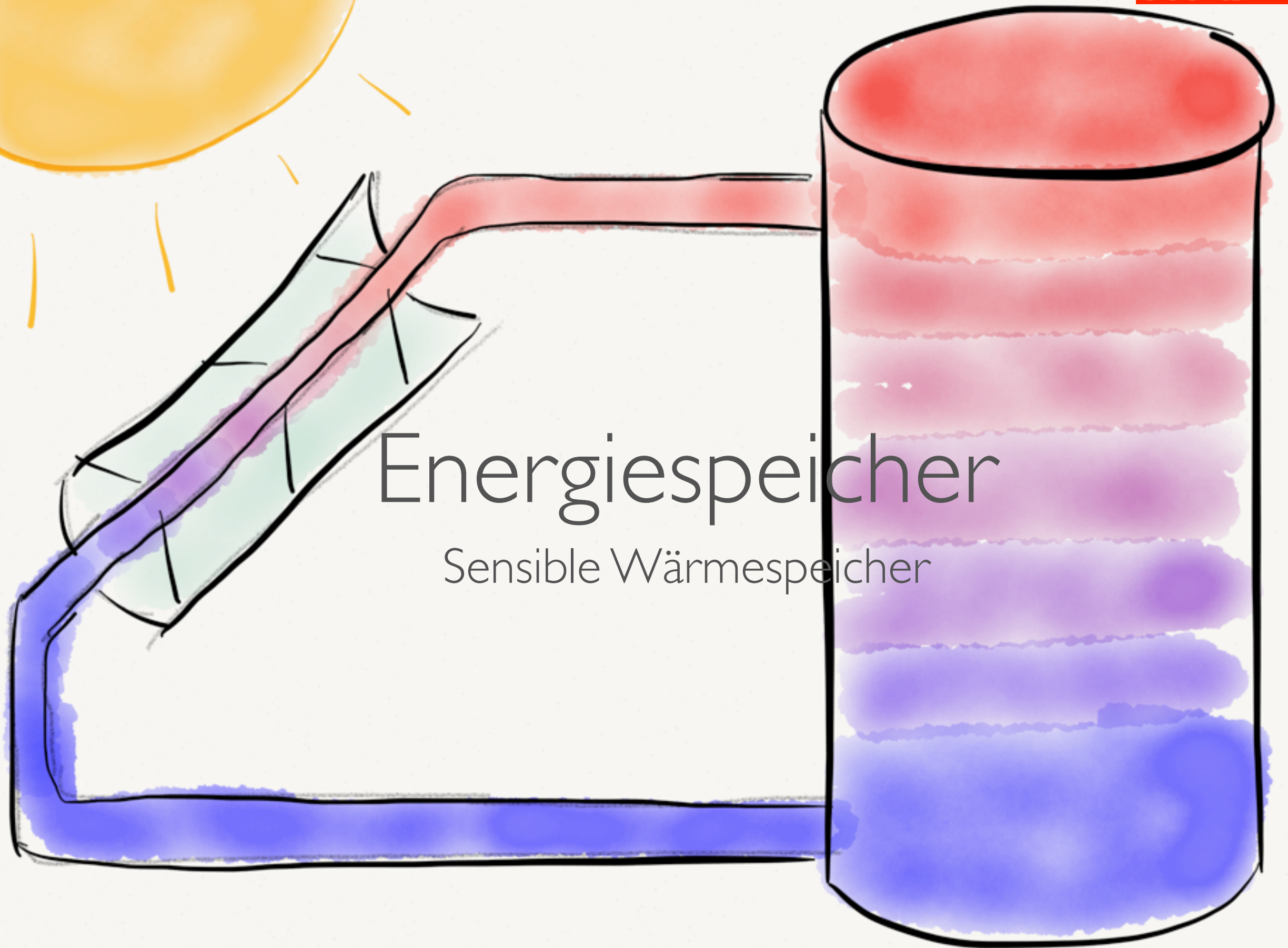


Energiespeicher

Sensible Wärmespeicher



Wiederholung Wärmekapazität

Wärmekapazität

- Wie viel Wärme kann in einem Stoff (Gas, Flüssigkeit, Festkörper) gespeichert werden.
- Symbol C
- Einheit J / K

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$$

$$C_V = \left. \frac{\partial U}{\partial T} \right|_V$$

$$C_p = \left. \frac{\partial H}{\partial T} \right|_p$$

H = Enthalpie. Dazu nächstes Mal mehr.

Wärmekapazität

- Die Wärmekapazität von Gasen und Flüssigkeiten wird typischerweise bei konstantem Volumen gemessen.
- Bei konstantem Druck vergrößert sich das Volumen und muss mechanische Arbeit gegen den Zylinderdruck aufbringen.
- Deswegen ist die Wärmekapazität bei konstantem Druck höher.

Spezifische Wärmekapazität

- Die spezifische Wärmekapazität bezieht die Wärmemenge Q auf die Masse m des Stoffes (in kg)
- Symbol c
- Einheit J / (kg K)
- Alternativ: pro Mol

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$$

$$c = \frac{C}{m} = \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta T}$$

Wärmekapazität

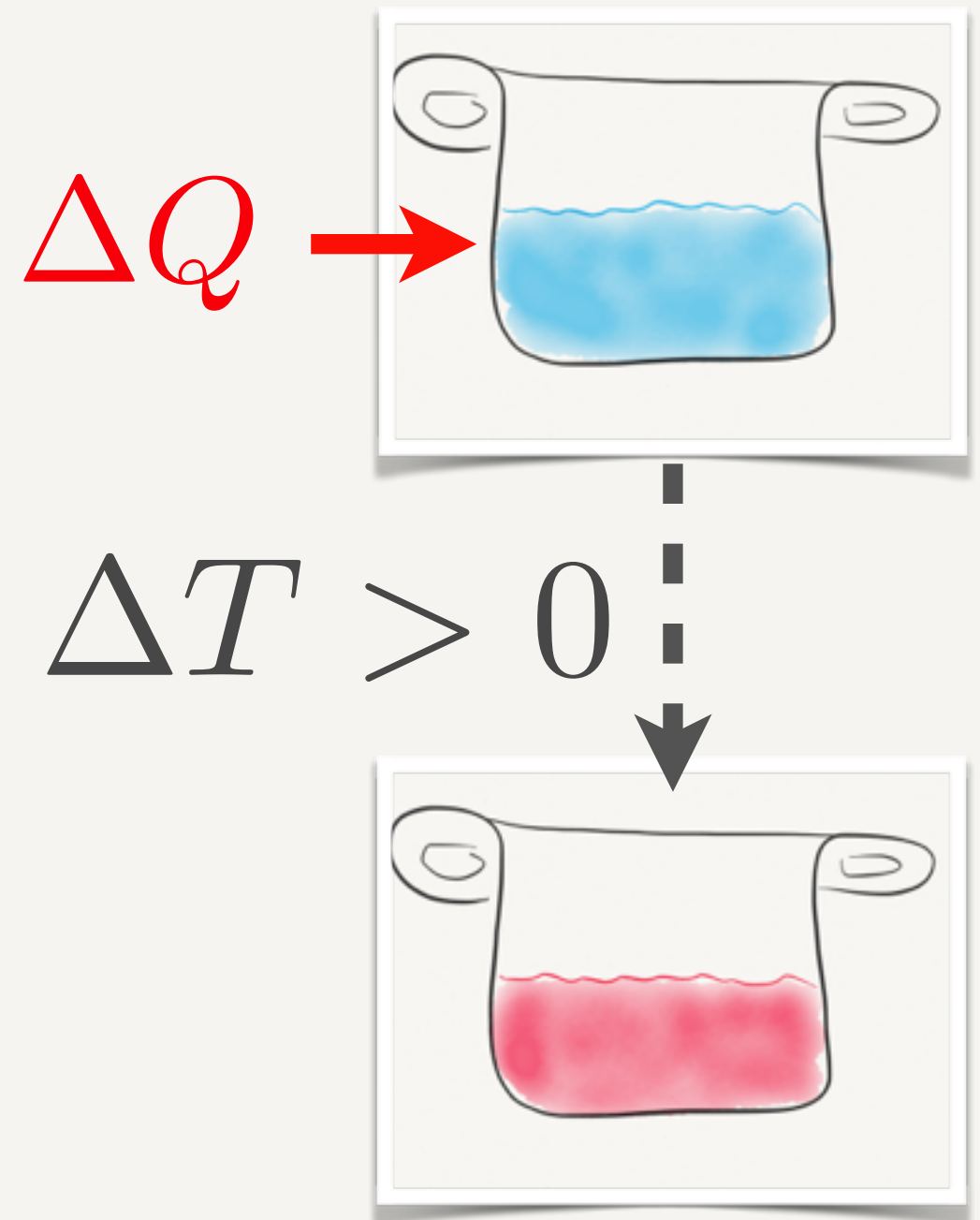
Beispiele

Material	spez. Wärmekapazität c / kJ / (kg K)
Luft (gasförmig)	1
Wasser (flüssig)	4.2
Kupfer (fest)	0.385

Sensible Wärmespeicher

Sensible Wärmespeicher

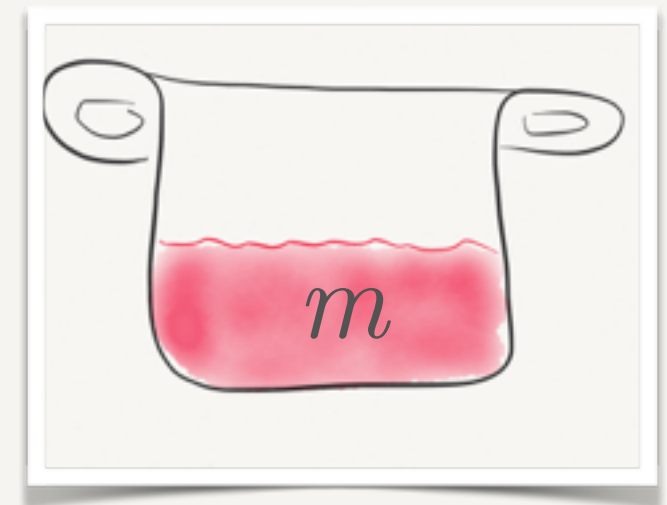
- Sensible Wärme kann gefühlt werden: ist das Wasser warm oder kalt?
- Ein sensibler Wärmespeicher nimmt Wärme auf und wird dadurch spürbar wärmer.
- Die Wärmekapazität stellt die maximal aufnehmbare Wärme pro Temperaturdifferenz dar.



Kapazität

- Die spezifische Wärmekapazität c gibt an wie viel Wärme nötig ist um einen Körper mit einer Masse von 1kg um 1K zu erhitzen.
- Entsprechend ist die Kapazität des Speichers:

$$\Delta T > 0$$



$$\Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

Aufgabe

Wasserspeicher

- Berechnen Sie die Kapazität des Wasserspeichers für $\Delta T = 50\text{K}$.
- Berechnen Sie die Speicherdichte (pro Volumen und pro Masse)



$$\Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

Flüssige Speichermedien

Tab. 8.1 Thermophysikalische Daten einiger potenzieller einphasiger Speichermedien sowie deren volumenspezifischer Wärmekapazität, gewichtsspezifischer Kosten und Kosten pro thermisch erzeugter Kilowattstunden (Barlev et al. 2011)

Speichermedium	T_{min}	T_{max}	ρ	λ	c_p	$(c_p \cdot \rho)$	Kosten/ kg	Kosten/ kWh_{th}
	(°C)	(°C)	(kg/m^3)	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)	($\text{kWh}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$)	US \$/kg	US \$/ kWh_{th}
Wasser	50	140	1000	0.67	4180	1.161	10^{-4}	
Mineralöl	200	300	770	0.12	2600	0.556	0.3	4.2
Synthetiköl	250	350	900	0.11	2300	0.575	3.0	43.0
Silikonöl	300	400	900	0.10	2100	0.525	5.0	80.0
Nitritsalze	250	450	1825	0.57	1500	0.760	1.0	12.0
Nitratsalze	265	565	1870	0.52	1600	0.831	0.5	3.7
Carbonatsalze	450	850	2100	2.0	1800	1.050	2.4	11.0
Natrium	140	550	850	71	1300	0.307	2.0	21.0

Quelle: Thermische Solarenergie [1]

Flüssige Speichermedien

In der gezeigten Liste:

- Keine Flüssigkeit hat eine höhere spezifische Wärmekapazität als Wasser
- Keine Flüssigkeit hat eine höhere Speicherdichte als Wasser
- Keine Flüssigkeit ist günstiger als Wasser.
- Wasser hat die niedrigste Arbeitstemperatur.

Die Temperatur gibt die Einsatzmöglichkeiten vor!

Feste Speichermedien

Tab. 8.2 Thermophysikalische. Daten einiger potenzieller massiver fester Speichermedien sowie deren volumenspezifische Wärmekapazität, gewichtsspezifische Kosten und Kosten pro thermisch erzeugter Kilowattstunden. (Stand 2008)

Speichermedium	T_{min}	T_{max}	ρ	λ	c_p	$(c_p \cdot \rho)$	Kosten/ kg	Kosten/ kWh_{th}
	(°C)	(°C)	(kg/m^3)	$\text{W}/(\text{mK})$	($\text{J}/(\text{kgK})$)	($\text{kWh}/(\text{m}^3\text{K})$)	US \$/kg	US \$/kWh _{th}
Wasser	50	140	1000	0.67	4180	1.161	10^{-4}	
Sandstein	200	300	1700	1.0	1300	0.614	0.15	4.2
Faserverstärkter Beton	200	400	2200	1.5	850	0.519	0.05	1.0
Kochsalz (fest)	200	500	2160	7.0	850	0.510	0.15	1.5
Gusseisen	200	400	7200	37.0	560	1.120	1.00	32.0
Gussstahl	200	700	7800	40	600	1.300	5.00	60.0
Siliziumziegel	200	700	1820	1.5	1000	0.505	1.00	7.0
Magnesiumziegel	200	1200	3000	5.0	1150	0.958	2.00	6.0

Wärmekapazität II

$$C = C(T)$$

- Über große Temperaturbereiche ist die Wärmekapazität im Allgemeinen temperaturabhängig.
- Die gespeicherte Wärmemenge berechnet sich dann als Integral über den Temperaturverlauf.

$$\begin{aligned}\Delta Q &= \int_{T_1}^{T_2} C(T) \cdot dT \\ &= \int_{T_1}^{T_2} m \cdot c(T) \cdot dT\end{aligned}$$

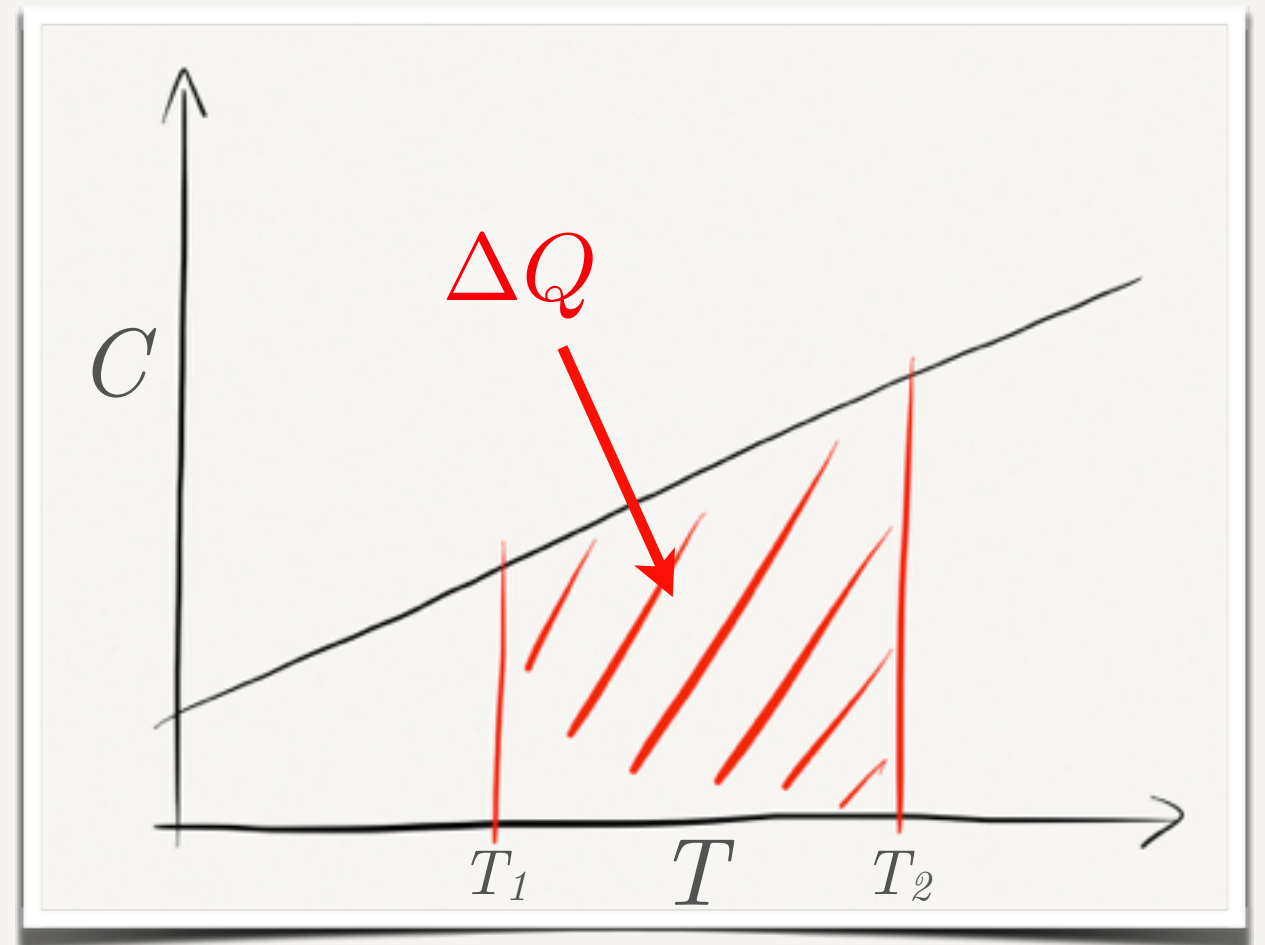
Für konstantes C wird das grade wieder

$$\Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

Aufgabe

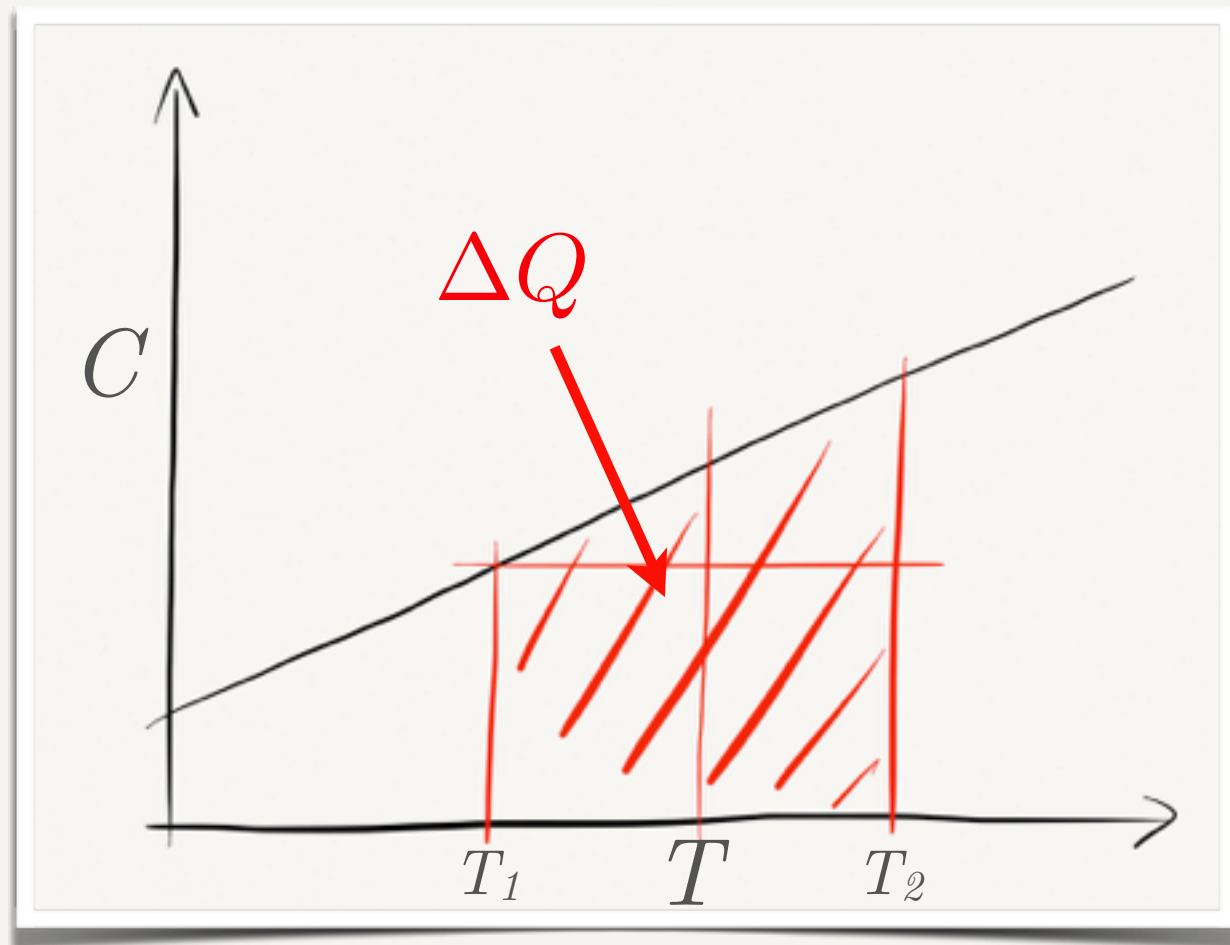
$$C(T) = C(T_1) + \alpha \cdot T$$

- Nehmen Sie an die Wärmekapazität ist über den betrachteten Bereich linear von der Temperatur abhängig.
- Berechnen Sie analytisch die benötigte Wärmemenge um den Körper von T_1 auf T_2 zu erwärmen.



Aufgabe

$$C(T) = C(T_1) + \alpha \cdot T \quad \Delta Q = \int_{T_1}^{T_2} (C(T_1) + \alpha \cdot T) dT$$



$$\begin{aligned} &= \left[C(T_1) \cdot T + \frac{1}{2} \alpha T^2 \right]_{T_1}^{T_2} \\ &= C(T_1) \Delta T + \frac{1}{2} \alpha (T_2^2 - T_1^2) \\ &= C(T_1) \Delta T + \alpha \bar{T} \Delta T \end{aligned}$$

Normaler Anteil Steigender Anteil

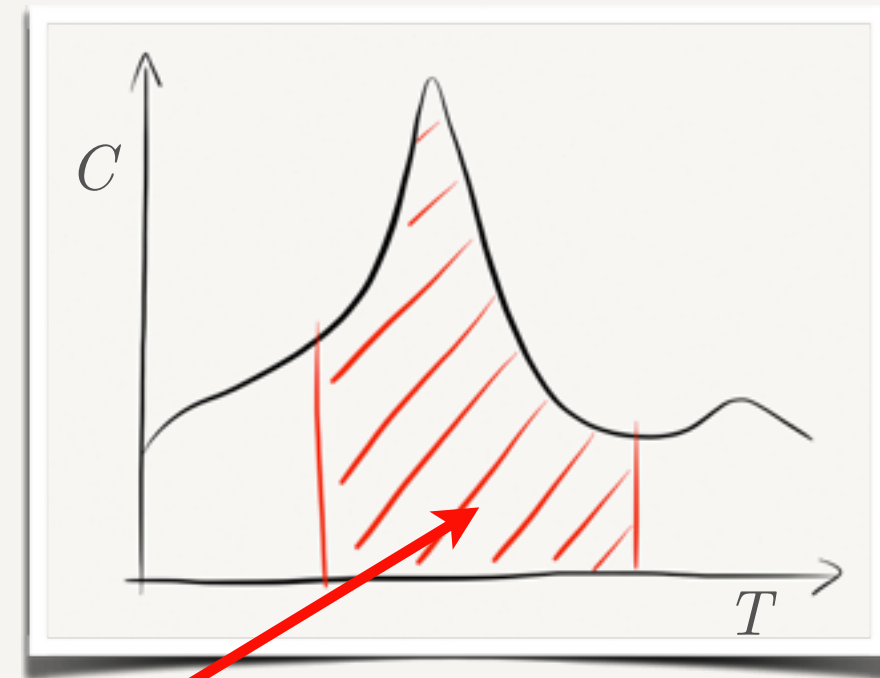
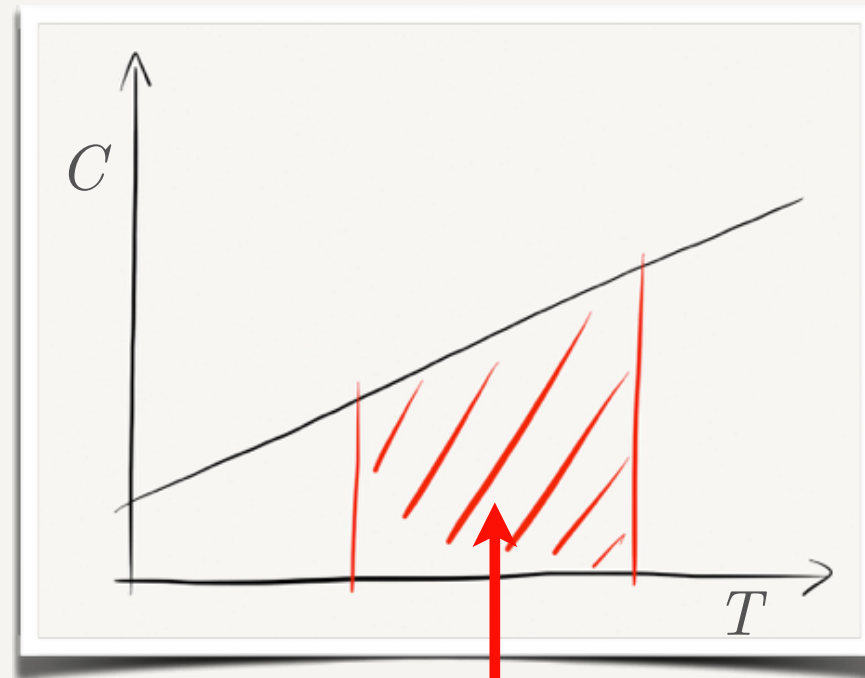
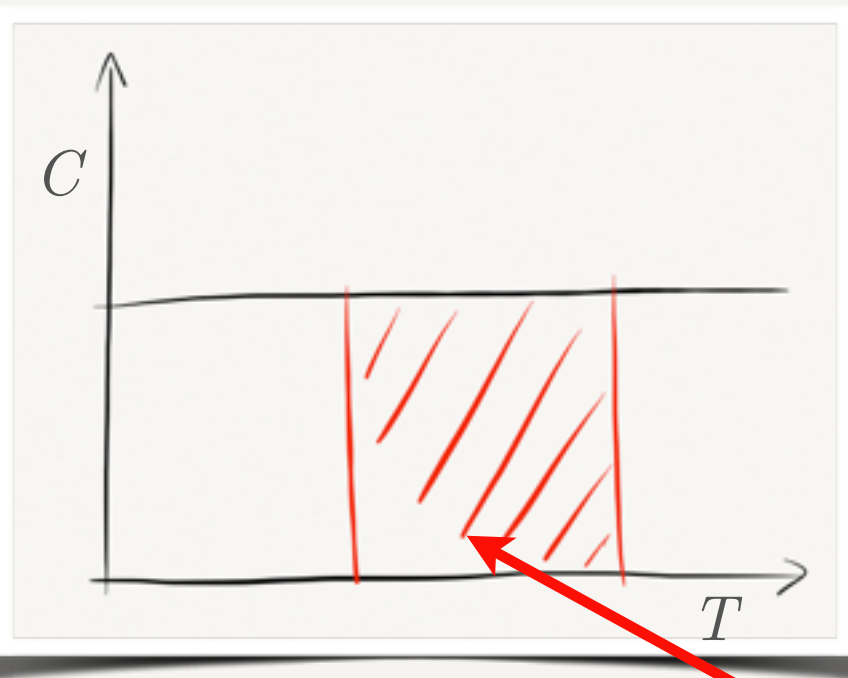
$$\begin{aligned} \text{Mit } T_2^2 - T_1^2 &= (T_2 + T_1)(T_2 - T_1) \\ &= 2 \cdot \bar{T} \cdot \Delta T \end{aligned}$$

Temperaturabhängigkeit

Konstant

Linear

Beliebig



ΔQ

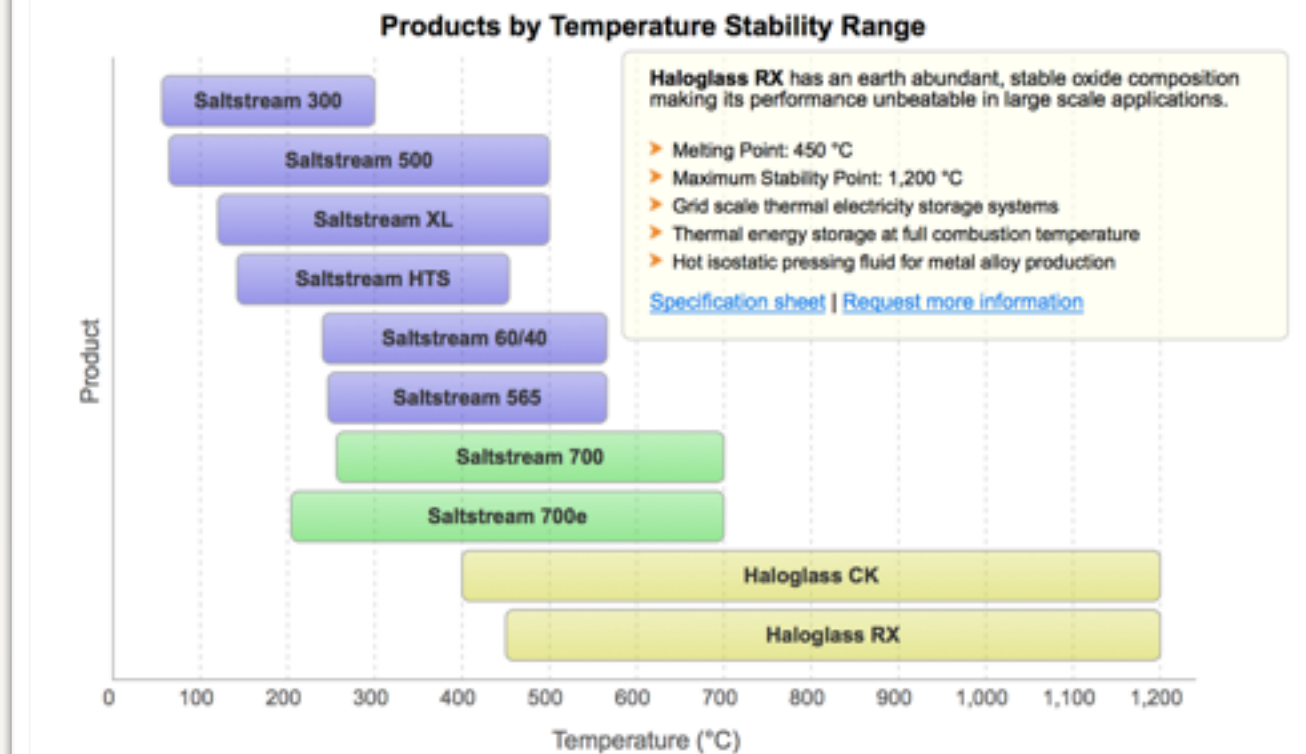
Materialien

Quelle: <http://www.halotechnics.com/products/>

- Weil kein Material alle Bedingungen erfüllt ist die Materialforschung ein sehr aktives Gebiet.
- Zielsetzung: neue Arbeitsbereiche, umweltverträgliche Materialien, geringere Produktionskosten.

Beispiel Halotechnics

High Temperature Thermal Fluids



- Materialsuche mit High-Throughput-Screening.
- 18.000 Materialien untersucht
- Ergebnis:
 - Höhere Temperaturen
 - 3-fach höhere Wärmekapazität

<http://www.technologyreview.com/news/427190/cheap-solar-power-at-night/>

Aufgabe

- Haloglass CK hat folgende Eigenschaften:
 - ▶ Arbeitsbereich von 400 - 1200°C.
 - ▶ Das Material hat eine Wärmekapazität von 1.22 kJ / (kg K)
 - ▶ Dichte: 2.890 kg/m³
- Berechnen Sie die Speicherkapazität (pro Masse und Volumen) von einer Tonne Haloglass CK.

Quelle: <http://www.halotechnics.com/products/haloglassck.html>

Kraftwerksbetrieb

Zweck des Speichers

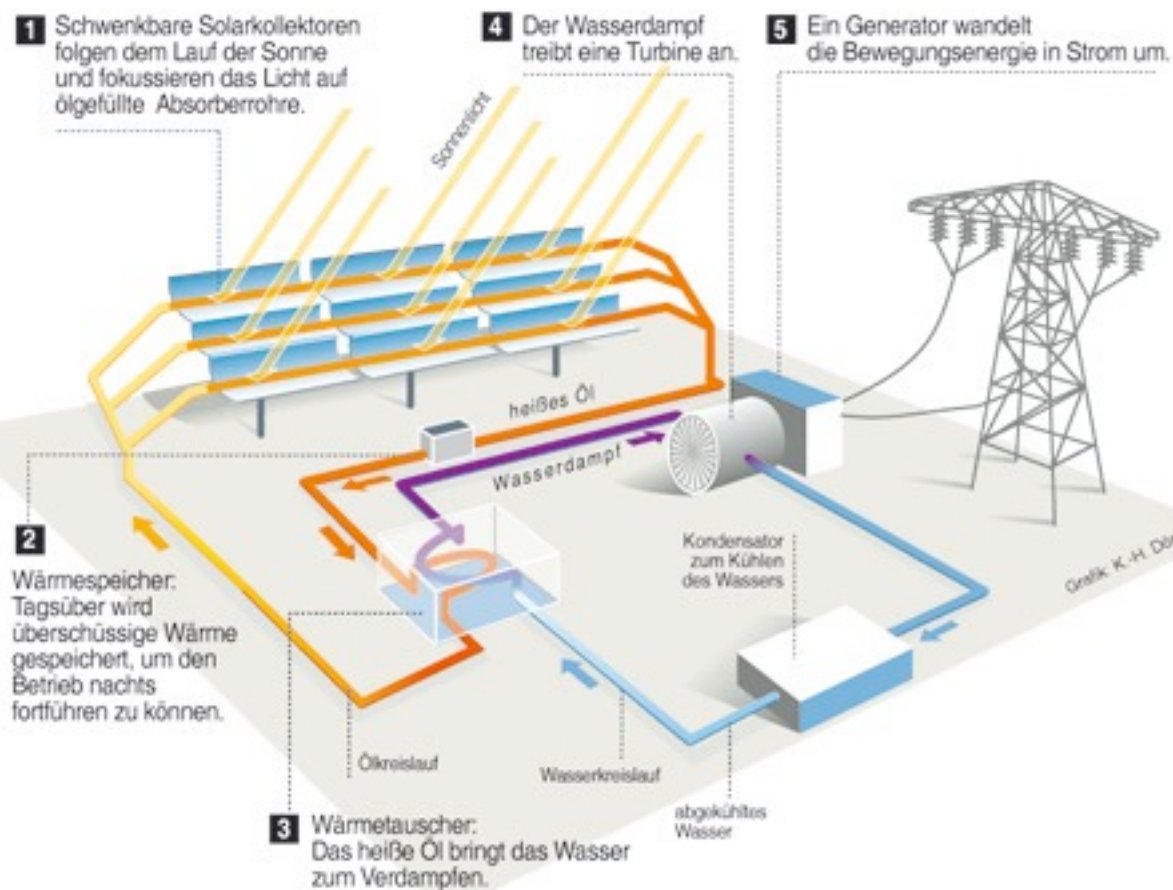
- Beim Kraftwerksbetrieb sind es vor allem Solarkraftwerke die große Wärmespeicher einsetzen.
- Der Speicher gleicht kurzzeitige Schwankungen aus (Bewölkung).
- Der Speicher verlängert die Verfügbarkeit des Kraftwerks in die sonnenfreien Stunden hinein (Bewölkung, Nacht).

Solkraftwerke

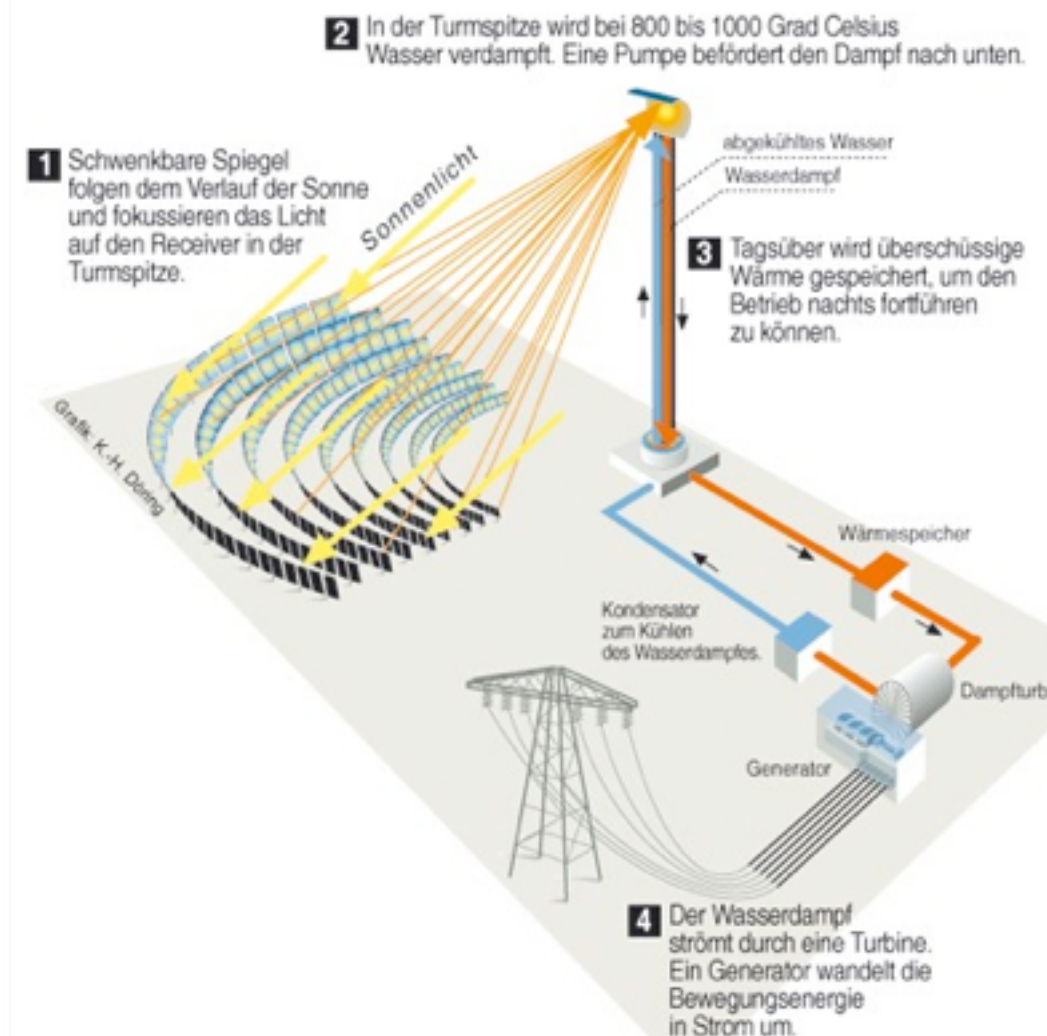
Parabol-Rinnen-Kraftwerk

Solarturm-Kraftwerk

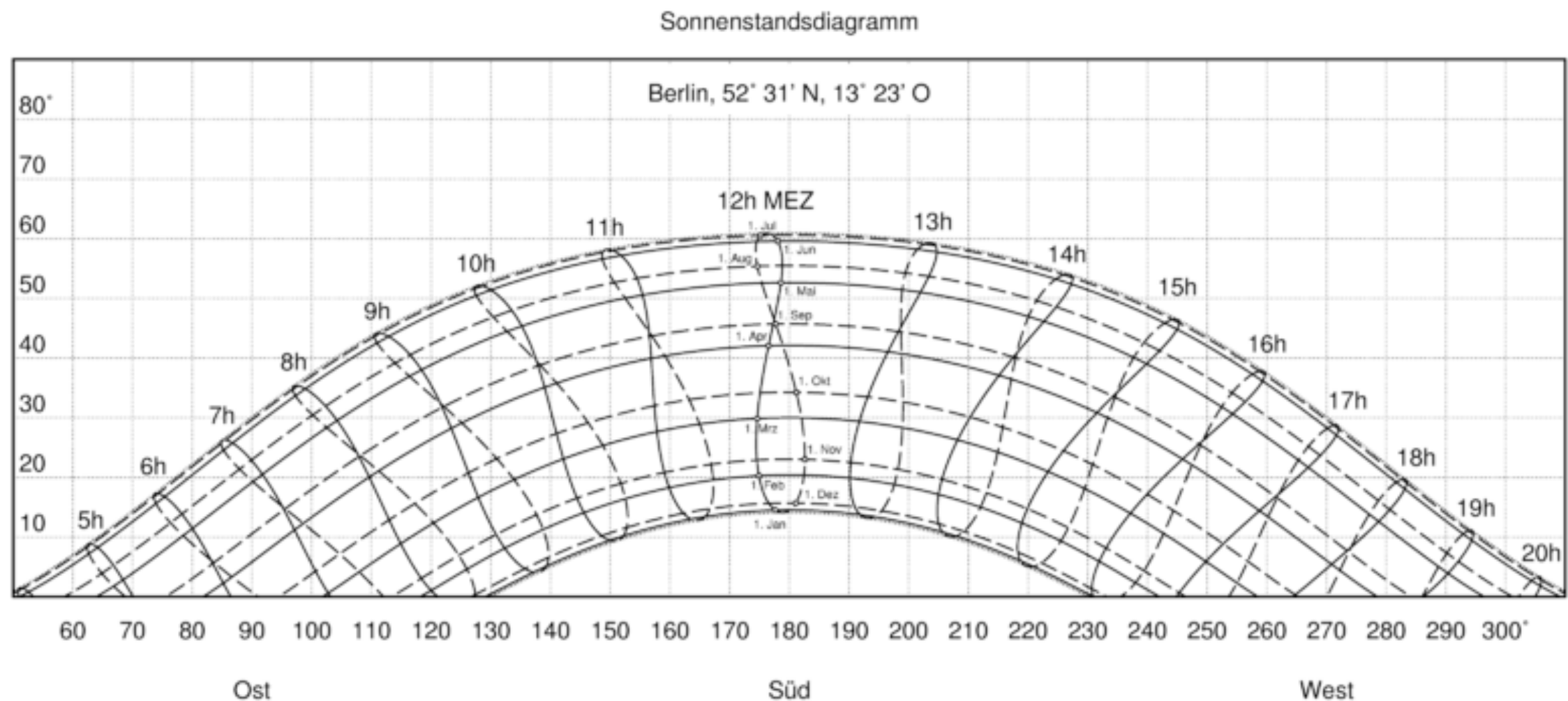
Solkraftwerk mit ölgefüllten Rohren



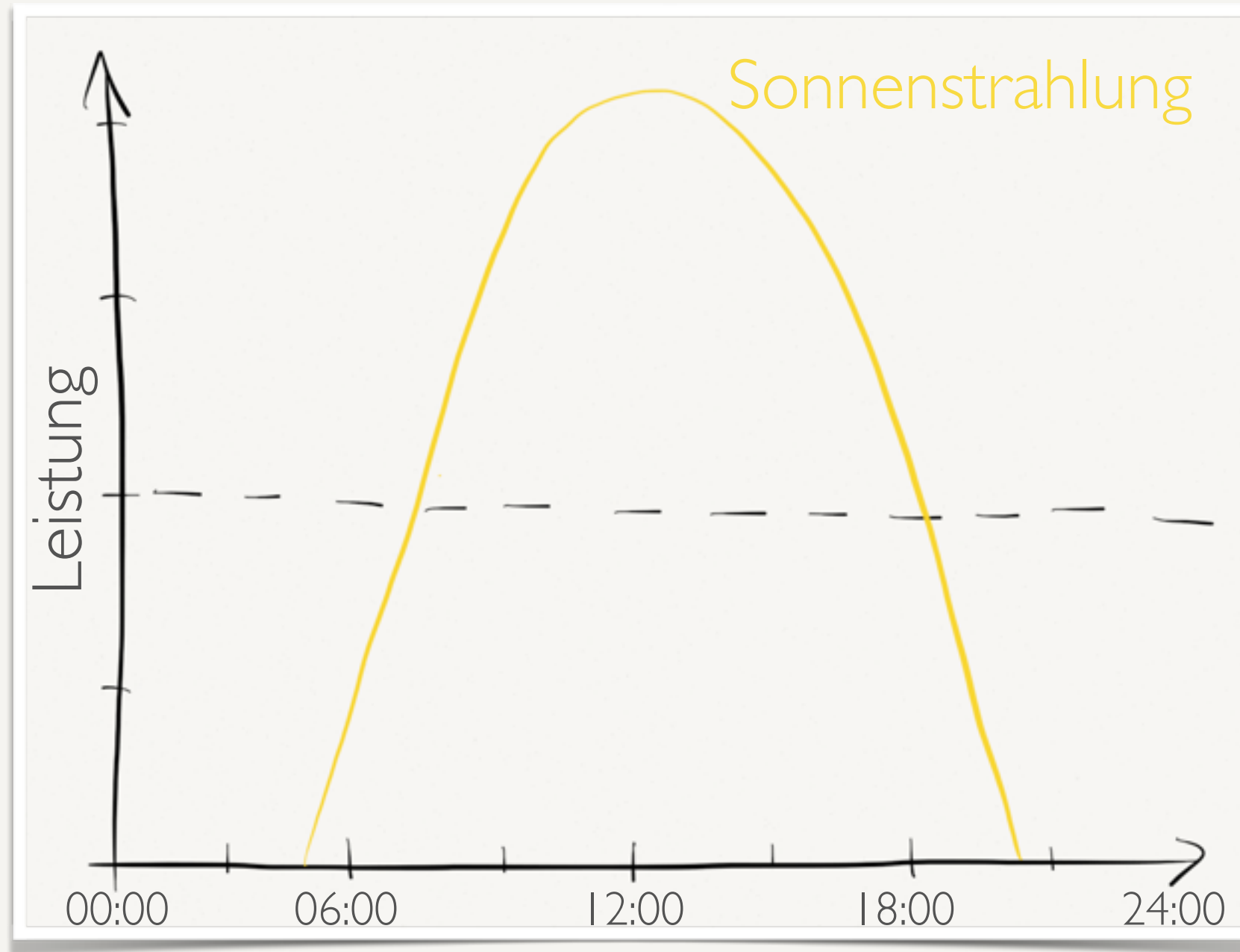
Solkraftwerk mit Wasserturm



Sonnenstand



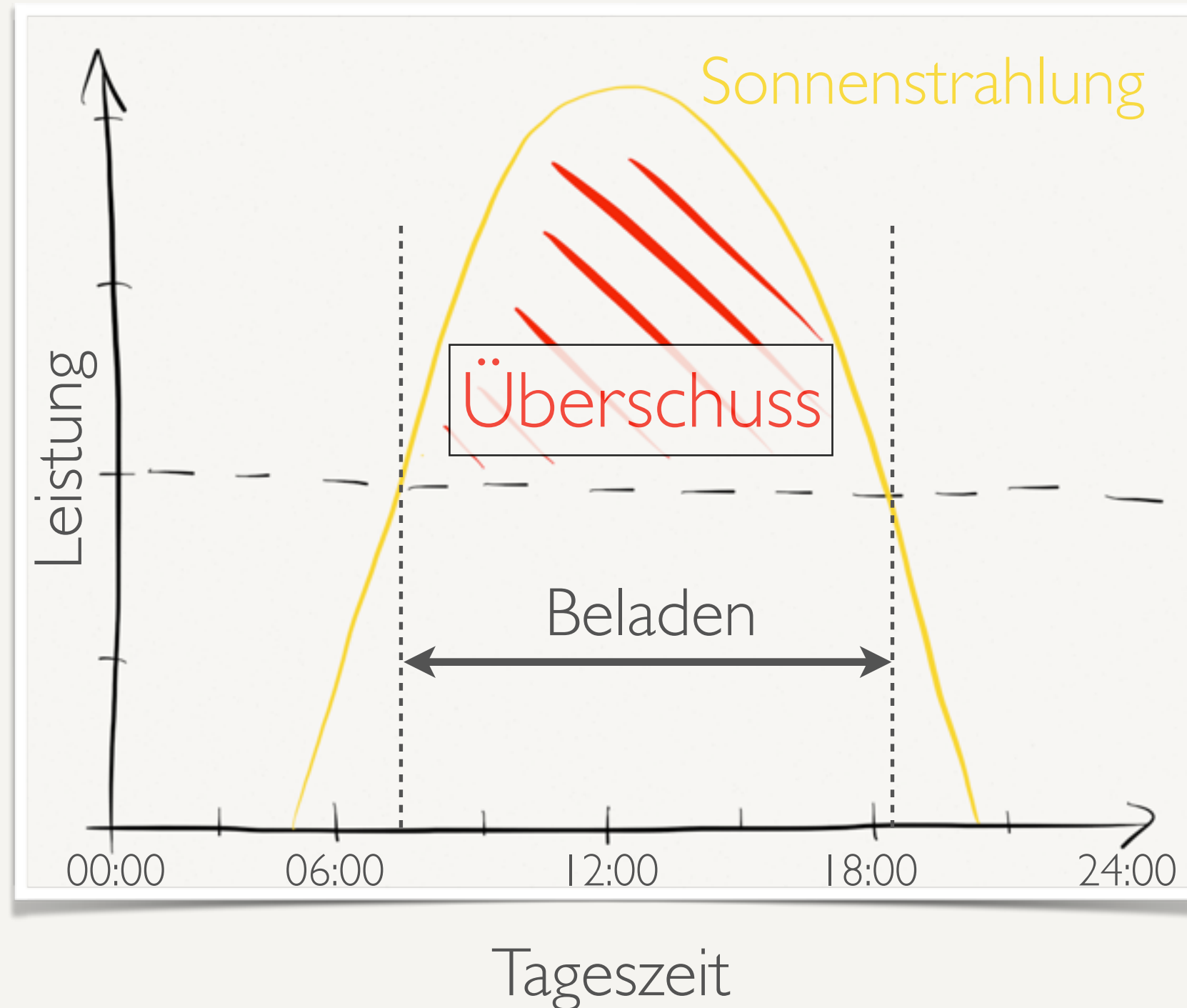
Solarkraftwerk mit Nachtbetrieb



Nominelle
Kraftwerksleistung

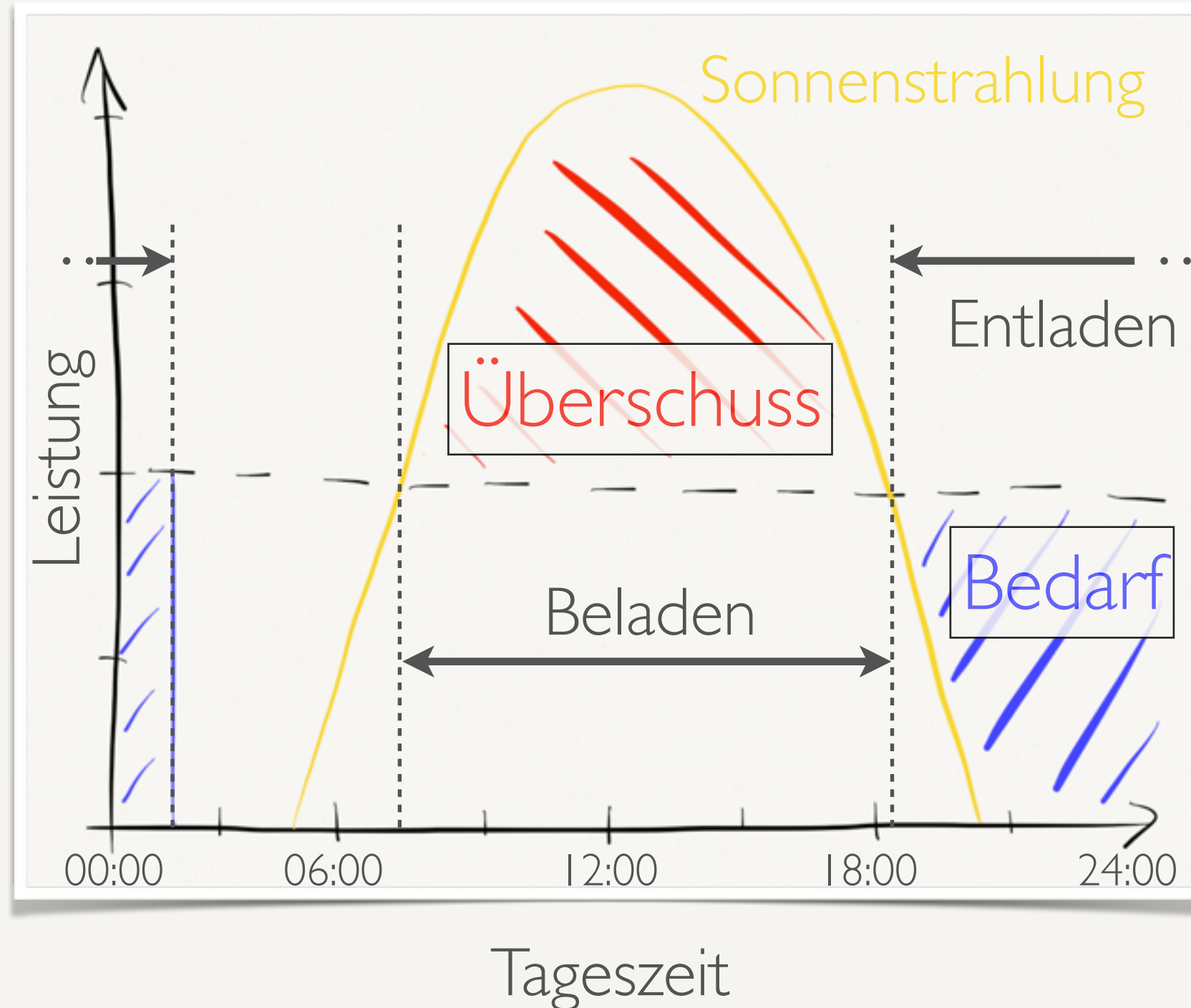
Tageszeit

Solkraftwerk mit Nachtbetrieb



Nominelle
Kraftwerksleistung

Solkraftwerk mit Nachtbetrieb

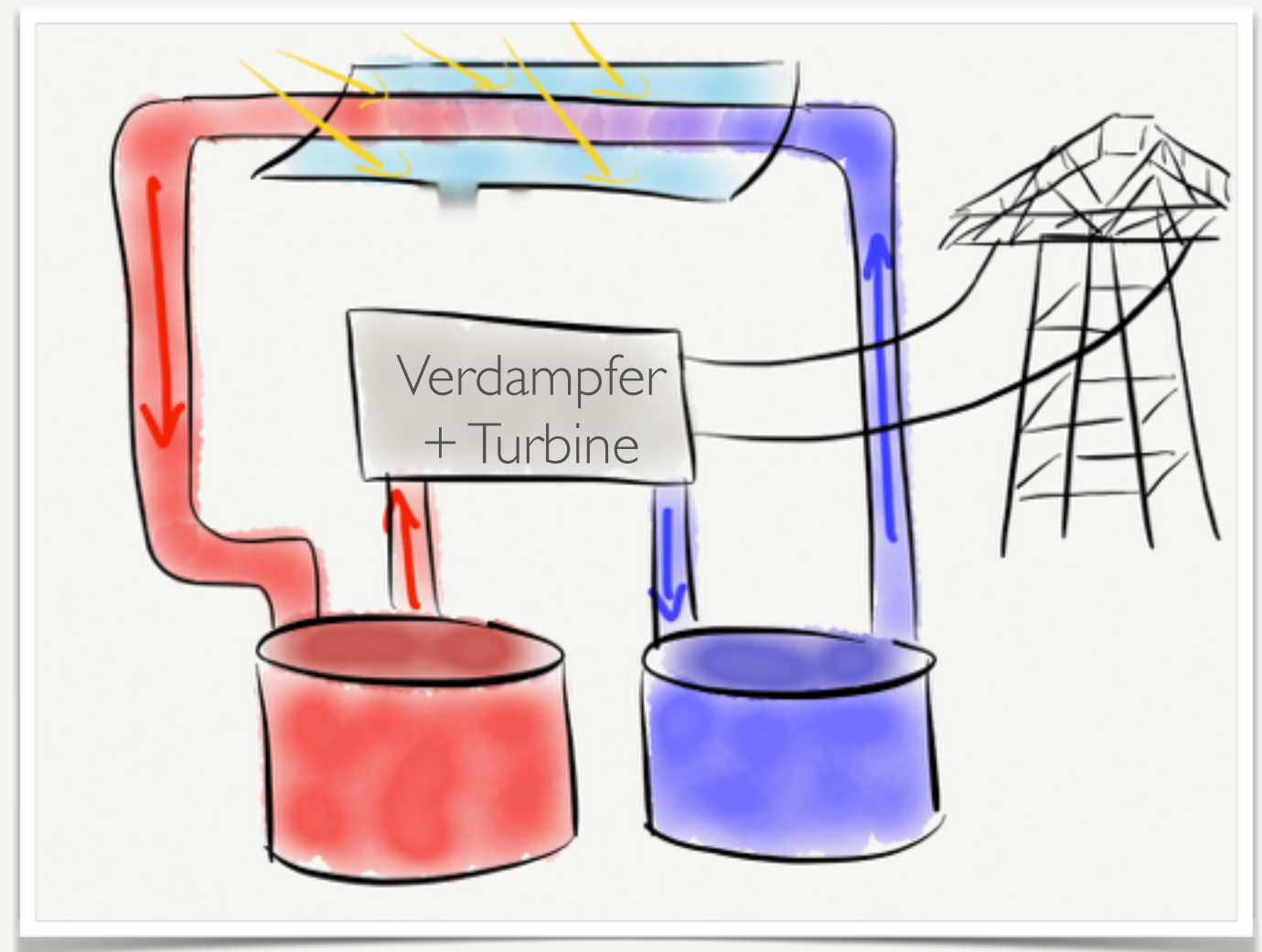


Typen

- Flüssigspeicher
 - ▶ Zwei-Tank-Direktspeicher
 - ▶ Zwei-Tank-Indirektspeicher
 - ▶ Eintank Thermokline
- Festkörperspeicher

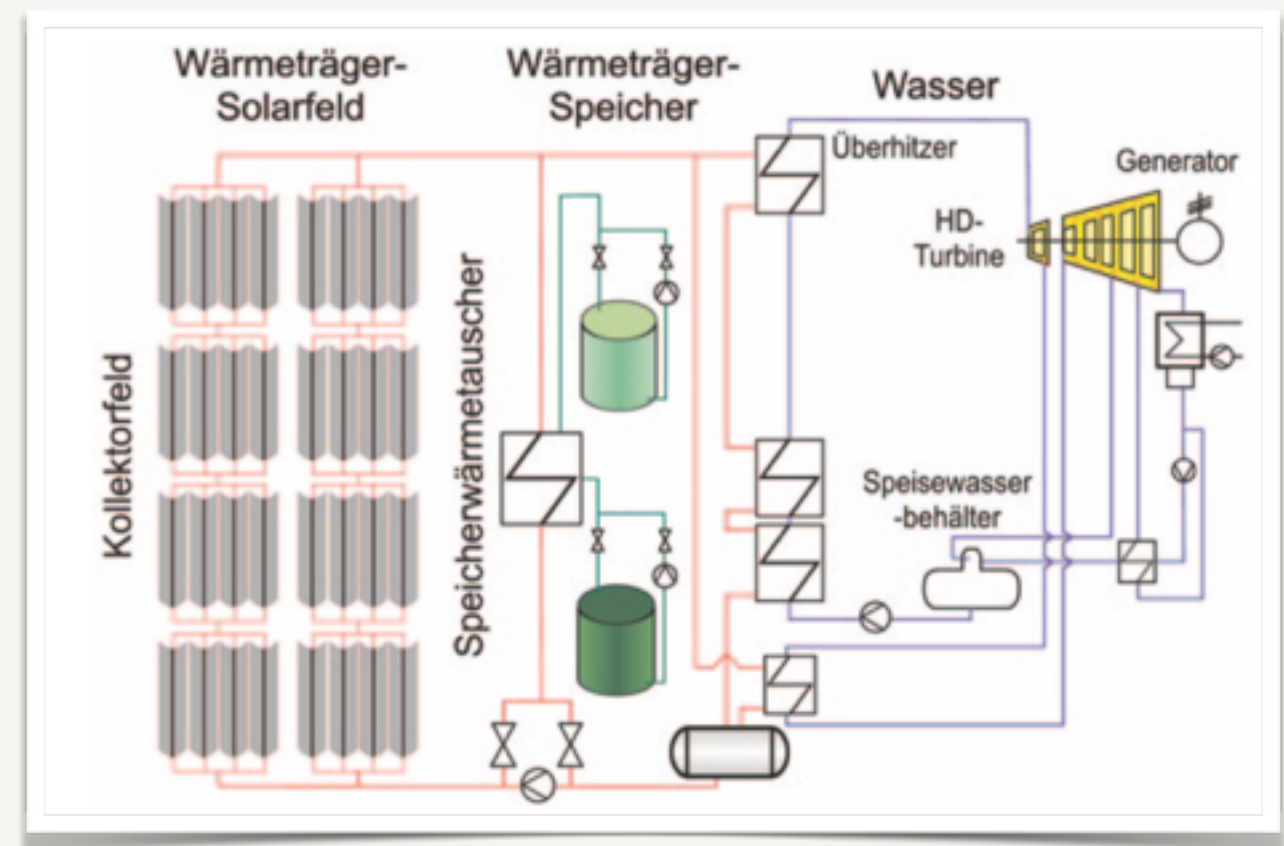
Zwei-Tank-Direktspeicher

- Das Speichermedium ist gleichzeitig das Betriebsmedium
 - ▶ für die Erhitzung im Solarfeld.
 - ▶ für den Betrieb der Dampfturbine.



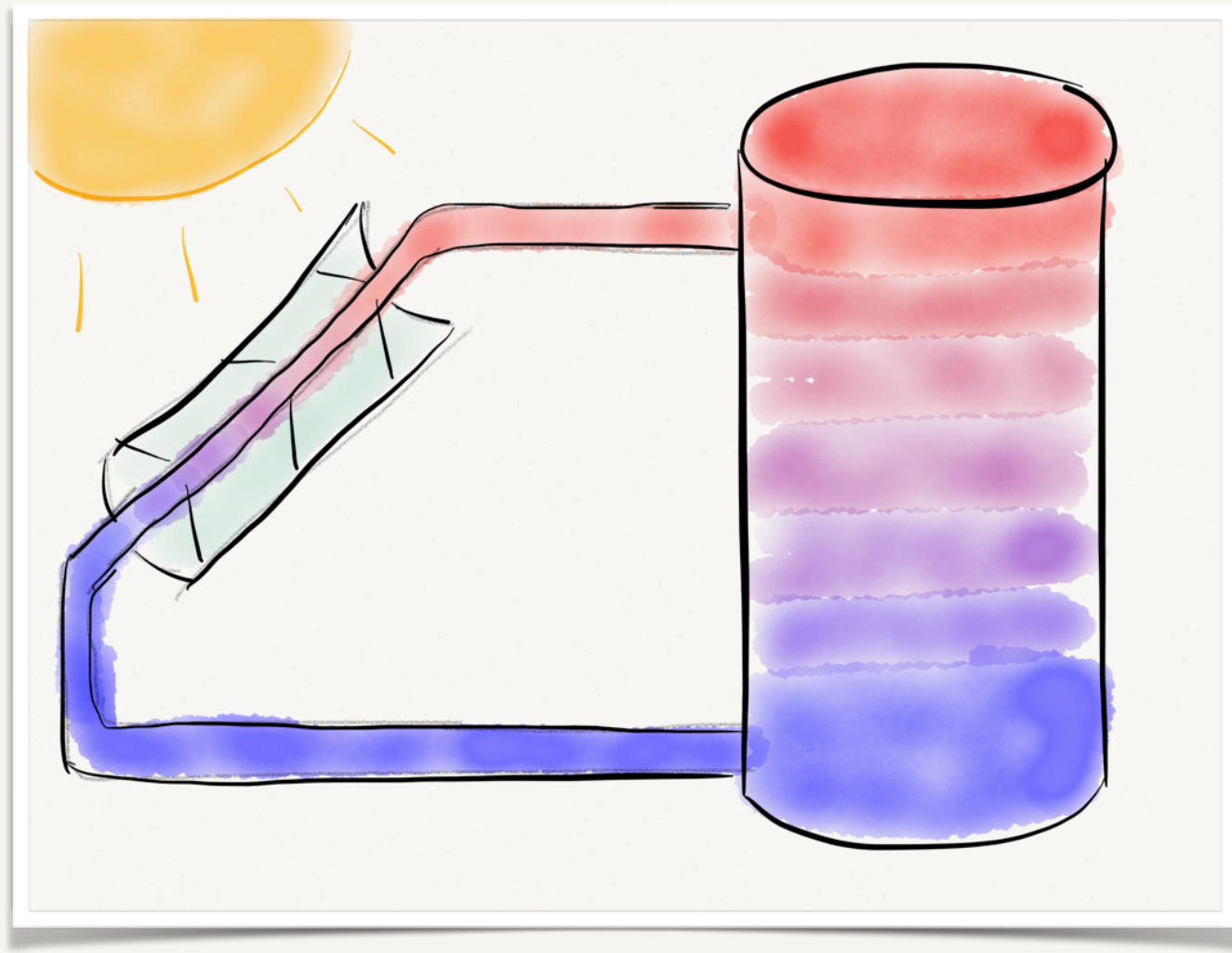
Zwei-Tank-Indirektspeicher

- Speicher- und Betriebsmedium sind getrennt.
- Wärmetauscher übertragen die gewonnene Energie sowohl beim Be- als auch Entladen.



Eintank-Thermokline

- Ein einzelner Tank ist gleichzeitig Wärme- und Kältespeicher.
- Kann direkt und indirekt betrieben werden.
- Systembedingt ist der Temperaturgradient und damit die maximale Temperatur beschränkt.



Festkörperspeicher

- Steine, Felsen oder Beton.
- Wärmeausdehnung des Speichers und der Rohre muss angepasst sein.
- Ohne natürliche Ressourcen (Gesteinsbett) ebenfalls hohe Kosten.
- Natürliche Ressource: Wüstensand.

Tab. 8.2 Thermophysikalische. Daten einiger potenzieller massiver fester Speichermedien sowie deren volumenspezifische Wärmekapazität, gewichtsspezifische Kosten und Kosten pro thermisch erzeugter Kilowattstunden. (Stand 2008)

Speicherme- dium	T_{min}	T_{max}	ρ	λ	c_p	$(c_p \cdot \rho)$	Kosten/ kg	Kosten/ kWh _{th}
	(°C)	(°C)	(kg/m ³)	W/(mK)	(J/(kgK))	(kWh/(m ³ K))	US \$/kg	US \$/kWh _{th}
Wasser	50	140	1000	0.67	4180	1.161	10 ⁻⁴	
Sandstein	200	300	1700	1.0	1300	0.614	0.15	4.2
Faserverstärk- ter Beton	200	400	2200	1.5	850	0.519	0.05	1.0
Kochsalz (fest)	200	500	2160	7.0	850	0.510	0.15	1.5
Gusseisen	200	400	7200	37.0	560	1.120	1.00	32.0
Gussstahl	200	700	7800	40	600	1.300	5.00	60.0
Siliziumziegel	200	700	1820	1.5	1000	0.505	1.00	7.0
Magnesium- ziegel	200	1200	3000	5.0	1150	0.958	2.00	6.0

Projekte und Aufgabe

- Die Speicher für Gemasolar und Valle I sind mit Nitratsalzen gefüllt.
- Berechnen Sie benötigte Menge Salz und das dazu gehörige Volumen.

Zwei-Tank-Direkt:
Gemasolar

Zwei-Tank-Indirekt:
Torresol Valle I

Aufgabe Solarspeicher

	Valle 1	Gemasolar
P (MW)	50	20
C (h)	7.5	15
C (kWh)	375000	300000
Speichermedium	Nitratsalze	Nitratsalze
Dichte (kg/m³)	1870	1870
T1 (°C)	265	265
T2 (°C)	565	565
ΔT (K)	300	300
c_p (KJ / (kg K))	1.6	1.6
Masse (kg)	2812500	2 250 000
Masse (t)	2813	2 250
V (m³)	1 504.01	1 203.21
L (m)	11.46	10.64

Links

Liste der Energiespeicher:

http://www.nrel.gov/csp/troughnet/thermal_energy_storage.html

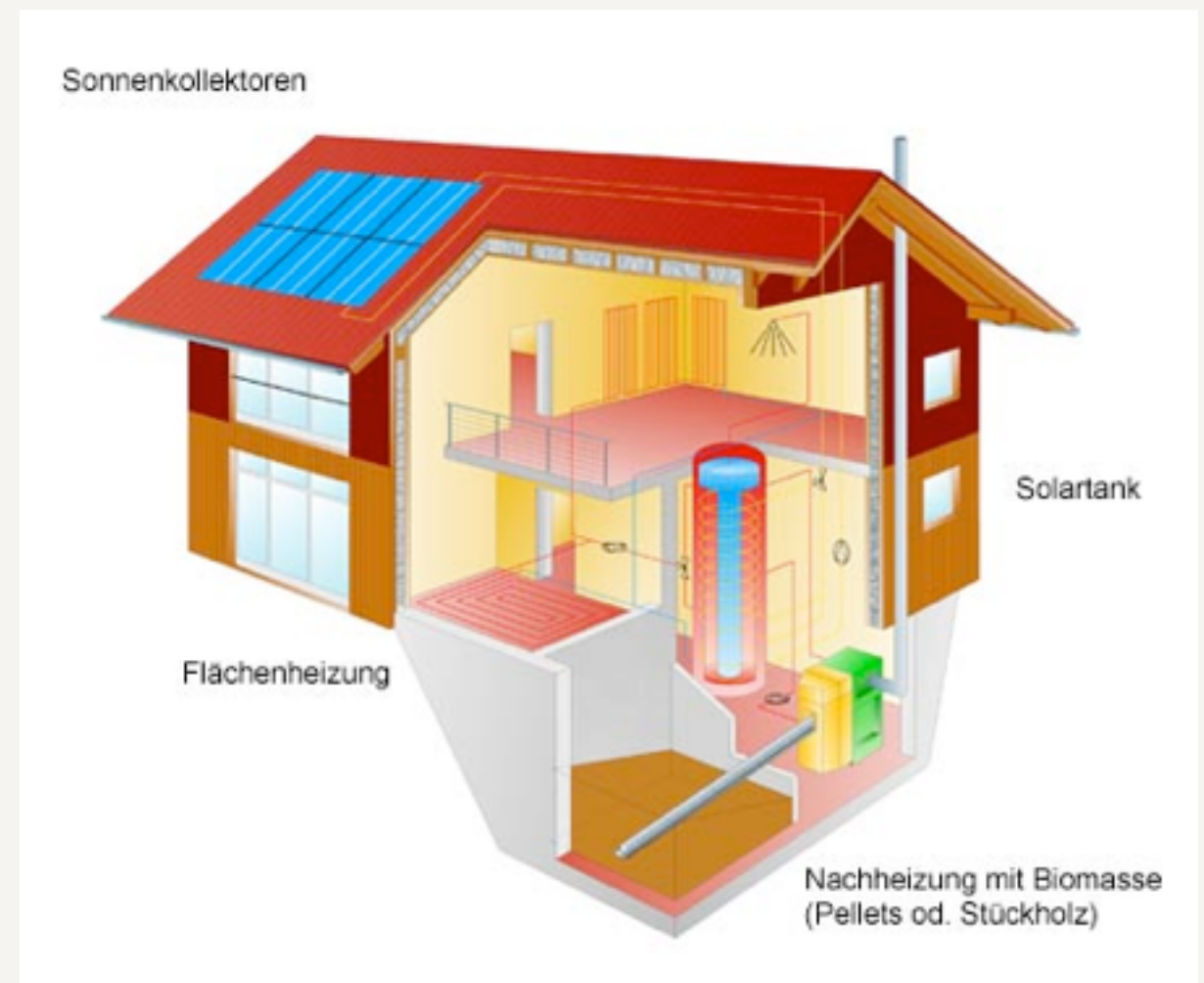
Liste der Solarkraftwerke:

http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/by_project.cfm

Hausbetrieb

Hausbetrieb

- Pufferspeicher für Brenner
 - Brenner muss seltener angeschaltet werden.
- Kleiner Speicher für Brauchwasser-Unterstützung
- Sonnenhaus - s. Vortrag 07. Mai 2014



<http://www.sonnenhaus-institut.de/baukonzept.html>

Verluste

Verluste

- Die Berechnung von Isolationsverlusten von Wärmespeichern kann beliebig kompliziert werden.
- Statt dessen gibt es ganz heuristisch einen einfachen mathematischen Ansatz der empirisch überprüft (gemessen) wird:
- **Die Wärmeverluste werden proportional zur Temperaturdifferenz innen / außen angenommen.**
- **Der Verlustkoeffizient (Wärmeübergangskoeffizient) wird gemessen.**

$$\frac{dQ}{dt} = -k \cdot A(T - T_U)$$

k Wärmeverlustkoeffizient

A Fläche

Verluste

- Wenn die Änderung proportional zur Größe ist ergibt sich immer eine Exponentialfunktion als zeitlicher Verlauf.
- In anderen Worten: bei der genannten Näherung entladen sich alle Wärmespeicher auf diese Art.
- Die Fläche des Speichers ist bekannt, und der Wärmeübergangskoeffizient wird vermessen.
- Die Temperaturverteilung im Speicher wird homogen angenommen.

$$\frac{dQ}{dt} = -k \cdot A (T - T_U)$$

$$Q = m \cdot c \cdot (T - T_U)$$

$$\frac{dQ}{dt} = -k \cdot A \cdot (T - T_U)$$

$$\stackrel{!}{=} \frac{d}{dt} m \cdot c \cdot (T - T_U)$$

$$\Rightarrow T - T_U = (T - T_U)_{t=0} \cdot e^{-\frac{kA}{mc}t}$$

Verluste

- Die anfängliche Temperaturdifferenz wird mit der Zeit exponentiell kleiner.
- Der Exponent ist proportional zum
 - Wärmeübergangskoeffizient
 - Verhältnis Fläche zur gespeicherten Wärme
- Deswegen muss ein Wärmespeicher
 - gut isoliert sein (kleines k).
 - möglichst viel Wärme mit möglichst wenig Fläche einsperren.
- Daher haben große Speicher geringere Verluste.

$$\begin{aligned} T - T_U &= (T - T_U)_{t=0} \cdot e^{-\frac{kA}{mc}t} \\ &= \Delta T_0 \cdot \exp\left(-\frac{kA}{Q}t\right) \end{aligned}$$

Halbwertszeit:

$$\begin{aligned} t_{1/2} &= \frac{mc}{kA} \cdot \ln 2 \\ &= \frac{Q}{kA} \cdot \ln 2 \end{aligned}$$

Wärmeübergangskoeffizient

- Die Einheiten von k sind $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$
- Im Bauwesen ist dies der U-Wert
- Er beinhaltet den Wärmeübergang von
 - einem Fluid auf
 - ein Material einer Dicke d
 - auf ein weiteres Fluid
- Z.B. Luft-Wand-Luft oder hier Speichermedium-Wand-Luft

Bauteil-Schichten und Dicke [cm]:

Mauerwerk (Beton)	10	cm
Schüttung (Zellulose, Korkschröt)	20	cm
Mauerwerk (Beton)	10	cm
---		cm
---		cm
---		cm

lambda [W/mK]	R [m²K/W]
2.3	0.04
0.04	5
2.3	0.04

Art des Bauteils: Außenwand

Rechnen Zurücksetzen

U-Wert: 0.19 W/m²K

0.17

U-Wert-Berechnung: <http://www.energiesparhaus.at/denkwerkstatt/uwert.htm>

Aufgabe

- Nehmen Sie einen k -Wert von $0.2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ für eine gute Isolierung an.
- Berechnen Sie für folgende Speicher die Verlustleistung, der prozentuale Verlust und die Halbwertszeit:
 - ▶ Valle I
 - ▶ Sonnenhaus (10m³ Wassertank)
 - ▶ Pufferspeicher 300l

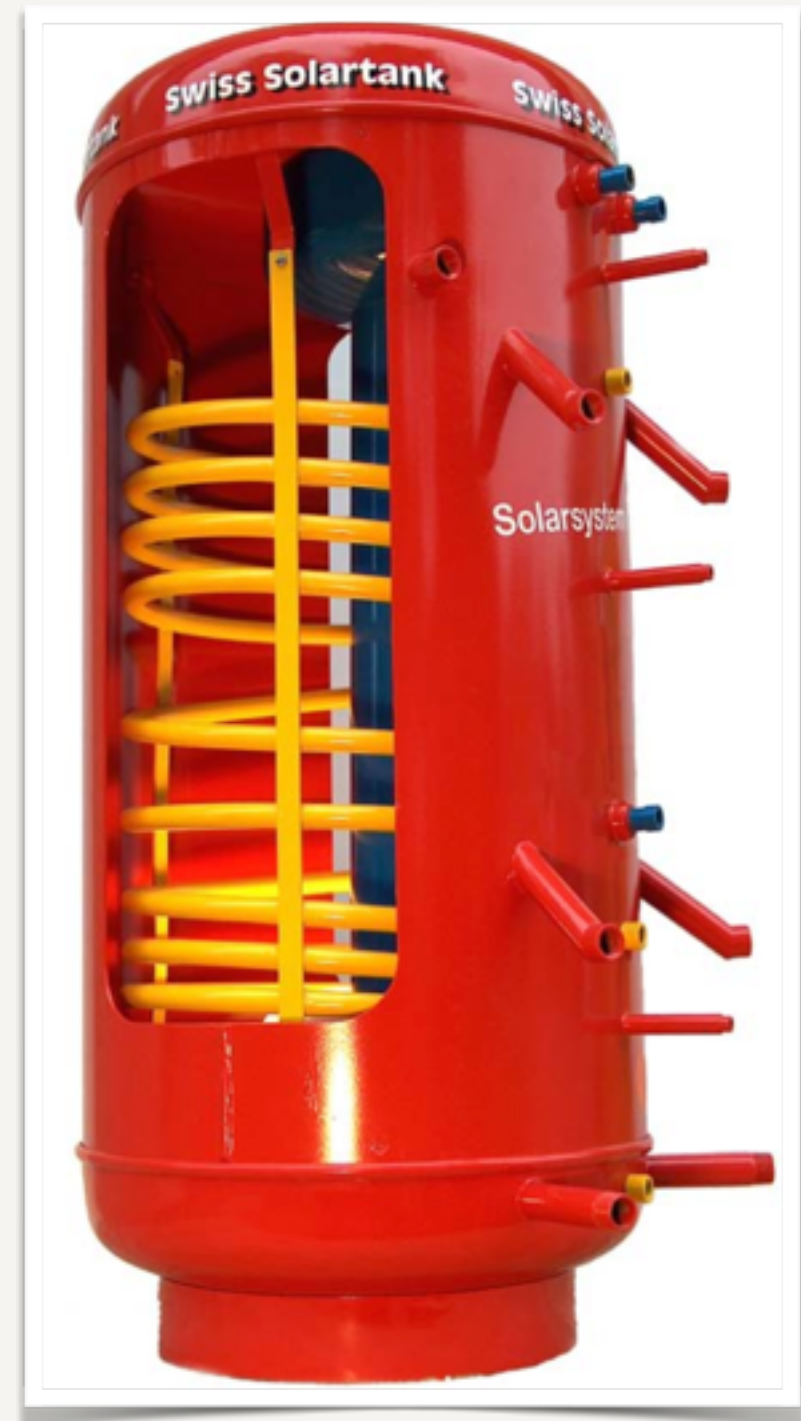
Aufgabe Verluste

	Valle 1	Gemasolar	Sonnenhaus	Pufferspeicher
P (MW)	50	20		
C (h)	7.5	15		
Q (kWh)	375000	300000	600	20
Speichermedium	Nitratsalze	Nitratsalze	Wasser	Wasser
Dichte (kg/m³)	1870	1870	1000	1000
T1 (°C)	265	265	30	30
T2 (°C)	565	565	85	85
ΔT (K)	300	300	55	55
c_p (KJ / (kg K))	1.6	1.6	4.2	4.2
Masse (kg)	2812500	2 250 000	9 351	312
Masse (t)	2813	2 250	9.35	0.31
V (m³)	1 504.01	1 203.21	9.35	0.31
L (m)	11.46	10.64	2.11	0.68
A (m²)	787.62	678.75	26.63	2.76
k (W /m² K)	0.2	0.2	0.2	0.2
dQ/dT (kW)	85.85	73.98	0.35	0.04
Verlust (%)	0.02 %	0.02 %	0.06 %	0.18 %
Halbwertszeit (h)	3 028	2 811	1 201	387
Halbwertszeit (d)	126	117	50	16
Zehntelzeit (h)	5 481	5 089	259	83
Zehntelzeit (d)	228	212	11	3

Kosten

Preis Sonnenhaus-Speicher

- Jenni Energietechnik
- Tank 9400l
- Inkl. allem Zubehör ca. 16000€
- Ca. 600kWh
Speicherkapazität
- Kosten ca. 26.7€ / kWh



Quelle: <http://www.jenni.ch/pdf/Solarspeicher.pdf>

Preis Kraftwerksspeicher

- Ulf Herrmann, Bruce Kelly, Henry Price: „Two-tank molten salt storage for parabolic trough solar power plants“, Energy **29**, 883 (2004) [Link](#)
 - ▶ Bewertung der Kraftwerke SEGS I und Solar Two.
 - ▶ \$30 - 40 / kWh
- K. Nithyanandam, R. Pitchumani: „Cost and performance analysis of concentrating solar power systems with integrated latent thermal energy storage“, Energy **64**, 793-810 (2014) [Link](#)
 - ▶ Theoretische und praktische Betrachtung von Solarturm-Kraftwerken mit und ohne Wärmespeicher
 - ▶ Zwei-Tank-Salzspeicher: \$27 /kWh
- US SunShot Initiative: Ziel \$15 /kWh_{th} Speicherkosten, 95% Effizienz und \$0.06 / kWh_{el}

Aufgabe

- Schätzen Sie die Kosten für die Speicher von Valle I und Gemasolar ab.
- Nehmen Sie an welcher Anteil der Kosten durch das Speichermedium entsteht. Schätzen Sie einen Preis (pro kg) der Salze ab.

Sensible Wärmespeicher

Eigenschaft	Wasser	Salznitrate
Kapazität	4.2 kJ / (kg K)	1.6 kJ / (kg K)
Speicherdichte	1.16 kWh / (m ³ K) 63.8 kWh / m ³ @ $\Delta T = 55K$	0.83 kWh / (m ³ K) 249 kWh / m ³ @ $\Delta T = 300K$
Leistung	n.a. (für Hausbetrieb, einige kW)	n.a. (für 50MW Kraftwerk)
Zeitskala	Tage	Stunden
Wirkungsgrad	fast 100%	fast 100%
Temperaturbereich	30 - 95°C	265 - 565°C
Anzahl Ladezyklen	beliebig	beliebig
Verluste *	Halbwertszeit 3 Tage	Halbwertszeit > 60 Tage
Kosten	€27 / kWh _{th}	\$27 / kWh _{th}

Literatur

1. Stieglitz, Heinzel: Thermische Solarenergie, Springer (2008)
2. U. Sauer et al: Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität, SEFEP (2012). Übersetzung der englischen Originalversion. Siehe www.sefep.eu.
3. Weigand, Köhler, v. Wolfersdorf: Thermodynamik kompakt, Springer-Vieweg (2013)