

Vergleich und Bewertung verschiedener Speicherkonzepte für Nahwärmenetze der 4. Generation

Britta Kleinertz ¹(1), Theresa Faber (2), Serafin von Roon (1)

(1) Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Am Blütenanger 71, 80995 München
+49 (0) 89 158 121 - 39, bkleinertz@ffe.de, www.ffegmbh.de

(2) Wegatech Greenenergy GmbH, Birketweg 31, 80639 München

Kurzfassung:

Zum Erreichen der Klimaziele muss im Wärmesektor neben massiven Energieeinsparungen eine Umstellung von fossilen Brennstoffen auf erneuerbare Energie erfolgen. Zur Umsetzung von Wärmeversorgungskonzepten, basierend auf fluktuierenden erneuerbaren Wärmequellen, ist die effiziente Nutzung von Speichern von essenzieller Bedeutung.

Für ein Wärmeversorgungskonzept bestehend aus einer Serienschaltung der Niedertemperaturwärmequellen Wärmepumpe und Solarthermie mit den Hochtemperatur Wärmequellen Holzvergaser mit BHKW und Anschluss zum Primärnetz werden auf Basis einer Grundlagenrecherche drei verschiedene Speicherkonzepte erarbeitet. Das Speicherkonzept mit Solarthermie und saisonalem Speicher erreicht den größten Anteil an Erneuerbaren Energien an der Wärmebereitstellung, jedoch weist es auch die meisten thermischen Verluste und somit den höchsten Energiebedarf auf. Die beiden weiteren Speicherkonzepte, jeweils ohne Solarthermie, unterscheiden sich darin, dass eines über dezentrale Speicher verfügt, welche im Sommer einen diskontinuierlichen Betrieb des Wärmenetzes erlauben. Die Verringerung der Netzverluste im Konzept mit dezentralen Wärmespeichern ist größer als die zusätzlich entstehenden Speicherverluste der dezentralen Speicher, jedoch sind die Investitionskosten höher und der Betrieb ist von erhöhtem Regelaufwand geprägt. Die Wärmegestehungskosten belaufen sich für das Konzept mit Solarthermie auf 14,4 €/kWh für die anderen Konzepte auf 13,1 €/kWh. Insgesamt schneidet, das Konzept ohne Solarthermie und ohne dezentrale Wärmespeicher in der Nutzwertanalyse am besten ab, gefolgt von dem Konzept mit dezentralen Speichern.

Keywords: Wärmenetze 4.0, Wärmespeicher, Serienschaltung Wärmeerzeuger

1 Einführung

Da knapp ein Drittel des deutschen Endenergieverbrauchs auf die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser zurückzuführen ist [1], muss zum Erreichen der Klimaziele auch im Wärmesektor eine Umstellung von der Nutzung fossiler Brennstoffe hin zu erneuerbaren Energien erfolgen. Speziell in städtischen Gebieten wird auf Grund fehlender Freiflächen und hoher Wärmebedarfsdichte erwartet, dass Fernwärmenetze den Wärmebedarf kostengünstiger auf Basis emissionsarmer Wärmequellen decken werden als dezentrale Lösungen [2], [3]. Wärmenetze der 4. Generation stellen Wärme bei Temperaturen zwischen 20 und 90 °C hocheffi-

¹ Jungautor

zient bereit, womit sie die Integration von erneuerbaren Wärmequellen und Abwärme ermöglichen [4]. In Abbildung 1 sind die Bestandteile eines solchen Wärmenetzes dargestellt. Zum Ausgleich von Schwankung des Wärmeverbrauchs und der –bereitstellung aus erneuerbaren Wärmequellen, ist die Anwendung geeigneter Wärmespeicher sowie deren intelligente Regelung von essenzieller Bedeutung.

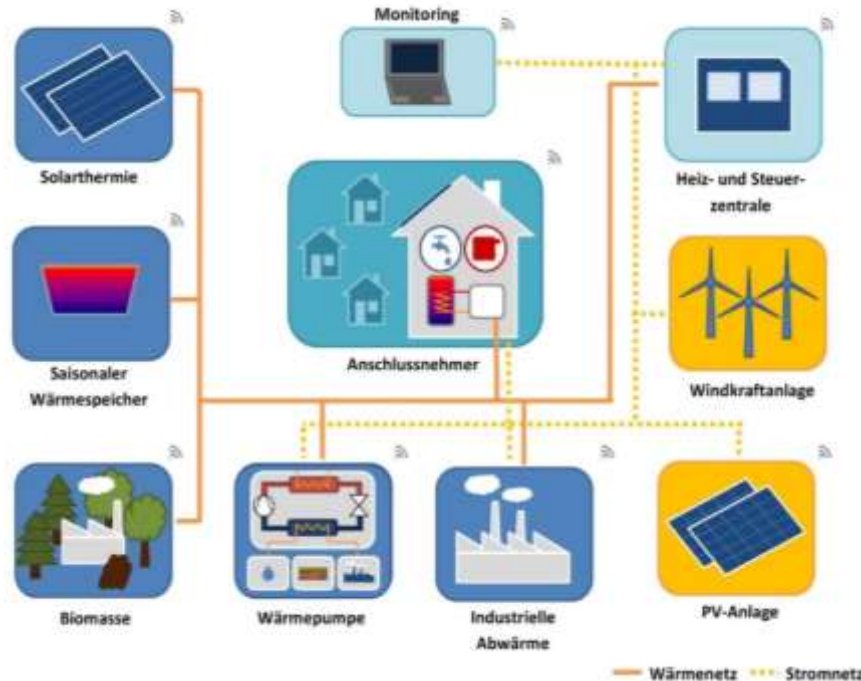


Abbildung 1: Komponenten der zukünftigen netzgebundenen Wärmeversorgung basierend auf erneuerbaren Energien und Abwärme

In dem Projekt „Machbarkeitsstudie für ein Wärmenetz 4.0“ [5] werden für ein exemplarisches Versorgungsgebiet verschiedene Maßnahmen untersucht, um die Effizienz der netzbasierten Wärmeversorgung zu steigern und die Wärmeversorgung aus erneuerbaren Energiequellen zu ermöglichen. Angelehnt daran werden, basierend auf einer Metastudie zu aktuell in Wärmenetzen verwendeten Speicherkonzepten, für das favorisierte Versorgungskonzept drei unterschiedliche Speicherkonzepte erarbeitet und untersucht. Abschließend werden basierend auf den Ergebnissen der Erarbeitungsschritte ein Fazit und Ausblick zur Bedeutung einer fundierten Analyse von Wärmespeicherkonzepten gegeben.

2 Speicherkonzepte – Definition und Status Quo

Im Folgenden werden zunächst relevante Begriffe für die Untersuchung von Speicherkonzepten definiert und der Status Quo verwendeter Arten von Wärmespeichertechnologien dargestellt. Danach werden die Ergebnisse der Metastudie zu genutzten Speicherkonzepten in Wärmenetzen der vierten Generation erläutert und bewertet.

2.1 Relevante Komponenten und Definitionen für Speicherkonzepte

In Abbildung 2 sind die Komponenten eines Speichersystems sowie ihre Verknüpfung dargestellt. Jedes Speichersystems umfasst neben dem Speicher selbst, die angeschlossenen Wärmeerzeuger und –verbraucher sowie die Regelung der einzelnen Komponenten. Immer dient

der Speicher als Ausgleich zwischen Erzeugung und Verbrauch. Während das Verbrauchsprofil als unveränderbar anzusehen ist, ermöglicht der Speicher vor allem, dass die Betriebsführung der Wärmeerzeuger optimiert werden kann. Diese Optimierung kann beinhalten, dass Erzeuger kontinuierlich laufen können oder stromgekoppelte Anlagen (Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen, Wärmepumpen) strompreisoptimiert eingesetzt werden können.

Ein Speicherkonzept besteht aus einem oder mehreren Speichersystemen. Hierbei sind die Erzeuger und Verbraucher meist identisch, es liegen jedoch mehrere Speicher mit unterschiedlichen Regelungen vor.

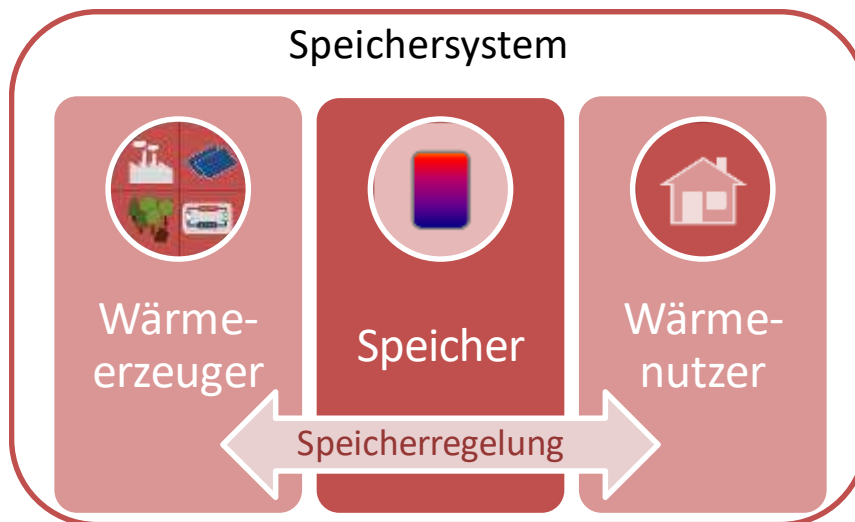


Abbildung 2: Schematische Darstellung der relevanten Komponenten eines Speichersystems

2.2 Charakteristika verschiedener thermischer Energiespeicher

Thermische Energie lässt sich in verschiedenen Medien entweder sensibel, latent oder thermochemisch speichern.

Sensible Wärme wird in festen oder flüssigen Medien gespeichert, wobei die Energieaufnahme immer zu einer Änderung des Temperaturniveaus des Speichermediums führt. Die Volumina sensibler Speicher schwanken von kleinen Pufferspeichern in Einfamilienhäusern (zum Teil kleiner als 1 m³) bis hin zu saisonalen Wärmespeichern, welche erst ab Volumina größer 1.000 m³ energetisch effizient sind. Während Haushaltsspeicher aus Kostengründen immer Wasser als Speichermedium nutzen, gehören zu den saisonalen Speichern **Erdsonden-, Aquifer-, Kies-Wasser-Erdbecken- und Behälterspeicher**, die sowohl feste als auch flüssige Medien zur Speicherung einsetzen. Die Speicherung in festen Medien ist jedoch auch für kurze Zeit möglich, wie beispielsweise bei einem **Feststoffspeicher** aus Beton. [6], [7], [8]

In latenten Speichern führt die Aufnahme bzw. Abgabe thermischer Energie zu einem Phasenwechsel, wobei überwiegend Speicher mit einem Phasenübergang von fest zu flüssig realisiert werden. Der Vorteil der latenten Speicher ist somit, dass sich die Temperatur nur gering erhöht und Wärmeverluste reduziert werden können. Das Speichermedium ist dabei so zu wählen, dass die Temperatur des Phasenübergangs des Mediums im Bereich der Wärmequelletemperatur liegt. Häufig eingesetzte Speichermedien sind dabei **Salzhydrate** und **Paraffine** aber auch **Wasser** bzw. **Eis**. [6], /BIN-E02 13/

Bei der thermochemischen Speicherung wird die Reaktionsenergie von reversiblen chemischen Prozessen oder von Sorptionsprozessen genutzt. Wie bei latenten Speichern kann der

Prozess der Wärmeaufnahme zu einem beliebigen Zeitpunkt umgekehrt und die gespeicherte Wärme wieder abgeben werden. Das am häufigsten verwendete Speichermaterial ist eine Mischung aus **Zeolith** bzw. **Silicagel** mit Wasser, welches beim Laden, also unter Zufuhr thermischer Energie, getrennt wird. Zum Entladen des Speichers werden die beiden Speicherma- terialien wieder zusammengebracht. [6], [9]

In Tabelle 1 ist die Klassifizierung der genannten Speicher über die spezifische Speicherkapazität, das Temperaturniveau des Einsatzes die spezifischen Kosten, die Speicherdauer, und den Einsatzbereich dargestellt. Die sensiblen Speichertechnologien, in gelb dargestellt, weisen eine niedrigere Speicherkapazität auf als die latenten (orange) und die thermochemischen Speicher (rot). Dafür sind die spezifischen Kosten von sensiblen Speichern aktuell ebenfalls sehr viel niedriger. Während stationäre Speicher immer an ihrem Einsatzort verbleiben, können mobile Speicher an einem anderen Standort sowohl be- als auch entladen werden. Hierfür sind auf Grund der höheren spezifischen Speicherkapazität und dem damit einhergehenden geringeren zu transportierenden Gewicht vor allem latente und thermochemische Speicher geeignet.

Tabelle 1: Übersicht über Einsatzbereich, Speicherdauer, Speicherkapazität und Temperaturbereich ausgewählter Speichertechnologien [10]¹, [11]², [7]³, [12]⁴ (gelb = sensibel, orange = latent, rot = thermochemisch)

Speichertechnologie	Spezifische Speicherkapazität in kWh/m ³	Temperaturniveau in °C	Kosten ⁴ in €/kWh	Speicher- dauer		Einsatz- bereich	
				Kurz	Lang	Stat.	Mob.
Erdsondenspeicher ³			4		x	x	
Feststoffspeicher ³			18	x	x	x	
Behälterspeicher ³			5	x	x	x	
Kies-Wasser-Erdbecken ³			4		x	x	
Aquiferspeicher ³			1		x	x	
Wasser/Eis ¹			150	x	x	x	
Salzhydrate ¹				x	x	x	x
Paraffin ¹				x	x	x	x
Zeolith ²			75	x	x	x	x
Silicagel ²				x	x	x	x

2.3 Bestehende Speichersysteme und –konzepte in innovativen Wärmenetzen

Unter innovativen Wärmenetzen werden hier Wärmenetze verstanden, welche zu einem relevanten Anteil erneuerbare Energien zur Wärmeerzeugung einsetzen. Zu diesen innovativen Wärmenetzen und den darin eingesetzten Speicherkonzepten, wurden Informationen recherchiert. Die gewonnenen Erkenntnisse sind im Folgenden nach Zusammensetzung der Wärmeerzeugung strukturiert und in Tabelle 2 übersichtlich dargestellt. Neben den Wärmeerzeugern, gilt das Interesse vor allem dem Speicherkonzept und deren Einsatzbereich. Weitere Informationen zu den Speicherkonzepten sind in /FAB 01-18/ dargestellt.

Die Wärmenetze Crailsheim und Dronninglund fallen mit knapp 50 % solaren Deckungsgrad unter solare Wärmenetze und besitzen beide die Anbindung an einen saisonalen Wärmespeicher [13] [14] [15].

Im Gegensatz dazu weisen die Nahwärmenetze in Büsingen und Eibiswald keine Einbindung eines Saisonalspeichers auf, was daran liegt, dass die Solarthermie nur einen kleinen Anteil der Wärmeversorgung übernimmt. Als weitere erneuerbare Wärmequelle steht Bioenergie zur Verfügung. Im Sommer kann der Trinkwarmwasserbedarf vollständig durch die Solarthermie gedeckt werden. In den Übergangszeiten und im Winter werden die beiden Holzhackschnitzel-Kessel hinzugeschaltet. Durch die Kombination aus der Solarthermie mit geeigneten Wärmespeichern können rund 12 % des gesamten Wärmebedarfs solarthermisch gedeckt und Biomasse eingespart werden. [16] [17]

Das Wärmenetz in Dollnstein wird im Sommer (Mai-Oktober) als kaltes Netz über den Rest des Jahres jedoch als warmes Netz mit Temperaturen von ca. 75 – 80 °C betrieben. Zur Wärmegewinnung werden Solarthermie, eine Wärmepumpe und ein Erdgas-BHKW eingesetzt. Die effiziente Verknüpfung dieser Anlagen, wird durch mehrere zentrale Speicher auf verschiedenen Temperaturniveaus ermöglicht. Die Haushalte sind jeweils mit einer dezentralen Wärmepumpe, einer Übergabestation und einem Kombispeicher (ca. 0,3 m³) ausgestattet. Die Wärmepumpen nutzen im Sommer die Energie aus dem kalten Wärmenetz, um dezentral Wärme auf dem benötigten Temperaturniveau von 70 °C zu erzeugen. [18] [19] [20]

Das Wärmenetz am Ackermannbogen in München ist ein Sekundärnetz, welches an das bestehende Münchener Fernwärmenetz angebunden wurde. Das Nahwärmenetz wird durch Solarkollektoren versorgt und zusätzlich durch das Fernwärmenetz der Stadtwerke München. Im Sommer wird die überschüssige Wärme aus den Solarkollektoren in den saisonalen Speicher eingespeist. Im Winter kann die Wärme anfangs direkt aus dem Speicher entnommen werden, um die Siedlung mit Wärme zu versorgen. Danach wird der Speicher bei niedrigeren Temperaturen als Wärmequelle für eine mit Fernwärme angetriebene Absorptionswärmepumpe genutzt. [21]

Aus Tabelle 2 ist ersichtlich, dass beim Einsatz von größeren Solarthermie-Anlagen in der Regel ein saisonaler Wärmespeicher genutzt wird, um die im Sommer überschüssige Wärme bis in den Winter nutzbar zu machen. Bei kleineren solarthermischen Anlagen wird wiederum ein Kurzzeitspeicher eingesetzt, der die täglichen Schwankungen zwischen Bedarf und Bereitstellung ausgleicht.

Wird als Wärmeerzeuger ein Biomassekessel eingesetzt, dient der nachgeschaltete Speicher zum effizienten Betrieb des Kessels und vermeidet unwirtschaftliche Teillastbetriebszustände. In Konzepten mit verschiedenen relevanten Temperaturniveaus, erfolgt eine Verknüpfung der Anlagen über mehrere Speicher auf verschiedenen Temperaturniveaus.

Tabelle 2: Übersicht über bestehende Speichersysteme bzw. –Speicherkonzepte innovativer Wärmenetze in Europa

Wärmenetz	Wärmeerzeuger	Speichertechnologie	Einsatzbereich
Crailsheim	7.500 m ² Solarthermie 530 kW Wärmepumpe	100 m ³ Heißwasserspeicher 480 m ³ Heißwasserspeicher 37.750 m ³ Erdsondenspeicher	Tagesspeicher für Solarthermie Kurzzeitspeicher für Solarthermie Saisonaler Speicher für Solarthermie
Dronninglund	37.600 m ² Solarthermie Wärmepumpe	62.000 m ³ Erdbeckenspeicher	Saisonaler Speicher für Solarthermie
Büdingen	1.000 m ² Solarthermie 450 kW _{therm} Biomassekessel 900 kW _{therm} Biomassekessel	50 m ³ Behälterspeicher 50 m ³ Behälterspeicher	Kurzzeitspeicher für Solarthermie, Effizienter Betrieb des Biomassekessels
Eibiswald	1.450 m ² Solarthermie 700 kW _{therm} Biomassekessel 2.300 kW _{therm} Biomassekessel	69 m ³ Behälterspeicher 105 m ³ Behälterspeicher	Kurzzeitspeicher für Solarthermie, Effizienter Betrieb des Biomassekessels
Dollnstein	200 m ² Solarthermie 440 kW Wärmepumpe 250 kW _{therm} Erdgas-BHKW	15 m ³ Niedertemperatur-Behälterspeicher 27 m ³ Hochtemperatur-Behälterspeicher 0,3 m ³ dezentrale Speicher	Kalter Speicher für Wärmequelle der Wärmepumpe Kurzzeitspeicher für Solaranlage, Wärmepumpe und BHKW Kombispeicher für Haushalte
Ackermannbogen	3.000 m ² Solarthermie Fernwärme	6.000 m ³ Behälterspeicher	Saisonaler Speicher für Solarthermie

3 Untersuchung verschiedener Speicherkonzepte für ein exemplarisches Wärmenetz

Für die Entwicklung des Speicherkonzeptes sind vor allem das Temperaturniveau und der zeitliche Verlauf von Wärmeverbrauchs bzw. –erzeugung von Bedeutung. Daher werden diese hier kurz dargestellt und daraus geeignete Speicherkonzepte erarbeitet. Die ausführliche Beschreibung der Wärmeverbraucher sowie die Prüfung auf Anwendbarkeit verschiedener Wärmeerzeuger kann [5] entnommen werden.

3.1 Wärmeverbraucher und-erzeuger auf dem betrachteten Gelände

Auf dem zu versorgenden Gelände sind eine Liegenschaft sowie der Neubau einer Hochschule vorhanden. Das Gelände der Liegenschaft wird ganzjährig sieben Tage die Woche betrieben. Insgesamt stehen 24 Gebäude niedriger energetischer Qualität auf dem Gelände, welche in Summe einen Wärmebedarf von ca. 3,4 GWh aufweisen. Um die Raumwärme und das Trinkwarmwasser bereitzustellen, wird eine Vorlauftemperatur von 70 °C benötigt und eine Rücklauftemperatur von 50 °C erreicht.

Auf dem Neubaugelände der Hochschule werden neue Werks- und Laborhallen errichtet. Die Raumwärme der neuen Gebäude soll durch ein Niedertemperaturnetz bei 50 °C bereitgestellt

werden, woraus eine Rücklauftemperatur von ca. 30 °C resultiert. Da vom Einsatz von dezentralen Wärmeübertragern für die Trinkwarmwasserbereitstellung ausgegangen wird, ist dieses Temperaturniveau auch für die Erwärmung von Trinkwarmwasser geeignet. Basierend auf der verfügbaren Fläche wird ein jährlicher Wärmebedarf von 0,8 GWh erwartet. Der zu erwartende Lastgang wurde mit dem Simulationsprogramm Sophena [22] erstellt.

Zur Erhöhung der Temperaturdifferenz zwischen maximalem Vorlauf und minimalem Rücklauf werden die beiden Verbraucher in Serie geschaltet. Hieraus ergeben sich als relevante Temperaturen der Vorlauf der Liegenschaft (ca. 70 °C), der Rücklauf der Liegenschaft bzw. Vorlauf der Hochschule (50 °C) und der Rücklauf der Hochschule (30 °C)

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurden verschiedene erneuerbare Energien auf ihre Anwendbarkeit für das Wärmeversorgungskonzeptes des Geländes geprüft. Möglich sind die Aufstellung einer Solarthermieanlage, einer Abwasserwärmepumpe, eines Biomassevergasers mit Blockheizkraftwerk (BHKW) oder ein Anschluss des Netzes an das Rosenheimer Primärnetz.

Für die solarthermische Anlage soll möglichst eine große zusammenhängende Fläche genutzt werden, da kleine Anlagen mit einem hohen Verrohrungsaufwand verbunden sind und die Einbindung in das Wärmenetz konstruktiv anspruchsvoll wäre. Als Fläche für die Solarthermie würde folglich eine nutzbare Fläche von 1.000 m² zur Verfügung stehen. Die erzeugte thermische Leistung hängt von der Bestrahlungsstärke, der Umgebungstemperatur und dem Kollektortypen sowie dessen Wirkungsgrad ab. Mit der betrachteten Anlage können Temperaturdifferenzen von Kollektortemperatur zur Außentemperatur von 20 bis 80 °C erzeugt werden. [23]

Das Abwasser für die Abwasserwärmepumpe steht mit einem Volumenstrom von 25 l/s zur Verfügung, wobei dieses einer saisonalen Temperaturschwankung zwischen 12 und 14 °C unterliegt. Die Wärmeentzugsleistung ergibt sich aus dem Volumenstrom und der Abwassertemperatur und wird in den Untersuchungen vereinfacht mit der Temperaturdifferenz von 14 °C zu 11,2 °C und somit 290 kW_{thermisch} angesetzt. Da der Coefficient of Performance (COP) einer Wärmepumpe mit einem Anstieg der Zieltemperatur sinkt [24], soll der Einsatz der Wärmepumpe auf einem möglichst niedrigen Temperaturniveau erfolgen.

Der Biomassevergaser erzeugt Synthesegas, welches im nachgeschalteten Blockheizkraftwerk BHKW verbrannt wird. Das BHKW nutzt dabei das Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung und erzeugt neben thermischer auch elektrische Energie, wodurch eine möglichst effiziente Nutzung der eingesetzten Biomasse erreicht werden kann. Für die hier dargelegten Untersuchungen wird mit einem BHKW mit einer thermischen Leistung von 380 kW und einer elektrischen Leistung von 180 kW ausgegangen.

Bei der Nutzung des Vergasers mit BHKW müssen einige Besonderheiten beachtet werden. Da der Holzvergaser bei Temperaturen um die 500 °C betrieben wird, benötigt er ca. 24 h um aus dem Stillstand auf das geeignete Temperaturniveau aufgeheizt zu werden. Aus diesem Grund sollte ein häufiges An- und Ausschalten der Anlage vermieden werden. Des Weiteren ist zu beachten, dass die Anlage nur auf eine minimale Teillast von 50 % geregelt werden kann. Dieser Betrieb in Teillast ist wiederum möglichst zu vermeiden, da die Wartungskosten auf die Betriebskosten angesetzt werden und nicht auf die erzeugte Energiemenge. Die Nutzwärme des BHKWs setzt sich aus der Abgaswärme und der mittels Kühlwasser ausgekoppel-

ten Motorabwärme zusammen [25]. Um die Kühlung des Motors zu gewährleisten muss deshalb darauf geachtet werden, dass das Kühlwasser also der Vorlauf die Temperaturen von 60 °C nicht überschreitet.

Ein Arm des Fernwärmenetzes der Stadtwerke Rosenheim verläuft direkt neben dem betrachteten Gelände der Liegenschaft. Das Fernwärmenetz wird im Sommer bei Temperaturen von 80 - 90 °C und im Winter bei 110 °C betrieben. Das Abrufen der Wärme aus dem Primärnetz über einen Wärmeübertrager ist jederzeit binnen Minuten möglich und kann sowohl in Voll- als auch in Teillast erfolgen.

3.2 Speicherkonzepte für das betrachtete Gebiet

Wie beschrieben, soll der Betrieb der Wärmepumpe auf niedrigen Temperaturen erfolgen, während Vergaser mit BHKW und Primärnetz zur Bereitstellung erhöhter Temperaturen genutzt werden. Um dies zu ermöglichen, wird eine temperaturseitige Serienschaltung der verschiedenen Wärmeerzeuger angesetzt. In diesem Konzept der Wärme-Dispatch-Zentrale können Niedertemperatur-Wärmequellen (z.B. Wärmepumpe) den ersten Temperaturhub von Rück- zu Vorlauf erbringen, während Hochtemperatur-Wärmequellen (z.B. BHKW) den Wärmestrom durch einen zweiten Temperaturhub auf die Zieltemperatur bringen [5], [26]. Gleichzeitig kann der Strom aus dem BHKW direkt in der Wärmepumpe verbraucht werden, was die Zahlung von Umlagen vermeidet und die Wärmebereitstellung zu 100 % aus erneuerbaren Energie gewährleistet.

Die Bezeichnung von Mitteltemperatur- und Hochtemperatur-Speicher dient der Unterscheidung der Speicher bezogen auf das im Netz vorliegende Temperaturniveau. Als Speichermedium wird jeweils Wasser eingesetzt, wodurch eine direkte Beladung der Speicher möglich ist.

Da die Kriterien für ein Wärmenetz der vierten Generation nach [27] nur mit der Wärmepumpe und dem BHKW erreicht werden können, werden im Folgenden zunächst ein Speicherkonzept mit Solarthermie und zwei Speicherkonzepte ohne Solarthermie entwickelt.

3.2.1 Speicherkonzept mit Solarthermie und saisonalem Wärmespeicher

In diesem Speicherkonzept werden alle vier zuvor dargestellten Wärmeerzeuger in das System eingebunden. Es besteht aus einem Kurzfrist- und einem saisonalen Wärmespeicher (siehe Abbildung 3). Die beiden Speicher sind mit Wasser gefüllte Behälterspeicher und unterscheiden sich durch Temperaturbereich, Volumen und Speicherdauer.

Der Hochtemperaturspeicher wird zur Erreichung zweier Einsatzziele eingesetzt. Zum einen wird hier die kurzzeitige Zwischenspeicherung der solarthermischen Wärme, welche auf der gewünschten Vorlauftemperatur anfällt und nicht direkt benötigt wird, gespeichert. Dies ist vor allem im Sommer und in der Übergangszeit der Fall. Zum anderen dient er zur Optimierung der Betriebszeit des BHKWs. Dies ist vor allem in der Übergangszeit notwendig, wenn der Wärmebedarf in manchen Stunden geringer ist als die minimale Leistung des BHKWs und so das BHKW eigentlich abschalten müsste. Die mittlere Speichertemperatur des Speichers soll der Temperatur des Vorlaufes der Liegenschaft von 70 °C entsprechen. Ist die Soll-Temperatur des Speichers von 70 °C erreicht, kann das BHKW seine Zieltemperatur von 70 °C auf 90 °C erhöhen um ein Abschalten zu verhindern.

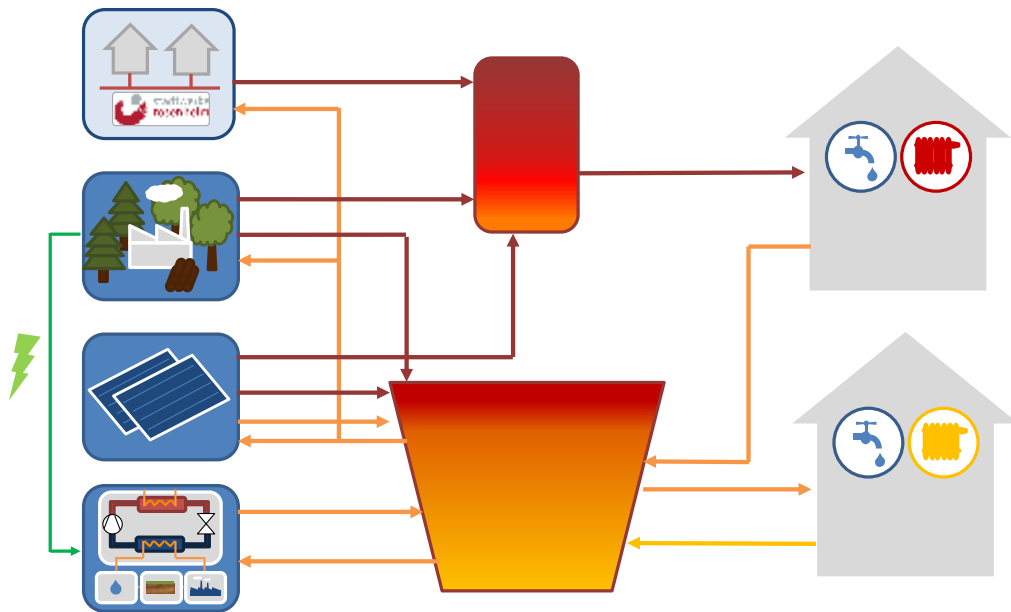


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Speicherkonzeptes mit Solarthermie und saisonalem Wärmespeicher

Im saisonalen Wärmespeicher wird die überschüssige Wärme der Solarthermie, welche auf Grund einer zu niedrigen Temperatur oder zu hoher Erzeugungsüberschüsse nicht zum Beladen des Hochtemperaturspeichers geeignet ist, gespeichert. Zudem werden die oberen Schichten des Saisonspeichers genutzt, damit Solarthermie und BHKW in diesen einspeisen können, wenn der maximale Speicherfüllstand des Hochtemperaturspeichers erreicht ist. Hierbei ist eine maximale Beladetemperatur des Speichers von 80 °C erlaubt.

Die Wärmepumpe entnimmt Wasser auf dem niedrigsten vorhandenen Temperaturniveau im Saisonspeicher, minimal die Rücklauftemperatur des Neubaus der Hochschule bei 30 °C, und erhöht dessen Temperatur auf maximal 60 °C (genauere Analyse siehe [26]).

Der saisonale Mitteltemperaturspeicher dient zudem dem Ausgleich sowohl auf Verbraucher- als auch auf Erzeugerseite. Hier werden der Rücklauf der Liegenschaft und der Vorlauf der Hochschule hydraulisch entkoppelt. Erzeugerseitig sind hier der erzeugte Wärmestrom aus der der Niedertemperaturquelle (Wärmepumpe) und der Zustrom zu den Hochtemperaturwärmequellen (Primärnetz, BHKW) verknüpft.

Somit hat die unterste Schicht im Speicher minimal ein Temperaturniveau von 30 °C und die oberste Schicht eine Maximaltemperatur von ca. 80 °C.

Im Winter reicht die installierte Leistung der Wärmeerzeuger im Versorgungsgebiet (Wärmepumpe und Vergaser mit BHKW) nicht aus, um den benötigten Wärmebedarf bereit zu stellen. Da der zusätzliche Wärmebedarf exakt durch die Zuschaltung von Wärme aus dem Primärnetz erfolgt, besteht hier kein Hochtemperatur-Speicherbedarf. Somit wird im Winter nur ein Teil des Speichers als Bypass genutzt. Zu Beginn des Winters wird die Wärme aus dem Saisonspeicher als Zustrom für den Wärmeübertrager zum Primärnetz genutzt, im Laufe des Winters kühlt dieser aus bis zur Rücklauftemperatur des Versorgungsgebietes.

Im Sommer würde das BHKW immer mehr Wärme erzeugen als auf dem Gelände benötigt wird, weshalb das BHKW im Sommer abgeschaltet wird. Gleichzeitig wird die Wärmepumpe außer Betrieb genommen, da sie sonst Strom aus dem Netz der öffentlichen Versorgung be-

ziehen müsste. Das Abschalten des BHKWs erfolgt, wenn die Differenz aus täglichem Wärmebedarf und Solarthermiewärme geringer ist, als die erzeugbare Wärme aus dem BHKW in Minimallastbetrieb.

3.2.2 Speicherkonzept ohne Solarthermie ohne dezentrale Speicher

In diesem Konzept wird die Wärme nur durch Wärmepumpe, BHKW und Fernwärme bereitgestellt, wofür zwei Behälterspeichern eingesetzt werden. In Abbildung 4 ist die Einbindung dieser zwei Speicher in die Wärme-Dispatch-Zentrale zu erkennen.

Auch in diesem Konzept dient der Hochtemperaturspeicher primär dem kontinuierlichen Betrieb des BHKWs und somit des Vergasers, daher ist er als Kurzfristspeicher ausgelegt. Da im Winter immer mehr Wärme benötigt wird als das BHKW erzeugen kann, fungiert er auch hier im Winter ausschließlich als Bypass. Die Temperaturen im Speicher liegen wie zuvor beschrieben zwischen 50 °C und 90 °C.

In diesem Konzept, dient ein Mitteltemperaturspeicher dem Ausgleich von Verbraucher- und Erzeugerseite. Da das Konzept keine Solarthermie enthält und somit vor allem untertägige Schwankungen auf Verbraucher- und Erzeugerseite auszugleichen sind, ist dieser als Kurzfristspeicher ausgelegt ist.

Wie im vorherigen Konzept, werden BHKW und Wärmepumpe zum Sommer hin abgeschaltet und die Versorgung erfolgt ausschließlich über das Primärnetz.

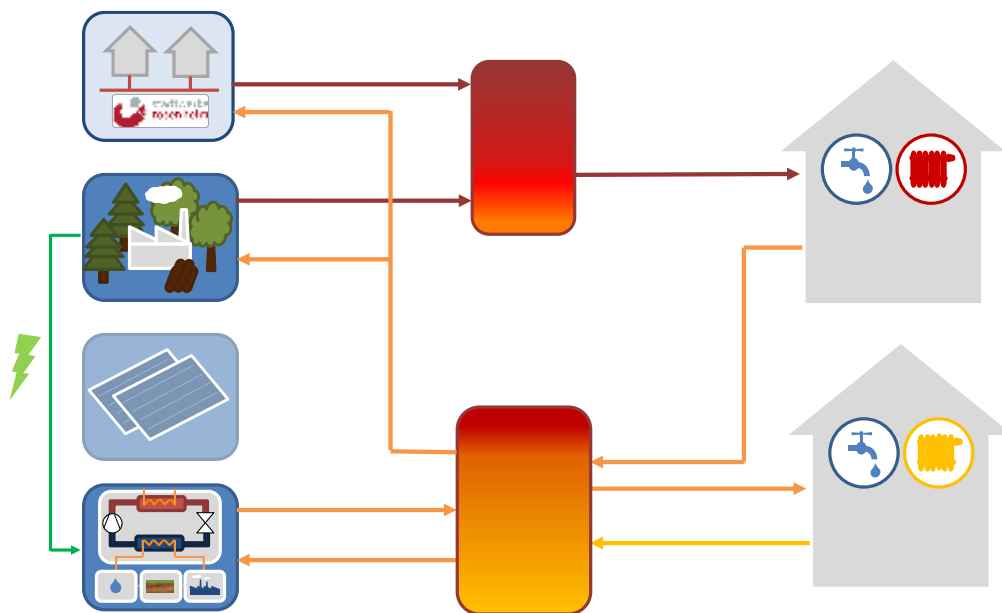


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Speicherkonzeptes ohne Solarthermie ohne dezentrale Speicher

3.2.3 Speicherkonzept ohne Solarthermie mit dezentralen Speichern

Das Speicherkonzept ohne Solarthermie mit dezentralen Speichern besteht aus drei unterschiedlichen Speichersystemen, wobei sich die Speicher primär durch ihr Volumen und die Position im Versorgungssystem unterscheiden. Abbildung 5 zeigt, dass diese Speicherkonzept wie das vorherige einen Mittel- und einen Hochtemperaturspeicher besitzt, welche außerdem genauso dimensioniert und geschaltet sind wie im Konzept zuvor.

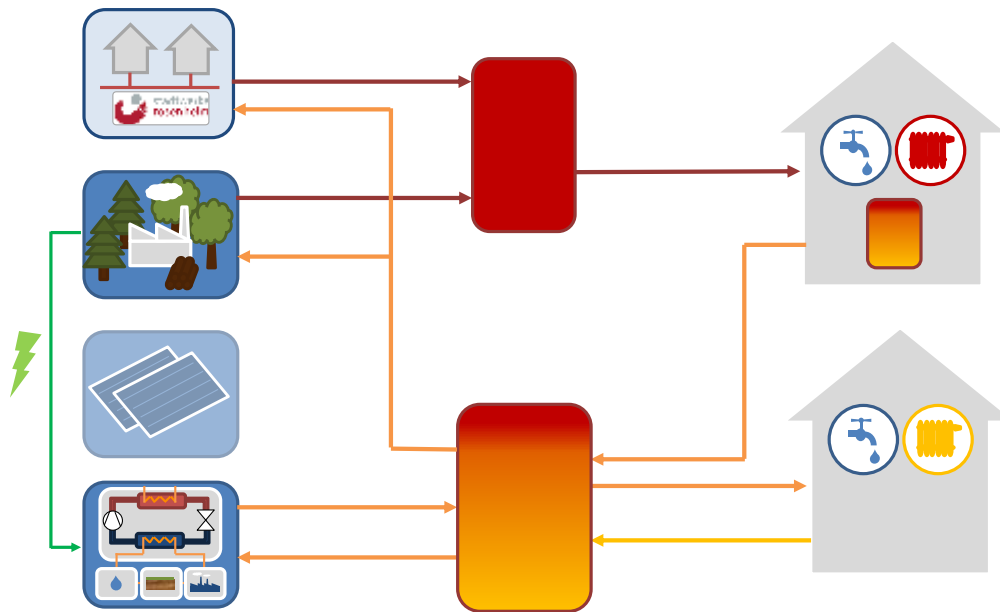


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Speicherkonzeptes ohne Solarthermie und mit dezentralen Speichern

Zusätzlich zu den zentralen Speichern sind in den Gebäuden der Liegenschaft dezentrale Speicher vorhanden. Diese werden für die sogenannte Sommerschaltung eingesetzt. Hierfür werden sie im Sommer zweimal täglich geladen und versorgen die Gebäude über den gesamten Tag mit Trinkwarmwasser. Das Netz muss daher nicht kontinuierlich auf 70 °C gehalten werden, wodurch potenziell geringere Netzverluste entstehen. Erreicht einer der Speicher früher als erwartet seinen minimalen Speicherfüllstand, wird die Netztemperatur angehoben und es erfolgt eine Ladung aller Speicher.

3.3 Auswertung der Speicherkonzepte

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der simulierten Speicherkonzepte vorgestellt. Diese sind unterteilt in Wärmebereitstellung, Wärmeverbrauch und wirtschaftliche Betrachtung.

3.3.1 Wärmeverbrauch

Der Wärmeverbrauch lässt sich in den Wärmebedarf der Nutzer und die im Verteilsystem auftretenden Wärmeverluste unterteilen. Insgesamt weisen die drei Speicherkonzepte verschiedene Wärmeverbräuche auf, was an den unterschiedlichen Wärmeverlusten der Speicher und des Wärmenetzes liegt. Der Wärmebedarf der Liegenschaft und der Hochschule liegt bei allen drei Konzepten bei rund 4,2 GWh. Da der Wärmebedarf in allen drei Konzepten gleich ist, sind in Abbildung 6 nur die jährlichen Wärmeverluste der Netze und Speicher abgebildet.

Die Netzverluste für das Speicherkonzept mit Solarthermie und Saisonspeicher sowie dem Konzept ohne Solarthermie ohne dezentrale Speicher liegen bei 413 MWh, wohingegen das Speicherkonzept ohne Solarthermie mit dezentralen Speichern nur 318 MWh an Netzverlusten aufweist. Dies liegt daran, dass hier das Netz im Sommer nicht kontinuierlich betrieben wird.

Den in Summe höchsten Wärmeverbrauch und die meisten Verluste mit fast 700 MWh hat das Konzept mit Solarthermie mit Saisonspeicher. Die Speicherverluste liegen bei rund

275 MWh, wobei die Verluste des saisonalen Speichers knapp 98 % an den diesen ausmachen, die des Hochtemperaturspeichers nur 2 %. Das Konzept mit dem geringsten Wärmeverbrauch und somit mit den geringsten Verlusten, ist das Konzept ohne Solarthermie mit dezentralen Speichern. Zwar fallen die Speicherverluste mit 28 MWh höher aus als in der Variante ohne Solarthermie mit zentralen Speichern (12 MWh), die Netzverluste gleichen dies jedoch aus (318 MWh mit und 413 MWh ohne dezentrale Speicher).

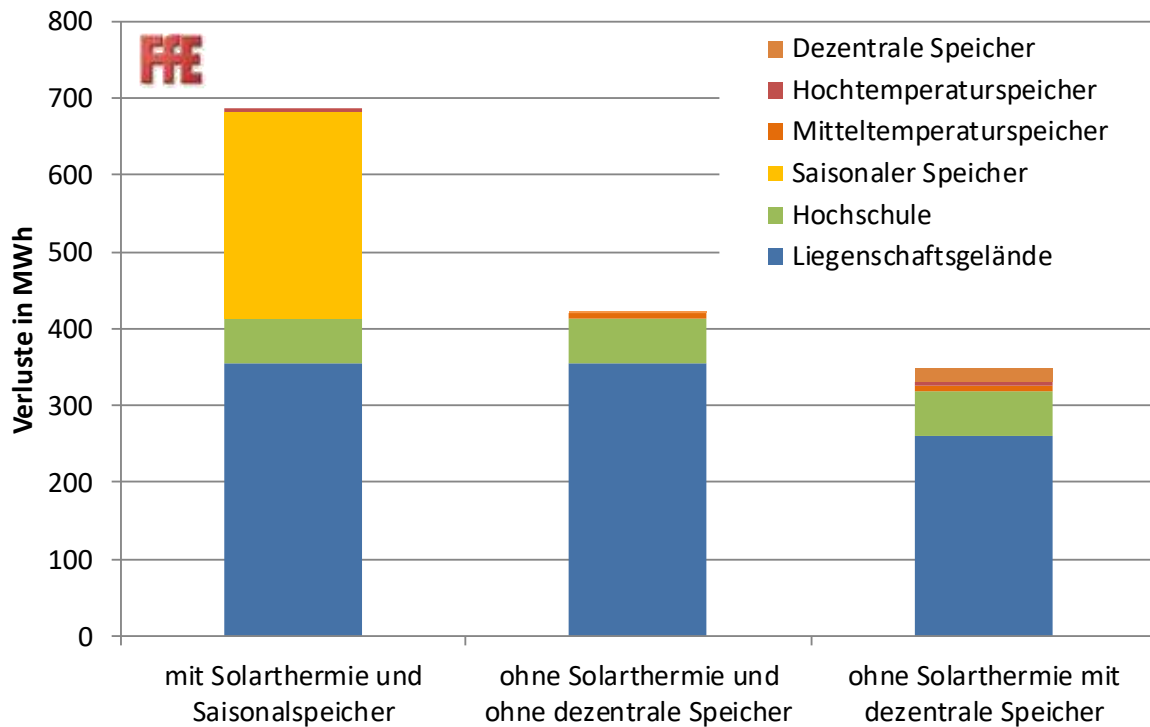


Abbildung 6: Jährliche Wärmeverluste der verschiedenen Speicherkonzepte

Je nach Variante führen die Netz- und Speicherverluste zu einer Erhöhung des Wärmebedarfs im Verhältnis zum Wärmeverbrauch um:

- Mit Solarthermie und Saisonalspeicher: 14,1 %
- Ohne Solarthermie und ohne dezentrale Speicher: 9,2 %
- Ohne Solarthermie mit dezentralen Speichern: 7,7 %

3.3.2 Wärmebereitstellung

Abbildung 7 zeigt die Zusammensetzung der Wärmebereitstellung nach Erzeugern. Als Wärmeerzeuger stehen dabei die Solarthermie, die Abwasserwärmepumpe, der Biomassevergaser mit gekoppelten BHKW und das Primärnetz zur Verfügung.

Das Speicherkonzept mit Solarthermie und Saisonalspeicher bezieht alle vier Wärmeerzeuger mit ein, wohingegen die anderen beiden Speicherkonzepte die Solarthermie nicht nutzen. Dadurch erreicht das Speicherkonzept mit Solarthermie und Saisonalspeicher einen höheren Anteil an erneuerbaren Energien von 86 %, was sich wiederum unterteilen lässt in 46 % nicht biogene erneuerbare Wärme und 40 % Wärme aus Biomasse. Zudem benötigt dieses Speicherkonzept den geringsten Wärmebezug aus dem Primärnetz.

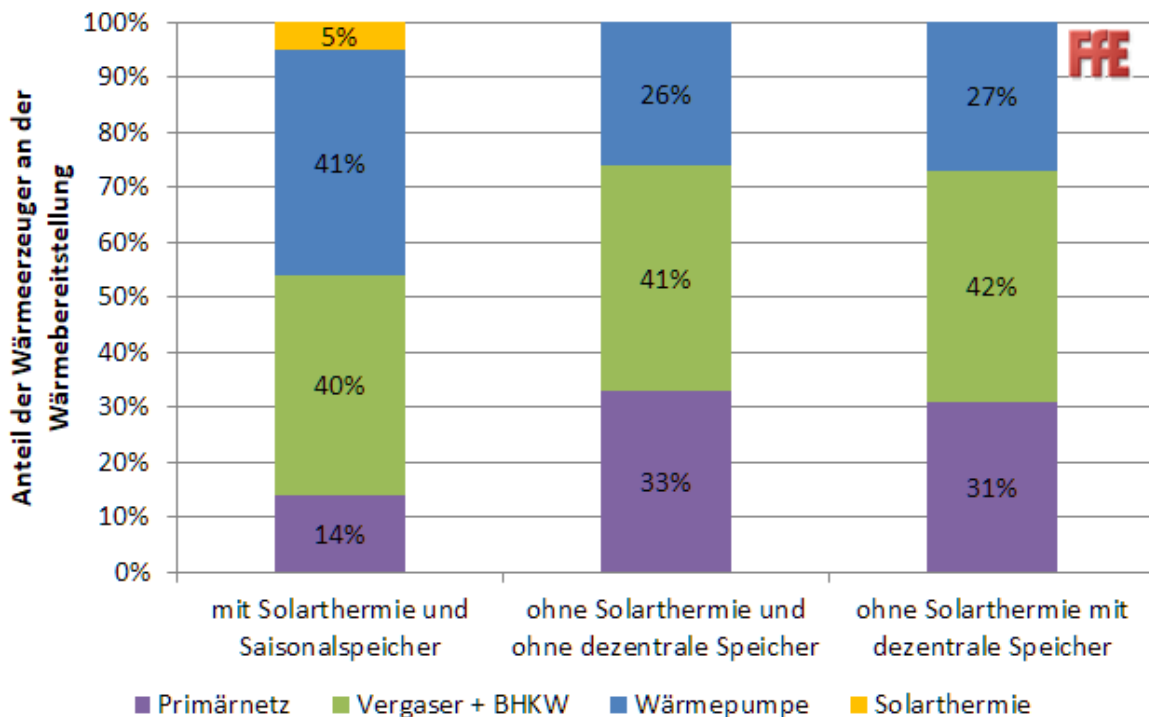


Abbildung 7: Bereitstellung der Wärme nach Erzeuger der verschiedenen Speicherkonzepte

In den beiden Speicherkonzepten ohne Solarthermie, ist zwischen den Konzepten mit bzw. ohne dezentralen Speichern nur ein minimaler Unterschied bei der Wärmebereitstellung zu erkennen. Hier unterscheidet sich die Wärmebereitstellung ausschließlich im Sommer, in welchem die Wärme ausschließlich über das Primärnetz bereitgestellt wird. Da der Einsatz der dezentralen Wärmespeicher den Wärmebedarf reduziert, sinkt die Wärmebereitstellung aus dem Primärnetz und somit ihr Anteil an der gesamten Energiebereitstellung.

3.3.3 Wirtschaftliche Betrachtung

Die Gesamtkostenbilanz ergibt sich aus den jährlichen Einnahmen und Ausgaben. Abbildung 8 zeigt eine Aufschlüsselung der jährlichen Kostenbilanz für die verschiedenen Speicherkonzepte. Hier angesetzte Kostenkomponenten und Abschreibungsdauern der einzelnen Technologien sind in [5] aufgeschlüsselt, die angesetzten Speicherkosten je Konzept sind in Tabelle 1 festgehalten.

Die Kostenpunkte für Messeinrichtungen, Monitoring, Nebenanlagen, Heizzentrale, Hausübergabestationen sowie Netzkosten Liegenschaft und Hochschule sind in Grautönen dargestellt, da sie in allen drei Konzepten gleich sind (ca. 87.350 €). Die Detailplanung und Genehmigung sind von den Investitions- und Instandsetzungskosten abhängig, wodurch sie sich zwischen den Konzepten leicht unterscheiden. Zudem unterscheiden sich Investitions- und Instandsetzungskosten für die Speicher sowie die Betriebskosten von Wärmepumpe und BHKW.

Tabelle 1 Übersicht über zu erwartende fixe jährliche Kosten und Relevanz für die einzelnen Konzepte, wobei 1: mit Solarthermie und Saisonalspeicher, 2 ohne Solarthermie und ohne dezentrale Speicher, 3: ohne Solarthermie und mit dezentralen Speichern mit (Quellen: 1Kostenkurve aus /FAB-01 18/, 2aus Angebot (Lebensdauer, da keine Abschreibungsdauer in Literatur), 3aus eigenen Abrechnungsdaten, 4Kostenkurve aus /FFE-11 17/, 5/VDI-04 12/

Technologie	Investitions- und Anschlusskosten	Abschreibungsdauern	Jährliche Wartungskosten	Konzept
Saisonalspeicher (Volumen 12.300 m ³)	710.000 € ¹	50 Jahre ²	200 € ³	1
Hochtemperatur-Wärmespeicher 65m ³	36.900 € ¹	50 Jahre ²	200 € ³	1
Hochtemperatur-Wärmespeicher 40m ³	28.200 € ¹	50 Jahre ²	200 € ³	2, 3
Mitteltemperaturspeicher (Volumen 44 m ³)	29.700 € ¹	50 Jahre ²	200 € ³	2, 3
Dezentrale Speicher (13 x 2 m ³)	39.000 € ⁴	50 Jahre ²	1 %des Invests ⁵	3

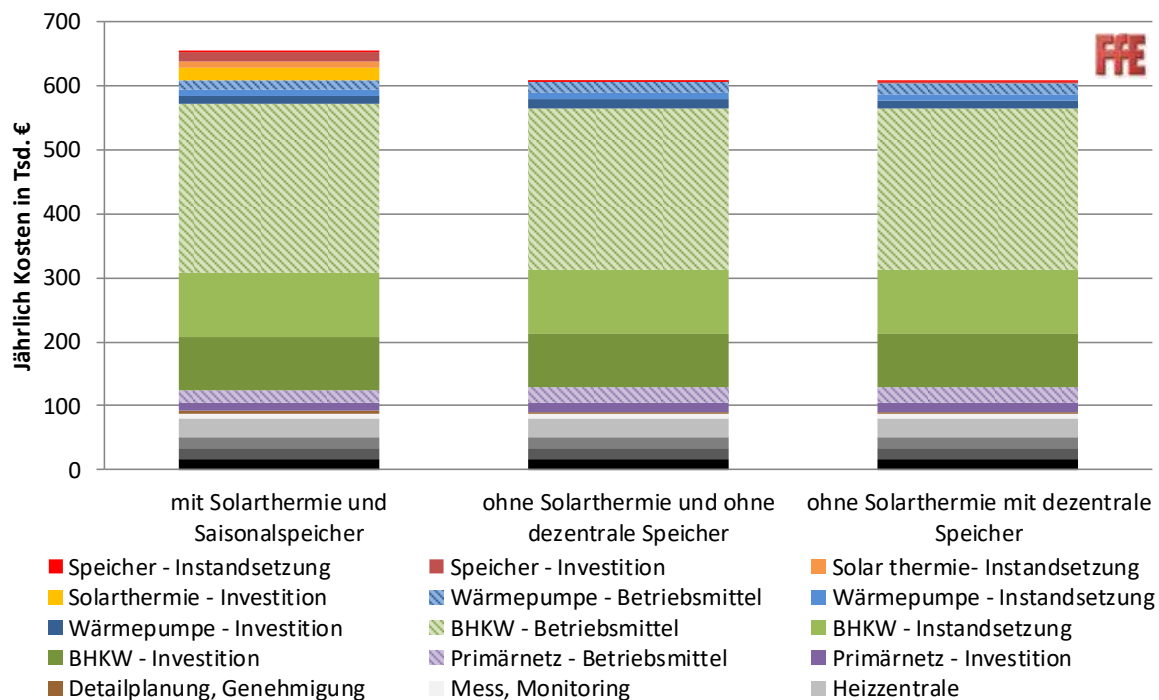


Abbildung 8: Aufgeschlüsselte jährliche Kostenbilanz für die verschiedenen Speicherkonzepte mit und ohne Standardförderung

Insgesamt weißt das Speicherkonzept mit Solarthermie und saisonalem Wärmespeicher etwa 43.000 € höhere annuitätische Investitions- und jährliche Instandhaltungskosten aus als das Speicherkonzept ohne Solarthermie und ohne dezentrale Wärmespeicher. Die zusätzlichen annuitätischen Kosten für die dezentralen Speicher betragen 2.000 €.

Die Betriebsmittelkosten, welche in Abbildung 8 schraffiert dargestellt sind, hängen mit dem Anteil der eingesetzten Wärmeerzeuger an der Wärmebereitstellung zusammen (Abbildung 7). Da sich die Anteile der Wärmezusammensetzung sehr ähneln, ist auch bei den Kosten für die Betriebsmittel kaum ein Unterschied zu erkennen. Beim Speicherkonzept mit Solarthermie und Saisonalspeicher liegt der Anteil der Betriebsmittelkosten an den jährlichen Gesamtkosten bei 45 % und bei den anderen beiden Konzepten bei etwa 49 %. Dies liegt ausschließlich an den insgesamt höheren Kosten des Versorgungssystems.

In allen drei Konzepten macht der Biomassevergaser mit BHKW 68% (Solarthermie und Saisonalspeicher) bis zu 74 % (ohne Solarthermie und ohne dezentrale Speicher) den größten

Teil der Gesamtkosten aus. Der Anteil der Speicherkosten an den Gesamtkosten ist sehr gering. Bei dem Konzept mit Solarthermie und Saisonalspeicher liegt er bei 2,3 % und bei den anderen beiden Konzepten bei 1 %.

Die aus den verschiedenen Speicherkonzepten resultierend Wärmegestehungskosten, die mit Formel 1 berechnet werden, liegen nah beieinander.

$$\text{Wärmegestehungskosten} = \frac{\text{annuitätische Gesamtkosten}}{\text{Wärmebedarf}} \quad (1)$$

Das Speicherkonzept mit saisonalem Wärmespeicher hat dabei jeweils den höchsten Wärmegestehungspreis mit 14,4 €/ct/kWh. Die anderen Speicherkonzepte haben etwas niedrigere Wärmegestehungskosten mit ca. 13,1 €/ct/kWh mit.

3.4 Diskussion der Ergebnisse

Alle drei Speicherkonzepte ermöglichen einen deutlich höheren Anteil an erneuerbaren Energien an der Wärmeversorgung als [27] fordert. Da die Wärmeerzeuger unterschiedliche Betriebsmittelkosten aufweisen, kann durch eine Veränderung der Regelung der einzelnen Wärmeerzeuger, eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit aller drei Konzepte erreicht werden. Die Betriebsmittelkosten der Solarthermie sind dabei am niedrigsten, gefolgt von dem Wärmebezug aus dem Primärnetz, der Wärmepumpe bei Eigenstromverbrauch und dann dem Vergaser mit BHKW.

Im Konzept mit Solarthermie und Saisonalspeicher, könnte die Wärmepumpe weniger Wärme bereitstellen oder die Solarthermieanlage geringer dimensioniert werden. Eine kleinere Dimensionierung der Solarthermie reduziert die Investitionskosten sowie Wärmeerzeugungsüberschüsse. Dies wiederum ermöglicht eine geringere Dimensionierung des saisonalen Wärmespeichers. In allen drei Speicherkonzepten könnte eine optimierte Auslegung des BHKWs auf den Strombedarf der Wärmepumpe die Wärmebereitstellung aus dem BHKW reduzieren ohne im ungünstigen Teillastbetrieb zu fahren. Diese Wärme würde dann durch den spezifisch günstigeren Wärmebezug aus dem Primärnetz ersetzt.

Die Wirtschaftlichkeit des gesamten Wärmenetzes wird durch die Speicher nur geringfügig beeinflusst, da sie sowohl bei den Verlusten als auch bei den Investitionskosten nur einen kleinen Anteil ausmachen. Eine intelligente Regelung der Erzeuger und der Speicher kann jedoch eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit bewirken. Durch den Hochtemperaturspeicher kann beispielsweise die kostengünstig erzeugte Wärme der Solarthermie kurzzeitig zwischengespeichert werden und so vor allem im Sommer einen Teil des Wärmebedarfs decken.

4 Nutzwertanalyse der Speicherkonzepte

Um die entwickelten Speicherkonzepte untereinander bewerten und vergleichen zu können, wird eine Nutzwertanalyse durchgeführt. Da in der Literatur noch keine Bewertung von Speicherkonzepten dokumentiert ist, wurden zunächst relevante Kriterien zusammengestellt, definiert und mittels des SIMOS-Verfahrens aus Sicht des Wärmenetzbetreibers gewichtet. Die Methodik sowie die genaue Definition der Bewertungskriterien können /FAB 01-18/ entnommen werden.

4.1 Untersuchte Kriterien in der Nutzwertanalyse

Das Ergebnis für die Gewichtung der definierten Bewertungskriterien sind in Tabelle 3 aufgelistet. Wichtig ist hierbei, dass diese sowohl quantitativ als auch rein qualitativer Natur sein können.

Die Wirtschaftlichkeit wird mit einer Gewichtung von 29,4 % als wichtigstes aller Kriterien eingestuft. Darauf folgen die Komplexität des Konzeptes und die Gewährleistung der Versorgungssicherheit. Als eher unbedeutend für die Wahl eines Speicherkonzeptes werden die Kriterien Platzbedarf und Erweiterbarkeit sowie Flexibilität des Einsatzes gewichtet.

Tabelle 3: Übersicht der Technologie-Bewertungskriterien inklusive Gewichtung

Kriterium	Quantitativ	Gewichtung
Wirtschaftlichkeit	Ja	29,4 %
Komplexität	Nein	20,6 %
Versorgungssicherheit	Nein	17,6 %
Sozialverträglichkeit	Nein	8,8 %
Integration von erneuerbaren Energien exklusive Biomasse	Ja	8,8 %
Integration von Biomasse	Ja	8,8 %
Platzbedarf	Ja	2,9 %
Erweiterbarkeit und Flexibilität des Einsatzes	Nein	2,9 %

4.2 Ergebnisse der Nutzwertanalyse

Für die Nutzwertanalyse wurden aus den vorher ermittelten Bewertungskriterien nur die vier quantitativen Kriterien herangezogen. Für die qualitativen Kriterien konnte aufgrund fehlender Informationen keine Ausprägung festgelegt werden.

Die Nutzwertanalyse ist eine Methodik, die bei der Entscheidungsfindung komplexer Probleme helfen soll. Dabei wurde den quantitativen Kriterien Punktwerte zwischen 0 und 100 zugewiesen, wobei der Wert 0 die schlechteste Kriterienausprägung und 100 die beste darstellt. Diese Ausprägungen werden durch die durchgeführte Gewichtung in einen Gesamtpunktwert verrechnet.

Tabelle 4 zeigt die jeweiligen Ausprägungen und Gewichtungen der quantitativen Kriterien.

Das Speicherkonzept mit saisonalem Wärmespeicher erreicht einen Gesamtpunktwert von 67 und schneidet am schlechtesten von den drei untersuchten Speicherkonzepten ab. Zwar ermöglicht nur das Konzept mit Saisonspeicher eine Integration der Solarthermie, es weist auf Grund der höheren Verluste jedoch gleichzeitig höheren Wärmegestehungskosten aus.

Nach der Nutzwertanalyse, ausschließlich basierend auf den quantitativen Bewertungskriterien, ist das beste Speicherkonzept somit das Speicherkonzept ohne Solarthermie und ohne dezentrale Speicher. Die beiden Konzepte ohne Solarthermie haben zwar einen geringeren Anteil an erneuerbaren Energien ohne Biomasse, jedoch ist der Anteil der Biomasse größer als beim Speicherkonzept mit saisonalem Speicher. Des Weiteren benötigt das Speicherkonzept ohne Solarthermie und ohne dezentrale Speicher am wenigsten Platz und hat somit die höchste Ausprägung beim Kriterium Platzbedarf. Das Speicherkonzept ohne Solarthermie mit dezentralen Speichern unterscheidet sich nur hier in der Punktzahl, was zu einer minimal schlechteren Bewertung führt.

Tabelle 4: Nutzwertanalyse der ermittelten Speicherkonzepte

Speicherkonzepte	Quantitative Kriterien				Gesamtpunktwert
	Wirtschaftlichkeit	Integration Biomasse	Integration EE ohne Biomasse	Platzbedarf	
Gewichtung	29,4 %	8,8 %	8,8 %	2,9 %	50%
Saisonaler Wärmespeicher	98	40	46	1	67
Ohne Solarthermie ohne zentralen Speichern	100	48	31	100	72
Ohne Solarthermie mit dezentrale Speicher	99	48	31	76	71

Die Ergebnisse der Nutzwertanalyse sind grafisch in Abbildung 10 durch ein Netzdiagramm dargestellt. Dabei repräsentiert der Radius der eingefärbten Kreisflächen die Ausprägung des Kriteriums. Die Winkelgröße stellt die Gewichtung des jeweiligen Kriteriums dar. Der Gesamtpunktwert der Speicherkonzepte ist der Anteil der farbigen Kreissektoren. Umso größer die farbige Fläche der Sektoren, umso besser schneidet das Speicherkonzept bezüglich des Kriteriums ab.

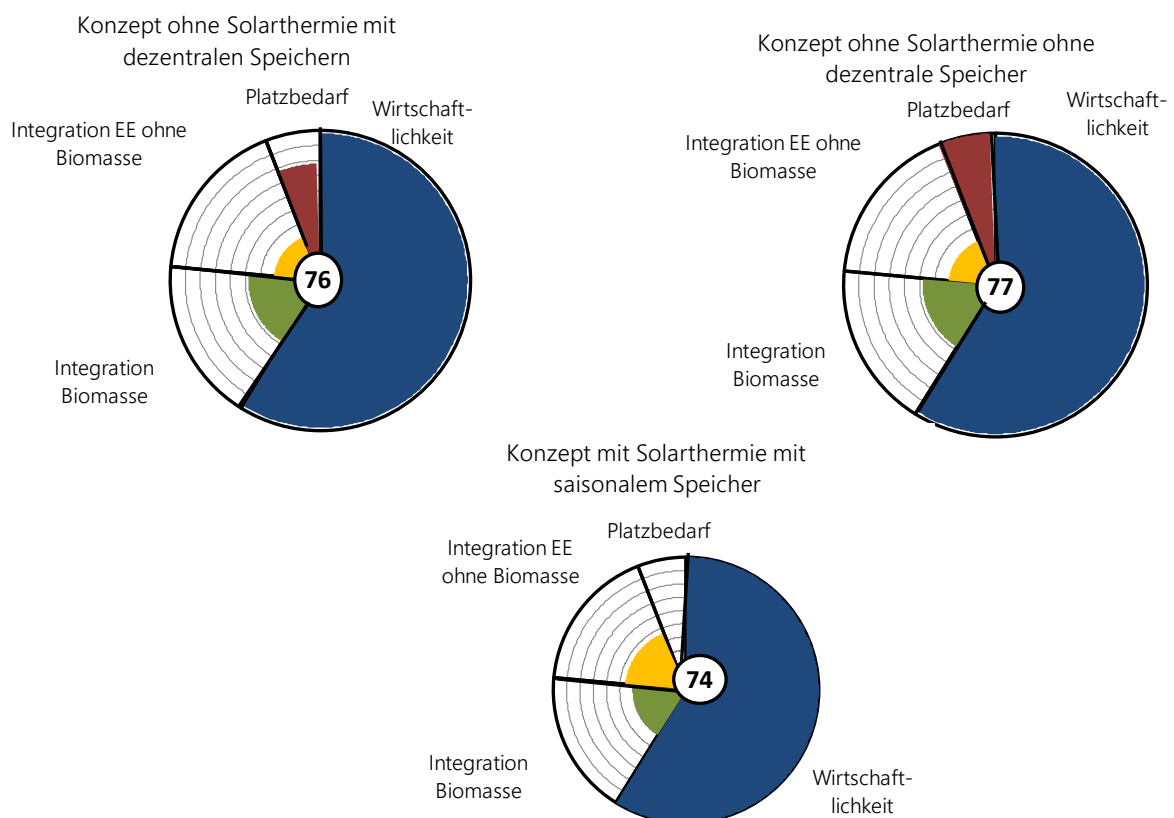


Abbildung 10: Netzdiagramme der Nutzwertanalyse der entwickelten Speicherkonzepte

Da es sich bei den gewählten Speichern in allen drei Konzepten um marktreife Technologien handelt, ist das gleiche Maß an Versorgungssicherheit anzusetzen. Diese würde sich verschlechtern, wenn beispielsweise latente oder thermochemische Speicher eingesetzt werden. Jedoch hängt dieses Kriterium auch mit dem Kriterium Komplexität zusammen. Bei einer erhöhten Steuerungs- und Regelungstechnik, ist auch das Auftreten von Störfällen etwas größer.

Da bei dem Speicherkonzept mit Saisonalspeicher die Solarthermie als Wärmeerzeuger mit einbezogen wird, erhöht sich hier der Aufwand der Steuerungs- und Regelungstechnik. Die beiden anderen Konzepte unterscheiden sich nicht in den verwendeten Wärmeerzeugern. Jedoch benötigt das Konzept mit dezentralen Speichern mehrere dezentrale Speicher, die zur Erhöhung der Komplexität führen. Das Konzept mit der geringsten Komplexität ist somit das Speicherkonzept ohne Solarthermie und ohne dezentrale Speicher.

Das Kriterium Erweiterbarkeit und Flexibilität des Einsatzes enthält einen sehr weiten Szenarienraum, wie beispielsweise eine Reduktion oder Erhöhung des Wärmebedarfs oder die Veränderung der Wärmeerzeuger. Daher ist hier eine generelle Abschätzung nicht möglich ohne eine genaue Veränderung zu definieren.

Alles in allem erreicht bei den quantitativen Kriterien somit das Speicherkonzept mit saisonalem Wärmespeicher die niedrigste Punktzahl und das Konzept ohne Solarthermie und ohne dezentrale Speicher bei allen Kriterien den besten Wert. Somit würde sich die Reihenfolge der Gesamtpunktwerte aus der Nutzwertanalyse der quantitativen Kriterien nicht verändern. Im Gegenteil würde eine Nutzwertanalyse qualitativer und quantitativer Kriterien, die Abstände zwischen den Gesamtpunktwerten stattdessen voraussichtlich vergrößern.

5 Fazit und Ausblick

Aktuell wird die Diskussion zur Wärmewende von den Limitationen einzelner Wärmeerzeuger dominiert. Auch wird häufig nur Wert gelegt auf die Art des eingesetzten Speichers, jedoch weniger auf dessen Regelung und Systemnutzen. Zudem sind bei der Wahl eines geeigneten Speicherkonzeptes für Wärmenetze der 4. Generation neben den Wärmeverbräuchern und –erzeugern auch das Temperaturniveau kritisch zu analysieren. Die Verwendung von Wärmespeichern auf unterschiedlichen Temperaturniveaus, ermöglicht die effiziente Einbindung von Nieder- und Hochtemperaturwärmequellen und somit die Serienschaltung dieser.

Bezogen auf die zukünftige Wärmebereitstellung aus erneuerbaren Energien, wird diese Serienschaltung für die Bereitstellung von Raum-, Trinkwarmwasser und Prozesswärme an Relevanz gewinnen und somit die Einbindung effizienter Speicherkonzepte.

Das Speichersystem mit dezentralen Wärmespeichern schneidet im vorliegenden Vergleich schlechter ab als das ohne. Allerdings ist die Kombination des Konzeptes mit einer zentralen Solarthermieranlage denkbar. So würde das Wärmenetz nur in der Zeit der Wärmeerzeugung aus Solarthermie betrieben und die dezentralen Speicher gefüllt.

Auch in Siedlungen, in denen eine Raumwärme auf niedrigen Temperaturen, z. B. 40 °C, bereitgestellt werden kann, müssen Wärmenetze auf Grunde der Trinkwarmwasserhygiene auf mindestens 70 °C betrieben werden. Würden hier dezentrale Speicher für das Trinkwarmwasser eingesetzt und einmal am Tag bei hohen Temperaturen beladen, könnte das Netz den Rest des Tages auch im Winter bei niedrigeren Temperaturen operieren.

Aktuell werden zwar primär wasserbasierte Behälterspeicher eingesetzt, in der Industrie und mobilen Anwendungen ist jedoch mit einer steigenden Bedeutung anderer Speichermedien zu rechnen. Dies ist zum einen mit der höheren spezifischen Speicherkapazität, den geringeren thermischen Verlusten und somit mit deren Einsatzmöglichkeit als mobile Speicher begründet. Diese sind vor allem für die Nutzung von Abwärme aus Industriebetrieben unter aktuellen Bedingungen häufig noch nicht wirtschaftlich, mit steigenden Kosten für fossile Brennstoffe kann sich dies jedoch potenziell ändern. Somit können sie einen wichtigen Beitrag zur Senkung der wärmebedingten Emissionen leisten.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Energieeffizienz in Zahlen. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2017.
- [2] Connolly, David et al.: Heat Roadmap Europe: Combining district heating with heat savings to decarbonise the EU energy system. In: Energy Policy 65 (2014) 475-489. Amsterdam: Elsevier Ltd., 2014.
- [3] District energy in cities - Unlocking the Potential of Energy Efficiency and Renewable Energy. Paris, Frankreich: United nations Environmental Programm - Division of Technology, Industry and Economics, 2015
- [4] Pehnt, Martin et al.: Wärmenetzsysteme 4.0 - Endbericht - Kurzstudie zur Umsetzung der Maßnahme "Modellvorhaben erneuerbare Energien in hocheffizienten Nieder-temperaturwärmenetzen".. Heidelberg, Berlin, Düsseldorf, Köln: Adelphi, 2017.
- [5] Kleinertz, Britta et al.: Machbarkeitsstudie eines Wärmenetzes 4.0 - Transformation des Bestandsnetzes des Liegenschaftsgeländes der Bundespolizeiinspektion Rosenheim und Erweiterung um die Hochschule Rosenheim. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2018.
- [6] Sterner, Michael Prof. Dr.-Ing.; Stadler, Ingo Prof. Dr.-Ing.: Energiespeicher - Bedarf - Technologie - Integration. Berlin Heidelberg: Springer, 2014
- [7] Maier, Magnus: Großwärmespeicher - Zentraler Baustein einer flexiblen Strom- und Wärmeversorgung. Berlin: Agentur für Erneuerbare Energien e. V., 2017.
- [8] Mangold, Dirk: Saisonalspeicher. In: www.saisonalspeicher.de. (Abruf am 2018-07-31); Stuttgart: Solites, 2018.
- [9] Fact sheet Speichertechnologien - Sorptionsspeicher. Berlin: Bundesverband Energiespeicher e.V. (BVES), 2016.
- [10] Sterner, Michael; Stadler, Ingo: Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 2014
- [11] Thermochemische Speicher in: BINE Informationsdienst. Eggenstein-Leopoldshafen: Fachinformationszentrum Karlsruhe GmbH, 2001
- [12] Rundel, Paul; Meyer, Benedikt; Meiller, Martin; Meyer, Inge; Daschner, Robert; Jakuttis, Michael; Franke, Matthias; Binder, Samir; Hornung, Andreas: Speicher für die Energiewende. Sulzbach-Rosenberg: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, 2013
- [13] Technik, Ökologie und Lebensqualität im Einklang - Das Crailsheimer Solarthermie-Projekt im Überblick. Crailsheim: Stadtwerke Crailsheim GmbH, 2009.
- [14] Hübner, Jürgen: Solare Nahwärme am Beispiel Crailsheim - Hirtenwiesen II - Projektentwicklung und Betriebserfahrungen von Deutschlands größter Solarthermieanlage. Crailsheim: Stadtwerke Crailsheim GmbH, 2016.
- [15] Sunstore 3 - Phase 2 Implementation - Final report. Skørping: PlanEnergi, 2015.
- [16] Boenigk, Nils: Büsingen. In: <http://www.kommunal-erneuerbar.de/de/energie-kommunen/energie-kommunen/buesingen.html>. (Abruf am 2018-08-01); Berlin: Agentur für Erneuerbare Energien, 2017.
- [17] Fink, Christian et al.: Wissenschaftliche Begleitforschung zum Förderprogramm "Solarthermie - Solare Großanlagen". Gleisdorf: AEE - Institut für Nachhaltige Technologien, 2016.
- [18] Wesche, Julius: Nachhaltige Wärmenetze. In: TransNIK Abschlussveranstaltung; Berlin: Fraunhofer ISI, 2018.

- [19] Ramm, Tobias et al.: Energy storage and integrated energy approach for district heating systems. Amsterdam, Netherlands: Elsevier B.V., 2017.
- [20] Moises, Wolfgang: Kombinierte Kalt-/Warme-Nahwärmenetze im Vergleich zu Standard-Nahwärmenetzen - Projektbeispiel "Dollnstein". München: team für technik, 2015.
- [21] Reuß, Manfred: Wärmeversorgung im Quartier. Garching: Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V., 2016.
- [22] C.A.R.M.E.N. e.V.:(2017). Sophena (1.1) [Software]. Abgerufen von <https://www.carmen-ev.de/infothek/downloads/sophena/2008-download-von-sophena>. Straubing: 2017
- [23] Quaschnig, Volker: Regenerative Energiesysteme - Technologie - Berechnung - Simulation. München: Hanser Verlag, 2011
- [24] Waldschmidt, Wolfgang: ABC der Wärmepumpe. Frankfurt am Main: EW Medien und Kongresse, 2010.
- [25] BHKW-Grundlagen. Berlin: ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., 2010.
- [26] Kleinertz, Britta et al.: Heat Dispatch Centre – Symbiosis of heat generation units to reach cost efficient low emission heat supply. In: Energy Procedia (2019). Munich: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH
- [27] Merkblatt zu den technischen Anforderungen an ein Wärmenetzsystem 4.0 - Modellvorhaben Wärmenetzsysteme 4.0. Eschborn: Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, 2017.