

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

Teil 1: Entwicklungen in Deutschland seit 2010

Teil 2: Europäische Situation im Jahr 2016

Thomas Linnemann, Guido S. Vallana



Fakt: Die Nennleistung aller Windenergieanlagen in 18 Ländern Europas hat sich in den letzten 17 Jahren auf mehr als ≈ 150.000 MW verzehnfacht.

Wussten Sie, dass

- 1) ... Leistungseinspeisungen aus Windenergie europaweit stark fluktuieren?
- 2) ... die intuitiv vermutete Glättung nur in sehr geringem Umfang eintritt?
- 3) ... die Windenergie praktisch nicht zur Versorgungssicherheit beiträgt?
- 4) ... Windenergie praktisch 100 % planbare Backup-Technik erfordert?
- 5) ... die Windleistungseinspeisungen vieler Länder korreliert sind?
- 6) ... bei europaweitem Stromaustausch hohe Verluste auftreten?

VGB-Faktencheck ▶ Plausibilitätsnachweise

Europa: Windstromproduktion 2016

Sieben Nachbarländer Deutschlands



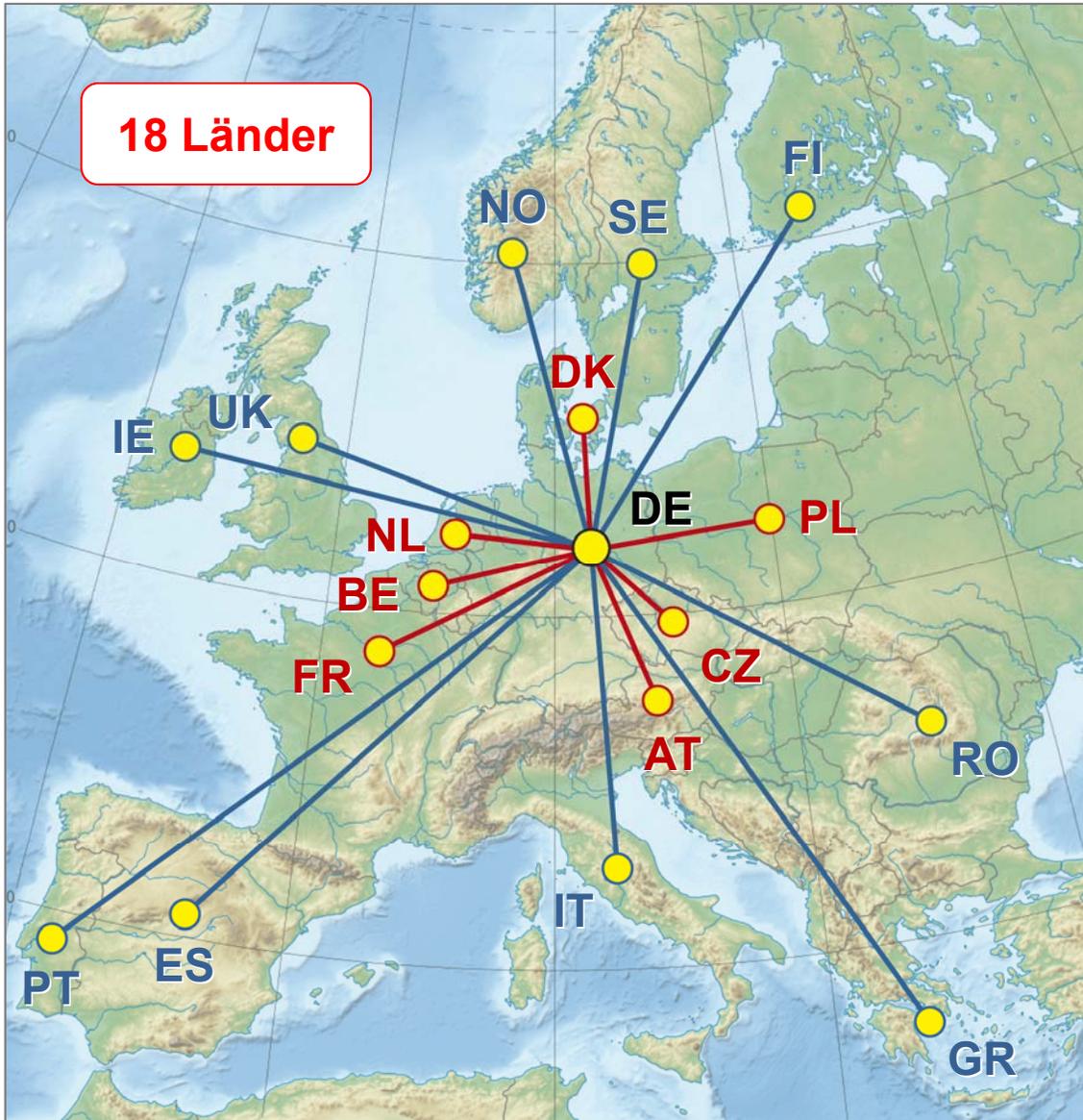
- AT** Österreich
- BE** Belgien
- CZ** Tschechien
- DE** Deutschland
- DK** Dänemark
- ES Spanien
- FI Finnland
- FR** Frankreich
- GR Griechenland
- IE Irland
- IT Italien
- NL** Niederlande
- NO Norwegen
- PO** Polen
- PT Portugal
- RO Rumänien
- SE Schweden
- UK Großbritannien

Zehn weiter entfernte Länder

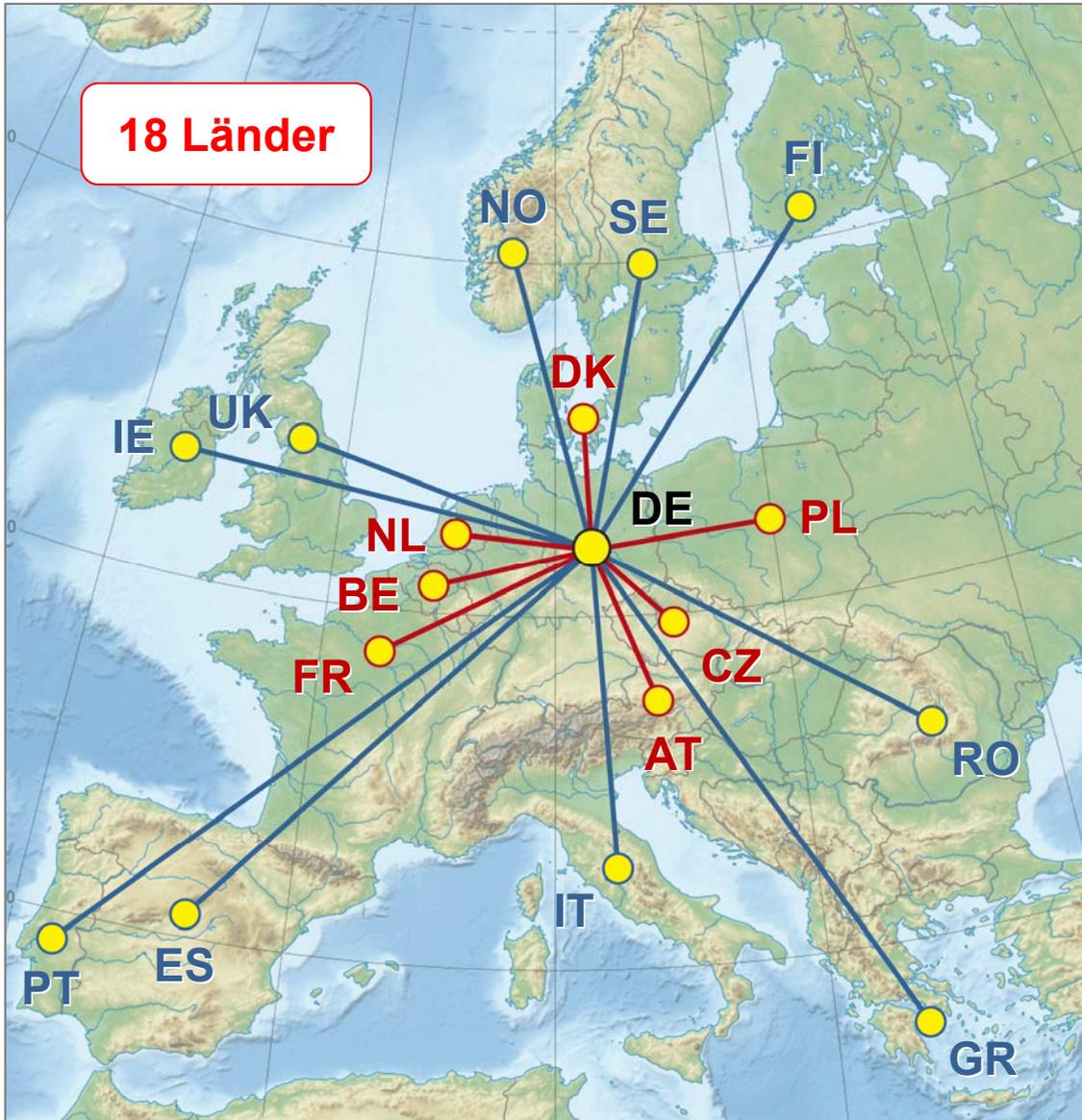


- AT Österreich
- BE Belgien
- CZ Tschechien
- DE** Deutschland
- DK Dänemark
- ES Spanien
- FI Finnland
- FR Frankreich
- GR** Griechenland
- IE Irland
- IT Italien
- NL Niederlande
- NO** Norwegen
- PO Polen
- PT Portugal
- RO** Rumänien
- SE Schweden
- UK Großbritannien

Europa: Windstromproduktion 2016



- 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

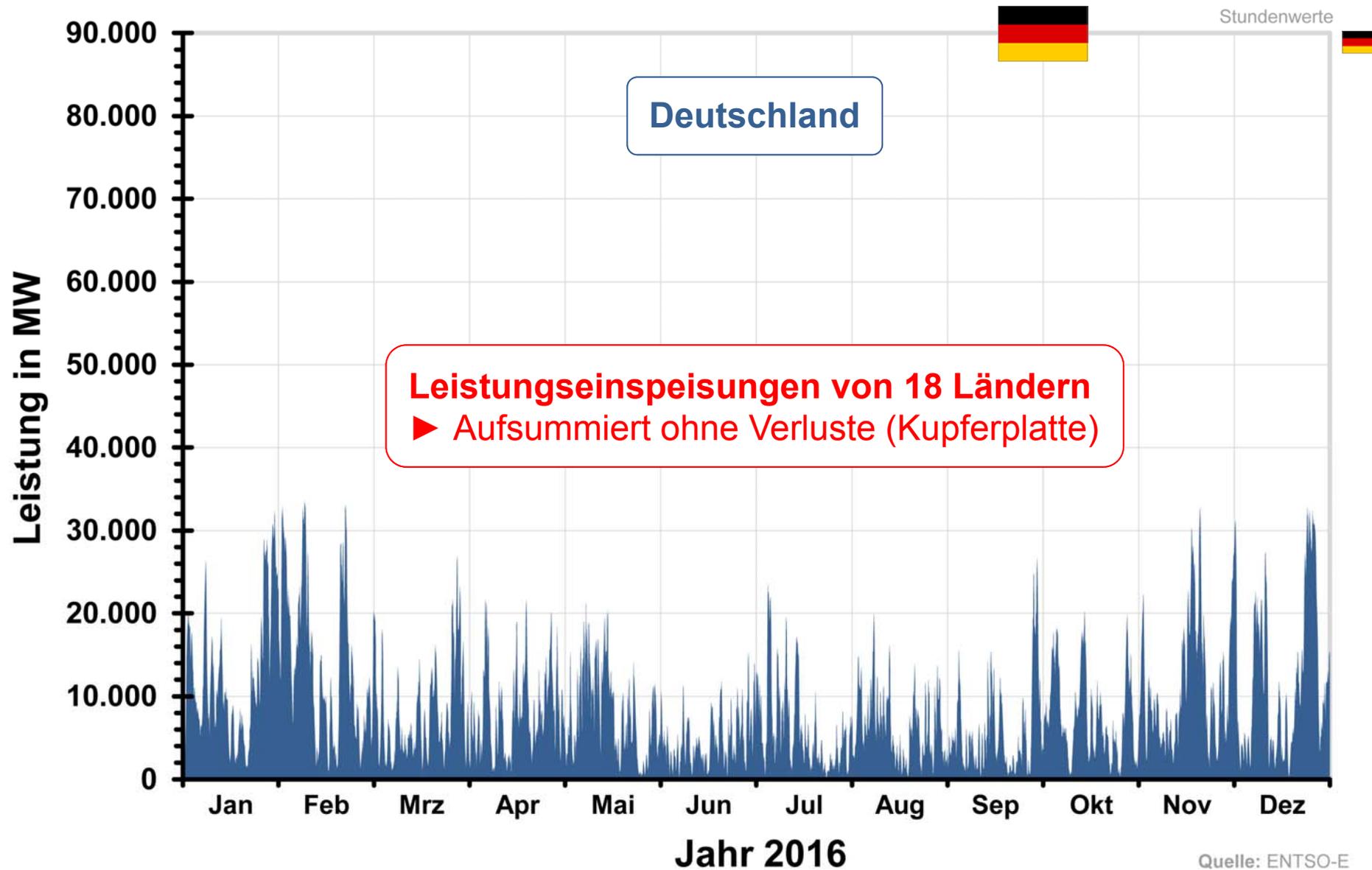


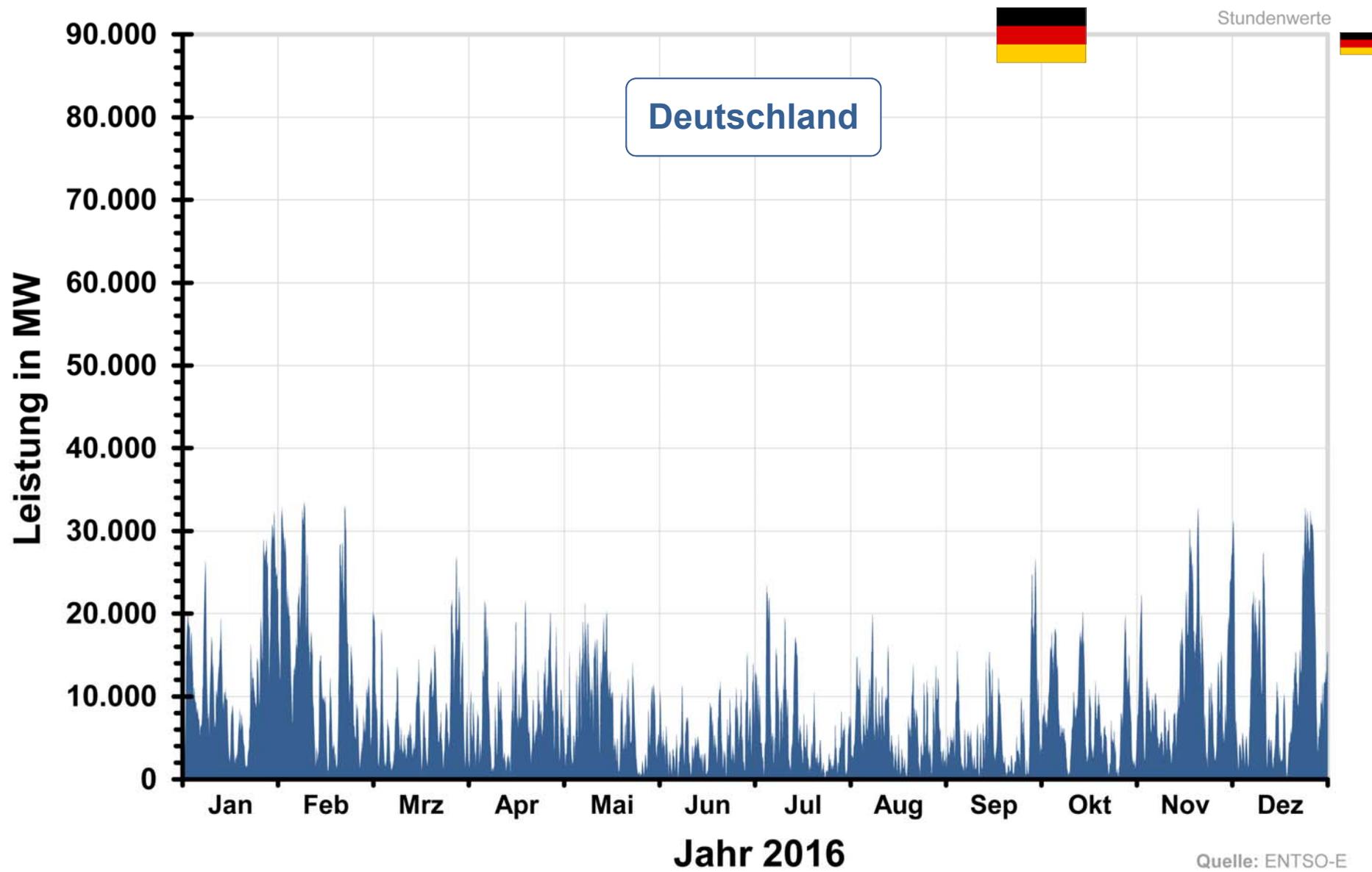
Zeitreihen der Leistung

- **ENTSO-E**
Europäische Übertragungsnetzbetreiber
- **TSO**
Nationale Übertragungsnetzbetreiber

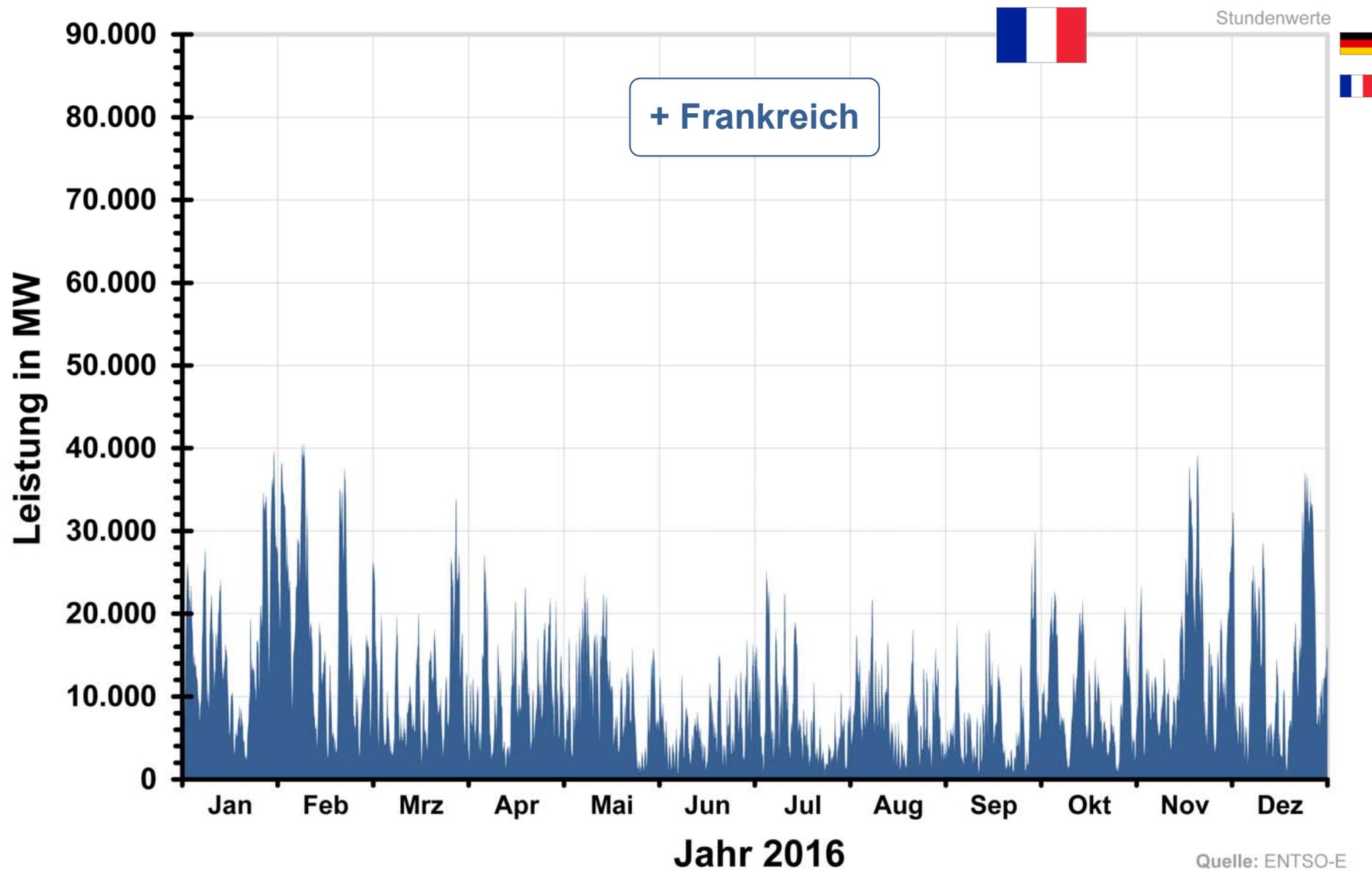
Energiestatistische Daten

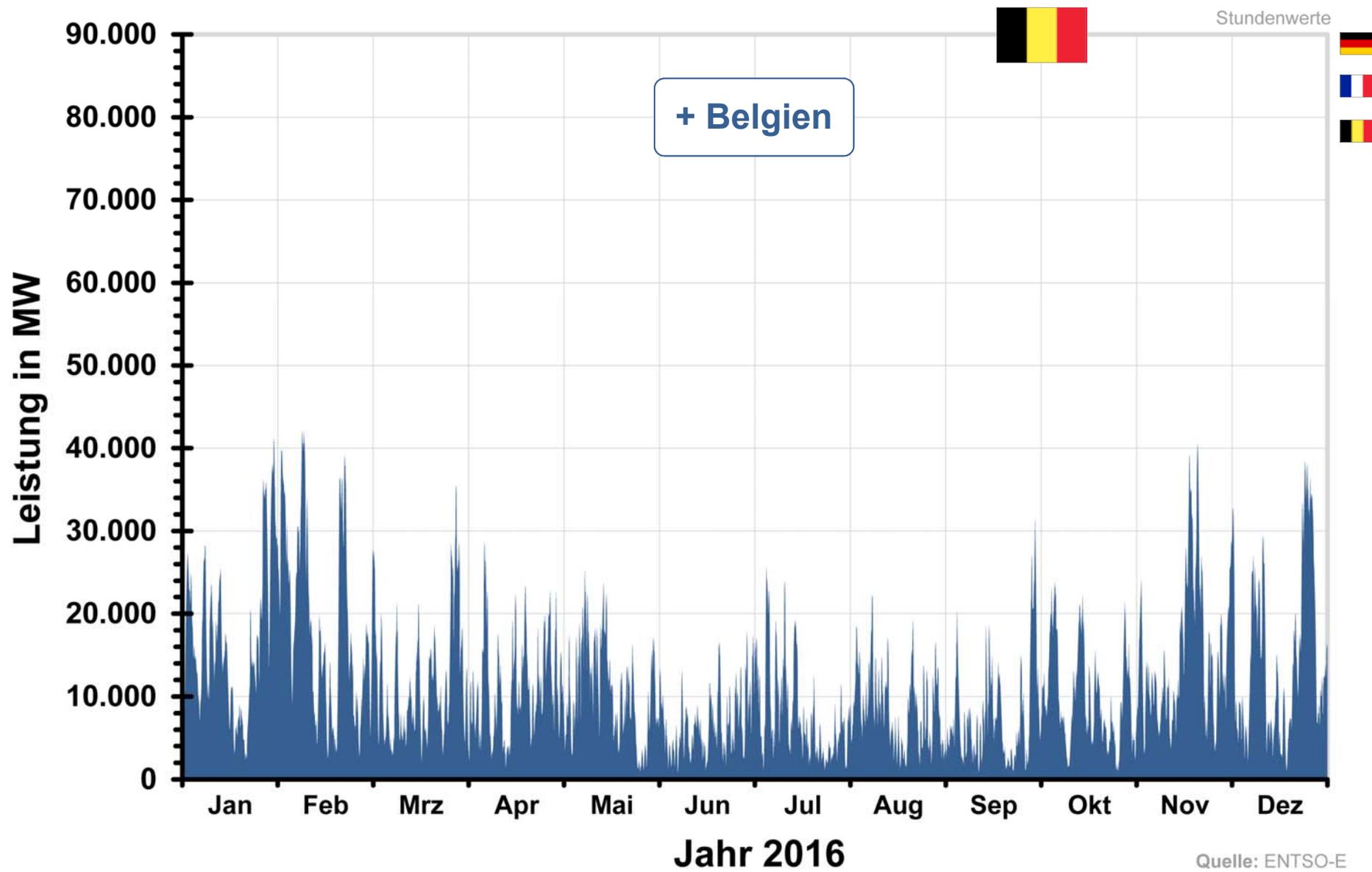
- **BP**
Statistical Review of World Energy
- **ESTAT**
Europäisches Statistikamt
- **WindEurope**
Europäischer Windenergieverband

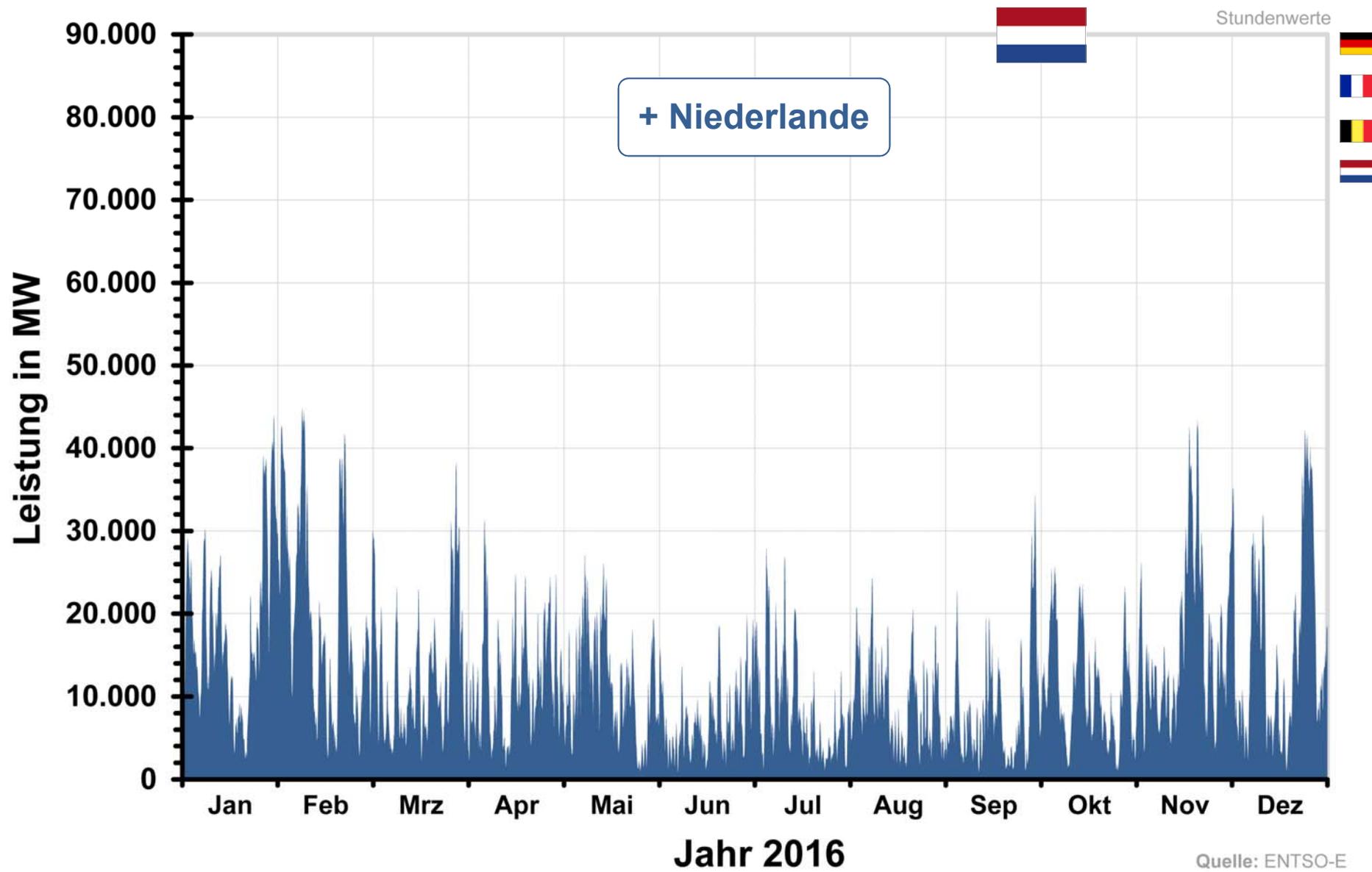


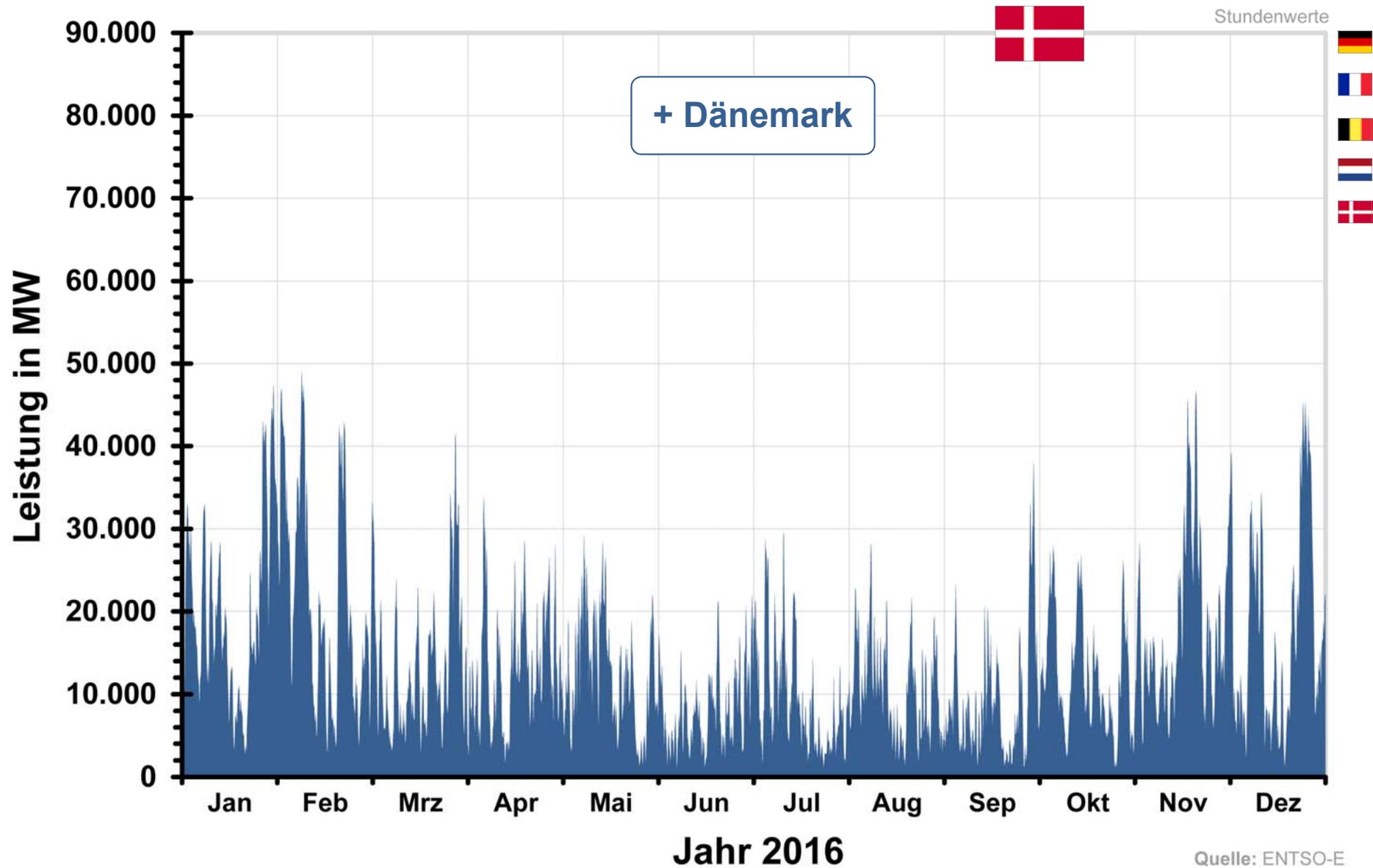


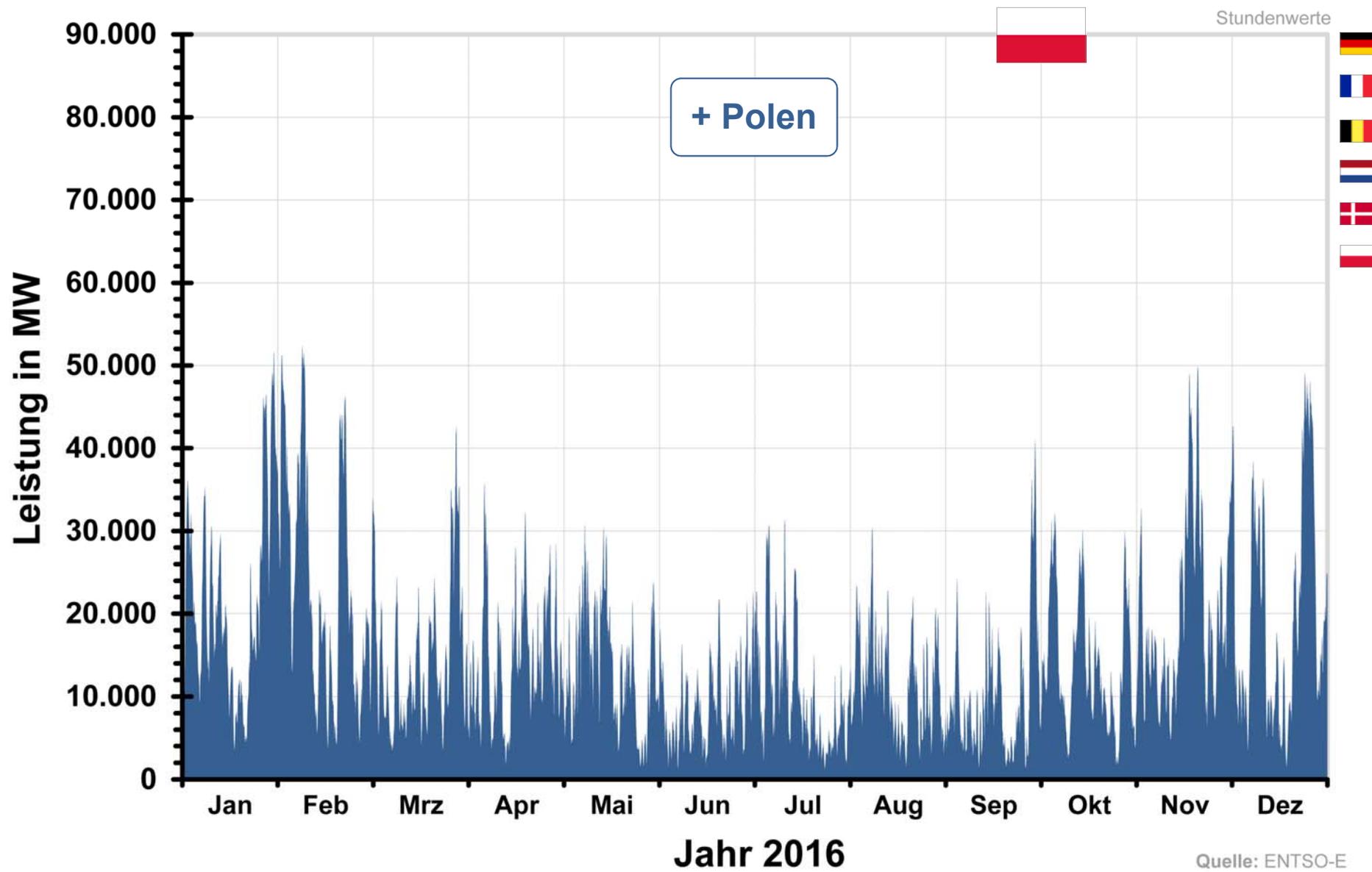
Quelle: ENTSO-E



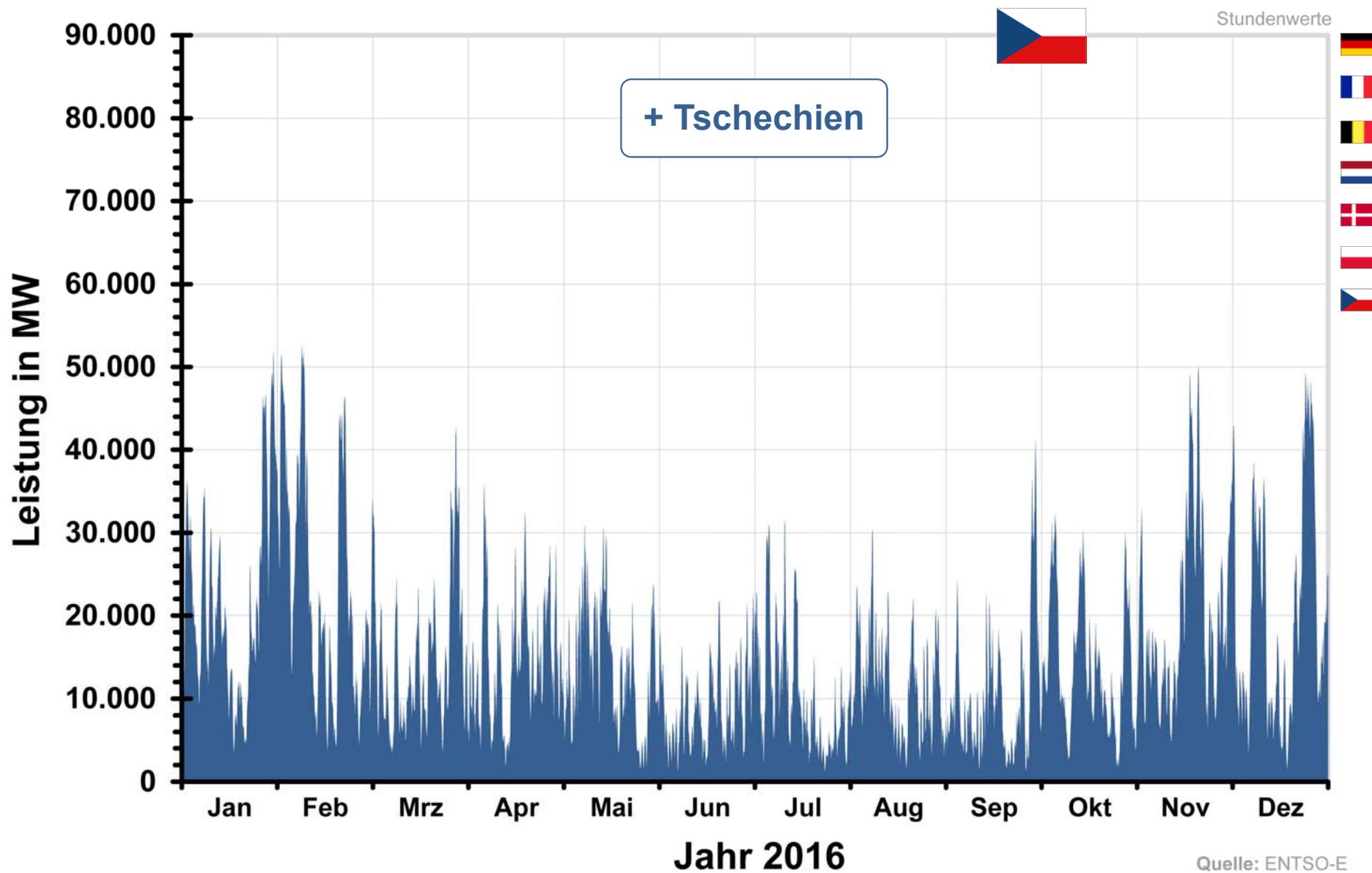


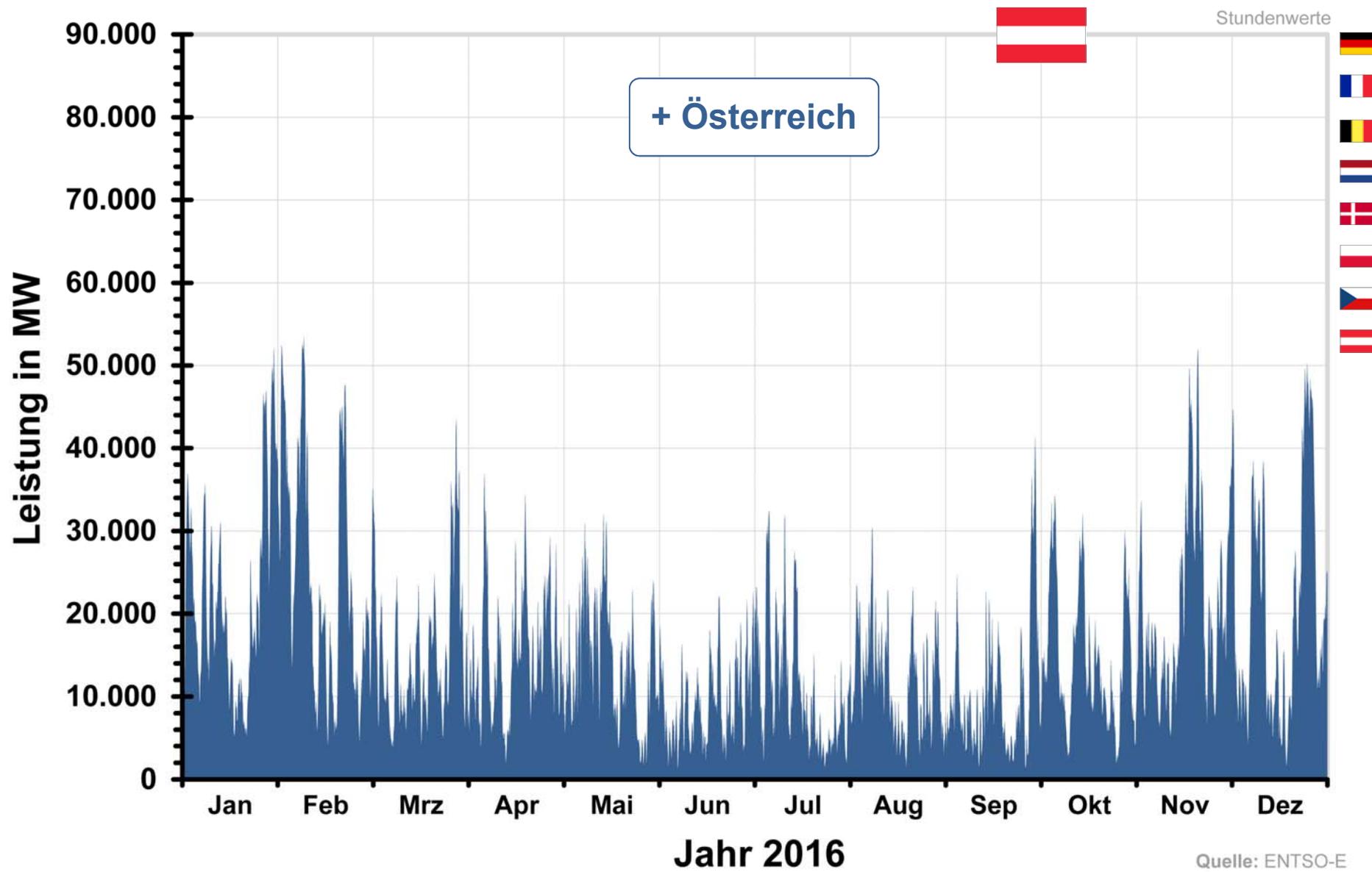


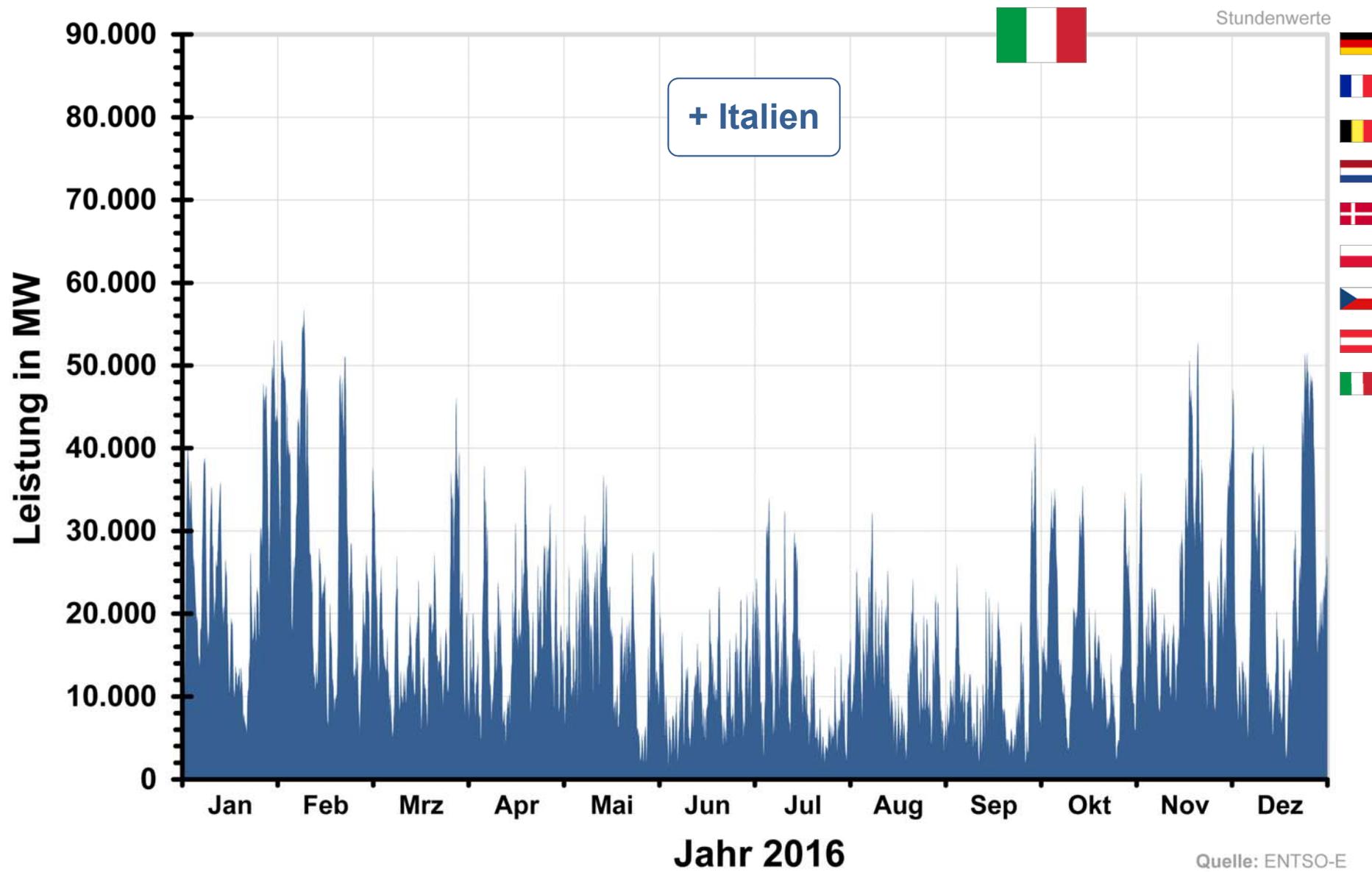




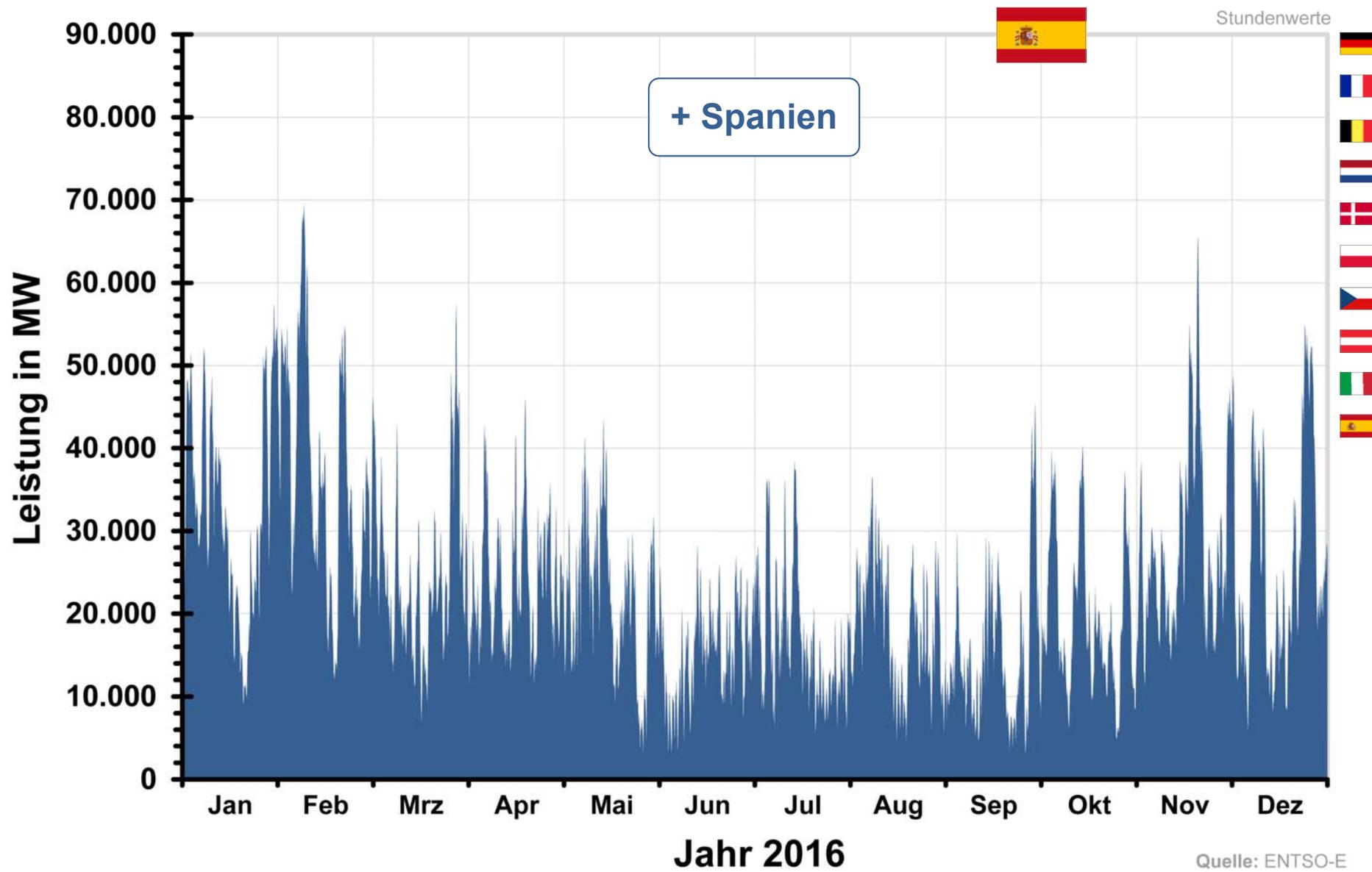
Quelle: ENTSO-E

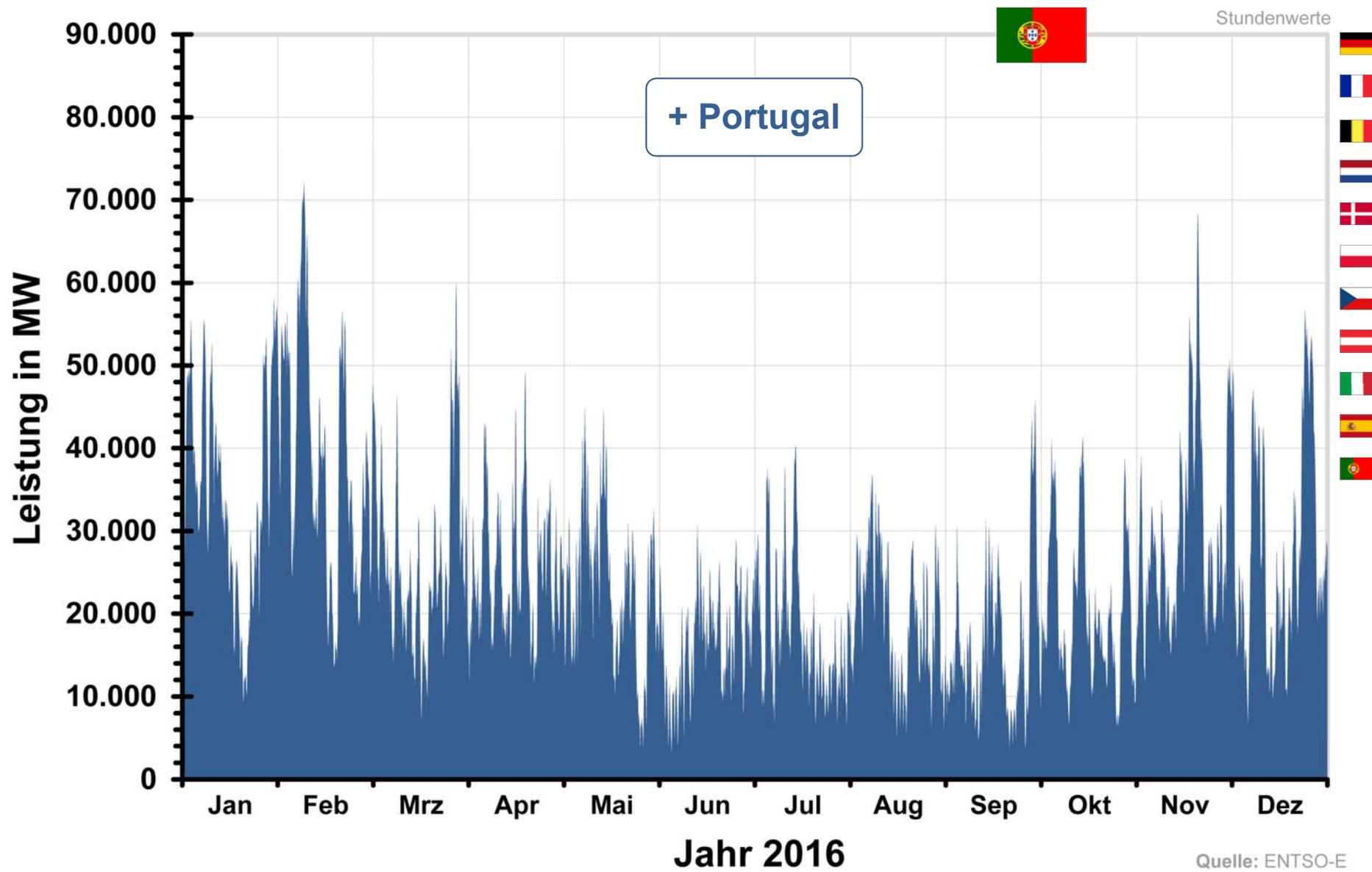


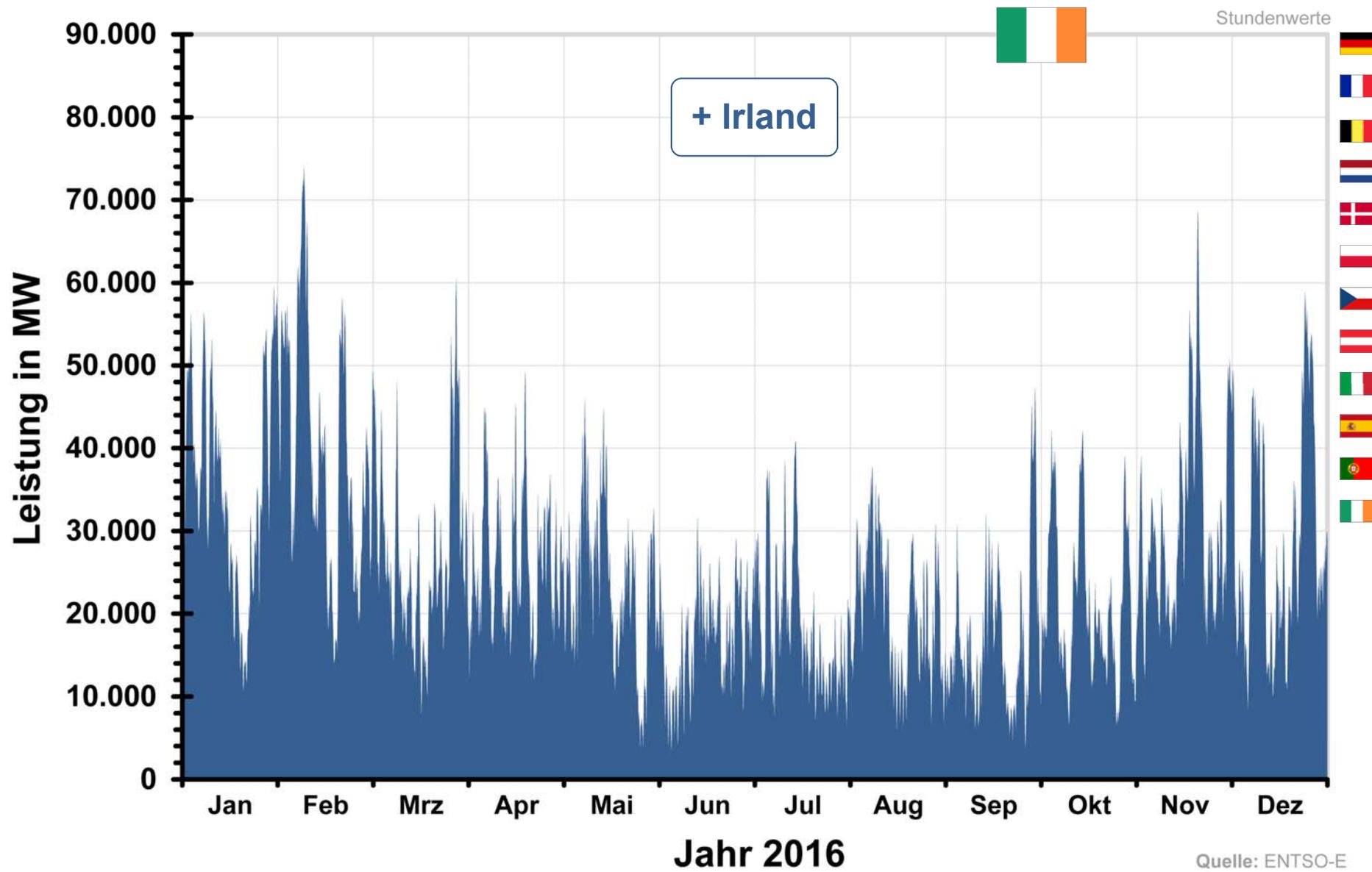


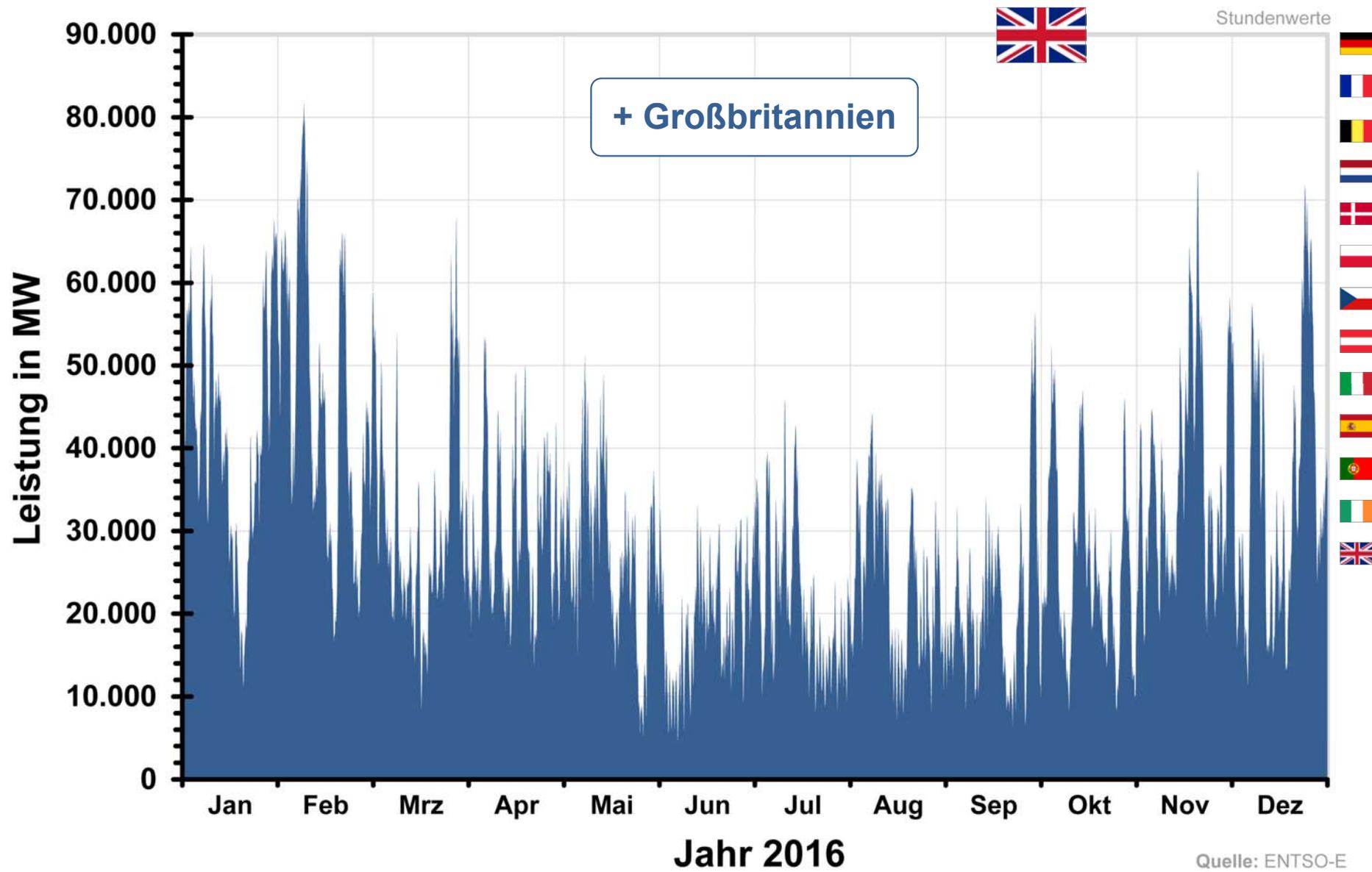


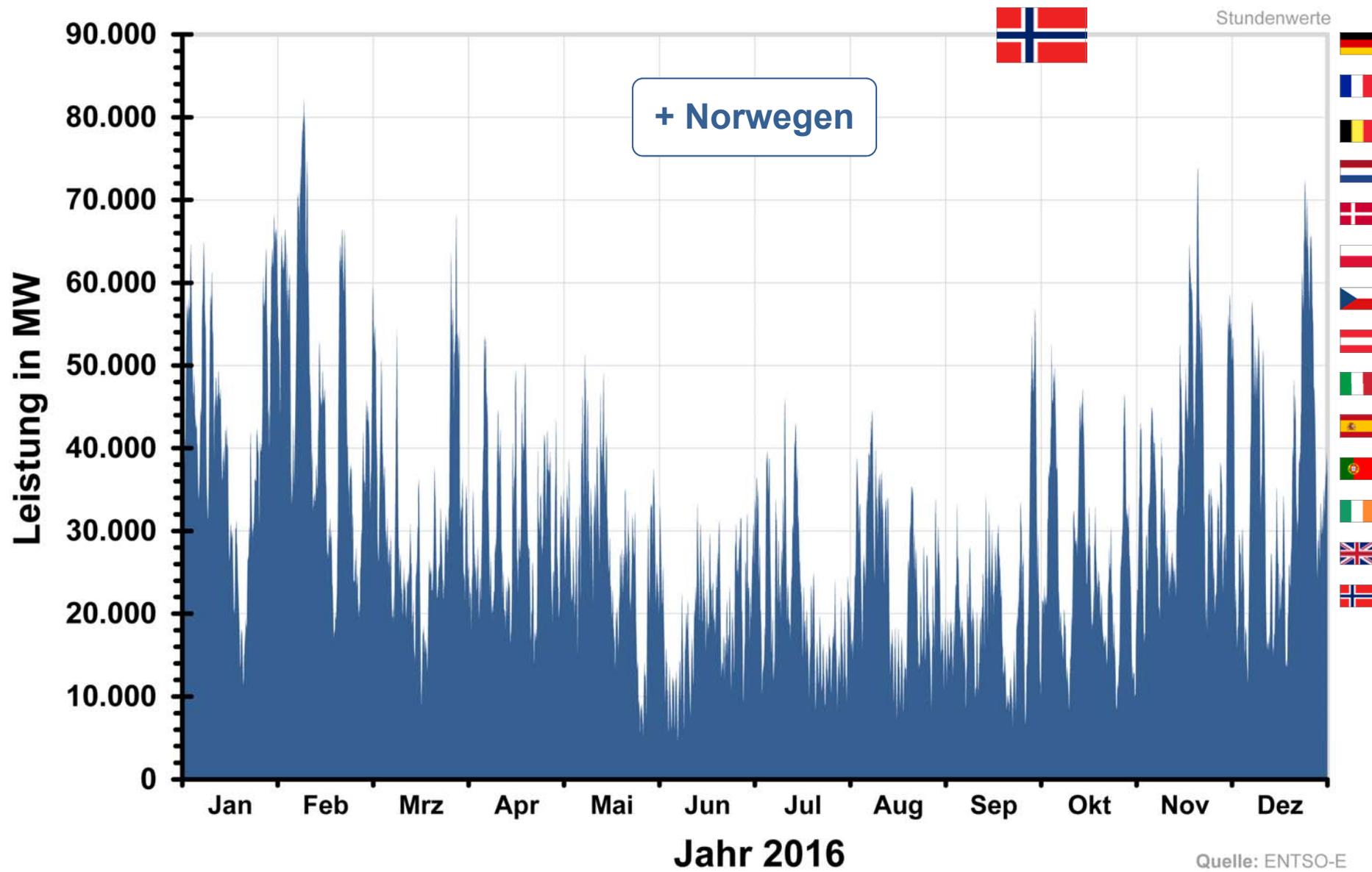
Quelle: ENTSO-E

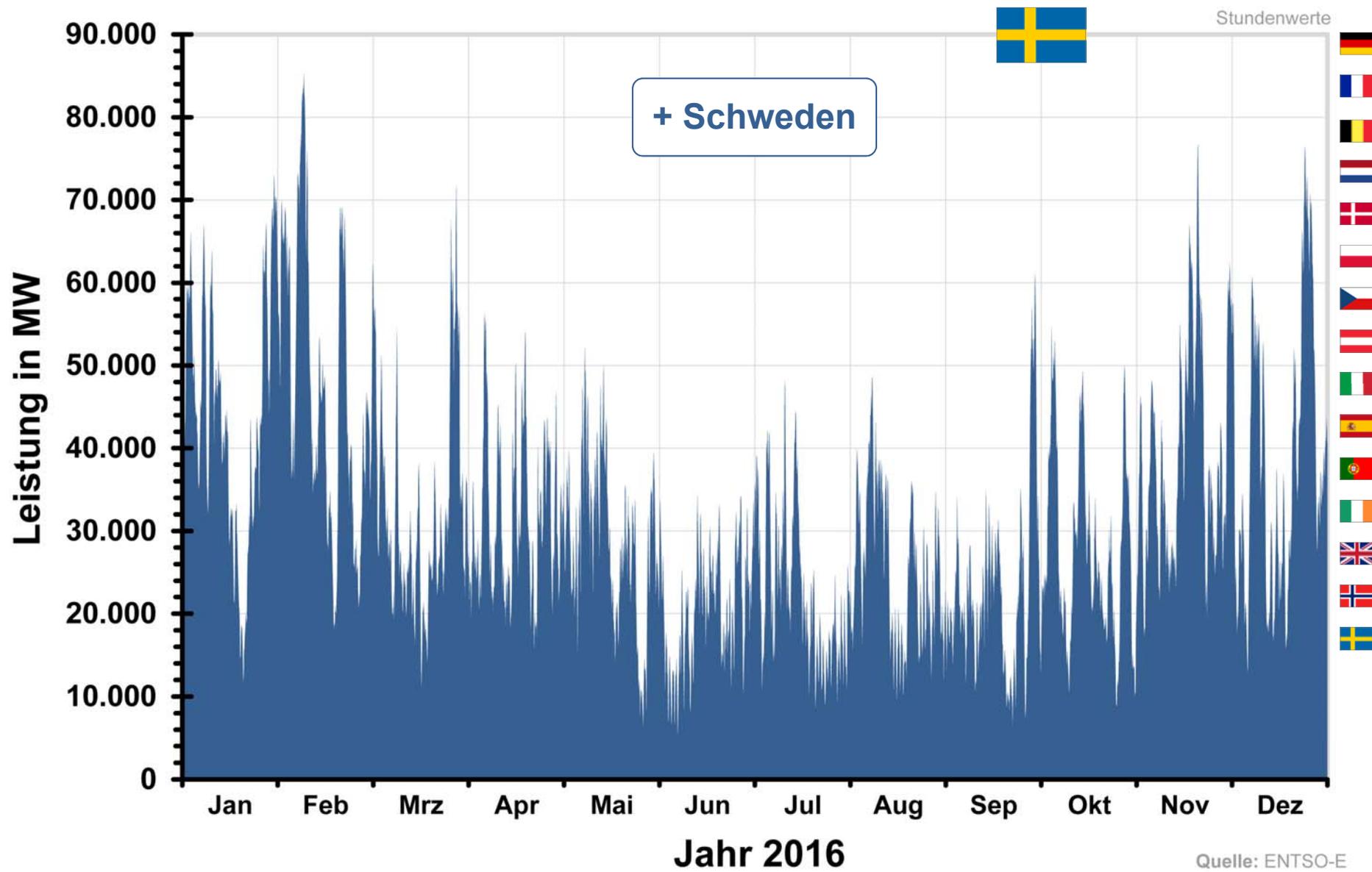


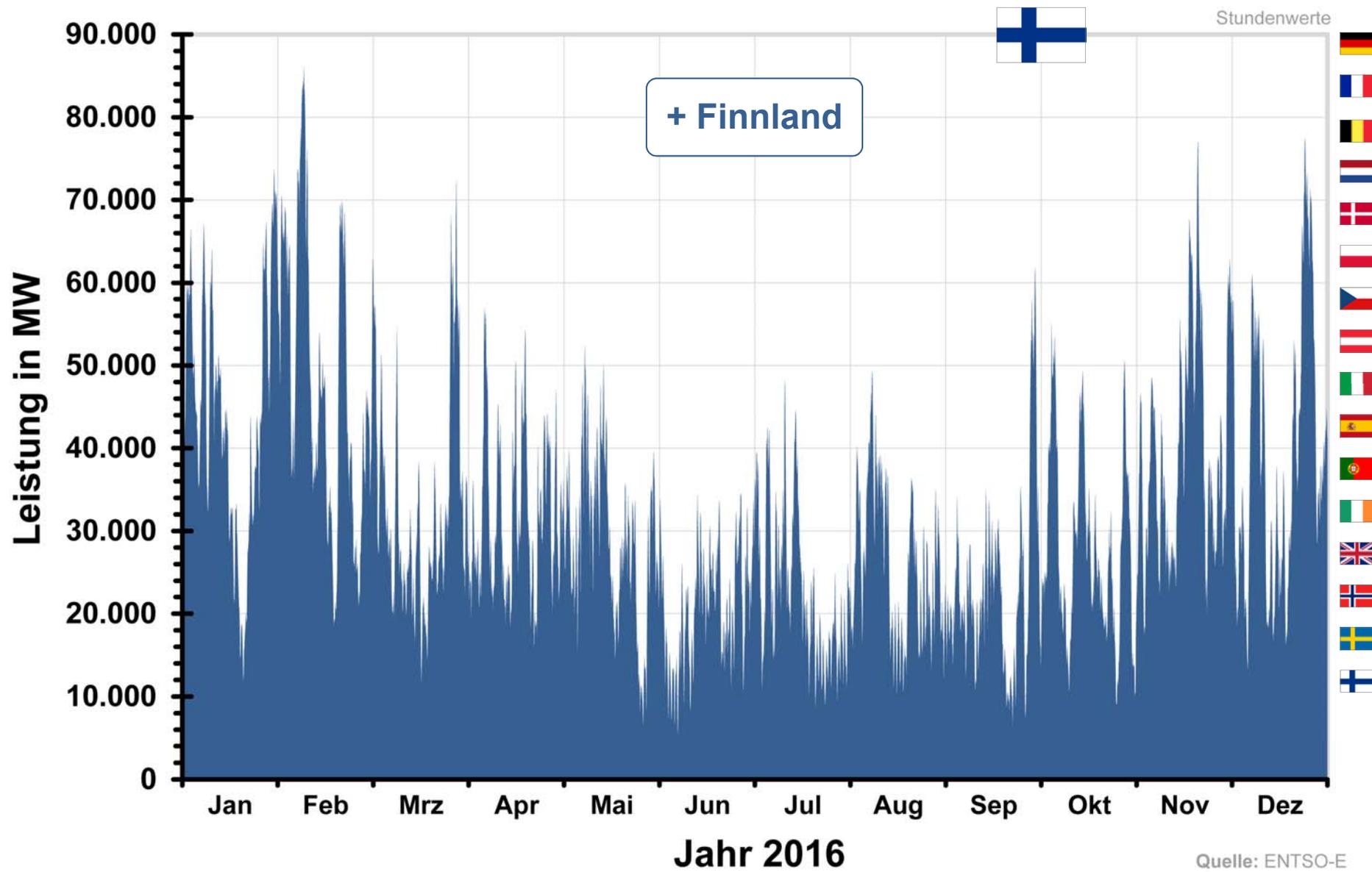


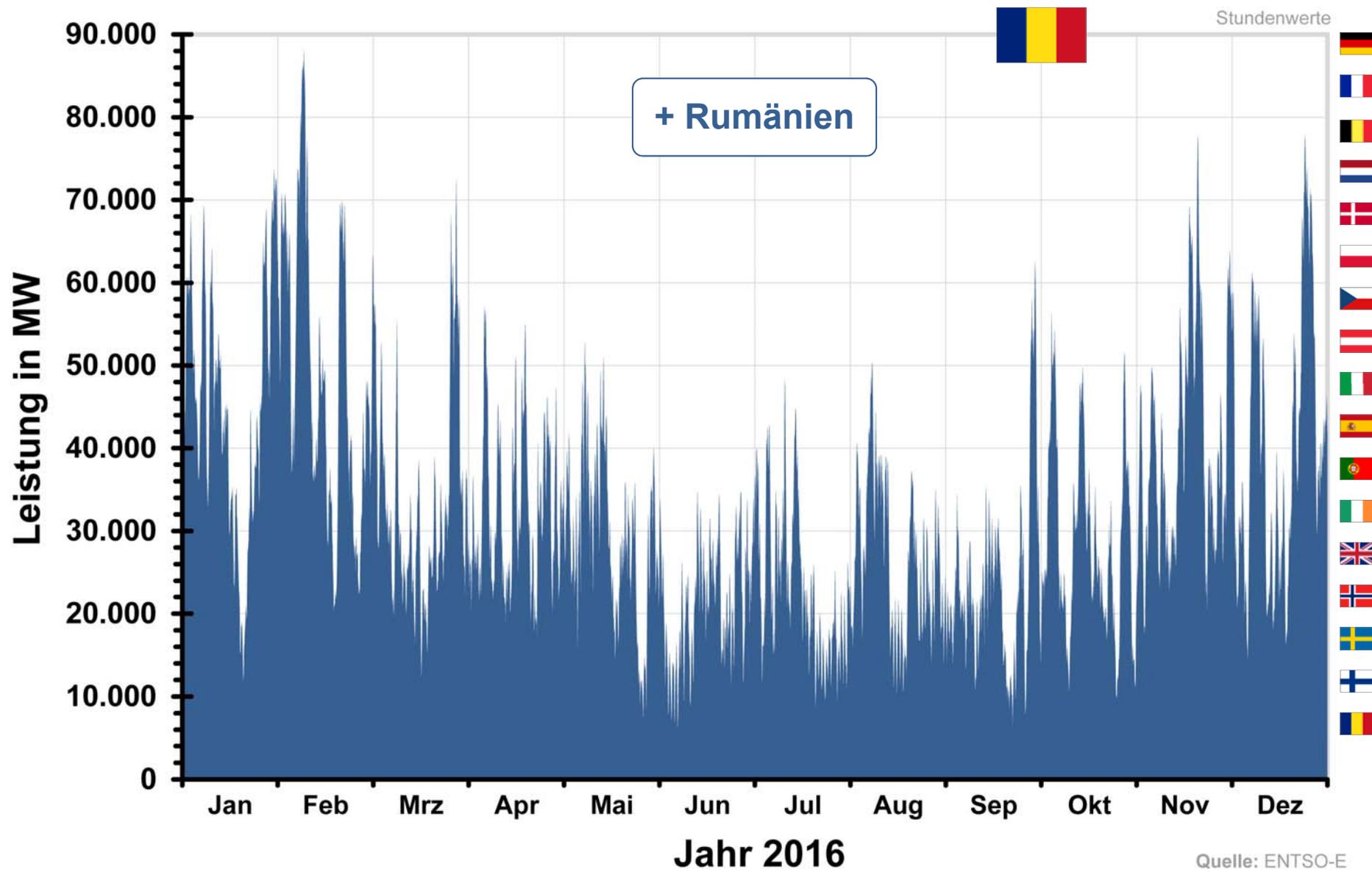




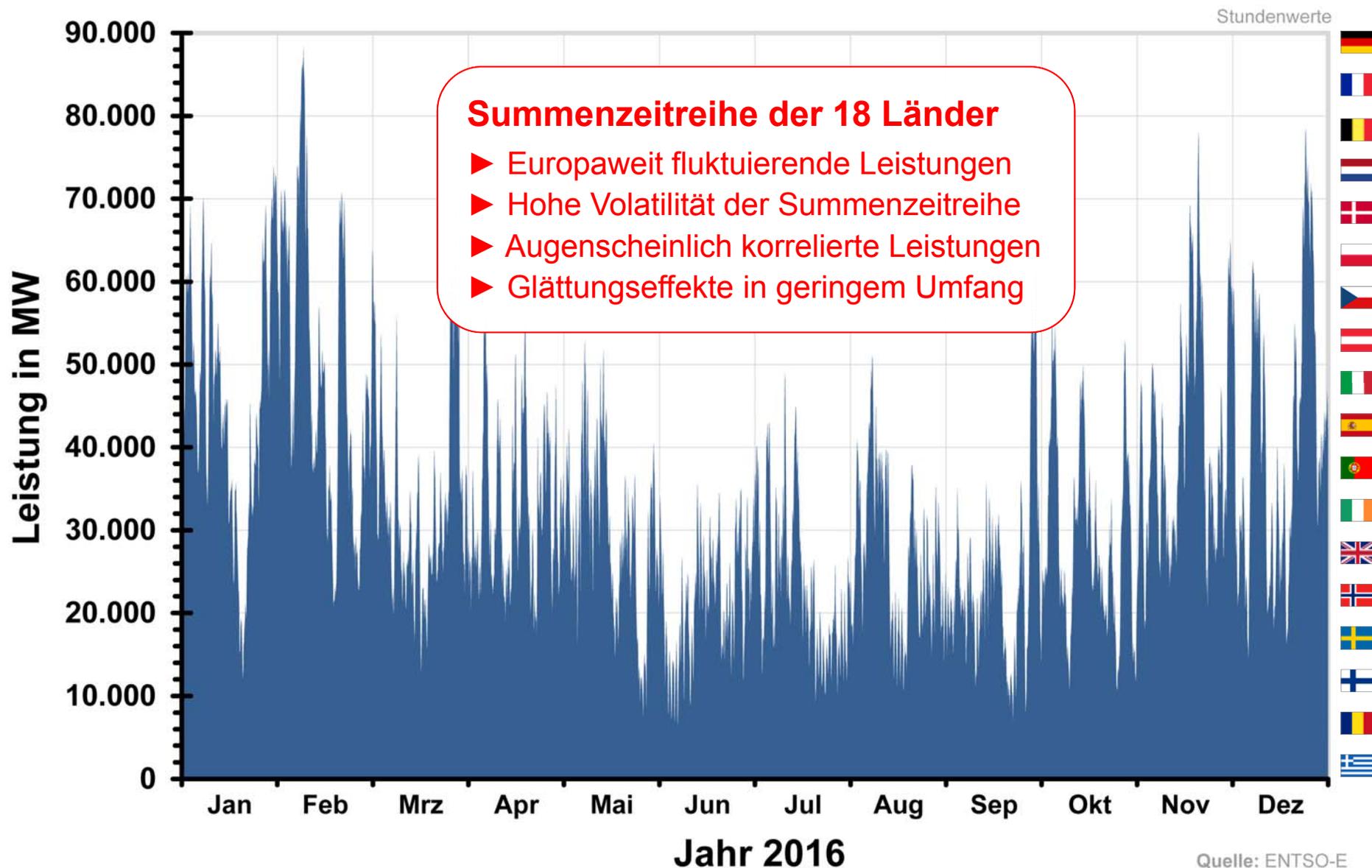


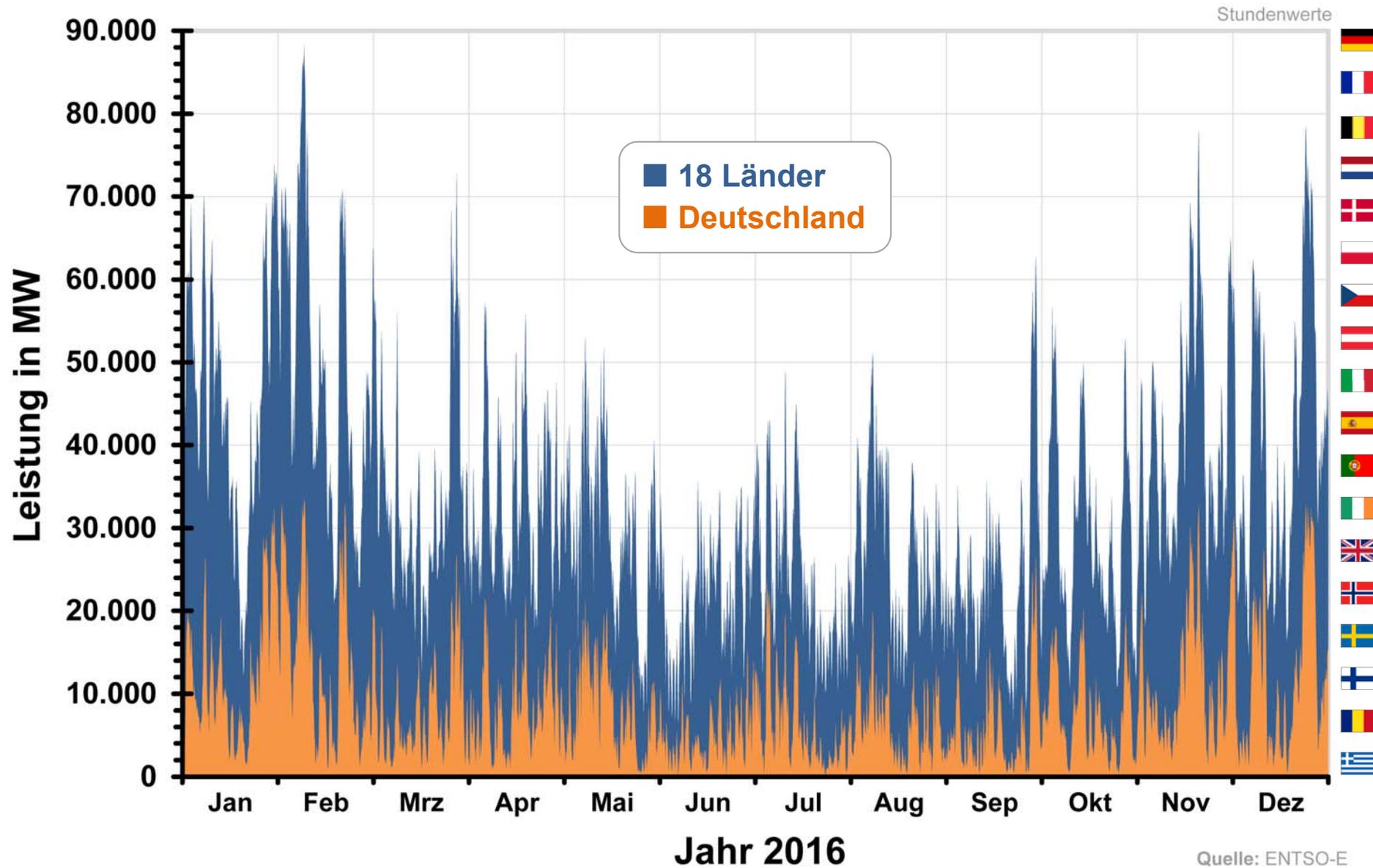


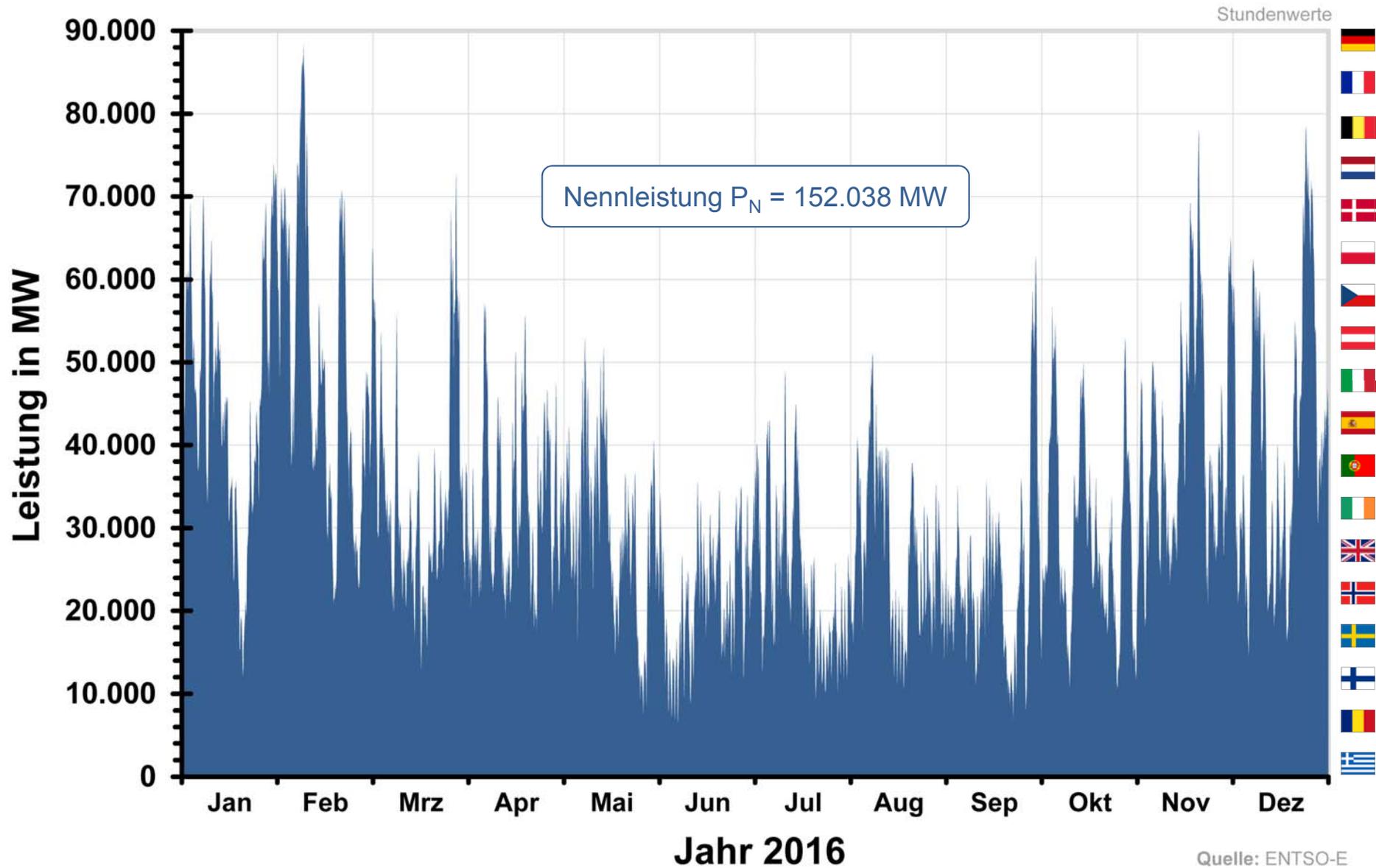


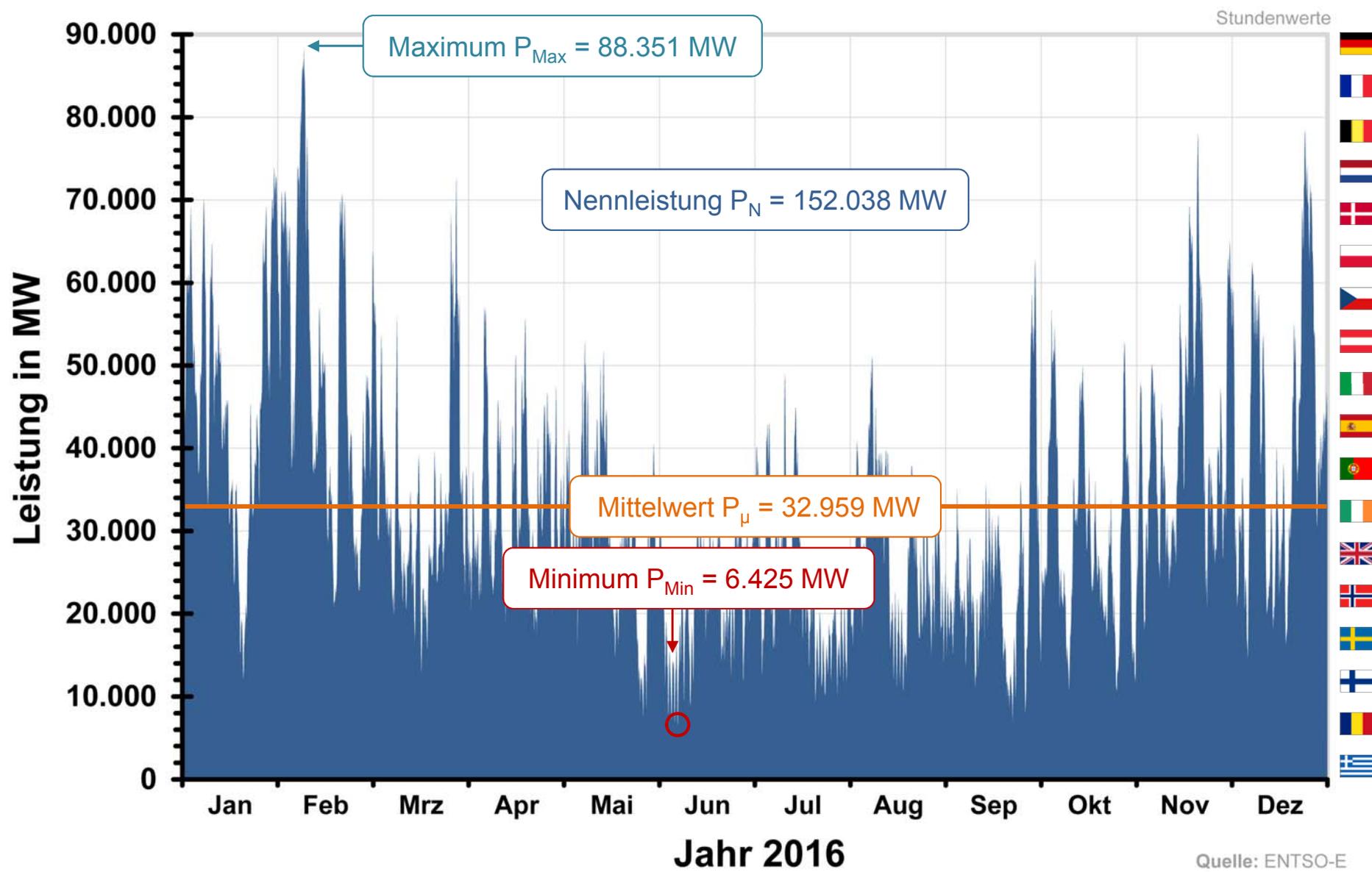


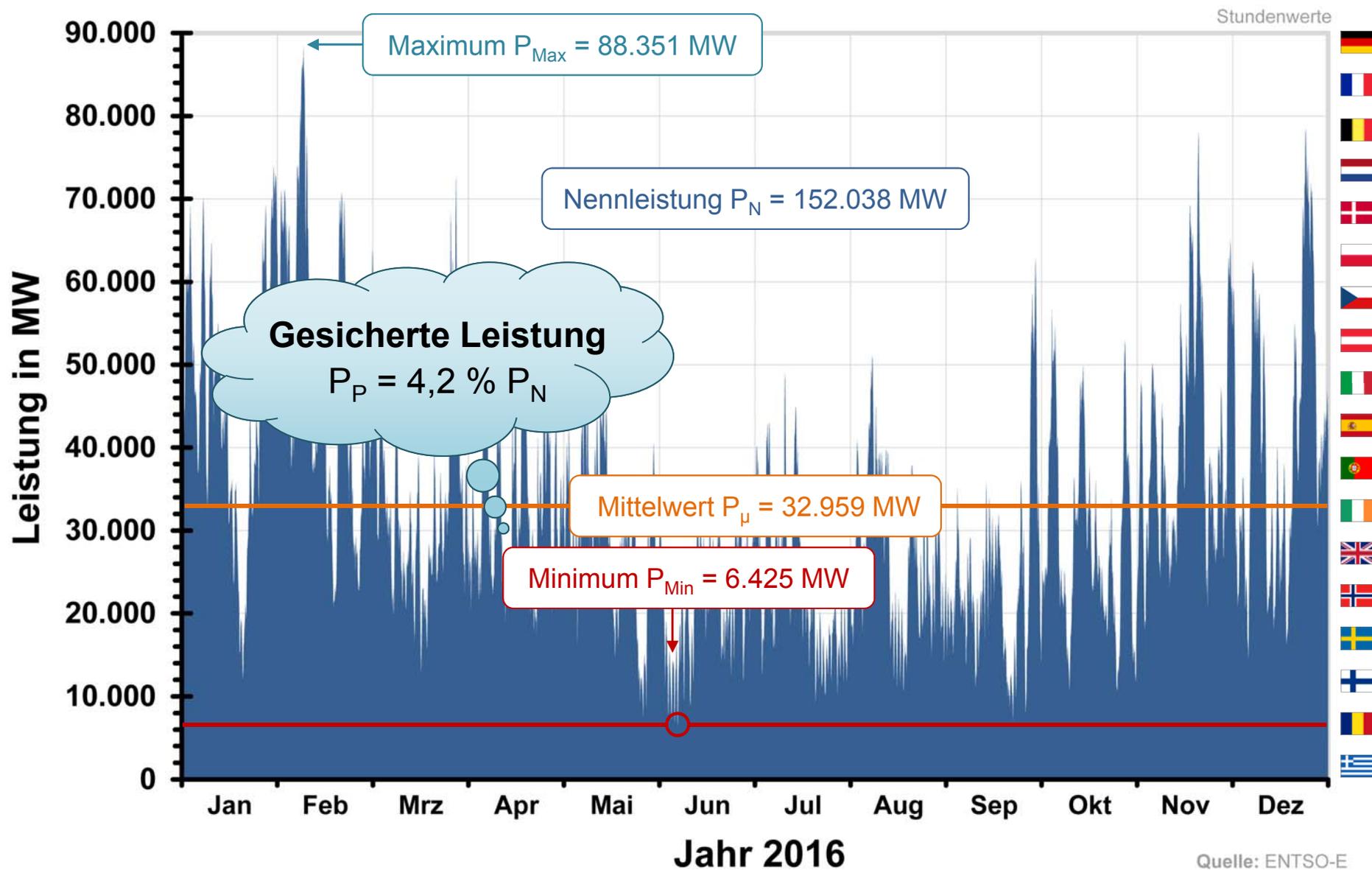


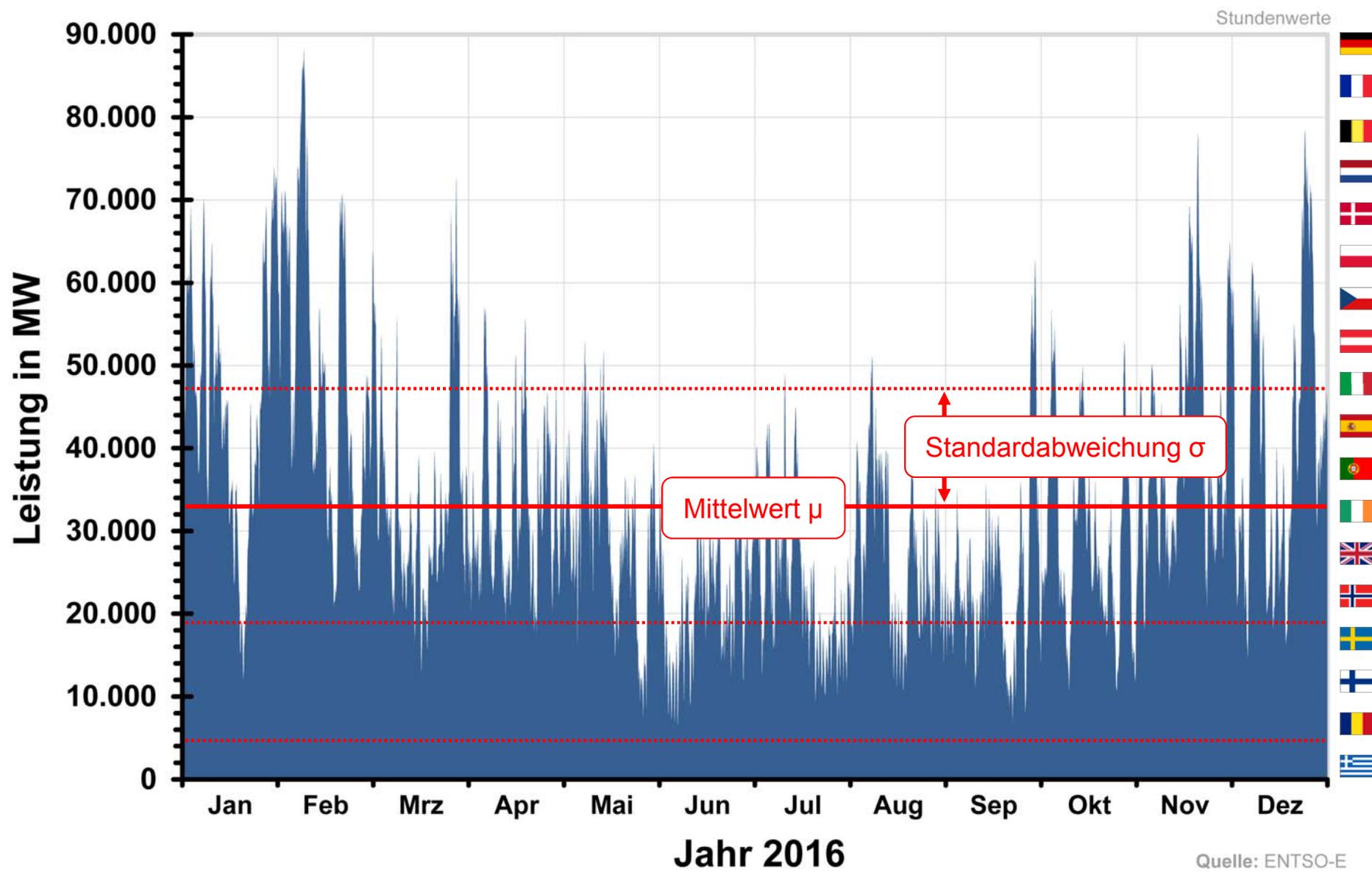




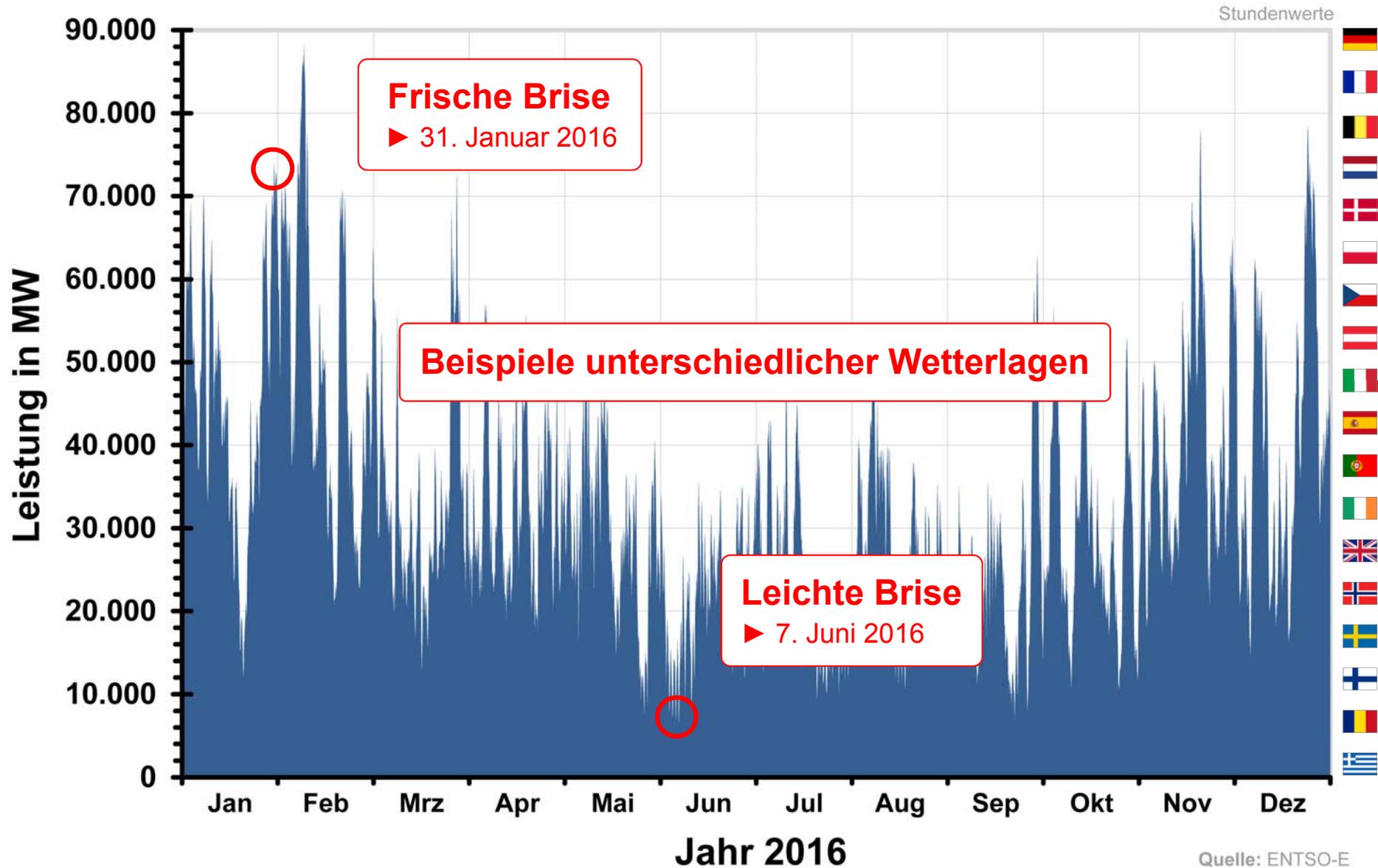




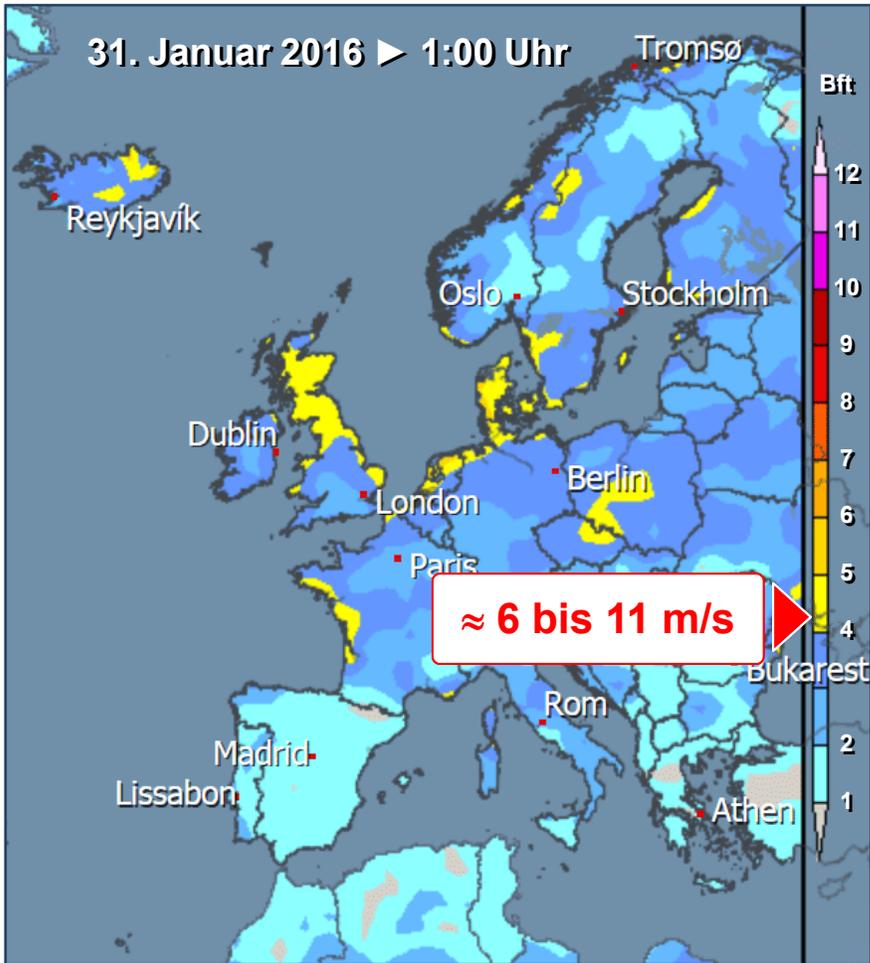




Quelle: ENTSO-E

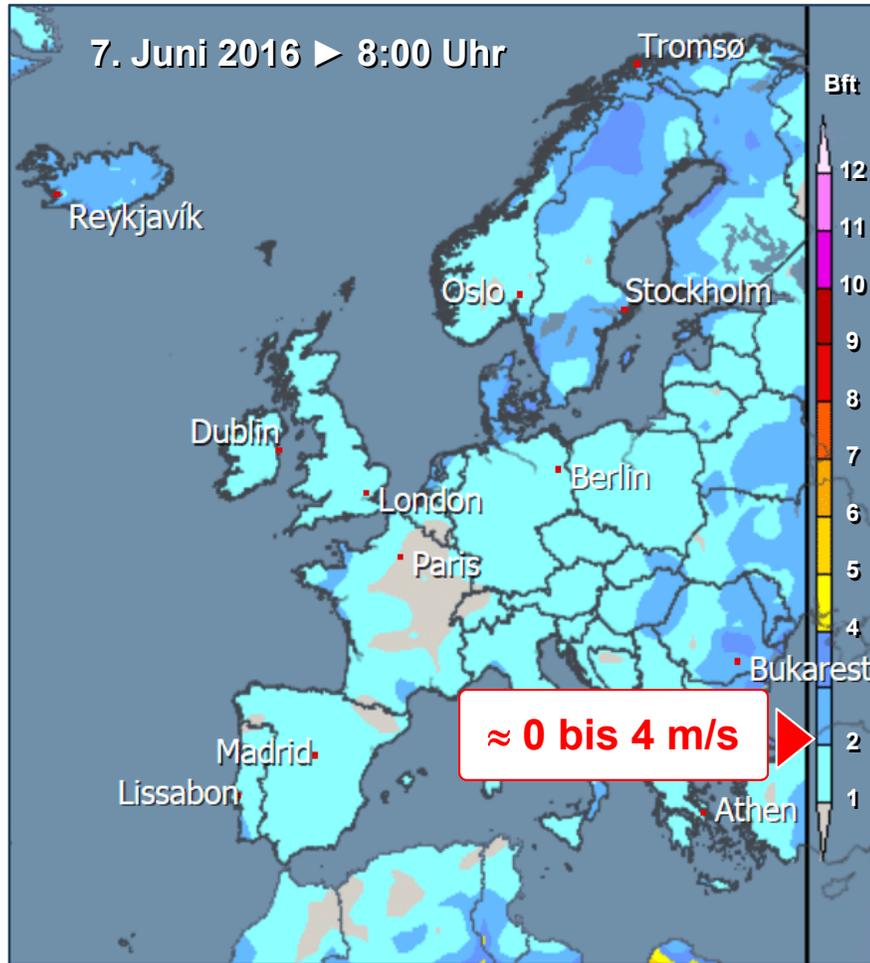


Frische Brise



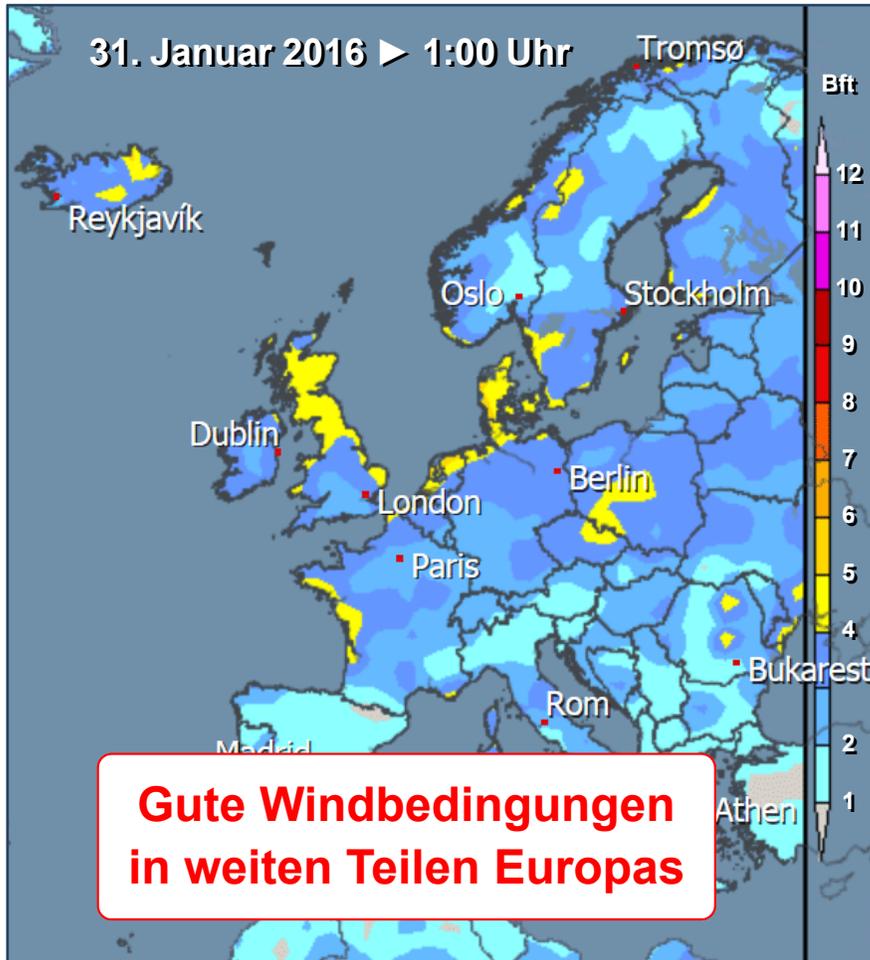
Quelle: www.wetter.info

Leichte Brise



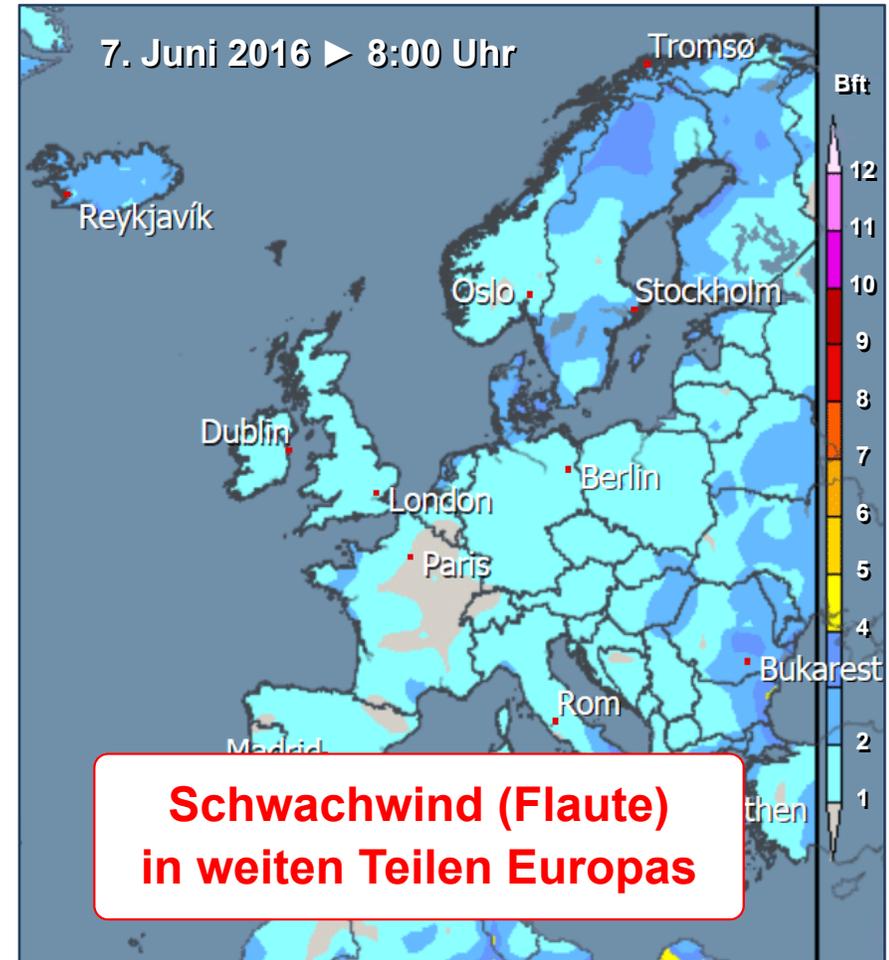
Quelle: www.wetter.info

Frische Brise



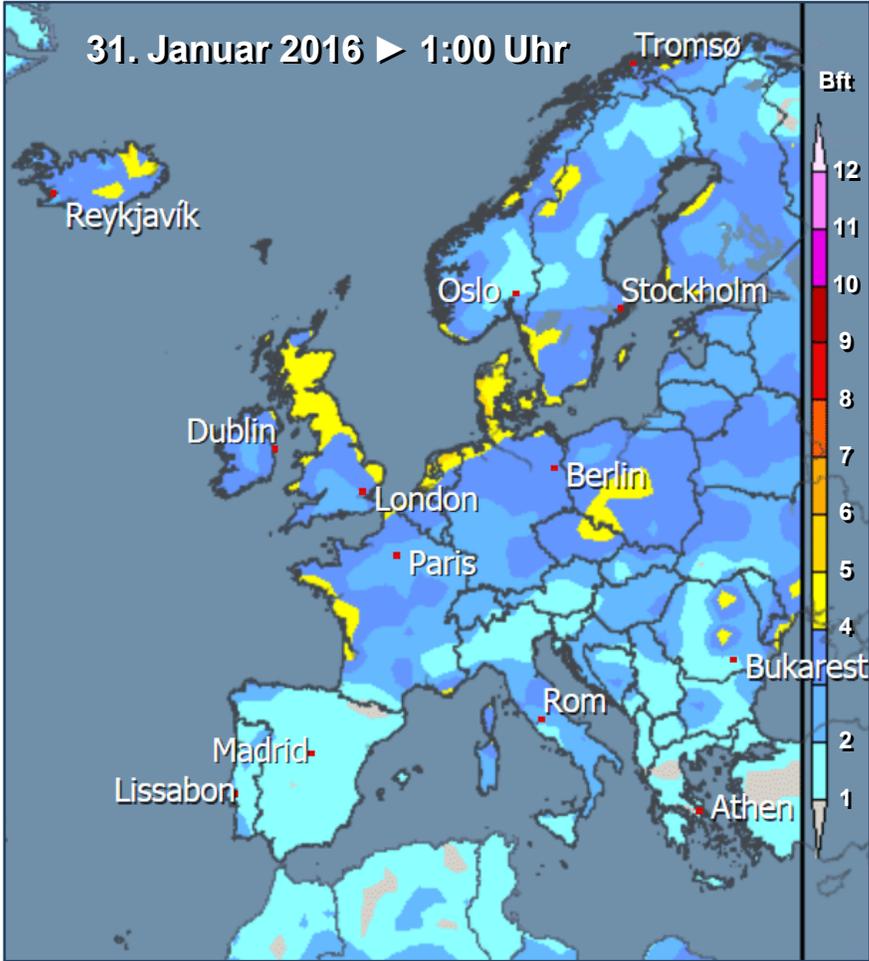
Quelle: www.wetter.info

Leichte Brise



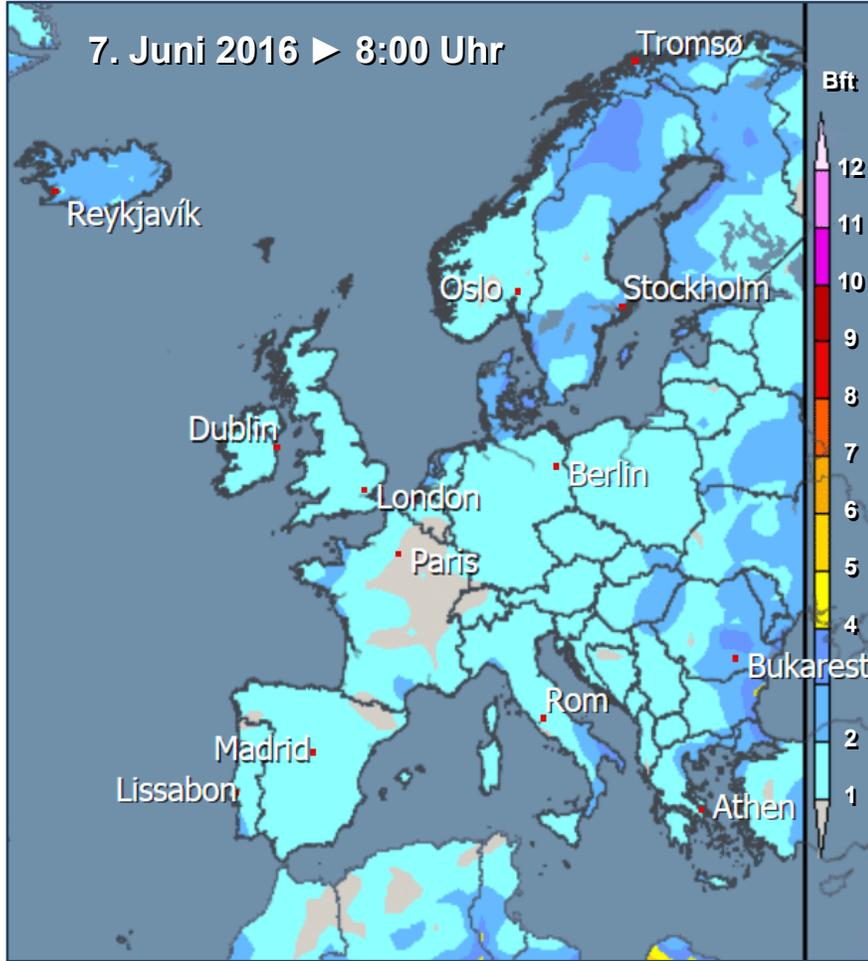
Quelle: www.wetter.info

Frische Brise

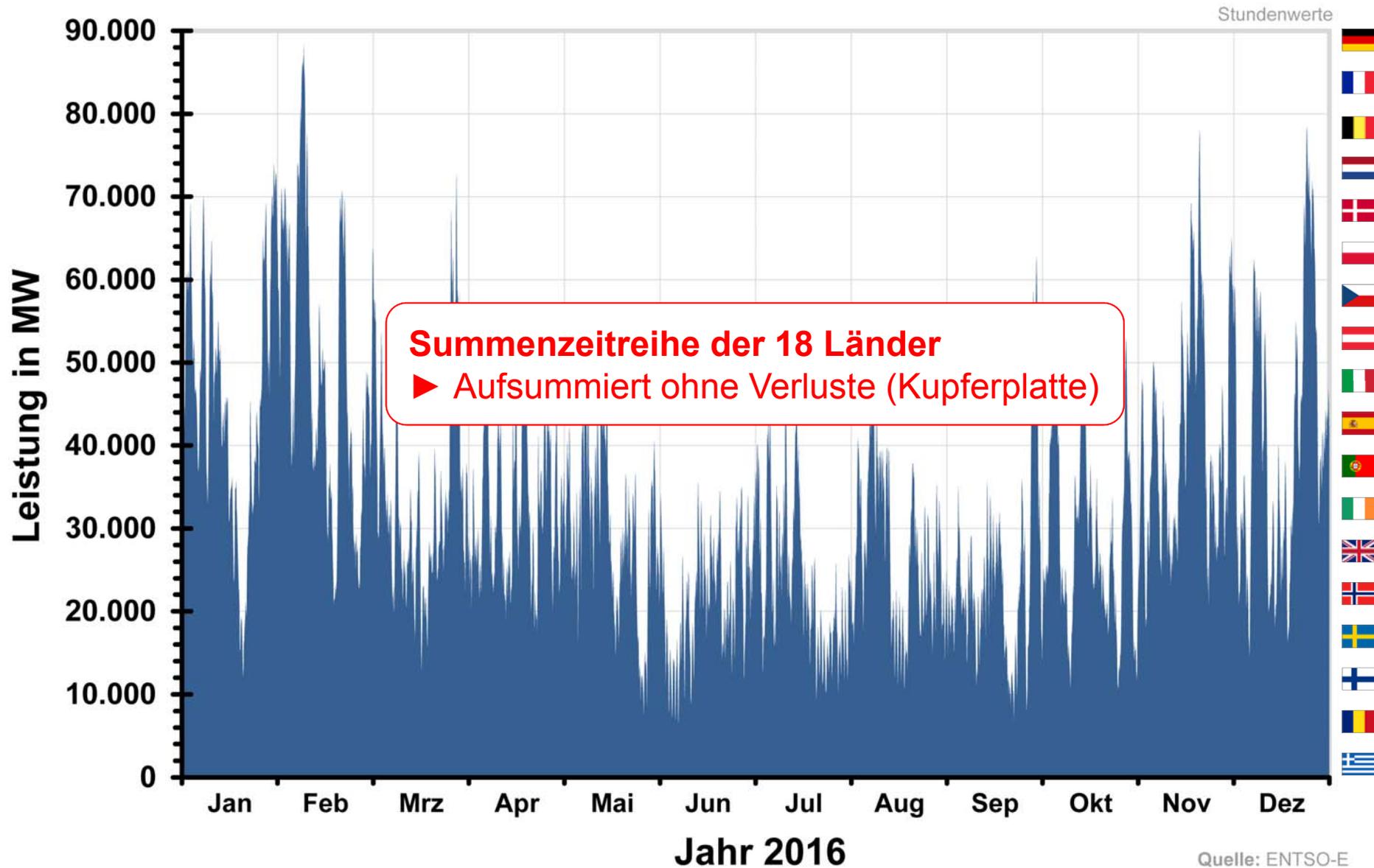


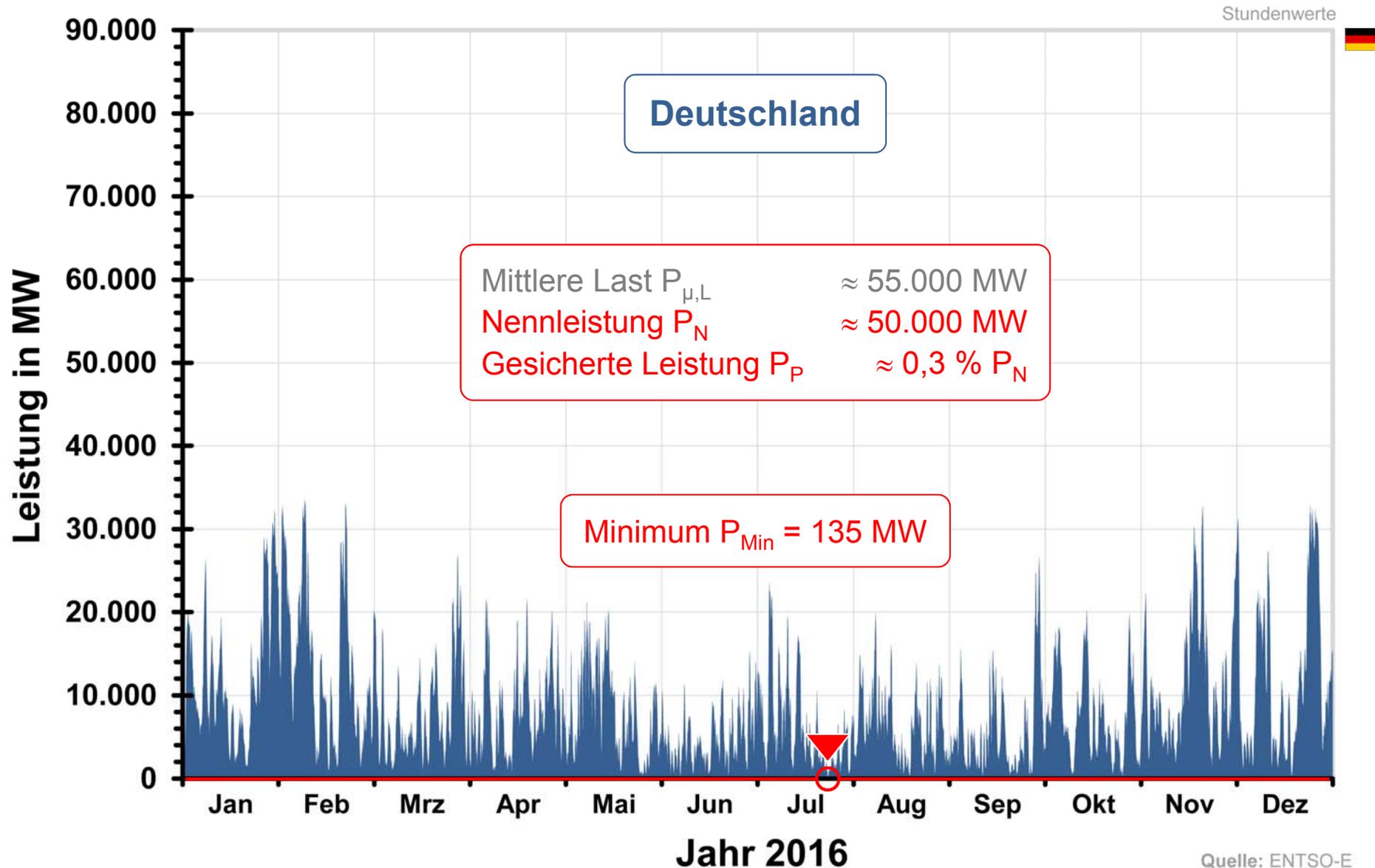
Quelle: www.wetter.info

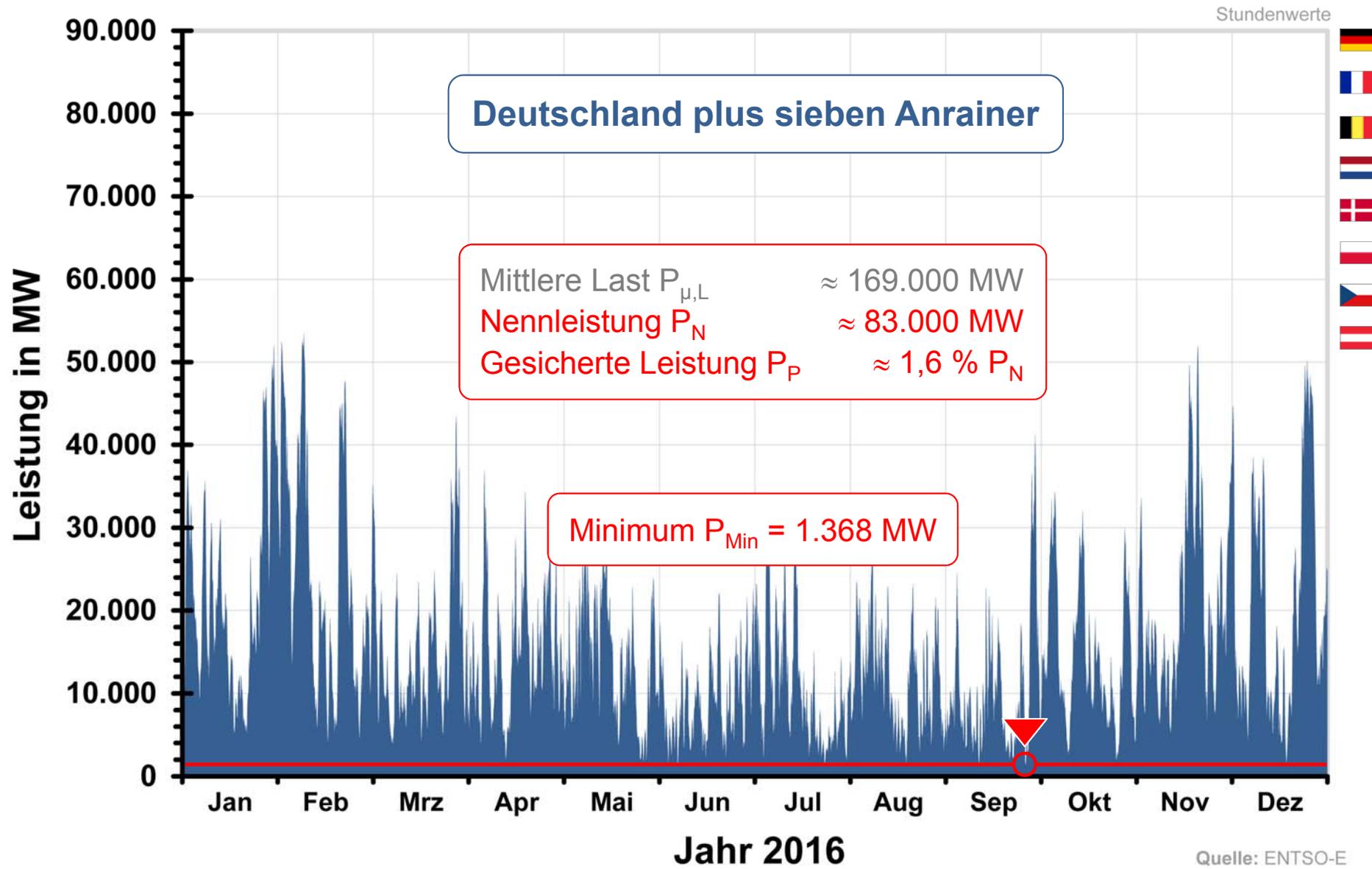
Leichte Brise

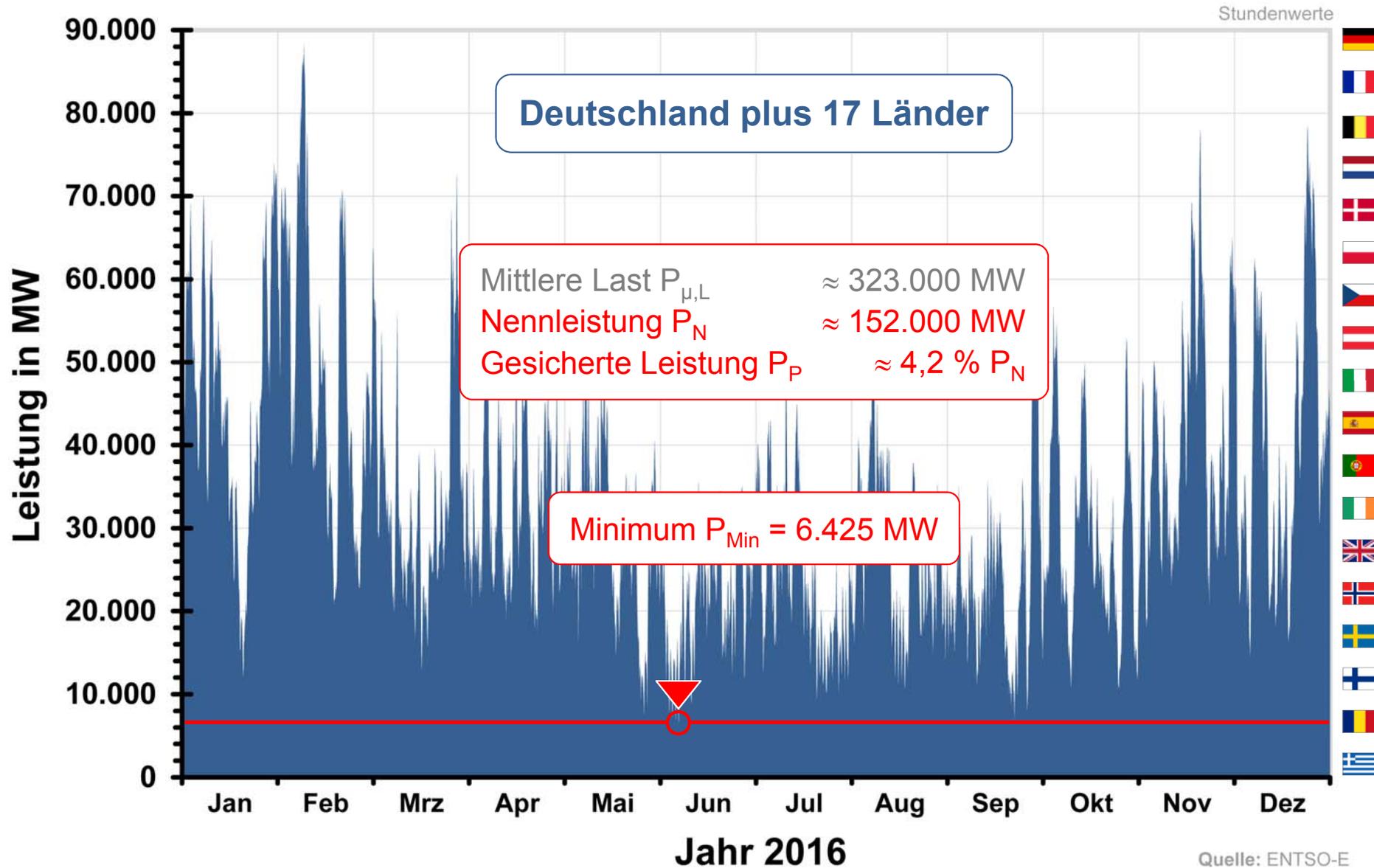


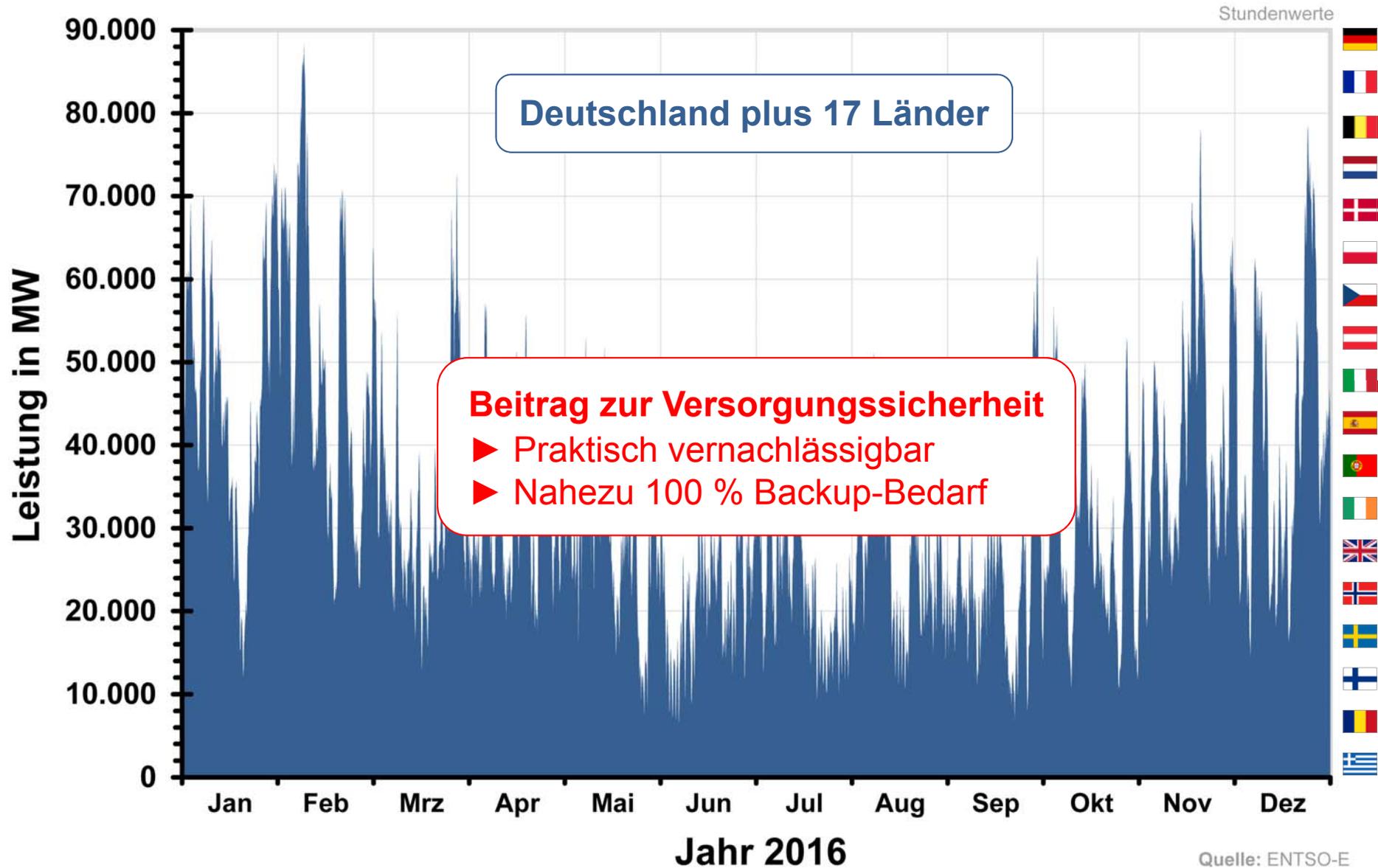
Quelle: www.wetter.info



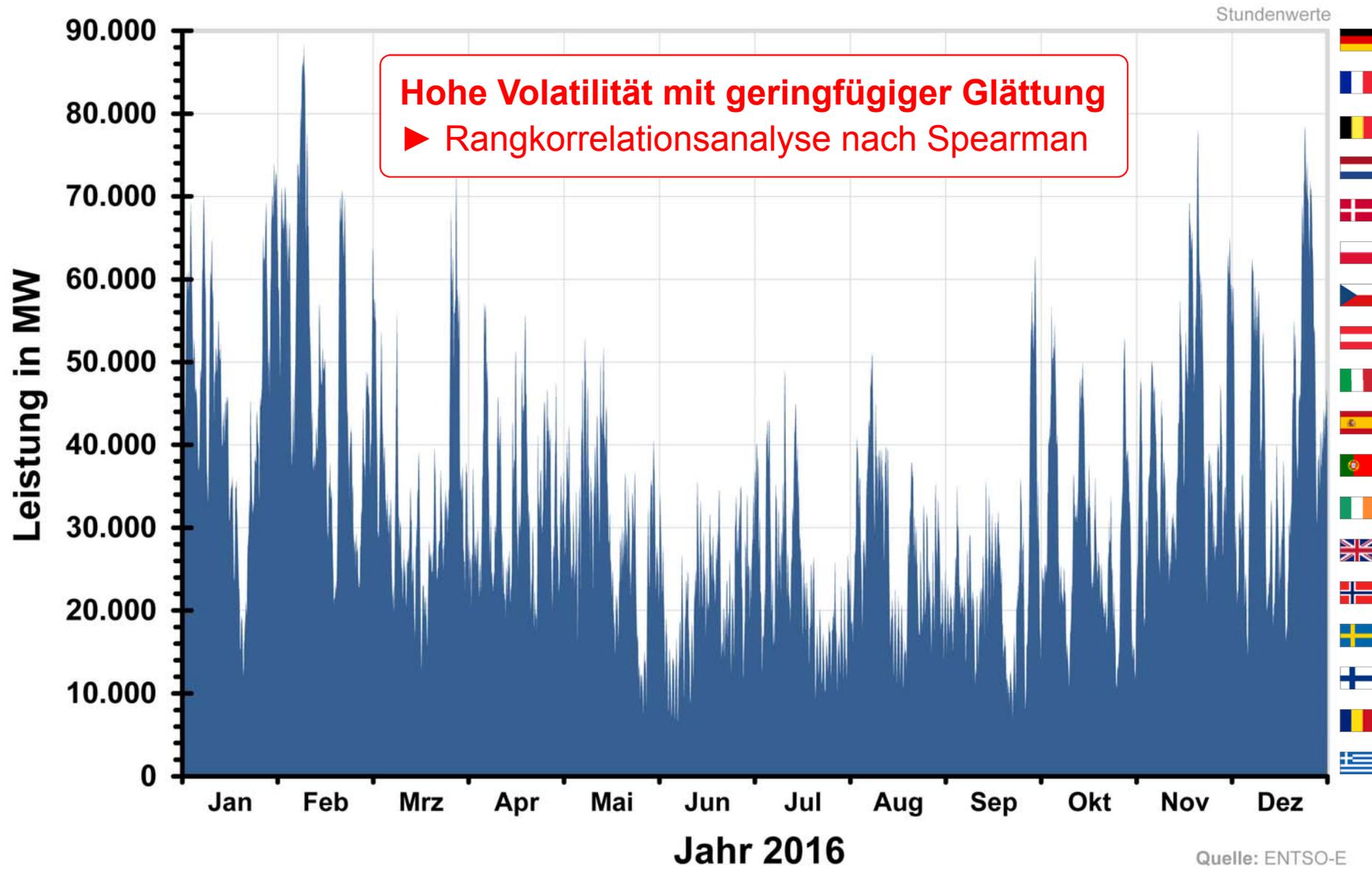








Europa: Räumliche Korrelation der Leistungszeitreihen



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
	8 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 Δx zwischen zwei Ländern

Vorgehensweise

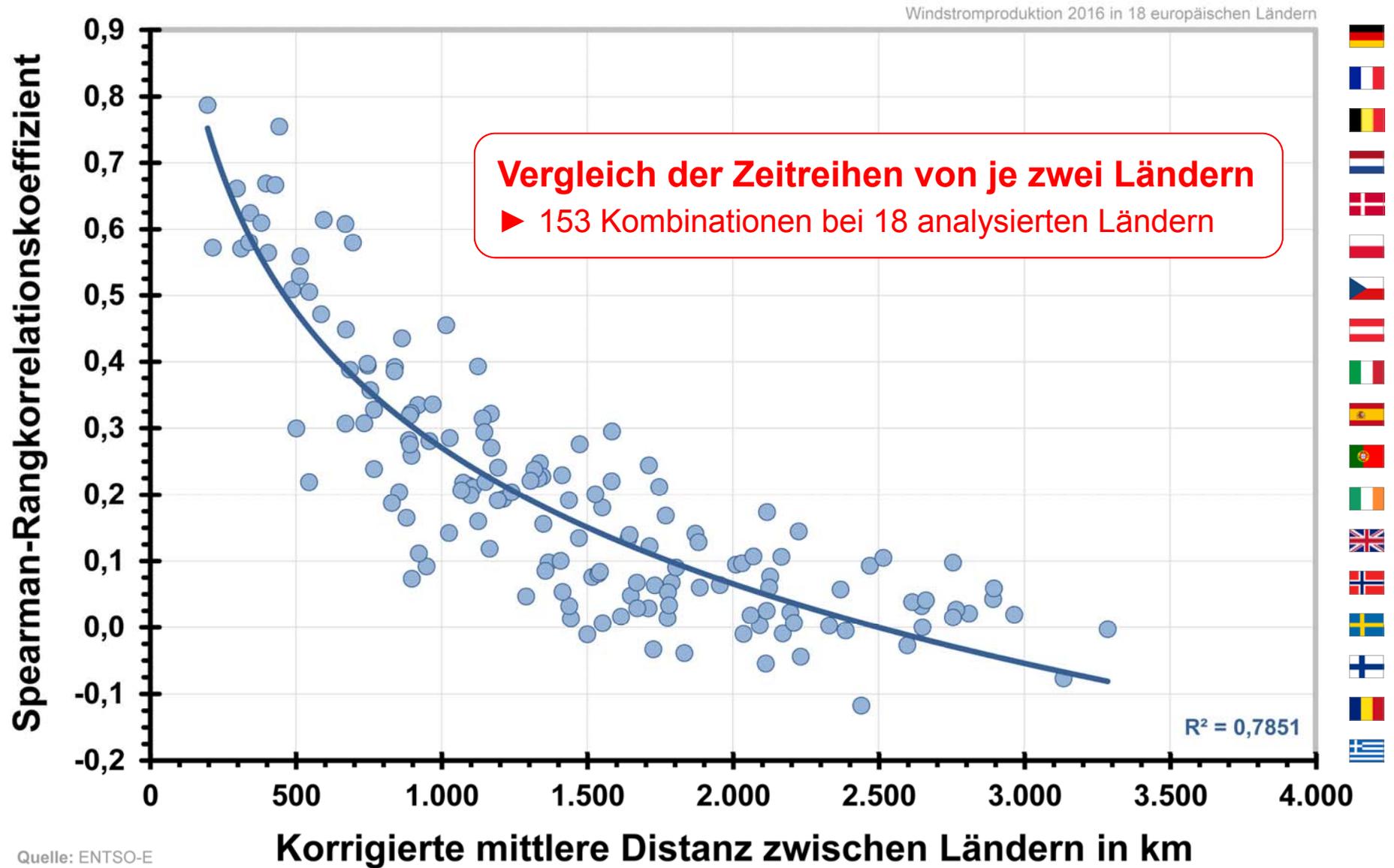
- Vergleich der Zeitreihen aller 18 Länder untereinander
- Anzahl N an Kombinationen bei k = 18 Ländern:

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

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	1.098 MW
8.468 MW	964 MW
8.431 MW	830 MW
8.394 MW	696 MW
8.357 MW	562 MW
8.320 MW	428 MW
8.283 MW	294 MW
8.246 MW	160 MW
8.209 MW	26 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

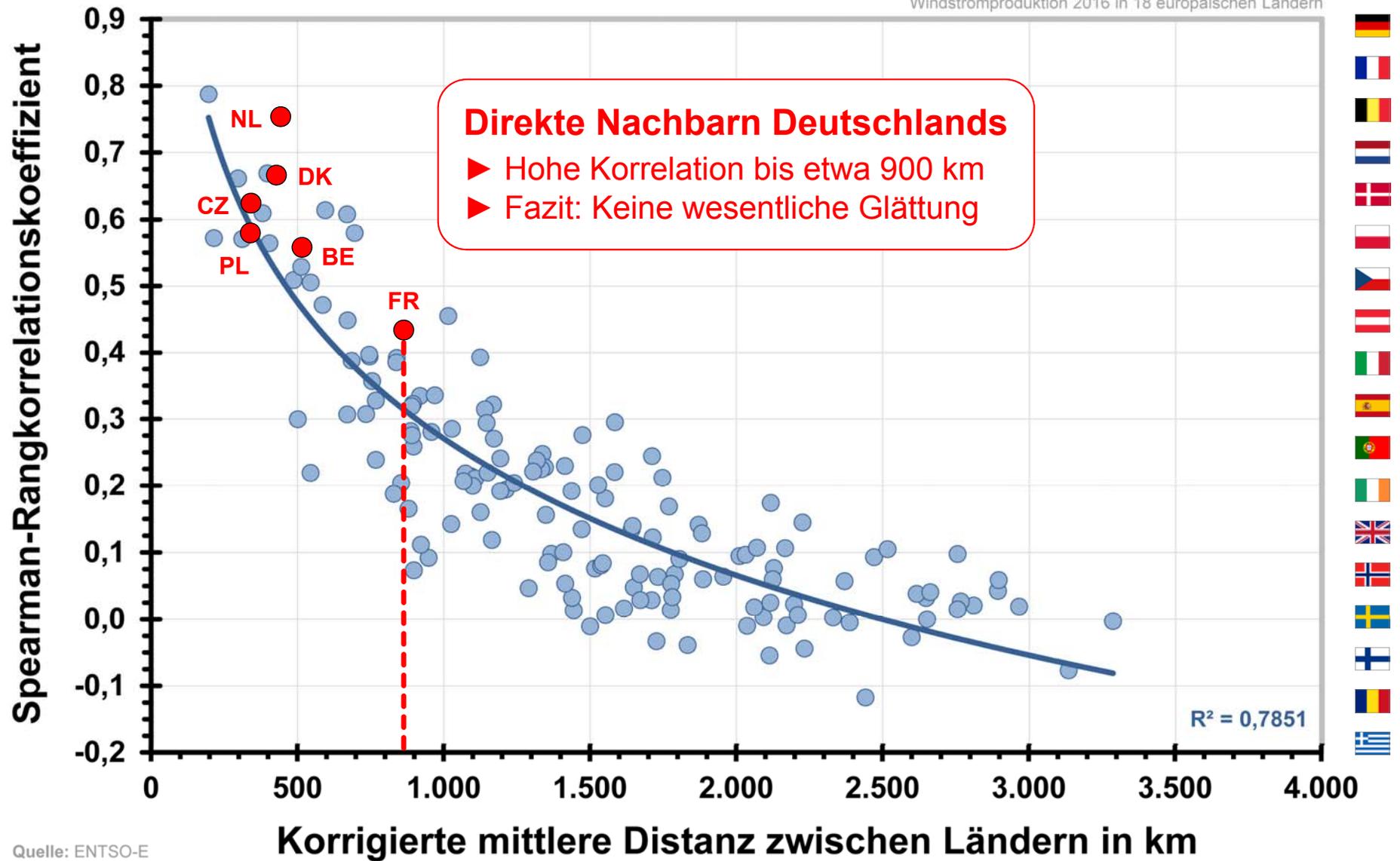
Beispiel

Europa: Räumliche Korrelation der Leistungszeitreihen

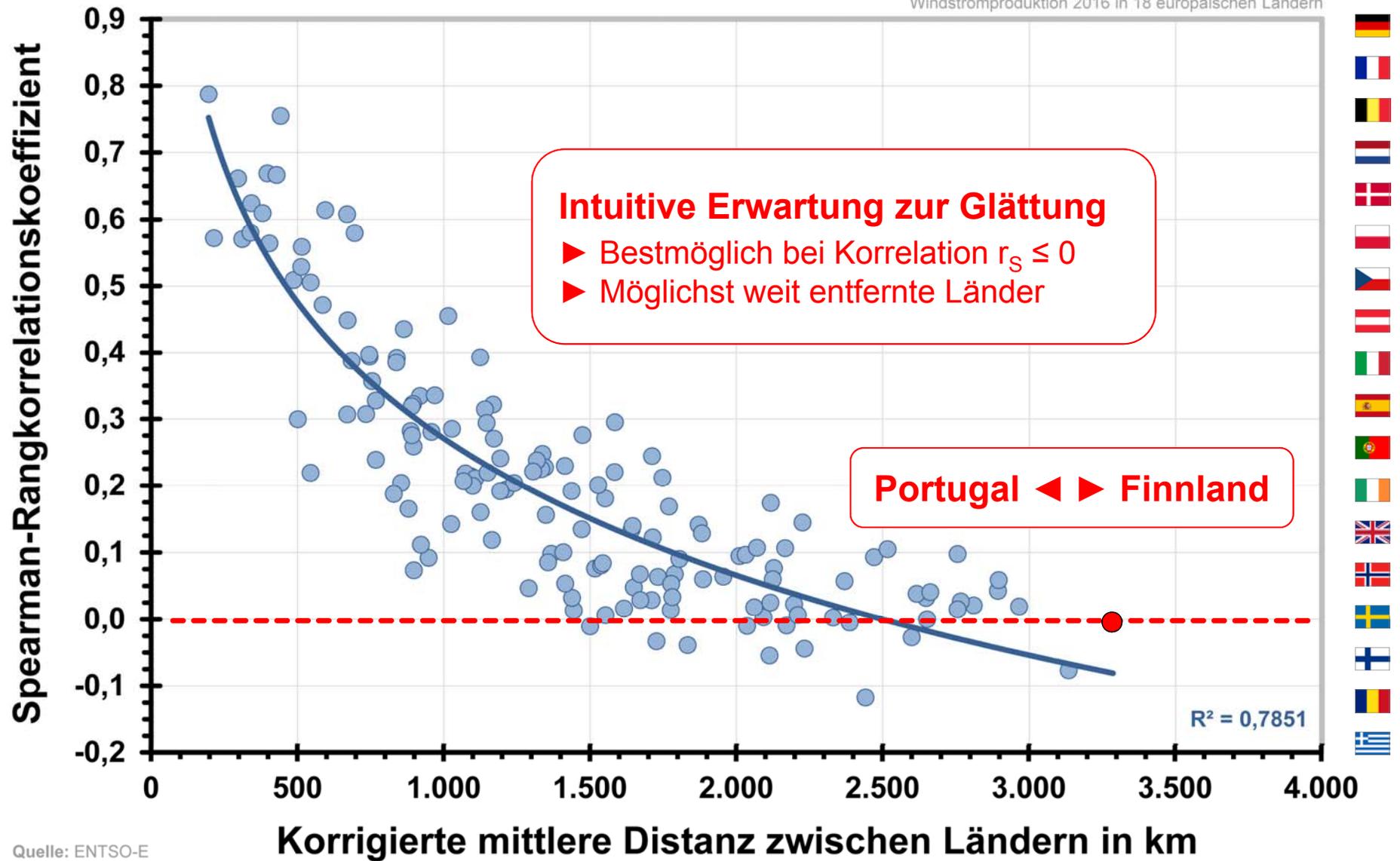


Quelle: ENTSO-E

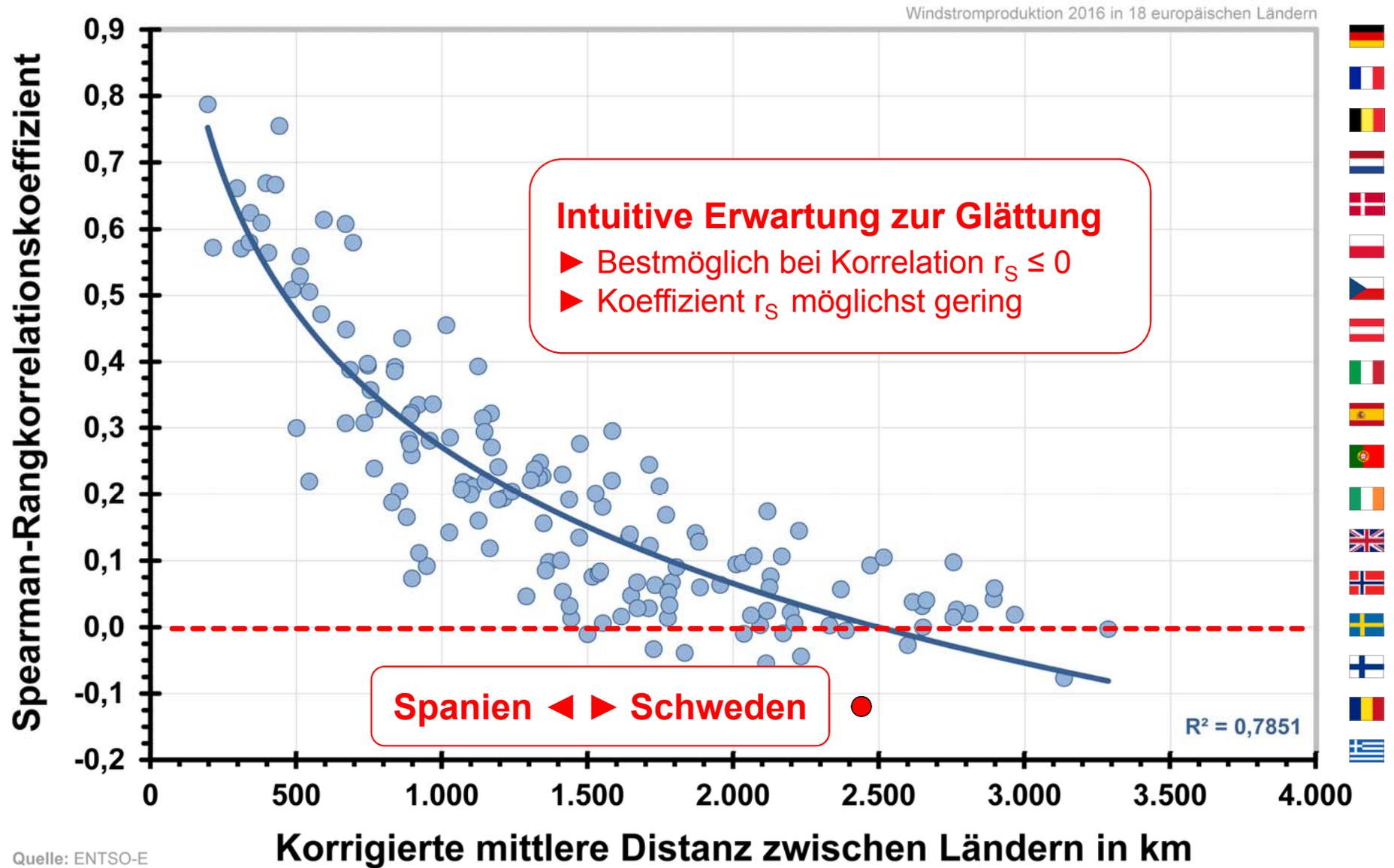
Europa: Räumliche Korrelation der Leistungszeitreihen

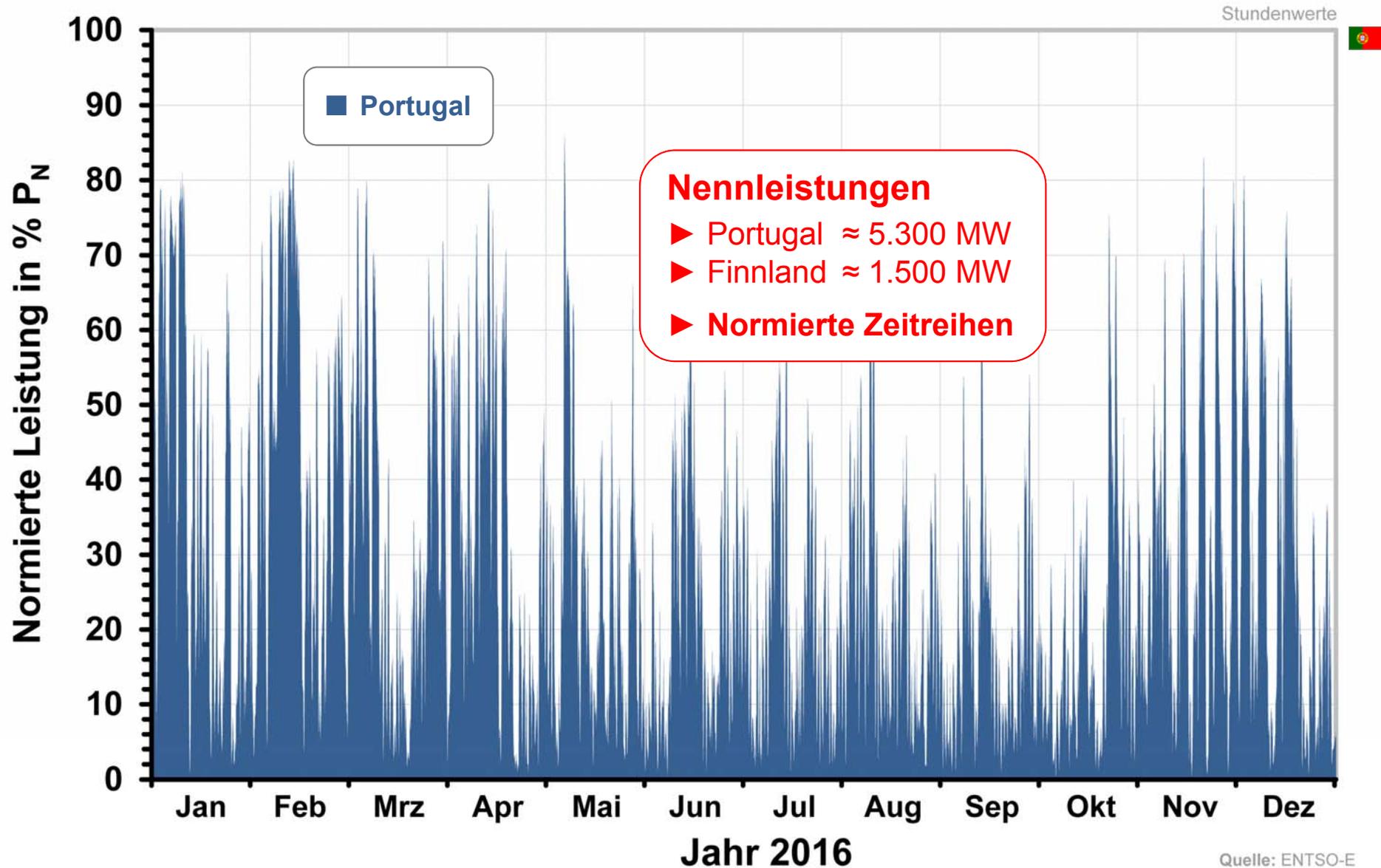


Europa: Räumliche Korrelation der Leistungszeitreihen

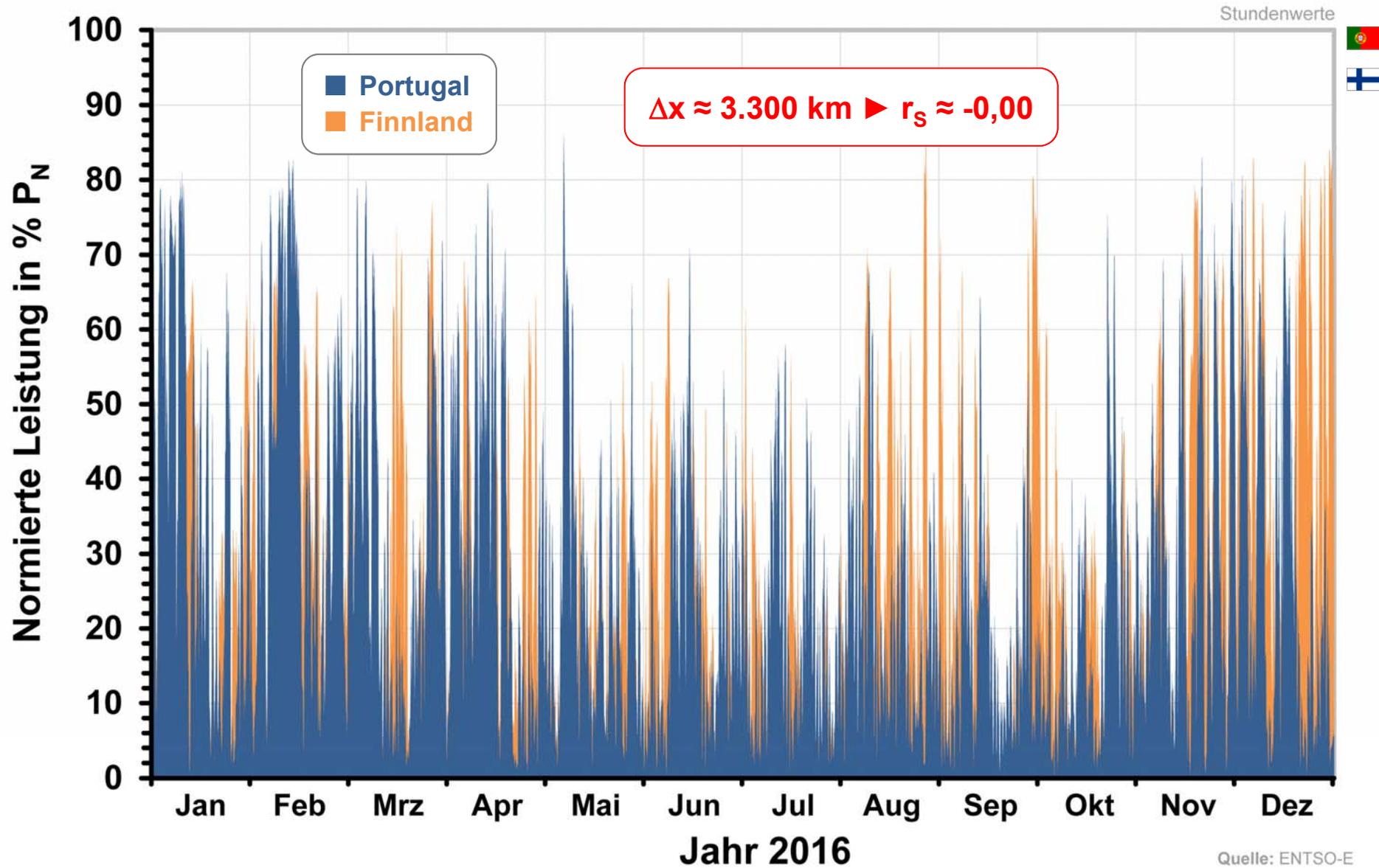


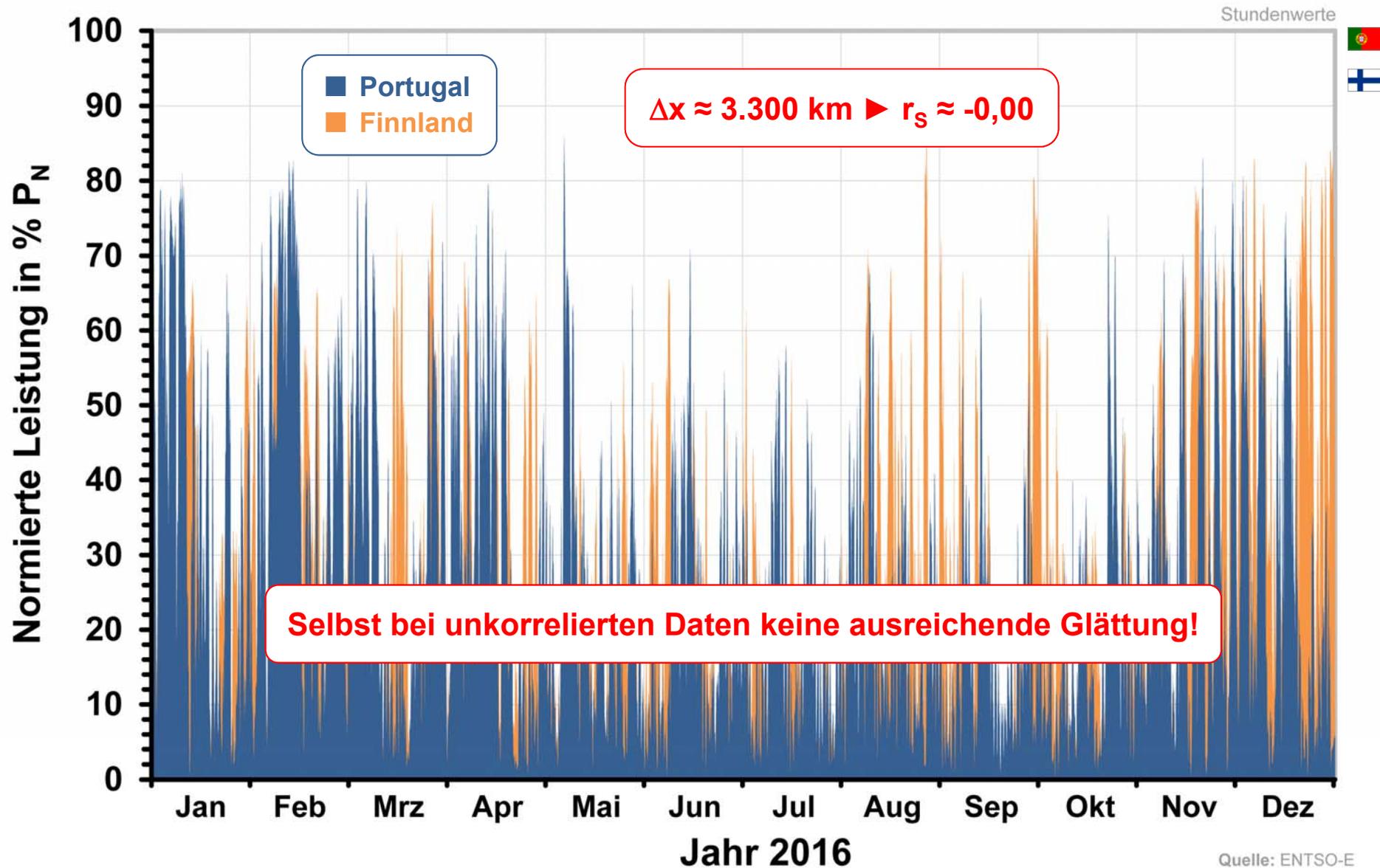
Europa: Räumliche Korrelation der Leistungszeitreihen

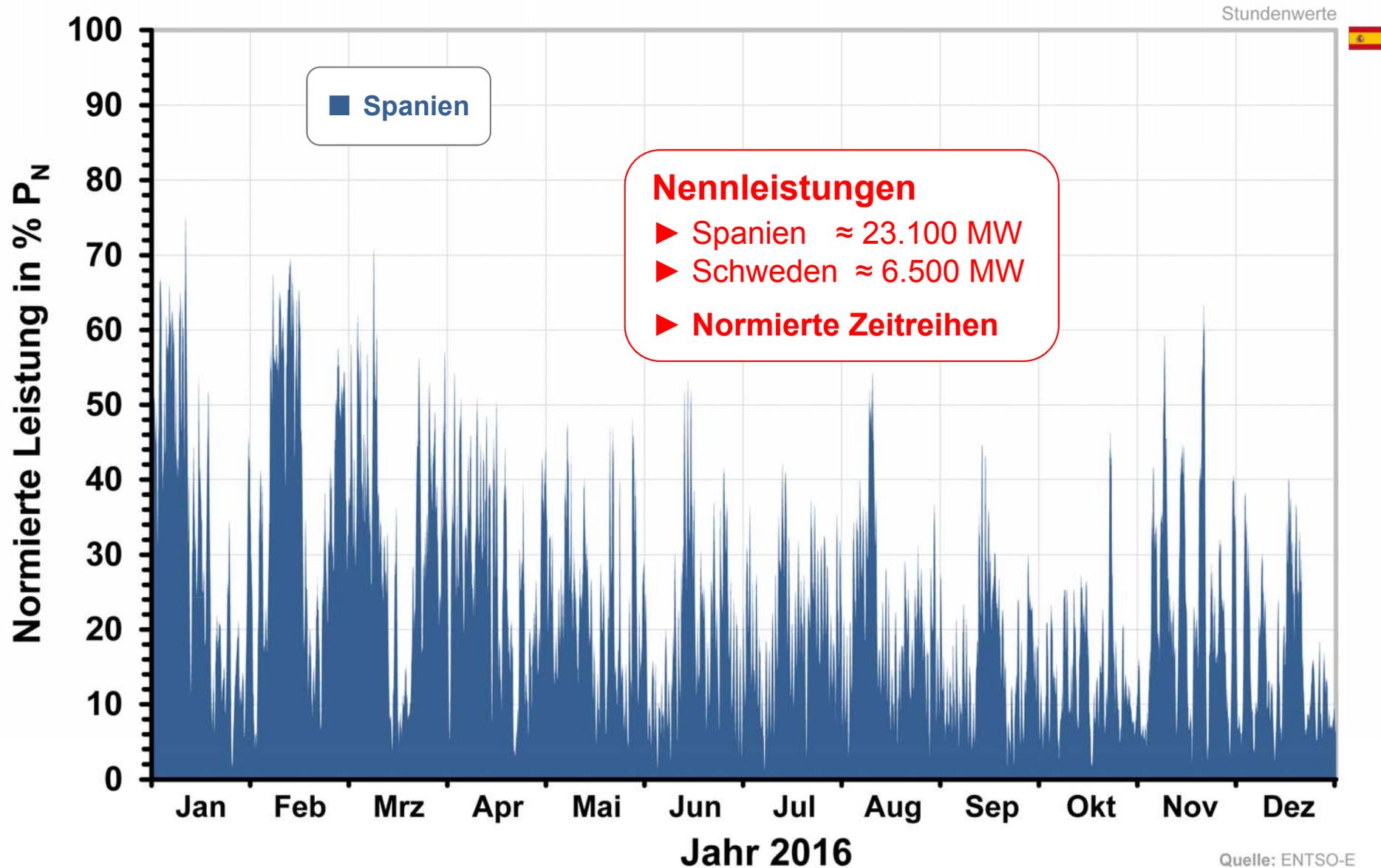


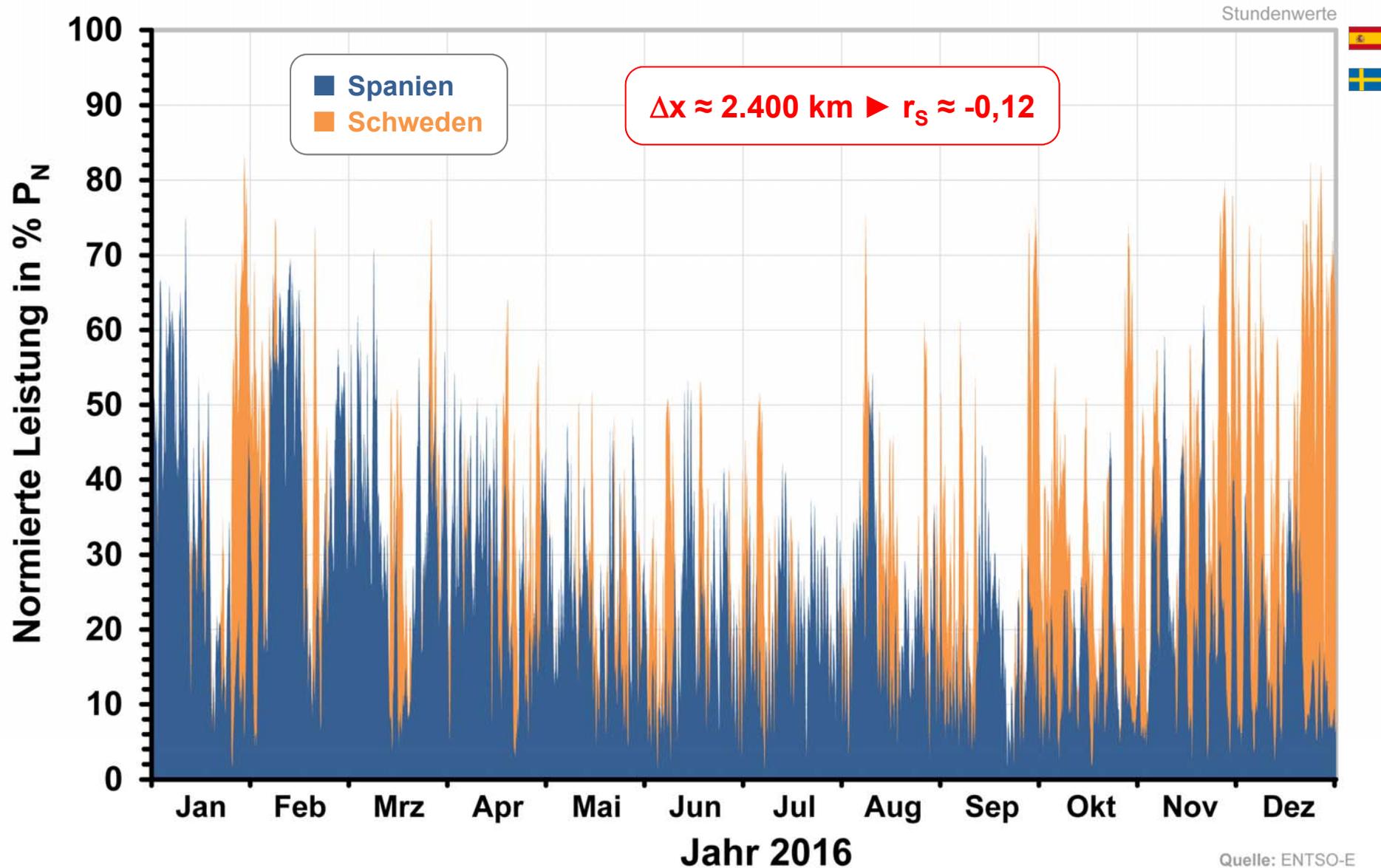


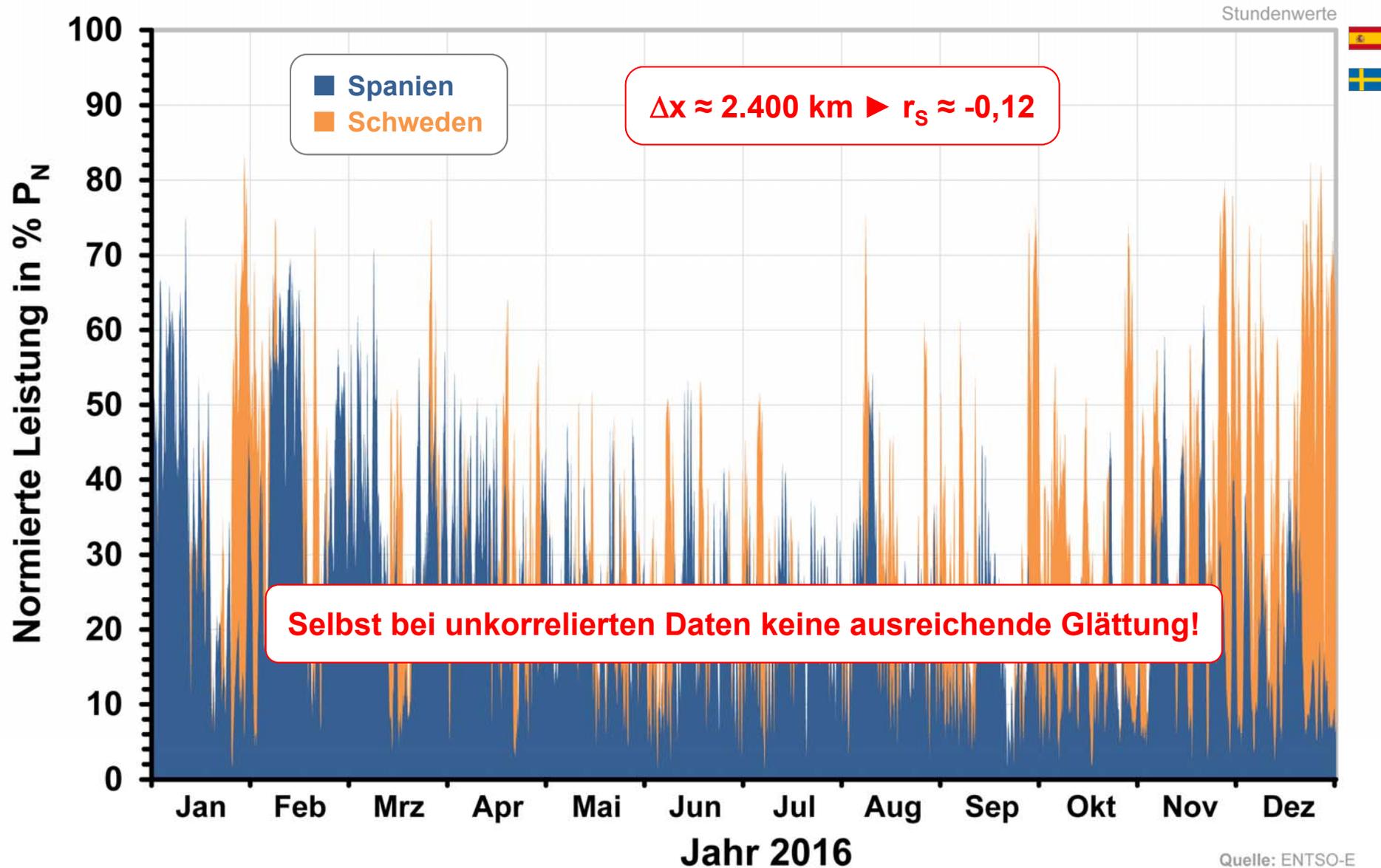
Quelle: ENTSO-E



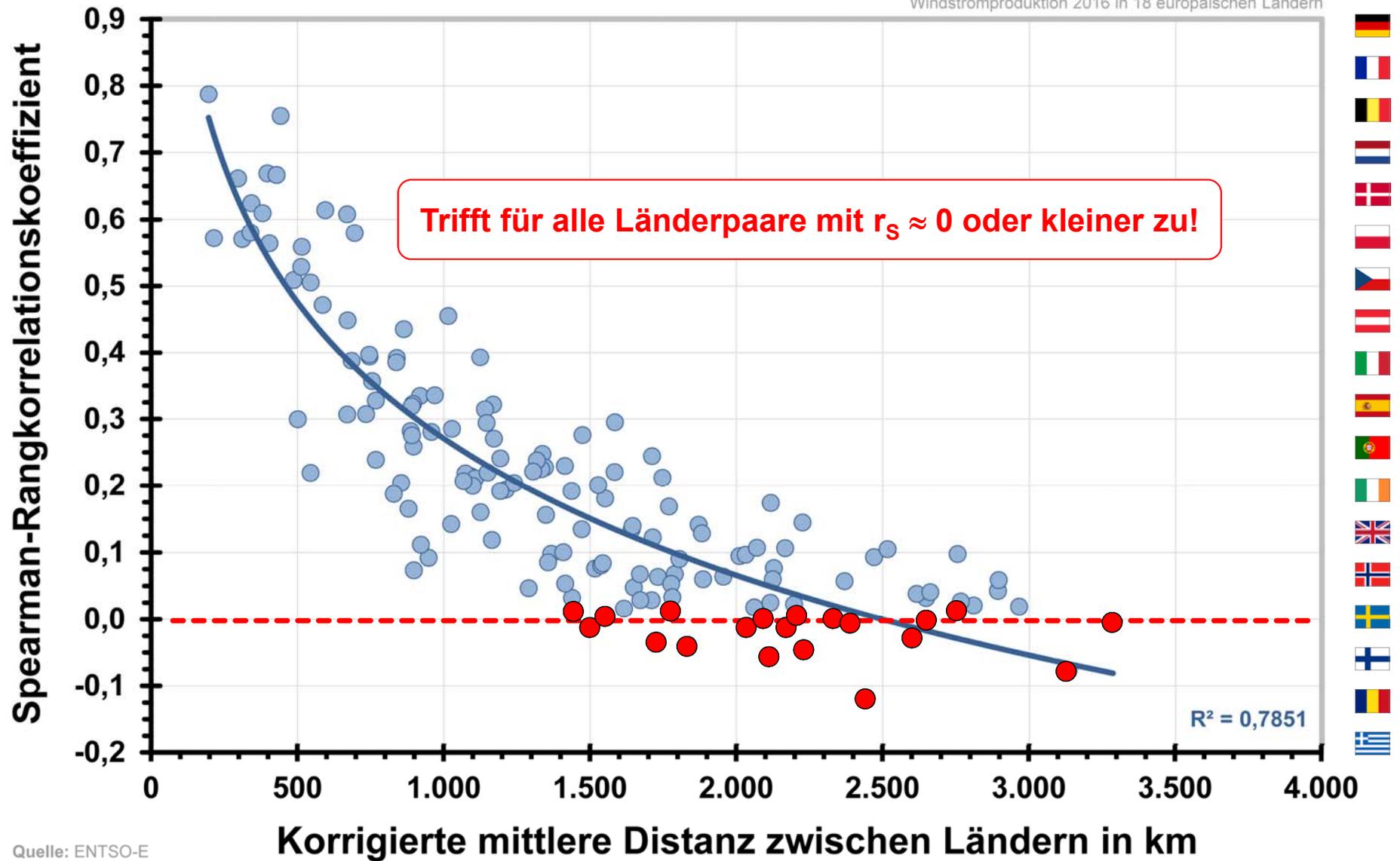




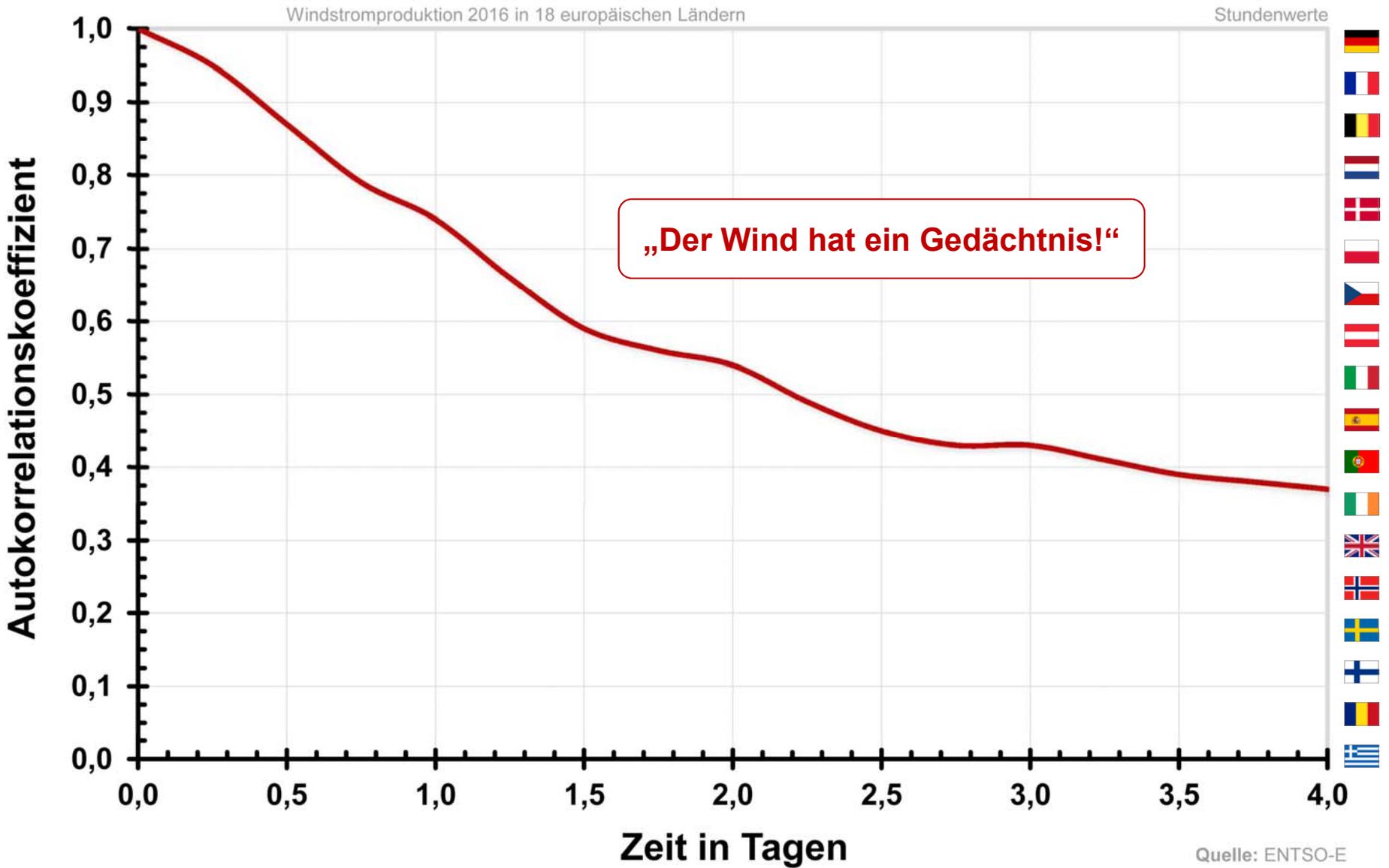


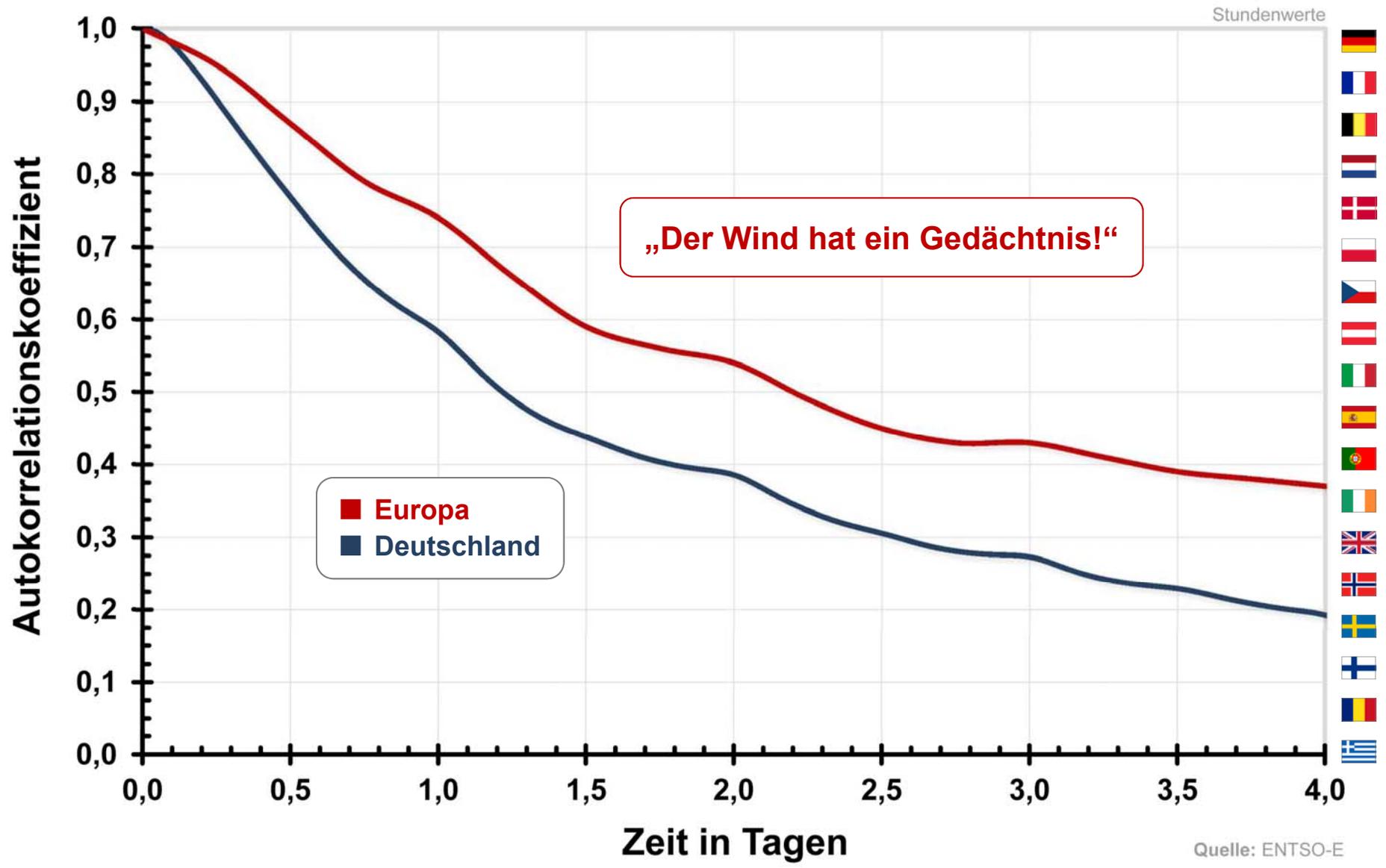


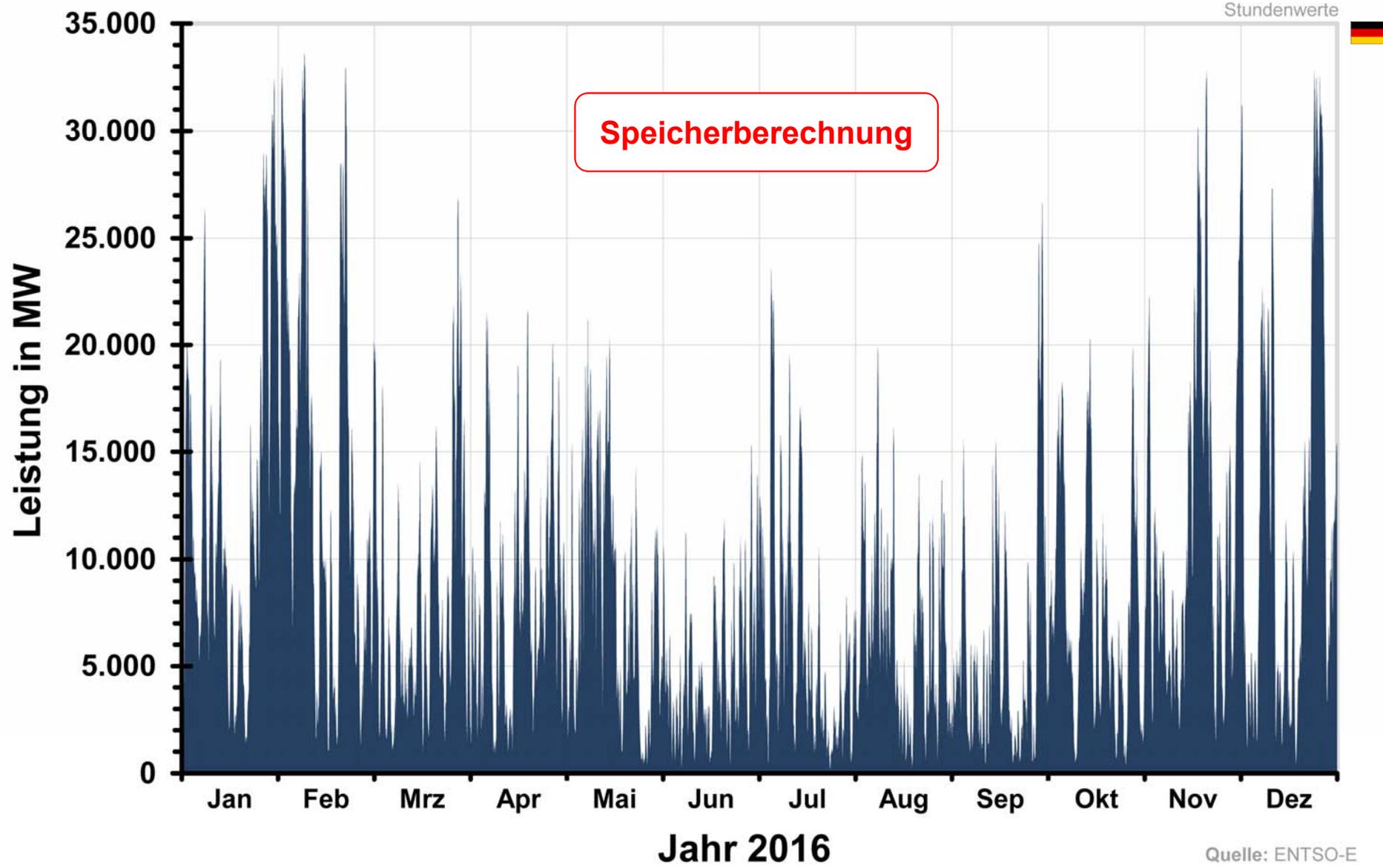
Europa: Räumliche Korrelation der Leistungszeitreihen



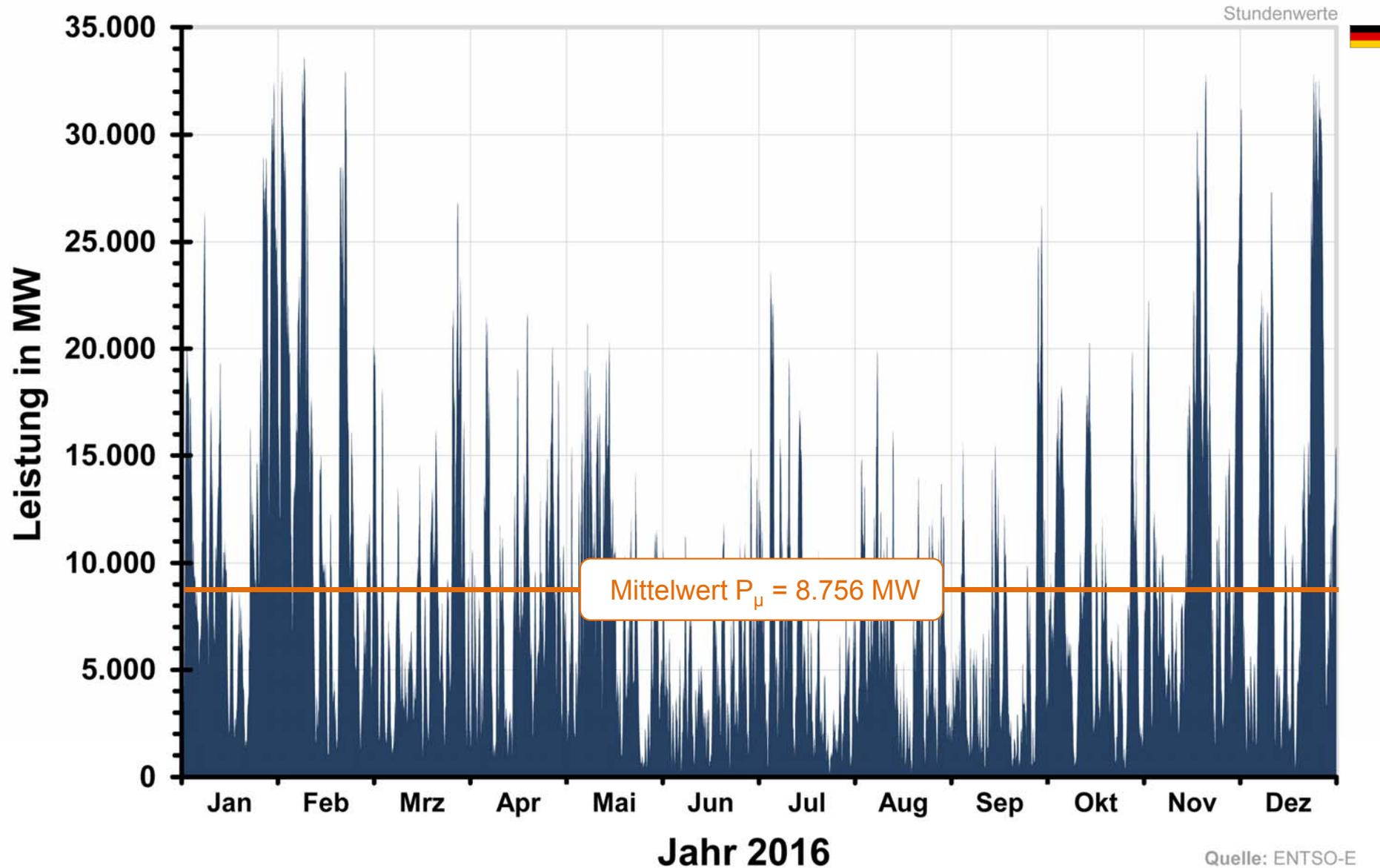
Quelle: ENTSO-E



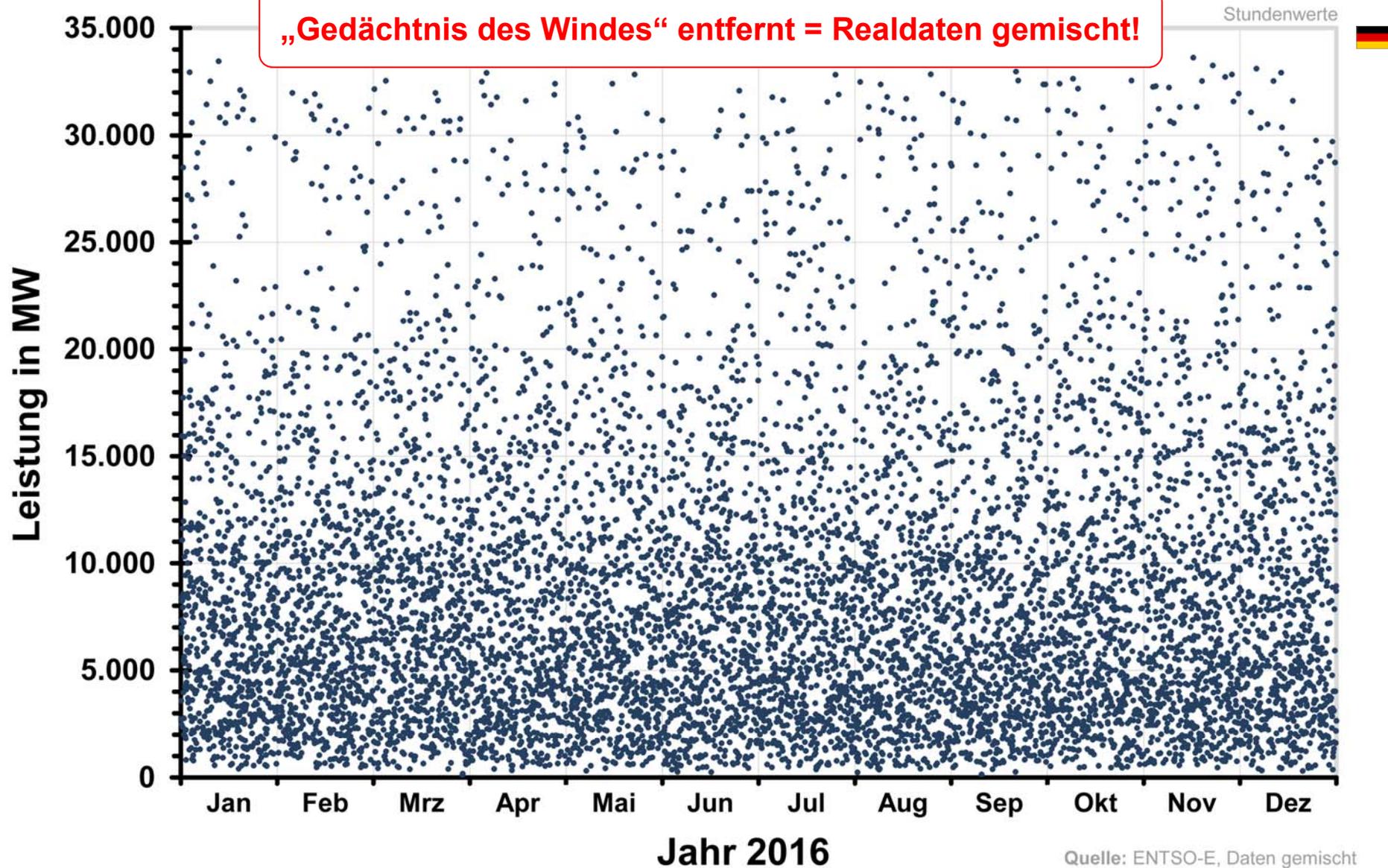


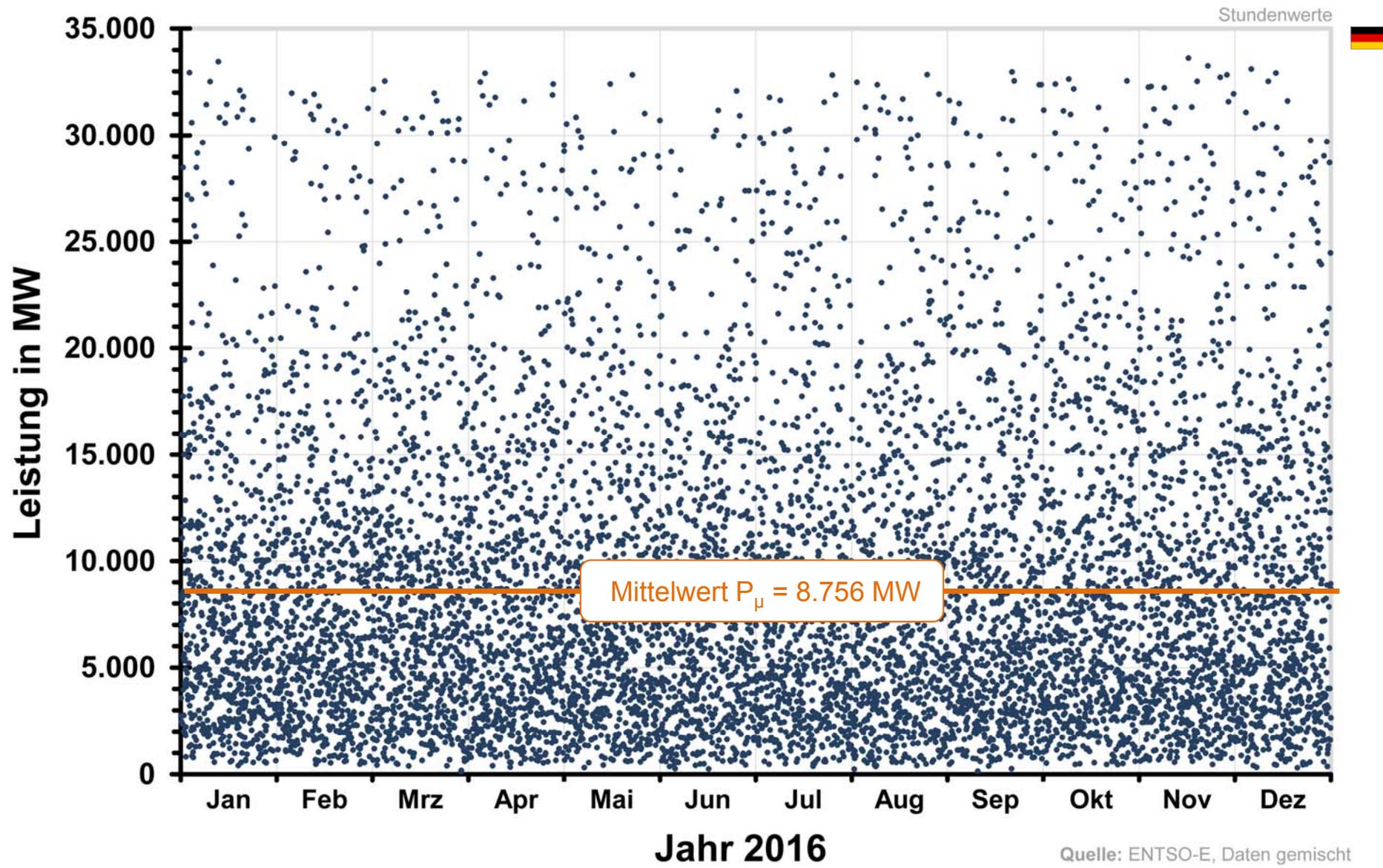


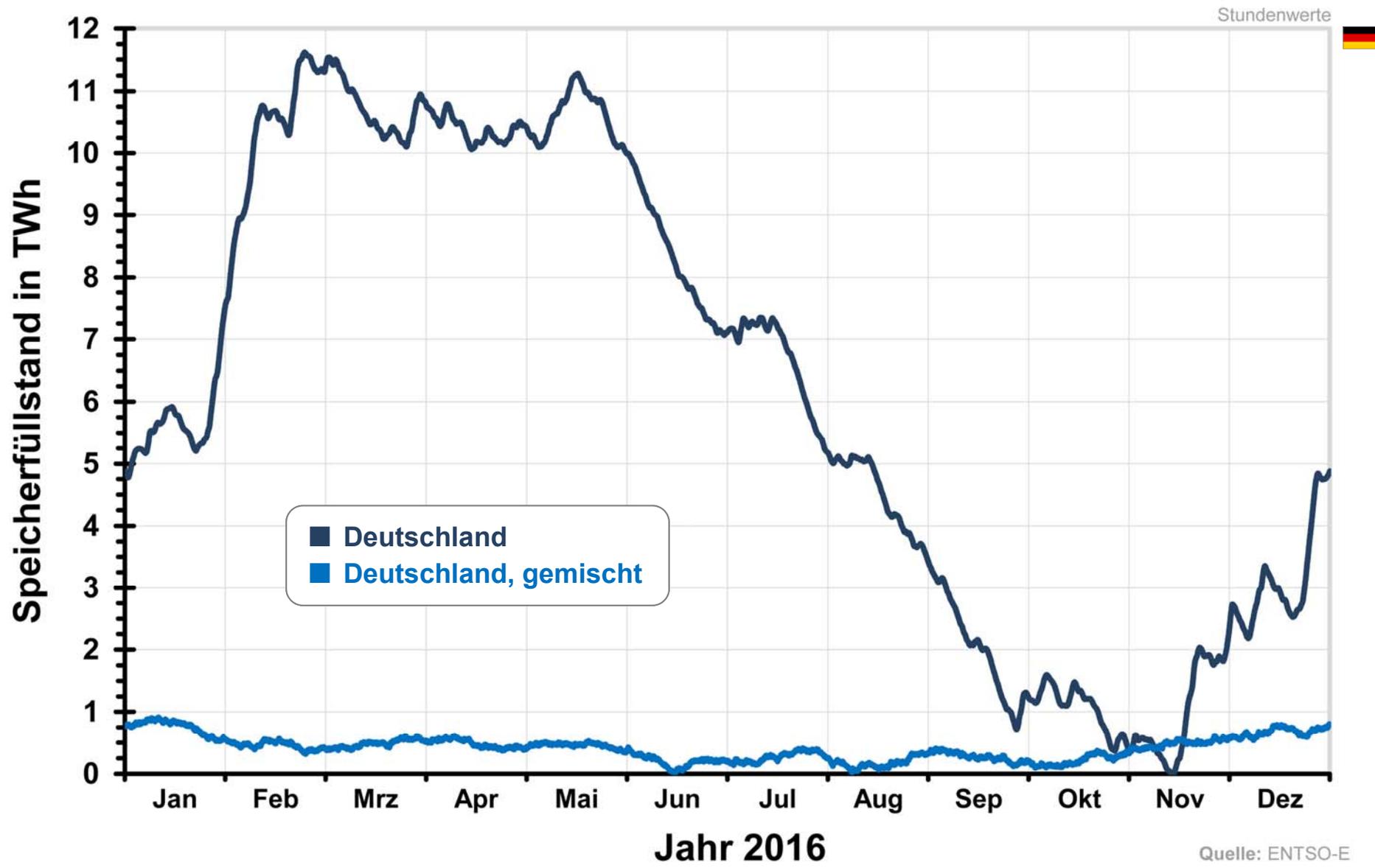
Quelle: ENTSO-E



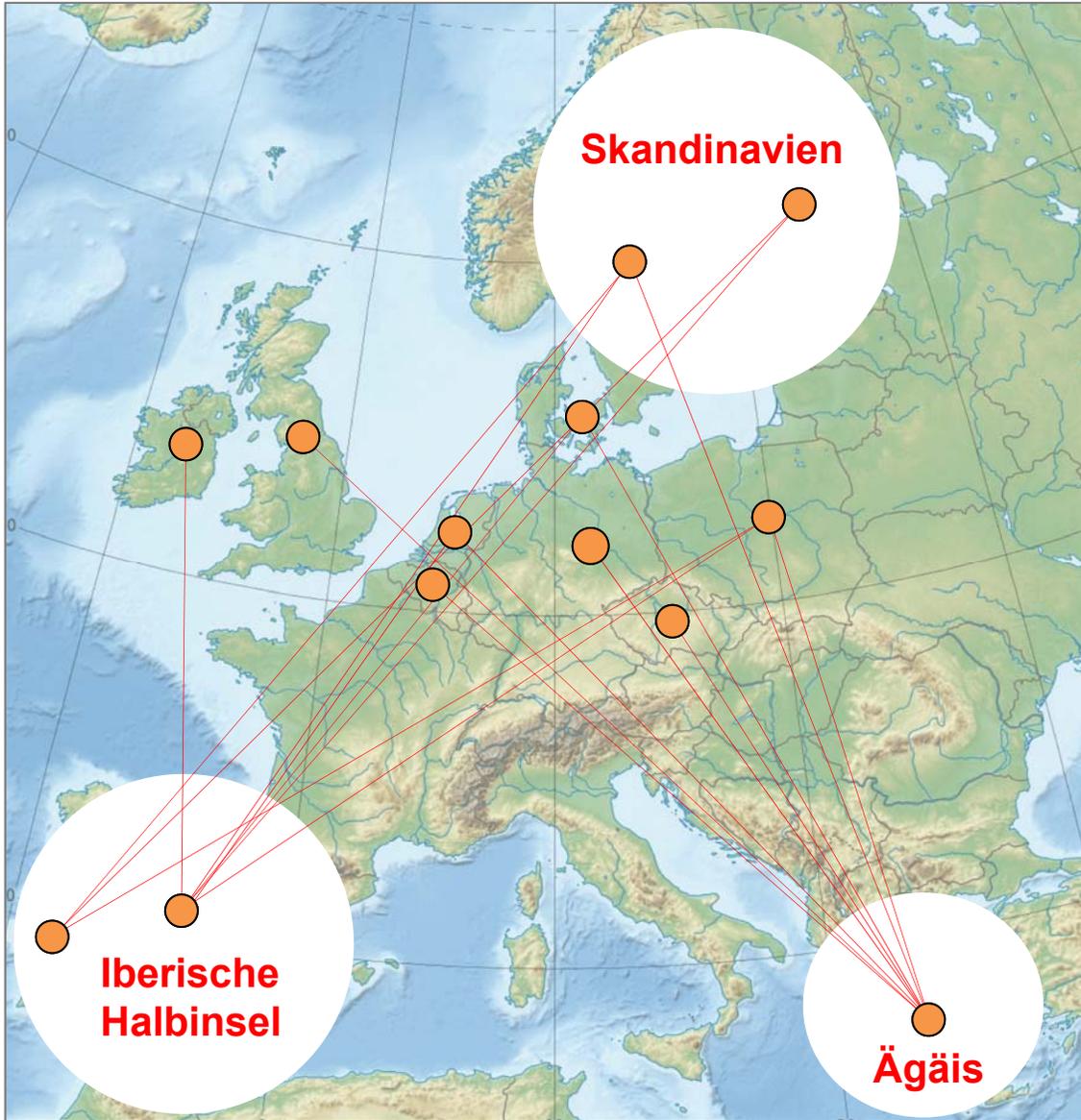




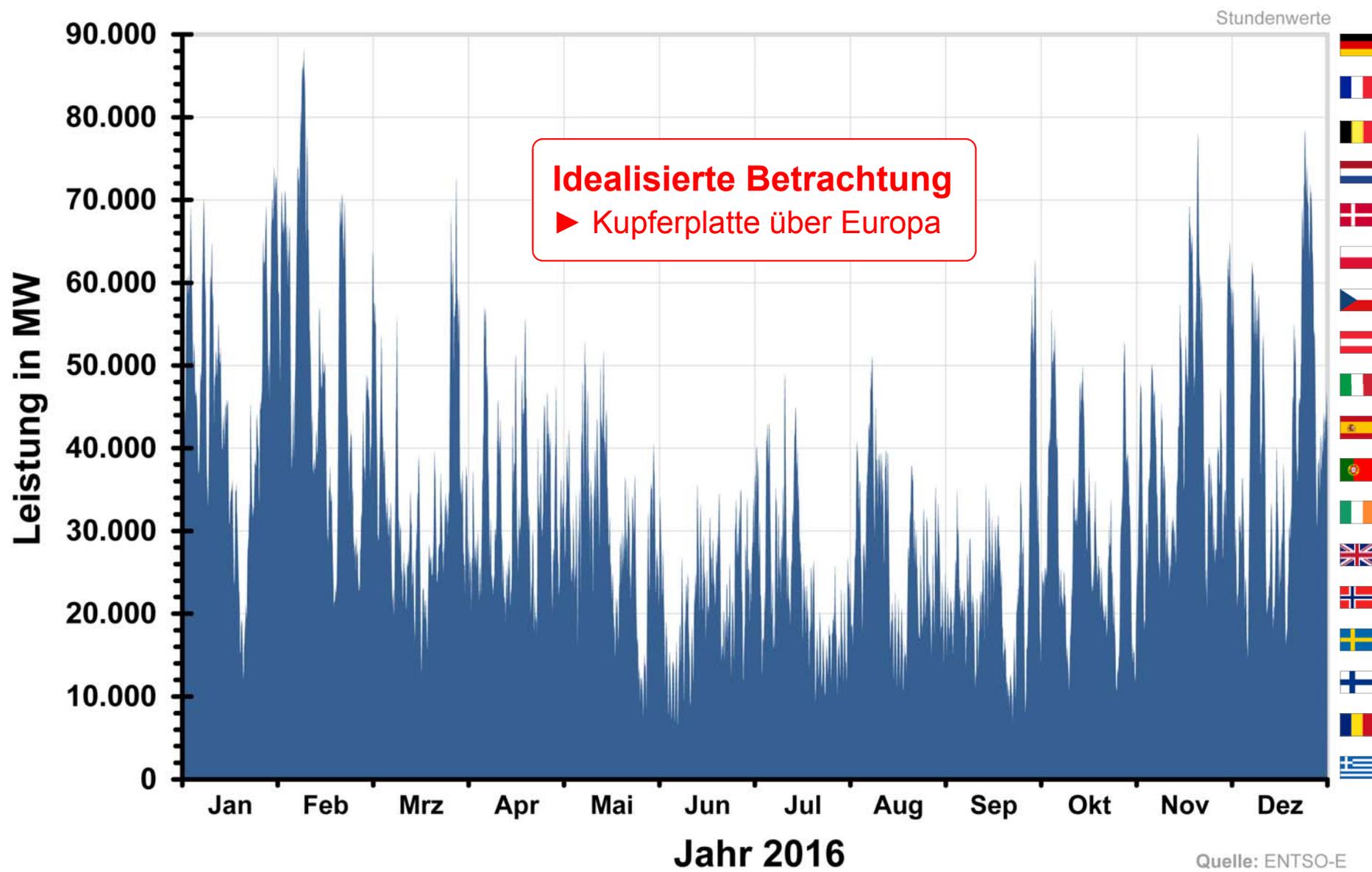


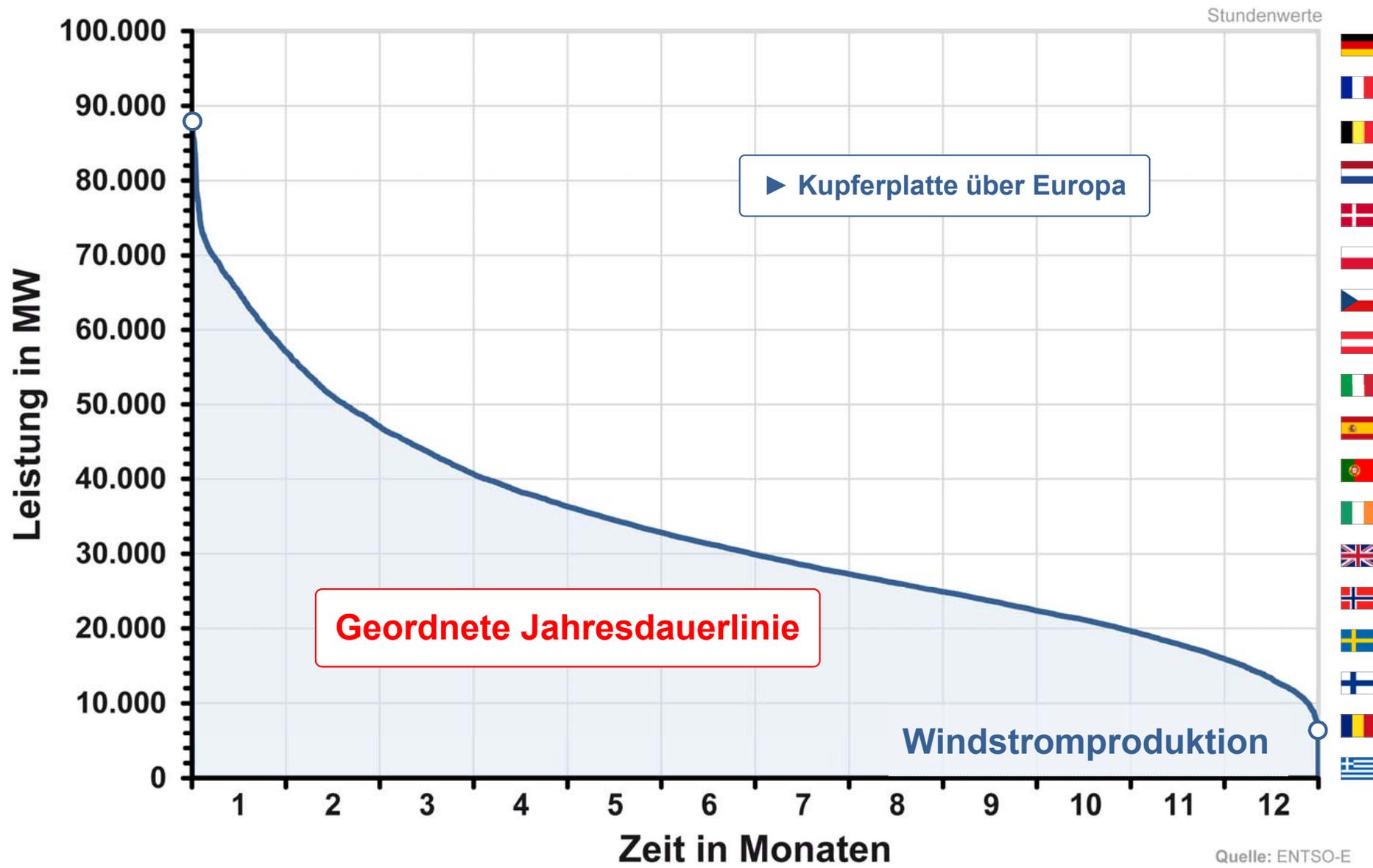


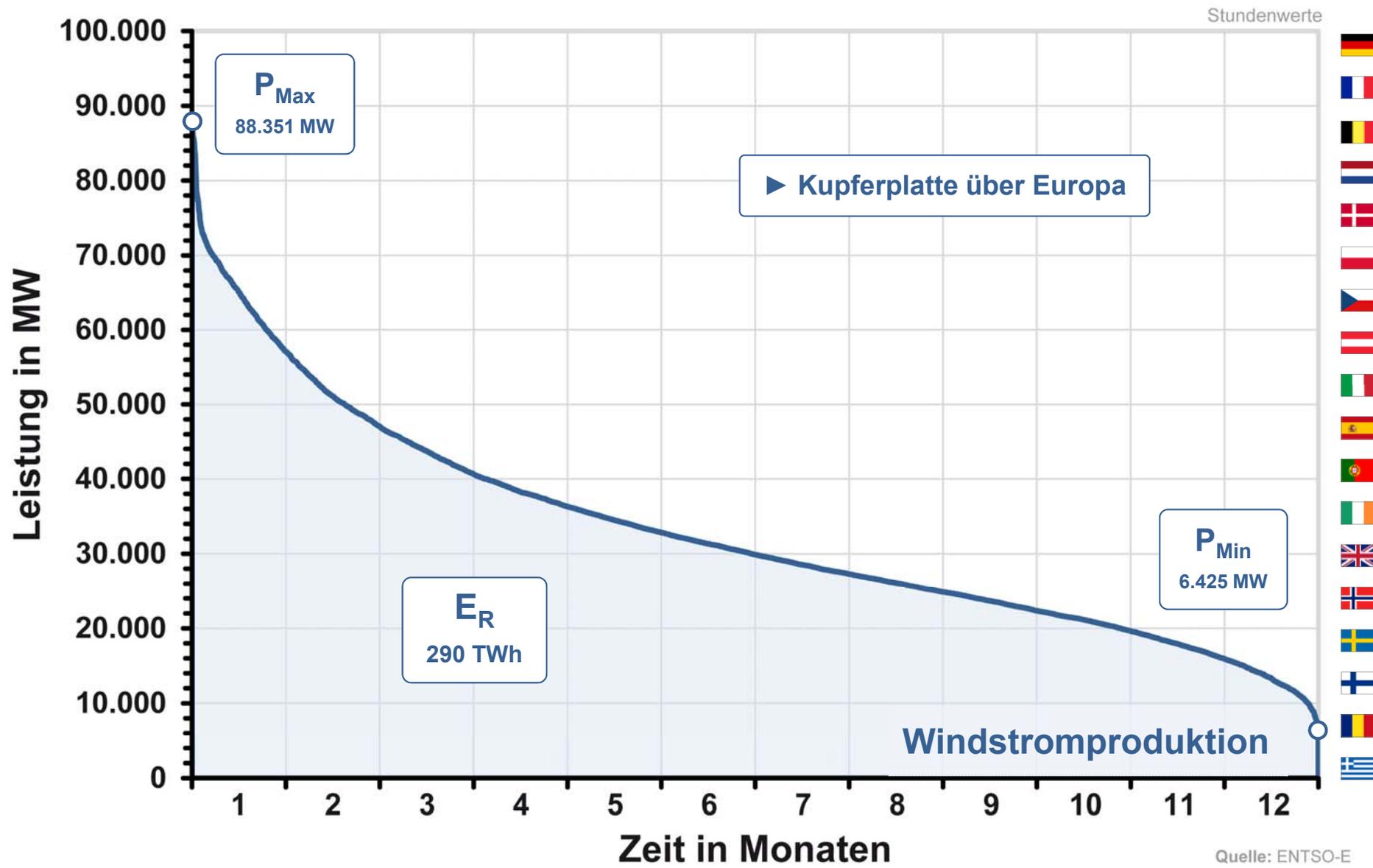
Europa: Räumliche Korrelation der Leistungszeitreihen



Länderpaar	Mittlere Distanz	$r_s \leq 0,01$
ES ◄► DK	2.036 km	-0,01
ES ◄► FI	3.135 km	-0,08
ES ◄► IE	1.444 km	0,01
ES ◄► NL	1.552 km	0,01
ES ◄► PL	2.113 km	-0,05
ES ◄► SE	2.441 km	-0,12
PT ◄► FI	3.286 km	0,00
PT ◄► PL	2.330 km	0,00
PT ◄► SE	2.599 km	-0,03
GR ◄► BE	2.092 km	0,00
GR ◄► CZ	1.500 km	-0,01
GR ◄► DE	1.833 km	-0,04
GR ◄► DK	2.232 km	-0,04
GR ◄► NL	2.171 km	-0,01
GR ◄► PL	1.727 km	-0,03
GR ◄► SE	2.387 km	0,00
GR ◄► UK	2.755 km	0,01

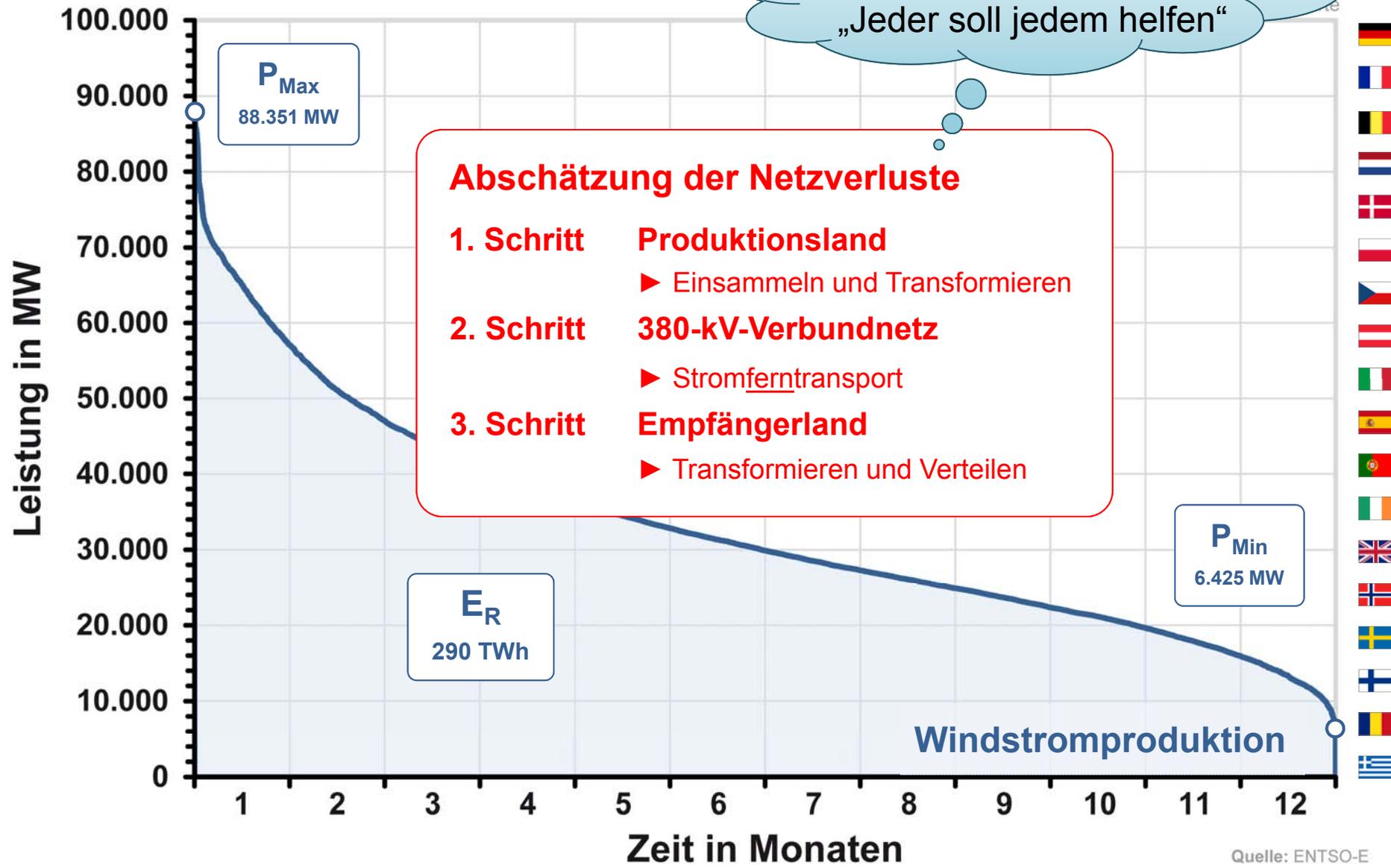


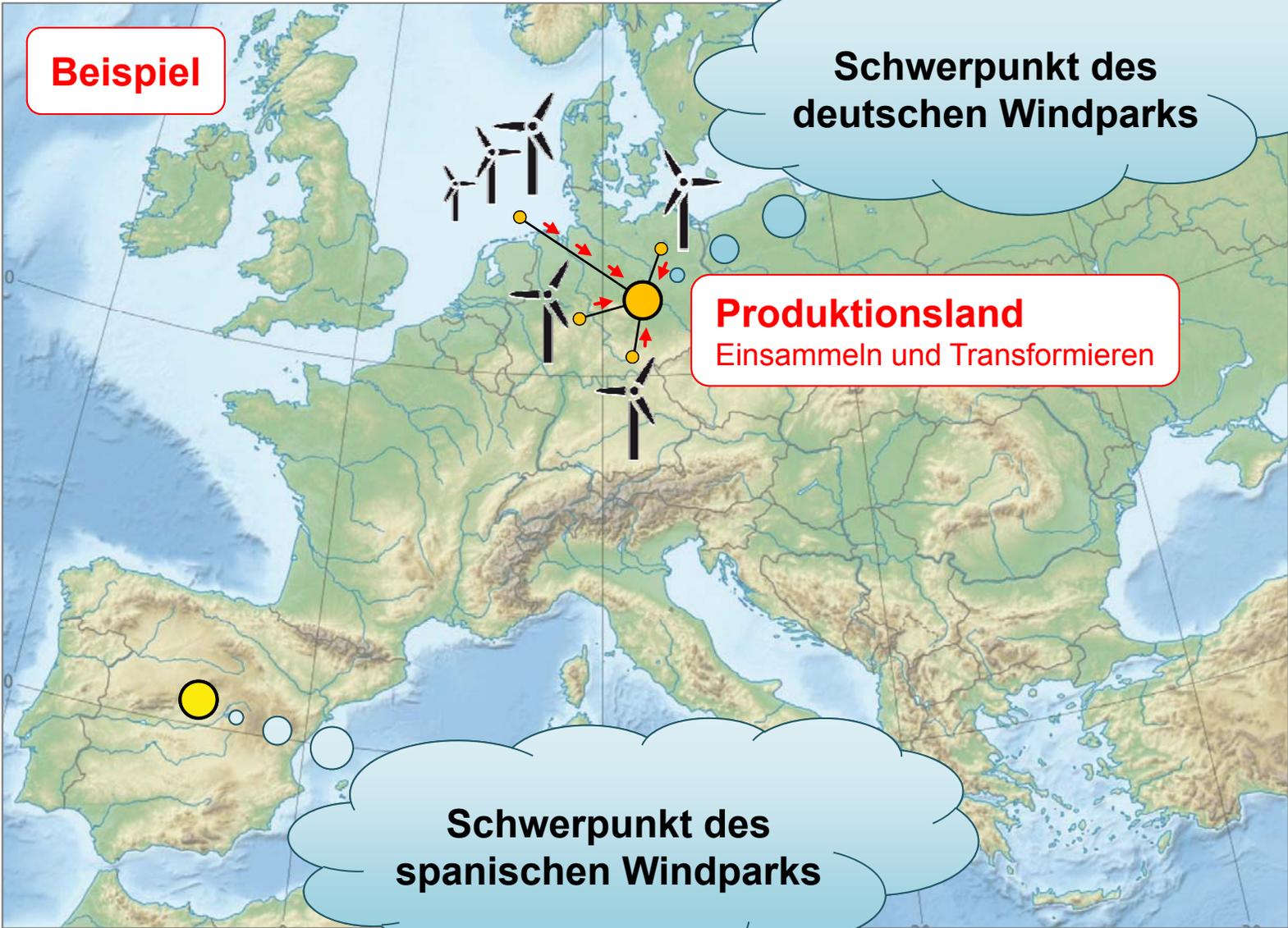


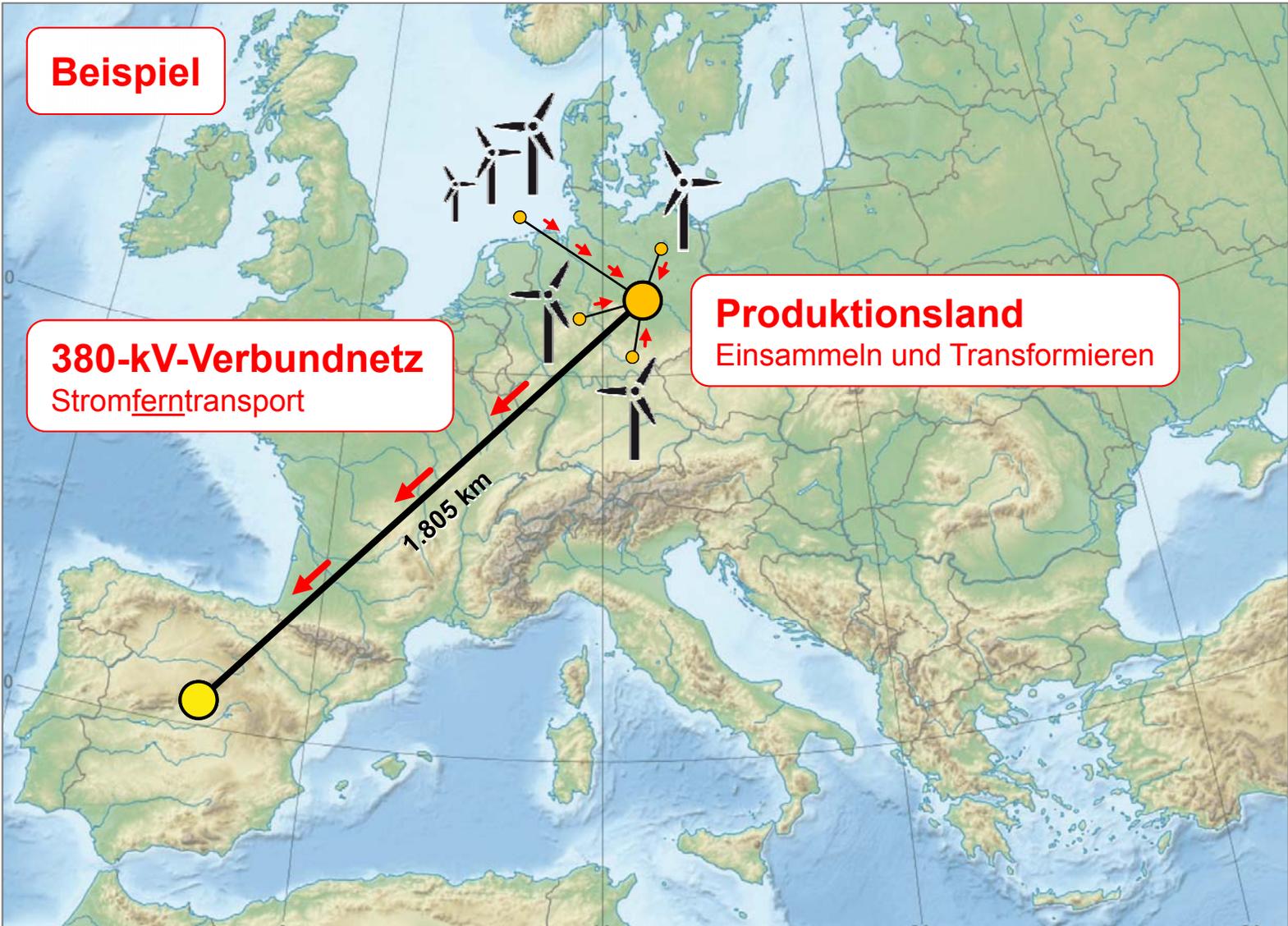


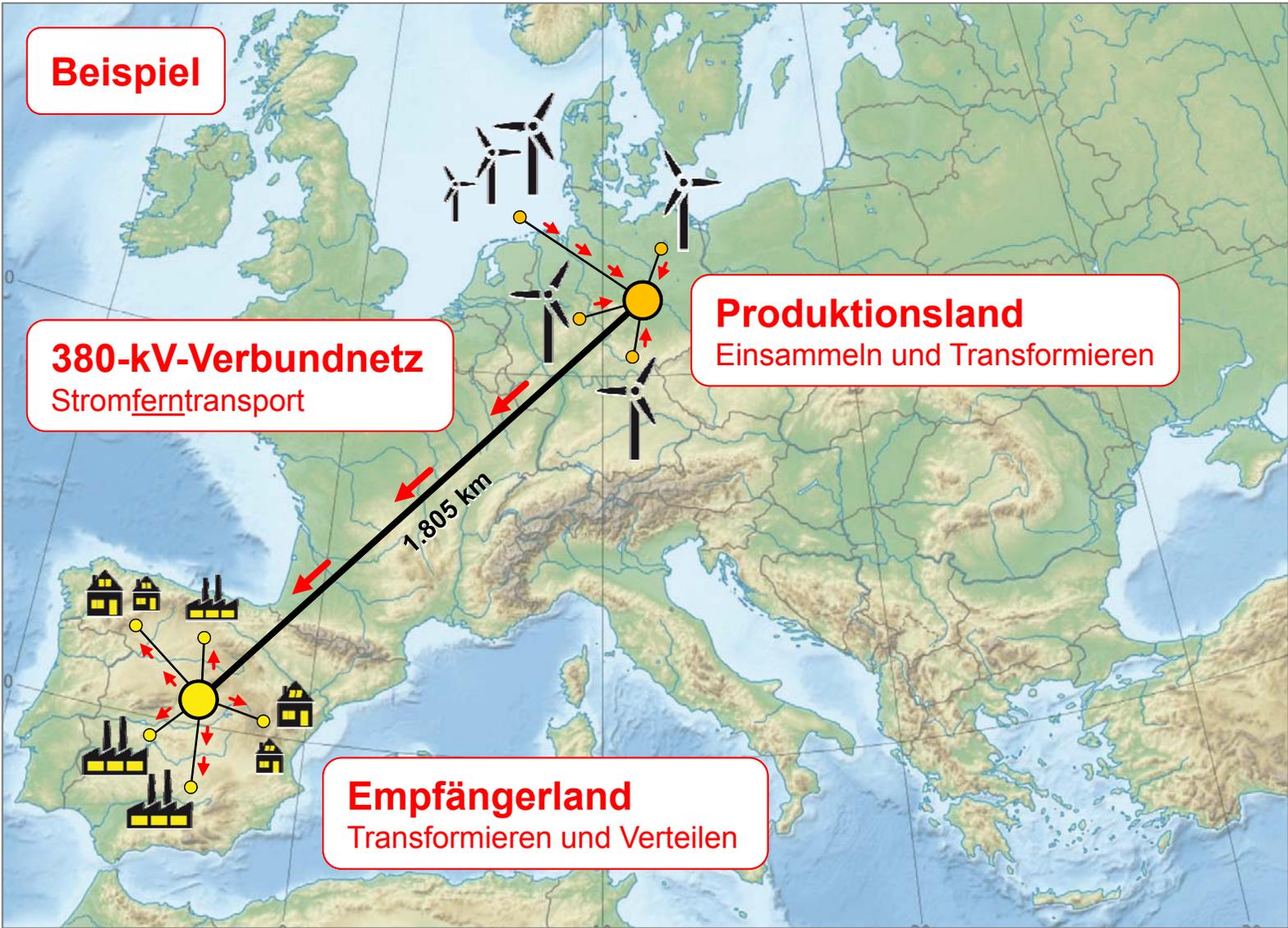
Europa: Abschätzung der Netzverluste

Zielvorgabe für Europa
„Jeder soll jedem helfen“









Zielvorgabe für Europa
„Jeder soll jedem helfen“

Abschätzung der Netzverluste

1. Schritt Produktionsland

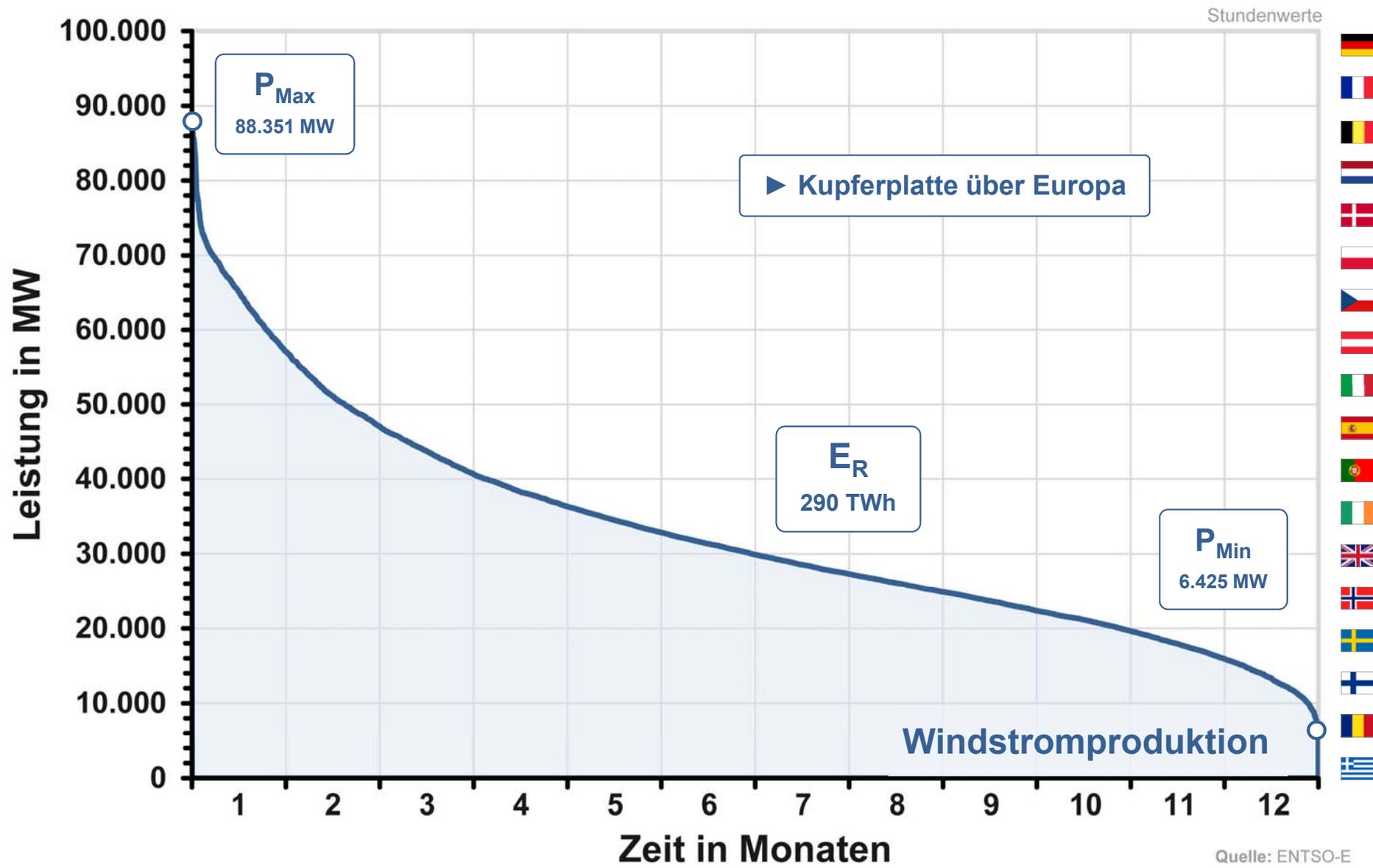
- ▶ Einsammeln und Transformieren
- ▶ Verteilungsverluste: $7 \% P_{\text{Wind}}$
- ▶ Durchschnittswert der 18 Länder

2. Schritt 380-kV-Verbundnetz

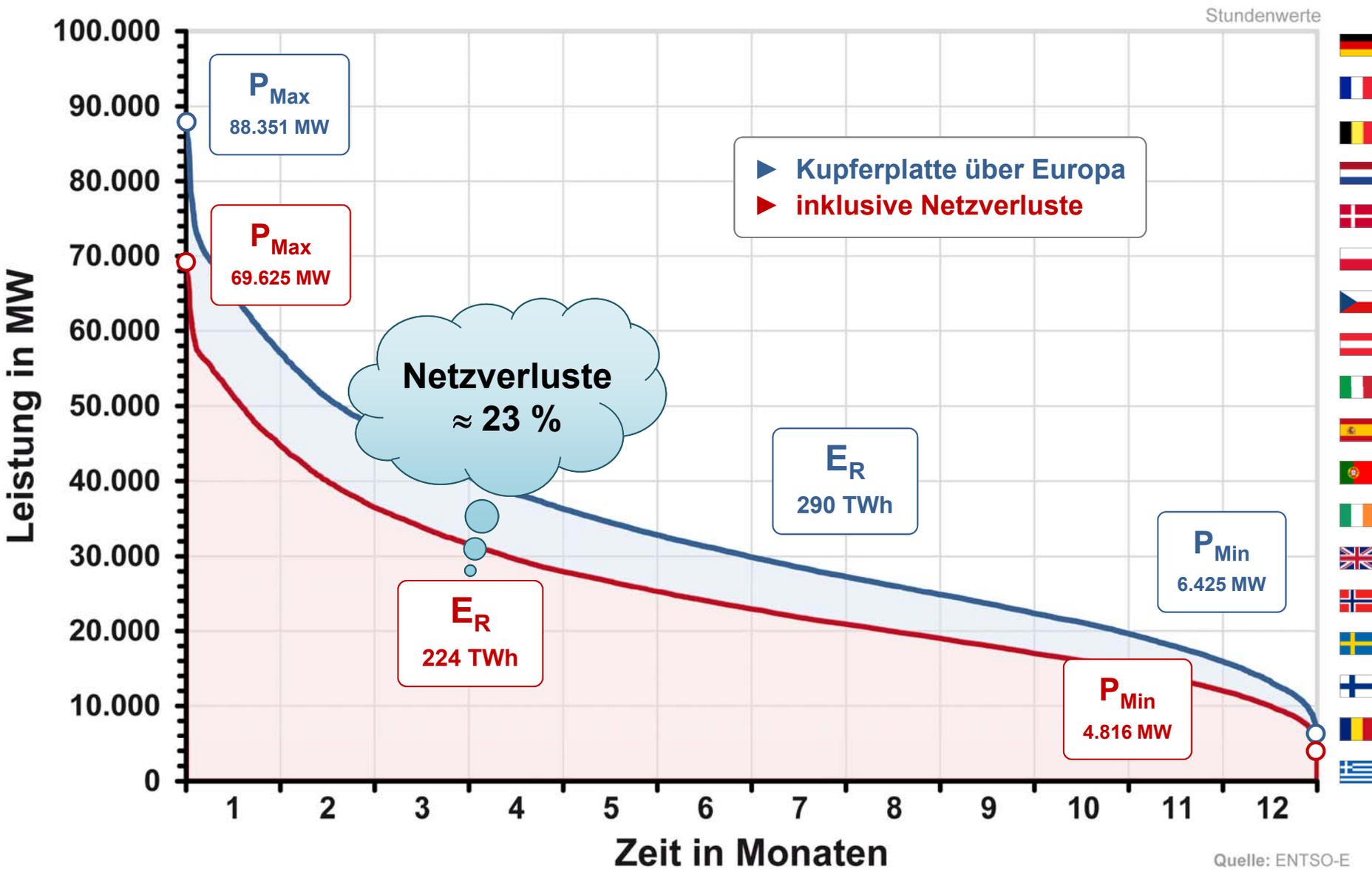
- ▶ Stromferntransport
- ▶ Transportverluste: $1 \% P_{\text{Wind}}$ je 100 km

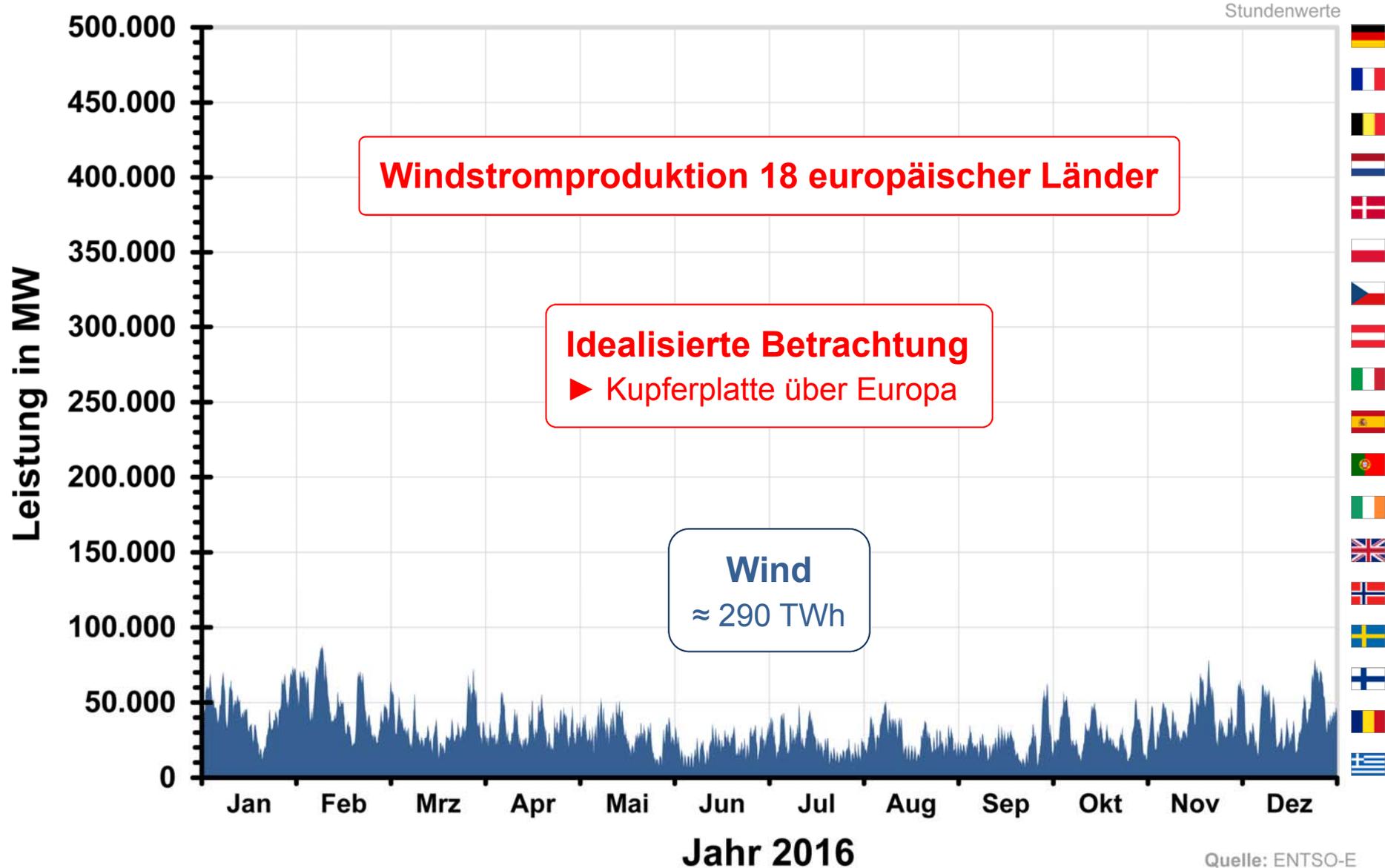
3. Schritt Empfängerland

- ▶ Transformieren und Verteilen
- ▶ Verteilungsverluste: $7 \% P_{\text{Wind}}$
- ▶ Durchschnittswert der 18 Länder

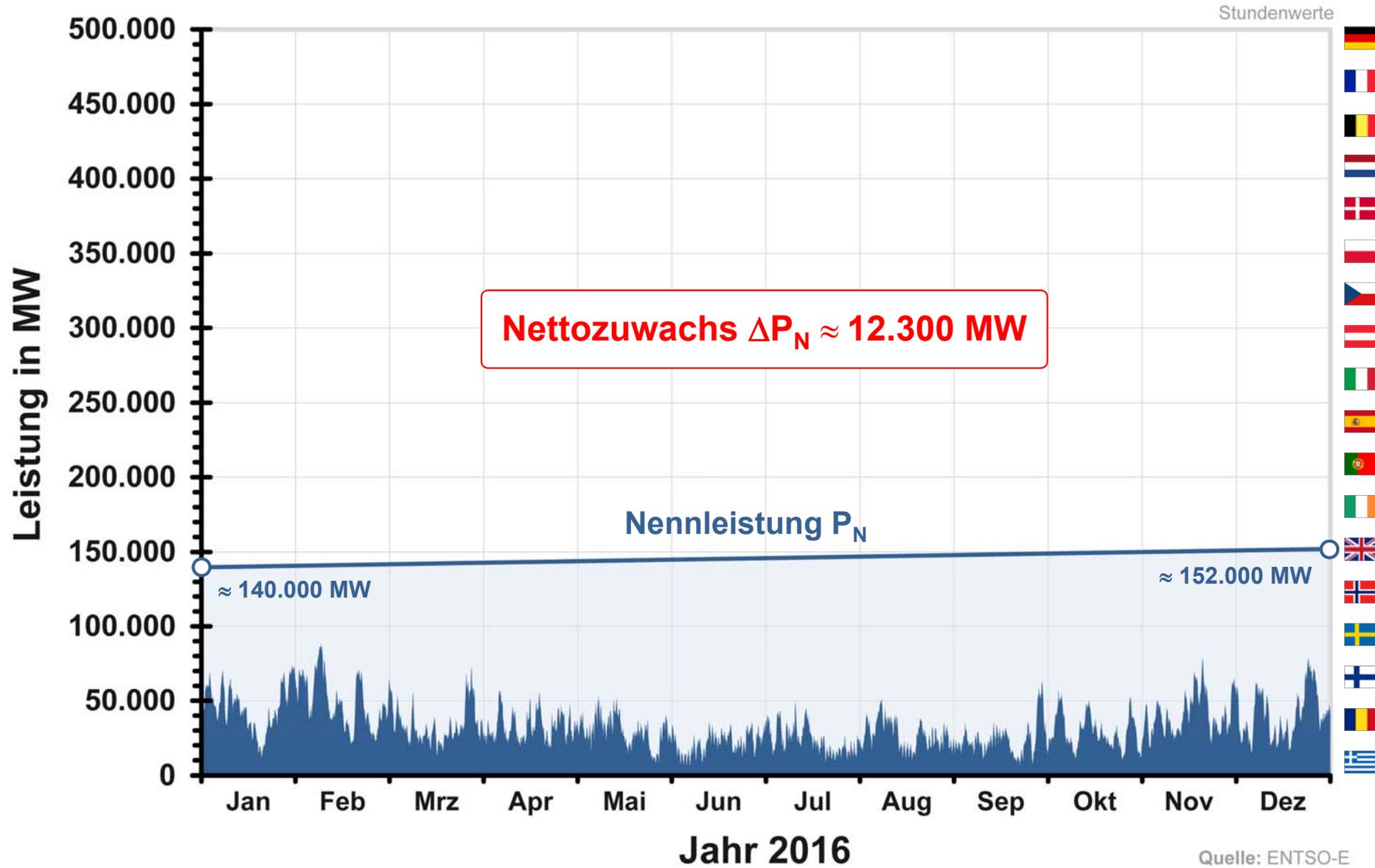


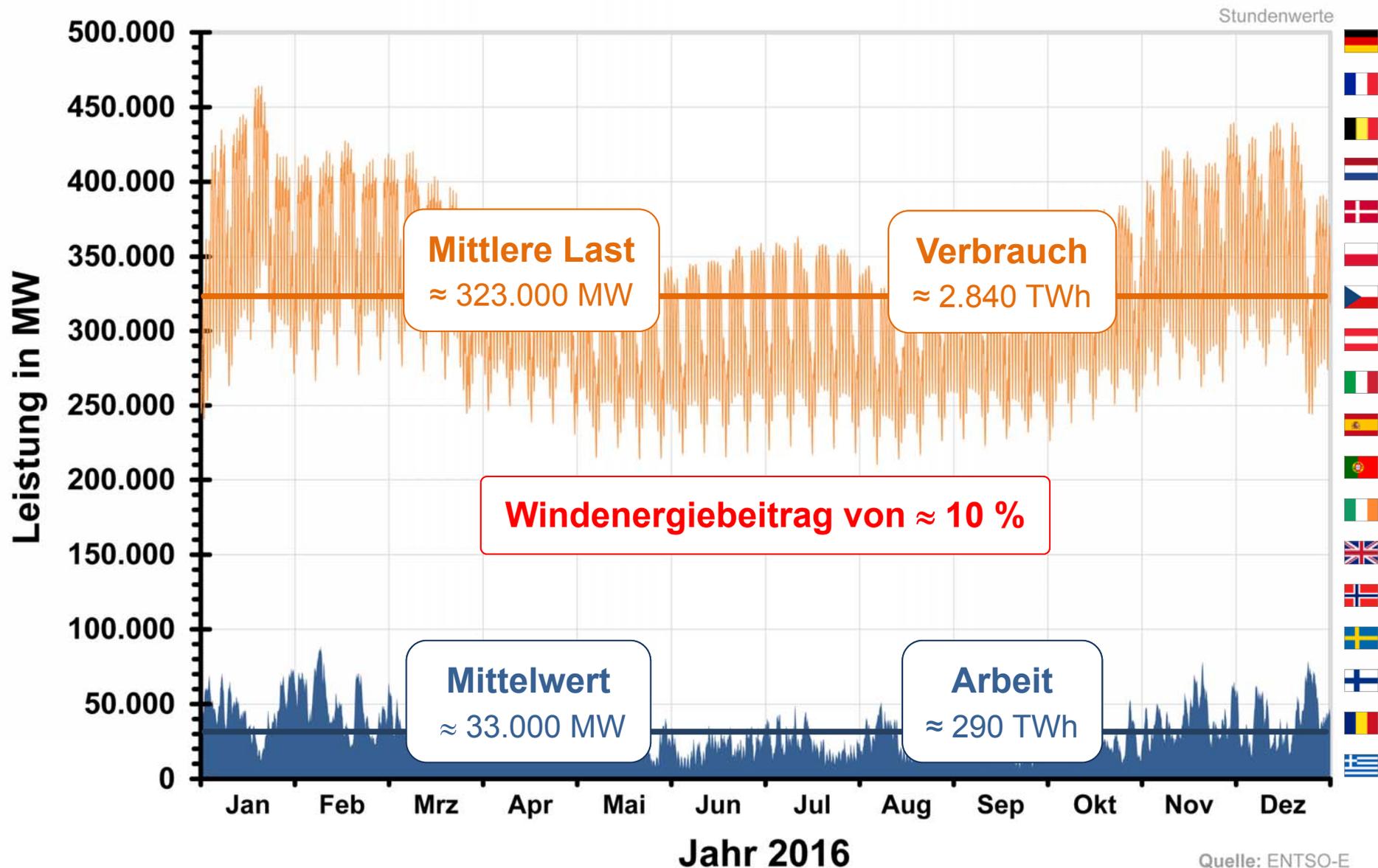
Europa: Abschätzung der Netzverluste





Europa: Windstromproduktion versus Nachfrage





Europa im Jahr 2016

- Sehr geringe Glättung der Leistungseinspeisungen aus Windenergie in 18 europäischen Ländern (Annahme: Kupferplatte über Europa)
- Weiträumige Stromeinspeisungen über mehrere tausend Kilometer
- Gesicherte Leistung von lediglich 4 % der installierten Nennleistung
- Ausgeprägte raumzeitliche Korrelation der Windstromproduktion
- Vernachlässigbare Glättung selbst bei unkorrelierten Daten
- Zudem hohe Verluste bei Stromtransport und -verteilung
- Überschaubarer Nutzen des 380-kV-Verbundnetzes
- Bedarf an 100 % planbarer Backup-Leistung
- Dringender Bedarf an Speichertechnik

- 1) Die Leistungseinspeisungen aus Windenergie fluktuieren europaweit. ✓
- 2) Die Leistungseinspeisungen vieler europäischer Länder sind korreliert. ✓
- 3) Die intuitiv vermutete Glättung tritt nur in sehr geringem Umfang ein. ✓
- 4) Der europäische Verbund kann diesbezüglich kaum Abhilfe schaffen. ✓
- 5) Die Windenergie trägt praktisch nicht zur Versorgungssicherheit bei. ✓
- 6) Windenergie erfordert praktisch 100 % planbare Backup-Technik. ✓
- 7) Bei europaweitem Stromaustausch treten hohe Verluste auf. ✓

VGB-Faktencheck ► Plausibilitätsnachweise erbracht

VGB-Windstudie 2017, Teil 2, Fachaufsatz und Foliensatz

Veröffentlichung in Vorbereitung

VGB PowerTech e.V.

Thomas Linnemann, Guido Vallana

Deilbachtal 173, 45257 Essen, Germany

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

Vorsitzender des Vorstandes: Dr. Hans Bünting

Geschäftsführer: Erland Christensen

Registergericht: Amtsgericht Essen

Registernummer: VR 1788

www.vgb.org