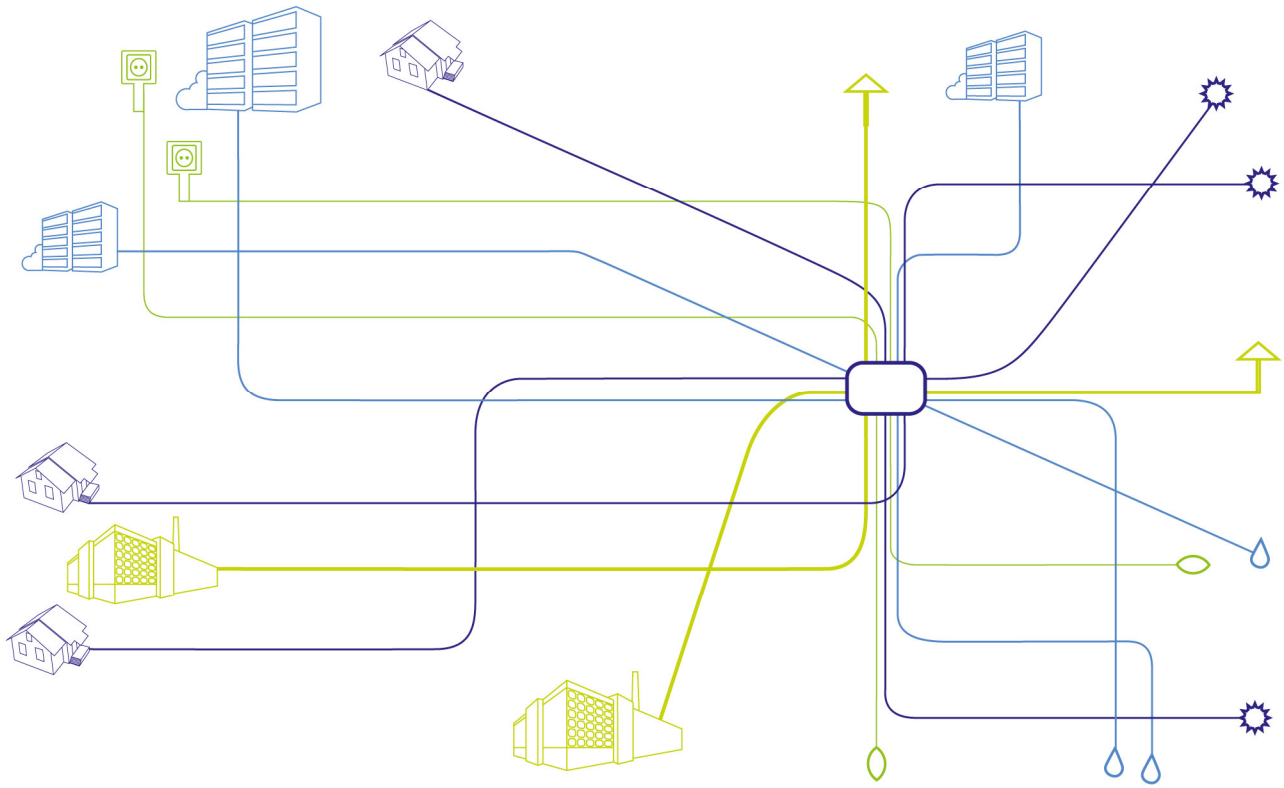
Blue Globe Report
Smart Energies #1/2014

SOCO

Storage Optimisation Concepts

Optimierte thermische Speichersysteme für Industrie, Gewerbe und Fernwärmenetze



Christoph Brunner et al.

VORWORT

Die Publikationsreihe BLUE GLOBE REPORT macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem BLUE GLOBE REPORT informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der BLUE GLOBE REPORT wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020". Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

1 Inhaltsverzeichnis

1 Inhaltsverzeichnis 1

2 Einleitung 3

2.1 Aufgabenstellung 3

2.2 Schwerpunkte des Projektes 4

2.3 Einordnung in das Programm 4

2.4 Methodik 5

2.4.1 Evaluierung bestehender Speichersysteme 5

2.4.2 SOCO Planungstool 5

2.4.3 Fallstudien – Anwendung SOCO Planungstool 6

2.5 Aufbau der Arbeit 6

3 Projektergebnisse 7

3.1 Evaluierung bestehender Speichersysteme 7

3.1.1 Datenerhebung mittels Fragebogen 7

3.1.2 Auswahl eines geeigneten Speichermodells 8

3.1.3 Modellierung der realen Speicher in der Simulationsumgebung von TRNSYS 9

3.1.4 Ergebnisse der Simulationen 10

3.1.5 Sensitive Parameter 13

3.1.6 Speicheralgorithmus 18

3.1.7 Effizienz von thermischen Energiespeichern 18

3.2 SOCO Planungstool 21

3.2.1 Speicheralgorithmus 21

3.2.2 Adaptierter Pinch Algorithmus für variable Prozessströme 25

3.2.3 Der SOCO Algorithmus 25

3.2.4 Programmierung des Planungstools 26

3.2.5 Verbesserung des Planungstools auf Basis der Fallstudien 27

3.3 Fallstudien – Anwendung SOCO Planungstool 27

3.3.1 Datenaufnahme und Darstellung Status Quo 27

3.3.2 Optimiertes Wärmekonzept 29
3.3.3 Optimierungspotential durch das Planungstool (Ökonomische Bewertung) 32
4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen 33
4.1 Evaluierung bestehender Speichersysteme 33
4.1.1 Datenerhebung 33
4.1.2 Grundlagen zur Entwicklung des Speicheralgorithmus 33
4.1.3 Effizienz von thermischen Energiespeichern 33
4.2 Fallstudien – Anwendung SOCO Planungstool 37
4.2.1 Molkerei 37
4.2.2 Brauerei 42
4.2.3 Fernwärme 46
5 Ausblick und Empfehlungen 50
6 Literaturverzeichnis 52
7 Anhang 54

2 Einleitung

2.1 Aufgabenstellung

In einem komplexen thermischen Netz, sei es in der Industrie, Gewerbe oder in einem Fernwärmenetz, ist die Dimensionierung und Verknüpfung von Speichern nicht trivial. Speicher beeinflussen bei diskontinuierlicher Energiebereitstellung und/oder Energiebedarf den Energieverbrauch entscheidend und tragen dazu bei,

- in wie weit Energiebereitstellungssysteme geregelt werden müssen und können,
- in wie weit der Betrieb von Energiebereitstellungssysteme wirtschaftlich optimiert werden kann,
- zu welchen Lasten und damit mit welcher Effizienz Energiebereitstellungssysteme arbeiten müssen,
- in welchem Ausmaß Unterschiede zwischen Abwärmeanfall und Wärmebedarf ausgeglichen werden können,
- welche Verluste beim Ausgleich von Wärmeversorgung und Bedarfszeiten auftreten,
- welche Energieeinsparung bei Wärmerückgewinnungssystemen erreicht werden kann.

Planungstools, die nicht nur Einzelspeicher, sondern industrielle Speicherkonzepte bestehend aus mehreren Speichern optimieren, sind derzeit nicht verfügbar. Gerade in thermischen Energiesystemen mit vielen unterschiedlichen Energieströmen für Wärmebedarf und Wärmeverfügbarkeit ist allerdings die Entscheidung welche Wärmeströme in welchen Speichern bestmöglich kombiniert werden sollen entscheidend. In industriellen und gewerblichen Energiesystemen, wie auch in Fernwärmenetzen müssen für eine energieeffiziente Betriebsweise unterschiedliche Abwärmeströme in das Energiesystem bestmöglich integriert werden. Des Weiteren muss für eine nachhaltige Energieversorgung erneuerbare Energie technisch und wirtschaftlich sinnvoll eingebunden werden. Beide dieser Schritte erfordern die Integration von Wärmespeichern. Die Entscheidung welche Speichertypen in einem komplexen thermischen Energiesystem gesetzt werden und wie Speicher geregelt werden sollen, muss zukünftig über eine intelligente Planung von „Speichersystemen“ erfolgen. Diese Speichersysteme können die Effizienz der Abwärmenutzung und der erneuerbaren Energiesysteme entscheidend beeinflussen.

In den meisten Fällen werden diese Speichersysteme derzeit von wenigen einzelnen Firmen aus Erfahrungswerten geplant. Da viele dieser Speicher nicht kontinuierlich über ein Monitoring überwacht werden, können derzeit keine Rückschlüsse über die Effizienz der bestehenden Systeme und das Verbesserungspotential von großen thermischen Speichern (10-2000 m^3) gezogen werden. In den bestehenden Speichersystemen, die in einigen Fallstudien in der Industrie rudimentär betrachtet wurden, hat sich weiters gezeigt, dass meist die Speichergröße ohne detaillierte Auslegung festgelegt wurde und die Betriebsweise d.h. Menge und zeitlicher Verlauf der Input- und Outputströme an den Speicher angepasst wurde und nicht umgekehrt.

In den letzten Jahren wurde in gemeinsamen Projekten der JOANNEUM RESEARCH und der AEE INTEC (SolproBat, IEA Task 33, Promise Application) ein Pinch Tool (PE^2) entwickelt, welches

sich mit der konzeptionellen Optimierung des thermischen Energiehaushaltes von Industriebetrieben beschäftigt und Wärmetauschernetzwerke auf Basis von statischen Prozessdaten (durchschnittliche Last, On/Off) konzipiert. Dabei hat sich in unterschiedlichen Industriebetrieben durch die Entwicklung von Umsetzungskonzepten für Wärmetauschernetzwerke ein Einsparungspotential von 20-30% des thermischen Energiebedarfs ergeben (siehe Ergebnisse aus z.B. den Projekten „Grüne Brauerei", „Promise Application"). Bei der Auslegung von Speichersystemen, die bisher in den Fallstudien per Hand durchgeführt wurden, wurde deutlich, dass für eine optimale Realisierung der Einsparpotentiale Speichersysteme geplant werden müssen. Außerdem hat sich das zusätzliche Potential der Energieeinsparung durch die Implementierung von optimierten Speichersystemen gezeigt. Dies gilt insbesondere auch für die Integration erneuerbarer Energiesysteme nach der Optimierung des Energiehaushaltes über Wärmerückgewinnung.

Das Potential für Solare Prozesswärme ist in Österreich bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Gründe dafür sind u.a. fehlende Planungstools für den gesamten thermischen Wärmehaushalt um den solaren Deckungsgrad und die Wirtschaftlichkeit solarer Prozesswärme zu erhöhen.

2.2 Schwerpunkte des Projektes

Im Projekt SOCO wurde ein Planungstool für die optimierte Planung von Energiespeichersystemen und Wärmetauschernetzwerken auf Basis von Prozessdaten basierend auf betrieblichen Lastprofilen, zur gesamtheitlichen Optimierung von thermischen Energiesystemen und für die optimierte Integration von erneuerbarer Energie, insbesondere solarer Prozesswärme entwickelt. Die Anwendung des Tools soll es ermöglichen mit Prozessdaten auf Basis von Lastprofilen verbraucherseitige Effizienzmaßnahmen (Wärmeintegration in der Industrie, Gewerbe) optimal planen und auslegen zu können und gleichzeitig die Möglichkeiten des technisch und wirtschaftlich sinnvollen Einsatzes von erneuerbarer Energie auszubauen. Besonders für die Integration von erneuerbaren Energieträgern (vor allem Solarthermie) ist die Entscheidung über Anzahl, Art, Größe und der Temperaturschichtung von thermischen Speichern für die Optimierung des gesamten Wärmehaushaltes von Industriebetrieben und Fernwärmenetzen entscheidend.

2.3 Einordnung in das Programm

Das Projekt wurde aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen der 3. Ausschreibung des Programms „NEUE ENERGIEN 2020" durchgeführt. Die Einordnung in das Programm erfolgte unter den Themenpunkten „3.3.5 Systemintegration von Prozessen", „3.5.2. Solarthermie – Systeme", „3.2.2 Thermische Speicher", „3.3.2. Low CO2 Branchenlösungen" und „3.3.3 Prozessintegrierter Einsatz erneuerbarer Energien".

2.4 Methodik

2.4.1 Evaluierung bestehender Speichersysteme

Die Erhebung der Basisdaten erfolgte über ein Datenblatt zur Abfrage aller relevanten Speicherdaten. Die wichtigsten Kriterien waren dabei die Geometrie der Speicher, deren Anschlüsse, Lastverhalten, verfügbare Betriebsdaten (Temperaturen, Volumenströme) und verwendeten Materialen des Speichers und der Wärmedämmung.

Die Datensammlung erfolgte zum einen durch bestehende kontinuierliche Betriebsdatenerfassungen der Speicherbetreiber (notwendiges Auslesen der Betriebsdaten aus den Leittechnik- und SCADA-Systemen) und zum anderen, wo notwendig, durch ergänzende Messungen, um eine bessere Datengrundlage für die Bilanzierung und Erfassung des Ist-Zustandes zu gewährleisten. Zusätzlich wurden noch Daten aus dem Prozessleitsystem ausgelesen. Dadurch konnte der Zugang zur Temperaturschichtung in den Speichern geschaffen werden, was wiederum die Grundlage für die Simulation in TRNSYS ist. Die Messungen des Wärmestroms erfolgten eingriffslos an den heißwasserführenden Rohren. Die Volumenstrommessungen wurden mittels eines Ultraschall-Durchflussmessgerätes durchgeführt, und die Temperaturmessungen mittels eines 4-Kanal Temperaturmessgerätes mit Thermoelementen.

2.4.2 SOCO Planungstool

Zur Entwicklung des Planungstools wurden zuerst eine Literaturrecherche zu derzeit verfügbaren Speichermodellen in thermischen Simulationsprogrammen sowie verfügbare und sinnvoll anwendbare Pinch-Algorithmen durchgeführt. Dabei wurden die physikalischen Berechnungsmethoden, die hinter den Speichermodellen und den Pinch-Algorithmen stehen hinsichtlich Nutzung, Genauigkeit und Rechengeschwindigkeit und (Festplatten-)Speicherbedarf analysiert.

Die vermessenen Speicher unterschiedlicher Nutzung und Größe wurden in der thermischen Anlagensimulation abgebildet und mit den Messdaten verifiziert. Darauf aufbauend wurde ein **Speicheralgorithmus** zur Auslegung von verschiedenen Speichertypen entwickelt.

Parallel dazu wurde ein Algorithmus zum Vorschlag eines optimierten **Speicher- und Wärmetauscher-Netzwerks** entwickelt. Beide Algorithmen wurden zum **SOCO-Algorithmus** zusammengefasst und in einen Quasi-Code heruntergebrochen, der die notwendigen Kalkulationsschritte beschreibt. Dieser Quasi-Code wurde in das SOCO Planungstool implementiert und mit einer ansprechenden Graphical User Interface ausgestattet.

Die Entwicklung wurde über Milestones definiert und erfolgte in Diskussionen zur Algorithmusentwicklung sowie laufenden Präsentationen des Projektfortschrittes. Dieser wurde zusätzlich über Testbeispiele überprüft, wodurch laufend Verbesserungen in das SOCO Planungstool implementiert werden konnten. Dadurch wurde die Erreichung des Projektzieles gewährleistet. Bei der Durchführung der Fallstudien wurde die Fehleranfälligkeit, Anwendbarkeit und Benutzerfreundlichkeit des Planungstools überprüft. Mögliche Verbesserungen wurden identifiziert und in SOCO implementiert und in einen neuen Release gebündelt.

2.4.3 Fallstudien – Anwendung SOCO Planungstool

Um die Anwendbarkeit des SOCO Planungstools zu zeigen, wurden 3 Fallbeispiele untersucht. Dabei wurde folgende methodische Vorgangsweise gewählt.

2.4.3.1 Datenaufnahme und Darstellung Status Quo

Reale Messdaten wurden erhoben, ausgewertet und in definierten Zeitschrittweiten übertragen. Für Prozessströme ohne Messdatenaufzeichnung wurden aus den bekannten Betriebsdaten semi-kontinuierliche Ströme definiert. Für die mögliche Integration von solarer Prozesswärme wurde mit dem Programm T-Sol Simulationen durchgeführt, die die Basis für die Stromdefinition der Solarwärme bildete. Die von SOCO geforderten Daten zur Definition von bestehenden Speicher und Wärmetauscher wurden ebenfalls erhoben. Im implementierten Visio-Fließschema wurden die bestehenden Wärmerückgewinnungs-Maßnahmen abgebildet. Die zuvor definierten, bestehenden Speicher und Wärmetauscher wurden definiert und mit den gezeichneten Fließschema verlinkt. Das bestehende Speicher- und Wärmetauschernetzwerk kann so simuliert werden. Die Ergebnisse wurden mit der anschließend entwickelten Optimierung verglichen.

2.4.3.2 Optimiertes Wärmekonzept

Ausgehend von den definierten Strömen der Fallbeispiele, schlägt der SOCO-Algorithmus ein Speicher- und Wärmetauscher-Netzwerk vor. Der Vorschlag kann bei unterschiedlicher Kriterien-Vergabe und Parameter-Einstellung unterschiedliche Ergebnisse liefern und so ein tieferes Verständnis für die Problemstellung liefern. Ausgehend von den vom SOCO-Algorithmus vorgeschlagenen Speicher und Wärmetauscher kann ein optimiertes Netzwerk im Visio-Flowsheet gezeichnet werden. Dieses Netzwerk wird simuliert und die Ergebnisse mit jenen der Status-Quo-Simulation verglichen.

2.4.3.3 Ökonomische Bewertung

Die Einsparungen durch das designte, optimierte Speicher- und Wärmetauscher-Netzwerk wurde den dadurch entstandenen Kosten in einer ökonomischen Bewertung gegenübergestellt. Die ökonomische Bewertung erfolgt durch den Vergleich der Kosten und Erträge über die Nutzungsdauer. Die Kapitalkosten wurden mittels der Annuitätenmethode ermittelt. Damit wurden jährlich konstante Kapitalkosten mit Annahme eines gleichbleibenden Zinssatzes und der Nutzungsdauer der Anlagen berechnet. Zu diesen jährlichen Kapitalkosten wurden die Betriebskosten ohne Kostensteigerungen addiert. In den Betriebskosten sind Kosten für Wartung und Instandhaltung der Investitionsgüter über 10 Jahre enthalten. Dem wurden die Erlöse ohne Steigerungsraten über 10 Jahre gegenübergestellt. Die Amortisationszeit (angegeben in Jahren) errechnet sich ausgehend von den Investitionskosten und den kumulierten jährlichen Überschüssen. Wenn diese kumulierten jährlichen Überschüsse größer sind als die Investitionskosten (= Schnittpunkt mit der Nulllinie) hat sich die Anlage amortisiert.

2.5 Aufbau der Arbeit

Die Arbeiten gliedern sich in folgende 4 Arbeitspakete (AP):

- *AP 1: Erhebung der Basisdaten bei bestehenden Energiespeichern*

Dieses Arbeitspaket diente der Datenerfassung und Aufbereitung realer Daten von Großspeichern zur Generierung der Basisdaten für die Berechnungs – und Simulationsalgorithmen

- *AP 2: Entwicklung des Planungstools*

Dieses Arbeitspaket beschäftigte sich mit der Entwicklung von Algorithmen und ihrer programmtechnischen Umsetzung zur Definition und Auslegung von Wärmetauscher- und komplexen industriellen Wärmespeichersystemen. Inputdaten waren gemessene Prozessdaten, sowie Versorgungsprofile von möglichen erneuerbaren Energiequellen, wie etwa für die Integration von solarer Prozesswärme, sowie bestehender Wärmetauscher und Speicher.

- *AP 3: Fallstudien – Anwendung des Planungstools*

In diesem Arbeitspaket wurde das Planungstool an 3 Fallstudien (Fernwärmenetz, Brauerei, Molkerei) angewandt. Dabei wurden Optimierungsmaßnahmen für die Fallstudien entwickelt, wobei Maßnahmen zur Energieeffizienz und Einbindung erneuerbarer Energie technisch und wirtschaftlich geprüft wurden.

- *AP 4: Projektmanagement und Verbreitung*

3 Projektergebnisse

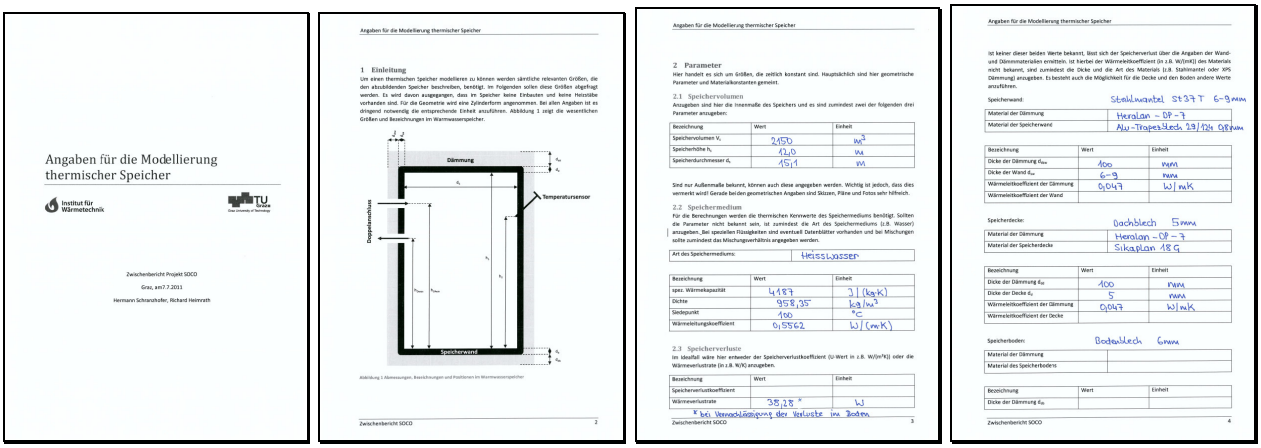
3.1 Evaluierung bestehender Speichersysteme

3.1.1 Datenerhebung mittels Fragebogen

Die Erhebung der notwendigen Parameter zur Modellierung der betrachteten Speicher in der Simulation erfolgte mittels eines Fragebogens. In diesem Fragebogen wurden allgemeine Parameter wie Speichervolumen, Speichermedium, Speicherverluste, Anschlüsse, Temperatursensoren und auch zusätzliche Angaben zum Speicher (Überlaufstrategie, Verbindungen) abgefragt. Zusätzlich gab dieser einen Vorschlag zur Gestaltung der Ein- und Ausgabedateien. Diese Fragebogen wurden von den Anlagenbetreibern ausgefüllt und dienten als Grundlage zum Aufbau der Simulation in TRNSYS. Jedoch ist anzumerken, dass einige Parameter wie z.B. die Wärmeverlustrate von den meistens Anlagenbetreibern nicht angegeben werden konnten. Nur für Speicher 3 war die Wärmeverlustrate bekannt, bzw. bereits bestimmt worden. Für die übrigen neun Speicher mussten die Wärmeverluste mittels der angegeben Dämmstärken (Fragebogen) und einem gewählten Wärmeleitkoeffizienten der Dämmung und der Speicherwand berechnet werden. Auch die vertikalen Wärmeleitkoeffizienten waren meist nicht bekannt und so wurden diese Werte aus der Literatur entnommen.

Folgende Anforderungen konnten aus den Fragebögen abgeleitet werden:

- Abbildung einer konstanten als auch variablen Füllhöhe
- Vorgabe der Starttemperaturen eines Speichers
- Vorgabe der Dämmstärken in drei Bereichen (Mantel, Deckel und Boden)
- Vorgabe der Wärmeverluste an den Anschlüssen (in W/K)
- Mindestens zwei Anschlüsse zum Be- und Entladen
- Temperatursensoren an zwanzig Positionen



Angaben für die Modellierung thermischer Speicher

Institut für Wärmetechnik

Zwischenbericht Projekt SOCO

Graz, am 7.7.2011

Hermann Schranzhofer, Richard Heinrath

Angaben für die Modellierung thermischer Speicher

1 Einleitung

Um einen thermischen Speicher modellieren zu können werden sämtliche relevanten Größen, die den abzubildenden Speicher beschreiben, benötigt. Im Folgenden sollen diese Größen abgefragt werden. Es wird davon ausgegangen, dass im Speicher keine Einbauten und keine Heizstäbe vorhanden sind. Für die Geometrie wird eine Zylinderform angenommen. Bei allen Angaben ist es dringend notwendig die entsprechende Einheit anzuführen. Abbildung 1 zeigt die wesentlichen Größen und Bezeichnungen im Warmwasserspeicher.

Abbildung 1 Abmessungen, Bezeichnungen und Positionen im Warmwasserspeicher

Zwischenbericht SOCO 2

Angaben für die Modellierung thermischer Speicher

2 Parameter

Hier handelt es sich um Größen, die zeitlich konstant sind. Hauptsächlich sind hier geometrische Parameter und Materialkonstanten gemeint.

2.1 Speichervolumen

Anzugeben sind hier die Innenmaße des Speichers und es sind zumindest zwei der folgenden drei Parameter anzugeben:

Bezeichnung	Wert	Einheit
Speichervolumen V_s	2,150	m^3
Speicherhöhe h_s	1,20	m
Speicherdurchmesser d_s	1,51	m

Sind nur Außenmaße bekannt, können auch diese angegeben werden. Wichtig ist jedoch, dass dies vermerkt wird! Gerade bei den geometrischen Angaben sind Skizzen, Pläne und Fotos sehr hilfreich.

2.2 Speichermedium

Für die Berechnungen werden die thermischen Kennwerte des Speichermediums benötigt. Sollten die Parameter nicht bekannt sein, ist zumindest die Art des Speichermediums (z.B. Wasser) anzugeben. Bei speziellen Flüssigkeiten sind eventuell Datenblätter vorhanden und bei Mischungen sollte zumindest das Mischungsverhältnis angegeben werden.

Art des Speichermediums:	Heisswasser

Bezeichnung	Wert	Einheit
spez. Wärmekapazität	4189	J/(kgK)
Dichte	958,35	kg/m³
Siedepunkt	100	°C
Wärmeleitungskoeffizient	0,5562	W/(mK)

2.3 Speicherverluste

Im Idealfall wäre hier entweder der Speicherverlustkoeffizient (U-Wert in z.B. W/(m²K)) oder die Wärmeverlustrate (in z.B. W/K) anzugeben.

Bezeichnung	Wert	Einheit
Speicherverlustkoeffizient		
Wärmeverlustrate	38,28 *	W

* bei Vernachlässigung der Verluste im Boden

Zwischenbericht SOCO 3

Angaben für die Modellierung thermischer Speicher

Ist keiner dieser beiden Werte bekannt, lässt sich der Speicherverlust über die Angaben der Wand- und Dämmmaterialien ermitteln. Ist hierbei der Wärmeleitkoeffizient (in z.B. W/(mK)) des Materials nicht bekannt, sind zumindest die Dicke und die Art des Materials (z.B. Stahlmantel oder XPS Dämmung) anzugeben. Es besteht auch die Möglichkeit für die Decke und den Boden andere Werte anzuführen.

Speicherwand: Stahlmantel St37T 6-9mm

Material der Dämmung	Heralan - DP-7
Material der Speicherwand	Alu-Trapezblech 29/124 0,8mm

Bezeichnung	Wert	Einheit
Dicke der Dämmung d_{dm}	100	mm
Dicke der Wand d_{sw}	6-9	mm
Wärmeleitkoeffizient der Dämmung	0,047	W/mK
Wärmeleitkoeffizient der Wand		

Speicherdecke: Dachblech 5mm

Material der Dämmung	Heralan - DP-7
Material der Speicherdecke	Sikaplan 18G

Bezeichnung	Wert	Einheit
Dicke der Dämmung d_{dd}	100	mm
Dicke der Decke d_d	5	mm
Wärmeleitkoeffizient der Dämmung	0,047	W/mK
Wärmeleitkoeffizient der Decke		

Speicherboden: Bodenblech 6mm

Material der Dämmung	
Material des Speicherbodens	

Bezeichnung	Wert	Einheit
Dicke der Dämmung d_{db}		

Zwischenbericht SOCO 4

Abbildung 1: Auszug aus dem Fragebogen der Speicherparameter für den Speicher 3

3.1.2 Auswahl eines geeigneten Speichermodells

Diese Vorgaben konnte nur von einem Modell (Type844) der Simulationsumgebung TRNSYS zur Gänze erfüllt werden. Das Modell wurde am Institut für Wärmetechnik (IWT) entwickelt und basiert auf dem Ansatz eines Knotenmodells nach den Finiten Differenzen Verfahren (explizit gelöst). Alle weiteren Modelle können nur eine konstante Füllhöhe abbilden. Zum Vergleich der unterschiedlichen mathematischen Modellansätze wurde eine Vergleichsrechnung mit den verschiedenen, in TRNSYS verfügbaren, Speichermodellen durchgeführt. Hierzu wurden die gleichen Randbedingungen für alle Speicher gewählt und die Be-und Entladung nach einem definierten Zyklus an einem Speicher mit einer konstanten Füllhöhe durchgeführt. Abbildung 2 zeigt, dass sich die verschiedenen Modelle, bis auf den Plug Flow Ansatz (Type38), nur geringfügig voneinander unterscheiden. Als Basis wurde in Abbildung 2 das Speichermodell Type340 gewählt, da dieses Modell bereits mehrfach validiert wurde und am ITW Stuttgart für Speichertests verwendet wird (Moser, 2012). Die geringen Abweichungen zwischen den Modellen mit dem Knotenansatz zeigen, dass der mathematische Ansatz eines Knotenmodells, wie beim Type844 eine sehr gute Eignung für die Abbildung der betrachteten thermischen Speicher in der Simulationsumgebung von TRNSYS besitzt.

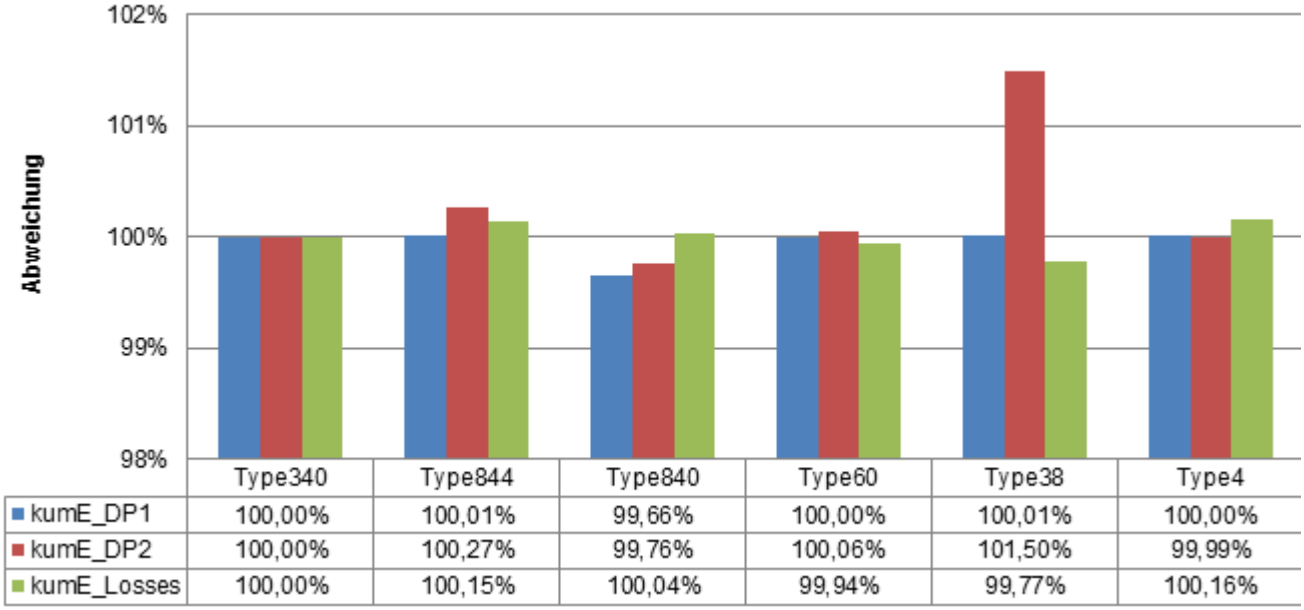


Abbildung 2: Vergleich der Abweichungen der simulierten Speichermodelle bei einem Be- und Entladevorgang, wobei als Referenzwert der Type 840 gewählt wurde

3.1.3 Modellierung der realen Speicher in der Simulationsumgebung von TRNSYS

In der Simulationsumgebung von TRNSYS wurden die einzelnen Speicher auf Basis der Daten aus den Fragebögen parametriert, sowie auch die hydraulische Verschaltung des Speichers im Gesamtsystem modelliert (Moser, 2012). Hierzu mussten neben dem Speichermodell (Type844) auch Rohrleitungen (Type709) der Simulation hinzugefügt werden. In Abbildung 3 ist ein beispielhafter Simulationsaufbau abgebildet.

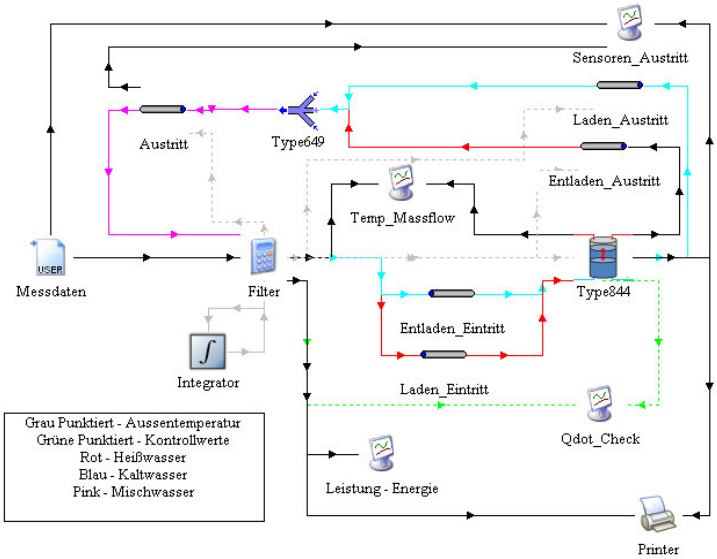


Abbildung 3: Simulationsaufbau Speicher 3

Die am realen Speicher auftretenden Wärmeverluste an den Anschlüssen wurden anhand einer Studie der Hochschule Rapperswil – Institut für Solartechnik (Lauber, 2007) abgeschätzt und dem Speicher als Parameter übergeben. Die Messdaten der Volumen- oder Massenströme und der Temperaturen wurden mittels eines Datenlesers (Type9) in die Simulation eingelesen. Diese Daten wurden mit weiteren Signalen, wie z.B. dem Stellsignal einer Regelklappe, verknüpft (Filter) um geringe Massenströme aufgrund von Messabweichungen auszuschließen. Durch die relativ geringe Messdauer (120 Stunden – 750 Stunden) stellte sich heraus, dass die Vorgabe der Knotentemperaturen unabdingbar für die Simulation ist, da sich die Speicher hinsichtlich der Beladung voneinander unterscheiden.

3.1.4 Ergebnisse der Simulationen

Die genaue Kenntnis der hydraulischen Verschaltung ist zur Bewertung der Simulationsergebnisse von großer Bedeutung. Auftretende Temperaturschwankungen, besonders bei Speichern, welche bereits in ein Anlagenkonzept eingebunden sind (Warmwasserspeicher Brauerei), können dann hinsichtlich der Simulation bewertet werden. Die genaue Position der Temperaturfühler sowie die Ausführung der Messstelle (Temperaturmessung in Tauchhülse Speicher 8) stellt eine wichtige Information dar, da sich spontane oder verzögerte Temperaturänderungen des Temperaturprofils im Speicher sowie an den Temperaturmessstellen dadurch erklären lassen. Generell zeigte sich, dass sie Simulation bei ausreichender Datenlage die gemessenen Energiemengen, als auch die Temperaturverläufe im Speicher sehr gut wiedergeben kann.

Exemplarisch wird nun näher auf einen Speicher eingegangen. Der Speicher 3 (Abbildung 3) wies eine sehr gute Datenlage mit Fotos, Schaltplänen und Messdaten ohne fehlende Zeitschritte auf. Abbildung 4 zeigt den Verlauf der Temperaturen (oben Messung, linke y-Achse; unten Simulation, rechte y-Achse) der im Speicher eingebauten Temperaturfühler. Im oberen Bereich der Abbildung 4 befinden sich die gemessenen Temperaturen, im unteren Bereich die dazugehörigen Temperaturen aus der Simulation. Die realen Messdaten wiesen eine Temperaturerhöhung (T9) im Bereich zwischen der Stunde 10 und 20 auf. Dies könnte durch die Dampfauflage begründet sein, durch welche ein Energieeintrag in den realen Speicher erfolgte. Die Temperaturen in der Simulation waren geringfügig höher als die Messdaten. Am Behälterboden (T1, T2) wies die Simulation eine geringfügig bessere Schichtung auf. Durch die fehlende Kenntnis über die Einlaufgeometrie in den Speicher und die der Temperaturfühler kann dies nicht näher betrachtet werden. Auch der Temperaturabfall im Bereich zwischen der Stunde 110 und 125 wies einen größeren Abfall (Messung 1,1 [K], Simulation 0,4 [K]) auf, obwohl der reale Speicher während der Beladung geringere Verluste zeigte.

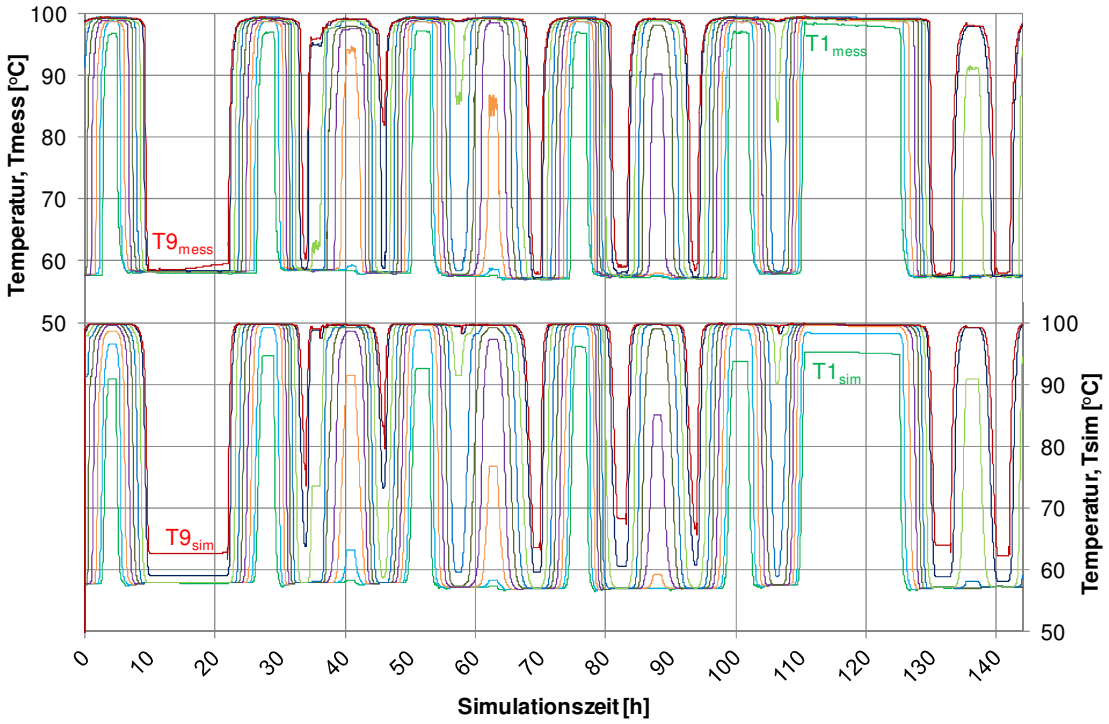


Abbildung 4: Temperaturverlauf im Speicher 3

Abbildung 5 zeigt den Verlauf der gemessenen Temperaturen der Rohrleitungen (linke y-Achse) sowie eine Bilanz des Volumenstroms (unterer Bereich, rechte y-Achse).

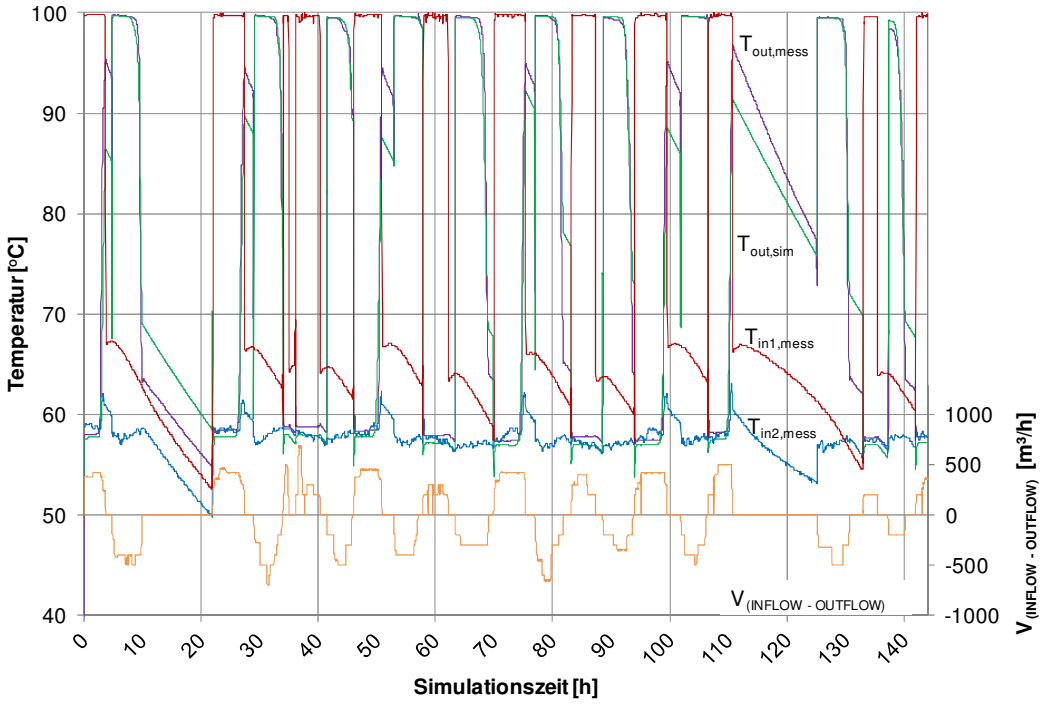


Abbildung 5: Temperaturverlauf der Rohrleitungen – Speicher 3

Der Temperaturverlauf der Simulation wich, im Falle der Beladung (z.B. Stunde 70 bis 75) und des Ruhezustands (z.B. Stunde 110 bis 125), von der Messung ab. Der Temperaturverlauf während der Entladung (z.B. Stunde 63 bis 69) zeigte kleinere Abweichungen. Die Ursache für die Umkehrung der Abweichung der Austrittstemperaturen ($T_{out,mess}$, $T_{out,sim}$) könnte in den Randbedingungen der Simulation zu finden sein. Es musste jedem Rohrleitungsmodell, eine Initialisierungstemperatur, sowie konstante Stoffdaten, wie Dichte (ρ), Wärmeleitfähigkeit (λ) und Viskosität (η), zugewiesen werden. Die eintretenden und austretenden Leistungen ($Q_{bal,mess}$, $Q_{bal,sim}$) sind in Abbildung 6 zu erkennen. Wie schon in der Abbildung 5 beschrieben war, weisen die Temperaturen nur geringe Abweichungen auf. Diese minimalen Abweichungen sind auch bei den kumulativen Energien erkennbar.

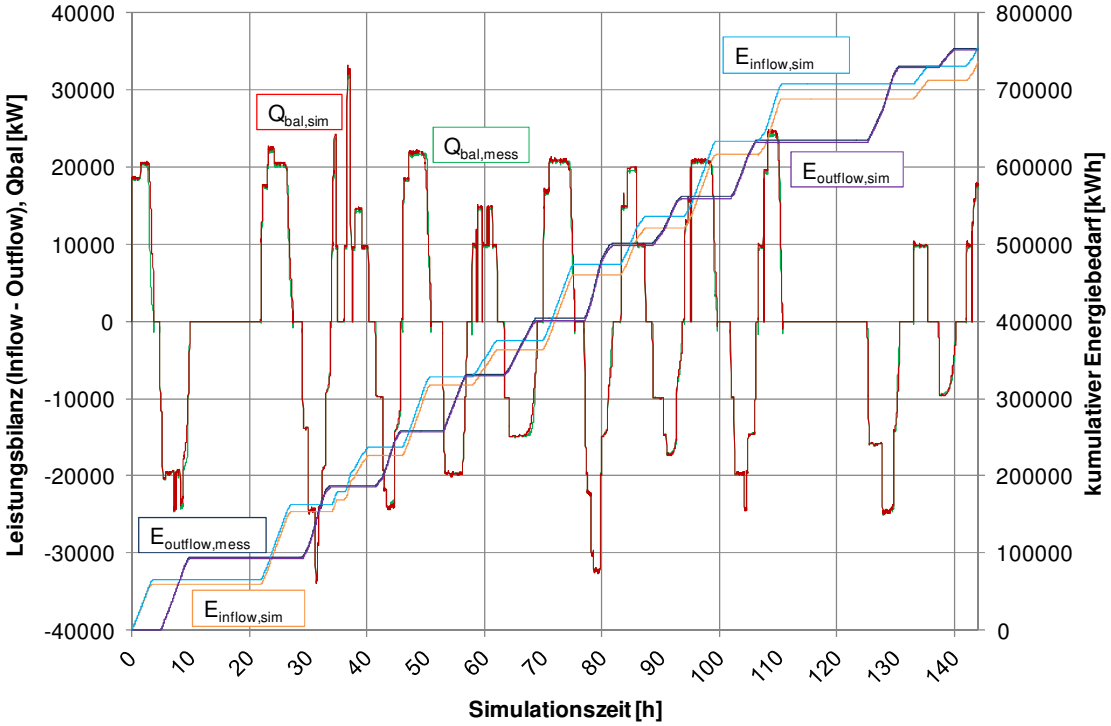


Abbildung 6: Leistung und kumulativer Energiebedarf – Speicher 3

Der kumulative Energiebedarf wies, am Ende der Simulation, eine Abweichung von 2,2 % bei der Beladung und 0,1 % bei der Entladung auf. Den Einfluss der Dampfhaube, im Sinne einer Energieerhöhung, war in den Messdaten ($T9_{,mess}$) nur zwischen der Stunde 10 und 20 zu erkennen. Da in der Simulation die weiteren Einbauten, wie das Be- und Entlüftungsventil und der Überlauftrichter nicht berücksichtigt wurden, ist davon auszugehen, dass diese Verluste durch die Dampfhaube kompensiert werden. Die fehlende Dämmung des Behälterbodens (T1) wurde durch die Berechnung einer äquivalenten Dämmstärke berücksichtigt und stellte für diesen, bereits länger in Betrieb stehenden Speicher (stationärer Zustand), eine hinreichend gute Näherung dar.

3.1.5 Sensitive Parameter

Da durch das SOCO- Tool dem Benutzer auch parametrierte Speicher vorgeschlagen werden sollen, mussten sensitive Parameter gefunden werden, die einen Speicher beschreiben können. Hierzu wurden die betrachteten Speicher gegenübergestellt und vom Volumen abhängige Ausgleichskurven erstellt.

Die Verluste eines Speichers werden von seiner Umhüllungsfläche und der Dämmung bestimmt. Somit erreichen die Verluste ihr Minimum bei einem Durchmesser zu Höhe Verhältnis von 1:1. Für den Einbau in bestehende Gebäude ist meist die erforderliche Grundfläche der limitierende Faktor. Hier hat der Benutzer je nach Anwendungsfall den Durchmesser oder die Höhe zu spezifizieren.

Dämmstärke

Die Dämmstärken der Energiespeicher lagen im Bereich zwischen 10 bis 25 cm. Bei den Fernwärmespeichern Speicher 8 und Speicher 10 wurde die Einhausung mit Einblasdämmstoff gefüllt, wodurch sich eine relativ große Dämmstärke für diese beiden Speicher ergab.

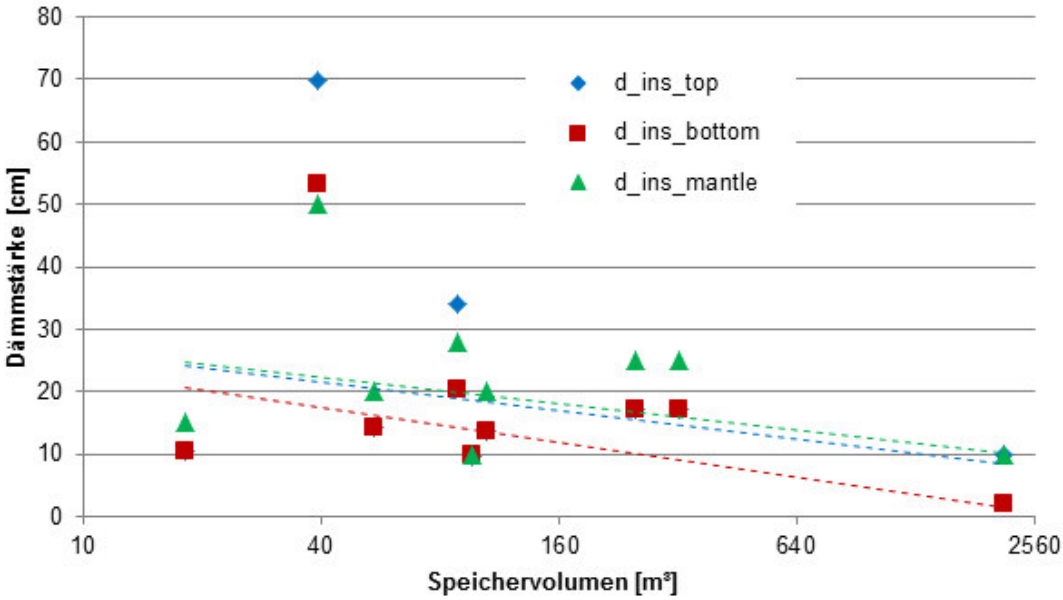


Abbildung 7: Dämmstärke in Abhängigkeit vom Speichervolumen

Anschlusshöhen

Die Ausgleichskurven für die Anschlusshöhen wurden aus dem Speichervolumen und den relativen Höhen der Anschlüsse für die Be- und Entladung (Abbildung 8) berechnet. Speicher 8 und Speicher 10 weisen zusätzliche Anschlüsse im mittleren Speicherbereich auf, welche jedoch nicht die Bewertung mit eingeflossen sind (Beladung Sommerfall).

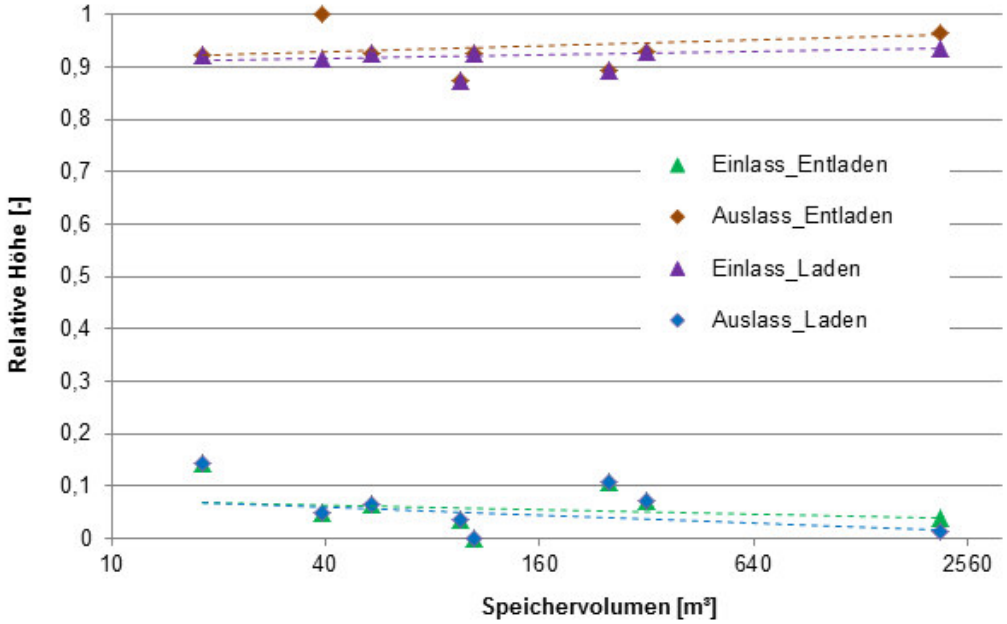


Abbildung 8: Anschlusshöhen in Abhängigkeit vom Speichervolumen

Anschlussverluste

Die Anschlussverluste wurden auf Basis der Angaben im Fragebogen, sowie den zusätzlichen Daten wie Fotos und Verschaltungsplänen abgeschätzt. In Abbildung 9 wurden die Anschlussverluste über dem Speichervolumen aufgetragen.

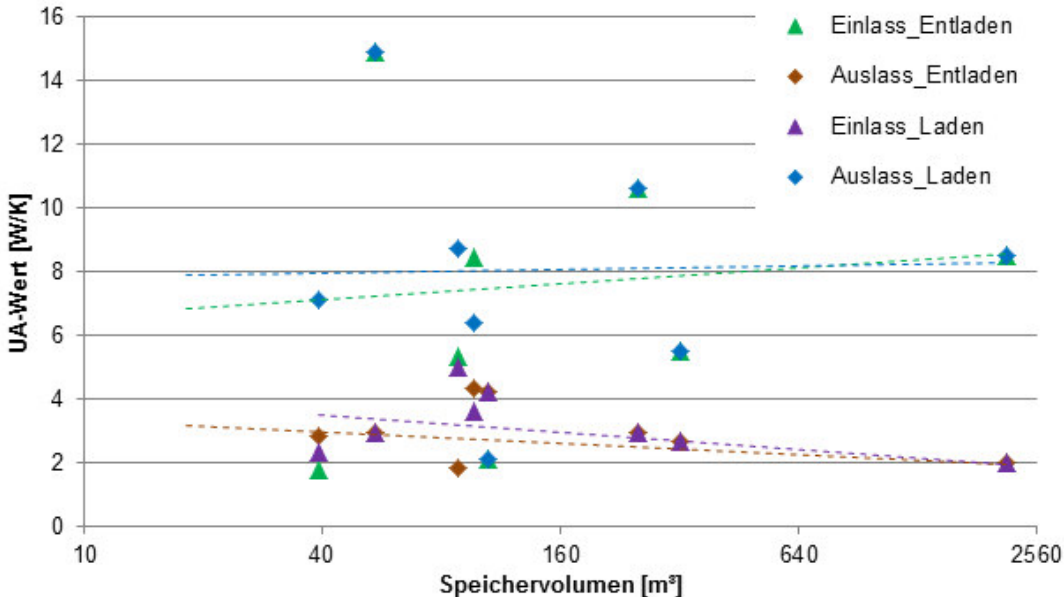


Abbildung 9: Anschlussverluste in Abhängigkeit vom Speichervolumen

Anschlussdurchmesser

Die Nenndurchmesser der betrachteten Speicheranschlüsse über das Volumen sind in Abbildung 10 abgebildet. Die Strömungsgeschwindigkeit wurde auf der Basis des maximalen Durchflusses und dem angegebenen Nenndurchmesser des Speicheranschlusses berechnet. Ein Vergleich mit empfohlenen Werten aus der Literatur (Recknagl et al., 2007) zeigte eine gute Übereinstimmung mit den berechneten Geschwindigkeiten aus der Messung.

Folgende Geschwindigkeit sollte an einem Speicheranschluss nicht überschritten werden (Gl. 1):

$$v = \begin{cases} v < 6{,}054 \cdot DN + 0{,}751 & DN < 400 \\ v \leq 3, & DN \geq 400 \end{cases} \qquad \textbf{Gl. 1}$$

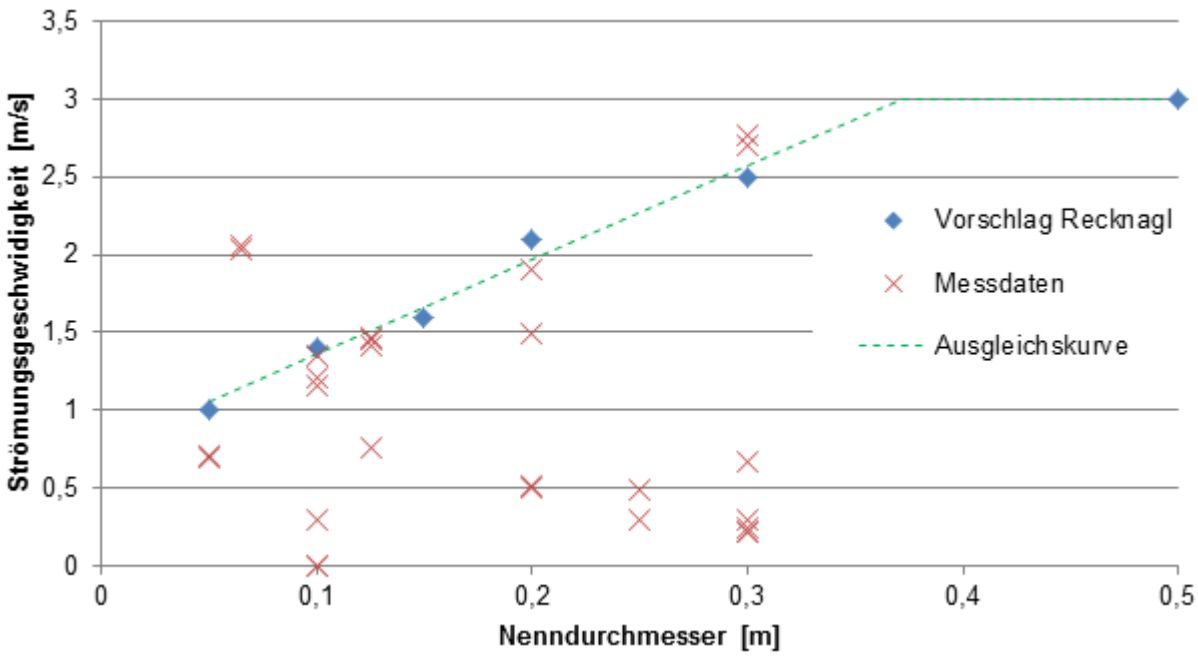


Abbildung 10: Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Nenndurchmesser

Volumenabhängige Verluste

Die Volumenabhängigen Verluste (V_{loss}) stellen das Speichervolumen dar, welches zur Deckung der Wärmeverluste an die Umgebung benötigt wird. Die Volumenabhängigen Verluste wurden aus der maximalen Verlustleistung der jeweiligen Simulation berechnet.

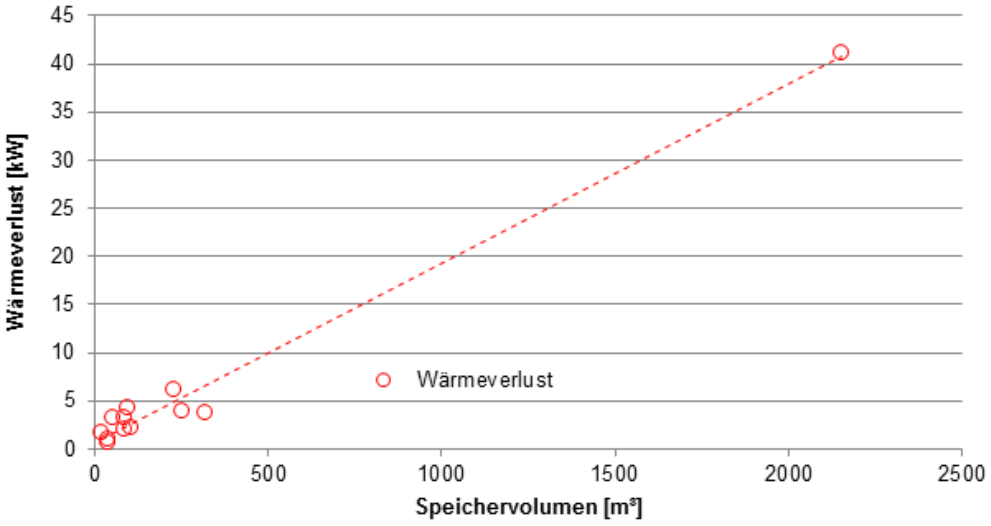


Abbildung 11: Wärmeverluste in Abhängigkeit vom Speichervolumen

Mittels der Volumenabhängigen Wärmeverluste kann das zusätzlich benötigte Volumen zur Deckung der Verluste V_{loss} berechnet werden (Gl. 2).

$$V_{loss} = time \cdot \frac{\dot{Q}_{loss}}{cp \cdot \Delta T \cdot \rho} \qquad \textbf{Gl. 2}$$

Das nutzbare Speichervolumen V_{use} ergibt sich aus Gl. 3.

$$V_{use} = V_{ges} - V_{loss} \qquad \textbf{Gl. 3}$$

<u>Anzahl der Knoten</u>

Die Anzahl der Knoten eines Speichermodells in der Simulation wird bestimmt durch die Schichtung im Speicher. Diese ist abhängig von der Wärmeleitfähigkeit des verwendeten Speichermaterials, des Speichermediums (Wasser) und den Einbauten im Speicher (Wärmetauscher, Schichtladeeinheit).

Diese Zahl sollte nicht zu groß gewählt werden, da diese Größe direkt die Berechnungsgeschwindigkeit beeinflusst.

$$N = \begin{cases} 50, & V_{ges} \leq 50 \\ V_{ges}, & 50 < V_{ges} < 200 \\ 200, & V_{ges} \geq 200 \end{cases} \qquad \textbf{Gl. 4}$$

Anschlusstyp

In Abhängigkeit des zuvor berechneten Nenndurchmessers kann durch die Angabe eines definierten Anschlusstyps (Abbildung 12) eine Berechnung des Anschlussverlustes möglich sein. In der Abbildung 12 ist der Speicher als rote Linie und der Anschluss als schwarze Linie angedeutet.

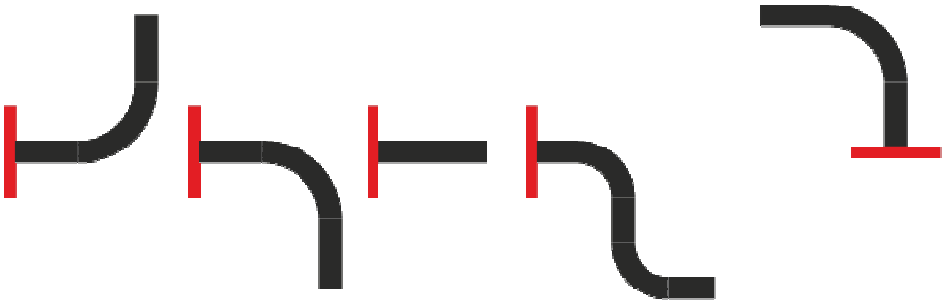


Abbildung 12: Anschlusstypen; a) nach oben, b) nach unten, c) gerade, d) Siphon, e) nach oben – zur Seite (Abbildung angelehnt an Fragebogen)

Entsprechend der Wärmeverlustrate des Anschlusstyp aus Tabelle 1, dem Größenbeiwert fg aus Gl. 6, dem Werkstoffbeiwert fw aus Tabelle 2 kann nach Gl. 5 der Anschlussverlust berechnet werden (Berechnung angelehnt an Lauber, 2007).

$$UA_{Anschluss} = \dot{q}' \cdot f_w \cdot f_g \qquad \textbf{Gl. 5}$$

$$f_g = \frac{DN}{0{,}0254} \qquad \textbf{Gl. 6}$$

Tabelle 1 : Wärmeverlustrate nach Anschlusstyp

Anschlusstyp	Wärmeverlustrate q‘ [W/K]
1	0,18
2	0,14
3	0,28
4	0,05
5	0,375

Tabelle 2: Werkstoffbeiwert f_w

Material	Faktor
Baustahl	1,333

Edelstahl	1

cp ..... Spezifische Wärmekapazität ; kJ/(kgK)
$d_{ins,bottom}$ ..... Dämmstärke des Speicherbodens ; cm
$d_{ins,mantle}$ ..... Dämmstärke des Speichermantel ; cm
$d_{ins,top}$ ..... Dämmstärke des Speicherdeckel ; cm
DN ..... Nenndurchmesser; m
f_g ..... Größenbeiwert ; -
f_w ..... Werkstoffbeiwert ; -
N ..... Anzahl der Konten eines Speichermodells ; -
q' ..... Wärmeverlustrate ; W/K
Q_{loss} ..... Wärmeverlust ; kW
$time$ ..... Speicherdauer ; s
v ..... Strömungsgeschwindigkeit ; m/s
V_{loss} ..... Volumen zur Deckung der Speicherverluste ; m³
V_{ges} :..... Gesamtes Speichervolumen ; m³
V_{loss} ..... Volumen zur Deckung der Speicherverluste ; m³
V_{use} ..... Nutzbares Volumen ; m³
$UA_{Anschluss}$ ..... Anschlussverlust ; W/K
ΔT ..... Temperaturdifferenz Speichers/Umgebung ; °C
ρ ..... Dichte ; kg/m³

3.1.6 Speicheralgorithmus

Die durchgeführten Simulationen zeigten eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse der Messung und der Simulation, welche mit dem Speichermodell Type844 durchgeführt wurden. Somit kann ein Eindimensionales Knotenmodell auch im Speicheralgorithmus zum Einsatz kommen. Da für den Anwendungsfall im SOCO-Tool keine internen Wärmetauscher und Zusatzheizungen notwendig waren wurde diese hinsichtlich der verkürzten Rechenzeit nicht in den Speicheralgorithmus implementiert.

Der entwickelte Speicheralgorithmus wurde in das SOCO Planungstool implementiert. Der Vorgang hierfür wird Kapitel 3.2 näher erläutert.

3.1.7 Effizienz von thermischen Energiespeichern

Die im Projekt betrachteten Industriespeicher wiesen unterschiedliche Be- und Entladungsstrategien auf und unterschieden sich auch hinsichtlich Anzahl und Art der vorhandenen Temperaturfühler. Somit ist ein direkter Vergleich zwischen den Speichern nur bedingt möglich. Um diese Speicher nun untereinander vergleichen zu können wurde ein Prüfzyklus generiert, welcher in Anlehnung an die prEN 12977-3:2008 (E) erstellt wurde. Mittels dieses Prüfzyklus ist es möglich die Speicher hinsichtlich ihrer Parameter (z.B. Dämmung, Kubatur) zu vergleichen. Die reale Betriebsweise der einzelnen Speicher hat einen entscheidenden Einfluss auf die Verluste, welche während der Speicherung entstehen. Um das Optimierungspotential der Speicher aufzuzeigen wurde jeder Speicher in der Simulation (basierend auf Messdaten) mit einem optimierten Speicher gleicher Größe verglichen.

<u>Berechnung der Effizienz</u>

Die Berechnung wurde nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik, dem Energieansatz, durchgeführt. Dabei ist nur die Kenntnis der Energien (Q) notwendig. Die Gesamteffizienz kann anhand einer Energiebilanz (Abbildung 13) ermittelt werden. In der Mitte ist die Änderung der gespeicherten Energie (ΔE), auf der linken Seite ist die zugeführte Energie (Q_{in}), auf der rechten Seite die entnommene Energie aus dem Speicher (Q_{out}) und die Speicherverluste (Q_{loss}) abgebildet.

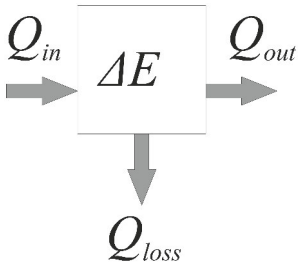


Abbildung 13: Energiebilanz eines thermischen Energiespeichers

Ausgehend von Abbildung 13 kann nun nach Dincer et al. (2002) die Effizienz (η^D) bestimmt werden. Diese Definition berücksichtigt den Energieinhalt zum Startzeitpunkt (E'_i) und auch den Energieinhalt zum Endzeitpunkt (E'_f).

$$\eta^D = \frac{\text{entnomme Energie + Energieinhalt}^{Endzeitpunkt}}{\text{zugeführte Energie + Energieinhalt}^{Startzeitpunkt}} = \frac{Q_{out} + E'_f}{Q_{in} + E'_i} \qquad \textbf{Gl. 7}$$

Ausgehend von (Gl. 7) kann auch für die einzelnen Betriebszustände eines thermischen Energiespeichers (Laden, Speichern und Entladen) die Effizienz bestimmt werden. Das Produkt der Periodeneffizienzen ergibt die Gesamteffizienz (Gl. 8).

$$\eta^D = \prod_{i=1}^{3} \eta_i^D \qquad \textbf{Gl. 8}$$

Detailliertere Ausführungen über die Periodeneffizienzen sind in Moser (2012) zu finden.

<u>Effizienz des Modellprozesses (Prüfzyklus)</u>

Das in der prEN 12977-3:2008 (E) vorgestellten Prüfverfahren dient zur Bewertung von Wasserspeicher thermischer Solaranlagen. Mit diesen Prüfverfahren ist es möglich Parameter zu generieren, welche zur Simulation eines Wasserspeichers (betrachtete Volumina: 0,05 m³ - 3 m³) benötigt werden. Diese Parameter umfassen das effektive Speichervolumen, die Wärmeverlustrate des gesamten Speichers, den Abbau der Temperaturschichtung während der Ruhephase und die Temperaturschichtung bei der

Entladung. Diese zu vermessenden Speicher weisen meist eine Vielzahl an Anschlüssen auf, wie Solarkreis (Wärmetauscher), Raumheizung, Trinkwasser und Kessel, wodurch eine Abschätzung dieser Parameter schwierig ist.

Dieser Prüfzyklus wurde in Richtung industriell genutzter Energiespeicher erweitert (Moser, 2012), sodass der Speicher (T_{init} = 20°C) bereits bei der ersten Beladung (DP1) mit 90 °C beladen wird bis am Austritt des DP1 ($T_{out,DP1}$) eine Temperatur von 85 °C erreicht wird (Abbildung 14). Nach einer kurzen Ruhephase von vier Stunden erfolgt die Entladung über DP2 (Eintrittstemperatur 20 °C). Die Entladung wird beendet, wenn die Austrittstemperatur ($T_{out,DP2}$) 25 °C unterschreitet. Nach diesem ersten Zyklus (Be- und Entladung) erfolgt eine Ruhephase von 11 Stunden. Nach der Ruhephase erfolgt ein weiterer Be- und Entladungszyklus, wobei bei diesem Zyklus die Dauer der Ruhephase 16 Stunden beträgt. Wenn dieser Zyklus beendet ist, beginnt eine Auskühlphase, welche aber in der Berechnung der Effizienzen nicht berücksichtigt wird.

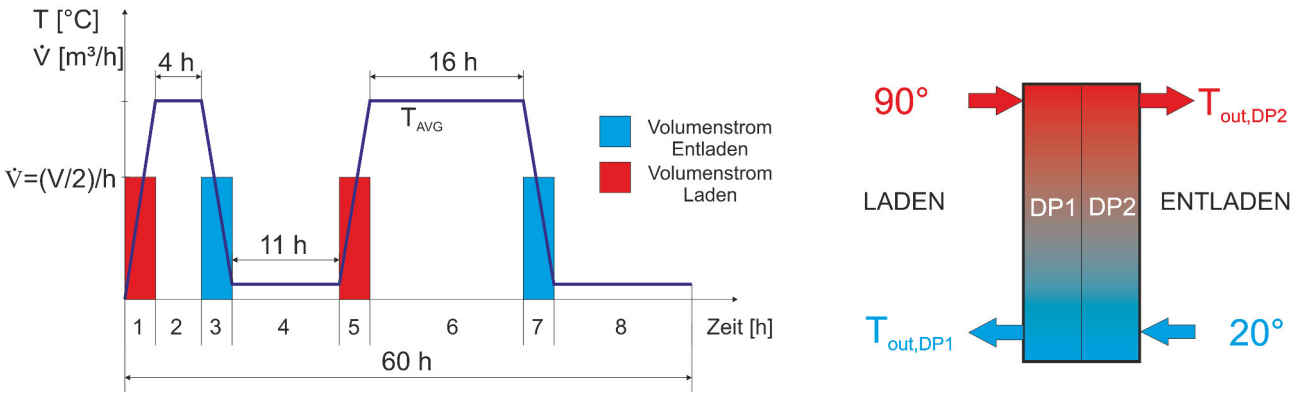


Abbildung 14: Prüfzyklus Speichertest für industriell genutzte Speicher (in Anlehnung an prEN 12977-3:2008 (E))

DP ..... Doppelanschluss ; -
T..... Temperatur ; °C
T_{avg} ..... Mittlere Temperatur im Speichers ; °C
T_{init}..... Initialisierungstemperatur des Speichers ; °C
V..... Speicherinhalt ; m³
V̇ ..... Volumenstrom ; m³/h

Um das mögliche Optimierungspotential eines Speichers aufzuzeigen, wurde bei der Berechnung der Effizienz zwischen einem realen Speicher und einem idealen Speicher unterschieden. Der reale Speicher entspricht einem Speicher mit den Parametern welcher bei der Simulation der Messdaten zum Einsatz kam. Der ideale Speicher weist dagegen folgende Änderungen auf:

- Schichtladeeinheit
- optimale Entnahmehöhen
- keine Anschlussverluste

- Dämmstärke festgelegt auf 20 cm

Die Ergebnisse aus den Simulationen mit diesem Prüfzyklus wurden mittels EXCEL ausgewertet. Dazu wurde im ersten Schritt die Änderung der Energie im Speicher (ΔE) mit den kumulativen Energien des Eintritts (Q_{in}), des Austritts (Q_{out}) und der Verluste (Q_{loss}) am Ende der Simulation überprüft, um eine etwaige Abweichung der Energiebilanz festzustellen. Durch die Ausgabe der austretenden Massenströme des Speichers in der Simulation konnte eine Aufteilung in Beladung, Entladung und Ruhephase durchgeführt werden. Daraus wurden die einzelnen Periodeneffizienzen gebildet. Ihr Produkt ergab die Gesamteffizienz. Kapitel 4.1.3 zeigt die Ergebnisse dieser Berechnungen.

Effizienz des realen Prozesses (Messdaten)

Zur Bestimmung der Effizienz des realen Prozess wurde in der Simulation mit den Messdaten der Speicher mit einem idealen Speicher (Schichtladung, optimale Entnahmehöhen, keine Anschlussverluste, einheitliche Dämmstärke 20 cm) verglichen. Da die Dauer der Messdaten der Speicher variierte wurde der Simulationszeitraum auf die kürzeste Dauer aller Messdaten (120 Stunden - Messzyklus der Speicher 6 und 7) begrenzt. Die Ergebnisse wurden mittels EXCEL ausgewertet und die Effizienzen bestimmt. Die Ergebnisse werden in Kapitel 0 dargestellt.

3.2 SOCO Planungstool

Das SOCO Planungstool besteht aus 2 Hauptmodulen:

- Vorschlag eines optimierten Speicher- und Wärmetauschernetzwerks:
  Der
- Der SOCO Optimierungs-Algorithmus.
  Der Algorithmus ist eine Kombination von
  - Speicheralgorithmus
  - Pinch-Algorithmus für variable Ströme
- Die Simulation von in Visio-Fließschemen gezeichneten Speicher- und Wärmetauscher-Netzwerken

3.2.1 Speicheralgorithmus

Der im Rahmen des Projektes erstellte Speicheralgorithmus (Moser, 2012) basiert auf den Ansatz eines Knotenmodells und wird nach dem Finiten Differenzen Verfahren explizit gelöst. Das Speichervolumen wird dabei in *N* vollkommen durchmischte Volumensegmente eingeteilt. Das Volumen jedes Segment bleibt, bei einer konstanten Füllhöhe, über die gesamte Simulationszeit konstant.

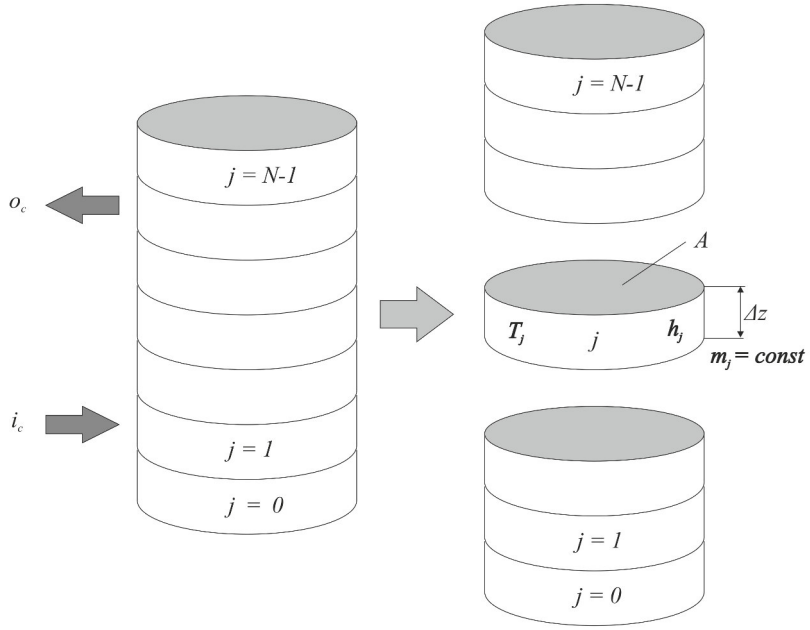


Abbildung 15: Ansatz eines Knotenmodell

Wenn sich das Füllvolumen des Speichers im Laufe der Zeit ändert, dann muss sich auch die Masse im letzten Knoten ändern. Dies muss im Modell durch einen internen Zeitschritt berücksichtigt werden, sodass die zugeführte Energiemenge den Energieinhalt des Knotens in diesem internen Zeitschritt nicht übersteigt. Zusätzlich muss nach jedem Simulationszeitschritt eine Anpassung der Masse im letzten Knoten erfolgen. Die maßgeblichen Wärmeströme sind in Abbildung 16 dargestellt.

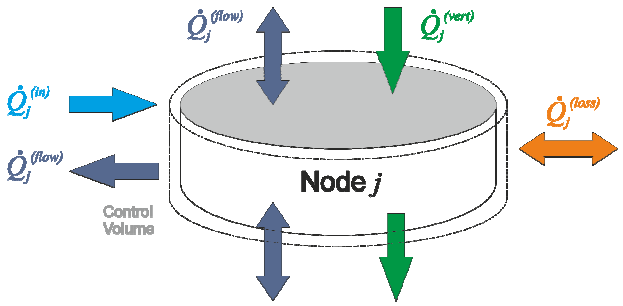


Abbildung 16: Energieströme im Knoten *j*

Die Energiebilanz lautet somit für jeden *j*-ten Knoten (explizit gelöst) (Gl. 9).

$$\sum \dot{Q}_j(t) = m_j \cdot \frac{h_j(t+\Delta t) - h_j(t)}{\Delta t} \qquad \textbf{Gl. 9}$$

Es treten folgende Energieströme am Knoten *j* auf (Gl. 10):

$$\sum \dot{Q}_j = \dot{Q}_j^{(in)} + \dot{Q}_j^{(flow)} + \dot{Q}_j^{(vert)} + \dot{Q}_j^{(loss)} \qquad \textbf{Gl. 10}$$

Der erste Energiestrom beschreibt den konvektiv zugeführten Energiestrom, welcher aus dem eintretenden Massenstrom und der Differenz zwischen der Enthalpie des eintretenden Stoffstroms und der Enthalpie des Eintrittsknotens berechnet wird (Gl. 11).

$$\dot{Q}_j^{(in)} = \sum_c \dot{m}_{c,in} \cdot \left[\left(h_{c,in} - h_j \right) \cdot \delta_{i_c,j} \right]$$
$$\delta_{i_c,j} = \begin{cases} 1 \text{ wenn } \mathrm{i}_c = j \\ 0 \text{ wenn } \mathrm{i}_c \neq j \end{cases} \qquad \textbf{Gl. 11}$$

Der zweite Energiestrom beschreibt den Wärmestrom innerhalb des Speichers wobei dieser mit dem resultierenden Massenstrom innerhalb des Speichers und der Differenz der Knotentemperatur entsprechend der Strömungsrichtung berechnet wird (Gl. 12).

$$\dot{Q}_j^{(flow)} = \left| \dot{m}_{j,res} \right| \cdot \left(h_{j-1} - h_j \right) \cdot \zeta_j + \left| \dot{m}_{j,res} \right| \cdot \left(h_{j+1} - h_j \right) \cdot (1 - \zeta_j)$$
$$\dot{m}_{j,res} = \sum_c \dot{m}_{c,j,i_c} + \sum_c \dot{m}_{c,j,o_c} \qquad \textbf{Gl. 12}$$
$$\zeta_j = \begin{cases} 1 \text{ wenn } \dot{m}_{j,res} > 0 \\ 0 \text{ wenn } \dot{m}_{j,res} \leq 0 \end{cases}$$

Die vertikale Wärmeleitung in einem Speicher kann durch die effektive Wärmeleitfähigkeit (λ_{eff}) beschrieben werden. Sie hat einen wesentlichen Einfluss auf die Schichtung in einem Speicher. λ_{eff} ist abhängig von der Geometrie, vom Material der Speicherwand, der Wärmedämmung und den zusätzlichen Einbauten im Speicher. Nach Drück (2006) ergibt sich für einen Speicher mit guter Wärmedämmung λ_{eff} näherungsweise zu (Gl. 13):

$$\lambda_{eff} = \frac{A_{Wasser} \cdot \lambda_{Wasser} + A_{Wand} \cdot \lambda_{Wand}}{A_{Wasser} + A_{Wand}} \qquad \textbf{Gl. 13}$$

Somit kann der Energiestrom durch vertikale Wärmeleitung aus der Differenz der Knotentemperaturen, der vertikalen Wärmeleitfähigkeit und dem Verhältnis zwischen Querschnittsfläche und Knotenhöhe bestimmt werden (Gl. 14).

$$\dot{Q}_j^{(vert)} = \lambda_{eff} \cdot \frac{A}{\Delta z} \cdot \left(T_{j+1} + T_{j-1} - 2 \cdot T_j\right) \qquad \textbf{Gl. 14}$$

Der letzte Energiestrom (Gl. 15) beschreibt den Wärmeverlust an die Umgebung und wird aus der Wärmedurchgangszahl, der wärmeabgebenden Oberfläche sowie der Temperaturdifferenz zwischen der Umgebungs- und der Knotentemperatur berechnet. Die zusätzlichen Wärmeverluste werden direkt mit dem *UA*-Wert des Knotens addiert.

$$\dot{Q}_j^{(loss)} = \left(U \cdot A\right)_{loss,j} \cdot \left(T_{amb} - T_j\right) \qquad \textbf{Gl. 15}$$

Indizes:

A ..... Fläche ; m²
h ..... Enthalpie ; kJ/(kgK)
N..... Anzahl der Speicherknoten ; -
Q ..... Energie ; kWh
Q ..... Wärmeleistung ; kW
t ..... Zeit ; h
T ..... Temperature ; °C
U ..... Wärmedurchgangszahl
Δz ..... Höhe des Knotens ; m
λ ..... Wärmeleitfähigkeit ; W/mK
δ ..... Schalter für Einlassknoten
ζ..... Schalter für Strömungsrichtung
amb..... Umgebung (ambient)
c ..... Anschlussnummer (Port)
$const$ ..... Konstant
d ..... Richtung des Wärmeflusses
$flow$..... Wärmefluss durch Konvektion
i ..... Knoten des Eintrittsmassenstroms
in ..... Eintretend
j ..... Knoten
$loss$ ..... Verluste an Umgebung
o ..... Knoten des Austrittsmassenstroms
res..... Resultierend
$vert$ ..... Vertikale Wärmeleitung

3.2.2 Adaptierter Pinch Algorithmus für variable Prozessströme

In der bestehenden PE[2] Software konnte nur mit statischen Betriebsdaten gerechnet werden. Die Lastprofile wurden in einem adaptierten Time Slice Modul dargestellt. Dies bedingte eine Simplifizierung der Prozessparameter und in weiterer Folge einen Verlust an Information, da zum Beispiel bestimmte Lastspitzen nicht berücksichtigt werden konnten.

Der Algorithmus wurde so weiterentwickelt, dass die zeitlich variierenden Lastprofile nicht mehr in Abschnitte (Time Slice Modul) unterteilt sondern das Wärmetauscher- und Speichernetzwerk mit realen Lastprofilen in voller zeitlichen Auflösung dimensioniert werden.

Das erlaubt eine völlige freie Wahl des Simulationszeitraums, sowie der Zeitschrittweite. Zum Beispiel wurden folgende Kombinationen im Zuge des Projekts getestet bzw. sind denkbar und durchführbar.

Tabelle 3: Mögliche Definition der Auflösung der Stromdaten

	Simulationszeitraum	Zeitschrittweite	Zeitschritte	Anwendung
Auflösung I	1 Jahr	1 Stunde	8760	Ganzjährige Simulationen bei vor allem saisonalen Produktionsunterschieden, starker Außentemperaturabhängigkeit oder Integration von Solarthermie
Auflösung II	2-3 Wochen	1-10 Minuten	2016-30240	Simulation des Speicher- und WT-Netzwerkes in einer typischen Produktionswoche mit Berücksichtigung des Wochenendes
Auflösung III	1 Tag	1 Sekunde	86400	Detailanalyse von Be- und Entladungsvorgänge eines Speichers

Der Pinch-Algorithmus identifiziert für jeden heißen Strom den passenden kalten Strom, wobei der Wärmeübertrag über den ganzen Simulationszeitraum berücksichtigt wird. Welcher Strom der passendste ist, wird durch 3 Kriterien bewertet (Energie, Exergie und Leistung). Zunächst wird ein Wärmetauschernetzwerk vorgeschlagen, dass vereinfachte Speicher mitberücksichtigt. Die Verschränkung mit dem Speicheralgorithmus passiert später und wird im nächsten Punkte beschrieben.

3.2.3 Der SOCO Algorithmus

Der SOCO Optimierungs-Algorithmus wurde mit der in Kapitel 2.4.2 dargestellten Methodik und Vorgehensweise entwickelt. Es vereint die beiden zuvor vorgestellten „Speicheralgorithmus“ und „Pinch-Algorithmus“.

Abbildung 17 zeigt den SOCO Algorithmus zum Vorschlag eines optimierten Wärmetauscher- und Speichernetzwerkes. Die blauen Kästchen beschreiben den adaptierten Pinch-Algorithmus der die besten Kombinationen von heißen und kalten Strömen definiert und in jedem Zeitschritt die direkt (über WT) und indirekt (über Speicher) übertragbare Energie berechnet. Die roten Kästchen beschreiben dann, wie für das vorgeschlagene Netzwerk die Speicher im Detail ausgelegt werden, was auf den zuvor beschriebenen Speicher-Algorithmus basiert. Das am besten bewertete Speicher- und Wärmetauscher-Netzwerk wird schließlich vorgeschlagen.

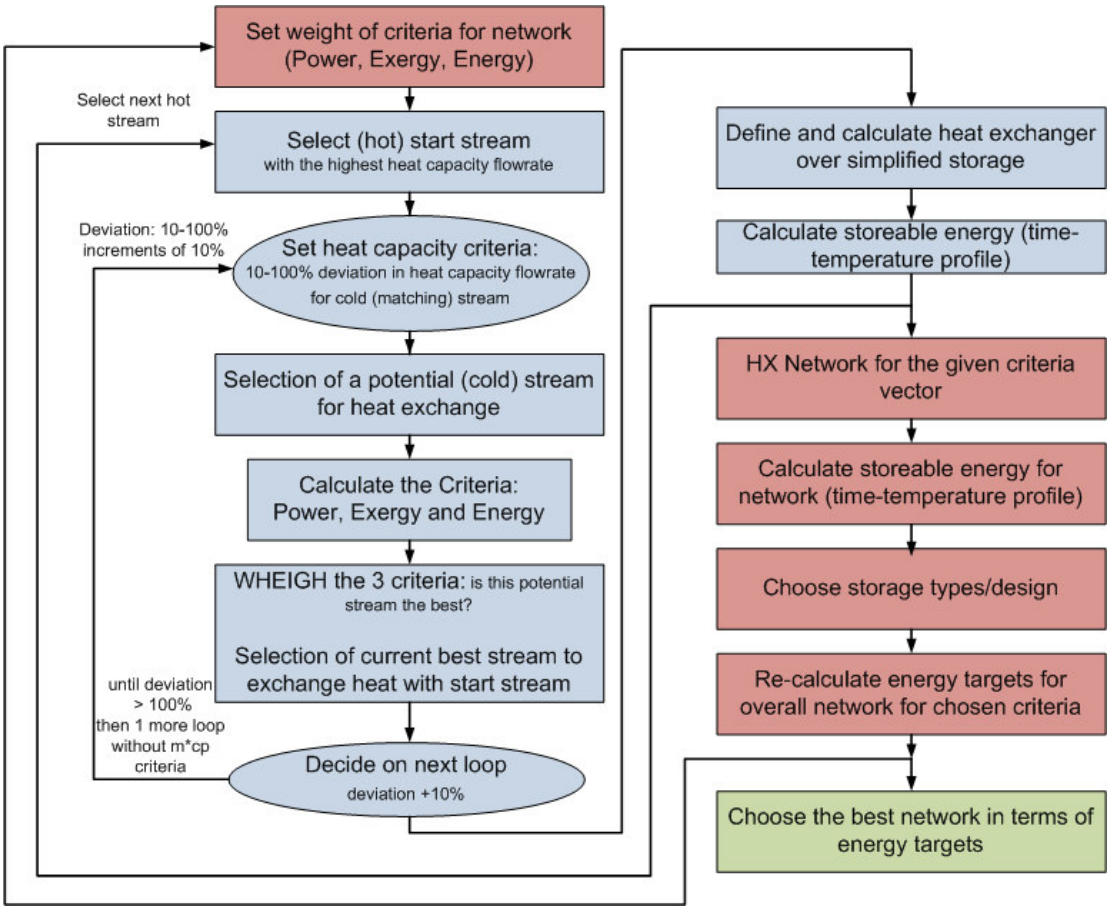


Abbildung 17: SOCO Algorithmus zum Vorschlag eines optimierten Wärmetauscher- und Speichernetzwerkes

3.2.4 Programmierung des Planungstools

Die Entwicklung des SOCO Tools wurde an die Firma Bongfish GmbH über den vorgesehenen Werkvertrag vergeben. Diese Vergabe erfolgte zum einen aufbauend auf guten Erfahrungen mit der Firma sowie deren Erfahrung in der Entwicklung von Benutzeroberflächen und mathematischen Algorithmen und ihrem fundierten Zugang zur Materie.

Die methodische Herangehensweise der Programmierung wurde in Kapitel 2.4.2 erläutert. Inhaltliche umfasste die Programmierung folgende Hauptfeatures:

- Darstellung des theoretischen maximalen Wärmerückgewinnungspotenzials durch die Pinch-Kurven sowohl in Übersichtsform als auch in jedem Zeitschritt
- Implementierung des SOCO-Algorithmus zum Vorschlag eines optimierten Wärmetauscher- und Speichernetzwerks
- Integration einer Visio™-Zeichenfläche und Definition von Visio™-Icons zum Designen von Wärmetauscher- und Speichernetzwerken
- Simulation des gezeichneten Wärmetauscher- und Speichernetzwerks
- Ansprechende Aufbereitung der Benutzeroberfläche und Bedienung
- Ergebnisdarstellungen, Import- und Exportfunktionen

3.2.5 Verbesserung des Planungstools auf Basis der Fallstudien

Basierend auf den durchgeführten Fallbeispielen (Kapitel 3.3) wurden mögliche Verbesserungen identifiziert, vorgeschlagen und implementiert. Neben der Verifizierung der Korrektheit der Ergebnisse wurde auch die einfache Anwendbarkeit und die Benutzerfreundlichkeit überprüft und Adaptionen vorgenommen um die Akzeptanz bei zukünftigen Usern zu heben. Die durchgeführten Maßnahmen umfassen folgende Bereiche:

- Adaption der Simulation des gezeichneten Speicher- und Wärmetauscher-Netzwerkes
- Verbessertes Informationsmanagement bei unzureichender Dateneingabe
- Identifikation von ungültigen Konfigurationen im Visio™-Fließschema
- Selbsterklärendes und intuitives Handling des Tools, Strukturierung der Arbeits-Abläufe
- Verbesserungen der Benutzeroberflächen (Diagramme, Zahlenformate, etc.)

3.3 Fallstudien – Anwendung SOCO Planungstool

Basierend auf der in Kapitel 2.4.2 beschriebenen Vorgehensweise wurden 3 Fallbeispiele mit Speichersystem in Betrieben aus folgenden Sub-Sektoren untersucht:

- Molkerei
- Brauerei
- Fernwärme

Dabei wurden Optimierungsmaßnahmen für die Fallstudien entwickelt und Maßnahmen zur Energieeffizienz und Einbindung erneuerbarer Energie technisch und wirtschaftlich geprüft.

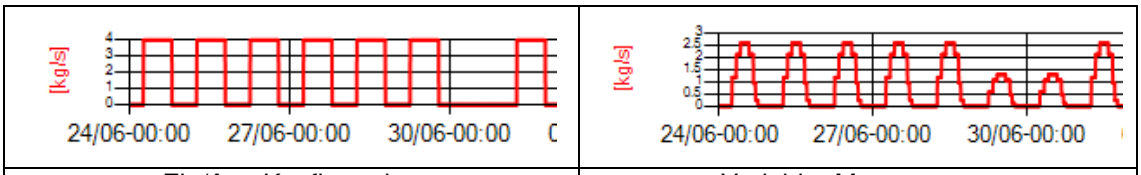
3.3.1 Datenaufnahme und Darstellung Status Quo

Die Stromdaten des jeweiligen Fallbeispiels werden in eine Excel™-Vorlage eingetragen. Jeder Strom wird in ein eigenes Arbeitsblatt eingetragen, wobei für jeden die gleiche Zeitschrittweite definiert werden muss. Notwendig ist Start- und Endtemperatur, Massenfluss und spezifische Wärmekapazität (Abbildung 18). Die Enthalpie wird automatisch berechnet.

time dependent						
date	Start Temperature	End Temperature	mass flow m	specific heat capacity cp	specific enthalpy h	Enthalpy H
	[°C]	[°C]	[kg/s]	[kJ/kg.K]	[kJ/kg]	[kW]
24.06.2013 15:40:00	6,00	70,00	-	3,77	0	-
24.06.2013 15:50:00	6,00	70,00	-	3,77	0	-
24.06.2013 16:00:00	6,00	70,00	6,68	3,77	241,28	1.611,75
24.06.2013 16:10:00	6,00	70,00	6,68	3,77	241,28	1.611,75

Abbildung 18: Excel™-Vorlage für den Stromimport

Abbildung 19 zeigt die Darstellung der Ströme in SOCO nachdem sie eingelesen wurden.



Ein/Aus-Konfiguration	Variabler Massenstrom

Abbildung 19: Eingelesene Stromdaten in SOCO

Das bestehende Wärmerückgewinnungsnetzwerk (Status Quo) kann mit den zur Verfügung gestellten Icons des implementierten Visio™-Flowsheets gezeichnet werden (Abbildung 33).

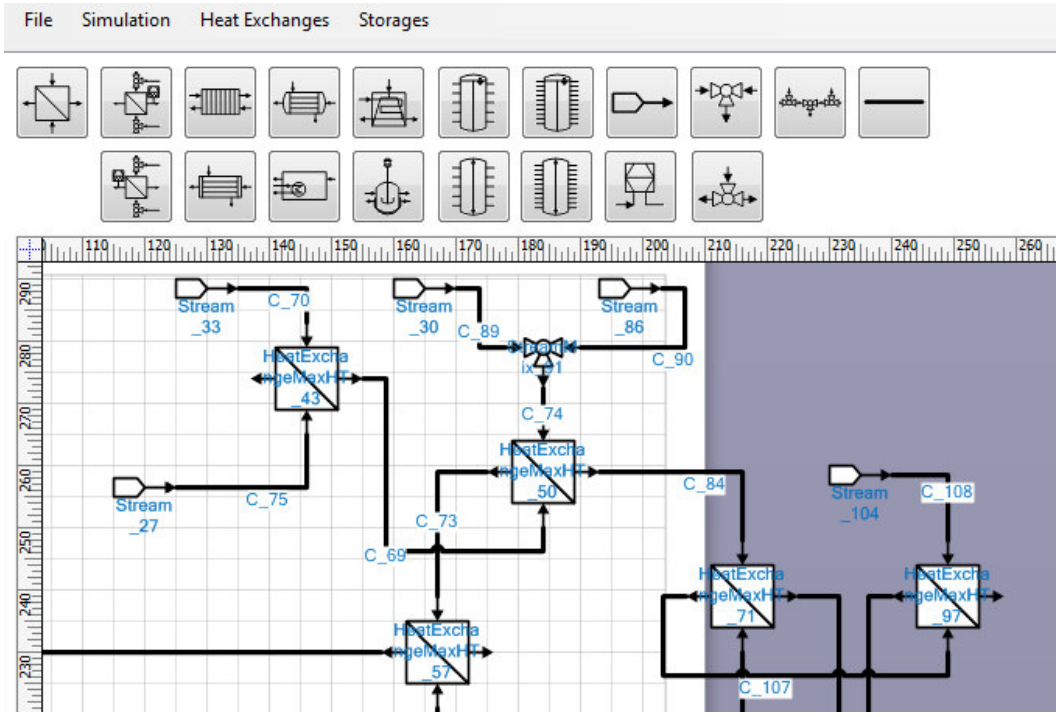


Abbildung 20: VisioTM-Flowsheet

Die bestehenden Speicher und Wärmetauscher müssen zuvor definiert werden (Abbildung 21 und Abbildung 22) um dann mit dem Visio™-Flowsheet verknüpft werden zu können.

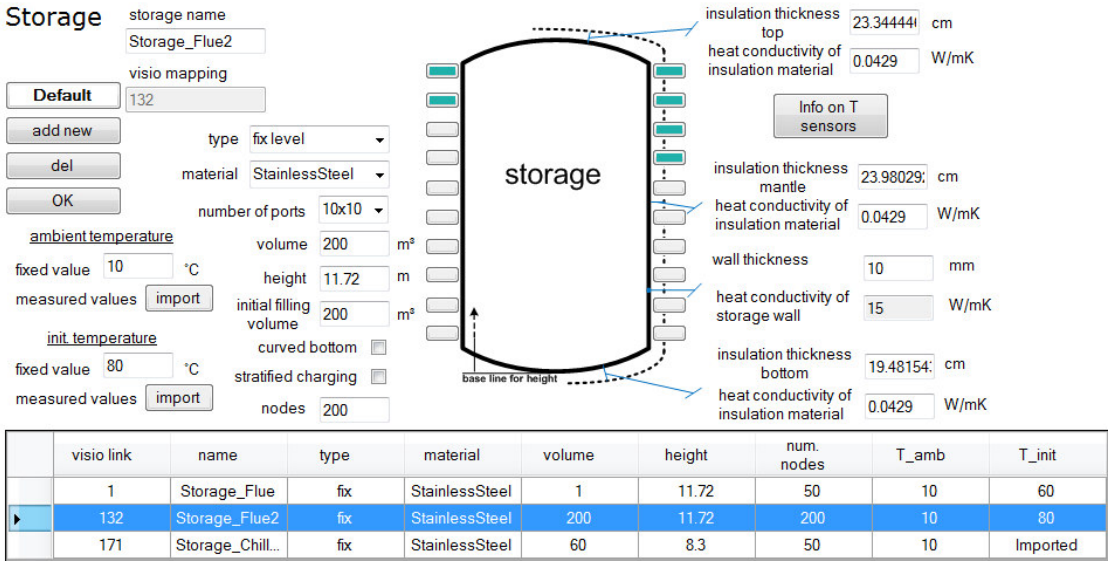


Abbildung 21: Definition Speicher

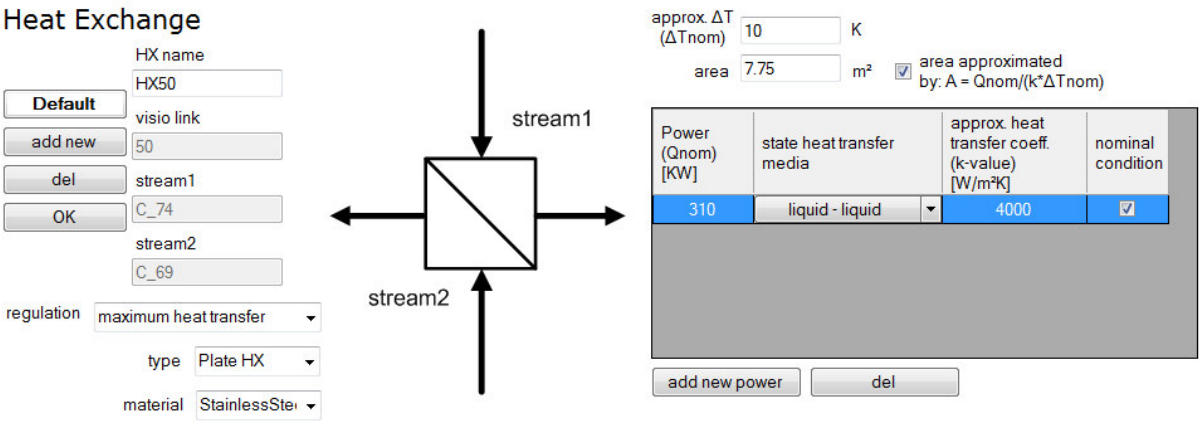


Abbildung 22: Definition Wärmetauscher

3.3.2 Optimiertes Wärmekonzept

Basierend auf den definierten Strömen der Fallbeispiele, kann mit dem SOCO-Algorithmus ein Speicher- und Wärmetauscher-Netzwerk vorgeschlagen werden. Abbildung 23 zeigt welche Parameter variiert werden können um das Ergebnis des Vorschlages zu beeinflussen.

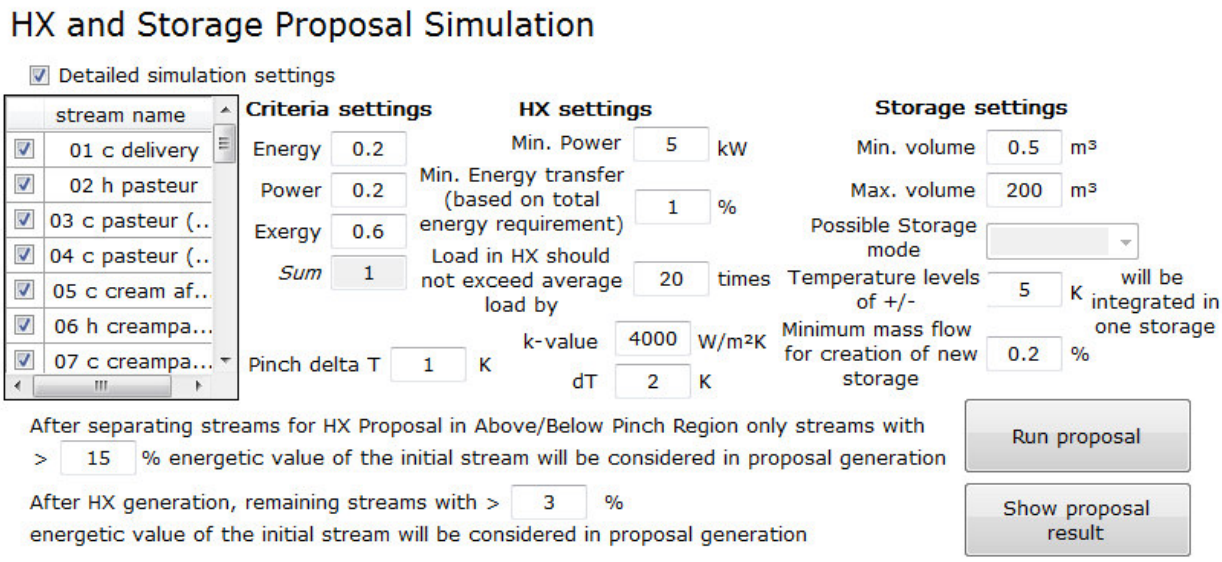


Abbildung 23: Parameter für die Erstellung eines Wärmetauscher- und Speicher-Netzwerkes basierend auf den SOCO-Algorithmus

Für die Erstellung der Fallbeispiele wurden mehrere Vorschläge generiert um ein tieferes Verständnis für die möglichen Wärmeintegrationsmaßnahmen zu bekommen. Auch können manche Kombinations-Vorschläge abgelehnt werden, da sie aufgrund von nicht im Programm definierbaren Gründen nicht sinnvoll sind (z.B. Kombination von Rauchgas-Abwärme mit Lebensmittelströmen). SOCO erlaubt dem User entsprechende Einflussnahme und bietet Entscheidungsgrundlagen für die Kombination von mehreren kleineren Speichern zu einem großen. Abbildung 24 zeigt das Speicherdiagramm, das für jeden Speicher anzeigt in welchen Temperaturbereichen die Be- und Entladung erfolgt.

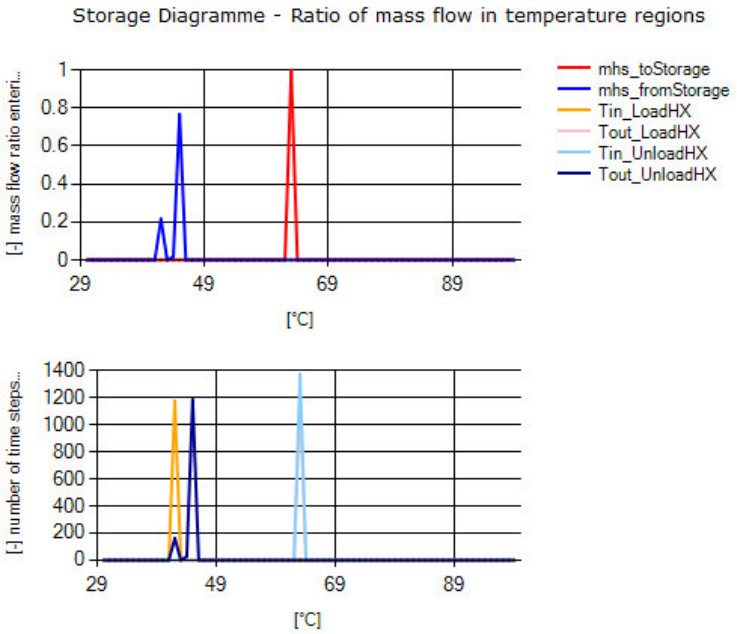


Abbildung 24: Speicherdiagramme – Anteil des Massenflusses der Be- und Entladungen in Temperaturbereichen

Die vom User für sinnvoll erachteten Wärmetauscher und Speicher können – wie in Abbildung 25 dargestellt – ausgewählt werden. Dadurch werden sie automatisch in die entsprechenden Arbeitsbereiche übernommen (siehe die bereits vorgestellten Arbeitsbereiche in Abbildung 21 und Abbildung 22). Während für den Status Quo die Anlagen noch gänzlich neu definiert werden mussten, wurden nun die Werte aus dem SOCO-Vorschlag eingetragen und können – bei Bedarf – vom User adaptiert werden. Die voreingetragenen Werte basieren auf den Analysen der 10 vermessenen Speicher (Kapitel 3.1)

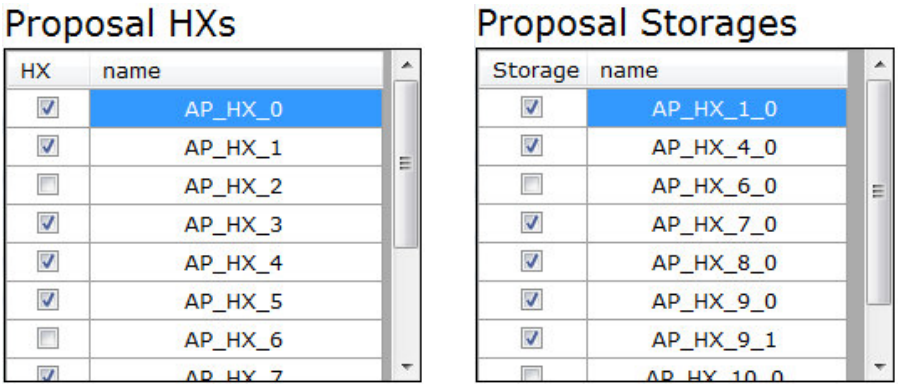


Abbildung 25: Auswahl der vorgeschlagenen Wärmetauscher und Speicher

Wie schon für den Status Quo kann das nun optimierte Speicher- und Wärmetauscher-Netzwerk im Visio™-Flowsheet gezeichnet und simuliert werden. Die Ergebnisse der Simulation können auf unterschiedlichen Ebenen eingesehen werden (siehe Kapitel xxx) und wurden in Excel™-Spreadsheets weiterverarbeitet und mit den Ergebnissen des Status Quos verglichen.

3.3.3 Optimierungspotential durch das Planungstool (Ökonomische Bewertung)

Die Einsparungen durch das designte, optimierte Speicher- und Wärmetauscher-Netzwerk wurde den dadurch entstandenen Kosten in einer ökonomischen Bewertung gegenübergestellt. Der methodische Ansatz wurde in Kapitel 2.4.3.3 erläutert.

Die Kosten setzen sich aus Wärmetauscher, Speicher und eventuell Solaranlagen zusammen. Die Kosten für die Wärmetauscher wurden von der FISCHER GMBH berechnet (exemplarische Berechnung - Abbildung 26). Die Kosten für die Speicher wurden von JOANNEUM RESEARCH ermittelt. Die Kosten für die etwaige Integration von solarer Prozesswärme basierte in 2 von 3 Fallbeispielen auf entsprechende Vorstudien der AEE INTEC. Für das Fernwärme-Beispiel wurde keine Solarintegration untersucht.

FISCHER
Maschinen- u. Apparatebau GmbH
Linke Bahnzeile 22
2483 Ebreichsdorf
Austria / Europe

Kunde	AEE INTEC	
Projekt	SOCO	
Datum	17.09.2013	
Angebotsnr.		Herbert Fischer
Berechnungsnr.	HE8860 05b_cooking mash 1	

(1) **E60OFG6-1.4301/0,5-**

water			**mash**		
35 m³/h		ΔT_m = 15,8 °C	**141,42 m³/h**		
95,6 °C → 77 °C		$f\Delta T_m$ = 1	**67 °C → 72,1 °C**		
c	4,20 kJ/kgK	**Q = 735,7 kW**	c_2	3,60 kJ/kgK	
ρ	0,97 kg/dm³	A = 22,8 m²	ρ	1,02 kg/dm³	
λ	0,670 W/mK	A_{res} = 111,54 %	λ	0,600 W/mK	
η	0,34 mPas	**U = 4320 W/m²K**	η	0,85 mPas	
1 x 19 (0)		⇆	**1 x 20 (0)**		**+ 1 = 40**
0,36 m/s			1,38 m/s		
α = 7910 W/m²K	**Δp = 0,07 bar**		**α = 13986 W/m²K**	**Δp = 0,96 bar**	

24	Platten Mat Kosten	00 €	00 €	00 €
1	SL Gestell	00 €	00 €	00 €
			00 €	**00 €**

Abbildung 26: Ökonomische Bewertung Wärmetauscher

Für die Wärmetauscher- und Speicher-Kosten wurden jeweils Kostenkurven ermittelt um auch für weitere Studien auf diese Informationen zurückzugreifen. Die durch das Netzwerk umgesetzten Energieeinsparungen werden mit den individuellen Wärmepreisen der Fallbeispiele monetisiert. Dadurch kann eine Wirtschaftlichkeitsrechnung durchgeführt werden.

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

4.1 Evaluierung bestehender Speichersysteme

4.1.1 Datenerhebung

Die in Tabelle 4 angeführten Speicher wurden für die Evaluierung bestehender Speichersysteme herangezogen.

Tabelle 4: Vermessene Speicher

Bezeichnung	Speichertyp	Anwendung
Speicher 1	Heißwasserspeicher	Brauerei
Speicher 2	Energiespeicher	Brauerei
Speicher 3	Heißwasserspeicher	Fernwärme
Speicher 4	Heißwasserspeicher	Fernwärme
Speicher 5	Heißwasserspeicher	Fernwärme
Speicher 6	Heißwasserspeicher	Fernwärme
Speicher 7	Heißwasserspeicher	Fernwärme
Speicher 8	Heißwasserspeicher	Fernwärme
Speicher 9	Heißwasserspeicher	Fernwärme
Speicher 10	Heißwasserspeicher	Fernwärme

4.1.2 Grundlagen zur Entwicklung des Speicheralgorithmus

Die in den Kapiteln 3.1.2 bis 3.1.6 dargestellten Arbeiten dienten als Grundlage zur Entwicklung des Speicheralgorithmus für SOCO. Der entwickelte Speicheralgorithmus wurde in das SOCO Planungstool implementiert. Der Vorgang hierfür wird in Kapitel 3.2 näher erläutert.

4.1.3 Effizienz von thermischen Energiespeichern

Die Effizienz der thermischen Energiespeicher wurde zum einen anhand eines Modellprozesses berechnet und zum anderen basierend auf den realen Daten der Prozesse.

<u>Effizienz des Modellprozesses (Prüfzyklus)</u>

In der **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist zu erkennen, dass die im idealen Fall (Schichtladung, optimale Entnahmehöhen, keine Anschlussverluste, einheitliche Dämmstärke 20 cm) die Gesamteffizienz in großem Maße vom Volumen bestimmt ist (Speicher 3 größtes Volumen, Speicher 9 kleinstes Volumen (20 m³)). Speicher 6 (25 cm Dämmstärke), Speicher 8 (~40 cm Dämmstärke) und Speicher 10 (~60 cm Dämmstärke) wiesen größere Dämmstärken auf als die angenommene Dämmstärke (20 cm) für den idealen Fall. Der Speicher 2 (10 cm Dämmstärke) weist bedingt durch die Annahmen in der Simulation (Anschlussverluste) eine große Differenz zum idealen Fall auf. Die

Anschlussverluste sind beim Speicher 4 (20 cm Dämmstärke) und Speicher 5 (25 cm Dämmstärke) besonders ausgeprägt.

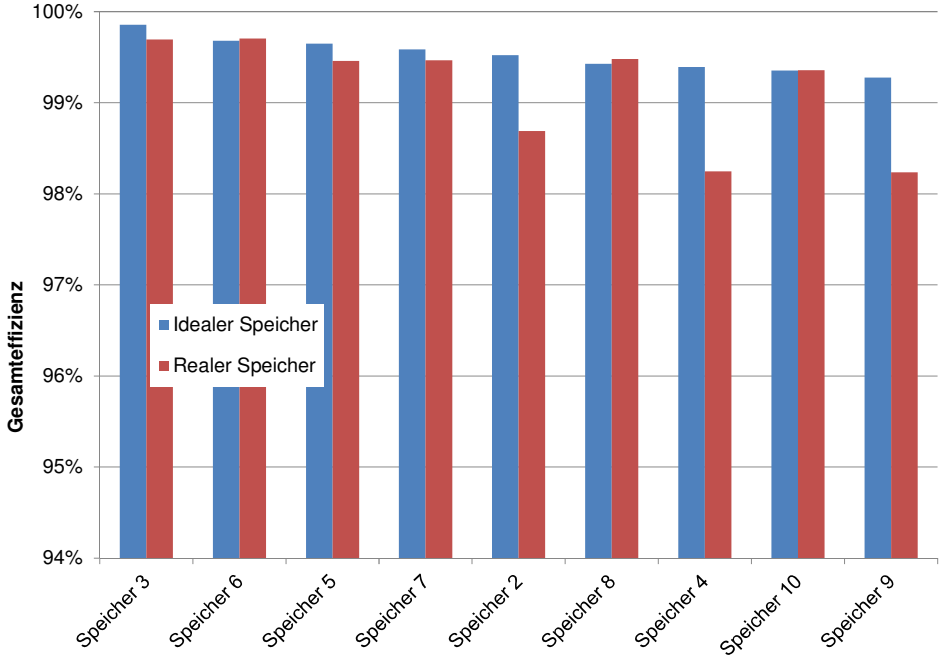


Abbildung 27: Gesamteffizienz Prüfzyklus ; reale – ideale Speicher

Auch der Speicher 3 wies eine Differenz auf, welche hauptsächlich auf die geringe Dämmstärke (12 cm) zurückzuführen ist. Der Speicher 9 (15 cm Dämmstärke) konnte in der Simulation, aufgrund der unzureichenden Datenlage, nicht nachgebildet werden. Seine Parameter wurden zwar ermittelt, konnten jedoch nicht mit der Messung validiert werden. Die Gesamteffizienz in Abhängigkeit vom Füllvolumen zeigt Abbildung 28**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**. Es lässt sich die Tendenz erkennen, dass mit steigendem Füllvolumen die Effizienz steigt. Dies kann auf die Verluste zurückgeführt werden.

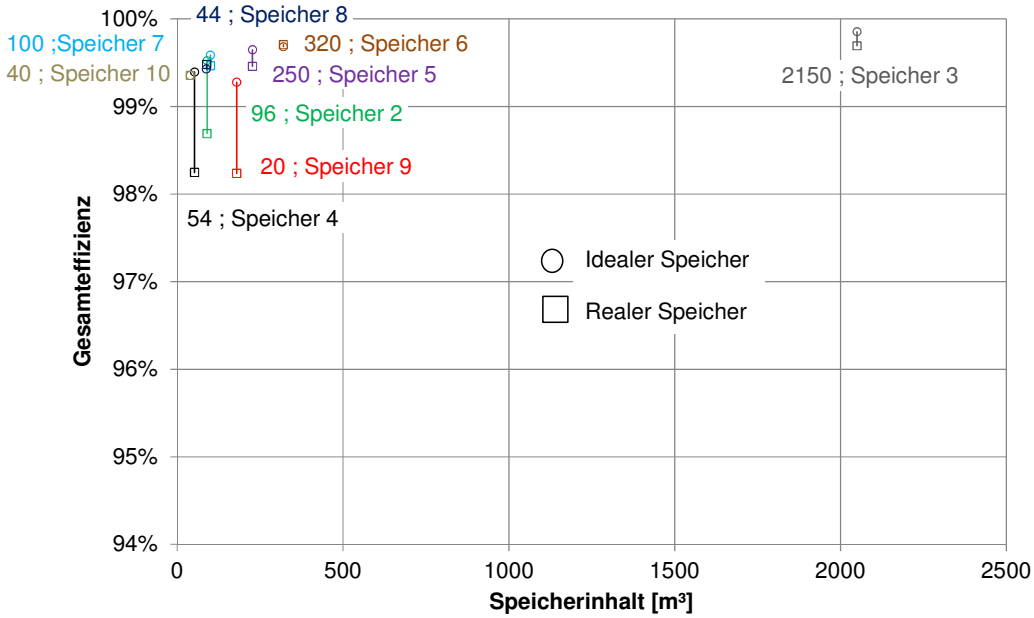


Abbildung 28: Gesamteffizienz Prüfzyklus ; reale – ideale Speicher vs. Füllvolumen

<u>Effizienz des realen Prozesses (Messdaten)</u>

Da nun die reale Betriebsweise in die Berechnung der Gesamteffizienz einfließt, kann nur die Differenz zwischen dem realen und dem idealen Speicher verglichen werden und nicht die Differenz der Speicher untereinander. Die Ergebnisse der Anlagensimulation sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt. Es zeigte sich, dass beim Speicher 2 die Verluste während der Auskühlphase die Effizienz maßgeblich beeinflussten. Beim Speicher 4 zeigte sich, dass durch die häufige Beladung die Verluste eine geringere Rolle spielten im Vergleich zum idealen synthetischen Prüfzyklus**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** davor. Der Effekt der Be- und Entladung ist auch am Speicher 10 zu erkennen, wies er doch nur eine Stillstandszeit von zwei Minuten über die gesamte Simulationszeit (120 Stunden) auf. Die Verluste der Speicherphase konnten somit die Gesamteffizienz nur unwesentlich beeinflussen.

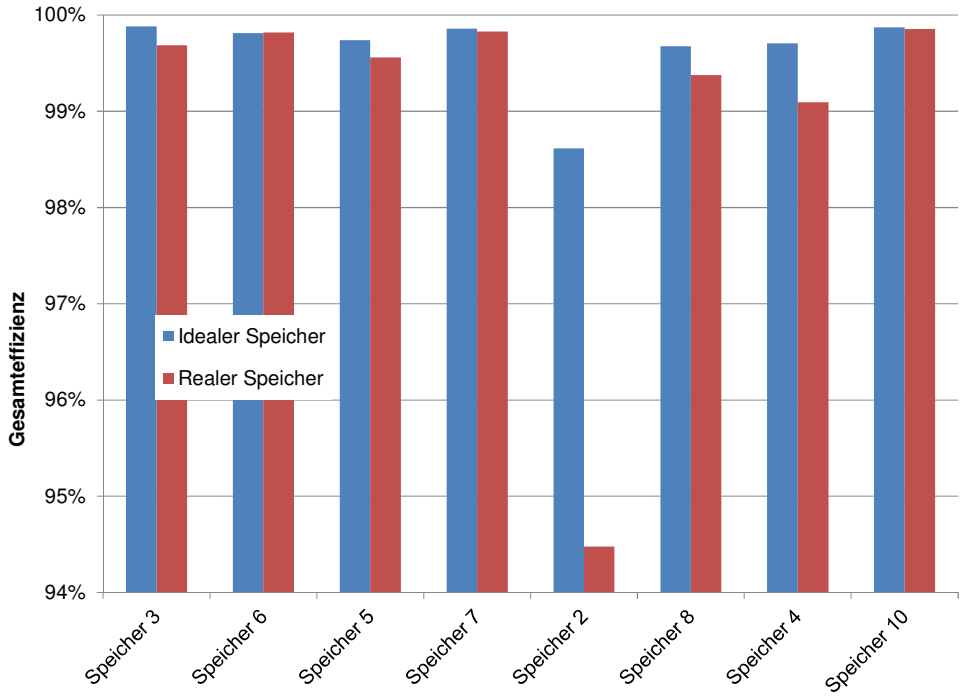


Abbildung 29: Gesamteffizienz Realer Prozess ; reale – ideale Speicher

Die Gesamteffizienz in Abhängigkeit vom Füllvolumen (Abbildung 30**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) gibt ein ähnliches Ergebnis, wie schon zuvor der Prüfzyklus (Abbildung 28**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) wieder. Jedoch führt nun die reale Betriebsweise (Sommer- oder Winterbetrieb, kontinuierlicher – oder diskontinuierlicher Betrieb) bei den Speichern zu einer Verschiebung der Ergebnisse (vor allem für den Speicher 2 in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** deutlich zu erkennen).

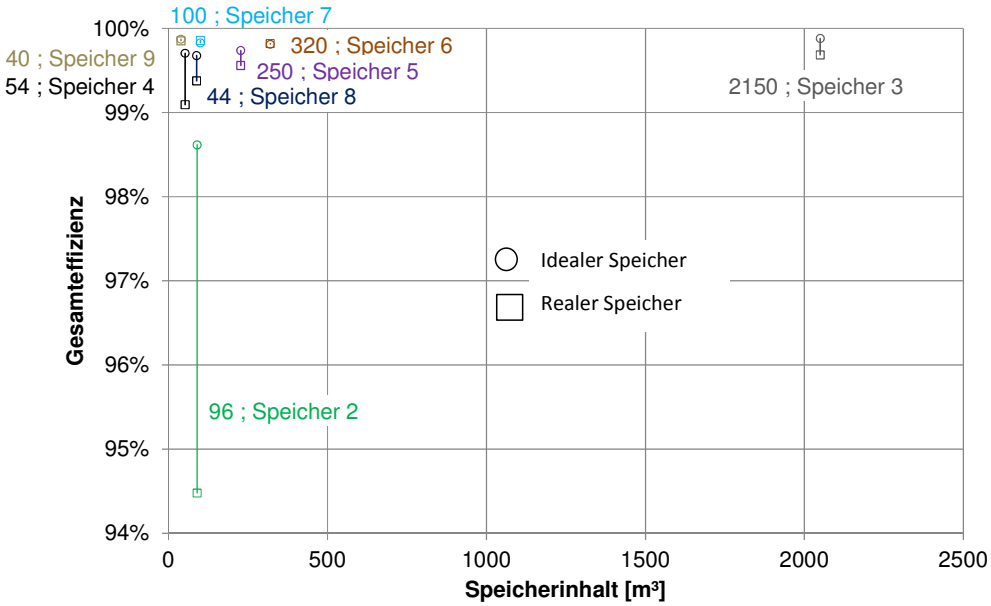


Abbildung 30: Gesamteffizienz Realer Prozess ; reale – ideale Speicher vs. Füllvolumen

<u>Bewertungen der berechneten Effizienzen</u>

Die unterschiedlichen realen Betriebsweisen der einzelnen Energiespeicher erlaubte keine Bewertung der Effizienzen untereinander. Deshalb wurde ein idealer Prüfzyklus, in Anlehnung an die prEN 12977-3:2008 (E) erstellt, welcher nur den Speicher (ohne Verrohrung) berücksichtigt. Dadurch war es möglich einen Vergleich zwischen den einzelnen Speichern darzustellen. Es konnte die Abhängigkeit der Effizienz von der Dämmstärke, den Anschlusshöhen, sowie den Anschlussverlusten durch einen Vergleich mit einem optimal ausgeführten Speicher aufgezeigt werden. Daraus konnte für den jeweiligen Speicher auf das mögliche Optimierungspotential geschlossen werden. Welchen großen Einfluss die Dämmung auf die Effizienz hat, wurde am Beispiel des Speicher 2 (10 cm Dämmung) deutlich. Im idealen Prüfprozess wich die Effizienz des Speichers 2 bereits merklich vom optimalen Fall ab, was im realen Betrieb durch die längere Auskühlphase noch deutlicher zu erkennen war. Die berechneten Effizienzen im idealen Prüfprozess wiesen generell, im optimalen Fall, eine deutliche Verbesserung mit steigenden Speichervolumen auf.

4.2 Fallstudien – Anwendung SOCO Planungstool

Als Fallstudien dienten eine Molkerei, eine Brauerei und ein Fernwärme-Beispiel. Kapitel 2.4.3 zeigte die methodische Herangehensweise bei der Erstellung und Durchführung der Fallbeispiele. Kapitel 3.3 gibt einen Einblick in die dafür notwendigen Schritte. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Analysen präsentiert.

4.2.1 Molkerei

4.2.1.1 Datenaufnahme und Status Quo

Die Molkerei produziert Käse, Milch, Topfen, Butter und Molke. Insgesamt wurden für die Molkerei 35 Ströme definiert die entweder gekühlt (hot stream) oder erhitzt (cold stream) werden müssen. Die Daten basieren auf Vorstudien der AEE INTEC, bei denen auch der zeitliche Ablauf der Prozesse in der Molkerei analysiert wurde. Die Ströme wurden zumeist als On/Off-Streams definiert. Bei zirka einem Drittel der Ströme variierend Temperatur und/oder Massenstrom auch während des aktiven Betriebes.

Abbildung 31 zeigt den Status Quo der Wärmerückgewinnung in der Molkerei. Die Kondensatströme wärmen Käsemilch vor und werden dann in zwei Speicher (hier als ein kumulierter Speicher dargestellt) gesammelt und später zur Vorwärmung des Kesselspeisewassers verwendet. Die Käsemilch wird weitervorgewärmt durch einen internen WT.

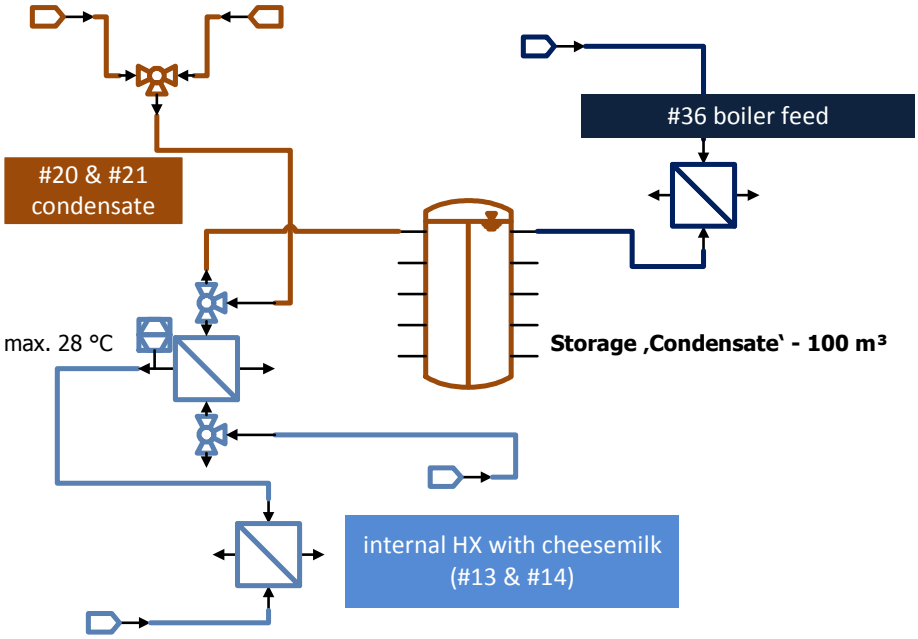


Abbildung 31: Status Quo Wärmerückgewinnung der Molkerei

4.2.1.2 Optimiertes Wärmekonzept

Basierend auf den definierten Strömen, wurde ein Wärmetauscher- und Speichernetzwerk-Vorschlag generiert. Dabei wurden 17 Wärmetauscher mit 9 Speicher vorgeschlagen, wobei SOCO die mögliche Kombination von einigen Speichern mit ähnlichem Temperaturniveau anzeigt.

Abbildung 32 zeigt das entwickelte optimierte Wärmekonzept basierend auf den generierten Vorschlag. Die 3 Speicher wurden aus den vorgeschlagenen Speicher abgeleitet und so in das Netzwerk integriert, dass sie auf verschiedenen Temperaturniveaus betrieben werden können (Tabelle 5).

Tabelle 5: Definierte Speicher in Molkerei

Storage Name	Storage Size	Outlet temperature at biggest consumer	
		Highest	Average
	[m³]	*[°C]*	*[°C]*
Storage HT	200	137	100
Storage MT	20	64	54
Storage LT	50	28	27

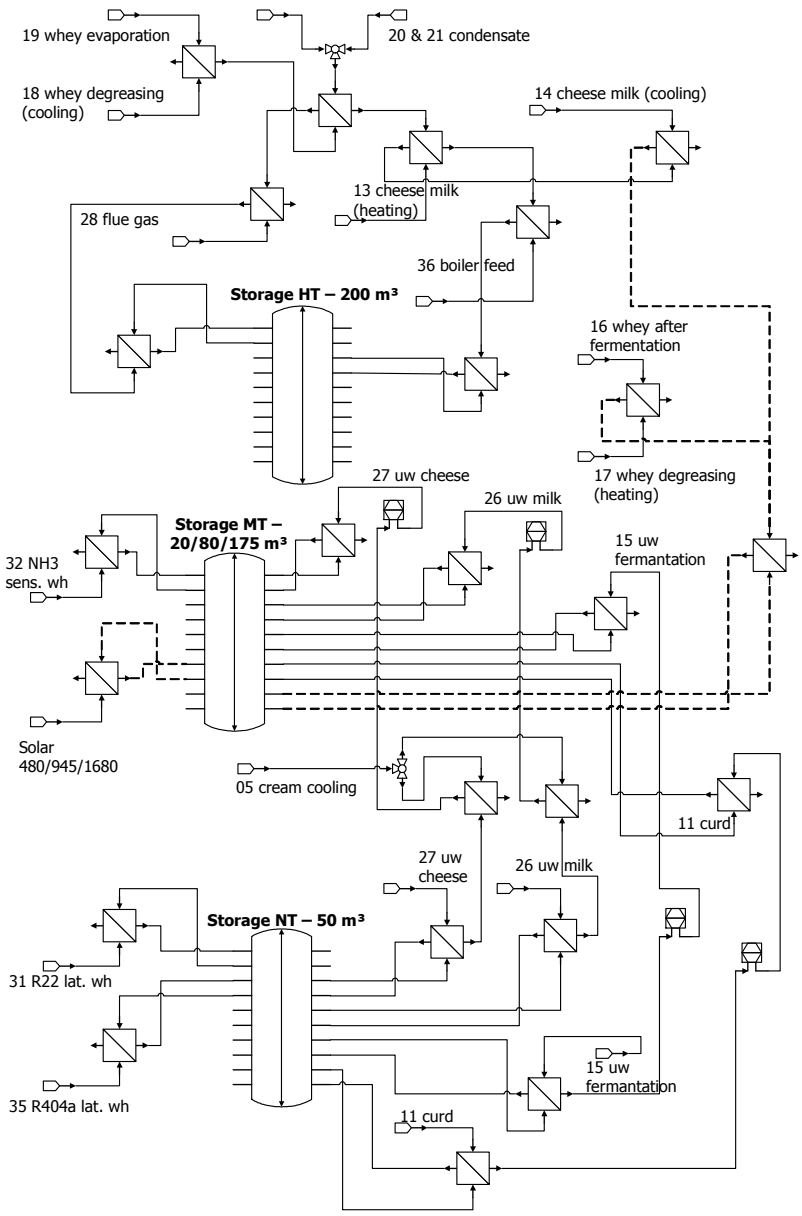


Abbildung 32: Optimiertes Wärmetauscher- und Speicher-Netzwerk für die Molkerei

Tabelle 6 zeigt das Ergebnis der Simulation des optimierten Wärmekonzepts. Die Wärmequelle können entweder heiße Ströme oder Entladungen von den Speichern sein. Als Wärmesenke dienen kalte Ströme und ebenfalls die Speicher. Die Wärmeverluste der Speicher sind ebenfalls angegeben. Der ‚total heat transfer' ist die Summe aller Wärmeüberträge der Wärmetauscher, allerdings kann nur die direkte Wärmeintegration (zwei Prozessströme) und das Entladen aus dem Speicher zur effektiven Wärmerückgewinnung gezählt werden.

Tabelle 6: Simulationsergebnisse Molkerei

HX-ID	Wärmequelle	Wärmesenke	Wärmeübertrag
			[MWh]
43	18 c whey degreasing	19 h whey evapor	1,205
50	20 & 21 condensate	19 h whey evapor	1,738
57	28 flue gas	19 h whey evapor	2,660
71	20 & 21 condensate	13 h cheesemilk	626
97	14 c cheesemilk	13 h cheesemilk	2,090
122	28 flue gas	Storage HT	2,083
174	32 wh NH3	Storage MT	183
175	Storage LT	27 h uw cheese	90
182	Storage LT	26 h uw milk	39
189	Storage LT	15 h uw ferment	142
196	Storage LT	11 h curd	225
202	20 & 21 condensate	36 boiler feed	309
216	35 wh R404a	Storage LT	180
223	31 wh R22	Storage LT	316
259	16 c whey aft ferment	17 h whey degreasing	1,758
280	Storage HT	36 boiler feed	2,266
317	Storage MT	27 h uw cheese	74
324	Storage MT	26 h uw milk	32
331	Storage MT	15 h uw ferment	59
338	Storage MT	11 h curd	9
399	05 c cream after milkpasteur	26 h uw milk	73
406	05 c cream after milkpasteur	27 h uw cheese	170
Speicherverluste		Storage HT	25
		Storage MT	14
		Storage LT	6
Gesamter Energieübertrag			16,327
Direkte Wärmeintegration			10,629
Speicherbeladungen			2,762
Speicherentladungen			2,936
Gesamte Speicherverluste			45
Gesamter effektiver Wärmeübertrag (Direkt + Entladung)			**13,565**

Für das Molkerei-Beispiel wurde die Integration von 3 verschieden großen Solarthermie-Anlagen untersucht, um den verbleibenden Energiebedarf mit erneuerbaren Energiequellen zu decken. Tabelle 7 zeigt das Ergebnis dieser Untersuchung.

Tabelle 7: Bewertung Solarintegrations-Varianten

Strom name	Solar-ertrag	Beladung in Speicher	Wirkungsgrad Beladung	Reduzierte Wärmeintegration von Abwärme		Speicher-größe
	[kWh]	*[kWh]*	*[%]*	*[kWh]*	*[%]*	*[m³]*
41 Solar 480	18.538	18.006	97,1	141	1,3	80
42 Solar 945	36.395	35.508	97,6	123	1,2	80
43 Solar 1680	64.976	62.914	96,8	4,542	43,5	175

Abbildung 33 zeigt die Gegenüberstellung der Energiebilanzierung über den Solarspeicher (Storage NT in Abbildung 32) für die verschiedenen Integrationsvarianten. Der Speicher wird ursprünglich nur durch die Abwärme der Kälteanlage beladen (32 wh NH3). Bei den beiden kleineren Solaranlagen kommt es zu keiner Verdrängung der Abwärmenutzung, bei der größten Solaranlage kommt es jedoch – aufgrund des Lastprofils des dominierenden Wärmeabnehmers – zu einer Reduktion der Abwärmenutzung um 43,5 %.

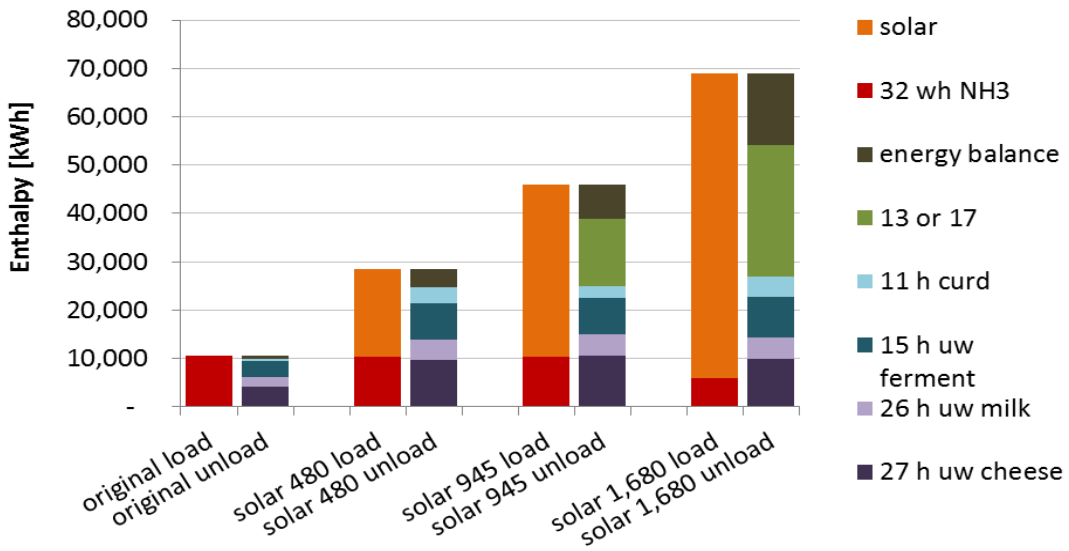


Abbildung 33: Energiebilanz Solarintegration Molkerei

4.2.1.3 Optimierungspotential durch das Planungstool (Ökonomische Bewertung)

Weiters wurde untersucht, wie sich die Variierung des minimalen ΔT der WT auf die Wärmeübertragung und dadurch auf die gesamten Energieeinsparungen auswirkt. Da dadurch gleichzeitig die WT-Fläche und damit die WT-Kosten sinken, kann eine Optimierung des ΔTs vorgenommen werden. Die ΔT der WT wurde auf 2, 5 und 10 Kelvin gesetzt, simuliert und ökonomisch bewertet. Die

Optimierungsvorschläge für die Fallstudie Molkerei amortisieren sich bereits innerhalb des ersten Jahres (siehe Abbildung 34, Abbildung 35 und Abbildung 36).

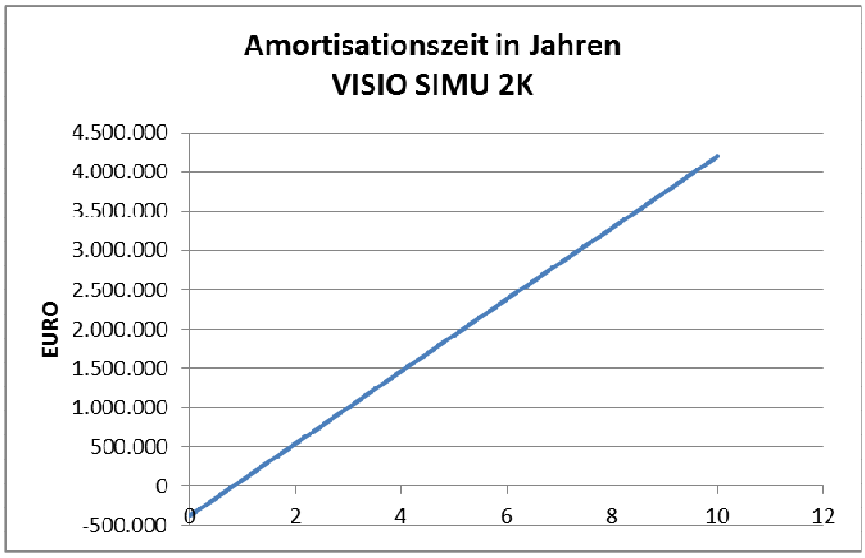


Abbildung 34: Amortisationszeit Fallstudie Molkerei, Optimierungsvorschlag „VISIO SIMU 2K“

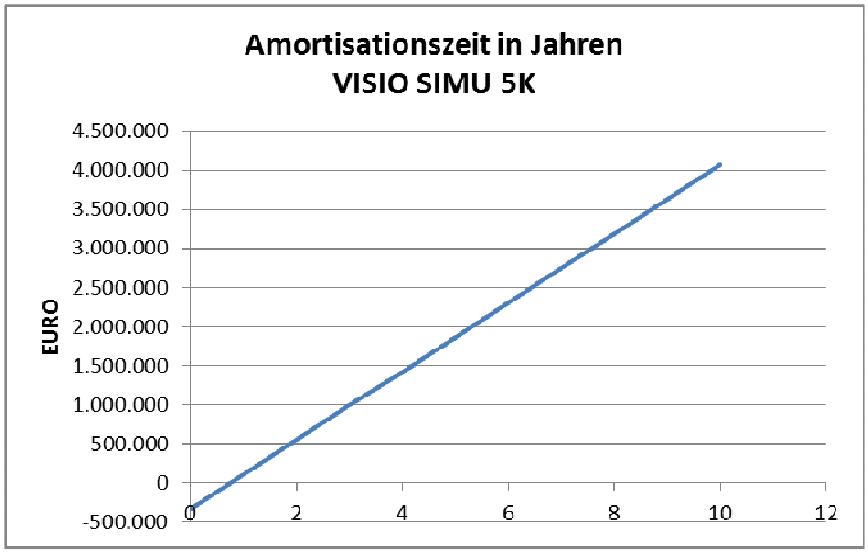


Abbildung 35: Amortisationszeit Fallstudie Molkerei, Optimierungsvorschlag „VISIO SIMU 5K“

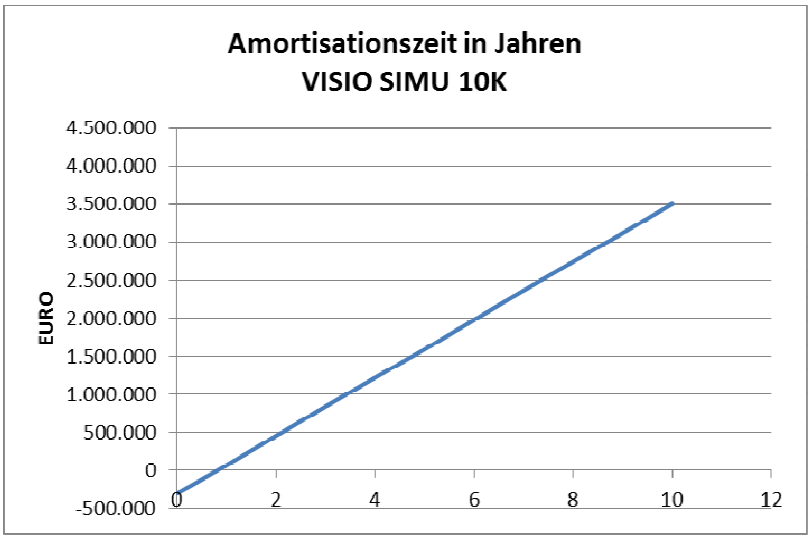


Abbildung 36: Amortisationszeit Fallstudie Molkerei, Optimierungsvorschlag „VISIO SIMU 10K“

4.2.2 Brauerei

4.2.2.1 Datenaufnahme und Status Quo

Die Brauerei produziert verschiedene Sorten Bier, wobei sich der Brauprozess von der energetischen Seite soweit ähnelt, dass er für die Fallbeispiele als konstant angenommen werden kann. Es wurden 25 heiße und kalte Ströme definiert, die größtenteils auf Messungen vor Ort basieren, durchgeführt von AEE INTEC im Zuge von früheren Studien.

Abbildung 37 zeigt den Status Quo der Wärmerückgewinnung der Brauerei. Die Abwärme der Würzekühlung wird für die Brauwasser im Brauhaus sowie für weitere Wasserbedarfe in der Flaschenabfüllanlage verwendet. Ein Teil des Bedarfs muss durch Dampf gedeckt werden.

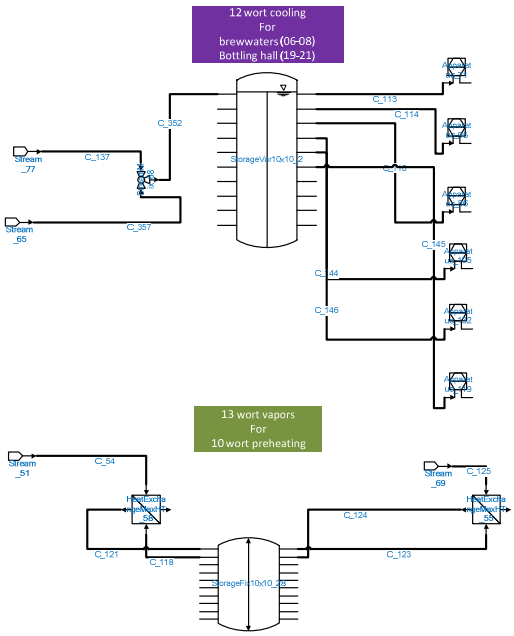


Abbildung 37: Status Quo Wärmerückgewinnung der Brauerei

4.2.2.2 Optimiertes Wärmekonzept

Nach der Abbildung des Status Quo wurde mit sämtlichen Strömen und den in Abbildung 38 sichtbaren Einstellungen das Proposal erstellt.

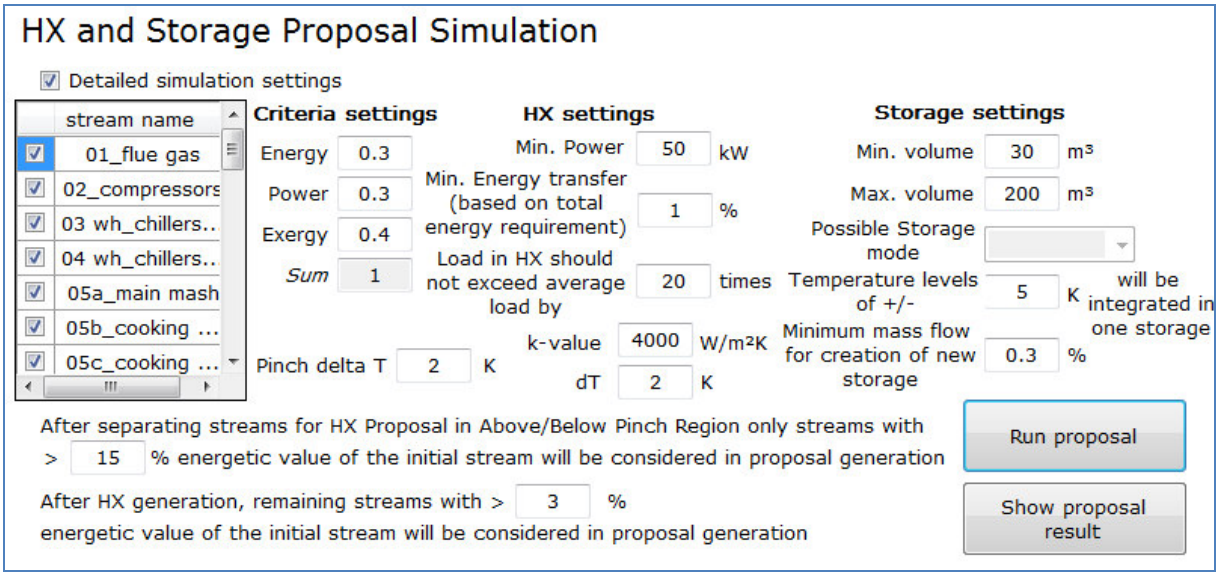


Abbildung 38: Proposal Parameter Brauerei

Das SOCO Proposal schlägt 15 WT mit 12 Speicher vor. Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, werden nicht alle vorgeschlagenen WT und Speicher übernommen, sondern müssen sich einer kritischen Analyse unterziehen. Dies beinhaltet Einflussfaktoren die fallspezifisch sind. SOCO unterstützt den User bei diesen Entscheidungen, zum Beispiel bei der möglichen Kombination von mehreren Speichern. Bei dem Brauerei-Beispiel wurde darauf geachtet, die bestehenden Speicher – wenn sinnvoll – auch im optimierten Konzept zu verwenden. Weiters wurde die örtliche Distanz zwischen den einzelnen Prozessen mitberücksichtigt.

Auf Basis dieser Überlegungen und nach der Simulation von verschiedenen Varianten wurden die in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** und **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellten Versionen festgelegt. Bei der ersteren Variante wird die Abwärme der Kältemaschinen in einem Energiespeicher geladen. Bei der zweiten Variante wird derselbe Strom in einen Speicher mit variabler Füllhöhe geleitet. Dies wurde auch deshalb festgelegt, um die Unterschiede der beiden, in SOCO definierbaren, Speichertypen zu vergleichen.

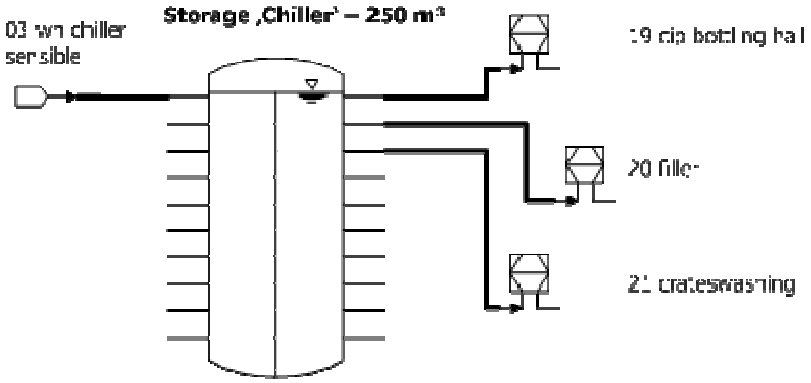


Abbildung 39: Optimiertes Wärmekonzept Brauerei (wie Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, aber mit Speicher ‚Var Chiller' statt ‚Fix Chiller')**

Tabelle 8 und Tabelle 9 zeigen die Ergebnisse für die beiden Varianten.

Tabelle 8: Simulation Brauerei – ‚Fixed Chiller'

HX/Stream ID	Heat source	Heat sink	Heat transfer *[MWh/a]*	
			Simulated	Adapted
Storage 'Brewwater'				
HX 105	12_wort cooling	10_wort preheating	1,786	
ST 366	12_wort cooling	St_Brewwater	8,184	
ST 357	Hot Utility	St_Brewwater	2,157	1,508
ST 113	St_Brewwater	06_mash water	4,201	3,965
ST 114	St_Brewwater	07 sparge water	3,970	3,744
ST 116	St_Brewwater	08 cip water	1,985	1,864
Storage 'Wort'				
HX 58	13 wort vapors	St_Vapors	1,170	
HX 55	St_Vapors	05a_main mash	607	
HX 126	St_Vapors	05b_cooking mash1	431	
HX 156	St_Vapors	05c_cooking mash2	136	
Storage 'Fix Chiller'				
HX 233	03 wh_chillers_sens	St_Chiller	768	
HX 288	23_wh sewage brewing h	St_Chiller	538	
HX 226	St_Chiller	19_cip bottling hall	267	
HX 275	St_Chiller	20_filler	26	
HX 140	St_Chiller	21 crateswashing	1,069	
Heat losses				
	Heat losses Brewwater		119	
	Heat losses Wort		43	
	Heat losses Chiller		23	

Tabelle 9: Simulation Brauerei – ‚Var Chiller'

HX/Stream ID	Heat source	Heat sink	Heat transfer *[MWh/a]*	
			Simulated	Adapted
Storage 'Var Chiller'				
ST 394	03 wh_chillers_sens	St_Chiller	2,090	2,090
ST 425	St_Chiller	19_cip bottling hall	286	286
ST 426	St_Chiller	20_filler	35	35
ST 427	St_Chiller	21_crateswashing	1,722	1,083
Heat loss				36

Tabelle 10 zeigt den Vergleich der beiden Varianten für das optimierte Wärmekonzept der Brauerei.

Tabelle 10: Vergleich Variante ‚fix chiller' und ‚var chiller' – Fallbeispiel Brauerei

Comparison	Energy value [MWh/a]	
	Fixed level chiller	Variable level chiller
Gesamter Energieübertrag	23,046	23,874
Hot Utility	1,508	1,508
Direkte Wärmeintegration	1,786	1,786
Speicherbeladungen	10,659	11,444
Speicherentladungen	10,601	10,644
Gesamte Speicherverluste	185	836
Gesamter effektiver Wärmeübertrag (Direkt + Entladung)	**12,386**	**12,429**

4.2.2.3 Optimierungspotential durch das Planungstool (Ökonomische Bewertung)

Aus den Optimierungsvorschlägen für die Fallstudie Brauereiergaben sich Amortisationszeiten zwischen 4,5 und 5,5 Jahren (siehe Abbildung 41 und Abbildung 40)

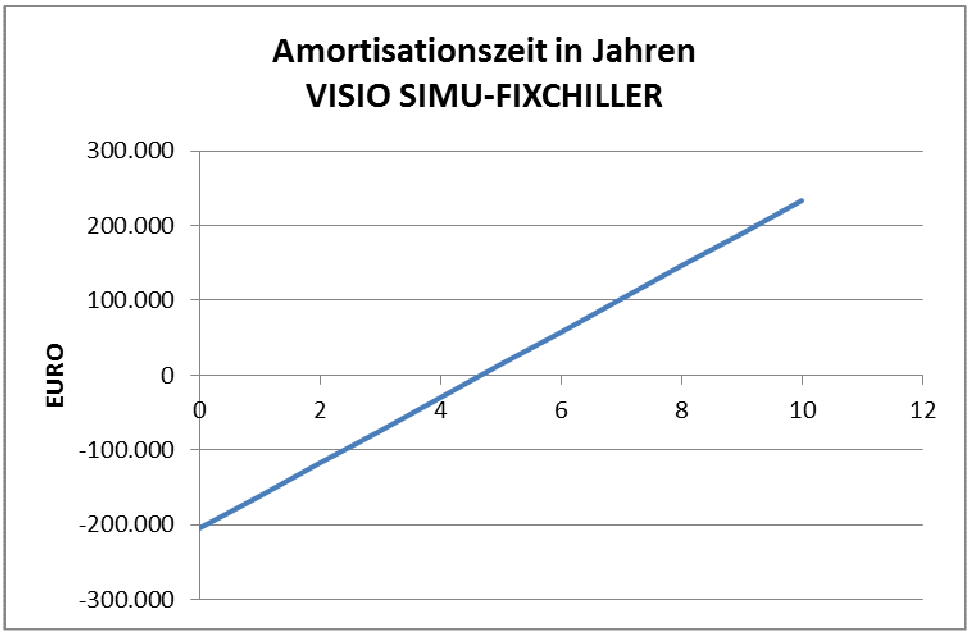


Abbildung 40: Amortisationszeit Fallstudie Brauerei, Optimierungsvorschlag „Fix Chiller“

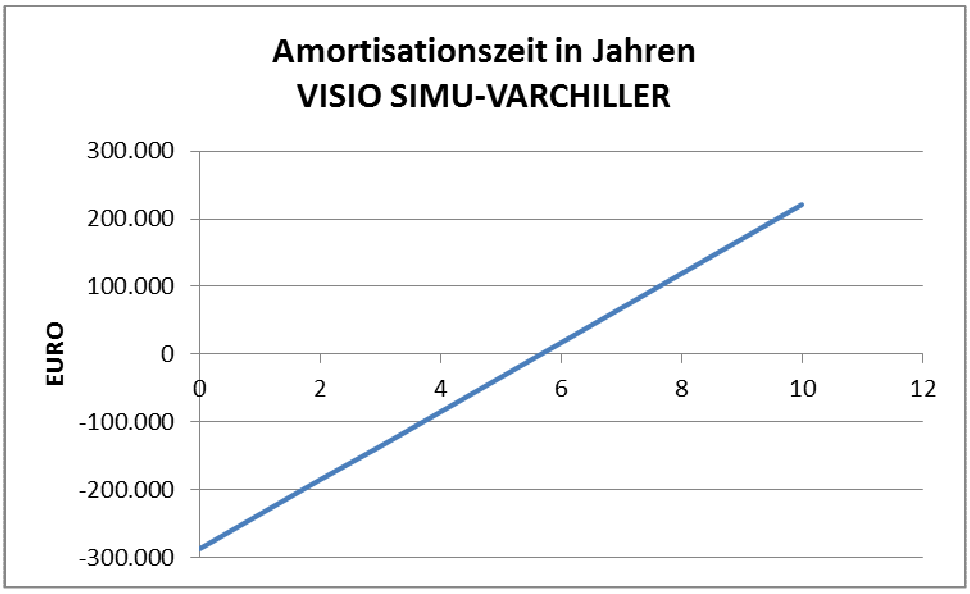


Abbildung 41: Amortisationszeit Fallstudie Brauerei, Optimierungsvorschlag „Var Chiller“

4.2.3 Fernwärme

4.2.3.1 Datenaufnahme und Status Quo

Für das Fernwärme-Fallbeispiel wurde eine Anlage mit 2 bereits vermessenen Speichern gewählt. Die Messdaten dieser 2 existierenden Speicher standen zur Verfügung. Untersuchungsgegenstand war die Identifikation der idealen Speicherkonfiguration und -größe. Bekannt waren die Ströme in und aus den Speichern. Die Optimierung der einzelnen Speicher auf Basis dieser differenzierten Ströme wurde untersucht, aber auch die mögliche Kombination zu einem Speicher.

Der Status Quo ist ein großer Speicher mit 250 m³ und ein kleinerer Speicher mit 54 m³. Die Speicher wurden auch mit diesen Größen simuliert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 angeführt.

4.2.3.2 Optimiertes Wärmekonzept

Das Proposal wurde mit den in Abbildung 42 angezeigten Parametern erstellt. Zunächst mit den differenzierten Strömen (Stromdaten für beide existierende Speicher getrennt) und dann mit den kombinierten Strömen (Stromdaten der beiden Speicher zu einem Strom gemischt).

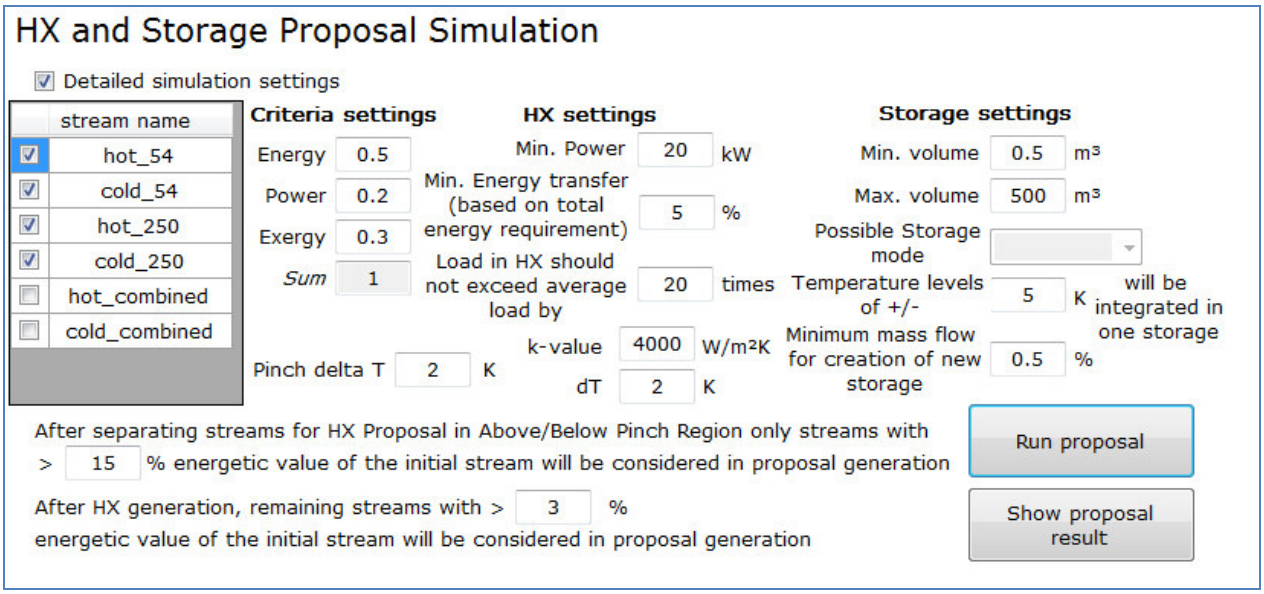
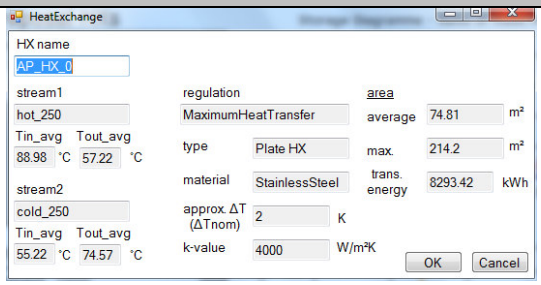
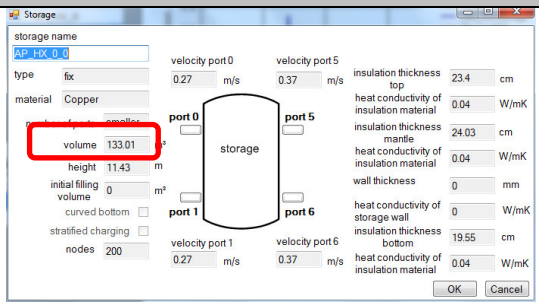
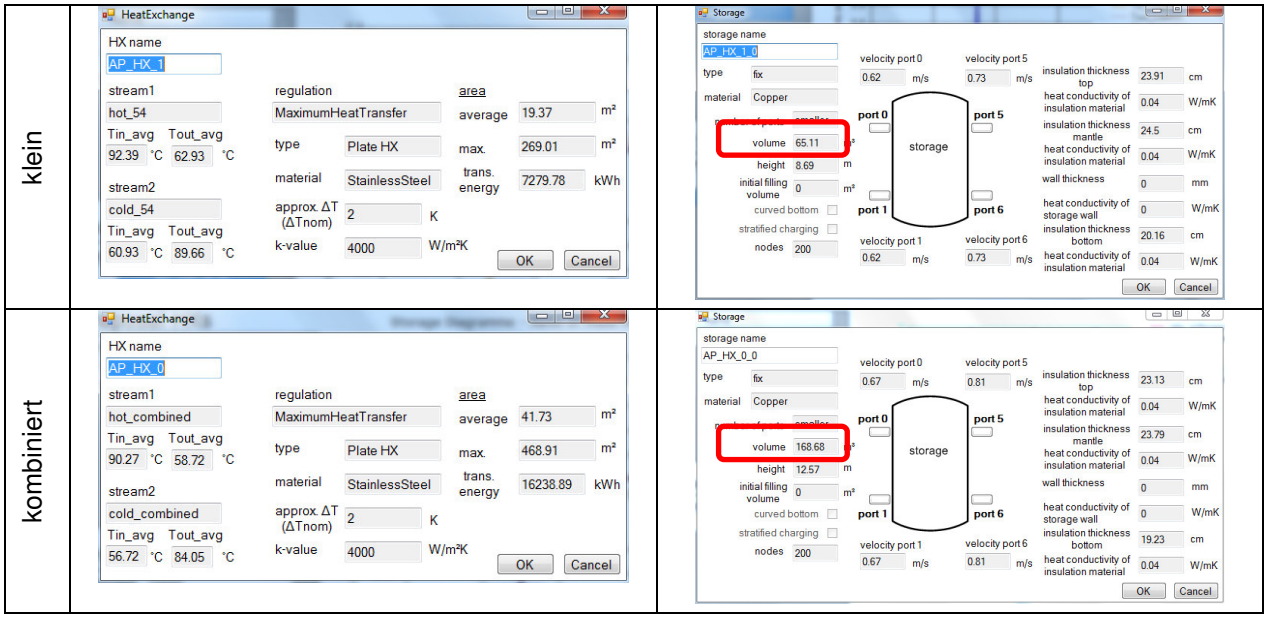


Abbildung 42: Proposal Parameter Fernwärme

Tabelle 11 zeigt die Detailergebnisse des Proposals. Statt 250 m³ werden 133 m³ und statt 54 m³ werden 66 m³ vorgeschlagen.

Tabelle 11: Proposal Ergebnis Fernwärme

	HX	Storage
groß		



Folgende Konfigurationen wurden untersucht (Tabelle 12):

Tabelle 12: Untersuchte Konfigurationen Fernwärme

Name	Konfiguration
Fix - Existing	2 Fix-Level Speicher mit jetzigem Volumen
Fix - Proposal	2 Fix-Level Speicher mit vorgeschlagenem Volumen
Fix - Combined	1 Fix-Level Speicher mit vorgeschlagenem Volumen
Var - Optimized	**2 Variable-Level Speicher mit vorgeschlagenem und optimierten Volumen**
Var - Combined	1 Variable-Level Speicher mit vorgeschlagenem und optimierten Volumen

Hierbei wurden die in Abbildung 43 gezeigten Verschaltungen für die jeweiligen Speicher verwendet.

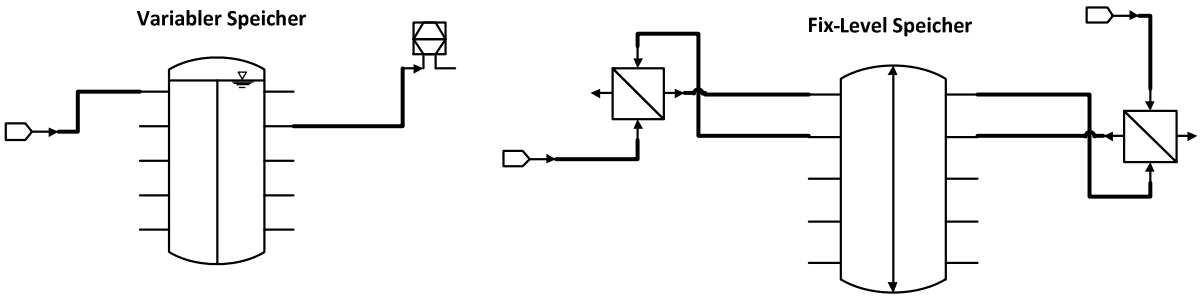


Abbildung 43: Verschaltungen für variable und fix-level Speicher

Tabelle 13 und Abbildung 44 zeigen die Simulationsergebnisse für die verschiedenen Varianten. Die Variante ‚Var – Optimized' bringt die höchste spezifische Wärmeübertragungsrate. Das

Speichervolumen konnte im Vergleich zum Status Quo von 304 m³ auf 231 m³ (170 + 61 m³) reduziert werden.

Tabelle 13: Simulationsergebnisse Fernwärme

	Wärmeübertrag		Speichervolumen	Spez. Wärmeübertragung
	[kWh/6days]	*[kWh/4months]*	*[m³]*	*[kWh/m³]*
Fix - Existing	16,787	340,399	304	1,120
Fix - Proposal	16,698	338,592	198	1,709
Fix - Combined	16,332	331,167	168	1,971
Var - Optimized	24,303	492,811	231	2,133
Var - Combined	24,303	492,811	250	1,971

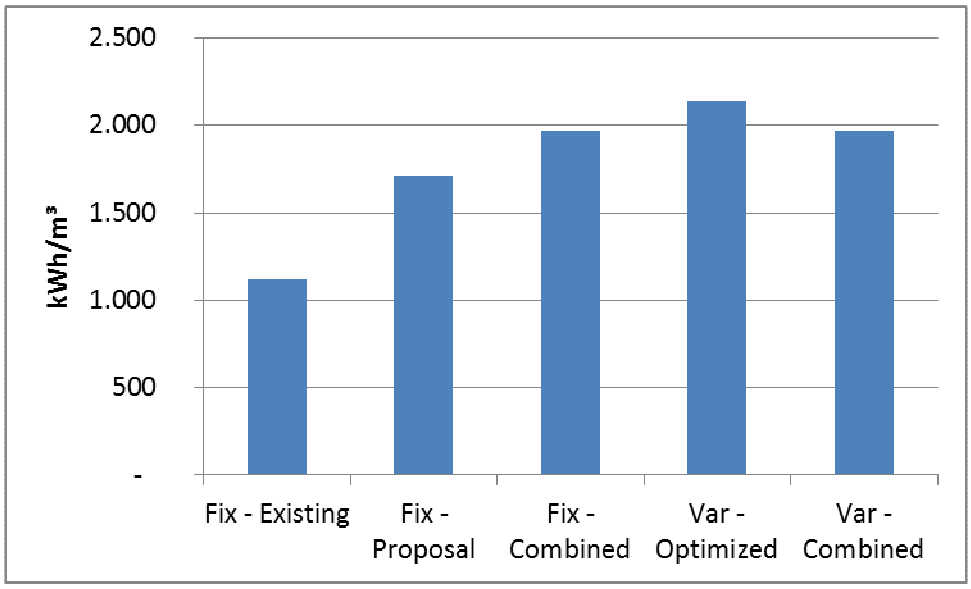


Abbildung 44: Varianten-Vergleich Fernwärme

4.2.3.3 Optimierungspotential durch das Planungstool (Ökonomische Bewertung)

Tabelle 14 zeigt, dass die Speicher um 44.516 € weniger angeschafft werden hätten können, wenn zuvor eine detaillierte Simulation durchgeführt worden wäre. Das entspricht einer Einsparung von 20%.

Tabelle 14: Ökonomische Bewertung der Speicher – Fallbeispiel Fernwärme.

	Status Quo		Optimierung	
	Volumen	Kosten	Volumen	Kosten
	[m³]	*[€]*	*[m³]*	*[€]*
Großer Speicher	250	180,256	170	130,376
Kleiner Speicher	54	49,754	61	55,119
Gesamt		**230,011**		**185,495**

5 Ausblick und Empfehlungen

Ziel des Projektes SOCO war es, mit Prozessdaten auf Basis von Lastprofilen verbraucherseitige Effizienzmaßnahmen (Wärmeintegration in der Industrie, Gewerbe) optimal planen und auslegen zu können und gleichzeitig die Möglichkeiten des technisch und wirtschaftlich sinnvollen Einsatzes von erneuerbarer Energie auszubauen. Besonders für die Integration von erneuerbaren Energieträgern (vor allem Solarthermie) ist die Entscheidung über Anzahl, Art, Größe und der Temperaturschichtung von thermischen Speichern für die Optimierung des gesamten Wärmehaushaltes von Industriebetrieben und Fernwärmenetzen entscheidend.

Diese Zielsetzung wurde durch die Entwicklung des SOCO Planungstools und der darin integrierten Pinch- und Speicheralgorithmen erreicht und basierend auf 10 erhobenen Speichersystemen und 3 detaillierten Fallstudien evaluiert und bewertet. Durch die Anwendung der zeitabhängigen Pinch-Analyse zur Auslegung eines optimierten Wärmetauschernetzwerkes sowie der Kombination mit einem Speichernetzwerk konnte in allen Fallstudien das große Potential zur Energieeinsparung dargestellt werden. In den beiden Industriebetrieben (Molkerei, Brauerei) konnte das Potential für eine signifikante Reduktion des Energiebedarfs aus fossilen Energieträgern durch Wärmerückgewinnung mit optimierten Speichersystemen und der Integration von Solarthermie bewertet werden. In dem Fallbeispiel Fernwärme konnte gezeigt werden, dass durch eine Optimierung der Speichergrößen selbige um 34% reduziert werden könnten. Alle Optimierungsmaßnahmen wurden auch als wirtschaftlich sinnvoll bewertet. Eine Evaluierung und techno-ökonomische Detailprüfung von vorgeschlagenen Maßnahmen ist anzustreben

Das SOCO Planungstool wurde neben der hohen Nutzerfreundlichkeit modular offen programmiert, was eine einfache Erweiterung der Funktionalität garantiert. Die entwickelte Methode aus zeitlich variabler Pinch-Analyse im Zusammenspiel mit einem optimierten Speicheralgorithmus zeigt eine hervorragende Eignung für die untersuchten Fallbeispiele. Ziel muss es sein, diesen Ansatz an weiteren Beispielen zu evaluieren und weiter zu entwickeln. Eine Weiterentwicklung sollte neben Studien in Sub-Sektoren der produzierenden Industrie mit einem Wärmebedarf bis 200 °C (Lebensmittel, Metallverarbeitung) auch auf die energieintensive Industrie erweitert werden, um auch hier das Potential für Optimierungen durch Effizienzmaßnahmen der Wärmeintegration im Zusammenspiel mit optimierten Speichernetzwerken darzustellen. Gerade in diesen Branchen ist die zeitliche Abhängigkeit und Unterschiede in der Verfügbarkeit von Abwärme und dem Bedarf an Energie sehr groß. Durch den neuen und einzigartigen Ansatz der entwickelten SOCO-Pinch-Analyse kann diesen Anforderungen entsprochen werden. Selbiges gilt auch und im speziellen in Fernwärmenetzen, in denen Erweiterungen und Optimierungen des Netzbetriebs basierend auf realen Betriebsdaten erfolgen müssen und die verfügbaren Wärmequellen und auftretenden Wärmesenken in einem Wärmetauscher- und Speichernetzwerk zusammengeführt werden. Speziell die kritische Evaluierung von Speichergrößen ist hier anzuführen.

Damit bietet sich neben der Evaluierung des entwickelten Algorithmus die Möglichkeit der Weiterentwicklung und Optimierung des Pinch-Algorithmus und des Speicheralgorithmus auf weitere Speichertechnologien, etc. an. Zusätzlich sind ein physikalisches Modell zur Modellierung von

Verbindungsleitungen, die Kontrolle der Regelstrategie von Speichern und die Bestimmung der Anschlussverluste von Speichern, die nur schwer quantifiziert werden können, durch eine CFD-Simulation anzustreben, Damit können im Speicheralgorithmus implizite Knotenmodelle, 2D-Modelle und die Erweiterung um interne Wärmetauscher integriert werden.

Zukünftig soll im SOCO Planungstool die Integration von realen Prozessen als darstellbare Größen angestrebt werden, wodurch die Modellierung der Produktionsabläufe im Programm erleichtert und die Nutzerfreundlichkeit erhöht wird. Die entwickelten Fallbeispiele als Best Practice Examples und ihre technische, energetische und wirtschaftliche Evaluierung dienen der Darstellung des großen Energieeinsparungspotentials der identifizierten Maßnahmen. Für eine zielgerechte Weiterentwicklung und Verbesserung des SOCO Tools ist die Verwendung bei weiteren Energieaudits in unterschiedlichen Industriesektoren notwendig. Erst dadurch soll gewährleistet werden, dass es zu einer Evaluierung der verschiedenen Funktionen des SOCO Planungstool kommen kann und unterschiedliche Prozesse, Speichersysteme und Wärmetauschernetzwerke auf die Anwendbarkeit im SOCO Planungstool getestet werden können. Der Vergleich mit realisierten Maßnahmen aus dem SOCO Planungstool würde zu einer weiteren Evaluierung und Optimierung der Software führen. Die Weiterentwicklung und Verbreitung der Methodik sowie des SOCO Planungstools und der Ergebnisse kann so über Anwendungsfälle vorangetrieben und im Rahmen von weiteren geförderten nationalen und europäischen Projekten verfolgt werden.

Ein weiterer Aspekt ist die Integration bzw. das Zusammenspiel des SOCO Planungstools mit anderen Tools wie EINSTEIN (Methodik und Software für thermische Energieaudits) oder relevanten Branchenkonzepten (SolarFoods, GREENFOODS, etc.). Anzustreben ist auch die Integration von SOCO als Modul in anderen Prozesssimulationstools, wodurch der Nutzen und der Ansatz verbreitet werden.

6 Literaturverzeichnis

Dincer I., Rosen M., (2002), Thermal energy storage: systems and applications, Wiley, New York

Drück H., (2006), Wärmespeicher 1. Teil, Folien der Vorlesung „Solarenergienutzung WS 2006/07“,Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart, Folie S29

Lauber A., (2007), Wärmeverluste durch rohrinterne Gegenstromzirkulation in Speicheranschlussleitungen, und deren Verminderung mittels konvektionsbremsen, Konvektionssperren und Wärmesiphons – Quantifizierung der Effekte mittels Messung, SPF Solartechnik, Hochschule für Technik HSR Rapperswil

Moser C., 2012. Optimierte Einbindung von Energiespeichern in industrielle Prozesse, Diplomarbeit, Institut für Wärmetechnik, Technische Universität Graz

prEN 12977-3:2008 (E), 2008, Thermal solar systems and components – Custom built systems – Part3: Performance test methods for solar hot water heater stores, FINAL DRAFT, Februar 2008

Recknagl, Sprenger, Schramek (2007), Taschenbuch für Heizungs- und Klimatechnik, 73.Auflage

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Auszug aus dem Fragebogen der Speicherparameter für den Speicher 3
Abbildung 2: Vergleich der Abweichungen der simulierten Speichermodelle bei einem Be- und Entladevorgang, wobei als Referenzwert der Type 840 gewählt wurde
Abbildung 3: Simulationsaufbau Speicher 3
Abbildung 4: Temperaturverlauf im Speicher 3
Abbildung 5: Temperaturverlauf der Rohrleitungen – Speicher 3
Abbildung 6: Leistung und kumulativer Energiebedarf – Speicher 3
Abbildung 7: Dämmstärke in Abhängigkeit vom Speichervolumen
Abbildung 8: Anschlusshöhen in Abhängigkeit vom Speichervolumen
Abbildung 9: Anschlussverluste in Abhängigkeit vom Speichervolumen
Abbildung 10: Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Nenndurchmesser
Abbildung 11: Wärmeverluste in Abhängigkeit vom Speichervolumen
Abbildung 12: Anschlusstypen; a) nach oben, b) nach unten, c) gerade, d) Siphon, e) nach oben – zur Seite (Abbildung angelehnt an Fragebogen)
Abbildung 13: Energiebilanz eines thermischen Energiespeichers
Abbildung 14: Prüfzyklus Speichertest für industriell genutzte Speicher (in Anlehnung an prEN 12977-3:2008 (E))
Abbildung 15: Ansatz eines Knotenmodell
Abbildung 16: Energieströme im Knoten *j*
Abbildung 17: SOCO Algorithmus zum Vorschlag eines optimierten Wärmetauscher- und Speichernetzwerkes
Abbildung 18: Excel™-Vorlage für den Stromimport

Abbildung 19: Eingelesene Stromdaten in SOCO
Abbildung 20: VisioTM-Flowsheet
Abbildung 21: Definition Speicher
Abbildung 22: Definition Wärmetauscher
Abbildung 23: Parameter für die Erstellung eines Wärmetauscher- und Speicher-Netzwerkes basierend auf den SOCO-Algorithmus
Abbildung 24: Speicherdiagramme – Anteil des Massenflusses der Be- und Entladungen in Temperaturbereichen
Abbildung 25: Auswahl der vorgeschlagenen Wärmetauscher und Speicher
Abbildung 26: Ökonomische Bewertung Wärmetauscher
Abbildung 27: Gesamteffizienz Prüfzyklus ; reale – ideale Speicher
Abbildung 28: Gesamteffizienz Prüfzyklus ; reale – ideale Speicher vs. Füllvolumen
Abbildung 29: Gesamteffizienz Realer Prozess ; reale – ideale Speicher
Abbildung 30: Gesamteffizienz Realer Prozess ; reale – ideale Speicher vs. Füllvolumen
Abbildung 31: Status Quo Wärmerückgewinnung der Molkerei
Abbildung 32: Optimiertes Wärmetauscher- und Speicher-Netzwerk für die Molkerei
Abbildung 33: Energiebilanz Solarintegration Molkerei
Abbildung 34: Amortisationszeit Fallstudie Molkerei, Optimierungsvorschlag „VISIO SIMU 2K“
Abbildung 35: Amortisationszeit Fallstudie Molkerei, Optimierungsvorschlag „VISIO SIMU 5K“
Abbildung 36: Amortisationszeit Fallstudie Molkerei, Optimierungsvorschlag „VISIO SIMU 10K“
Abbildung 37: Status Quo Wärmerückgewinnung der Brauerei
Abbildung 38: Proposal Parameter Brauerei
Abbildung 39: Optimiertes Wärmekonzept Brauerei (wie Abbildung 40, aber mit Speicher ‚Var Chiller‘ statt ‚Fix Chiller‘)
Abbildung 40: Amortisationszeit Fallstudie Brauerei, Optimierungsvorschlag „Fix Chiller“
Abbildung 41: Amortisationszeit Fallstudie Brauerei, Optimierungsvorschlag „Var Chiller“
Abbildung 42: Proposal Parameter Fernwärme
Abbildung 43: Verschaltungen für variable und fix-level Speicher
Abbildung 44: Varianten-Vergleich Fernwärme

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 : Wärmeverlustrate nach Anschlusstyp
Tabelle 2: Werkstoffbeiwert f_w
Tabelle 3: Mögliche Definition der Auflösung der Stromdaten
Tabelle 4: Vermessene Speicher
Tabelle 5: Definierte Speicher in Molkerei
Tabelle 6: Simulationsergebnisse Molkerei
Tabelle 7: Bewertung Solarintegrations-Varianten
Tabelle 8: Simulation Brauerei – ‚Fixed Chiller‘
Tabelle 9: Simulation Brauerei – ‚Var Chiller‘
Tabelle 10: Vergleich Variante ‚fix chiller‘ und ‚var chiller‘ – Fallbeispiel Brauerei

Tabelle 11: Proposal Ergebnis Fernwärme
Tabelle 12: Untersuchte Konfigurationen Fernwärme
Tabelle 13: Simulationsergebnisse Fernwärme
Tabelle 14: Ökonomische Bewertung der Speicher – Fallbeispiel Fernwärme.

7 Anhang

Eine Toolbeschreibung ist als pdf-Datei in Englisch verfügbar und kann beim Projektleiter angefordert werden.

IMPRESSUM

Verfasser
AEE INTEC
Institut für Nachhaltige Technologien
Feldgasse 19, A-8200 Gleisdorf
Tel: 0043 3112 5886 470
Fax: 0043 3112 5886 18
E-Mail: c.brunner@aee.at
Web: www.aee-intec.at

Projektpartner
- Technische Universität GRAZ
  Institut für Wärmetechnik
- JOANNEUM RESEARCH
  Forschungsgesellschaft mbH
- Pink Energie und Speichertechnik GmbH
- Fischer Maschinen- u. Apparatebau AG
- Steirische Gas-Wärme GmbH

AutorInnen
- Christoph Brunner
- Wolfgang Glatzl
- Jürgen Fluch
- Bettina Muster
- Stefan Gunczy
- Rudolf Stiglbrunner
- Christoph Moser
- Richard Heimrath
- Hermann Schranzhofer

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber
Klima- und Energiefonds
Gumpendorfer Straße 5/22
1060 Wien
office@klimafonds.gv.at
www.klimafonds.gv.at

Disclaimer
Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Der Klima- und Energiefonds ist nicht für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes
ZS communication + art GmbH