

# Teil 2 – Energiespeicher

## 1. Definition und Funktion von Energiespeichern

Eine etwas sperrige, dafür aber inhaltlich erschöpfende Definition für Energiespeicher hat der Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BEDW) in einem [Dokument aus dem Jahre 2014](#) vorgeschlagen: Energiespeicher sind demnach...

*„Anlagen, die Energie mit dem Ziel der elektrischen, chemischen, elektrochemischen, mechanischen oder thermischen Speicherung aufnehmen und einer zeitlich verzögerten Nutzung wieder zur Verfügung stellen.“*

Da ist wirklich alles drin; insbesondere werden hier gleich die Energiearten genannt, die zur Speicherung dienen. Das [Energielexikon](#) bezeichnet eine „Anlage, die Energie aufnehmen und später wieder abgeben kann“ als Energiespeicher. Herr Dr. Paschotta, Autor dieser sehr informativen und daher empfehlenswerten Webseite, lässt dieser kurzen und schmerzlosen Definition einige ausführliche Erläuterungen folgen, die der interessierte Leser dort direkt nachvollziehen kann.

Grundsätzlich genügt uns für den Einstieg die kurze Definition, weil sie die Funktion von Energiespeichern ausreichend beschreibt. Unsere auf Erneuerbare Energien bezogene makroökonomische Betrachtungsweise legt allerdings folgende Ergänzung nahe.

*Speicher sind technische Anlagen, die in der Lage sind, die durch die dargebotsabhängigen EE-Erzeuger zeitweilig generierten Überschüsse aufzunehmen, um sie in Mangelsituationen wieder bereit zu stellen.*

Photovoltaik- und Windkraftanlagen sind seit langem die bedeutendsten EE-Erzeugersparten und als solche stark dargebotsabhängig. Erzeugungsschwankungen treten sowohl im Tages- als auch im Jahreszyklus auf. Diese wirken sich bei weiterem Ausbau der Erneuerbaren **zunehmend kritisch** auf die Versorgungssicherheit mit Strom und damit auf unser gesamtes gesellschaftliches Leben aus. Daher wiederholen wir die schon in Teil 1 formulierte Forderung:

**Jeder Neubau einer EE-Anlage muss mit der Bereitstellung eines adäquaten Energiespeichers einhergehen.**

Es ist unserer Meinung nach an der Zeit, diese Forderung in ein entsprechendes Gesetz zu gießen.

Unsere Erörterung des Themas Speicher konzentriert sich aber nicht nur aus Gründen der Stabilisierung des Netzes auf den Stromsektor. Schließlich lautete unsere These aus Teil 1, dass die Sektoren Verkehr und Wärme im Wesentlichen zukünftig durch Strom bedient werden müssen, wenn die vollständige Dekarbonisierung der Wirtschaft gelingen soll. Mit dieser These stehen wir nicht allein.

### Design von Energiespeichern

Damit ein Energiespeicher seine Funktion effektiv erfüllen kann, müssen folgenden Voraussetzungen gegeben sein.

- a) Seine Befüllung muss sich entsprechend seines Einsatzzweckes (Tages- oder Jahreszyklus) möglichst nahe seiner Nennkapazität ändern. Ein Speicher, der sich nicht „dreht“, sprich der ständig nahezu voll oder nahezu leer ist bzw. dessen Befüllung sich im avisierten Einsatzzyklus kaum ändert, ist ein technisch schlecht dimensionierter, unwirtschaftlicher Speicher.
- b) Die Kapazität eines Speichers muss in einem sinnvollen Verhältnis zu den Lade- und Entladeleistungen stehen. Dies trifft in etwa zu, wenn der Speicher im angestrebten Anwendungszyklus wenigstens zur Hälfte geladen bzw. entladen werden kann. Keinesfalls darf die maximale Lade- bzw. Entladeleistung beim Betrieb des Speichers überschritten werden.
- c) Der Speicher muss sowohl für die Aufnahme als auch die Bereitstellung von Energie mit einer, dem Anwendungsfall adäquaten Verzögerung zur Verfügung stehen. Batteriespeicher reagieren z.B. in Millisekunden, Pumpspeicher und erst recht Elektrolyseanlagen bzw. das von ihnen erzeugte Gas benötigen deutlich mehr Zeit zur Energieaufnahme bzw. -abgabe.

## 2. Technische Parameter für Speicher

Nennkapazität: [kWh]:

Maximal möglicher Inhalt des Speichers; physikalisch die Energie, die beim vollständigen Entladen des Speichers zur Verrichtung von Arbeit zur Verfügung steht. **Die Nennkapazität ist die grundlegende physikalische Größe zur Charakterisierung eines Speichers.**

Angaben in Amperestunden (ohne gleichzeitige Angabe der Spannung) oder Watt sagen nichts über den Energieinhalt von Speichern aus. Nichtsdestotrotz findet man selbst in Publikationen von Behörden dergleichen irreführende Angaben, z.B. in der aktuellen [„Genehmigung des Szenariorahmens 2021-2035“ der BNetzA vom 20.Juni 2020](#). Schon in der Basistabelle auf Seite 4, in der die zu betrachtenden Szenarien vorgestellt werden, operiert die BNetzA mit Speicherleistungen statt -kapazitäten. Welche konkreten Schlussfolgerungen sich aus diesen Leistungsangaben ableiten lassen, können wir nicht nachvollziehen. Es bleibt schlicht unklar, wie lange die dort genannten Leistungen in die eine (beim Laden) oder andere (beim Entladen) Richtung zur Verfügung gestellt werden können.

Auf Seite 53 heißt es dann unter der Überschrift 3.6.6 *Speicher*:

*„Die Bundesnetzagentur orientiert sich an ihrer letzten Genehmigung des Szenariorahmens 2019-2030 und nimmt in allen Szenarien eine etwas höhere Kapazität von 3,4 GW an.“*

Solche Aussagen einer Bundesbehörde, von der man eigentlich Sorgfalt im Umgang mit Begriffen und Sachkunde erwarten sollte, verursachen bei Technikern körperliche Schmerzen. Immerhin werden in der folgenden Tabelle 12 auf Seite 54 Leistungen und Kapazitäten bestimmter Speichertypen richtig benannt. Da in ebendieser Tabelle nur Kurzzeitspeicher auftauchen, liegt jedoch die Vermutung nahe, dass Konzepte der Langzeitspeicherung von Strom für die BNetzA auch im Jahre 2020 noch keine für sie erwähnenswerte Rolle spielten.

Beispiele:

- a) **Batterieelektrische Speicher:** Bei diesen Speichern ist zu beachten, dass die Nennkapazität weder beim Laden noch beim Entladen voll ausgeschöpft werden sollte, weil sich dies negativ auf die Lebensdauer der Speicherzellen auswirkt. Dies gilt mehr oder weniger für alle etablierten Typen von Batteriespeichern, also auch für den Bleiakku. Bei der Konzeption von Speicherlösungen sollte man höchstens 90%, besser nur 80% der Nennkapazität als nutzbare Kapazität in Ansatz bringen. Übliche Lithiumionen-Akkus von Elektrofahrzeugen haben Kapazitäten zwischen 20 und 90 kWh. Von einem durchschnittlichen 50 kWh Fahrzeug-Akku lassen sich nach obiger Rechnung nur 40 kWh sinnvoll nutzen. Damit erzielt man derzeit Reichweiten um die 250 km. Pro gefahrenen 100 Kilometern verbraucht ein Elektrofahrzeug der Mittelklasse etwa 16 kWh Elektroenergie. Lassen Sie sich also nicht von den Versprechungen der Fahrzeughersteller hinsichtlich theoretischer Reichweiten täuschen.
- b) Wenn Wasser durch Elektrolyse in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten wird, ist die im Wasserstoff enthaltene chemische Energie das Speichermedium. Das sind pro Kubikmeter unter Normbedingungen etwa 3 kWh. Die Kapazität des Gasspeichers, der den entstehenden Wasserstoff aufnimmt, könnte man, dieser Rechnung folgend, ebenfalls in Kilowattstunden angeben. Dies ist allerdings nicht üblich. Vielmehr werden bei brennbaren Gasen und flüssigen Kraftstoffen Energieinhalte als Masse- oder Volumenäquivalente angegeben. Ohne die Rechnung im Einzelnen auszuführen, ist rein anschaulich klar, dass die Masse des Wasserstoffs in einem Gasspeicher in direkter Proportionalität zu der Energiemenge in Kilowattstunden Elektroenergie steht, die aus dieser Masse durch Rückverstromung gewonnen werden könnte. Ob ebendiese Rückverstromung von Speichergasen in jedem Fall sinnvoll ist, werden wir unter 5. klären.
- c) Pumpspeicherkraftwerke nutzen die potenzielle Energie des Wassers. Neben den Volumina der Speicherbecken geht in die Kapazitätsrechnung der Höhenunterschied ein. (Orangebuch S. 94)

### Maximale Ladeleistung [kW]

Maximale physikalische Leistung, mit der der Speicher geladen werden kann. Mitunter werden synonym maximale Ladeströme angegeben aus denen sich die Kenngröße unter Zuhilfenahme der Nennspannung des Speichers errechnen lässt.

Beispiele:

- a) Bleiben wir bei unserem 50 kWh-PKW-Akku. Wäre seine maximale Ladeleistung 1 kW, würde man 40 Stunden benötigen, ihn von 10% auf 90% zu laden. Dies wäre ziemlich unbefriedigend. Moderne Fahrzeugbatterien bewältigen deshalb Ladeleistungen von 100 kW und mehr. Was Anwendern dabei nicht immer klar ist: Superschnelles Laden von Batterien wirkt sich genau wie schnelles Entladen negativ auf die Lebensdauer der Batterie aus.
- b) Beim Elektrolyseur wäre die Ladeleistung die für die Zersetzung des Wassers maximal anwendbare elektrische Leistung multipliziert mit dem Wirkungsgrad des Elektrolyseprozesses.
- c) Die Ladeleistung eines Pumpspeicherkraftwerkes ergäbe sich entsprechend aus der maximalen Leistungsaufnahme der Pumpen.

### Maximale Entladeleistung [kW]

Maximale physikalische Leistung, die der Speicher an Verbraucher abgeben kann.

Beispiel:

Unser 50 kWh-PKW-Akku wäre mit einem 300 kW-Elektromotor, wie er in der (ökologisch fragwürdigen) Oberklasse der Elektromobilität durchaus üblich ist, überfordert. Dort müssen größere Akkus mit mehr Einzelzellen verbaut werden, um diese immensen Leistungen wenigstens kurzfristig (300 kW Dauerleistung wären auch damit nicht realisierbar) bereit zu stellen.

### Selbstentladung [% pro Monat] oder [% pro Jahr]

Das ist die prozentuale Energiemenge, die ein Speicher pro Zeiteinheit verliert, ohne dass Verbraucher angeschlossen sind.

Beispiele:

- a) Sowohl von Blei- als auch Lithiumionen-Akkus ist das Phänomen wohl bekannt. Lässt man sie geladen eine Weile liegen, verlieren sie an Kapazität, weil sich die beim gewollten Entladen über einen Verbraucher stattfindenden chemischen Prozesse nie komplett unterbinden lassen. Ein Blei-Akku verliert zwischen 4 und 10% seiner Kapazität pro Monat, ein Lithiumionen-Akku immer noch um die 2%.
- b) Beim Gasspeicher sind Leckagen ein Synonym für Selbstentladung. Die extrem kleinen Wassermoleküle haben zusätzlich das Bestreben, durch viele Materialien, die man landläufig für gasdicht halten würde, einfach hindurch zu diffundieren. Dies ist eines der Handhabungsprobleme von Wasserstoff.
- c) Bei mechanischen Schwungradspeichern ist Reibung für deren Selbstentladung verantwortlich. Obwohl der Verlust an nutzbarer Energie mit 3 bis 20% pro Stunde hier besonders hoch liegt, finden Schwungradspeicher vor allem als Kurzzeitspeicher breite technische Anwendung.

### Speicherverluste [%]

Ein- und Ausspeichern elektrischer Energie ist, abgesehen von Kondensatorspeichern, immer mit Umwandlungen einer Art Energie in eine andere verbunden. Die dabei entstehenden Verluste sind eines der wichtigsten Kriterien zur Bewertung eines Speichers. Mitunter wird die Zahl 1-Verluste auch als Speicherwirkungsgrad bezeichnet. Manche Autoren beziehen die Selbstentladung in die Speicherverluste ein, was die Betrachtung der Gesamtwirtschaftlichkeit eines Speichers etwas vereinfacht.

## Beispiele

- a) Lithiumionen-Akkus schneiden hier mit weniger als 20% Verlust über einen vollständigen Lade-Entladezyklus sehr gut ab.
- b) Bei der Elektrolyse von Wasser zu Wasserstoff und dessen ggf. notwendiger Rückverstromung sind die Verluste mit mehr als 50% deutlich größer. Beim Umweg über Methan betragen sie rund 64%, d.h. aus einer Kilowattstunde, die ursprünglich zur elektrolytischen Wasserstoffgewinnung eingesetzt wurde, kann man nur etwa eine Drittel-Kilowattstunde Strom zurück gewinnen. Dieses Ergebnis ist auf den ersten Blick ernüchternd, lässt jedoch außer acht, dass durchaus bessere Möglichkeiten der Verwendung von Wasserstoff existieren als dessen Rückverstromung. Wird das Gas für Antriebe eingesetzt, liegt es wiederum im Auge des Betrachters, ob er den beim Betrieb des Fahrzeuges entstehenden Schwund in die Berechnung des Wirkungsgrads einbeziehen will oder nicht. Schließlich rangiert der Wirkungsgrad herkömmlicher benzin- oder dieselgetriebener Vehikel auf einem mit Wasserstoff-Verbrennern vergleichbaren Niveau von mageren 25 bis 40%. Letztere ersetzen jedoch die alten, CO<sub>2</sub>-erzeugenden Antriebe zu 100% und genau darauf kommt es an. Auf Wasserstoff basierende Brennstoffzellenantriebe schneiden im Wirkungsgrad besser ab als die Verbrenner. Dadurch stellt sich diese Art der Wasserstoff-Mobilität in der Gesamtbetrachtung sogar als energetisch günstiger dar als die heute üblichen Verbrenner.

## Energiedichte [MJ/kg] bzw. [MJ/l]

Damit ist das Verhältnis der Nennkapazität eines Speichers zu seiner Masse (gravimetrische Energiedichte) oder zu seinem Volumen (volumetrische Energiedichte) gemeint. Im Wikipedia-Artikel sind hierfür die Größenarten MJ/kg bzw. MJ/l angegeben. Wir haben über die Gleichung  $1 \text{ MJ} = 0,278 \text{ kWh}$  die in den Beispielen genannten Energiedichten in die von uns bevorzugten Einheiten umgerechnet.

### Beispiele:

- a) Flüssige Treibstoffe sind bekanntermaßen sehr leicht handhabbar. Daneben weisen sie immer noch eine derzeit unschlagbar hohe Energiedichte auf. So ist die auf die Masse bezogene Energiedichte von Diesel (11,5 kWh/kg) über 60 mal größer als die von Lithiumionen-Akkus (0,18 kWh/kg). Dieser Vorsprung des Diesels schrumpft allerdings bei zusätzlicher Betrachtung der Wirkungsgrade beider Antriebssysteme auf den Faktor 25. Nichtsdestotrotz schleppen Elektrofahrzeuge jede Menge Ballast mit sich herum. Stand 2021 gilt daher der Einsatz batteriegetriebener LKWs zumindest auf Langstrecken als wenig wirtschaftlich. Ob sich dies in Zukunft ändert, hängt davon ab, inwieweit unsere Ingenieure die technologischen Reserven, die Batterien bieten, nutzbar machen können. Es existieren bereits Konzepte für Akkus (auch ohne Einsatz des knapper werdenden Lithiums), die verglichen mit einem Lithiumionen-Akku mehr als doppelte gravimetrische Energiedichten aufweisen.

Flüssige Kraftstoffe werden uns dennoch nicht nur aufgrund ihrer hohen Energiedichte noch lange Zeit erhalten bleiben. Es existiert schließlich eine gewaltige Anzahl moderner und technisch ausgereifter Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren als Antrieb, die wir weder von heute auf morgen ersetzen können noch müssen. Es spricht im Übrigen nichts gegen das längerfristige Betreiben dieser Fahrzeuge, sofern flüssige Kraftstoffe per Power2Fuel-Verfahren aus erneuerbarem Strom gewonnen werden.

- b) Bei emissionsfreien LKW hat derzeit Wasserstoff Vorfahrt. Seine gravimetrische Energiedichte beträgt über 33 kWh/kg und schlägt den Dieselmotorkraftstoff damit um den Faktor drei. Leider beansprucht dieses Kilogramm Wasserstoff unter Normbedingungen (1 Bar) das gigantische Volumen von über 11 m<sup>3</sup>. Bei derzeit technisch machbaren 700 Bar Druck ergibt sich daraus ein Volumen von fast 16 Litern. Ein Kilogramm tiefgekühlter, flüssiger Wasserstoff gönnt sich immer noch 12,8 Liter Raum; beim LKW wäre das Laderaum. In der Gesamtbilanz und auch unter Berücksichtigung der Massen und Volumina der Tanks haben Wasserstoff-LKW (unabhängig davon, ob von einer Brennstoffzelle oder von einem Wasserstoff-Verbrennungsmotor angetrieben) vor allem in Sachen Reichweite und Nutzlast Vorteile gegenüber batterieelektrisch betriebenen. Letztere finden vornehmlich für lokalen und regionalen Güterverkehr Verwendung.

- c) Wenn wir uns einen Blick in die Zukunft gestatten: Ein Kilogramm Brennstoff für die Kernfusion speichert gigantische 80 Mio. kWh Energie. Könnten wir diese komprimierte Energie nutzen, wären alle Energieprobleme der Menschheit inklusive das der Speicherung langfristig gelöst. Auch wenn es sich mit der Kernfusion seit Jahrzehnten so verhält, wie mit der berühmten Taube auf dem Dach und selbst das Dach noch in ziemlicher Ferne zu liegen scheint, sollte die Forschung auf diesem Gebiet forciert werden. Dabei sollten die Wissenschaftler die potenziellen Folgen des Einsatzes der Kernfusionstechnologie unbedingt einkalkulieren. Es wäre unklug, die Fehler der Vergangenheit zu wiederholen.
- d) Damit wir nicht falsch verstanden werden und der Vollständigkeit halber noch der Blick auf besagte Vergangenheit. Eine Renaissance der Kernspaltung lehnen wir aufgrund der von dieser Technologie bereits verursachten und potentiell drohenden Katastrophen sowie der nach wie vor ungeklärten Frage der Endlagerung verbrauchten Kernbrennstoffs vehement ab. Daran kann auch die Energiedichte von ca. 22 Mio. kWh/kg 235iger Uran nichts ändern.

### Langzeitstabilität/Ladezyklen

Wie fast alles im Leben haben auch Speicher eine begrenzte Lebensdauer. Angaben zur Haltbarkeit eines Gastanks oder der maximal möglichen Betriebsdauer eines Speicherbeckens für ein Pumpspeicherkraftwerk sind zwar möglich, aber von relativ geringem praktischen Interesse. Anders sieht es mit der Anzahl der Ladezyklen eines batterieelektrischen Speichers (im Folgenden Akku) aus. Dieser äußerst wichtige Parameter gibt Auskunft darüber, wie lange man einen Akku in einem bestimmten Umfeld verwenden kann. Ein Ladezyklus definiert das (theoretisch mögliche, praktisch aber nicht empfehlenswerte) Aufladen eines Akkus von 0 auf 100% seiner Nennkapazität. Lädt man einen Akku von 20% auf 80%, entspricht dieser Vorgang 0,6 Ladezyklen. Fahrzeugtaugliche Lithiumionen-Akkus schaffen gewöhnlich um die 1.000 Ladezyklen, ohne dass die Akkukapazität unter 80% absinkt. Bei Reichweiten eines durchschnittlichen Elektromobils von um die 300 km ist daher der Akku nicht mehr unbedingt das schwächste Glied, wie es bei den ersten Modellen der Fall war.

Lithium-Eisenphosphat (LiFePO<sub>4</sub>)-Akkus bringen es auf ca. 2.000 Ladezyklen. Aufgrund ihrer geringeren Energiedichte sind sie für Fahrzeuge ungeeignet. Als Speicher für Solaranlagen finden sie hingegen immer stärkere Verbreitung.

### **3. Klassifikation der Speicher und Speicherzyklen**

Prinzipiell kann man Speicher in zwei Kategorien einteilen, nämlich in Kurz- und Langzeitspeicher. Auch wenn diese Klassifizierung auf den ersten Blick recht grob erscheint, genügt sie vollauf für unsere weiteren Betrachtungen.

Beide Speichertypen erfüllen im Zusammenhang mit volatiler EE-Erzeugung die Aufgabe, Stromüberschüsse aufzunehmen und in Mangelsituationen wieder bereit zu stellen. Beide lösen das Problem der zeitlichen Diskrepanz zwischen der Verfügbarkeit von EE und dem Bedarf an elektrischer Energie.

Der wesentliche Unterschied zwischen beiden Kurz- und Langzeitspeichern liegt im zeitlichen Verlauf ihrer Lade- bzw. Entladecharakteristik. Wir verbinden Kurzzeitspeicher mit dem Tageszyklus und Langzeitspeicher mit dem Jahreszyklus.

## Der Tageszyklus

Schauen wir uns zunächst den Tageszyklus anhand konkreter, realer Daten an.

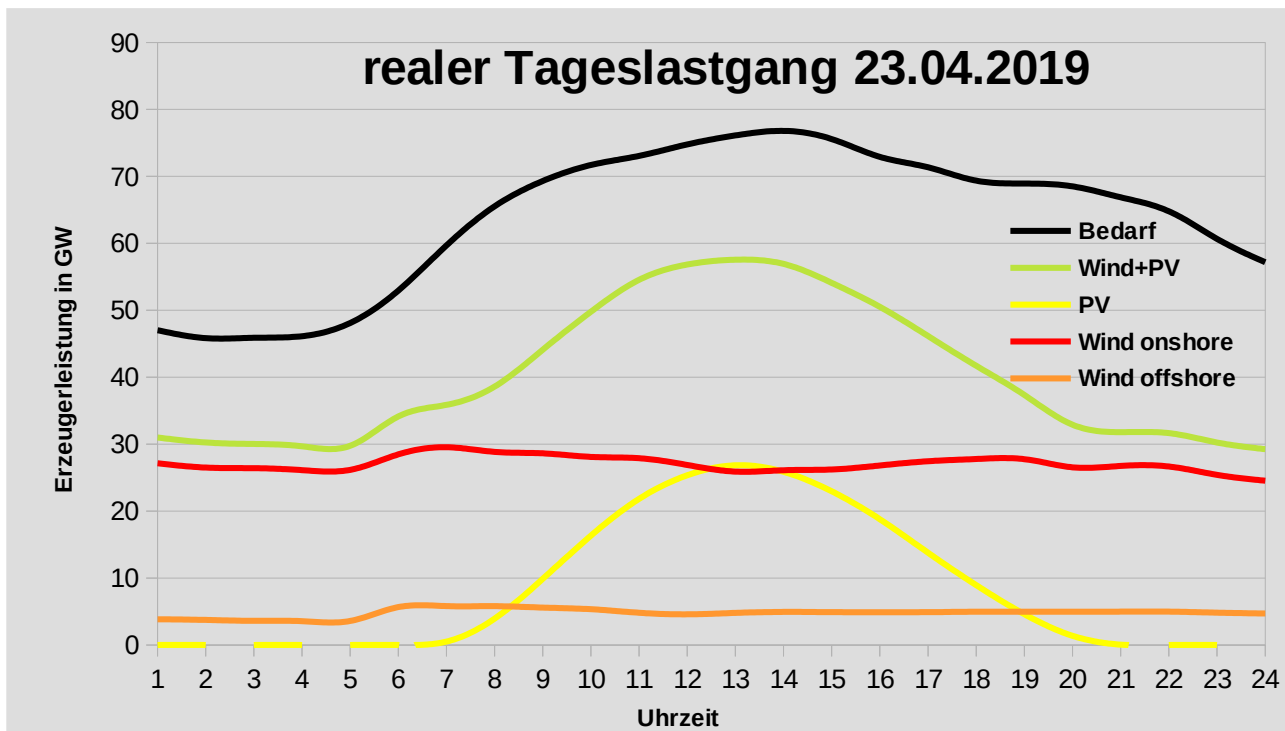


Abbildung 1: Tageslastgang und EE-Erzeugung am 23.04.2019; Daten von Agora Energiewende (Agorameter)

Der 23.04.2019 war ein sonniger, windiger und damit günstiger Tag für die Stromerzeugung aus Sonne und Wind. Dass auch an solchen Tagen eine Lücke zwischen EE-Erzeugung und Bedarf klafft, liegt an den derzeit noch viel zu geringen EE-Erzeugerkapazitäten. Die Lücke wird immer kleiner, d.h. mit dem weiteren Ausbau von PV- und Windenergie verschiebt sich die grüne Wind+PV-Kurve in **allen** Tageslastgängen tendenziell nach oben. Momentan handelt es sich jedoch nach wie vor um eine **permanente** Lücke, die durch den Dauerbetrieb fossiler Erzeuger geschlossen wird. Da dieser Dauerbetrieb hinsichtlich seiner gelieferten Leistung nur eine begrenzte Elastizität aufweist, während man Windkraft- und PV-Anlagen sehr bequem und vor allem schnell abregeln kann, fallen schon gegenwärtig zwischen 5 und 10 TWh sogenannte „EE-Verlustrarbeit“ pro Jahr an. Damit ist EE-Strom gemeint, den man hätte produzieren können, wenn das Netz bereit gewesen wäre, diesen Strom aufzunehmen. Dieser spezielle und hochaktuelle Aspekt der Ressourcenverschwendung ergibt sich aus dem Mangel an geeigneten Speichermöglichkeiten. Wir fordern unsere politischen Entscheidungsträger daher auf, sich dem Problem der „Verlustrarbeit“ endlich ernsthaft zu widmen und zielführende Maßnahmen zu ergreifen.

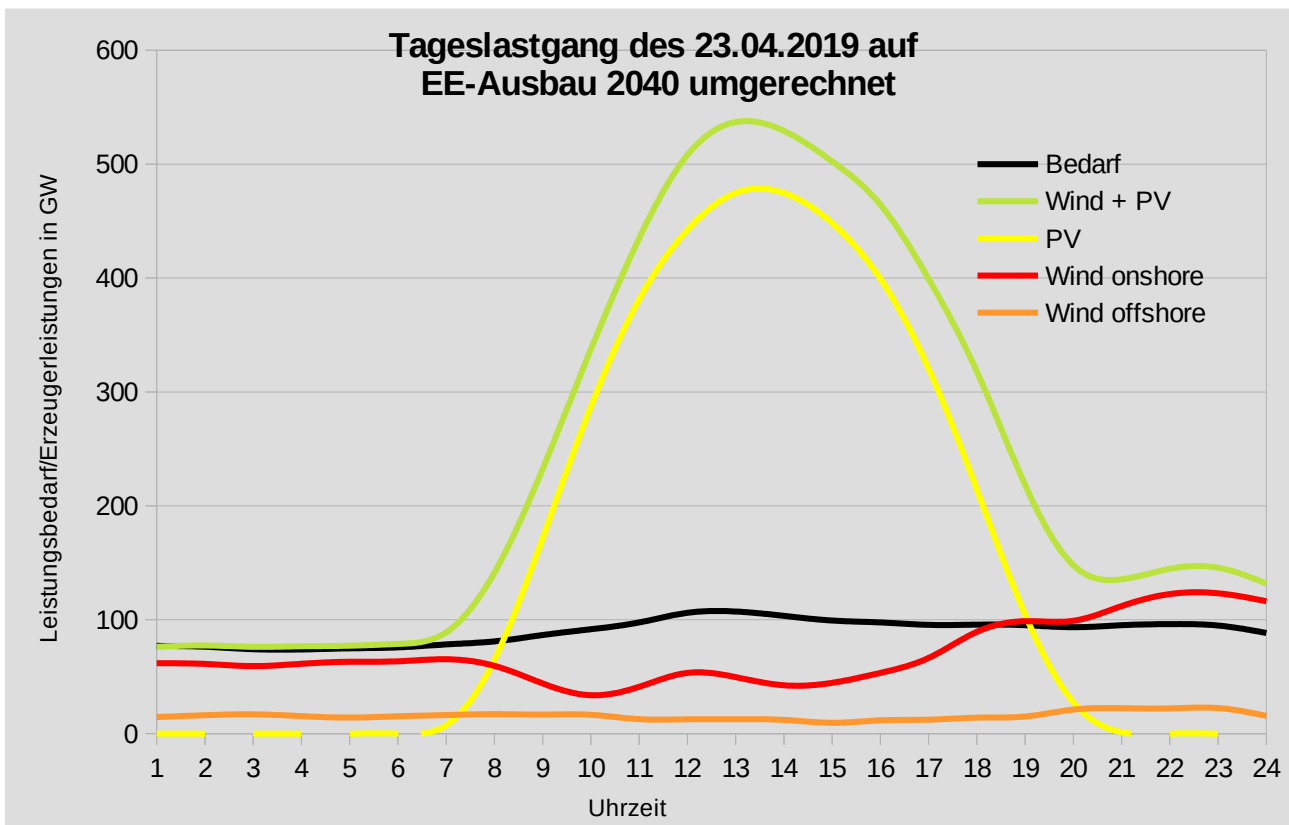
In Abbildung 1 gut zu erkennen: Die EE-Erzeugung, über einen Tag betrachtet, folgt prinzipiell dem Bedarf. Der PV-Peak hilft bei der Deckung des um die Mittagszeit deutlich erhöhten Strombedarfs.

Abbildung 2 ergibt sich aus der Umrechnung der realen Daten aus Abbildung 1 auf die von uns im ersten Teil (notwendige EE-Erzeugerkapazitäten) angenommenen Verhältnisse des Jahres 2040. Konkret haben wir hierfür folgende Faktoren verwendet:

- Der Bedarf hat sich um den Faktor 1,83 erhöht (1.000 TWh in 2040 statt 547 TWh in 2019).
- Der Ausbau von Wind on- und offshore hat sich gegenüber 2019 vervierfacht.
- Die verfügbare PV-Erzeugerleistung ist 2040 15 Mal größer als 2019.

Hinweis: In Teil 1 „Erzeugerkapazitäten“ sind wir von einer Verdopplung der Zubauraten für Windkraft und einem siebzehn Mal höheren Ausbau der Photovoltaik ausgegangen. Beim Rechnen haben wir festgestellt, dass diese „Mischung“ nicht zielführend ist.

Daraus ergibt sich folgender für 2040 (vollständige Dekarbonisierung) modellierter Tageslastgang:



**Abbildung 2:** Tageslastgang und EE-Erzeugung eines ertragreichen Tages unter den Bedingungen des EE-Ausbaus 2040

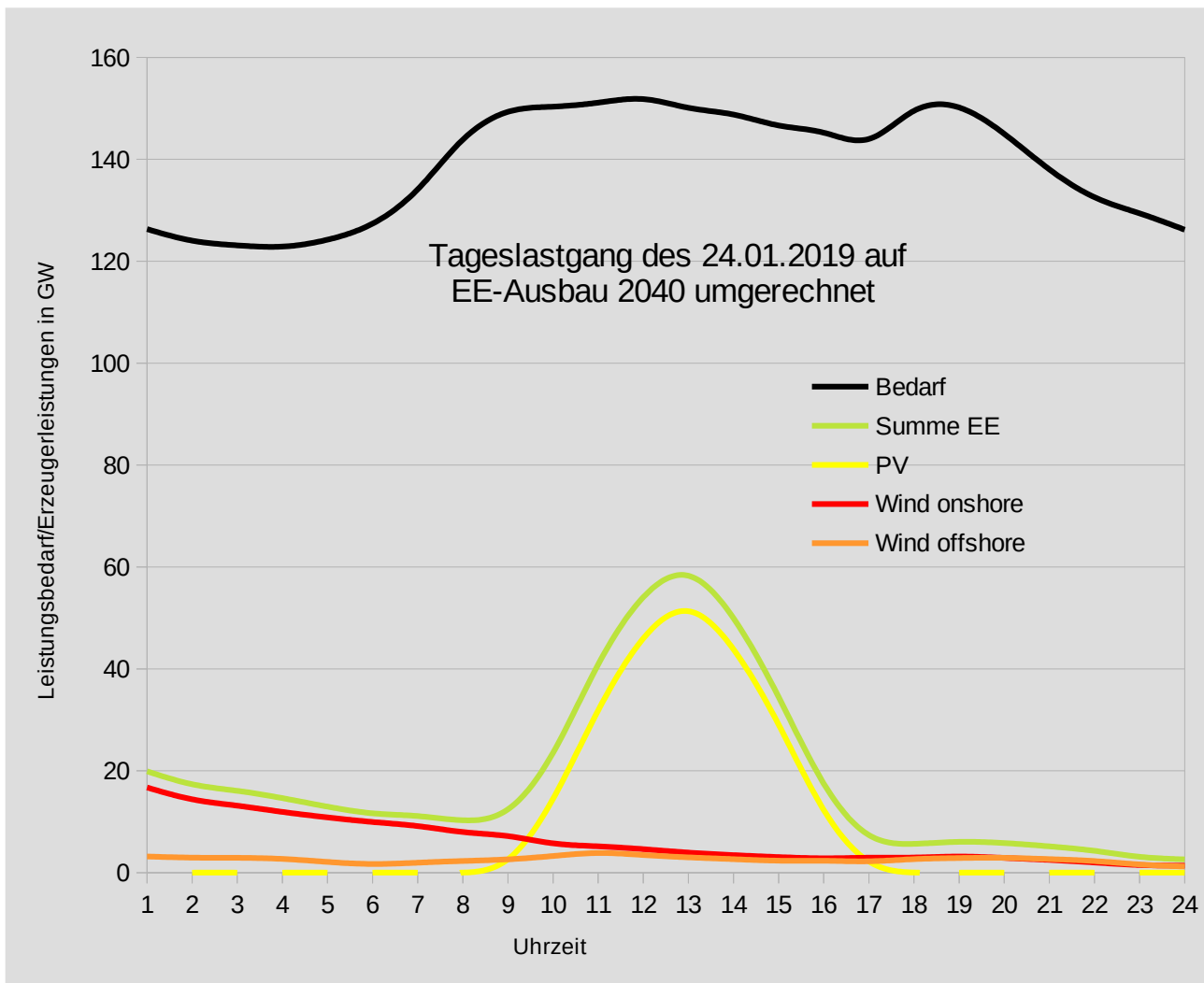
Unter den o.g. Annahmen, liegt die grüne EE-Erzeugerkurve fast überall über der schwarzen Bedarfskurve. Die Fläche zwischen grüner und schwarzer Kurve symbolisiert die zu speichernde Energiemenge.

Den Hinweis, dass unser Stromnetz ohne Speicher spätestens gegen 7:30 Uhr wegen des schon zu diesem Zeitpunkt massiven Überangebots an EE-Strom zusammenbrechen würde, wollen wir nicht nur als Randbemerkung verstanden wissen. Die gezeigten Kurven illustrieren das Problem der mit dem EE-Ausbau tendenziell sinkenden Netzstabilität so drastisch, wie es tatsächlich ist. Dieses Problem besteht allerdings nicht, wenn genügend Speicherkapazitäten zur Verfügung stehen.

Wenn wir die gleiche Umrechnung auf die Agora-Daten vom 24.01.2019 anwenden, ergibt sich ein gänzlich anderes Bild. Dieser Tag war ein extrem ungünstiger für die Erzeugung erneuerbaren Stroms aus Sonne und Wind. Die schwarze Bedarfskurve liegt von 0 bis 24 Uhr weit oberhalb der EE-Erzeugerkurve. Die Differenzfläche zwischen beiden stellt demnach ein sattes Manko dar, das aus (dann hoffentlich ausreichend gefüllten) Speichern ausgeglichen werden muss, wenn unser Netz stabil bleiben soll.

In der Gesamtbetrachtung geht es darum, dass sich die Überschüsse der „guten“ und die Defizite der „schlechten“ Tage im Jahreszyklus und darüber hinaus idealerweise zu Null ergänzen. Dabei muss außerdem die erforderliche Speicherkapazität auf ein Minimum optimiert werden.

Die Umsetzung im makroökonomischen Maßstab ist ohne Zweifel alles andere als einfach. Die bequeme Variante, den Ausbau der Erneuerbaren und den notwendigen flankierenden Speicherausbau zu unterlassen oder zu verzögern und die Defizite weiterhin durch Strom aus fossiler Erzeugung zu decken, stellt dennoch keine längerfristige Option dar.



**Abbildung 3:** Tageslastgang und EE-Erzeugung eines extrem ertragsarmen Tages unter den Bedingungen des EE-Ausbau 2040

Die Frage, wie viel Kurzzeitspeicher wir benötigen, um Tagesschwankungen auszugleichen, können wir ansatzweise mit den Zahlen beantworten, die Auskunft darüber geben, wie viel wir aktuell schon haben.

In Deutschland sind Pumpspeicherkraftwerke mit einer Gesamtleistung von 9,6 GW installiert. Geht man näherungsweise davon aus, dass die genannte Leistung mindestens 6 Stunden am Stück bereit gestellt werden kann (anderenfalls wären Pumpspeicherkraftwerke kaum wirtschaftlich), ergibt sich eine Speicherkapazität von  $9,6 \text{ GW} \cdot 6 \text{ h} = 57,6 \text{ GWh}$ . Das ist viel zu wenig zur Aufnahme für die in Abbildung 2 gezeigten Überschüsse und ebenso für das Ausfüllen des in Abbildung 3 gezeigten Defizits. Allerdings beziehen sich beide Abbildungen auf die Zukunft. Gegenwärtig produzieren wir unseren Strom noch zu einem großen Teil aus fossilen Quellen mit wesentlich geringeren Schwankungen, die von den Pumpspeicherkraftwerken recht gut ausgeglichen werden können. Wenn die Erneuerbaren jedoch in dem nicht nur von uns als notwendig erachteten Tempo ausgebaut werden, wird sich dies schon in den nächsten Jahren fundamental ändern. Die vorhandenen Pumpspeicherkapazitäten genügen demnach schon mittelfristig nicht, um ausreichend Kurzzeitspeicher bereit zu stellen. Ein Zubau weiterer Anlagen dieser Art ist in Deutschland nicht einmal in bescheidenem Umfang möglich und wäre außerdem mit massiven Eingriffen in die Natur verbunden.

Bleiben Batteriespeicher: 2017 waren 0,8 GWh Batteriespeicher in privaten Haushalten installiert. Hinzu kamen 3.1 GWh Speicher in Elektrofahrzeugen. Die Prognosen des [Fraunhoferschen Herkulesprojektes](#) (ein treffender Name, wie wir finden) gehen davon aus, dass zum Zeitpunkt der vollständigen Abkehr von fossiler Stromerzeugung 60 GWh stationäre Speicher und immerhin 2.430 GWh „rollender Speicher“ verfügbar sein werden. Auch diese Menge würde nicht vollständig genügen, um hinsichtlich der EE-Erzeugung extrem starke bzw. extrem schwache Tage zu puffern, zumal die genannten Speichermengen nur bedingt zur Verfügung stehen. Vom Netz getrennte, weil ihrer eigentlichen Bestimmung, sich zu bewegen, Genügende Elektrofahrzeuge können z.B. nicht mitgerechnet werden.

In der Praxis spielt dieses rechnerische Defizit für Kurzzeitspeicher jedoch eine untergeordnete Rolle. Die üblichen Verdächtigen von EIKE & Co und deren politische Erfüllungsgehilfen, die von sich behaupten, eine



Alternative zu sein, argumentieren immer wieder, man müsste theoretisch ganz Deutschland mit Batteriespeichern und Pumpspeicherkraftwerken zupflastern, um auf fossile Energieerzeugung verzichten zu können. Wir erlauben uns, hier eins dieser [Schmankerl](#) zu zitieren:

*Um den Strombedarf für solche 14 Tage „Dunkelflaute“ einigermaßen verlässlich speichern zu können, kostet alleine die Infrastruktur zur Akkuspeicherung über die ersten 10 Jahre (einschließlich dem ersten Austauschzyklus-Invest) mindestens 37.720.755 Mio EUR (37.721 Milliarden EUR; 38 Billionen EUR).*

Die Rechnung ist in der Größenordnung völlig richtig. Es hapert nur ein wenig mit dem ihr zugrunde liegenden Parametersatz. EIKE beruft sich ausschließlich auf Batteriespeicher und beschwört einmal mehr die „Dunkelflaute“ als die größte Bedrohung der deutschen Energieversorgung herauf. Derartige geistige Ergüsse kann man nur als Demagogie vom Feinsten kategorisieren, denn auch den EIKE-Ingenieuren dürfte inzwischen bekannt sein, dass es neben Batteriespeichern einige andere und dabei sehr viel wirtschaftlichere Möglichkeiten der Speicherung von überschüssigem Strom gibt.

Eine Windkraftanlage kann diesen z.B. direkt an einen Elektrolyseur schicken, der Wasserstoff erzeugt. Die Power2Gas-Technologie offeriert die besten Optionen für die Langzeitspeicherung von Energie, und es existieren noch einige andere, die sich dafür eignen.

Die Rolle der teuren Kurzzeitspeicher beschränkt sich hingegen im Wesentlichen darauf, mit geringen Schaltzeiten primäre und sekundäre Regelleistung (Orangebuch S. 46) bereit zu stellen. Der wichtigste Eingangsparameter für deren Dimensionierung ist demnach weniger ihre Kapazität als die Leistung, die sie kurzfristig, soll heißen für einige Stunden, offerieren können. Engpässe gibt es hier schon heute nicht mehr und, gemessen an den von Fraunhofer getroffenen Prognosen, dürfte sich daran in Zukunft nichts ändern.

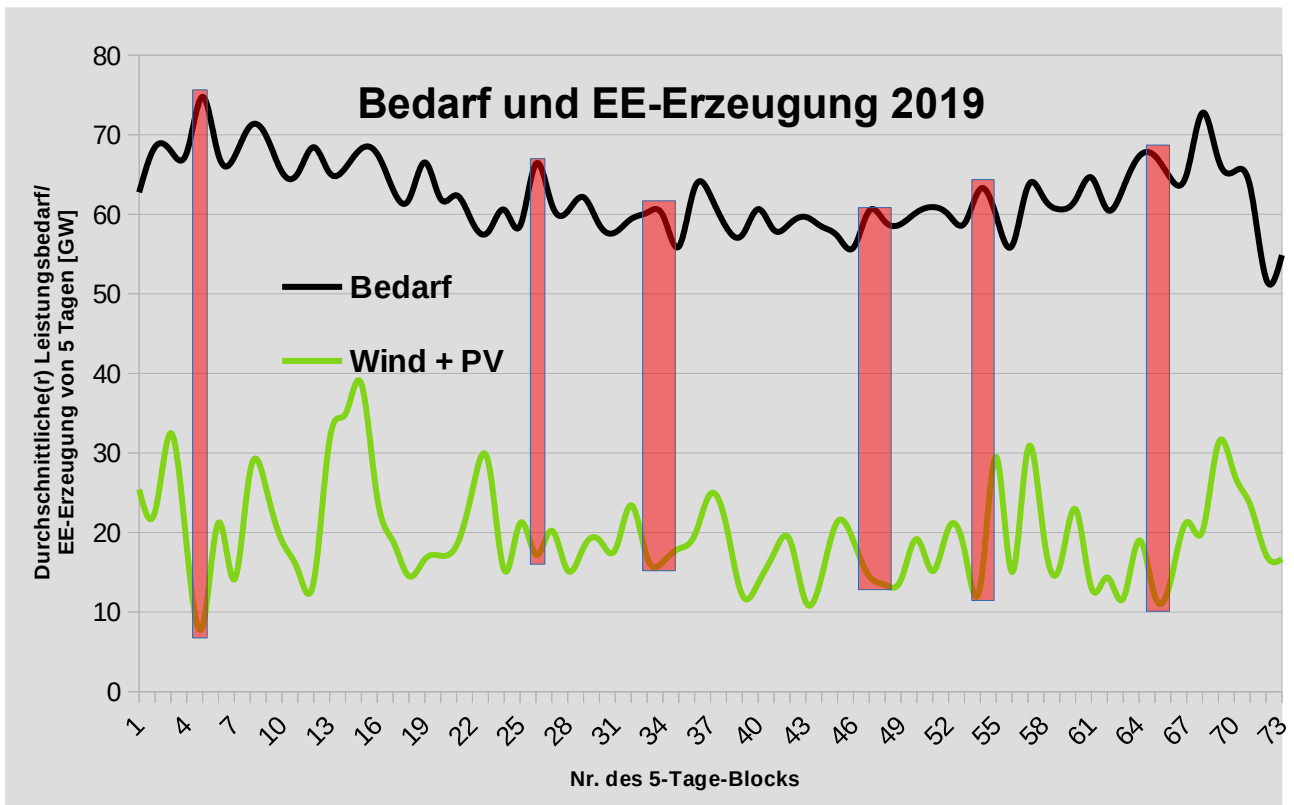
Die eigentlich relevante Frage lautet:

**Welche Langzeitspeicherkapazität ist für eine komplett dekarbonisierte Gesellschaft notwendig?**

#### Der Jahreszyklus

Um einer Antwort auf diese Frage näher zu kommen, muss man den Jahreszyklus der EE-Erzeugung, vornehmlich der aus Wind und Sonne, näher untersuchen. Die übrigen relevanten EE-Erzeugersparten Wasserkraft und Biomasse leisten in Deutschland einen wichtigen, weil grundlastfähigen Beitrag, mit kaum ausbaufähigen Erzeugerkapazitäten von insgesamt 13 GW können sie aber nur um die 10% des heutigen Strombedarfs decken.

Betrachten wir zunächst wieder beispielhaft die realen, von Agora-Energiewende gelieferten Daten des Jahres 2019.



**Abbildung 3:** Bedarf und EE-Erzeugung 2019; aus Agorameter-Daten erzeugt

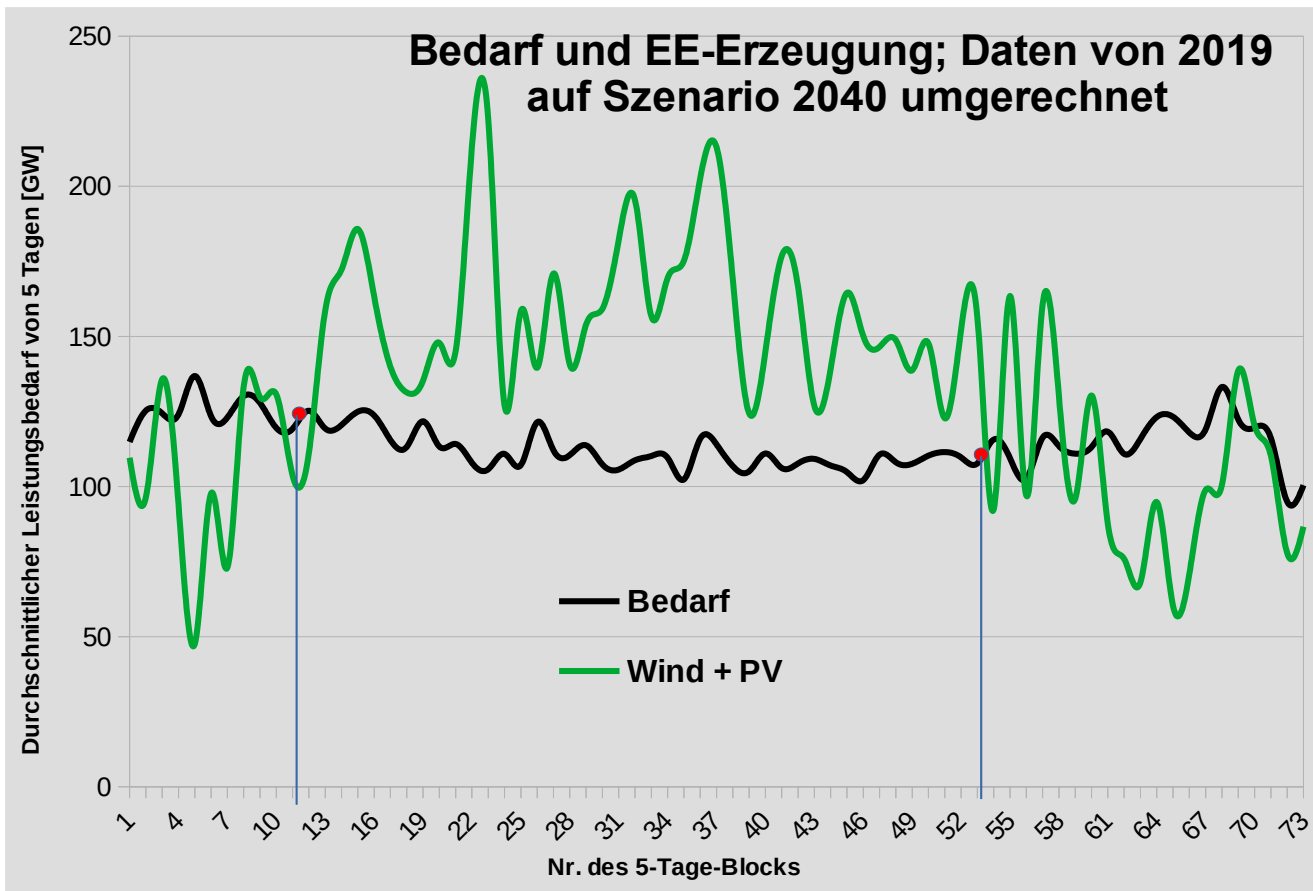
Die Agorameterdaten der Agora-Energiewende geben stündlich Auskunft über den Leistungsbedarf Deutschlands sowie die Erzeugung der einzelnen Erzeugersparten. Da eine Darstellung von 8.760 Bildpunkten in einem Diagramm etwas unübersichtlich wirken würde, haben wir den Durchschnitt der Leistungsdaten von jeweils 5 Tagen (120 Stunden) gebildet und damit 73 (=365/5) Diagrammpunkte erzeugt. Wir sehen im Diagramm:

- Der Strombedarf ist im Winter, abgesehen von der Weihnachtspause, etwas höher als im Sommer. Der Effekt würde für andere Jahre deutlicher ausfallen als für 2019 mit seinen relativ milden Wintermonaten.
- Die Lücke zwischen EE-Erzeugung und Bedarf 2019 besteht über das ganze Jahr, was den viel zu geringen Erzeugerkapazitäten von Wind und Sonne geschuldet ist. Bilanziell war es also in 2019 unmöglich, aus erneuerbaren Quellen erzeugten Strom zu speichern. Dennoch ist der Schluss, Speicher wären erst sinnvoll, wenn sich etwas an dieser Bilanz ändert, eine krasse Fehleinschätzung.
- Die Fluktuationen der EE-Erzeugung durch Sonne und Wind sind auch nach der 5-Tage-Durchschnittsbildung noch deutlich erkennbar.
- Andererseits gibt es in 2019 keine längeren „Dunkelflauten“, die so gerne als Totschlagargument gegen die Energiewende in Stellung gebracht werden. Die grüne Kurve bewegt sich mit einer einzigen Ausnahme (Ende Januar) immer oberhalb der 10 GW-Linie. Diese generelle Aussage über Dunkelflauten gilt gleichlautend für die Jahre 2015 bis 2020, die wir neben dem exemplarisch dargestellten Jahr 2019 untersucht haben.
- Anders als beim Tageszyklus ergeben sich innerhalb eines Jahres immer wieder Phasen (durch rote Rechtecke im Diagramm vermerkt), in denen besonders viel Strom gebraucht und dabei besonders wenig EE-Strom produziert wird. In der Gesamtbetrachtung spielen diese Phasen für die Dimensionierung der Langzeitspeicher dennoch keine Rolle.

Erst wenn genügend gespeicherte erneuerbare Energie über den gesamten Jahreszyklus verfügbar ist, kann die fossile Stromerzeugung beendet werden. Die Aufgabe der Speicherung müssen Langzeitspeicher übernehmen. Das Ganze ist ein gleitender Prozess. Seine Formel lautet:

**EE-Energieerzeugung und Langzeitspeicher ausbauen und fossile Erzeugung parallel reduzieren.**

Wenn wir das Diagramm aus Abbildung 3 mit der gleichen Methode wie für Kurzzeitspeicher beschrieben, auf die Verhältnisse vollständiger Dekarbonisierung im Jahre 2040 umrechnen, erhalten wir folgendes Bild:



**Abbildung 4:** Bedarf und EE-Erzeugung 2040 (vollständige Dekarbonisierung), aus Agorameter-Daten 2019 errechnet

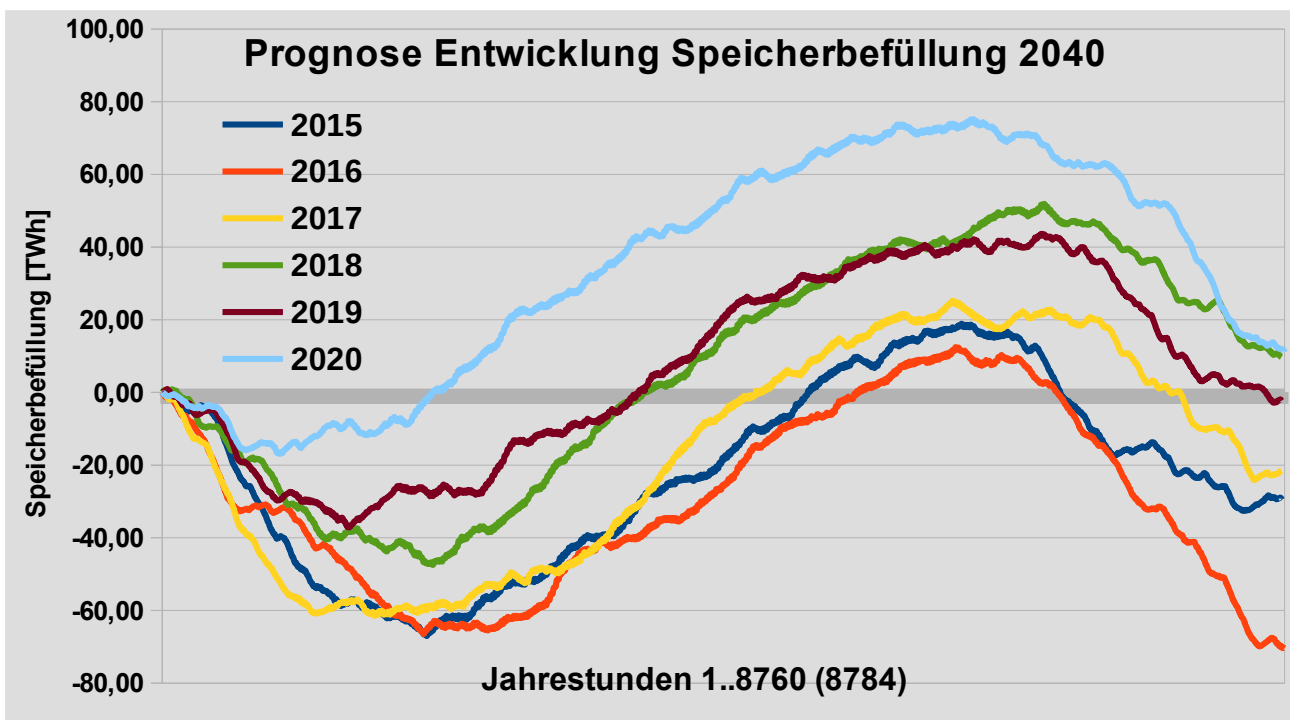
Bei dem von uns gewählten Parametersatz (Vervielfachung Wind, PV-Faktor 15, Bedarfserhöhung 83%) liegt die grüne EE-Erzeugerkurve dominant über der schwarzen Bedarfskurve. Die meiste Zeit können die Langzeitspeicher also geladen werden. Nur in den Wintermonaten erfolgt Entladung, wobei die Defizite augenscheinlich kleiner sind als die Überschüsse. Leider können wir daraus nicht schlussfolgern, dass wir weniger EE-Stromerzeuger benötigen. Die Nutzung von Langzeitspeichern ist mit z.T. erheblichen Verlusten verbunden, die wir in unsere Berechnungen mit einbeziehen müssen.

#### 4. Abschätzung der notwendigen Langzeitspeicherkapazitäten

Die Fläche zwischen der grünen EE-Erzeugerkurve und der schwarzen Bedarfskurve von Block 13 (9. März) bis Block 53 + 2 Tage (3. September) (Abbildung 4) steht in grober Betrachtung für die Menge Überschuss-Strom, die in die Langzeitspeicher überführt werden müsste, wenn man Abschaltungen von EE-Erzeugungsanlagen vermeiden will. Insofern symbolisiert diese Fläche die erforderliche Kapazität der Langzeitspeicher im Jahre 2040 bei ähnlichem Wetter wie 2019. Diese Kapazität müsste außerdem zwingend die Defizite für die Zeit nach dem 3. September und die Wintermonate des Folgejahres decken können.

Wir haben die gesuchten Kapazitäten unter Nutzung der Agorameter-Daten der Jahre 2015 bis 2020 auf die Verhältnisse vollständiger Dekarbonisierung in 2040 mit folgendem Algorithmus errechnet:

- Die schon für den Tageszyklus gewählten Skalierungsfaktoren 4 (Wind), 15 (PV) und 1,83 (Bedarf) wurden auch hier genutzt. Dabei sind die Faktoren auf das Jahr 2019 normiert. Durch den geringeren EE-Ausbau in den Jahren 2015 bis 2018 liegen sie etwas höher, 2020 mit mehr installierter Wind + PV-Kapazität (verglichen mit 2019) etwas niedriger.
- Andere EE-Erzeuger wurden vernachlässigt.
- Im- und Export wurden nicht berücksichtigt.
- Fossile Erzeugung wurde auf Null gesetzt.
- Der Speicherinhalt  $S_0$  vom 01.01., 01:00 Uhr ist per Definition der (das) in der ersten Stunde des Jahres entstandene Überschuss (Defizit). Dieser Wert liegt deshalb nahe Null. Wir haben diese Definition gewählt, weil die tatsächliche Befüllung der Langzeitspeicher zu o.g. Zeitpunkt, sprich der Übertrag aus dem Vorjahr, nicht prognostizierbar ist. Dadurch ergeben sich die physikalisch unmöglichen, in den Diagrammen dargestellten, negativen Speicherbefüllungen, die entfallen würden, wäre der Übertrag bekannt.
- Der Speicherinhalt  $S_i$  ( $i = 1..8759$ ) ergibt sich kumulativ aus der Summe von  $S_0$  bis  $S_{i-1}$ . Liefert der Algorithmus am 31.12., 24:00 Uhr eine Befüllung  $S_{8759}$  ( $S_{8783}$  für ein Schaltjahr) in der Nähe der Null, ist für das betreffende Jahr die Speicherbilanz ausgeglichen. **Die Langzeitspeicher müssen letztendlich so dimensioniert werden, dass die Bilanz auf längere Sicht als nur ein Jahr ausgeglichen bleibt.**
- Annahme eines Wirkungsgrades von 50%, d.h. es müssen zwei Kilowattstunden gespeichert werden, um eine Kilowattstunde zu entnehmen



**Abbildung 5:** Prognostizierte Speicherbefüllung 2040 unter Bezugnahme auf die realen Leistungsdaten aus dem Agorameter für die Jahre 2015 bis 2020

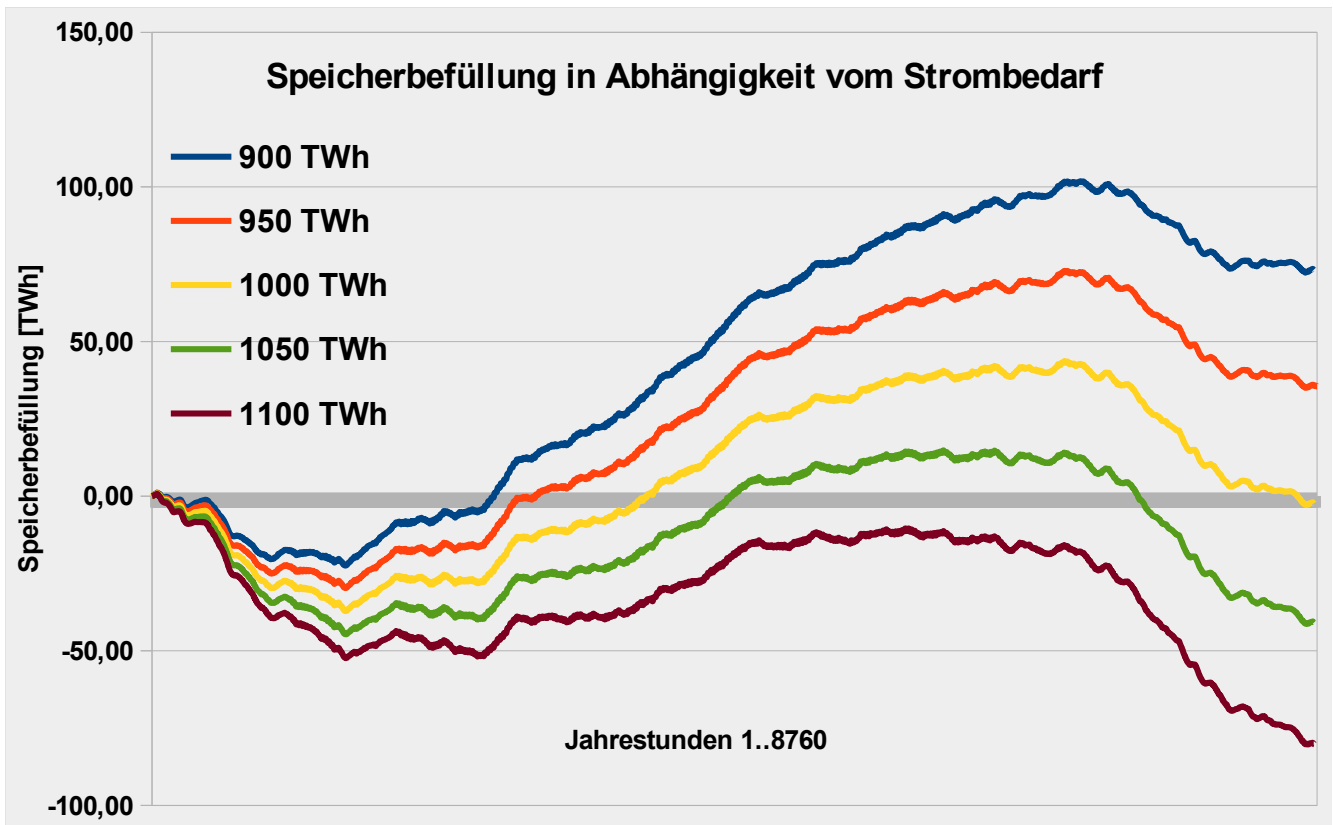
Der maximale absolute Betrag der Minima und Maxima aller gezeigten Kurven steht für den von uns gesuchten Wert – die für 2040 notwendige Kapazität an Langzeitspeicher. Wir finden das Minimum am Jahresende 2016 und das Maximum im Frühherbst des recht warmen Coronajahrs 2020 mit relativ geringem Strombedarf – jeweils bei um die 70 TWh. Da dieser Wert aus den Daten von sechs Jahren erzeugt wurde, kann er als gute Näherung angenommen werden.

Das Maximum ist naturgemäß weniger kritisch. Wenn nicht alle Überschüsse gespeichert werden können, weil der Speicher zu klein ist, bleiben immer noch der Export und als Ultima Ratio das Abregeln von EE-Erzeugern als Ausweg. Ist dagegen der Speicher von vornherein zu klein dimensioniert oder weist eine Befüllung auf, die zum Ausgleich der Defizite nicht ausreicht, muss die Fehlmenge importiert werden. Falls auch die Nachbarn nicht liefern können, drohen Abschaltungen oder Netzausfälle.

## Maßgebliche Parameter

Die für unsere Prognosen kritischen Parameter sind die Skalierungsfaktoren von Zubau und Bedarf, insbesondere auch das dabei entstehende Verhältnis von Wind und Sonne. Extremen Einfluss hat darüber hinaus der angenommene Wirkungsgrad der Speichernutzung. Deshalb werden wir uns unter 5. mit sektorübergreifenden Optimierungsmöglichkeiten gesondert befassen.

Hier zunächst einige Ergebnisse, die die Auswirkungen der maßgeblichen Einflussgrößen illustrieren.



**Abbildung 6:** Prognostizierte Speicherbefüllung 2040 unter Bezugnahme auf die realen Leistungsdaten aus dem Agorameter 2019; variabler Parameter: Strombedarf

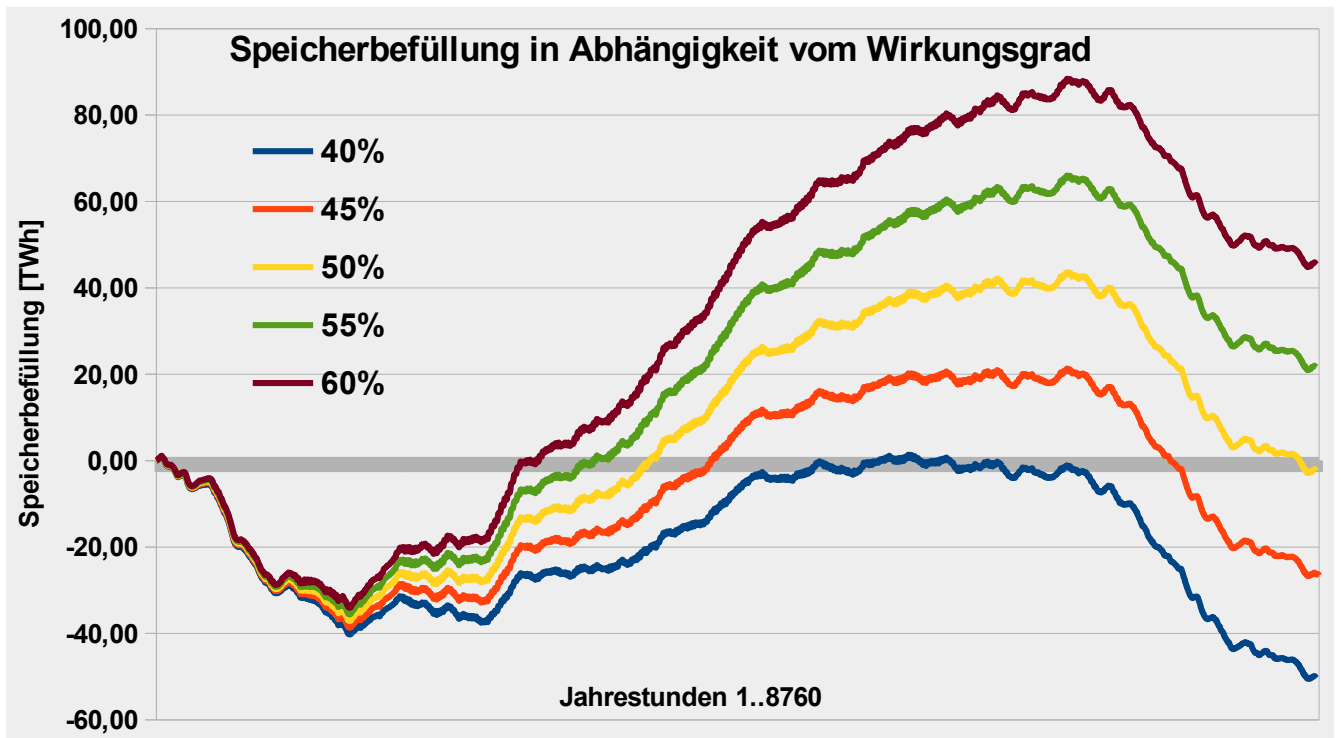


Abbildung 7: Prognostizierte Speicherbefüllung 2040 unter Bezugnahme auf die realen Leistungsdaten aus dem Agorameter 2019; variabler Parameter: Speicherwirkungsgrad

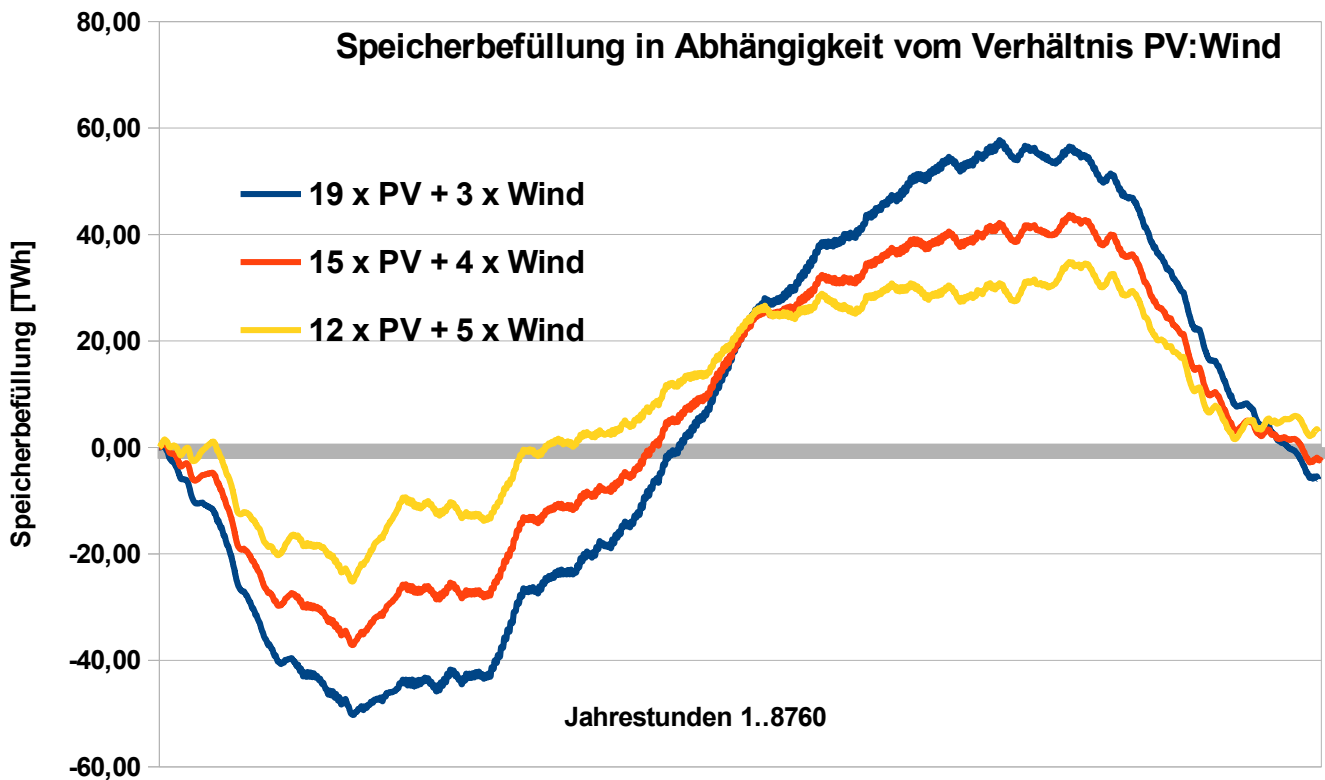


Abbildung 8: Prognostizierte Speicherbefüllung 2040 unter Bezugnahme auf die realen Leistungsdaten aus dem Agorameter 2019; variabel: Verhältnis PV zu Wind

### (noch) unberücksichtigte Parameter

Die Erzeugerleistungen von Biomasse (ca. 9 GW) und Wasserkraft (ca. 5 GW) haben wir in unserer Prognose nicht berücksichtigt. Gleiches gilt für die deutsche Stromhandelsbilanz. Deutschland ist seit ungefähr 20 Jahren Nettostromexporteur. Die exportierten Überschüsse waren in den Jahren 2015 bis 2018 mit 46 bis 60 TWh p.a. besonders hoch. Insofern ist es nicht verwunderlich, dass die Jahre 2015 bis 2017 relativ hohe Defizite am Jahresende aufweisen. Dass dieser Effekt für 2018 nicht sichtbar ist, liegt an dem von Ende April bis Mitte Oktober 2018 währenden „Jahrhundertsommer“.

Schlussendlich fehlt die Betrachtung einiger Übergangsszenarien mit verschiedenen Anteilen fossiler Erzeugung.

Wir werden unsere Berechnungen in einem dritten Teil dieser Artikelserie entsprechend verfeinern und die aktualisierten Libreoffice-Tabellen auf unserer Webseite zur Verfügung stellen.

Offensichtlich ist: Unter Einbeziehung dieser Aspekte würden sich alle Kurven nach oben verschieben. Das Speicherproblem ist demnach nicht ganz so gewaltig, wie es nach unserer ersten Abschätzung erscheint. Gleichwohl bleibt die Speicherung aus erneuerbaren Quellen erzeugten Stroms eine große Herausforderung, der wir uns nicht irgendwann, sondern sehr schnell stellen müssen.

## **5. Wirkungsgrad der Speicherung und Prozessketten**

Wie aus Abbildung 7 ersichtlich, hat der Wirkungsgrad erheblichen Einfluss auf die notwendige Kapazität von Langzeitspeicherlösungen und damit auf deren Wirtschaftlichkeit. Daher widmen wir diesem Aspekt ein gesondertes Kapitel.

Die Bewertung des Wirkungsgrades von Kurzzeitspeichern ist weniger von Interesse. Technologiebedingt (Pumpspeicher, Batterien) weisen Speicher für den Tageszyklus bereits Wirkungsgrade  $> 80\%$  auf. Das Optimierungspotential hält sich damit in Grenzen.

Bei Langzeitspeichern sieht es anders aus. Die Power2Gas-Technologie gilt, und das zu Recht, als der Königsweg der saisonalen Speicherung überschüssigen EE-Stroms. Grund dafür ist die einfache, aber zu selten publizierte Tatsache, dass wir uns über das Vorhandensein von ausreichend Speicherkapazitäten für das Synthesegas keine Sorgen machen müssen: Unser Gasnetz kann über 200 TWh bereitstellen und bietet durchaus noch etliche Erweiterungsmöglichkeiten.

### Das deutsche Gasnetz...

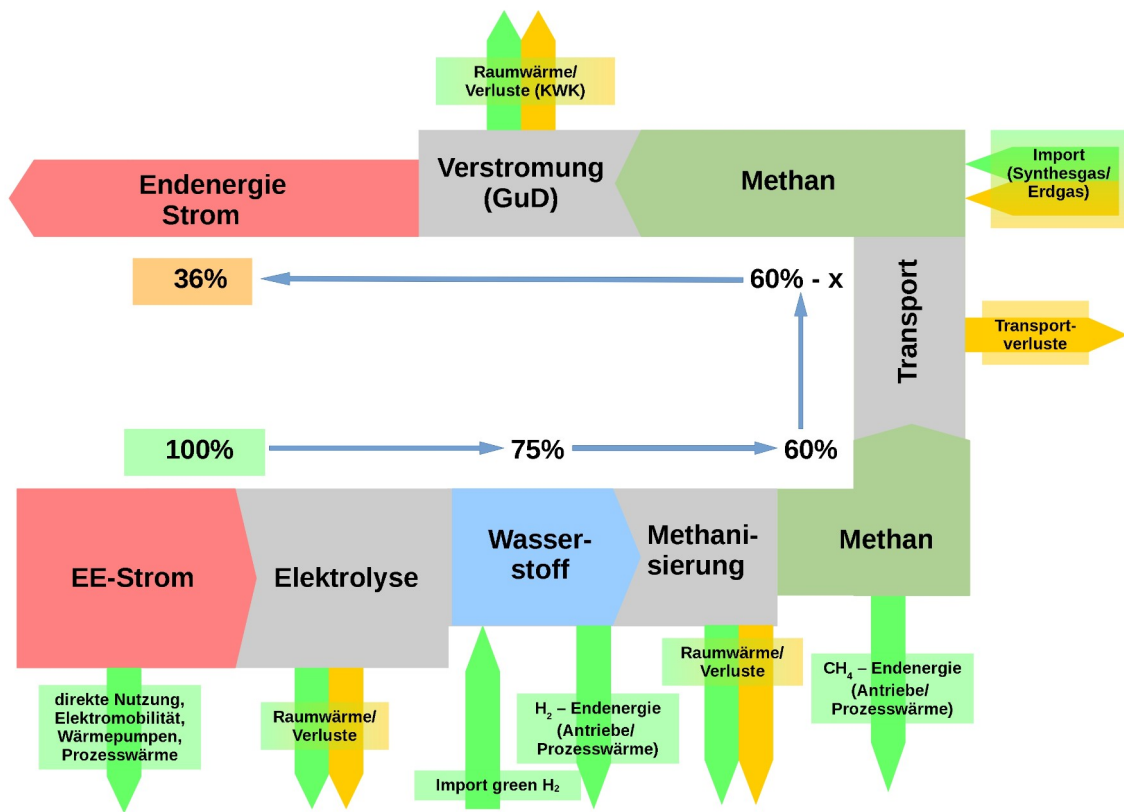
...besteht nicht nur aus Leitungen, sondern auch aus einem riesigen Volumen an unterirdischen Poren- und Kavernenspeichern. Diese Speicher sind vornehmlich mit Erdgas (Hauptbestandteil Methan) befüllt. Es spricht absolut nichts gegen die schrittweise Substitution des Erdgases durch Synthesegas, das aus erneuerbaren Quellen produziert wurde.

Alleine die Speicher des deutschen Gasnetzes können 25 Milliarden Normkubikmeter ( $\text{Nm}^3$ ) Gas aufnehmen. Das sind etwa 210 TWh in Methan gespeicherte, nutzbare Energie. Hinzu kommen die Speicherkapazitäten des Transportnetzes.

Mischt man dem Methan 10% Elektrolysewasserstoff bei, was technisch unproblematisch ist, ergibt sich eine „energetische Verdünnung“ (geschuldet der geringen volumenbezogenen Energiedichte des Wasserstoffs) auf etwa 197 TWh. Dennoch wäre eine ad hoc Beimischung von Wasserstoff in das (Erd)gasnetz schon heute sinnvoll. Wasserstoff ist bekanntlich recht schwer handhabbar. Wenn sich also  $\text{H}_2$ -Überschüsse ergeben, die kurzfristig nicht einer sinnvolleren Verwendung zugeführt werden können, wäre das Gasnetz ein immer noch wirtschaftlicher „Notausgang“ für diese Überschüsse.

Bei der Wasserstoffmenge, die wir perspektivisch benötigen und der daran gebundenen Kapazität an Elektrolyseuren werden temporäre Überschüsse zwangsläufig anfallen.

Die Power2Gas – Prozesskette



**Abbildung 9:** Schema einer (möglichen) Prozesskette Überschuss-EE-Strom → Methan als Speicher → nutzbarer EE-Strom

Die in Abbildung 9 vorgestellte Prozesskette fördert zunächst eine bittere Wahrheit zutage: Der Strom-zu-Strom-Wirkungsgrad über Wasserstoff und Methan beträgt magere 36%. Wir müssen also ca. 2,8 kWh EE-Überschuss-Strom aufwenden, um dem Speicher später 1 kWh nutzbaren Strom entnehmen zu können. Ist die, einigen unserer Berechnungen zugrunde liegende Annahme von 50% Effizienz demnach zu optimistisch? Für o.g. Prozesskette müssen wir die Frage mit einem klaren Ja beantworten. Es sind jedoch andere Wege der Einlagerung von EE-Überschuss-Strom denkbar. Man kann z.B. den Umweg über Methan vermeiden und Wasserstoff in Gas- und Dampfkraftwerken (GuD) direkt rückverstromen. Außerdem existieren reversible [Hochtemperatur-Brennstoffzellen](#) (Strom ↔ H<sub>2</sub>) und Ansätze der Meidung von Wasserstoff (z.B. Methanol aus Strom) mit deutlich höheren Wirkungsgraden.

Gleichwohl dürfte das in Abbildung 9 gezeigte Schema auch mittelfristig die in der Praxis dominante Variante der Langzeitstromspeicherung versinnbildlichen. Das hängt nicht nur mit den „gratis“ zur Verfügung stehenden unterirdischen Speichervolumina zusammen, sondern ergibt sich vielmehr aus den mannigfaltigen Möglichkeiten der Nutzung der Zwischenprodukte der Kette. Wir haben dies durch die grünen, nach außen zeigenden Pfeile symbolisiert. In diesem Zusammenhang sprechen Techniker gerne vom **Gesamtwirkungsgrad** einer Prozesskette. Die 36% Stromertrag aus 100% Stromeinsatz beziehen sich **ausschließlich** auf temporäre Stromüberschüsse, die die **gesamte** Kette durchlaufen. Wird „unterwegs“ nutzbare Endenergie entnommen, verringert das zwar den absoluten Ertrag an recyceltem EE-Strom, erhöht aber die Effizienz ganz entscheidend.

Im Schema unberücksichtigt blieb die stromlose EE-Endenergie, die aber z.B. als Raumwärme (Solarthermie) oder in Form von Biokraftstoffen schon gegenwärtig einen durchaus nennenswerten Beitrag zur Verbesserung der „grünen“ Energiebilanz Deutschlands liefert. Im Fokus unserer Betrachtung steht jedoch der elektrische Strom als das Schlüsselement der sektorübergreifenden Substitution fossiler Brennstoffe.

Die direkte Nutzung des EE-Stroms vor der Elektrolyse ist freilich am wenigsten verlustbehaftet. Insofern bleibt batteriegestützte Mobilität definitiv ein wichtiger Baustein zur Pufferung von Strom-Überschüssen, wenn das Laden der Fahrzeugakkus entsprechend organisiert wird. Dass die Batterien der Elektromobile gleichzeitig noch als Kurzzeitspeicher für die Erhöhung der Netzstabilität dienen können, ist eher ein netter Nebeneffekt.



Wärmepumpen mit Arbeitszahlen von 3 und darüber haben unter Nutzung der Umgebungswärme sogar eine Effizienz von über 100%. 1 kWh Strom liefert 3 kWh Raumwärme.

Die bei der Elektrolyse von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff entstehende Wärme lässt sich z.B. schon heute für die Beheizung von Räumen einsetzen. Da Elektrolyseure in den meisten Fällen dezentral installiert sind (bzw. werden), ist es vergleichsweise einfach, die sogenannte Abwärme in nutzbare Wärme zu verwandeln. Es entsteht ein neuer Begriff – die WWK, die Wasserstoff-Wärme-Kopplung.

Auch industrielle Hochtemperatur-Prozesswärme kann man im oben gezeigten Schema an mehreren Stellen abgreifen. Diese Energieform stellt uns indes vor besondere Herausforderungen. Die Nutzung von Wasserstoff dürfte ein, wenn nicht sogar **der** entscheidende Weg sein, Prozesswärme zu generieren. Wir halten die [Nationale Wasserstoff-Strategie \(NWS\)](#) deshalb in ihrem grundlegenden Ansatz für richtig. Sie ist jedoch in ihrem geplanten Umfang unzureichend und [in ihrer konkreten Umsetzung fragwürdig](#). Allein um die deutsche Stahlindustrie auf Wasserstoff umzustellen, benötigt man nach unserer Schätzung eine Elektrolysekapazität zwischen 15 und 20 Gigawatt.

Aufgrund seiner vielfältigen Einsatzmöglichkeiten wird Wasserstoff von manchen Fachleuten ein wenig prosaisch als „[Champagner der Energiewende](#)“ bezeichnet.

Wir sollten bei aller, u.a. von den Medien befeuerten Wasserstoff-Euphorie jedoch nicht vergessen, dass sich die optimale makroökonomische Lösung nur im Zusammenwirken aller, nutzbare Endenergie liefernden Teilprozesse aus unserem Beispielschema ergibt. Wir sollten uns des Weiteren daran erinnern, dass dieses Schema nur eines unter vielen ist. Schlussendlich sollten wir erkennen, dass nicht zwingend die Notwendigkeit besteht, dass Deutschland in der Bewältigung der Energiewende als Land Autarkie anstrebt. Bei etwa 100 Mrd. Euro Importkosten p.a. für fossile Energieträger steht Deutschland auch gegenwärtig energetisch nicht auf eigenen Füßen. Wir haben unserem Schema daher ein paar eingehende grüne Pfeile hinzugefügt und diese entsprechend beschriftet. Die sich in diesem Zusammenhang stellende, komplexe Frage, wie wir zukünftig mit Gas als Energieträger umgehen, werden wir in einem Folgeartikel behandeln.

Entscheidend ist: Die Primärenergie für alle denkbaren Teilprozesse muss schon bald – wir sagen in spätestens 20 Jahren – ausschließlich aus erneuerbaren Quellen stammen. Welche physikalischen Wirkungsgrade im Zuge der Wandlung in nutzbare Endenergie vorliegen, ist unserer Meinung ebenso von nachgeordnetem Interesse wie die Frage, in welchem Land diese Wandlung stattfindet.

Summa summarum können wir feststellen: Die direkte und damit effizientere Nutzung verschiedener Formen Endenergie, die während der Wandlung von EE-Überschuss-Strom anfallen, senkt

- den Strombedarf (Wandlungsverluste werden minimiert) und
- damit auch die notwendige Langzeitspeicherkapazität (s. Abbildung 6).

Das sind gewiss keine neuen Erkenntnisse. Überhaupt bilden wir uns nicht ein, mit diesem Text irgendwelche fundamental neuen Resultate geliefert zu haben. Innovativ könnte allenfalls der empirische Ansatz unserer Berechnungen sein. Die Projektion realer Daten aus der Vergangenheit auf die Zukunft hat schon in anderen Lebenslagen gute Dienste zu deren Gestaltung geliefert. Nur:

**Wann fangen wir endlich ernsthaft damit an?**

## 6. Politische Realitäten

Das kürzlich gefällte [Urteil des Bundesverfassungsgerichtes zum Klimaschutzgesetz 2019](#) war eine schallende Ohrfeige für unsere führenden Politiker. Die vorwiegend von der Jugend getragene Klimaschutzbewegung feiert ihren Sieg. Wenn die Jugend aber glaubt, bereits heute auf dem Grab jahrelang verfehlter Energie-, Klima- und Umweltpolitik zu tanzen, irrt sie gewaltig.

Was hat sich seit dem Tage der Urteilsverkündung wirklich geändert? Alle etablierten Parteien übertreffen sich in Lippenbekenntnissen und überhäufen das BfG mit Lob in Bezugnahme auf den „weisen Beschluss“.

### Sprechblasen

Beginnen wir mit Peter Altmaier (CDU), einem der größten Verhinderer effektiver Klimapolitik, der in einem [Spiegel-Interview](#) vom 30.04.2021 folgendes Statement traf:

*Das Urteil ist ein deutlicher Warn- und Weckruf: Das bisherige Klimaschutzgesetz ist nicht ausreichend und muss korrigiert werden. Allerdings stellt das Bundesverfassungsgericht die klimapolitischen Ziele von Regierung und Parlament, wie zum Beispiel das Pariser Klimaschutzabkommen, gerade nicht infrage. Stattdessen wird bemängelt, dass das bestehende Gesetz zur Erreichung der selbst gesetzten Ziele nicht ausreicht. Deshalb besteht nun dringender Handlungsbedarf für den Gesetzgeber: Wir müssen erstens sicherstellen, dass unsere Klimaziele tatsächlich erreicht werden, und zweitens verhindern, dass dies einseitig zulasten der jüngeren Generationen geht. Dafür tragen Bundesregierung und Parlament gemeinsam die Verantwortung. Und die Zeit drängt: Wir haben nur noch wenige Wochen, bis zum Ende der Wahlperiode, und müssen deshalb schnell und zügig handeln. Gegenseitige Schuldzuweisungen lenken von diesem Ziel ab und schaden dem Ziel des Klimaschutzes.*

Diese Aussage erfüllt die Standards der auserlesenen rhetorischen Qualität, die wir seit Ihrer Zeit als Bundesumweltminister von Ihnen gewohnt sind. Bezogen auf den Inhalt müssen Sie uns jedoch den Hinweis gestatten, dass Sie als Wirtschaftsminister maßgeblich für die Sabotage des beschleunigten Ausbaus der Solar- und Windenergie in den letzten Jahren Verantwortung tragen, während die Kohleindustrie nach wie vor den Segen üppiger Subventionen genießt. Und – um bei unserem Thema zu bleiben – die Frage der dringend notwendigen Langzeitspeicherung temporärer EE-Überschüsse scheint ähnliches Neuland für Ihr Ministerium zu sein wie das Internet für Angela Merkel im Jahre 2013.

SPD-Fraktionsvize [Matthias Miersch würdigt Altmaiers Aktionen](#) bzw. seinen simulierten Aktionismus im Zusammenhang mit dem Urteil des BVerfG, ganz in unserem Sinne, wie folgt:

*Bundesminister Altmaier, der Regierungs-Pinocchio, schmolzt, dass keiner Vorschläge zu seiner Klimacharta gemacht hat, und hat darüber scheinbar vergessen, dass er selbst für den Ausbau der Erneuerbaren sorgen müsste, den er die ganzen Monate blockiert hat.*

Völlig richtig, Herr Miersch. Allerdings erlauben wir uns die Anmerkung, dass sich Ihre Partei seit geraumer Zeit in Regierungsverantwortung befindet. Wir haben nicht vergessen, dass Ihr Parteikollege Sigmar Gabriel, Altmaiers Vorgänger, seinerzeit nahezu identisch agierte wie der aktuelle „Regierungs-Pinocchio“. Er verwandelte den Vorschlag einer erhöhten Klimaabgabe im Sommer 2015 innerhalb von 14 Tagen in 1,6 Mrd. € Subventionen für drei stillgelegte Braunkohlekraftwerke, die drei Jahre als „Reserve“ startklar gehalten wurden. Sie waren in dieser Zeit nicht eine Sekunde am Netz, und das war vorher absehbar. Das nutzlose Versenken von Steuergeldern ist demnach kein Alleinstellungsmerkmal der CDU. Wir erinnern uns überdies an die Blutgrätsche Gabriels gegen die damalige Umweltministerin Barbara Hendricks, die sich erdreistete, konkrete Zahlen auf der Weltklima-Konferenz in Marrakesch 2016 vorlegen zu wollen. Dafür gebührt Frau Hendricks noch heute unsere Hochachtung. Seien Sie, Herr Miersch, daher bitte vorsichtig damit, wem Sie öffentlich lange Nasen verpassen.

Ihr SPD-Kanzlerkandidat Scholz klingt im Übrigen deutlich konzilianter und, für seine Verhältnisse, ehrlicher:

*Wir werden nächste Woche im Kabinett sein mit einem ehrgeizigen Klimaschutzgesetz, das allerdings machbar ist.*

Die Botschaft ist angekommen, Herr Scholz; es muss **machbar** sein und **was** machbar ist, das werden Ihnen die Leute mit Einfluss auch weiterhin direkt in die Gesetzestexte diktieren. Das Ergebnis dieser, der von Ihnen hier wenigstens zu Protokoll gegebenen, allgemeinen Herangehensweise, kennen wir aus Erfahrung.

„[Innovatives](#)“ [kommt von der FDP](#). Ihr Vorsitzender, Christian Lindner, wandelt ganz klar auf den Pfad der Kernkompetenz der Liberalen („Der Markt regelt das“), indem er sagt:

*Das Urteil des Bundesverfassungsgerichtes ist ein Anlass für einen klimapolitischen Neustart in Deutschland. Wir brauchen nach Auffassung der Karlsruher Richter mehr Verbindlichkeit bei den Reduktionszielen für Treibhausgase. Diese Haltung vertritt auch die FDP. Zugleich sollten wir aber stärker auf Ideenwettbewerb und einen Technologieschub setzen. Bisher hat sich die deutsche Klimapolitik planwirtschaftlich verzettelt und technologisch festgefahren.*

Dann starten Sie mal durch, Herr Lindner. Vergessen Sie dabei aber nicht, dass die deutsche Klimapolitik mitnichten „technologisch festgefahren“ ist. Die Technologien sind seit langem vorhanden und haben sich inzwischen, trotz der aktiven Verhinderungspolitik, [an der sich auch Ihre Partei beteiligt](#), gut am Markt etabliert. Haben Sie da **alternativ** noch ein As im Ärmel, das Sie erst auszuspielen gedenken, wenn es ganz

dick kommt? Uns beschleicht bei Aussagen wie Ihrer ein ungutes Gefühl. Wir wollen es hier zunächst bei dieser milden Unterstellung belassen. Irgendwann werden Sie sich ohnehin näher erklären müssen, was Sie mit „technologisch festgefahren“ tatsächlich meinen.

### Gängige politische Praxis

Am Ende des Tages werden für alle Parteien wie bisher die Interessen des eigenen Klientels Vorfahrt haben, Vorfahrt vor den von Wissenschaftlern seit langer Zeit glasklar ausformulierten notwendigen Maßnahmen. Das macht uns Angst, obwohl wir in unserem gesetzten Alter die Konsequenzen wahrscheinlich nicht mehr miterleben müssen. Unsere Kinder und Enkel aber vermutlich schon.

Es gibt keinen neuen Szenariorahmen der BNetzA, der das Urteil des BVG würdigt. Es gibt keine Pläne, die Power2Gas- oder die Power2Fuel-Technologien in einem Maße vorantreiben, das dem Problem der Langzeitspeicherung gerecht wird. Man holt innovative Projekte wie die Energiespeicherung über Druckluft nicht aus der Schublade. Man rettet lieber klimaschädliche Unternehmen wie die Lufthansa und schantzt den Abgasbetrügnern der Automobilindustrie weiterhin Milliardenbeträge zu, statt mittelständische Innovationen im Bereich der Erneuerbaren Energien endlich effektiv zu fördern. Die Gesetze, die dem beschleunigten Ausbau von Wind- und Sonne-Stromerzeugern im Wege stehen, sind nach wie vor in Kraft.

Interessant ist einzig die Frage, wie sich eine von den Grünen geführte Regierung schlagen wird, sollte Frau Baerbock im Herbst tatsächlich zur Kanzlerin gewählt werden. Der Blick nach Baden-Württemberg und die mangelnde Sachkenntnis der grünen Kanzlerkandidatin lassen indes auch für dieses Szenario immense Zweifel an essenziellen Fortschritten in der Klimapolitik bei uns aufkommen.

### Abseits aller Parteipolitik...

...gehört aber auch die zunehmende Anzahl von Menschen, die sich ehrlich für die dringend notwendige und schnelle Kehrtwende in der Klimapolitik engagieren, zur politischen Realität. Sie organisieren sich in NGOs und Arbeitsgruppen, zwischen denen reger Austausch von Daten und Fakten stattfindet. In diesem Sinne danken wir insbesondere Agora-Energiewende für die Bereitstellung der Leistungsdaten 2015 bis 2020, die wir als Basismaterial für unsere beiden Texte verwendet haben. Wir hoffen, unsere Analysen liefern Ansatzpunkte für weitere Diskussionen.