



## Ziele der Unterrichtseinheit

- Die Schüler/innen setzen sich kreativ mit der Problematik der verlustarmen Speicherung von elektrischem Strom in großem Maßstab auseinander.
- Die Schüler/innen erarbeiten eine Vorstellung der Speicherkapazität eines realen Pumpspeicherkraftwerks im Vergleich zu Autobatterien.
- Die Schüler/innen diskutieren das Konzept der „Smart Meter“ und bilden sich eine eigene Meinung zu Vorteilen und Problematik dieser Technologie.
- Die Schüler/innen erarbeiten Überblickswissen zu diversen Speichertechnologien für elektrischen Strom.
- Die Schüler/innen erarbeiten im Rollenspiel die Kompetenz, eine sinnvolle Lösungsstrategie für eine komplexe Problemstellung im demokratischen Prozess zu identifizieren.

## Fächer und Altersstufe

- Physik, Deutsch, Geografie, wirtschaftliche Fächer
- Ab der 10. Schulstufe

## Dauer der Einheit

2–3 Unterrichtsstunden

## Benötigte Materialien

Internetzugang zum Recherchieren (Computer oder Smartphones)

## Möglicher Unterrichtsverlauf

- 1 Thematisieren Sie die Problematik, dass Überschussstrom sofort gespeichert werden muss, da er sonst ungenutzt verloren geht.
- 2 Erarbeiten Sie mit den Schüler/innen die grundlegende Funktionsweise eines Pumpspeicherkraftwerks.
- 3 Unterstützen Sie die Schüler/innen bei der Abschätzung der Speicherkapazität des Stausees Mooserboden/Kaprun.
- 4 Regen Sie ein möglichst kreatives Team-Brainstorming über unkonventionelle und ausgefallene Ideen zum lokalen Speichern von überschüssigem Strom an.
- 5 Moderieren Sie die gemeinsame Bewertung der gefundenen Ideen im Team.
- 6 Unterstützen Sie die Schüler/innen in der Recherche der Vor- und Nachteile verschiedener gängiger oder zukünftiger Speichersysteme für Überschussstrom.
- 7 Thematisieren Sie die Vorteile, aber auch die Problematik von „Smart Metern“ und regen Sie eine Diskussion über die Meinungen der Schüler/innen zu diesem Thema an.
- 8 Inszenieren Sie das Rollenspiel „Gemeinderats-sitzung“ mit Inputs aus den „Expert/innen-Teams“ und anschließender Abstimmung über die zu realisierende Lösung.
- 9 Zeit für Feedback

## Hintergrundinformationen

Während fossile Energieträger in großen Mengen auch über lange Zeit praktisch verlustfrei in Tanks gelagert werden können, ist die Speicherung von elektrischer Energie nach wie vor eine große Herausforderung. Akkus sind teuer, schwer, entladen sich mit der Zeit von selbst und verfügen über eine begrenzte Lebensdauer. Für das Speichern großer Energiemengen sind sie daher kaum geeignet. Um elektrische Energie im großen Maßstab zu speichern, verfügt Österreich über einige Pumpspeicherkraftwerke. Normalerweise leitet man das Wasser aus dem Stausee durch eine Rohrleitung auf die Turbine und erzeugt Strom. Vor allem kurzfristiger Spitzenbedarf kann so abgedeckt werden. Im Pumpspeicherkraftwerk wird das Wasser unter

der Turbine in einem zweiten Staubecken aufzufangen, um den Prozess bei Bedarf umkehren zu können: Mit dem überschüssigen Strom aus anderen Kraftwerken wird das Wasser vom unteren in den oberen Stausee gepumpt und erst später bei Bedarf verwendet. Im Kraftwerk Kaprun (Limbeck II) können dabei die beiden Generatoren, die normalerweise selbst Strom erzeugen, direkt mit externem Überschussstrom angesteuert und als Motoren betrieben werden. Die Turbinenräder pumpen dann das Wasser zurück in den oberen Speichersee. Außer einer intelligenten Steuerung ist daher für den Pumpbetrieb kein zusätzlicher technischer und baulicher Aufwand nötig.

Zur Abschätzung der Speicherkapazität des als Pumpspeicher genutzten oberen Speichersees Mooserboden in Kaprun (siehe Abbildung auf dem Arbeitsblatt für Schüler/innen):

- Fassungsvermögen: ca. 85 Mio m<sup>3</sup>, daher ist die Masse  $m = 85 \cdot 10^9 \text{ kg}$
- Mittlere Fallhöhe:  $h = 365 \text{ m}$
- Fallbeschleunigung:  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
- Potenzielle Energie:  $E = m \cdot g \cdot h$
- $E = 85 \cdot 10^9 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 365 \text{ m} \approx 304 \cdot 10^{12} \text{ J}$
- Für die Umrechnung in kWh:  
 $1 \text{ J} = 1 \text{ Ws}$ ,  $1 \text{ h} = 60 \text{ min} = 60 \cdot 60 \text{ s} = 3600 \text{ s}$
- $E = 304 \cdot 10^{12} \text{ J} = 304 \cdot 10^{12} \text{ Ws} \approx 85 \cdot 10^9 \text{ Wh} = 85 \cdot 10^6 \text{ kWh}$

Zum Vergleich – technische Daten einer typischen PKW-Autobatterie (Bleiakku):

- Spannung: 12V, Nennladung: 45Ah, Längenabmessung: 20 cm
- Energiegehalt:  $45 \text{ Ah} \cdot 12 \text{ V} = 540 \text{ Wh}$

Wie lange müsste eine Reihe aneinandergelagerter Autobatterien sein, um dieselbe Energiemenge zu speichern wie der Stausee Mooserboden?

- 5 Batterien passen aneinandergereiht auf 1 m und haben eine Kapazität von ca. 2,7 kWh.
- Länge der Reihe bei  $85 \cdot 10^6 \text{ kWh}$  Gesamtenergie und  $2,7 \text{ kWh/m}$ :
- $85 \cdot 10^6 / 2,7 \text{ m} \approx 31 \cdot 10^6 \text{ m} = 31.000 \text{ km}$  (mehr als  $\frac{3}{4}$  des Äquatorumfangs!)

Um die in den Stausee Mooserboden „gepumpte“ elektrische Energie in Autobatterien zu speichern, bräuchte man eine beinahe um die ganze Erde reichende Reihe von Bleiakkus!

## Speichermethoden für elektrischen Strom: Powertower

Quelle: Klima- und Energiefonds, [www.klimafonds.gv.at](http://www.klimafonds.gv.at)

Der Powertower ist ein neuer hydraulischer Energiespeicher und basiert auf der jahrelang erprobten Technologie der Pumpspeicherkraftwerke. Beim Powertower handelt es sich um ein geschlossenes System, welches topografieunabhängig nahe an Standorten volatiler Energieerzeugung angeordnet werden kann. Es besteht aus einem mit Wasser gefüllten Zylinder, in dem sich eine vertikal bewegliche Auflastkonstruktion befindet. Die Auflast bewirkt durch die Dichte ihres Materials und ihr Höhenmaß, unabhängig von ihrer Position, eine konstante Druckerhöhung im darunter befindlichen Reservoir. Durch zusätzliche Federkonstruktionen lässt sich die Druckhöhe wegabhängig noch erhöhen. Zur Energiespeicherung wird Wasser aus dem oberen in das untere Reservoir gepumpt, wodurch die Auflast im Zylinder aufsteigt und der Energiegehalt zunimmt (Auflast oben = geladener Zustand). Um die gespeicherte Energie wieder freizugeben, wechselt die Richtung des Förderstroms, die Auflast sinkt ab und treibt eine Turbine an. Somit kann elektrische Energie mit hohem Wirkungsgrad (~85%) standortunabhängig gespeichert werden.

## Kurzinformation zu weiteren Speichersystemen für Überschussstrom

(Quelle: Zentrum für Energieforschung Stuttgart, [www.zfes.uni-stuttgart.de](http://www.zfes.uni-stuttgart.de))

### Pumpspeicherwerke

Pumpspeicherwerke (PSW) sind den mechanischen, indirekten Elektroenergiespeichern zuzuordnen, da sie elektrische Energie in Form von potenzieller Energie von Wasser speichern. PSW sind aus zwei Speicherbecken aufgebaut, die sich auf verschiedenen geodätischen Höhenniveaus befinden. Während des Ladevorganges wandeln Elektromotoren elektrische Energie erst in mechanische Energie. Pumpen wandeln diese in potenzielle Energie, indem Wasser vom Unterbecken durch Rohrleitungen in das höher liegende Oberbecken befördert wird. In Strommangelzeiten kann das im Oberbecken gespeicherte Wasser über Turbinen wieder in das Unterbecken geleitet werden, wodurch aus der potenziellen Energie mechanische Energie und mithilfe von Generatoren wieder elektrische Energie entsteht.

### Druckluftspeicherkraftwerke

Druckluftspeicherkraftwerke (CAES – Compressed air energy storage) wandeln während des Ladevorgangs elektrische Energie in mechanische Energie um. Das geschieht durch Kompression von Umgebungsluft in einem Verdichter und anschließender Speicherung der erzeugten Druckluft in einer unterirdischen Kaverne. Beim Entladen wird die Druckluft aus der Kaverne über Turbinen geleitet und dort entspannt. Ein den Turbinen nachgeschalteter Generator wandelt die mechanische Energie wieder in Strom um und gibt sie an das Netz ab. Elektrische Energie treibt einen Motor an, der eine Verdichtereinheit betreibt. Der Verdichter komprimiert Umgebungsluft in einer oder mehreren Verdichterstufen auf das benötigte Druckniveau. Dabei wird thermische Energie frei. Um die Verdichter durch die hohen Temperaturen bei der Kompression nicht zu stark zu belasten, wird das Arbeitsmedium zwischen- und nachgekühlt. Die komprimierte Luft wird anschließend in unterirdischen Kavernen zwischengespeichert. Im Bedarfsfall wird die Druckluft in einer Gasturbine wieder expandiert. Dabei muss Erdgas zugefeuert werden, um die Turbine auf Betriebstemperatur bzw. über der Vereisungsgrenze zu halten. Die Turbine treibt einen Generator an, der die mechanische Energie wieder in elektrische Energie umwandelt und ins Netz einspeist. Bei einem diabaten Druckluftspeicherkraftwerk geht die frei werdende thermische Energie verloren, bei einem adiabaten Kraftwerk wird sie gespeichert und im Prozess wiederverwendet.

### Wasserstoffspeicher

Bei der Wasserelektrolyse wird elektrische Energie in chemische Energie gewandelt und in Form von Wasserstoff gespeichert. Der so erzeugte Energieträger eignet sich zur Speicherung und bedarfsgerechten Rückverstromung, bspw. in Brennstoffzellen oder in kombinierten Gas- und Dampfkraftwerken. Das Prinzip der Wasserelektrolyse beruht darauf, dass Wasser durch elektrische Energie in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten wird. Zwei Verfahren sind heute Stand der Technik: die alkalische Elektrolyse mit flüssigen Elektrolyten und die saure Elektrolyse mit Polymer-Elektrolyt-Membran (PEM). Daneben gibt es die Hochtemperaturelektrolyse, die sich aber noch im Entwicklungsstadium befindet.

### Methanisierung von Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid – Power-to-Gas

Beim Power-to-Gas-(PtG-)Verfahren wird nach der Wasserelektrolyse eine weitere Stufe, die Methanisierung, angeschlossen. Bei der Methanisierungsreaktion verbindet sich Wasserstoff ( $H_2$ ) mit dem Kohlenstoff des Kohlenstoffdioxids ( $CO_2$ ) zu Methan ( $CH_4$ ) und mit dem Sauerstoff ( $O_2$ ) zu Wasser ( $H_2O$ ). Dieser weitere Umwandschritt ist wiederum mit Energieeinsatz und entsprechenden Verlusten behaftet. Die Vorteile des Verfahrens liegen jedoch im Speicherpotenzial der verfügbaren Erdgas-Infrastruktur und der vielfältigen Nutzungsoptionen. Durch die Methanisierung steigt der volumetrische Energiegehalt um bis zu 300% gegenüber reinem Wasserstoff. Ohne weitere Anpassungen kann Wasserstoff lediglich zu einem niedrigen Prozentsatz in das bestehende Erdgasnetz als Zusatzgas eingespeist werden. Synthetisch hergestelltes Erdgas (SNG) hingegen ist chemisch identisch mit fossilem Erdgas, erfüllt die Anforderungen gängiger Normen und kann zu 100% als Austauschgas verwendet werden. An das Erdgasnetz angeschlossene Verbraucher, bspw. Wärmeerzeuger, Kraftwerke oder Tankstellen, haben hohe Anforderungen an eine gleichbleibende Erdgasqualität, eine Toleranz gegenüber variablen Wasserstoffanteilen besteht lediglich in engen Grenzen.

### Rollenspiel

Damit die Schüler/innen sich gut auf das realistische Spielen einer Rolle vorbereiten können, können Sie im Vorfeld folgende Leitfragen für die betreffende Rolle vorbereiten:

- 1 Gebt der Person einen Namen!
- 2 Welche Meinung hat diese Person? Wofür ist sie?
- 3 Welche Gegenargumente sind zu erwarten?
- 4 Welche Interessen vertritt die Person? Was will sie erreichen?
- 5 Welche Werte leiten diese Person? Was ist ihr wichtig?

Im Arbeitsblatt können die Schüler/innen sich dazu schon Notizen machen. Anschließend, als weitere Vorbereitung für das Rollenspiel, können die Schüler/innen die vorbereiteten Argumente den unterschiedlichen Fächern der Argumente-Kommode zuordnen. Dadurch verschafft man sich schon einen Überblick, worauf welche Argumente eigentlich

basieren bzw. welche Einstellungen die eigene Rolle leiten, aber auch darüber, auf welchen Ebenen ein/e Gesprächspartner/in Gegenargumente bringen könnte.




Die Argumente-Kommode ist ein Tool, das veranschaulicht, welche Argumente von einer Person eingesetzt werden (können) und worauf diese Argumente basieren.

In das erste Fach der Argumente-Kommode „Sachwissen“ werden Argumente eingeordnet, die rein objektiver Natur sind und auf Sachwissen beruhen. In das zweite Fach „Normen und Werte“ ordnet man Argumente ein, die auf gesellschaftlichen Normen oder persönlichen Werten basieren, die also widerspiegeln, was der Person wichtig ist, z. B. Fairness, ethisch richtiges Handeln o. ä.



In das dritte Fach „Interessen“ werden Argumente eingeordnet, die auf den Interessen der handelnden Person basieren. Beispielsweise liegt es im Interesse eines Verkäufers/einer Verkäuferin, Profit zu erwirtschaften.

## Weiterführende Links

### Vertiefende Hintergrundinformation zum Thema Energiespeicher

-  ZFES Uni Stuttgart Stromspeicher
-  Klimafonds Speichertechnologien
-  <https://www.klimafonds.gv.at/assets/Uploads/Broschren/Science-Brunch-Broschren/8speichertechnologien.pdf>

### Vertiefende Hintergrundinformation zum Thema Smart Meter

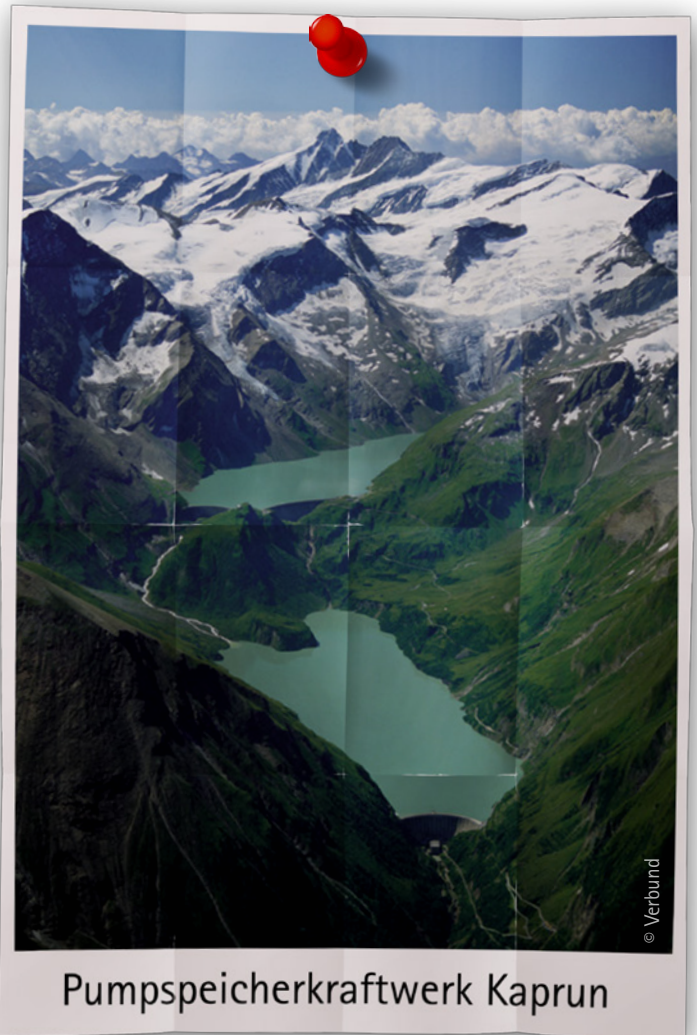
-  [http://www.cybersecurityaustria.at/images/pdf/csa\\_smart\\_metering\\_-\\_chancen\\_und\\_risiken.pdf](http://www.cybersecurityaustria.at/images/pdf/csa_smart_metering_-_chancen_und_risiken.pdf)
-  [http://www.cybersecurityaustria.at/images/pdf/smart\\_metering\\_und\\_moegliche\\_auswirkungen\\_auf\\_die\\_nationale\\_sicherheit.pdf](http://www.cybersecurityaustria.at/images/pdf/smart_metering_und_moegliche_auswirkungen_auf_die_nationale_sicherheit.pdf)



Windräder und Solarkraftwerke können bei idealen Bedingungen große Mengen an umweltfreundlichem Strom erzeugen. Was macht man aber, wenn der gerade nicht benötigt wird? Wie kann man ihn speichern und erst später verwenden? Wenn das nämlich nicht gelingt, muss der Strom in die Erde geleitet werden und geht verloren.

## CHECKLIST

- In Österreich sind Pumpspeicherkraftwerke eine gängige Methode zur Speicherung großer Energiemengen.  
Berechnet die Speicherkapazität des Stausees Mooserboden in Kaprun (► Tipps)!
- Überlegt in Teams von bis zu 4 Schüler/innen, wie man überschüssigen Strom noch speichern könnte.  
Versucht möglichst kreative Ideen zu finden, wie man elektrische Energie in andere Energieformen umwandeln und damit indirekt speichern könnte, um sie später wieder zur Verfügung zu haben.
- Bewertet eure Ideen nach folgenden Kategorien:
  - Kosten und Aufwand der Speicherung
  - Platzbedarf und Umweltauswirkungen
  - Sicherheit
  - Kapazität/Fassungsvermögen
  - Eignung als verlustarmer LangzeitspeicherIn jeder Kategorie können maximal 10 Punkte vergeben werden. Ermittelt so eure beste Speicher-Idee!
- Die Alternative zum Speichern: Der Strom wird gezielt dann verbraucht, wenn zu viel davon vorhanden ist.  
Ein intelligenter Stromzähler könnte z. B. die Waschmaschine genau dann in Betrieb nehmen, wenn mitten in der Nacht überschüssiger Strom im Netz verfügbar ist. Diskutiert im Team, welche Stromverbraucher ihr zu Hause und in der Schule von so einem „Smart Meter“ steuern lassen könntet.



Pumpspeicherkraftwerk Kaprun

- Rollenspiel: Gemeinderatssitzung  
Die Gemeinde Sturmhausen hat eine große Windkraftanlage bauen lassen, die aber leider oft zur falschen Zeit zu viel Strom erzeugt. Wie soll man ihn speichern? Recherchiert in Kleingruppen Argumente für eine der folgenden Lösungen:
  - Pumpspeicherkraftwerk
  - Power-To-Gas
  - Druckluftspeicher
  - Hydraulischer Powertower
  - „Smart Meter“ statt SpeicherJede Kleingruppe präsentiert ihre Lösung in der Gemeinderatssitzung (= Rest der Klasse) und versucht Überzeugungsarbeit zu leisten. Im Anschluss entscheidet die Klasse durch Abstimmung, welches System realisiert wird.  
Umseitig findet ihr Tipps und ein Arbeitsblatt zum Rollenspiel!

*Weiter geht's auf der nächsten Seite!*

## TIPPS

### + Pumpspeicherkraftwerk in Kaprun

Bei normalen Wasserkraftwerken leitet man das Wasser aus dem Stausee durch eine Rohrleitung auf die Turbine und erzeugt Strom. In Kaprun (Salzburg) wird das Wasser in einem zweiten Stausee aufgefangen, daher kann man den Prozess auch umdrehen und Energie speichern: Mit dem überschüssigen Strom aus anderen Kraftwerken wird das Wasser vom unteren in den oberen Stausee gepumpt und erst später bei Bedarf wieder zur Stromerzeugung verwendet.

#### Infos zur Abschätzung der gespeicherten Energie:

- Inhalt: 85 Mio m<sup>3</sup>
- Mittlere Fallhöhe: 365 m

Berechne die im vollen Stausee gespeicherte potenzielle Energie und vergleiche, wie viele Autobatterien für diese Energiemenge nötig wären! Würde man diese Batterien direkt aneinanderreihen – wie lang wäre diese Kette?

### + Datenschutzproblematik

Ein „Smart Meter“-Stromzähler muss natürlich das Nutzungsverhalten im Haushalt genau analysieren und könnte im Extremfall auch zum „Ausspähen“ unseres Verhaltens im Privatbereich missbraucht werden. Diskutiert auch diese Problematik im „Gemeinderat“!

### + Rollenspiel

Wenn ihr eure Rollen vorbereitet, überlegt euch Folgendes:

- Welche Meinung hat diese Person? Wofür ist sie?
- Welche Gegenargumente sind zu erwarten?
- Welche Interessen vertritt die Person?
- Welche Werte leiten diese Person? Was ist ihr wichtig?
- Gebt der Person einen Namen!



## Rollenspiel

Ergänze in der Rollenkarte den Namen deiner Rolle und sortiere ihre Argumente in die Fächer der Kommode:  
Ganz oben sind rein sachliche Argumente, in die Mitte kommen Argumente, die die Interessen eurer Person widerspiegeln, unten ist Platz für Argumente, die den Werten der Person entsprechen.  
Mögliche Gegenargumente kannst du ganz unten notieren.

## Argumentesammlung

### Rollenkarte

Name .....

.....

Sachwissen:  
objektive Argumente

Normen & Werte:  
das ist mir wichtig

Interessen:  
das will ich erreichen

Mögliche Gegenargumente