

Sebastian Leitner

**Physik neuartiger Wärmespeicher:
Flaktürme als saisonale Wärmespeicher**

Diplomarbeit

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de/> abrufbar.

Dieses Werk sowie alle darin enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsschutz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlanges. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Auswertungen durch Datenbanken und für die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme. Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe (einschließlich Mikrokopie) sowie der Auswertung durch Datenbanken oder ähnliche Einrichtungen, vorbehalten.

Copyright © 2013 Diplomica Verlag GmbH
ISBN: 9783842839304

Sebastian Leitner

Physik neuartiger Wärmespeicher: Flaktürme als saisonale Wärmespeicher

Leitner, Sebastian: Physik neuartiger Wärmespeicher: Flaktürme als saisonale Wärmespeicher, Hamburg, Diplomica Verlag GmbH 2013

PDF-eBook-ISBN: 978-3-8428-3930-4

Herstellung: Diplomica Verlag GmbH, Hamburg, 2013

Zugl. Universität Wien, Wien, Österreich, Diplomarbeit, Februar 2013

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die Informationen in diesem Werk wurden mit Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden und die Diplomica Verlag GmbH, die Autoren oder Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für evtl. verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Alle Rechte vorbehalten

© *Diplom.de*, Imprint der Diplomica Verlag GmbH
Hermannstal 119k, 22119 Hamburg
<http://www.diplom.de>, Hamburg 2013
Printed in Germany

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
→ Wärmeleitfähigkeit	21
→ 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.

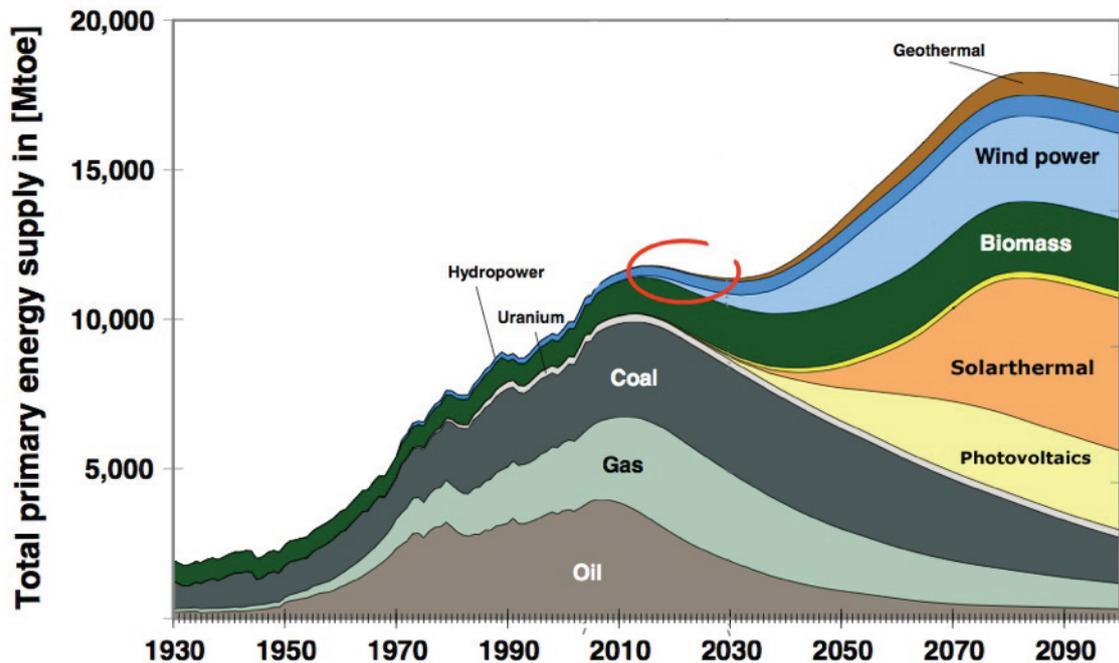
Im Folgenden wird eine grobe Gliederung der Arbeit gegeben:

- 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, mengenunabhängig). 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 demselben 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, T_2 (mit $T_1 > T_2$) die absoluten Temperaturen in $[^\circ K]$ der beteiligten Systeme sind und diese *Temperaturspreizung* allein für die Größe von " η " ausschlaggebend ist. 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 ($T_u \dots$ Umgebungstemperatur):

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

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 vor allem 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