



Energiespeicherung

Heute und Morgen

Von Thomas Wipfli

Abgabedatum: 11.11.2024
Ausbildung: Dipl. Energie- und Umwelttechniker/in HF
Klasse: L-TEU-21-Do-a

Inhaltsverzeichnis

1	Management Summary	4
2	Einleitung	5
3	Speicherarten	6
3.1	Mechanisch.....	6
3.1.1	Pumpspeicherkraftwerke	6
3.1.2	Hubspeicherkraftwerk.....	7
3.1.3	Druckluftspeicher.....	9
3.1.4	Schwungradspeicher.....	11
3.2	Elektrochemische Zellen.....	13
3.2.1	Blei-Akku	14
3.2.2	Nickel-Akku	15
3.2.3	Lithium-Akku.....	16
3.2.4	Redox-Flow Batterien.....	17
3.2.5	Superkondensatoren	18
3.3	Chemisch.....	19
3.3.1	Power-to-Gas Wasserstoff	19
3.3.2	Power-to-Gas Methan	21
3.4	Thermische Speicher.....	22
3.4.1	Thermovoltaik.....	22
3.4.2	Sensible Wärmespeicher.....	22
3.4.3	Latenter Wärmespeicher	23
4	Technologien für die Zukunft	24
4.1	Fortschritte in der Batterietechnologie	24
4.1.1	Lithiumgewinnung	24
4.1.2	Festkörperakkumulator.....	27
4.1.3	Salzwasserbatterie	27
4.2	Second-Life.....	28
4.2.1	E-Autos.....	28
4.2.2	Einweg-Vapes	28
4.3	Ringspeicherkraftwerke	30
5	Anlagen und Pläne in der Schweiz	31
5.1	Stauseen.....	31
5.2	Wasserstoff.....	32
5.2.1	Energie Uri	32
5.2.2	SWOT-Analyse zu Wasserstoff	33
5.3	Batterien	35
5.3.1	MW Storage AG	35
5.3.2	Geplanter Batteriespeicher in Laufenburg.....	36

5.4	Weitere Speicher.....	37
5.4.1	Hubspeicherkraftwerke von Energie Vault.....	37
5.4.2	Druckluftspeicher.....	37
6	Fazit.....	38
7	Lessons learned.....	39
8	Persönliches Schlusswort.....	40
9	Danksagung.....	41
10	Anhang.....	42
10.1	Redlichkeitserklärung.....	42
10.2	Themeneingabe Diplomarbeit.....	43
10.3	Terminplan SOLL.....	44
10.4	Terminplan IST.....	45
10.5	Quellenverzeichnis.....	46
10.6	Abbildungsverzeichnis.....	48
10.7	Erweiterte Tabelle zu der elektrochemischen Spannungsreihe.....	49
10.8	AI-generiertes Mindmap zu Energiespeicher.....	50

1 Management Summary

Überall in der Schweiz werden Photovoltaik-, Wasser- und Windkraftanlagen gebaut. Das Ziel ist klar: die Energiewende. Um die wetterabhängige Unbeständigkeit von erneuerbaren Energiequellen auszugleichen und so die sichere Versorgung garantieren zu können, werden aber Möglichkeiten benötigt, um die Energie zwischenspeichern zu können. Diese Diplomarbeit befasst sich mit den unterschiedlichen Arten Energie zu speichern.

In einem ersten Teil werden die Speicher mechanisch, elektrochemisch, chemisch und thermisch eingeordnet und beschrieben.

Im zweiten Teil werden zukünftige Technologien betrachtet. Dazu zählen zum Beispiel Fortschritte beim nachhaltigen Abbau von Lithium, Fortschritte in der Batterietechnologie oder eine innovative Idee eines Pumpspeicherkraftwerkes, welches auch im Flachland gebaut werden könnte. Auch wird dabei aufmerksam gemacht, dass man E-Auto-Akkus für andere Zwecke, wie Grossspeicher wiederverwenden könnte. Das Recyclingproblem von Einweg-Vapes und eine Lösung dazu wird ebenfalls angesprochen.

Im dritten Teil werden gebaute oder geplante Anlagen in der Schweiz gezeigt. Besonderes Augenmerk wird auf die erste Wasserstoffanlage der Schweiz gelegt. Diese Anlage befindet sich in Bürglen in Uri und wird bald bis zu 900 Kg Wasserstoff pro Tag herstellen. Dieser Wasserstoff wird als Treibstoff für Wasserstofffahrzeuge eingesetzt.

Zudem werden noch zwei Batterie-Speicher angeschaut. Einer davon ist schon im Einsatz, der andere befindet sich erst noch in der Planung.

Interessant ist auch der Plan, nach dem Abschmelzen unserer Gletscher an diesen Orten Pumpspeicherkraftwerke zu errichten. So könnten die Auswirkungen des Klimawandels, wie Überschwemmungen und Dürren, etwas reduziert werden.

Mit so vielen unterschiedlichen Möglichkeiten und den jetzt schon geplanten und gebauten Anlagen, ist es durchaus realistisch, die Energiestrategie 2050 zu erreichen.

2 Einleitung

Um den weltweit steigenden Energieverbrauch irgendwann nachhaltig decken zu können, wird der Ausbau von erneuerbaren Energiequellen, wie Solarzellen und Windkraftwerken, stark vorangetrieben. Einerseits besteht schon in gewissen Kantonen eine Mindestausnutzungspflicht von Dächern auf Neubauten, andererseits wird mit dem Bundesgesetz über eine sichere Stromversorgung mit erneuerbaren Energien weitere Anreize gesetzt, solche Anlagen zu bauen. Sei es mit angepassten Einmalvergütungen oder mit Abnahme- und Vergütungspflichten. (1)(2)

Das Problem mit elektrischer Energie ist aber, dass sie verbraucht werden muss, wenn sie produziert wird und umgekehrt. Schon kleine Abweichungen der Normfrequenz von 50 Hz kann zu Schäden in elektrischen Geräten und Anlagen oder gar zu Netzausfällen führen.

In der Schweiz ist Swissgrid dafür verantwortlich das Netz im Gleichgewicht zu halten. Viele Kraftwerke laufen mit einer gewissen Reserve, mit der Swissgrid dann bei Bedarf das Netz stabilisieren kann.

Mit erneuerbaren Energiequellen ist das aber nur bedingt möglich. Man kann nicht mehr Sonne oder mehr Wind verlangen. Man kann die Anlagen nur ganz oder teilweise vom Netz nehmen, um weniger Energie zu produzieren. Auch schwankt die Produktion stark, zum Beispiel wenn es bewölkt ist oder es stürmt. Dann gibt es auch Zeiten, wo überhaupt keine Energie produziert wird. In der Nacht oder bei Windstille.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Lösung dieses Problems, nämlich mit dem Speichern von Energie. Im Rahmen dieser Arbeit werden unterschiedliche Arten zur Speicherung von Energie vorgestellt und nachgeforscht, was für zukünftige Technologien am Horizont zu sehen sind. Des Weiteren wird der momentane Stand und die zukünftigen Pläne in der Schweiz betrachtet.

3 Speicherarten

Beim Wort Energiespeicher denkt man vor Allem an Akkus, also wiederaufladbare, elektrische Zellen. Doch Energie kann man auf unterschiedliche Arten speichern. Alle Arten haben unterschiedliche Vor- und Nachteile, wie Effizienz, also die Menge an Energie, die man nach den Umwandlungsverlusten wieder Ausspeichern kann, Investitionskosten oder die Selbstentladung. Die Investitionskosten wurden in dieser Arbeit aber nicht mit einbezogen.

3.1 Mechanisch

3.1.1 Pumpspeicherkraftwerke

Dieser Speicher nutzt die potenzielle Energie von Wasser in hohen Lagen aus. Mit überschüssiger Energie pumpt man Wasser aus einem tieferen Becken in ein höheres. Zum Beispiel ein Stausee. Wird diese Energie wieder benötigt, kann das Wasser über eine Turbine zurück ins tiefere Becken gelassen werden. (3)

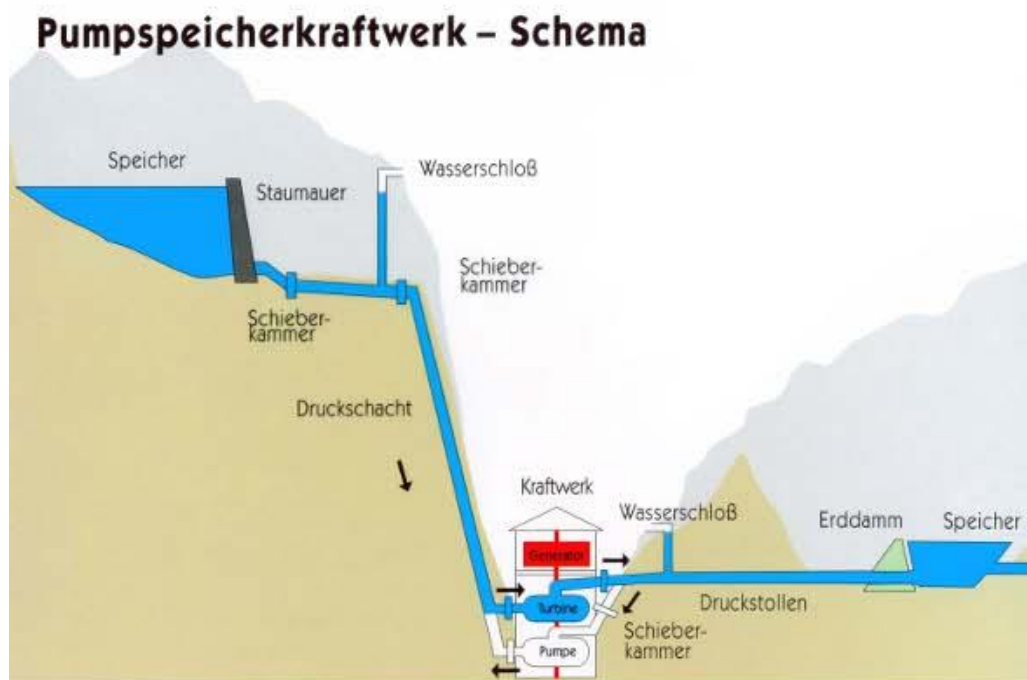


Abbildung 1 Exemplarische Zeichnung eines Pumpspeicherkraftwerkes

Vorteile

Je nach Standort, zum Beispiel in einem Stausee, können extrem grosse Mengen an Energie eingespeichert werden. Und mit genügend Regen, um der Verdampfung entgegenzuwirken, hat man eine unbegrenzte Einspeicherdauer ohne Selbstentladung. Auch sind Pumpspeicherkraftwerke sehr langlebig und können bis zum Ende ihrer Lebenszeit die gleiche Menge an Energie speichern.

Nachteile

Nicht jeder Standort ist gut geeignet für so eine Art Speicher. Berge sind von Vorteil, aber nicht zwangsweise notwendig. Aber es wird sicher eine grosse Menge an Wasser benötigt. Die Baukosten und Bauzeiten sind im Vergleich sehr hoch. Auch ist der Eingriff in die Natur sehr stark.

Wirkungsgrad

Mit 70% bis 85%, je nach Stand der Technik, ist der Wirkungsgrad sehr gut.

3.1.2 Hubspeicherkraftwerk

Ähnlich dem Pumpspeicherkraftwerk, wird auch hier die potenzielle Energie von Masse ausgenutzt. In dem Fall nicht von Wasser, sondern von einem Hubgewicht aus Beton oder Metall. Dieses kann entweder überirdisch von einem Kran angehoben und gestapelt oder in einen vorhandenen Schacht heruntergelassen werden. (4)



Abbildung 2 Kranaufbau eines Hubspeicherkraftwerkes

Vorteile

Diese Art von Speicher ist Standortunabhängig, eventuell kann man sogar alte Bergbauschächte umbauen. Mit einer schwimmenden Plattform wäre es sogar möglich auf offenem Meer ein Gewicht in die Tiefsee herabzulassen.

Auch hier hat man über längere Zeit keine Selbstentladung und mit der grösseren Dichte von Beton oder Metall gegenüber Wasser, hat man bei Hubspeicher eine höhere Energiedichte als Pumpspeicher.

Nachteile

Geringere Lebensdauer durch hohe mechanische Belastung der Seile, Hubvorrichtungen usw. Die Technologie ist noch nicht sehr verbreitet und es fehlen noch praktische Erfahrungswerte.

Wirkungsgrad

Wird wie Pumpspeicherkraftwerken mit 70% bis 85% angegeben, jedoch fallen mit den Seilzügen und Umlenkrollen etwas mehr Reibungsverluste an.

Formel für die Berechnung von potenzieller Energie

Zum Vergleich der unterschiedlichen Arten von Speicher kann man die jeweiligen Energieformeln betrachten. Für die Potenzielle- oder auch Lageenergie sieht wie folgt aus:

$$E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h$$

E_{pot} ist die Menge an potenzieller Energie in der Einheit J (Joule).

m steht für Masse, also das Gewicht in der Einheit kg (Kilogramm).

g steht für die Beschleunigung eines frei fallenden Körpers. Dieser Wert beträgt auf der Erde durchschnittlich $9,81 \text{ m/s}^2$ (Meter pro Sekunde im Quadrat).

h steht für den Höhenunterschied in m (Meter).

Wenn wir nun zum Beispiel in einem Hubspeicherkraftwerk ein Betonmodul von 1'000 kg um 10 m anheben, sieht die Rechnung so aus:

$$1'000\text{kg} \times 9,81\text{m/s}^2 \times 10\text{m} = \underline{\underline{98'100 \text{ J}}}$$

Dieser Wert ist aber nur theoretisch. In der echten Welt kommen immer noch Verluste dazu, wie zum Beispiel Luftwiderstand oder Reibungsverluste. Das ergibt den Wirkungsgrad. Wenn wir nun zum Beispiel in einem Hubspeicherkraftwerk mit 85% Wirkungsgrad 100'000 J einspeichern, können wir wegen den Verlusten nur noch 85'000 J ausspeichern. (5)

3.1.3 Druckluftspeicher

Ein Druckluftspeicher ist ein druckfester Tank, der durch überschüssige Energie mit Druckluft gefüllt wird. Wenn Energie benötigt wird, kann diese Druckluft über eine Turbine wieder entspannt werden. (6)

Anstelle von oberirdischen Drucktanks kann man auch dichte Salzkavernen oder alte Bunkeranlagen und Tunnel umrüsten.

Man unterscheidet drei Typen von Druckluftspeicher über die Art wie sie mit der Abwärme umgehen, die beim Komprimieren der Luft entsteht:

Typ 1 führt die Wärme über einen Wärmetauscher an die Umgebung ab. Sie ist damit verloren. Beim Entspannen der Luft wird dann ein fossiler Brennstoff benötigt, um das Vereisen der Turbine zu verhindern.

Typ 2 speichert die Wärme in einem thermischen Speicher und führt sie beim Entspannen der Luft wieder hinzu. So eine Anlage ist einfacher als Typ 3.

Typ 3 kühlt die Luft vor dem Komprimieren ab und wärmt sie vor dem Entspannen wieder auf. Diese Anlage erfordert einen komplexen Aufbau. (7)

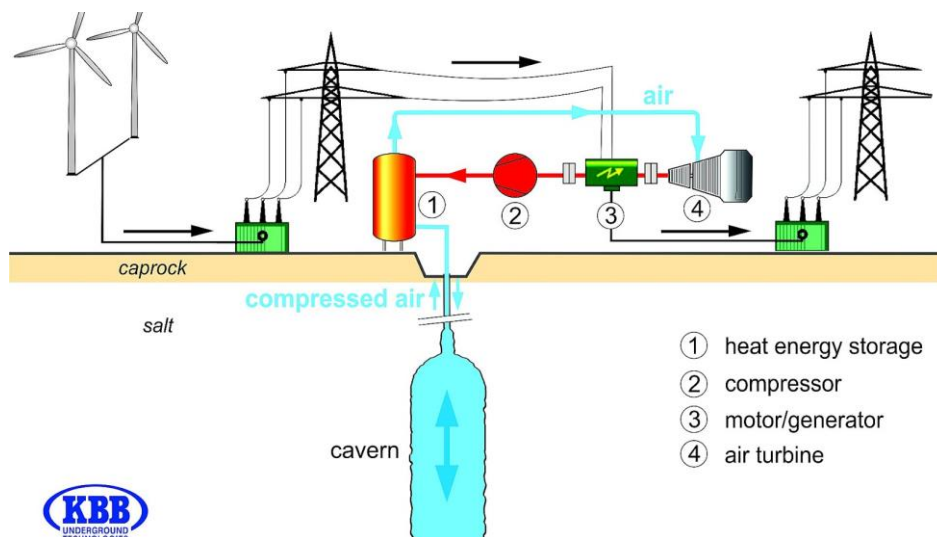


Abbildung 3 Exemplarische Zeichnung eines Druckluftspeichers

Vorteile

Nachhaltige, weiterführende Nutzung von Kavernen, Bunkern oder Tunnel. Die Landschaft wird kaum beeinträchtigt, da nur ein kleineres Gebäude auf der Oberfläche sichtbar ist. So eine Anlage kann sehr einfach zum Beispiel um ein Gasturbinenkraftwerk erweitert werden, um so die Effizienz zu steigern. Auch kann so eine Anlage Ortsunabhängig gebaut werden, wenn man nicht auf vorhandene Kavernen zurückgreifen will oder kann. Luft zum Komprimieren ist überall genügend vorhanden.

Nachteile

Beim Komprimieren von Luft entsteht viel Abwärme, was sich auf die Lebensdauer und Effizienz auswirkt. Ebenso kühlt die Luft beim Entspannen sehr stark ab, was die Anlage vereisen und beschädigen könnte. Mit einem komplizierteren System kann die Abwärme aber zum Wärmen beim Entspannen genutzt werden.

Wirkungsgrad

Ohne Verwertung der Abwärme nur um die 40% bis 55%. Mit Abwärmenutzung bis zu 70%

Energieformel

Die Energieformel beim Komprimieren von Luft kann auf isotherme oder adiabatische Weise berechnet werden. Wenn beim Druckluftspeicher die entstehende Wärme in einem Wärmespeicher zwischengelagert wird, hat die komprimierte Luft eine ähnliche Temperatur wie die Aussentemperatur. So kann die isotherme Formel benutzt werden. (8)

$$E = p_{Kaverne} \cdot V \cdot \ln\left(\frac{p_{Kaverne}}{p_{Umgebung}}\right)$$

E ist wieder die Energie in J (Joule).

$p_{Kaverne}$ ist der Enddruck in Pa (Pascal) nach dem Komprimieren.

V ist das Volumen nach dem Komprimieren in m^3 (Kubikmeter).

ln steht für den natürlichen Logarithmus. Dieser wird gebraucht, da der Druck nicht linear, sondern umgekehrt proportional zu Volumen ist.

$p_{Umgebung}$ ist der Anfangsdruck, oder Umgebungsdruck, in Pa (Pascal). Auf Meereshöhe ungefähr 101,325 Pa

3.1.4 Schwungradspeicher

Ein Schwungradspeicher ist ein mechanisches Energiespeichersystem, das elektrische Energie durch die Rotation einer massiven Scheibe speichert. Die Energie wird in Form von kinetischer Energie gespeichert, indem die Scheibe mithilfe eines Elektromotors auf hohe Drehzahlen beschleunigt wird. Bei Bedarf kann das Schwungrad wieder abgebremst werden, wobei die kinetische Energie über denselben Motor in elektrische Energie umgewandelt wird. (9)

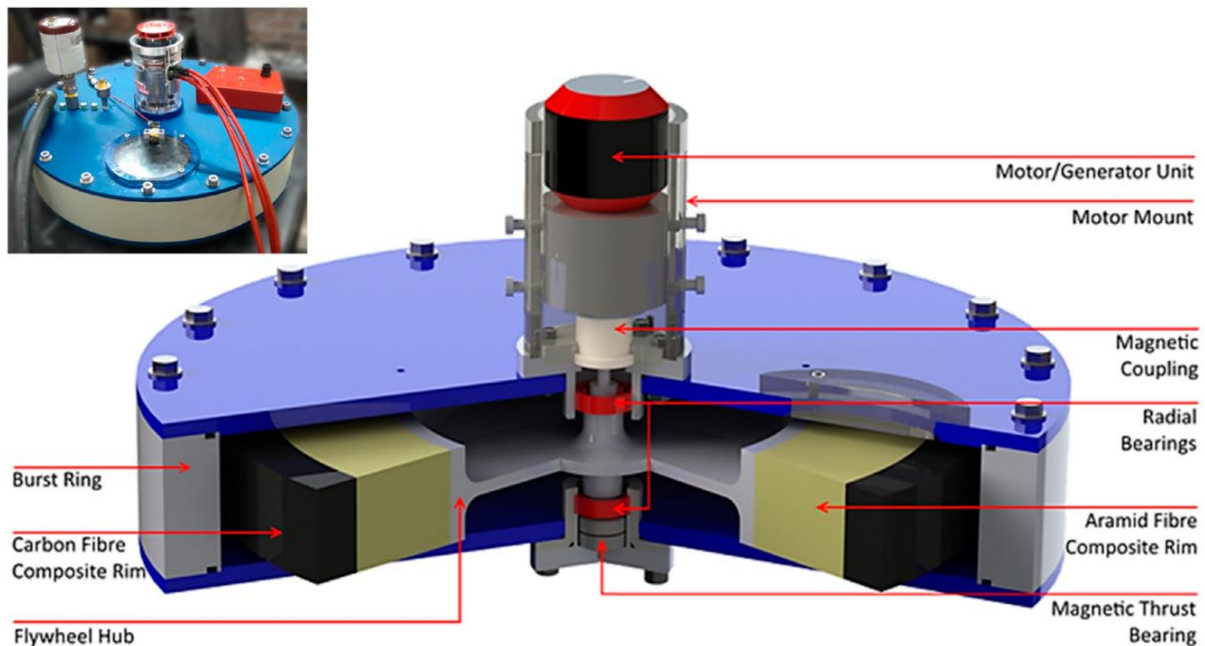


Abbildung 4 Moderner Aufbau eines Schwungrades

Vorteile

Ein Schwungrad kann sehr schnell viel Leistung erbringen/generieren. Darum wird es oft für die Notstromversorgung eingesetzt. Wenn der Strom ausfällt, können Schwungräder kurzfristig unterbrechungsfrei die Versorgung garantieren, bis die Anlage sicher runtergefahren ist oder ein anderes Notstromaggregat die Versorgung übernehmen kann. Durch ausgeklügelte Technologien, wie der Gebrauch von Magnetlager und den Betrieb in einem Vakuum, haben Schwungräder eine lange Lebensdauer. Auch eine komplette Tiefenendladung hat keinerlei negative Folgen.

Nachteile

Trotz zahlreicher Innovationen kommt es immer noch zu Reibungsverlusten, was zu einer vergleichsweise schnellen Selbstentladung von 3% bis zu 20% pro Stunde führt. Auch ist die Kapazität sehr begrenzt.

Wirkungsgrad

Wird die Energie innerhalb von Sekunden nach dem Einspeichern wieder ausgespeichert, erreicht man einen Wirkungsgrad von bis zu 90%.

Energieformel

Die Energieform in einem Schwungrad ist die Rotationsenergie, welche als die kinetische Energie verstanden werden kann, die einem drehenden Körper innewohnt. Sie ist abhängig von der Masse, dem Trägheitsmoment und der Winkelgeschwindigkeit des Körpers. Die Formel dazu sieht wie folgt aus:

$$E_{\text{rotation}} = 0.5 \times J \times \omega^2$$

E_{rotation} steht für die Energie in J (Joule).

J steht für das Trägheitsmoment. Dieses kann je nach Form des drehenden Körpers variieren. Für die Form eines Zylinders, wie er üblicherweise in Schwungrädern eingesetzt wird, steht J für $0.5 \times m \times r^2$. Das m steht dann für die Masse, normalerweise in Kg, und r für den Radius des Zylinders zum Beispiel in Meter.

ω (kleines Omega (Ω)) steht für die Winkelgeschwindigkeit in Radianten pro Sekunde. Sie kann von der Drehzahl umgerechnet werden. (10)

Beispielrechnung

Gegeben: Zylinderschwungrad mit der Masse $m = 10 \text{ Kg}$ und dem Radius $r = 0.5\text{m}$
Gesucht: Energie in Joule bei 3000 Umdrehungen pro Minute.

Berechnung:

3000 Umdrehungen pro Minute entsprechen 50 Umdrehungen pro Sekunde.

Ein ganzer Kreis mit 360° entspricht 2π .

Die Winkelgeschwindigkeit ist dann: $\omega = 2 \times \pi \times 50 = 314.16 \text{ rad/s}$

$$J = 0.5 \times m \times r^2 = 0.5 \times 10\text{Kg} \times 0.5^2\text{m} = 1.25 \text{ Kg pro m}^2$$

$$E_{\text{rotation}} = 0.5 \times J \times \omega^2 = 0.5 \times 1.25 \times (314.16)^2 = \underline{\underline{61\,718 \text{ J}}}$$

Interessant ist, dass die Rotationsenergie quadratisch mit der Winkelgeschwindigkeit zunimmt. Dies bedeutet, dass die Verdopplung der Winkelgeschwindigkeit die Rotationsenergie vervierfacht.

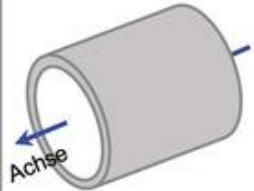
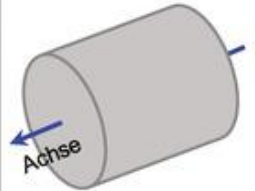

Hohlzylinder	Vollzylinder	Massive Kugel
		
$J = M \cdot R^2$	$J = \frac{1}{2} \cdot M \cdot R^2$	$J = \frac{2}{5} \cdot M \cdot R^2$

Abbildung 5 Formel für unterschiedliche, drehende Körper

3.2 Elektrochemische Zellen

Die wohl bekanntesten Speicher gehören zu den galvanischen Elementen. Man findet sie in jedem elektrischen Gerät, welches nicht durchgehen ans Netz angeschlossen ist. Wie zum Beispiel Smartphones, E-Bikes oder Laptops. Auch Autos können mit so einem Speicher betrieben werden oder benutzen eine kleinere Version zum Starten des Motors. Diese so genannten Sekundärzellen, oder auch Akkumulatoren, bestehen aus zwei Elektroden, einer Anode und einer Kathode, und einem Elektrolyten. Die Elektroden bestehen aus Materialien, die Elektronen speichern oder abgeben können, während der Elektrolyt eine leitfähige Flüssigkeit oder Gel ist, durch das Ionen zwischen den Elektroden fließen. (11)

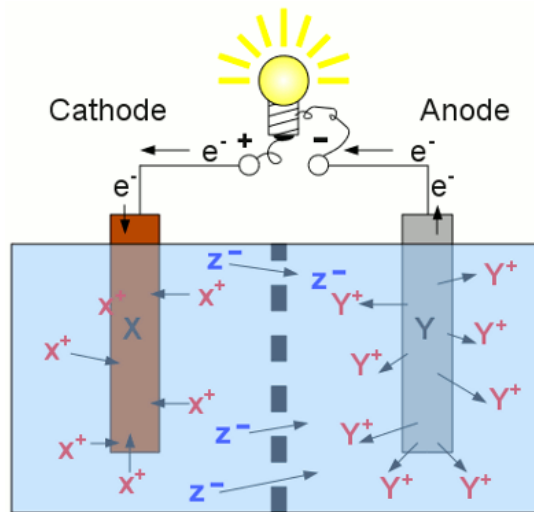


Abbildung 6 Exemplarische Zeichnung eines galvanischen Elementes

Mithilfe der elektrochemischen Spannungsreihe können Materialien für die Elektroden und so das Gesamtpotenzial bestimmt werden. Wenn auch theoretisch möglich, eignen sich nicht alle Kombinationen für kommerzielle Zellen. Gründe dafür wären zum Beispiel der Preis oder die Haltbarkeit von Materialien. Auch die Sicherheit und Umweltverträglichkeit spielen natürlich eine wichtige Rolle. Folgend sind ein paar Beispiele aufgelistet. Eine umfangreichere Tabelle findet sich im Anhang. (12)

Fluor	+2.87 Volt	Wasserstoff	0	Volt	Blei	-0.13	Volt
Schwefel	+2.00 Volt				Nickel	-0.23	Volt
Gold	+1.69 Volt				Cadmium	-0.4	Volt
Platin	+1.20 Volt				Zink	-0.76	Volt
Eisen	+0.77 Volt				Titan	-1.21	Volt
Kupfer	+0.52 Volt				Natrium	-2.71	Volt
Zinn	+0.15 Volt				Lithium	-3.04	Volt

3.2.1 Blei-Akku



Abbildung 7 Blei-Akku in einem Gabelstapler Abbildung 8 Starterbatterie eines Autos

Blei-Akkus, auch Blei-Säure-Akkus, gehören zu den ältesten kommerziellen Akkuarten. Der positive Pol besteht aus Bleioxid, der negative Pol aus metallischem Blei. Als Elektrolyt wird verdünnte Schwefelsäure verwendet. Die nominale Spannung einer einzelnen Zelle liegt bei zwei Volt. Die bekannteste Anwendung ist die Starterbatterie für Kraftfahrzeuge, wofür man sechs Zellen in Serie für 12 Volt schaltet. Weitere Anwendungen sind zum Beispiel bei Gabelstaplern oder elektrischen Rollstühlen, wobei das vergleichsweise hohe Gewicht bei der Kippsicherheit zum Vorteil eingesetzt wird.

Blei-Akkus gelten als zuverlässig und günstig. Sie können auch kurzzeitig eine hohe Stromstärke abgeben. Man sollte sie aber nicht zu tief entladen, da sich sonst ihre Lebensdauer drastisch verringert. Je nach Bauart und Gebrauch erreicht man um die 1`000 Ladezyklen. Grössere Akkus müssen dafür regelmässig gewartet werden. Die Selbstentladung liegt bei ca. 5% pro Monat.

Mittlerweile werden Blei-Akkus aber nach und nach von anderen Arten abgelöst. (13)

Energieformel

Die elektrische Ladung eines Akkumulators kann man mit der Spannung in Volt und der Kapazität Q in Amperestunden berechnen.

$$E_{\text{bat}} = V \times Q$$

Wenn man zum Beispiel den Akku aus dem linken Bild oben nimmt, hat man für V 12 Volt und für Q 80 Amperestunden.

$$E_{\text{bat}} = 12 \times 80 = 960 \text{ Wattstunden}$$

960 Wattstunden entsprechen 3`456`000 Joule oder 3`456 Kilojoule. Bei elektrischer Energie wird aber immer in Watt gerechnet. Also Watt oder Kilowatt für die Leistungsangabe und Wattstunden, Kilowattstunden oder sogar Megawattstunden für die Ladungsmenge.

Zum Vergleich der Energiedichte unterschiedlicher Akkutypen werden auch oft die Wattstunden pro Kilogramm angegeben. Diese Angaben variieren aber stark. Bei Bleiakkumulatoren liegt man so bei 3 bis 30 Wh/kg.

3.2.2 Nickel-Akku

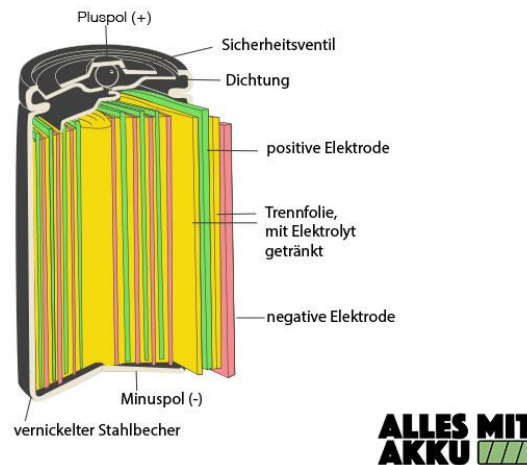


Abbildung 9 Aufbau eines Nickel-Akkus

Da sie sehr robust und widerstandsfähig waren, fand man Nickel-Cadmium-Akkus früher in beinahe jedem technischen Gerät. Als Elektrolyt verwendet man flüssiges Kalium. Mit einem Formfaktor ähnlich von Einwegbatterien und einer Zellspannung von 1,2 bis 1,4 Volt, eigneten sie sich für kleinere Geräte ohne hohen Energiebedarf. Vollgeladen liegt die Entladungsrate am ersten Tag bei bis zu 10%. Danach pro Tag nur noch etwa bei einem halben Prozent.

Frühere Modelle litten unter dem sogenannten Memory-Effekt. Dabei „merkte“ sich die Zelle bei falscher Handhabung bis zu welcher Spannung sie geladen, beziehungsweise entladen wurde und so reduzierte sich die Kapazität spürbar. Bis heute sorgen sich noch viele Menschen beim Laden um den Memory-Effekt, auch wenn dieser bei neueren Modellen kaum mehr ausgeprägt ist, oder wie bei anderen Arten von Akkus keine Rolle spielt. Es liegen bis zu 4`000 Ladezyklen drin.

Akkus mit Cadmium sind bei falscher Entsorgung sehr schädlich für die Umwelt und sind darum im vielen Ländern mittlerweile verboten. Als Ersatz verwendet man heutzutage Nickel-Eisen- oder Nickel-Metallhydrid-Akkus. (14)

Energiedichte

Bei Nickel-Eisen-Akkus erreicht man ca. 19 bis 25 Wh/kg.

3.2.3 Lithium-Akku

Lithium-Ionen-Akkus sind mittlerweile eine der fortschrittlichsten und am häufigsten verwendeten Akkutechnologien. Die nominale Zellspannung liegt bei 3,7 Volt. Je nach Modell sind sie bei 4.2 Volt voll aufgeladen und bei 3.3 Volt komplett entladen. Dank der sehr hohen Energiedichte findet man sie in unterschiedlichsten Bauformen zum Beispiel in In-Ear-Kopfhörern, Smartphones, Laptops, E-Bikes, Elektroautos und noch vielem mehr.

Je nach Anbieter wird die erreichbare Zahl an Lade- und Entladezyklen von 4'000 bis 6'000 Mal angegeben. Danach sollten sie immer noch über 80 Prozent Restkapazität haben. (15)



Abbildung 10 Drohnenakku

Lithium-Akkus sind etwas empfindlicher in der Handhabung und verlangen daher gewisse Sicherheitsvorkehrungen. Auf dem ersten Bild, sieht man einen sehr kleinen Akku, der zum Beispiel in ferngesteuerten Drohnen oder anderen kleinen Geräten eingesetzt wird. Da dabei das Gewicht und die Grösse eine Rolle spielen, hat man auf eine integrierte Sicherheit verzichtet. Es muss darum mit speziellen externen Ladegeräten geladen werden, die darauf ausgelegt sind. Auch die Drohne, die mit diesem Akku betrieben wird, muss wissen, wie stark sie den Akku belasten oder entladen darf.



Abbildung 11 Wohnwagenakku

Auf dem mittleren Bild sieht man ein grösseres Akkupack, welches zum Beispiel in einen Wohnwagen eingebaut werden kann. An ihm ist ein BMS, ein Batteriemanagementsystem, angebracht, das rote Gerät an der linken Seite. Es überwacht den Zustand und sorgt dafür, dass der Akku weder zu tief entladen noch zu hoch geladen wird. Auch sorgt es dafür, dass nicht zu viel Energie aufs Mal entnommen wird und stoppt auch die Benutzung bei zu tiefen oder zu hohen Temperaturen. Das alles kann mit einer App überwacht und eingestellt werden.



Abbildung 12 E-Autobatterie

Auf dem unteren Bild sieht man ein Pack, welche in E-Autos eingebaut werden. Diese sind zusätzlich noch mit aktiven Heizungen und Kühlsystemen ausgerüstet.

Energiedichte

Neuere Modelle, dieser Akkuart, erreichen bis zu 250 Wh/Kg.

3.2.4 Redox-Flow Batterien

Redox-Flow Batterien, oder auch Flüssigbatterien, sind Akkumulatoren, bei denen die Reaktionspartner in zwei von einer Membrane getrennten Flüssigkeiten gelöst sind. Die Membrane in der Zelle lässt dabei den Ionenaustausch zu. In der Zelle werden dabei die gelösten Stoffe chemisch reduziert bzw. oxidiert, wobei elektrische Energie frei wird. Ist die Reaktion in der Zelle abgeschlossen, kann mithilfe von Pumpen frische Flüssigkeit nachgeführt werden. Die Flüssigkeit wird in Tanks ausserhalb der Zelle gelagert. Da die Flüssigkeiten nicht degenerieren erreicht man eine hohe Standzeit und gleichzeitig eine geringe Selbstentladung. (16)

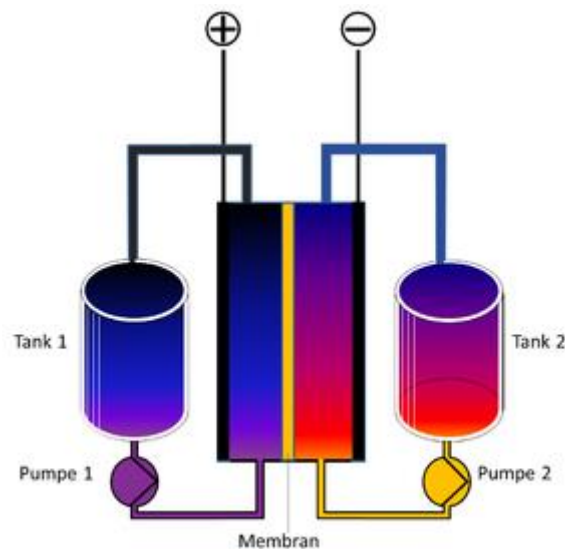


Abbildung 13 Beispiel für den Aufbau einer Redox-Flow-Batterie

Je nach verwendeten Materialien sind Zellen von 1 Volt bis 2,2 Volt realisierbar. Durch den etwas komplexeren Aufbau mit Tanks, Pumpen und Steuerungen, eignen sich Flüssigbatterien vor Allem für grosse Anlagen. Die Zelle selbst kann aber sehr klein sein. Die Tanks dazu können dann an einem anderen Ort aufgebaut werden und die Flüssigkeiten einfach über ein Rohrsystem zur Zelle leiten. Will man mehr Energie speichern, kann man einfach grössere Tanks nehmen. Theoretisch kann die geladene oder entladene Flüssigkeit auch mit Tanklastwagen an einen anderen Ort gefahren werden. In der Praxis findet man aber vor Allem geschlossene Systeme.

Energiedichte

Bei Redox-Flow-Batterien wird die Energiedichte in Liter angegeben. Je nach verwendeten Flüssigkeiten erreicht man bis zu 50 Wh/l.

3.2.5 Superkondensatoren

Ein normaler Kondensator ist ein passives elektrisches Bauelement, welches man in beinahe jedem elektronischen Gerät findet. Im Prinzip bestehen Kondensatoren aus zwei leitfähigen Flächen, die von einem isolierenden Material getrennt sind. Legt man nun eine Spannung an, entsteht zwischen den Elektroden ein elektrisches Feld, dessen Feldstärke der aufgebauten Spannung proportional ist. Sobald die Spannungsquelle und der Kondensator die gleiche Spannung haben, fließt kein Strom mehr und der Kondensator ist geladen. Wird dann die Spannungsquelle getrennt, bleibt die Ladung erhalten und die Spannung bleibt konstant. Anschliessend kann man einen Verbraucher anschliessen und der Kondensator wird entladen. Ein grosser Vorteil von diesen Bauelementen ist, dass sie extrem schnell geladen und entladen werden können. Durch ihre einfache Aufbauweise sind sie Tiefentladefähig, arbeiten in einem breiten Temperaturbereich und haben eine Lebensdauer von über 100'000 Lade- und Entladezyklen. (17)

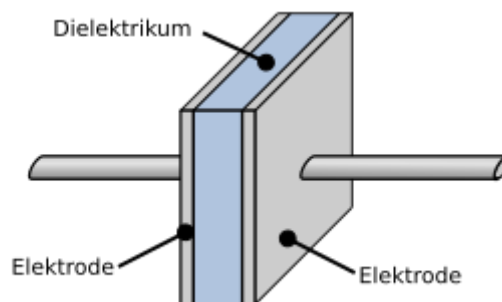


Abbildung 14 Exemplarischer Aufbau eines einfachen Kondensators

Je grösser die Fläche der Platten oder Folien und je näher sie zueinander sind, umso mehr Energie kann gespeichert werden. Bei zu hoher Spannung kann es aber zu einem Funken sprung kommen, welcher den Kondensator zerstört. Die bekannte runde Bauform erklärt sich durch das platzsparende Aufrollen der Folie. Einfache Kondensatoren sind aber sehr limitiert in der Energiedichte und sie entladen sich nach dem Trennen der Spannungsquelle innerhalb von Sekunden bis Minuten selbst.

Durch zahlreiche Entwicklungen kam man vom normalen Kondensator über den Doppelschichtkondensator zum Superkondensator. Dieser konnte alle seine Vorzüge behalten, aber seine Energiedichte wurde stark erhöht. Auch seine Selbstentladung konnte stark reduziert werden, auch wenn sie noch bei Weitem nicht an andere Speicherarten herankommt. (18)

Eingesetzt werden Superkondensatoren heute schon in der Autoindustrie. In E-Autos und Hybriden kann zum Beispiel Bremsenergie zurückgewonnen und wieder zum Anfahren benutzt werden. Auch schnelles Beschleunigen kann besser über Superkondensatoren erfolgen, was die Batterie weiter entlastet. (19)

Auch im Busverkehr werden sie momentan getestet. Superkondensatoren werden in Bushaltestellen verbaut und langsam, netzentlastend aufgeladen. Sobald ein E-Bus kommt, können die im Bus verbauten Superkondensatoren innerhalb von Sekunden geladen werden und der Bus fährt weiter. Die Busse können so mit einem kleineren, leichteren elektrischen Speicher gebaut werden. (20)

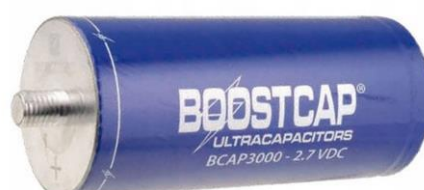


Abbildung 15 Super- oder auch Ultrakondensator

3.3 Chemisch

3.3.1 Power-to-Gas Wasserstoff

Bei einem Wasserstoffspeicher wird überschüssige Energie dazu benutzt Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff aufzuspalten. Der Wasserstoff kann dann auf unterschiedliche Arten gespeichert werden. Zum Beispiel Gasförmig oder nach starkem Abkühlen und Verdichten als Flüssigkeit in einem Druckbehälter. Auch kann der Wasserstoff in einem Metallhydridspeicher eingespeichert werden. Bei Bedarf kann der Wasserstoff in einer Brennstoffzelle wieder in Strom umgewandelt werden. (21)



Abbildung 16 Konzeptbild einer Wasserstoffanlage

Vorteile

Je nach Bedarf und Möglichkeiten lässt sich Wasserstoff auf flexible und mobile Art speichern. Wasserstoff hat auch auf die Masse bezogen eine mehr als doppelt so grosse Energiedichte als Erdgas.

Nachteile

Auf das Volumen bezogen hat Wasserstoff nur ca. ein Drittel der Energiedichte von Erdgas. Als das kleinste mögliche Molekül, kann Wasserstoff leicht durch viele Materialien diffundieren. Das stellt grosse Herausforderungen an die Infrastruktur. Auch ist das Gas extrem leicht entzündlich, was besondere Sicherheitsmassnahmen erfordert.

Wirkungsgrad

Bei jeder Umwandlung von Energie fallen Verluste an. Bei der Elektrolyse von Wasser erreicht man momentan einen ungefähren Wirkungsgrad von 60% bis 70%. Bei der Rückverstromung in einer Brennstoffzelle liegt der Wirkungsgrad bei etwa 40% bis 60%. Insgesamt kommt man so auf einen Wirkungsgrad von 30% bis 40%. Davon abzuziehen ist aber noch die benötigte Energie beim Einlagern in die Drucktanks. Durch zahlreiche Verbesserungen der einzelnen Schritte kann in der Zukunft mit einem besseren Wirkungsgrad gerechnet werden.

Farben des Wasserstoffs

Je nach Art der Herstellung und deren Auswirkungen aufs Klima wird Wasserstoff in unterschiedliche Farben eingeteilt. Der grüne Wasserstoff wird aus der Elektrolyse von Süßwasser hergestellt. Dabei entsteht als Nebenprodukt reiner Sauerstoff. Dieser kann entweder ebenfalls verwertet, oder bedenkenlos an die Umwelt abgegeben werden. (22)

Um als grüner Wasserstoff zu gelten, muss für die Elektrolyse erneuerbare Energie verwendet werden. Darum gilt er als Klimaneutral.

Blauer Wasserstoff wird bei der Spaltung von Erdgas, genauer Methan, zu Wasserstoff und CO₂ gewonnen. Ein Prozess dazu wäre die Dampfreformierung.

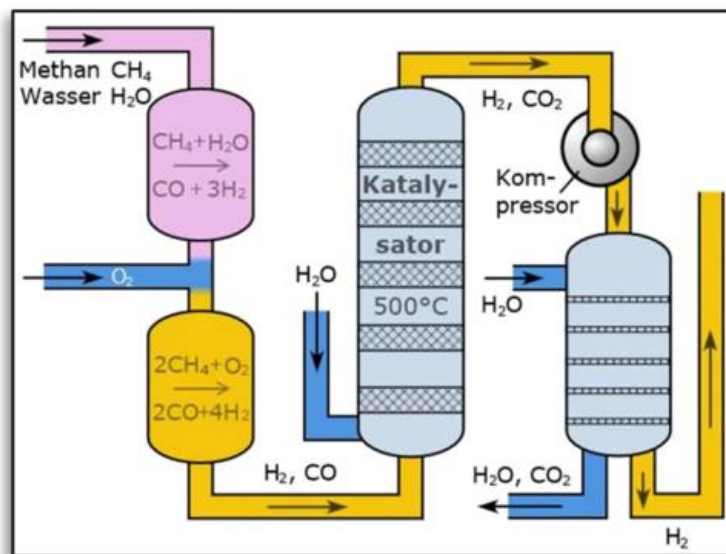


Abbildung 17 Fließbild zur Dampfreformierung

Vereinfacht erklärt wird Methan mit Wasserdampf erhitzt und reagiert dabei zu Wasserstoff und CO. Durch Zuführen von noch mehr Wasser reagiert das CO zu CO₂ und es entsteht noch mehr Wasserstoff. Um als blauer Wasserstoff zu gelten, darf das entstehende CO₂ nicht freigesetzt werden, sondern muss zum Beispiel in Salzkavernen gespeichert werden.

Grauer Wasserstoff wird wie Blauer hergestellt, allerdings wird das CO₂ einfach an die Umwelt abgegeben, was nicht Klimaneutral ist.

Es gibt noch einige weitere Farben. Bei Interesse findet man eine Zusammenstellung unter:

[Kleine Farbenlehre für Wasserstoff | Telepolis](#) Abgerufen am 26.10.24

3.3.2 Power-to-Gas Methan

Wasserstoff kann auch mit CO₂ zu Biogas methanisiert werden. Dazu wird der Wasserstoff nach der Elektrolyse mit CO₂ aus einer nachhaltigen Quelle zu Methan umgewandelt, welcher dann zum Beispiel ins Schweizer Erdgasnetz eingespeichert werden kann. Bei Bedarf kann mit einer Gasturbine Strom und Wärme erzeugt werden. Biogas und Erdgas kann aber auch direkt als Treibstoff für gewisse Fahrzeuge benutzt werden. (23)

Der Unterschied von Biogas und Erdgas ist nur die Entstehung. Beides besteht vor allem aus Methan. Erdgas ist einfach ein natürliches Gas, das aus dem Erdinneren gefördert wird, während Biogas bei der Vergärung von biogenen Abfällen oder durch Methanisierung entsteht.

Vorteile

Einfachere und sicherere Handhabung als Wasserstoff. Es kann schon bestehende Infrastruktur benutzt werden. Vielseitig einsetzbar. Das benötigte CO₂ kann aus unterschiedlichen Quellen stammen wie aus Abgasen aus Kehrlichtverbrennungsanlagen oder Abwasserreinigungsanlagen. Es könnte auch aus der Luft gefiltertes CO₂ verwendet werden.

Nachteile

Ein weiterer Umwandlungsschritt notwendig. Methan ist ein schlimmeres Treibhausgas als CO₂.

Wirkungsgrad

Trotz eines weiteren Umwandlungsschrittes liegt der Wirkungsgrad durch die einfachere Handhabung bei ca. 40% bis 50%.

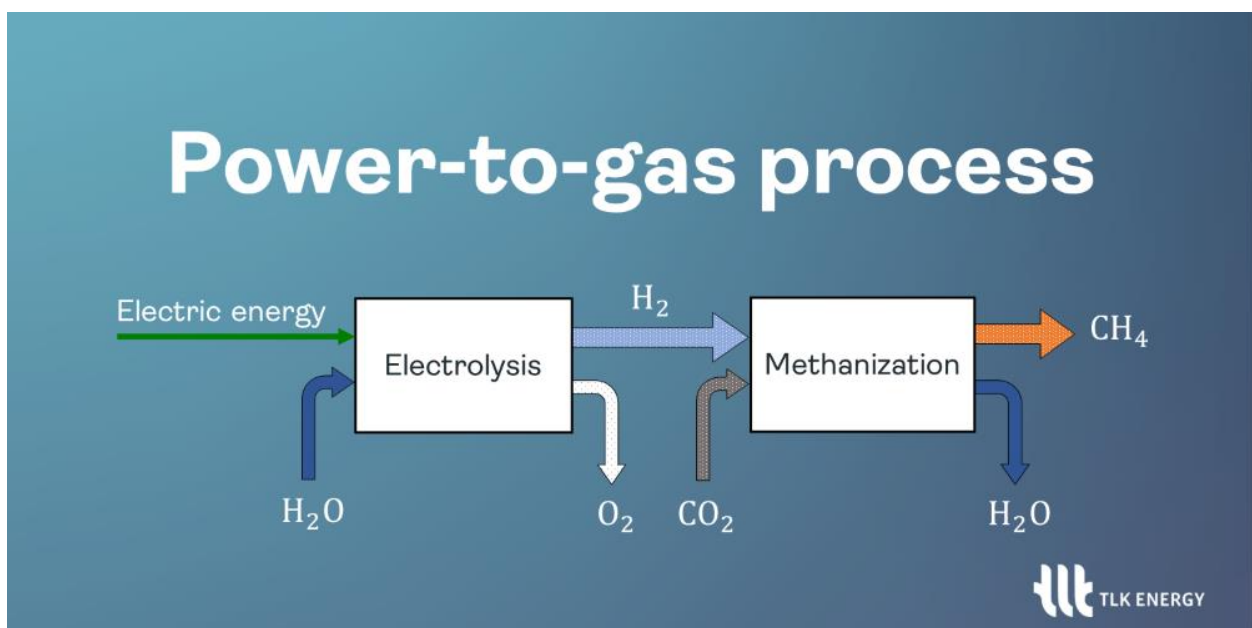


Abbildung 18 Einfaches Fließbild zum erweiterten Power-to-Gas Prozess

3.4 Thermische Speicher

Energie kann auch thermisch gespeichert werden. Ein einfaches Beispiel dazu ist ein Warmwasserboiler. Dieser kann mit Solarstrom und einem Heizelement erwärmt werden. Dank der Isolation wird die Wärme über längere Zeit mit wenig Verlust gespeichert und kann später benutzt werden, um ein Gebäude zu heizen oder warm zu duschen.

Um aus Wärme Strom zu machen, wird Wasser zu Wasserdampf erhitzt und damit eine Turbine angetrieben. Dazu wird aber nicht nur Wasser als Grundspeichermedium benutzt.

Man kann Wärmespeicher in vier Arten unterteilen. (24)

3.4.1 Thermovoltaik

Eine Möglichkeit, um direkt von gespeicherter Wärme elektrische Energie zu erhalten, bietet die Thermovoltaik. Dazu wird Grafit auf 2400 Grad Celsius erhitzt. Wird elektrische Energie benötigt, leitet man die Hitze zu Wolframwellen. Diese Wellen strahlen die Wärme dann als Infrarotstrahlung auf spezielle Photovoltaikzellen ab.

Das ganze System ist sehr wartungsarm und das Grafit ist vergleichsweise günstig und einfach zu bekommen. Wird die Abwärme nicht genutzt, erreicht man aber nur einen Wirkungsgrad von ca. 35%. (25)

3.4.2 Sensible Wärmespeicher

Für ein sensibler Wärmespeicher wird ein Medium beim Einspeichern erwärmt. Es findet also eine Temperaturänderung statt. Jeder Warmwasserboiler ist also ein sensibler Wärmespeicher. Je nachdem, was für Temperaturen gefordert sind, kann man unterschiedliche Speichermedien verwenden. Wasser hat eine erstaunliche Wärmekapazität, kann aber nur im Bereich von 0 Grad Celsius bis 100 Grad Celsius eingesetzt werden. Sand oder Kies als Medium sind bis zu 800 Grad Celsius einsetzbar.

Tab. 10.3 Temperaturbereich, Wärmekapazität, Dichte und Anwendungsbereiche verschiedener Materialien (s. [3, 8])

Medium	Temperaturbereich	Spezifische Wärmekapazität	Volumetrische Wärmekapazität	Dichte	Anwendungen
Einheit	°C	kJ/(kg K)	kJ/(m ³ K)	kg/m ³	
Wasser	0–100	4,19	4175	998	Brauchwasser, Heizungsanlagen
Sand, Kies, Gestein	0–800	0,71	1278–1420	1800–2000	Erdreich-Wärmespeicher
Granit	0–800	0,75	2062	2750	Erdreich-Wärmespeicher
Beton	0–500	0,88	1672–2074	1900–2300	Thermisch aktive Bauteile
Ziegelstein	0–1000	0,84	1176–1596	1400–1900	

Abbildung 19 Aus einem Buch kopierte Tabelle über unterschiedliche Medien

Die Isolierung ist bei allen Wärmespeichern von höchster Bedeutung. Je besser die Isolation, desto weniger „entlädt“ sich der Speicher mit der Zeit. Ebenfalls wichtig ist der Temperaturunterschied vom Speicher zur Aussenwelt. Je höher der Unterschied, desto mehr entlädt sich der Speicher mit der Zeit.

3.4.3 Latenter Wärmespeicher

Ein Latentwärmespeicher nutzt die Umwandelungsenthalpie beim Phasenwechsel eines Mediums aus. Also zum Beispiel beim Aggregatswechsel von Fest zu Flüssig. Dabei wird eine beachtliche Menge an Wärme aufgenommen. Die Temperatur ändert sich dabei erst wieder, wenn das gesamte Medium den Aggregatzustand gewechselt hat.

Das Medium wird nach dem gewünschten Temperaturbereich ausgesucht. Paraffine haben Schmelztemperaturen zwischen 40 Grad Celsius und 70 Grad Celsius. Eine Aluminium-Silicium-Legierung, die als Latentwärmespeicher eingesetzt wird, schmilzt bei 577 Grad Celsius. Salze haben einen Schmelzbereich um die 800 Grad Celsius.

Zum Einspeichern von Energie in thermische Speicher ist elektrische Energie nicht sehr effizient. Die Umwandlungsverluste von elektrischer Energie zu Wärmeenergie und wieder zurück zu elektrischer Energie, rentieren sich in den wenigsten Fällen. Viel besser eignet sich dafür gleich Wärmeenergie von der Sonne einzufangen. Dazu gibt es zwei Varianten. Mit der einen Methode kann man mit vielen Spiegeln die Solarstrahlung auf einen zentralen Punkt konzentrieren. Mit der anderen Methode richtet man die Solarstrahlung mit Parabolspiegeln auf in die Module integrierte Rinnen aus.



Abbildung 20 Turm basierendes Kraftwerk

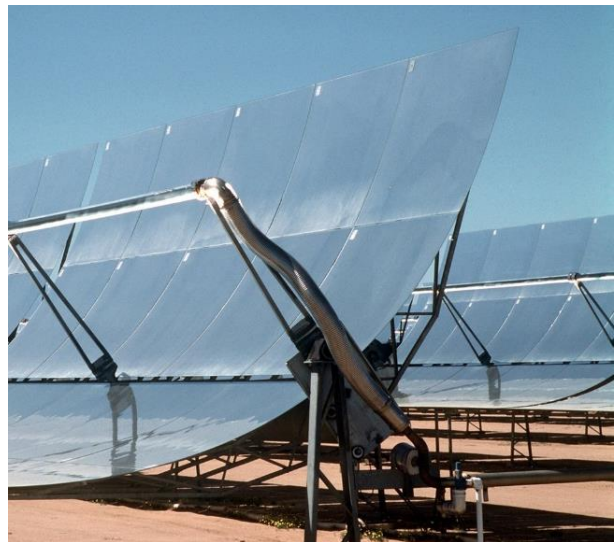


Abbildung 21 Rillen basierendes Kraftwerk

Das Medium befindet sich entweder im Turm oder fließt durch die Rinnen. Damit wird Wasser verdampft und mit dem Dampf über eine Turbine elektrische Energie erzeugt. Mit einem thermischen Speicher kann auch über Nacht Energie erzeugt werden.

Beide Anlagen brauchen viel Platz und so viel Sonnenschein wie möglich. Dafür bieten sich vor allem Wüsten an. Hin und wieder müssen aber die Spiegel vom Staub befreit werden. (26)

4 Technologien für die Zukunft

4.1 Fortschritte in der Batterietechnologie

4.1.1 Lithiumgewinnung

Lithium ist und bleibt ein wichtiger Bestandteil der Batterietechnologie von Heute und Morgen. Es wurde im Jahre 1817 von Johan August Arfwedson entdeckt, als er in Petalit neben Aluminium und Silizium ein unbekanntes Element fand. Bis zum Zweiten Weltkrieg wurde es nur zum Eindicken von Schmiermittel oder in der Glasindustrie gebraucht. Das änderte sich aber, als die Vereinigten Staaten anfangen aus grossen Mengen Lithium Tritium zu gewinnen, welches sie für den Bau von Wasserstoffbomben benötigten. Des Weiteren wird es für die Polymerisation von Elastomeren, in der Bauindustrie und für die Synthese von Pharmazeutika und Agrochemikalien eingesetzt. Seit 2007 sind aber Batterien und Akkumulatoren das wichtigste Segment. Dabei übersteigt die Nachfrage zeitweise das Angebot. Der Preis von Lithium verzehnfachte sich beinahe im Zeitraum von 2020 bis 2022. Danach erholte sich der Preis ein wenig, da sehr schnell neue Quellen erschlossen wurden. Lithium findet man in der Erdkruste mit einem Anteil von 0,006 Prozent. Das hört sich nach sehr wenig an, es ist aber häufiger als Kobalt, Zinn oder Blei.

Bisher verwendete man drei Arten der Lithiumgewinnung: im offenen Tagebau, durch Verdunstung von Salzseen und seltener aus Thermal- und Grubenwasser.

Beim Tagebau ist es in Mineralien wie Amblygonit, Lepidolith oder Spodumen gebunden. Lithiumhaltige Mineralien werden zum Beispiel in Australien, Kanada oder Russland abgebaut. Auch in Europa, in Serbien, Finnland und Österreich, werden Lagerstätte erschlossen.

Beim Verdunsten ist es insbesondere als Lithiumchlorid im Salzwasser gelöst. Zur Gewinnung wird salzhaltiges Grundwasser in riesige Becken gepumpt und das Wasser wird langsam von der Sonne verdunstet. Die so konzentrierte Lösung wird weiter in eine Aufbereitungsanlage gepumpt, wo unerwünschte Begleitstoffe extrahiert werden. Danach wird das Lithiumchlorid mit Natriumcarbonat reagiert und fällt als Lithiumcarbonat aus der Lösung. Solche Lithiumvorkommen findet man zum Beispiel in Chile, Argentinien, Bolivien oder auch China.



Abbildung 22 Lithiumbecken in unterschiedlichen Konzentrationstadien

Aus Thermal- oder Grubenwasser ist Lithium eher ein Nebenprodukt der Geothermie. Aus dem heissen Thermalwasser im Geothermiekraftwerk Insheim, zum Beispiel, wird in einer Pilotanlage das Lithiumchlorid durch Elektrolyse als Lithiumhydroxid herausgelöst. Allerdings konnte im Jahr 2021 nur wenige Kilogramm Lithiumhydroxid pro Monat gewonnen werden.

Beim Tagebau und beim Verdunsten ist der Eingriff in die Natur enorm und die Umweltbelastung durch Staub und die Wasserentnahme gehen vor allem zulasten der meist armen Bevölkerung der Gebiete.

Eine neue Technologie soll das aber nun ändern. Die Direct Lithium Extraction (DLE) oder Direkte Lithium Extraktion. Das ist ein Überbegriff für mehrere Methoden, um Lithium aus dem Wasser zu lösen, ohne es verdunsten zu lassen. Von den Methoden sind viele noch in der Entwicklungsphase. Aber Einige sind mittlerweile in einem Stadium, in dem sie gewinnbringend eingesetzt werden können. Je nach Methode wird dabei Lithiumchlorid oder Lithiumhydroxid hergestellt. Beide Materialien werden für unterschiedliche Batterietypen gebraucht und lediglich für metallenes Lithium wird ein weiterer Umwandlungsschritt nötig. (27)

Alle diese Verfahren sind platz- und zeitsparender als die bisherigen Methoden. Dadurch können sich auch plötzlich neue Lithiumquellen rentieren, wie zum Beispiel gewöhnliches Meerwasser. So können weltweit Anlagen entstehen, die die steigende Nachfrage decken und so kann auch die weltweite Abhängigkeit von einzelnen Ländern verhindert werden.

Adsorption

Mit diesem Verfahren werden Lithium-Ionen selektiv aus einer flüssigen Lösung auf unlösliche Materialien, den sogenannten Sorbenten, gebunden. Das kann mit, oder ohne Ionenaustausch erfolgen. Die Sorbenten können zum Beispiel aus Aluminium, Mangan oder Titan sein. Später wird das Lithium mit einer warmen, verdünnten Chlorid-Lösung wieder desorbiert.

Bei diesem Verfahren ist es wichtig, dass die Sole, also die salzhaltige, mineralreiche Flüssigkeit, gewisse Kriterien erfüllt. Für optimale Ergebnisse sollte sie mindestens 100 mg/L (Milligramm pro Liter) Lithium gelöst haben und auch sonst nicht zu stark verunreinigt sein. Auch funktioniert das Verfahren besser, wenn die Sole warm ist.

Lösungsmittel- Extraktion

Die lösungsmittelbasierte Extraktion nutzt die unterschiedlichen Löslichkeiten von Verbindungen in wässrigen und organischen Phasen. Dieses Verfahren umfasst mehrere Schritte: Das organische Medium, das ein Lithium-selektives Extrakt enthält, wird mit der Sole kombiniert, um Lithium-Komplexe zu bilden. Diese Komplexe werden danach rausgefiltert, um das Lithium zu extrahieren, bevor die organische Phase recycelt wird. Als Lösungsmittel wird zum Beispiel Benzol, Kerosin oder Chloroform eingesetzt.

Wird die Extraktion mehrfach wiederholt, kann man über 90 Prozent des Lithiums extrahieren. Nachteile dieser Methode sind die hohen Kosten der Lösungsmittel und etwaige Umweltbedenken, falls das Lösungsmittel nicht komplett zurückgewonnen werden kann. Auch ist es nicht sehr einfach grosse Volumen zu verarbeiten. Diese Methode eignet sich darum eher als Nachbehandlungsschritt um das Lithium noch weiter zu reinigen.

Membrantechnologie

Bei der Membrantechnologie unterscheidet man zwischen druckunterstützt und potenzialunterstützt. Druckunterstützte Membranverfahren sind die Mikrofiltration, Ultrafiltration, Nanofiltration und die Umkehrosmose. In dieser Reihenfolge eingesetzt, wird die Sole nach und nach von Verunreinigungen befreit. Es wird aber schon eine gewisse Sauberkeit vorausgesetzt. Nach der Nanofiltration hat man eine stark konzentrierte Lösung, die nur noch monovalente Lithium-, Natrium- und Kaliumionen beinhaltet. Mit der Umkehrosmose wird dann noch weiter Flüssigkeit, reines Frischwasser, abgeschieden.

In potenzialunterstützten Prozessen werden spezielle lithiumselektive Membranen eingesetzt, um die positiv geladenen Lithiumionen von den anderen Ionen zu trennen. Mit dieser Art von Elektrodialyse wird das Lithiumchlorid in Lithiumhydroxid umgewandelt. (28) (29)

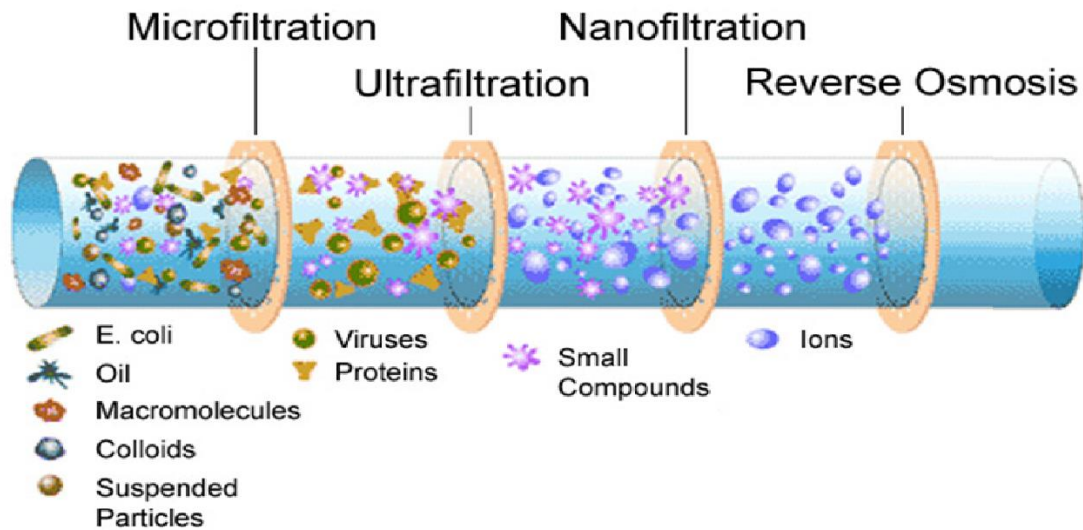


Abbildung 23 Vergleich der Porengrößen

Mikrofiltration hat eine Porengröße von etwa 0.1 bis 10 Mikrometer. Es wird zur Vorreinigung gebraucht und filtert Schwebstoffe und Mikroorganismen raus.

Bei der Ultrafiltration hat man eine Porengröße von etwa 0.01 bis 0.1 Mikrometer. Sie bestehen zum Beispiel aus Keramik und filtern Makromoleküle, aber auch Viren und Proteine raus.

Ein Nanofilter hat eine Porengröße von 1 bis 10 Nanometer. Mehrwertige Ionen werden damit aufgehalten, doch einwertige Ionen wie Lithium-, Natrium- oder Kaliumionen werden noch durchgelassen.

Die Umkehrosmose hat eine Porengröße von 0.1 bis 1 Nanometer. Damit wird absolut alles aus dem Wasser entfernt.

Mit steigendem Feinheitsgrad der Filter, steigt auch der benötigte Druck. Für die Mikrofiltration werden noch keine grossen Anforderungen gestellt. Aber nur schon für die Ultrafiltration werden Drücke im Bereich von 0.5 bis 7 Bar benötigt. Für die Nanofiltration bis zu 20 Bar und die Umkehrosmose bis zu 80 Bar. (30)

4.1.2 Festkörperakkumulator

Heutige Lithium-Ionen-Akkus sind äusserst empfindlich. Um ihre Lebensdauer möglichst auszunutzen, dürfen sie weder zu tief entladen noch überladen werden. Auch die Leistung und die Zellstände müssen von einem Batteriemanagementsystem überwacht werden. Optimal funktionieren sie in einem Temperaturbereich von ca. 18° C bis 25° C. Unterschiedliche Typen können dabei noch etwas andere Temperaturbereiche haben. Nichtsdestotrotz benötigen grössere Packs, zum Beispiel in E-Autos, aktive Kühlungen und Heizungen, um das Pack im optimalen Temperaturbereich zu halten. Der flüssige Elektrolyt kann bei Beschädigungen auslaufen und ist in den meisten Fällen brennbar, was weitere Sicherheitsvorrichtungen erfordert. Diese ganzen Zusatzsysteme können in gewissen Fällen über die Hälfte des Volumens eines Akkus ausmachen.

Im Gegensatz zu den bisherigen Akkumulatoren ist der Elektrolyt zwischen den Elektroden in einem Festkörperakku nicht flüssig. Das hat einige Vorteile wie Einsparungen beim Gewicht und eine allgemeine Robustheit gegenüber Umwelteinflüssen. Da keine Flüssigkeit mehr verwendet wird, gibt es auch nichts das Einfrieren, Kochen oder Auslaufen könnte. Bei E-Autos könnte man so auf eine Heizung verzichten, um die Batterie beim Starten im Winter auf Temperatur zu bringen.

Auch die Energiedichte wird stark erhöht. So glauben Forscher bis zu 1`000 Wh/Kg erreichen zu können. Einen Nachteil gibt es aber noch. Es ist schwieriger hohe Ströme zu übertragen. Man kann also nicht so viel Energie aufs Mal beziehen.

Tests zeigen das mehr als 12`500 Ladezyklen ohne nennenswerte Kapazitätsverluste erreichbar sind. (31)

4.1.3 Salzwasserbatterie

Die sogenannte Salzwasserbatterie nutzt für die Speicherung von elektrischer Energie die Ionen von Natrium. Als Bestandteil von Kochsalz ist es Weltweit leicht und praktisch unbegrenzt verfügbar. Natrium ist auch ein Nebenprodukt bei der Gewinnung von Kalisalzen und wird, mangels Bedarfes, zu sogenannten Kalihalden aufgetürmt.

Anders als Lithium-Akkus kommen gewisse Bauformen von Salzwasserbatterien ohne teure, kritische Materialien wie Cobalt und Nickel aus. Stattdessen kann man Preussisch Weiss oder Preussisch Blau (das sind Komplexe auf Eisenbasis) für die Kathode und Hartkohlenstoff für die Anode verwenden. Beides ist leicht verfügbar und günstig.

Alle Materialien sind weltweit im Überfluss verfügbar und man ist nicht von einzelnen Ländern abhängig. Auch sind sie sehr einfach zu recyceln.

Die Energiedichte ist mit bis zu 160 Wh/kg aber geringer als bei anderen Akkus und darum eignen sie sich weniger für mobile Anwendungen wie E-Autos oder kleinere Geräte. Wenn aber das Gewicht und die Grösse keine Rolle spielt, wie bei stationären Grossspeicherkraftwerken, sind sie eine äusserst nachhaltige Alternative.

Momentan ist die Zyklfestigkeit noch ein Problem, doch die weltweite Forschung lässt hoffen. (32)

4.2 Second-Life

4.2.1 E-Autos

Die Lebensdauer der Batterien in den heutigen E-Autos wird mit durchschnittlich 8 Jahren angegeben. Doch die Akkus halten viel länger als gedacht. Laut Aussage von Nissan UK Marketing Director Nic Thomas im Jahre 2020, waren damals die meisten Batterien im Model Leaf nach über 10 Jahren immer noch im Einsatz. Auch gewisse Hybridfahrzeuge vom Model Prius von Toyota sind nach über 25 Jahren immer noch auf der Strasse! Diese Batterien können nach Ende der Nutzungsdauer des Autos teilweise noch über 60 Prozent der angegebenen Kapazität haben. Das reicht zwar nicht mehr zum Antreiben eines Fahrzeugs, aber eignet sich sehr gut als Energiespeicher zum Beispiel für Solarfarmen. (33) (34) (35)

4.2.2 Einweg-Vapes

Seit einiger Zeit finden Einweg-Vapes immer mehr Anklang. Das sind E-Zigaretten, die mit einem Lithium-Ionen-Akku und einer vorgefüllten E-Liquid-Kartusche ausgestattet sind. Sobald die Flüssigkeit oder der Akku leer ist, wird das Gerät entsorgt. Leider oft nicht korrekt. Anstelle sie an einer Verkaufsstelle zurückzugeben, landen sie im Müll oder werden achtlos weggeworfen. Laut einer Studie aus Grossbritannien werden dort um die 5 Millionen Einweg-Vapes weggeworfen – und zwar wöchentlich. Über ein Jahr gesehen geht so viel Lithium verloren, wie in 5000 E-Autos sind.

Dies führt nicht nur dazu, dass schädliche Stoffe in die Umwelt gelangen, sondern auch, dass wichtige Ressourcen verschwendet werden. In den Vapes sind wiederaufladbare Lithium-Ionen-Akkus verbaut, die im besten Fall zwar recycelt werden, aber noch eine lange Lebensdauer gehabt hätten.

Im Netz finden sich viele Beispiele, wie man solche Akkus einfach weiterverwenden kann. Im Rahmen dieser Arbeit wurde mal versucht, wie einfach das ist. (36) (37)

Achtung! Die Arbeit mit Lithium-Ionen-Akkus kann gefährlich sein. Nicht nur besteht die Gefahr eines Stromschlages, Lithium-Ionen-Akkus können bei falscher Handhabung auch in Flammen aufgehen und giftige Dämpfe freisetzen.

Zuerst wurden an zwei Wochenenden am Abend in Zürich Vapes gesammelt. Ohne gross suchen zu müssen, konnten 12 Vapes gefunden werden. Unter anderem einige der Marke „Elfbar“. Diese Vapes wurden auseinandergenommen. Dazu konnte einfach mit einer Zange die Bodenabdeckung abgezogen werden, an dieser die gesamten „Innereien“ des Vapes befestigt sind. Der Akku wurde herausgetrennt und der Rest fachgerecht entsorgt.



Abbildung 24 Vapekörper und die entfernten "Innereien"

Der Akku hat eine runde Bauform. Plus- und Minuspol sind mit rotem und schwarzem Klebeband gekennzeichnet. Auf dem Akku befindet sich noch die Beschriftung 3.7V, 360mAh und 1.33Wh.

Vier von diesen Akkus wurden mit einem Lithium-Ladegerät auf 4 Volt geladen. Normalerweise können solche Akkus auf 4.2 Volt geladen werden, aber aus Gründen der Sicherheit blieb man etwas darunter. Es ist wichtig alle Zellen möglichst gleich geladen zu haben, da sie sich nach dem Zusammenschliessen rasant ausgleichen. Wenn die Unterschiede zu gross sind, könnten sie sich zu stark belasten und in Flammen aufgehen.

Mit 4 Volt kann man aber noch nicht viel anfangen. Darum wurden die Vier Akkus in Serie zusammengehängt. Dadurch addiert sich die Spannung auf 16 Volt. Das Ganze wurde dann an ein USB-Ladegerät angeschlossen, welches man normalerweise in einem Wohnwagen verbaut findet. Um zu funktionieren, benötigt es 12 bis 24 Volt. Das passt also.



Abbildung 26 LED wird betrieben

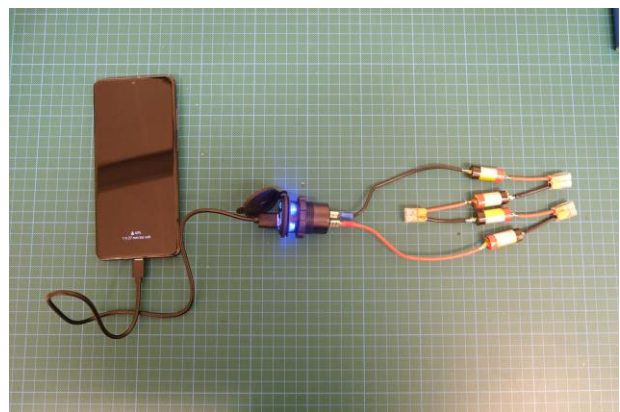


Abbildung 25 Smartphone wird geladen

Als kleiner Verbraucher wurde zuerst eine LED-Lampe angeschlossen. Als das funktionierte, wurde sehr kurz auch noch ein Smartphone geladen.

Die Vier Akkus zusammen haben zusammen 5.32 Wh. Die LED benötigt 1 Watt. Mit diesem Proof-of-Concept einer kleinen Powerbank kann die LED also über 5 Stunden betrieben werden. Der Akku des Smartphones hat eine Kapazität von 19.3 Wh. Es könnte mit der Powerbank also ca. um 25 Prozent geladen werden.

Das Ganze ist natürlich noch nicht sehr brauchbar. Dazu bräuchte man noch mehr Batterien und eine Platine, die ein sicheres Laden und Entladen ermöglicht.

Im Internet finden sich noch viele weitere Projekte, die mit diesen Akkus betrieben werden. Zu Beispiel kleine Computer wie der Raspberry Pi, Ventilatoren oder ganze E-Bikes. Der Fantasie sind hier keine Grenzen gesetzt. Batterien hat es leider genug.



Abbildung 27 Beispiel eines selbstgemachten E-Bike-Akkus

4.3 Ringspeicherkraftwerke

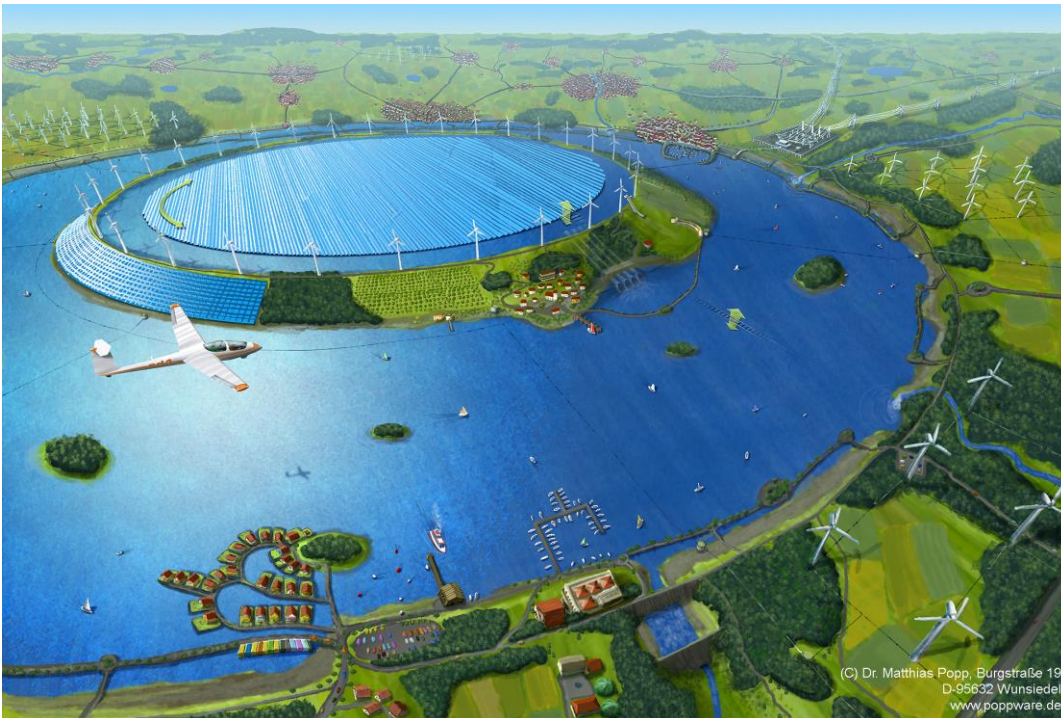


Abbildung 28 Konzeptzeichnung eines Ringspeicherkraftwerkes

Ein Ringspeicherkraftwerk ist eine Konzeptidee vom Ingenieurbüro Matthias Popp. Es ist eine spezielle Variante eines Pumpspeicherkraftwerks, welches auch in Gebieten ohne Bergen gebaut werden kann. Es besteht aus zwei Ringen. Mit dem Aushub des Unterbeckens wird der Ringwall für das Oberbecken errichtet. Es kann mit Solarzellen und Windkraftanlagen zu einem Hybridkraftwerk erweitert werden.

Die auf dem Bild dargestellte Grösse hat einen Durchmesser von 11 Kilometern. Die Wallhöhe liegt bei 215 Metern. Das Pegelspiel ist im Oberbecken 50 Meter und im Unterbecken 20 Meter. Da das Kraftwerk aber auf Langzeitspeicher ausgelegt ist, werden extreme Pegelstandänderungen nur sehr selten und sehr langsam passieren. Das untere Becken würde sich darum für Freizeitbeschäftigungen wie Wassersport oder im allgemeinen als Naherholungsgebiet anbieten.

Ein Bauwerk in dieser Grösse hätte eine Kapazität von ca. 700 GWh und mithilfe der zusätzlichen erneuerbaren Energieanlagen könnte es zwei Kernkraftwerke versorgungssicher ersetzen.

Der Bau einer solchen Anlage ist natürlich ein gigantisches Unterfangen. Aber es ist machbar. Alleine der Braunkohletagebau in Hambach erreicht im Endausbau ein bewegtes Erdbauvolumen von sieben Ringspeicherkraftwerken.

Die runde Form ist eine idealisierte Bauweise und natürlich nicht notwendig. In der Praxis würden dann natürliche Höhenunterschiede und andere bessere Gegebenheiten ausgenutzt, was viel wirtschaftlicher ist. Zum Beispiel kann es auch in Meeresnähe gebaut werden, was ein unteres Becken überflüssig macht.

Auch die Grösse kann den Begebenheiten angepasst werden, deutlich kleinere Ringspeicherkraftwerke können immer noch wirtschaftlich sein und verteilt über das ganze Land gebaut werden. Die einzige Voraussetzung ist die Verfügbarkeit von grossen Mengen an Wasser für die Erstbefüllung. (38) (39)

5 Anlagen und Pläne in der Schweiz

Das Bundesgesetz über eine sichere Stromversorgung wurde mit 68,7 Prozent Ja-Stimmen deutlich angenommen. Es tritt somit am 1. Januar 2025 in Kraft. Dabei wird vor allem die Produktion von Energie gefördert. Einerseits wird die finanzielle Förderung für den Ausbau von erneuerbaren Energien verlängert, auch werden die Verfahren für die Bewilligungen beschleunigt. Andererseits werden neue Reservekraftwerke und Notstromgruppen gebaut und Wasserkraft- und Wintergasreserven erhöht. Zusätzlich sind noch viele weitere Massnahmen geplant. Unter Anderem den Bau von 15 weiteren Stauseen.

5.1 Stauseen

Zum Speichern von Energie haben wir in der Schweiz schon rund 100 Stauseen. Allerdings verfügen nur etwa 15 von diesen Kraftwerken über ein Pumpsystem, um Energie aktiv einzuspeichern. Das Potenzial für Pumpspeicherkraftwerke ist aber noch nicht ganz ausgeschöpft. Durch das Abschmelzen der Gletscher werden zudem noch rund weitere 60 Standorte frei, die sich für den Bau von Stauseen oder Dämmen eignen. Sieben Standorte sind laut der Studie der ETH besonders vielversprechend. (40)

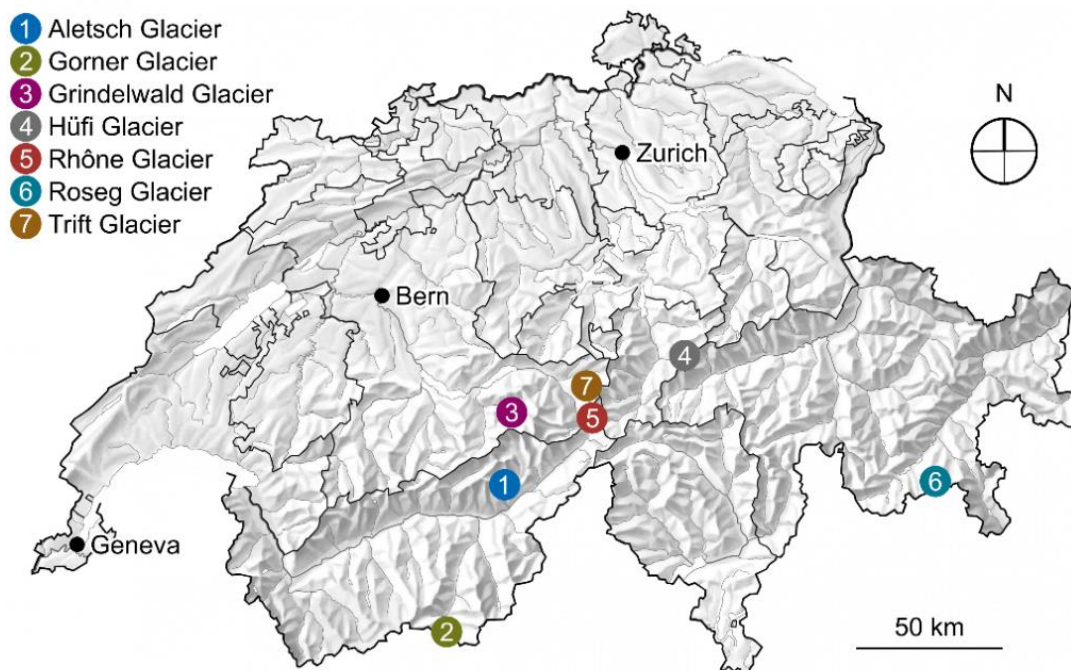


Abbildung 29 Mögliche Standorte für Gletscher ersetzende Pumpspeicherkraftwerke

Gletscher speichern auf eine natürliche Art im Winter gefrorenes Wasser in den Bergen und geben dieses durch Schmelzen langsam über das Jahr verteilt wieder ab. Stauseen könnten in diesem Fall die Rolle der Gletscher übernehmen. So können sie starke Regenfälle zurückhalten und Überschwemmungen verhindern und in Fällen von Dürren als Wasserreserve dienen. Wird dieses Wasser gebraucht, kann es einfach turbinieren und fliesst den natürlichen Weg des Wassers weiter.

5.2 Wasserstoff

5.2.1 Energie Uri

Andere Arten der Nutzung von überschüssiger Energie findet man zum Beispiel in Uri. Das Wasserkraftwerk in Bürglen (EWA Energie Uri) wird um die erste Wasserstoff-Produktionsanlage der Schweiz erweitert. Mithilfe von zwei PEM-Elektrolyseure werden jährlich bis zu 260 Tonnen grünen Wasserstoff produziert. Das ist umgerechnet der Jahresbedarf von ca. 50 Wasserstoff-Lastwagen. Der Wasserstoff kann dann an Avia Tankstellen als Treibstoff getankt werden. Auch das Motorschiff Saphir soll künftig auf dem Vierwaldstättersee mit Wasserstoff aus Bürglen betrieben werden. Die Investitionskosten für die Anlage belaufen sich auf 7.5 Millionen Franken und die Anlage soll noch im Jahr 2024 mit der Wasserstoffproduktion starten. (41)

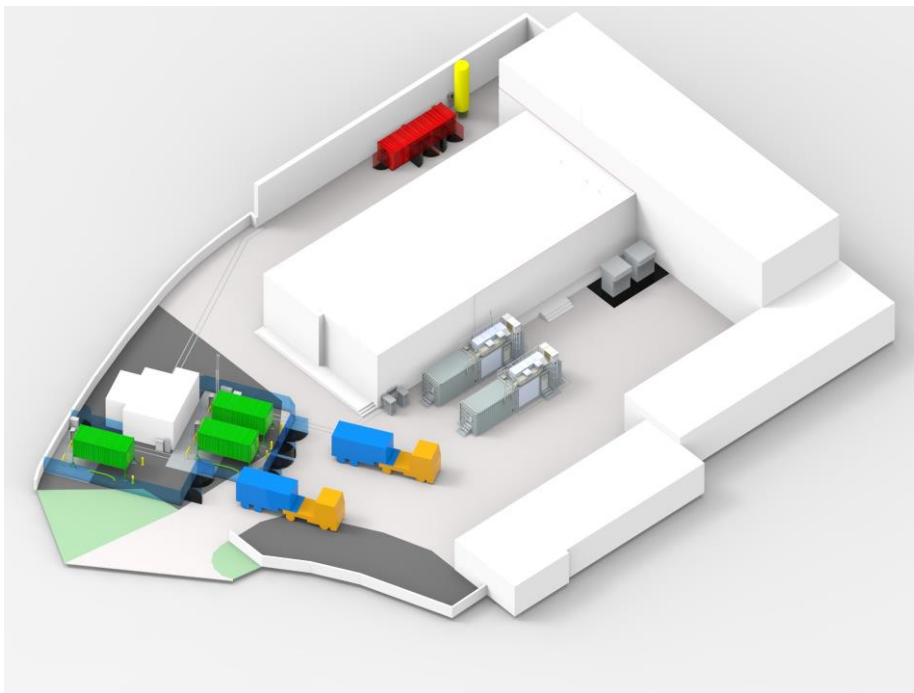


Abbildung 30 Geplante Anlage in Bürglen

Auf dem Bild sieht man die geplante Anlage. In der Mitte sieht man die zwei grauen Elektrolyseure. Sie sind jeweils in einem 40 Fuss Container installiert und haben je eine Leistung von 1 Megawatt. Die anfallende Prozesswärme wird in den Nahwärmeverbund von Bürglen eingespiesen. Der gelbe Tank oben, in der Mitte des Bildes, speichert den Wasserstoff bei ca. 30 Bar zwischen, bevor er dann links daneben im roten Verdichter auf 450 Bar verdichtet wird. Über ein Rohrsystem wird der Wasserstoff dann zur Abfüllstation geleitet und in mobile Speichercontainer gefüllt. Mit Lastwagen wird der Wasserstoff dann an Tankstellen und so weiter ausgeliefert.

Bei Volllast können um die 900 Kg Wasserstoff pro Tag produziert werden. Mit zwei Megawatt liegt der Stromverbrauch bei 48'000 KWh pro Tag, oder 53.33 KWh pro Kg Wasserstoff. Ein Kilo Wasserstoff kostet an der Tankstelle je nach Standort und Anbieter 10 bis 12 Franken. Mit 12 Franken gerechnet, erhält man 0.23 Franken pro eingesetzter KWh. Diese Berechnung lässt noch einige Variablen aus. Die Transport- oder Betriebskosten oder auch der Gewinn, der mit der Abwärme erzielt werden kann, sind noch nicht einbezogen. Mit einem durchschnittlichen Strompreis von 0.33 Franken pro KWh in Bürglen, rentiert es sich erst, wenn mehr Energie mit dem Fliesskraftwerk und der Photovoltaikanlage produziert wird, als gerade verbraucht wird.

Für ein Kilogramm Wasserstoff benötigen die Elektrolyseure 14 Liter Wasser. Bei 900 Kilogramm Wasserstoff sind das 12'600 Liter Wasser pro Tag. Die kleinste mittlere Abflussmenge im Schächen ist im Februar und beträgt 1.28 Kubikmeter pro Sekunde, oder mit anderen Worten, in nicht mal 10 Sekunden fliesst die Menge an Wasser, die für die Tagesproduktion benötigt wird. (42)

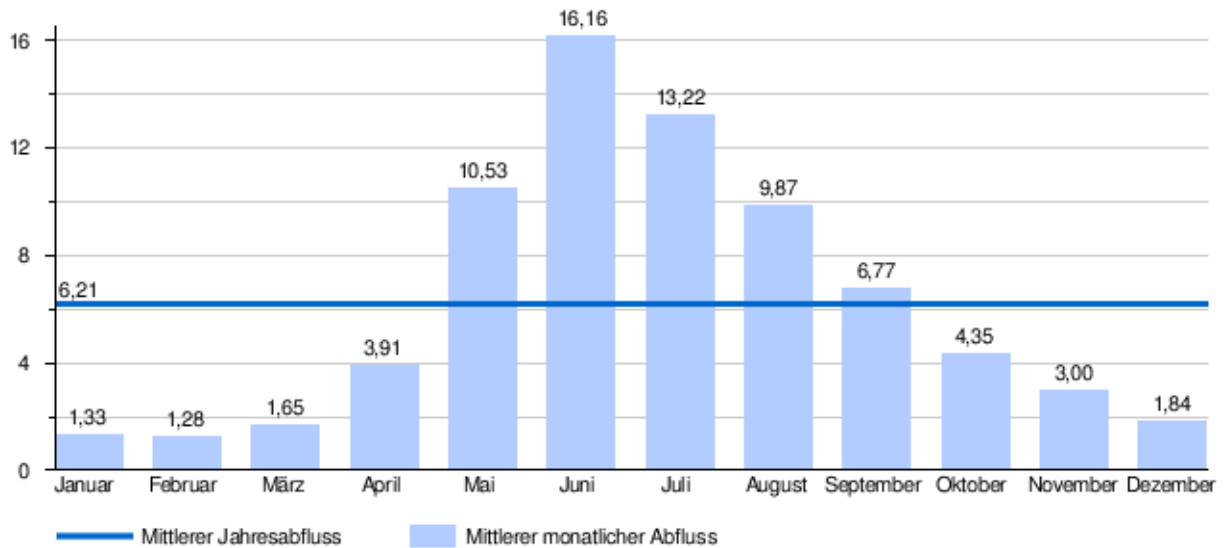


Abbildung 31 Jährliche Durchschnittsflussmenge Schächen

Stand Ende 2024 gibt es in der Schweiz erst 18 Tankstellen, an denen Wasserstoff getankt werden kann. (43) Diese befinden sich vor allem an wichtigen Verkehrsachsen. Im Allgemeinen ist der Transport von Wasserstoff ein wichtiger Preisfaktor. Vorzugsweise wird der Wasserstoff darum dort getankt, wo er auch produziert wird. Kurz- und Mittelfristig, solange das Tankstellennetz noch nicht vollständig ausgebaut ist, würde sich Wasserstoff für Transportunternehmen oder der öffentliche Verkehr lohnen. So können Lastwagen und Busse vor dem Start der Reise an der Heimatzentrale auftanken, wo der Wasserstoff in einer Anlage produziert wird. So eine Anlage könnte man auch im Heimathafen von Kursschiffen errichten und den öffentlichen Schiffsverkehr damit betreiben. (44)

5.2.2 SWOT-Analyse zu Wasserstoff

<p>Stärken:</p> <ul style="list-style-type: none"> Umweltfreundlichkeit Vielseitigkeit Langfristige Speicherung möglich 	<p>Schwächen:</p> <ul style="list-style-type: none"> Infrastruktur Verluste
<p>Chancen:</p> <ul style="list-style-type: none"> Diversifikation Innovationen 	<p>Risiken:</p> <ul style="list-style-type: none"> Ressourcenbedarf Konkurrenz durch andere Technologien

Stärken

Die Umweltfreundlichkeit ist sicher eine grosse Stärke. Mit Energie aus erneuerbaren Quellen kann ein Treibstoff hergestellt werden, welcher keine Treibhausgase ausstösst.

Wasserstoff ist ausserdem sehr vielseitig einsetzbar, so kann man mit ihm unterschiedlichste Fahrzeuge antreiben oder rückverstromen. Die Anlagen selbst können mehr oder weniger Ortsunabhängig aufgestellt werden, im Gegensatz zu Druckspeicher, die Kavernen benötigen, oder Pumpspeicher, die in Gebirgen gebaut werden müssen.

Mit guten Speichertanks kann der Wasserstoff über längere Zeit gespeichert bleiben.

Schwächen

Die Infrastruktur ist in der Schweiz noch kaum vorhanden. Wie oben erwähnt, befindet sich die erste Produktionsanlage noch im Bau und auch die Anzahl an Tankstellen ist mit 18, im Vergleich zu über 3000 Tankstellen mit fossilen Treibstoffen, sehr überschaubar.

Die Erzeugung von Wasserstoff benötigt grosse Mengen an Energie und die momentan erreichbare Effizienz ist geringer als bei anderen Speicherarten.

Chancen

Unterschiedliche Speicherarten benötigen unterschiedliche Materialien und bieten unterschiedliche Vorteile. Mit der Speicherung von Wasserstoff erhöht man die Versorgungssicherheit durch das Hinzufügen einer weiteren Energieart.

Weitere Innovationen können die Effizienz noch in mehreren Bereichen verbessern. Zum Beispiel bei der Elektrolyse oder bei den in Fahrzeugen verbauten Brennstoffzellen.

Risiken

Die Produktion ist von günstigem, überschüssigem Strom abhängig. Solange die Stromproduktion den Bedarf nicht übersteigt, rentiert es sich nicht Wasserstoff zu produzieren. Fortschritte in der Batterietechnologie oder in anderen alternativen Kraftstoffen könnten die Bedeutung von Wasserstoff als Energieträger schmälern.

5.3 Batterien

5.3.1 MW Storage AG

In Ingenbohl wird seit Oktober 2020 von der Firma MW Storage AG ein Batterie-Energie-Speicher-System (BESS) betrieben. Das System besteht aus 6 Schiffscontainer mit insgesamt 3179 Lithium-Ionen Batteriemodulen und hatte eine Leistung von 20 Megawatt. Nach einer Erweiterung hat der Speicher jetzt eine Leistung von 28 Megawatt. (45)

Dieser Speicher steht der Übertragungsnetzbetreiberin Swissgrid für die spontane Bereitstellung von Regelenergie zu Verfügung. Darum ist der ideale Ladezustand dieser Batterie bei 50 Prozent. So kann er jederzeit sehr schnell Energie abgeben, aber auch aufnehmen und so das Netz stabilisieren.

Nach dem Erfolg mit der Anlage in Ingenbohl ist die Firma MW Storage AG in ganz Westeuropa aktiv. Zum Beispiel bauten sie in Finnland ebenfalls eine 20-Megawatt-Batterie und sind momentan an ihrem grössten Projekt in Deutschland dran: eine 100-Megawatt-Anlage. (46)



Abbildung 32 In Betrieb genommene Anlage in Ingenbohl

5.3.2 Geplanter Batteriespeicher in Laufenburg

In Laufenburg AG wird ein neues Technologiezentrum errichtet. Neben einem Rechenzentrum für künstliche Intelligenz und einem Windkanal für Forschungs- und Entwicklungszwecken, soll als Herzstück die weltweit grösste und modernste Redox-Flow-Batterie gebaut werden. Sie wird eine Leistung von mehr als 500 Megawatt haben und über 1,2 Gigawattstunden speichern können.

Der Baustart soll spätestens im Frühling 2025 erfolgen und im Sommer 2028 abgeschlossen sein. Der geplante Bau ist mit 30 Metern eigentlich zu hoch. Der Gemeinderat müsste die Bestimmungen zugunsten des Projektes anpassen. Es wurde aber auch ein Bauprojekt mit nur 20 Metern Höhe eingereicht, um möglichst schnell mit dem Bau starten zu können.

Das Gebäudedach wird zudem mit einer Photovoltaikanlage von 8'400 Quadratmetern ausgestattet und die Abwärme vom Datencenter wird ins Fernwärmenetzwerk der Stadt Laufenburg eingespiesen. Dadurch erhofft man sich fossile Heizkraftwerke in der Nähe stillzulegen zu können oder sie zu Backup-Systeme umfunktionieren zu können. (47)



Abbildung 33 Konzeptzeichnung vom geplanten Gebäude von Flex Base

5.4 Weitere Speicher

5.4.1 Hubspeicherkraftwerke von Energie Vault

Die Firma Energie Vault testete im Tessin über ein Jahr erfolgreich ihren ersten Prototypen eines Kran basierenden Hubspeicherkraftwerk. Mittlerweile wurde dieses abgebaut und nach Indien geliefert. Jetzt wird ein Gebäude basierendes Hubspeicherkraftwerk getestet. Dazu werden die Betongewichte in Stockwerke unterschiedlicher Höhe eingelagert. (48)

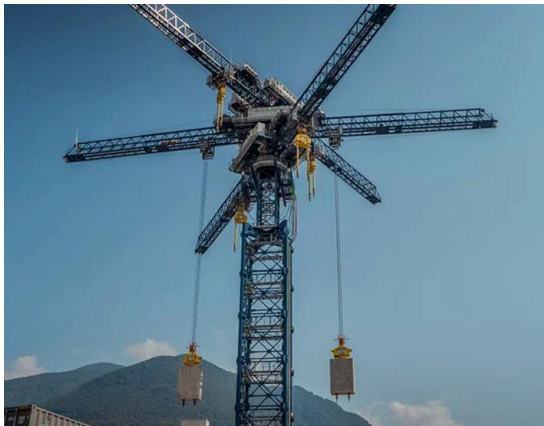


Abbildung 34 das alte Kransystem



Abbildung 35 das neue Gebäudesystem

5.4.2 Druckluftspeicher

Ein Pilotprojekt in Biasca nutzte einen ehemaligen Neat-Stollen um eine Druckluftspeicher des Typ 2 zu testen. Die Resultate zeigten, dass solche Speicher technisch machbar, wirtschaftlich betreibbar und ähnlich umweltfreundlich wie Pumpspeicher sind. Durch die vielen unterirdischen Hohlräume im wenig zerklüfteten Aare- und Gotthardgranit, hat die Schweiz grosses Potenzial für Druckluftspeicher. (49)

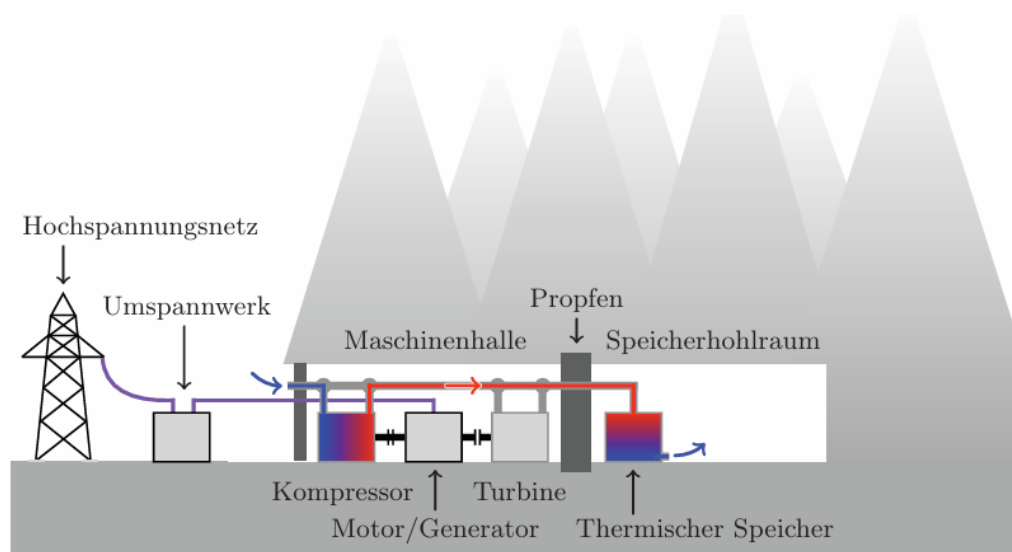


Abbildung 36 Beispielzeichnung eines Druckluftspeichers

6 Fazit

Das Ziel dieser Arbeit war es, wie auch in der Themeneingabe im Anhang nachzulesen, dem Leser die unterschiedlichen Speichermöglichkeiten näher zu bringen und die jeweiligen Vor- und Nachteile zu beschreiben. Auch wurden einige gebaute und geplante Anlagen angeschaut, mit denen man versucht in Zukunft die Energieversorgung mit nachhaltigen Energiequellen zwischenzuspeichern und so die Versorgung zu sichern. Dieses Ziel wurde erreicht. Viele werden dieser Arbeit etwas entnehmen können, was sie vorher nicht wussten.

Stand jetzt, im Jahr 2024, sind wir noch weit davon entfernt ganz auf nichterneuerbare Energiequellen zu verzichten. Doch mit den vielen, unterschiedlichen Forschungsansätze und Möglichkeiten, und dem nötigen Willen, ist es durchaus realistisch die Ziele der Energiestrategie 2050 zu erreichen.

Um dieses Ziel zu erreichen, gibt es noch weitere Ansätze, die in dieser Arbeit aber nicht angeschaut wurden. Zum Beispiel Fortschritte in der Energieeffizienz von Gebäuden und Geräten. Oder die weitere Einführung von smarten Geräten, die ihren Stromverbrauch an das Netz anpassen und dieses so entlasten. Auch sind in nächster Zeit einige revolutionäre Fortschritte in der Erzeugung von Energie zu erwarten, zum Beispiel im Bereich der Solarzellen.

Zu erwähnen ist auch, dass unser Stromnetz nicht an der Schweizer Grenze aufhört. Ganz Europa hängt am europäischen Verbundsystem und teilt sich das Angebot und die Nachfrage. Wichtig ist gemeinsam Lösungen zu finden, die für alle passen und so die politischen Beziehungen weiter zu verbessern. Nur gemeinsam schaffen wir den Umstieg auf erneuerbare Energien.

7 Lessons learned

Beim Erstellen dieser Arbeit ist vieles sehr gut gelaufen. Immerhin konnte sie fristgerecht eingereicht werden. Ich habe auch zum ersten Mal erfolgreich eine künstliche Intelligenz unterstützend eingesetzt. Natürlich schrieb sie keine Texte, sondern half nur zur Ideenfindung und lieferte Ansätze, auf die ich dann meine Recherche vertiefen konnte. Dabei zeigte sich auch die Wichtigkeit alles genau zu überprüfen und hinterfragen. Zum Beispiel liess ich die künstliche Intelligenz ein Mindmap zu Energiespeicher erstellen, was auch sehr gut funktionierte. Aber als zukünftige Technologie empfahl sie mir einen Quantenpunkte-Speicher. Schon nach kurzer Recherche stellte sich heraus, dass das ein Daten-Speicher, kein Energiespeicher ist. Das Arbeiten mit künstlichen Intelligenzen kann also durchaus eine Hilfe sein, aber man darf sich sicher noch nicht darauf verlassen. Das Mindmap findet man im [Angang](#).

Die Planung machte auch einige Probleme. Zu Beginn der Arbeit die benötigte Zeit für die einzelnen Themen festzulegen, war sehr schwierig. Beim Bearbeiten stellte sich dann heraus, dass gewisse Themen schneller abgearbeitet werden konnten, aber auch, dass Andere mehr Zeit in Anspruch nahmen. Hin und wieder musste auch auf Rückmeldungen von Drittpersonen gewartet werden, was den Zeitplan weiter durcheinanderbrachte.

Für eine nächste Arbeit wird die Planung sicher besser überdacht. Zum Beispiel könnten über den ganzen Zeitraum verteilt einzelne Tage freigehalten werden, um zeitaufwendige Themen aufzuholen. Das würde auch das Stressmanagement stark verbessern, da man an diesen Tagen nicht schon ein anderes Thema eingeplant hat.

Auch würde ich mehr und bessere Meilensteine zur Fortschrittskontrolle einplanen.

8 Persönliches Schlusswort

Die Energiewende ist im vollen Gange. Die Speicherung von Energie ist dabei ein wichtiger Stützfeiler. Aus dieser Arbeit kann sicher Jeder noch etwas neues zu Energiespeicher lernen. Ich selbst konnte viel Neues erfahren und es hat viel Spass gemacht über das Thema zu recherchieren. Ich war überrascht, wie viele Möglichkeiten es gibt und an wie vielen unterschiedlichen Punkten geforscht und verbessert wird. Auch gefällt mir gut, dass es für die unterschiedlichsten Begebenheiten massgeschneiderte Lösungen gibt. So kann man mit einer kleinen Redox-Flow-Batterie anfangen und diese dann irgendwann mit grösseren Tanks erweitern. Hat man Kavernen oder nicht mehr gebrauchte Tunnel, baut man einfach Druckluftspeicher. Technologische Fortschritte bei Batterien erhöhen die Reichweite und Sicherheit bei E-Autos. Wasserstoff senkt den CO₂-Ausstoss im Waren- und öffentlichen Personentransport. Die Beispiele hören fast nicht mehr auf.

Besonders interessant finde ich auch die Idee Pumpspeicherkraftwerke als Ersatz für unsere schmelzenden Gletscher einzusetzen und so die Auswirkungen des Klimawandels immerhin reduzieren zu können.

Alles in Allem blicke ich positiver in die Zukunft als auch schon.

9 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen bedanken, die mich während der Erstellung dieser Diplomarbeit unterstützt und begleitet haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer, Stefan Schmidt, für seine Unterstützung, Anregungen und konstruktiven Ratschläge. Sie waren mir eine grosse Hilfe.

Einen grossen Dank richte ich auch an meine Familie und meine Freunde, für ihre Inputs, ihre Geduld und ihren Rückhalt, welcher ich während der ganzen Zeit spüren konnte.

Dessweiteren möchte ich mich bei der Firma EnergieUri AG für die Einblicke in ihr Unternehmen danken. Die Informationen waren sehr interessant und äusserst lehrreich.

Zu guter Letzt möchte ich mich auch bei meinen Mitschülern und meinen Dozenten bedanken. Die Zeit, die ich mit euch verbringen durfte, verflog wie im Flug, doch sie wird in guter Erinnerung bleiben. Ich freue mich schon darauf, mein erlangtes Wissen anzuwenden.

10 Anhang

10.1 Redlichkeitserklärung

Die Verfasserin/der Verfasser bestätigt mit ihrer/seiner Unterschrift, dass die vorliegende Arbeit selbstständig, ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt wurde.

Die aus fremden Quellen (einschliesslich elektronischer Quellen) direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht vorgelegt worden.

Datum/Ort: 11.11.2024 / Isleten

Unterschrift:



Thomas Wipfli

10.2 Themeneingabe Diplomarbeit

Thema: Energiespeicherung Heute und Morgen

Kurzbeschreibung: Die Energiewende ist im vollen Gange. Beinahe auf jedem Neubau in der Schweiz wird die Sonne auf die eine oder andere Art genutzt und auch viele Windanlagen werden geplant und gebaut. Dazu kommen noch weitere unterschiedliche Arten von Kraftwerken, die unseren steigenden Bedarf an Energie bereitstellen sollen. Um den Betrieb unseres Netzes auch in der Nacht und bei Windstille sicherstellen zu können, werden aber Möglichkeiten gebraucht, um die Energie kurz- und langfristig zu speichern. Das ist aber leider nicht sehr einfach. Unsere momentanen Möglichkeiten sind teilweise noch nicht sehr ausgereift, teilweise nicht sehr nachhaltig und vor allem der breiten Bevölkerung nicht sehr geläufig. Im Rahmen dieser Diplomarbeit werde ich mich mit bestehenden Anlagen und Technologien befassen und herausfinden, mit welchen Möglichkeiten wir in Zukunft unsere Energie speichern.

Erfolgskriterien: Nach dem Lesen meiner Arbeit sollte Jeder über ein fundiertes Wissen über Energiespeichermöglichkeiten und deren Zukunft haben.

10.3 Terminplan SOLL

Zeitplan Soll	
Woche	Datum
1	16.09.2024
	17.09.2024
	18.09.2024
	19.09.2024
	20.09.2024
	21.09.2024
2	22.09.2024
	23.09.2024
	24.09.2024
	25.09.2024
	26.09.2024
	27.09.2024
3	28.09.2024
	29.09.2024
	30.09.2024
	01.10.2024
	02.10.2024
	03.10.2024
4	04.10.2024
	05.10.2024
	06.10.2024
	07.10.2024
	08.10.2024
	09.10.2024
5	10.10.2024
	11.10.2024
	12.10.2024
	13.10.2024
	14.10.2024
	15.10.2024
6	16.10.2024
	17.10.2024
	18.10.2024
	19.10.2024
	20.10.2024
	21.10.2024
7	22.10.2024
	23.10.2024
	24.10.2024
	25.10.2024
	26.10.2024
	27.10.2024
8	28.10.2024
	29.10.2024
	30.10.2024
	31.10.2024
	01.11.2024
	02.11.2024
	03.11.2024
	04.11.2024
	05.11.2024
	06.11.2024
	07.11.2024
	08.11.2024
	09.11.2024
	10.11.2024
	11.11.2024

- Aburbarung
- Grundrecherche
- Überblick Spielarten
- mechanisch
- elektrisch
- chemisch
- thermisch
- Schweiß
- Weilwehre Anlagen
- zukünftige technologien
- Zusammenfassung
- Bildersuche Triebblatt usw.
- letzte Anpassungen
- Formulierung
- Spielraum für Notfälle
- Angabe

Meilenstein recherche Arten

1. Besprechung

Meilenstein EWA

Meilenstein Fertigstellung Schreibeitl

2. Besprechung 14:00

10.4 Terminplan IST

Zeitplan IST		Woche
Datum		
Abfahrplanung		
Grundrecherche		
Überblick Speicherarten		
mechanisch		
elektrisch		
chemisch		
thermisch		
Schweiß		
Weitverle Anlagen		
zukünftige Technologien		
Zusammenfassung		
Bildersuche Triebblattsw.		
letzte Anpassungen		
Formatierung		
Spezialum für Notfälle		
Abgabe		
16.09.2024		1
17.09.2024		
18.09.2024		
19.09.2024		
20.09.2024		
21.09.2024		2
22.09.2024		
23.09.2024		
24.09.2024		
25.09.2024		
26.09.2024		3
27.09.2024		
28.09.2024		
29.09.2024		
30.09.2024		
01.10.2024	Meilenstein recherche	4
02.10.2024		
03.10.2024		
04.10.2024		
05.10.2024		
06.10.2024		5
07.10.2024		
08.10.2024		
09.10.2024		
10.10.2024		
11.10.2024		6
12.10.2024		
13.10.2024		
14.10.2024		
15.10.2024	1. Besprechung	
16.10.2024	Meilenstein EWA	7
17.10.2024		
18.10.2024		
19.10.2024		
20.10.2024		
21.10.2024		8
22.10.2024		
23.10.2024		
24.10.2024		
25.10.2024		
26.10.2024	Meilenstein Fertigstellt	9
27.10.2024		
28.10.2024		
29.10.2024		
30.10.2024	2. Besprechung 14:00	
31.10.2024		10
01.11.2024		
02.11.2024		
03.11.2024		
04.11.2024		
05.11.2024		11
06.11.2024		
07.11.2024		
08.11.2024		
09.11.2024		
10.11.2024		12
11.11.2024		

10.5 Quellenverzeichnis


- (1) [Vorlage für eine sichere Stromversorgung \(admin.ch\)](#)
- (2) [Solarpflicht bei Neubauten: Umsetzung der dringlichen Massnahmen \(swissolar.ch\)](#)
- (3) [Pumpspeicherkraftwerk – Wikipedia](#)
- (4) [Hubspeicherkraftwerk – Wikipedia](#)
- (5) [Potentielle Energie • einfach erklärt, Formel · \[mit Video\]](#)
- (6) <https://de.wikipedia.org/wiki/Druckluftspeicherkraftwerk>
- (7) <https://www.energie-experten.ch/de/wissen/detail/wie-speichert-die-schweiz-in-zukunft-ihre-energie.html#a1e1-aid>
- (8) [Kompressionsarbeit - Lexikon der Physik](#)
- (9) <https://de.wikipedia.org/wiki/Schwungradspeicherung>
- (10) [Rotationsenergie: Formel, Einheit & Berechnung](#)
- (11) [Akkuarten - Welche Typen gibt es? & was ist der Unterschied? \(alles-mit-akku.de\)](#)
- (12) https://de.wikipedia.org/wiki/Elektrochemische_Spannungsreihe
- (13) [Bleiakkumulator – Wikipedia](#)
- (14) [Nickel-Eisen-Akkumulator – Wikipedia](#)
- (15) [Lithium-Ionen-Akkumulator – Wikipedia](#)
- (16) <https://de.wikipedia.org/wiki/Redox-Flow-Batterie>
- (17) [Kondensator \(Elektrotechnik\) – Wikipedia](#)
- (18) [Supercapacitors explained - the future of energy storage?](#)
- (19) [Could Ultracapacitors Replace Batteries in Future Electric Vehicles?](#)
- (20) [ABB Sells First Order for 15-Second Bus Charging | Greentech Media](#)
- (21) [Wasserstoffspeicherung – Wikipedia](#)
- (22) [Grüner Wasserstoff - Infos & Einordnung | EWE AG](#)
- (23) <https://de.wikipedia.org/wiki/Power-to-Gas>
- (24) <https://de.wikipedia.org/wiki/Wärmespeicher>
- (25) <https://de.wikipedia.org/wiki/Thermovoltaik>
- (26) [Sonnenwärmekraftwerk – Wikipedia](#)
- (27) <https://edison.media/umwelt/neues-verfahren-zur-lithium-gewinnung-aus-salzwasser/25251638/>
- (28) [Direct-Lithium-Extraction-DLE-An-introduction-ILiA-June-2024-v.1-English-web.pdf](#)

- (29) [Enhanced lithium separation from brines using nanofiltration \(NF\) technology: A review - ScienceDirect](#)
- (30) [Nanofiltration – Wikipedia](#)
- (31) <https://de.wikipedia.org/wiki/Festk%C3%B6rperakkumulator>
- (32) <https://de.wikipedia.org/wiki/Natrium-Ionen-Akkumulator>
- (33) https://efahrer.chip.de/e-wissen/reparieren-weiterverwenden-recyclen-das-passiert-mit-alten-e-auto-akkus_104229#A4
- (34) <https://cleantechnica.com/2022/09/21/surprise-nissan-leaf-batteries-last-much-longer-than-expected/>
- (35) <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/laden/elektroauto-batterie/>
- (36) [Einweg-Vapes: So will man das Recycling-Problem in den Griff bekommen](#)
- (37) [Turning Disposable Vapes into a Fast Charge Power Bank](#)
- (38) <http://www.ringwallspeicher.de/>
- (39) http://www.poppware.de/Veranstaltungen/Matthias_Popp_Ringwallspeicher_Geotechnik_Tag_Muenchen_2012.pdf
- (40) <https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/vaw/vaw-dam/documents/das-institut/mitteilungen/2010-2019/248.pdf>
- (41) <https://h2uri.ch/>
- (42) <https://de.wikipedia.org/wiki/Sch%C3%A4chen>
- (43) <https://www.glpautogas.info/de/wasserstoff-tankstellen-schweiz.html>
- (44) <https://www.ewe.com/de/zukunft-gestalten/wasserstoff/wasserstoff-anwendungen>
- (45) <https://ews.ch/news/batterie-energie-speicher-system>
- (46) <https://infrastructure.reichmuthco.ch/en/news/reichmuth-infrastructure-and-mw-storage-are-building-a-100-mw-battery-storage-power-plant/>
- (47) <https://flexbase.ch/projekt>
- (48) <https://www.energyvault.com/>
- (49) https://www.stromzeit.ch/blog/energiewende-6/schweizer-speicherkraftwerke-in-den-bergen-druckluftspeicher-174#blog_content

10.6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Exemplarische Zeichnung eines Pumpspeicherkraftwerkes	6
Abbildung 2 Kranaufbau eines Hubspeicherkraftwerkes	7
Abbildung 3 Exemplarische Zeichnung eines Druckluftspeichers	9
Abbildung 4 Moderner Aufbau eines Schwungrades	11
Abbildung 5 Formel für unterschiedliche, drehende Körper	12
Abbildung 6 Exemplarische Zeichnung eines galvanischen Elementes	13
Abbildung 7 Blei-Akku in einem Gabelstapler Abbildung 8 Starterbatterie eines Autos	14
Abbildung 9 Aufbau eines Nickel-Akkus.....	15
Abbildung 10 Drohnenakku	16
Abbildung 11 Wohnwagenakku	16
Abbildung 12 E-Autobatterie	16
Abbildung 13 Beispiel für den Aufbau einer Redox-Flow-Batterie.....	17
Abbildung 14 Exemplarischer Aufbau eines einfachen Kondensators	18
Abbildung 15 Super- oder auch Ultrakondensator	18
Abbildung 16 Konzeptbild einer Wasserstoffanlage	19
Abbildung 17 Fließbild zur Dampfpreformierung.....	20
Abbildung 18 Einfaches Fließbild zum erweiterten Power-to-Gas Prozess	21
Abbildung 19 Aus einem Buch kopierte Tabelle über unterschiedliche Medien	22
Abbildung 20 Turm basierendes Kraftwerk	23
Abbildung 21 Rillen basierendes Kraftwerk.....	23
Abbildung 22 Lithiumbecken in unterschiedlichen Konzentrationstadien	24
Abbildung 23 Vergleich der Porengrößen	26
Abbildung 24 Vapekörper und die entfernten "Innereien".....	28
Abbildung 26 Smartphone wird geladen	29
Abbildung 25 LED wird betrieben.....	29
Abbildung 27 Beispiel eines selbstgemachten E-Bike-Akkus.....	29
Abbildung 28 Konzeptzeichnung eines Ringspeicherkraftwerkes	30
Abbildung 29 Mögliche Standorte für Gletscher ersetzende Pumpspeicherkraftwerke	31
Abbildung 30 Geplante Anlage in Bürglen	32
Abbildung 31 Jährliche Durchschnittsflussmenge Schächten	33
Abbildung 32 In Betrieb genommene Anlage in Ingenbohl.....	35
Abbildung 33 Konzeptzeichnung vom geplanten Gebäude von Flex Base	36
Abbildung 34 das alte Kransystem	37
Abbildung 35 das neue Gebäudesystem.....	37
Abbildung 36 Beispielzeichnung eines Druckluftspeichers	37

10.7 Erweiterte Tabelle zu der elektrochemischen Spannungsreihe

Red. \leftrightarrow Ox + e ⁻	E ⁰ [V]	
Li \leftrightarrow Li⁺ + e⁻	-3.045	 <ul style="list-style-type: none"> ➤ Oxidierbarkeit nimmt zu ➤ Reduktionsvermögen nimmt zu ➤ Metalle werden unedler
K \leftrightarrow K ⁺ + e ⁻	-2.925	
Ca \leftrightarrow Ca ²⁺ + 2e ⁻	-2.866	
Na \leftrightarrow Na ⁺ + e ⁻	-2.714	
Mg \leftrightarrow Mg ²⁺ + 2e ⁻	-2.363	
Al \leftrightarrow Al ³⁺ + 3e ⁻	-1.662	
Mn \leftrightarrow Mn ²⁺ + 2e ⁻	-1.180	
Zn \leftrightarrow Zn ²⁺ + 2e ⁻	-0.7627	
Cr \leftrightarrow Cr ³⁺ + 3e ⁻	-0.744	
Cd \leftrightarrow Cd ²⁺ + 2e ⁻	-0.4029	
Fe \leftrightarrow Fe ²⁺ + 2e ⁻	-0.4002	
Co \leftrightarrow Co ²⁺ + 2e ⁻	-0.277	
Ni \leftrightarrow Ni ²⁺ + 2e ⁻	-0.250	
Pb \leftrightarrow Pb ²⁺ + 2e ⁻	-0.126	
H₂ \leftrightarrow 2H⁺ + 2e⁻	±0.0000	
CH ₄ \leftrightarrow C + 4H ⁺ + 4e ⁻	+0.1316	
Cu ⁺ \leftrightarrow Cu ²⁺ + e ⁻	+0.153	
Cu \leftrightarrow Cu ²⁺ + 2e ⁻	+0.337	
2OH ⁻ \leftrightarrow ½ O ₂ + H ₂ O + 2e ⁻	+0.401	
I ⁻ \leftrightarrow ½ I ₂ + e ⁻	+0.5355	
Fe ²⁺ \leftrightarrow Fe ³⁺ + e ⁻	+0.771	
Ag \leftrightarrow Ag⁺ + e⁻	+0.7991	
Hg \leftrightarrow Hg ²⁺ + 2e ⁻	+0.854	
Hg ₂ ²⁺ \leftrightarrow 2Hg ²⁺ + 2e ⁻	+0.9075	
Pd \leftrightarrow Pd ²⁺ + 2e ⁻	+0.987	
Br ⁻ \leftrightarrow ½ Br ₂ + e ⁻	+1.0652	
Pt \leftrightarrow Pt²⁺ + 2e⁻	~+1.2	
Cl ⁻ \leftrightarrow ½ Cl ₂ + e ⁻	+1.3595	
Au ⁺ \leftrightarrow Au ³⁺ + 2e ⁻	+1.402	
Au \leftrightarrow Au³⁺ + 3e⁻	+1.498	
Pb ²⁺ \leftrightarrow Pb ⁴⁺ + 4e ⁻	+1.80	
Ag ⁺ \leftrightarrow Ag ²⁺ + e ⁻	+1.980	
F ⁻ \leftrightarrow ½ F ₂ + e ⁻	+2.87	
HF (aq) \leftrightarrow ½ F₂ + H⁺ + e⁻	+3.06	

Einige Standard-Reduktionspotentiale, übernommen aus:
Küster, Thiel, Rechentafeln für die Chemische Analytik, 1985, 103. Auflage

10.8 AI-generiertes Mindmap zu Energiespeicher

1. Mechanische Energiespeicher

- *Pumpspeicherkraftwerke*
 - Wasser wird hochgepumpt und bei Bedarf wieder abgelassen
- *Druckluftspeicher*
 - Komprimierte Luft wird gespeichert und bei Bedarf entspannt
- *Schwungradspeicher*
 - Rotationsenergie in einem Schwungrad gespeichert

2. Elektrische Energiespeicher

- *Batteriespeicher*
 - Lithium-Ionen-Batterien
 - Blei-Säure-Batterien
 - Festkörperbatterien
- *Superkondensatoren*
 - Schnelle Speicherung und Freisetzung von Energie

3. Chemische Energiespeicher

- *Wasserstoffspeicher*
 - Umwandlung von Strom in Wasserstoff (Power-to-Gas)
- *Methanspeicher*
 - Speicherung als synthetisches Methan
- *Redox-Flow-Batterien*
 - Energie durch Redox-Reaktionen gespeichert

4. Thermische Energiespeicher

- *Sensible Wärmespeicher*
 - Speicherung durch Temperaturänderung (z.B. Warmwasser)
- *Latentwärmespeicher*
 - Speicherung durch Phasenwechsel (z.B. Schmelzvorgänge)
- *Thermochemische Speicher*
 - Nutzung chemischer Reaktionen zur Energiespeicherung

5. Zukünftige Technologien

- *Graphen-basierte Speicher*
- *Organische Batterien*
- *Quantenpunkte-Speicher*