Technische Aspekte der Forcierung von Primärenergieeffizienz an oberösterreichischen Produktionsstandorten durch Nutzung von Wärmespeichern

Bericht

Jänner 2018 - Dezember 2018

Dipl.Ing. Simon Lassacher
Dipl. Ing. Stefan Puschnigg
Dipl.Ing. (FH) Johannes Lindorfer

ENERGIE INSTITUT
an der Johannes Kepler Universität Linz

JOHANNES KEPLER UNIVERSITÄT LINZ

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung ... 4

1.1 Zielsetzung ... 4
1.2 Ausgangssituation ... 4
1.3 Überblick und Aufbau ... 5

2 Systemanalyse ... 6

2.1 Wärmebedarf in der oberösterreichischen Industrie ... 6
2.1.1 Endenergieverbrauch in Oberösterreich ... 6
2.1.2 Wärmebedarf in Oberösterreich ... 8

2.2 Wärmespeicherbedarf ... 11
2.2.1 Langfristiger Ausgleich der Energiebereitstellung ... 12
2.2.2 Lastmanagement und Spitzenreduktion in Wärmenetzen ... 13
2.2.3 Flexibilisierung der Wärmebereitstellung ... 13
2.2.4 Abwärmenutzung und Prozessoptimierung ... 13
2.2.5 Power-to-Heat ... 13

2.3 Arten von Wärmespeichern ... 14
2.3.1 Sensible Wärmespeicher ... 15
2.3.2 Latente Wärmespeicher ... 18
2.3.3 Thermochemische Wärmespeicher ... 19
2.3.4 Temperatureinsatzbereiche ... 21
2.3.5 Entwicklungsstadium ... 24
2.3.6 Kosten ... 25

2.4 Österreichs Stärkefelder bei Wärmespeichertechnologien ... 25

3 Einsatzgebiete von thermischen Speichern ... 27

3.1 Nutzung industrieller Abwärme ... 27
3.2 Verstromung von Abwärme ... 28
3.3 Sektorenkopplung ... 28
3.4 Systemdienstleistungen durch thermische Speicher ... 29
3.4.1 Allgemeine Maßnahmen ... 29
3.4.2 Power-to-Heat für den Regelenergiemarkt ... 30
3.4.3 Teilnahme am Regelenergiemarkt Österreich ... 32

3.5 Praxisbeispiele ... 32
3.5.1 Heißwasserspeicher ... 32
3.5.2 Feststoffspeicher für Hochtemperaturwärme ... 33
3.5.3 Latentwärmespeicher ... 34
3.5.4 Adsorptionsspeicher ... 34
3.5.5 Sektorenkopplung Power-to-Heat ... 35
3.5.6 Aktuelle Forschungsprojekte ... 36

4 SWOT Analyse von thermischen Speichern ... 38

4.1 Sensible Wärmespeicher ... 38
4.1.1 Wasserspeicher ... 38
4.1.2 Flüssigsalzspeicher ... 39
4.1.3 Hochtemperatur-Feststoffwärmespeicher ... 39
4.1.4 Erdwärmesonden- und Aquiferspeicher ... 40

4.2 Latentwärmespeicher (PCM-Speicher) ... 40
4.2.1 Niedertemperatur-Latentwärmespeicher ... 40
4.2.2 Hochtemperatur-Latentwärmespeicher ... 41
4.3 Thermochemische Speicher ... 41
5 Anwendungsfelder thermischer Speicher in oberösterreichischen Industriebranchen ... 42
5.1 Temperatureinsatzbereiche thermischer Wärmespeicher ... 42
5.2 Abgeleitete Einsatzgebiete von Wärmespeichern in oberösterreichischen Industriebranchen ... 43
6 Einflussgrößen für eine forcierende Speicherintegration in Oberösterreich ... 46
7 Zusammenfassung und Ausblick ... 49
Literaturverzeichnis ... 51
Abbildungsverzeichnis ... 53
Tabellenverzeichnis ... 54
Anhang ... 55

1 Einleitung

Eine der größten bevorstehenden Herausforderungen wird für die kommenden Jahre und Jahrzehnte das Herbeiführen einer erneurbaren Energieversorgung sein. Dadurch soll der Einsatz fossile Energieträger reduziert und im besten Falle zukünftig gänzlich ausgeschlossen werden. Zahlreiche unterschiedliche Energiekonzepte wie Biotreibstoffe, Photovoltaik, Solarthermie, Wasserkraftwerke, Windräder, Erdwärme und effizientere Energienutzungsmaßnahmen werden dazu als Hybridlösung eine entscheidende Rolle für eine erfolgreiche Gestaltung der Energieversorgung der Zukunft spielen. Um dies umzusetzen, wird es aber wesentlich sein, fluktuierende Energieerzeugungen wie Photovoltaik oder Windenergie durch Energiespeichersysteme zu unterstützen. Dadurch kann die Versorgung aus intermittierenden Energieerzeugungsquellen nahezu konstant gestaltet und somit zeitliche Differenzen zwischen Erzeugung und Nachfrage von Verbrauchern ausgeglichen werden. Ebenso ist es für das Senken des Primärenergiebedarfes von zentraler Bedeutung, Energie innerhalb eines Unternehmens bestmöglich zurückzugewinnen und wiederzuverwerten, oder anderen potentiellen Abnehmern zur Verfügung zu stellen. Auch hier wird wiederum durch Energiespeichersysteme Abhilfe durch einen Ausgleich zwischen Angebot und Nachfrage geschaffen.

Im Rahmen dieser Studie werden Energiespeicherkonzepte analysiert, wobei der Fokus speziell auf thermische Wärmespeicher gelegt wird. Nicht betrachtet werden elektrische, mechanische oder chemische Speicher. Thermische Speicher können überschüssige Wärme, anfallende Abwärme oder auch überschüssigen Strom (umgewandelt in Wärme) zwischenspeichern und bei Bedarf wieder abgeben. Dadurch kann die Primärenergieeffizienz erhöht und somit ein Schritt in Richtung Umsetzung einer erneuerbaren Energieversorgung gesetzt werden. Im Zentrum der Anwendung für Wärmespeicher stehen dabei vor allem Unternehmen, die in Relation zu privaten Verbrauchern, hohe Endenergieverbräuche für beispielsweise das Bereitstellen von Prozesswärme haben und somit ein großes Einsparungspotenzial auch für Primärenergie aufweisen.

1.1 Zielsetzung

Im Projekt „Technische Aspekte der Forcierung von Primärenergieeffizienz an oberösterreichischen Produktionsstandorten durch Nutzung von Wärmespeichern“ wird die Eignung von Wärmespeichern in oberösterreichischen Industriebranchen bewertet. Ziel ist es, verfügbare Wärmespeicher zu identifizieren, diese nach deren Eigenschaften zu klassifizieren, und hinsichtlich ihren möglichen Einsatzbereichen Anwendungsfelder für unterschiedliche Temperaturniveaus in oberösterreichischen Industriebranchen abzuleiten. Aufbauend auf dieser Auswertung, sollen Einflussgrößen für eine forcierende Speicherintegration in den oberösterreichischen Industrien identifiziert werden. Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse des Projektes zusammen.

1.2 Ausgangssituation

Oberösterreich ist geprägt von einer energieintensiven Unternehmenslandschaft verschiedenster Größenordnungen. Dazu zählen Branchen wie die Eisen- und Stahlindustrie mit einem hohen Endenergieverbrauch für Industrieöfen, die Papier- und Zellstoffbranche mit hohen Energieverbrauchsmengen in Form von Prozessdampf, sowie auch die Maschinenbau- oder Fahrzeugbranche mit Wärmebedarf für Warmwasser und Raumheizung der Produktionshallen. Um die Primärenergieeffizienz in oberösterreichischen Industriebranchen zu erhöhen, ist es erforderlich, Wärme bzw. Abwärme in Betrieben bestmöglich im Rahmen der gegebenen Anforderungen einzusetzen. Dabei spielt die Integration von Wärmespeichern eine wesentliche Rolle.

Dieses Projekt basiert auf dem durch das Land Oberösterreich geförderten Projekt „Rechtliche Rahmenbedingungen für Wärmespeicher“, und durch weitere am Energieinstitut der JKU Linz durchgeführten Projekten zur Steigerung der Primärenergieeffizienz. Im Zuge dieses Projektes werden jedoch vor allem die technischen Aspekte einer Speicherintegration in Industriebranchen zur Erhöhung der innerbetrieblichen

Primärenergieeffizienz genauer untersucht. Des Weiteren wird der Zusatznutzen von Wärmespeichern durch deren Einsatz im Lastmanagement, der flexiblen Wärmebereitstellung sowie am Regelenergiemarkt genauer erörtert.

Für die Umsetzung eines solchen Projektes bedarf es zu Beginn einer Systemanalyse hinsichtlich existierenden Wärmespeichern, und vorhandenen Temperaturniveaus und Wärmebedarfsmengen in oberösterreichischen Industriebranchen. Durch standortspezifische Randbedingungen ergeben sich sehr unterschiedliche Anforderungen an Speicherkonzepte. Als Ergebnis dieser Analyse wird ein fachspezifischer Mangel an Knowhow für Wärmespeicherkonzepte in Unternehmen gedeckt, relevante Einflussgrößen bestimmt, und somit der Schritt in Richtung einer forcierten zukünftigen Speicherintegration umgesetzt.

1.3 Überblick und Aufbau

In Kapitel 2 erfolgt die Berechnung des Wärme-Endenergieverbrauches der oberösterreichischen Industriebranchen unterteilt nach unterschiedlichen Temperaturniveaus. Ebenso wird in diesem Kapitel der Bedarf für Wärmespeicher erörtert sowie deren Arten und Eigenschaften genauer analysiert.

Im anschließenden Kapitel 3 werden die möglichen Einsatzgebiete von Wärmespeichern erläutert. Zusätzlich werden anhand von Praxisbeispielen derzeitige Anwendungen veranschaulicht.

Für das Beurteilen der Stärken, Schwächen, Risiken und Chancen unterschiedlicher Speichertechnologien wird in Kapitel 4 eine SWOT-Analyse von Wärmespeichern durchgeführt. Diese dient als Diskussionsbasis der thermischen Speicher.

In Kapitel 5 werden die Temperatureinsatzbereiche der eruierten Wärmespeicher aufgezeigt. Darauf aufbauend wird die Anwendungseignung von Wärmespeichern in den unterschiedlichsten Industriebranchen gegliedert nach den vorhandenen Temperaturniveaus und Endenergieintensitäten bewertet.

Anknüpfend daran, werden in Kapitel 6 Einflussgrößen beschrieben, die wesentlich für eine forcierende Speicherintegration in oberösterreichischen Industriebetrieben sind. Zusätzlich werden Gesichtspunkte angesprochen, die für eine Speicherauswahl zu berücksichtigen sind.

Kapitel 7 schließt mit einer Zusammenfassung der erarbeiteten Erkenntnisse und Informationen. Darüber hinaus wird ein Ausblick hinsichtlich zukünftiger Handlungsempfehlungen und Maßnahmen geliefert.

2 Systemanalyse

Im Rahmen der durchgeführten Systemanalyse werden folgende spezifische Fragestellungen addressiert:

a) In welchen Branchen wird Wärme gebraucht und zu welcher Qualität und Quantität?
b) Wo besteht generell Bedarf zur Wärmespeicherung?
c) Welche Arten von Wärmespeichern gibt es?
d) In welchen Bereichen werden die bekannten Wärmespeicher eingesetzt?

2.1 Wärmebedarf in der oberösterreichischen Industrie

Bevor der Einsatz von Wärmespeichern diskutiert wird, soll evaluiert werden, welcher generelle Wärmebedarf in der oberösterreichischen Industrie besteht. Es soll neben der Energie- bzw. Wärmeintensität der verschiedenen Industriebranchen auch die Qualität in Bezug auf das Temperaturniveau der eingesetzten Wärme identifiziert werden. Dazu werden Daten der Statistik Austria (Energiebilanz und Nutzenergieanalyse) sowie der WKÖ (Firmenlisten) verwendet. Ausgehend von dem gesamten Endenergiebedarf Oberösterreichs wird im Top Down Verfahren auf den Wärmebedarf der einzelnen Industriebranchen geschlossen. Als Ergebnis werden die absoluten Zahlen des Wärmebedarfs nach Temperaturniveau pro Branche den aktiven Unternehmen gegenübergestellt, um so die Energieintensität pro Branche zu verdeutlichen.

2.1.1 Endenergieverbrauch in Oberösterreich

Basierend auf Daten von Statistik Austria lag 2016 der gesamte Endenergiebedarf von Oberösterreich bei 237 PJ. Wie in Abbildung 1 dargestellt, unterteilt sich der Endenergiebedarf in drei Sektoren:

- Produzierender Bereich mit einem Anteil von 44% bzw. 104 PJ
- Verkehr mit einem Anteil von 28% bzw. 66 PJ
- Sonstige mit einem Anteil von 28% bzw. 67 PJ.

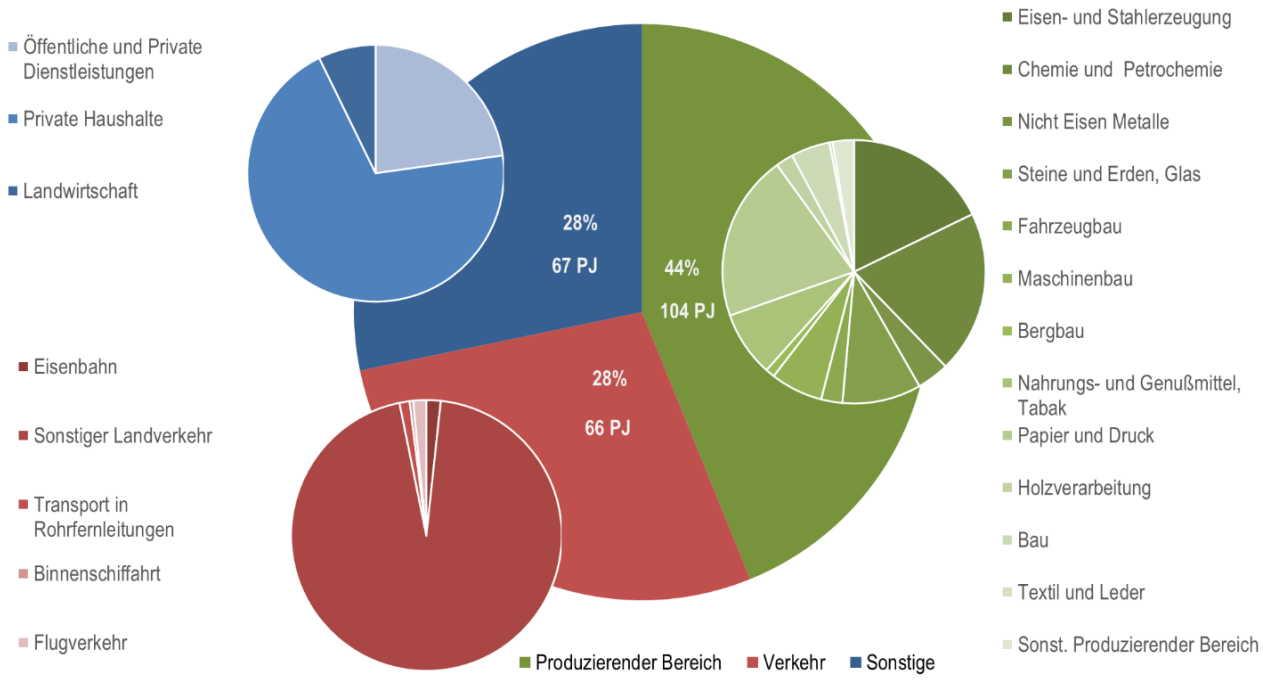

Abbildung 1: Endenergiebedarf OÖ 2016 aufgeteilt in die Sektoren Produzierender Bereich, Verkehr und Sonstige (eigene Darstellung, basierend auf den Daten von Statistik Austria [1])

Vergleicht man ausschließlich den oberösterreichischen Endenergiebedarf des produzierenden Bereichs mit den anderen acht Bundesländern, so zeigt sich (wie in Abbildung 2 dargestellt), dass Oberösterreich mit 104 PJ vor der Steiermark mit 69 PJ und Niederösterreich mit 62 PJ den größten Energiebedarf aufweist. Dabei werden in Oberösterreich 11 PJ (11%) für die Bereitstellung von Raumheizung und Fernwärme, 30 PJ (29%) für die Dampferzeugung, 35 PJ (34%) für Industrieöfen, 25 PJ (24%) für Standmotoren, 2 PJ (2%) für Beleuchtung und EDV und vernachlässigbare 0,1 PJ (0,1%) für elektrochemische Zwecke aufgewendet.

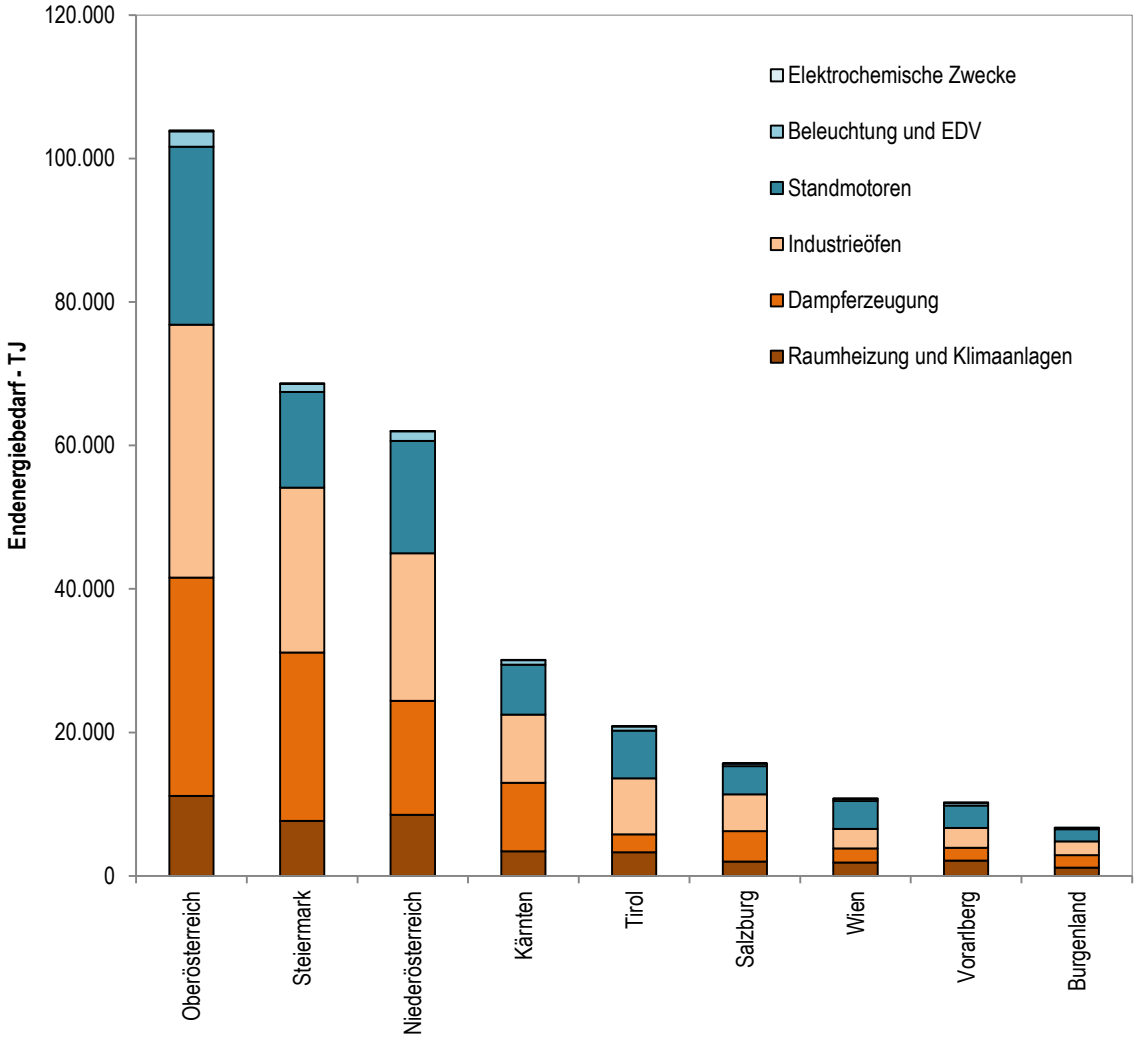

Abbildung 2: Endenergiebedarf 2016 Bundesländer unterteilt in Nutzenergiekategorien im Produzierenden Bereich (eigene Darstellung, basierend auf den Daten von Statistik Austria [1])

Die Daten für Abbildung 2 setzen sich jeweils aus den Verbräuchen 13 verschiedener Branchen des produzierenden Bereichs zusammen. Welchen Anteil die jeweilige Branche an dem oberösterreichischen Endenergiebedarf (des produzierenden Bereichs) von 104 PJ hat, zeigt Abbildung 3. So weisen bereits nur drei Branchen (Eisen- und Stahlerzeugung, Papier und Druck sowie Chemie und Petrochemie) mit 60% den größten Anteil am Endenergiebedarf des oberösterreichischen produzierenden Bereichs auf. Die Branchen Holzbearbeitung, Bergbau sowie Textil und Leder haben den geringsten Einfluss.

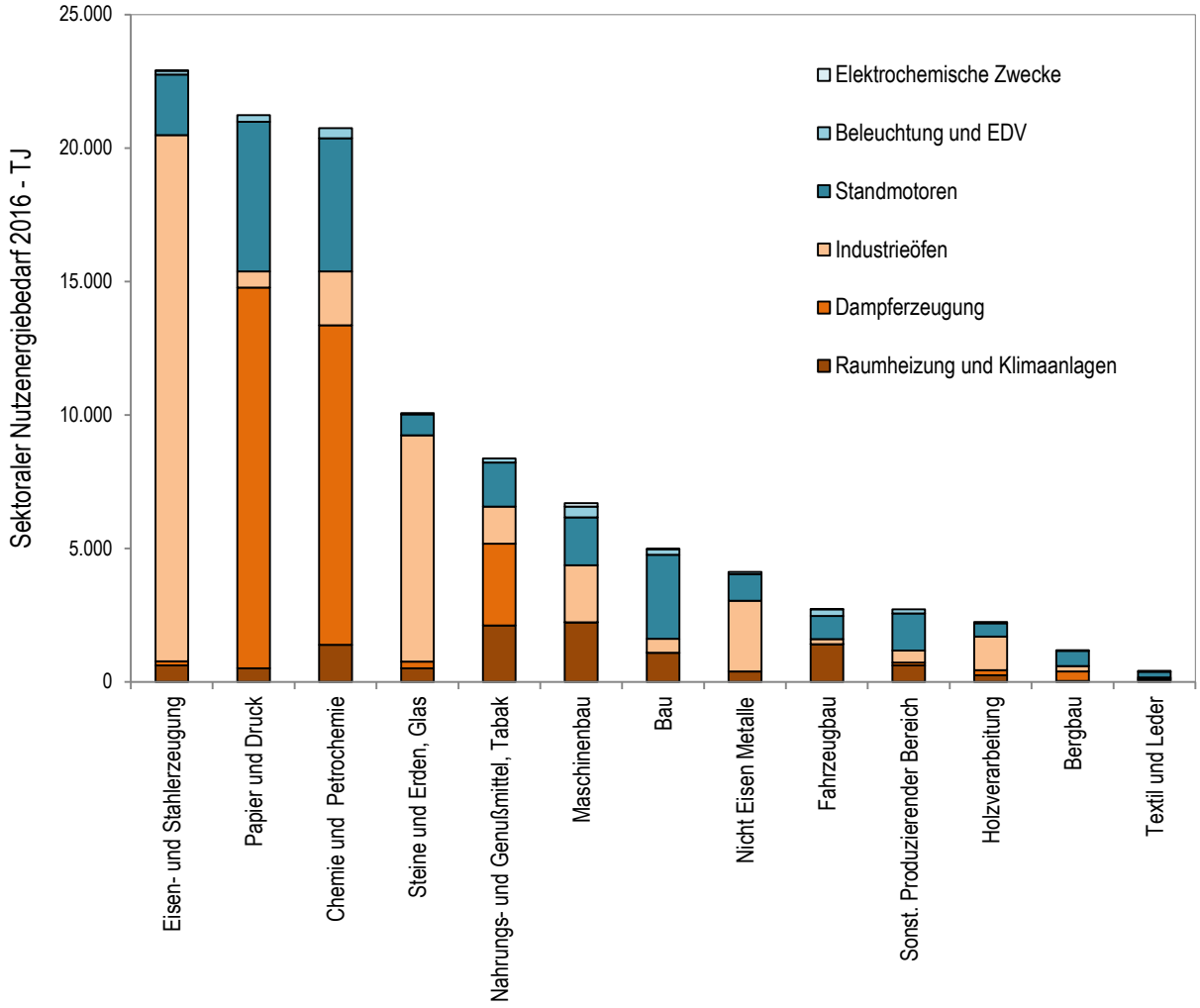

Abbildung 3: Endenergiebedarf OÖ 2016 nach Branche unterteilt in Nutzenergiekategorien (eigene Darstellung, basierend auf den Daten von Statistik Austria [1])

Für den Wärmebedarf sind im Wesentlichen nur die von der Statistik Austria festgelegten Nutzenergiekategorien Raumheizung und Klimaanlagen, Dampferzeugung sowie Industrieöfen von Interesse. Die restlichen Kategorien beziehen sich auf eine elektrische Prozessenergieversorgung. Wie die Energie genutzt wird, ist von Branche zu Branche unterschiedlich. Beispielsweise wird in den Branchen Eisen- und Stahlerzeugung, Steine und Erden, Glas, sowie Nicht-Eisen Metallindustrie der größte Anteil an Endenergie für den Betrieb von **Industrieöfen** verwendet. Wohingegen in Branchen wie der Papier- und Druckindustrie, Chemie und Petrochemie sowie der Nahrungsmittel- und Genussindustrie der Anteil an **Dampferzeugung** überwiegt. Die Versorgung mit **Raumwärme** ist bei allen Branchen vertreten. In Branchen wie der Nahrungs- und Genussmittelindustrie, Maschinenbau sowie Fahrzeugbau liegt der Anteil bei bis zu 50% des gesamten Endenergiebedarfs.

2.1.2 Wärmebedarf in Oberösterreich

Für eine vertiefende Betrachtung des Wärmebedarfs der verschiedenen Branchen in Oberösterreich wurden die wärmerelevanten Anteile des Endenergiebedarfs (Raumwärme und Klimaanlagen, Dampferzeugung und Industrieöfen) aus Abbildung 3 verwendet. Da die Nutzungskategorien keine explizite Aussage über das Temperaturniveau der Wärme geben, wurde die Wärmemenge pro Temperaturbereich und Branche mit Hilfe von Richtwerten von charakteristischen Temperaturverteilungen des Wärmeeinsatzes aus der Literatur berechnet.

Abbildung 4 zeigt für verschiedene Branchen die Anteile der Temperaturbereiche von Raumwärme bis Temperaturen über 1000 °C am Gesamtwärmebedarf.

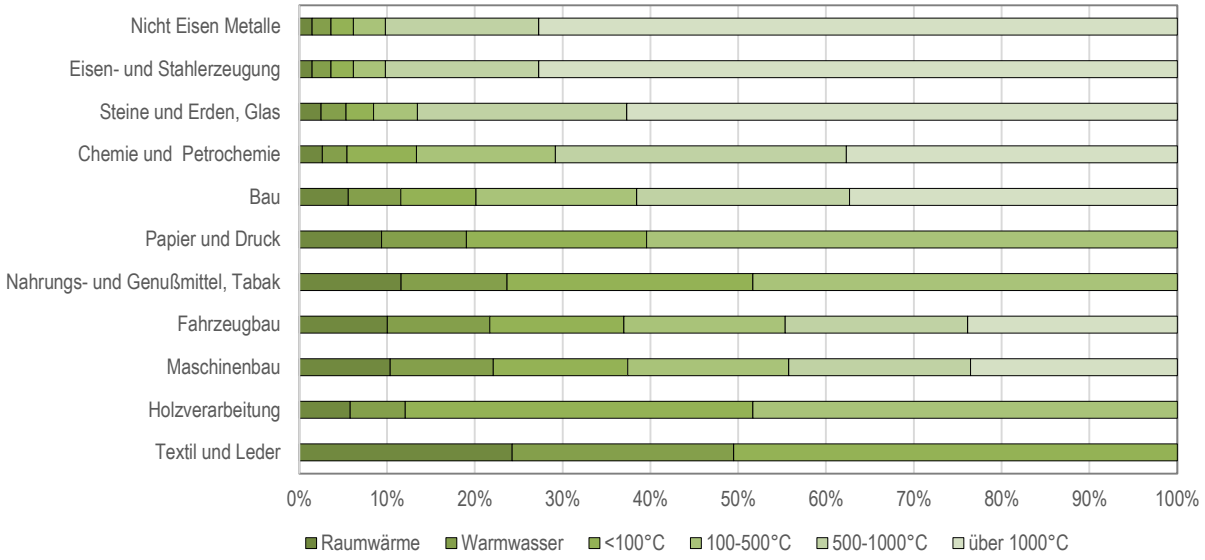

Abbildung 4: Temperaturanteile des Wärmeeinsatzes in verschiedenen Branchen der Industrie [2–4]

Für die Übertragung auf die oberösterreichischen Daten werden die Wärmemengen der Nutzungskategorien jeder Branche aufsummiert und mit den jeweiligen Temperaturanteilen aus Abbildung 4 zusammengeführt. Zusätzlich werden die Temperaturbereiche Raumwärme (RW) und Warmwasser (WW) zur besseren Übersichtlichkeit zu einer Kategorie (RW+WW) zusammengefasst. Die Ergebnisse daraus sind in Abbildung 5 dargestellt und in Tabelle 1 aufgelistet.

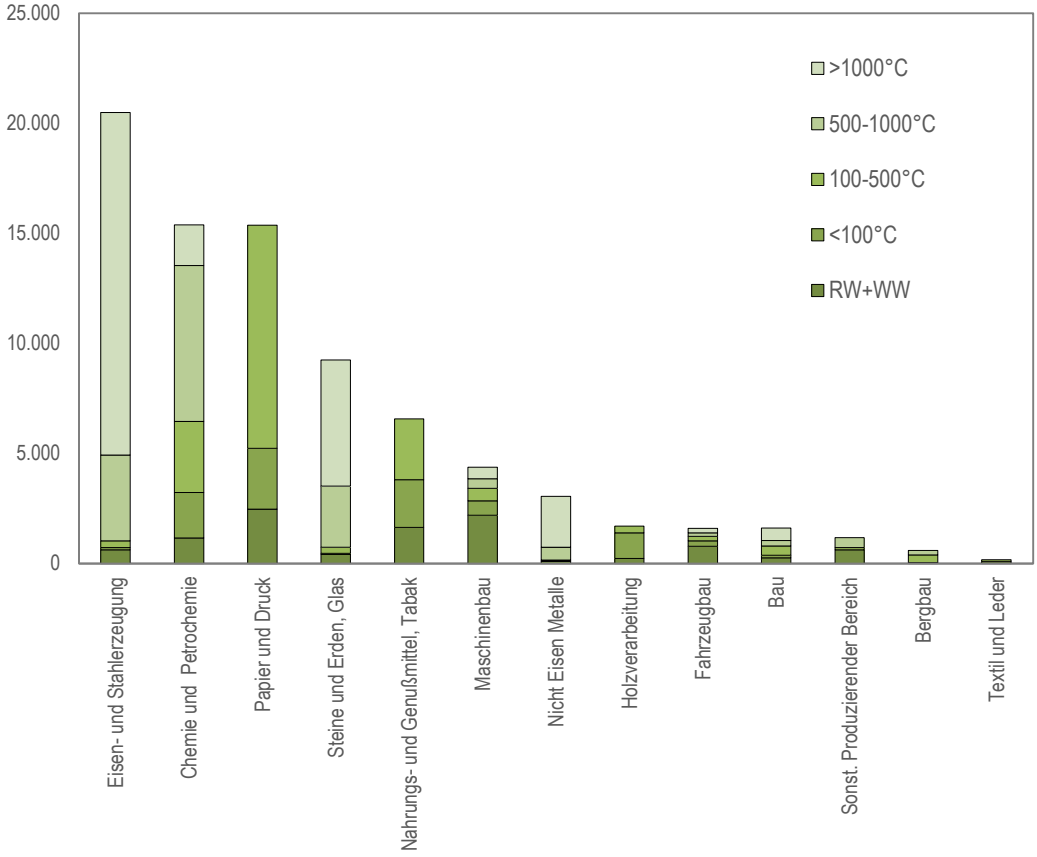

Abbildung 5: Berechneter Wärmebedarf pro Branche unterteilt in verschiedene Temperaturniveaus in OÖ (eigene Darstellung, basierend auf den Daten von Statistik Austria [1])

Daraus ergeben sich folgende Sachverhalte:

- Es zeigt sich, dass Wärme bei höchsten Temperaturniveaus (> 1000 °C) in den Branchen Eisen- und Stahlerzeugung, Chemie und Petrochemie, Steine und Erden sowie in der Nichteisen-Industrie benötigt wird. Dies ist auf Schmelz-, Brenn- bzw. Sinterprozesse zurückzuführen.
- Wärme bei Temperaturen zwischen 500 – 1000 °C werden besonders in der Chemie und Petrochemie sowie in der Eisen- und Stahlerzeugung, Steine und Erden und der Nichteisen-Industrie beispielsweise für thermische Raffinerieprozesse, für das Härten von Stahl oder Glasieren von Keramik oder in Backprozessen nachgefragt.
- Im Bereich zwischen 100 – 500 °C werden viele Anwendungen bedient, die eine Dampfversorgung erfordern (wie etwa in der Papier- oder der Nahrungs- und Genussmittelindustrie).
- Wärme im Temperaturbereich unter 100 °C wird besonders bei der Zellstoffherstellung, bei Koch- bzw. Eindickungsprozessen oder bei Trocknungsverfahren eingesetzt. Wichtige Abnehmer sind Branchen wie die Nahrungsmittel-, Papier-, Holz- und die Chemieindustrie.
- Raumwärme und Warmwasser wird generell in allen Branchen nachgefragt. Allerdings besonders in Branchen, welche große Produktionsflächen wie Hallen und wenig Abwärmepotential aus den Produktionsprozessen, wie beispielsweise im Maschinen- oder Fahrzeugbau, besitzen.

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der Ergebnisse des Wärmebedarfs in der oberösterreichischen Industrie basierend auf den Daten von 2016. Neben den absoluten Zahlen des Wärmeverbrauchs pro Branche ist aber auch die Anzahl der bestehenden Unternehmen von Interesse, welche diesen Wärmeverbrauch verursachen. Daher wurde die Tabelle um eine weitere Spalte mit der Anzahl an Unternehmen pro Branche erweitert. Die Daten stammen dabei von einer Abfrage der Firmendatenbank der WKO. Es zeigt sich, dass es sich bei den energieintensivsten Branchen

wie der Eisen- und Stahlerzeugung und Papier und Druck um nur drei bzw. 28 Unternehmen handelt, hingegen bei der Chemie und Petrochemie im Gegenzug 181 Unternehmen verzeichnet sind.

Mit Hilfe der Tabelle können wärmeintensive Branchen identifiziert, nach deren Temperaturanforderungen strukturiert, und die dazugehörige Anzahl an energieverursachenden Firmen in Oberösterreich bestimmt werden.

Tabelle 1: Berechneter Wärmebedarf je Branche nach Temperaturniveau und Anzahl an Unternehmen in OÖ (eigene Darstellung, basierend auf den Daten von Statistik Austria)

Industriebranche	RW+WW [TJ]	<100°C[1] [TJ]	100-500°C [TJ]	500-1000°C [TJ]	> 1000°C [TJ]	Summe [TJ]	Anzahl Firmen[2]
Eisen- und Stahlerzeugung	615	102	307	3.893	15.571	20.488	3
Chemie und Petrochemie	1.153	2.076	3.229	7.074	1.845	15.377	181*
Papier und Druck	2.460	2.767	10.147	0	0	15.374	28
Steine und Erden, Glas	416	46	277	2.773	5.730	9.242	156
Nahrungs- und Genussmittel, Tabak	1.642	2.168	2.759	0	0	6.569	192
Maschinenbau	2.184	655	568	437	524	4.367	414
Nichteisen Metalle	91	15	46	578	2.314	3.044	9
Holzverarbeitung	220	1.167	305	0	0	1.692	325
Fahrzeugbau	784	240	208	160	208	1.600	45
Bau	258	113	419	258	564	1.611	57
Sonst. Produzierender Bereich	615	0	105	457	0	1.177	k.A.
Bergbau	38	0	353	198	0	590	21
Textil und Leder	82	82	0	0	0	165	75

2.2 Wärmespeicherbedarf

Für die Abschätzung des Speicherbedarfs von Energie werden die Energieträger Elektrizität, Wärme und erneuerbares Gas betrachtet. Unterschiedliche Speichertechnologien finden dabei Anwendung in den verschiedensten Wirtschaftssektoren, aber auch im privaten Bereich. Jedoch stellt das Energiespeichern in den diversesten Formen und Energieträgern noch immer eine weltweite Herausforderung dar, obwohl dies mitunter eine Voraussetzung für eine zunehmende Nutzung von Energie aus erneuerbaren und fluktuierenden Quellen ist. Entlang der Energieversorgungskette können Speichersysteme eine Vielzahl an Aufgaben übernehmen (Erzeugung, Verteilung und Verbrauch). Dabei können sie für das Glätten kurzfristiger Lastschwankungen eingesetzt werden, bis hin zu einem langfristigen Speichern zum Ausgleich saisonaler Energieströme [5].

In Österreich werden rund 50 % der Endenergie für die Wärmeerzeugung verwendet. Dadurch ergibt sich, dass der Wärmemarkt der größte Energiemarkt Österreichs ist [6]. Unterteilt man den Wärmemarkt nach Sektoren, findet Wärmeenergie zur Schaffung von Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme unterschiedlichster Temperaturniveaus Anwendung, wie im vorangegangenen Kapitel bereits charakterisiert. Allerdings wird bisher nur ein geringer Anteil der Wärmeerzeugung durch erneuerbare Energiequellen gedeckt. Für ein zukünftiges Energiesystem ist es deshalb erforderlich den Wärmeverbrauch zu reduzieren, fossile Energiequellen durch erneuerbare Wärme und Brennstoffe zu ersetzen, sowie durch die Sektorenkopplung z.B. über Power-to-Heat überschüssigen Strom in Wärme umzuwandeln. Um dies umsetzen zu können, spielen Wärme und in weiterer Folge thermische Energiespeicher eine wesentliche Rolle [7].

Die Motivation für den Einsatz und Weiterentwicklung von Energiespeichern liegt in folgenden Punkten [8]:

[1] Raumwärme und Warmwasser wurden zu einer Kategorie zusammengefasst
[2] Laut WKÖ Firmenadressen; * Chemie und Petrochemie inkl. Kunststoffindustrie

- Integration erneuerbarer Energien
- Ausgleich fluktuierender Energiequellen
- Steigerung der Energieeffizienz
- Nutzbarmachung ungenutzter Energien

Grundsätzlich werden Wärmespeicher dann eingesetzt, wenn es eine Differenz zwischen Wärmebereitstellung und Bedarf gibt. Dabei übernimmt der Wärmespeicher die Funktion entweder einen fehlenden Wärmebedarf auszugleichen, oder überschüssige Wärme zu speichern [9]. Diese Variation entsteht dabei durch die Dynamik des Wärmebedarfs. Zu berücksichtigen sind [10]:

- Tagesdynamik (Tag/Nacht Variationen)
- Saisonale Abhängigkeiten (Sommer/Winter)
- Leistungsschwankungen
- Prozesswärmebedarf in der Industrie (meist nur an 3 - 4 Tage/Woche benötigt)

Abbildung 6 zeigt zwei Fälle für den zeitlichen Ausgleich bei Ungleichmäßigkeiten. Im Fall a) ist die Wärmebereitstellung konstant und der Bedarf variiert, hingegen ist im Fall b) der Bedarf konstant und dafür die Wärmebereitstellung variabel. Der Fall a) dient als Beispiel für eine konstante Wärmeerzeugung eines Energieerzeugers (z.B. Kraftwerk), wobei der Fehlbetrag an Wärme aus der Entladung eines Speichers kommt, und überschüssige Wärme in einem Speicher für eine spätere Nutzung zwischengespeichert wird. Durch den Einsatz eines Wärmespeichers wird es dem Kraftwerk ermöglicht im optimalen Betriebspunkt zu arbeiten und Lastspitzen abzudecken. Der Fall b) illustriert das Beispiel einer konstanten Grundlastdeckung über variable Wärmeerzeuger (z.B. Sonnenenergie). Durch die Unterstützung des Wärmespeichers können fluktuierende Energiequellen für die Wärmeerzeugung integriert werden. Da in Zukunft die Anwendung erneuerbarer Energiequellen für die Energieversorgung zunehmend in den Fokus rückt, wächst das Potenzial und die Notwendigkeit für thermische Speicher [9].

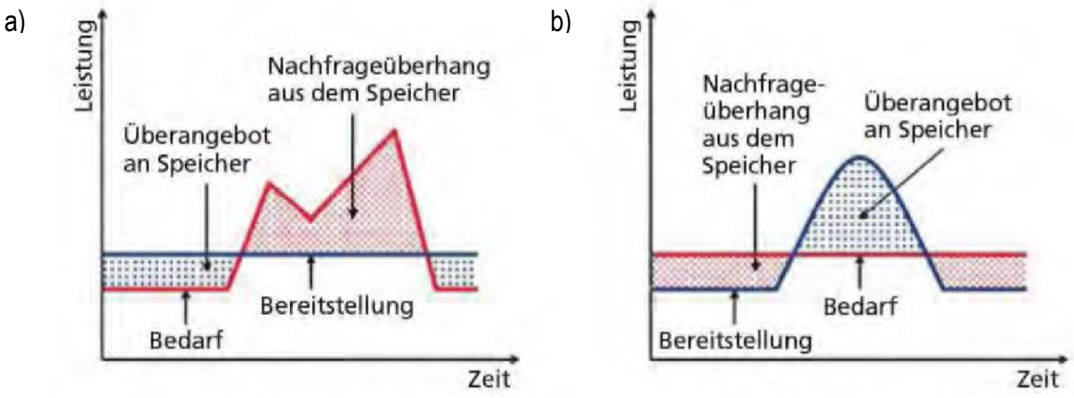

Abbildung 6: a) Bereitstellungsmanagement und b) Bedarfsmanagement [9]

Nachfolgende Subkapitel zeigen den spezifischen Bedarf für thermische Energiespeicher inklusive den dazugehörigen Anforderungen auf.

2.2.1 Langfristiger Ausgleich der Energiebereitstellung

Für eine Energieversorgung rein aus erneuerbaren Quellen ist es erforderlich einen saisonalen Ausgleich zwischen dem Energieangebot im Sommer (Solar, Wind, etc) und der Energienachfrage im Winter zu schaffen. Durch saisonale Wärmespeicher wird es möglich gemacht, dass anfallende Energie im Sommer in den Winter verlagert werden kann. Derzeit gibt es jedoch im österreichischen Marktsystem nur geringe Anreize für ein langfristiges Speichern. Zukünftig wird diesem Einsatzbereich jedoch großes Potenzial nachgesagt [11]. Nachfolgende Punkte erläutern das wesentliche Anforderungsprofil solcher Speicher [11]:

- Geringe Verluste über die Speicherdauer
- Hohe Speicherkapazität für geringen Flächenbedarf
- Robuste Komponenten für Langlebigkeit und um Wartungskosten vorzubeugen
- Nutzbare Deckflächen für andere Zwecke (z.B. Parkplätze, Spielplätze etc.)
- Kombinierte Wärme- und Kältespeicherung in Hinblick auf Klimaveränderung

2.2.2 Lastmanagement und Spitzenreduktion in Wärmenetzen

Um Lastspitzen im Wärmenetz zu vermeiden, können thermische Speicher für eine optimierte Wärmebereitstellung verwendet werden. Wärmespeicher sind in der Lage zeitliche und räumliche Unterschiede zwischen Angebot und Nachfrage auszugleichen. In Wärmenetzen werden derzeit auf Grund der vorhandenen Temperaturen Wasserspeicher eingesetzt [11].

Folgende Anforderungen ergeben sich [11]:

- Kommunikative Anbindung der Wärmeverbraucher (analog zum Smart Meter im Stromnetz)
- Aggregatoren für Marktanbindung

2.2.3 Flexibilisierung der Wärmebereitstellung

Durch den Einsatz von Wärmespeichern können unterschiedliche Wärmequellen wie Solarwärme, Umweltwärme, Biomasse, Abwärme oder auch Power-to-Heat genutzt werden. Dadurch wird eine Flexibilisierung der Wärmebereitstellung erzielt. Zusätzlich kann über den Speicher die Wärmebereitstellung an den benötigten Wärmebedarf angepasst werden [11]. Anforderungen an den Speicher [11]:

- Funktion als Wärme- und Kältespeicher
- Hohe Zuverlässigkeit und geringe Amortisationszeit
- Möglichst hohe Leistungen verfügbar
- Verschiedene Temperaturniveaus müssen abgedeckt werden

2.2.4 Abwärmenutzung und Prozessoptimierung

Vor allem in der Industrie gibt es viele temperaturintensive Prozesse mit Abwärmepotenzial. Durch Wärmespeicher kann diese Abwärme zwischengespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt in den Prozess wieder rückgeführt werden. Dadurch wird eine Primärenergieeffizienzsteigerung erreicht [11].

Des Weiteren können durch die Unterstützung von thermischen Speichern Teillastbetriebszustände von Wärmeerzeugungsanlagen optimiert werden. Diese Anlagen werden dadurch wirtschaftlicher betrieben. Zusätzlich werden Wärmespeicher für Energieengpässe bei ungeplanten Stillständen wie Stromausfällen genutzt [11].

Anforderungen an den Speicher [11]:

- Verschiedene Temperaturniveaus für unterschiedliche Abwärmetemperaturen müssen vorhanden sein
- Hohe Leistungsdichte um eine geringe Baugröße zu erzielen
- Kurze Amortisationszeit für Investition
- Einfaches Konzept um Verbreitung und Akzeptanz zu beschleunigen

2.2.5 Power-to-Heat

Die Technologie Power-to-Heat bietet eine Möglichkeit den Energieträger Strom in Wärme umzuwandeln. In den meisten Fällen wird Power-to-Heat verwendet um Überschussstrom aus dem Stromnetz in Wärme umzuwandeln und um damit das Stromnetz zu entlasten (genauere Infos zu dieser Vorgangsweise sind in Kapitel 3.4.2 angeführt). Durch diesen Ansatz bedarf es thermischen Speichern, die anschließend die anfallende Wärme speichern und bei Bedarf zur Verfügung stellen [7; 12]. Folgende Anforderungen werden an Power-to-Heat Technologien gestellt [11]:

- Kostenreduktion für vermehrten Einsatz (z.B. Wärmepumpen)
- Optimierung des Teillastbetriebes
- Sinnvolle Wärmenutzung (keine langen Umwandlungsketten)
- Smart-Grid-Fähigkeit zur Systemintegration (Ansteuerbarkeit über standardisierte Schnittstellen)

2.3 Arten von Wärmespeichern

Ein Wärmespeicher ist eine energietechnische Anlage zur Speicherung von Energie in Form von Wärme. Man unterschiedet zwischen Hoch-, Mittel- und Niedertemperatur- (> 500 °C, 500 – 120 °C, < 120 °C) sowie Kurz- oder Langzeitspeichern. So werden Kurzzeitspeicher im Bereich von einigen Stunden bis wenigen Tagen, und Langzeitspeicher über Zeiträume von wenigen Wochen bis zu einem Jahr eingesetzt [13]. Des Weiteren lassen sich wie in Abbildung 7 dargestellt die Speicher zusätzlich nach deren thermodynamischem Prinzip klassifizieren [13]:

- **Sensible Wärmespeicher**: Bei dieser Wärmespeicherung erfolgt eine fühlbare „sensible" Erhöhung der Temperatur des Speichermediums. Die speicherbare Energiemenge ist abhängig von der spezifischen Wärmekapazität des Stoffes. Da die Temperaturdifferenz zwischen Speichermedium und Umgebung in der Regel höher ist als bei anderen Speichertechnologien, spielt die Wärmedämmung eine große Rolle. Da Wasser eine hohe spezifische Wärmekapazität und zudem Vorteile geringer Kosten, Umweltverträglichkeit und hoher Verfügbarkeit hat, werden viele Speicher mit Wasser betrieben. Als Pufferspeicher befinden sich sensible Wärmespeicher in nahezu jedem Haushalt. Neben dem flüssigen Speichermedium Wasser finden auch Feststoffe wie Kies oder Eisenoxidsteine Verwendung. Verglichen mit latenten oder thermochemischen Speichern weisen sensible Speicher niedrige Energiedichten auf. Allerdings ist die Technik ausgereift und kostengünstig.
- **Latente Wärmespeicher**: In latenten Wärmespeichern oder Phasenwechselmaterialien (Phase Change Materials PCM) ist die Wärme im Gegensatz zu den sensiblen Wärmespeichern nicht „fühlbar", sondern „verborgen" gespeichert. Das Ein- und Ausspeichern erfolgt durch eine Änderung des Aggregatszustands des Mediums (meist zwischen flüssig/fest) unter Nutzung der jeweiligen Enthalpie. Bei geringen Temperaturdifferenzen können wesentlich größere Energiemengen erhalten werden als bei sensiblen Wärmespeichern, d.h. die Energiedichte ist höher. Die Schmelztemperaturen verschiedener Materialien können zwischen -40 bis weit über 1000 °C liegen. Latente Wärmespeicher werden z. B. in der Gebäudearchitektur eingesetzt und können Wärme über lange Zeit relativ verlustfrei speichern.
- **Thermochemische Wärmespeicher**: Thermochemische Wärmespeicher nutzen den Wärmeumsatz umkehrbarer chemischer Reaktionen. Durch eine endotherme Reaktion wird der Speicher geladen und nimmt Enthalpie auf. Diese wird bei der exothermen Entladung wieder abgegeben. Thermochemische Speicher ermöglichen sehr hohe Energiedichten, sind aber momentan kaum in Anwendung, da sich die Technologie größtenteils noch in der Grundlagenforschung befindet.

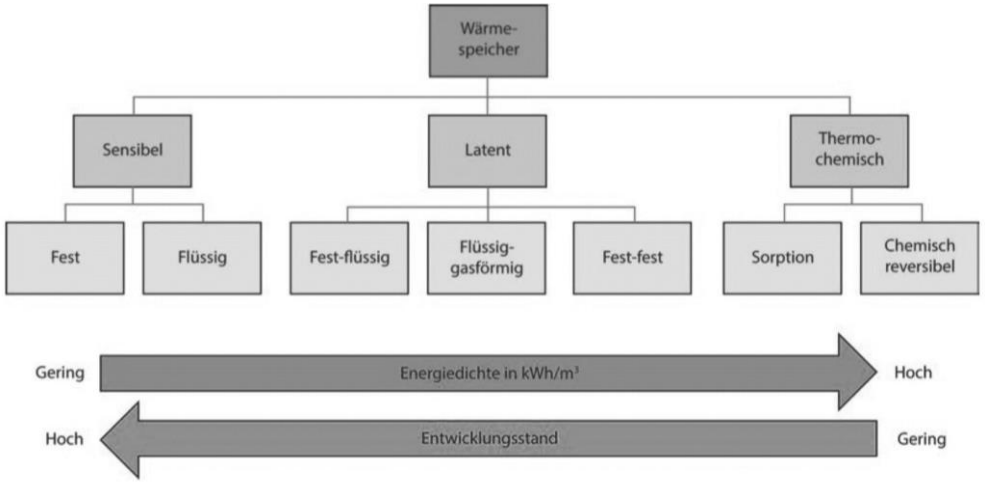

Abbildung 7: Übersicht der Technologien zur thermischen Energiespeicherung [13]

Tabelle 2 zeigt eine Übersicht der technoökonomischen Kenndaten von verschiedenen Wärmespeichern.

Tabelle 2: Technoökonomische Kenndaten von Wärmespeichertechnologien [7]

Kenndaten	Einheit	Feststoff-speicher	Flüssig-speicher	Latentwärmespeicher	Thermochemische Speicher
Spez. Energiespeicherdichte (abhängig vom Anwenderprozess)	kWh/m³	70 – 150	70 – 200	ca. 100	150 – 500
Spez. Leistungsdichte	kWh/m³	20 – 400	Keine Limitierung	15 – 80	-
Typ. realisierbare Speichergröße	MWh	1 – 1.000	500 – 5.000	0,1 – 500	-
Speicherwirkungsgrad	%	98	98	98	60 – 95
Verluste (% der Kapazität/Tag)	%/d	2 – 4	2 – 4	2 – 4	0
Speicherdauer	-	Stunden – Tage	Stunden – Tage	Stunden – Tage	Stunden – Monate
Reaktionszeit	-	Minuten	Minuten	Minuten	Minuten
Lebensdauer (Zyklen)	-	>10.000	>10.000	>10.000	>10.000 (Sorption)
Lebensdauer (Jahre)	a	>20	>20	>20	-
Investition	€/kWh	15 – 40	20 – 50	40 – 80	-

2.3.1 Sensible Wärmespeicher

Bei der Wärmeaufnahme oder Wärmeabgabe kommt es bei sensiblen Wärmespeichern zur fühlbaren Änderung der Temperatur. Der Zusammenhang zwischen der Wärmemenge Q und der Temperaturänderung lässt sich durch folgende Gleichung beschreiben:

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

Neben der Temperaturdifferenz $(T_2 - T_1)$ und der Masse m des Speichermediums, ist die Wärmemenge von der spezifischen Wärmekapazität c_p abhängig. Eine höhere spezifische Wärmekapazität bedeutet, dass man für die Speicherung einer gewissen Wärmemenge eine geringere Menge des Speichermediums benötigt und so der Speicher kleiner ausfällt. Die Energiedichte ist aufgrund der maximal möglichen Temperaturdifferenz (Temperaturen unterhalb des Phasenwechsels) und der spezifischen Wärmekapazität begrenzt und somit niedriger als bei latenten oder thermochemischen Speichern. Temperaturbereich, Wärmekapazität, Dichte und Anwendungsbereiche verschiedenerer Materialien sind in Tabelle 3 aufgelistet. Es zeigt sich, dass feste Speichermedien große Temperaturbereiche bzw. auch sehr hohe Temperaturen speichern können. Merkmale von sensiblen Speichern sind die eher geringen Investitionskosten und der hohe Reifegrad [13].

Tabelle 3: Kenndaten sensibler Speicher [13]

Medium	Temperaturbereich	Spezifische Wärmekapazität	Volumetrische Wärmekapazität	Dichte	Klassische Anwendungen
Einheit	°C	kJ/kg K	kJ/m³ K	kg/m³	
Wasser	0 – 100	4,19	4175	998	Brauchwasser, Heizungsanalgen
Sand, Kies, Gestein	0 – 800	0,71	1278 – 1420	1800 – 2000	Erdreich Wärmespeicher
Granit	0 – 800	0,75	2062	2750	Erdreich Wärmespeicher
Beton	0 – 500	0,88	1672 – 2074	1900 – 2300	Thermisch aktive Bauteile
Ziegelstein	0 – 1000	0,84	1176 – 1596	1400 – 1900	
Eisen	0 – 800	0,47	3655	7860	Speichermaterial bei solaren Speichern
Thermoöl	0 – 400	1,6 – 2,1	1360 – 1620	850 – 900	Solaranlagen mit Parabolrinnen-kollektor
Kies-Wasser-Schüttung	0 – 100	1,32	2904	2200	Erdreich Wärmespeicher
Salzschmelze	150 – 450	1,3	1970 – 1725	2561 – 2243	Solarturmkraftwerke
Natrium	100 – 800	1,3	925 – 750	1203 – 975	Solarturmkraftwerke

Wasserspeicher

Wasser ist das am häufigsten verwendete sensible Speichermedium. Es wird im Temperaturbereich zwischen 0 – 100 °C besonders als Pufferspeicher eingesetzt und gleicht kurzfristige (einige Stunden/Tage) bis saisonale Differenzen (Monate, Jahr) zwischen erzeugter und verbrauchter Wärme aus [13]. Warmwasser- oder Heißwasserspeicher können entweder direkt oder indirekt beladen werden und sind meist als Schichtenspeicher ausgeführt. Dabei wird der Dichteunterschied zwischen warmem und kaltem Wasser ausgenutzt. Da oberhalb von 100 °C der Dampfdruck stark ansteigt und dies die Anforderungen an den Behälter sowie die Kosten erhöht, werden diese Speicher nur im Niedrigtemperaturbereich angewandt. Im größeren Maßstab werden Wasserspeicher als Puffer für die Wärmeversorgung bei Blockheizkraftwerken eingesetzt, wenn diese aufgrund geringen Strombedarfs auf Teillast gefahren werden müssen [14].

Dampfspeicher

Dampfspeicher bestehen aus druckfesten Stahlkesseln, welche mit Wasserdampf beladen werden welcher anschließend auskondensiert. Die Wassertemperatur entspricht der Siedetemperatur, welche aufgrund des Drucks von bis zu 10 bar auch über 100 °C (bei 10 bar, etwa 180 °C) liegen kann. Diese Technologie findet Einsatz in Industriebereichen mit schwankenden Lastspitzen wie in Brauereien, Molkereien etc. Bei der Entnahme von Dampf verringert sich allerdings der Druck, wodurch auch die Sattdampftemperatur bzw. das auskoppelbare Temperaturniveau fallen. Da somit kein konstantes Druck- und Temperaturniveau gewährleistet werden kann, scheiden Dampfspeicher als Langzeitspeicher aus [14].

Thermalölspeicher

Bei Temperaturen oberhalb von 100 °C wird meist anstatt Wasser Thermalöl verwendet. Thermalöle wie bspw. Mineral-, Synthetik- oder Silikonöle haben niedrigere Wärmeleitfähigkeiten als Wasser und können aufgrund der thermischen Zersetzung nur in bestimmten Temperaturbereichen bzw. zur Kurzzeitspeicherung eingesetzt werden. Für die Speicherung größerer Energiemengen würden viele teure Drucktanks benötigt werden, deren Herstellung und Betrieb momentan aber nur in kleinem Maßstab existieren [13].

Neben der klassischen Wärmebereitstellung für Gebäude können Thermalölspeicher durch die höheren Speichertemperaturen bspw. für die Prozessdampfbereitstellung (6 bar, 160 °C) für Papier-, Lebensmittel- oder Holzindustrie genutzt werden. Die Vorlauftemperaturen liegen bei diesem Speichertyp zwischen -50 und 400 °C. Aufgrund der meist umweltschädlichen Öle erfolgt die Beladung meist indirekt über Wärmeübertragungssysteme [14].

Flüssigsalzspeicher

Höhere Betriebstemperaturen als Thermalölspeicher lassen sich durch Flüssigsalzspeicher erreichen. Diese können im Bereich zwischen 150 und 550 °C eingesetzt werden [14]. Nachdem das Salz einmalig über seine Schmelztemperatur erhitzt wird und den Aggregatzustand von fest zu flüssig ändert und danach im flüssigen Zustand verbleibt, wird diese Art von Speicher den sensiblen Speichern zugeordnet. Diese Technologie wird beispielsweise bei solarthermischen Kraftwerken verwendet, wo das Speichermedium bei Temperaturen zwischen 250 und 565 °C variiert. Wird die Temperatur unterschritten, zerstört sich der Speicher durch Kristallisation (Erstarrung). Wird sie überschritten, kann durch die Zersetzung der Salze brandfördernder Sauerstoff freigesetzt werden. Die Wärmeübertragung erfolgt normalerweise über indirekte Wärmeübertragungssysteme [13]. Verwendete Stoffe und deren Eigenschaften sind in Tabelle 4 angeführt.

Tabelle 4: Verwendete Salzmischungen für Flüssigsalzspeicher und deren Eigenschaften [14]

Salzgemisch	Schmelztemperatur	Schüttgewicht	Spez. Gewicht erstarrtes Salz	Wärmekapazität	Temperaturbereich
Einheit	°C	kg/m³	kg/m³	kJ/kg K	°C
$NaNO_2/NaNO_3/KNO_3$	142	1200	2100	1,56	200 – 500
$NaNO_2/KNO_3$	141	1200	2050	1,52	200 – 500

Als Pufferspeicher für Solarthermische Kraftwerke können Schattenzeiten bis hin zu 24 Stunden überbrückt werden. Die Speichergröße liegt zwischen 100 kW bis über 150 MW [14].

Feststoffspeicher

Bei Speichermedien sensibler Feststoffspeicher kann es sich um kompakte Feststoffe (z.B. Beton oder Eisen), stapelbaren keramischen Formsteinen (typischerweise Oxidkeramiken) oder um Schüttungen handeln [14; 15]. Um ein geringes Speichervolumen zu erreichen, sollten die Speichermedien eine hohe spezifische Wärmekapazität und Stoffdichte aufweisen. Bei kompakten Feststoffspeichern erfolgt die Wärmeübertragung mittels Wärmeübergang durch eine möglichst große Oberfläche (gut strukturiertes Kanalsystem) des Speichers, welche durch einen fluiden Wärmeträger geladen oder entladen wird. Feststoffspeicher aus Schüttungen zeichnen sich durch eine große Wärmeübertragungsfläche aus. Das Wärmeübertragungsfluid umfließt die Schüttungspartikel durch ein Labyrinth von Kanälen, wodurch sich eine intensive Wärmeübertragung ergibt [14]. Die äußere Hülle des Speichers muss einen hohen thermischen Widerstand aufweisen, damit die Verluste minimiert werden können. Des Weiteren wird die Geometrie des Behälters durch die thermische Speichereffizienz, den geringen Druckverlust bei der gleichmäßigen Durchströmung des Speichermaterials, den Maßnahmen zur Beherrschung der zyklisch induzierten thermischen Spannungen im Speichermaterial, den Herstellkosten des Behälters, und der Isolation bestimmt. Die Modularisierung der Speicherkapazität kann vorteilhaft sein, z.B. im Hinblick auf geringe Druck- und Wärmeverluste und guter Regelbarkeit [15]. Die Auswahlkriterien des mineralischen bzw. keramischen Schüttguts setzen sich aus den thermischen und mechanischen Materialeigenschaften im Arbeitspunkt, der Langzeitstabilität und den Materialkosten zusammen [14].

Die Anwendungsgebiete für Feststoffspeicher sind sehr unterschiedlich und abhängig von der Herkunft der Wärme des Wärmeträgermediums (z.B. Abwärme, solar oder elektrisch erzeugte Wärme) sowie der Nutzungsart der Entladewärme (z.B. für die Luftvorwärmung eines Vebrennungsprozesses oder zur Dampferzeugung). So werden Feststoffspeicher (Regeneratoren) bereits in der Glasindustrie, in der Metallurgie und bei der Zementherstellung in diskontinuierlichen Prozessen für die Zwischenspeicherung von Hochtemperaturwärme verwendet. Neuere

Entwicklungen zielen auf die Nutzung in Kraftwerken ab. Dabei soll eine Betriebsflexibilisierung durch die Verbesserung der Lastwechselfähigkeit und Mindestlastreduktion, sowie bei KWK-Kraftwerken durch die Aufhebung der starren Kopplung von Wärme- und Stromerzeugung erreicht werden. Dazu werden bspw. Schüttspeicher im Rauchgaspfad einer Gasturbine installiert. Ein weiteres Beispiel wäre der thermische Wärmespeicher im Solarturmkraftwerk Jülich mit einer Speicherkapazität von 12 MWh_{th} und einer Entladeleistung von 5,7 MW_{th} [15].

2.3.2 Latente Wärmespeicher

Bei Latentwärmespeichern erweitert sich die Speicherkapazität gegenüber sensiblen Speichern durch die Schmelzenthalpie beim Phasenübergang von fest zu flüssig. Dies bedeutet, dass ein Latentwärmespeicher bei kleinen Temperaturänderungen mehr Wärme speichern kann als ein sensibler Wärmespeicher. Voraussetzung dafür ist, dass der Phasenübergang des Speichermaterials (englisch. phase change material, PCM) in diesem Temperaturbereich stattfindet [13]. Dabei schmilzt das Wärmespeichermedium unter Wärmezufuhr durch ein Wärmeträgermedium, wobei die Temperatur jedoch gleichbleibt. Die zugeführte Wärme erzeugt bei konstanter Temperatur eine Unordnung im Atomgitter des PCM, wodurch es zu einer Entropieerhöhung kommt. Erst nachdem das komplette PCM geschmolzen ist, steigt die Temperatur wieder an. Die Wärmeabgabe ergibt sich durch die Kristallisation der Schmelze, wodurch sich die Atome wieder anordnen und die Entropie sinkt [14]. Der Zusammenhang ist in Abbildung 8 dargestellt.

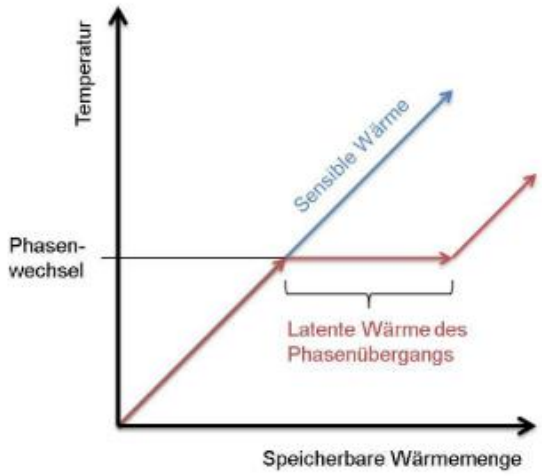

Abbildung 8: Vergleich des Verlaufs der sensiblen und der latenten Wärmespeicherung [14]

Bei latenten Wärmespeichern muss zwischen passiven und aktiven Systemen unterschieden werden. Sind Speichermedium und Wärmeträgerfluid voneinander getrennt, spricht man von einem passiven System. Bei diesen Systemen tritt normalerweise eine sehr niedrige Entladeleistung auf. Dies hat damit zu tun, dass sich beim Kristallisationsprozess eine Feststoffschicht zur Isolationsschicht des Wärmeüberträgers bildet und diese nur eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit aufweist. Bei aktiven Systemen hingegen sind PCM und Wärmeträgerfluid in Kontakt was in einer besseren Be- und Entladeleistung resultiert. Abbildung 9 zeigt verschiedenen PCM Materialklassen und deren Schmelzenthalpie und Temperatureinsatzbereiche [14].

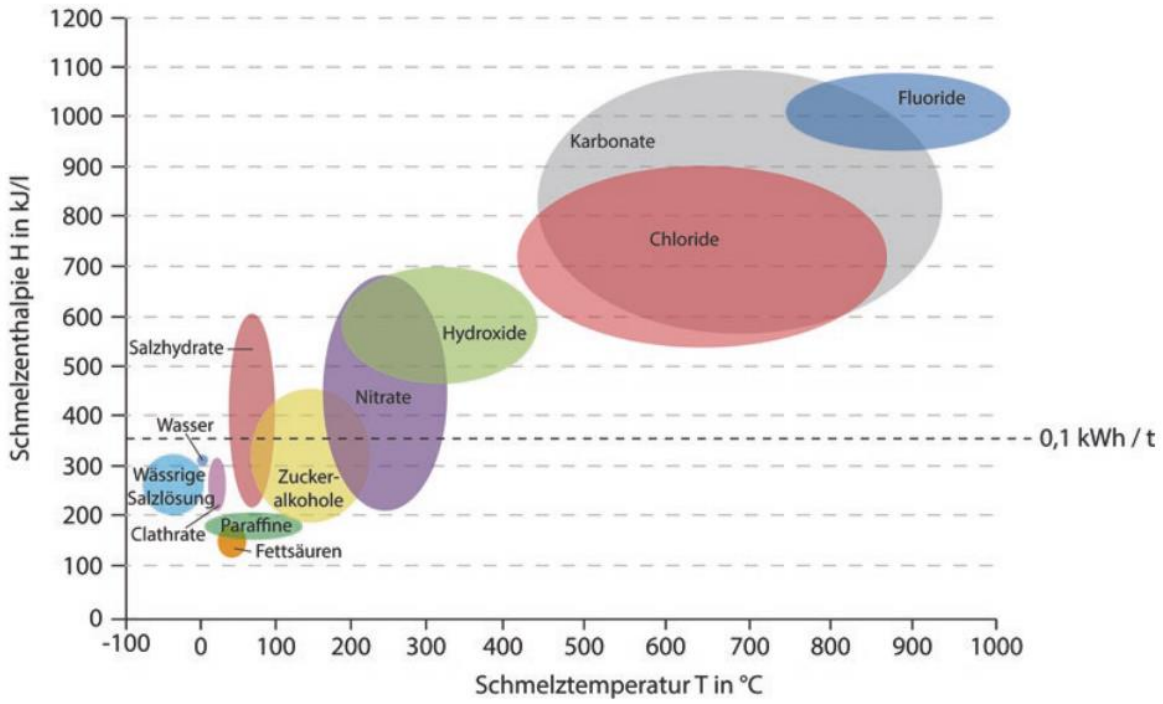

Abbildung 9: PCM Klassen und deren Temperaturbereiche [13]

Wie aus Abbildung 9 hervorgeht, finden im Niedrigtemperaturbereich nahezu alle Klassen von PCMs Verwendung [14]. Ein großer Überblick zu allen Klassen von PCMs ist in [16] angeführt.

Der Vorteil von latenten gegenüber sensiblen Wärmespeichern ist, dass Wärme auf einem konstanten Temperaturniveau gespeichert und entnommen werden kann und dadurch größere Speicherkapazitäten erzielt werden. Es gibt dabei ein weites Spektrum an Schmelztemperaturen. Außerdem ermöglichen PCMs die Glättung von Temperaturspitzen bei der Wärmeabgabe. Es ist dabei zu beachten, dass sich die beiden Stoffe in flüssiger Phase nicht mischen dürfen, um bei der Entladung eine Trennung zu garantieren [14].

2.3.3 Thermochemische Wärmespeicher

Thermochemische Wärmespeicher nutzen die Reaktionsenergie von reversiblen chemischen Prozessen oder von physikalischen Oberflächenreaktionen (Adsorption, Absorption) und erreichen dadurch hohe Energiedichten. Die Energie wird nicht als Wärme, sondern als Reaktionsenergie gespeichert, wodurch theoretisch keine thermischen Verluste während der Speicherung entstehen und somit eine lange Speicherdauer ermöglicht wird. Erst bei der Entladung, also dem erneuten Zusammenbringen der Reaktionspartner, gibt eine exotherme Reaktion die gespeicherte Energie in Form von Wärme wieder frei [13]. Der abgedeckte Temperaturbereich liegt meist bei 50 bis 200 °C, bei bestimmten Materialen können auch Temperaturen bis zu 1450 °C erreicht werden. Die Leistungsdichte des Speichers bewegt sich zwischen 20 und 40 kW/kg, dass einem Vielfachen von Wasserspeichern entspricht. Der Wirkungsgrad ist allerdings mit 35 bis 80% vergleichsweise gering [12].

Folgend werden die verschiedenen thermochemischen Energiespeicher kurz beschrieben:

- **Chemisch reversible Reaktionen**
  Das Auswahlkriterium für eine Wärmespeicherung in einer chemischen Reaktion ist die Gleichgewichtstemperatur, bei der die Produkte und Edukte im thermodynamischen Gleichgewicht sind. Die Entladung in Folge einer exothermen Reaktion findet bei einer Temperatur unterhalb der Gleichgewichtstemperatur statt. Die Beladung wiederum erfolgt auf einem höheren Temperaturniveau [13].

Ein Beispiel wäre die Erzeugung von Metalloxiden aus Hydroxiden durch Wärmezufuhr. Durch Zugabe von Wasser (flüssig oder gasförmig) wird diese Wärme wieder freigesetzt [11].

Thermochemische Speicher liegen bei einem TRL von 3, abgesehen von $CaO/Ca(OH)_2$ Systemen für Hochtemperaturanwendungen. Die Problemstellungen liegen in der Materialentwicklung, Verfahrenstechnik der Speichermaterialien, Komponentenentwicklung und Steuerungstechnik [12].

- **Adsorptionsspeicher**

  Adsorptionsspeicher basieren auf dem physikalischen Prozess, bei dem Stoffe (Absorbat) auf der Oberfläche anderer Stoffe (Adsorbens) haften bleiben und sich anlagern. Die technische Machbarkeit ist grundsätzlich im Labormaßstab nachgewiesen (TRL 3). Zukünftige Anwendungen wären saisonale Wärmespeicher für Wohngebäude [12].

- **Absorptionsspeicher**

  Bei Absorptionsspeichern wird Wärme gespeichert indem ein Molekül in eine absorbierende Phase eingelagert bzw. ausgelagert (desorbiert) wird. Ziel von Forschungsarbeiten ist es, Langzeitspeicher mit geringen Verlusten und hohen volumetrischen Energiedichten zu entwickeln. Forschungsbedarf gibt es besonders noch bei der Flüssigkeitsverteilung, Benetzung und Abdichtung nach außen [11].

2.3.4 Temperatureinsatzbereiche

In diesem Abschnitt werden anhand einer grafischen Übersicht die Temperatureinsatzbereiche der verschiedenen Speicherarten characterisiert.

Sensible Wärmespeicher

Wie in Abbildung 10 dargestellt, können sensible Wärmespeicher mit dem Speichermedium Wasser (bei atmosphärischen Bedingungen) nur im flüssigen Aggregatzustand bis 100 °C angewendet werden. Andere flüssige Speichermedien wie Thermoöl oder Salzschmelzen ermöglichen aufgrund höherer Siedetemperaturen Einsatzbereiche bis zu etwa 450 °C. Für höhere Speichertemperaturen werden Speicher mit festen Speichermaterialien wie Eisen, Gesteine oder Ziegel verwendet.

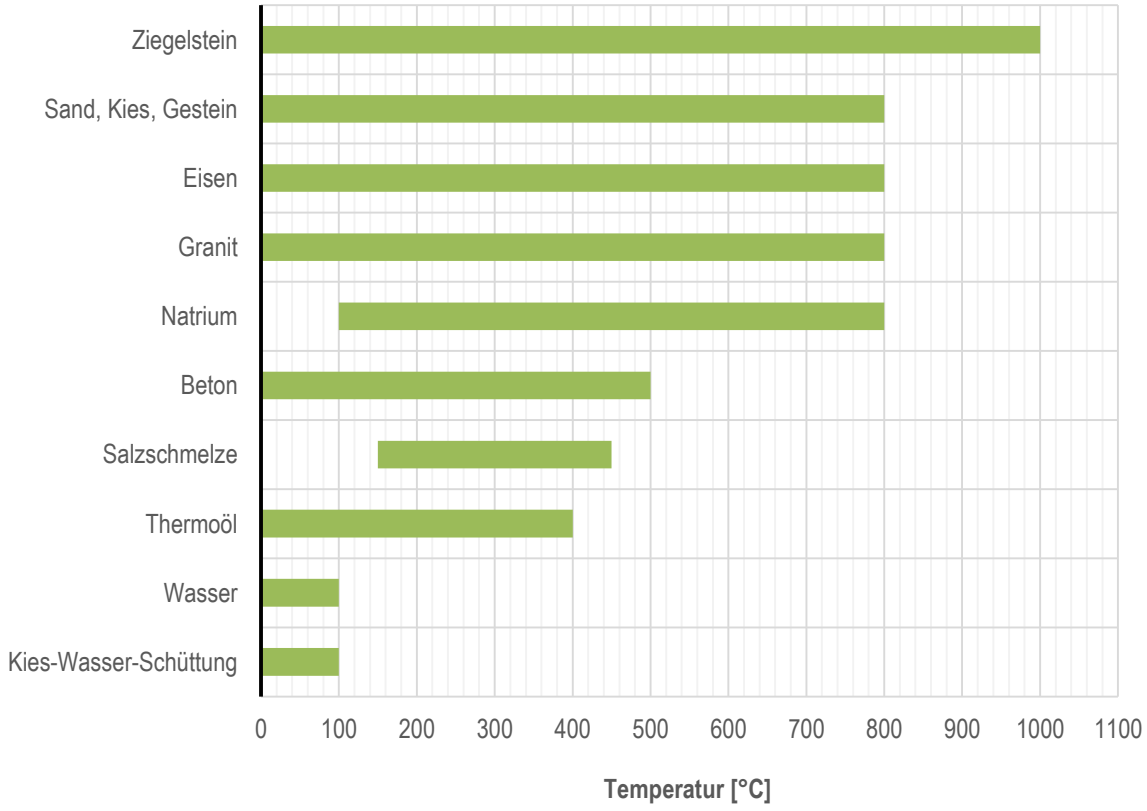

Abbildung 10: Temperatureinsatzbereiche von sensiblen Wärmespeichern (eigene Darstellung, für Datenquellen siehe Tabelle 17)

Latentwärmespeicher

Abbildung 11 zeigt die Temperatureinsatzbereiche von latenten Wärmespeichern. Die grünen Balken stellen dabei immer eine Zusammenfassung von Speichern (blaue Balken) einer übergeordneten Kategorie dar. Speicherarten wie Paraffine, PEG, Fettsäuren und Zuckeralkohol können für Speichertemperaturen unterhalb von etwa 120 °C und meist kleinen Temperaturintervallen eingesetzt werden, wohingegen Salzhydratspeicher mit vielen verschiedenen chemischen Zusammensetzungen bereits größere Temperaturbereiche abdecken können. Die höchsten Temperaturen lassen sich mit Salzmischungen oder Salzen erzielen.

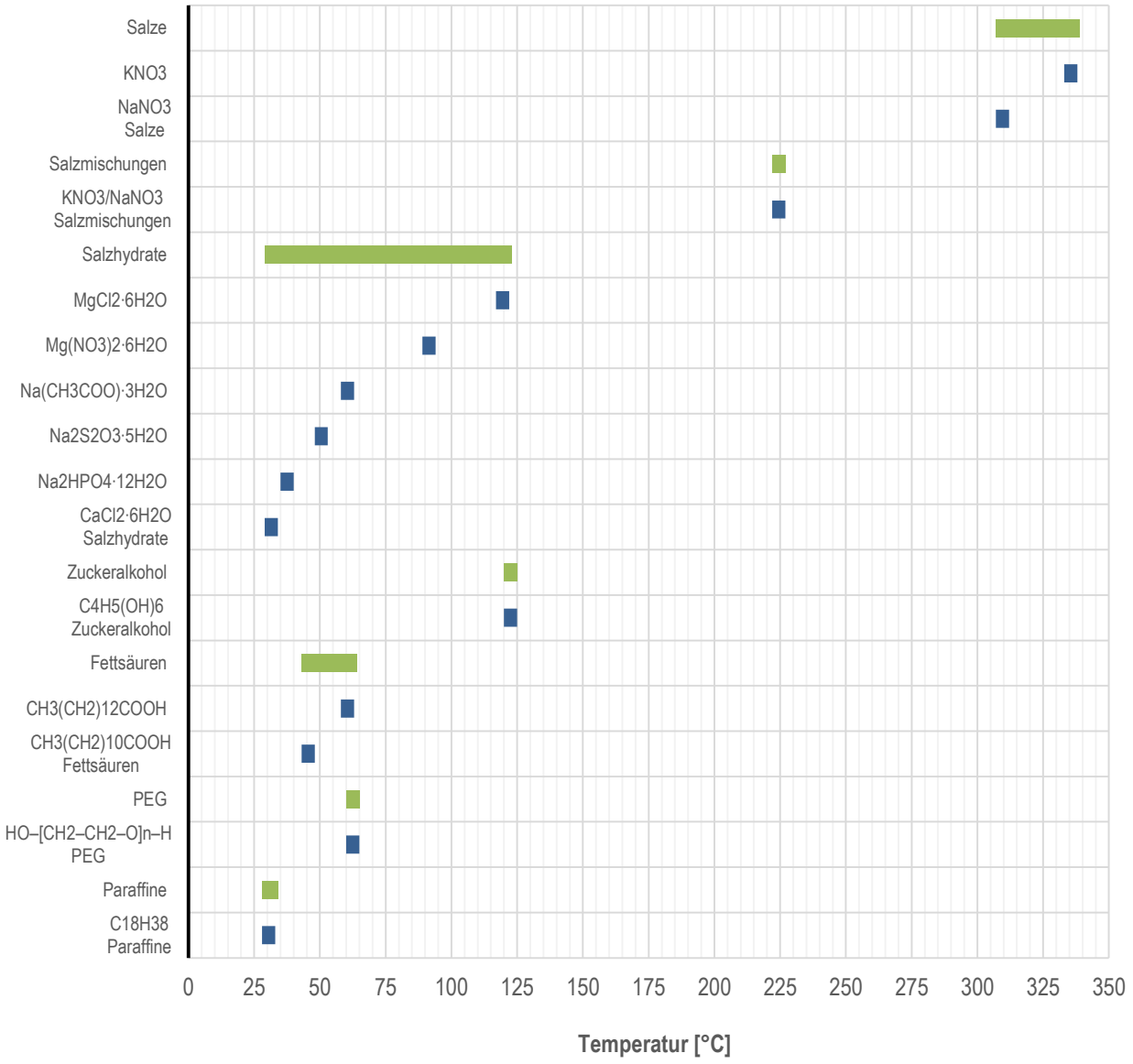

Abbildung 11: Temperatureinsatzbereiche von latenten Wärmespeichern (eigene Darstellung, für Datenquellen siehe Tabelle 17)

Thermochemische Wärmespeicher

Auch in Abbildung 12 fassen die grünen Balken die untergeordneten Speicher zusammen. Bei den thermochemischen Speichern werden besonders bei Temperaturen unterhalb von etwa 300 °C Zeolithe oder Hydrate verwendet. Bei höheren Temperaturen zwischen 350 und 600 °C kommen Hydroxide oder Oxide zum Einsatz. Die höchsten Temperaturanwendungen haben Carbonate mit bis zu 1450 °C.

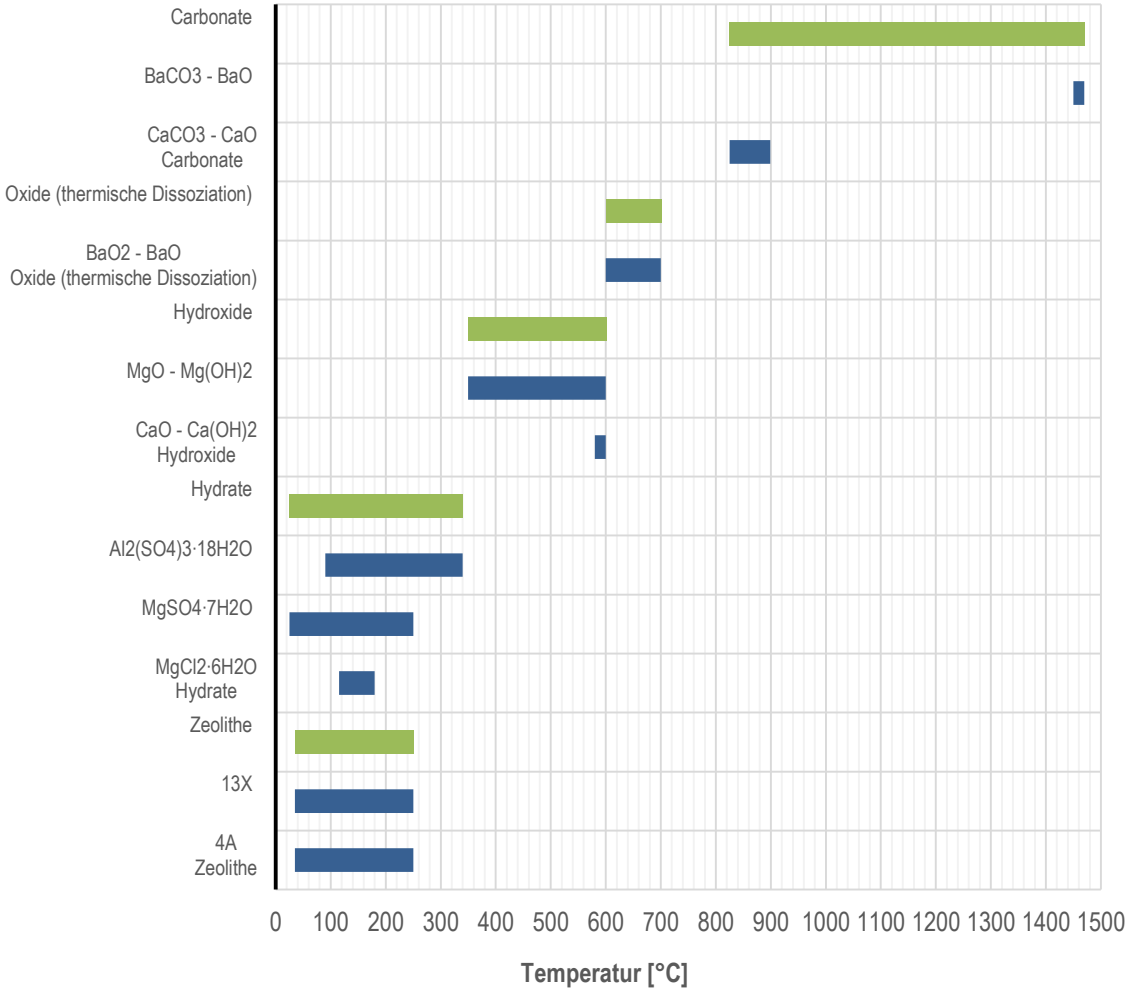

Abbildung 12: Temperatureinsatzbereiche von thermochemischen Wärmespeichern (eigene Darstellung, für Datenquellen siehe Tabelle 17)

2.3.5 Entwicklungsstadium

Das Entwicklungsstadium der verschiedenen Wärmespeichertechnologien wird mit Hilfe des TRL (Technology Readiness Level, Technologie-Reifegrad) bewertet. Dieser beschreibt auf einer Skala von 1 bis 9 den Entwicklungsstand der Technologie [17]:

- TRL 1: Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips
- TRL 2: Beschreibung der Anwendung einer Technologie
- TRL 3: Nachweis der Funktionstüchtigkeit einer Technologie
- TRL 4: Versuchsaufbau im Labor
- TRL 5: Versuchsaufbau in Einsatzumgebung
- TRL 6: Prototyp in Einsatzumgebung
- TRL 7: Prototyp im Einsatz
- TRL 8: Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich
- TRL 9: Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes

Abbildung 13 zeigt den Entwicklungsstand der einzelnen Wärmespeichertechnologien.

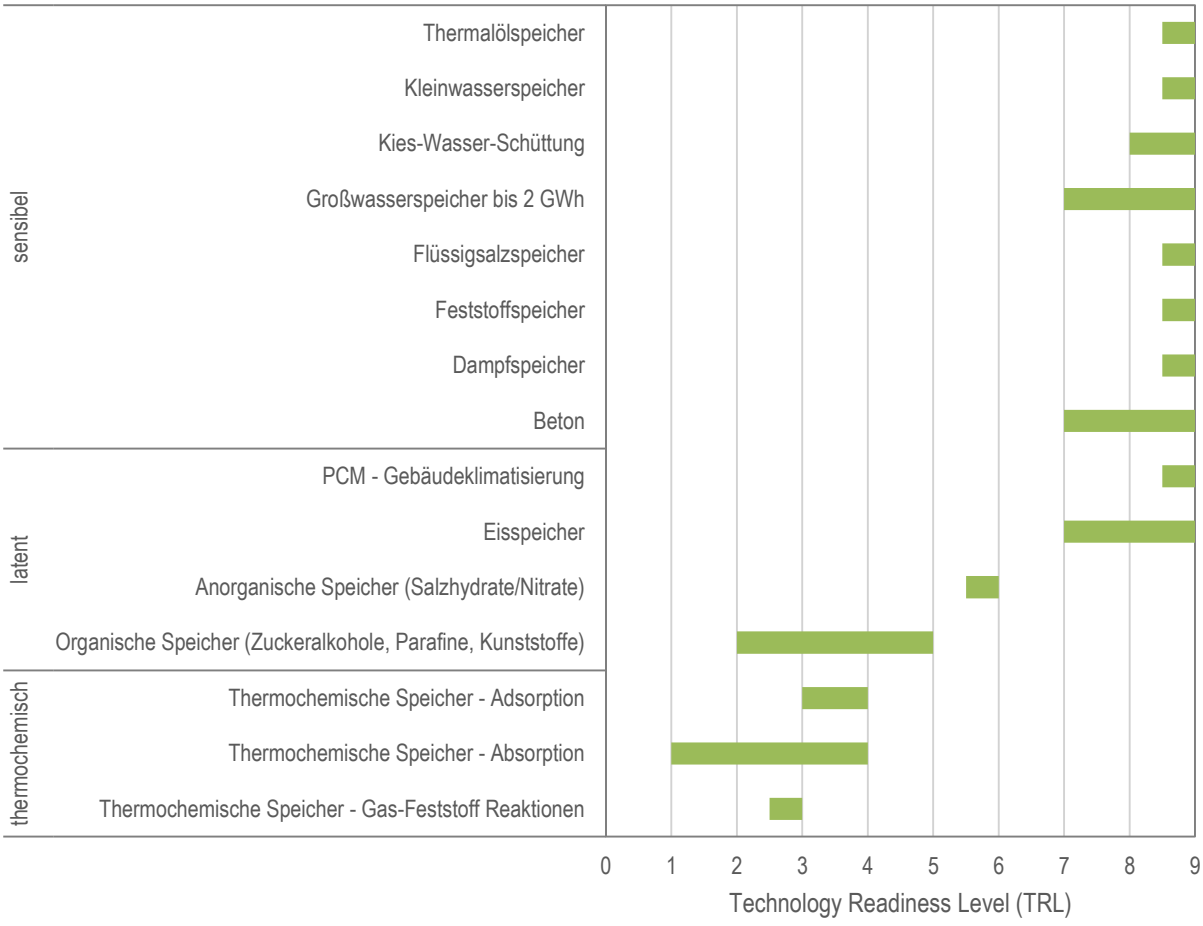

Abbildung 13: Entwicklungsstand (TRL) der verschiedenen Wärmespeichertechnologien [7; 11; 12]

Bei den sensiblen Niedertemperaturspeichern werden neben kleinen Wasser-Pufferspeichern auch größere Anlagen in Verbindung mit Nah- und Fernwärmenetze kommerziell eingesetzt (TRL 7-9). Die Machbarkeit von großen saisonalen Speichern für Linz wurde in Zuge der Studie Seasonal Heat Storage überprüft (TRL 3) [7]. Bei den sensiblen Hochtemperaturwärmespeichern existieren einige Anlagen in speziellen Anwendungen wie etwa

Flüssigsalzspeicher für solarthermische Kraftwerke oder Regeneratoren in der Glas- und Stahlindustrie mit TRL 9. Auch Dampfspeicher werden schon lange eingesetzt [7].

Kommerziell verfügbare Latentwärmespeicher (TRL 9) im Niedrigtemperaturbereich sind etwa Eisspeicher sowie passive Speicher für die Gebäudeklimatisierung. Bei den Hochtemperatur-Latentwärmespeichern erreichen Technologien mit Phasenwechselmaterial aus anorganischen Materialen wie Salzhydraten oder Nitraten TRL 6, Speicher mit organischen Materialien wie Zuckeralkoholen, Paraffine oder Kunststoffe einen TRL zwischen 2 und 5. Aktive Konzepte wurden erst im Labor (TRL 4) nachgewiesen [7].

Thermochemische Speichern haben einen Entwicklungsstand von TRL 1 – 4, bei Speichertechnologien basierend auf Adsorption konnte die technische Machbarkeit im Labor nachgewiesen werden (TRL 3) [12]. Friedl et al. [11] schätzen den Entwicklungsstand von Adsorptions- und Absorptionsspeicher auf TRL 1 – 4, und Speicher mit Gas-Feststoff Reaktionen auf TRL 3 ein.

2.3.6 Kosten

Die Kostenbetrachtung für thermische Speicher sollte nicht auf das Speichermaterial beschränkt werden, sondern auch wichtige Systemelemente wie etwa Wärmetauscher integrieren. Tabelle 5 zeigt eine Übersicht zu den spezifischen Investitionskosten in Euro pro Speicherkapazität. Die Wirtschaftlichkeit eines Wärmespeichers hängt besonders von der Anwendung und der daraus folgenden Zyklenzahl ab. Sensible Langzeitspeicher bzw. saisonale Speicher mit niedriger Zyklenzahl (1 – 1,5) können nur durch die Verwendung sehr preiswerter Speichermaterialien und Speicherbehälter wirtschaftlich betrieben werden. Wohingegen thermische Speicher in industriellen Anwendungen mit 3 Zyklen pro Tag deutlich teurer sein können. Besonders latente und thermochemische Speicher werden in Zukunft für derartige Anwendungen interessant werden [13].

Tabelle 5: Übersicht spezifischer Investitionskosten verschiedener Wärmespeichertechnologien (eigene Darstellung)

Speicherart	Spezifische Investitionskosten [€/kWh]	Quelle
Warm-/Heißwasserspeicher	5 – 7	[12; 14]
Großwasserspeicher bis 2 GWh	0,5 – 3	[13]
Fluidspeicher mit Flüssigsalz	30 – 40	[14]
Feststoffspeicher	15 – 40	[7]
PCM - Allgemein	40 – 80	[7]
Thermochemische Speicher - Allgemein	8 – 100	[12]
Sorptionswärmespeicher	50 – 100	[14]

2.4 Österreichs Stärkefelder bei Wärmespeichertechnologien

Österreich ist ein wichtiges Land für die Entwicklung und Anwendung von Wärmespeichertechnologien. Es wird innerhalb des Landes für die unterschiedlichsten Speichertechnologien Forschung betrieben und dadurch verschiedenste Technologiekompetenzen aufgebaut. Basierend auf den Entwicklungen und dem neu errungenen Knowhow, werden im Land Wärmespeicher produziert und vertrieben. Österreich exportiert dazu die unterschiedlichsten Speichertechnologien ins Ausland. Eine genaue Aufschlüsselung darüber, an welchen Speichertechnologien in Österreich geforscht, welche Speichertechnologien produziert und exportiert werden, und wo Technologiekompetenzen vorhanden sind, liefert Tabelle 6.

Nachfolgende Symbole dienen als Legende für die Stärkefelder in Tabelle 6:

Produktion und Zusammenbau in Österreich

Heimische Technologiekompetenz

Großes Exportpotenzial

In Österreich vorhandenes Forschungswissen

Tabelle 6: Österreichs Stärkefelder von thermischen Speichertechnologien [12]

Speichertechnologie	Stärkefeld
Power-to-Heat	
Wasserspeicher	
Sensible Flüssigkeitsspeicher	
Hochtemperatur Feststoffspeicher	
Thermische Bauteilaktivierung	
Erdsonden-Felder	
Phasenwechselspeicher	
Adsorptionsspeicher	
Thermochemische Speicher	
Mobile thermische Speicher	

Die Schwerpunkte liegen damit im Bereich Power-to-Heat, großvolumigen Wasserspeichern bzw. sensiblen Flüssigkeitsspeichern generell aber auch im Themenfeld Hochtemperatur-Feststoffspeicher.

3 Einsatzgebiete von thermischen Speichern

Das folgende Kapitel zeigt Anwendungsfelder von thermischen Speichern auf. Mögliche Einsatzgebiete ergeben sich durch eine interne oder externe Nutzung industrieller Abwärme, durch eine Verstromung der Abwärme, oder durch den Transfer der Abwärme in einen anderen Sektor (Sektorenkopplung). Die genannten Einsatzmöglichkeiten werden in nachfolgenden Kapiteln genauer erläutert und anhand von Praxisbeispielen veranschaulicht.

3.1 Nutzung industrieller Abwärme

Ein großer Teil an Energie geht in der Industrie als Abwärme an die Umgebung verloren. Um dies zu verhindern und somit die Primärenergieeffizienz zu erhöhen, wird versucht die Abwärme entweder in den Prozess rückzuführen, diese für den Antrieb von Wärmepumpen und Kältemaschinen zu nutzen, oder in Nah- oder Fernwärmenetze einzuspeisen [18]. Inwieweit eine sinnvolle interne Abwärmenutzung betrieben werden kann, hängt dabei von verschiedenen Faktoren ab:

- Das Temperaturniveau der Abwärme muss den Anforderungen des Nutzungsprozesses entsprechen
- Zeitliche Übereinstimmung von Abwärmeanfall und Wärmebedarf
- Die Verfügbarkeit eines prozess-spezifischen Wärmeübertragersystems für Aufnahme, Transport und Abgabe der Abwärme

Für eine externe Verwertung der Abwärme in Nah- und Fernwärmenetzen bedarf es wiederum einiger Bedingungen. Damit eine wirtschaftliche Lösung erreicht werden kann, sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Verfügbarkeit/Anschluss eines Nahwärmenetzes
- Saisonale Schwankungen im Wärmebedarf
- Gewährleistungspflicht für Wärmeversorgung durch Industriebetriebe
- Ausprägung von zeitlichen Diskontinuitäten der verfügbaren Abwärme

Um die bisher genannten Bedingungen für eine sinnvolle Abwärmenutzung zu mindern, werden thermische Speichersysteme eingesetzt. Durch die Verwendung von Wärmespeichern können Schwankungen im Abwärmeangebot kompensiert und der Teillastbetrieb von Komponenten reduziert werden. Da es im Bereich der Energiespeicher durch Entwicklungen oberhalb der üblichen Temperaturen von bis zu 100 °C zu neuen Möglichkeiten gekommen ist, werden thermische Speicher vermehrt im industriellen Bereich eingesetzt [18]. Aus Abbildung 14 gehen drei Konzepte zur Abwärmenutzung hervor [18]:

a) Batch-Prozesse: Zwischenspeicherung von Abwärme die während dem Produktionszyklus anfällt und zu einem späteren Zeitpunkt wieder benötigt und eingekoppelt wird.
b) Kraft-Wärme-Kopplung (KWK): Da eine gleichzeitige Bereitstellung von Strom und Wärme oft nicht dem Bedarfsprofil entspricht, kann durch einen thermischen Speicher eine Entkopplung von Strom und Wärme erreicht werden und somit eine erhöhte Flexibilisierung der Wärmenutzung.
c) Kühl-/Heizaggregate: Kann anfallende Abwärme nicht in Prozesse rückgekoppelt werden, wird durch thermische Speicher die Abwärme zwischengespeichert und dient anschließend für eine bedarfsgerechte Bereitstellung von Heizwärme und Kälte in optimalen Betriebspunkten.

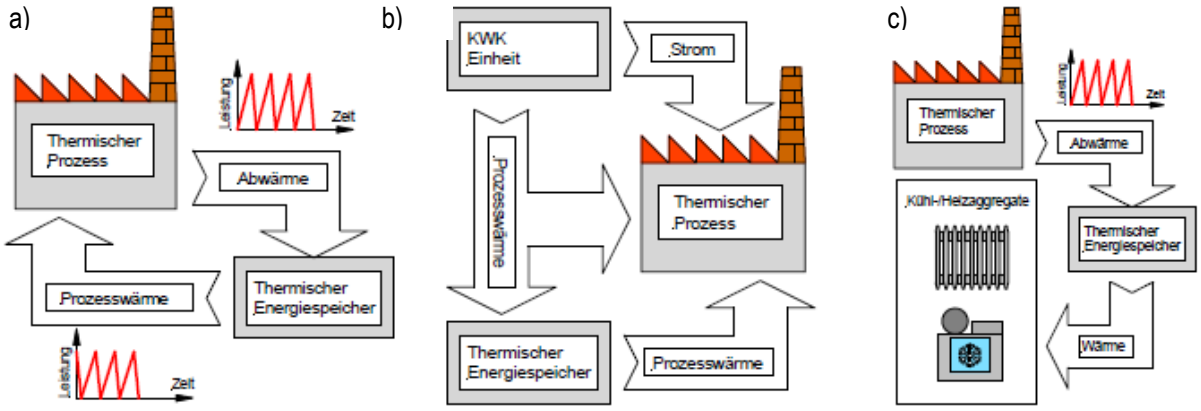

Abbildung 14: Industrielle Abwärmenutzung a) Batch-Prozess b) Kraft-Wärme-Kopplung c) Kühl-/Heizaggregat [18]

3.2 Verstromung von Abwärme

Zuvor beschriebene Konzepte zur Abwärmenutzung erfordern stets eine Anpassung an die Charakteristik und Eigenschaften der Anlage bzw. Prozesse. Zusätzlich ist oft auf Grund eines zu geringen Temperaturniveaus die innerbetriebliche Abwärmenutzung sowie die Einspeisung in ein Nah- oder Fernwärmenetz nicht möglich bzw. unwirtschaftlich. Deshalb bietet sich als Alternative die Verstromung der Abwärme an, obwohl aus Effizienzgründen die Nutzung von Abwärme als Wärme vorteilhafter wäre. Der Wärmespeicher nutzt nun die Abwärmequellen, um sie anschließend für einen thermischen Kreisprozess zur Umwandlung von Wärme in mechanische Energie bereit zu stellen (siehe Abbildung 15) [18].

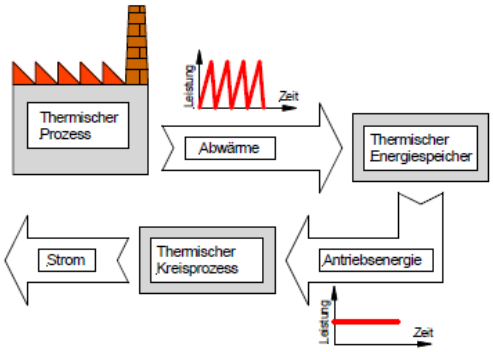

Abbildung 15: Verstromung von Abwärme durch thermische Kreisprozesse [18]

3.3 Sektorenkopplung

Energiespeicher können in sektorale und sektorenkoppelnde Speicher unterschieden werden. Sektorale Speicher werden nur in einem Sektor (Strom, Wärme, Verkehr, Gas, etc.) angewendet. Dort findet auch der Ein- und Ausspeichervorgang statt. Die Energie wird also innerhalb eines Sektors gehalten. Klassische Beispiele dafür sind Pufferspeicher im Wärmesektor oder Pumpspeicherwerke im Stromsektor. Sektorenkoppelnde Energiespeicher hingegen können in mehreren Sektoren eingesetzt werden und das Ein- und Ausspeichern muss nicht im selben Sektor erfolgen. Das Ziel dabei ist, Energie aus einem Sektor zu Speicher- und Nutzungszwecken in einen anderen Sektor zu übertragen. Typische Beispiele dafür sind die Kopplung des Strom- und Gassektors über Gasspeicher mit Powert-to-Gas, oder die Kopplung des Strom- und Wärmesektors über Pufferspeicher mit Power-to-Heat. Weitere Anwendungsbeispiele für mögliche Sektorenkopplungen gehen aus Abbildung 16 hervor. Ohne Energiespeicher könnte eine Kopplung der unterschiedlichen Sektoren nicht erreicht werden [13; 19].

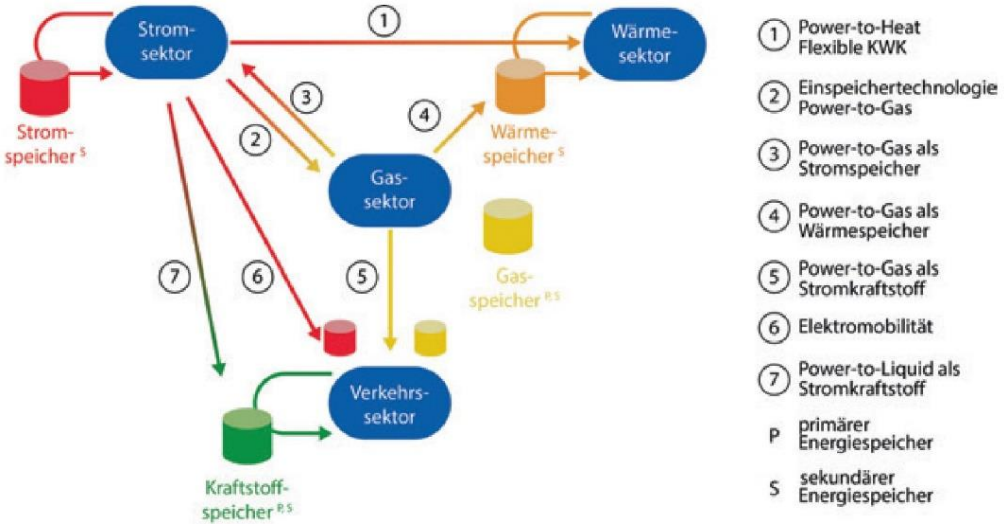

Abbildung 16: Arten von Sektorenkopplungen [19]

3.4 Systemdienstleistungen durch thermische Speicher

Damit Netzbetreiber die Funktionstüchtigkeit der elektrischen Energieversorgung aufrechterhalten können, bedarf es fortlaufend Maßnahmen, damit eine zuverlässige, hoch qualitative und sichere Stromübertragung und -verteilung gewährleistet werden kann. Diese Maßnahmen werden als Systemdienstleistungen bezeichnet und umfassen die Einhaltung von Frequenz, Spannung und Belastung der Netzbetriebsmittel innerhalb der zulässigen Grenzwerte sowie die Rückführung in deren Normalbereich nach möglichen Störungen. Um dies zu erreichen, werden vom Netzbetreiber Produkte aus Erzeugungsanlagen (z.B. Power-to-Heat Anlagen) oder aus anderen technischen Anlagen verwendet [20].

3.4.1 Allgemeine Maßnahmen

Für eine erfolgreiche Frequenzhaltung ist es erforderlich, ein Gleichgewicht zwischen Stromerzeugung und -verbrauch einzuhalten. Dies wird durch den Einsatz der Momentanreserve und durch Regelenergie ermöglicht. Des Weiteren ist es die Aufgabe der Netzbetreiber (Übertragungsnetzbetreiber sowie Verteilnetzbetreibern) etwaige Spannungsschwankungen innerhalb einer zulässigen Toleranzgrenze zu halten sowie bei Auftreten eines Kurzschlusses großflächige Spannungseinbrüche zu verhindern. Sollte es dennoch zu einem Stromausfall kommen, muss die Energieversorgung innerhalb kürzester Zeit wiederhergestellt werden [20].

Um nun eine sichere Betriebsführung ohne Grenzwertverletzungen wie zum Beispiel durch Stromflussüberlastungen zu erreichen, werden derzeit folgende Maßnahmen eingesetzt [20]:

- intrinsische oder beispielsweise über Netzanschlussbedingungen bzw. gesetzliche Anforderungen eingeforderte Systemeigenschaften von Stromerzeugern bzw. Stromverbrauchern
- flexibler Einsatz von Betriebsmitteln der Netzbetreiber im Rahmen der Betriebsführung
- Dienstleistungen, die durch Netzbetreiber von Dritten auf Basis bilateraler Vereinbarungen oder über Marktmechanismen beschafft werden.

Die wesentlichen Systemdienstleistungsprodukte sind aus Abbildung 17 ersichtlich:

System-dienst-leistung (SDL)	Frequenzhaltung	Spannungshaltung	Versorgungswiederaufbau	Betriebsführung
Ziel	▪ Halten der Frequenz im zulässigen Bereich	▪ Halten der Spannung im zulässigen Bereich ▪ Begrenzung des Spannungseinbruchs bei einem Kurzschluss	▪ Wiederherstellung der Versorgung nach Störungen	▪ Koordination des Netz- und Systembetriebes
Produkte/ Maßnahmen	▪ Momentanreserve ▪ Regelleistung ▪ Zu-/Abschaltbare Lasten ▪ Frequenzabhängiger Lastabwurf ▪ Wirkleistungsreduktion bei Über-/Unterfrequenz (EE- und KWK-Anlagen)	▪ Bereitstellung von Blindleistung ▪ Spannungsbedingter Redispatch ▪ Spannungsbedingter Lastabwurf ▪ Bereitstellung von Kurzschlussleistung ▪ Spannungsregelung	▪ Schaltmaßnahmen zur Störungseingrenzung ▪ Koordinierte Inbetriebnahme von Einspeisern und Teilnetzen mit Last ▪ Schwarzstartfähigkeit von Erzeugern	▪ Netzanalyse, Monitoring ▪ Engpassmanagement ▪ Einspeisemanagement ▪ Koordination der Erbringung von SDL Netzebenen übergreifend
Heutige Erbringer (Auswahl)	▪ Konventionelle Kraftwerke ▪ Flexible steuerbare Lasten ▪ Regelleistungspools (u.a. mit EE-Anlagen und Großbatterien)	▪ Konventionelle Kraftwerke ▪ Netzbetriebsmittel (z.B. Kompensationsanlagen) ▪ EE-Anlagen	▪ Netzleitwarten ▪ Schwarzstartfähige, konventionelle Kraftwerke ▪ Pumpspeicherwerke	▪ Netzleitwarten in Zusammenspiel mit Netzbetriebsmitteln und konventionellen Kraftwerke

Abbildung 17: Übersicht Systemdienstleistungen[20]

Durch den Ausbau von erneuerbaren Energien wie Photovoltaik- und Windenergieanlagen, kommt es zunehmend zu stark fluktuierenden Lastflusssituationen. Dies führt zu veränderten Anforderungen im Stromversorgungssystem und stellt Stromnetzbetreiber vor neue Herausforderungen [20].

3.4.2 Power-to-Heat für den Regelenergiemarkt

Der Begriff Power-to-Heat steht für die Umwandlung von Strom in Wärme. Dazu zählen elektrisch beheizte Warmwasserspeicher in Kleinanlagen (z.B. in Wohnungen und Gebäuden), aber auch Großanlagen für Wärmenetze und industrielle Anwendungsbereiche [11]. Auf Grund dessen, dass Strom aus reiner Exergie (hochwertigste Energieform) besteht, ist die Verwendung von Power-to-Heat Anlagen nur dann energetisch sinnvoll, wenn kein anderweitiger Verwendungsbedarf für den Strom besteht [21]. Typische Umwandlungstechnologien in Österreich sind [11]:

- der Elektroheizstab
- der Elektrodenheizkessel
- die Wärmepumpe.

Power-to-Heat Anlagen tragen zur Netzstabilisierung am Regelenergiemarkt bei. Meist handelt es sich hierbei um Elektrodenheizkessel mit Leistungen bis 5 MW und einer Speicherkapazität von bis zu 30 MWh. Zusätzlich können Power-to-Heat Anlagen mit Wärmespeichern kombiniert werden, wenn die umgewandelte Wärme nicht sofort benötigt wird [11; 21].

In Abbildung 18 ist das Funktionsprinzip einer Power-to-Heat Anlage dargestellt. Dabei symbolisieren graue Pfeile die Energieform Strom, und schwarze Pfeile die Energieform Wärme. Die Residuallast ergibt sich aus der Differenz des gesamten Stromverbrauches und der erneuerbaren Stromerzeugung. Sie ist also der Lastanteil an Strom, der von konventionellen Kraftwerken gedeckt werden muss [21].

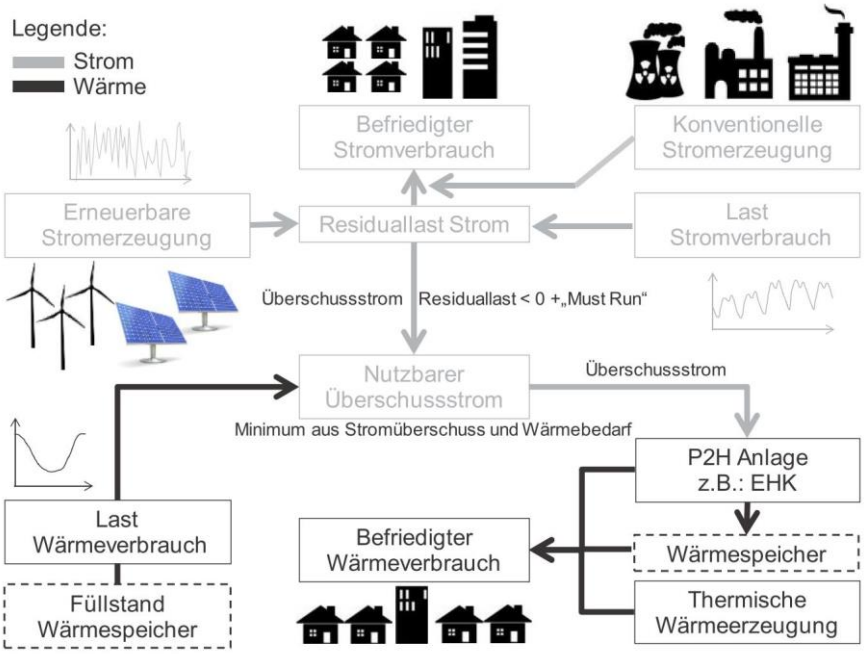

Abbildung 18: Funktionsprinzip von Power-to-Heat (Eller 2015, S. 9)

Kommt es nun zu dem Fall einer negativen Residuallast, dann ist die Stromerzeugung durch erneuerbare Energien größer als der gesamte Stromverbrauch. Das bedeutet, dass Stromüberschüsse im Netz vorhanden sind und die Grundvoraussetzung zur Ausschöpfung des Potenzials von Power-to-Heat Anlagen gegeben ist. In Abbildung 19 ist ein frei angenommener Residuallastverlauf über die Zeit dargestellt. Sobald die Residuallast negativ wird, wird die Power-to-Heat Anlage in Betrieb genommen und Strom in Wärme umgewandelt (z.B. durch einen Elektrodenkessel). Außerdem wird die Leistung des Heizwerkes (z.B. über Gaskessel) reduziert oder das Heizwerk gänzlich vom Netz genommen bis es wieder zu einer positiven Residuallast kommt und somit das Kraftwerk für die Energieversorgung aufs neue benötigt wird [21]. Zusätzlich zu berücksichtigen ist hierbei jedoch noch die „Must Run“ Leistung der thermischen Kraftwerke, die zur Aufrechterhaltung der Netzstabilität unabdingbar ist. Auch bei einer 100%igen Deckung des Stromverbrauchs durch erneuerbare Energien verbleiben konventionelle Kraftwerke immer am Netz um die Systemsicherheit zu gewährleisten. Die aus Überschussstrom umgewandelte Wärme kann anschließend direkt für den Wärmegebrauch (z.B. Nah- oder Fernwärme) genutzt werden, oder in Wärmespeichern zwischengespeichert und bei Bedarf abgerufen werden. Diese Systemdienstleistung führt zu einer Entlastung des Stromnetzes und somit zur Aufrechterhaltung der Netzstabilität. Des Weiteren bringt dieses System den Vorteil, dass fossile Primärenergieträger für die Wärmeproduktion eingespart werden und somit die Primärenergieeffizienz erhöht wird [21].

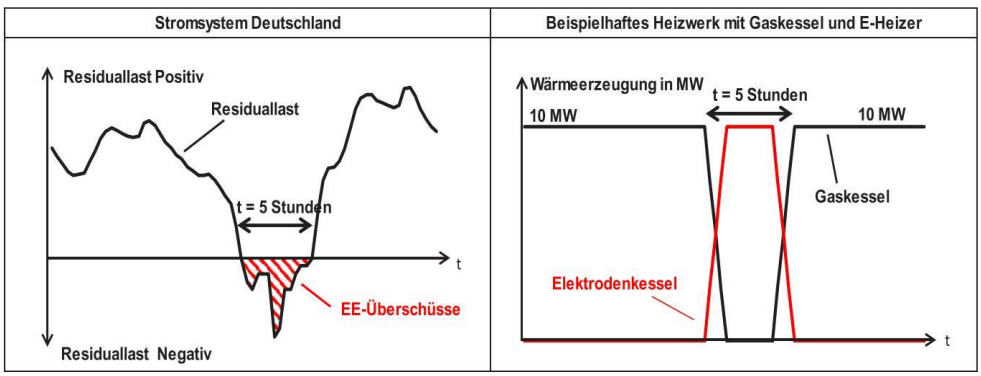

Abbildung 19: Positive und negative Residuallast (Eller 2015, S. 17)

3.4.3 Teilnahme am Regelenergiemarkt Österreich

Seit 2012 erfolgt in Österreich in Form von wöchentlichen Ausschreibungen durch die Austrian Power Grid (APG) eine vollständig marktbasierte Beschaffung von Regelreserven. Da elektrische Energie im Stromnetz nicht gespeichert werden kann, ist ein ständiger Ausgleich zwischen Erzeugung und Verbrauch notwendig. Geregelt wird dies durch die APG. Teilnahmeberechtigt am Regelenergiemarkt sind Eigenenergieerzeuger und Verbraucher mit Anlagen, die kurzfristig zu- oder abschaltbar sind. Unternehmen können sich dazu einzeln oder im Zusammenschluss mit anderen Teilnehmern (als Pool) bewerben. Notwendige Bedingungen für eine Teilnahme sind ein positives technisches Präqualifizierungsverfahren und ein Abschluss eines Rahmenvertrages zwischen der APG und dem Teilnehmer [22]. Die Vorteile einer Teilnahme sind [22]:

- die eigene Energiebilanz nachhaltig zu optimieren
- zusätzlich Erlöspotenzial zu erschließen
- von der Preisentwicklung am Großhandelsmarkt und Regelenergiemarkt zu profitieren
- einen Beitrag zur Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit in Österreich zu leisten.

3.5 Praxisbeispiele

Nachfolgende Beispiele aus der Praxis sollen derzeitige Verwendungen von thermischen Speichern aufzeigen. Dabei wird mindestens immer ein Speicher aus den Kategorien sensibel, latent und thermochemisch genauer anhand des Einsatzgebietes erörtert. Zum Abschluss dieses Kapitels werden noch aktuelle Forschungsprojekte zu den diversen Speichertechnologien vorgestellt.

3.5.1 Heißwasserspeicher

Für das Speichern von Niedertemperaturwärme werden sehr oft Flüssigkeiten eingesetzt. Das Angebot reicht dabei von kleinen Speichern mit wenigen Kubikmetern an Flüssigkeit (für Trinkwarmwasser und Heizungsbedarf), bis hin zu Großwasserspeichern für Wärmenetze und industrielle Anwendungen.

Der Vakuumpufferspeicher (siehe Abbildung 20) ist ein Beispiel für einen sensiblen Niedertemperaturspeicher. Er zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass er durch seine Vakuumdämmung nur sehr geringe Wärmeverluste hat. Dieser Speicher ist je nach Bedarf in unterschiedlichen Größen (von 5 m³ bis zu 100 m³) am Markt verfügbar. Außerdem kann dieser Speicher auf Grund seiner geringen Wärmeverluste im Inneren eines Unternehmens, als auch außerhalb im Freien aufgestellt werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass durch die Schichtladeeinrichtung ein korrektes Einschichten in die jeweilige Temperaturschicht erfolgen kann. Der in Abbildung 20 dargestellte Vakuumpufferspeicher hat ein Volumen von 6 m³ und wird über Solarthermie sowie über ein Blockheizkraftwerk beladen. Eingesetzt wird er zur Wärmeversorgung eines Büro- und Laborgebäudes.

Ein Beispiel für einen Großwasserspeicher hingegen liefert der Heißwasserspeicher in Ackermannbogen (siehe Abbildung 21). Ein 6000 m³ großer Betonbehälter dient im Nahwärmesystem als saisonaler Wärmespeicher. Um eine optimale Dämmung zu erreichen, wird das Äußere des Speichers mit einer Schüttung aus Blähglasgranulat und Erde eingekleidet, und das Innere des Speichers mit Edelstahl ausgekleidet. Im kalten Zustand befinden sich 5700 m³ Wasser im Speicher. Die restlichen 300 m³ werden als Puffervolumen verwendet, um bei einer maximalen Aufheiztemperatur von 95 °C der Wärmeausdehnung entgegenzuwirken [19].

Abbildung 20: Vakuumpufferspeicher [19]

Abbildung 21: Großwasserspeicher [19]

3.5.2 Feststoffspeicher für Hochtemperaturwärme

Winderhitzer, wie in Abbildung 22 mit möglichen Formsteinarten für Feststoffspeicher dargestellt, werden in der Roheisenherstellung verwendet und dienen als Beispiel für einen Hochtemperatur-Feststoffspeicher. Mit einer Leistung von 100 MW und einer Temperatur von ca. 1300 °C weisen Winderhitzer 3000 Zyklen pro Jahr auf [19]. Beim Ladevorgang durchströmen die Verbrennungsgase den Speicher und erhitzen das aus Formsteinen aufgebaute Gitter. Für den Entladevorgang wird der Speicher von Umgebungsluft durchströmt. Diese nimmt dabei die Wärme der Formsteine auf und wird anschließend dem Hochofen zugeführt. Durch den Druckwechsel beim Lade- und Entladevorgang ist es jedoch erforderlich 3 – 4 Winderhitzer parallel zu schalten, um einen kontinuierlichen Betrieb aufrecht zu erhalten [23]. Übergeordnetes Ziel ist eine kontinuierliche Wärmeversorgung über die diskontinuierliche Wärme des Batch-Betriebes [19].

Abbildung 22: Winderhitzer und mögliche Formsteinarten [24]

3.5.3 Latentwärmespeicher

Das Heizkraftwerk Wellesweiter in Abbildung 23 benutzt als Absicherung für die Prozessdampfherstellung einen Latentwärmespeicher. Die Dampfversorgung erfolgt im Normalbetrieb über eine Gasturbine. Sollte es jedoch zu Störungen oder zu einem Ausfall der Gasturbine kommen, übernimmt ein zusätzlich installierter Heizkessel die Dampfversorgung. Dieser Heizkessel wird jedoch dauerhaft in Teillast betrieben und Überschusswärme produziert. Deswegen wird als Ersatz für den Teillastbetrieb des Heizkessels ein Latentwärmespeicher installiert, der die Dampfversorgung bis zum Hochfahren des Ersatzdampfkessels garantiert. Die Kapazität des Speichers beträgt 1,5 MWh. Als Speichermaterial wird $NaNO_3$ (Natriumnitrat) mit einer Schmelztemperatur von 306 °C verwendet. Der Speicher wiegt ca. 30 Tonnen und hat eine Größe von 1,5 m x 2,5 m x 8 m [25].

Ein weiteres Beispiel für einen Latentwärmespeicher liefert das Dampfkraftwerk im spanischen Carboneras (siehe Abbildung 24). Der integrierte Speicher enthält 14 Tonnen Natriumnitratsalz und weist eine Speicherkapazität von 700 kWh auf. Der Phasenübergang des Mediums findet bei 300 °C statt [26].

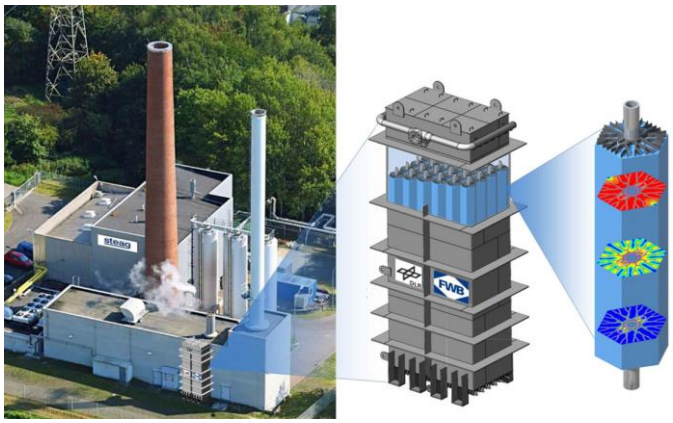

Abbildung 23: Latentwärmespeicher STEAG-Kraftwerk Wellesweiler [25]

Abbildung 24: Latentwärmespeicher Dampfkraftwerk Carboneras [26]

3.5.4 Adsorptionsspeicher

Die Abfallverbrennungsanlage in Hamm (Nordrhein-Westfalen) verwendet einen thermochemischen Speicher in Form einer Pilotanlage eines Adsorptionsspeichers für die Speicherung der entstehenden Abwärme. Da der Speicher mobil ist (siehe Abbildung 25), wird der gespeicherte Energieinhalt jedoch nicht vor Ort verbraucht, sondern in einem 7 km entfernten Unternehmen. Dort wird die gespeicherte Wärme für einen Trocknungsprozess von Kunststoffen verwendet. Anhand dieses Prinzips kann industrielle Abwärme von einem Wärmelieferanten zu einem Abnehmer transportiert werden. Die benötigte Zusatzenergie für Be- und Entladung sowie für den Transport des Speichers beträgt 10% der gespeicherten Energie. Der erzielbare Preis der Anlage liegt bei 0,05 €/kWh. Allgemein ist zu beachten, dass mit zunehmenden Transportweg und Transportaufwand auch die Kosten der Anwendung zunehmen [27; 28].

Das Speicherprinzip beruht auf Zeolith 13X und Wasser in einem offenen System. Die Ladetemperatur beträgt 135 – 250 °C mit einer Speicherkapazität von 2,4 – 3,7 MWh pro Container. Die Entladung erfolgt über feuchte Zuluft in den Speicher mit 55 °C und der daraus resultierenden trockenen Luft aus dem Speicher mit 150 – 210 °C. Die Abmaße eines Containers liegen bei 8,35 m x 2,49 m x 2,85 m [27; 28].

Abbildung 25: Mobiler Adsorptionsspeicher [29]

3.5.5 Sektorenkopplung Power-to-Heat

Ein Beispiel für eine österreichische Power-to-Heat Anlage ist der Heißwasser-Elektrodenkessel für die Fernwärmeversorgung des Heizkraftwerkes Nord der Salzburg AG in Itzling. Da die Produktion von Strom aus Wind und Solar fluktuierend und wetterabhängig ist, kann es bei einem Überangebot an solarer Einstrahlung und Wind zur Stromüberproduktion kommen. Wenn dieser Strom im Netz gerade nicht benötigt wird, kann über die Power-to-Heat Anlage der Strom in Wärme umgewandelt und anschließend direkt ins Fernwärmenetz eingespeichert werden, oder in einem Wärmespeicherturm zwischengespeichert werden. Dadurch wird vermieden, dass überschüssiger Strom verloren geht. Die Leistung des Elektrodenkessels liegt bei 15 MW. Die Anlage wird jedoch nur in Betrieb genommen, wenn Überschussstrom anfällt und eine Zuteilung vom Übertragungsnetzbetreiber (Austrian Power Grid) erfolgt [30].

In Abbildung 26 ist der Wasser-Pufferspeicher des Heizkraftwerkes Nord dargestellt. Das Volumen des Speichers liegt bei 27000 m³ (Höhe beträgt 44 m) mit einer maximalen Speicherkapazität von 1,1 GWh. Die maximale Be- und Entladeleistung liegt bei 60 MW [26; 31].

Abbildung 26: Heizkraftwerk Nord der Salzburg AG [32]

3.5.6 Aktuelle Forschungsprojekte

In Tabelle 7 werden derzeitige Forschungsprojekte zu Wärmespeichern aufgezeigt. Diese werden dazu nach deren thermodynamischen Speicherprinzip eingeteilt. Die Erläuterungen zu den einzelnen Forschungsprojekten beinhalten die Lade- und Entladetemperaturen, sowie den wesentlichen Entwicklungsinhalt, der im Rahmen des Projektes entwickelt werden soll.

Tabelle 7: Forschungsprojekte zu thermischen Speichern [33]

Forschungsprojekt	Entwicklungsfokus
Sensible Speicher	
Gießerei nutzt Abwärme des Schmelzofens	Speichermedium (Feststoffspeicher), Stahl-Speicherkonstruktion Ladetemperatur: bis 300 °C, Entladetemperatur: entsprechend Abnehmer
Große außenaufgestellte Warmwasserspeicher (StoEx)	Großvolumige, preiswerte Warmwasserspeicher mit hocheffizienter Dämmung zur Außenaufstellung Ladetemperatur: 5 – 95 °C, Entladetemperatur: 5 – 95 °C
Segmentbauweise senkt Baukosten für Tankspeicher	Baukostensenkung etablierter und zuverlässiger Wassertanks Ladetemperatur: 40 – 98 °C, Entladetemperatur: 40 – 98 °C
Saisonale Wärmespeicherung in Aquiferen	Speicherkonzeptentwicklung, aufzeigen des Potenzials von Aquiferspeichern Ladetemperatur: 5 – 90 °C, Entladetemperatur: 5 – 90 °C
Latentwärmespeicher	
Wirtschaftlicher dank neuem Phasenwechselmaterial (MALATrans)	Makroverkapselter Latentwärmespeicher für den straßengebundenen Transport von Abwärme; Speichermedium; Speicherkonstruktion sowie Be- und Entladeeinrichtungen: Makroverkapselung Ladetemperatur: 80 – 160 °C, Entladetemperatur: 60 – 140 °C
Abwärme für Herstellung von Betonfertigteilen nutzen	Energieeffiziente Betonfertigteilherstellung mittels Wärmerückführung über Latentwärmespeicher bei gleichzeitiger Verbesserung der Betonqualität; neue Anlagenkomponenten Ladetemperatur: 60 °C, Entladetemperatur: 50 °C
Hochtemperatur PCM	Mesoskalige, metallverkapselte Hochtemperatur-PCM für dynamische Wärmespeicher; Schütt- und pumpfähige Wärmespeicherkapseln Ladetemperatur: 130 – 300 °C, Entladetemperatur: 130 – 300 °C
Slurries für Kühlprozesse (KOLAN)	Kompakte und wirtschaftliche Latentwärmespeicher für Kühlprozesse im Niedertemperaturbereich; Speichermedium mit hoher Wärmekapazität; Be-/Entladeeinrichtungen (PCM-Emulsionen Slurries, Makrokapseln, Verbundmaterialien) Ladetemperatur: 10 – 30 °C, Entladetemperatur: 6 – 25 °C
Dreidimensionales Drahtgeflecht (MOSPEDRA)	Modulare PCM-Speicher mit hoher Leistungsdichte auf Basis von 3D-Drahtstrukturen, Ladetemperatur: 150 – 350 °C, Entladetemperatur: 150 – 350 °C
Phasenwechsel-Material wird kristallisiert (MIKOPUK)	Unterkühlung in mikrokompartierten organischen PCM; gezielte Untersuchung von organischen PCM um neue Anwendungsfelder zu identifizieren
Sonnenwärme über Wochen speichern	Teil-saisonaler thermischer Energiespeicher mit hoher Speicherdichte auf Basis eines Wasserschichtspeichers mit PCM-Elementen; Speichermedium und Speicherkonstruktion Ladetemperatur: 35 – 95 °C, Entladetemperatur: 35 – 95 °C
„SALSA“ macht Dampf und Abwärme nutzbar	Salzbasierter Latentwärmespeicher für solare Dampferzeugung und Abwärmenutzung; Be-/Entladeeinrichtung Ladetemperatur: 200 – 300 °C, Entladetemperatur: 180 – 280 °C
Thermochemische Speicher	
Trocknung mit offenen Sorptionsprozessen	Wärme- und Stoffübergang im Absorber und Regenerator; Komponenten (Absorber, Regenerator, 2-Kammer Speicherbehälter) und Systeme im Labor und in einer Feldtestanlage; Untersuchung geeigneter Sorbentien Ladetemperatur: ab ca. 50 °C, Entladetemperatur: Hub von ca. 10 K

Aktivkohle für sorptive Wärmespeicher	Sorptionswärmespeicher auf Basis neuer hydrophilisierter Aktivkohlen; Sorptiver Formkörper mit Wabenstruktur für Sorptionswärmespeicher Ladetemperatur: 70 – 120 °C, Entladetemperatur: 25 – 40 °C
Sorptive Wärmespeicher (MoGeSoWa)	Modularer, geschlossener, sorptiver Wärmespeicher zur Energieeffizienzsteigerung von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen Ladetemperatur: 80 – 300 °C, Entladetemperatur: 40 – 130 °C
Metallhydride schneller speichern mit Graphit	Hochdynamische thermochemische Energiespeicher auf Basis von Hybrid-Graphit-Verbundwerkstoffen Temperaturbereich: noch nicht definiert, jedoch Hochtemperaturbereich denkbar
Speicherdichte mit Salzhydraten erhöhen	Optimierung der Speicherdichte eines thermochemischen Speichers für solare Wärme unter Verwendung von Komposit-Materialien aus Salzhydraten und hierarchisch strukturierten porösen Trägermaterialien Ladetemperatur: max. 150 °C, Entladetemperatur: < 50 °C
Wärme auf kleinstem Raum speichern	Thermochemische Festphasen-Wärmespeicher mit optimierten Wärmeleiteigenschaften Materialabhängig: Ladetemperatur: 150 – 300 °C, Entladetemperatur: 100 – 250 °C
Wärmespeicherung in Kalk (BERTI)	Bewegtes Reaktionsbett zur thermochemischen Energiespeicherung mit Calziumoxid; Prozessführung und Funktionsnachweis Ladetemperatur: 400 – 600 °C, Entladetemperatur: 400 – 600 °C
Energiedichte von Wärmespeichern erhöhen (MAKSORE)	Materialien und Komponenten für Sorptionswärmespeicher mit hoher Energiedichte Ladetemperatur: bis. 250 °C, Entladetemperatur: mindestens 40 °C oder 30 K Hub
Langzeitwärmespeicher zur Gebäudebeheizung (EnErChem)	Erprobung eines chemisch-sorptiven Langzeitwärmespeichers für die Gebäudebeheizung Ladetemperatur: > 130 °C, Entladetemperatur: 35 °C
Wärme in Aktivschichten speichern (NEOTHERM)	Synthese und Charakterisierung von funktional-beschichteten Kompositmaterialien zur thermischen Energiespeicherung - Nachwuchsgruppe 'Neuartige Kompositwerkstoffe für die thermochemische Energiespeicherung' (NEOTHERM) Temperaturbereich: wird im Projekt untersucht

4 SWOT Analyse von thermischen Speichern

Die SWOT-Analyse liefert einen umfassenden Überblick über interne Stärken (Strenghts) und Schwächen (Weaknesses), sowie über externe Risiken (Threats) und Chancen (Opportunities) eines Unternehmens, eines Geschäftsbereiches oder eines Produktes [34]. Der Nutzen einer SWOT-Analyse liegt in folgenden Punkten [34]:

- Transparente Darstellung der Stärken und Schwächen gespiegelt an den Möglichkeiten und Risiken
- Fokussierung der Aktivitäten
- Identifikation von Handlungsbedarf
- Erarbeitung einer Basis für die strategische Planung (Ausbauen der Stärken, Stärken der Schwächen)

Um nun eine breite Informations- und Diskussionsbasis für thermische Speicher zu schaffen, wird eine detaillierte SWOT-Analyse durchgeführt. In den nachfolgenden Kapiteln werden zu den Speicherkategorien sensibel, latent und thermochemisch unterschiedliche Technologien analysiert und diskutiert.

4.1 Sensible Wärmespeicher

4.1.1 Wasserspeicher

Tabelle 8: SWOT Analyse Wasserspeicher [13; 19]

Intern	Stärken	Schwächen
	▪ Kostengünstige Speicher ▪ Es gibt bereits viele etablierte Anlagen ▪ Bewährte, einfache Technik ▪ Hohe Lebensdauer und Zyklenfestigkeit ▪ Verwendung als Kurzzeit- sowie als Langzeitspeicher möglich ▪ Speichermedium Wasser ist nahezu kostenlos ▪ Keine Umweltgefährdung durch Wasser ▪ Hohe Speicherdichte unter Flüssigkeiten bei hoher Temperaturspreizung ▪ Hohe Übertragungsleistung ▪ Moderate Investitionskosten für Speicherbehälter	▪ Einsatz nur für Niedertemperaturanwendungen < 120 °C ▪ Großer Platzbedarf ▪ Hohe Selbstentladung im Stand-by ▪ Mittlere Wirkungsgrade
Extern	Möglichkeiten	Gefahren
	▪ Entstehung einer Kostendegression durch große Behälter ▪ Zunahme an Wärmespeicherbedarf durch die Energiewende ▪ Materialien für Hochtemperaturanwendungen ▪ Oftmals in Verwendung in Verbindung mit Solarenergie ▪ Notwendig für Geothermie, Wärmepumpen und für die Flexibilisierung von KWK ▪ Chancen in Fernwärme, Wärmenetze und Langzeitspeicherung	▪ Fossil erzeugte Wärme ist derzeit sehr kostengünstig und konkurriert deshalb mit Wärmespeichern

4.1.2 Flüssigsalzspeicher

Tabelle 9: SWOT Analyse Flüssigsalzspeicher [13; 19]

	Stärken	Schwächen
Intern	▪ Kommerziell demonstrierte Technologie ▪ Einsatz von unkritischen Materialien ▪ Leistung und Kapazität sind frei skalierbar ▪ Hohe Lebensdauer und Zyklenfestigkeit	▪ Mindestgröße erforderlich um Einfrieren und zu große Selbstentladungsverluste zu verhindern ▪ Kosten werden durch Salzinventar bestimmt ▪ Bewegte Teile wie Pumpen notwendig ▪ Temperaturbereich ist eingeschränkt auf Grund der Stabilitätsgrenze der Salze und der Schmelztemperatur
	Möglichkeiten	**Gefahren**
Extern	▪ Neue potenzielle Anwendungsfelder erschließbar (Power-to-Heat, Flexibilisierung von konventionellen KWK-Anlagen, Hochtemperaturprozesse in der Industrie, Heizkraftwerk) ▪ Entstehung einer Kostendegression durch breite Markteinführung möglich ▪ Entstehung einer Kostendegression mit Hilfe von neuen Speicherkonzepten durch Substitution von Salz mit neuen günstigeren Füllstoffen ▪ Keine standortspezifischen Anforderungen für Speicher	▪ Marktvolumen von Nitraten beschränkt (insbesondere von Natriumnitrat), es kann zu Engpässen kommen bei zügigem Ausbau von solarthermischen Kraftwerken ▪ Fossil erzeugte Wärme ist derzeit sehr kostengünstig und konkurriert deshalb mit Wärmespeichern

4.1.3 Hochtemperatur-Feststoffwärmespeicher

Tabelle 10: SWOT Analyse Hochtemperatur-Feststoffwärmespeicher [19]

	Stärken	Schwächen
Intern	▪ Einspeichertemperatur entspricht nahezu Ausspeichertemperatur ▪ Keine brennbaren Eigenschaften ▪ Geringe Investitionskosten möglich ▪ Leistung und Kapazität sind frei skalierbar ▪ Hohe Lebensdauer und unbegrenzte Zyklenfestigkeit	▪ Derzeitige Einsatzfähigkeit nur für gasförmige Medien ▪ Thermomechanische Spannungen durch günstige Materiallösungen (Natursteinschüttungen) ▪ Abfall der Temperatur am Ende des Entladevorgangs
	Möglichkeiten	**Gefahren**
Extern	▪ Reduktion der Kosten möglich durch optimierte Materialauswahl ▪ Flexible Nutzung durch geeignete Auslegung ▪ Keine standortspezifischen Anforderungen für Speicher	▪ Fossil erzeugte Wärme ist derzeit sehr kostengünstig und konkurriert deshalb mit Wärmespeichern

4.1.4 Erdwärmesonden- und Aquiferspeicher

Tabelle 11: SWOT Analyse Erdwärmesonden- und Aquiferspeicher [19]

	Stärken	Schwächen
Intern	▪ Kostengünstig ▪ Hohe Lebensdauer und Zyklenfestigkeit ▪ Anwendung getrennt als Wärmespeicher und Kältespeicher oder in Kombination	▪ Standortspezifische Anforderungen (Geologie und Hydrogeologie muss geeignet sein) ▪ Nur als Großspeicher sinnvoll
	Möglichkeiten	**Gefahren**
Extern	▪ Entstehung einer Kostendegression durch größere Anlagen ▪ Zunahme an Wärmespeicherbedarf durch die Energiewende	▪ Abfall der Temperatur am Ende des Entladevorgangs ▪ Wasserrechtliche Genehmigungen

4.2 Latentwärmespeicher (PCM-Speicher)

4.2.1 Niedertemperatur-Latentwärmespeicher

Tabelle 12: SWOT Analyse PCM-Speicher [8; 13; 19]

	Stärken	Schwächen
Intern	▪ Hohe Lebensdauer und Zyklenfestigkeit (abhängig vom PCM) ▪ Hohe Speicherdichten erreichbar ▪ Wärmespeicherung erfolgt isotherm ▪ Hohe Wirkungsgrade erzielbar	▪ Durch die Wahl des Speichermediums wird die Einsatztemperatur bestimmt ▪ Kosten ▪ Noch nicht etabliert ▪ Niedrige Wärmeleitfähigkeit ▪ Festgelegte Temperatur ▪ Instabile Kapselungen ▪ Leistungslimitierung bei gekapselten PCM ▪ Bei Wärmeanwendungen mit großen nutzbaren Temperaturdifferenzen ist die Speicherdichte im Vergleich zu Wasser nicht viel besser
	Möglichkeiten	**Gefahren**
Extern	▪ Entstehung einer Kostendegression durch neue günstigere Verkapselungen ▪ Großes F&E-Potenzial ▪ Materialien für Hochtemperaturanwendungen ▪ Chance für Klimatisierung und Spezialanwendungen ▪ Zunahme an Wärmespeicherbedarf durch die Energiewende	▪ Kostenzunahme infolge von steigenden Rohstoffkosten ▪ Langzeitstabilität

4.2.2 Hochtemperatur-Latentwärmespeicher

Tabelle 13: SWOT Analyse Hochtemperatur-Latentwärmespeicher [8; 19]

	Stärken	Schwächen
Intern	▪ Leistung und Kapazität sind frei skalierbar ▪ Hohe Lebensdauer und Zyklenfestigkeit ▪ Keine brennbaren Eigenschaften ▪ Tiefentladungsfähig	▪ Durch die Wahl des Speichermediums wird die Einsatztemperatur bestimmt ▪ Niedrige Wärmeleitfähigkeit ▪ Noch nicht etabliert ▪ Komplexer Wärmeübergang
	Möglichkeiten	**Gefahren**
Extern	▪ Keine standortspezifischen Anforderungen für Speicher (keine Brennbarkeit, keine Gasentwicklung) ▪ Reduktion der Kosten durch optimierte Wärmeübertragergeometrie ▪ Reduktion der Kosten durch hohe Produktionsstückzahlen von Komponenten des Wärmeübertragers	▪ Um eine effektive Integration zu gewährleisten, sind Kenntnisse über instationäre Wärmeströme in der Anwendung erforderlich. In der Prozessindustrie sind diese Kenntnisse jedoch häufig nicht verfügbar. ▪ Langzeitstabilität

4.3 Thermochemische Speicher

Tabelle 14: SWOT Analyse Thermochemische Speicher [8; 13; 35]

	Stärken	Schwächen
Intern	▪ Sehr hohe Wirkungsgrade ▪ Geringe Investitionskosten ▪ Langzeitspeicherung ▪ Unbegrenzte Zyklenzahl ▪ Keine Brennbarkeit der Materialien ▪ Höchste Energiedichte erzielbar ▪ Keine sensiblen Verluste	▪ Noch nicht etabliert ▪ Geringe Wärmeleitfähigkeit der Materialien ▪ Unbefriedigende Energiedichte, wenn Material nur einfach geschüttet wird ▪ Geometrie des Wärmetauschers im Soprtionsmaterial ist entscheidend für Wärmeübergang und Wasseraufnahme
	Möglichkeiten	**Gefahren**
Extern	▪ Großes Forschungs- und Entwicklungspotenzial ▪ Einstellbare Temperatur ▪ Chance für verlustfreien Wärmetransport und Langzeitspeicherung	▪ Forschung und Entwicklung noch notwendig um TRL zu erhöhen ▪ Starke Abhängigkeit von Umgebungsbedingungen ▪ Schwierigkeiten bei dauerhafter Verbindung von Materialien mit einem Metall-Wärmetauscher

5 Anwendungsfelder thermischer Speicher in oberösterreichischen Industriebranchen

In diesem Kapitel werden Anwendungsfelder thermischer Wärmespeicher in oberösterreichischen Industriebranchen diskutiert. Dazu werden in einem ersten Schritt die Einsatzbereiche der Speichertechnologien nach deren Temperaturniveau aufgezeigt, und in einem zweiten Schritt die Speichertechnologien den Industriebranchen zugeordnet um potenzielle Anwendungsfelder zu identifizieren.

5.1 Temperatureinsatzbereiche thermischer Wärmespeicher

In Abbildung 27 sind auf der vertikalen Achse derzeit relevante Speichertechnologien, klassifiziert nach dem Wärmespeicherprinzip (sensibel, latent und thermochemisch), aufgelistet. Die horizontale Achse gibt den dazugehörigen Temperatureinsatzbereich an. Wie aus Abbildung 27 ersichtlich, werden latente Speicher vor allem im Niedertemperaturniveau eingesetzt, thermochemische Speicher bei Temperaturen bis zu 1450 °C, und sensible Speicher bis zu 1000 °C. Je nach gewünschtem Einsatzgebiet und vorhandenem Temperaturniveau des Unternehmens, wird für jeden spezifischen Anwendungsfall eine eigene Auswahl basierend auf Kosten, Speicherdichte, Randbedingungen und sonstigen Anforderungen getroffen. Weitere wichtige Einflussgrößen und Parameter für eine standortspezifische Speicherintegration werden in Kapitel 6 erläutert. Im nachfolgenden Kapitel werden den Wärmespeichern potenzielle Einsatzgebiete in oberösterreichischen Industriebranchen basierend auf deren Temperaturniveaus zugeordnet.

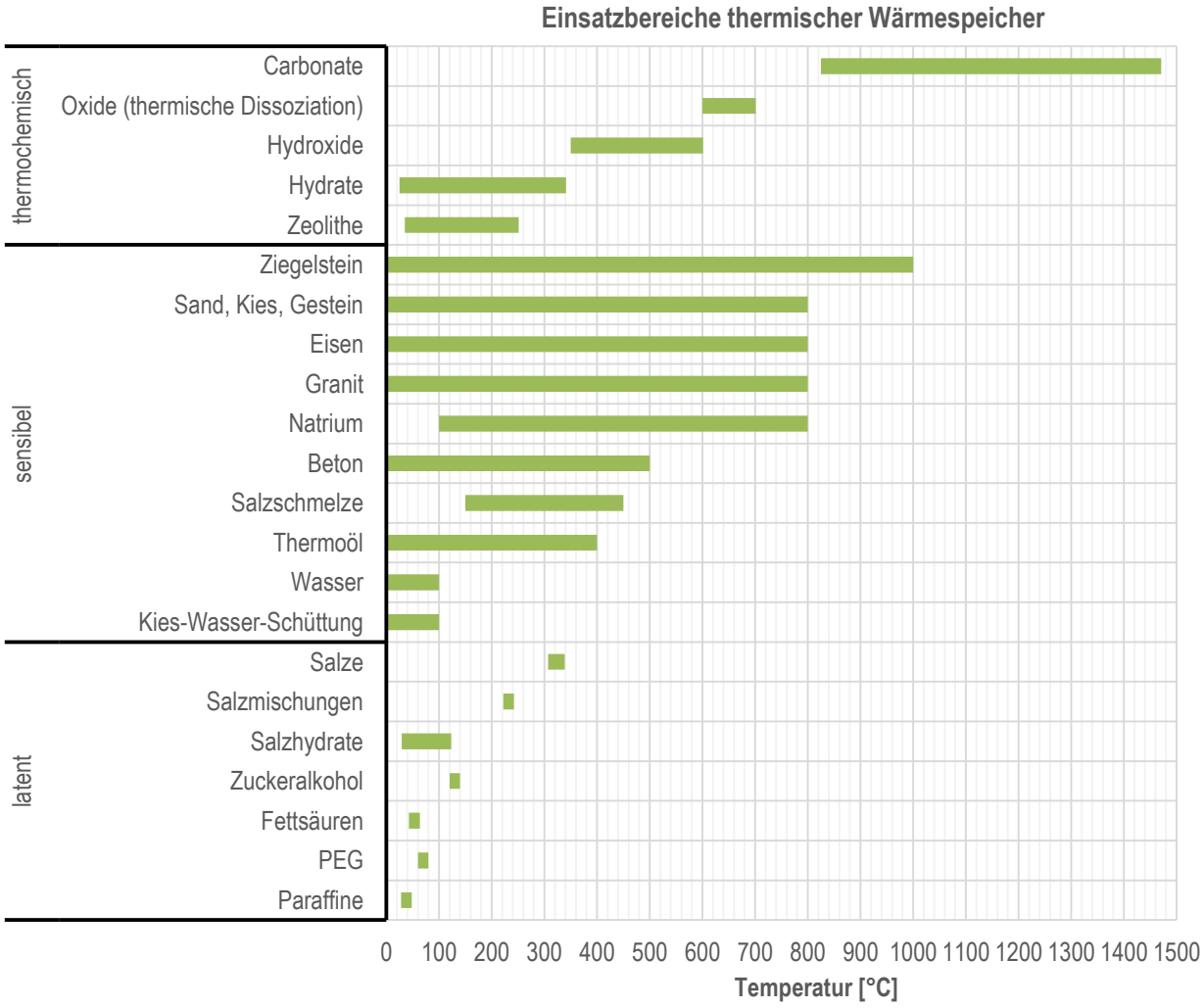

Abbildung 27: Einsatzbereiche thermischer Energiespeicher nach Temperaturniveau (eigene Darstellung, für Datenquellen siehe Anhang Tabelle 17)

5.2 Abgeleitete Einsatzgebiete von Wärmespeichern in oberösterreichischen Industriebranchen

In Tabelle 15 werden potenzielle Anwendungsfelder thermischer Energiespeicher für unterschiedliche Industriebranchen in Oberösterreich analysiert. Vertikal werden dazu die einzelnen Speichertechnologien characterisiert, und horizontal die jeweiligen Industriebranchen. In den ersten Spalten ebenfalls die spezifischen Temperaturbereiche der einzelnen Speichertechnologien [°C], die dazugehörige Speicherdichte [kWh/m³] und die spezifischen Investitionskosten [€/kWh] der einzelnen Technologien zusammengefasst. Die Zeilen geben einen genaueren Einblick in die jeweiligen Branchen. Für jede Branche wird dazu die Anzahl der vorhandenen Firmen identifiziert, sowie der Wärmebedarf nach Temperaturniveau abgeschätzt. Anschließend erfolgt das Ableiten potenzieller Anwendungsfelder, indem Speichertechnologien den Temperaturniveaus der einzelnen Branchen zugeordnet werden.

Für jede Branche gibt es Temperaturniveaus eingestuft in RW + WW (Raumwärme + Warmwasser), < 100 °C, 100 – 500 °C, 500 – 1000 °C und > 1000 °C. Basierend darauf, ist für jedes Temperaturniveau der Wärmebedarf abgeschätzt worden. Um pro Branche die Intensität des Wärmebedarfs in den unterschiedlichen Temperaturniveaus zu visualisieren, ist der Wärmebedarf anhand einer Farbskala hinterlegt. Je dunkler dabei die Einfärbung, desto größer ist in diesem Temperaturniveau der Wärmebedarf. Ist keine Einfärbung vorhanden (weiß), dann ist in diesem Temperaturniveau derzeit kein signifikanter Wärmebedarf zugeordnet. Um nun Anwendungsfelder von Wärmespeichern in Industriebranchen zu identifizieren, werden mit Hilfe von Ampelsymbolen (grün, gelb und rot) die einzelnen Speichertechnologien den unterschiedlichen Temperaturniveaus zugeordnet und deren Eignung qualitativ beurteilt. Eine genauere Erläuterung der Ampelsymbole sowie der Farbskalierung ist in der Legende von Tabelle 15 enthalten.

Überall dort, wo nun in einer Zelle ein grünes Ampelsymbol und die dunkel verfärbteste Fläche (größter Endenergieverbrauch) gemeinsam anzutreffen sind, ist ein großes Anwendungspotential für die berücksichtigten Wärmespeicherarten gegeben. In diesen Zellen stimmen der Einsatzbereich der jeweiligen Speichertechnologie mit der Wärmebedarfsintensität im jeweiligen Temperaturniveau der Branche gut überein. Durch diesen Auswertevorgang ist es jetzt möglich, für jede Branche passende Speichertechnologien im jeweiligen Temperaturniveau unter Berücksichtigung des Endenergieverbrauches aufzuzeigen. Wichtig zu beachten ist jedoch, dass auch andere Kombinationen (z.B. gelbes Ampelsymbol mit mittlerem Endenergieverbrauch oder grünes Ampelsymbol mit geringem Endenergieverbrauch) Anwendungsfelder darstellen können und somit nicht kategorisch auszuschließen sind.

Die verwendeten Daten für die Ausarbeitung dieser Tabelle wurden im Rahmen dieses Projektes erarbeitet und im gegenständlichen Bericht dokumentiert. Die notwendigen Informationen sowie deren Quellen entstammen den folgenden Kapiteln:

- Für Temperatureinsatzbereiche der Speichertechnologien siehe Anhang und Tabelle 17: Übersicht Speicherkenndaten
- Für Speicherdichten siehe Kapitel 2.3 „Arten von Wärmespeichern“ und Tabelle 2: Technoökonomische Kenndaten von Wärmespeichertechnologien
- Für spezifische Investitionskosten siehe Kapitel 2.3.6 „Kosten“ und Tabelle 2: Technoökonomische Kenndaten von Wärmespeichertechnologien
- Für Branchen in Oberösterreich siehe Kapitel 2.1 „Wärmebedarf in der oberösterreichischen Industrie“ und Abbildung 3: Endenergiebedarf OÖ 2016 nach Branche unterteilt in Nutzenergiekategorien
- Für die Anzahl der Unternehmen pro Branche siehe Kapitel 2.1 „Wärmebedarf in der oberösterreichischen Industrie“ und Tabelle 1: Berechneter Wärmebedarf je Branche nach Temperaturniveau und Anzahl an Unternehmen in OÖ

- Für den abgeschätzten Wärmebedarf nach Temperaturniveau siehe Kapitel 2.1 „Wärmebedarf in der oberösterreichischen Industrie“ und Tabelle 1: Berechneter Wärmebedarf je Branche nach Temperaturniveau und Anzahl an Unternehmen in OÖ

Tabelle 15: Anwendungsfelder thermischer Speicher in oberösterreichischen Industriebranchen (eigene Darstellung, basierend auf Tabelle 1, Tabelle 2, Tabelle 5 und Tabelle 17)

Legende:

- Prioritäres Anwendungsfeld
- Mögliches Anwendungsfeld
- Keine geplante Anwendung
- Derzeit keine wesentliche Nachfrage

- Größter Endenergieverbrauch in diesem Temperaturniveau
- Mittlerer Endenergieverbrauch in diesem Temperaturniveau
- Geringer Endenergieverbrauch in diesem Temperaturniveau
- Kein Endenergieverbrauch in diesem Temperaturniveau

Speichertechnologien		Temperaturbereich [°C]	Speicherdichte [kWh/m³]	Spezifische Investitionskosten [€/kWh]
thermochemisch	Carbonate	425 – 1450	150 – 500	8 – 100
	Oxide (thermische Dissoziation)	600 – 700		
	Hydroxide	350 – 600		
	Hydrate	25 – 340		
	Zeolithe	35 – 250		
sensibel	Ziegelstein	0 – 1000	70 – 200	15 – 50
	Sand, Kies, Gestein	0 – 800		
	Eisen	0 – 800		
	Granit	0 – 800		
	Natrium	100 – 800		
	Beton	0 – 500		
	Salzschmelze	150 – 450		
	Thermoöl	0 – 400		
	Wasser	0 – 100		
	Kies-Wasser-Schüttung	0 – 100		
latent	Salze	307 – 333	100	40 – 80
	Salzmischungen	222		
	Salzhydrate	29 – 117		
	Zuckeralkohol	120		
	Fettsäuren	43 – 58		
	PEG	60		
	Paraffine	28		

Anwendungseignung nach Temperaturniveau

Branchen	Anzahl Firmen	Abgeschätzer Wärmebedarf je Temperaturniveau [TJ]	Temperaturniveau
Eisen- und Stahlerzeugung	3	615	RW+WW
		102	< 100 °C
		307	100 - 500 °C
		3.893	500 - 1000 °C
		15.571	> 1000 °C
Chemie und Petrochemie	181	1.153	RW+WW
		2.076	< 100 °C
		3.229	100 - 500 °C
		7.074	500 - 1000 °C
		1.845	> 1000 °C
Papier und Druck	28	2.460	RW+WW
		2.767	< 100 °C
		10.147	100 - 500 °C
		0	500 - 1000 °C
		0	> 1000 °C
Steine und Erden, Glas	156	416	RW+WW
		46	< 100 °C
		277	100 - 500 °C
		2.773	500 - 1000 °C
		5.730	> 1000 °C
Nahrungs- und Genußmittel, Tabak	192	1.642	RW+WW
		2.168	< 100 °C
		2.759	100 - 500 °C
		0	500 - 1000 °C
		0	> 1000 °C
Maschinenbau	414	2.184	RW+WW
		655	< 100 °C
		568	100 - 500 °C
		437	500 - 1000 °C
		524	> 1000 °C
Nichteisen Metalle	9	91	RW+WW
		15	< 100 °C
		46	100 - 500 °C
		578	500 - 1000 °C
		2.314	> 1000 °C
Holzverarbeitung	325	220	RW+WW
		1.167	< 100 °C
		305	100 - 500 °C
		0	500 - 1000 °C
		0	> 1000 °C
Fahrzeugbau	45	784	RW+WW
		240	< 100 °C
		208	100 - 500 °C
		160	500 - 1000 °C
		208	> 1000 °C
Bau	57	258	RW+WW
		113	< 100 °C
		419	100 - 500 °C
		258	500 - 1000 °C
		564	> 1000 °C
Sonst. Produzierender Bereich	k.A.	615	RW+WW
		0	< 100 °C
		105	100 - 500 °C
		457	500 - 1000 °C
		0	> 1000 °C
Bergbau	21	38	RW+WW
		0	< 100 °C
		353	100 - 500 °C
		198	500 - 1000 °C
		0	> 1000 °C
Textil und Leder	75	82	RW+WW
		82	< 100 °C
		0	100 - 500 °C
		0	500 - 1000 °C
		0	> 1000 °C

6 Einflussgrößen für eine forcierende Speicherintegration in Oberösterreich

Wärmespeicher werden nach unterschiedlichen Gesichtspunkten ausgewählt. Häufig erfolgt die Auswahl unter Berücksichtigung von systemtechnischen Aspekten. Sensible Wärmespeicher werden meist in Kombination mit einphasigen Arbeitsmedien ausgewählt, während Latentwärmespeicher hingegen oft in Systemen mit zweiphasigen Arbeitsmedien verwendet werden. Um jedoch eine erfolgreiche wirtschaftliche Speicherauswahl zu treffen, ist eine optimale Systemintegration essentiel. Das heißt, dass eine gute Anpassung des Speichers für die Energieerzeugung (z.B. der Anlagenteile für die Beladung), sowie für den Energieverbrauch (z.B. der Anlagenteile für die Entladung) unabdingbar ist. Somit werden Auslegungsfaktoren und Kenngrößen erst durch einen konkreten Anwendungsfall eines Speichers bestimmt und daher sind allgemeine Angaben zu z.B. Kosten über thermische Speicher prinzipiell sehr eingeschränkt möglich [18]. Die wesentlichen Kosten eines Wärmespeichers bestimmen sich aus nachfolgenden systemtechnischen Faktoren des Anwendungsfalls [18]:

- Speicherkapazität und Leistungsdichte
- Leistung während der Be- und Entladung
- Temperatur- und Druckniveau
- Wärmeträgermedium für die Ein- und Auskopplung der Energie
- Frequenz der Lade- und Entladezyklen
- Zulässige Anfahrzeiten.

Um die unterschiedlichsten Energiespeicher (mechanisch, elektrisch, chemisch und thermisch) untereinander vergleichen zu können, werden physikalische Kenngrößen verwendet. Anhand dieser Größen können Speicher für beliebige Anwendungszwecke verglichen und anschließend je nach Bedarf passend ausgewählt werden.

Energiespeicher können auch nach

- zeitlichen
- räumlichen
- und ökonomischen

Aspekten klassifiziert werden. In Bezug auf zeitliche Aspekte, erfolgt hinsichtlich der Entladedauer von Speichern eine Einteilung in Kurzzeitspeicher (Sekunden, Minuten, Stunden und Tage) und Langzeitspeicher (Wochen, Monate und Saison). Betreffend räumlichen Aspekten, wird zwischen großen zentralen und kleineren dezentralen Speichern unterschieden. Darüber hinaus wird bei räumlichen Speichern noch zwischen ortsfesten (an einen Ort gebunden) und mobilen Speichern (positionierbar) unterteilt. Der letzte Aspekt betrifft eine Unterscheidung nach wesentlichen Kostenstrukturen. Dabei wesentlich sind die Kapitalkosten (Investitionskosten), Betriebskosten, Amortisationszeit sowie die geplante Nutzungsdauer. Üblich ist es dabei die Kapitalkosten auf die installierte Leistung (€/kW) oder installierte Speicherkapazität (€/kWh) zu beziehen, und die Betriebskosten auf die umgesetzte Energie (€/kWh) [13]. Tabelle 16 definiert und erläutert die wesentlichen physikalischen und energetischen Kenngrößen von Energiespeichern [13; 19].

Tabelle 16: Einflussgrößen einer erfolgreichen Speicherintegration in Oberösterreich [13; 19]

Kenngröße [Einheit]	Beschreibung
Leistungsgrößen	
Leistung P [W]	Leistung als Energie pro Zeit
Einspeicherleistung P_{ein} (auch zugeführte Leistung P_{zu}) [W]	Einspeicherleistung (Ladeleistung) als Energie/Arbeit/Wärme pro Zeit
Ausspeicherleistung P_{aus} (auch abgeführte Leistung P_{ab}) [W]	Ausspeicherleistung (Entladeleistung) als Energie/Arbeit/Wärme pro Zeit
Einspeicherverlustleistung $P_{V,ein}$ [W]	Verlustleistung, die durch die Energiewandlung in der Einspeicherung entsteht
Speicherverlustleistung $P_{V,sp}$ [W]	Verlustleistung, die während des Speicherns (Halten) über t_{sp} durch die Selbstentladung und Stand-by entsteht
Stand-by-Verlustleistung $P_{V,SB}$ [W]	Verlustleistung, die während des Speicherns (Halten) über t_{sp} durch den Bereitschaftszustand (Stand-by) entsteht
Selbstentladungsverlustleistung $P_{V,SE}$ [W]	Verlustleistung, die während des Speicherns (Halten) über t_{sp} durch die Selbstentladung entsteht
Ausspeicherverlustleistung $P_{V,aus}$ [W]	Verlustleistung, die durch die Energiewandlung in der Ausspeicherung entsteht
Leistungsdichte p [W/kg, W/m³]	Nutzbare Leistung pro Masse bzw. Volumen
Leistungsgradient LG [W/s]	leistungsbezogene Ein-/Ausspeichergeschwindigkeit (Lade-/Entladegeschwindigkeit)
Energiegrößen	
Energie E, Arbeit W [Wh] (Energiemenge, Speicherkapazität)	nutzbarer Energieinhalt des Speichers
Energiedichte e [Wh/kg, Wh/m³]	Nutzbare Energiemenge pro Masse bzw. Volumen
Gespeicherte Energie $E_{sp,start}$ [Wh] (Energieinhalt als Energie E, Arbeit W, Wärme Q, Maximalwert als Speicherkapazität)	Gespeicherte Energie im Energiespeicher (Energieinhalt), für Maximalwerte (Speicherkapazität) $E_{sp,max}$
Verbleibende Energie $E_{sp,end}$ [Wh]	Verbleibende Energie im Energiespeicher nach der Speicherdauer t_{sp} (gespeicherte Energie abzüglich Verluste durch t_{sp} Selbstentladung und Stand-by)
Einzuspeichernde oder zugeführte Energie E_{ein} (bzw. E_{ein}) [Wh]	Einzuspeichernde oder zugeführte Energie in einen Energiespeicher (Ladevorgang)
Speicherverlust $E_{V,sp}$ [Wh]	Verlust, der während des Speicherns (Halten) über t_{sp} durch die Selbstentladung und Stand-by entsteht
Selbstentladeverlust $E_{V,SE}$ [Wh]	Verlust, der während des Speicherns (Halten) über t_{sp} durch Selbstentladung entsteht
Stand-by-Verlust $E_{V,SB}$ [Wh]	Verlust, der während des Speicherns (Halten) über t_{sp} durch Stand-by entsteht
Ausgespeicherte oder ausspeicherbare Energie (E_{ab}) aus E_{ab}	Ausgespeicherte oder ausspeicherbare Energie aus einen Energiespeicher (Entladevorgang)
Zeitgrößen und Wirkungsgrad	
Wirkungsgrad η [%]	Effizienz eines Energiewandlungs- oder -speicherprozesses
Einspeicherwirkungsgrad η [%]	Effizienz des Energiewandlungsprozesses der Einspeicherung
Speicherwirkungsgrad η [%]	Effizienz des Speicherprozesses (gespeicherte Energie halten)
Ausspeicherwirkungsgrad η [%]	Effizienz des Energiewandlungsprozesses der Ausspeicherung

Gesamtwirkungsgrad η_{ges} eines Speicherzyklus mit der Speicherdauer t_{sp} [%]	Effizienz des gesamten Energiespeicherprozesses eines Zyklus mit der Speicherdauer t_{sp}
Selbstentladungsrate SR [%/Tag, %/Woche, %/Monat]	Anteil der während einer Zeitspanne durch Selbstentladung verlorenen gespeicherten Energie
Einspeicherdauer t_{ein} [s]	Dauer des Einspeichervorgangs (Ladevorgangs)
Speicherdauer t_{sp} [s]	Dauer des eigentlichen Speicherns bzw. Haltens der Energie
Ausspeicherdauer t_{aus} (E/P-Verhältnis, E/P-Ratio) [s]	Dauer des Ausspeichervorgangs (Entladevorgangs); auch E/P-Verhältnis (E/P-Ratio) genannt
Reaktionszeit t_{RZ} [s]	Dauer für den Übergang aus dem Stillstand bzw. Ruhezustand in einen Betriebszustand, aus dem unmittelbar die Ein- oder Ausspeicherung erfolgen kann
Zyklenzahl pro Tag, Woche, Jahr z [-]	Einsatzhäufigkeit des Energiespeichers: Anzahl eines Speicherzyklus (Ladung und Entladung des Speicherinhaltes) innerhalb eines Zeitintervalls
Zyklische Lebensdauer z_{max} [-]	Maximale Anzahl von Speicherzyklen eines Energiespeichers bis zum Erreichen des physikalischen Lebensendes
Kalendarische Lebensdauer [a]	technische Lebensdauer eines Energiespeichers

Die zusammengetragenen wesentlichen physikalischen und energetischen Kenngrößen von Energiespeichern verdeutlichen die Vielfalt an Einflussparametern auf einen konkreten Einsatz eines Wärmespeichersystems und Variablität möglicher Anwendungsfälle. Daraus kann die Notwendigkeit von spezifischen Erhebungen und Charakterisierungen von möglichen Anwendungsfällen auf Unternehmensebene in den für Oberösterreich besonders relevanten Industriebereichen (siehe Tabelle 15) abgeleitet werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Studie werden potenzielle Anwendungsfelder von thermischen Energiespeichern im oberösterreichischen Industrie- und Gewerbebereich analysiert. Dazu wird zu Beginn der Endenergieverbrauch der einzelnen Branchen an Wärme auf Basis einer Top-down-Analyse bestimmt und die wesentlichen Verbrauchssegmente bestehend aus Industrieöfen, Dampferzeugung, Raumwärme und Warmwasser grob unterteilt. **Um detailliertere Informationen hinsichtlich des Endenergieverbrauches je Temperaturniveau zu bekommen, werden über übliche Temperaturverteilungen von Industriebranchen Endenergieverbräuche je Temperaturstufe abgeschätzt.** Dabei werden die Temperaturniveaus in die Stufen RW + WW (Raumwärme + Warmwasser), < 100 °C, 100 – 500 °C, 500 – 1000 °C und > 1000 °C eingeteilt. Dadurch kann für jede Branche aus Oberösterreich der Endenergieverbrauch gegliedert nach unterschiedlichen Temperaturniveaus qualitativ bewertet werden. Wie im Bericht erläutert, werden thermische Energiespeicher angesichts des unterschiedlichen thermodynamischen Speicherprinzips in sensible, latente und thermochemische Wärmespeicher klassifiziert. Zusätzlich können Einteilungen hinsichtlich Speicherdauer (Kurzzeit- oder Langzeitspeicher) und dem Temperaturniveau erfolgen. Während sensible Speicher etabliert sind und einen hohen Entwicklungsstand und eine geringe Speicherdichte aufweisen, verhält es sich bei thermochemischen Speichern genau umgekehrt, die erwarteten Speicherdichten sind hoch, jedoch der Entwicklungsstand gering. Die latenten Wärmespeicher sind mit ihren charakteristischen Eigenschaften in der Mitte zwischen sensiblen und thermochemischen Speichern einzuordnen. Durch sensible Wärmespeicher können prinzipiell Temperaturen bis zu 1.000 C abgedeckt werden. Am häufigsten werden Wasserspeicher auf Grund der geringen Kosten, der relativ hohen spezifischen Speicherkapazität im Vergleich zu anderen sensiblen Speichern, der Umweltverträglichkeit und der großen Verfügbarkeit verwendet. Für hohe Temperaturen sind Feststoffe wie Ziegelstein oder Eisen in Anwendung bzw. in Erprobung. Nachteile von sensiblen Speichern ergeben sich jedoch durch den großen Platzbedarf und die hohen thermischen Verluste, die durch eine Wärmedämmung jedenfalls abgemindert werden müssen. Latente Wärmespeicher eignen sich für Temperaturen bis zu über 300 °C und nutzen die Änderung des Aggregatszustandes des Mediums für den Speichervorgang aus. Die Phasenübergangstemperatur wird dabei bestimmt vom gewählten Speichermedium. Im Vergleich zu sensiblen Speichern, zeichnen sich latente Speicher durch höhere Energiedichten aus. Die größten Energiedichten können durch thermochemische Speicher erzielt werden. Diese nutzen umkehrbare chemische Reaktionen aus, um Energie zu speichern bzw. wieder abzugeben. Derzeit sind diese Speicher jedoch noch sehr selten in der Anwendung, da sich diese Technologien größtenteils noch in der Grundlagenforschung befinden. Einsatzbereiche sind Temperaturen bis zu 1.450 °C. **Im Zuge einer SWOT-Analyse wurden die unterschiedlichen Speichertechnologien hinsichtlich interner Stärken (Strenghts) und Schwächen (Weaknesses), sowie betreffend externer Risiken (Threats) und Chancen (Opportunities) genauer analysiert.** Diese transparente Darstellung der Stärken und Schwächen in Kapitel 4 unterstützt die Ableitung von möglichen Einsatzgebieten von Wärmespeichern in oberösterreichischen Industriebranchen und produzierenden Unternehmen.

Thermische Speicher werden grundsätzlich immer dann eingesetzt, wenn es eine Differenz zwischen Wärmebereitstellung und Bedarf gibt. Dabei übernehmen diese die Funktion, dass entweder ein fehlender Wärmebetrag ausgeglichen, oder überschüssige Wärme gespeichert wird. Dadurch können erneuerbare fluktuierende Energiequellen stärker miteinbezogen und Schwankungen im Wärmebedarfsprofil, ob tages-, saison- oder anwendungsabhängig besser kompensiert werden. Ziel ist es, einen langfristigen Lastausgleich, eine flexible Wärmebereitstellung und eine optimierte Abwärmenutzung durch forcierte Implementierung von Wärmespeichern zu schaffen. Eine Einteilung in Anwendungsbereiche erfolgt dabei in Abwärmenutzung, Abwärmeverstromung, Sektorenkopplung und Systemdienstleistungen. Bei der Abwärmenutzung wird die anfallende Prozesswärme zwischengespeichert, um diese beispielsweise bei Batch-Prozessen zu verwenden, oder um in der Kraft-Wärme-Kopplung die Bereitstellung von Strom und Wärme zu entkoppeln und eine bedarfsgerechte Wärmebereitstellung (z.B. für Fernwärme) zu erreichen. Des Weiteren gibt es die Möglichkeit, die Abwärme in thermische Kreisprozesse

einzubringen und somit Strom zu erzeugen. Eine weitere Option Wärmespeicher zu integrieren bietet die Sektorenkopplung. Diese erlaubt, überschüssige Energie aus einem Sektor (Wärme, Strom, Gas etc.) in einen anderen zu verschieben. Ein typisches Beispiel dafür ist die Power-to-Heat Technologie (Umwandlung von Strom in Wärme, z.B. durch Elektrodenheizkessel), die am Regelenergiemarkt eine Sonderstellung für Systemdienstleistungen einnimmt. Überschüssiger Strom aus dem elektrischen Netz wird bei dieser Anwendung in Wärme umgewandelt und in thermischen Speichern zwischengespeichert. Dadurch wird das Stromnetz stabilisiert und ein Zusatzerlös für aus dem Überschuss erzielt.

Durch den in Kapitel 2und 3 beschriebenen und ermittelten Endenergieverbrauch pro Branche und Temperaturniveau, und **durch die gesammelten Informationen hinsichtlich Temperatureinsatzbereiche und Eigenschaften thermischer Speichertechnologien, wurde eine Auswertung durchgeführt, die die Eignung von Speichertechnologien in den jeweiligen Temperaturniveaus der Industriebranche bewertet**. Die Ergebnisse der Eignung wurden in Tabelle 15 mit Hilfe von Ampelsymbolen (grün, gelb und rot) visualisiert. Zusätzlich wurde die Intensität des Endenergieverbrauches je Temperaturstufe durch Farbverläufe grafisch dargestellt. Mit dieser Auswertung und Zuordnung ist es nunmehr möglich, für jede Branche passende Speichertechnologien im jeweiligen Temperaturniveau unter Berücksichtigung des Endenergieverbrauches grundsätzlich aufzuzeigen.

Um nachgeschaltet eine geeignete Speicherauswahl zu treffen, bedarf es vor allem der Kenntnis der standortspezifischen Eigenschaften (vorhandenes Temperaturniveau, Leistung, geforderte Speicherdauer, verfügbarer Platz, erforderliche Speicherkapazität, Anzahl Lade- und Entladezyklen etc.) und spezifischen Bedarfssituation eines möglichen Anwendungsfalls. In Abstimmung mit den Randbedingungen und Anforderungen des geplanten Anwendungsfeldes können passende Speicherkonzepte erarbeitet werden. Zahlreiche weitere Einflussgrößen bestimmen dabei eine erfolgreiche Speicherintegration in Oberösterreich und sind im Zuge dieser Studie erörtert.

In Zukunft wird es erforderlich sein, Unternehmen aktiv darauf aufmerksam zu machen, vorhandene Wärmepotenziale in ihren Betrieben zu nutzen und somit eine Erhöhung der Primärenergieeffizienz zu forcieren. Dazu bedarf es in einem ersten Schritt dem Aufzeigen von Primärenergiesparmaßnahmen in Form von thermischen Speichern. Derzeit ist der Mangel an Know-how hinsichtlich einer sinnvollen Wärmepotenzialnutzung ein entscheidendes Hemmnis für ein aktives Handeln der Unternehmen. Durch das Einsetzen von Energieberatern, die zusammen mit den Unternehmen in einem maßgescheiderten Beratungsprogramms Wärmepotenziale ermitteln und geeignete Speicherkonzepte ausarbeiten, könnte zukünftig diese Informationslücke geschlossen werden. In einem zweiten Schritt wird es notwendig sein, Förderungen für den effizienten Einsetzen von Wärmespeichern einzuführen. **Teilweise hohe spezifische Investitionskosten für Speichersysteme und unausgereifte Speichertechnologien erschweren derzeit deren Integration in Anwendungen und Unternehmen und somit deren vermehrten Einsatz. Dadurch wird es in einem dritten Schritt erforderlich sein, Demonstrationsprojekte für das Speichern von Abwärme oder Überschussstrom als Power-to-Heat Anlagen zu bauen**. Derartige Forschungs- und Entwicklungsprojekte werden unumgänglich sein, um Speichertechnologien in der Praxis zu erproben und somit Unternehmen von einer zukünftigen Speicherinvestition zu überzeugen.

Im Zuge dieser Studie konnte vorerst nur ein grober Überblick hinsichtlich Speicherarten und deren möglicher Anwendung in oberösterreichischen Industrieunternehmen gegeben werden. Spezifische Aspekte für die unterschiedlichen Speicherkonzepte und wie diese integriert werden können, müssten in einer weiteren Detailierung in repräsentativen Fallstudien genauer ausgearbeitet werden. **Für eine erfolgreich forcierte Speicherintegration in Oberösterreich wird zudem ein maßgeschneidertes Beratungsprgramm unter Erhebung der spezifischen Design- und Einflusskenngrößen auf Unternehmensebene empfohlen.** Als Startpunkt für eine derartige Initiative bieten sich im speziellen die Chemie- und Petrochemie, Papier- und Zellstoffindustrie sowie Nahrungs- und Genussmittelerzeugung an.

Literaturverzeichnis

1 Statistik Austria. *Bundesländer-Energiebilanzen Oberösterreich 1988-2016*, 2017.

2 Wagner H-J, Unger H. Validierung und kommunale Disaggregierung des Expertensystems HERAKLES 2002.

3 Naegler T, Simon S, Klein M *et al.* Quantification of the European industrial heat demand by branch and temperature level. *Int. J. Energy Res.* 2015:2019–30.

4 Jochem E, Idrissova F, Pehnt M *et al.* Die Nutzung industrieller Abwärme – technisch-wirtschaftliche Potenziale und energiepolitische Umsetzung 2010.

5 Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Klima- und Energiefonds. Innovative Energiespeichersysteme in und aus Österreich 2018.

6 Erneuerbare Energie Österreichs. *Arbeitsbereich - Wärme*. http://www.erneuerbare-energie.at/wrme/ (22 November 2018, date last accessed).

7 Seitz A, Zunft S, Hoyer-Klick C. *Technologiebericht. 3.3b Energiespeicher (thermisch, thermo-chemisch und mechanisch) innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende*, 2018.

8 Hauer A. *Thermische Speicher - Neuer Frühling im Zuge der Energiewende*. www.ak-energie.at/pdf/EEK2013/EEK2013_Hauer.pdf (22 November 2018, date last accessed).

9 Hauer A, Hiebler S, Reuß M. *Wärmespeicher*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2013.

10 Reuß M. Wärmespeicher - Ein Baustein der Energiewende 2015.

11 Friedl W, Wild V, Popp H *et al. Technologie-Roadmap. Energiespeichersysteme in und aus Österreich*. Wien, 2018.

12 Klima- und Energiefonds. Abschlussbericht der Speicherinitiative 2016.

13 Sterner M, Stadler I. *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2017.

14 Frauenhofer UMSICHT. Speicher für die Energiewende 2013.

15 Nöller D. Fact Sheet Speichertechnologien. Feststoffspeicher für Hochtemperaturwärme 2016.

16 Alva G, Lin Y, Fang G. An overview of thermal energy storage systems. *Energy* 2018:341–78.

17 Mankins JC. Technology Readiness Levels. A White Paper 1995.

18 Steinmann W-D. EVA-Thermische Energiespeicher zur Verstromung diskontinuierlicher Abwärme 2010.

19 VDI. Energiespeicher. VDI-Statusreport 2017.

20 Deutsche Energie-Agentur GmbH. Systemdienstleistungen 2030 2014.

21 Eller D. *Integration erneuerbarer Energien mit Power-to-Heat in Deutschland*. Wiesbaden: Springer, 2015.

22 E-Control. Ausgleichs– und Regelenergie. Energie-Control Austria für die Regulierung der Elektrizitäts- und Erdgaswirtschaft 2013.

23 Rebhan E. *Energiehandbuch. Gewinnung, Wandlung und Nutzung von Energie*, 2002.

24 Tamme R. Thermische Energiespeicher zur Nutzung industrieller Abwärme 2012.

25 Nöller D. Anwendungsbeispiel Speichertechnologien. Thermische Energiespeicher zur Absicherung der Bereitstellung von Prozessdampf im Heizkraftwerk 2015.

26 Thess A, Trieb F, Wörner A *et al.* Herausforderung Wärmespeicher 2015.

27 Corrodi R, Bertsch S. Hochtemperaturspeicher in der Industrie 2015.

28 KlimaExpo.NRW. *MobS Mobiler Sorptionsspeicher: heiße Luft mobil gemacht*. http://leistungsschau.klimaexpo.nrw/projekte-vorreiter/mobs.html#filter[init]=0&filter[tags][]=mobs (21 November 2018, date last accessed).

29 MHB Hamm Betriebsführungsgesellschaft. *Wärme fährt mit dem Sattelschlepper zum Abnehmer*. http://eneff-industrie.info/projekte/2015/waerme-faehrt-mit-dem-sattelschlepper-zum-abnehmer/ (21 November 2018, date last accessed).

30 Salzburger Nachrichten. *Salzburg AG - Überflüssiger Windstrom liefert Wärme*. https://www.sn.at/salzburg/wirtschaft/salzburg-ag-ueberfluessiger-windstrom-liefert-waerme-1721884 (8 November 2018, date last accessed).

31 Salzburg AG. *Wärmespeicher HKW Nord*. https://www.salzburg-ag.at/ueber-die-salzburg-ag/unternehmen/erzeugung/erzeugungsanlagen/waermespeicher-hkw-nord.html (20 November 2018, date last accessed).

32 Salzburg24. *Salzburg AG nimmt neuen Wärmespeicher in Betrieb*. https://www.salzburg24.at/news/salzburg/grenznah/salzburg-ag-nimmt-neuen-waermespeicher-in-betrieb-59293537 (20 November 2018, date last accessed).

33 Energiespeicher - Forschungsinitiative der Bundesregierung. *Wärme speichern*. http://forschung-energiespeicher.info/waerme-speichern/projektliste/ (20 November 2018, date last accessed).

34 Schawel C, Billing F. Top 100 Management Tools. SWOT-Analyse. In: Schawel C, Billing F (eds.). *Top 100 Management Tools*. . Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 331–33.

35 Energieportal24. *Thermochemische Energiespeicher*. http://www.energieportal24.de/cms1/wissensportale/energiespeicherung/chemische-speicher/thermochemische-energiespeicher/ (16 November 2018, date last accessed).

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Endenergiebedarf OÖ 2016 aufgeteilt in die Sektoren Produzierender Bereich, Verkehr und Sonstige .6
Abbildung 2: Endenergiebedarf 2016 Bundesländer unterteilt in Nutzenergiekategorien im Produzierenden Bereich.7
Abbildung 3: Endenergiebedarf OÖ 2016 nach Branche unterteilt in Nutzenergiekategorien 8
Abbildung 4: Temperaturanteile des Wärmeeinsatzes in verschiedenen Branchen der Industrie 9
Abbildung 5: Berechneter Wärmebedarf pro Branche unterteilt in verschiedene Temperaturniveaus in OÖ 10
Abbildung 6: a) Bereitstellungsmanagement und b) Bedarfsmanagement 12
Abbildung 7: Übersicht der Technologien zur thermischen Energiespeicherung 15
Abbildung 8: Vergleich des Verlaufs der sensiblen und der latenten Wärmespeicherung 18
Abbildung 9: PCM Klassen und deren Temperaturbereiche 19
Abbildung 10: Temperatureinsatzbereiche von sensiblen Wärmespeichern 21
Abbildung 11: Temperatureinsatzbereiche von latenten Wärmespeichern 22
Abbildung 12: Temperatureinsatzbereiche von thermochemischen Wärmespeichern 23
Abbildung 13: Entwicklungsstand (TRL) der verschiedenen Wärmespeichertechnologien 24
Abbildung 14: Industrielle Abwärmenutzung a) Batch-Prozess b) Kraft-Wärme-Kopplung c) Kühl-/Heizaggregat 28
Abbildung 15: Verstromung von Abwärme durch thermische Kreisprozesse 28
Abbildung 16: Arten von Sektorenkopplungen 29
Abbildung 17: Übersicht Systemdienstleistungen 30
Abbildung 18: Funktionsprinzip von Power-to-Heat 31
Abbildung 19: Positive und negative Residuallast 31
Abbildung 20: Vakuumpufferspeicher 33
Abbildung 21: Großwasserspeicher 33
Abbildung 22: Winderhitzer und mögliche Formsteinarten 33
Abbildung 23: Latentwärmespeicher STEAG-Kraftwerk Wellesweiler 34
Abbildung 24: Latentwärmespeicher Dampfkraftwerk Carboneras 34
Abbildung 25: Mobiler Adsorptionsspeicher 35
Abbildung 26: Heizkraftwerk Nord der Salzburg AG 35
Abbildung 27: Einsatzbereiche thermischer Energiespeicher nach Temperaturniveau 42

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Berechneter Wärmebedarf je Branche nach Temperaturniveau und Anzahl an Unternehmen in OÖ 11
Tabelle 2: Technoökonomische Kenndaten von Wärmespeichertechnologien 15
Tabelle 3: Kenndaten sensibler Speicher 16
Tabelle 4: Verwendete Salzmischungen für Flüssigsalzspeicher und deren Eigenschaften 17
Tabelle 5: Übersicht spezifischer Investitionskosten verschiedener Wärmespeichertechnologien.....25
Tabelle 6: Österreichs Stärkefelder von thermischen Speichertechnologien.....26
Tabelle 7: Forschungsprojekte zu thermischen Speichern 36
Tabelle 8: SWOT Analyse Wasserspeicher.....38
Tabelle 9: SWOT Analyse Flüssigsalzspeicher 39
Tabelle 10: SWOT Analyse Hochtemperatur-Feststoffwärmespeicher.....39
Tabelle 11: SWOT Analyse Erdwärmesonden- und Aquiferspeicher 40
Tabelle 12: SWOT Analyse PCM-Speicher 40
Tabelle 13: SWOT Analyse Hochtemperatur-Latentwärmespeicher 41
Tabelle 14: SWOT Analyse Thermochemische Speicher.....41
Tabelle 15: Anwendungsfelder thermischer Speicher in oberösterreichischen Industriebranchen.....45
Tabelle 16: Einflussgrößen einer erfolgreichen Speicherintegration in Oberösterreich 47
Tabelle 17: Übersicht Speicherkenndaten.....56

Anhang

Tabelle 17 enthält sämtliche Speicherkenndaten, die für die Erstellung der Grafiken in den jeweiligen Kapiteln benötigt werden. Die thermischen Speicher werden dafür klassifiziert (sensibel, latent, thermochemisch), der Aggregatzustand (fest, flüssig, gasförmig) bestimmt, und der theoretische sowie relevante Temperaturbereich der jeweiligen Speichertechnologie angegeben. Zusätzlich ist der Reifegrad (TRL) der einzelnen Speicher angeführt.

Bei den Latentwärmespeichern und thermochemischen Speichern wird zusätzlich eine weitere Einteilung nach der Art der Speichermedien getroffen. Latentwärmespeicher werden dazu in Salzhydrate, Salze, Salzmischungen, Paraffine, Fettsäuren, Zuckeralkohole und PEG gegliedert. Die thermochemische Speichergliederung erfolgt in Zeolithe, Hydrate, Hydroxide, Carbonate und Oxide. Für diese übergeordneten Gruppen werden basierend aus den Daten der untergeordneten Speichermedien durch Minima- und Maximawerte Temperatur- sowie Reifegradbereiche abgeleitet.

Die Informationen zu den spezifischen Speicherkenndaten für Tabelle 17 liegen folgenden Quellen zu Grunde:

[1] Sterner, Michael; Stadler, Ingo (2017): Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

[2] Klima- und Energiefonds (2016): Abschlussbericht der Speicherinitiative.

[3] Friedl, Werner; Wild, Veronika; Popp, Hartmut; Kubeczko, Klaus; Kathan, Johannes; Zahradnik, Georg et al. (2018): Technologie-Roadmap. Energiespeichersysteme in und aus Österreich. Eine Studie erstellt im Auftrag des Klima- und Energiefonds. Hg. v. Klima- und Energiefonds. AIT Austrian Institute of Technology GmbH. Wien

[4] IFA (2017): "GESTIS-Stoffdatenbank", http://gestis.itrust.de (abgerufen am 27.02.2018)

[5] Wesselak, Viktor; Schabbach, Thomas; Link, Thomas; Fischer, Joachim (2017): Handbuch Regenerative Energietechnik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Konnten keine relevanten Eigenschaften zu einzelnen Einträgen der jeweiligen Speicherkategorien identifiziert werden, so werden diese in der Tabelle mit dem Kürzel „k.A.“ (keine Angabe) vervollständigt.

Tabelle 17: Übersicht Speicherkenndaten (eigene Darstellung)

Speichertechnologie		Aggregatzustand	Temperaturbereich			relevanter Temperaturbereich			TRL		Quelle	Anmerkungen
Klassifizierung	Speichermedium		Δ-Temperatur	min	max	Δ-Temperatur	min	max	min	max		
sensibel	**Wasser**	flüssig	100	0	100	100	0	100	7	9	[1],[2]	Begrenzung durch Aggregatzustand Wasser
	Kies-Wasser-Schüttung	fest/flüssig	100	0	100	100	0	100	7	8	[1],[2]	Begrenzung durch Aggregatzustand Wasser
	Sand, Kies, Gestein	fest	800	0	800	800	0	800	6	7	[1],[2]	Temperaturlimit Festigkeit Sand, Kies, Gestein
	Granit	fest	800	0	800	800	0	800	6	7	[1],[2]	Temperaturlimit Festigkeit Granit
	Beton	fest	500	0	500	500	0	500	7	9	[1],[2]	Temperaturlimit Festigkeit Beton
	Ziegelstein	fest	1000	0	1000	1000	0	1000	6	7	[1],[2]	Temperaturlimit Festigkeit Ziegelstein
	Eisen	fest	800	0	800	800	0	800	6	7	[1],[2]	Temperaturlimit Festigkeit Eisen
	Thermoöl	flüssig	400	0	400	400	0	400	7	8	[1],[2]	Begrenzung durch Aggregatzustand Thermoöl
	Salzschmelze	flüssig	300	150	450	300	150	450	2	7	[1],[2]	Temperaturbereich abhängig vom Salz
	Natrium	flüssig	700	100	800	700	100	800	2	7	[1],[2]	Begrenzung durch Aggregatzustand Natrium
latent	**Salzhydrate**	fest - flüssig	360	-30	330	88	29	117	6	6		
	$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	*fest - flüssig*	*65*	*-30*	*35*	*0*	*29*	*29*	*6*	*6*	[1],[2],[4]	*Thermische Zersetzung Tetrahydrat >35°C, Dihydrat >176°C*
	$Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$	*fest - flüssig*	*280*	*-30*	*250*	*5*	*35*	*40*	*6*	*6*	[1],[2],[4]	*Thermische Zersetzung >250°C*
	$Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$	*fest - flüssig*	*330*	*-30*	*300*	*0*	*48*	*48*	*6*	*6*	[1],[2],[4]	*Thermische Zersetzung >300°C*
	$Na(CH_3COO) \cdot 3H_2O$	*fest - flüssig*	*350*	*-30*	*320*	*0*	*58*	*58*	*6*	*6*	[1],[2],[4]	*Thermische Zersetzung >320°C*
	$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	*fest - flüssig*	*360*	*-30*	*330*	*0*	*89*	*89*	*6*	*6*	[1],[2],[4]	*Thermische Zersetzung >330°C*
	$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	*fest - flüssig*	*330*	*-30*	*300*	*0*	*117*	*117*	*6*	*6*	[1],[2],[4]	*Thermische Zersetzung >300°C*
	Salze	fest - flüssig	k.A.	k.A.	400	26	307	333	k.A.	k.A.		
	$NaNO_3$	*fest - flüssig*	*k.A.*	*k.A.*	*380*	*0*	*307*	*307*	*k.A.*	*k.A.*	[1],[4]	*Thermische Zersetzung >380°C*
	KNO_3	*fest - flüssig*	*k.A.*	*k.A.*	*400*	*0*	*333*	*333*	*k.A.*	*k.A.*	[1],[4]	*Thermische Zersetzung >400°C*
	Salzmischungen	fest - flüssig	k.A.	k.A.	400	0	222	222	k.A.	k.A.		
	$KNO_3/NaNO_3$	*fest - flüssig*	*k.A.*	*k.A.*	*400*	*0*	*222*	*222*	*k.A.*	*k.A.*	[1]	*Thermische Zersetzung >400°C*
	Paraffine	fest - flüssig	150	100	250	0	28	28	2	5		
	$C_{18}H_{38}$	*fest - flüssig*	*150*	*100*	*250*	*0*	*28*	*28*	*2*	*5*	[1],[2]	
	Fettsäuren	fest - flüssig	k.A.	k.A.	250	15	43	58	2	5		
	$CH_3(CH_2)_{10}COOH$	*fest - flüssig*	*k.A.*	*k.A.*	*225*	*0*	*43*	*43*	*2*	*5*	[1],[2],[4]	*Zündtemperatur bei 230°C; Siedepunkt bei ca. 298°C*
	$CH_3(CH_2)_{12}COOH$	*fest - flüssig*	*k.A.*	*k.A.*	*250*	*0*	*58*	*58*	*2*	*5*	[1],[2],[4]	*Flammpunkt bei >160°C, Siedepunkt bei 326°C*
	Zuckeralkohol	fest - flüssig	150	100	250	0	120	120	2	5		
	$C_4H_5(OH)_6$	*fest - flüssig*	*150*	*100*	*250*	*0*	*120*	*120*	*2*	*5*	[1],[2]	
	PEG	fest - flüssig	k.A.	k.A.	150	0	60	60	k.A.	k.A.		
	$HO–[CH_2–CH_2–O]_n–H$	*fest - flüssig*	*k.A.*	*k.A.*	*150*	*0*	*60*	*60*	*k.A.*	*k.A.*	[1],[5]	*Zersetzung bei höheren Temperaturen*
thermochemisch	**Zeolithe**		1000	0	1000	215	35	250	1	4	[3]	
	4A	*fest*	*1000*	*0*	*1000*	*215*	*35*	*250*	*k.A.*	*k.A.*	[4],[5]	*Schmelztemperatur bei 1000°C*
	13X	*fest*	*1000*	*0*	*1000*	*215*	*35*	*250*	*k.A.*	*k.A.*	[4],[5]	*Schmelztemperatur bei 1000°C*
	Hydrate		1099	25	1124	315	25	340	1	4	[3]	
	$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	*fest*	*185*	*115*	*300*	*65*	*115*	*180*	*k.A.*	*k.A.*	[4]	*Thermische Zersetzung >300°C*
	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	*fest/flüssig*	*1099*	*25*	*1124*	*225*	*25*	*250*	*k.A.*	*k.A.*	[4]	*Thermische Zersetzung >1124°C*
	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	*fest*	*680*	*90*	*770*	*250*	*90*	*340*	*k.A.*	*k.A.*	[4]	*Thermische Zersetzung >770°C*
	Hydroxide		2450	350	2800	250	350	600	1	4	[3]	
	$CaO - Ca(OH)_2$	*fest*	*2000*	*580*	*2580*	*0*	*580*	*580*	*k.A.*	*k.A.*	[4]	*Schmelztemperatur CaO bei 2580°C*
	$MgO - Mg(OH)_2$	*fest*	*2450*	*350*	*2800*	*250*	*350*	*600*	*k.A.*	*k.A.*	[4]	*Schmelztemperatur MgO bei 2800°C*
	Carbonate		1755	825	2580	625	825	1450	1	4	[3]	Beim Beladen wird CO_2 frei, das gespeichert oder beim Entladen extern zugeführt werden muss
	$CaCO_3 - CaO$	*fest*	*1755*	*825*	*2580*	*74*	*825*	*899*	*k.A.*	*k.A.*	[4]	*Schmelztemperatur CaO bei 2580°C*
	$BaCO_3 - BaO$	*fest*	*470*	*1450*	*1920*	*0*	*1450*	*1450*	*k.A.*	*k.A.*	[4]	*Schmelztemperatur MgO bei 2800°C; BaO ist giftig*
	Oxide (thermische Dissoziation)		1420	500	1920	100	600	700	1	4	[3]	Beim Beladen wird O_2 frei, das gespeichert oder beim Entladen extern zugeführt werden muss
	$BaO_2 - BaO$	*fest/flüssig*	*1420*	*500*	*1920*	*100*	*600*	*700*	*k.A.*	*k.A.*	[4]	*Schmelztemperatur BaO=1920°C, BaO_2=450°C; giftig, Oxidation BaO --> BaO_2 bei 500-600°C*