

**Vorlesung :** **Energiespeichertechnologien- & Anwendungen**  
**RUB | MB-Master | Kursnr.: 139030**

**Lecture:** **Energy Storage Technologies and Applications**

**Vortragender**

***Prof. Dr. Christian Doetsch***

Lehrstuhl »Cross Energy Systems«

c/o Fraunhofer UMSICHT  
 +49 208 8598-1195

christian.doetsch@rub.de

**2. Mechanische Energiespeicher Teil a –**  
 „Schwungradspeicher“

**2. Mechanical Energy Storage part a –**  
 „Flywheels“

**Vorlesung #2a | Lecture #2a**



Ministerium für  
 Kultur und Wissenschaft  
 des Landes Nordrhein-Westfalen



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz. Ausgenommen von der Lizenz sind die verwendeten Logos sowie alle anders gekennzeichneten Elemente. [www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0](http://www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0)



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License. All logos and explicitly marked elements used are excluded from this license. [www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0](http://www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0)



## Flywheels

### Content ⇒ Learning objectives

- Operating principle, classification, applications, historical applications  
⇒ Introduction to the topic
- Physical basics, area moment of inertia, calculation of energy content, state-of-charge  
⇒ Basic understanding of mathematics and the physical relationships as well as the ability to calculate simple tasks
- Flywheel construction, materials, products, applications  
Flywheel construction, materials, products, applications  
⇒ Knowledge of common applications and products

## 1. Flywheels

### Inhalt ⇒ Lernziele

- Funktionsprinzip, Klassifizierung, Einsatzgebiete, historische Anwendungen  
⇒ Heranführung an das Thema
- Physikalische Grundlagen, Flächenträgheitsmoment, Berechnung Energieinhalt, State-of-Charge  
⇒ Mathematisches Grundverständnis und die physikalischen Zusammenhänge sowie Fähigkeit einfache Aufgaben zu rechnen
- Flywheel-Aufbau, -Materialien, Produkte, Anwendungen  
⇒ Wissen zu üblichen Anwendungen und Produkten

1. Flywheels

Charge:

By means of electrical energy, the motor sets the flywheel in rotation or increases its rotational speed

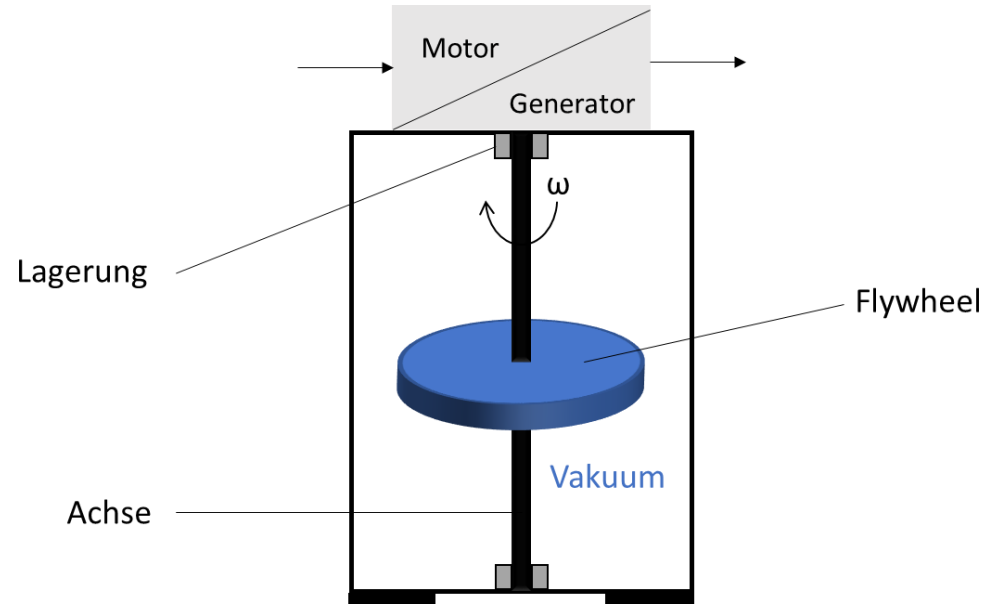
Storage

Kinetic energy of the rotating mass. Friction losses ("self-discharge") at the bearings and possibly gas friction

Discharge

Electrical energy is produced in the generator causing the flywheel to slow down or come to a standstill

# 1. Flywheels



Einspeicherung	Speicherung	Ausspeicherung
Mittels elektrischer Energie versetzt der Motor das Schwungrad in Rotation bzw. erhöht dessen Rotationsgeschwindigkeit	Kinetische Energie der rotierenden Masse. Reibungsverluste („Selbstentladung“) am Lager und evtl. Gasreibung	Elektrische Energie wird im Generator erzeugt, wodurch das Schwungrad verlangsamt wird bzw. bis zum Stillstand kommt

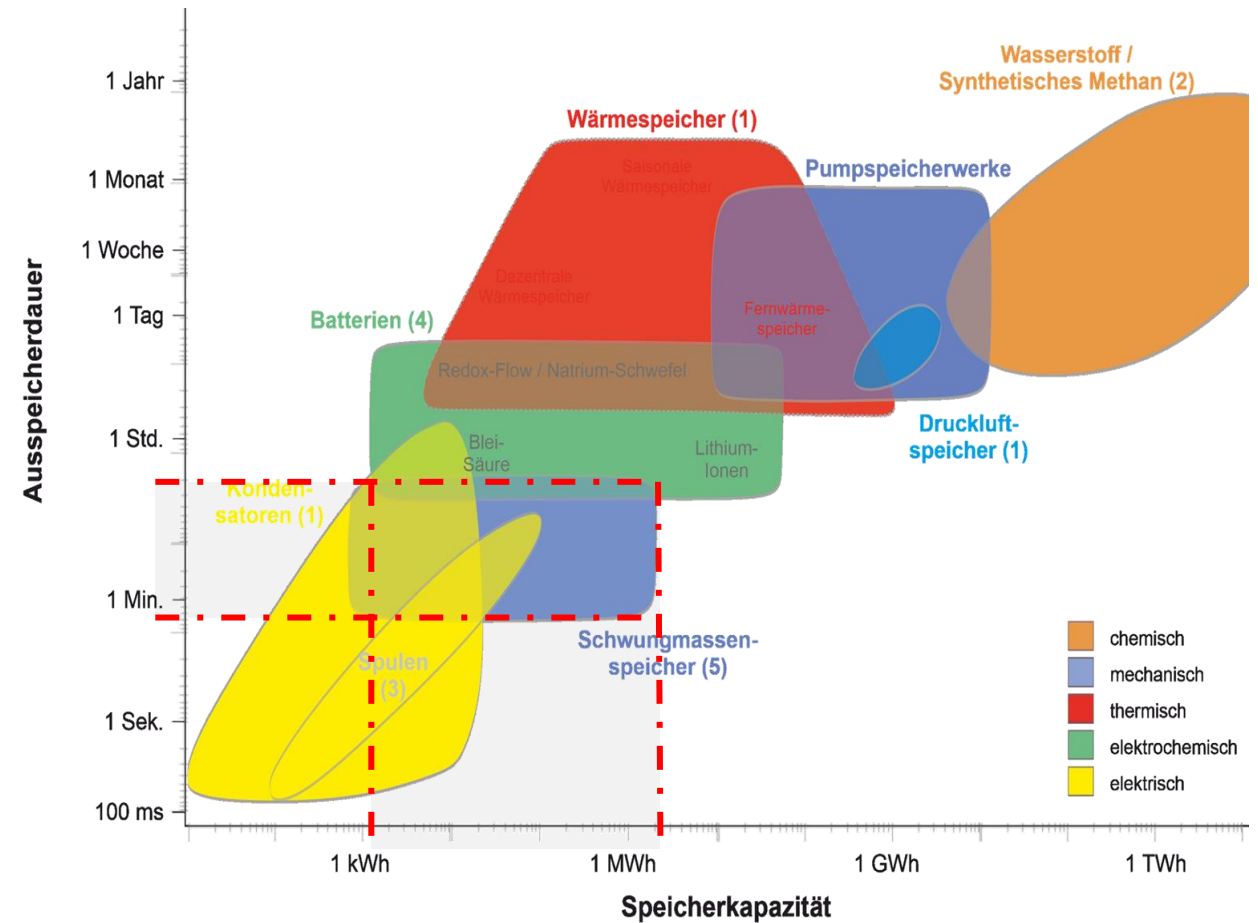
1. Flywheels

1.1 Classification according to storage performance and capacity

- Seasonal storage
- Monthly storage
- Weekly storage
- Daily storage
- Hourly storage
- Storage for minutes
- Storage for seconds

1. Flywheels

1.1 Klassifizierung hinsichtlich Ausspeicherzeit und Speicherkapazität

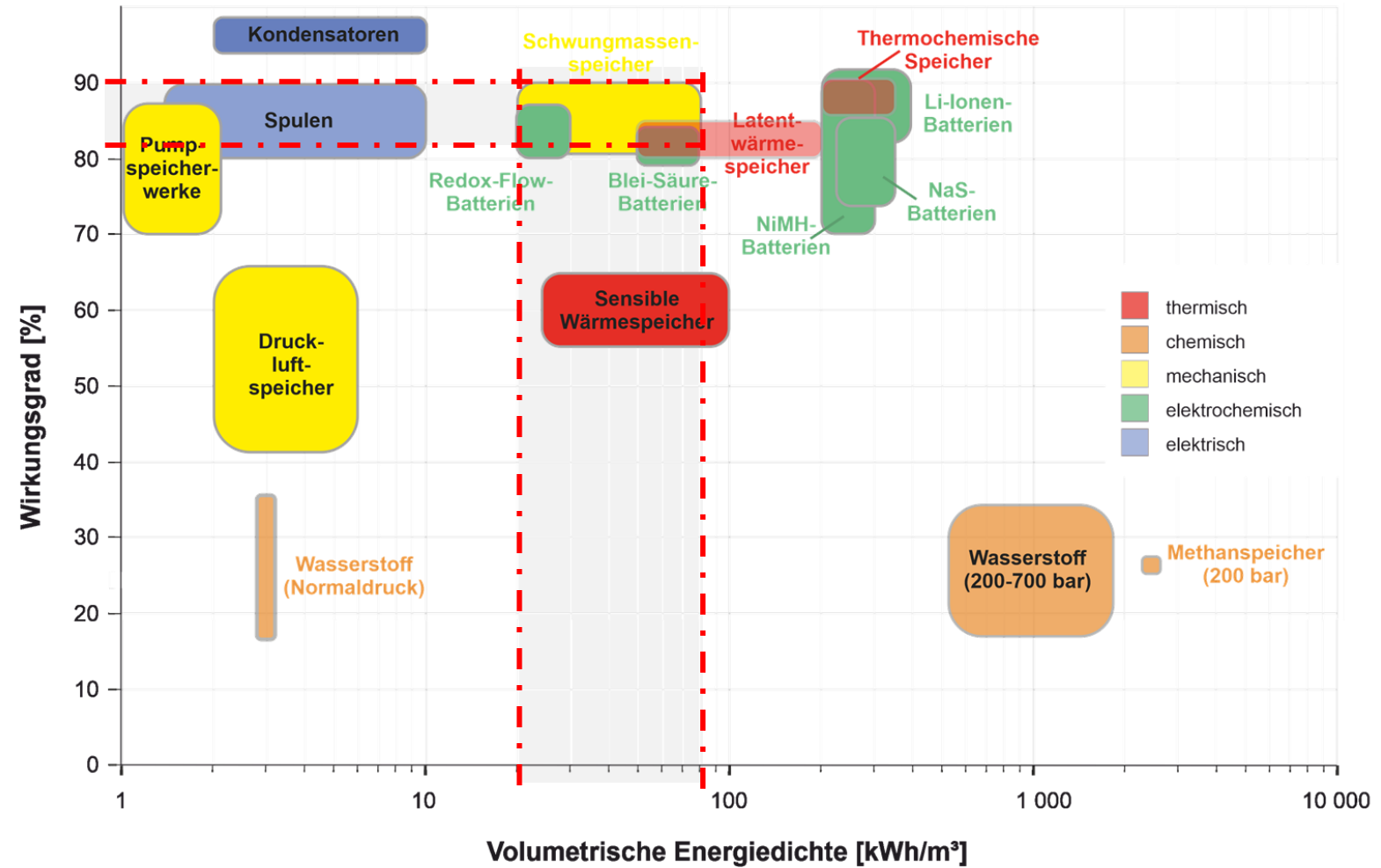


1. Flywheels

1.2 Classification according to efficiency and volumetric energy density

1. Flywheels

1.2 Klassifizierung nach Wirkungsgrad und volumetrischer Energiedichte



1. Flywheels

1.3 Historical applications

Earliest (craft) application

- Potters wheel
- Spinning wheel / spindle

Balanced power generation

- Windmills (system integrated)
- water mills (system integrated)

As a modern machine element

- Steam engine and reciprocating engine, because only a linear movement and recompression or overcoming the dead center is necessary.

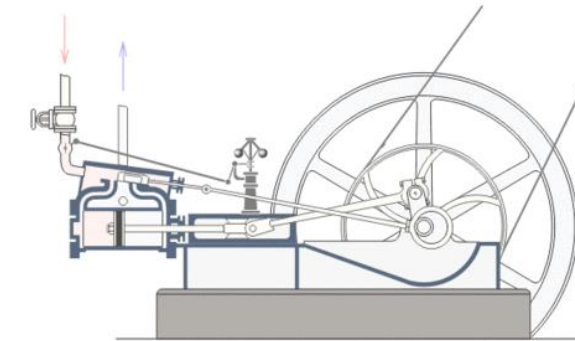
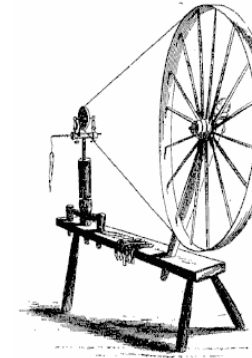
As energy storage in toys

- Toy car with flywheel motor
- Spinning top / yojo

# 1. Flywheels

## 1.3 Historische Anwendungen

- **Früheste (handwerkliche) Anwendung**
  - Töpferscheibe
  - Spinnrad / Spindel
- **Vergleichmäßigte Energieerzeugung**
  - Windmühlen (systemintegriert)
  - Wassermühlen (systemintegriert)
- **Als modernes Maschinenelement**
  - Dampfmaschine und Hubkolbenmotor, da nur eine lineare Bewegung und Rückverdichtung bzw. Überwindung des Totpunktes notwendig ist.
- **Als Energiespeicher im Spielzeug**
  - Spielzeugauto mit Schwungradmotor
  - Kreisel / Jojo



"Spinning wheel", Nopi-ra, Public Domain †; <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8e/Spinning-wheel.png>

"Windmill", osde8info, CC-BY-SA 2.0†; <https://search.creativecommons.org/photos/71d69367-b324-417c-bb72-bdcc1429f1b8>

"Steam engine in action", Panther, CC-BY-SA 3.0†; [https://de.wikipedia.org/wiki/Dampfmaschine#/media/Datei:Steam\\_engine\\_in\\_action\\_\(two-thirds\\_speed\).gif](https://de.wikipedia.org/wiki/Dampfmaschine#/media/Datei:Steam_engine_in_action_(two-thirds_speed).gif)

"Schwungradmotor", Dirk, Public Domain †; [https://de.wikipedia.org/wiki/Frictionsmotor#/media/Datei:Motor\\_barring.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Frictionsmotor#/media/Datei:Motor_barring.jpg)

"Jo-Jo", Kriplozoik, Public Domain †; <https://de.wikipedia.org/wiki/Jo-Jo#/media/Datei:Yo-yo2.jpg>



## 1. Flywheels

### 1.4 Historical applications

#### 1954 Gyrolokomotive

- Charging at intermediate / terminal stations, then driving possible without electrical connection
- theoretically, braking energy can be stored (not realized at that time)
- Lorraine iron ore mine "Mines de Saint Pierremont" –

#### Autotram (since 2005)

- Electromotive drive based on fuel cell and flywheel storage
- As energy storage, if contact to the grid or as a power booster
- Recovery of braking energy
- Later (after an accident) the flywheel was replaced by supercaps.

## 1. Flywheels

### 1.4 Mobilitäts-Anwendungen

#### ➤ 1954 Gyrolokomotive

- Aufladen an Zwischenstationen, dann Fahrt ohne elektrische Verbindung möglich
- theoretisch kann Bremsenergie eingespeichert werden (damals nicht realisiert)
- Lothringische Eisenerzmine „Mines de Saint Pierremont“



AutoTram Busbahn mit optischem Leitsystem im Busbetriebshof Dresden Gruna (95 Jahre Busbetrieb in Dresden); Henry Mühlpfordt, CC-BY-SA 3.0†; [https://de.wikipedia.org/wiki/AutoTram#/media/Datei:AutoTram\\_Busbahn\\_Fraunhofer-Institut\\_in\\_Dresden\\_2009-06-07.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/AutoTram#/media/Datei:AutoTram_Busbahn_Fraunhofer-Institut_in_Dresden_2009-06-07.jpg)



Gyro-Lokomotive untertage; Felix Hasler; <https://rail.lu/materiel/mfogyrolok.html>

#### ➤ Autotram (seit 2005)

- Elektromotorischer Antrieb basierend auf Brennstoffzelle und Schwungradspeicher
- Als Energiespeicher, sofern Kontakt zum Netz oder auch als Leistungsbooster
- Rückgewinnung von Bremsenergie
- Der Schwungradspeicher wurde nach einem Unfall durch Supercaps ersetzt.

## 1. Flywheels

### 1.5 Physical basics

#### Simplified view:

A single mass point  $m$  rotates at speed  $v$  about an axis.

The kinetic energy is then:

$$E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$$

The orbital velocity  $v$  then results from the angular velocity  $\omega$  and the radius  $r$  as follows:

$$v = r \cdot \omega$$

From this it follows:

$$E_{kin} = \frac{1}{2}m(r\omega)^2$$

Here one recognizes the mass moment of inertia  $J$  again with

$$J = mr^2$$

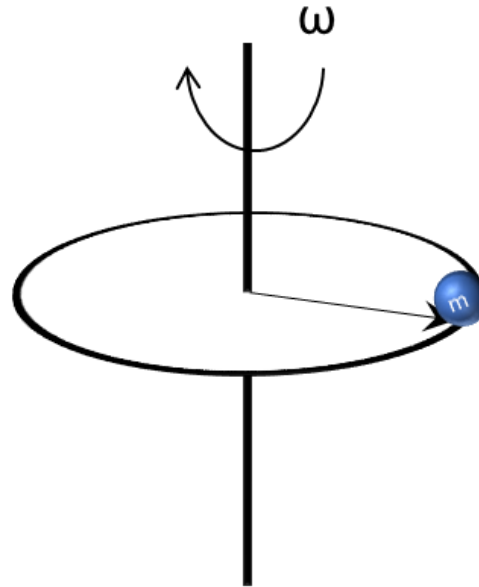
So that the equation is:

$$E_{kin} = \frac{1}{2}J\omega^2$$

The moment of inertia, also moment of inertia, indicates the inertia of a rigid body against a change in its angular velocity in rotation about a given axis (torque divided by angular acceleration).

## 1. Flywheels

### 1.5 Physikalische Grundlagen



Das Trägheitsmoment, auch Massenträgheitsmoment, gibt die Trägheit eines starren Körpers gegenüber einer Änderung seiner Winkelgeschwindigkeit bei der Drehung um eine gegebene Achse an (Drehmoment geteilt durch Winkelbeschleunigung).

#### Vereinfachte Betrachtung

Ein einzelner Massepunkt  $m$  rotiert mit der Geschwindigkeit  $v$  um eine Achse.

Die Kinetische Energie ist dann:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Die Bahngeschwindigkeit  $v$  ergibt sich dann aus der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  und dem Radius  $r$  wie folgt:

$$v = r \cdot \omega$$

hieraus folgt:  $E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r \cdot \omega)^2$

Hierbei erkennt man das Massenträgheitsmoment  $J$  wieder mit  $J = m \cdot r^2$

so dass die Gleichung lautet:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2$$



1. Flywheels

1.5 Physical basics

Stored energy amount:

$$\Delta E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot (\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2)$$

with angular velocity ([n] = s<sup>-1</sup>)

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$$

The moment of inertia is:

- Point mass

$$J_{point\ mass} = m \cdot r^2$$

- Full cylinder

$$J_{cylinder} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2$$

- Hollow cylinder / ring

$$J_{ring} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_1^2 + r_2^2)$$

# 1. Flywheels

## 1.5 Physikalische Grundlagen

### ➤ Eingespeicherte Energiemenge

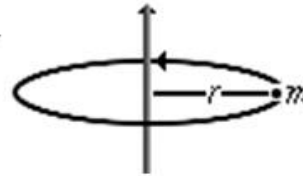
mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  (mit [n] = s<sup>-1</sup>)

$$\Delta E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot (\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2)$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$$

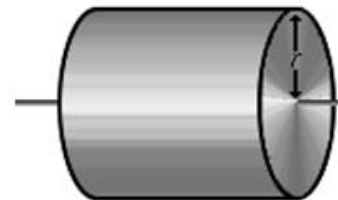
### ➤ Das Massenträgheitsmoment beträgt dabei:

#### Punktmasse



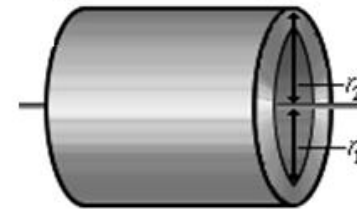
$$J_{point\ mass} = m \cdot r^2$$

#### Vollzylinder



$$J_{cylinder} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2$$

#### Hohlzylinder/Ring



$$J_{ring} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_1^2 + r_2^2)$$

A filled cylinder on a central axis, with radius indicated., GKFX, CC-BY-SA 3.0 † <https://de.wikipedia.org/wiki/Tr%C3%A4gheitsmoment>

A pipe of finite thickness, with its symmetry axis and radii marked., GKFX, CC-BY-SA 3.0 † <https://de.wikipedia.org/wiki/Tr%C3%A4gheitsmoment>

Trägheitsmoment einer Punktmasse um eine Achse, Florian, CC-BY-SA 3.0 † <https://de.wikipedia.org/wiki/Tr%C3%A4gheitsmoment>

1. Flywheels

1.5 Physical basics

State of Charge (SOC) of flywheels (E):

$\omega$ : current angular velocity

$\omega_{min}$ : minimum angular velocity  
(lower limit of the usable speed range)

• maximum angular velocity  
 $\omega_{max}$ : (upper limit of the usable speed range)

Figure shows the quadratic relationship between speed and energy content using a steel flywheel with 16.5 MJ.

# 1. Flywheels

## 1.5 Physikalische Grundlagen

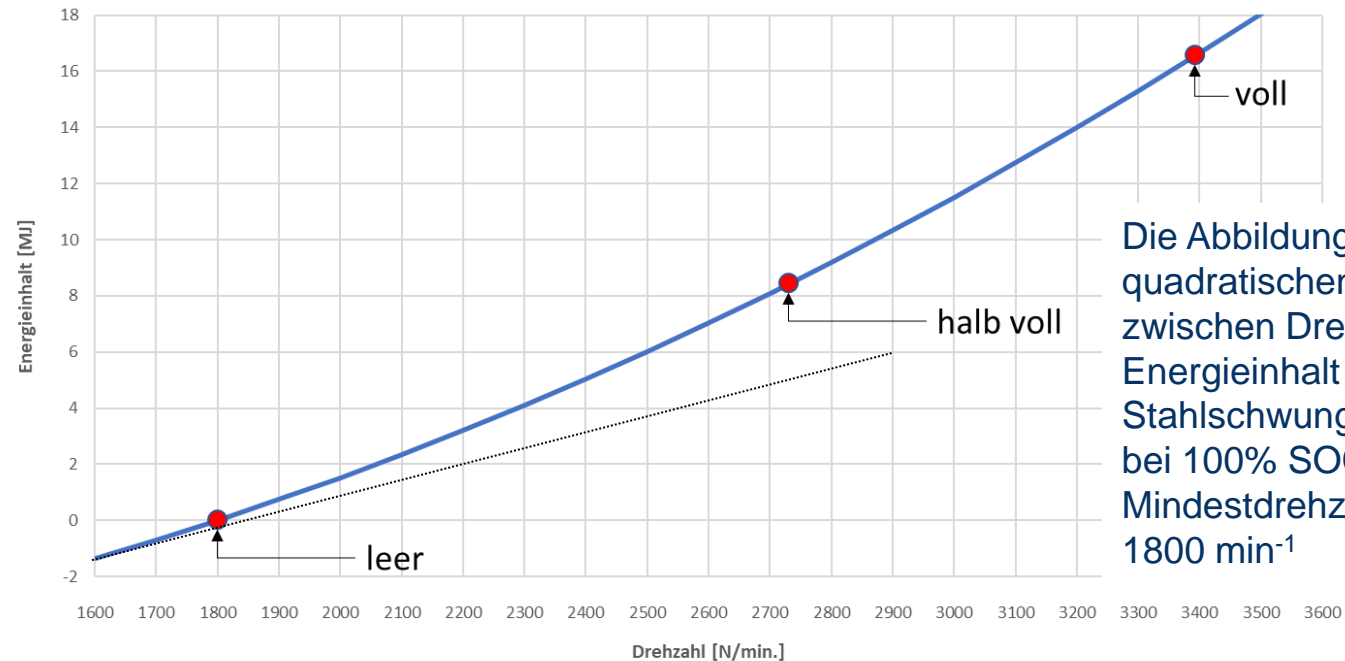
### Ladezustand eines Flywheels (SOC= State of Charge)

$$SOC = \left( \frac{\omega^2 - \omega_{min}^2}{\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2} \right) \cdot 100\%$$

$\omega$ : Aktuelle Winkelgeschwindigkeit

$\omega_{min}$  Minimale Winkelgeschwindigkeit  
(untere Grenze des nutzbaren Drehzahlbereichs)

$\omega_{max}$  Maximale Winkelgeschwindigkeit  
(obere Grenze des nutzbaren Drehzahlbereichs)



Die Abbildung zeigt den quadratischen Zusammenhang zwischen Drehzahl und Energieinhalt anhand eines Stahlschwungrads mit 16,5 MJ bei 100% SOC und einer Minstdrehzahl von ca. 1800 min<sup>-1</sup>

## 1. Flywheels

## 1.5 Physical basics

Formula application:

What is the energy storage capacity of a rotating hollow cylinder?

## 1. Flywheels

## 1.5 Physikalische Grundlagen

## Formelanwendung:

Wie hoch ist die Energiespeicherkapazität eines rotierenden Hohlzylinders ?

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad J_{ring} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_1^2 + r_2^2) \quad \omega = 2 \cdot \pi \cdot n$$

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_1^2 + r_2^2) \right) \cdot (2 \cdot \pi \cdot n)^2$$

$$E_{kin} = m \cdot (r_1^2 + r_2^2) \cdot \pi^2 \cdot n^2$$

## 1. Flywheels

### 1.6 Physical basics

How can the energy storage capacity be increased (hollow cylinder)?

OPTIMAL would be a fast-spinning and heavy flywheel with a large outer and inner diameter

- For stationary applications, high masses (steel, concrete) are possible, but only at a lower speed (risk of bursting).
- High-speed flywheel are mostly made of fibre reinforced plastic because of the higher strength and the less dangerous bursting behavior (defibration instead of large, heavy pieces); but these are also usually rather lightweight.

## 1. Flywheels

### 1.6 Energiespeicherkapazität

Wie kann die Energiespeicherkapazität erhöht werden ?

**Beispiel: Hohlzylinder**  $E_{kin} = m \cdot (r_1^2 + r_2^2) \cdot \pi^2 \cdot n^2$

**OPTIMAL** wäre ein möglichst **schnell drehendes** ( $n \uparrow$ ), **schweres** ( $m \uparrow$ ) Schwungrad mit **großem Außendurchmesser** ( $r_2 \uparrow$ ) und **großem Innendurchmesser** ( $r_1 \uparrow$ )

- Bei stationären Anwendungen sind hohe Massen (Stahl, Beton) möglich, aber bei nur geringerer Drehzahl (Berstgefahr).
- Schnelldrehende Schwungradmassenspeicher sind zumeist aus Spezial-Kunststoff (faserverstärkt), wegen der höheren Festigkeit und des ungefährlicheren Berstverhaltens (Zerfaserung statt großer, schwerer Stücke); damit sind diese aber auch zumeist eher leicht.

## 1. Flywheels

## 1.7 Materials for Flywheels

## Materials / Assembly of Flywheels

## Advantages / Disadvantages of Materials

- Isotropic material (steel, titanium): The tensile strength is independent of the load direction
- Anisotropic material (GRP, CFRP): The tensile strength in the direction of the fibers is more than 20 times higher than across it.
- Fiber-reinforced plastics can store more energy in conjunction with metal despite their lower density due to their higher specific strength
- At up to 100,000 rpm, circumferential speeds of up to 1,000 m / s are achieved in a vacuum, 2,000 m / s are considered possible

## 1. Flywheels

## 1.7 Materialien für Flywheels

## Materialien / Aufbau von Schwungrädern

Material		Tensile strength	Density	Max. speed of rotation	Possible energy density
Material		Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Max. Rotationsgeschwindigkeit [m/s]	Potentielle Energiedichte [Wh/kg]
Stahl	isotrop	1300	7800	410	29,4
Titan	isotrop	1150	5100	570	39,7
GFK	anisotrop	1300	1900	820	93,1
CFK	anisotrop	6300	1546	1570	436,1

- Isotropes Material (Stahl, Titan): Die Zugfestigkeit ist unabhängig von der Lastrichtung
- Anisotropes Material (GFK, CFK): In Faserrichtung ist die Zugfestigkeit mehr als 20 mal höher als quer dazu.
- Faserverstärkte Kunststoffe können i.V. zu Metall trotz geringerer Dichte wegen der höheren spezifischen Festigkeit mehr Energie speichern
- Bei bis zu 100.000 U/min werden Umfangsgeschwindigkeiten von bis zu 1.000 m/s im Vakuum erreicht, 2.000 m/s gelten als möglich

Source: Sterner, M.; Stadler, I. et al., „Energiespeicher“, p. 512, Springer 2014

## 1. Flywheels

### 1.8 Construction and efficiency improvement

#### Efficiency losses

- Mainly losses in the flywheel due to bearing friction, friction in air

#### Efficiency improvement

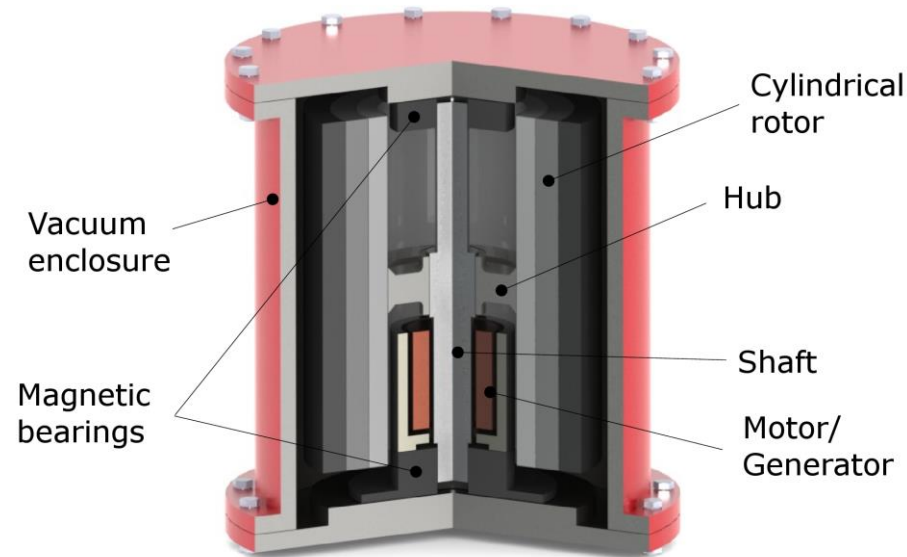
- Flywheel in a vacuum if possible
- Magnetically stored as possible

#### Self-discharge

- A disadvantage is the self-discharge (3-20% per hour) caused by air friction and bearing losses.
- Self-discharge remains the biggest problem with flywheel mass storage devices, therefore mostly only as short-term storage devices

## 1. Flywheels

### 1.8 Aufbau und Wirkungsgradverbesserung



The main components of a typical flywheel, Pjrensburg, CC-BY-SA 3.0 † [https://en.wikipedia.org/wiki/Flywheel\\_energy\\_storage#/media/File:Example\\_of\\_cylindrical\\_flywheel\\_rotor\\_assembly.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Flywheel_energy_storage#/media/File:Example_of_cylindrical_flywheel_rotor_assembly.png)

#### ➤ Wirkungsgradverluste

- Hauptsächlich Verluste beim Schwungrad durch Lagerreibung, Reibung an Luft

#### ➤ Wirkungsgradverbesserung

- Schwungrad möglichst im Vakuum
- möglichst magnetisch gelagert

#### ➤ Selbstentladung

- Ein Nachteil ist die Selbstentladung (3-20 % pro Stunde), die durch Luftreibung und Verluste des Lagers entstehen.
- Die Selbstentladung bleibt das größte Problem bei Schwungradmassenspeichern, daher zumeist nur als Kurzzeitspeicher



## 1. Flywheels

### 1.9 Products/Applications

Company STORNETIC, product EnWheel®

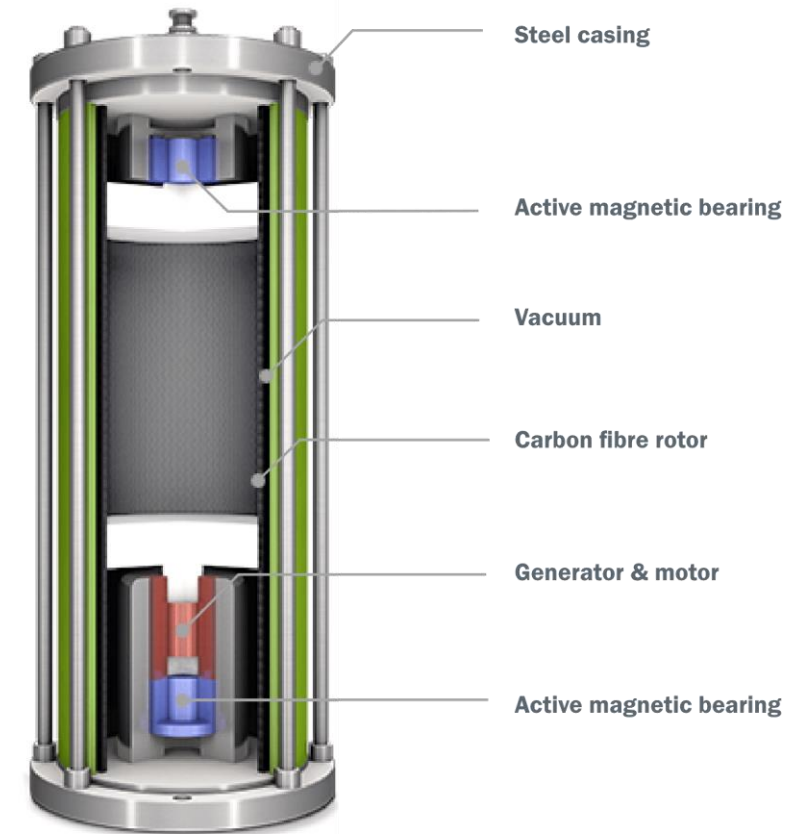
Know-how of the company comes from gas centrifuge technology

## 1. Flywheels

### 1.9 Produkte/Anwendungsbeispiele

Firma STORNETIC mit dem Produkt EnWheel®  
(Know-how der Firma entstammt der Gaszentrifugentechnik)

- Pro Flywheel 22 kW und 3,6 kWh
- Pro Container 28 Flywheels mit insgesamt 616 kW und 100 kWh
- Langlebig und emissionsfrei
- Keine relevante Alterung (verglichen mit Batterien)
- Hohe Sicherheitsanforderung wegen sehr schnell drehender Teile



Quelle: FIRMA STORNETIC; [https://www.stornetic.com/wp-content/uploads/2022/02/flywheel\\_diagram\\_UK@2x.png](https://www.stornetic.com/wp-content/uploads/2022/02/flywheel_diagram_UK@2x.png)

## 1. Flywheels

### 1.9 Products/Applications

#### Project DYNASTORE

- German research project for optimized flywheel storage
- Within 20 ms 2 MW output to the medium-voltage network for a maximum of 20 seconds
- More compact and lighter flywheels
- Reduced maintenance and service life of 20 years
- Reduction of standby losses (storage) by 90%

## 1. Flywheels

### 1.9 Produkte/Anwendungsbeispiele

#### Projekt DYNASTORE



Quelle: [https://www.apex-portal.com/ecosolutions/analysederexergie/images/energiespeichern/241\\_dynastore.jpg](https://www.apex-portal.com/ecosolutions/analysederexergie/images/energiespeichern/241_dynastore.jpg)

- Deutsches Forschungsprojekt für optimierten Schwungrad-Stromspeicher
- innerhalb von 20 ms 2 MW Abgabe ans Mittelspannungsnetz für die Dauer von max. 20 Sekunden
- Kompaktere und leichtere Schwungräder
- Reduzierter Wartungsaufwand und Lebensdauer von 20 Jahren
- Verringerung der Standby-Verluste (Lagerung) um 90%

## 1. Flywheels

### 1.9 Products/Applications

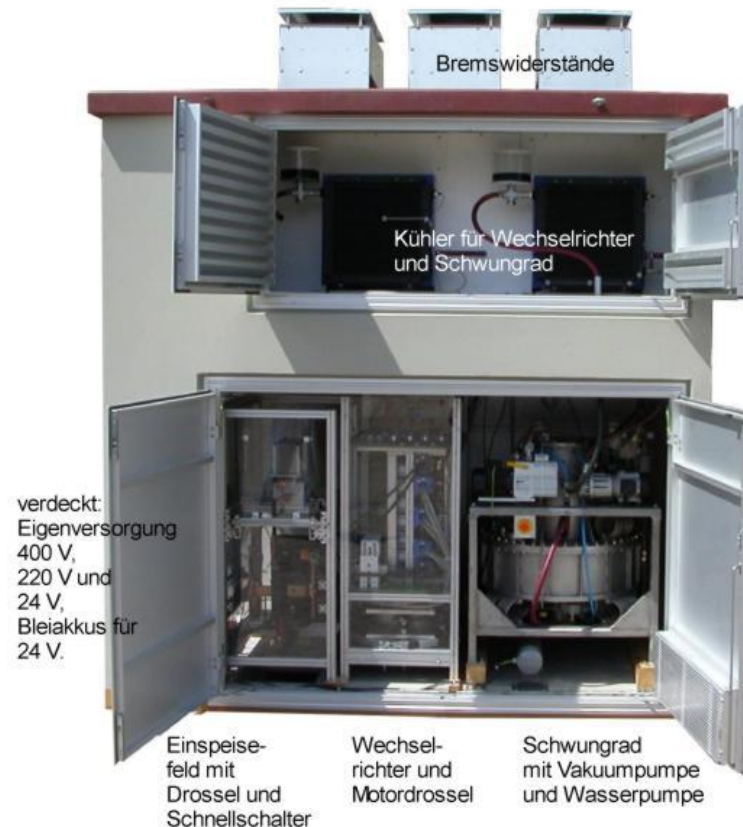
Flywheel from Rosseta at the tram company in Zwickau

- Tram weighs up to 80 t and can feed back up to 2 kWh with each braking process
- High demands on accumulators due to constant load changes every minute - flywheel accumulators are the right solution

## 1. Flywheels

### 1.9 Produkte/Anwendungsbeispiele

Schwungradmassenspeicher der Firma Rosseta (Aufbau siehe Foto Typ „T2“; ca. 1,8 m x 3m) bei Zwickauer Straßenbahnen



Quelle: Rosseta Technik GmbH. F- Täubner; <http://www.rosseta.de/fotos/betonsc.jpg>

- Straßenbahn wiegt bis zu 80 t und kann bei jedem Bremsvorgang bis zu 2 kWh zurückspeisen
- Hohe Anforderungen an Speicher durch ständige Lastwechsel im Minutentakt – Schwungradspeicher sind die richtige Lösung

1. Flywheels

1.9 Products/Applications

Flywheel in a container crane

Approximately every 75 s, a container weighing 30 t is lowered by 15 m braked

# 1. Flywheels

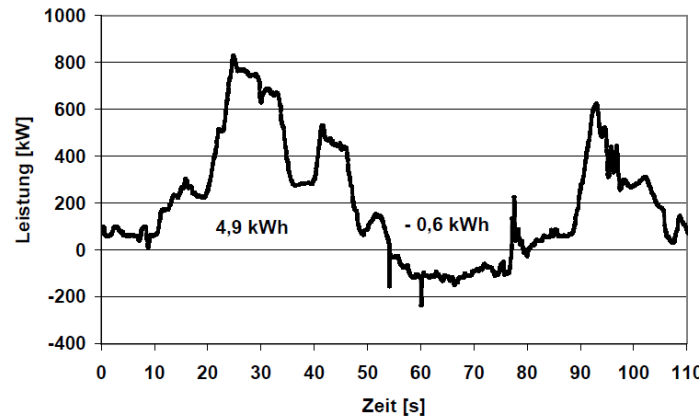
## 1.9 Produkte/Anwendungsbeispiele

### Schwungradmassenspeicher im Containerkran



Typischer Hafenkran (siehe Abbildung):

- Ungefähr alle 75 s wird ein Container der Masse 30 t um 15 m gebremst abgesenkt
- Energieeinsparung pro Jahr ca. 82 MWh (lt. Quelle)



$$E = m \times h \times 9,81 \times \eta_1 \times \eta_2 \times t_2 \times t_3 / (1000 \times t_1)$$

Formelzeichen	Bedeutung	Beispiel: Containerkran
<b>E</b>	Energie-Einsparung pro Jahr in kWh	81.889
<b>m</b>	Masse der abzusenkenden Last in kg	30.000
<b>h</b>	Weg des Absenkens in m	15
<b>η1</b>	Wirkungsgrad der Bremsenergie-Erzeugung	0,5
<b>η2</b>	Wirkungsgrad der Energiespeicherung und -rückspeisung	0,75
<b>t1</b>	Durchschnittlicher Abstand zwischen zwei Absenkvorgängen in s	75
<b>t2</b>	Arbeitsstunden pro Tag	14
<b>t3</b>	Arbeitstage pro Jahr	265

Alle Abbildungen aus: Rosseta Technik GmbH. F- Täubner „Reduzierung des Energiebedarfs durch Schwungradspeicher; <http://www.rosseta.de/texte/vor-sps09.pdf>



## 1. Flywheels

### 1.9 Products/Applications

MPI - Fusion Research (Short-time Energy for Laser System)

The experimental pulse requires a total of 400 megawatts of electrical power for 10 seconds. The largest flywheel generator in the IPP can store 1514 megajoules or 421 kilowatt hours of usable energy. The 220-ton flywheel is accelerated from a standstill to 1650 revolutions per minute in 30 minutes by a drive motor fed by the mains. Its peripheral speed reaches up to 900 kilometers per hour, almost the speed of sound.

During an experiment pulse, the flywheel then drives an electrical three-phase generator, decelerating to 1270 revolutions per minute. The three-phase generator can provide up to 155 megawatts of power for around 10 seconds. After the energy has been released, the flywheel is brought up to full speed again in six minutes.

## 1. - Flywheels

### 1.9 Produkte/Anwendungsbeispiele

MPI – Fusionsforschung (Kurzzeitenergie für Magnetfeldspulen und Plasmaheizung)

Experimentierpuls benötigt für 10 Sekunden eine elektrische Leistung von insgesamt 400 Megawatt. Der größte Schwunradgenerator im IPP kann 1514 Megajoule oder 421 Kilowattstunden nutzbare Energie speichern. Das 220 Tonnen schwere Schwunrad (siehe Bild) wird dazu von einem aus dem Netz gespeisten Antriebsmotor in 30 Minuten von Stillstand auf 1650 Umdrehungen pro Minute beschleunigt. Seine Umfangsgeschwindigkeit erreicht bis zu 900 Kilometer pro Stunde, also nahezu Schallgeschwindigkeit.



Foto: IPP, Axel Griesch; <https://www.ipp.mpg.de/4241286/generatoren>

Während eines Experimentpulses treibt das Schwunrad dann einen elektrischen Drehstromgenerator an, wobei es auf 1270 Umdrehungen pro Minute abbremst. Der Drehstromgenerator kann etwa 10 Sekunden lang bis zu 155 Megawatt Leistung zur Verfügung stellen. Nach der Energieabgabe ist das Schwunrad in jeweils sechs Minuten wieder auf volle Touren gebracht.

## 1. Flywheels

### 1.9 Products/Applications

VIDEO: Promotional video Beacon POWER

## 1. Flywheels

### 1.9 Produkte/Anwendungsbeispiele

VIDEO: Werbevideo Beacon POWER [0:00 – 1:24] 

Das Video zeigt recht gut den Aufbau der Flywheels sowie die Installation vor Ort.



Power storage with Flywheels

<https://youtu.be/eCtlfj4kMJs>



## 1. Flywheels

### 1.11 Summary / Take aways

1. Flywheel mass storage devices store the energy in the rotating mass
2. High moments of inertia and high speeds increase capacity
3. Fiber composite materials (anisotropic) enable significantly higher speeds, so that higher energy storage capacities can be achieved despite the lower mass.
4. Operation with as little friction as possible, i.e. vacuum and magnetic bearings
5. High conversion efficiency, but high self-discharge rate. Therefore rather short-term storage.
6. Danger in the event of an accident (rotating masses), high-strength materials required
7. Hardly any aging (neither in terms of calendar nor according to the number of cycles)
8. Applications are:
  - Seconds reserve: Smoothing short-term load and power fluctuations
  - Bridging power interruptions and "Premium Power"
  - Provision or capping of load peaks (e.g. start-up processes)
  - Short-term storage of otherwise unusable energy in mobile and stationary systems (e.g. B. from braking energy or gantry cranes).

## 1. Mechanische Energiespeicher - Flywheels

### 1.11 Kurzzusammenfassung / „Take aways“

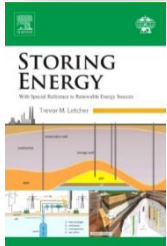
1. Schwungradmassenspeicher speichern die Energie in der rotierenden Masse
2. Hohe Trägheitsmomente, hohe Geschwindigkeiten erhöhen die Kapazität
3. Faserverbundwerkstoffe (anisotrop) ermöglichen deutlich höhere Geschwindigkeiten, so dass trotz geringerer Masse höhere Energiespeicherkapazitäten erreicht werden.
4. Möglichst reibungsarmer Betrieb, d.h. Vakuum und Magnetlager
5. Hoher Wandlungswirkungsgrad, aber hohe Selbstentladungsrate. Daher eher Kurzzeitspeicher.
6. Gefahr bei Havarie (rotierende Massen), hochfeste Werkstoffe notwendig
7. Kaum Alterung (weder kalendarisch noch nach Zyklenzahl)
8. Anwendungen sind:
  - Sekundenreserve: Glättung von kurzzeitigen Last- und Leistungsschwankungen
  - Überbrückung von Leistungsunterbrechungen und „Premium Power“
  - Bereitstellung bzw. Kappung von Lastspitzen (z. B. Anfahrvorgänge)
  - Kurzfristige Speicherung sonst nichtnutzbarer Energie in mobilen und stationären Systemen (z. B. von Bremsenergie oder Portalkrane).

## Weiterführende Literatur

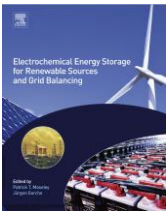
### Further Reading










- Michael Sterner, Ingo Stadler (Hrsg.); „Energiespeicher – Bedarf – Technologien – Integration“
- Kapitel 9.3.1 „Schwungradspeicher“



- Trevor M. Letcher (ed.); „STORING ENERGY: with Special Reference to Renewable Energy Sources“
- Chapter 10 „Flywheels“



- Moseley, P.T.; Garch J. [Hrsg./Ed.]: „Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing“
- Chapter 7.3.3 “Flywheels”

†CC-Lizenzen	Bezeichnung	Version	Link zum Lizenz-/Vertragstext
	CC0 Bedingungslose Lizenz	Vers. 1.0	<a href="https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/legalcode">https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/legalcode</a>
	CC-BY Attribution (Namensnennung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	<a href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by/2.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by/2.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by/1.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by/1.0/legalcode</a>
	CC-BY-SA Attribution ShareAlike (Namensnennung-Weitergabe unter gleichen Bedingungen)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	<a href="http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-sa/1.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-sa/1.0/legalcode</a>
	CC-BY-ND Attribution NoDerivatives (Namensnennung-Keine Bearbeitung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	<a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nd/2.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nd/2.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nd/1.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nd/1.0/legalcode</a>
	CC-BY-NC Attribution NonCommercial (Namensnennung-Nicht kommerziell)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	<a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc/1.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc/1.0/legalcode</a>
	CC-BY-NC-SA Attribution NonCommercial ShareAlike (Namensnennung-Nicht kommerziell-Weitergabe unter gleichen Bedingungen)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	<a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/1.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/1.0/legalcode</a>
	CC-BY-NC-ND Attribution NonCommercial NoDerivatives (Namensnennung-Nicht kommerziell-Keine Bearbeitung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	<a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/1.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/1.0/legalcode</a>

**Prof. Dr. Christian Doetsch**

Lehrstuhl »Cross Energy Systems«

c/o Fraunhofer UMSICHT  
+49 208 8598-1195

christian.doetsch@rub.de

QR-Code: Business Card



# ORCA.nrw

Technology  
Arts Sciences  
TH Köln

RUHR  
UNIVERSITÄT  
BOCHUM

RUB

Hochschule  
Bonn-Rhein-Sieg

Hochschule Düsseldorf  
University of Applied Sciences  
HSD

ISEA

Stromrichter-  
technik und  
Elektrische  
Antriebe

RWTH AACHEN  
UNIVERSITY

FH AACHEN  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Ein Kooperationsvorhaben empfohlen durch die:



INNOVATION DURCH KOOPERATION

Gefördert durch:

Ministry of Culture and Science  
of the State of  
North Rhine-Westphalia



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.  
All logos and explicitly marked elements used are excluded from this license. [www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0](http://www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0)

**Vorlesung :** **Energiespeichertechnologien- & Anwendungen**  
**RUB | MB-Master | Kursnr.: 139030**

**Lecture:** **Energy Storage Technologies and Applications**

**Vortragender**

***Prof. Dr. Christian Doetsch***

Lehrstuhl »Cross Energy Systems«

c/o Fraunhofer UMSICHT  
 +49 208 8598-1195

christian.doetsch@rub.de

**2. Mechanische Energiespeicher Teil b –**  
 „Pumpspeicherkraftwerke“

**2. Mechanical Energy Storage part b –**  
 „Pumped Hydro“

**Vorlesung #2b**

**| Lecture #2b**



Ministerium für  
 Kultur und Wissenschaft  
 des Landes Nordrhein-Westfalen



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz. Ausgenommen von der Lizenz sind die verwendeten Logos sowie alle anders gekennzeichneten Elemente. [www.creativecommons.org/licences/by-sa/4.0](http://www.creativecommons.org/licences/by-sa/4.0)



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License. All logos and explicitly marked elements used are excluded from this license. [www.creativecommons.org/licences/by-sa/4.0](http://www.creativecommons.org/licences/by-sa/4.0)



## 2. Pumped Hydro Energy Storage (PHES)

### Content ⇒ Learning objectives

- Functional principle, classification, areas of application  
⇒ Introduction to the technology
- Physical basics, calculation of energy content  
⇒ Basic understanding of physical relationships and the simplest calculation
- Typical specifications, design variants ⇒ Understanding in practice

## 2. Pumpspeicherkraftwerke

### Inhalt ⇒ Lernziele

- Funktionsprinzip, Klassifizierung, Einsatzgebiete  
⇒ Heranführung an die Technologie
- Physikalische Grundlagen, Berechnung Energieinhalt  
⇒ Grundverständnis für physikalische Zusammenhänge und einfachste Berechnung
- Typische Spezifikationen, Ausführungsvarianten  
⇒ Verständnis für die Praxis



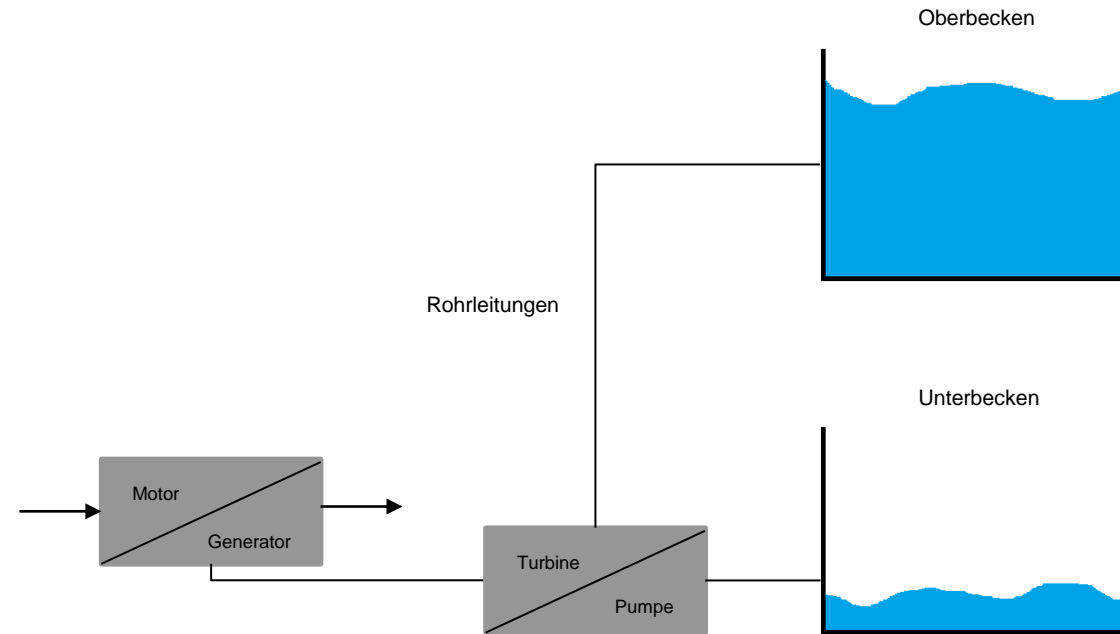
2. Pumped Hydro Energy Storage (PHES)

Charge:  
Electrically driven pumps carry water from the lower to the upper basin

Storage:  
Water is stored in the higher upper basin

Discharge:  
Water from the upper basin flows through turbines that generate electricity by means of a generator

2. Pumpspeicherkraftwerke



Einspeicherung	Speicherung	Ausspeicherung
Elektrisch angetriebene Pumpen befördern Wasser aus dem Unterbecken in das höhergelegene Oberbecken	Wasser wird im höhergelegenen Oberbecken gespeichert	Wasser aus dem Oberbecken strömt durch Turbinen, die mittels Generator Strom erzeugen, in das Unterbecken

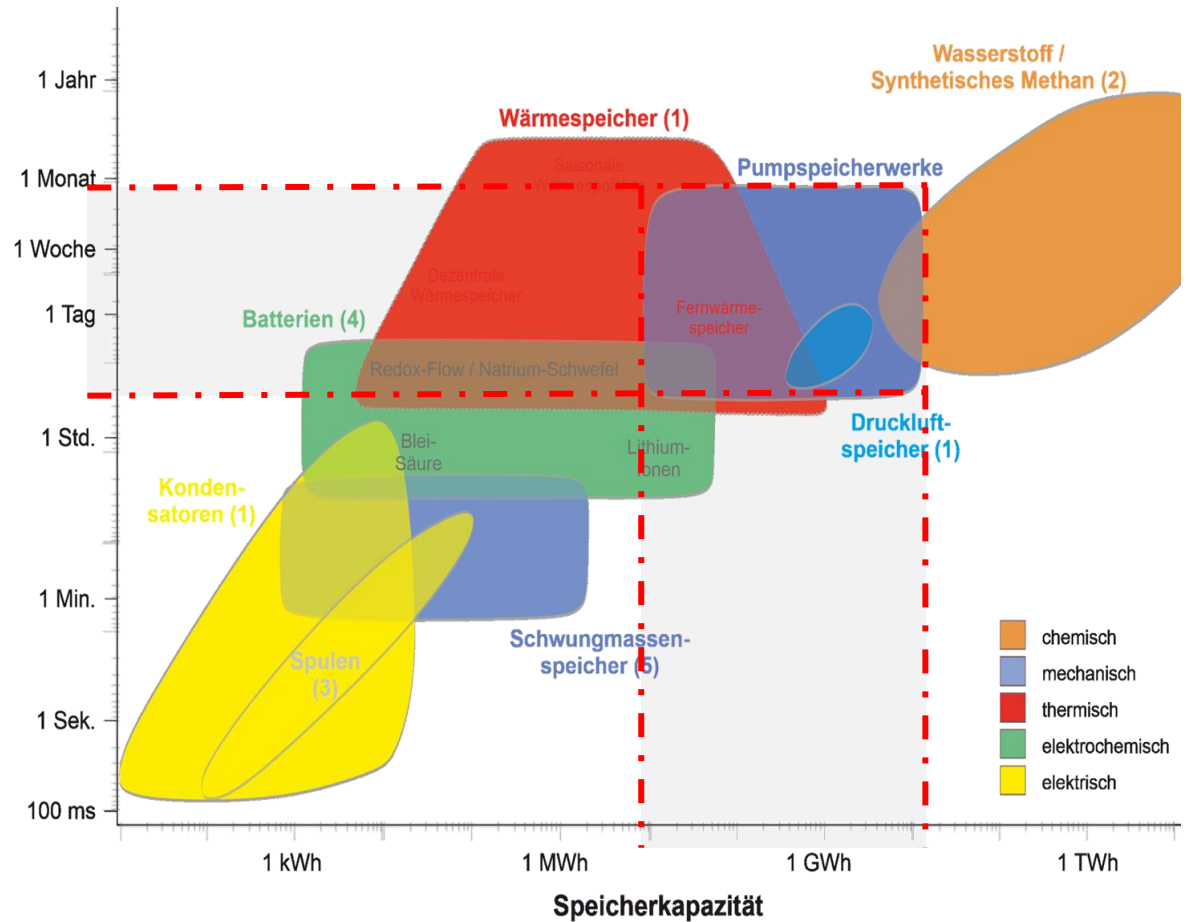
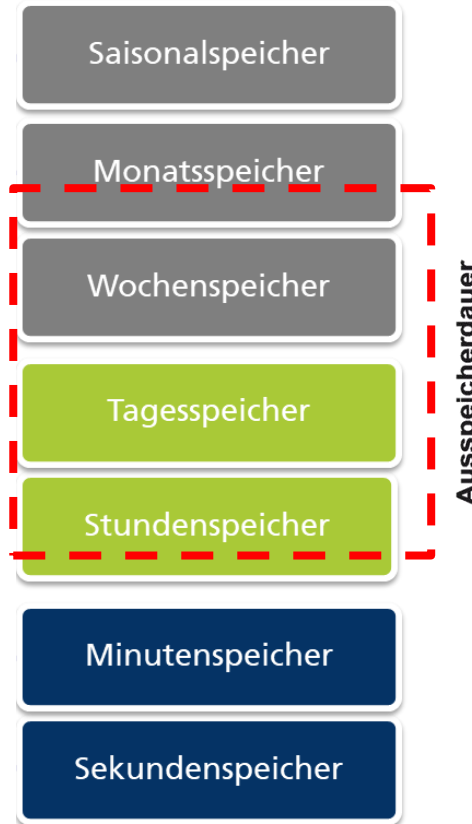
2. Pumped Hydro Energy Storage (PHES)

2.1 Classification according to storage performance and capacity

- Seasonal storage
- Monthly storage
- Weekly storage
- Daily storage
- Hourly storage
- Storage for minutes
- Storage for seconds

2. Pumpspeicherkraftwerke

2.1 Klassifizierung hinsichtlich Ausspeicherzeit und Speicherkapazität

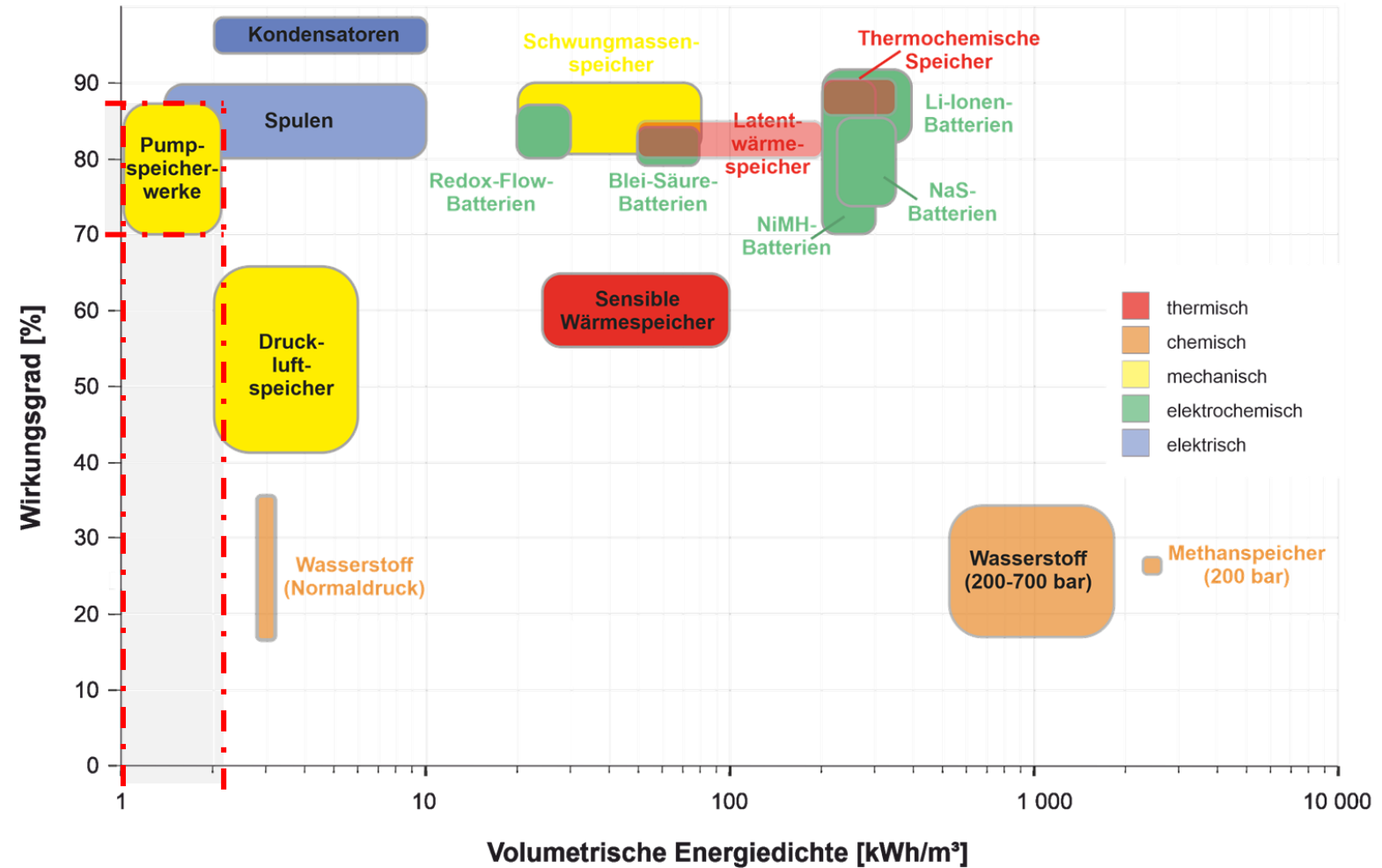


2. Pumped Hydro Energy Storage (PHES)

2.2 Classification according to efficiency and volumetric energy density

## 2. Pumpspeicherkraftwerke

### 2.2 Klassifizierung nach Wirkungsgrad und volumetrischer Energiedichte



2. Pumped Hydro Energy Storage (PHES)

2.2 Basics

Typical characteristics

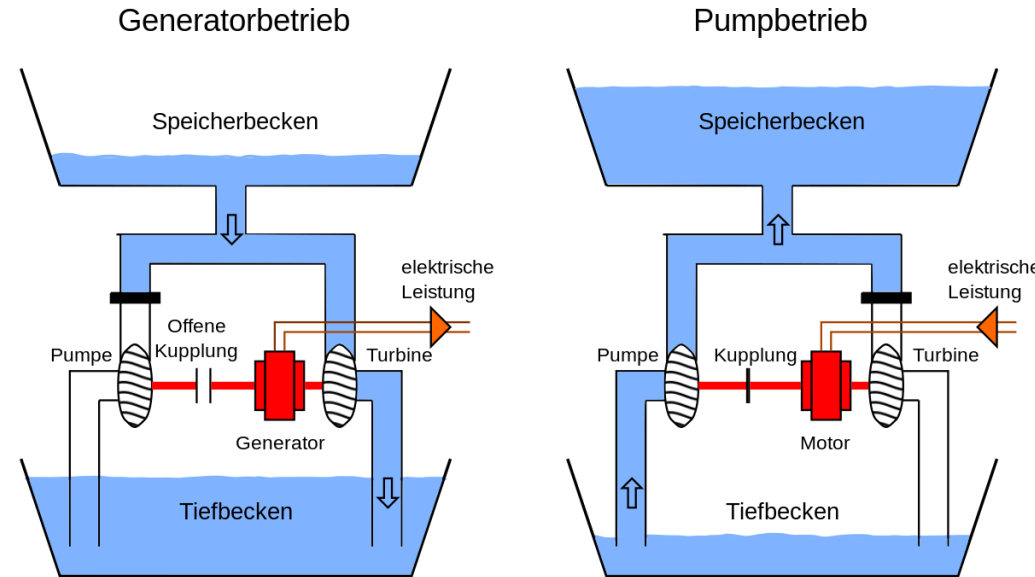
- Cycle efficiency = 70–85 %
- Energy density = 0.5–1.4 kWh/m<sup>3</sup> (200–500 m)

Symbols

- E = potential energy
- V = Volume
- g = acceleration of gravity
- ρ = density of water
- Δh = effective fall height

2. Pumpspeicherkraftwerke

2.3 Grundlagen



$$E = V \cdot \rho \cdot g \cdot \Delta h$$

- E potenzielle Energie
- V Volumen
- g Erdbeschleunigung  $\left( g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)$
- ρ Dichte des Wassers  $\left( \rho \approx 1.000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$
- Δh effektive Fallhöhe

➤ Typische Kenndaten

- Anlagennutzungsgrad = 70–85%<sub>AC-AC</sub>
- Energiedichte = 0,5–1,4 kWh/m<sup>3</sup> (200-500 m)

Prinzipaufbau eines Pumpspeicherkraftwerks mit ternärem Maschinensatz im Generator- oder Pumpbetrieb, wdw, CC-BY-SA 4.0 [https://de.wikipedia.org/wiki/Pumpspeicherkraftwerk#/media/Datei:Prinzip\\_Pumpspeicherkraftwerk.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Pumpspeicherkraftwerk#/media/Datei:Prinzip_Pumpspeicherkraftwerk.svg)

## 2. Pumped Hydro Energy Storage (PHES)

 2.3 EXCURSUS: Derivation for  $g = 9.81 \text{ m}^2 / \text{s}^2$ 

Why is the acceleration due to gravity  
 $g = 9.81 \text{ m} / \text{s}^2$

Derivation from the general gravitational force  
 $F_G$

Gravitational constant  $G$

Mass of the Earth  $m_E$

Test mass (human/test specimen)  $m_x$

Radius of the earth  $r$

## 2. Pumpspeicherkraftwerke

 2.3 EXKURS: Herleitung für  $g=9,81 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 

 ➤ Wieso ist die Erdbeschleunigung  $g=9,81 \text{ m/s}^2$ 

Herleitung aus der allgemeinen Gravitationskraft  $F_G$

$$F_G = G \cdot \frac{m_E \cdot m_x}{r^2}$$

$$\cancel{m_x} \cdot a = \cancel{m_x} \cdot \left( G \cdot \frac{m_E}{r_E^2} \right)$$

$$a = G \cdot \frac{m_E}{r_E^2}$$

$$g \approx 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Gravitationskonstante  $G$ :  $6,674 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2}$

Masse der Erde  $m_E$ :  $5,972 \cdot 10^{24} \text{ kg}$

Prüfmasse (Mensch/Prüfkörper)  $m_x$

Radius der Erde  $r$ :  $6371 \text{ km}$



## 2. Pumped Hydro Energy Storage (PHES)

2.3 EXCURSUS: Derivation for  $E=m \cdot g \cdot h$ 

Why is the potential energy linear with altitude? (Answer: it actually isn't)

Derivation from the path integral over the force

## 2. Pumpspeicherkraftwerke

2.3 EXKURS: Herleitung für  $E=m \cdot g \cdot h$ 

➤ **Wieso ist die potentielle Energie linear zur Höhe?** (Antwort: Ist sie eigentlich nicht)

Herleitung aus dem Wegintegral über die Kraft

$$\begin{aligned}
 W &= - \int_{r_0}^{r_0+h} F_G \cdot dr = - \int G \cdot \frac{m_E \cdot m_x}{r^2} dr = -G \cdot m_e \cdot m_x \cdot \int \frac{1}{r^2} dr \\
 &= -G \cdot m_e \cdot m_x \cdot \left| -\frac{1}{r} \right|_{r_0}^{r_0+h} = -\frac{G \cdot m_e}{r_0^2} \cdot r_0^2 \cdot m_x \cdot \left( -\frac{1}{r_0+h} + \frac{1}{r_0} \right) \\
 &= g \cdot m_x \cdot \left( r_0 - \frac{r_0^2}{r_0+h} \right) = g \cdot m_x \cdot \left( \frac{r_0(r_0+h) - r_0^2}{r_0+h} \right) \\
 &= g \cdot m_x \cdot \left( \frac{r_0 \cdot h}{r_0+h} \right) = g \cdot m_x \cdot \left( \frac{h}{\frac{r_0+h}{r_0}} \right) \\
 &= g \cdot m_x \cdot \left( \frac{h}{1+\frac{h}{r_0}} \right) = g \cdot m_x \cdot h \cdot \left( \frac{1}{1+\frac{h}{r_0}} \right)
 \end{aligned}$$

wobei für  $r_0 \gg h$  gilt, dass  $\frac{h}{r_0} \rightarrow 0$  geht.

2. Pumped Hydro Energy Storage (PHES)

2.4 Turbine types

Turbines are usually designed according to the head and volume flow.

The three main types of pumps are

- Pelton turbine
- Francis turbine
- Kaplan turbine

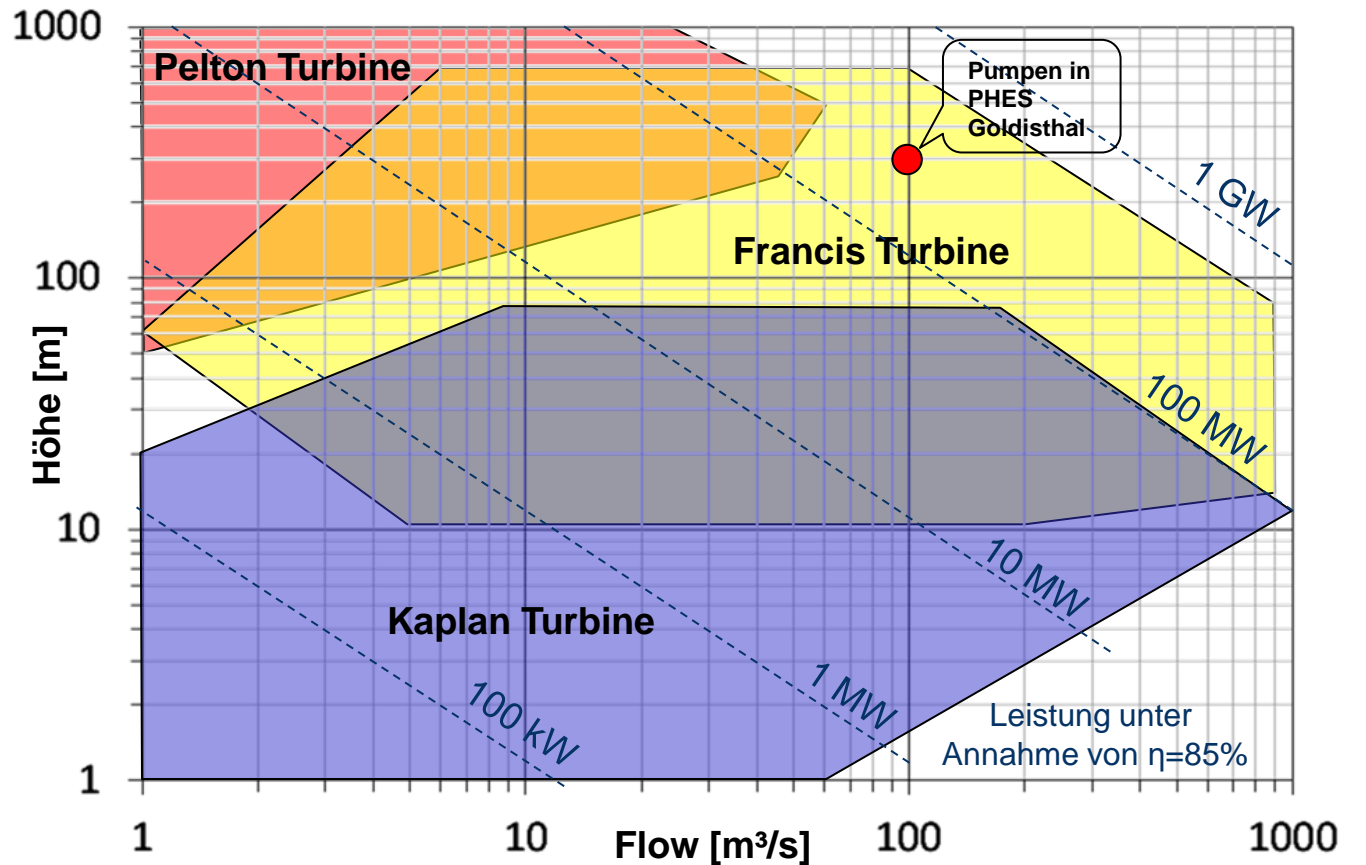
2. Pumpspeicherkraftwerke

2.4 Turbinentypen

Turbinen werden nach Fallhöhe und Volumenstrom zumeist ausgelegt.

Die drei wichtigsten Turbinentypen sind

- Pelton Turbine
- Francis Turbine
- Kaplan Turbine



2. Pumped Hydro Energy Storage (PHES)

2.4 Turbine types

Pelton turbine

- High head and low volume flow
- High wear (sand, water speed)
- no possibility of pumping

Francis turbine

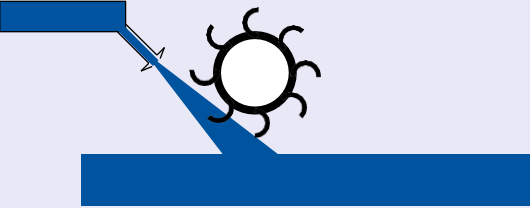
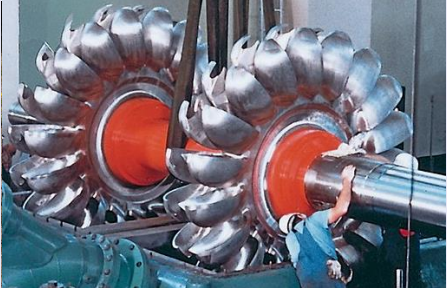
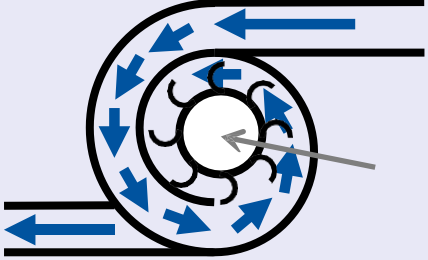

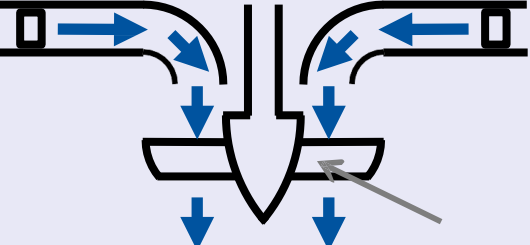

- Most frequently used turbine
- Medium, drop height
- Not suitable for fluctuating fall heights
- Pumping option

Kaplan turbine

- Ideal for low to very low heights
- Blade adjustment for fluctuating volume flows
- Most often for river power plants

2. Pumpspeicherkraftwerke

2.4 Turbinentypen

<p>Pelton Turbine</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hohe Fallhöhe und geringer Volumenstrom</li> <li>▪ Hoher Verschleiß (Sand, Wassergeschwindigkeit)</li> <li>▪ keine Pumpmöglichkeit</li> </ul>		
<p>Francis Turbine</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Häufigste eingesetzte Turbine</li> <li>▪ Mittlere, Fallhöhe</li> <li>▪ Nicht für schwankende Fallhöhe geeignet</li> <li>▪ Pumpmöglichkeit</li> </ul>		
<p>Kaplan Turbine</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ideal für niedrige bis sehr niedrige Fallhöhen</li> <li>▪ Schaufelverstellung für schwankende Volumenströme</li> <li>▪ Häufigst für Flusskraftwerke</li> </ul>		

"Pelton turbine", Voith Siemens Hydro Power, CC BY-SA 3.0†; <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=544820>  
 "Francis turbine", Stahlkocher, CC-BY-SA 3.0 †; [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d1/Francis\\_Turbine\\_High\\_flow.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d1/Francis_Turbine_High_flow.jpg)  
 "Kaplan turbine", Reinraum – Technisches Museum Wien, CC-0 †; [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/03/Kaplan\\_Turbine.JPG](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/03/Kaplan_Turbine.JPG)

## 2. Pumped Hydro Energy Storage (PHES)

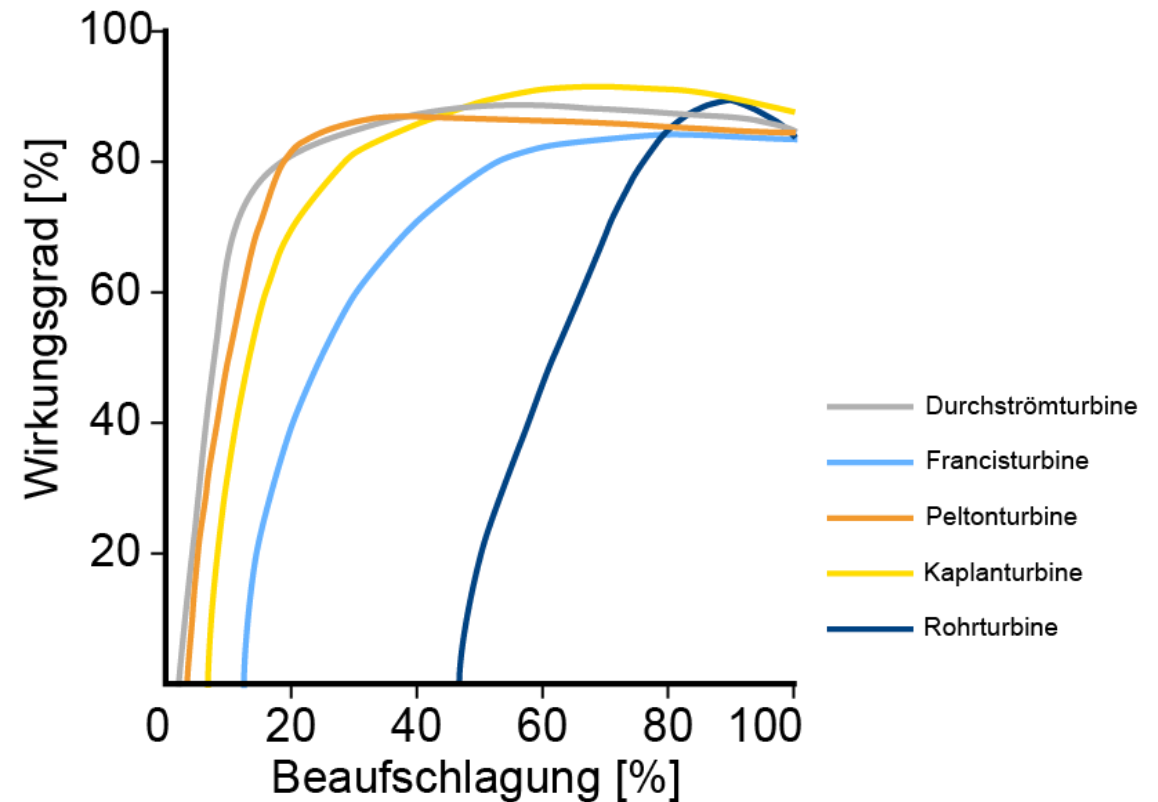
### 2.4 Turbine types

- Pelton and Kaplan turbines almost reach their maximum efficiency at a flow rate of 30%
- Francis turbines require almost 60% flow rate for this
- The maximum efficiency is similar for all three turbines

## 2. Pumpspeicherkraftwerke

### 2.4 Turbinentypen

- Pelton und Kaplan Turbinen erreichen schon bei 30% Durchflussmenge fast ihren maximalen Wirkungsgrad
- Francis Turbine benötigen hierfür fast 60% Durchflussmenge
- Der maximale Wirkungsgrad ist bei allen drei Turbinen ähnlich hoch



„Wirkungsgrad einer Wasserturbine“, enargus, CC-BY-SA 3.0†; [https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d14004-2/\\*\\*/Wirkungsgrad%20einer%20Wasserturbine.html?op=Wiki.getwiki](https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d14004-2/**/Wirkungsgrad%20einer%20Wasserturbine.html?op=Wiki.getwiki)

2. Pumped Hydro Energy Storage (PHES)

2.5 Variants - Use of existing height differences

Project example »Underground Pumped Hydro Energy Storage«:

- Lower basin in existing, disused sections of a mine
- Upper basin on normal ground level (e.g. as a lake)

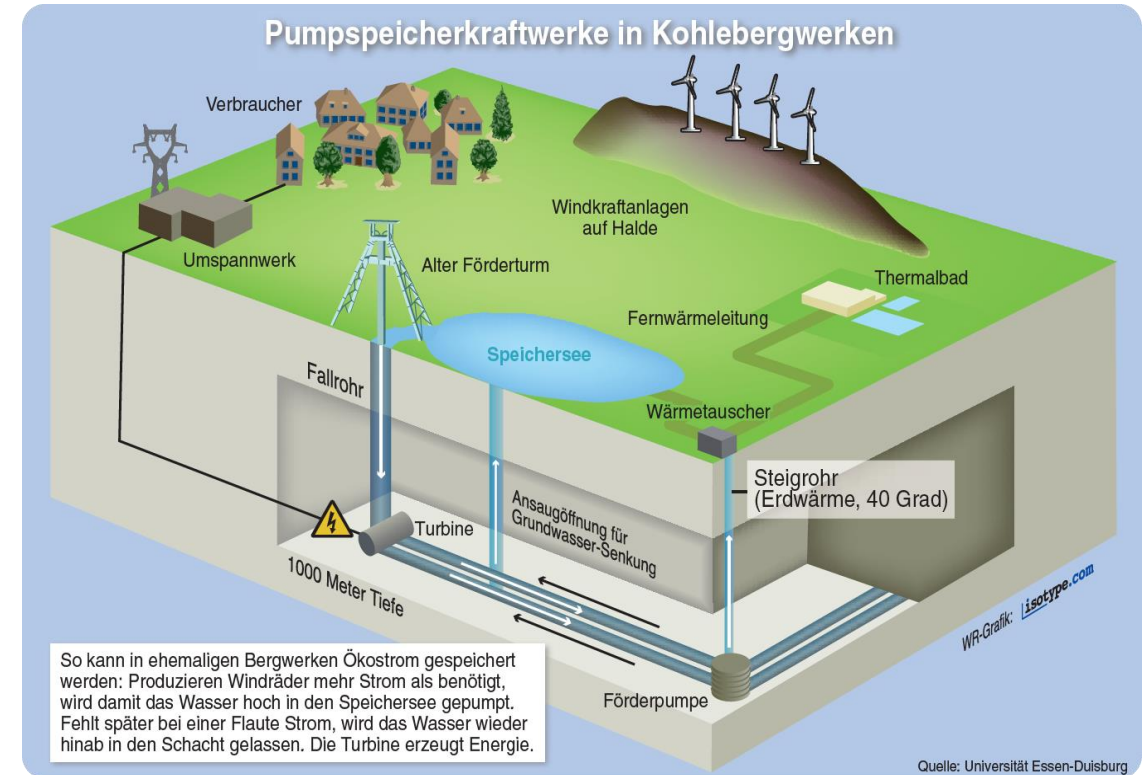
Advantages/Disadvantages:

- Limited underground volume, but large usable difference in height (see formula  $E_{pot}$ )
- High CAPEX

2. Pumpspeicherkraftwerke

2.5 Varianten – Nutzung unterirdischer Hohlräume

- **Projektbeispiel: »Pumpspeicher unter Tage«**
  - Unterbecken in bestehenden, stillgelegten Strecken des Bergbaus
  - Oberbecken auf normaler Geländehöhe (bspw. als See)
- **Vor- & Nachteile**
  - Begrenzte untertägige Volumen, dafür großer Höhenunterschied nutzbar (vgl. Formel  $E_{pot}$ )
  - Hohe Investitionskosten



Quelle: Unterflur Pumpspeicherwerke, Uni Duisburg-Essen <http://www.upsw.de/index.php/de/startseite.html>



## 2. Pumped Hydro Energy Storage (PHES)

### 2.5 Variants - artificially created systems

Project example »StEnSEA«:

- Lower basin in the form of hollow concrete spheres on the seabed
- Upper basin is the surrounding sea
- Usable height difference: Sea level to liquid level in hollow sphere
- Charge: Water is pumped out of the hollow sphere
- Discharge: Water is forced through a turbine from the adjacent water column into the hollow sphere

## 2. Pumpspeicherkraftwerke

### 2.5 Varianten – künstlich geschaffene Systeme

#### ➤ Projektbeispiel: »StEnSEA«

- Unterbecken in Form von Betonhohlkugeln am Meeresboden
- Oberbecken ist das Meer
- Nutzbarer Höhenunterschied: Meeresspiegel zu Flüssigkeitsspiegel in Hohlkugel
- Beladung: Wasser wird aus der Hohlkugel gepumpt
- Entladung: Wasser wird über eine Turbine von der anliegenden Wassersäule in die Hohlkugel gedrückt



## 2. Pumped Hydro Energy Storage (PHES)

### 2.6 Potential conflicts

- Interruption of the fish migration
- The drainage of deep water leads to an enrichment of the underwater with cold, oxygen-free water
- Each reservoir acts as a sediment trap ⇒ silting up of the lake
- Difficulties in adapting fauna and flora to fluctuating water levels
- Frequent protests by the local population when building new PHES  
(Fig. : Protest against the planned pumped storage power plant in Flintsbach/Einöden. Because although most people recognize that renewable energy is necessary for climate protection and that it needs buffer storage because it fluctuates, the willingness to accept changes on site is rather low: "Nimby - Not in my backyard")
- Tourism, ecological use and energetic use of a body of water usually contradict each other

## 2. Pumpspeicherkraftwerke

### 2.6 Potenzielle Konflikte

- Unterbrechung der Fischwanderung
- Die Entwässerung von Tiefenwasser führt zu einer Anreicherung des Unterwassers mit kaltem, sauerstofffreiem Wasser
- Jedes Reservoir wirkt als Sedimentfalle ⇒ Verlandung des Sees
- Anpassungsschwierigkeiten von Fauna und Flora an schwankende Wasserstände
- Häufige Proteste der lokalen Bevölkerung bei Neubau  
(Abb.: Protest gegen das geplante Pumpspeicherkraftwerk in Flintsbach/Einöden. Denn obwohl von den meisten anerkannt wird, dass für den Klimaschutz EE notwendig sind und diese, da fluktuierend – Pufferspeicher benötigen, ist die Bereitschaft vor Ort Veränderungen zu akzeptieren eher gering ausgeprägt: „Nimby – Not in my backyard“)
- Tourismus, ökologische Nutzung und energetische Nutzung eines Gewässers widersprechen sich meist



„Der Protest gegen das geplante Pumpspeicherkraftwerk wird offenkundig“; Reisner, OVB GmbH & Co. KG. <https://www.ovb-online.de/rosenheim/rosenheim-land/erster-widerstand-regt-sich-2766540.html>

## 2. Pumped Hydro Energy Storage (PHES)

### 2.7 Application example - Germany, Goldisthal

- Largest pumped storage power plant in Germany 1060 MW<sub>el</sub>, 13 million m<sup>3</sup> of working water. The mountain top was removed to create this basin. This amount of water is sufficient for eight hours of full-load turbine operation. This corresponds to a maximum storable amount of electrical energy of 8.5 GWh
- 4 Francis turbines (each 103.3 m<sup>3</sup> / s at a drop height of 302 m); Start-up time to 100%, approx. 100 seconds
- Project start in 1975 and 1991 resumption, commissioning in 2004
- 1995/96 action by the BUND: With the settlement sum of. In 1998, after the withdrawal of the lawsuit, the BUND established the NATURstiftung David, an environmental foundation “for the promotion of projects for nature conservation and renewable energies in the new federal states”, to life 3.65 million euros
- Today both lakes are also popular tourist destinations

## 2. Pumpspeicherkraftwerke

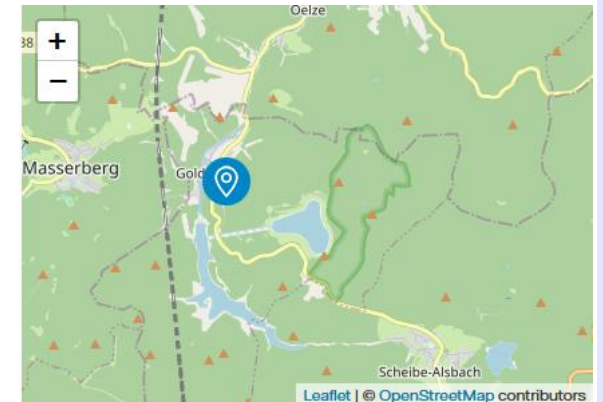
### 2.7 Anwendungsbeispiel – Deutschland, Goldisthal

- **Größtes Pumpspeicherkraftwerk Deutschlands**  
1060 MW<sub>el</sub>, 13 Mio. m<sup>3</sup> Arbeitswasser  
Der Berggipfel wurde abgetragen, um dieses Becken zu schaffen. Diese Wassermenge reicht für acht Stunden Turbinen-Volllastbetrieb. Dies entspricht einer maximal speicherbaren Elektroenergiemenge von 8,5 GWh
- 4 Francisturbinen (je 103,3 m<sup>3</sup>/s bei 302 m Fallhöhe);  
Anfahrzeit auf 100%, ca. 100 Sekunden
- Projektbeginn 1975 bzw. 1991 Wiederaufnahme,  
Inbetriebnahme 2004
- 1995/96 Klage des BUND: Mit der Vergleichssumme von 3,65 Millionen Euro rief der BUND im Jahr 1998 nach Klage-Rückzug die NATURstiftung David, eine Umweltstiftung „zur Förderung von Projekten für den Naturschutz und von regenerativen Energien in den neuen Bundesländern“, ins Leben
- Heute sind beide Seen auch touristische Ausflugsziele

Informationen von: : <https://powerplants.vattenfall.com/de/goldisthal/>; [https://de.wikipedia.org/wiki/Pumpspeicherwerk\\_Goldisthal](https://de.wikipedia.org/wiki/Pumpspeicherwerk_Goldisthal)



„Unterbecken des PSW in Goldisthal“, Störfix, CC-BY-SA 3.0†; [https://de.wikipedia.org/wiki/Pumpspeicherwerk\\_Goldisthal#/media/Datei:Goldisthal-PSW-Unterbecken.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Pumpspeicherwerk_Goldisthal#/media/Datei:Goldisthal-PSW-Unterbecken.jpg)



Map; OSM – Open Street Map, CC-BY-SA 2.0†; <https://www.openstreetmap.org/copyright/en>



## 2. Pumped Hydro Energy Storage (PHES)








### 2.8 Short summary / take aways

1. Pump storage is the "backbone" of energy storage in Germany and worldwide and stores energy for hours to days (in Germany on average approx. 6-7 hours)
2. Pumped storage power plants are highly efficient, have a long service life, but have a low energy density.
3. Pumped storage power plants usually represent a massive intervention in nature and are therefore controversial.
4. Pump storage requires geodetic differences in height ("mountains"), only a few variants, which are currently only in development, also implement pump storage in the lowlands or at sea.

## 2. Pumpspeicherkraftwerke

### 2.8 Kurzzusammenfassung / „Take aways“

1. Pumpspeicher sind das „Rückgrat“ der Energiespeicherung in Deutschland und weltweit. Sie speichern Energie für Stunden bis Tage (in Deutschland im Mittel ca. 6-7 h)
2. Pumpspeicherkraftwerke haben eine hohe Effizienz, lange Lebensdauer aber eine geringe Energiedichte.
3. Pumpspeicherkraftwerke stellen zumeist einen massiven Eingriff in die Natur dar und sind deswegen umstritten.
4. Pumpspeicher erfordern geodätische Höhenunterschiede („Berge“), nur einige Varianten, die bisher nur in der Entwicklung sind, realisieren auch Pumpspeicher im Flachland bzw. auf See.

†CC-Lizenzen	Bezeichnung	Version	Link zum Lizenz-/Vertragstext
	CC0 Bedingungslose Lizenz	Vers. 1.0	<a href="https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/legalcode">https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/legalcode</a>
	CC-BY Attribution (Namensnennung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	<a href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by/2.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by/2.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by/1.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by/1.0/legalcode</a>
	CC-BY-SA Attribution ShareAlike (Namensnennung-Weitergabe unter gleichen Bedingungen)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	<a href="http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-sa/1.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-sa/1.0/legalcode</a>
	CC-BY-ND Attribution NoDerivatives (Namensnennung-Keine Bearbeitung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	<a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nd/2.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nd/2.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nd/1.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nd/1.0/legalcode</a>
	CC-BY-NC Attribution NonCommercial (Namensnennung-Nicht kommerziell)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	<a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc/1.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc/1.0/legalcode</a>
	CC-BY-NC-SA Attribution NonCommercial ShareAlike (Namensnennung-Nicht kommerziell-Weitergabe unter gleichen Bedingungen)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	<a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/1.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/1.0/legalcode</a>
	CC-BY-NC-ND Attribution NonCommercial NoDerivatives (Namensnennung-Nicht kommerziell-Keine Bearbeitung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	<a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/1.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/1.0/legalcode</a>



**Prof. Dr. Christian Doetsch**

Lehrstuhl »Cross Energy Systems«

c/o Fraunhofer UMSICHT  
+49 208 8598-1195

christian.doetsch@rub.de

QR-Code: Business Card



# ORCA.nrw

Technology  
Arts Sciences  
TH Köln

RUHR  
UNIVERSITÄT  
BOCHUM

RUB

Hochschule  
Bonn-Rhein-Sieg

Hochschule Düsseldorf  
University of Applied Sciences  
HSD

ISEA  
Stromrichter-  
technik und  
Elektrische  
Antriebe

RWTH AACHEN  
UNIVERSITY

FH AACHEN  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Ein Kooperationsvorhaben empfohlen durch die:



INNOVATION DURCH KOOPERATION

Gefördert durch:

Ministry of Culture and Science  
of the State of  
North Rhine-Westphalia



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.  
All logos and explicitly marked elements used are excluded from this license. [www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0](http://www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0)

**Vorlesung :** **Energiespeichertechnologien- & Anwendungen**  
**RUB | MB-Master | Kursnr.: 139030**

**Lecture:** **Energy Storage Technologies and Applications**

**Vortragender**

**Prof. Dr. Christian Doetsch**

Professur »Cross Energy Systems«

c/o Fraunhofer UMSICHT  
 +49 208 8598-1195

christian.doetsch@rub.de

**#2. Mechanische Energiespeicher Teil c –**  
 „Druckluftspeicherkraftwerke“

**#2. Mechanical Energy Storage part c –**  
 „Compressed Air Energy Storage (CAES)“

**Vorlesung #2c | Lecture #2c**



Ministerium für  
 Kultur und Wissenschaft  
 des Landes Nordrhein-Westfalen



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz. Ausgenommen von der Lizenz sind die verwendeten Logos sowie alle anders gekennzeichneten Elemente. [www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0](http://www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0)



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License. All logos and explicitly marked elements used are excluded from this license. [www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0](http://www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0)



### 3. Compressed Air Energy Storage (CAES)

#### Content ⇒ Learning objectives

- Functional principle, classification, areas of application  
⇒ Introduction to the technology
- Physical principles, definition (s) of the degree of system utilization  
⇒ Basic understanding of physical relationships and calculation
- Typical specifications, design variants and variants of essential assemblies  
⇒ Understanding and overview of the different variants, classification with regard to their advantages and disadvantages

### 3. Druckluftspeicherkraftwerke

#### Inhalt ⇒ Lernziele

- Funktionsprinzip, Klassifizierung, Einsatzgebiete  
⇒ Heranführung an die Technologie
- Physikalische Grundlagen, Definition(en) des Anlagennutzungsgrades  
⇒ Grundverständnis für physikalische Zusammenhänge und Berechnung
- Typische Spezifikationen, Ausführungsvarianten und Varianten wesentlicher Baugruppen  
⇒ Verständnis für und Übersicht über die verschiedenen Varianten, Einsortierung bzgl. ihrer Vor- und Nachteile

3. Compressed Air Energy Storage (CAES)

Charge:  
Electrically driven compressor compresses ambient air

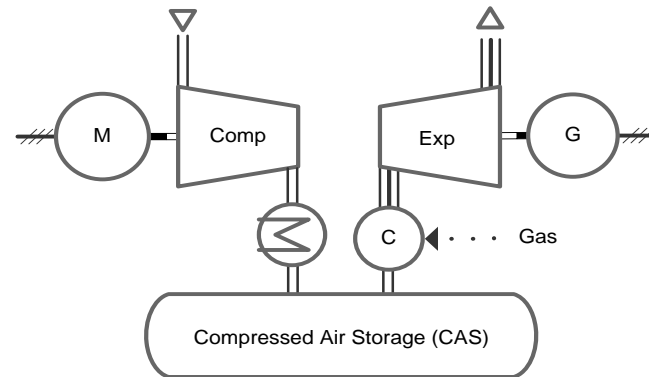
Accumulating heat is taken from the air

Storage:  
Compressed air is stored, for example, in salt caverns

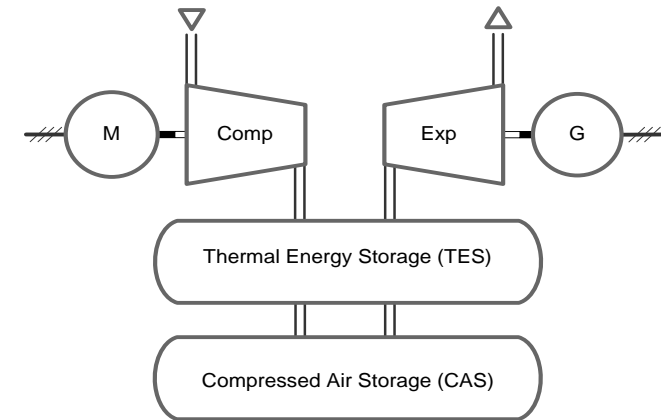
if necessary additional thermal storage for temporary storage of heat

Discharge:  
Compressed air drives expansion machine  
Air must be preheated before expansion (e.g. icing/condensation)

3. Druckluftspeicherkraftwerke  
– Compressed Air Energy Storage (CAES)



oder



Einspeicherung	Speicherung	Ausspeicherung
Elektrisch angetriebener Kompressor verdichtet Umgebungsluft. Anfallende Kompressionswärme wird an Umgebung abgegeben oder gespeichert	Druckluft wird bspw. in Salzkavernen gespeichert ggf. zus. thermischer Speicher zur Zwischenspeicherung der Wärme	Druckluft treibt Expansionsmaschine an Luft muss vor Expansion vorgewärmt werden (wg. Vereisung/Kondensation)

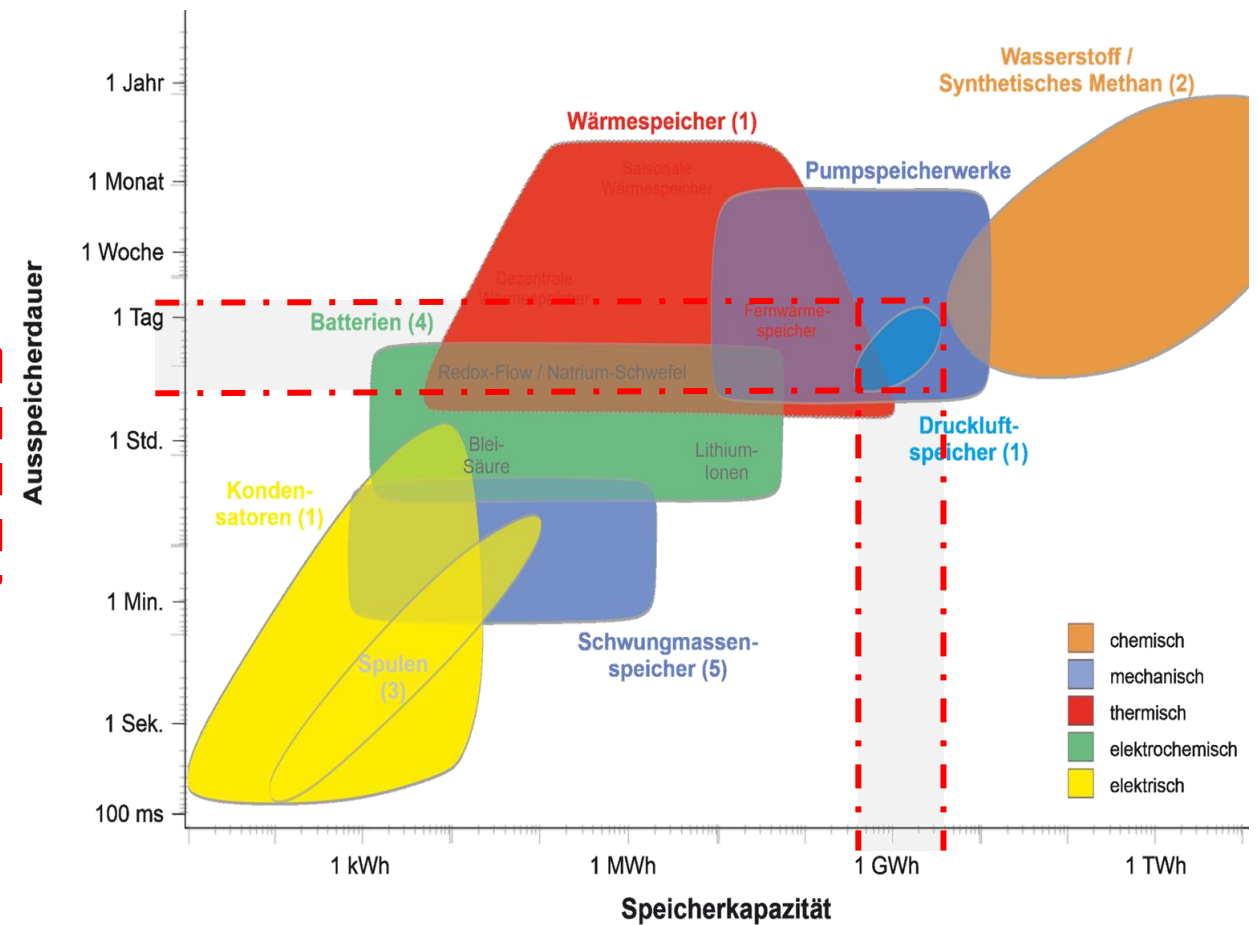
3. Compressed Air Energy Storage (CAES)

3.1 Classification according to storage performance and capacity

- Seasonal storage
- Monthly storage
- Weekly storage
- Daily storage
- Hourly storage
- Storage for minutes
- Storage for seconds

3. Druckluftspeicherkraftwerke

3.1 Klassifizierung hinsichtlich Ausspeicherzeit und Speicherkapazität

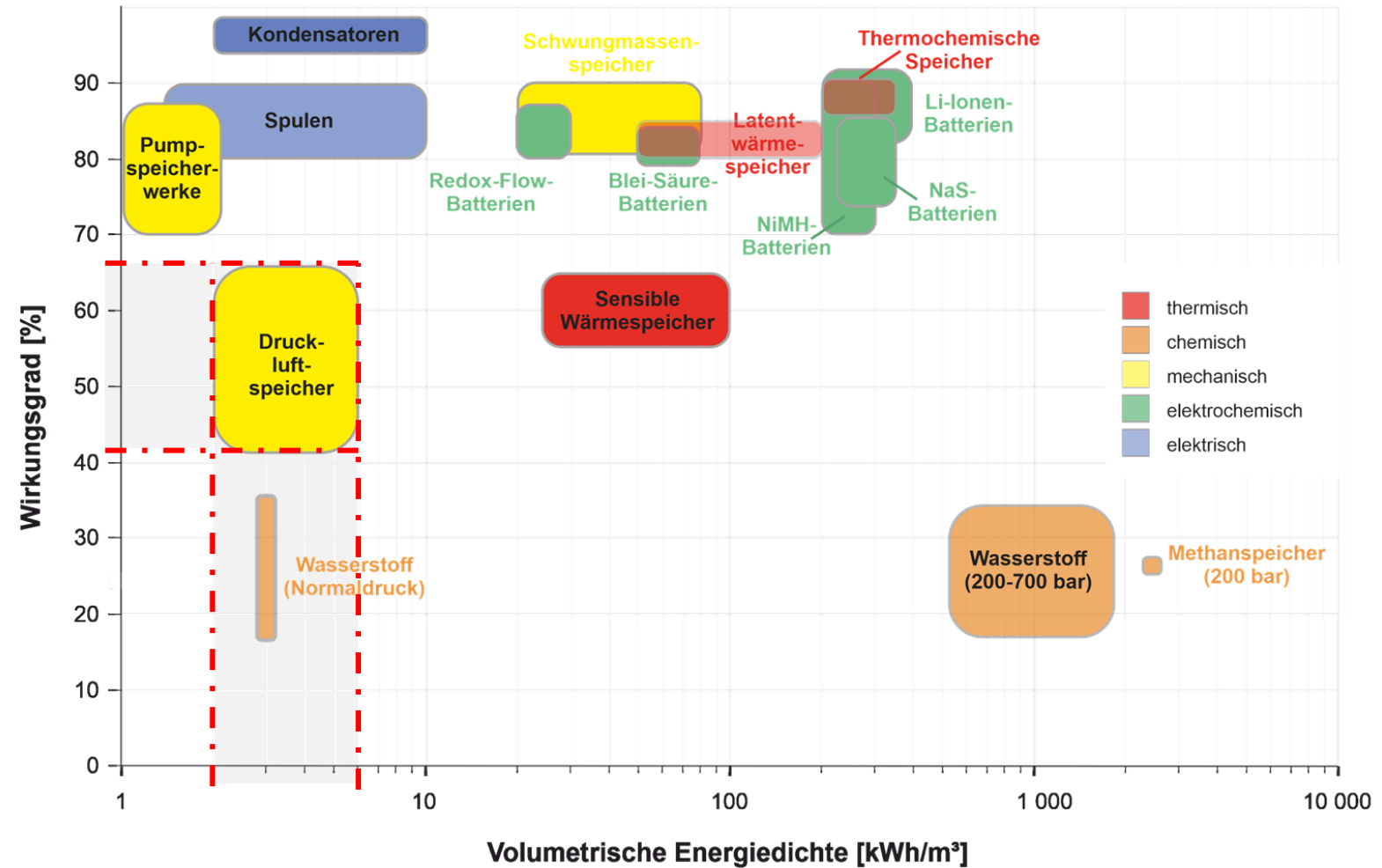


3. Compressed Air Energy Storage (CAES)

3.2 Classification according to efficiency and volumetric energy density

3. Druckluftspeicherkraftwerke

3.2 Klassifizierung nach Wirkungsgrad und volumetrischer Energiedichte



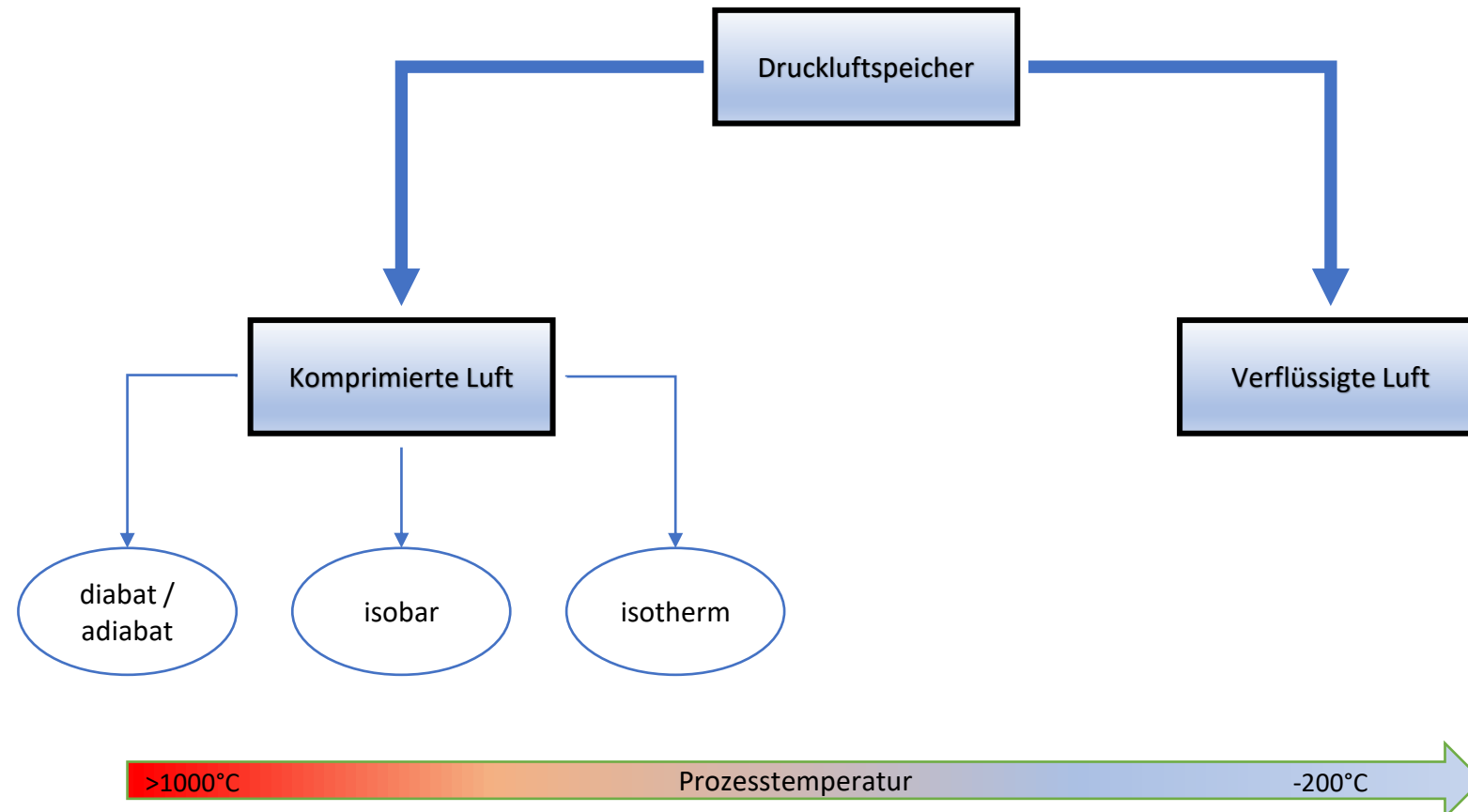


3. Compressed Air Energy Storage (CAES)

3.3 Classification within air energy storage technologies

### 3. Druckluftspeicherkraftwerke

#### 3.3 Einordnung innerhalb der Luftenergiespeichertechnologien

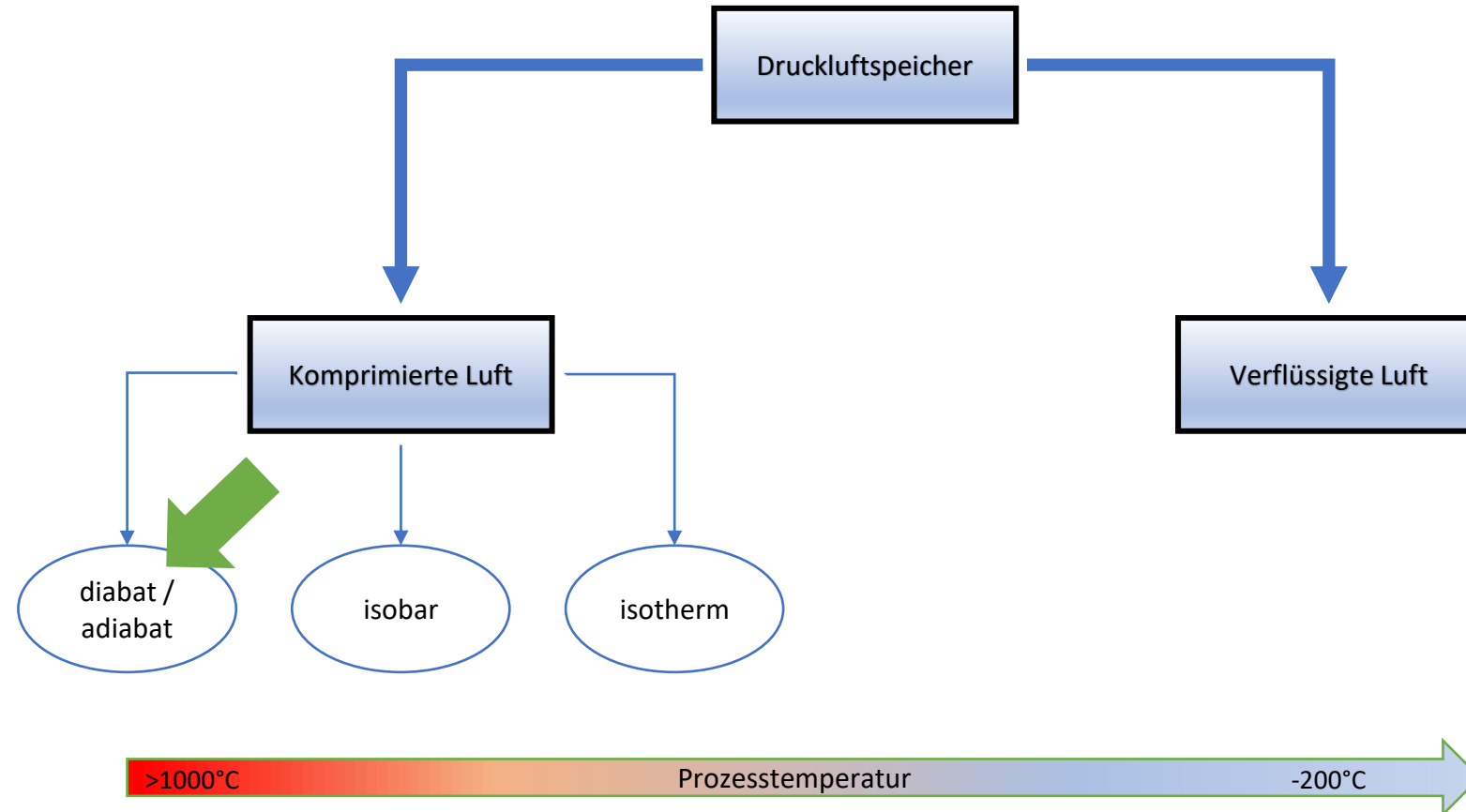


3. Compressed Air Energy Storage (CAES)

3.3 Classification within air energy storage technologies

### 3. Druckluftspeicherkraftwerke

#### 3.3 Einordnung innerhalb der Luftenergiespeichertechnologien



### 3. Compressed Air Energy Storage (CAES)

#### 3.4 Diabatic vs. Adiabatic CAES

##### D-CAES

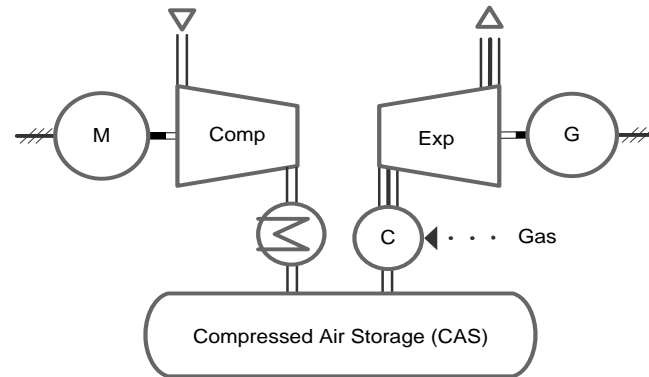
- Heat generated during compression is cooled to the environment (diabatic)
- Compressed air must be preheated with external thermal energy (usually natural gas) before being released (diabatic)

##### A-CAES

- Heat generated during compression is kept in the system and stored in a thermal energy storage (TES) (adiabatic)
- Preheating of the compressed air takes place by means of the thermal energy stored in the system from the TES (adiabatic)

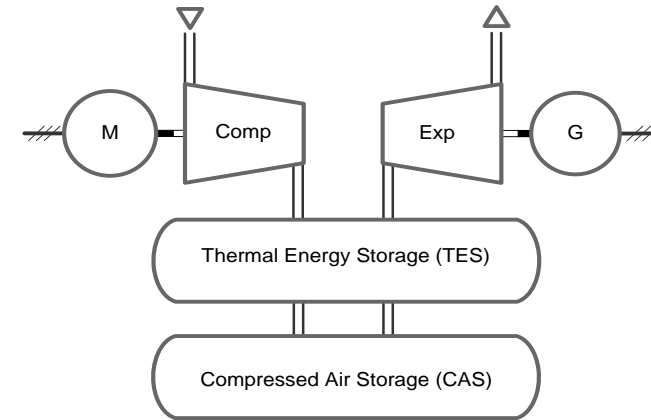
## 3. Druckluftspeicherkraftwerke

### 3.4 Diabates vs. Adiabate CAES



#### ➤ D-CAES

- Bei Verdichtung anfallende Wärme wird an die Umgebung abgeführt (diabat)
- Druckluft muss vor der Entspannung mit von außen zugeführter thermischer Energie (üblich Erdgas) vorgewärmt werden (diabat) – evtl. Rekuperation im Ausspeicherstrang zur Effizienzsteigerung möglich (Huntorf vs. McIntosh)



#### ➤ A-CAES

- Bei Verdichtung anfallende Wärme wird im System gehalten und in einem Wärmespeicher (TES) gespeichert (adiabat)
- Vorwärmung der Druckluft erfolgt mittels der im System gespeicherten thermischen Energie aus dem TES (adiabat)
- Aufgrund von Irreversibilitäten (nicht-isentroper Verdichtung) fällt bei der Einspeicherung mehr Wärme an, als bei der Ausspeicherung benötigt wird.

3. Compressed Air Energy Storage (CAES)

3.5 Diabatic CAES - example

Huntorf plant / Germany (built in 1978, upgraded in 2006)

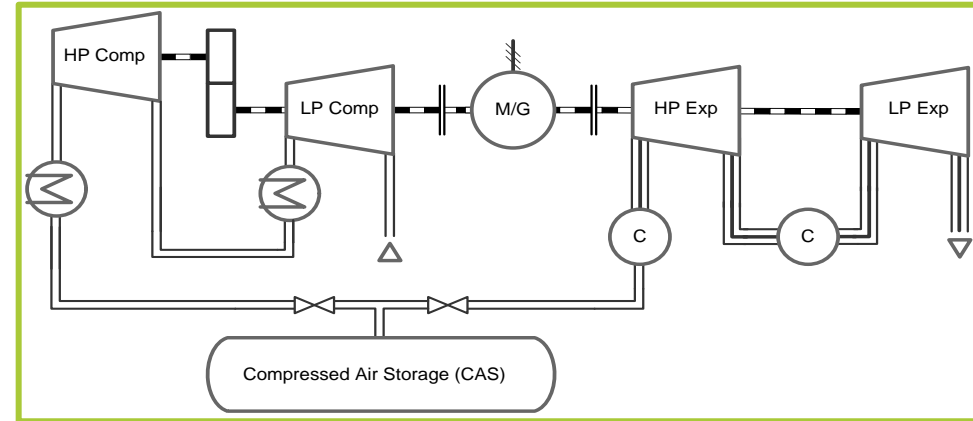
- Gas firing for heating in the event of discharging
- Two caverns (extracted) with a total of 310,000 m<sup>3</sup>
- Pressure clearance between 46 and 72 bar
- Compressor output 60 MW (8h), capacity 480 MWh
- Turbine output 321 MW (2h), discharging 642 MWh
- An additional 960 MWh of natural gas was fired.
- "Efficiency": 44.5%

3. Druckluftspeicherkraftwerke

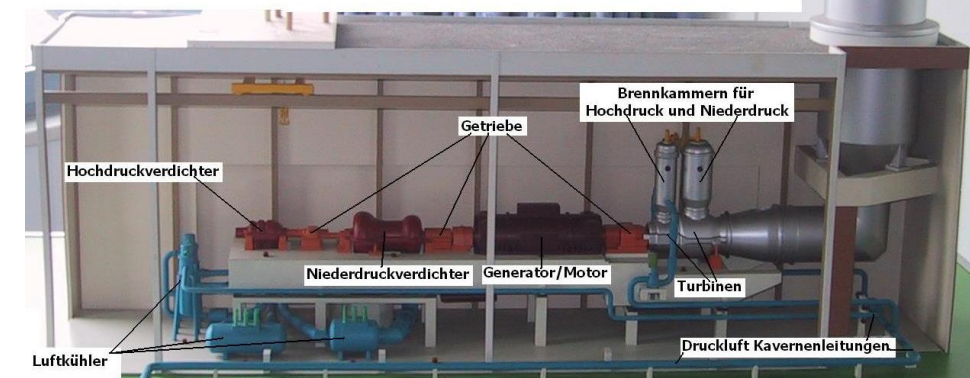
3.5 Diabates CAES - Beispiel

Anlage Huntorf/Deutschland (Bj. 1978, 2006 ertüchtigt)

- Gaszuführung zur Erwärmung bei Ausspeicherung



- Zwei Kavernen (ausgesolt) mit insg. 310.000 m<sup>3</sup>
- Druckspiel zwischen 46 und 72 bar
- Kompressorleistung 60 MW (8h), Kapazität 480 MWh
- Turbinenleistung 321 MW (2h), Ausspeicherung 642 MWh
- Zusätzlich 960 MWh Erdgas zugeführt.
- „Wirkungsgrad“: 44,5%



„Kraftwerk von innen mit Verdichtern im Vordergrund“, Govgel, Public Domain; [https://de.wikipedia.org/wiki/Kraftwerk\\_Huntorf#/media/Datei:Kraftwerk\\_Huntorf\\_innen.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Kraftwerk_Huntorf#/media/Datei:Kraftwerk_Huntorf_innen.jpg)  
 „Modell vom Kraftwerk Huntorf“, Govgel, Public Domain; [https://de.wikipedia.org/wiki/Druckluftspeicherkraftwerk#/media/Datei:Kraftwerk\\_Huntorf\\_Modell.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Druckluftspeicherkraftwerk#/media/Datei:Kraftwerk_Huntorf_Modell.jpg)

### 3. Compressed Air Energy Storage (CAES)

#### 3.5 Diabatic CAES with recuperation - example

Realized plant McIntosh / USA (YOC 1991)

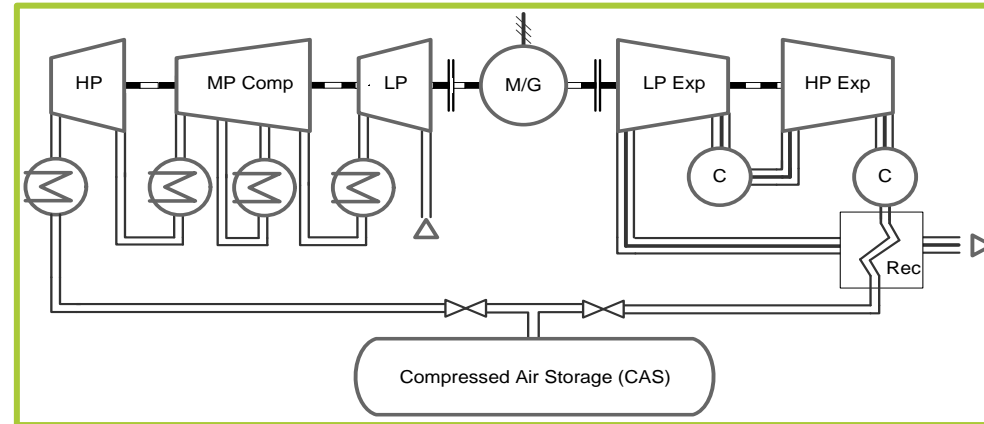
- Gas firing for heating and heat recuperation in case of discharging
- Two caverns (extracted) with a total of 538,000 m<sup>3</sup>
- Pressure clearance between 45 and 76 bar
- Compressor output 60 MW (45h), capacity 2700 MWh
- Turbine output 110 MW (26h), withdrawal 2860 MWh
- An additional 2,600 MWh of natural gas is fired.
- "Efficiency": 54%

## 3. Druckluftspeicherkraftwerke

### 3.5 Diabates CAES mit Rekuperation - Beispiel

#### Realisierte Anlage McIntosh/USA (Bj. 1991)

- Gaszuführung zur Erwärmung und Wärmerekuperation bei Ausspeicherung



„McIntosh Power Plant (CAES Unit)“, Energy Institute of Alabama;  
[https://energyinstituteal.org/wp-content/uploads/2015/12/McIntosh\\_Power\\_Plant\\_CAES\\_Unit\\_Ssl2wu-okEt1Tt3rCboEx8t18q0ABIZBh\\_rgb\\_72.jpg](https://energyinstituteal.org/wp-content/uploads/2015/12/McIntosh_Power_Plant_CAES_Unit_Ssl2wu-okEt1Tt3rCboEx8t18q0ABIZBh_rgb_72.jpg)

- Zwei Kavernen (ausgesolt) mit insg. 538.000 m<sup>3</sup>
- Druckspiel zwischen 45 und 76 bar
- Kompressorleistung 60 MW (45h), Kapazität 2700 MWh
- Turbinenleistung 110 MW (26h), Ausspeicherung 2860 MWh
- Zusätzlich 2600 MWh Erdgas zugeführt.
- „Wirkungsgrad“: 54%

3. Compressed Air Energy Storage (CAES)

3.5 Diabatic CAES - Determination of cycle efficiency

Two methods

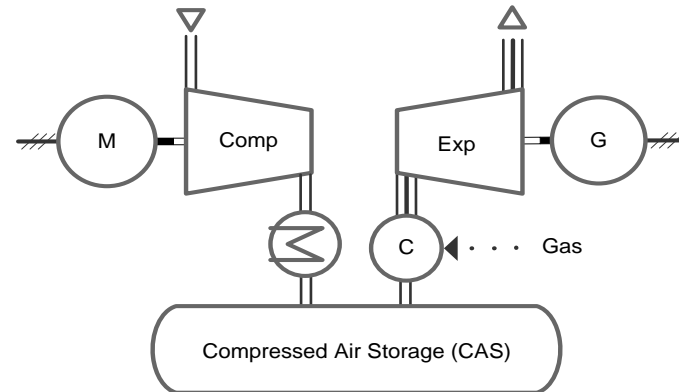
- a. Amount of energy stored (dc=discharged) in relation to the amount of energy stored (ch=charged) and additionally "fired".
- b. Stored energy quantity minus fictitious energy quantity that could have been produced with the "fired" gas ("reference power plant") in relation to the stored energy quantity

3. Druckluftspeicherkraftwerke

3.5 Diabates CAES - Bestimmung des Anlagennutzungs- bzw. Wirkungsgrades

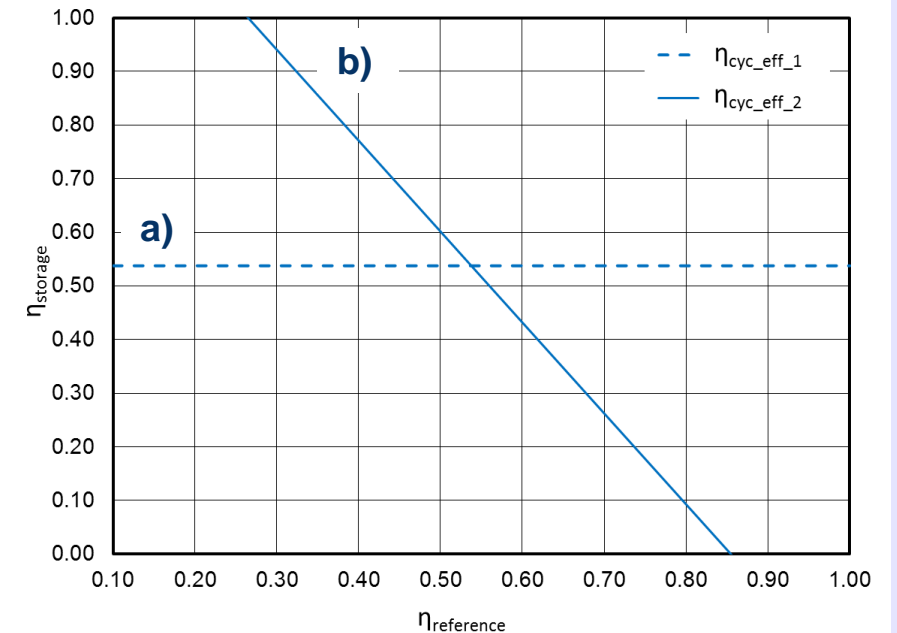
Zwei Methoden

- a. Ausgespeicherte Energiemenge (dc=discharged) im Verhältnis zur eingespeicherten (ch=charged) und zusätzlich „verfeuerten“ Energiemenge
- b. Ausgespeicherte Energiemenge minus fiktive Energiemenge die mit dem „zugefeuerten“ Gas hätte erzeugt werden können („Referenzkraftwerk“) im Verhältnis zur eingespeicherten Energiemenge



$$\eta_{cyc,eff,1} = \frac{E_{dc,el}}{E_{ch,el} + E_{ch,th}} = 54\%$$

$$\eta_{cyc,eff,2} = \frac{E_{dc,el} - E_{ch,th} \cdot \eta_{reference}}{E_{ch,el}} = \dots$$





3. Compressed Air Energy Storage (CAES)

3.6 Adiabatic CAES

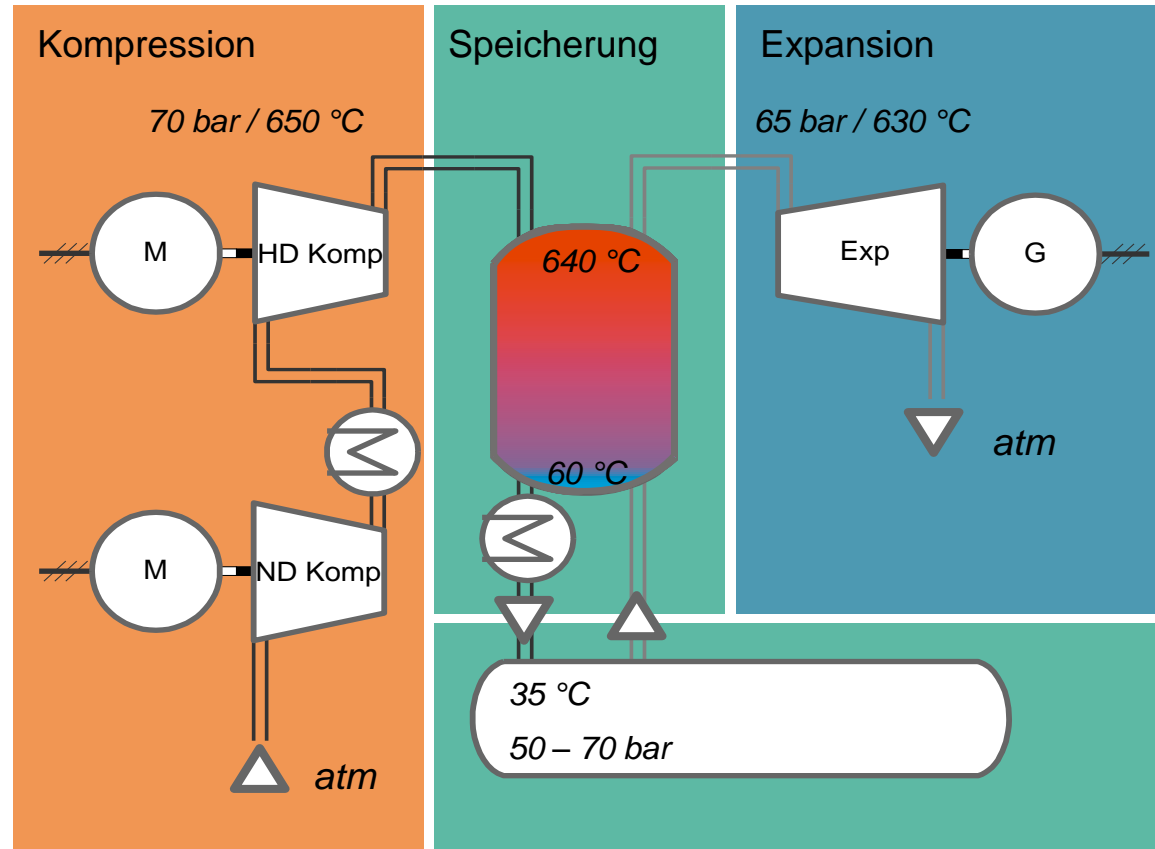
Advantages

- High cycle efficiency achievable (about 70 %)

Challenges at high process temperatures

- Compressors not available, development necessary
- High-temperature heat storage is simultaneously exposed to high temperatures and high pressure loads
- Expensive materials needed
- Starting time > 10 min

3. Druckluftspeicherkraftwerke  
3.6 Adiabate CAES



➤ Vorteile

Hoher Zykluswirkungsgrad erreichbar (ca. 70%)

$$\eta_{cycle} = \frac{E_{dc,el}}{E_{ch,el}} = 70\%$$

➤ Herausforderungen bei hohen Prozesstemperaturen

- Verdichter nicht verfügbar, Entwicklung notwendig
- Hochtemperaturwärmespeicher ist gleichzeitig hohen Temperaturen und hohen Druckbelastungen ausgesetzt
- Teure Werkstoffe nötig
- Anfahrtdauer >10min.

3 Compressed Air Energy Storage (CAES)

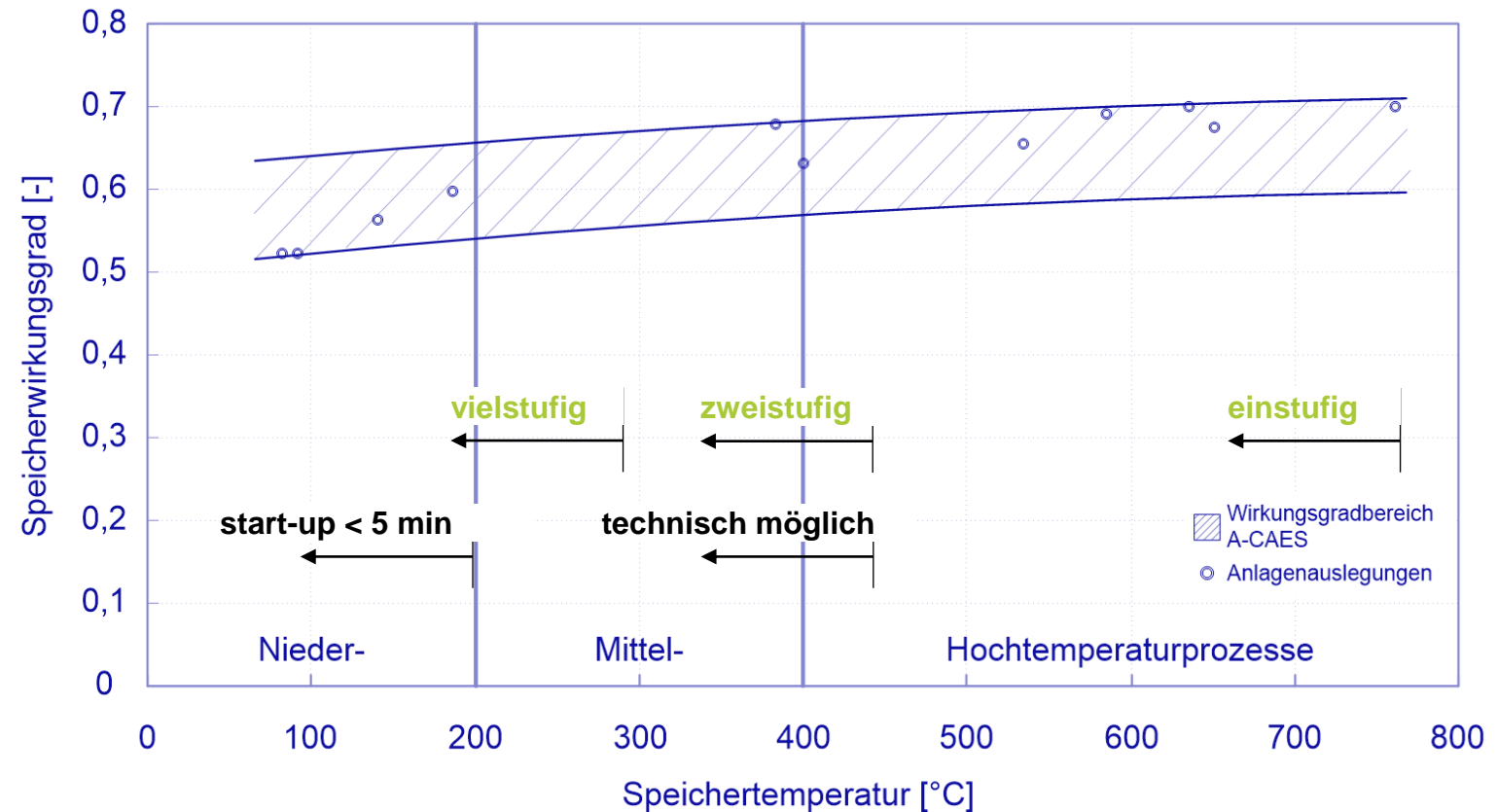
3.6 Adiabatic CAES (A-CAES) - efficiency vs. storage temperature

- Number of expansion / compression levels required
- boundary conditions

3. Druckluftspeicherkraftwerke

3.6 Adiabate CAES (A-CAES) – Wirkungsgrad vs. Speichertemperatur

- Anzahl der notwendigen Expansions-/Kompressionsstufen
- Randbedingungen



### 3 Compressed Air Energy Storage (CAES)

#### 3.6 Adiabatic CAES (A-CAES) – Low temperature A-CAES

##### Advantages

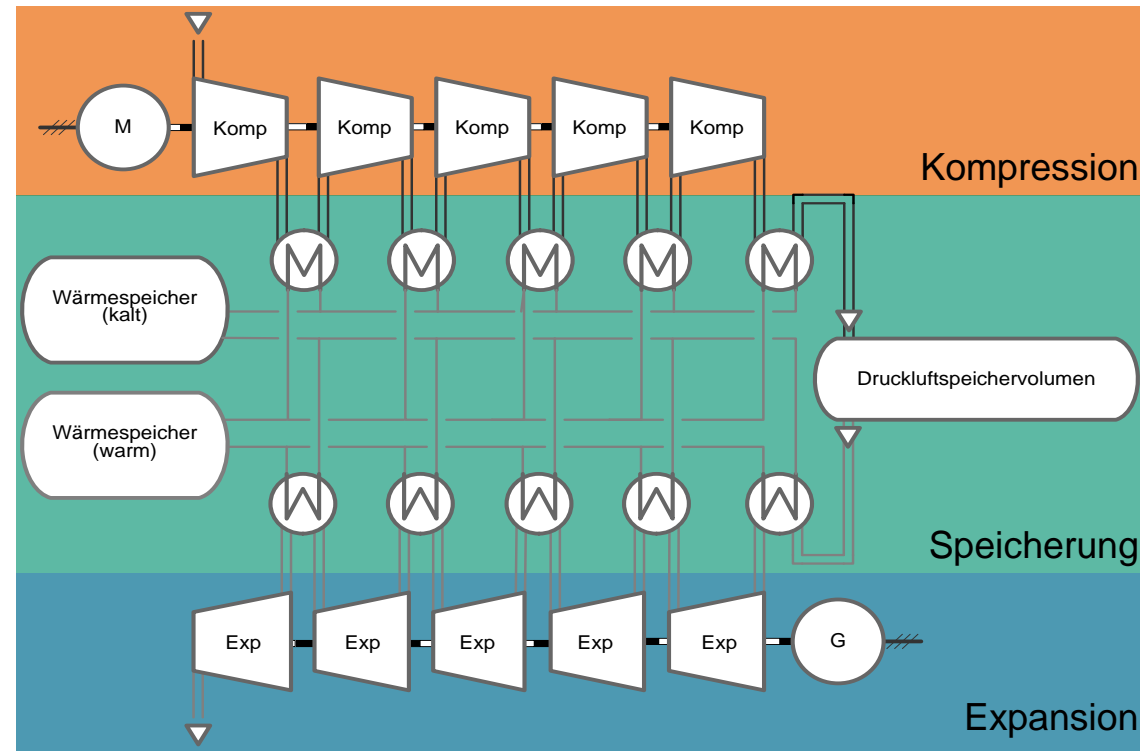
- Marketable components
- Low thermal loads
- Starting time <5min

##### Challenges at low process temperatures

- Lower efficiency

## 3. Druckluftspeicherkraftwerke

### 3.6 Adiabate CAES (A-CAES) – Niedertemperatur A-CAES



#### ➤ Vorteile

- Marktverfügbare Komponenten
- Geringe thermische Belastungen
- Anfahrtdauer <5min.

#### ➤ Herausforderungen bei niedrigen Prozesstemperaturen

- Etwas geringerer Wirkungsgrad

### 3 Compressed Air Energy Storage (CAES)

#### 3.6 Adiabatic CAES (A-CAES) – Low temperature A-CAES

##### R&D at Fraunhofer UMSICHT

Rel. low process temperatures (<200 °C)

- Use of proven off the shelf components
- start-up <5 min
- broad control range

Thermal storage in liquid medium

- Reduction of cost and hazard potential

Freely scalable system layout

- 5–50 MW installed compressor capacity
- 70–150 (250) bar maximum cavern pressure
- 95–180 °C upper storage temperature

Cycle efficiency

- depending on configuration  
52–60 %<sub>AC-AC</sub> (green field)
- Upgrade by coupling with other processes possible (e.g. with district heating or CHP)

## 3. Druckluftspeicherkraftwerke

### 3.6 Adiabate CAES (A-CAES) – Niedertemperatur A-CAES

#### Forschung & Entwicklung bei Fraunhofer UMSICHT

- Rel. niedrige Prozesstemperaturen (< 200°C)
  - Einsatz erprobter, marktverfügbarer Komponenten (Getriebekompressor/Expander, Standard-WT)
  - start-up < 5 min
  - weiter Regelungsbereich
- Speicherung der Kompressionswärme in flüssigem Wärmeträgermedium
  - Senkung von Kosten- und Gefährdungspotenzial
- Frei skalierbares Anlagenlayout
  - 5–50 MW installierter Kompressorleistung
  - 70–150 (250) bar maximalem Kavernendruck
  - 95–180°C oberer Speichertemperatur
- Zykluswirkungsgrad
  - je nach Konfiguration 52-60 %<sub>AC-AC</sub> (grüne Wiese)
  - Upgrade durch Kopplung mit anderen Prozessen möglich (z.B. mit Fernwärme oder BHKW)

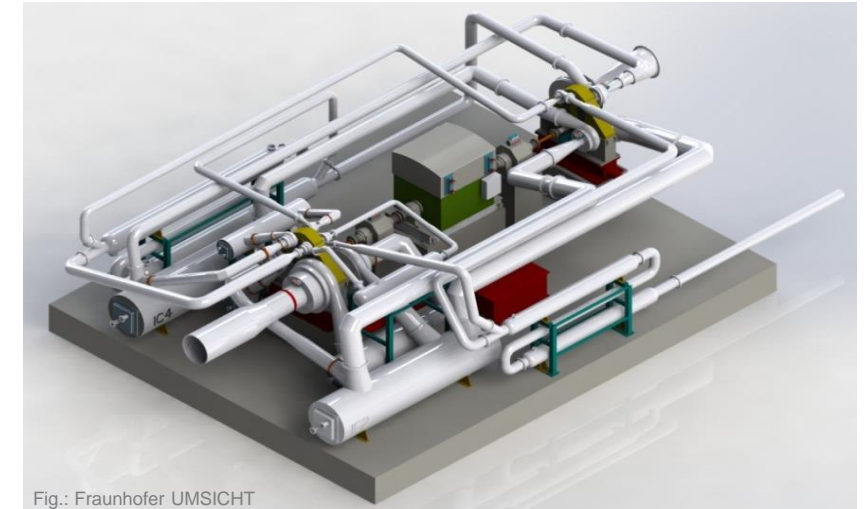


Fig.: Fraunhofer UMSICHT

„LTA-CAES® Anlagendesign für 50 MW<sub>Komp</sub> / 150 bar“,  
Fraunhofer UMSICHT, Marcus Budt

Entwickelt von



**Fraunhofer**  
UMSICHT

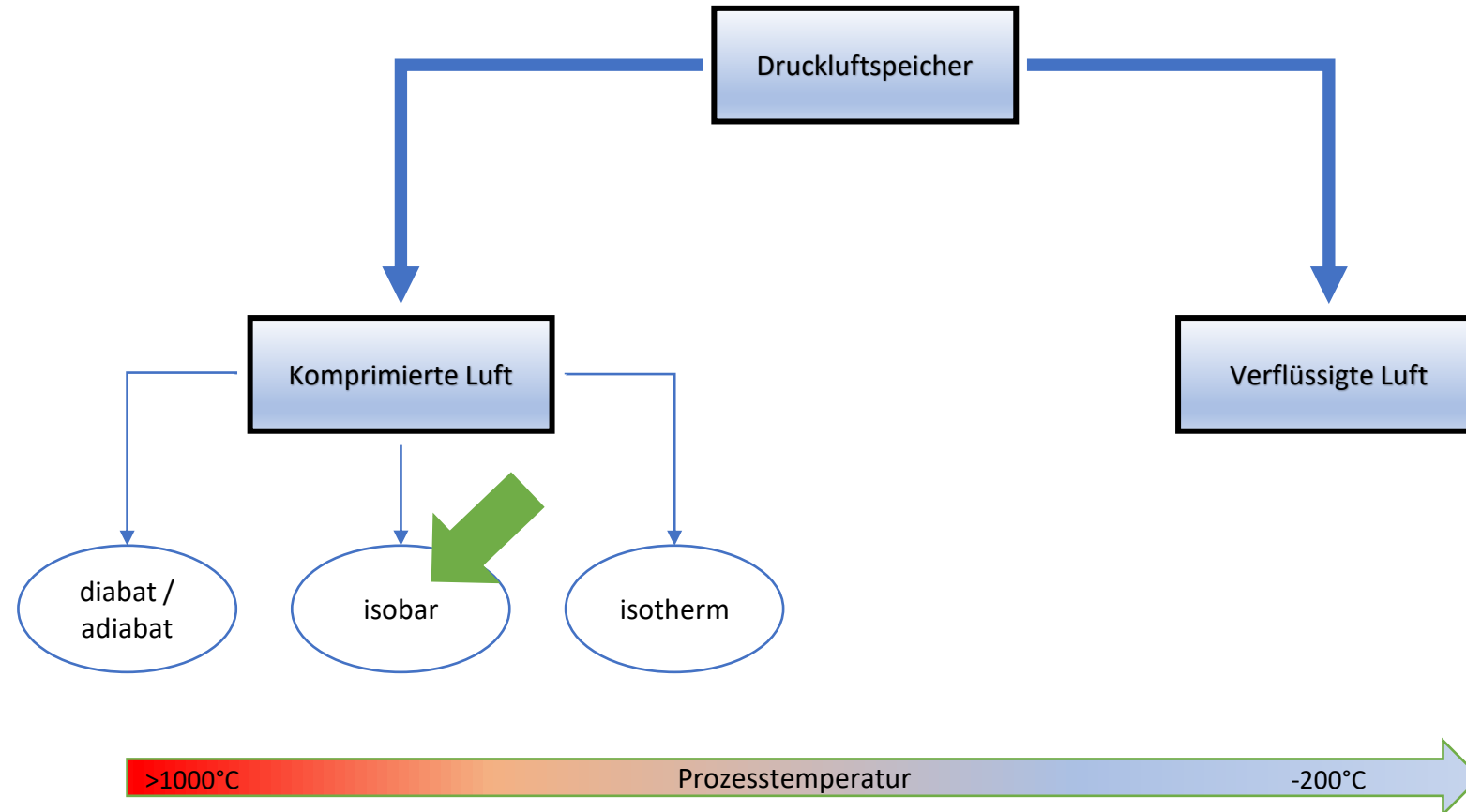
Gefördert durch BMU



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz  
und Reaktorsicherheit

### 3. Druckluftspeicherkraftwerke

#### 3.7 Isobare CAES





### 3 Compressed Air Energy Storage (CAES)

#### 3.7 Isobaric CAES

##### Basic concept

The pressure of the stored air (gas) is kept constant by e.g. hydrostatic pressure (under water)

##### Advantages

- Higher energy density, as all the air it contains can be used
- The pressure is identical for all charge states, i.e. more efficient compressors / turbines
- Less dependent on geological preconditions

##### Disadvantages

- Higher costs, since the storage tank(s) usually have to be built very deep (in the sea).

## 3. Druckluftspeicherkraftwerke

### 3.7 Isobares CAES

#### Grundkonzept

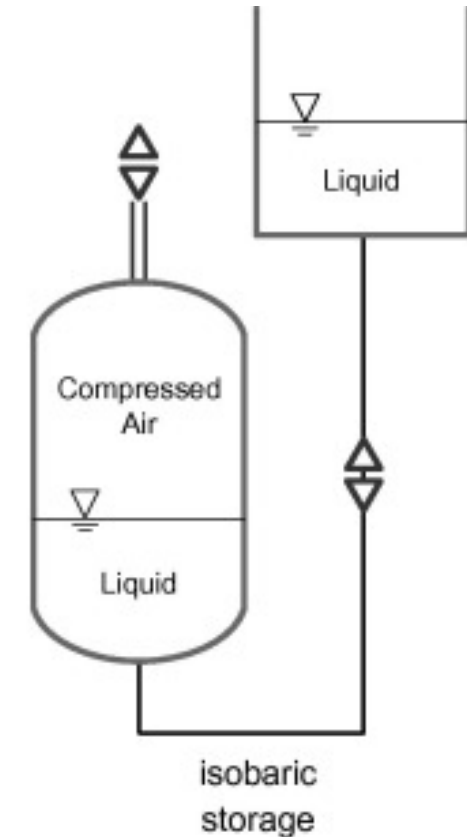
**Der Druck der gespeicherten Luft (Gas) wird konstant gehalten durch bspw. hydrostatischen Druck (unter Wasser)**

##### ➤ Vorteile:

- Höhere Energiedichte, da die komplette enthaltene Luft genutzt werden kann
- Der Druck ist bei allen Ladezuständen identisch, d.h. effizientere Verdichter/Turbinen
- Weniger abhängig von geologischen Vorbedingungen

##### ➤ Nachteile

- Höhere Kosten, da der/die Speicherbehälter zumeist sehr tief (im Meer) gebaut werden müssen.



### 3 Compressed Air Energy Storage (CAES)

#### 3.7 Isobaric CAES – Example Submarine Compressed Air Storage

##### Basic concept

- Compressed air storage installed on seabed
- Container with a solid or flexible cover
- High pressures possible (100 bar)
- Ballast necessary because of buoyancy

##### Option

- Storage of energy e.g. directly at offshore wind farms possible

##### Disadvantages

- High installation costs and maintenance costs

## 3. Druckluftspeicherkraftwerke

### 3.7 Isobares CAES – Beispiel Installation am Meeresboden

#### Grundkonzept

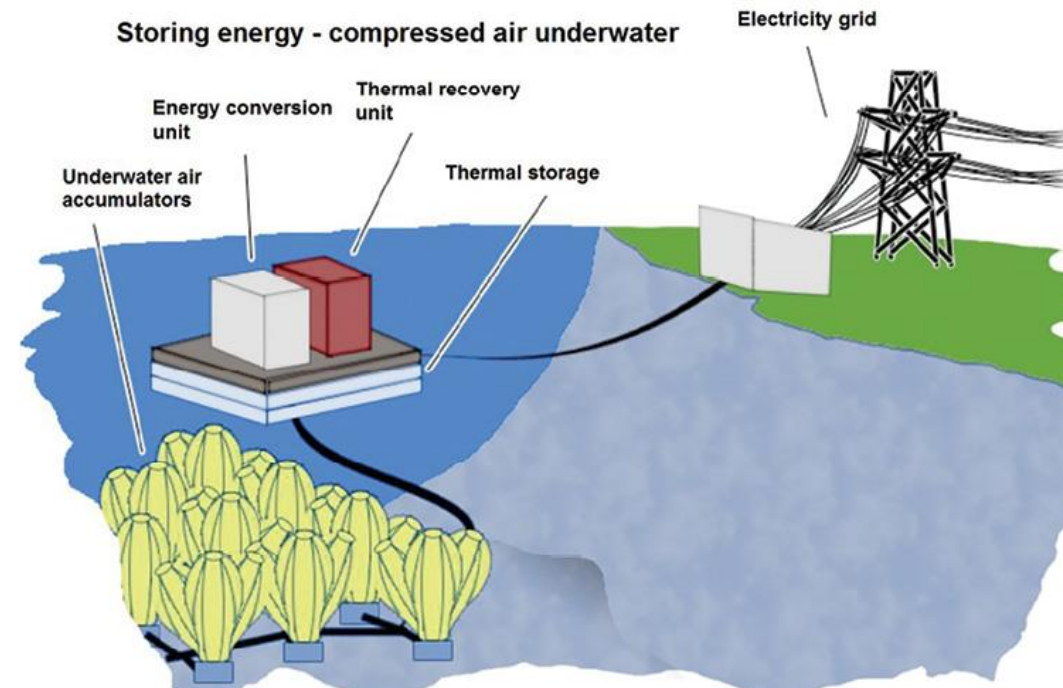
- Auf dem Meeresboden installierter Druckluftspeicher
- Behälter mit festem oder flexiblem Deckel
- Hohe Drücke möglich (100 bar)
- Ballast notwendig wegen des Auftriebs

#### ➤ Option

- Speicherung der Energie z.B. direkt an Offshore-Windparks möglich

#### ➤ Nachteil:

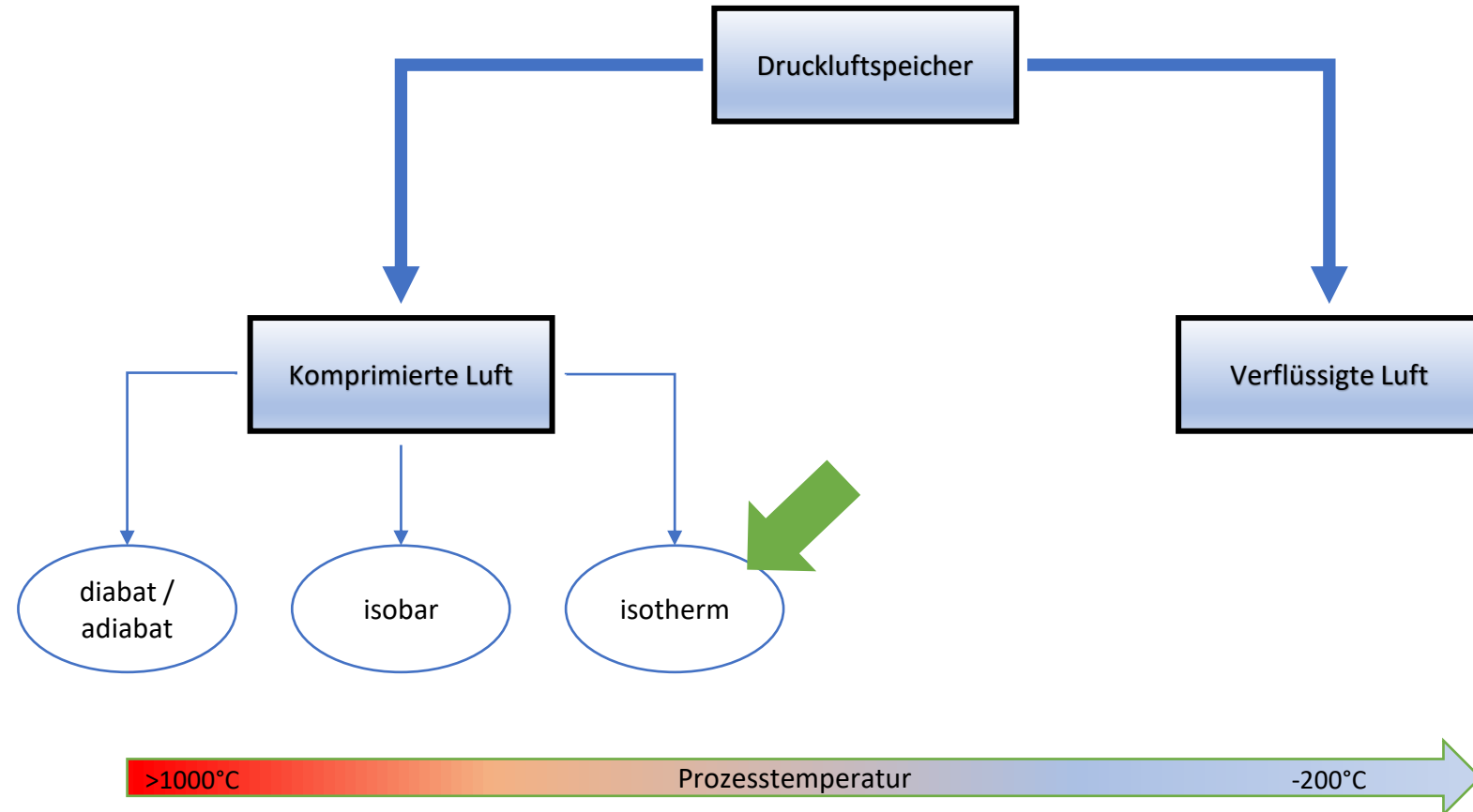
- Hohe Installations- und Wartungskosten



Paul Dvorak, Windpower Engineering&Development; <https://www.windpowerengineering.com/underwater-compressed-air-storage-making-good-progress/>

### 3. Druckluftspeicherkraftwerke

#### 3.8 Isotherme CAES



### 3 Compressed Air Energy Storage (CAES)

#### 3.8 Isothermal CAES

##### Basic concept

Approaches to minimize the temperature change during compression and expansion

- Slow change of state (piston engines)
- Increase of thermal mass (liquid piston)
- Increase of heat transport (e.g. due to additional installations)

##### Challenges

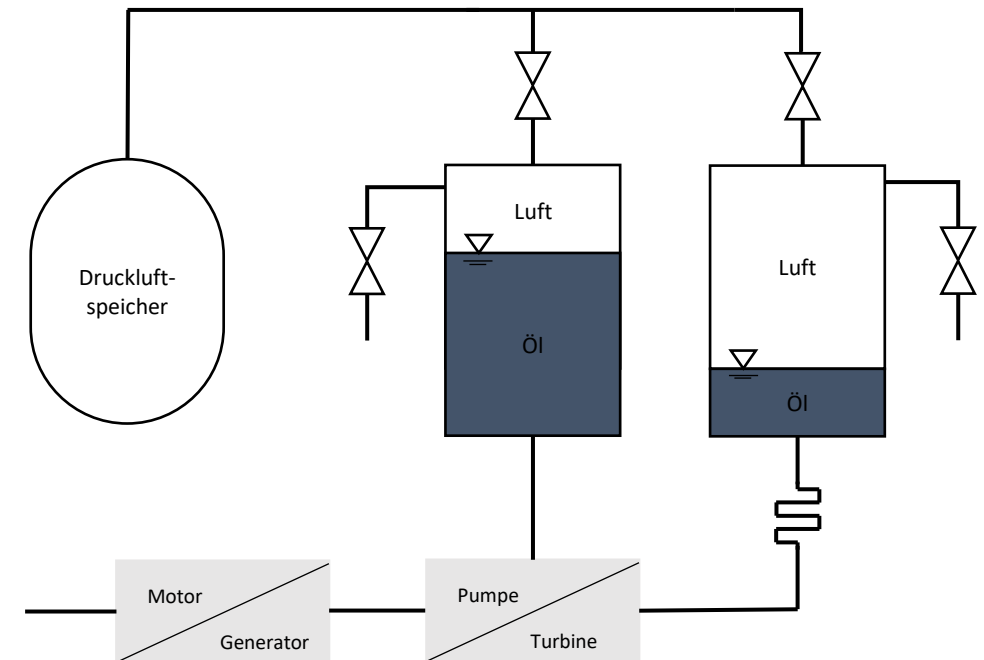
- Foaming and gas solubility
- Limited power of piston engines

## 3. Druckluftspeicherkraftwerke

### 3.8 Isotherme CAES

#### Grundkonzept

- **Ansätze zur Minimierung der Temperaturänderung bei Verdichtung und Expansion**
  - Langsame Zustandsänderung (Kolbenmaschinen)
  - Erhöhung der thermischen Masse (Flüssigkeitskolben)
  - Erhöhung des Wärmetransports (z.B. durch zus. Einbauten)
  - Höherer Wirkungsgrad als beim CAES (ca. 70%)
- **Herausforderungen**
  - Schaumbildung und Gaslöslichkeit
  - Begrenzte Leistung der Kolbenmaschinen



3 Compressed Air Energy Storage (CAES)

3.8 Isothermal CAES

Implementation

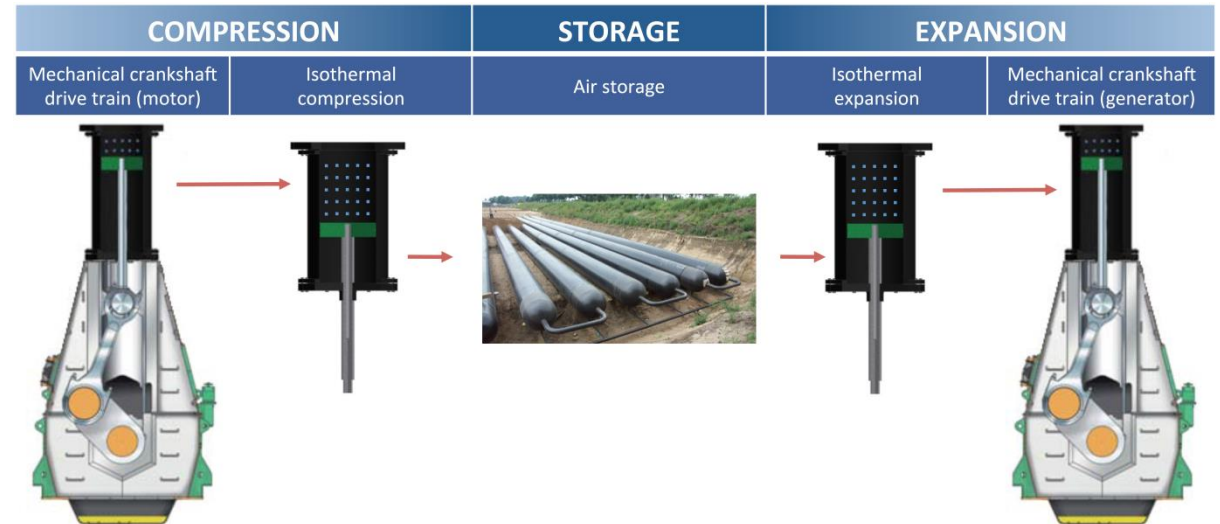
- Water injection
- Foam compression

### 3. Druckluftspeicherkraftwerke

#### 3.8 Isotherme CAES

#### Umsetzung

➤ Wassereinspritzung



Quelle: BRODY, R.: ISOTHERMAL CAES: Site-anywhere compressed air energy storage, Berlin, 2012.

➤ Schaumverdichtung



Quelle: MCBRIDE ET AL., ICAES Innovation - Foam-Based heat exchange, Seabrook, USA, 2013.



## 3 Compressed Air Energy Storage (CAES)

## 3.8 Isothermal CAES - Example

## Pilot plant »SustainX«

- about 1.5 MW<sub>el,ch</sub>
- Based on marine diesel
- Foam compression: Just 20 K temperature change if compressing 1 bar -> approx. 200 bar in 2 stages ( $\Pi \approx 14$ )
- Challenge: Environmental heat must be coupled in

## 3. Mechanische Energiespeicher – Druckluftspeicherkraftwerke

## 3.8 Isotherme CAES - Beispiel

## Pilotanlage »SustainX« (Aufbau siehe Bild)

- ca. 1,5 MW<sub>el,ch</sub>
- Basiert auf Schiffsdiesel
- Schaumverdichtung: 1 bar -> ca. 200 bar in 2 Stufen ( $\Pi \approx 14$ ) mit nur 20 K Temperaturänderung
- Herausforderung: Umweltwärme muss eingekoppelt werden

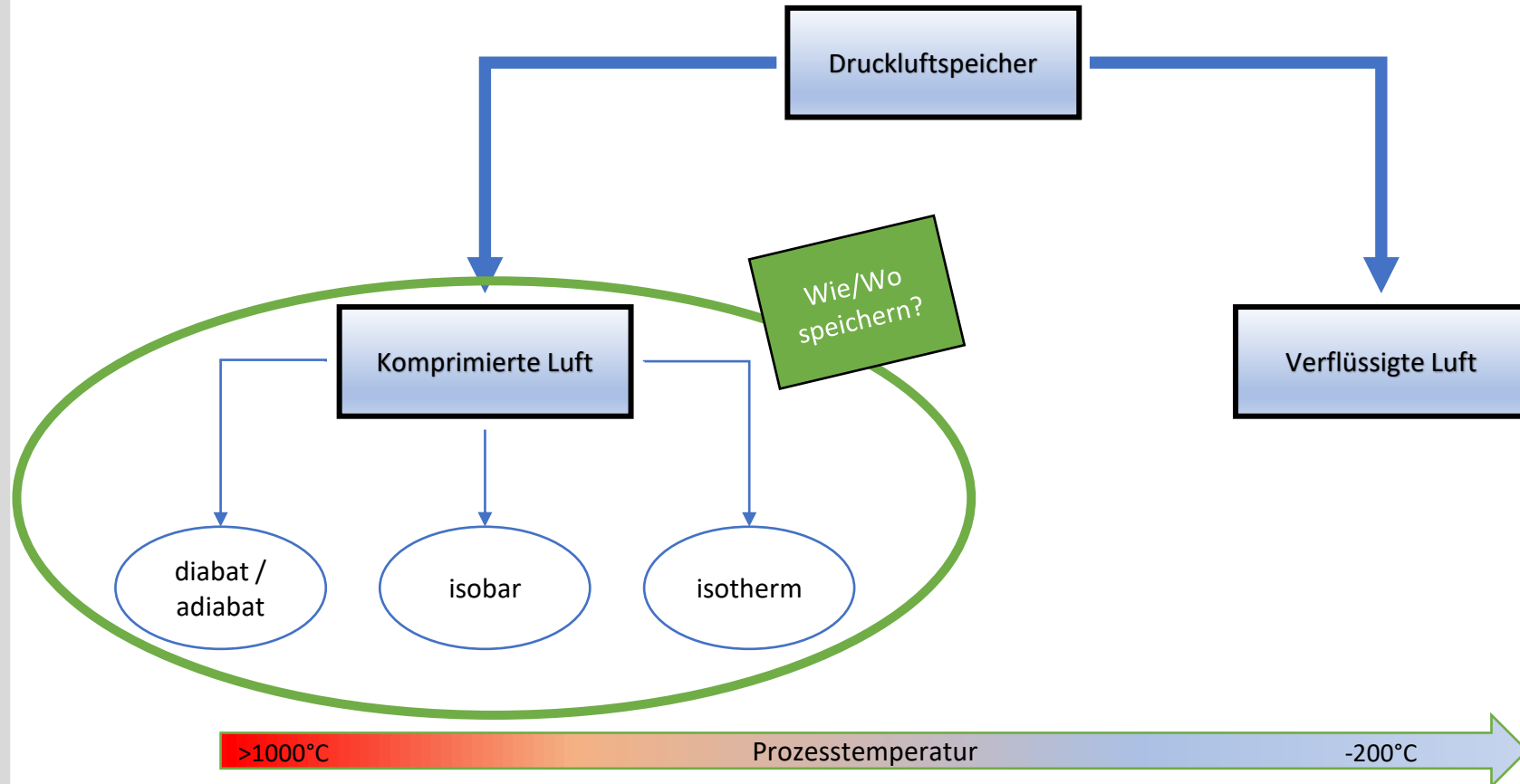


Quelle: Greentech Media / Wood Mackenzie; <http://www.greentechmedia.com/articles/read/sustainx-to-merge-with-general-compression-abandon-above-ground-caes-ambiti>



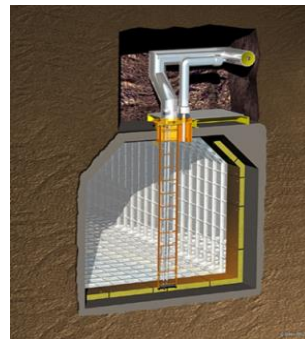
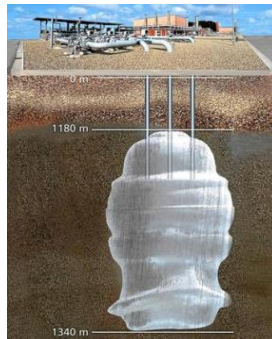
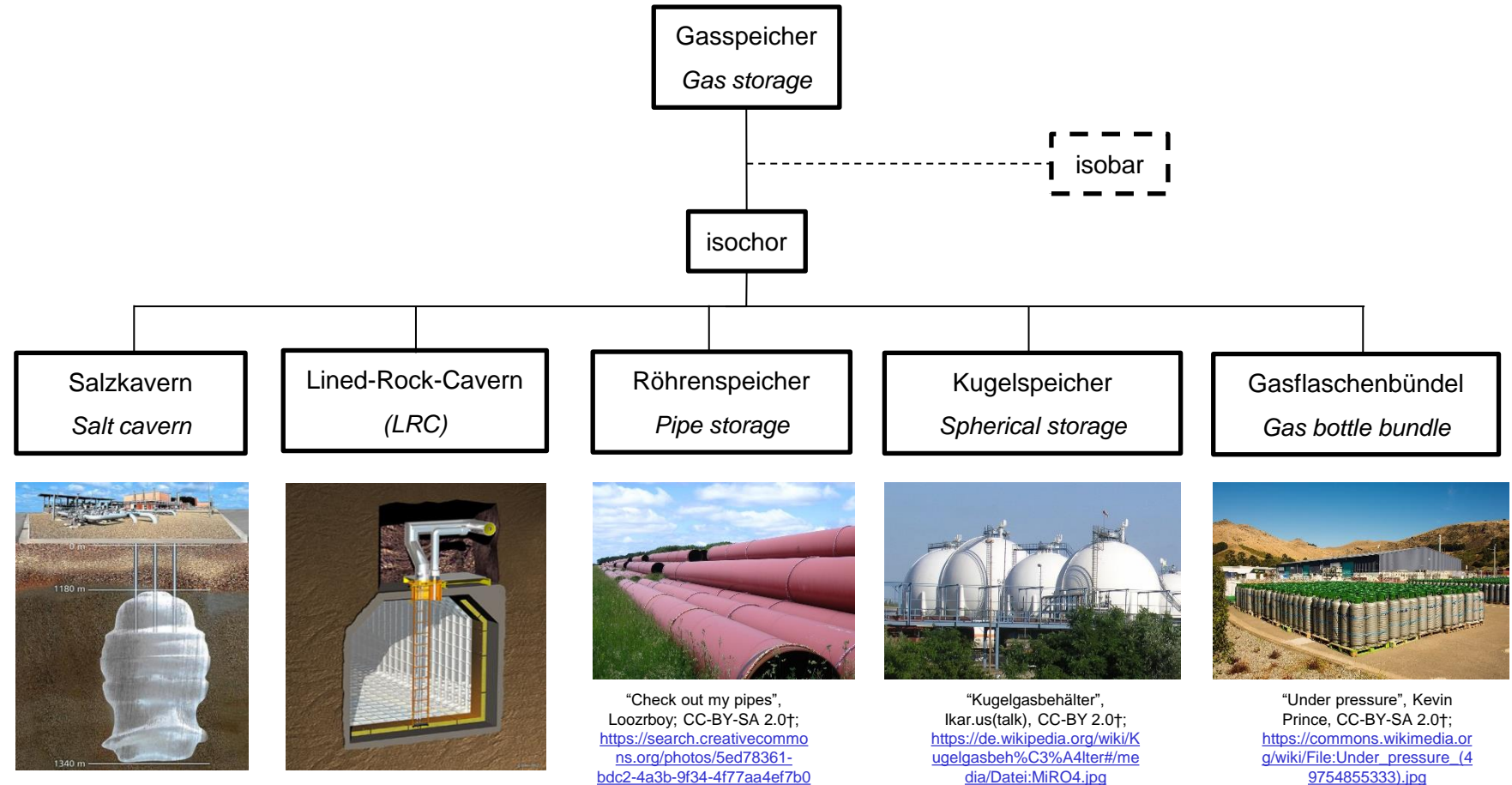
### 3. Druckluftspeicherkraftwerke

#### 3.9 Druckluft-Speichervolumina



### 3. Druckluftspeicherkraftwerke

#### 3.9 Druckluft-Speichervolumina



“Check out my pipes”,  
Loozrboy; CC-BY-SA 2.0†;  
<https://search.creativecommons.org/photos/5ed78361-bdc2-4a3b-9f34-4f77aa4ef7b0>



“Kugelgasbehälter”,  
Ikar.us(talk), CC-BY 2.0†;  
<https://de.wikipedia.org/wiki/Kugelgasbeh%C3%A4lter#/media/Datei:MiRO4.jpg>



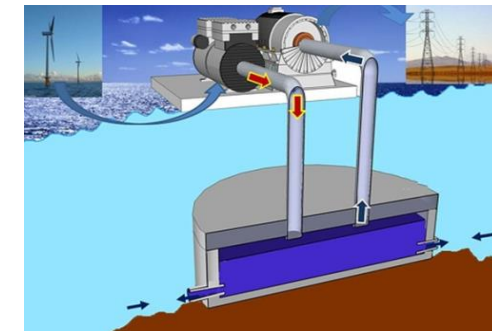
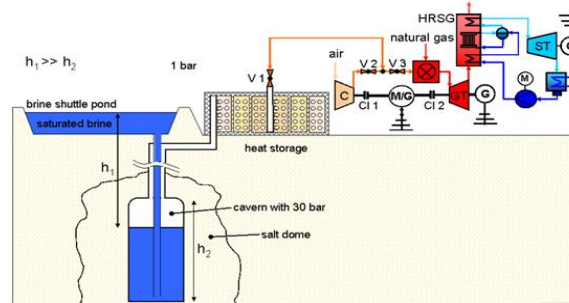
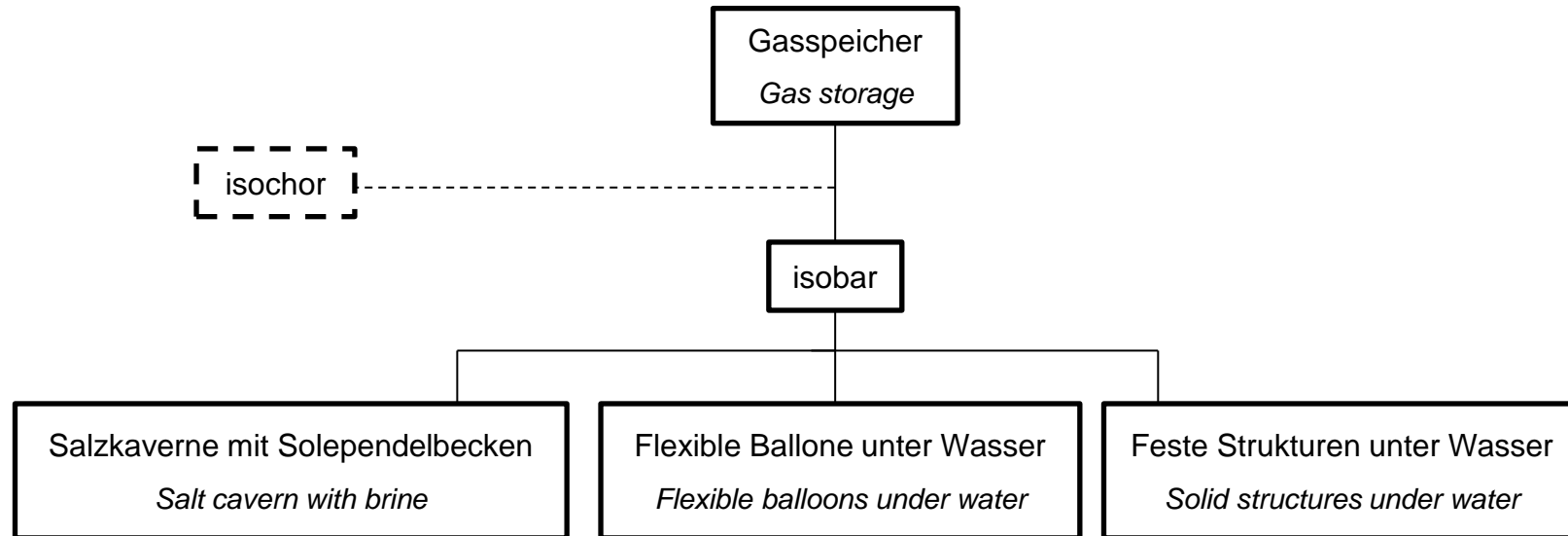
“Under pressure”, Kevin Prince, CC-BY-SA 2.0†;  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Under\\_pressure\\_\(49754855333\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Under_pressure_(49754855333).jpg)

Quellen: Trianel 2013; <https://www.presseportal.de/pm/67884/1633048>

Park et al. 2010; <https://www.intechopen.com/chapters/40556>

### 3. Mechanische Energiespeicher – Druckluftspeicherkraftwerke

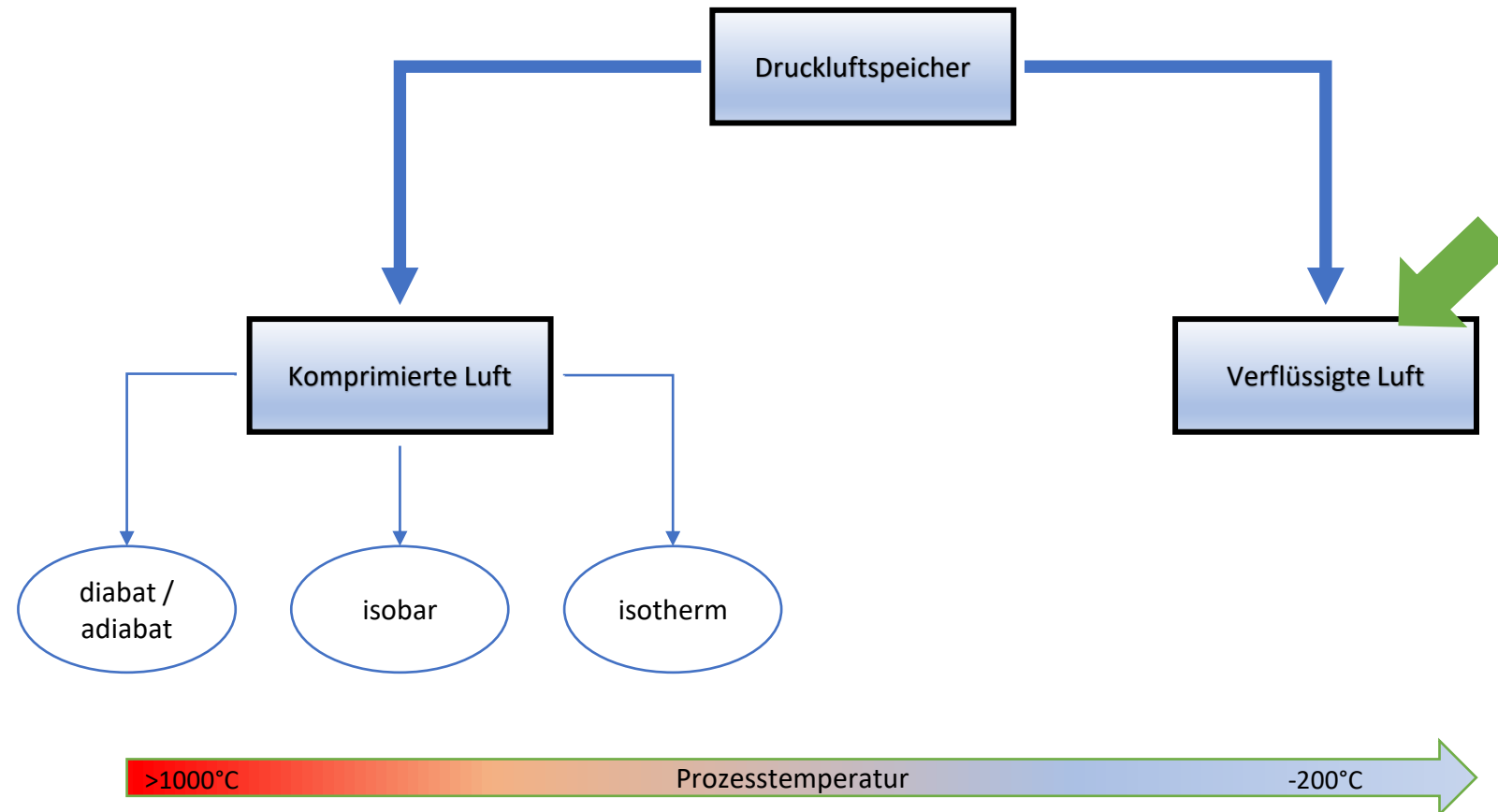
#### 3.9 Druckluft-Speichervolumina



Quelle: NIELSEN & LEITHNER 2009; PIMM ET AL. 2014; KOREN ET AL. 2017

### 3. Druckluftspeicherkraftwerke

#### 3.10 Flüssigluftenergiespeicher – Liquid Air Energy Storage (LAES)



3 Compressed Air Energy Storage (CAES)

3.10 Liquid Air Energy Storage (LAES)

Basic concept

Liquefied air ...

... has a very high storage density (110–120 kWh / m<sup>3</sup>)

... a system efficiency of 50-65%

... can be stored without pressure in insulated tanks

... has liquid-air losses due to the "boil-off" effect (stand-by losses)

### 3. Druckluftspeicherkraftwerke

#### 3.10 Flüssigluftenergiespeicher – Liquid Air Energy Storage (LAES)

##### Grundkonzept

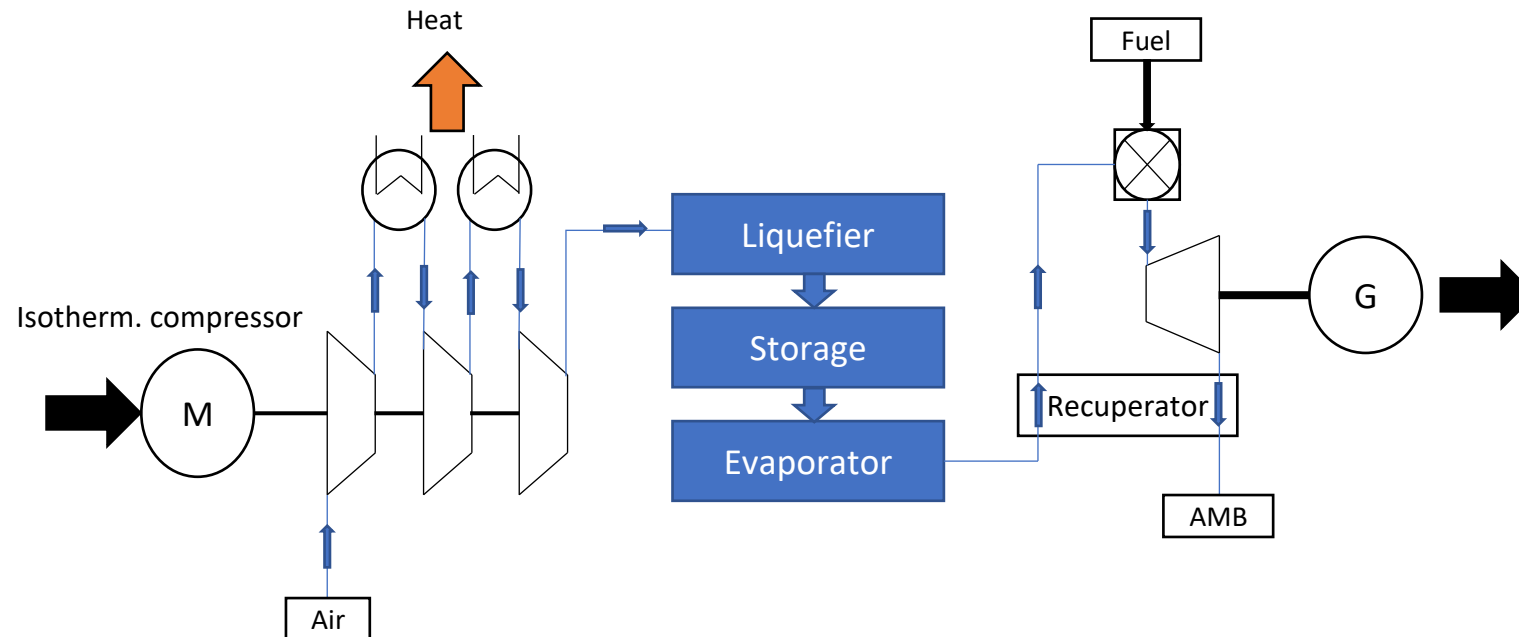
➤ **Verflüssigte Luft...**

... hat eine sehr hohe Speicherdichte (ca. 120 kWh/m<sup>3</sup>)

... einen Systemwirkungsgrad von 50-65%

... kann in isolierten Tanks drucklos gelagert werden

... hat Stand-by Verluste durch „boil-off“-Effekt



### 3 Compressed Air Energy Storage (CAES)

#### 3.11 Summary / Take aways

1. Compressed air storage systems have only been implemented twice worldwide, each on an industrial scale in the three-digit MW range
2. The efficiency of modern compressed air storage systems is between 54% (CAES), 50-65% (L-CAES) to over 70% (A-CAES and isothermal CAES), although the method of calculating the efficiency is not unambiguous for simple CAES.
3. Only A-CAES do not require any additional heat, whereby the isothermal CAES manages with ambient heat, whereas the CAES requires a relevant additional gas heating.
4. The efficiency of an A-CAES depends only insignificantly on the process or storage temperature, so that low temperature (NT) A-CAES can also be implemented, which circumvent the problems of HT-A-CAES (high temperature storage at high pressure).
5. While CAES, A-CAES and isobar, isotherm CAES have no or minimal stand-by losses (minimal amounts of gas escape unintentionally from the pressure chamber), the L-CAES has a necessary "boil-off" effect.
6. Pressurized gas storage tanks can be isochoric (common) or isobaric (advantageously, however, so far only R&D has been implemented).

## 3. Druckluftspeicherkraftwerke

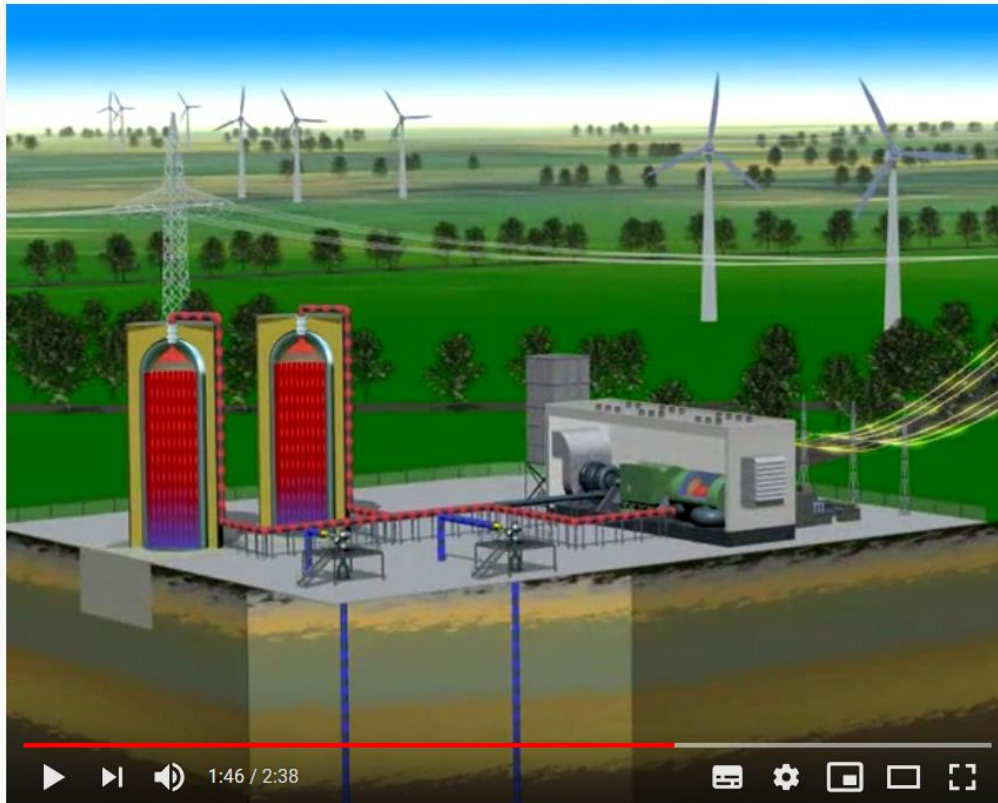
### 3.11 Kurzzusammenfassung / „Take aways“

1. Druckluftspeicher sind bisher erst zweimal weltweit realisiert worden, jeweils großtechnisch im dreistelligen MW Bereich
2. Der Wirkungsgrad von modernen Druckluftspeichern liegt zwischen 54% (CAES), bei 50-65% (L-CAES) bis über 70% (A-CAES und isothermer CAES), wobei beim einfachen CAES die Wirkungsgradberechnung methodisch nicht eindeutig ist.
3. Nur A-CAES benötigen keine Zusatzwärme, wobei der isotherme CAES mit Umweltwärme auskommt, dagegen der CAES eine relevante Gas-Zufuhr benötigt.
4. Der Wirkungsgrad eines A-CAES hängt nur unwesentlich von der Prozess- bzw. Speichertemperatur ab, so dass auch Niedertemperatur (NT) A-CAES realisierbar sind, die die Probleme der HT-A-CAES (Hochtemperaturspeicher bei hohem Druck) umgehen.
5. Während CAES, A-CAES und Isobare, Isotherme CAES keine bzw. minimale Stand-by Verluste haben (minimale Gasmengen entweichen ungewollt der Druckkammer) gibt es beim L-CAES einen notwendigen „boil-off“ Effekt.
6. Druckgasspeicher können isochor (üblich) bzw. isobar (vorteilhaft, aber bisher nur F&E realisiert) sein.










## Further Information

VIDEO: "RWE Power: ADELE - Adiabatic compressed-air energy storage (CAES)" [0:00 – 2:38]



RWE Power: ADELE - Adiabatic compressed-air energy storage (CAES) for electricity supply

<https://youtu.be/K4yJx5yTzO4>

†CC-Lizenzen	Bezeichnung	Version	Link zum Lizenz-/Vertragstext
	CC0 Bedingungslose Lizenz	Vers. 1.0	<a href="https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/legalcode">https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/legalcode</a>
	CC-BY Attribution (Namensnennung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	<a href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by/2.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by/2.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by/1.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by/1.0/legalcode</a>
	CC-BY-SA Attribution ShareAlike (Namensnennung-Weitergabe unter gleichen Bedingungen)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	<a href="http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-sa/1.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-sa/1.0/legalcode</a>
	CC-BY-ND Attribution NoDerivatives (Namensnennung-Keine Bearbeitung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	<a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nd/2.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nd/2.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nd/1.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nd/1.0/legalcode</a>
	CC-BY-NC Attribution NonCommercial (Namensnennung-Nicht kommerziell)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	<a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc/1.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc/1.0/legalcode</a>
	CC-BY-NC-SA Attribution NonCommercial ShareAlike (Namensnennung-Nicht kommerziell-Weitergabe unter gleichen Bedingungen)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	<a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/1.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/1.0/legalcode</a>
	CC-BY-NC-ND Attribution NonCommercial NoDerivatives (Namensnennung-Nicht kommerziell-Keine Bearbeitung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	<a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/legalcode</a> <a href="http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/1.0/legalcode">http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/1.0/legalcode</a>

**Prof. Dr. Christian Doetsch**

Lehrstuhl »Cross Energy Systems«

c/o Fraunhofer UMSICHT  
+49 208 8598-1195

christian.doetsch@rub.de

QR-Code: Business Card



# ORCA.nrw

Technology  
Arts Sciences  
TH Köln

RUHR  
UNIVERSITÄT  
BOCHUM

RUB

Hochschule  
Bonn-Rhein-Sieg

Hochschule Düsseldorf  
University of Applied Sciences  
HSD

ISEA  
Stromrichter-  
technik und  
Elektrische  
Antriebe

RWTH AACHEN  
UNIVERSITY

FH AACHEN  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Ein Kooperationsvorhaben empfohlen durch die:



INNOVATION DURCH KOOPERATION

Gefördert durch:

Ministry of Culture and Science  
of the State of  
North Rhine-Westphalia



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.  
All logos and explicitly marked elements used are excluded from this license. [www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0](http://www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0)