

Die Unmöglichkeit, die „letzten 10 %“ auf dem Weg zu „100 % sauberer Elektrizität“ zu überbrücken

geschrieben von Chris Frey | 22. Dezember 2022

[Francis Menton](#), [MANHATTAN CONTRARIAN](#)

Wie im letzten Beitrag erwähnt, befasst sich mein neuer Bericht über die Energiespeicherung mit dem Titel „The Energy Storage Conundrum“ hauptsächlich mit Themen, die bereits in diesem Blog diskutiert wurden; der Bericht geht jedoch auf einige davon noch wesentlich detaillierter ein.

Ein Thema, zu dem der Bericht viele zusätzliche Details enthält, ist die Frage des Wasserstoffs als Alternative zu Batterien als Energiespeichermedium. Beispiele für frühere Diskussionen in diesem Blog über Wasserstoff als Speichermedium zur Unterstützung eines Stromnetzes findet man z. B. in „The Idiot’s Answer To Global Warming: Hydrogen“ [\[Link\]](#) vom 12. August 2021 und „Hydrogen Is Unlikely Ever To Be A Viable Solution To The Energy Storage Conundrum“ [\[Link\]](#) vom 13. Juni 2022.

Auf den ersten Blick scheint Wasserstoff die offensichtliche Lösung für die schwierigsten Probleme der Energiespeicherung zur Unterstützung der intermittierenden erneuerbaren Energieerzeugung zu sein. Insbesondere die saisonalen Erzeugungsmuster von Wind und Sonne erfordern eine Speicherlösung, die die überschüssige Stromproduktion über Monate hinweg aufnehmen und die gespeicherte Energie dann über ein ganzes Jahr hinweg entladen kann. Die derzeitige Batterietechnologie ist dazu nicht in der Lage, vor allem deshalb nicht, weil sich ein Großteil der gespeicherten Energie einfach verflüchtigt, wenn sie ein Jahr lang in einer Batterie verbleibt, bevor sie abgerufen wird. Wenn man aber Wasserstoff aus irgendeiner Quelle herstellen kann, kann man ihn irgendwo für ein Jahr oder sogar länger ohne nennenswerte Verluste speichern. Problem gelöst!

Nun, es muss ein Problem mit Wasserstoff geben, sonst würde man ihn bereits in großem Umfang nutzen. Und in der Tat sind die Probleme mit Wasserstoff, obwohl sie sich von denen der Batteriespeicherung unterscheiden, ähnlich groß. Vor allem die Herstellung großer Mengen an Wasserstoff, ohne dabei die Treibhausgas-Emissionen zu verursachen, die man vermeiden will, erweist sich als enorm kostspielig. Und wenn man den Wasserstoff erst einmal hat, sind seine Verteilung und Handhabung eine große Herausforderung.

Im Gegensatz zu Sauerstoff oder Stickstoff, die als freie Gase in der Atmosphäre allgegenwärtig sind, gibt es fast keinen frei verfügbaren Wasserstoff. Er ist entweder in Kohlenwasserstoffen (fossile Brennstoffe

wie Kohle, Erdöl und Erdgas), Kohlenhydraten (Pflanzen und Tiere) oder Wasser gebunden. Um freien Wasserstoff zu erhalten, muss er durch Energiezufuhr von einem dieser Stoffe getrennt werden. Der einfachste und billigste Weg zur Gewinnung von freiem Wasserstoff besteht darin, ihn vom Kohlenstoff im Erdgas abzutrennen. Dies geschieht in der Regel durch ein Verfahren namens „Dampfreformierung“, bei dem der Kohlenstoff aus dem Erdgas in Form von CO₂ in die Atmosphäre entweicht. Mit anderen Worten: Die Gewinnung von Wasserstoff aus Erdgas durch das kostengünstige Verfahren der Dampfreformierung bietet keine Vorteile in Bezug auf die Kohlenstoff-Emissionen gegenüber der Verbrennung des Erdgases. Wenn man also darauf besteht, kostenlosen Wasserstoff ohne Kohlenstoffemissionen zu erhalten, muss man ihn durch ein Elektrolyseverfahren aus Wasser gewinnen. Wasserstoff, der durch Elektrolyse aus Wasser gewonnen wird, ist unter Umweltschützern als „grüner Wasserstoff“ bekannt, da keine Kohlenstoffemissionen entstehen. Leider erfordert das Elektrolyseverfahren einen sehr hohen Energieaufwand.

Wie viel wird es kosten, grünen Wasserstoff als Speichermedium für ein hauptsächlich aus Wind und Sonne bestehendes Netz zu produzieren? In meinem Bericht wird zunächst darauf hingewiesen, dass es *bis heute fast keine Produktion von grünem Wasserstoff gibt, weil die Elektrolyse viel teurer ist als die Dampfreformierung von Erdgas und daher ohne staatliche Subventionen unwirtschaftlich ist. Im JP Morgan Asset Management 2022 Annual Energy Paper heißt es: „Die derzeitige Produktion von grünem Wasserstoff ist vernachlässigbar...“.*

Es gibt also keine funktionierenden Großprojekte, aus denen wir ableiten könnten, wie teuer grüner Wasserstoff sein wird. In Ermangelung dessen habe ich mir überlegt zu berechnen, wie viel Kapazität an Solarmodulen erforderlich wäre, um 288 MW an fester Leistung für ein bestimmtes Land zu erzeugen, wobei die Module entweder Strom direkt an die Verbraucher liefern oder alternativ Wasserstoff durch Elektrolyse erzeugen könnten, der gespeichert und dann in einem Kraftwerk zur Stromerzeugung verbrannt werden könnte. (Die Zahl von 288 MW wurde gewählt, weil GE eine Turbine für Erdgaskraftwerke mit dieser Leistung herstellt und angibt, die Turbine für die Verwendung von Wasserstoff als Brennstoff umrüsten zu können). Hier ist ein Auszug aus meinem Bericht dazu:

Nehmen wir ein Land mit einer konstanten Stromnachfrage von 288 MW ... Der Strombedarf unseres Landes kann vollständig durch die Verbrennung von Erdgas in der Anlage gedeckt werden. Nehmen wir nun aber an, wir wollen Sonnenkollektoren verwenden, um den Strom und/oder Wasserstoff für das Kraftwerk zu liefern, der ausreicht, um die 288 MW das ganze Jahr über fest zu versorgen. Welche Kapazität an Solarzellen müssen wir bauen? Hier ist eine Berechnung:

● *Im Laufe des Jahres wird das Land $288 \text{ MW} \times 8760 \text{ Stunden} = 2.522.880 \text{ MWh}$ an Strom verbrauchen.*

● Wir beginnen mit dem Bau von 288 MW an Solarzellen. Wir gehen davon aus, dass die Solarmodule im Laufe eines Jahres mit einem Kapazitätsfaktor von 20 % produzieren. (An sehr sonnigen Orten wie der kalifornischen Wüste kann der Kapazitätsfaktor von Solarmodulen bis zu 25 % betragen, aber an bewölkten Orten wie im Osten der USA und in ganz Europa liegt er weit unter 20 %; im Vereinigten Königreich liegt der typische Kapazitätsfaktor von Solarmodulen auf Jahresbasis unter 15 %). Das bedeutet, dass die 288 MW Solarmodule nur $288 \times 8760 \times 0,2 = 504.576$ MWh in einem Jahr erzeugen.

● Daher benötigen wir zusätzlich zu den 288 MW an Solarmodulen, die direkt Strom erzeugen, weitere Solarmodule, um Wasserstoff zu produzieren, der im Kraftwerk verbrannt wird und ausreicht, um die restlichen 2.018.304 MWh zu erzeugen.

● Bei einem Wirkungsgrad von 80 % im Elektrolyseprozess werden 49,3 kWh Strom benötigt, um 1 Kilogramm Wasserstoff zu erzeugen. GE gibt an, dass seine 288-MW-Anlage 22.400 Kilogramm Wasserstoff pro Stunde verbrauchen wird, um die volle Kapazität zu erzeugen. Es werden also $49,3 \times 22.400 = 1.104.320$ kWh oder etwa 1.104 MWh Strom benötigt, um den Wasserstoff für den Betrieb der Anlage für eine Stunde zu gewinnen. Für die 1.104 MWh an eingesetzter Elektrizität erhalten wir 288 MWh an erzeugter Elektrizität von der GE-Anlage zurück.

● Aufgrund des Kapazitätsfaktors der Solarmodule von 20 % müssen wir die Anlage während $8760 \times 0,8 = 7008$ Stunden im Jahr betreiben. Das bedeutet, dass wir Solarmodule benötigen, die ausreichen, um $7008 \times 1104 = 7.736.832$ MWh Strom zu erzeugen.

● Wiederum aufgrund des Kapazitätsfaktors von 20 % benötigen wir zur Erzeugung der 7.736.832 MWh Strom mit Hilfe von Solarmodulen Module mit einer Kapazität, die fünfmal so hoch ist, also 38.684.160 MWh. Dividiert man dies durch 8760 Stunden im Jahr, so benötigt man Solarpaneele mit einer Kapazität von 4.416 MW, um den Wasserstoff zu erzeugen, den wir als Reserve benötigen.

● Hinzu kommen die 288 MW an Solarmodulen, mit denen wir begonnen haben. Die Gesamtkapazität der Solarmodule, die wir benötigen, um die 288 MW an festem Strom mit grünem Wasserstoff als Backup zu erzeugen, beträgt also 4.704 MW.

Mit anderen Worten: Für die Nutzung von Erdgas reicht die 288-MW-Anlage aus, um das ganze Jahr über 288 MW an fester Leistung zu liefern. Für die Nutzung von Solarkollektoren plus grünem Wasserstoff als Backup benötigt man jedoch dieselbe 288-MW-Anlage für die Verbrennung des Wasserstoffs plus die 16-fache Leistung, d. h. 4 704 MW an Solarkollektoren, um direkt Strom zu liefern und ausreichend Wasserstoff für das Backup zu erzeugen.

Bei dieser Berechnung wurde von einem Kapazitätsfaktor von 20 % für die Produktion der Solarmodule im Laufe eines Jahres ausgegangen. Es hat

sich herausgestellt, dass die tatsächlichen Kapazitätsfaktoren der Sonnenenergie in [Deutschland](#) eher bei 10-13 %, in [UK](#) bei 10-11 % und in [New York](#) bei 12,6 % liegen. (In [Kalifornien](#), wo es nur wenige Wolken gibt, liegt der Kapazitätsfaktor bei etwas über 25 %). Wenn Sie dieselbe Berechnungsreihe mit einem Kapazitätsfaktor von 10 % für die Solarpaneele durchführen, benötigen Sie etwa 9.936 MW an Solarpaneelen, um Ihre 288 MW an festem Strom für das Jahr bereitzustellen, wobei der grüne Wasserstoff als Speichermedium dient.

Mit anderen Worten: Man benötigt etwa die 35-fache Kapazität an Solarmodulen als die Menge an festem Strom, die man bereitstellen will. Die Gründe für diesen enormen Unterschied sind unter anderem: Die Sonne scheint die Hälfte der Zeit nicht voll; wenn die Sonne scheint, steht sie meist tief am Himmel; Orte wie UK, Deutschland und New York sind häufiger bewölkt als anderswo; und es gibt erhebliche Energieverluste sowohl bei der Elektrolyse des Wassers als auch bei der Verbrennung des Wasserstoffs.

Es steht jedem frei, meine Berechnungen hier zu überprüfen. Ich bin durchaus in der Lage, Fehler zu machen. Mehrere Personen haben dies jedoch bereits überprüft.

In meinem Bericht wird dann versucht, die enormen zusätzlichen Kapitalkosten all dieser Solarzellen in einen sehr groben Kostenvergleich zwischen der Erzeugung von 288 MW fester Leistung aus Solarzellen und grünem Wasserstoff und der einfachen Verbrennung von Erdgas in der Anlage umzurechnen. Ich habe die Kosten für die Turbinenanlage und die Solarzellen aus einem [Bericht](#) der U.S. Energy Information Agency vom März 2022. Unter Verwendung dieser Daten ergibt sich:

Die Kosten für das 288-MW-Turbinenkraftwerk von General Electric belaufen sich auf etwa 305 Millionen Dollar, und die Kosten für die 4 704-MW-Solarpaneele betragen etwa 6,25 Milliarden Dollar.

Wenn man die 9.936 MW Solarpaneele bräuchte, weil man in einem wolkenreichen Gebiet lebt, würden aus den 6,25 Mrd. \$ etwa 13 Mrd. \$ werden.

Nach meinen sehr groben Berechnungen im Bericht würde Strom aus Sonnenkollektoren und grünem Wasserstoffspeicher bei einem angenommenen Kapazitätsfaktor von 20 % zunächst etwa 5 bis 10 Mal teurer sein als Strom, der nur aus der Verbrennung von Erdgas stammt. Bei einem angenommenen Solarkapazitätsfaktor von 10 % wäre der Strom sogar 10 bis 20 Mal teurer.

Und nach all dem sind wir noch immer nicht bei den erheblichen zusätzlichen technischen Herausforderungen angelangt, die der Umgang mit dem sehr leichten, explosiven Wasserstoffgas mit sich bringt. Ein paar Beispiele aus dem Bericht:

- *Um genügend grünen Wasserstoff für die Stromversorgung der Welt herzustellen, muss man den Ozean elektrolysieren. Süßwasser ist nur begrenzt vorhanden und vor allem an den besten Orten für Solarenergie, nämlich in den Wüsten, knapp. Bei der Elektrolyse des Ozeans wird nicht nur das Wasser, sondern auch das Salz elektrolysiert, wodurch große Mengen an hochgiftigem Chlor entstehen, das neutralisiert und entsorgt werden muss. Alternativ kann man das Meerwasser vor der Elektrolyse entsalzen, was aber einen zusätzlichen Energieaufwand erfordert. Es gibt Menschen, die an der Lösung dieser Probleme arbeiten, aber Lösungen sind noch weit entfernt und könnten sehr kostspielig sein.*
- *Die Energiedichte von Wasserstoff ist nur etwa 30 % so hoch wie die von Erdgas. Das bedeutet, dass man etwa die dreifache Pipelinekapazität benötigt, um den gleichen Energiegehalt an Wasserstoff wie an Erdgas zu transportieren. Alternativ kann man den Wasserstoff auch komprimieren, aber auch das würde zusätzliche und potenziell hohe Kosten verursachen.*
- *Wasserstoff ist viel schwieriger zu transportieren und zu handhaben als Erdgas. Die Nutzung der bestehenden Erdgaspipeline-Infrastruktur für Wasserstoff ist sehr problematisch, da viele bestehende Gaspipelines aus Stahl bestehen und Wasserstoff Risse im Stahl verursacht. Die daraus resultierenden Lecks können zu Explosionen führen.*

Der ganze Beitrag steht [hier](#).

Link:

<https://wattsupwiththat.com/2022/12/11/the-impossibility-of-bridging-the-last-10-on-the-way-to-100-clean-electricity/>

Übersetzt von [Christian Freuer](#) für das EIKE