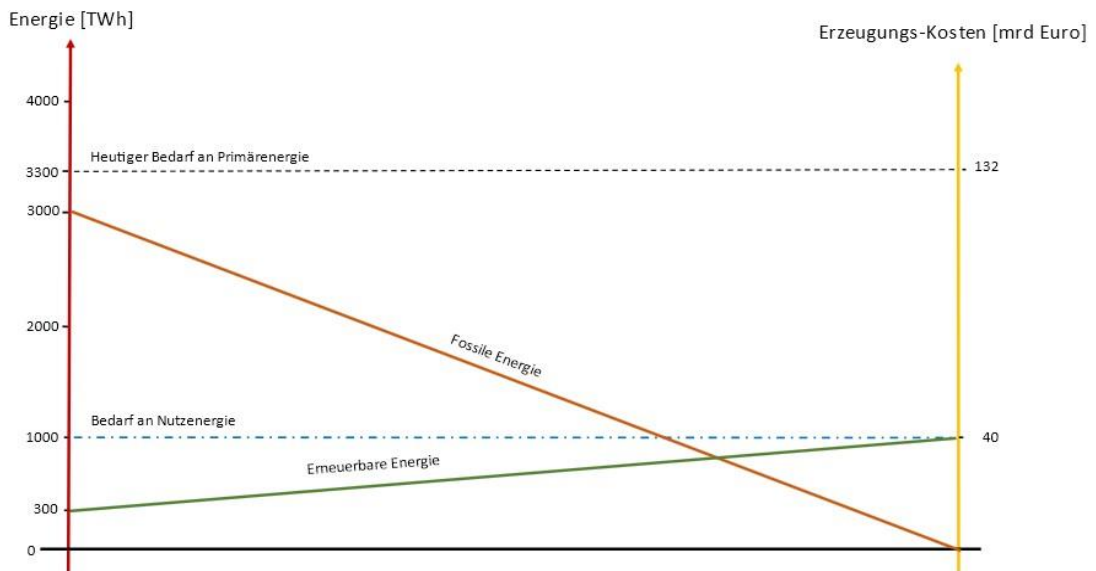


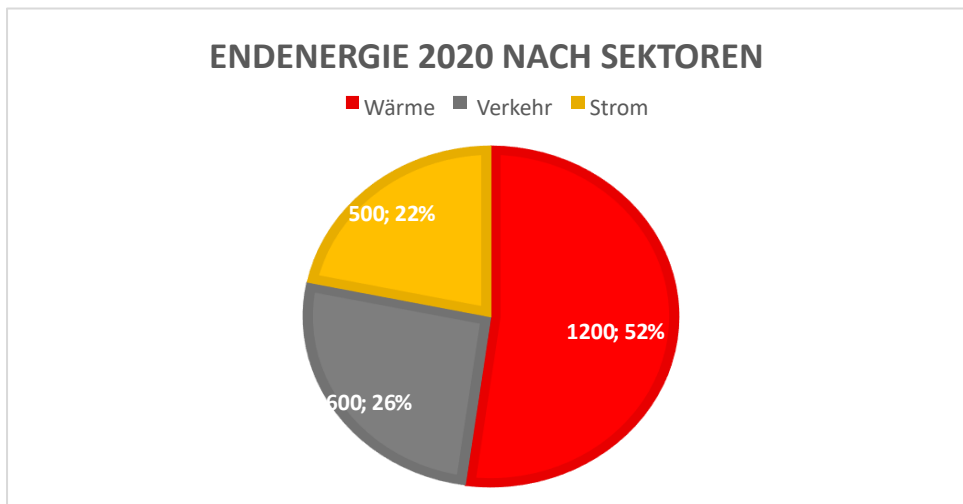
Szenario des Wandels unserer Energieversorgung

Betrachten wir den Wandel unserer Energieversorgung vom Ende her, so ergibt sich folgendes Bild: Mit 3000 TWh fossiler Energie decken wir unseren heutigen Bedarf an 1000 TWh Nutzenergie. Der weitaus größte Teil der Energie geht als Verlustwärme verloren: bei der Stromerzeugung durch Kühltürme, bei Verbrennungsmotoren durch Motorkühler und bei Gebäuden durch die Gebäudehülle. Mit dem Wandel ersetzen wir fossile Energie durch elektrische, die wir auf der Basis von Sonne und Wind erzeugen. Dabei können wir auf den Ersatz der Verluste verzichten, weil elektrische Energie fast reine Nutzenergie ist.



Wandel unserer Energieversorgung von fossiler Energie zu Strom auf der Basis von Sonne und Wind

Unser heutiger Bedarf an 3300 TWh Primärenergie wird zu 2300 TWh Endenergie verarbeitet. Dabei entfallen auf Wärme 1200 TWh, auf die Mobilität 600 TWh und auf Strom 500 TWh. Geht man vom Endzustand aus, dann ist der Wandel von den Verbrennungsmotoren zu Elektromotoren abgeschlossen.

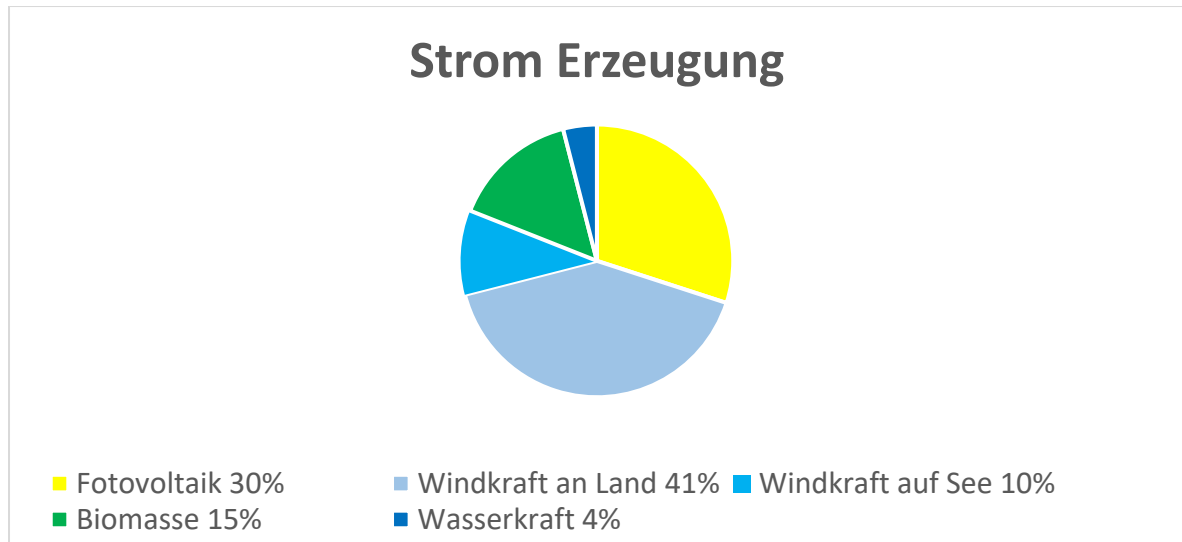


Die thermodynamische Energiewandlung im Bereich unserer Stromerzeugung entfällt. Im Bereich der Mobilität wird sie durch eine elektromagnetische ersetzt. Somit entfällt die Kühlung von Verbrennungsmotoren. Der Ersatz der thermodynamischen Energiewandlung spart zweidrittel der Endenergie im Sektor Mobilität und senkt sie auf 200 TWh. Durch verbesserte Dämmung von Gebäuden sinkt ihr Bedarf an Endenergie im Sektor Wärme ebenfalls auf ein Drittel des heutigen Werts, folglich auf 400 TWh. Wärmepumpen verringern diesen Wert noch mal auf ein Drittel. Es

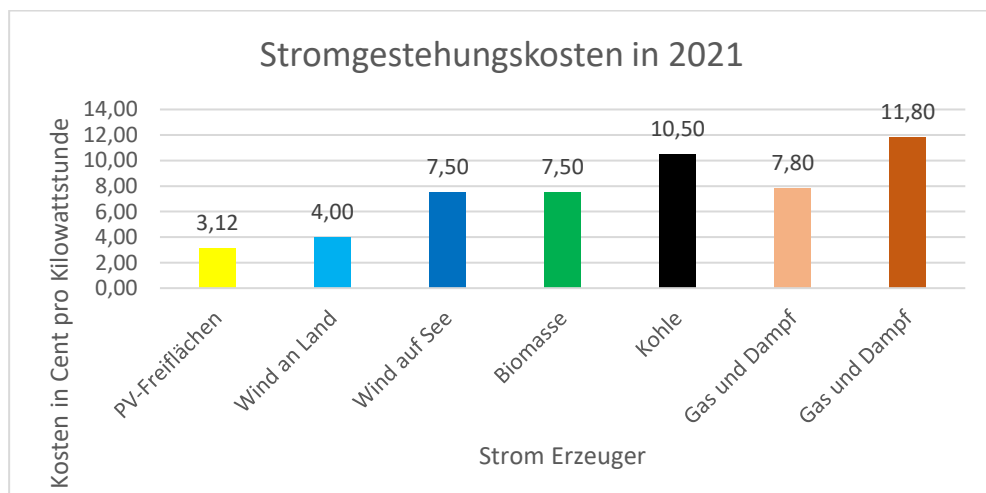
bleiben für den Wärmebereich 130 TWh. In Summe steigt der Bedarf an Strom folglich auf 830 TWh. Aufgerundet und konservativ geschätzt, könnte der Strombedarf mit Abschluss des Wandels bei 1000 TWh liegen. Dieser Wert entspricht der Nutzenergie. Außerdem ermöglicht der höhere Wert Redundanzen im Bereich der Erzeugung.

Wir werden den Bedarf an Nutzenergie durch elektrische Energie decken, wenn wir die heutige Stromerzeugung von 500 TWh verdoppeln. Als Ersatz der fossilen Energien erzeugen wir Strom auf der Basis von Sonne und Wind, dessen Anteil zurzeit 250 TWh beträgt. Diesen Anteil werden wir vervierfachen, um auf 1000 TWh zu kommen. Das ist die erste Herausforderung.

Die Aufteilung auf die unterschiedlichen Erzeugungsarten könnte folgendermaßen aussehen.



Die Kosten für die Stromgestehung setzt sich zusammen aus den anteiligen Beiträgen von 3,12 Cent für Fotovoltaik, 4,0 Cent für Windstrom an Land, 7,5 Cent jeweils für Windenergie auf See, Biomasse und Wasserkraft. Im Ergebnis folgt daraus ein Wert von 4,75 Cent pro Kilowattstunde für die Stromerzeugung.



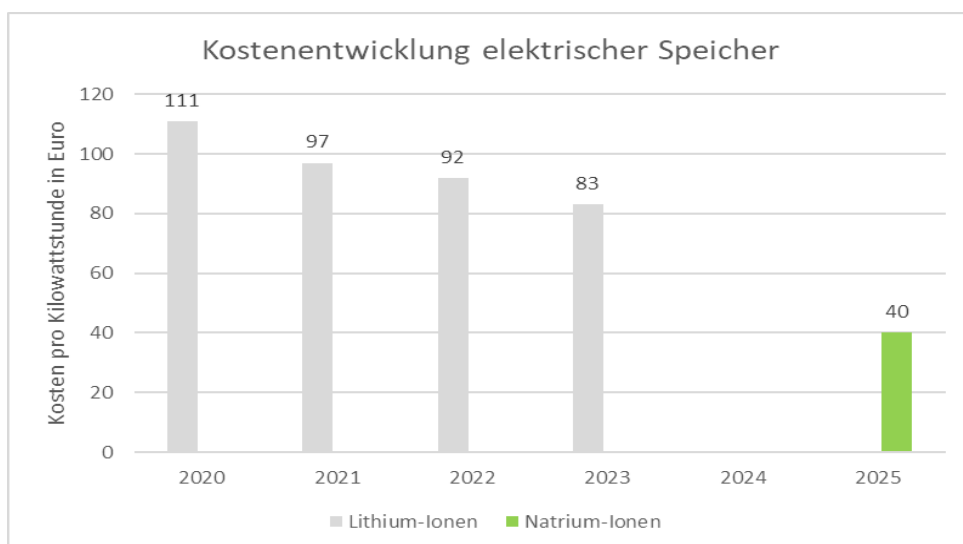
Die Stromerzeugungen aus Sonne und Wind an Land ist etwa doppelt so günstig wie Windkraft auf See, Strom aus Biomasse und Wasserkraft. Folglich werden sie aus ökonomischen Gründen diese Quellen nach und nach verdrängen.

Die zweite Herausforderung besteht darin, die doppelte Menge an Strom nicht nur zu erzeugen, sondern sie auch zu den Nutzern zu transportieren. Dazu müssen wir die Kapazität der Übertragung unserer Netze und ihre Leistung verdoppeln. Vorteilhaft lässt sich dies dadurch erreichen, dass wir das Netz so ertüchtigen, dass es rund um die Uhr, also auch in Schwachlastzeiten, in der Lage ist, seinen Spitzenstrom zu transportieren. Erreichen lässt sich dies durch Tagesspeicher in der Nähe der Nutzer, folglich untersten Ebene des Netzes, beispielsweise hinter den Ortsnetztransformatoren. Wenn auf dieser Ebene Speicher die Hälfte eines Tagesbedarfs aufnehmen, kann das Netz mit maximaler Kapazität rund um die Uhr betrieben werden. Außerdem kann die Leistung des Ortsnetztransformators durch die Leistung des Speichers verdoppelt oder auch noch weiter erhöht werden.

Die dritte Herausforderung besteht darin, saisonale Speicher einzurichten, die in der Lage sind, „Dunkelflauten“ zu überbrücken und Energie vom Sommer in den Winter zu übertragen. Die maximale Dauer einer „Dunkelflaute“ wird von Meteorologen mit drei Wochen angegeben. Wenn wir 10 Prozent des Jahresbedarfs speichern, so könnten wir damit die Verfügbarkeit der Energieversorgung stützen und garantieren.

Die Strom-Infrastruktur gehört zu KRITIS - unserer kritischen Infrastruktur. Diese wird besonders geschützt. So sind die höheren Strom-Ebenen im Übertragungsnetz üblicherweise redundant ausgelegt. Daher wird man auch bei Netzspeichern auf Redundanzen achten. Die Windenergie ist das Rückgrat der zukünftigen Stromversorgung. Sie trägt die Hauptlast. Das Verhältnis zwischen Strom aus Wind und Sonne wird so austariert, dass es für den Winter gerade reicht. Die Überschüsse, die sich durch die Fotovoltaik dadurch im Sommer ergeben, füllen die saisonalen Speicher und werden in Wasserstoff für Industrie- und Chemieanwendungen umgesetzt. Als Reserve und Redundanz stehen für eine garantiert sichere Versorgung, auch im Winter, die saisonalen Speicher zur Verfügung.

Als Speicherkosten können bei Lithium-Eisen-Phosphat-Batterien zwei Cent pro Speicherzyklus anfallen. Sie ergeben sich aus den Kosten zur Speicherung einer Kilowattstunde von 100 Euro und der Berücksichtigung von 5000 möglichen Speicherzyklen.



Günstigere Speicher als solche auf der Basis von Lithium-Ionen werden auf der Grundlage von Natrium-Ionen prognostiziert. In diesem Fall geht man von 40 Euro als Investition für die Speicherung einer Kilowattstunde aus und wartet 4000 Zyklen. Das senkt die Speicherkosten auf einen Cent.

Legt man die Kosten der Speicherung von einem Cent den gesamten Strom um, so bleibt ein halber Cent, da nur die Hälfte des täglichen Strombedarfs in den Tagesspeichern aufgenommen wird. Für

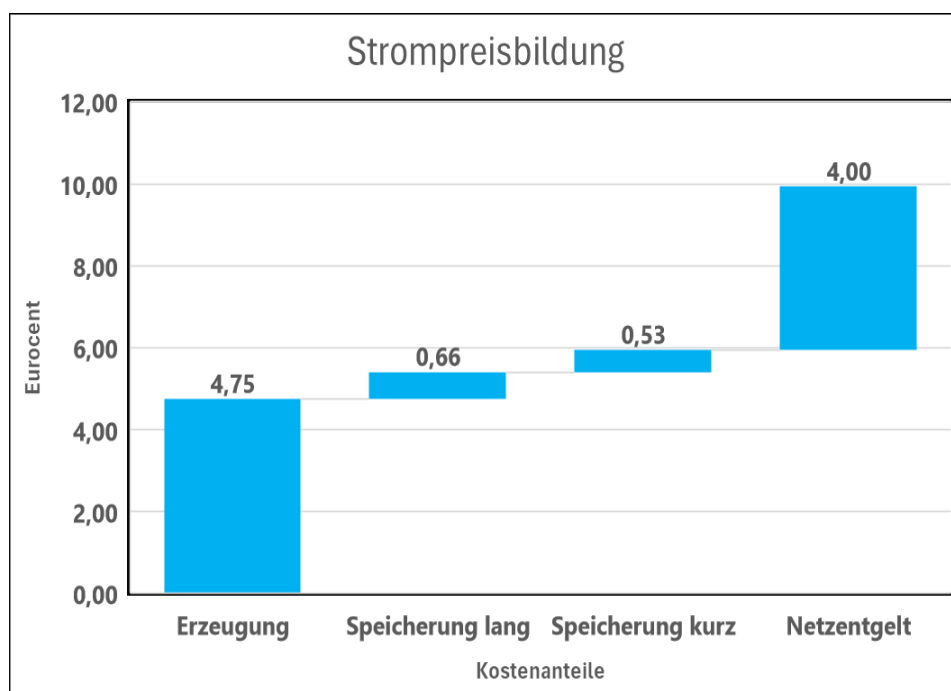
den Wechselrichter treten weitere Kosten von 0,03 Cent auf, so dass sich für die Kurzzeitspeicherung der Tagesspeicher in Summe ein Wert von 0,53 Cent ergibt.

Entlastend wirken die Tagesspeicher auf die Netzentgelte, die zurzeit etwa acht Cent betragen. Infolge des doppelten Stroms im Netz würden die Erträge der Netzbetreiber sich verdoppeln. Dem könnte die Bundesnetzagentur durch eine Absenkung der spezifischen Netzkosten auf die Hälfte entgegenwirken. Damit blieben die Erträge der Netzbetreiber auf dem ursprünglichen Niveau, und die Benutzer würden um vier Cent pro Kilowattstunde entlastet.

Für saisonale Speicher könnte eine Speicherung in Form von Wasserstoff in Frage kommen. Elektrolyse und Wandlung des Gases in Strom erfolgen mit Hilfe von Brennstoffzellen jeweils mit einem Wirkungsgrad von 70 Prozent. Folglich geht mit einem Zyklus die Hälfte der Energie verloren, was einem Wertverlust und damit Grundkosten von 4,75Cent entspricht. Umgelegt auf den Strompreis unter Berücksichtigung von 10 Prozent Speicherung, ergibt folglich eine Erhöhung um ein Zehntel des Werts. Hinzu kommen Kosten für Elektrolyseure in Brennstoffzellenkraftwerken. Vorteilhaft ist, dass Brennstoffzellen sowohl für die Erzeugung von Wasserstoff durch Strom wie auch durch eine Umkehrung des Prozesses zur Erzeugung von Strom durch Wasserstoff verwendet werden können. Umgelegt auf die Gesamtstromproduktion ergibt sich für die langfristige Speicherung in Summe ein Wert von 0,66 Cent pro Kilowattstunde.

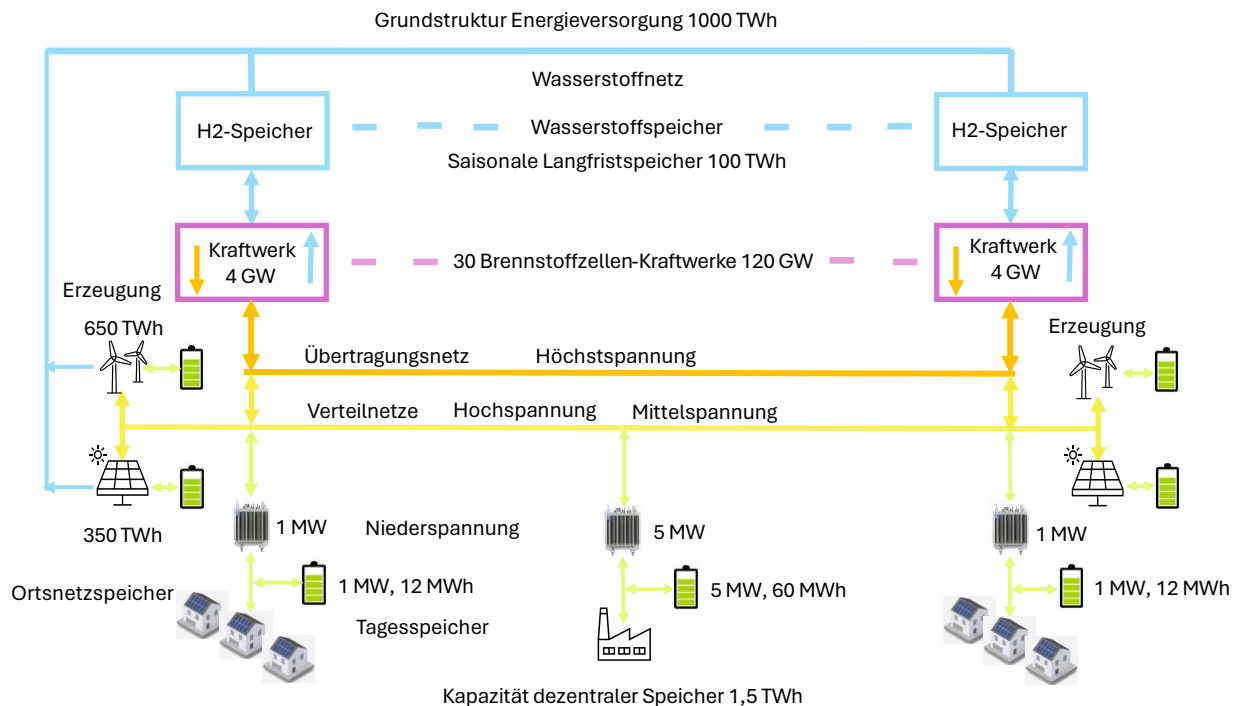
Zum Transport könnte man die vorhandenen Erdgasleitungen nutzen und zur Speicherung die heutigen Erdgasspeicher. Mit dem Gasnetz verfügen wir über ein zweites Netz, das parallel zum Stromnetz für den Austausch von Sekundärenergie in Form von Wasserstoff oder Methan zur Verfügung steht. Es könnte das Stromnetz entlasten und Gas aufnehmen, das durch überschüssigen Strom direkt an den Quellen erzeugt wird. Vorteilhaft ist, dass die Netzgebühren des Gasnetzes wesentlich geringer sind als die des Stromnetzes. Speicher und Sektorenkopplung können folglich in Zukunft dafür sorgen, dass das Erzeugungspotenzial aus Sonne und Wind rund um die Uhr voll ausgeschöpft wird.

Berücksichtigt man die Entlastung durch Halbierung der Netzkosten, die Stromgestehungskosten und die Speicherung, so ergibt sich ein Endpreis von: 9,94 Cent.



Daraus folgt eine energetische Produktivität von etwa 10 kWh pro Euro. Wir erhalten somit zukünftig einen günstigen Energiepreis, in dem Erzeugung und Transport enthalten sind.

Die Versorgungsstruktur, die dieser Prognose zugrunde liegt, lässt sich anschaulich in folgender Grafik darstellen.



Fazit:

Grundlage unserer zukünftigen Energieversorgung ist eine preisgünstige Stromerzeugung durch Sonne und Wind an Land. Unterberücksichtigung von Innovationen zu Brennstoffzellen und Natrium-Ionen-Speichertechnologien im Automobilbereich lassen sich Möglichkeiten voraussagen, Erzeugung, Speicherung, Verteilung und Nutzung von Energie effizienter und wesentlich kostengünstiger aufeinander abzustimmen.

Das Netz der Zukunft wird mit Tagesspeichern und saisonalen Speichern ausgerüstet sein. Es wird wie ein Schwamm den erzeugten Strom aufnehmen und bei Bedarf abgeben. Mit Tagesspeichern werden tägliche Veränderungen zwischen Angebot und Nachfrage aufeinander abgestimmt und ausgeglichen. Abregelungen bei einem Überangebot an Strom wird es nur noch in äußerst seltenen Ausnahmen. Mit saisonalen Speichern werden längerfristige Schwankungen im Bereich mehrerer Wochen aufgefangen. Beide Speicherarten garantieren eine zuverlässige und sichere Versorgung und senken die Netzkosten. Sie könnten aus heutiger Sicht wesentlich günstiger sein als das, was wir heute zahlen. Voraussetzung ist, dass wir darauf achten, dass das Netz mithilfe der Tagesspeicher mit maximalem Strom rund und die Uhr betrieben werden kann.

Die Windenergie auf dem Meer wird aus ökonomischen Gründen nur ein Nischendasein führen. Die spezifischen Speicherkosten werden durch Entwicklungen der Natriumionen-Technologie¹ voraussichtlich bis auf einen Cent sinken. Mit Speichern auf der Basis von Natrium wären auch Versorgungsengpässe von Lithium kein Hinderungsgrund, Großspeicher zur Stützung der elektrischen Versorgung aufzubauen.

¹ CATL Kostengünstige Natrium-Ionen-Akkus <https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/batterie-forschung-catl-natrium-akku-statt-lithium-ionen/>

Ihre Bedeutung verliert die Kraftwärmekopplung auf der Basis von fossilen Energien. Auch die Verwendungen von Holz und Biomasse im Energiebereich verlieren ihre Bedeutung. Da es keine fossilen Energien mehr gibt, die sie verdrängen könnten, bringt ihre Verwendung keinen ökologischen Gewinn mehr. Ob die Biomasse verrottet und dabei ihr gespeichertes Kohlendioxid freisetzt, oder ob sie zu Heizzwecken oder zur Erzeugung von Biogas verwendet wird, ist ökologisch gleichwertig. Sollten sich die Energiekosten von Biomasse allerdings sehr günstig entwickeln, könnte die Verwendung aus wirtschaftlichen Gründen weiterhin sinnvoll sein.

Das Szenario basiert auf den heute zugänglichen Kosten für die Erzeugung von Strom aus Sonne und Wind. Es geht von einer Entwicklung entlang maximaler technischer und ökonomischer Effizienz aus. Beabsichtigt ist eine Maximierung energetischer Produktivität als Voraussetzung für volkswirtschaftlichen Erfolg. Es könnte auch anders kommen, wenn Energiekonzerne und Netzbetreiber im Sinn einer Maximierung ihrer betriebswirtschaftlichen Gewinne mit mehr Windkraft im Meer und einer Verdopplung der Netze die Zukunft bestimmen. In dem Fall würde der anzunehmende zukünftige Strompreis weit über dem im Text dargestellten ansteigen.

Quellen

Endenergie 2022

<https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/endenergieverbrauch-strom-waermeverkehr>

Stromgestehungskosten 2021

<https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/studie-stromgestehungskostenerneuerbare-energien.html>

Kostenentwicklung von Lithium-Ionen-Akkus

<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/534429/umfrage/weltweite-preise-fuer-lithium-ionen-akkus/>

Entwicklungsperspektive von Natrium-Ionen-Akkus

<https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/batterie-forschung-catl-natrium-akku-stattlithium-ionen/>

Zur Information: Prof. Lesch zum Thema Energiewandel <https://www.youtube.com/watch?v=HHdoEyKCDvo>

Prof. Dr. Michael Sterner: So retten wir das Klima: Energiewende einfach erklärt – 5. Dezember 2022

Kontakt: SPD-Rodgau Arbeitskreis „Zukunft“

Reinhard Seyer

E-Mail: reinhard.seyer@rseyer.de

Dateiname: Szenario des Energiewandels v1.13.docx

Berechnungen basieren auf Exceldatei: Modellierung des Strompreises v1.01.xlsx