



universität
wien

DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

Physik neuartiger Wärmespeicher

Verfasser/in

Sebastian Erik Leitner

angestrebter akademischer Grad

Magister der Naturwissenschaften (Mag.)

Verfasserin / Verfasser:	Sebastian Leitner
Matrikel-Nummer:	
Studienrichtung (lt. Studienblatt):	411 Diplomstudium Physik UniStG
Betreuerin / Betreuer:	Ao. Univ. Prof. Dr. Armin Fuith

Wien, 2013

Neuartige Wärmespeicher

Innovative Thermal Energy Storage

Universität Wien, Physikalisches Institut
Technische Universität Wien, Energy Economics Group
2012

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Kurzfassung/Abstract	1
1.2. Motivation und Aufbau der Arbeit	3
2. Physikalische Grundlagen	5
2.1. Größen und Begrifflichkeiten	5
→ Exergie und Energieumsatz	6
→ Solarthermie	7
→ Kraft-Wärme-Kopplung	8
→ Wärmepumpen und -überträger	9
2.2. Thermodynamik und thermodynamische Systeme	14
→ Konvektion	21
→ Wärmeisolation	22
3. Physikalische Mechanismen zur Wärmespeicherung	23
3.1. Wasser als Medium - Eine Übersicht	23
3.2. Theoretische Grundlagen und Modelle	31
3.2.1. Allgemeine Energieverluste und Effizienz	35
3.2.2. Speicherung sensibler Wärme in gesättigten Fluiden	38
3.2.3. Speicherung über Latentwärme	45
3.2.4. Andere thermische Speichermethoden	50
4. Etablierte Systeme und Pilotanlagen	52
4.1. Sensible Wärmespeicher	52
4.1.1. Pilotprojekte zu sensiblen Saisonspeichern	65
4.2. Latentwärmespeicher	71
4.2.1 Etablierte Anwendungen zu PCMs	77
4.3. Thermochemische Speicher	78
5. Abdeckung des Energiebedarfs	82
5.1. Der Energiebedarf Europas und Österreichs bis 2050	82
5.2. Abdeckung des Bedarfs durch etablierte Wärmespeicher	86
→ Wirtschaftlicher Fokus auf Österreich/Wien	86
→ Übersicht qualitativer Parameter saisonaler Speichermethoden	87
→ Fallbeispiel Wien, Potential für Solarthermie	90
5.3. Modell Wien: Flaktürme als saisonale Speicher	92
6. Schlussfolgerungen	108
7. Literaturverzeichnis	111

1. Einleitung

1.1. Kurzfassung/Abstract

Effiziente Wärmespeicherung - besonders langzeitige - stellt die Schlüsseltechnologie für eine zukünftige vollsolare Wärmeversorgung dar. Bis heute gibt es keine kompakte saisonale Lösung mit hoher Energiedichte. Bestehende Techniken sind meist mit hohem Aufwand und geringem Wirkungsgrad verbunden. Wo besteht also Innovationsbedarf? Können wir in Zukunft mit mehr "erneuerbarer Wärme" rechnen?

Die vorliegende Arbeit gibt einen Gesamtüberblick der derzeit am Markt etablierten Möglichkeiten zur langfristigen Wärmespeicherung und evaluiert diese nach physikalischen Parametern. Hervorgehoben wird besonders jener Bereich, der erhöhten Bedarf an Wärmespeichern aufweist: Die Raumwärme für Haushalte. Für diesen Sektor werden innovative Lösungsansätze aus der Physik untersucht, sowie eigene Berechnungen angestellt. In diesem Zusammenhang wird ein Modell der Wiener Flaktürme als saisonale Wärmespeicher, gekoppelt mit solarthermischen Anlagen und der Fernwärme, vorgestellt.

Die Methodik der Arbeit umfasst Literaturrecherche und -analyse, aber auch eigene Berechnungen und Ergebnissynthese. In Zukunft sinkt die Nachfrage nach Raumwärme durch fortschreitende Gebäudesanierung, gleichzeitig steigt aber der Strombedarf. Das hat zur Folge, dass vermehrt Abwärme in Kraftwerken frei wird, welche sich dann nicht mehr verkaufen lässt. Moderne thermische Speichersysteme auf Basis von Solarthermie könnten beispielsweise neue Möglichkeiten zur Kraft-Wärme-Kopplung Einsatzoptimierung schaffen.

Saisonale Heißwasserspeicher sind bereits erfolgreich durch Pilotanlagen mit solaren Deckungsanteilen von bis zu rund 65% demonstriert worden, in der Entwicklung stecken noch die Alternativen mit höheren Energiedichten, die nicht auf Basis von Wasser als Medium arbeiten. Besonders Latentwärmespeicher stellen den nächsten Fortschritt bei Saisonspeichern in Aussicht, diese sind bereits Thema zahlreicher Untersuchungen und Publikationen. So auch thermochemische Systeme, welche jedoch noch an zu hohen Investitionskosten und geringem Wirkungsgrad scheitern.

→ English

Storing heat efficiently, especially when it comes to long term storage, is the key to a fully solar-driven heat supply in the future. Until today there exists no compact seasonal solution with high energy density and established techniques are mostly rather complex but not very efficient. Is there any potential for innovation? Will there be more “renewable heat” in the future?

This thesis sketches an overview of most available possibilities on the market for short and long-term heat storage. Moreover, it evaluates them in physical terms. Furthermore, it highlights a section of elevated demand for storage solutions: Household space heating. For this section innovative methods (from a physical point of view) are investigated and also own calculations are presented. Concerning this matter the thesis suggests a model for the use of the Flak towers in Vienna as thermal energy storage systems, in which two of the towers would be connected to solar thermal collector fields and/or district heat.

The methodology used combines literature search and analysis with own calculations and interpretations. In the future the demand for household space heating will decrease due to advancing building renovations. The demand for electricity however will increase and that will lead to more waste heat in caloric power plants. It will not be possible to sell this additional thermal energy. State of the art thermal energy storage systems that operate on solar heat for example could replace caloric power plants during the summer time.

Seasonal, long-term heat storage is one of the important applications in question. With its help the solar fraction of solar-thermal applications can be optimized to about 60% at the moment. This is not pure theory but reality now and done in several pilot facilities all over the globe. Alternatives to seasonal heat storage that do not work with pure water as a medium, are still topics of science and under development. Especially systems operating on latent heat could replace hot water storage soon. For that many suitable types of storage media exist which are being investigated by current studies. Also thermo chemical storage is very promising, but at the moment such systems are still too expensive and their efficiency is far too low.

1.2. Motivation und Aufbau der Arbeit

Neue Energieformen beschäftigen die Menschheit zunehmend, früher oder später muss der Umstieg auf flächendeckende und autarke, erneuerbare Energieversorgung geschafft werden. Fossile Ressourcen schwinden, aber die Sonne bleibt der größte Energielieferant der Erde, ihr Potenzial ist noch nicht einmal im Ansatz ausgeschöpft. Der Solarthermie, also dem Gewinn von nutzbarer Wärmeenergie durch Sonneneinstrahlung und deren (langfristige) Speicherung, wird zukünftig eine wichtige Rolle im Wärmebereich beigemessen. *Grafik [1.1]* illustriert die modellierte Ablöse der fossilen durch erneuerbare Energien.

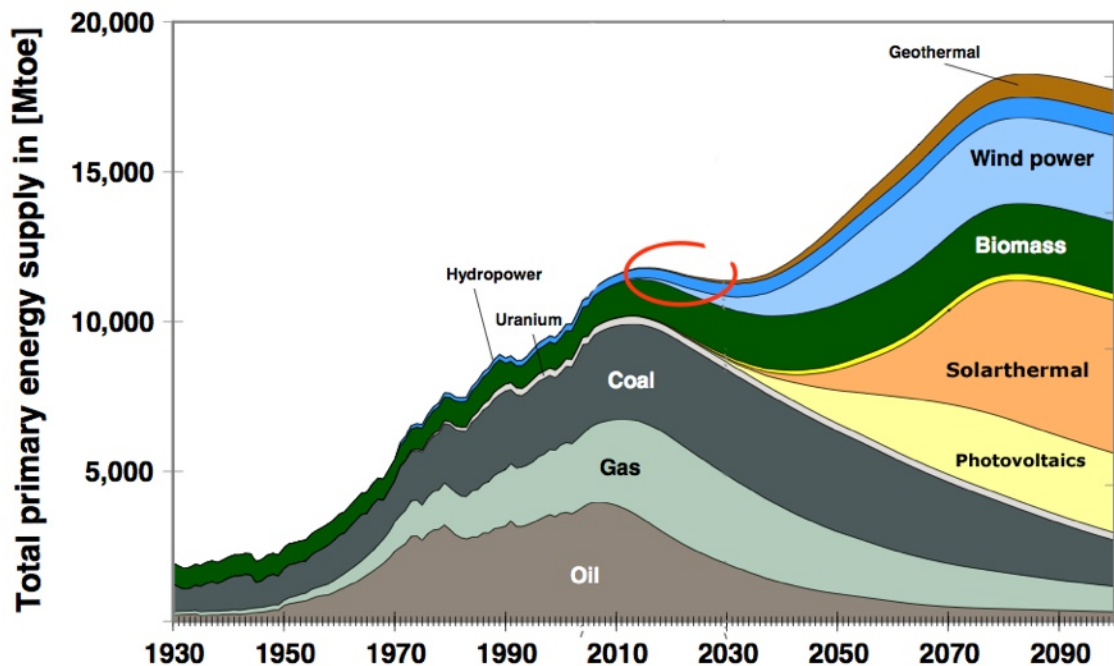
Im Folgenden wird eine grobe Gliederung der Arbeit gegeben:

- Zunächst werden physikalische Grundlagen der Thermodynamik und Materialphysik aufgearbeitet. Der Überblick behandelt all jenes Basiswissen, das für das Speichern thermischer Energie notwendig ist.
- Dann wird auf die Methoden zur Wärmespeicherung näher eingegangen. Sowohl Modelle und Optimierungsmöglichkeiten als auch Konzepte werden vorgestellt und nach physikalischen Grundlagen untersucht.
- Es folgt ein Überblick über bereits am Markt befindliche und in Pilotanlagen eingesetzte Systeme und deren Erfahrungswerte. Hierbei wird verstärkt auf die langzeitige, saisonale Speicherung eingegangen.
- Schlussendlich illustriert diese Arbeit den Energiebedarf Europas, seine Entwicklung und untersucht die Abdeckung durch innovative Methoden.
- Für Wien wird ein Modell der Wiener Flaktürme als solarthermische Anlage mit saisonalem Heißwasserspeicher gezeigt, welches im Zuge der Arbeit entstanden ist und sich auf Werte und Erfahrungen einiger Pilotanlagen stützt.

→ *Hinweis:* Es werden die in der Energiewirtschaft gebräuchlichen Angaben für Energie in “kWh” hervorgehoben (statt der physikalisch üblichen Einheit “J”).

→ *Hinweis:* Wenn nicht weiters angegeben, beziehen sich Zahlenangaben “(x)” in den Quellen auf das Literaturverzeichnis am Ende. Einmalige Zahlenwertquellen o.ä. werden nur per Fußnoten angeführt.

→ *Hinweis:* Ist keine explizite Grafikquelle angegeben, handelt es sich um eine selbst erstellte Abbildung oder Visualisierung, u.U. nach dokumentierten Datensätzen.



Grafik 1.1: Wenn fossile Energieträger auf der ganzen Welt zu Ende gehen, tritt die Ablöse durch erneuerbare Energien ein. In diesem globalen Modell wird deutlich, dass der Übergang mit einem Rückgang an Energieangebot verbunden ist, die Umsattelung also notwendiges Energiesparen bewirkt. Erst wenn ausreichend Kapazitäten zur Verfügung stehen, erholt und vergrößert sich das Angebot in diesem Modell. Fossile Ressourcen sind begrenzt. Durch verspätetes Setzen auf erneuerbare Energien der Industrieländer scheint der Übergang problematisch zu werden (rote Markierung). Neue Energiequellen wie Geothermie oder Solarthermie werden erst allmählich erschlossen, in letzterer steckt aber auch das meiste Potential. Kernfusion ist in dieser Abschätzung nicht berücksichtigt, denn die Marktreife ist schlecht abschätzbar. Fraglich bleibt, ob erneuerbare Energieformen allein wirklich die Nachfrage befriedigen können (und sogar das Angebot steigern) oder Energiesparen für die Zukunft unumgänglich ist. "Mtoe" steht für "Million Tonne of Oil Equivalent" mit $1\text{Mtoe} \approx 42\text{GJ}$.

Grafik: *Alternative World Energy Outlook, Ludwig Bolkow Systemtechnik 2007*

2. Physikalische Grundlagen

2.1. Größen und Begrifflichkeiten¹

Zunächst zu den physikalischen Fundamenten der Thermodynamik, den Hauptsätzen. In weiterer Folge beziehen sich viele Begriffe, Relationen und Aussagen auf sie.

- **Nullter Hauptsatz der Thermodynamik**

Die Existenz der Temperatur als physikalische, skalare Messgröße wird postuliert (historisch aber erst nach erstem und zweitem Hauptsatz, daher vorangestellt): Jedes makroskopische System besitzt eine Temperatur “T”, die einem homogenen Gleichgewichtswert zustrebt (*intensive* Größe). A, B, C seien thermodynamische Systeme, dann folgt aus $T_A > T_B$ und $T_B > T_C$ stets $T_A > T_C$. Bei Kontakt geht das so entstehende Gesamtsystem wieder in einen Gleichgewichtszustand über: $T_A = T_B$ und $T_B = T_C \Rightarrow T_A = T_C$

- **Erster Hauptsatz der Thermodynamik**

Die Temperatur eines Systems lässt sich ohne Ausübung von Arbeit an demselbigen erhöhen - Wärme ist also eine Energieform, die von einem System abgegeben oder aufgenommen wird. Der gesamte Energieinhalt eines Systems wird dann als *innere Energie* “U” bezeichnet. Bei *isolierten* Systemen, bei denen Wechselwirkung und Austausch mit der Umwelt unmöglich ist, ist $dU = 0$. Auf *geschlossene* Systeme, bei denen Wechselwirkung stattfindet (aber kein Materieaustausch), wird ab Seite 15 eingegangen, dort gilt: $dU = \partial Q + \partial W$

- **Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik**

Es kann keine *Zustandsänderung* (periodisch ablaufender Kreisprozess) geben, die einem Reservoir ausschließlich Wärme entzieht und sie vollständig in Arbeit umwandelt oder die als einziges Ergebnis den Wärmetransfer von einem “kälteren” Körper auf einen mit höherer Temperatur (“wärmeren”) hat. In diesem Zusammenhang wird die *adiabatische Zustandsänderung* formuliert: Bei einem solchen Prozess bleibt die *Zustandsfunktion Entropie* “S” konstant (siehe Seite 17), er läuft ohne Austausch von Wärme mit der Umgebung ab.

- **Dritter Hauptsatz der Thermodynamik**

Besagt, dass der absolute Nullpunkt der Temperatur nicht erreicht und ein System nicht bis auf diesen Punkt abgekühlt werden kann.

¹ **Quellen:** Weast (1), Desertec Foundation (2), Schreier et al. (3), Schnell (4), Nolting (16)

→ Exergie und Energieumsatz

Energie ist die Fähigkeit eines Systems, Arbeit zu verrichten. Man unterscheidet zwischen für Arbeit nutzbare Energie (*Exergie*) und für Arbeit nicht nutzbare Energie (*Anergie*), dabei gilt die folgende Energiebilanz:

$$\text{Exergie} + \text{Anergie} = \text{Energie}$$

Die Bewegungsenergie der Atome und Moleküle bezeichnet man als *thermische Energie*: Die Teilchen schwingen oder bewegen sich frei und ungeordnet als gasförmige Bestandteile (je nach Temperatur mehr oder weniger stark).

Energie ist zwar ein Skalar, besitzt also keine Ausrichtungsinformation, man unterscheidet aber zwischen gerichteten und ungerichteten ("diffusen") Energieströmen (beispielsweise bei Wärmefluss von einem Körper auf den anderen). Die Kenngröße für einen Energiestrom wird *Leistung* genannt - allgemein Energie pro Zeit, also: $[W] = [J/s]$. Weiters gilt:

$$\text{Nutzleistung} + \text{Verlustleistung} = \text{Leistungsaufnahme.}$$

Energie lässt sich umwandeln, der *zweite Hauptsatz der Thermodynamik* setzt dafür aber Grenzen. Thermische Energie ist nur eingeschränkt in andere Energieformen umwandelbar und zwischen Systemen übertragbar. Wenn zwei Körper mit unterschiedlicher Temperatur zur Verfügung stehen, tritt stets ein vom wärmeren zum kälteren Bereich gerichteter Energiestrom auf, von dem ein gewisser Prozentsatz in Nutzarbeit umgewandelt werden kann. Wie groß dieser Anteil (in %) höchstens (praktische Verluste vernachlässigt) ist, kann durch den (*Carnot*-) *Wirkungsgrad* " η " angegeben werden:

$$\eta = \frac{(T_1 - T_2)}{T_1} \cdot 100\%$$

Wobei T_1 bzw. T_2 die absoluten Temperaturen in $[^\circ K]$ der beteiligten Systeme sind und $T_1 > T_2$ gilt. In der Praxis sind systemabhängig Anteile von 45% (Kohlekraftwerk) bis 85% (*Kraft-Wärme-Kopplung*, siehe Seite 7) realistisch. Wärme bei einer Temperatur T_0 hat einen Exergieanteil entsprechend dem Carnot-Wirkungsgrad (T_u ... Umgebungstemperatur), der sich wie folgt schreibt:

$$\eta_{th} = \left(1 - \frac{T_u}{T_0}\right) \cdot 100\%$$

Je länger eine bestimmte Leistung also auftritt oder andauert, umso mehr Energie ("Nutzenergie") steht zur Verfügung. Ein Strom- bzw. Energieanbieter verrechnet daher nach "kWh". Diese Einheit ist in der Energiewirtschaft relevant und parallel zu Joule zu verstehen. Dies nennt sich *Energieumsatz*.

Die Umrechnung zwischen “J” und “kWh” ist simpel:

$$1\text{J} = 1\text{Ws} \Rightarrow 3,6 \cdot 10^6 \text{J} = 1\text{kWh}$$

→ Solarthermie

Solarthermie beschreibt die Umwandlung von Sonnenenergie in nutzbare thermische Energie, also Wärmegewinnung aus der Sonneneinstrahlung (vergleiche *Grafik [2.1]*). Sie ist parallel zur Photovoltaik zu verstehen, aber ihr Wirkungsgrad (verstanden als Verhältnis genutzter zu eingestrahelter Energie) ist mit 60-75% jährlich rund drei mal so hoch wie jener der Photovoltaik. Die Amortisationszeit ist noch dazu geringer. Solarthermische Anlagen können u.a. durch Kombination mit *Wärmepumpen* (siehe Seite 9) verbessert werden, der jährliche Wärmeertrag steigt. Dabei wird beispielsweise der Erdboden, aus dem die Wärmepumpe thermische Energie gewinnt, durch die Kollektoren und Überschusswärme erwärmt. Der Wirkungsgrad eines solarthermischen Kollektors wird vorallem durch die Temperaturdifferenz von Umgebung zu Absorber bestimmt, daher steigert die Abgabe von Überschusswärme den Wirkungsgrad.

Auf Grund von Reflexion/Absorption an Wolken und Aerosolen wird die tatsächliche Einstrahlungsflussdichte der Sonne stark reduziert. Sie variiert je nach Breitengrad und Einstrahlungswinkel und die Strahlung muss längere Wege durch die Atmosphäre zurücklegen. Somit ergeben sich (auch wegen des veränderlichen Sonnenstands) unterschiedliche Flussdichten an unterschiedlichen Orten. In Deutschland können im Jahresmittel rund $100\text{W}/\text{m}^2$ genutzt werden, wobei sich die maximal erzeugte Energie pro Jahr in der Praxis auf etwa $1071\text{ kWh}/\text{m}^2$ (*laut TREC, Desertec Foundation*) beläuft.

Es lassen sich mehrere Typen von solarthermischen Anlagen unterscheiden:

- **Flachkollektoren:** Arbeiten bei einer durchschnittlichen Temperatur von 80°C . Einfallende Strahlung erwärmt eine Ebene, die von fluidführenden Rohren durchzogen ist. Meist werden aber nicht reines Wasser (nur wenn der Wärmespeicher direkt mit diesem Wasser beladen wird), sondern Wasser-Propylenglykol-Gemische als Wärmeträgermedium verwendet (indirekte Speicherung über Wärmetauscher). Der Zusatz von Propylenglykol dient als Frostschutz und hebt die Siedetemperatur je nach Druck auf bis zu 150°C und mehr. Wärmeverluste sind gering und jährliche nutzbare Wärmeenergie liegt bei ca. $400\text{ kWh}/\text{m}^2$ (*nach Schreier et al.*). Auch Vakuum kann als (sehr effektive) Dämmung dienen.
- **Parabolrinnenkollektoren:** Nutzen die Fokussierung der Einstrahlung durch Parabolspiegel auf eine zentral verlaufende Wärmeleitung. Zu beachten ist hier die deutlich höhere Arbeitstemperatur zwischen 200°C und 500°C , daher müssen

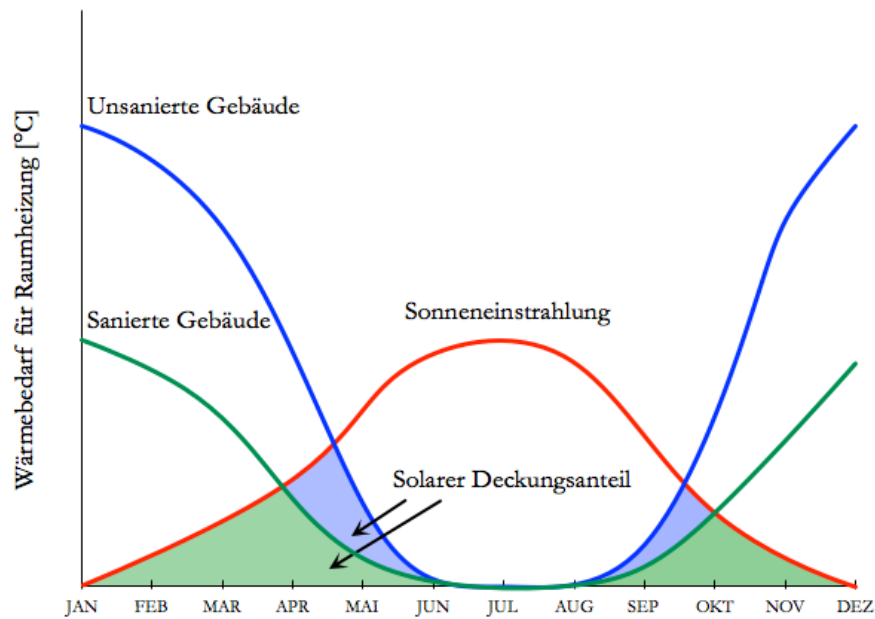
als Wärmeträgermedium diverse Öle eingesetzt werden. Der Wirkungsgrad ist hoch und die Verluste gering, Wärme steht durch die Fokussierung schnell bereit, aber die Spiegel müssen zur optimalen Leistung dem Sonnenstand nachgedreht werden. Das geschieht durch Drehung um die eigene, vertikale Achse.

- **Solartürme:** Viele einzelne Flachspiegel werden der Sonne nachgeführt, um so Licht an der Turmspitze auf den Absorber zu konzentrieren. Dadurch können sehr hohe Temperaturen von mehr als 1000°C erzeugt werden, die zu mehreren Zwecken einsetzbar sind (Energiegewinnung durch Verdampfung oder Wärmespeicherung). Die theoretische Grenze stellt nur die Strahlungstemperatur der Sonne dar. Als Wärmeträgermedien kommen Luft, Öle oder flüssiges Natrium (sehr reaktiv) in Frage. Der jährliche Wirkungsgrad ist gering.

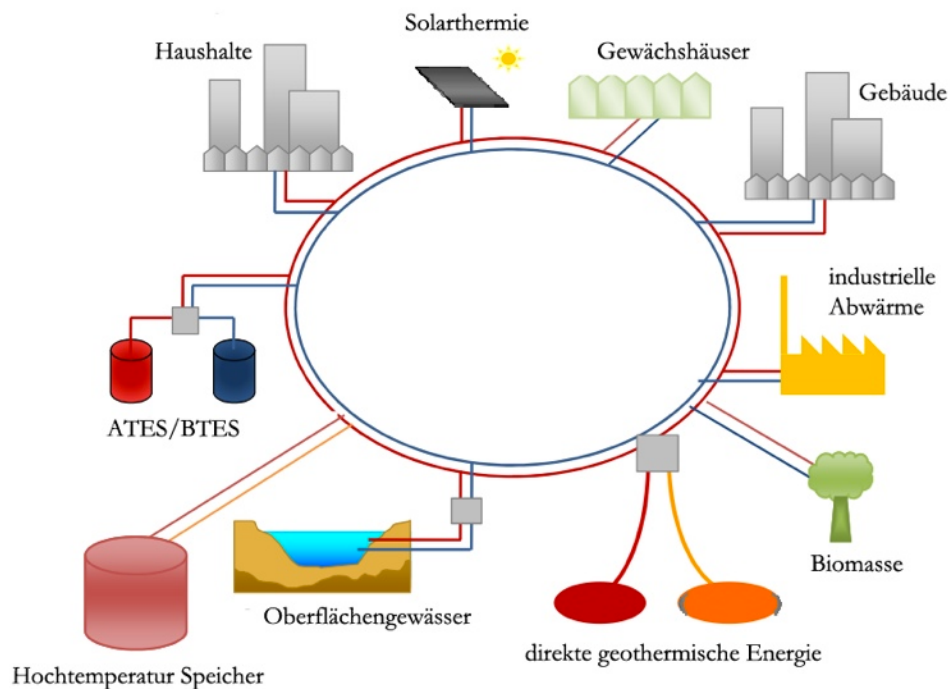
→ Kraft-Wärme-Kopplung

Die Kraft-Wärme-Kopplung ("KWK") beschreibt die Gewinnung von mechanischer Energie (direkt in elektrischen Strom umgewandelt) und gleichzeitig nutzbarer Wärme für Heiz- (*Fernwärme* bzw. *Nahwärme*) oder Produktionszwecke (*Prozesswärme*) in einem Heizkraftwerk. Der CO₂-Ausstoß eines Kraftwerks könnte zum Teil für Gewächshäuser weiterverwendet werden, wo das für die Photosynthese benötigte Kohlendioxid durch einen Katalysator aufbereitet würde. *Grafik [2.2]* illustriert den Energiezyklus (Angebot/Nachfrage) in einem zukünftig möglichen, erneuerbaren Energienetz. Eine zentrale Herausforderung besteht jedoch in den unterschiedlichen Temperaturniveaus.

Eine verbreitete Variante von KWK sind sogenannte Blockheizkraftwerke, kleinere Anlagen auf Basis von Verbrennungsmotoren oder Gasturbinen. Hier beschränkt sich die Wärmeversorgung auf ein bestimmtes Objekt oder die nähere Umgebung. Die Leitungsverluste sind so durch kürzere Transportwege geringer als bei Fernwärme.



Grafik 2.1: Schematischer Wärmeertrag durch Sonneneinstrahlung. Der visualisierte Deckungsanteil (*Solar Fraction*) kann durch saisonale Speicherung und anderen Hilfstechnologien aktiv verbessert werden (generell bis zu unwirtschaftlichen 100% - leistungsstarke Hilfssysteme vorausgesetzt), aber auch passiv etwa durch bessere thermische Gebäudedämmung.

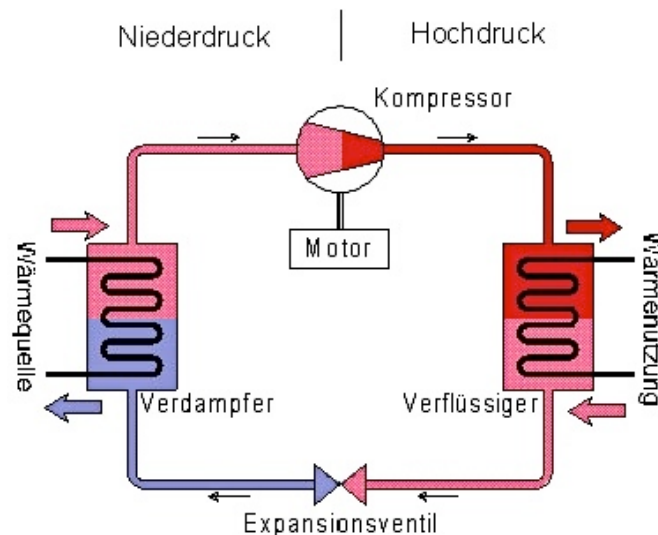


Grafik 2.2: Schematische Darstellung eines möglichen, zukünftigen Wärmezyklus. “Blau” steht für die geringere Rücklauf-, “Rot” für die Vorlauftemperatur. Problematisch sind die unterschiedlichen Temperaturniveaus und deren Eingliederung in das Netz: Wirkungsgrad und Verlustminimierung müssen beachtet werden. Entscheidend ist Anordnung/Reihung der Systeme zueinander. BTES und ATES stehen hierbei für “Borehole -” bzw. “Aquifer Thermal Energy Storage” und stellen unterschiedliche Arten von geothermischen Speichern dar - siehe dazu Kapitel 4.

→ Wärmepumpen und -überträger

Eine (Kompressions-)wärmepumpe nimmt unter Zufuhr von elektrischer Arbeit thermische Energie aus einem Reservoir niedriger Temperatur (im Regelfall der Umgebung, dem Erdreich oder dem Grundwasser) als Nutzwärme auf und überträgt diese in ein zu beheizendes System mit höherer Temperatur. Somit kann Wärme “veredelt” (technischer Terminus der Energiewirtschaft), also der Wirkungsgrad eines thermischen Energiespeichers verbessert werden, da die Temperatur des Speichermediums auch nach Erreichen des Temperaturgleichgewichts mit der Umgebung durch weitere Energiezufuhr angehoben werden kann (ebenso lässt sich ausschließlich mit einer Wärmepumpe ein Haus beheizen). Das geschieht aber eben nicht ohne zusätzlichen Arbeitsaufwand in Form von elektrischer Energie, die der Wärmepumpe zugeführt werden muss - dadurch entstehen zusätzliche Kosten, siehe nochmals *Grafik [2.1]*.

Kompressionswärmepumpen gleichen im Prinzip einem Kühlschrank und werden mit Fluiden (meist Kältemitteln - FKWs/Propan) als Arbeits- bzw. Wärmeüberträgermedien betrieben, die bei niedrigem Druck unter Wärmezufuhr verdampfen (*Verdunstungskälte*, *adiabatische Expansion*) und nach der Verdichtung (*adiabatische Kompression*) unter Aufwand elektrischer Arbeit auf höheren Druck unter Wärmeabgabe wieder kondensieren (*Kondensationswärme*). Es findet also zweimaliger Phasenübergang statt. *Grafik [2.3]* zeigt dazu die wichtigsten Charakteristika einer solchen Wärmepumpe.



Grafik 2.3: Die wichtigsten Charakteristika einer Kompressionswärmepumpe. Der Motor muss mit elektrischem Strom betrieben werden und stellt daher erhöhte, laufende Kosten dar. Die Drossel, das Expansionsventil, gewährleistet “Entspannung” (Abkühlung) des Fluids mit konstanter Totalenthalpie. *Grafik: Fleischer-Energietechnik (www.fleischer-energietechnik.de/waermepumpen.html)*

Die benötigte Energie zum Antrieb der Wärmepumpe verringert sich, je geringer die Temperaturdifferenz ist. Daher ist die *Temperaturpreizung*, also diese Differenz der bei-

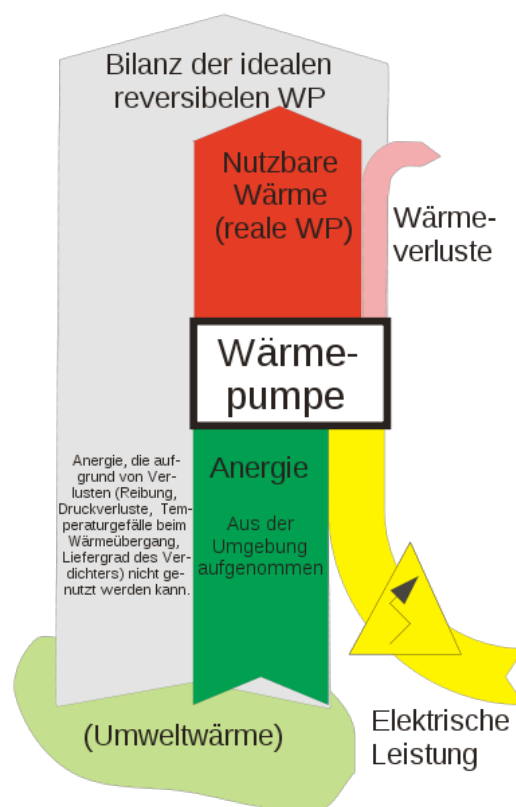
den Arbeitstemperaturen (die vorherrschenden, realen Temperaturen), ausschlaggebend für den Wirkungsgrad. Die Medien zum Wärmetransfer sollten daher für möglichst geringe Spreizungen zwischen der Primär- und Sekundärseite ausgelegt sein.

Das Verhältnis von nutzbarer Wärmeenergie “ Q_c ” zu zugeführter elektrischer Verdichterarbeit “ W ” wird als Leistungszahl bzw. *Coefficient Of Performance* (“COP”) bezeichnet. Es ist ein Multiplikator, um den die eingespeiste Leistung vervielfältigt werden kann. Dieser Wert hat allerdings eine obere Schranke, die der *Carnot-Prozess* (siehe Seite 14) nach dem *Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik* bestimmt:

$$\text{COP} = Q_c \cdot W^{-1}$$

$$\text{COP}_{\max} = T_2 \cdot (T_2 - T_1)^{-1}$$

Wobei $T_1 < T_2$. Der Gütegrad errechnet sich aus dem Verhältnis $\text{COP}/\text{COP}_{\max}$. Praktisch werden dabei Werte im Bereich 0,45 bis 0,55 erreicht. In *Grafik [2.4a]* ist die Energiebilanz schematisch gezeigt.



Grafik 2.4a: Flussbild der Energiebilanz einer Wärmepumpe. Der graue Bereich stellt jenen Teil der Anergie dar, der aufgrund von Verlusten nicht genutzt werden kann. *Grafik: Sielker 2008, http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/9/9e/Bilanz_der_Wärmepumpe.svg*

Der *Wärmeüberträger* (auch *Wärmetauscher*) überträgt thermische Energie von einem Medium (flüssig oder gasförmig, strömend bzw. zirkulierend) auf ein anderes. Wärmetauscher lassen sich hinsichtlich der Wärmeübertragungsart unterscheiden:

- **Direkte Wärmeübertragung** beruht auf dem Vorgang der kombinierten Wärme- und Stoffübertragung eines Mediums. Das Speichermedium ist so beispielsweise auch gleichzeitig das Überträgermedium.
- **Indirekte Wärmeübertragung** zeichnet sich dadurch aus, dass die Medien räumlich durch eine wärmedurchlässige Wand getrennt sind (“Wärmetauscher”) und mit einander nicht in Berührung kommen.

Das Ausmaß der Wärmeübertragung ist von der geometrischen Führung beider Stoffe zu einander bestimmt. Hier ist vor allem das *Gegenstromprinzip* (wenn die Strömungsrichtungen der beiden Medien entgegengesetzt verlaufen) bevorzugt, was *Grafik [2.4b]* veranschaulicht. Der Wirkungsgrad ist des weiteren dann groß, wenn das zu erwärmende Medium möglichst stark aufgewärmt und das andere möglichst stark abgekühlt wird, also die *Temperaturspreizung* wieder besonders hoch ist. Eine Grenze hierfür ist wieder durch den *Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik* gegeben. Die übertragene thermische Energieleistung bei absoluten Temperaturen ergibt sich (*nach H. Schnell*) zu:

$$\dot{Q} = kA \cdot \Delta\theta_m$$

$$\Delta\theta_m = \frac{T_1 - T_2}{\ln(T_1/T_2)}$$

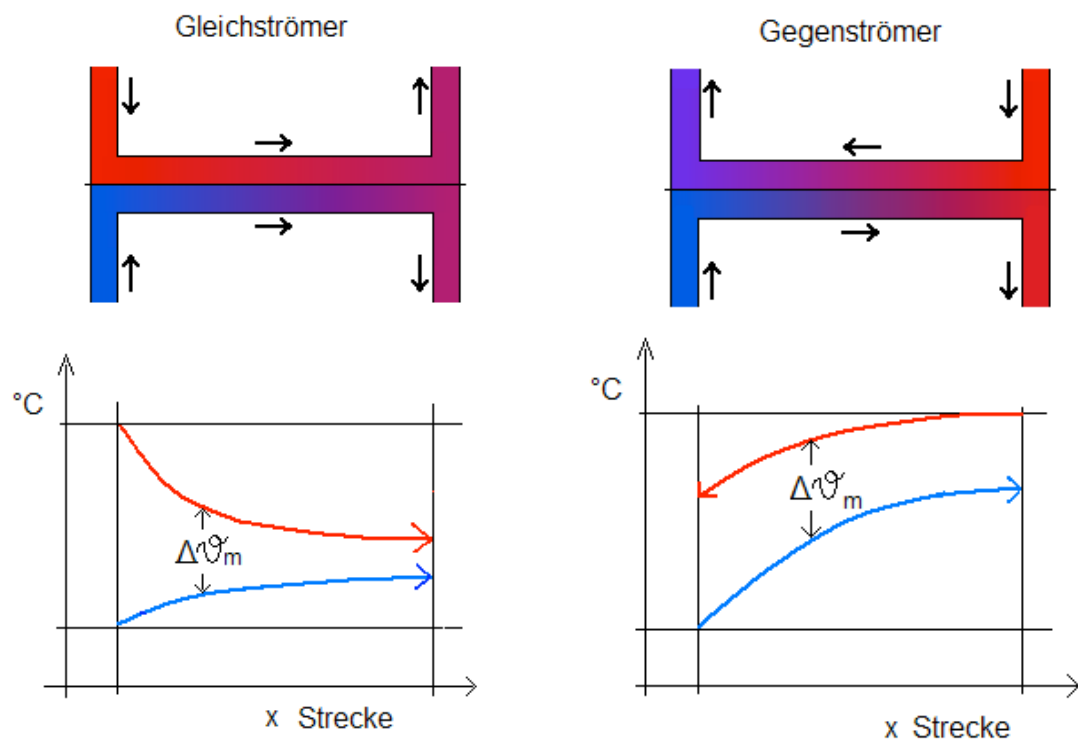
mit

k ... Wärmedurchgangskoeffizient [W/(m² K)]

A ... Übertragungsfläche

$\Delta\theta_m$... mittlere Temperaturspreizung

Eine simple geometrische Realisierung des Wärmetauschers sind zwei wärmedurchlässige, konzentrisch angeordnete Rohre unterschiedlichen Durchmessers, in denen zwei Medien räumlich getrennt an einander vorbei strömen. Die Außenhaut ist durch eine zusätzliche Vakuumschicht isoliert.



Grafik 2.4b: Grundlegende Strömungsgeometrien von Wärmetauschern bei indirekter Wärmeübertragung. Während bei gleich orientierter Strömungsrichtung die Temperaturpreizung mit dem zurückgelegten Weg abnimmt (links), bleibt sie im entgegengesetzten Fall in etwa konstant (rechts). Daher kann der Kontaktbereich beim Gegenströmer wesentlich länger ausfallen, ohne die Effizienz zu beeinträchtigen. Bei sehr kurzen Strecken ist wiederum der Gleichströmer von Vorteil (links). Der Gegenströmer bietet weiters eine höhere Endtemperatur, was ebenfalls von Vorteil ist.

Grafik: Anders 2004, <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/0/01/Gegenstromprinzip.png>

2.2. Thermodynamik und thermodynamische Systeme²

Als *thermodynamisches System* wird ein makroskopisches System bezeichnet, welches aus vielen Einzelementen (etwa Atomen) besteht. Es sind daher Systeme mit sehr vielen Freiheitsgraden, jedoch werden ihre Mikrozustände vernachlässigt. Dadurch lassen sich solche komplizierten Viel-Teilchen-Systeme ($N \dots$ Teilchenzahl) phänomenologisch ausreichend durch relativ wenige, makroskopische Observablen (messbare *Zustandsgrößen*) beschreiben. Von *Gleichgewicht* spricht man dann, wenn die Werte der Basis-Zustandsgrößen (V, T, P, N) zeitlich invariant (unveränderlich) sind.

Es ergibt sich daher der sogenannte *Zustandsraum*, der von einem vollständigen Satz unabhängiger Zustandsgrößen aufgespannt wird. Ein Zustand ist über Werte eines solchen vollständigen Satzes unabhängiger Größen definiert und stellt einen Punkt im Zustandsraum dar. Bei der Definition der (kalorischen) *Zustandsgleichung* wählt man weiters eine der Zustandsgrößen ("U") als *Zustandsfunktion* und die anderen, von ihr abhängigen Zustandsgrößen, als Zustandsvariablen: $U = U(V, T, N)$.

Eine Zustandsänderung (auch *Prozess*) wird *reversibel* genannt, wenn es sich um eine umkehrbare Folge von Gleichgewichten handelt und damit die zeitliche Umkehr der Änderung von äußeren Bedingungen einer zeitlichen Umkehr der vom System durchlaufenen Zustände entspricht. Im Falle eines *Kreisprozesses* kehren alle Zustandsgrößen immer wieder zu denselben Werten zurück. Zustandsänderungen eines Systems gehen in der Allgemeinheit mit Energieänderungen einher, welche durch geleistete Arbeit am System oder vom System hervorgerufen werden oder, weil sich der Wärmehalt des Systems ändert.

Der *Carnot-Wirkungsgrad* stellt die obere Grenze des Wirkungsgrades eines periodisch laufenden thermodynamischen Carnot-Prozesses (auch Kreisprozess) dar, er erreicht aber auch im theoretischen Modell nie "1" (nach dem *dritten Hauptsatz der Thermodynamik*), selbst wenn Verluste vernachlässigt und idealisierte Bedingungen angenommen und ein vollständig reversibler Prozesse vorausgesetzt werden. In der Praxis weicht der Wert des Wirkungsgrades noch deutlicher von "1" ab und ist wesentlich kleiner, denn die Verluste sind höher und nur ein kleiner Teil der Energie kann nutzbar gemacht (also umgewandelt) werden. Der Carnotgrad wird daher als reine Referenz genommen ("W" als Arbeit des Systems, "Q" als zugeführte Wärmemenge), er schreibt sich als:

$$\eta_c = \frac{W_{system}}{Q_{in}} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

² **Quellen:** Nolting (16), Demtröder (4), Halliday et al. (6b)

Wobei “ T_1 ” und “ T_2 ” (mit $T_1 < T_2$ und $T_2 > 0$) absolute Temperaturen sind und den Arbeitsbereich einer realen Wärmekraftmaschine darstellen. Sie beziehen sich auf die Reservoirs, zwischen denen Wärme durch Arbeitsaufwand ausgetauscht wird. (*Anmerkung*: Die Existenz der Temperatur als physikalische Größe wird von der Thermodynamik postuliert: *Nullter Hauptsatz der Thermodynamik*)

Wärme ist Energieform, die absorbiert oder abgegeben werden kann. Damit lässt sich die Temperatur eines Körpers (oder Systems) verändern ohne an ihm Arbeit zu verrichten. Daher ist die *innere Energie* “ U ” eines *geschlossenen* Systems (zwar Wechselwirkung aber kein stofflicher Austausch mit der Umgebung) als Zustandsfunktion $U=U(V,T)$ definiert über den *Ersten Hauptsatz der Thermodynamik* (eine Energiebilanz):

$$dU = \partial Q + \partial W$$

wobei

$$\partial Q = T dS \qquad \partial W = -p dV$$

mit

∂Q ... differentieller Wärmeaustausch

∂W ... differentielle *Volumsarbeit*

T ... Temperatur

dS ... differentielle Entropieänderung

p ... Druck

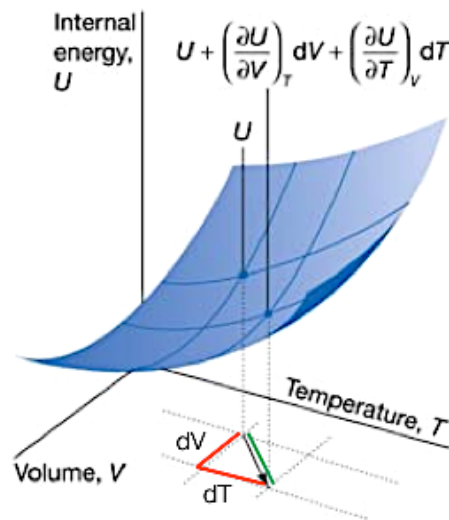
dV ... differentielle Volumsänderung

Anmerkung: Die Notation “ d ” weist auf ein *exaktes (totales) Differential* hin, “ ∂ ” lediglich auf eine infinitesimale Änderung und kein Differential. Exaktheit bedeutet Wegunabhängigkeit bei Integration, was für Arbeit und Wärme (Eigenschaften eines *Prozesses*) nicht erfüllt ist. Exakt differentierbar bedeutet, am Beispiel von $U=U(V,T)$:

$$dU = \left(\frac{\delta U}{\delta T}\right)_V \cdot dT + \left(\frac{\delta U}{\delta V}\right)_T \cdot dV$$

Dieser Umstand ist auch in *Grafik [2.4c]* illustriert. Der Index “ V ” bzw “ T ” gibt dabei an, welche Größe gerade fixiert bleibt. Die Funktion selbst ist dabei stets ein Minimum. Das Integral dieser Funktion ist weiters weg-unabhängig, also gilt für ein *isoliertes* System (für einem *reversiblen Kreisprozess = Carnot-Prozess*):

$$\oint dU = 0$$



Grafik 2.4c: Der Zustandsraum für die Funktion der inneren Energie, der infinitesimale Änderungen von “ dU ” proportional zu “ dV ” und “ dT ” beschreibt, welche jeweils als Tangenten an die Funktionen verstanden und durch Projektion zweidimensional dargestellt werden können (rot). Auf grund der Wegunabhängigkeit von “ dU ”, kann statt des roten der grüne Weg benutzt werden, um eine Zustandsänderung U zu berechnen.

Grafik: Von Grün, <http://www.uni-graz.at/people/vongruen/VORLESUNG/PC1/Kapitel3.pdf>

Dabei gibt die Zustandsfunktion *Entropie* Auskunft über den Energieverlust der für Arbeit zur Verfügung stehenden Energie (Exergie) in einem irreversiblen thermodynamischen Prozess. In der Praxis ist kein Prozess völlig reversibel. Entropie vergrößert sich oder bleibt zumindest konstant in einem *isolierten* System. Diesen Umstand formuliert der *Zweite Hauptsatz der Thermodynamik* und damit fließt Wärme (ohne äußeren Energieaufwand - siehe *Wärmepumpe*) immer nur vom wärmeren zum kälteren Körper:

$$dS \geq \partial Q \cdot T^{-1}$$

Der *Dritte Hauptsatz der Thermodynamik* postuliert klassisch $S \Rightarrow 0$, wenn die Temperatur gegen den absoluten Nullpunkt ($T \Rightarrow 0^\circ\text{K}$) strebt und liefert damit eine Integrationsbedingung für obige Formel, um den Absolutwert zu bestimmen. Der absolute Nullpunkt kann auch in der Theorie nur in guter Näherung erreicht werden, da für Wärmefluss immer ein Reservoir noch geringerer Temperatur existieren muss und mit $T \rightarrow 0$ auch für “ dT ” (die Temperaturniedrigung) $dT \rightarrow 0$ folgt (siehe (4) Demtröder).

Alternativ lässt sich das auch über die *quantenmechanische Nullpunktsenergie* erklären: Diese stellt die Differenz zwischen der Energie eines quantenmechanischen Systems im Grundzustand und dem Energieminimum des Systems klassisch beschrieben dar. “Wird, wie im Falle von thermodynamischen Systemen, Energie mit der Umgebung ausgetauscht, ist die Nullpunktsenergie gleich der Energie des Systems am absoluten Temperaturnullpunkt“, nach Schwabl, *Quantenmechanik*, 6. Auflage, Springer Verlag 2005.

Klassisch ist der energieärmste Zustand jener, in dem das Teilchen am Potentialminimum ruht, also am Ort $x = 0$ mit dem Impuls $p = 0$ und der Nullpunktsenergie $E = 0$. In der Quantenmechanik liegt die geringst mögliche Energie aber über dem Wert des Potentialminimums, nämlich bei $E \geq \frac{1}{2}\hbar\omega$, da die *Unschärferelation von Heisenberg* gilt:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar^2}{2}$$

Eine endliche Ortsunschärfe, wie etwa bei gebundenen Zuständen, verlangt grundsätzlich eine Impulsunschärfe größer Null. Daher können weder Impuls noch kinetische Energie exakt Null sein. Da die kinetische Energie weiters auch nicht negativ werden kann, muss die Gesamtenergie, (Summe aus potentieller Energie und kinetischer Energie) also größer sein als das Minimum der potentiellen Energie. In der Quantenmechanik verbietet die Unschärferelation also, dass die Größen Ort und Impuls exakte Werte annehmen. Je genauer der Ort bekannt ist, um so weniger genau kennt man den Impuls, und vice versa. Anschaulich ergibt sich die Nullpunktsenergie dann als Mittelwert dieser Schwankungen über die Unschärferelation. Details siehe *Schwabl, Quantenmechanik, 6. Auflage, Springer Verlag 2005*.

Sehr anschaulich wird das bei der Betrachtung des Standardbeispiels für die Nullpunktsenergie, des quantenphysikalischen harmonischen Oszillators (mit ω ... Kreisfrequenz, $\hbar$... reduziertes Planksches Wirkungsquantum und m ... Masse).

Dieser besitzt zwar ein kontinuierliches Potential $V(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \cdot m\omega^2\mathbf{x}^2$, also ein Potentialminimum $V(0) = 0$, aber ein quantisierte Energiespektrum $E_n = \hbar\omega \cdot (n + \frac{1}{2})$. Selbst im energetisch niedrigsten Zustand, dem Grundzustand mit $n = 0$, existiert somit eine Energie größer Null, nämlich die bereits genannte $E = \frac{1}{2} \cdot \hbar\omega$.

Zusammenfassend ergibt sich die *Grundgleichung der Thermodynamik* aus erstem und zweitem Hauptsatz im thermodynamischen Limit (Gleichgewichtszustand) für einen reversiblen Prozess in einem geschlossenen System. Sie verbindet die Änderung der inneren Energie mit Änderungen der Entropie und den externen Parametern:

$$dU = TdS - pdV$$

Ist eine Zustandsänderung *adiabatisch* (ohne Austausch von Wärme mit der Umgebung, $dQ = 0$), geht die gesamte am System verrichtete Arbeit in die innere Energie über oder umgekehrt (das ist in der Praxis prinzipiell durch unvollständige Isolation jedoch nicht erreichbar), es gilt:

$$dU = \partial W = -pdV$$

Über den *Ersten Hauptsatz der Thermodynamik* ergibt sich nun weiters die *Wärmekapazität* “C” eines Stoffes, welche angibt, wieviel Wärmeenergie aufgenommen werden kann, also mit welcher Temperaturänderung ein System auf Wärmezufuhr oder -abfuhr reagiert. Bleibt dabei das Volumen konstant (keine *Volumsarbeit*), verschwindet der differentielle Volumensanteil aus der Funktion für die innere Energie $U = U(V, T)$:

$$dU = \left(\frac{\delta U}{\delta T}\right)_V \cdot dT = \delta Q$$

Dass eine Variable festgehalten wird (invariant ist), wird durch den tiefgestellten Index der jeweiligen Größe dargestellt - In diesem Fall “V”. Bei homogenen Körpern wird die Wärmekapazität auf die Masseinheit bezogen, heißt dann *spezifische Wärmekapazität* “c” (hier bei konstantem Volumen) und lässt sich in die obige Gleichung setzen:

$$c_V = \left(\frac{\delta U}{\delta T}\right)_V$$

$$dU = c_V \cdot dT = \delta Q$$

Für das *ideale Gas* (Gasteilchen als Punktmassen angenommen, bewegen sich kräftefrei, also geradlinig mit konstanter Geschwindigkeit, bis ein Stoß an anderen Teilchen oder der “Volumswand” sie in eine andere Richtung lenkt und sie dabei beschleunigt oder abbremst) gilt diese Gleichung also differentiell. Ganz allgemein bedeutet das aber für eine Temperaturerhöhung von 1°K, wenn “ΔQ” eine kleine Wärmemenge darstellt:

$$\Delta Q = C \cdot \Delta T$$

wobei

$$C = cM$$

die Wärmekapazität auf die Masse “M” bezogen mit $[C] = [J/K]$ beschreibt. Wenn auf Mol bezogen, heißt sie “molekulare Wärmekapazität” mit $[C] = [J/(mol \cdot K)]$. Für eine beliebige Masse $M^* = aM$ gilt demnach allgemein:

$$\Delta Q = aC \cdot \Delta T$$

Ist nun der Druck konstant, ergibt sich die spezifische Wärmekapazität zu:

$$c_P = \left(\frac{\delta H}{\delta T}\right)_P$$

Wobei die *Enthalpie* “H”, der “Wärmeinhalt” definiert ist als:

$$H = U + pV$$

bzw. abgeleitet

$$dH = TdS + Vdp$$

Diese Enthalpie und vor allem die *spezifische Enthalpie* “h” (pro Masseinheit) ist ausschlaggebend bei der theoretischen Formulierung von Wärmespeicherung: Sie beinhaltet sowohl die Beisteuerung an Energie über die Temperatur (die Wärme selbst) als auch über die Volumsarbeit, die beim Erwärmen/Abkühlen (Ausdehnen/Zusammenziehen) verrichtet wird. Bei Flüssigkeiten und Feststoffen kann diese Volumsarbeit aber vernachlässigt werden.

Man unterscheidet bei der spezifischen und molaren Wärmekapazität, ob ein Stoff isochor ($dV = 0$) oder isobar ($dp = 0$) erwärmt wird. Die innere Energie eines Mediums hängt dabei von der Zahl der Freiheitsgrade “f” seiner “ N_A ” Stoffmoleküle ab. Mit *Freiheitsgrad* wird die Zahl der frei wählbaren, von einander unabhängigen Bewegungsmöglichkeiten eines Systems bezeichnet. Für 1 Mol eines ideales Gases bei fixem Volumen [mit Gaskonstante $R \sim 8,314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$] bedeutet das:

$$U = \frac{1}{2} f \cdot RT$$

Wobei hier die mittlere Energie eines Moleküls $\mathbf{E}' = \frac{1}{2} f \mathbf{k}_B \mathbf{T}$ mit der Boltzmannkonstante $\mathbf{k}_B = \mathbf{N}_A \mathbf{R}$ aus der kinetischen Gastheorie verwendet wurde. Die innere Energie verteilt sich im thermischen Gleichgewicht gleichmäßig auf alle Freiheitsgrade (über Stöße zwischen den Molekülen) und jeder Freiheitsgrad besitzt im Mittel den gleichen Energiebeitrag von $\langle E \rangle = \frac{1}{2} \cdot k_B T$, sofern dieser auch tatsächlich angeregt wird und nicht “eingefroren” ist (*Äquipartitionstheorem* bzw. *Gleichverteilungssatz*). Siehe Grafik [2.5]

Es gilt für die spezifische Molwärme von idealen Gasen bei konstantem Volumen über Differenzieren von “U” bei fixiertem “V”:

$$c_V = \frac{1}{2} f \cdot R$$

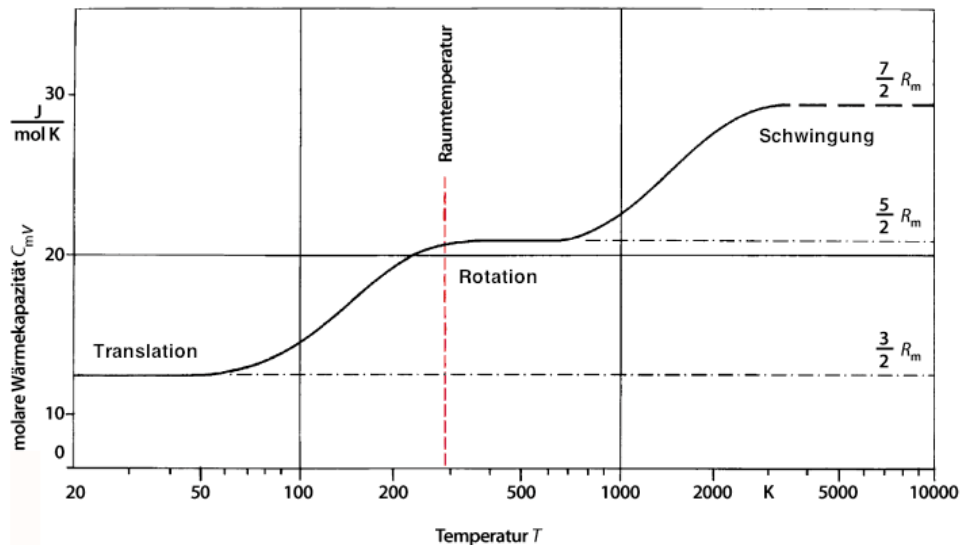
Bei isobarer Erwärmung muss zusätzliche Energie zur Expansion bereitgestellt werden, die spezifische Molwärme eines idealen Gases bei konstantem Druck ist dann:

$$c_P = c_V + R$$

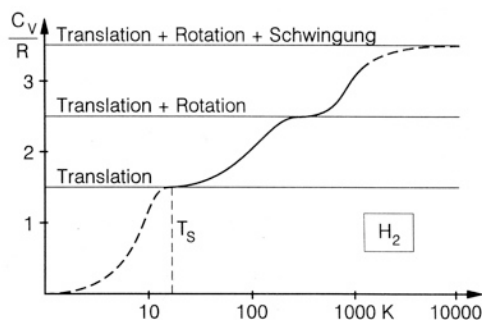
Freiheitsgrade können Translation in die drei Raumrichtungen sein, aber auch Rotation um Raumachsen und Schwingung (bei Molekülen) können zugeführte Energie absorbieren und so speichern. Bei Raumtemperatur existieren effektiv aber nur die drei Translationsfreiheitsgrade. Ein zweiatomiges Molekül, wie molekularer Wasserstoff etwa, besitzt sechs: Drei der Translation, zwei der Rotation, und einen Schwingungsfreiheitsgrad (dieser zählt allerdings bei der Berechnung der inneren Energie doppelt). Rotation und Schwingung sind quantisiert und bei zu geringer Gesamtenergie eines Moleküls können energetisch höher liegende Freiheitsgrade nicht angeregt werden.

So werden bei Wasserstoff bei niedriger Temperatur nur 5 Freiheitsgrade angeregt, was sich am *Adiabatenindex* ablesen lässt - Bei hohen Temperaturen sind dem System alle Freiheitsgrade zugänglich. Details siehe *Grafiken [2.5a] und [2.5b]*. Das Verhältnis von “ c_p ” zu “ c_v ” nennt man dann *Adiabatenindex* “ κ ”:

$$\kappa = \frac{c_P}{c_V} = \frac{f + 2}{f}$$



Grafik 2.5a: Temperaturabhängigkeit der molaren Wärmekapazität “ C_{mV} ” von Wasserstoff (einzelnes H_2 -Molekül), welcher bei rund $T = 2300K$ dissoziiert (die fortgesetzte gestrichelte Linie würde dann, wäre es stabil, für ein zweiatomiges Molekül gelten). Bei tiefen Temperaturen verhält sich H_2 offenbar wie ein einatomiges Gas mit 3 Freiheitsgraden der Translation (insgesamt beläuft sich der Beitrag der Translationsfreiheitsgrade auf $\frac{3}{2}$ der molaren Gaskonstanten “ R_m ”). Mit steigender Temperatur (ab etwa 80K) beginnen die Moleküle zu rotieren, dies bewirkt einen Anstieg der Wärmekapazität. Bei Raumtemperatur rotieren praktisch alle Moleküle und der Gesamtbeitrag der beiden Rotationsfreiheitsgrade ist $1R$. Einen erneuten Anstieg der Wärmekapazität verzeichnet man ab rund $T = 800K$, wenn die Moleküle zu schwingen beginnen - hier ist der Beitrag von potentiellen und kinetischen Energie der Schwingungsbewegung im Grenzfall bei hoher Temperatur (ab 2300K) ebenfalls $1R$. Da der Drehimpuls quantisiert ist, kann der Beitrag durch Rotation/Schwingung erst ab einer bestimmten Temperatur (Energie) einsetzen - ist diese Voraussetzung nicht gegeben, spricht man von “ausgefrorenen” Freiheitsgraden. *Grafik: Hering/Martin/Stobrer: Physik für Ingenieure, 11. Auflage, Springer Verlag 2012*



Grafik 2.5b: Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärme von Wasserstoff in Analogie zur obigen Abbildung, aber mit besonderem Augenmerk auf den Bereich unterhalb von $T=20^\circ K$. Sobald nämlich der Schmelzpunkt bei $T_s=14^\circ K$ erreicht ist (Wasserstoff wird fest), sind auch Rotationsfreiheitsgrade möglich.

Grafik: H. Paus: Physik in Experimenten und Beispielen, erste Auflage, Carl Hanser Verlag, München 2007

→ Wärmeleitfähigkeit

Der Wärmeleitwert “ G_{th} ”, die absolute Wärmeleitfähigkeit in [W/K], ist der von der Geometrie eines Wärmeleiters abhängige spezifische Kennwert. Für ihn gilt in Analogie zur Elektrizität das *Ohmsche Gesetz des thermischen Kreises*:

$$I_{th} = \Delta T \cdot G_{th}$$

wobei

I_{th} ... Wärmestrom

ΔT ... Temperaturdifferenz

Die Wärmeleitfähigkeit (auch *Wärmeleitzahl* “ λ ”) eines Stoffs ist sein Vermögen, thermische Energie über Wärmeleitung zu transportieren. Es handelt sich um eine temperatur-abhängige Materialkonstante. Die Wärmeleitfähigkeit unterscheidet sich aber von der Temperaturleitfähigkeit - dem *Temperaturleitwert* “ $\dot{T}$ ”, welcher Aussage über die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Temperaturänderung durch das Medium trifft und wie folgt definiert ist (ρ ... Dichte):

$$\dot{T} = \frac{dT}{dt} = \frac{\lambda}{\rho c} \cdot \Delta T$$

Zu beachten ist, dass Wärme nicht nur durch Wärmeleitung transportiert wird, sondern auch durch *Konvektion* (in Fluiden) und Wärmestrahlung.

Alternativ lässt sich dieser Zusammenhang auch rein über die Geometrie des Wärmeleiters definieren. Bei einem Quader etwa, wenn “ ΔT ” die Temperaturdifferenz in Längsrichtung (Länge “ L ”) ist und der Querschnitt “ A ”, fließt durch Wärmeleitung von “warm nach kalt” der Wärmestrom in [W]:

$$I_{th} = \Delta T \cdot A L^{-1} \cdot \lambda$$

mit der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit “ λ ” in [W/(m·K)]. Über kleinere Temperaturbereiche in isotropen Materialien wird sie als konstant angenommen.

→ Konvektion

Thermische Konvektion stellt eine Ortsveränderung von leichtbeweglichen (flüssigen oder gasförmigen) Teilchen dar, die thermische Energie mit sich führen. Erwärmt man die unterste Schicht eines Fluids, so erreicht diese eine höhere Temperatur als die darüber liegenden Schichten. Die Dichte sinkt dadurch (außer bei Wasser unter 4°C)

und die Fluidschicht steigt durch den Auftrieb nach oben, während die darüber liegenden, kälteren Schichten nach unten sinken. Dieser Konvektionsvorgang führt zu einem Wärmetransport von “warm nach kalt”. Die transportierte Wärmemenge hängt von der Konvektionsgeschwindigkeit und dem Temperaturunterschied zwischen sich vermischenden Nachbarschichten ab. Die Konvektionsströmung kann, abhängig von Randbedingungen, laminar oder turbulent sein.

Man unterscheidet zwischen:

- **Natürliche (freie) Konvektion:** Ausschließlich durch einen Temperaturgradienten und die damit verbundenen Dichteschwankungen hervorgerufen.
- **Erzwungene Konvektion:** Der Teilchentransport wird durch externe Einwirkung hervorgerufen, wie es beispielsweise bei einem Zu- bzw. Ablass eines Fluids (respektive Wasser) der Fall ist.

→ Wärmeisolation

Für eine zufriedenstellende Isolation muss man die Beiträge aller drei Mechanismen des Wärmetransports beachten. Die Wärmeleitung (*Wärmeverlust*) in Joule (Wattsekunden) durch die Fläche “A” (hier pro Zeiteinheit) mit der Dicke “d” wird bei einer Außentemperatur “ T_a ” und einer Innentemperatur “ T_i ” differentiell angegeben:

$$\frac{dQ}{dt} = A \cdot k \cdot (T_i - T_a)$$

wobei der sogenannte “k-Wert” (auch “U-Wert”) materialspezifisch ist und die pro Flächeneinheit transportierte Wärmeleistung bei $\Delta T = 1^\circ\text{K}$ angibt:

$$k = \frac{\lambda}{d}$$

Er ist also Maß für die Wärmeisolation und gibt im Inversen den *Wärmewiderstand* “R” (bei Bauteilen) an. Ein Beispiel einer Hauswand zeigt: Der Wärmetransport zwischen innen und außen geschieht überwiegend über die Wärmeleitung durch Wände. Konvektion durch undichte Fugen trägt nur einen geringeren Teil bei. Beispielsweise lässt sich die Wärmetransmission durch Verwendung einer Styropor- (= Polystyrol) Schicht von 20cm an der Außenwand um den Faktor 1,5 (gegenüber normalem Verputz) verringern (*nach (4) Demtröder*).

3. Physikalische Mechanismen zur Wärmespeicherung

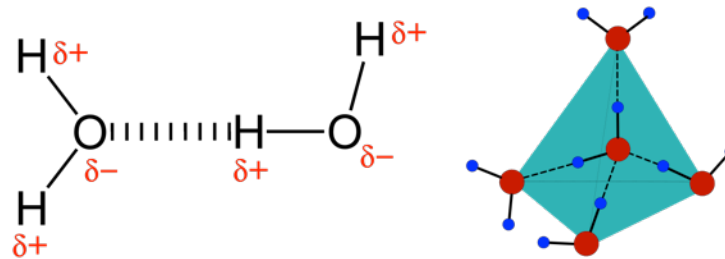
3.1. Wasser als Medium - Eine Übersicht

Die physikalisch-chemischen Eigenschaften des Wassers beruhen auf dem Aufbau des Wassermoleküls und den daraus resultierenden Verkettungen und Wechselwirkungen der Wassermoleküle untereinander. Durch gelöste Stoffe (in der Natur vorwiegend Ionen von Salzen) verändern sich diese Eigenschaften leicht. Maßgeblich ist vor allem die dreidimensionale Verkettung der Wassermoleküle über *Wasserstoffbrückenbindungen*, ohne die sich eine Substanz mit einer so geringen molaren Masse wie Wasser ganz anders verhalten würde. Das gilt besonders für den hohen Schmelz- und Siedepunkt sowie für die Dichte, die unter Normaldruck bei 3,98°C am höchsten ist. In *Tabelle [3.1]* findet sich eine Übersicht der relevantesten Parameter.

Molare Masse	18,02 g/mol
Dichte	999,98 kg/m ³ (3,98°C)
Schmelz/Siedepunkt	0,00°C/99,97°C
Tripelpunkt	0,01°C (6,12 hPa)
kritischer Punkt	373,95°C (22,06 MPa)
Sättigungsdampfdruck	31,69 hPa (25°C)
spezifische Wärmekapazität	4187 J/(kg·K)
Wärmeleitfähigkeit	0,60 W/(m·K) (20°C)
Verdampfungswärme	2257 kJ/kg
Schmelzwärme	332,5 kJ/kg

Tabelle 3.1: Übersicht relevanter Parameter des Wassers. Wenn nicht anders angegeben unter Normalbedingungen von 1013,25 hPa. *Datenquelle: Scheffler, Thermodyn. Eigenschaften v. Wasser u. Wasserdampf*

Wasserstoff- und Sauerstoffatom im Wassermolekül sind unter einem Winkel von 105° (siehe Seite 30, *Grafik [3.4c]*) angeordnet, wodurch die elektrischen Ladungen asymmetrisch verteilt sind: Am Sauerstoff negativ, am Wasserstoff positiv. Die Ladungen benachbarter Moleküle ziehen sich gegenseitig an und bilden so Ketten und größere Cluster, einzelne Wassermoleküle sind also nicht frei beweglich. Diese Wasserstoffbrückenbildung illustriert *Grafik [3.1a]*.



Grafik 3.1a: LINKS: Durch die höhere Elektronegativität des Sauerstoffs gegenüber der des Wasserstoffes weist das Wassermolekül einen Dipolcharakter auf. Sauerstoff ist dadurch partiell negativ (δ^-), Wasserstoff partiell positiv (δ^+). Die Wasserstoffbrücken (gestrichelte Linie) bilden sich zwischen den unterschiedlichen Partialladungen aus. RECHTS: Ideale Tetraederstruktur des Wasserclusters, bei der jedes Sauerstoff- auf 4 Wasserstoffatome zeigt und jedes Wasserstoff- auf zwei Sauerstoffatome.

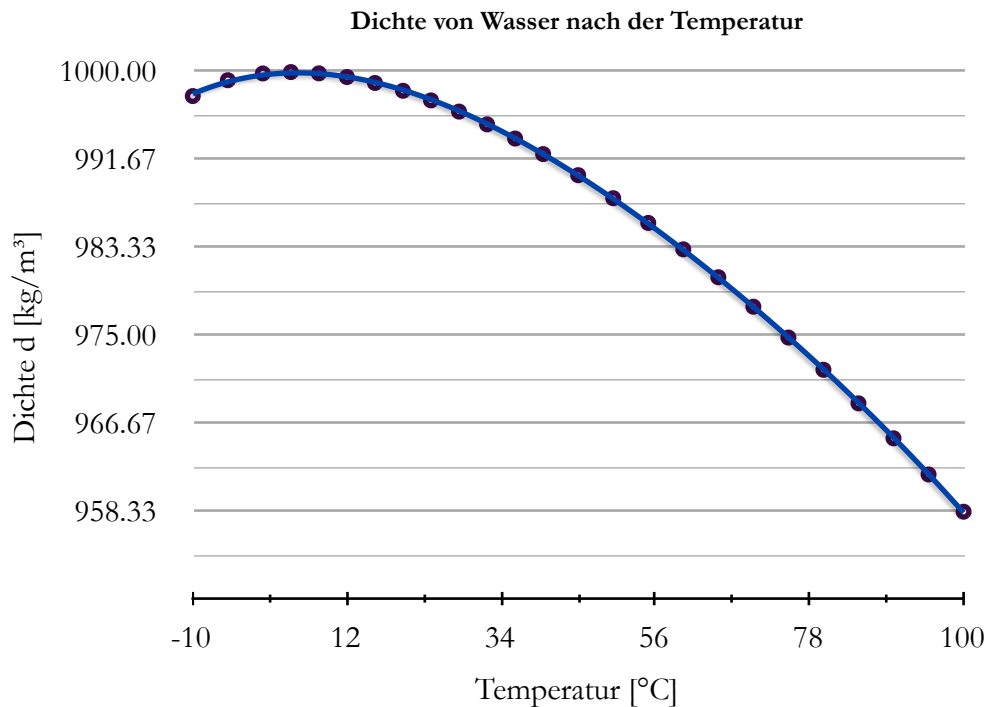
Grafik: Benjah 2007, <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b5/Hydrogen-bonding-in-water-2D.png>; http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/ba/Wasserstoffbrückenbindungen_des_Wassers_Pyramide.svg

Die physikalischen Parameter verändern sich aber mit Temperatur und Druck, was in den *Grafiken [3.1b] bis [3.3]* veranschaulicht ist. Unter bestimmten Bedingungen ist Wasser mit bis zu -30°C noch flüssig (unterkühltes Wasser) und Eis über 0°C noch fest (solange diese Temperatur nicht an der Oberfläche erreicht wird). Es gibt mehrere druckabhängige Eisformen. Ähnlich verhält es sich mit dem *Siedepunkt* bei 100°C : Der Siedebeginn lässt sich leicht erhöhen (bis etwa 110° bei Normaldruck), wenn Siedekeime (*Nukleationskeime*) fehlen (also keine Übersättigung vorliegt - sie ist die treibende Kraft zur Keimbildung), was als *Siedeverzug* bezeichnet wird. Dies ist aber nur unter hohen Druckverhältnissen möglich. Diese Keimbildung ist der erste Teilprozess, der einen Phasenübergangs erster Ordnung einleitet. Das Fehlen eines solchen Nukleationskeims (beispielsweise bei glatter, homogenen Gefäßoberfläche und reiner, gas- bzw. partikelfreier Flüssigkeit) wirkt als kinetische Schwelle.

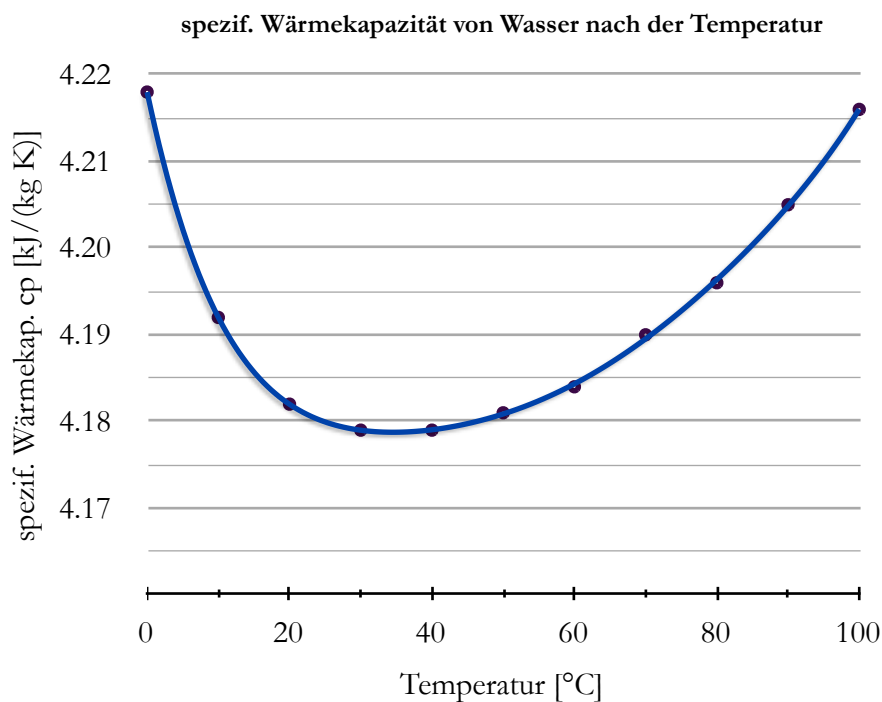
Der *Siedepunkt* ist jener Punkt, an dem sich flüssige Phase und Gasphase im Gleichgewicht befinden. Der Dampfdruck “p” der Flüssigkeit entspricht dort dem äußeren Druck, es gilt die *Van’t-Hoffsche Gleichung* (T ... Temperatur des Fluids):

$$\ln p \approx T^{-1}$$

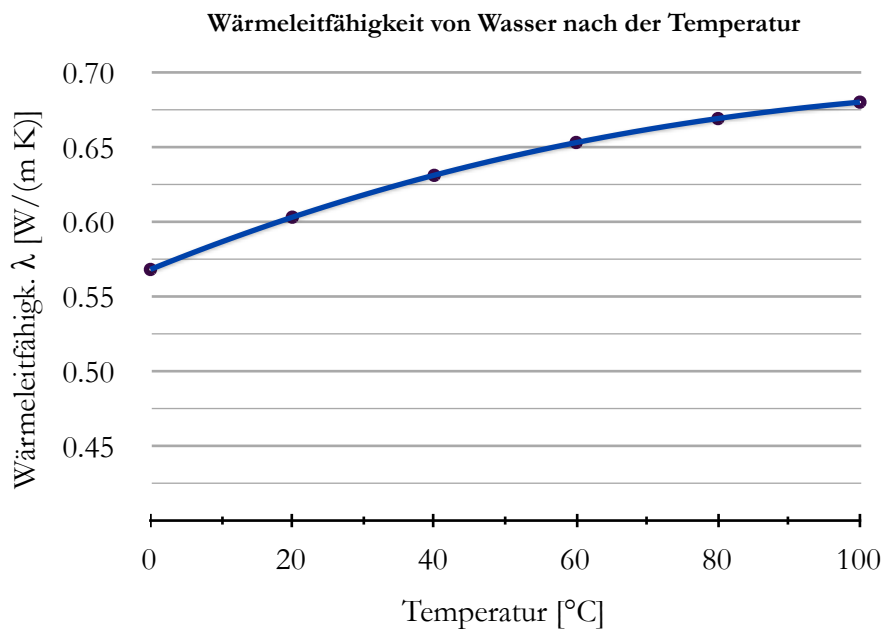
Wird Wasser zum Beispiel in einem Topf auf einer Herdplatte erhitzt (Gase werden ausgetrieben), erwärmt sich das Wasser am Boden schneller als das an der Oberfläche. So bildet sich ein labiler Temperaturgradient, der jedoch weitgehend durch Konvektion verschwindet (Wärme wird in die höheren Schichten transportiert). Aufsteigende Dampfblasen dienen hier als Kondensationskeime bei 100°C (abhängig vom Umgebungsdruck). Anders ist das aber bei Erhitzung in der Mikrowelle, dort kann Wasser nicht zum Sieden gebracht werden, da das gesamte Wassermolekül “warm gerüttelt” wird (die Moleküle werden zu gleichverteilten Schwingungen angeregt), es fehlen heterogene Keime. Es findet Siedeverzug statt, wobei dieser Zustand metastabil ist und bei geringster Störung (Vibration etwa) tritt schlagartiges Sieden und Überlaufen ein.



Grafik 3.1b: Die temperaturabhängige Dichte von Wasser mit dem höchsten Wert bei 4°C. Eis mit 0°C hat eine geringere Dichte von 918kg/m³, sowie Wasserdampf bei 100°C von 0.59kg/m³. Unterkühltes Wasser ist wesentlich dichter als Eis bei gleicher Temperatur. Die diskreten Werte wurden mit einem Polynom 4. Grades gefittet. *Datenquelle: Weast, 64. Handbuch f. Chemiker u. Physiker, CRC Press 1984*



Grafik 3.2: Die temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität von Wasser mit dem kleinsten Wert bei 30°C und 40°C. Die diskreten Werte wurden mit einem Polynom 6. Grades gefittet. *Datenquelle: Weast, Handbuch für Chemiker und Physiker, 64th Edition 1984, CRC Press*



Grafik 3.3: Die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit von Wasser. Eis bei 0°C hat eine wesentlich höhere Wärmeleitfähigkeit von rund 2,2 W/(mK). Die diskreten Werte wurden mit einem Polynom 3. Grades gefittet. *Datenquelle: Weast, Handbuch für Chemiker und Physiker, 64th Edition 1984, CRC Press*

Um auf die *Gibbsche Phasenregel* sprechen zu kommen: Existieren gleichzeitig drei Phasen (z.B. Wasser flüssig, gasförmig und fest), so verbleibt genau ein Punkt im Phasendiagramm (der *Tripelpunkt*), da keine Wahlfreiheit für Werte der Variablen (alle Zustandsgrößen sind fix festgelegt) vorliegt: $f=0$. Die Gibbsche Phasenregel für Fluide besagt, dass im thermodynamischen Gleichgewicht nicht beliebig viele Phasen gleichzeitig nebeneinander vorliegen können, sie schreibt sich als:

$$f = N - P + 2$$

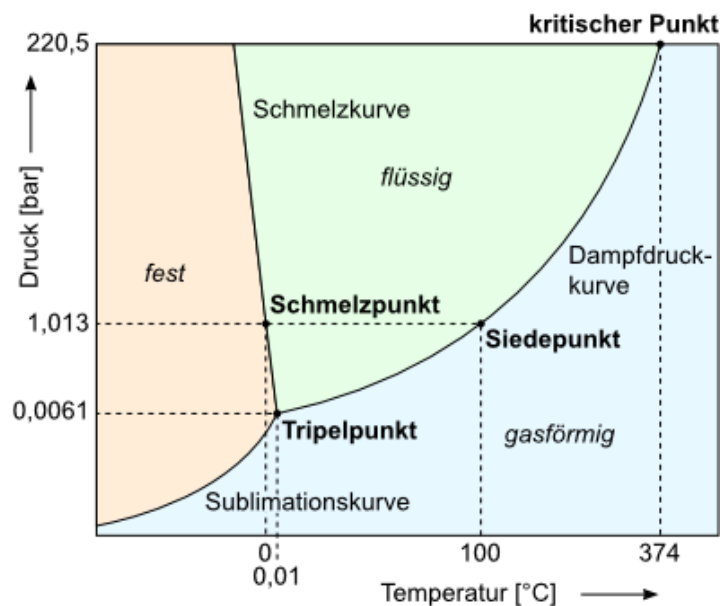
mit

N ... Zahl der unabhängigen Komponenten (Moleküle)

P ... Zahl der Phasen/Koexistenzlinien im Phasendiagramm

f ... Wahlfreiheit für Werte der Variablen ("Dimension")

Nimmt man die molare Masse jedoch als alleiniges Merkmal, so müsste Wasser, verglichen mit Materialien ähnlichen Molgewichts, einen geringeren Siedepunkt/Gefrierpunkt besitzen. So hat Methan beispielsweise seinen Siedepunkt bei -162°C und den Gefrierpunkt bei -182°C. Der reale, hohe Siedepunkt des Wassers liegt an der temperaturgekoppelten, steigenden Energiemenge, die notwendig ist, um den Stoff in den gasförmigen Aggregatzustand zu überführen: Die Wasserstoffbrückenbindungen müssen beim Phasenübergang zusätzlich überwunden werden. *Grafik [3.4a]* zeigt in diesem Zusammenhang alle möglichen Phasen von Wasser.



Grafik 3.4a: Mögliche Phasen von Wasser. Am kritischen Punkt bei 374,12°C (221bar) haben sich die Eigenschaften von flüssigem zu gasförmigen Wasser (Wasserdampf) vollkommen aneinander angeglichen und es besteht kein Unterschied mehr der beiden Phasen zu einander. Weder Sieden noch Kondensieren ist möglich. Am Tripelpunkt sind alle 3 Phasen möglich. Für "reines" H₂O, also perfekt destilliertes Wasser als Einstoffsystem ohne Verunreinigungen (Störungen), läge der Tripelpunkt bei 0°C (mit Gefrierpunkt bzw. Siedepunkt bei 0°C bzw. 100°C - heißes Wasser gefriert so schneller, da weniger verunreinigende Gase gelöst vorliegen: Der sogenannte "*Mpemba-Effekt*"). Eis liegt sogar in 18 verschiedenen, druckabhängigen Phasen vor (13 kristalline und 5 amorphe).

Grafik: <http://lp.uni-goettingen.de/get/image/5155>; Datenquelle: Weast: 64th Edition 1984, CRC Press

Gefrierpunktniedrigung bzw. *Siedepunkterhöhung* beschreiben einen anderen Sachverhalt, nämlich die Verschiebung des jeweiligen Punkts auf Grund von chemischen Charakteristika (respektive Gefrierpunkt/Siedepunkt) der gelösten, verunreinigenden Stoffe im Medium (z.B. NaCl in Wasser). Siehe Grafik [3.4b].

Umgekehrt gibt es auch den Effekt der *Unterkühlung* (auch *Übersättigung*), der auf demselben Prinzip beruht. Unterkühlung bezeichnet das Senken der Temperatur einer Flüssigkeit unter den Gefrierpunkt, ohne dass diese erstarrt. Eine so unterkühlte Flüssigkeit (etwa Wasser-Glykol Mischungen) hat somit eine geringere Temperatur als ihrem Aggregatzustand entspricht. Das "Impfen" mit kleinsten Keimen ("Störung" der Homogenität) oder auch Impulsübertragung durch Erschütterung führen unter Freisetzung der *Schmelzenthalpie* zu spontaner Kristallisation. Unterkühlung nennt man daher einen metastabilen Zustand des Stoffes. So verhält es sich bei der Energiespeicherung unter dem Gefrierpunkt: Solange es keine Kristallisationskeime gibt, liegt unterkühltes Wasser mit höherer Speicherdichte vor. Gefriert dann dieses Wasser (spontan durch einen Reiz), entsteht Eis mit 0°C und Energie wird frei (*Kristallisationswärme*).

Dieses Prinzip findet sich auch bei sogenannten “Wärmekissen”, wässrige Paraffinlösungen in einem geschlossenen System, die durch Wärmezufuhr “aufgeladen” werden und erst durch einen gesetzten Impuls kristallisieren und die sogenannte *latente Wärme* abgeben. Hierauf wird später eingegangen. All diese Phänomene lassen sich also zur Energiespeicherung sehr gut ausnützen: Wasser hat anderen Flüssigkeiten einiges voraus und ist sowohl günstig als auch umweltschonend verfügbar. Die geringe thermische Leitfähigkeit mindert Energieverluste.

Als Keime (durch thermische Fluktuationen gebildet) können sowohl Verunreinigungen als auch der Stoff selbst (homogene Keime) dienen. Hierbei ist die *kritische Keimgröße* ausschlaggebend, ab der Energiegewinn zu verzeichnen ist und die Keime schnell zur makroskopischen Phase anwachsen und Kristallisation einleiten.

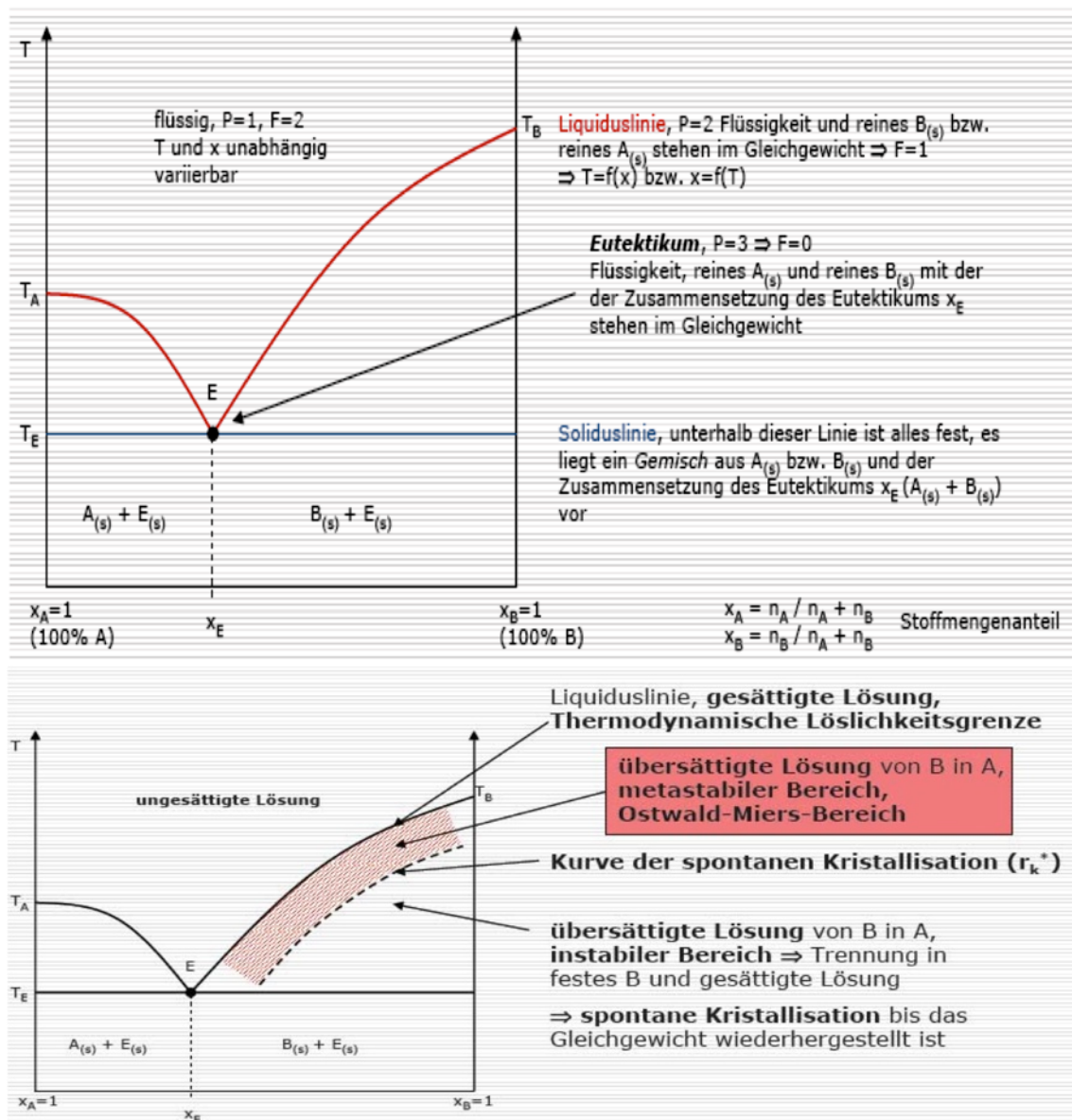
Bei der Speicherung von Wärmeenergie im Medium Wasser möchte man Konvektion (und Sieden) vermeiden, um eine stabile Temperaturschichtung, *Stratifikation* (entsteht durch die temperaturabhängige Dichte von Wasser), beizubehalten. Nur so können Verluste gering gehalten werden. Ein Zu- und Ablauf stellt daher gewisse Probleme dar, weil er diese Schichtung stört.

Anmerkung: Zur Veranschaulichung sollen nun die Energiedichten von 1kg Wasser und 1kg eines handelsüblichen Bleiakkumulators gegenübergestellt werden (ungeachtet des Einsatzbereichs bzw. Unterschieds zwischen thermischer und elektrischer Leistung). Unter einem Bleiakkumulator ist ein Akkumulator zu verstehen, bei dem die Elektroden aus Blei bzw. Bleidioxid bestehen und das Elektrolyt (ionisierte Flüssigkeit mit Ausrichtung in einem elektrischen Feld) verdünnte Schwefelsäure ist.

Wasser	Bleiakku
4,2 kJ/(kg K)	110 kJ/kg

Datenquellen: Rand/Moseley: *Valve-regulated Lead-Acid Batteries*, Elsevier, 2004, ISBN 0-444-50746-9 und Sedlbauer/Krus: *Bauphysik - Skript zur Vorlesung*, Fraunhofer Institut für Bauphysik, Holzkirchen, 2009

Hervorzuheben sei, dass bei Wasser die Energiedichte auch pro Kelvin gilt, sodass jede Temperaturerhöhung um 1°K bei einer fixen Masse von 1kg eine Energiemenge von rund 4,2kJ beiträgt. Temperaturerhöhungen bei einem Bleiakkumulator fördern zwar auch die Reaktionsfähigkeit geringfügig, nicht aber die Lebensdauer oder Energiedichte. Wasser “altert” (verliert seine Eigenschaften) im Gegensatz nicht.



Grafik 3.4b: OBEN - Schematisches Zweistoffsystem-Phasendiagramm, auch *Eutektikum* (dazu später mehr). UNTEN - Ostwald-Miers Bereich, der metastabile Bereich, der den Zustand einer übersättigten Lösung (oder einer unterkühlten Schmelze) beschreibt. Die Liquiduskurve gilt nur für einen Gleichgewichtszustand, ist dieser gestört, befinden wir uns im zuvor genannten metastabilen Bereich.
 Grafiken: E. Wuttke, Uni Konstanz 2008 - http://dg3.chemie.uni-konstanz.de/~agmue/pdf/Vortrag_EZ.pdf

→ Warum besitzt Wasser eine so ungewöhnlich hohe spezif. Wärmekapazität?

Geht man dieser Frage nach, stellt man Folgendes fest: Sie ist nur in Relation so hoch, nämlich abhängig davon, ob man sich auf die Masse oder Stoffmenge bezieht. Im Vergleich mit anderen Stoffen wird deutlich, dass die Wärmekapazität von Wasser nur beim Bezug auf die Masse groß ist. Wasser ist ein verhältnismäßig kleines (vgl. *Grafik [3.4c]*) und leichtes Molekül, dadurch befinden sich beispielsweise rund **viermal** mehr Moleküle in einem Kilogramm als bei Kupfer (vgl. *Tabelle [3.2a]*) - jedes Molekül trägt zur Wärmekapazität bei. Weiters besitzt ein Wassermolekül viele Freiheitsgrade auf Grund seiner 3-atomigen Struktur. In den vielen dadurch möglichen Kombinationen können relativ hohe Energiemengen gespeichert werden. Siehe hierzu *Tabelle [3.2b]*.

	Wasser	Kupfer
molare Masse	18g/mol	63,5g/mol
Molzahl pro kg	56mol/kg	15,7mol/kg
Teilchenzahl pro kg	$3,7 \times 10^{25}$ /kg	1×10^{25} /kg

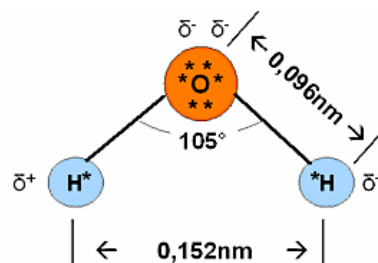
Tabelle 3.2a: Gerundete Molekülzahl von Wasser in Relation zu Kupfer. $1\text{Mol} \approx 6,6 \times 10^{23}$ Teilchen.

Datenquelle: Weast, *Handbuch für Chemiker und Physiker*, 64th Edition 1984, CRC Press

Wasser (18g/mol)	Kupfer (63,5g/mol)	Eis
$c_p = 4187 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	$c_p = 385 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	$c_p = 2060 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
$c_p = 75,3 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	$c_p = 26,0 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	$c_p = 37,7 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$

Tabelle 3.2b: Wärmekapazität von Wasser im Bezug auf Masse bzw. Stoffmenge und verglichen mit denen anderer Stoffe. Eis weist etwas geringere Dichte als Wasser ($\sim 0,92 \text{ g}/\text{cm}^3$), aber mehr Volumen auf. Zu dieser Dichteanomalie kommt es, da die Wassermoleküle im hexagonalen Gitter einen größeren Abstand zu einander haben als im flüssigen, ungeordneten Zustand.

Datenquelle: Weast, *Handbuch für Chemiker und Physiker*, 64th Edition 1984, CRC Press



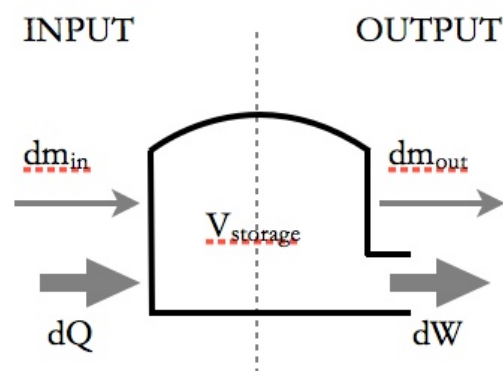
Grafik 3.4c: Schematischer Aufbau des Wassermoleküls.

Grafik: http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de/experimente/effekt/bilder/h-bruecken_molekuel.gif

Datenquelle: Falbe/Regitz: *Römpch Chemie Lexikon*, 9. Auflage, Georg Thieme Verlag Stuttgart/New York 1992

3.2. Theoretische Grundlagen und Modelle³

Das Fundament bei der Speicherung thermischer Energie sind Akkumulator (thermisch isolierter Speicher mit einem Speichermedium), Be- und Entladesystem (aktiv über Zu- oder Abnahme des Speichermediums selbst oder passiv über vom Medium getrennte Wärmetauscher - meist mit Wasser betrieben) und etwaige Hilfsttechnologien wie Wärmepumpen (zur Verbesserung des Wirkungsgrades) oder *Stratifikations-Vorrichtungen* (zur Einhaltung einer stabilen Temperaturschichtung im Speichermedium, siehe Seite 26 und Kapitel 4).



Grafik 3.5: Schematische Energiebilanz eines Speichers (offenes System, direkte Wärmeübertragung). Differentieller Masseinput (dm_{in}), differentieller Masseoutput (dm_{out}), Wärmezufuhr unabhängig vom Massetransport (" dQ "), Arbeit des Systems unabhängig vom Massetransport (" dW ").

Ein Speicherprozess, so wie in *Grafik [3.5]* gezeigt, legt die Rahmenbedingungen des Speichers fest. Formell kann die Energiebilanz wie folgt verstanden werden:

$$E_{in} - E_{out} = E_{store}$$

mit

$E_{in/out}$... hineingesteckte/entnommene Wärmeenergie

E_{store} ... gespeicherte Wärmeenergie

So auch die Massenbilanz in Analogie:

$$dm_{in} - dm_{out} = dm_{store}$$

Wendet man den *Ersten Hauptsatz der Thermodynamik* auf Energie In- bzw. Output des offenen Systems an, wobei sowohl Speicherung von kinetischer Energie (Geschwindig-

³ **Quellen:** Ataer (1), Beckmann/Gilli (3), Heinz (6)

keit des Massestroms) wie auch potentieller Energie (Höhe des Speichers) vernachlässigt werden, erhält man die *Allgemeine Formulierung der Energiespeicherung*:

$$(u+pv)_{\text{in}} \cdot dm_{\text{in}} + dQ - (u+pv)_{\text{out}} \cdot dm_{\text{out}} = d \cdot (um)_{\text{store}} + p_{\text{store}} \cdot dV_{\text{store}}$$

wobei

dm_{store} ... differentielle Änderung der Masse des Speichermediums im Speicher, m...Masse

$dm_{\text{in/out}}$... differentieller Masse In/Output

dV_{store} ... differentielle Änderung des Volumens des Speichermediums

u ... spezif. innere Energie, $u = U/m$

p ... Druck

v ... spezifisches Volumen, $v = V/m$

pv ... spezifische Volumsarbeit, um Masse zu- oder abzuführen

dQ ... Wärmezufuhr unabhängig vom Massetransport

Durch Definition von differentieller Arbeit des Systems (unabhängig vom Massetransport) und der spezifischen Enthalpie “h”:

$$dW = p_{\text{store}} \cdot dV_{\text{store}}$$

$$h = u + pv$$

kann man die obige Energiebilanz als *Allgemeine Speichergleichung*, die Be- und Entladevorgang beschreibt, formulieren:

$$h_{\text{in}} \cdot dm_{\text{in}} + dQ - h_{\text{out}} \cdot dm_{\text{out}} = d \cdot (um)_{\text{store}} + dW$$

Aus den obigen Definitionen und Ableitungen kann man nun thermische Energiespeicherung wie folgt klassifizieren:

→ Nach Speicher- und Wärmeübertragermedium

- **Direkte Speicherung:** Speicher- und Wärmeübertragermedium sind ident. Das Speichermedium ist fest, flüssig, gasförmig oder 2-phasig (flüssig und gasförmig)
- **Indirekte Speicherung:** Energie wird entweder durch Wärmetransfer allein oder durch Massetransfer mit Hilfe eines Wärmeübertragermediums umgesetzt. Das Speichermedium ist fest/flüssig/gasförmig/durchläuft einen Phasenübergang.
- **Sorptionsspeicherung:** Manche Speichermedien erlauben es, Gase zu absorbieren und dabei Wärme abzugeben (und umgekehrt). Diese Fähigkeit wird genutzt und der Wärmeübertrag erfolgt direkt oder über das Gas.

→ Nach Masse des Speichermediums

- **Konstante Masse ($dm_{\text{store}} = 0$):** Meistens bei indirekter Speicherung, manchmal auch bei direkter, sofern die entnommene Masse nach dem Abkühlen (Entladung) oder Aufheizen (Beladung) sich wieder komplett im Speicher befindet.
- **Variable Masse ($dm_{\text{store}} \neq 0$):** Ausschließlich bei direkter Speicherung der Fall.

→ Nach Speichervolumen

- **Konstantes Volumen ($dV_{\text{store}} = 0$):** Näherungsweise bei Speicherung in geschlossenen Behältern.
- **Variables Volumen ($dV_{\text{store}} \neq 0$):** Speicherung bei Umgebungsdruck oder spezieller Druckapplikation.

→ Nach Speicherdruck

- **Konstanter Druck ($dp_{\text{store}} = 0$)**
- **Variabler Druck “Sliding Pressure” ($dp_{\text{store}} \neq 0$)**

Im Falle von *sensibler* Speicherung, bei der das Speichermedium 1-phasig bleibt und erhitzt wird, ist Energie (*Exergie*) in der Temperaturdifferenz des Mediums “gespeichert”. Diese Temperaturdifferenz wird als *Temperaturspreizung* bzw. “Temperature Swing” bezeichnet und ist neben der Speichermasse die ausschlaggebende Größe für diese Methode. Als “sensibel” oder “fühlbar” bezeichnet man jene thermische Energie, die sich bei Zufuhr oder Abfuhr unmittelbar in Änderungen der Temperatur äußert und damit direkt messbar ist (mehr ab Seite 35).

Die gespeicherte thermische Energie ist dann:

$$E = m \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) \cdot dT$$

wobei

m ... Masse des Speichermediums

c_p ... spezif. Wärmekapazität bei konstantem Druck

T_1, T_2 ... min/max. Arbeitstemperatur

Die speicherbare Wärmemenge “ Q_S ”, also die Speicherkapazität (oder *Energiedichte*, wenn auf Q/V umgeformt) ergibt sich weiters über den folgenden Zusammenhang, der zur Berechnung von Masse und Volumen des Speichermediums für einen bestimmten Energiespeicherwert verwendet werden kann:

$$Q_S = mc_p \cdot \Delta T = V \varrho \cdot c_p \cdot \Delta T$$

wobei

V ... Volumen des Speichermediums

ϱ ... Dichte des Speichermediums

$\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$... maximale Temperaturdifferenz des Speichermediums

Für Wasser beispielsweise beläuft sich der Energieinhalt bei Normaldruck pro “ m^3 ” (1000kg) und Grad auf 1,16 kWh - der von trockener Erde (wobei $1m^3 \triangleq 2500kg$) auf 0,9 kWh (*nach (6) Heinz*). Erdreich isoliert zusätzlich und bietet deshalb in großen Volumina ($> 2000m^3$) sehr gute Bedingungen für die Wärmespeicherung im Untergrund oder Grundwasser, mehr zu den sogenannten *Erdsondenspeichern* bzw. *Aquiferspeichern* jedoch später (siehe ab Seite 55).

Wenn Schüttungen oder Festbette (z.B. Beton) als Speichermedium verwendet werden, muss auch die Porosität mit einbezogen werden. Vernachlässigt man die Wärmekapazität des Energieüberträgermediums im Speicher, kann man das Volumen der Schüttung für eine bestimmte speicherbare Wärmemenge “ Q_S ” schreiben als:

$$V = \frac{Q_S}{\rho c_p \cdot (1 - \epsilon) \cdot \Delta T}$$

wobei der Term $(1 - \varepsilon)$ mit $0 \leq \varepsilon < 1$ die Porosität darstellt. Die Energiedichte pro Masse- (“ q_m ”) bzw. Volumseinheit (“ q_v ”) ist weiters definiert als:

$$q_m = \frac{Q_S}{m} = c_p \cdot (T_{max} - T_{min}) \qquad q_v = \frac{Q_S}{V} = \rho c_p \cdot (T_{max} - T_{min})$$

Der allgemeine Wirkungsgrad “ η ” eines thermischen Speichers wird durch die Verluste definiert und kann als Verhältnis von gespeicherter zu abgeführter Energie des Speichers wie folgt beschrieben werden:

$$\eta = \frac{E(T)}{E(T_{max})} = \frac{mc_p \cdot (T - T_0)}{mc_p \cdot (T_{max} - T_0)} < 1$$

wobei

mc_p ... Gesamte Wärmekapazität des
Speichermediums

T, T_0 ... max/min. Arbeitstemperaturen
des Speichers während Entladung

T_{max} ... max. Temperatur nach Aufladung

$E(T), E(T_{max})$... gespeicherte, abgeführte Energie

3.2.1. Allgemeine Energieverluste und Effizienz⁴

Wärmeverluste an die Umgebung zwischen Ende des Entlade- und Anfang des Aufladevorgangs (wie auch währenddessen) wurden vernachlässigt. “Im Falle eines Wärmetauschers sollte dieser mit der kleinstmöglichen Temperaturdifferenz arbeiten, um die Gesamteffizienz nicht zu stören” (*nach Beckmann/Gilli*). Hier sind durch Reibung, dadurch entstehenden Druck und Vermischung, Exergieverluste zu verzeichnen.

Weiters lässt sich die Effizienz durch die Vermeidung von Störung der Temperaturschichtung bei Wasser als Speichermedium erhöhen. Wasser der Temperatur höher als der mittleren Mischungstemperatur kann dem Speicher an der Oberseite entnommen werden, Wasser mit niedriger Temperatur als die mittlere Mischungstemperatur an der Unterseite. Eine zur Gänze ungestörte Schichtung ist unmöglich, da Wasser beim Ein- und Ausströmen lokale Vermischung durch Strömungen verursacht.

⁴ **Quellen:** Ataer (1), Beckmann/Gilli (3), Heinz (6)

Der Tank muss sehr gut isoliert sein, da es durch Verluste an den Seiten, nahe der Wand durch Wärmeleitung zu einem Temperaturabfall kommt. Dadurch entsteht natürliche *Konvektion*, die die *Temperaturschichten* zerstört. Die Energieverluste an Grenzschichten ergeben sich über den *Wärmeübergangskoeffizienten* “k” (siehe Seite 18), der nicht nur materialspezifisch (über die *Wärmeleitfähigkeit* des Mediums bzw. der Grenzschicht) sondern auch abhängig von Strömungsgeschwindigkeit, Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit ist. Er beschreibt die Fähigkeit eines Stoffs, Energie über Kontaktflächen abzugeben oder aufzunehmen. Der Verlust (*Stagnation*, “Selbstentladung”) über die Oberfläche ergibt sich, nun absolut, zu:

$$Q = Ak \cdot (T_a - T_i) \cdot \Delta t$$

wobei $[k] = [W/(m^2 K)]$ und

A ... betrachtete Kontaktfläche

T_i, T_a ... Innen/Außentemperatur

Δt ... betrachtetes Zeitintervall

Es wird solange thermische Energie mit der Umgebung (in Abhängigkeit von der Zeit) ausgetauscht, bis ein Temperaturgleichgewicht eintritt. Der Wirkungsgrad, die kalorische Effizienz “ $\eta(t)$ ” (oder *Stagnationsfaktor*) eines Wärmespeichers (*nach* (3) *Beckmann/Gilli*) lässt sich angeben als:

$$\eta(t) = \exp\left(\frac{-\Delta t \cdot Ak}{m_{store} \cdot c_p}\right)$$

Für Wärmetauscher ist es komplizierter. Nimmt man an, es existieren keine Wärmeverluste und die Speicherkapazität ist über die Zeit konstant, ergibt sich die Exergieeffizienz “ ξ ” (*nach* (3) *Beckmann/Gilli*) zu:

$$\xi = \left[1 - T_0 \frac{\ln(T'_{out}/T'_{in})}{T'_{out} - T'_{in}}\right] \cdot \left[1 - T_0 \frac{\ln(T''_{in}/T''_{out})}{T''_{in} - T''_{out}}\right]^{-1}$$

wobei

T_0 ... Umgebungstemperatur

T' ... primäre Seite (Wärmeversorgung)

T'' ... sekundäre Seite (Wärmeverbrauch)

Wenn “ T_{mix} ” für die Output-Temperatur steht (wobei $T_{in} > T_{out}$) und sich über die Wärmebilanz ergibt, gilt für den Wirkungsgrad (gemittelte Exergieeffizienz) “ ξ_{mix} ”:

$$\xi_{mix} = \left[1 - T_0 \frac{\ln(T_{mix}/T_{out})}{T_{mix} - T_{out}}\right] \cdot \left[1 - T_0 \frac{\ln(T_{in}/T_{out})}{T_{in} - T_{out}}\right]^{-1}$$

Generell treten Energieverluste an den Oberflächen auf, deshalb ist es essentiell darauf zu achten, dass das Speichervolumen groß genug ist, um die Verluste klein zu halten. Das Verhältnis Oberfläche/Volumen ist also entscheidend und Langzeitheißwasserspeicher machen erst ab etwa 1000m³ Sinn (*nach (6) Heinz*), sofern eine zylindrische Form gewählt wird, die an sich besser zur Erhaltung der *Stratifikation* (Temperaturschichtung des Mediums, siehe Seite 26 und Kapitel 4) geeignet ist. Ein kugelförmiger Speicher wäre zur Minimierung der Oberflächenverluste am besten geeignet, ist aber in der Praxis oft zu kompliziert und aufwändig herzustellen.

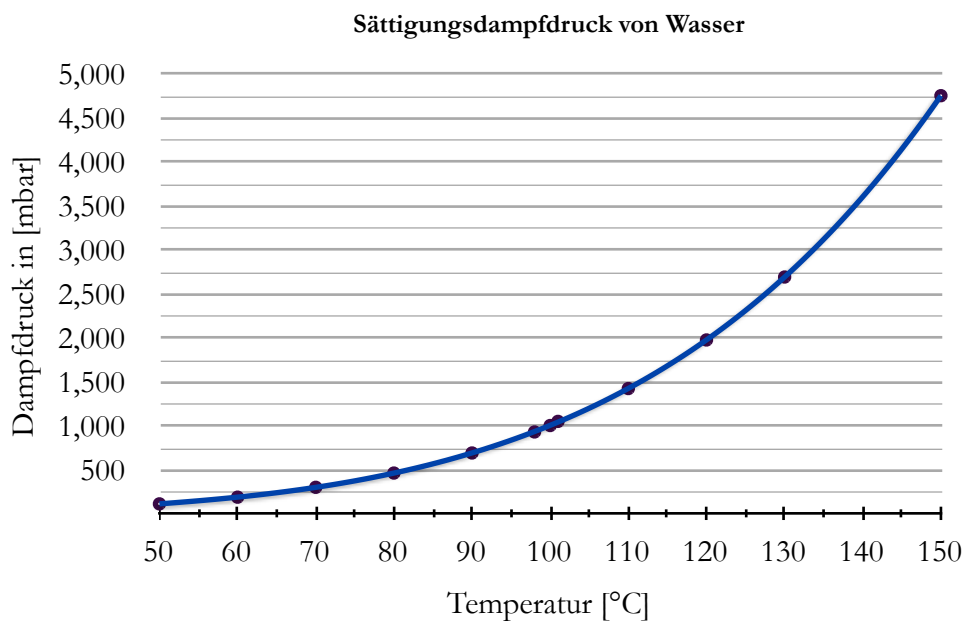
Für zylindrische Tankgeometrien ist die *Kompaktheit* ein wichtiges Charakteristikum (*nach (3) Beckmann/Gilli*), sie ist gegeben durch die innere Höhe bzw. Breite “H” (vertikaler bzw. horizontaler Tank) und den inneren Durchmesser “D”: $K = HD^{-1}$, zusammen mit dem Speichervolumen und der Isolation/Wanddicke determiniert diese Kompaktheit “K” die Investitions- und Betriebskosten des Speichers. Entscheidend für die Effizienz bleibt das O/V-Verhältnis - wie noch später im Detail besprochen. Der hydrostatische Druck “p” des Speichermediums (Dichte “ ϱ ”) limitiert aber reale Werte von “H” bei drucklosen Speichern:

$$p = \varrho \cdot g \cdot H$$

Wobei “g” die Schwerebeschleunigung ist.

3.2.2. Speicherung sensibler Wärme in gesättigten Fluiden⁵

Speicher dieser Art bestehen aus einer Flüssigkeit (z.B. Wasser) im unteren und Dampf (z.B. Wasserdampf) im oberen Teil bei Sättigungstemperatur. Dabei macht die gasförmige Phase nur einen geringen Prozentsatz des Volumens aus. Man spricht hierbei von Sättigungsdampfdruck, der lediglich von der Temperatur abhängt. Wasserdampf ist dann gesättigt, wenn er nicht mehr fähig ist, seine eigene Konzentration in der Luft weiter zu erhöhen (ein Gleichgewichtszustand). Einen schematischen Überblick der Dampfdruckkurve von Wasser bieten *Grafik [3.6a] und [3.6b]*.

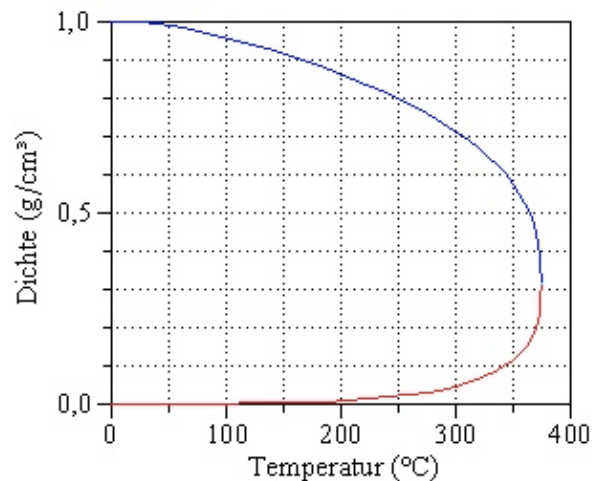


Grafik 3.6a: Die Sättigungsdampfdruckkurve von Wasser von 50°C bis 150°C. Aus den Dampfdruckdaten ist ersichtlich, wieviel Druck mindestens erforderlich ist, um Wasserdampf bei einer gegebenen Temperatur zu kondensieren oder umgekehrt, bei welcher Temperatur Wasser bei einem gegebenen Druck siedet. *Datenquelle: Weast: Handbuch für Chemiker und Physiker, 64th Edition 1984, CRC Press*

Energieentnahme findet nun direkt (in wahlweise einer der beiden Phasen) oder indirekt (über Wärmeaustausch) statt. Beim Aufladevorgang ist es ähnlich, Wasserdampf kann etwa zu Wasser kondensieren und bis zur Sättigung aufgeheizt werden oder gesättigter (bzw. übersättigter) Dampf wird direkt in die flüssige Phase gepumpt. Das System ist natürlich geschlossen und besteht aus mechanisch verstärkten Druckspeichern.

Eine Druckänderung während des Be- und Entladens ist charakteristisch für diesen Speichertyp. Weiters findet stets ein Phasenübergang (Kondensation bzw. Verdampfung) statt, der jedoch kaum Einfluss auf die Speicherkapazität nimmt. Diese wird fast ausschließlich durch die Veränderung der sensiblen Wärme bestimmt.

⁵ **Quellen:** Ataer (1), Beckmann/Gilli (3), Heinz (6)



Grafik 3.6b: Dichte von Wasser und Wasserdampf im Gleichgewicht: Die Dichte von Wasser (blau) und Wasserdampf (rot) in Abhängigkeit von der Temperatur. Der Druck ist eine reine Funktion der Temperatur. Bei Annäherung an die kritische Temperatur verschwindet die Differenz, und beide Phasen gleichen sich an. Dieser temperaturabhängige und stoffspezifische Druck wird als „Dampfdruck“ und der Graph dieser Funktion als „Dampfdruckkurve“ bezeichnet (diese endet im kritischen Punkt).

Grafik: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4b/WasserDampfDichte.png>

In Fernwärmeapplikationen der Industrie kommen sogenannte *Sliding Pressure* Speicher (variabler Druck) schon länger zum Einsatz und sind daher nicht neu. Sie arbeiten ebenfalls auf Basis von Wasserdampf. Es sind mechanische Speicher, oft als Dampfdruckspeicher oder *Ruths Speicher* (nach ihrem Erfinder 1920) genannt. Entnommen wird ausschließlich gesättigter Wasserdampf mit Temperaturen um die 100°C. Etwa 75% bis 95% des Tanks sind mit Wasser gefüllt, der Rest mit gesättigtem Wasserdampf, der als “Kissen” (zur Phasenseparation) dient. Wenn das Entnahmevertil geöffnet wird, fällt der Druck und das Wasser entweicht als Wasserdampf mit hoher Enthalpie (nur ein kleiner Teil des Wassers verdampft und wird abgeführt, das meiste verbleibt im Tank bei geringerer Temperatur zurück).

Beim Beladevorgang findet der Vorgang gegenläufig statt: Wasserdampf wird in sehr kurzer Zeit komprimiert (nahezu adiabatisch) und hat daher wenig Gelegenheit, die Wärme an die Umgebung abzugeben. Nach dem Austritt aus dem Kompressor ist die Luft stark erhitzt, bei 10bar werden bereits Lufttemperaturen von 200°C überschritten. Für 1kg Wasserdampf bei 100°C werden (laut Weast: *Handbuch für Chemiker und Physiker*, 64th Edition 1984, CRC Press) beim Kondensieren 2256kJ an Enthalpie frei.

→ Die Vorteile eines solchen “Sliding Pressure” Speichers sind in erster Linie:

- Sofortige Verfügbarkeit und geringe Investitionskosten
- Direkte Versorgung mit Wasserdampf (etwa für industrielle Prozesse)
- Beladung mit demselbigen (etwa aus industrieller Prozesswärme)

Es ist auch möglich einen solchen Speicher unterirdisch (in *Kavernen/Enklaven*) zu betreiben, wodurch das Volumen wesentlich steigt und damit auch die langfristige Energieausbeute. Das Stichwort hierzu heißt “Geothermie” und findet bereits praktische Anwendungen, wenngleich solche Anlagen noch in den Kinderschuhen stecken. Blickt man nach Island, wird dort beispielsweise Strom und Wärme über vulkanische Geysire bzw. Schwefelwasserstoffdämpfen gewonnen: Diese steigen unter hohem Druck und Temperatur aus dem Erdinneren auf, betreiben Turbinen oder kondensieren. Aber nicht überall herrschen derartige Voraussetzungen oder können genutzt werden.

Nimmt man nun die vorhin abgeleitete, *Allgemeine Speichergleichung* für thermische Speicher und nimmt an, es handle sich um direkte Speicherung und der Wasserdampf sei gesättigt, erhält man (“h” und “u” sind wieder wie üblich spezifische Größen, also auf “kg” bezogen mit $h = H/m$ und $u = U/m$):

$$-\hat{h}'' \cdot \Delta m_{\text{out}} + \Delta Q = \Delta(u_{\text{store}} \cdot m_{\text{store}})$$

wobei

ΔQ ... Austauschwärme über Kontaktflächen

Wobei für genügend kleine Schritte der Enthalpie (beim Entladeprozess) gilt:

$$\hat{h}'' = \frac{1}{2} \cdot (\hat{h}_{\text{anfang}} + \hat{h}_{\text{ende}})$$

mit

$\hat{h}$... gemittelte Enthalpie

$\hat{h}''$... spezifische Enthalpie des Sättigungsdampfdrucks

$\Delta(u_m)$... endliche Differenz von Anfang und Ende des Entladeprozesses

Es reduziert sich die Massebilanz auf:

$$\Delta m_{\text{out}} = \Delta m_{\text{store}} = m_{\text{store, ende}} - m_{\text{store, anfang}}$$

Wenn der Einfluss des Dampfvolumens nicht vernachlässigt werden kann, das ist etwa bei hohem Druck der Fall, müssen sowohl der Wasserinhalt bei u' als auch der Dampfanteil bei u'' berücksichtigt werden. Benützt man dazu Volumen- und Massebilanz ergibt sich (wieder gilt: $v = V/m$, der zweite Term beschreibt das Gesamtsystem):

$$u_{\text{store}} = j_{\text{store}} + \frac{\left(\frac{V_{\text{store}}}{m_{\text{store}}}\right)(u'' - u')}{(v'' - v')}$$

mit

$$j = u' - \left[\frac{v'(u'' - u')}{(v'' - v')} \right]$$

wobei

$j = j_{store}$... extensiver Anteil des Speichermediums,
größenvariant, $j = j(u', u'')$

v', u' ... Beiträge von Wasser

v'', u'' ... Beiträge von Wasserdampf

v, u ... spezif. Volumen/innere Energie

Unter *extensiv* versteht man eine Zustandsgröße, die sich mit der Größe des betrachteten Systems ändert. Zusammen mit der Massebilanz lässt sich nun die *Allgemeine Speichergleichung* für direkte Speicherung schreiben (nach Beckmann/Gilli/Hardeggen 1933):

$$(\hat{h}'' - j_{st, ende}) \cdot \Delta m_{out} = (j_{st, anfang} - j_{st, ende}) \cdot m_{st, anfang} + B + \Delta Q$$

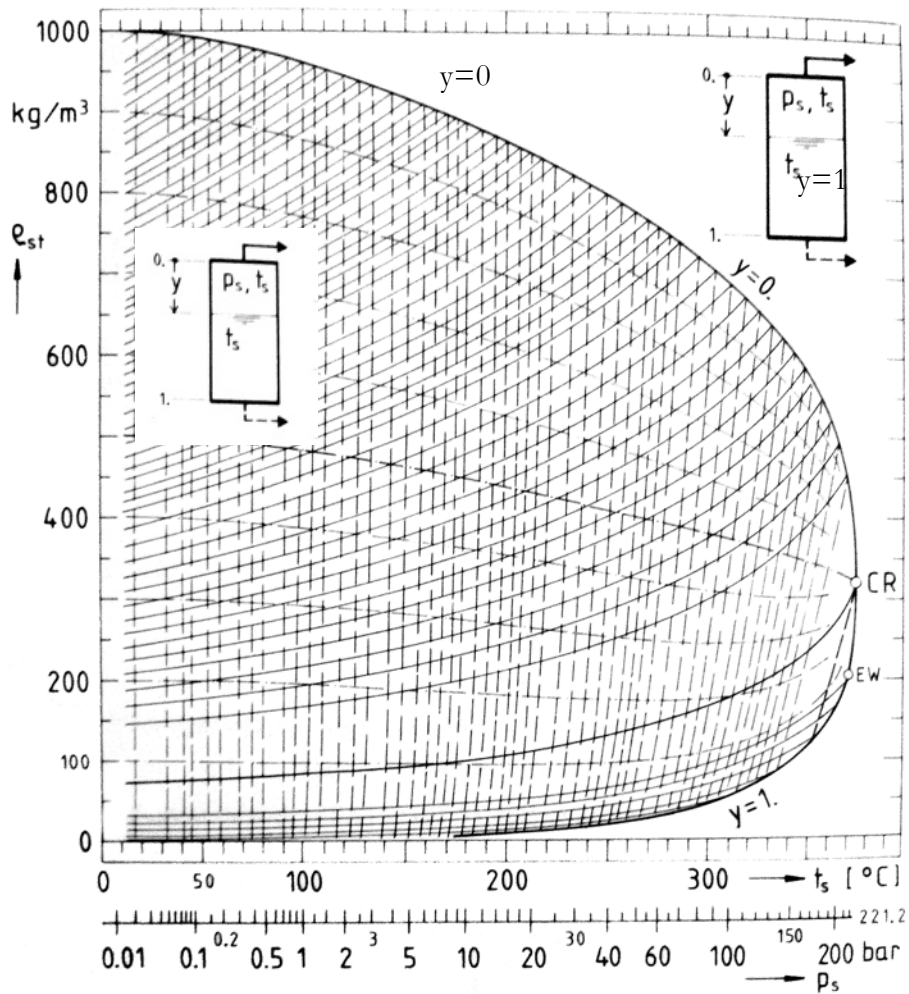
mit

$$B = V_{store} \left[\left(\frac{h'' - h'}{v'' - v'} \right)_{anfang} - \left(\frac{h'' - h'}{v'' - v'} \right)_{ende} - (p_{anfang} - p_{ende}) \right]$$

Diese Speichergleichung gilt sowohl für die Änderung des Energieinhalts des Speichers (inklusive des Dampf Volumens in Term “ j ”) als auch für den Wärmegewinn, beispielsweise durch Speicherung thermischer Energie in der Tankwand oder einer Wärmetauscher Oberfläche (minus Verluste durch Term “ ΔQ ”). In den folgenden *Grafiken* [3.7] und [3.8] sind die ausschlaggebenden Parameter Speicherdichte und Sättigungstemperatur, sowie die Enthalpie illustriert.

Es existieren mehr passende Speichermedien in Form von unterkühlten Flüssigkeiten als es gesättigte Fluide zur thermischen Energiespeicherung gibt. Werden Feststoffe als Speichermedien verwendet, werden diese Körper ohne Phasenwechsel erhitzt bzw. abgekühlt: Man spricht dann von sensibler Wärme, die über die spezifische Wärmekapazität an die inneren Energie gekoppelt ist.

In einigen Anwendungen, wenn thermische Energie für Stromkraftwerke gespeichert wird etwa, ist eine weitere Größe entscheidend: Die Exergie, siehe *Grafik* [3.8].



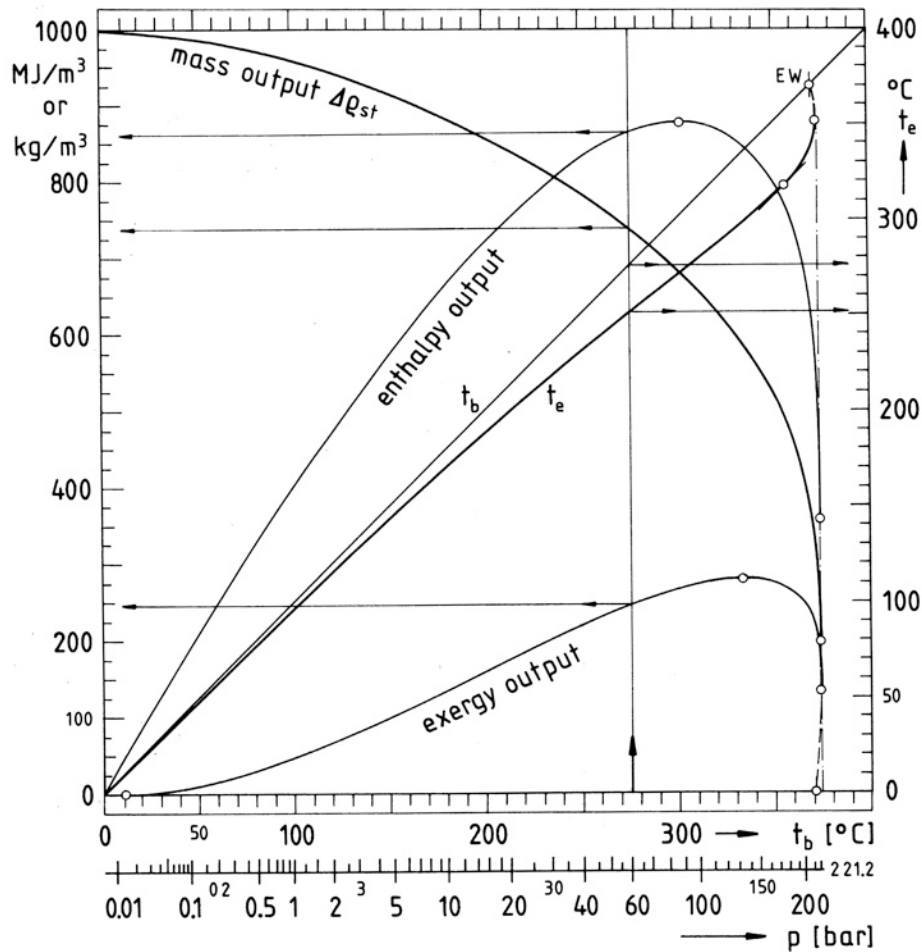
Grafik 3.7: Spezifische Speicherkapazität an Masse eines Sliding-Pressure Akkumulators (Speicherdichte “ Q_{est} ” gegen Sättigungstemperatur “ t_s ” bzw. “ p_s ”). Die durchgehende Linie beschreibt den Entladevorgang von Sättigungsdampf, die unterbrochene den von Wasser. Die Enthalpie steigt kontinuierlich, während die Dichte zusehends abnimmt. CR ... kritischer Punkt, EW ... Ende der Dampfentladung, y ... Dampfvolumen. Grafik: Beckmann/Gilli (3)

Im Falle von indirekter Speicherung ($m_{store} = V_{store} = konst$) erfolgen Be- und Entladung über Energieaustausch über die Oberfläche eines Wärmetauschers. Sind Wasser und Dampf im thermodynamischen Gleichgewicht und $m_{store, anfang} = konst$ bzw. $\Delta m_{out} = 0$, ergibt sich die *Allgemeine Speichergleichung (nach (3) Beckmann/Gilli)* zu:

$$\Delta Q_{out} = (j_{st, anfang} - j_{st, ende}) \cdot m_{st} + B + \Delta Q$$

mit

$$B = V_{st} \left[\left(\frac{u'' - u'}{v'' - v'} \right)_{anfang} - \left(\frac{u'' - u'}{v'' - v'} \right)_{ende} \right]$$



Grafik 3.8: Masse-, Enthalpie- und Exergie-Output eines Expansionspeichers zwischen den Zuständen völlig beladen ($y=0$) und völlig entladen ($y=1$). t_b ... Temperatur bei Beginn des Entladevorgangs, t_e ... Temperatur am Ende der Heißwasserentladung. Eine optimale Ausbeute (entspricht dem *Arbeitspunkt*) der Exergie/Enthalpie bekommt man um 300°C , daher ist ein solcher Ruthsspeicher in erster Linie für industrielle Anwendung interessant. *Grafik: Beckmann/Gilli (3)*

Ein interessanter Fall in den *Grafiken* [3.7] und [3.8], wenngleich auch von geringer praktischer Bedeutung, spielt sich zwischen den Punkten “CR” und “EW” ab. Dort kondensiert mehr Wasser als dem Dampfdruckspeicher entzogen wird und der Wasserspiegel steigt zunächst, bis es im Punkt “EW” wieder zu Gleichgewicht von entnommenem und kondensiertem Wasser kommt.

Für einen Speicher mit flüssigem Speichermedium unter konstantem Druck ($dp = 0$) gilt der folgende differentielle Zusammenhang:

$$dV_{\text{store}} = v \cdot dm_{\text{store}} + m_{\text{store}} \cdot dv$$

Damit wird aus der Speichergleichung:

$$h_{\text{in}} \cdot dm_{\text{in}} + dQ - h_{\text{out}} \cdot dm_{\text{out}} = d \cdot (hm)_{\text{store}}$$

Enthalpieänderung des Mediums (rechte Seite) tritt unabhängig davon, ob diese durch Änderung der spezifischen Enthalpie “ h_{store} ” oder der spezifischen Masse “ m_{store} ” (oder beiden) hervorgerufen wurde, auf. Die Systemgrenzen und folglich auch das Speichervolumen “ V_{store} ” sind variabel, daher wird volumetrische Arbeit während des Entladevorgangs von Außen verrichtet. Die Entlade-Enthalpie “ h_{out} ” bleibt dabei unverändert, also konstant.

Ist auch die Speichermasse konstant, erhält man bereits Bekanntes:

$$dQ = m_{\text{store}} \cdot dh \Rightarrow V_{\text{store}} \varrho_{\text{store}} c_p \cdot dT$$

Mit der Änderung der Enthalpie:

$$dh = c_p \cdot dT$$

Der Ansatz für die Speicherkapazität spezifischer Exergie, die als Enthalpie “ h ” frei wird (mit $h = H/m$) beruht auf dem Exergiegehalt von Wärme, der eine Funktion der Umgebungstemperatur “ T_0 ” ist. Für eine Temperaturspreizung von $[T_1, T_2]$ gilt:

$$\Delta E_{12} = \Delta Q_{12} - T_0 \int_1^2 T^{-1} dh$$

Für die gespeicherte Wärmemenge “ ΔQ_{12} ” bei konstantem “ m_{store} ” und “ c_p ” gilt:

$$\Delta Q_{12} = m_{\text{store}} \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1)$$

Exergiespeicherkapazität ist bei tiefen Temperaturen hoch, daher ist die Niedertemperaturspeicherung thermischer Energie mit unterkühlten Medien sehr verlustarm. In diesem Fall ist der Entladevorgang mit einer Temperaturerhöhung verbunden, die Umgebung fungiert als Wärmequelle, der kalte Speicher als Wärmesenke. Bei $T_{\text{store}} = 0,203T_0$ sind Wärme- und Exergiespeicherkapazität gleich hoch, darunter ist Letztere höher.

Ruths Speicher stellen die einfachste und älteste Form von *Latentwärmespeichern* dar, durch die hohen Druckverhältnisse sind sie aber außerhalb industrieller Prozesse nur schwer bis gar nicht anwendbar. Die Innovation liegt bei anderen Latentwärmesystemen.

3.2.3. Speicherung über Latentwärme⁶

Latentwärmespeicher nutzen die Enthalpie reversibler thermodynamischer Zustandsänderungen eines passenden Speichermediums. Als *latente Wärme* bezeichnet man die bei einem Phasenübergang erster Ordnung aufgenommene oder abgegebene Wärmemenge, wobei die Aufnahme bzw. Abgabe dieser Wärme nicht zu einer Temperaturänderung führt. Phasenübergänge zweiter und höherer Ordnung zeigen kein solches Phänomen.

→ Beispiele zu Phasenübergänge erster Ordnung über latenter Wärme:

- Verdampfungs- bzw. Kondensationswärme (flüssig ↔ gasförmig)
- Schmelz- bzw. Kristallisationswärme (fest ↔ flüssig)

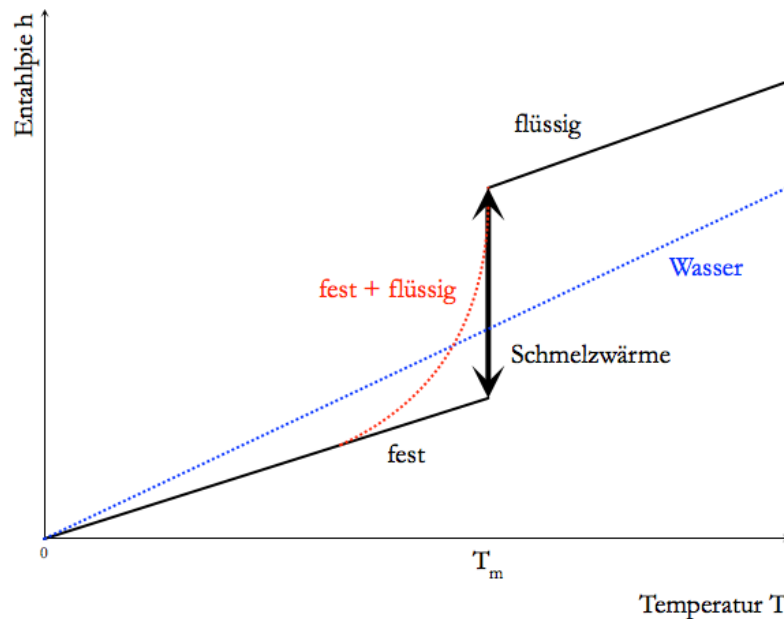
Man beschränkt sich bei technischer Anwendung aber auf den Phasenübergang flüssig-fest, denn hierbei ist die Volumszunahme nicht so groß wie bei flüssig-gasförmig. Dadurch werden zwar geringere Energiemenge frei, aber die Speichergröße (und -belastung) hält sich in Grenzen. Die Kombination und gemeinsame Nutzung sensibler und latenter Wärme ist möglich (und steigert die Speicherkapazität), geht aber auf Kosten der Möglichkeit, Energie bei konstanter Temperatur abzuführen. Die Applikation entscheidet über die Wahl des technischen Vorgangs. Der Übergang fest-fest (in metallischen Stoffen beispielsweise, die aber keine allzu hohe latente Wärme aufweisen) zu thermischer Energiespeicherung wurde bisher nicht näher untersucht und für technische Anwendung vorerst ausgeschlossen: Es liegen metastabile Phasen vor und wenn nicht ständig Energie (latente Wärme) zugeführt wird, kommt der Prozess zum Stillstand. Dimensionierung und Energieausbeute sind des Weiteren in diesem Zusammenhang nicht dokumentiert worden.

Schmelzwärme ist dabei jene Energiemenge, die zugeführt werden muss, um einen vollständigen Phasenübergang zu gewährleisten. Diese wird auch wieder frei, läuft der Prozess umgekehrt. Für die meisten Materialien ist diese Schmelzwärme wesentlich größer als ihre Enthalpiezunahme pro Kelvin. Um 1kg Eis zu schmelzen wird 80-mal mehr Energie benötigt als zur Erwärmung von 1kg Wasser um 1°C. Die Verdampfungsenthalpie von Wasser beträgt weiters bei 1bar beispielsweise 2256,5 kJ/kg und die Schmelzenthalpie von Wassereis zu Wasser 333,5 kJ/kg. Diese Werte liegen beträchtlich über den 4,18 kJ/(kg K) von sensibler Wärmespeicherung mit flüssigem Wasser.

Diese Form der Speicherung von thermischer Energie befindet sich noch in der Erforschungsphase. Konkret werden diverse Materialien, die zu dieser Speichermethode in Frage kommen untersucht und entwickelt. Man nennt sie *Phase Change Materials*, kurz

⁶ **Quellen:** Ataer (1), Beckmann/Gilli (3), Heinz (6)

“PCM”. Während des Ladevorgangs erhöhen sich Temperatur sowie Enthalpie des Zustands eines Systems. Zunächst wird zugeführte Energie als sensible Wärme in der festen Phase des Mediums gespeichert, Schmelzwärme wird dann beim Phasenübergang (zu flüssig) bei konstanter Schmelztemperatur “ T_m ” absorbiert. Weitere zugeführte Wärme wird danach in der flüssigen Phase des Mediums gespeichert, was wiederum zu dessen Temperaturerhöhung führt. Diesen Vorgang zeigt *Grafik [3.9]*.



Grafik 3.9: Gespeicherte Enthalpie (kJ/kg) als Funktion der Temperatur für ein Material mit Phasenübergang bei Schmelztemperatur “ T_m ” im Vergleich mit Wasser am Tripelpunkt. Die Wärmekapazitäten der festen bzw. flüssigen Phase werden durch die Steigung der jeweiligen Gerade repräsentiert. Für unreine Materialien findet der Phasenübergang nicht an einem speziellen Punkt, sondern über einen Temperaturbereich statt, welches durch die rote Kurve illustriert ist.

Latentwärmespeicher sind Systeme mit konstantem Druck bei konstanter Masse. Daher lässt sich die Enthalpiezunahme eines Festkörper- bzw. Fluidsystems von $T_1 < T_{\text{fest}}$ zu $T_2 > T_m$ wie folgt definieren:

$$\Delta h = c_{p, \text{fest}} \cdot (T_m - T_1) + \Delta h_m + c_{p, \text{flüssig}} \cdot (T_2 - T_m)$$

mit

$c_{p, \text{fest}}$... spezif. Wärmekapazität (fest)

$c_{p, \text{flüssig}}$... spezif. Wärmekapazität (flüssig)

Δh_m ... Enthalpie des Phasenübergangs (Schmelzwärme)

T_m ... Schmelztemperatur

Wobei der erste Term der Gleichung den sensiblen Teil der festen Phase darstellt, der zweite die latente Wärme und der dritte den sensiblen Teil der flüssigen Phase. Für die Exergiespeicherung “ ΔE ” gilt (nach (3) Beckmann/Gilli) das Folgende (T_0 ... Umgebungstemperatur):

$$\frac{\Delta E}{m_{store}} = C_{fest} + C_{flüssig} + \Delta h_m \left(1 - \frac{T_0}{T_m}\right)$$

wobei

$$C_{fest} = c_{p,fest} (T_m - T_1 - T_0 \ln \frac{T_m}{T_1})$$

$$C_{flüssig} = c_{p,flüssig} (T_2 - T_m - T_0 \ln \frac{T_2}{T_m})$$

Alternativ lässt sich die gespeicherte Energie auch wie folgt ausdrücken, wenn sie von der Masse “ m ” und der Schmelzwärme “ λ ” (in J/kg) des Speichermediums abhängt:

$$E = m\lambda$$

Wenn keine Zustandsänderung an “ T_m ” vorliegt, sondern sich der Schmelzpunkt über einen weiten Bereich $[T_1, T_2]$ erstreckt, muss die sensible Wärme berücksichtigt werden und die gespeicherte Energie kann geschrieben werden als:

$$E = m \left(\int_{T_1}^{T_m} c_{p,fest} \cdot dT + \lambda + \int_{T_m}^{T_2} c_{p,flüssig} \cdot dT \right)$$

Latentwärmespeicher lassen sich durch ihre höhere Energiedichte wesentlich kompakter bauen als sensible Speicher. Die Enthalpie des Phasenübergangs zu kennen ist ausschlaggebend bei der Wahl des Mediums. Für reine Materialien lassen sich (nach (3) Beckmann/Gilli) Abschätzungen in [kJ/kg] treffen (M ...molare Masse [mol/kg]):

- organische Stoffe: $\Delta h_m \approx 0,7 T_m \cdot 1 \text{ kJ}/(\text{kgK})$
- anorganische Stoffe: $\Delta h_m \approx (24M^{-1}) T_m \cdot 1 \text{ kJ}/\text{kmol}$

Wird die Enthalpie zusätzlich noch mit der Dichte multipliziert, erhält man den Wert in [kJ/m³]. Direkte Speicherung auf Grund der geringen Wärmeleitfähigkeit von so genannten *Phase Change Materials* (kurz “PCM”) ist nicht immer möglich. Es muss auf Wärmetauscher bzw. ein extra Wärmeüberträgermedium zurückgegriffen werden.

→ Wichtige Charakteristika, die von PCM erfüllt werden sollten:

- hohe Schmelzwärme, hohe Dichte
- adäquate (anwendungsfreundliche) Schmelztemperatur
- hohe thermische Leitfähigkeit in beiden Phasen
- hohe Wärmekapazität in beiden Phasen
- keine Phasentrennung oder thermische Instabilität
- kein Unterkühlen beim Gefrieren, keine Übersättigung beim Schmelzen
- geringe thermische Expansion, geringe Volumsänderung beim Schmelzen

Tabelle [3.2] bietet eine Übersicht typischer Vor- und Nachteile organischer bzw. anorganischer Speichermedien. Auf detaillierte Stoffstudien wird später eingegangen.

	organisch	anorganisch
Vorteile	• nicht korrodierend • chemisch und thermisch stabil • nicht/wenig unterkühlbar	• hohe Schmelzenthalpie • hohe Dichte
Nachteile	• niedrigere Schmelzenthalpie • weniger dicht • geringe Wärmeleitfähigkeit • brennbar	• geringe Wärmeleitfähigkeit • unterkühlbar • korrodierend • Segregation*, instabil • teilweise toxisch

Tabelle 3.3: Vor- und Nachteile von organischen bzw. anorganischen PCM. (*) Inhomogenität, Bildung von unterschiedlichen Bereichen im Material durch Phasenaufspaltung. *Nach Heinz (6)*

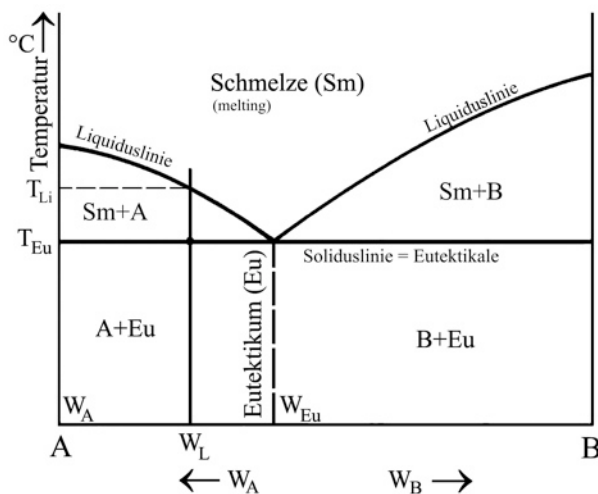
PCMs können rein oder unrein sein, bei letzterem gibt es zwei Möglichkeiten: binäre und tertiäre Mischungen (aus respektive 2 bzw. 3 Substanzen).

Zu den Vorteilen von binären Zusammensetzungen (=Zweistoffsysteme) gehören:

- Schmelzpunkte in anwendungsfreundlicheren Bereichen
- Hohe Energiedichten selbst bei niederen Schmelzpunkten
- Teure Substanzen können mit billigen Stoffen gestreckt werden

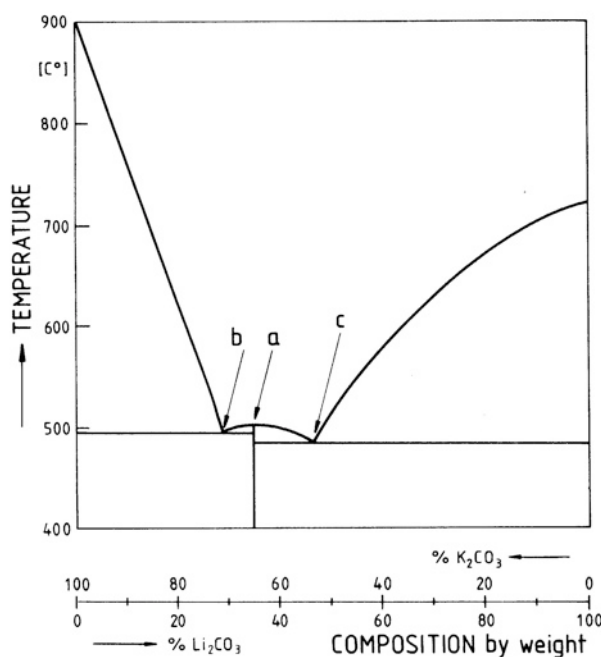
Als Voraussetzung zur Verwendung von binären Mischungen gilt, dass sie schmelzen bzw. gefrieren müssen wie ein homogenes, reines Medium. Das ist der Fall bei zwei speziellen Kompositionen:

- **Die eutektische Mischung:** Befindet sich in einem Phasengleichgewicht, das sich nur durch sehr eingeschränkt wählbare Freiheitsgrade auszeichnet. Die Komposition wird durch den niedrigsten Wert im Schmelzdiagramm repräsentiert. *Grafik [3.10a]* zeigt das Zustandsbild einer eutektischen Mischung.
- **Die dystektische Mischung:** Weist eine spezielle Komposition auf, die eine Mixphase bildet (eine chemische Bindung). Deshalb verhält es sich fast wie ein reiner Stoff. Siehe hierzu *Grafik [3.10b]*.



Grafik 3.10a: Das Zustandsbild eines Eutektikums in 2 Freiheitsgraden (Temperatur und Konzentration). Im eutektischen Punkt sind 3 Phasen des Systems im Gleichgewicht.

Grafik: Ra'ike 2006,
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bf/Alloy_diagram_separate_crystal_building.png



Grafik 3.10b: Phasendiagramm eines Li₂CO₃ - K₂CO₃ Systems, auf das nicht näher eingegangen werden soll. Die Abbildung soll vielmehr die Verknüpfung von Dystektikum mit Eutektikum illustrieren:
 a ... dystektischer Punkt
 b/c ... eutektische Punkte.

Grafik: Beckmann/Gilli (3)

Liegt keine dieser beiden Mischungen vor, ist der Schmelzprozess inkongruent. Das bedeutet, die feste Phase zerfällt in eine flüssige und eine weitere feste Phase. Die unterschiedlichen Dichten und Sprünge zwischen den Phasen führen dann zur sogenannten *Segregation*, der Bildung von unterschiedlichen Bereichen und damit zu Inhomogenität des Materials.

Folgende allgemeine Probleme treten bei Latentwärmespeicherung auf: Der Wärmetransfer gestaltet sich als schwierig, da in der festen Phase keine Konvektion existiert, die Wärmeleitfähigkeit gering ist und sich das Volumen ändert. Um diese Limitierungen zu umgehen, wurden die sogenannten *PCM Slurries* bzw. *Encapsulations* entwickelt. Dabei befinden sich PCMs beispielsweise in Rohren, die wiederum von einem Arbeitsmedium (Wasser oder Wasserdampf) umgeben sind oder werden in mikroskopische Kapseln verpackt, die in einem Arbeitsmedium "schwimmen". Somit ergibt sich ein "Brei", der *Slurry*, der auch in fester Bausubstanz Verwendung findet und eine Art "intelligente" Wand für Passivhäuser darstellen kann. Es entsteht ein mehrphasiges Speichermedium, bei dem die einzelnen Phasen von einander räumlich und chemisch getrennt sind.

3.2.4. Andere thermische Speichermethoden⁷

Eine weitere, vielversprechende und auch noch in der Erforschung steckende Methode thermische Energie zu speichern, geschieht über die Änderung von Bindungsenergie zwischen zwei oder mehr Speichermedien (*Thermochemische Speicherung*). Wärme wird durch endotherme Reaktionen gespeichert und durch exotherme Vorgänge abgegeben. Vorausgesetzt die chemische Reaktion ist reversibel (im thermodynamischen Gleichgewicht) und die Reaktionspartner können in der flüssigen Phase gespeichert werden, sind hohe Energiedichten möglich. Dieser Prozess ist in *Grafik [3.11]* dargestellt. Weiters können Energieverluste über unzureichende Isolation vermieden werden, wenn die beteiligten Medien während des Aufladevorgangs getrennt (oder "kalt" bei Umgebungstemperatur) gespeichert werden können.

Diese Speichermöglichkeit verspricht eine gute Grundlage für Langzeitspeicherung von thermischer Energie, es muss nur darauf geachtet werden, dass nach jedem Zyklus wieder annähernd 100% der stofflichen Voraussetzungen gegeben sind.

Abhängig von der Bindungsart, lässt sich ein Spezialfall definieren: Die *Sorption*. Diese Speichermöglichkeit basiert auf folgendem Reaktionsschema zweier Stoffe:



⁷ **Quellen:** Ataer (1), Beckmann/Gilli (3), Heinz (6)

Wobei “AB”, bzw. “A” allein fest oder flüssig ist und “B” gasförmig (“Reaktionsprodukt”). Weiters kann Stoff “A” ein Element, eine Komponente oder Mischung sein. Die Reaktionswärme bei Atmosphärendruck beträgt (*nach Beckmann/Gilli (3)*):

$$\Delta h_s \approx 135 \pm 15 T_s M_B^{-1}$$

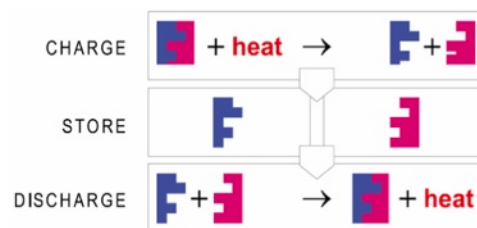
mit

Δh_s ... Sorptionsenthalpie [kJ/kg]

T_s ... Sorptionstemperatur [°K]

M_B ... Molmasse von “B” [kmol/kg]

Die Masse von “A” darf nicht vernachlässigt werden, ist aber für das Modell zweit-rangig. Oft enthält der Speichertank Granulate stark poröser Stoffe (große innere Oberflächen) mit hygroskopischer Eigenschaft, also der Fähigkeit, Wasserdampf anzuziehen und an der Oberfläche anzulagern (wobei Wärme frei wird). Dies nennt sich *Adsorption*. Umgekehrt muss zum Trocknen von diesen Stoffen (*Desorption*) Wärmeenergie aufgewendet werden. Da mehr Temperatur beim Beladen aufgewendet werden muss (endliche Reaktionsrate der Komponenten) als beim Entladen frei wird, kommt es zu Verlusten, die als reine Exergieverluste (wie bei Wärmetauschern) behandelt werden können.



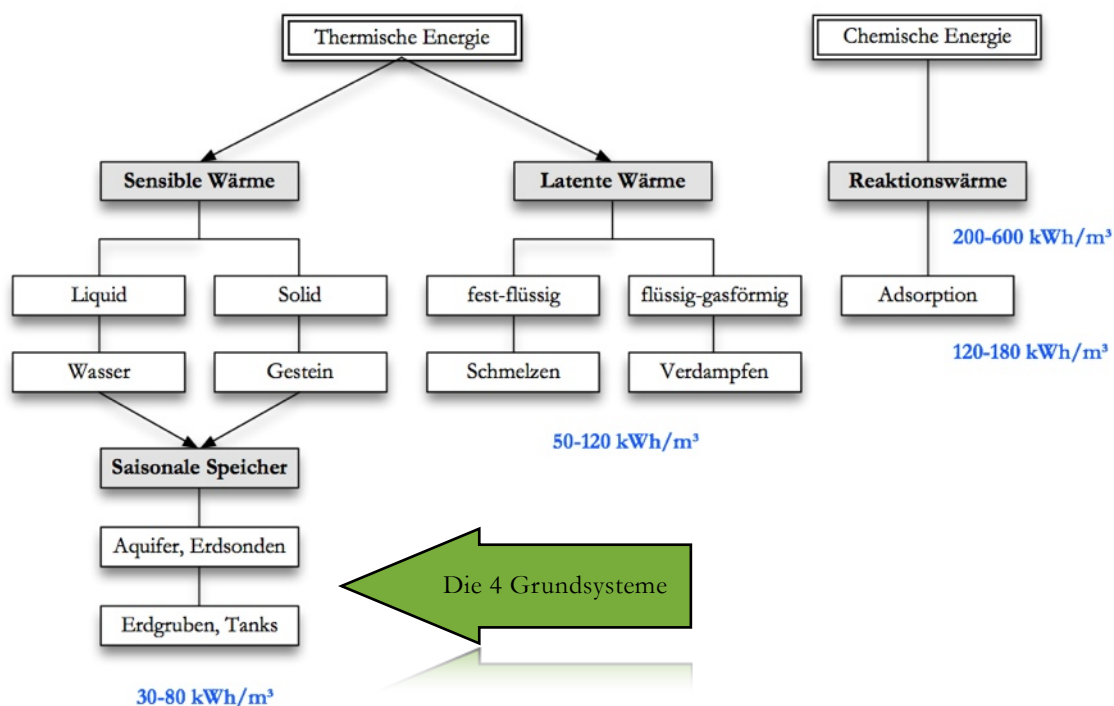
Grafik 3.11: Das Prinzip thermochemischer Wärmespeicherung schematisch dargestellt. Thermische Energie wird aufgenommen, um ein chemisches Gemisch in seine Bestandteile zu zerlegen, diese Bestandteile können über längeren Zeitpunkt getrennt gespeichert werden. Bei der Rekombination wird wiederum nutzbare thermische Energie durch chemische Reaktion frei.

Grafik: M. Bakker, *Thermochemical Storage Systems, ECN Biomass and Energy Efficiency 2012*

Hinweis: Es gibt auch noch die Möglichkeit, Wasserstoff als Speichermedium zu verwenden. Er lässt sich durch Elektrolyse von Wasser mit (Überschuss-)Energie aus Photovoltaik oder Hochtemperaturprozessen erzeugen und weist hohe Energiedichten auf. Über Verbrennung, die Reaktion mit Sauerstoff, wobei reines Wasser als Abfallprodukt entsteht, kann Wärme gewonnen werden. Hierauf wird aber nicht weiter eingegangen, da nur Systeme untersucht werden sollen, welche zur direkten Speicherung von Niedertemperatur-Solarwärme aus thermischen Kollektoren (für Haushalts-Applikationen) dienen können. Außerdem stellt die Diffusion von Wasserstoff (auch bei tiefen Temperaturen) ein Problem bei der Speicherung desselben dar.

4. Etablierte Systeme und Pilotanlagen

Im Folgenden wird auf bereits entwickelte und verfügbare Langzeitsysteme und deren Methoden eingegangen (Stand nach zehnjähriger Entwicklung). *Grafik [4.1]* bietet einen ersten Überblick. Kleine Anlagen (Kurzzeitspeicher), wie sie beispielsweise als elektrische Heißwasserboiler in Haushalten zu finden sind, sind nicht Gegenstand dieser Arbeit und werden deshalb nicht erwähnt. Angeführt werden weiters wichtige Pilotprojekte (und deren Daten bzw. Grundparameter) ausschließlich zu saisonaler Wärmespeicherung.



Grafik 4.1: Schematische Darstellung der wichtigsten, verfügbaren thermischen Speichermethoden. Die drei Grundprinzipie liefern unterschiedliche Energiedichten (blau) bei unterschiedlicher Dimensionierung und Reinheit. Der Forschungsstand bei latenter Wärme ist bereits fortgeschritten, erste Entwicklungen befinden sich im Test, vorallem die Integration in Gebäude bzw. Baustoffe ist populär. Anders verhält es sich bei chemischer Energiespeicherung: Die Möglichkeiten sind alle noch Gegenstand der Forschung. Es existieren noch keine Pilotanlagen oder entwickelte Systeme, obgleich das Potential enorm ist (Stand 2010). Sensible Wärmespeicher (in vier verschiedenen Grundformen) stellen den aktuellen Entwicklungsstand bei saisonalen (langzeitigen) Speicherlösungen dar. *Datenquelle: Kerskes (9)*

4.1. Sensible Wärmespeicher

Werden auch *kapazitive* oder *konvektive* Wärmespeicher genannt. Die gespeicherte Energie steckt in der Temperaturänderung des (eiphasigen) Mediums, daher wird sie

“fühlbare” Temperatur genannt und ist proportional zur Masse. Viel wichtiger ist aber ihre Abhängigkeit vom Volumen (und der Dichte). Durch Abkühlen gibt das Medium die zuvor zugeführte Wärme ab. Bei schlechter Isolierung kommt es zu hohen Verlusten an die Umgebung (durch Wärmefluss auf Grund der herrschenden Temperaturdifferenz) führt. Die Vakuumisolation stellt eine bedeutende Verbesserung zu herkömmlichen Dämmstoffen dar. Problematisch sind weiters die Speichergeometrien, erst bei sehr großem Volumen ($>1000\text{m}^3$ bei Wasser beispielsweise) rentiert sich ein sensibler Speicher, da die Oberflächenverluste dann im Verhältnis akzeptabel sind. Sensible Speicher brauchen daher viel Platz.

Tabelle [4.1] gibt volumsbezogene Wärmekapazitäten von möglichen Medien an. Wasser ist und bleibt das bevorzugte Speichermedium (wenngleich es korrodierend wirkt, wodurch Veredelungen und Beschalungen der Oberflächen notwendig werden): Es ist billig und hat keinerlei negative ökologische Auswirkungen auf die Umwelt. Wasser kann auch gleichzeitig als Wärmeüberträgermedium fungieren und spart so zusätzliche Wärmetauscher. Für Hochtemperaturanwendungen (ab 100°C) muss auf Sand und Beton zurückgegriffen werden, denn Salzschnmelzen (z.B. NaCl , MgCl_2 , Li_2CO_3 , K_2CO_3) befinden sich noch in der Erforschung.

Stoff	Temperaturbereich, $^\circ\text{C}$	Wärmekapazität, $\text{kJ}/(\text{m}^3\text{K})$
Wasser	0-100	4175
Kies, Sand	0-800	1278-1420
Granit	0-800	2062
Beton, Keramik	0-500	1672-2074
Ziegelstein	0-1000	1176-1596
Eisen	0-800	3655
Wärmeträgeröl	0-400	1360-1620
Kies-Wasser	0-100	2904
Salzschnmelze	150-450	1970-1620
Natrium	100-800	925-750

Tabelle 4.1: Auflistung einiger möglicher Medien und deren volumsbezogenen Wärmekapazitäten bei 20°C . Der Temperaturbereich beschreibt das Einsatzgebiet der Stoffe (unter- bzw. oberhalb der Grenzen findet Phasenübergang statt bzw. sind die Medien chemisch nicht zu thermischer Speicherung geeignet).
Datenquelle: Oertel (17)

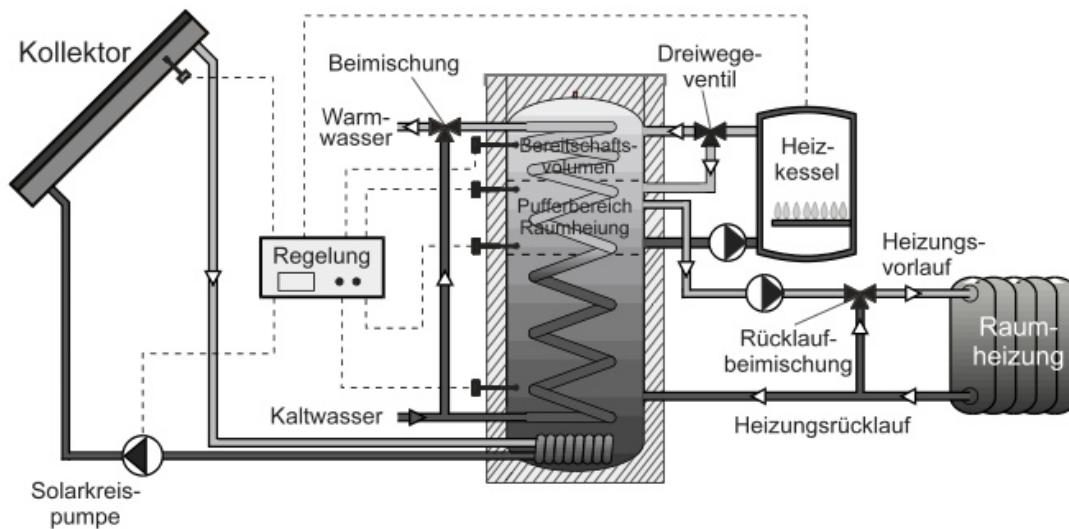
Für industrielle Abwärme kommen vorallem *Dampfdruckspeicher* auf Basis von Wasserdampf in Frage. Es handelt sich um druckdichte Stahlkessel, die mit Wasserdampf be-

und entladen werden. Das Wasser kondensiert im Druckvolumen (bei etwa 10bar *nach (17) Oertel*) und die thermische Energie steht schnell zur Verfügung. Es entsteht so ein zweiphasiges System (flüssig, gasförmig), bei dem nur Verdampfen bei weiterer Wärmezufuhr möglich ist: Der Wasserdampf gibt den Referenzdruck für das Sieden vor. So lassen sich Temperaturen weit über dem Siedepunkt erreichen. Eine andere Möglichkeit für industrielle Abwärme sind *Fluidspeicher* mit Thermoölen oder Flüssigsalzen (beides sehr teuer, daher nur kleine Volumina realisierbar) als Basis. Die erwähnten Systeme sind nicht für Langzeitspeicherung konzipiert, können aber gut als Puffer oder Zuspäher eingesetzt werden, jedoch ist ihre Lebenszeit beschränkt: Öle und anorganische Salzschnelzen degenerieren mit der Zeit (Oxidation, Dekomposition), verstärkt vorallem dann, wenn sie über der empfohlenen Temperatur eingesetzt werden. Flüssige Salze sind weiters stark korrodierend, was es schwierig macht, sie bei höheren Temperaturen ein zu dämmen. Auch die Entzündlichkeit von Ölen über einer bestimmten Temperaturgrenze stellt ein Problem dar, weshalb solche Systeme durch inerte Gase verschlossen werden müssen. Einfache und kostengünstige *Feststoffspeicher* sind Höhlen oder unterirdische Gesteinsschichten (*Felsenklavenspeicher*). Sie besitzen, sowie teurere, großflächige Betonspeicher, nur eine geringe Ausbeute und hohe Verluste. Problematisch ist die Einbindung von Wärmetauschern für Be- und Entladung.

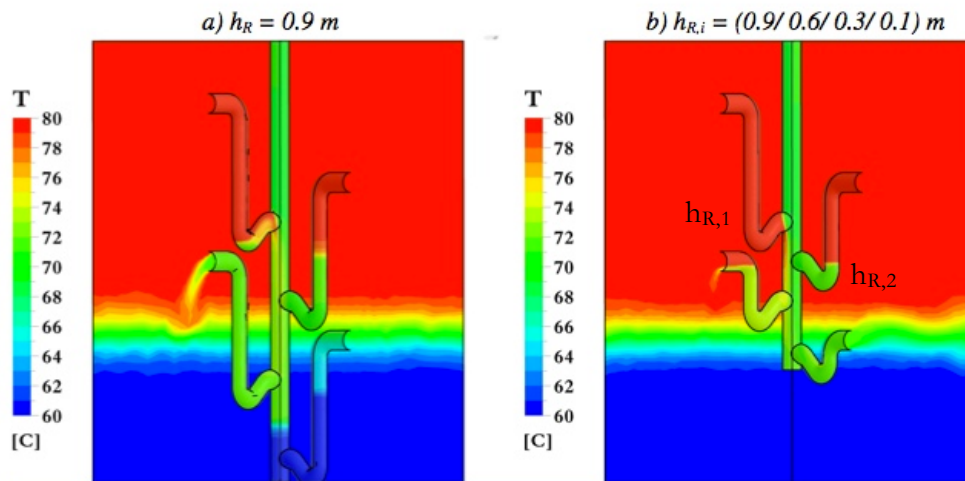
Für *Solarthermie* in Verbindung mit einem saisonalen Wärmespeicher ist unter Umständen ein Biomasseboiler oder eine Wärmepumpe als unterstützendes System notwendig. Das bringt zwar logistische Schwierigkeiten mit sich, trägt aber zu verbesserter Ausbeute und Kosteneffizienz bei: Die Kollektorfläche muss nicht aufgestockt werden, um den solaren Anteil zu steigern. Durch Fortsetzung der Entwicklung zur Effizienzsteigerung von saisonalen Wärmespeichern (bei gleichzeitiger Kostenreduktion) wird jedoch in Zukunft der Einsatz einer Wärmepumpe im Vergleich zu einer Vergrößerung des Solarsystems keine Kostenvorteile mehr bieten können (*nach (11) Mangold*). Ein weiterer Faktor für hohe Solarerträge und Systemeffizienz ist darüber hinaus die Realisierung von möglichst geringer *Netzzücklauftemperatur* (dazu später mehr), da diese die untere Schranke der Arbeitstemperatur festlegt (Auskühltemperatur) und die damit zur Verfügung stehende Speicherkapazität (maximale Temperaturdifferenz des Mediums). Einige Pilotprojekte verwenden daher Wärmepumpen zur Auskühlung des saisonalen Speichers. Siehe dazu *Grafik [4.2]*.

Für ein solches solares Nahwärmesystem (Lebensdauer etwa 40 Jahre *nach (11) Mangold*) ist eine maximale Temperatur von 95°C ausreichend (Raumwärme und Heißwasser), daher eignen sich die gut etablierten drucklosen Heißwasserspeicher (trotz ihrer Nachteile) hervorragend. Die *Stratifikation* etwa, also die Temperaturschichtung in Wasser, ist zu beachten, denn diese kann Verluste verhindern und die Effizienz steigern (der solare Anteil lässt sich so *nach (30) BINE* um 5-10% verbessern). Der Speicher sollte über die Schicht gleicher Temperatur (Zuleitung in die richtige Schichtung nach Einspeisungstemperatur) und mit geringer Strömungsgeschwindigkeit (um Turbulen-

zen zu vermeiden) beladen werden. Vergleiche dazu *Lohse et al. (10)*: Durch geeignete Aus- bzw Einlassgeometrie lassen sich Mischungs- und Ansaugeffekte minimieren. *Grafik [4.3]* zeigt die Simulation eines Schichtbeladesystems.



Grafik 4.2: Prinzipieller Aufbau einer bivalenten solaren Kombinationsanlage (Raumwärme und Heißwasser) für ein Einfamilienhaus, ausgelegt für Vorlauf/Rücklauf von 50°/30°C. Die Stratifikation wird durch unterschiedliche Ein- und Auslasshöhen berücksichtigt, ein Heizkessel wirkt unterstützend. Für große Volumina gilt eine sehr ähnliche Funktionsweise. *Grafik: Fraunhofer SOBIC (21)*



Grafik 4.3: Temperaturdistribution in einem Speichertank während des Ladevorgangs mit einem geeigneten Schichtbeladesystem (2,7m Gesamtlänge, optimale Geometrie). “ h_R ” ist dabei der Abstand von Rohrein- und ausgang. $\Delta T = 10K$, **a)** $V'_{in} = 6m^3/h$, **b)** $V'_{in} = 14m^3/h$. RECHTS: h_R variiert und nur geringe Druckverluste treten auf - Ansaugeffekte sind dann geringer und das Ausströmverhalten verbessert. *Quelle/Grafik: Lohse et al. (10)*

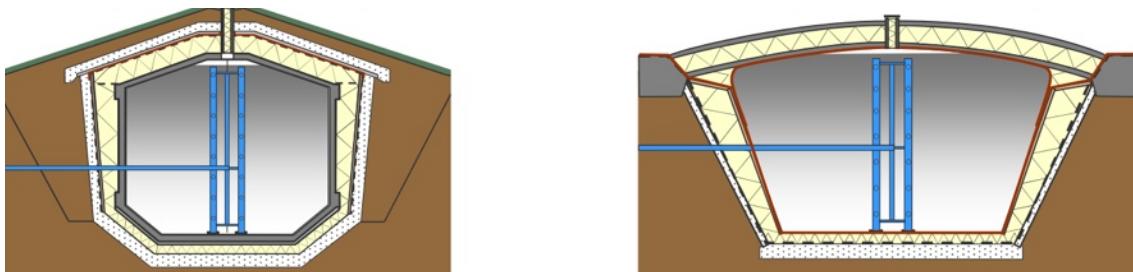
Zur Verbesserung von saisonalen Wärmespeichern auf Basis von Wassertanks können die folgenden Punkte (aus Modellberechnungen) beitragen (*nach (6) Haberl et al.*):

- Die Effizienz eines Systems ist höher, wenn auch als Wärmeüberträgermedium Wasser gewählt wird und die Wärmetauscher (und damit Frostschutzmischungen als Medium) wegfallen.
- Initiale Investitionskosten werden durch die Wahl des Mediums (Dichte) und die Dimensionierung der Anlage festgelegt. Bei Wasser musste man im Jahr 2012 mit $3\text{€}/\text{kWh}$ Investitions- und $0,1\text{€}/\text{kWh}$ Betriebskosten rechnen. Bei momentan 1-5 Zyklen der Anlage im Jahr beläuft sich der Energiepreis für den Kunden auf $0,31\text{€}/\text{kWh}$ während eines Zyklus. Um die Speicherkosten zu verringern sollten mindestens 10 Zyklen im Jahr gefahren werden, der Energiepreis würde dann auf $0,031\text{€}/\text{kWh}$ sinken.
- Zylindrische Geometrie des Wassertanks unterstützt die Ausbildung von Temperaturschichtung, aber die Annäherung an die Kugelform verringert Wärmeverluste über die Oberfläche. Des Weiteren können Stratifikationsvorrichtungen die Leistung weiter steigern, sind aber wegen erhöhter Energieaufnahme problematisch und sollten mit Vorsicht eingesetzt werden. Warmwasser vom Kollektor bzw. Hilfssystem (etwa einem Boiler) wird dabei in die entsprechende Schicht je nach Temperatur eingeleitet oder entnommen.
- Die Zugabe von PCM (Phasenwechsel Materialien, in 50% des Volumens und bei 58°C) hat in Untersuchungen von “*IEA SHC Task 32 (6)*” bisher noch keine effektive Leistungssteigerung erzielen können. Die Zukunft gehört der chemischen Sorptionstechnik, die viel Potenzial und hohen solaren Anteil bieten könnte.

Für “künstlich gedämmte” saisonale Heißwasserspeicher gibt es mehrere Realisierungsformen (vgl. *Grafik [4.4]*), der Aufwand für Isolation und Energieaustausch bei diesen Modellen ist relativ hoch, dafür aber auch die Energiedichte:

- **Wassertankspeicher** (“TANK”): Dieser geschlossene Wärmespeicher aus Beton steht frei und ist daher teuer wie aufwändig in der Konstruktion. Die Dämmung ist das Hauptproblem, die Verluste sind hoch und er wird meist nur in kleinen Volumina als Pufferspeicher (für Heißwasseraufbereitung oder Kurzzeitspeicher eingesetzt. Für saisonale Anlagen ist es sinnvoller, das Erdreich in die Konstruktion miteinzubeziehen und den Tank “einzugraben”, also ihn unterirdisch zu bauen, was viele der Nachteile behebt bzw. relativiert (siehe “Erdbeckenspeicher”). Die maximale Speichertemperatur beträgt 95°C . Die unterste Schicht kann prinzipiell bis zu Umgebungstemperatur (unterirdisch bis rund 10°C) abgekühlt werden, sofern der Netzurücklauf bzw. das Schichtbeladesystem das erlauben. Realisierbare Energiedichten (abhängig von der Temperaturdifferenz, *nach (9) Kerskes*) bewegen sich zwischen **$60\text{--}80\text{ kWh}/\text{m}^3$** , das gilt auch für:

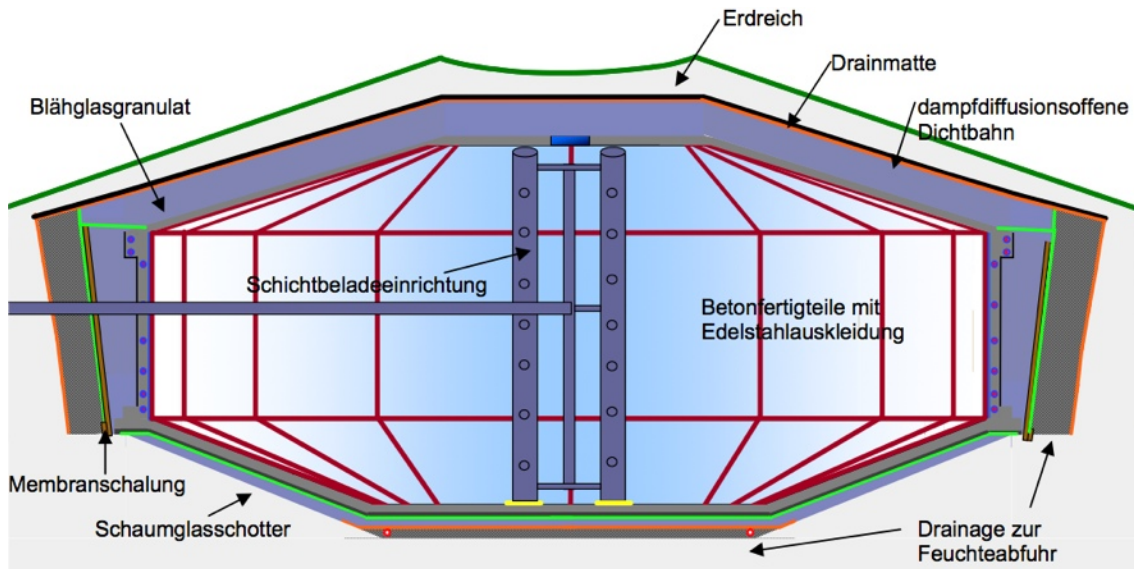
- **Erdbeckenspeicher** (“PIT”): Typischerweise bis zu einem Volumen von 20.000m^3 aus Beton gebaut, ist dieser unverschlossene (bessere Druck-Lastungsverteilung) Wassertankspeicher teilweise oder vollständig in das Erdreich versenkt (auch “Erdgrubenspeicher”) und profitiert dadurch von besserer Isolation und geringeren Kosten, die Erdoberfläche ist weiterhin nutzbar (das Erdreich muss keine besonderen Voraussetzungen erfüllen). Das Dach ist thermisch isoliert und schwimmt entweder auf der Oberfläche (oft in Dänemark zu finden) oder ist als selbstunterstützender Bogen ausgefertigt. Die Konstruktion des Speichers kann also unterschiedliche Geometrien aufweisen, wie *Grafik [4.4]* zeigt. Die Statik ist unter Umständen ein Problem, wenn es zu Rissbildung (durch die Dampfdruck-Lastung bei 95°C) kommt und Wasser austritt. Daher wird ein solcher Speicher vorgespannt und durch speziell behandelten hochfesten Beton oder Stahl vor Wasserdampfdiffusion in das umliegende Erdreich geschützt. Es ist jedoch sinnvoller, ein für Dampfdiffusion offenes System zu betreiben, da kein Druck aufgestaut wird, der die Statik beeinflussen könnte. Durch sogenannte *Drainagen* an den umliegenden Materialien wird so entwichene Feuchtigkeit abgefangen und zurückgeführt. Die Innenauskleidung zur Abdichtung wird beispielsweise über teure Edelstahlliner vorgenommen. Verkleinert man den Speicherboden (Trapezform) und ist das Erdreich stabil (und warm) genug, so reicht oft bei kleineren Volumina eine Kunststofffolie zur Dämmung. Nähere Auskünfte über Ausfertigung und Baumaterialien gibt *Grafik [4.5]*.



Grafik 4.4: Links: Unterirdischer “TANK”, Rechts: Unterirdischer “PIT”. Das Be- und Entladesystem (blau) weist eine Stratifikationsvorrichtung (“Schichtbeladesystem”) auf, der Speicher selbst ist aus Beton (grau). Umschlossen ist der Speicher mit einer dampfdiffusionsoffenen thermischen Dämmschicht, meist Blähglasgranulat (gelb). Ganz Außen gewährleistet Schaumglasschotter (weiß) zusätzliche Stabilität und Dämmung, vorallem nach unten hin, eine Drainage führt entwichene Feuchte (Wasserdampf) wieder zurück in den Speicher. Der Gradient im Inneren deutet die Temperaturschichtung an: Nach oben hin wird das Wasser wärmer. Die Systeme unterscheiden sich nur im Bauaufwand. *Grafik: Mangold (11)*

Der Einsatz von thermischen Dämmstoffen in “eingegrabenen” Speichern erfordert die Kenntnis der effektiven Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs als Funktion der Temperatur und des Wassergehalts. *Ochs/Steinhagen (21)* bieten in ihrer Publikation eine solche Modellierung für hochporöse, druckbeständige und schüttfähige Isolationsstoffe zwischen 10 und 90°C .

Des Weiteren bietet der *Austrian Masterplan*, *Heinz et al. (7)* eine detaillierte Übersicht der Forschungsprojekte zur Verbesserung der sensiblen saisonalen Wärmespeicher, wie etwa der Tankkonstruktion oder neuartige Materialien.

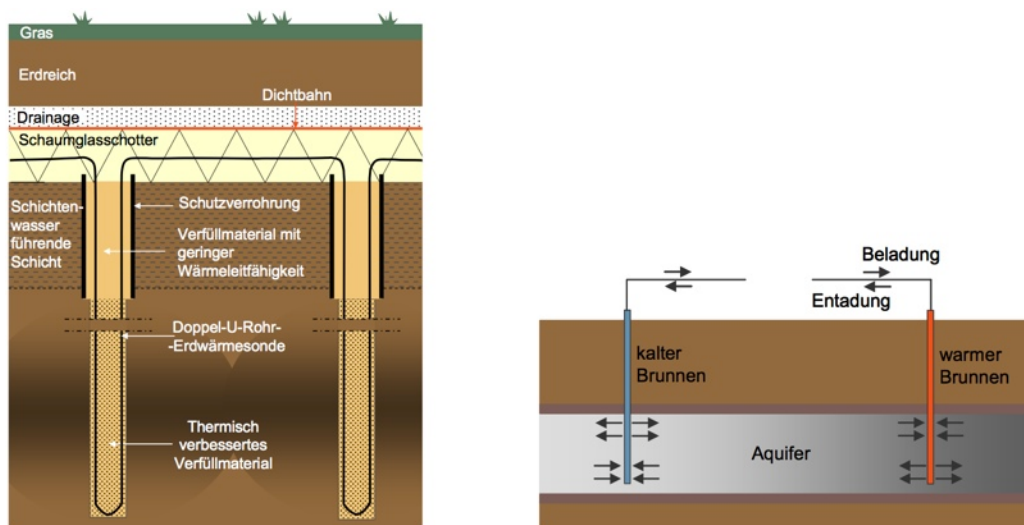


Grafik 4.5: Detaillierte Ausführung eines Erdbeckenspeichers mit 5700m³ Fassungsvermögen. Er ist circa 10m hoch, ist vorgespannt und seine Speicherform ist der einer Kugel angenähert (optimales Oberflächen-Volumen Verhältnis). Die Dämmstärke der thermischen Isolation nimmt vertikal nach Oben auf max. 70cm zu. Der Speicher ist "havariesicher" gebaut, also unanfällig für einen Totalausfall (Leck oder Flutung der Dämmung). *Grafik: Mangold (13)*

→ Für "natürlich gedämmte" saisonale Wärmespeicher auf Basis von Wasser im Erdreich (oder künstlich imitiert durch Kies-Wasser Schüttung) werden diesbezüglich die folgenden Techniken eingesetzt, siehe auch *Grafik [4.6]*. Der Konstruktions- und Isolationsaufwand ist geringer, wie auch die Energiedichte (diese Anlagen müssen sehr groß sein, die Zugriffszeit ist lange):

- **Erdsondenspeicher** ("BTES"): Auch *konduktive* Speicher. In einem großen Areal (der Untergrund sollte keine fließenden Grundwasservorkommen aufweisen) werden "u-förmige" Wärmetauscherrohre (siehe unterschiedliche Ausführungen in *Grafik [4.7]*) aus Kunststoff, sogenannte Erdsonden (geschlossenes System, das Medium ist Sole, Durchmesser 1-2cm), tief in das Erdreich bei 20-100m eingebracht (vgl. *Grafik [4.6]*). So wird thermische Energie in den wassergesättigten Untergrund eingelagert, die Dämmung übernimmt das Erdreich (nur nach oben hin wird künstlich isoliert), die Verluste sind daher relativ hoch. Deshalb ist einerseits großes Volumen (optimaler Weise ab 10.000m³, kann jederzeit einfach erweitert werden) notwendig und andererseits dauert es ungefähr 3-5 Jahre (*nach (7) Heinz et al.*), bis eine solche Anlage "eingeschwungen" ist, sich also das Erdreich auf eine stabile einheitliche Grundtemperatur (=Betriebstemperatur, meist

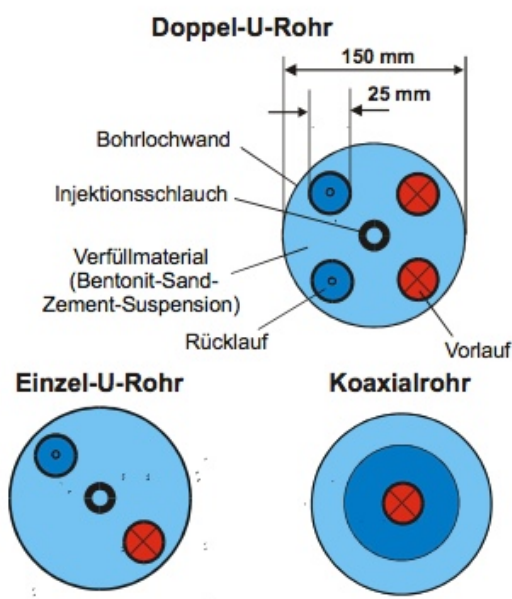
um die 30°C) erwärmt hat. Je nach Tiefe ist prinzipiell eine Minimalspeichertemperatur von um die 0°C zu erwarten, in der Praxis sind es 4°C. *Grafik [4.8]* zeigt die Temperaturentstehung und das Temperaturfeld im Untergrund. In Verbindung mit Wärmepumpen kann die Leistung verbessert werden, denn die maximale Speichertemperatur beträgt etwa 80°C und ist durch die Lebensdauer des Sondenmaterials begrenzt, ebenso wird ein Pufferspeicher empfohlen. Der realisierbare Energiedichtebereich (*nach (9) Kerskes*) beträgt nur **15-30 kWh/m³**, dafür ist ein solches System relativ günstig und ohne größeren Aufwand zu installieren, vorausgesetzt, die geologischen Kriterien (siehe weiter unten) sind erfüllt. Der Wärmeübergangswiderstand zwischen Erdreich und Wärmeträgermedium wird über Verfüllmaterial optimiert.



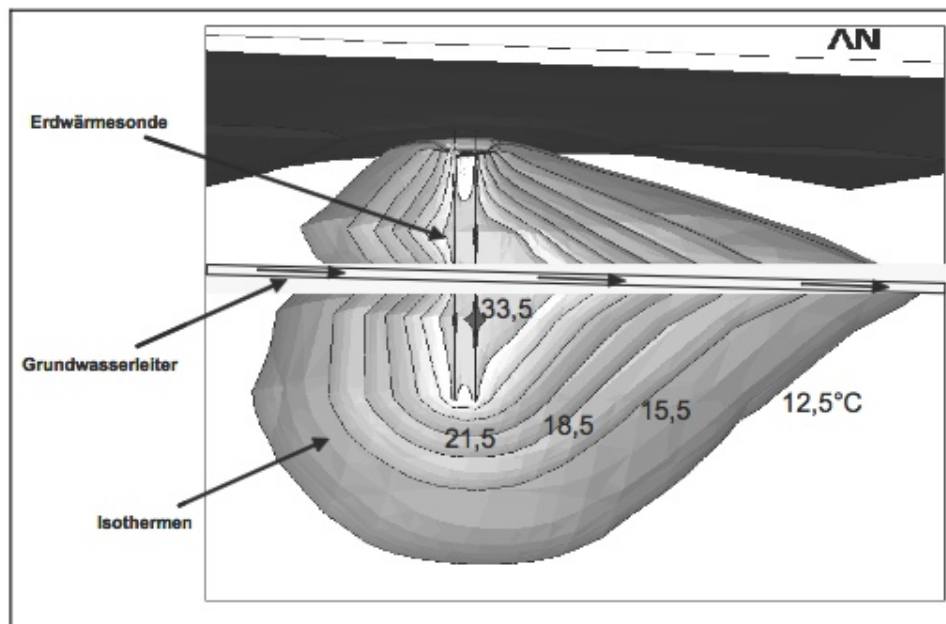
Grafik 4.6: Schematische Schnittdarstellung der “natürlich gedämmten” Wärmespeicher. Links: BTES (bis 100m), Rechts: ATES. Nicht maßstabgetreu. Der Erdsondenspeicher ist zumindest nach oben hin gedämmt (mit etwa 70cm Isolationsmaterial), ebenso beim Durchqueren von wasserführenden Schichten. Die Energiedichte von (wassergesättigter) Erde ist nicht so hoch wie die von reinem Wasser, daher weist der Aquiferspeicher trotz fehlender Dämmung höhere Speicherdichten auf. Beim Aquiferspeicher stellt sich horizontale (statt vertikaler) Stratifikation ein, was durch Be- und Entladung an unterschiedlichen Orten hervorgerufen wird und gewollt ist. Etwaige Strömungserscheinungen des Aquifers würden zur Temperaturvermischung und einer geringeren Leistung führen. *Grafik: Mangold (11, 13)*

- **Aquiferspeicher** (“ATES”): Auch *konvektiv-konduktive* Speicher. Hierbei handelt es sich um ein sehr einfach zu installierendes System (ebenfalls in einem großen Areal, optimaler Weise ab 10.000m³), das Aquifere, starres bzw. schwach fließendes Grundwassers (in unterirdischen, hydraulisch abgeschlossenen Becken bzw. gesättigten, durchlässigen Schichten), in Tiefen von normalerweise 100-300m nützt. *Grafik [4.6]* stellt dies schematisch dar. Auch diese Methode benötigt einige Jahre, abhängig von Volumen, bis das Grundwasser auf die gewünschte Betriebstemperatur erwärmt wurde. Der Vorteil dieses Systems: Liegen mehrere Grund-

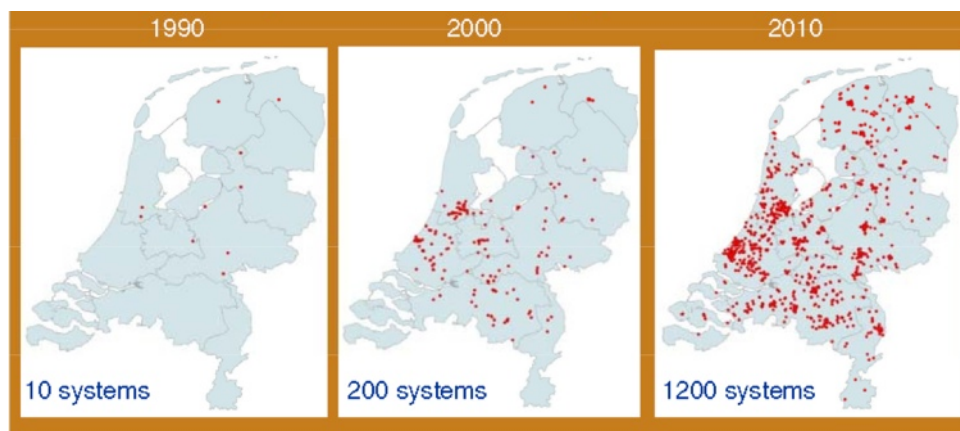
wasserschichten in unterschiedlichen Tiefen vor, so kann die höher liegende (um die 50m) im Sommer zum Kühlen verwendet werden. Die dabei aufgenommene Abwärme wird der wärmeren, tieferen Schicht (zusätzlich zur solarthermischen Speisung) für den Winter zugeführt. Das Grundwasser selbst wird hierbei zum Wärmetauschermedium, es wird über Brunnen entnommen, in der solarthermischen Anlage erhitzt und in einem geschlossenen Zyklus wieder rückgeführt. Die Investitionskosten rentieren sich oft bereits nach 10 Jahren (*nach (7) Heinz et al.*) Betriebszeit des Systems, vorallem die Niederlande setzen auf diese Methode, was in *Grafik [4.9]* illustriert ist. Das Umfeld und Grundwasser müssen jedoch für einen Aquiferspeicher strikte hydrochemische, hydrogeologische und mikrobiologische Rahmenbedingungen erfüllen, denn Speichertemperaturen über 50°C können zu biologischen und geochemischen Änderungen des Grundwassers und des damit verbundenen Ökosystems hervorrufen: Ablagerungen an den Brunnenfiltern können auftreten, die im Extremfall die Förderung zum Stillstand bringen könnten, daher ist eine Wasseraufbereitung während des Betriebes notwendig. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse sind diesbezüglich noch nicht eindeutig und weitere Untersuchungen müssen vorangetrieben werden. *Nach (9) Kerskes* betragen die realisierbaren Energiedichten bis zu **40 kWh/m³**, bei einer maximalen Speichertemperatur von knappen 70°C.



Grafik 4.7: Erdwärmesonden können in verschiedenen Ausführungen verwendet werden, am häufigsten als „Doppel-U-Rohr“. Die Dimensionsangaben variieren von Anlage zu Anlage, spielen sich aber im Allgemeinen um den genannten Bereich ab. Das Koaxialrohr stellt den klassischen Wärmetauscher dar. Als Material haben sich die Kunststoffe „PEX“ und „PE-HT“ bewährt. Das Verfüllmaterial garantiert guten Wärmeaustausch zwischen Erdreich und Trägermedium. *Grafik: Schmidt (23)*



Grafik 4.8: Die simulierte Verschleppung des Temperaturfeldes einer Erdwärmesonde durch einen linienförmigen Grundwasserleiter. Dies tritt durch unzureichende Isolation der Wärmetauscher auf, sollte der Untergrund ein fließendes Grundwasservorkommen aufweisen. *Grafik: Renss (20)*

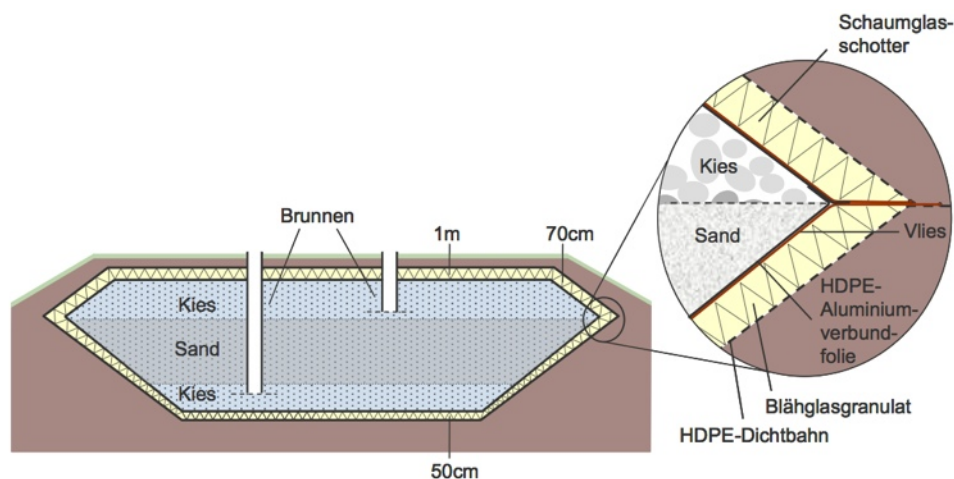


Grafik 4.9: Das Wachstum an Aquiferspeichersystemen in den Niederlanden in den letzten 20 Jahren. Durch die sehr sumpfigen, feuchten Böden bietet sich im Norden Europas sehr viel Potenzial für eine derartige Wärmespeichermethode. *Grafik: Martijn van Aarssen, IF Technology 2010*

- **Kies-Wasser Speicher:** Ähnlich einem Erdgrubenspeicher, handelt es sich hierbei um eine sehr kostengünstige und einfache pyramidenförmige Einlassung im Erdreich, in der Erd- und Gesteinsschichten simuliert werden. Ähnlich einem Aquiferkonzept, bringt man Brunnen als Zu- bzw. Ableiter ein, aber in diesem Fall als Wärmetauscher, denn das Wasser ist nicht direkt entnehmbar. Die maximale Arbeitstemperatur ist mit 90°C höher als bei BTES oder ATES, was (nach

(17) Oertel) zu ebenfalls höheren Energiedichten von **30-50 kWh/m³** führt. Grafik [4.10] zeigt einen solchen thermischen Energiespeicher auf Basis von einer Kies-Sand-Wasser Schüttung. (26) Urbaneck *et al.* modellieren einen derartigen Speicher im Detail und beschreiben die Ausbildung eines stabilen Temperaturfeldes.

Nach Mangold (11) beliefen sich die Baukosten eines Erdsondenspeichers im Jahr 2009 auf rund 44€/m³, die eines Aquiferspeichers auf rund 25€/m³, während in etwa mit 400€/m³ für einen Betontankspeicher zu rechnen war (Stahlspeicher bewegten sich bei ungefähr dem Fünffachen). Weiters lag der Preis von solarer Wärme mit Flachkollektoren [65-85 kWh/(m²a)] ab einer installierten Kollektorfläche von rund 2000m² (bei gewährleistetem solarem Anteil von 60%) bereits unter 0,3€/kWh. Bei einem solaren Anteil von 50% sind es weniger als 0,25€/kWh. Vergrößert man die Kollektorfläche, sinkt der Preis weiter.



Grafik 4.10: Schematisches Modell eines Kies-Wasser Speichers. Ähnlich einem ATES-Systems, werden auch hier Brunnen zur Ein- und Ausspeisung benötigt, der Vorteil liegt darin, dass keinerlei Strömung auftritt. Die Kies-Sand-Wasser Schüttung imitiert die Erdboden- und Gesteinsschichten. Die Dämmung ist gut und wird nach oben hin dicker, die Konstruktion ist dabei recht einfach, die Energiedichte ist dafür nicht ganz so hoch wie bei TANK- oder PIT-Speichern, aber höher als bei BTES oder ATES. Grafik: Mangold (11)

Ob und welche dieser “natürlich isolierten” saisonalen Speicherlösungen realisiert werden kann (auch für industrielle Abwärme geeignet!), hängt in erster Linie von der geologischen und hydrogeologischen Beschaffenheit des Bodens ab. Oft muss für einen Aquiferspeicher das Grundwasser behandelt werden, um es nutzbar zu machen. Tabelle [4.1] listet ausschlaggebende Standortparameter auf. Die folgenden ökologischen Rahmenbedingungen spielen hierfür eine große Rolle und können über einen sogenannten “Thermal Response Test” bestimmt werden:

- Bohrlochwiderstand (Wärmeübertragungseigenschaften der Sonde)
- Thermische Leitfähigkeit und Wärmekapazität des Untergrundes

Parameter	Voraussetzungswert
Mächtigkeit der Abdichtung zur Oberfläche	$d > 20\text{m}$
Aquifermächtigkeit	$D = 50 - 100\text{m}$
Hydraulische Durchlässigkeit	im “ $\mu\text{m/s}$ ” Bereich
Transmissivität	$T = 1 \cdot 10^{-2}$ bis $3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$
Natürliche Grundwasserbewegung	$v < 11 \text{ cm/Tag}$
Bei Gefahr von Bodensenke	tiefe Aquifere bevorzugen

Tabelle 4.1: Wichtige Standortparameter zur Eignung von großen ($500\text{m}^3/\text{h}$ Förderung) Aquiferwärmespeichern in den Niederlanden. Mit Mächtigkeit ist der Durchmesser gemeint. *Datenquelle: Van Loon 1991*

- **Permeabilität und Transmissivität:** Permeabilität “K” beschreibt im geologischen Zusammenhang die Quantifizierung der Durchlässigkeit von Böden und Fels für Fluide und ist von der Porosität derselben abhängig. Mit ihr verbunden ist auch der Durchlässigkeitsbeiwert (*hydraulische Leitfähigkeit*) “ k_f ”, der speziell für Wasser gilt, die Transmissivität “T” ist dann wiederum das Produkt aus “ k_f ” mit der Mächtigkeit “M” der wasserführenden Boden- oder Gesteinsschicht.

$$k_f = \frac{Q \cdot l \cdot \rho \cdot g}{A \cdot \Delta p}$$

$$T = k_f \cdot M$$

Q ... Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

l ... durchströmte Länge [m]

ρ ... Fluidichte [kg/m³]

g ... Erdbeschleunigung [m/s²]

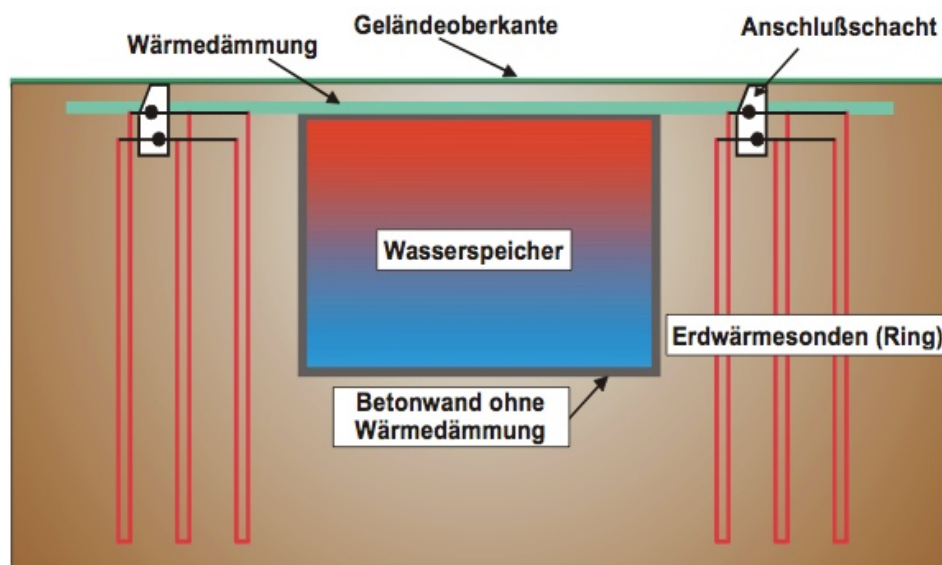
A ... durchströmter Querschnitt [m²]

Δp ... Druckdifferenz durch Q [N/m²]

- **Hydraulisches Potenzial:** Es beschreibt den herrschenden Zustand von Grundwasser im Boden an einer bestimmten Stelle. Dieser hängt (sofern bei geringer Strömungsgeschwindigkeit kinetische Anteile vernachlässigt werden) von

Druck und Lage (relativ zu einem Bezugsniveau) ab. Unterschiede im Energieniveau an unterschiedlichen Stellen des Grundwasserleiters führen zu Strömungsbewegung zwischen diesen Punkten (wenn beispielsweise Höhenunterschiede vorliegen). Der Energieverlust ist durch Reibung an Festgestein zu erklären und somit fließt Grundwasser vom höheren zum niederen hydraulischen Potential (so kann es auch, je nach Druck und Lage, gegen die Schwerkraft fließen).

Oft wird durch Kombination von Lang- und Kurzzeitspeichern (sogenannten Hybridspeichern) eine saisonale Anlage verbessert. Der Kurzzeitspeicher dient hierbei etwa als Puffer für die sofortige Bereitstellung von Heißwasser bzw. ist der Puffer systembedingt eine Voraussetzung, da in den Flächenkollektoren Temperaturen von bis zu 110°C (an sehr sonnenreichen Tagen) erzeugt werden und der Saisonspeicher aber nur mit einer geringeren Maximaltemperatur beladen werden kann. Aus dem Pufferspeicher wird dann die gewünschte Temperatur in den Speicher abgeführt. Das kann beispielsweise ein Erdgrubenspeicher sein, der von einem Erdsondenring umgeben ist. *Grafik [4.11]* zeigt eine solche Anlage schematisch.



Grafik 4.11: Schema einer Hybridanlage, einer Kombination aus Erdbeckenspeicher (Kurzzeitspeicher, 500m^3) und Erdsondenring (Langzeitspeicher, 90 Sonden in 30m Tiefe). Eine Wärmepumpe ist notwendig, um die Leistung zu garantieren. *Grafik: ZAE Bayern, Garching (11)*

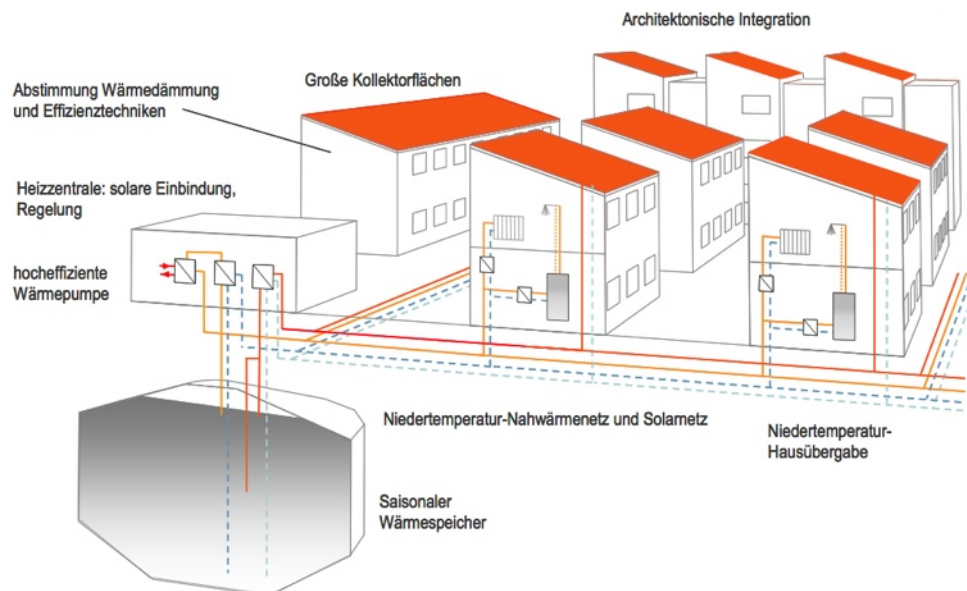
Hinweis: Reuss (20) gibt an, unter Auslegungsbedingungen würden die Wärmeverluste eines TANK- bzw. PIT-Speichers unter 10% liegen.

4.1.1. Pilotprojekte zu sensiblen Saisonspeichern

Im Folgenden werden nun einige ausgewählte Pilotprojekte und Anwendungen zu sensiblen Langzeitwärmespeichern (vorallem in Deutschland) präsentiert. *Grafik [4.12]* zeigt ein oft umgesetztes Modell eines saisonalen Wärmespeichers gekoppelt mit Solarthermischen Anlagen. Effektive Speicherwirkungsgrade sind leider kaum publiziert. Verwiesen sei auch auf Fotos eines Speicherbaus im *Anhang*.

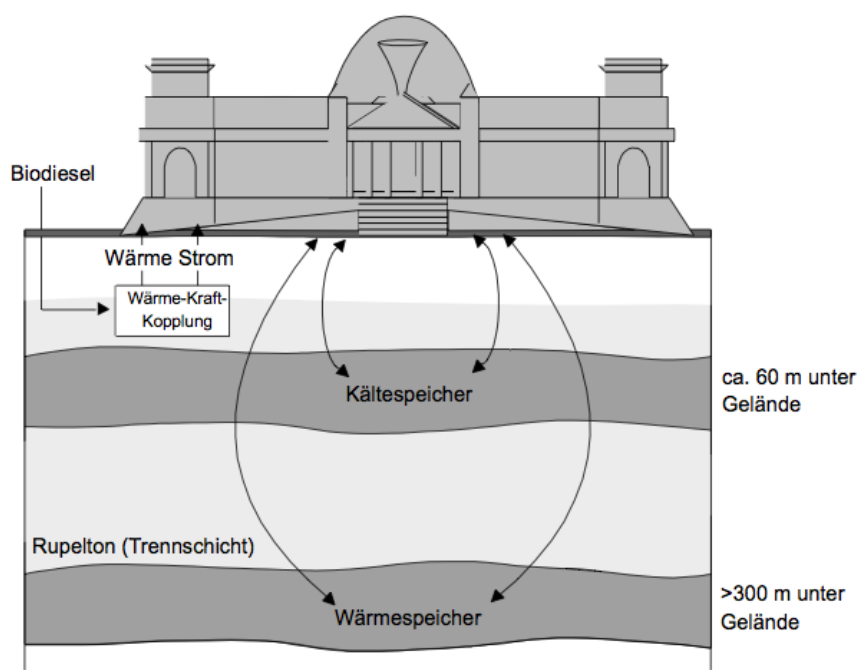
→ Berliner Reichstag heizt und kühlt autark

Ein Paradebeispiel eines Aquiferwärme- und -kältespeichers findet sich unter dem Berliner Reichstag, begünstigt durch den wasserreichen Berliner Untergrund (der Name “Berlin” leitet sich vom altslawischen Wort für “Sumpf” ab). Im Detail sind es zwei unabhängige Aquifere in unterschiedlichen Tiefen, die als Wärme- bzw. Kältespeicher genutzt werden (vgl. dazu *Grafik [4.13]*, die einen schematischen Überblick gibt). Kälte wird sowohl der Umgebungsluft im Winter als auch den Verdampfern der Wärmepumpen entnommen, Wärme wird über Abwärmeüberschuss aus der Kraft-Wärme-Kopplung (Stromerzeugung für den Reichstag mit Biodiesel) im Sommer eingespeichert. Die Abwärme bei 110°C dient weiters zum Heizen wie auch zum Antrieb von Absorptionskältemaschinen und -wärmepumpen. Die “warme” Seite des Kältespeichers ist im Winter zusätzlich Quelle für Wärmepumpen. *Tabelle [4.2]* liefert einige Zahlenwerte in diesem Zusammenhang.



Grafik 4.12: Visualisierung einer Möglichkeit der Koppelung und Installation von Solarthermie mit saisonaler thermischer Speicherung. Die Flachkollektoren befinden sich dabei entweder auf dezitierten Bodenflächen oder (wie hier gezeigt) platzsparend beispielsweise auf Hausdächern.

Grafik: Mangold (11)



Grafik 4.13: Lage der Aquiferspeicher unter dem Berliner Reichstagsgebäude. Der Kältespeicher wird zwischen 5°C und 28°C betrieben, der Wärmespeicher bis max. 70°C. *Grafik: Geothermie Neubrandenburg*

Energiebedarf des Reichstags und Betriebsbedingungen ATES

Strom: 19.500 MWh/a

Wärme: 16.000 MWh/a

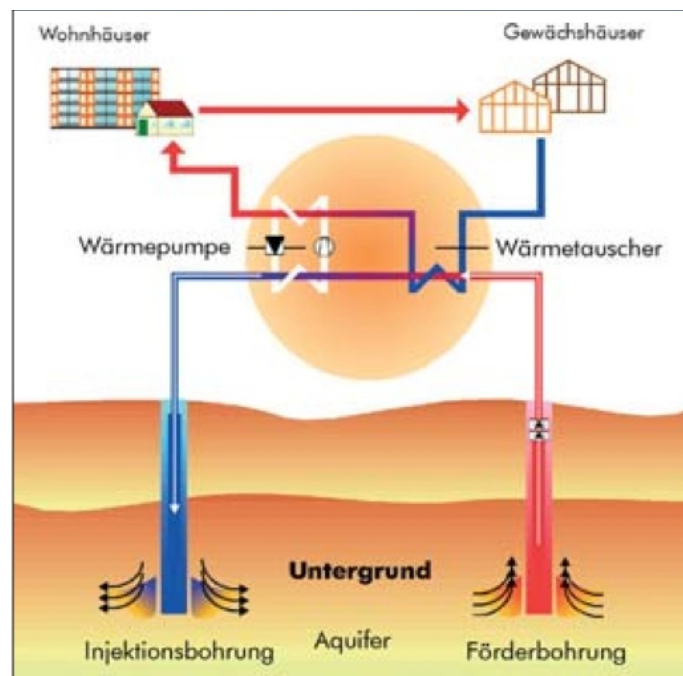
Kälte: 2.800 MWh/a

		Wärmespeicher	Kältespeicher
Sommer	Fördertemperatur	20°C	6-10°C
	Beladetemperatur	70°C	15-28°C
	eingelagerte Energie	2.650 MWh/a	3.950 WMh/a
Winter	Fördertemperatur	65-30°C	22°C
	Beladetemperatur	-	5°C
	eingelagerte Energie	2.050 MWh/a	4.250 MWh/a
Bilanz	Förderaufwand	280 MWh/a	220 MWh/a
	Verhältnis genutzte/ eingelagerte Energie	77%	93%

Tabelle 4.2: Einige Parameter der Anlage im Berliner Reichstag. *Datenquelle: BINE Projektinfo 13/03 (30)*

→ Aquifer speichert Überschusswärme eines Heizkraftwerks

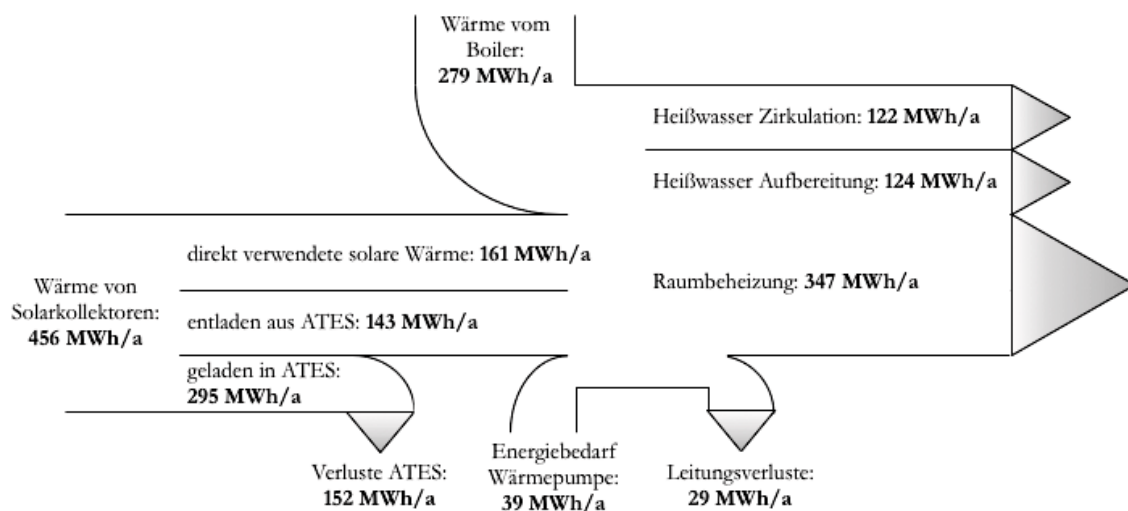
Sommerliche Überschusswärme eines Gas- und Dampfkraftwerks in Neubrandenburg wird in einem gekoppelten Aquifer saisonal gespeichert. Diese Energie wird im Winter zu einem Teil dem Fernwärmenetz zugeführt und zum anderen Teil für die Nahversorgung eingesetzt. Auf diesem Weg findet der saisonale Ausgleich der Wärmebilanz des Kraftwerks statt (siehe *Grafik [4.14]*). Das Besondere: Die thermische Energie wird in einer Tiefe von 1.200m in salzigem Thermalwasser (40-100°C) gespeichert. Die saisonale Anlage operiert unter einer Vorlauftemperatur von 80°C und einer Rücklauftemperatur von 45°C (handelsübliche Radiatoren). Nähere Informationen finden sich in *BINE Projektinfo 04/07 (30)*.



Grafik 4.14: Das Funktionsprinzip der hydro-geothermischen Heizzentrale in Neubrandenburg. Durch Wärmepumpen wird der thermische Wirkungsgrad erhöht. *Grafik: Geothermie Neubrandenburg*

→ Erstes solares Heizwerk mit Aquiferwärmespeicher in Rostock

Im Jahr 2000 ging das erste deutsche Solarheizwerk mit Aquifersaisonspeicher in Betrieb (es war eines von acht Pilot- und Demonstrationsprojekten im Rahmen von "Solarthermie 2000"). Es beheizt 108 Wohnungen mit insgesamt 7000m² Wohnfläche und stellt Warmwasser zur Verfügung (Gesamtbedarf fast 600WMh/a, *nach* (22) *Schmidt et al.*). Die Anlage besteht sowohl aus einem Aquiferspeicher (20.000m³ in 30m Tiefe), als auch aus einem Heißwasserpuffer (30m³) und rund 1000m² Kollektorfläche. Der solare Anteil beträgt 50%, der Arbeitstemperaturbereich ist zweigeteilt: Einerseits auf Vorlauf/Rücklauf von 50/30°C (handelsübliche Radiatoren) und andererseits auf 65°C für Heißwasser (extra 750 Liter Tank). Unterstützend wirken sowohl ein Gaskondensationsboiler als auch eine Wärmepumpe, um die anderen 50% der Nachfrage zu gewährleisten. *Grafik [4.15]* zeigt ein Energieflussdiagramm des Systems. Nach Optimierung der Anlage konnte der errechnete solare Anteil nach langjährigem Betrieb auf 62% gesteigert werden (*nach Geothermie Neubrandenburg*). Die Endverbraucherkosten liegen bei 0,26€/kWh (*nach* (22) *Schmidt et al.*).



Grafik 4.15: Flussdiagramm der saisonalen Speicheranlage in Rostock. *Datenquelle: Schmidt et al. (22)*

→ “State of the Art” Heißwasserspeicher bei München

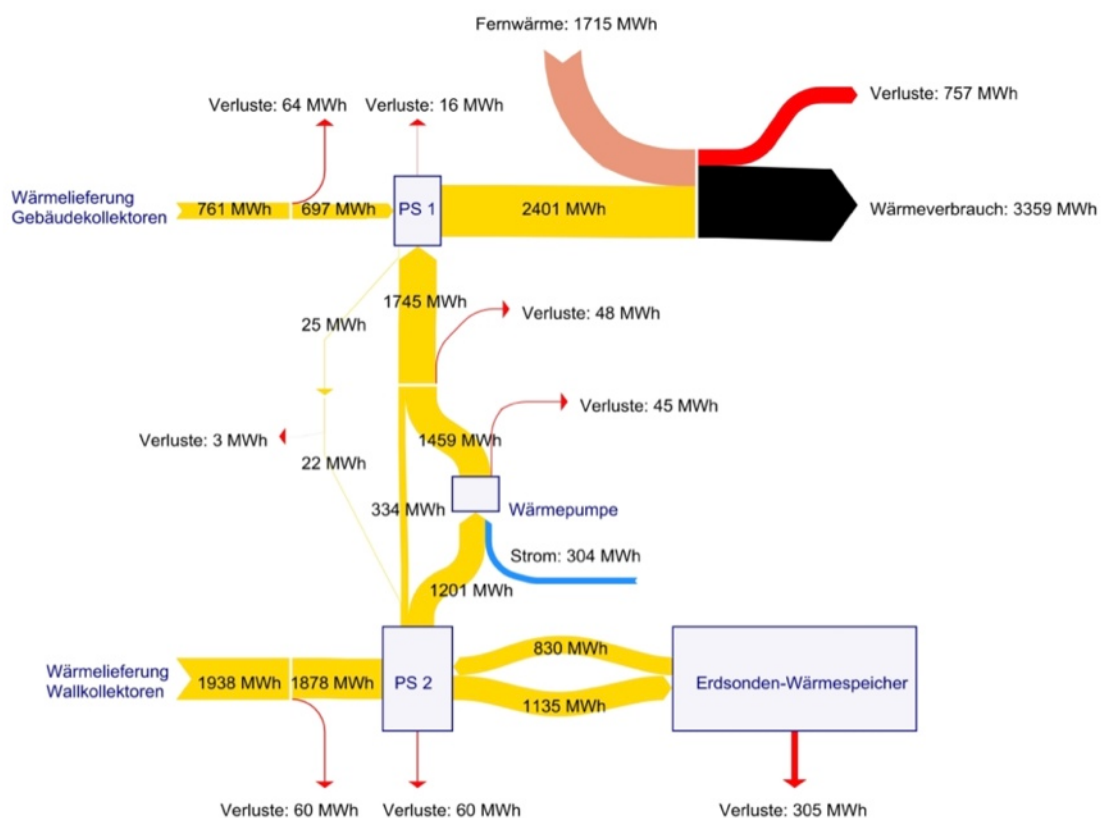
Eine solarthermische Versorgungsanlage in Verbindung mit einem saisonalen Heißwasserspeicher bei München stellt eines der aktuellsten Projekte von “Solarthermie 2000” dar. Für sie wurde ein “PIT”-Speicher mit den letzten Erkenntnissen gebaut. Seine Form ist der einer Kugel angenähert und eine Absorptionswärmepumpe (1,4MW *nach (11) Mangold*, senkt minimale Operationstemperatur) sorgt gemeinsam mit einem Schichtbeladesystem für optimale Leistung und optimiert die Wirtschaftlichkeit (vgl. *Tabelle [4.3]*). Die Kollektorfläche beträgt rund 2.900m², das Speichervolumen 5.700m³. Das System wurde für ein Versorgungsgebiet von 300 Wohnungen (Gesamtfläche etwa 25.000m² und Wärmebedarf von 2.300MWh/a, *nach (11) Mangold*) konzipiert. Simulationen des ZAE Bayern zeigen eine solare Deckung von knappen 50%, Daten aus dem Langzeitbetrieb sind noch nicht publiziert. Der Energiepreis für den Verbraucher beläuft sich auf 0,24€/kWh und die maximale Netzrücklauftemperatur beläuft sich auf 30°C. Die Anlage bezieht dabei die andere Hälfte der benötigten thermischen Energie aus der Fernwärme. *Fotos aus der Bauphase finden sich im Anhang.*

→ “State of the Art” Erdsondenspeicher bei Crailsheim

Eine solarthermische Versorgungsanlage in Verbindung mit einem saisonalen Erdsondenspeicher (80 Sonden auf 37.500m³) in Crailsheim stellt ein anderes aktuelles Projekt und gleichzeitig das größte von “Solarthermie 2000” dar. In diesem Fall wurde ein Erdsondenspeichersystem nach den aktuellsten Erkenntnissen gebaut, das den CO₂-Ausstoß um 50% (= Solarer Anteil) reduzieren kann. Das System versorgt rund 260 Wohnhäuser und eine Schule mit Sporthalle mit Wärme (Gesamtbedarf ca. 4.100MWh/a, *nach (11) Mangold*) aus 7300m² Flächenkollektoren. Zwei Druckspeicher ohne Wärmeüberträger dienen als Pufferspeicher (100m³ und 480m³, letzterer kommt zum Einsatz, wenn an sehr sonnenreichen Tagen zu viel thermische Energie in den Kollektoren produziert wird). In einer weiteren Ausbaustufe wurden dem System weitere 80 Erdwärmesonden hinzugefügt und die Kollektorfläche auf 10.000m² vergrößert, um für die Versorgung von 211 weiteren Wohnhäusern vorbereitet zu sein. Der Energiepreis lag bei 0,19€/kWh (*nach (11) Mangold*). Auch dieses Projekt betreibt eine Wärmepumpe und ein Heizerk zur Unterstützung. *Grafik [4.16]* zeigt das Energieflussdiagramm der Anlage.

	mit Wärmepumpe	ohne Wärmepumpe
Solarer Nutzwärmeertrag	1.154 MWh/a	965 MWh/a
Wärmeverlust Solarsystem	6%	10%
Fernwärmezuschuss	1.141 MWh/a	1.331 MWh/a
Solarer Deckungsanteil	50%	42%
max./min. Speichertemperatur	92/10°C	95/30°C
Investitionskosten	<i>mehr als das Vierfache</i>	
Energiepreis	0,22 €/kWh	0,245 €/kWh

Tabelle 4.3: Vergleich der Varianten mit und ohne Wärmepumpe (dafür mit Hochleistungswärmeüberträger) für das Projekt München. Die Wärmepumpe ist essentiell, um die Abkühltemperatur der unteren Schichten (und damit die Speicherkapazität) zu optimieren. Auffällig ist, der Energiepreis sinkt, wenn zusätzliche Investitionskosten für eine Wärmepumpe aufgebracht werden. *Datenquelle: Mangold (11)*



Grafik 4.16: Detailliertes Energieflussdiagramm inkl. Verluste für Crailsheim. *Grafik: SuN, Mangold (11)*

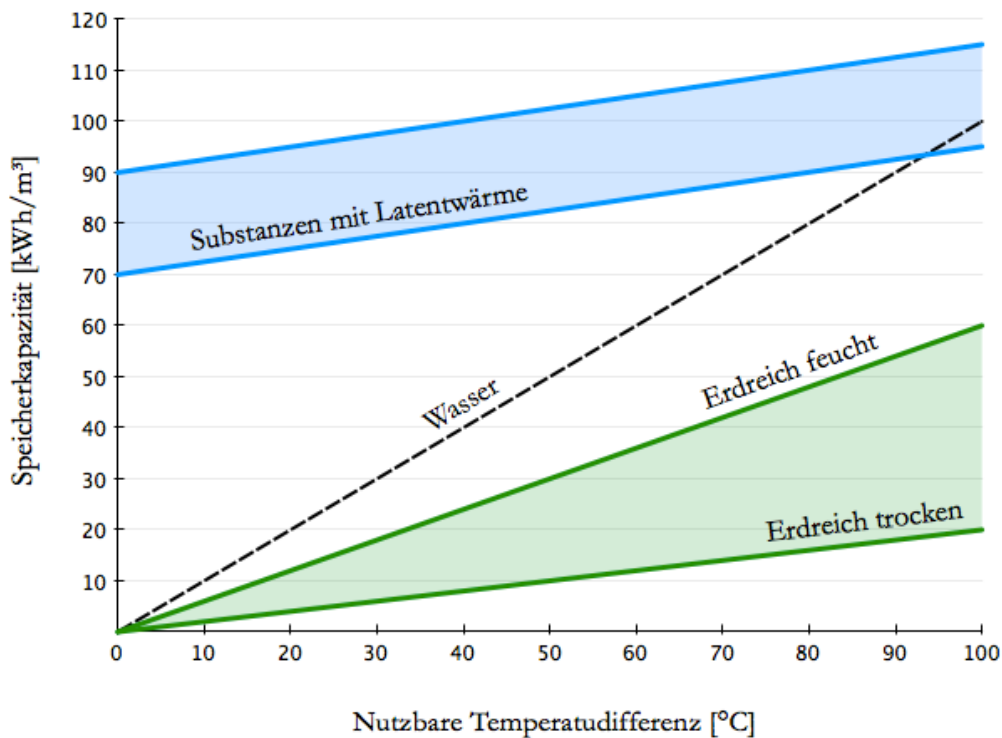
→ Großer Heißwasserspeicher in Friedrichshafen

An dieser Stelle soll noch kurz auf ein sehr großes Projekt aus 1996 eingegangen werden, das bis heute einen 12.000m³ Heißwasserspeicher betreibt. Es versorgt so in Friedrichshafen knapp 400 Mehrfamilienhäuser, 33.000m² Wohnfläche. Das Kollektorareal umfasst 4050m² und die Anlage bietet einen solaren Deckungsanteil von 47% bei einem, dank des langzeitigen Betriebes (eingeschwungen), sehr niederen Energiepreis von 0,16€/kWh (*nach (11) Mangold*). Damit ist es das für den Verbraucher “günstigste” Pilotprojekt von “Solarthermie 2000”.

Hinweis: Detaillierte Dokumentation einiger anderer Pilotprojekte und Demonstrationsanlagen finden sich unter Anderem in: *Mangold (11, 13)*, *SAIC Report (5)* und *SUNSTORE 4 Marstal Fjernvarme (Project No. 249800)*.

4.2. Latentwärmespeicher

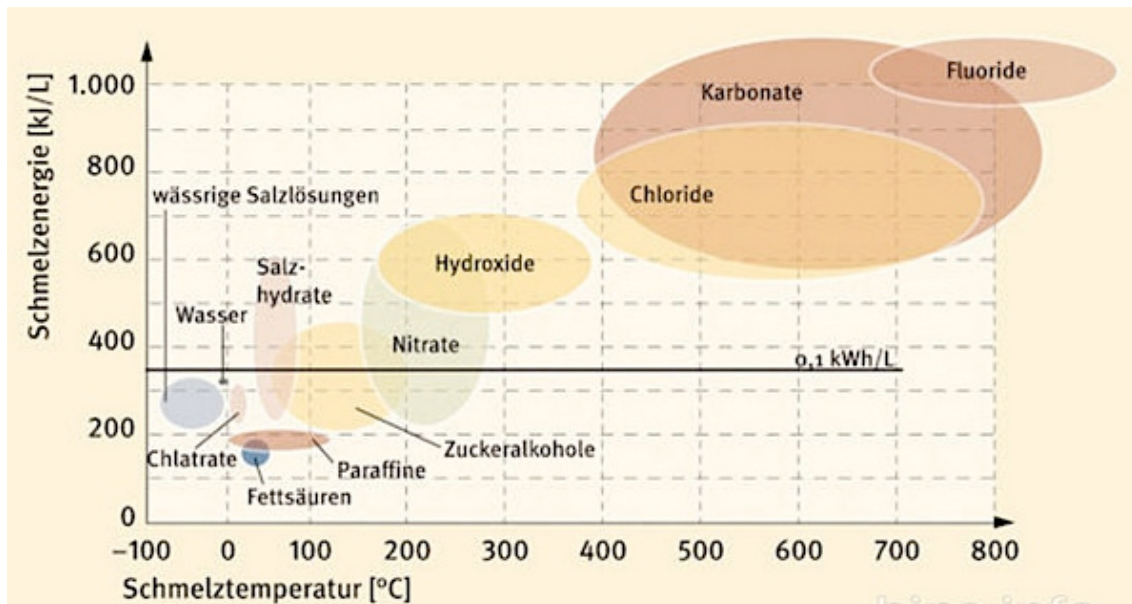
Langsam im Kommen sind die sogenannten PCMs, die “Phase Change Materials”, deren Temperatur konstant bleibt (also eine Energieentnahme bei kontinuierlicher Temperatur möglich ist) und Wärme durch Phasenübergang (meist fest-flüssig) aufgenommen (*Schmelzen*) oder abgegeben (*Kristallisation*) wird. Dass diese verwendbare thermische Energie prinzipiell wesentlich größer als bei sensibler Speicherung ist, zeigt *Grafik [4.17]*, eine Übersicht der gängigen, in Frage kommenden PCMs bieten *Grafik [4.18]* und *Tabelle [4.4]*. Wichtig ist, dass das Medium einen engen Schmelzbereich bzw. scharf definierten Schmelzpunkt aufweist. Bei manchen Stoffen können Dichteunterschiede nach dem Schmelzen auftreten, was zu einer Verbreiterung dieses Schmelzbereichs führt. Abhilfe schafft die Innovation der Zuckeralkohole, Einstoffsysteme variabler Kettenlänge (bestimmt den Schmelzpunkt). Im Vergleich zu sensiblen Speichern, beispielsweise bei $\Delta T = 10^\circ\text{C}$, ist das 10-20fache an Energiedichte mit PCMs möglich (*nach (17) Oertel*). Die fast nicht vorhandene Leitfähigkeit von PCMs macht den Wärmetransport allerdings komplizierter. Große Oberflächen bzw. teure Verbundmaterialien sind notwendig, um ein Be- bzw. Entladesystem zu integrieren. Als Lösung für dieses Problem sind vorallem *Slurries* und *Encapsulations* (quasi-direkte Wärmeüberträger, beides siehe Seite 70) vielversprechende Methoden, diese lassen sich auch in die Bausubstanz integrieren. Ein weiterer Anwendungsbereich von Latentwärmespeichern ist das “Glätten” von Energiezufuhr, denn sie wandeln, wegen des zugrunde liegenden physikalischen Prinzips, diskontinuierliche Wärmezufuhr in kontinuierliche Wärmeabgabe (also in einen konstanten Wärmestrom) um. So können sie etwa in der Industrie Lastspitzen, ähnlich einem Kondensator, abdecken, dabei bestimmt das Speichermedium die Einsatzmöglichkeit und die Arbeitstemperatur. Allerdings ist der Phasenwechsel auch mit einer Volumsvergrößerung verbunden und kann limitierend wirken.



Grafik 4.17: Spezifische Speicherkapazität nach der nutzbaren Temperaturdifferenz verschiedener Speichermedien. Es handelt sich um rein errechnete Werte der Theorie. Interessant ist der Schnitt von Wasser mit der Unterkante der PCM: Wasser ist bei hohen Temperaturen ein gutes Speichermedium, allerdings kommt es durch Wärmeleitung und Konvektion auch zu hohen Verlusten. PCM bieten ein breites Feld überlegener Energiedichten vorallem bei tiefen Temperaturen. Die Speichervolumina können somit kleiner sein bei selber Energieausbeute. *Datenquelle: Reuss (20)*

	organisch	anorganisch
	Eutektische Mischungen mit Fixtemperatur	
Eutektische Mischungen mit Temperaturinterval	Fettsäuren Paraffine (Alkanketten)	Salzhydrate

Tabelle 4.4: Klassifikation von Medien zu Latentwärmespeicherung mit Schwerpunkt auf PCMs mit wählbarer Schmelztemperatur im für Raumwärme und Heißwasser relevanten Bereich von 0-100°C. Vor- und Nachteile von organischen und anorganischen Stoffen finden sich in *Tabelle [3.3]* des vorigen Kapitels. Mit Paraffinen ist man, ökonomisch betrachtet, von Rohöl abhängig. *Datenquelle: Heinz (7)*



Grafik 4.18: Als PCM untersuchte Materialien. Als Innovation gelten Zuckeralkohole. *Grafik: BINE (30)*

Eine simple Möglichkeit der Konstruktion eines Latentwärmespeichers (das “Boiler-tank Konzept”) zeigt *Grafik [4.19]*. Die Alternative dazu bringt einige Verbesserungen, denn durch *Slurries* und verkapselte PCMs werden die Medien selbst zum Wärmeüberträger und bieten ähnliche Vorteile wie ein sensibler Wärmespeicher. Generell tritt sensible Wärmespeicherung (über die Wärmekapazitäten der Materialien) beim Aufheizen auf, vorallem bei Salzhydraten, die größtenteils aus Wasser bestehen. Nun müssen Stoffe, die latente Wärme aufweisen, bestimmte physikalische Kriterien erfüllen, um als PCMs in Wärmespeichern fungieren zu können. *Heinz (7)* stellt in diesem Zusammenhang die folgenden Randbedingungen:

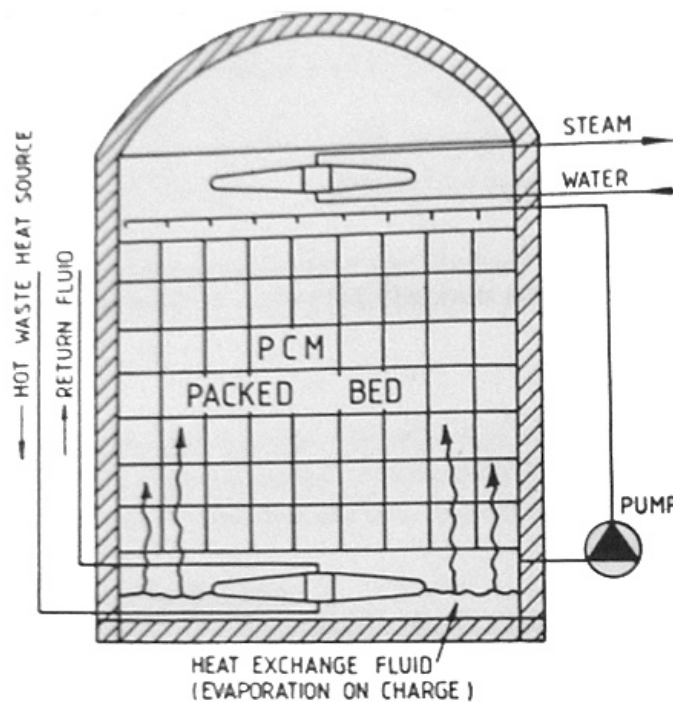
- **Thermische Parameter:** Phasenwechseltemperatur passend zur Applikation, hohe Enthalpieänderung nahe dieser Einsatztemperatur, gute thermische Leitfähigkeit (nicht immer notwendig)
- **Physikalische Parameter:** Hohe Dichte bei geringer Dichteverianz, wenig bis gar nicht unterkühlbar
- **Chemische Parameter:** Zyklische Stabilität, keine Phasensegregation, kompatibel mit Containermaterial, non-toxisch, weder entflammbar noch kontaminierend
- **Wirtschaftliche Parameter:** Kostengünstig und reichlich vorhanden

Im Weiteren sollen die wesentlichen Eigenschaften der drei am häufigst verwendeten Stoffe diskutiert werden, *Tabelle [4.5]* und *Grafik [4.20]* listet die wichtigsten Werte:

- **Paraffine:** Es handelt sich um Wachse aus vorwiegend Mineralölen und daher um organische Stoffe (größtenteils aus Alkanen). Sowohl Schmelztemperatur als auch Schmelzenthalpie steigen mit der Kettenlänge, daher lassen sich diese Parameter von Paraffinen an die gewünschte Applikation anpassen, was sie sehr attraktiv für Wärmespeicherzwecke macht. Kommerzielle Paraffine bestehen meist aus Kohlenwasserstoffen unterschiedlicher Kettenlängen, sie schmelzen also immer in einem bestimmten Temperaturbereich, der umso größer wird, je höher der Schmelzpunkt liegt. Paraffine sind weiters stabil gegenüber thermischen Zyklen, also oftmaligem Phasenwechsel ohne Änderung der Materialcharakteristika. Sie sind allerdings brennbar und besitzen nur geringe Schmelzenthalpie wie Dichte.
- **Salzhydrate:** Es sind anorganische Stoffe aus Wasser und Salz molekülen, deren Temperatur beim Phasenwechsel (anders als bei organischen) konstant bleibt und die eine wesentlich höhere Schmelzenthalpie wie Dichte aufweisen. Im flüssigen Zustand sind die Salz moleküle im Wasser gelöst, bei Schmelztemperatur liegt eine gesättigte Salzlösung vor. Nach dem Kristallisationsprozess, im festen Zustand sind die Wassermoleküle schließlich in das Kristallgitter des Salzes integriert und es entsteht so ein Salzhydrat. Die Nachteile solcher Stoffe liegen vor allem in der Zykleninstabilität und der Unterkühlbarkeit (das Material kristallisiert nicht bei Schmelztemperatur sondern unter Umständen erst weit darunter).
- **Fettsäuren:** Diese Stoffe besitzen ähnliche Schmelzpunkte und Schmelzwärme wie Paraffine, sind jedoch wesentlich teurer und riechen oft streng, was ihre Anwendungsgebiete stark einschränkt.

Stoffbezeichnung	Schmelzpunkt °C	Enthalpie, kJ/kg	Dichte, kg/L
Paraffin RT20	22	172	0.88
Paraffin RT27	28	179	0.87
Paraffin RT54	55	179	0.90
Paraffin RT65	64	173	0.91
Salzhydrat AC27	27	207	1.47
Salzhydrat STL47	47	221	1.34
Salzhydrat STL52	52	201	1.30
Salzhydrat STL55	55	242	1.29

Tabelle 4.5: Eckdaten einiger kommerziell erhältlichen PCMs in unterschiedlichen Alkanmischungen (Details (24) *Streicher et al.*). Die relativ geringe Wärmeleitfähigkeit “ λ ” variiert minimal mit der Temperatur und ist z.B. für Paraffin RT65: $\lambda < 0,2 \text{ W/(mK)}$, L ... Liter; *Datenquelle: Streicher et al. (24)*

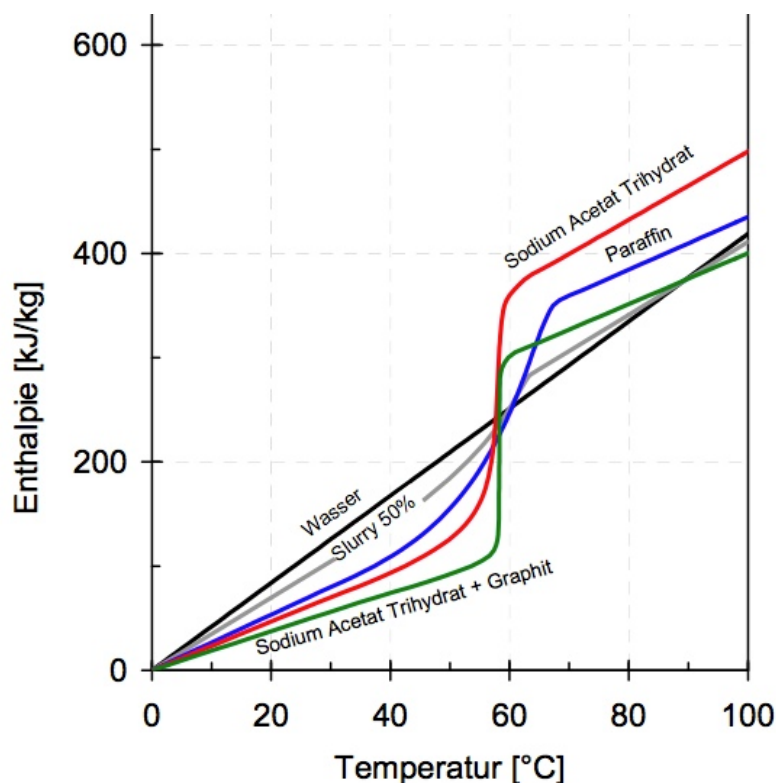


Grafik 4.19: Energiespeicherkonzept als Boilertank mit PCM-Schicht. Durch Wasserdampf wird dem PCM thermische Energie zugeführt und bei Wärmeentnahme durchläuft Wasser das PCM und nimmt dessen thermische Energie auf. Dabei muss nicht unbedingt Wasser als Wärmeträgermedium eingesetzt werden, das hängt vom gewünschten Temperaturbereich ab. Dieses Konzept ist also beschränkt durch die Parameter des Wärmeträgermediums und die eigentlichen Eigenschaften des PCMs werden nur indirekt genutzt. *Grafik: Beckmann/ Gilli (3)*

Phasensegregation, die mit fortschreitender Anzahl an Zyklen (Phasenwechsel zum Ausgangspunkt) sinkende thermische Speicherkapazität bei Salzhydraten, tritt durch Absenkung von wasserlosem Salz (höhere Dichte als Wasser) auf den Boden des PCM Containers auf. Dieses Salz fehlt beim Phasenwechselprozess. Dieses Problem lässt sich durch Zugabe von mehr Wasser (damit auch das wasserlose Salz aufgelöst werden kann) beheben.

Unterkühlung (oder *Überkühlung*) ist ein weiteres Problem, das vor allem bei Salzhydraten auftritt. Die Kristallisation tritt erst weit unter der eigentlichen Schmelztemperatur ein (weil Kristallisationswärme frei wird) und das Material wird unter Umständen nicht fest, da die Temperatur während des Entladevorgangs nicht tief genug gesenkt wird. Kleine Mengen von sogenannten “Nukleatoren” (Materialien, die immer fest bleiben, auch wenn das PCM selbst flüssig ist) können dem PCM beigefügt werden, um den Prozess wesentlich zu reduzieren. Sie dienen dann als *Kristallisationskeime*, von denen aus die PCM-Kristalle wachsen.

Einige PCMs besitzen auch Schmelzpunkte unter 0°C , *Zalba/Cabeza et al. (29)* führen sehr genau alle unter Erforschung stehenden Materialien an.

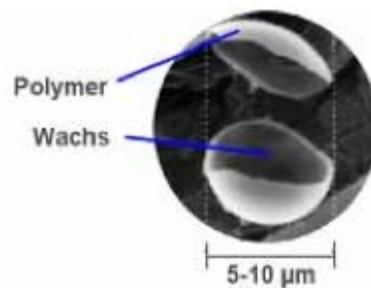


Grafik 4.20: Schmelzenthalpiekurven verschiedener PCMs. Die resultierende Speicherdichte pro Volumseinheit im Vergleich zu Wasser ist dann (bei einem Temperaturbereich von 50-70°C) bei Paraffinen etwa doppelt und bei Salzhydraten bis zu sechs mal so groß. Auffällig ist auch die nicht eindeutige kritische Temperatur bei Paraffinen, diese weisen einen Schmelzbereich auf. *Quelle: Streicher et al. (24)*

Die Bestimmung der thermischen Leitfähigkeit von gemischten PCMs (die Kristallisation erstreckt sich über einen Temperaturbereich) gestaltet sich schwierig, denn beim Schmelzen und Verfestigen tritt das sogenannte “Moving Boundary” Problem ein, bei dem die Phasengrenze fest-flüssig sich nach der Geschwindigkeit der Latentwärmeabsorption bzw. des -verlustes an jener Phasengrenze verändert. Daher ist die Phasengrenze a priori unbekannt und es bildet sich eine “Mushy Region”, eine 2-Phasenzone zwischen festem und flüssigen Aggregatzustand.

Um einigen der genannten Komplikationen und Limitationen im Umgang mit PCMs Herr zu werden, verkapselt man PCMs mit Wärmeüberträgern (*Encapsulation*, vgl. Grafik [4.21]). Dies verleiht dem PCM Stabilität (10.000 Zyklen $\approx$ 30 Jahre Lebensdauer bei 24 Zyklen/Tag, nach Schmidt, CEP 2011 Stuttgart, BASF) und “ungestörte” Phasenwechsel (keine Interaktion mit der Umgebung, ausschließlich thermische Energie wird ausgetauscht). Es liegt somit ein quasi-direktes Speichermedium vor, dass sich fast wie ein sensibles Medium verhält und zum direkten Be- und Entladen verwendet werden kann: Das Material verhält sich wie ein Feststoff, der in einer Flüssigkeit gelöst ist (unabhängig vom Phasenzustand des PCMs). Paraffine werden beispielsweise in Polymercontainern untergebracht und können so mit Baumaterial oder

Wärmetransportmedium kombiniert und vermischt werden, was die Speicherkapazität erhöhen kann. Eine derartige Suspension heißt dann *Slurry*. Salzhydrate lassen sich momentan noch nicht verkapseln, dafür kann man ihnen 10Vol.% Graphit beimengen, was zu gesteigerter thermische Leitfähigkeit um einen Faktor von etwa 10-20 führt (nach (7) Heinz). Dabei wird zwar die Zyklenstabilität erhöht, aber die Latentwärme des Materials sinkt. Grafik [4.20] zeigt einige Werte zu den genannten Suspensionen.



Grafik 4.21: Eine aufgebrochene PCM-Mikroverkapselung unter dem Mikroskop: Wadkugeln, umgeben von dünnen Polymerschichten. Durch den geringen Durchmesser der Kapsel stellt sich ein hohes Oberflächen-Volumen Verhältnis ein ($1\text{ml} \Leftrightarrow 30\text{m}^2$, nach Schmidt, CEP 2011 Stuttgart, BASF), was die geringe Leitfähigkeit vernachlässigbar macht. Mit Wasser vermischt erhält man ein pumpfähiges Medium ("Slurry"). Grafik: BASF

4.2.1 Etablierte Anwendungen zu PCMs

Der *Austrian Masterplan*, Heinz et al. (7) bietet eine detaillierte Übersicht der Forschungsprojekte zur Verbesserung von PCM-Wärmespeichern und die Erforschung neuartiger Materialien. Hier nun zwei der relevantesten Anwendungsgebiete:

- **PCM als Gebäudepuffer:** Wird PCM in das Baumaterial eingebracht, erhält man einen passiven Heizeffekt, indem das PCM thermische Energie durch Sonneneinstrahlung (Aufheizung des Innenraumes durch die Fenster) aufnimmt und, beim Fallen der Umgebungstemperatur unter eine gewisse Schwelle, wieder abgibt. Dies ist auch die einzige Möglichkeit, Temperaturanstieg im Innenraum zu vermeiden, ohne zusätzlich Energie aufzuwenden. Gemeinsam mit guter Dämmung stellt dies das Passivhaus der Zukunft dar. Betrachtet man das Speichervermögen thermischer Energie, so leisten 1,5cm Gipsputz mit 3g/m^2 PCM in etwa so viel wie vergleichsweise 7cm Beton oder 10cm Ziegel (nach Schmidt, CEP 2011 Stuttgart, BASF). Ein weiterer Vorteil von PCM ist, dass es sprunghaft (also schnell auf Umgebungsänderungen) reagiert und somit beispielsweise eine Klimaanlage mit rund 2kW Leistung darstellt (bei 20W/m^2 , 300kg PCM im Wohnhausmaterial und 100m^2 Wohnfläche, nach Schmidt, CEP 2011 Stuttgart, BASF).

- **Eisspeicher:** Es gibt bereits einige Systeme (mit bis zu 12.000 Liter) für Einfamilienhäuser, welche die frei werdende Latentwärme beim Kristallisieren/Schmelzen von Wasser nützen, um damit Wärme im Winter und Kälte im Sommer bereitzustellen. Das System besteht aus Solarthermie gekoppelt mit einer Wärmepumpe zur Warmwasserbereitung. Die eingespeicherte thermische Energie wird dabei als Abwärme aus dem Wärmepumpenprozess zugeführt. Dem Eisspeicher wird solange Energie entzogen, bis das Wasser gefriert (in den Wärmetauscherrohren wird unterkühlbare "Sole", ein Glykol-Wasser-Gemisch verwendet). Oft wird auch als Speichermedium unterkühlbare Sole verwendet, um den Arbeitsbereich zu erhöhen. Der Tank ist auf die Volumsvergrößerung beim Gefrieren ausgelegt. Umgekehrt nimmt im Sommer das Eis Wärme auf und beginnt zu tauen. Die Kosten für ein solches System (etwa 10kW Leistung) sind mit denen von Erdwärme vergleichbar (*nach ISOCAL, Alexander von Rohr*). Der sogenannte *Eisbrei* ("Ice Slurry") bezeichnet ein Wassergemisch, das zusätzlich aus winzigen Eispartikeln (0,01-0,5mm) und einer Gefrierpunkt senkenden Substanz (Salz oder Glykol) besteht. Er ist unter 0°C abkühlbar, ohne zu gefrieren, ungiftig und pumpbar. Des Weiteren weist er sowohl hohe Energiedichte als auch Wärmeleitfähigkeit auf. Sensible wie latente Wärme werden zur Energiespeicherung in diesem 2-Phasigen Medium genutzt, der Eisbrei muss allerdings durch Rühr- oder Pumpvorrichtungen in Bewegung gehalten werden, um einer Verfestigung durch die Verbindung der Eiskristalle entgegen zu wirken. *Momota et al. (14)* zeigen eine interessante Möglichkeit eines vertikalen, haushohen Eistanks auf, in dem Eiskubus eingelagert werden. Das System weist eine Temperaturschichtung, ähnlich einem Heißwasserspeicher, auf.

4.3. Thermochemische Speicher

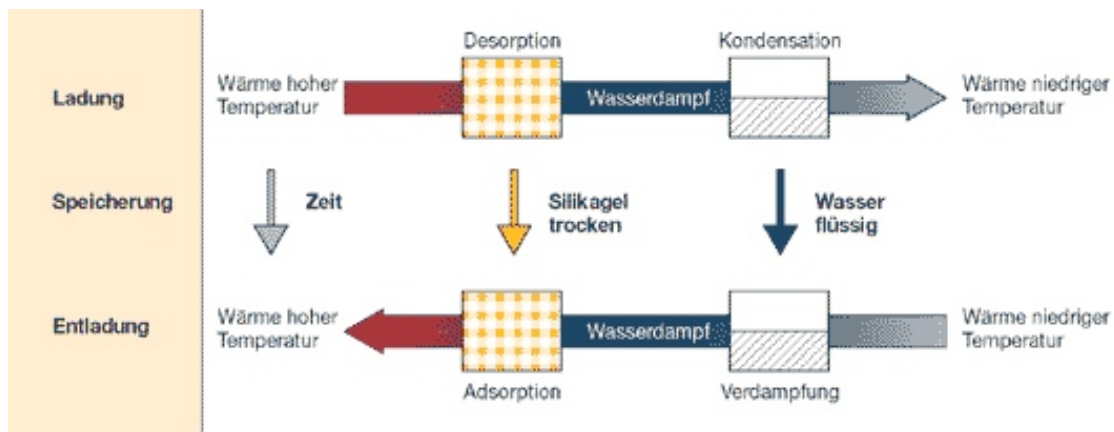
Diese teuren, noch weitgehend in der Erforschung befindlichen Anlagen basieren auf Wärme ab- bzw. aufnehmenden (reversiblen) chemischen Reaktionen. Man unterscheidet zwischen *Sorptionsspeichern* und Speichern mit *reversiblen Bindungen*. Am gängigsten sind die *Adsorptionsspeicher*, da sie sehr hohe Energiedichten (**theoretisch 200-500 kWh/m³**, *nach (17) Oertel*) bei kaum auftretenden Verlusten aufweisen und sowohl zu Heiz- wie auch Kühlzwecken eingesetzt werden können. Des Weiteren ist ihre Speicherdauer theoretisch fast unbegrenzt. Als Arbeitsmedium kommt dabei meist Wasser oder ein anderer umweltverträglicher Stoff wie Silikat zum Einsatz. Das Sorptionsmaterial gibt Wasserdampf bei Erhitzung ab und andererseits Wärme, wenn Wasserdampf absorbiert wird. Ein Problem der Adsorptionsspeicher stellt die geringe Leitfähigkeit und die damit verbundene Anordnungsgeometrie der Wasseraufnahme dar. Generell versteht man darunter die Anlagerung von Fremdmolekülen an oder in Festkörpern oder Flüssigkeiten. Man unterscheidet Adsorptions- von Absorptionsspeichern, welche beide reversible Prozesse darstellen:

- **Adsorption:** Hierbei handelt es sich um eine inhomogene Verteilung der Moleküle. Durch *Desorption* (den reversiblen Umkehrungsprozess) wird der Speicher aufgeladen. Dazu wird Wasserdampf dem Speichermedium (festes Sorptionsmaterial mit großer inneren Oberfläche) entzogen und am Kondensator gesammelt. Beim Entladen verdampft das Wasser am Kondensator durch Wärmezufuhr von außen (Abwärme) und der Wasserdampf lagert sich wieder am Sorptionsmaterial ab, wobei Energie frei und die Luft erwärmt wird. Somit dient dieser Speichertyp auch als Luftbe- bzw. -entfeuchter und ist somit beispielsweise zur kombinierten Beheizung und Entfeuchtung für Schwimmbäder sehr gut geeignet. *Grafik [4.22]* illustriert den Funktionsprozess der Adsorption.
- **Absorption:** Hierbei liegt eine homogene Verteilung im Inneren vor und die Aufladung findet ebenfalls über die sogenannte Desorption statt: Die Salzlösung als Medium wird durch zugeführte Heißluft im Regenerator aufkonzentriert, der dadurch ausgetriebene Wasserdampf durch einen Luftstrom abtransportiert. Beim Entladen entfeuchtet die konzentrierte Lösung wiederum den Luftstrom und es entsteht trockene Luft (die durch den Befeuchter abgekühlt wird) auf der einen und verdünnte Lösung auf der anderen Seite. Für Heizanwendungen ist dieses System weniger gut geeignet, weil die Luft nur schwach erhitzt wird (da in einer Flüssigkeit schwächere Bindungen vorliegen).

Trockene Luft ist physikalisch bedingt "kälter" (respektive kann sie mehr Feuchtigkeit aufnehmen und die Verdunstungskälte ist somit stärker) und deshalb kommen beide Speichertypen auch als Klimaanlage (thermochemische "Trocknung") in Frage. Als Sorptionsmaterialien kommen vorallem Silikagele (40-100°C, *nach (17) Oertel*) oder Zeolithe (100-300°C, *nach (17) Oertel*) in Frage, da ihre hygroskopischen Eigenschaften und ihre poröse Struktur (hohe innere Oberfläche für reichlich Wasseraufnahme) von Vorteil sind. In Zukunft könnten solche Speicher als Pufferspeicher für Haushalt und Industrie (und auch zum Lastausgleich der Fernwärme) interessant werden.

- **Reversible chemische Bindungen:** Die molekularen Zustände, genauer deren Bindungsenergien werden zur Wärmespeicherung bei diesem Verfahren genutzt. Geladen wird ein solcher Speicher durch Wärmezufuhr, welcher die Bindung in ihre Basisverbindungen aufspaltet. Bei diesem Prozess sind die Stoffeigenschaften für den Temperaturbereich ausschlaggebend). Die Reaktionspartner können dann getrennt gelagert werden und es tritt kein Energieverlust auf. Erst beim erneuten Zusammenführen der beiden Teile wird Bindungsenergie in Form von Wärme frei und es entsteht die Ausgangsbindung bei Entladung. Zu dieser Methode gibt es noch keinerlei Praxiserfahrung.

Auch hierzu listet der *Austrian Masterplan*, *Heinz et al. (7)* eine Übersicht der Forschungsprojekte zur thermochemischen Speichertechnik.



Grafik 4.22: Das physikalische Grundprinzip der Adsorptionsspeicherung. Es handelt sich um indirekte, *offene* Speicherung: Energie muss in die Umgebung abgegeben bzw. ihr entzogen werden. Unter einer gewissen Temperaturgrenze wird keine Wärme gespeichert (dies hängt von der Kondensationstemperatur ab). Nachdem der Speicher aufgeladen wurde, kann er auf die Umgebungstemperatur auskühlen, die gespeicherte Energie geht dabei nicht verloren: Die Adsorptionsenthalpie bleibt gespeichert, solange Sorptionsmaterial und Arbeitsmedium nicht in Kontakt kommen. *Grafik: BINE (30)*

Ein interessantes **Pilotprojekt** aus 2005 befindet sich in Österreich und trägt den Namen MODESTORE (*“Haus der Zukunft”*, Jähnig et al. AEE). Die beiden Sorptionsspeicher (etwa 500kg) sind quasi eine thermisch angetriebene Wärmepumpe auf Basis von Silikagel-Wasser und versorgen das Niedertemperaturheizsystem eines Einfamilienhauses. Die Anlage wird unter Vakuum betrieben, um Verdampfung auch bei niederen Temperaturen zu ermöglichen. Gespeist wird sie durch 32m² Flachkollektoren und einen Heißwasserpuffer mit 900L. Durch relativ kleine Dimensionierung werden zur Nachheizung eine Pelletheizung und ein Boiler für Warmwasser benötigt. An den 1000kg Silikagel können rund 150L Wasser adsorbieren (entspricht ungefähr 100 kWh, nach *bm:vit*, Jähnig et al.). Das Pilotprojekt hat die folgenden Punkte gezeigt:

- Räumliche Trennung der Reaktionspartner bringt verlustfreie Speicherung, aber ein solches geschlossenes System benötigt Wärmetauscher (Verluste treten auf).
- Schlechte Wärmeleitfähigkeit von Silikagel resultiert in geringer Wärmetausch- und Speicherleistung (Verdampfungswärme $\neq$ Adsorptionswärme).
- Die praktische Energiedichte ist geringer, denn durch Auskühlen fallen sensible Effekte weg und die Temperaturdifferenz vergrößert sich.
- Der Temperaturhub (Wärmepumpeneffekt) muss daher groß genug sein, damit die gespeicherte Energie sinnvoll eingesetzt werden kann.
- Die Paarung Silikagel-Wasser ist nicht geeignet, um den solaren Deckungsanteil von Solarthermie maßgeblich zu verbessern.

(Offene) Sorptionsspeicher bieten zwar die Fähigkeit, thermische Energie über nahezu unbegrenzte Zeiträume quasi verlustfrei zu speichern (was sie zu idealen Saisonspeichern machen würde), aber die Investitionskosten sind für nur einen Zyklus im Jahr zu hoch (100.000€ für die Beheizung eines Einfamilienhauses, *nach ZAE Bayern 2009*). Trotz hoher Energiedichten weisen thermochemische Speicher Untersuchungen zufolge ausserdem einen noch relativ geringen Wirkungsgrad (in der derzeitigen technischen Realisierung) auf. Das stellt ein momentanes Hemmnis zur praktischen Umsetzung solcher Anlagen dar, denn die tatsächlichen Speicherdichten sind damit wesentlich geringer. Der nach Carnot mögliche theoretische Wirkungsgrad ist nur von den Temperaturniveaus für Lade- und Entladevorgang abhängig, wie gezeigt wird (*nach ZAE Bayern, Sorptionsspeicher - Grenzen als saisonale Wärmespeicher, 2009*):

Laden	Entladen	Speicherung
$\eta_c = 1 - T_1/T_0$	$\eta_d = (1 - T_2/T_0)^{-1}$	$\eta_{\text{store}} = \eta_c \cdot \eta_d$

wobei

Ladetemperatur: $T_0 = 100^\circ\text{C}$

Umgebungstemperatur Sommer: $T_1 = 30^\circ\text{C}$

Entladetemperatur: $T_2 = 100^\circ\text{C}$

Umgebungstemperatur Winter: $T_2 = -20^\circ\text{C}$

Daraus folgt, mit der Annahme, dass praktisch nur die Hälfte (bei mittlerem Aufwand) des theoretischen Carnotgrades (oberes Limit) erreicht werden kann:

Carnot	Realität
$\eta_{\text{store}} \approx 0,6$	$\text{COP} \approx 0,3$

Details zum "COP" sind auf Seite 11 entnehmbar. Der Entladewirkungsgrad bricht im Winter ein, da zum Entladen des Systems keine geeignete Niedertemperaturquelle verfügbar ist. Auf Grund dieser ungünstigen Bedingungen können rund 70% der im Sommer eingesetzten Wärme im Winter nicht mehr nutzbar gemacht werden. Chemische Sorptionsspeicher benötigen also einerseits hohe Ladetemperatur, jenseits der 100°C im Sommer und andererseits eine passende Niedertemperaturquelle für den Entladevorgang im Winter. Damit sind sie für saisonale Wärmespeicherung im Haushalt (momentan) nur geringfügig von Interesse.

5. Abdeckung des Energiebedarfs

5.1. Der Energiebedarf Europas und Österreichs bis 2050⁸

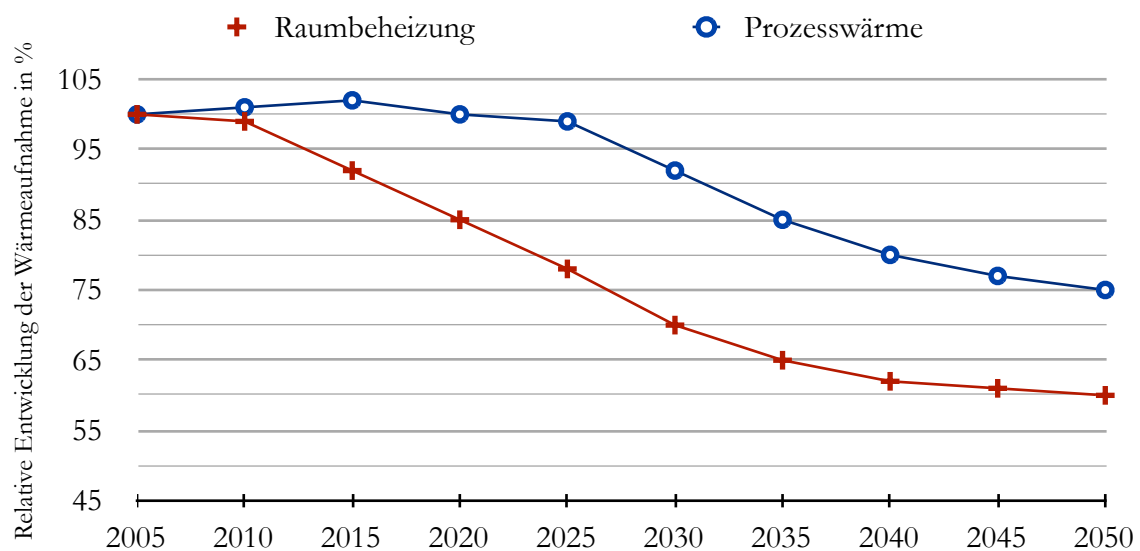
Im Folgenden wird ausschließlich auf den Bedarf an thermischer Energie eingegangen. Verlustleistungen und Preisentwicklungen werden nicht berücksichtigt. Es gilt zu zeigen, wie viel an Wärmeenergie pro Jahr in Europa (speziell Österreich) benötigt wird und welcher Anteil davon durch saisonale Speicherung abdeckbar wäre. Europaweit wurden 2006 nur 6% durch “erneuerbare Wärme” gedeckt, dabei ließen sich die CO₂-Emissionen durch Einsatz von Solarthermie um 50% reduzieren (*nach ESTIF 2008*).

→ *Zunächst zum bestehenden Wärmenetz:* Erdgas für Heizzwecke ist weit verbreitet (historisch günstig und unter allen fossilen Energieträgern am umweltfreundlichsten), daher sehen viele Anbieter keinen Handlungsbedarf für saisonale Wärmespeicherung. Weiters ist auch Fernwärme gut etabliert und günstig, zeigt aber eine recht hohe Verlustleistung (auf Grund langer Transportwege). Alte Gebäude sind zudem schlecht isoliert, das bedeutet, dort herrscht hoher Vorlauftemperaturbedarf für Heizzwecke von etwa 100°C (nach dem Wärmetausch Verteilung auf handelsübliche Radiatoren mit 60-80°C Vorlauf). Die *Netzzrücklauftemperatur* beträgt dann rund 50°C, die nicht ungenützt einfach wieder zum Heizwerk zurück geleitet werden sollen (der Wirkungsgrad ist dort von der Temperaturdifferenz abhängig), auch wenn die Leitungsverluste durch kürzere Distanz geringer wären. Moderne und sanierte Gebäude weisen eine wesentlich bessere Isolation auf und besitzen zum Teil objekteneigene Solarkollektoren (in urbanen Bereichen ist das aber nur spärlich der Fall). Dadurch und durch Fußbodenheizungen mit Vorlauf von nur 35°C) kommen sie mit wesentlich weniger thermischer Energie aus, was sie zum logischen nächsten Glied in der Fernwärmekette macht. Die 50°C werden zum neuen Vorlauf für moderne Objektgruppen und die Netzzrücklauftemperatur minimiert sich damit auf etwa 35°C. Die gewonnene Wärme aus der Solarthermie kann nun entweder in den Netzzrück- oder Vorlauf eingespeist werden. Der Wirkungsgrad steigt mit fallender Temperaturdifferenz, aber die Leitungsverluste im Rücklauf sind auf Grund hoher Distanzen groß. Zukünftig wird wohl nur das Aufteilen in Netzebenen nach Nieder- und Hochtemperatur in Frage kommen, um den Kreis zu optimieren. Unsanierbare Gebäude (z.B. aufgrund von Denkmalschutz) werden weiterhin hohe Wärmeabnehmer bleiben, aber die Gesamtnachfrage nach Wärme sinkt durch moderne Sanierungsmaßnahmen und Niederenergietechnologien, nicht zuletzt auch durch Einsparungen im Rahmen der “EU-20%” CO₂-Reduktionsrichtlinien (vgl. *Grafik [5.1]*). Gleichzeitig steigt aber der Strombedarf und mehr Abwärme wird bei der Erzeugung frei. Das bedeutet, die Fernwärme findet zunehmend weniger Abnehmer und

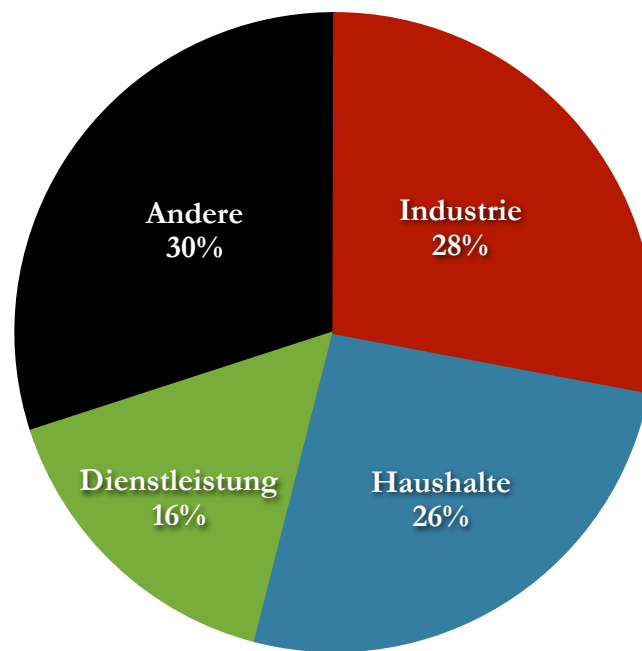
⁸ **Quellen:** (1) ESTIF 2008, (2) EU 2008, (3) Statistik Austria, (4) Wille, (5) Pieler, (6) Schreier et al., (7) Heindl, (8) Ebel, (9) Sedlbauer/Krus

überproduziert. Für Solarthermie und saisonale Speicherung ist aber die Anbindung an das Wärmenetz nicht zwingend notwendig. Einfamilienhäuser in ländlichen Regionen und kleinere Siedlungen lassen sich gut autark versorgen.

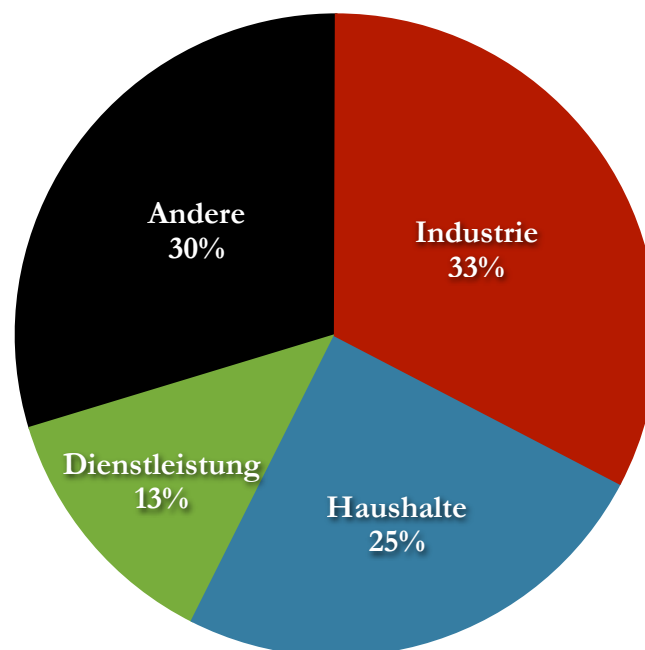
Der jährliche Wärmebedarf Europas betrug 2006 ungefähr 13.678 TWh (*nach EU 2008*). Fast die Hälfte davon bezogen Warmwasseraufbereitung und Raumbeheizung im Haushalts- und Dienstleistungssektor. Die Industrie spielt dabei vor allem im Bereich der Niedertemperatur-Prozesswärme eine Rolle. *Grafik [5.2]* gibt näheren Aufschluss über den Energieaufwand für die einzelnen Sektoren in Europa, *Grafik [5.3]* und *[5.4]* über den in Österreich: Der jährliche Wärmebedarf Österreichs belief sich 2006 auf ungefähr 311 TWh (*nach Statistik Austria*), ein Drittel davon bezogen auch hier Warmwasseraufbereitung und vorallem Raumbeheizung.



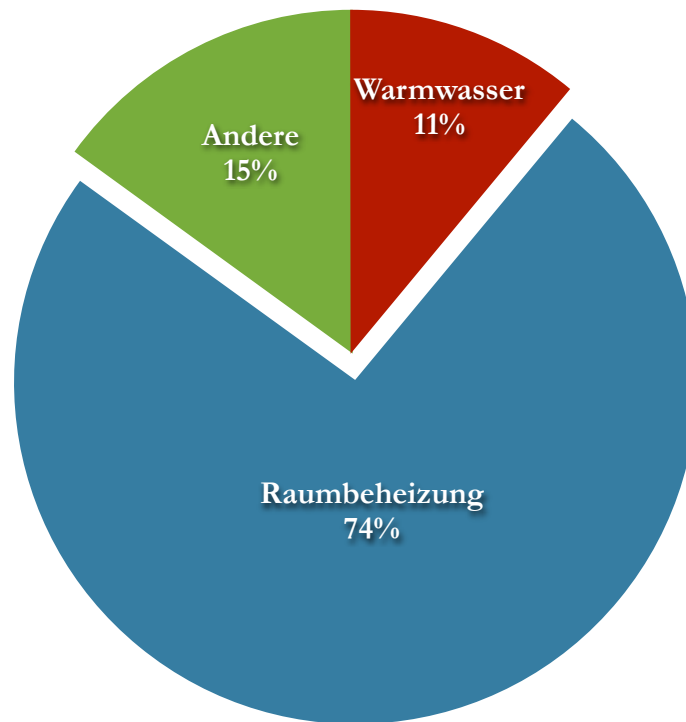
Grafik 5.4: Geschätzte Entwicklung der Energieaufnahme (in %) zweier entscheidenden Sektoren bis zum Jahr 2050. Im Fall der Industrie ("Blau") ist anfangs ein geringer Anstieg zu verzeichnen, gefolgt von träger Reaktion durch erhöhte Investitionen und Aufwand. *Datenquelle: ESTIF 2008, Solar Thermal Markets in Europe, Trends and Market Statistics 2007, Brussels*

2006 Wärmebedarf EU: 13.678 TWh

Grafik 5.2: Energiebedarf des Jahres 2006 in Europa nach den wichtigsten Sektoren. Der Bereich “Andere” bezieht sich u.a. auf das Transportwesen. *Quelle: EU Energy and Transport in Figures, Statistical Pocketbook 2008, Directorate-General for Energy and Transport*

2006 Wärmebedarf Österreich: 311 TWh

Grafik 5.3: Energiebedarf des Jahres 2006 in Österreich nach den wichtigsten Sektoren aufgeteilt. Der Bereich “Andere” bezieht sich u.a. auf das Transportwesen. *Quelle: Statistik Austria, Jährliche Erhebung des Energieaufwands 2006-2010*

2006 Haushalte Österreich: 77 TWh

Grafik 5.4: 57TWh wurden 2006 zur Raumbeheizung der Haushalte aufgewendet. Ähnlich sieht es im Dienstleistungssektor aus, wobei nur Haushalte (vor allem moderne Objektgruppen und Siedlungen) recht einfach autark über saisonale Speicherung versorgt werden könnten. *Quelle: Statistik Austria, Jährliche Erhebung des Energieaufwands 2006-2010*

5.2. Abdeckung des Bedarfs durch etablierte Wärmespeicher

→ Wirtschaftlicher Fokus auf Österreich/Wien

Da es nur wenige erneuerbare Energiequellen gibt, die direkt zur Wärmeerzeugung eingesetzt werden (Biomasse - fest/flüssig/gasförmig, Geothermie, Solarthermie, Umgebungswärme durch Wärmepumpen und Klärgas bzw. Müllverbrennung), werden solarthermische Systeme einen wesentlichen Beitrag zum “EU 20%” - Ziel leisten müssen. Entsprechend einer Studie, die im Auftrag der *European Solar Thermal Industry Federation* (ESTIF) erstellt wurde, hat die Solarthermie langfristig das Potenzial, in Österreich 40% des Niedertemperaturwärmebedarfs zu decken (*nach (28) Weiss/Biermayr*). Gekoppelt mit saisonaler Speicherung stellt diese solare Wärme das zentrale Argument für eine innovative Wärmeversorgung dar. Nur durch die Speicherung der thermischen Energie kann das Potential ausgeschöpft werden.

Es zeigt sich, dass Deutschland – in absoluten Zahlen betrachtet - den weitaus größten Solarthermiemarkt aufweist, gefolgt von Österreich. Alle anderen europäischen Länder haben gegenwärtig einen relativ kleinen Markt. Diese Reihenfolge ändert sich jedoch, wenn das Marktvolumen auf die Einwohnerzahl bezogen wird. Österreich ist diesbezüglich in Europa ein eher unauffälliges Land. Es liegt jedoch mit über 250kW_{th} (Basis 2008) pro 1000 Einwohner um mehr als das Sechsfache über dem europäischen Durchschnitt (*nach (27) Weiss et al.*).

Insgesamt waren in Österreich bis zum Ende des Jahres 2009 rund $4,3 \times 10^6 \text{ m}^2$ thermische Sonnenkollektoren mit einer Leistung von rund $3\text{GW}_{\text{thermisch}}$ installiert. Die Anwendung von solarthermischen Anlagen konnte in den vergangenen Jahren von den Bereichen Schwimmbäder, Warmwasserbereitung und Raumheizungsunterstützung für Einfamilienhäuser auf große Anlagen in Mehrfamilienhäusern, Einbindung in Nah- und Fernwärmenetze bzw. Wärmebereitstellung für Gewerbebetriebe deutlich erweitert werden. (*nach (28) Weiss/Biermayr*).

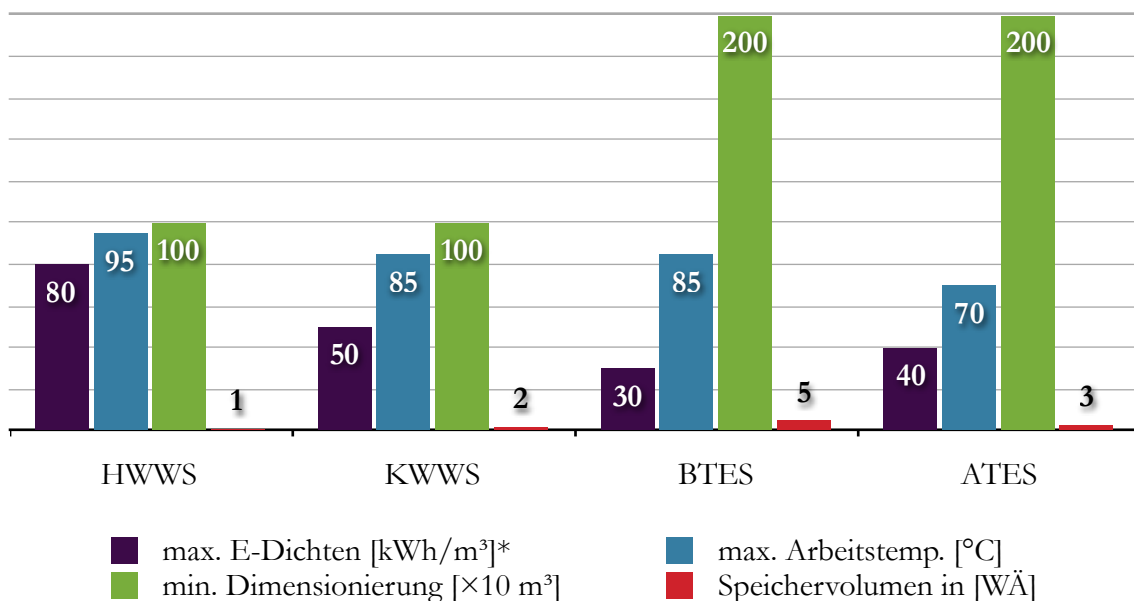
Die Aufteilung der jährlich installierten Kollektorflächen in den Bundesländern ist jedoch sehr unterschiedlich und so war beispielsweise in Jahr 2008 Wien absolutes Schlusslicht mit nur einem Anteil von 2% der in diesem Jahr installierten Anlagen (*nach einer Erhebung der AEE INTEC 2009*). Spitzenreiter mit 26% war (und ist vermutlich noch immer) Oberösterreich, für dieses Bundesland werden in zahlreichen Publikationen massive Potenziale festgestellt. Die Errichtung neuer Anlagen ist vor allem von der freien Fläche und dem Informationsstand der Bevölkerung bzw. der entscheidungskräftigen politischen Ebene abhängig. In Wien beispielsweise kommen legislative Hürden wie Eigentümerstruktur in Gemeindebauten, Denkmalschutz und Mehrheitsbeschluss, sowie mangelnde Bewusstseinsbildung der Bewohner und Zuständigen hinzu (*nach (25) Tschernigg*).

→ Übersicht qualitativer Parameter saisonaler Speichermethoden

Die beiden folgenden *Grafiken* [5.5] und [5.6] geben Aufschluss über einzelne wichtige Parameter saisonaler Speichermethoden. Sie zeigen, welche Energiemengen mit unterschiedlichen Systemen differierender Größe speicherbar sind. Vor- und Nachteile werden kurz diskutiert und dargestellt. Im Prinzip sind Heißwasserspeicher der letzte Stand der Technik. Bei ihnen gibt es kaum noch große Entwicklungsschritte zu erwarten, sie gelten als “etablierte” Systeme. Anderen Möglichkeiten der Wärmespeicherung befinden sich noch in Erforschung und Entwicklung.

Der solare Deckungsanteil (*Solar Fraction*) bestimmt die wirtschaftliche Effizienz einer Anlage, also wie viel Prozent der durch Sonneneinstrahlung erzeugten thermischen Energie zu Heizzwecken ganzjährig verwendet werden kann. Üblicherweise liegt bei der durch saisonale Speicherung unterstützte Solarthermie ein Deckungsanteil von 50-60% vor, dieser kann aber in Zukunft auf bis zu 80% gesteigert werden (*nach* (24) *Streicher*). Eine möglichst hohe “Solar Fraction” ist also sehr erstrebenswert. *Grafiken* [5.7] und [5.8] zeigen in diesem Zusammenhang, wie ein Heißwasserspeicher durch PCM verbessert werden kann.

Grundlegende Parameter sensibler saisonaler Wärmespeicher



Grafik 5.5: HWWS...Heißwasserspeicher, KWWS...Kies-Wasserspeicher, BTES...Erdsonden- bzw. Bohrlochspeicher, ATES...Aquiferspeicher, WÄ...Wasseräquivalent (Faktor); Die angegebenen Energiedichten (*) bei sensibler Speicherung gelten für die jeweiligen Temperaturdifferenzen von max. Arbeitstemperatur zur definierten Minimaltemperatur/Umgebungstemperatur (meist 10°C). Die minimalen Dimensionierungen geben das Volumen an, ab dem die Energieverluste über die Oberfläche gering sind. BTES und ATES müssen deutlich größer angelegt sein, um effektiv arbeiten zu können. Es dauert mehrere Jahre, bis diese Systeme eingeschwungen sind und ihre maximale Effizienz erreicht haben (stabile Untergrundtemperatur). Hinweis: HWWS und KWWS sind erst ab etwa 30°C einsetzbar. *Datenquellen:* BINE (30), Mangold (12)

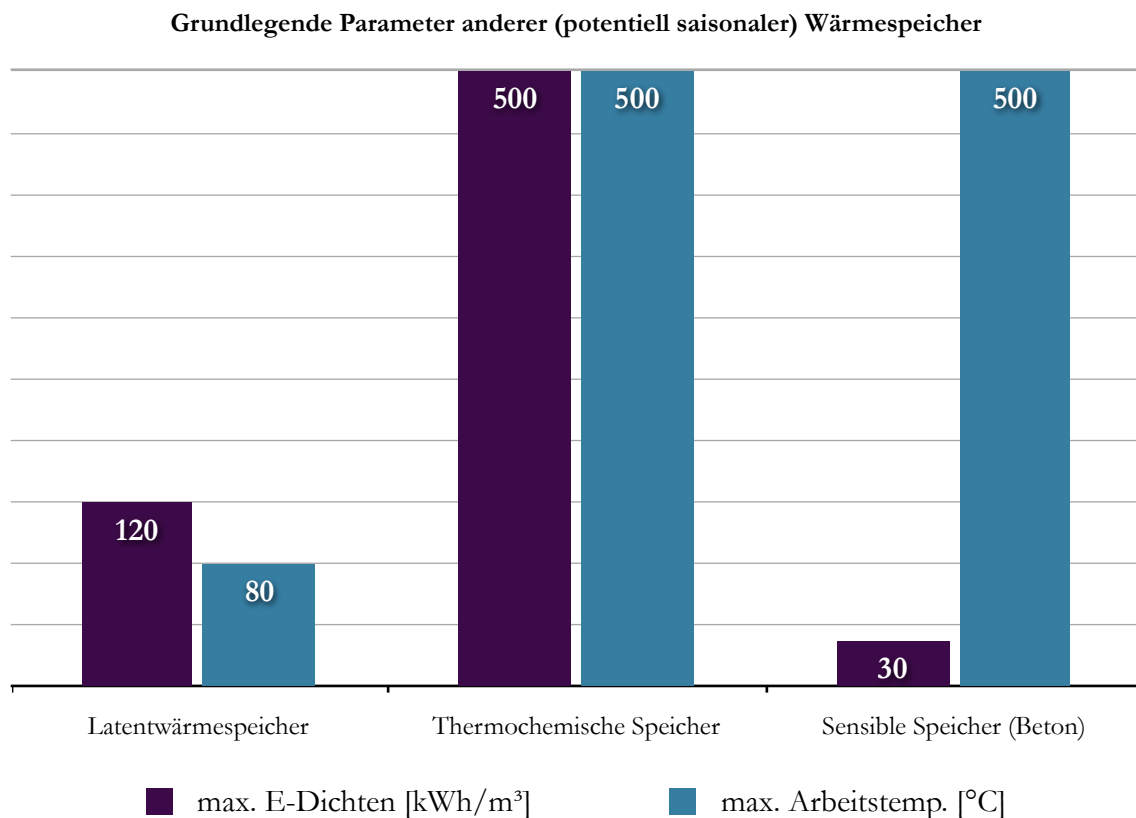


Figure 5.6: Zu Latentwärmespeichern gibt es bereits einige Anwendungen mit geringem Speichervolumen und -aufwand bei guter Wärmeausbeute, aber keine großflächigen Lösungen. Thermochemische Speicher sind noch Gegenstand der Forschung und Theorie. Viele Materialien stecken noch in der Entwicklungs- und Testphase, die Kombination mit bereits etablierten Speichern ist vielversprechend. Anzumerken sei, Latentwärmespeicher sind erst ab etwa 10°C und thermochemischen Speicher ab etwa 40°C einsetzbar. *Datenquellen: BINE (30), Mangold (12)*

In Zukunft könnten thermochemische Speicher die folgenden Verbesserungen bieten (im Vergleich mit einem Heißwasserspeicher gleichen Energieoutputs, *nach (9) Kerskes*):

- **Adsorption:** 1/2 Kollektorfläche, 1/2 Speichervolumen
- **Bindungsenergie:** 1/2 Kollektorfläche, 1/4 Speichervolumen

Damit würden natürlich sowohl Kosten, als auch Energieverluste sinken.

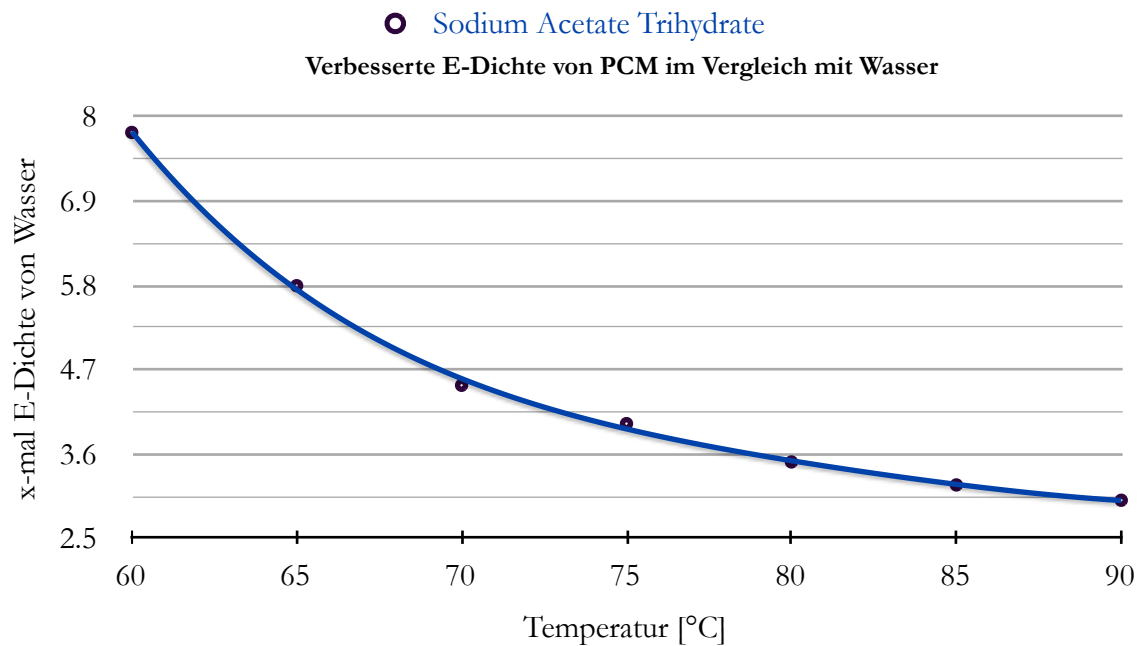
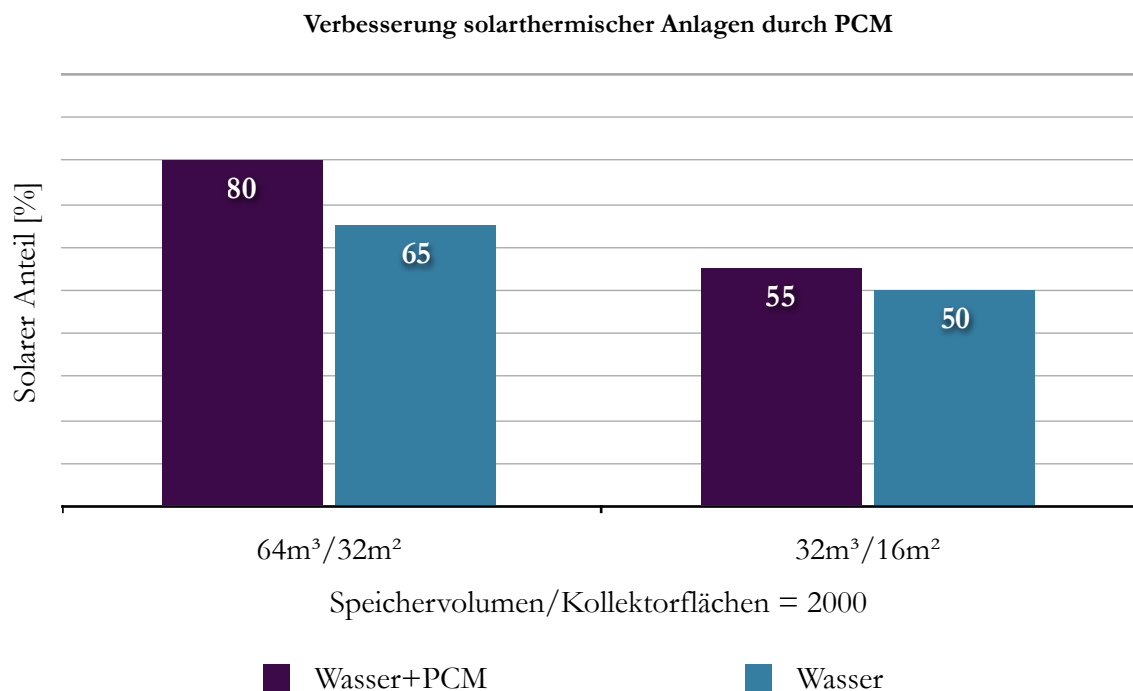


Figure 5.7: “Faktor 8 Speicher”: Es zeigt sich wesentliche Verbesserung der Speicherdichte durch PCM. Zu bemerken ist, dass die Vielfachen für Bereiche von 50°C bis zur jeweiligen Temperatur gelten. Das gewählte PCM zeigt die größte Verbesserung bei niederen Temperaturen (Raumwärmebereich). Die diskreten Werte wurden mit einem Polynom 4. Grades gefittet. *Datenquelle: Streicher (24)*



Grafik 5.8: Der solare Anteil könnte sich in bestimmten Kombinationen von Parametern durch PCM Nutzung parallel zu Wasser signifikant erhöhen. Hier wurde der größte Verbesserungsanstieg im Modell gewählt. *Datenquelle: Streicher (24)*

→ Fallbeispiel Wien, Potential für Solarthermie

Der Anteil der für Raumwärme genutzten Energie (*Niedertemperaturwärme*) betrug 2007 in etwa 14TWh (nach *AEE INTEC 2009*), das sind 38% vom Gesamtenergiebedarf. *Laut Statistik Austria* wurden davon rund 64% durch Erdgas gedeckt und rund 24% durch Fernwärme.

Bevor eine genaue Berechnung des solarthermischen Potenzials in Wien erfolgen kann, müssen einige Annahmen getroffen werden. Im Durchschnitt steht jedem Einwohner (1,68 Millionen Menschen *laut Statistik Austria 2008*) eine nutzbare Dachfläche von ungefähr 10m² zur Verfügung (nach Norden oder ungünstig ausgerichtete Dachflächen wurden bereits abgezogen). Eine ebenso große Fläche gilt für die Fassadennutzung. Weiters wurde ein mittlerer Kollektorwirkungsgrad von 55% (unter Standardbedingungen und über ein Jahr verteilt) angenommen. Somit erhält man das technische Erzeugungspotenzial, also die maximale Energiemenge, die jährlich mit Solarthermie auf den verwendeten Flächen erzielt werden kann (*nach (25) Tschernigg**):

Technisches Erzeugungspotential*

über Dachflächen	8,9 TWh/a
über Fassadenflächen	6,4 TWh/a
15,3 TWh/a	

Rein rechnerisch ließe sich also der Bedarf von 14TWh leicht durch Solarthermie decken. Ein wesentlicher, ertragmindernder Faktor der solarthermischen Energieerzeugung ist aber die Divergenz zwischen Angebot und Nachfrage in Bezug auf Raumheizung. Die im Sommer durch hohe Sonneneinstrahlung gewonnene Wärme wird nicht für den Winter zur Verfügung gestellt. Es gibt so gut wie keine saisonale Wärmespeicherung in Österreich bzw. Wien. In Städten kann die Wärmespeicherung im Allgemeinen nicht in den Untergrund entwickelt werden, sondern nur in die Höhe, denn unter Anderem behindern Rohrleitungen, U-Bahn Schächte und der Bodenzustand den Einsatz von saisonalen Speichersystemen im Erdreich. Überirdische Methoden sind teuer, unansehnlich, groß (über 100m³) und ihre Isolierung ist zudem aufwendig. Sie müssten in Gebäude und in das Fernwärmenetz integriert werden, wobei dort das hohe Temperaturniveau Schwierigkeiten machen könnte.

Das nächste Kapitel schlägt ein Modell für Wien vor, das neuen, "alten" Raum für Heißwasserspeicher vorstellt und die wichtigsten Parameter diskutiert, ungeachtet einer etwaigen Unwirtschaftlichkeit durch Überproduktion von (Fern-)wärme, was die Speicherung in einer Stadt redundant werden ließe.

Der nachfolgende Abschnitt
“Flaktürme als saisonale Wärmespeicher” gewann
am 21. November 2012 den Wettbewerb **“EnergieNeuDenken”**
des “bm:vlt” in Wien.

“Energie ist Zukunft! Das Leitmotiv der Veranstaltungsreihe EnergieNeuDenken ist die brisante Frage: Welche Energie sollen und werden wir künftig wie nutzen, um die Klimaerwärmung bei maximal 2°C zu stoppen? Der Weg hin zur klimaverträglichen Gesellschaft bedarf eines Paradigmenwechsels. Erste Schritte von der fossilen in die postfossile Gesellschaft wurden bereits gemacht. Technologische Lösungen sind vorhanden und werden entwickelt. Durch die Bündelung aller Kräfte und Interessen wird eine Wende zur Nachhaltigkeit möglich. Der Klima- und Energiefonds in Kooperation mit dem Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie laden ein, gemeinsam über die Zukunft von Energieerzeugung und Umgang mit Energie zu diskutieren!”

www.energie-neu-denken.eu



5.3. Modell Wien: Flaktürme als saisonale Speicher⁹

In einer Großstadt Platz für saisonale Wärmespeicher an der Oberfläche zu finden (der Untergrund ist oft ungeeignet durch verzweigte Netze von etwa Gas- und elektrischen Leitungen, U-Bahn etc.) ist unter verschiedenen Gesichtspunkten kaum realisierbar und vor allem teuer. Erst ab einem Speichervolumen von rund 1000m³ sind die Oberflächenverluste gering im Verhältnis zur Speicherkapazität. Bei Verdoppelung des Speichervolumens steigt der Wärmeverlust bei kompakten Bauformen um circa 30% an, weil die Oberfläche eines Speichers unterproportional mit dem Volumen ansteigt.

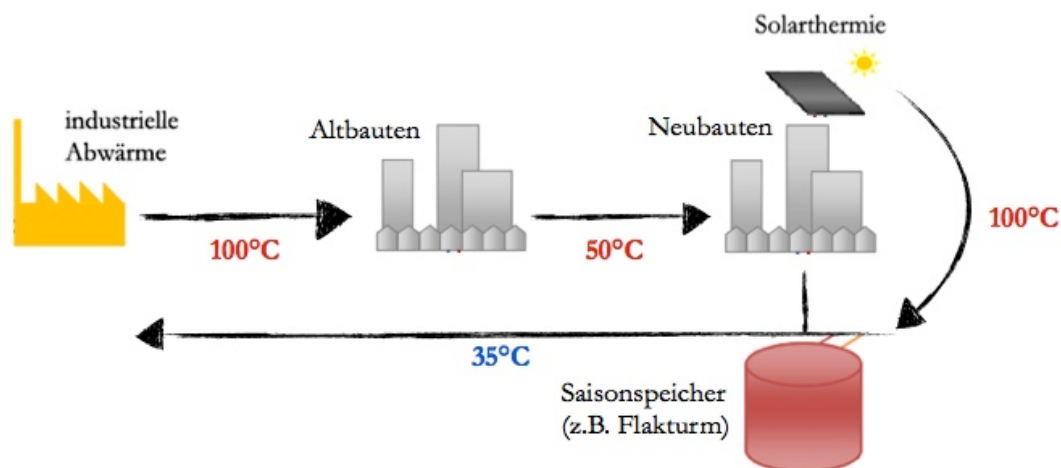
Der Vergleich mit Pilotanlagen in Deutschland, die über Jahre hinweg bereits gute Ergebnisse liefern und ständig verbessert werden, zeigt, in welchen Dimensionen es möglich ist begrenzte Einzugsgebiete mit Wärme zu versorgen. Bei fast allen größeren Pilotprojekten (ab 25.000m² Versorgungswohnfläche) ist ein solarer Deckungsanteil von 50% möglich, der Rest wird z.B. über Fernwärme abgedeckt. Das folgende Modell basiert auf einem saisonalen Heißwasserspeicher, der in einem leerstehenden Flakturm untergebracht ist. Etwaige Sanierungs- und Konstruktionsdetails werden hier nicht behandelt. Im Folgenden werden zwei Wiener Flakturmpaare betrachtet, wobei nur drei dieser vier leer stehen. Jeweils ein Flakturm sei der “Kollektorturm” (mit Solarthermie am Dach und der Fassade) und der andere der “Speicherturm” (mit dem Heißwasserspeicher im Inneren). Der “Speicherturm” übernimmt aber zusätzlich auch eine Kollektorfunktion. *Grafiken [5.9]* zeigt den großen Flakturm im Wiener Augarten.



Grafik 5.9: Der höchste freistehende Flakturm Wiens im Wiener Augarten (Brigittenau-Leopoldstadt). Er weist eine 16-eckige Form auf und ist 55m hoch. Sein Zustand ist leider sehr schlecht. Foto: Zoegernitz 2007, <http://www.flickr.com/photos/zoegernitz/359924485>

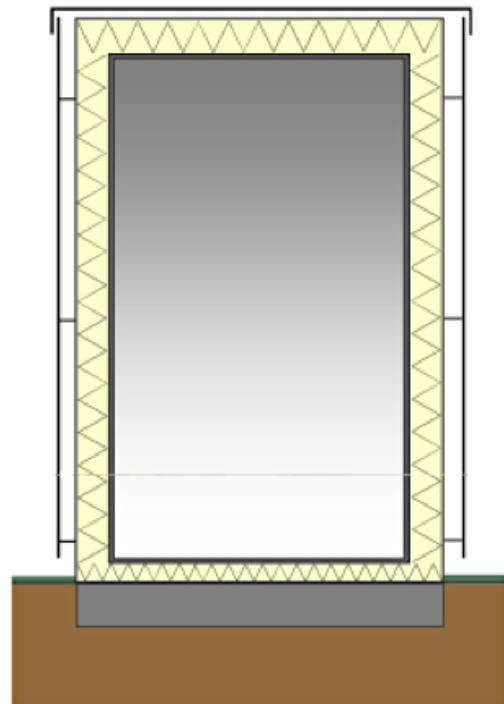
⁹ **Quellen:** (1) ESTIF 2008, (2) EU 2008, (3) Statistik Austria, (4) Wille, (5) Pieler, (6) Schreier et al., (7) Heindl, (8) Ebel, (9) Sedlbauer/Krus

Solare Speicher sind oft bivalent ausgelegt, sie besitzen zusätzlich zum Wärmeübertrager des Solarkreises eine weitere Quelle zum Nachheizen, beispielsweise eine Absorptionswärmepumpe. Dieses Nachheizen wird immer dann notwendig, wenn die Sonne nicht genügend Energie liefert, um die Nachfrage an Wärme zu decken, bzw. um die Vorlauftemperatur zu garantieren. Das wird besonders im Winter wichtig, wenn der Heißwasserspeicher entladen wird. Im Sommer wird ausschließlich durch Solarthermie versorgt. Die Wassererwärmung durch Strom als Hilfssystem ist aber energetisch sehr ineffizient und wenig umweltfreundlich. Das Flakturm-Speichersystem müsste in das Fernwärmenetz integriert sein, um einerseits Energiezuschüsse beziehen zu können und andererseits das Gesamtangebot an Wärme zu erhöhen. Im Sommer könnte so ein Heizkraftwerk mit geringerer Leistung betrieben werden oder sogar ganz ersetzt werden, wenn es sich ausschließlich um Warmwasseraufbereitung handelt. Die Problematik liegt erneut in der Netzstruktur und den Temperaturniveaus: An welcher Stelle und mit welcher Temperatur ist es sinnvoll, in das bestehende Wärmenetz einzuspeisen (vgl. *Grafik [5.10]*). Auch hier könnte die Unterteilung in Teilnetze die Lösung sein: „Inselnetze“, die in erster Linie die nähere Umgebung versorgen und Leitungsverluste gering halten, wären zu prüfen. Eine Wärmepumpe zur Unterstützung im Winter böte sich als Alternative an (auch sie könnte über Fernwärme betrieben werden). Es bleibt zu untersuchen, welche Variante zielführender wäre. Bei Wegfall des Hilfssystems (Wärmepumpe) kann der Speicher im Winter nicht mehr auf die Minimaltemperatur von circa 10°C in den unteren Speicherschichten abgekühlt werden. Diese zusätzliche Wärmemenge steht dann nicht mehr für die Nutzung zur Verfügung. In fast jeder saisonalen Pilotanlage wird daher ein unterstützendes System verwendet, das auf die lokal herrschende Situation angepasst ist und durch höheren Ertrag der Solaranlage geringere Energiepreise für den Abnehmer garantiert. Ein solches Hilfssystem könnte auch eine Biogasanlage sein.



Grafik 5.10: Skizze einer möglichen Fernwärmekoppelung mit Solarthermie und saisonalem Speicher. Letztere müssten einen eigenen Kreislauf darstellen, wobei Kollektoren auch auf Hausdächern in der Stadt verteilt sein könnten. Bei zu wenig Sonneneinstrahlung springt die Fernwärme als Energielieferant (mit 100°C) für den Speicher ein. Durch Sanierung und Niedertemperaturtechnologien sinkt der Vorlaufbedarf von Neubauten, sie nützen die „Abwärme“ der (teilweise unsanierbaren) Altbauten.

Einen Stahlbetonspeicher in dieser Größe zu bauen kostet normalerweise um 120€/m³, etwa 100€/m³ bei einem Stahltank (*nach (30) BINE*). Diese Investitionskosten würden bei einem Flakturm (Stahlbetondicke 2,5m) entfallen, nicht aber die Kosten für Abdichtung (Innenverkleidung durch Kunststofffolie) und thermische Isolation (hier Polystyrol von 20cm Dicke, thermische Stabilität wird vorausgesetzt), wobei es sich um einen drucklosen Speicher handeln müsste - die Ausdehnungseigenschaft wäre sonst u.a. zu berücksichtigen. Dadurch treten aber Verdampfungsverluste auf, das Kollektorfeld könnte daher nur mit max 95°C betrieben werden (für Flachkollektoren ineffizient, Vakuum-Rohrkollektoren würden hier einen sinnvollen Temperaturbereich bieten oder die reine Koppelung an die Fernwärme). Beton ist selbst potenzielle Speichermasse, jedoch variiert der Zustand der Außenschale der Flaktürme. Vernachlässigt man etwaige Sanierbedürftigkeit, müsste lediglich nach außen hin wärmegeämmt werden. Wärmeüberträger könnten in die vorhandene Substanz eingebracht werden. Um die Temperaturschichtung auszunützen, befände sich das Be- und Entladesystem sowohl am Kopf als auch an der Basis des Speichers. Weiters müsste man eine maximale Rücklauftemperatur definieren (etwa 30°C), um einen kontinuierlich hohen Wirkungsgrad aufrecht erhalten zu können.



Grafik 5.11: LINKS: Der Partnerturm im Wiener Augarten. Er ist leerstehend und sein Zustand ist gut. Seine Höhe beträgt 51m, seine Grundfläche ist wesentlich kleiner als die des 16-eckigen Partners. *Foto: Bertram 1990, http://www.turbo.at/geheimprojekte/augarten_103.JPG*. RECHTS: Schematische Darstellung des Flakturmes als Heißwasserspeicher mit Temperaturgradient. Die Betonwand (hellgelb) ist innen mit einer Plastikfolie (Abdichtung) ausgekleidet und nach außen hin durch Polystyrol wärmegeämmt. Eine 2,5m dicke Betonwand hält dem Wasserdruck von rund 5bar (hydrostatischer Druck) leicht stand. Gegebenenfalls muss eine solche zusätzlich am Boden eingezogen werden.

Es folgen Basiswerte eines Flakturm-Speichermodells, die sich aus den theoretischen Parametern und Definitionen zusammensetzen. Durch detaillierte Konzeption eines Systems könnten sich die Energieerträge (z.B. mit Hilfe von Wärmepumpen) noch steigern lassen, auch bezüglich der Planung des Kollektorfeldes. Es soll hier aber nur ein Überblick gegeben und mögliche Energiemengen abgeschätzt werden. Das Flakturmpaar aus Stahlbeton ist durch ein Wärmeüberträgersystem verbunden. Beide Türme besitzen Kollektoren am Dach, wobei auch über Solarthermie an der Fassade nachgedacht werden kann. Die innere Beschaffenheit wurde vernachlässigt, die Türme wurden als hohle Heißwassertankspeicher angenommen (vgl. *Grafik [5.11]*).

In *Tabelle [5.1]* sind alle relevanten Grundparameter aufgelistet, *Tabelle [5.2]* enthält die Stoffdaten. Zu beachten: Beton ist ebenfalls wesentliches Speichermedium. In *Tabelle [5.3]* finden sich die daraus errechneten Energiewerte, wobei Verluste vorerst ignoriert wurden. Der Rechengang erfolgt analog zu den Grundlagen der ersten Kapitel.

	Augarten	Arenbergpark
Kollektorturm	BTH $43 \times 43 \times 55\text{m}$ 1.960m ² Dachfläche (+ 80m ²) <i>baufällig bis zerfallen</i>	BTH $47 \times 47 \times 42\text{m}$ 3.600m ² Dachfläche (+ 1400m ²) <i>nicht leer, als Lager genutzt</i>
Speicherturm	BTH $31 \times 18 \times 53\text{m}$ 740m ² Dachfläche (+ 40m ²) 16.224m ³ Wasservolumen 15.775m ³ Betonvolumen	BTH $38 \times 19 \times 39\text{m}$ 800m ² Dachfläche (+ 950m ²) 15.708m ³ Wasservolumen 14.725m ³ Betonvolumen
Verallgemeinerte Betondicke: 2,5m		
Hydrostatischer Druck auf Boden: max. 5bar		
Gesamtflächen	2700m ² (2820m ²)	4400m ² (6750m ²)

Quellen: Wille, *Die Flaktürme in Wien, Berlin und Hamburg*, VDM-Verlag Saarbrücken 2008; Pieler, *Wiener Flaktürme, Studie für die MA 18*, Architekturbüro Bernstein-Pieler, Wien 2003

Tabelle 5.1: Basisdaten der Flakturmpaare. Der zylinderförmige Kollektorturm im Augarten wurde zum besseren Vergleich quaderförmig angenommen. Die Grundflächen unterscheiden sich auf Grund der Bauweise oft von den tatsächlich nutzbaren Dachflächen, deshalb wurden diese über ein Satellitenbild abgeschätzte Werte berechnet (die Oberfläche wurde als plan angenommen). Die Flächenwerte in Klammern beziehen sich auf die Rundborke an der Außenwand bzw. die daran ausgefassten Schwalbennester. Vernachlässigt wurde, dass die dortigen zusätzlich möglichen Kollektorflächen sich tageszeitabhängig teilweise im Schatten befänden. Der auf die Grundfläche wirkende Schweredruck des Wassers ist statisch vernachlässigbar, sofern auch der Boden eine Betondicke von min. 2m aufweist.

Der hydrostatische Druck “ p ” des Speichermediums (Dichte “ ϱ ”) bei drucklosen Speichern (Höhe “ H ”) wirkt über “ g ”, die Schwerebeschleunigung:

$$p = \varrho \cdot g \cdot H$$

Die speicherbare Wärmemenge “ Q_s ” (auch *Enthalpie*), also die Speicherkapazität (oder *Energiedichte*) ergibt sich über den folgenden Zusammenhang:

$$Q_s = m c_p \cdot \Delta T = V \varrho \cdot c_p \cdot \Delta T$$

wobei

V ... Volumen des Speichermediums

$\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$... maximale Temperaturdifferenz
des Speichermediums

- **Wärmeinhalt Wasser bei $\Delta T = 85^\circ\text{C}$:** $\sim 100 \text{ kWh/m}^3$, $1000 \text{ MWh/10.000m}^3$
- **Wärmeinhalt Stahlbeton $\Delta T = 85^\circ\text{C}$:** $\sim 60 \text{ kWh/m}^3$, $600 \text{ MWh/10.000m}^3$
- **Nutzenergieertrag Flachkollektoren:** $400 \text{ kWh/(m}^2 \text{ a)}$, $400 \text{ MWh/(1000m}^2 \text{ a)}$
(laut *Schreier et al.*; Der Ertrag hängt u.a. vom erwarteten Temperaturniveau ab)

	Dichte ϱ	Wärmekapazität c_p	bzw. c_v
Wasser	1000 kg/m^3	4187 J/(kg K)	$4187 \text{ kJ/(m}^3 \text{ K)}$
Beton (Porosität 0)	2400 kg/m^3	1000 J/(kg K)	$2400 \text{ kJ/(m}^3 \text{ K)}$

Tabelle 5.2: Angenommene Stoffdaten unter Normalbedingungen. *Datenquelle: Sedlbauer/Krus: Bauphysik - Skript zur Vorlesung, Fraunhofer Institut für Bauphysik, Holzkirchen, 2009*

	Augarten	Arenbergpark
Wärmemenge durch Solarthermie	1080 MWh/a (1128 MWh/a)	1760 MWh/a (2700 MWh/a)
Speicherpotential des Wasserinhalts	1611 MWh	1556 MWh
Speicherpotential des Betonmantels	890 MWh	833 MWh
Gesamtenergie	2501 MWh	2389 MWh

Tabelle 5.3: Errechnete jährliche Energieerträge (gerundet) der beiden Flakturmpaare ohne Verluste bei einer fixen Temperatur von 85°C (Vorausgesetzt, der Speicher kann auf 10°C abkühlen - tatsächlich wären wohl 30°C Rücklauftemperatur realistischer.) Die Werte in den Klammern beziehen sich auf die jeweiligen Klammerwerte der *Tabelle [5.1]*. Wärmeverteiler- oder Hilfssysteme wurden außer Acht gelassen. Der Speicher wird rein statisch betrachtet und es findet weder Be- noch Entladung statt (reine Richtwerte aus einem theoretischen Modell).

Natürlich könnten die Heißwasserspeicher nicht nur über die Kollektoren am eigenen Dach des Flakturmpaares beladen werden, sondern auch über die des anderen Paares oder über jegliche andere Solarthermiequelle der Stadt (sofern die Systeme in das Fernwärmenetz integriert werden). Das verfügbare Volumen bei Kombination der beiden Speichertürme ist sehr groß. Die technische Realisierung soll hier jedoch nicht weiter diskutiert werden (dazu wären grundlegende Untersuchungen notwendig). Die Abschätzung, wie viele Haushalte durch ein derartiges Modell versorgt werden könnten, ist interessant. Das Ergebnis illustriert *Tabelle [5.4]*.

Gesamtwärme beider Flakturmpaare im Jahr	Wärmebedarf für Raumheizung in Wien	Versorgbare Wohnungen bei gemittelten 60m²
4890 MWh/a	140 kWh/(m ² a)	582

Tabelle 5.4: Mit Energie aus den Speichern versorgbare Wohnungen. Der Sanierungszustand der Gebäude wurde vernachlässigt. Die Berechnungen orientieren sich an den technischen Basisdaten der E-Control Austria. Nicht berücksichtigt wurde die Wärmeabstrahlung (durch die dichte Bauweise und Bausubstanz) und die dadurch auftretende Mehrfachnutzung der Abwärme in Städten. Dadurch ließe sich die Zahl der versorgbaren Wohnungen im Winter wohl noch etwas nach oben korrigieren, die Vorlauftemperatur würde sinken und mehr thermische Energie zur Verfügung stehen.

Quelle: E-Control Austria 2010

Wenn man einen solaren Deckungsanteil von 50% annimmt, also davon ausgeht, dass nur die Hälfte des Wärmebedarfs des Einzugsgebiets durch das Flakturmsystem gedeckt werden soll und der Rest durch z.B. Fernwärme (Leitungsverluste vernachlässigt), verdoppelt sich die Zahl der versorgbaren Haushalte.

	München	Friedrichshafen
Inbetriebnahme	2006	1996
Versorgungsgebiet (Wohnungen, m²)	300 24.800m ²	570 39.500m ²
Kollektorfläche, Speichervolumen	2.900m ² 5.700m ³	5.600m ² 12.000m ³
Nutzwärmelieferung, Solare Deckung	1.080 MWh/a 47%	1.915 MWh/a 47%

Tabelle 5.5: Errechnete Werte zweier Vergleichsanlagen in Deutschland nach langfristiger Laufzeit. Die Investitionskosten der beiden Anlagen beliefen sich je auf etwa 3 Mio. Euro, die Preise pro “kWh” unterscheiden sich jedoch, da bei der Münchner Anlage (24ct/kWh) eine Wärmepumpe zum Einsatz kommt und dieses Projekt noch nicht so lange läuft wie das in Friedrichshafen (19ct/kWh).

Datenquellen: ZAE Bayern (20), Mangold (12)

Vergleicht man dieses Modell mit saisonalen Heißwasser-Pilotprojekten ähnlicher Dimensionierung in Deutschland (Tabelle [5.5]), zeigt sich, ein solches System ist durchaus realistisch, aber bringt erst nach langfristigem Betrieb stabile Erträge (vorausgesetzt ist gute Isolation der Gebäude, also Neubauten - oder Gebäude nicht älter als 14 Jahre). Durch komplexe Hilfs- und Leitungssysteme lässt sich die Energieausbeute zudem noch steigern. Moderne Beheizungsverfahren vorausgesetzt, wird der Wärmespeicher nie vollständig entladen. Auch lässt sich das Speichervolumen verringern bzw. besser nutzen, indem man ausschließlich die für den Winter benötigte Energiemenge berücksichtigt. Unumgänglich ist die Installation einer Einheit zur Wasserentnahme aus unterschiedlichen thermischen Schichten (*Schichtladeeinheit*), denn dadurch vergrößert sich das Angebot an Temperatur, die Anlage arbeitet gleichzeitig effizienter und es kann schneller auf die Nachfrage eingegangen werden.

Kommt man nun auf die **Wärmeverluste** zu sprechen, wird deutlich, dass ein reiner Betonspeicher nicht zielführend ist. Die Transmissionsverluste über die Speicher Oberfläche sind ohne Isolation erheblich. Im Weiteren wird gezeigt, inwieweit man Energieverluste minimieren kann. Zunächst einige energietechnisch-relevante Vereinfachungen und Annahmen:

- Der Tankspeicher wird, wie in Grafik [5.11] gezeigt, quaderförmig angenommen. Nicht-lineare Randphänomene (höhere Wärmeleitfähigkeit von Beton) wurden bei der Berechnung vernachlässigt, das Beton-Wassersystem befindet sich im Gleichgewicht (Ausgleich durch Konvektion) und es wird nur Wärme nach Außen an die Umgebung abgegeben (Transmissionsverluste). Alle Temperaturen werden als mittlere Temperaturen verstanden. In diesem Modell wird davon aus-

gegangen, dass sich alle Vorgänge auf lange Sicht ausgleichen. Der Speicher wird dann im “Ruhezustand” (Nach der Aufladung, stabile Mischtemperatur) in der Relaxationsphase betrachtet.

- Vernachlässigt wurden die Wärmeleitung zwischen Beton und Wasser, sowie die Wärmeübergangskoeffizienten der Umgebungsluft und dem Speicherwasser. Die Grundfläche, der Speicherboden, trägt durch Kontakt mit dem wärmeren Erdreich geringfügig zum Wärmeverlust bei. Im Modell wird der Speicher aber als quasi frei schwebend betrachtet, alle Seitenflächen sind gleich.

Zusätzlich wurde auch die folgende Vereinfachung getroffen: Wasser- und Betonvolumen wurden zusammengefasst und mit der mittleren Wärmekapazität beider Stoffe identifiziert. Da sich die Speichertürme sehr ähnlich sind, wird hier nur *einer* näher behandelt. Es gilt, in Bezug auf *Tabellen [5.1] bis [5.3]*, für den **Speicherturm Augarten**:

- **Gesamtvolumen bzw. -masse:** 32.000m³, 54.398t
- **Oberfläche des Betonmantels:** 6310m²
- **Gemittelte Wärmekapazität $\hat{c}_v$ bzw. $\hat{c}_p$:** 3300 kJ/(m³K), 2600 J/(kgK)
- **Jahresmitteltemperatur in Wien** (laut *Statistik Austria*): $T_a = 10^\circ\text{C}$
- **Angenommene max. Speichertemperatur** (konst.): $T_i = 95^\circ\text{C}$

Es lässt sich nun zeigen (*siehe auch Seiten 21-22*), dass bei Verwendung von mittleren Temperaturwerten (über eine bestimmte Zeitspanne) die Ergebnisse bereits nach etwa 7 Tagen mit denen über diskrete Messwerte berechneten übereinstimmen. Daher können die Außentemperatur “ T_a ” wie auch die Innentemperatur “ T_i ” als mittlere Jahreswerte angenommen werden.

Für die Verlustleistung in [W] gilt also zunächst:

$$q_v = A \cdot k \cdot (T_i - T_a)$$

wobei “ k ” in [W/(m² K)] der indirekt materialspezifische Wärmeübergangskoeffizient (mit “ λ ” als Wärmeleitkoeffizient und “ d ” als Stoffdicke) ist:

$$k = \lambda/d$$

“ d ” kann als Dicke der Dämmschicht angesehen werden. Der Verlust (*Stagnation*, “Selbstentladung”) über die Oberfläche und nach der Zeit ergibt sich dann zu:

$$Q = q_v \cdot \Delta t$$

wobei

A ... betrachtete Kontaktfläche

T_1, T_2 ... Stofftemperaturen der beteiligten Medien

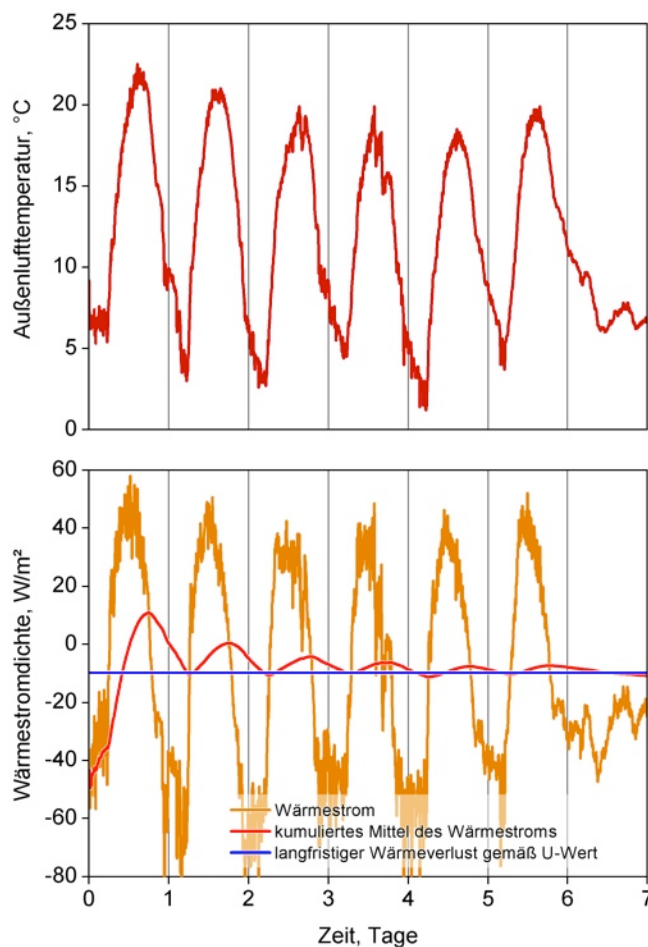
Δt ... betrachtetes Zeitintervall

Diese Definition setzt stationäre Verhältnisse voraus und ist für Momentanwerte bei zeitlich veränderlichen Temperaturen nicht geeignet. Verlaufen Temperaturänderungen jedoch periodisch zu einander, ist die Abweichung vernachlässigbar klein. Daher lässt sich der Zusammenhang auch für reale instationäre Bedingungen bei über längere Zeitspannen summierte Transmissionswärmeverluste durch die Querschnittsfläche verwenden. Ein Beispiel in *Grafik [5.11b]* unterstreicht mit tatsächlichen Messdaten die Eignung von mittleren Temperaturwerten in der Praxis.

Zunächst ist die Isolation nur reiner Beton mit hoher Wärmeleitfähigkeit, dann Polystyrol an der Außenseite (ein Standarddämmstoff der Bauindustrie, günstig und effektiv bereits bei geringer Dicke). Die Wärmekapazität des Dämmstoffs wird dabei aber vernachlässigt. Dazu zunächst einige Stoffdaten in *Tabelle [5.6]*.

Um nun von der Verlustleistung auf den tatsächlichen Wärmeverlust in “J” (“Ws”) zu kommen, fehlt eine absolute Zeitkomponente. Dieser Parameter nennt sich *Volllaststunden* (“VLS”) in der Energietechnik. Es handelt sich dabei um einen Zahlenwert, der angibt, wie hoch die Ausnutzung einer Anlage ist: Wie viele Stunden diese Anlage gelaufen wäre, um die Jahresenergieproduktion zu erreichen, wenn sie nur unter Volllast gelaufen wäre und sonst stillgestanden hätte. Ein Jahr hat 8760 Stunden, daher ist das der Maximalwert. Dieser wird auch für das Flakturmmodell verwendet, denn der Speicher wird über den Zeitraum eines Jahres betrachtet (statisch, ungeachtet der Be- und Entladungsvorgänge): **VLS = 8760h**. Daher ergibt sich für den Wärmeverlust:

$$Q = \text{VLS} \cdot q_v$$



Grafik 5.11b: Die Abbildung zeigt den instationären Wärmestrom durch die Außenoberfläche eines Vollziegelmauerwerks ($d=40\text{cm}$, $k = 1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$) in Orange und vergleicht den kumulierten Mittelwert (rot) mit dem über den k-Wert berechneten mittleren Wärmeverlust (blau). Die Aussenlufttemperaturen sind reale, fünfminütig-scharfe Messdaten von insgesamt 7 Tagen. Das Mittel der Aussenlufttemperaturen in diesen 7 Tagen beträgt $11,9^\circ\text{C}$. Die instationären Schwankungen heben sich innerhalb der Zeitspanne auf und nähern sich dem durch den k-Wert vorhergesagten Mittelwert an.

Quellen: IBP Holzkirchen Mai 2006; Heindl: *Der Wärmeschutz einer ebenen Wand bei periodischen Wärmebelastungen*, 1. Teil, 1966; Ebel: *Der U-Wert - stationär oder instationär*, *Bauphysik Zeitung* 2002

	λ	d
Stahlbeton	$2,1 \text{ W/(mK)}$	$2,5\text{m}$
Polystyrol (Styropor)	$0,025 \text{ W/(mK)}$	$0,2\text{m}$

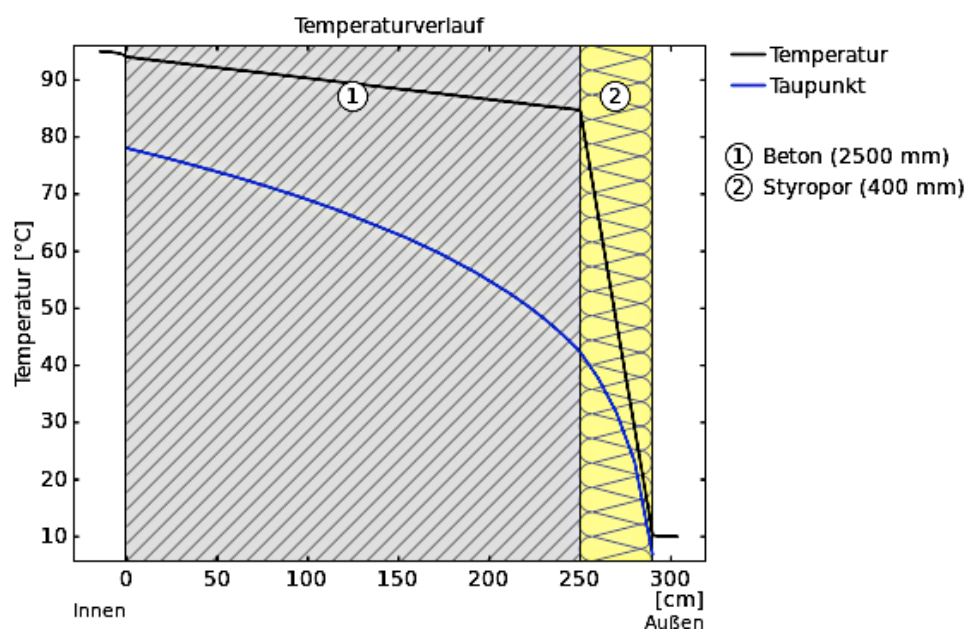
Tabelle 5.6: Materialspezifische Wärmeleitkoeffizienten und die im Modell verwendete Dicke.

Quelle: Sedlbauer/Krus, *Bauphysik - Skript zur Vorlesung*, Fraunhofer Institut für Bauphysik, Holzkirchen 2009

Dies wird nun einerseits ungedämmt, also für reinen Beton, berechnet und andererseits mit 20cm bzw. 40cm Polystyrol als Verkleidung. *Tabelle [5.7]* listet die Ergebnisse bereits in “MWh” Vergleichswerten. Es wird deutlich, dass ein solches Tankspeichersystem nur mit ausreichend Isolation rentabel ist (in Relation zum Speichervolumen). Eine 20cm starke Verkleidung ist das Minimum. *Grafik [5.12] und [5.13]* illustrieren den Temperaturverlauf an den einzelnen Schichten unter Annahme fixer Innen- und Außentemperaturen. Die effektiv nutzbare Speichertemperatur liegt an der Grenze von Beton zu Polystyrol, im Modell beträgt diese rund 85°C (mineralische Dämmung könnte hier auf Dauer wesentlich höhere thermische Stabilität bieten).

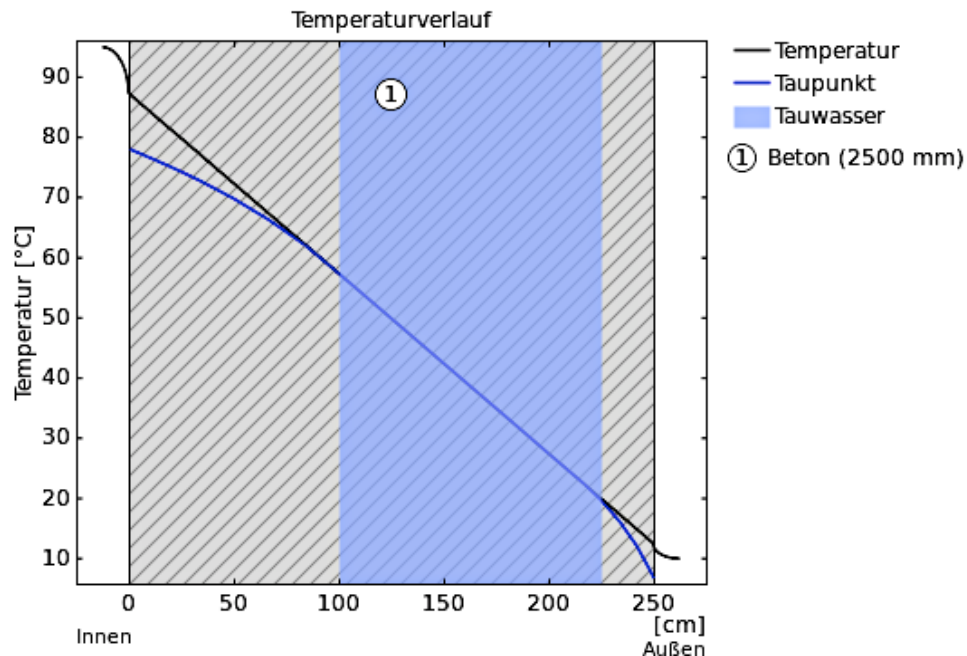
	Verlustleistung q_v	Wärmeverlust Q	Heizbare Wohnungen
Stahlbeton 2,5m	451 kW	3947 MWh	470
Polystyrol 20cm	67 kW	587 MWh	70
Polystyrol 40cm	34 kW	298 MWh	35

Tabelle 5.7: Gerundete Rechenergebnisse des Wärmeverlustes durch die Tankwand des Speicherturmes Augarten. Der Wert für “heizbare Wohnungen” bezieht sich (in Analogie zur versorgbaren Wohnungszahl bei 140 kWh/(m²a) und der Mittelung auf 60m² Wohnungen - vgl. *Tabelle [5.4]*) auf die Anzahl der Wohnungen, die mit dieser Verlustwärme beheizbar wären, er dient also rein der Veranschaulichung. Eine Wärmedämmung ist unumgänglich.



Grafik 5.12: Die Abbildung zeigt den Temperaturverlauf bei Isolation (schwarze Linie), einer Innentemperatur von 95°C und einer Außentemperatur von 10°C. An der Grenzsicht von Beton und Polystyrol beträgt die Temperatur immer noch 85°C, das wäre die effektiv nutzbare Speichertemperatur. Die Taupunkttemperatur kennzeichnet jene Temperatur, bei der Wasserdampf kondensieren würde. Solange die Temperatur über der Taupunkttemperatur liegt, entsteht kein Tauwasser. Falls sich die Kurven berühren, bildet sich an diesen Stellen Tauwasser. *Quelle: Ralf Plag, u-wert.net UG*

Der Wärmeverlust ist natürlich von der herrschenden Temperaturdifferenz abhängig. In kalten Monaten fließt nach den Grundregeln der Thermodynamik mehr thermische Energie nach außen. Die genannten Aussagen gelten daher pauschal über lange Zeit.



Grafik 5.13: Die Abbildung zeigt den Temperaturverlauf ohne Isolation (schwarze Linie), einer Innentemperatur von 95°C und einer Außentemperatur von 10°C. Es entsteht eingeschlossenes Tauwasser im Beton, was bei Temperaturen um den Gefrierpunkt im Winter zu Frostsprengungen führen kann und auch sonst durch Bildung von Schimmelpilzen den Baustoff schädigt. *Quelle: Ralf Plag, u-wert.net UG*

Es lassen sich aber noch weitere Aussagen über das Auskühlverhalten eines derartigen Heißwassertankspeichers treffen. Zum einen lässt sich über die Zeitspanne eines Jahres die Abnahme der Temperaturdifferenz (grundlegender Parameter der Wärmespeicherung) visualisieren und zum anderen kann der Verlauf des Speicherinhalts in Prozent dargestellt werden (wobei Be- und Entladevorgänge wieder vernachlässigt werden und der Speicher statisch angenommen wird).

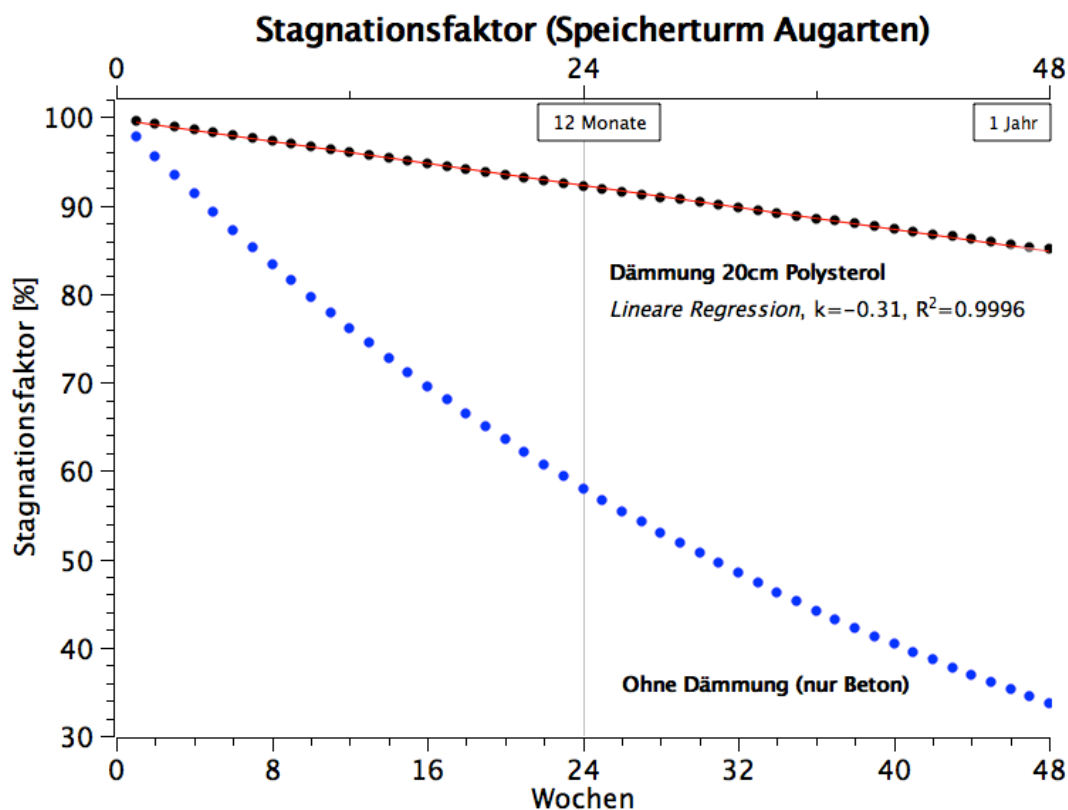
Zunächst zur *Stagnation*, der *Selbstentladung* (in Analogie zu den Seiten 21-22): Es wird solange Wärme mit der Umgebung ausgetauscht, bis ein Temperaturgleichgewicht eintritt. Hierzu wird der Stagnationsfaktor benutzt, mit 100 multipliziert bekommt man prozentuale Teilwerte über eine gewisse Zeitspanne, die in diesem Modell in Wochen gemessen werden soll. Ein Jahr hat in etwa 48 Wochen (bei 4 Wochen pro Monat, was ausreichend genau ist, da der Speicher sowieso nie ein volles Jahr "stillstehen" würde). Eine Woche hat 604800 Sekunden. "t" soll daher in Schritten von Wochen diskret verlaufen. Durch die Vereinfachung auf symmetrische 48 Wochen im Jahr ergibt sich bei 24 Wochen (Sommer-Winter Grenze) die ausschlaggebende "Halbwertszeit". Für den Stagnationsfaktor "η" gilt also:

$$\eta(t) = \exp\left(\frac{-\Delta t \cdot Ak}{m \cdot c_p}\right) \cdot 100$$

Wobei “A” wieder die Oberfläche ist und “k” der Wärmedurchgangskoeffizient. Für “m” und “c_p” werden die gemittelten Werte des Augartenspeichers verwendet:

- **Gesamtvolumen bzw. -masse:** 32.000m³, 54.398t
- **Oberfläche des Betonmantels:** 6310m²
- **Gemittelte Wärmekapazität $\hat{c}_v$ bzw. $\hat{c}_p$:** 3300 kJ/(m³K), 2600 J/(kgK)
- **Jahresmitteltemperatur in Wien (laut Statistik Austria):** T_a = 10°C
- **Angenommene max. Speichertemperatur (konst.):** T_i = 95°C

Temperaturdifferenzen spielen hier vorerst keine Rolle. Man erhält lediglich den prozentualen Verlust der Energiedichte über ein Jahr “Stillstehen”. Siehe *Grafik [5.14]*.



Grafik 5.14: Die Stagnation “ η ” aufgetragen über die Zeit in Wochen. Die Abbildung verdeutlicht die Unumgänglichkeit einer thermischen Dämmung. Bei reinem Beton (blaue Kurve) stehen schon nach einem halben Jahr nur noch rund 60% der anfänglichen Energiedichte zur Verfügung. Der Wirkungsgrad ist schlecht. Bereits bei 20cm Polystyrol-Isolation sind die Verluste so gering, dass das Stagnationsverhalten beinahe linear verläuft. Interessant ist die “Halbwertszeit” bei 24 Wochen, wenn das Auskühlen im Winter wieder durch Aufladen im Sommer ersetzt werden würde.

Komplizierter wird es nun in Anbetracht des Temperaturdifferenzverlaufes. Als Ausgangspunkt kann die Ladekurve eines Kondensators und ihre mathematische Beschreibung dienen. Alle Werte lassen sich gut an das Speichermodell uminterpretieren und anpassen.

Im Detail bedeutet das: $T_i = f(t, T_a(t))$, da aber “ T_a ” eine konstante Normaltemperatur ist, reduziert sich die Abhängigkeit auf: $T_i = f(t)$. Wie für einen Kondensator oder Zerfallprozess schreibt sich die Entladegleichung mathematisch ähnlich:

$$T_i = T_0 \cdot \exp(-t/\tau)$$

wo “ τ ” die *Eigenzeit* in [s] ist (nach der “ T_i ” auf $1/e = 36,8\%$ von “ T_0 ”, dem Ausgangswert der Temperaturdifferenz, abgesunken ist) und es gilt:

$$\tau = R_{th} \cdot C_{th}$$

mit “ R_{th} ” als thermischem Widerstand und “ C_{th} ” als Wärmekapazität, wobei

$$R_{th} = d \cdot (\lambda A)^{-1}$$

mit den bereits bekannten Dämmparametern gilt:

	λ	d
Stahlbeton	2,1 W/(mK)	2,5m
Polystyrol (Styropor)	0,025 W/(mK)	0,2m

Weiters beinhaltet

$$C_{th} = \hat{c}_v \cdot V$$

die gemittelte Wärmekapazität pro Volumseinheit und das Gesamtvolumen.

Fragt man sich nun, wann der Speicher nur noch die Hälfte der anfänglichen Temperaturdifferenz “ T_0 ” aufweist, muss die Eigenzeit vorerst berechnet und dann die Exponentialfunktion auf die folgende Form gebracht werden:

$$t = -\tau \cdot \ln(1/2)$$

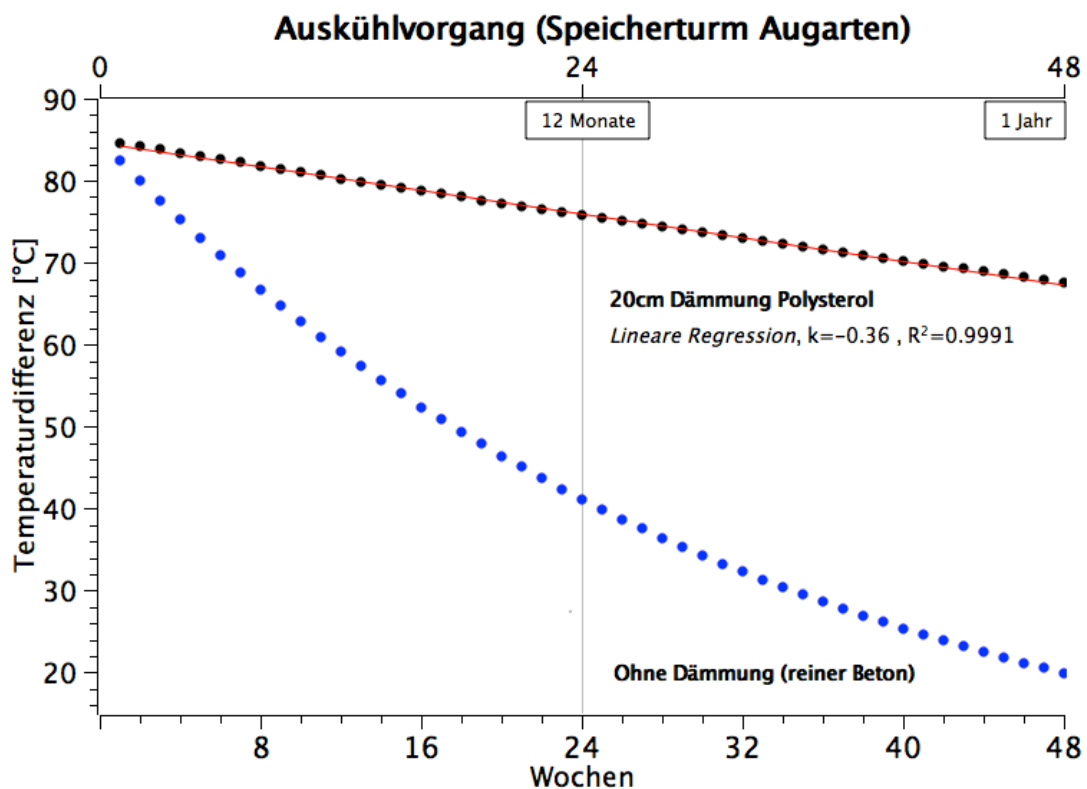
“ τ ” ist dann allgemein bekannt als *Halbwertszeit*.

In *Tabelle [5.8]* sind die Ergebnisse der Werte des Speicherturms Augarten dargestellt.

	Eigenzeit τ	Halbwertszeit $\tau_{1/2}$
Stahlbeton 2,5m	7,6 Monate	5,3 Monate
Polystyrol 20cm	4 Jahre	2,8 Jahre
Polystyrol 40cm	8 Jahre	5,6 Jahre

Tabelle 5.8: Anschauliche (und gerundete) Eigenzeiten. Denkt man keine Dämmung an, sind die Verluste in Relation zum Speichervolumen unverträglich hoch. Bereits 20cm Dämmstoff erzielen aber bereits sehr gute Ergebnisse. Realistischer Weise würde eine solche Anlage nicht länger als ein halbes Jahr “auskühlen”, denn den zweiten Jahresteil wird sie wieder aufgeladen.

Zu guter Letzt lässt sich auch dieses Verhalten von “ T_i ” visualisieren. Hierzu wurde für die Zeit wieder als Einheit Wochen gewählt. *Grafik [5.15]* stellt den Jahresverlauf der Temperaturdifferenz dar. Die Außentemperatur variiert dabei nicht mit der Zeit.



Grafik 5.15: Das Auskühlverhalten (Temperaturdifferenz T_i), ähnlich der Entladung eines Kondensators, nach der Zeit. Die Abbildung verdeutlicht erneut die Unumgänglichkeit einer thermischen Dämmung. Bei reinem Beton (blaue Kurve) stehen nach einem halben Jahr nur noch rund 40°C als Temperaturdifferenz zur Verfügung. Der Wirkungsgrad ist daher sehr schlecht. Bereits bei 20cm Polystyrol-Isolation sind die Verluste so gering, dass das Verhalten beinahe linear verläuft, aber es gibt noch Verbesserungsmöglichkeit. Die doppelte Menge an Dämmstoff könnte die Temperaturdifferenz noch besser aufrecht erhalten.

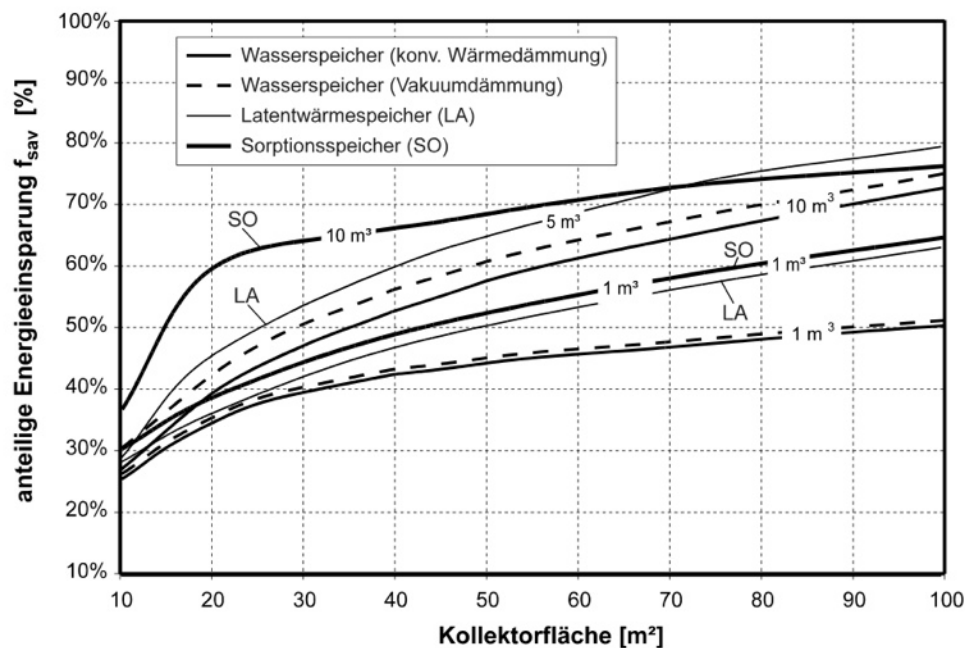
Abschließend bleibt zu sagen, dass besonders die letzte Abbildung (*Grafik [5.15]*) eine Dämmung mit mehr als 20cm Dämmstoff vorschlägt. Nach oben hin findet sich eindeutig noch Spielraum und die Möglichkeit an Isolationsgewinn. 40cm Dämmstoff sollten die Temperaturdifferenz um die 80°C auch nach 1 Jahr noch halten können.

Das Hauptproblem an einer Umsetzung dieses Modells wäre mit Sicherheit der Sanierungsbedarf der Flaktürme und die Einbringung von Wärmetäuschern bzw. eines Schichtbeladesystems. Eine Anbindung an das (Fern)wärmenetz müsste vorausgesetzt sein, die politische Situation wäre daher auch nicht zu unterschätzen.

6. Schlussfolgerungen

Der aktuelle Stand der Technik sind Heißwasserspeicher, bei ihnen lässt sich kaum noch etwas verbessern, wie zahlreiche Pilotanlagen demonstriert haben (dabei stechen besonders Projekte in nördlichen Regionen hervor). Die vielversprechenden (bessere Ausbeute) Alternativen sind noch Gegenstand der Forschung: Latentwärmespeicher (auf Basis von *Phase Change Materials*, „PCM“) und thermochemische Speicher.

Wie in *Grafik [6.1]* dargestellt, zeigt sich, dass es beim Einsatz von Latentwärme- oder Sorptionsspeicher theoretisch bereits mit einem Speichervolumen von rund 1 m^3 (zuzüglich 750 Liter für einen konventionellen Kombispeicher) und Kollektorflächen im Bereich von etwa 45 m^2 bis 50 m^2 möglich ist, im Vergleich mehr als die Hälfte des Wärmebedarfs (z.B. den eines Einfamilienhauses) durch Solarenergie zu decken. Bei einem konventionellen Heißwasserspeicher wäre hierzu (bei einem Volumen von 10 m^3) eine Kollektorfläche von 35 m^2 erforderlich.



Grafik 6.1: Anteile zur Energieeinsparung für diverse Speichertechnologien und -volumina in Abhängigkeit von der Kollektorfläche (Flachkollektoren). Bei den Speichervolumina von Latent- und Sorptionsspeichern ist zu berücksichtigen, dass es sich um Effektivwerte handelt (Idealisierungen). Die tatsächlichen Volumina können um Faktor 2 größer sein, da noch Wärmeüberträger bzw. Behälter mit einberechnet werden müssen. *Quelle: SOBIC (21)*

Thermochemische Speicher sind (noch) zu teuer und weisen praktisch einen zu geringen Wirkungsgrad auf. Der nächste Schritt für Raumwärme liegt daher darin, das Medium Wasser gegen PCM auszutauschen, um so von höherer Speicherdichte bei geringen

gerem Volumen zu profitieren. Moderne Gebäude weisen verringerten Wärmebedarf sowie geringere Heizungs-Vorlauftemperaturen auf, was einerseits den solaren Deckungsanteil verbessert und andererseits werden dadurch bestimmte PCMs bei Temperaturen unter 60°C bevorzugt: In diesem Bereich kommt es zu bis zu achtfach größerem Energieinhalt („Faktor 8 Speicher“ sind daher theoretisch möglich). Saisonale Heißwasserspeicher wurden bereits erfolgreich in Pilotanlagen getestet (die Rentabilität ist sehr gut), vergleichbare PCM-Systeme müssen folgen, um den solaren Anteil ökonomisch weiter anzuheben.

Vor allem in Österreich gibt es diesbezüglich kaum Entwicklungsprojekte und Realisierungskonzepte, die es zur Marktreife geschafft haben. Es lässt sich nur recht unpräzise beurteilen, ob und wie sich ein möglicher Markt an Latentwärmespeichern gestalten könnte. Geeignete Speichermedien müssen dazu erst in Großproduktion gehen und die passende Tanktechnologie entwickelt werden. PCM-Verkapselungen in Baumaterial zur passiven Regelung der Temperatur von Gebäudeinnenräumen andererseits ist mittlerweile gut etabliert und findet in modernen Passivbauten (Bürogebäude, Einfamilienhäuser) häufig Verwendung.

Solarthermie bietet durch ihre hohe Effizienz (momentan bis zu 60%) beim Umstieg von fossilen auf erneuerbare Energieträger das meiste Potenzial. Das bestehende Wärmenetz ist dazu aber nicht unbedingt notwendig (Solarthermie funktioniert sehr gut lokal). Durch die unterschiedlichen Temperaturniveaus der Einspeiser (beispielsweise Solarthermie und Fernwärme) und der Abnehmer (sanierte und unsanierte Bauten) wäre eine Aufteilung des Wärmenetzes in Teilnetze (Einzelkreise mit fixem Temperaturbereich) notwendig. Die thermische Energieversorgung müsste, ähnlich einem „Smart Grid“ bei Stromnetzen, dezentralisiert werden, um auf solche Technologien wie Solarthermie im Wärmenetz eingehen zu können. Fluktuierende Energieerzeugung (beispielsweise durch bewölkten Himmel bei Solarthermie) würde auch hier durch Reserve- oder eben Speichersysteme ausgeglichen werden. Ein Problem stellt diese Angebotsschwankung allerdings im saisonalen Bereich dar, wo kurzfristige Ausgleichsreserven nicht unterstützend wirken können.

Wie das Modell der Flaktürme als Heißwasserspeicher zeigt, ist es technisch auch in Städten möglich, Überschusswärme von verschiedenen Quellen einzulagern. Durch Erfahrungen aus ähnlichen Demonstrationsanlagen und deren Optimierungsentwicklungen können Deckungsgrade von bis zu 65% erreicht werden, eine detaillierte Planungsphase und Simulation mit geeigneten Unterstützungstechnologien vorausgesetzt. Die Investitionen in einen derartigen Speicher machen nur Sinn, wenn dadurch erhebliche Reduktion von CO₂-Emissionen entsteht bzw. Bedarf derart gedeckt wird, dass (zumindest im Sommer) auf ein Heizwerk verzichtet werden kann. Es könnten jedoch nicht signifikant viele Wohnungen mit einem solchen System versorgt werden, wie das Modell zeigt. Die Anlage wäre also nicht relevant wirtschaftlich nutzbar.

Anhang



Grafik A.1: Innenansicht des TANK-Speichers der Münchner Ackermannbögen. Der Heißwasserspeicher ist rund 26x16m groß und enthält ein Schichtbeladesystem, welches gut erkennbar an der Mittelkonstruktion angebracht ist. *Quelle: Stadtwerke München GmbH*



Grafik A.2: LINKS: Aussenansicht des noch unfertigen TANK-Speichers der Münchner Ackermannbögen. Die Konstruktionsphase ist hier noch mäßig fortgeschritten. RECHTS: Endphase des Speichers mit noch fehlender Verkleidung. *Quelle: Stadtwerke München GmbH*

7. Literaturverzeichnis

- (1) Ataer, Ercan O.: Storage of Thermal Energy, Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Gazi University, Ankara/Turkey, 2006
- (2) Baehr, Hans Dieter/Kabelac, Stephan: Thermodynamik/Grundlagen und technische Anwendungen, 13. Auflage, Berlin Heidelberg, Springer Verlag, 2006
- (3) Beckmann, Georg/Gilli, Paul Viktor: Thermal Energy Storage/Basics-Design-Applications to Power Generation and Heat Supply, Wien, Springer Verlag, 1984
- (4) Demtröder, Wolfgang: Experimentalphysik 1, 3. Auflage, Berlin Heidelberg, Springer Verlag, 2005
- (5) Drake Landing Solar Community Energy Report: Annual Report for 2008-2009, SAIC Science Applications International Corporation, Canada, 2010
- (6) Haberl/Letz/Bales/Streicher/Hadorn et al.: IEA-EHC Solar Heating and Cooling Programme Task 32 Report - Advanced Storage Concepts for Solar and low Energy Buildings, Institut für Solartechnik Rapperswil/Schweiz, 2008
- (6b) Halliday et al.: Fundamentals of Physics, Extended 6th Edition, Wiley-VCH 2007
- (7) Heinz, Andreas: Application of Thermal Energy Storage with PCM in Heating Systems, Dissertation, Technische Universität Graz, 2005
- (8) Heinz, Andreas et al.: Austrian Masterplan Thermal Energy Storage, Preliminary Report, ASIC Austria Solar Innovation Center, 1. Oct. 2010 - 31. Dec. 2011
- (9) Kerskes, H.: Seasonal Thermal Storage/State of the Art and Future Aspects, Institute for Thermodynamic and Thermal Engineering (ITW), Stuttgart, 2011
- (10) Lohse, R./Urbaneck T./Platzer, B. et al.: Optimization of a Stratification Device for Thermal Storage Tanks. Chemnitz University of Technology, 2008
- (11) Mangold, D. et al.: Solare Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicher, Forschungsbericht zum BMU-Vorhaben 0329607L, Programmbegleitung für Solarthermie2000Plus, SOLITES, Stuttgart

- (12) Mangold D.: Seasonal Storage - a German Success Story, Article in Sun & Wind Energy Issue 1/2007
- (13) Mangold D./Schmidt, Th.: Saisonale Wärmespeicher/Neue Pilotanlagen im Programm Solarthermie2000Plus und Forschungsperspektiven, Statusseminar Thermische Energiespeicher, SOLITES, Freiburg, 2006
- (14) Momota, M. et al.: A Fundamental Study of the Practical Use of the Vertical Ice Storage Tank, Tokyo Denki University, 2006
- (15) Momota, M. et al.: Fundamental Study on "Thermal Transportation System using Ice & Water by one-pipe Loop Systems"/The maximum Ice Packing Factor for Transportation of Block Ice, Tokyo Denki University, 2006
- (16) Nolting, Wolfgang: Grundkurs Theoretische Physik 4/Spezielle Relativitätstheorie - Thermodynamik, 7. Auflage, Berlin Heidelberg, Springer Verlag, 2010
- (17) Oertel, Dagmar: Energiespeicher - Stand und Perspektiven/Sachstandbericht zum Monitoring "Nachhaltige Energieversorgung", TAB - Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim deutschen Reichstag, Arbeitsbericht Nr. 123, Berlin 2008
- (18) Paksoy, H./Snijders, A./Stiles L.: State-of-the-Art Review of Aquifer Thermal Energy Storage Systems for Heating and Cooling Buildings
- (19) Purkarthofer, G.: Sorptionsspeicher/Langzeitspeicherung von Wärme mit hohen Energiedichten, AAE INTEC, Erneuerbare Energien, Gleisdorf, 2002
- (20) Reuss, Manfred: Saisonale Wärmespeicherung im Untergrund, ZAE Bayern - Zentrum für angewandte Energieforschung, Garching
- (21) Statusseminar: Thermische Energiespeicherung - mehr Energieeffizienz zum heizen und Kühlen, Fraunhofer Solar Building Innovation Center SOBIC, Freiburg, 2006
- (22) Schmidt, Thomas/Müller-Steinhagen, Hans: The central Solar Heating Plant with Aquifer Thermal Energy Store in Rostock - Results after four years of Operation, Solar- und Wärmetechnik Stuttgart (SWT), EuroSun Conference, Freiburg, 2004
- (23) Schmidt, Thomas/Müller-Steinhagen, Hans: Erdsonden- und Aquifer-Wärmespeicher in Deutschland, Solar- und Wärmetechnik Stuttgart (SWT), OTTI Profilforum oberflächennahe Geothermie, Regenstauf/Deutschland, 2005

- (24) Streicher, W./Heinz, A. et al.: Fortschrittliche Wärmespeicher/Erhöhung von solarem Deckungsgrad (...), Projekt zum IEA-SHC Task 32, Berichte aus Energie- und Umweltforschung Ausgabe 15/2007, nachhaltig wirtschaften, bmvit 2007
- (25) Tschernigg, Gundula/Stumpf, Stefan.: Studie Zukünftige Chancen der Solarthermie in Wien, WUA, AIT, Arsenal Research, 2008
- (26) Urbaneck, T./Platzer, B./Schirmer, U.: Advanced Monitoring of Gravel Water Storage, FUTURESTOCK 2003, International Conference on Thermal Energy Storage, Warschau/Polen, 2003
- (27) Weiss, W. et al.: Forschungsagenda Solarthermie, Berichte aus Energie- und Umweltforschung 14/2010, Herausgeber bmvit, AEE INTEC, Gleisdorf 2010
- (28) Weiss, W./Biermayr, P.: Potential of Solar Thermal in Europe, European Solar Thermal Industry Federation ESTIF, Brussels, 2009
- (29) Zalba, Belén/Cabeza, Luisa et al.: Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, Universidad de Zaragoza, EUITIZ "EDIFICIOB.3", Zaragoza/Spain, 2002
- (30) Zahlreiche Publikationen und Kurzreports von BINE Informationsdienst, Fachinformationszentrum Karlsruhe, Gesellschaft für wissenschaftlich-technische Information mbH, 2006-2010

Siehe auch nächste Seite!

Weitere Quellen aus den Fußnoten und Grafiken:

- *Abbildung 1.1:* Alternative World Energy Outlook, Ludwig Bolkow Systemtechnik GmbH 2007, <http://www.lbst.de>
- *Seite 5:*
 - (1) Weast: Handbuch für Chemiker und Physiker, 64th Edition 1984, CRC Press
 - (2) TREC, Desertec Foundation: Clean Power from Deserts, White Book 4th Edition
 - (3) Schreier et al.: Solarwärme optimal nutzen, Wagner & Co Verlag, 2005
 - (4) H. Schnell: Wärmeaustauscher, Energieeinsparung durch Optimierung von Wärme-
prozessen, 2 Auflage, Vulkan-Verlag Essen 1994
- *Tabelle 3.1:* K. Scheffler: Wasserdampftafeln/Thermodyn. Eigenschaften v. Wasser u.
Wasserdampf bis 800°C, Berlin 1981
- *Abbildung: 3.11:* M. Bakker, Thermochemical Storage Systems, ECN Biomass and
Energy Efficiency 2012, ECN-M—11-110, <http://www.ecn.nl>
- *Seite 75 und 89:*
 - (1) ESTIF 2008, Solar Thermal Markets in Europe, Trends and Statistics, Brussels
 - (2) EU 2008, EU Energy and Transport in Figures, Statistical Pocketbook 2007/2008,
Directorate-General for Energy and Transport
 - (3) Statistik Austria, Jährliche Erhebung des Energieaufwands 2006-2010
 - (4) Wille: Die Flaktürme in Wien, Berlin und Hamburg/Geschichte, Bedeutung und
Neunutzung, VDM-Verlag Saarbrücken 2008
 - (5) Pieler: Wr. Flaktürme, MA18 Studie, Architekturbüro Bernstein-Pieler, Wien 2003
 - (6) Schreier et al.: Solarwärme optimal nutzen, Wagner & Co Verlag, 2005
 - (7) Heindl: Wärmeschutz einer ebenen Wand bei period. Belastungen, Teil 1, 1966
 - (8) Ebel: Der U-Wert - stationär oder instationär, Bauphysik Zeitung, 2002
 - (9) Sedlbauer/Krus: Bauphysik - Skript zur Vorlesung, Fraunhofer Institut für Bau-
physik, Holzkirchen, 2009
- *Tabelle 5.1:* Wille: Die Flaktürme in Wien, Berlin und Hamburg/Geschichte, Bedeu-
tung und Neunutzung, VDM-Verlag, Saarbrücken 2008; Pieler: Wiener Flaktürme,
Studie für die MA 18, Architekturbüro Bernstein-Pieler, Wien 2003

Ich habe mich bemüht, sämtliche Inhaber der Bildrechte ausfindig zu machen und anzuführen. Sollte eine Urheberrechtsverletzung bekannt werden, ersuche ich um Meldung bei mir.

Sebastian Leitner

Kontakt

seb.leitner@gmail.com

Persönliches

Geboren 1987 in Wien, Österreich

Sprachen: Deutsch, Englisch (fließend in Wort u. Schrift), Italienisch (fortgeschritten)

Ausbildung

1997 - 2005: AHS BRG3 Kundmannngasse, Wien (humanistischer Zweig)

2006 - 2012: Physik Diplom an der Universität Wien

Universitäre Tätigkeiten

2008: Tutor der e-learning Plattform "Physikwiki" (Aufbereitung u. Multimedia)

2009: Mitgestaltung und Live-Präsentation auf der "Langen Nacht der Forschung" in Wien als Vertretung der Biophysik mit dem Thema "Das Rätsel der Wasserbrücke (inkl. Produktion von didaktischen Hochgeschwindigkeitsvideos und einer Website)

Sonstige Tätigkeiten

2005 - 2006: Zivildienst in der Krankenanstalt Rudolfstiftung, Wien (Neurochirurgie)

seit 2008: Einzelunternehmen der Branche Film- und Medienproduktion (SLfilm.at)

2012: "Flaktürme als saisonale Wärmespeicher" war der Gewinner des Wettbewerbs "EnergieNeuDenken" des bm:vit in Wien