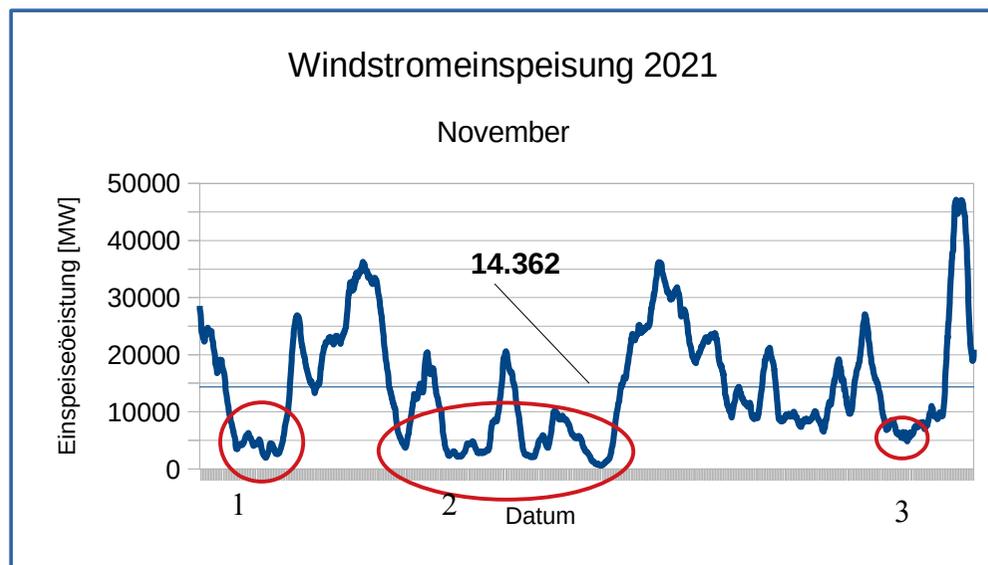


Windflauten und die Folgen 2021



(Quelle: SMARD Strommarktdaten)

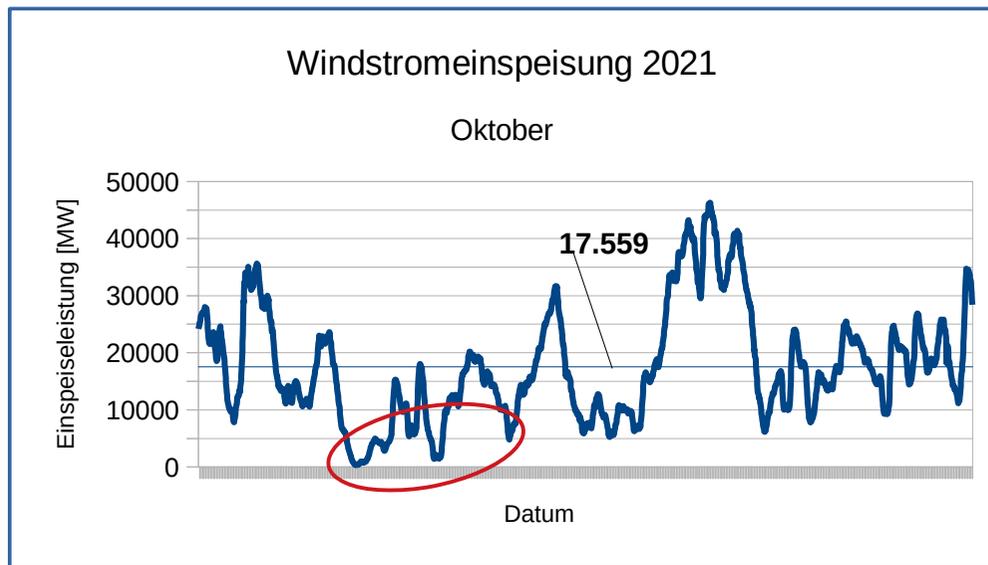
Verlauf November 2021 mit 3 Schwachwindbereichen (Leistungen unter 5000 MW). Verhältnis Monatsdurchschnitte 2021/2020 = $14.362 / 15.582 = 0,92$

Schwachwind-		Gesamtdauer	Dunkel-Anteil
Bereiche	Datum	Std.	Std.
1	02.11.21 10:15	8,25	
	03.11.21 13:15	23,50	12,00
	04.11.21 00:15	5,25	5,25
2	08.11.21 23:15	4,25	4,25
	09.11.21 00:00	1,00	1,00
	10.11.21 23:23	12,50	7,00
	11.11.21 03:15	24,00	13,75
	12.11.21 00:30	6,00	6,00
	13.11.21 20:45	12,25	7,25
	15.11.21 23:45	4,75	4,75
	16.11.21 12:30	24,00	14,25
	3	28.11.21 09:45	0,75
Anzahl		Summe	
3	12	127	76

Anschließende Folien, Inhalt:

- Folie 2-11: Monatsdiagramm Oktober - Januar
- Folie 12: Statistisches Ergebnis (Ersatzeinspeisung)
- Folie 13: Gesamtjahres-Prognose
- Folie 14: Zusammenfassung
- Folie 15: Vorgehensweise
- Folie 16: Quellenverzeichnis

Windflauten und die Folgen 2021

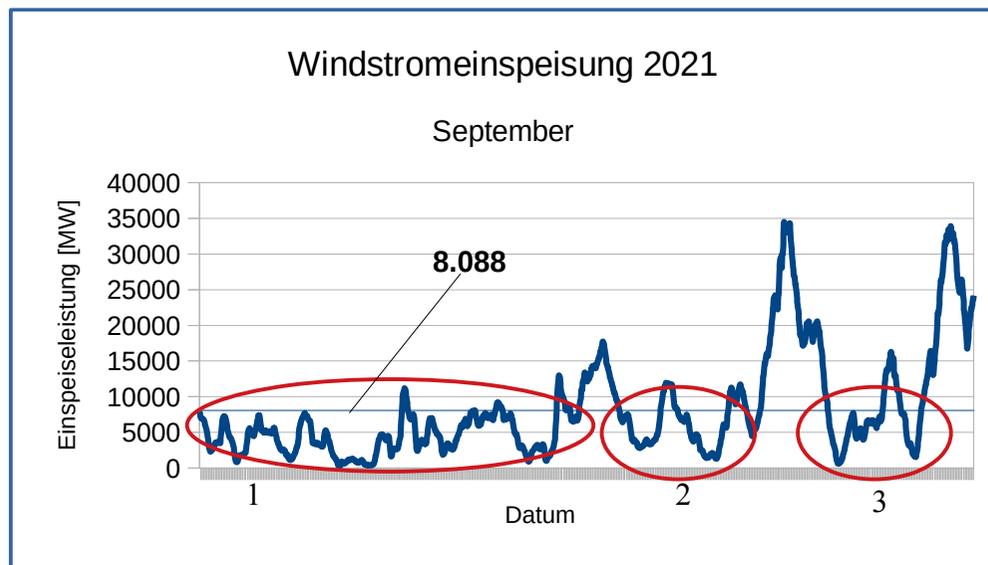


(Quelle: SMARD Strommarktdaten)

Verlauf Oktober 2021 mit 1 Schwachwindbereich (Leistungen unter 5000 MW). Verhältnis Monatsdurchschnitte 2021/2020 = $17.559 / 15.656 = 0,94$

Schwachwind-		Gesamtdauer	Dunkel-Anteil
Bereiche	Datum	Std.	Std.
1	06.10.21 23:59	1,5	1,50
	07.10.21 07:15	24	12
	08.10.21 11:15	16,75	7
	10.10.21 10:45	11,75	
	13.10.21 11:15	0,5	
Anzahl		Summe	
1	5	54,5	20,5

Windflauten und die Folgen 2021

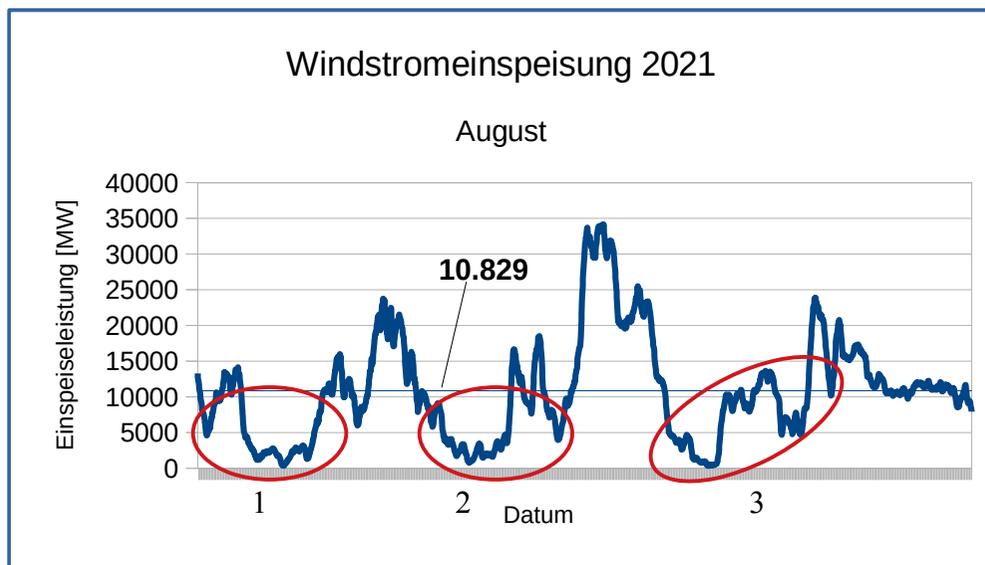


(Quelle: SMARD Strommarktdaten)

Verlauf September 2021 mit 3 Schwachwindbereichen (Leistungen unter 5000 MW). Verhältnis Monatsdurchschnitte 2021/2020 = $8.088 / 8.816 = 0,92$

Schwachwind-		Gesamtdauer	Dunkel-Anteil
Bereiche	Datum	Std.	Std.
1	01.09.21 10:30	13	
	02.09.21 10:45	19	4
	03.09.21 02:30	5	4,00
	04.09.21 12:30	20,5	6,00
	05.09.21 18:30	15,75	3,75
	06.09.21 10:00	24	9,50
	07.09.21 15:00	24	9,75
	08.09.21 10:30	19	6
	09.09.21 10:45	11	
	10.09.21 10:15	19,5	5,50
	11.09.21 00:00	1,5	1,50
	13.09.21 18:30	18,5	4,50
	14.09.21 10:30	19	6,25
	17.09.21 23:59	6,5	3,25
2	18.09.21 00:45	18,5	6,5
	19.09.21 23:59	23,5	10,50
	21.09.21 01:00	6	6,00
	22.09.21 10:00	1,75	
	25.09.21 18:15	12,5	3,50
3	26.09.21 00:00	9,75	3,25
	28.09.21 17:45	12	2,25
Anzahl		Summe	
3	21	299,75	96

Windflauten und die Folgen 2021

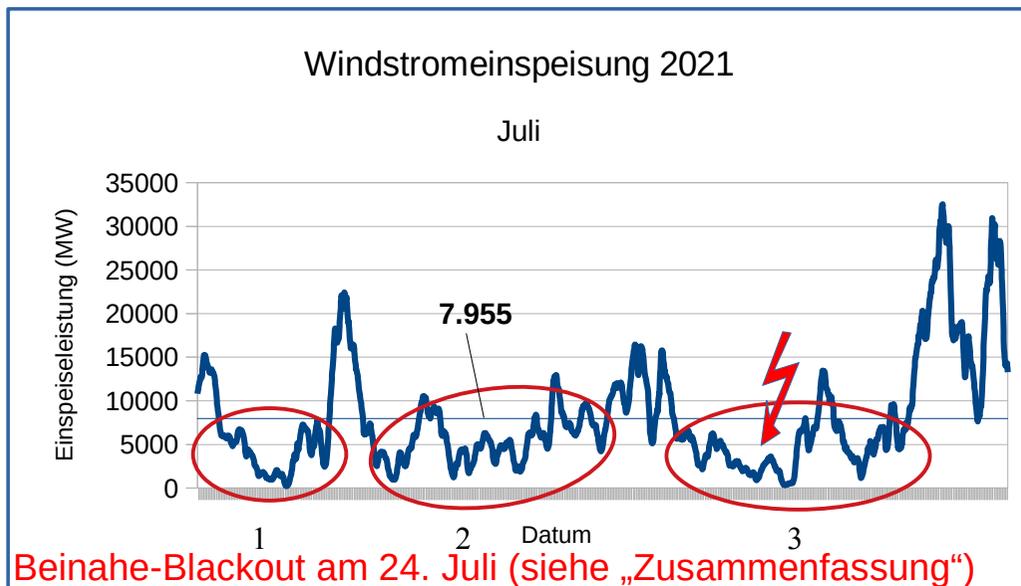


(Quelle: SMARD Strommarktdaten)

Verlauf August 2021 mit 3 Schwachwindbereichen (Leistungen unter 5000 MW). Verhältnis Monatsdurchschnitte 2021/2020 = $10.829 / 9.081 = 1,19$

Schwachwind		Gesamtdauer	Dunkel-Anteil
Bereiche	Datum	Std.	Std.
1	01.08.21 08:45	1,25	
	02.08.21 23:59	3	2
	03.08.21 09:45	24	7,5
	04.08.21 10:15	24	7,75
	05.08.21 09:30	16	5,25
2	10.08.21 23:59	4	2,75
	11.08.21 21:00	24	6,00
	12.08.21 00:00	24	6,00
	13.08.21 03:30	10,5	5,50
	15.08.21 10:15	4	
3	19.08.21 23:59	3	3
	20.08.21 20:45	24	8,25
	21.08.21 10:15	22,25	6,75
	24.08.21 09:15	1,25	
	25.08.21 03:00	2	2,00
Anzahl		Summe	
3	15	187	63

Windflauten und die Folgen 2021

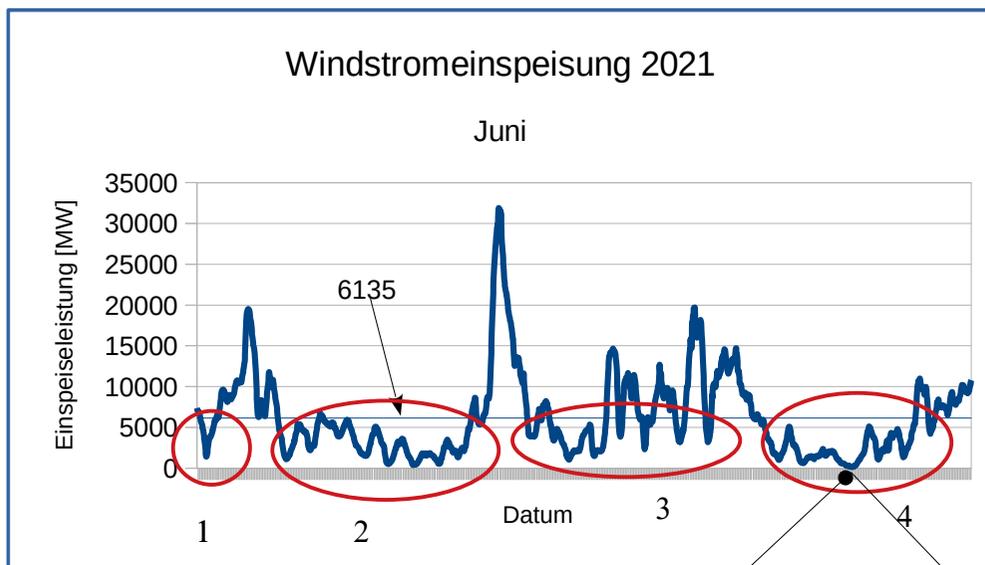


(Quelle: SMARD Strommarktdaten)

Verlauf Juli 2021 mit 3 Schwachwindbereichen (Leistungen unter 5000 MW).
Verhältnis Monatsdurchschnitte 2021/2020 = $7.955 / 9.400 = 0,85$

Bereiche	<u>Schwachwind-</u>	Gesamtdauer	Dunkel-Anteil	
	Datum	Std.	Std.	
1	02.07.21 20:45	5,25	2,00	
	03.07.21 20:30	24	6	
	04.07.21 09:15	21	2,25	
	05.07.21 20:45	9,5	1,50	
2	07.07.21 20:45	6,5	2,00	
	08.07.21 12:45	24,00	6,50	
	09.07.21 00:00	4,75	4,50	
	10.07.21 19:00	10,25	2,00	
	11.07.21 09:00	20,5	4,50	
	12.07.21 09:30	14,25		
	13.07.21 08:15	14,5	5,50	
	14.07.21 09:15	2,25		
	16.07.21 10:30	3,25		
	20.07.21 04:45	18	6,25	
3	21.07.21 20:30	22	7,25	
	22.07.21 09:45	24	7,00	
	23.07.21 11:30	22,75	5,75	
	24.07.21 09:00	2		
	25.07.21 23:59	5,75	2,50	
	26.07.21 09:15	20,75	6,25	
	27.07.21 20:15	3,75		
	Anzahl		Summe	
	3	21	279	72

Windflauten und die Folgen 2021



(Quelle: SMARD Strommarktdaten)

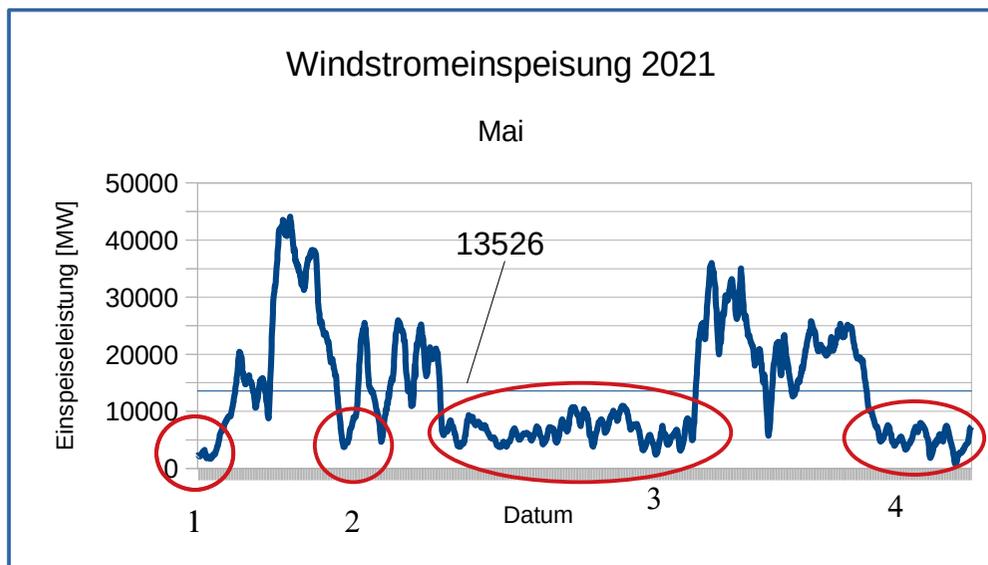
Jahres-Minimum = 0,14 GW

Verlauf Juni 2021 mit 4 Schwachwindbereichen (Leistungen unter 5000 MW). Verhältnis Monatsdurchschnitte 2021/2020 = $6135 / 8.865 = 0,69$

Schwachwind-Bereiche		Gesamtdauer	Dunkel-Anteil
Bereiche	Datum	Std.	Std.
1	01.06.21 08:45	8,75	
	04.06.21 11:15	17	
2	05.06.21 09:15	14,75	5,25
	06.06.21 11:30	9,25	1,00
	07.06.21 13:00	24	6,25
	08.06.21 10:15	24	6,25
	09.06.21 09:15	24	6,00
	10.06.21 09:15	24	6,25
	11.06.21 02:45	13,75	4,00
	13.06.21 21:45	3,75	2,00
3	14.06.21 19:30	10	5,75
	15.06.21 10:00	24	6,00
	16.06.21 09:30	13,75	4,25
	17.06.21 09:45	2,25	0,00
	18.06.21 08:30	3	0,00
	19.06.21 17:30	6,5	
	20.06.21 19:00	4,5	
	23.06.21 13:15	22,3	4,50
4	24.06.21 13:15	24	6,25
	25.06.21 23:59	24	6,25
	26.06.21 08:45	24	6,25
	27.06.21 09:45	24	6,25
	28.06.21 09:00	18,25	4,25
	29.06.21 10:15	2,75	
Anzahl		Summe	
4	24	366	87

Grau markiert = längste zusammenhängende Flauten-Dauer des ffd. Jahres 137 Std.

Windflauten und die Folgen 2021

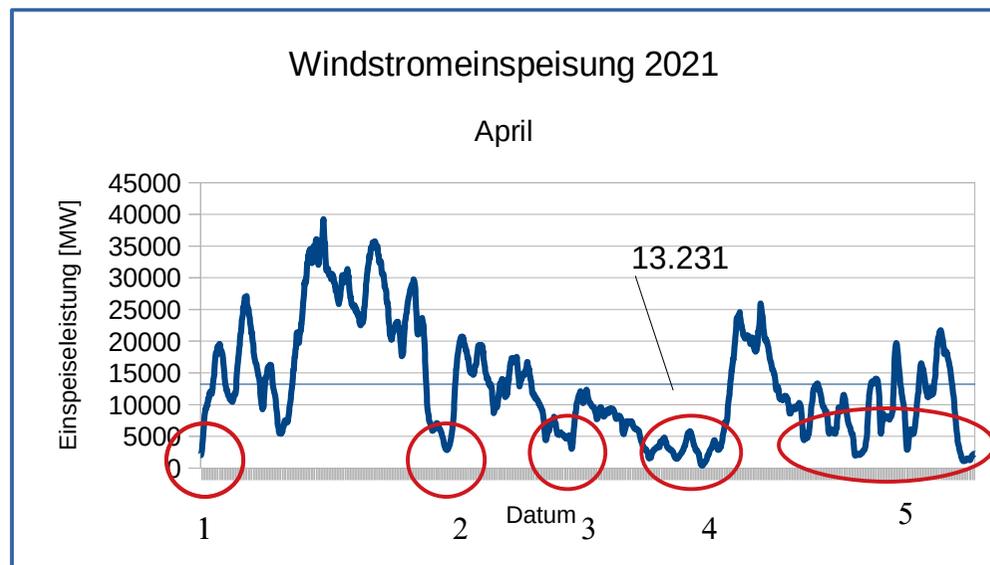


(Quelle: SMARD Strommarktdaten)

Verlauf Mai 2021 mit 4 Schwachwindbereichen (Leistungen unter 5000 MW).
Verhältnis Monatsdurchschnitt 2021/2020 = $13.526 / 10.237 = 1,32$

Bereiche	Schwachwind-	Gesamtdauer	Dunkel-Anteil
	Datum	Std.	Std.
1	01.05.21 02:30	21	5
	06.05.21 21:15	5	3
2	07.05.21 01:00	1	1,00
	08.05.21 09:00	0,5	
3	11.05.21 12:30	7,75	
	12.05.21 23:59	1,75	1,75
	13.05.21 09:00	12,75	5,00
	14.05.21 20:15	4	1,75
	15.05.21 09:30	2	2,00
	16.05.21 20:15	3	0,50
	18.05.21 20:00	6	2,50
	19.05.21 08:30	7,5	0,50
	20.05.21 08:15	5	
	4	28.05.21 21:45	4,5
29.05.21 08:30		8,75	2,00
30.05.21 08:30		9,75	
31.05.21 08:45		17,5	
Anzahl		Summe	
4	17	118	27

Windflauten und die Folgen 2021



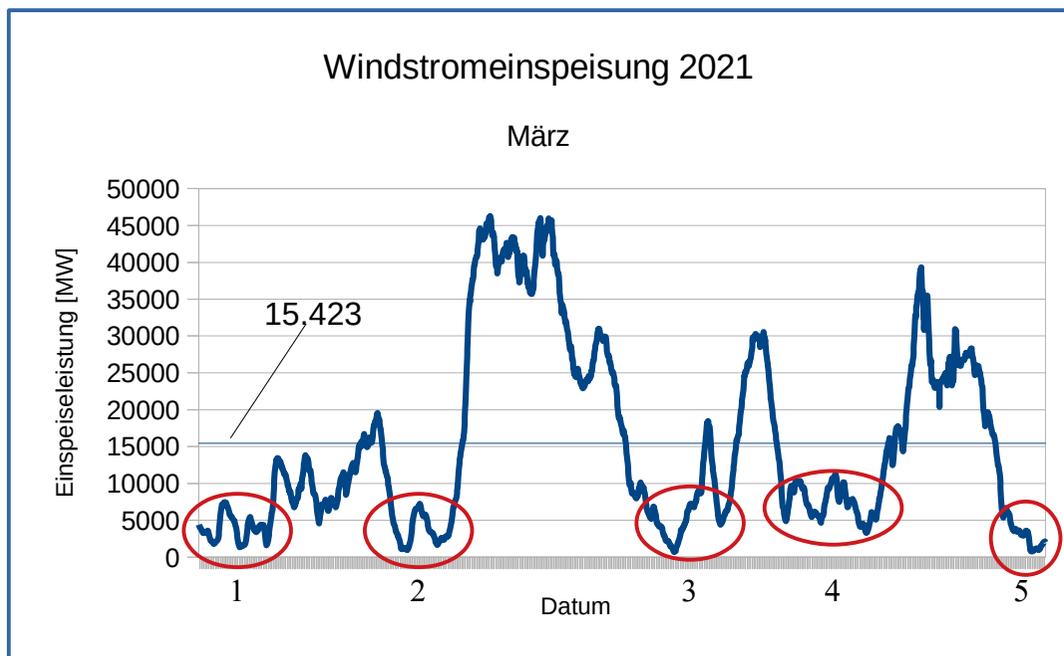
(Quelle: SMARD Strommarktdaten)

Verlauf April 2021 mit 5 Schwachwindbereichen (Leistungen unter 5000 MW).
Verhältnis Monatsdurchschnitt 2021/2020 = $13,231 / 12,138 = 1,09$

Schwachwind-		Gesamtdauer	Dunkel-Anteil
Bereiche	Datum	Std.	Std.
1	01.04.21 11:45	2,25	2,25
2	10.04.21 13:00	8	
3	15.04.21 09:00	3,5	2,25
4	18.04.21 09:15	23	7,75
	19.04.21 11:15	20,5	5,50
	20.04.21 10:45	22,75	7,50
	21.04.21 10:45	5,5	5,50
5	24.04.21 09:15	4,25	
	26.04.21 08:45	12,5	0,25
	28.04.21 09:15	3	
	29.04.21 09:15	16	3,00
Anzahl		Summe	
5	11	121	34

Graue markiert = zweitägige zusammenhängende
Flaute Dauer 43,5 h

Windflauten und die Folgen 2021

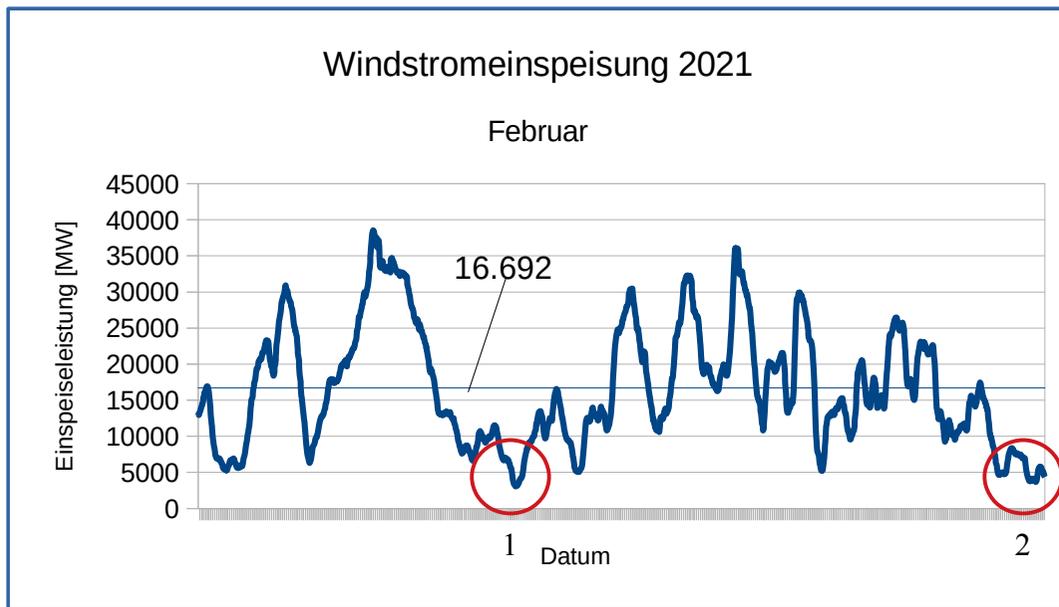


(Quelle: SMARD Strommarktdaten)

Verlauf März 2021 mit 5 Schwachwindbereichen (Leistungen unter 5000 MW).
 Verhältnis Monatsdurchschnitt 2021/2020 = $15.423/19.076 = 0,809$.
 Blauer Pfeil = bisher längste zusammenhängende Windflauten-Dauer

Schwachwind-		Gesamtdauer	Dunkel-Anteil
Bereiche	Datum	Std.	Std.
1	01.03.21 13:15	18,5	6,50
	02.03.21 12:00	15	3,5
	03.03.21 11:30	15	6,25
2	08.03.21 14:30	17,25	7,50
	09.03.21 17:15	15,5	5,50
	10.03.21 00:00	5,75	5,75
3	17.03.21 23:59	6,25	5,25
	18.03.21 09:15	19,75	6,75
	20.03.21 02:15	3	3
4	22.03.21 11:15	0,25	
	23.03.21 18:00	0,75	
	25.03.21 09:30	10,25	5,5
5	30.03.21 23:15	6,75	4
	31.03.21 11:45	24	10,25
Anzahl		Summe	
5	14	158	70

Windflauten und die Folgen 2021

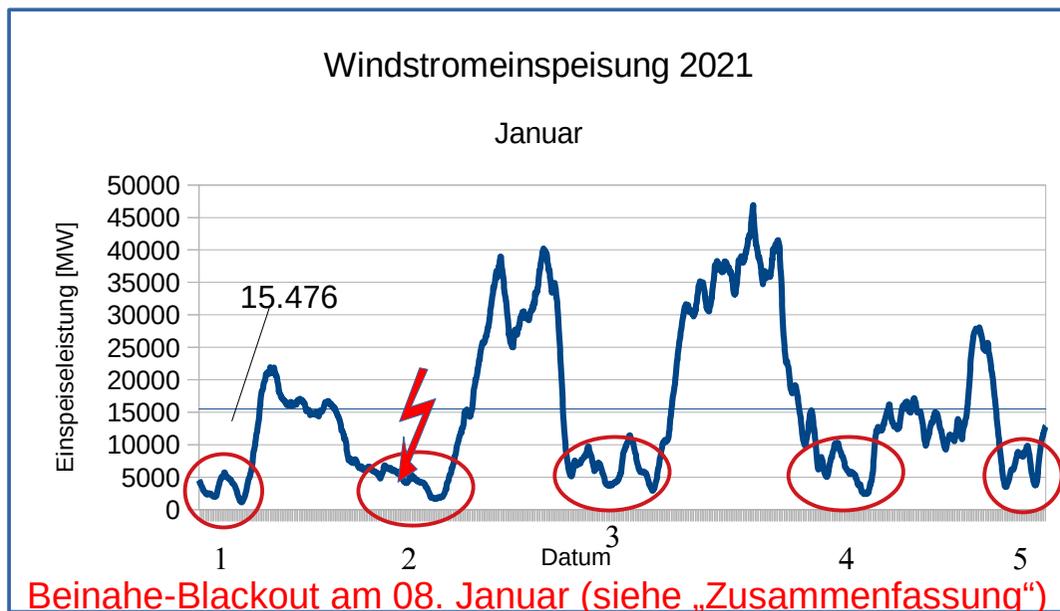


(Quelle: SMARD Strommarktdaten)

Verlauf Februar 2021 mit 2 Schwachwindbereichen (Leistungen unter 5000 MW). Verhältnis Monatsdurchschnitt 2021/2020 = $16.692/29.125 = 0,573$.

Schwachwind-		Gesamtdauer	Dunkel-Anteil
Bereiche	Datum	Std.	Std.
1	11.02.21 12:00	7,75	
2	27.02.21 11:30	6,25	
	28.02.21 12:30	9,5	1,00
Anzahl		Summe	
2	3	23,5	1

Windflauten und die Folgen 2021

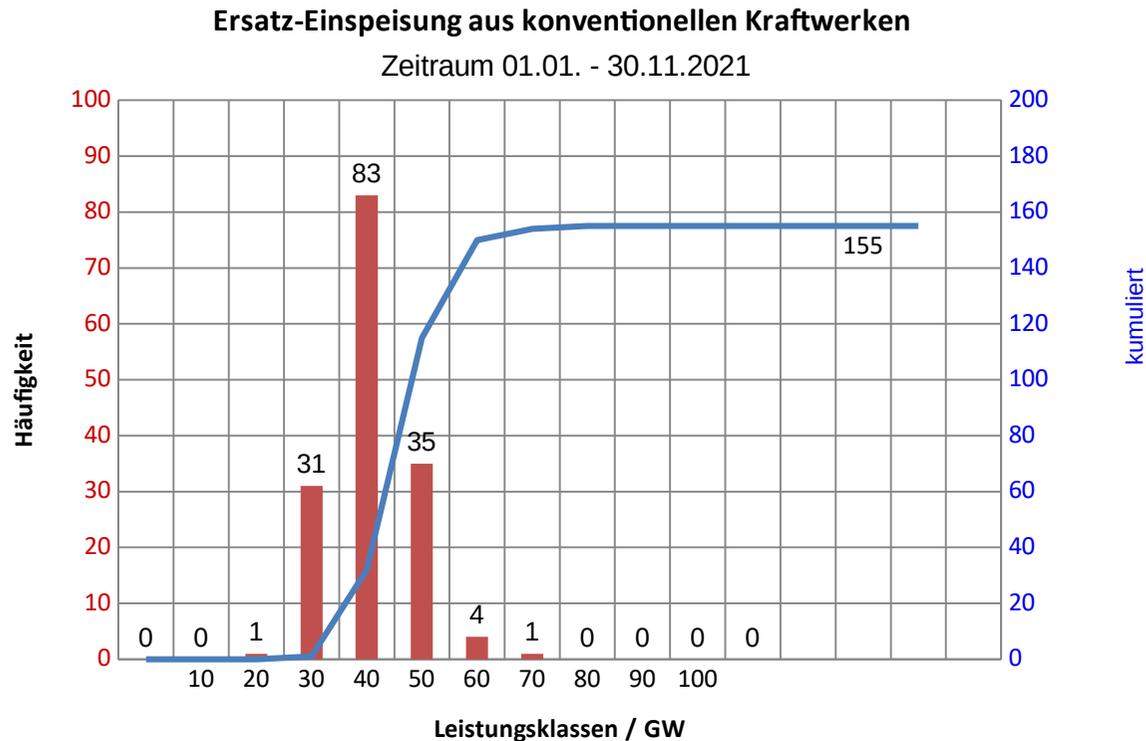


(Quelle: SMARD Strommarktdaten)

Verlauf Januar 2021 mit 5 Schwachwindbereichen (Leistungen unter 5000 MW). Verhältnis Monatsdurchschnitt 2021/2020 = $15.476/21.445 = 0,722$.

Bereiche	Schwachwind-Datum	Gesamtdauer Std.	Dunkel-Anteil Std.
1	01.01.21 13:00	20,75	10,75
	02.01.21 13:30	19,5	10,50
2	07.01.21 15:15	1	1,00
	08.01.21 14:00	11,75	4,50
	09.01.21 15:00	24	14,25
	10.01.21 00:00	3,75	3,75
3	15.01.21 23:59	3,75	3,75
	16.01.21 00:15	9,25	7,50
	17.01.21 14:45	8	1,25
4	25.01.21 08:15	14	7,50
	30.01.21 13:15	5,5	
5	31.01.21 14:45	4	
Anzahl		Summe	
5	12	125,25	64,75

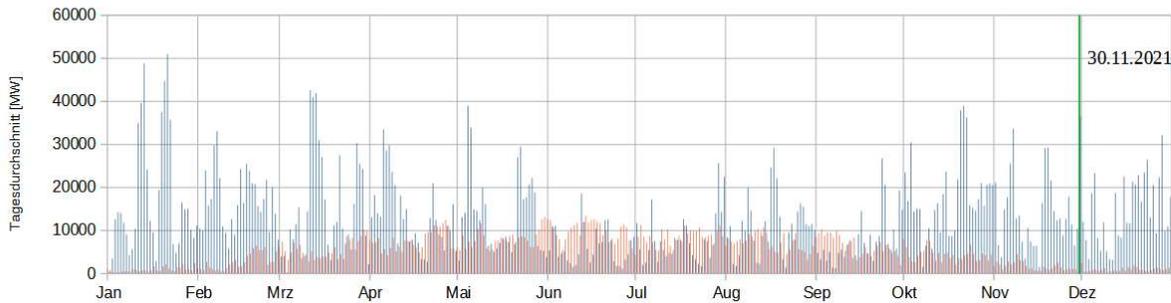
Windflauten und die Folgen 2021



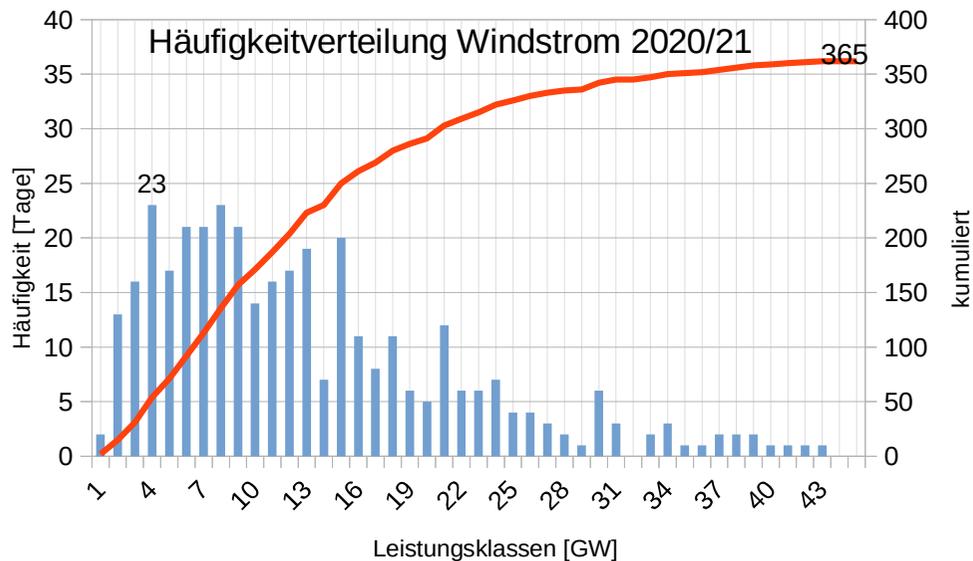
Statistisches Ergebnis von Jahresbeginn bis zum 30. November 2021. An 155 Tagen trat Windleistung unter 5 GW (= 8% der installierten Leistung) auf. Der jeweils am Minimum eines Schwachwindtages ermittelte Leistungsbedarf abzüglich Windstromeinspeisung und abzüglich aller sonstigen EE-Einspeisungen ergibt die geforderte Ersatzkapazität, aktuell zwischen > 20 bis ≤ 70 GW.

Windflauten und die Folgen 2021

Vergleich Wind- / Solareinspeisung 2020/21



Windstromerzeugung und Vergleich mit Solar
(Quelle: Windjournal)



Histogramm Windstromerzeugung
(Quelle: B. Zierenberg)

Oberes Diagramm: Jahresverlauf der Tagesdurchschnitte Wind (blau) + Solar (rot) für gesamtes Jahr 2020, überschrieben mit Verlauf 2021 bis Ausgabedatum der Präsentation. In anderen Studien wird gezeigt, dass zur vollständigen Verstetigung dieser Einspeisevolatilität und der ebenfalls schwankenden Residuallast eine Speicherkapazität von insgesamt 15 TWh benötigt wird [3], wobei ein vollkommen verlustloser Speicher unterstellt wird.

Unteres Diagramm: Die aus dem Jahresverlauf 2020 / 21 ermittelte Häufigkeitsverteilung, zeigt ein Übergewicht geringerer Leistungen, mit Maximum von 23 Tagen bei der Klasse 4 GW (Bereich $> 3 \dots \leq 4$ GW).

Die der Windstromerzeugung zugrunde liegenden Gesetze der Physik und statistischen Mathematik lassen kein anderes Resultat erwarten! [4]

Die im Laufe des Jahres 2021 getroffene Schwachwindprognose für das gesamte lfd. Jahr ist: an mindestens 71 Tagen wird die durchschnittliche tägliche Windstromerzeugung weniger als 5 GW betragen (Summe der Häufigkeit der ersten 5 Balken). Aktueller Ist-Stand: 155 Tage (siehe Diagramm Folie 12)

Zusammenfassung 2021 (Jahresbeginn bis Ausgabedatum der vorliegenden Präsentation)

Windflauten-Lage: Die Dauer der 155 Windflauten (Folie 12) summierte sich auf 1859 Stunden. Im Verlauf des gesamten Jahres ist zu jeder Zeit eine Gesamt-Jahresprognose mit großer Sicherheit auf Basis der Vorjahresdaten möglich (Folie 13).

Längste ununterbrochene Schwachwindperiode = 137 Stunden vom 23.06. 00:30 bis 28.06. 18:15 Uhr (siehe Folie 3).

An 121 Tagen wurden die Schwachwindperioden von Dunkelflauten mit einer Gesamtdauer von 610 Stunden begleitet.

Die gesicherte Leistung der Windkraft betrug im Jahr 2021 **bis zum aktuellen Datum** 0,140 GW, dem am 26.06. aufgetretenen niedrigsten Einspeisewert. Das entspricht der Leistung von ca. 0,1 Kernkraftwerk.

Bedarfsdeckung durch konventionelle (Ersatz-)Kapazität: erfolgte während der Schwachwindperioden in der Spitze mit 60 GW konventioneller Kraftwerksleistung, bei 92% Deckungsgrad. Dies entspricht 59 % der installierten konventionellen Leistung (Kohle, Erdgas, Pumpspeicher, Kernenergie, Sonstige = 101 GW). Am häufigsten, nämlich 83 mal, kamen konventionelle Kraftwerks-Einsätze zur Bedarfsdeckung im Bereich zwischen 30 bis 40 GW vor.

Deckungsbeitrag Kohle + Kernkraft (bei erstlosem Ausstieg = nationale Stromlücke): Kohlekraftwerke deckten den Bedarf während der Schwachwindzeiten in der Spitze zu 52 % am 21.09. mit 23 GW, Kernkraftwerke zu 19 % am 25.08. mit 7,9 GW.

Maximaler Stromimport während Windflauten: am 14.05. mit 11 GW

Netzstabilität: 2 „Beinahe-Blackouts“ am 24. Juli, nach dem Vorfall am 8. Januar. In beiden Fällen mußten Netzbereiche bis zur Wiederherstellung der Stabilität abgetrennt werden [6] und [7]

Vorgehensweise

Definition: unter „Windflauten und die Folgen“ ist, im Sinne der vorliegenden Präsentation, die stark ertragsgeschwächte Windstrom-Einspeisung während Schwachwindzeiten und dem damit einhergehenden Bedarf an Ersatzkapazität zu verstehen.

Windstromeinspeisung:

Aus der Aufnahme von öffentlich zugänglichen Strommarktdaten, die als Viertelstunden-Ertrags-Mittelwerte vorliegen [1], wird der monatliche Verlauf der Windstromeinspeisung ins Netz ermittelt und als Ergebnisdiagramm mit Tabelle dargestellt. Das besondere Interesse gilt hier der Hervorhebung von Einspeiseleistungen (On- + Offshore), die in Summe gleich oder kleiner als 5.000 MW sind, im Verlauf der sogenannten Schwachwindbereiche. Am Minimum einer jeden Schwachwindperiode entsteht ein erhöhter Bedarf an Ausgleichskapazität, eine Hürde, die derzeit nur mit Hilfe von Ersatzspeisung mittels konventioneller Kraftwerke überwunden werden kann. Das Vorgehen wird im folgenden „Schwachwindanalyse“ genannt.

Zu den Monats-Diagrammen: Anordnung in absteigender Reihenfolge, d.h. aktueller Monat zuerst, Januar zuletzt. Mit „Datum (und Uhrzeit)“ wird jeweils das Tagesminimum der Einspeiseleistung markiert. Unter Gesamtdauer und Dunkel-Anteil sind die entsprechenden Dauern für jeden von Schwachwind betroffenen Tag zu verstehen. Es wird dann jeweils die erforderliche Ersatzspeisung ermittelt, also die zur Bedarfsdeckung an diesem kritischen Zeitpunkt erforderliche Leistung, ohne Systemdienstleistung, also der Residuallast.

Statistische Aussage:

Das Ergebnis der „Schwachwindanalyse“, ist eine zusammenfassende Darstellung der gesamten Ersatzspeisung in Form eines Histogramms (mit Überschrift „Ersatzspeisung aus konventionellen Kraftwerken“), das sich immer auf die aktuelle Gesamtauswertung bezieht, also zum Jahresende hin zunehmend genauer wird.

Danach wird der gesamte Jahresverlauf der Windkraft und PV-Einspeisung dargestellt mit dem Ziel, schon zu Jahresbeginn eine Gesamtjahres-Prognose zu ermöglichen und diese mit dem aktuellen Verlauf vergleichen zu können.

Quellenverzeichnis

- [1] smard strommarktdaten der Bundesnetzagentur
- [2] Windjournal (Windenergie-Schwankung, Sonnenenergie-Schwankung)
- [3] Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Hans-Werner Sinn, ifo-Institut München, „Wieviel Zappelstrom verträgt das Netz“(2014)
- [4] Vernunftkraft, Windkraft vs. Würfeln; Statistische Betrachtungen
- [5] Vernunftkraft Landesverband Hessen e.V.
- [6] <https://pc-projekte.lima-city.de/stromnetz-01.html>
Netzfrequenz-Infodienst
- [7] Netzfrequenzmessung <https://www.netzfrequenzmessung.de/aktuelles.htm>