



Energiespeicherung: Schlechtes Wetter - keine Energie?

Professor Dr. - Ing. habil. Achim Dittmann

(unterstützt durch Dr.-Ing. T. Sander und Dr.-Ing. R. Huhn)

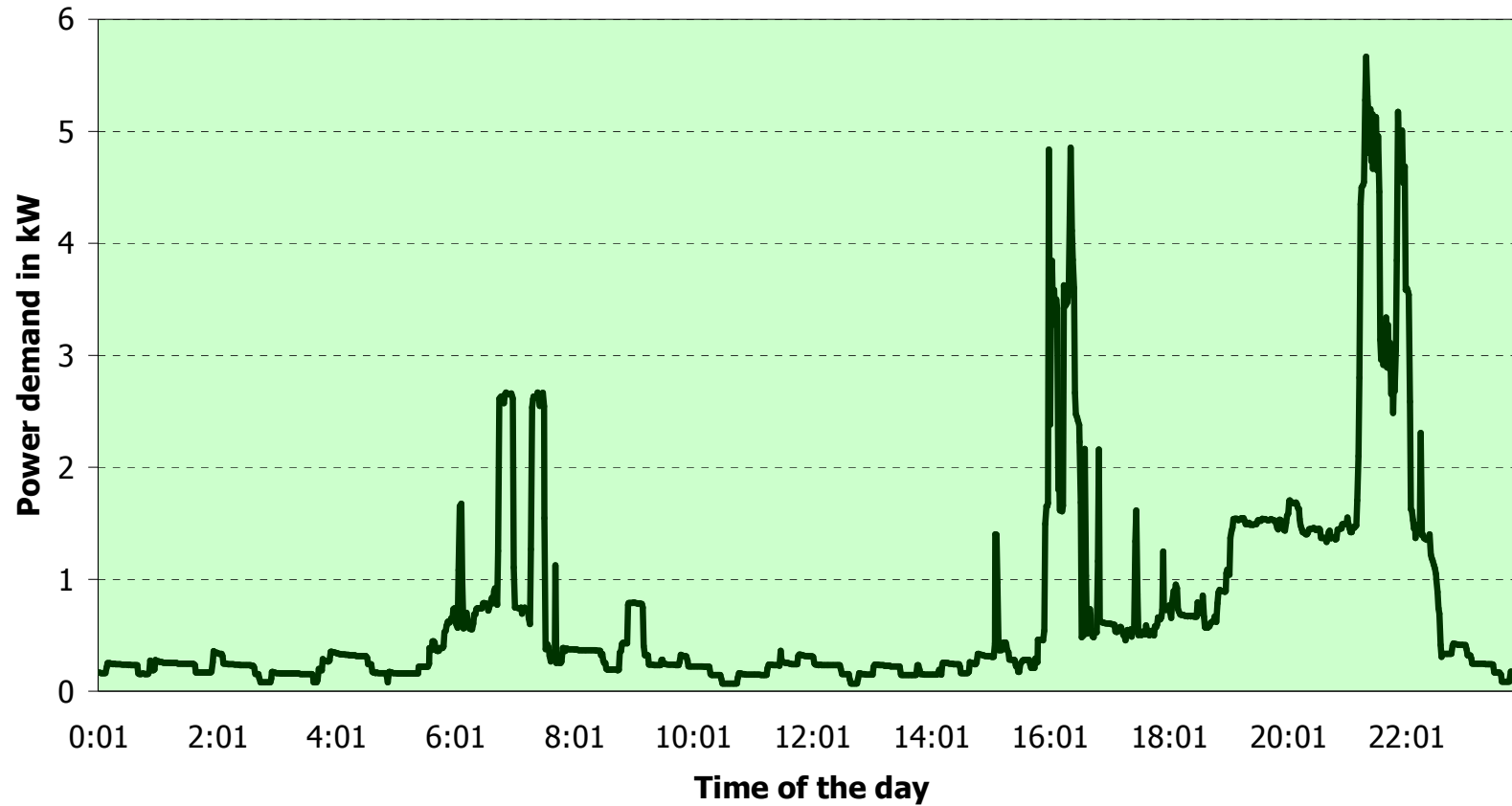
Inhalt

1. Weshalb Einsatz von Speichern in der Energietechnik ?
2. Einige grundlegende Bemerkungen
3. Prinzipien und physikalische Basis der Energiespeicherung
 - 3.1 Thermische Energiespeicher
 - 3.2 Elektrische bzw. mechanische Speicher

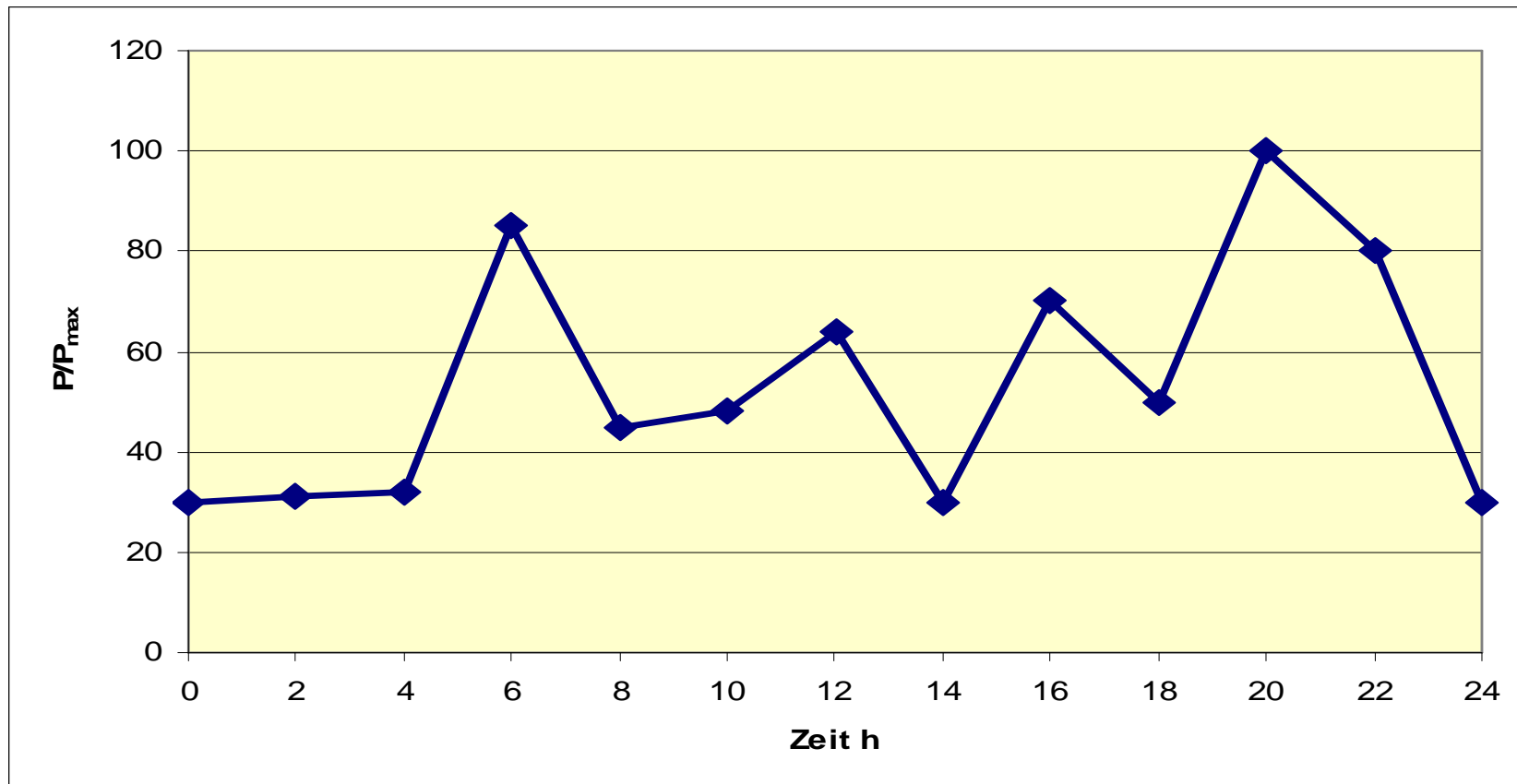
Ausgleich dynamischer Vorgänge

- Tagesgang: *Wärme - und Elektroenergiebedarf von Gebäuden (Außenlufttemperatur, Nutzergewohnheiten u.a.)**
 - *Klima-Kältebedarf von kulturellen Einrichtungen und Gesellschaftsbauten**
 - *Tagesgang des elektrischen Verbundnetzes**
 - *Anfall von Solarthermie und Photovoltaik**
 - *diskontinuierliche Produktionsprozesse**
- Wochen-, saisonaler - bis Jahrgang:**
 - *Erdgasbedarf**
 - *Solarthermie Winter/Sommer**
- Sicherheit und Stabilität von Produktionsprozessen: z.B. Chip-Produktion**
- “Chaotischer“ Anfall: z.B. Windstrom**

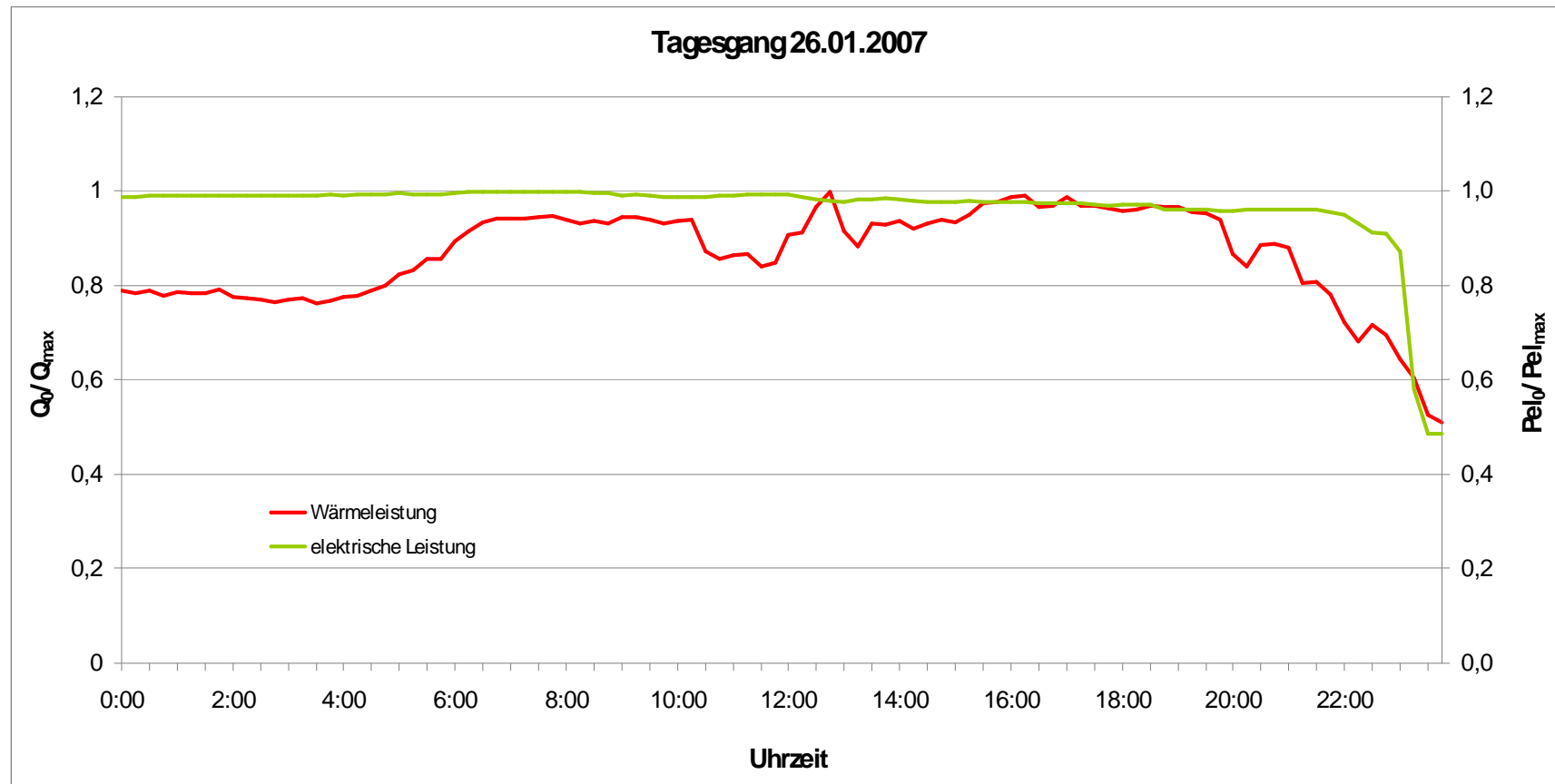
Tagesganglinie Elektroenergie (Wochentag - Familienhaushalt)



Tagesganglinie Elektroenergie-Verbundnetz

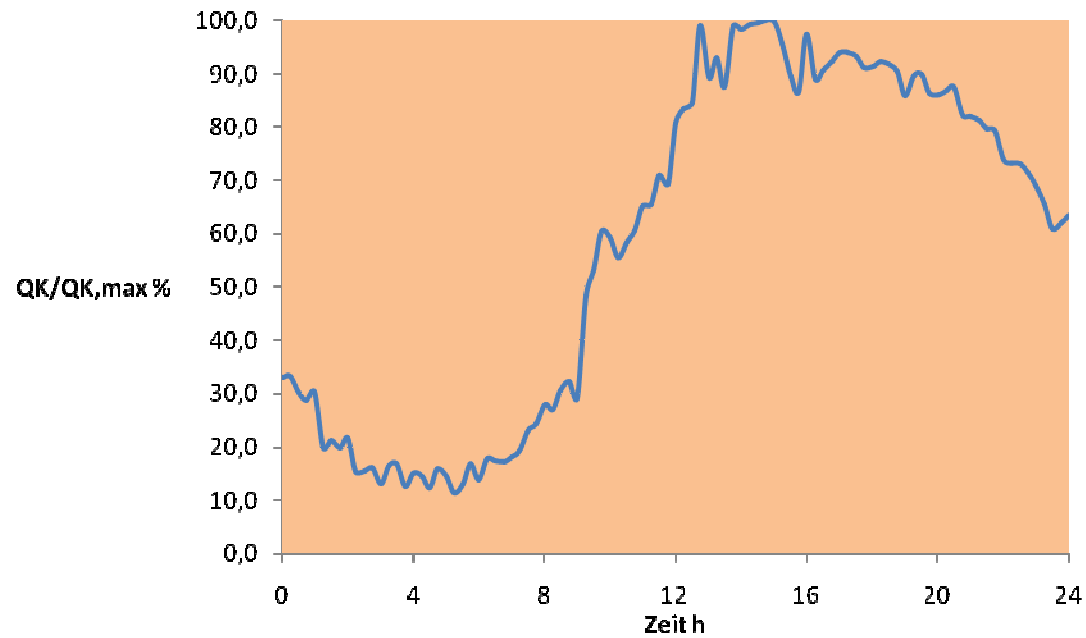


Wärmelastgang einer mitteldeutschen Großstadt



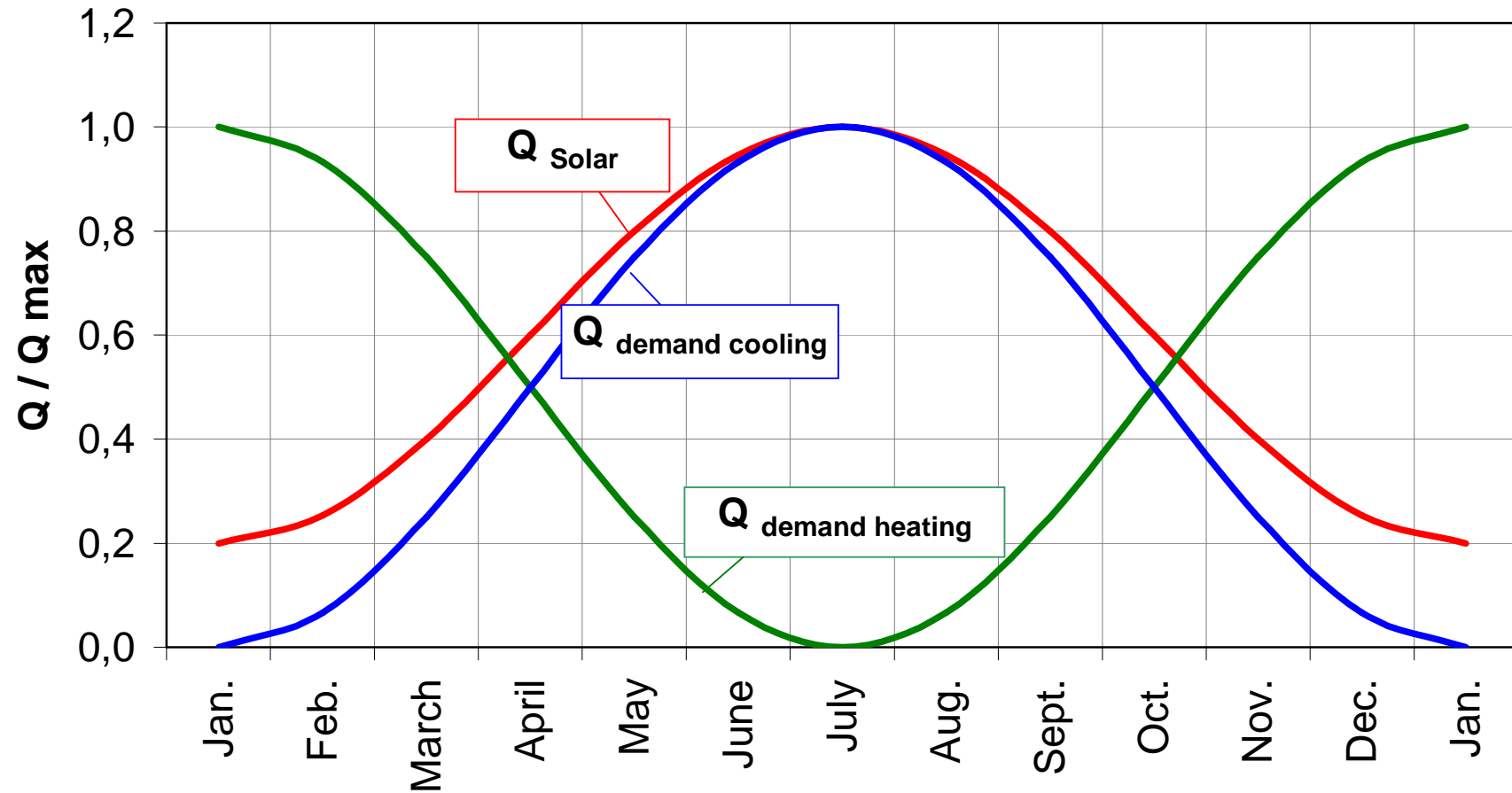
Klima-Kälte-Tagesgang

Kälteleistungsbedarf eines Hotels an einem Sommertag

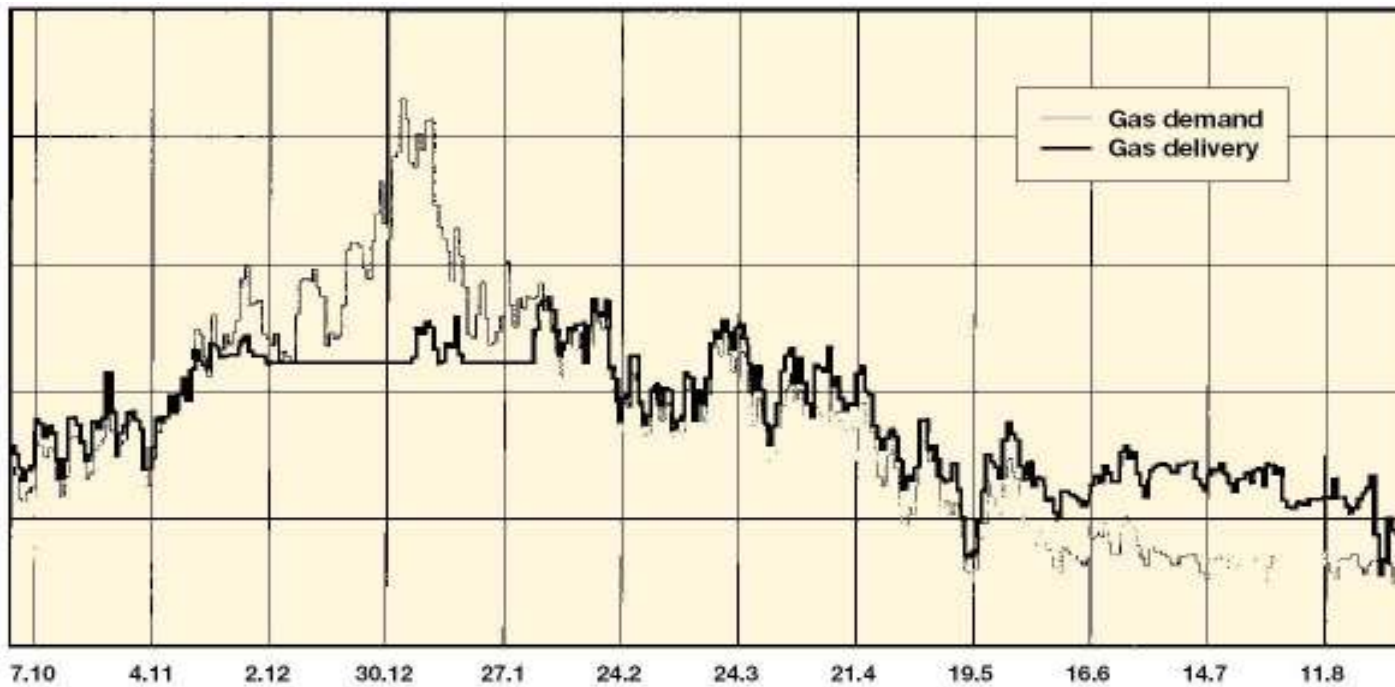


Solares Heizen und Kühlen-Bedarf und Angebot

(nördliche Hemiosphäre)

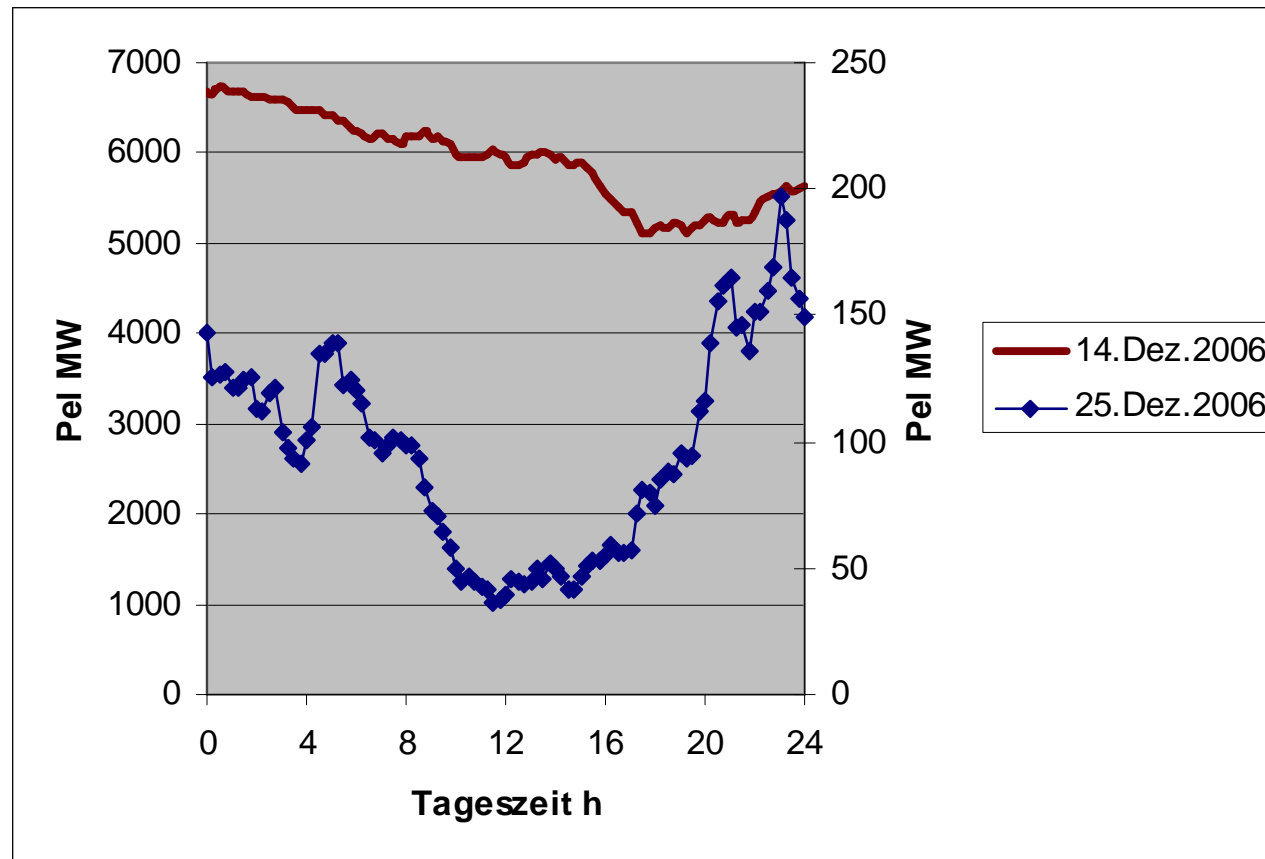


Erdgasbedarf und -lieferung



Quelle: [2]

Windstromeinspeisung ins EON-Netz an exponierten Tagen



Source: EON-Internetstatistik

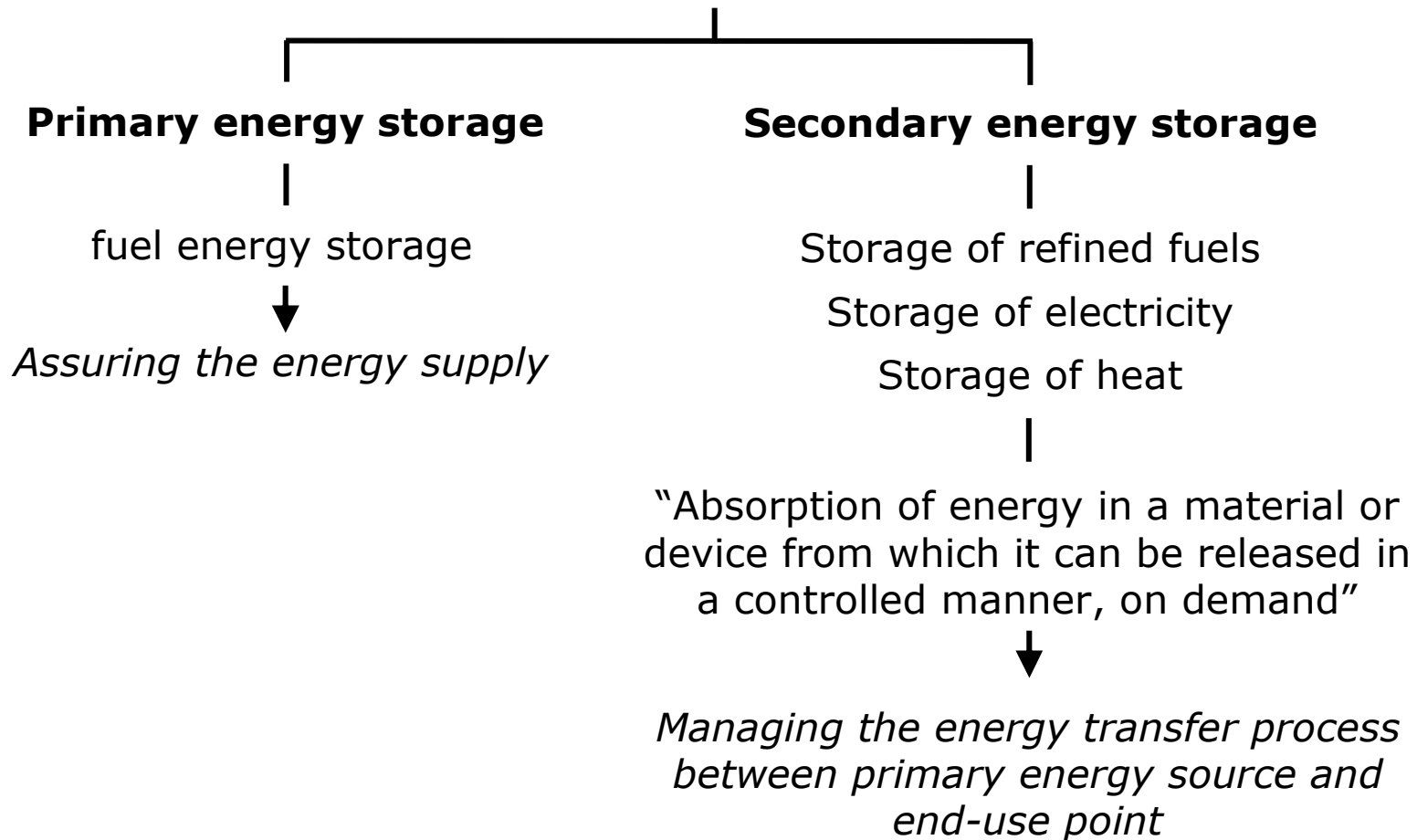
Ökonomische Aspekte

- Brennstoffeinsparungen durch Vermeidung von Teillastzuständen
- Reduzierung von Investitionskosten durch geringere Dimensionierung der „Erzeugersysteme“
- Ausnutzung unterschiedlicher Einspeisevergütungen (HT/NT)
- Vermeidung von Produktionsausfällen

Ökologische Aspekte

- Reduzierung der CO₂-Emissionen durch verbesserte Gütegrade
- Nutzungsmöglichkeiten für regenerative Energiequellen (Windenergie, Solarthermie..)

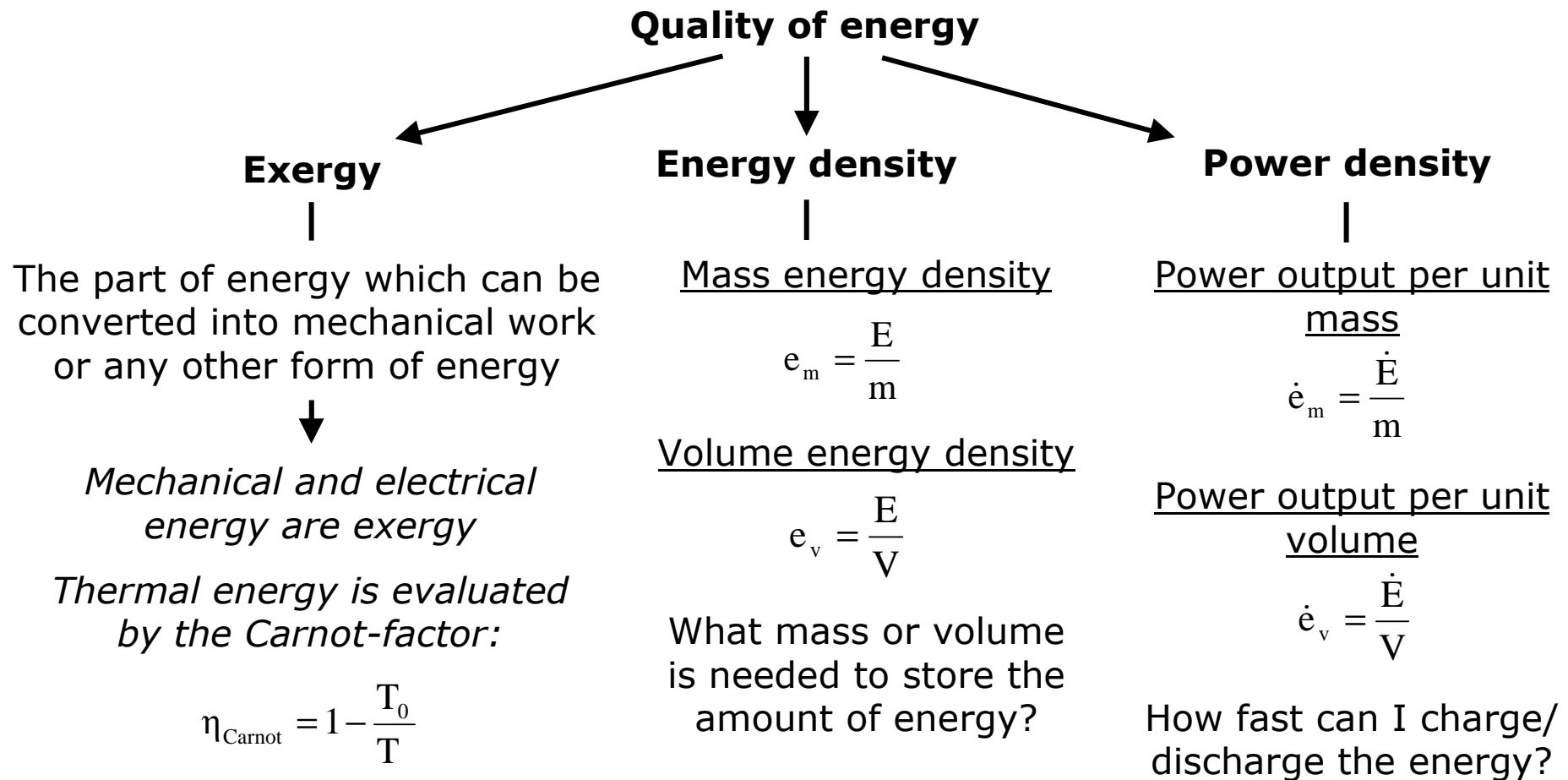
Energy storage



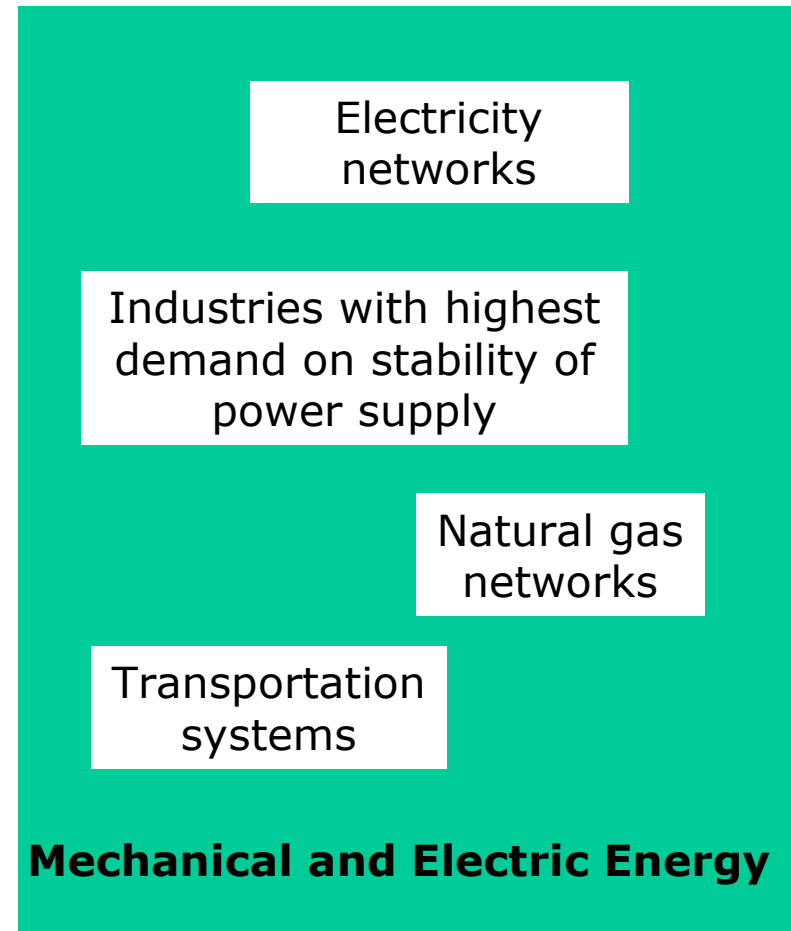
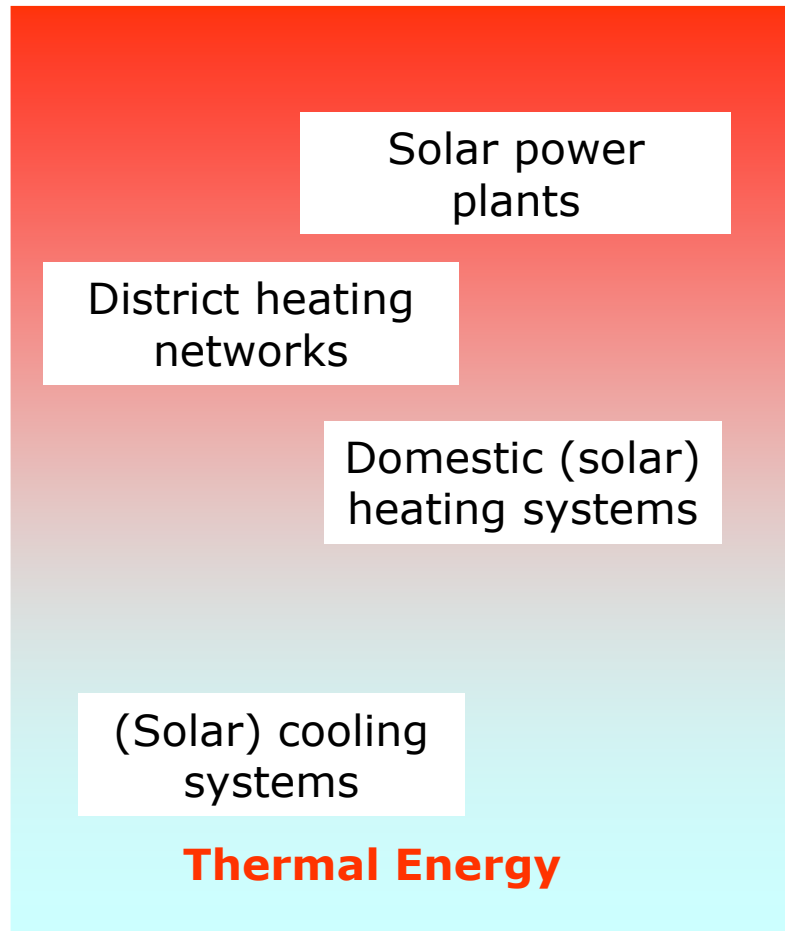
Speichervermögen unterschiedlicher Energieformen

Energy storage form	Storage material	Energy density	
		kJ/kg	MJ/m ³
Conventional Fuels	Crude oil	42000	37000
	Coal	32000	42000
	Dry wood	15000	10000
Synthetic Fuels	Hydrogen, gas	120000	10
	Hydrogen, liquid	120000	8700
	Methanol	21000	17000
	Ethanol	28000	22000
Thermal - low quality	Water, 100°C → 40°C	250	250
	Rocks, 100°C → 40°C	40-50	100-140
	Iron, 100°C → 40°C	≈30	≈230
Thermal - high quality	Rocks, 400°C → 200°C	≈160	≈430
	Iron, 400°C → 200°C	≈100	≈800
	Inorganic salts, heat of fusion > 300°C	>300	>300
Mechanical	Pumped hydro, 100 m head	1	1
	Compressed air 70 → 50 bar	≈22	≈1,8
	Compressed air 70 → 1 bar	≈500	≈42
	Flywheels, steel	30-120	240-950
	Flywheels, advanced materials	300-1500	600-2400
Electrochemical	Lead-acid battery	40-140	100-900
	Nicke-cadmium battery	≈350	≈350
	Advanced batteries	>400	>300

Key figures of energy storage

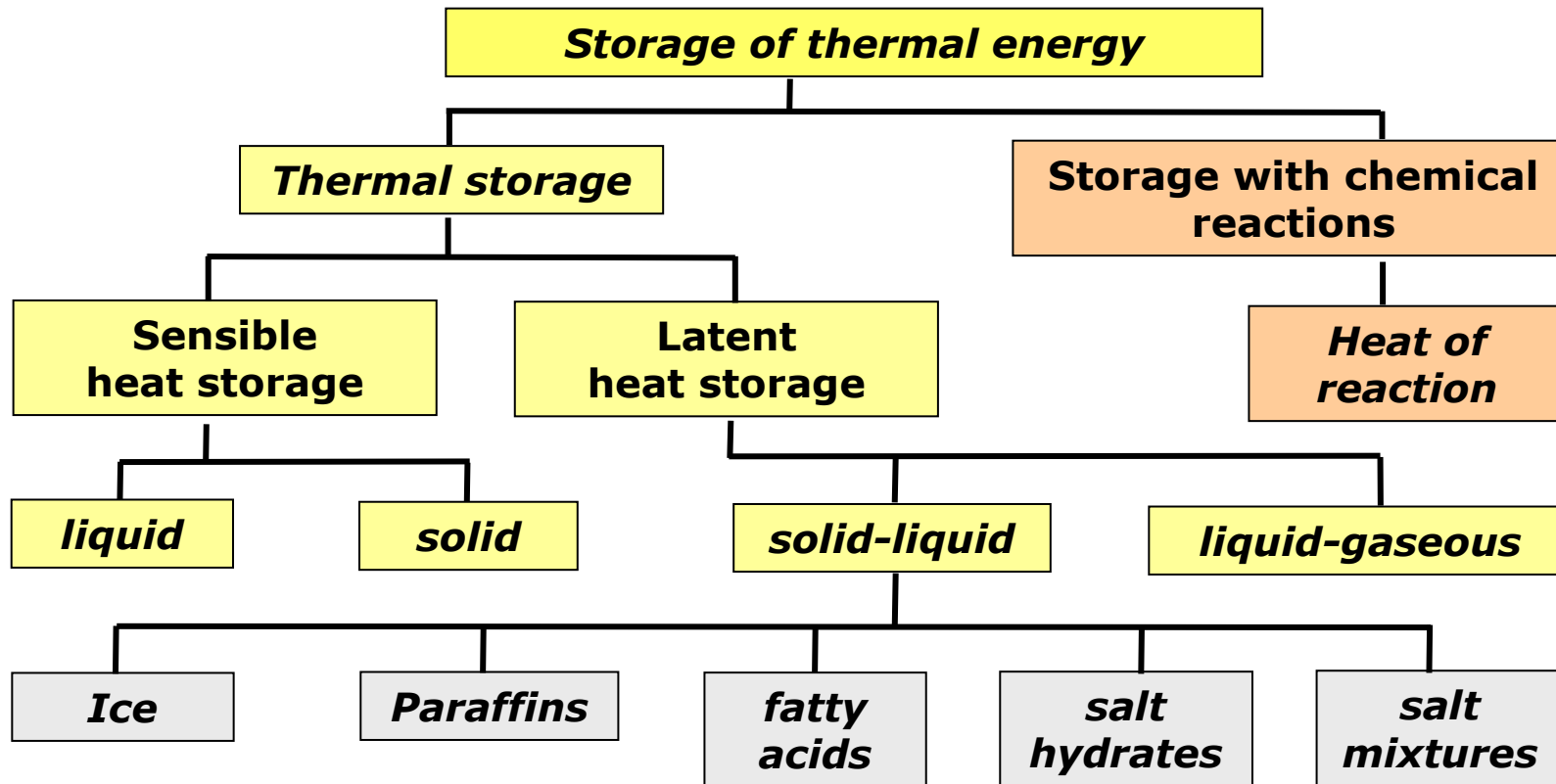


Where is energy storage required?



3.1 Thermische Energiespeicherung

Principles and physical basics of energy storage (1)



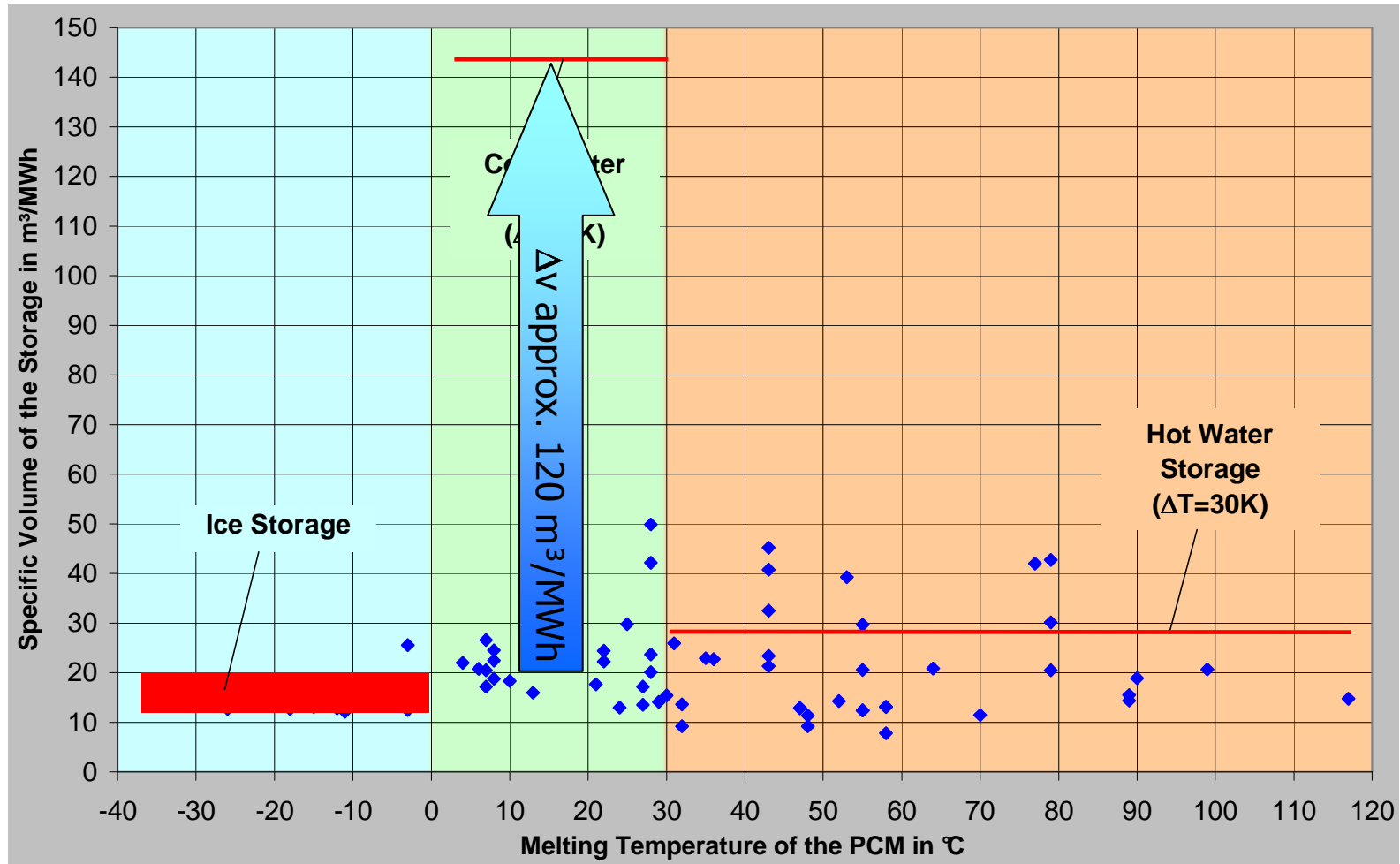
Principles and physical basics of energy storage (2)

Type of storage	Function	Characteristics
Sensible heat storage	Change in temperature of storage medium is used	<ul style="list-style-type: none"> • Common type of storage • Cheap storage medium (hot and cold water tanks)
Latent heat storage	Phase change enthalpy of storage medium (PCM – P hase C hange M aterial) is used	<ul style="list-style-type: none"> • High volumetric capacity • Smaller tank sizes • Less heat losses • Typical PCMs: Paraffins Salt hydrates Water/Ice Water/Steam
Storage with chemical reactions	Chemical binding or solution energy at favourable temperature is used	<ul style="list-style-type: none"> • “no” heat losses → for long term storage preferable • storage material too expensive for large scale applications

Physical basics - thermal energy storage

Type of storage	Physical description of storage energy
Sensible heat storage	$E_{th} = m \cdot c_p \cdot \Delta T$
Latent heat storage	for liquid-solid phase change $E_{th} = m \cdot (c_{p,liquid} \cdot (\vartheta_{max} - \vartheta_{melt}) + c_{p,solid} \cdot (\vartheta_{melt} - \vartheta_{min}) + \Delta_{melt} h)$
Storage with chemical reactions	$E_{th} = m \cdot \Delta h_{reaction}$

Spezifische Volumina von "Wärme- und Kältespeichern"



Source: 7

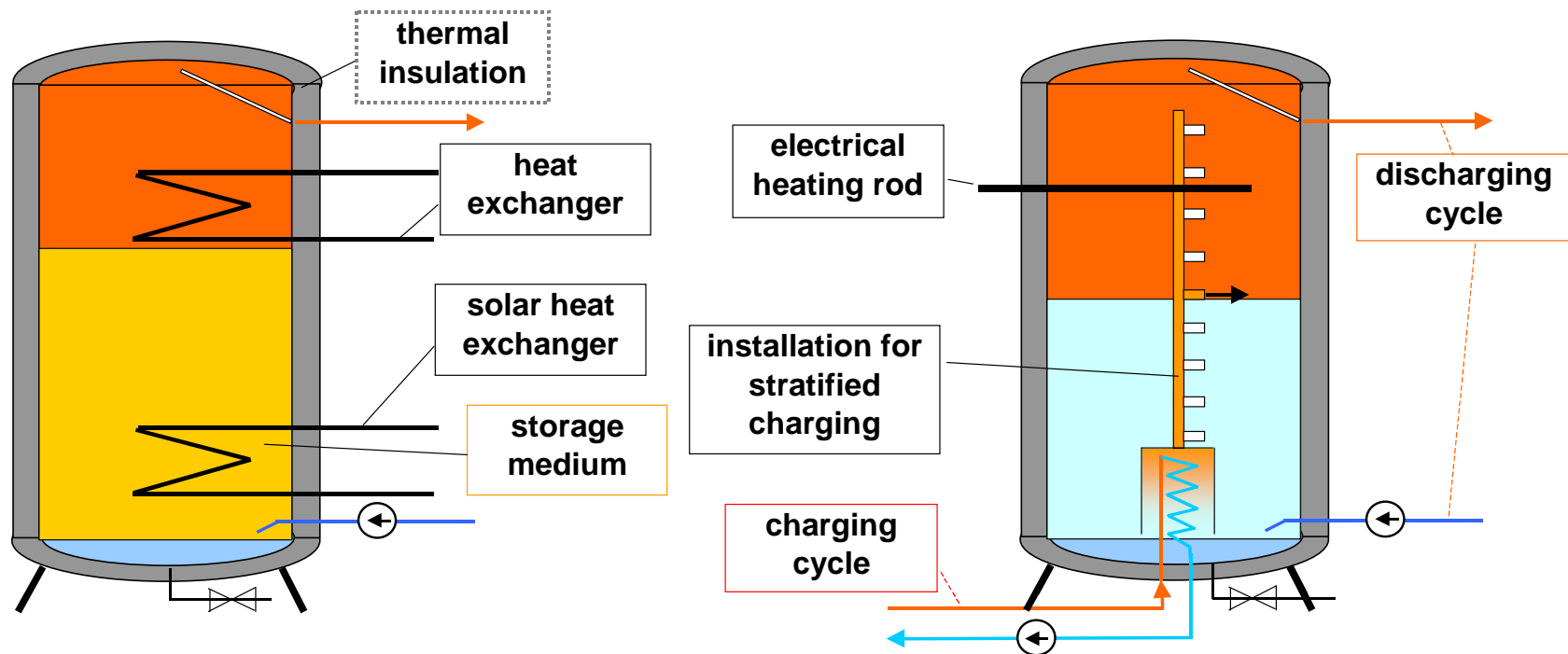
Derzeitiges Fazit:
Im Temperaturbereich
0...150 °C
ist der Wasserspeicher
ökonomisch nicht zu schlagen“!!

Häufigste Ausführung: Wasser“verdrängungs“speicher (Mischzone)

Beispiele:

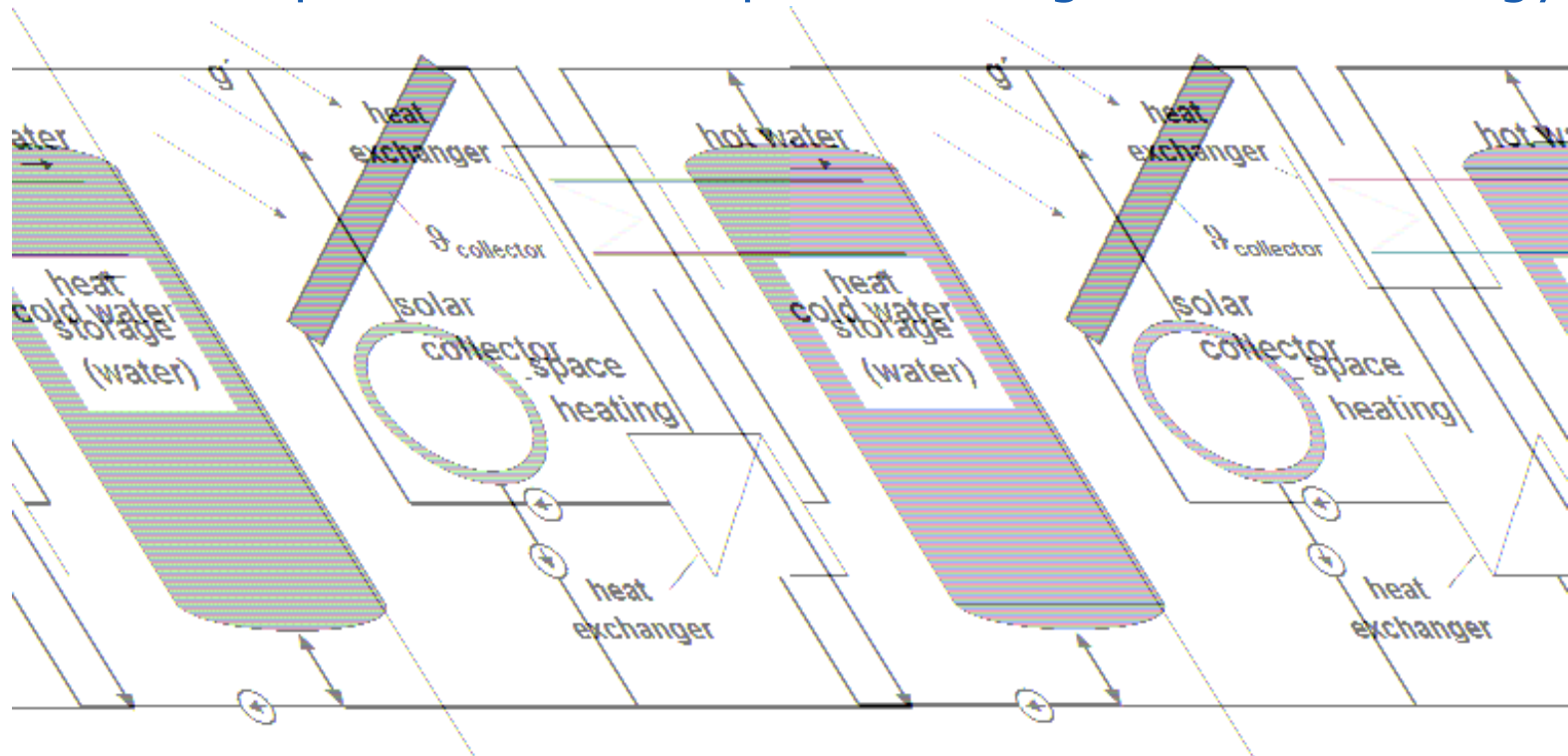
- **Fernwärme: Dresden, Chemnitz, Halle/Saale (6000 m³ in einem Behälter, Fernwärmeschiene Saar u.v.a.**
- **Trinkwarmwasserbereitung („Puffer“speicher) in Einfamilien- bis Wohnhochhäusern**
- **Pufferspeicher in solarthermischen Anlagen**
- **Saisonale Warmwasserspeicher**
- **stehende Kaltwasserspeicher (Berndt –Bau)**

Examples for hot water storage for solar applications



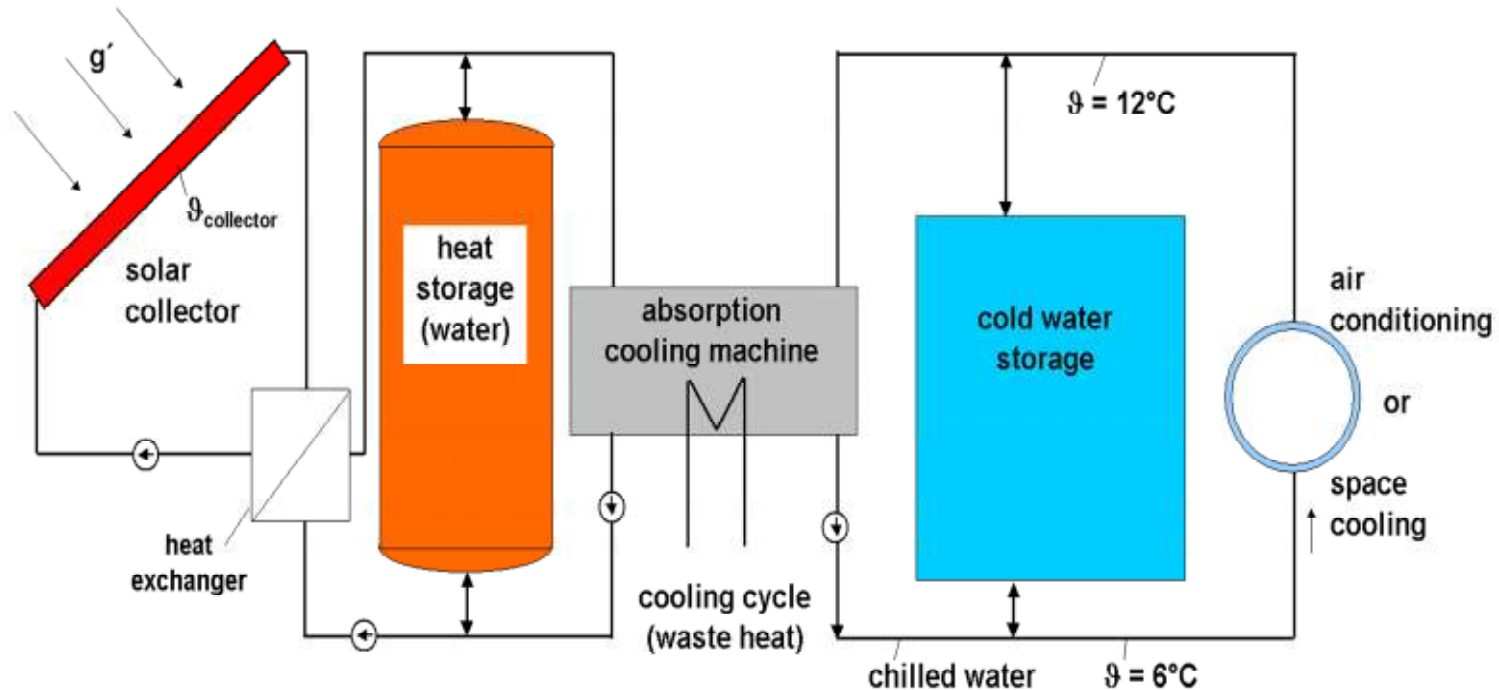
- good insulation for low heat losses
- improved stratification (hot water above cold water)
- second heat exchanger or electrical heating rod for the case of low solar input
- storage capacity in the range of the demand of several days

Hot water production and space heating with solar energy



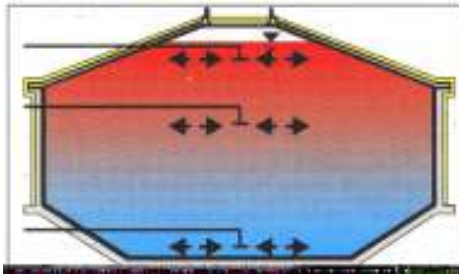
- storage tank made of construction steel (cheaper)
- separate heat exchanger for hygienic clean hot water production
- space heating directly with storage tank water

Solar cooling with heat and cold storage

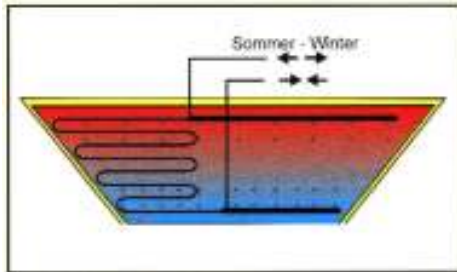


- heat storage for buffering solar supply
- cold storage enables smaller designed cooling machine
- waste heat from cooling machine has to be extracted by a separate cooling cycle

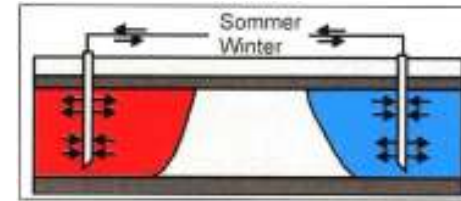
Systems for long term thermal energy storage (1)



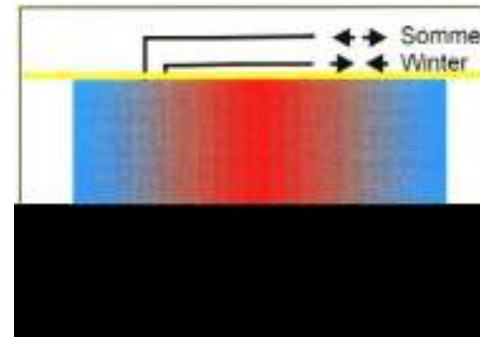
Hot water storage tank
(i.e. concrete tank)



Gravel-water thermal
energy storage tank



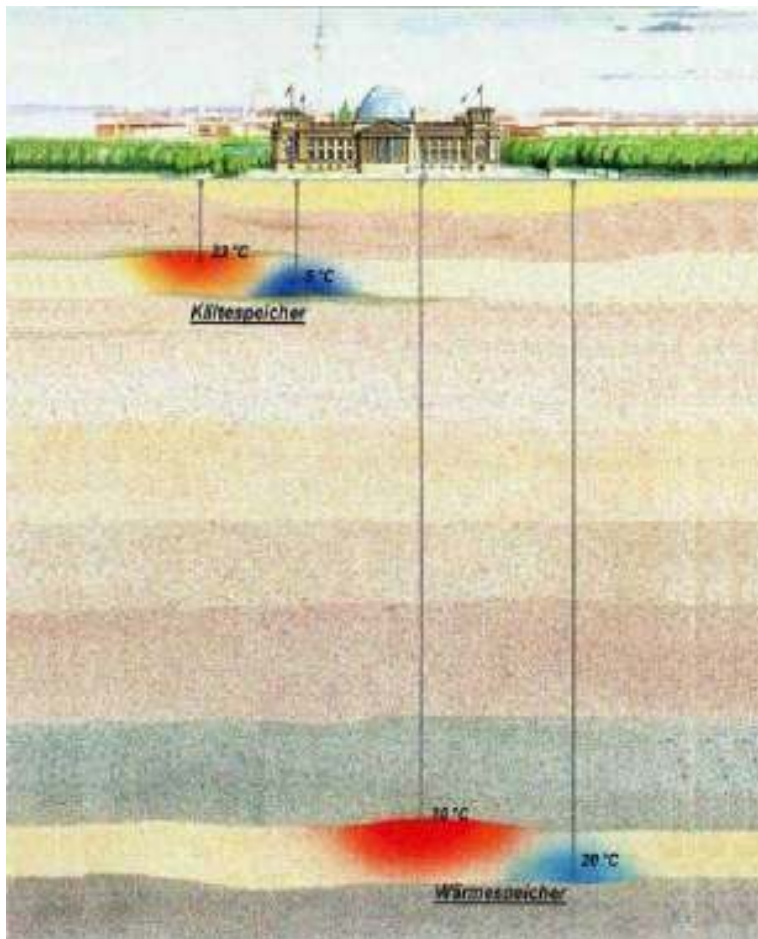
Aquifer thermal energy
storage (ATES)



Borehole Thermal Energy
Storage (BTES)

Source: 4

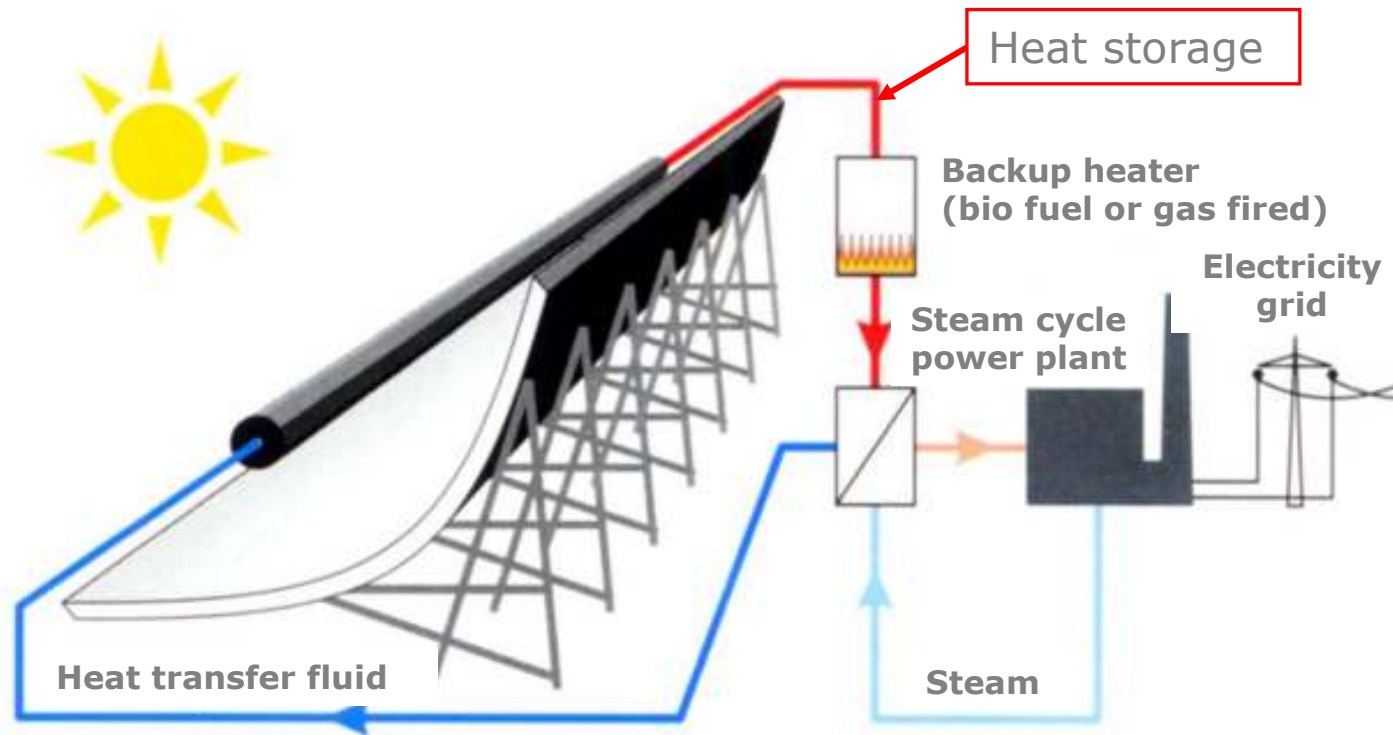
Systems for long term thermal energy storage (2)



Example for aquifer thermal energy storage:

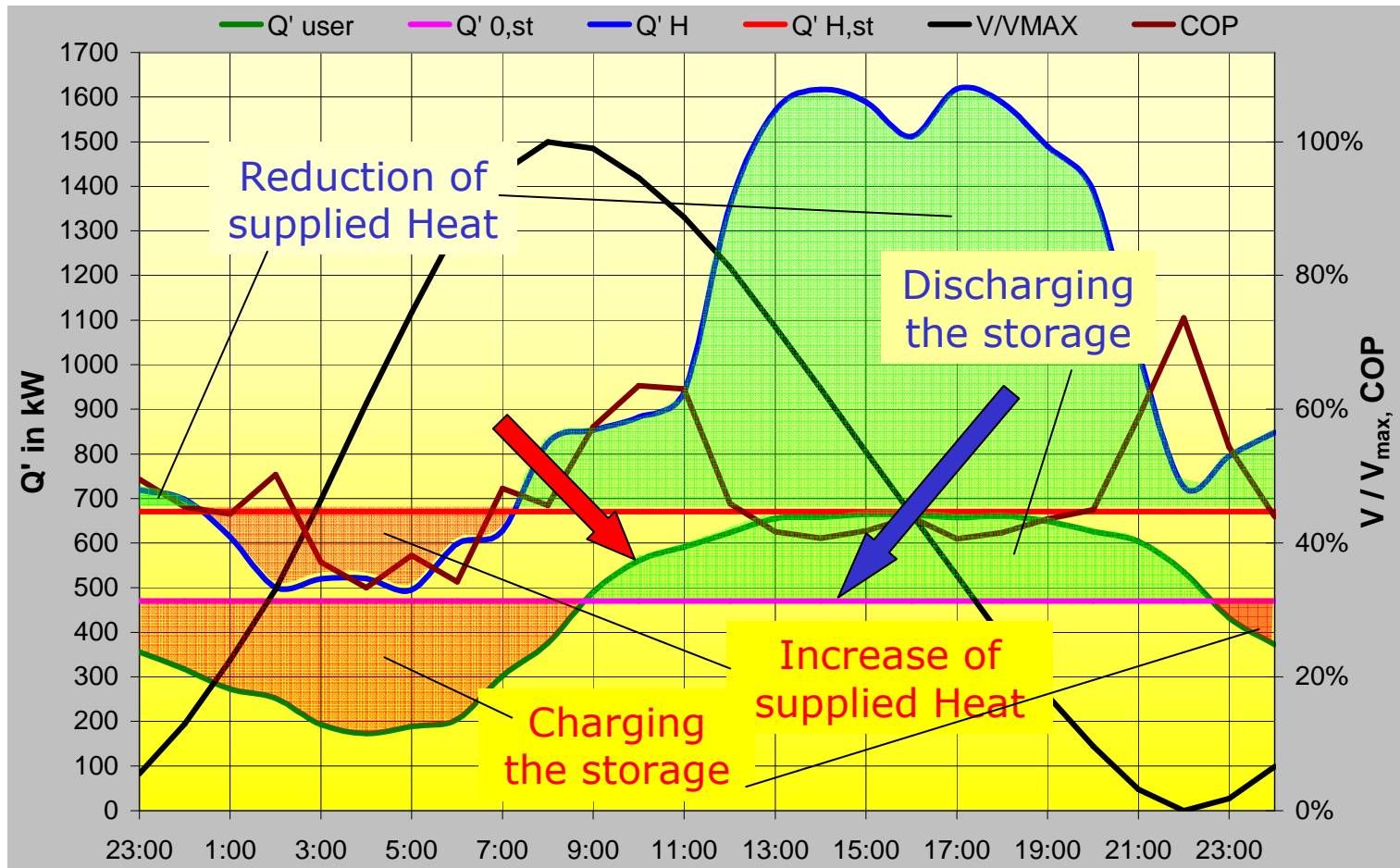
Buildings of Deutscher Bundestag in Berlin

Solar thermal Power Plant - today until 80 MW



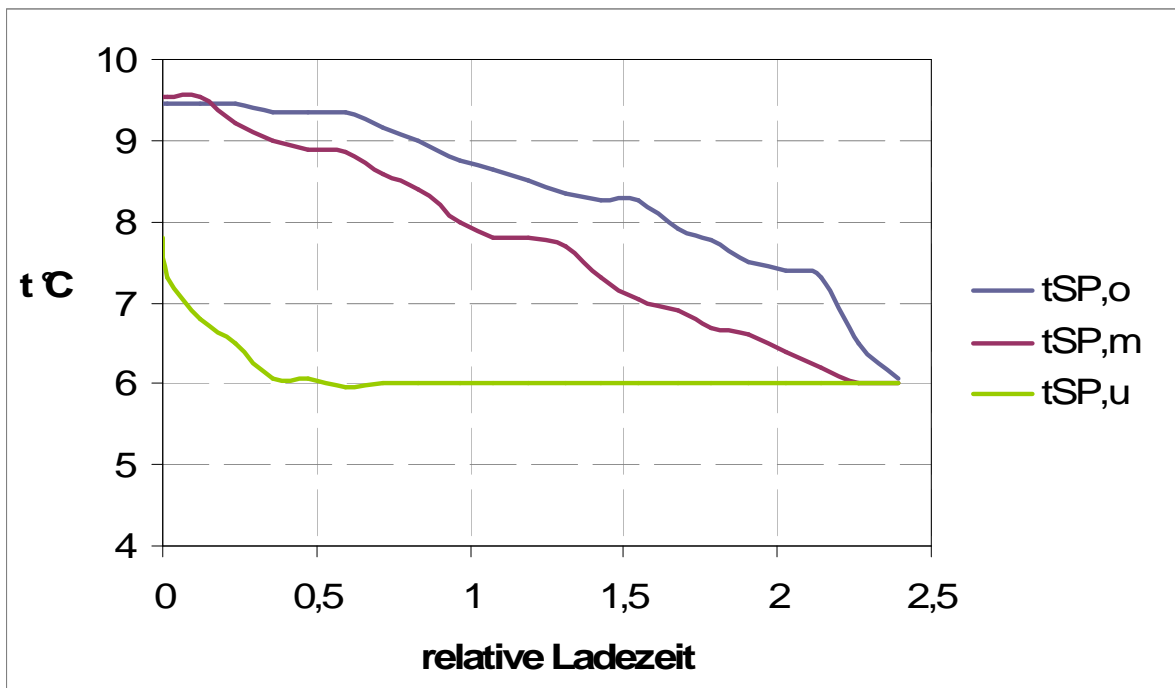
Principle Scheme of a Solar power plant with parabolic trough collector

“Kälte”speicher für die Klimatisierung



Source: 7

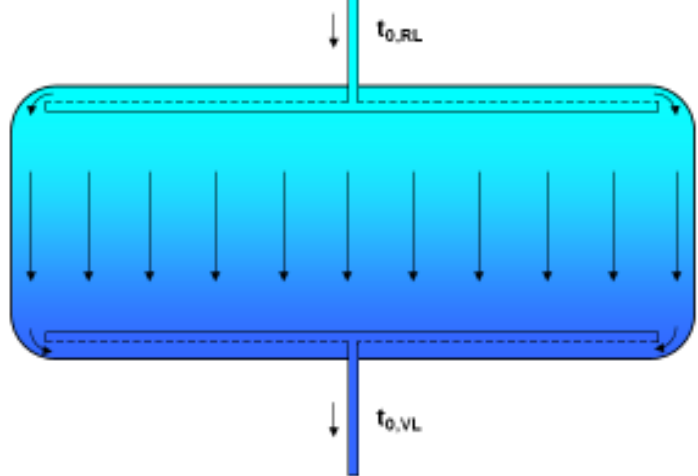
Stehender Kaltwasserspeicher-Speicher mit der größten Tradition



Quelle:L.Dittmann.s.v.

Problem: Impulsabbau

Ausführung mit
Düsenregistern

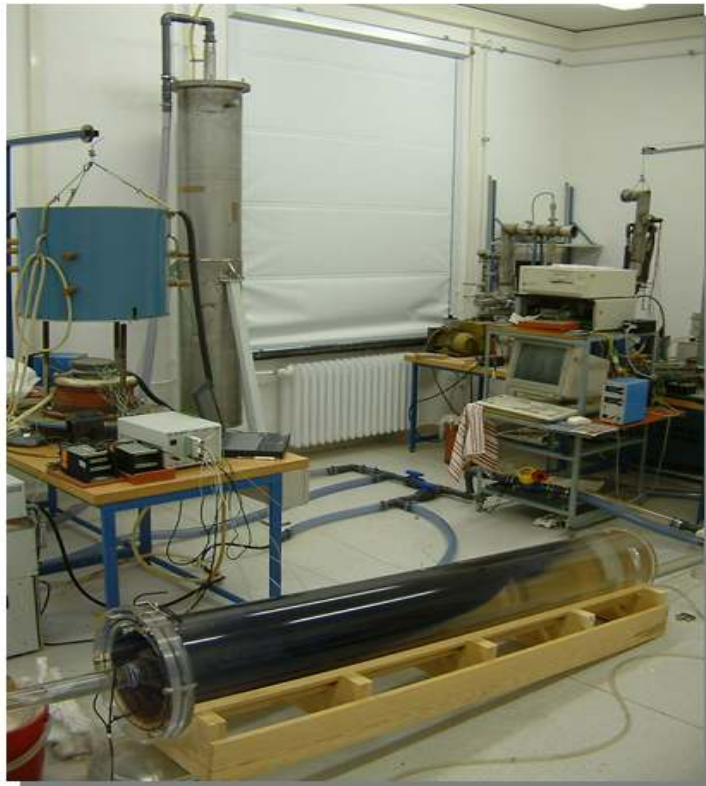


Quelle: L.Dittmann.s.v.



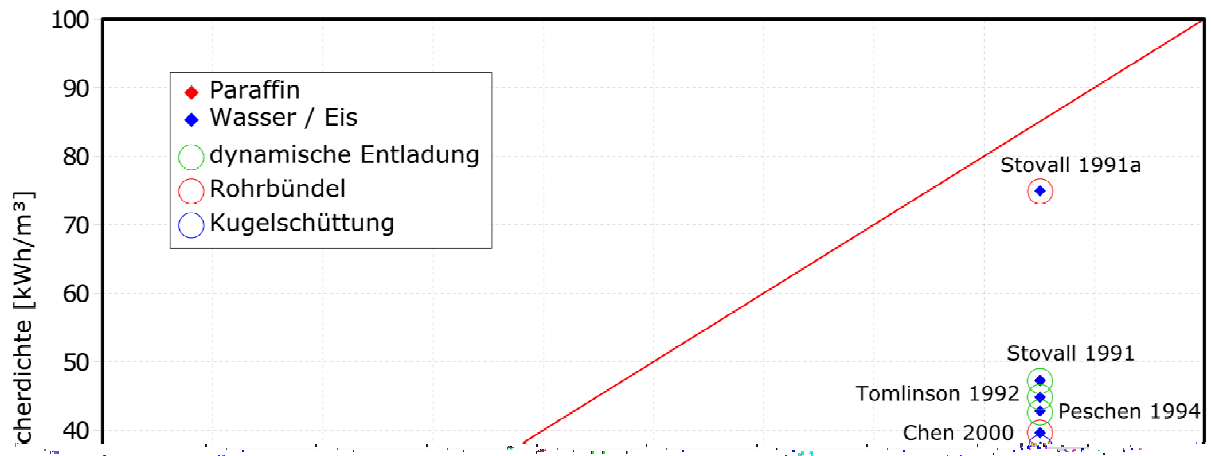
Versuche an der TU Dresden zu liegenden Kaltwasserspeichern in einfachster Ausführung

Komponenten der Versuchsanlage



Quelle :s.v.

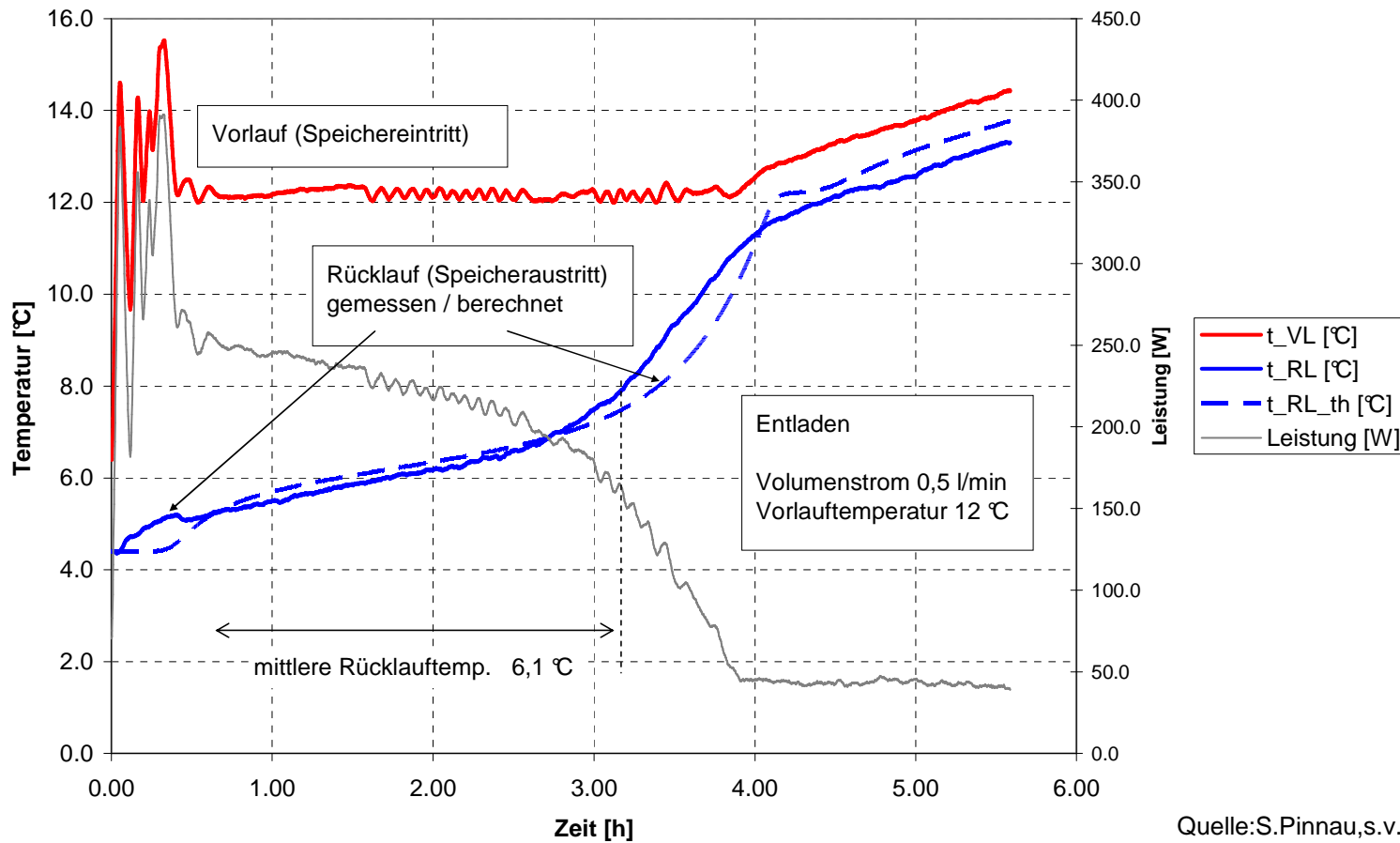
Potenziale von Latentkältespeichern



- reale Speicher meist deutlich unter dem theoretischen Maximum
- höchste Speicherdichte bei (statischen) Rohrbündeln
- dichteste Kugelpackung max. 74 % Raumfüllung ungeordnete Packung deutlich geringer
- verbleibende Freiräume zur Durchströmung bei dynamischen Systemen

Quelle: S. Pinnau, TU-Dresden, Entwurf
Dissertationsschrift .06/2008

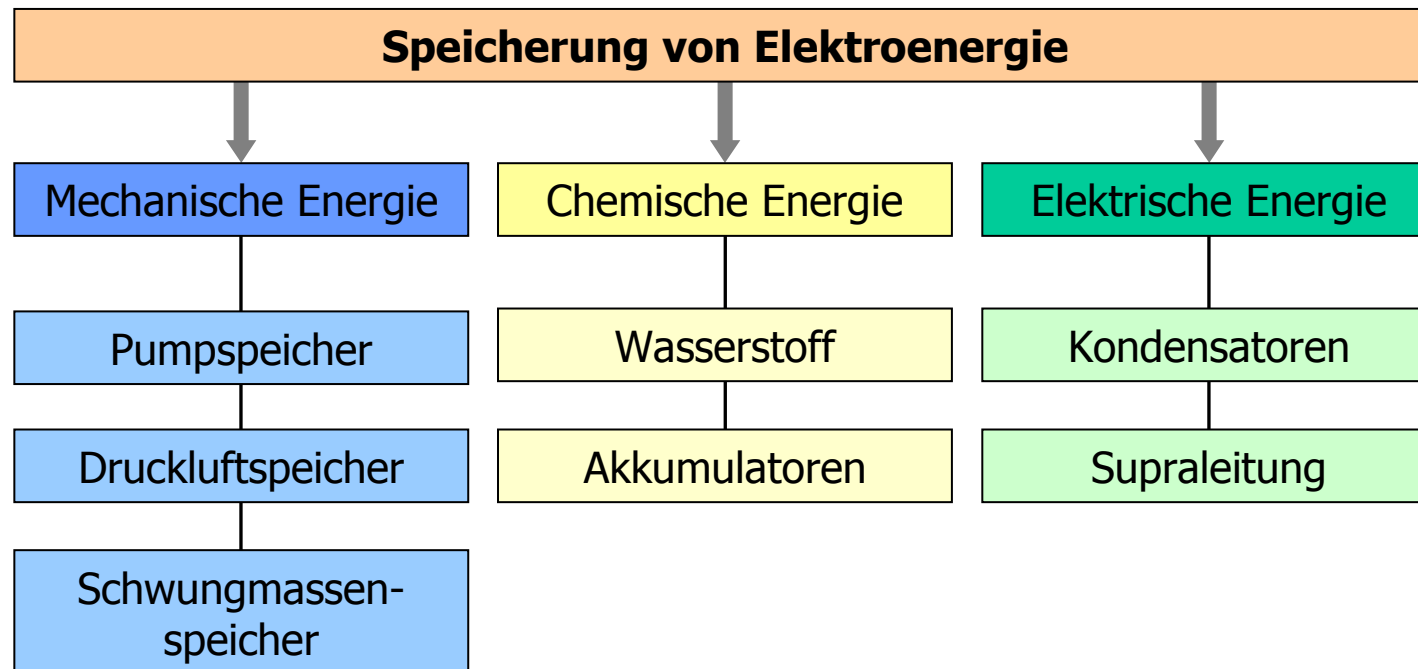
Entladen

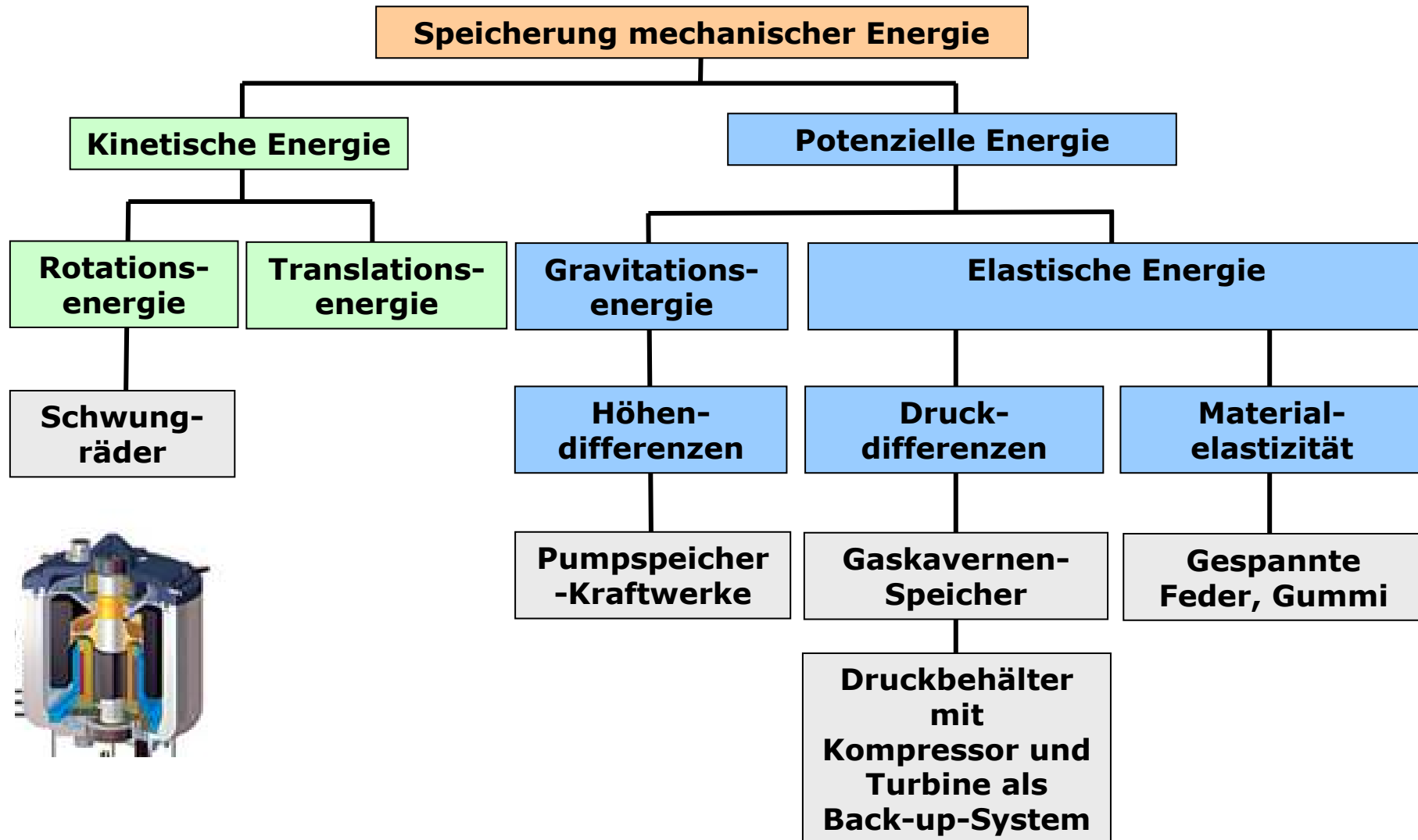


Quelle: S. Pinnau, s.v.

3.2 Speicherung elektrischer bzw. mechanischer Energie

Direkte und indirekte Speicherung von Elektroenergie





Physical basics - mechanical energy storage

Type of storage	Physical description of storage energy
Rotation energy	$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} J \cdot \omega^2$ with $J = \int r^2 dm$ as moment of inertia ω as angular velocity
Linear motion	$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m \cdot u^2$ with u as velocity
Height differences	$\Delta E_{\text{pot}} \approx m \cdot g \cdot \Delta z$ with Δz as height difference (valid near the surface of the earth)
Pressure differences	$\Delta E_{\text{pot}} \equiv W = - \int_{v_0}^v p \, dV$ v - specific volume

Speicherarten, Möglichkeiten der Energiewandlung und Energieform der Speicherung

Energieform	Wandler		Speicher	Gesamtwir- kungsgrad %	Spez. Speicher- fähigkeit* kWh/m ³
	Laden	Entladen			
elektrisch	-	-	Kondensator	> 90	0,3
elektrisch	-	-	supraleitender Magnet	80 – 90	15
potenziell	Pumpe	Wasserturbine	Hydraulischer Pumpspeicher	70 – 80	0,5 – 0,8 ^{2*} (300bar)
	Wasserturbine mit Umkehrbetrieb				
Pneumatisch	Verdichter	Gasturbine	Druckluft- speicher	65 – 70	5 – 8 ^{2*} (60 bar)
Kinetisch	Motor	Generator	Schwungrad- speicher	70	50 - 100
Chemisch gebunden	Batteriestromrichter		Batteriespeicher Wasserstoffsp.	65 – 80	30 – 100
	Elektrolyse	Brennstoffzelle		30 – 50	100 – 120 ^{2*} 40 bar

* Abhängig von Konstruktion und Auslegung

^{2*} druckabhängig

aus: VDI Lexikon Energietechnik

Batterien

Definition: **Kombination** von zwei oder mehreren elektrochemischen Zellen (galvanischen Elementen) durch Parallel- oder Serienschaltung.

Arten: Primärbatterien (zum einmaligen Gebrauch)
Sekundärbatterien (Akkumulatoren, wiederaufladbar)

Vorteile: großer Einsatzbereich – **Stromquellen:**
tragbare Geräte (Starterbatterien, oder Automobilantriebsbatterien);
ortsfeste Anlagen (Notstromversorgung und Spitzenlastdeckung sowie Inselbetriebsnetzversorgung)

Japan ab 1995 „Moonlight Project“: zahlreiche Systeme mit 0,1 bis 6 MW installiert.

Nachteile: Gespeicherte Strommengen energiewirtschaftlich gesehen recht klein, Speicherung ist sehr teuer.

An **Verbesserungen** weltweit intensiv gearbeitet, **durchschlagende Erfolge** nicht in Sicht.

Berlin 1986 bis etwa 1992 (Abschaltung 1994): **Batterieanlage** zur Stromspeicherung mit einer Leistung von etwa 17 MW und Kapazität von 14 MWh betrieben.

Diese Anlage war nur durch die **politische Inselsituation** zu rechtfertigen.

Vergleicht man die genannte **Batterieleistung** mit dem derzeitigen durchschnittlichen **Strom-Leistungsbedarf** in Deutschland von etwa 50.000 MW, so werden die Grenzen der Speicherbarkeit von Strom in Batterien offensichtlich.

Quelle: Schwarz: Stromspeichertechnologien

Batterien

Alter Batterieraum der Bewag Berlin -Steglitz

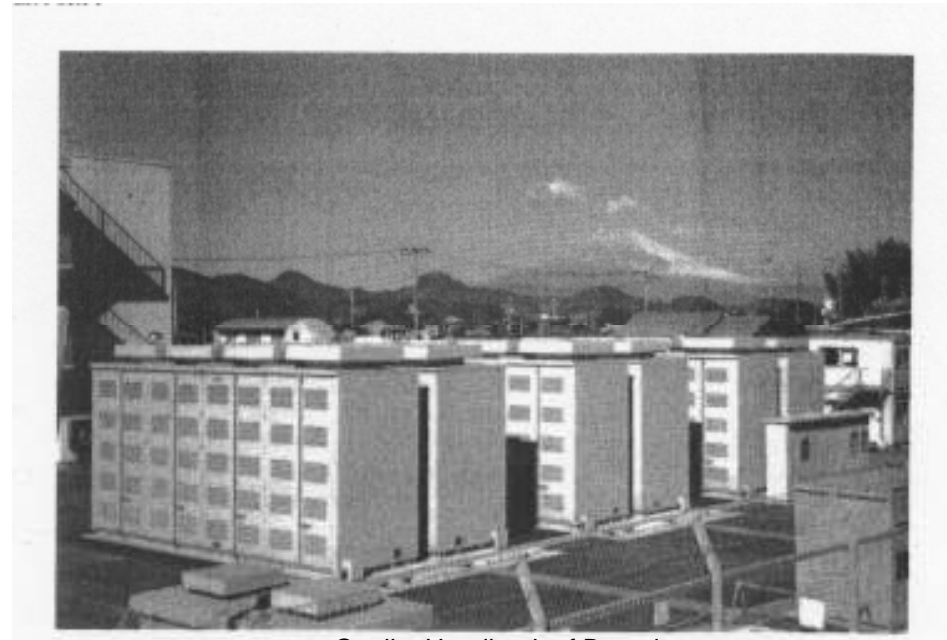


Quelle :VDI Lexikon Energietechnik

**Einer von 12 Batterieräumen
Sofortreserveleistung:
17 MW für 20 – 30 min
1994 abgeschaltet**

Quelle: Schwarz: Stromspeichertechnologien

Akkumulatorengebäude in Ohito,Japan



Quelle: Handbook of Batteries

**6 MW / 48 MWh NGK Natrium/Schwefel
Batteriesystem betrieben seit 1997**

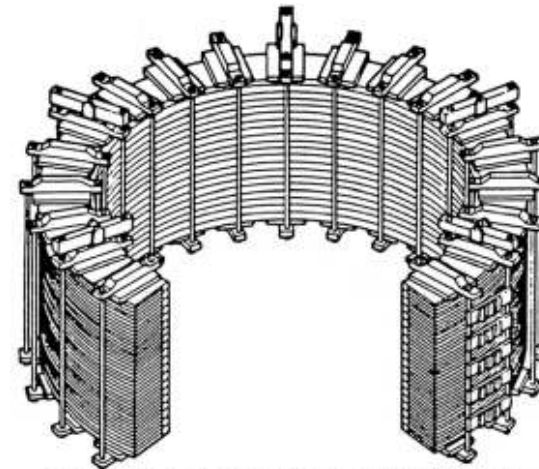
Supraleitende magnetische Energiespeicher (SMES) speichern elektrische Energie *magnetisch in Spulen* aus supraleitendem Material.

Ausgeführte SMES: konventionelle NbTi-Supraleiter, tiefgekühlt mit flüssigem Helium (Low-Temperatur – L-T)

Erste Versuche: SMES mit Hoch-Temperatur-Supraleiter (in einem Sägewerk): SMES (L-T) mit 250 kJ zur *kurzzeitigen Lastanpassung* vom fzk (Forschungszentrum Karlsruhe) 2003

Versuche mit SMES: L-T: *Leistungsvermögen* 1 MW
Energiespeicherkapazität 133 kWh

**30-MJ-SMES-
Stabilisierungsspule**



Quelle: Schwarz: Stromspeichertechnologien

Kondensatoren

Definition: *Kondensatoren* speichern Energie in Form eines elektrischen Feldes.

Arten:

- konventionelle Kondensatoren (physikalische Kondensatoren)
- Supercapacitoren (*neu*: elektrochemische Kondensatoren)

Supercapacitoren sind *Doppelschichtkondensatoren* mit Verschiebung von Elektronen und Massen (Ionen):

Entnehmbare Leistung > Batterie

Speicherbare Energie > konventionelle Kondensatoren

Nachteile: Benötigter *Konverter* wegen fallender $U(t)$ - Kennlinie

Daten:	<u>konv. Kondensator</u>	<u>Supercapacitor</u>
Kapazität	100 F	4000 F
Energiedichte	0,4 kWh/m ³	10 kWh/m ³
Energiespeicherkap.	16 kWh	40 kWh
Leistungsvermögen	10 MW	100 kW

Wasserstoff als Speicher

Zwischenspeicherung elektrischer Energie in Wasserstoff als späterer Brennstoff für Gasakkumulatoren – Brennstoffzellen.

- Vorteil:**
- a) *Brennstoffzelle* – Leistung und Kapazität des System unabhängig voneinander wählbar
 - b) *Wasserstoffgas* – Lagerung direkt als Gas ohne Verlust bei neuerdings wachsender technischer Realisation
 - c) verschiedene *Herstellungsverfahren* – Technik wählbar nach Randbedingungen

Herstellungsverfahren : Dampfreformierung,
Partielle Oxidation,
Elektrolyse von Wasser,
aus Biomasse,
Kraemer – Verfahren,
Thermische Dissoziation

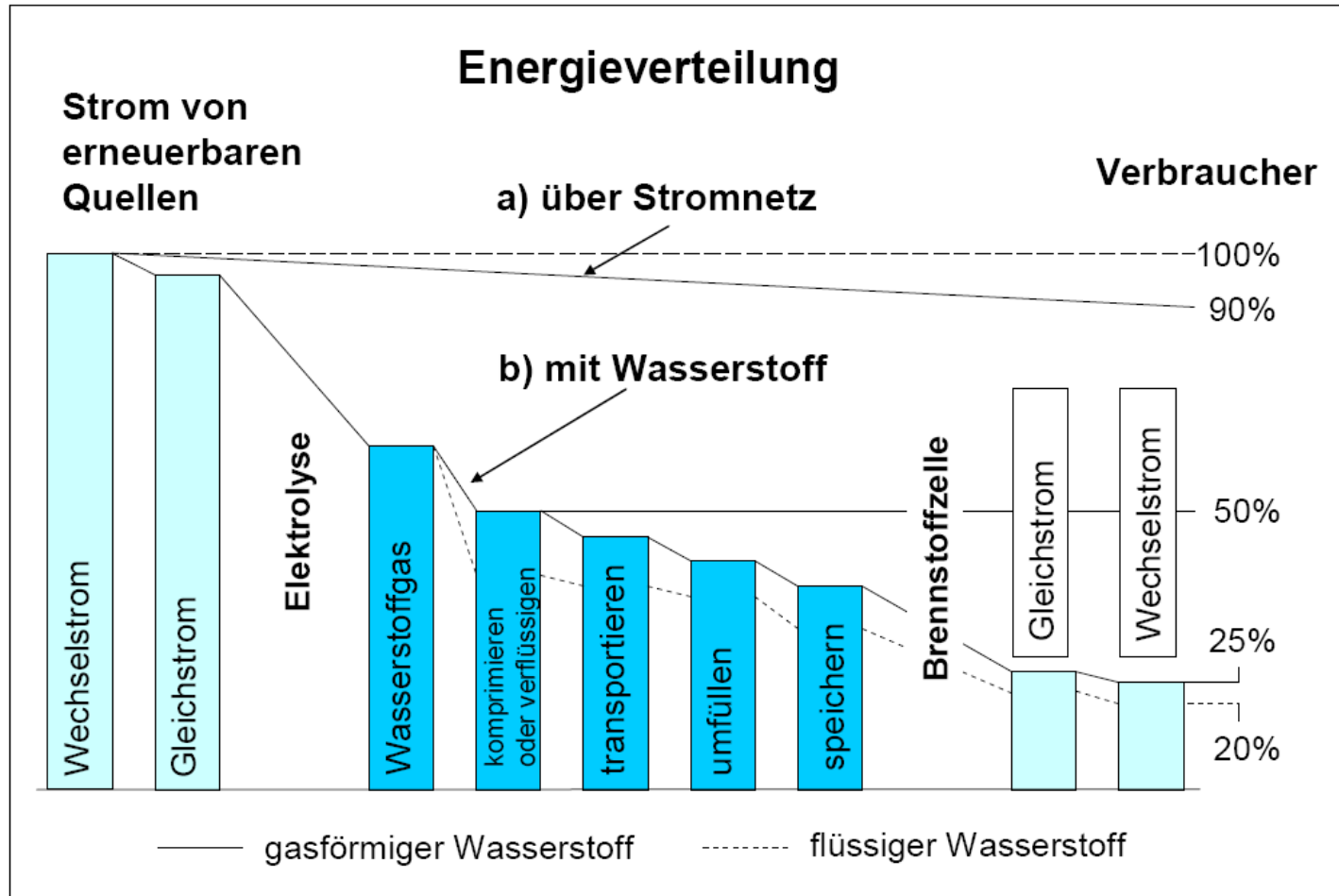
Nachteil: noch *geringer Wirkungsgrad* ca. 45 %

Quelle: Schwarz: Stromspeichertechnologien

Wasserstoff als Speicher



Energiebilanz der Wasserstoffnutzung



Quelle: Wasserstoff löst keine Energieprobleme. Ulf Bossel, European Fuel Cell Forum

Speichertechnologien

- Pumpspeicherkraftwerke:
 - Zahlreiche Anlagen weltweit in Betrieb
 - Technik etabliert und ausgereift
- Druckluftspeicherkraftwerke (CAES):
 - weltweit arbeiten derzeit 2 Kraftwerke
 - Deutschland: Huntorf, 290 MW(2 h), Betrieb seit 1978, Betreiber E.ON
 - USA: MCIntosh, Alabama, 110 MW(2h), Betrieb seit 1991
- Batterien, Schwungräder, Supercapacitors und Kombination aus Wasser- und Brennstoffzelle
 - Geringe Speichermenge und Speicherzeit
 - Nur bedingt und für kleine Anlagengrößen geeignet
 - Verhältnismäßig teuer

Schwungradspeicher (Flywheels)

Prinzip: Speicherung kinetischer Energie

Zweck: - **Glättung** kurzzeitiger Last- und Leistungsschwankungen

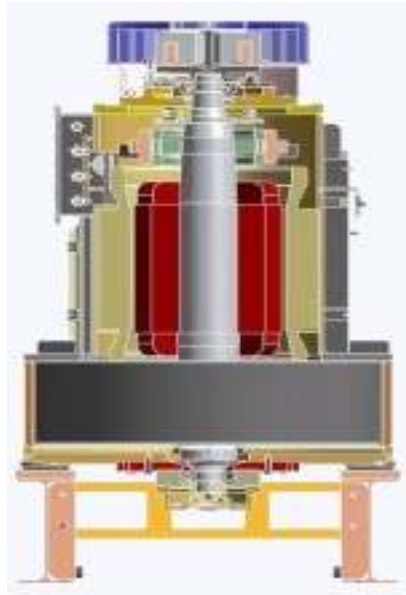
- Erzielung hoher **Leistungsspitzen**
- **Überbrückung** von Unterbrechungen
- **Speicherung**
- **Augenblicksreserve**

Mobile (Gyrobuss 1950) und **stationäre Anwendung** möglich,
letztere kaum ausgebaut wegen hohen *Speicherverlusts* und geringer *Energiedichte*
bis 1980: fehlende *Materialentwicklung*

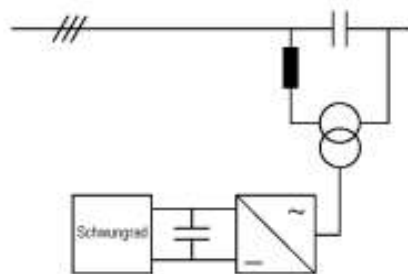
Vorteile: Leistungsspitzen möglich, große Zahl von Lade- und Entladevorgängen möglich –
somit Nischennutzung

Weiterentwicklung (Faserverbundstoffe anstatt Stahlrotoren): vielfältige Möglichkeiten:
Fahrzeuge, Glättung, Notstrom, Wissenschaft, Raumfahrt

Schwungradspeicher (Flywheels)



Querschnitt Flywheel



Flywheel als aktiver Netzfilter

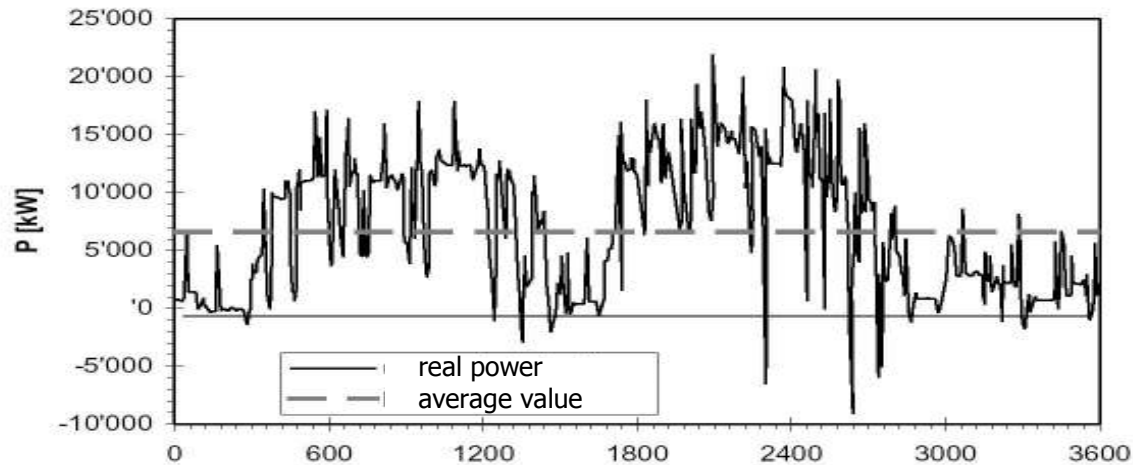
Merkmale der neuesten Generation (in Forschung):

- Umfangsgeschwindigkeit bis zu 1000 m/s
- Rotor aus Kohlefaser verstärktem Kunststoff
- Vakuum-Rotorgehäuse
- supraleitende Magnetlager

Abb 7: Modell DYNASTORE



Schwungradspeicher (Flywheels)



Variation der Bahnstromleistung (SBB)

Material	Zugfestigkeit [MPa]	Dichte [kg/m ³]	spez. Festigkeit [kNm/kg]	max. Umfangs- geschwindigkeit [m/s]	mögliche Energiedichte [kJ/kg]
Stahl	1300	7800	167	410	106
Titan	1150	5100	225	570	143
GFK	1300	1900	680	820	335
CFK	6300	1546	2470	1570	1'570

Werkstoffeigenschaften



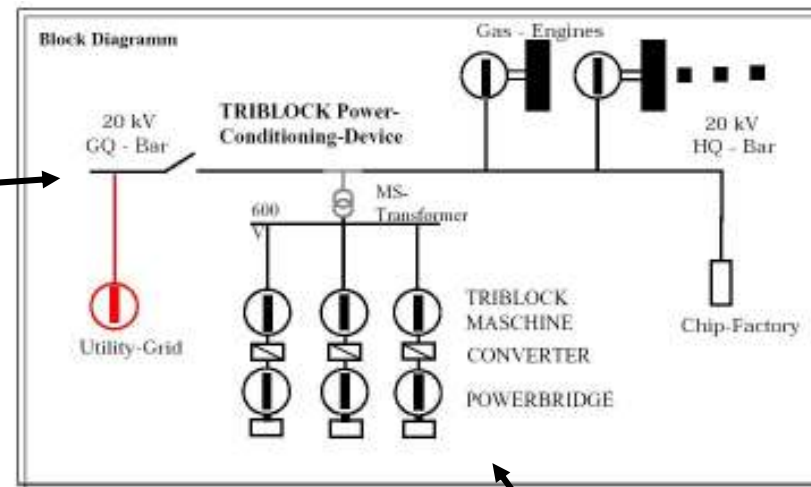
Geborstenes Schwungrad (Metall)



Geborstenes Schwungrad
(Kohlefaser verstärkter Kunststoff)

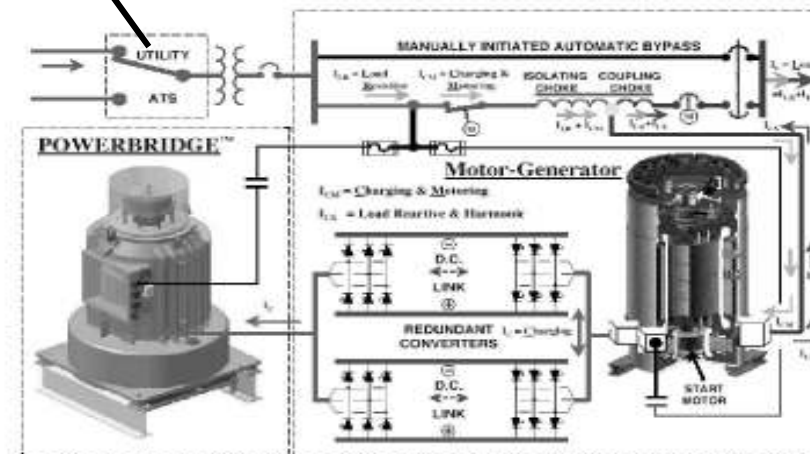
Schwungradspeicher (Flywheels)

Beispiel für Stabilität und Sicherheit



Utility cogeneration application at AMD, Dresden

Source: RWE Piller GmbH [1]



Pumpspeicherkraftwerke

Prinzip Einsatz von Strom → Wasser wird von einem tief gelegenen Wasserbecken in ein möglichst hoch gelegenes Wasserbecken gepumpt, aus dem dann im Bedarfsfall über Turbinen und Generatoren wieder Strom erzeugt werden kann.

Stand Bekanntestes und mit Abstand am häufigsten eingesetztes Verfahren
Pumpspeicher-Kraftwerke sind technisch ausgereift. Der sog.
Umwälzwirkungsgrad beträgt bei ihnen etwa 75 ... 80 Prozent

Technische Vorteile:

- Beliebig lange Vorhaltezeit, da *kein Speicherverlust*
- Schnelle Ein- und Umschaltzeiten (45 ... 72 s)
- Augenblicksreserve

Zukünftige Entwicklung

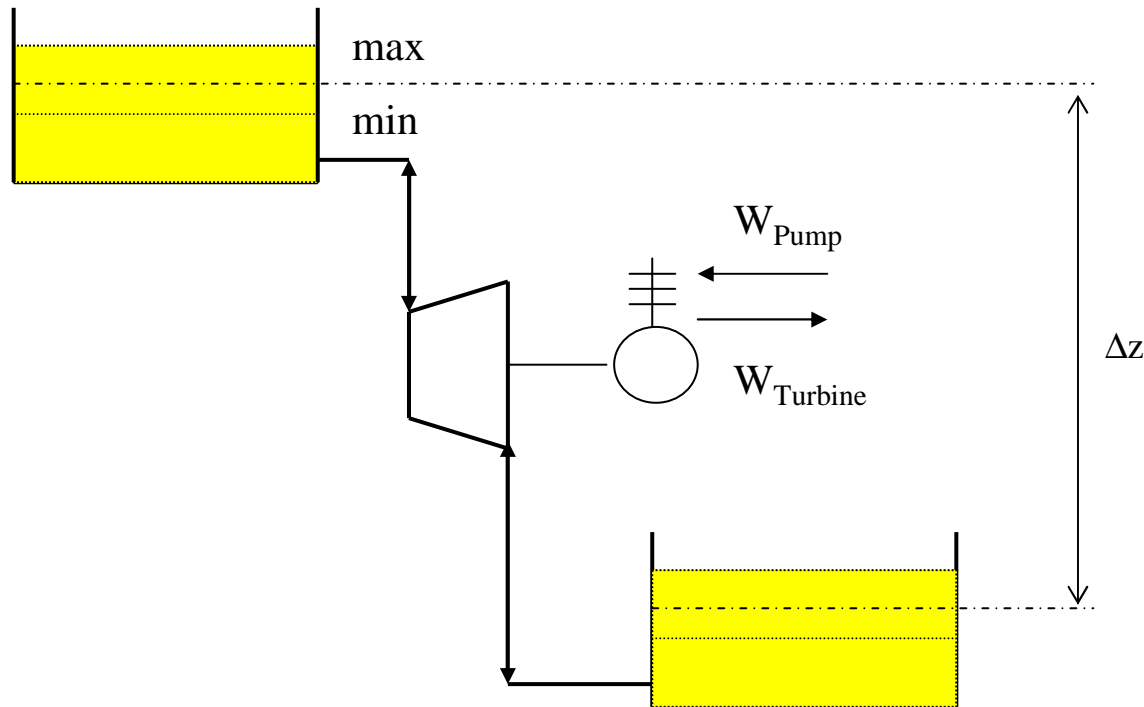
- In **Deutschland** kaum noch freie Geländekapazitäten, nur Modernisierung ⇒
Ausbaumöglichkeiten weitgehend erschöpft!
- Weltweit weiterer Neubau, wo *Kapital und Gelände* gegeben

Probleme

- *Ökologische Probleme* beim Neubau durch Stauwehr und neu angelegte Becken
- *Akzeptanzprobleme* in der Bevölkerung

Quelle: Schwarz: Stromspeichertechnologien

Pumping storage power station



Principle of pumping storage power station

Utilisation ratio of
pumping storage
power station:

$$\zeta = \frac{W_{\text{Turbine}}}{W_{\text{Pump}}} = \zeta_{\text{Pump}} \cdot \zeta_{\text{Turbine}}$$

$$\zeta_{\text{Pump}} \approx 0,85$$

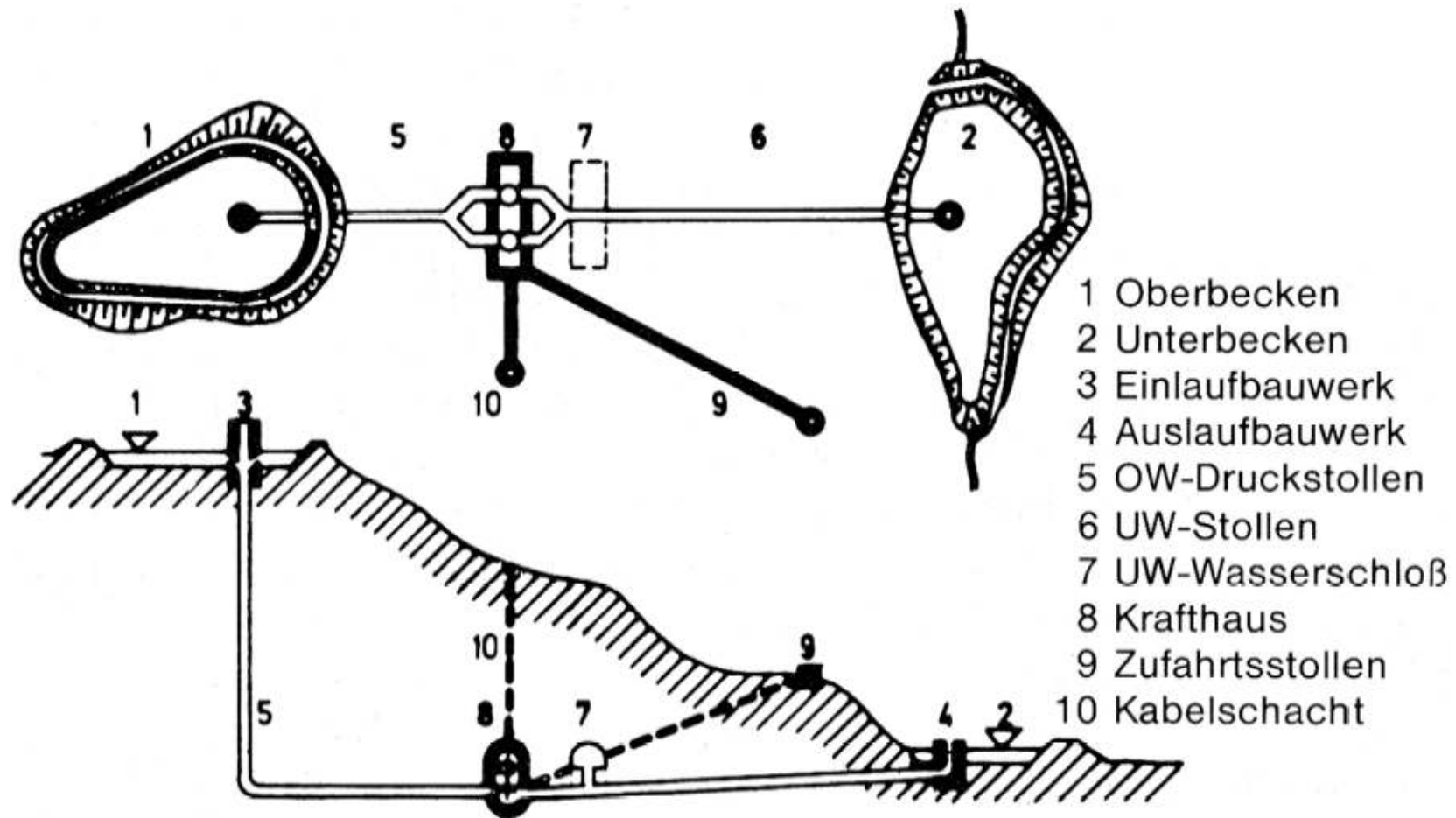
$$\zeta_{\text{Turbine}} \approx 0,85$$

Pumpspeicherkraftwerk Niederwartha - ältestes in Deutschland



Pumpspeicherkraftwerk Niederwartha - unteres Becken





(Quelle: Sauer, E.; Zeise, R.: Energietransport, -speicherung und -verteilung, Technischer Verlag Resch, Gräffeling/Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln, 1983, S. 246)

Hauptelemente eines Pumpspeicherwerkes (Maschinenhaus in Kaverne)



Unter- und Oberbecken Pumpspeicher-Kraftwerk Goldisthal



Wichtige technische Kraftwerksdaten

Inbetriebnahme	2003/2004
Gesamtnennleistung	1.060 MW
Oberbecken	
Nutzinhalt	12 Mio. m ³
Dammvolumen	5,4 Mio. m ³
maximale Beckenlänge	935 Meter
maximale Beckenbreite	1.015 Meter
maximale Dammhöhe	ca. 40 Meter
maximale Stauspiegelschwankung	ca. 25 Meter
Unterbecken	
Gesamtstauraum	ca. 18,9 Mio. m ³
davon Hochwasserrückhalteraum	1,2 Mio. m ³
Dammvolumen	700.000 m ³
maximale Stauspiegelschwankung	ca. 20 Meter
Oberwasserstollen	
Länge	ca. 830 Meter
Lichter Durchmesser	6,2 Meter
Mindestwandstärke der Panzerung	16 mm
Unterwasserstollen	
Länge	ca. 300 Meter
Lichter Durchmesser	8,2 Meter
Pumpspeichersätze	
Anzahl	4
davon	2 Synchron-Motor-Generatoren 2 Asynchron-Motor-Generatoren
Nenn Drehzahl	333 U/min (synchron) 300 - 346,4 U/min (asynchron)
Nennleistung Turbinenbetrieb	269 MW
Nennleistung Pumpbetrieb	257 MW



Ihr Partner vor Ort
Vattenfall Europe Generation
Betrieb Spitzenlastkraftwerk
PSW Goldisthal
Am Rotseifenbach
98746 Goldisthal

Thomas Schubert
Tel +49 367-81 33-22 10
Fax +49 367-81 33-22 00
thomas.schubert@vattenfall.de

Vattenfall Europe Mining &
Vom-Stein-Str. 39
03050 Cottbus

Tel +49 355-28 87-30 50
Fax +49 355-28 87-30 66

www.vattenfall.de

04/2007

PSW Goldisthal

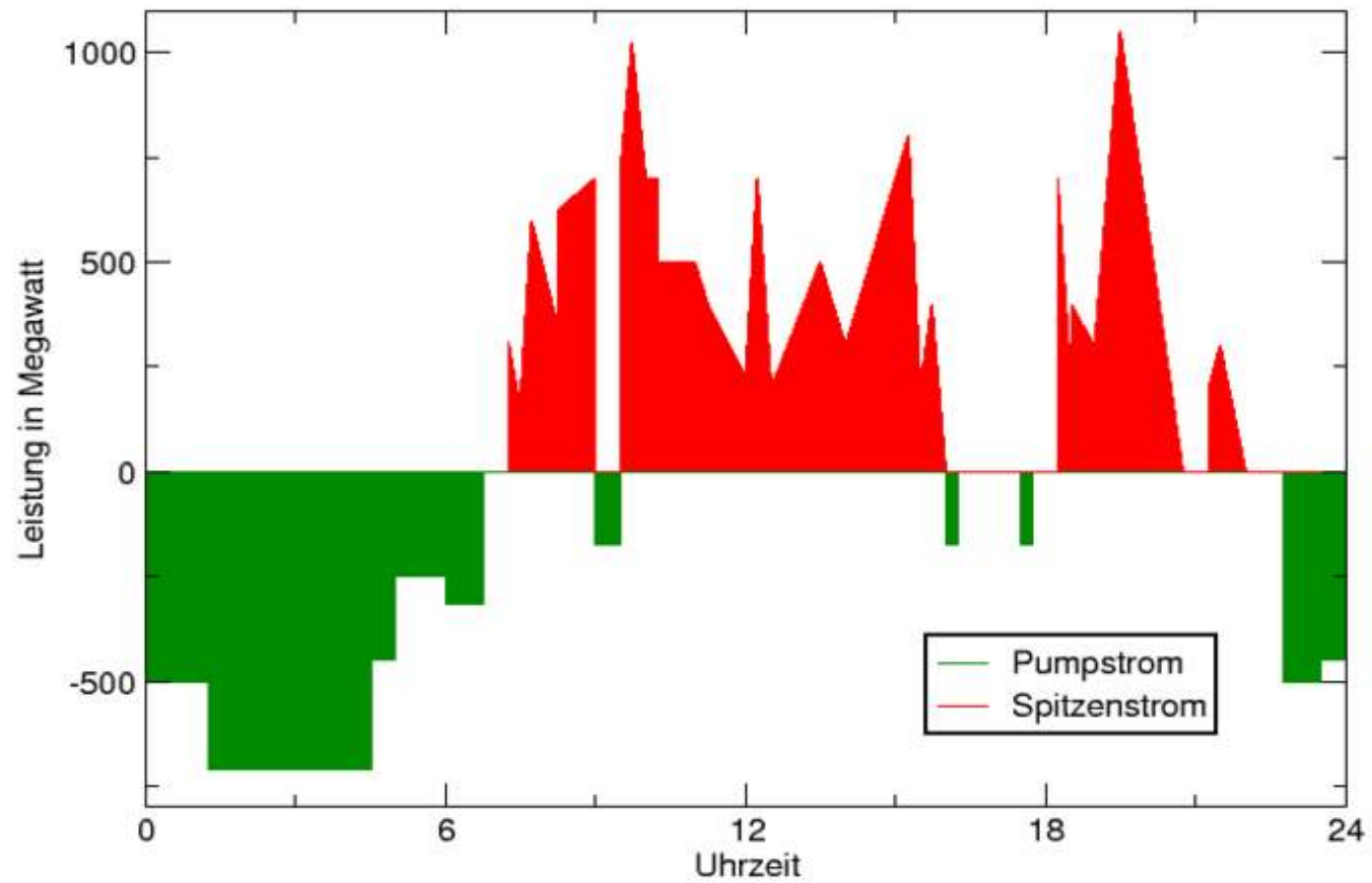


Schematische Darstellung des Pumpspeicher-Kraftwerkes Goldisthal

Dramatischer Eingriff in die Natur



Tagesgang eine Pumpkraftwerkes



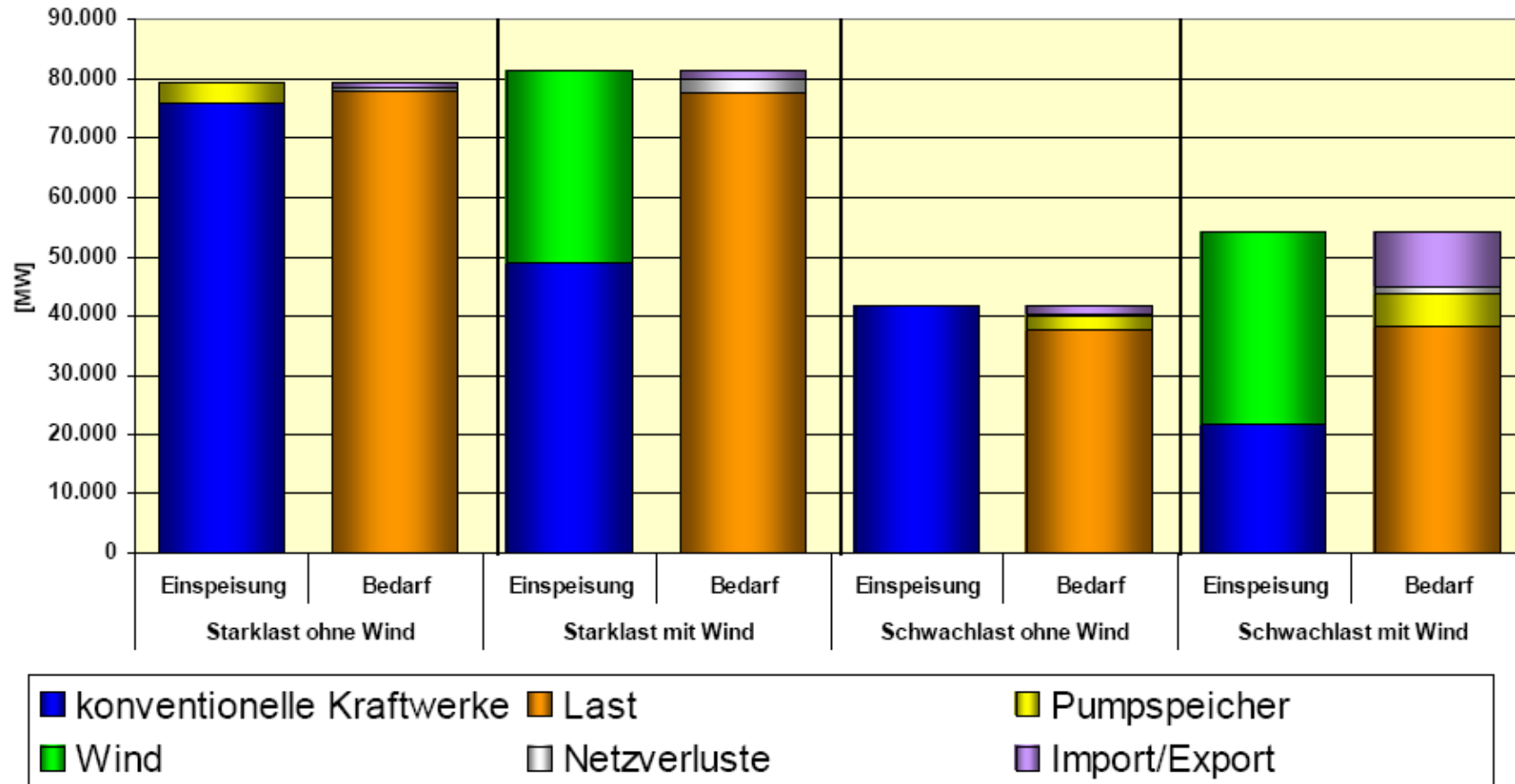
Pumpspeicherkraftwerke

Stand 10/2004: BRD: 33 Pumpspeicherkraftwerke mit 6 797 MW
Weltweit: 280 Pumpspeicherkraftwerke mit ca. 50 000 - 82 000 MW

Größte PSW 2004:

Anlage	Leistung in MW	Anlage	Leistung in MW
Bath Country / USA	2 100	Shin Tovone / J	1 125
Ludingtow / USA	1 755	Vianden / Luxemburg	1 080
Dinorwig / UK	1 620	Goldisthal / G	1 060
Raccoon/USA	1 600	Markersbach / G	1 050
Shi Takase-gawa / J	1 280	Roncovalgrande / I	1 024
Gr. Maison / F	1 224	Coo / B	1 015
Oku-Yoshino / J	1 212	Edolo / I	1 000
Zagorsk/ehe. UdSSR	1 200	Drakensberg / SouthA	1 000
Piastra / Italien	1 280	Montezic / F	900

Quelle : VDI –Lexikon Energietechnik



Leistungsbilanzen für Stark- und Schwachwind / Stark- und Schwachlast 2015

Druckluftspeicher - Kraftwerke

Daten KW Huntorf

2 Kavernen in Salzgestein in 600 - 800 m Tiefe, ges. 300.000 m ³ , 50 bis 70 bar	
Turbinenbetrieb	290 MW über 2 h
Kompressorbetrieb	60 MW über 8 h
Gesamtwirkungsgrad	max. 42 %

Daten KW McIntosh

Salzkaverne 538.000 m ³ in 450 – 750 m Tiefe, 45 bis 76 bar	
Turbinenleistung	110 MW über 26 h
Gesamtwirkungsgrad	max. 55 % (<i>Abwärmennutzung!</i>)

In Planung:

EnBW in *Deutschland* an der Nordseeküste mit 150 bis 600 MW
mehrere Anlagen in den *USA*, die größte in Norton, Ohio, mit 2.700 MW
Erzeugerleistung über 8 Tage (entspricht 520.000 MWh)

Zukünftig:

Anwendung möglich zwischen Windpark und Netz
Gleichmäßige Regelung zu *Direkteinspeisung* Windstrom (Gesetzesänderung nötig!)

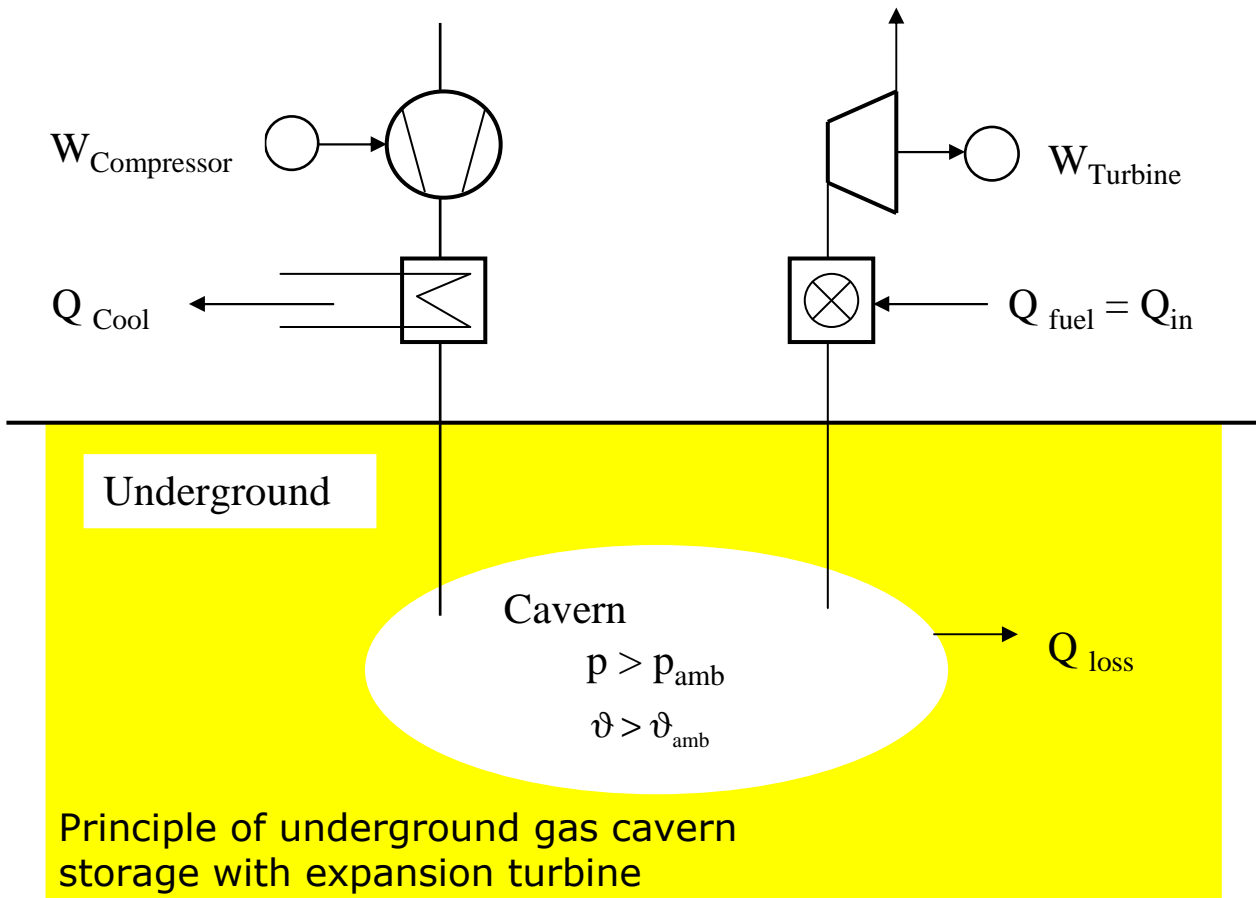
Neue Systeme

sollen nicht nur Druckluft in unterirdischen Salzkavernen speichern, sondern auch die *bisher abgeführte Wärme* aus der Verdichtung

Bei konventionellen CAES-Kraftwerken muss bis zu 700 Grad heiße Druckluft vor dem Verpressen in die Tiefe aufwändig gekühlt werden.

Energie in flüssige oder feste **Wärmespeicher**, Zufuhr an Druckluft beim Ausströmen zur Expansionsturbine. Solche *adiabaten Druckluftspeicher-Kraftwerke* können Wirkungsgrad bis zu 65 Prozent erreichen.

Gas cavern storage

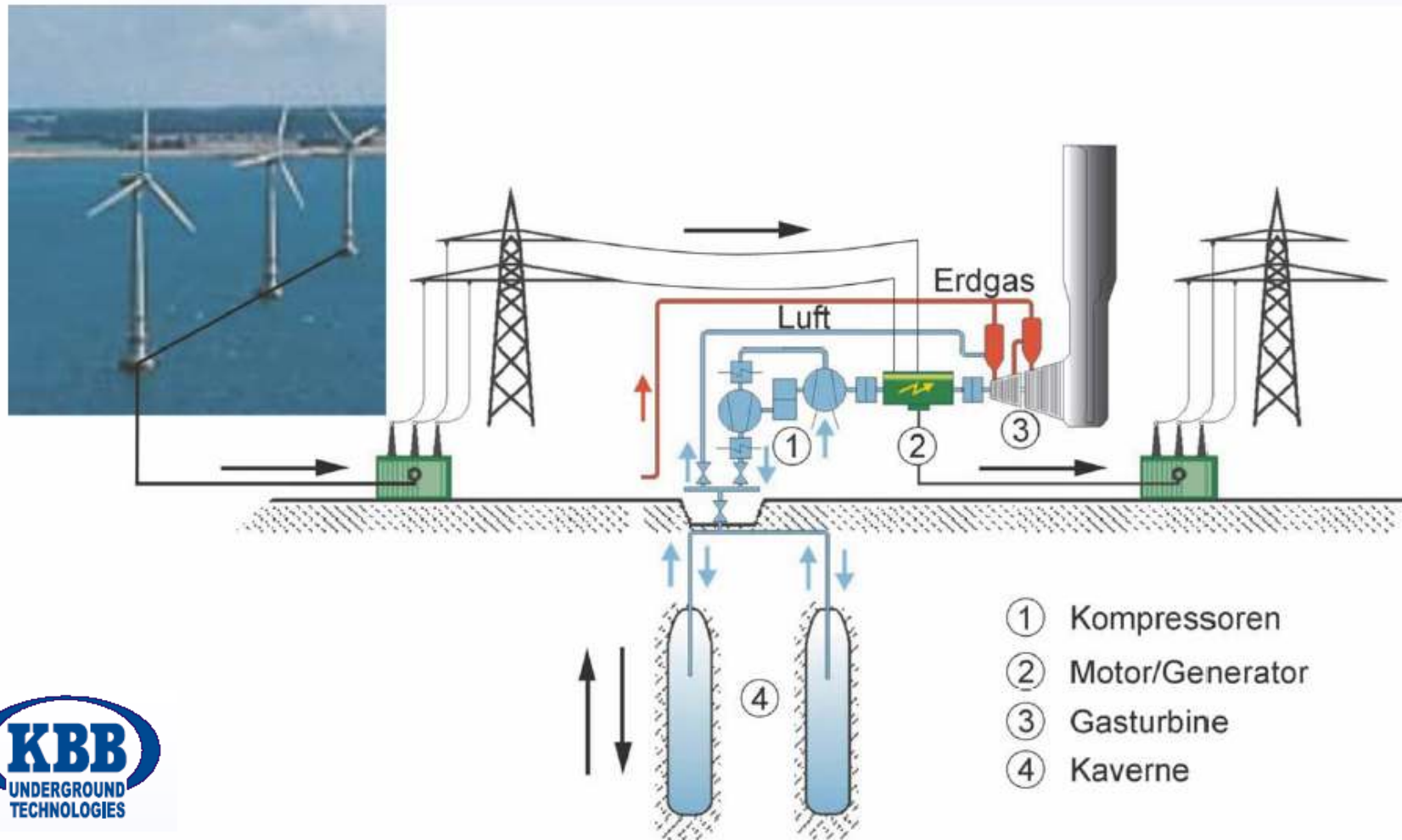


Utilisation ratio of underground gas cavern storage:

$$\zeta = \frac{W_{Turbine} - W_{Compressor}}{Q_{fuel}}$$

$$\zeta \approx 0,25$$

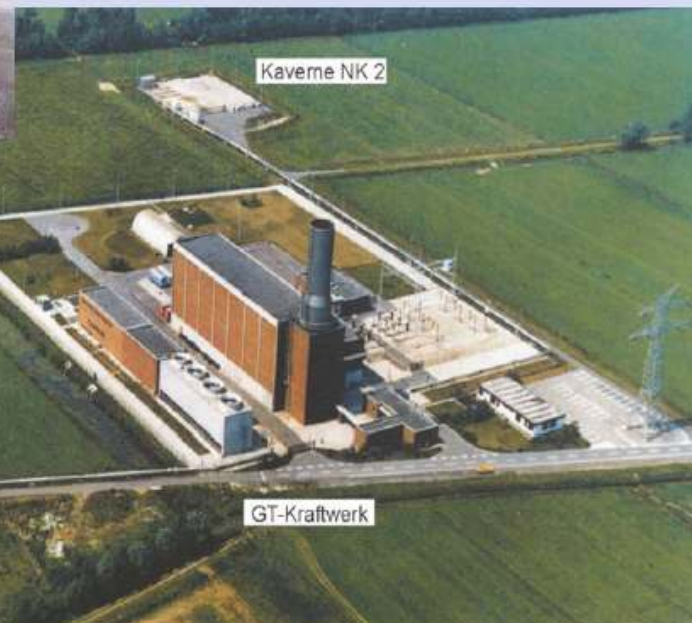
Druckluftspeicher-Gasturbinenkraftwerk



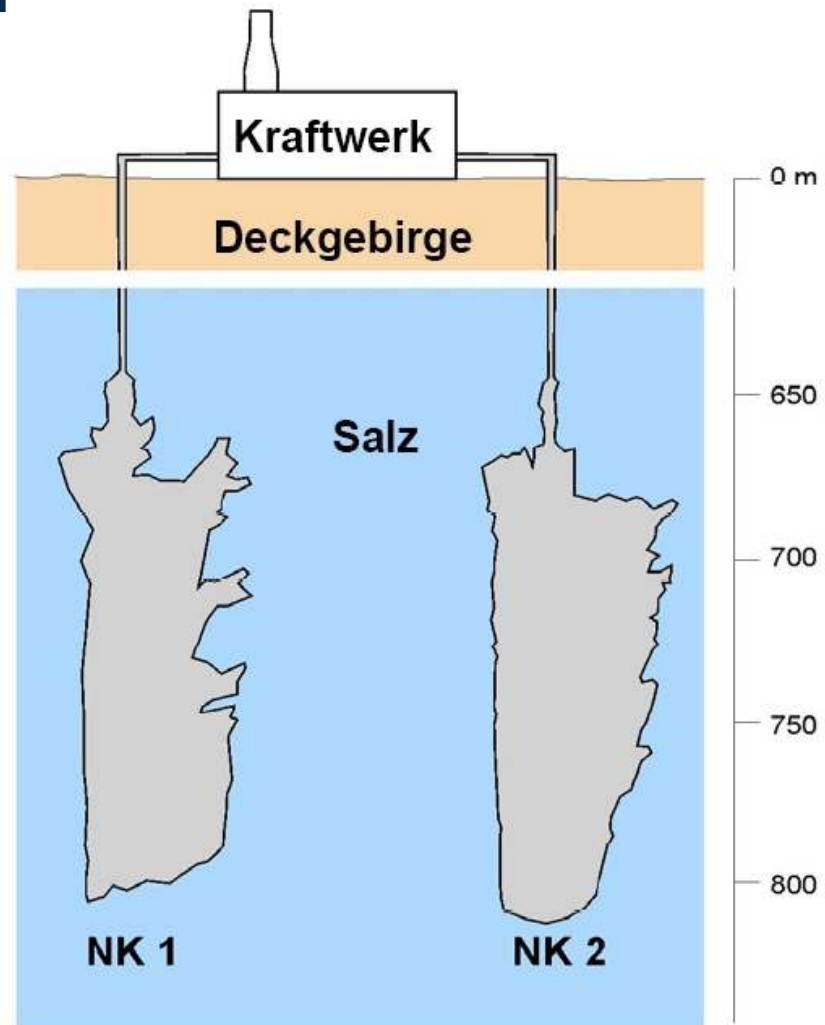
Druckluftspeicher-Gasturbinenkraftwerk Huntorf



- output 320 MW * 2h
- input 60 MW * 8h
- 2 Kavernen à 150 000 m³
- Druckbereich 50..70 bar



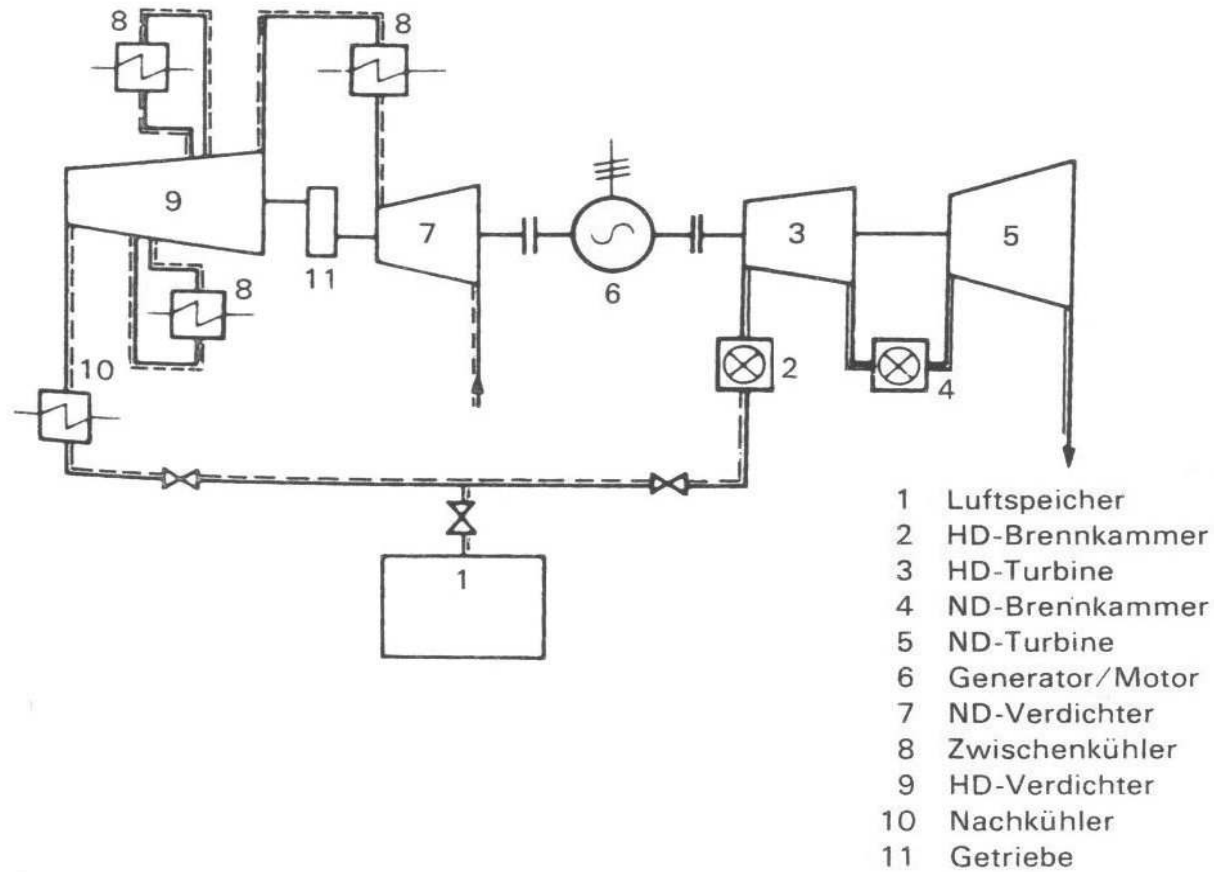
Kavernenschnitt KW Huntorf



Nochmals - etwas futuristischer



Schaltbild Druckluftspeicherkraftwerk



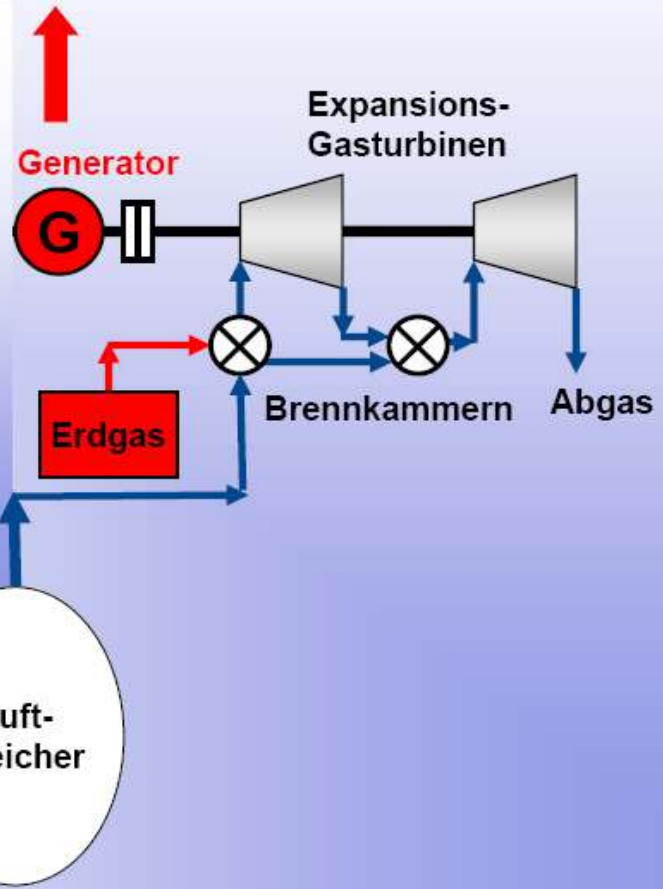
Druckluftspeicher-Gasturbinenkraftwerk Huntorf

Input:
0,83 kWh elektr. Energie
1,56 kWh fossile Energie

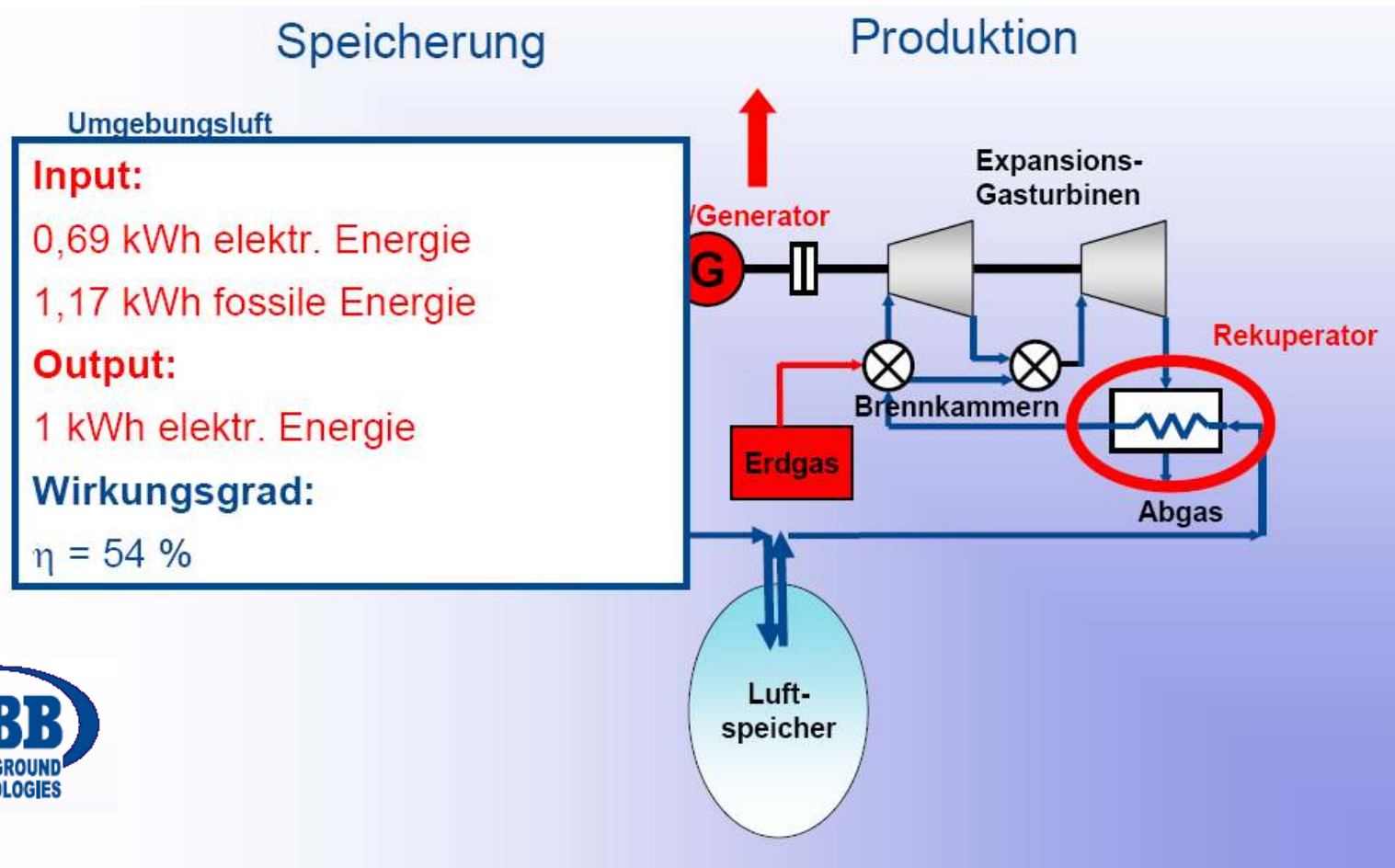
Output:
1 kWh elektr. Energie

Wirkungsgrad:
 $\eta = 42 \%$

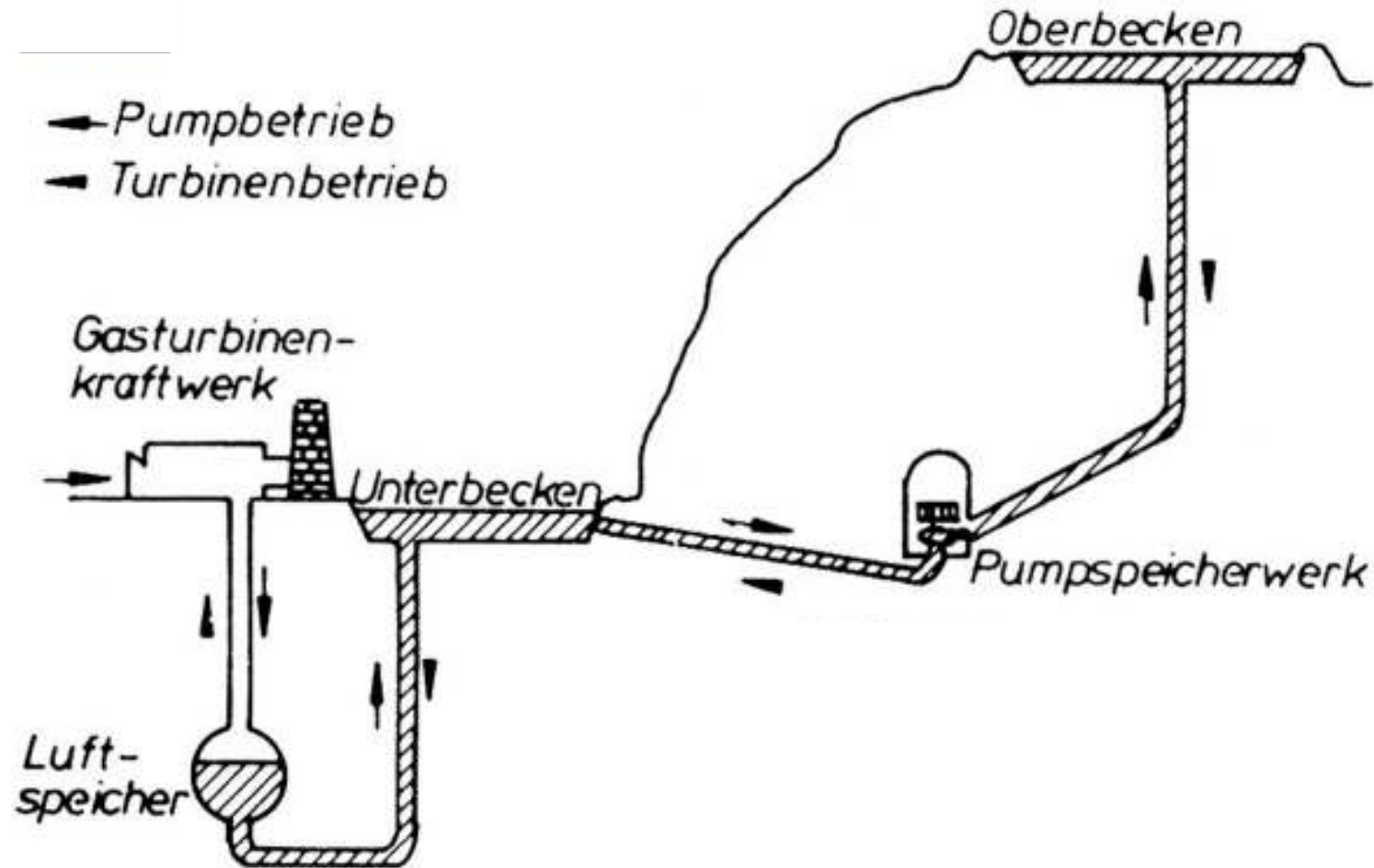
Produktion



Druckluftspeicher-Gasturbinenkraftwerk mit Rekuperator (McIntosh)



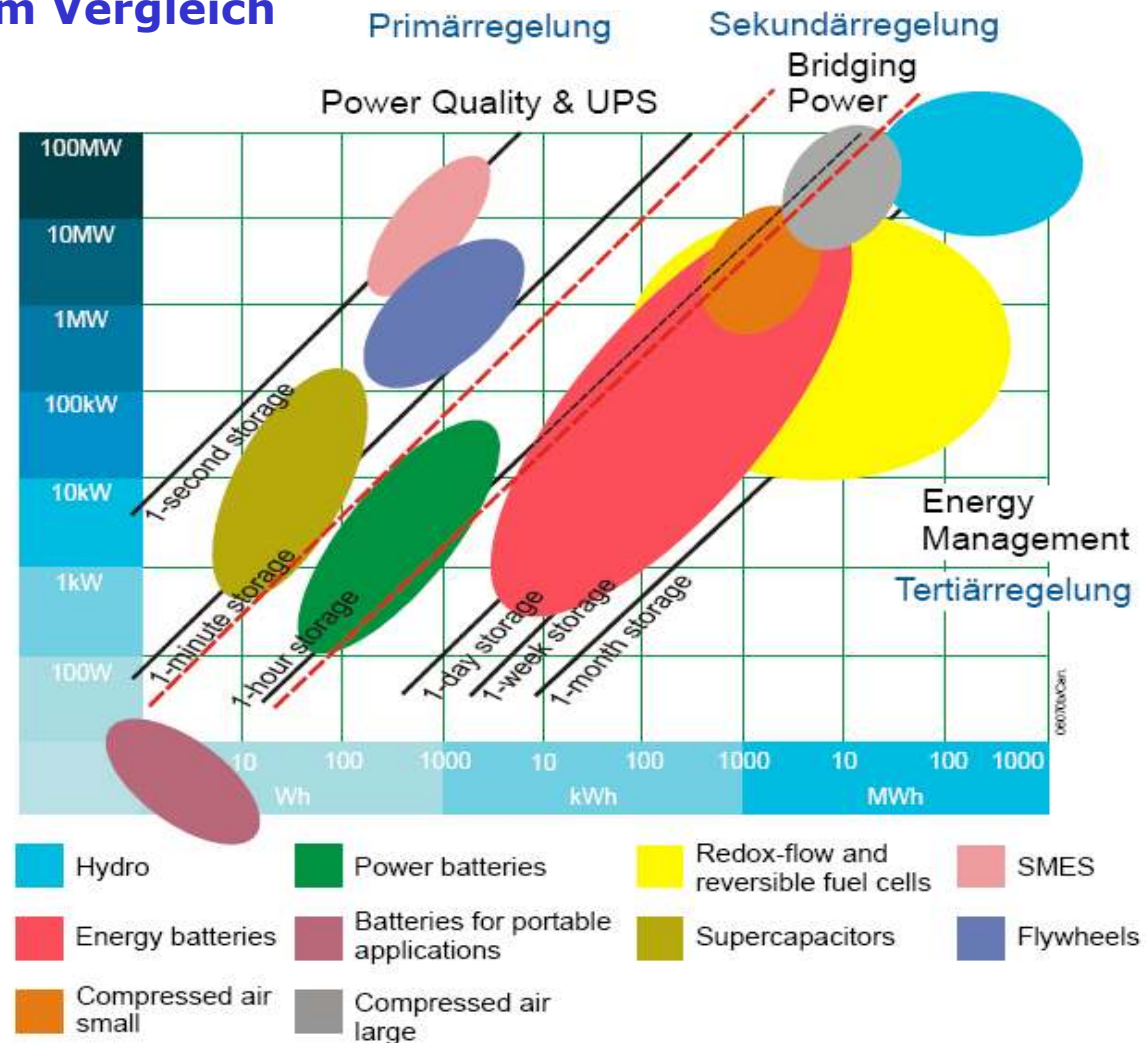
Projektierte Anlage eines kombinierten Luft-/Pumpspeicherkraftwerks



(Quelle: Sauer, E.; Zeise, R.: Energie transport, -speicherung und -verteilung, Technischer Verlag Resch, Gräffling/Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln, 1983, S. 251)

Speichertechnologien im Vergleich

Energieinhalt und Leistung im Vergleich



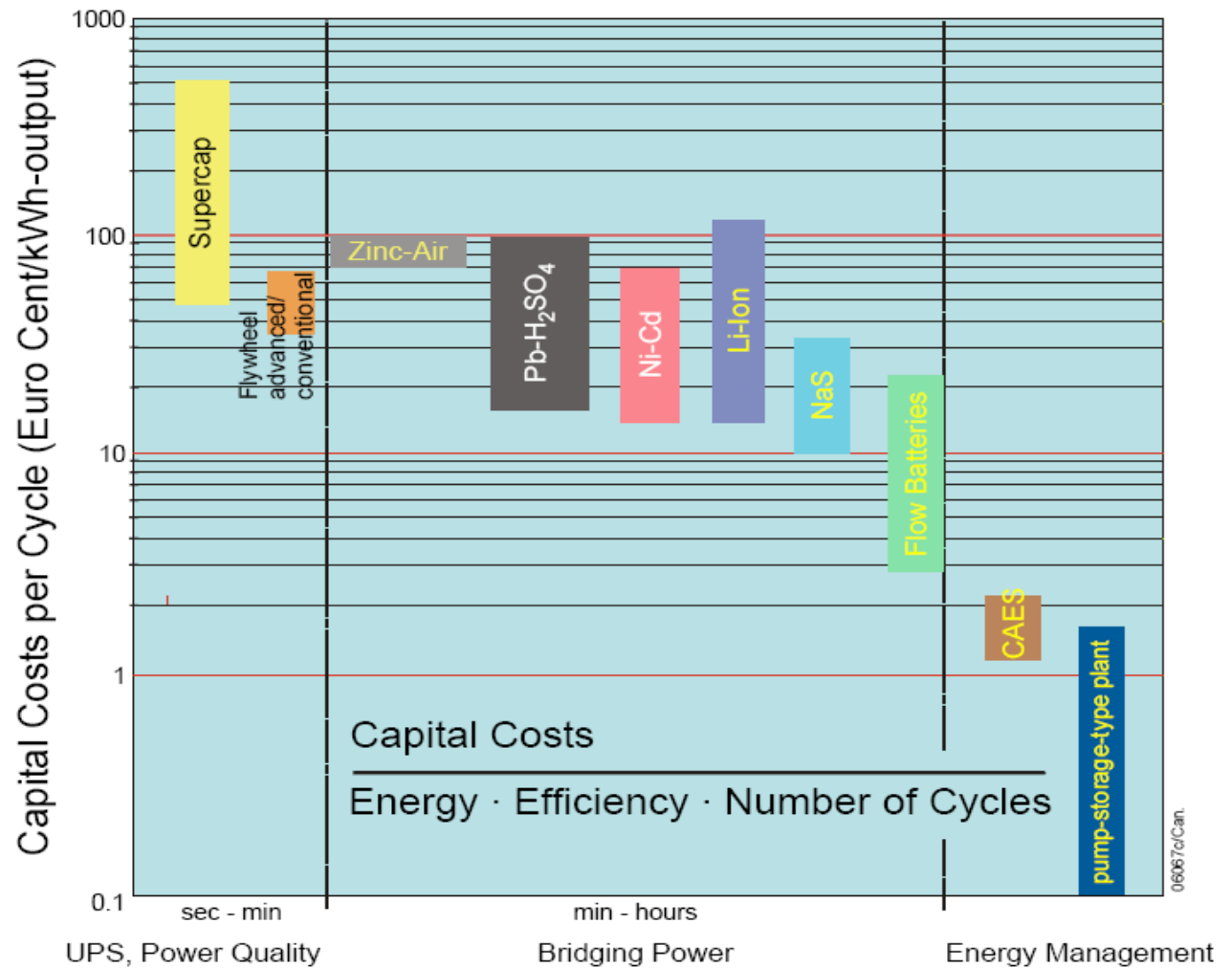
Speichertechnologien im Vergleich

Abb 3: Technologievergleich für Elektrizitätsspeicherung

	Kondensatoren (supercap)	Supraleitende Spulen (SMES)	Schwungrad (status quo)	Schwungrad (neu)	Akkumulator (Batterie)
Leistungszeit (E/P in sec)	$10^6 - 1$	1 - 20	10 - 30	20 - 500 ...	> 1.000
Energiedichte [kWs/kg Speicher]	5 - 20	< 5	15 - 200	150 - 500	100 - 800
Leistung [kW]	≤ 10	≤ 7.000	≤ 15.000	≤ 50.000	≤ 500
Lebensdauer [Zyklenzahl]	> 1.000.000	ca. 1.000.000	ca. 1.000.000	ca. 1.000.000	≤ 1.000
Energieeffizienz [%]	> 95	ca. 90	85 - 90	90 - 95	70 - 85
Stand-by-Verluste / Selbstentladung	0,1 - 0,2%/h	Kühlleistung	1 - 10 kW 3 - 20%/h	0,05 - 1 kW < 1 - 10%/h	< 0,01%/h
Kosten [€/kWh Speicherkapazität]	10 - 20	30 - 200	5	1 (Zielwert)	0,08

Speicher- technologie	Energiedichte [Wh/kg]	Leistungs- dichte [W/kg]	Energie / Leistung [sec]	Zyklenzahl Lebensdauer [-]	Wirkungsgrad [%]
Schwungrad	5-50	180-1800	100	10^6	90-95
Batterie	30-200	100-700	>1'000	1'000	80-85
Kondensator	2-5	7'000- 18'000	<1	> 10^6	>95
SMES	<1	1'000	10	10^6	90

**Energiespezifische
Investitionskosten bei
Berücksichtigung von
Wirkungsgrad und
Lebensdauer**



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Sources:

- [1] Homepage of RWE Piller GmbH
- [2] Siegmund Cierniak, Wärtsilä Compression Systems: Reciprocating compressors in natural gas underground storages in Germany
- [3] Jensen, Johannes; Sørensen, Bent: Fundamentals of energy storage.
- [4] BINE Informationsdienst - „Langzeit-Wärmespeicher und solare Nahwärme“
- [5] Peter von Burg: Moderne Schwungmassenspeicher – eine alte Technik in neuem Aufschwung
- [6] BINE projektinfo 11/03, ISSN 0937 8367
- [7] Dittmann, L.: Thermal Storage in Combined Cooling Systems. 9th International Symposium on District Heating and Cooling, 30.-31.08.2004, Helsinki