



**Die folgenden Stromspeicher wurden durch das Helmholtz-Institut Ulm (HIU) als Schulmaterial (Klasse 10 bis 12) zusammengestellt.**

**Sie sollen veranschaulicht zeigen, dass es (nicht nur) hochinteressante Innovationen auf dem Gebiet der elektrochemischen Speichertechnologie gibt.**

**Der Einsatz bietet sich für den Schulunterricht in Chemie und Physik an.**

**Ansprechpartner:**

Patrick von Rosen

Marketing & Public Relations  
Helmholtz Institute Ulm  
Electrochemical Energy Storage (HIU)  
Helmholtzstraße 11  
89081 Ulm

Tel. +49 (0731) 50 34013

Email: [patrick.rosen@kit.edu](mailto:patrick.rosen@kit.edu)

Website: [www.hiu-batteries.de](http://www.hiu-batteries.de)

Twitter: [@HelmholtzUlm](https://twitter.com/HelmholtzUlm)

Podcast: [Geladen.podigee.io](http://Geladen.podigee.io)





<b>Name des Stromspeichers:</b>	<b>„Samsung Akku EB-BG900 Galaxy S5“ (E1)</b>
<b>Art des Stromspeichers:</b>	<b>Lithium-Ionen-Batterie</b>
<b>Speicherkapazität:</b>	<b>10,8 Wattstunden (Wh)</b>
<b>Energiedichte:</b>	<b>502,2<sup>a</sup> kWh/m<sup>3</sup></b>

Die Zeiten, in denen man sein Handy nur einmal in der Woche ans Netz hängen musste, sind lange vorbei. Heutige Ansprüche sind weit weniger ambitioniert. Wenn man mit dem Smartphone-Akku „den Tag übersteht“, ist man zufrieden.

In den vergangenen 10 Jahren ist die Kapazität der Handyakkus dennoch wieder stark gewachsen. Warum? In moderne Smartphones werden häufig sehr starke Akkus integriert. Die Smartphones sind größer geworden, es passt also „mehr Akku“ rein. Aber auch ein viel größeres Display, das mehr Strom benötigt. Auch die Rechen- und Grafikleistung verbraucht immer mehr Strom.

Moderne Smartphones brauchen also stärkere Akkus, um ähnliche Laufzeiten zu erreichen wie früher.

Fast komplett ausgestorben sind Smartphones mit Wechsel-Akku. Zwar lässt sich ein kaputter Akku heutzutage noch immer aufwendig bei einem Reparaturdienstleister austauschen – früher konnte man Handyakkus kinderleicht entnehmen und mit neuen Akkus ersetzen.

Die heutigen Alternativen sind Powerbanks und besonders schnell ladende Netzteile.



**Name des Stromspeichers:** „Tesla Powerwall 6,4 kWh Solarbatterie“ (E2)  
**Art des Stromspeichers:** Lithium-Ionen-Batterie  
**Speicherkapazität:** 6,4 Kilowattstunden (kWh)  
**Energiedichte:** 30,6<sup>a</sup> kWh/m<sup>3</sup>

Der „Tesla Powerwall“ ist ein Lithium-Ionen-Akkumulator des amerikanischen Elektroauto-Herstellers Tesla, die als Solarbatterie für Privathaushalte unter der Bezeichnung „Powerwall“ angeboten wird. Das elektrische Energiespeichersystem kann Strom speichern, die von einer Photovoltaikanlage auf dem Dach kommt.

Das bisher vorwiegend als Elektroauto-Produzent bekannte kalifornische Unternehmen „Tesla Motors“ kündigte am 1. Mai 2015 den Einstieg in die Produktion der Powerwall an. Die Produktion der „Powerwall“ erfolgt seit Oktober 2015 in der „Tesla Gigafactory 1“ in Nevada.

Die Tesla-„Powerwall“ kann in Haushalten aufgestellt werden. Die „Powerwall“ verfügt über eine eigene digitale Steuerung und Internet-Datenverbindung, so dass sie untereinander, mit anderen Geräten im Haushalt und mit einem intelligenten Stromnetz vernetzt werden können. Auch ist es möglich, zum Beispiel ein Elektroauto in dieses Stromnetz zu integrieren.

Die Abmessungen für eine Powerwall sind 130 cm × 86 cm × 18 cm (ca. 200 l) bei 100 kg Gewicht. Die Gesamtkosten für die Powerwall 2 liegen zwischen 10.400 bis 12.600 Euro.

Die Anzahl der Ladezyklen liegt bei 5.000. Tesla bietet für die Powerwall 10 Jahre Garantie. Wenn der Speicher in dieser Zeit kaputtgehen sollte, ersetzt Tesla den defekten Speicher mit einem neuen Speicher.

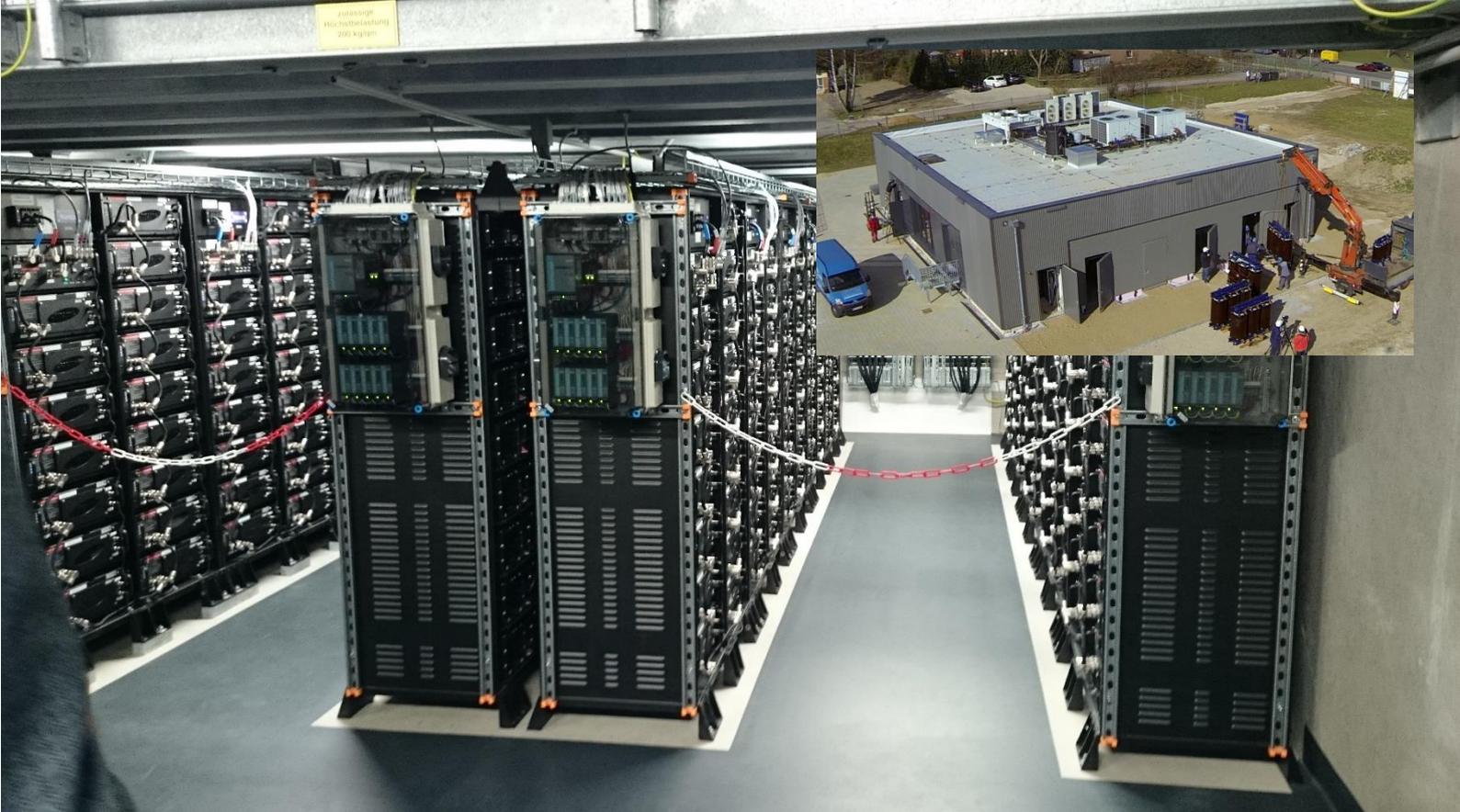


**Name des Stromspeichers:** „Pufferspeicher für Fahrradstandlicht“ (A2)  
**Art des Stromspeichers:** Superkondensator  
**Speicherkapazität:** 1,8 Milliwattstunden (mWh)  
**Energiedichte:** 126 Wh/m<sup>3</sup>

Der Fahrrad-Scheinwerfer „Lumotec IQ Cyo T“ der Firma Busch & Müller hat einen Superkondensator verbaut. Dieser Stromspeicher ermöglicht eine Beleuchtung von bis zu 80 Lux der LED-Leuchte. Der Kondensator, in dem Strom zwischengespeichert wird, lädt sich über einen Fahrrad-Dynamo auf.

Dieser Superkondensator liefert aber noch lange Strom, auch wenn das Fahrrad längst steht – und sich der Dynamo nicht mehr dreht.

**So brennt die LED-Leuchte ca. vier Minuten als Standlicht nach.  
Der Strom wird dann komplett aus dem Superkondensator gespeist.**



**Name des Stromspeichers:** „WEMAG Batteriespeicherkraftwerk“ (E3)  
**Art des Stromspeichers:** Lithium-Ionen-Batterie  
**Speicherkapazität:** 5,4 Megawattstunden (MWh)  
**Energiedichte:** 4,4<sup>a</sup> kWh/m<sup>3</sup>

In Schwerin betreibt der Stromversorger „WEMAG“ einen Lithium-Ionen-Batteriespeicher zum Ausgleich kurzfristiger Netzschwankungen. Lieferant des Batterie-Speicherkraftwerks ist die Berliner Firma „Yunicos“. Das südkoreanische Unternehmen „Samsung“ lieferte die Lithium-Ionen-Zellen.

Der Speicher mit einer Kapazität von 5,4 MWh ging im September 2014 in Betrieb.

Der Lithium-Ionen-Batteriespeicher besteht aus 25.600 Lithium-Manganoxid-Zellen und ist über fünf Mittelspannungs-Transformatoren sowohl mit dem regionalen Verteilnetz als auch mit dem nahegelegenen 380-kV-Höchstspannungsnetz verbunden.

Im Juli 2017 wurde der Batteriespeicher auf 10 MW / 15 MWh erweitert. Die Erweiterung besteht aus 53.444 Lithium-Ionen-Zellen.



**Name des Stromspeichers:** „Pumpspeicherkraftwerk Goldisthal“ (J1)  
**Art des Stromspeichers:** Lageenergiespeicher  
**Speicherkapazität:** 8,5 Gigawattstunden (GWh)  
**Energiedichte:** 706,7 Wh/m<sup>3</sup>

Das Pumpspeicherkraftwerk (PSW) Goldisthal im Thüringer Schiefergebirge wurde im Jahr 2003 in Betrieb genommen und ist das größte Wasserkraftwerk Deutschlands und eines der größten Europas.

2003 wurde der Kraftwerksbetrieb aufgenommen und am 30. September 2003 das Kraftwerk offiziell eröffnet. Seit 2004 laufen alle vier Maschinensätze im Dauerbetrieb. Betrieben wird das PSW Goldisthal heute vom Energiekonzern Vattenfall GmbH.

Ein Pumpspeicherkraftwerk, ist ein Speicherkraftwerk, das elektrische Energie in Form von potentieller Energie (Lageenergie) in einem Stausee speichert. Das Wasser wird durch elektrische Pumpen in den Speicher gehoben, um später wieder für den Antrieb von Turbinen zur Stromerzeugung benutzt werden zu können. Pumpspeicherkraftwerke sind gegenwärtig die einzige Möglichkeit, großtechnisch elektrische Energie unter wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zu speichern. Sie nehmen in nachfrageschwachen Zeiten ein Überangebot von elektrischer Energie im Stromnetz auf und geben sie bei Spitzenlast wieder ins Netz ab.

Grundsätzlich wird in jedem Pumpspeicherkraftwerk mehr Strom zum Hochpumpen benötigt als beim Herunterfließen wieder zurückgewonnen werden kann. Verluste entstehen beim Lade- und beim Entladevorgang (1) durch die Reibungsverluste des fließenden Wassers (Flüssigkeiten haben einen Strömungswiderstand; bei Wasser spricht man auch von Wasserwiderstand und hydraulischen Verlusten), (2) durch den Wirkungsgrad der Pumpe (Ladevorgang) bzw. Turbine (Entladevorgang), (3) durch den Wirkungsgrad des Motors bzw. des Generators.

**Der Gesamtwirkungsgrad eines Pumpspeicherkraftwerkes liegt bei 75–80 %**, in Ausnahmefällen etwas höher. Der Gesamtwirkungsgrad ist geringer als bei Speicherkraftwerken, da bei einem Pumpspeicherkraftwerk der Wirkungsgrad für die Pumpen hinzukommt.



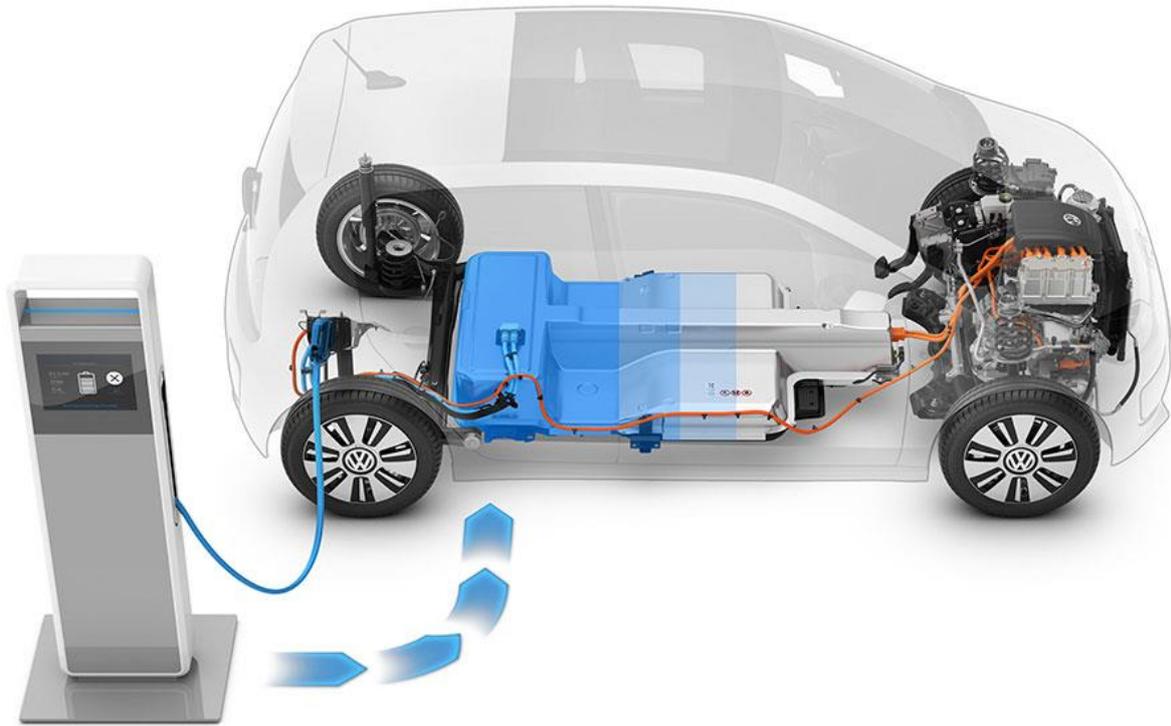
<b>Name des Stromspeichers:</b>	<b>„Varta Silver Dynamic Starterbatterie“ (F2)</b>
<b>Art des Stromspeichers:</b>	<b>Blei-Säure-Batterie</b>
<b>Speicherkapazität:</b>	<b>1,3<sup>a</sup> Kilowattstunden (kWh)</b>
<b>Energiedichte:</b>	<b>98,58<sup>a</sup> kWh/m<sup>3</sup></b>

Blei-Säure-Batterien haben mit rund 90 Prozent den größten Anteil am weltweiten Batteriemarkt. Die Blei-Säure-Batterie gehört zu den ältesten Batteriesystemen überhaupt. Sie ist bereits seit Mitte des 19. Jahrhunderts bekannt.

Vorteile: (1) Blei-Säure-Batterien haben eine hohe Lebensdauer. Allerdings tritt mit der Zeit ein Verschleiß der Elektroden auf. Der Verschleiß in Lithium-Ionen-Batterien ist wesentlich geringer. (2) Eine hohe Zellspannung von etwa 2 V ist ermöglicht hohe Stromstärken in sehr kurzer Zeit, weshalb Blei-Säure-Batterien häufig in Autos als Starter-Batterien eingesetzt werden. (3) Sie haben kein Memory-Effekt, können also unabhängig vom Entladezustand immer wieder geladen werden. (4) Sehr robuster, kostengünstiger Batterietyp mit geringen Wartungskosten.

Nachteile: (1) Geringe Energiedichte: Blei-Säure-Batterien sind bei gleicher Kapazität ungefähr viermal schwerer und deutlich größer als Lithium-Ionen-Batterien. (2) Blei-Säure-Batterien müssen in Räumen mit guter Belüftung untergebracht werden, da beim Laden kleinere Gasmengen entstehen, die sich in geschlossenen Räumen sammeln und explodieren können. Sie enthalten das giftige und umweltschädliche Schwermetall Blei.

Ein Recycling ist aber zu einem sehr großen Teil möglich und gut organisiert. Im Gegensatz zu den Gerätebatterien gibt es für Fahrzeugbatterien (Starterbatterien) eine Pfandpflicht. Um möglichst viele der bleihaltigen Batterien zurückzuführen, ist die Ausgabe dann pfandpflichtig (7,50 Euro), wenn bei einem Neukauf keine Altbatterie zurückgegeben wird.



<b>Name des Stromspeichers:</b>	<b>„Transaktionsbatterie VW e-Up!“ (E4)</b>
<b>Art des Stromspeichers:</b>	<b>Lithium-Ionen-Batterie</b>
<b>Speicherkapazität:</b>	<b>18,7 Kilowattstunden (kWh)</b>
<b>Energiedichte:</b>	<b>32,8<sup>a</sup> kWh/m<sup>3</sup></b>

Der VW e-Up! (2017) ist ein batterieelektrisches Auto. Das Auto betreibt keinen Verbrennungsmotor, und fährt somit ohne Benzin oder Diesel. Nur mit Strom. Dafür benötigt es eine Transaktionsbatterie und einen Elektromotor.

Das Auto stößt so gut wie keine Stickoxide, Feinstpartikel (Emissionen) aus und macht wenig Lärm. Das ist gut für die Umwelt.

Offen bleibt die Frage, wo die Menschen in Zukunft ihr Auto aufladen können, denn in Deutschland gibt es immer noch zu wenig Ladesäulen. An der Ladesäule ist der e-Up (2017) leider ein so genannter „Schnarchlader“. Eine Vollladung von 0% auf 100% dauert sechs Stunden.

Die Alltagsreichweite des e-Up (2017) ist mit knapp 160 Kilometern ziemlich gering. Der VW e-Up! kostet 26.900 Euro.



**Name des Stromspeichers:** „ARES Rail Based Energy Storage System“ (J4)  
**Art des Stromspeichers:** Lageenergiespeicher  
**Speicherkapazität:** 5,3 Gigawattstunden (GWh)  
**Energiedichte:** 4 kWh/m<sup>3</sup>

Das kalifornische Unternehmen ARES hat eine vielversprechende Idee zur Speicherung für Erneuerbare Energie, die es so noch nirgends gibt: Überschüssiger Strom soll mit Hilfe von Zugwaggons gespeichert werden. Eine 55 Millionen Euro teure Testanlage entsteht derzeit in Kalifornien und soll 2019 in Betrieb gehen.

Erneuerbare Energien sind die Zukunft. Sie sind nahezu unbegrenzt verfügbar und liefern kostengünstigen und vor allem sauberen Strom. Doch der altbekannte Haken an der Sache: Leider können sie nicht rund um die Uhr Energie erzeugen – vor allem Sonnen- und Windenergie sind den Schwankungen der Umweltbedingungen unterworfen. Weht kein Wind und scheint keine Sonne geht die Stromerzeugung gegen Null zurück.

Dennoch wollen immer mehr Länder ihren Strommix möglichst vollständig auf regenerative Energien (Wind, Sonne, Wasser, etc.) umstellen. Auch der US-Bundesstaat Kalifornien hat diesbezüglich ambitionierte Pläne: Der „Sunshine-State“ will bis 2030 die Hälfte seines Stroms mit Erneuerbaren Energien erzeugen. Um das möglich zu machen, müssen effiziente Energiespeichersysteme Solar- und Windstrom immer dann speichern, wenn die Bedingungen gut sind, also mehr Strom erzeugt als benötigt wird.

Das kalifornische Start-up-Unternehmen Ares will das Realität werden lassen: Energiespeicherung mithilfe der Schwerkraft. Das funktioniert überraschend einfach: Ares will künftig elektrisch betriebene Zugwaggons einen Hügel hinaufschicken – und zwar immer dann, wenn Erneuerbare-Energien-Anlagen einen Überschuss an Strom erzeugen. Dieser Strom wird benutzt, um die Züge den Hügel erklimmen zu lassen. Oben angekommen bleiben die Züge so lange stehen, bis die regenerativen Kraftwerke zu wenig Strom produzieren und ein Mangel herrscht. Dann werden die Energiespeicher-Züge den Hügel hinunter geschickt. Das erledigt die Schwerkraft bekanntermaßen ganz von alleine. Während der Talfahrt werden die Wagons mittels des sogenannten regenerativen Bremsens verlangsamt. Die dabei entstehende kinetische Energie wird durch die Elektromotoren wieder zurück in elektrische Energie umgewandelt. Diese kann dann ins Stromnetz gespeist werden.



<b>Name des Stromspeichers:</b>	<b>„Kraftwerk Huntorf“ (I1)</b>
<b>Art des Stromspeichers:</b>	<b>Druckluftenergiespeicher</b>
<b>Speicherkapazität:</b>	<b>642,0 Megawattstunden (MWh)</b>
<b>Energiedichte:</b>	<b>2,1 kWh/m<sup>3</sup></b>

Das Kraftwerk Huntorf ist ein kombiniertes Druckluftspeicher- und Gasturbinenkraftwerk in Huntorf (Niedersachsen). Das Kraftwerk war bei seiner Inbetriebnahme 1978 das erste kommerziell genutzte Druckluftspeicherkraftwerk der Welt. Das Kraftwerk hatte ursprünglich die Aufgabe, Grundlaststrom des nahegelegenen Kernkraftwerks Unterweser in Schwachlastzeiten aufzunehmen und in Spitzenlastzeiten ins elektrische Netz einzuspeisen. Außerdem soll das Speicherkraftwerk im Fall eines Netzzusammenbruchs die Notstromversorgung des Kernkraftwerks absichern.

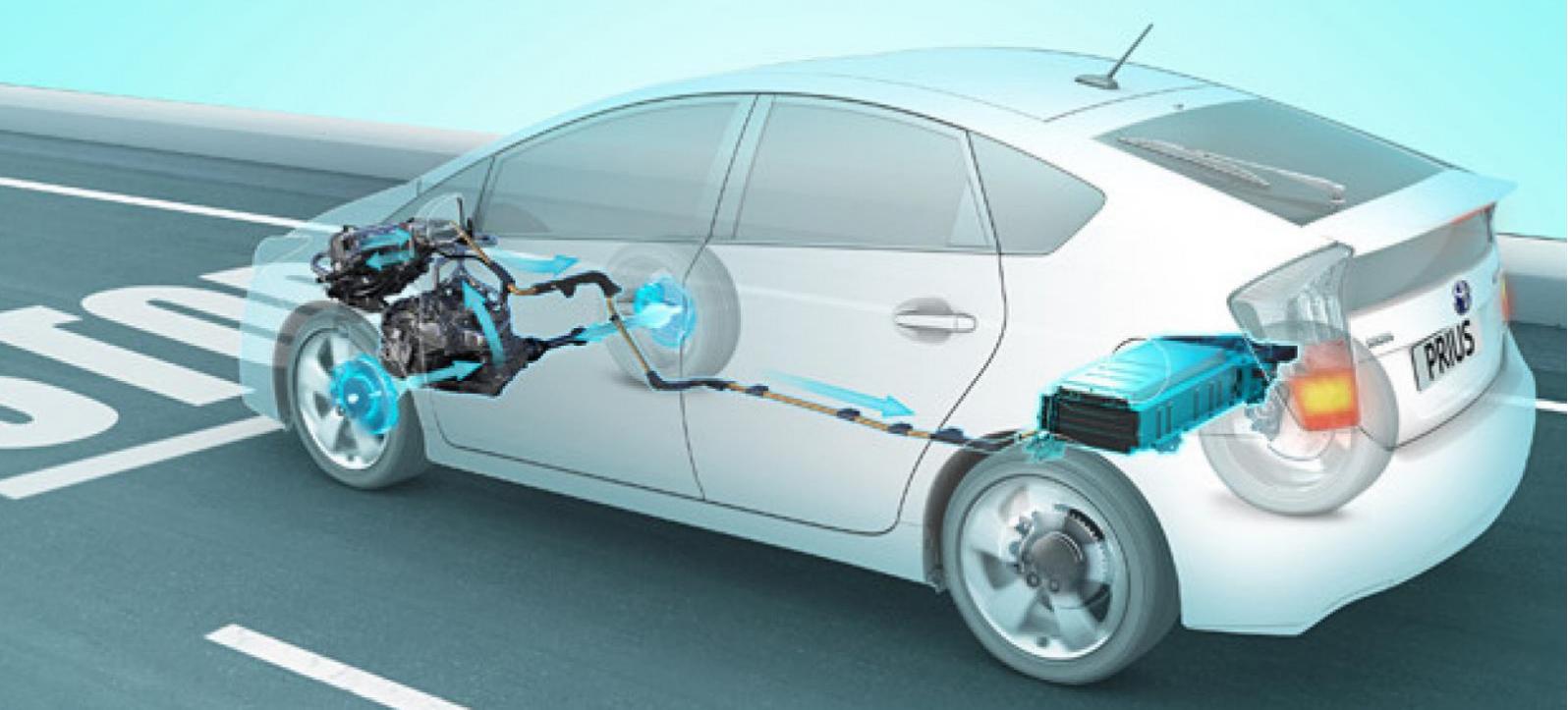
Beim Bau der Anlage wurden in einer Tiefe zwischen 650 m und ca. 800 m zwei Kavernen (große Räume) im Salzgestein ausgesolt. Sie haben ein Gesamtvolumen von ca. 310.000 m<sup>3</sup> (bei einer länglichen Form mit maximal 60 m Durchmesser und 150 m Höhe).

Um das Kraftwerk startbereit zu machen, wird in Zeiten, zu denen ein Stromüberschuss besteht (also Schwachlastzeiten), Luft mit einem Druck von 46 bis 72 bar in die Kavernen gepumpt. Die in Reihe geschalteten Hoch- und Niederdruck-Kompressoren nehmen dabei eine Leistung von ca. 60 MW auf. Es dauert ca. acht Stunden, bis die Luft im Speicher auf den Enddruck von 72 bar komprimiert ist.

Dann kann man über 72.000 t Pressluft verfügen. Die Kompression der Luft führt automatisch zu einer Erhöhung ihrer Temperatur. Um die Anlage davor zu schützen, wird ihre Wärmeenergie über Wärmetauscher an die Umgebung abgegeben.

Wird zu Spitzenlastzeiten elektrische Energie benötigt, so strömt die komprimierte Luft geregelt aus den Kavernen. Dabei dehnt sie sich aus und kühlt ab. Bei reinem Druckluftbetrieb würde die Turbine vereisen. Deswegen wird über eine Gasleitung Erdgas in die Brennkammer der Gasturbine zugeführt. Der Energie des Erdgas ist dabei etwa doppelt so groß, wie die elektrische Energie zum Aufbau des Drucks. Das so entstehende Luft-Brenngas-Gemisch wird in der Brennkammer verbrannt. Die Turbine entzieht dem Abgasstrom Energie und transformiert sie über einen Generator in elektrische Energie.

Das Druckluftspeicherkraftwerk Huntorf hat eine Leistung von 321 MW, das ist rund ein Viertel eines Kernkraftwerkes üblicher Größe von 1.300 MW. Diese Leistung kann über zwei Stunden abgegeben werden, dann ist der Druck im Speicher für einen Vollastbetrieb zu niedrig, und die Maschine geht in den Gleitdruckbetrieb über.



<b>Name des Stromspeichers:</b>	<b>„NiMH-Transaktionsbatterie Toyota Prius (G1)</b>
<b>Art des Stromspeichers:</b>	<b>Nickel-Metallhydrid-Batterie</b>
<b>Speicherkapazität:</b>	<b>1,3 Kilowattstunden (kWh)</b>
<b>Energiedichte:</b>	<b>31,9<sup>a</sup> kWh/m<sup>3</sup></b>

Leichter und effizienter gewordener Antrieb mit mehr Leistung: Seit er im Jahr 2000 in Europa auf den Markt kam, hat sich der Toyota Prius zum Paradebeispiel für ein umweltfreundliches Auto gemausert.

Die Gesamtleistung des neuen Prius liegt bei 136 PS.  
So beschleunigt das Auto aus dem Stand in 10,4 Sekunden auf 100 km/h.

**Der Prius besitzt einen so genannten leistungsverzweigten Hybridantrieb aus Verbrennungsmotor und Elektromotor.**

Der Elektromotor ist sehr leicht, obwohl er 60 kW (82 PS) zur Verfügung stellt. Die Ingenieure erreichten dies, indem sie die Höchstdrehzahl des Elektromotors mehr als verdoppelten und das zur Verfügung stehende Drehmoment durch ein integriertes Untersetzungsgetriebe maximierten. Um die maximale Leistungsabgabe zu erhöhen, wurde die Betriebsspannung von 500 auf 650 Volt gesteigert. In normalen Fahrsituationen wird der Motor jedoch weiterhin mit 500 Volt betrieben, um Energie zu sparen.

### **Nickel-Metallhydrid-Batterie**

Zur Energiespeicherung dient eine Nickel-Metallhydrid-Batterie von Panasonic. Die unter dem Gepäckraum platzierte Batterie fällt sehr kompakt aus.



<b>Name des Stromspeichers:</b>	<b>„Supercap Rekuperationsspeicher für AutoTram Extra Grand“ (B1)</b>
<b>Art des Stromspeichers:</b>	<b>Superkondensator</b>
<b>Speicherkapazität:</b>	<b>940 Wattstunden (Wh)</b>
<b>Energiedichte:</b>	<b>1,37 kWh/m<sup>3</sup></b>

Die AutoTram Extra Grand – der derzeit längste und wohl einer der innovativsten Busse der Welt – vereint die Vorteile konventioneller Straßenbahnen mit denen des Busses.

Sie kann mehr als 250 Fahrgäste befördern, lässt sich über eine längere Strecke rein elektrisch fahren, ist flexibel auf beliebigen Strecken einsetzbar und, das mag einer der wichtigsten Vorteile gegenüber einer Straßenbahn sein, in den Anschaffungs- und Betriebskosten nur halb so teuer.

Aufgrund der großen Beförderungskapazität, vergleichsweise geringer Kosten und hoher Einsatzflexibilität eignet sich die AutoTram Extra Grand besonders für den Einsatz in Groß- und Megastädten mit schnell wachsendem Transportbedarf.

Die AutoTram Extra Grand fährt nicht nur mit einer Lithium-Ionen-Batterie. Sie kombiniert einen Superkondensator mit einer Lithium-Ionen-Batterie. Deshalb hat sie ein hochdynamisches Leistungsprofil und eignet sich im Bereich öffentlicher Verkehrsmittel sehr gut.

Der Dualspeicher besteht aus einem Speicherteil mit hoher Leistungsdichte zur Abdeckung von Beschleunigungs- und Rekuperationsvorgängen (Superkondensator) und einem Speicherteil mit hoher Energiedichte zur Realisierung rein elektrischer und somit lokal emissionsfreier Fahrt (Lithium-Ionen-Batterie).

Bei der „Rekuperation“ wird durch den Bremsvorgang Energie zurückgewonnen, was dem Superkondensator zur erneuten Beschleunigung dient.

Während Doppelschicht-Kondensatoren vorteilhafte Eigenschaften bezüglich der Leistungsdichte besitzen, weisen Lithium-Ionen-Zellen Vorteile durch ihre hohe erzielbare Energiedichte auf.