

Projektabschlussbericht

ZE: DLR, Institut für Technische Thermodynamik Steag New Energies Badische Stahl Engineering	Förderkennzeichen: 03ESP011A 03ESP011B 03ESP011C												
Vorhabenbezeichnung: TESIN													
Laufzeit des Vorhabens: 1. Mai 2013 – 31.07.2021													
Bearbeiter*innen: <table> <tr> <td>Maike Johnson (DLR)</td> <td>Dan Bauer (DLR)</td> </tr> <tr> <td>Andreas Dengel (SNE)</td> <td>Michael Fiß (DLR)</td> </tr> <tr> <td>Ralf Hetzel (BSE)</td> <td>Matthias Hempel (DLR)</td> </tr> <tr> <td>Bernd Hachmann (FWB)</td> <td>Ronny Ortwein (BSE)</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Markus Seitz (DLR)</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Julian Vogel (DLR)</td> </tr> </table>		Maike Johnson (DLR)	Dan Bauer (DLR)	Andreas Dengel (SNE)	Michael Fiß (DLR)	Ralf Hetzel (BSE)	Matthias Hempel (DLR)	Bernd Hachmann (FWB)	Ronny Ortwein (BSE)		Markus Seitz (DLR)		Julian Vogel (DLR)
Maike Johnson (DLR)	Dan Bauer (DLR)												
Andreas Dengel (SNE)	Michael Fiß (DLR)												
Ralf Hetzel (BSE)	Matthias Hempel (DLR)												
Bernd Hachmann (FWB)	Ronny Ortwein (BSE)												
	Markus Seitz (DLR)												
	Julian Vogel (DLR)												



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ENERGIESPEICHER

Forschungsinitiative der Bundesregierung

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

Inhaltsverzeichnis

I.	Projektübersicht.....	I-1
II.	Darstellung der Ergebnisse – gegliedert nach Arbeitspaketen	II-1
II.-1.	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele.....	II-1
AP 1	Referenzkonzept und Potenzialanalyse für Einsatz von Speichern in Elektrostahlwerken (BSE, DLR, BSW).....	1-1
AP1.1	Identifikation von Optionen für den Speichereinsatz im Elektrostahlwerk in Kehl (DLR, BSE, BSW).....	1-2
AP1.2	Entwicklung eines Referenzkonzepts und wirtschaftliche Beurteilung (BSE, DLR, BSW).....	1-16
AP1.3	Potentialanalyse für globalen Einsatz von Speichern in Elektrostahlwerken (BSE, DLR, BSW)	1-23
AP 2	Potenzialanalyse für Einsatz von Speichern im Kraftwerksbereich (SNE, DLR)	2-1
AP 2.1	Definition der Energieflüsse und Analyse von verschiedenen Kraftwerksstandorten und -prozessen im Unternehmen mit Augenmerk auf die Energiespeicherintegration (SNE)	2-1
AP 2.2	Identifikation von Optionen für den Speichereinsatz im Heizkraftwerksbereich (DLR, SNE).....	2-10
AP 3	Weiterentwicklung der Latentwärmespeicher für hohe Leistungsdichte und Überhitzung (DLR, FWB).....	3-1
AP 3.1	Hohe Leistungsdichte (DLR, FWB)	3-5
AP 3.2	Überhitzung mit Latentwärme (DLR)	3-7
AP 4	Bau und Integration eines PCM-Speichers im Heizkraftwerk (SNE, DLR, FWB).....	4-1
AP 4.1	Wärmetechnische Auslegung PCM-Speicher für HKW Wellesweiler (DLR, SNE).....	4-1
AP 4.2	Systemtechnik für die Anbindung des Speichers (SNE, DLR).....	4-1
AP 4.3	Detailed Engineering PCM-Speicher für HKW Wellesweiler (DLR)	4-4
AP 4.4	Bau des PCM-Speichers (DLR, SNE, FWB)	4-16
AP 4.5	Integration des PCM-Speichers in das Kraftwerk (SNE).....	4-20
AP 4.6	Spezielle Gestaltung des Speichers im Bereich Sammler/Verteiler (DLR)	4-22
AP 4.7	Entwicklung und Erprobung einer Lösung zur Transportsicherung des PCM Speichers (DLR)	4-22
AP 4.8	Simulative Auslegung von Bypassfahrensweise und Ventilbetrieb zur Beladung und Einhaltung der geforderten Umschaltzeit bei der Entladung (DLR)	4-23
AP 5	Inbetriebnahme und Betrieb des PCM-Speichers im HKW Wellesweiler (SNE, DLR)	5-1
AP 5.1	Inbetriebnahme des PCM-Speichers (SNE, DLR)	5-1
AP 5.2	Analyse der Speicherperformance und Betriebsoptimierung (DLR, SNE).....	5-10
AP 5.3	Regulärer Speicherbetrieb (SNE).....	5-13
AP 5.4	Beladezustandsbestimmung mittels RADAR (DLR).....	5-13
AP 6	Entwicklung eines Analyseverfahrens zum Speichereinsatz in Industrieprozessen (DLR, SNE, BSE).....	6-1
AP 6.1	Entwicklung eines Softwaretools (DLR)	6-1
AP 6.2	Erprobung des Softwaretools mit Hilfe der Referenzkonzepte (DLR).....	6-9
AP 6.3	Definition und Sammlung der notwendigen Datenbasis (DLR).....	6-9
AP 8	Mitarbeit im IEA implementing Agreement ECES (DLR)	8-1
II.-2.	Voraussichtlichen Nutzen.....	II.-2-1
II.-3.	Veröffentlichungen	II.-3-1

I. Projektübersicht

Aufgabenstellung

Das übergeordnete Ziel des Projekts TESIN ist, die Energieeffizienz im industriellen Bereich und im Versorgungsbereich durch den Einsatz thermischer Energiespeicher zu steigern.

Konkret wurden im Elektrostahlwerk Kehl der Badische Stahlwerke durch die Analyse der Energieströme verschiedene Integrationsmöglichkeiten von Energiespeichern von Badische Engineering (BSE) und vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) analysiert. Für die aussichtsreichste Variante erstellte DLR ein Referenzkonzept zur Speichereinbindung. Darauf aufbauend hat BSE das Marktpotential für die Speicherintegration in Elektrostahlwerken in Deutschland identifiziert. Steag New Energies (SNE) identifizierte das Marktpotential für die Speicherintegration in ihren Heiz(kraft)werken in Deutschland. Das DLR entwickelte einen Hochleistungs-Latentwärmespeicher, der speziell für Besicherungsprozesse mit extrem hoher Entladeleistung benötigt wird. Die speziellen Wärmeleitstrukturen dafür wurden mit F.W.Brökelmann (FWB) entwickelt. Darauf aufbauend wurde ein Pilotspeicher gebaut und im Heizkraftwerk Wellesweiler der SNE in einen laufenden Besicherungsprozess integriert und in Betrieb genommen. Der Speicher sollte nach einem ausgiebigen Testprogramm im Realbetrieb demonstriert werden, was jedoch aufgrund eines Schadens Ende 2020 nicht im geförderten Zeitraum erfolgen konnte. Für die allgemeine Potenzialabschätzung von Energiespeichern in der Industrie hat das DLR eine systematische Analyseverfahren entwickelt und in einem geeigneten Softwaretool realisiert. Anhand der Daten aus der Elektrostahlproduktion und dem Heizkraftwerk konnte ein breites Anwendungsfeld validiert werden. Damit können in Zukunft Prozesse schnell analysiert und die besten Speichereinsatzmöglichkeiten identifiziert werden.

Voraussetzungen des Vorhabens

Dieses Vorhaben hat einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung thermischer Energiespeicher für Industrieprozesse geleistet. Bei dem Vorhaben TESIN handelte es sich um ein Vorhaben in der vorwettbewerblichen Phase, in dem Forschungs- und Entwicklungsaufgaben mit hohem Potential aber auch hohem Entwicklungsrisiko untersucht wurden. Die Entwicklung der thermischen Energiespeichersysteme für spezifische Industrieprozesse und hohe Leistungen ist eine Voraussetzung zur Etablierung und Integration in Industrieprozesse und kann damit die Dekarbonisierung unterstützen.

Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben TESIN wurde als Verbundvorhaben von DLR, Steag New Energies, Badische Stahl Engineering sowie, als assoziierte Partner, F.W. Brökelmann Aluminium und Badische Stahlwerke durchgeführt. Das DLR übernahm die Koordination des Verbundvorhabens. Das Profil und die Rolle der Verbundpartner waren wie folgt definiert:

DLR e.V., Institut für Technische Thermodynamik (DLR), Stuttgart

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) ist das Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland für Luft- und Raumfahrt mit den weiteren Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkten Energie und Verkehr, Sicherheit und Digitalisierung. Das Institut für Technische Thermodynamik ist eines von 55 Forschungsinstituten und wissenschaftlichen Einrichtungen des DLR. Seine 170 Mitarbeiter an den Standorten Stuttgart, Köln-Porz, Hamburg, Ulm und Oldenburg bearbeiten Forschungs- und Entwicklungsaufgaben zur effizienten und schadstoffarmen Energieumwandlung und zur Nutzung erneuerbarer Energien. Im Rahmen seiner F&E-Arbeiten zur Speichertechnik, war das DLR in den letzten 20 Jahren an zahlreichen

Entwicklungsprojekten von Speichersystemen im Nieder- und Hochtemperaturbereich beteiligt. Dabei wurden an sensible Feststoff-Speicherkonzepte, thermochemische Speichersysteme, Flüssigsalzspeicher sowie Latentwärmespeicherkonzepte für die Speicherung Wärme bei hohen Temperaturen erforscht. Das DLR hat mit der Entwicklung der Latentwärmespeichertechnologie die Grundlagen und die wesentlichen Auslegungskriterien für die Weiterentwicklung dieser Speicher geschaffen.

Tabelle 1: Daten zur DLR

Organisation	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt	
Institut	Institut für Technische Thermodynamik	
Abteilung	Thermische Prozesstechnik	
Straße	Pfaffenwaldring 38-40	
Ort	70569 Stuttgart	
Mitarbeitende	Zahl	ca. 10.000 (Feb. 2021)
www	www.dlr.com	
Finanzierung über Drittmittel	€/Jahr	548 Mio. € (in 2020)
Ansprechpartnerin	Maike Johnson	
Telefon	0711 / 6862-344	
Email	maike.johnson@dlr.de	

In diesem Projekt hat das DLR die Systemsimulation weiterentwickelt und die Kenntnisse mit bereits vorhandenem Know-How zu Flüssigsalzspeicher als auch Latentwärmespeicher koppeln und mit den Informationen zu den Prozessen der Projektpartner zusammenbringen können. In der Weiterentwicklung der Latentwärmespeicher hat das DLR die Methodik und Modelle weiterentwickelt, sowie die Auslegung und Inbetriebnahme des Forschungsspeichers am Heizkraftwerk Wellesweiler übernommen, sowie die detaillierte Auslegung und Bau des Speichers als Auftraggeber. Das DLR war in diesem Projekt Koordinator.

Steag New Energies, Saarbrücken und Wellesweiler

Seit über acht Jahrzehnten steht STEAG national und international für effiziente und sichere Energieerzeugung. Als erfahrener Partner unterstützt STEAG seit jeher die Kunden umfassend in allen Phasen der Energieversorgung und bietet ihnen maßgeschneiderte Lösungen im Bereich der Strom- und Wärmeversorgung.

STEAG ist auf dem Weg zum smarten Energiedienstleister. Schritt für Schritt erschließt das Unternehmen neue Geschäftsfelder und Märkte außerhalb des bisherigen Kerngeschäfts.

Die neue STEAG nutzt und bündelt die Expertise und Erfahrung ihrer zahlreichen Ingenieure in den verschiedenen Konzernunternehmen zum Nutzen ihrer Kunden und Partner. STEAG verstehen sich als Ermöglicher der Energiewende. So entwickelt STEAG zukunftssträchtige, digitale Geschäftsmodelle und begleitet Großunternehmen aus energieintensiven Industriebranchen auf dem Weg der Dekarbonisierung ihrer Produktionsprozesse. Dabei gründet die Expertise in Sachen Dekarbonisierung auch auf den Erfolgen bei der stetigen Reduzierung der eigenen CO₂-Bilanz: Seit 1990 sanken die Treibhausgasemissionen von STEAG in Deutschland um rund 85 Prozent.

Tabelle 2: Daten zur Steag New Energies

Organisation	STEAG New Energies GmbH	
Abteilung	Innovationsprojekte	
Straße	St. Johanner Straße 101 - 105	
Ort	66115 Saarbrücken	
Mitarbeitende	Zahl	377
Gründungsjahr	1998	
www	www.steag-newenergies.com	
Umsatz	€/Jahr	175.000.000
Ansprechpartner	Prof. Dr. -Ing. Andreas Dengel	
Telefon	0681 / 9494 1600	
Email	Andreas.dengel@steag.com	

In diesem Projekt hat STEAG New Energies (SNE) die Potenzialstudie für Hochtemperaturspeicher in den eigenen Heiz(kraft)werken angefertigt und die Erkenntnisse mit DLR diskutiert. Am Standort des Heizkraftwerks Wellesweiler wurde die Anbindung des von DLR entwickelten Hochtemperatur- Latentwärmespeichers in die vorhandene Verfahrenstechnik des Standorts geplant und ausgeführt. In diesem Zusammenhang waren die administrativen Aufgaben wie beispielsweise Genehmigungen zu bewerkstelligen. Unter Anweisung des DLR wurde der Wärmespeicher des DLR von SNE mit in Betrieb genommen und die ersten Aufheiz- und Abkühlprozesse im Zusammenhang mit der Beladung des Speichers mit dem Medium Natriumnitrat durchgeführt.

Badische Engineering, Kehl

Seit 1983 liefert die Badische Stahl-Engineering GmbH (BSE) erfolgreich technische- und Beratungs-Dienstleistungen in die ganze Welt. Die BSE ist eine Schwester-Gesellschaft der Badische Stahlwerke GmbH (BSW) – eines der produktivsten Elektrostahlwerke der Welt.

Beide Unternehmen sind Teil der ‚Badischen Gruppe‘. Diese legt den Fokus ihrer Aktivitäten auf die Erzeugung von Baustahl (Ausgangsmaterial: 100% Schrott), sowie auf dessen Weiterverarbeitung zu Drahtprodukten und Baustahlmatten, einschließlich der Vermarktung dieser Produkte.

Die Aktivitäten der BSE gehen jedoch weit über diesen Fokus hinaus. Der Kundenstamm der BSE reicht über die gesamte Elektrostahlbranche und deckt dabei sämtliche Einsatzstoffe und deren Kombinationen ebenso ab wie die Herstellung der unterschiedlichsten Stahlqualitäten.

Basierend auf den entwickelten Techniken und Methoden sowie einer Vielzahl von Netzwerk-Partnern werden auch zunehmend Walzwerke, integrierte Stahlerzeuger, Anwender anderer metallurgischer Prozesse sowie branchenfremdes Klientel beraten.

Tabelle 3: Daten zur Badische Engineering

Organisation	Badische Stahl-Engineering GmbH	
Abteilung	Consulting	
Straße	Robert-Koch-Straße 13	
Ort	77694 Kehl	
Mitarbeitende	Zahl	58
Gründungsjahr	1983	
www	www.bse-kehl.de	
Ansprechpartner	Ralf Hetzel	
Telefon	07851/877-127	
Email	ralf.hetzel@bse-kehl.de	

In diesem Projekt hat BSE mehrfach Messreihen zur Temperaturerfassung an den Abgas Anlagen der beiden Elektrolichtbogen Öfen im Elektro Stahlwerk in Kehl am Rhein durchgeführt. Dabei wurden Messreihen gefahren um den diskontinuierlichen Betrieb nachzumessen. Somit wurde versucht zu erfassen, welche Energiemenge auf welchem Potential im Stahlwerk in Kehl im Abgas der beiden Öfen zur Verfügung stehen würde. Interessant war auch zu sehen, wie sich die anfallende Energiemenge im zeitlichen Verlauf einer jeden Schmelze verändert. Dies wiederum wäre ja dann durch einen Energiespeicher zu puffern, sollte man eine kontinuierliche Energie-Abgabe benötigen.

Ablauf des Vorhabens

Das Förderprojekt TESIN wurde zum 01.05.2013 bewilligt und kostenneutral bis 31.07.2021 verlängert. Am 13.12.2016 wurde das Projekt mit neuen wissenschaftlichen Arbeiten aufgestockt.

In Tabelle 3 sind die Projektmeilensteinen unter Berücksichtigung der bewilligten Verlängerungen und die bewilligte Aufstockung dargestellt. Dadurch, dass der Forschungsspeicher eine Leckage bekam, konnten die Meilensteine 8, 9, 14, 15 und 16 im Projekt nicht erreicht werden.

Tabelle 4: Meilensteine im Projekt TESIN.

	Plan/Antrag	Erzielt	Meilensteine
	Monate nach Start		
M 1	10		10 Energieströme im Elektrostahlwerk Kehl abgebildet
M 2	19		19 Theoretisches Potenzial für Speichereinsatz im Elektrostahlwerk bestimmt
M 3	28		28 Referenzkonzept für Kehl definiert
M 4	11		11 Energieströme und Prozesse in Kraftwerken analysiert
M 5	16		16 Theoretisches Potenzial für Speichereinsatz in Kraftwerken bestimmt
M 6	11	11	Auslegungsgrundlagen für hohe Leistungsdichten und Überhitzung festgelegt => Voraussetzung für Speicherbau
M 7	15		28 Detailauslegung Speicher abgeschlossen
M 8	20		offen Inbetriebnahme des Speichersystems erfolgreich
M 9	24		offen Regulärer Betrieb des Speichers gestartet
M 10	36		32 Softwaretool für Analyse Speichereinsatz entwickelt
M 11	3* /45		64 Finale Druckprüfung des Speichers in Laucha/Kleinostheim erfolgreich
M 12	4* /46		88 Teilbefüllung in Laucha abgeschlossen
M 13	4* /46		65 Transport und Errichtung in Wellesweiler abgeschlossen
M 14	6* /48		offen 1. Testbetrieb in Wellesweiler erfolgreich
M 15	7* /49		offen Restbefüllung des Speichers abgeschlossen
M 16	12* /54		offen RADAR Messung bewertet

* ab Aufstockung

Die Arbeiten am Speicherbau sind aus verschiedenen Gründen nicht mit dem geplanten Fortschritt erfolgt wie geplant. Der tatsächliche Ablauf ist in Abbildung 1 und Abbildung 2 dargestellt. Zum einen hat eine Deutschlandweite Ausschreibung einiges an Zeit in Anspruch genommen, die detaillierte Auslegung und Abstimmung mit der Tochterfirma des Auftragnehmers Seab GmbH ebenfalls. Nach Anfang der Herstellung gab es Probleme mit der Beschaffung der Rohre vom assoziierten Projektpartner Brökelmann. Im Anschluss, kurz vor Fertigstellung des Speichers, hat die Tochterfirma des Auftragnehmers Insolvenz angemeldet, so dass er Speicher erst vom Auftragnehmer aus der Insolvenzmasse geholt werden musste. Im Anschluss hat die Klärung aller notwendigen Unterlagen und Informationen mit der Zulassungsstelle sehr viel Zeit in Anspruch genommen, so dass bis zur Speichererrichtung insgesamt deutlich mehr Zeit und organisatorische Arbeit aufgewendet werden musste als geplant war. Der Speicher hat eine Leckage bekommen während der Inbetriebnahme; die Reparatur konnte jedoch nicht mehr vom TESIN Budget und Zeit aufgefangen werden. Ein Anschlussvorhaben ist beantragt und bewilligt, um diese Arbeiten durchzuführen.

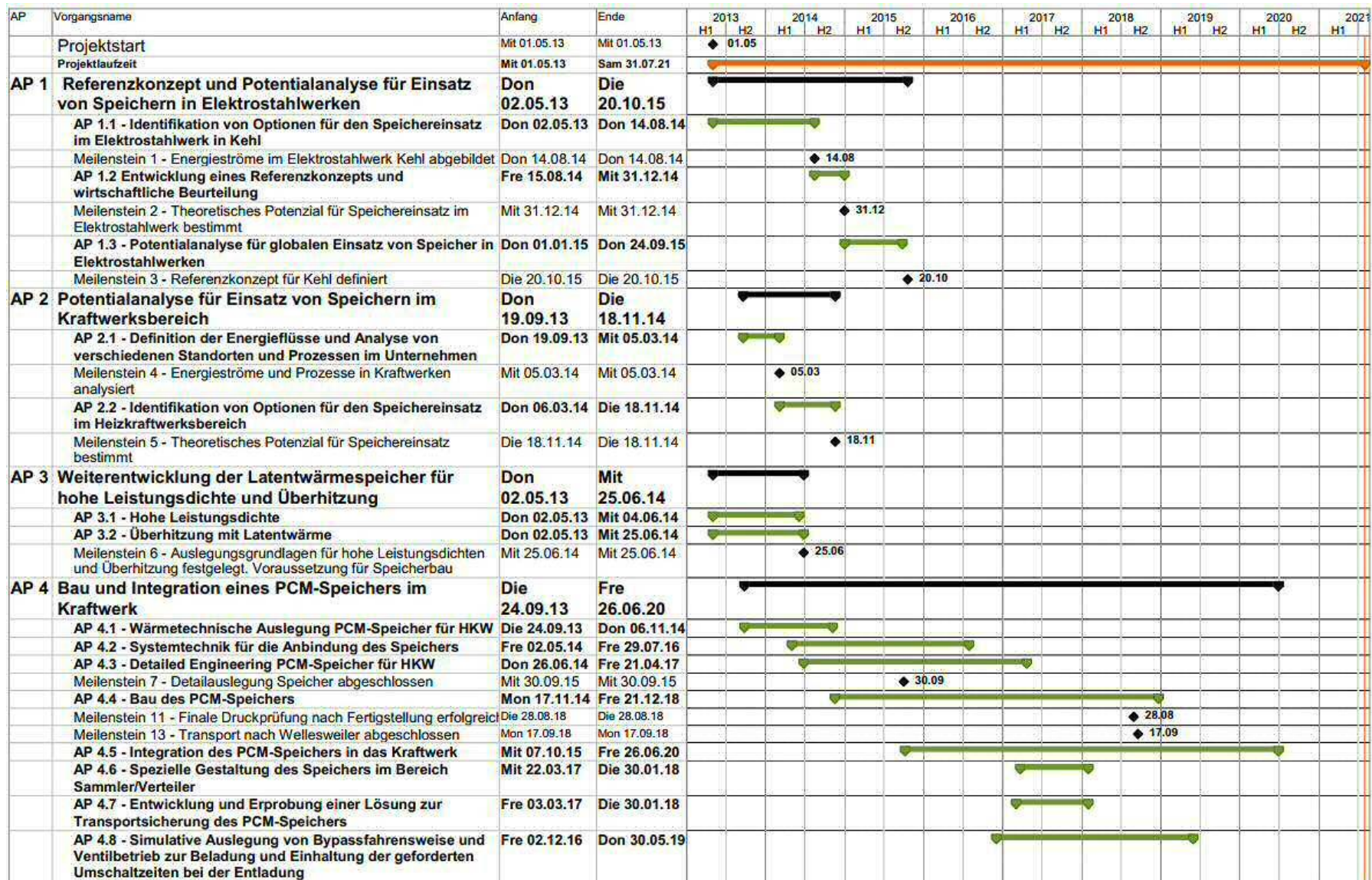


Abbildung 1: Zeitplan des Projekts mit Darstellung der Unterarbeitspakete und Meilensteine, Arbeitspakete 1 bis 4.

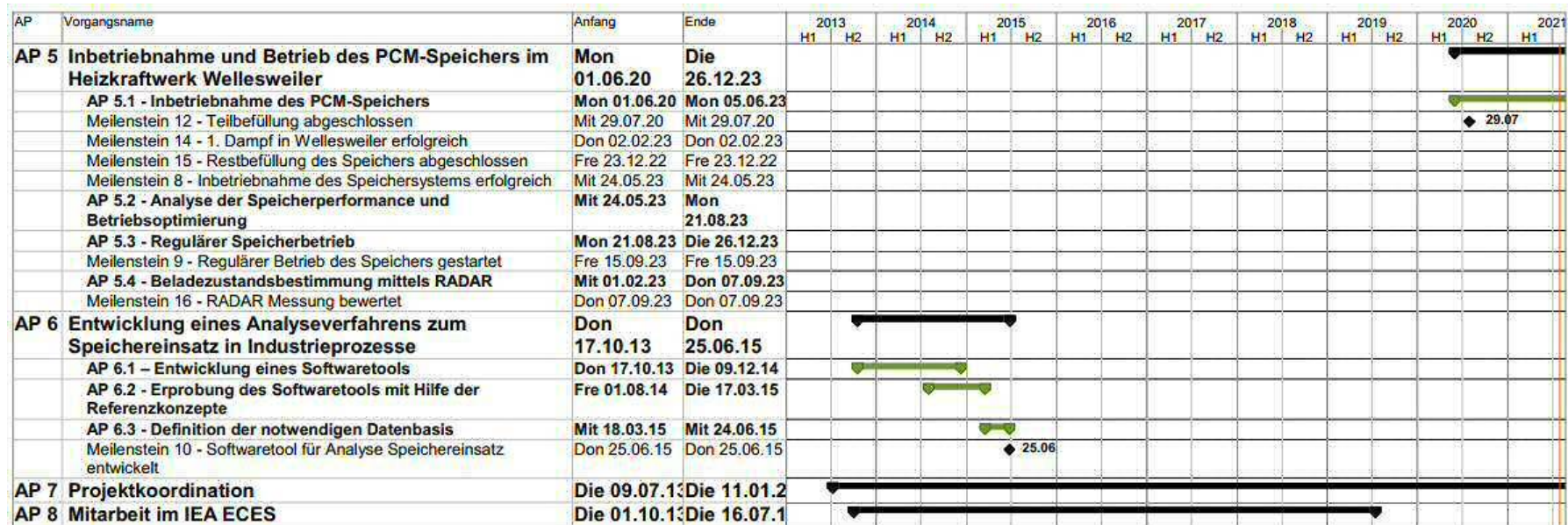


Abbildung 2: Zeitplan des Projekts mit Darstellung der Unterarbeitspakete und Meilensteine, Arbeitspakete 5 bis 8

Wissenschaftlicher und technischer Stand der Technik zu Vorhabenbeginn

Im industriellen Bereich werden bisher zur Speicherung von Dampf vor allem Druckwasserspeicher in begrenztem Umfang eingesetzt. Diese speichern die Energie aus der Kondensation des Dampfes in einem Druckwasserbehälter. Bei der Entladung wird durch Entspannung des Druckes Sattdampf im Gleitdruckbetrieb erzeugt. Wesentliche Nachteile dieser Technologie liegen zum einen in den hohen Kosten für die Druckbehälter, wodurch der Einsatzbereich auf geringe Kapazitäten zur Pufferspeicherung begrenzt ist, zum anderen kann hiermit kein überhitzter Dampf und kein konstantes Druckniveau bereitgestellt werden [1].

Latentwärmespeicher bieten die Möglichkeit der effizienten Speicherung von Kondensationswärme in einem schmalen Temperaturbereich. Bei der Latentwärme-Speicherentwicklung für den Temperaturbereich 120-330 °C wurde der technische Durchbruch durch die Entwicklung des berippten Wärmeübertragerkonzepts im Speicher erreicht. Im Rahmen der Projekte PROSPER (BMW-gefördert, 0327360), DISTOR (EU-gefördert, SES6-CT-2004-503526), PROSPERplus (BMW-gefördert, 0327825) und ITES (BMU-gefördert, 03UM0064) wurde die technische Machbarkeit nachgewiesen und bis zu einem Maßstab von 700 kW demonstriert [2]. Hierbei lag der Schwerpunkt auf den Speicherentwicklung für Kapazitäten im Bereich von einer bis mehrere Stunden, nicht im Minutenbereich. Die Leistungsdichte war in diesen Projekten daher deutlich geringer als im Projekt TESIN.

Auch im Bereich der Speicherung sensibler Wärme wurden deutliche Entwicklungsfortschritte bei thermischen Speichersystemen für höhere Temperaturen, vor allem motiviert durch die Nachfrage aus dem Bereich der solarthermischen Kraftwerkstechnologie, erzielt. Hier sind inzwischen kommerzielle Flüssigsalzspeicher mit Speicherkapazitäten im GWh-Bereich im Einsatz. Flüssigsalzspeicher eignen sich für sensible Wärmeträgermedien, aufgrund der Pinch-Point-Problematik werden diese Speicher nicht zur Be- und Entladung durch das zweiphasige Wärmeträgerfluid Wasser/Dampf eingesetzt. Die im Rahmen der BMU geförderten Projekte WESPE (PA-RASOL/WESPE), WANDA (03UM0030) und ITES für solarthermische Parabolrinnenkraftwerke entwickelten Betonspeicher bieten eine interessante Alternative zu Flüssigsalzspeichern zur Speicherung sensibler Wärme und zeigen auch ein Einsatzpotential für die Speicherung sensibler Prozesswärme, sind aber ebenfalls nicht für die Speicherung der Latentwärme des zweiphasigen Wärmeträgerfluids Wasser/Dampf geeignet [3].

Im Rahmen der grundfinanzierten Arbeiten untersucht das DLR Schmelzbereichsspeicher und kaskadierte PCM-Speicher für den Überhitzungsbereich von 300-500 °C für Anwendungen in solarthermischen Kraftwerken mit solarer Direktverdampfung. Hiermit wird eine deutlich höhere Speicherdichte als mit Beton- oder Flüssigsalzspeichern angestrebt, die Konzepte sind aber ebenfalls nur für einphasige Fluide geeignet.

Das ZAE Bayern entwickelt Wärmespeichersysteme vorwiegend für den Temperaturbereich unter 120 °C. Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Nutzung von Abwärme durch mobile Sorptionsspeicher“ wurden drei Machbarkeitsstudien durchgeführt. In ihnen wurden die technischen und ökonomischen Möglichkeiten der Abwärmenutzung bei Biogasanlagen (500 kWel), einer Müllverbrennungsanlage und in einem metallverarbeitenden Betrieb untersucht. Die Ergebnisse für den mobilen Sorptionsspeicher und für einen mobilen Latentwärmespeicher mit PCM wurden verglichen [4]. Zudem werden offene Adsorptionsspeicher mit Zeolithen entwickelt, die zur Klimatisierung eingesetzt werden [5]. Die hier untersuchten Speichertechnologien sind alle nicht für den erforderlichen hohen Temperaturbereich anwendbar.

Für die Anwendung im Bereich Solarthermische Kraftwerke wurden zwei Forschungsprojekte zum Thema Latentwärmespeicher durchgeführt, gefördert durch die E.ON Forschungsinitiative, wobei auch hier der Fokus nicht auf hoher Leistungsdichte lag. Das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme arbeitete im Rahmen des Projekts INNOLAT-CSP „Entwicklung eines innovativen Systems zur Speicherung latenter Wärme für CSP-Kraftwerke mittels direkter Dampferzeugung sowie anderer Wärmeübertragungsmedien“ an der Entwicklung eines

Latentwärmespeichers bei dem Leistung und Kapazität durch einen externen Wärmeübertrager voneinander getrennt sind [6]. Die Universität South Florida, Forschungszentrum für saubere Energie (USA) und das Madrider Institut für weiterführende Studien IMDEA Energie (Spanien) arbeiteten im Rahmen des Projekts „Innovatives System zur Speicherung latenter thermischer Energie bei CSP-Kraftwerken“ an Latentwärmespeichern mit gekapselten PCM-Pellets mit einer Spezialbeschichtung [7].

Literatur:

- [1] Steinmann, Wolf-Dieter und Eck, Markus (2006) *Buffer storage for direct steam generation*. Solar Energy, 80, Seiten 1277-1282. Elsevier.
- [2] Laing, Doerte und Bahl, Carsten und Fiß, Michael und Hempel, Matthias und Meyer-Grünefeldt, Mirko und Eickhoff, Martin und Stückle, Andreas (2011) *TEST AND EVALUATION OF A THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEM FOR DIRECT STEAM GENERATION*. SolarPACES 2011, 21. -24. Sept. 2011, Granada, Spanien.
- [3] Laing, Doerte und Bahl, Carsten und Bauer, Thomas und Fiß, Michael und Breidenbach, Nils und Hempel, Matthias (2011) *High Temperature Solid Media Thermal Energy Storage for Solar Thermal Power Plants*. Proceedings of the IEEE (99), Seiten 1-9.
- [4] <http://www.zae-bayern.de/hauptforschungsthemen/energiespeicher/projekte/mobile-sorptionsspeicher.html>, abgerufen 28.02.2012.
- [5] http://zae.uni-wuerzburg.de/files/zeo_absorp.pdf, abgerufen 28.02.2012.
- [6] http://www.eon.com/de/downloads/101015_2010_Gewinnerprojekt_3.pdf, abgerufen 28.02.2012.
- [7] http://www.eon.com/de/downloads/101015_2010_Gewinnerprojekt_4.pdf, abgerufen 28.02.2012.

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Während des Projekts hat Frau Dr. Antje Seitz den Annex 30 der IEA ECES als Operating Agent geleitet. Diese Arbeiten sind eingehend im nächsten Abschnitt im Arbeitspaket 8 berichtet.

II. Darstellung der Ergebnisse – gegliedert nach Arbeitspaketen

Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Das übergeordnete Ziel des Projekts TESIN ist, die Energieeffizienz im industriellen Bereich und im Versorgungsbereich durch den Einsatz thermischer Energiespeicher zu steigern. Im folgenden Abschnitt werden die durchgeführten Arbeiten und die dabei erzielten Ergebnisse für die jeweiligen Arbeitspakete dargestellt. Die Arbeiten im Projekt sind gemäß dem Projektantrag in acht Arbeitspakete aufgeteilt und sind hier kurz zusammengefasst.

Im ersten Arbeitspaket wurden durch die Analyse der Energieströme des Elektrostahlwerks Kehl des BSW verschiedene Integrationsmöglichkeiten von Energiespeichern durch BSE und das DLR analysiert. Für die aussichtsreichste Variante erstellte das DLR ein Referenzkonzept zur Speichereinbindung. Darauf aufbauend hat BSE das Marktpotential für die Speicherintegration in Elektrostahlwerken in Deutschland identifiziert. Diese Arbeiten haben gezeigt, dass die Einbindung eines Speichers im Elektrostahlwerk technisch möglich ist, aber aufgrund der starken Temperaturschwankungen im Abgaskanal die Wärmeauskopplung auf hohem Niveau herausfordernd ist. Aufgrund der weltweiten Marktlage ist die Einbindung jedoch bisher nicht wirtschaftlich.

Im zweiten Arbeitspaket identifizierte SNE das Marktpotential für die Speicherintegration in ihren Heiz(kraft)werken in Deutschland. Zusammen mit dem DLR wurden für die aussichtsreichsten Varianten Speichersysteme berechnet und ausgelegt, um die technische und wirtschaftliche Machbarkeit analysieren zu können. Diese Arbeiten haben gezeigt, dass die Integration in bestehende Werke technisch machbar aber herausfordernd ist, und wirtschaftlich derzeit nicht darstellbar. Es wurde dennoch gezeigt, dass in greenfield Integrationen sowohl die Wirtschaftlichkeit als auch technische Machbarkeit deutlich besser aussehen, da alle Komponenten somit aufeinander abgestimmt sein können.

Das DLR entwickelt Hochleistungs-Latentwärmespeicher, wie sie speziell für Besicherungsprozesse mit extrem hoher Entladeleistung benötigt werden. Die speziellen Wärmeleitstrukturen dafür werden mit FWB entwickelt. Auf dieser Basis wurde in den Arbeitspaketen drei, vier und fünf ein Speicher speziell für das Heizkraftwerk Wellesweiler ausgelegt, gebaut und in das laufende Werk integriert. Ziel war ebenfalls nach einem ausgiebigen Testprogramm den Speicher im Realbetrieb zu betreiben. Die Ziele der Arbeitspakete drei und vier wurden erreicht mit der Entwicklung und Integration des Speichers im Heizkraftwerk. Die Arbeiten in Arbeitspaket 5 wurden durch einen Schaden am Speicher abgebrochen. Diese ausstehenden Arbeiten sind in einem bereits beantragten Anschlussvorhaben enthalten.

Für die allgemeine Potenzialabschätzung von Energiespeichern in der Industrie wurde am DLR im sechsten Arbeitspaket eine systematische Analyseverfahren entwickelt und in einem geeigneten Softwaretool realisiert. Anhand der Daten aus der Elektrostahlproduktion und dem Heizkraftwerk konnte ein breites Anwendungsfeld validiert werden. Damit können in Zukunft Prozesse schnell analysiert und die besten Speichereinsatzmöglichkeiten identifiziert werden.

Die Arbeiten zur IEA ECES Annex 30 wurden im achten Arbeitspaket durchgeführt. Annex 30 beschäftigte sich mit thermischen Energiespeichern für wirtschaftliches Energiemanagement und Kohlendioxidminderung („Thermal Energy Storage for Cost-Effective Energy Management and CO₂ Mitigation“) und wurde erfolgreich durchgeführt.

AP 1 Referenzkonzept und Potenzialanalyse für Einsatz von Speichern in Elektrostahlwerken (BSE, DLR, BSW)

Inhaltsverzeichnis

AP1.1	Identifikation von Optionen für den Speichereinsatz im Elektrostahlwerk in Kehl (DLR, BSE, BSW).....	1-2
1.1.1	Konstruktion eines Stützrohrs zur Temperaturmessung (BSE)	1-2
1.1.2	Volumenstrommessung auf dem Dach (BSE).....	1-3
1.1.3	Erfassung weiterer Prozessparameter (BSE).....	1-3
1.1.4	Auswertung der Volumenstrommessungen (BSE)	1-3
1.1.5	Auswertung der Messungen am Ofen 1 (DLR)	1-4
1.1.6	Messungen an Ofen 2 (BSE)	1-6
1.1.7	Auswertung der Messungen am Ofen 2 (DLR)	1-7
1.1.8	Gegenüberstellung der Messungen am Ofen1 und am Ofen 2 (DLR).....	1-8
1.1.9	Analyse der auskoppelbaren Wärme (DLR).....	1-9
1.1.10	Wärmesenken (BSE)	1-12
1.1.11	Mögliche Speichervarianten (DLR)	1-13
AP1.2	Entwicklung eines Referenzkonzepts und wirtschaftliche Beurteilung (BSE, DLR, BSW).....	1-16
1.2.1	Entwicklung des Referenzkonzepts (DLR).....	1-16
1.2.2	Wirtschaftlichkeit des Referenzsystems (BSE)	1-21
AP1.3	Potentialanalyse für globalen Einsatz von Speichern in Elektrostahlwerken (BSE, DLR, BSW).....	1-23
1.3.1	Wesentliche Unterscheidungsmerkmale von Elektrolichtbogenöfen weltweit (BSE).....	1-23
1.3.2	Speicherkonzeptbetrachtung bei parallel geschalteten EAFs (DLR)	1-26
1.3.3	Wirtschaftliches Potenzial der Speicherkonzepte (BSE)	1-29

Durch die Arbeiten in AP 1 konnte das Potenzial für eine speichergestützte Energierückgewinnung ermittelt werden. Hierzu wurden zunächst die infrage kommenden Energieströme analysiert und ausgewertet. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde ein Referenzsystem von den Projektpartnern entwickelt und bewertet. Anschließend wurde das globale wirtschaftliche Potenzial des Referenzkonzepts ermittelt und bewertet. Diese Ergebnisse sind hier kurz zusammengefasst und anschließend detailliert berichtet.

AP 1.1 Identifikation von Optionen für den Speichereinsatz im Elektrostahlwerk in Kehl

Durch die Erfassung der Energieströme im Elektrostahlwerk in Kehl durch BSE konnten durch DLR die Energieströme in der Elektrostahlproduktion ermittelt und quantifiziert werden. Weitergehend wurde mit Hilfe eines Simulationsmodells die Wärmeauskopplung mit einem Flüssigsalz als Wärmeträgermedium betrachtet. Hierbei wurde eine thermische Leistung von 10 MW_{th} ermittelt, die zur Abwärmenutzung zur Verfügung steht. Durch die Analyse verschiedener Senken und Speichertechnologien konnte die Grundlage für die weiteren Untearbeitspakete geschaffen werden.

AP 1.2 Entwicklung eines Referenzkonzepts und wirtschaftliche Beurteilung

In diesem Arbeitspaket wurde, basierend auf den in AP 1.1 erhobenen Daten, vom DLR ein Referenzsystem zur Energierückgewinnung mit anschließender Verstromung der thermischen Energie entwickelt. Kernbestandteil der Arbeiten war die Auslegung eines thermischen Energiespeichers, der zur Pufferung der schwankenden Leistung der Abwärmequelle dient. Basierend auf den technischen Daten wurde die Wirtschaftlichkeit des Konzepts von BSE berechnet und von BSE bewertet.

AP 1.3 Potenzialanalyse für globalen Einsatz von Speichern in Elektrostahlwerken

Weltweit befinden sich ca. 1.000 Anlagen mit einem Elektrolichtbogenofen in Betrieb. Im Rahmen der Arbeiten wurde von BSE abgeschätzt, in wie weit sich die Ergebnisse aus dem AP 1 bzw. dem Referenzkonzept auf weitere Anlagen übertragen lassen. Abschließend wurde der parallele Betrieb von zwei unabhängig arbeitenden Elektrolichtbogenöfen durch DLR untersucht.

AP1.1 Identifikation von Optionen für den Speichereinsatz im Elektrostahlwerk in Kehl (DLR, BSE, BSW)

In der Elektrostahlproduktion fallen im regulären Anlagenbetrieb große Abwärmeströme an. Durch die diskontinuierliche Fahrweise des Elektrolichtbogenofens¹ werden diese in der Regel ungenutzt an die Umgebung abgegeben. Im Bereich der heutigen Abgasanlage² werden ca. 13 MW_{th} zur Kühlung der Anlage auf einem sehr niedrigen Temperaturniveau (ca. 75 °C) ausgekoppelt, aber nicht weiter genutzt.

Im Rahmen des AP 1.1 wurden verschiedene Abwärmequellen im Stahlwerksprozess betrachtet und analysiert. Die größte Einzelquelle stellte hierbei das heiße Abgas des EAFs dar. Daher wurde für das Projekt TESIN aufgrund der Größe der Einzelquelle entschieden, Abwärme aus dem Ofenabgas mit Hilfe eines Zwei-Tank-Flüssigsalzspeichers zurückzugewinnen und zeitlich konstant zu verstromen. Die durch den Dampfkraftprozess erzeugte Energie soll dazu benutzt werden, den elektrischen Energieverbrauch der sekundären Anlagen des Ofenprozesses zu decken.

1.1.1 Konstruktion eines Stützrohrs zur Temperaturmessung (BSE)

Da im heißen Ofenabgas Extremtemperaturen von über 1.500 °C erwartet wurden, kommen die gewöhnlichen Thermoelemente, die bei BSW eingesetzt werden, für eine Temperaturmessung im Ofenabgas nicht in Frage. Zur Lösung dieses Problems konstruierte BSE ein Stützrohr, welches aus einem dünnen und flexiblen Typ B Thermoelement besteht, das in das wassergekühlte Stützrohr eingelassen wird. Das Stützrohr wurde von der BSW Anlagenbau und Ausbildung GmbH (BAG) basierend auf der Konstruktion von BSE gefertigt. Das erste Stützrohr war 5 Tage am Stück und das zweite Stützrohr sogar 34 Tage (vgl. Abbildung 1-1) dem heißen Abgas ausgesetzt. Nach dem jeweiligen Ausbau wurden die Rohre auf physische Beschädigungen hin untersucht. Hierbei wurden keine tiefgehenden Beschädigungen bzw. Leckagen an den beiden Stützrohren festgestellt.



Abbildung 1-1: Foto der wassergekühlten Stützrohre nach ihrem Einsatz.

¹ E-Ofen bzw. englisch EAF.

² Auch als Stickeranlage bezeichnet.

1.1.2 Volumenstrommessung auf dem Dach (BSE)

Zur weitergehenden Auswertung der Messdaten bzw. zur Ermittlung der auskoppelbaren Leistung, war es notwendig gemessene Temperaturen auf einen Massenstrom beziehen zu können. Eine direkte Messung in der Stickeranlage war durch die örtlichen Gegebenheiten in der Anlage nicht möglich.

Zur Messung des Volumenstroms wird die Abgasleitung nach der Sprühkammer genutzt. Dieser befindet sich auf dem Dach. Dort gibt es eine ca. 20-30 m horizontal verlaufende Rohrleitung. Diese Rohrleitung mündet dann in die Rohrleitung der Dachabsaugung. Im Rahmen der Messung wurde eine alte 2" Messöffnung (vgl. Abbildung 1-2) genutzt um das S-Pitot zu fixieren. Neben dem 2" Stutzen wird ein 8 mm Bohrloch gesetzt, um das Einführen eines Thermoelements zu ermöglichen.

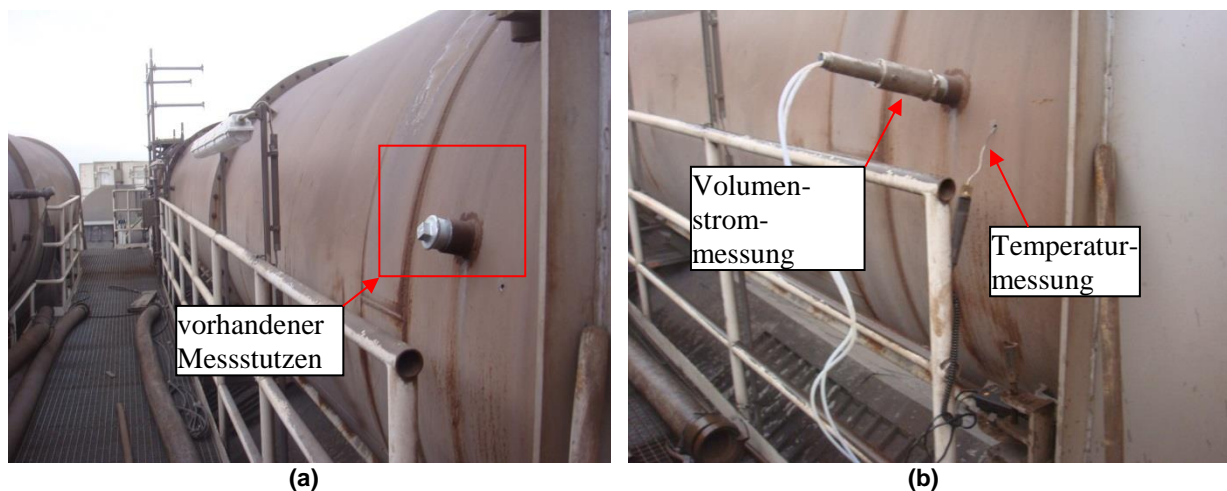


Abbildung 1-2: (a) Messöffnungen auf dem Dach mit (b) eingebauter S-Pitot-Sonde und Thermoelement.

1.1.3 Erfassung weiterer Prozessparameter (BSE)

Zur Kontrolle und Steuerung des gesamten Stahlprozesses ist im BSW Stahlwerk in Kehl ein Online-Messdatenerfassungssystem vorhanden. Dieses System erfasst alle kontinuierlich gemessenen Parameter der installierten Anlagen in einem fest eingestellten Zeitintervall, bzw. bei Änderung eines Messwerts. Diese Daten dienen in erster Linie der Steuerung und Kontrolle des Prozesses und werden im Werk auf einem Server gespeichert. Diese Messdaten konnten für das Projekt TESIN aus dem Erfassungssystem geladen und für die Auswertung der Messungen herangezogen werden.

1.1.4 Auswertung der Volumenstrommessungen (BSE)

In Abbildung 1-3 ist das Ergebnis der mit dem Pitot-Rohr durchgeführten Messung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das zeitliche Mittel über die aufgenommene Charge bei ca. 106.000 m³/h i.N. liegt. Durch die starken Schwankungen der Abgastemperatur des Ofenabgases, die durch die Batchbetriebsweise des Lichtbogenofens verursacht wird, schwanken die gemessenen Volumenstromwerte. Durch die aufwändige Handmessung konnte keine dauerhafte Messung des Volumenstroms durchgeführt werden. Daher liegt der gemessene Volumenstrom allen durchgeführten Auswertungen zugrunde.

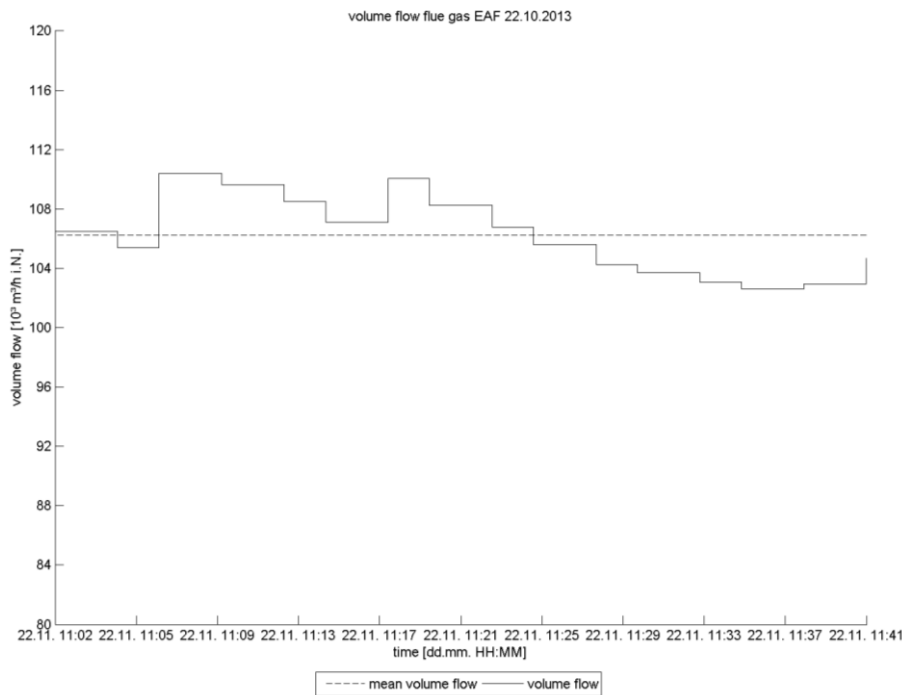


Abbildung 1-3: Ergebnis der Volumenstrommessung vom 22.11.2013.

1.1.5 Auswertung der Messungen am Ofen 1 (DLR)

Die durchgeführten Messungen wurden mit dem konstruierten Stützrohr und einem Thermoelement am Eingang der Nachverbrennungskammer (vgl. Abbildung 1-4) von BSE durchgeführt. Diese Position wurde aufgrund der Eignung für eine mögliche Wärmeauskopplung gewählt. Alle Temperaturwerte wurden vom Datenlogger sekundlich mitgeschrieben. Hierdurch wurde gewährleistet, dass die hohen Temperatursprünge im Ofenabgas ausreichend aufgelöst werden. Die Daten aus dem Prozessleitsystem lagen in 2 sekundlicher Auflösung vor.

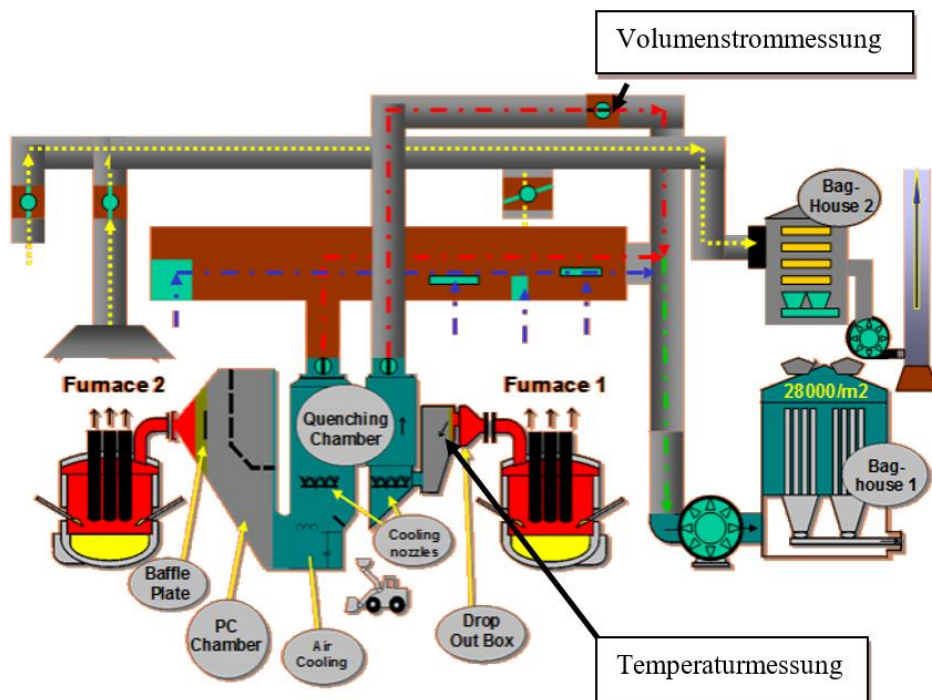


Abbildung 1-4: Anordnung der Temperatur- und Volumenstrommessung im Gesamlayout im Schmelzbetrieb von BSW.

Messung vom 15.11. bis zum 22.11.2013

In Tabelle 1-1 ist eine Übersicht über die durchgeführten Einzelmessungen dargestellt. Zu beachten ist, dass die Messung vom 22.11.2013 erkennbar von den beiden anderen Messungen vom 15.11. und 19.11.2013 abweicht. Der Grund hierfür liegt an der aufgetretenen Störung am EAF, die durch die sehr kurze Messdauer stark ins Gewicht fällt. Daher ist wahrscheinlich, dass die mittlere Temperatur des Rauchgases aus dem EAF-Prozess eine Temperatur von ca. 728 °C besitzt. Dadurch lässt sich aus dem Rauchgas eine mittlere thermische Leistung von ca. 4 MW_{th} unter Berücksichtigung einer Rauchgastemperatur von > 800 °C zurückgewinnen. Bei einer möglichen Absenkung der minimalen Rauchgastemperatur vor dem Eintritt der Quenche lässt sich eine entsprechend höhere Leistung zurückgewinnen.

Tabelle 1-1: Zusammenfassung der Messergebnisse vom November 2013.

		15.11.2013	19.11.2013	22.11.2013
Mittlere Temperatur	°C	729	727	667
Messdauer	h	4,2	8,2	3,4
Mittlere Leistung bei $T_{\min} = 600^{\circ}\text{C}$	MW	9,88	9,49	7,76
Mittlere Leistung bei $T_{\min} = 700^{\circ}\text{C}$	MW	6,44	6,65	5,21
Mittlere Leistung bei $T_{\min} = 800^{\circ}\text{C}$	MW	3,89	4,12	3,08

Messung vom 06.12. bis zum 11.12.2013

Da die Beständigkeit der entwickelten Temperaturlanze durch die durchgeführten Messungen bewiesen wurde, konnte am 06.12.2013 eine längerfristige Messung der Rauchgastemperatur am EAF 1 gestartet werden (vgl. Abbildung 1-4). Hierbei wurden durch BSE die Temperaturen einer gesamten Betriebswoche über 129 h ohne Ausfälle bei der Messtechnik aufgezeichnet.

Die Zusammenfassung der vom DLR ermittelten Ergebnisse zu der durchgeführten Messung sind in Tabelle 1-2 dargestellt. Hierbei lag die mittlere Temperatur des Rauchgases bei 755 °C. Die potenziell rückgewinnbare thermische Leistung lag im Bereich zwischen 10,00 MW_{th} und 4,51 MW_{th}.

Tabelle 1-2: Ergebnisse der Messung vom 06.12. bis zum 11.12.2013.

Mittlere Temperatur	°C	755		
Minimaltemperatur	°C	600	700	800
Mittlere Leistung	MW _{th}	10,00	7,11	4,51
Messdauer	h	129,0		
Thermische Energie	MWh	1293,9	917,9	582,3

Ermittlung einer statistisch repräsentativen Ofencharge (DLR)

Da der Einschmelzprozess ein Batch-Prozess ist, und keine Charge mit der anderen komplett identisch ist, wurde ein Temperaturverlauf für eine statistisch repräsentative Charge ermittelt. Hierzu dienen die Werte aus der Messung vom 06.12.-11.12.2013 am EAF 1 bei BSW in Kehl. Hierzu wurden die gemessenen Temperaturen zunächst dem jeweiligen Eintrag der elektrischen Energie des EAF zugeordnet. Die eingetragene elektrische Energie dient somit als Indikator für den zeitlichen Fortschritt der aktuellen Charge.

Da die Chargen einen unregelmäßigen Energieeintrag haben, müssen statistisch nicht repräsentative Messpunkte vor Berechnung der mittleren Ofencharge entfernt werden. Dies betrifft zunächst die Menge der zugeführten elektrischen Energie des EAF. Übersteigt die zugeführte Energiemenge einer einzelnen Charge die der gemittelten Chargen, so wird das Ergebnis verfälscht. Dies liegt an der Tatsache, dass für hohe Energiewerte nur sehr wenige Temperaturmessungen zugeordnet werden können. Dies lässt sich dadurch erklären, dass

eine so hohe Stromzuführung nur sehr selten vorkam. Dies war zum Beispiel nach einem längeren Stillstand der Fall.

Nach dem Entfernen aller als Ausreißer definierten Messpunkte ergibt sich die in Abbildung 1-5 dargestellte Verteilung der Messwerte. Es ist zu erkennen, dass sich der grundlegende Ablauf des Ofenprozesses nachvollziehen lässt. Nachdem der erste Schrottkorb chargiert wurde, und der Einschmelzprozess durch die Zufuhr von elektrischer Energie gestartet wurde, steigt die Rauchgastemperatur kurz vor dem Chargieren des zweiten Korbs leicht an. Während des Chargierens des zweiten Schrottkorbes sinkt die Temperatur oft bis auf Hallentemperatur ab, was aber in der dargestellten Temperaturverteilung nicht mehr erkennbar ist. Der Grund hierfür sind Überlagerungen, die durch das Chargieren bei leicht unterschiedlichen Energieeinträgen hervorgerufen werden. Nach dem Schließen des Ofendeckels und erneuter Energiezufuhr steigt die Rauchgastemperatur beim 2. Korb über die Werte des ersten Korbs an. Zum Ende des Batchprozesses wird die Streuung der Messwerte etwas größer. Dieser Effekt entsteht durch die teilweise doch sehr unterschiedlichen elektrischen Energiemengen beim Abstich. Zudem verweilt der Ofen bis zum Abstich ohne weitere Energiezufuhr noch kurze Zeit. So entstehen aus einer Charge bei gleichbleibendem Stromeintrag in den EAF im zeitlichen Verlauf abnehmende Temperaturmesswerte, die die starke Streuung erklären.

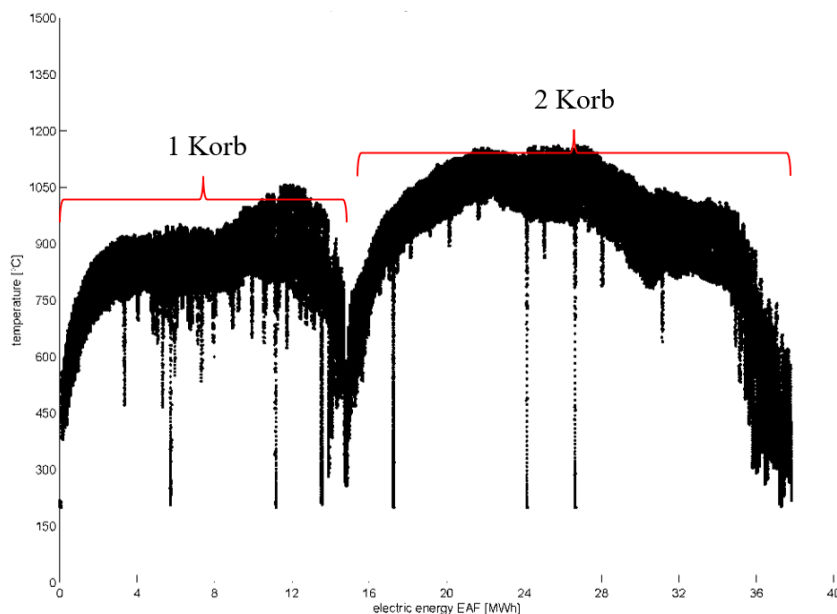


Abbildung 1-5: Repräsentative Charge die aus den Messungen vom 06.12.-11.12.2013 ermittelt wurden.

Aus einer temperaturbezogenen Mittelwertbildung, die sich jeweils auf den ersten bzw. zweiten Schrottkorb bezieht, ergeben sich die mittleren Temperaturen $T_{1.Korb,mittel} = 810 \text{ °C}$ bzw. $T_{2. Korb, mittel} = 914 \text{ °C}$.

Hiermit konnte die qualitative Auswertung der Abbildung 1-5, dass die Rauchgastemperatur des zweiten Schrottkorbs deutlich höher als die mittlere Temperatur des ersten Schrottkorbs liegt, bestätigt werden. Zu beachten ist bei der Betrachtung der beiden Temperaturen, dass es sich nur um Mittelwerte des Betriebs handelt. Die realen Mittelwerte der Rauchgastemperatur (vgl. Tabelle 1-2) fallen deutlich niedriger aus, da hier auch Chargier- und Vorbereitungszeiten des EAF berücksichtigt werden müssen.

1.1.6 Messungen an Ofen 2 (BSE)

Basierend auf den Erfahrungen von BSE ist bekannt, dass sich die Prozessführung wie auch die Konstruktion von E-Öfen und deren Abgassystemen stark unterscheidet. Zum Vergleich

zweier unabhängiger Systeme (E-Ofen und Absaugung) wurde beschlossen neben den Messungen am E-Ofen 1 im Jahr 2013 zusätzliche Messungen am E-Ofen 2 im Jahr 2014 durchzuführen.

Bedingt durch einen Umbau der Entstaubung zwischen den Jahren 2013 und 2014 hat sich das BSW-Entstaubungssystem komplett geändert (vgl. Abbildung 1-6). Beide Ofenlinien wurden physisch getrennt. Ebenso wurde die Absaugleistung erhöht. Für die durchgeführten Messungen hatte dies den Einfluss, dass neben einem anderen Ofen auch ein komplett neues Abgassystem betrachtet werden konnte.

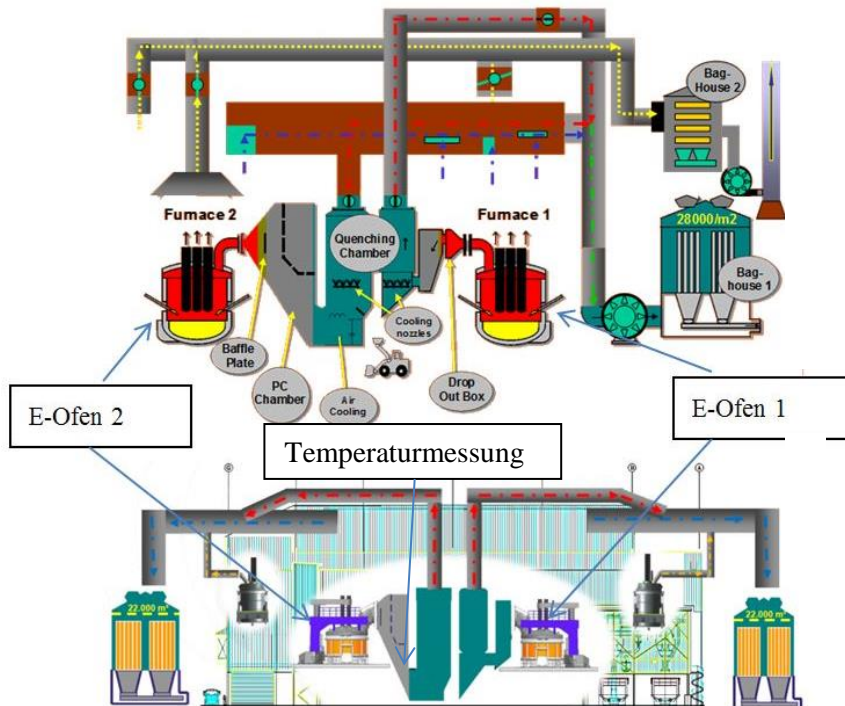


Abbildung 1-6: Vergleich der neuen (unten) und alten (oben) Anordnung des BSW-Entstaubungssystems.

Bedingt durch die Konstruktion der wassergekühlten Abgasanlage des E-Ofens 2 war es nicht möglich, Messöffnungen einzubauen, die sich nah am Ofenkrümmer befinden. Daher wurde eine Messstelle am Übergang der Abgasanlage zur HTQ-Sprühkammer gewählt (vgl. Abbildung 1-6).

1.1.7 Auswertung der Messungen am Ofen 2 (DLR)

Der Volumenstrom des Rauchgases wurde am 27.05.2014 mit einem Pitot-Rohr an der Rauchgasleitung des EAF 2 durch BSE ermittelt. Hierbei wurde ein mittlerer Volumenstrom des Rauchgases von 150.000 m³/h i.N. gemessen. Dieser Volumenstrom wurde vom DLR als Grundlage für die Auswertung der im Jahr 2014 erfassten Temperaturwerte herangezogen.

Stellt man die Messergebnisse aus dem Jahr 2014 in Tabelle 1-3 gegenüber, so lässt sich feststellen, dass die mittleren Rauchgastemperaturen im Rahmen der Messgenauigkeit in derselben Größenordnung liegen. Jedoch ist zu beachten, dass die Messungen immer wieder durch Störungen beeinflusst wurden. Dies hat Auswirkungen auf die gemittelte Rauchgastemperatur. Zudem war die Messposition für eine Temperaturbestimmung nicht optimal. Dies war jedoch aufgrund der Zugänglichkeit der Anlage nicht anders zu realisieren.

Tabelle 1-3: Zusammenfassung der Messergebnisse aus dem Jahr 2014.

		20.03.- 21.03.2014	25.03.- 26.03.2014	26.05.- 27.05.2014	27.05.- 29.05.2014
Mittlere Temperatur	°C	512	553	563	522
Messdauer	h	14,0	29,2	29,1	54,9
Mittlere Leistung bei $T_{\min} = 600^{\circ}\text{C}$	MW _{th}	4,4	5,0	7,3	6,1
Mittlere Leistung bei $T_{\min} = 700^{\circ}\text{C}$	MW _{th}	2,5	2,7	4,7	3,7
Mittlere Leistung bei $T_{\min} = 800^{\circ}\text{C}$	MW _{th}	1,3	1,3	2,7	1,9

1.1.8 Gegenüberstellung der Messungen am Ofen1 und am Ofen 2 (DLR)

Insgesamt wurde im Rahmen des Projekts TESIN für ca. 272 h die Temperatur der Ofenabgase ermittelt und aufgezeichnet. Eine grafische Gegenüberstellung der Temperaturmittelwerte aller Messkampagnen aus den Jahren 2013 und 2014 ist in Abbildung 1-7 dargestellt.

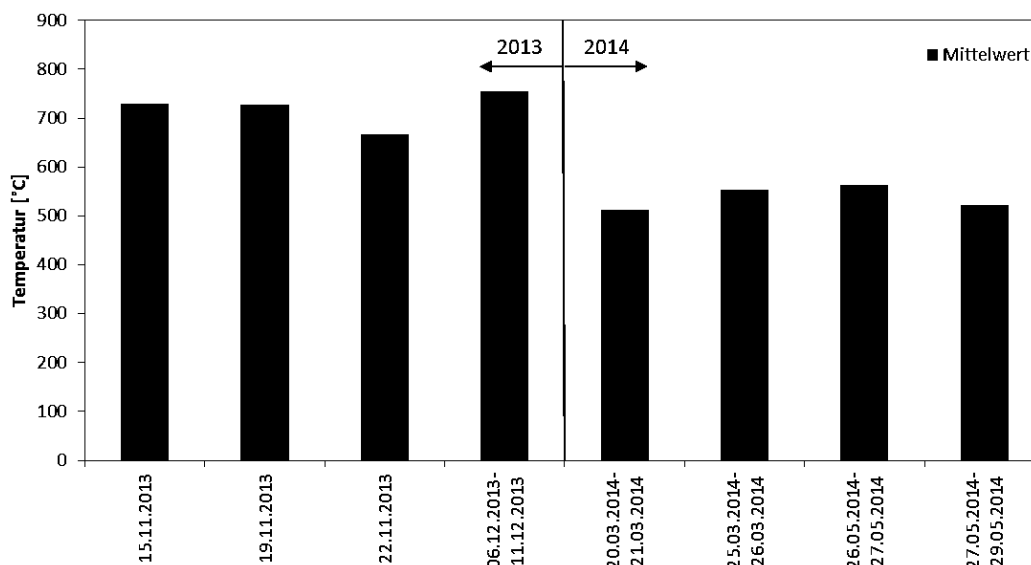


Abbildung 1-7: Gegenüberstellung aller gemessenen mittleren Rauchgastemperaturen.

Die gemessenen und anschließend gemittelten Rauchgastemperaturen am EAF 2 aus dem Jahr 2014 sind im Vergleich zu den gemessenen Rauchgastemperaturen am EAF 1 aus dem Jahr 2013 deutlich niedriger. Die Gründe für diesen Effekt wurden bereits im Kapitel 1.1.6 benannt.

In Abbildung 1-8 ist die ermittelte ideale mittlere auskoppelbare Leistung dargestellt. Je nach betrachteter minimaler Auskopplungstemperatur kann eine unterschiedlich große Energiemenge ausgekoppelt werden.

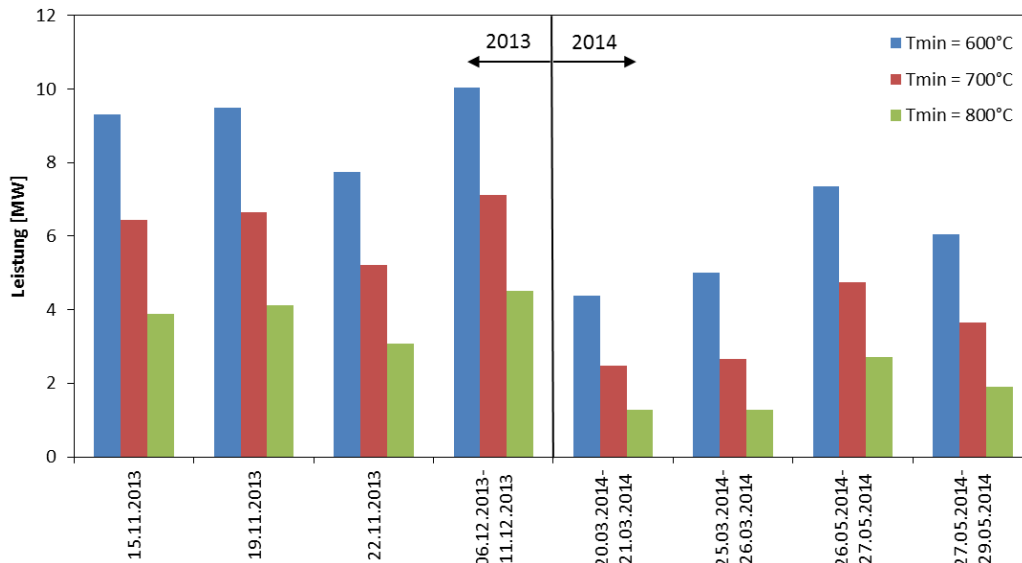


Abbildung 1-8: Gegenüberstellung der ermittelten mittlere auskoppelbaren Leistungen.

1.1.9 Analyse der auskoppelbaren Wärme (DLR)

Um mit einem Wärmeübertrager Wärme auf hohem Temperaturniveau auszukoppeln, musste dieses im Vergleich zur jetzigen Heißwasserkühlung angepasst werden. Hierzu wurde ein Simulationsmodell genutzt, welches in Abbildung 1-9 dargestellt ist.

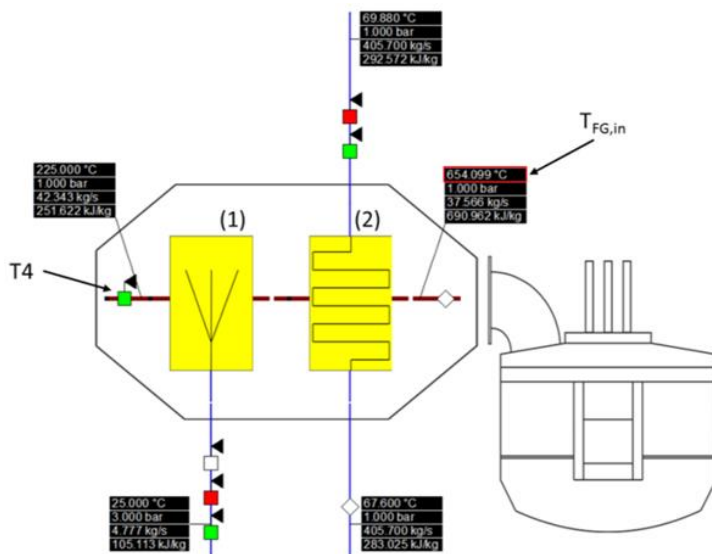


Abbildung 1-9: Simulationsmodell zur Berechnung der Wärmeauskopplung; Rauchgas als FG/flue gas bezeichnet.

Stoffwerte der benutzten Fluide

Zur Auskopplung der thermischen Energie aus den Abgasen des EAFs ist ein Wärmeträgerfluid erforderlich. In Tabelle 1-4 ist eine Auswahl verschiedener HTFs, die für die Anwendung in Frage kommen, gegenüber gestellt.

Tabelle 1-4: Gegenüberstellung verschiedener Wärmeüberträgerfluide^{3 4 5}.

	Erstarrungspunkt [°C]	Stabilitätsgrenze [°C]	NaNO ₃ Mol-%	KNO ₃ Mol-%	NaNO ₂ Mol-%
Solar Salt	238	550 ⁶	66	34	-
Hitec HTS	142	450	7	44	49
VP1	12	400	Biphenyl/Diphenyloxid		

Nach Gegenüberstellung der verschiedenen Wärmeträgerfluide (vgl. Tabelle 1-4) wurde die Salzmischung Hitec HTS für die Auskopplung der Wärme im Rahmen der Arbeiten verwendet. Die zu erwartenden verfahrenstechnischen Betriebsvorteile rechtfertigen daher aus aktueller Sicht die Untersuchung dieser Salzschnmelze. Daher wurden in der Parameterstudie für die Salzschnmelze eine minimale Temperatur von $T_{\text{HTF,Design,min}} = 180 \text{ °C}$ und eine obere Temperaturgrenze von $T_{\text{HTF,Design,max}} = 400 \text{ °C}$ gewählt. Diese obere Grenztemperatur orientiert sich an einer Auswahl möglicher Werkstoffe für den vorliegenden Temperaturbereich. Bei einer Überschreitung dieser Temperatur müssen wesentlich hochwertigere und damit auch teurere Stähle für den Wärmeübertrager bzw. Speicherbehälter verwendet werden. Zudem sinkt mit einer Anhebung der maximalen Fluidtemperatur auf der wärmeaufnehmenden Seite des Wärmeübertragers zugleich die Menge an Wärme, die im Mittel aus dem Rauchgas entnommen werden kann. Dies liegt daran, dass für eine Wärmeübertragung eine treibende Temperaturdifferenz vorhanden sein muss. Liegt die Temperatur des Rauchgases unterhalb der Temperatur des Fluids, so kann keine Wärme mehr aus dem Rauchgas ausgekoppelt werden.

Mit Hilfe des Simulationsmodells wurden unterschiedlichen Wärmeübertragerflächen errechnet. Für den Wärmeübergangskoeffizienten auf Salz- und Rauchgasseite des Wärmeübertragers wurden gängige Werte aus der Fachliteratur⁷ abgeschätzt.

Die Auslegungskriterien für die Wärmeübertrager sind:

- Rauchgas – Eintrittstemperatur: $T_{\text{FG,Design,in,max}} = 1.400 \text{ °C}$
- Wärmeübergangskoeffizient Rauchgas: $\alpha_{\text{FG}} = 50 \text{ W/m}^2\text{K}$
- HTF: Hitec HTS, NaNO₂-KNO₃-NaNO₃ (eu)
- HTF – Eintrittstemperatur: $T_{\text{HTF,in}} = 225 \text{ °C}$
- HTF – Austrittstemperatur: $T_{\text{HTF,Design,out}} = 400 \text{ °C}$
- HTF – Wärmeübergangskoeffizient: $\alpha_{\text{HTF}} = 500 \text{ W/m}^2\text{K}$

³ Costal Chemical Co.: HITEC® Heat Transfer Salt. Datenblatt.

⁴ Sigel, P.; Bradshaw, W.; et al.: Thermophysical Property Measurement of Nitrate Salt Heat Transfer Fluids. Proceedings of the ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability ES2011 August 7-10. 2011, Washington, DC, USA.

⁵ Bradshaw, R. W.; Siegel, N. P.: Molten Nitrate Salt Development for Thermal Energy Storage in Parabolic Trough Solar Power Systems. Proceedings of ES2008 Energy Sustainability 2008 August 10-14. 2008, Jacksonville, Florida, USA

⁶ Bauer, T.; et al.: Material Aspects of Solar Salt for Sensible Heat Storage. Innostock 2012.

⁷ Cerbe, G.; Wilhelms, G: Technische Thermodynamik. Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen. 14. Auflage. Carl Hanser Verlag München, Wien. 2005

Simulationsergebnisse

Das Ergebnis der durchgeführten Parameterstudie ist in Abbildung 1-10 dargestellt. Hierbei wurde die Fläche des Wärmeübertragers schrittweise vergrößert.

Durch diese Variation der Fläche des Wärmeübertragers kann das Verhalten der mittleren auskoppelbaren Leistung ermittelt werden, bzw. umgekehrt, wie groß die Fläche für die festgelegten $10 \text{ MW}_{\text{th}}$ an thermischer Leistung sein muss, die im Rahmen des Projekts TESIN mit dem Projektpartner BSE als entnehmbare Leistung festgelegt wurde.

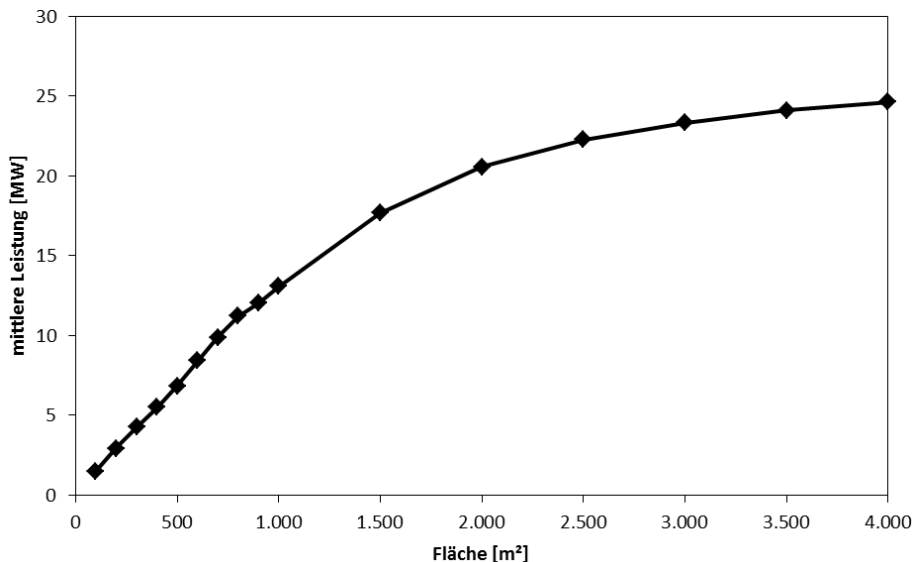


Abbildung 1-10: Auskoppelbare thermische Leistung aus dem Rauchgas in Abhängigkeit der Wärmeübertragerfläche.

Es ist festzustellen, dass sich die ausgekoppelte thermische Energie zunächst bis zu einer Fläche von ca. 900 m^2 nahezu linear zur in den Rauchgasstrom eingebrachten wärmeübertragenden Fläche verhält (vgl. Abbildung 1-10). Danach flacht die entnommene mittlere Leistung deutlich ab. Dies bedeutet, dass jeder weitere Quadratmeter keinen gleichwertigen Zuwachs an entnommener mittlerer Leistung verspricht. Erhöht man die Fläche trotzdem weiter, so nähert sich die entnommene mittlere Leistung asymptotisch einem maximalen Endwert von circa $25 \text{ MW}_{\text{th}}$.

Betrachtet man nun das zuvor festgelegte Ziel, einen Wärmeübertrager mit einer Fläche für eine mittlere Wärmeauskopplung von ca. $10 \text{ MW}_{\text{th}}$ zu konzipieren, so kann festgestellt werden, dass hierfür eine Fläche von ca. 800 m^2 benötigt wird. Die errechneten Temperaturverläufe für den Eintritt und den Austritt des gewählten Wärmeübertragers mit einer Fläche von 800 m^2 sind Abbildung 1-11 aufgetragen.

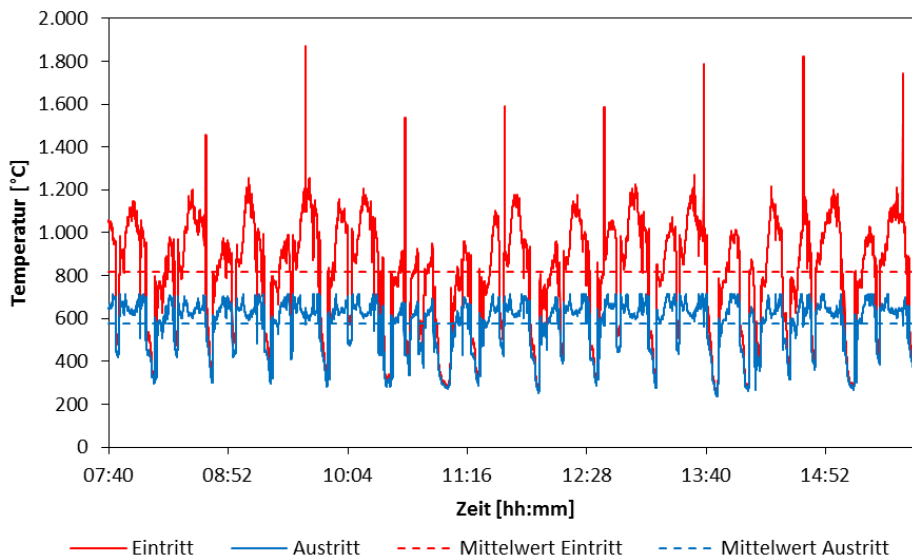


Abbildung 1-11: Verlauf der Rauchgastemperaturen am Eintritt und am Austritt des Wärmeübertragers.

Zusammenfassung

Durch die durchgeführten Simulationen mit verschiedenen Wärmeübertragern mit einer Salzschnmelze als Wärmeübertragermedium kann gezeigt werden, dass mit einer ausreichend großen Wärmeübertragerfläche sehr viel Wärme aus dem Rauchgas entnommen werden kann. Jedoch ist hierbei zu beachten, dass für eine Auskopplung von circa $10 \text{ MW}_{\text{th}}$ thermischer Leistung eine Wärmeübertragerfläche von circa 800 m^2 erforderlich ist.

Zu beachten ist abschließend, dass es sich bei den durchgeführten Simulationen nicht um eine detaillierte Auslegung eines Wärmeübertragers handelt. So wurden Randbedingungen wie die Rußschichten, die durch das verschmutzte Rauchgas entstehen, nicht berücksichtigt. Zudem wurde der Einfluss der Staubbelastung auf die Gasstrahlung bzw. die mechanische Festigkeit eines eingesetzten Wärmeübertragerwerkstoffs nicht untersucht und bewertet. Der durch den Wärmeübertrager entstehende Druckverlust im Rauchgasstrom wurde ebenfalls nicht berücksichtigt. Dieser ist für eine spätere Realisierung eines solchen Vorhabens von entscheidender Bedeutung, da dieser Druckverlust mit einer Vergrößerung der elektrischen Leistung des Saugzuges einhergeht.

1.1.10 Wärmesenken (BSE)

Thermische Energiespeicher koppeln Wärmequellen und Wärmesenken. Um solche Energiespeicher in AP 1.2 konzipieren zu können, wurden mögliche Wärmesenken untersucht.

Der Fokus lag dabei vorwiegend auf neuen bisher ungenutzten Verfahren, welche in Stahlwerken noch nicht flächendeckend eingesetzt werden. Die Gründe hierfür lagen oft in der schlechten Bereitstellung der Abwärme bedingt durch die Batchfahrweise des Elektrolichtbogenofens (E-Ofen). Durch den thermischen Energiespeicher, welcher im Rahmen des TESIN-Projekts konzipiert wurde, sollte eine kontinuierliche Abwärmerückgewinnung im Hochtemperaturbereich möglich sein.

Stahlwerke, die über die passende Infrastruktur verfügen, nutzen oft bereits ihre Abwärme um z.B. Nah- bzw. Fernwärmenetze zu versorgen. Daher lag das Augenmerk im AP 1 im Bereich der wirtschaftlichen Nutzbarmachung der Abwärme in Stahlwerken ohne externe Infrastruktur. Als aussichtsreichste Möglichkeit wurde die Verstromung der Abwärme gesehen. Diese Möglichkeit ist, bezogen auf den Wirkungsgrad, schlechter als die direkte Wärmenutzung. Genau in dieser Erschließung ungenutzter Potenziale wurde die Notwendigkeit neuer Aspekte in Forschung & Entwicklung und auch ein großer Potenzial zur Verbesserung der Gesamteffizienz des Elektrostahlprozesses im Rahmen des Projekts TESIN gesehen.

Die favorisierte Nutzung der Abwärme sieht eine direkte Verstromung der zurückgewonnenen thermischen Energie vor. Als potenzielle Möglichkeit steht hier der klassische Prozess einer Wasserdampfturbine zur Verfügung. Alternativ lassen sich auch Möglichkeiten mit organischen Verdampfungsmedien, wie z.B. ORC-Motoren bzw. ORC-Turbinen, realisieren. Als Zielsetzung wurde eine elektrische Energieerzeugung im Bereich von ca. 3 MW_{el} festgelegt.

Um eine möglichst hohe Verwertbarkeit der Abwärme zu erreichen, wird ein 2-stufiges Energierückgewinnungskonzept verfolgt. Hierbei soll die zurückgewonnene Wärme aufgrund des Temperaturniveaus und der ausgekoppelten thermischen Leistung mit einem Dampfkraftprozess verstromt werden. Dies kann unabhängig von den infrastrukturellen Rahmenbedingungen geschehen. Mit der Abwärme aus dem Verstromungsprozess kann eine Absorptionskältemaschine betrieben werden, welche den Kühlbedarf des Stahlwerkes abdeckt.

1.1.11 Mögliche Speichervarianten (DLR)

Für die Wärmerückgewinnung im Rauchgaskanal des EAF wurden verschiedene Speichertechnologien betrachtet. Diese Speichertypen sind:

- Zwei-Tank Flüssigsalz
- Partikelspeicher
- Latentwärmespeicher
- Thermochemischer Speicher

Die Vorteile und Nachteile dieser Varianten für diesen Prozess werden hier kurz erörtert.

Zwei-Tank Flüssigsalzspeicher

Flüssigsalzspeicher haben ein sensibles Speichermedium, was bedeutet, dass dieses Material mit zunehmendem Enthalpiegehalt an Temperatur zunimmt. Das Speichermedium ist ein Salz, das über seine Schmelztemperatur aufgeheizt und zwischen zwei Temperaturen be- und entladen wird. Typischerweise werden Nitratsalze verwendet, zum Beispiel das sogenannte Solar Salt (siehe Tabelle 1-4). In einem Zwei-Tank Flüssigsalzspeicher gibt es einen heißen und einen kalten Vorrattank, wobei der kalte Tank immer über der Schmelztemperatur des Salzes gehalten wird. Das Salz wird vom kalten Behälter über eine wärmeübertragende Fläche gepumpt und beladen. Anschließend fließt das Salz in den heißen Tank und wird dort gespeichert. Für die Entladung wird das Salz vom heißen zum kalten Tank gepumpt, wiederum über die wärmeübertragende Fläche. Da die Temperaturen durch die Auslegung und den Prozess konstant gehalten werden, kann ein Zwei-Tank Speicher eine konstante Leistung bei konstanter Temperatur bereitstellen, so lange genug Speicherkapazität vorhanden ist. Diese Leistungs- und Temperaturstabilität ist für manche Wärmesenken von großem Vorteil, da manche Verstromungsprozesse am effektivsten konstant laufen.

Das ausgewählte Speichermedium muss eine möglichst geringe Erstarrungstemperatur besitzen, um die Gefahren einer Erstarrung zu vermeiden. Gleichzeitig wird eine ausreichend hohe Temperatur, bei der das Salz noch thermisch stabil ist, benötigt.

Es ist möglich, den Speicher mit einem Wasser/Dampf-Kreislauf über einen Wärmeübertrager zu be- und zu entladen. Die Pumpwege vom Salz können damit kurz gehalten werden. Da im Elektrostahlwerk aber eine zweite Wärmeübertragung vom Rauchgas auf Wasser/Dampf nötig wäre, würde man aber diesen Wärmeübertrager einsparen und die Be- und Entladung direkt vom Rauchgas auf flüssigsalzführende Leitungen planen. Somit ist eine Speicherung bei sehr hohen Temperaturen möglich. Diese Verschaltung hat den Nachteil, dass die Temperaturschwankungen im Rauchgas im Betriebsbereich des Salzes liegen müssen, wobei die Stahlrohre, in dem das Speichermedium fließt für die Wärmeübertragung eine gewisse Trägheit besitzen, so dass einige Spitzen und Tiefen geglättet werden.

Zwei-Tank Speicher sind für andere Anwendungen kommerziell verfügbar und bekannt. Allerdings wurden sie noch nicht für industrielle Anwendungen weiterentwickelt. Die Nachteile dieser Technologie für den Elektrostahlwerksprozess können durch Planung berücksichtigt und minimiert werden. Dieser Speichertyp wurde in AP 1.2 weiter berücksichtigt.

Partikelspeicher

Partikelspeicher sind sensible Speicher, in denen zum Beispiel Sand als wärmeübertragendes und wärmespeicherndes Material zugleich zum Einsatz kommt. Diese Speichertechnologie wird zurzeit am Institut für Technische Thermodynamik und am Institut für Solarforschung am DLR untersucht. Sowohl das Wärmeübertragungsverhalten in Wanderbettwärmeübertragern wie auch verschiedene Schüttgüter mit Variationen in Korngröße und Material und deren Eigenschaften, z.B. geometrische, thermophysikalische und rheologische Eigenschaften sowie mechanisches und thermomechanisches Verhalten (Zyklentests) und Abriebsverhalten werden erforscht.

Sowohl ein direkter als auch ein indirekter Kontakt zwischen dem heißen Medium und den Partikeln ist möglich. Im direkten Kontakt, wie er für konzentrierende Solarturmkraftwerke konzipiert wird, wird ein sauberes Gas (aufgeheizte Luft) an fallenden Partikel vorbeigeleitet und gibt dabei Wärme an diese ab. Die Partikel werden im Luftstrom hineingerieselt und am unteren Ende wieder aufgefangen. Die heißen Partikel können im Speicher gelagert werden und dann über einen anderen Wärmeübertrager die Wärme an einem Wasser-/Dampfkreislauf abgeben. Hierzu wird ein indirekter Kontakt vorgesehen. Ein indirekter Kontakt zwischen dem heißen Medium und den Partikeln ist auch dann sinnvoll, wenn das heiße Medium flüchtig oder für die Partikel kontaminierend wäre.

Einen Vorteil von Partikelspeichern ist ihre Temperaturunempfindlichkeit. Das Speichermedium kann nicht erstarren, so dass Temperaturuntergrenzen unkritischer als bei Zwei-Tank Flüssigsalzspeichern sind. Je nach Partikelmaterial gibt es Temperaturobergrenzen, da die Partikel auch zerfallen oder schmelzen können. Allerdings haben die Partikel einen vergleichsweise schlechten Wärmeübergang, was eine große Fläche im Wärmeübertrager erfordert.

Im EAF Rauchgaskanal müsste das Speichermedium indirekt die Wärme vom Rauchgas aufnehmen, da das staubbeladene Rauchgas die Partikel sonst schnell erodieren wie auch kontaminieren würde. Aus diesem Grund sollten die Partikel in diesem Fall durch Rohre im Rauchgaskanal strömen. Damit haben die einzelnen Partikel keinen Kontakt mit dem heißen Medium. Durch den schlechteren Wärmeübergang wäre die Oberfläche der Rohre circa zweimal größer als die benötigte Oberfläche von flüssigsalzführenden Rohren. Die Betriebsführung des partikelbasierten Speichers wäre im Vergleich zum Flüssigsalz einfacher, da die Partikel nicht erstarren können. Allerdings wäre eine Integration eines Partikelspeichersystems im EAF kompliziert, da das Einrieseln, das Auffangen, die Förderung und die Speicherung der Partikel einige offene Fragen aufweisen.

Für den Referenzfall im Projekt TESIN wurde wegen dieser offenen Fragestellungen diese Speichertechnologie nicht weiterverfolgt.

Latentwärmespeicher

Latentwärmespeicher nutzen die Phasenwechselenthalpie des Speichermaterials aus, um in einem, im Vergleich zu sensiblen Speichern, kleineren Temperaturbereich viel Energie speichern zu können. Der Phasenwechsel im Speichermaterial kann prinzipiell von fest zu fest, fest zu flüssig oder flüssig zu gasförmig erfolgen. Der Wechsel von fester zu flüssiger Phase im Speichermaterial wird häufig untersucht, da die Volumenänderung im Vergleich zum Phasenwechsel flüssig-gasförmig klein ist. Der Phasenwechsel fest-fest wird bisher hauptsächlich akademisch untersucht.

Ein Ziel bei der Auslegung von Latentwärmespeichern ist es, die Schmelztemperatur des Speichermaterials an den Temperatur- und Druckbereich des Wärmeträgermediums anzupassen, so dass dieses während der Be- und Entladung auch einen Phasenwechsel erfährt. Der Vorteil hiervon ist, dass das Wärmeträgermedium bei einer konstanten Temperatur aus dem Speicher austritt und gleichzeitig die Grädigkeit im Wärmeübergang im Speicher über den kompletten Speicherbetrieb klein bleibt. Allerdings ist die Schmelztemperatur des Speichermaterials eine Materialeigenschaft, so dass eine Anpassung auf der Speichermaterialseite nur durch eine Änderung des Materials stattfinden kann. Die Temperatur- und Druckbereiche des Wärmeübertragermediums, häufig Wasser/Dampf, sind oft vom Prozess vorgegeben. Im Projekt TESIN und anderen Projekten am DLR werden Fragen zur Systemeinbindung sowie Auslegung von Latentwärmespeichern erforscht. Ein Nachteil von Phasenwechselmaterialien sind ihre schlechten Wärmeleitfähigkeiten, so dass verschiedene Ansätze untersucht werden, um Wärme schnell bzw. kontrolliert in und aus dem Speicher zu bringen.

Der große Volumenstrom des Rauchgases kann nicht in einem Rohrbündel geführt werden, um Wärme in den Speicher zu transportieren, weil das zu einem unverhältnismäßig großen Anstieg der nötigen Saugleistung führen würde. Daher muss ein Zwischenkreislauf eingeführt werden, in dem mit Wasser/Dampf Wärme aus dem Rauchgas ausgekoppelt wird und dann im Speicher wieder abgegeben wird. Durch diese doppelte Wärmeübertragung (vom Rauchgas zu Wasser/Dampf und vom Wasser/Dampf zu Speichermaterial) treten zwei Temperaturabsenkungen durch Grädigkeiten auf. Um die Wärmeauskopplung auf hohem Temperaturniveau zu halten, müsste der Wasser/Dampf-Kreislauf druckbeladen sein. Die Integration von einem druckbeladenen Wasser/Dampf-Wärmeübertrager im Rauchgaskanal mit dem mit Partikeln beladenen Rauchgas birgt Sicherheitsrisiken von Rohrreißen.

Da die Möglichkeiten für eine Wärmeauskopplung auf hohem Temperaturniveau mit Latentwärmespeichern in diesem Industrieprozess eingeschränkt sind, wurde diese Technologie für AP 1.2 nicht weiter betrachtet.

Thermochemische Speicher

Thermochemische Speicher nutzen die Reaktionsenthalpie in reversible Reaktionen aus, um Wärme in einem System zu speichern und zu einem anderen Zeitpunkt zu entkoppeln. Für die Beladung von einem thermochemischen Speicher reagiert ein Feststoff (AB) endotherm zu einem Feststoff (A) und einem Gas (B). Diese Materialien können getrennt gelagert werden. Dadurch kann thermische Energie einerseits verlustfrei über einen längeren Zeitraum gespeichert und andererseits die Rückreaktion zum gewollten Zeitpunkt gestartet werden. Wenn der Speicher entladen werden soll, werden die zwei Reaktanten zusammengebracht, wobei der Gasdruck über die Reaktionstemperatur, also über die maximale Entladungstemperatur, entscheidet. Durch das Prinzip der chemischen Speicherung von Wärme ergeben sich unterschiedliche Vorteile, wie hohe Speicherdichten, verlustfreie Langzeitspeicherung oder die Möglichkeit der Wärmetransformation. Darüber hinaus stehen teilweise sehr kostengünstige Speichermaterialien zur Verfügung. Je nach Reaktionssystem kann die thermochemische Speicherung in einem breiten Temperaturbereich angewendet werden – von unterhalb der Raumtemperatur bis zu 1.000 °C.

Die Speicherdichten von sensiblen Speichersystemen sind im Bereich von 25-30 kWh/m³. In Latentwärmespeichern werden Speicherdichten von 50-100 kWh/m³ erreicht. In thermochemischen Speichern dagegen sind die erwarteten und zum Teil gemessenen Speicherdichten zwischen 250-400 kWh/m³. Diese hängen allerdings insbesondere bei thermochemischen Speichern entscheidend von der Integration des Speichers ab.

Wie oben beschrieben, können die Materialien im beladenen Zustand getrennt voneinander gelagert werden. Damit muss für eine Entladung nur die sensible Wärme zur Vorwärmung der Komponenten auf ihre Reaktionstemperatur aufgebracht werden, wodurch thermochemische Speicher insbesondere für lange Speicherzeiten sehr interessant sind.

Durch die Gas-Feststoff-Reaktion können thermochemische Speicher auch mit einer Wärmetransformation kombiniert werden. Dabei kann die Entladungstemperatur des Speichers durch eine Drucksteigerung des Gases oberhalb der zur Beladung notwendigen Temperatur liegen. Dies ist insbesondere für die thermische Aufwertung von Prozesswärme interessant.

Der Einsatz von kostengünstigen Materialien ist ein weiterer Vorteil gegenüber zum Beispiel Latentwärmespeicher oder Flüssigsalzspeicher. Einer der Reaktionen, an dem das DLR forscht, ist die Reaktion von Löschkalk (Ca(OH)_2) zu Calciumoxid (CaO) und Wasser (H_2O). Diese Reaktion findet bei Temperaturen zwischen 400 und 600 °C statt.

Ein Prototyp dieses thermochemischen Speichers, mit einer Speichermasse von 20 kg, wird derzeit am DLR untersucht. Die aktuellen Forschungsthemen in diesem grundlagennahen Gebiet liegen hauptsächlich in der Bewegung der Feststoffkomponenten während der Reaktion, der Variation der Druck und Temperaturparameter, sowie generelle Materialuntersuchungen.

Löschkalk wird im Elektrostahlwerksprozess verwendet und ist somit schon im Stahlwerk vorhanden. Zudem ist häufig auf Grund von gewachsenen Strukturen, wie bspw. am BSW Standort in Kehl, das Volumen des Speichers ein kritischer Faktor. Eine mögliche Kombination der hohen Speicherdichten mit den prinzipiell vorhandenen Reaktanten macht diese Technologie daher grundsätzlich sehr interessant für den adressierten Prozess. Die thermochemischen Reaktionen benötigen allerdings eine Mindestqualität der Fest- und Gasstoffe um einen zyklenstabilen Prozess zu gewährleisten. Der im Prozess vorhandene Löschkalk ist dafür mit großer Wahrscheinlichkeit ungeeignet. Zudem führen die extremen Temperaturschwankungen nach heutigem Kenntnisstand zu sehr schwer kontrollierbaren chemischen Reaktionen, sodass diese Speichertechnologie in diesem Projekt nicht weiter betrachtet wird.

AP1.2 Entwicklung eines Referenzkonzepts und wirtschaftliche Beurteilung (BSE, DLR, BSW)

Im Rahmen des AP 1.2 wurde ein Referenzkonzept basierend auf Zwei-Tank Flüssigsalzspeicher entwickelt und bewertet. Es wurde eine Kapitalrücklaufzeit von 12,5 Jahren ermittelt, welche allerdings nur mit großen Unsicherheiten bestimmt werden konnte. Ein Referenzkonzept mit einer elektrischen Leistung von 2,9 MW_{el} wurde erstellt. Mit diesem können die Hauptventilatoren mittels Abwärme betrieben werden. Die Untersuchungen im Rahmen dieses Arbeitspaketes haben gezeigt, dass es im Bereich der Wärmeauskopplung auf hohem Temperaturniveau noch Forschungsbedarf gibt.

1.2.1 Entwicklung des Referenzkonzepts (DLR)

Durch die Abbildung der Energieströme im Elektrostahlprozess im Rahmen von AP 1.1 ist die zur Verfügung stehende Energiemenge, die aus dem Abgas des Elektrolichtbogenofens zurückgewonnen werden kann, bekannt. Da im Stahlwerk viele Kleinverbraucher elektrisch zu versorgen sind, wurde vom Projektpartner BSE eine Verstromung der zurückgewonnenen thermischen Energie als zielführend identifiziert. Daher wurde das in Abbildung 1-12 dargestellte Referenzkonzept zur Energierückgewinnung konzipiert. Hierbei wird die aus dem Rauchgas zurückgewonnene thermische Energie in einem thermischen Energiespeicher zunächst gepuffert, um anschließend in einem klassischen Verstromungsprozess in elektrische Energie und Abwärme umgewandelt zu werden. Da die Auskopplung der thermischen Energie auf hohem Temperaturniveau geschieht, ist es denkbar, dass bei längeren Produktionsunterbrechungen der Wärmeübertrager durch den kalten Rauchgasvolumenstrom so stark abgekühlt wird, dass Wärme auf das Rauchgas übertragen wird.

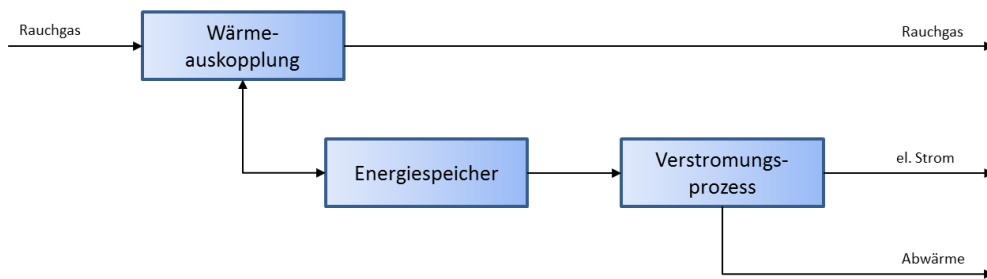


Abbildung 1-12: Energieströme im entwickelten Referenzkonzept zur Energierückgewinnung aus dem Lichtbogenprozess.

Simulationsmodell für das Referenzkonzept (DLR)

Die bereits im AP 1.1 erstellten Einzelmodelle wurden im Rahmen der Arbeiten zum AP 1.2 zu einem gekoppelten Gesamtmodell verschaltet. Für die Modellierung des gesamten Prozesses wurde die Simulationsumgebung Epsilon Professional verwendet. Eine schematische Darstellung der Energieflüsse des Gesamtmodells ist in Abbildung 1-13 dargestellt. Basierend auf den drei Teilsystemen Quelle, Speicher und Senke wurden alle relevanten Energieströme des Prozesses abgebildet und so im Modell berücksichtigt.

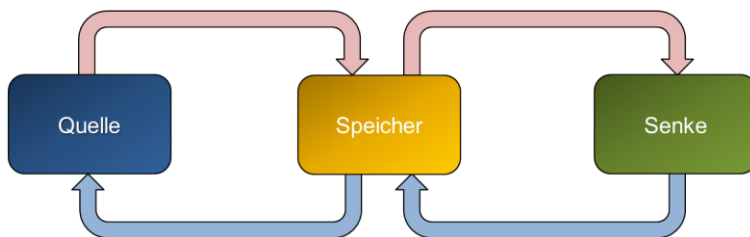


Abbildung 1-13: Energieflussschema des Referenzkonzepts zur Wärmerückgewinnung aus dem Abgas des Elektrolichtbogenofens der BSW in Kehl.

Das Simulationsmodell in Abbildung 1-14 entspricht von seinem logischen Aufbau dem Energieflussschema des Prozesses in Abbildung 1-13. Demnach wird dem thermischen Energiespeicher über einen Wärmeübertrager im Abgasstrom des Elektrolichtbogenofens Wärme diskontinuierlich zugeführt. Der thermische Energiespeicher glättet bzw. puffert die Leistungsabgabe auf ein zeitlich konstantes Niveau. Als Energiesenke wurde ein Simulationsmodell eines Clausius-Rankine-Prozesses an den Energiespeicher angeschlossen. Die Teilsysteme sind über Thermofluidleitungen miteinander verbunden. Zur Beladung des Speichers wird über eine Pumpe die Salzschnmelze aus dem kalten Tank in den Wärmeübertrager geleitet. Dort wird diskontinuierlich Wärme vom Rauchgas auf die Salzschnmelze übertragen. Erreicht die Salzschnmelze ihre Zieltemperatur von 400 °C, so wird sie im heißen Speicher zwischengelagert. Ist die Temperatur des Rauchgases, z.B. bei Betriebsunterbrechungen, zu gering um die Salzschnmelze ausreichend zu erwärmen, so wird diese über eine Bypassleitung in den kalten Salzbehälter zurückgeleitet. Zur Dampferzeugung wird eine konstante Salzmenge aus dem heißen Speichertank entnommen und dem Clausius-Rankine-Prozess, bestehend aus Dampferzeuger und Turbine, zugeführt. Hier wird Frischdampf erzeugt, der anschließend von der Turbine in elektrische Energie umgewandelt wird.

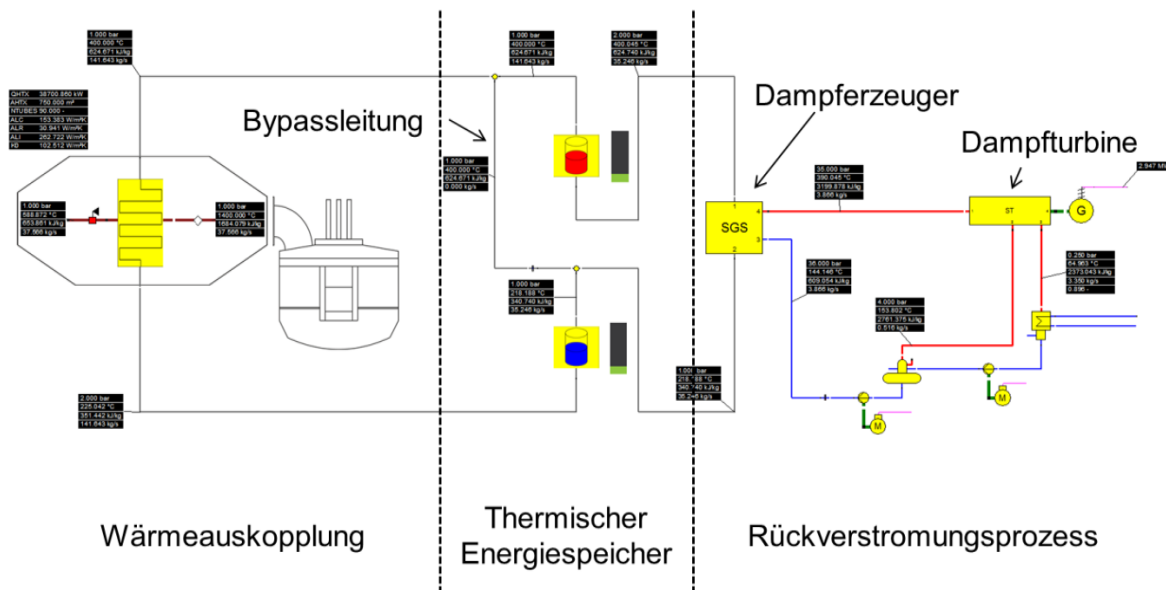


Abbildung 1-14: Screenshot des gekoppelten Simulationsmodells zur Simulation des gesamten Wärmerecoverykonzepts mit Energiequelle, thermischem Energiespeicher und Energiesenke.

In Tabelle 1-5 sind die Auslegungsdaten für die Wärmeauskopplung und den Rückverstromungsprozess angegeben. Grundlage für die Definition von 10 MW_{th} Nennleistung war eine Orientierung an der bereits bestehenden Wärmeauskopplung.

Tabelle 1-5: Auslegungsdaten des Simulationsmodells zur Berechnung des Referenzkonzepts.

Mittlere auskoppelbare Leistung	10,1	MW _{th}
Fläche	800	m ²
Thermische Nennleistung	10	MW _{th}
Frischdampfdruck	35	bar
Frischdampf Temperatur	390	°C
Elektrische Bruttoleistung	2,9	MW _{el}
Wirkungsgrad	29	%

Basierend auf der Größe der Energiequelle wurde ein passender Senkenprozess ausgelegt. Dieser wurde ebenfalls auf eine mittlere Leistung von 10 MW_{th} ausgelegt. Durch die sehr kleine Größe der in Frage kommenden Dampfturbinen liegt der Wirkungsgrad bei nur circa 29 %. Dies bedeutet, dass insgesamt 2,9 MW_{el} Strom aus der Abwärme des Elektrolichtbogenofens erzeugt werden kann. Die verbleibenden 7,1 MW_{th} müssen auf einem Temperaturniveau von ca. 60 °C abgeführt werden, können aber noch für Heizzwecke Verwendung finden. Sollte die Abwärme auf einem höheren Temperaturniveau genutzt werden, so bleibt nur die Anhebung des Kondensatordrucks übrig. Dies bedeutet im Umkehrschluss aber auch, dass der Wirkungsgrad des Verstromungsprozesses absinkt. Bei der Betrachtung des Gesamtwirkungsgrads kann dieser jedoch aufgrund von Synergieeffekten ansteigen.

Die erforderliche Speichergöße wurde iterativ bestimmt. Als Basis diente die Temperaturzeitreihe des Elektrolichtbogenofens vom 19.11.2013. Als Optimierungsziel wurde festgelegt, dass das System dann optimal ausgelegt ist, wenn zu jederzeit genügend Salz zur Kühlung des Wärmeübertragers bereitgestellt werden kann. Das Simulationsergebnis für das Speichersystem ist in Abbildung 1-15 dargestellt. Demnach ist eine Salzmasse von 70 t ausreichend um die vom Elektrolichtbogenofen abgegebene Leistung rein sensibel zu speichern.

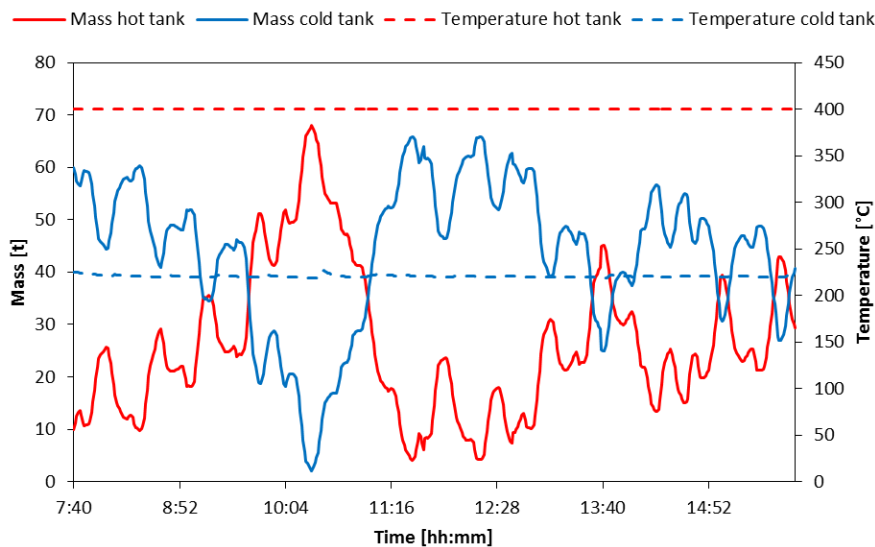


Abbildung 1-15: Verlauf der Salzmassen und Salztemperaturen im heißen und kalten Speichertank.

In Tabelle 1-6 sind die wichtigsten Ergebnisse aus der Simulation des Prozesses dargestellt. Demnach besitzt der ausgelegte Speicher für das Referenzkonzept eine Speicherkapazität von 5.300 kWh. Die thermische Energiemenge, die mit Hilfe des ausgelegten Wärmeübertragers aus dem Rauchgas im betrachteten Zeitraum entnommen werden kann, beträgt insgesamt 83 MWh. Hieraus konnte, mit der auf Stromerzeugung optimierten Wärmesenke, eine elektrische Energiemenge von ca. 24 MWh erzeugt werden. Diese kann z.B. im Stahlwerk zur Versorgung von Kleinverbrauchern herangezogen werden.

Tabelle 1-6: Ergebnisse der Berechnung des Referenzkonzepts.

Salzinventar	70	t
Speicherkapazität	5.300	kWh
Temperatur kalter Tank	225	°C
Temperatur heißer Tank	400	°C
Gesamt ausgekoppelte Energie	83	MWh _{th}
Gesamt umgewandelte Energie	24	MWh _{el}

Berechnung der Investitionskosten für den Referenzspeicher (DLR)

Zur Prüfung der Wirtschaftlichkeit war es erforderlich, die Investitionskosten des im Rahmen von AP 1.2 ausgelegten thermischen Energiespeichers abzuschätzen. Für eine detaillierte Betrachtung der Kosten werden folgende Teilkomponenten betrachtet:

- Behälter für das Speichermaterial
- Speichermaterial
- Pumpen zur Förderung des Speichermaterials
- Wärmedämmungsmaterial
- Abschätzung indirekter Kosten wie z.B. Planungs- und Auslegungskosten

Diese Kosten sind nach den Erläuterungen in Tabelle 1-7 zusammengefasst.

Behälter für das Speichermaterial

Die Speicherbehälter müssen jeweils die gesamte Salzschnmelze von ca. 70 t im heißen Zustand aufnehmen können. Hierfür ist ein Behältervolumen von ca. 40 m³ erforderlich. Aus

einer überschlägigen Berechnung des als liegender Tank ausgeführten Behälters, lässt sich eine benötigte Stahlmasse von ca. 6 t berechnen. Aus dem abgeschätzten Gewicht können dann die Investitionskosten von 38 T€ abgeschätzt werden. Dieser Preis⁸ beinhaltet sowohl die reinen Materialkosten für den Behälterstahl, sowie die zur Produktion notwendige Arbeitszeit.

Speichermaterial

Als Speichermaterial kommt beim Referenzkonzept für die Wärmeauskopplung eine Salzschnmelze aus Natriumnitrit (NaNO_2), Kaliumnitrat (KNO_3) und Natriumnitrat (NaNO_3), sogenanntes Hitec HTS, zum Einsatz. Diese Salzschnmelze kostet ca. 1.000 €/t⁹. Daher ergeben sich Gesamtkosten von 70 T€ für das Speichermaterial.

Pumpen zur Förderung des Speichermaterials

Zur Berechnung der Investitionskosten der Förderpumpen für das Speichermaterial wurde die jeweils notwendige Pumpenleistung über den zu erwartenden Druckverlust im Energierückgewinnungssystem abgeschätzt. Aus der Fachliteratur⁸ wurden dann die groben Kosten der beiden Pumpen abgeschätzt. Die Gesamtkosten für die beiden Pumpen belaufen sich daher auf ca. 7 T€.

Wärmedämmungsmaterial

Das Volumen des Wärmedämmungsmaterials wurde basierend auf den Abmessungen der ausgelegten Behältergröße abgeschätzt und beträgt ca. 18 m³. Mit Hilfe der spezifischen Kosten für das Wärmedämmungsmaterial⁹ und dessen aufwändige Montage bzw. Verkleidung lassen sich Gesamtkosten von 53 T€ berechnen.

Abschätzung indirekter Kosten

Durch die Planung, Auslegung und Genehmigung einer solchen Speicheranlage entstehen weitergehende Kosten, die im jetzigen Konzeptstadium nur sehr schwer abgeschätzt werden konnten. Für die Abschätzung der indirekten Kosten wurden 50 %¹⁰ der direkten Kosten (in Summe 168 T€) pauschal angesetzt. Nach diesem Ansatz betragen die indirekten Kosten des Speichers ungefähr 84 T€.

Gesamtkosten

Aus den direkten und indirekten Kosten lassen sich nun die Gesamtkosten für den Speicher abschätzen. Diese betragen insgesamt 252 T€. Die spezifischen Speicherkosten betragen bei einer thermischen Speicherkapazität von 5.300 kWh rund 47 €/kWh. Dies liegt etwas über den spezifischen Speicherkosten bei größeren Speichern in solarthermischen Kraftwerken. Die kleinere Baugröße des ausgearbeiteten Speicherkonzepts führt allerdings erwartungsgemäß zu einer Verteuerung des Speichers. Die einzelnen Teilkosten, die im Rahmen der Kostenschätzung ermittelt wurden, sind in Tabelle 1-7 dargestellt.

⁸ Turton R. et al.: Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes, Third Edition.

⁹ Interne Angebotsunterlagen des DLR.

¹⁰ Expertenschätzung im Rahmen von Erfahrungswerten.

Tabelle 1-7: Kostenschätzung für die Speicherkosten des Referenzkonzepts.

<i>Komponente</i>	<i>Einzelparameter</i>	<i>Gesamtkosten</i>
Gesamtsumme der Kosten		252 T€
Direkten Kosten		168 T€
Speicherbehälter		38 T€
Masse Salzschnmelze	70 t	
Volumen Salzschnmelze	40 m ³	
Tankgewicht	6 t	
Kosten pro Behälter	19 T€	
Gesamtkosten Speicherbehälter		
Speichermaterial		70 T€
Masse Salzschnmelze	70 t	
Spezifische Materialkosten	1.000 €/t	
Pumpen		7 T€
Auslegungsleistung kalte Pumpe	10 kW _{el}	
Auslegungsleistung heiße Pumpe	3 kW _{el}	
Kosten kalte Pumpe	4 T€	
Kosten heiße Pumpe	3 T€	
Speicherbehälter		53 T€
Volumen Wärmedämmungsmaterial	18 m ³	
Spezifische Kosten Wärmedämmungsmaterial	1.400 €/m ³	
Indirekten Kosten		84 T€
Pauschale im Bezug zu direkten Kosten	50 %	

1.2.2 Wirtschaftlichkeit des Referenzsystems (BSE)

Für die wirtschaftliche Betrachtung wurden die jeweiligen Kernkomponenten identifiziert und anhand von Angeboten wie auch durch qualifizierte Annahmen die Investitions- und die Betriebskosten für das Energierückgewinnungskonzept ermittelt. Unter Berücksichtigung der Einsparpotenziale wird daraus folgend die Wirtschaftlichkeit in Form einer Return-on-Investment (ROI) Rechnung ermittelt.

Abschätzung der wirtschaftlichen Parameter

Basierend auf den oben dargestellten Auflistung ergibt sich ein Gesamtsumme der Investitionskosten von ca. 7,8 M€ (vgl. Tabelle 1-8). Hierbei fallen vor allem die Wärmeauskopplung und der Verstromungsprozess mit zusammen mehr als 6,2 M€ ins Gewicht. Ein weiterer wichtiger Punkt bei der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit sind die jährlichen Betriebskosten einer solchen Anlage. Diese wurden ebenfalls abgeschätzt und belaufen sich auf ca. 1,2 M€ (vgl. Tabelle 1-9).

Die Betriebskosten der Anlage betragen mit 1,2 M€ einen Großteil des Anlagenertrags von 1,8 M€ (vgl. Tabelle 1-10), wodurch ein Reinerlös von ca. 600 T€/a zur Amortisation der Investitionskosten zur Verfügung steht.

Mit Hilfe einer Investitionsrechnung wurde aus den aufgeführten Kostendaten der ROI Wert für das Energierückgewinnungssystem berechnet werden. Dieser beträgt für das betrachtete System 12,5 Jahre.

Tabelle 1-8: Übersicht über Investitionskosten.

<i>Komponente</i>	<i>Kosten</i>
Wärmeauskopplung	2.250.800 €
Wärmeübertrager	2.025.000 €
thermische Isolierung	225.800 €
Wärmespeicherung	850.000 €
Zwei-Tank-Speicher	250.000 €
Infrastruktur	600.000 €
Verstromungsprozess	3.987.100 €
Dampferzeuger	1.500.000 €
Turbine	2.487.100 €
Personal und Planung	662.400 €
Gesamtsumme	7.750.300 €

Tabelle 1-9: Übersicht über die Betriebskosten.

<i>Komponente</i>	<i>Kosten</i>
Wartung Wärmeübertrager	700.000 €/a
Sonstige Wartungen	354.400 €/a
Mehrkosten Hauptventilatoren	117.200 €/a
Summe	1.171.600 €/a

Tabelle 1-10: Übersicht über die Anlagenerträge.

<i>Parameter</i>	<i>Kosten</i>
Produktionszeit	7.600 h/a
Leistung Generator	2,9 MW _{el}
Strompreis	0,08 €/kWh
Stromerzeugung	22.374 MWh/a
Ertrag	1.790.000 €/Jahr

Tabelle 1-11: Übersicht über die Erträge der Anlage.

<i>Parameter</i>	<i>Kosten</i>
Investkosten der Anlage	7.750.300 €
Betriebskosten	1.171.600 €/Jahr
Anlagenertrag	1.790.000 €/Jahr
Errechneter ROI	12,5 Jahre

Zusammenfassung der wirtschaftlichen Betrachtung

Bezogen auf die potentielle Stromerzeugung von 2,9 MW_{el} erfüllt das Projekt die zuvor definierten technischen Erwartungen. Mit dem Energierückgewinnungssystem könnten die Hauptventilatoren (3 x ca. 1,0 MW_{el}) mittels Abwärme betrieben werden. Jedoch hat die Untersuchung im Rahmen dieses Projektes ergeben, dass es im Feld der Abgas/Rauchgas-Wärmeübertrager noch großen Forschungsbedarf zur Anhebung des Temperaturniveaus gibt. Die Abschätzung der Investitionskosten hat gezeigt, dass es bei vielen Komponenten zu wenig Erfahrung gibt, um die Investitionskosten sicher abschätzen zu können. Sollte es gelingen, die Investitionskosten besser abschätzen zu können, könnte damit der ROI eventuell aufgrund wegfallender Sicherheitsfaktoren niedriger ausfallen. Der für das Referenzsystem berechnete ROI von 12,5 Jahren ist nach aktueller Marktlage für eine Umsetzung des entworfenen Vorhabens im Bereich der Stahlindustrie deutlich zu lang. Der Einfluss des Energiespeichers auf die Wirtschaftlichkeit ist mit den vorliegenden Zahlen als sehr gering zu bewerten, da nur ca. 3 % der Investitionskosten auf den eigentlichen Speicher entfallen.

AP1.3 Potentialanalyse für globalen Einsatz von Speichern in Elektrostahlwerken (BSE, DLR, BSW)

Im Rahmen des AP 1.3 wurden durch BSE die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale von Elektrostahlwerken weltweit herausgearbeitet. Vom DLR wurde die Auswirkung von der parallelen Schaltung mehrerer Öfen betrachtet. Darauf aufbauend wurde die weltweite Wirtschaftlichkeit des Referenzkonzepts von BSE abgeschätzt.

Die Arbeiten haben gezeigt, dass sich EAF-Stahlwerke weltweit zum Teil sehr stark unterscheiden und die wirklich anfallenden Abwärmeströme von der Betriebsweise beeinflusst werden. Durch die Vielzahl an Anlagen ist das Abwärmepotenzial global gesehen nicht zu vernachlässigen. Auch der Betrieb mehrerer EAF an einer Energierückgewinnungsanlage wurde eingehend untersucht. Als Ergebnis dieser Untersuchungen lässt sich feststellen, dass ein gekoppelter Betrieb bei mehreren Öfen in der Regel zu bevorzugen ist. Durch die Überkapazität an Anlagen ist es fraglich, ob die sich in Betrieb befindlichen Anlagen auch in Zukunft am Markt behaupten können oder geschlossen werden. Daher ist das globale Potenzial des Rückgewinnungskonzepts aus heutiger Sicht kaum abzuschätzen.

1.3.1 Wesentliche Unterscheidungsmerkmale von Elektrolichtbogenöfen weltweit (BSE)

Weltweit sind derzeit über 1.000 Elektrolichtbogenstahlwerke in Betrieb. Die Gemeinsamkeit dieser Werke liegt in der Art des Energieeintrages mittels elektrischer Energie. Diese Energie wird mittels eines Transformators transformiert und mit Hilfe von Grafitelektroden die Energie dann zum Einsatzstoff geführt und über einen Lichtbogen dieser damit eingeschmolzen.

Die Rohstahlerzeugung weltweit lag im Jahr 2014¹¹ bei über insgesamt 1.600 Millionen Tonnen. Diese kann je nach der Art der Erzeugung auf die Produktion mittels Hochofen und anschließendem Konverter mit Sauerstoff-Blasverfahren (73,9 %), Elektrostahlwerken (25,6 %) oder auch mittels des mittlerweile eher seltenen Siemens Martin Verfahren (0,5 %) aufgeteilt werden.

Die stahlerzeugende Welt unterliegt auch gewissen zeitlichen Veränderungen. In den vergangenen zehn Jahren hat sich die Verteilung der Stahlproduktion sehr geändert. Dies liegt vor allem an der extremen Zunahme der Stahlerzeugung in China. Wie in Abbildung 1-16 zu erkennen ist, produzierte China im Jahr 2004 bereit ein Viertel der weltweiten Stahlproduktion. Dies hat sich bis zum Jahr 2014 noch einmal dramatisch verändert. Aktuell liegt der Anteil am Weltmarkt bereits bei fast der Hälfte der weltweiten Produktion.

¹¹ World Steel in Figures 2015, worldsteel Association

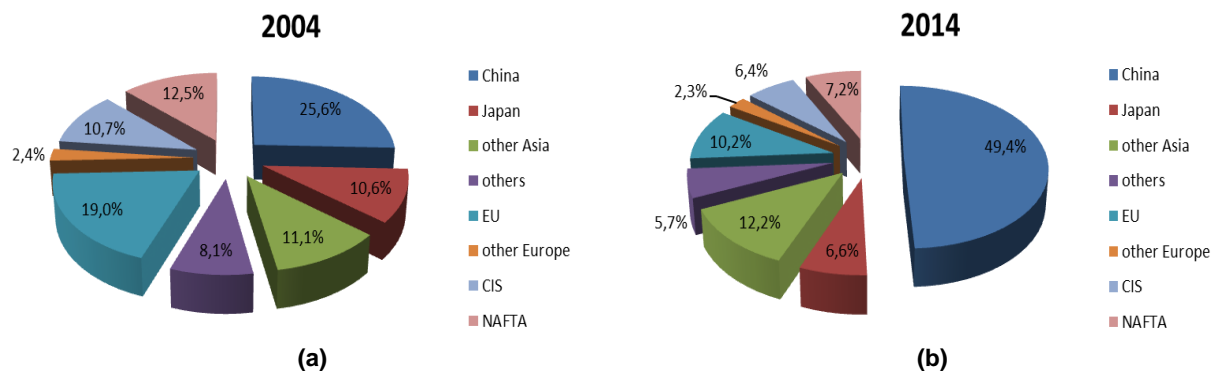


Abbildung 1-16: Darstellung der Verteilung der weltweiten Stahlproduktion (a) in den Jahren 2004 und (b) 2014.

Die Unterschiede zwischen den einzelnen EAFs liegen im Detail bzw. auch in der Größe der EAFs. Grundsätzlich gibt es zwei Arten von EAFs; den Wechselstrom EAF (AC) und den Gleichstrom EAF (DC). AC EAFs sind in großer Mehrzahl vertreten und haben eine weite Verbreitung. In den 90er Jahren wurden immer mehr DC EAFs installiert, allerdings hat sich dieses Verfahren nicht durchgesetzt. Deren grundsätzlicher Vorteil, weniger Netzurückwirkungen zu erzeugen, hat sich nicht als zu dominant herausgestellt.

Die Unterschiede zwischen EAFs liegen hauptsächlich in ihrer Größe, welche zwischen 10 t bis zu 350 t Abstichgewicht liegen kann. Die Mehrzahl der EAFs (> 50 %) liegt aber bei einer Größe zwischen 80-120 t Abstichgewicht. Jeder dieser EAFs hat alleine im Abgas ca. 10 bis 15 MW_{th} an Abwärme, die theoretisch für eine Wärmerückgewinnung genutzt werden könnten.

Ein weiterer Unterscheidungspunkt der EAFs liegt in ihrer Produktivität. Diese wiederum hängt von vielen Randbedingungen wie z.B.: Schrottverfügbarkeit, Ausbildungsstand des Personals, Qualität des erzeugten Stahles, Limitierungen in der elektrischen Energie, Verwendung von chemischer Energie (Sauerstoff, Erdgas, Kohle...) oder aber auch dem Einsatzmaterial ab.

In Europäischen Ländern wird hauptsächlich Rücklaufschrött als Einsatzmaterial verwendet. Dieser Mix setzt sich aus Spänen, Stanzabfällen der metallverarbeiteten Industrie sowie gepressten Paketen und Schredderschrött aus zerkleinerten Fahrzeugen zusammen. Des Weiteren wird auch Abbruchschrött aus abgerissenen Betonstahlkonstruktionen sowie Stahlträger, Heizkörper und Behälter als Rücklaufschrött eingesetzt. Eine Mischung aus diesem Schrött ermöglicht eine recht hohe Produktivität aufgrund der Materialreinheit, des Einschmelzverhaltens und der Schröttdichte.

Im Gegensatz dazu wird in Ländern mit Eisenerz und Erdgasvorkommen pelletierter Eisenschwamm als Einsatzmaterial verwendet. Dieses pelletierte direkt reduzierte Eisenerz (direct reduced iron, DRI) hat ein Eisengehalt von nur ca. 92-95 % und keine Legierungsbestandteile, wie dies bei Rücklaufschrött der Fall ist. Daher ist eine größere Energiemenge zum Einschmelzen erforderlich, da beim Produktionsprozess mit DRI eine größere Schlackemenge anfällt, was den Prozess wiederum verlangsamt.

Zusätzlich findet vor allem in fernöstlichen Ländern auch die Verwendung von flüssigem Roheisen im EAF, das direkt von einem Hochofen geliefert wird, immer mehr Verwendung. Diese Fahrweise wird vor allem in Ländern betrieben, wo kleinere integrierte Werke mit Hochöfen aus Erz und Kohle zunächst einmal Roheisen herstellen. Da aber auch in diesen Ländern die Menge an Rücklaufschrött zunimmt und ein Konverter nur eine begrenzte Menge an Kühleisenschrott verwenden bzw. einschmelzen kann, wird als Alternative ein EAF mit flüssigem Roheisen im Mix mit Schrött oder aber auch DRI betrieben. Diese unterschiedlichen

Einsatzmaterialien führen zur unterschiedlichen Produktivität und zu unterschiedlichen Betriebsverhalten der EAFs, was auch einen Einfluss auf die Abgasmengen sowie der Abgastemperaturen hat.

Grundsätzlich handelt es sich beim Betrieb eines EAFs aber nahezu immer um einen Batchbetrieb, also ein Stoßbetrieb mit Unterbrechungen. Bei diesen Unterbrechungen wird zum einen neuer Schrott bzw. Einsatzstoff chargiert oder aber der EAF abgestochen. Zu diesen Zeiten findet kein Energieeintrag statt und somit fällt die Abgastemperatur stark ab. Es gibt auch EAFs mit Schrottvorwärmung in der Abgasanlage, wobei der Schrott vom heißen Abgas für einige Zeit bereits vorgewärmt wird, bevor er in den Ofen fällt. Hierbei geht Energie aus dem Abgas in den Schrott über. Diese Energie muss nicht mehr im Kühlwasser abgeführt werden, d.h. diese EAFs mit Schrottvorwärmung erzeugen daher etwas weniger Abwärme.

Bei EAFs mit Schrottvorwärmung ist allerdings grundsätzlich die Problematik der Entstehung von Dioxinen und Furanen¹² zu beachten. Da sich im Schrott auch Elemente wie Schmieröle, Farbrückstände oder Plastikteile befinden und diese beim Einschmelzen des Schrotts verbrennen, gelangen deren Bestandteile in das heiße Abgas. Wenn das heiße Gas langsam abkühlt, bilden sich dabei langmolekulare Verbindungen, welche stark toxisch sind (Novo Synthese). Dies erfolgt vor allem während der Abkühlung des Gases im Bereich unter 800 °C bis zu ca. 300 °C (vgl. Abbildung 1-17). Bei einer Schrottvorwärmung ist dies auch der Fall, d.h. der Rückgewinn an Energie geht zu Lasten der Umwelt. Man kann diese Dioxine teilweise auch wiederum mittels Aktivkohle, welche vor dem Filterhaus ins Abgas geblasen wird, binden. Allerdings muss diese Aktivkohle zusammen mit dem Staub als Sondermüll entsorgt werden. Es ist daher im Hinblick auf eine Minimierung der zu entsorgenden Stoffe besser, die noch heißen Abgase mittels eingeblassenen Wassers abzuschrecken bzw. zu quenchen und somit die Bildung dieser Elemente zu verhindern.

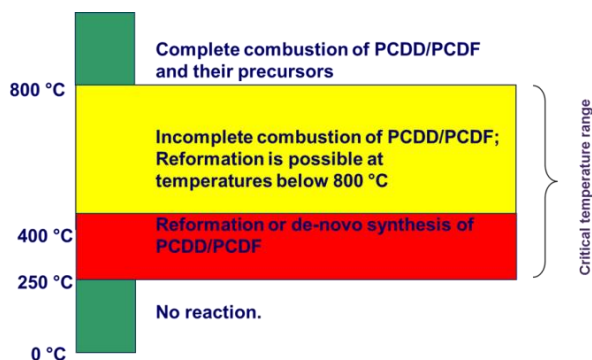


Abbildung 1-17: Darstellung des Temperaturbereichs in dem es zur Neubildung von Dioxinen und Furanen kommen kann.

Es gibt allerdings auch einige Stahlwerke, die mehr als einen EAF parallel betreiben. Teilweise sind dies zwei oder bei großen Stahlwerken sogar mehr als zwei EAFs, die dort gleichzeitig betrieben werden. Bei diesen Werken ergibt sich durch die größere Anzahl an Abwärmeströmen eine weitere Möglichkeit der Energierückgewinnung. Eventuell sind Synergien durch eine „Glättung“ der Energieabgabe möglich. Je mehr EAFs in Betrieb sind desto gleichmäßiger kann solch eine Energieabgabe werden.

¹² Abkürzung aus dem Englischen PCDD/PCDF.

1.3.2 Speicherkonzeptbetrachtung bei parallel geschalteten EAFs (DLR)

Im Rahmen der Arbeiten des AP 1.3 wurde neben den wesentlichen Unterscheidungsmerkmalen verschiedener Elektrostahlwerke deren Einfluss auf die Speicherauslegung abgeschätzt. Da sich die Elektrostahlwerke durch die Anzahl paralleler Öfen unterscheiden können, wurde dieser Einfluss auf das Speichersystem durch das DLR untersucht.

Für diese Arbeiten wurde das in AP 1.2 entwickelte Referenzkonzept (vgl. Abbildung 1-14) mit einem Rauchgaswärmeübertrager thermische Energie aus einem im Batch-Betrieb arbeitenden Elektrolichtbogenofen (EAF) ausgekoppelt. Diese zeitlich diskontinuierlich anfallende Energie wird in einem Zwei-Tank Flüssigsalzspeicher zwischengespeichert um anschließend kontinuierlich verstromt zu werden.

Es gibt viele Elektrostahlwerke, in denen zwei oder mehr Öfen betrieben werden. Ein solches Werk ist in Abbildung 1-18 skizziert. Hierbei wären zwei Öfen (z.B. EAF 1 und EAF 2) parallel mit dem thermischen Speicher verschaltet. Im Vergleich zum Referenzkonzept ist der prinzipielle Aufbau des parallelen Konzepts relativ ähnlich. Lediglich die Auslegungskennwerte der Systeme unterscheiden sich. Im Rahmen des Projekts TESIN wurden in AP 1.1 Messungen an einem Elektrolichtbogenofen durchgeführt. Aus diesen Messungen wurde für eine gesamte Charge ein Temperaturverlauf des Rauchgases ermittelt, der für beide Öfen als repräsentativ angenommen werden kann.

Die beiden Öfen werden vor Ort im Stahlwerk in der Regel komplett unabhängig voneinander betrieben. Es ist daher unklar, welche Zustände diese relativ zueinander haben. Daher wurden die stochastischen Auswirkungen der beiden Systeme in einem vereinfachten Simulationsmodells ermittelt und bewertet.

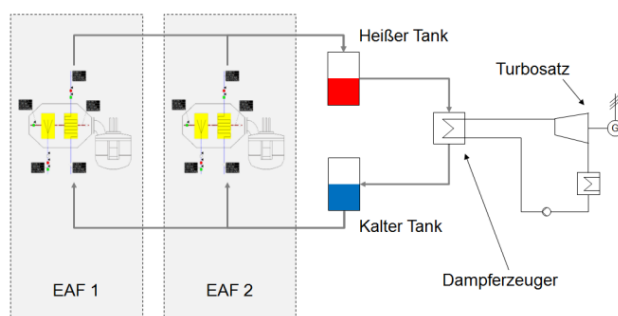


Abbildung 1-18: Angepasstes Konzept für zwei parallel betriebene Elektrolichtbogenöfen.

Durch die bisherigen Arbeiten wurde festgestellt, dass der Temperaturverlauf des Rauchgases eines Elektrolichtbogenofens im Wesentlichen nur vom Prozessfortschritt abhängt. Um dies zu verdeutlichen wurden im Projekt gemessenen Temperaturen in einem Scatterplot (vgl. Abbildung 1-19 (a)) aufgetragen. Mit diesen Temperaturmessdaten wurde durch eine intervallweise Mittelwertbildung ein repräsentativer Temperaturverlauf generiert. Das Ergebnis dieser Bearbeitung ist in Abbildung 1-19 (b) als Temperaturverlauf über der Chargenzeit dargestellt.

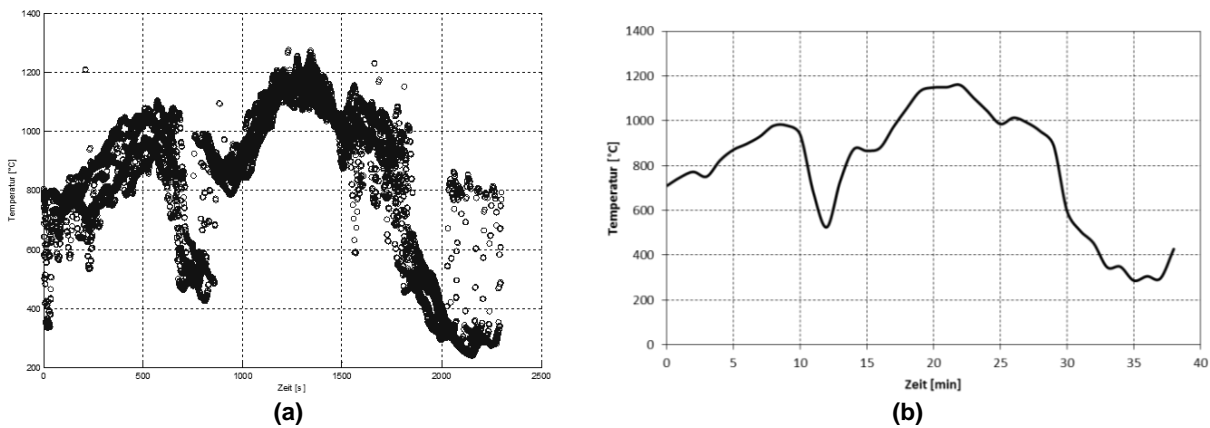


Abbildung 1-19: (a) Darstellung der einzelnen Temperaturmessungen als Scatterplot in Abhängigkeit des Zeitablaufs einer Charge. (b) Aus (a) ermittelter repräsentativer Temperaturverlauf einer Ofencharge.

Die stochastische Betrachtung des Betriebs von zwei parallelen Öfen wurde eine Monte Carlo Simulation angewendet. Bei einer Monte-Carlo-Simulation wird basierend auf dem Gesetz großer Zahlen versucht, ein analytisch nicht oder nur sehr schwer lösbares Problem numerisch zu lösen. Bei der Anzahl der Simulationen muss beachtet werden, dass die Anzahl der Simulationen ausreichend groß ist, da die Qualität der Ergebnisse einer Monte-Carlo-Simulation im Wesentlichen von der Anzahl der Einzelbetrachtungen abhängt. Als Vergleichsbasis für die Simulation mit zwei baugleichen EAFs dient eine Simulation mit nur einem Ofen, die bereits in AP 1.2 beschrieben wurde.

In Abbildung 1-20 sind die Ergebnisse zu den durchgeführten Untersuchungen dargestellt. Die Durchgangsfunktion $F(x)$ verdeutlicht die kumulierte Häufigkeit der aufgetretenen Leistungen bzw. deren Wahrscheinlichkeit. Durch den parallelen Betrieb von zwei Öfen kann die Verteilung der ausgekoppelten Leistung dem Verlauf einer Normalverteilung angenähert werden.

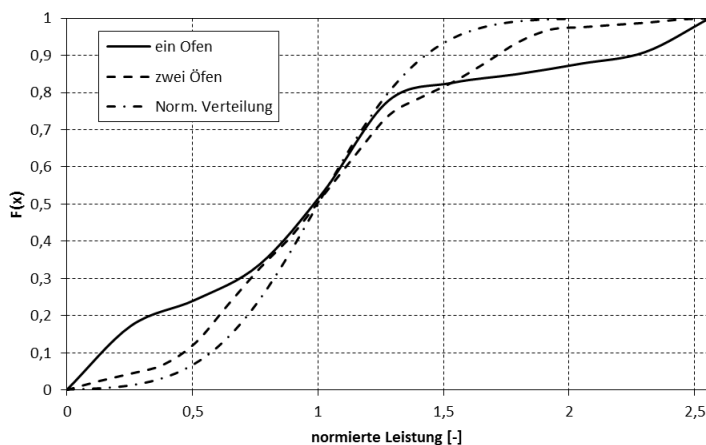


Abbildung 1-20: Darstellung der Durchgangsfunktion $F(x)$ zweier stochastischer Verteilungen eines EAF-Energierückgewinnungskonzepts mit einem bzw. zwei EAFs, die jeweils auf ihre Medianleistung bezogen wurden. Zum Vergleich wurde zusätzlich der Verlauf einer Normalverteilungsfunktion dargestellt.

Für die abschließende Bewertung des Systems wurden Untersuchungen zum zeitversetzten Betrieb unternommen. Hierbei wurden insgesamt vier Zeitreihenbetrachtungen durchgeführt, wobei der relative Prozessfortschritt der beiden Öfen zueinander jedes Mal um zehn Minuten bzw. 25 % verschoben wurde. Hierbei werden die zur Speicherung benötigten Salzmassen ausgewertet.

Die Ergebnisse der Untersuchung (vgl. Abbildung 1-21) zeigen deutlich, dass der ungünstigste Fall der synchrone Betrieb der beiden Öfen ist. Dies ist zu erwarten, da sich hier die Abstich- bzw. Chargiervorgänge direkt auf den Speicher auswirken. Durch eine zeitliche Verschiebung wird erreicht, dass sich die Leistungsverläufe beider Öfen ausgleichen.

Die Gegenüberstellung der benötigten Salzmassen in Tabelle 1-12 zeigt, dass der optimale zeitliche Versatz des Speichers ca. 30 min bzw. 75 % Chargenfortschritt beträgt. Dies hat zur Folge, dass sich bei dieser Konstellation die Öfen optimal ergänzen und so weniger Leistung im Speicher zwischengelagert werden muss.

Tabelle 1-12: Ergebnisse aus den Zeitreihenuntersuchungen zwei versetzt laufenden EAFs.

<i>Fall</i>	<i>Benötigte Salzmasse</i>
(1) Synchroner Betrieb/ 0 %	81,9 t
(2) Zeitversatz 10 min/ 75 %	63,6 t
(3) Zeitversatz 20 min/ 50 %	52,3 t
(4) Zeitversatz 30 min/ 75 %	30,6 t

Die durchgeführten Arbeiten zeigen, dass die Integration von einem Speicher in einem Betrieb von mehreren Öfen den Betrieb des Speichers deutlich wirtschaftlicher machen würde. Eine solche Verschaltung hat zudem den Vorteil, dass der Umwandlungswirkungsgrad im Senkenprozess aufgrund der besseren Auslastung und der besseren thermodynamischen Parameter gesteigert werden kann. Zusätzlich vereinfacht sich der reale Betrieb des Speichers erheblich, da große Temperaturgradienten vermutlich deutlich seltener auftreten werden.

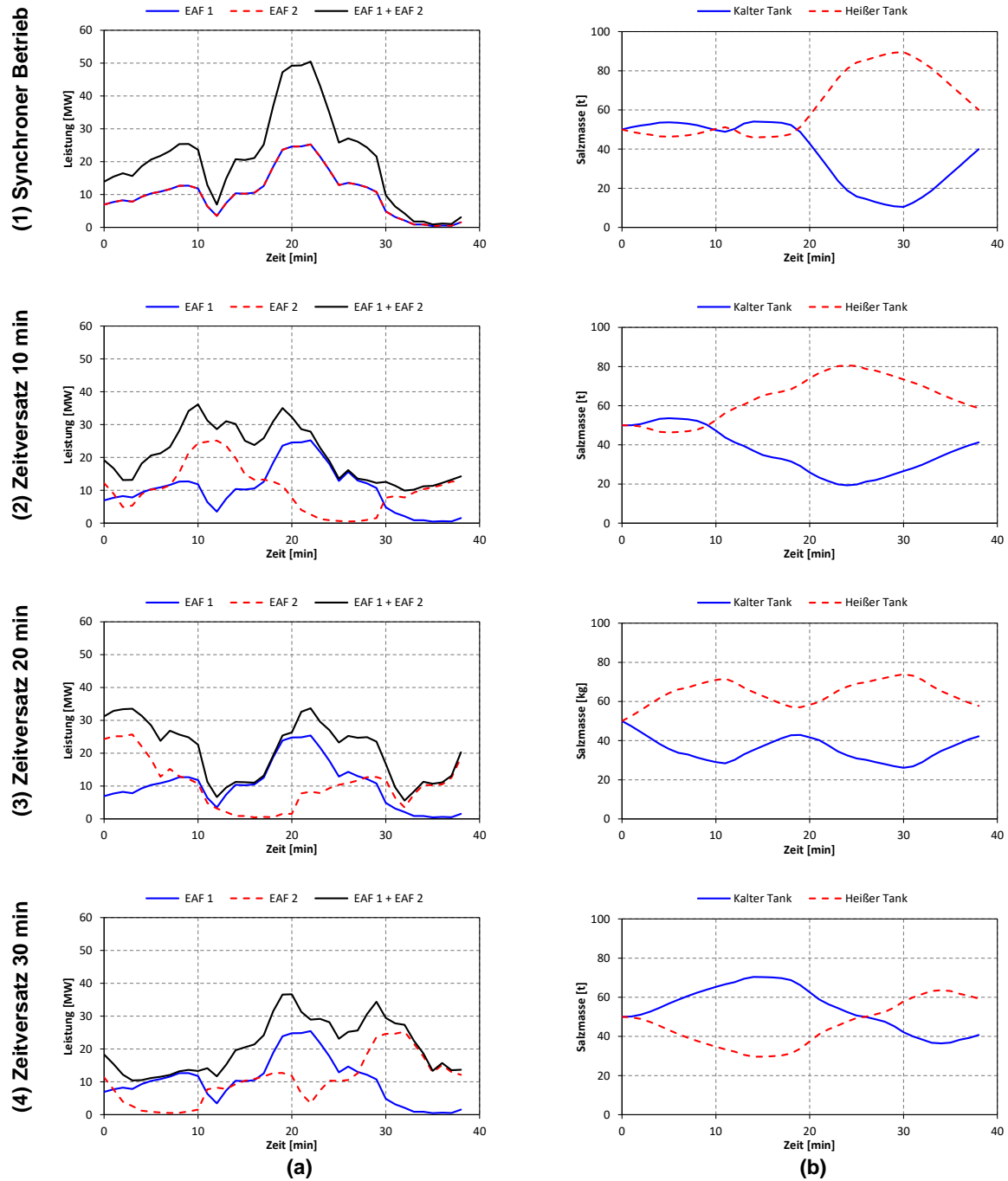


Abbildung 1-21: Ermittlung der Auswirkungen eines zeitlich versetzten Ofenbetriebs bei einem Energierückgewinnungskonzept mit zwei Elektrolichtbogenöfen durch eine detaillierte Systemsimulation. (a) Thermische Leistung der Wärmeübertragung. (b) Salzmassen im Zwei-Tank Flüssigsalzspeicher. Fälle (1-4) Versatz von 0 %/Synchron bis 75 %/30 min.

1.3.3 Wirtschaftliches Potenzial der Speicherkonzepte (BSE)

Bei einem speicherbasierten Energierückgewinnungskonzept am Elektrolichtbogenofen ist, wie bei den meisten regenerativen Energieerzeugungsmöglichkeiten, das wirtschaftliche Potenzial hauptsächlich von den regionalen Energiekosten abhängig. Der Betrieb des Elektrostaahlwerks beeinflusst sehr stark die Einsatzmöglichkeiten und die Auslegung des Speicherkonzepts. Umstände wie z.B.: Schrottbeschaffungsengpässe, Marktsituation, höhere Stahl-

qualitäten und dadurch bedingte Produktionsverzögerungen oder auch mögliche Kapazitätsengpässe in der Sekundärmetallurgie bzw. dem nachfolgenden Walzwerk können diesen Batchbetrieb erheblich in seinem Rhythmus stören bzw. verzögern und somit eine Zwischenspeicherung nahezu unmöglich machen, da die Ladezyklen nicht mehr ausreichend wären. Der Betrieb des Werks von BSW in Kehl, welches für die Entwicklung des Referenzkonzepts herangezogen wurde, ist sehr gut optimiert, so dass es nahezu keine ungeplanten Stillstände gibt.

Bei fast allen sich weltweit im Betrieb befindlichen Stahlwerken mit einem Elektrolichtbogen, bleibt die abgeführte Abwärme aus der Kühlung der Wandpaneele sowie des Abgastraktes derzeit noch ungenutzt und wird über Kühltürme an die Umwelt abgeführt. In einigen wenigen Fällen, vor allem in Norden Europas, wird die Wärme während der kalten Jahreszeit teilweise, wenn auch auf einem relativ geringen Temperaturniveau (ca. 100 °C), zum Speisen eines Fernwärmenetzes verwendet. Im Sommer muss die anfallende Energie im Kühlturm ungenutzt an die Umgebung abgegeben werden. Bei wenigen Stahlwerken weltweit, wird derzeit direkt Dampf in der Panelkühlung erzeugt; allerdings auf einem relativ niedrigem Temperaturniveau von $T < 230$ °C. Dieser Dampf wird entweder im Stahlwerk als Prozessdampf verwendet oder zur Verstromung in einer Turbine eingesetzt.

Diese Technik steht somit in Konkurrenz zu der Salzkühlung, hat aber im Gegensatz zur Salzkühlung einige Herausforderungen, wie z.B. die Entnahme des Dampfes bei höheren Drücken oder Temperaturen oder die Umschaltung zwischen der Be- und der Entladung eines Speichers. Hierfür müssten weitere Forschungsarbeiten erfolgen, um geeignete Speicher zu entwickeln. Zudem würde die Entnahme von überhitztem Dampf zu höheren Entladeparametern des Speichers führen.

Das in diesem Projekt entwickelte Konzept ermöglicht eine Glättung des anfallenden Wärmestroms durch eine drucklose Speicherung der Energie im Zwei-Tank-Flüssigsalzspeicher. Zudem kann im Vergleich zur direkten Dampferzeugung mit dem Flüssigsalzspeicher überhitzter Frischdampf erzeugt und somit eine effizientere Energierückgewinnung bei höheren Temperaturen durchgeführt werden.

Derzeit werden nahezu alle gekühlten Wandelemente oder Kühlpaneele beim Elektrolichtbogenofen mittels Wasser oder Wasser/Dampf-Gemisch gekühlt. Dies sind bekannte und bewährte Praktiken, welche allerdings auch ihre Nachteile im Betrieb am Elektrolichtbogenofen haben. Der Ofen ist im unteren Bereich mit hitzebeständigen Feuerfeststeinen ausgemauert, die nicht in Kontakt mit dem als Kühlmittel eingesetzten Wasser kommen dürfen. Im Falle einer Leckage an den Kühlpaneelen besteht die Gefahr eines Ofendurchbruchs. Mit dem Austausch des Kühlmediums Wasser gegen eine Salzschnmelze könnte dieses Problem ggf. eliminiert werden.

Seit mehreren Jahren ist die Stahlüberkapazität eine große Herausforderung am Weltmarkt. Der weltweite Stahlbedarf und die dem gegenüberstehende Produktion driften immer mehr auseinander. Man kann von einer Überkapazität von über 600 Millionen Tonnen Stahl ausgehen. China hat z.B. im Jahr 2015 über 100 Millionen Tonnen Stahl exportiert. Inwieweit die mehr als 1.000 weltweit installierten Elektrolichtbogenöfen Stahl erzeugen, hängt zusätzlich auch von anderen Faktoren, wie z.B. dem Eisenerzpreis ab. Sobald dieser fällt, wird die klassische Stahlerzeugung, mittels Hochofen- und Sauerstoffblaskonverter-Route, wirtschaftlicher und wettbewerbsfähiger. Dies führt derzeit zu zeitweisen Produktionsstopps bei Elektrostahlwerken.

Ohne eine Betrachtung von sich ändernden gesetzlichen Rahmenbedingungen, ist die Wirtschaftlichkeit des Konzepts von den Investitions- und Betriebskosten in Kombination mit den Energiekosten abhängig. Es ist davon auszugehen, dass die Mehrzahl aller Elektrostahlwerke weltweit einen sehr guten Energievertrag mit ihrem Lieferanten hat und daher wesentlich geringere Preise für die Kilowattstunde als der normale Konsument bezahlt. Es gibt nur sehr

wenige Ausnahmen von dieser Regel, da normalerweise der weltweite Stahlwettbewerb solch ein Elektrostahlwerk automatisch zur Schließung zwingen würde. Als Ausnahmebeispiel könnte hier ein Stahlwerk in Süd-Ost-Asien gelistet werden, welches trotz seiner Lage inmitten einer Metropole und vergleichsweise relativ hohen Energiekosten nur aufgrund eben dieser Lage innerhalb einer extrem expandierenden Stadt mit einem boomenden Baugewerbe, überleben kann. Unter diesen Bedingungen ist ein globales wirtschaftliches Potenzial des erarbeiteten Konzepts zur Hochtemperaturwärmeauskopplung und Verstromung dieser Wärme aktuell nicht gegeben.

Allerdings ist wahrscheinlich damit zu rechnen, dass sich die Randbedingungen für die Elektrostahlproduktion in Zukunft wieder verändern werden. Ansteigende Energiepreise und strengere gesetzliche Umweltauflagen zur CO₂-Einsparung werden dazu führen, dass sich ein speichergestütztes Energierückgewinnungskonzept schneller amortisiert und somit wirtschaftlicher wird. Es ist daher eine Frage der Zeit bis ein erster Elektrolichtbogenofen mit einer Salzkühlung mit einem thermischen Energiespeicher ausgestattet wird, um die ansonsten verlorene Energie aus der Abwärme zurückzugewinnen. Im Rahmen der durchgeführten Arbeiten wurde weiterer Forschungsbedarf im Bereich der Wärmeauskopplung aus verschmutzten Rauch- bzw. Abgasen festgestellt. Hier müssen Verfahren und Apparate entwickelt werden, die den am Elektrolichtbogenofen herrschenden Bedingungen standhalten.

AP 2 Potenzialanalyse für Einsatz von Speichern im Kraftwerksbereich (SNE, DLR)

Inhaltsverzeichnis

AP 2.1	Definition der Energieflüsse und Analyse von verschiedenen Kraftwerksstandorten und -prozessen im Unternehmen mit Augenmerk auf die Energiespeicherintegration (SNE).....	2-1
2.1.1	Gruppeneinteilung	2-2
2.1.2	Detaillierung der Potenzialanalyse auf ausgewählte Anlagen	2-4
AP 2.2	Identifikation von Optionen für den Speichereinsatz im Heizkraftwerksbereich (DLR, SNE).....	2-10
2.2.1	Entwickelte Speicherkonzepte (DLR)	2-11
2.2.2	Betrachtung und Berechnung der Einbindung in einem Biomasseheizkraftwerk – BMHKW Dresden (DLR).....	2-11
2.2.3	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Einbindung in einem Biomasseheizkraftwerk – BMHKW Dresden (SNE)	2-18
2.2.4	Industrie – HKW Bad Kreuznach (DLR).....	2-18
2.2.5	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Industrie (SNE).....	2-22
2.2.6	Blick auf Neuanlagen (SNE)	2-22

Die SNE betreibt bundesweit mehr als 200 Anlagen zur Erzeugung von Strom und Wärme überwiegend auf Basis regenerativer Energieträger wie Biomasse, Biogas und Geothermie, aber auch konventioneller fossiler Primärenergien, inklusive Grubengas. Insbesondere in Kraft-Wärme-Kopplung betriebene Anlagen erzeugen die nicht primär vom Verbraucher geforderte Energieform suboptimal. Lastspitzen oder außerplanmäßige Anforderungen führen zum Einsatz von Besicherungsinstrumenten, deren Einsatz ökonomisch, aber auch wegen des Primärenergieeinsatzes ökologisch (CO₂) wenig wünschenswert ist.

Um die Energieflüsse von verschiedenen Kraftwerksstandorten zu ermitteln, wurde von SNE eine Parameterstudie im Rahmen von AP 2.1 durchgeführt. Für sechs Anlagen wurde anhand von realen Betriebsdaten der Einsatz idealer Speicher geprüft.

Eine Speicherauslegung für das Heizkraftwerk Wellesweiler erfolgt nicht im Rahmen dieses Arbeitspakets, da sie bereits im AP 3 berücksichtigt wurde. Für zwei ausgewählte Anlagen, das Biomasseheizkraftwerk Dresden und das Heizkraftwerk Bad Kreuznach, wurden verschiedene Speicherkonzepte ausgelegt und thermodynamisch betrachtet sowie von SNE wirtschaftlich bewertet. Diese Ergebnisse zeigen lange Amortisationszeiten unter den aktuellen Abruflhäufigkeiten und -vergütungen von Minuten- und Sekundärreserveleistung sowie kritische Dampfparameter bei der Entladung von Latentwärmespeichern. Die untersuchten Heizkraftwerke sind historisch gewachsen und wurden daher ursprünglich nicht für einen Speichereinsatz konzipiert. Würden Speicher bei der Auslegung von Heizkraftwerken und Industrieprozessen berücksichtigt, könnten Parameter und Dimensionierung entsprechend angepasst werden.

AP 2.1 Definition der Energieflüsse und Analyse von verschiedenen Kraftwerksstandorten und -prozessen im Unternehmen mit Augenmerk auf die Energiespeicherintegration (SNE)

Das Ziel des Gesamtprojektes war es, die Energieeffizienz im industriellen Bereich und im Versorgungsbereich durch den Einsatz thermischer Energiespeicher zu steigern. Im Rahmen des Projekts wurde daher in diesem Arbeitspaketteil von SNE eine Potenzialanalyse zur

Energieeffizienzsteigerung durchgeführt. Die Betrachtung der Anlagen erfolgte anhand von Daten aus dem Anlagenpark des Unternehmens.

Für diese Potenzialstudie wurden die Anlagen zunächst in Gruppen aufgeteilt, als Gruppen analysiert und dann sechs repräsentative Fälle genauer betrachtet. Diese Potenzialstudie hat gezeigt, dass einige Anlagengruppen Bedarf für Niedrigtemperaturwärmespeicher oder saisonale Wärmespeicher haben, welche nicht in diesem Projekt betrachtet wurden. Manche Anlagen sind schon soweit betriebsoptimiert und mit Speicher ausgestattet, dass eine weitere Analyse nicht nötig ist. Für das HKW¹ Wellesweiler ist das größte Potenzial zur Einbindung eines Hochtemperaturwärmespeichers festzustellen.

2.1.1 Gruppeneinteilung

Da eine detaillierte Einzelbetrachtung aller Anlagen der SNE den zeitlichen Rahmen dieser Untersuchung sprengen würde, wurden Anlagengruppen gebildet, die auf praxisnahen Basis-Szenarien beruhen. Die Szenarien werden beschrieben durch die Merkmale Stromvergütung, Wärmeerzeugung und der vorherrschenden Kundenstruktur. Anlagen zur Bereitstellung von Prozesswärme konnten ebenfalls zusammengefasst werden, da hier die Gemeinsamkeiten bei Betriebsführung, Kundenstruktur und Anlagentechnik die Unterschiede überwiegen.

Die vorhandenen Anlagen konnten so in insgesamt sechs Anlagengruppen aufgeteilt werden. Die Gruppen können folgendermaßen beschrieben werden:

Anlagengruppe 1

EEG-subventionierte, stromgeführte Anlagen, die – sofern eine Wärmesenke vorhanden ist – den Wärmebedarf vollständig über die Kraft-Wärme-Kopplung decken.

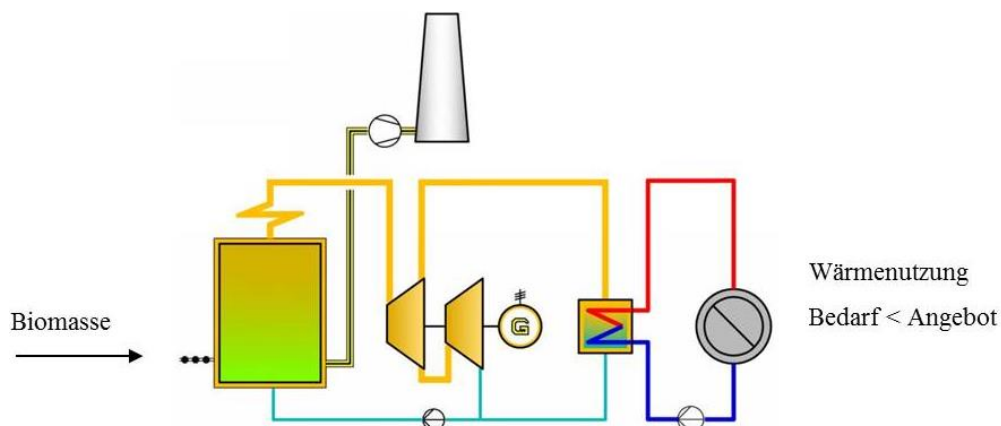


Abbildung 2-1: Energieflussschema Anlagengruppe 1 am Beispiel Biomasse-HKW.

Anlagengruppe 2

EEG-subventionierte, stromgeführte Anlagen, die den Wärmebedarf der angeschlossenen Verbraucher nicht vollständig über die Kraft-Wärme-Kopplung decken können. Der zusätzliche Wärmebedarf wird durch den Einsatz fossiler Brennstoffe (zumeist Erdgas H) bereitgestellt.

¹ HKW: Heizkraftwerk

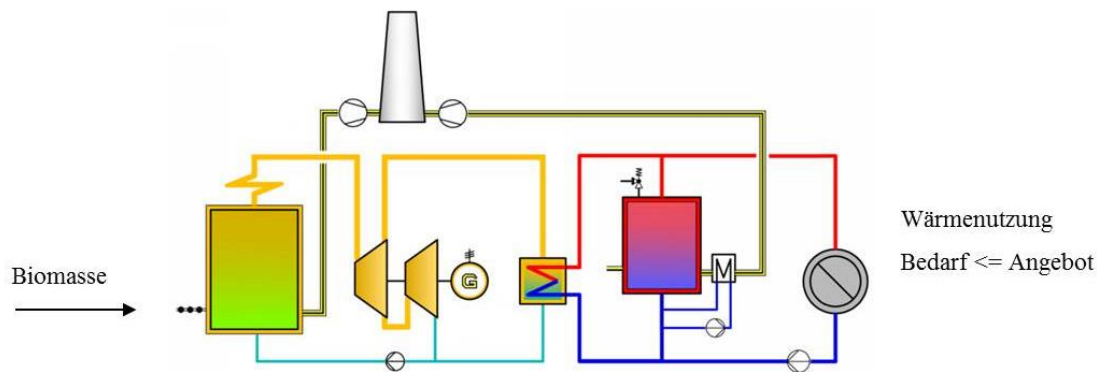


Abbildung 2-2: Energieflussschema Anlagengruppe 2 am Beispiel Biomasse-HKW.

Anlagengruppe 3

Wärmegeführte, fossil befeuerte KWK-Anlagen zur Versorgung von gewerblichen und privaten Verbrauchern. Die benötigte Heizleistung kann nicht vollständig durch die Kraft-Wärme-Kopplung bereitgestellt werden.

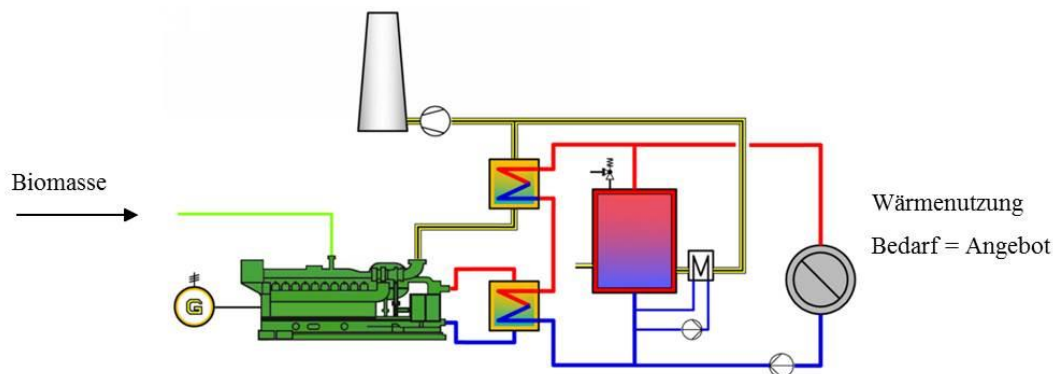


Abbildung 2-3: Energieflussschema Anlagengruppe 3 am Beispiel Gasmotor-BHKW.

Anlagengruppe 4

Fossil befeuerte Heizwerke zur Versorgung von gewerblichen und privaten Verbrauchern.

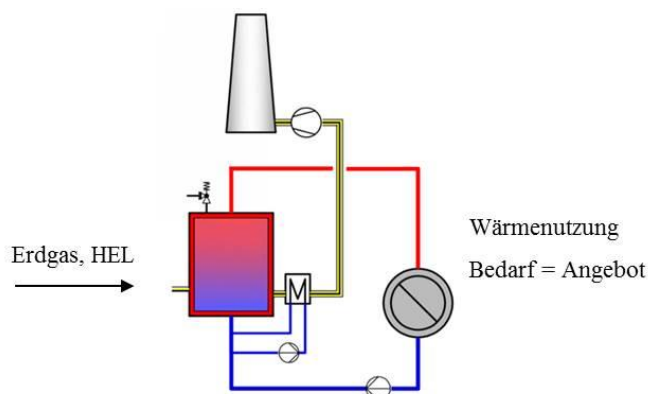


Abbildung 2-4: Energieflussschema Anlagengruppe 4 am Beispiel Heizwerk (fossil).

Anlagengruppe 5

Heizwerke zur Versorgung von gewerblichen und privaten Verbrauchern. Die Wärme wird nicht in SNE-eigenen Anlagen erzeugt sondern von externen Wärmequellen (Abwärme, übergeordnete Wärmenetze) bezogen, auf deren Betriebsweise nicht oder nur indirekt Einfluss genommen werden kann.

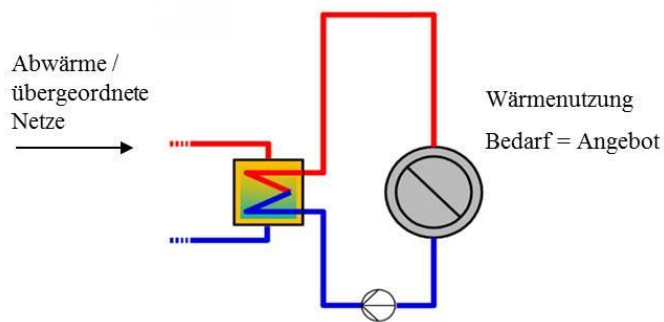


Abbildung 2-5: Energieflussschema Anlagengruppe 5.

Anlagengruppe 6

Fossil befeuerte Heizwerke und KWK-Anlagen zur Versorgung von Industriekunden mit Prozesswärme, zumeist in Form von Prozessdampf. Da es sich hier um komplexe Einzellösungen handelt, kann leider kein vereinfachtes Schema dargestellt werden.

2.1.2 Detaillierung der Potenzialanalyse auf ausgewählte Anlagen

Bei der ersten Analyse der Anlagengruppen, hatten sich Gruppe 1, 2 und 6 als erfolgsversprechend herauskristallisiert. Die Potenziale in den übrigen Anlagengruppen sind bereits weitgehend ausgenutzt oder nicht vorhanden.

In den Anlagengruppen 1 und 2 zeigen sich vor allem die Biomasseheizkraftwerke aufgrund ihrer Frischdampfparameter für eine thermische Energiespeicherung als zielführend. Dies liegt vor allem an der Rostfeuerung, die aufgrund des eingesetzten Brennstoffs nur sehr träge reagiert. Exemplarisch wurden aus den Anlagengruppen 1 und 2 insgesamt drei Biomasseheizkraftwerke zur detaillierteren Speicherkonzeptionierung ausgewählt.

In Anlagengruppe 6 fallen insgesamt acht Industrie-Contracting Anlagen. Diese Anlagen unterscheiden sich zum Teil sehr stark, da es sich bei diesen Anlagen im Allgemeinen um maßgeschneiderte Sonderlösungen handelt. Anwendungsgebiete für thermische Speicher in solchen Systemen sind die Deckung von Lastspitzen sowie die kurzzeitige Besicherung der Dampfproduktion bei Ausfall eines Dampferzeugers. Als Brennstoff kommt in diesen Anlagen hauptsächlich Erdgas bzw. Grubengas zum Einsatz.

Die nachfolgenden 6 Anlagen wurden detaillierter betrachtet.

- BMK2 Lünen (Anlagengruppe 1)
- BMHKW3 Dresden (Anlagengruppe 2)
- BMHKW Ilmenau (Anlagengruppe 2)
- HKW Wellesweiler (Anlagengruppe 6)
- HKW Bad Kreuznach (Anlagengruppe 6)
- HKW Castrop-Rauxel (Anlagengruppe 6)

Biomassekraftwerk Lünen

Im BMK Lünen gibt es derzeit keine Fernwärme- oder Prozessdampfauskopplung. Der Einsatz eines möglichen Wärmespeichers beschränkt sich im BMK Lünen daher auf die Erhöhung der Anlagenflexibilität, um erfolgreich am lukrativen Regelleistungsmarkt teilnehmen zu können. Ziel ist es, neben der bisherigen MRL⁴ auch am SRL⁵-Markt teilnehmen zu können. Aufgrund

² BMK: Biomassekraftwerk

³ BMHKW: Biomasseheizkraftwerk

⁴ MRL: Minutenreserveleistung

⁵ SRL: Sekundärreserveleistung

der höheren Aufrufhäufigkeiten der SRL sollte der Wärmespeicher in der Lage sein, die anfallenden Wärmearbeiten der SRL vollständig aufzunehmen.

Bei der Betrachtung einer möglichen Speichereinbindung soll nur die elektrische Regelleistung vermarktet werden können, welche sich thermisch durch den Wärmespeicher einspeichern lässt. Die dabei anfallenden Wärmearbeiten wurden auf unterschiedliche Wärmespeicherkapazitäten hin untersucht. Auf diesen Annahmen basieren die nachfolgenden Ergebnisse. Es wird von einer jährlichen Abrufhäufigkeit von 27 MRL und 150 SRL ausgegangen. Tabelle 2-1 fasst die getroffenen Annahmen nochmal zusammen.

Tabelle 2-1: Annahmen für die Erhöhung der Regelleistung im BMK Lünen.

Wirkungsgrad	Wirkungsgrad thermisch	90	%
	Wirkungsgrad elektrisch	30	%
	Speicher beladen Verluste	15	%
	Speicher entladen Verluste	5	%
SRL	Negative elektrische Leistung	5	MW _{el}
	Negative elektrische Arbeit	0,9	MWh _{el}
	Thermische Wärmearbeit	3,1	MWh _{th}
	Abrufhäufigkeit im Jahr	150	Abrufe/a
MRL	Negative elektrische Leistung	16	MW _{el}
	Negative elektrische Arbeit	9,3	MWh _{el}
	Thermische Wärmearbeit	31	MWh _{th}
	Abrufhäufigkeit im Jahr	27	Abrufe/a

In Abbildung 2-6 sind die Wärmearbeiten aufgetragen, welche sich durch die Erbringung der negativen MRL und der SRL speichern lassen. Die rote Kurve stellt die speicherbare thermische Wärmearbeit der MRL dar. Die blaue Kurve stellt die speicherbare thermische Wärmearbeit der SRL dar.

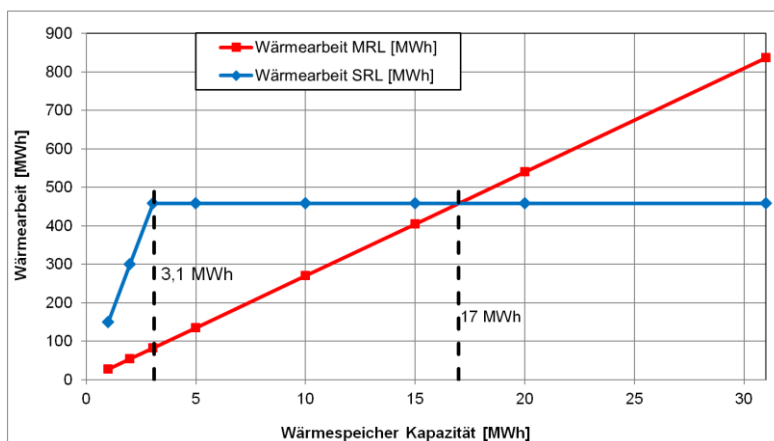


Abbildung 2-6: Aufgetragen ist die Wärmearbeit, welche durch Erbringung der MRL und der SRL gespeichert werden kann; Annahmen nach Tabelle 2-1.

Die rote Linie der MRL steigt ebenfalls linear mit steigender Wärmespeicherkapazität an. Die durchschnittlich anfallende thermische Wärmearbeit der MRL wurde konstant mit 31 MWh angenommen. Mit den zuvor getroffenen Annahmen, ist die durchschnittlich anfallende thermische Wärmearbeit der SRL ab einer Kapazität von 3,1 MWh_{th} konstant. Die speicherbare Wärmearbeit der SRL steigt bis zu diesem Maximalwert mit steigender Wärmespeicherkapazität linear an. Mit Wärmespeicherkapazitäten von mehr als 3,1 MWh_{th} lassen sich durch die SRL keine höheren Wärmearbeiten speichern. Aus diesem Grund verläuft die Kurve ab einer Kapazität von 3,1 MWh_{th} waagrecht. Unter den getroffenen Annahmen und Abrufhäufigkeiten

kann die gleiche Wärmearbeit für MRL und SRL bei einer Wärmespeicherkapazität von 17 MWh gespeichert werden.

Biomasseheizkraftwerk Dresden

Im BMHKW Dresden kann der Biomassekessel maximal 29 Mg/h an Dampf liefern. Der Dampfbedarf für eine maximale elektrische Leistung von 7,1 MW der Dampfturbine liegt jedoch bei 30 Mg/h. Daher erscheint für die Anlage in Dresden eine Lastgangoptimierung nicht sinnvoll, da keine Wärmereserven vorhanden sind, mit denen der Speicher beladen werden kann. Das gilt für die derzeitige Anlagenfahrweise. Bei einer Änderung der Fahrweise, z.B. durch neue Stromvermarktungsmodelle oder Abwurf von Dampfkunden, könnte die Einbindung eines Wärmespeichers zu technischen und wirtschaftlichen Vorteilen führen. Kann durch einen Wärmespeicher die Teilnahme am Regelleistungsmarkt ermöglicht werden, ergeben sich gegebenenfalls wirtschaftliche Vorteile.

Die Anlage besteht im Wesentlichen aus drei Betriebseinheiten: der Biomasse-Kesselanlage, einer Entnahmekondensationsturbine zur Strom und Wärmeauskopplung sowie einem Dampf-Heißwasser-Wärmetauscher. Zur Überbrückung von Kesselstillständen stehen zwei ölbefeuerte Heißwassererzeuger (2x 7 MW_{th}) zur Verfügung. Die erzeugte Wärme von 12 MW_{th} geht in ein Fernwärmenetz mit einer Länge von 4.600 m, aus dem der Wärmebedarf von kommunalen und gewerblichen Abnehmern gedeckt wird. Der erzeugte Strom wird in das öffentliche Netz als Strom aus regenerativen Quellen auf Grundlage der im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) festgesetzten Vergütungen eingespeist.

Bei einem ausreichend groß bemessenem Speicher kann die Stromproduktion stabilisiert werden, um höhere Einspeisevergütungen nach dem EEG zu erreichen. Zu beachten ist, dass die Dampfturbine einen möglichst konstanten Dampfstrom mit einer Temperatur von min. 410 °C (Druck: 64 bar_ü) benötigt; unterhalb dieser Temperatur wird die Turbine aus Schutz vor schwerwiegenden Schäden (durch Nassdampf) abgeschaltet.

Das untersuchte BMHKW Dresden wird nach EEG gefördert, die Wärmenutzung des Biomassekessels ist zu nahezu 100 % gegeben. Um die maximale elektrische Leistung am Generator zu erreichen, benötigt die Dampfturbine einen Dampfstrom, der größer ist als die maximale Dampfleistung des Biomassekessels. Bei der derzeitigen Fahrweise ergeben sich daher nur geringe wirtschaftliche Vorteile aus einer Optimierung des Lastgangs. Bei einer Änderung der Anlagenbetriebsweise, der Anlagenkonfiguration oder der Nutzung eines neuen Stromvermarktungsmodells, kann eine Lastgangoptimierung allerdings sinnvoll sein. Durch den Einsatz eines Wärmespeichers kann diese Anlage zusätzlich zum Marktprämienmodell am Minutenreservemarkt teilnehmen.

Auf Basis der aktuellen Betriebsweise des BMHKW Dresden ist das Vermarkten von negativer MRL denkbar. Da Biomassekessel von Natur aus äußerst träge sind, kann der Kessel bei Nutzung von negativer MRL weiter laufen. Die anfallende Wärme kann im Fernwärmenetz genutzt werden und die darüber hinaus gehende Wärme wird zwischengespeichert. Bei einem Bedarf von einer Zeitscheibe MRL muss die Dampfturbine nach 4 h wieder hochgefahren werden. Die gespeicherte Wärme kann zum Betreiben der Dampfturbine (z.B. bei Ausfall des Biomassekessels) oder zur Einspeisung in das Fernwärmenetz genutzt werden.

Positive Minutenreserve ist mit der aktuellen Fahrweise nicht möglich. Denkbar wäre jedoch, die Anlage phasenweise mit Teillast, z.B. 5 MW elektrischer Leistung zu fahren, dann sind Leistungsreserven vorhanden, die zur Vermarktung als positive MRL nutzbar sind. Nachteilig an der Vermarktung der positiven MRL ist, dass der Wärmedeckungsanteil durch den Biomassekessel im Fernwärmenetz geringer ausfällt. In der Folge ist ein höherer Heizöleinsatz notwendig, um die geringere Wärmeleistung des Biomassekessels auszugleichen.

Biomasseheizkraftwerk Ilmenau

In Ilmenau kann das Biomasseheizkraftwerk den jährlichen Wärmebedarf nicht vollkommen abdecken. Daher ist der Einsatz von Zusatzkesseln erforderlich. Es hat sich gezeigt, dass eine merkliche Erhöhung der Fernwärmeabdeckung in Ilmenau über das Biomasseheizkraftwerk nur mit einem saisonalen Wärmespeicher erreicht werden kann. Als saisonaler Speicher kommen meist einfache Warmwasserspeicher mit großen Volumen in Betracht. Für die direkte Nutzung eines Hochtemperaturwärmespeichers wird in Ilmenau daher kein Potenzial gesehen.

Vor allem innerhalb der Heizperiode ist die Möglichkeit negative MRL bzw. SRL anzubieten sehr interessant. Bei Anforderung für negative Reserveleistung wird der Frischdampf an der Turbine vorbeigeleitet und damit die Stromproduktion reduziert. Der überschüssige Dampf kann zur Versorgung des Fernwärmenetzes genutzt werden. Der Heizkondensator leistet maximal 11 MW, die überschüssige Wärmearbeit kann durch einen Wärmespeicher aufgenommen und dem Heizkreislauf bei Bedarf zugeführt werden.

Das BMHKW Ilmenau befindet sich zurzeit in der Präqualifikationsphase, um negative MRL anzubieten. Im Verbund mit weiteren dezentralen Anlagen der SNE, kann das BMHKW Ilmenau eine negative MRL von 1,5 MW anbieten.

Beim Anbieten von negativer MRL entstehen überschüssige Dampfmengen, welche abgekühlt werden müssen. Die Wärmearbeit dieser Dampfmengen kann zur Beladung eines Wärmespeichers genutzt werden. Der Wärmespeicher kann anschließend das Fernwärmenetz versorgen. Da aber nur innerhalb des Winters ein zusätzlicher Fernwärmebedarf besteht, kann statt eines Wärmespeichers, auch ein größerer oder zusätzlicher Heizkondensator zum Einsatz kommen. Dieser kann seine Wärmeenergie direkt an den Fernwärmekreislauf abgeben.

Heizkraftwerk Wellesweiler

Im HKW Wellesweiler kann der Wärmespeicher zur Besicherung der Dampfversorgung eingesetzt werden. Dadurch kann eine dauerhafte Warmhaltung der Kesselanlagen vermieden werden. Zusätzlich kann der Wärmespeicher Druckschwankungen im Dampfnetz ausgleichen, womit ein Hochfahren der zusätzlichen Kesselanlagen nicht mehr erforderlich wäre.

Das Anbieten von negativer MRL und SRL ist neben der Besicherungsfunktion im HKW Wellesweiler technisch und wirtschaftlich interessant, da eine Gasturbine im Allgemeinen sehr flexibel betrieben werden kann. Durch die Einbindung eines Wärmespeichers kann eine Teilnahme am Regelleistungsmarkt erschlossen werden. Durch den Wärmespeicher ist es möglich, die Volllaststundenzahl der Gasturbine zu erhöhen. In der Folge lässt sich ein höherer Stromabsatz erreichen. Zusätzlich sind die Gasbezugskosten der Gasturbine geringer als in den Dampfkesselanlagen.

Das HKW Wellesweiler versorgt nahegelegene Industrie- und Gewerbekunden mit Prozessdampf. Der produzierte Dampf wird über zwei Wärmenetze den Verbrauchern zur Verfügung gestellt. Für das HKW Wellesweiler wurde die konkrete Entwicklung und Erprobung eines Latentwärmespeichers im Rahmen der AP 3-5 geplant und durchgeführt.

Das HKW Wellesweiler besteht aus einer Gasturbine mit einer elektrischen Nennleistung von 5,2 MW_{el} und einem nachgeschalteten Abhitzeessel (AHK) mit einer thermischen Nennleistung von 8,4 MW_{th}. Die Gasturbine wird mit Grubengas aus dem Grubengasnetz der SNE betrieben. Weiterhin befinden sich zwei Dampfkessel zur Dampferzeugung mit einer thermischen Nennleistung von jeweils 12 MW_{th} auf der Anlage. Diese beiden Kessel werden ebenfalls mit Grubengas betrieben, lassen sich aber auch mit leichtem Heizöl (HEL) befeuern.

Der Abhitzeessel hinter der Gasturbine übernimmt den Hauptteil der Dampfproduktion. Die beiden Dampfkessel liefern die zusätzlich benötigten Dampfmengen, welche verstärkt im Winter angefordert werden. An die Qualität und Verfügbarkeit des Dampfes werden hohe

Anforderungen gestellt. Ein kurzzeitiger Ausfall der Dampfversorgung führt zu einem Anlagenstillstand des angeschlossenen Folienwerkes Treofan.

In Abbildung 2-7 ist die geordnete Jahresdauerlinie der einzelnen Dampferzeuger abgebildet. Dargestellt sind die geordneten Wärmeleistungen des Abhitzekekessels und der beiden Dampfkessel. Es lässt sich erkennen, dass durch den Abhitzekekessel der größte Teil der Wärmearbeiten erbracht wird. Der Abhitzekekessel ist 8.107 h/a in Betrieb und leistet 63.000 MWh im Jahr bzw. 73 % der Gesamtwärmearbeit. Die beiden Dampfkessel dienen zur Abdeckung der Spitzenlasten und leisten zusammen 23.000 MWh im Jahr bzw. 27 % der Gesamtwärmearbeit.

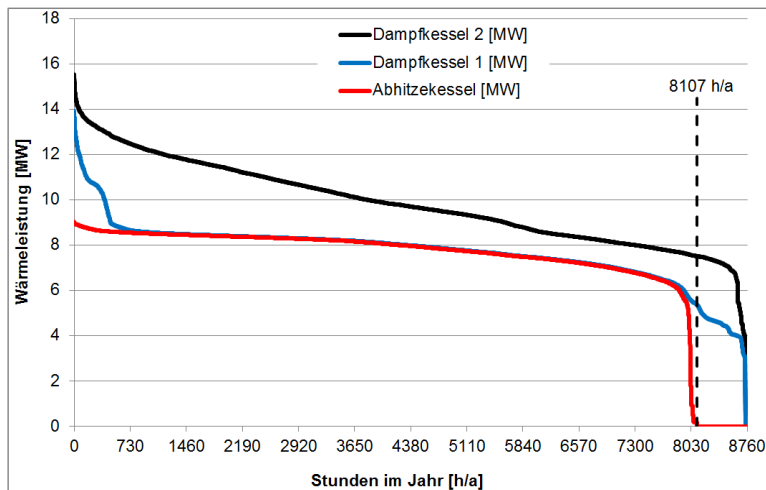


Abbildung 2-7: Geordnete kumulierte Jahresdauerlinie der Dampferzeugung im HKW Wellesweiler von Februar 2013 bis Februar 2014.

Der Besicherungsfall liegt vor, wenn der Abhitzekekessel den Wärmebedarf alleine abdecken kann und kein Dampfkessel in Betrieb ist. Bei einem Ausfall des Abhitzekekessels, muss der Wärmespeicher für eine Zeitdauer von 15 min die Nennleistung des Abhitzekekessels überbrücken. Diese Zeitspanne sollte genügen, um einen der beiden Dampfkessel hochzufahren. Es ergibt sich für diesen Anwendungsfall eine notwendige Speicherkapazität von 2,1 MWh.

Bei einer Entladeleistung von $8,4 \text{ MW}_{\text{th}}$ und einer Kapazität von 2,1 MWh kann der Wärmespeicher die Dampfproduktion für die geforderte Zeitspanne von 15 min absichern. Soll die Dampfproduktion nur für das Folienwerk Treofan sichergestellt werden, kann das Netz 2 abgekoppelt werden. In diesem Fall kann die Kapazität des Wärmespeichers mit rund 1,5 MWh und einer Leistung von rund 6 MW_{th} (8 Mg/h Dampf) geringer ausfallen.

Eine Gasturbine kann im Allgemeinen sehr flexibel betrieben werden. Technisch ist das HKW Wellesweiler für eine Anbindung in den Regelleistungsmarkt gut geeignet. Mit der aktuellen Anlagenbetriebsweise ist ein Anbieten von negativer Regelleistung möglich. Es kann eine negative elektrische Leistung von 2 MW_{el} angeboten werden. Beim Anbieten von negativer Regelleistung wird die Leistung der Gasturbine reduziert. In der Folge sinkt die thermische Leistung des angeschlossenen Abhitzekekessels. Um die reduzierte Wärmeleistung des Abhitzekekessels auszugleichen, muss der Wärmespeicher entladen werden. Reicht die Wärmeleistung des Wärmespeichers nicht aus, muss ein Dampfkessel zugeschaltet oder die Leistung eines sich in Betrieb befindenden Dampfkessels erhöht werden.

Heizkraftwerk Bad Kreuznach

Bei dem wärmegeführten konventionellen HKW in Bad Kreuznach führt die Einbindung eines Hochtemperatur-Wärmespeichers über eine Lastgangoptimierung zur Senkung von Gaslastspitzen und zur Erhöhung des KWK-Anteils bei der Wärmeversorgung. Gleichzeitig steigt damit die Stromerzeugung.

Das Heizkraftwerk versorgt das Michelin-Werk Bad Kreuznach mit Prozessdampf und Strom. Die Anlage wird wärmegeführt betrieben. Überschüssiger Strom wird in das öffentliche Netz eingespeist. Bis zu 25 % des Strombedarfs wird durch Bezug aus dem öffentlichen Netz gedeckt. Die Grundlast an Wochenenden ist teilweise zu gering für den Betrieb der Gasturbine. Der Abhitzeessel ist nur in Kombination mit der Gasturbine zu betreiben, da keine eigenständige Frischluftzufuhr vorhanden ist.

Wesentlicher Bestandteil der Anlagenkonzeption ist eine Gasturbine mit nachgeschaltetem Abhitzeessel. Neben der Gasturbine mit dem nachgeschalteten Abhitzeessel besteht die Anlage aus drei Dampfkesseln sowie einer Dampfturbine. Die installierte Gesamtdampfleistung beträgt 85,6 Mg/h und die installierte Gesamtstromleistung 11,7 MW_{el}.

Rechnerisch soll die Anzahl der Volllaststunden der Gasturbine erhöht werden, indem der nicht notwendige Prozessdampf in einen Speicher gefahren wird und bei Bedarf abgerufen wird. Durch die Speichernutzung zur Abdeckung von Lastspitzen im Dampfbedarf werden simultan die Gaslastspitzen reduziert, weil der Besicherungskessel weniger Dampf erzeugen muss. Durch die gleichmäßigere Fahrweise wird zudem der Anlagenverschleiß reduziert. Bei einer ausreichenden Dimensionierung des Speichers kann damit der Besicherungskessel eingespart werden. Denn alleine die jährlichen Wartungskosten eines einzelnen Dampfkessels sind auf etwa 10.000 € zu beziffern.

Hierzu wurde ein Hochtemperaturwärmespeicher berechnet, der in das bestehende System integriert wurde. Zudem ist bekannt, dass ein hoher Wärmeüberschuss vorliegt, der phasenweise über den Kamin entspannt wird. Diese Wärme kann zum Beladen des Wärmespeichers genutzt werden, wodurch sich Einsparungen beim Gasbezug ergeben. Im Jahr 2011 betrug dieser Wärmeüberschuss 7.630 MWh.

Bei der Betrachtung der geordneten Jahresdauerlinie aus Abbildung 2-8 wird deutlich, dass sich die nutzbare Wärme aus dem Dampfkessel, bei einer Speicherkapazität von 10 MWh sowie einer Leistung von 2,5 MW_{th}, deutlich erhöht.

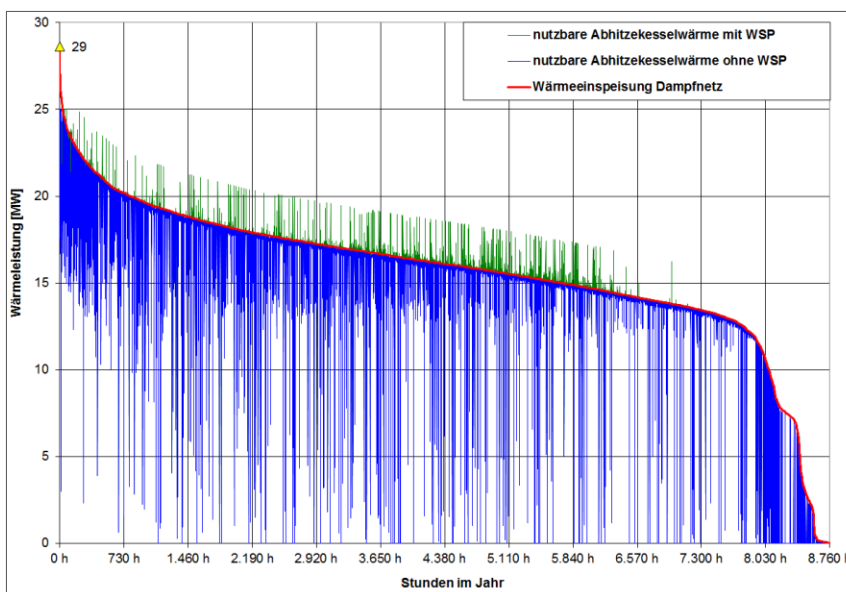


Abbildung 2-8: Geordnete Jahresdauerlinie des HKW Bad Kreuznach. Sollwert und AHK mit einem thermischen Energiespeicher mit einer 10 MWh Kapazität und 2,5 MW_{th} Leistung.

Durch die Verlängerung der Laufzeit der Gasturbine erhöht sich die Stromerzeugung. Bei einer Speicherkapazität von 30 MWh und einer Leistung von 7,5 MW_{th} steigen die Werte auf bis zu 3,2 % an. In Abbildung 2-9 ist die prozentual mögliche Erhöhung der Stromerzeugung als Funktion der Wärmespeicherkapazität aufgetragen. Hierbei beträgt das Verhältnis aus Leistung und Kapazität der betrachteten Speicher immer 4 1/h.

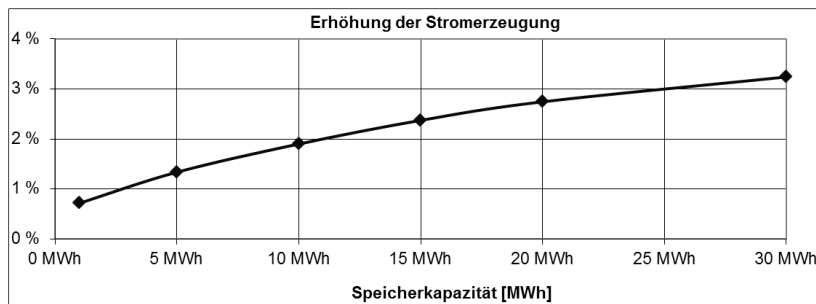


Abbildung 2-9: HKW Bad Kreuznach – Erhöhung der Stromerzeugung mit dem ausgelegten Speicher.

Alternativ zur alleinigen Speichernutzung zur Vermarktung von MRL ist eine Kombination von Lastgangoptimierung und MRL-Vermarktung denkbar. Die bei der Lastgangoptimierung ermittelte ideale Speicherkapazität liegt bei 10 MWh. Mit dieser Kapazität lässt sich eine elektrische Leistung von 2 MW_{el} vermarkten. Allerdings können durch die parallele Speichernutzung (MRL und Lastgangoptimierung) Nachteile beim Lastspitzenabbau entstehen.

Heizkraftwerk Castrop-Rauxel

Das Heizkraftwerk Castrop-Rauxel ist für die Produktion von Strom und Prozessdampf der Rütgers Chemical AG verantwortlich. Als Brennstoff dienen Erdgas sowie HEL. Die Anlage wird stromgeführt betrieben. Neben der Gasturbine mit dem nachgeschalteten Abhitzekegel besteht die Energiezentrale aus vier Dampfkesseln sowie zwei Dampfturbinen. Die installierte Gesamtdampfleistung beträgt 135,6 Mg/h und die installierte Gesamtstromleistung 11,4 MW_{el}.

Die Anlage in Castrop-Rauxel wird seit mehreren Jahren aus wirtschaftlichen Aspekten stromgeführt gefahren. Bei der Betrachtung der Lastgangkurve für die Generatorleistung fällt auf, dass der Strombedarf im Schnitt zwischen 7 und 8 MW_{el} liegt und die maximale elektrische Leistung von rund 11,4 MW_{el} nie erreicht wird.

Aus der Berücksichtigung von Wärmeeinsatz durch den Abhitzekegel und Wärmebedarf in der 41 bar_ü Schiene sowie der Umformstation (41 bar_ü zu 25 bar_ü) wird ersichtlich, dass beim AHK lediglich 4,3 % Wärmeüberschuss anfällt, also wird die Wärme aus dem KWK-Prozess fast zu 100 % genutzt.

Bei der Lastgangoptimierung der Anlage in Bad Kreuznach war die zusätzliche Laufzeit der Gasturbine und damit die erhöhte Stromerzeugung neben der Lastspitzenabsenkung ein entscheidender Faktor für die Wirtschaftlichkeit zur Einbindung eines Wärmespeichers. Es sind also kaum Einsparpotenziale zu sehen, außer es gelingt, Lastspitzen durch Speicherentladung abzubauen. Deshalb entfällt bei dieser Anlage die Option, durch Lastgangoptimierung mit Hilfe eines Wärmespeichers Einsparungen zu erzielen. Zumindest so lange, wie diese stromgeführt gefahren wird.

AP 2.2 Identifikation von Optionen für den Speichereinsatz im Heizkraftwerksbereich (DLR, SNE)

Für die im Rahmen von AP 2.1 identifizierten Anlagengruppen 1, 2 und 6 wurden im Rahmen des AP 2.2 mögliche thermische Energiespeicher konzipiert. DLR identifizierte Speicherkonzepte für den Einsatz im Heizkraftwerksbereich unter rein technischen Gesichtspunkten. Eine wirtschaftliche Betrachtung erfolgte anschließend durch SNE.

Für die Flexibilisierung und Optimierung der Lastgänge besitzt ein Wärmespeicher theoretisches Potenzial. Allerdings lässt sich das Speicherkonzept in der Praxis zurzeit aufgrund der geringen Frischdampfdrücke und einer fehlender Überhitzungsmöglichkeit nicht wirtschaftlich realisieren.

2.2.1 Entwickelte Speicherkonzepte (DLR)

In diesem Schritt wurden für die in AP 2.1 ausgewählten sechs Anlagen Speicherkonzepte erarbeitet. Verschiedene Technologien zur Energiespeicherung (Flüssigsalzspeicher, Latentwärmespeicher und Feststoffspeicher) wurden in den jeweiligen Temperaturbereichen betrachtet.

Zusammenfassend wurde für das BMK Lünen und das BMHKW Dresden ein kombiniertes Speichersystem aus einem Latentwärmespeicher und einem Zwei-Tank Flüssigsalzspeicher konzipiert. Für das BMHKW Ilmenau, HKW Bad Kreuznach sowie HKW Castrop-Rauxel wurden Latentwärmespeicher als Möglichkeiten für eine Speicherintegration identifiziert.

Durch Betrachtung der einzelnen Anlagenparameter ließen sich bereits erste Gemeinsamkeiten bzw. Unterschiede bei der Betrachtung unterschiedlicher Speicherkonzepte erkennen. Da bei den Anlagen der Gruppe 2 das Druckniveau grundsätzlich höher ist als bei der Anlagen-Gruppe 6, lassen sich hier PCM-Speicher mit Lithiumnitrat (bei Dampfdrücken über 60 bar) und einer Mischung aus Natriumnitrat und Kaliumnitrat (bei Dampfdrücken zwischen 30 bar und 60 bar) einsetzen. Bei den Anlagen der Gruppe 6 stellt sich grundsätzlich das Problem, dass der erzeugte Dampf über verschiedene Dampfschienen direkt zum Kunden geführt wird. Durch die notwendige Druckabsenkung bei Phasenwechselspeichern können teilweise entscheidende Dampfschienen nicht mehr bedient werden. Bei den betrachteten Biomasseanlagen kann die eingespeicherte Energie nicht im Nennlastpunkt des Turbosatzes verstromt werden, da die betrachteten Latentwärmespeicher bei einem niedrigeren Druck entladen als beladen werden. Daher kann die Dampfturbine des Turbosatzes nur in einem Teillastpunkt betrieben werden. In Tabelle 2-2 sind die ausgelegten Speicherkonzepte zusammengefasst.

Tabelle 2-2: Übersicht der Speicherkonzepte für die ausgewählten Anlagen.

Anlage	Frischdampf- temperatur [°C]	Frischdampf- druck [bar]	Kondensati- onstemperatur [°C]	hierzu pas- sendes PCM	Phasenwech- seltemperatur [°C]
BMK Lünen	460	66	281	LiNO ₃	254
BMHKW Dresden	425	64	280	LiNO ₃	254
BMHKW Ilmenau	430	47	260	KNO ₃ /NaNO ₃	222
HKW Bad Kreuznach	300	23	219	LiNO ₃ /NaNO ₃	194
HKW Castrop-Rauxel	330	41	252	KNO ₃ /NaNO ₃	222

Nach Rücksprache mit dem Projektpartner SNE wurden vom DLR zwei grundlegende Anlagenkategorien für die weitere Betrachtung ausgewählt. Hierbei handelt es sich zum einen um biomassebefeuerte Anlagen und zum anderen um Anlagen, die im Rahmen eines Industriecontractings betrieben werden. Diese Anlagen zeigen große Ähnlichkeiten in Bezug auf Frischdampfdruck und Temperaturniveau des überhitzten Dampfes. Für die beiden Anlagenkategorien wurde jeweils eine der bereits beschriebenen Anlagen ausgewählt (vgl. ausgegraute Zeilen in Tabelle 2-2) und für die detaillierte Auslegung des thermischen Energiespeichers herangezogen – BMHKW Dresden und HKW Bad Kreuznach.

2.2.2 Betrachtung und Berechnung der Einbindung in einem Biomasseheizkraftwerk – BMHKW Dresden (DLR)

Für die Einbindung eines thermischen Energiespeichers im Bereich Biomasse wurde das BMHKW Dresden ausgewählt. Das entsprechende Verfahrensbild ist in Abbildung 2-10 dargestellt. Bei der Anlage steht zur Beladung Frischdampf mit 64 bar Druck und einer Temperatur von 425 °C zur Verfügung. Der Dampferzeuger wird durch eine Vorschubrostfeuerung beheizt. Auf dieser wird die zu Hackschnitzeln vorbereitete Biomasse verbrannt. Der so erzeugte Frischdampf wird in einer Dampfturbine entspannt. Mit der so umgesetzten mechanischen Energie wird ein Generator mit einer elektrischen Leistung von 7,1 MW_{el} angetrieben.

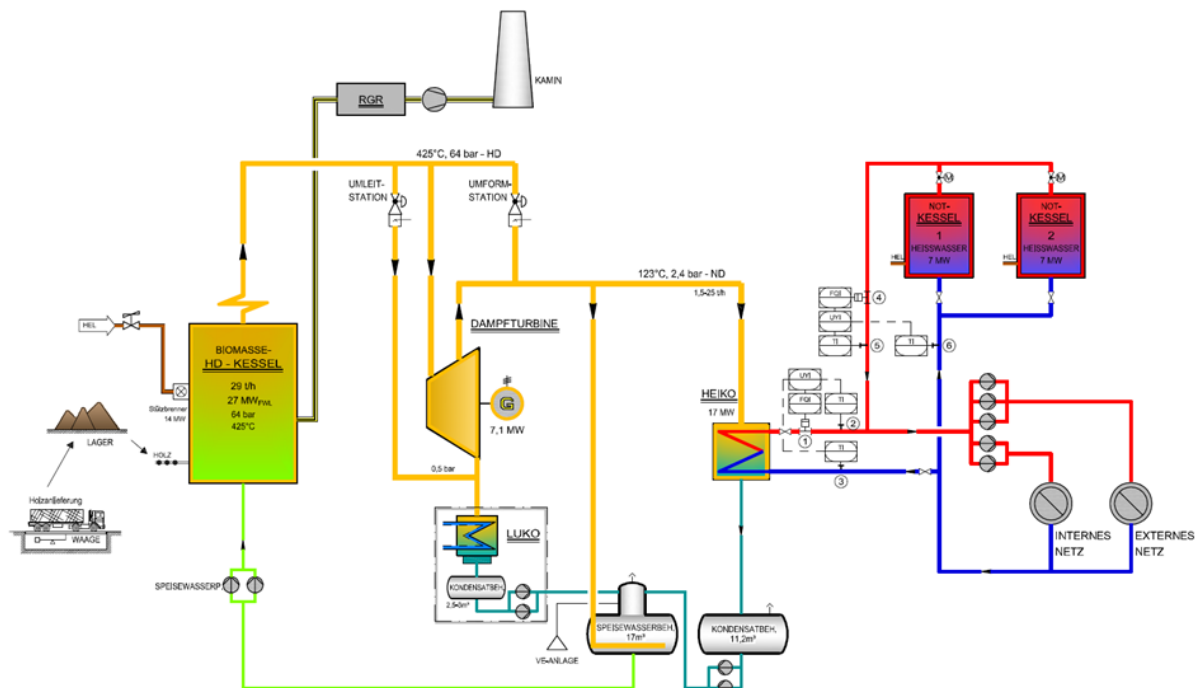


Abbildung 2-10: Verfahrensfliessbild des BMHKW Dresden als Musteranlage im Bereich Biomasseanlagen.

Das Biomasseheizkraftwerk soll mit der Einbindung eines thermischen Energiespeichers für die Vermarktung von negativer MRL am Regelenergiemarkt optimiert werden. Da die vorhandene Rostfeuerung sehr träge ist, muss zur Kühlung des Dampferzeugers weiter Speisewasser zugeführt werden. Der so entstehende Dampf kann während der Anbietetung negativer Reserveleistung nicht in der Turbine entspannt werden und muss daher im Kondensator kondensiert werden.

Für die Auslegung eines thermischen Energiespeichers wurde eine Erbringung von 5 MW_{el} negativer Reserveleistung am Generator angenommen. Dies bedeutet, dass das Kraftwerk nur noch $2,1 \text{ MW}_{el}$ an das Stromnetz abgibt und daher der Turbosatz in einem Teillastpunkt von ca. 30 % betrieben wird. Die Feuerung wird während der Erbringung der Regelleistung weiter im Nennlastpunkt betrieben und der zur Verfügung stehende Dampf zur Beladung des Speichers verwendet.

Referenzkonzept Biomasse, Unterstützungsbetrieb

Bei der Speichergrobauslegung in Tabelle 2-2 wurde für das Biomasseheizkraftwerk Dresden ein PCM-Speicher mit LiNO_3 ausgewählt. Für die Erarbeitung eines passenden Speichersystems musste die Einbindung in das Kraftwerk näher betrachtet werden. Hierzu wurde das Verfahrensfliessbild des BMHKW Dresden (vgl. Abbildung 2-10) herangezogen. Basierend auf dieser Betrachtung wurde die Einbindung des Speichersystems wie in Abbildung 2-11 dargestellt geplant.

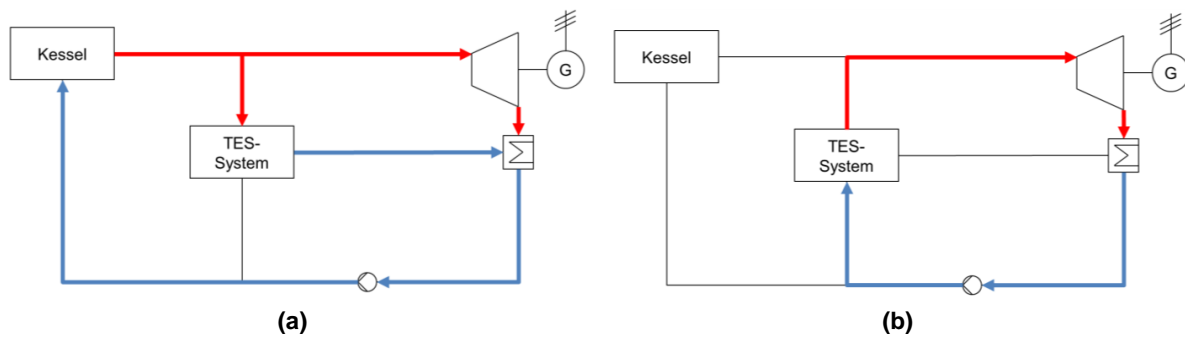


Abbildung 2-11: Verfahrensskizze des Referenzkonzepts zur Einbindung eines thermischen Energiespeichersystems beim Anlagenkonzept Biomasse bei der (a) Be- und (b) Entladung.

Hierbei wird der Massenstrom des Frischdampfs in zwei Teilmassenströme aufgeteilt (vgl. Abbildung 2-11 (a)). Der Teil, der nach dem aktuellen Stand, komplett im Kondensator enthitzt, kondensiert und unterkühlt werden müsste, wird in das thermische Energiespeichersystem geleitet und belädt dieses während der Zeitscheibe. Der Massenstrom Wasser/Dampf, der aus dem Speicher austritt, wird zur vollständigen Kondensation bzw. Abkühlung in den Kondensator geleitet.

Für die Entladung des Speichers wird über ein Ventil Speisewasser in das thermische Energiespeichersystem geleitet und dort vorgewärmt, verdampf und überhitzt (Abbildung 2-11 (b)). Der so erzeugte Frischdampf wird dann der Turbine in einem Teillastpunkt zugeführt und verstromt. Da die Dampfturbine sehr sensibel auf Schwankungen der Frischdampf-temperatur reagiert, muss eine dauerhafte Überhitzung während der Entladung gewährleistet sein.

Basierend auf den Vorbetrachtungen lässt sich nun ein geeignetes Speichersystem basierend auf einem PCM und einem Zwei-Tank Flüssigsalzspeicher auslegen. Bei der Beladung (vgl. Abbildung 2-12 (a)) wird der Frischdampf zunächst vom Kessel in einen Wärmeübertrager geleitet. In diesem wird der Frischdampf zunächst enthitzt. Die Wärme wird auf eine nahe-tektonische Mischung aus Natriumnitrat (NaNO_3) und Kaliumnitrat (KNO_3) übertragen.

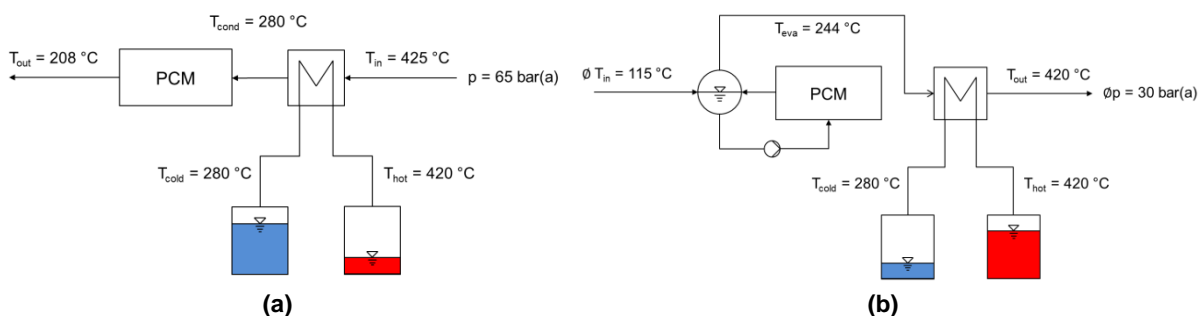


Abbildung 2-12: Verfahrensskizze des Speichersystems bestehend aus PCM- und Zwei-Tank Flüssigsalzspeicher für die (a) Be- und die (b) Entladung.

Bei der Entladung (vgl. Abbildung 2-12 (b)) wird der Speicher in entgegengesetzter Richtung durchströmt. Hierbei ist es aufgrund der Dampfturbine von Vorteil, den Speicher im Gleitdruckbetrieb zu entladen. Dies bedeutet, dass eine direkte Beziehung zwischen Dampfdruck und zu entladender Leistung besteht, die sich wiederum über die Temperaturdifferenz zwischen Wasser/Dampf und PCM regeln lässt. Die Temperaturdifferenz lässt sich im Speicher im Betrieb durch die Verdampfungstemperatur bzw. -druck auf der Wasser/Dampfseite des Rohrregisters einstellen.

Simulation des Referenzkonzepts Biomasse

Mit Hilfe von Auslegungstools des DLR konnten für das oben beschriebene Speicherkonzept zwei Kennlinien für den PCM-Speicher erzeugt werden. Diese sind in Abbildung 2-13 für die Be- und die Entladung dargestellt. Diese Kennlinie wurde in einem Simulationsmodell (vgl. Abbildung 2-14) in Epsilon integriert.

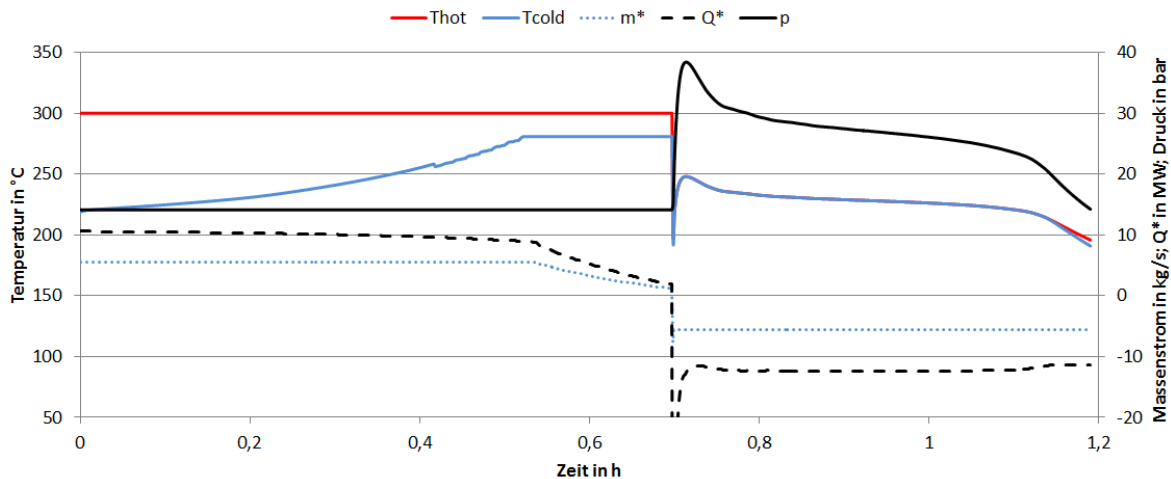


Abbildung 2-13: Be- und Entladeverhalten für Referenzkonzept Biomasse (rot – HTF-Temperatur heiße Speicherseite; blau – HTF-Temperatur kalte Speicherseite; gepunktet – Massenstrom; gestrichelt – Leistung; schwarz – Druck in bar).

Als Hauptkomponenten wurden im Modell (vgl. Abbildung 2-10) der Dampferzeuger, sowie die Dampfturbine und der Kondensator und einige Hilfsaggregate wie z.B. die benötigten Speisepumpen modelliert.

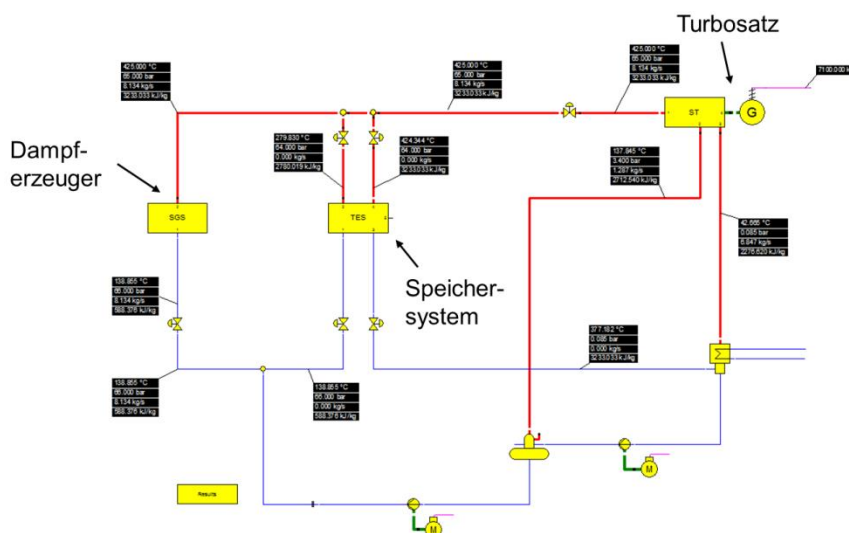


Abbildung 2-14: Modell für das Referenzkonzept für Biomasseanlagen basierend auf dem BMHKW Dresden.

Ergebnisse der Simulation des Referenzkonzepts Biomasse

Das Ergebnis der Beladungsberechnung ist in Abbildung 2-15 (a) dargestellt. Der beschriebene Festdruckbetrieb lässt sich am abrupten Leistungsverlauf ab ca. 35 min deutlich erkennen. Der Gesamtverlauf der Leistung des Speichersystems wird ausschließlich vom PCM-Speicher vorgegeben. Der vorgelagerte sensible Speicherteil wird während der gesamten Beladung mit einer konstanten Leistung betrieben.

Bei der Entladung des zuvor beladenen Speichers zeigt sich aufgrund der veränderten Betriebsführung ein anderes Verhalten (vgl. Abbildung 2-15 (b)). Durch den von der Turbine vorgegebenen Gleitdruckbetrieb und der PCM-Charakteristik ergibt sich eine langsam sinkende Leistung.

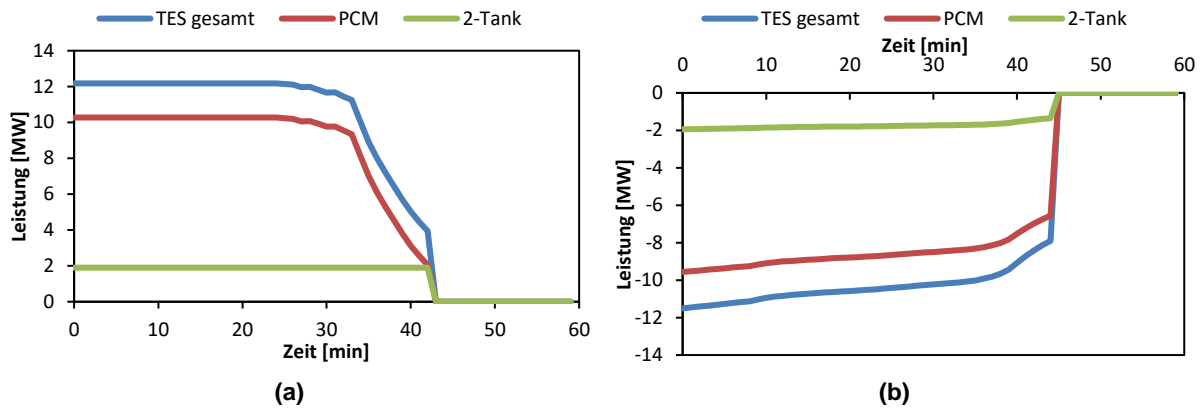


Abbildung 2-15: Darstellung des zeitlichen Leistungsverlaufs des Energiespeichers beim Referenzkonzept für Biomassenanlagen während der (a) Be- und (b) Entladung.

Zusammenfassung des Referenzkonzepts Biomasse

Mit den Simulationsergebnissen wurde eine grobe Dimensionierung des Speichersystems vorgenommen (vgl. Tabelle 2-3). Demnach liegt die thermische Gesamtkapazität des Speichersystems bei 7,8 MWh, welche sich auf 30 t einer naheutektischen Mischung aus Natrium- und Kaliumnitrat im sensiblen Speicher und 45 t Lithiumnitrat im Latentwärmespeicher aufgeteilt. Die Energiedichte des gesamten Speichersystems beträgt 104 kWh/t.

Tabelle 2-3: Zusammenfassung der Ergebnisse für das Referenzkonzept für Biomassenanlagen.

Kapazität	7,8 MWh
Belade- und Entladezeit	45 min
Salzinventar (sensibel)	30 t
Salzinventar (latent)	45 t
Energiedichte	104 kWh/t

Durch den Betrieb des Speichers im Gleitdruckbetrieb ist eine Entladung und Verstromung der eingespeicherten Energie nur in einem Teillastpunkt der Turbine möglich. Jedoch kann der Speicher nicht bei Nennlastbedingungen der Turbine im sogenannten Unterstützungsbetrieb, parallel zum Kessel, eingesetzt werden. Durch die vorgesehene Integration und Betriebsweise ist aber eine Entladung parallel zum Kessel nötig. Somit wäre eine Druckerhöhung nach dem Speicher bei der Entladung nötig. Nach Rücksprache mit dem Projektpartner SNE wurde dieses Konzept nicht weiter betrachtet.

Alternativkonzept, Speisewasservorwärmung

Bei dem in Abbildung 2-16 skizzierten System wird das Speichersystem wie im Referenzkonzept beladen. Die Entladung erfolgt anschließend über einen zusätzlichen Speisewasservorwärmer. Hierbei kommt ein vereinfachtes Speichersystem zum Einsatz, da kein überhitzter Dampf zur Speisewasservorwärmung benötigt wird. Bei der Beladung kann der Dampf mit einer Temperatur von 350 °C in den PCM-Speicher geleitet werden. Da der Kessel weiterhin für die Dampfturbine Frischdampf mit einer Temperatur von 425 °C erzeugt, muss der Teilmassenstrom vor dem Eintritt in den PCM-Speicher mit einer Wassereinspritzung abgekühlt werden (in Abbildung 2-16 nicht dargestellt). Aufgrund der Dampfparameter kommt ein PCM,

bestehend aus einer eutektischen Mischung aus Kaliumnitrat (KNO_3) und Natriumnitrat ($NaNO_3$) mit einer Phasenwechseltemperatur von $222\text{ }^\circ\text{C}$, zur Energiespeicherung in Frage.

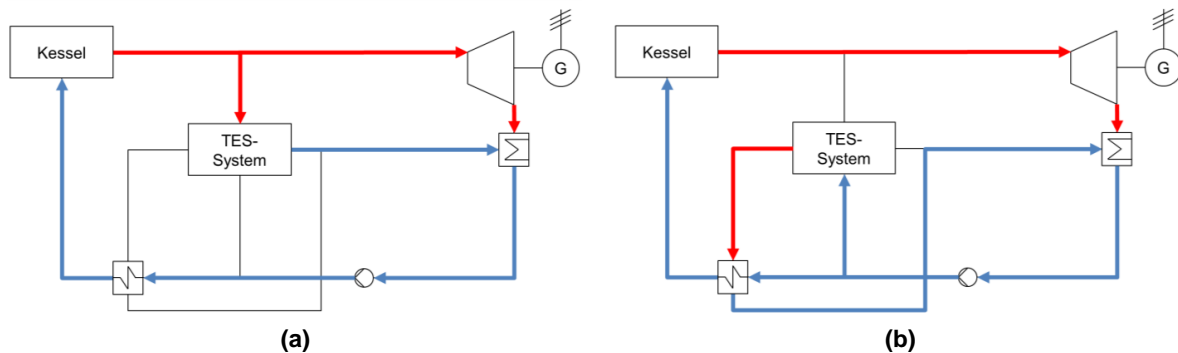


Abbildung 2-16: Verfahrensskizze des Speisewasservorwärmkonzepts zur Einbindung eines thermischen Energiespeichersystems beim Anlagenkonzept Biomasse für die (a) Be- und (b) Entladung.

Bei der Entladung (vgl. Abbildung 2-16 (b)) wird Speisewasser mit einem Druck von ca. 22 bar in den Speicher geleitet und dort verdampft und leicht überhitzt. Diese Überhitzung ist möglich, weil bei der Entladung, genau wie bei der Beladung, der PCM-Speicher im Festdruckbetrieb betrieben wird. Hierdurch wird der PCM-Speicher während der Entladung mit dem Massenstrom durchströmt, wie gerade zur Vorwärmung des Speisewassers benötigt wird. Durch den zweiten Wärmeübertrager für die Speisewasservorwärmung ist die Absenkung des Dampfdrucks bei der Entladung unerheblich.

Simulation des Speisewasservorwärmkonzepts Biomasse

In Abbildung 2-17 ist das Verhalten des ausgelegten PCM-Speichers bei der Be- und bei der Entladung dargestellt, das aus dem Auslegungsprozess mit Hilfe von DLR-Simulationstools abgeleitet wurde.

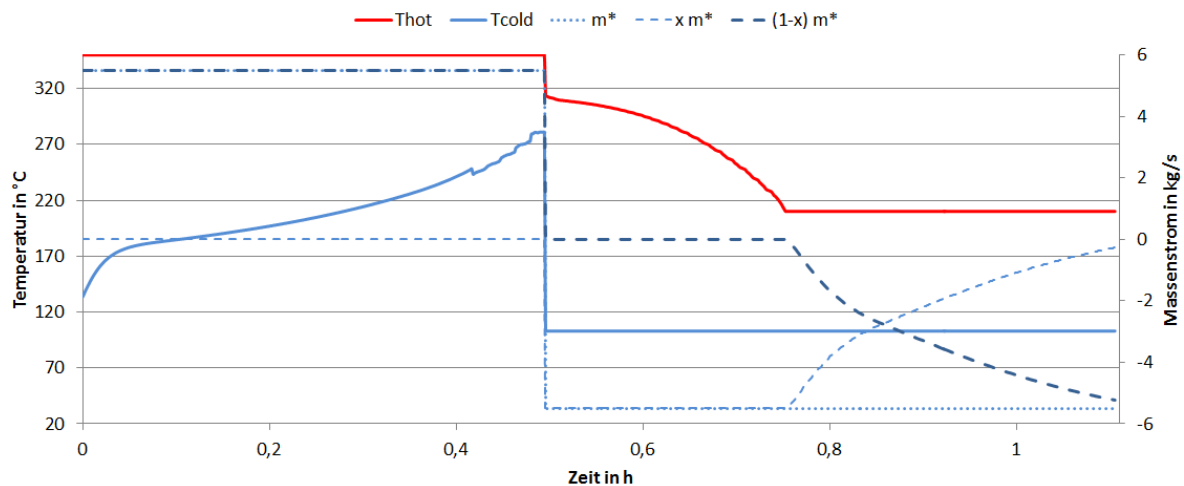


Abbildung 2-17: Be- und Entladeverhalten für das Vorwärmkonzept für Biomasseanlagen (rot – HTF-Temperatur heiße Speicherseite; blau – HTF-Temperatur kalte Speicherseite; gepunktet – Massenstrom; schwach gestrichelt – dampfförmiger Massenstrom, stark gestrichelt – wasserförmiger Massenstrom).

Für das Konzept der Speisewasservorwärmung wurde das Simulationsmodell des Referenzkonzepts Biomasse angepasst. Das Speichersystem wurde durch einen reinen latenten PCM-Speicher ersetzt und ein zusätzlicher Speisewasservorwärmer eingebaut (vgl. Abbildung 2-18). Die Funktionsweise der üblichen Kraftwerkskomponenten bleibt von der Anpassung des

Simulationsmodell unberührt. Lediglich die Charakteristik des PCM-Speichers wurde mit den Kennlinien aus Abbildung 2-17 angepasst.

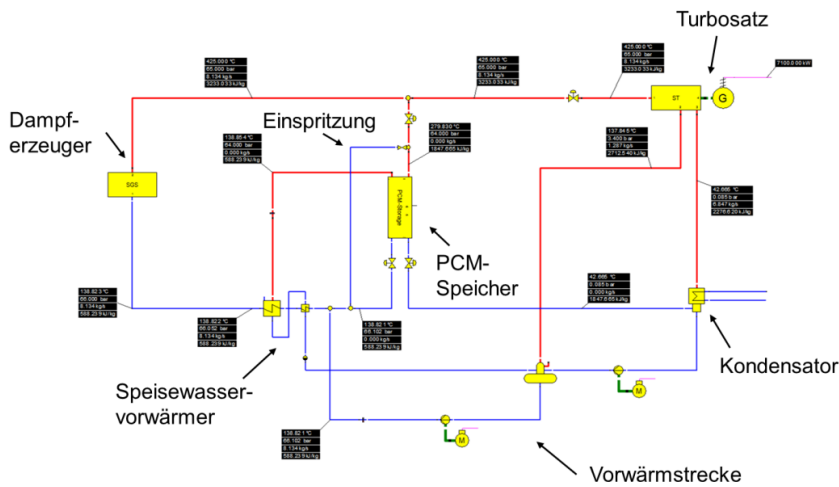


Abbildung 2-18: Epsilonmodell für das Speisewasservorwärmkonzept für Biomasseanlagen basierend auf dem BMHKW Dresden.

Ergebnisse des Speisewasservorwärmkonzepts Biomasse

Die Ergebnisse der Simulation des Speisewasservorwärmkonzepts für einen Belade- und einen Entladevorgang sind in Abbildung 2-19 dargestellt. Demnach ergibt sich bei der Beladung das für den Festdruckbetrieb charakteristische Plateau bei der Leistung des Speichers. Nach ca. 30 min ist der Speicher vollständig beladen. Die Entladung des Speichers (Abbildung 2-19 (b)) findet hingegen mit einer geringen Leistung statt, da das Speisewasser nur um eine Temperaturdifferenz von ca. 70 K erwärmt wird.

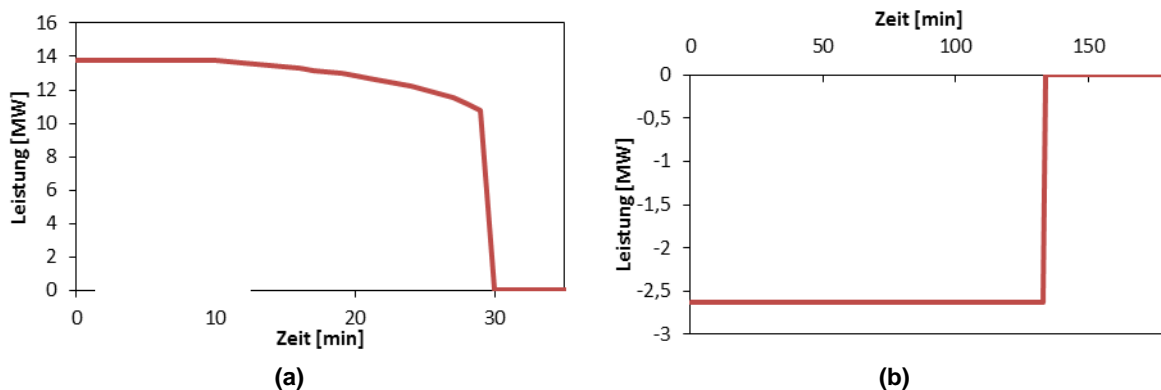


Abbildung 2-19: Darstellung des zeitlichen Leistungsverlaufs des Energiespeichers beim Speisewasservorwärmkonzept für Biomasseanlagen während (a) Be- und (b) Entladung.

Zusammenfassung des Speisewasservorwärmkonzepts Biomasse

Das zweite Konzept für die Einbindung eines thermischen Energiespeichers hat eine Kapazität von insgesamt 6,5 MWh. Die niedrige Speisewassertemperatur von ca. 140 °C kühlt bei der Entladung das PCM sehr weit ab. Die Beladung erfolgt in 30 min. Durch die geringere Leistung beim Entladen kann der Speicher in 130 min entladen werden. Für die Speicherung der Energie sind insgesamt 80,2 t des PCM erforderlich, was eine Energiedichte von 81 kWh/t ergibt.

Tabelle 2-4 Zusammenfassung der Ergebnisse für das Vorwärmkonzept für Biomasseanlagen.

Kapazität	6,5 MWh
Beladezeit	30 min
Entladezeit	130 min
Salzinventar (latent)	80,2 t
Energiedichte	81 kWh/t

2.2.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Einbindung in einem Biomasseheizkraftwerk – BMHKW Dresden (SNE)

In Tabelle 2-4 sind die Eckdaten des vom DLR dimensionierten Speichers für die Einbindung eines Speichers für die Vorwärmung von Speisewasser während der Entladung aufgelistet. Bei der dimensionierten Speicherkapazität von 6,5 MWh und angenommenen spezifischen Kosten über 70 €/kWh ergeben sich für den Speicher Gesamtinvestitionskosten in Höhe von 455.000 €. Darin enthalten sind ca. 50.000 € für das Speichermedium bei spezifischen Materialkosten von ca. 600 €/t.

Bei einer Entladungsdauer von 130 min und einer Reduzierung der Feuerungswärmeleistung von 2,5 MW lassen sich pro Aufruf der negativen Reserveleistung 5,4 MWh an Brennstoffenergie einsparen. Voraussetzung für diese Annahme ist, dass bei der vorangegangenen negativen Reserveleistung der Speicher vollständig gefüllt werden konnte.

Bei der Annahme von jährlich 30 Aufrufen der negativen Minuten Reserveleistung ergibt sich eine Brennstoffeneinsparung von 162 MWh. Der Preis für den Brennstoff Altholz A1-A4 für das BMHKW Dresden beträgt im Jahresdurchschnitt ca. 5 €/MWh. Daraus ergibt sich eine jährliche Brennstoffkosteneinsparung von ca. 810 €/a.

Fazit

Die wirtschaftliche Betrachtung lässt aktuell keine wirtschaftliche Umsetzung des TES im BMHKW Dresden zum jetzigen Zeitpunkt zu. Zukünftig kann sich die Wirtschaftlichkeit des TES verbessern, wenn der Brennstoffpreis ansteigt, sich die Abrufhäufigkeiten der negativen MRL-Aufrufe erhöhen und die Investitionskosten des Speichers reduziert werden können.

2.2.4 Industrie – HKW Bad Kreuznach (DLR)

Bei den Industrieanlagen wird die Anlage des HKW Bad Kreuznach (vgl. Abbildung 2-20) zur Speicherkonzepterstellung herangezogen. Im Unterschied zu den Biomasseanlagen wird bei den Industrieanlagen Prozessdampf über Dampfschienen an Kunden geliefert. Daher sind die Anlagen vom Prinzip her anders ausgelegt als Anlagen, die primär nur zur Stromerzeugung dienen. Als wesentliches Unterscheidungsmerkmal lässt sich ein geringerer Frischdampfdruck identifizieren. Die Musteranlage in Bad Kreuznach hat im Auslegungsfall einen Frischdampfdruck von ca. 22 bar. Der vorhandene Abhitzekessel hat eine Frischdampferzeugungskapazität von 34 t/h. Zur Besicherung ist zusätzlich noch ein erdgasbefeuerter Heizkessel vorhanden, der im Notfall die Versorgung des Kunden sicherstellt.

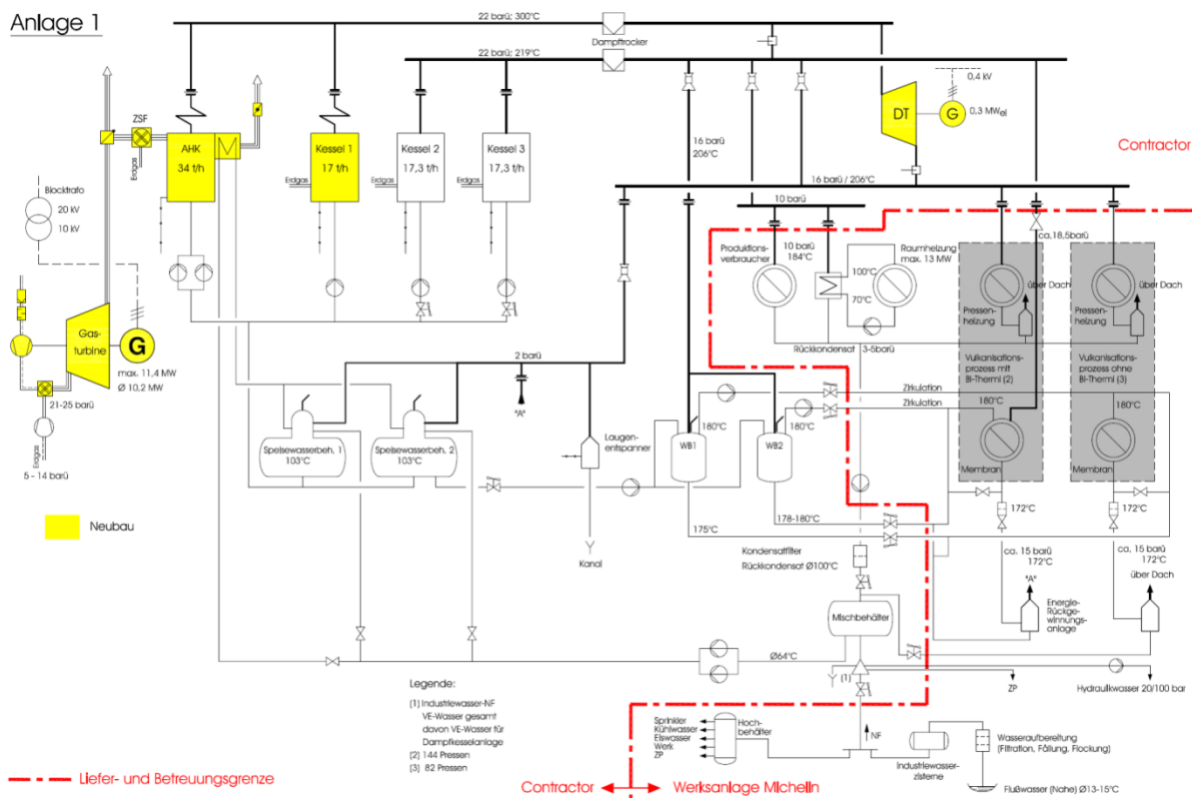


Abbildung 2-20: Verfahrensfließbild des HKW Bad Kreuznach als Musteranlage für die Gruppe der Industrieanlagen.

Aus der Betrachtung des Anlagenfließbildes in Abbildung 2-20 wird deutlich, dass zur Beladung eines möglichen Energiespeichers nur Dampf mit einem sehr niedrigen Frischdampfdruck (22 bar) zur Verfügung steht. Dies erfordert wiederum ein PCM mit einer sehr niedrigen Phasenwechseltemperatur. Bei der ersten Vorauslegung wurde in Tabelle 2-2 als PCM eine eutektische Mischung aus Lithiumnitrat (LiNO_3) und Natriumnitrat (NaNO_3) ausgewählt. Diese besitzt einen Phasenwechsel bei einer Temperatur von 194 °C und kann daher mit dem zur Verfügung stehenden Frischdampf beladen werden.

Referenzkonzept Industrie

In Abbildung 2-21 sind die beiden Verfahrensskizzen zur Einbindung des Energiespeichers in das Heizkraftwerk für (a) die Be- und (b) die Entladung dargestellt. Bei einer Dampf nachfrage, die unterhalb der Nennleistung des Abhitzekeessels liegt, wird ein Teilmassenstrom in den PCM-Speicher geleitet. Der Speicher wird im Festdruckbetrieb betrieben. Übersteigt die vom Kunden aktuell benötigte Dampfmenge die Erzeugungskapazität des Abhitzekeessels, so kann zuvor eingespeicherte Energie aus dem Energiespeicher entnommen werden und auf einer Dampfschiene bereitgestellt werden. Dadurch wird vermieden, dass ein zusätzlicher Kessel angefahren werden muss.

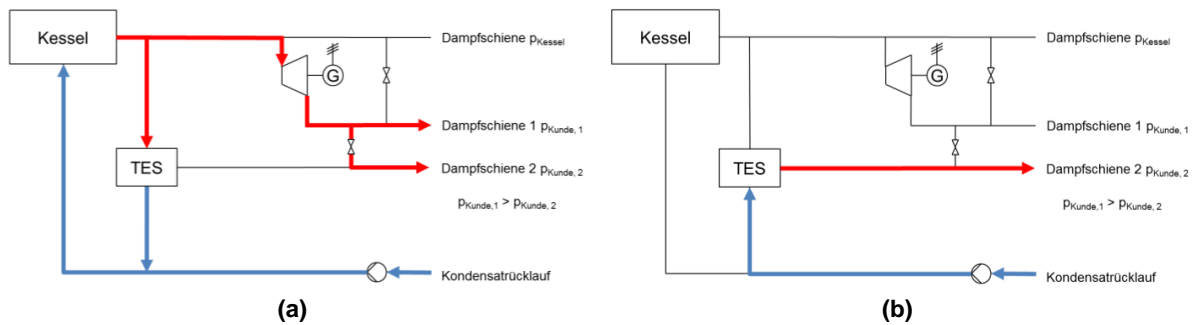


Abbildung 2-21: Verfahrensskizze des Referenzkonzepts zur Einbindung eines thermischen Energiespeichersystems beim Anlagenkonzept Industrie für die (a) Be- und (b) Entladung.

Wie bereits aus Abbildung 2-21 zu erkennen ist, wirkt sich die notwendige Druckabsenkung zur Entladung des PCM-Speichers auch bei diesem Konzept negativ aus. So kann Dampfschiene 1 zu jeder Zeit nur aus dem Abhitzekessel bedient werden, da der Druck des Speichers im Entladebetrieb zur Erzeugung einer ausreichend großen Temperaturdifferenz im PCM-Speicher auf ca. 10 bar abgesenkt werden muss. Demnach kann im Entladebetrieb nur Dampfschiene 2 durch den Speicher bedient werden. Für die Auslegung des Speichers wurde daher vorausgesetzt, dass die Lastspitze kleiner oder gleich groß der auf Dampfschiene 2 angeforderten Dampfmenge ist. Unter dieser Annahme ist es möglich, Dampfschiene 1 alleine durch den weiter betriebenen Kessel zu versorgen. Die Reduzierstation zwischen Dampfschiene 1 und 2 ist folglich während einer Speicherentladung außer Betrieb. Auf die Darstellung dieser Dampfströme wurde in Abbildung 2-21 aus Übersichtlichkeitsgründen verzichtet.

Simulation des Referenzkonzepts Industrie

In Abbildung 2-22 ist das Verhalten des ausgelegten PCM-Speichers bei der Be- und Entladung für das Referenzkonzept Industrie dargestellt, dass aus dem Auslegungsprozess mit Hilfe von DLR-Simulationstools abgeleitet wurde.

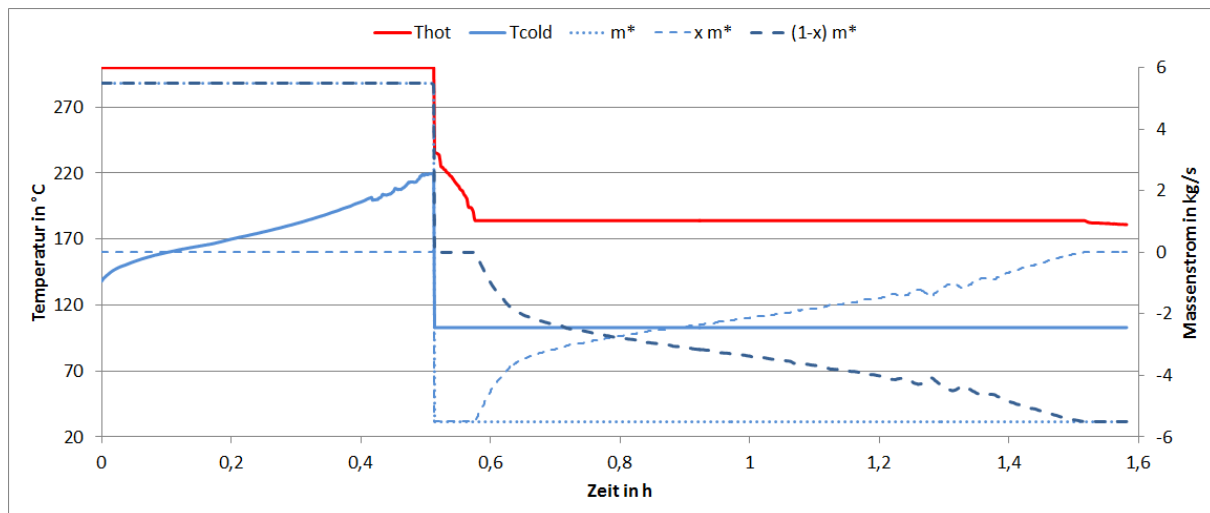


Abbildung 2-22: Be- und Entladeverhalten für Referenzkonzept für Industrieanlagen (rot – HTF-Temperatur heiße Speicherseite; blau – HTF-Temperatur kalte Speicherseite; gepunktet – Massenstrom; schwach gestrichelt – dampfförmiger Massenstrom, stark gestrichelt – wasserförmiger Massenstrom).

Für die Simulation der Musteranlage Bad Kreuznach wurde ein Simulationsmodell erstellt. Zur Modellierung des PCM-Speichers kommt wieder das PCM-Modul aus AP 6 zum Einsatz. Die Dampfturbine wird durch ein entsprechendes Modell abgebildet.

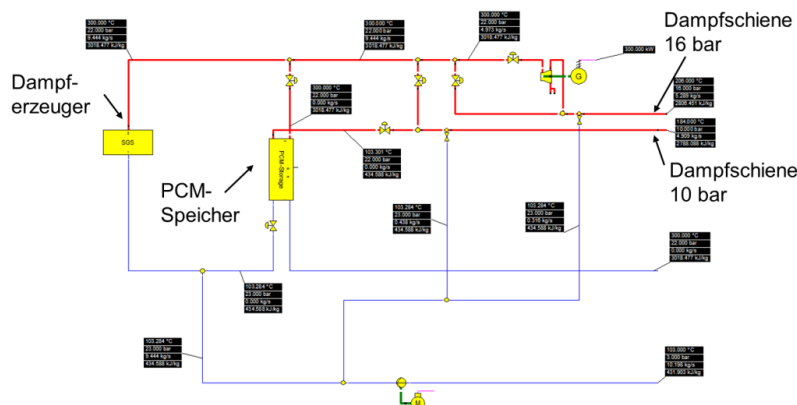


Abbildung 2-23: Modell für das Referenzkonzept für Industrieanlagen basierend auf dem HKW Bad Kreuznach.

Ergebnisse des Referenzkonzepts Industrie

Während der Beladung (vgl. Abbildung 2-24 (a)), nimmt der Speicher eine thermische Leistung von ungefähr 14 MW_{th} auf. Diese fällt im Verlauf der Speicherbeladung leicht ab. Abbildung 2-24 (b) zeigt deutlich, dass der Speicher nicht lange entladen werden kann. Dies liegt daran, dass die Prozessdampfschiene mit 10 bar eine Mindesttemperatur von 184 °C benötigt und der damit verbundenen niedrigen Temperaturdifferenz gegenüber der Schmelztemperatur des PCMs.

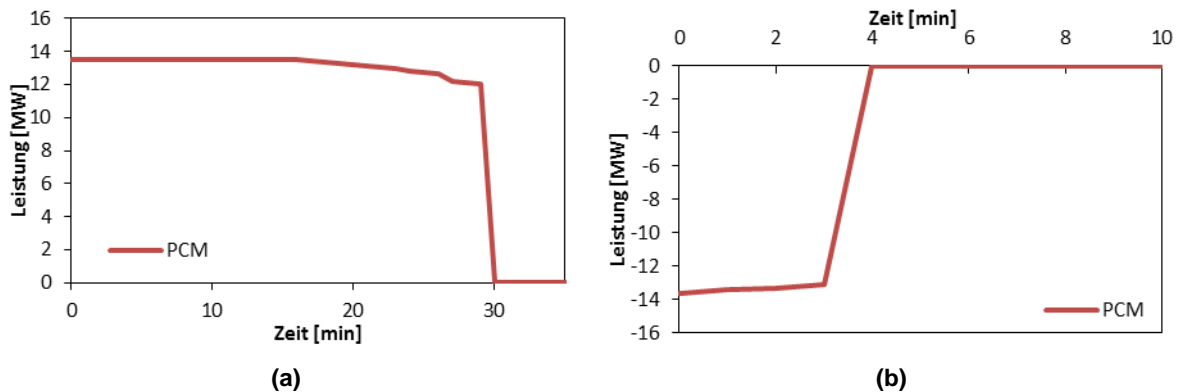


Abbildung 2-24: Darstellung des zeitlichen Leistungsverlaufs des Energiespeichers beim Referenzkonzept für Industrieanlagen während der (a) Be- und (b) Entladung.

Zusammenfassung des Referenzkonzepts Industrie

Eine Übersicht der wichtigsten Parameter aus der Simulation des Referenzkonzepts für Industrieanlagen ist in Tabelle 2-5 zusammengefasst. Das Speichersystem hat eine Gesamtkapazität von 6,6 MWh und kann innerhalb von 30 min vollständig beladen werden. Durch die nicht gegebene Überhitzungsmöglichkeit kann der Speicher nur 4 min lang entladen werden. Zur vorwiegend latenten Speicherung der thermischen Energie werden insgesamt 73,2 t des PCM benötigt. Dies führt zu einer Energiedichte des Speichers von 90 kWh/t.

Tabelle 2-5: Zusammenfassung der Ergebnisse für das Referenzkonzept für Industrieanlagen.

Kapazität	6,6 MWh
Beladezeit	30 min
Entladezeit	4 min
Salzinventar (latent)	73,2 t
Energiedichte	90 kWh/t

Bei der Betrachtung der Leistungsverläufe in Abbildung 2-24 fällt auf, dass die Energiemenge (Fläche unter der Leistungskurve) bei der Entladung wesentlich kleiner sein muss. Von den eingespeicherten 6,6 MWh können nur ungefähr 13 % der Energie innerhalb der 4 min aus dem Speicher entladen werden. Dies zeigt deutlich, dass der ausgelegte Speicher nicht in das untersuchte Anlagenkonzept des HKW Bad Kreuznach passt. Daher wird dieses Konzept nicht weiter betrachtet.

2.2.5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Industrie (SNE)

Die Simulationsergebnisse des DLR haben ergeben, dass aufgrund der fehlenden Überhitzungsmöglichkeiten bei der Speicherentladung, nur 13 % der eingespeicherten Energie wieder entladen werden können.

Für die Investitionskosten des Wärmespeichers ist die Speicherkapazität entscheidend. Der vorliegende Speicher wäre immer zu 87 % gefüllt und könnte ohne zusätzliche Überhitzung nicht weiter entladen werden. Aus diesem Grund erfolgte keine detailliertere Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.

2.2.6 Blick auf Neuanlagen (SNE)

Die untersuchten Heizkraftwerke sind historisch gewachsen und wurden daher ursprünglich nicht für einen Speichereinsatz konzipiert. Wird ein Wärmespeicher bereits in die Planung eines neuen Heizkraftwerks berücksichtigt, könnten sich entscheidende Vorteile ergeben. Die Besicherungs- und Spitzenlastkessel können deutlich kleiner dimensioniert werden. Die Spitzenlasten und die Besicherungsfunktion können durch einen Wärmespeicher übernommen werden. Dadurch ließen sich die zusätzlichen Investitionskosten für einen größer dimensionierten Kessel einsparen. Weiterhin kann der Kessel bei kleinerer Dimensionierung häufiger im Nennlastbereich arbeiten und dadurch effizienter betrieben werden. Hierfür sind allerdings erste Erfahrungen vom Speicherbetrieb in Anlagen nötig. Die Mehrheit der betrachteten Integrationsmöglichkeiten zeigt dieselben technologischen Anforderungen an PCM-Speicher auf:

- Konstante Entladecharakteristik, d.h. konstanter Leistungsverlauf über die gesamte Be- bzw. Entladedauer, sowie
- sehr hohe Wärmeübertragungsleistung zwischen PCM und Wärmeträgermedium, um geringe Temperatur- und Druckdifferenzen zwischen Speicherbe- und -entladung zu realisieren.

Hierzu ergibt sich weiterer F&E-Bedarf bei PCM-Speicherkonzepten, die diesen Anforderungen potentiell gerecht werden können, insbesondere bei aktiven Speicherkonzepten.

AP 3 Weiterentwicklung der Latentwärmespeicher für hohe Leistungsdichte und Überhitzung (DLR, FWB)

Inhaltsverzeichnis

AP 3.1 Hohe Leistungsdichte (DLR, FWB).....	3-5
AP 3.2 Überhitzung mit Latentwärme (DLR)	3-7

Grundausslegung

Um den ständigen Minimallastbetrieb des zur Besicherung vorgehaltenen Heizkessel im HKW Wellesweiler zu ersetzen, muss ein Latentwärmespeicher für eine kurze Zeit (circa 15 Minuten) den erforderlichen überhitzten Dampf (>300 °C, >21 bar) produzieren. Bisherige Speicher wurden für längere Entladezeiten im Bereich 1-2 oder 6-8 Stunden, und mit entsprechend geringeren Leistungen ausgelegt. Zudem wird in dieser Anwendung überhitzter Dampf benötigt, der ebenfalls im Latentwärmespeicher erzeugt werden soll. Bisherige Erfahrungen beschränkten sich auf die Erzeugung von Sattdampf. Daher wurde in diesem Projekt die Technologie von Latentwärmespeichern weiterentwickelt.

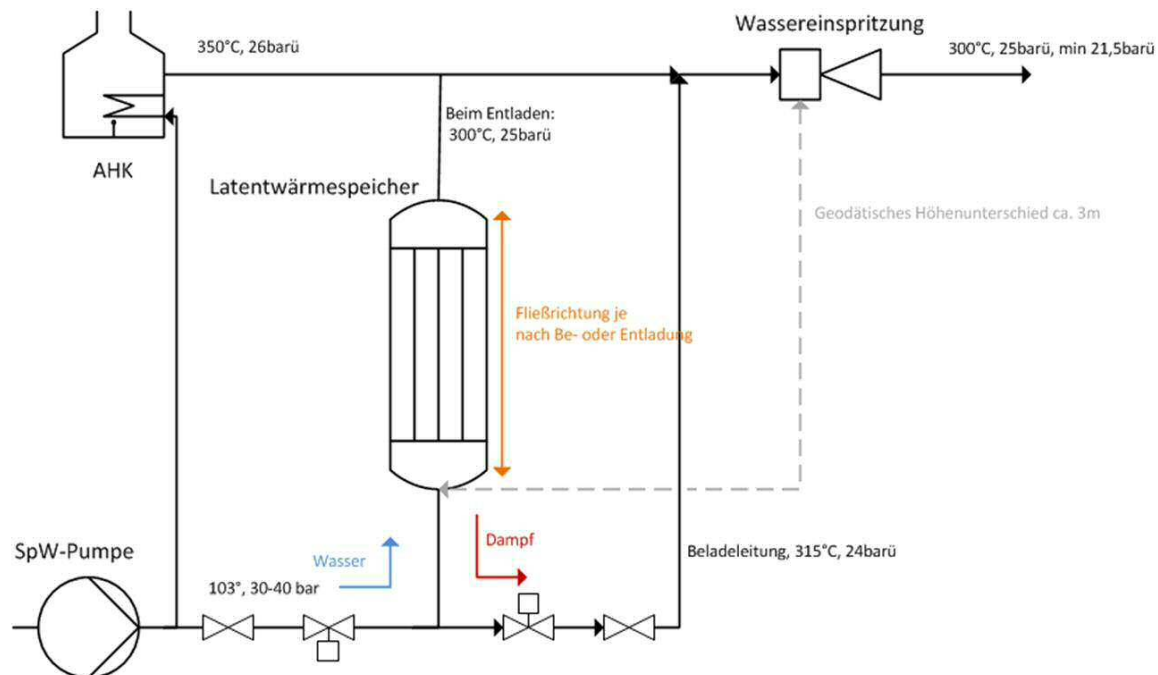


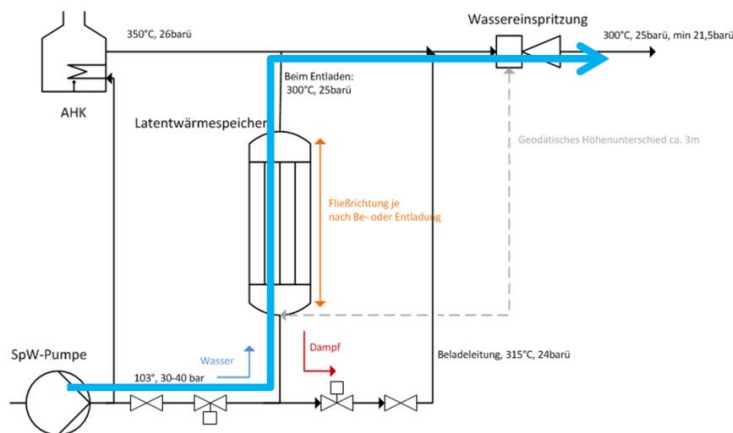
Abbildung 3-1: Verfahrenstechnische Einbindung des Latentwärmespeichers im HKW Wellesweiler

Die Grundanforderungen an den Speicher wurden mit dem Projektpartner SNE besprochen und festgelegt. Zudem wurde die mögliche Einbindung des Speichers im Heizkraftwerk Wellesweiler analysiert. Die Einbindung des Speichers ist skizzenhaft in Abbildung 3-1 dargestellt. Hierbei hat sich gezeigt, dass nicht nur die Entladung des Speichers eine große Herausforderung darstellt, sondern auch die Beladung, welche bisher als unkritisch angenommen wurde. Die verfahrenstechnischen Parameter sind in Tabelle 3-1 aufgelistet. Die geforderte minimale Austrittstemperatur beim Beladen liegt bei 300 °C.

Tabelle 3-1: Auslegungsparameter des Latentwärmespeichers im HKW Wellesweiler

	<i>Beladen</i>		<i>Entladen</i>	
	Eintritt	Austritt	Eintritt	Austritt
Medium	Dampf vom AHK	Dampf für Kunden	Speisewasser	Dampf für Kunden
Temperatur	350 °C	min. 300 °C	103 °C	min. 300 °C
Druck	26 barü	21,5 barü min.	25,5 barü	21,5 barü min.
Massenstrom	8-10,5 t/h		8-10,5 t/h	
Dauer	Nicht eingeschränkt		min. 15 Minuten	

Für die Entladung wird Speisewasser von unten in den Speicher gepumpt. Dieses verdampft und wird zum Kunden von SNE weitergeleitet. Hier ist die Herausforderung, den Speicher für diese hohe Leistung zu entwickeln. In Abbildung 3-2 zeigt der blaue Pfeil die Flussrichtung des Wasser-/Dampfkreislaufs für die Entladung.

**Abbildung 3-2: Einbindung des Latentwärmespeichers mit Entladeverlauf in Blau**

Die Beladung ist verfahrenstechnisch interessant, weil der überhitzte Dampf aus dem Abhitzekeessel, der für die Beladung verwendet wird, bei dem im Speicher herrschenden Druckniveau nur zu Beginn der Beladung kondensiert werden kann. Daher wurde eine verfahrenstechnische Einbindung des Speichers geplant, bei der der Speicher während der Beladung zunächst nur von einem Teil des Massenstroms durchströmt wird. Der restliche Massenstrom wird am Speicher vorbei geleitet und an einer Mischstelle mit dem Dampfmassenstrom aus dem Speicher gemischt. Der Dampf vom Abhitzekeessel wird zur Beladung von oben in den Speicher eingeleitet. Dieser kühlt sich im Speicher zu Beginn auf unter 300 °C ab. Durch die beschriebene Aufteilung des Massenstroms ist es möglich, an der Mischstelle eine Mischtemperatur größer 300 °C zu gewährleisten. Der Massenstrom, der durch den Speicher geleitet wird, wird langsam erhöht, bis der komplette Massenstrom durch den Speicher geleitet wird. Bis zur vollständigen Beladung des Speichers wird dieser von dem gesamten verfügbaren Dampfmassenstrom durchströmt. Diese Massenstromaufteilung ist in Abbildung 3-3 in Orange dargestellt.

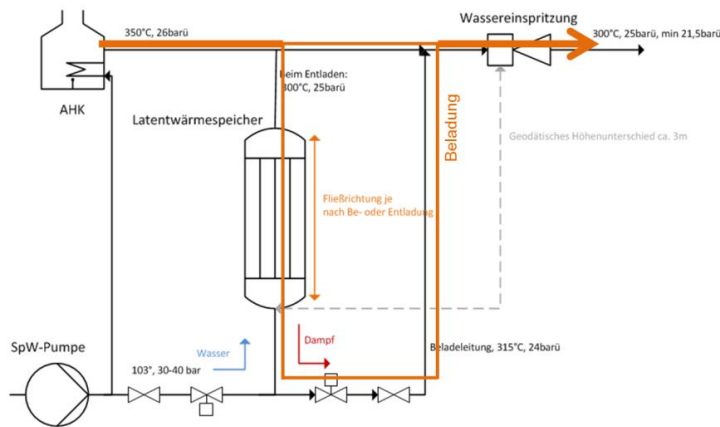


Abbildung 3-3: Einbindung des Latentwärmespeichers mit Beladeverlauf in Orange

Im Projekt TESIN wurde ein Latentwärmespeicher mit Phasenwechselmaterial (PCM) für die Produktion von überhitztem Dampf mit hohen Leistungen entwickelt. Aufgrund der geringen Leitfähigkeit von Nitratsalzen, die bei diesen Temperaturen als PCM einsetzbar sind, sind Rippenstrukturen notwendig, um die Wärme zwischen dem Wärmeträger und dem PCM zu übertragen. Hierfür wird ein Rippen-Rohr-Speicherkonzept mit axialen Rippen aus Aluminium als Wärmeleitstruktur entwickelt. Diese Rippen-Rohre sind parallel zueinander angeordnet, vertikal aufgestellt und mittels Sammler oben und unten auf der Wasser-/Dampf-Seite verbunden. Ein Speicherbehälter ummantelt das Speichermaterial, die Rohre und die zugehörigen Rippen.

Die Rippenstrukturen und die damit zusammenhängenden Parameter wie Rohrabstand und Anzahl der Rohre mussten für die Auslegung des Speichers passend zu den Anforderungen der Prozessparameter bestimmt werden. Für das Wärmeleitverhalten der Rippen wurden detaillierte Simulationen in ANSYS Fluent ausgeführt. Die Ergebnisse dieser Simulationen wurden auf vereinfachte Modelle in Dymola übertragen, um die Systemsimulationen für die Auslegung des Speichers auszuführen. Dabei wurde angenommen, dass alle Rohre gleichmäßig durchströmt werden. Somit ist innerhalb der Simulation in Dymola nur die Betrachtung eines einzelnen Rohres notwendig. Da in der Systemsimulation nur ein Rohr betrachtet wird, werden die Sammlergeometrie und die Endabmessungen des Speichers nicht berücksichtigt.

Diese Prozessrandbedingungen resultieren in den in Tabelle 3-2 aufgelisteten Parametern, die für die Betrachtung des Speichers relevant sind. Die geforderte minimale Austrittstemperatur während der Entladung liegt bei 300 °C; maximal werden 350 °C auftreten. Somit liegt die mittlere Austrittstemperatur bei 325 °C. Die mittlere Entladeleistung ergibt sich aus dem geforderten Massenstrom und der nötigen Enthalpieänderung auf der Wasserdampfseite. Die Enthalpieänderung, die Leistung und die benötigte Speicherkapazität werden folgendermaßen kalkuliert:

$$\Delta h = h(p_{hot}, T_{hot}) - h(p_{cold}, T_{cold}) = h(25 \text{ bar}, 325 \text{ °C}) - h(25 \text{ bar}, 103 \text{ °C}) \approx 2636 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (3-1)$$

$$\dot{Q}_{min} = \dot{m} \cdot \Delta h = 2,22 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 2636 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \approx 5856 \text{ kW} \quad (3-2)$$

$$E_{th} = \dot{Q}_{min} \cdot \Delta t_{Entladen} = 5856 \text{ kW} \cdot 15 \text{ min} \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 1464 \text{ kWh} \quad (3-3)$$

Tabelle 3-2: resultierende Randbedingungen

Enthalpieänderung Δh Wasser/Dampf	2636 kJ/kg
Minimale Leistung \dot{Q}_{\min}	5856 kW
Speicherkapazität thermische Energie E_{th}	1464 kWh

Stoffdaten

Die in den Simulationen und in der Auslegung verwendeten Stoffdaten sind in Tabelle 3-3 aufgelistet.

Für die im Prozess benötigte Entladetemperatur eignet sich Natriumnitrat (NaNO_3) als Speichermaterial. Dieses Speichermaterial hat eine Schmelztemperatur von $T_{\text{Schmelz}} = 306 \text{ °C}$. Die Materialdaten für das PCM wurden aus einer DLR-eigenen Stoffdaten-Tabelle entnommen. Die einzelnen Referenzen für die Parameter sind unter Tabelle 3-3 aufgelistet. Das Aluminium, welches für die Strangpressrippen verwendet wird, ist Aluminium 6060.

Wegen der inneren Druckbelastung durch den Dampf sowie der Verarbeitungsmöglichkeiten, wird Stahl als Werkstoff für die Rohre sowie die Sammler verwendet. Untersuchungen zur Korrosion der Stähle 16Mo3 (1.5415) sowie St 35.8 (1.0305) in NaNO_3 wurden vom DLR im Projekt DISTOR durchgeführt. Die Messungen ergaben für beide Materialien eine mittlere Korrosionsrate von etwa $12 \mu\text{m}/\text{Jahr}$, bei einer Temperatur von 350 °C und einer Versuchsdauer von 2500 h. Dieser Wert wird als unkritisch bewertet. Zudem sinkt die Korrosionsrate deutlich mit fortschreitender Versuchsdauer, was auf die Ausbildung einer stabilen schützenden Oxidschicht schließen lässt. Der Stahl 16Mo3 ist vorzugsweise zu verwenden, da dieser im Auslieferungszustand bereits eine glattere Oberfläche mit weniger Beschädigungen an der Oxidschicht aufweist. An den Beschädigungen könnten Belastungsspitzen auftreten, die zur Rissbildung und schließlich zum frühzeitigeren Versagen führen könnten. Darüber hinaus liegt die Dehngrenze bei diesem Stahl etwas höher. Wegen den erhöhten Belastungen durch große Temperaturschwankungen in dem hier betrachteten Prozess wurde daher der Speicher mit dem Stahl 16Mo3 konzipiert.

Tabelle 3-3: Stoffdaten

Dichte ρ	PCM (fest, bei 306 °C) ¹	2113 kg/m ³
	PCM (flüssig, bei 306 °C) ²	1908 kg/m ³
	PCM (Mittelwert fest/flüssig)	2010,5 kg/m ³
	Aluminium-Rippe ^{3,6}	2700 kg/m ³
	Stahlrohr ⁴	7850 kg/m ³
Spezifische Wärmekapazität c_p	PCM ¹	1,655 kJ/kg/K
	Aluminium-Rippe (bei 300 °C) ⁵	1,02 kJ/kg/K
	Stahlrohr (bei 306 °C) ⁴	0,554 kJ/kg/K
Wärmeleitfähigkeit λ	PCM ¹ (Mittelwert fest/flüssig)	0,55 W/(mK)
	Aluminium-Rippe ^{3,6}	210 W/(mK)
	Stahlrohr (bei 306 °C) ⁴	45 W/(mK)
Schmelzenthalpie h_m	PCM ¹	178 kJ/kg
Dehngrenze $R_{p,0.2}$	Stahlrohr (bei 350 °C) ⁷	159 N/mm ²

¹: Bauer, T., D. Laing, and R. Tamme, Characterization of Sodium Nitrate as Phase Change Material. International Journal of Thermophysics, 2012. 33(1): p. 91-104.

²: Schinke, H., Sauerwald, F. (1960) Über die Volumenänderung beim Schmelzen und den Schmelzprozeß bei anorganischen Salzen, Z. für anorg. Chemie, 304, S. 25-36.

³: COSMOS Aluminium Alloy Data Sheet EN AW 6060 [AlMgSi0.5]

⁴: VDI Wärmeatlas 3.0 Abschnitt Dea

⁵: Kammer, C. (2003) Aluminium Taschenbuch 3, 16. Auflage, Aluminium Verlag.

⁶: Werkstoff-Datenblatt: EN AW-6060 [AlMgSi]

⁷: Werkstoff-Datenblatt: Stahl 16Mo3 (1.5415), ThyssenKrupp

⁸: DISTOR Project SES6-CT-2004-50326 Technical Progress Report, WP4, Task 4.1

PCM – NaNO₃ – Masse und Volumen

Nimmt man an, dass sich das Speichermedium beim Entladen im Mittel von etwa 350 °C auf 265 °C (Mittelwert zwischen der Verdampfungstemperatur von 224 °C und der Schmelztemperatur des PCM von 306 °C) abkühlt, dann ergibt sich für die sensible Wärme (für den flüssigen und den festen Bereich zusammen) ein Temperaturbereich von 85 K. Betrachtet man nur die latente und sensible Speicherfähigkeit des PCM-Materials (das heißt keine Berücksichtigung von Stahl und Aluminium), dann ergeben sich unter dieser Annahme folgende Werte für die theoretische Speichermediummasse und das dazu gehörige mittlere Speichermediumvolumen:

$$m_{PCM} = \frac{Q}{(h_m + c_{p,PCM} \cdot \Delta T)} = \frac{1464 \text{ kWh} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}}{(178 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 1,655 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot 85 \text{ K})} \approx 16,98 \text{ t} \quad (3-4)$$

$$V_{PCM,Mittel} = \frac{m_{PCM}}{\rho_{PCM,Mittelwert}} \approx 8,2 \text{ m}^3 \quad (3-5)$$

Zusammenfassung

Gefordert ist in diesem Projekt ein Speicher, der für eine Dauer von mindestens 15 Minuten einen Massenstrom 8 t/h Dampf bei einer minimalen Temperatur von 300 °C und einem Druck von circa 25 bar bereitstellen kann. Dabei liegt die Speisewassertemperatur bei 103 °C. Mit den in diesem Bericht beschriebenen Simulationen wurde ein Speicher mit einer Entladezeit von 28 Minuten ausgelegt. Dieser Speicher wird unter Regelbedingungen 13 Stunden und 53 Minuten für die Beladung benötigen.

Die sich daraus ergebende hohe Leistung von circa 6 MW macht kleine Rohrteilungen und eine gute Wärmeleitstruktur notwendig. Das Design der Rippen und die kleine Rohrteilung sind für optimale Leistungen ausgelegt. Trotzdem kann das Speichermedium beim Entladen nicht zu 100 % erstarrt werden. Es muss stets eine gewisse Größe der wärmeübertragenden Rohrinnenfläche im Teil des nicht erstarrten PCMs zur Verfügung stehen, um den Dampf auf die nötige Temperatur überhitzen zu können. Diese Fläche wird gegen Ende des Entladens immer kleiner.

Die Simulationen können für die Auslegung keine hundertprozentige Sicherheit bieten, da noch Unsicherheiten in den verwendeten Modellen bestehen. Dies betrifft zunächst die Annahme, dass sich alle Rohre im Speicher identisch verhalten und daher die Betrachtung auf einen einzelnen Rohr-Rippen-Verbund reduziert werden kann. Durch diese Betrachtung können auch Wärmeverluste nicht berücksichtigt werden. Weiterhin bestehen Unsicherheiten bei dem Modell zur Vereinfachung der Wärmeleitstruktur, und bei der Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten. Auch der Einfluss der natürlichen Konvektion innerhalb der flüssigen Phase des Speichermediums konnte momentan nicht berücksichtigt werden, wobei dessen Einfluss nur bei der unkritischen Beladephase von Bedeutung ist.

Um trotzdem eine möglichst große Sicherheit in der Funktionsfähigkeit des Speichers zu gewährleisten, wurde der Entladezeit ein zusätzlicher Puffer von 10 Minuten aufgeschlagen. Der daraus resultierende Speicher ist damit zu 40 % überdimensioniert.

AP 3.1 Hohe Leistungsdichte (DLR, FWB)

Der Speicher soll innerhalb von 15 Minuten entladen werden können und dabei im Mittel $\dot{m} = 8 \text{ t/h}$ Dampf liefern (siehe Tabelle 3-1). Somit ist die benötigte Leistung des Speichers sehr hoch (circa 6 MW_{th}). Zum Vergleich: der im Projekt ITES entwickelte PCM-Demonstratorspeicher hatte eine maximale Entladeleistung von circa 760 kW. Im Mittel lag sie bei etwa 450 kW. Für eine Rohrteilung von $D_m = 160 \text{ mm}$ sind am DLR experimentelle Daten von

einem Versuchsspeicher vorhanden. Aufgrund der hohen benötigten Leistung wurde eine Rohrteilung von $D_m = 70$ mm gewählt. Nach Absprache mit Herstellern kann dieser Abstand noch geschweißt werden. Auch andere Abstände wären möglich. In dem oben erwähnten Versuchsspeicher wurden Stahlrohre mit einem Außendurchmesser von $d_a = 21,3$ mm verwendet. Da der gewählte Rohrabstand von $D_m = 70$ mm wenig Raum für PCM lässt, wurde ein schmaleres Stahlrohr gewählt. Der dadurch ebenfalls kleinere Innendurchmesser sorgt für eine turbulenteren Strömung und für einen dementsprechend besseren Wärmeübergang. Die genauen Rohrabmessungen, vor allem die Wandstärke, wurden vom Hersteller des Speichers festgelegt. DLR interne Analysen haben ergeben, dass die unten aufgelistete Wandstärke ausreichend ist. Eine minimale Wandstärke lässt sich nach einer vereinfachten aber konservativen Berechnungsweise aus dem Buch „Festigkeitsberechnung im Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau“ von Schwaigerer (1990) folgendermaßen abschätzen:

$$s_{min} = \frac{p D}{2 \sigma_{Zul}} + s_F + s_K = \frac{2,6 \frac{N}{mm^2} \cdot 17,2 \text{ mm}}{2 \cdot 79,5 \frac{N}{mm^2}} + 0,1 \text{ mm} + 1 \text{ mm} = 1,38 \text{ mm}. \quad (3-6)$$

Dabei ist p der auf das Rohr lastende Überdruck, D der Außendurchmesser des Rohres und σ_{Zul} die maximal zulässige Spannung. Zusätzlich wird ein Zuschlag für die Fertigungstoleranz $s_F = 0,1$ mm und ein Korrosionszuschlag $s_K = 1$ mm addiert. Als Werkstoffkennwert für die zulässige Spannung wird hier die 0,2 %-Dehngrenze verwendet und ein Sicherheitsfaktor $S = 2$ aufgeschlagen:

$$\sigma_{Zul} = \frac{R_{p,0,2}}{S} = \frac{159 \frac{N}{mm^2}}{2} = 79,5 \frac{N}{mm^2}. \quad (3-7)$$

Die berechnete minimale Wandstärke liegt mit $s_{min} = 1,38$ mm deutlich unter der ausgelegten Rohrwanddicke $s = 2,3$ mm.

Die Rohrlänge zwischen den Sammlern wird auf $L_{Rohr} = 6$ m festgelegt. Dies ist eine Standardrohrlänge und auf einem LKW transportierbar. Die aktive Länge des Rohrs wird als $L_{Rohr,aktiv} = 5,8$ m festgelegt. Diese Länge wird das PCM im flüssigen Zustand einnehmen. Im festen Zustand steigt die Dichte des PCMs und wird daraus resultierend nur noch eine Länge von $L_{Rohr,fest} = 5,2$ m einnehmen. Oberhalb von 5,8 m Höhe befindet sich stets Luft. Da der Phasenwechsel des PCMs zu einer Volumenänderung führt, wird die in der Simulation genutzte Rohrlänge, bezogen auf die Höhe bei einer mittleren Dichte des PCMs, auf $L_{PCM} = 5,5$ m festgelegt. Tabelle 3-4 listet die Geometriedaten auf.

Tabelle 3-4: Geometriedaten

Rohrwanddicke s	2,3 mm
Rohraußendurchmesser d_a	17,2 mm
Rohrteilung D_m	70,0 mm
Rohrlänge zwischen den Sammlern L_{Rohr}	6 m
PCM-umhüllte Rohrlänge bei mittlerer Dichte L_{PCM}	5,5 m

Die Aluminium-Rippen wurden mit dem Projektpartner F.W. Brökelmann GmbH & Co. KG entwickelt und im Strangpressverfahren gefertigt. Im Laufe des Entwicklungsprozesses wurden vier verschiedene Geometrien ausgelegt und analysiert, die hier mit V1, V2, V2-2 und V3 bezeichnet werden. Während bei V1 und V2 der Außendurchmesser des umschlossenen Rohres noch $d_a = 21,3$ mm betrug, wurde dieser bei V2-2 auf $d_a = 17,2$ mm verringert. Die letztendlich gewählte Geometrie V3 hat ebenfalls den geringeren Durchmesser, wurde jedoch weiter auf die Anforderungen optimiert. Diese ist zweidimensional in Abbildung 3-4 dargestellt. Zwei Rippenhälften werden mittels Springstahl-Federn um ein Rohr geklammert, welches das Wärmeträgerfluid (heat transfer fluid, HTF) führt. Für die Klammerung besitzen die Rippenhälften

jeweils Nasen auf beiden Seiten (siehe Abbildung 3-4). In Abbildung 3-4 werden die Federn zur Vereinfachung nicht dargestellt.

Die Rippen haben verzweigte „Arme“, um thermische Energie schnell in ein größeres Volumen ein- bzw. auszuleiten. Aus dieser Geometrie ergibt sich ein volumetrischer Rippenanteil von 17,6 % innerhalb des PCM-Bereichs.

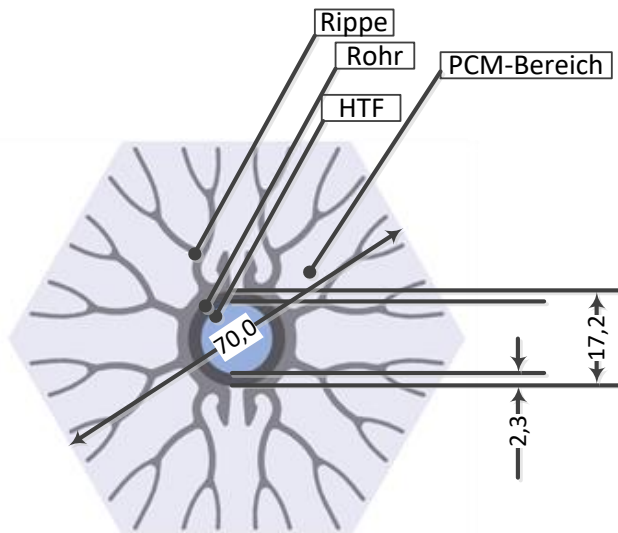


Abbildung 3-4: Aufsicht der Geometrie eines Einzelrohres, Bemaßung in mm.

Bei diesem Rippenanteil von 17,6 % ist pro Rohr folgendes PCM Volumen vorhanden.

$$V_{PCM,Rohr} = \frac{\pi}{4} [(1,05D_T)^2 - d_a^2] \cdot L_{PCM} \cdot (1 - 0,176) = 0,0182 \text{ m}^3 \quad (3-8)$$

Dieses Design wurde von DLR mittels ANSYS und Fluent auf der Salzseite betrachtet. Diese Simulationen zeigen eine gute Wärmeverteilung im PCM. Mit ANSYS können schnell Simulationen durchgeführt werden, allerdings ohne die Berücksichtigung von natürlicher Konvektion. Die Simulationen mit Fluent benötigen dagegen einige Wochen, können aber auch die Effekte der Dichteänderung während des Phasenwechsels berücksichtigen und sind somit genauer.

AP 3.2 Überhitzung mit Latentwärme (DLR)

Die Parameter der Wasser-/Dampfseite sind in Abbildung 3-5 im T-s Diagramm dargestellt. Hier sieht man, dass das Wärmeübertragermedium bei der Entladung den 2-Phasen-Bereich komplett durchquert. Am Eintritt des Speichers liegt die Temperatur des Speisewassers deutlich unterhalb der Kondensationstemperatur, wohingegen der produzierte Dampf den Speicher deutlich überhitzt verlässt. Hierdurch entsteht eine große Enthalpiedifferenz des Wärmeübertragermediums. Die Beladung, dagegen, findet (zeitlich nahezu) komplett im überhitzten Bereich statt, so dass eine deutlich geringere Enthalpiedifferenz verfügbar ist.

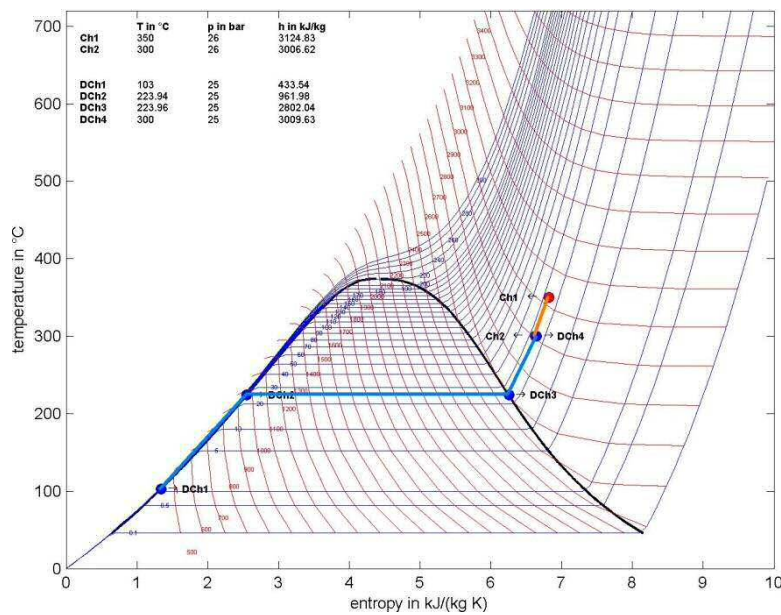


Abbildung 3-5: T-s Diagramm für Wasser/Dampf mit Entladeparameter in Blau und Beladeparameter in Orange

Bei der Betrachtung der Entladung, bei der das Speisewasser in den Speicher mit $T_{SpW} = 103 \text{ °C}$ eintritt, ist ein sehr hoher Temperaturunterschied zum Speichermaterial $T_{PCM} = 310 \text{ °C}$ vorhanden. Der Dampf soll einen Druck vom 26 barü aufweisen. Bei diesem Druck herrscht eine Verdampfungstemperatur $T_V = 226 \text{ °C}$. Damit ist der austretende Dampf mit $T_{Dampf} > 300 \text{ °C}$ deutlich überhitzt. Diese Entladung wurde mit Dymola simuliert und ist in Abbildung 3-6 dargestellt. Somit wurde gezeigt, dass der Speicher mit der angenommenen Rippenoberfläche in der durchgeführten Simulation über einen Zeitraum von 18 Minuten Dampf entsprechend den geforderten Parametern produzieren kann.

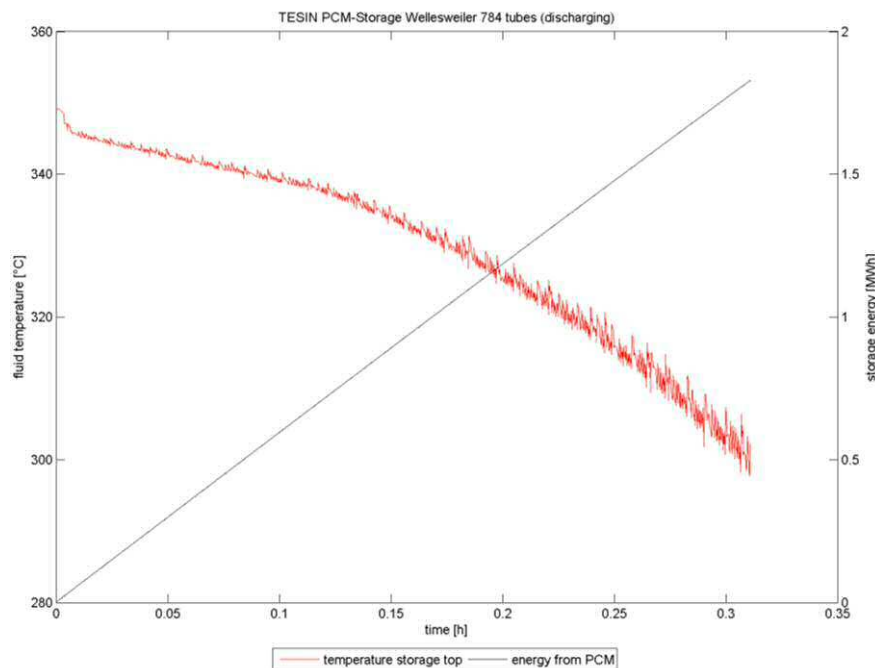


Abbildung 3-6: Entladung des Latentwärmespeichers innerhalb von ca. 18 min

Während der Beladung soll überhitzter Dampf sowohl in den Speicher ein- wie auch ausströmen. Wegen der geringen Menge an übertragener Energie, die durch den fehlenden Phasenwechsel auf der Wasser-/Dampf-Seite hervorgerufen wird, dauert die Beladung ca. 40 Mal so

lange wie die Entladung. Um zu verhindern, dass Dampf bei Temperaturen unter $T_{\text{Dampf}} < 300 \text{ °C}$ produziert wird, wird ein Teil des Massenstroms um den Speicher geleitet (siehe Abbildung 3-3). Da aber dieser Dampf weiterhin zum Kunden geleitet werden kann, außerdem die Besicherungskessel dann in Betrieb sind, ist diese lange Beladedauer für SNE akzeptabel.

Diese Auslegungsarbeiten wurden in Dymola durchgeführt. Hier wird die Rippenstruktur vereinfacht dargestellt, um die komplexeren Systemsimulationen zu ermöglichen. Das Speicher-material in diesem Modell ist eine Mischung aus Rippen- und Speicher-material und wird als ‚effektives Material‘ betrachtet. Das macht es notwendig die kompliziertere, nahezu reale Geometrie aus Fluent auf das vereinfachte Dymola-Modell zu übertragen.

Das effektive Material wird in Dymola radial um das mit dem Wärmeträgermedium durchflossene Rohr angeordnet, und wird durch eine effektive Dichte, spezifische Speicherkapazität sowie örtlich variable Wärmeleitfähigkeiten beschrieben. Es werden mehrere radiale Elemente verwendet. Somit besteht das Modell aus mehreren radial aneinander liegenden Hohlzylindern (siehe Abbildung 3-7). Das innere Element beinhaltet zusätzlich die Masse und Kapazität des Stahlrohres.

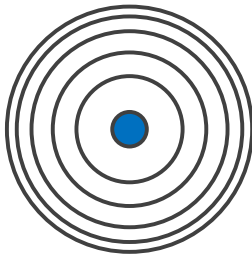


Abbildung 3-7: radialer Modellaufbau schemahaft dargestellt.

Dichte und spezifische Wärmekapazität werden anhand des Rippenanteils von 17,6 % durch folgende Gleichungen bestimmt:

- effektive Dichte:

$$\rho_{eff} = \frac{m_{PCM,gesamt} + m_{Alu,gesamt}}{V_{PCM,gesamt} + V_{Alu,gesamt}} \quad (3-9)$$

- effektive spezifische Wärmekapazität:

$$c_{p,eff} = \frac{m_{PCM,gesamt} \cdot c_{p,PCM} + m_{Alu,gesamt} \cdot c_{p,Alu}}{m_{PCM,gesamt} + m_{Alu,gesamt}} \quad (3-10)$$

Für das innerste radiale Element wird das Stahlrohr einbezogen:

- effektive Dichte:

$$\rho_{eff} = \frac{m_{PCM,gesamt} + m_{Alu,gesamt} + m_{Stahl}}{V_{PCM,gesamt} + V_{Alu,gesamt} + V_{Stahl}} \quad (3-11)$$

- effektive spezifische Wärmekapazität:

$$c_{p,eff} = \frac{m_{PCM,gesamt} \cdot c_{p,PCM} + m_{Alu,gesamt} \cdot c_{p,Alu} + m_{Stahl} \cdot c_{p,Stahl}}{m_{PCM,gesamt} + m_{Alu,gesamt} + m_{Stahl}} \quad (3-12)$$

Für das PCM und das Aluminium wurden in der Berechnung die Massen und Volumen aus dem gesamten Querschnitt genutzt. Die effektive Dichte und die effektive spezifische Wärmekapazität sind damit über alle radialen Elemente gleich groß (ausgenommen ist das innere

Element, da dieses das Stahlrohr enthält). Diese Annahme kann gemacht werden, weil sich die Erstarrungsfront im Realfall nicht von innen nach außen bewegt, sondern von dem Rippenmaterial ausgeht.

Verschiedene Diskretisierungsversuche haben gezeigt, dass im Falle dieses Speichers, 12 radiale Elemente gute Ergebnisse liefern, ohne dabei die Rechenleistung zu stark zu strapazieren. Dabei sind die Volumen jedes radialen Elementes gleich groß. Nur die zwei inneren und die zwei äußeren Elemente sind gegenüber den anderen Elementen halb so groß, weil das Modell in diesen Bereichen detailliertere Ergebnisse liefern muss. Der innere Bereich muss feiner diskretisiert sein, da die Entladeleistung zu Beginn der Entladung sehr groß ist. Der äußere Bereich muss feiner diskretisiert sein, da die Entladeleistung zum Ende der Entladung sehr klein ist.

Um die Qualität des Dymola-Modells bewerten zu können, wird der Leistungsverlauf der Dymola-Simulation mit dem Leistungsverlauf der Fluent-Simulation verglichen. Abbildung 3-8 gibt den resultierenden Leistungsverlauf beider Simulationen bezogen auf die Rohrrinnenoberfläche wieder. Zu Beginn der Dymola-Simulation kann der starke Leistungs-Peak aus Fluent nicht abgebildet werden, weil das innere radiale Element gegenüber der Diskretisierung in Fluent groß ist. Das resultiert in einem großen Widerstand zu Simulationsbeginn, welcher die Leistung hemmt. Der weitere Leistungsverlauf ist nahezu identisch.

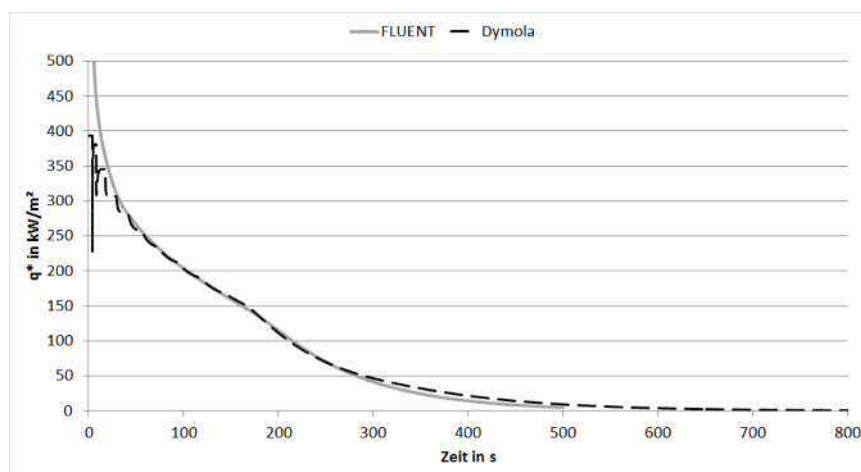


Abbildung 3-8: Leistungsverlauf in Fluent / Dymola.

Mit dem nun gegebenen radialen Leistungsverhalten von einem Rohrausschnitt, kann das axiale Verhalten eines Speicherrohres und somit das Systemverhalten simuliert werden.

In Kapitel ‚*Rippengeometrie bzw. Speicherkonzept*‘ wurden grob Speichermaterial errechnet um die benötigte Energiemenge von 1464 kWh zu speichern. Das entspräche 452 Rohren. Mit diesen Daten ergibt sich in der Simulation eine Entladezeit von 12 Minuten. Das liegt etwas unter dem Zielwert von 15 Minuten. Des Weiteren wurden 10 Minuten Puffer für die Entladezeit aufgeschlagen um eine Prozesssicherheit zu gewährleisten.

Der Speicher wird neben einem Gebäude aufgestellt und es muss genug Abstand für eine Feuerwehrezufahrt frei gelassen werden. Daher wurde die Obergrenze für die Tiefe des Speichers auf $T = 2,5$ m festgelegt. Die Rohrzahl wurde auf Minimum 838 Rohre bestimmt. Damit enthält der Speicher 30,18 t NaNO_3 (genutzte Menge ohne Totvolumen). Das entspricht im Mittel (aufgrund von temperaturbedingten Dichteunterschieden) $15,0$ m³ NaNO_3 . Die Rohranzahl führt unter dieser Randbedingung zu einem Speicher mit den in Tabelle 3-5 aufgeführten Abmessungen (rechteckiger Querschnitt).

Tabelle 3-5: Vorläufige Abmessungen der Innenseite eines Speicherbehälters mit 838 Rohren in Dreiecksanordnung, 70 mm Rohrteilung und 6 m Rohrlänge

Breite (m)	1,54
Tiefe (m)	2,38
In Aufsicht, Rohrreihen in der Breite	25
In Aufsicht, Rohrreihen in der Tiefe	34

Systemverhalten – Entladen

Abbildung 3-9 bildet den Entladevorgang detailliert ab. Eine Entladedauer von 28 Minuten wurde berechnet. Während des Entladevorgangs ist der Massenstrom auf der kalten Speicherseite (Eintritt) größer als auf der heißen Speicherseite (Austritt). Grund dafür ist der steigende Wasserfüllstand mit zunehmendem Entladungsgrad. Der Entladevorgang wird als beendet betrachtet, wenn die Austrittstemperatur auf der heißen Speicherseite unter 300 °C fällt bzw. 300 °C erreicht (siehe Tabelle 3-1).

Das Diagramm enthält folgende Werte (von links nach rechts in der Legende):

- *Thot*: HTF-Temperatur an der heißen Seite des Speichers (oben)
- *Tcold*: HTF-Temperatur an der kalten Seite des Speichers (unten)
- *TMTop*: mittlere Speichermaterialtemperatur an der heißen Speicherseite (oben)
- *TMMiddle*: mittlere Speichermaterialtemperatur in der Speichermitte
- *TMBottom*: mittlere Speichermaterialtemperatur an der kalten Speicherseite (unten)
- *Tmix*: Mischtemperatur aus Speichermassenstrom und Bypass-Massenstrom (nicht eingetragen)
- *m*Speicher,cold*: HTF-Massenstrom auf der kalten Seite des Speichers (unten)
- *m*Speicher,hot*: HTF-Massenstrom auf der heißen Seite des Speichers (oben)

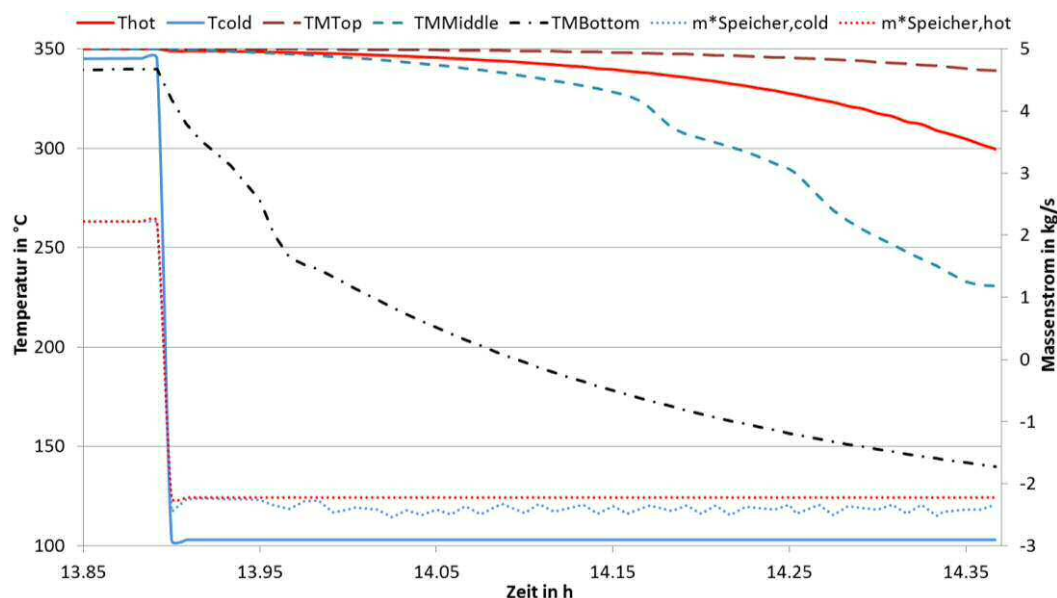


Abbildung 3-9: Prozessdaten für die Entladung des Speichers mit 838 Rohren und einen Gesamtmassenstrom von 8 t/h.

Abbildung 3-10 zeigt die mittleren Temperaturverläufe im Speichermaterial an verschiedenen Speicherhöhen beim Entladen. *TM1* bezeichnet die heiße, obere Speicherseite und *TM80* die untere, kalte Speicherseite. Dabei ist zu erkennen, dass der Speicher stark abgekühlt wird und dass etwa 25 % des Speichermaterials über 310 °C bleiben. Dieser Teil des Speichers kann nicht vollständig genutzt werden, da dem Speicher ab diesem Grad der Entladung im Teil des flüssigen PCMs nicht mehr genug wärmeübertragende Rohrfinnenfläche zur Verfügung steht

und der Speicher somit keine 300 °C Dampftemperatur am Austritt bereitstellen kann (siehe Abbildung 3-9).

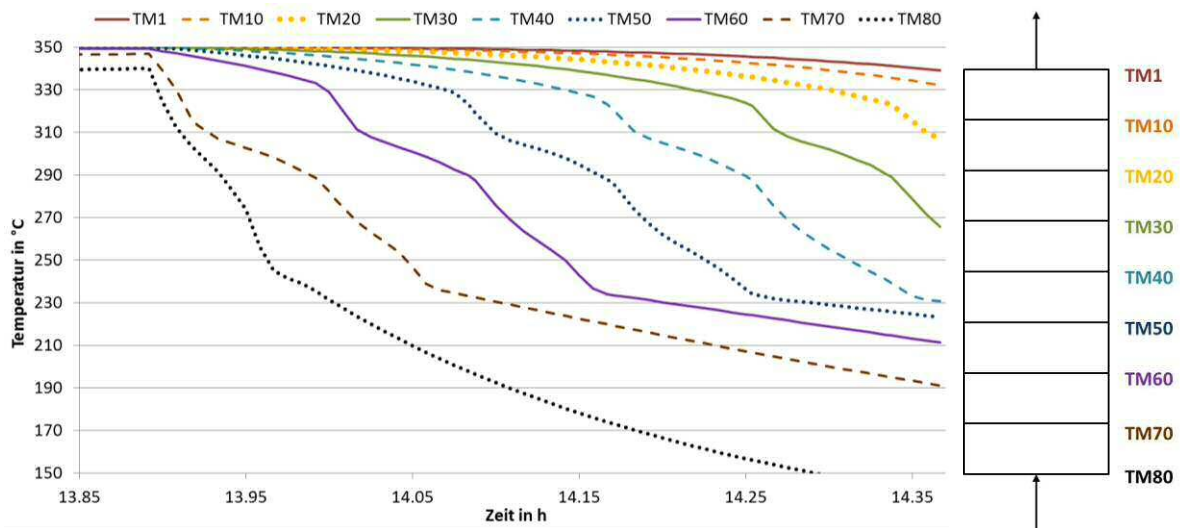


Abbildung 3-10: Mittlere axiale Speichermaterialtemperaturen während der Entladung, von TM1 (oben, heiße Seite) bis TM80 (unten, kalte Seite).

Systemverhalten – Beladen

Der Speicher wurde für die Entladung ausgelegt, um Dampf im Störfall des Abhitzekessels bereitstellen zu können. Da auch während eines Beladevorgangs Dampf für die Dampfschiene produziert werden muss, muss eine Austrittstemperatur von $T_{\text{Austritt, Dampf}} = 310 \text{ °C}$ (10 K Puffer zur minimalen Zieltemperatur von 300 °C) in den Simulationsmodellen gewährleistet werden. Um dies am Anfang des Beladeprozesses für einen entladenen Speicher realisieren zu können, wird ein Bypass-Massenstrom an dem Speicher vorbeigeführt. Weil die Beladung auf der HTF-Seite hauptsächlich sensibel durchgeführt wird, dauert diese deutlich länger als die Entladung.

Abbildung 3-11 zeigt den Beladeverlauf für 13 Stunden und 53 Minuten und den Entladeverlauf für 28 Minuten. Im stationären Zustand sind die Massenströme am oberen und unteren Speicherende gleich. Im instationären Zustand können Differenzen durch Dichteänderungen auftreten. Deshalb werden beide Massenströme betrachtet. Die Mischtemperatur T_{mix} ergibt sich aus der Temperatur des dampfförmigen Anteils des Speichermassenstroms am Speicherantritt und der Temperatur des Bypass-Massenstromes. Kondensat, das zu Beginn der Beladung im Speicher entsteht, wird abgeschieden.

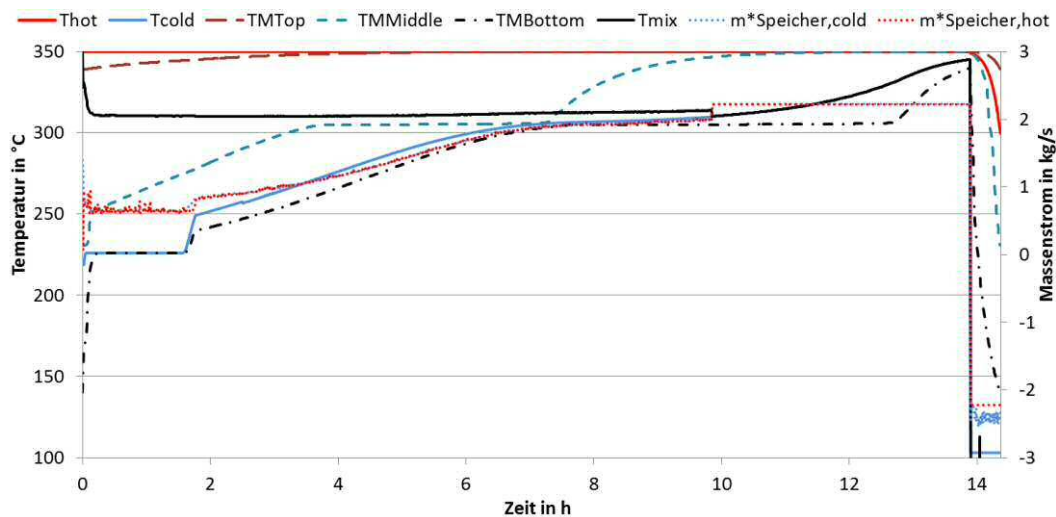


Abbildung 3-11: Prozessdaten für die Be- und Entladung des Speichers mit 838 Rohren und einen Gesamtmassenstrom von 8 t/h.

Im Folgenden wird das Beladeverhalten näher betrachtet. Da der Speicher, abhängig vom Grad der Beladung, verschiedene Zustände des Wärmeträgerfluides am Austritt liefert (Kondensat, Zweiphasengemisch, Dampf), werden vier Stufen für die Beladeregulierung definiert. Diese vier Stufen der Beladeregulierung garantieren, dass stets ein Dampfmassenstrom von 8 t/h an die Dampfschiene geleitet werden kann; siehe Tabelle 3-6, Abbildung 3-12 und Abbildung 3-13.

Tabelle 3-6: Stufen der Beladeregulierung

Stufe	Bedingung	[t/h]	[t/h]	[t/h]	[t/h]
1	$x < 0$	10,5	8,0 t/h	2,5	
2	$0 < x < 1$	fällt auf 8	geregelt		soll: 8,0
3a	$x = 1$	8,0	geregelt		
3b	$x > 1$	8,0	geregelt		
4		8,0	0,0		

Die verschiedenen Massenströme sind in einem sehr vereinfachten Schaltschema für den Beladefall in Abbildung 3-12 dargestellt.

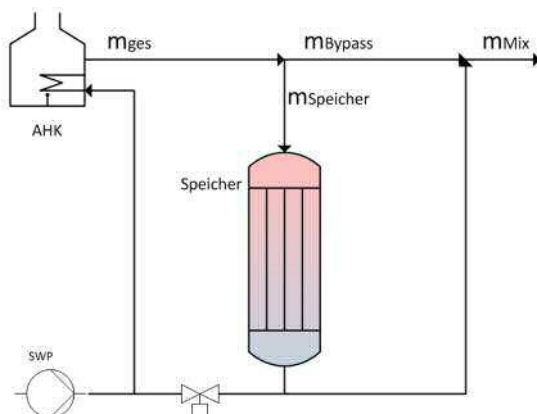


Abbildung 3-12: Massenströme im Beladefall im vereinfachten Schaltschema.

Die dritte Stufe ist in die Unterstufen a und b unterteilt. Die Unterteilung wurde vorgenommen, weil dies eine Stufe ist, in der zu Beginn (a) das HTF bis an die Sattdampflinie herabgekühlt wird und später (b) das HTF höhere Austrittstemperaturen erfährt – siehe Erläuterungen zu Punkt 3.

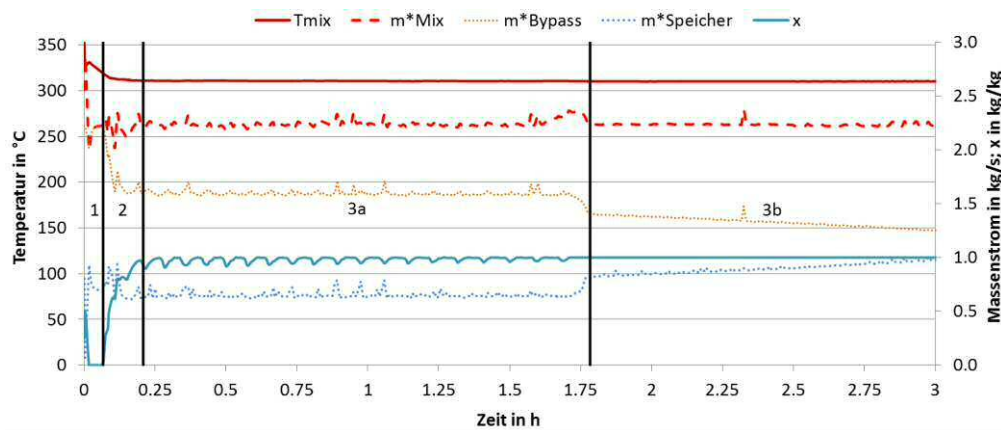


Abbildung 3-13: Stufen der Beladeregulung.

Dazu folgende Erläuterungen:

1. Zu Beginn der Beladung wird der gesamte Massenstrom für die Damfschiene (hier 8 t/h oder 2,22 kg/s) über den Bypass bereitgestellt. Bei 10,5 t/h möglichem Gesamtmassenstrom bleiben 2,5 t/h, welche durch den Speicher strömen und aufgrund der Unterkühlung des Speichermaterials auskondensiert werden. Diese Stufe dauert circa 4 Minuten an.
2. Sobald der Speichermassenstrom nicht mehr vollständig auskondensiert wird, sondern ein Zweiphasengemisch austritt, wird der Gesamtmassenstrom langsam auf 8 t/h abgesenkt. Dabei wird der Bypassmassenstrom so geregelt, dass sich aus dem Bypassmassenstrom und dem Dampfanteil des Speichermassenstromes eine Mischtemperatur von 310 °C ergibt. Der Kondensatanteil des Speichermassenstroms wird abgeschieden. Diese Stufe dauert circa 8,5 Minuten an.
3. Ab diesem Punkt läuft die Beladung des Speichers ausschließlich im sensiblen Bereich ab. Der Gesamtmassenstrom beträgt nun stets 8 t/h. Der Anteil des Bypassmassenstroms wird weiterhin so geregelt, dass sich aus dem Bypassmassenstrom und dem Speichermassenstrom eine Mischtemperatur von 310 °C ergibt.
 - a. Anfangs kühlt sich der Speichermassenstrom bis auf Kondensationstemperatur ab. Er kondensiert nicht aus, da das Speichermaterial auf der kalten Speicherseite auf dem Temperaturniveau der Kondensationstemperatur liegt (siehe TM_{Bottom} in Abbildung 3-11). Diese Stufe dauert circa eine Stunde und 35 Minuten an.
 - b. Im darauffolgenden Bereich steigt die Austrittstemperatur an. Daraus folgt ein Anstieg des Speichermassenstromes, während der Bypassmassenstrom abnimmt. Dieser Teil der Beladung ist in Abbildung 3-13 nur zum Teil dargestellt und dauert nochmal ca. 8 h.
4. In diesem Bereich gibt es keine Regelung und ein Bypassmassenstrom ist nicht nötig. Der Speicher ist soweit beladen, dass die Austrittstemperatur über 310 °C bereitgestellt wird. Der Speicher wird weiter beladen, bis das Speichermaterial am kalten Ende (TM_{Bottom}) auf 340 °C erwärmt wird. Dieser Teil der Beladung dauert nochmal circa 4 h und ist in Abbildung 3-13 nicht dargestellt.

Am Ende der Beladestufe 4 wird der Beladeprozess beendet. In der Simulation erfolgt direkt anschließend die Entladung. Im realen Fall wird der Speicher im beladenen Zustand einsatzbereit zur Verfügung stehen, jedoch höchstwahrscheinlich nicht direkt entladen werden.

Würden zu Beginn (Stufe 1) nicht 2,5 t/h für den Speicher bereitstehen, weil mehr Dampf an die Verbraucher geleitet werden müsste, würde das den Beladeprozess verlängern. Der Speicher würde in diesem Fall zu Beginn nur mit 10,5 t/h abzüglich des vom Verbraucher geforderten Dampfmassenstroms beladen werden können. Fordert der Verbraucher also 10,0 t/h, bleiben für den Speicher also nur 0,5 t/h.

AP 4 Bau und Integration eines PCM-Speichers im Heizkraftwerk (SNE, DLR, FWB)

Inhaltsverzeichnis

AP 4.1	Wärmetechnische Auslegung PCM-Speicher für HKW Wellesweiler (DLR, SNE)	4-1
AP 4.2	Systemtechnik für die Anbindung des Speichers (SNE, DLR)	4-1
4.2.1	Hydraulische und regelungstechnische Einbindung eines Latentwärmespeichers in das HKW Wellesweiler	4-1
4.2.2	Hydraulik und Regelkreise	4-2
AP 4.3	Detailed Engineering PCM-Speicher für HKW Wellesweiler (DLR)	4-4
4.3.1	Detaillierte Auslegung der Speichereinhausung (DLR)	4-4
4.3.2	Auslegung und Montage der Rippenrohre (FWB)	4-6
4.3.3	Untersuchungen an den Rippenrohren (DLR)	4-8
4.3.4	Abzugsversuche	4-12
4.3.5	Betrachtung der Rippenrohrpreise (FWB)	4-14
AP 4.4	Bau des PCM-Speichers (DLR, SNE, FWB)	4-16
4.4.1	Fertigung des Speichers (DLR)	4-16
4.4.2	Wärmedämmung des Speichers (SNE)	4-20
AP 4.5	Integration des PCM-Speichers in das Kraftwerk (SNE)	4-20
AP 4.6	Spezielle Gestaltung des Speichers im Bereich Sammler/Verteiler (DLR)	4-22
AP 4.7	Entwicklung und Erprobung einer Lösung zur Transportsicherung des PCM Speichers (DLR)	4-22
AP 4.8	Simulative Auslegung von Bypassfahrensweise und Ventilbetrieb zur Beladung und Einhaltung der geforderten Umschaltzeit bei der Entladung (DLR)	4-23
4.8.1	Beladung	4-24
4.8.2	Entladung	4-26
4.8.3	Zusammenfassung	4-30

AP 4.1 Wärmetechnische Auslegung PCM-Speicher für HKW Wellesweiler (DLR, SNE)

Die wärmetechnischen Auslegungen wurden im Rahmen des dritten Arbeitspakets beschrieben und sind somit abgeschlossen. Die genaue Rohrzahl wurde vom Hersteller angepasst von 838 auf 852. Somit waren die Sammlerreihen herstellbar.

AP 4.2 Systemtechnik für die Anbindung des Speichers (SNE, DLR)

Das Lastenheft sowie die Leistungsbeschreibung mit Schnittstellenliste wurden gemeinsam von SNE und DLR erarbeitet. Dies diente als Grundlage für die Einbindung des von DLR gelieferten Wärmespeicher in die bestehende Anlage des Heizkraftwerks Wellesweiler. Hierzu wurden auch erste Überlegungen für die Rohrleitungsanbindung erarbeitet. Das R&I Schaltbild zur Einbindung des Wärmespeichers in die bestehende Anlage wurde entwickelt.

4.2.1 Hydraulische und regelungstechnische Einbindung eines Latentwärmespeichers in das HKW Wellesweiler

Abbildung 4-1 zeigt die geplante Einbindung des Latentwärmespeichers in das HKW Wellesweiler. Der Latentwärmespeicher ist parallel zum vorhandenen Abhitzekegel eingebunden. Der beim Entladen des Speichers produzierte Heißdampf wird in die 300 °C-Dampfschiene eingespeist und ist damit grundsätzlich in der Lage, Dampfmengen aus einem der drei vorhandenen Kessel zu substituieren.

4.2.2 Hydraulik und Regelkreise

Zwischen Latentwärmespeicher und bestehendem Heizkraftwerk existieren die vier vorgeannten Medienschnittstellen (Abbildung 4-1). Je nach Betriebsfall (Laden/Warmhalten oder Entladen) sind die hierfür vorgesehenen Strömungswege geöffnet und die übrigen Wege geschlossen. Zu diesem Zwecke werden die Absperrorgane der einzelnen Strömungswege motorisch betätigt. Die Hauptabsperrungen der Anlage werden manuell betätigt.

Grundsätzlich werden an allen Anschlussleitungen des Speichers Druck, Temperatur und Durchfluss messtechnisch erfasst. So ist eine Massen- und Energiebilanzierung der Speicheranlage möglich. Außerdem werden verschiedene Messdaten auch für regelungstechnische Aufgaben verwendet.

Ladevorgang und Warmhaltung

Die Phasenwechseltemperatur im Latentwärmespeicher beträgt 306 °C. Beim Beladevorgang wird dem Speicher überhitzter Dampf bei bis zu 350 °C am oberen Sammler zugeführt. Dieser Dampf wird aus der Heißdampfleitung des Abhitzekeessels entnommen (Leitung Nr. 1 im R&I). Da der Dampf des Abhitzekeessels mittels einer geregelten Einspritzung von Speisewasser auf die Netztemperatur von 300 °C abgekühlt wird, erfolgt die Entnahme des Beladedampfes vor dem Einspritzkühler.

Der ausgekühlte Dampf wird am unteren Sammler entnommen, wieder der Heißdampfleitung des Abhitzekeessels zugeführt und dort mit Dampf bei 350 °C gemischt (Leitung Nr. 2 im R&I). Die Dampfrückführung erfolgt ebenfalls vor dem Einspritzkühler. Durch die Dampfrückführung und Mischung stellt sich eine Dampftemperatur < 350 °C ein. Die einzuspritzende Speisewassermenge wird dadurch während des Beladevorganges verringert.

Um die Wärmeverluste des geladenen Speichers im Stillstand zu kompensieren, soll kontinuierlich oder diskontinuierlich eine entsprechende Menge Dampf durch den Speicher gefahren werden. Die Dampfströmung erfolgt hierbei auf demselben Wege wie beim Beladevorgang. Als Isolierstärke des Speichers werden aus Gründen des Arbeitsschutzes und unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit ca. 400 mm vorgesehen.

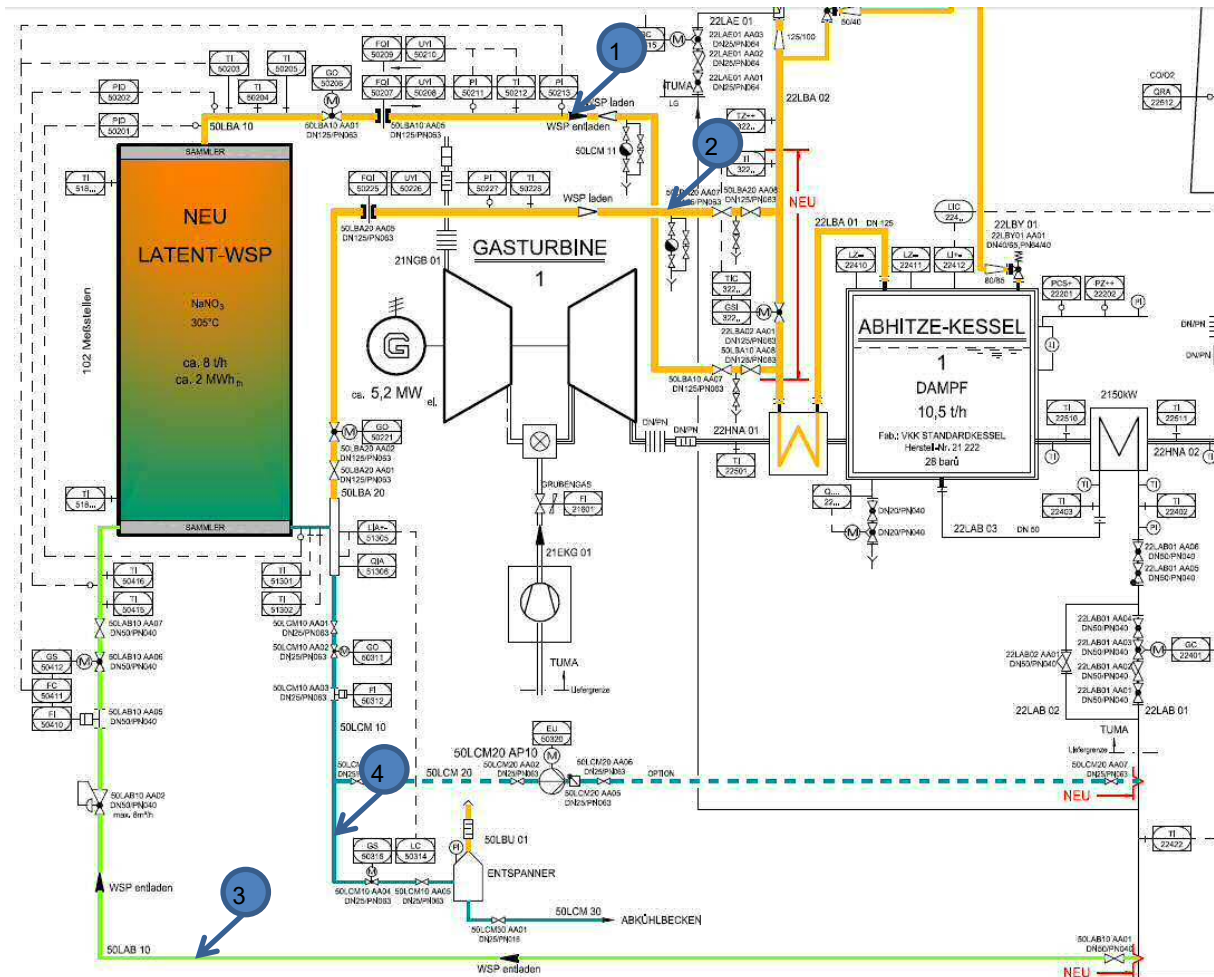


Abbildung 4-1: Geplantes R&I-Schema zur Einbindung des Latentwärmespeichers im HKW Wellesweiler. (1) Lade- und Entladedampfleitung; (2) Dampfdruckführungsleitung; (3) Speisewasserzuleitung; (4) Kondensatableitung.

Um beim Beladen oder Warmhalten des Speichers einen definierten Dampfmassenstrom zu realisieren, ist zwischen den beiden Anbindepunkten der Dampfleitungen Nr. 1 und 2 ein Regelventil eingebunden. Dieses verursacht entsprechend seiner Stellung einen Druckverlust, welcher parallel zum Druckverlust der Speicheranlage wirkt. Die Dampfmassenströme über das Regelventil und die Speicheranlage stellen sich entsprechend der Verhältnisse dieser Druckverluste zueinander ein.

Der Dampf darf aufgrund externer Kundenanforderungen an der Mischstelle nach Dampfdruckführung nicht unter 300 °C abgekühlt werden. Um dies sicherzustellen, wird die Mischtemperatur messtechnisch überwacht und hieraus ein Sollwert für die Stellung des Regelventils generiert. Sollte dieser Regelkreis unter besonderen Umständen, z. B. beim Beladen des vollständig ausgekühlten Speichers bei der Erstinbetriebsetzung oder nach längerer Wartung, nicht in der Lage sein, die geforderte Dampftemperatur sicherzustellen, kann ggf. der nicht verwertbare Dampf über den vorhandenen Anfahrtschaldämpfer verworfen werden.

Da das Speichermaterial bei der Entladung in gewissem Maße unterkühlt wird, ist zu Beginn eines erneuten Beladevorganges der Anfall von Kondensat aus dem Beladedampf zu erwarten. Im Verlauf des Beladevorganges wird sich diese Kondensation sukzessive verringern, bis der Beladedampf schließlich als überhitzter Dampf aus dem unteren Sammler austritt. Für die Zeitspanne der Kondensation muss das Flüssigkeits-Dampf-Gemisch unmittelbar nach dem Austritt aus dem unteren Sammler getrennt werden. Aus diesem Grunde ist eine Abscheide-

flasche mit Füllstandsüberwachung vorgesehen. Der Dampfanteil wird wie vorstehend beschrieben verwendet und soll nur in Ausnahmefällen verworfen werden. Das anfallende Kondensat wird in einen Entspannungsbehälter geleitet, wo es in den Siedezustand bei Atmosphärendruck überführt wird (Leitung Nr. 4 im R&I). Die dabei entstehende Entspannungs dampfmenge soll über einen geeigneten Schalldämpfer an die Atmosphäre abgegeben werden. Die verbleibende Kondensatmenge wird in einen vorhandenen Abwasseranschluss eingeleitet.

Entladevorgang

Beim Entladen wird dem Speicher an einem zweiten Anschluss des unteren Sammlers Speisewasser aus der Zuleitung des Abhitzekekessels zugeführt (Leitung Nr. 3 im R&I).

Damit die Speicheranlage ordnungsgemäß entladen werden kann und die geforderte Dampftemperatur von mindestens 300 °C eingehalten wird, wurde die Speisewassermenge mechanisch auf 8 t/h begrenzt. Dies entspricht gleichzeitig dem Auslegungsmassenstrom der Speicheranlage.

Als Führungsgröße für die Speicherentladung dient der Dampfdruck in der Entladeleitung (Leitung Nr. 1 im R&I), d.h. der Netzdruck. Sollte aufgrund der Netzlast ein geringerer Dampfmassestrom als 8 t/h benötigt werden, wird dies durch die Dampfdruckmessung erkannt. Mit Hilfe des für diesen Fall vorgesehenen Speisewasserregelventils wird anschließend der geforderte Mengenstrom eingestellt.

Der Entladevorgang wird ausgelöst, sobald der Abhitzekekessel ausfällt. Der Befehl zum Entladen wird daher an eine Sammelstörmeldung der Kesselanlagen geknüpft.

AP 4.3 Detailed Engineering PCM-Speicher für HKW Wellesweiler (DLR)

4.3.1 Detaillierte Auslegung der Speichereinhausung (DLR)

Im Rahmen vom AP 4 wurde die Speichereinhausung europaweit ausgeschrieben. Ausgeschrieben wurde die Detaillauslegung und, abhängig von der vom Projektpartner SNE dann noch einzuholenden Baugenehmigung, anschließend auch der Bau der Speichereinhausung. Mit dem Begriff Speichereinhausung sind die Sammler, Wände, Schweißnähte, sowie Einschweißung der vom Projektpartner FWB gelieferten Rohre und Rippen gemeint. Die Auslegung und der Bau sind nach Druckgeräterichtlinie und gängige Normen erfolgt. Nach der Ausschreibung mit nur ein Teilnehmer, der nicht aus formalen Gründen abgelehnt werden konnte, war der Auftragnehmer für die Speichereinhausung die Seab GmbH. Der Zuschlag wurde in August, 2014 erteilt.

Im Rahmen der Auslegung wurde die Rohranzahl auf 852 Rohre festgelegt, sowie die endgültigen Abmessungen des Speichers und die Rohrlängen bestimmt. Simulationen wurden durchgeführt mit diesen Änderungen. Abbildung 4-2 zeigt die Entladung des Speichers, wonach der Speicher nach 27,5 Minuten entladen ist. Abbildung 4-3 zeigt die Beladung. Der Speicher ist nach 12,8 h beladen.

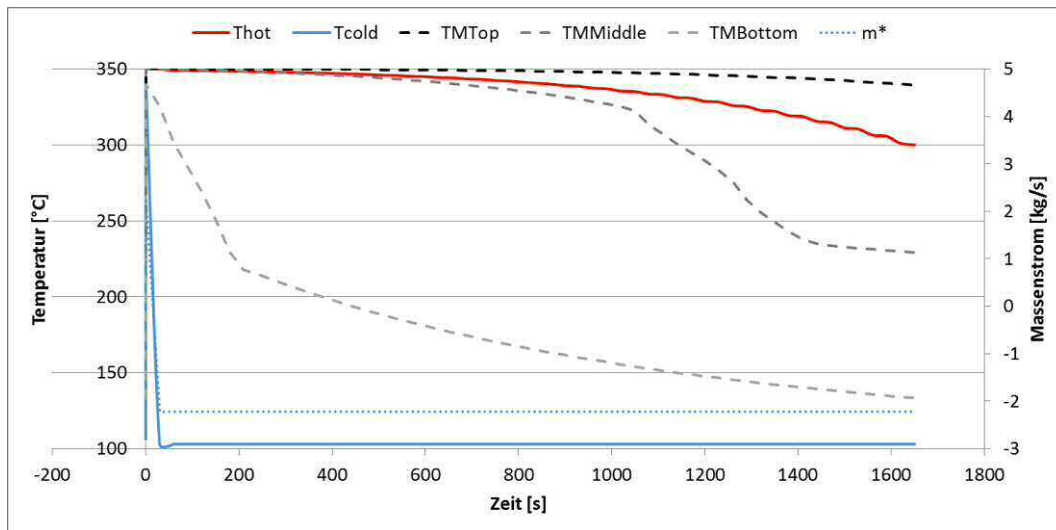


Abbildung 4-2: Simulation der Entladung mit den Auslegungsparametern. Der Speicher kann für 27,5 Minuten entladen werden.

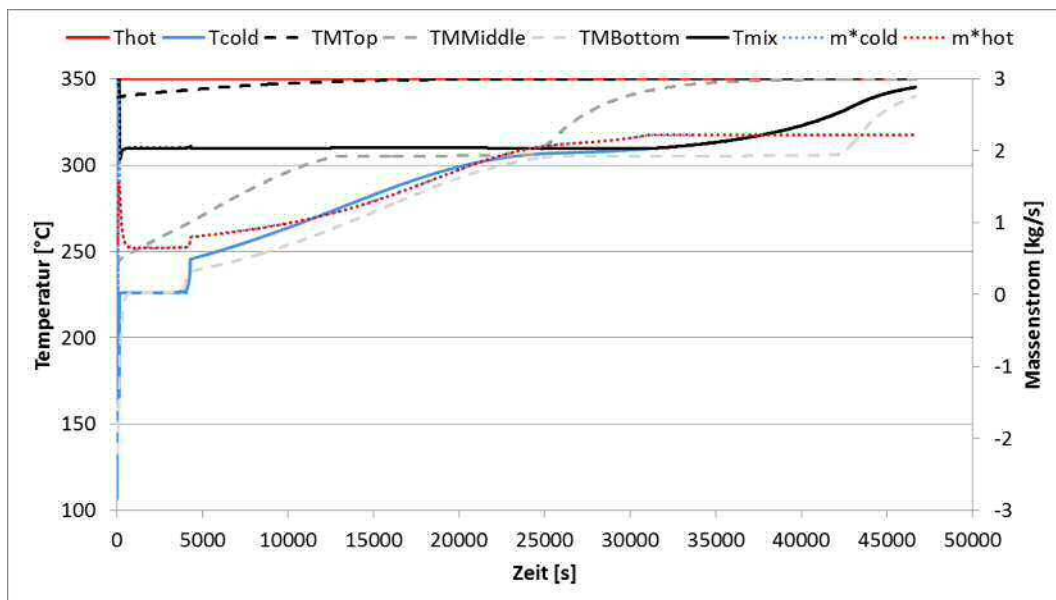


Abbildung 4-3: Simulation der Beladung mit den Auslegungsparametern. Der Speicher ist nach 12,8 h vollständig beladen.

4.3.2 Auslegung und Montage der Rippenrohre (FWB)

Gleichzeitig wurde mit dem assoziierten Projektpartner FWB das endgültige Design der Rippe festgelegt (siehe Abbildung 4-4).

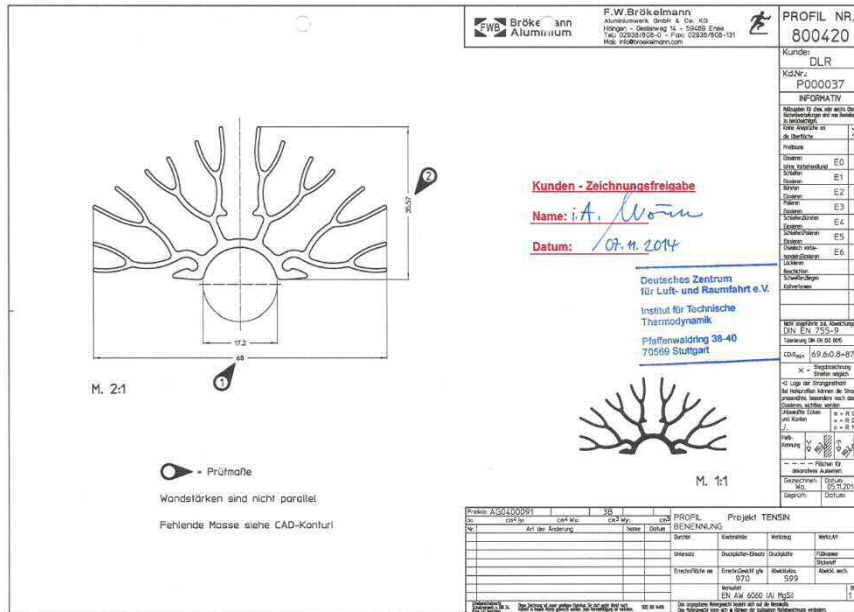


Abbildung 4-4: Freigegebener Rippenstruktur für den Wellesweiler Speicher.

Ebenso wurde das Design der Federklammern für die Verbindung der Profilhälften auf dem Kernrohr abgeschlossen (Abbildung 4-5). Als Werkstoff wird Walzblech Federstahl 1.4310 verwendet. Die Walzrichtung verläuft quer zur Federachse. Nach der Formgebung wird das Material auf die Endfestigkeit vergütet.

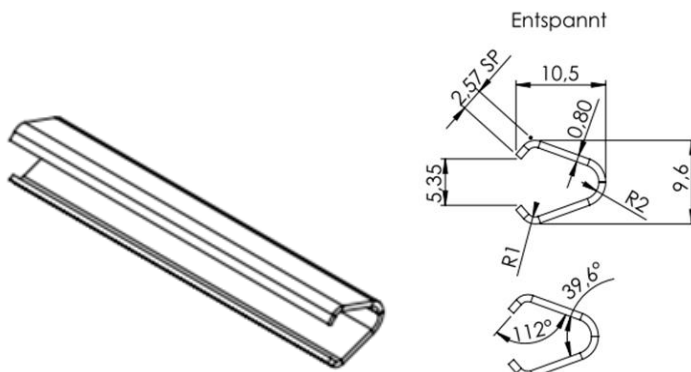


Abbildung 4-5: Geometrie der Federklammer mit einer Länge von 60 mm.

Nach einer ersten Probepressung zur Überprüfung der strangpresstechnisch erzeugten Geometrie im Dezember 2014 wurden kurze Profilstücke und Klammern mit Hilfe einer einfachen Vorrichtung manuell zu ersten Mustern (Abbildung 4-6) zusammengesetzt.

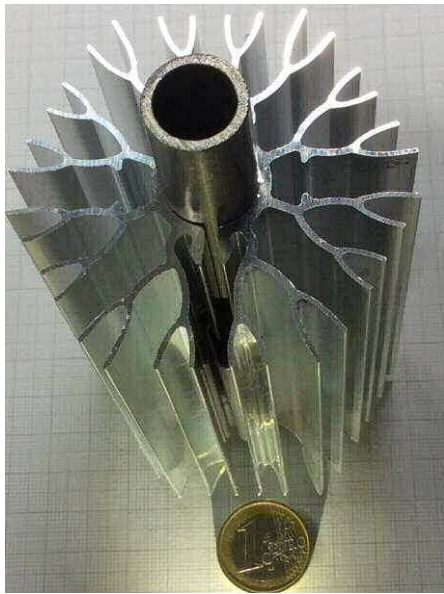


Abbildung 4-6: Montiertes Musterstück der extrudierten Rippe.

Diese Musterstücke wurden zur Erprobung des Montageprinzips für den Aufbau von Prototypen verwendet. Diesem Prinzip folgend, wurden mittels einer vereinfachten Vorrichtung zunächst einige Bauteile mit einer Länge von ca. 2 m montiert.

Nach der erfolgreichen Verifizierung des Montageprinzips wurde das Konzept der Vorrichtung zur Montage von 6 m-Stücken konstruktiv umgesetzt und der Aufbau gestartet. Hierbei wurden die Erkenntnisse aus der Musterphase berücksichtigt. Diese Vorrichtung erlaubt mittels Pneumatikzylindern die gleichmäßige und parallele Dehnung aller an einem Rohr befindlichen Klammern, um die maximal mögliche Überdehnung von 0,7 mm, um das Kernrohr einschieben zu können. Nur so ist die Montierbarkeit der 6 m langen Komponenten zu gewährleisten.

Die Fertigstellung der vollständigen speziell für die geometrischen Erfordernisse von Rippenstruktur, Kernrohr und Klammer im TESIN Projekt adaptierte Vorrichtung zur Montage der Aluminiumrippen auf die Stahlrohre und Beginn der Montage erfolgte Februar 2016. Abbildung 4-7 und Abbildung 4-8 zeigen Details des Vorrichtungsaufbaus und der Funktionsweise. Die Montagevorrichtung wurde ausführlich getestet. Mit der erteilten CE-Zertifizierung wurde auch den Arbeitssicherheitsbestimmungen während des Montageprozesses entsprochen.

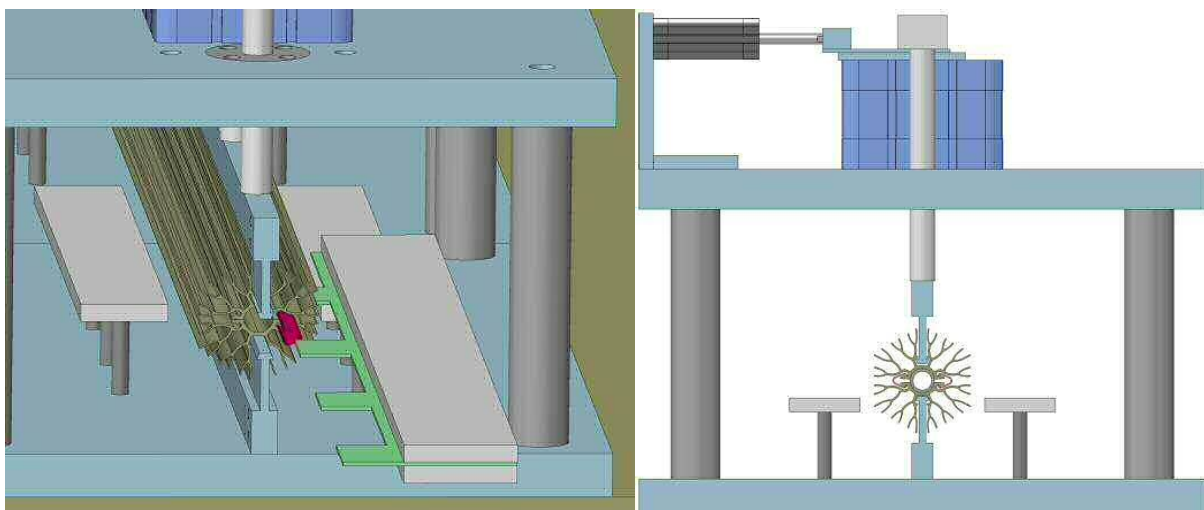


Abbildung 4-7: Montagevorrichtung: links mit axialer Positionierung der Klammern über einen Kamm, rechts als Ansicht im entspannten Zustand mit montiertem Modul.

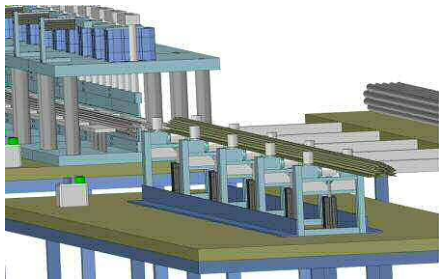


Abbildung 4-8: Montagevorrichtung für Profile und Kernrohr, Konstruktion und Aufbau.

Folgende Schritte wurden im Montageprozess durchgeführt:

1. Einlegen des unteren Aluminiumprofils in die Führung und Einschieben in die Montageeinheit
2. Anheben der Führungsrollen
3. Einlegen des oberen Aluminiumprofils in die Führung und Einschieben in die Montageeinheit
4. Positionieren der Klammern beidseitig mit Hilfe von Kämmen
5. Aufspannen der Profile gegen die Federn
6. Einführen und Positionieren des Stahlrohrs
7. Entspannen der Profile
8. Entnahme des Moduls

Vor der Montage, die für September 2015 geplant war, sollten die Kernrohre noch eine finale Reinigung erhalten, um Produktionsrückstände bzw. den reichlich aufgetragenen ölhaltigen Korrosionsschutz zu entfernen. Hierbei wurde versehentlich ein nicht geeignetes Tauchbad verwendet, welches unmittelbar zu einem starken Korrosionsangriff führte und den Einsatz dieser Rohre nicht mehr erlaubte.

Die Ersatzbeschaffung gestaltete sich aufgrund der spezifischen Abmessung und des zu verwendenden Werkstoffs mit Zertifizierung nach der Druckgeräte-Richtlinie sowie einer 100%-Ultraschallprüfung als sehr zeitaufwändig, so dass sich die Anlieferung letztlich um rund 16 Wochen verzögert und Mitte Februar 2016 stattgefunden hat.

Damit konnten auch alle nachfolgenden Bearbeitungsschritte zum Bau des Speichers und dessen Implementierung in das Kraftwerk Wellesweiler erst mit dieser Verzögerung starten. Um den Zeitplan für die Speichererstellung und alle Folgeaufgaben nicht noch weiter zu verzögern, wurde der Montageprozess unmittelbar gestartet und im Mehrschichtbetrieb durchgeführt. Die erstellten Module wurden in Teillieferungen direkt zum Betrieb für den schweißtechnischen Zusammenbau der Speichereinheit gebracht.

Die Montage konnte dabei ohne Probleme durchgeführt werden. Nach Fertigstellung der benötigten Menge (ca. 900 berippten Rohren) wurde die Vorrichtung wieder demontiert, da sie nur für das im Projekt einmalig eingesetzte Profil ausgelegt ist. Durch den trotz pneumatischer Unterstützung der Spann- und Positionierschritte hohen manuellen Aufwand ist eine Produktion höherer Stückzahlen mit dieser Vorrichtung nicht wirtschaftlich. Dennoch hat sich der Montageprinzip bewährt und kann in einer weiter automatisierten Fertigungseinrichtung für die industrielle Serienproduktion angewendet werden.

4.3.3 Untersuchungen an den Rippenrohren (DLR)

Die mechanische Anbindung von der Rippe zum Rohr wurde untersucht. Durch verschiedene Versuchsaufbauten sollte festgestellt werden, wie viele Klemmfedern benötigt werden, um eine optimale Anbindung der Rippe an das Rohr zu erzielen um die Anzahl an Klemmfedern

zu minimieren. Hierbei wurden zuerst Proberippen mit einer anderen (und schwereren) Geometrie an ein Rohr montiert und untersucht, und anschließend nach der Fertigstellung der Proberippen aus dem TESIN Projekt diese untersucht.

Es gibt zwei Phänomene, die diese Anbindung beeinflussen können und diese Untersuchungen notwendig machen. Zum einen wird das Aluminium der Rippe wärmebehandelt, um eine höhere Festigkeit zu bekommen. Der Effekt dieser Behandlung nimmt ab einer Temperatur von 250 °C wieder ab, so dass das Aluminium wieder weich wird. Die Klemmfedern aus Federstahl haben zwar auch über 250 °C eine hohe Festigkeit, klemmen aber ab einer Temperatur von 250 °C weiches Aluminium zusammen, was vermutlich zu einer schlechteren Klemmwirkung führt. Dies wirkt sich negativ auf die Anbindung der Aluminiumrippe an das Stahlrohr aus. Zudem haben Stahl und Aluminium unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten, so dass die thermische Zyklierung auch zu einer ständigen Änderung des Gefüges führt.

Durch die Toleranzen von Rohr, Rippe und Federn sowie die Veränderung der Materialeigenschaften bei höheren Temperaturen und der wechselnden thermischen Belastung ist eine Berechnung des notwendigen Federdrucks nicht zielführend.

Diese Arbeiten sind im Journal of Applied Thermal Engineering veröffentlicht (siehe Abschnitt II.-3. Veröffentlichungen).

Untersuchung an vorhandenem Rippendesign

Im Versuchsstand wird das Rippenrohr von innen und außen um die Rippen herum mit Luft beheizt und zyklisch um verschiedene Temperaturen zyklert. Das Rohr wird innen durchströmt. Im Rippenraum ist die Wärmedämmung mit einer elektrischen Heizung versehen, so dass die Luft um die Rippen beheizt ist. Ziel dieser Untersuchungen ist es zu prüfen, ob die mechanische und damit die thermische Anbindung der Rippe durch thermische Zyklierung beeinflusst werden, und meidet den komplizierten Aufbau mit Salz. Dazu wurden Rippensegmente mit unterschiedlichen Anzahlen an Klemmfedern untersucht.

In diesen Versuchen wurden Rippen von vorherigen Arbeiten mit dem Projektpartner FWB verwendet. In der ersten Versuchsreihe wurde die Hälfte der Rippenlänge mit Klemmfedern bestückt. Diese Versuche zeigten eine sehr gute Verbindung zwischen Rippe und Rohr. Dadurch, dass kein Rutschen mit 50% Bestückung aufgetreten ist, wurden weitere Versuche mit weniger Klemmfedern durchgeführt. Die Versuche mit einer aussagekräftigen Zyklenanzahl durchzuführen ist sehr zeitintensiv, so dass entschieden wurde, das 4 m Versuchsrohr mit 4x0,95 m Stücken Rippe zu bestücken statt mit 2x2 m. Diese wurden auch mit unterschiedlichen Anzahlen an Klemmfedern bestückt. Die Rippen wurden mit der in Tabelle 4-1 angegebenen Anzahl an Klemmfedern montiert. In Abbildung 4-9 sind montierten Rippenstücke gezeigt.

Tabelle 4-1: Bestückung der Rippen, 2. Versuchsreihe, vorhandenes Rippendesign

<i>Rippe (von oben)</i>	<i>Anzahl Klemmfedern</i>	<i>Abstand zw. Klemmfedern [cm]</i>
1	15	3
2	12	4.9
3	8	9.4
4	3	43

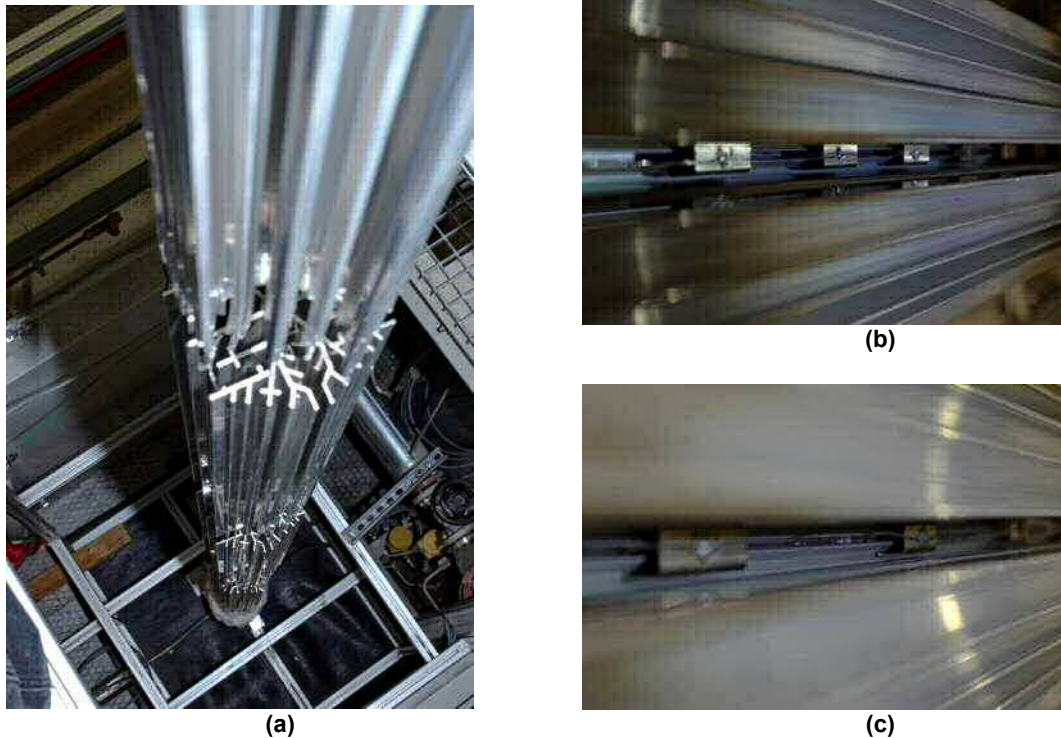


Abbildung 4-9: (a) 4 Rippensegmente, montiert; (b) Klemmfedern auf Rippe 2; (c) Rippe 3.

In dieser Versuchsreihe wurde um die Temperaturen $T = 225 \text{ }^\circ\text{C}$ und $T = 305 \text{ }^\circ\text{C}$ zyklert. Da der Speicher in Wellesweiler planmäßig für längere Zeiträume beladen bereit stehen soll bei circa $340 \text{ }^\circ\text{C}$, wurde für diese Bedingung eine Testreihe gefahren. Da Aluminium bei diesen Temperaturen eine geringe Festigkeit hat, wurde untersucht ob die Rippen unter Eigengewicht langsam rutschen oder sich verformen. Bei keinem der montierten Rippenstücke gab es eine nachhaltige Bewegung oder Verformung.



Abbildung 4-10: 15 Clips, demontiert.

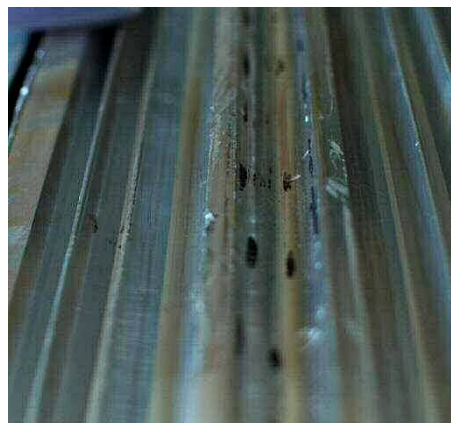


Abbildung 4-11: 15 Clips, Detailansicht.

Nach den Versuchen wurden die Rippen demontiert. Die Position der Federn hat sich im Versuch nicht verändert, ebenso sind die Rohre nicht verrutscht. Etwas Aluminium blieb am Rohr haften. Die Aluminiumbelege waren regelmäßig am Rohr sichtbar, vermutlich an den Stellen, an der der Kontakt durch die wellige Oberfläche des Rohrs (gezogenes Rohr) am besten war. Dieser Belag lässt vermuten, dass das Aluminium bei höheren Temperaturen eine Fügeverbindung mit dem Stahl bildet, der auch durch das zyklische Ausdehnen und zusammenziehen

nicht gebrochen wird bzw. sich immer wieder bildet. Dadurch wird ein guter thermischer Kontakt gewährleistet. Da die Rippen keiner mechanischen Belastung unterliegen, ist diese Fügeverbindung akzeptabel. Dies ist durch den Einsatz eines gezogenen Rohres zu erklären. Die Oberfläche des gezogenen Rohres ist leicht wellig. Das Aluminium wird beim Versuch erwärmt und dadurch weich. Die Kraft der Federn bewirkt wahrscheinlich ein leichtes Verformen wodurch die Leitstruktur hiernach nicht mehr verrutschen kann.

Diese Versuche haben gezeigt, dass die Rippen sich auf den kaltgezogenen Rohren nicht nachhaltig bewegen, auch wenn weniger als 50% der Rohrlänge mit Klemmfedern bestückt ist. Da die Rippen und Klemmfederauslegungen für TESIN anders sind, kann nicht direkt rückgeschlossen werden auf welche Anzahl an Klemmfedern im Projekt montiert werden soll. Allerdings kann zusammengefasst werden, dass das System thermomechanisch zyklisch belastbar ist.

Untersuchung mit TESIN Probepressungen

Mit montierten Rippenrohren aus der Probepressung wurden einige Versuche durchgeführt. Rippenrohre mit vier verschiedenen Bestückungsdichten der Klemmfedern wurden für Versuche an der Einzelrohrversuchsanlage vorbereitet. Dadurch, dass diese Untersuchungen sehr lange brauchen, liefen diese Parallel zum Speicherbau. Für den Bau des Speichers wurde eine konservative Klemmfederbestückung eingesetzt (33%). Die hier gewonnenen Ergebnisse sind für zukünftige Auslegungen und Arbeiten interessant.

Die Rohre wurden von FWB mit vier Klemmfederbestückungen, wie in Tabelle 4-2 dargestellt, vorbereitet. Jedes Rohr hat zwei Rippensegmente, jeweils 1,8 m lang. An der am DLR befindlichen Einzelrohrversuchsanlage für berippte Rohre (EVA) werden die Klemmfederbefestigungen bei unterschiedlichen thermischen Belastungen, wie oben beschrieben, untersucht. Dabei wird gemessen, ob sich die Rippen bewegen.

Tabelle 4-2: Bestückung der Rippenrohre mit TESIN Rippen.

<i>Rohr</i>	<i>Anzahl Federn pro Seite [-]</i>	<i>Bestückung [%]</i>
1	6	20
2	8	26
3	44	36,67
4	15	50

Für die erste Untersuchung wurde ein Rippenrohr mit 20% Klemmfederbestückung thermisch zyklisiert. Nach 100 Zyklen zwischen 220 °C und 110 °C wurde eine 4 mm Bewegung nach unten im oberen bestückten Bereich gemessen. Im zweiten Messzyklus mit ebenfalls 100 Zyklen wurde zwischen 275 °C und 175 °C zyklisiert. Hier gab es keine weitere Bewegung im oberen Bereich. Im unteren Bereich wurde eine Bewegung nach unten von 7 mm gemessen. Beim dritten Messzyklus wurde zwischen 325 °C und 285 °C zyklisiert, wobei keine weitere Verschiebung gemessen wurde.

Als nächstes wurde ein Rippenrohr mit 26% Klemmfederbestückung eingebaut und untersucht. Dieses verhielt sich ähnlich zum ersten TESIN Rohr. Beide haben Bewegungen bei Temperaturen unterhalb von 250 °C gezeigt. Nachdem die Rippen über 250 °C aufgeheizt wurden, gab es keine kontinuierliche Bewegung mehr.

Es wurde entschieden, Rohr 4 als nächstes zu untersuchen. Hiermit ist eine Untersuchung von Rohr 3 nur von Interesse, wenn die Ergebnisse von Rohr 4 von Rohr 2 abweichen. Dieses war nicht nennenswert der Fall. Die Untersuchung von Rohr 4 hat ähnliche Ergebnisse zu den Rohren 1 und 2 ergeben: Bis zur Temperatur von 250°C konnte ein leichtes Verschieben der Rohre bis zu 5 mm beobachtet werden. Bei Überschreiten dieser Temperaturmarke ergab sich hier keine weitere Verschiebung. Erklärt werden kann dies mit der Abnahme der Festigkeit des Aluminiums bei dieser Temperatur, wodurch sich dieses eher an die Unebenheit des Rohrs

anpasst und daher aufgrund der vergrößerten Reibung nicht mehr abrutschen kann. Es wurden für jede Temperaturabstand 100 Belade- und Entladeversuche gefahren, so dass hier wieder der reale Betrieb (ohne PCM) nachgebildet wurde.

Somit kann zusammengefasst werden, dass die Rippen unter thermische Zyklierung, ohne Salz, bei Temperaturen unterhalb von 250 °C sich bewegen. Oberhalb von dieser Temperatur, auch bei einer Bestückung von nur 20%, ist keine bleibende Bewegung mehr festzustellen. Für zukünftige Speicher können somit Auslegungen mit weniger Klammern geplant und durchgeführt werden. Insgesamt kann festgehalten werden, dass bei größerer Rohroberfläche, und somit Kontaktfläche, weniger Klammern schon zu einer erhöhten Festigkeit in der Verbindung führen.

4.3.4 Abzugsversuche

Im BMWi-Projekt DSG-Store (FKZ 0325333) wurde ein Messverfahren erarbeitet, mit dem die Kraft gemessen wird, welche zum Abziehen der Rippen von einem Rohr nötig ist. Dieses Verfahren ist im Abschlussbericht des Projekts DSG-Store detailliert beschrieben. Dasselbe Verfahren wurde für die in TESIN entwickelten Rippenrohre angewandt. Ziel dieser Untersuchungen war es, verschiedene Anbindungsverfahren miteinander zu vergleichen, um Aussagen zur Haltekraft der Verbindungen, vor allem nach thermischer Zyklierung im Salz, treffen zu können.

Für diese Untersuchungen wurden kurze Rippenstücke in einem Ofen montiert, auf Betriebstemperatur gebracht und dann unter Bestimmung des erforderlichen Kraftaufwands die Rippen mit Klammer vom Rohr abgezogen. Es wurden Proben mit einer vorherigen zyklischen Auslagerung im Salz sowie nicht ausgelagerte Referenzproben abgezogen. Die untersuchten TESIN-Proben sind in Abbildung 4-12 dargestellt. Im Projekt DSG-Store wurden auch andere Rippen- und Klammergeometrien sowie gelötete, gepresste und gekrimpte Varianten vermessen.

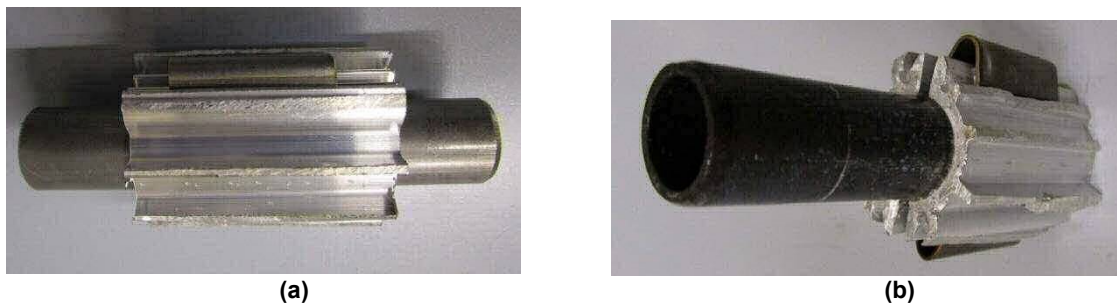


Abbildung 4-12: TESIN Proben für die Abzugsversuche (a) vor der Auslagerung und (b) nach der Auslagerung und dem Abzug.

In Abbildung 4-13 ist ein Foto des Rohrofens und der Abzugsapparatur dargestellt. Im Rohrofen wird die Probe mit einem Gestänge von links gehalten. Die Rippe und Klammer werden mit einem Pneumatikzylinder durch eine Halterung nach rechts gezogen. Die Kraft-Weg-Messung findet während des Versuchs statt.

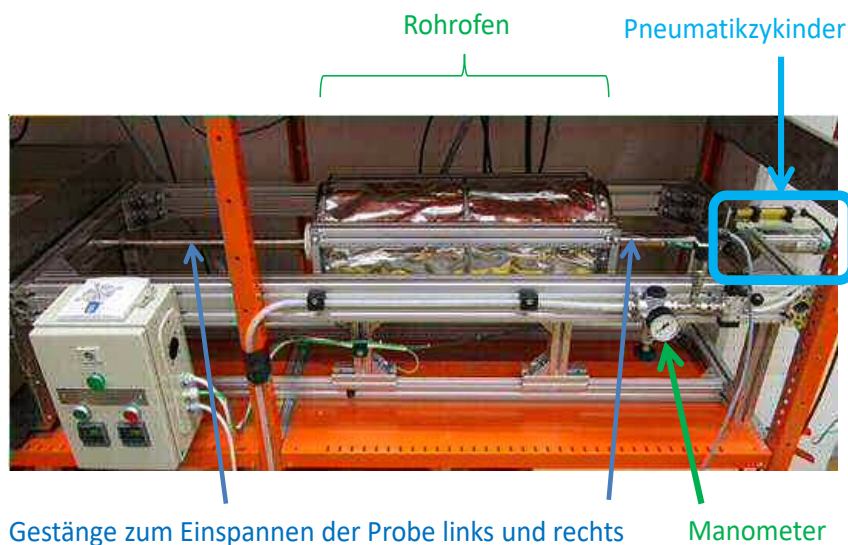


Abbildung 4-13: Abzugsapparatur bestehend aus Rohrfen, Pneumatikzylinder, Manometer sowie das Gestänge zum Einspannen der Probe.

Für die TESIN-Rippen wurden bei den Referenzproben 632 N und 760 N Kraft aufgewendet, um die Proben abzuziehen. Diese Ergebnisse sind mit den Abzugsversuchen der zwei anderen Rippengeometrien aus DSG-Store zusammen in Abbildung 4-14 dargestellt. Diese Kurve zeigt, dass schon bei den nicht ausgelagerten Proben die TESIN Rippe leichter abzuziehen ist, als die größeren Geometrien „Schneeflocke“ und „DSG-Store“. Das kann mit der kleineren Reibungsfläche der dünneren TESIN-Rohre begründet werden.

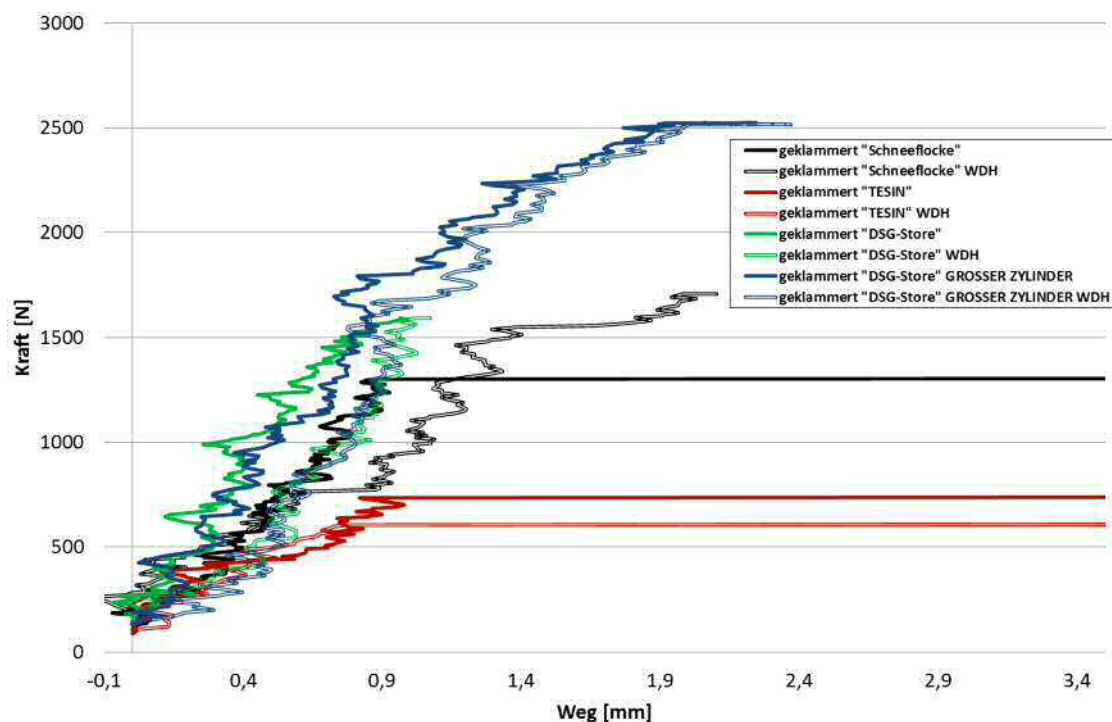


Abbildung 4-14: Kraft-Weg-Diagramm der geklemmten Referenzproben der TESIN-Rippengeometrie sowie andere Rippengeometrien zu Vergleichszwecken.

Die vor dem Abziehversuch ausgelagerten Proben haben für die TESIN Rippe gleich beim Aufsetzen der Abzugsvorrichtung angefangen zu kriechen. Diese Ergebnisse sind in Abbildung 4-15 zusammen mit den anderen Rippengeometriedaten dargestellt. Diese Abzugsversuche zeigen, dass der Verlust an Steifigkeit beim Aluminium, der bei allen drei Rippen-

geometrien stattfindet, zu einem Verlust der Haltekraft führt. Da die Rippen keine mechanischen Belastungen ausgesetzt sind, ist dieser Verlust nicht kritisch. Allerdings ist ein Rutschen der Rippen und Klammern auf den Rohren, bis diese auf der Rohrplatte im unteren Teil des Speichers aufsetzen, nicht ausgeschlossen.

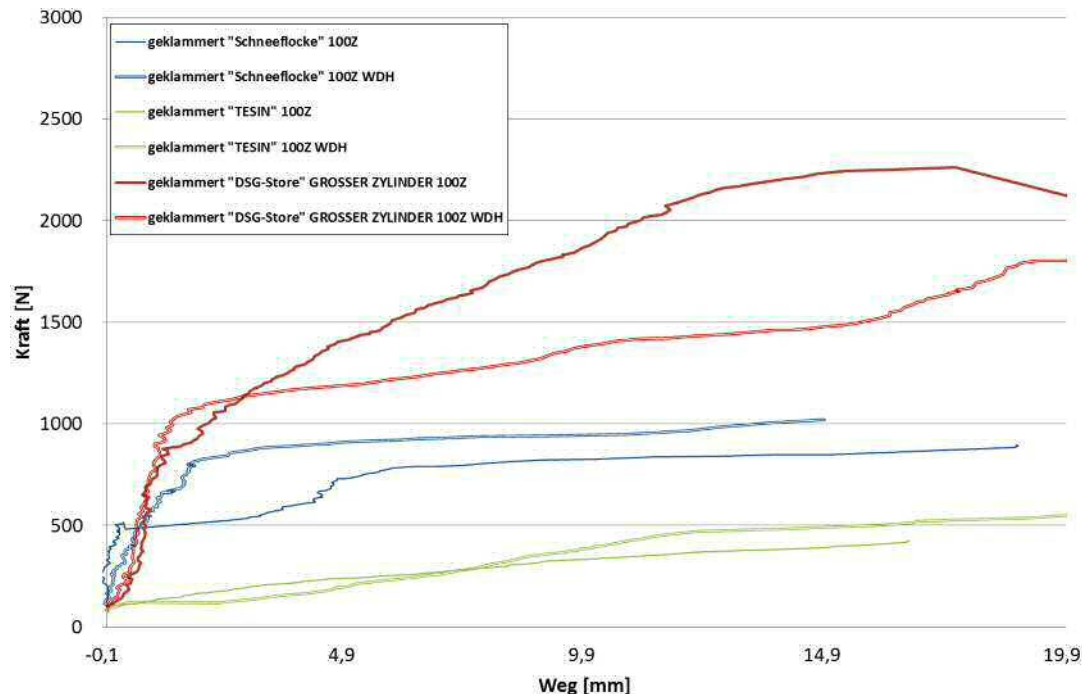


Abbildung 4-15: Kraft-Weg-Diagramm der geklammerten ausgelagerten Proben der TESIN-Rippengeometrie sowie andere Rippengeometrien zu Vergleichszwecken.

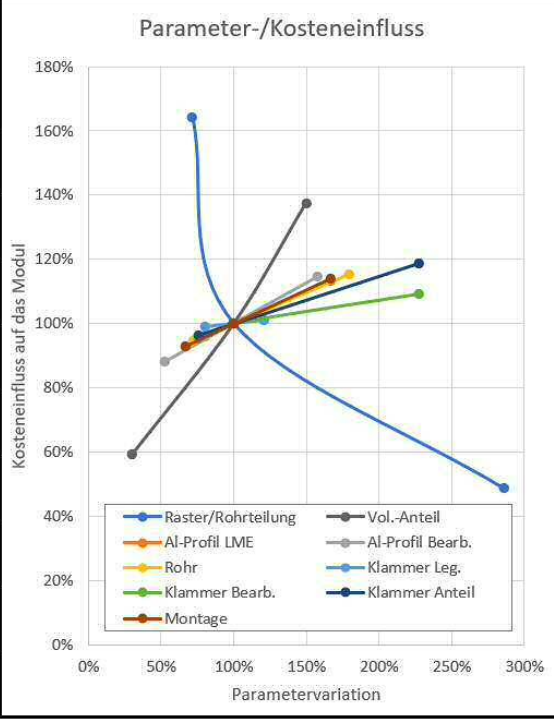
4.3.5 Betrachtung der Rippenrohrpreise (FWB)

Durch die Produktion der berippten Rohre wurde einiges an Erfahrung hierzu gewonnen, so dass Preise für die Rippenrohre für weitere Speicher besser abgeschätzt werden können. Diese Preise sind natürlich von verschiedenen Faktoren abhängig. Zum einen ist der Entwicklung des Materialpreises ein Faktor, der vom Markt vorgegeben wird und nur durch eine andere Materialauswahl beeinflusst werden kann. Je nach Anwendungsmarkt werden unterschiedlich dimensionierte Speichergrößen mit daran orientierten Rippenrohrmengen sowie anwendungsspezifische Anpassungen in der Geometrie zu Grunde gelegt. Folgend werden zwei konkrete Anwendungen sowie die zum Zeitpunkt der Analyse (2016) wahrscheinlichen minimalen und maximalen Werte je Parameter verglichen. Die TESIN Rippenrohre für hohe Leistungen und mittlere Stückzahlen werden mit solaren Anwendungen mit mittleren Leistungen und hohen Stückzahlen verglichen.

Die einzelnen Bestandteile der Rippenrohrmodule wurden jeweils einzeln variiert (min./max. nach Einschätzung FWB) und die daraus folgenden relativen Kosten für die Rippenrohrmodule für eine Kilowattstunde berechnet. Die Spalte „SOLAR“ zeigt die Konfiguration für eine „langsame“ Auslegung – eben für eine Anwendung im Solarbereich und die Spalte TESIN zeigt die im Projekt angewendeten bzw. erarbeiteten Parameter. In Tabelle 4-3 sind die Kosten auf die Kilowattstunde gespeicherte Energie bezogen. Damit kann der Einfluss der technischen Parameter auf die Speicherkosten unabhängig vom ausgewählten Speichermaterial betrachtet werden.

Tabelle 4-3: Parametervariation der Rippenrohrkosten.

	Parametervariationen				
	min	SOLAR	TESIN	max	
Raster/Rohrteilung	286%	257%	100%	71%	mm
Vol.-Anteil	30%	48%	100%	150%	%
Al-Profil LME	80%	100%	100%	167%	€/kg
Al-Profil Bearb.	53%	100%	100%	158%	€/kg
Rohr	72%	125%	100%	179%	€/m
Klammer Leg.	81%	100%	100%	121%	€/kg
Klammer Bearb.	50%	50%	100%	200%	€/m
Klammer Anteil	76%	100%	100%	227%	%
Montage	67%	33%	100%	167%	€/m
<i>in Kombination</i>	<i>11%</i>	<i>23%</i>	<i>100%</i>	<i>439%</i>	<i>zu TESIN</i>



Die Rohrteilung und der Volumenanteil der Rippe beeinflussen direkt die eingesetzte Aluminiummasse.

Der Al-Profil LME (London Metal Exchange) ist der Einkaufspreis für Aluminium. Da der Aluminiumpreis derzeit großen Preisschwankungen unterliegt, wurde für die Darstellung des Einflusses der verschiedenen technischen Parameter die Relation zu den gewählten Parametern des TESIN-Speichers (jeweils 100%) gewählt.

Unter der Bearbeitung (Bearb.) werden die Kosten für die Bolzenprämie und das Strangpressen zusammengefasst. Die Bolzenprämie ist auch ein schwankender Preis, der von den Aluminiumhütten festgelegt wird. Das Strangpressen variiert je nach Rippenstruktur, da eine feinere Rippe langsamer gepresst werden muss als eine mit größeren Wanddicken.

Der Rohrpreis pro Meter wurde unter der Annahme variiert, dass der Durchmesser, die Wanddicke, das Material und auch unterschiedliche Abnahmemengen der Anwendungen einen Einfluss auf dem Preise haben werden.

Die Anbindung mit Klammern führt zu drei Variablen. Zum einen wird eine Federstahllegierung hierfür verwendet, welche ebenfalls Preisschwankungen am Markt hat. Die Bearbeitungskosten der Klammern wurde mengen- und damit automatisierungsgradabhängig abgeschätzt und basiert auf Erfahrungswerten von FWB. Anzahl und Größe der Klammern hängen vom Gewicht und Durchmesser der Rippengeometrie ab, so dass eine größere Rippe mehr bzw. stärkere Klammern benötigt.

Die Erfahrungen aus der Montage der Rippen in diesem Projekt und im oben erwähnten DSG-Store Projekt haben gezeigt, dass diese ca. um den Faktor 5 variieren können. Der Aufwand für die Montage ist für SOLAR geringer als bei TESIN, durch eine größere Anzahl an erwarteten Rippenrohrmodulen, so dass weiter automatisierte Montageverfahren eingesetzt werden würden.

Man sieht, dass die Variablen „Raster“ und „Vol.-Anteil“ erwartungsgemäß den größten Einfluss auf die Hardwarekosten für eine gespeicherte Kilowattstunde haben. Damit wird deutlich, dass das Ziel einer Auslegung das Optimum zwischen maximiertem Rohrabstand, minimierter Rippenmasse und der thermischen Mindestanforderungen des Prozesses sein muss.

Die letzten Zeilen zeigen die resultierenden Kosten für die kombinierte Variation und damit die min./max.-Spanne des Bauprinzips. Die Rippenrohrmodulkosten für eine „solare“ Anwendung betragen ca. 23% der Kosten für einen Auslegung mit hoher Leistung, wie im Projekt TESIN gefordert.

AP 4.4 Bau des PCM-Speichers (DLR, SNE, FWB)

Im Anschluss an die detaillierte Auslegung des Speichers wurde der Speicher gebaut. Nachdem die Rippenrohre geliefert wurden, konnte die Messtechnik montiert werden und der Speicher gebaut werden. Die Lieferung der Rippenrohre hat erst mehrfach zum Verzug geführt, danach die Insolvenz der Tochterfirma vom Seab GmbH, Seab Umwelttechnik GmbH am 21.12.2016. Insgesamt betrug die Bauphase des Speichers von Anfang der Arbeiten mit der ersten Wandplatte in Januar 2016 bis zur Errichtung in September 2018 nicht die planmäßigen und vereinbarten 12-16 Wochen, sondern 139 Wochen.

4.4.1 Fertigung des Speichers (DLR)

Der Speicher wurde vom Unterauftragnehmer des DLR, Seab GmbH bzw. deren Subunternehmer und Tochterfirma, Seab Umwelttechnik GmbH in Laucha an der Unstrut gebaut. DLR hat während der Bauzeit die Thermoelemente an die von FWB montierten Rippenrohre montiert. Die Montage der Thermoelemente ist in Abbildung 4-16 dargestellt.



(a)



(b)

Abbildung 4-16: (a) Montage der Thermoelemente an einem Rippenrohr, (b) alle mit Thermoelementen bestückten Rippenrohren.

Um ein Gefühl für die Rahmenbedingungen und Größenordnungen vom Speicher und dessen Fertigung zu geben, sind Bilder in Abbildung 4-17 dargestellt.



(a)



(b)

Abbildung 4-17: (a) Blick auf den oberen Sammler des liegenden Speichers mit installierten Thermoelementen; Im Vordergrund: vorbereitete berippte Rohre, (b) Montageort, mit bereitstehende Rippenrohranlieferung rechts, Rohrplatte und eine Seitenwand oben mittig und vorbereitete Rippenrohre links.

Nach der Insolvenz des Unterauftragnehmers Seab Umwelttechnik GmbH musste eine Transportsicherung für den halbgebauten Speicher entwickelt werden. Diese Arbeiten sind in Arbeitspaket AP 4.7 dokumentiert. Nach der Integration der Transportsicherung für die berippten Rohren des halbfertigen Speichers konnte der Speicher am 31.07.2017 von Sachsen-Anhalt nach Bayern zum Auftragnehmer Seab GmbH transportiert werden. Zunächst wurde der Speicher auf Transportschäden untersucht und sodann der Weiterbau vom TÜV akzeptiert.

Die Arbeiten wurden am unteren Sammler zuerst fortgesetzt. Bei jeder der Zwischensammler waren 3 Schweißlagen notwendig. Bei jeder ersten Naht wurde ein Platzhalter für die Spaltgröße eingeschweißt, im Anschluss dann entfernt.

Der fertiggestellte untere Sammler ist in Detail und insgesamt in Abbildung 4-18 (a) und (b) dargestellt. Abbildung 4-18 (c) und (d) zeigen einen Zwischenstand an den Arbeiten am oberen Sammler. Hier wurden als nächstes die großen Außensammler angeschweißt. Diese Schweißarbeiten für Druckgefäße sind kompliziert und bedürfen eines hohen Grades an Schweißexpertise. Die drucktragenden Teile des Speichers wurden Anfang Februar 2018 fertig geschweißt; ebenfalls wurde der Speicher mit der Hülle versehen. Anschließend wurde der Speicher einer Druckprüfung unterzogen.



(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 4-18: (a) unterer mittlere Sammler mit fertige Schweißnaht; (b) fertiggestellter unterer Sammler; (c) oberer mittlere Sammler mit Platzhalter angepunktet für die Anschweißung des Außensammlerrohrs auf einer Seite; (d) oberen Sammlerbereich.

Nachdem die Klärung der Ausführung der Wärmedämmung vom Auftragnehmer von SNE abgeschlossen wurde, konnten die Aufhängungen hierfür von Seab GmbH montiert werden (siehe Abbildung 4-19, links). Für die Befüllung in Wellesweiler war ein Gelände notwendig, das separat angefertigt wurde. Ebenfalls war eine weitere Transportsicherung notwendig, siehe hierzu AP 4.7. Zum Zeitpunkt der Verladung wurde der Hof der Firma VAD, in dem der Speicher zuletzt zusammengeschweißt wurde, saniert, so dass die Verladung und Transport des Speichers weiter verzögert wurden (siehe Abbildung 4-19, rechts).



Abbildung 4-19: Links: Speicher mit Versteifungselemente und Aufhängungen für die Wärmedämmung. Rechts: Hof der Firma VAD, bei dem der Speicher letztendlich fertig gestellt wurde.

Das Fundament für den Speicher in Wellesweiler wurde von Seab mittels Schablone mit Ankerbolzen versehen (siehe Abbildung 4-20). Diese Ankerbolzen dienen hauptsächlich dazu, dass der Speicher durch thermisches Zyklieren nicht weg vom Fundament ‚wandern‘ kann. Statisch ist der Speicher auch ohne Ankerbolzen stabil, auch im leeren Zustand.



Abbildung 4-20: Links: Schablone für die Ankerbolzen auf das Speicherfundament in Wellesweiler. Rechts: montierte Ankerbolzen.

Der Speicher wurde am 14.09.2018 mittels Schwerlastkran auf einen Schwerlasttransporter verladen. Der Speicher wiegt im leeren Zustand ca. 27 Tonnen, so dass die Verladung auf dem Hofgelände von VAD nur mittels einen 5-achsigen LKW-Kran möglich war (siehe Abbildung 4-21).



Abbildung 4-21: Links: Verladung des Speichers auf einem LKW für den Transport von Kleinostheim nach Wellesweiler. Rechts: Speicher verladen und gesichert auf dem LKW.

Der Speicher wurde am 17.09.2018 am Kraftwerk Wellesweiler angeliefert. Vom liegenden Zustand wurde dieser mit einem Kran vom LKW gehoben, und mit einem zweiten Kran dann auf die stehende Position gedreht (siehe Abbildung 4-22). Somit konnte der Speicher geschwenkt werden und auf die 8 zuvor montierten Ankerbolzen abgesetzt werden.



Abbildung 4-22: Links: Wendung des Speichers von liegend aufstehend am Kraftwerk Wellesweiler. Rechts: Speicher erfolgreich errichtet.

Danach wurden durch das DLR die Thermoelemente an der Außenhülle des Speichers sowie am unteren Sammler montiert, so dass die Wärmedämmung montiert werden konnte.

4.4.2 Wärmedämmung des Speichers (SNE)

Da der Speicher ein Druckgerät ist, muss nach jeglichen Schweißarbeiten am Speicher eine Druckprüfung erfolgen. Es ist daher zweckmäßig, auch die Aufhängungen für die Wärmedämmung vor der Druckprüfung und Auslieferung anzuschweißen. Diese Arbeiten wurden allein aus Zulassungs- und Gewährleistungsgründen vom Hersteller Seab ausgeführt.

Der Auftrag zur Wärmedämmung bzw. Isolierung des Speichers wurde von SNE gemeinsam mit dem Rohrleitungsbau und dessen Isolierung an die Firma ARB vergeben. Für die Isolierarbeiten selbst hat ARB die Firma Lindner unterbeauftragt. Da bei der Vergabe des Auftragspakets im Dezember 2015 vom DLR bzw. von Seab nur die Kubatur des Wärmespeichers bemaßt werden konnte, basierte die ursprüngliche Kalkulation von ARB (resp. Lindner) auf dieser. Da erst im Frühjahr 2018 die Unterkonstruktion für die Isolierung entsprechend der am Speicher notwendigen Befestigungselemente detailliert geplant werden konnte, kam es zu erheblichen Preissteigerungen für die Isolierung des Speichers.

AP 4.5 Integration des PCM-Speichers in das Kraftwerk (SNE)

Mit der Vergabe des Rohrleitungsbaus und der MSR Technik wurde auch die Einbindung des Speichers sowohl physikalisch, als auch vom Leitsystem her geplant und von den jeweiligen Auftragnehmern im Detail realisiert, so dass der Speicher im 2. Quartal 2016 hätte eingebunden werden können. Bis zum Beginn der Arbeiten am Standort Wellesweiler mussten für die entsprechenden Maßnahmen Gefährdungsanalysen durchgeführt werden.

Am 21. März 2016 wurde die Baustelle im Heizkraftwerk Wellesweiler eingerichtet und mit dem Bau begonnen (Abbildung 4-23). Vor Ort waren gleichzeitig sowohl die Tiefbaufirma, die die Auffangwanne, die Stützen aus Beton für den Speicher, das Abkühlbecken für das Kondensat und die Rinne zum Abkühlbecken, welche die Kondensatleitung aufnimmt, hergestellt hat sowie das für den Bau der Rohrleitungen beauftragte Unternehmen. Die Bauarbeiten wurden fristgerecht Ende April 2016 abgeschlossen.

Der Rohrleitungsbau konnte aufgrund der Verzögerungen beim Speicherbau erst mit Anlieferung des Wärmespeichers abgeschlossen werden. Fertiggestellt waren zu diesem Zeitpunkt der Rohrleitungsbau inklusive Einbindung an den Abhitzekeessel und Montage der entsprechenden Armaturen, Ventile und Messstellen innerhalb des Gebäudes. Die Arbeiten wurden vom SiGeKo sowie fallweise vom TÜV begleitet.



(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 4-23: (a) Vorbereitung des Fundaments, (b) Speicherfundament mit integrierter Auffangwanne für das Speichermaterial am HKW Wellesweiler, (c) Abkühlbecken für Kondensat aus dem Speicher, (d) Panoramabild vom HKW Wellesweiler mit Fundament.

Außerdem wurde der Rohrleitungsbau außerhalb des Gebäudes, soweit möglich, fertiggestellt. Weiterhin wurde die Statik des Gebäudes geprüft, da für die Wärmespeicheranlage mehrere Schalldämpfer vorgesehen sind. Diese sind aufgrund einer Auflage der Genehmigungsbehörde notwendig und sollen auf dem Dach installiert werden. Der Antrag auf Erlaubnis nach BetrSichV wurde gemeinsam mit dem TÜV-Süd erarbeitet und bei der Genehmigungsbehörde eingereicht und positiv beschieden.

Nach der Anlieferung des Speichers am 17. September 2018 an den Standort Wellesweiler wurden die Rohrleitungsanbindungen fertiggestellt; die Druckprüfungen der Rohrleitungen erfolgten.

In Abbildung 4-24, links, ist die rohrleitungstechnische Anbindung zu sehen; in Abbildung 4-24, rechts, die Isolierung des Speichers. Gespräche mit dem TÜV haben zu einem umfangreichen Sicherheitskonzept geführt.



Abbildung 4-24: Links: Montierte und gedämmte Ventile. Rechts: Wärmegeprägter Speicher und Rohrleitungen.

Nach der Abnahme des Sicherheitskonzepts durch den TÜV sowie Befriedigung der geforderten Genehmigungsaufgaben und der vom Speicherhersteller Seab gelieferten Abnahmezeugnisse wurde bei der Genehmigungsbehörde die Betriebserlaubnis für das Speichersystem erwirkt. Erst mit dieser Erlaubnis darf der Speicher mit Dampf oder Heißwasser beaufschlagt werden. Mit Vorlage der Erlaubnis wurden kleine rohrtechnische Umbauten (Einbau eines Spiegels, Ablaufleitung) für den Vorgang des „Ausblasens“ durchgeführt. Nach dem Ausblasen

und Rückbau der kleinen Umbauten konnte mit dem Befüllen des Speichers mit Natriumnitrat durch DLR begonnen werden. Der Termin des Ausblasens wurde mit den Behörden, Feuerwehr und dem Betrieb sowie den Dampfbeziehern abgestimmt.

AP 4.6 Spezielle Gestaltung des Speichers im Bereich Sammler/Verteiler (DLR)

Im unteren Bereich des Sammlers sind zusätzliche Schweißarbeiten durch die Firma Seab GmbH erforderlich gewesen, da jede Rohrreihe mit Verteilerhülsen vorgesehen werden musste. Die Schweißarbeiten am unteren Sammler wurden vom TÜV gesondert geprüft. Mit der Auslieferung des Speichers waren die Arbeiten an Sammler und Verteiler fertiggestellt.

AP 4.7 Entwicklung und Erprobung einer Lösung zur Transportsicherung des PCM Speichers (DLR)

Durch die Insolvenzmeldung von Seab Umwelttechnik GmbH am 21.12.2016 wurde eine Transportsicherung für den Speicher notwendig. Der Speicher wurde dann nach Kleinostheim zum Auftragnehmer von DLR, Seab GmbH, transportiert, so dass der Speicher direkt von Seab GmbH abschließend gebaut werden konnte.

Durch den nötigen Transport des Speichers im halb-fertigen Zustand, musste eine Transportsicherung für die Speicherrohre im halb-fertigen Zustand nachträglich integriert werden. Das Ziel, außer einen Schadenfreien und sicheren Transport, war eine Transportsicherung, welches die bereits integrierten Thermoelementen nicht beschädigt und wenig Volumen einnimmt, da dieses Speichermaterial und dadurch Kapazität verdrängt.

Bleche wurden zwischen den Rippen geschoben, um eine Durchhängung und Stöße aufeinander durch Bewegungen im Transport zu vermeiden bzw. verringern. Diese Bleche sind von der Seite des Speichers (links) und als Zeichnung (rechts) in Abbildung 4-25 und komplett montiert in Abbildung 4-18(b), rechts dargestellt. Die Bleche wurden zwischen den Rippenrohrreihen montiert, in dem die Rohrreihen auseinander gehoben und die Bleche vom oberen Sammler Richtung unterer Sammler geschoben wurden. Dadurch, dass dieses auch die Einbaurichtung der Thermoelemente ist, erwarten wir hier keine Beschädigung der Thermoelemente.

Die Bleche sind mit dem in Abbildung 4-25 sichtbaren Rahmen punkt-geschweißt, so dass eine Demontage theoretisch möglich gewesen wäre. Dieses hätte allerdings eine nochmalige Anhebung jeder Rohrreihe erfordert, was zu einer Beschädigung der Schweißnaht im Sammlerbereich hätte führen können. Daher wurde dagegen entschieden. Es wurde nach dem Transport begutachtet, dass die Transportsicherung ausreichend war. Diese Bleche reduzieren zum einen Speichermaterialvolumen, zum anderen sind aus Forschungssicht ungünstige Einflüsse auf die Messergebnisse zu erwarten.

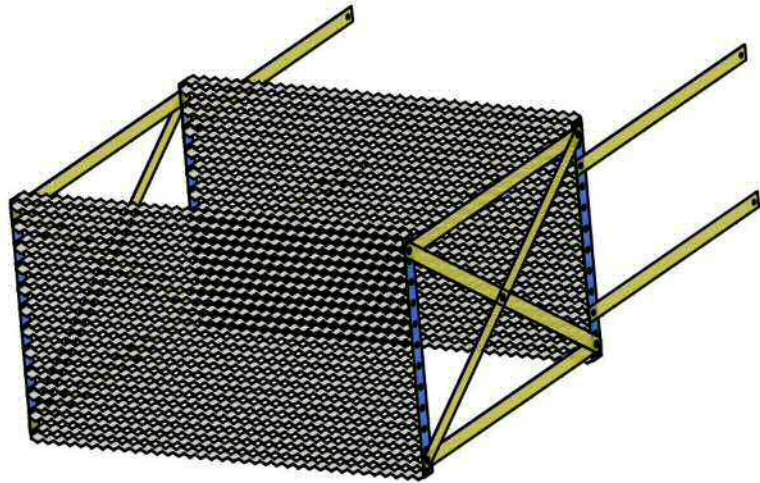


Abbildung 4-25: Bleche zur Transportsicherung der berippten Rohre für den Zwischentransport (a) von der Seite des Speichers und (b) als Zeichnung.

Durch die im Speicher montierten Blechen wurde eine längere Befülldauer vermutet, dadurch dass an vielen Stellen das Salz nicht mehr komplett nach unten Rieseln konnte. Durch die Verwendung von geprilltem Salz für die Befüllung war das Rieseln kein Problem.

Für den 2. Transport war eine weitere Transportsicherung notwendig. Der Speicher ist mit seiner kompletten Breite, inklusive statischer Versteifungen, zu breit um quer transportiert zu werden, wie dies für den 1. Transport gemacht wurde. Daher musste der Speicher um 90° gedreht werden, wobei hier die Querbleche deutlich weniger Unterstützung bieten. Hierfür wurden Elemente an den Wänden eingeschweißt, um die kompletten Rohrpakete zu Stützen. In einer Rohrreihe wurden diese Pakete nach der Errichtung wieder entfernt, um Platz für die RADAR-Sonde zu gewährleisten. Diese Elemente sind in Abbildung 4-26 dargestellt.



Abbildung 4-26: Mittig im Bild ist ein Transportsicherungselement zu sehen, eingeschweißt an der Wand des Speichers.

AP 4.8 Simulative Auslegung von Bypassfahrensweise und Ventilbetrieb zur Beladung und Einhaltung der geforderten Umschaltzeit bei der Entladung (DLR)

In diesem Arbeitspaket wurde das tatsächlich geplante bzw. gebaute System simuliert, da reale Ventile und Schaltungen nicht ideal betrieben werden können und eher ein transientes Verhalten bei der Umschaltung besitzen sowie verursachen. Für diese Arbeiten wurde zunächst eine geeignete Modellierungsmöglichkeit erarbeitet und umgesetzt. Zur Berücksichtigung des Phasenwechsels wurde eine Variante der Enthalpiemethode angewandt, jedoch in einer abgewandelten Variante eingesetzt. Durch Rückführung auf eine Darstellung in der

Temperatur können verschiedene Materialien im gleichen Rechengebiet eingesetzt werden. Allgemein ist eine räumliche sowie zeitliche Veränderung der Materialparameter grundsätzlich möglich. Die räumliche Diskretisierung erfolgt durch Approximation mit zentralen finiten Differenzen zweiter Ordnung. Die Anwendung der Enthalpiemethode linearisiert die Gleichungen, wobei ein Quellterm für die Schmelzenthalpie entsteht, dessen freigesetzter Anteil durch eine zusätzliche Variable, den Flüssigkeitsanteil, festgelegt wird. Die Lösung der Temperaturen und der Flüssigkeitsanteile muss iterativ bestimmt werden. Eine implizite zeitliche Diskretisierung erster Ordnung führt schließlich auf ein lineares Gleichungssystem, das für einen Ausgangszeitpunkt die Lösung nach einem bestimmten Zeitschritt liefert. Die Lösung gilt als konvergiert, wenn das Residuum des Gleichungssystems einen Maximalwert unterschreitet. Der Zeitschritt wird variabel nach jeder konvergierten Lösung oder bei einer nicht-konvergierenden Lösung angepasst. Indikativ ist dafür die Anzahl benötigter Iterationen und zwei dimensionslose Kennzahlen. Mit diesem Modell lässt sich die Entladung des Speichers mit angepasstem Massenstrom passend zum realen Ventil berechnen.

Das Anlagensystem und der Speicher wurden geplant, ausgelegt und gebaut. Allerdings wurde der Speicher mit idealisierten Ventilschaltzeiten sowie ohne die tatsächliche Länge der Anbindeleitungen ausgelegt und simuliert. Um diesen Speicher aus wissenschaftlicher Sicht bewerten zu können und auch besser zu verstehen wie die Regelung für den Betrieb des Speichers eingestellt werden sollte, ist eine genauere Betrachtung mit realen Werten erforderlich. Da der Speicher unter diesem Aspekt im Wesentlichen in zwei Betriebsmodi betrieben wird, werden diese zwei Modi – Beladung und Entladung – separat betrachtet.

4.8.1 Beladung

Bei der Beladung wird über das Anlagensystem der Dampfmassenstrom vom Abhitzekeessel zum Speicher geführt. Der Massenstrom wird über einem Bypass aufgeteilt, sodass am Anfang der Beladung nur einen Teil des Dampfes durch den Speicher fließt. Diese Menge wird temperaturabhängig geregelt, sodass die Dampftemperatur an der Mischstelle, an dem die zwei Ströme wieder zusammengeführt werden, so früh wie möglich mehr als 300 °C erreicht, und danach so schnell wie möglich auf den vollen Massenstrom im Speicher geschaltet werden kann. Das Ziel dieser Regelungsstrategie ist, so schnell wie möglich Dampf zu produzieren, welcher ausreichende Qualität hat, um zur Dampfschiene geleitet zu werden. Gleichzeitig soll der Speicher beladen werden, sodass er wieder die Standby Funktion übernehmen kann. Am Anfang dieser Beladezeit tritt Kondensat aus dem Speicher aus, bis die Temperatur am Auslass über die Verdampfungstemperatur steigt (ca. 225 °C). Der Dampf für die Dampfschiene muss allerdings mehr als 300 °C aufweisen, sodass auch Dampf mit einer Temperatur zwischen der Verdampfungstemperatur und 300 °C verworfen werden muss. Hier wurde betrachtet, welche Mengen an Kondensat und Dampf bei einer vollständigen Beladung entstehen. Bei einer Teilbeladung im Versuchsbetrieb reduzieren sich diese Mengen entsprechend.

Abbildung 4-27 zeigt die Gesamtsimulation zur Beladung des Speichers mit der geplanten Bypassfahrweise. Hierbei wird ein Teil des Dampfes am Speicher vorbei geleitet (orange Punkte), und mit dem aus dem Speicher heraustretendem Dampf (gelbe Rauten) vermischt. Der Dampfmassenstrom über den Speicher wird angepasst und mit fortschreitender Beladedauer erhöht, sodass die erforderliche Mindesttemperatur (lila Linie) von 300°C möglichst nicht unterschritten wird. Allerdings wird am Anfang der Beladung am Speicheraustritt, unten, trotzdem Kondensat und Dampf anfallen. In dieser Simulation wurde eine Mindesttemperatur von 310 °C zugrunde gelegt. Die genaue Grenze, die an der Mischstelle einzuhalten ist, wird während der Versuchsphase im Anschlussvorhaben festgelegt. Das Ziel soll dabei die Gewährleistung der erforderlichen Dampftemperatur in der Dampfschiene bei gleichzeitiger Minimierung des verworfenen Speisewassers sein.

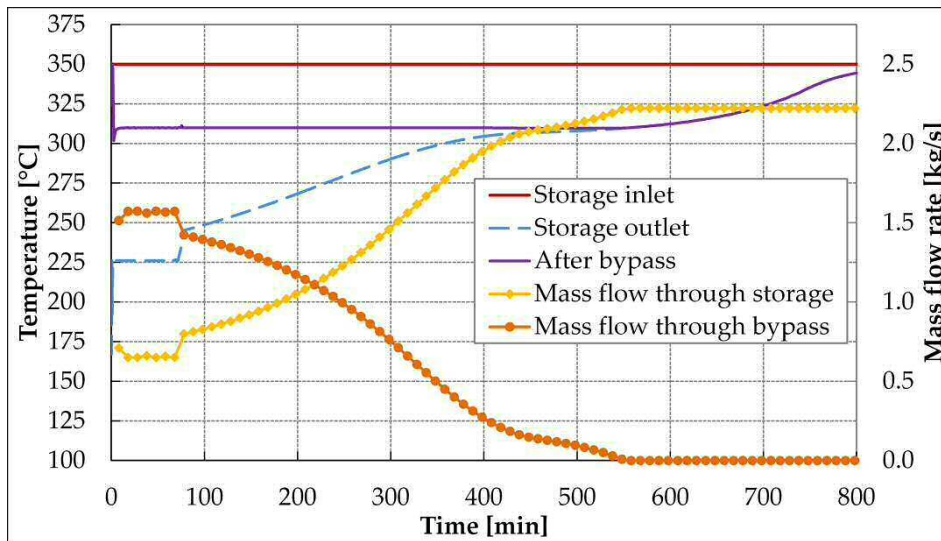


Abbildung 4-27: Massenströme im Speicher während der Beladung mit einer Bypassregelung.

Um die Regelung der Anlage und die verworfenen Speisewassermengen besser berechnen zu können, wurde ein Modell in Epsilon Professional erstellt (s. Abbildung 4-28) und analysiert. In diesem Modell werden die Temperaturen und Drücke der verschiedenen Ströme über der Zeit berechnet und die Ergebnisse miteinander verglichen. Damit ist eine genauere Betrachtung der Regelweise möglich als mit dem zuvor verwendeten Dymola Modell.

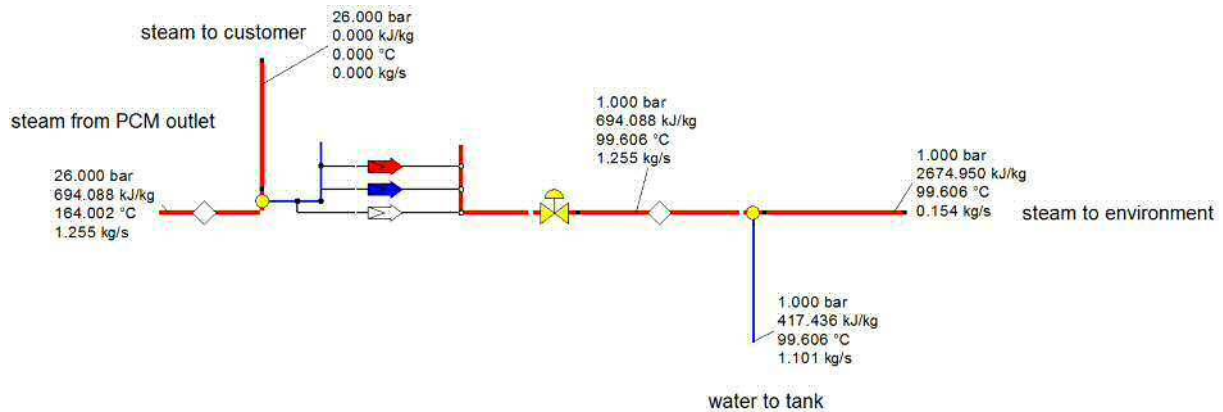


Abbildung 4-28: Modellaufbau in Epsilon Professional für die Beladung des Speichers.

Analog zu den bereits in Dymola durchgeführten Berechnung, zeigen die Ergebnisse aus dem Epsilon Modell, dass bei der Bypassverfahrensweise nur zu Beginn der Beladung Kondensat anfällt, welches verworfen werden muss. Durch die sensible Temperaturänderung innerhalb des PCMs ist für die gesamte Beladung des Speichers eine Dauer von über 14 h erforderlich. Speisewasser, in Form von Kondensat und Dampf, wird dabei nur in den ersten 20 Minuten verworfen.

Abbildung 4-29 zeigt die aufsummierten Kondensat- und Dampfmengen, die bei der Beladung verworfen werden müssen. Hierbei fallen die Hauptmengen während den ersten 8 Minuten an. Anschließend steigen die Mengen leicht an und erreichen nach 20 Minuten eine konstante Summe von 492 kg Kondensat und 117 kg Dampf bis zur Ende des Beladevorgangs. Diese leichte Steigung nach der Anfangsphase hängt mit der Regelung des Ventils und der Zusammenmischung der Ströme zusammen.

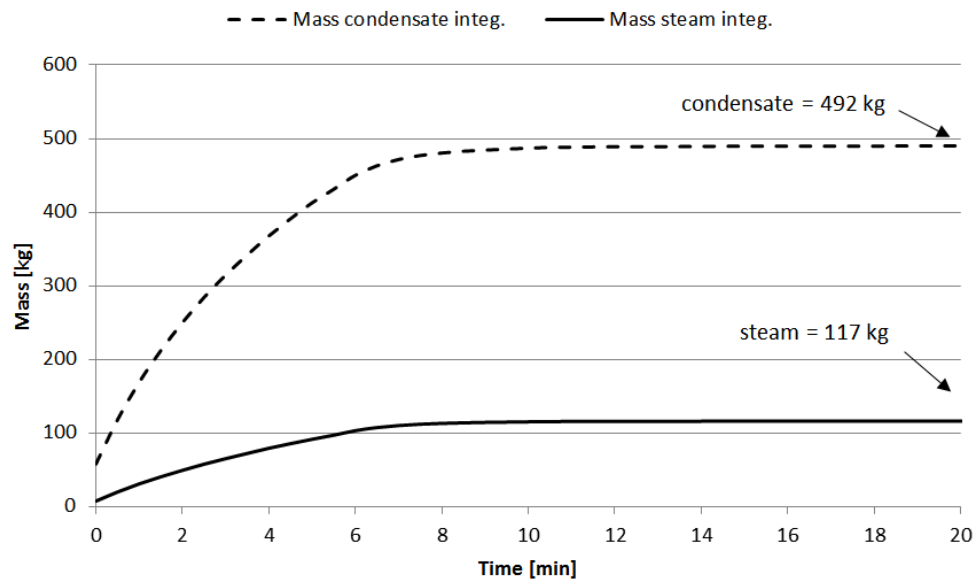


Abbildung 4-29: Berechnung der aufsummierten Kondensat- und Dampfmengen, die bei der Beladung verworfen werden müssen.

Was mit diesem Modell nicht betrachtet werden kann, ist die Verteilung des Dampfes zu Beginn der Beladung. In dieser Phase sind die Massenströme zunächst klein, sodass nicht mit einer idealen Verteilung zu rechnen ist. Somit werden einige Rohre schon mit Energie beladen, während andere noch nicht durchströmt werden. Allerdings wurden bei der Konstruktion des Speichers bauliche Maßnahmen vorgesehen, die eine ungleiche Verteilung der Dampfmasseströme minimieren soll. Die Versuchsphase soll auch hier genauere Erkenntnisse liefern.

4.8.2 Entladung

In diesem Abschnitt werden insbesondere das dynamische Verhalten des Regelventils im Speisewasserzulauf des Speichers und die entsprechende Wechselwirkung zwischen dem Speicher und dem restlichen Anlagensystem des Heizkraftwerks bei der Entladung betrachtet. Von besonderem Interesse ist dabei, ob die notwendige Umschaltzeit des Regelventils von ca. 30 Sekunden bei einer maximalen Reaktionszeit des Besicherungsprozesses von 2 Minuten eine ausgeprägte Rolle spielt. Für eine entsprechende Bewertung des Umschaltvorgangs wurde zunächst das dynamische Verhalten des Regelventils untersucht und anschließend eine Simulation der Speicheranlage mit transienten Randbedingungen durchgeführt. Die Ergebnisse sollen zeigen, ob die Mindestanforderungen für Druck und Temperatur an der Mischstelle bzw. am Speicheraustritt eingehalten werden.

Untersuchung des dynamischen Verhaltens des Regelventils

Das eingesetzte Regelventil vom Typ MV 5311 befindet sich im Speisewasserzulauf des Latentwärmespeichers (s. Abbildung 4-30, zum Vergleich des Gesamtsystems, siehe Abbildung 4-1) und kann über einen elektrischen Stellmotor stufenlos geöffnet und geschlossen werden.

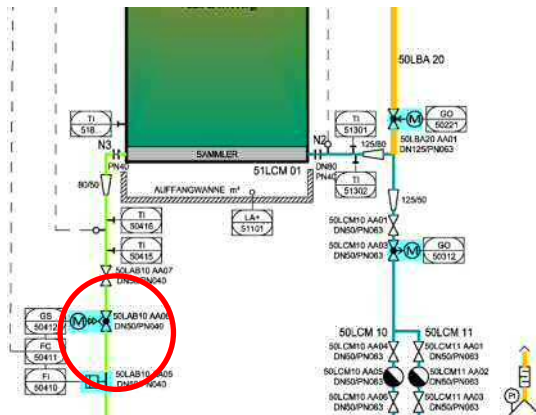


Abbildung 4-30: Regelventil in der Speisewasserleitung des Latentwärmespeichers

Wesentliche Eingabeparameter für die transiente Simulation der Speicheranlage sind die Umschaltzeit des Regelventils sowie die zeitliche Änderung des Massenstroms und der Temperatur des Speisewassers am Speichereintritt. Die Umschaltzeit kann über den Hub des Ventils und die Stellgeschwindigkeit des Motors bestimmt werden. Anhand der technischen Daten aus Tabelle 4-4, ergibt sich eine Umschaltzeit von 34 Sekunden bis das Ventil einen Hub von 100% erreicht und somit voll geöffnet ist. Für diese Ventilstellung wird der maximal mögliche Volumenstrom mit einem K_{VS} -Wert von 24 m^3/h angegeben. Darüber hinaus weist das betrachtete Regelventil eine lineare Kennlinie auf.

Tabelle 4-4: Technische Daten des Motorregelventils mit elektrischem Stellantrieb

Baureihe Motorregelventil	-	MV 5311
Kegelform	-	Kronenkegel, metallisch dichtend
Kennlinie/Anströmung	-	Linear/ auf den Kegel
Nennweite/Nenndruck	DN/PN	50/40
Sitzdurchmesser	mm	32
K_{VS} -Wert	m^3/h	24
Elektrischer Stellantrieb	-	ST 5113-35
Stellgeschwindigkeit	mm/s	0,44
Hub	mm	15

Die Volumenströme für Ventilstellungen zwischen 100% und 0% können über den K_V -Wert berechnet werden.

$$\frac{Q}{Q_{100\%}} = \frac{h}{h_{100\%}}$$

(4-1)

Der K_V -Wert entspricht dem Volumendurchfluss einer Flüssigkeit mit einer Dichte von 1000 kg/m^3 , der bei einem bestimmten Hub und einer Druckdifferenz von 1 bar durch das Regelventil fließt. Ist der K_V -Wert bekannt, kann durch entsprechende Umformung von Gleichung (4-1) der Speisewasservolumenstrom bestimmt werden. Dabei ist die entsprechende Dichte des Speisewassers und die Druckdifferenz zwischen Ventileintritt und Ventilaustritt zu berücksichtigen. Diese wird durch physikalische Gegebenheiten festgelegt, insbesondere durch den Druckverlust des Rohrleitungsnetzes. Für den betrachteten Fall ergibt sich bei voll geöffnetem Ventil eine Druckdifferenz von 0,3 bar. Die Werte für das geschlossene Ventil und für Ventilstellungen zwischen 100% und 0% sind nicht bekannt. Daher wird für eine grobe Abschätzung des Speisewassermassenstroms bei geschlossenem Ventil der maximale Pumpendruck zugrunde gelegt und ein linearer Druckabfall über die Umschaltzeit angenommen. Darüber hinaus werden potenzielle Einschwingeffekte während der Umschaltung nicht berücksichtigt. Zum Vergleich wird die zeitliche Änderung des Speisewassermassenstroms mit einer

konstanten Druckdifferenz von 0,3 bar bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-31 dargestellt.

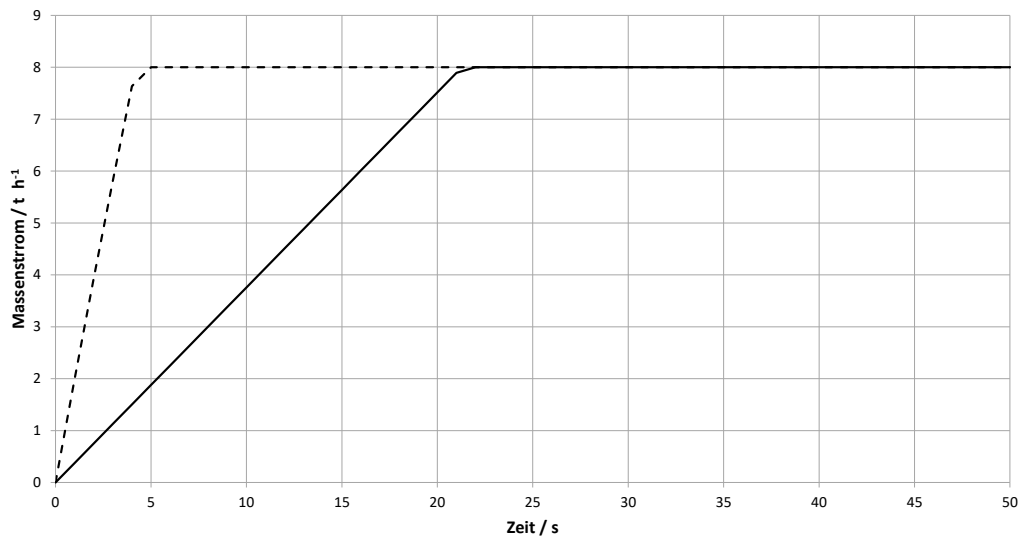


Abbildung 4-31: Berechneter Speisewassermassenstrom für die Entladung während der Öffnung des Regelventils. Die schwarze Linie zeigt den Massenstrom bei konstanter Druckdifferenz und die gestrichelte Linie bei linearem Druckabfall am Ventil.

Die schwarze Kurve zeigt den zeitlichen Verlauf des Speisewassermassenstroms bei konstanter Druckdifferenz und die gestrichelte Kurve bei linearem Druckabfall während der Öffnung des Regelventils. Der für die Entladung erforderliche Massenstrom von 8 t/h wird bei linearem Druckabfall nach ca. 5 Sekunden und bei konstanter Druckdifferenz nach ca. 22 Sekunden erreicht. Da sich eine längere Zeitdauer stärker auf das Verhalten des Latentwärmespeichers auswirkt, wird der zeitliche Verlauf des Speisewassermassenstroms bei konstantem Druckabfall im Regelventil als transiente Randbedingung bzw. Eingabeparameter für die Simulation verwendet. Dadurch soll der theoretische Extremfall zugrunde gelegt werden.

Simulation der Speicheranlage mit transienten Randbedingungen

Für den Auslegungsfall ist eine Speisewassertemperatur von 103 °C am Speichereintritt vorgesehen. Kommt es zu längeren Stillstandszeiten, kühlt das Speisewasser in der Zuleitung des Speichers ab, insbesondere im Außenbereich der Anlage. In diesem Fall strömt bei der Öffnung des Regelventils zunächst eine bestimmte Menge an Speisewasser von geringerer Temperatur in den Latentwärmespeicher. Geplant ist, diese Abkühlung durch eine wiederkehrende seichte Durchströmung zu minimieren. Analog zum Massenstrom soll auch für die Eintrittstemperatur des Speisewassers hier der Extremfall untersucht werden. Daher wird dem Speicher bei der Simulation zunächst ein Speisewasservolumen von ca. 80 Litern mit einer Temperatur von 10 °C zugeführt. Dieses Volumen ergibt sich aus dem Volumen des Sammlers und dem Volumen der Speisewasserzuleitung bis zur Anbindung an das bestehende Rohrleitungsnetz. Unter Berücksichtigung der zeitlichen Änderung des Massenstroms wird nach einer Entladedauer von 47 Sekunden die Auslegungstemperatur von 103 °C am Speichereintritt erreicht.

Im Rahmen dieser Untersuchung wurde die Speicheranlage mit diesen transienten Randbedingungen simuliert. Zusätzlich soll eine Parametervariation den Einfluss unterschiedlicher Wärmeübergangskoeffizienten verdeutlichen. Als Anfangsbedingung wurden eine Speichertemperatur von 350 °C und eine Außentemperatur von 10 °C zugrunde gelegt. Die Ergebnisse sollen zeigen, ob sich das dynamische Verhalten des Regelventils während der Umschaltzeit wesentlich auf die Betriebsparameter am Speicheraustritt bzw. an der Mischstelle auswirkt. Nach dem „Lastenheft für die Latentspeicheranlage“ vom 21. Mai 2014 bedeutet das für die

Speicheranlage, dass nach einem Ausfall des Abhitzekessels spätestens nach 2 Minuten eine Minimaltemperatur von 290 °C und ein Minimaldruck von 21,5 bar an der Mischstelle bereitgestellt werden muss.

Abbildung 4-32 zeigt die berechnete Dampftemperatur am Speicheraustritt für verschiedene Wärmeübergangskoeffizienten in den ersten 2 Minuten der Entladung. Der Temperaturabfall zu Beginn resultiert aus der zeitlichen Änderung des Speisewassermassenstroms, der nach 22 Sekunden einen Wert von 8 t/h erreicht. Der Sprung nach einer Entladedauer von 47 Sekunden markiert den Zeitpunkt, an dem sich die Temperatur des Speisewassers am Eintritt des Speichers von 10 °C auf 103 °C erhöht. Für die ersten 3 Sekunden mussten die Dampftemperaturen extrapoliert werden, da bei sehr kleinen Massenströmen numerische Instabilitäten auftreten. Deshalb sind die Linien in diesem Bereich gestrichelt dargestellt. Die Variation der Wärmeübergangskoeffizient zeigt, dass sogar bei einem verhältnismäßig geringen Wert von 500 W/m²/K die Minimaltemperatur von 290 °C deutlich überschritten wird und dass der Einfluss des Wärmeübergangskoeffizienten auf das Verhalten der Speicheranlage bei Werten > 8000 W/m²/K abnimmt.

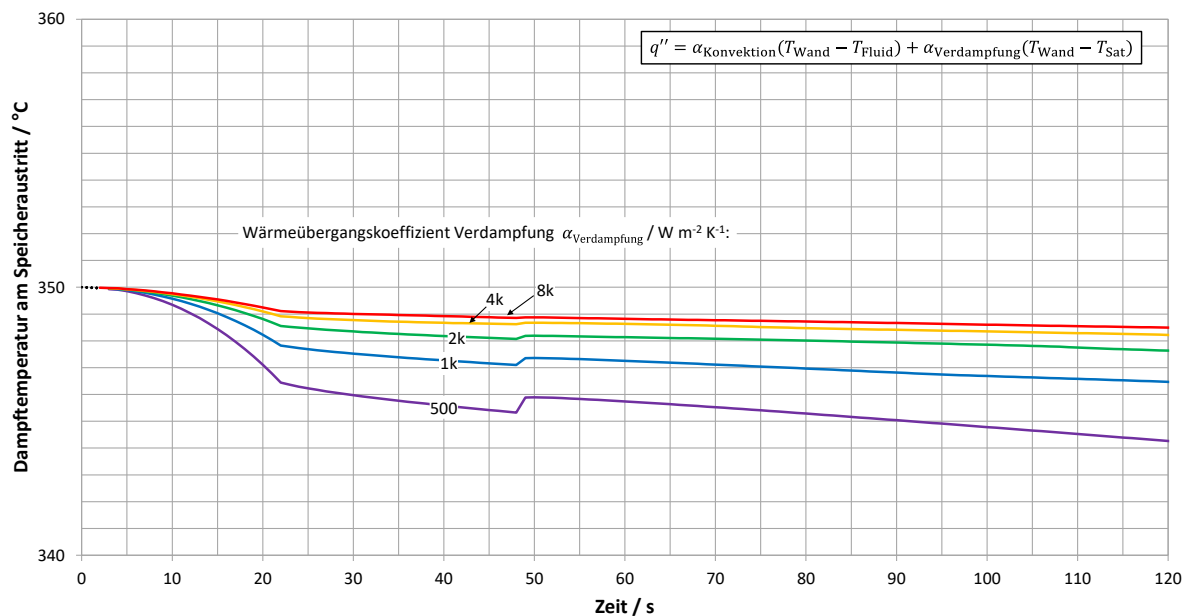


Abbildung 4-32: Berechnete Dampftemperatur am Speicheraustritt für verschiedene Wärmeübergangskoeffizienten bei der Entladung.

In Abbildung 4-33 wird der Dampfdruck am Austritt des Speichers für verschiedene Wärmeübergangskoeffizienten in den ersten 2 Minuten der Entladung dargestellt. Hier zeigt sich, dass sich weder das dynamische Verhalten des Regelventils noch die Variation der Wärmeübergangskoeffizienten wesentlich auf die Druckdifferenz zwischen Speichereintritt und Speicheraustritt auswirken. Der Minimaldruck von 21,5 bar wird deutlich überschritten.

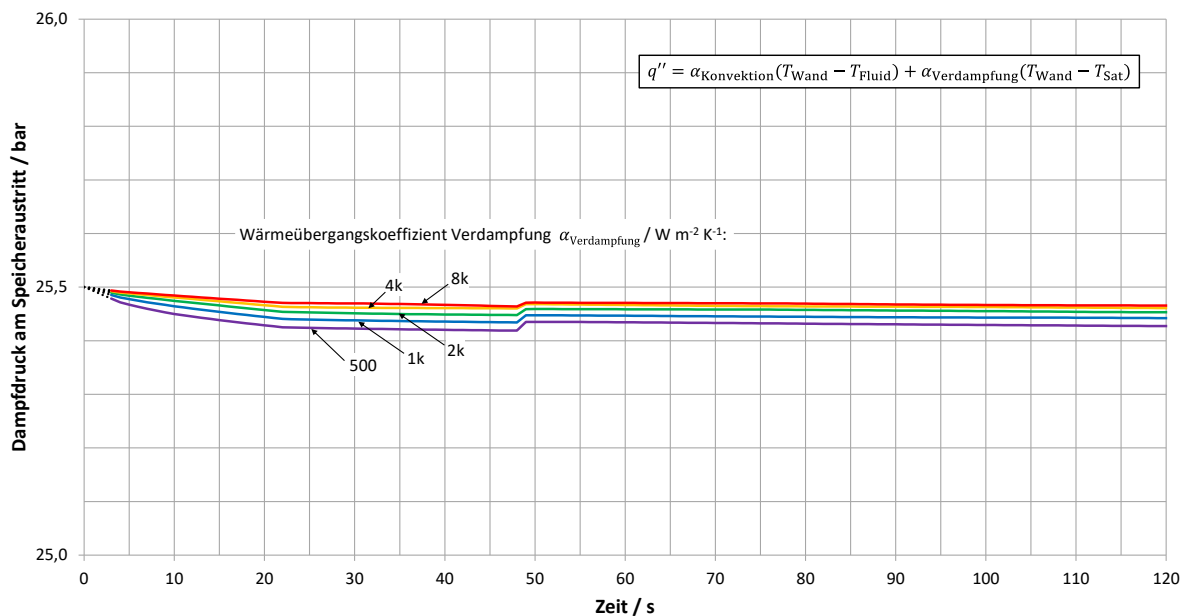


Abbildung 4-33: Berechneter Dampfdruck am Speicheraustritt für verschiedene Wärmeübergangskoeffizienten bei der Entladung.

Zusammenfassung der betrachteten Entladung

Die vorgestellten Simulationsergebnisse zeigen, dass durch die notwendige Umschaltzeit des Regelventils auch bei extrem angenommenen Bedingungen keine wesentlichen Beeinträchtigungen der Austrittsparameter an der Speicheranlage zu erwarten sind. Trotz der im Verhältnis zur maximalen Reaktionszeit des Besicherungsprozesses von 2 Minuten langen Umschaltzeit von 34 Sekunden, kann die Besicherung regelungstechnisch erfolgreich erreicht werden.

4.8.3 Zusammenfassung

Die verschiedenen Simulationen zum Thema Auslegung von Bypassfahrweise und Ventilbetrieb zur Beladung und Einhaltung der geforderten Umschaltzeit bei der Entladung haben zum einen gezeigt, dass während der Beladung nur wenig Kondensat und wenig Dampf anfällt, welche nicht zur Dampfschiene beigemischt werden können. Zum anderen haben die Betrachtungen zur Entladung ergeben, dass durch die realen Schaltzeiten der Ventile, die Einhaltung der schnellen Umschaltzeit von 2 Minuten nicht gefährdet wird. Zu beiden Betriebsmodi – Beladung und Entladung – werden die Ergebnisse aus der Versuchsphase im Anschlussvorhaben weitere Information liefern.

AP 5 Inbetriebnahme und Betrieb des PCM-Speichers im HKW Wellesweiler (SNE, DLR)

Inhaltsverzeichnis

AP 5.1	Inbetriebnahme des PCM-Speichers (SNE, DLR)	5-1
5.1.1	Inbetriebnahme ohne PCM (SNE).....	5-1
5.1.2	Speicherbefüllung (DLR)	5-3
5.1.3	Planung der Befüllung (DLR).....	5-4
5.1.4	1. Speicherbefüllung (DLR)	5-5
5.1.5	1. Aufheizen und aktives Abkühlen (SNE)	5-6
5.1.6	2. Speicherbefüllung (DLR)	5-6
5.1.7	2. Aufheizen und aktives Abkühlen (SNE)	5-7
5.1.8	3. Speicherbefüllung (DLR)	5-7
5.1.9	3. Aufheizen und aktives Abkühlen (SNE)	5-7
5.1.10	Schadensbetrachtung und Schutz vom Speicher (DLR).....	5-7
5.1.11	FEM-Berechnung der Schadensmechanismus (DLR)	5-10
AP 5.2	Analyse der Speicherperformance und Betriebsoptimierung (DLR, SNE).....	5-10
5.2.1	Betrachtung der Ergebnisse vom 2. aktiven Abkühlen (DLR).....	5-11
5.2.2	Betrachtung der Ergebnisse vom 3. aktiven Abkühlen (DLR).....	5-11
AP 5.3	Regulärer Speicherbetrieb (SNE).....	5-13
AP 5.4	Beladezustandsbestimmung mittels RADAR (DLR).....	5-13

AP 5.1 Inbetriebnahme des PCM-Speichers (SNE, DLR)

Die Inbetriebnahme ist ein Prozess aus mehreren Schritten, mit dem Ziel, dass System in seinen Teilen und als Ganzes in Betrieb zu nehmen, um anschließend eine Versuchsphase durchführen zu können. Zu Beginn wurde das Speichersystem von Schweiß- und Montagepartikeln durch den Prozess des Ausblasens gereinigt. Der nächste Schritt war das iterative Befüllen mit Speichermaterial NaNO_3 . Nach jeder Befüllung wurde das System und vor allem der Speicherinhalt auf eine Temperatur oberhalb der Schmelztemperatur des NaNO_3 (306 °C) erhitzt, um die Salzpartikel aufzuschmelzen und zusammenfallen zu lassen. Danach wurde durch eine aktive Entladung (Abkühlung durch Kesselspeisewasser) das Speichermaterial wieder erstarrt. Die aktive Kühlung bringt das System jedoch nicht unter 100 °C, so dass danach passiv gekühlt wird – sprich: gewartet – bis es Arbeitssicherheitstechnisch möglich ist, weiter zu befüllen.

Während der Heiz- und Kühl- bzw. Belade- und Entladephasen wurden schon erste Lernschritte mit dem System durchgeführt, so dass die Anpassungen von Ventilstellungen oder Schaltungen durchgeführt werden konnte.

Es wurden drei Befüllvorgänge durchgeführt. Zum einen dauert die passive Kühlung lange, zum anderen müssen sowohl die Befüllvorgänge als auch die Aufheiz- und aktiven Abkühlphasen mit dem Kraftwerk, mit SNE und mit DLR koordiniert werden, inklusive der notwendigen Bestellungen von z.B. Hubsteiger für die Befüllvorgänge. Bei der 3. Aufheizung trat eine Leckage auf, so dass zunächst nicht weiter befüllt werden kann. Die Befüllvorgänge sind also noch nicht komplett abgeschlossen.

Am Ende der Befüllung ist der nächste Schritt der Inbetriebnahme der Durchführung der Versuchsphase. Diese wurde im Projekt nicht durchgeführt. Die verschiedenen durchgeführten Vorgänge sind nachfolgend erläutert, sowie die aktuellen Erkenntnisse zum weiteren Vorgehen.

5.1.1 Inbetriebnahme ohne PCM (SNE)

Als erste Maßnahme der Inbetriebnahme ist der Vorgang des Ausblasens durchzuführen. Hierzu wurden notwendige temporäre Umbauten durchgeführt. Ende Juni 2020 wurde die Anlage sicherheitstechnisch sowohl von der Verfahrensseite, als auch von der Leittechnik vom TÜV als Voraussetzung für den Ausblaseprozess abgenommen. Im Vorfeld wurden die Genehmigungsbehörde, Ordnungsamt,

Feuerwehr und Polizei informiert, dass es während der Ausblasvorgänge zu nicht unerheblichen Lärmemissionen kommt.

Der eigentliche Ausblaseprozess wurde am 10.07.2020 erfolgreich durchgeführt. Der Speicher wurde zuerst mehrmals mit Kesselspeisewasser geflutet, welches dann abgelassen wurde. Nach diesem Vorwärmen durch das Speisewasser mit etwa 106 °C wurde der Speicher mehrmals mit Dampf beaufschlagt und zwar sowohl von oben nach unten, als auch von unten nach oben. Der Dampf konnte sodann über einen provisorischen Schalldämpfer im Bereich der Kondensomaten, bzw. über den fest installierten Schalldämpfer über Dach auf Atmosphärenbedingungen entspannen. Durch dieses Prozedere wurde sichergestellt, dass mögliche Ablagerungen und Korrosionsprodukte aus den Dampfrohren mitgerissen und entfernt wurden. Dieser Prozess ist notwendig, damit im späteren Betrieb keine Schäden an nachgelagerten Armaturen oder Anlagen durch mitgerissene Teilchen im Dampf auftreten können. Der Nachweis der „Dampfreinheit“ erfolgte durch sogenannte Spiegel, polierte Kupferplatten, welche in die Ausblaseleitung eingebaut worden waren und bei jedem Ausblasevorgang gewechselt wurden. So konnte eine deutliche Reduzierung der Einschläge bis unter die Nachweisgrenze nachgewiesen werden. Bilder vom Ausblasen sind in Abbildung 5-1 dargestellt.

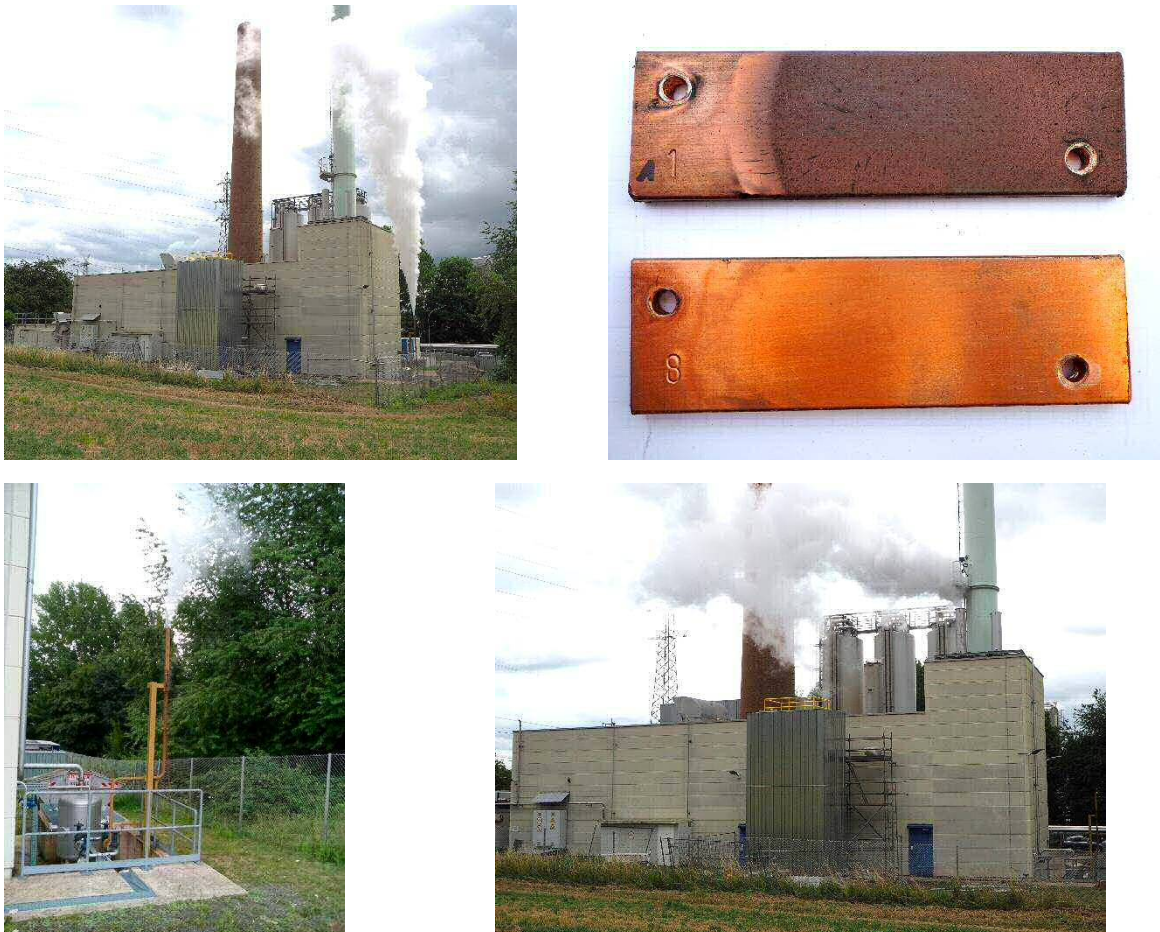


Abbildung 5-1: Links oben: Ausblasvorgang von oben nach unten durch den Speicher. Rechts oben: 1. und 8. Spiegel vom Ausblasen. Links unten: Umbau am Kondensomat für das Ausblasen. Rechts unten: Ausblasvorgang von unten nach oben durch den Speicher.

Danach wurden die Umbauten für den Prozess des Ausblasens wieder rückgebaut und die Anlage vom TÜV für die eigentliche Inbetriebnahme abgenommen.

Die vorgenannten Arbeiten wurden wegen der COVID-19 Pandemie und damit einhergehend wegen der hohen Sicherheits- und Hygienevorschriften in diesem systemrelevanten Betrieb nur mit Verzögerung und entsprechendem Aufwand umgesetzt.

5.1.2 Speicherbefüllung (DLR)

Der Speicher wird mit Natriumnitrat befüllt. Für eine Anwendung in dieser Größe ist ein technisch reines Salz eine gute Lösung: dieses ist deutlich günstiger als ein sehr reines ‚suprapure‘, hat aber trotzdem geringe Unreinheiten. Wichtig für den Speicherbehälter ist, dass das Salz Chlorid-arm ist. Ein technisch reines Salz hat eine Zusammensetzung von ca. 99,2% NaNO_3 und 0,18% Cl. Dieses Salz kann in verschiedenen Formaten geliefert werden.

Die Möglichkeit, den Speicher mit sogenannten ‚Prills‘ zu befüllen statt Salz in Pulverform wurde untersucht. Prills, zu Deutsch Granalien, sind kleine Aggregate oder Kügelchen, geformt aus der Flüssigkeit. Diese Bezeichnung wird meist für Metalle verwendet. Prills haben verschiedene Vorteile für die Befüllung. Zum einen gibt es eine geringere Staubentwicklung während der Befüllung, da die Kugeln wegen der Form diese nicht begünstigen. Zum anderen ist mit Prills eine deutlich schnellere Befüllung möglich. Zum einen lassen sich diese besser aus den 25 kg Säcken schütten, zum anderen haften die Prills beim Einfüllen nicht an den Leitstrukturen, auch aufgrund des größeren Gewichtes der einzelnen Kugeln, so dass die Leitstrukturen über die Befüllzeit nicht zugesetzt werden

Es wurden Proben aus reinstem Pulver, technisch reinem Pulver, sowie aus Prills untersucht. Proben wurden aufgeschmolzen und optisch miteinander verglichen. Bilder des technisch reinen Pulvers sowie von den Prills sind in Abbildung 5-2 zu sehen; beide Proben haben keine Schaumbildung aufgewiesen.

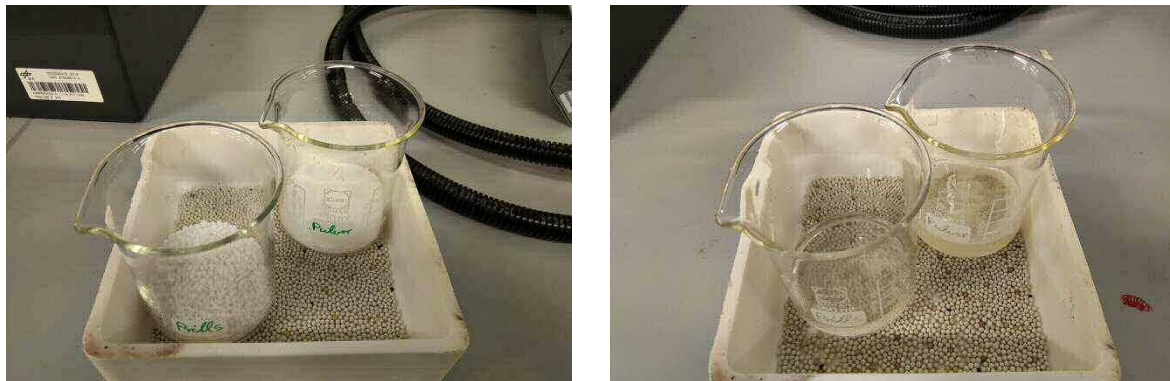


Abbildung 5-2: Links: Proben von Prills und Pulver vor der Aufschmelzung. Rechts: Gleiche Proben nach der Aufschmelzung.

Abbildung 5-3 zeigt die DSC (differential scanning calorimetry) Signale der vierten Messzyklen der Proben. Es ist zu erkennen, dass von den drei untersuchten Proben ‚ NaNO_3 suprapure‘ die höchste Schmelztemperatur (306,3 °C) und den größten Temperaturunterschied zwischen Beginn und Ende des Schmelzprozesses (9,3 K) aufweist (s. die Kurven über Null.). Dies kann auf die hohe Reinheit der Probe zurückgeführt werden, da die kaum vorhandenen Verunreinigungen keinen Einfluss auf die Schmelztemperatur und den Temperaturbereich des Schmelzprozesses haben. Der Einfluss der Verunreinigungen (Schmelzpunkterniedrigung) auf die thermischen Eigenschaften der Materialien kann in den beiden anderen Proben beobachtet werden; ‚Cofermin Prills‘ und ‚Cofermin Kristalle‘ haben geringere Reinheiten und daher etwas niedrigere Schmelztemperaturen: 305,2 °C bzw. 304,4 °C. Außerdem ist der Temperaturbereich des Schmelzprozesses zwischen diesen beiden Proben leicht unterschiedlich. ‚Cofermin-Kristalle‘ hat den kleinsten Temperaturbereich für den Schmelzprozess (7,9 K). Außerdem ist zu erkennen, dass die Proben ‚Cofermin-Prills‘ und ‚Cofermin-Kristalle‘ im Vergleich zur Probe ‚ NaNO_3 suprapure‘ eine geringere Differenz zwischen Liquidus- und Solidustemperatur aufweisen. Dies kann auch auf den Gehalt an Verunreinigungen in den ersten beiden Proben zurückzuführen sein. Schließlich dient die Differenz zwischen den Temperaturen am Ende des Schmelz- und Erstarrungsvorgangs der Proben als Grundlage für die Abschätzung der Temperaturbereiche für die Be- und Entladung des Wärmespeichersystems.

Dennoch lässt sich festhalten, dass die beschriebenen Temperaturunterschiede zwischen den NaNO_3 -Pulvern und den NaNO_3 -Prills sehr gering und innerhalb akzeptabler Grenzen sind. In allen Fällen werden die Schmelz- und Erstarrungsvorgänge im Temperaturbereich zwischen 290 °C und 320 °C abgeschlossen.

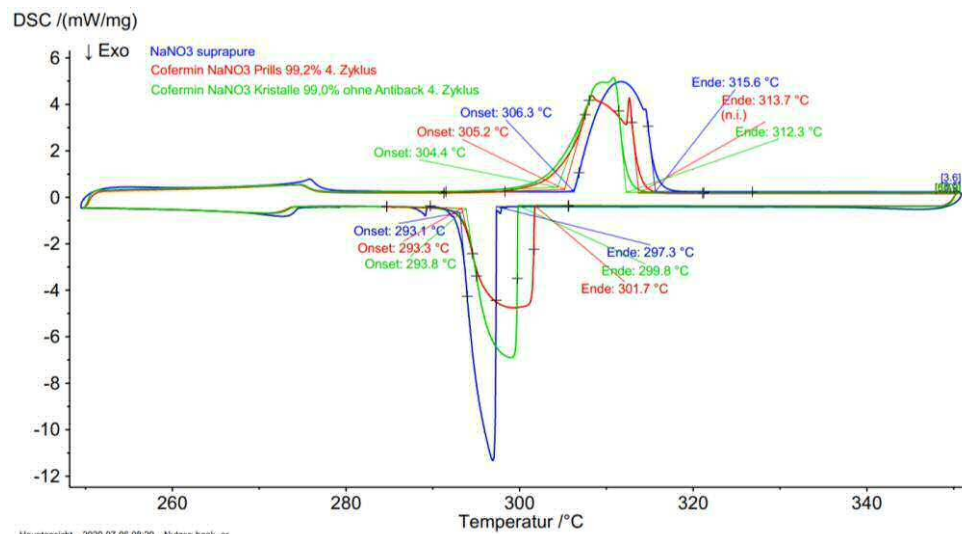


Abbildung 5-3: DSC Messungen von Prills, technisch reinem sowie reinstem Natrium Nitrat (NaNO_3).

5.1.3 Planung der Befüllung (DLR)

Für die Planung der Befüllung waren verschiedene Aspekte wichtig. Zum einen musste das Salz termingerecht geliefert werden, so dass es am Lagerplatz nicht lange normaler Luftfeuchtigkeit ausgesetzt ist. Eine Gefährdungsbeurteilung für die Befüllungsarbeiten wurde erstellt und die notwendige Sicherheitsausrüstung wurde bereitgestellt. Die Planung wurde wegen der Corona-Pandemie erschwert.

Salz in geprillter Form wurde für das Speichermaterial ausgewählt. Steag New Energies hat die Salzbestellung durchgeführt, und DLR hat den Kostenunterschied zwischen geprilltem und pulverförmigen Salz übernommen, da die Befüllung mit geprillter Qualität für DLR einen erheblich geringeren Arbeitsaufwand bedeutet.

Dadurch, dass das rieselfähiges Salz eine geringere Dichte hat als sowohl flüssiges Salz bei der höchstmöglichen Systemtemperatur (350 °C) als auch wie das erstarrte Salz im Block (siehe Tabelle 5-1), kann nur ein Teil des Salzes in jedem Befüllvorgang eingefüllt werden.

Tabelle 5-1: Dichte von Natriumnitrat in verschiedenen Zuständen

Zustand	Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)	Dichte (kg/m^3)
Prills	25	1230
Erstarrt im Block	25	2260
Flüssig	306	1908
Flüssig	350	1874

Da auch das tatsächlich verfügbare Volumen im Speicher nur ungenau bestimmbar ist, musste abgeschätzt werden, wie viel Salz zu jeder Befüllung eingefüllt werden kann. In der Zeichnung des Speichers ist notiert, dass $16,92\text{ m}^3$ Volumen für das Speichermaterial verfügbar sind. Der Speicher ist allerdings mit Transportversteifungen versehen (siehe AP 4.7), die hier nicht berücksichtigt sind. Auch führen Schweißnähte und Unebenheiten bzw. Wölbungen an den Wänden insgesamt zu Unsicherheit in dem Volumen.

Es wurde bei der 1. Befüllung nicht die maximal eingeschätzte mögliche einfüllbare Menge – $20,8\text{ t}$ – geliefert, sondern eine Menge an Prills, die sicherlich eingefüllt werden können – 18 t , um zu vermeiden, dass Salz herumsteht und aushärtet. Die restlichen Paletten wurden in der 2. Charge geliefert. Für jeden Befüllvorgang wurden 1-3 Tage Befüllung vorgesehen. Die entsprechenden Aufheiz- und Abkühlvorgänge zum Aufschmelzen der gesamten Salzmenge im Speicher nehmen entsprechend viel Zeit in Anspruch. Pro Befüllvorgang mit Aufheizen (Aufschmelzen) und anschließendem aktiven Abkühlen muss etwa eine Woche gerechnet werden; hinzu kommen mehrere Wochen passives Abkühlen, bis wieder weiteres Salz nachgefüllt werden kann.

Für die ersten beiden Befüllvorgänge war es möglich, dass DLR für die Befüllung angereist ist. Wegen der durch die Corona Pandemie verursachten Reisebeschränkungen im Herbst war es danach nicht

mehr möglich, die Befüllungen selber durchzuführen. Die dann noch einzufüllenden Mengen waren allerdings nicht mehr bedeutend und es waren keine Sonderaufgaben notwendig, so dass die Beauftragung einer Fremdfirma hierfür möglich war.

Die ausgerechneten und tatsächlich befüllten Mengen an Salz sind in Tabelle 5-2 dargestellt. Die Abläufe der Befüllungen sowie Aufheizphasen werden anschließend kurz erläutert. Der Speicher war am Ende der 3. Befüllung zu 96 % befüllt.

Tabelle 5-2: Eckdaten der Befüllmengen und -volumen

Einheit	Freiraum, 25 °C <i>m</i> ³	Theoretischer Salzmasse bei 350 °C in die- sem Freiraum <i>t</i>	-- Anzahl an Säcke für diese Masse	Maximale Masse in Prills in diesem Freiraum <i>t</i>	Salz- masse im Speicher <i>t</i>	Befüllgrad %
Leer	16,92	31,7	1268,4	20,8	-	0
Nach 1. Befüllung	8,9	13,7	548,4	11	18	57
Nach 2. Befüllung	4,7	4,1	164,4	5,8	27,6	87
Nach 3. Befüllung	3,5	1,4	56,4	4,3	30,3	96

5.1.4 1. Speicherbefüllung (DLR)

Die Befüllung wurde mittels einer Hebebühne und einem Gabelstapler durchgeführt. Die Mitarbeiter des DLR sind mit Sicherheitsgeschirr und Geländer am Speicher gesichert. Ein an der Seite des Speichers von Steag bereitgestelltes Gerüst diente als Notabstieg.

Die Lieferung der 1. Charge des Salzes erfolgte am 27. Juli 2020. Insgesamt wurden bei dieser Befüllung 18 t, oder 15 Paletten/720 Säcke, eingefüllt. Es hat sich gezeigt, dass sich das geprillte Salz hervorragend aus den Säcken entleeren lässt. Impressionen der Befüllung sind in Abbildung 5-4 gezeigt.



Abbildung 5-4: Links oben: Befüllung des Speichers mit den ersten Säcken. Rechts oben: Prills fallen aus einem Sack Salz. Links unten: Ansicht des Speichers von oben, gefüllt mit Salz. Rechts unten: Detailansicht nach der 1. Befüllung.

5.1.5 1. Aufheizen und aktives Abkühlen (SNE)

Das erste Aufheizen dauerte von 17.08. bis zum 19.08.2020; an diesem Tag wurde aktiv mit Kessel-speisewasser der Speicher entladen, das Salz zum Erstarren gebracht. Der entstandene Dampf aus dem Speicher wurde über Dach und Schalldämpfer abgeleitet.

5.1.6 2. Speicherbefüllung (DLR)

Für die 2. Befüllung musste gewartet werden, bis der Speicher passiv abgekühlt war. Arbeitssicher-liche Regelungen sehen vor, dass zu berührende Oberflächen maximal 60°C heiß sein sollen. Wie lange es dauert, bis der Speicher im oberen Bereich maximal 60 °C aufweist, um dort arbeiten zu können, ist abhängig von der Temperatur im Speicher nach der aktiven Kühlung, der Masse des sich bereits im Speicher befindlichen Salzes, sowie der Witterung. Um die passive Kühlung zu beschleunigen, ist DLR nach der aktiven Abkühlung angereist, um die obere Wärmedämmung zu entfernen.

Da der Speicher für eine Wärmespeicherung an sich ausgelegt ist und auch entsprechend gedämmt ist, dauerte die passive Abkühlung auf Arbeitstemperatur ca. 5 Wochen. Hier musste koordiniert werden, wann die Temperaturen genügend abgesunken sind, um die Lieferung der 2. Charge Salz sowie die Bestellung der Arbeitsgeräte für die Befüllung (Hebebühne, Gabelstapler) auszulösen.

Die 2. Befüllung erfolgte vom 24.-25.09.2020. Als weiterer Punkt bei dieser Befüllung war die Montage der RADAR-Sonde vorgesehen. Das Führungsrohr der Sonde ist ein 2 m langer Stab, weswegen dieser jetzt und nicht bei späteren Befüllvorgängen montiert werden musste. Mithilfe der Hebebühne wurde die Sonde von oben in den Speicher in den dafür vorgesehenen Führungsflansch eingebracht und eingeschraubt. Dafür musste das Geländer auf dem Speicher abgesägt werden. Die oberen Stangen des Geländers wurden anschließend wieder gesichert, so dass die Arbeitssicherheit auf dem Speicher gewährleistet ist. Abbildung 5-5 zeigt die Entladung vom LKW sowie den Aufbau der Arbeitsgeräte und die montierte RADAR-Sonde.

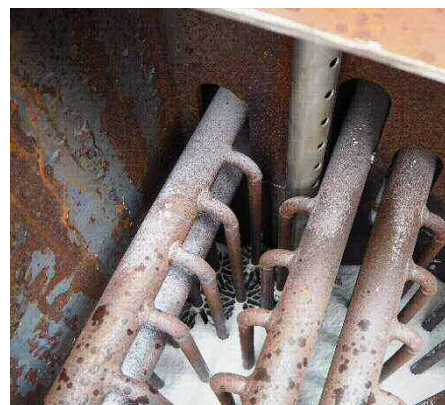
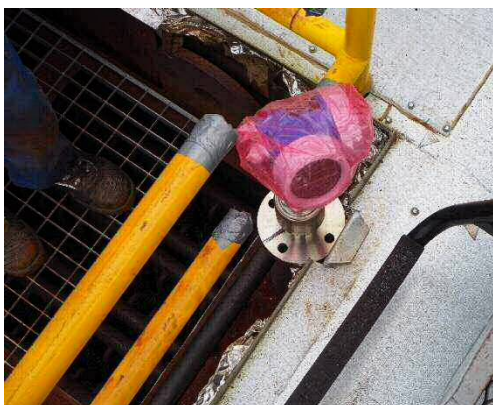


Abbildung 5-5: Links oben: Entladen des LKWs mit den restlichen Paletten NaNO₃. Rechts oben: Ansicht des Speichers mit Gabelstapler und Hebebühne während der Befüllung. Links unten: Montierte RADAR-Sonde. Rechts unten: Führungsstab der RADAR-Sonde im befüllten Speicher.

5.1.7 2. Aufheizen und aktives Abkühlen (SNE)

Das zweite Aufheizen erfolgte vom 28.09.2020 bis zum 30.09.2020. Das aktive Abkühlen wurde am 01.10.2020 eingeleitet. Der anfangs entstandene Dampf wurde in die Dampfschiene eingebracht; somit hat der Wärmespeicher erstmals überhitzten Dampf erzeugt, der zwar nur mit einem geringen Massenstrom aber dennoch zu den Abnehmern transportiert wurde.

5.1.8 3. Speicherbefüllung (DLR)

Wegen der hohen Inzidenzwerte für COVID-19, war zum geplanten Zeitraum der 3. Befüllung, November 2020, eine Reise von Stuttgart nach Wellesweiler von DLR aus untersagt. Dadurch, dass bei dieser Befüllung weder Messtechnik installiert werden musste noch der finale Füllstand bestimmt werden sollte, war eine Fremdeinfüllung möglich. Die Firma ARB wurde beauftragt, diese Befüllung durchzuführen. Die Befüllung mit 108 Säcken, 2,25 t, hat ARB am 18.11.2020 durchgeführt.

5.1.9 3. Aufheizen und aktives Abkühlen (SNE)

Das dritte Aufheizen erfolgte ab dem 26.11.2020. Bereits von Anfang an war ein leichter Dampfaustritt im oberen Speicherbereich zu sehen. Dies wurde auf die Verdampfung von eingedrungenem Regenwasser zurückgeführt, da es in den letzten Wochen stark geregnet hatte und auch die Abdeckung der oberen Isolierung für den dritten Befüllvorgang geöffnet worden war. Außerdem war kein außergewöhnlicher Druckabfall im System feststellbar. Am 28.11.2020 war immer noch leichter Dampfaustritt vorhanden; bei der Besichtigung der abgedeckten Auffangwanne wurde leichter Salzaustritt in die Auffangwanne festgestellt. Da die Menge gering war, wurde weiterhin der Aufschmelzvorgang fortgesetzt, bis der Speicherinhalt vollständig aufgeschmolzen war. Der aktive Abkühlprozess wurde sodann am 29.11.2020 eingeleitet. Dabei trat Wasser aus dem Speicherboden aus. Der entstandene überhitzte Dampf wurde anfangs wiederum in die Dampfschiene eingeleitet.

5.1.10 Schadensbetrachtung und Schutz vom Speicher (DLR)

Um die Schadensgröße und Schadensursache untersuchen zu können, wurde in der 51. KW 2020 die untere Isolation am Speicherboden mit den Sammlerrohren und das ausgetretene und erstarrte Salz in diesen Bereichen weitgehend entfernt. Eine detaillierte Besichtigung dieses Bereichs auch mit Lecksuchspray bei gleichzeitiger Beaufschlagung des Speichers mit Stickstoff wurde am 05. Januar 2021 durchgeführt. Bilder von dieser Schadensbetrachtung sind in Abbildung 5-6 dargestellt.

Die Untersuchungen ergaben, dass es 15 Leckagestellen auf der Salzseite gab und 40 auf der Dampfseite, wie in Abbildung 5-9 dargestellt. Diese Leckagestellen sind alle an den Enden der Quersammler. Die Salzleckagen sind an der Grenze zwischen Rohrplatte und Rohr; die Dampfleckagen an der Grenze zwischen Rohr und Rohrsammler.

Der Speicher wurde durch drei Firmen besichtigt, die gegebenenfalls eine Reparatur dieser Stellen machen können. Dadurch, dass der Speicher mit ca. 31 t Natriumnitrat befüllt ist, muss der Speicher vor Ort repariert werden. Der enge Rohrabstand von 70 mm macht die Einzelreparatur der Rohre nahezu unmöglich. Eine Reparatur, dass der Speicher dennoch mit genügend Kapazität und Leistung für den Betrieb im Kraftwerk geeignet bleibt, wird von allen drei Firmen als machbar betrachtet. Allerdings übersteigt diese Reparatur das noch offene Budget im Projekt TESIN.

Der Speicherboden wurde mittels Sandstrahlen gereinigt (Abbildung 5-7). Das Strahlgut hat eine Körnung zwischen 0,2-1,0 mm, und der Speicher wurde mit 4 bar Druck gereinigt. Circa 450 kg Strahlgut wurden hierfür verwendet. Durch die Reinigung wurden erst einige der dampfseitigen Leckagestellen sichtbar.

Anschließend wurde der Speicher mit einem Rostumwandler (L296 Korrostop-Rostumwandler von Förch) geschützt (siehe Abbildung 5-8). Somit ist der Speicher bis weitere Arbeiten in einem Anschlussvorhaben durchgeführt werden können geschützt.



(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 5-6: Schadensbetrachtung: (a) Untersuchungen mit Stickstoff; (b) ausgetretenes Salz in der Wärmedämmung; (c) Salzleckagen sichtbar; (d) Dampfleckagen mittels Leckspray sichtbar.



(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 5-7: (a) Reinigung des Speichers mittels Sandstrahlen; (b) linke Seite noch nicht bestrahlt, rechte Seite bereits gereinigt; (c) Strahlgut; (d) Dampfseitige Leckagestelle.



Abbildung 5-8: Speicher nach der Besprühung mit Rostumwandler.

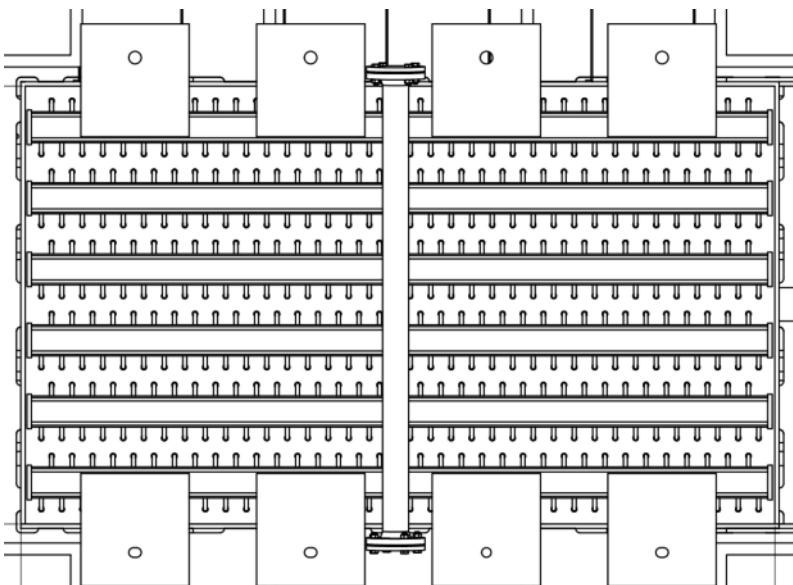
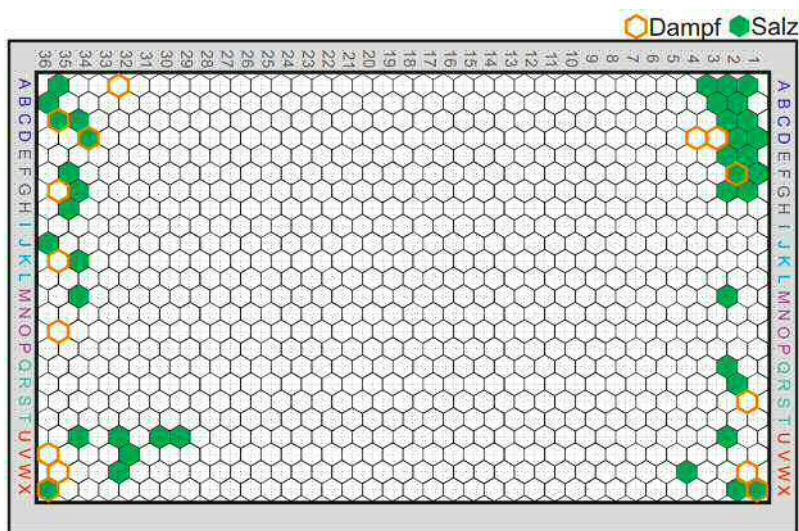


Abbildung 5-9: Schadensbild mit Dampfleckagen orange umrahmt und Salzleckagen grün gefüllt. Dargestellt sind die 852 Rippenrohre von oben. Die Leckagen sind unterhalb des Speichers im Bereich des Sammlers. Im unteren Bereich ist eine Zeichnung des Sammlers dargestellt, um die Ortung der Leckagen besser verständlich zu machen.

5.1.11 FEM-Berechnung der Schadensmechanismus (DLR)

Um besser verstehen zu können, warum dieser Schaden am Speicher entstanden ist, wurde der TÜV SÜD Industrie Service GmbH beauftragt, dies zu analysieren. Dieser betreut die Speicheranlage und müsste im Falle einer Wiederinbetriebnahme eine Freigabe erteilen.

Es wurden die Spannungen im unteren Sammler während der Entladung berechnet. Diese Berechnungen sind konservativ, dennoch geben sie gute Aussagen über die Auslegung. Abbildung 5-10 zeigt die Vergleichsspannungen am Anfang der Entladung.

Obwohl diese Parameter in der Ausschreibung für den Speicher bekannt und benannt waren, und dort auch auf diesen Zustand aufmerksam gemacht wurde, sind die berechneten Spannungen über dem zulässigen Limit. Da die Inbetriebnahme lange andauert hat, ist der Speicher aus jeglichem Gewährleistungszeitraum heraus.

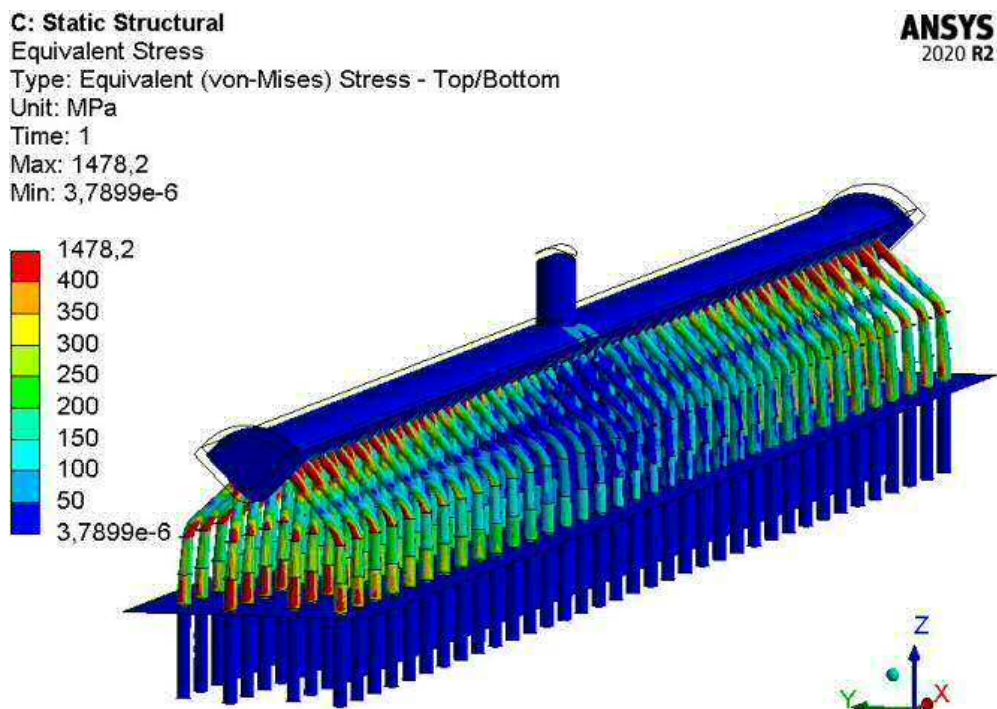


Abbildung 5-10: Berechnete Vergleichsspannungen während der Entladung.

Geklärt werden muss weiterhin, wie dieser Speicher im aktuellen Stand repariert werden kann, so dass er wieder in Betrieb genommen werden kann, ohne dass weitere Schäden auftreten. Hierfür gibt es verschiedene Varianten, die strömungstechnisch sowie fertigungstechnisch betrachtet werden müssen. Zudem muss die Restkapazität des Speichers bei möglichen Kürzungen der Rohrreihen noch die Systemanforderungen erfüllen, um diesen Aufwand zu rechtfertigen. Auch müssen während der Reparatur dem Arbeitsschutz (Arbeiten unter dem Speicher in der Auffangwanne) und dem Brandschutz (Natriumnitrat) besondere Beachtung gewidmet werden. Diese Betrachtungen können nur im bewilligten Anschlussvorhaben (FKZ 03EN4025, TESIN2) durchgeführt werden.

AP 5.2 Analyse der Speicherperformance und Betriebsoptimierung (DLR, SNE)

Obwohl der Speicher noch nicht vollständig mit Speichermaterial befüllt wurde, wurden die Messdaten aus der 2. sowie 3. Aufheizung und Abkühlung analysiert. Das Aufheizen erfolgte von nahezu Raumtemperatur und die gepörrte Salzpartikel wurden aufgeschmolzen. Dieser Vorgang ist nicht mit einer nominellen Beladung vergleichbar. Die Entladungen erfolgten vom aufgeheizten Zustand, also beladenem Zustand, auf eine so kalte Temperatur wie systemtechnisch erreichbar, und sind daher in den Anfangszeiten der Entladung nah an eine nominelle Entladung mit geringerer Speicherkapazität angelehnt. Betriebsoptimierungen waren während diesen Entladungen noch nicht möglich und werden im nachfolgenden Projekt TESIN2 durchgeführt.

5.2.1 Betrachtung der Ergebnisse vom 2. aktiven Abkühlen (DLR)

Abbildung 5-11 zeigt den Massenstrom im Speicher sowie Austrittstemperatur aus dem Speicher und übertragene Energie während der Entladung. Linien grenzen den Zeitraum ab, währenddessen Dampf in die Dampfschiene geleitet wurde. Hier wurde der Speicher von 9:22 bis 14:08 entladen. Zwischen 9:43 und 11:27 wurde Dampf in die Dampfschiene geleitet, mit einer gemittelten Leistung von 1,33 MWth und Massenstrom von 1,9 t/h. Es wurde in diesen Zeitraum ca. 0,9 MWh übertragen.

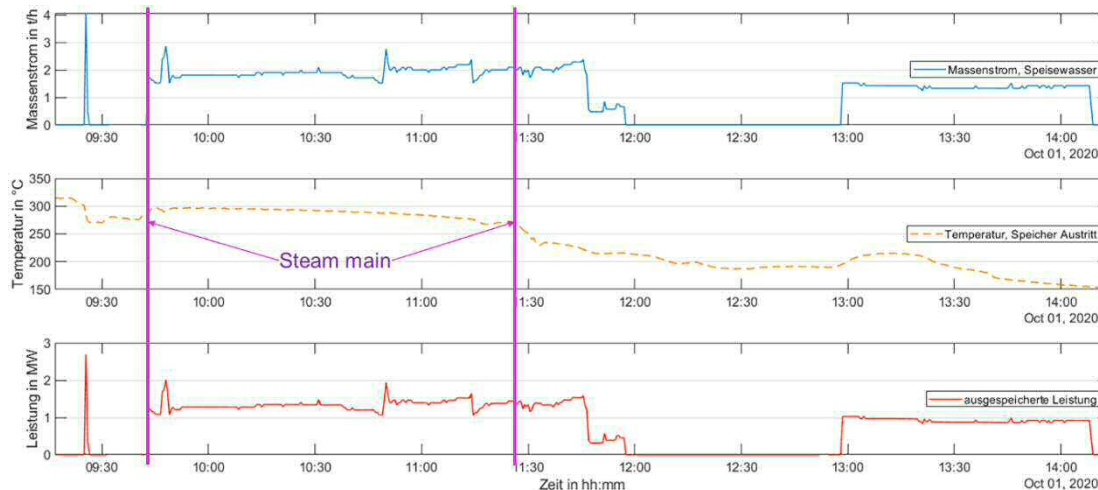


Abbildung 5-11: Massenstrom im Speicher sowie Austrittstemperatur aus dem Speicher und errechnete Leistung während der 2. Entladung.

5.2.2 Betrachtung der Ergebnisse vom 3. aktiven Abkühlen (DLR)

Abbildung 5-12 bis Abbildung 5-15 zeigen die Messwerte bzw. Ergebnisse aus dieser Abkühlung mit 96% eingefüllter Speicherkapazität. Abbildung 5-12 zeigt den Zeitraum der 3. Entladung, währenddessen Dampf in die Dampfschiene eingeleitet wurde. Der Speicher wurde von 10:11 bis 13:33 insgesamt, inklusive Pausen, entladen. Von 10:21 bis 11:05 wurde Dampf in die Dampfschiene geleitet. In diesem Zeitraum wurde Dampf im Speicher produziert mit einer Temperatur von $> 300\text{ °C}$, - wie gefordert, von 10:24 bis 10:53 – also für 29 Minuten. Mindestens notwendig sind 15 Minuten; in diesem Bereich wurden die erforderlichen Parameter erreicht. Es wurden in diesen 29 Minuten 2,15 MWh erzeugt. Diese Messungen sagen noch nichts aus, ob der Speicher die Energie nach einer Standbyzeit übertragen kann. Das muss in weiteren Untersuchungen geklärt werden. Auch ist zu klären, ob der Speicher nach seiner Reparatur diese Performance noch hat.

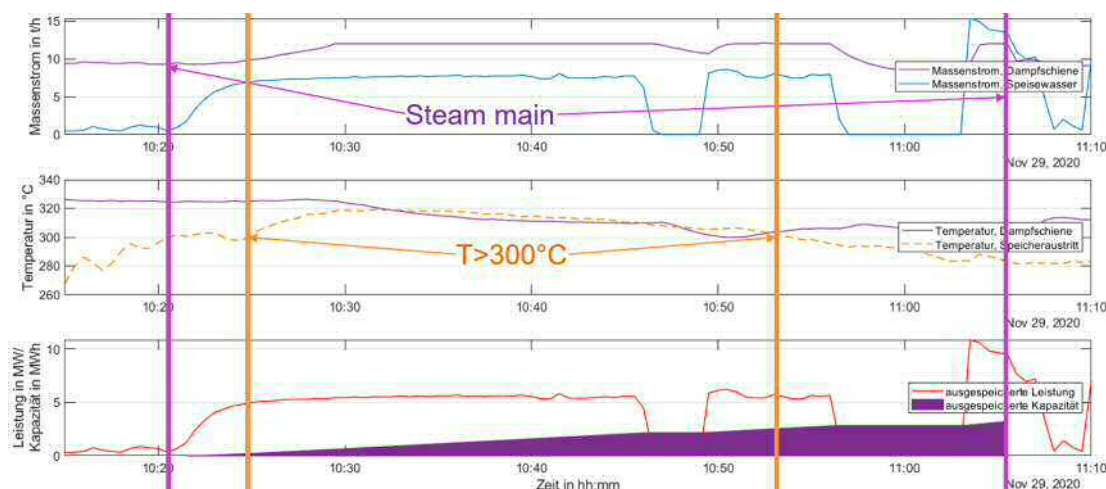


Abbildung 5-12: Massenstrom im Speicher und in der Dampfschiene, Austrittstemperatur aus dem Speicher und in der Dampfschiene und errechnete Leistung und Energie während der 3. Entladung.

In Abbildung 5-13 sind die Werte aller Thermoelemente im Speicher während der Entladung am 29.11.2020 dargestellt. Hier sieht man die Temperaturen während dieser vollständigen Entladung und die Erstarrungsfront im Speicher wird durch den gruppenweisen Abstieg der Temperaturen im Verlauf klar dargestellt. Nach und nach fallen die Temperaturen nach jeden Messquerschnitt steil ab oder erreichen ein Erstarrungsplateau. Nach einer ersten Einschätzung passen diese Ergebnisse gut zu den Simulationswerten aus der Auslegung.

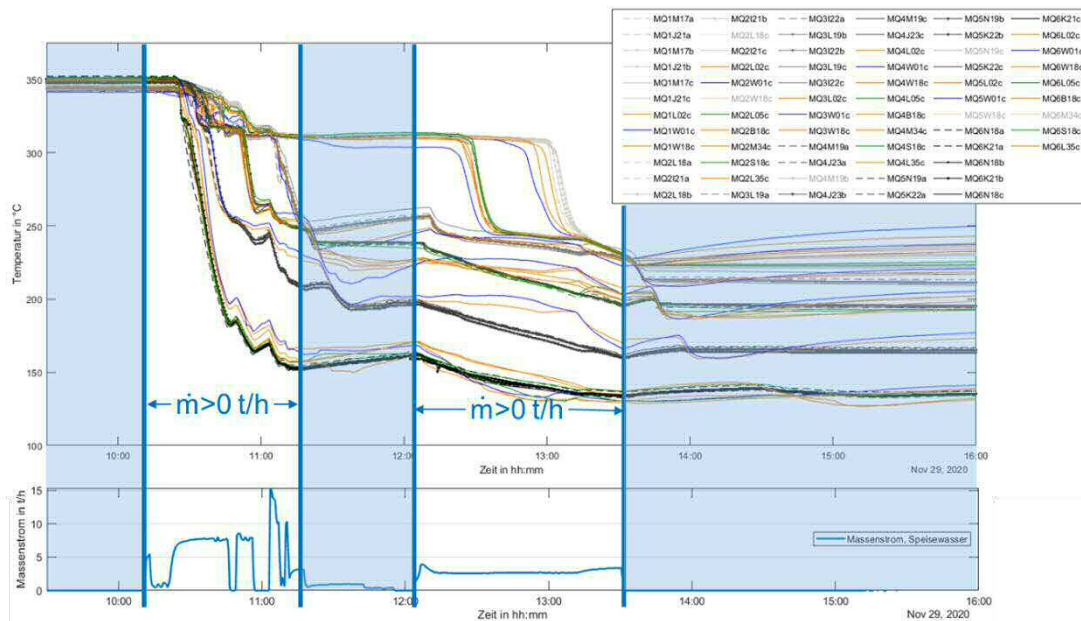


Abbildung 5-13: Messungen aller Thermoelemente im Speichermaterial während der 3. Entladung. Unten mit angezeigt ist der Massenstrom im Speicher. Somit sieht man die vollständige Entladung des Speichers am 29.11.2020. Die Erstarrung der jeweiligen Messquerschnitte nacheinander ist klar sichtbar.

Abbildung 5-14 zeigt die Messwerte am Anfang der Entladung für die zentral angeordneten Thermoelemente. Diese sind an den Stellen ,a', ,b' und ,c' an der Rippe montiert, wie schematisch dargestellt. Hier ist ersichtlich, dass Stelle ,a' in jedem Messquerschnitt schneller entladen wird als Stellen ,b' und ,c', wie zu erwarten ist. Die Stellen ,b' und ,c', dagegen, sind ungefähr gleich schnell. Die Simulationsergebnisse aus Ansys Fluent, bunt dargestellt, helfen diesen Verlauf zu verstehen.

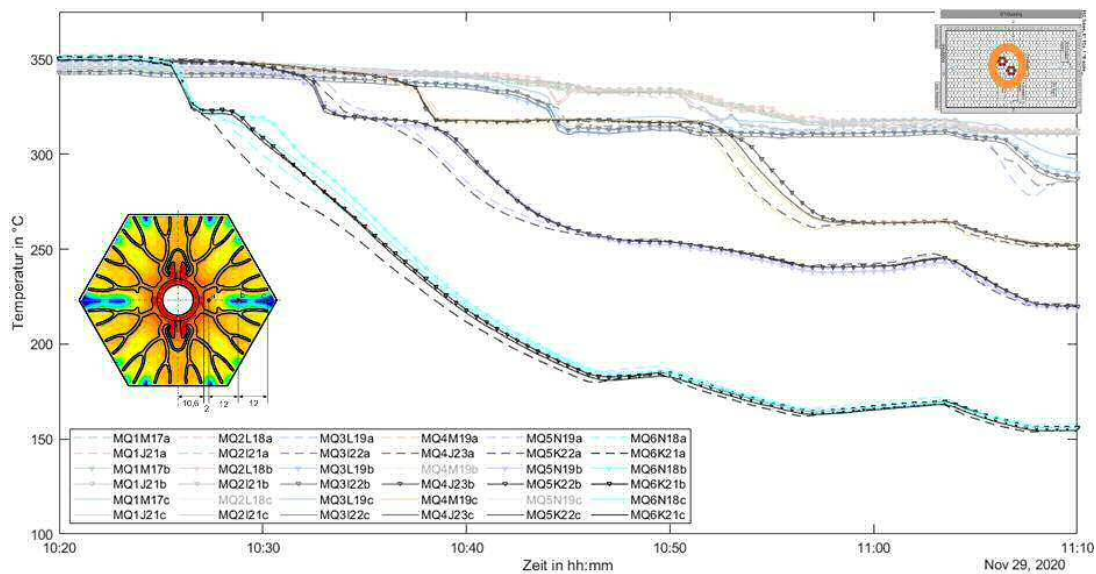


Abbildung 5-14: Messungen der Thermoelemente an den zentralen Rohren im Speicher am Anfang der 3. Entladung. Hier sieht man die Positionen a, b und c als je gestrichelt, mit Dreiecken und glatte Linie dargestellt. In bunt sind Simulationsergebnisse für die Beladung schematisch dargestellt, um zu zeigen, wie die Positionen a, b und c sich generell unterscheiden können.

In Abbildung 5-15 sind im oberen Bereich die Simulationsergebnisse für die Entladung des Speichers dargestellt. In ähnlicher Darstellung sind im unteren Bereich die Messwerte aufgetragen. Zum einen sind hier die Eintritts- und Austrittstemperaturen in blau und orange dargestellt. Zum anderen sind die gemittelten Temperaturen im Messquerschnitt aufgetragen. Im simulierten Fall sind dies alle Temperaturen im Messquerschnitt. Im gemessenen Fall sind dies die jeweils montierten Thermoelemente. Hier sehen wir eine ähnlich lange Entladungszeit, aber eine abweichende Form der PCM-Kurven.

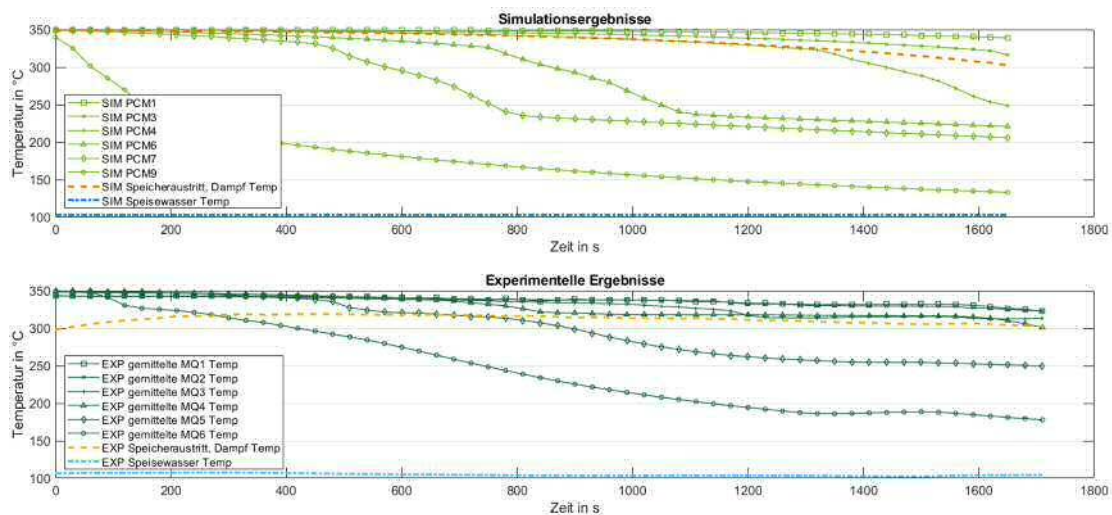


Abbildung 5-15: Qualitativer Vergleich der Systemsimulationen sowie Messwerte der 3. Entladung.

AP 5.3 Regulärer Speicherbetrieb (SNE)

Dieser Arbeitspaket konnte wegen dem Schaden am Speicher nicht durchgeführt werden.

AP 5.4 Beladezustandsbestimmung mittels RADAR (DLR)

Das RADAR Messgerät ist am Speicher integriert. Eine Inbetriebsetzung seitens des Herstellers wird mit einer erneuten Inbetriebnahme erfolgen. Anschließend werden die Beladezustandsbestimmungen durchgeführt.

AP 6 Entwicklung eines Analyseverfahrens zum Speichereinsatz in Industrieprozessen (DLR, SNE, BSE)

Inhaltsverzeichnis

AP 6.1	Entwicklung eines Softwaretools (DLR)	6-1
6.1.1	Allgemeine Einführung Prozessanalyse	6-1
6.1.2	Excel-Speicheranalysetool – Ebene 0	6-3
6.1.3	Bauteilbibliothek – Ebene 1	6-6
AP 6.2	Erprobung des Softwaretools mit Hilfe der Referenzkonzepte (DLR).....	6-9
6.2.1	Excel-Speicheranalysetool – Ebene 0	6-9
6.2.2	Bauteilbibliothek – Ebene 1	6-9
AP 6.3	Definition und Sammlung der notwendigen Datenbasis (DLR).....	6-9
6.3.1	Analyse von Prozessdaten	6-9
6.3.2	Erstellung Fragebogen	6-10

Zur Steigerung der Energieeffizienz im Industrie- und im Versorgungsbereich wurde im Rahmen des Gesamtprojekts der Einsatz von thermischen Energiespeichern untersucht. Da die Bandbreite von möglichen Prozessen sehr groß ist, muss für jeden vorliegenden möglichen Einsatzfall eines thermischen Energiespeichers dessen Potenzial zur Senkung des Primärenergieeinsatzes abgeschätzt werden. Hierfür wurde ein Verfahren zur Analyse von verschiedenen vorliegenden Prozessen entwickelt und an den vorhandenen Daten der Projektpartner SNE und BSE erprobt. Anhand eines ausgearbeiteten Fragebogens ist es zukünftig möglich, Daten von in Frage kommenden thermischen Prozessen gezielter abzufragen und mit Hilfe des entwickelten Tools zu prüfen.

AP 6.1 Entwicklung eines Softwaretools (DLR)

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde ein Softwaretool entwickelt, das eine Bandbreite von Industrieprozessen, die jeweils aus einer Energiequelle, einem Speicherprozess und einer Energiesenke bestehen, auf deren Eignung zur thermischen Energiespeicherung hin prüfen kann. Zusätzlich zu dem Softwaretool wurde eine Bauteilbibliothek für die Simulationssoftware EBSILON®Professional erstellt, mit der sich thermische Prozesse aus bestehenden Bauteilen zusammensetzen lassen.

6.1.1 Allgemeine Einführung Prozessanalyse

Da die Bandbreite an möglichen Prozessen relativ hoch ist, wurden zunächst die in AP 1 und AP 2 vorkommenden Prozesse als Datenquelle herangezogen. Eines der möglichen Verschaltungsszenarien ist in Abbildung 6-1 grafisch dargestellt. Hierbei wird eine vereinfachte Energiequelle mit einem zeitlich diskontinuierlichen Leistungsverlauf angenommen. Diese Energiequelle ist in der Regel so beschaffen, dass eine direkte Nutzung der thermischen Energie in Form von Wärme nicht möglich ist. Diese Energie wird durch eine als ideal angenommene thermische Energiespeichervorrichtung zwischengespeichert und so in ihrem zeitlichen Leistungsverlauf manipuliert. Diese Manipulation erfolgt je nach Leistungsanforderung der thermischen Energiesenke.

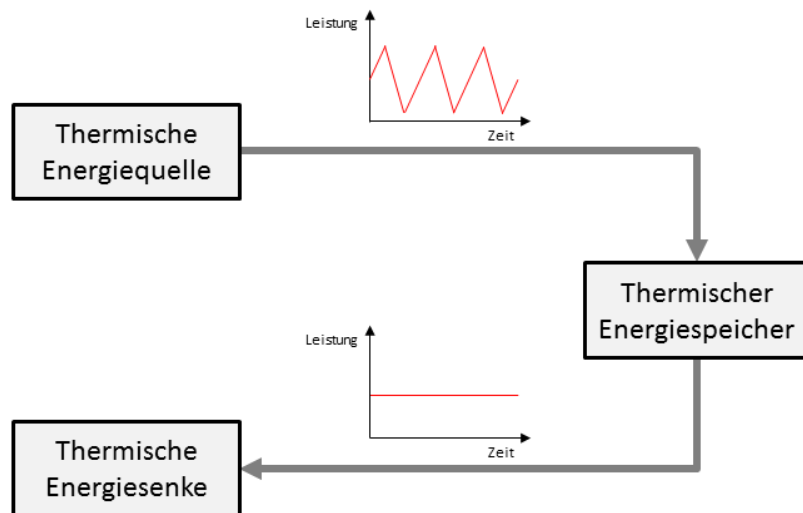


Abbildung 6-1: Exemplarische Darstellung der Energieströme beim Einsatz eines thermischen Energiespeichers.

Bei der Simulation von thermischen Energiespeichern müssen unterschiedlichste Fragestellungen beantwortet werden. Daher gibt es auch je nach Fragestellung unterschiedliche Simulationstools, die sich vor allem hinsichtlich ihrer Detaillierung unterscheiden. Diese können, wie in Abbildung 6-2 dargestellt, zu drei Ebenen zusammengefasst werden. Die Simulationsmodelle der Ebene 0 verfolgen einen sehr vereinfachten Ansatz. Hierbei werden nur Energieströme betrachtet und hinsichtlich des Einsatzes idealer Speicher hin untersucht. Dabei wird z.B. ein Energierückgewinnungsprozess im Hinblick auf den Einsatz eines idealen Speichers mit unendlicher Kapazität und Leistung untersucht. So kann festgestellt werden, wie viel Energie maximal unter idealen Bedingungen zurückgewonnen werden kann. Die Analyse mit einer solchen Software sollte möglichst schnell und einfach erfolgen. Demnach eignet sich für diese Ebene z.B. die Tabellenkalkulationssoftware MS Excel, die für kleinere Softwareprojekte bereits eine Entwicklungsumgebung bereitstellt.

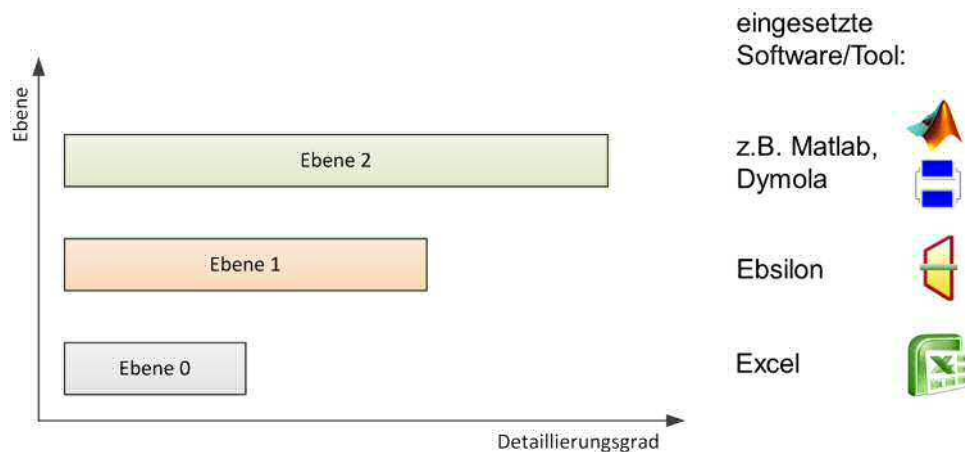


Abbildung 6-2: Zuordnung der zur Berechnung eingesetzter Software zur jeweiligen Detaillierungsebene.

Wurde die Eignung eines thermischen Prozesses durch den Einsatz einer Software der Ebene 0 für den Einsatz eines thermischen Energiespeichers festgestellt, so muss ein wesentlich detaillierteres Modell des Gesamtprozesses erstellt werden (vgl. Ebene 1 in Abbildung 6-2). So kann ermittelt werden, welcher Speicher hinsichtlich der genauen thermodynamischen Zustandsgrößen des Prozesses überhaupt infrage kommt. Weiterhin kann durch die Berücksichtigung der Größe eines Wärmeübertragers, die Menge an Energie ermittelt werden, die durch eine bestimmte Apparategröße bzw. finanzielles Investment wieder zurückgewonnen werden kann. Hierfür kommt eine Systemsimulationssoftware wie EBSILON®Professional

zum Einsatz. Durch die bereits vorhandenen Modelle für z.B. Wärmeübertrager können beliebige Prozesse nachgebildet oder neu entworfen werden.

Da sich die instationären Vorgänge in thermischen Energiespeichern (insbesondere bei Latentwärmespeichern bzw. Regeneratorspeichern) oft nicht analytisch lösen lassen, ist es erforderlich, dass numerische Modelle zum Einsatz kommen. Diese sind in ihrer Detaillierung komplex und aufwändig. Mit diesen Modellen (vgl. Ebene 2 in Abbildung 6-2) können Kennfelder bzw. Kennlinien für die Systemsimulationstools der Ebene 1 abgeleitet werden. Zur Berechnung kommen hier Programme wie MATLAB® oder Dymola zum Einsatz.

6.1.2 Excel-Speicheranalysetool – Ebene 0

Das im Rahmen von TESIN entwickelte Softwaretool ist der Ebene 0 (vgl. Abbildung 6-2) zuzuordnen. Es soll zur Analyse von thermischen Prozessen in der Industrie eingesetzt werden, in denen Abwärme anfällt, die aber aufgrund des zeitlichen Verlaufs nicht direkt im Prozess wiederverwendet werden kann. Im Wesentlichen ist für eine solche Betrachtung nur der zeitliche Verlauf der Leistung von Quelle, Senke oder beidem bekannt. Die vorliegende Zeitreihe soll dann in das Programm eingegeben und analysiert werden. Da Zeitreihen in der Regel tabellarisch vorliegen, oder sich relativ leicht ohne Zusatzprogramme konvertieren lassen, bietet sich als Basis das Softwaretool MS Excel an. Hinzu kommt, dass dieses Programm sich in der Vergangenheit fest im Büroalltag etabliert hat, und so kein besonders hoher Schulungs- bzw. Einarbeitungsaufwand der künftigen Benutzer besteht. Ein weiterer Vorteil ist die Verfügbarkeit des Programms auf nahezu jedem Bürocomputer ohne zusätzlichen Lizenzierungsaufwand. Der Benutzer arbeitet mit dem entwickelten Softwaretool (vgl. Abbildung 6-3) wie mit einem herkömmlichen Tabellenblatt. Dieses enthält jedoch bereits verschiedene vordefinierte Bereiche. Im Datenbereich gibt der Benutzer die bekannten Zeitreihen vor und kann die vom Programm ermittelten Werte im Detail betrachten oder z.B. mit Hilfe der Zwischenablage in ein anderes Tabellenblatt kopieren. Neben dem Bereich der Dateneingabe kann der Benutzer den Berechnungsmodus auswählen, bekommt verschiedene skalare Ergebniswerte dargestellt und kann die verschiedenen Funktionen des Programms über Funktionsschaltflächen aufrufen. Im rechten Bereich des Tabellenblatts befinden sich zur grafischen Darstellung der Zeitreihen verschiedene Diagrammplots.

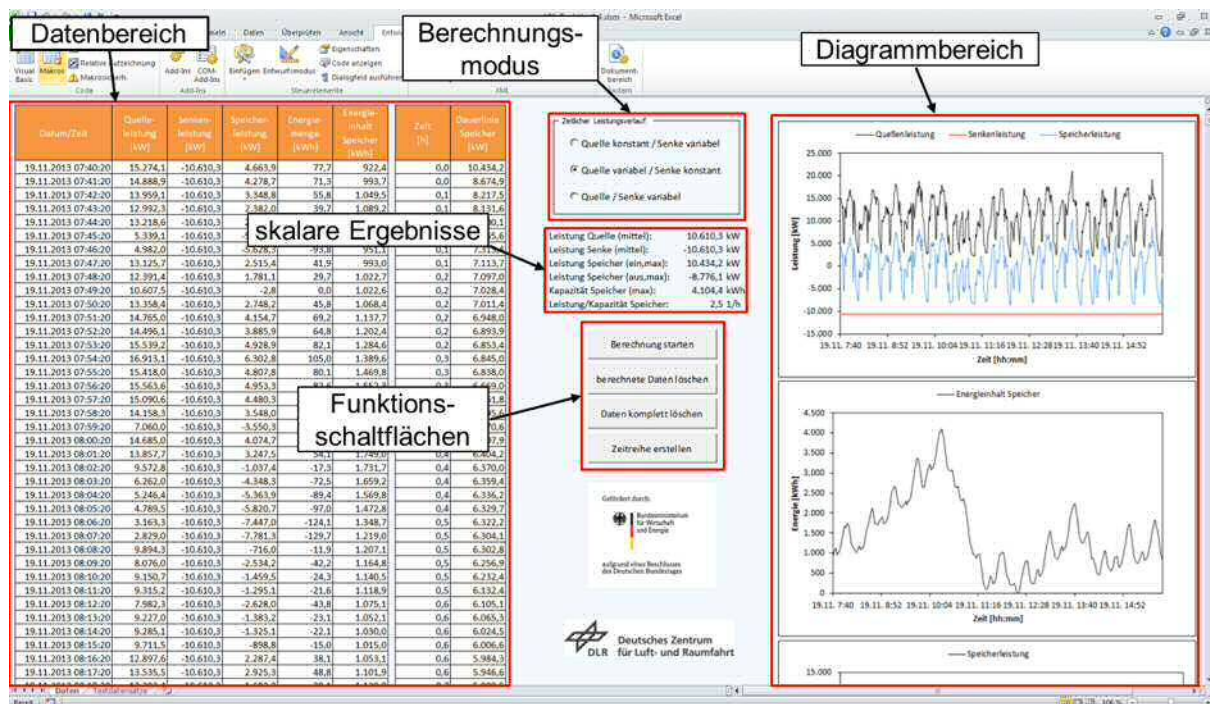


Abbildung 6-3: Screenshot des entwickelten Softwaretools auf Basis von MS Excel 2010.

Um mit dem Programm interagieren zu können, werden eine Reihe von Funktionsschaltflächen auf dem Tabellenblatt bereitgestellt. Diese sind in Abbildung 6-4 vergrößert dargestellt. Zunächst muss vom Benutzer der Berechnungsmodus vorgegeben bzw. ausgewählt werden. Dies erfolgt je nachdem, welche Daten dem Benutzer bekannt sind bzw. vorliegen. Handelt es sich beispielsweise um einen Energierückgewinnungsprozess mit einer diskontinuierlichen Quelle und einem angeschlossenen, kontinuierlich zu betreibenden Verstromungsprozess, so muss der zweite Berechnungsmodus „Quelle variabel/Senke konstant“ ausgewählt werden. Alternativ gibt es auch die Möglichkeit eine konstant anfallende Wärmequelle an eine bedarfsgeführte bzw. zeitlich instationäre Wärmesenke abzuführen (Modus „Quelle konstant/Senke variabel“). Weiterhin kann der Benutzer sowohl Senke wie auch Quelle zeitlich komplett frei vorgeben. Dies wäre z.B. bei einem instationären Wärmerückgewinnungsprozess der Fall, der seine Wärme an einen bedarfsgeführten Verstromungsprozess abgibt. In diesem Fall kann auf eine Mittelwertbildung der Senke bzw. der Quelle verzichtet werden (Modus „Quelle/Senke variabel“).

Zusätzlich werden dem Benutzer nach einer erfolgreichen Berechnung verschiedene skalare Werte zur Information ausgegeben. Dies sind im Einzelnen die Mittelwerte der Quellen- bzw. Senkenleistung, die maximale und minimale Leistung des Speichers während der Be- bzw. Entladung, sowie dessen Gesamtkapazität und das errechnete Verhältnis aus Leistung und maximaler Kapazität als weitere charakteristische Kenngröße des thermischen Speichers. Der Bilanzraum des thermischen Speichers wurde so gewählt, dass in den Bilanzraum eintretende Energieströme ein positives Vorzeichen und austretende Energieströme ein negatives Vorzeichen erhalten.

Durch die Schaltflächen kann der Benutzer die Ausführung von verschiedenen Funktionen starten. Dies betrifft vor allem das Starten des Berechnungsvorgangs und das Löschen der berechneten Ergebnisse bzw. aller eingegebenen Daten. Durch einen Klick auf die Schaltfläche „Zeitreihe erstellen“ kann der Benutzer die Spalte „Datum/Zeit“ automatisch erstellen lassen, falls die vorhandenen Daten keinen Zeitstempel besitzen, der vom Programm verarbeitet werden kann.

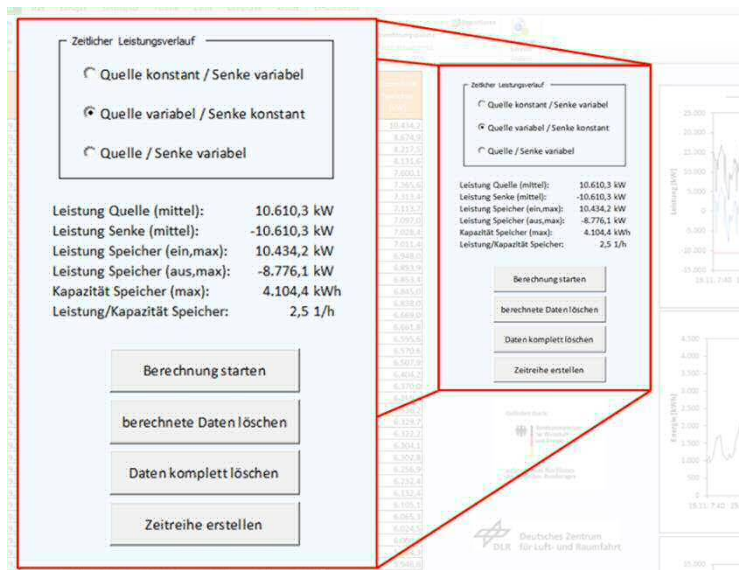


Abbildung 6-4: Detaillierte Ansicht der Steuerelemente des Excel-Softwaretools.

In Abbildung 6-5 ist der Datenbereich des Softwaretools mit Berechnungsschritten und einem Berechnungsbeispiel dargestellt. In diesem Beispiel ist die Quellenleistung bekannt, aber nicht die Senkenleistung.

Durch die immer vorzugebende Spalte (1) Datum/Zeit wird zunächst ein Zeitschritt bestimmt, der für die spätere Berechnung der Energiemenge dient. Mit einer vom Benutzer vorgegebenen Quellenleistung in Spalte (2) wird die Senkenleistung in Spalte (3) aus dem negativen arithmetischen Mittelwert der Quellenleistungsdaten errechnet. Dieser Mittelwert wird auch im mittleren Tabellenbereich unter den skalaren Ergebnissen (siehe Abbildung 6-3) ausgegeben.

Da der Speicher basierend auf den idealen Randbedingungen immer die Differenz zwischen der Quelle und der Senke leisten muss, werden beide Zeitreihen addiert. Durch die Bilanzraumgrenzen wird der thermische Speicher bei einer positiven Leistung in Spalte (4) beladen und bei einer negativen Leistung entladen. Durch die Einbeziehung des bereits errechneten Zeitschritts aus Spalte (1) wird die Energiemenge pro Zeitschritt in Spalte (5) bestimmt, die in den Speicher ein- oder ausgespeichert wird. Durch eine Summation wird der zeitliche Verlauf des Energieinhalts in Spalte (6) bestimmt. Abbildung 6-5 zeigt als erste Zeile 922,4 kWh in Spalte (6), da diese Zeile nicht die erste in der Berechnung ist. Die Dauerlinie der Speicherleistung in Spalte (8) wird erstellt durch eine absteigende Sortierung der Leistung aus Spalte (4).

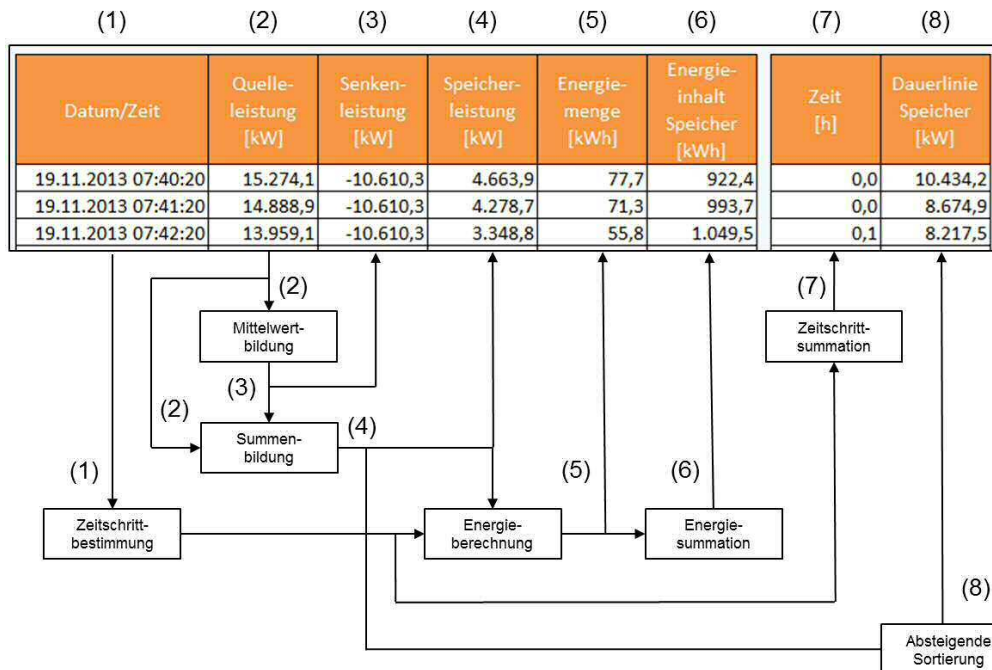


Abbildung 6-5: Berechnungsschema des Excel-Softwaretools für eine vorgegebene Quellenleistung.

6.1.3 Bauteilbibliothek – Ebene 1

Als nächste Detaillierungsebene betrachtet Ebene 1 das Gesamtsystem ohne eine detaillierte Speicherberechnung. Diese Arbeiten können zum Beispiel mit der EBSILON®Professional Software durchgeführt werden. Für eine Modellierung eines Energiespeichers ist eine Energiequelle erforderlich. Diese stellt in der Regel die Energie zur Beladung des thermischen Energiespeichers zur Verfügung. Im Bereich der Heizkraftwerke und Industrieprozesse wurden zunächst zwei unterschiedliche Energiequellen betrachtet, für die ein umfangreicheres Modell zur Berechnung benötigt wird. Da im Rahmen des Projekts TESIN schwerpunktmäßig der Einsatz von sensiblen und latenten Hochtemperaturenergiespeichern betrachtet werden soll, kommt als Energiequelle die Auskopplung aus Rauchgasströmen aus Öfen in Frage. Im Rahmen des AP 1 des Projekts TESIN ist dies der Elektrolichtbogenofen des Projektpartners in Kehl, der als Musteranlage herangezogen wurde. Für diesen Fall wurde ein Modul für die Simulationssoftware EBSILON®Professional erstellt, das zur Wärmeauskopplung aus Rauchgasströmen in der Industrie eingesetzt werden kann. Für das Modell ist es nicht entscheidend welche Anlage den Rauchgasstrom erzeugt, und kann daher für sehr viele Prozesse eingesetzt werden, in denen auch die Wärmeübertragung durch Strahlung nicht vernachlässigbar klein ist. In Abbildung 6-6 ist ein Screenshot des Modells der Wärmeauskopplung dargestellt. Es besitzt vier Konnektoren, mit denen es mit dem restlichen Wärmeschaltbild über jeweils zwei Fluidleitungen für das Wärmeträgerfluid bzw. den Rauchgasvolumenstrom verbunden ist.

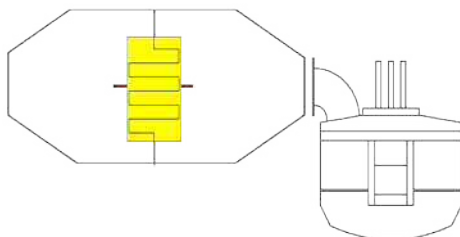


Abbildung 6-6: Screenshot des Simulationsmodells für die Wärmeauskopplung aus dem Rauchgas eines Elektrolichtbogenofens.

Für die exakte Parametrisierung des Wärmeauskopplungsmodells ist eine geometrische Auslegung des Rohrbündels bzw. der Strahlungsheizflächen erforderlich. Weiterhin müssen die Randbedingungen des Prozesses bereits aus Messungen bekannt sein. Daher ist es unumgänglich zunächst eine Bestandsanalyse des zu untersuchenden Prozesses zu betreiben. Mit Hilfe des Modells können nach kleineren Veränderungen neben Salzsäure auch andere Wärmeträgerfluide wie Wasser, Dampf oder Thermoöl berechnet werden. Eine Anpassung der bereits implementierten Betriebsstrategie zur Prozessführung der Wärmeauskopplung ist dann ebenfalls erforderlich und mit geringem Aufwand möglich.

Als weitere Energiequelle bieten sich bereits bestehende Anlagen aus dem Heizkraftwerksbereich an. Im Zuge des AP 2 wurden verschiedene Anlagen unterschiedlichen Typs betrachtet. Für die Abbildung der Dampferzeuger wurde ein vereinfachtes Modul entwickelt, das eine sehr vereinfachte Berechnung des Brennstoffeinsatzes ermöglicht, der zur Dampferzeugung erforderlich ist. Durch die flexiblen Anpassungsmöglichkeiten der Wärmeschaltbilder (vgl. Abbildung 6-7) lässt sich ein Speichermodul (vgl. Abbildung 6-8 bzw. Abbildung 6-9) in die Schaltung einbinden.

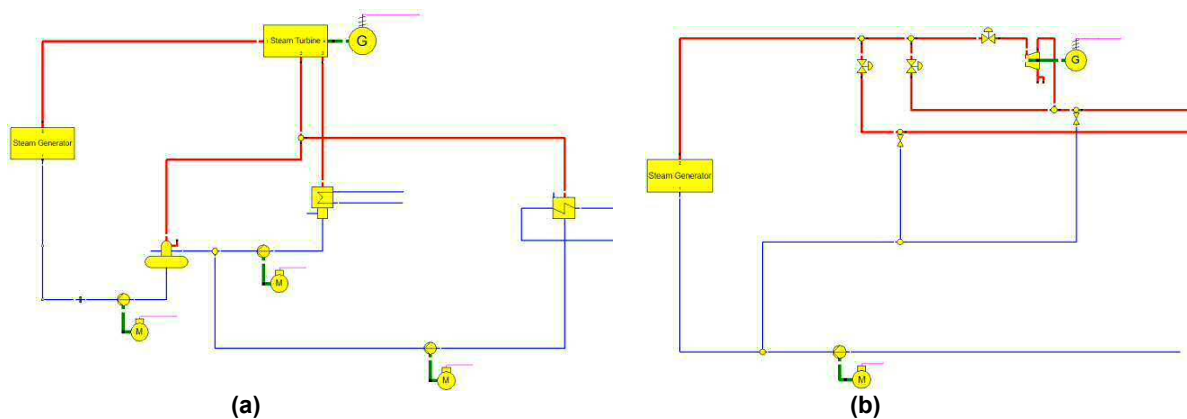


Abbildung 6-7: Screenshot der Simulationsmodelle (a) eines Biomasseheizkraftwerks und (b) eines Heizkraftwerks zur Prozessdampferzeugung.

Mit dem entworfenen Konzept können auch eine Vielzahl anderer Wärmeträger als Energiequelle für eine Speicherbeladung herangezogen werden. Für diesen Fall können die Fluidströme mit den bereits vorhandenen Stoffwertbibliotheken modelliert oder eigene Stoffwerte hinzugefügt werden.

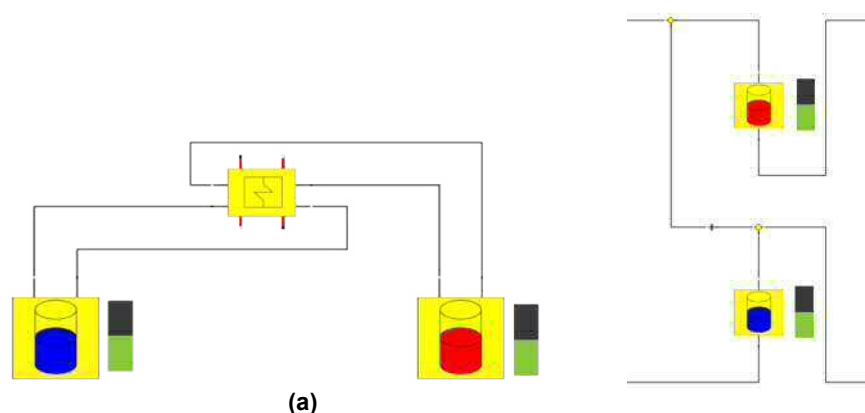


Abbildung 6-8: Screenshot des Simulationsmodells für (a) einen indirekten Zwei-Tank Flüssigsalzspeicher und (b) einen direkten Zwei-Tank Flüssigsalzspeicher mit Bypassleitung zur Umgehung des heißen Speicherbehälters.

Für die Simulation sensibler Speichersysteme wurde ein indirektes Modul eines Zwei-Tank Flüssigsalzspeichers erstellt. Für einen solchen Speicher sind zunächst zwei Speichertanks inklusive Förderpumpen erforderlich. Zur Wärmeübertragung zwischen dem Speichermedium und dem Wärmeträgerfluid wird ein Wärmeübertrager verwendet, der wieder in beide Richtungen berechnet werden kann. Die hierfür notwendigen Teilmodelle wurden zu einem Wärmeübertragermodul zusammengefasst. Durch Anpassungen am Speichermodell lassen sich auch andere Fluide als Wärmeübertrager- bzw. Speichermedien einsetzen. Das Modell für den Speicher lässt sich über insgesamt vier Konnektoren für Fluidleitungen in ein bestehendes Wärmeschaltbild integrieren.

Bei vielen Prozessen kann das Wärmeträgerfluid auch gleichzeitig als Speichermedium eingesetzt werden. Für solche Fälle entfällt der bei einem indirekten System notwendige Wärmeübertrager. Ein auf diese Weise vereinfachtes Zwei-Tank-Flüssigsalzspeichersystem ist in Abbildung 6-8 dargestellt.

Für die Simulation von PCM-Speichern ist es erforderlich, deren instationäres Verhalten zeitlich abzubilden. Aufgrund des Berechnungsaufwandes ist es nicht sinnvoll, für längere Betriebszeiträume instationäre Rechnungen zur Systemintegration durchzuführen. Aus diesem Grund werden mit Hilfe von Testfällen und sehr aufwändigen Simulationstools (Ebene 2) repräsentative Charakteristiken für den Speicher ermittelt. Diese werden dann in einem Modul für die Berechnung von PCM-Speichern hinterlegt, und gemäß des anliegenden Ladezustands und Betriebsmodus ausgewertet. Zur Realisierung dient ein eigenes Modul für den PCM-Speicher (vgl. Abbildung 6-9 (a)).

In diesem Modul sind für die Beladung und Entladung des PCMs jeweils gesonderte Fluidleitungen vorgesehen. Dies ist erforderlich, da in der Simulationssoftware EBSILON®-Professional immer nur in Strömungsrichtung der Fluidleitung gerechnet werden kann. Für die Vorgabe des Massenstroms zur Be- und Entladung, sowie zur Ausgabe des Energieinhalts dienen drei zusätzliche logische Leitungen am Speichermodul.

Als Energiesenke wurde das in Abbildung 6-9 (b) dargestellte Simulationsmodell eines Rückverstromungsprozesses erstellt. Dieser besteht aus einem Modul für einen mit Thermoöl beheizten Dampferzeuger, der im Zwangs- bzw. Naturumlauf betrieben werden kann. Der so erzeugte Dampf wird in einer Kondensationsdampfturbine entspannt. Ebenfalls sind ein Kondensator und ein Speisewasserbehälter im Wärmeschaltplan enthalten. Durch Anpassungen am Modell können Parameter, wie z.B. der Frischdampfdruck, an die gewünschten Werte angepasst werden.

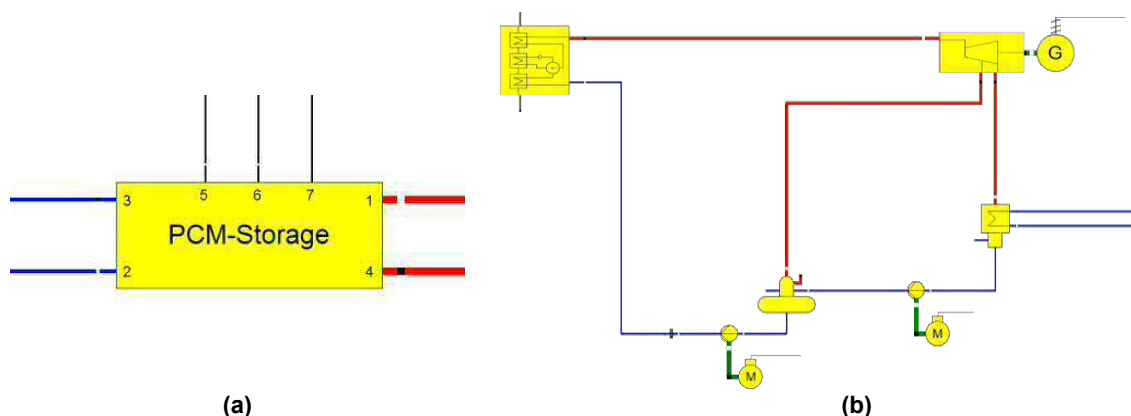


Abbildung 6-9: Screenshot des Simulationsmodells für (a) einen PCM-Speicher mit hinterlegter Leistungscharakteristik und (b) eine Wärmesenke in Form eines Wasser/Dampf-Verstromungsprozesses.

Als weitere Energiesenken wurden im Rahmen von TESIN Prozessdampfschienen und weitere Wärmeverbraucher betrachtet. Für solche Senken ist kein gesondertes Modell erforderlich, da diese über Fluidleitungen abgebildet werden können.

Durch die grundlegenden Entwicklungsarbeiten an den EBSILON®Professional Modellen wurden für die jeweiligen Aufgaben maßgeschneiderte Lösungen entwickelt, die für die Arbeiten im Rahmen des Projekts aber auch darüber hinaus Anwendung finden können.

AP 6.2 Erprobung des Softwaretools mit Hilfe der Referenzkonzepte (DLR)

Durch die Erprobung der erstellten Softwaretools anhand der Referenzfälle aus den Arbeitspaketen des Projekts TESIN wurde die Übertragbarkeit der entwickelten Modelle geprüft und bestätigt. Diese Arbeiten wurden im Rahmen von AP 1 und 2 durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den jeweiligen Arbeitspaketen beschrieben.

6.2.1 Excel-Speicheranalysetool – Ebene 0

Nach Abschluss der Entwicklungsarbeiten wurde das Programm einer Testphase mit verschiedenen Anwendungen von BSE und SNE aus den AP 1 und 2 unterzogen, um Schwachstellen und Programmfehler zu identifizieren. Vereinzelt wurden auch geringfügige Veränderungen hinsichtlich der Bedienbarkeit des Analysetools realisiert. Nach Abschluss dieser Anpassungsarbeiten lag eine fertige nutzbare und dokumentierte Programmversion vor.

6.2.2 Bauteilbibliothek – Ebene 1

Im Rahmen der Projektarbeit im AP 6.2 wurden die entwickelten Komponenten bereits zur Berechnung bzw. Simulation der thermischen Prozesse der Projektpartner herangezogen und auf Plausibilität geprüft. Hierbei konnte durch das DLR und die Projektpartner BSE bzw. SNE festgestellt werden, dass mit Hilfe der Speicherbibliothek in EBSILON®Professional belastbare Simulationsergebnisse erzielt werden. Im Rahmen der möglichen Genauigkeit und den zum Teil bereits mit Unsicherheiten behafteten Eingabeparameter ist bei Simulationsergebnissen mit diesem Detaillierungsgrad immer mit Abweichungen zu einer realen Anlage zu rechnen. Diese Arbeiten sind in den entsprechenden AP 1 und 2 dokumentiert.

AP 6.3 Definition und Sammlung der notwendigen Datenbasis (DLR)

Für die zielführende Nutzung der entwickelten Softwaretools wurde die Datenbasis recherchiert und in der Entwicklung der Tools berücksichtigt. Weiterhin wurde ein Fragebogen zur Abfrage von Prozessdaten erstellt, der in Kombination mit den erstellten Werkzeugen genutzt werden kann.

Im Rahmen von TESIN wurde im Annex 30 das Subtask 1 geleitet, indem eine Prozessanalysemethode erarbeitet wurde. Hiermit konnten die Prozesse verschiedenster Bereiche mitberücksichtigt werden. Die ausgearbeitete wurde im Journal of Applied Energy veröffentlicht (siehe II.-3. Veröffentlichungen).

6.3.1 Analyse von Prozessdaten

Für die Anwendung der im Rahmen von AP 6 entwickelten Tools ist eine gewisse Datenbasis erforderlich. Diese kann sich je nach Industriezweig bzw. vorliegendem thermischen Prozess unterschiedlich stark ändern. Hierzu wurde zunächst ermittelt, welche Daten bei bekannten thermischen Prozessen, zur Ermittlung der Speichereignung, abgefragt werden müssen. Hierbei wurden zusätzlich zu den Prozessen aus AP 1 und 2 weitere Prozesse, z.B. Gießerei oder Baustoffherstellung, analysiert. Hierdurch konnte die notwendige Datenbasis für die Analyse thermischer Prozesse verbreitert werden.

6.3.2 Erstellung Fragebogen

In einem zweiten Schritt wurde ein Fragebogen (vgl. Abbildung 6-10) entwickelt, mit dem diese Daten bei einem Betreiber eines thermischen Industrieprozesses abgefragt werden können. Ziel der Arbeiten war es, möglichst alle Informationen auf einer DIN A4 Seite abzufragen. Dies dient der Übersichtlichkeit und stellt einer Erleichterung für zukünftige Bearbeiter dar. Es wurden die häufigsten Auswahlmöglichkeiten in den Fragebogen aufgenommen. Sollte in einem Fall z.B. ein anderes Wärmeträgermedium zur Beladung bereitstehen, so kann der Bearbeiter dies in speziell hierfür frei gehaltene Felder handschriftlich eintragen.

Der Fragebogen ist in verschiedene Abschnitte gegliedert:

- Abfrage des Mediums, das zur Speicherbeladung zur Verfügung steht,
- Arten möglicher Wärmesenken,
- Spezifikation des zeitlichen Leistungsverlaufs von Wärmequelle und -senke,
- Benötigte zeitabhängige thermodynamische Zustandsgrößen,
- Anlagenskizze und
- Zusatzblatt mit weiterführenden Erklärungen zur Handhabung des Fragebogens.

Mit dem entwickelten Fragebogen (in Englisch und Deutsch) können alle wichtigen Prozessdaten abgefragt und der jeweilige Prozess hinsichtlich seiner Speichereignung analysiert werden.

Fragebogen zur Analyse thermischer Prozesse hinsichtlich ihrer Speichereignung und grober Speicherauslegung

Kontaktdaten: _____
 Prozessbereich: _____

1. Medium das als Wärmeträgermedium zur Speicherbeladung zur Verfügung steht:

<input type="checkbox"/> Wasser	<input type="checkbox"/> Salzhmelze
<input type="checkbox"/> Dampf	<input type="checkbox"/> Rauchgas
<input type="checkbox"/> Thermöl	<input type="checkbox"/> _____

2. Art der möglichen Wärmesenke(n):

<input type="checkbox"/> thermischer Prozess	<input type="checkbox"/> Prozessdampfschne
<input type="checkbox"/> Verstromung	<input type="checkbox"/> Kältemaschine
<input type="checkbox"/> Nah-/Fernwärme	<input type="checkbox"/>

3. Zeitlicher Leistungsverlauf

Wärmequelle: kontinuierlich kontinuierlich
 diskontinuierlich diskontinuierlich

4. Optimal benötigte zeitabhängige thermodynamische Zustandsgrößen

Wärmequelle:	Wärmesenke:
<input type="checkbox"/> Temperatur	<input type="checkbox"/> Temperatur
<input type="checkbox"/> spez. Enthalpie	<input type="checkbox"/> spez. Enthalpie
<input type="checkbox"/> Massenstrom	<input type="checkbox"/> Massenstrom
<input type="checkbox"/> Druck (abs.)	<input type="checkbox"/> Druck (abs.)
<input type="checkbox"/> Leistung	<input type="checkbox"/> Leistung

5. Anlagenskizze zur Darstellung der für den Wärmespeicher notwendigen Anlagenteile:

Erläuterungen:

Zu 1. Zur Auslegung eines thermischen Energiespeichers ist es zunächst wichtig zu wissen, welches Medium zur Beladung des Speichers als Energiequelle zur Verfügung steht. Das zur Verfügung stehende Medium kann dann, je nach Art des thermischen Energiespeichers, direkt zur Beladung genutzt werden. Einige Medien können nicht zur direkten Beladung des thermischen Speichers genutzt werden. Für solche Fälle wird anhand des vorhandenen Mediums ein geeignetes Wärmeträgerfluid ausgewählt, das zur Energieübertragung zwischen Energiequelle und Speicher dient.

Zu 2. Soll ein thermischer Energiespeicher zum Einsatz kommen, so dient dieser in der Regel zur zeitlich verzögerten Bereitstellung von thermischer Energie. Die sogenannte Energiespeicherung ist die Energie, die der thermische Speicher abgibt, auf.

Zu 3. Der zeitliche Leistungsverlauf ist für die Auslegung eines thermischen Speichers von großer Bedeutung, da er nicht nur auf die erforderliche Kapazität des Speichers geschlossen werden kann. Bei einem Speicher Einsatz können sich sowohl Quelle wie auch Senke zeitlich konstant oder variabel darstellen. Es ist unbedingt erforderlich, dass für eine Speicherauslegung zeitlich aufgelöste Zeitreihen zur Verfügung stehen.

Zu 4. Um den thermischen Energiespeicher auslegen zu können, werden zur Bilanzierung verschiedene thermodynamische Zustandsgrößen benötigt. Mit den vorhandenen Energiezeitreihen der entsprechenden Zustandsgrößen kann auf den Wärmekapazitätsstrom geschlossen werden. Bei druckabhängigen Medien (z.B. Wasserkreislauf) ist zudem die Angabe des Mediendruckes von besonderer Bedeutung. Sind wichtige Messdaten nicht vorhanden, so müssen diese durch geeignete Messungen zunächst ermittelt werden.

Zu 5. Zum besseren Verständnis ist eine vereinfachte Anlagenskizze des Wärmespeichers hilfreich. Diese kann auf die wichtigsten Anlagenteile und Wärmeströme beschränkt werden. Eine handschriftliche Skizze ist für eine grobe Beurteilung ausreichend.

Abbildung 6-10: Fragebogen zur Datenerfassung bei der Analyse von thermischen Industrieprozessen.



AP 8 Mitarbeit im IEA implementing Agreement ECES (DLR)

Die wissenschaftlichen Arbeiten innerhalb des TESIN Projektes sind ein deutscher Beitrag zu diesem Arbeitskreis der IEA. Neben dem DLR beteiligt sich von deutscher Seite noch das ZAE Bayern und die Technische Universität Chemnitz an Annex 30.

Der Annex 30 „*Thermal Energy Storage for Cost-Effective Energy Management and CO₂ Mitigation*“ baute auf die Ergebnisse von Annex 25 auf und erarbeitete eine weitere Detaillierung der Einsatzmöglichkeiten für thermische Energiespeicher zum Energiemanagement und zur CO₂-Einsparung. Es lief von Oktober 2015 bis Juni 2018. DLR bzw. Antje Seitz war Operating Agent des Annexes. Reisetätigkeiten für Annex 30 wurden unterstützt durch TESIN sowie das Förderprojekt THESAN (Förderkennzeichen 03ET1297 A-E). In Abbildung 8-1 wird das Arbeitsprogramm schematisch dargestellt.

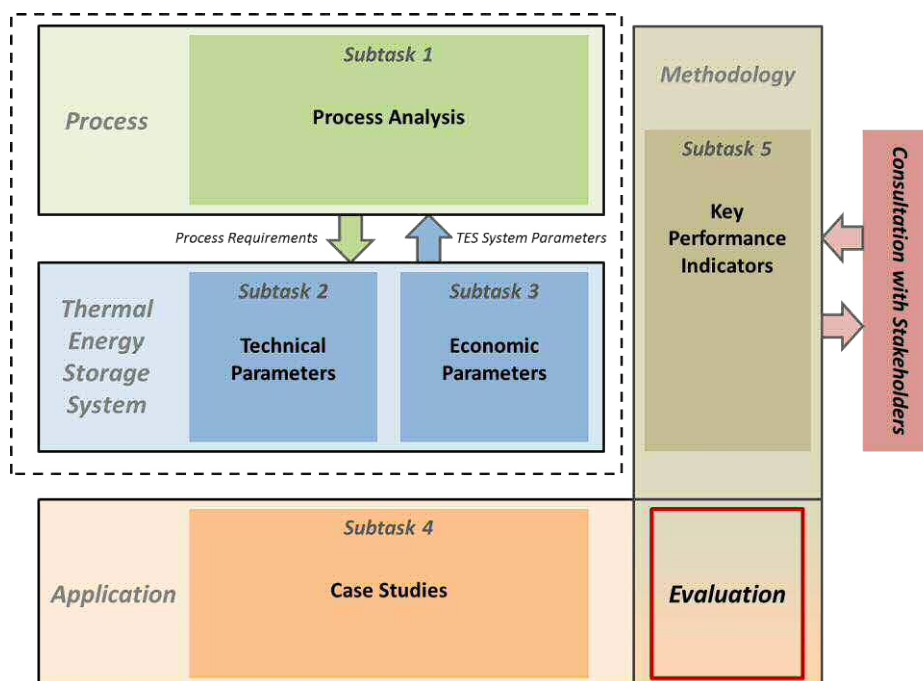


Abbildung 8-1: Struktur des Arbeitsprogramms von Annex 30.

Arbeiten am Arbeitsprogramm in halbjährlichen Treffen stattgefunden. Dort wurde in World Cafe Stil, in Gruppen und im Plenum gearbeitet, sowie Ergebnisse gesammelt und geliefert zwischen den Treffen. Ein wesentlicher Aspekt in Annex 30 war die Beteiligung der Industrie. Bei jedem Treffen wurde regionale Industrieteilnehmer eingeladen und über die Integration und Entwicklung von Thermischen Energiespeicher diskutiert.

Im September 2018 wurden die Abschlussberichte „public report“ und „ECES internal report“ fertiggestellt und versandt. Am 15.11.2018 wurden die Annex 30 Arbeiten beim ExCo-Meeting des IEA ECES in Jeju, Südkorea abschließend vorgestellt. Der final report wurde gemäß den Rückmeldungen der Reviewer überarbeitet und abschließend von diesen freigegeben. Der öffentliche final report kann unter dem folgenden Link aufgerufen werden: <https://iea-es.org/publications/final-report-annex-30/>

II.-2. Voraussichtlichen Nutzen

Im Rahmen des geförderten Projekts TESIN wurden erstmalig zum einen die Einbindung von Hochtemperatur Wärmespeichern in Elektrostahlwerken untersucht, sowie ein Hochtemperatur Latentwärmespeicher für überhitzten Dampf und hohe Leistungen für ein laufendes Heizkraftwerk entwickelt, ausgelegt, gebaut, integriert und zum Teil in Betrieb benommen. Die ersten Daten hiervon sehen sehr vielversprechend aus, so dass nach einer Reparatur und erneuter Inbetriebnahme hier sehr wertvolle Daten entstehen werden, sowie Hürden für weitere Integrationen damit abgebaut werden. Allerdings gilt es noch, diese Inbetriebnahme, den vorgesehenen Versuchsplan sowie den anschließenden Realbetrieb durchzuführen.

Bei der Speicheranlage in Wellesweiler wird durch eine Verminderung des jährlichen Brennstoffbedarfs um 5.000 MWh eine CO₂ Einsparung von ca. 2.200 t/a sowie eine Reduzierung der Brennstoffkosten von 75 T€/a erwartet. Die tatsächliche Einsparung ist abhängig von der Betriebsweise insbesondere des Abnehmers / der Abnehmer des Dampfes, deren Sommerstillständen und der Witterung sowie der Verfügbarkeit des von der Gasturbine befeuerten Abhitzeessels.

Die Arbeiten zur Einbindung in Elektrostahlwerken haben gezeigt, dass die Einbindung von einem 2-Tank Salzspeicher technisch machbar ist, aber aufgrund der weltweiten Marktsituation wirtschaftlich nicht umsetzbar ist. Die hohen Temperaturschwankungen im Batchbetrieb des Elektrostahlwerks machen die technische Umsetzung der Wärmeauskopplung schwierig, aber es wird als machbar betrachtet.

II.-3. Veröffentlichungen

Ergebnisse von anderen Stellen

Es sind neue relevante F&E-Ergebnisse von dritter Seite im Projektzeitraum bekannt geworden.

Garcia und Vuillerme et. al haben einen kombinierten Latentwärmespeicher mit sensiblem Speichersystem für ein Direktverdampfungssystem in solarthermischen Kraftwerken entwickelt und untersucht. Ein Teil des Systems ist ein Rippenrohr-Latentwärmespeicher mit einem Speicherinhalt von ca. 8 m³, also ca. die Hälfte des TESIN Speichers. Dieser Speicher wird in einem Forschungstestloop untersucht.

Vuillerme, V., Garcia, P., Aubouin, P., Camus, A., Carnacina, E., Manzoni, M., and Bregeard, E., Experimental results of 2018 test campaign of the ALSOLEN 450 prototype for direct steam generation and thermal storage, AIP Conference Proceedings 2303, 090002 (2020) <https://doi.org/10.1063/5.0028743>

Garcia, P., Vuillerme, V., Olcese, M., El Mourchid, N., "Design and modelling of an innovative three-stage thermal storage system for direct steam generation CSP plants", AIP Conference Proceedings 1734, 050015 (2016) <https://doi.org/10.1063/1.4949113>

Garcia, P., Olcese, M., Rougé, S., Experimental and Numerical Investigation of a Pilot Scale Latent Heat Thermal Energy Storage for CSP Power Plant, Energy Procedia, Volume 69 (2015): 842-849, doi:10.1016/j.egypro.2015.03.102.

Im Rahmen des DSG-Store Projekts (FKZ 0325333A/D), in dem DLR mit Linde an der Entwicklung von Latentwärmespeicher für DSG (direct steam generation) Solarkraftwerke gearbeitet hat, wurde eine Dissertation sowie ein Journalartikel seitens Stefan Hübner veröffentlicht. Die Veröffentlichungen die zusammen mit dem DLR erfolgten sind hier nicht aufgelistet.

Hübner, S.; "Optimierung des Wärmeübergangs in Hochtemperatur-Latentwärmespeichern durch techno-ökonomische Optimierung von Wärmeleitstrukturen sowie durch Untersuchung von Verbindungsverfahren für Stahlrohr-Aluminiumrippen Verbindungen" Dissertation Universität Stuttgart, 2018.

Sciacovelli et al. hat Arbeiten zu einem anderen Ansatz zur Profilloptimierung publiziert, der aber nur eine technische Optimierung (Maximierung der auszuspeichernden Energie) ohne Berücksichtigung der ökonomischen Fragestellungen nur für ein Niedertemperatur-PCM durchführt. Hierbei wurden nur einzelne Fragen, der hier untersuchten Fragestellungen bearbeitet und beantwortet (Beschränkung auf 2 Profiltypen, Beschränkung auf Aluminiumrippen, Beschränkung auf kreisförmige Profilquerschnitte).

Sciacovelli A.; Gagliardi F.; Verda V.: Maximization of performance of a PCM latent heat storage system with innovative fins. Int J of Applied Energy Vol 137 (2015), pp. 707 – 715.

Urschitz, G. et al. (TU Wien) hat experimentelle Untersuchungen eines neuen Anbindungsverfahrens (Schlauchschellen) am Einzelrohr veröffentlicht, das aber nur für runde und somit ineffiziente Profilquerschnitte geeignet ist. Weitere theoretische Entwicklungen von Anbindungsverfahren, basierend auf einer Presspassung mit geringem Erfolg (nur eins von vier Verfahren ist theoretisch geeignet), wurden ebenfalls veröffentlicht.

Urschitz, G.; Walter, H.; Hameter, M.: Laboratory test rig of a LHTES (latent heat thermal energy storage): construction and first experimental results. Int J of Energy and Power Engineering Vol 8 (2014), pp 1838 – 1847.

Urschitz, G.; Brier, J.; Walter, H.; Mertz, R.; Bleicher, F.; Haider, M.: New design of a bimetallic finned tube for use in latent heat thermal energy storage units. Proceedings of the ASME 2015 9th Int Conf on Energy Sustainability.

Ziaei et al. haben, ähnlich zu Sciacovelli et al., an einem anderen Ansatz für Profilloptimierung gearbeitet, aber haben sich nur auf die Profilloptimierung beschränkt.

Ziaei, S.; Lorente, S.; Bejan, A., Morphing tree structures for latent thermal energy storage, Journal of Applied Physics. 117 (2015) 22. doi: 10.1063/1.4921442.

Vorträge und Vorstellungen vom Konsortium

EnInnov 2014, 13. Symposium Energieinnovation, Graz, 12.-14.02.2014

Energiespeichersymposium, Stuttgart, 12.03.2014

21. Symposium REGWA, Stralsund, 06.-08.11.2014

VGB Fachtagung ‚Dezentrale Erzeugung – Status und Perspektiven‘, Kufstein, 18.-19.11.14

IRES, Düsseldorf, 09.-11.03.2015

Greenstock, Peking, China, 19.05.2015

Energiespeichersymposium, Stuttgart, 28.01.2015

ACHEMA Tagung, Frankfurt, 17.06.2015

Kolloquium regenerative Energien RWTH Aachen, 23.06.2015

OTTI Fachforum, Neumarkt i.d. Oberpfalz, 03.-04.07.2015

Kurzvorstellung der Projekte der STEAG New Energies GmbH – darunter auch TESIN – im VGB Arbeitskreis „Distributed Generation“ am 25.Mai 2016

Hannover Messe 2016, Stand von F.W.Brökelmann.

ProcessNet Tagung, 15.09.2016 in Aachen: „Integration of a latent heat storage unit into the Wellesweiler cogeneration plant“, DLR

ProcessNet AA Sitzung am 17.11.2016 in Frankfurt: „TESIN: Thermische Energiespeicher für die Erhöhung der Energieeffizienz in Heizkraftwerken (und Elektrostahlwerken)“, SNE

6. Fachkonferenz Strom- und Wärmespeicher am 30.11.2016 in Düsseldorf: „Wärmespeicher zur Steigerung der Energieeffizienz“, SNE

VGB Konferenz Blockheizkraftwerke und virtuelle Kraftwerke am 5. und 6. April 2017 in Berlin: Dr.-Ing. A. Dengel, STEAG New Energies GmbH, Saarbrücken, Dipl.-Ing. M. Johnson, M.Eng. M. Seitz, DLR e.V., Stuttgart: „Hochtemperatur-Wärmespeicher in der dezentralen Energiewirtschaft“

Workshop on Thermal Energy Storage at the Laboratory of Renewable Energy Sciences and Engineering (LRESE), 11.12.2017, Lausanne, Schweiz: Maike Johnson, DLR: „Design of high temperature latent heat thermal energy storage for high power levels : TESIN“

24. Symposium REGWA, Stralsund, 09.-11.11.2017

Dengel, A., Johnson, M., & Hachmann, B. (2018). Entwicklung eines Hochtemperatur – Latentwärmespeichers für hohe Ausspeiseleistung. In U. Bachhiesl (Ed). 15. Symposium Energieinnovation, 14-16 Feb 2018, Technische Univ. Graz, 171-172. Graz, Austria: Vlg der Technischen Univ.

Dengel, A.: Ein Hochtemperatur – Wärmespeicher für das Heizkraftwerk Wellesweiler. VBG workshop „Speicher-Flexibilität in einem kohlenstoffarmen Energiesystem“, 20 Feb 2018 in Herne.

Dengel, A.: Einsatz von Wärmespeichern zur Flexibilisierung in der Industrie, Vortrag 5. KWK.NRW-Forum der EnergieAgentur.NRW, 27. September 2018, Düsseldorf

Dengel, Andreas und Johnson, Maike und Hachmann, Bernd (2018) Anforderungen an einen Hochleistungs- und Hochtemperatur- Latent-Wärmespeicher zur Besicherung der Versorgung sensibler Industriebetriebe. 6. VDI Fachtagung: Energiesysteme und Energieversorgung für Gebäude, Quartiere und Industrieanlagen, 23.-24.10.2018, Nürnberg.

Johnson, M., Dengel, A., Hachmann, B., Fiß, M. & Bauer, D. (2018). Large-Scale High Temperature and Power Latent Heat Storage Development. SolarPACES 2018, Casablanca, Morocco.

Dengel, Andreas und Johnson, Maike und Hachmann, Bernd (2019) Das Projekt TESIN – Entwicklung und Erprobung eines Hochtemperatur-Latent-Wärmespeichers. 11. Internationale Energiewirtschaftstagung, 13.-15. Feb. 2019, Wien, Österreich.

Johnson, Maike und Dengel, Andreas und Hachmann, Bernd und Fiß, Michael und Bauer, Dan (2019) Large-scale high temperature and power latent heat storage unit development. IRES, 12.-14. Mär. 2019, Düsseldorf, Germany.

Artikel vom Konsortium

Johnson M, Vogel J, Hempel M, Dengel A, Seitz M, Hachmann B. High Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage Integration in a Co-gen Plant. Energy Procedia [Internet].

- 2015 Jun [cited 2015 Aug 20];73:281–8. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215014575>
- Seitz, Markus und Johnson, Maike und Hetzel, Ralf (2015). Steigerung der Energieeffizienz eines Stahlrecyclingprozesses. *BWK*, 67 (10), Seiten 34-37. Springer-VDI-Verlag. ISSN 1618-193X.
- Artikel zum Speicher in ‚Aluminium Praxis‘, Innovativer Wärmetauscher von Brökelmann, Ausgabe 5/16, Seite 3.
- Johnson, Maike und Vogel, Julian und Hempel, Matthias und Hachmann, Bernd und Dengel, Andreas (2017) Design of high temperature thermal energy storage for high power levels. *Sustainable Cities and Society*, 35, Seiten 758-763. Elsevier. DOI: 10.1016/j.scs.2017.09.007 ISSN 2210-6707
- Johnson, M., Hachmann, B., Dengel, A., Fiß, M., Hempel, M. & Bauer, D. (2018). Design and Integration of High Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage for High Power Levels. *Proceedings of the ASME IMECE*, IMECE2018-86281, Pittsburgh, PA, USA, November.
- Johnson, M., Hübner, S., Braun, M., Schönberger, M., Martin, C., Fiß, M., Hachmann, B., & Eck, M. (2018). Assembly and attachment methods for extended aluminum fins onto steel tubes for high temperature latent heat storage units. *Applied Thermal Engineering*, 144, 96-105, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.08.035
- Gibb, D., Johnson, M., Romaní, J., Gasia, J., Cabeza, L., & Seitz, A. (2018). Process integration of thermal energy storage systems – evaluation methodology and case studies. *Applied Energy*, 230, 750-760, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.09.001
- Vogel, Julian und Johnson, Maike (2019) Natural convection during melting in vertical finned tube latent thermal energy storage systems. *Applied Energy*, 246, Seiten 38-52. Elsevier. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.04.011 ISSN 0306-2619
- Knight, Sara (2019) Methane sequestered and waste heat put to work. *Foresight Climate & Energy*, 27.03.2019, <https://foresightdk.com/molten-salt-storage/>, aufgerufen 02.07.2019.
- IEA-ECES (2018), “Applications of Thermal Energy Storage in the Energy Transition – Benchmarks and Developments”, [Gibb et al., German Aerospace Center (DLR)], IEA Technology Collaboration Programme on Energy Conservation through Energy Storage (IEA-ECES), 2018.

Geplante Veröffentlichungen vom Konsortium

Es ist geplant die Ergebnisse aus den Befüllvorgängen und die damit verbundene Be- und Entladungen sowie die Arbeiten insgesamt im Rahmen der Dissertation von Maike Johnson zu veröffentlichen. Die Arbeitstitel bzw. -informationen sind unten aufgelistet.

Johnson, M. et al. Superheated steam discharged from megawatt-scale latent heat storage system, *Journal* – noch offen.

Johnson, M. Development of a high temperature and high power PCM storage for standby operation. *Dissertation Universität Stuttgart* – noch offen.