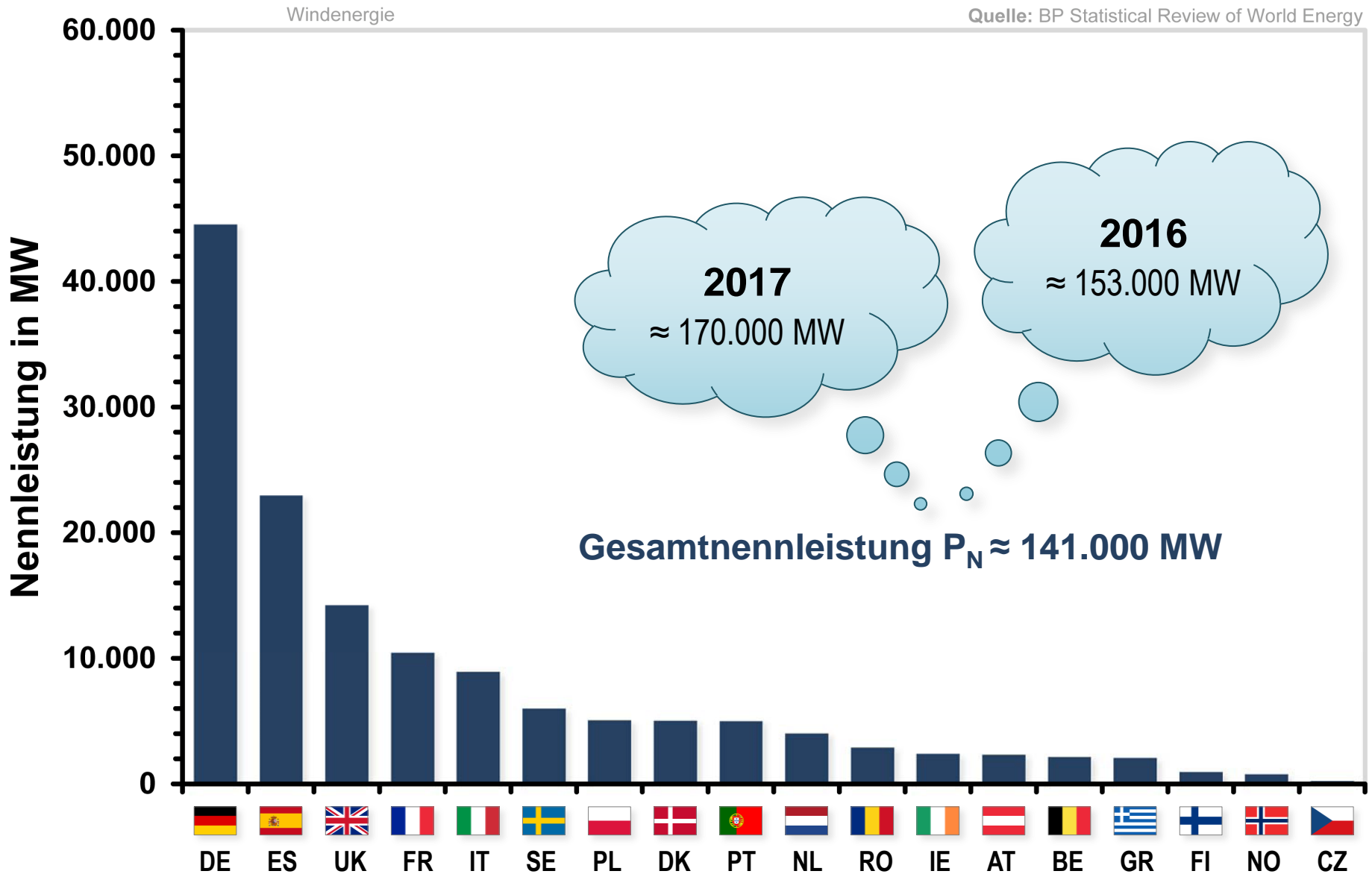
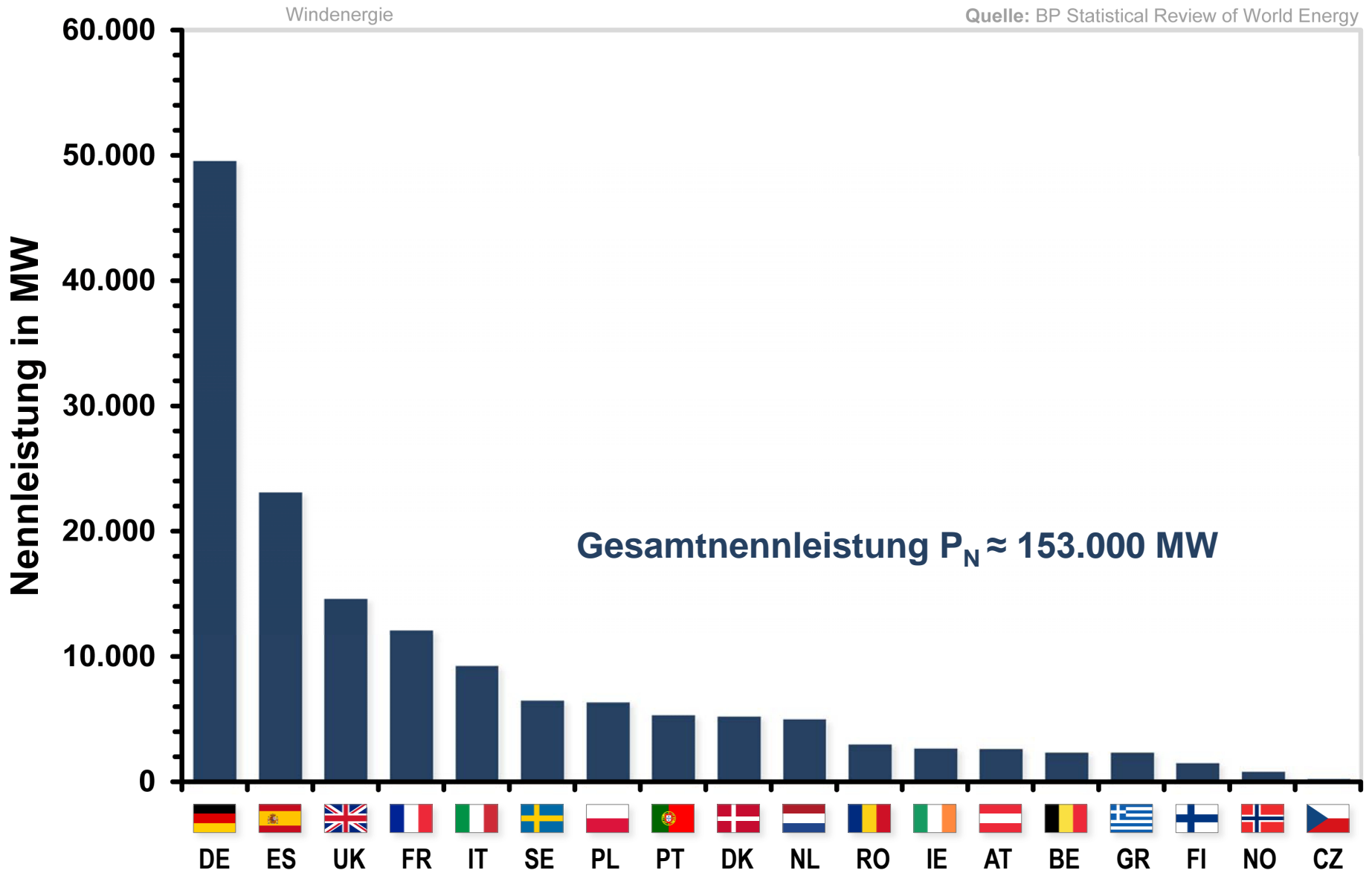


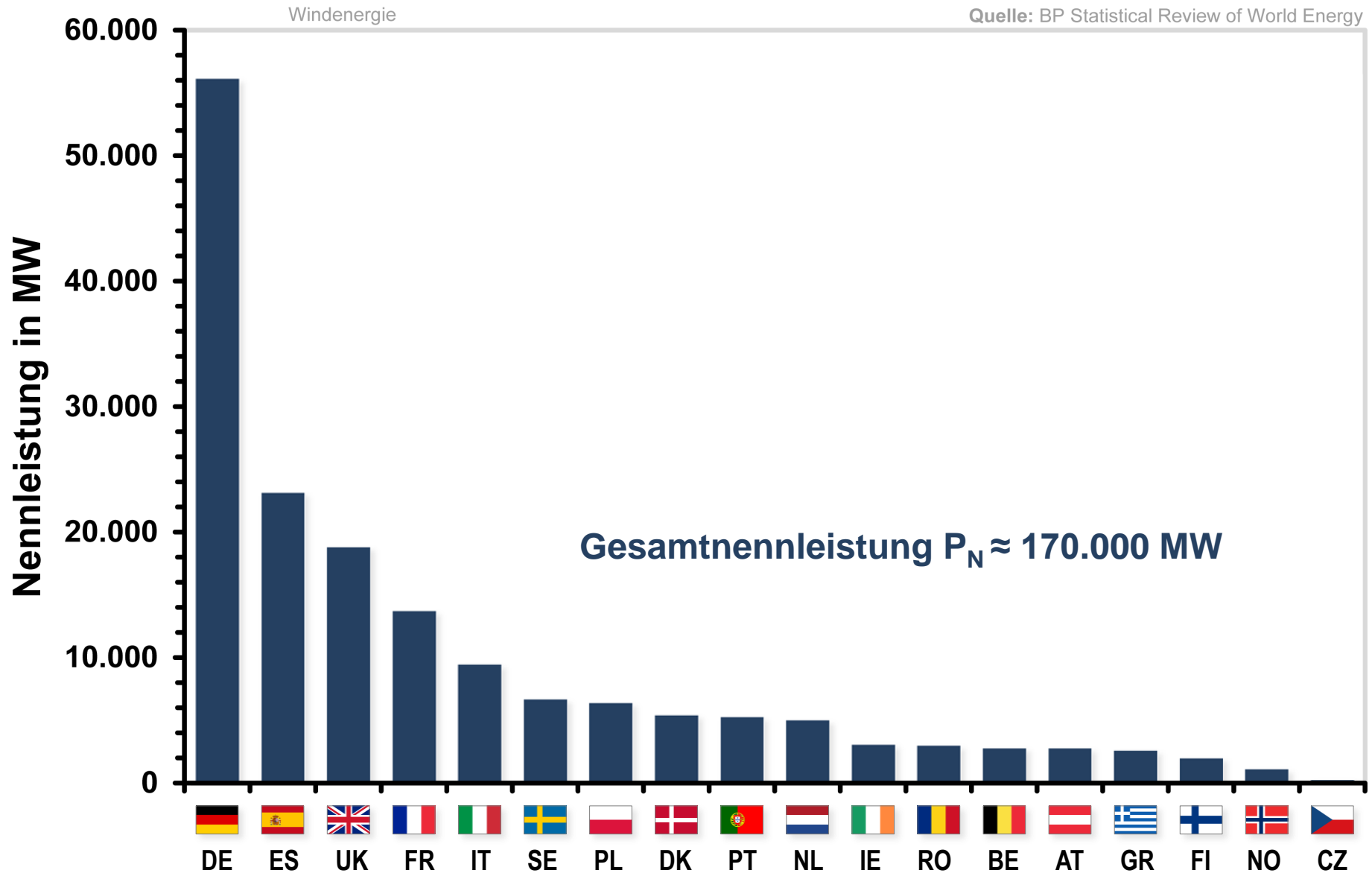
Illustration: [www.kultur-denkmal-merzenich.de](http://www.kultur-denkmal-merzenich.de)

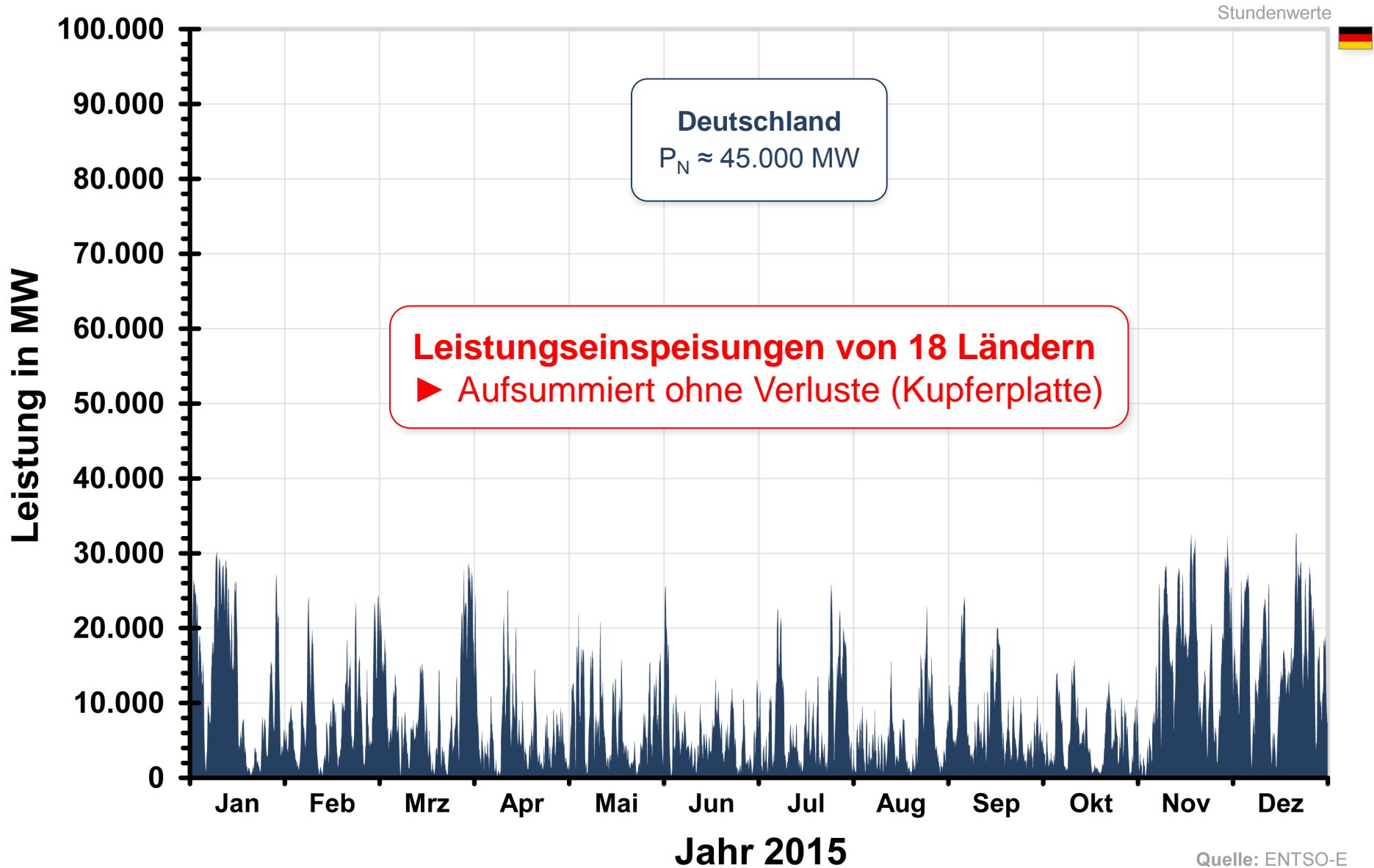


- AT** Österreich
- BE** Belgien
- CZ** Tschechien
- DE** Deutschland
- DK** Dänemark
- ES** Spanien
- FI** Finnland
- FR** Frankreich
- GR** Griechenland
- IE** Irland
- IT** Italien
- NL** Niederlande
- NO** Norwegen
- PO** Polen
- PT** Portugal
- RO** Rumänien
- SE** Schweden
- UK** Großbritannien



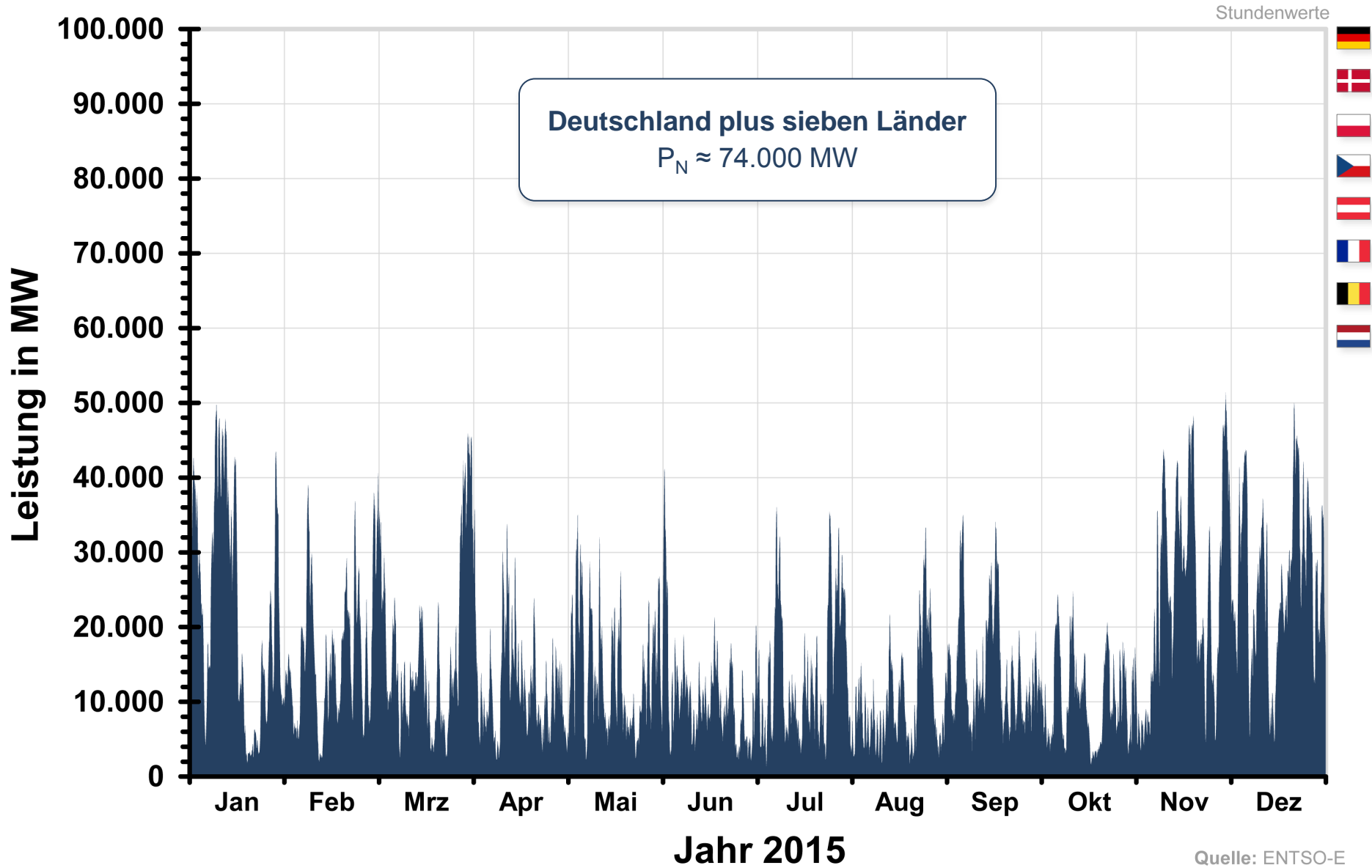




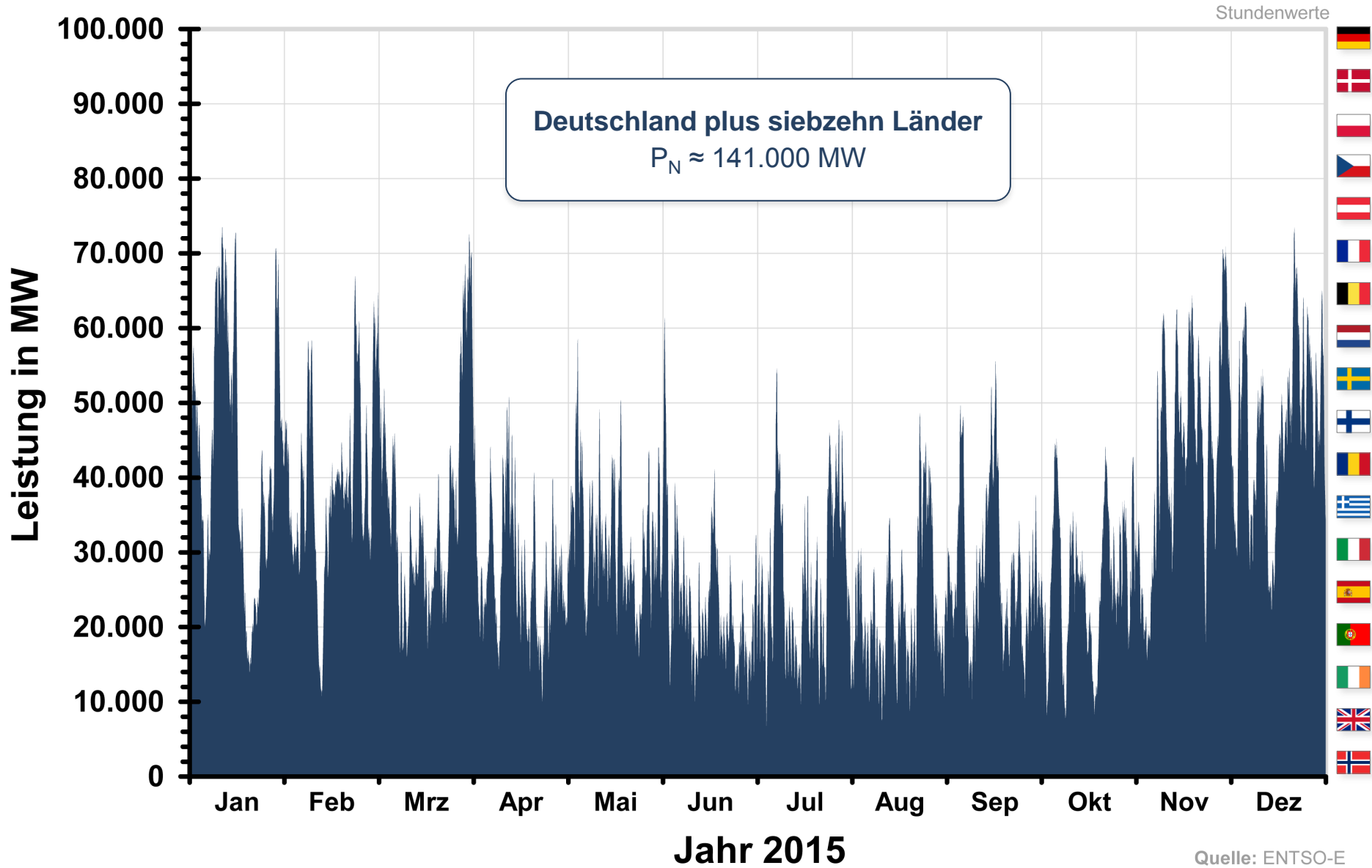


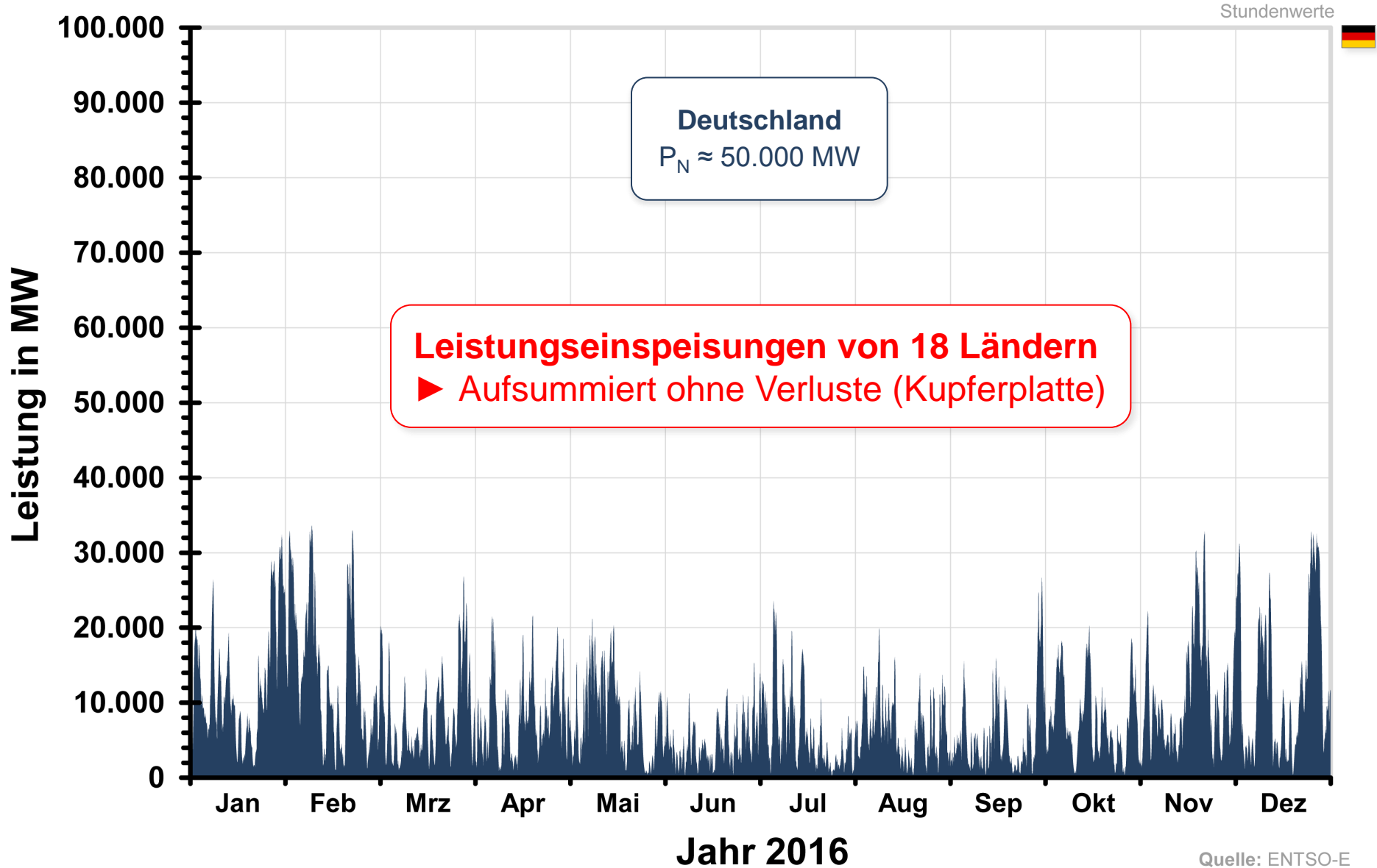
Quelle: ENTSO-E



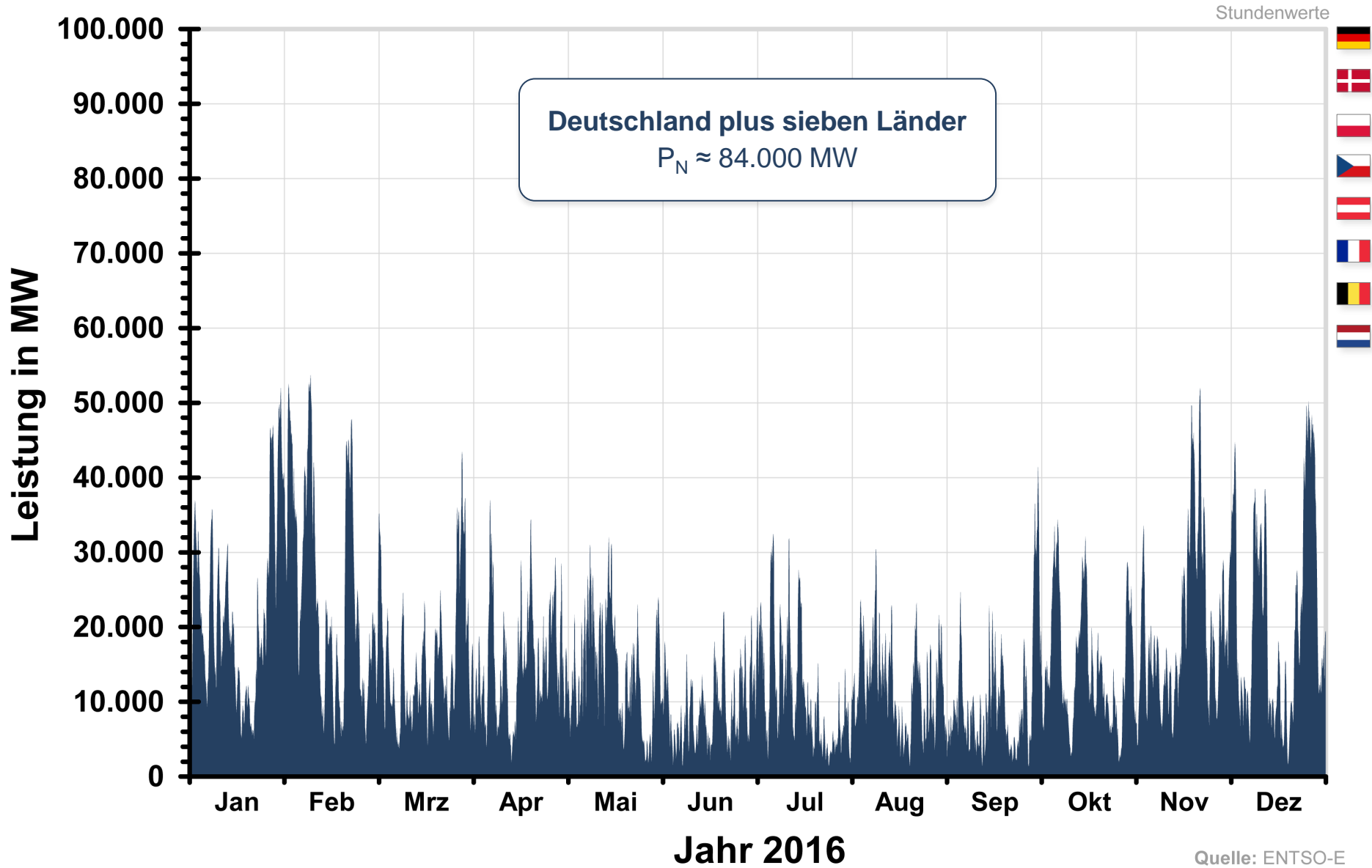


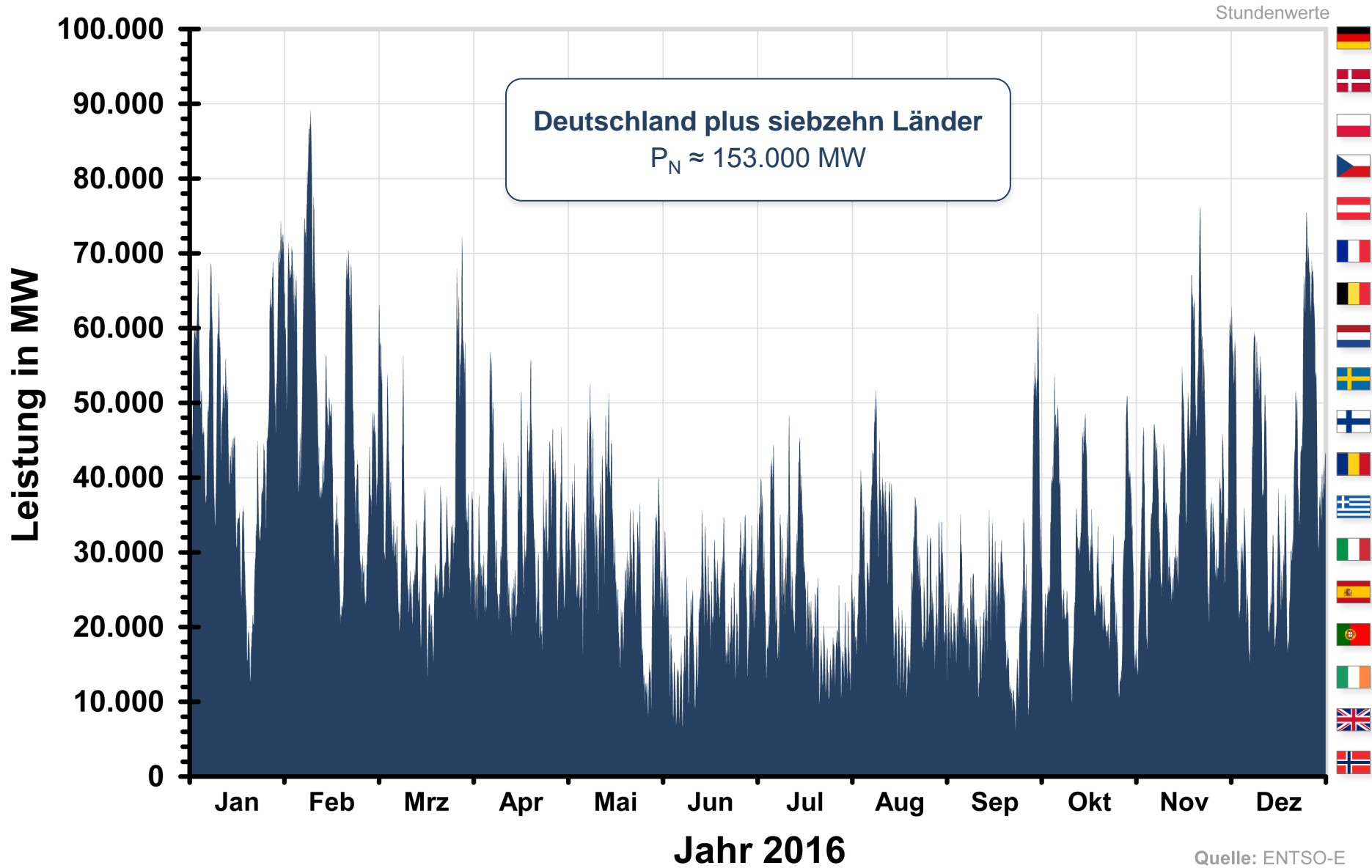


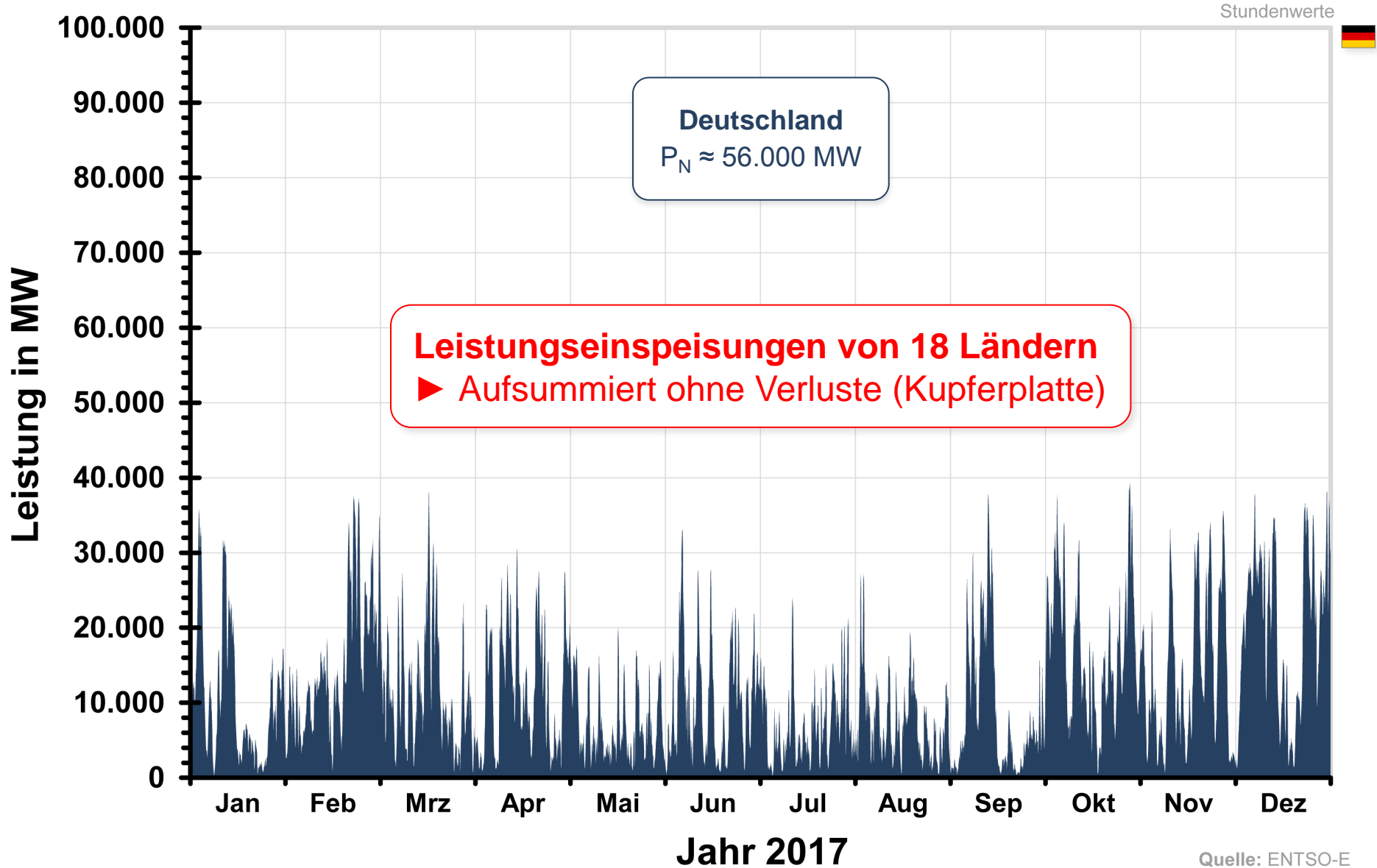




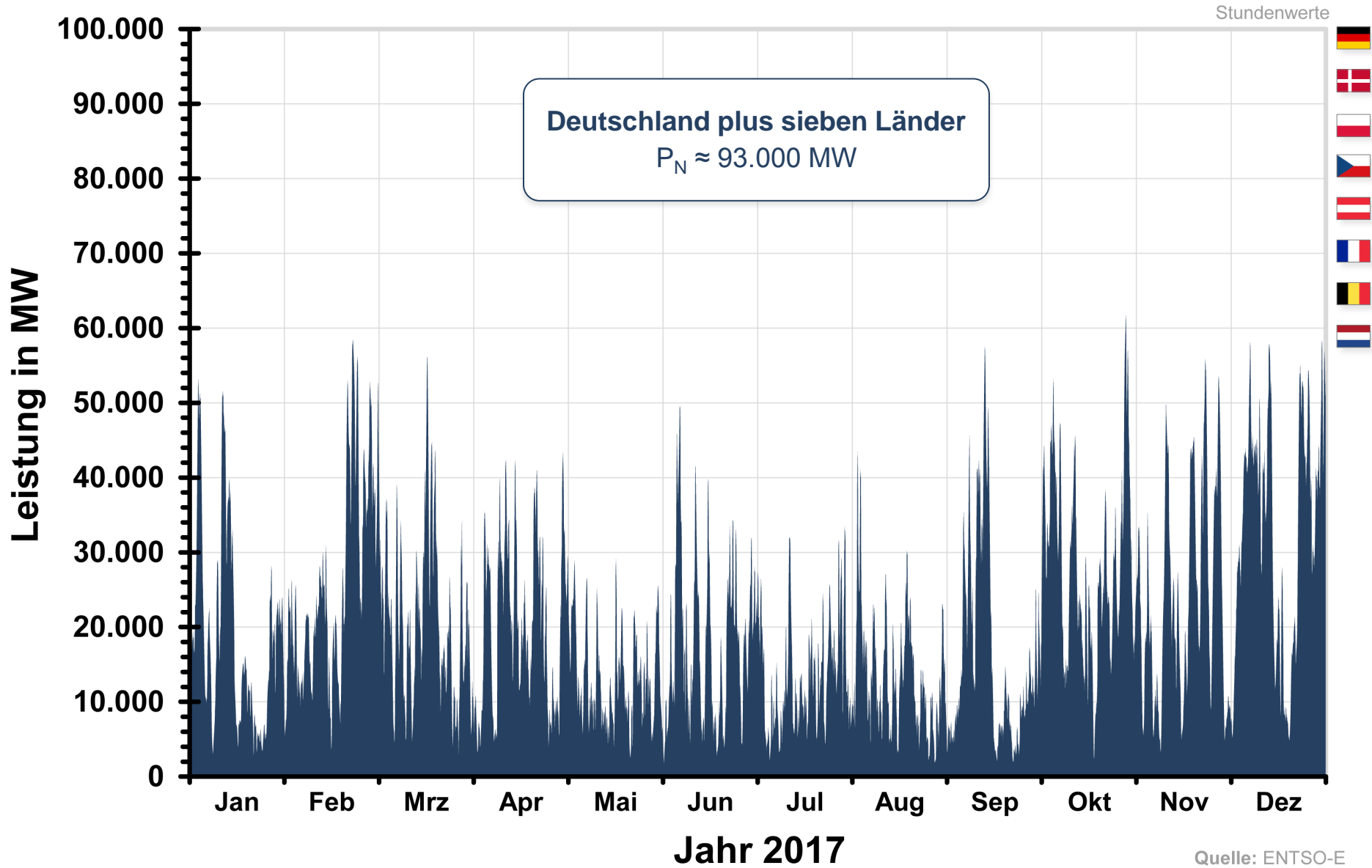
Quelle: ENTSO-E

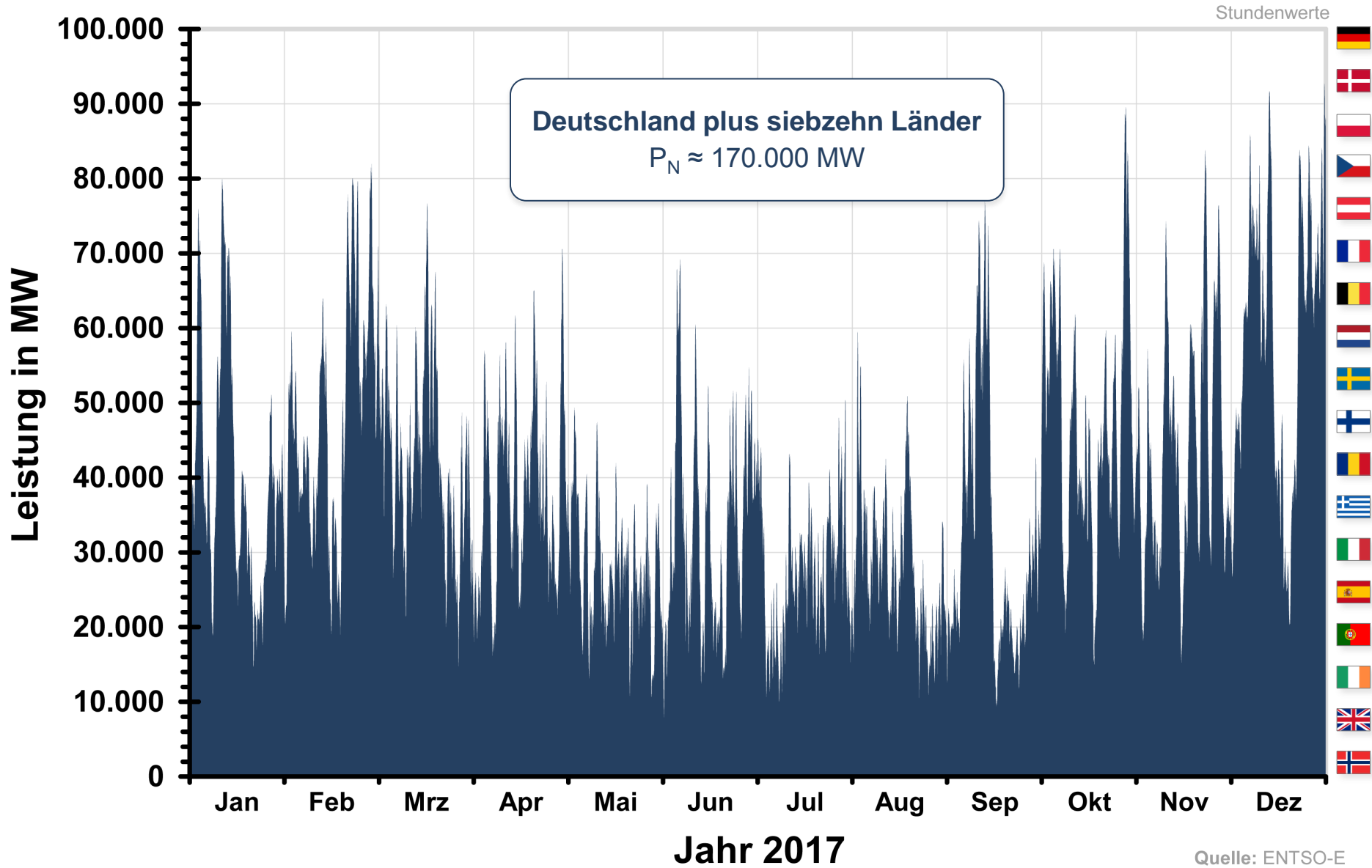


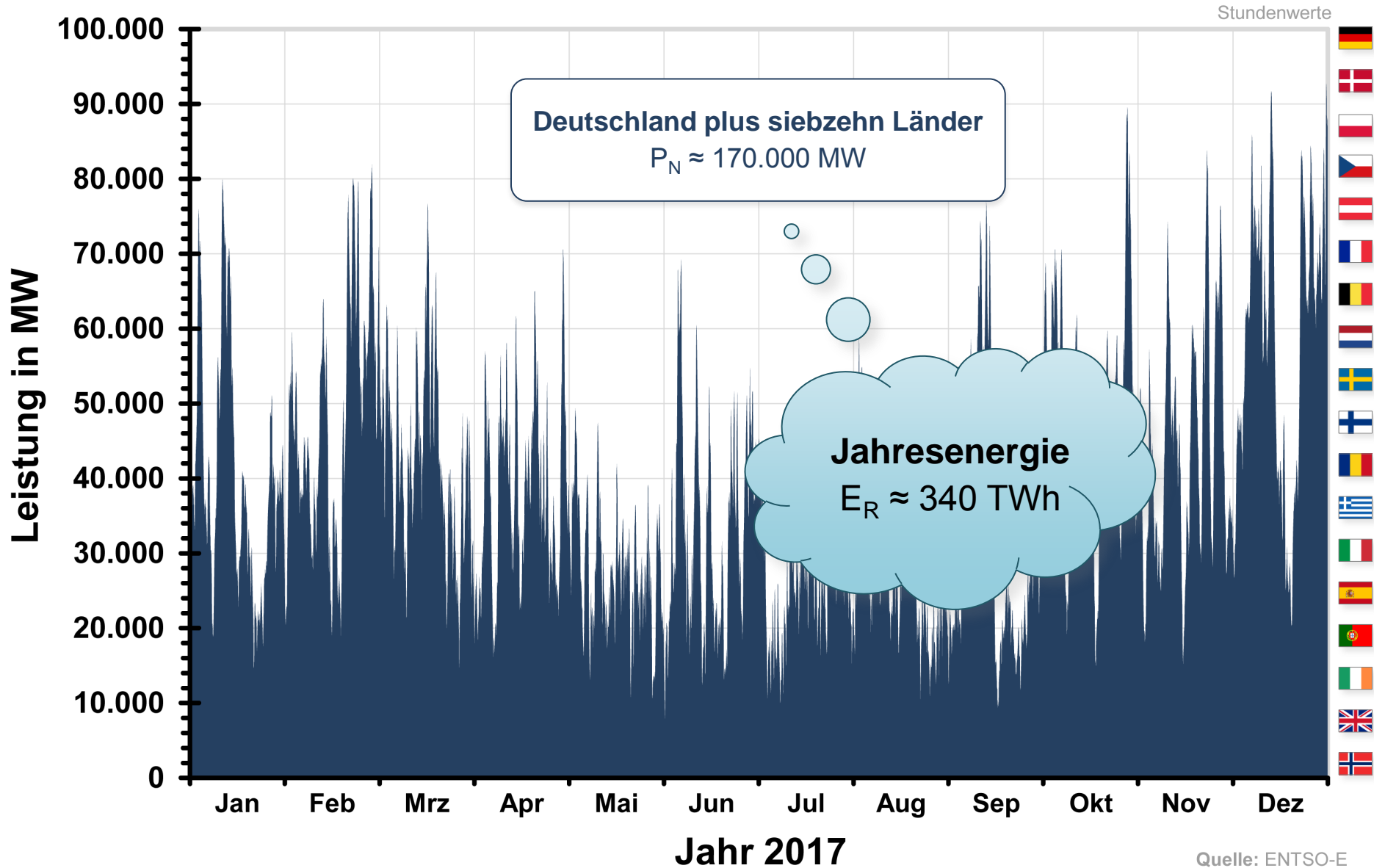




Quelle: ENTSO-E

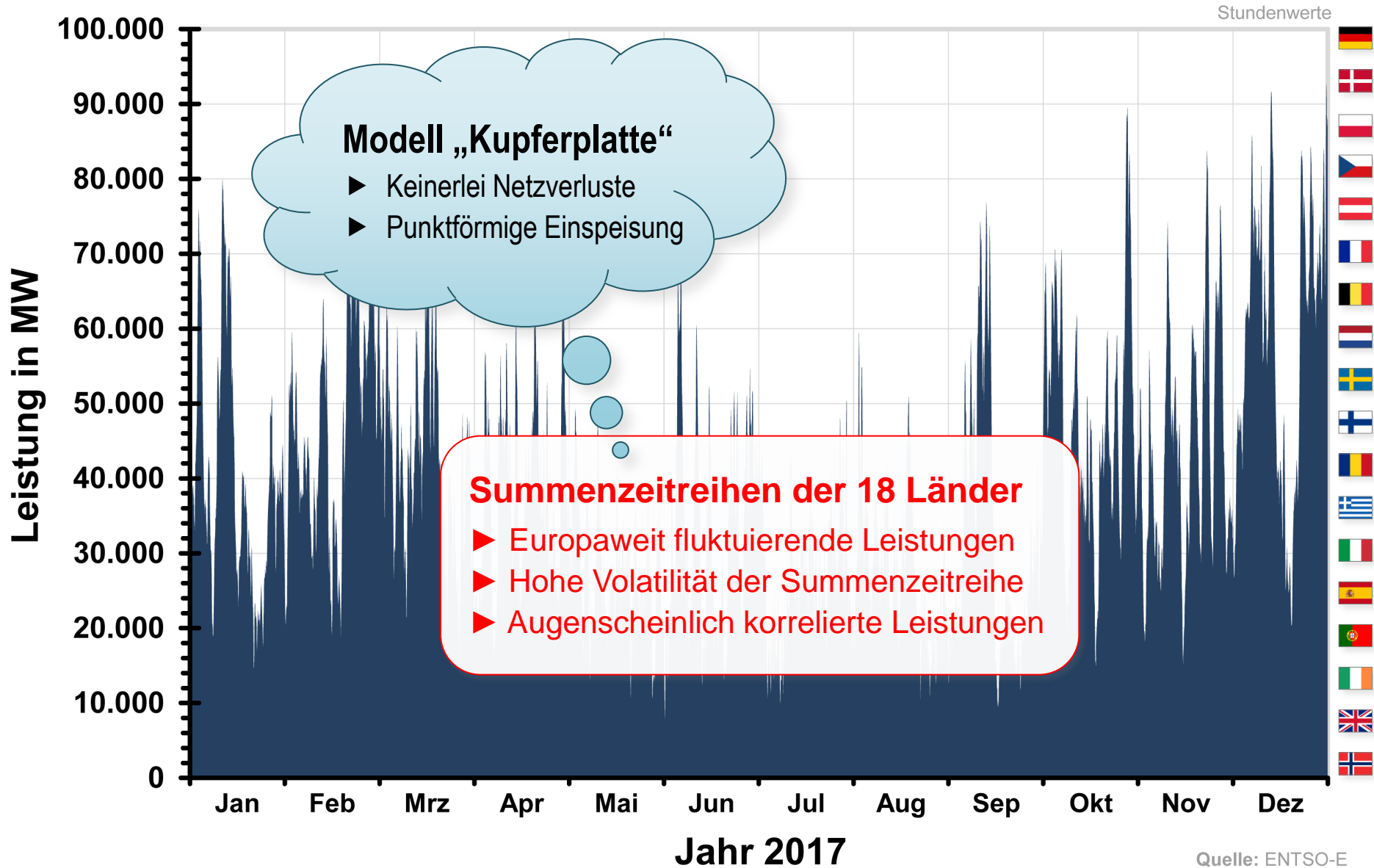


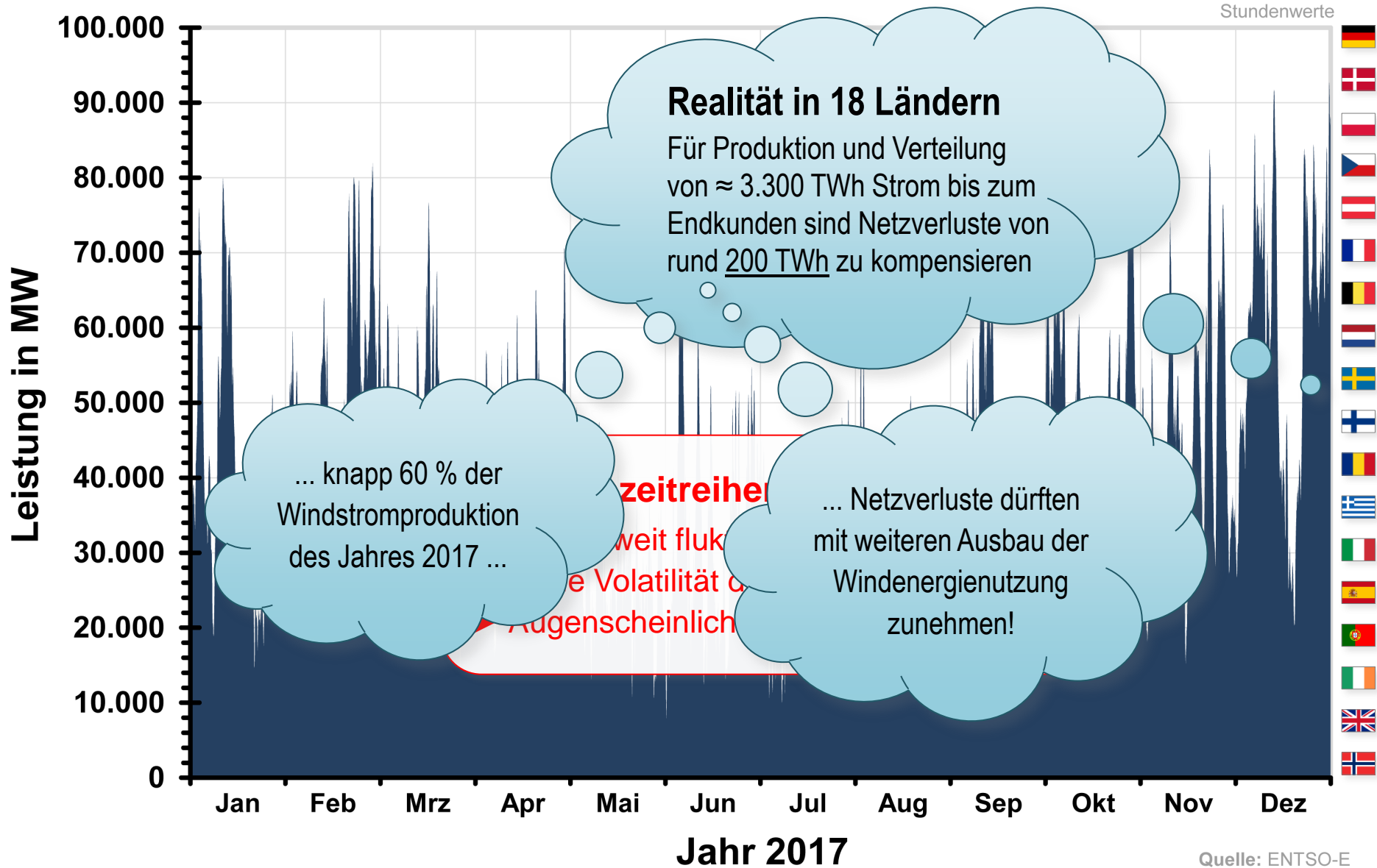




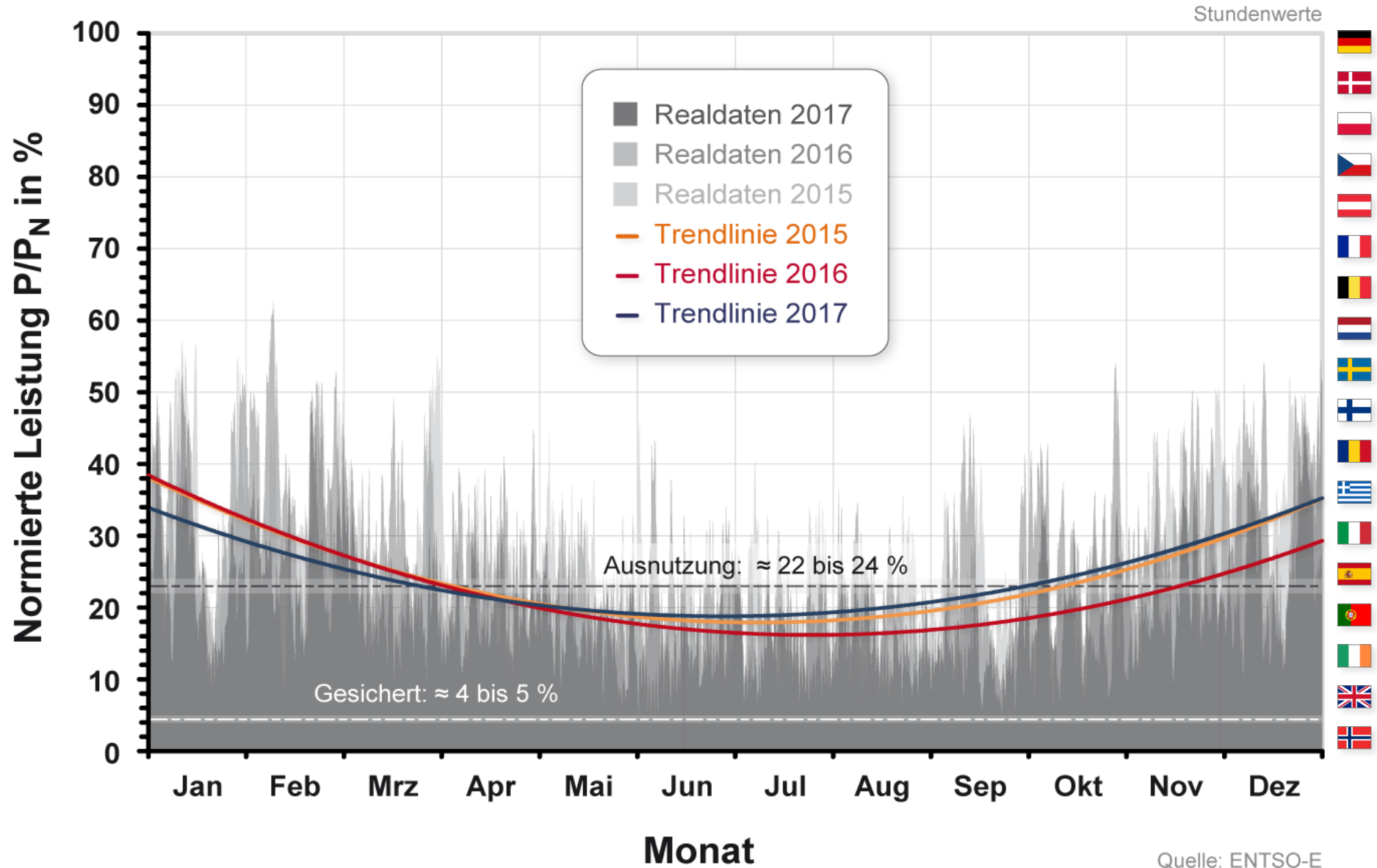
Quelle: ENTSO-E

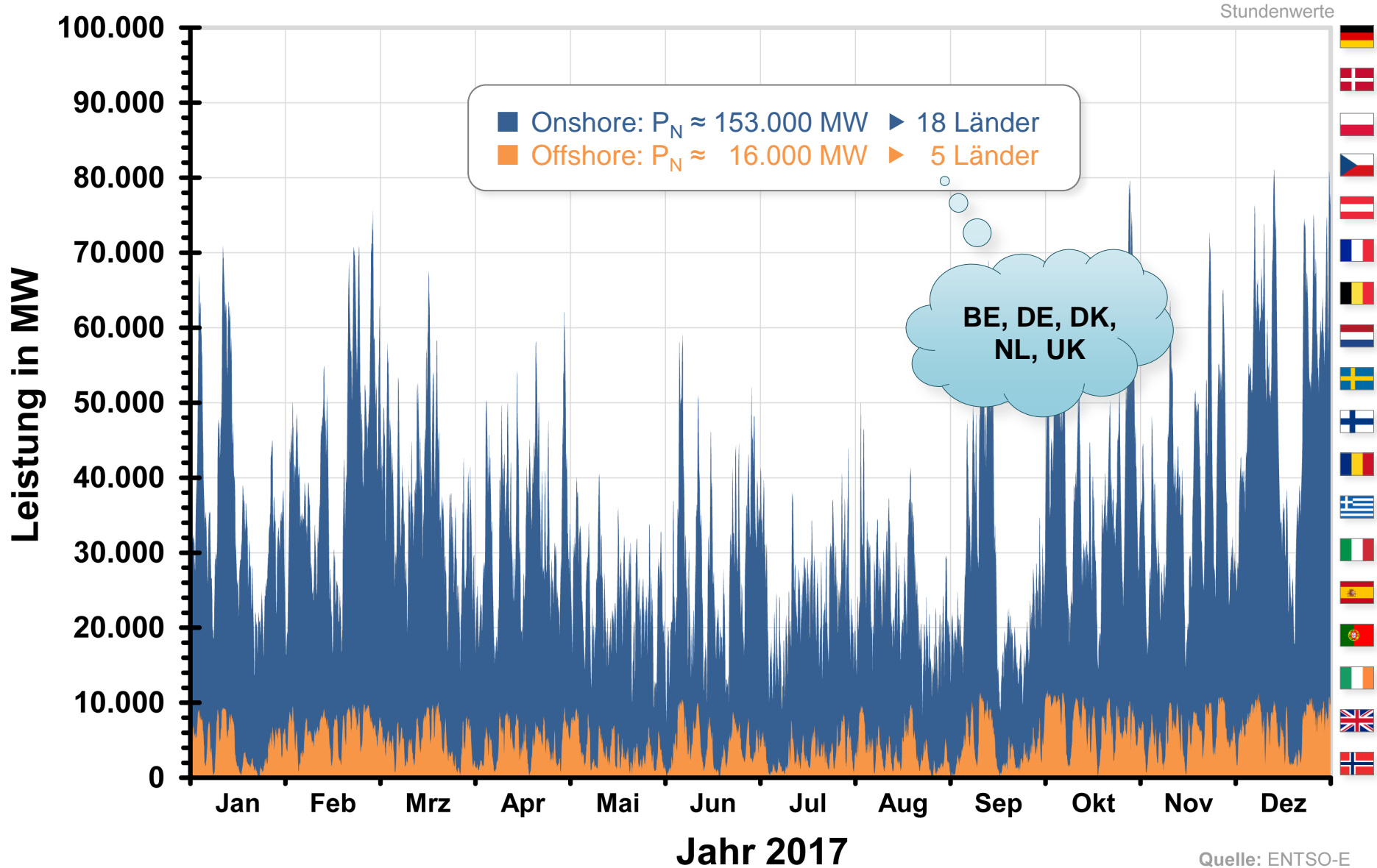


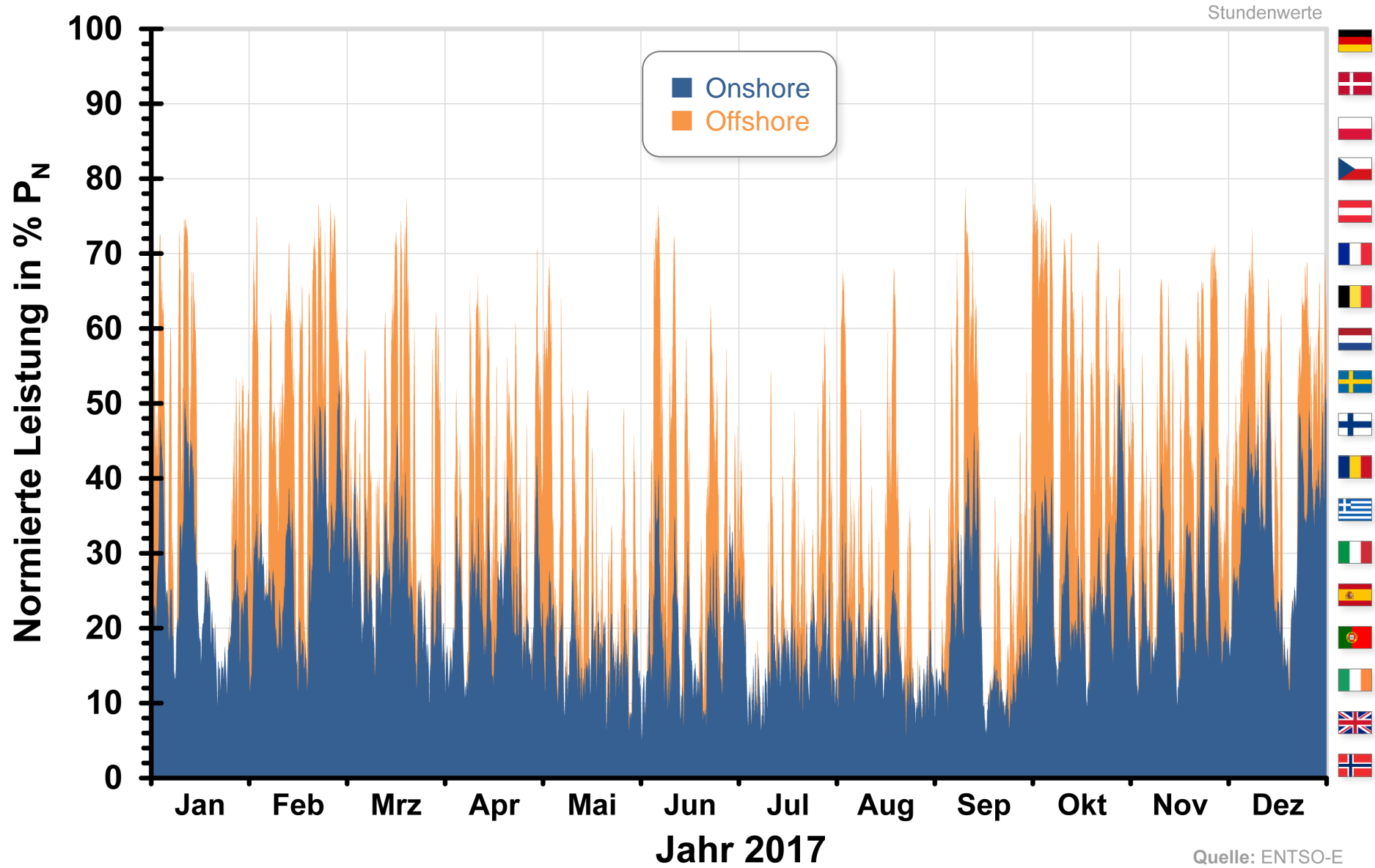


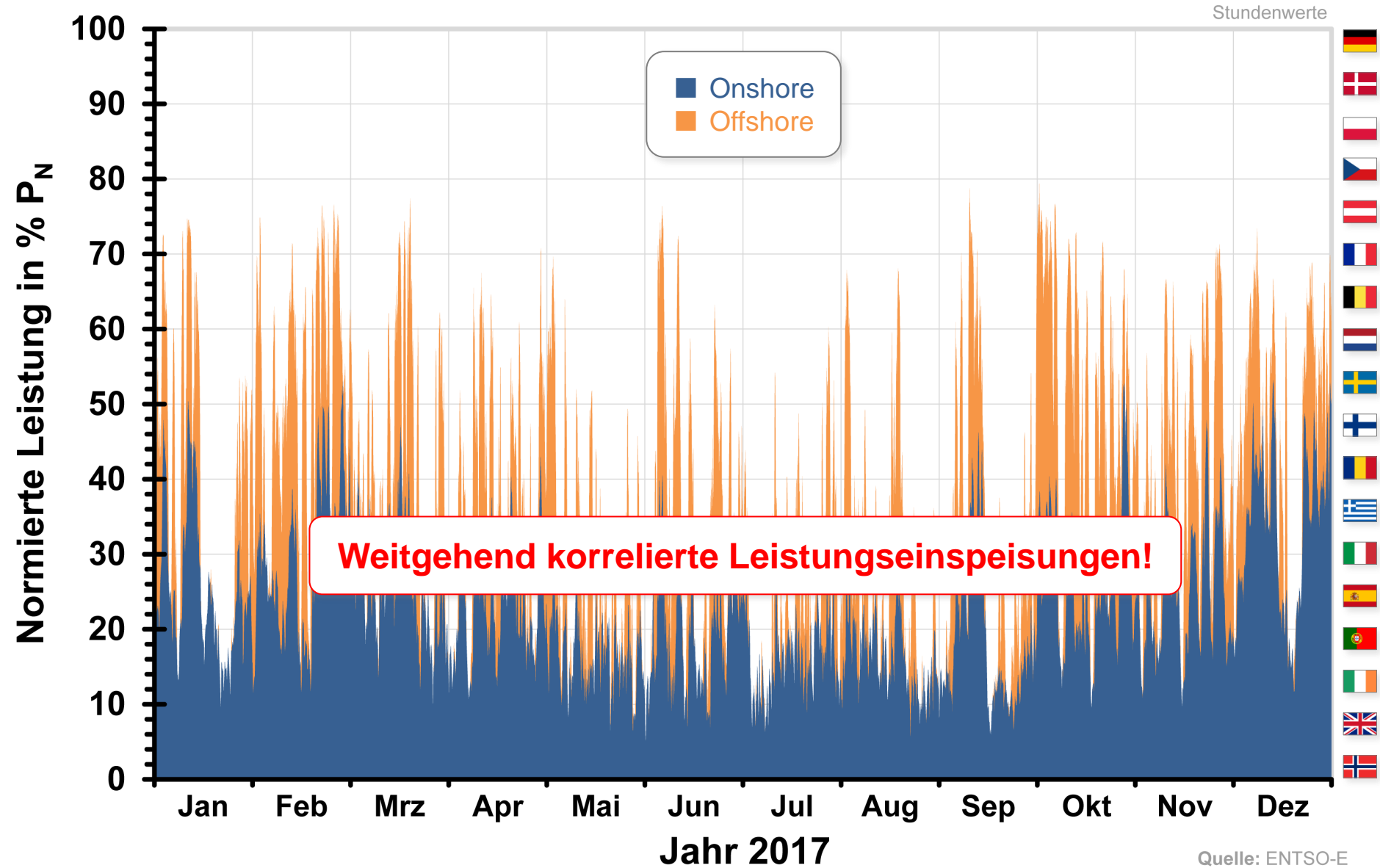


Quelle: ENTSO-E

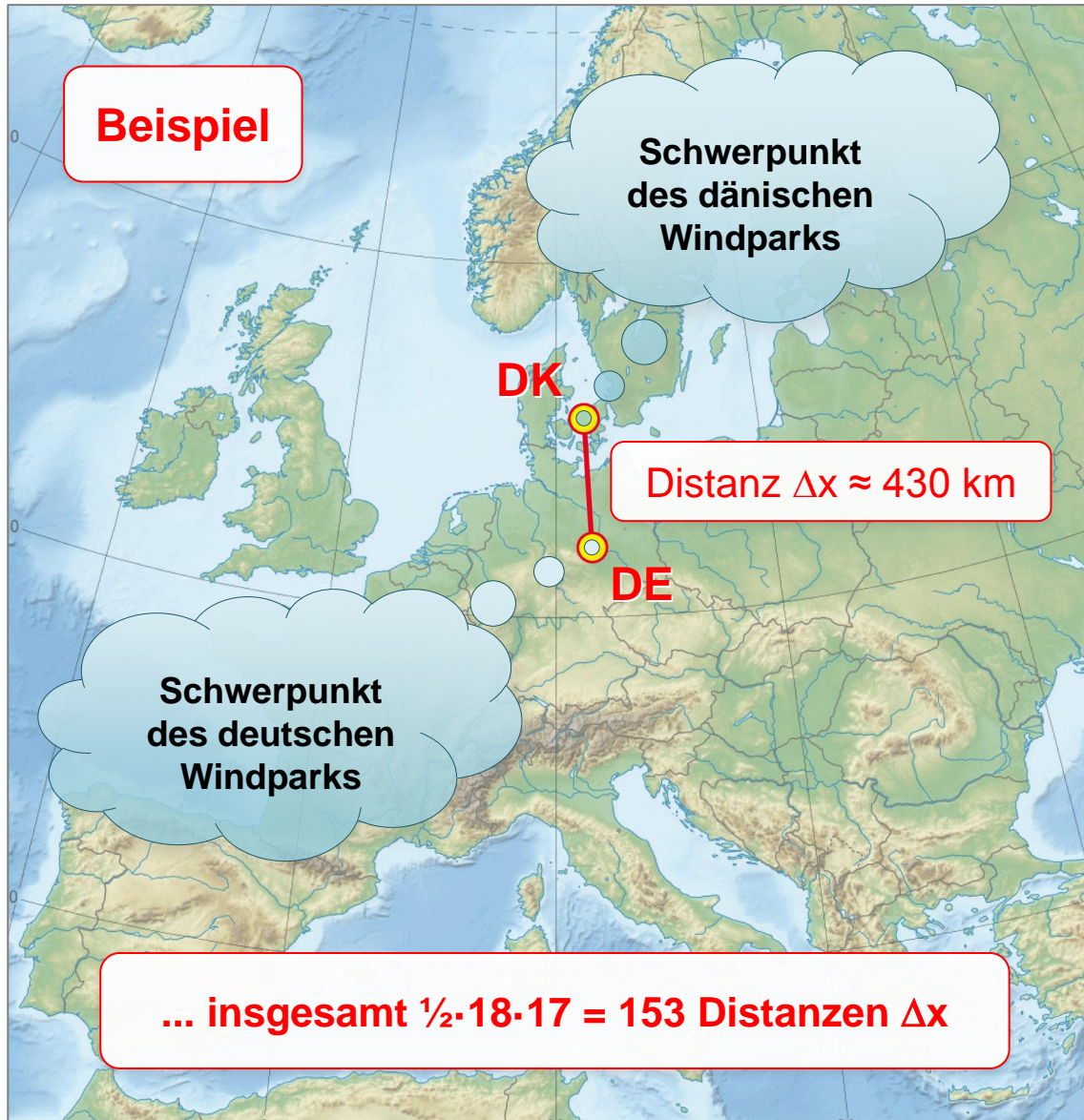












Land	Deutschland	Dänemark
Kürzel	DE	DK
Zeitraum	2016	2016
Schaltjahr	Ja	Ja
Leistung P	Windenergie	Windenergie
01.01.2016 00:00	8.579 MW	1.366 MW
01.01.2016 01:00	8.542 MW	1.232 MW
01.01.2016 02:00	8.443 MW	1.220 MW
01.01.2016 03:00	8.295 MW	1.118 MW
01.01.2016 04:00	7.320 MW	1.049 MW
01.01.2016 05:00	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:

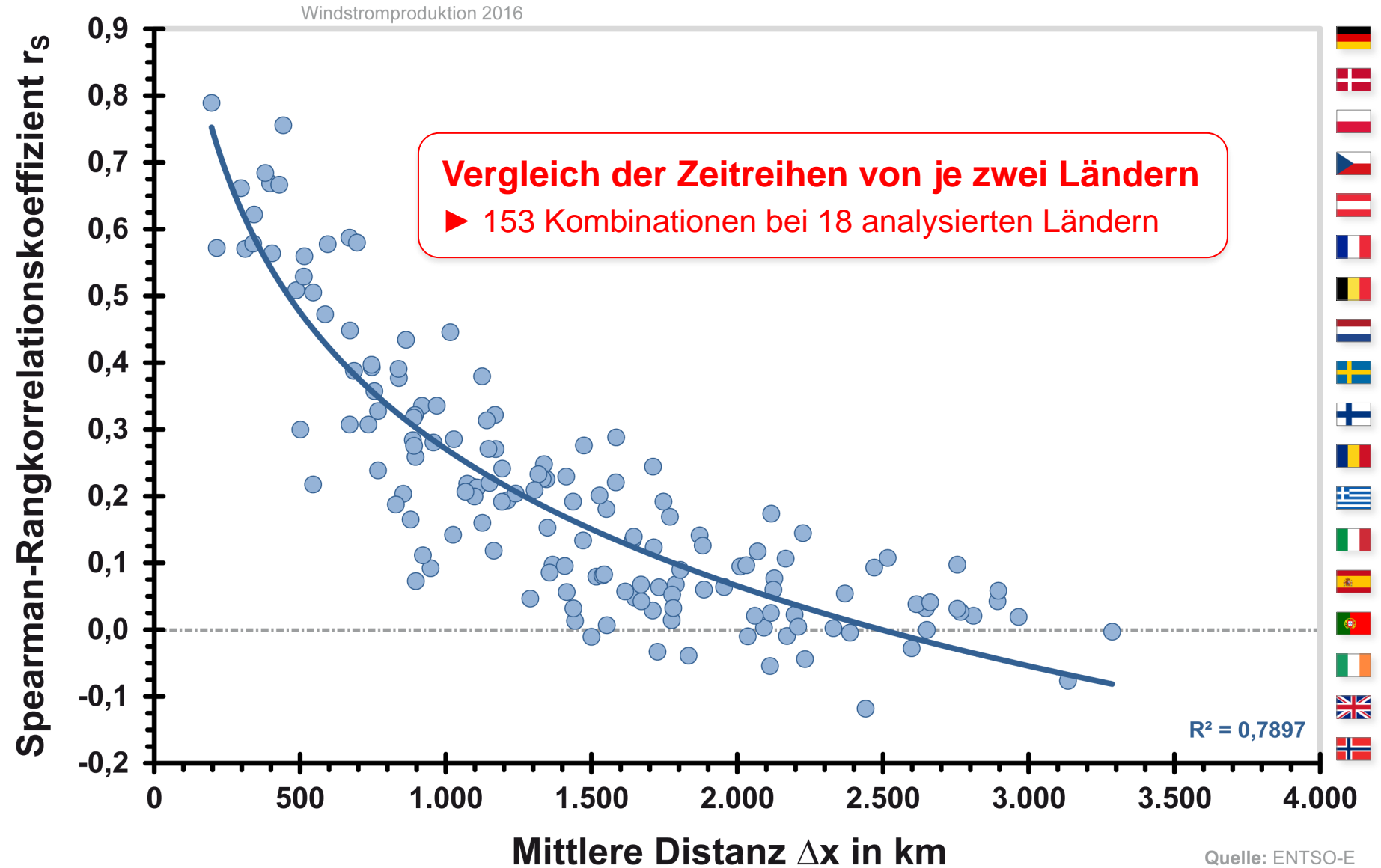
- $r_K \approx 0$  Unkorrelierte Daten  
z. B. Hausnummer und Körpergröße
- $r_K > 0$  Positiv korrelierte Daten  
z. B. Körper- und Schuhgröße (↑↑)
- $r_K < 0$  Negativ korrelierte Daten  
z. B. Außentemperatur und Skiurlauberzahl (↓↑)
- $r_K = \pm 1$  Perfekte positive bzw. negative Korrelation

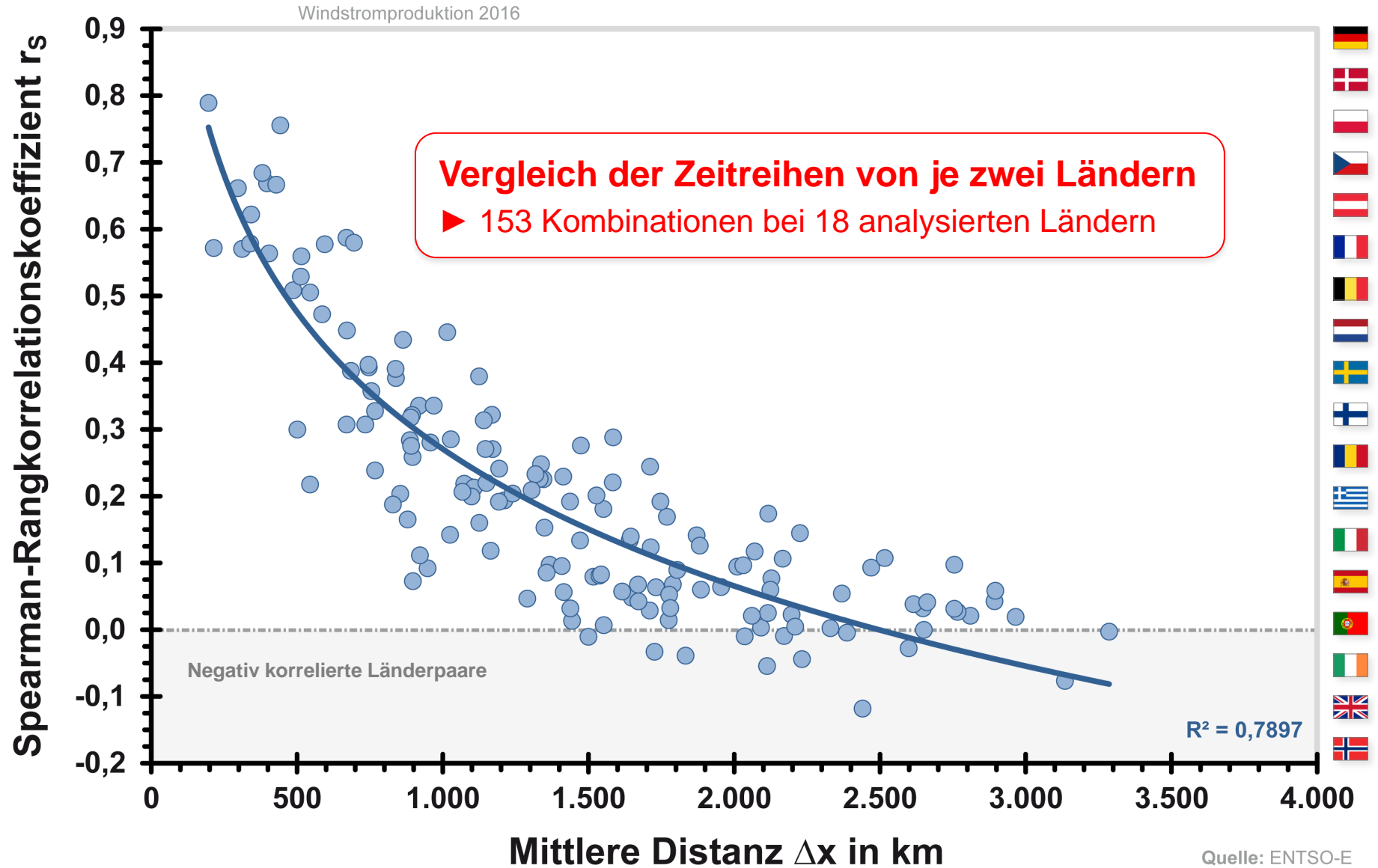
## Gewählte Methode

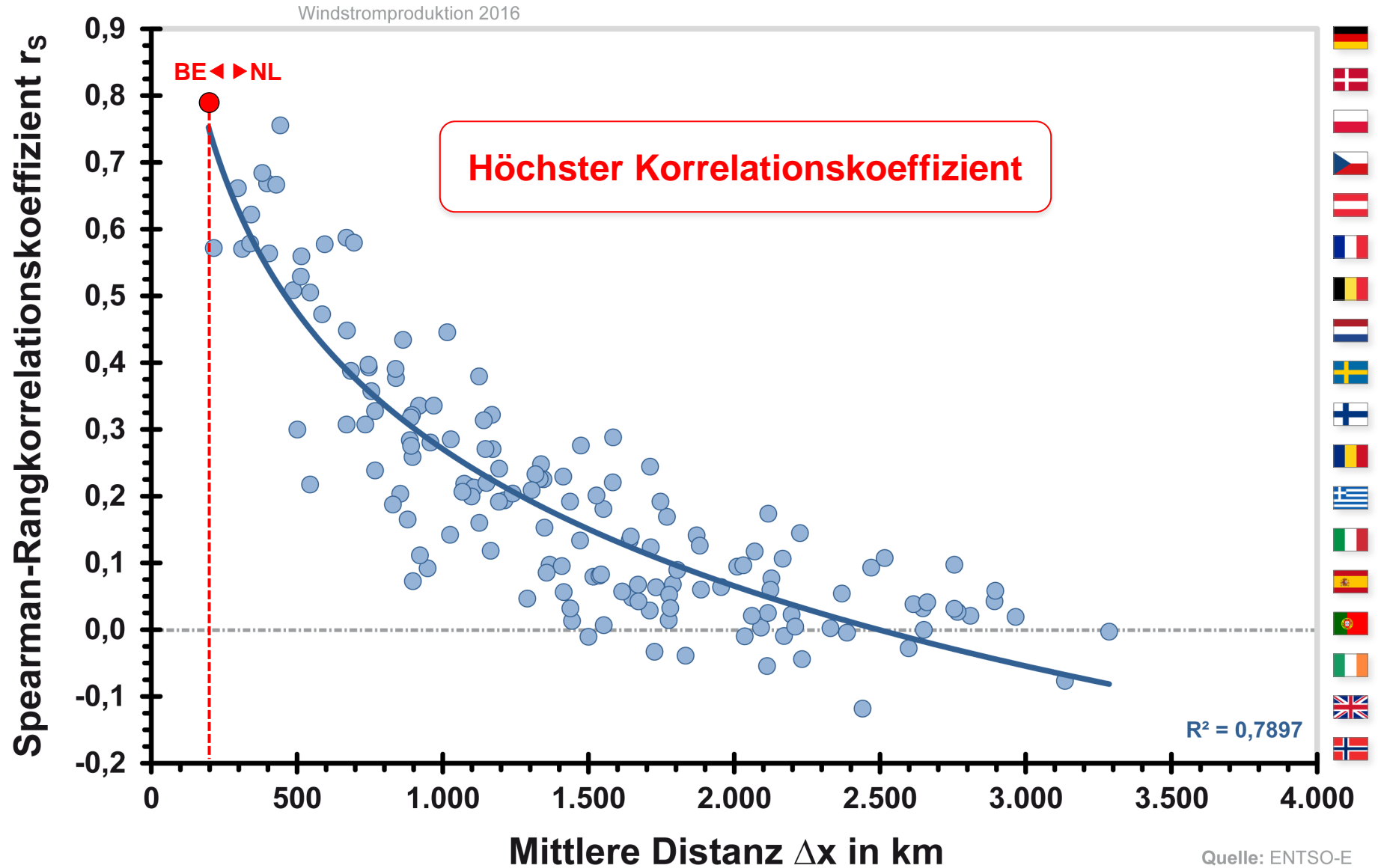
- Rangkorrelationskoeffizient  $r_S$  nach Spearman aufgrund nicht normalverteilter Daten (Leistungseinspeisungen)

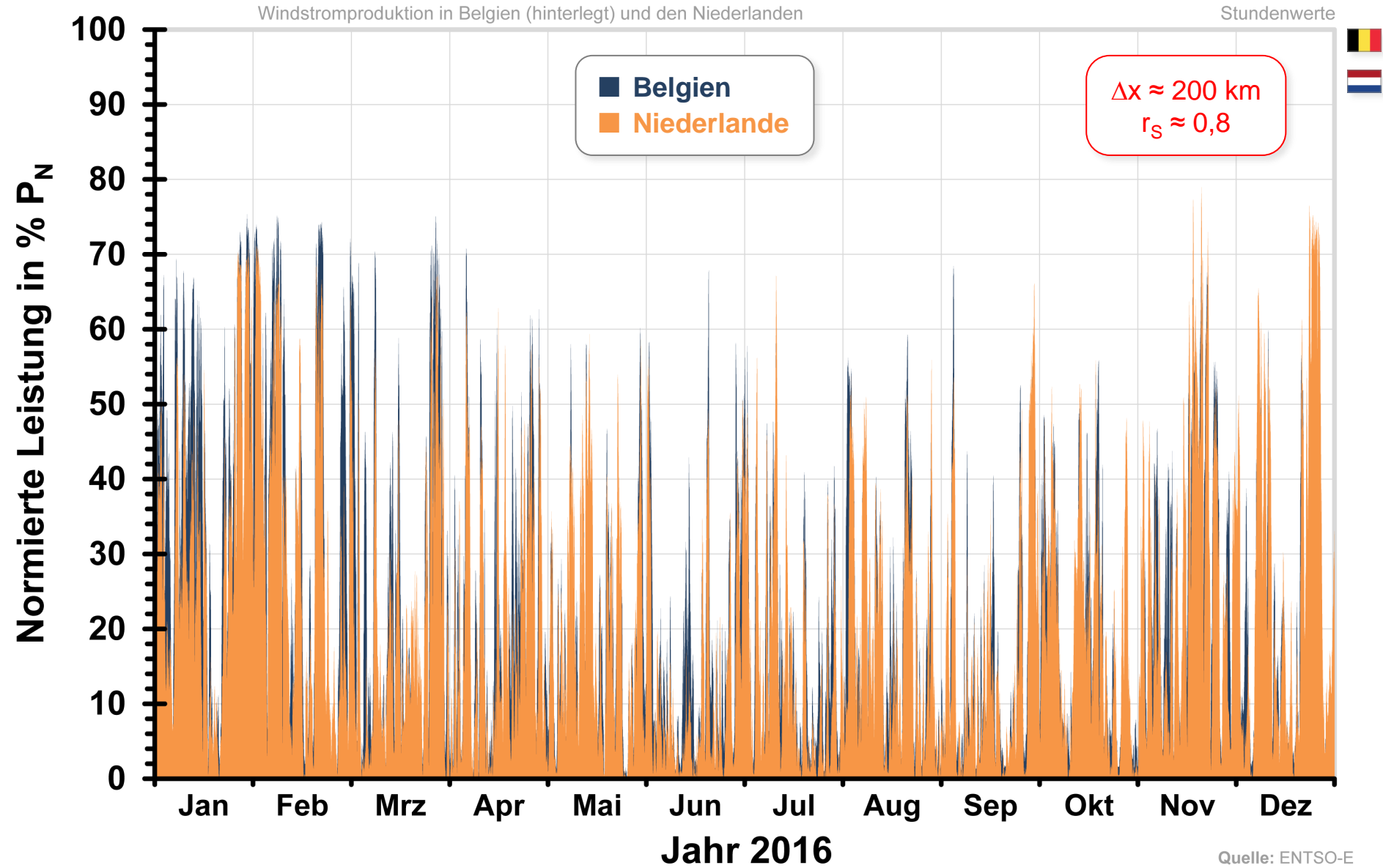
Deutschland	Dänemark
DE	DK
2016	2016
Ja	Ja
ENTSO-E	ENTSO-E
8.579 MW	1.366 MW
8.542 MW	1.232 MW
8.505 MW	1.100 MW
8.468 MW	968 MW
8.431 MW	836 MW
8.394 MW	704 MW
8.357 MW	572 MW
8.320 MW	440 MW
8.283 MW	308 MW
8.246 MW	176 MW
8.209 MW	48 MW
8.172 MW	120 MW
8.135 MW	240 MW
8.098 MW	360 MW
8.061 MW	480 MW
8.024 MW	600 MW
7.987 MW	720 MW
7.950 MW	840 MW
7.913 MW	960 MW
7.876 MW	1.080 MW
7.839 MW	1.200 MW
7.802 MW	1.320 MW
7.765 MW	1.440 MW
7.728 MW	1.560 MW
7.691 MW	1.680 MW
7.654 MW	1.800 MW
7.617 MW	1.920 MW
7.580 MW	2.040 MW
7.543 MW	2.160 MW
7.506 MW	2.280 MW
7.469 MW	2.400 MW
7.432 MW	2.520 MW
7.395 MW	2.640 MW
7.358 MW	2.760 MW
7.321 MW	2.880 MW
7.284 MW	3.000 MW
7.247 MW	3.120 MW
7.210 MW	3.240 MW
7.173 MW	3.360 MW
7.136 MW	3.480 MW
7.099 MW	3.600 MW
7.062 MW	3.720 MW
7.025 MW	3.840 MW
6.988 MW	3.960 MW
6.951 MW	4.080 MW
6.914 MW	4.200 MW
6.877 MW	4.320 MW
6.840 MW	4.440 MW
6.803 MW	4.560 MW
6.766 MW	4.680 MW
6.729 MW	4.800 MW
6.692 MW	4.920 MW
6.655 MW	5.040 MW
6.618 MW	5.160 MW
6.581 MW	5.280 MW
6.544 MW	5.400 MW
6.507 MW	5.520 MW
6.470 MW	5.640 MW
6.433 MW	5.760 MW
6.396 MW	5.880 MW
6.359 MW	6.000 MW
6.322 MW	6.120 MW
6.285 MW	6.240 MW
6.248 MW	6.360 MW
6.211 MW	6.480 MW
6.174 MW	6.600 MW
6.137 MW	6.720 MW
6.100 MW	6.840 MW
6.063 MW	6.960 MW
6.026 MW	7.080 MW
5.989 MW	7.200 MW
5.952 MW	7.320 MW
5.915 MW	7.440 MW
5.878 MW	7.560 MW
5.841 MW	7.680 MW
5.804 MW	7.800 MW
5.767 MW	7.920 MW
5.730 MW	8.040 MW
5.693 MW	8.160 MW
5.656 MW	8.280 MW
5.619 MW	8.400 MW
5.582 MW	8.520 MW
5.545 MW	8.640 MW
5.508 MW	8.760 MW
5.471 MW	8.880 MW
5.434 MW	9.000 MW
5.397 MW	9.120 MW
5.360 MW	9.240 MW
5.323 MW	9.360 MW
5.286 MW	9.480 MW
5.249 MW	9.600 MW
5.212 MW	9.720 MW
5.175 MW	9.840 MW
5.138 MW	9.960 MW
5.101 MW	10.080 MW
5.064 MW	10.200 MW
5.027 MW	10.320 MW
4.990 MW	10.440 MW
4.953 MW	10.560 MW
4.916 MW	10.680 MW
4.879 MW	10.800 MW
4.842 MW	10.920 MW
4.805 MW	11.040 MW
4.768 MW	11.160 MW
4.731 MW	11.280 MW
4.694 MW	11.400 MW
4.657 MW	11.520 MW
4.620 MW	11.640 MW
4.583 MW	11.760 MW
4.546 MW	11.880 MW
4.509 MW	12.000 MW
4.472 MW	12.120 MW
4.435 MW	12.240 MW
4.398 MW	12.360 MW
4.361 MW	12.480 MW
4.324 MW	12.600 MW
4.287 MW	12.720 MW
4.250 MW	12.840 MW
4.213 MW	12.960 MW
4.176 MW	13.080 MW
4.139 MW	13.200 MW
4.102 MW	13.320 MW
4.065 MW	13.440 MW
4.028 MW	13.560 MW
3.991 MW	13.680 MW
3.954 MW	13.800 MW
3.917 MW	13.920 MW
3.880 MW	14.040 MW
3.843 MW	14.160 MW
3.806 MW	14.280 MW
3.769 MW	14.400 MW
3.732 MW	14.520 MW
3.695 MW	14.640 MW
3.658 MW	14.760 MW
3.621 MW	14.880 MW
3.584 MW	15.000 MW
3.547 MW	15.120 MW
3.510 MW	15.240 MW
3.473 MW	15.360 MW
3.436 MW	15.480 MW
3.399 MW	15.600 MW
3.362 MW	15.720 MW
3.325 MW	15.840 MW
3.288 MW	15.960 MW
3.251 MW	16.080 MW
3.214 MW	16.200 MW
3.177 MW	16.320 MW
3.140 MW	16.440 MW
3.103 MW	16.560 MW
3.066 MW	16.680 MW
3.029 MW	16.800 MW
2.992 MW	16.920 MW
2.955 MW	17.040 MW
2.918 MW	17.160 MW
2.881 MW	17.280 MW
2.844 MW	17.400 MW
2.807 MW	17.520 MW
2.770 MW	17.640 MW
2.733 MW	17.760 MW
2.696 MW	17.880 MW
2.659 MW	18.000 MW
2.622 MW	18.120 MW
2.585 MW	18.240 MW
2.548 MW	18.360 MW
2.511 MW	18.480 MW
2.474 MW	18.600 MW
2.437 MW	18.720 MW
2.400 MW	18.840 MW
2.363 MW	18.960 MW
2.326 MW	19.080 MW
2.289 MW	19.200 MW
2.252 MW	19.320 MW
2.215 MW	19.440 MW
2.178 MW	19.560 MW
2.141 MW	19.680 MW
2.104 MW	19.800 MW
2.067 MW	19.920 MW
2.030 MW	20.040 MW
1.993 MW	20.160 MW
1.956 MW	20.280 MW
1.919 MW	20.400 MW
1.882 MW	20.520 MW
1.845 MW	20.640 MW
1.808 MW	20.760 MW
1.771 MW	20.880 MW
1.734 MW	21.000 MW
1.697 MW	21.120 MW
1.660 MW	21.240 MW
1.623 MW	21.360 MW
1.586 MW	21.480 MW
1.549 MW	21.600 MW
1.512 MW	21.720 MW
1.475 MW	21.840 MW
1.438 MW	21.960 MW
1.401 MW	22.080 MW
1.364 MW	22.200 MW
1.327 MW	22.320 MW
1.290 MW	22.440 MW
1.253 MW	22.560 MW
1.216 MW	22.680 MW
1.179 MW	22.800 MW
1.142 MW	22.920 MW
1.105 MW	23.040 MW
1.068 MW	23.160 MW
1.031 MW	23.280 MW
994 MW	23.400 MW
957 MW	23.520 MW
920 MW	23.640 MW
883 MW	23.760 MW
846 MW	23.880 MW
809 MW	24.000 MW
772 MW	24.120 MW
735 MW	24.240 MW
698 MW	24.360 MW
661 MW	24.480 MW
624 MW	24.600 MW
587 MW	24.720 MW
550 MW	24.840 MW
513 MW	24.960 MW
476 MW	25.080 MW
439 MW	25.200 MW
402 MW	25.320 MW
365 MW	25.440 MW
328 MW	25.560 MW
291 MW	25.680 MW
254 MW	25.800 MW
217 MW	25.920 MW
180 MW	26.040 MW
143 MW	26.160 MW
106 MW	26.280 MW
69 MW	26.400 MW
32 MW	26.520 MW
0 MW	26.640 MW
0 MW	26.760 MW
0 MW	26.880 MW
0 MW	27.000 MW
0 MW	27.120 MW
0 MW	27.240 MW
0 MW	27.360 MW
0 MW	27.480 MW
0 MW	27.600 MW
0 MW	27.720 MW
0 MW	27.840 MW
0 MW	27.960 MW
0 MW	28.080 MW
0 MW	28.200 MW
0 MW	28.320 MW
0 MW	28.440 MW
0 MW	28.560 MW
0 MW	28.680 MW
0 MW	28.800 MW
0 MW	28.920 MW
0 MW	29.040 MW
0 MW	29.160 MW
0 MW	29.280 MW
0 MW	29.400 MW
0 MW	29.520 MW
0 MW	29.640 MW
0 MW	29.760 MW
0 MW	29.880 MW
0 MW	30.000 MW
0 MW	30.120 MW
0 MW	30.240 MW
0 MW	30.360 MW
0 MW	30.480 MW
0 MW	30.600 MW
0 MW	30.720 MW
0 MW	30.840 MW
0 MW	30.960 MW
0 MW	31.080 MW
0 MW	31.200 MW
0 MW	31.320 MW
0 MW	31.440 MW
0 MW	31.560 MW
0 MW	31.680 MW
0 MW	31.800 MW
0 MW	31.920 MW
0 MW	32.040 MW
0 MW	32.160 MW
0 MW	32.280 MW
0 MW	32.400 MW
0 MW	32.520 MW
0 MW	32.640 MW
0 MW	32.760 MW
0 MW	32.880 MW
0 MW	33.000 MW
0 MW	33.120 MW
0 MW	33.240 MW
0 MW	33.360 MW
0 MW	33.480 MW
0 MW	33.600 MW
0 MW	33.720 MW
0 MW	33.840 MW
0 MW	33.960 MW
0 MW	34.080 MW
0 MW	34.200 MW
0 MW	34.320 MW
0 MW	34.440 MW
0 MW	34.560 MW
0 MW	34.680 MW
0 MW	34.800 MW
0 MW	34.920 MW
0 MW	35.040 MW
0 MW	35.160 MW
0 MW	35.280 MW
0 MW	35.400 MW
0 MW	35.520 MW
0 MW	35.640 MW
0 MW	35.760 MW
0 MW	35.880 MW
0 MW	36.000 MW
0 MW	36.120 MW
0 MW	36.240 MW
0 MW	36.360 MW
0 MW	36.480 MW
0 MW	36.600 MW
0 MW	36.720 MW
0 MW	36.840 MW
0 MW	36.960 MW
0 MW	37.080 MW
0 MW	37.200 MW
0 MW	37.320 MW
0 MW	37.440 MW
0 MW	37.560 MW
0 MW	37.680 MW
0 MW	37.800 MW
0 MW	37.920 MW
0 MW	38.040 MW
0 MW	38.160 MW
0 MW	38.280 MW
0 MW	38.400 MW
0 MW	38.520 MW
0 MW	38.640 MW
0 MW	38.760 MW
0 MW	38.880 MW
0 MW	39.000 MW
0 MW	39.120 MW
0 MW	39.240 MW
0 MW	39.360 MW
0 MW	39.480 MW
0 MW	39.600 MW
0 MW	39.720 MW
0 MW	39.840 MW
0 MW	39.960 MW
0 MW	40.080 MW
0 MW	40.200 MW
0 MW	40.320 MW
0 MW	40.440 MW
0 MW	40.560 MW
0 MW	40.680 MW
0 MW	40.800 MW
0 MW	40.920 MW
0 MW	41.040 MW
0 MW	41.160 MW
0 MW	41.280 MW
0 MW	41.400 MW
0 MW	41.520 MW
0 MW	41.640 MW
0 MW	41.760 MW
0 MW	41.880 MW
0 MW	42.000 MW
0 MW	42.120 MW
0 MW	42.240 MW
0 MW	42.360 MW
0 MW	42.480 MW
0 MW	42.600 MW
0 MW	42.720 MW
0 MW	42.840 MW
0 MW	42.960 MW
0 MW	43.080 MW
0 MW	43.200 MW
0 MW	43.320 MW
0 MW	43.440 MW
0 MW	43.560 MW
0 MW	43.680 MW
0 MW	43.800 MW
0 MW	43.920 MW
0 MW	44.040 MW
0 MW	44.160 MW
0 MW	44.280 MW
0 MW	44.400 MW
0 MW	44.520 MW
0 MW	44.640 MW
0 MW	44.760 MW
0 MW	44.880 MW
0 MW	45.000 MW
0 MW	45.120 MW
0 MW	45.240 MW
0 MW	45.360 MW
0 MW	45.480 MW
0 MW	45.600 MW
0 MW	45.720 MW
0 MW	45.840 MW
0 MW	45.960 MW
0 MW	46.080 MW
0 MW	46.200 MW
0 MW	46.320 MW
0 MW	46.440 MW
0 MW	46.560 MW
0 MW	46.680 MW
0 MW	46.800 MW
0 MW	46.920 MW
0 MW	47.040 MW
0 MW	47.160 MW
0 MW	47.280 MW
0 MW	47.400 MW
0 MW	47.520 MW
0 MW	47.640 MW
0 MW	47.760 MW
0 MW	47.880 MW
0 MW	48.000 MW
0 MW	48.120 MW
0 MW	48.240 MW
0 MW	48.360 MW
0 MW	48.480 MW
0 MW	48.600 MW
0 MW	48.720 MW
0 MW	48.840 MW
0 MW	48.960 MW
0 MW	49.080 MW
0 MW	49.200 MW
0 MW	49.320 MW
0 MW	49.440 MW
0 MW	49.560 MW
0 MW	49.680 MW
0 MW	49.800 MW
0 MW	49.920 MW
0 MW	50.040 MW
0 MW	50.160 MW
0 MW	50.280 MW
0 MW	50.400 MW
0 MW	50.520 MW
0 MW	50.640 MW
0 MW	50.760 MW
0 MW	50.880 MW
0 MW	51.000 MW
0 MW	51.120 MW
0 MW	51.240 MW
0 MW	51.360 MW
0 MW	51.480 MW
0 MW	51.600 MW
0 MW	51.720 MW
0 MW	51.840 MW
0 MW	51.960 MW
0 MW	52.080 MW
0 MW	52.200 MW
0 MW	52.320 MW
0 MW	52.440 MW
0 MW	52.560 MW
0 MW	52.680 MW
0 MW	52.800 MW
0 MW	52.920 MW
0 MW	53.040 MW
0 MW	53.16



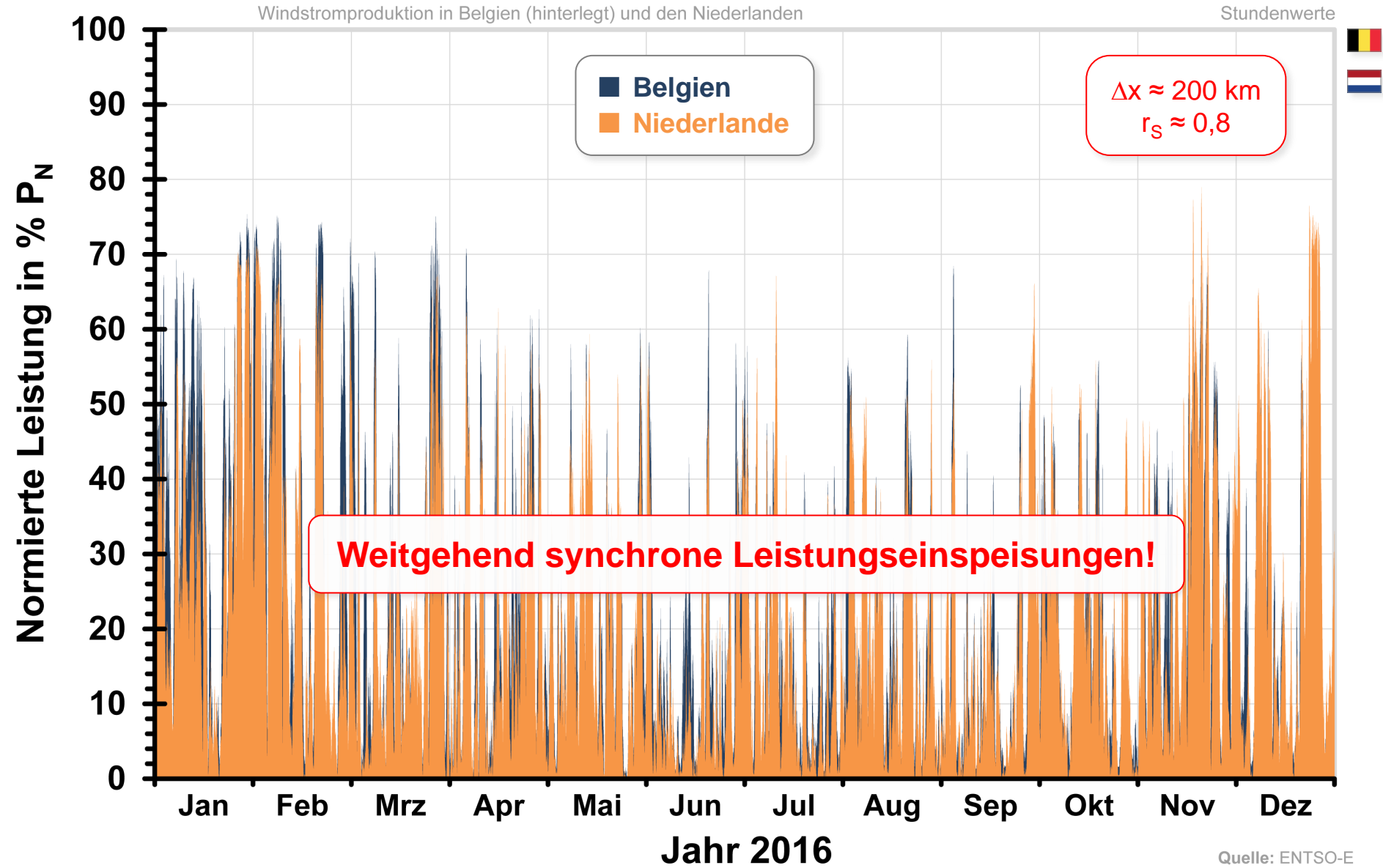


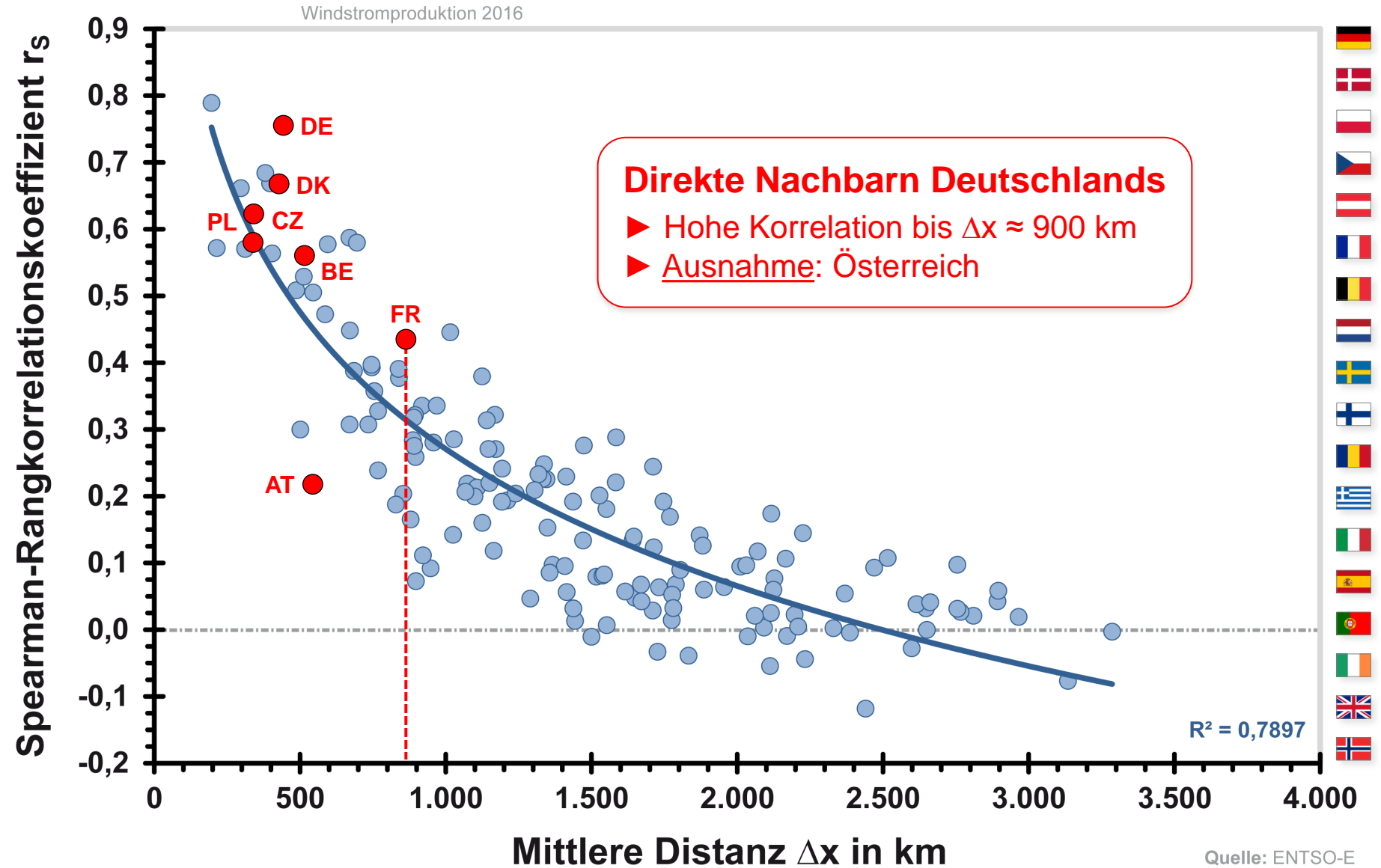


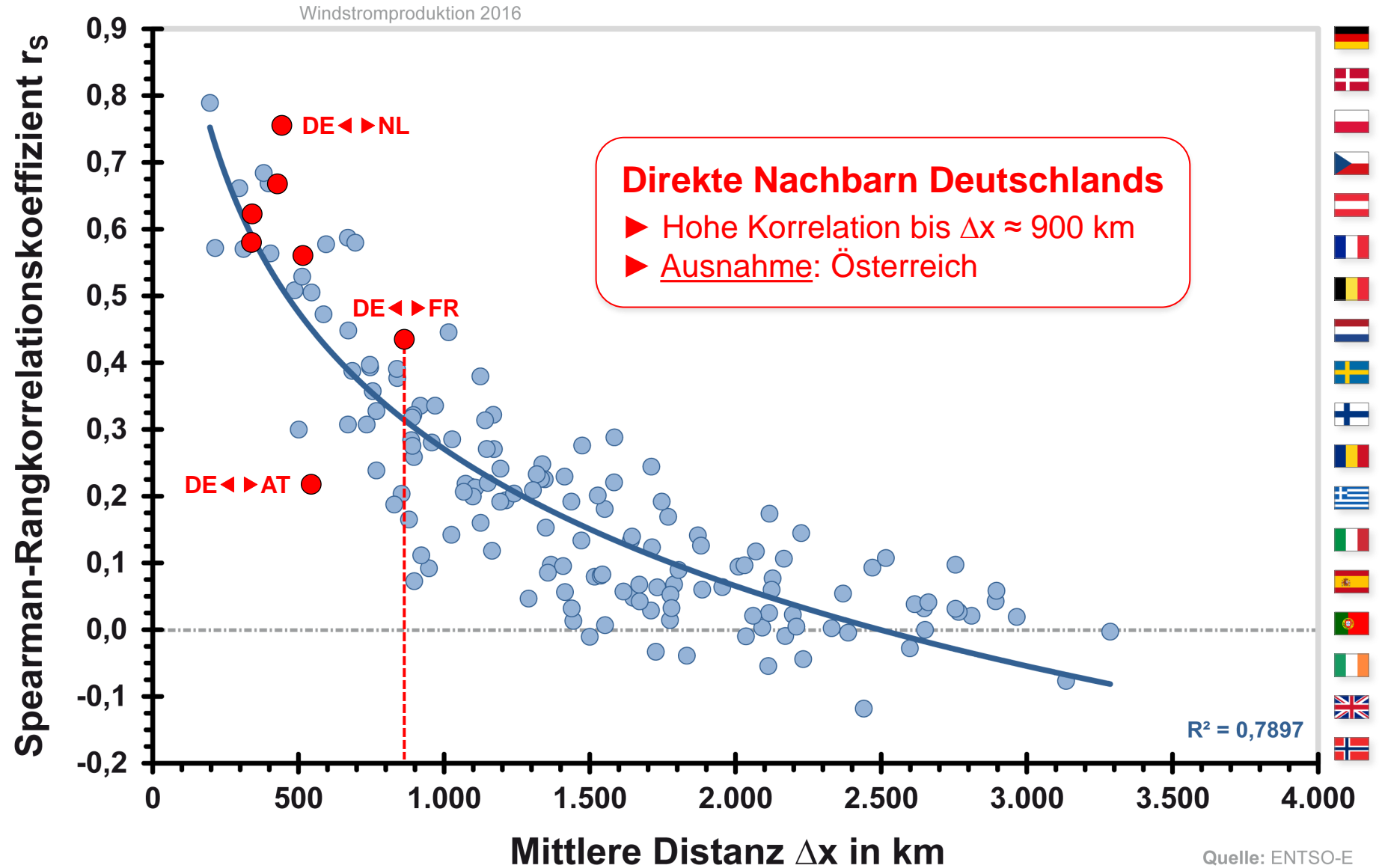


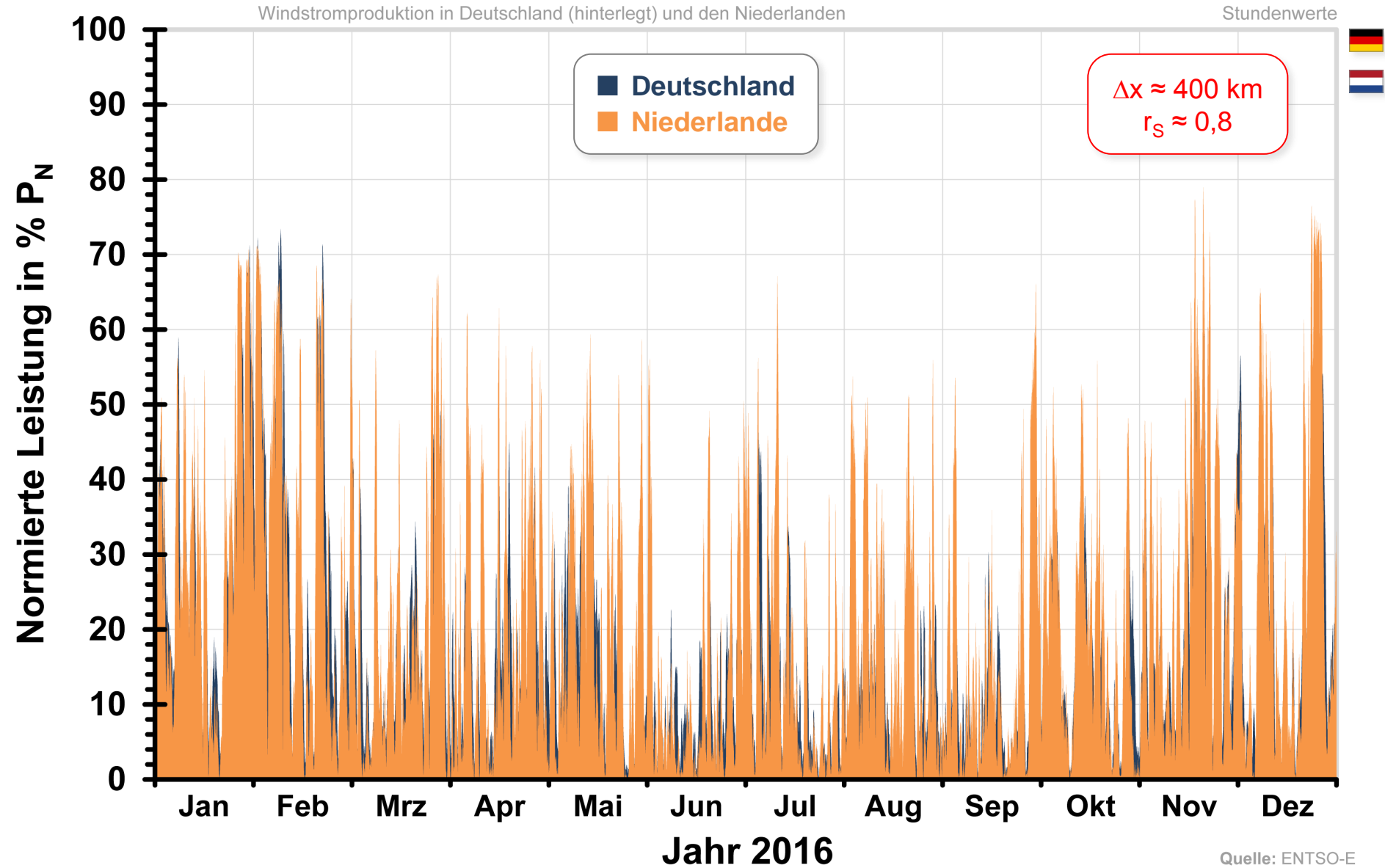


Quelle: ENTSO-E



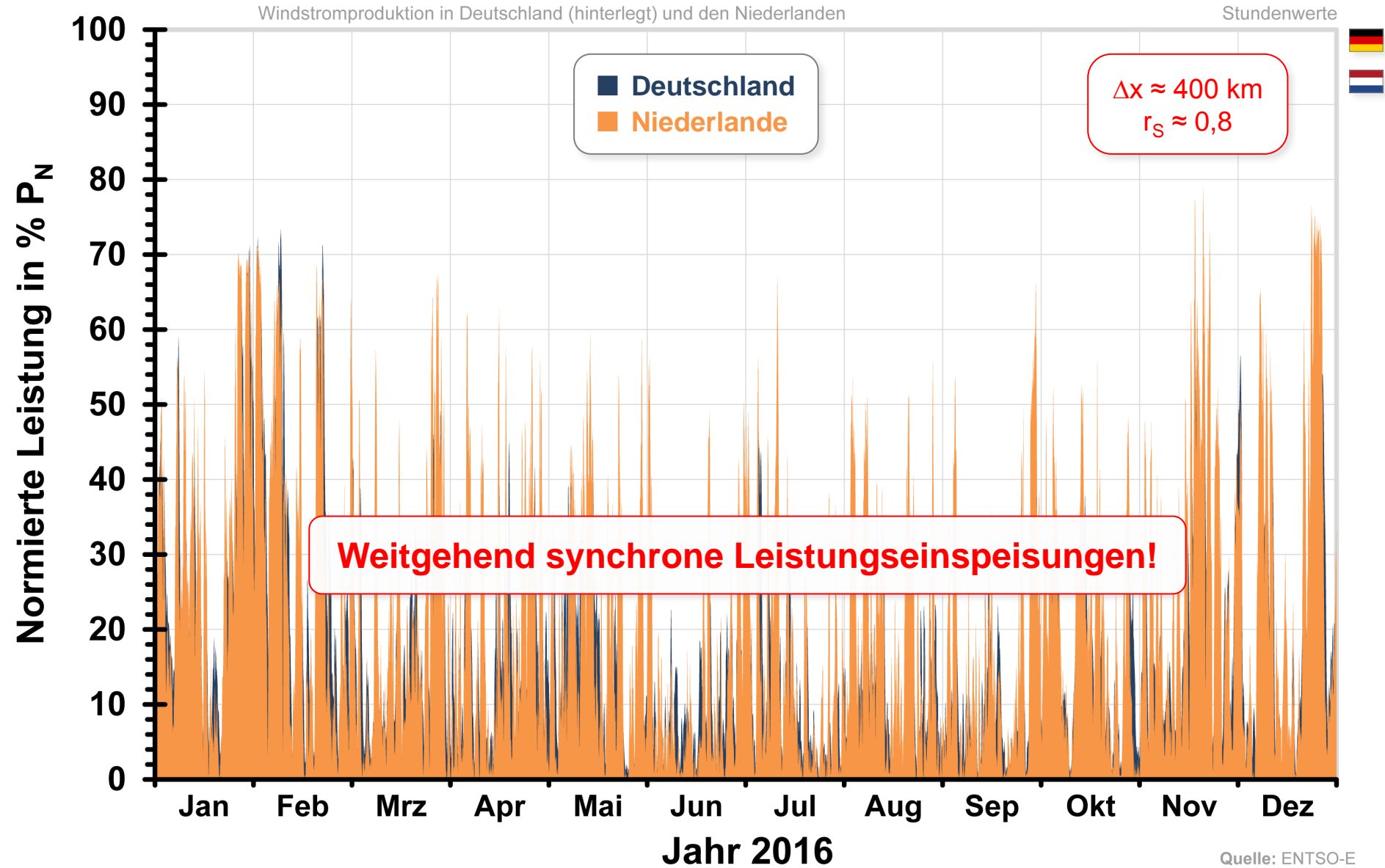




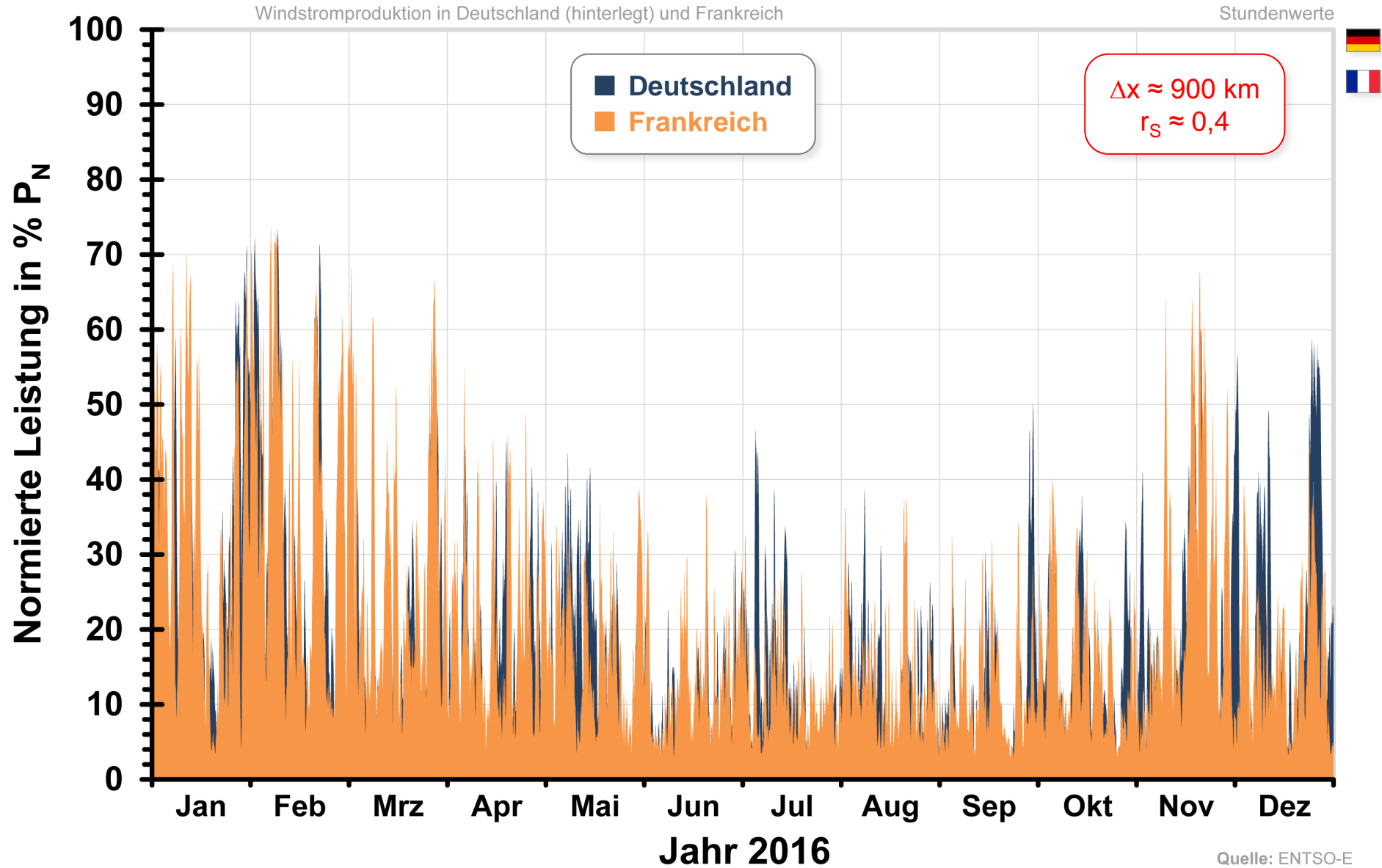


Quelle: ENTSO-E

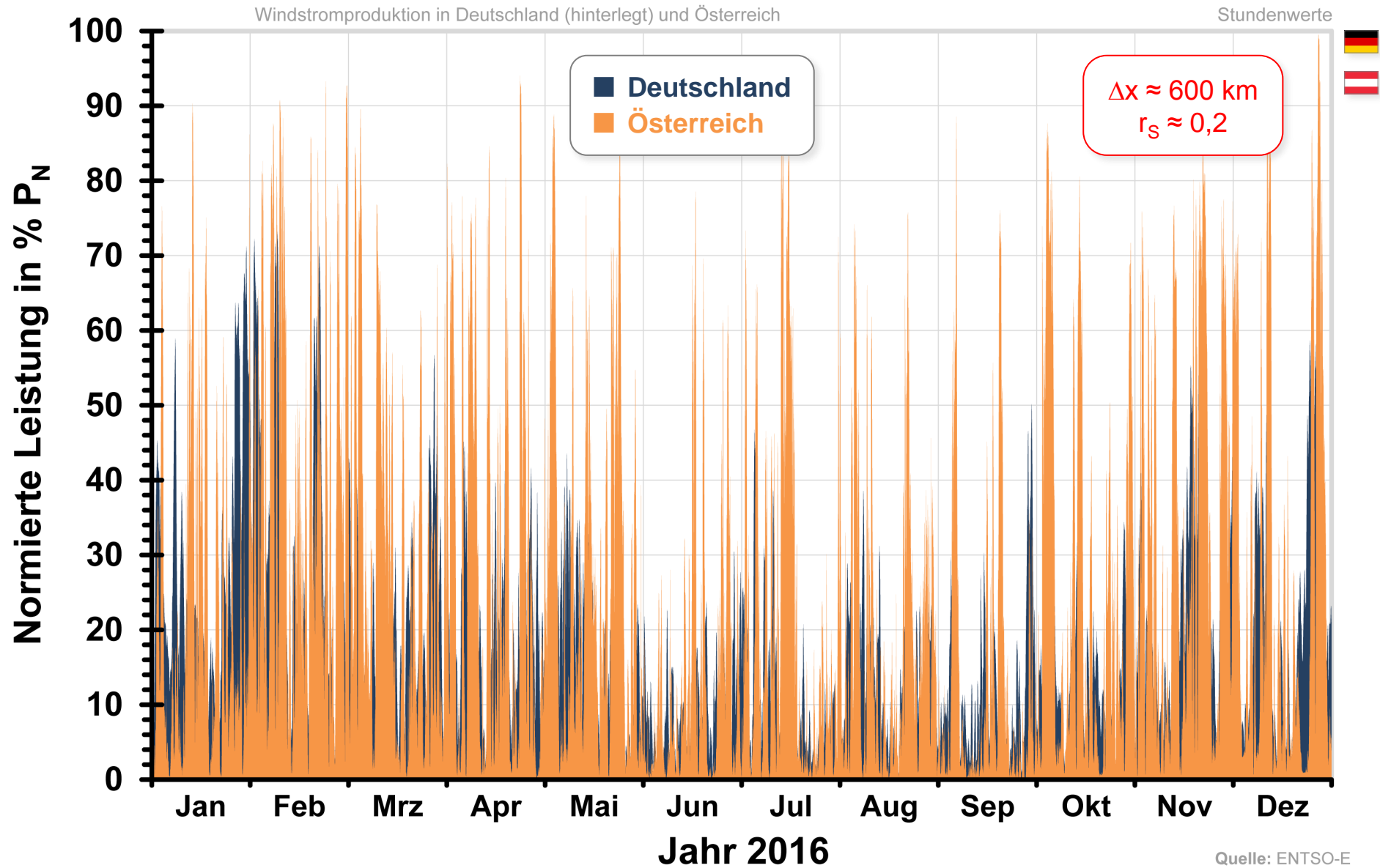




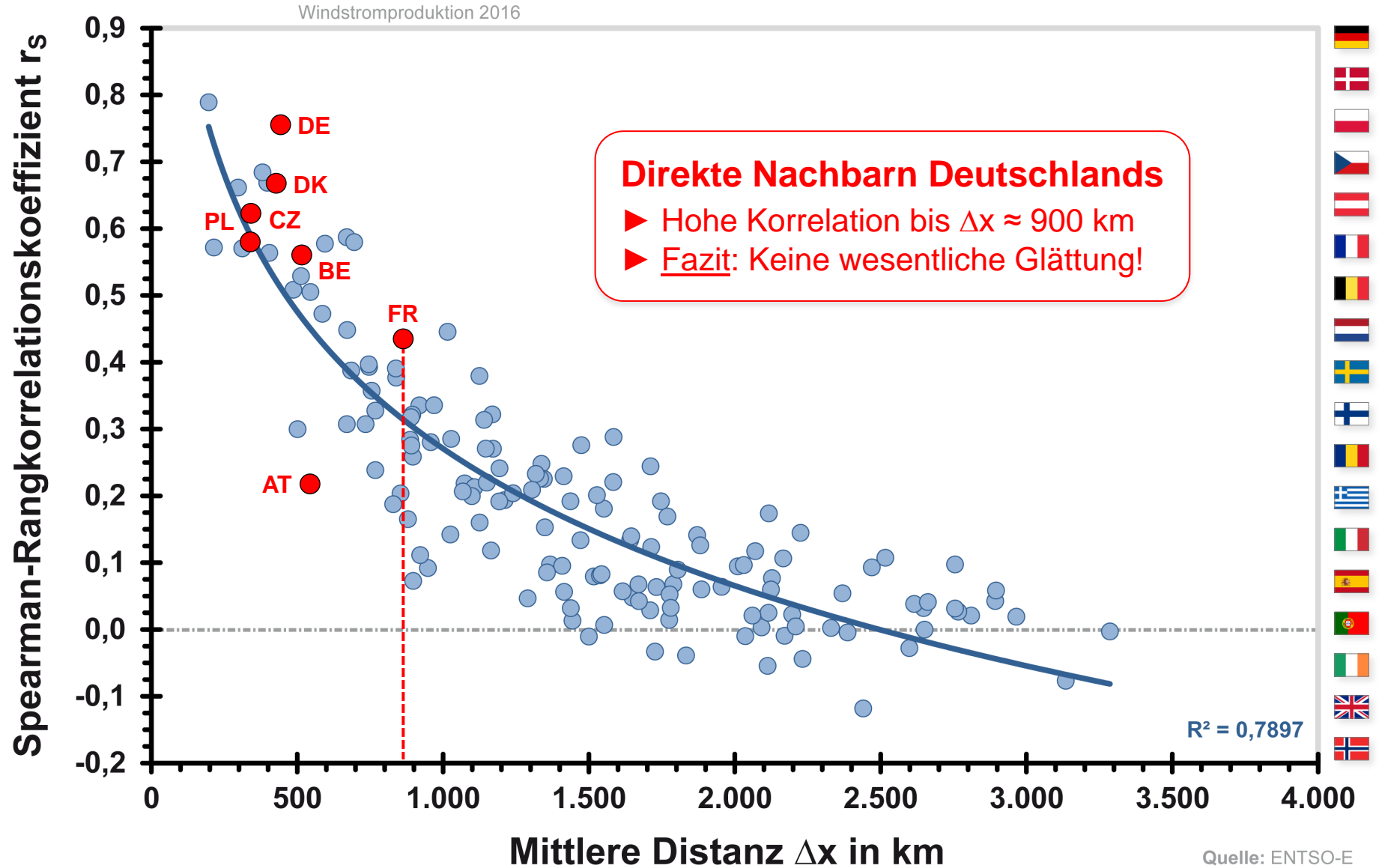
Quelle: ENTSO-E

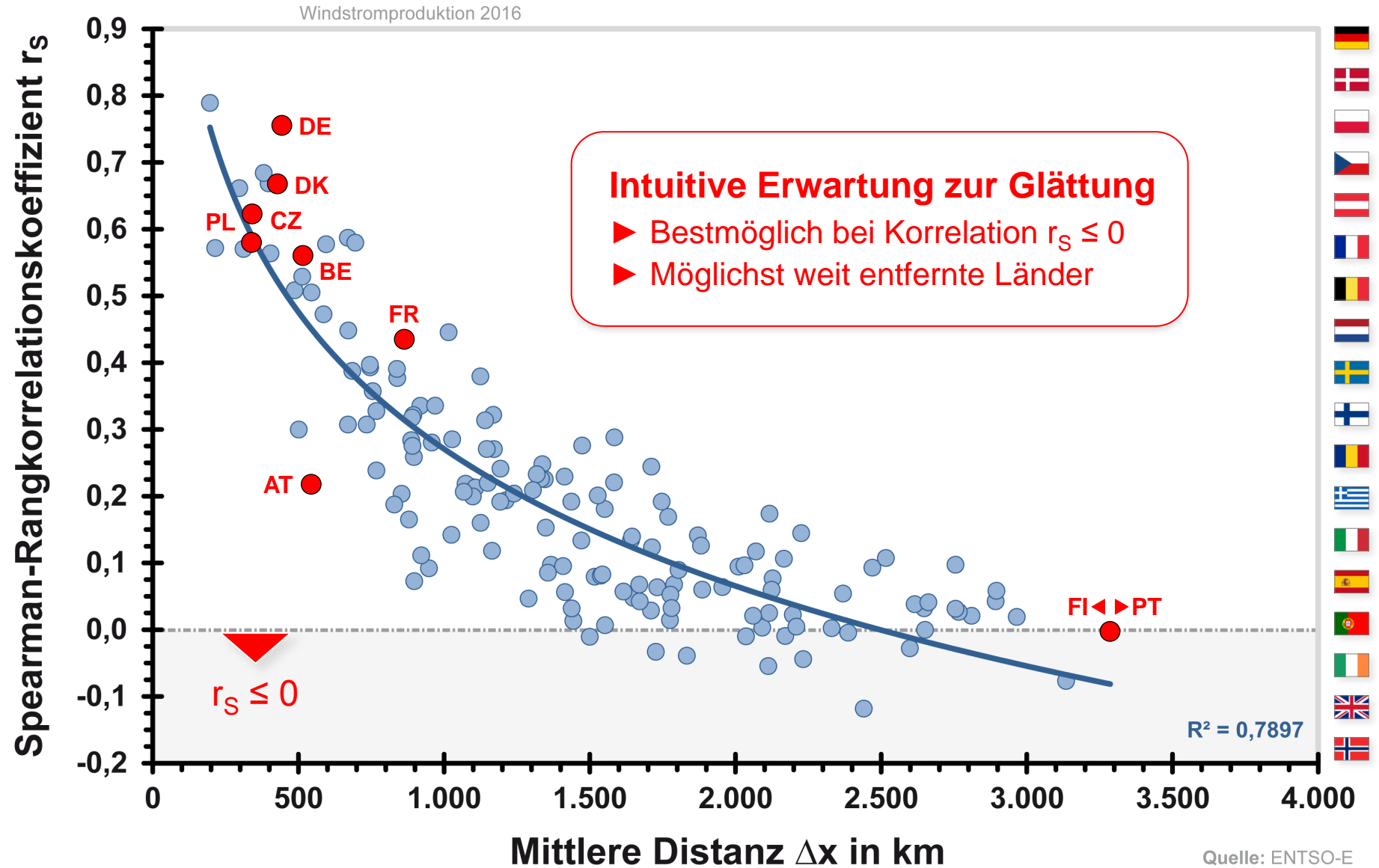


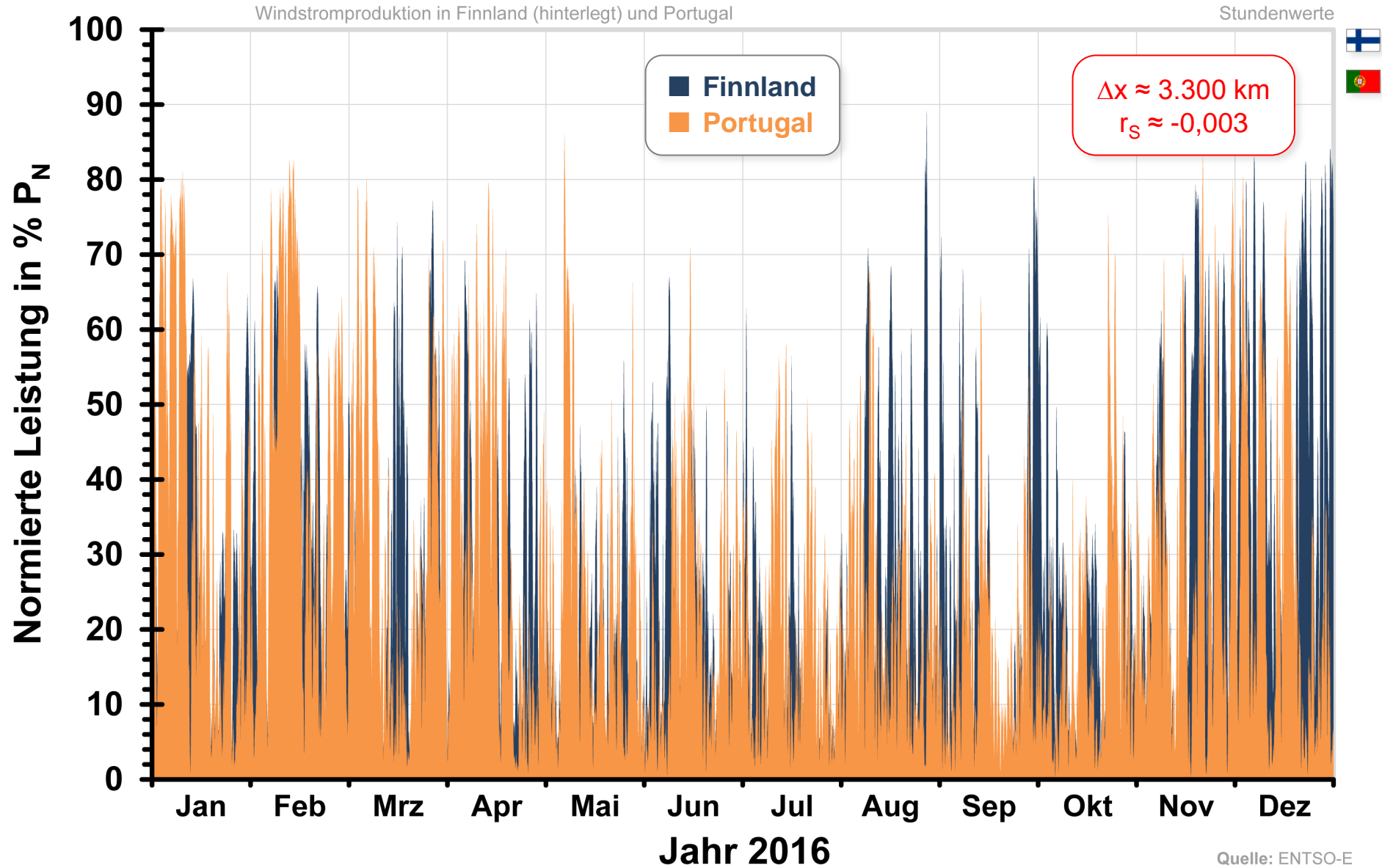
Quelle: ENTSO-E



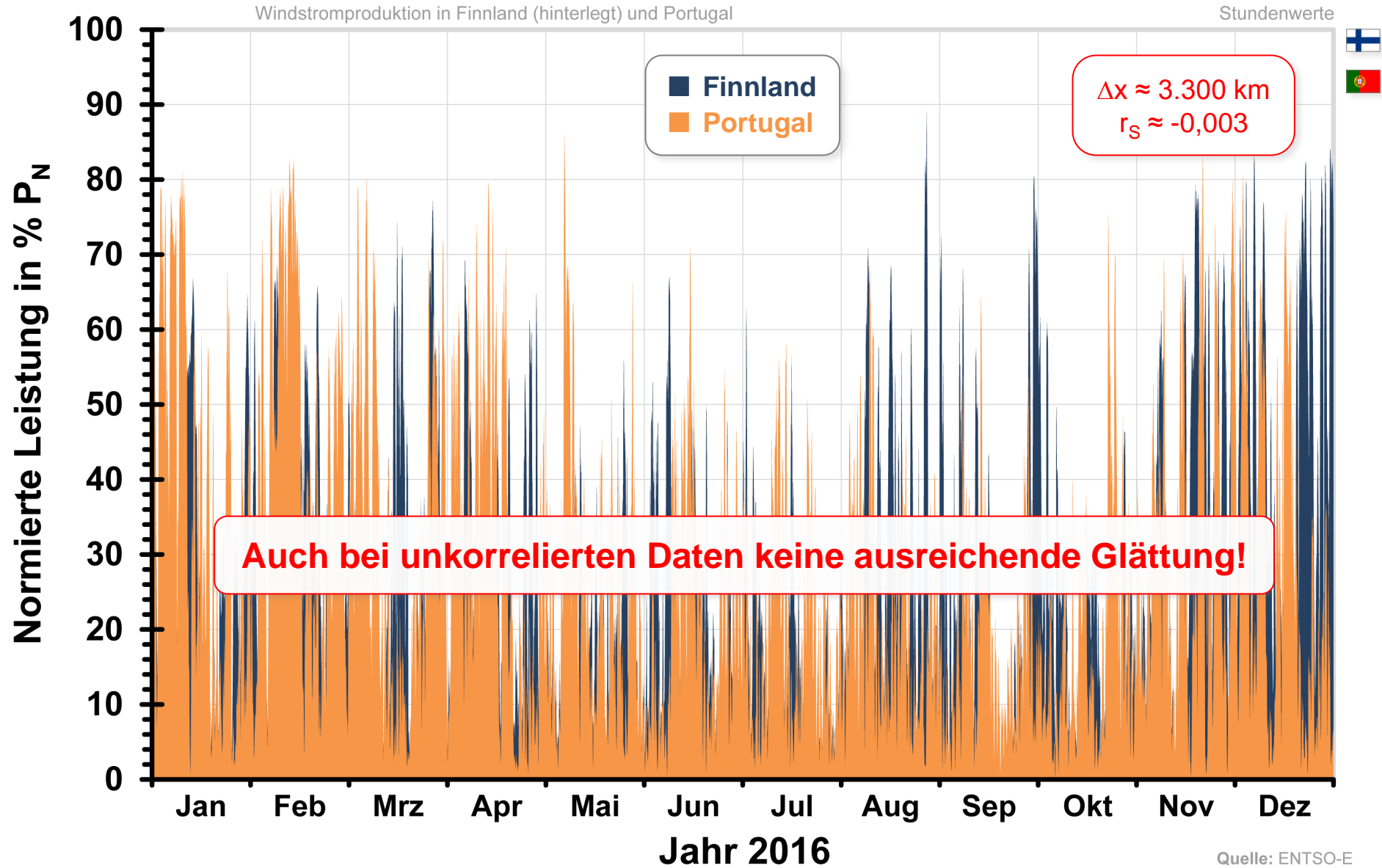
Quelle: ENTSO-E



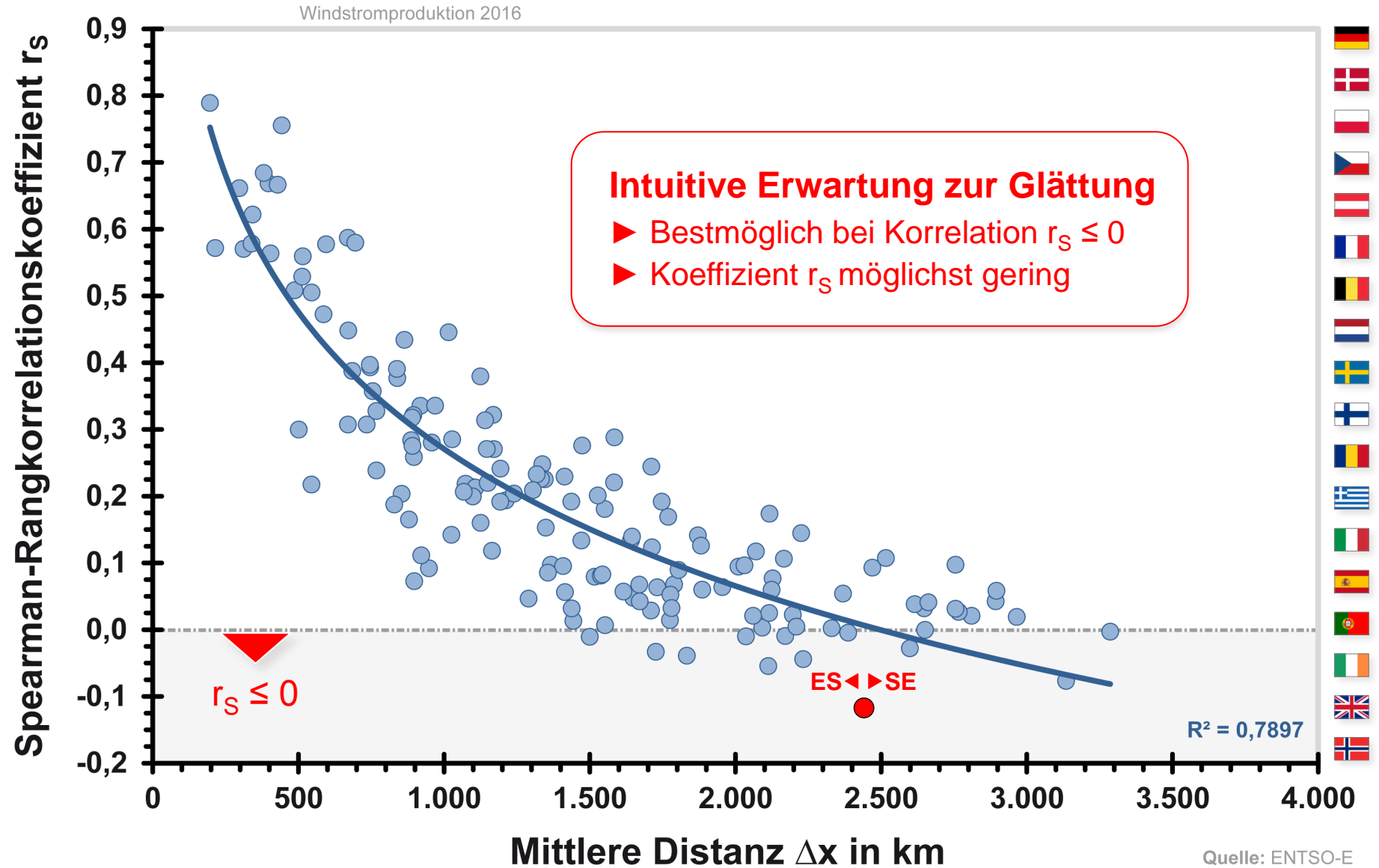




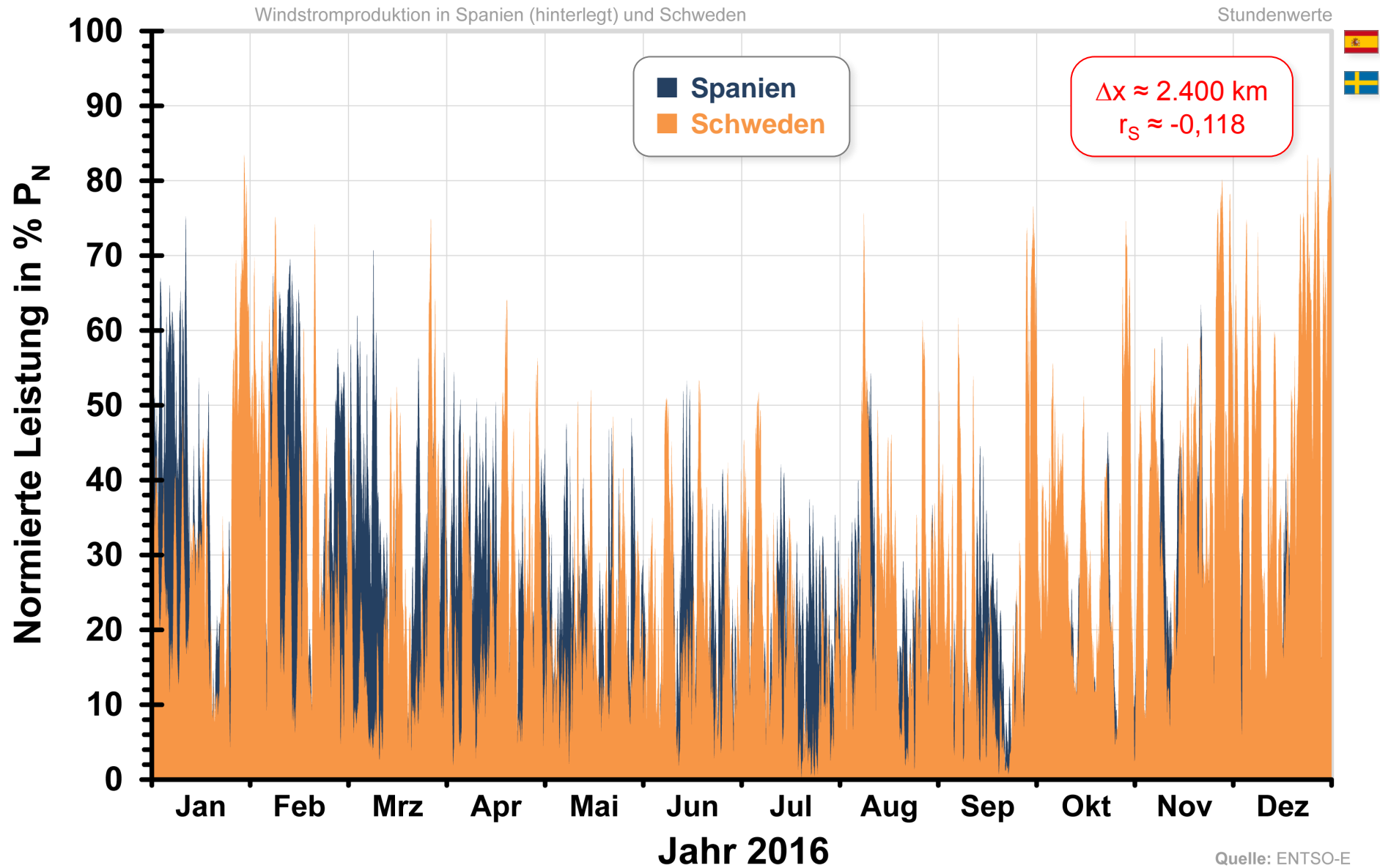
Quelle: ENTSO-E



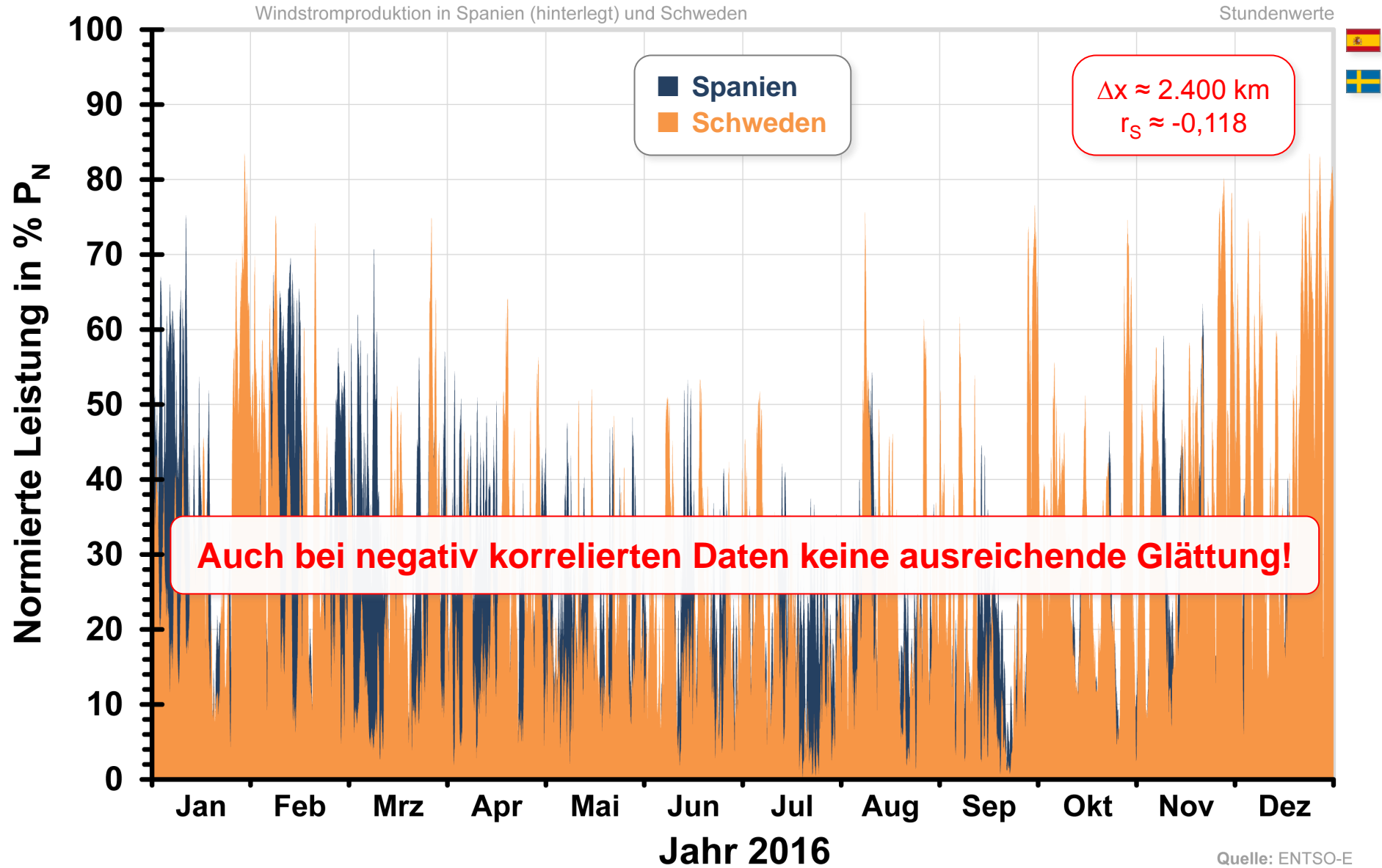
Quelle: ENTSO-E



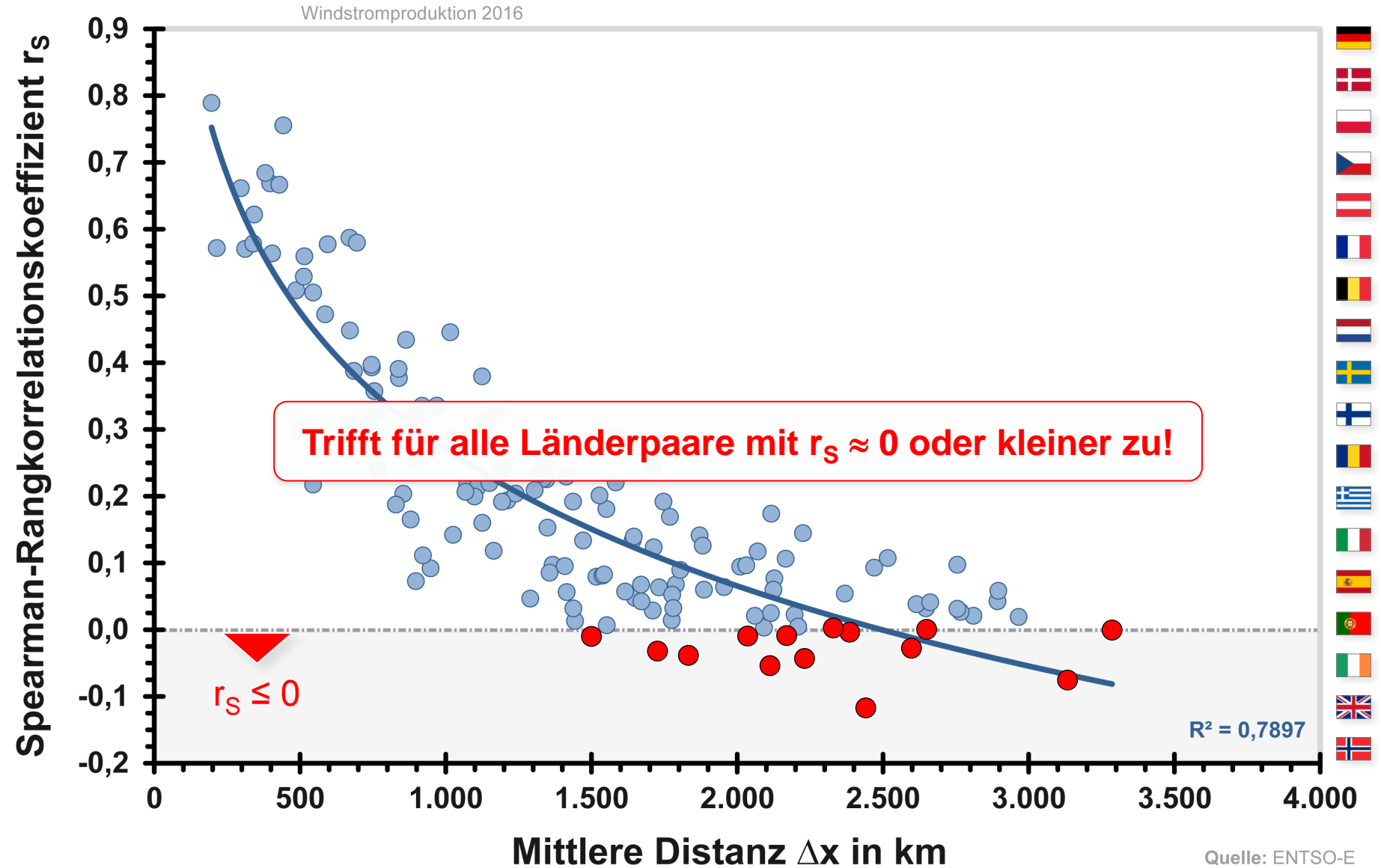


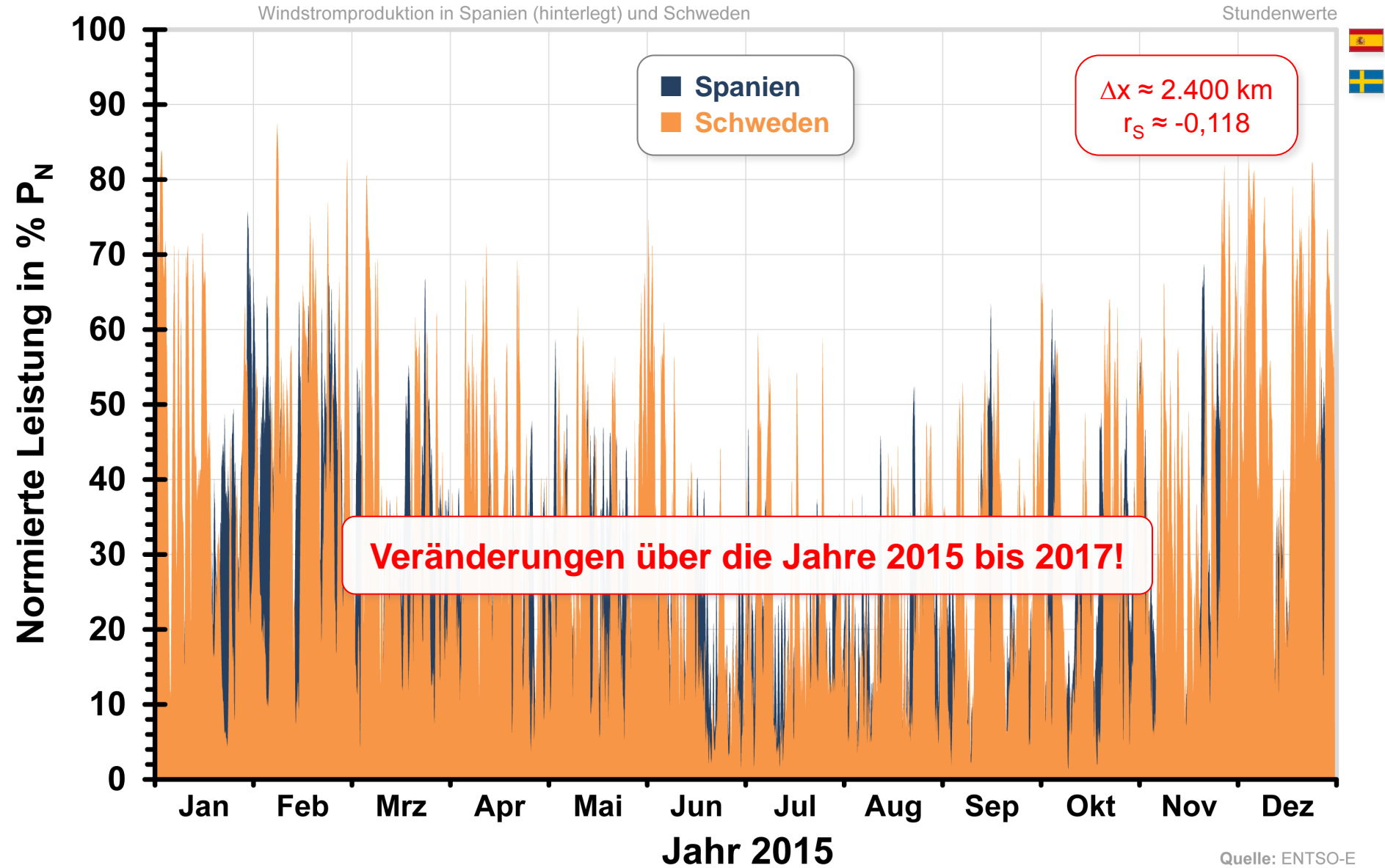


Quelle: ENTSO-E

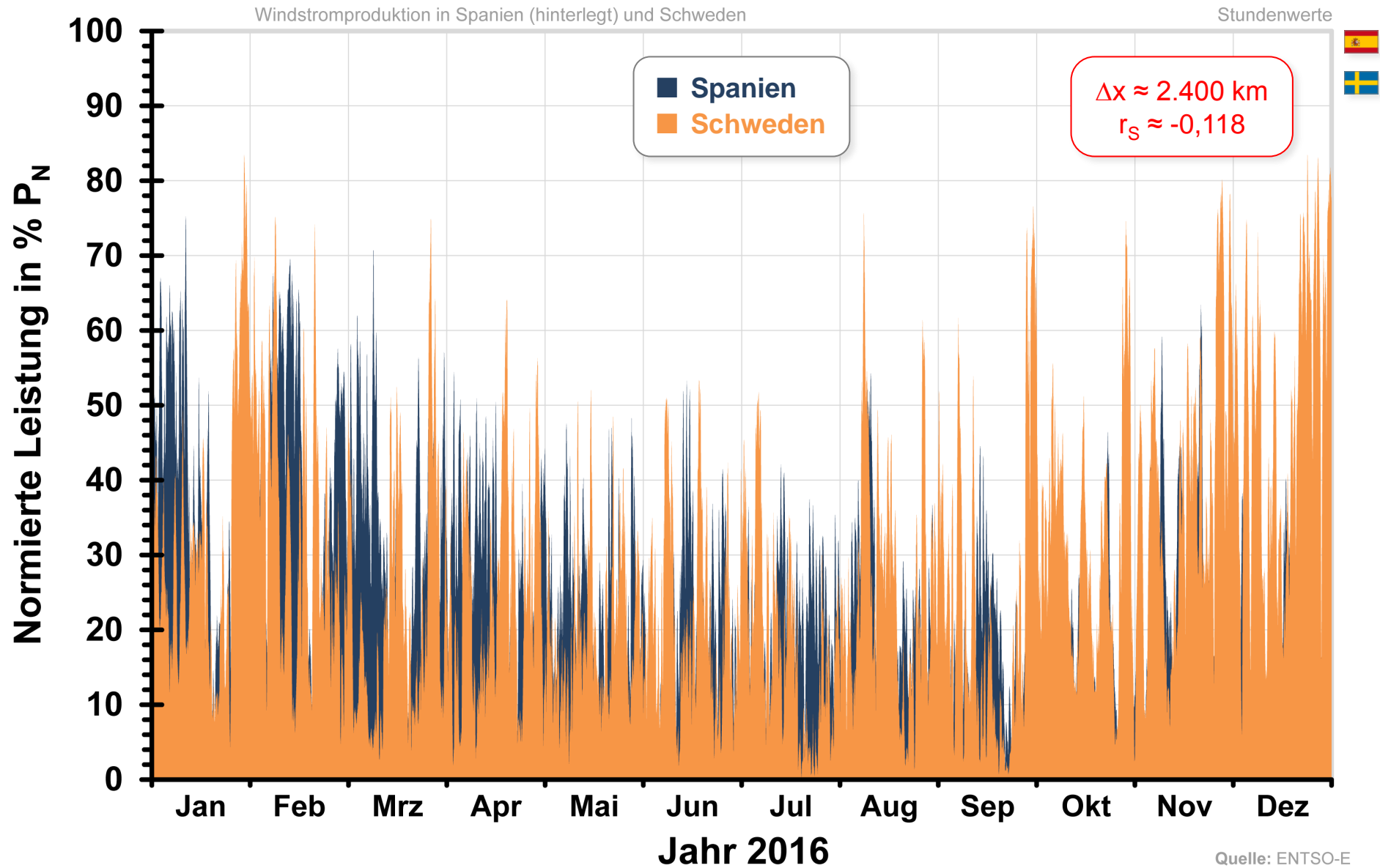


Quelle: ENTSO-E

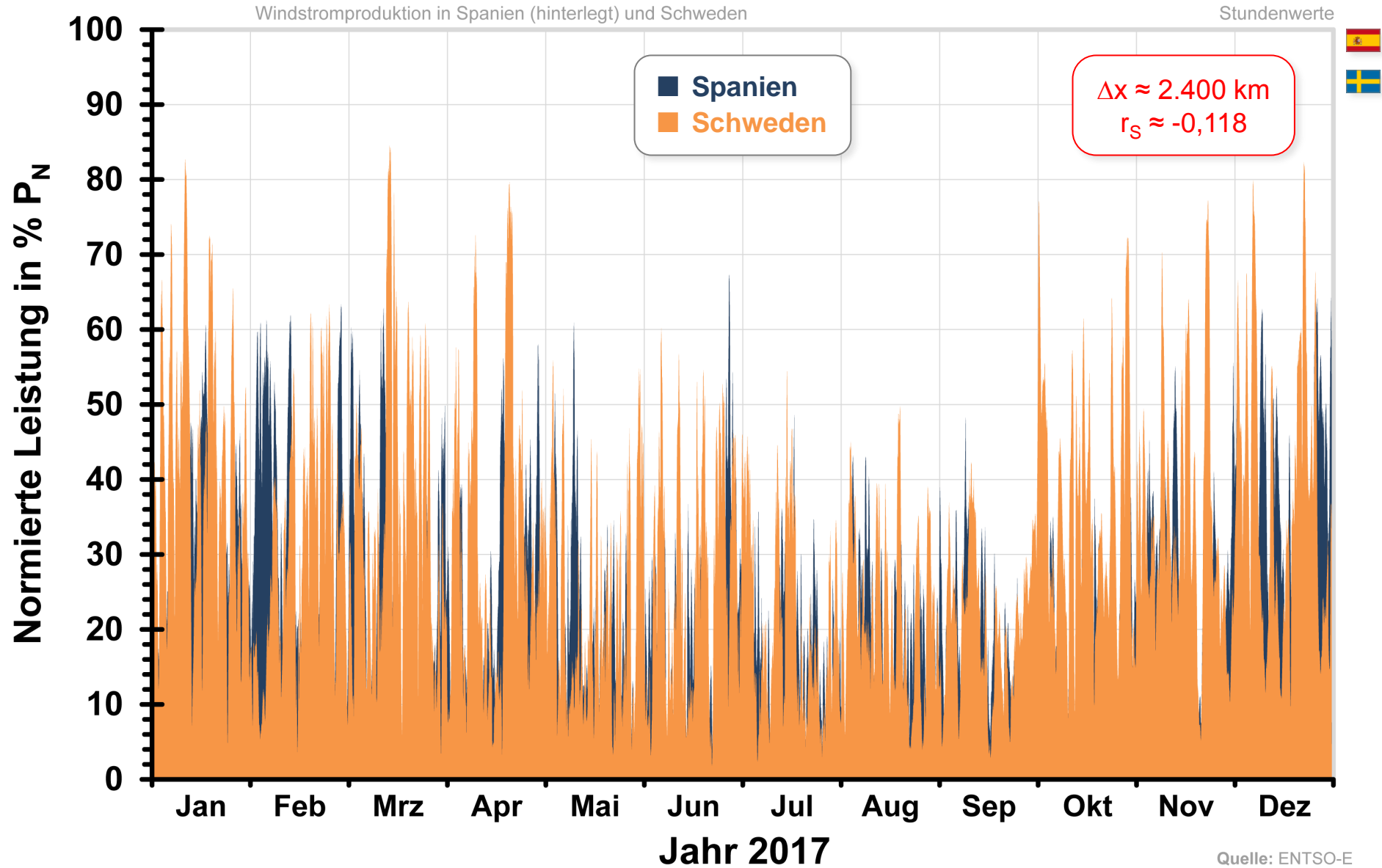




Quelle: ENTSO-E

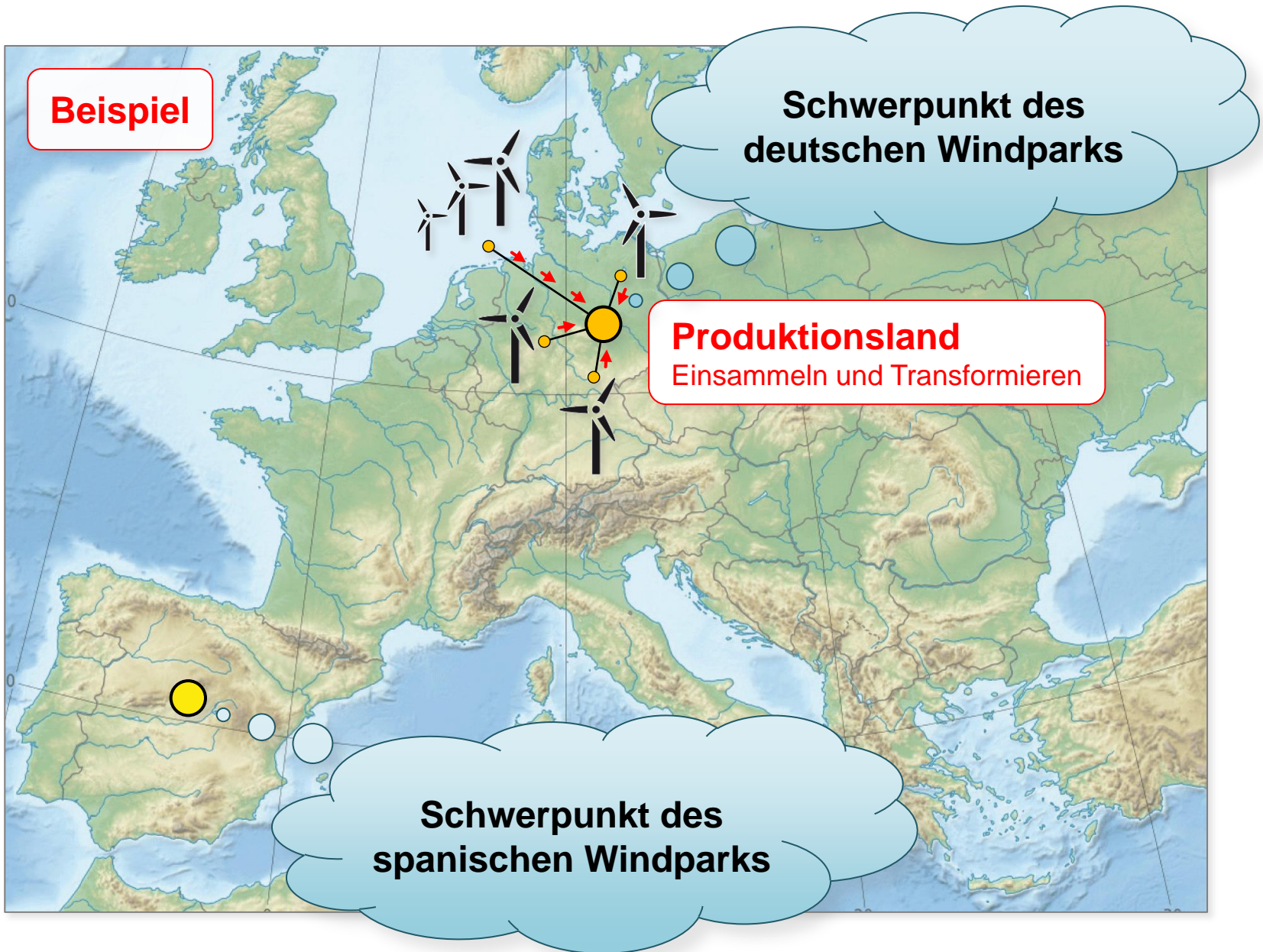


Quelle: ENTSO-E

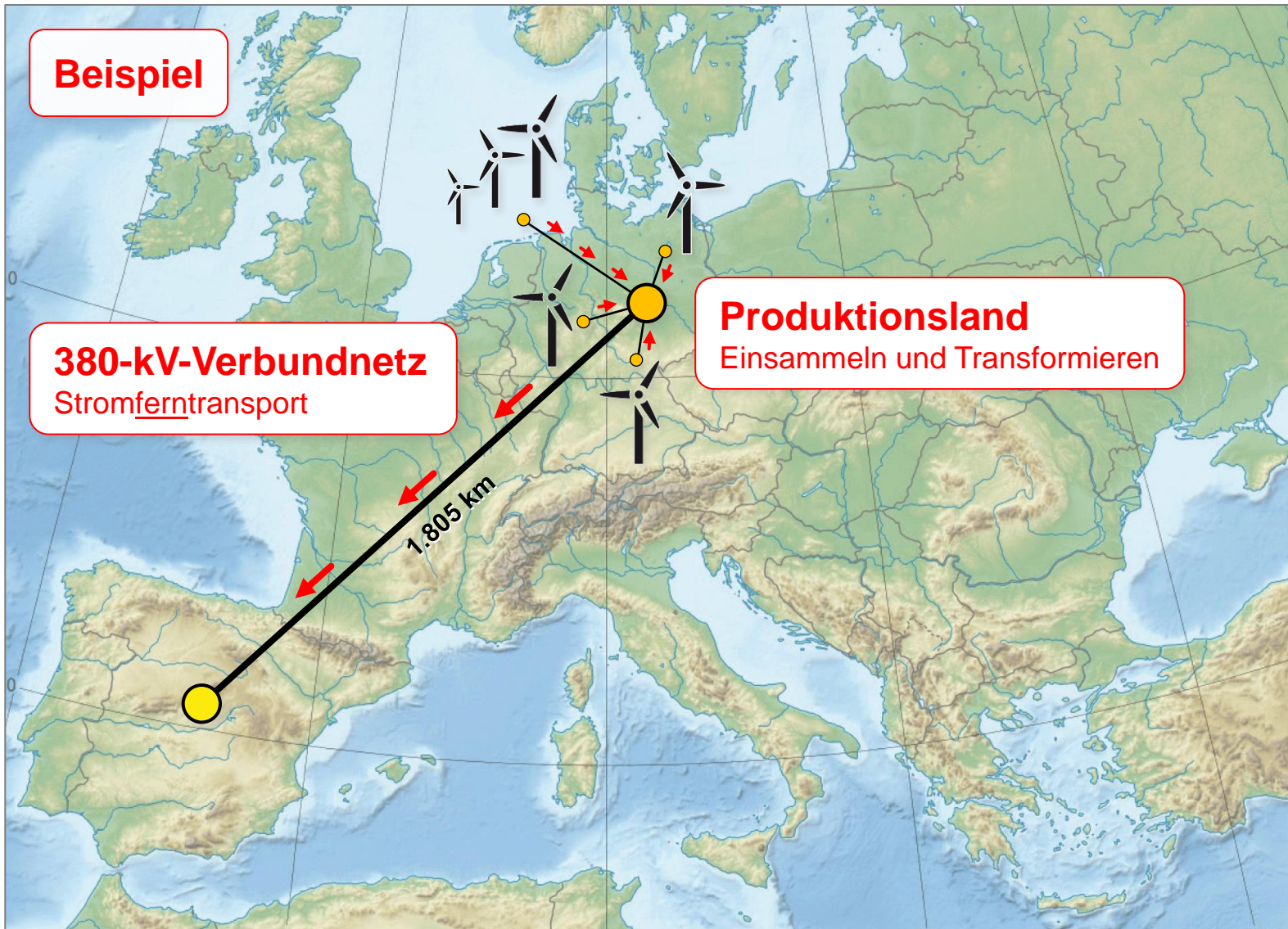


Quelle: ENTSO-E

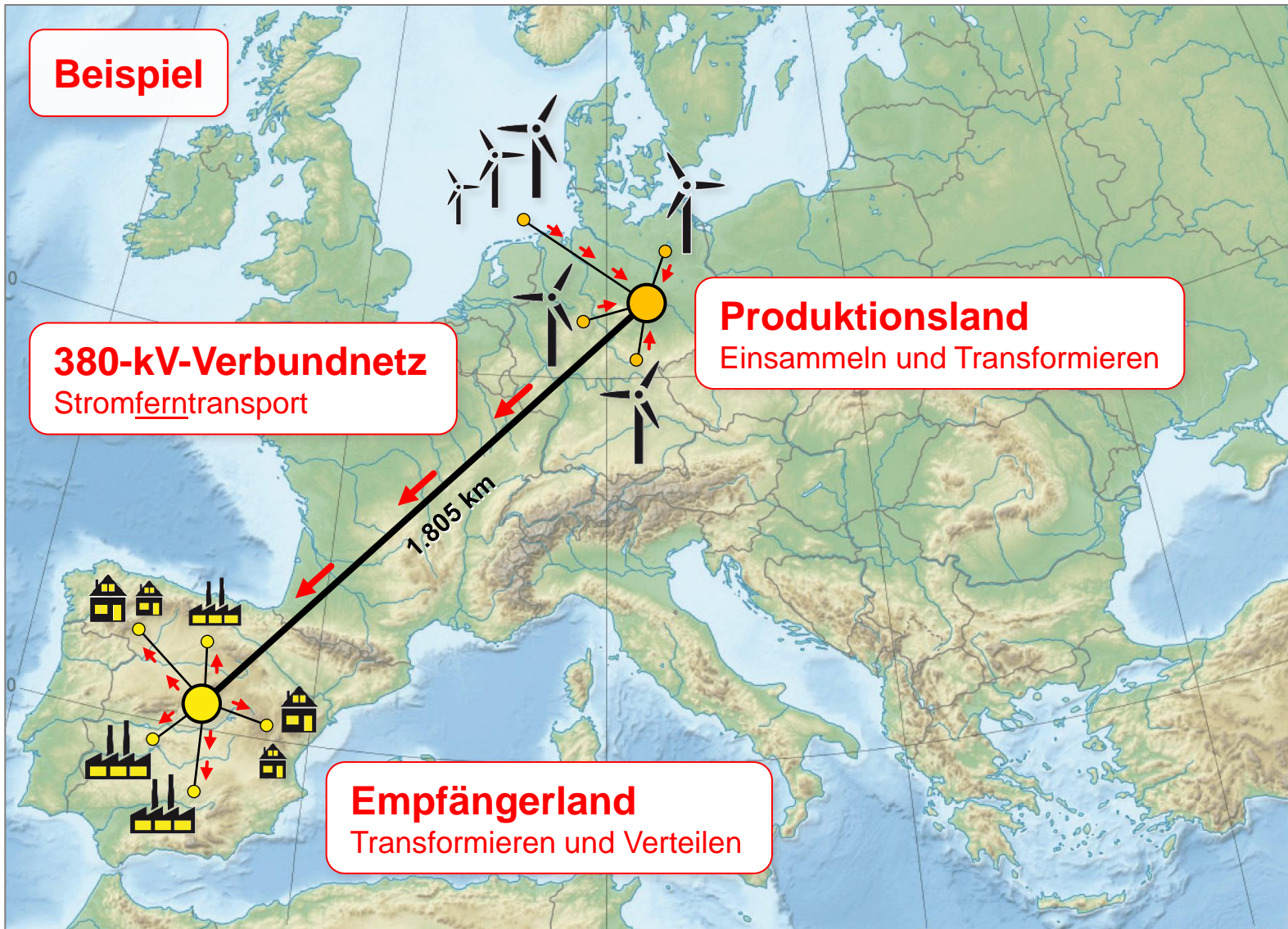


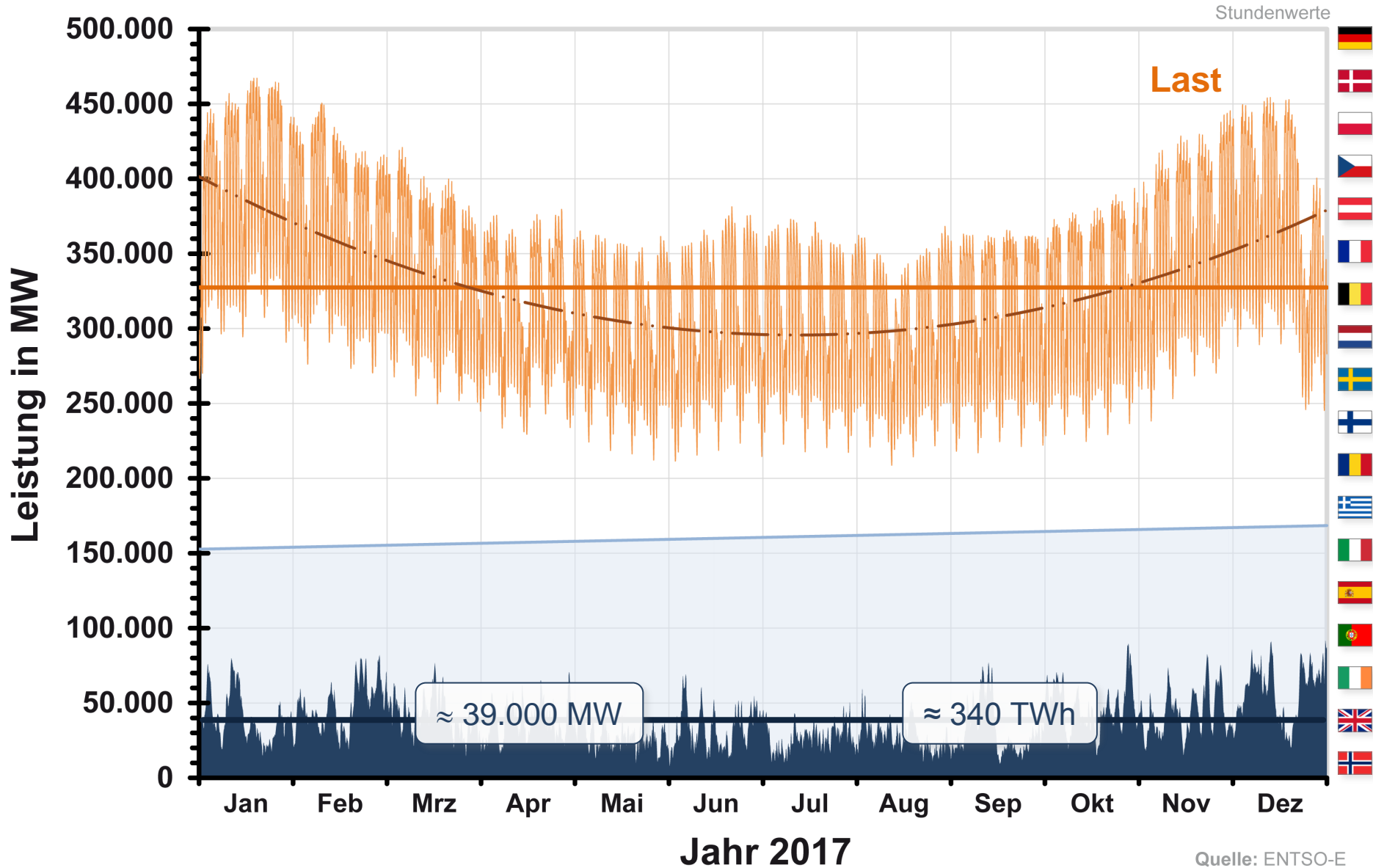


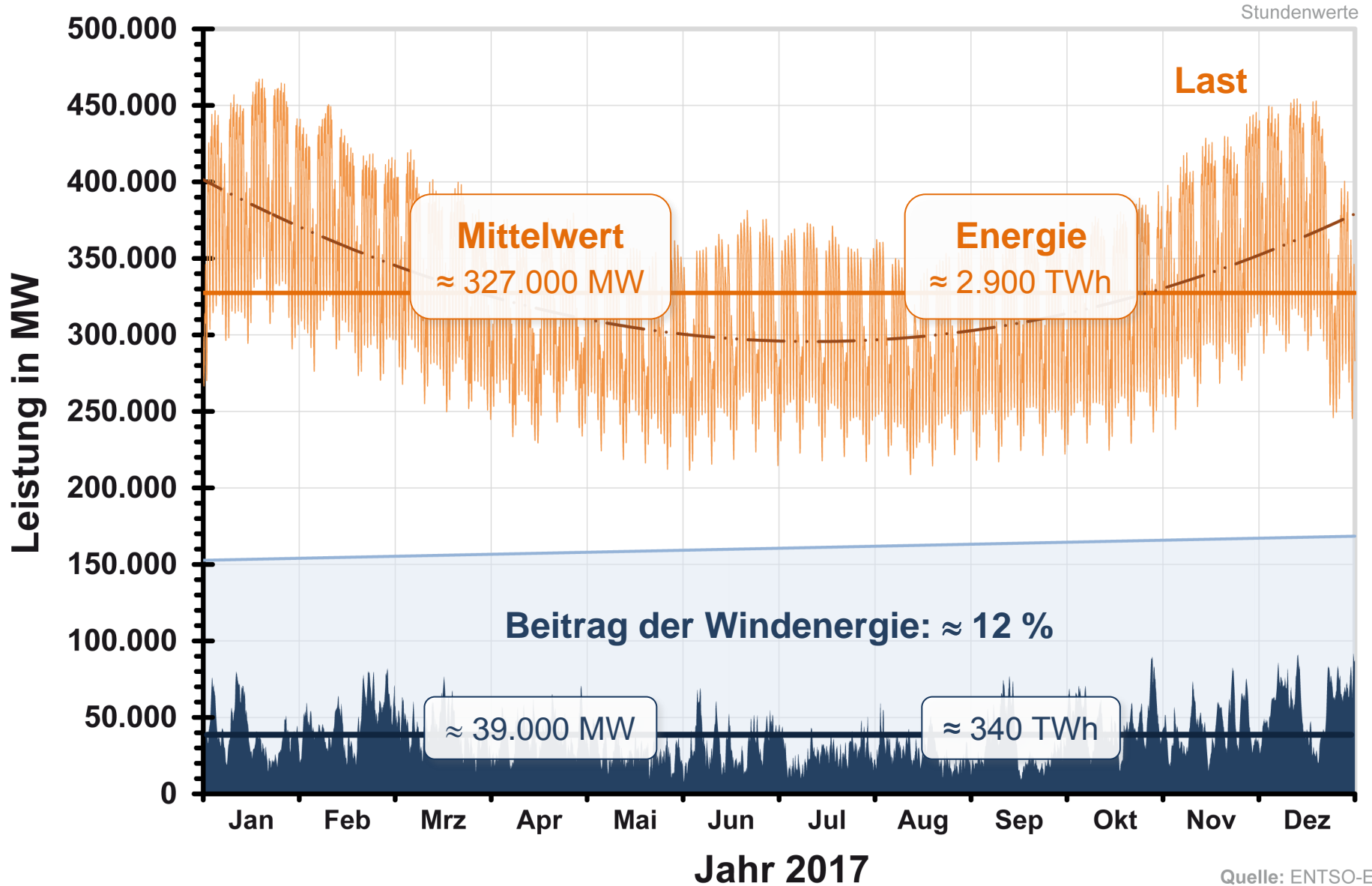












## Fazit

- 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](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](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

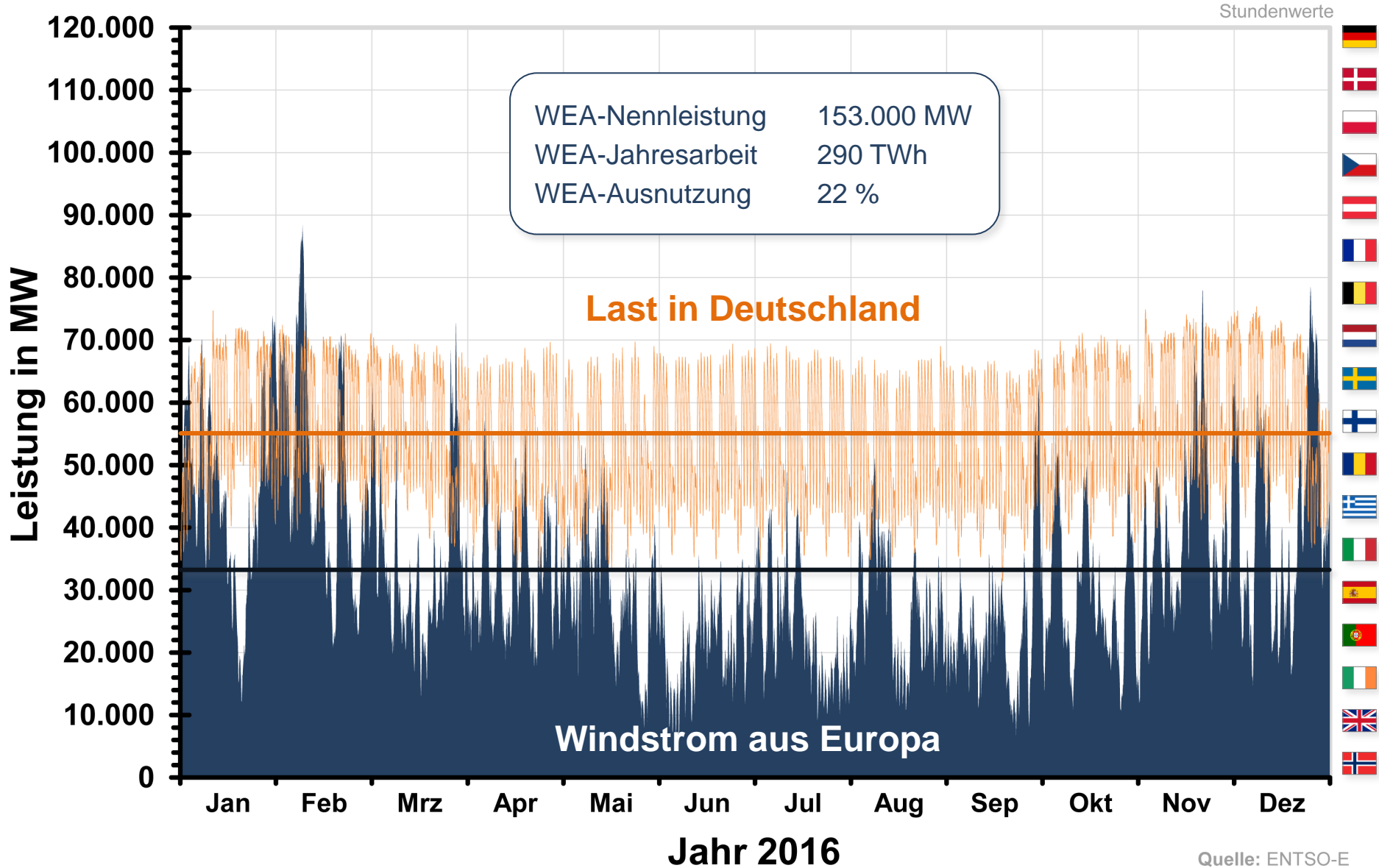
Registergericht: Amtsgericht Essen

Registernummer: VR 1788

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

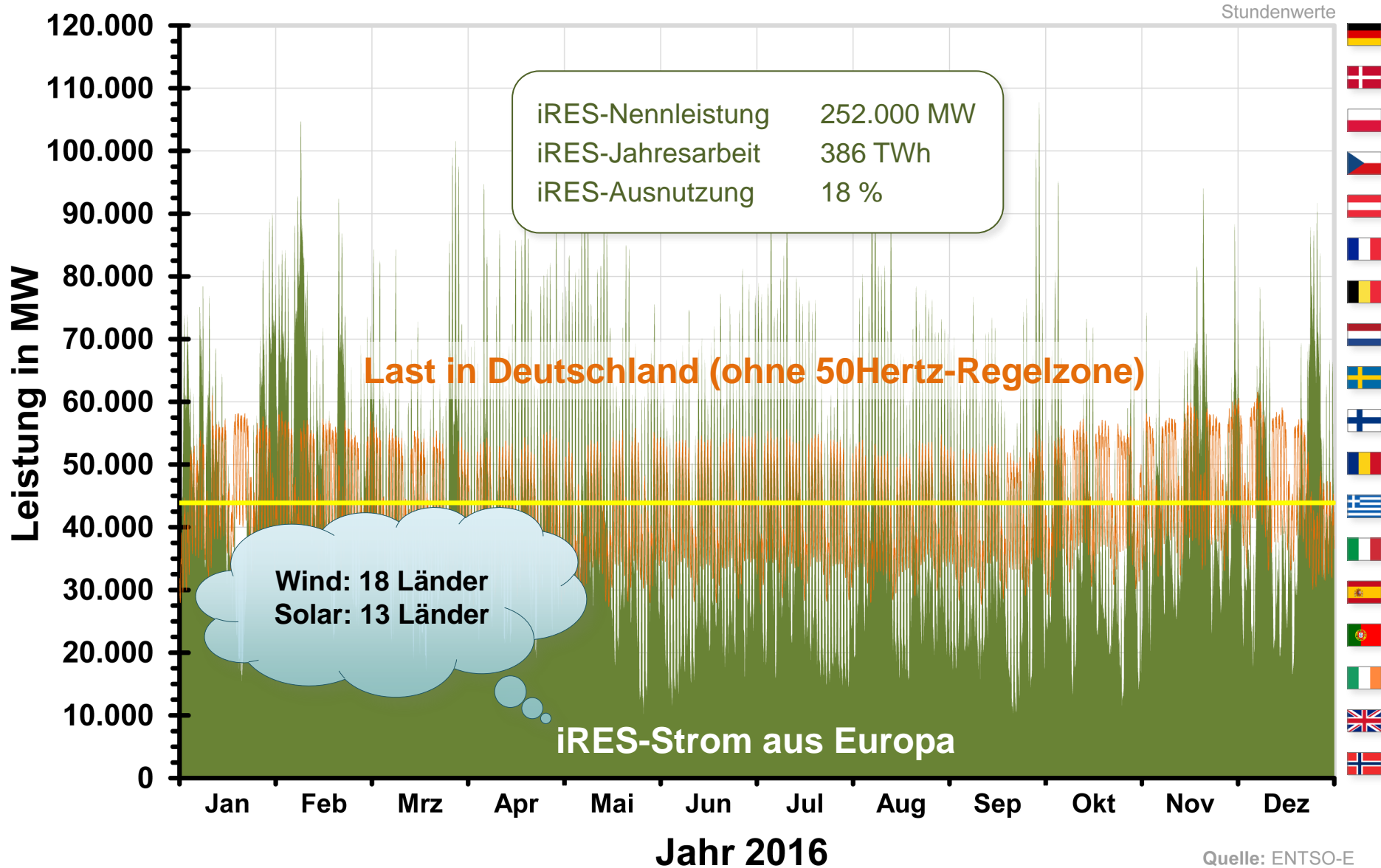
## Es gilt das gesprochene Wort!

# Backup



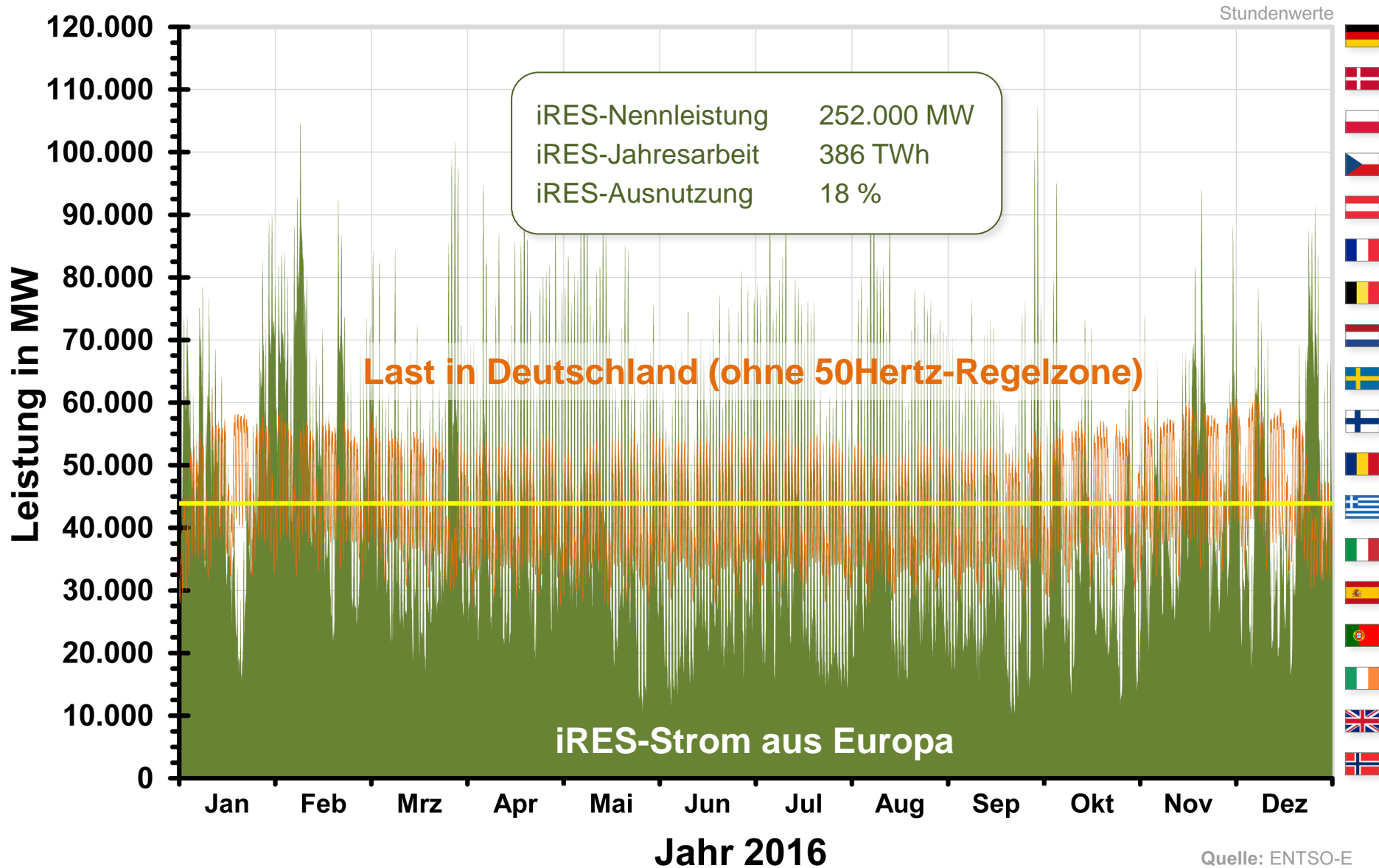


# Szenario: Wind- plus Solarstrom aus Europa für Deutschland



iRES: intermittierende regenerative Energiesysteme (Wind/Solar)

# Szenario: Wind- plus Solarstrom aus Europa für Deutschland



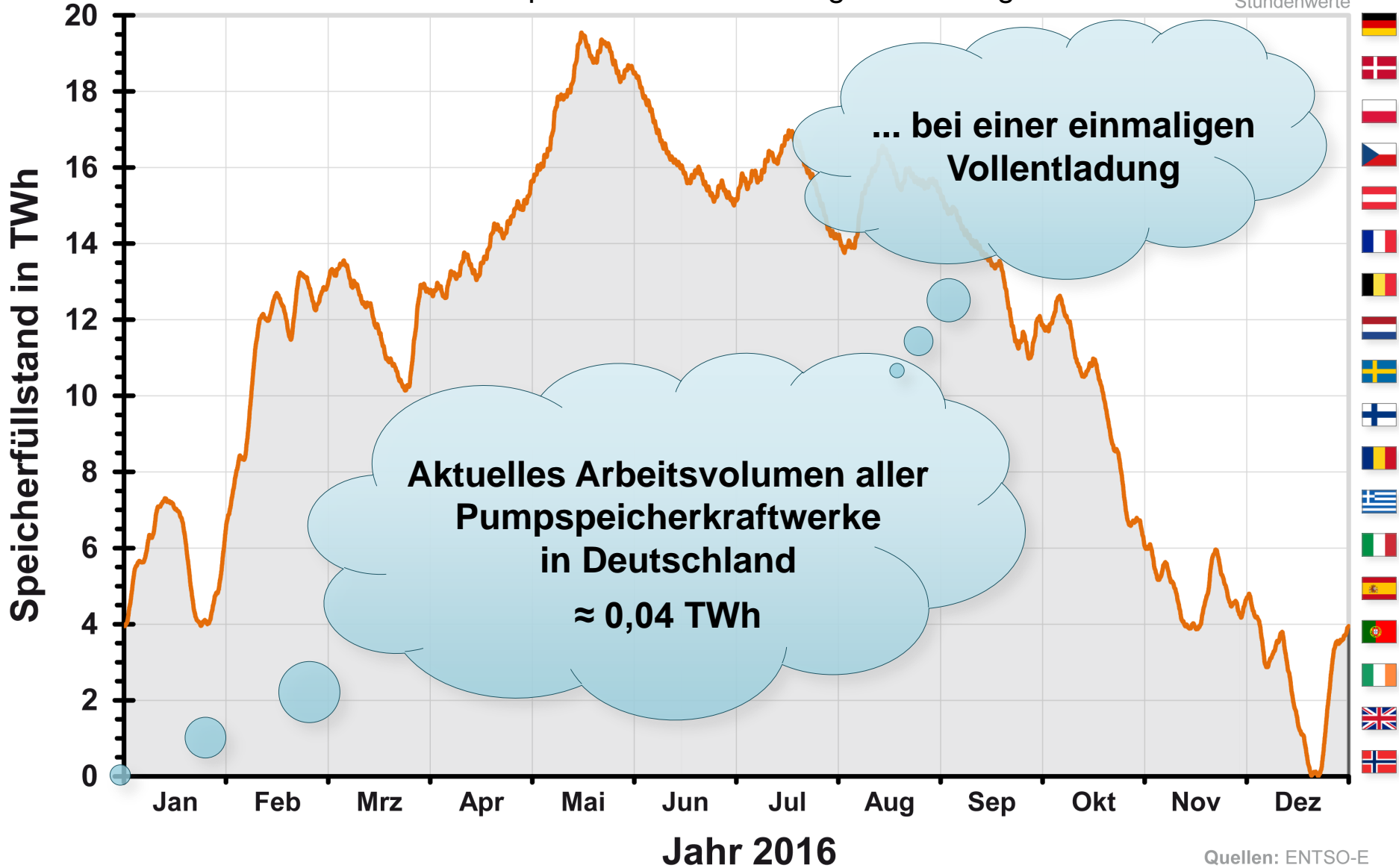
Quelle: ENTSO-E

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



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