

Energieeinsparung durch Einbinden von latenten thermischen Energiespeichern in industrielle Prozesse mittels mehrperiodischer Wärmeintegration

Simon Möhren¹, Jörg Meyer¹, Hartmut Krause², Shichang Wang¹

¹Hochschule Niederrhein, SWK E² - Institut für Energietechnik und Energiemanagement, Reinartzstr. 49, 47805 Krefeld, Germany, +49 2151822 6684, simon.moehren@hs-niederrhein.de, www.hs-niederrhein.de/swk-e2

²TU Bergakademie Freiberg, Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik, Gustav-Zeuner-Straße 7, 09599 Freiberg, Germany, +49 373139 3940, Hartmut.Krause@iwtt.tu-freiberg.de, www.gwa.tu-freiberg.de

Kurzfassung: Zum Gelingen der Energiewende ist eine Dekarbonisierung der industriellen Wärmeversorgung notwendig, die bislang noch weitestgehend auf Basis fossiler Energieträger geschieht. Mit der Methode der Wärmeintegration kann die innerbetriebliche und überbetriebliche Wärme- und Kälteversorgung sowie die Nutzung von Abwärme optimiert werden. Dies kann zu erheblichen Verbesserungen der Energieeffizienz und zur Reduzierung von Kosten und Treibhausgasemissionen führen. Durch die Einbindung von thermischen Energiespeichern kann eine zeitliche Entkopplung zwischen Angebot und Bedarf von Wärme erfolgen. Hierdurch können der Energiebedarf, die Energiekosten und die Treibhausgasemissionen weiter reduziert werden. In den letzten Jahren wurde die Einbindung von sensiblen thermischen Energiespeichern untersucht. Die Einbindung von latenten thermischen Energiespeichern lässt aufgrund höherer Energiedichten weitere Einsparpotenziale vermuten. In dieser Arbeit wird erstmalig ein Ansatz zur Einbindung von latenten thermischen Energiespeichern in die Methode der Wärmeintegration vorgestellt und anhand eines Fallbeispiels untersucht. Mit Hilfe von Binärvariablen und big-M Formulierungen wird der unstetige Zusammenhang zwischen Speichertemperatur und Energie im Speicher im gemischt-ganzzahligen linearen Optimierungsproblem berücksichtigt. Anhand eines einfachen Fallbeispiels konnte die korrekte Funktionsweise des vorgestellten Ansatzes demonstriert werden.

Keywords: Wärmeintegration, Latente thermische Energiespeicher, Prozessoptimierung

1 Einleitung

Die Industrie verursacht knapp 28% des Endenergiebedarfs in Deutschland [1]. Mehr als 73% des Endenergiebedarfs werden zur Wärmebereitstellung benötigt und werden bislang überwiegend durch fossile Energieträger gedeckt. Zur Erreichung der nationalen und internationalen Klimaschutzziele ist eine systematische und schnelle Dekarbonisierung der industriellen Wärmeversorgung notwendig.

Neben dem Einsatz Erneuerbarer Energien und der Elektrifizierung stellt die Steigerung der Energieeffizienz ein wirksames und wichtiges Instrument zur Verringerung von Treibhausgasemissionen dar [2]. Die Methode der Wärmeintegration kann durch effiziente Nutzung der verfügbaren Wärmeströme zu einer signifikanten Reduzierung von Energiebedarf, Treibhausgasemissionen und Betriebskosten beitragen [3].

Durch Einbindung von thermischen Energiespeichern (TES) können weitere Einsparungen erzielt werden. TES ermöglichen eine zeitliche Entkopplung von Wärmebedarf und Wärmeangebot. Zur Berücksichtigung der zeitlichen Komponente können Methoden der mehrperiodischen Wärmeintegration genutzt werden [4]. Thermische Energiespeicher werden allgemein in sensible, latente und thermochemische Energiespeicher unterschieden [5].

Die Einbindung von sensiblen thermischen Energiespeichern (STES) in die mehrperiodische Wärmeintegration wurde bereits durchgeführt und anhand von Fallbeispielen untersucht [6]. Beck und Hofmann [7] haben eine sequenzielle Methode zur Einbindung von sensiblen TES vorgestellt. Dieser Ansatz wurde durch Prendl et al. [8] zu einem simultanen Ansatz weiter entwickelt und zusammen mit der Einbindung von Wärmepumpen untersucht. Nach der Kenntnis der Autoren existiert bislang kein Ansatz zur Einbindung von latenten thermischen Energiespeichern (LTES) in die Methode der Wärmeintegration. Eine Vielzahl an Untersuchungen behandelt die Einbindung von LTES in solarthermische Anlagen (z.B. [9]), in Organic Rankine Cycle (ORC) Systeme (z.B. [10]) oder zur Verschiebung von Stromlasten in Kombination mit einer Wärmepumpe [11]. Da diese Ansätze jedoch das Layout für die Einbindung des LTES vorgeben und nicht wie bei der Wärmeintegration die optimale Einbindung mittels mathematischer Optimierung bestimmt wird, sind die bisherigen Arbeiten nur begrenzt zur Einbindung in die Wärmeintegration übertragbar.

In dieser Arbeit wird erstmalig ein Ansatz zur Einbindung von LTES in die Methode der Wärmeintegration vorgestellt. Der zugrunde liegende Ansatz der mehrperiodischen Wärmeintegration basiert auf der stationären Formulierungen nach Cerda et al. [12], dem mehrperiodischen Ansatz nach Aydemir et al. [13] und deren Anpassungen in Möhren et al. [4]. Die Einbindung des LTES erfolgt in Anlehnung an die in Möhren et al. [6] vorgestellte Einbindung eines STES. In Abschnitt 3 wird der hier entwickelte Ansatz an einem einfachen Fallbeispiel untersucht.

2 Methode

In dieser Arbeit wird ein Ansatz zur Einbindung von latenten thermischen Energiespeichern (LTES) auf Basis des Modells zur mehrperiodischen Wärmeintegration nach [4] vorgestellt. LTES nutzen zusätzlich zur sensiblen Wärme auch die latente Wärme des Phasenübergangs zur Speicherung von thermischer Energie [5]. Zur Modellierung des sensiblen Anteils des LTES wird das Modell zur Einbindung von sensiblen thermischen Energiespeichern nach [6] verwendet. Dieser Ansatz wird um die Phasenwechselenthalpie ΔH_{PC} erweitert.

Zunächst wird die zugrundeliegende Formulierung des mathematischen Optimierungsproblems für die mehrperiodische Wärmeintegration vorgestellt. Dieser Ansatz wurde in [3] und [4] detailliert beschrieben. Anschließend wird erstmalig ein LTES in eine mathematische Methode der Wärmeintegration eingebunden. Hierbei wird zunächst eine mathematische Beschreibung des Speichers vorgestellt, anschließend Nebenbedingungen für die Be- und Entladung des Speichers identifiziert und abschließend die Bestimmung der Speichertemperatur mit Hilfe von Binärvariablen und big-M Formulierungen detailliert beschrieben. Die Berechnung der Speichertemperatur ist notwendig, um eine korrekte Be- und Entladung des Speichers zu gewährleisten.

2.1 Mathematische Formulierung der mehrperiodischen Wärmeintegration

Gegeben sei

- eine Anzahl H heißer Ströme (HS) j die abgekühlt werden sollen,
- eine Anzahl C kalter Ströme (CS) i die erwärmt werden sollen,
- eine Anlage zur Bereitstellung von Wärme HU (hier: Dampferzeuger),
- eine Anlage zur Abfuhr von Wärme CU (hier: Kompressionskältemaschine)

sowie

- ein LTES (Hier: Nur Betrachtung des Phasenwechsels zwischen fest und flüssig).

Entsprechend der Temperatur-Intervall-Methode nach Linnhoff und Flower [14] wird jeder HS in eine Anzahl L von Temperaturintervallen l und jeder CS in insgesamt L Temperaturintervalle i unterteilt. Jedem HS wird eine zeitliche Periode r und jedem CS eine Periode t zugeordnet. Innerhalb der gleichen Periode ($t = r$) kann mittels Wärmeübertrager ein Wärmestrom $\dot{Q}_{t,i,k,r,j,l}$ von einem HS oder der HU auf einen CS oder die CU übertragen werden. Dabei werden generell Gegenstrom-Wärmeübertrager zwischen Wärmequelle und Wärmesenke vorgesehen. Mit Hilfe des LTES kann Wärme eines HS in Periode r auf einen CS in einer späteren Periode $t > r$ übertragen werden.

Diese Formulierung des mehrperiodischen Wärmetransportproblems basiert auf den Ansätzen von Cerda et al. [12] und Aydemir et al. [13]. Die Einführung zweier separater Perioden für Wärmequellen und Wärmesenken wurde bereits in [4] vorgestellt. Ziel der Optimierung ist die Minimierung der Summe aller mit einem Kostenfaktor c gewichteten Wärmeströme zwischen allen Quellen und Senken.

$\min \sum_t \sum_i \sum_k \sum_j \sum_l c_{t,i,k,r,j,l} \cdot \dot{Q}_{t,i,k,r,j,l} \cdot \tau_t$ $\forall t, r = 1, \dots, NOP, i = 1, \dots, C, j = 1, \dots, H, k, l = 1, \dots, L$	(1)
---	-----

Darüber hinaus müssen die Energiebilanzen der Prozessströme erfüllt sein. T_{ein} ist dabei die Eintrittstemperatur und T_{aus} die Austrittstemperatur, \dot{m} ist der Massenstrom und c_p die spezifische Wärmekapazität eines Prozessstroms. [12]

$\dot{m}_{t,i,k} c_{p,t,i,k} (T_{aus,t,i,k} - T_{ein,t,i,k}) = \sum_r \sum_j \sum_l \dot{Q}_{t,i,k,r,j,l}$	(2)
$\dot{m}_{r,j,l} c_{p,r,j,l} (T_{ein,r,j,l} - T_{aus,r,j,l}) = \sum_t \sum_i \sum_k \dot{Q}_{t,i,k,r,j,l}$	(3)

Die Nichtnegativitätsbedingung garantiert einen Wärmetransport von Wärmequellen hin zu Wärmesenken. [12]

$\dot{Q}_{t,i,k,r,j,l} \geq 0$	(4)
--------------------------------	-----

Durch einfügen einer Auslegungsperiode t_A und eines Teillastfaktors f_{TL} werden die Perioden miteinander verknüpft [13]. Hierdurch variiert das berechnete Wärmeübertragernetzwerk zwischen den Perioden nicht und ermöglicht einen Wärmetransport in allen Perioden. Der Nachteil ist, dass mit diesem Ansatz das Auffinden einer über alle Perioden optimalen Lösung nicht garantiert werden kann und dass die Lösung je nach Wahl der Auslegungsperiode

variiert. Mit Hilfe der Pinch-Analyse kann, wie in [3] gezeigt, in der Regel aber die beste Auslegungsperiode identifiziert werden.

$\dot{Q}_{t,i,k,r,j,l} \leq \dot{Q}_{t_A,i,k,t_A,j,l} \cdot f_{TL}$	(5)
---	-----

Ein Wärmetransport mittels Gegenstrom-Wärmeübertrager kann nur stattfinden, wenn die folgenden Temperaturbedingungen erfüllt sind. ΔT_{min} stellt die wirtschaftlich sinnvolle Mindest-Temperaturdifferenz zwischen HS und CS dar.

$T_{HS,ein} \geq T_{CS,aus} + \Delta T_{min}$ und $T_{HS,aus} \geq T_{CS,ein} + \Delta T_{min}$	(6)
---	-----

Für die Indizes der Nebenbedingungen gelten die in der Zielfunktion genannten Grenzen.

2.2 Modellierung von latenten thermischen Energiespeichern

Zur Einbindung eines latenten thermischen Energiespeichers in das zuvor beschriebene mehrperiodische Optimierungsproblem müssen die relevanten Zusammenhänge zunächst mathematisch beschrieben werden.

Die im LTES maximal speicherbare Wärme $Q_{LTES,max}$ kann für $T_{min} < T_{PC} < T_{max}$ nach Gleichung (7) berechnet werden [5]. Diese setzt sich zusammen aus der sensiblen Wärme des Speichermediums im festen Zustand (Index fe), der latenten Wärme des Phasenwechsels (Index pc) und der sensiblen Wärme des Speichermediums im flüssigen Zustand (Index fl). In der Regel wird der Phasenübergang zwischen fest und flüssig verwendet, da hierbei im Gegensatz zu flüssig-gasförmig die Volumenänderung technisch einfacher beherrschbar ist [5]. Die sensible Wärme kann aus dem Produkt der Dichte ρ , des Volumens V , der spezifischen Wärmekapazität c_p und der Temperaturdifferenz ΔT berechnet werden. Für das Speichermedium im festen Zustand wird eine Temperaturdifferenz zwischen der Phasenwechseltemperatur T_{pc} und einer minimalen Ausgangstemperatur T_{min} und im flüssigen Zustand die Temperaturdifferenz zwischen einer maximalen Temperatur T_{max} und der Phasenwechseltemperatur T_{pc} angesetzt. Die latente Wärme kann aus der spezifischen Phasenwechselenthalpie Δh_{pc} , der Dichte und dem Volumen bestimmt werden. [5]

$Q_{LTES,max} = \int_{T_{min}}^{T_{pc}} \rho_{fe} \cdot V_{fe} \cdot c_{p,fe} dT + \rho_{fe} \cdot V_{fe} \cdot \Delta h_{pc} + \int_{T_{pc}}^{T_{max}} \rho_{fl} \cdot V_{fl} \cdot c_{p,fl} dT$	(7)
---	-----

2.3 Beladung und Entladung des Speichers

Zur Einbindung des LTES wird, analog zur Einbindung eines STES (siehe [6]), ein Index $s = 1, \dots, NOP + 1$ zur Beschreibung des zeitlichen Zustandes des Speichers eingeführt. NOP ist hierbei die Anzahl der definierten zeitlichen Perioden des mehrperiodischen Problems. $s = 1$ beschreibt dabei den Speicher zum Beginn und $s = NOP + 1$ am Ende der Betrachtung. Der Index des Speichers steht in Beziehung zu den Indizes t und r der mehrperiodischen Wärmeintegration [4]. So liegt jeweils zwischen den aufeinander folgenden Zuständen s und $s + 1$ die Perioden $r = t = s$. Der Zusammenhang ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

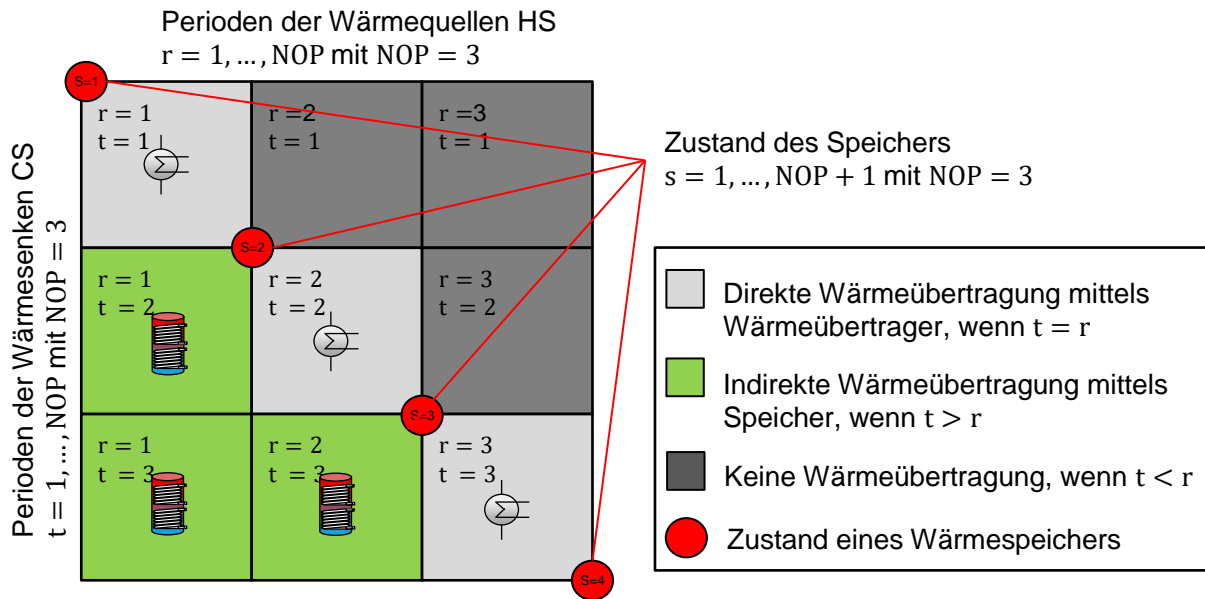


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen den Zuständen des Speichers s und der Perioden von Wärmequellen r und Wärmesenken t für ein Beispiel mit $NOP = 3$ Perioden

Die im LTES gespeicherte thermische Energie im Zustand s kann allgemein als die Energie des vorherigen Zustandes $s - 1$ sowie die Änderung der thermischen Energie zwischen den Zuständen $s-1$ und s beschrieben werden. $Q_{LTES,max}$ ist die maximal speicherbare thermische Energie nach Gleichung (7), die technisch nicht überschritten werden darf.

$Q_{LTES,s} = Q_{LTES,s-1} + \Delta Q_{LTES,s-1,s} \leq Q_{LTES,max}$	(8)
$\Delta Q_{LTES,s-1,s} = Q_{Beladung,s-1,s} - Q_{Entladung,s-1,s}$	(9)

Eine Beladung wird im Zustand s des Speichers berücksichtigt, wenn die Beladung ausgehend von einer Wärmequelle HS in der Periode zeitlich vor dem Zustand s des Speichers stattgefunden hat ($r = s - 1$) und die Nutzung der gespeicherten Wärme in den Perioden $t = s, \dots, NOP + 1$ erfolgt. Eine Entladung wird im Zustand s des Speichers berücksichtigt, wenn die Wärme es HS aus der Periode $r = 1, \dots, s - 2$ von einem CS in Periode $t = z - 1$ genutzt wird. Hieraus ergeben sich die folgenden Berechnungen der in den und aus dem Speicher übertragenen Wärmemengen.

$Q_{Beladung,s-1,s} = \sum_{t=s}^{NOP} \sum_{i=1}^C \sum_{k=1}^L \sum_{r=s-1}^{s-1} \sum_{j=1}^H \sum_{l=1}^L \dot{Q}_{t,i,k,r,j,l} \cdot \tau_r \quad \forall s = 2, \dots, NOP + 1$	(10)
---	------

$Q_{Entladung,s-1,s} = \sum_{t=s-1}^{s-1} \sum_{i=1}^C \sum_{k=1}^L \sum_{r=1}^{s-2} \sum_{j=1}^H \sum_{l=1}^L \dot{Q}_{t,i,k,r,j,l} \cdot \tau_t \quad \forall s = 3, \dots, NOP + 1$	(11)
--	------

Neben diesen für die Be- und Entladung notwendigen Rahmenbedingungen müssen auch Temperaturbedingungen erfüllt sein, damit die Be- oder Entladung technisch möglich ist. Die zur Be- und Entladung des Speichers erforderlichen Temperaturbedingungen werden im Folgenden beschrieben.

2.4 Formulierung der Temperaturbedingungen

Zur Überprüfung, ob ein Wärmetransport in den oder aus dem Speicher möglich ist, müssen die Temperaturbedingungen in den Gleichungen (12) und (13) erfüllt sein. Diese werden in [6] detailliert beschrieben.

$T_{HS,ein,r,j,l} \geq T_{TES,s} + \Delta T_{min}$	$T_{HS,aus,r,j,l} \geq T_{TES,s-1} + \Delta T_{min}$	(12)
$T_{CS,ein,t,i,k} \leq T_{TES,s} - \Delta T_{min}$	$T_{CS,aus,t,i,k} \leq T_{TES,s-1} - \Delta T_{min}$	(13)

$$\forall s = 2, \dots, T + 1; t, r = 1, \dots, T; i = 1, \dots, C; k, l = 1, \dots, L; j = 1, \dots, H$$

Die in diesen Temperaturbedingungen enthaltene Temperatur des Speichermediums T_{TES} ist jedoch zum Zeitpunkt der Problemformulierung unbekannt, daher wird diese als variable im Optimierungsmodell formuliert und erst während des Lösens des Optimierungsproblems bestimmt. Die Berechnung von T_{TES} muss gegenüber [6] für LTES angepasst werden, da gegenüber STES ein abweichender Zusammenhang zwischen Speichertemperatur und der Energie im Speicher besteht. In Abbildung 2 ist der Zusammenhang zwischen Speichertemperatur und gespeicherter Energie schematisch dargestellt. Der Temperaturverlauf wird dabei entsprechend der Art der thermischen Speicherung in die drei Intervalle (1) sensibel (fest), (2) latent und (3) sensibel (flüssig) unterteilt.

Im Gedankenexperiment steigt entsprechend Abbildung 2 mit zunehmender Beladung des LTES die Speichertemperatur zunächst bis zum Erreichen der Phasenwechseltemperatur T_{pc} an. Beim Erreichen von T_{pc} erfolgt mit weiterer Beladung der Phasenübergang von fest nach flüssig und die Energie im Speicher nimmt bei konstanter Speichertemperatur $T_{LTES} = T_{pc}$ zu. Nach vollständig abgeschlossenem Phasenwechsel liegt das Speichermedium im flüssigen Zustand vor und die Speichertemperatur steigt bei weiterer Beladung wieder an.

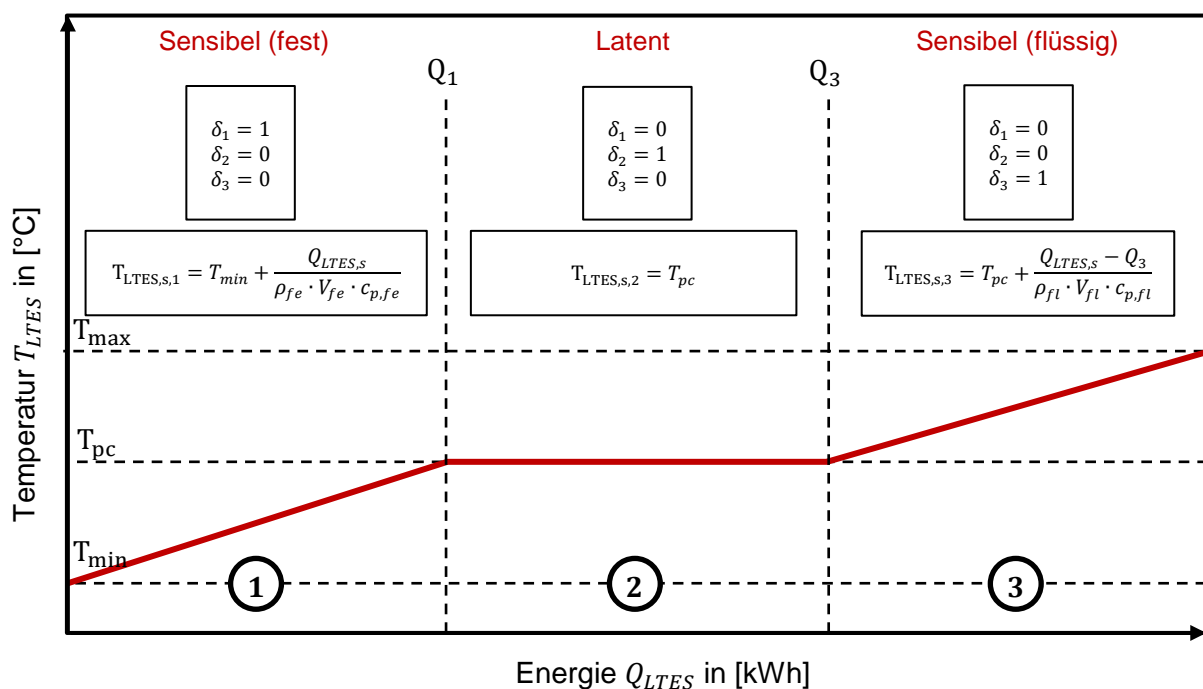


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines LTES im Q-T-Diagramm

Es wird deutlich, dass es sich bei $T_{TES} = f(Q_{TES})$ um eine unstetige Funktion handelt, welche durch die Energiemengen Q_1 und Q_3 in drei Bereiche (sensibel-fest, latent, sensibel-flüssig) unterteilt werden kann. Die Energiemenge an den beiden Unstetigkeitsstellen kann entsprechend der Gleichungen (14) und (15) berechnet werden.

$Q_1 = \rho_{fe} \cdot V_{fe} \cdot c_{p,fe} \cdot (T_{pc} - T_{min})$	(14)
$Q_3 = Q_1 + \rho_{fl} \cdot V_{fl} \cdot \Delta h_{pc}$	(15)

Entsprechend Gleichung (16) kann die Speichertemperatur in Abhängigkeit von der Energie im Speicher bestimmt werden.

$T_{TES,s}(Q_{TES,s}) = \begin{cases} Q_{TES,s} < Q_1 & T_{TES,s,1} = T_{min} + \frac{Q_{TES,s}}{\rho_{fe} \cdot V_{fe} \cdot c_{p,fe}} \\ Q_1 \leq Q_{TES,s} \leq Q_3 & T_{TES,s,2} = T_{pc} \\ Q_{TES,s} > Q_3 & T_{TES,s,3} = T_{pc} + \frac{Q_{TES,s} - Q_3}{\rho_{fl} \cdot V_{fl} \cdot c_{p,fl}} \end{cases}$	(16)
--	------

Zur Umsetzung im gemischt-ganzzahligen Optimierungsmodell werden Binärvariablen eingefügt, um eine Fallunterscheidung zwischen den drei in Abbildung 2 dargestellten Bereichen durchzuführen. Je nach Speicherbeladung nimmt eine der drei Binärvariablen $\delta_1, \delta_2, \delta_3 = \{0,1\}$ den Wert 1 und die übrigen den Wert 0 an. Hierdurch wird anhand der Gleichungen (20) und (21) die Speichertemperatur $T_{TES,s}$ stets mit der relevanten Funktionsbereich berechnet.

$\delta_1 = \begin{cases} 1, \text{ wenn } Q_{TES,s} < Q_1 \\ 0, \text{ sonst} \end{cases}$	(17)
---	------

$\delta_2 = \begin{cases} 1, \text{ wenn } Q_1 \leq Q_{TES,s} \leq Q_3 \\ 0, \text{ sonst} \end{cases}$	(18)
---	------

$\delta_3 = \begin{cases} 1, \text{ wenn } Q_{TES,s} > Q_3 \\ 0, \text{ sonst} \end{cases}$	(19)
---	------

$T_{TES,s} = \delta_1 \cdot T_{TES,s,1} + \delta_2 \cdot T_{TES,s,2} + \delta_3 \cdot T_{TES,s,3}$	(20)
--	------

$T_{TES,s} = \delta_1 \cdot \left(T_{min} + \frac{Q_{TES,s}}{\rho_{fe} \cdot V_{fe} \cdot c_{p,fe}} \right) + \delta_2 \cdot T_{pc} + \delta_3 \cdot \left(T_{pc} + \frac{Q_{TES,s} - Q_3}{\rho_{fl} \cdot V_{fl} \cdot c_{p,fl}} \right)$	(21)
--	------

Die in den Gleichungen (17) bis (19) dargestellten Fallunterscheidungen können im Optimierungsmodell in Form der folgenden Nebenbedingungen unter Einsatz von big-M Formulierungen umgesetzt werden [15]. M ist dabei eine sehr große Zahl. Die Bedingung für Intervall 2 konnte vereinfacht werden, da diese zum Tragen kommt, wenn weder Intervall 1 erfüllt ist ($\delta_1 = 0$), noch Intervall 3 erfüllt ist ($\delta_3 = 0$). Es folgt daher aus Gleichung (23), dass $\delta_2 = 1$ sein muss wenn $\delta_1 = \delta_3 = 0$ gilt.

Intervall 1: $Q_{TES,s} \leq Q_1 + M \cdot (1 - \delta_1)$	(22)
$Q_{TES,s} \geq Q_1 - M \cdot \delta_1$	

Intervall 2: $\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = 1$	(23)
---	------

Intervall 3: $Q_{TES,s} \geq Q_3 - M \cdot (1 - \delta_3)$ $Q_{TES,s} \leq Q_3 + M \cdot \delta_3$	(24)
---	------

In Gleichung (21) erfolgt in zwei Fällen eine Multiplikation einer Binärvariable mit der reellen variable Energie im Speicher $Q_{TES,s}$. Da dies zu einem nichtlinearen Optimierungsproblem führt, werden die reellen Hilfsvariablen z_1 und z_2 und die nachfolgenden Gleichungen zur Linearisierung eingefügt. Die Nebenbedingungen zur Linearisierung von $z_1 = \delta_1 \cdot Q_{TES,s}$ mit der unterer Schranke $Q_{TES,s} = 0$ und der oberer Schranke $\bar{Q}_{TES,s} = Q_1$ erfolgt in Gleichung (25). Die Nebenbedingungen zur Linearisierung von $z_3 = \delta_3 \cdot Q_{TES,s}$ mit der unterer Schranke $Q_{TES,s} = Q_3$ und der oberer Schranke $\bar{Q}_{TES,s} = Q_{TES,max}$ erfolgt in Gleichung (26). Hieraus resultiert die in Gleichung (27) dargestellte linearisierte Form der Gleichung (21).

$0 \leq z_1 \leq Q_1$ $0 \leq z_1 \leq Q_1 \cdot \delta_1$ $Q_{TES,s} - (1 - \delta_1) \cdot Q_1 \leq z_1 \leq Q_{TES,s}$ $z_1 \leq Q_{TES,s} + (1 - \delta_1) \cdot Q_1$	(25)
$0 \leq z_3 \leq Q_{TES,max}$ $Q_3 \cdot \delta_3 \leq z_3 \leq Q_{TES,max} \cdot \delta_3$ $Q_{TES,s} - (1 - \delta_3) \cdot Q_{TES,max} \leq z_3 \leq Q_{TES,s} - (1 - \delta_3) \cdot Q_3$ $z_3 \leq Q_{TES,s} + (1 - \delta_3) \cdot Q_{TES,max}$	(26)
$T_{TES,s}$ $= \left[\delta_1 \cdot T_{min} + \frac{z_1}{\rho_{fe} \cdot V_{fe} \cdot c_{p,fe}} \right] + [\delta_2 \cdot T_{pc}]$ $+ \left[\delta_3 \cdot T_{pc} + \frac{z_3}{\rho_{fl} \cdot V_{fl} \cdot c_{p,fl}} - \frac{\delta_3 \cdot Q_3}{\rho_{fl} \cdot V_{fl} \cdot c_{p,fl}} \right]$	(27)

3 Fallbeispiel

Die Funktionsweise des neuen Ansatzes soll im Folgenden anhand eines einfachen Fallbeispiels demonstriert werden. Zur Überprüfung der korrekten Umsetzung des in Abbildung 2 dargestellten unstetigen Zusammenhangs zwischen Speichertemperatur und gespeicherter Wärme wird das Fallbeispiel so formuliert, dass über elf Perioden ein Wärmeüberschuss vorliegt, der zu einer Beladung des LTES genutzt werden kann und in Periode zwölf ein großer Wärmebedarf vorliegt ($NOP = 12; s = 1, \dots, 13$). Hierzu werden jeweils ein HS und CS sowie eine HU und eine CU vorgegeben. Die Daten der Ströme sind in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1: Daten der Prozessströme für Fallbeispiel 2

T_{ein}	T_{aus}	c_p	Massenströme in [kg/s] der Perioden											
[°C]	[°C]	[$\frac{kJ}{kg \cdot K}$]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

HS	120	50	4,19	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0
CS	10	80	4,19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20
HU	120	120	2,08												
CU	5	18	4,19												

Als Speichermedium des LTES wird das anorganische Phasenwechselmaterial (PCM) Mangannitrat Hexahydrat ($Mn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) mit der Dichte $\rho_{fe} = 1.795 \text{ kg/m}^3$ bzw. $\rho_{fl} = 1.738 \text{ kg/m}^3$ und der spezifischen Wärmekapazität $c_{p,fe} = 2,34 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$ bzw. $c_{p,fl} = 2,78 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$. Die spezifische Phasenwechselenthalpie beträgt $\Delta h = 125,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ und das Volumen des Speichers wird auf $V_{fe} = 16,5 \text{ m}^3$ definiert. Der zulässige Temperaturbereich des LTES wird zwischen 20 und 95 °C vorgegeben. Die Phasenwechseltemperatur des PCM beträgt 25,8 °C. [16]

Der im Rahmen der Lösung des mehrperiodischen Optimierungsproblems berechnete Temperaturverlauf im LTES ist in Abbildung 3 dargestellt. Es wird deutlich, dass die Energie im Speicher mit fortlaufender Periode zunimmt und dabei den charakteristischen Kurvenverlauf eines LTES abbildet. Im Zustand $s = 12$ hat der Speicher die maximal speicherbare Energie von 2.631 kWh aufgenommen und wird in Periode $t = 12$ wieder vollständig entladen. Die Zustände $s = 1$ und $s = 13$ sind daher identisch. Die im Zustand $s = 12$ gespeicherte Energie entspricht der nach Gleichung (7) berechenbaren maximal speicherbaren Energie $Q_{LTES,max}$.

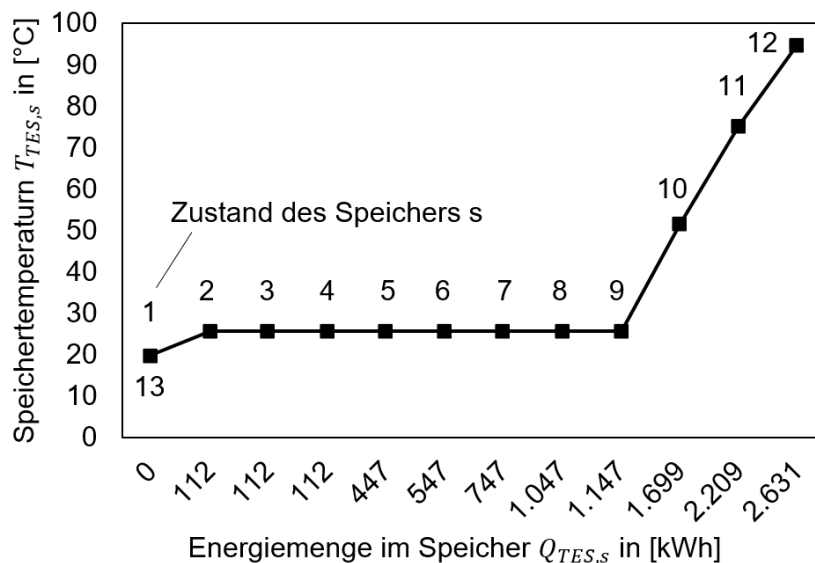


Abbildung 3: Speichertemperatur und Energiemenge während der Be- und Entladung des LTES für das Fallbeispiel nach Tabelle 1 mit $s = 1, \dots, 13$

Da zu keinem Zeitpunkt ($t = r$) gleichzeitig ein Wärmebedarf eines CS und ein Wärmeüberschuss eines HS vorliegen, erfolgt keine direkte Nutzung der Abwärme mittels Wärmeübertrager. Aus der Lösung des Wärmetransportproblems lässt sich zudem ableiten, dass in den Perioden 1 bis 11 insgesamt 3.821,4 kWh thermischer Energie über die CU abgeführt werden müssen. In Periode 12 muss der nicht über den LTES gedeckte Wärmebedarf von 3.234,8 kWh mittels HU bereitgestellt werden. Die gesamte Wärme des HS von insgesamt 6.452,6 kWh für das in Tabelle 1 dargestellten Fallbeispiels werden somit

entweder über den Speicher oder über mittels CU abgeführt. Gleichermaßen wird der Wärmebedarf des CS von insgesamt 5.866 kWh durch den Speicher und die HU gedeckt.

Insgesamt konnte anhand des einfachen Fallbeispiels gezeigt werden, dass die korrekte Be- und Entladung eines latenten thermischen Energiespeichers mit dem entwickelten Ansatz entsprechend der Erwartungen umgesetzt werden konnte. Im betrachteten Fallbeispiel kann hierdurch der Energiebedarf des Systems um 2.631 kWh (also um etwa 45%) reduziert werden.

4 Zusammenfassung

In dieser Arbeit konnte erstmalig die Methode der Wärmeintegration um die Einbindung von latenten thermischen Energiespeichern erweitert werden. Die Herausforderung bei der Einbindung eines thermischen Energiespeichers liegt in der Tatsache begründet, dass die Temperatur im Speicher vor dem Lösen des Optimierungsproblems unbekannt ist und als Variable in den Nebenbedingungen berücksichtigt werden muss. Die Temperaturbedingungen, die zur Gewährung einer korrekten Be- und Entladung des Speichers notwendig sind, müssen daher, wie bereits in [6] gezeigt, mit Hilfe von binären Hilfsvariablen und big-M Formulierungen als Nebenbedingungen berücksichtigt werden.

Zur Einbindung von latenten thermischen Speichern muss der unstetige Zusammenhang zwischen der Speichertemperatur und der Energiemenge im Speicher ebenfalls mittels binärvariablen und big-M Formulierungen abgebildet werden. Die sich hieraus ergebende Multiplikation zwischen einer Binärvariable und der gespeicherten Energie muss mit Hilfe weiterer reeller Hilfsvariablen linearisiert werden.

Anhand eines einfachen Fallbeispiels konnte gezeigt werden, dass der vorgestellte Ansatz die Einbindung und die Be- und Entladung des Speichers korrekt in einer gemischt-ganzzahlig linearen Formulierung der mehrperiodischen Wärmeintegration berücksichtigen kann. Durch den Phasenwechsel wird die speicherbare thermische Energie erhöht. Dies kann bei geeigneten betrieblichen Randbedingungen das Potenzial zur Reduzierung von Energiebedarf und Treibhausgasemissionen erhöhen. Der Ansatz soll nun in komplexeren Fallbeispielen und realen Anwendungsbeispielen erprobt werden. Zudem sollen die Wärmeverluste von Speichern und Rohrleitungen berücksichtigt werden, um auch die Nachteile einer thermischen Speicherung berücksichtigen zu können. Weitere Flexibilisierungspotenziale könnten durch die Einbindung von Wärmepumpen und die Kopplung zwischen den Sektoren der elektrischen und thermischen Energie entstehen. Auch dies soll im Rahmen kommender Forschungsprojekte untersucht werden.

5 Literaturverzeichnis

- [1] BMWI, „Energiedaten - Nationale und Internationale Entwicklung,“ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin, 2019.
- [2] Agora Energiewende; Stiftung 2°, Roland Berger, „Klimaneutralität 2050: Was die Industrie jetzt von der Politik braucht,“ 2021.
- [3] S. Möhren, J. Meyer und H. Krause, „Wege zur klimaneutralen und kosteneffizienten Wärme- und Kälteversorgung von Industriestandorten,“ in *16. Symposium Energieinnovation*, Graz, 2020.

- [4] S. Möhren, J. Meyer, H. Krause und L. Saars, „A multiperiod approach for waste heat and renewable energy integration of industrial sites,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 148, 2021.
- [5] M. Sterner und I. Stadler, Hrsg., *Energiespeicher*, Berlin: Springer-Verlag, 2017.
- [6] S. Möhren, „A Simultaneous Approach for integration of thermal energy storages in industrial processes using multiperiod heat integration,“ in *16th SDEWES Conference*, Dubrovnik, 2021.
- [7] A. Beck und R. Hofmann, „A sequential approach for integration of multiple thermal energy storages with fixed mass and variable temperature,“ *Applied Thermal Engineering*, pp. 278-294, 2019.
- [8] L. Prendl, K. Schenzel und R. Hofmann, „Simultaneous integration of heat pumps and different thermal energy storages into a tightened multi-period MILP HENS superstructure formulation for industrial applications,“ *Computers and Chemical Engineering*, Bd. Volume 147, April 2021.
- [9] D. Li, Y. Hu, D. Li und J. Wang, „Combined-cycle gas turbine power plant integration with cascaded latent heat thermal storage for fast dynamic responses,“ *Energy Conversion and Management*, pp. 1-13, 1. März 2019.
- [10] J. Lizana, C. Bordin und T. Rajabloo, „Integration of solar latent heat storage towards optimal small-scale combined heat and power generation by Organic Rankine Cycle,“ *Journal of Energy Storage*, 2020.
- [11] T. XU, E. N. Humire, J. N. Chiu und S. Sawalha, „Latent heat storage integration into heat pump based heating systems for energy-efficient load shifting,“ *Energy Conversion and Management*, 2021.
- [12] J. Cerda, A. W. Westerberg, D. Mason und B. Linnhoff, „Minimum utility usage in heat exchanger network synthesis - a transportation problem,“ *Chemical Engineering Science*, Bd. 38(3), pp. 373-387, 1983.
- [13] A. Aydemir, C. Rohde und S. Möhren, „Energy savings of intercompany heat integration: A methodological framework - Part 1,“ in *14. Symposium Energieinnovation*, Graz, 2016.
- [14] B. Linnhoff und J. Flower, „Synthesis of heat exchanger networks: I. Systematic generation of energy optimal networks,“ *AIChE Journal*, Bd. 24(4), pp. 633-642, 1978.
- [15] J. Kallrath, *Gemischt-ganzzahlige Optimierung: Modellierung in der Praxis*, Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2002.
- [16] P. Verma und V. S. Singal, „Review of mathematical modeling on latent heat thermal energy storage systems using phase-change material,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 999-1031, 2008.