

Vorlesung : **Energiespeichertechnologien- & Anwendungen**
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

#9 Thermische Energiespeicher Teil a – Grundlagen

#9 Thermal Energy Storage part a – Basics

Vorlesung #9a

| Lecture #9a



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



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



Thermal Energy Storage**Content ⇒ Learning objectives**

- Basic physical storage principles, common temperature ranges and energy densities as well as storage times
⇒ Introduction to the topic of thermal energy storage and its terminology as well as classification in context
- Sensible heat storage, latent heat storage, chemical heat storage
⇒ Basic understanding of the various technologies, how they work and their advantages and disadvantages

Thermische Energiespeicher**Inhalt ⇒ Lernziele**

- Grundsätzliche physikalische Speicherprinzipien, übliche Temperaturbereiche und Energiedichten sowie Speicherdauern
⇒ Heranführung an das Thema thermische Energiespeicher und deren Begrifflichkeit sowie Einsortierung in den Kontext
- Sensible Wärmespeicher, latente Wärmespeicher, Chemische Wärmespeicher
⇒ Grundverständnis für die verschiedenen Technologien, ihre Funktionsweise sowie Vor- und Nachteile

1. Thermal Energy Storage

Overview – e.g. electrolysis–fuel cell

Charge:

The storage fluid (e.g. water) is heated by a heat exchanger (heat source) and the temperature in the storage tank increases

Storage:

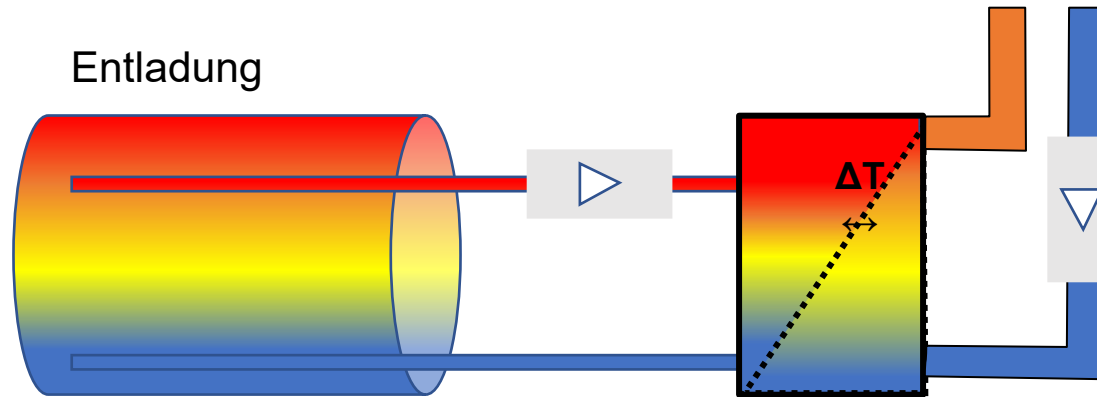
The warm fluid remains in the thermally insulated storage tank

Discharge:

The warm storage fluid releases heat to the consumer with a heat exchanger and cools down itself and thus the storage tank

1. Thermische Energiespeicher

Übersicht – am Beispiel Sensibler Wärmespeicherung



Einspeicherung	Speicherung	Ausspeicherung
Das Speicher-Fluid (z.B. Wasser) wird durch einen Wärmetauscher (Wärmequelle) erwärmt und die Temperatur im Speicherbehälter erhöht sich	Das warme Fluid verbleibt im thermisch isolierten Speicherbehälter	Das warme Speicher-Fluid gibt mittels eines Wärmetauschers die Wärme an den Verbraucher ab und kühlt sich und damit den Speicherbehälter ab

1. Thermal Energy Storage

1.1 Classification according to storage temperature

Temperature according to source temperature or demand temperature

- High-temperature storage (HT-TES): approx. 300-600 °C [solar power plants, compressed air storage power plants, industrial processes, ...]
- Process heat storage (MT-TES): approx. 100 to 250 °C [Steam processes such as pasteurization, district heating, ...]
- Heating heat storage tank (RT-TES): approx. 25-90 °C [solar storage, heating storage, heat pump storage, ...]

1. Thermische Energiespeicher

1.1 Klassifizierung nach Speichertemperatur

Temperatur nach Quell-Temperatur oder Bedarf-Temperatur



1. Thermal Energy Storage

1.1 Classification according to storage temperature

Temperature according to source temperature or demand temperature

- Air conditioning storage: approx. 6-18 °C [climate control systems, component activation, „thermal mass“ €, ...]
- Plus cold storage: approx. 0-8 °C [refrigerated warehouses, refrigerators, ...]
- Freezer storage: approx. -33 to 0 °C [deep-freeze warehouses, ...]

1. Thermische Energiespeicher

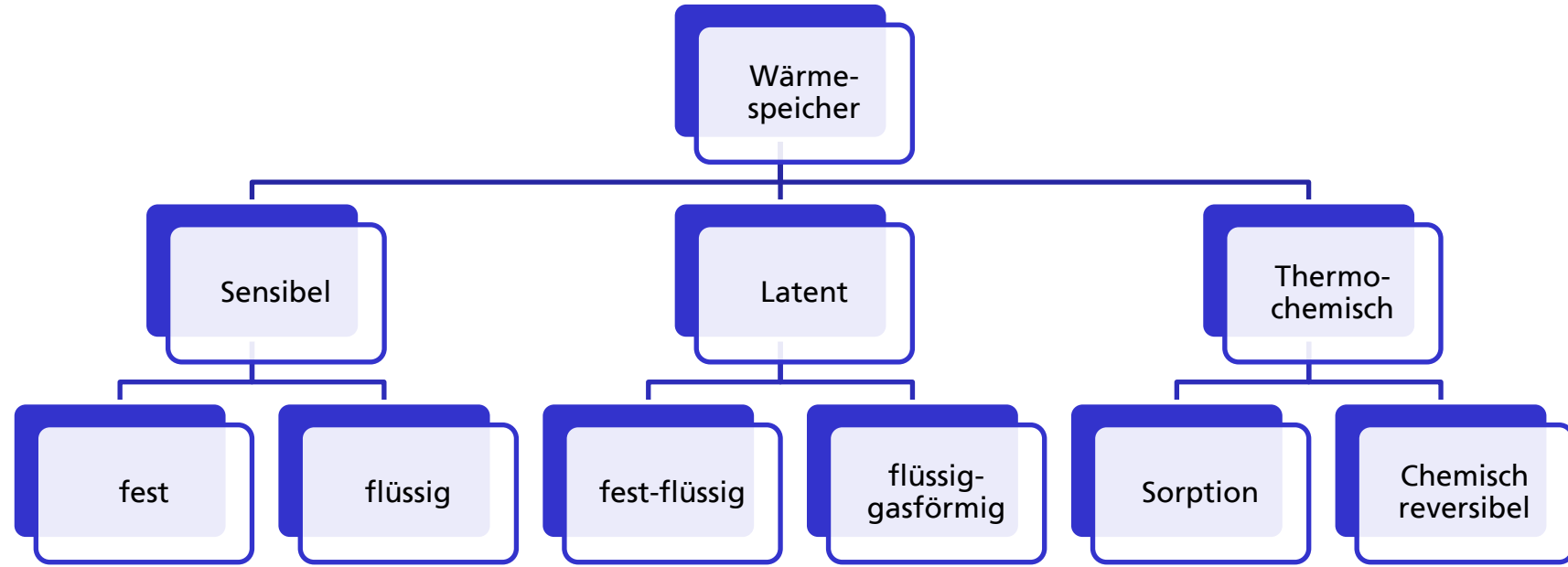
1.1 Klassifizierung nach Speichertemperatur

Temperatur nach Quell-Temperatur oder Bedarf-Temperatur



1. Thermische Energiespeicher

1.1 Klassifizierung nach Speichereffekt



Filament in an electric kettle, Meganbeckett27, CC-BY-SA 3.0†
https://de.wikipedia.org/wiki/Wasserkocher#/media/Datei:Filament_in_an_electric_kettle.JPG

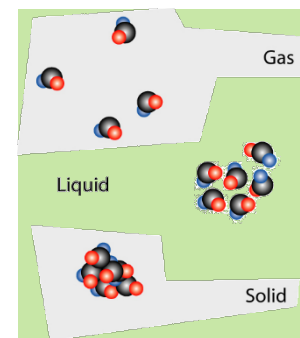
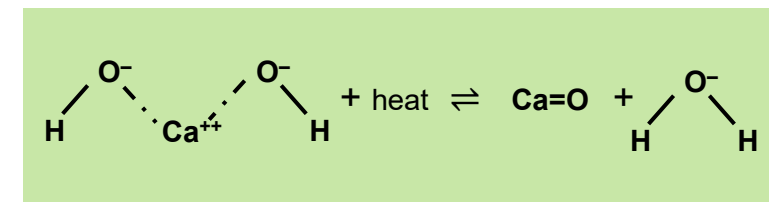


Diagram of particles in solid, liquid, and gas states, Luis Javier Rodriguez Lopez, CC-BY-SA 3.0†
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/45/Solid_liquid_gas.jpg



1. Thermal Energy Storage

1.1 Classification according to physical storage method

Sensible heat storage

- no phase changes
- Storage effect due to temperature increase
- Storage density approx. 25-100 kWh/m³ (depending on ΔT and c_p)

Latent heat storage

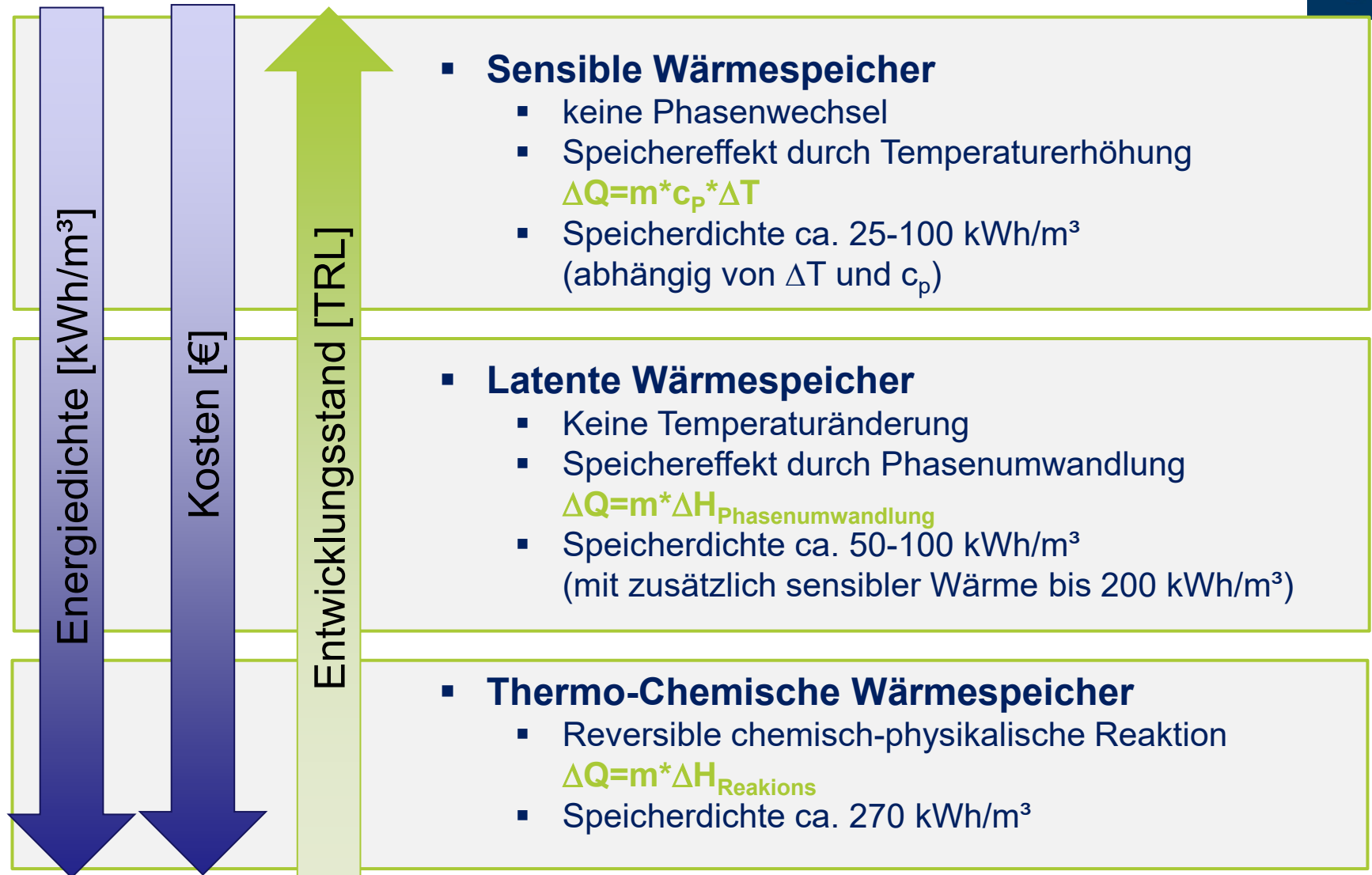
- No temperature change
- Storage effect due to phase transformation
- Storage density approx. 50-100 kWh/m³ (with additional sensible heat up to 200 kWh/m³)

Thermo-Chemical Heat Storage

- Reversible chemical-physical reaction
- Storage density approx. 270 kWh/m³

1. Thermische Energiespeicher

1.1 Klassifizierung nach Speichereffekt



1. Thermal Energy Storage

1.2 Relevant parameters for description

“Name Plate” Parameters

- Necessary storage capacity
- Temperatures for charging and discharging
- Maximum charge and discharge current
- Maximum temperature load
- Maximum pressurization
- ...

Further data

- Heat storage or heat transfer materials used
- Pressure loss at full capacity
- Heat loss at maximum level / Maximum self-discharge
- Dynamics of heat transfer
- Charging and discharging cycles
- ...

Subject details

- Temperature curve in the heat transfer medium at shutdown
- Flow concept and profile through the storage tank
- Aging behavior of the media

1. Thermische Energiespeicher

1.2 Relevante Parameter zur Beschreibung

▪ „Name Plate“ Kenngrößen








- Notwendige Speicherkapazität
- Temperaturen zum Laden und Entladen
- Maximaler Lade- und Entladestrom
- Maximale Temperaturbelastung
- Maximale Druckbeaufschlagung
- ...

▪ Weitere Daten

- Verwendete Wärmespeicher- bzw. Wärmeübertragungsmaterialien
- Druckverlust bei voller Leistung
- Wärmeverlust bei maximalem Füllstand / Maximale Selbstentladung
- Dynamik der Wärmeübertragung
- Lade- und Entladezyklen
- ...

▪ Fachdetails

- Temperaturverlauf im Wärmeträgermedium bei Stillstand
- Strömungskonzept und -profil durch den Speicher
- Alterungsverhalten der Medien

†CC-Lizenzen	Bezeichnung	Version	Link zum Lizenz-/Vertragstext
	CC0 Bedingungslose Lizenz	Vers. 1.0	https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/legalcode
	CC-BY Attribution (Namensnennung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/1.0/legalcode
	CC-BY-SA Attribution Share Alike (Namensnennung-Weitergabe unter gleichen Bedingungen)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/1.0/legalcode
	CC-BY-ND Attribution No Derivatives (Namensnennung-Keine Bearbeitung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/1.0/legalcode
	CC-BY-NC Attribution Non Commercial (Namensnennung-Nicht kommerziell)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/1.0/legalcode
	CC-BY-NC-SA Attribution Non Commercial Share Alike (Namensnennung-Nicht kommerziell-Weitergabe unter gleichen Bedingungen)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/1.0/legalcode
	CC-BY-NC-ND Attribution Non Commercial No Derivatives (Namensnennung-Nicht kommerziell-Keine Bearbeitung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/1.0/legalcode

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

Vorlesung : **Energiespeichertechnologien- & Anwendungen**
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

**#9 Thermische Energiespeicher Teil b –
 Sensible Wärmespeicher**

**#9 Thermal Energy Storage part b –
 Sensible Heat Storage**

Vorlesung #9b | Lecture #9b



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



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



Thermal Energy Storage – Sensible Heat Storage

Content ⇒ Learning objectives

- Calculation of heat quantity; different storage media; structure and operation of stratified storage
⇒ Basic understanding of the structure and the materials used as well as competence for the calculation of heat quantities
- Sensible storage with water for low temperature applications: Stratified storage, intermixed storage, vacuum super-insulation, geothermal probe and earth basin storage.
⇒ Overview as well as characteristics of different storage solutions in the end customer and commercial sector and applications
- Sensitive storage for medium and high temperature applications; properties, application limits as well as advantages/disadvantages of thermal oils, concrete, molten salts, and bricks.
⇒ Overview as well as characteristics of different storage solutions and applications in industrial (special) cases.

Thermische Energiespeicher – Sensible Wärmespeicher

Inhalt ⇒ Lernziele

- Berechnung Wärmemenge; verschiedene Speichermedien; Aufbau und Betrieb von Schichtenspeichern
⇒ Grundverständnis für den Aufbau und die eingesetzten Materialien sowie Kompetenz zur Berechnung von Wärmemengen
- Sensible Speicher mit Wasser für Niedertemperaturanwendungen: Schichtenspeicher, durchmischte Speicher, Vakuum-Superisolation, Erdsonden- und Erdbeckenspeicher
⇒ Übersicht sowie Charakteristika von verschiedenen Speicherlösungen im Endkunden- und Gewerbebereich und Anwendungen
- Sensible Speicher für Mittel- und Hochtemperaturanwendungen; Eigenschaften, Anwendungsgrenzen sowie Vor-/Nachteile von Thermoölen, Beton, Salzschmelzen und Ziegelsteinen
⇒ Übersicht sowie Charakteristika von verschiedenen Speicherlösungen und Anwendungen in industriellen (Spezial)-Fällen

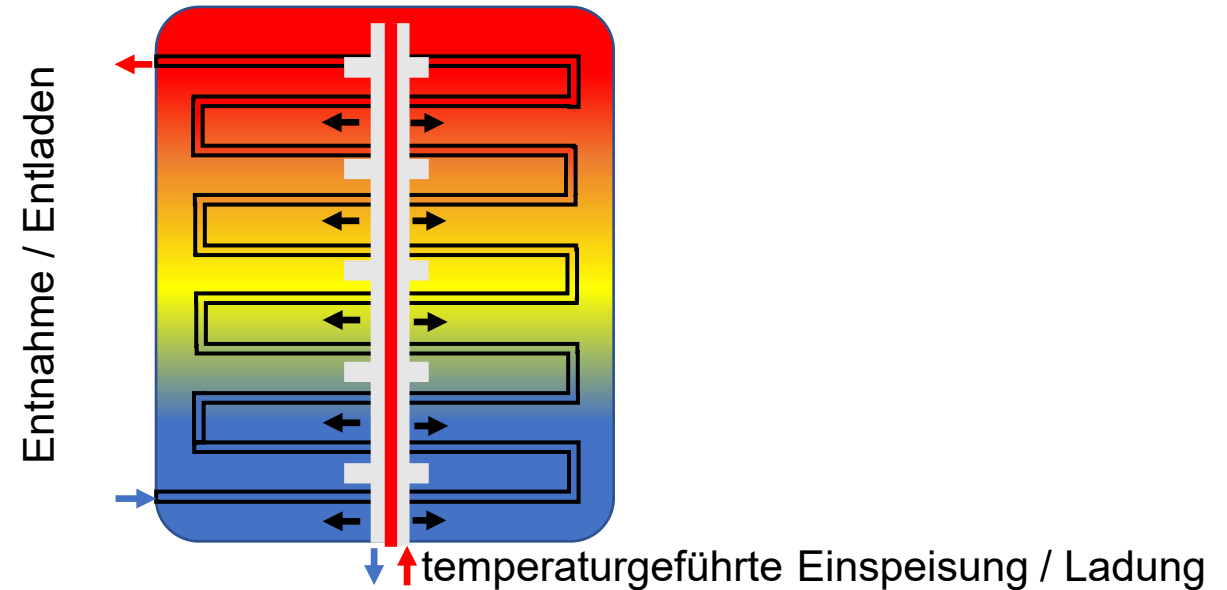
2. Thermal Energy Storage – sensible heat storage – Overview

Charge:
The storage fluid (e.g. water) is heated by a heat exchanger (heat source) and the temperature in the storage tank increases

Storage:
The warm fluid remains in the thermally insulated storage tank

Discharge:
The warm storage fluid releases heat to the consumer with a heat exchanger and cools down itself and thus the storage tank

2. Thermische Energiespeicher – Sensible Wärmespeicher
Übersicht



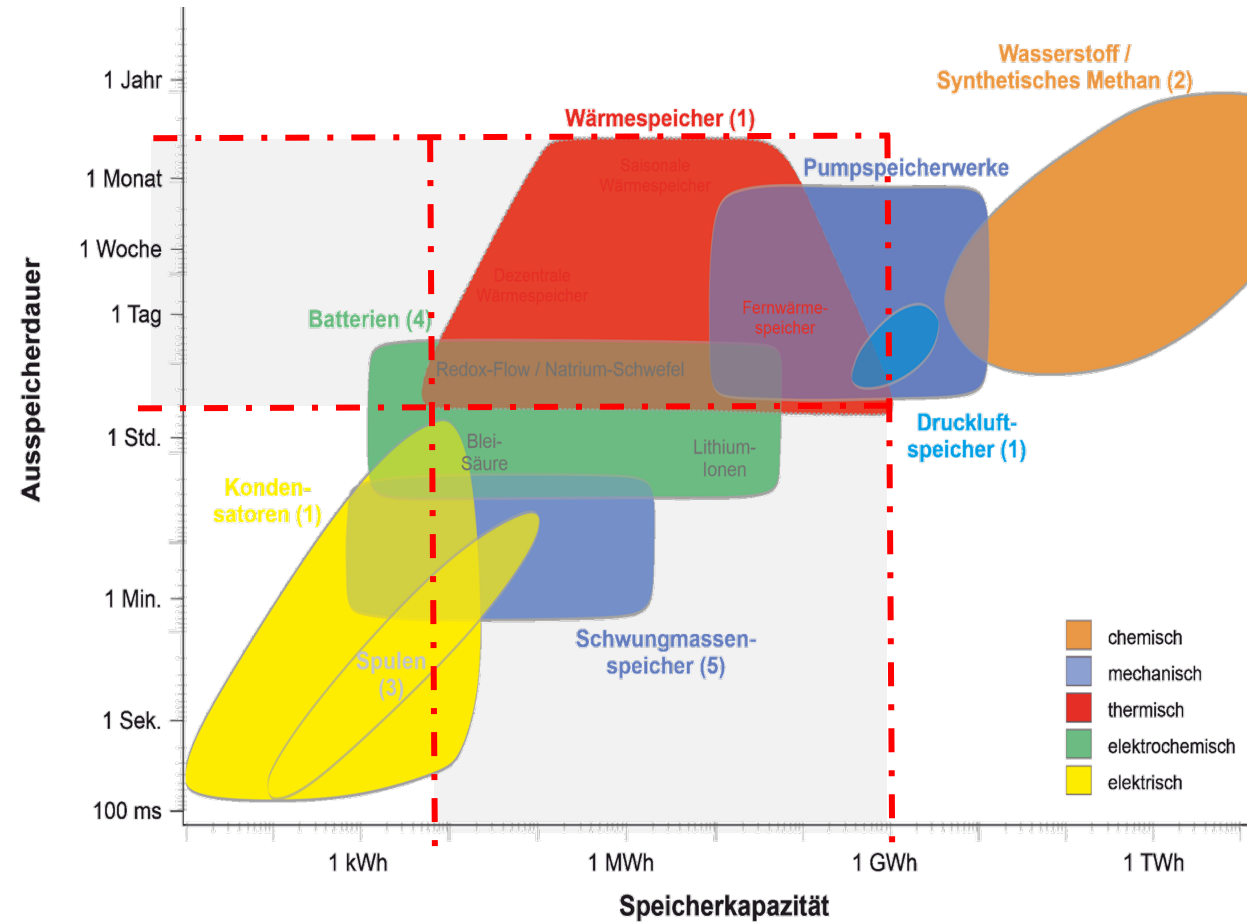
Einspeicherung	Speicherung	Ausspeicherung
Das Speicher-Fluid (z.B. Wasser) wird durch einen Wärmetauscher (Wärmequelle) erwärmt und die Temperatur im Speicherbehälter erhöht sich	Das warme Fluid verbleibt im thermisch isolierten Speicherbehälter	Das warme Speicher-Fluid gibt mittels eines Wärmetauschers die Wärme an den Verbraucher ab und kühlt sich und damit den Speicherbehälter ab

2. Thermal Energy Storage – sensible heat storage

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

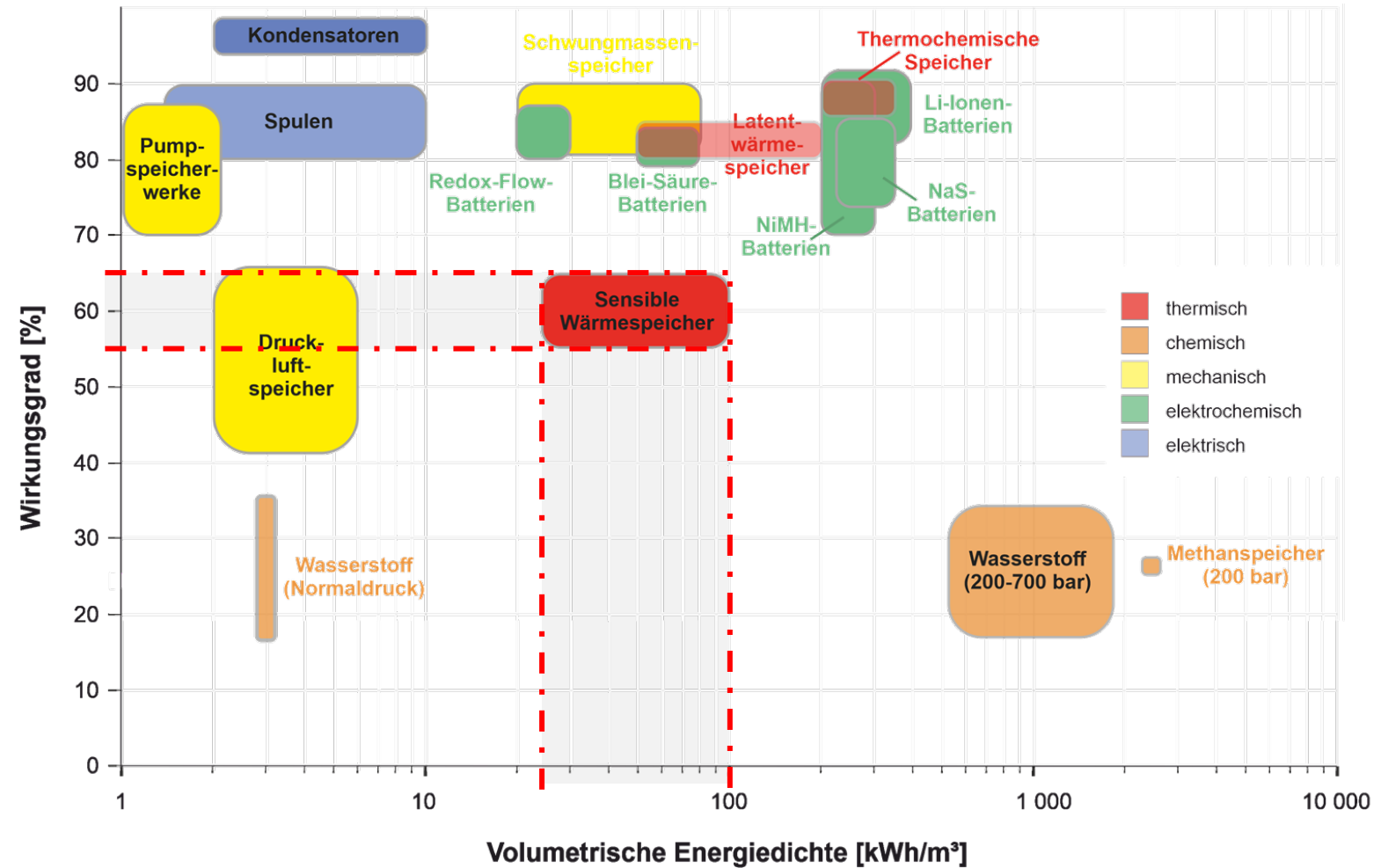
2. Thermische Energiespeicher – Sensible Wärmespeicher
2.1 Klassifizierung hinsichtlich Ausspeicherzeit und Speicherkapazität



2. Thermal Energy Storage – sensible heat storage
 2.1 Classification by efficiency and volumetric energy density

2. Thermische Energiespeicher – Sensible Wärmespeicher

2.1 Klassifizierung nach Wirkungsgrad und volumetrischer Energiedichte



2. Thermal Energy Storage – sensible heat storage

2.2 Basics – calculation of heat amount

- The absorbed heat quantity Q is the integral of the heat capacity c_p over the temperature from T_1 to T_2 multiplied by the mass m
- For simplicity, it is assumed that c_p is approximately constant above temperature, thus simplifying the formula
- When charging and discharging, e.g. by using an external heat exchanger, a driving temperature difference is necessary (usually 5 K), which must be taken into account when determining T_1 and T_2 .
- Example: A waste heat source has a temperature of 95°C, then the (liquid) storage medium can reach approx. 90°C when "charging".

2. Thermische Energiespeicher – Sensible Wärmespeicher

2.2 Grundlagen – Berechnung der Wärmemenge

- Die aufgenommene Wärmemenge Q ist das Integral der Wärmekapazität c_p über der Temperatur von T_1 nach T_2 multipliziert mit der Masse m

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} m \cdot c_p dT$$

- Vereinfachend wird angenommen, dass c_p über der Temperatur näherungsweise konstant ist, dadurch vereinfacht sich die Formel zu:

$$Q = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1)$$

Beim Laden und Entladen bspw. mittels eines externen Wärmeübertragers ist eine treibende Temperaturdifferenz notwendig (üblich 5 K), die bei der Bestimmung von T_1 und T_2 zu berücksichtigen sind.

Beispiel:

Eine Abwärmequelle hat eine Temperatur von 95°C, dann kann das (flüssige) Speichermedium ca. 90°C erreichen beim „Laden“.

2. Thermische Energiespeicher – Sensible Wärmespeicher

2.2 Grundlagen - Wärmekapazitäten

Medium	Temperaturbereich [°C]	Wärmekapazität [kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	Dichte [kg·m ⁻³]	Volumetrische Energiedichte [kWh·m ⁻³ ·K ⁻¹]	Gravimetrische Energiedichte [Wh·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	Anwendung
Wasser	0-100 (bei 40 bar bis 250°C)	4,19	1000	1,16	1,16	Heizung, Brauchwarmwasser
Wasser + Ethylenglykol	0-100	3,47	1050	1,01	0,96	Warmwasser mit Frostschutz
Sand, Kies (trocken)	0-800	0,50-0,59	1200-1600	0,17-0,26	0,14-0,16	Erdreichwärmespeicher
Kies-Wasser-Schüttung	0-100	0,85-1,90 (je nach Wasser-Kies-Anteil)	ca. 1300	0,31-0,69	0,24-0,53	Erdreichwärmespeicher
Salzschmelze	150-450	1,5	1200	0,5	0,42	Solarturmkraftwerk
Thermoöl	0-400	1,6-2,1	900-950	0,4-0,55	0,44-0,58	Industrieprozesse
Beton	0-500	1,0	2000	0,56	0,28	Industrieprozesse
Eisen	0-800	0,47	7870	1,03	0,13	Industrieprozesse
Ziegelstein	0-1000	0,84	1600-1800	0,37-0,42	0,23	Industrieprozesse

2. Thermal Energy Storage – sensible heat storage

2.2 Basics - Assessment of the heat storage medium water

Advantages

- Very high heat capacity and volumetric energy density
- available in quantities at low cost
- environmentally friendly, non-toxic, aggressive, flammable, etc.
- easy to transport (pump) and low viscosity
- easy to handle (craftsmen, household) different densities at different temperatures
-> enables stratified storage
- low (!) thermal conductivity (WITHOUT convection)
-> enables stratified storage
- good heat exchange using plate heat exchangers possible
- as service water can be stored directly the required product.

Disadvantages

- Leads to corrosion
- can be easily "colonized" biologically

2. Thermische Energiespeicher – Sensible Wärmespeicher

2.2 Grundlagen – Beurteilung des Wärmespeichermediums Wasser

Vorteile

- Sehr hohe Wärmekapazität und volumetrische Energiedichte
- kostengünstig in Mengen verfügbar
- umweltverträglich, nicht toxisch, aggressiv, brennbar etc.
- leicht zu transportieren (pumpen) und geringe Viskosität
- einfach zu handhaben (Handwerker, Haushalt)
- unterschiedliche Dichten bei verschiedenen Temperaturen -> ermöglicht Schichtenspeicher
- geringe (!) Wärmeleitfähigkeit (OHNE Konvektion) -> ermöglicht Schichtenspeicher
- Guter Wärmeaustausch mittels Plattenwärmetauschern möglich
- Als Brauchwasser kann direkt das benötigte Produkt gespeichert werden.

Nachteile

- führt zu Korrosion
- kann leicht biologisch „besiedelt“ werden

2. Thermal Energy Storage – sensible heat storage

2.3 Hot water stratified storage

Differences- similarities: fully mixed storage and stratified storage

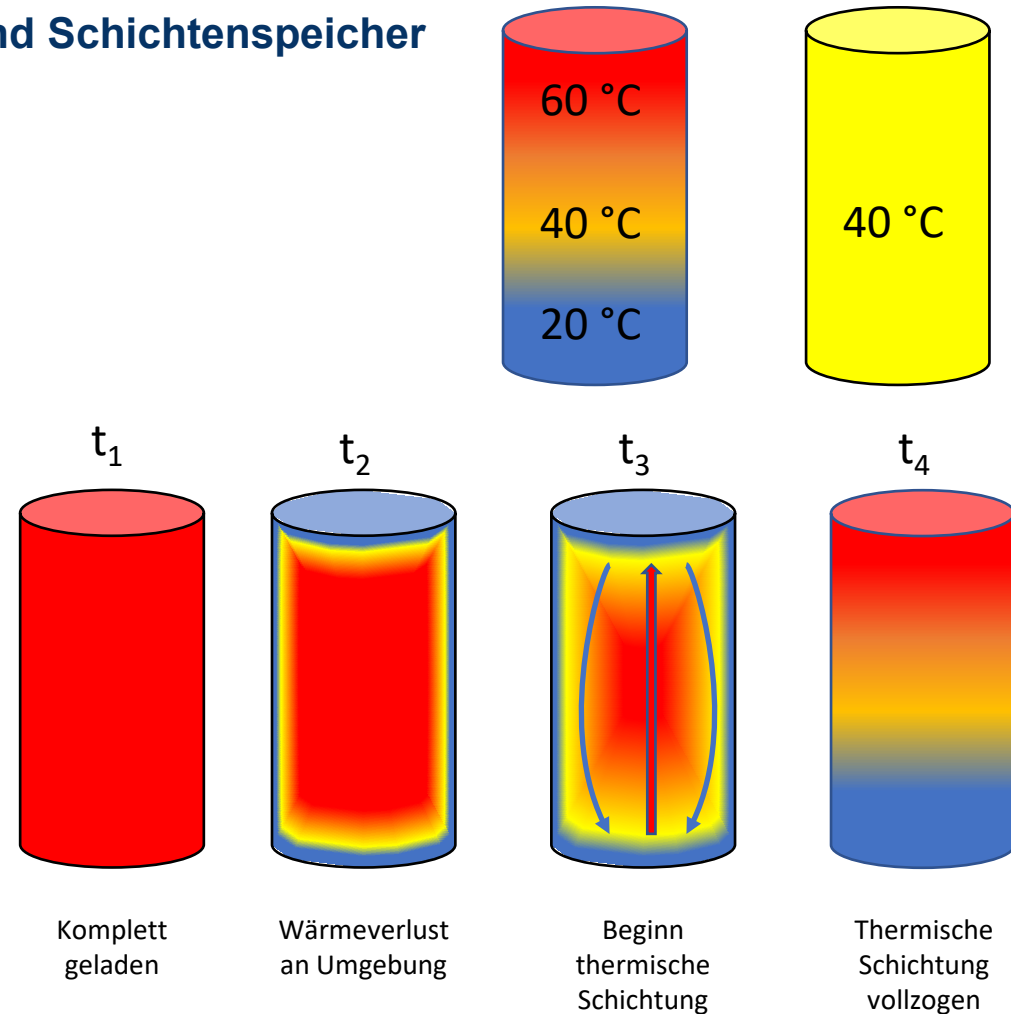
- Same amount of energy !
- Higher exergy in stratified storage
- Dormant storage tank intrinsically becomes stratified storage tank (reason: density of warm water is lower than of cold water ($>4^{\circ}\text{C}$))

2. Thermische Energiespeicher – Sensible Wärmespeicher

2.3 Heißwasser-Schichtenspeicher

Unterschiede-Gemeinsamkeiten: voll durchmischter Speicher und Schichtenspeicher

- Gleiche Energiemenge !
- Höhere Exergie im Schichtenspeicher
- Ruhender Speicher wird intrinsisch zum Schichtenspeicher (Grund: Dichte von warmen Wasser ist geringer als von kaltem ($>4^{\circ}\text{C}$))



2. Thermal Energy Storage – sensible heat storage

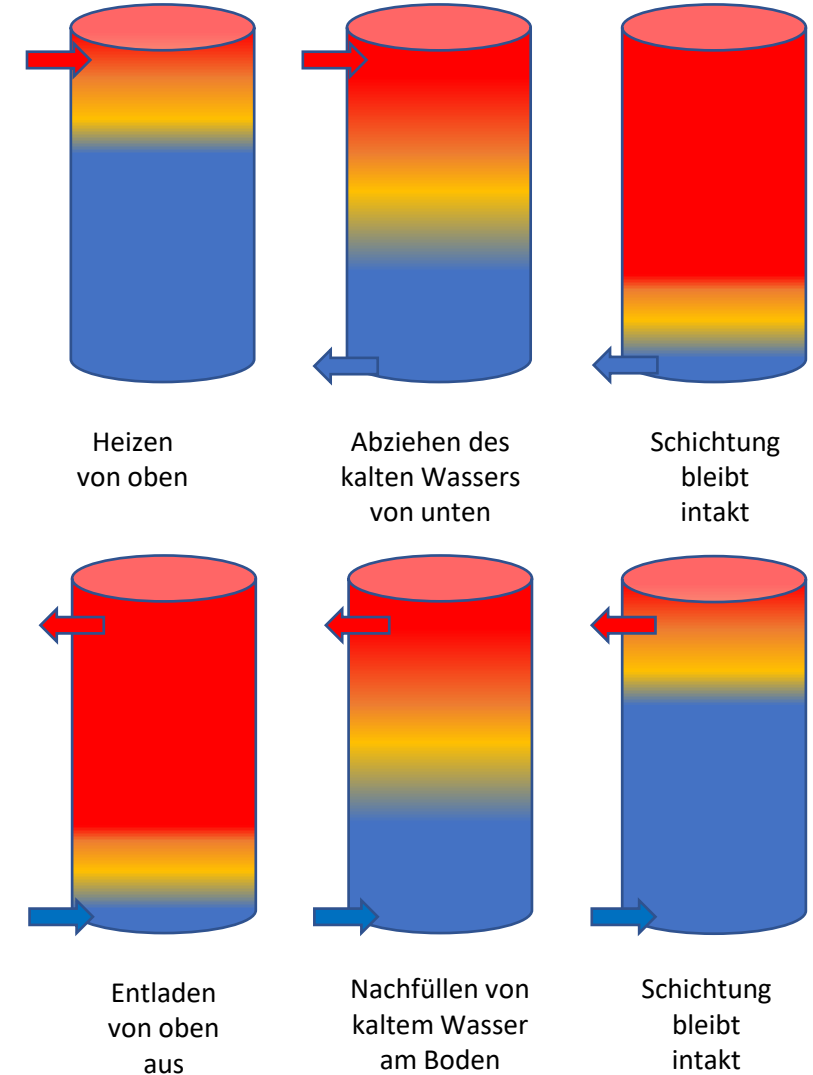
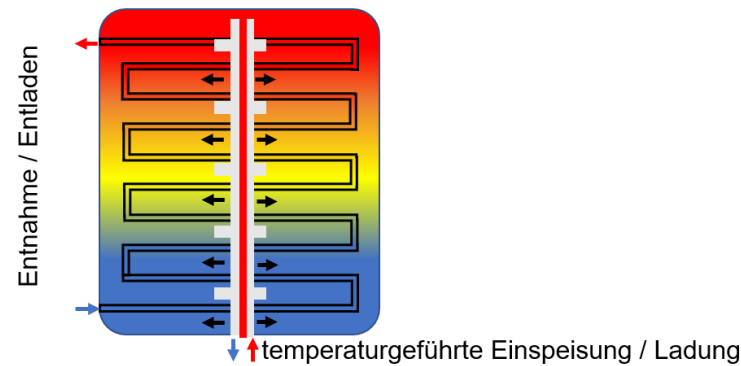
2.3 Hot water stratified storage

- Loading of hot water must be done from above
- Withdrawal of hot water must also be done from above
- Cold water supply and removal always at the bottom
- Inflow and outflow as turbulence-free as possible (little mixing)
- Loading or discharge at medium temperatures, if possible at optimum height

2. Thermische Energiespeicher – Sensible Wärmespeicher

2.3 Heißwasser-Schichtenspeicher – Beladung - Entladung

- Beladung mit heißem Wasser muss von oben erfolgen
- Entnahme von heißem Wasser muss ebenfalls von oben erfolgen
- Kaltwasserzufuhr und -abfuhr immer unten
- Ein- und Ausströmung möglichst turbulenzfrei (wenig Durchmischung)
- Beladung oder Entnahme bei mittleren Temperaturen möglichst auf optimaler Höhe

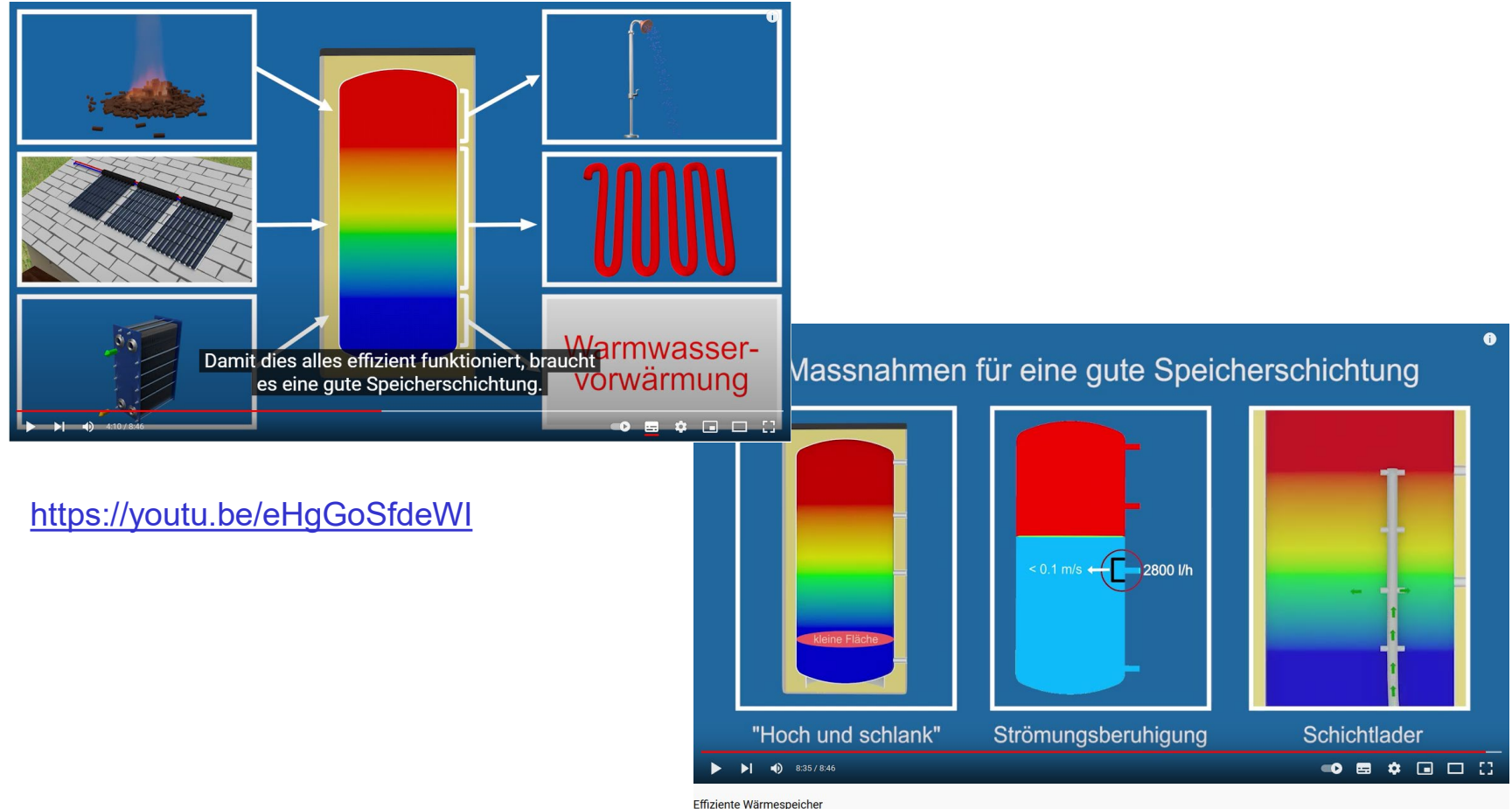


2. Thermal Energy Storage – sensible heat storage
2.3 Hot water stratified storage

Video “Efficient Heat Storage” Use and optimization of stratified storage tanks

2. Thermische Energiespeicher – Sensible Wärmespeicher
2.3 Heißwasser-Schichtenspeicher –

Video: „Effiziente Wärmespeicher“
Einsatz und Optimierung von Schichtenspeichern [0:00 – 8:46] dt. 



Damit dies alles effizient funktioniert, braucht es eine gute Speicherschichtung.

Warmwasser-vorwärmung

Massnahmen für eine gute Speicherschichtung

"Hoch und schlank" Strömungsberuhigung Schichtlader

Effiziente Wärmespeicher

<https://youtu.be/eHgGoSfdeWI>

2. Thermal Energy Storage – sensible heat storage

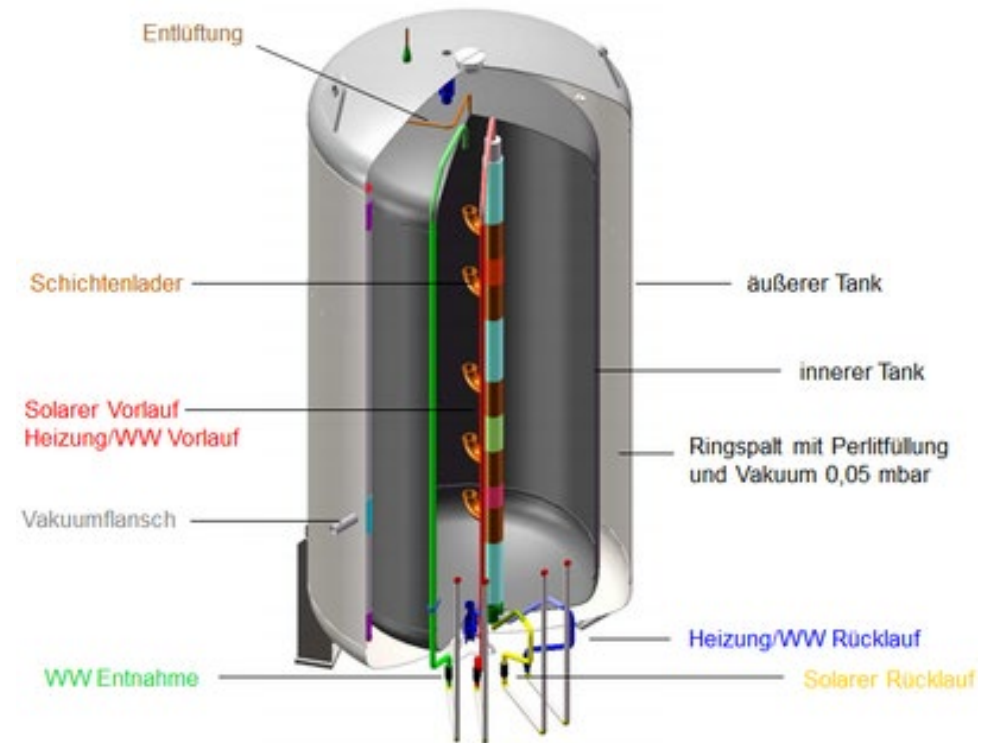
2.3 Hot water stratified storage – with vacuum super insulation

- 5-10 times better insulating effect than conventional insulating materials.
- Functional principle similar to a thermos flask
- Double-walled evacuated container suppresses gas heat transport
- However, heat loss due to IR radiation from hot to cold container wall (increase with growing temperature)
- Insertion of a microporous powder suppresses heat radiation losses with minimal solid state heat conduction
- Low-cost evacuation into fine vacuum (< 1 mbar) is sufficient

2. Thermische Energiespeicher – Sensible Wärmespeicher

2.3 Heißwasser-Schichtenspeicher – mit Vakuumsuperisolation

- 5-10 Fach besserer Dämmwirkung als konventionelle Dämmstoffe.
- Funktionsprinzip ähnlich einer Thermoskanne
- Doppelwandiger evakuierter Behälter unterdrückt den Gaswärmehtransport
- Jedoch Wärmeverlust durch IR-Strahlung von heißer zu kalter Behälterwand (Anstieg mit wachsender Temperatur)
- Einbringen eines mikroporösen Pulvers unterbindet Wärmestrahlungsverluste bei minimaler Festkörperwärmeleitung
- kostengünstige Evakuierung ins Feinvakuum (< 1 mbar) reicht aus.



Quelle: ZAE Bayern, Andreas Hauer

2. Thermal Energy Storage – sensible heat storage

2.3 Hot water stratified storage – with vacuum super insulation

Microporous powder

- non-toxic volcanic rock
- stable up to 800°C
- porous, pore size 5µm
- density 50-100 kg/m³
- price 50 €/m³

2. Thermische Energiespeicher – Sensible Wärmespeicher

2.3 Heißwasser-Schichtenspeicher – mit Vakuumsuperisolation

Mikroporöse Pulver

- ungiftiges Vulkangestein
- bis 800°C stabil
- porös, Porengröße 5 µm
- Dichte 50-100 kg/m³
- Preis 50 €/m³



Quelle: ZAE Bayern, Andreas Hauer

2. Thermal Energy Storage – sensible heat storage

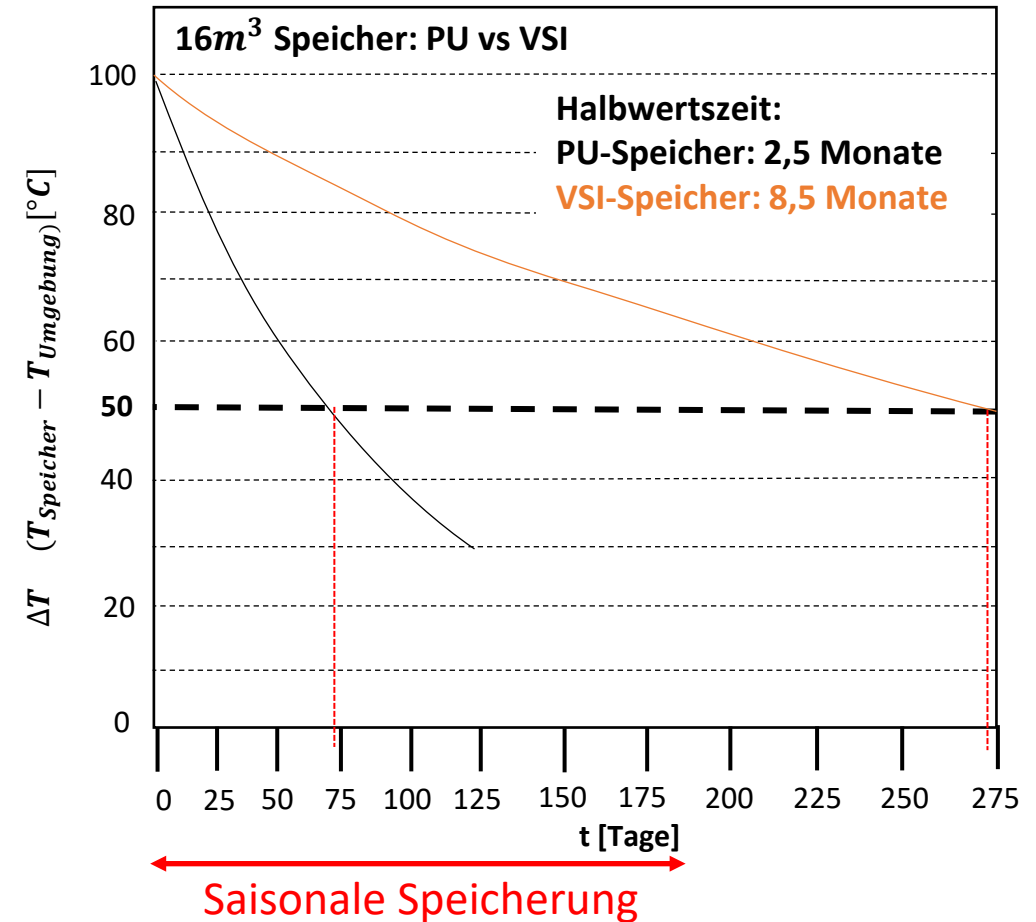
2.3 Hot water stratified storage – with vacuum super insulation

- Heat conductivity factor 10 lower than with PU foam (mineral wool is even worse)
- Example calculation results in a 3-4 times "half-life", i.e. temperature reduction to half takes 3-4 times as long as with conventional insulation with PU foam.

2. Thermische Energiespeicher – Sensible Wärmespeicher

2.3 Heißwasser-Schichtenspeicher – mit Vakuumsuperisolation

- Wärmeleitfähigkeit Faktor 10 geringer als mit PU-Schaum (Mineralwolle ist noch schlechter)
- Beispielrechnung ergibt eine 3-4 fache „Halbwertszeit“, d.h. Temperaturabsenkung auf die Hälfte dauert 3-4 mal so lange wie bei konventioneller Dämmung mit PU-Schaum



Daten von: ZAE Bayern

2. Thermal Energy Storage – sensible heat storage

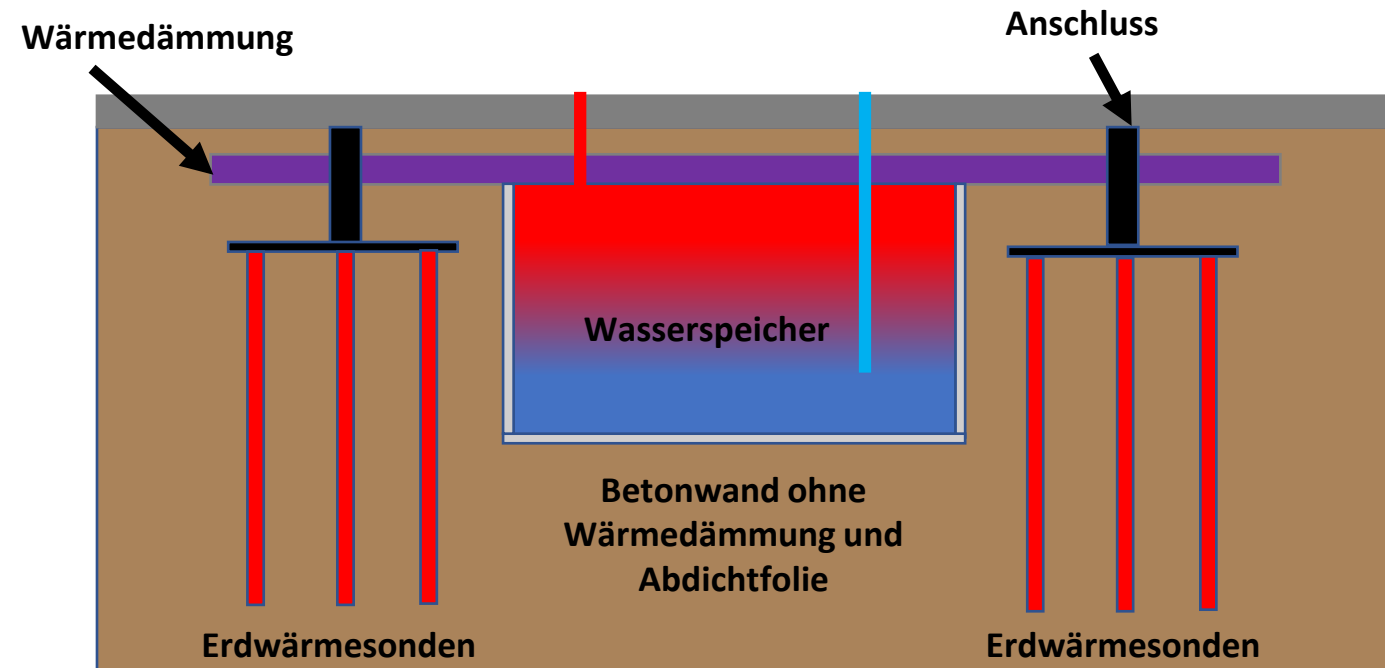
2.4 Seasonal large hot water tank – principle

- Combination water storage / geothermal probe storage tank
- Seasonal heat storage in the ground
- Earth reservoir as buffer storage
- Losses of the water storage go into the ground

2. Thermische Energiespeicher – Sensible Wärmespeicher

2.4 Saisonale Groß-Warmwasserspeicher - Prinzip

- Kombination Wasserspeicher/ Erdwärmesonden-speicher
- Saisonale Wärmespeicherung im Erdreich
- Erdbeckenspeicher als Pufferspeicher
- Verluste des Wasserspeichers gehen ins Erdreich



2. Thermal Energy Storage – sensible heat storage

2.4 Seasonal large hot water tanks – examples

Example "Solar Local Heating Munich"

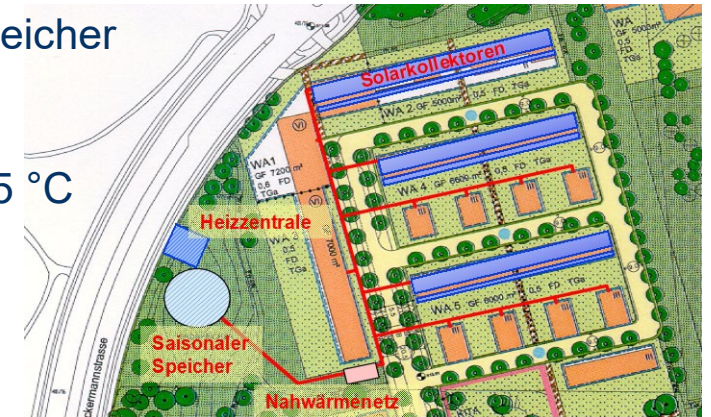
- 13 buildings, 320 apartments
- 30,400 m² (floor area)
- 2,900 m² collectors
- District heating driven absorption heat pump (AWP)
- Water storage
- 6,000 m³
- 10 °C - 95 °C

2. Thermische Energiespeicher – Sensible Wärmespeicher

2.4 Saisonale Groß-Warmwasserspeicher - Beispiele

Beispiel „Solare Nahwärme München“

- 13 Gebäude, 320 Wohnungen
- 30.400 m² (Geschossfläche)
- 2.900 m² Kollektoren
- Fernwärme angetriebene Absorptionswärmepumpe (AWP)
- Wasserspeicher
- 6.000 m³
- 10 °C – 95 °C



Quelle: ZAE Bayer, Andreas Hauer

2. Thermal Energy Storage – sensible heat storage

2.5 Heat transfer oils as medium temperature accumulators

Thermal oils are usually used for heating industrial plants or for heat extraction. They can also be used as a heat storage medium.

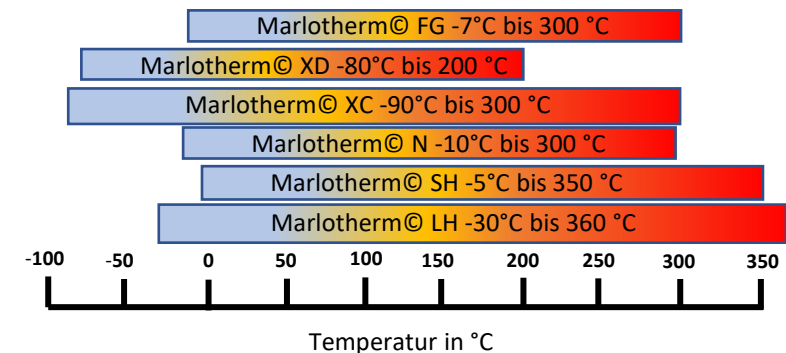
- **Mineral oil-based heat transfer oils** are obtained from petroleum. They are relatively inexpensive, but are usually flammable and chemically aggressive towards many sealing materials. After thermal stress, low-boiling decomposition products can form which lower the flash point of the oil.
- **Synthetic oils** based on aromatic hydrocarbons have a particularly high thermal stability due to their molecular structure and are used for applications up to 400 degrees. Their viscosity is significantly lower, which means that less pumping work is required. The price is approx. a factor of 4 higher than that of mineral oils.
- Example: Marlotherm SH is a high-boiling, synthetic heat transfer fluid based on dibenzyl toluenes. In continuous operation up to 350 °C.

2. Thermische Energiespeicher – Sensible Wärmespeicher

2.5 Wärmeträgeröle als Mitteltemperaturspeicher

Thermalöle dienen üblicherweise zur Beheizung von industriellen Anlagen bzw. zur Wärmeauskopplung. Sie können auch als Wärmespeichermedium eingesetzt werden.

- **Wärmeträgeröle auf Mineralölbasis** werden aus Erdöl gewonnen. Sie sind relativ preisgünstig, jedoch üblicherweise brennbar und chemisch aggressiv gegenüber vielen Dichtungsmaterialien. Nach thermischer Belastung können sich leichtsiedende Zersetzungsprodukte bilden, die den Flammpunkt des Öles senken.
- **Synthetische Öle** auf Basis aromatischer Kohlenwasserstoffe haben aufgrund ihrer Molekülstruktur eine besonders hohe thermische Stabilität und werden für Anwendungen bis 400 Grad eingesetzt. Ihre Viskosität ist deutlich geringer wodurch weniger Pumparbeit zu leisten ist. Der Preis ist ca. um den Faktor 4 höher als der von Mineralölen
- Beispiel: Marlotherm SH ist eine hochsiedende, synthetische Wärmeträgerflüssigkeit auf der Basis von Dibenzyltoluolen. Im Dauerbetrieb bis zu 350 °C.



2. Thermal Energy Storage – sensible heat storage

2.6 Concrete as a high-temperature heat storage

- 100 kW, 400 kWh
- Cyclic operation between 300°C and 400°C
- Concrete must be permeable to water vapor, since physically and chemically bound water leaks out during the initial heating process
- All aggregates (sand, gravel, etc.) must be regional, low-cost materials, therefore no special mixes

2. Thermische Energiespeicher – Sensible Wärmespeicher

2.6 Beton als Hochtemperatur-Wärmespeicher

- 100 kW, 400 kWh
- Zyklischer Betrieb zwischen 300°C und 400°C
- Beton muss Wasserdampfdurchlässig sein, da beim ersten Aufheizen physikalisch und chemisch gebundenes Wasser austritt
- Alle Zuschlagstoffe (Sand, Kies etc.) müssen regionale, kostengünstige Stoffe sein, daher keine Spezialmischungen



Betonspeicher - Pilotanlage in Kooperation mit der Firma Züblin beim DLR in Stuttgart. Bild: DLR. Bild

Quelle: <http://archiv.aktuelle-wochenschau.de/2010/w23/woche23.html/>

2. Thermal Energy Storage – sensible heat storage

2.7 Molten salts as high-temperature heat storage

- Highly corrosive
- Low heat conduction due to practically no convection (thermal conductivities with 0.5 W/(mK) otherwise similar to aqueous systems).
- Minimum temperature (melting temperature) must be maintained at all times - NO use of enthalpy of fusion !
- Sodium nitrate (307°C) or potassium nitrate (333°C)
- Alternatively (222°C) eutectic mixture of sodium nitrate + potassium nitrate

2. Thermische Energiespeicher – Sensible Wärmespeicher

2.7 Salzschnmelzen als Hochtemperatur-Wärmespeicher

- Hoch korrosiv
- geringe Wärmeleitung durch praktisch fehlende Konvektion (Wärmeleitfähigkeiten mit 0,5 W/(mK) ansonsten ähnlich zu wässrigen Systemen).
- Mindesttemperatur (Schmelztemperatur) muss jederzeit aufrecht erhalten werden – KEINE Nutzung der Schmelzenthalpie !
- Natriumnitrat (307°C) oder Kaliumnitrat (333°C)
- Alternativ (222°C) Eutektische Mischung von Natriumnitrat + Kaliumnitrat



Abb.1 Mit den 14 Tonnen Natriumnitratsalz dieses weltgrößten Latentwärmespeichers lassen sich 700 kWh thermischer Energie bei 300°C speichern. Der Speicher wurde in ein Dampfkraftwerk im spanischen Carboneras integriert und absolvierte dort erfolgreich hundert Zyklen. Solche Konzepte eignen sich besonders für solarthermische Kraftwerke mit Direktverdampfung.

Quelle: <http://archiv.aktuelle-wochenschau.de/2010/w23/woche23.html/>

2. Thermal Energy Storage – sensible heat storage

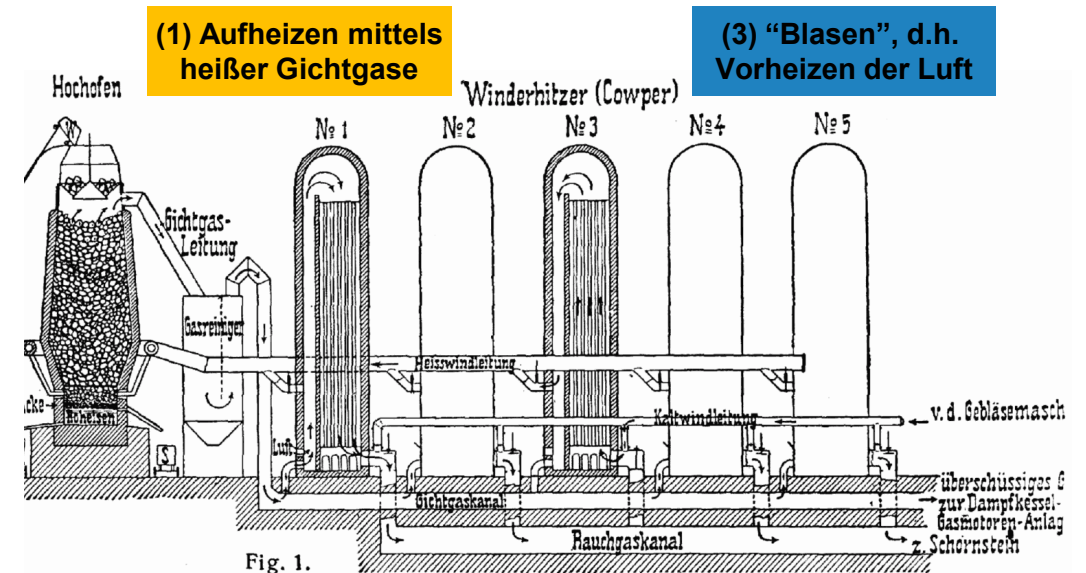
2.8 Hot-blast stoves as a high-temperature heat storage

- Batch operation at up to 1350°C
- Lined with fireclay bricks
- Heat transfer (!) from hot blast furnace gas to fresh air
- Rather a **heat exchanger** than a heat storage!

2. Thermische Energiespeicher – Sensible Wärmespeicher
2.8 Winderhitzer als Hochtemperatur-Wärmespeicher



- Batchbetrieb bei bis 1350°C
- Mit Schamott-Steinen ausgemauert
- Wärmeübertragung (!) vom heißen Gichtgas auf Frischluft
- Eher ein **Wärmeübertrager** als Wärmespeicher !



Landschaftspark Duisburg-Nord, DerHexer, CC-BY-SA 3.0† [https://de.wikipedia.org/wiki/Winderhitzer#/media/Datei:Cowper-Winderhitzer_Landschaftspark_Duisburg-Nord_\(DerHexer\).jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Winderhitzer#/media/Datei:Cowper-Winderhitzer_Landschaftspark_Duisburg-Nord_(DerHexer).jpg)

Fünf Winderhitzer in einer Reihe, Kolossos, Public Domain† <https://de.wikipedia.org/wiki/Winderhitzer#/media/Datei:L-Roheisenherstellung.png>

2. Thermal Energy Storage – sensible heat storage








2.9 Summary

1. Heat storage can store sensible, latent and/or thermochemical energy; their range of application is from cold to heating to process heat to high-temperature heat.
2. Sensitive heat storage is the most advanced technology.
3. As a rule, it is cost-effective, but has rather little potential for cost reduction
4. Water is the most commonly used storage medium up to 100°C (unpressurised) or up to approx. 200°C (16 bar) or 250°C (40 bar).
5. The self-adjusting temperature stratification can be used specifically to provide higher temperatures than would be possible in the mixed state.
6. Insulation of the storage is significant for self-discharge (e.g. vacuum super insulation)
7. For medium temperatures, heat transfer oils can be used. Up to 300°C mineral oils, up to 400°C synthetic oils.
8. For high temperatures concrete, sand or molten salt can be used ($300\text{-}500^{\circ}\text{C}$ or even higher).
9. Heat conduction is low for most heat media. For low-viscosity fluids, heat conduction increases due to free/forced convection.

2. Thermische Energiespeicher – Sensible Wärmespeicher

2.9 Kurzzusammenfassung / „Take aways“

1. Wärmespeicher können sensible, latente und/oder thermochemische Energie speichern; ihr Einsatzbereich ist von Kälte über Heizung zu Prozesswärme hin zu Hochtemperaturwärme.
2. Sensible Wärmespeicher sind die am weitesten entwickelte Technologie
3. Sie ist im Regelfall kostengünstig, birgt aber eher geringe Kostensenkungspotenziale
4. Wasser ist bis 100°C (drucklos) bzw. bis ca. 200°C (16 bar) bzw. 250°C (40 bar) das am meisten eingesetzte Speichermedium
5. Die sich selbst einstellende Temperaturschichtung kann gezielt genutzt werden um höhere Temperaturen bereitzustellen als im durchmischten Zustand möglich wäre
6. Dämmung des Speichers ist für die Selbstentladung entscheidend (u.a. Vakuumsuperisolation)
7. Für mittlere Temperaturen können Wärmeträgeröle eingesetzt werden. Bis 300°C Mineralöle, bis 400°C synthetische Öle.
8. Für hohe Temperaturen können auch Beton, Sand oder Salzschnmelzen genutzt werden ($300\text{-}500^{\circ}\text{C}$ oder auch höher)
9. Die Wärmeleitung ist bei den meisten Wärmemedien gering. Bei niedrig-viskosen Flüssigkeiten erhöht sich die Wärmeleitung durch freie/erzwungene Konvektion

†CC-Lizenzen	Bezeichnung	Version	Link zum Lizenz-/Vertragstext
	CC0 Bedingungslose Lizenz	Vers. 1.0	https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/legalcode
	CC-BY Attribution (Namensnennung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/1.0/legalcode
	CC-BY-SA Attribution Share Alike (Namensnennung-Weitergabe unter gleichen Bedingungen)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/1.0/legalcode
	CC-BY-ND Attribution No Derivatives (Namensnennung-Keine Bearbeitung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/1.0/legalcode
	CC-BY-NC Attribution Non Commercial (Namensnennung-Nicht kommerziell)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/1.0/legalcode
	CC-BY-NC-SA Attribution Non Commercial Share Alike (Namensnennung-Nicht kommerziell-Weitergabe unter gleichen Bedingungen)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/1.0/legalcode
	CC-BY-NC-ND Attribution Non Commercial No Derivatives (Namensnennung-Nicht kommerziell-Keine Bearbeitung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/1.0/legalcode

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

Vorlesung : **Energiespeichertechnologien- & Anwendungen**
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

**#9 Thermische Energiespeicher Teil c –
 Latent-Wärmespeicher**

**#9 Thermal Energy Storage part c –
 Latent Heat Storage**

Vorlesung #9c

| Lecture #9c



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



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



Thermal Energy Storage – Latent Storage

Content ⇒ Learning objectives

- Basic physical storage principles, common temperature ranges and energy densities as well as storage durations
⇒ Introduction to the topic of latent heat energy storage and its terminology as well as sorting it into context
- Latent heat storage in general; phase change solid/liquid and liquid/gas; differences to sensible storage, examples of materials and applications; special case ice slurries; latent storage based on crystallization energy
⇒ Overview of the various technologies, how they work, and advantages and disadvantages.

Thermische Energiespeicher – Latentspeicher

Inhalt ⇒ Lernziele

- Grundsätzliche physikalische Speicherprinzipien, übliche Temperaturbereiche und Energiedichten sowie Speicherdauern
⇒ Heranführung an das Thema Latent-Wärmeenergiespeicher und deren Begrifflichkeit sowie Einsortierung in den Kontext
- Latentwärmespeicher allgemein; Phasenwechsel fest/flüssig und flüssig/gas; Unterschiede zu sensiblen Speichern, Material- und Anwendungsbeispiele; Sonderfall Ice-Slurries; Latentspeicher auf Basis von Kristallisationsenergie
⇒ Übersicht über die verschiedenen Technologien, ihre Funktionsweise sowie Vor- und Nachteile

3. Thermal Energy Storage – Latent Storage

Overview

Charge

Phase conversion to the higher energy form PLUS heating of the storage medium by ΔT

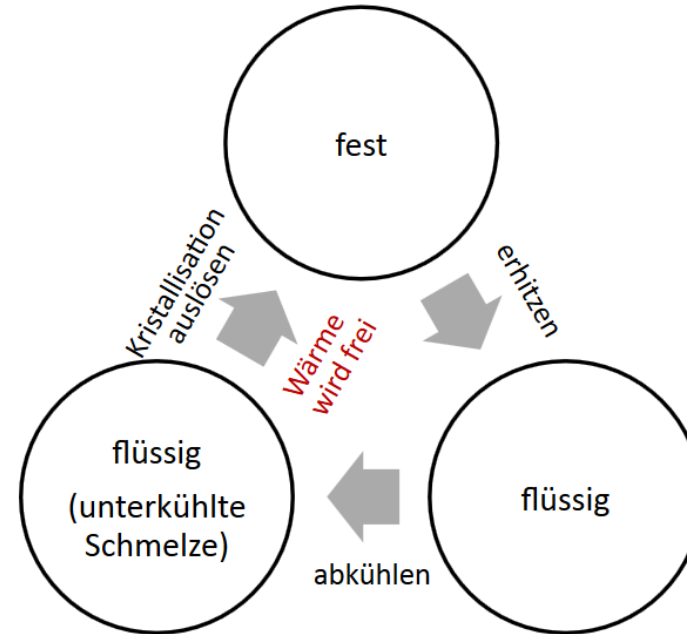
Storage

Storage of the heated and phase-converted medium

Discharge

Phase conversion to the low-energy form PLUS cooling of the storage medium by ΔT

3. Thermische Energiespeicher - Latentspeicher
Übersicht



Einspeicherung	Speicherung	Ausspeicherung
Phasenumwandlung zur höherenergetischen Form PLUS Erwärmung des Speichermediums um ΔT	Speicherung des erwärmten und phasengewandelten Mediums	Phasenumwandlung zur niederenergetischen Form PLUS Abkühlung des Speichermediums um ΔT

ergatzzustandübergänge eines Latentwärmespeichers, Visionimperator, Public Domain† https://de.wikipedia.org/wiki/Latentw%C3%A4rmespeicher#/media/Datei:Zustand%C3%BCberg%C3%A4nge_W%C3%A4rmekissen.svg

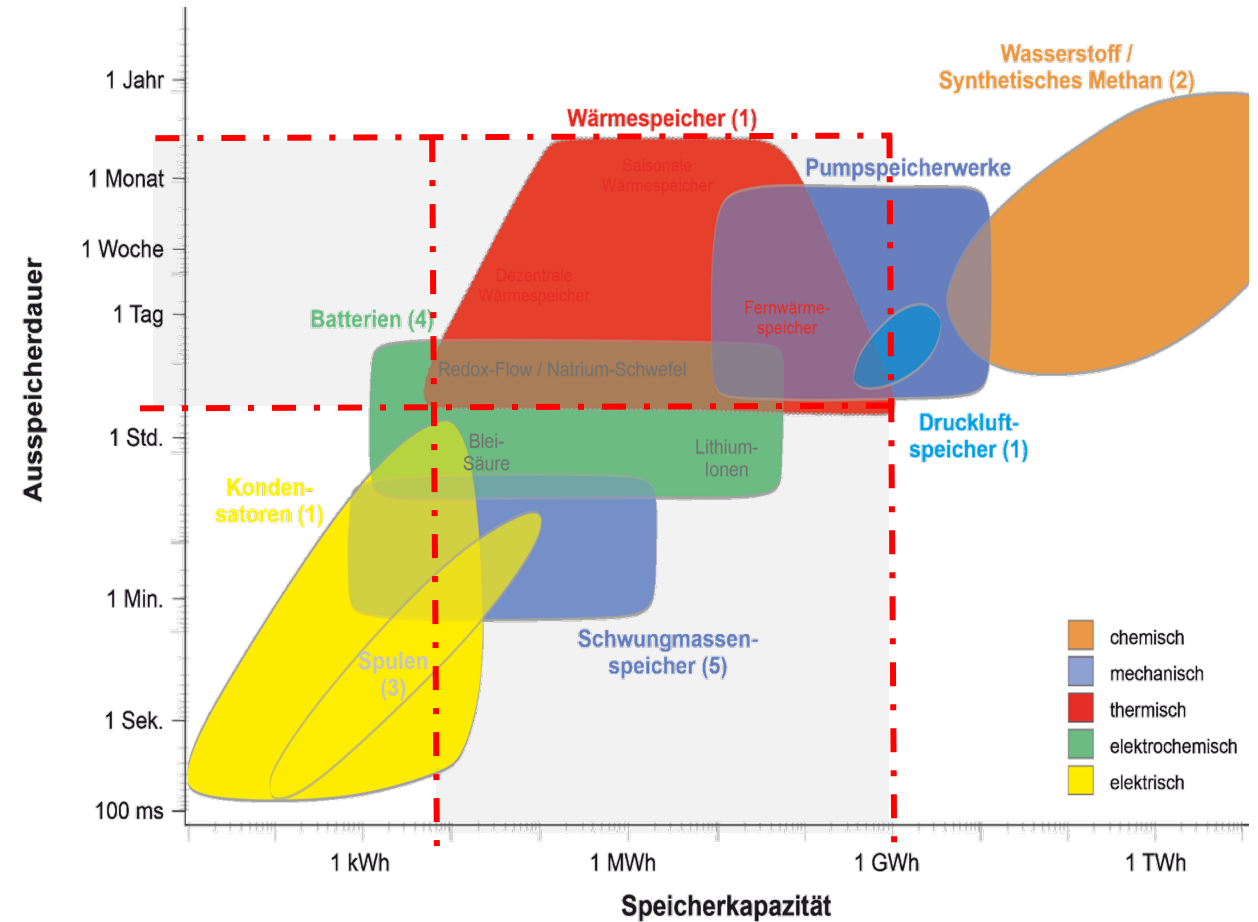
3. Thermal Energy Storage – Latent Storage

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. Thermische Energiespeicher - Latentspeicher

3.1 Klassifizierung hinsichtlich Ausspeicherzeit und Speicherkapazität

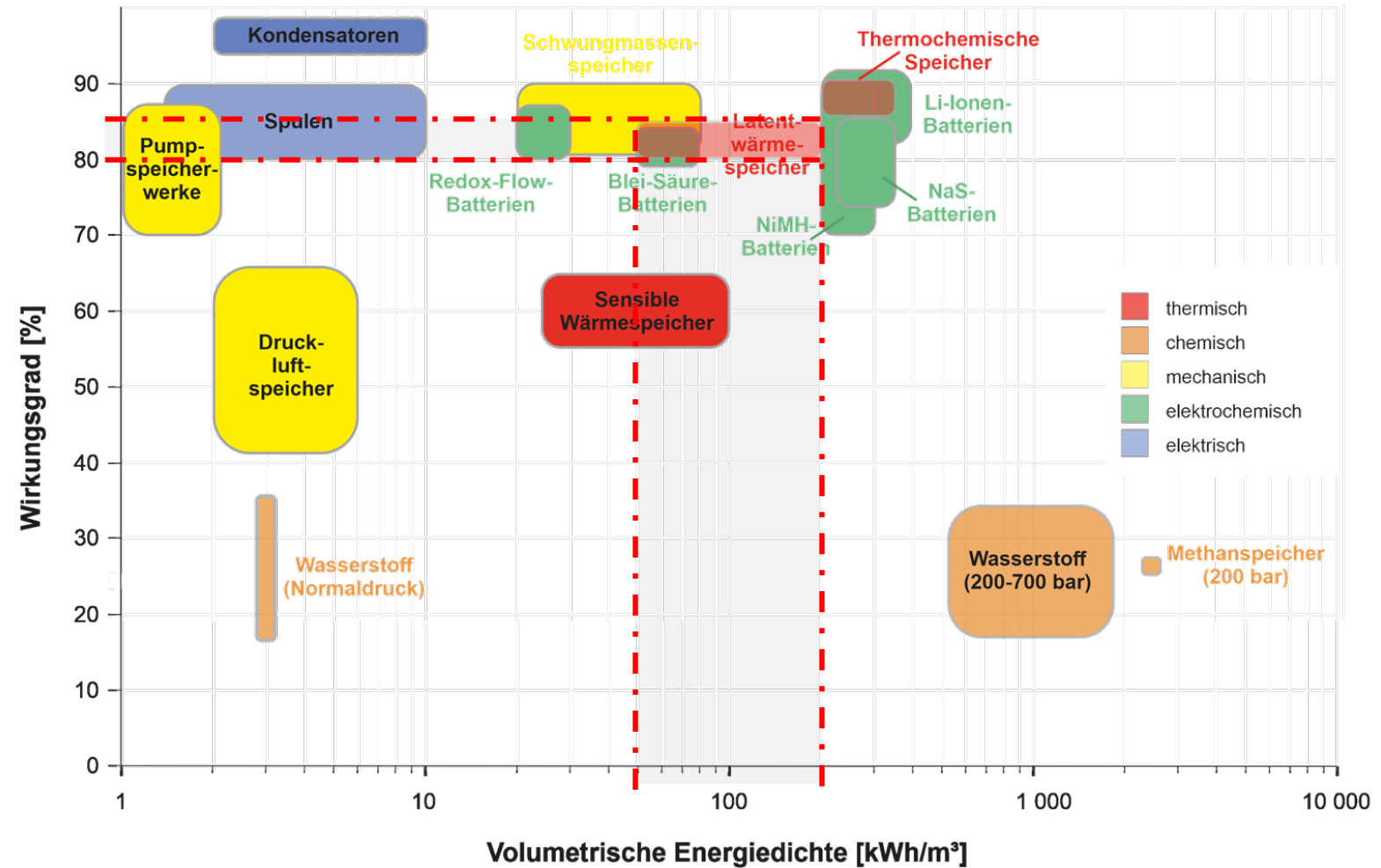


3. Thermal Energy Storage – Latent Storage

3.1 Classification by efficiency and volumetric energy density

3. Thermische Energiespeicher - Latentspeicher

3.1 Klassifizierung nach Wirkungsgrad und volumetrischer Energiedichte



3. Thermal Energy Storage – Latent Storage

3.1 Classification according to energy density and temperature

Phase change materials have an energy density of approx. 100-200 kWh/m³.

Thermochemical energy storage media are significantly higher.

For comparison:

Water has an energy density ($\Delta T=1\text{ °C}$) of approx. 1.163 kWh/m³,
i.e. to store 100 kWh/m³ thermal energy one needs approx. 86°C temperature difference, i.e. heating from approx. 10°C to 96°C.

3. Thermische Energiespeicher - Latentspeicher

3.1 Klassifizierung nach Temperatur und volumetrischer Energiedichte

Phasenwechselmaterialien haben eine Energiedichte von ca. 100-200 kWh/m³

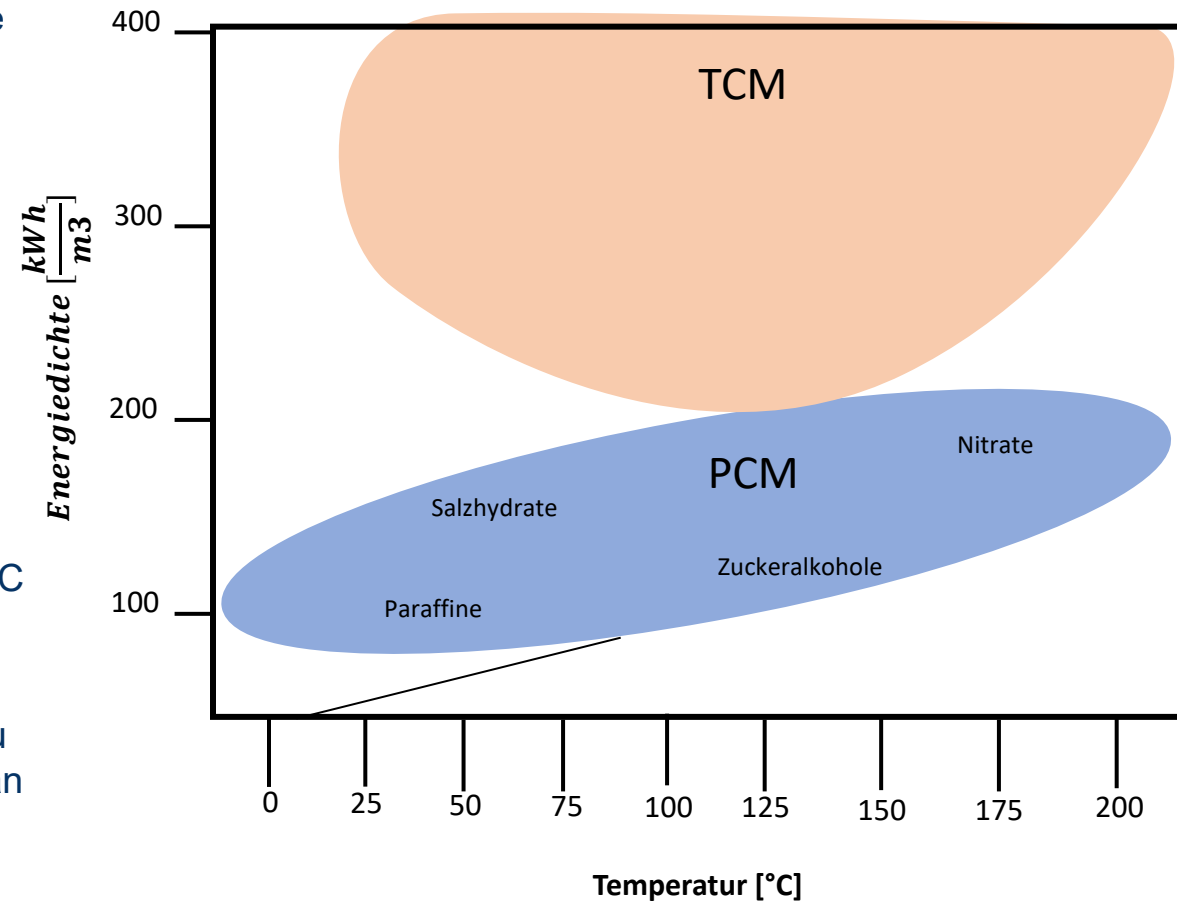
Thermochemische Energiespeichermedien liegen deutlich drüber

Zum Vergleich:

Wasser hat bei $\Delta T=1\text{ °C}$ ca. 1,163 kWh/m³,

d.h. um 100 kWh/m³ thermische Energie zu speichern benötigt man ca. 86°C

Temperaturdifferenz, d.h. Erwärmung von ca. 10°C auf 96°C



3. Thermal Energy Storage – Latent Storage

3.2 Basics - Calculation of the amount of heat

- The stored heat quantity Q is equal to the phase transformation energy ΔH_{trs}
- However, since a temperature change is practically always necessary as well, the total amount of heat stored is the mass m multiplied by the integral of the heat capacity c_p of phase 1 over the temperature from T_1 to T_{trs} plus the integral of the heat capacity c_p of phase 2 over the temperature from T_{trs} to T_2 plus the phase transformation energy ΔH_{trs}
- or simplified at constant c_p

3. Thermische Energiespeicher - Latentspeicher

3.2 Grundlagen – Berechnung der Wärmemenge

- Die gespeicherte Wärmemenge Q entspricht der Phasenumwandlungsenergie ΔH_{trs}

$$Q = m \cdot \Delta H_{trs}$$

- Da jedoch praktisch immer auch eine Temperaturänderung notwendig ist, ist die insgesamt gespeicherte Wärmemenge die Masse m multipliziert mit dem Integral der Wärmekapazität c_p der Phase 1 über der Temperatur von T_1 nach T_{trs} plus dem Integral der Wärmekapazität c_p der Phase 2 über der Temperatur von T_{trs} nach T_2 plus der Phasenumwandlungsenergie ΔH_{trs}

$$Q = \int_{T_1}^{T_{trs}} m \cdot c_{P,1} \cdot dT + m \cdot \Delta H_{trs} + \int_{T_{trs}}^{T_2} m \cdot c_{P,2} \cdot dT$$

- oder vereinfacht bei konstantem c_p

$$Q = m \cdot \left[c_{P,1} \cdot (T_{trs} - T_1) + \Delta H_{trs} + c_{P,2} \cdot (T_2 - T_{trs}) \right]$$

3. Thermal Energy Storage – Latent Storage

3.2 Basics - comparison of sensible to latent heat quantity

- Pure substances have a higher phase change enthalpy than less pure substances (technical quality).
- Pure substances mostly have a phase change temperature, mixtures or less pure substances, mostly a transformation range over several degrees Celsius

3. Thermische Energiespeicher - Latentspeicher

3.2 Grundlagen – Vergleich sensible zu latenter Wärmemenge

- Reinstoffe haben höhere Phasenänderungsenthalpie als weniger reine (technische Qualität)
- Reinstoffe haben zumeist eine Phasenänderungstemperatur, Mischungen oder weniger reine Stoffe, zumeist einen Umwandlungsbereich über mehrere Grad Celsius

$$Q = m \cdot \left[c_{P,1} \cdot (T_{trs} - T_1) + \Delta H_{trs} + c_{P,2} \cdot (T_2 - T_{trs}) \right]$$

Medium	Phasen-änderung	Phasen-änderungs-temperatur [°C]	Phasen-änderungs-Enthalpie [kJ·kg ⁻¹]	Spezifische Wärmekapazität c _{P1} c _{P2} [kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
Wasser	fest flüssig	0	333	2,1 4,19
Wasser	flüssig gas	100	2540	4,19 1,86
Paraffin (Eicosan)	fest flüssig	36,6	243	1,94 2,08
Stearinsäure	fest flüssig	69,7	221	1,83 2,3
NaCl / MgCl ₂	fest flüssig	450	432	0,9 1,0

3. Thermal Energy Storage – Latent Storage

3.2 Basics - comparison of sensible to latent heat quantity

In a narrow band around the transformation temperature, the amount of energy stored is greater due to the phase transformation energy

At large temperature change, on the other hand, the effect disappears due to lower c_p values

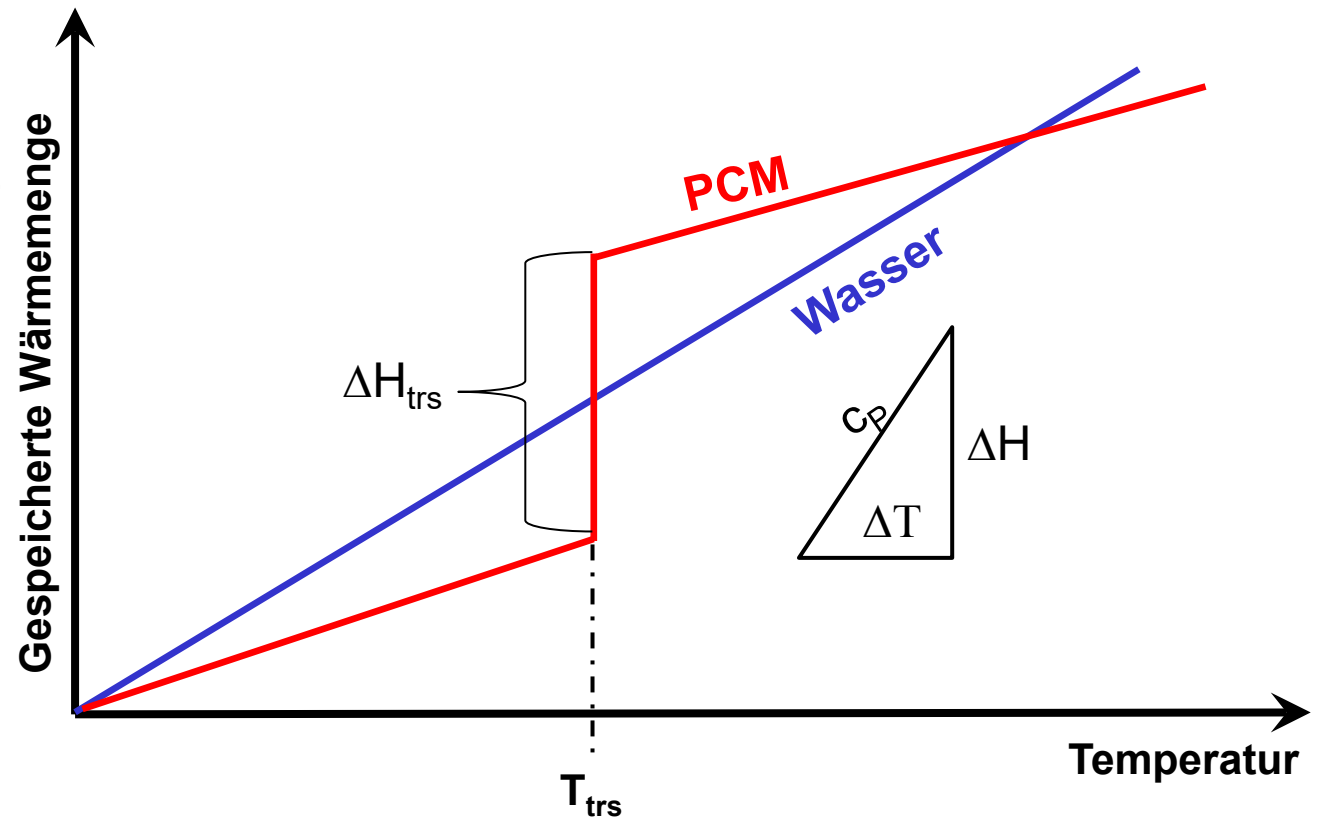
3. Thermische Energiespeicher - Latentspeicher

3.2 Grundlagen – Vergleich sensible zu latenter Wärmemenge

In einem engen Band um die Umwandlungs-temperatur ist die gespeicherte Energiemenge durch die Phasenumwandlungsenergie größer

Bei großer Temperaturänderung dagegen verschwindet der Effekt durch geringere c_p -Werte

$$Q = m \cdot \left[c_{P,1} \cdot (T_{trs} - T_1) + \Delta H_{trs} + c_{P,2} \cdot (T_2 - T_{trs}) \right]$$



3. Thermal Energy Storage – Latent Storage

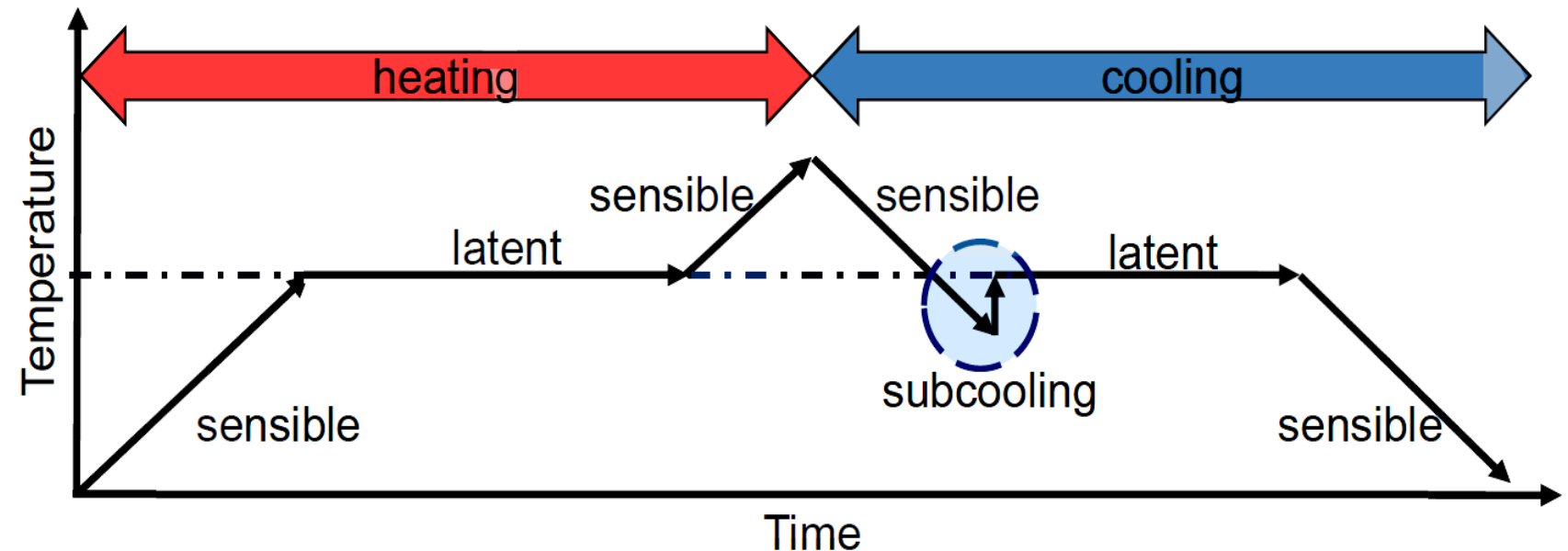
3.2 Basics - comparison of sensible to latent heat quantity

- While a "melt distortion" occurs rather rarely during heating, subcooling can easily occur during cooling.
- During the phase change, a volume (and density) change usually occurs. Here it must be ensured that the storage (container) is dimensioned for the greater volume (lower density) (regularly the liquid phase; exception water, there it is the other way round, the ice phase, the more volume - "anomaly of the water").

3. Thermische Energiespeicher - Latentspeicher

3.2 Grundlagen – Vergleich sensible zu latenter Wärmemenge

- Während beim Erhitzen ein „Schmelzverzug“ eher selten auftritt, kann beim Abkühlen leicht eine Unterkühlung auftreten
- Bei der Phasenänderung tritt zumeist eine Volumen (und Dichte-) Änderung auf. Hier ist darauf zu achten, dass der Speicher(behälter) für das größere Volumen (geringere Dichte) dimensioniert wird (im Regelfall für die flüssige Phase; Ausnahme Wasser, da ist es umgekehrt, also die Eisphase, die mehr Volumen benötigt – „Anomalie des Wassers“)



3. Thermal Energy Storage – Latent Storage

3.2 Basics - Heat conduction as a limiting factor

- Thermal conductivity of aqueous systems at approx. $0.5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
=>In reality, heat transfer by convection is usually much better because the viscosity is low.
- Thermal conductivity of molten salts also at approx. $0.5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Rather viscous, therefore hardly any convection
- Thermal conductivity of organic substances at approx. $0.15 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

PROBLEM: Low thermal conductivity requires measures to compensate for the problem, otherwise a large part of the PCM will not participate in the phase transformation.

3. Thermische Energiespeicher - Latentspeicher

3.2 Grundlagen – Wärmeleitung als limitierender Faktor

Wärmeleitfähigkeit [$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$]				
Wasser	Natriumnitrat	Kaliumnitrat	Paraffin (Oktadekan)	Laurinsäure
0,597	0,51	0,5	0,15	0,15

- Wärmeleitfähigkeit wässriger Systeme bei ca. $0,5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
=> In der Realität zumeist deutlich besserer Wärmeübergang durch Konvektion da die Viskosität gering ist
- Wärmeleitfähigkeit von Salzschnmelzen ebenfalls bei ca. $0,5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Eher viskos, daher kaum Konvektion
- Wärmeleitfähigkeit organischer Substanzen bei ca. $0,15 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

PROBLEM: Geringe Wärmeleitung erfordert Maßnahmen, die das Problem kompensieren, da ansonsten ein Großteil des PCM nicht an der Phasenumwandlung teilnimmt

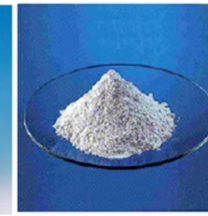
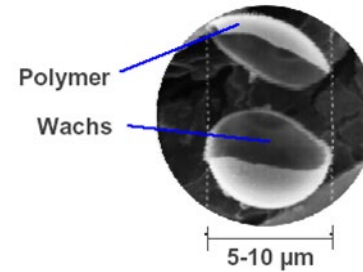
3. Thermal Energy Storage – Latent Storage

3.3 Construction shapes – Technical

- Spheres (micro/macro)
- finned tubes (for better heat conduction)
- plates with heat conducting particles (for better heat conduction)

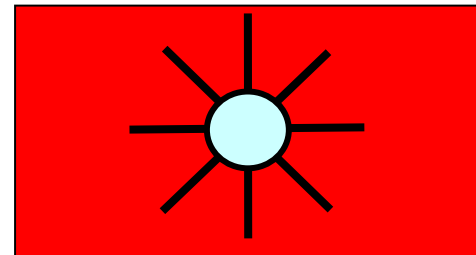
3. Thermische Energiespeicher - Latentspeicher
3.3 Bauformen - Technisch

➤ Kugeln (mikro/makro)



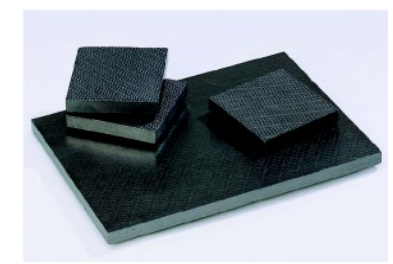
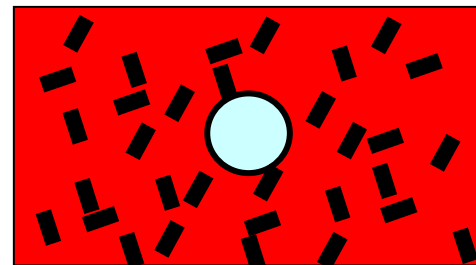
BASF SE, <http://www.bosy-online.de/PCM-Phasenwechselmaterial.htm>

➤ Berippte Rohre (für bessere Wärmeleitung)



Rippenrohre eines dampfbeheizten Wärmetauschers, Sensenschmied, CC-BY-SA 3.0†
https://de.wikipedia.org/wiki/Rippenrohr#/media/Datei:Rippenrohre_DampfLUVO_Biomasseheizkraftwerk_Steyr.jpeg

➤ Platten mit Wärmeleit-Partikeln (für bessere Wärmeleitung)



ZAE Bayern, Andreas Hauer

3. Thermal Energy Storage – Latent Storage
3.4 Application

Incorporation of PCM into common building materials, e.g., sheetrock.

Comparison of heat storage capacity:

Advertising for this (beware of the advertising statement!)

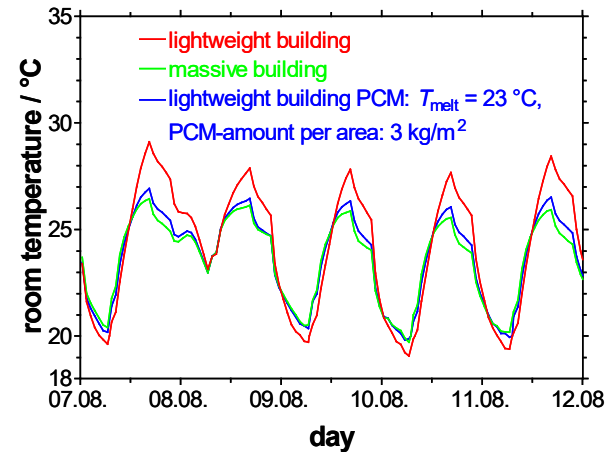
Comparison in the graph: Assumption only 2 K temperature change ! Since concrete/brick are sensitive to heat storage, only approx. 15 mm of concrete or 20 mm of brick would be required at 10K!

3. Thermische Energiespeicher - Latentspeicher
3.4 Anwendung

Einbringung von PCM in gängige Baumaterialien, bspw. in Rigipsplatten

Vergleich der Wärmespeicherfähigkeit:

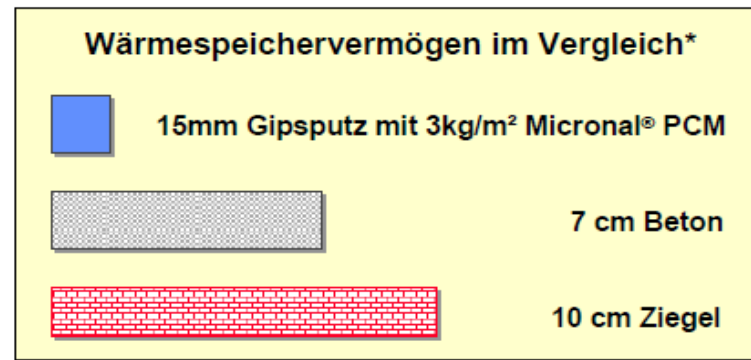
temperature during one week in August



ZAE Bayern, Andreas Hauer



Werbung dazu (Vorsicht vor der Werbeaussage!)



* Verglichen wird 1x Schmelzvorgang (23,62J/g von 25,5°C bis 27,5°C nach RAL) mit 2K Temperaturänderung bei spez. Wärme Beton + Ziegel 0,84J/gK und Dichte 2kg/dm³ Beton bzw. 1,4kg/dm³ Ziegel

Vergleich in der Grafik: Annahme nur 2 K Temperaturänderung ! Da Beton/Ziegel sensibel die Wärme speichern wären bei 10K nur ca. 15 mm Beton bzw. 20 mm Ziegel notwendig !

3. Thermal Energy Storage – Latent Storage

3.4 Application

Cooling of an office building in the UK by storing the "cold" at night

- Measurements before and after installation showed a reduction of indoor temperatures by 3-4 K (but not more !)
- Investment costs significantly lower than conventional air conditioning
- Energy consumption is low: electrical COP (for fans) is 20

3. Thermische Energiespeicher - Latentspeicher

3.4 Anwendung

Kühlung eines Bürogebäudes in UK durch Speicherung der "Kälte" in der Nacht

- Messungen vor und nach dem Einbau ergaben eine Reduktion der Innentemperaturen um 3-4 K (mehr aber auch nicht !)
- Investitionskosten deutlich geringer als konventionelle Klimaanlage
- Der Energieverbrauch ist gering: Elektrischer COP (für Gebläse) liegt bei 20



Ventilator

PCM

3. Thermal Energy Storage – Latent Storage

3.4 Application - example of ice storage

Charge

The cold fluid flows through the ice storage and the phase transformation from liquid to solid takes place in the storage medium (water->ice), the enthalpy of fusion must be applied for this.

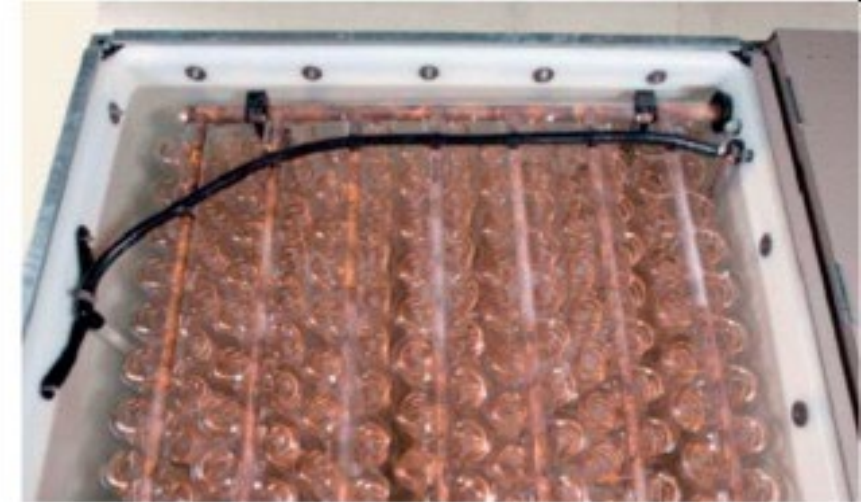
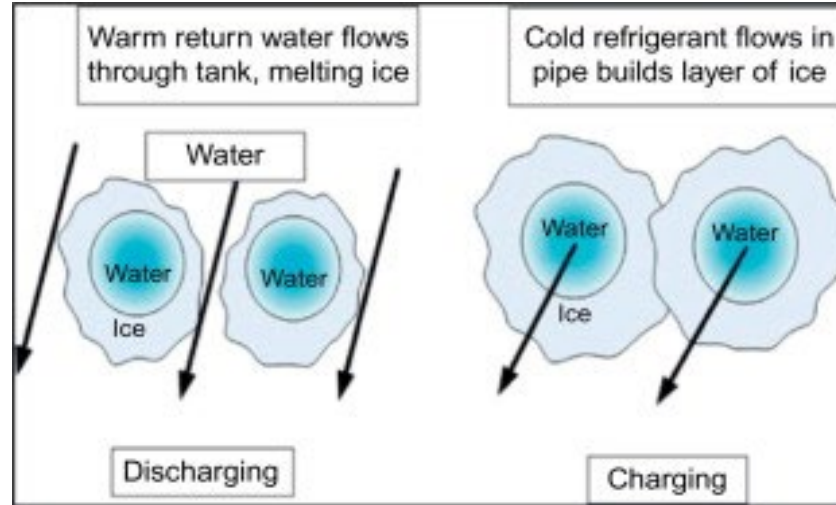
Storage

The energy storage medium (here water) remains in the phase with the lower energy (here solid: ice).

Discharge

The warm refrigerant fluid flows through the ice storage tank and cools down, the phase transformation from solid to liquid takes place.

3. Thermische Energiespeicher - Latentspeicher
3.4 Anwendung - Beispiel eines Eisspeichers



Ice Thermal Storage, Sciencedirekt, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/ice-thermal-storage>

Einspeicherung

Das kalte Kälte­träger­fluid durch­strömt den Eisspeicher und die Phasenumwandlung von flüssig nach fest im Speichermedium erfolgt (Wasser->Eis), die Schmelzenthalpie muss hierzu aufgebracht werden.

Speicherung

Das Energiespeicher­medium (hier Wasser) bleibt in der Phase mit der geringeren Energie (hier fest: Eis)

Ausspeicherung

Das warme Kälte­träger­fluid durch­strömt den Eisspeicher und kühlt sich ab, die Phasenumwandlung von fest nach flüssig erfolgt.

3. Thermal Energy Storage – Latent Storage

3.5 Phase Change Dispersions - Phase Change Slurries

Overview

- Dispersion* of PCM in a liquid "bulk" material
- The PCM itself absorbs heat or releases it during phase transformation
- The bulk material is only used for heat conduction and convection and does not undergo any phase transformation itself.
- PCS can therefore be pumped and stored like heat transfer fluids.
- In case of density differences of the PCM material compared to the "bulk" material, the floating or sinking of the PCM must be limited

3. Thermische Energiespeicher - Latentspeicher

3.5 Phasenwechsel-Dispersionen - Phase Change Slurries

Übersicht

- Dispersion* von PCM in einem flüssigen „Bulk“-Material
- Das PCM selber nimmt Wärme auf bzw. gibt sie ab bei Phasenumwandlung
- Das „Bulk“-Material dient nur zur Wärmeleitung und Konvektion und erfährt selber keine Phasenumwandlung
- PCS können daher wie Wärmeträgerfluide gepumpt und gespeichert werden
- Bei Dichteunterschieden des PCM Materials gegenüber des „Bulk“-Materials muss das Aufschwimmen bzw. Absinken des PCM eingeschränkt werden

Three typical types

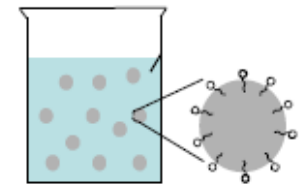
- Ice Slurry



- PCM Micro-Capsules



- PCM Emulsion



***Dispersion** ist der Oberbegriff zu
Suspension: feinverteilter Feststoff in einer Flüssigkeit
Emulsion: feinverteilter Gemisch zweier eher nicht mischbarer Flüssigkeiten

3. Thermal Energy Storage – Latent Storage

3.5 Phase Change Dispersions – Application

Application: capillary tube mats with PCS in wall and ceiling

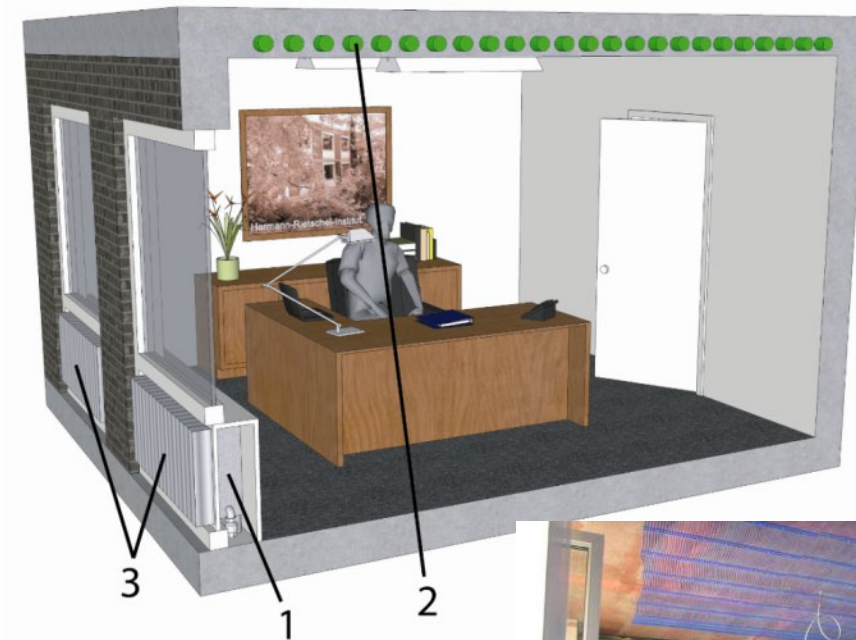
- PCS is cooled at night on external heat exchanger (PCM solidifies) and stored.
- During the day, the cool PCS is pumped through the capillary tube mats and absorbs heat (PCM melts).
- Effect: cooling, capping of temperature peaks
- No active cooling, only pumping current

3. Thermische Energiespeicher - Latentspeicher

3.5 Phasenwechsel-Dispersionen - Anwendung

Anwendung: Kapillarrohrmatten mit PCS in Wand und Decke

- PCS wird nachts an außenliegendem Wärmetauscher abgekühlt (PCM erstarrt) und gespeichert.
- Tags wird das kühle PCS durch die Kapillarrohrmatten gepumpt und nimmt Wärme auf (PCM schmilzt)
- Effekt: Abkühlung, Kappung von Temperaturspitzen
- Keine aktive Kälteerzeugung, nur Pumpstrom



- 1: Heat storage
2: Capillary tube mat
3: Heat exchanger outside



E.ON Energy Research Center
EBC | Institute for Energy Efficient
Buildings and Indoor Climate



source: EBC of RWTH Aachen

3. Thermal Energy Storage – Latent Storage

3.6 Crystallization energy

Example heat pad

- In heat pads, sodium acetate trihydrate is often used, which liquefies at a melting temperature of 77°C
- The material remains liquid as a supercooled melt in a metastable state even at temperatures below the melting point (down to -20°C)
- If crystallisation is triggered, the pad heats up to 58°C, although complete crystallisation and thus the release of latent heat can extend over a longer period of time.
- Possible triggers for crystallisation of the supersaturated solution are:
 - the pressure wave triggered by pressing the metal plate?
 - the resulting release of microscopic crystallisation nuclei, which settle in small crevices of the metal during each crystallisation.
- Other salt hydrates can also be used, e.g. Glauber's salt with a melting point of 32.5 °C.

3. Thermische Energiespeicher - Latentspeicher

3.6 Kristallisationsenergie

Beispiel Wärmekissen

- In Wärmekissen wird häufig Natriumacetat-Trihydrat verwendet, das bei einer Schmelztemperatur von 77°C verflüssigt wird
- Das Material bleibt auch bei Temperaturen unterhalb des Schmelzpunktes (bis -20°C) als unterkühlte Schmelze in einem metastabilen Zustand flüssig
- Wird die Kristallisation ausgelöst erwärmt sich das Kissen auf 58°C, wobei die vollständige Kristallisation und damit die Freigabe der latenten Wärme sich über eine längere Zeit erstrecken kann.
- Als Auslöser für die Kristallisation der übersättigten Lösung kommen in Frage:
 - die Druckwelle, die durch das Drücken des Metallplättchens ausgelöst wird?
 - die dabei verursachte Freisetzung mikroskopisch kleiner Kristallisationskeime, die sich bei jeder Kristallisation in kleinen Ritzen des Metalls festsetzen
- Andere Salzhydrate können ebenfalls verwendet werden, z. B. Glaubersalz mit einem Schmelzpunkt von 32,5 °C.



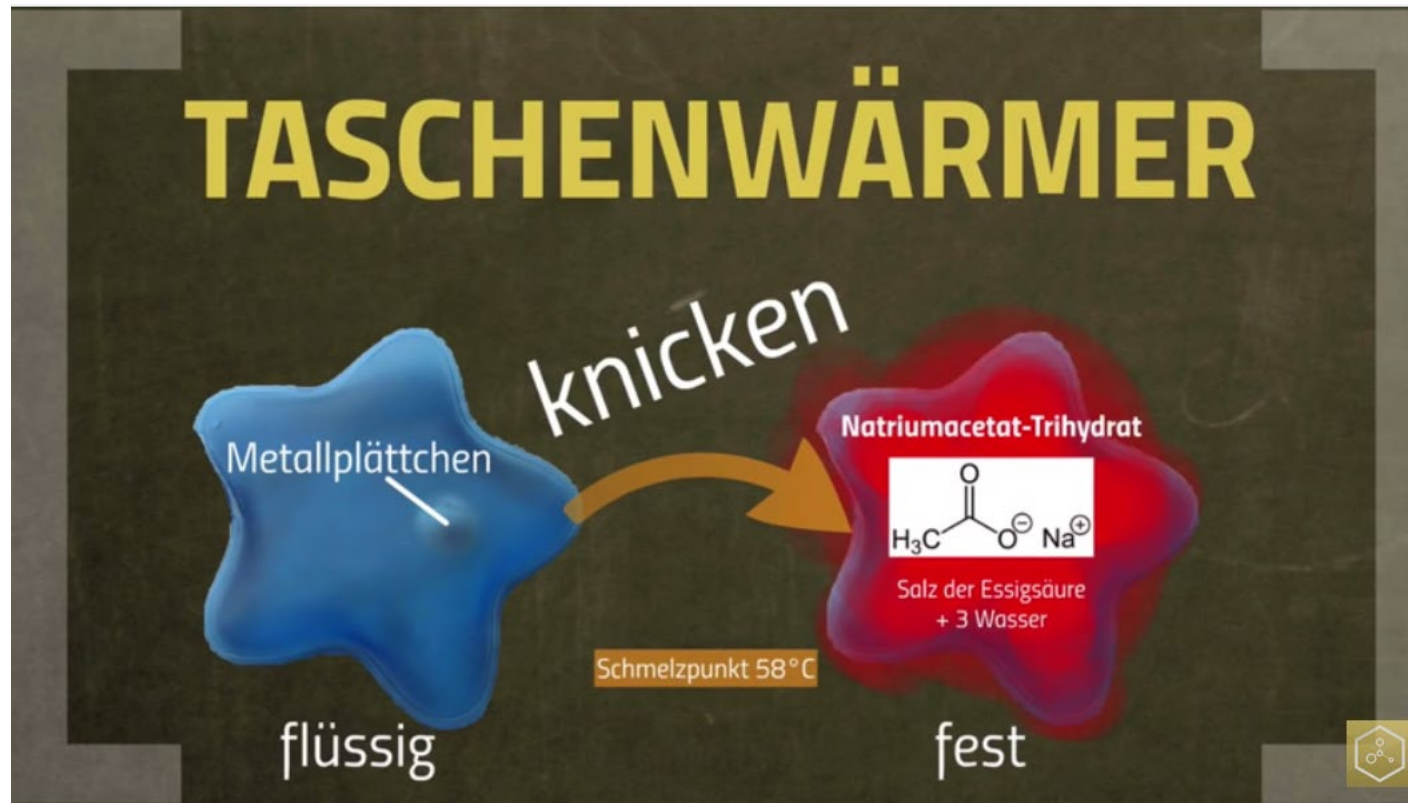
Latentwärmespeicher, Taschenwärmer, Surricata, CC-BY-SA 3.0†
<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8c/Handwaermer12.jpg>

3. Thermal Energy Storage – Latent Storage
3.6 Crystallization energy

Video

3. Thermische Energiespeicher - Latentspeicher
3.6 Kristallisationsenergie

VIDEO: „Wie funktioniert ein Taschenwärmer?!“ [0:00-2:54]



<https://youtu.be/knZWAcE9sjA>

3. Thermal Energy Storage – Latent Storage

3.6 Crystallization energy

Application: Mobile latent heat storage

- Storage based on a 20-foot container with sodium acetate trihydrate
- 1 partial storage with tube heat exchanger
- 1 partial storage tank with tube heat exchanger and graphite lamellas
- Total mass: 25 t
- Mass PCM: 16.6 t
- Phase change temperature: 58°C
- Lower process temperature: 35°C
- Upper process temperature: 95°C
- Loading power: 180-200 kW
- Discharge power: 80-100 kW
- Storage capacity: 2 000 kWh

3. Thermische Energiespeicher - Latentspeicher

3.6 Kristallisationsenergie - Anwendung

Anwendung: Mobiler Latentwärmespeicher

- Speicher auf Basis eine 20-Fuß-Containers mit Natriumacetat-Trihydrat
- 1 Teilspeicher mit Rohr-WÜT
- 1 Teilspeicher mit Rohr-WÜT und Graphitlamellen
- Gesamtmasse: 25 t
- Masse PCM: 16,6 t
- Phasenwechseltemperatur: 58°C
- Untere Prozesstemperatur: 35°C
- Obere Prozesstemperatur: 95°C
- Beladeleistung: 180-200 kW
- Entladeleistung: 80-100 kW
- Speicherkapazität: 2 000 kWh



Mobile und stationäre Latentwärmespeicher, Fraunhofer UMSICHT
https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Events/Eninnov2014/files/pr/PR_Deckert.pdf

3. Thermal Energy Storage –

Latent Storage

3.7 Summary

1. Latent heat energy storage save energy in the form of phase transformation energy (e.g. melting) and usually additionally also sensible energy in both phases.
2. Latent heat stores always have a material-related temperature window (point) at which they can be used. It is usually particularly advantageous when only a narrow temperature window can be used from an application point of view. In the case of large temperature spreads, the sensitive (water) storage is usually an advantage.
3. For pure substances, the transformation temperature is usually a fixed value, for mixtures or technically pure substances it tends to be a wider temperature window (up to approx. 10 K).
4. Thermodynamic imbalances can also occur during phase transformation, e.g. subcooling effect, which often leads to two different phase transformation temperatures during charging and discharging.
5. Since thermal conductivity is often the limiting factor, PCM storage must either be thin or have a high A/V ratio, or alternatively, heat conduction additives (e.g. graphite threads) must be added. Otherwise, there is a risk that only part of the PCM will participate in the phase transformation.
6. Besides the classic solid-liquid phase transformation, there is also crystallization. Here, particularly frequent and strong subcooling effects occur, which can store the energy particularly loss-free in order to then spontaneously reach the higher operating temperature during discharge.

3. Thermische Energiespeicher - Latentspeicher

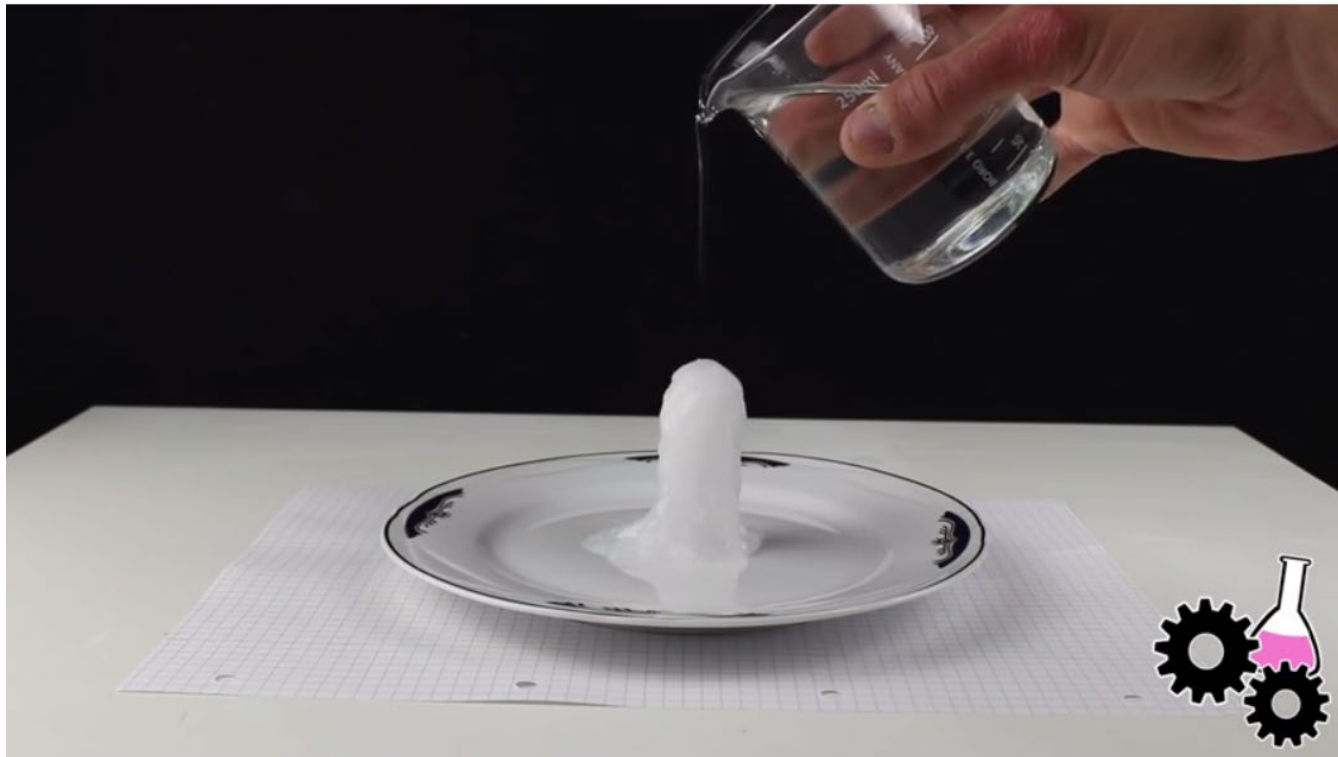
3.7 Kurzzusammenfassung / „Take aways“

1. Latente Wärmeenergiespeicher speichern die Energie in Form von Phasenumwandlungsenergie (bspw. Schmelzen) und meistens zusätzlich noch sensible Energie in beiden Phasen.
2. Latentspeicher haben immer eine stoffbezogenes Temperaturfenster (Punkt) an dem sie eingesetzt werden können. Besonders vorteilhaft ist es zumeist dann, wenn aus anwendungstechnischer Sicht nur ein enge Temperaturfenster genutzt werden kann. Bei großen Temperaturspreizungen ist meistens der sensible (Wasser)-Speicher im Vorteil.
3. Bei Reinstoffen ist die Umwandlungstemperatur zumeist ein fester Wert, bei Mischungen bzw. technisch reinen Stoffen eher ein breiteres Temperaturfenster (bis ca. 10 K).
4. Bei der Phasenumwandlung können auch thermodynamische Ungleichgewichte auftreten, bspw. Unterkühlungseffekt, die häufig dann zu zwei verschiedenen Phasenumwandlungs-temperaturen führen beim Laden und Entladen.
5. Da die Wärmeleitfähigkeit häufig der limitierende Faktor ist, müssen PCM Speicher entweder dünn bzw. mit einen hohen A/V-Verhältnis aufgebaut werden oder alternativ mit Wärmeleitungs-Zusatzstoffen (bspw. Graphit-Fäden) versetzt werden. Sonst besteht die Gefahr, dass nur ein Teil des PCM an der Phasenumwandlung teilnimmt.
6. Neben der klassischen Phasenumwandlung fest-flüssig gibt es auch noch die Kristallisation. Hier entstehen besonders häufig und starke Unterkühlungseffekt, die die Energie besonders verlustfrei speichern kann um dann beim Entladen spontan auf die höhere Betriebstemperatur zu kommen.








Weiterführende Videos

Further Videos

VIDEO: „Taschenwärmerflüssigkeit selber herstellen!“ [0:00-2:53]  DE



<https://youtu.be/84Gi16cjTho>

†CC-Lizenzen	Bezeichnung	Version	Link zum Lizenz-/Vertragstext
	CC0 Bedingungslose Lizenz	Vers. 1.0	https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/legalcode
	CC-BY Attribution (Namensnennung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/1.0/legalcode
	CC-BY-SA Attribution Share Alike (Namensnennung-Weitergabe unter gleichen Bedingungen)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/1.0/legalcode
	CC-BY-ND Attribution No Derivatives (Namensnennung-Keine Bearbeitung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/1.0/legalcode
	CC-BY-NC Attribution Non Commercial (Namensnennung-Nicht kommerziell)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/1.0/legalcode
	CC-BY-NC-SA Attribution Non Commercial Share Alike (Namensnennung-Nicht kommerziell-Weitergabe unter gleichen Bedingungen)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/1.0/legalcode
	CC-BY-NC-ND Attribution Non Commercial No Derivatives (Namensnennung-Nicht kommerziell-Keine Bearbeitung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/1.0/legalcode

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

Vorlesung : **Energiespeichertechnologien- & Anwendungen**
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

**#9 Thermische Energiespeicher Teil d –
 Thermochemische Wärmespeicher**

**#9 Thermal Energy Storage part d –
 Thermochemical Storage**

Vorlesung #9d | Lecture #9d



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



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



4. Thermal Energy Storage – Thermochemical Storage

Learning objectives / content

- Basic physical storage principles, common temperature ranges and energy densities as well as storage durations ⇒ Introduction to the topic of thermal energy storage and its terminology as well as sorting it into context

Thermische Energiespeicher –Thermochemische Speicher

Inhalt ⇒ Lernziele

- Grundsätzliche physikalische Speicherprinzipien, übliche Temperaturbereiche und Energiedichten sowie Speicherdauern
⇒ Heranführung an das Thema thermische Energiespeicher und deren Begrifflichkeit sowie Einsortierung in den Kontext

4. Thermal Energy Storage – Thermochemical Storage Overview

Charge:

Heat is applied to split a substance into two components (endothermic reaction).

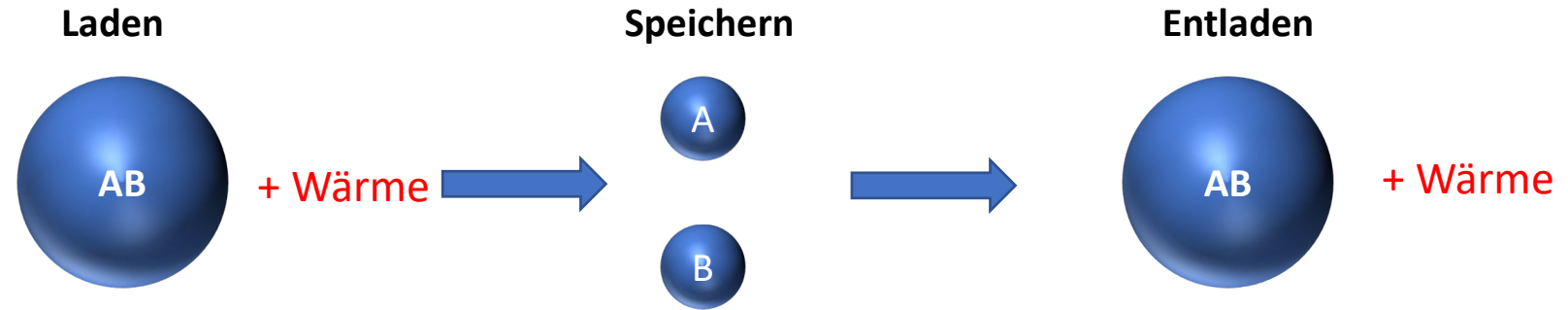
Storage:

The components are stored separately.

Discharge:

The components react with each other and release heat(Exothermic reaction)

4. Thermische Energiespeicher – Thermochemische Speicher
Übersicht

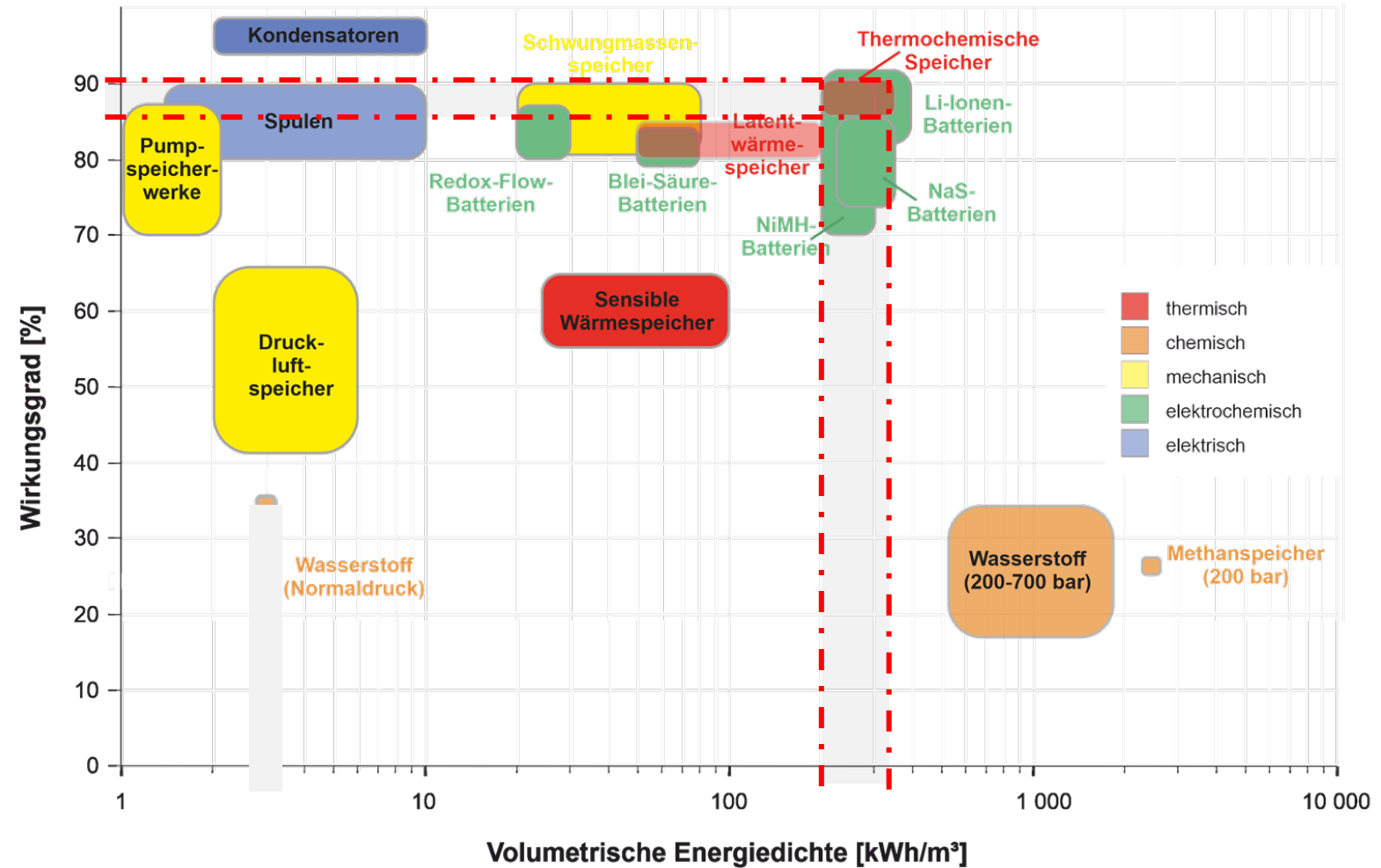


Einspeicherung	Speicherung	Ausspeicherung
Durch Wärmezufuhr wird ein Stoff in zwei Komponenten aufgespalten (Endotherme Reaktion)	Die Komponenten werden getrennt gespeichert	Die Komponenten reagieren miteinander und setzen Wärme frei (Exotherme Reaktion)

4. Thermal Energy Storage – Thermochemical Storage

4.1 Classification by efficiency and volumetric energy density

4. Thermische Energiespeicher – Thermochemische Speicher
4.1 Klassifizierung nach Wirkungsgrad und volumetrischer Energiedichte



4. Thermal Energy Storage – Thermochemical Storage

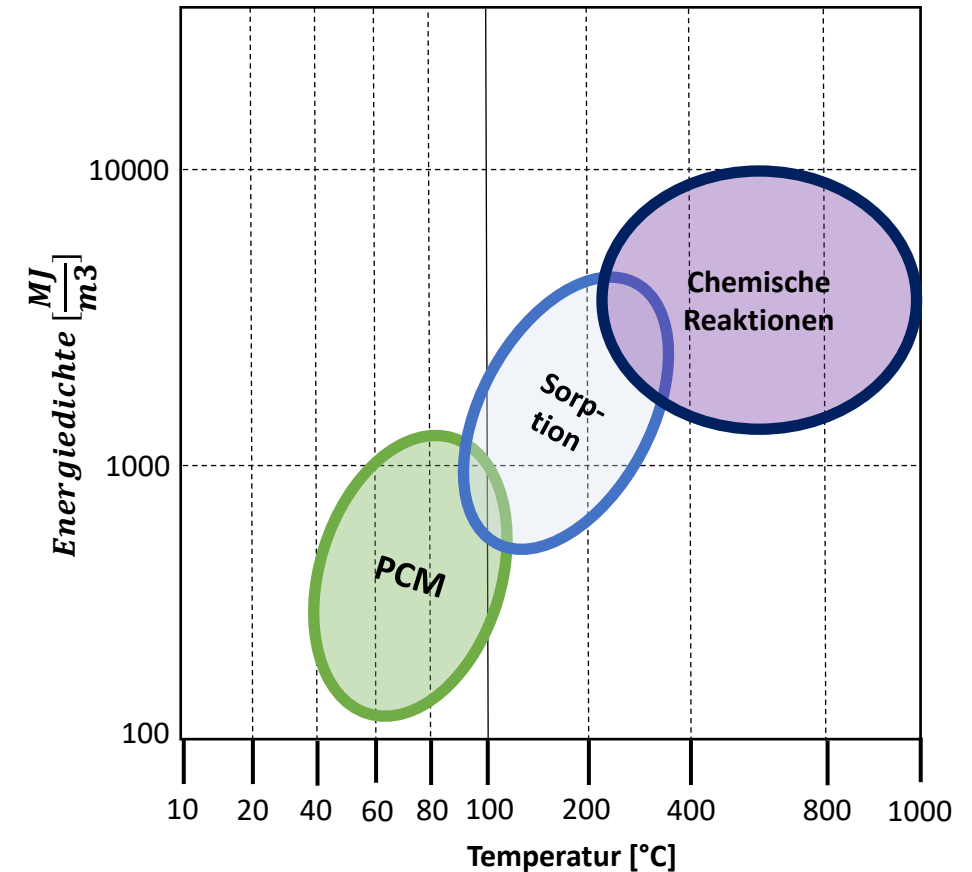
4.1 Classification by temperature and volumetric energy density

- Thermochemical energy storage uses the reaction enthalpy of reversible reactions
- Long-term storage through component separation
- The endothermic outward reaction stores the heat, the exothermic reverse reaction releases it again.
- Sorption storage has higher energy densities than PCM storage and chemical reaction storage has even higher energy densities.

4. Thermische Energiespeicher – Thermochemische Speicher

4.1 Klassifizierung nach Temperatur und volumetrischer Energiedichte

- Thermochemische Energiespeicher nutzen die Reaktionsenthalpie von reversiblen Reaktionen
- Langzeitspeicherung durch Komponentenseparation
- Die endotherme Hin-Reaktion speichert die Wärme, die exotherme Rückreaktion setzt diese wieder frei
- Sorptionsspeicher haben höhere Energiedichten als PCM Speicher und Chemische Reaktionsspeicher haben nochmals höhere Energiedichten.



4. Thermal Energy Storage - Thermochemical Storage

4.2 Reaction and Sorption Storage

Materials

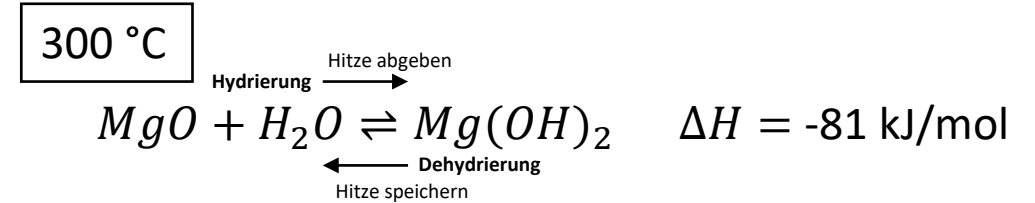
- Magnesium chloride Water
- Magnesium oxide water
- Lithium chloride water
- ...
- Zeolite water
- Silica gel water
- ...

4. Thermische Energiespeicher – Thermochemische Speicher

4.2 Reaktions- und Sorptionsspeicher

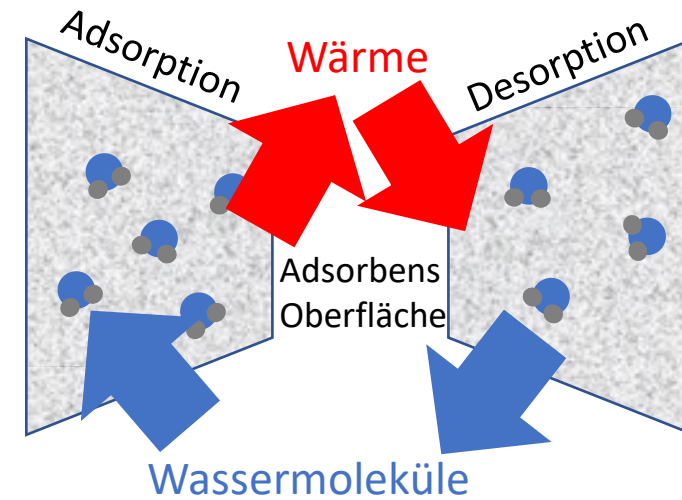
Materialien-Reaktionsspeicher

- Magnesiumoxid-Wasser
- Magnesiumchlorid-Wasser
- Lithiumchlorid-Wasser
-



Materialien-Sorptionsspeicher

- Zeolith-Wasser
- Silicagel-Wasser
-



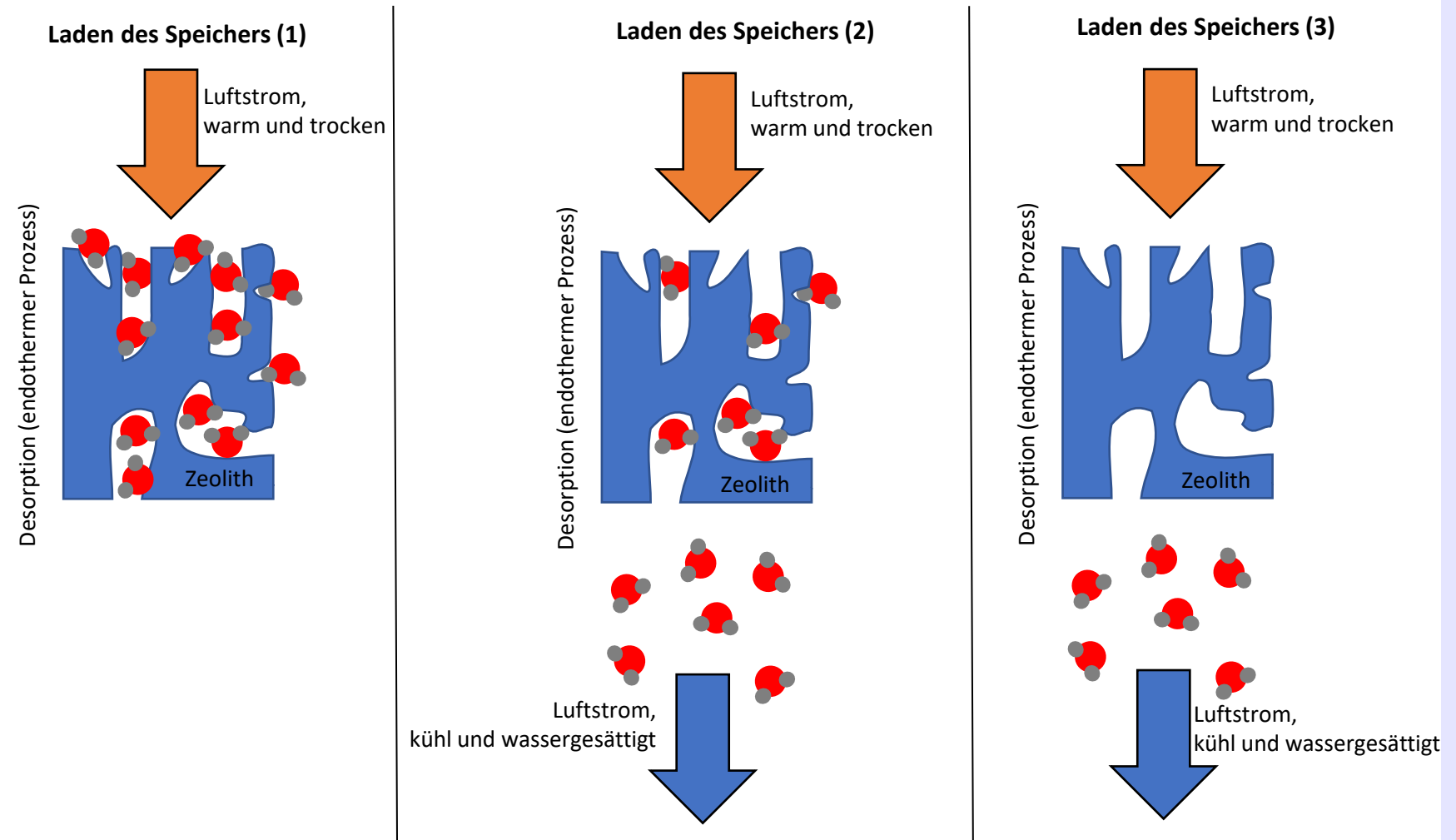
4. Thermal energy storage - Thermochemical storage
4.3 Sorption storage

Example: Zeolite - charging process, providing cool, humid air

Charging the storage
Air flow, warm and dry
Desorption (endothermic process)
Air flow, cool and water saturated

4. Thermische Energiespeicher – Thermochemische Speicher
4.3 Sorptionsspeicher

Beispiel: Zeolith – Ladevorgang, Bereitstellung kühler, feuchter Luft



4. Thermal energy storage - Thermochemical storage

4.4 Sorption storage

Example: Zeolite - discharging process, providing warm, dry air

Discharge of the storage

Air flow, warm and dry

Adsorption (exothermic process)

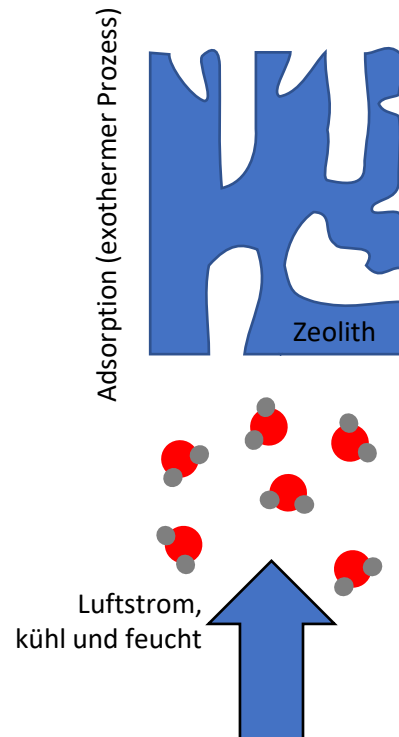
Air flow, cool and moist

4. Thermische Energiespeicher – Thermochemische Speicher

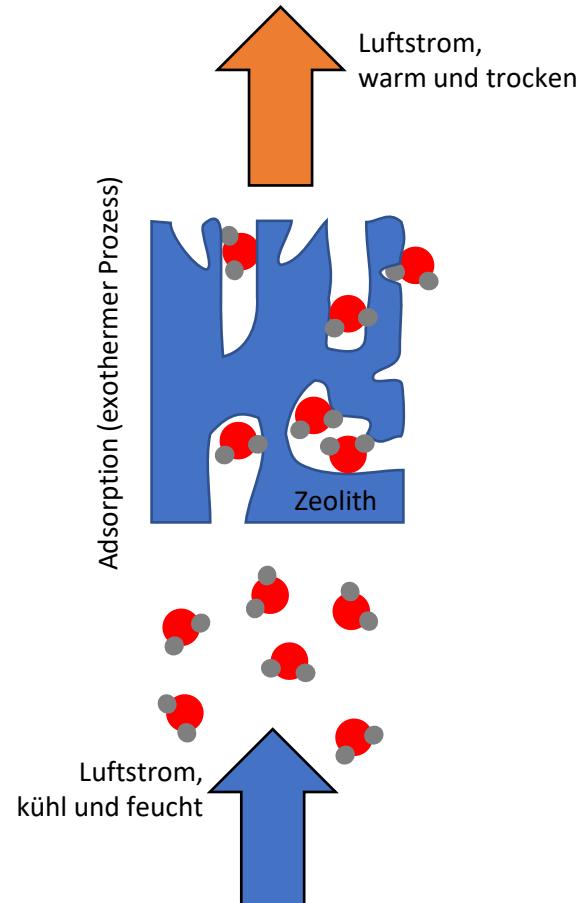
4.4 Sorptionsspeicher

Beispiel: Zeolith – Entladevorgang, Bereitstellung warmer, trockener Luft

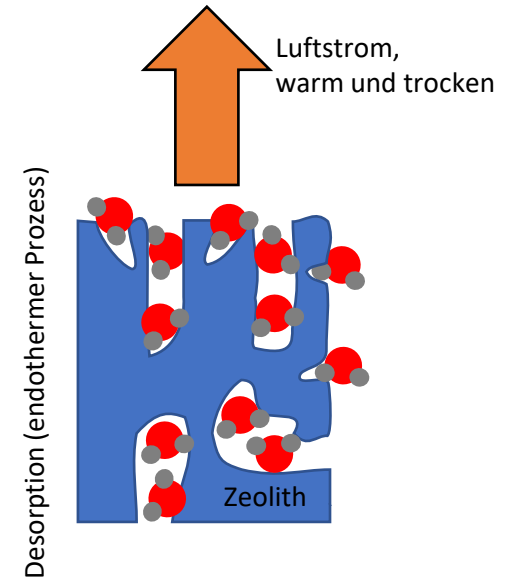
Entladen des Speichers (1)



Entladen des Speichers (2)



Entladen des Speichers (3)



4. Thermal energy storage - Thermochemical storage

4.4 Sorption storage - application as a seasonal storage system

- A tank contains granules of silica gel, which is hygroscopic and highly porous and therefore has a large internal surface area (one gram has an internal surface area of about 600 m²). Silica gels have the property of attracting water vapor and accumulating it on their surface (adsorption), releasing heat. Conversely, heat energy must be used to dry silica gels (desorption).
- The silica gel is in granular form in a boiler in which contains a heat exchanger. With the expenditure of energy, the silica gel is dried in summer and it is under high internal tension. In winter, it is ventilated a little and brought step by step to the water vapor partial pressure of the environment. The resulting heat is used.
- The advantage of thermochemical heat storage systems over conventional heat storage systems in the form of a water tank is their higher storage density of 200 to 1000 kWh/m³ compared to only about 25-100 kWh/m³ for water. In addition, the energy can be stored for years without loss.
- In addition to silica gels, metal hydrides or zeolites can also be used as heat storage materials, but these require higher operating temperatures.

4. Thermische Energiespeicher – Thermochemische Speicher

4.4 Sorptionsspeicher – Anwendung als Saisonaler Speicher

- Ein Tank enthält Granulat aus Silicagel, das hygroskopisch und stark porös ist und deshalb eine große innere Oberfläche hat (ein Gramm hat eine innere Oberfläche von etwa 600 m²). Silikagele haben die Eigenschaft, Wasserdampf anzuziehen und an ihrer Oberfläche anzulagern (Adsorption), wobei Wärme frei wird. Umgekehrt muss zum Trocknen von Silikagelen (Desorption) Wärmeenergie aufgewendet werden.
- Das Silicagel ist in Granulatform in einem Kessel, in dem sich ein Wärmeübertrager befindet. Unter Energieaufwand wird im Sommer das Silicagel getrocknet und es steht unter hoher innerer Spannung. Im Winter wird es ein wenig belüftet und Schritt für Schritt auf den Wasserdampf-Partialdruck der Umgebung gebracht. Die entstehende Wärme wird genutzt.
- Der Vorteil von thermochemischen Wärmespeichern gegenüber konventionellen Wärmespeichern in Form eines Wassertanks liegt in ihrer höheren Speicherdichte von 200 bis 1000 kWh/m³ gegenüber nur etwa 25-100 kWh/m³ bei Wasser. Außerdem kann die Energie über Jahre verlustfrei gespeichert werden.
- Neben Silicagelen können auch Metallhydride oder Zeolithe als Wärmespeicher verwendet werden, die jedoch höhere Betriebstemperaturen benötigen.

4. Thermal energy storage - Thermochemical storage

4.5 Short summary

1. Thermochemical storages often have the highest energy density of all thermal storages.
2. In most cases, they allow higher temperatures to be stored, but at the same time, higher temperatures are required to charge them.
3. There are a variety of chemical reactions or more physical processes such as adsorption (but these are often grouped together under "thermochemical" storage).
4. Self-discharge over the storage period is mostly very low.
5. The level of development is not comparable with sensible, but also not yet with latent storage.
6. The costs for thermochemical storage are comparatively high.
7. Applications have so far tended to be in niches.

4. Thermische Energiespeicher – Thermochemische Speicher

4.5 Kurzzusammenfassung / „Take aways“

1. Thermochemische Speicher haben häufig die höchste Energiedichte aller thermischen Speicher
2. Zumeist ermöglichen diese höhere Temperaturen zu speichern, zugleich sind aber auch zur Beladung höherer Temperaturen notwendig.
3. Es gibt eine Vielzahl von chemischen Reaktionen oder auch eher physikalischen Prozessen wie Adsorption (die aber häufig unter „thermochemische“ Speicher zusammen gefasst werden).
4. Die Selbstentladung über der Speicherzeit ist zumeist sehr gering.
5. Der Entwicklungsstand ist nicht mit sensiblen, aber auch noch nicht mit latenten Speichern vergleichbar.
6. Die Kosten für thermochemische Speicher sind vergleichsweise hoch.
7. Anwendungen finden bisher eher in Nischen statt.

#9. Thermische Energiespeicher: Sensible Speicher – Latente Speicher – Thermochemische Speicher

#9 Thermal Energy Storage: Sensible Heat Storage – Latent Heat Storage – Thermochemical Storage

$$Q = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1)$$

$$Q = m \cdot \Delta H_{trs}$$

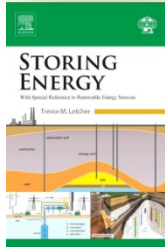
$$Q = m \cdot \left[c_{P,1} \cdot (T_{trs} - T_1) + \Delta H_{trs} + c_{P,2} \cdot (T_2 - T_{trs}) \right]$$

Weiterführende Literatur
Further Reading



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

- Kapitel 10 „Thermische Speicher“



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

- Chapter 13 „Phase Change Materials“
- Chapter 15 „Sensible Thermal Energy Storage: Diurnal and Seasonal“
- Chapter 17 „Thermochemical Energy Storage“



Andreas Hauer, Stefan Hiebler, Manfred Reuß; „Wärmespeicher“

- Seiten 1-151 / vollständiges Buch

Weiterführende Literatur - Moodle

Further Reading - Moodle



Eisner, Sauer et al.; „Energiespeicher“, Schriftenreihe Energiesystem der Zukunft

- Kapitel 4 „Thermische Speicher“








Siehe auch Moodle



Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.); „dena-Studie, thermische Energiespeicher für Quartiere, Überblick zu Rahmenbedingungen, Marktsituationen und Technologieoptionen für Planung, Beratung und politische Entscheidungen im Gebäudesektor“, 71 Seiten

<https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/dena-studie-thermische-energiespeicher-fuer-quartiere/>

Siehe auch Moodle

†CC-Lizenzen	Bezeichnung	Version	Link zum Lizenz-/Vertragstext
	CC0 Bedingungslose Lizenz	Vers. 1.0	https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/legalcode
	CC-BY Attribution (Namensnennung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/1.0/legalcode
	CC-BY-SA Attribution Share Alike (Namensnennung-Weitergabe unter gleichen Bedingungen)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/1.0/legalcode
	CC-BY-ND Attribution No Derivatives (Namensnennung-Keine Bearbeitung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/1.0/legalcode
	CC-BY-NC Attribution Non Commercial (Namensnennung-Nicht kommerziell)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/1.0/legalcode
	CC-BY-NC-SA Attribution Non Commercial Share Alike (Namensnennung-Nicht kommerziell-Weitergabe unter gleichen Bedingungen)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/1.0/legalcode
	CC-BY-NC-ND Attribution Non Commercial No Derivatives (Namensnennung-Nicht kommerziell-Keine Bearbeitung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/1.0/legalcode

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