Global Energy Solutions e.V.

For Prosperity and Climate Neutrality

Erzeugung und Speicherung grünen Stroms

Siddhant Bane, Wilfried Lyhs

10.05.2022

Inhaltverzeichnis

Inhaltverzeichnis 2
Abkürzungsverzeichnis 1
Abbildungen und Tabellen 2
1. Einleitung 3
2. Erzeugung grünen Stroms 5
1.1. Globales Energiepotential 6
1.2. Kapazitätsfaktoren 7
1.3. Stromgestehungskosten 7
1.4. Installationskosten 8
3. Speicherung grünen Stroms 10
3.1. Installationskosten 11
3.2. LCOS 12
3.3. Wirkungsgrade 13
4. Ökologische und geopolitische Aspekte 15
4.1. Lebenszyklusemissionen 15
4.2. Umweltbelastung 16
4.3. Rohstoffbedarf und Geopolitik 17
5. Zusammenfassung 20
Literaturverzeichnis 22

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
/a	pro Jahr
CCS	Carbon Capture and Storage
CSP	Collected Solar Power
GW (h)	Gigawatt (Stunde)= 10^6 kW (h)
IEA	International Energy Agency
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRENA	International Renewable Energy Agency
kt	Kilotonne = 10^6 kg
LCOE	Levelized Cost of Electricity
LCOS	Levelized Cost of Storage
LFP	Lithium-Eisen-Phosphat
PNNL	Pacific Northwest National Laboratory
PW (h)	Petawatt (Stunde)= 10^{12} kW (h)
THG	Treibhausgas auch GHG (Green House Gas)
TW (h)	Terawatt (Stunde) 10^9 kW (h) = 10^{12} W (h)
USD	US Dollar
USP	Utility Scale Photovoltaic

Abbildungen und Tabellen

Abbildung 1: Übersicht der Kennzahlen von Stromspeichern 14

Tabelle 1: Kennzahlen erneuerbarer Energiequellen 3

Tabelle 2: Globale Energiepotenziale für verschiedene Erzeugungsarten .. 6

Tabelle 3: Kapazitätsfaktoren für verschiedene Energieanlagen 7

Tabelle 4: Stromgestehungskosten (LCOE) durch verschiedene erneuerbare Energien 8

Tabelle 5: Zusammenfassung von Kenngrößen für diverse Arten der Erzeugung von grünem Strom, auf Basis ihres theoretischen globalen Potentials, der Kapazitätsfaktoren, den Stromgestehungs- und Installationskosten. 9

Tabelle 6: Zusammenfassung diverser Arten der Speicherung von grünem Strom, auf Basis von ihren Installationskoten, Wirkungsgrade, LCOS und Speicherdauer 13

Tabelle 7: Durchschnittliche Emissionen während des Lebenszyklus von Anlagen zur Energieerzeugung 15

Tabelle 8: Für 2040 prognostizierter weltweiter Bedarf an kritischen Elementen 18

Tabelle 9: Anteil der Verarbeitung wichtiger Metalle der globalen Energiewende durch China 18

1. Einleitung

Um die Net-Zero Ziele beim Ausstoß klimaschädlicher Gase zu erreichen, spielen erneuerbare Energiequellen laut den jüngsten Berichten von IRENA, IEA und IPCC eine zentrale Rolle.

In Tabelle 1 sind die Kennzahlen von Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energie zusammengestellt. Auch wenn 2020 weltweit insgesamt etwa 230 GW an Wind- und Photovoltaikkraftwerken zugebaut wurden, reicht dies nicht aus, um das Net-Zero-Ziel zu erreichen. IEA hat hierfür einen erforderlichen Zubau von weltweit 1.000 GW errechnet.

Die Roadmap zur Klimarettung sieht folgende Zwischenziele vor:

- ab 2035 muss der Strom in den fortgeschrittenen Volkswirtschaften Net-Zero sein,
- bis 2040 muss der Stromsektor weltweit Netto-Null werden,
- bis 2050 muss nach den Net-Zero-Plänen der IEA der Anteil von Wind und Photovoltaik an der weltweiten Stromversorgung 70 % erreichen,
- In 2050 könnte der Einsatz erneuerbarer Energien und die Elektrifizierung vieler Endverbraucher 45 % der globalen 36 Gt/a CO_2-Emissionen [1] verringern.

Tabelle 1: Kennzahlen erneuerbarer Energiequellen

	Wind onshore	Wind offshore	PV
Weltweite Kapazität im Jahr 2020 in GW (IRENA, 2021)	34	697	710
Zubau weltweit in 2020 in GW	230		
Jährlicher Zubau in GW, um das Netto-Null-Ziel zu erreichen (IEA, 2020)	1.000		
Reduktionspotenzial erneuerbare Energien in Gt CO_2/a (lt. IPCC, 2022)	3,9		4,2
Gesamtausstoß von CO_2 weltweit/a in 2020 in Gt (Statista und IEA)	34,8 (2020) 36,3 (2021)		

[1] Vgl. (IRENA, 2021)

Der IPCC-Bericht 2022 über Maßnahmen zur Abschwächung des Klimawandels unterstreicht das Potential der Erneuerbaren zur Reduktion der klimaschädlichen Gase (siehe Tabelle 1).

Neben den prominenten Energiequellen Photovoltaik und Windkraft stehen andere erneuerbare Energiequellen oft im Schatten, beispielsweise Wasserkraft, Bioenergie, Geothermie und CSP. Ihnen ist gemein, dass sie saisonalen und täglichen Schwankungen ausgesetzt sind und dass sie stark standortabhängig sind und den Einsatz von Energiespeichern für eine stabile Stromversorgung erfordern, denen sich dieser Artikel ebenfalls widmet.

Die Energiewende wird die Nationen nicht völlig unabhängig voneinander oder unabhängig von Rohstoffen oder Energieträgern machen, sondern vielmehr in eine Welt neuer Abhängigkeiten aber auch neuer Möglichkeiten und Geschäftsmodelle führen, die geopolitische Herausforderungen und die Notwendigkeit einer effizienten Nutzung von umweltfreundlichem Strom und der zu seiner Erzeugung notwendigen Ressourcen begründen werden.

2. Erzeugung grünen Stroms

Ein Photovoltaik-Großkraftwerk besteht in der Regel aus einer Reihe von Solarmodulen, die auf einer Montagestruktur oder einem Sonnennachführsystem montiert sind. Durch den "Photoelektrischen Effekt" erzeugen diese Module Gleichstrom, der in einen Wechselrichter eingespeist wird, der ihn in Wechselstrom umwandelt. Dieser Wechselstrom kann in das Stromnetz eingespeist oder vom Verbraucher selbst genutzt werden.

Eine Windturbine wandelt die kinetische Energie des Windes in die Drehbewegung der Turbinenblätter um, die schließlich den Generator antreibt. Windparks können an Land oder in flachem Wasser in bis zu 50 m Tiefe installiert werden. Um höhere und weniger turbulente Windgeschwindigkeiten zu nutzen, die über tiefem Offshore-Wasser anzutreffen sind, werden schwimmende Turbinen entwickelt[2].

Ein Wasserkraftwerk kann entweder die potenzielle Energie des Wassers nutzen, die in flussaufwärts gelegenen Stauseen gespeichert ist, oder direkt die kinetische Energie der Flüsse[3], ohne dass der Bau von Staumauern erforderlich ist.

Geothermische Anlagen funktionieren im Wesentlichen genauso wie ein Kohle- oder Kernkraftwerk, der Hauptunterschied liegt in der Art der genutzten Energiequelle. Bei der Geothermie ersetzt die Wärme der Erde den Kessel eines Kohlekraftwerks oder den Reaktor eines Kernkraftwerks. Die Turbinen und Generatoren werden mit dem heißen Dampf aus der Erde angetrieben.

CSP-Technik verwendet Spiegel, um das Sonnenlicht auf einen Receiver zu konzentrieren. Das konzentrierte Sonnenlicht erhitzt eine Hochtemperaturflüssigkeit im Receiver und die so transportierte Energie wird genutzt, um eine Turbine mit Generator zur Stromerzeugung anzutreiben.

Bioenergieanlagen wandeln erneuerbare Biomasse-Brennstoffe in Wärme und Strom um, wobei ähnliche Verfahren wie bei fossilen Brennstoffen zum Einsatz kommen. Die in der Biomasse gespeicherte Energie z.B. zur Stromerzeugung kann genutzt werden durch:

---

2 Vgl. (Windpower Engineering & Development, 2022)
3 Laufwasserkraftwerk

1. direkte Verbrennung
2. bakterielle Fermentierung zur Erzeugung von Biogasen oder
3. Umwandlung in gasförmigen/flüssigen Brennstoff

1.1. Globales Energiepotential

Solarenergie ist die ergiebigste Energiequelle auf unserem Planeten. Im Jahr 2000 veröffentlichte das Entwicklungsprogramm der Vereinten Nationen eine Schätzung der potenziellen, zur Nutzung verfügbarer erneuerbarer Energien. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengestellt. In anderen Studien wurde untersucht, ob der Luftwiderstand durch den Ausbau von Windparks in großem Maßstab die Erträge von Windparks weltweit durch die Verlangsamung großräumiger Winde verringern könnte. Dies ist in der Tat der Fall, sodass die Kapazitätsfaktoren von Windparks von deren Gesamtwindkapazitäten abhängig sind.

Ab einer Installationsdichte von 1,0 MW/km^2 wird eine Sättigung der globalen Windausbeute erreicht, obwohl einige Studien viel höhere Leistungsdichten ansetzen. Wenn man davon ausgeht, dass Windturbinen nur bis zu einer Dichte von 1 MW/km^2 in einem großen Gebiet vernachlässigbare Auswirkungen auf die Windgeschwindigkeit haben, dann müssen die vorgenannten Windenergiepotentialschätzungen realistischerweise von 560 bzw. 315 PWh/a einheitlich um den Faktor fünf reduziert werden.

Tabelle 2: Globale Energiepotenziale für verschiedene Erzeugungsarten

	Potenzial zur Energienutzung
Solarenergie	440 PWh/a bis 14.000 PWh/a[4] [5].
Windenergie onshore	560 PWh/a je nach Leistungsdichte
Windenergie offshore	315 PWh/a [6] [7] je nach Leistungsdichte
Wasserkraft	52 PWh/a [8]
Geothermie	70 – 80 GW mit Nutzung von 13 GW[9].

[4] Vgl. (UNDP, WEC, UNDESA, 2000)
[5] wobei Faktoren wie Sonneneinstrahlung, Wolkenbedeckung und die vom Menschen nutzbare Fläche berücksichtigt wurden
[6] Vgl. (Kelly, et al., 2017)
[7] Diese Schätzungen basieren auf 3,5 MW-Windturbinen mit einer Nabenhöhe von 90 Metern, einer Verfügbarkeit von 0,95, einem Wirkungsgrad der Anlage von 90 % und einer 5 MW/km^2 Einsatzdichte in nicht ausgegrenzten Gebieten.
[8] Vgl. (Olivier A. C., Meijer, Ruud J., & Nick C., 2017)
[9] Vgl. (World Bank 2017)

1.2. Kapazitätsfaktoren

Der Kapazitätsfaktor eines Kraftwerks entspricht dem prozentualen Anteil der Volllaststunden über ein Jahr mit 8760 Stunden. Aus der umfangreichen Datenbank von IRENA[10] sind die Kapazitätsfaktoren, die in Tabelle 3 zusammengefasst werden, übernommen worden.

Insbesondere bei den Windparks sind die Kapazitätsfaktoren abhängig vom Standort. Wasserkraftwerke und geothermische Kraftwerke verfügen über sehr hohe Kapazitätsfaktoren.

Tabelle 3: Kapazitätsfaktoren für verschiedene Energieanlagen

	Kapazitätsfaktoren
PV-Kraftwerk	12% - 22%
CSP	40% - 45%
Windparks onshore	27% - 50% je nach Standort
Windpark offshore	35% - 55%
Wasserkraftwerke	30% - 75%
Geothermische Kraftwerke	75% - 90%
Bioenergie Kraftwerke	30% - 85%

1.3. Stromgestehungskosten

Die Stromgestehungskosten[11] sind definiert als die Kosten, die pro Einheit Stromenergie also z.B. in USD/MWh anfallen, wobei die Kapitalinvestitionen, die Betriebs- und Wartungskosten, die Brennstoffkosten und die Projektzinssätze über die gesamte Projektlaufzeit von i.d.R. 30 Jahren berücksichtigt werden.

Die Stromgestehungskosten von allen Arten der erneuerbaren Energieerzeugung sind in den vergangenen Jahren einem starken Preisverfall ausgesetzt und werden, wie in Tabelle 4 zusammengestellt, auch zukünftig weiter fallen. Das Jahr, in dem die Berechnung durchgeführt wurde, ist ebenfalls in der Tabelle vermerkt. Im Gegenzug sind die derzeit bekannten Strom-

[10] Vgl. IRENA, 2021)

[11] Auch hier ist zu beachten, dass es sich bei diesen Preisen um globale Durchschnittswerte handelt, die in einigen Regionen der Welt höher oder niedriger sein können.

gestehungskosten von Kraftwerken mit fossilen Brennstoffen zu niedrig, da bei ihrer Berechnung davon ausgegangen wurde, dass über 30 Jahre ein konstant hoher Kapazitätsfaktor bei der Nutzung anzusetzen ist. Durch den verstärkten Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energien ist dies aber nicht mehr der Fall.

Tabelle 4: Stromgestehungskosten (LCOE) durch verschiedene erneuerbare Energien

	Durchschnittliche, globale Stromgestehungskosten (LCOE) in USD/MWh	
PV- Großkraftwerke[12]	380 in 2010	55 in 2020
CSP	340	108 in 2022
Wind onshore	90 in 2010	40 in 2020
Wind offshore stehend schwimmend	162 in 2010 120 in 2020	84 in 2020 40 – 60 in 2050[13] 65 in 2050
Wasserkraft	40	
Bioenergie	70	
Geothermie	60	

Die Stromgestehungskosten für ausgereifte Technologien wie Wasserkraft, Bioenergie und Geothermie sind in den vergangenen Jahren relativ stabil geblieben.

1.4. Installationskosten

In den letzten zehn Jahren sind die weltweiten durchschnittlichen Installationskosten für Photovoltaikanlagen rapide auf 880 USD/kW im Jahr 2020 gesunken und könnten weiter auf 640 USD/kW und sogar auf 280 USD/kW sinken[14]. IRENA prognostiziert eine drastischere Senkung der Installationskosten auf Werte bis 165 USD/kW[15].

In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sind die Installationskosten der anderen Energieerzeugungen mit ähnlichem Verfall der Kosten bis 2030 und 2050 zusammengestellt. Wie bei den Stromgestehungskosten zeigen die Installationskosten von Kraftwerken mit Bioenergie, Wasserkraft und Geothermie eine gewisse Stabilität.

[12] Bei USP (Utility Scale Photovoltaik)
[13] Vgl. (Wiser, Ryan, Joseph, & Joachim, 2021)
[14] Vgl. (Agora Energiewende; Fraunhofer, 2015)
[15] Vgl. (IRENA, 2019)

Tabelle 5: Zusammenfassung von Kenngrößen für diverse Arten der Erzeugung von grünem Strom, auf Basis ihres theoretischen globalen Potentials, der Kapazitätsfaktoren, den Stromgestehungs- und Installationskosten.

Energie-quelle	Globales, theoreti-sches Ener-giepotential in PWh/a	Bandbreite der Kapazi-tätsfaktoren	Globale, durch-schnittliche Stromgeste-hungskosten in 2020 in USD/MWh	Globale, durch-schnittliche Installati-onskosten in 2020 in USD/kW
Photo-voltaik	44 – 14.000 [16]	12% - 25%	55	880 Prognose 2030: 165
CSP	-	40% - 45%	108	4.500
Onshore Windkraft	110 – 560	27% - 50%	40	1.350 Prognose [17] 2030: 850 2050: 650
Offshore-Windkraft	63 -315	35% - 55%	84	3.200
Wasser-kraft	52	30% - 70%	40	1.800
Bio-energie	-	30% - 85%	70	2.500
Geo-thermie	70 GW	75% - 90%	60	4.500

[16] Inklusive Photovoltaik und CSP
[17] (IRENA, 2019)

3. Speicherung grünen Stroms

Die Energiespeicherung wird eine zentrale Rolle spielen, indem sie die Stabilisierung der Netzfrequenz, das Management täglicher und saisonaler Schwankungen in der grünen Stromerzeugung, die Erhöhung der Energieautarkie von Haushalten mit Photovoltaikanlagen und die Verbreitung von E-Mobilität erleichtert. In diesem Kapitel werden die Funktionsprinzipien verschiedener ausgereifter Technologien für die Speicherung von grünem Strom, deren Installationskosten, Speicherdauer und Gesamtwirkungsgrade diskutiert.

Eine Lithium-Ionen-Batterie oder Li-Ion-Batterie ist eine wiederaufladbare Batterie (Akkumulator), in denen Lithium-Ionen während der Entladung von der negativen Elektrode durch einen Elektrolyten zur positiven Elektrode und beim Aufladen zurückwandern. Lithium-Eisenphosphat-Batterien[18] vereinigen die Vorteile geringerer Kosten, hoher Sicherheit, geringerer Toxizität, und langer Lebensdauer auf sich und finden als LFP-Batterien eine Reihe von Einsatzmöglichkeiten in stationären Anwendungen der Energieversorgung und in der Notstromversorgung.

Eine Redox-Flow-Batterie arbeitet wie eine Brennstoffzelle, wobei die chemische Energie in zwei verschiedenen Flüssigkeiten gespeichert wird, die in zwei Behältern gelagert werden.

Die Anwendung von Wasserstoff als Speichermedium ist eine der populären Lösungen, besonders für die saisonale Speicherung des überschüssigen grünen Stroms.

Die Speicherung von grünem Strom in Wasserstoff erfolgt in drei Schritten:

1. die Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff mit Hilfe von Elektrolyseuren, die mit grünem Strom angetrieben werden,
2. Komprimierung und Speicherung des erzeugten Wasserstoffs und
3. die Verstromung des gespeicherten Wasserstoffs durch z.B. Brennstoffzellen zur Erzeugung von grünem Strom bei Strombedarf.

Ein CAES-System speichert Energie in Form komprimierter Luft in einem Reservoir. Beim Aufladen treibt überschüssiger Strom oder Strom aus Schwachlastzeiten eine Kette von Verdichtern an, die Luft im Reservoir

[18] $LiFePO_4$-Batterie oder LFP verwendet Lithiumeisenphosphat als Kathodenmaterial und eine Graphitkohleelektrode mit metallischer Unterlage als Anode

speichern. Während dieses Prozesses erwärmt sich die Luft, die in einem klassischen CAES-System an die Atmosphäre abgegeben wird, sodass diese Energie verlorengeht. Beim Entladen, wenn der Energiebedarf hoch ist, wird mit der gespeicherten Luft normalerweise ein gasbefeuerter Turbinengenerator betrieben. Wenn die komprimierte Luft aus dem Speicher entweicht und dabei adiabatisch expandiert, kühlt sie sich folglich ab und muss erwärmt werden, um ein Einfrieren der Anlage zu verhindern. Dies wird erreicht durch das Zumischen von Brennstoff zur Druckluft. Im ältesten CAES-System der Welt, das in Huntorf /Norddeutschland in Betrieb ist, wird auch mit der Zumischung von Wasserstoff anstelle von Erdgas experimentiert.

Pumpspeicherkraftwerke sind eine etablierte Form der Energiespeicherung, die in Stromnetzen zum Lastausgleich eingesetzt wird. Bei dieser Methode wird die potenzielle Energie des Wassers gespeichert, das aus einem tiefergelegenen Stausee mit Hilfe von kostengünstigem, überschüssigem Strom aus Schwachlastzeiten in einen höher gelegenen Stausee gepumpt wird. In Zeiten hohen Stromverbrauchs wird das gespeicherte Wasser über Turbinen zur Stromerzeugung abgelassen.

3.1. Installationskosten

In Tabelle 6 auf Seite 13 sind die Installationskosten verschiedener Energiespeicherarten und deren Prognosewerte für 2030 zusammengestellt.

Bei einer Leistung zwischen 1 MW und 100 MW und einer Speicherdauer zwischen 2 h und 10 h wird ein Absinken der Installationskosten für Netz- und Kleinspeicherlösungen bis zum Jahr 2030 erwartet, wie in Tabelle 6 dargestellt. Die Installationskosten für LFP-Speicher werden mit zunehmender Speicherdauer sinken und mit zunehmender Leistung steigen.

Bei Redox-Flow-Batterien sinken die Installationskosten (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) mit zunehmender Leistung und Speicherdauer.

Bei einer Speicherdauer von mehr als 10 Stunden könnten CAES eine kostengünstige Lösung darstellen. Diese Kosten werden unter der Annahme geschätzt, dass unterirdische Speicherkavernen zur komprimierten Speicherung von Luft zur Verfügung stehen. Die Speicherung von Druckluft in externen Tanks wird die Installationskosten erhöhen.

Die Installationskosten von wasserstoffbasierten Speichersystemen können bis 2030 auf 200 USD/kWh sinken, wenn natürlich vorkommende Salzkavernen für die Speicherung von Druckwasserstoff genutzt werden.

3.2. LCOS

Die LCOS sind definiert als die Kosten der von einem Speichergerät abgegebenen elektrischen Energie unter Berücksichtigung aller während der Lebensdauer des Geräts anfallenden Kosten. Wie bei LCOE wird die gleichmäßige Nutzung über etwa 30 Jahre vorausgesetzt. Die LCOS für verschieden Speicher sind ebenfalls in Tabelle 6 zusammengestellt.

Die durchschnittlichen LCOS für 8 h LFP-Speicher werden bis 2030 weiter fallen wie in Tabelle 6 dargestellt. Redox-Flow-Batterien bieten eine kostengünstigere Lösung für ähnliche Leistungen mit der Perspektive auf weiter fallende Preise. Bei ähnlichen Leistungs- und Speicherparametern sind Redox-Flow-Batterien kostengünstiger als LFP-Speicher.

Die günstigsten Speicher mit langer Laufzeit und hoher Leistung sind CAES, Pumpspeicherkraftwerke und Wasserstoffspeicher. Die Kosten dieser ausgereiften Techniken werden schätzungsweise in diesem Jahrzehnt nicht mehr sinken. Dagegen können die Stromgestehungskosten von Wasserstoffspeichern weiter sinken.

Die durchschnittlichen globalen Stromgestehungskosten eines Spitzenlastgaskraftwerks liegen in der Größenordnung von 150 bis 200 USD/MWh[19] (wobei diese Werte zu niedrig sind, da die Volllaststunden wegen des Einsatzes von erneuerbaren Energien gesunken sind und damit die Voraussetzung der Kalkulation verletzen).

Dies zeigt uns, dass moderne Energiespeicherlösungen auf der Basis der Stromkosten mit einem Spitzenlastgaskraftwerk konkurrieren können. Außerdem haben diese Speicherlösungen keine variablen Brennstoffkosten, die in letzter Zeit aufgrund geopolitischer Instabilitäten stark schwankten.

[19] (Lazard, 2020)

3.3. Wirkungsgrade

Die Wirkungsgrade der verschiedenen Speichertechniken sind zum Vergleich in Tabelle 6 zusammengestellt. Die bis heute am weitesten verbreitete Speicherform, das Pumpspeicherkraftwerk, bietet einen Gesamtwirkungsgrad zwischen 70 % und 85 %[20] bei relativ geringen Kosten, lässt sich aber leider nicht überall installieren. Langzeitspeicherlösungen wie CAES und Wasserstoffspeicher haben einen geringeren Wirkungsgrad. Bei den Wasserstoffspeichern ist dies auf die hohen Umwandlungsverluste beim Herstellen und Verstromen zurückzuführen[21].

Tabelle 6: Zusammenfassung diverser Arten der Speicherung von grünem Strom, auf Basis von ihren Installationskoten, Wirkungsgrade, LCOS und Speicherdauer

Stromspeicherungsart	Installationskosten in 2020 in USD/kWh	LCOS in 2020 und in 2030 in USD/MWh	Wirkungsgrad	Speicherdauer
LFP-Batterien	300 -600	330 - 370 2030: 240	85%-92%	2h-8h[22]
Redox-Flow Batterien	400 - 800	230 - 260 2030: 175 bei 100 MW und 200 bei 10 MW	60%-80%	2h-10h
CAES	100	150	50%-60%	mehrere Tage
Pumpspeicherkraftwerk	200 – 500	130	70%-85%	mehrere Stunden – mehrere Tage
Wasserstoffspeicher	400	2020: 200 2030: 150	25%-45%	mehrere Wochen

In Abbildung 1 sind die Kennzahlen zur Speicherung von elektrischem Strom grafisch dargestellt.

[20] Vgl. (World Energy Council, 2019)
[21] Vgl. (Mongird, et al., 2020)
[22] Vgl. (World Energy Council, 2019)

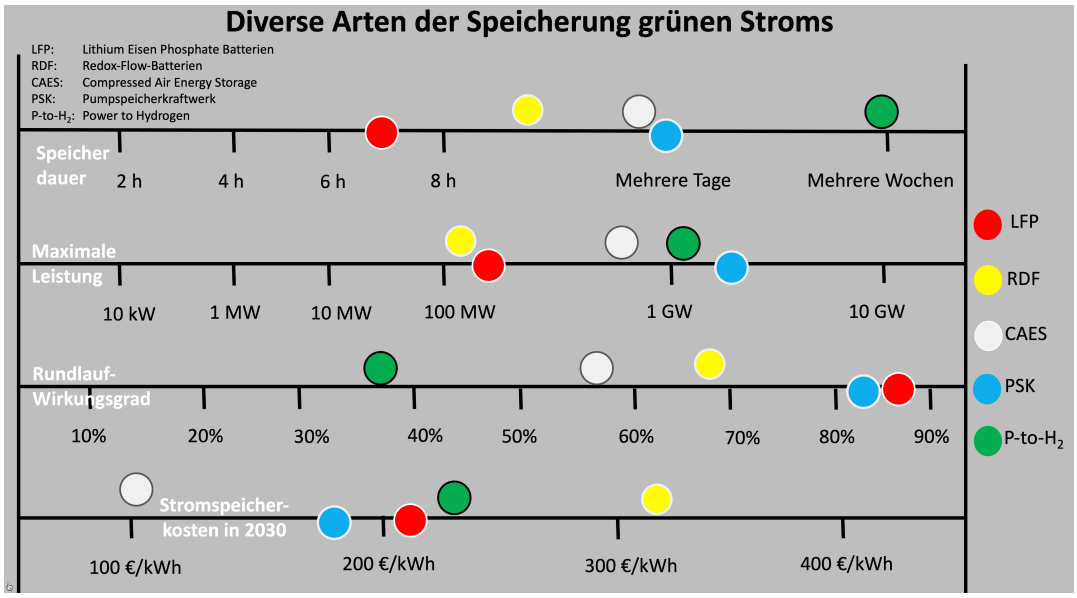

Abbildung 1: Übersicht der Kennzahlen von Stromspeichern

4. Ökologische und geopolitische Aspekte

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den Rohstoffbedarf der globalen Energiewende, die durch den Ausbau der grünen Stromerzeugungs- und Speicherungsanlagen entstehende Umweltbelastung und wichtige geopolitische Faktoren, die die Energiewende beeinflussen.

4.1. Lebenszyklusemissionen

Die verschiedenen Arten von Anlagen zur Energieumwandlung erzeugen in ihrem Lebenszyklus die in Tabelle 7 bezifferten Emissionen von CO_2, SO_2 und NO_x.

Tabelle 7: Durchschnittliche Emissionen während des Lebenszyklus von Anlagen zur Energieumwandlung

	CO_2-Emissionen in g CO_2eq/kWh	SO_2-Emissionen in mg/kWh	NOx-Emissionen in mg/kWh
PV-Anlagen polykristaline Siliziumzellen Monokristaline Zellen Dünnschichtzellen	50 [23].	120 100 60	65 58 30[24]
Wasserkraft	24		
Windkraftwerke	15		
Geothermie	38[25]		

Die Wasserkraft hat eine Reihe von Umweltauswirkungen, die noch untersucht werden. Die tatsächlichen Lebenszyklusemissionen eines Wasserkraftwerks können erheblich höher sein als der oben genannte Wert.

[23] Vgl. (NREL, 2020)
[24] Vgl. (Vasilis, et al., 2011).
[25] Vgl. (Energysage, 2022)

4.2. Umweltbelastung

Das Recycling d.h. die Wiederverwendung von Solarmodulen am Ende ihrer etwa 30-jährigen Lebensdauer wird wahrscheinlich bis 2050 weltweit schätzungsweise 15 GW von entsorgten Modulen verfügbar machen[26]. Andere Studien[27] prognostizieren eine Solarmodul-Abfallmenge von 20 GW, falls die Module günstiger und effizienter werden sollten und die Erneuerung von PV-Anlagen vorzeitig erfolgen wird. Diese Analyse ist auf private Dach-PV Anlagen beschränkt. Würden gewerbliche und industrielle Anlagen hinzugezählt, wäre die Menge viel größer.

Bis zum Jahr 2050 werden weltweit 43 Mt Windturbinenflügel als Abfälle anfallen, wobei 40 % der Abfälle aus China, 25 % aus Europa, 19 % von den Vereinigten Staaten 19 % und der Rest aus der Welt 16 % stammen werden[28]. Heute wird mit der Lebensdauer eines Onshore-Windparks von etwa 20-25 Jahre gerechnet. 85-90 % der Gesamtmasse einer Windkraftanlage können bereits recycelt werden. Für die meisten Komponenten – einschließlich Stahl, Zement, Kupfer, Elektronik und Getriebe – gibt es etablierte Recyclingkreise[29]. Die Windkraftanlagenflügel sind jedoch schwieriger zu recyceln als Solarmodule.

Seltene Erden werden hauptsächlich im Südosten Chinas, in Provinzen wie Jiangxi und Fujian, abgebaut, aber auch nördlich der inneren Mongolei und westlich von Sichuan. In den letzten Jahrzehnten hat sich China auch bemüht, exklusive Abbaurechte in afrikanischen Ländern zu erhalten, um im Gegenzug große Infrastrukturprojekte zu bauen. Es ist schwierig, Metalle der Seltenen Erden umweltverträglich abzubauen und zu verarbeiten. Bei dem heute üblichen Abbauverfahren wird die Erde in einem Auslaugungsbecken mit Chemikalien[30] behandelt, um die Metalle herauszulösen. Die bei diesem Trennungsprozess verwendeten Chemikalien können die Luft verschmutzen, Erosion verursachen und ins Grundwasser gelangen. Bei einer anderen Verarbeitungsmethode werden Löcher in den Boden gebohrt, PVC-Rohre und Gummischläuche eingeführt und Chemikalien gepumpt, um die Erde auszuspülen. Der dabei entstehende Schlamm wird dann in

[26] Vgl. (IRENA, 2016)
[27] vgl. (Atalay, Atasu, Duran, & Wassenhove, 2021)
[28] Vgl. (Pu & Clair, 2018)
[29] ebd
[30] z. B. Ammoniumsulfat und Ammoniumchlorid

Auslaugungsbecken gepumpt, um die Seltenen Erden abzutrennen. Verlassene Becken und Lager stellen eine ständige Gefahr für die Umwelt dar. Verbleibende Chemikalien können weiterhin ins Grundwasser sickern.

Die Überflutung von Land für ein Wasserkraftwerk hat extreme Auswirkungen auf die Umwelt: Es werden Wälder, Lebensräume für Wildtiere, landwirtschaftliche Flächen und landschaftlich reizvolle Gebiete vernichtet. In vielen Fällen, wie z. B. beim Three Gorges-Staudamm in China, mussten auch ganze Gemeinden umgesiedelt werden, um Platz für die Stauseen zu schaffen. Stauseewasser ist in der Regel stagnierender als normales Flusswasser. Dies hat zur Folge, dass der Stausee einen höheren Anteil an Sedimenten und Nährstoffen aufweist als üblich, was zu einer übermäßigen Vermehrung von Algen und anderen Wasserpflanzen führen kann[31].

Das größte Umweltrisiko im Zusammenhang mit geothermischen Kraftwerken ist die mögliche Instabilität der Oberfläche. Da geothermische Kraftwerke Wasser und Dampf aus Reservoirs in der Erde entnehmen, kann das Land über diesen Reservoirs im Laufe der Zeit langsam absinken. Die meisten geothermischen Anlagen leiten jedoch das verbrauchte Wasser über eine Injektionsbohrung wieder in die Erde zurück, um das Risiko von Bodensenkungen zu verringern. Ein weiteres Problem, das beim Betrieb von geothermischen Kraftwerken auftreten kann, ist die Zunahme von Erdbeben. Geo-thermische Kraftwerke befinden sich in der Regel in der Nähe von Verwerfungszonen oder geologischen "Hot Spots", die besonders anfällig für Instabilität und Erdbeben sind, und die Bohrungen in die Tiefe und die Entnahme von Wasser und Dampf können zu Beben führen.

4.3. Rohstoffbedarf und Geopolitik

Beim Rohstoffbedarf für die Solar-PV Branche wird ein erheblicher Teil des Materialbedarfs von Kupfer und Silizium dominiert. Engpässe in der Versorgung könnten auch wegen des Bedarfs von Tellur, Gallium und Indium bei der Herstellung der Dünnschichtzellen entstehen. In Tabelle 8 sind die für 2040 prognostizierten Verbräuche einiger als kritisch angesehenen Elemente zusammengestellt. Der Bedarf von Indium betrug im Jahr 2020 200 t und dieser Bedarf könnte sich bis 2040 fast verdreifachen.

[31] (Union of Concerned Scientists, 2021)

Tabelle 8: für 2040 prognostizierter weltweiter Bedarf an kritischen Elementen

Element	Prognostizierter Verbrauch bis 2040
Tellur	300 t/a [32]
Gallium	2,11 – 2,77 kt/a
Indium	ca. 600 t/a
Neodym	6 – 8 kt/a
Dysprosium	650 – 950 t/a
Terbium	260 – 380 t/a
Praseodym	1,08 – 1,62 kt/a

Der Bedarf von Elementen der Seltenen Erden wie Neodym, Dysprosium, Terbium und Praseodym wird im Kapitel 2.7 weiter diskutiert. Er könnte sich auch wegen der Monopolstellung von China in der Lieferkette zum Engpass der grünen Energiewende entwickeln (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Kobalt hat die Besonderheit, dass es einen hohen Schmelzpunkt hat und seine Festigkeit und magnetischen Eigenschaften auch bei extremen Temperaturen beibehält. Die Kobaltressourcen der Erde belaufen sich auf 25 Millionen Tonnen[33]. Die meisten dieser Ressourcen befinden sich im Kupfer-Belt, einem Bergbaugebiet, das einen Teil der Provinz Kantanga in der Demokratischen Republik Kongo umfasst. Die übrigen Ressourcen befinden sich hauptsächlich in Australien, Kuba, Kanada, Russland und den Vereinigten Staaten.

Tabelle 9: Anteil der Verarbeitung wichtiger Metalle der globalen Energiewende durch China

Rohstoff	Anteil Chinas bei der Verarbeitung
Lithium	58%
Seltene Erden	87%
Kobalt	65%
Nickel	35%
Kupfer	40%

Die Demokratische Republik Kongo und China haben 2019 etwa 70 % bzw. 60 % des weltweiten Bedarfs an Kobalt und Seltenen Erden gefördert. In

[32] Vgl. (IEA, 2021)
[33] Vgl. (IEA, 2021)

Tabelle 9 sind die Anteile Chinas bei der Verarbeitung kritischer Metalle zusammengestellt. Die hohe Konzentration bei den Lieferanten, die durch komplexe Versorgungsketten noch verstärkt wird, erhöht die Risiken, die sich aus physischen Störungen, Handelsbeschränkungen oder anderen Entwicklungen ergeben.

Die Gewinnung von Lithium geschieht mit hohem Einsatz von Süßwasser. Der Bericht „Battery Paradox“[34] weist darauf hin, dass z.B. in Bolivien 70 % des Wassers für den Bergbau und 17 % für die Landwirtschaft verwendet werden aber nur 13 % für den menschlichen Verbrauch übrig bleiben[35]. Der bolivianischen Regierung wird vorgeworfen, die riesigen Lithiumvorkommen des Landes zu plündern, die sich auf Gebiete konzentrieren, die vom indigenen Volk der Aymara bewohnt werden.

[34] Vgl. (Ester, de Haan, & Gonzalez, 2020)
[35] Vgl. (Ester, de Haan, & Gonzalez, 2020)

5. Zusammenfassung

Die hohe Durchdringung des Stromerzeugungssektors mit erneuerbaren Energieträgern ist eine Notwendigkeit, um die Treibhausgasemissionen des Sektors zu verringern. Sie unterliegt jedoch, wie in diesem Artikel erörtert, bestimmten umweltpolitischen, technischen und geopolitischen Beschränkungen.

Positiv zu vermerken ist, dass die Kosten für Strom aus erneuerbaren Energien und deren Speicherung voraussichtlich sinken werden. Es entstehen neue Initiativen und Geschäftsmodelle, die das Recycling von Solarmodulen und Batterien[36], die Herstellung von wiederverwertbaren Windturbinenblättern[37], die Entwicklung von Solar-PVT[38] oder hocheffizienten Multi-Junction-Solarzellen und den effizienten Stromverbrauch in mit Software automatisierten Haushalten und Industrien erleichtern werden.

Neben diesen Entwicklungen ist eine effiziente Nutzung von sauberem Strom durch die Steigerung der Energieeffizienz in der Industrie, im Gebäude- und im Dienstleistungssektor erforderlich. Dezentrale Systeme für erneuerbare Energien werden eine zentrale Rolle bei der Verbreitung von grünem Strom in Teilen der Welt spielen, in denen keine Netzinfrastruktur vorhanden ist. Grüner Strom und dafür bereitgestellte Finanzmittel müssen, wo immer möglich, für die direkte Elektrifizierung verwendet werden, um die vielen effizienzverringernden Schritte zu überspringen, die bei der Erzeugung von E-Fuels oder Wasserstoff durchlaufen werden. Die Priorisierung der weltweiten Dekarbonisierung des Stromnetzes und der Elektrifizierung stellt sicher, dass der Raum, die Ressourcen und die Kapitalallokation für den Einsatz von erneuerbaren Energien in einem Land am effizientesten zur THG-Minderung genutzt werden. An Orten mit reichlich erneuerbaren Energiequellen, an denen der Aufbau einer robusten Netzinfrastruktur möglicherweise nicht machbar oder wirtschaftlich nicht tragfähig ist, kann die Produktion von E-Kraftstoffen (Re-Fuels) jedoch eine praktikable Lösung für den Export und die Dekarbonisierung von Sektoren sein, die als "Hard-to-Decarbonise[39]" bezeichnet werden.

---

[36] First Solar, IBC Solar, Duesenfeld, Fortum
[37] Siemens Gamesa, IRT Jules Verne
[38] Sunovate
[39] Stahl, Zement, Flugfahrt, Schifffahrt

Darüber hinaus muss der Abbau von Mineralien, die für die Energiewende unverzichtbar sind, so erfolgen, dass fragile und wertvolle Gebiete mit biologischer Vielfalt und die Interessen von indigenen Gruppen nicht beeinträchtigt werden. Die Welt begibt sich hierdurch in neue geopolitische Abhängigkeiten. Diese Entwicklung erfordert auch eine bessere Cybersicherheit in der Energieinfrastruktur.

Die Sicherheit der Energieversorgung ist gleichbedeutend mit der nationalen Sicherheit. Wenn die wirtschaftlichen und ökologischen Vorteile der Energiewende gerecht über die Welt verteilt werden, könnten wir eine klimagerechte und klimaneutrale Zukunft für die Menschheit ermöglichen.

Literaturverzeichnis

Agora Energiewende; Fraunhofer. (2015). *Current and Future Costs of Photovoltaics.* Retrieved from https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/AgoraEnergiewende_Current_and_Future_Cost_of_PV_Feb2015_web.pdf

Atalay, Atasu, S., Duran, L., & Wassenhove. (2021). *The Dark Side of Solar Power.* Havard Business Review. Retrieved from https://hbr.org/2021/06/the-dark-side-of-solar-power#:~:text=The%20High%20Cost%20of%20Solar%20Trash&text=While%20panels%20contain%20small%20amounts,an%20extremely%20low%2Dvalue%20material.&text=In%20addition%2C%20some%20governments%20may,they%20contain.

EIA. (2021). Hydropower and the environment. Retrieved from https://www.eia.gov/energyexplained/hydropower/hydropower-and-the-environment.php

Energysage. (2022). *Environmental impacts of geothermal energy*. Retrieved from https://www.energysage.com/about-clean-energy/geothermal/environmental-impacts-geothermal-energy/

Ester, de Haan, A., & Gonzalez. (2020). *Battery Paradox.* Retrieved from https://www.somo.nl/the-battery-paradox/

Gonzales, A. (2020). *The Battery Paradox.* SOMO . Retrieved from https://www.somo.nl/declaration-on-mining-and-the-energy-transition-ahead-of-cop26/

IEA. (2020). *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector.* Retrieved from https://iea.blob.core.windows.net/assets/4719e321-6d3d-41a2-bd6b-461ad2f850a8/NetZeroby2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector.pdf

IEA. (2021). *The Role of Critcal Minerals in the Energy Transition.* Retrieved from https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions

IPCC. (2022). *Mitigation of Climate Change: A Summary for Policy Makers.* Retrieved from https://report.ipcc.ch/ar6wg3/pdf/IPCC_AR6_WGIII_SummaryForPolicymakers.pdf

IRENA. (2016). *End-of-life management: Solar Photovoltaic Panels.* IRENA & IEA. Retrieved from https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels

IRENA. (2019). *Future of Photovoltaic: Deployment, investment, grid-integration and socio-economic aspects.* Retrieved from https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Nov/IRENA_Future_of_Solar_PV_2019.pdf

IRENA. (2019). *Future of Wind: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects.* Retrieved from https://www.irena.org/-/media/files/irena/agency/publication/2019/oct/irena_future_of_wind_2019.pd

IRENA. (2021, 12 19). *IRENA Statistics.* Retrieved from https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Costs/Global-Trends

IRENA. (2021). *Statistics Time Series of Trends in Renewable Energy*. Retrieved from https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series

IRENA. (2021). *World Energy Transition Outlook: A 1.5°C Pathway.* Retrieved from https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_World_Energy_Transitions_Outlook_2021.pdf

Kelly, E., Patrick, S., Michael, G., Dylan, H., Donna, H., & Anthony, L. (2017). *An Improved Global Wind Resource Estimate for Integrated Assesment Models - NREL.*

Lazard. (2020). *Levelised Cost of Energy, Levelised Cost of Storage and Levelised Cost of Hydrogen.* Retrieved from https://www.lazard.com/perspective/lcoe2020

Mongird, Kendall, V., Viswanathan, J., Alam, C., Vartanian, V., Sprenkle, R., & Baxter. (2020). *2020 Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment.* Retrieved from https://www.pnnl.gov/sites/default/files/media/file/Final%20-%20ESGC%20Cost%20Performance%20Report%2012-11-2020.pdf

NREL. (2020). *NREL. Life Cycle Assessment Harmonization*. Retrieved from https://www.nrel.gov/analysis/life-cycle-assessment.html

Olivier A. C., H., Meijer, L. J., Ruud J., v. d., & Nick C., v. d. (2017). Systematic high-resolution assessment of global hydropower potential. doi:https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171844

PNNL. (2020). *Energy Storage Cost and Performance Database*. Retrieved from https://www.pnnl.gov/ESGC-cost-performance

Pu, L., & Clair, B. (2018). *Wind Turbine Blade Waste in 2050.* University of Cambridge Institute for Manufacturing. Retrieved from https://www.repository.cam.ac.uk/bitstream/handle/1810/263878/Liu_and_Barlow-2017-Waste_Management-AM.pdf?sequence=1&amp%3BisAllowed=y

UNDP, WEC, UNDESA. (2000). *World Energy Assessment': Energy and the Challenges of Sustainability.* Retrieved from https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/2423World_Energy_Assessment_2000.pdf

Union of Concerned Scientists. (2021). *Environmental Impacts of Hydroelectric Power*. Retrieved from

https://www.ucsusa.org/resources/environmental-impacts-hydroelectric-power#:~:text=Flooding%20land%20for%20a%20hydroelectric,way%20for%20reservoirs%20%5B3%5D.

USGS. (2021). *Lithium Statistics and Information.* Retrieved from https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/73374.pdf, https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/lithium-statistics-and-information

Vasilis, F., Hyung, C. K., Rolf, F., Marco, R., Parikhit, S., & Mattias, S. (2011). *Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems.* IEA. Retrieved from https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/rep12_10.pdf

Windpower Engineering & Development. (2022). *Ready-to-float: A permanent cost reduction for offshore wind.* Retrieved from https://www.windpowerengineering.com/ready-to-float-a-permanent-cost-reduction-for-offshore-wind/

Wiser, Ryan, R., Joseph, S., & Joachim. (2021). *Expert elicitation survey predicts 37% to 49% declines in wind energy costs by 2050.* doi:https://doi.org/10.1038/s41560-021-00810-z

World Energy Council. (2019). Retrieved from https://www.eesi.org/papers/view/energy-storage-2019