



Bemerkungen zum Osterpaket der Bundesregierung

Hintergrundpapier

Wilfried Lyhs, Siddhant Bane

01.05.2022

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	4
Die Volatilität der Erneuerbaren	4
Energien im Osterpaket für 2030 und 2035	5
Kosten des Osterpakets für 2030 und 2035.....	8
Zusammenfassung.....	9
Literaturverzeichnis	11

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Sankey-Diagramm für die Energieproduktion in 2030; primär werden 1247 TWh eingesetzt und Verluste in Höhe von 442,3 TWh (35%) erzeugt bis 750,7 TWh im Netz bereitstehen und 54,4 TWh Wasserstoff in den Speicher produziert wurden 8

Tabelle 1: Energieerzeugung in TWh /Jahr mit Ausbau der erneuerbaren Energieerzeuger wie im Osterpaket im Jahr 2030 und 2035 6

Tabelle 2: Investitionskosten für den Ausbau ab Status Quo; unveränderte oder rückzubauende Kapazitäten werden nicht berücksichtigt 9

Einleitung

Am 06.04.2022 verkündete der Bundesminister für Wirtschaft und Klimaschutz Robert Habeck das sog. Osterpaket: der Plan für den Ausbau der erneuerbaren Energien durch Windenergie auf dem Land und Photovoltaik in Deutschland bis 2035. Der Ausbau der Windenergie offshore wird später durch eine Neuauflage des Windenergie-auf-See-Gesetzes geregelt werden. Gegenüber dem aktuellen Stand von 122 GW sollen die Erneuerbaren bis 2030 auf etwa 353 GW ausgebaut werden. Für unsere Berechnungen haben wir dabei für die bislang etwas vernachlässigte Offshore-Energieerzeugung eine Verdreifachung der Kapazität angesetzt. Der Anteil der Erneuerbaren an der gesamten Stromerzeugung soll mindestens 80% betragen.

Die Volatilität der Erneuerbaren

Da mit zunehmendem Anteil der erneuerbaren Energiequellen die Schwankungen der aus Wind und Sonne gewonnenen Energie (Volatilität) größer werden und die Stabilität der Stromversorgung beeinträchtigen, wollen wir diese Volatilität erst einmal in Zahlen fassen. Mit der nachstehenden Rechenvorschrift werden die Schwankungen von Messwert y_i zum Vorgänger y_{i-1} erfasst und, damit sich Änderungen wegen der unterschiedlichen Vorzeichen nicht kompensieren, quadriert. Aus dieser Summe wird anschließend die Wurzel gezogen und durch die Schwankungsbreite der Messwerte $y_{\max} - y_{\min}$ dividiert, sodass der Volatilitätswert dimensionslos wird.

$$Vol = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^N (y_i - y_{i-1})^2}}{y_{\max} - y_{\min}}$$

mit y_i : Messwerte $i = 1 \leq i \leq N = 8760$, $y_{\max} - y_{\min}$: Spannbreite der Messwerte

Für die Messwerte aus 2021¹⁾ liefert die Berechnung für den Wind onshore den Wert $Vol = 2$, für Wind offshore den Wert $Vol = 4$ und für die Photovoltaik $Vol = 6,2$. Aber auch die Leistungsanforderungen des Netzes sind wenig konstant: Übers Jahr hat die Last im Netz eine Volatilität von 4,7.

Da wir wissen, wieviele TWh (Terawattstunden) Energie von den Erzeugern 2021 produziert worden sind¹, können wir unter der Annahme, dass zusätzliche Windräder und PV-Panels nicht die Erzeugung der vorhandenen behindern,

¹ Quelle: <https://www.stromdaten.info/ANALYSE/production/index.php> (unter Verwendung der Datenquelle der Agora Energiewende https://www.agora-energiewende.de/service/agorame-ter/chart/power_generation/24.01.2022/31.01.2022/today/ (abgerufen am 31.01.2022))

d.h. die Leistung linear skalierbar ist, die Energieproduktion bei Kenntnis des Erweiterungsfaktors ableiten.

Wir gehen davon aus, dass Winde in den nächsten Jahren ähnlich wehen, wie sie es im Jahr 2021 getan haben, und die Sonne ähnlich intensiv scheint. Ferner wird 2030 die im Osterpaket erwartete Energie aus Erneuerbaren in der Größenordnung von 600 TWh nur dann geliefert, wenn auch die Erzeugung von Strom aus Biomasse etwas mehr als verdoppelt wird. Das sind die Annahmen in der nachstehenden Berechnung, ohne dass das Osterpaket hierzu Angaben macht.

Allerdings fehlt zu dem im Osterpaket prognostizierten Jahresverbrauchswert von 750 TWh/a noch ein Teil, von dem uns die Verfasser des Osterpakets nicht verraten, wie er gedeckt werden soll. Erschwerend kommt hinzu, dass es Phasen mit kaum Wind und Sonne („Dunkelflauten“) gibt, in denen wenig erneuerbare Energie produziert wird und z.B. Gaskraftwerke einspringen müssen, um den Bedarf im Netz zu decken.

Nehmen wir daher an, dass unsere Kohlekraftwerke bis 2030 noch mit halber Kraft produzieren und die Kernkraftwerke bis dahin alle abgeschaltet sein werden. Mit den Kohlekraftwerken auf halber Last könnten zusätzliche 80 TWh erzeugt werden. Die Deckungslücke ist jetzt zwar auf der Basis von Jahreswerten auf 71 TWh geschrumpft, aber es bleiben immer noch 2.884 h im Jahr, an denen die Erneuerbaren schwächeln. In dieser Zeit müssen Erdgaskraftwerke in Gang gesetzt werden. So werden im Jahr 2030 zum Füllen der Lücken weitere 153,5 TWh benötigt.

Energien im Osterpaket für 2030 und 2035

Es gibt aber auch das umgekehrte Problem im Osterpaket. Im Fall (1) der Tabelle 1 werden 2030 an wind- und sonnenreichen Tagen 82,3 TWh mehr produziert als gebraucht werden. Das entspricht etwa 10 % der Gesamtenergie. Diese Energie ließe sich nur durch Abschalten von Windrädern und PV-Anlagen reduzieren, was angesichts der geringen Auslastung von Wind- und PV-Anlagen (Volllaststunden² Wind onshore: 1620 h, offshore: 3180 h und PV 899 h) unökonomisch wäre. Da 2030 noch keine Energiespeicher in Betrieb sind, die diese Energie aufnehmen könnten, geht die Überproduktion einfach verloren. Insgesamt werden von der gesamten erzeugten Energie (828,3 TWh)

² Die Anzahl der Volllaststunden wird aus der tatsächlich im Jahr produzierten Energie und der Kapazität, d.h. der Leistungsbereitschaft der Ablagen gemessen z.B. in GW, berechnet. D.h. die Volllaststunden sind die Anzahl der Stunden, in der eine Anlage bei voller Last die tatsächlich produzierte Energie erzeugen könnte.

im Fall (1) nur 70% aus erneuerbaren Energiequellen gespeist werden. Damit wird das im Osterpaket gesetzte Ziel von 80% nicht erreicht.

Würden bis 2030 genügend Elektrolyseure zur Verfügung stehen, um den Überschuss zur Produktion von Wasserstoff zu nutzen, könnte der Verlust auf 23,3 TWh verringert werden. Der produzierte Wasserstoff würde auf dem entstehenden Markt Absatz finden oder könnte dem Erdgas beigemischt werden. Diese Situation ist im Sankey-Diagramm in der Abbildung 1 dargestellt.

Versucht man den Grad der Erneuerbaren durch weiteren Zubau von Wind- und PV-Anlagen weiter zu steigern (Fall (2) in Tabelle 1, Kohlekraftwerke und „andere“ sind abgeschaltet), wächst zugleich der Anteil der nicht genutzten Überschussenergie auf 166 TWh. Das sind immerhin 18% der Gesamtenergie von 916,5 TWh. Der Bedarf im Netz von 750 TWh wurde konstant gehalten und der Anteil der Erneuerbaren beträgt jetzt 81%.

Tabelle 1: Energieerzeugung in TWh /Jahr mit Ausbau der erneuerbaren Energieerzeuger wie im Osterpaket im Jahr 2030 und 2035

	EE: Wind +PV	An- dere EE	Kohle	An- dere	Erd- gas	Über- schuss	H ₂	Netz- last	Anteil EE
(1) 2030	452,9	122,8	80,2	17,8	154,5	-77,7		750,7	70%
(2) 2035	627,4	122,8	0	0	166,3	-165,8		750,7	81%
(3)	823,6	122,8	0	0	0	-298,2	102,3	750,7	100%

Im Fall (2) werden von der jetzt 627,4 TWh betragenden Produktion der Erneuerbaren 166 TWh als Überschuss zu Zeiten produziert, in denen kein entsprechender Bedarf im Netz besteht. Würden mit dem Überschuss Elektrolyseure beliefert werden, könnte der so produzierte Wasserstoff in den Dunkelflauten anstelle des Erdgases verstromt werden: Eine sinnvolle Verwendung des Überschussstroms wäre gesichert. Allerdings reicht der erzeugte Wasserstoff noch nicht aus, um über das Jahr den Füllstand eines Gasspeichers stabil zu halten und einen kontinuierlichen Betrieb über das Jahr hinaus zu ermöglichen. Von den 166 TWh des Überschusses werden nur 46 TWh³ wiedergewonnen, die restlichen 120 TWh werden dem Speicher entnommen und müssten für einen kontinuierlichen Betrieb aus einer externen Wasserstoffquelle kommen.

Bemerkenswert ist auch, dass trotz der erhöhten Produktion der Erneuerbaren im Fall (2) die stützende Energiezufuhr durch Erdgas nur langsam abnimmt.

³ Die Berechnung erfolgt unter den Annahmen, dass Wasserstoff mit einem Wirkungsgrad von 70% erzeugt werden kann und die Verstromung von Wasserstoff mit einem Wirkungsgrad von 40% möglich ist.

Selbst wenn 2035 noch Kohle verstromt würde, würden immer noch 106 TWh Erdgas notwendig sein, um Spitzenlasten aufzufangen.

Erst bei einem weiteren Ausbau der Erneuerbaren auf eine Gesamtleistung von 794 GW (heute: 122,5 GW d.h. Skalierung um Faktor 6,5) wird aus der Überschussenergie von 298,2 TWh so viel Wasserstoff produziert, dass dessen Verstromung die Dunkelflauten abdeckt. In dieser Kalkulation, die als Fall (3) in der obigen Tabelle dargestellt ist, beträgt der Anteil erneuerbarer Energie 100%.

Grundsätzlich ist ein Zwischenspeicher für Energie eine Lösung, mit der die volatile Stromerzeugung durch Erneuerbare „geglättet“ werden kann. Da die direkte elektrische Speicherung noch zu teuer ist, wird man die überschüssige elektrische Energie umwandeln müssen, um sie speicherfähig zu machen. Die am weitesten verbreitete Methode hierzu ist, Wasser mit der Überschussenergie in höher gelagerte Becken zu pumpen und wieder über eine Turbine abzulassen, wenn Energie gebraucht wird (sog. Pumpspeicherkraftwerke). Ein anderes Verfahren, das auch im flachen Land erfolgreich ist, setzt Elektrolyseure ein, um mit Hilfe der Überschussenergie Wasser zu spalten und den entstehenden Wasserstoff in Tanks oder Kavernen unter Druck zu lagern und bei Energiebedarf wieder zu verstromen.

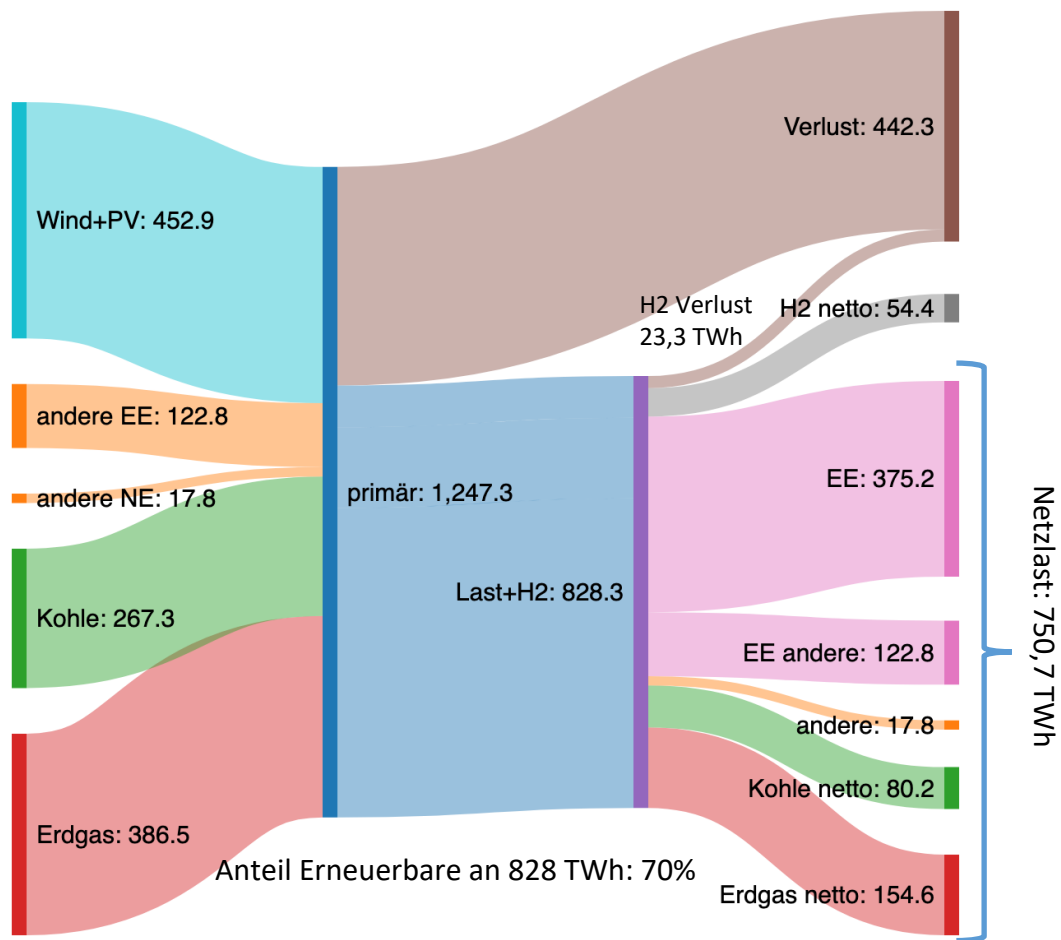


Abbildung 1: Sankey-Diagramm für die Energieproduktion in 2030; primär werden 1247 TWh eingesetzt und Verluste in Höhe von 442,3 TWh (35%) erzeugt bis 750,7 TWh im Netz bereitstehen und 54,4 TWh Wasserstoff in den Speicher produziert wurden

Wie bei allen Energieumwandlungen werden hierbei Verluste anfallen. Diese sind bei dem beschriebenen Prozess sehr hoch: Nur etwa 28% der Überschussenergie können nach der Rückverstromung wieder elektrisch genutzt werden.

Abbildung 1 stellt ausgehend von den eingesetzten Primärenergien die Aufspaltung in nutzbare und bei der Umwandlung verlorene Energiemengen dar.

Kosten des Osterpakets für 2030 und 2035

Mit dem Ausbau der erneuerbaren Energieanlagen müssen in jedem Fall weitere Gaskraftwerken gebaut werden, die in Dunkelflauten die Energieerzeugung mit hoher Peak-Leistung unterstützen. Das Osterpaket gibt hierzu nur die Peak-Leistungen (Kapazitäten) von Wind und PV vor. Die Peak-Leistungen in den linken Spalten der Tabelle 2 für Gaskraftwerke, die Erdgas oder Wasserstoff verstromen können, und die für Elektrolyseure erforderliche Peak-Leistung ergeben sich im Modell aus der stündlichen Bedarfsermittlung gegenüber der Netzlasterzeugung.

Im Fall der Erdgaskraftwerke, von denen 40-45 GW bis 2030 zugebaut werden müssten um den Spitzenbedarf decken zu können, bedeutet dies, dass sie mit der Ablieferung von 154 TW nur zu 27% ausgelastet sein werden. Ähnliches gilt für die Elektrolyseure: deren Auslastung beträgt 21%. Die fehlende kapazitäts-gemäße Auslastung wird die Gestehungskosten für den erzeugten Strom in die Höhe treiben. Auf der Basis der von Fraunhofer ISE genannten Stromgestehungskosten³⁾ wird für 2030 ein Wert von etwa 152 €/MWh in 2030 und 127 €/MWh in 2035 errechnet.

Tabelle 2: Investitionskosten für den Ausbau ab Status Quo; unveränderte oder rückzubauende Kapazitäten werden nicht berücksichtigt

	EE: Wind +PV	Erd- gas	H ₂ Ver- strom	Elekt- roly- seur	Capex in Mrd €			Summe Capex
	GW Peak	GW Peak	GW Peak	GW Peak	EE Aus- bau	Gas- kraft- werke	Elekt- roly- seure	Mrd €
(1) 2030	353	65	-	71,4	260	27	43	330
(2) 2035	496	-	81,5	119	418	49	71	538
(3)	794	-	80	150	632	47	90	769

Die Kosten für den Aufbau der Infrastruktur im rechten, grünen Teil der Tabelle 2 werden überschlägig aus den Capex-Werten pro Kapazität in der Literatur⁴ berechnet. Vermutlich werden die Kosten für die Bereitstellung von Kapazitäten zur Energieerzeugung in den nächsten Jahren weiter fallen, sodass die Werte in Tabelle 2 als obere Grenze zu bewerten sind.

Kosten für den Ausbau von Gasspeichern oder notwendigen Pipelines wurden nicht berücksichtigt.

Zusammenfassung

Das Osterpaket macht keine vollständigen Angaben, aus denen ein schlüssiges Gesamtbild für die Energieerzeugung in Deutschland bis 2035 erstellt werden kann. Es fehlen z.B. Angaben zum Ausbau anderer erneuerbarer Energiequellen wie Pumpspeicher, Laufwasser und Biomasse. Zum Ausbau der Offshore-Windanlagen werden keine Aussagen gemacht, vielmehr wird auf die Erweiterung des Windenergie-auf-See-Gesetzes verwiesen. Auch werden keine Angaben darüber gemacht, durch welche Anteile klassischer Energiequellen (Kern-

⁴ Vgl. FhG ISE: Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien, 2021

kraft, Stein- und Braunkohlekraftwerke, Gaskraftwerke) die Bedarfslücken gedeckt werden sollen. Ebenfalls unberücksichtigt bleibt, dass es erneuerbare Überschussenergie geben wird, die ohne Energiespeicher nicht zur Deckung des Strombedarfs verwendet werden kann. Daher wird das Ziel, in 2030 80% des Energiebedarfs durch Erneuerbare zu decken, deutlich verfehlt. Vielmehr wird dieses Ziel erst 2035 erreicht.

Zur Deckung des Strombedarfs in den Dunkelflauten ist der massive Ausbau von Gaskraftwerken notwendig. Hierzu wie auch zum Ausbau von Elektrolyseuren oder Gasspeichern macht das Osterpaket keine Angaben. Diese fehlenden Daten werden in unserem Modell auf der Basis von Stundenwerten aller Energieerzeuger und des Bedarfs in Deutschland berechnet.

Vollkommen unerwähnt bleibt der Kostenaspekt im Osterpaket. Die beschriebene Modellierung liefert auch hierzu Abschätzungen.

Um mittelfristig von Erdgaslieferungen unabhängig zu werden, bietet sich an, die unvermeidbaren Überschussenergien der Erneuerbaren in Speichern bis zum Abruf in den Dunkelflauten zwischenzulagern oder zur Produktion von Wasserstoff zu nutzen. Letzteres erfordert den zügigen Ausbau der Elektrolyseurkapazitäten sowie den Hochlauf einer internationalen Wasserstoffwirtschaft, da auf absehbare Zeit wohl keine installierten Kapazitäten, wie sie in Tabelle 2 dargestellt sind, erreicht werden können. Die Nationale Wasserstoffstrategie sieht in Deutschland bis 2040 einen Ausbau auf nur 10 GW installierte Leistung vor.

Deutschland bleibt dementsprechend auch zukünftig ein Energieimportland. Ein autarker Betrieb, bei dem ausschließlich erneuerbare Energien eingesetzt werden und keine Zulieferungen von außerhalb erforderlich sind, kann erst bei einem mehr als sechsfachen Ausbau von Wind und PV erreicht werden. Es ist fraglich, ob dies auf deutschem Boden möglich ist.

Insgesamt sehen wir das Osterpaket als Schritt in die richtige Richtung. Aber entscheidende Fragen bleiben unbeantwortet. Deshalb ist die Planung als Ganzes nicht nachvollziehbar. Insbesondere vermissen wir Aussagen über die erwarteten Kosten. Aufgrund der Vorgaben und unserer Kalkulationen bleibt hier nur ein Schluss: Strom wird in Deutschland noch einmal teurer werden.

Literaturverzeichnis

<https://www.stromdaten.info/ANALYSE/production/index.php> (unter Verwendung der Datenquelle der Agora Energiewende https://www.agora-energie-wende.de/service/agorameter/chart/power_generation/24.01.2022/31.01.2022/to-day/ (aufgerufen am 31.01.2022))

FhG ISE: Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien, 2021