

Dieser Artikel wurde im April 2021 in „Chemie Ingenieur Technik“, CITA 93 (4), veröffentlicht. Link: <http://dx.doi.org/10.1002/cite.202000148>

## PtX-Anwendungen mit Anschluss an das Stromnetz

### PtX applications with connection to the power grid

Carsten Siebels

#### Zusammenfassung

Power-to-X -Anwendungen (PtX) stehen im Rahmen der Energiewende u. a. deshalb in der Diskussion, da von ihnen erwartet wird, dass durch sie die zeitweise auftretenden Überschüsse elektrischer Energie aus der direkten Nutzung von Sonne und Wind sinnvoll verwertet werden können. Es werden am Beispiel Deutschlands die in den nächsten Jahrzehnten erwartbaren Überschussleistungen und -zeiten analysiert. Daneben werden sowohl die zeitgerecht durch Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien abdeckbaren als auch die dadurch ohne Zwischenspeicherung nicht abdeckbaren Anteile der Nachfrage exemplarisch ausgewiesen.

Schlagwörter: Power-to-X, Stromverbrauch, Abdeckungsgrad, Dauerlinie, Klimaschutzplan 2030

#### Abstract

Power-to-X applications (PtX) are part of the energy transition and therefore in the discussion since they are expected to be able to use the temporary surpluses of electrical energy from the direct use of sun and wind. Using Germany as an example, the surplus benefits and periods to be expected in the coming decades will be analyzed. In addition, both the portions of demand that can be covered in a timely manner by generating electricity from renewable energies and the portions of demand that cannot be covered by them without intermediate storage are shown as examples.

Keywords: Power to X, power consumption, coverage, permanent line, climate protection plan 2030

#### Einführung

Im Rahmen der deutschen Energiewende hat die Bundesregierung im Jahr 2019 ein Klimaschutzprogramm 2030 zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050 [1] verabschiedet. U. a. wird darin ein Zielmodell für den Ausbau Erneuerbarer Energien (EE) im Jahr 2030 als angestrebt ausgewiesen.

EE-Technologie	Stromerzeugung 2030 in TWh	Installierte Leistung 2030 in GW
Wind an Land	140-145	67-71
Photovoltaik	90	98
Wind auf See	79-84	20
Biomasse	42	8,4
Wasserkraft und sonstige	21	6

Tabelle 1: Zielmodell der Bundesregierung für das Jahr 2030 [1]

Die Relationen der in Tabelle 1 dargestellten Energiemengen und Leistungen stellen dabei aus Sicht des Autors Anhaltswerte dar, die stark von der zukünftig eingesetzten Technologie, den Standorten

der Erzeugung und insbesondere von den meteorologischen Verhältnissen im Kalenderjahr abhängen. Der jährliche Ertrag der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien kann stark schwanken, wie das Beispiel in Abbildung 1 für die Sonnenscheindauer als Indikator für Stromerzeugung mittels Photovoltaik zeigt.

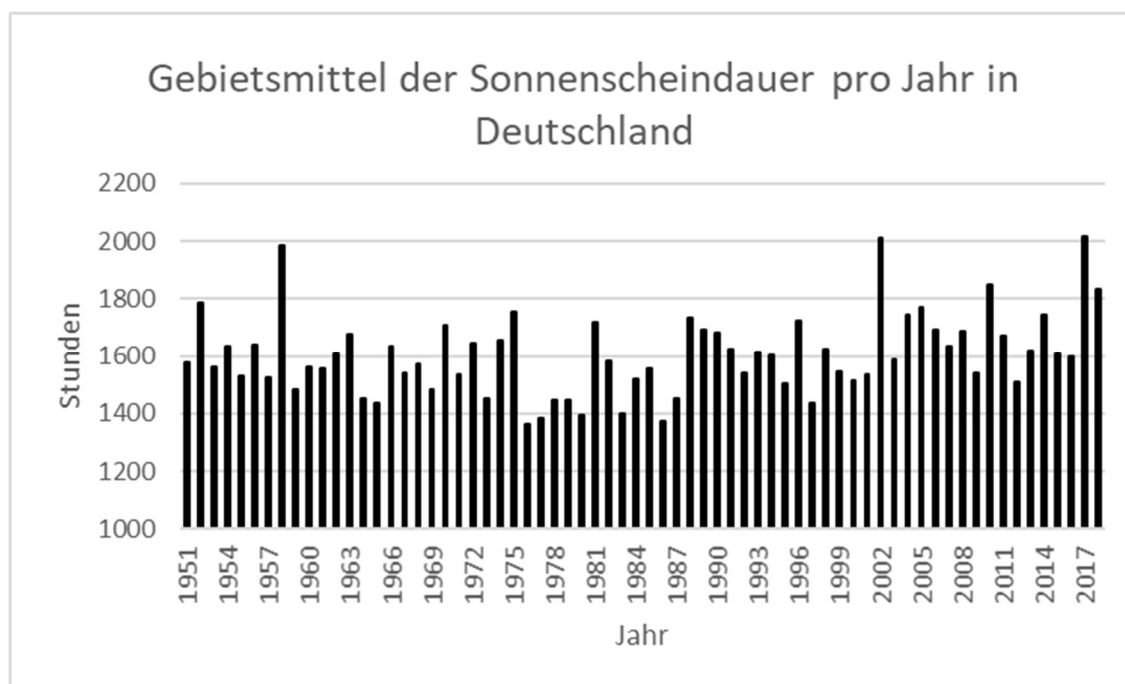


Abbildung 1: Gebietsmittel der Sonnenscheindauer pro Jahr in Deutschland [2]

Zusätzlich ist die unterjährige Stromerzeugung mittels Laufwasserkraftwerken, Windenergieanlagen und Photovoltaikanlagen nicht steuerbar, sondern abhängig vom jeweiligen Dargebot. Einerseits kommt es daher zu Situationen, in denen nur sehr wenig Leistung zur Deckung der Stromnachfrage verfügbar ist. Andererseits werden zukünftig immer öfter Situationen auftreten, in denen mehr elektrische Leistung zur Verfügung steht, als aktuell benötigt wird oder vom Stromnetz übertragen werden kann. Zum Umgang mit diesen überschüssigen Leistungen kommen in einem vorwiegend auf Erneuerbaren Energien basierenden Stromversorgungssystem verschiedene Optionen in Betracht:

- Speicherung in Pumpspeicherkraftwerken
- Speicherung in Batterien
- Export in benachbarte Strommärkte
- Verschiebung der Nachfrage (DSM) durch kurzfristige Erhöhung
- Reduzierung der Einspeisung aus Biomasseanlagen
- Abregelung der EE-Erzeugungsanlagen
- Umwandlung in Wärme (Power to Heat)
- Erzeugung von Wasserstoff und anderen speicherbaren chemischen Produkten.

In Zeiträumen, in denen nicht genug elektrische Leistung aus Erneuerbaren Energien zur Verfügung steht, kommen folgende Optionen in Betracht:

- Ausspeicherung aus Pumpspeicherkraftwerken
- Ausspeicherung aus Batterien
- Import aus benachbarten Strommärkten
- Verschiebung der Nachfrage (DSM) durch kurzfristige Reduzierung
- Erhöhung der Einspeisung aus Biomasseanlagen
- Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen und Kernenergie

- Stromerzeugung aus Wasserstoff und anderen speicherbaren chemischen Produkten.

Dieser Beitrag fokussiert sich auf die Möglichkeit der längerfristigen Speicherung von im Stundenmittel überschüssiger elektrischer Leistung. Das Energiespeichervermögen der in Deutschland verfügbaren Pumpspeicherkraftwerke ist mit etwa 40 GWh gegenüber dem täglichen Bedarf von 1000-2000 GWh so gering, dass diese vorwiegend zum Ausgleich von Prognosefehlern und kurzfristigen Erzeugungsschwankungen sowie für Systemdienstleistungen im Netz genutzt werden können. Der Austausch mit benachbarten Strommärkten wird für die folgenden Betrachtungen ausgeblendet, da sowohl die Nachfrage dort als auch die zukünftig erhöhte Stromerzeugung aus Wind und Sonne als zeitlich hoch korreliert mit dem heimischen Strommarkt anzusehen sind. Auch wird der Einfluss von Schwankungen in der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien auf die Nachfrage (DSM – Demand-Side-Management) für die Betrachtungen ausgeblendet, da die Kosten der genutzten elektrischen Energie für die meisten Anwendungen deutlich geringer sind als ihr Nutzen für den Anwender. Unter DSM können auch Steuerungsmöglichkeiten für die Ladung von Elektrofahrzeugen im nationalen Kontext gesehen werden. Für deren Umfang und Einfluss sind aktuell allerdings noch keine umfassenden Erfahrungen vorhanden.

Zur Nutzung von Überschussleistungen und ggf. auch zur Deckung der residualen Nachfrage verbleiben damit in diesem Beitrag die PtX-Anwendungen. Dies sind Stromanwendungen zur Erzeugung von Raumwärme, Prozesswärme, Wasserstoff und anderen chemischen Stoffen.

Zur Identifizierung des energetischen und zeitlichen Potenzials von PtX erfolgt zuerst eine Analyse der Charakteristiken von EE-Stromerzeugern.

### **Charakteristiken der regenerativen Erzeugung in Deutschland**

Die Charakteristiken der verschiedenen Arten der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien in Deutschland sind voneinander recht unterschiedlich, wie Abbildung 2 auf Basis der Auswertung von Daten aus [3] exemplarisch für das Jahr 2019 zeigt. Die Stromerzeugung aus der Gesamtheit aller Biomasse-Anlagen ist mit ca. 50-70 % der installierten Leistung über das ganze Jahr relativ stabil und liegt mit maximal 5.000 MW immer unterhalb der jeweiligen Nachfrage. Laufwasserkraftwerke speisen in Summe zwischen 20 % und 50 % ihrer installierten Leistung ein. Ihre maximale Einspeiseleistung betrug unter 2.600 MW. Für beide Erzeugungsarten wird auch in der Leistungsbilanz der deutschen Übertragungsnetzbetreiber [4] eine gegenüber der Erzeugung aus

Wind und Photovoltaik deutlich geringere Nichtverfügbarkeit angeben.

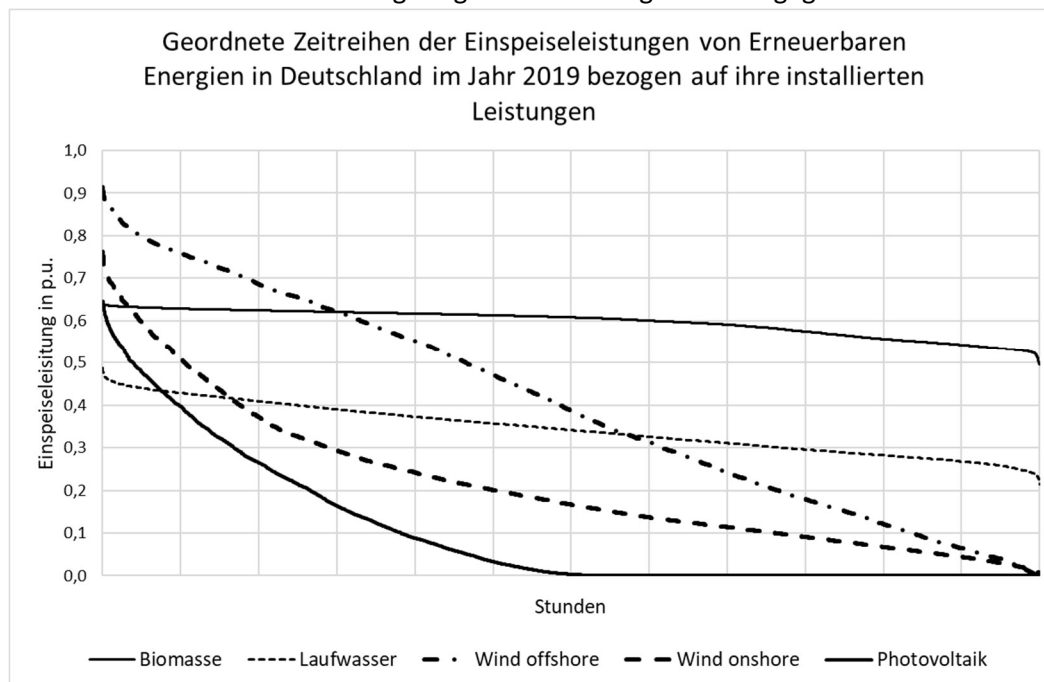


Abbildung 2: Geordnete Dauerlinien der EE in DE 2019 [2]

Die direkte Stromerzeugung durch Photovoltaik ist naturgemäß auf ca. 50 % des Jahres begrenzt und erreichte für Deutschland im Jahr 2019 in der Spitze unter 70 % der installierten Leistung. Auch wenn viele Anlagen durchaus 100 % ihrer Nennleistung erreichen, so ergeben sich in Summe aller Anlagen aufgrund ihrer räumlichen Verteilung, der unterschiedlichen Ausrichtungen und anderer Faktoren geringere gleichzeitige Einspeiseleistungen. Die Prognostizierbarkeit der Einspeiseleistung aus Photovoltaik ist – besonders nachts – besser als die der Windenergie.

Die gesicherte Leistung der Stromerzeugung aus Windenergie bewegt sich, wie Abbildung 2 zeigt und in [4] ausgewiesen, bei ca. 1 % der installierten Leistung. Die maximale Einspeisung der Windenergieanlagen betrug im Jahr 2019 an Land unter 80 % und auf See (offshore) über 90 % der installierten Leistung. Bei diesen Zahlen ist zu berücksichtigen, dass es für beide Erzeugungsarten zu netzbedingten Leistungsreduzierungen (Einspeisemanagement) gekommen sein könnte. Die gegenüber der Windenergienutzung an Land recht hohe gleichzeitige Einspeisung aus Offshore-Windenergieanlagen resultiert aus den mit ca. 33.000 km<sup>2</sup> [5] relativ kleinen dafür nutzbaren Flächen in Nord- und Ostsee gegenüber der Landfläche Deutschlands von fast 358.000 km<sup>2</sup> [6].

Im Jahresverlauf 2019 ergaben sich je Stunde kumulierte mittlere Einspeiseleistungen und mittlere Verbrauchsleistungen gemäß Abbildung 3. Es ist ersichtlich, dass allein die Stromerzeugung aus Biomasse und Laufwasser einen verlässlichen Beitrag zur Deckung der Nachfrage liefert. In Summe können nur für ca. 20 Stunden Leistungsüberschüsse der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien mit Werten bis zu 3.000 MW festgestellt werden.

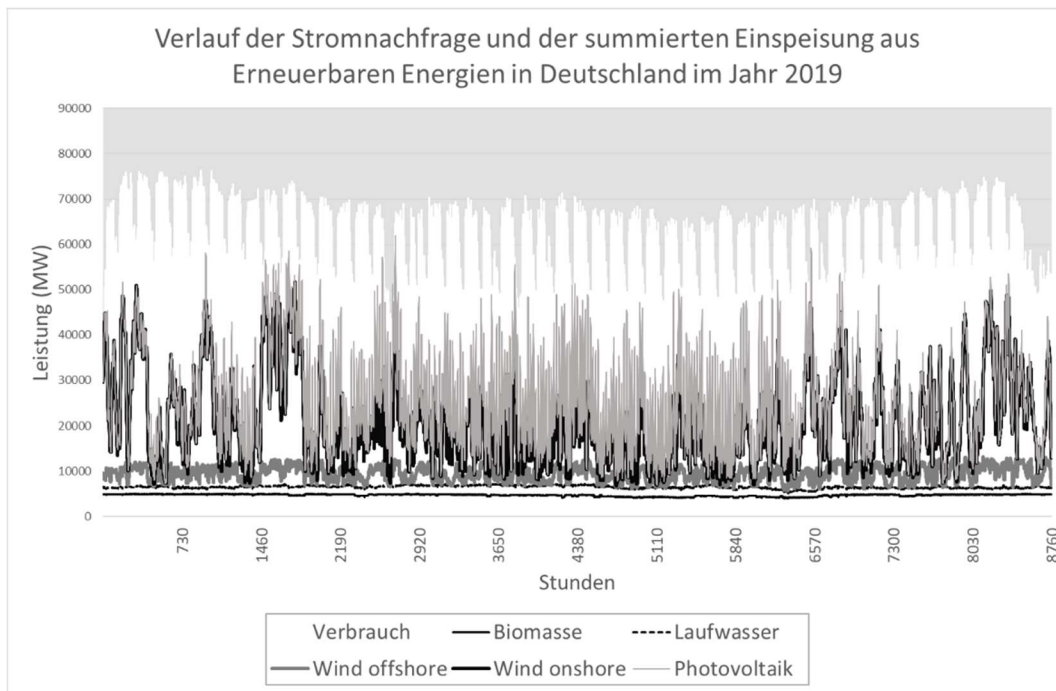


Abbildung 3: Leistungsverläufe Nachfrage und EE in DE 2019 [3]

Die Bedeutung von deutschlandweiten Überschüssen der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien ist aktuell noch recht gering. Dass dennoch häufig Stromexporte aus Deutschland auftreten, liegt am Einsatz von heute noch in Betrieb befindlichen Kernkraftwerken und Kohlekraftwerken. Einerseits haben diese häufig niedrigere Grenzkosten als viele Erzeugungsanlagen im benachbarten Ausland, andererseits müssen sie Leistung einspeisen, um die benötigte positive und negative Regelleistung im Bereich mehrerer Gigawatt kurzfristig bereitstellen zu können.

Heute werden besonders Windenergieanlagen dort errichtet, wo zwar die Ausbeute hoch ist, aber wenig Nachfrage besteht. Dadurch kommt es regional zu hohen Leistungsüberschüssen, die entweder abgeregelt werden müssen oder zu einem Ausbaubedarf des Netzes führen oder anderweitig, z. B. durch PtX-Anlagen genutzt werden können.

Die grundsätzlichen Verhältnisse von Stromnachfrage und Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien in der Zukunft werden im Folgenden dargestellt.

### **Stromnachfrage und regenerative Stromerzeugung**

Die den weiteren Betrachtungen zugrundeliegenden Entwicklungen der installierten Leistungen von Erzeugungsanlagen auf Basis Erneuerbarer Energien basieren auf den aktuellen Angaben der Bundesnetzagentur für das Jahr 2019 [3], dem Netzentwicklungsplan 2019-2030 [7], dem Klimaschutzprogramm 2030 [1] und dem Szenariorahmen 2021-2035 [8]. Für den Zeitraum nach 2040 wurden diese linear extrapoliert. Es ergibt sich damit ein Verlauf der installierten Leistungen gemäß Abbildung 4.

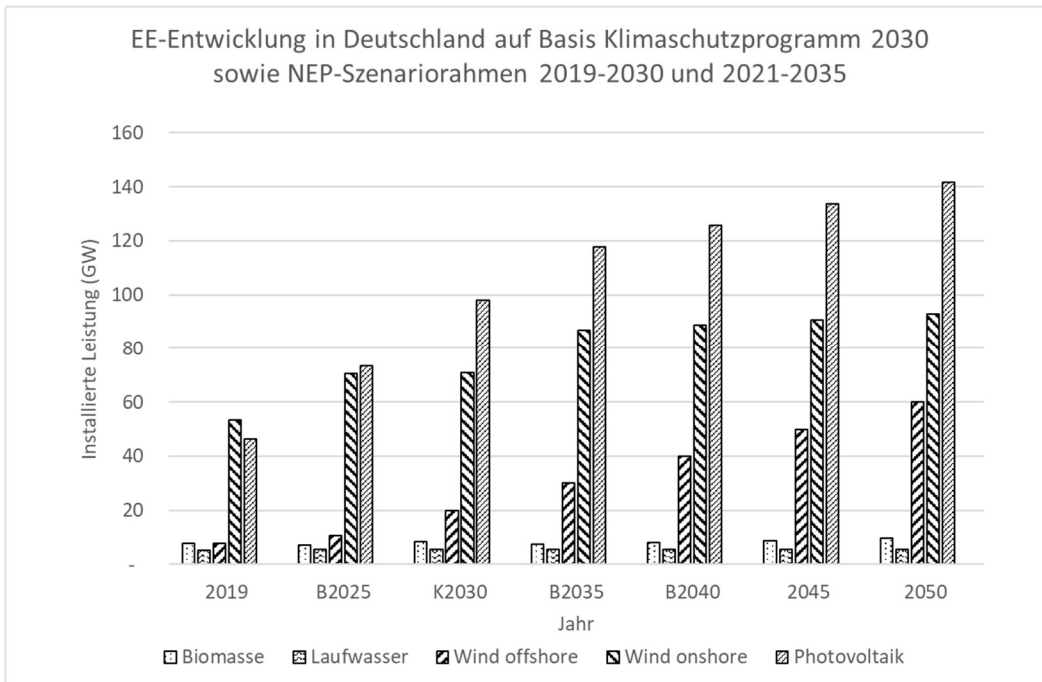


Abbildung 4: Entwicklung der Erneuerbaren Energien 2019-2050 [1],[2],[7],[8]

Tabelle 1Abbildung 4 weist ab 2035 sowohl für Windenergieanlagen an Land als auch für Photovoltaikanlagen installierte Leistungen aus, die die maximale Nachfrageleistung von ca. 80 GW im Jahr 2019 deutlich überschreiten.

Zur Beurteilung der Auswirkungen dieser hohen installierten Leistungen auf die stündliche Leistungsbilanz sind die Zusammenhänge der stündlichen mittleren Leistungsverläufe von Erneuerbarer Erzeugung und unbeeinflusster Nachfrage im Folgenden weiter zu untersuchen.

Mit den in Abbildung 2 dargestellten Erzeugungscharakteristiken für die einzelnen Energieträger und dem für das Jahr 2019 aus [3] entnommenen Nachfrageverlauf in Deutschland ergeben sich die in Abbildung 5

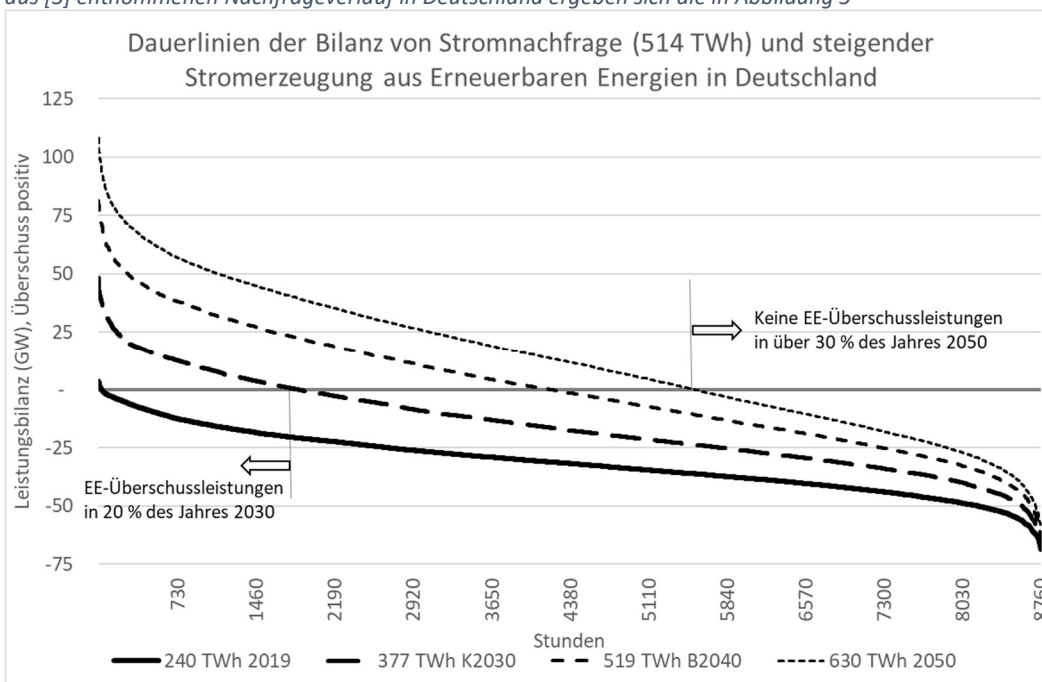


Abbildung 5 dargestellten Verläufe der mittleren stündlichen Leistungsbilanz für Deutschland bis zum Jahr 2050.

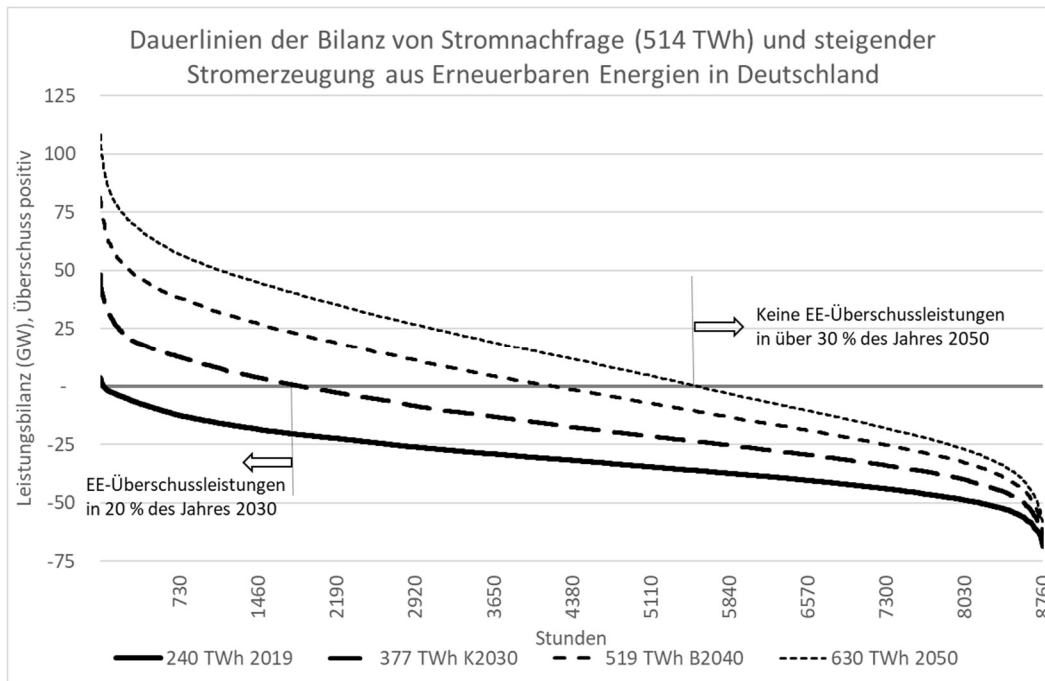


Abbildung 5: Geordnete Dauerlinien der Leistungsbilanz in Deutschland für steigende Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien bei einer jährlichen Stromnachfrage von 514 TWh

Hieraus ist erkennbar, dass es unabhängig von der Entwicklung des Umfangs der Wind- und Sonnenenergienutzung immer Zeiten geben wird, in denen die Nachfrage nicht durch gleichzeitige Strombereitstellung aus Erneuerbaren Energien abgedeckt werden kann. In diesen Zeiten müsste die Stromnachfrage eingeschränkt werden oder es müssen teilweise sehr hohe Leistungen aus Importen, fossilen Energieträgern oder Speichern bereitgestellt werden.

Andererseits steigen sowohl die maximalen Leistungen als auch die Zeitanteile, in denen Erneuerbare Energien nicht direkt für die Deckung der nationalen ungesteuerten Nachfrage genutzt werden können. Diese Energiemengen können exportiert, gespeichert, für Elektromobilität oder für PtX-Anwendungen genutzt werden. Teilweise wird aus wirtschaftlichen Gründen auch auf die Nutzung verzichtet werden müssen, insbesondere wenn sehr hohe schlecht prognostizierbare Leistungen nur über sehr kurze Zeiträume des Jahres auftreten.

Rein energetisch wäre im hier vorgestellten Szenario gemäß Abbildung 6 nach dem Jahr 2050 eine Vollversorgung der ab 2019 konstanten Stromnachfrage aus Erneuerbaren Energien möglich, wenn die Überschussleistung mit einem Wirkungsgrad von ca. 60 % gespeichert und mit einem Wirkungsgrad von ebenfalls ca. 60 % rückverstromt werden könnte.

Gegen das Erreichen einer Vollversorgung spricht allerdings, dass die Energiewende über die Sektorenkopplung, also den Einsatz von Strom für Wärme, Mobilität und bisher auf Kohlenstoff basierte industrielle Prozesse, einen deutlichen Anstieg des Bedarfs an elektrischer Energie aus Erneuerbaren Quellen erfordern wird.



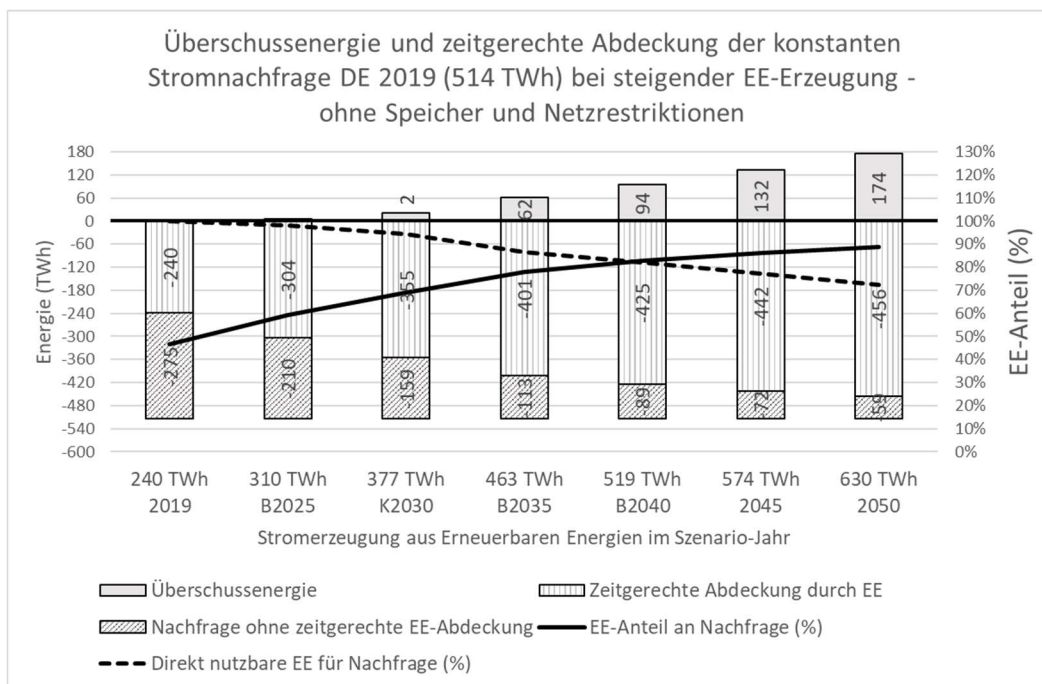


Abbildung 6: Überschussenergie und zeitgerechte Abdeckung der Nachfrage aus EE

In Abbildung 6 werden neben den Energien auch EE-Anteile ausgewiesen. Der Anteil der Nachfrage des Jahres 2019, der zeitgerecht aus EE-Erzeugung gedeckt werden könnte, kann demnach mit zunehmender installierter Leistung, besonders der Offshore-Windenergie-Anlagen, bis zum Jahr 2050 auf ca. 90 % ansteigen. Gleichzeitig sinkt der Anteil der EE-Erzeugung, der für die direkte Deckung der Nachfrage verwertbar wäre, auf ca. 70 % der gesamten EE-Erzeugung im Jahr 2050.

**Fazit**

Selbst bei Erzeugung von elektrischer Energie aus EE, die deutlich größer ist als die Stromnachfrage des Jahres 2019 kann in 30 % der Zeit der Leistungsbedarf nicht vollständig durch diese gedeckt werden. Es müssen dann noch ca. 10 % der Energienachfrage aus Speichern, durch Importe oder fossile Energieträger abgedeckt werden, wenn die Nachfrage aus dem Jahr 2019 weiter voll befriedigt werden soll.

Die Zeiten der Überschussleistungen aus EE können bis zum Jahr 2050 auf bis zu 70 % eines Jahres ansteigen, wobei Maximalwerte von über 100 GW erreicht werden können. Für den Umgang mit diesen Überschussleistungen stehen verschiedene Optionen mit unterschiedlichen wirtschaftlichen Auswirkungen zur Verfügung. Neben der Nichteinspeisung von Leistung, die auch aus Gründen der Transportfähigkeit des Stromnetzes angezeigt sein kann, kommen vorrangig die Speicherung in vorhandenen Speicherkraftwerken und der Export in Marktgebiete mit dann noch vorhandenem Bedarf in Frage. Auch durch zusätzliche Verbraucher wie E-Autos und Wärmepumpen, die nur in Zeiten von ausreichender Leistung aus EE Strom beziehen, werden Überschussmengen reduziert werden können. Wenn damit bereits ein großer Teil der Energie verwertet werden könnte, würden sowohl die Energiemengen als auch die Nutzungszeiten für neuartige Speicheroptionen noch geringer ausfallen, als in diesem Beitrag ausgewiesen wird.

Somit müssen weitere PtX-Anlagen mit Anschluss an ein starkes Verbundnetz stets so ausgeführt werden, dass sie sowohl intermittierend arbeiten können als auch mit geringen Benutzungsdauern noch wirtschaftlich betreibbar sind. Würden diese zu Zeiten von geringer EE-Produktion arbeiten müssen, müsste die Leistung importiert, aus anderen Speichern bezogen oder durch fossile Kraftwerke bereitgestellt werden.



Abkürzungsverzeichnis:

B2025	Szenario B2025 aus NEP 2019-2030
K2030	Angaben aus Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung
B2035	Szenario B2035 aus Szenariorahmen 2021-2035
B2040	Szenario B2040 aus Szenariorahmen 2021-2035
DE	Deutschland
EE	Erneuerbare Energie
NEP	Netzentwicklungsplan Strom
PtX	Power-to-X (X = Wärme, E-Mobilität, Gase, chemische Stoffe)

Literatur:

- 1 Bundesregierung 2019, <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klima-massnahmen-data.pdf?download=1>, Zugriff 25.05.2020
- 2 DWD, 2020, <https://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen/zeitreihen.html?nn=18256#buehneTop>, Download 08.07.2020
- 3 Bundesnetzagentur, <https://www.smard.de/home>, Zugriff 25.05.2020
- 4 Übertragungsnetzbetreiber, [https://www.netztransparenz.de/portals/1/Bericht\\_zur\\_Leistungsbilanz\\_2019.pdf](https://www.netztransparenz.de/portals/1/Bericht_zur_Leistungsbilanz_2019.pdf), Download 25.05.2020
- 5 Wikipedia, [https://de.wikipedia.org/wiki/Ausschließliche\\_Wirtschaftszone](https://de.wikipedia.org/wiki/Ausschließliche_Wirtschaftszone), Zugriff 25.05.2020
- 6 Umweltbundesamt, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/flaeche/struktur-der-flaechennutzung#die-wichtigsten-flachennutzungen>, Zugriff 25.05.2020
- 7 BNetzA, 2019, [https://data.netzausbau.de/2030-2019/NEP/NEP2019-2030\\_Bestaetigung.pdf](https://data.netzausbau.de/2030-2019/NEP/NEP2019-2030_Bestaetigung.pdf), Zugriff 08.07.2020
- 8 BNetzA, 2020, [https://www.netzausbau.de/SharedDocs/Downloads/DE/2035/SR/Szenariorahmen\\_2035\\_Genehmigung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.netzausbau.de/SharedDocs/Downloads/DE/2035/SR/Szenariorahmen_2035_Genehmigung.pdf?__blob=publicationFile), Zugriff 08.07.2020