

Wärmespeicherkraftwerke – Ein Pfad zu einhundert Prozent erneuerbarer Stromversorgung.¹

Franz Trieb und Judith Jäger

Die stark intermittierende Residuallast ist nach wie vor eine schwierige Hürde auf dem Weg der Transformation zu einer erneuerbaren und sicheren Energieversorgung. Ein Lösungsansatz zur Deckung der Residuallast mit Wärmespeicherkraftwerken wurde in früheren Beiträgen in den Energiewirtschaftlichen Tagesfragen Heft 11/2020 und Heft 5/2021 vorgestellt. Im vorliegenden Beitrag wird diskutiert, wie der Weg zu 100% erneuerbarer Versorgung im deutschen Stromsektor aussehen könnte.

Wärmespeicherkraftwerke zur Deckung der Residuallast

Die Residuallast ist die zeitlich variable Differenz zwischen der von den Verbrauchern geforderten elektrischen Last und dem Stromangebot aus erneuerbaren Quellen. Für Kraftwerke, die diese immer stärker intermittierende Residuallast sicher und in Zukunft ebenfalls erneuerbar decken sollen, wird es mit dem Ausbau von Wind- und Solarenergie technisch und wirtschaftlich immer unangenehmer: Schwankungen und Abregelung nehmen zu, Auslastung und wirtschaftlicher Umsatz fallen, und die Versorgungslücken infolge von Dunkelflauten bleiben.

In den vorhergehenden Teilen dieser Publikation [1][2] wurden Wärmespeicherkraftwerke (WSK) als hochflexible, erneuerbare Kraftwerke vorgestellt, die effektiv die zunehmend problematische Residuallast im deutschen Stromsektor abdecken können (Abb. 1). Ein WSK ist ein thermisches Kraftwerk zur Deckung stark intermittierender Stromlast. Es nutzt vorzugsweise erneuerbare Brennstoffe, um jederzeit sichere Leistung garantieren zu können. Weiterhin verfügt es über einen großen Photovoltaikgenerator und eine Carnot-Batterie, um möglichst viel Brennstoff einzusparen.

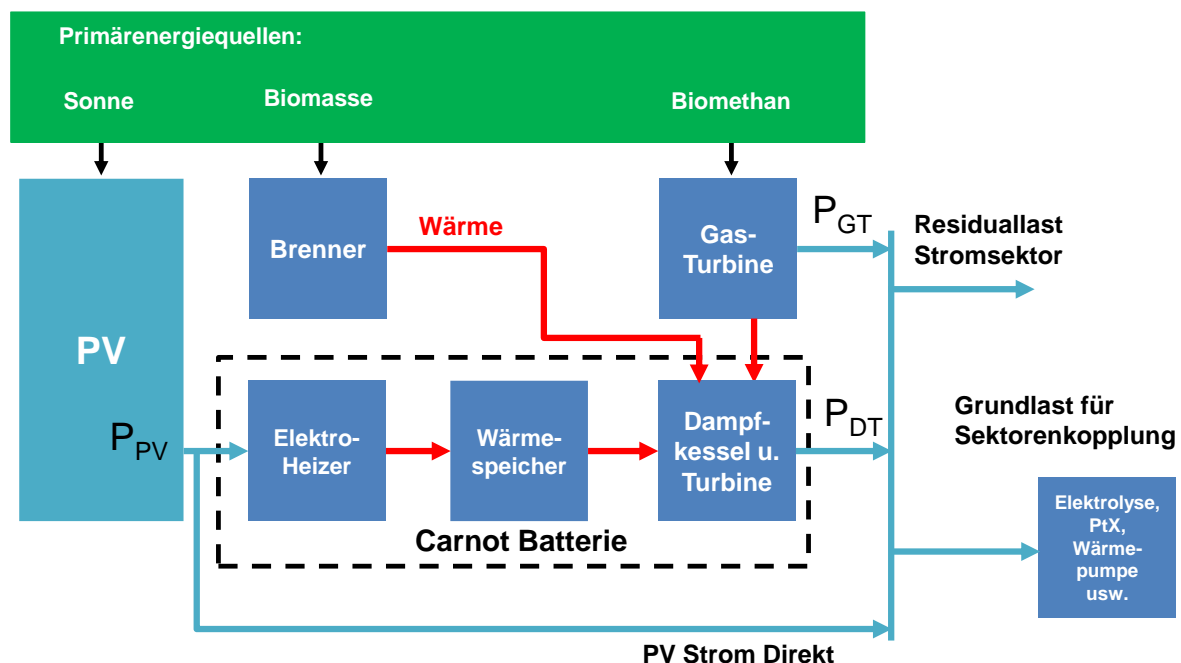


Abb. 1: Hochflexibles Wärmespeicherkraftwerk mit erneuerbaren Energiequellen, Wärmespeicher, Elektroheizer, Zuführung, Dampfturbine und Spitzenlast-Gasturbine mit Wärmerückgewinnung.

¹ Manuskript für Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Heft 5 (2022)

Solarstrom kommt entweder direkt aus dem PV-Generator oder wird über eine Carnot-Batterie (Wärmebatterie) bedarfsgerecht gepuffert. Droht diese leerzulaufen, wird mit Biobrennstoffen nachgeheizt, so dass die zur Lastdeckung notwendigen Leistungen von Dampfturbine (P_{DT}) und Gasturbine (P_{GT}) jederzeit gesichert sind.

Der Weg bis zu zwei Drittel erneuerbarem Stromanteil

Abb. 2 zeigt das Ergebnis einer Jahressimulation des deutschen Kraftwerksparks mit zwei Dritteln (67%) erneuerbarem Anteil. In diesem Modell sind insgesamt 115 GW PV, 90 GW Windkraft und 15 GW andere Erneuerbare installiert [3]. Die Herausforderungen bei der Deckung der Residuallast sind deutlich zu erkennen:

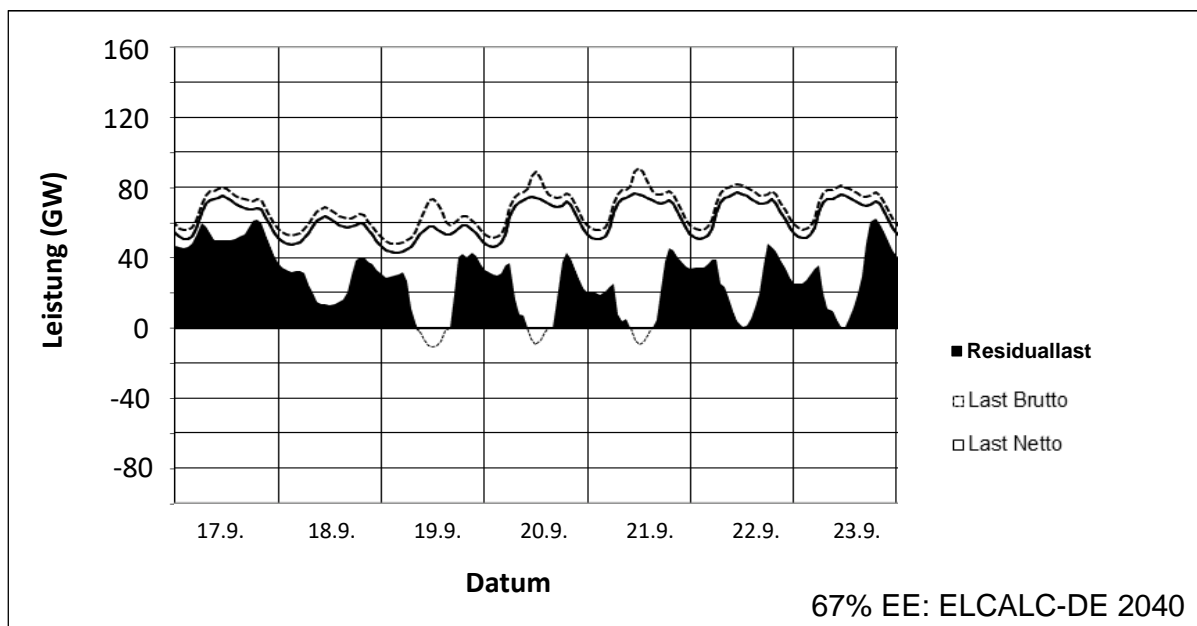
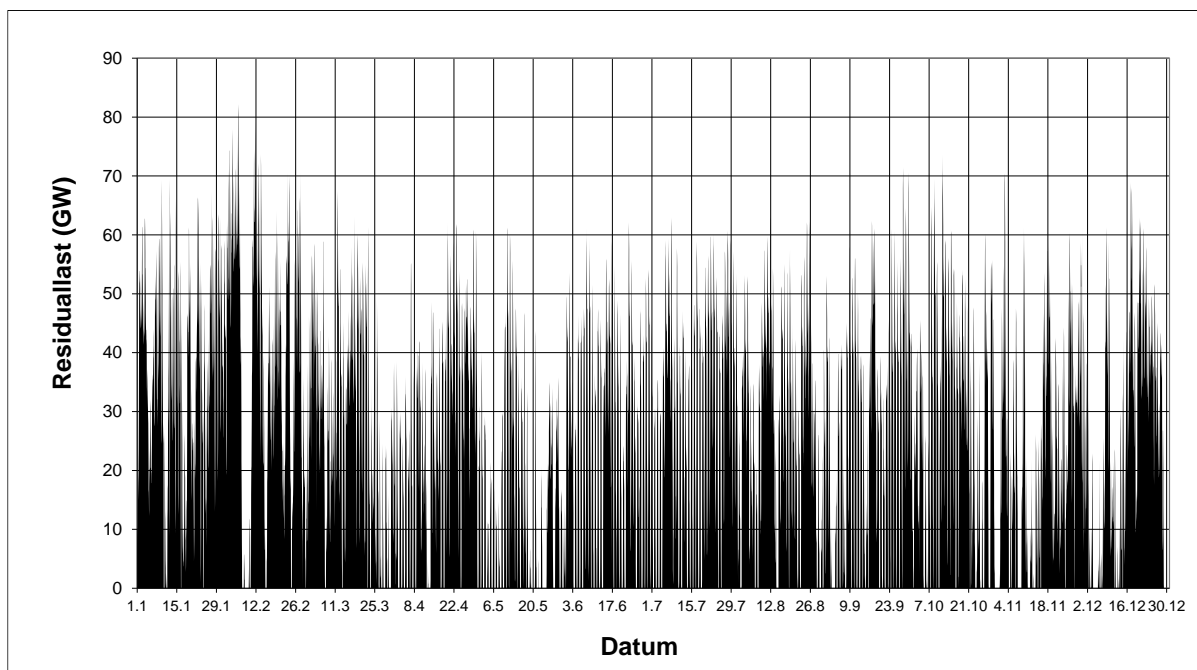


Abb. 2: Die Residuallast (schwarz) bei zwei Drittel erneuerbarem Stromanteil. Oben: Jahresverlauf. Unten: Verlauf während der Tag-Nacht-Gleiche im September. Die Residuallast entspricht etwa 2700 Volllastbetriebsstunden pro Jahr.

Auf der einen Seite geht der residuale Strombedarf an sonnigen und windigen Tagen auf Null zurück, und es werden bereits erste Überschüsse produziert (Abb. 2, unten, 19.9. bis 23.9.). Das zwingt alle anderen Kraftwerke zum Abschalten und verdeutlicht, dass Grundlastkraftwerke in diesem Szenario nicht mehr betriebsfähig sind. Der Betrieb von Grundlastkraftwerken würde ebenso wie ein weiterer Zubau Erneuerbarer zu inakzeptablen Überschüssen und Abregelung führen. Trotzdem reichen die unregelmäßigen erneuerbaren Stromüberschüsse an diesem Punkt nicht annähernd aus, um damit Batterien oder Wasserstoffproduktionsanlagen wirtschaftlich betreiben zu können.

Auf der anderen Seite gibt es immer noch Dunkelflauten, die durch den weiteren Ausbau von Wind- und PV-Leistung kaum beeinflusst würden (Abb. 2 unten, besonders am 17.9. bis 18.9., aber auch nachts an den anderen Tagen). Diese können im Winter bis zu zwei Wochen und länger andauern und erfordern regelbare Kraftwerke mit sicherer Leistung in beinahe voller Höhe der Stromlast.

Die Auslastung von Kraftwerken zur Deckung der Residuallast läge mit etwa 2700 Volllastbetriebsstunden pro Jahr weit unter dem, was für Kernkraftwerke und Braunkohlekraftwerke, aber auch für Öl- und Gaskraftwerke wirtschaftlich attraktiv und technisch machbar erscheint. Die aufgrund immer geringerer Auslastung ohnehin abnehmende Wirtschaftlichkeit würde voraussichtlich infolge steigender CO₂- und Brennstoffpreise weiter geschwächt. Auch technisch könnten konventionelle Kraftwerke den extrem hohen Flexibilitätsanforderungen nicht oder nur bedingt gerecht werden.

Der Weg bis zu 100% erneuerbarem Stromanteil

Ein weiteres Szenario (Abb. 3) zeigt, wie die oben beschriebene Residuallastlücke durch den Zubau von Wärmespeicherkraftwerken in Form von 21 GW Dampfturbinen (unteres Band in rot, grau und gelb), 48 GW Gasturbinen (schwarz), 105 GW Photovoltaik (Teil des grünen Bereichs) und 600 GWh Wärmespeichern (gelb, negativer Bereich beladen, positiver Bereich entladen) mit bis zu 100% erneuerbarer Primärenergie geschlossen werden kann [4].

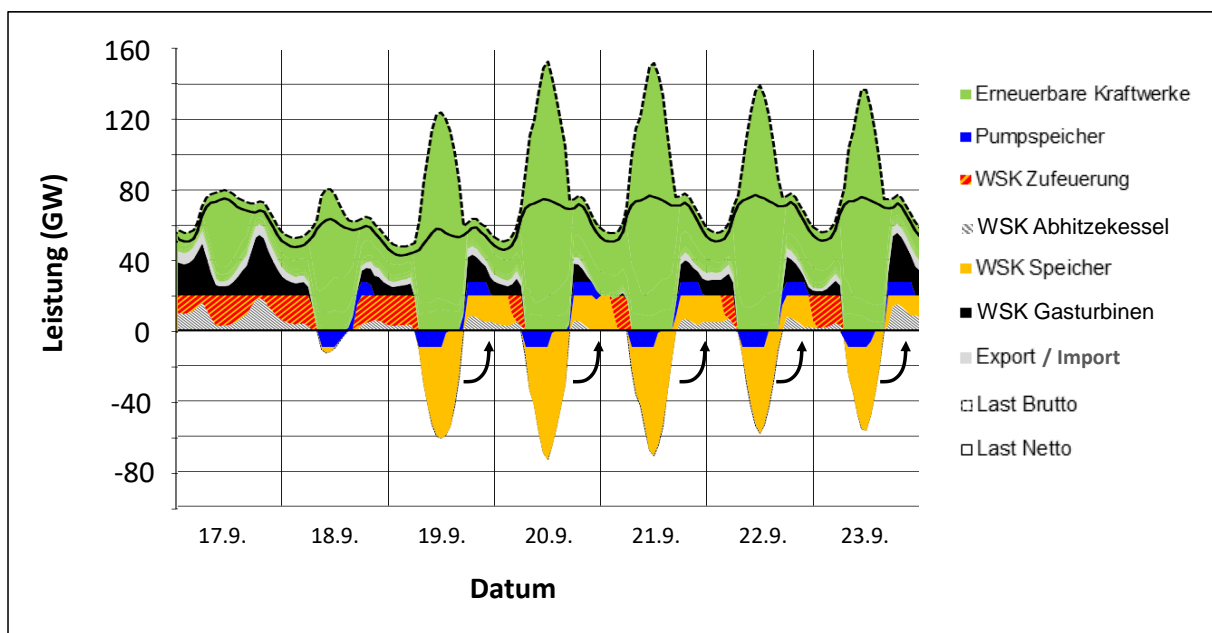


Abb. 3: Zubau von Wärmespeicherkraftwerken inklusive 21 GW Dampfturbinen, 48 GW Gasturbinen, 105 GW Photovoltaik und 600 GWh Wärmespeicher schließt die Residuallastlücke mit bis zu 100% erneuerbarer Energie.

In diesem Szenario weisen die Dampfturbinen der WSK insgesamt etwa 5000 Volllastbetriebsstunden auf, die zu etwa gleichen Teilen aus gespeichertem Photovoltaikstrom, zugefeuerter Biomasse und Abwärme aus den Spitzenlast-Gasturbinen abgedeckt werden. Die Gasturbinen tragen mit nur etwa 1500 Volllastbetriebsstunden zur sicheren Versorgung bei.

Interessanterweise liegt dabei der Strom-zu-Strom-Wirkungsgrad der Photovoltaik bei etwa 70%. Dieser Wert ergibt sich aus dem gewichteten Mittel aus knapp 50% des PV Stroms, der direkt zur Last geliefert werden kann und 50% des PV-Stroms, der mit 40% Wirkungsgrad durch die Carnot-Batterie gespeichert und verzögert abgegeben wird (vergl. Abb. 2 und Abb. 3). Der Wirkungsgrad der Gasturbinen mit Abhitzeessel liegt bei ca. 55%, der für die Zufeuerung bei etwa 36% [5].

Ein zügiger Ausbau von Wärmespeicherkraftwerken könnte innerhalb von knapp 20 Jahren zu einer 100%igen Stromversorgung mit erneuerbarer Energie führen. Dabei ist zu beachten, dass der Ausbau hin zu 67% erneuerbarem Anteil laut Abb.2 und der weitere Ausbau zu 100% erneuerbarem Anteil laut Abb. 3 nicht sukzessive nacheinander stattfinden kann. Stattdessen muss der Pfad zum eigentlichen Ziel einer zu 100% erneuerbaren Versorgung von Anfang an eingeschlagen werden, indem alle dafür notwendigen Bestandteile der Versorgung parallel und synchron ausgebaut werden (Abb.4).

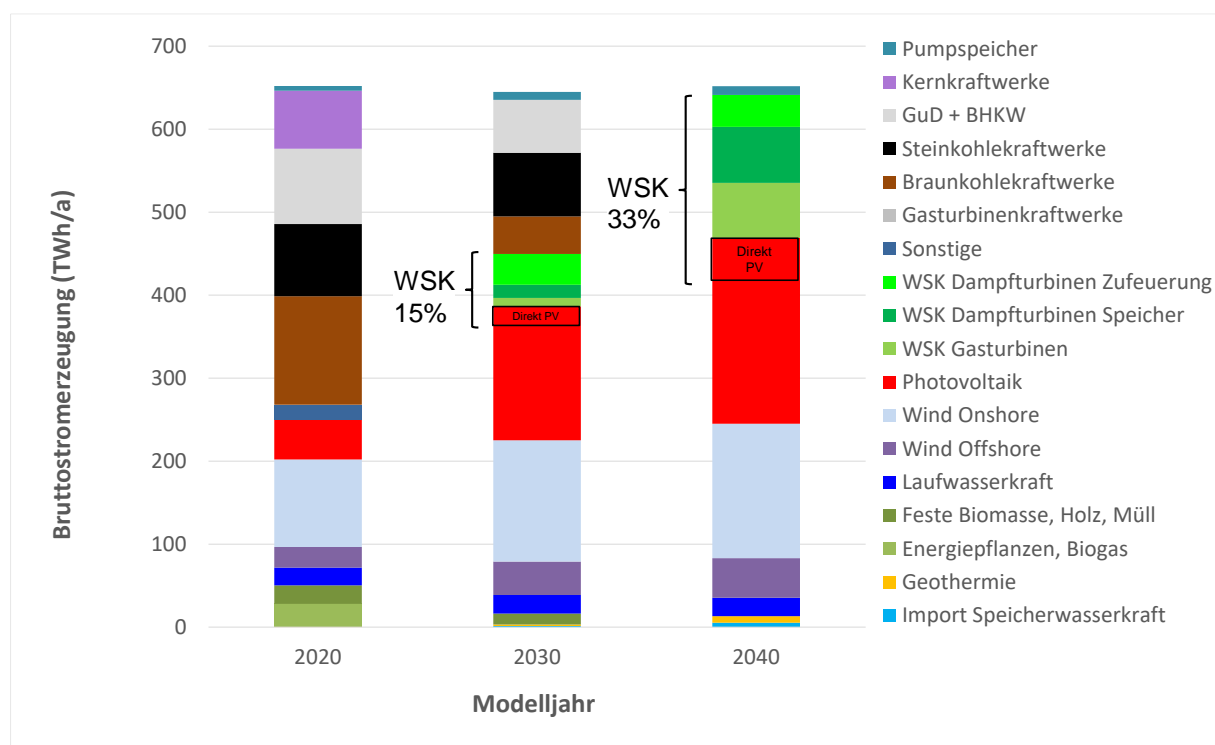


Abb. 4: Bruttostromerzeugung in einem Ausbaupfad der deutschen Stromversorgung mit bis zu 100% erneuerbarem Anteil bis 2040: ein Drittel des Bedarfs wird durch Wärmespeicherkraftwerke gedeckt [6].

Aus einem anderen Blickwinkel betrachtet: der Ausbau von Wärmespeicherkraftwerken erlaubt in Deutschland den weiteren Zubau von 105 GW Photovoltaik, ohne Schwankungen im Netz zu verursachen. Zusätzlich ermöglichen Wärmespeicherkraftwerke den hochflexiblen und gleichzeitig extrem sparsamen Einsatz von Biomasse und Biomethan zur Deckung der Residuallast. Damit eröffnen Wärmespeicherkraftwerke neue Geschäftsmodelle für Solar- und Bioenergie, die einen hohen Mehrwert für diese beiden Branchen und für die gesamte Stromversorgung darstellen.

Der EPEX Strompreis liegt derzeit bei über 250 €/MWh [7]. Strom aus Wärmespeicherkraftwerken ist mit geschätzten Gestehungskosten von anfangs 160-180 €/MWh bereits heute deutlich günstiger als alle anderen Optionen zur Deckung der Residuallast. Nach Durchlaufen einer entsprechenden Lernkurve kann für Wärmespeicherkraftwerke langfristig mit Stromgestehungskosten von etwa 100-140 €/MWh gerechnet werden [8]. Das liegt einerseits an der hervorragenden Anpassungsfähigkeit und Flexibilität dieses Kraftwerkstyps und andererseits an seinen erneuerbaren und lokal verfügbaren Primärenergiequellen, die nicht an internationale Brennstoffpreise gekoppelt sind.

Auch im Bereich der Sektorenkopplung weisen Wärmespeicherkraftwerke attraktive Optionen auf: sobald ein entsprechender Teil der Residuallastlücke durch Wärmespeicherkraftwerke geschlossen ist, können beispielsweise Elektrolyseure oder Wärmepumpen in kontinuierlicher Grundlast und damit wirtschaftlich und energieeffizient mit erneuerbarem Strom betrieben werden. So wird nicht nur grüner Wasserstoff und erneuerbare Wärme erzeugt, sondern die WSK werden auch besser ausgelastet und können daher wirtschaftlicher arbeiten als im reinen Residuallastbetrieb.

Die Potenziale dafür sind vorhanden: bei einer benötigten Landfläche von 15 km²/GW und einem Zubau von 105 GW Photovoltaik ergibt sich für das oben beschriebene Szenario ein Flächenbedarf von etwa 1575 km² entsprechend 0,43% der Landfläche Deutschlands [9]. Diese Landfläche könnte durch die kombinierte Nutzung von PV- und Agrarflächen (Stichwort: Agri-PV) entlang von Verkehrswegen erschlossen werden. Würde man zum Beispiel die heutigen Berliner Kraftwerke als Wärmespeicherkraftwerke zur Deckung der Residuallast umgestalten, ergäbe sich folgendes Bild (Abb.5):

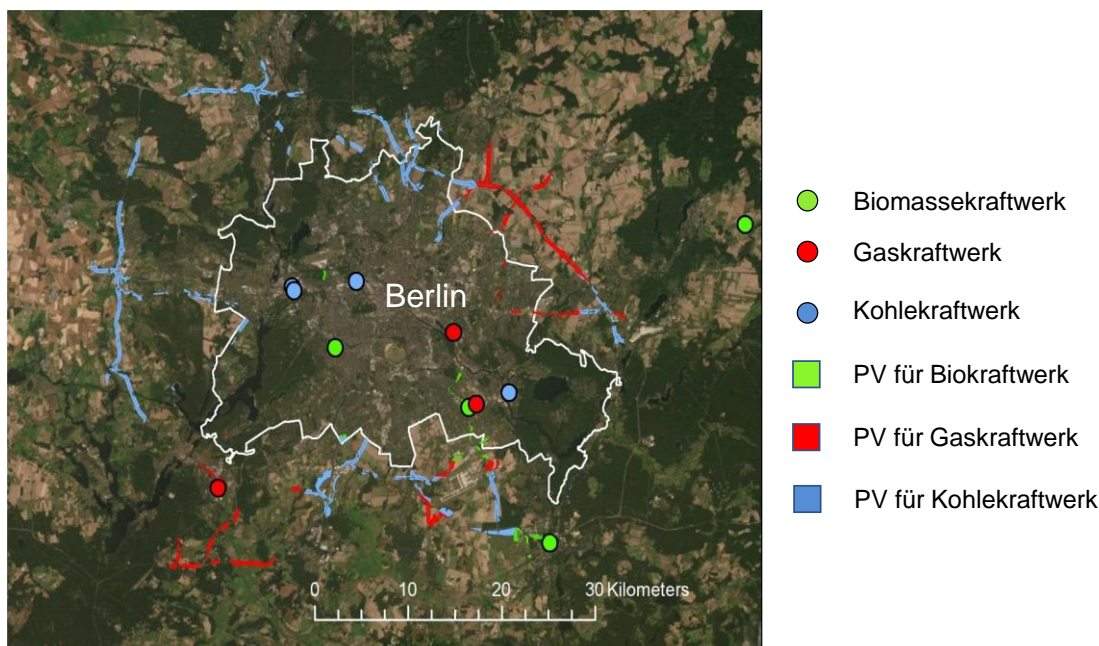


Abb. 5: Kraftwerke in Berlin und die für äquivalente Wärmespeicherkraftwerke notwendigen Photovoltaikflächen [9].

Da die Auslastung der Wärmespeicherkraftwerke (bei gleicher Kraftwerksleistung) nur noch etwa 2700 Volllaststunden pro Jahr beträgt, und weil zusätzlich Biomasse zur Deckung der Residuallast eingesetzt wird, ist der notwendige Flächenverbrauch für Photovoltaik nicht annähernd so exorbitant wie man zunächst vermuten möchte. Außerdem kann der Biomasseverbrauch im deutschen Stromsektor wegen der Kombination mit Photovoltaik in etwa auf heutigem Niveau gehalten werden, obwohl die WSK-Leistung deutlich höher als die heutiger Biomassekraftwerke ist.

Neben dem Umbau vorhandener Kraftwerke besteht technisch und wirtschaftlich die Möglichkeit, zeitliche Übergänge von fossilen Brennstoffen hin zu Biomasse, Biomethan und anderen erneuerbaren Energieträgern zu schaffen. Allerdings ist der sofortige Einsatz erneuerbarer Primärenergiequellen aufgrund heutiger fossiler Brennstoffpreise voraussichtlich die wirtschaftlichere Option.

Fazit

Wärmespeicherkraftwerke wandeln solare und biogene Primärenergie kostengünstig, effizient und umweltverträglich in hochflexiblen und sicheren Strom zur Deckung der Residuallast um und ebnet damit den Weg zu einhundert Prozent erneuerbarer Versorgung im Stromsektor und anderen Bereichen, ohne auf Umwege über Erdgas oder Kernenergie zurückgreifen zu müssen.

Anmerkungen

[1] Trieb, F., Geyer, M., Koll, G., Wärmespeicherkraftwerke – Ein Lösungsansatz für das Residuallastproblem im Stromsektor, *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 70. Jg. (2020), Heft 11

[2] Trieb, F., Wärmespeicherkraftwerke – Ist ein erneuerbarer Stromanteil von 90% bis 2040 machbar und bezahlbar? *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 71. Jg. (2021) Heft 5

[3] Zum Vergleich: der aktuelle Koalitionsvertrag der deutschen Bundesregierung setzt das Ziel einer zu 80% erneuerbaren Stromversorgung im Jahr 2030. Erreicht werden soll dies u.a. mit einem Ausbau der Photovoltaik auf 200 GW und einer Flächenverfügbarkeit für Wind von 2%: SPD, Bündnis90/Die Grünen und FDP, „Koalitionsvertrag - Mehr Fortschritt wagen,“ 2021.

<https://www.bundesregierung.de/resource/blob/974430/1990812/04221173eef9a6720059cc353d759a2b/2021-12-10-koav2021-data.pdf>

[4] Trieb, F., Thess, A., Storage plants – a solution to the residual load challenge of the power sector? *Journal of Energy Storage* 31 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101626>

[5] Trieb, F., Liu, P., Koll, G., Thermal Storage Power Plants (TSPP) - Operation modes for flexible renewable power supply, *Journal of Energy Storage* 50 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104282>

[6] Würde der hier beschriebene 33%ige WSK-Stromanteil stattdessen über Strom-Wasserstoff-Strom abgedeckt, würde sich der gesamte Bruttostrombedarf des Modelljahres 2040 aufgrund des niedrigen Wirkungsgrades dieser Umwandlungskette (ca. 25-35%) in etwa verdoppeln. Das liegt daran, dass Wasserstoff im Gegensatz zu Solar- und Bioenergie keine Primärenergiequelle ist, sondern mit Hilfe von Primärenergiequellen hergestellt werden muss.

[7] EPEX Strommarkt Spot-Preis: <https://www.epexspot.com/>

[8] Eine Kostenanalyse von WSK beim heutigen Stand der Technik finden Sie in Quelle [5], Kosten zukünftiger WSK in den Quellen [2] und [4]. In Quelle [5] werden auch Optionen zur Sektorenkopplung und deren Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit von WSK beschrieben.

[9] Liu, P., Trieb, F., Transformation of the electricity sector with Thermal Storage Power Plants and PV – a first conceptual approach, *Journal of Energy Storage* 44 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103444>