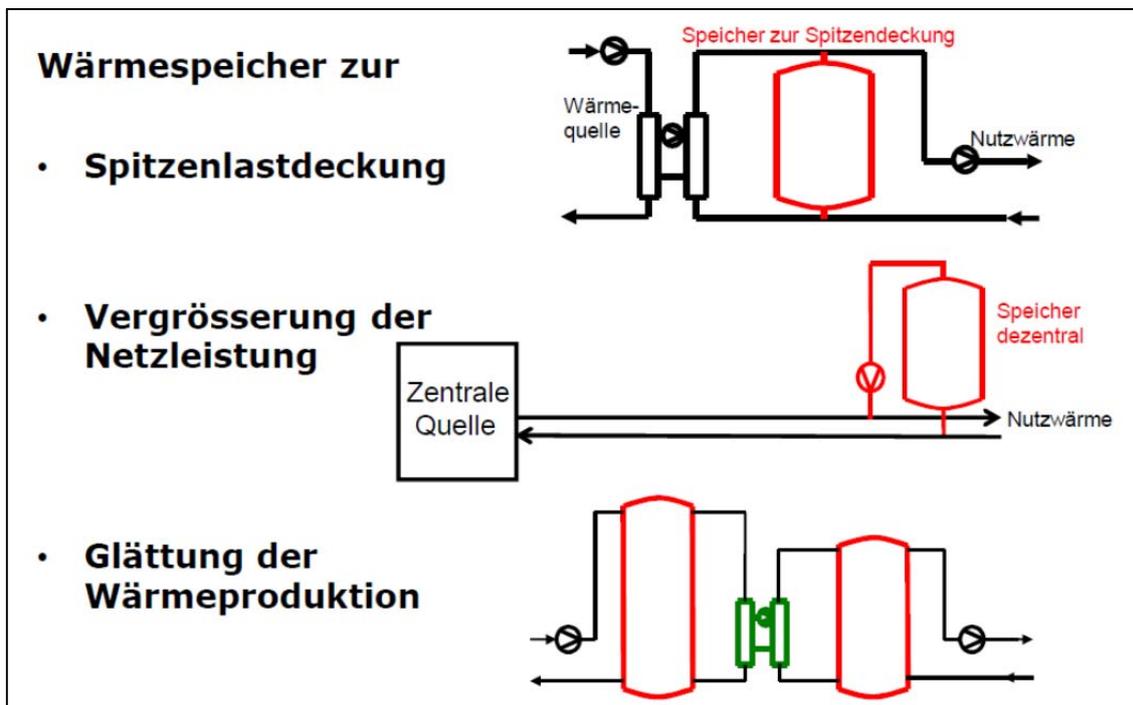


Programm „Thermische Netze“

Arbeitspaket Kurzzeitspeicher



Autoren

Diego Hangartner, HSLU

Joachim Ködel, HSLU

**Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt.
Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.**

Adresse

EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE
Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen. Postadresse: 3003 Bern
Infoline 0848 444 444. www.energieschweiz.ch/beratung
energieschweiz@bfe.admin.ch, www.energieschweiz.ch

Inhalt

1	Ausgangslage	4
2	Motivation, Ziele	4
3	Geltungsbereich.....	4
4	Grundlagen.....	5
5	Verfahrenstechnische Besonderheiten.....	6
5.1	Kapazität Wärmespeicher	6
5.2	Leistung Wärmespeicher.....	7
5.3	Trennschicht, zeitlicher Verlauf.....	8
5.4	Trennschicht, Vermeidung von Störungen	9
5.5	Wärmeverluste	9
5.6	Drucklose und druckbehaftete Speicher	10
5.7	Betriebsweisen von Speichern (>100 Zyklen/a)	10
5.8	Kurzzeitspeicher für Niedertemperaturanwendungen.....	12
5.9	Speicher mit Betriebstemperaturen \neq Medientemperatur	12
5.10	Einbindungsbeispiele Niedertemperaturspeicher	13
6	Ausführung, Auslegung.....	14
7	Einfluss auf Kosten.....	16
8	Anwendungsbeispiele.....	16
9	Ausblick.....	17
10	Quellenverzeichnis.....	17

1 Ausgangslage

Das Programm "Thermische Netze" beinhaltet die Erstellung von Grundlagenarbeiten zur Unterstützung der Branche Energiewirtschaft im Hinblick auf die Umsetzung der Energiestrategie 2050.

Wärmespeicher sind in Gebäuden, im Gewerbe und in der Industrie seit langer Zeit im Einsatz. Auch bei zentralen Versorgungsanlagen für thermische Energie werden Wärmespeicher zum Ausgleich des zeitlichen Überangebotes, oder zur Deckung des Spitzenbedarfs von Wärme und Kälte eingesetzt.

Im Rahmen des Programmes "Thermische Netze" wird die Technologie "Thermische Energiespeicher" als Schlüsseltechnologie betrachtet. Ein Grundlagenwerk zum Thema "Saisonale Speicherung" liegt vor.

Während bei saisonaler Speicherung von einem oder wenigen Lade-/Entladezyklen pro Jahr ausgegangen wird, liegt die Anzahl der Lade-/Entladezyklen bei Kurzzeitspeichern bei 20 bis 500 pro Jahr. Der Fokus liegt dabei eher bei Zyklenzahlen > 100 pro Jahr.

An Grundlagen zur Technologie für Kurzzeitspeicher gibt es Literatur, Forschungsberichte, Firmendokumente, Normen, Standards, Lehrbücher, Empfehlungen, Richtlinien. Diese Werke beziehen sich häufig auf spezifische Anwendungsfälle und standardisierte Produkte.

2 Motivation, Ziele

Für thermische Netze können Kurzzeitspeicher zur Effizienzsteigerung und Systemoptimierung eingesetzt werden. Trotz ihrer Vorteile werden sie selten eingesetzt, da u.a. erhöhte Investitionen resultieren und zusätzlich Platz beansprucht wird. Der Bericht Kurzzeitspeicher soll als Grundlagenwerk dem Interessenten die Zusammenhänge, Einsatzmöglichkeiten, Ausführungshinweise in kompakter Form zur Verfügung stellen.

Ausgehend von vorliegenden Manuskripten, Erfahrungsberichten und Untersuchungen werden mit diesem Bericht für Kurzzeitspeicher relevante Fakten für Wärmespeicher und Kältespeicher ohne Anspruch auf Vollständigkeit aufgezeigt. Dieser Bericht kann einem folgenden Arbeitspaket als Basis dienen, und als Anregung für weitere Überlegungen, Untersuchungen, Präzisierungen.

3 Geltungsbereich

Als Kurzzeitspeicher werden solche Wärme- und Kältespeicher betrachtet, bei welchen von jährlich mindestens 20 (eher >100) Lade- und Entladezyklen ausgegangen werden kann. Dies betrifft sowohl technische Speicher zur Reduktion der Einschalthäufigkeiten von Maschinen und Anlagen (Holzheizwerke, Blockheizkraftwerke, Wärmepumpen etc.), wie Speicher zum Ausgleich kurzfristiger Bedarfs- und Angebotsschwankungen, wie Speicher zur Gewährleistung konstanter Betriebsweisen von Anlagen und Maschinen, bis hin zum Ausgleich von Wochengangschwankungen. Das Dokument bezieht sich sowohl auf Anwendungen bei Maschinen, Heiz- und Kühlanlagen, wie insbesondere auf Anwendungen bei thermischen Netzen.

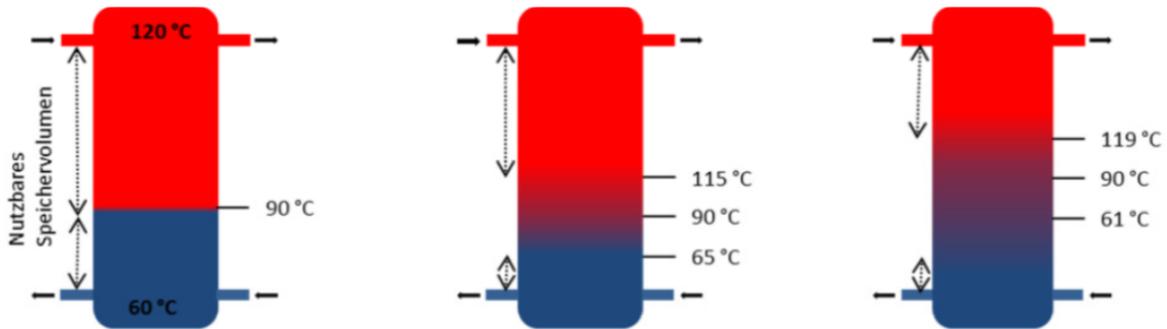
4 Grundlagen

An Grundlagen für den Bericht wurden verwendet:

- Bericht zu Arbeitspaket Einsatz von thermischen (saisonalen) Speichern in thermischen Netzen, Nov. 2017, Karl-Heinz Schädle. Darin enthalten ist der heutige Stand der Technologien und Anwendungen, sowie Besonderheiten der Einbindung.
- Manuskripte und Foliensätze des Modules Nachhaltige Industrie- und Fernwärme (NIF) der Hochschule Luzern Technik & Architektur (HSLU) mit Erfahrungswerten basiert auf Beispielen aus realisierten Anlagen.
- Planungshandbuch Fernwärme, QM Fernwärme, Verenum 2017 [2], Gestaltung und Auslegung, technische Daten von thermischen Speichern für Fernwärmenetze
- Skript Modul Storage HSLU Luzern, Prof. Dr. Jörg Worlitschek, Leiter Competence Center Thermische Energiespeicher HSLU
- Dokumente und Grundlagen aus der Pinch-Analyse (HSLU, Prof. Dr. Beat Wellig) zur systematischen energetischen Analyse und Optimierung komplexer Prozesse in Bezug auf Wärme- und Kälteströme und Energiespeicherung.
- Identifikation und Dimensionierung von Speichersystemen: F. Brunner, P. Krummenacher: Einführung in die Prozessintegration mit der Pinch-Methode. [7]
- Energy Storage Systems, Prof. Dr. Jörg Worlitschek u.a., Skript zu Vorlesung, Thermische Energiespeicher: Übersicht, Grundlagen zu Thermodynamik, Latentwärmespeicher, sensible Speicher [8]
- Zusammenstellungen, Berichte, Erfahrungsberichte zu Wärmespeichern der Gruner Gruneko AG, in Zusammenarbeit mit Firmen wie Energie 360°, Regio Energie Solothurn, ewl, AEW, SIG, IWB, TERIS.
- Grundlagen, Technik, Anwendung von Kältespeichern und Eisspeichern mit vielen detaillierten theoretischen Betrachtungen und Ausführungshinweisen, Dr.-Ing. Thorsten Urbaneck, Chemnitz
- Präsentation Dr.-Ing. Thorsten Urbaneck Nah- und Fernkälte, ganzheitliche Systemoptimierung mit Kältespeichern
- Dr. Michael Haller, Swiss Symposium Thermal Energy Storage 2014 zur Bewertung der Schichtung thermischer Speicher in Low Exergy-Systemen: Laden und Entladen ist entscheidend für die Schichtausbildung
- Informationen der Firmen Ramboll AG, Agro Energie Schwyz AG
- 3 Diplom-/Masterarbeiten zu Speichern in thermischen Netzen von Anna Jonasch FH Esslingen 2014 [3], Richard Dietiker HSLU 2016 [4], Christine Bourguignon FH Biberach 2008
- Dissertation Dr. R. Huhn, Dresden 2007 [1]

5 Verfahrenstechnische Besonderheiten

Die folgenden verfahrenstechnischen Auslegungsmerkmale beziehen sich in erster Linie auf Schichtspeicher für Wärme, d.h. stets gefüllte Speicher mit einer niedrigen (unteren) und einer hohen Temperatur (oben), getrennt durch eine natürliche Grenzschicht. Die Merkmale für Niedertemperatur- oder Kältespeicher können daraus teilweise abgeleitet werden.



Aus Bachelorthesis Anna Jonasch [3], Schematische Darstellung eines Speichers in ein Fernwärmenetz eingebunden mit Verdeutlichung des nutzbaren Volumens bei Ausbreitung der Schicht über die Zeit, und der Anforderungen an die Temperatur.

5.1 Kapazität Wärmespeicher

Speicherkapazität $Q = \rho(T_m) \cdot V_N \cdot c_p(T_m) \cdot (T_2 - T_1)$

mit $T_m = (T_2 - T_1)/2$

T_2 = hohe Temperatur,

T_1 = niedrige Temperatur

V_N = Nutzvolumen

$\rho(T_m)$ = mittlerer Dichte bei T_m

Das Nutzvolumen ist das nutzbare Volumen des Speichers. Bei einem zylindrischen stehenden Speicher ist dies vereinfacht etwa das zylindrische Volumen, abzüglich eines Einström- und Ausströmbereiches und des Volumens der Trennschicht zwischen der warmen und kalten Zone des Speichers, welche als Speichervolumen nicht genutzt werden können.

Die Verwendung der mittleren Dichte $\rho(T_m)$ und der mittleren Wärmekapazität $c_p(T_m)$ ist im Rahmen der in der Praxis erforderlichen Genauigkeiten akzeptabel.

5.2 Leistung Wärmespeicher

Leistung Schichtspeicher: Maximale Ladeleistung = Maximale Entladeleistung

bei symmetrischer Speicherausführung. Die maximale Leistung ist bedingt durch

1. die konstruktive Anordnung zur Sicherstellung der Schichtung
2. die Parameter wie Temperaturen, die die Schichtung beeinflussen

Folgende nicht näher begründete Richtwerte, als Erfahrungswerte aus der Praxis, können für die maximale Be-/Entladeleistung, ausgedrückt als vertikale Strömungsgeschwindigkeiten in den Speichern, verwendet werden:

$$T_2 = 50 - 120^\circ\text{C} \quad v = 4 \text{ m/h}$$

$$T_2 = 120 - 180^\circ\text{C} \quad v = 6 \text{ m/h}$$

(Hintergrund dieser Richtwerte ist der Umstand, dass die Wasserdichte mit steigender Temperatur stark abnimmt, somit bei hohen Wassertemperaturen ein höherer Dichtegradient vorliegt als bei niedrigen, und der Dichteunterschied die Ursache ist für eine natürliche Schichtung. Bei den Richtwerten wird von einer für Schichtung geeigneten Speicherkonstruktion ausgegangen.)

Bei der maximalen Strömungsgeschwindigkeit im Speicher, einhergehend mit der maximalen Lade-/Entladeleistung wird angenommen, dass die Trennschicht zwischen der warmen und kalten Zone im Schichtspeicher nicht gestört wird.

Ladeleistung / Entladeleistung $\dot{Q} = \dot{M} \cdot cp(T_m) \cdot (T_2 - T_1)$ mit $\dot{M} = \dot{V}_N \cdot \rho$

Bedingt durch die begrenzte Strömungsgeschwindigkeit im Speicher ergibt sich bei Schichtspeichern eine Lade-/Entladeleistung, die von der absoluten Temperatur, vom Temperaturunterschied und vom Speicherdurchmesser abhängt, siehe folgende Tabelle:

Die maximale **Lade-/Entladeleistung** eines Speichers beträgt **in kW**:

delta T = T ₂ -T ₁ in K	T ₂ = 50 - 120°C			T ₂ = 120 - 180°C		
	20	40	60	40	70	100
Ø = 2 m	293	586	879	879	1539	2198
Ø = 3 m	659	1319	1978	1978	3462	4946
Ø = 4 m	1172	2345	3517	3517	6154	8792
Ø = 6 m	2638	5275	7913	7913	13847	19782
Ø = 10 m	7327	14653	21980	21980	38465	54950

Anmerkungen zur Tabelle:

T₂ = 50 - 120°C steht für einen Warm-/Heisswasserspeicher mit einer max. Strömungsgeschwindigkeit von 4 m/h. T₂ = 120 - 180°C steht für einen Heisswasserspeicher mit einer max. Strömungsgeschwindigkeit von 6 m/h. Unterhalb der Temperatur T₂ = 50°C wird der Dichtegradient von Wasser so gering, dass sich Schichtstörungen stärker bemerkbar machen. Weitere Details dazu siehe Abs. 5.8 und Quelle [6].

Mit der Fragestellung der Leistung eines Wärmespeichers lässt sich auch die hydraulische Schaltung beurteilen: Mehrere Speicher **parallel oder seriell** einzubinden hängt davon ab, welche Leistung vom Speichersystem erwartet wird.

5.3 Trennschicht, zeitlicher Verlauf

Als Trennschichtstärke wird der Bereich betrachtet, der nicht der Temperaturanforderung für die warme oder die kalte Zone entspricht.

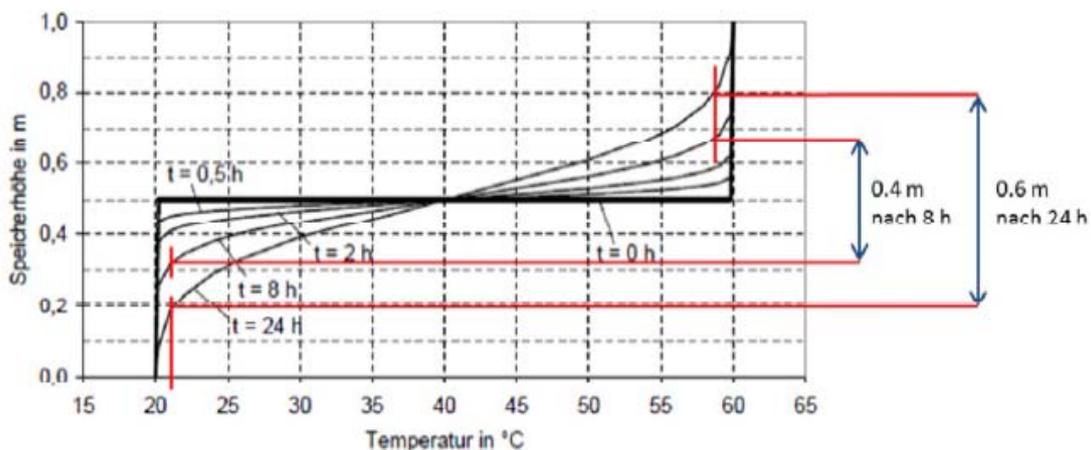
Die Ausbildung einer natürlichen Trennschicht zwischen warmer und kalter Zone eines Wärmespeichers beginnt ab dem Moment der Speicherladung und folgt zeitlich einer Hyperbelfunktion (arctanh-Funktion). Siehe dazu Quelle [1] Dr. R. Huhn, Dresden 2007, sowie Quelle [6].

In folgender Tabelle und Graphik sind die zeitliche Schichtausbildung als Funktion der zulässigen Temperaturabweichung von der Zonentemperatur (warme Zone, kalte Zone) dargestellt (Quelle Bachelorthesis Anna Jonasch [3])

Speicher mit $T_2 = 120^\circ\text{C}$, Schichtdicke = Eindringtiefe der Temperaturabweichung T_2 vom Sollwert, Werte der Abweichung von T_2 um 1, 2, 3, 4, 5 K (119°C , 118°C ,...)

Eindringtemperatur ϑ	Wirkungsgrad $\text{erf}(\eta)$	Eindringtiefe der Schicht nach				
		8 h	48 h	1 Woche	3 Wochen	6 Wochen
119°C	0.97	0.50 m	1.20 m	2.10 m	3.25 m	4.12 m
118°C	0.93	0.42 m	1.00 m	1.79 m	2.82 m	3.63 m
117°C	0.90	0.36 m	0.88 m	1.59 m	2.54 m <td 3.30 m	
116°C	0.87	0.33 m	0.79 m	1.43 m	2.32 m	1.52 m
115°C	0.83	0.30 m	0.36 m	1.30 m	2.14 m	2.83 m

Graphik Speicher 60°C , 30°C : Schichtung, zeitlicher Verlauf, Schichtdicke nach 8 h und nach 24 h [3]



Demzufolge startet die Schichtausbreitung sehr schnell und verlangsamt sich mit der Zeit. Ab dem Überschreiten einer zulässigen Schichtdicke kann über eine Speicherregeneration die Schichtdicke verkleinert oder eliminiert werden. Regeneration bedeutet hierbei Durchladen des Speichers bis zu $T_1 = T_2$ oder Entleeren des Speichers bis $T_2 = T_1$.

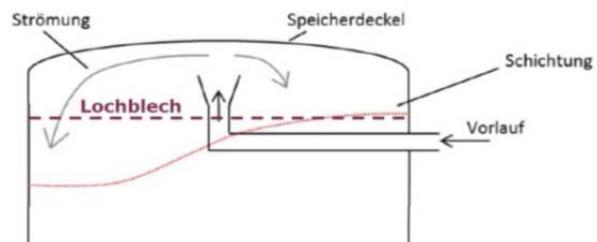
5.4 Trennschicht, Vermeidung von Störungen

Die Ausbildung einer möglichst ungestörten Trennschicht zwischen der warmen und kalten Zone eines Schichtspeichers ermöglicht ein grosses Nutzvolumen. Eine Störung der Schicht resultiert aus Strömungen im Speicher. Diese können gering gehalten werden u.a. durch Vermeidung von Impulsen durch ein- und austretende Volumenströme. Somit ist die strömungstechnische Ausbildung des Speicherzulaufs und -ablaufs entscheidend.

Möglichkeiten dazu sind im Planungshandbuch Fernwärme [2] aufgezeigt (Düsenrohr, Rohrbogen, Lochblech, Prallplatte mit horizontalem Austritt, u.a.)

Eine gängige Methode zur Gestaltung des Eintritts- und Austrittsbereich eines Speichers ist

1. Ablenkung der Strömung (Eintritt, Austritt) gegen den Speicherboden (-deckel) und Verlangsamung der Strömung durch Querschnittserweiterung.
2. Lochblech zur Vergleichmässigung der Strömung. Das Lochblech sollte zum Aufbau einer Druckdifferenz eine aufsummierte Loch-Querschnittsfläche von 1 – 2% der Speicherquerschnittsfläche aufweisen, um damit nominal eine Strömungsgeschwindigkeit im Loch von ca. 0,1 m/sec aufzubauen.



5.5 Wärmeverluste

Zur Berechnung bzw. Auslegung der Wärmedämmung von Apparaten, Rohrleitungen siehe Planungshandbuch Fernwärme [2]. Die Ausführungen gelten dabei insbesondere für Speicher mit einer Anzahl an Ladezyklen von > 100 .

Mit einer Stärke von 200 mm Mineralwolle gedämmte Speicher weisen bei einer typischen Speicherkonstruktion für 100 m^3 bei einer Vorlauftemperatur von 100°C einen Verlust von ca. 10 kW auf. Davon entfällt etwa 40% auf Stutzen, Flansche, Anschlüsse, Standzarge oder -füsse.

Von besonderer Bedeutung bei den Wärmeverlusten sind die Wärmebrücken an Speicheranschlüssen, Flanschen, Tragkonstruktionen, Stutzen, Messeinrichtungen.

Wärmeverluste hängen in hohem Masse von der Speicheroberfläche und der Dämmstärke ab. Spezifisch geringe Verluste haben demnach grossvolumige Speicher mit einem Durchmesser in ähnlicher Grösse wie die Speicherhöhe.

Bei Niedertemperatur- oder Kältespeichern sind die Kriterien für eine Wärmedämmung ausser wirtschaftlichen Aspekten auch die Vermeidung von Kondensation auf kalten Oberflächen. Gerade bei Kältespeichern kann sich erheblicher Wärmeeintrag aus der Umgebung durch Kondensation resultieren. Bei einem Speicherbetrieb im Temperaturbereich um die Umgebungstemperatur muss abgewogen werden, ob eine Dämmung zweckmässig, oder eventuell kontraproduktiv ist.

Für Speicher mit einer kleinen Anzahl an Ladezyklen ($< 100/\text{a}$) gewinnt die Dämmung eine andere Bedeutung. Die meist grossvolumigen Speicher als Erdspeicher oder Betonbauwerke erfordern ausser der Betrachtung der Wärmeverluste und der möglichen Art der Dämmung mehr eine Betrachtung der gesamten Effizienz über eine Periode (z.B. ein Jahr). Dazu sei auch auf Verlustbetrachtungen im Bericht zu saisonalen Speichern hingewiesen.

5.6 Drucklose und druckbehaftete Speicher

Für Speicher mit einer Ladezyklenzahl $> ca. 100/a$ kann wie folgt unterteilt werden.

Druckbehaftete Wärmespeicher sind mit dem Kreislaufmedium befüllt (Wasser des Heizkreises, Fernwärmewasser). Die temperaturbedingte Volumenausdehnung des Mediums erfolgt dabei über die Systemexpansion. Der Speicherdruck entspricht mindestens dem System-Rücklaufdruck. Die Vorlauftemperatur des Systems entspricht der Temperatur der warmen Zone des Speichers, die Rücklauftemperatur der kalten Zone.

Drucklose Wärmespeicher sind gewöhnlich vom System getrennt, z.B. über Wärmetauscher. Dadurch muss die temperaturbedingte Volumenausdehnung nicht über die Systemexpansion erfolgen, sondern der Speicher kann, z.B. mit einer Gas-/ Dampf-überlagerung selbst als Expansion genutzt werden. Aufgrund des Wärmetauschers reduziert sich beim Beladen wie beim Entladen jeweils die Vorlauftemperatur.

Siehe hierzu auch Quelle Planungshandbuch [2].

Die Wahl einer drucklosen oder druckbehafteten Speichergestaltung ist geprägt durch die Temperatur, das Medium und die Speichergroße.

Speicher mit $< ca. 100$ Zyklen/Jahr sind aufgrund der Größe meistens drucklos und offen.

5.7 Betriebsweisen von Speichern (>100 Zyklen/a)

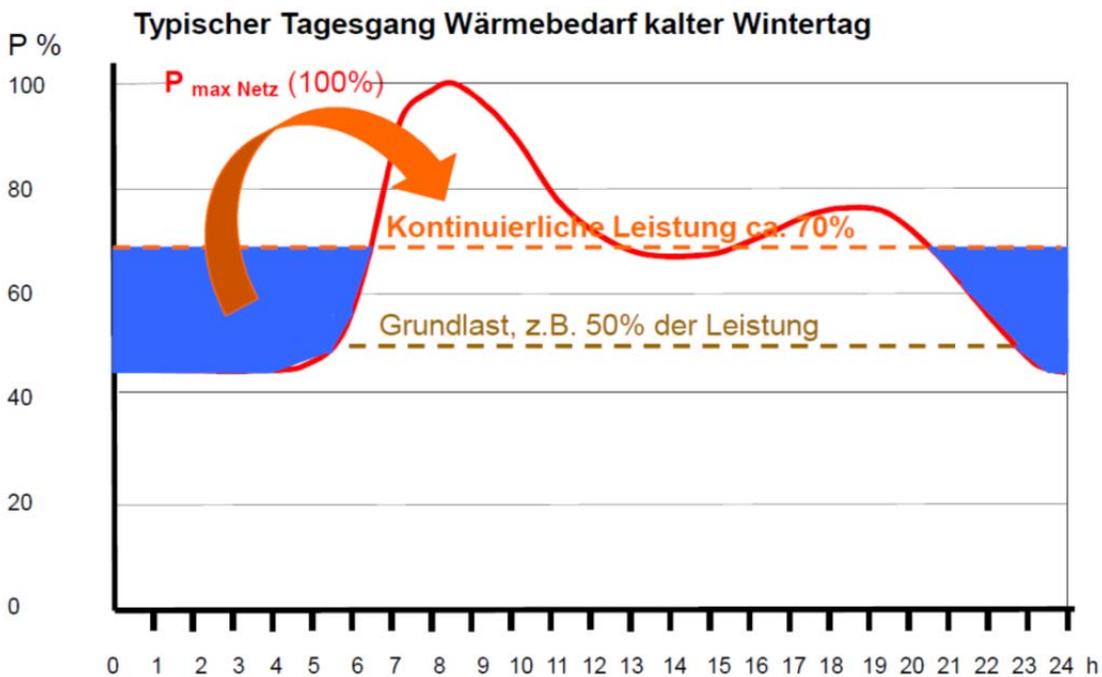
Wärmespeicher zur Spitzendeckung:

Bei Wärmeversorgungsnetzen beträgt die Leistung der Grundlast gewöhnlich etwa 50%, folglich die die Leistung zur Spitzendeckung ebenfalls etwa 50%. Die Kapazität, und damit das Speichervolumen, resultiert aus den Erfordernissen (Stundenspitze, Tagesgang) und aus den Ansprüchen an die Gewährleistung (vollständige oder teilweise Spitzendeckung durch den Speicher). Eine teilweise oder vollständige Spitzendeckung bei Verbunden durch v.a. dezentrale Wärmespeicher ist in Bezug auf die Kapazität Gegenstand einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Eine Erhöhung des Speichervolumens erhöht degressiv den Deckungsgrad [9]. D.h. zusätzliches Speicher-volumen wird spezifisch teurer.

Wärmespeicher zum Ausgleich des Tagesganges:

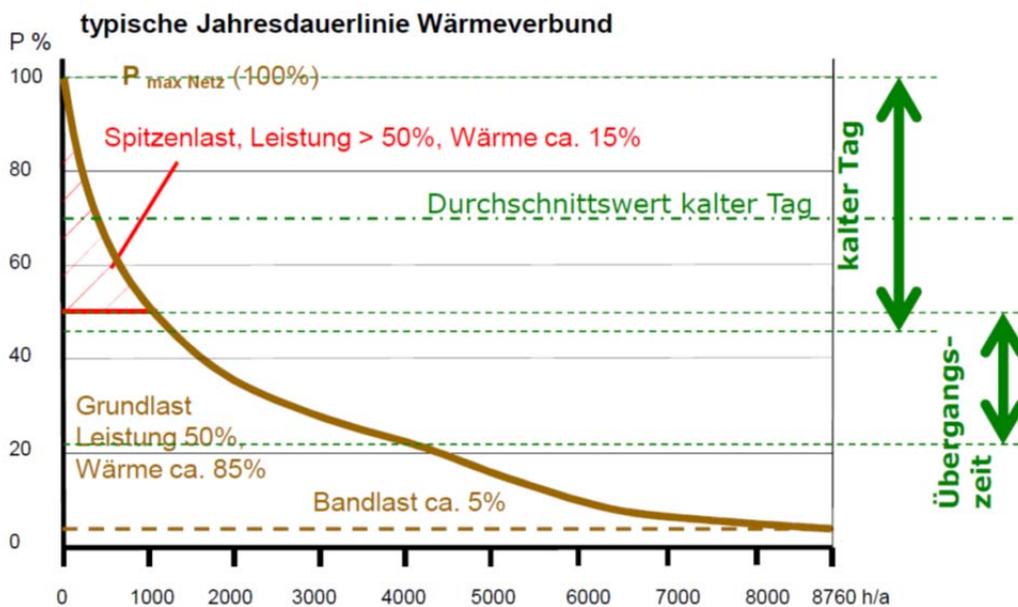
In der Branche wurden bereits verschiedene Excel- und andere Tools zur betriebswirtschaftlich optimierten Dimensionierung von Wärmespeichern erstellt. Auf diese kann ggf. für konkrete Vorhaben zurückgegriffen werden.

In folgender Graphik ist ein typischer Tagesgang einer Wärmekundengruppe mit Raumheizung und Warmwasserbereitung dargestellt. Ein Wärmespeicher einer Kapazität von etwa 1,25 bis 1,5 Stunden bei 100% Netzleistung würde genügen, um den Tagesgang der Kundengruppe auszugleichen (graphisch ermittelt).



Mit dem Tagesgangspeicher könnte die Netzleistung für die Leitungstrasse bis hin zum Speicher gemäss Graphik auf ca. 70% von P_{\max} begrenzt werden.

Ein Tagesgangspeicher würde während eines kalten Wintertages zur Spitzendeckung vollständig entleert. In der Übergangszeit würde eine Teilentleerung erfolgen. Zur Festlegung der Kapazität und der Lade-/Entladeleistung eines Tagesgangspeichers wird ein realistischer Tagesgang des Wärmebedarfs des relevanten Systems benötigt. Als relevantes System wird dabei die einem Speicher zuzuordnende Verbrauchergruppe betrachtet.



Über eine Simulation muss für jeden Anwendungsfall die geeignete Speicherkapazität ermittelt werden. Gemäss Tagesganglinie, s.o., liegen die Leistungen einer Verbrauchergruppe an einem kalten Tag zwischen 45% und 100% der Netzleistung, siehe Graphik mit Jahresdauerlinie.

5.8 Kurzzeitspeicher für Niedertemperaturanwendungen

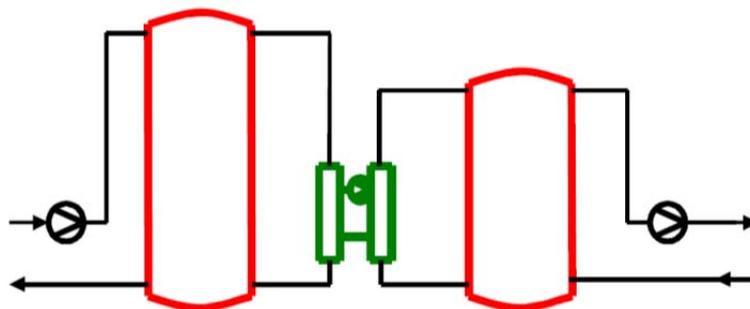
Bei geringen Medientemperaturen ($<50^{\circ}\text{C}$) ist der Dichtegradient von Wasser sehr gering. Folglich kann auch eine Schichtung leichter gestört werden. Die Lade-/Entladeleistung bzw. Strömungsgeschwindigkeit im Speicher sollte entsprechend der Anforderung an die Schichtung geringer gewählt werden. Folgende Tabelle gibt Richtwerte für maximale vertikale Strömungsgeschwindigkeiten in Speichern zur Vermeidung von Schichtstörungen in Abhängigkeit von der oberen Speichertemperatur (T_2) an.

T_2 °C	40 - 50	30 - 40	20 - 30	15 - 20
V_{max} m/h	2,9	2,4	1,8	1,2

Bei geringen Medientemperaturen ist gewöhnlich die Temperaturspreizung (Differenz Temperatur warme Zone – kalte Zone) gering. Andererseits dienen Speicher im Umgebungstemperaturbereich häufig auch der Einspeicherung von Wärme oder Kälte mit vom System abweichender Temperatur. Dabei ist die Qualität der Schichtung weniger bedeutend.

So darf ein Kurzzeitspeicher zur Glättung eines Abwärmefalls einer Anlage prioritär auf die Kapazität ausgelegt werden, ohne umfängliche Berücksichtigung der Leistung bzw. Strömungsgeschwindigkeit. Siehe folgendes Beispiel:

Der Speicher in folgender Abbildung links dient der Glättung des Wärmeangebotes, der Speicher rechts der verbrauchsseitigen Wärmepufferung.



5.9 Speicher mit Betriebstemperaturen \neq Medientemperatur

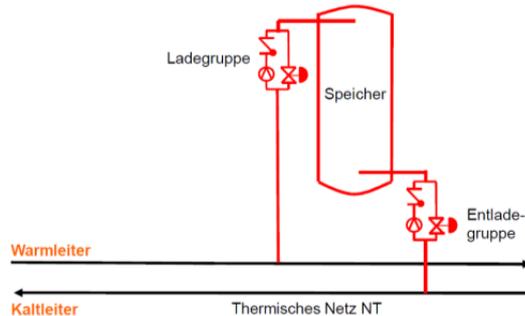
Wenn die Medientemperaturen eines thermischen Netzes **geringe Temperaturspreizungen** zwischen Warmleiter und Kaltleiter aufweisen, würde ein thermischer Energiespeicher mit Netztemperatur ein grosses Volumen annehmen für eine geforderte Kapazität. In diesem Fall bietet sich an, zur Senkung des Volumenbedarfs für den Speicher einen Wärmespeicher zeitweise wärmer als den Warmleiter, bzw. einen Kältespeicher zeitweise kälter als den Kaltleiter zu betreiben. Dazu müsste die einzuspeichernde Wärme/Kälte mittels Wärmepumpe/Kältemaschine auf die zeitweise gewünschte Temperatur gebracht werden (siehe folgendes Kapitel).

Ein Sonderfall dazu stellen **Eisspeicher** dar, dessen besonderes Merkmal aufgrund der Latentwärmenutzung durch den Phasenwechsel fest/flüssig die spezifisch hohe volumetrische Kapazität von 83 kWh/m^3 darstellt.

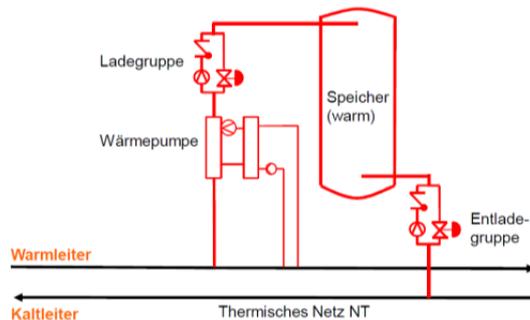
5.10 Einbindungsbeispiele Niedertemperaturspeicher

Folgende drei Beispiele zeigen Einbindungsmöglichkeiten von Speichern bei Niedertemperaturnetzen. Speicher können dabei als drucklose/offene oder als Druckspeicher oder als Geospeicher (z.B. Erdsonden) ausgeführt werden.

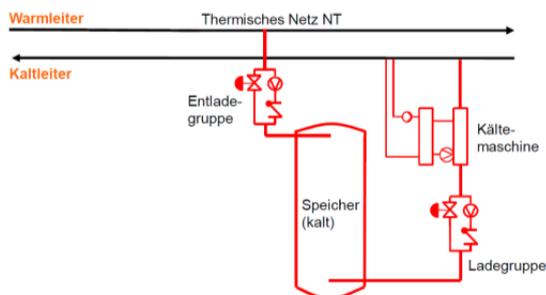
Fall 1: Direkte Einbindung mit Lade-/Entladegruppe (dargestellt jeweils als Pumpe zur Speicherbeladung mit Ventil zur Freigabe der Strömungsrichtung). Die Temperaturspreizung des Speichers entspricht der Temperaturspreizung des Netzes.



Fall 2: Wärmespeicher, Einbindung mit Wärmepumpe zur Erhöhung der Speicherkapazität durch zeitweise vergrößerte Temperaturspreizung im Speicher



Fall 3: Kältespeicher, Einbindung einer Kältemaschine zur Erhöhung der Speicherkapazität durch zeitweise vergrößerte Temperaturspreizung im Speicher



Bei Fall 2 und 3 wird die Gesamteffizienz der Anlage durch die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe bzw. Kältemaschine mitbestimmt. Effizienzfördernd ist damit eine Ausrichtung der Wärmepumpe/Kältemaschine auf den geringstmöglichen Temperaturhub. Effizienzfördernd ist auch eine Betriebsweise mit Betrieb der Wärmepumpe/Kältemaschine nur im Bedarfsfall oder bei einem Überangebot von elektrischer Energie (z.B. durch Regelenergie-pooling).

6 Ausführung, Auslegung

Checkliste für **Ausführungsmerkmale** von Kurzzeitspeichern in thermischen Netzen:

Drucklose (bzw. offene) Speicher mit Wasser als Medium (Qualität nach SWKI-Merkblatt BT102)	Gewöhnlich < 100°C (geringfügig > 100°C ist möglich), grosse Volumen möglich, hydraulische Trennung, Inertgas-/Dampfüberlagerung oder Trennung Wasser/Luft über eine Membrane
Druckspeicher (Stahl, begrenzt Beton)	Berücksichtigung Druckgeräterichtlinie, Durchmesser bis 4,5 m transportierfähig. (Als transportierfähig mittels Sondertransport gelten Apparate bis Ø 4,5 m und ca. 16 m Länge). Betonspeicher sind begrenzt druckbelastbar.
Druckfestigkeit, Unterdruckfestigkeit	Auslegung der Druckfestigkeit auf den maximalen Betriebs-Überdruck (P_S). Druckfeste Speicher sind nicht gleich vakuumfest. Die Vakuumfestigkeit eines Speichers muss konstruktiv nachgewiesen werden, ansonsten ist ein Vakuumbrecher dringend erforderlich.
Material	Kunststoff PP, PE < 90°C, GFK < 100°C, Stahl mit Kunststoff-Dichtelementen < 90°C, Beton auch > 100°C
Parallele oder serielle Einbindung	Hängt u.a. von der max. Lade-/Entlade-Leistung ab.
Durchmesser-/Höhenverhältnis	Keine allgemeine Aussage möglich, sondern hängt von Kapazität und Lade-/Entladeleistung ab.
Unterkonstruktion	Bodenbelastung berücksichtigen. Ggf. Ausbildung einer Tankwanne. Speicher mit Standzarge, mit Füßen, direkt auf Boden
Standort	Überprüfung ob Gebäude erforderlich
Einbauten für Schichtung	Umlenkung, Lochblech, Horizontalströmung, Prallplatten, Verteilrohre, Querschnittserweiterungen
Wärmedämmung	Nach BCI-Norm 2015: Mineralfaser bis 280 mm, Kälte­dämmung und Schutz vor Tauwasser PUR oder Elastomerschaumstoff
Ausrüstung eines Wärmespeichers	Temperaturmessungen (4 – 10 Stück, ca. alle 1,5 m), Begehungsöffnung, Sicherheitsventil, Druckanzeige, Entleerung, ggf. Vakuumbrecher, Entlüftung, ggf. Strömungseinbauten, Zulauf, Ablauf.

Auslegung

Folgende Orientierungshilfe kann für die Auslegung der **Speichergrossen** verwendet werden

1. Tagesgang – Ausgleich Vorschlag = **1,25** Stunden 100% Netzleistung (VIh Netz)
2. QM Holzheizwerke 1 Volllaststunde Leistung Holzfeuerung = ca. **0,5 VIh** Netz
3. Reduktion Einschaltzyklen 20% der Grundlast 1 h = ca. **0,1 VIh** Netz
(bei Grundlast = 50% Leistung Netz)

Damit ergeben sich Speichergrossen eines Systems mit Vorlauf 90°C / Rücklauf 50°C:

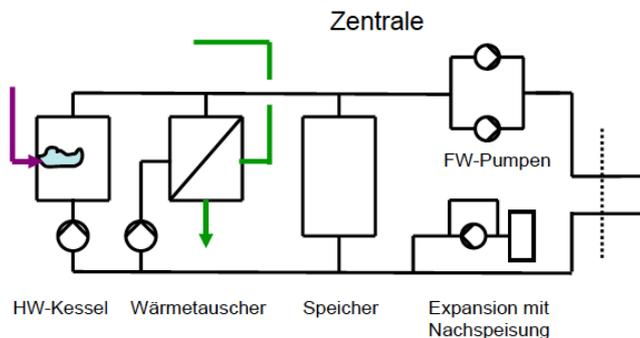
Volumen bei Netzleistung 1 MW, 90 / 50 (Kapazität spez. = 46,4 kWh/m³)

- zu 1. 27 m³ eff. Volumen (ca. 33 m³ real)
- zu 2. 11 m³ eff. Volumen (ca. 13 m³ real)
- zu 3. 2 m³ eff. Volumen (ca. 3 m³ real)

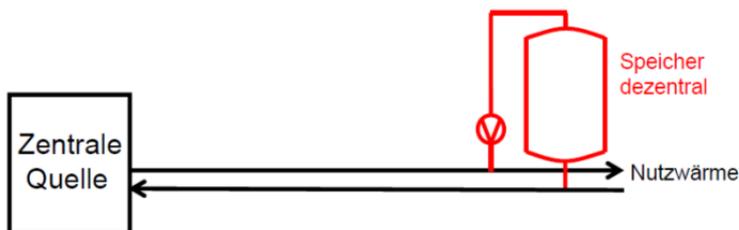
Es empfiehlt sich, die Speichergrosse projektspezifisch zu gestalten. Dabei haben auch örtliche Bedingungen wie Platz- und Raumangebot eine grosse Bedeutung.

Einbindung

Wärmespeicher in einer Zentrale als hydraulische Weiche



Dezentrale Anordnung von Speichern in thermischen Netzen:



Von grosser Bedeutung bei dezentraler Anordnung von thermischen Energiespeichern in thermischen Netzen ist die Leistungsauslegung der Leitungstrasse zwischen Zentrale und Speicher. Durch die Vermeidung der Übertragung von Leistungsspitzen kann die Leistungsauslegung der Trasse verkleinert werden.

7 Einfluss auf Kosten

Die Investitionen eines funktionsfertig in Betrieb gesetzten Druckspeichers (< 10 bar) mit einem Volumen von 100 m³ betragen ca. 150'000.- CHF (Stand 2015, Erfahrungswerte aus Projektierung).

Die Investitionen eines funktionsfertig in Betrieb gesetzten drucklosen Speichers mit einem Volumen von 500 m³ betragen ca. 350'000.- CHF (Stand 2017, Erfahrungswerte aus Projektierung).

Aus Quelle [5] stammen Investitionen von ca. 500.- CHF /m³ Speicher drucklos bei Speichergrössen von ca. 500 m³.

Problematisch ist die Skalierung der Kosten und die Kosten für hydraulische Trennung, Mediumtransfer, Anlagenbau und Infrastruktur für die Peripherie.

Richtwert Erhöhung Wärmegestehungskosten

Ausgehend von einer spezifischen Speicherkapazität eines Hochtemperaturspeichers (>60°C) von 40 kWh/m³ und einer jährlichen Zyklenzahl von 100, Zins 5%, Abschreibungszeit 20 Jahre, muss durch den Speicher mit 100 m³ pro kWh mit **zusätzlich 3 Rp./kWh** gerechnet werden.

Weitere Wirtschaftlichkeitsaspekte

Dezentral in Verbunde installierte Speicher zur Verkleinerung der Netzleistung zwischen Zentrale und Speicher, und damit zur Senkung der Investitionskosten für den Leitungsbau, müssen einer für das Vorhaben individuellen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unterzogen werden.

Bereits vorhandene Speichervolumen wie ehemalige Wasser- oder Brennstoffbehälter können bei entsprechender Eignung zu thermischen Speichern umgenutzt werden. Ggf. kann dadurch eine Kostenreduktion gegenüber einer Neubeschaffung erzielt werden.

8 Anwendungsbeispiele

- Regio Energie Solothurn: 3 x 100 m³ Wärmespeicher 120°C / 60°C für Wärmezentrale in Wärmeverbund
- Regionalwerke Baden, Dättwil: 3 x 100 m³ Wärmespeicher 100°C / 55°C für Holzkraftwerk mit Wärmeverbund
- Spital Bruderholz Basel: 1 x 80 m³ Wärmespeicher 115°C / 55°C
- AEW Wärmeverbund Rheinfelden Ost: 120 m³ 85°C, 120 m³ 105°C
- AEW Wärmeverbund Rheinfelden Mitte: Niedertemperaturspeicher 6 x 14 m³, Hochtemperaturspeicher
- Wärmeverbund Riehen: 3 x 100 m³ Wärmespeicher 90°C / 50°C
- Stadtspital Triemli: Heisswasserspeicher 80 m³ 165°C / 100°C
- Teleriscaldamento nel Bellinzonese (TERIS). Thermischer Speicher 500 m³ für Gewächshäuser zur Glättung der Leistungsspitzen.

9 Ausblick

Thermische Speicher können für thermische Netze für viele Zwecke genutzt werden, zur Spitzendeckung, zur Verkleinerung der thermischen Transportleistung, zum Ausgleich der Nachfrage und des Angebotes von thermischer Energie und zur Verbesserung der Regelbarkeit von Anlagen.

Der Einsatz von thermischen Energiespeichern ermöglicht, teils in Verbindung mit „power to Heat“, die Teilnahme am Regelenergiemarkt.

Offene Fragen und Anregungen:

Zur Charakterisierung von Kurzzeitspeichern wären folgende Sachverhalte in einer präzisen Untersuchung bedeutend:

- Einfluss der Medien-(Wasser-)temperatur und des Dichtegradienten zu schichtstörenden Strömungsbedingungen in Wärmespeichern.
- Einfluss der Ein- und Ausströmgeometrie von Wärme- und Kältespeichern zur Schichtstabilisierung.

Die Einbindung von thermischen Energiespeichern in Niedertemperatur-Anwendungen mit zeitweise gegenüber einem Verteilnetz unterschiedlichen Betriebstemperaturen könnte von Weiterentwicklungen oder Neuentwicklungen bei Wärmepumpen/Kältemaschinen mit niedrigem Temperaturhub profitieren.

10 Quellenverzeichnis

[1] Beitrag zur thermodynamischen Analyse, Dr. R. Huhn, Dresden 2007

[2] QM Fernwärme, Planungshandbuch Fernwärme, 2017

[3] Bachelorthesis Anna Jonasch, FH Esslingen, 2014

[4] Masterarbeit Richard Dietiker, HSLU, 2016

[5] Solites Technisch-wirtschaftliche Analyse, 2011

[6] Dr. Thorsten Urbaneck, Kältespeicher, Chemnitz, Oldenbourg-Verlag, 2012

[7] F. Brunner, P. Krummenacher: Einführung in die Prozessintegration mit der Pinch-Methode. Handbuch Bundesamt für Energie BFE, 2. Auflage, 2017.

[8] Energy Storage Systems, Prof. Dr. Jörg Worlitschek, Lorenz Gubler, Vinzenz Härrli, Anastasia Stamatiou

[9] Foliensatz Speicherintegration, HSLU