

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

06/08/2019

StoreITup-IF

Neue Polymer-Latentwärmespeicher für Industrie, Solarthermie, Wärmenetze und Kraftwerke im Temperaturbereich 80-400°C

Projektnummer: 848914

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	1. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01/04/2015
Projektende	31/03/2019
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	48 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	AIT Austrian Institute of Technology
AnsprechpartnerIn	Mag. Dr. Christoph Zauner
Postadresse	Giefinggasse 2, 1210 Wien
Telefon	0664 8251146
Fax	+43 (0) 50 550-6390
E-mail	christoph.zauner@ait.ac.at
Website	https://www.ait.ac.at/themen/sustainable-thermal-energy-systems/projects/storeitup-if/

StoreITup-IF

Neue Polymer-Latentwärmespeicher für Industrie, Solarthermie, Wärmenetze und Kraftwerke im Temperaturbereich 80-400°C

AutorInnen:

Christoph Zauner, Katharina Resch-Fauster, Gerald Steinmaurer

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung (C. Zauner)	5
3	Inhaltliche Darstellung und Ergebnisse	7
3.1	Polymer-PCM-Speicher in der Anwendung (TRL5) (C. Zauner)	7
3.1.1.	Aluminiumdruckguss	7
3.1.1.1.	Monitoring der Energieströme in einer Aluminium-Druckgussanlage	7
3.1.1.2.	Entwicklung des Konzepts einer energieeffizienten Gießerei mit Polymer-PCM-Speichern 13	
3.1.1.3.	Demonstration einer energieeffizienten Druckgussanlage mit Polymer-PCM-Speicher auf TRL5 18	
3.1.2.	Kunststoffextrusion.....	34
3.1.3.	Wärmenetze.....	36
3.2.	Laborspeicher und Wärmeübertrager (TRL4) (C. Zauner)	40
3.2.1.	Modellierung und Auslegung der TRL4 Speicher	40
3.2.2.	Konstruktion und Bau der TRL4 Speicher	45
3.2.3.	Charakterisierung und Betrieb der TRL4 Speicher	49
3.3.	PCM (K. Resch-Fauster)	62
3.4.	Messtechnik zur Ladezustandsermittlung (G. Steinmaurer).....	71
3.4.1.	Laborversuche < TRL4.....	71
3.4.2.	Proof of concept Versuch TRL5 am LKR.....	80
4	Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen (C. Zauner).....	85
4.	Anhang	87
4.1.1.1.	TRL5 Polymer-PCM-Speicher Demo-Anlage Kunststoff-Extrusion	87
4.1.1.2.	Publikationen und akademische Arbeiten	108
5.	Kontaktdaten.....	111

2 Einleitung (C. Zauner)

Um die Ziele der EU hinsichtlich Energieeffizienz, Senkung des CO₂-Ausstoßes und Steigerung des Anteils von Erneuerbaren zu erreichen, kommt Wärmespeichern eine zentrale Rolle zu, besonders da etwa die Hälfte des Gesamtenergieaufkommens der EU als thermische Energie anfällt. Energieangebot und Wärmenachfrage stimmen oft zeitlich und örtlich nicht überein, wodurch teure, meist fossile Überkapazitäten geschaffen werden müssen.

Mit thermischen Speichern lässt sich Angebot und Nachfrage ausgleichen und so verstärkt Abwärme nutzen, zeitlich fluktuierende Erneuerbare Energieträger in Wärmenetze einbinden und effizientere, rentablere Kraftwerke bauen.

Momentane Wärmespeichertechnologien haben vor allem hinsichtlich Kosten, Langzeitbeständigkeit, oder Umweltverträglichkeit Nachteile. Im Bereich über 100 °C erfordern die Speichermedien Wasser/Dampf oder Thermoöle erhöhten technischen und damit ökonomischen Aufwand, weshalb hier Technologiesprünge notwendig sind.

Die meisten industriellen Prozesse und Wärmenetze benötigen Energie auf einem zeitlich konstanten Temperaturniveau. Aufgrund des zugrundeliegenden Prinzips sind Latentwärmespeicher sensiblen Speichern überlegen: während des Phasenübergangs bleibt die Temperatur des Speichermediums nahezu konstant, hohe Phasenwechselenthalpien erlauben hohe Speicherkapazitäten und Leistungen. Die bisher untersuchten Latentwärmespeicher im angestrebten Temperaturbereich (80 bis 400 °C) basieren auf kleineren organischen Molekülen oder anorganischen Salzen, wobei aber aus Kostengründen nur wenige das Demonstrationsstadium erreicht haben.

Im einjährigen Vorprojekt „StoreITup!“, das zu Vorbereitung dieses Antrags diente, wurden weltweit erstmals 70 kostengünstige Polymere als Phasenwechselmaterialien (PCMs) systematisch untersucht. Davon sind 6 Materialklassen (PE, POM, PA, formstabile Polymere, Rezyklate, Compounds) besonders geeignet. Die vielfältigen Eigenschaften der Polymere ermöglichen den Einsatz von wesentlich kostengünstigen Wärmeübertrager- und Speicherkonzepten, wodurch eine breite Palette an Anwendungsfällen in Frage kommt: Prozesswärme, Solarthermie, Wärmenetze und Kraftwerke.

Ziel des Projektes „StoreITup-IF“ ist erstmalig Polymer-PCM-Speicher im Tonnen-Maßstab herzustellen und in der realen Einsatzumgebung zu testen. Die Speicher sollen industriell fertigbar und ökonomisch konkurrenzfähig sein.

Zunächst müssen dafür optimierte, günstige Polymere und Wärmeübertrager entwickelt und industriell hergestellt werden. Dann folgt der Bau und Test von Laborspeichern (TRL 4) für die besten PCM/HEX-Kombinationen. Am Ende werden erste Betriebserfahrungen bei der Abwärmenutzung in Kunststoff-Extrusion und Aluminium-Guss gesammelt (TRL 5) (Abbildung 1).

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

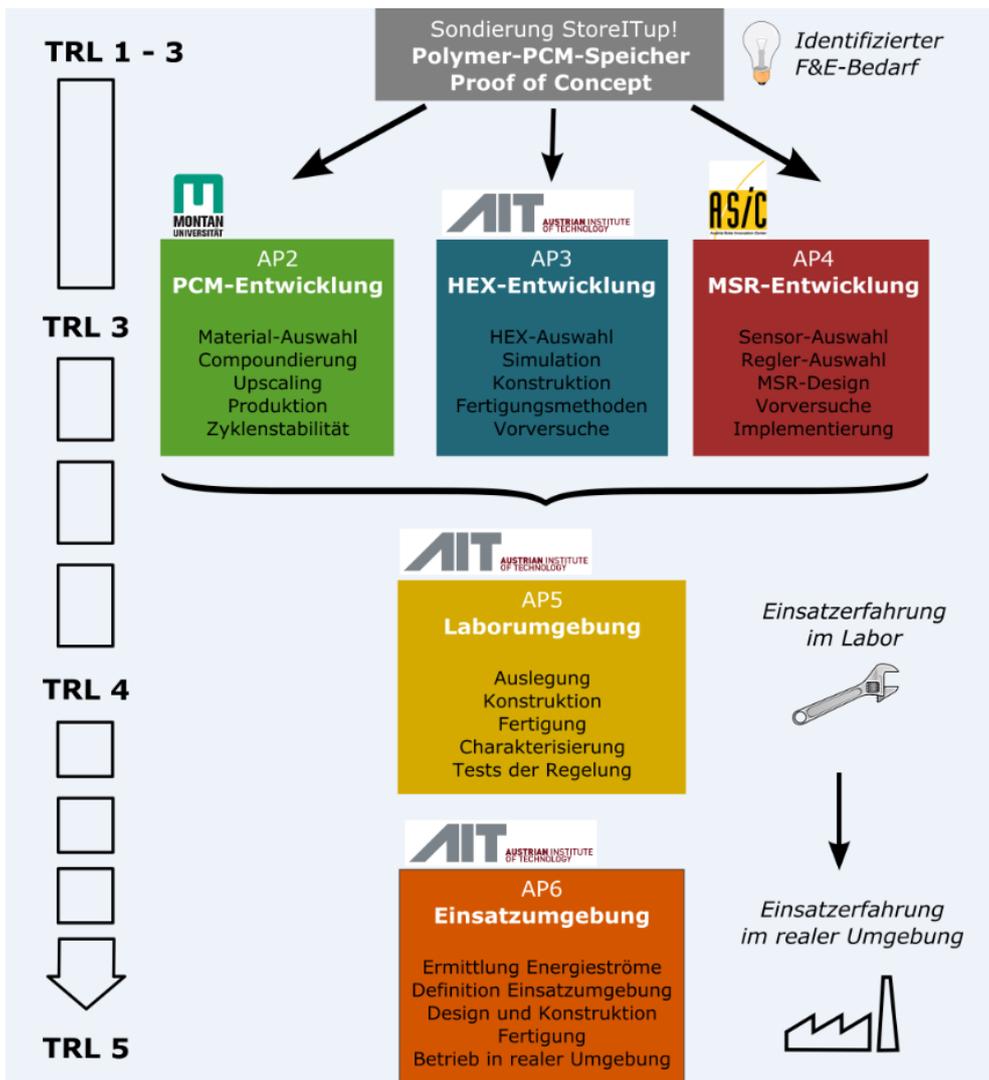


Abbildung 1: Struktur des Projekts StoreITup-IF

Nach dem Projekt ist klar, ob und wie ökonomische, leistungsfähige Polymer-PCM-Speicher großtechnisch gebaut werden können, welche Partner dafür notwendig sind und welche Anwendungen ein signifikantes Energieeinsparungs- und Marktpotential bieten.

Das Projekt behandelt prioritär Ausschreibungsschwerpunkt 5 des Energieforschungsprogramms, Speicher, (Subschwerpunkt: 5.4 Thermische Speicher) und liefert weiters Beiträge zu Schwerpunkt 2, Energieeffizienz und Energieeinsparungen (Subschwerpunkt: 2.1: Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe), Schwerpunkt 3, Erneuerbare Energien (Subschwerpunkt: Solarthermie) sowie Schwerpunkt 4, Intelligente Netze.

3 Inhaltliche Darstellung und Ergebnisse

3.1 Polymer-PCM-Speicher in der Anwendung (TRL5) (C. Zauner)

Ein Ziel im Projekt war das Untersuchen und Finden von konkreten Anwendungsgebieten für die entwickelten Polymer-PCM-Speicher in Industrieanwendungen und Wärmenetzen (in den HyCool (<https://hycool-project.eu/>) und Projekten Tes4seT (<http://tes4set.at/>) werden Anwendungsfälle für Solarwärme untersucht).

Es sollten Konzepte für energieeffiziente Anlagen mit Speichern entwickelt und diese auf Technology Readiness Level 5 (TRL5) umgesetzt und getestet werden.

Neben den Wärmenetzen wurden zwei Produktionstechnologien und Materialklassen für die Untersuchungen ausgewählt, welche einerseits weit verbreitet sind und andererseits einen generischen Charakter haben, sodass die dort gewonnenen Erkenntnisse auch auf andere Industrien und Prozesse übertragen werden können:

- Aluminiumdruckguss
- Extrusion in der Kunststoffindustrie

Neben der Kunststoffindustrie werden auch in anderen Industriezweigen wie Lebensmittel, Chemie, Pharmazie und als Strangpressen in der Metallindustrie ganz ähnliche Maschinen und Anlagen zur Herstellung verschiedener Güter und Halbzeuge verwendet. Der Aluminiumdruckguss ist eng verwandt mit Magnesiumdruckguss und dem Spritzguss, der ein wesentliches Verfahren in der Kunststoffindustrie dargestellt.

Die hier entwickelten Konzepte zur Erhöhung der Energieeffizienz lassen sich daher auf eine weite Palette an Materialien und Industriezweige übertragen.

3.1.1. Aluminiumdruckguss

3.1.1.1. Monitoring der Energieströme in einer Aluminium-Druckgussanlage

Ogleich es in der Literatur einige wenige Untersuchungen zum Verbrauch *elektrischer Energie* im Druckguss gibt, finden sich keine Daten zur benötigten *thermischen Energie*, welche jedoch den viel größeren Anteil an der Gesamtenergie einer Aluminiumdruckgussanlage darstellt, da das Einschmelzen des Aluminiums entsprechend energieintensiv ist.

Ebenso wenig gibt es Informationen über die genaue Aufteilung der Wärmeströme in einer Anlage und deren Temperaturniveaus, weshalb auch die Erstellung eines effizienten Abwärmekonzepts nicht fundiert möglich ist.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Daher wurde im ersten Projektschritt ein detailliertes Monitoring einer Druckgussanlage im Technikumsmaßstab am LKR Ranshofen vom AIT und LKR entwickelt und durchgeführt. Abbildung 2 zeigt die Squeeze Casting Maschine UBE HVSC 350 mit einer Zuhaltkraft von 350 Tonnen. Flüssiges Aluminium wird dabei unter hohem Druck in eine Form eingeschossen und mittels Wärmeträgermedium schnell unter die Erstarrungstemperatur gekühlt.

Als Gussteil wurde eine Stufenplatte mit 1.32 kg Schussgewicht gewählt, für welche bereits umfangreiche metallurgische und mechanische Informationen vorliegen und vom LKR langjährig untersucht wurde (Abbildung 3). Die festgelegte Legierung A226 (EN AC – 46000) ist preiswert und weit verbreitet und wird für Getriebe, Motorteile und Gehäuse in der KFZ-Industrie verwendet.

Ein detailliertes Sensor- und Messtechnikkonzept wurde entwickelt (Abbildung 4), um möglichst viele Wärmeströme, Temperaturen und Massenströme erfassen und berechnen zu können. Insbesondere wurden dabei beide Werkzeughälften der Druckgussmaschine und das Heiz-Kühl-Gerät instrumentiert. Ebenso wurde ein Ölbadkalorimeter zur Bestimmung der im Gussteil befindlichen Restwärme (nach der Entnahme aus der Druckgussmaschine) entwickelt und installiert.

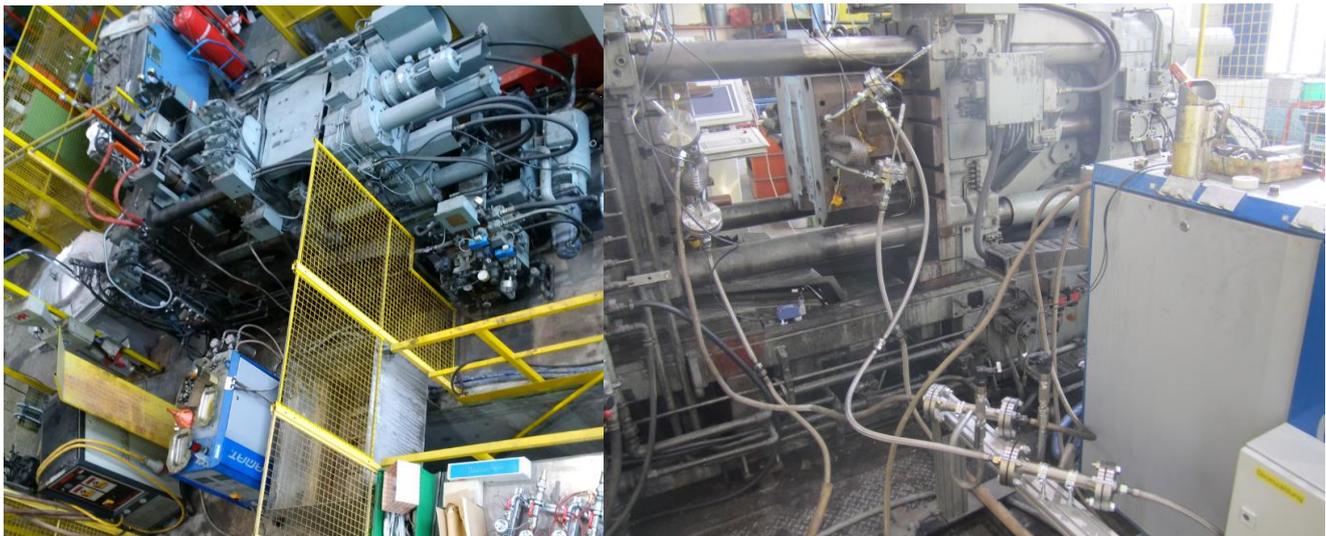


Abbildung 2: Links: Druckgussanlage im Technikum des LKR Ranshofen mit Heiz-Kühl-Gerät (blaue Maschine unten). Rechts: Frontansicht mit Heiz-Kühl-Gerät (rechts) und den Thermoölleitungen zur Werkzeugtemperierung.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

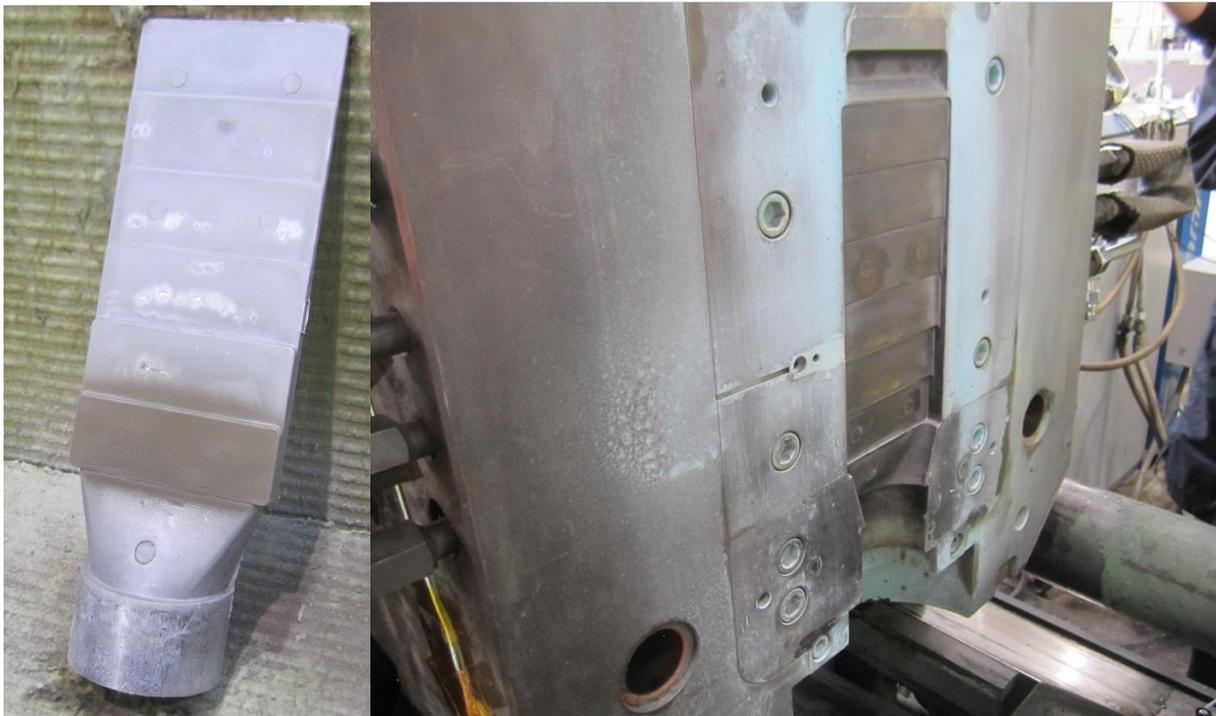


Abbildung 3: Links: Stufenplatte aus A226 mit einem Schussgewicht von 1.32 kg, welche als Referenzbauteil für das Monitoring ausgewählt wurde. Rechts: Aufgespanntes Werkzeug in der Druckgussanlage.

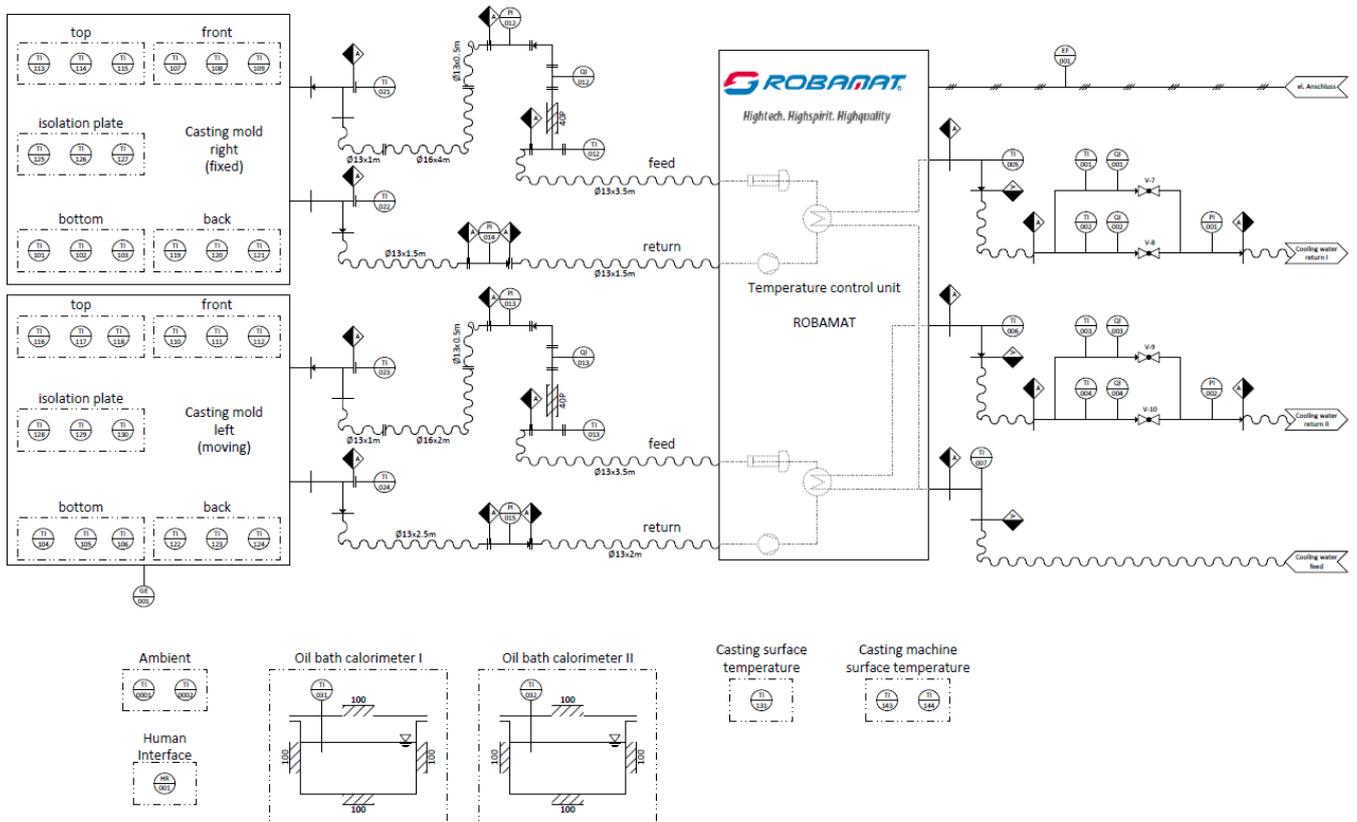


Abbildung 4: Schema des aufgebauten Monitorings mit verbauter Sensorik (links: feste und bewegliche Hälfte des Druckgusswerkzeugs; Mitte: Fluidmesstechnik; Rechts: Heiz-Kühl-Gerät mit zusätzlicher Messtechnik; unten: Ölbadkalorimeter und Zusatzsensoren)

Insgesamt wurden mehrere hundert Stufenplatten mit industriüblichen Druck- und Temperaturparametern gegossen. In Abbildung 5 sind exemplarische Messergebnisse dargestellt: Die Eintrittstemperaturen in die feste und bewegliche Formhälfte (Temperaturen unten) liegen im Mittel bei ca. 217 °C. Aufgrund der sehr einfachen 2-Stufen-Regelung (Heizer 0/50/100 %; Kurven „Electric Power“) der Heiz-Kühlgeräte schwanken diese allerdings sehr stark zw. Ca. 212 °C und 220 °C, wodurch keine konstanten Bedingungen in der Maschine und im Werkzeug möglich sind. Für eine effiziente Abwärmenutzung und optimale Produktion wäre eine Regelgenauigkeit auf +/- 1 °C um den Temperatursollwerte wünschens- und erstrebenswert.

Im oberen Plot der Abbildung 5 ist neben der elektrischen Heizleistung der Heiz-Kühl-Geräte die Netto-Wärmeleistung, welche das Thermoöl zum bzw. vom Druckgusswerkzeug transportiert und somit für eine potentielle Abwärmenutzung zur Verfügung stehen würde, dargestellt.

Mit dem Einschießen des flüssigen Aluminiums wird regelmäßig Wärmeenergie in das System eingebracht. Das im Vergleich zum Aluminium kalte Thermoöl kühlt das flüssige Aluminium im Gussteil und lässt dieses Erstarren und die Gussteile vor der Entnahme auf ca. 300 °C abkühlen. Dadurch erwärmt sich das Thermoöl entsprechend und muss vom Heiz-Kühl-Gerät rückgekühlt werden. Obgleich zwar tatsächlich netto Wärme aus dem Werkzeug abtransportiert wird, befindet sich das Heiz-Kühl-Gerät immer im Heizmodus. D.h. die Wärmeverluste im Gesamtsystem sind derart hoch, dass summa summarum (elektrische) Energie zugeführt werden muss anstatt tatsächlich Netto-Abwärme nutzen zu können.

Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen die unterschiedlichen Energieströme, die für die Systemgrenze Druckgusszelle und Druckgusswerkzeug auftreten. Eine detaillierte Auswertung der gesamten Monitoringdaten erlaubt schließlich die Erstellung von Sankey-Diagrammen zur Visualisierung der auftretenden Energieströme bezogen auf ein Gussteil (Abbildung 8, Abbildung 9).

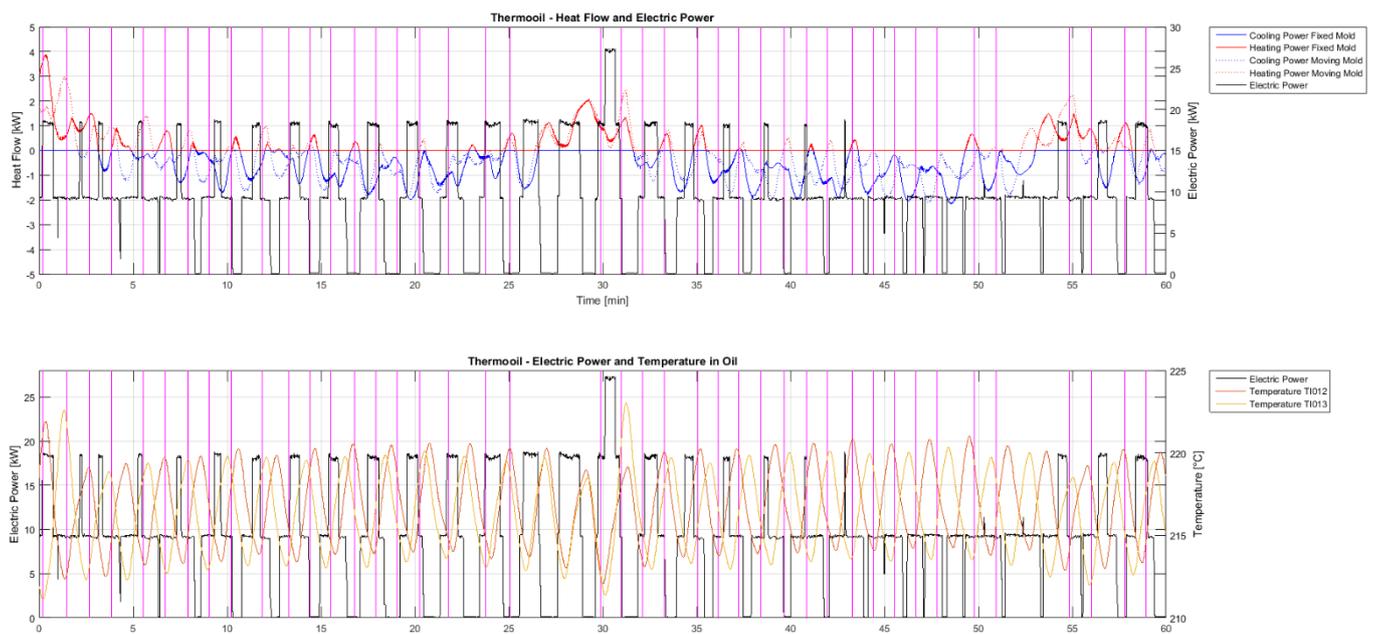


Abbildung 5: Oben: Elektrische Leistungsaufnahme des Heiz-Kühl-Geräts sowie Abwärme aus dem Druckgusswerkzeug ins Thermoöl. Unten: Die Werkzeugeintrittstemperaturen in die beiden Formhälften, welche aufgrund der sehr einfachen 2-stufigen Heizregelung um mehr als 10 °C schwankt.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

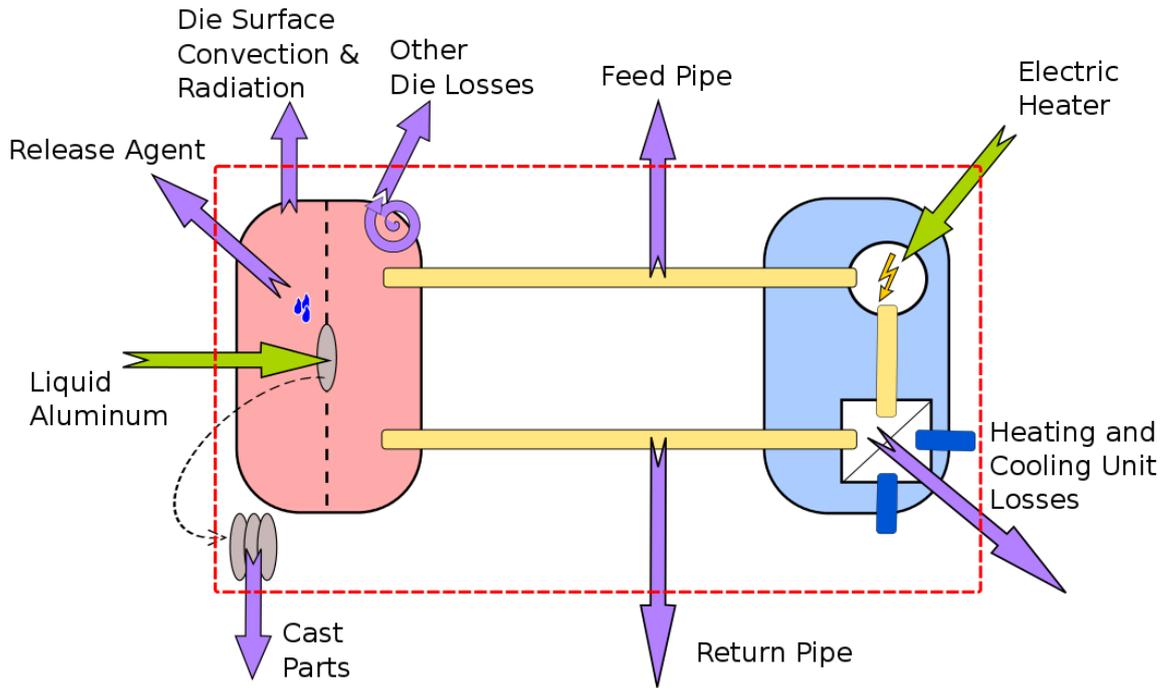


Abbildung 6: Energieströme die bei der Systemgrenze Druckgusszelle auftreten.

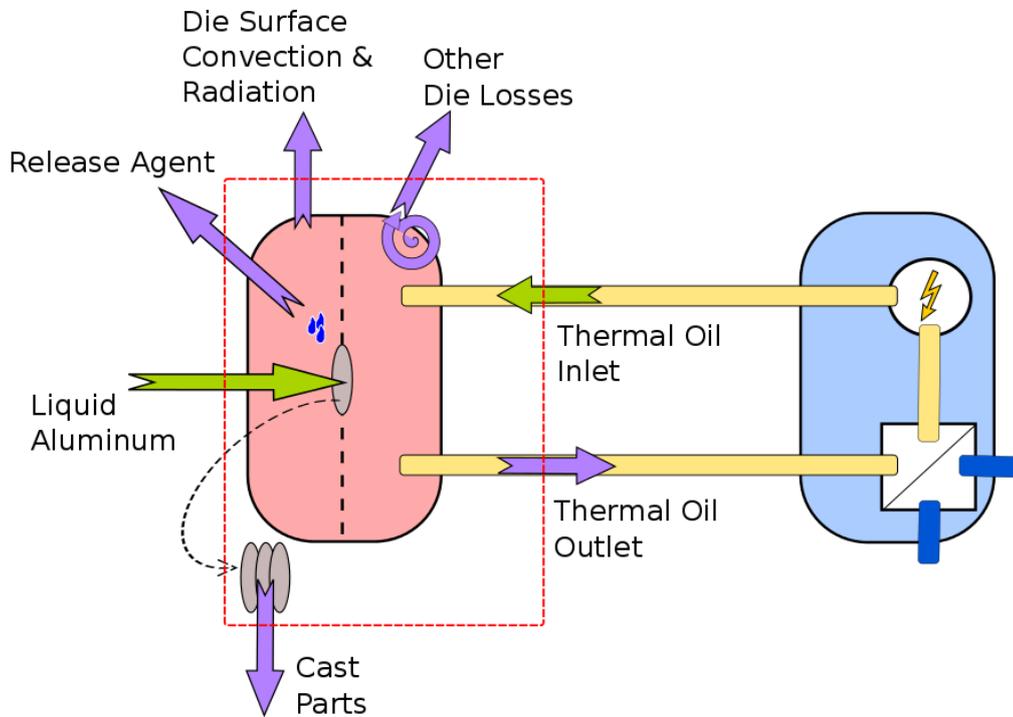


Abbildung 7: Energieströme die bei der Systemgrenze Werkzeug auftreten.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

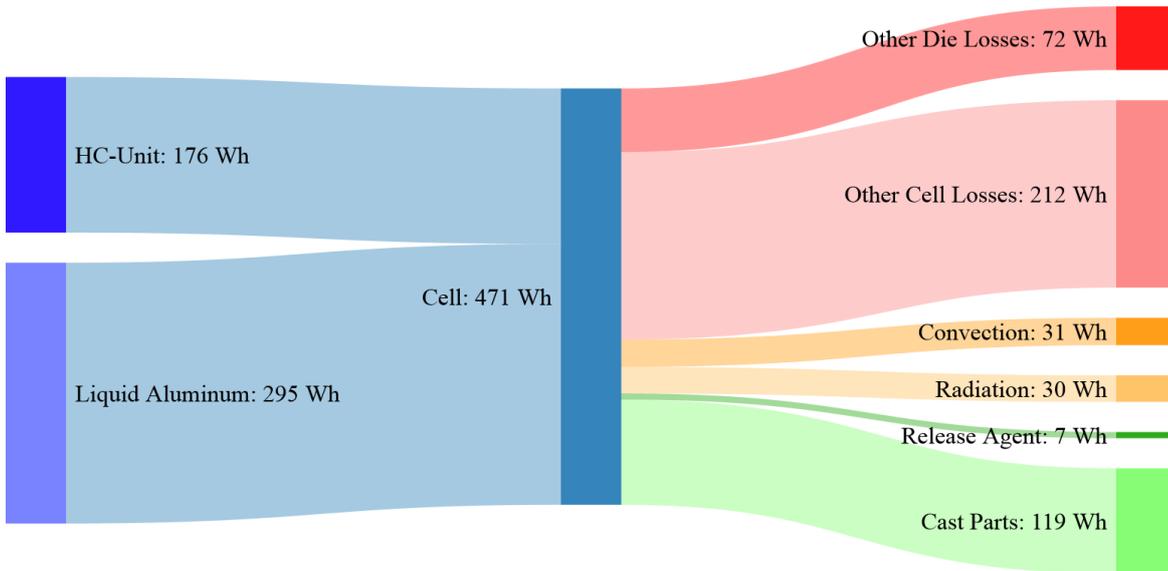


Abbildung 8: Sankey-Diagramm für die Systemgrenze Druckgusszelle.

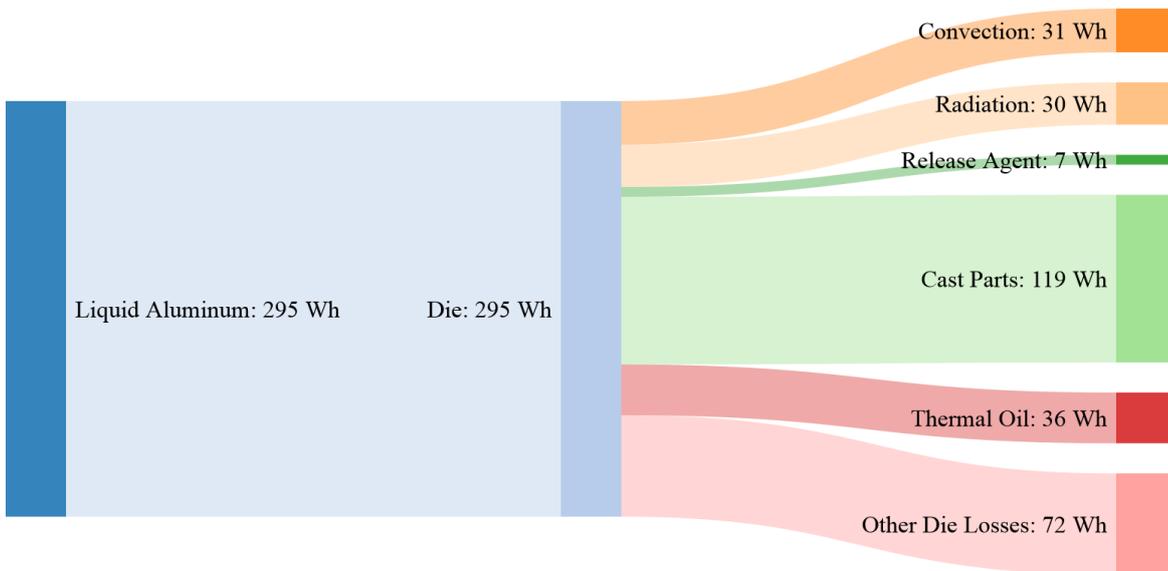


Abbildung 9: Sankey-Diagramm für die Systemgrenze Werkzeug.

Im System Druckgusszelle wird je Bauteil 295 Wh Wärme in Form von flüssigem Aluminium eingebracht. Aufgrund der auftretenden Wärmeverluste müssen zusätzlich noch 176 Wh Wärme durch das Heiz-Kühl-Gerät elektrisch zugeheizt werden. Das Druckgusswerkzeug ist gegenüber der Umgebung nicht und gegenüber der Druckgussmaschine nur schlecht thermisch isoliert, weshalb große Verluste auftreten (Radiation, Convection, Other Die Losses). Nach größere Verluste treten aufgrund der nicht isolierten Thermoölschläuche und Verlusten im Heiz-Kühl-Gerät auf¹. Die Verluste durch das

¹ Die hier verwendeten Schläuche sind auch in der Industrie üblich. Ebenso werden dort die bekannten „roten Schläuche“ mit einer wenige Millimeter dicken Isolierung verwendet. Eine solch dünne Isolierung ist dabei jedoch viel zu gering, um eine sinnvolle Wärmedämmung darstellen zu können.

Verdampfen der Schlichte sind hingegen sehr gering. Im Bauteil selbst, welches mit ca. 300 °C die Druckgusszelle verlässt, verbleiben ebenfalls noch ca. 119 Wh thermische Energie.

Im System Druckgusswerkzeug werden 295 Wh Wärme in Form von flüssigem Aluminium eingebracht. Als Abwärme ist direkt nur jener Teil nutzbar, der ins Thermoöl übertragen wird und damit zu anderen Prozessen/Anlagen „transportiert“ werden kann. Mit 36 Wh sind das nur rund 12 %. Die verbleibende Wärme im Gussteil, welche ca. 40 % beträgt, kann nur durch eine Erweiterung und Adaptierung der bestehenden Druckgussanlagen (siehe 3.1.1.2) nutzbar gemacht werden. Wesentliche Voraussetzung für eine energieeffiziente Gießerei ist zudem eine unbedingte Verringerung der Wärmeverluste an möglichst vielen heißen Anlagenteilen (insb. Schläuche und Werkzeug).

Nach der erstmaligen Analyse der thermischen Energieströme und möglichen Abwärmepotentiale erfolgte die Erarbeitung eines Abwärmenutzungskonzepts für den Druckguss. Obwohl eine Nutzung auch innerhalb der Druckgusszelle möglich ist, wird das volle Potential erst bei der Betrachtung der gesamten Gießerei ersichtlich und optimal erschließbar.

3.1.1.2. Entwicklung des Konzepts einer energieeffizienten Gießerei mit Polymer-PCM-Speichern

In industriellen Gießereien nach dem momentanen Stand der Technik (Abbildung 10) werden verschiedene Gussteile parallel in mehreren unterschiedlichen Druckgusszellen produziert. In einer zentralen Schmelzerei werden verschiedene Aluminiumlegierungen eingeschmolzen und zu den Druckgusszellen transportiert. Die Werkzeuge für verschiedenen Gussteile werden in eigenen Bereichen gelagert und bei Bedarf an den Druckgusszellen montiert. Bei größeren Druckgussmaschinen können 20 Temperierkanäle oder mehr im Werkzeug notwendig sein, welche mit separaten Heiz-Kühl-Geräten bedient werden (d.h. bis zu ca. 10 Geräte je Druckgusszelle). Jedes dieser Geräte ist dabei mit separaten Pumpe, Heizer und Kühl-Wärmetauscher je Temperierkanal ausgestattet. Roboter entnehmen die Gussteile und tauchen sie zur Abkühlung in ein kaltes Wasserbecken mit ca. 20-40 °C. Nach der ersten mechanischen Bearbeitung (z. B. Stanzen, Entgraten) werden manche Teile in speziellen Öfen einer Wärmebehandlung zur Optimierung der mechanischen Eigenschaften unterzogen. In der folgenden mechanischen Bearbeitung erfolgen schließlich die finalen Prozessschritte an den Produkten und Halbzeugen.

Wie aus der schematischen Darstellung in Abbildung 10 erkennbar, gibt es kein zentrales Energieversorgungssystem, sondern nicht verbundene Einzellösungen. Die Heiz-Kühl-Geräte beheizen die Werkzeuge elektrisch und kühlen das erwärmte Thermoöl aus den Werkzeugen mittels Kaltwasser, das von einem zentralen Kühlsystem rückgekühlt wird. An dieses sind auch die Kaltwasserbecken angeschlossen. Die Schmelz- und Wärmebehandlungsöfen werden mit eigenen Gasbrennern betrieben, ebenso wie die Hallen- und Gebäudeheizung². Da oftmals für die finale mechanische Bearbeitung konstante Raumtemperaturen notwendig sind, gibt es dort ein zusätzliches Klimatisierungssystem. Summa summarum findet in Standardgießereien jedoch keine Abwärmenutzung statt und thermische Isolierung zur Verringerung von Wärmeverlusten wird nicht eingesetzt. Teilweise geschieht beides

² Meist wird mit Gas geheizt, teilweise aber auch mit Öl, seltener Fernwärme, Biomasse oder Wärmepumpen.

Um eine Gießerei energetisch und zugleich prozesstechnisch optimieren zu können, ist eine Überarbeitung und Erweiterung der bisherigen Standard-Gießereien notwendig. Daher wurde das Konzept einer „Effizienten Gießerei“ entwickelt und schematisch in Abbildung 11 dargestellt. Nur durch eine energetische und informationstechnische Vernetzung unterschiedlicher Anlagen und Maschinen ist eine wesentliche Steigerung der Energieeffizienz durch Abwärmenutzung und thermische Isolierung möglich. Ebenso ist ein zentrales Leitsystem unumgänglich, um einerseits das komplexe Gesamtenergiesystem und zugleich die Produktionsanlagen gemeinsam optimiert zu steuern und zu überwachen.

Im Detail werden folgende energetische Optimierungsmaßnahmen vorgeschlagen, welche eine Reduktion des Energieverbrauchs um bis zu 50 % erlauben:

- Zentrales Wärmeverteilsystem (thermisch isoliert) mit mehreren Temperaturschienen und Medien (Wasser, Druckwasser, Thermoöl), optimiert und angepasst je nach Produkten und Anlagen
- Wärmerückgewinnung aus dem heißen Rauchgas der Schmelzöfen
- PCM-Speicher bis 400 °C zur Abwärmepufferung aus den Schmelzöfen und zur Spitzenlastglättung der verschiedenen Verbraucher
- Aluminiumvorwärmofen zur Vorwärmung der Aluminiummasseln und des Kreislaufmaterials auf bis zu 400 °C.
- Werkzeugvorwärmstation zur Vorwärmung der Werkzeuge auf bis zu 400 °C zur Verkürzung von Rüstzeiten und Vermeidung von schädlichem „Warmschießen der Werkzeuge“.
- Thermische Isolierung von heißen Anlagenteilen (insb. Druckgussmaschine) und Schläuchen mit ausreichend großen Dämmstärken zur drastischen Verringerung der Wärmeverluste. Erst dadurch wird es möglich einen Großteil der Abwärme in das Werkzeugkühlmedium zu transferieren und dadurch nutzbar zu machen.
- Konturnahes Kühlen durch angepasste 3-dimensionale Kühlkanalstrukturen. Dadurch ist eine Erhöhung der Fluidtemperatur in den Kühlkanälen auf bis zu 300 °C möglich, wodurch eine verbesserte Abwärmenutzung möglich ist.
- Mehrzonen-Heiz-Kühlgeräte mit deutlich geringerer Zahl an Pumpen, Heizern und Kühl-Wärmetauschern mit höherer Effizienz im Vergleich zu mehreren Einzelgeräten. Zusätzlich erlauben die „Übergabestationen“ die Übertragung der Abwärme aus den Gusszellen an das zentrale Wärmeverteilsystem.
- PCM-Speicher bis 300 °C zur Abwärmepufferung aus den Druckgusszellen und zur Spitzenlastglättung der verschiedenen Verbraucher.
- Nutzung der verbleibenden Restwärme der Gussteile nach deren Entnahme aus dem Werkzeug³. Die Teile werden dabei in einem Hochtemperaturwasserbad (60 – 90 °C) abgekühlt.
- Einsatz einer Hochtemperaturwärmepumpe, welche das Hochtemperaturwasserbad als Wärmequelle nutzt (und dadurch rückkühlt). Die Wärmepumpe pumpt die Abwärme im Wasserbad auf 120 – 180 °C.
- Nutzung der Abwärme in einer thermisch angetriebenen Absorptionswärmepumpe, welche die mechanische Bearbeitung klimatisiert.

³ Die mittlere Gussteiltemperatur kann bis zu 300 °C bei der Entnahme aus den Druckgusszellen betragen.

- Nutzung der Abwärme zur Hallen- und Gebäudeheizung.
- Nutzung der Abwärme mittels Fernwärmeauskopplung.
- Durch optimierte Nutzung der unterschiedlichen Abwärmequellen kann die verbleibende Last für die Rückkühlanlagen deutlich reduziert werden, wodurch diese einerseits kleiner dimensioniert werden können. Dadurch ergibt sich einerseits eine Verringerung der Invest- und Betriebskosten als auch der notwendigen elektrischen Energie für die Rückkühlsysteme. Durch die erhöhten Fluidtemperaturen sind zudem günstige, effiziente und wasserverbrauchsfreie „Free Cooling-Anlagen“ möglich.

Auf der informationstechnischen Seite ermöglichen folgende Neuerungen die gleichzeitige energetische als auch prozesstechnische Optimierung und stellen ein echtes „Industrie 4.0“ System dar:

- Zentrales Prozessleitsystem zur Überwachung und Steuerung aller wesentlichen Prozesse und Anlagen
- Digitaler Zwilling der wesentlichen Anlagen als Grundlage für künftige Prozessoptimierungen sowie zur Prozessüberwachung
- Mögliche Anbindung der Systeme und Daten an industrielle Cloud-Lösungen, um die dort verfügbaren Methoden zur Prozessüberwachung und -analyse verwenden zu können (z. Bsp. mittels machine learning).
- Vernetzung der Anlagen durch Verwendung des universellen OPC-UA-Busstandards.
- Durch obige Systeme sind die verschiedenen Anlagen einer einzelnen Gießerei vernetzt und können ebenfalls mit jenen von anderen Gießereien in Verbindung gebracht werden („Internet of Things“)
- Steuerung der Anlagen und des Prozessleitsystems mittels Augmented Reality. An der Anlage wird dadurch dem Operator ermöglicht sich frei und mit beiden Händen verfügbar in der Anlage zu bewegen und diese von allen Positionen aus zu bedienen. Ebenso kann die Anlage von jedem beliebigen (erlaubten) Ort gesteuert werden, ohne vor Ort anwesend sein zu müssen.
- Die Systemüberwachung der Anlagen mittels Augmented Reality erfolgt zusätzlich durch den Einsatz von IP-Kameras, die in der Datenbrille virtuell angezeigt werden. Dadurch können auch nicht zugängliche, neuralgische Anlagenteile jederzeit von jeder Position in der Anlage vom Operator kontrolliert werden.
- Visualisierung der Prozess- und Anlagendaten mittels Augmented Reality. Wichtige Informationen werden den realen Maschinen virtuell überlagert und erlauben dem Operator eine schnelle Vor-Ort-Analyse der Systeme auch an Anlagenteilen, von denen die fixen Computerbildschirme nicht sichtbar sind. Die verschiedenen Prozessfenster können im virtuellen Cockpit des Operators an beliebigen Positionen in der Halle angeordnet werden und jederzeit wieder geändert oder gelöscht werden.
- Automatisierte Kontrolle der Gussteile mittels In-Line Sensorik und/oder Kameras mit genauer Bauteilzuweisung an das zentrale Leitsystem. Insbesondere durch Verwendung von Bilderkennungsalgorithmen (basierend auf Artificial Intelligence) ist eine automatische Erkennung von „Schlecht-Teilen“ möglich.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

- Die Verwendung von moderner automatisierter Datenanalysesoftware (basierend auf Artificial Intelligence) ermöglicht die Korrelation von „Schlecht-Teilen“ mit verschiedenen Prozessparametern zur automatischen Erkennung von suboptimalen Prozesseinstellungen, welche letztendlich ebenso automatisch korrigiert und optimiert werden können.
- Arbeitsanweisungen unterstützt durch Augmented Reality, um einerseits „hands-free“ arbeiten zu können und andererseits wesentlich gezieltere, detailgetreuere und optimalere Anleitungen anbieten zu können.
- Inbetriebnahme und Wartung mittels Augmented Reality, um durch die Unterstützung von (externen), nicht anwesenden Experten auch nicht hochgeschultem Personal die Fehlerfindung und -behebung an Anlagen zu ermöglichen.

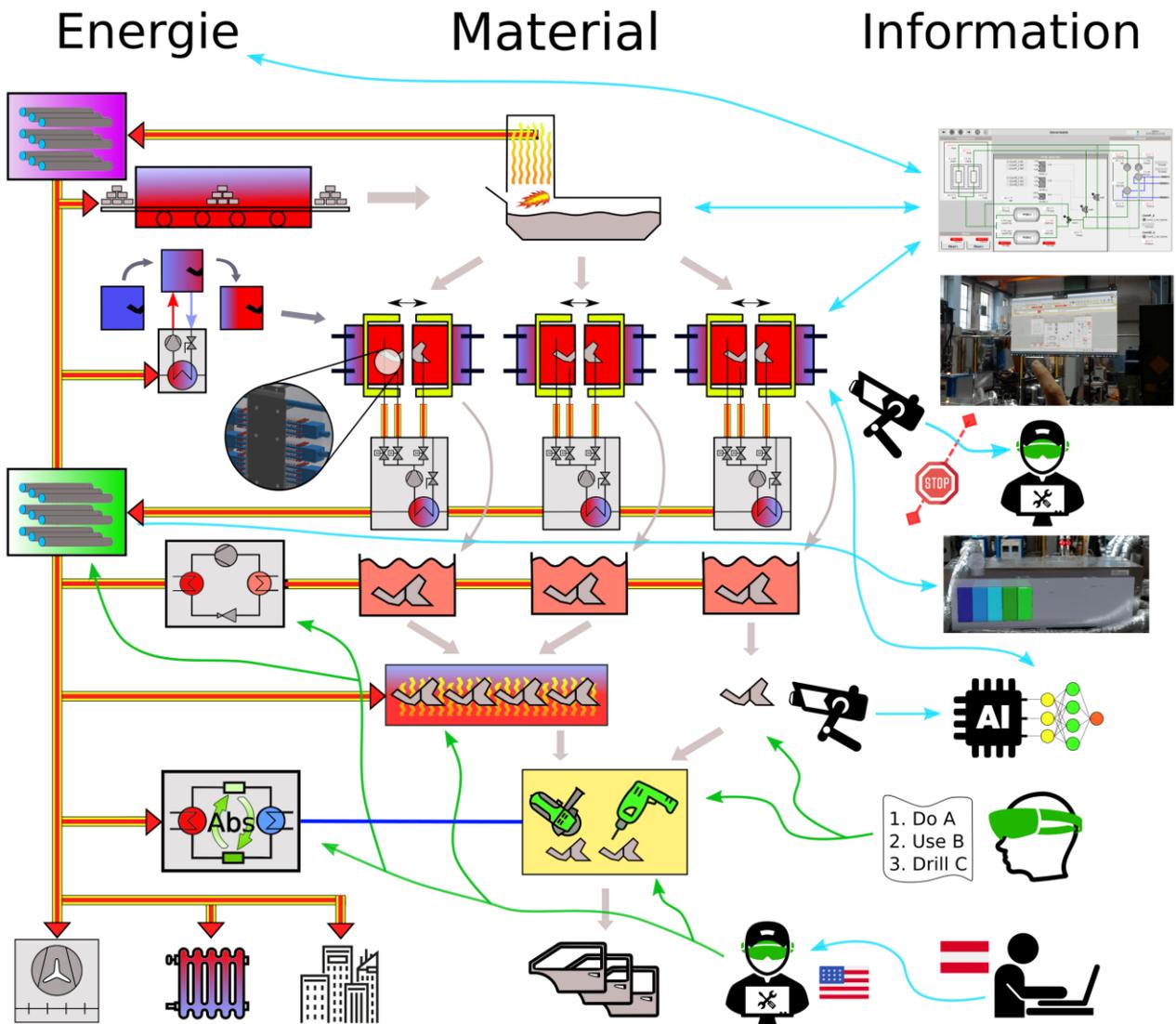


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Effizienten Gießerei. Die verschiedenen Prozesse sind energie- und informationstechnisch hoch vernetzt. Erst dadurch ist eine Abwärmenutzung durch Verbindung verschiedener Wärmequellen und -senken inklusive Pufferung und Spitzenglättung durch PCM-Speicher möglich. Eine energetische und prozesstechnische Gesamtsystemüberwachung und -optimierung wird durch ein zentrales Leitsystem und die Verwendung von modernen IT-Methoden (insb. Augmented Reality, Artificial Intelligence)

ermöglicht und stellt dadurch ein echtes „Industrie 4.0 System“ dar. Die Abbildung enthält modifizierte svg-Icons von flaticon.com (Hololens Frontansicht, IP-Kamera, Arbeiter, Flex, Bohrmaschine, Kühler, Stadt, Autotüre), onlinewebfonts.com (AI-Chip, PC-Arbeiter), freepik.com (USA/AUT-Fahne, Stopp-Schild), Microsoft (Hololens Seitansicht).

Für die Betreiber einer Gießerei ergeben sich durch die Umsetzung möglichst vieler der skizzierten Optimierungsmaßnahmen insbesondere folgende Vorteile:

- Energieverbrauch wird minimiert durch Isolierung und Abwärmenutzung
- Insbesondere durch konturnahes Kühlen und verbesserte Prozessparameter wird die Stückzahl maximiert
- Verlängerte Werkzeuglebensdauer durch Verringerung der Thermospannungen in den Werkzeugen aufgrund der höheren Temperatur der Fluide im Werkzeug.
- Durch optimierte Kühlkanäle und verbesserte Prozessparameter kann die Abkühlgeschwindigkeit in den Gussteilen erhöht werden, was sich positiv auf die Mikrostruktur und damit die mechanischen Eigenschaften der Gussteile auswirkt
- Die Werkzeugvorwärmung ermöglicht eine Verringerung der Rüstzeiten
- Durch die verschiedenen informationstechnischen Methoden und das zentrale Leitsystem wird eine Nachverfolgbarkeit von Fehlern und deren Behebung wesentlich erleichtert
- Obige Maßnahmen führen vielfältig direkt oder indirekt zur Senkung von Invest-, Betriebs und Personalkosten

3.1.1.3. Demonstration einer energieeffizienten Druckgussanlage mit Polymer-PCM-Speicher auf TRL5

Um die Machbarkeit und Vorteile der Effizienten Gießerei demonstrieren zu können wurde im Technikum des LKR Ranshofen eine völlig neue Anlage rund um die neue Kaltkammer-Druckgussmaschine DAK1100-112 (Zuhaltkraft 12100 kN) mit den wichtigsten Innovationen konzipiert und auf TRL5 aufgebaut (Abbildung 12):

- Zentrales Wärmeverteilsystem zur Wärmerückgewinnung aus dem Druckguss, Speicherung und Abwärmenutzung (Abbildung 13, Abbildung 14, Abbildung 15)
- Thermische Isolierung aller Schläuche zur Minimierung der Wärmeverluste (Abbildung 16)
- Zentrales Leitsystem zur Steuerung, Datenerfassung und -visualisierung der gesamten Anlage (vor Ort und remote) (Abbildung 17)
- Vernetzung der unterschiedlichen Maschinen und Anlagenkomponenten mittels OPC-UA (Abbildung 17)
- Werkzeug mit konturnahen 3-dimensionalen Kühlkanälen zur optimierten Gussteilkühlung und Wärmerückgewinnung aus dem Gussprozess (Abbildung 18, Abbildung 19)
- Optimierung der Prozessparameter zur Erhöhung der Taktzeit bei gleichbleibender Gussteilqualität (Abbildung 20, Abbildung 21, Abbildung 22)
- Erhöhung der Thermoöltemperatur im Werkzeug zur optimierten Abwärmenutzung und Erhöhung der Werkzeuglebensdauer (Abbildung 21, Abbildung 23)

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

- Polymer-PCM-Speicher zur Speicherung der Abwärme aus dem Gussprozess (Abbildung 24, Abbildung 25, Abbildung 26)
- Nutzung der zwischengespeicherten Abwärme für die Aluminium- oder Werkzeugvorwärmung (Abbildung 27)
- Digitaler Zwilling der Druckgussmaschine und Polymer-PCM-Speicher zur Anlagen- und Komponentenüberwachung, -auslegung und -optimierung (Abbildung 28, Abbildung 29)
- Steuerung und Überwachung der gesamten Anlage mittels Augmented Reality (Abbildung 30)
- Visualisierung von wichtigen Systemdaten mittels Augmented Reality (Abbildung 31)
- Einbindung und Übertragung von Anlagendaten in Cloud-Systeme mit automatisierten Analysemethoden basierend auf Artificial Intelligence (Abbildung 32)
- Inbetriebnahme, Arbeitsanweisungen für Reparaturen und Wartung, Schulungen und Kommunikation mittels Augmented und Virtual Reality (Abbildung 33)

Je nach den produzierten Gussteilen, den verwendeten Anlagen und deren technischen Details sowie den umgesetzten Innovationen sind nach Modellberechnungen, die mit den durchgeführten Versuchen abgeglichen wurden, Energieeinsparungen bei Gießereien von bis zu 50 % möglich.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

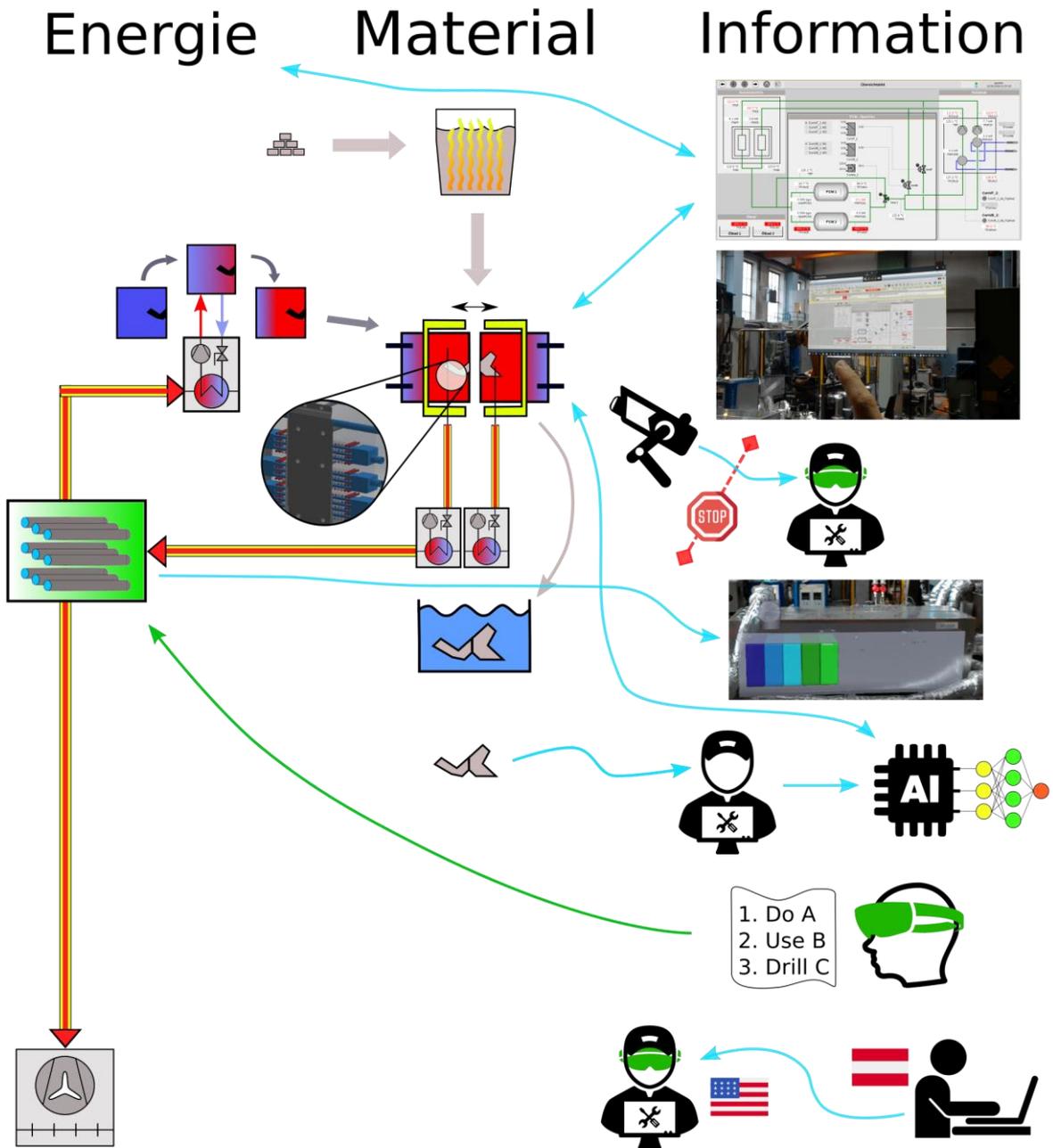


Abbildung 12: Schematische Darstellung der effizienten Druckgussanlage wie sie am Technikum des LKR Ranshofen aufgebaut wurde. Die wesentlichen Komponenten und Systeme der effizienten Gießerei wurden erfolgreich aufgebaut und getestet. Insbesondere ein Polymer-PCM-Speicher auf TRL5. Die Abbildung enthält modifizierte svg-Icons von flaticon.com (Hololens Frontansicht, IP-Kamera, Arbeiter, Kühler), onlinewebfonts.com (AI-Chip, PC-Arbeiter), freepik.com (USA/AUT-Fahne, Stopp-Schild), Microsoft (Hololens Seitansicht).

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

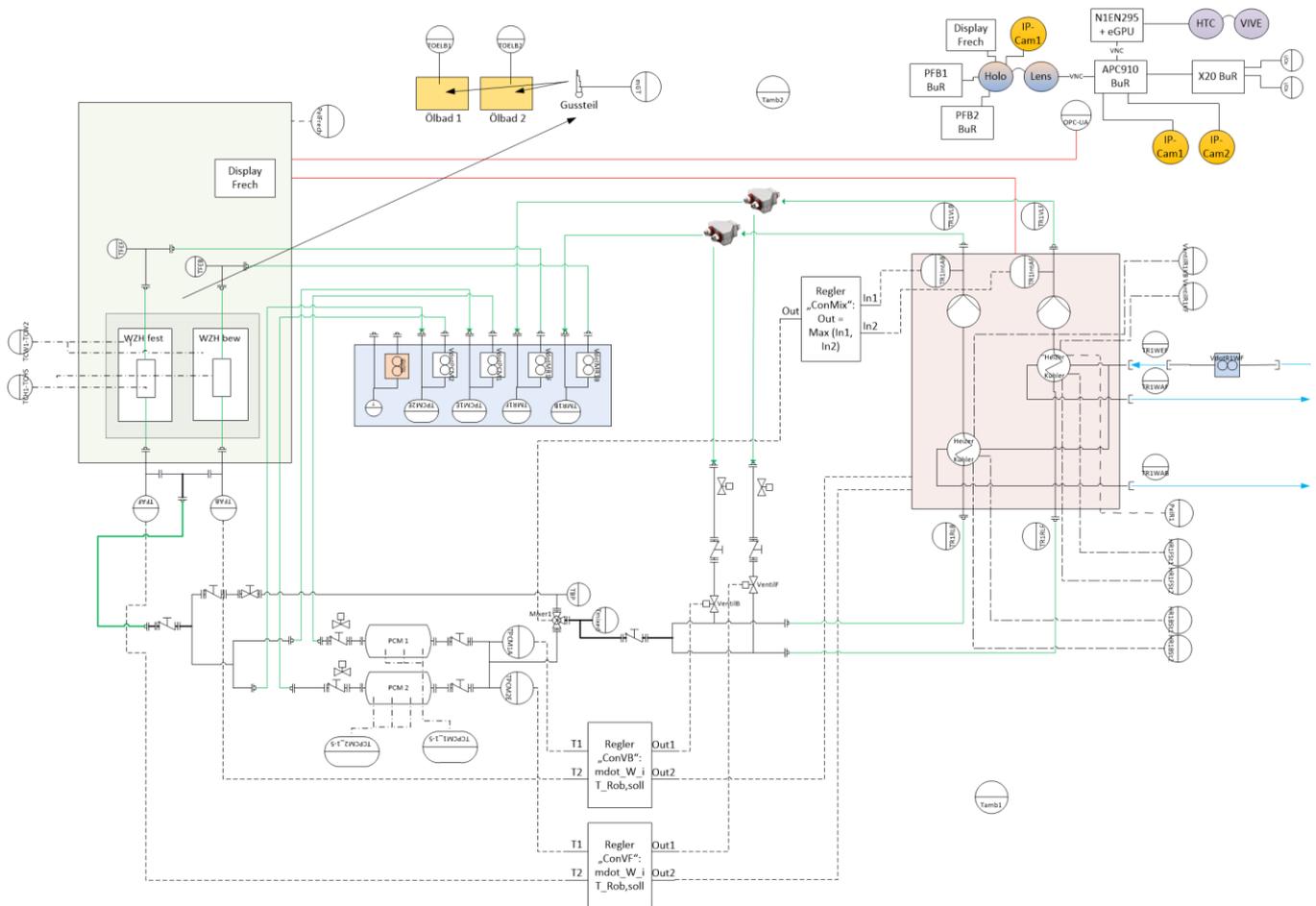


Abbildung 13: R&I Fließschema der LKR-Anlage bestehend aus Druckgussmaschine (links grün), Heiz-Kühl-Gerät (rechts rosa), Polymer-PCM-Speicher inklusive Armaturen und Regler sowie dem zentralen Leitsystem inklusive Augmented Reality und Cloud-Anbindung (rechts oben).

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Abbildung 14: Gesamtaufnahme der LKR-Druckgussanlage mit dem Polymer-PCM-Speicher vorne, den Heiz-Kühl-Geräten (blau-weiß), Anlagenmesstechnik, Druckgussmaschine, Schmelzofen, Roboter und den isolierten Leitungen.



Abbildung 15: Detailaufnahme der LKR-Anlage mit dem Monitor des Leitsystems (rechts,) Anlagenmesstechnik (links), dem Polymer-PCM-Speicher (Mitte, hinten) sowie den isolierten Leitungen.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

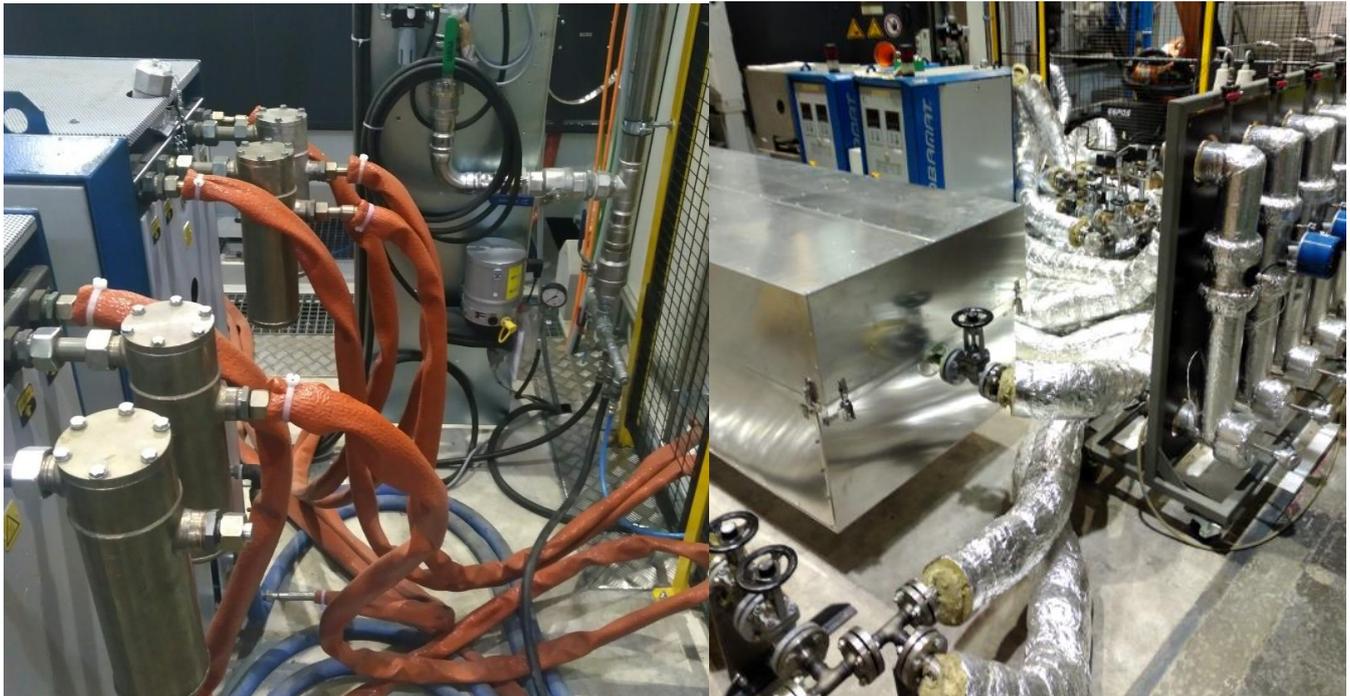


Abbildung 16: Links: Die in Gießereien oft verwendeten „roten Schläuche“ besitzen eine viel zu geringe Dämmstärke (nur wenige Millimeter) um Wärmeverluste hinreichend zu verringern. Rechts: Daher wurden bei der neuen Anlage Metallschläuche verwendet, welche vor Ort ausreichend thermisch isoliert wurden. Um eine ausreichende Dämmwirkung zu erzielen sind, je nach Temperatur des Fluids, 3-5 cm Dämmstärke notwendig.

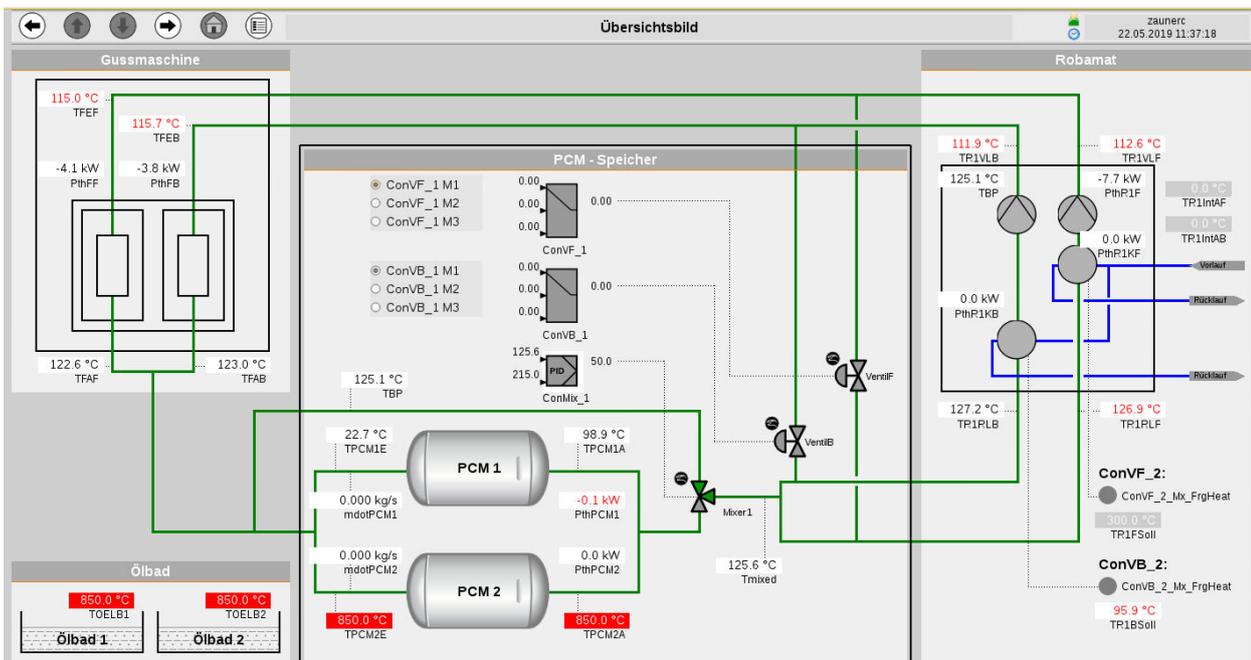


Abbildung 17: Ein zentrales Leitsystem zur Überwachung und Steuerung des Gesamtsystems wurde mit Bernecker und Rainer (B&R) realisiert. 2 OPC-UA- Server und mehrere Clients ermöglichen eine vollständige Vernetzung bis hin zu Cloud-Anbindungen. Insgesamt wurden ca. 150 I/Os ins System integriert und spezielle Reglungsalgorithmen entwickelt. Das System kann vor Ort oder auch remote bedient werden und gibt dadurch einen vollständigen Systemüberblick als Grundlage für eine Systemoptimierung.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

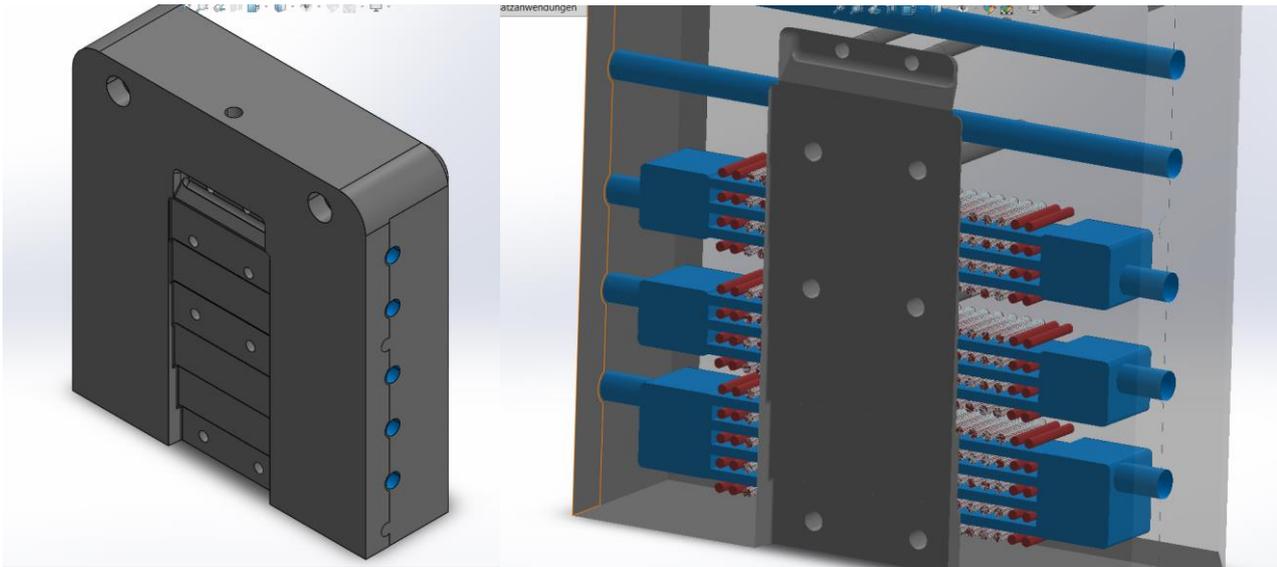


Abbildung 18: Ein neuartiges Kühlkanalkonzept („konturnahes Kühlen“) wurde für das Druckgusswerkzeug entwickelt, welches sowohl höhere Taktzeiten, weniger Thermospannungen und dadurch höhere Werkzeugstandzeiten als auch eine optimierte Wärmerückgewinnung ermöglicht. Das Werkzeug wird von der Fa. Hermle additiv gefertigt und von LKR, AIT und Hermle entwickelt.

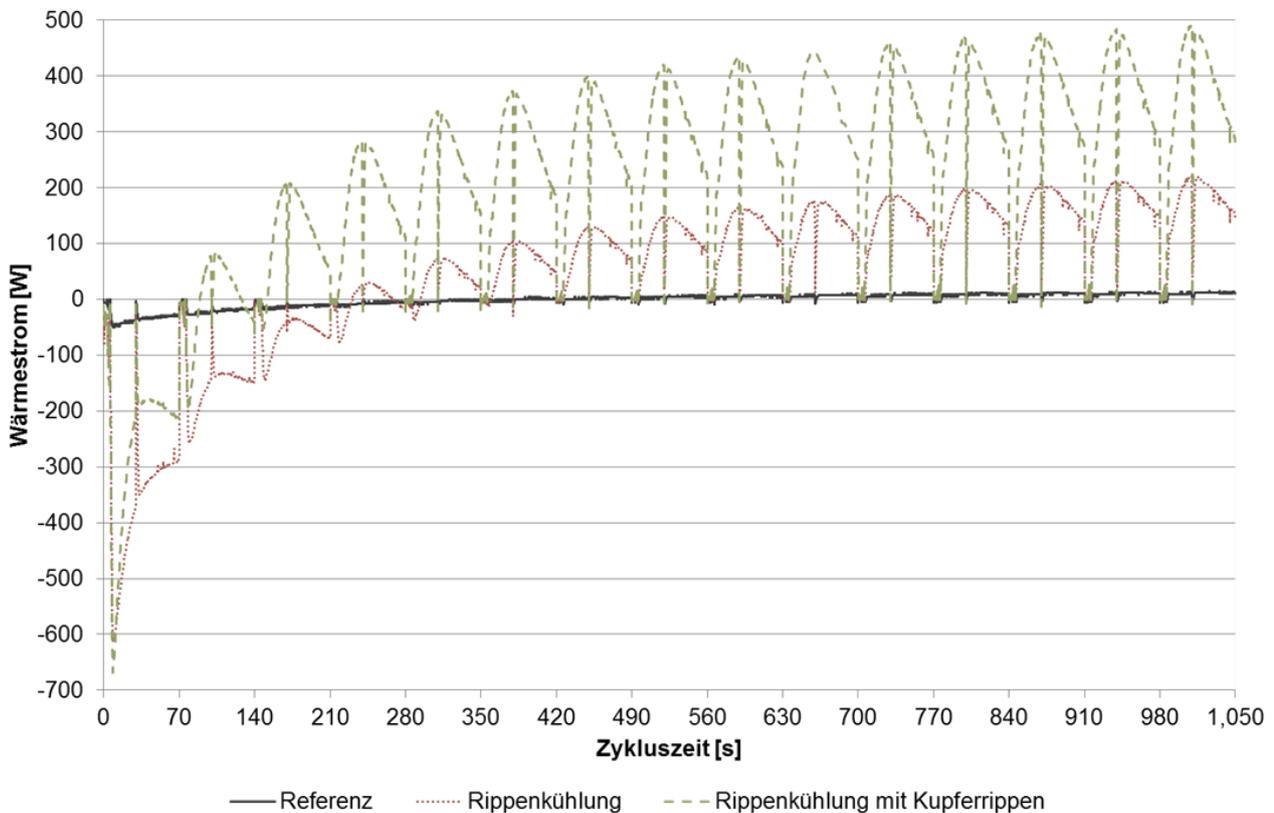


Abbildung 19: Vergleich der aus dem Werkzeug extrahierbaren Abwärme für ein Standardwerkzeug (Referenz), ein Werkzeug mit konturnahen Kühlkanälen (Rippenkühlung) sowie ein Werkzeug mit konturnahen Kühlkanälen und zusätzlichen Kupfereinlagen (Rippenkühlung mit Kupferrippen). Erst durch die optimierten Kühlkanäle kann das Abwärmepotential bestmöglich gehoben werden.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

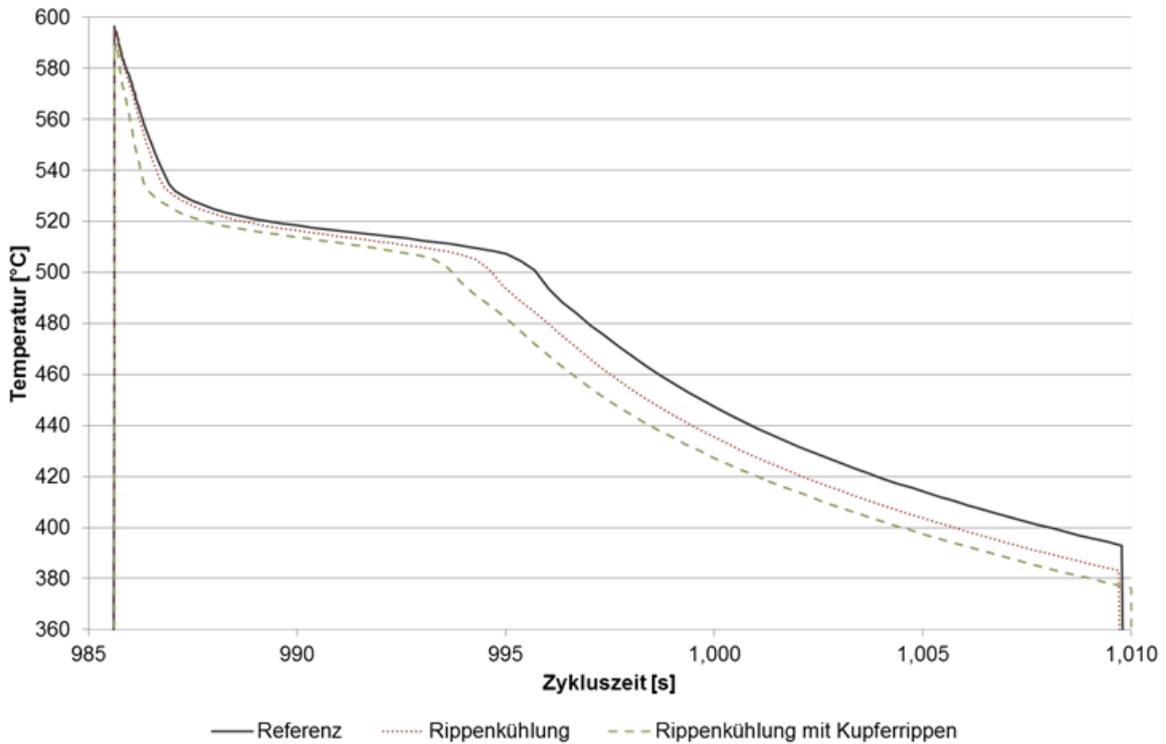


Abbildung 20: Auswirkung der verschiedenen Kühlkonzepte (vgl. Abbildung 19) auf die Gussteilwandtemperatur. Durch die effizienteren Kühlkanäle beim konturnahen Kühlen, kühlt das Aluminium schneller ab, wodurch eine Verringerung der Schusszeit und damit eine Erhöhung der Produktionstaktzeit ermöglicht wird.

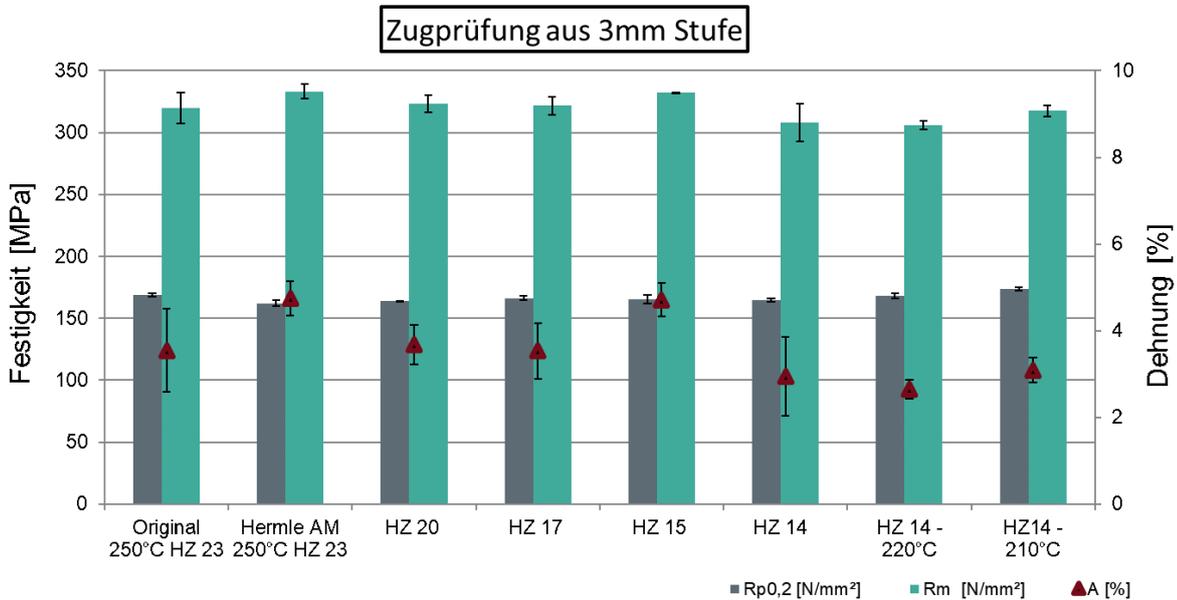


Abbildung 21: Durch die Verwendung der 3-dimensionalen konturnahen Kühlung, kann eine wesentliche bessere Kühlleistung erreicht werden, wodurch es möglich ist, die Thermoölmtemperatur auf bis zu 300 °C zu erhöhen. Die Abwärme steht damit auf einem höheren Temperaturniveau zur Verfügung und kann besser und vielseitiger genutzt werden (Exergie). In diesem Versuch wurde anstelle von 210 °C mit 250 °C Thermoöleintrittstemperatur und unterschiedlichen Haltezeiten (HZ 20...Haltezeit 20 Sekunden) gegossen. Es konnte dabei gezeigt werden, dass die geforderten mechanischen Eigenschaften weiter erreicht werden können.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Abbildung 22: Vergleich der Mikrostruktur für konventionelles Kühlen mit 210 °C Thermoöleintrittstemperatur und 250 °C mit konturnahem Kühlen. Durch die verbesserte Kühlleistung wird ein schnelleres Abkühlen möglich, was sich auch in einer verbesserten Mikrostruktur (kleinere Kristalliten, weniger Korngrenzen) auswirkt.

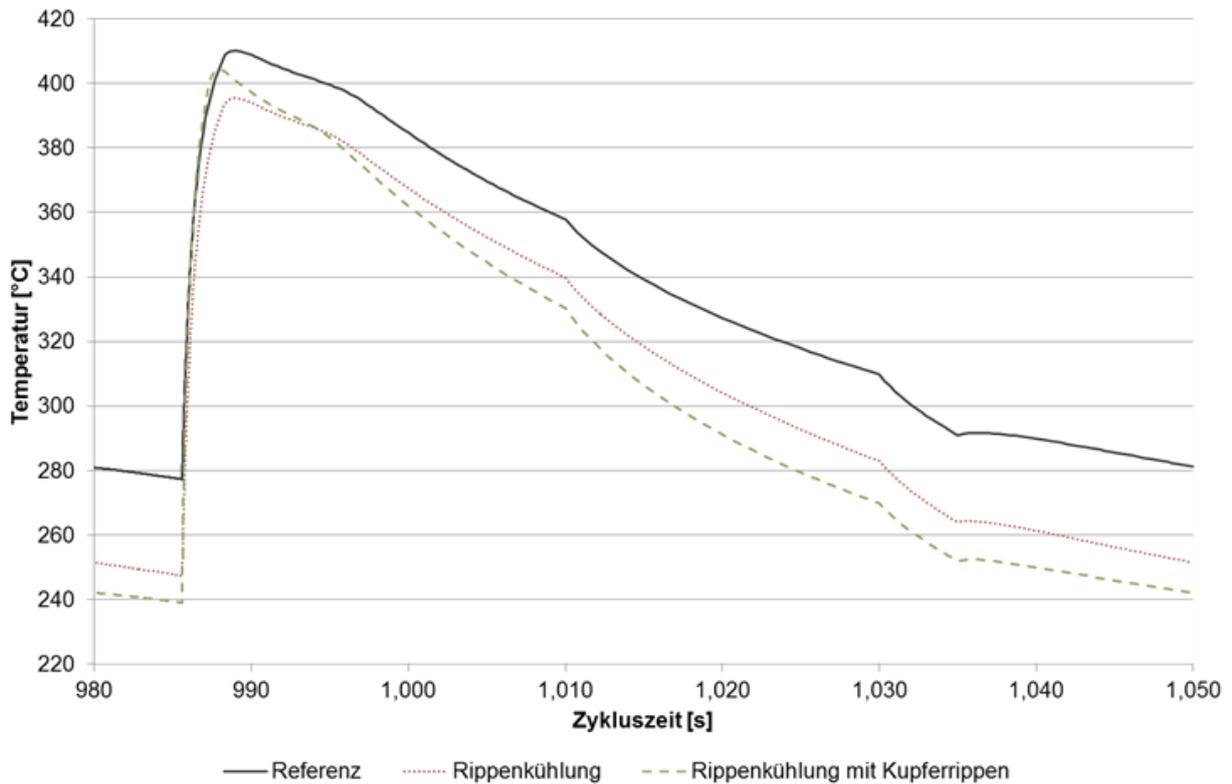


Abbildung 23: Das verbesserte Kühlkonzept für zusätzlich zu einer Verringerung der Werkzeugoberflächentemperatur, was zu einer Verringerung von Mikrorissen und damit einer

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Lebensdauererhöhung der Werkzeuge führt. Ebenso kann das Werkzeug mit einer höheren Heizleistung schneller erwärmt werden, was zu einer Verkürzung der Rüstzeit führt.



Abbildung 24: Der Polymer-PCM-Speicher wurde für die Einspeicherung von Abwärme aus dem Druckgussprozess für Beladeleistungen bis ca. 50 kW und einer Speicherkapazität von bis zu 100 kWh ausgelegt. Als Wärmeübertrager wurde ein Rohrbündel aus Stahl verwendet mit Sammlern, um eine gleichmäßige parallele Durchströmung zu gewährleisten. Als PCM wurde ein eigenes im Projekt entwickeltes wärmeleitfähiges HDPE-Compound entwickelt und vom Projektpartner gebildet hergestellt. Die thermische Isolierung erfolgte vor Ort. Die Sensorik wurde entsprechend ins Leitsystem integriert und erlaubt eine genaue Zustandsüberwachung. Durch die speziell entwickelten Regelungsalgorithmen kann eine Be- und Entladung mit vorgebbarem Temperatur- und Leistungsprofil erreicht werden.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

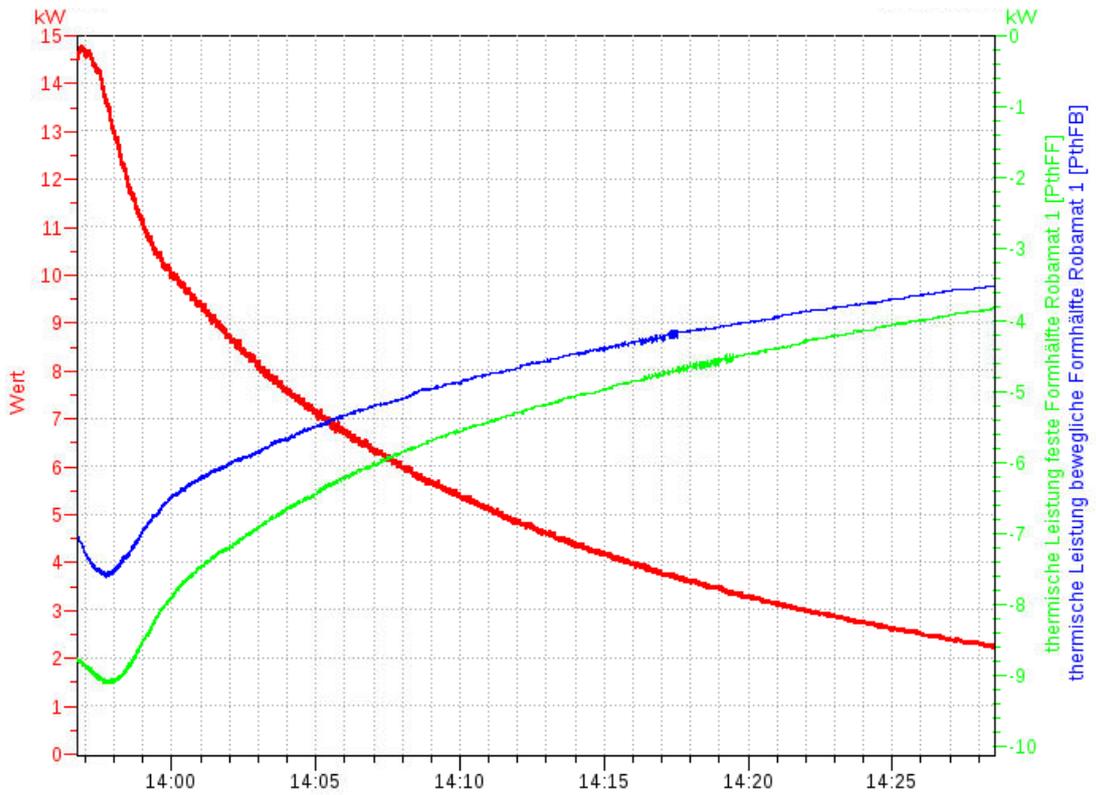


Abbildung 25: Die nach dem Gießen im Werkzeug verbleibende Wärme wurde in den Polymer-PCM-Speicher eingespeichert. Der Speicher stellt als Wärmesenke eine hohe Kühlleistung zur Verfügung, wodurch das Werkzeug schneller als mit den Heiz-Kühl-Geräten alleine abgekühlt werden kann. Damit wird zusätzlich zur Abwärmenutzung eine Verringerung der Stillstandzeiten erreicht.

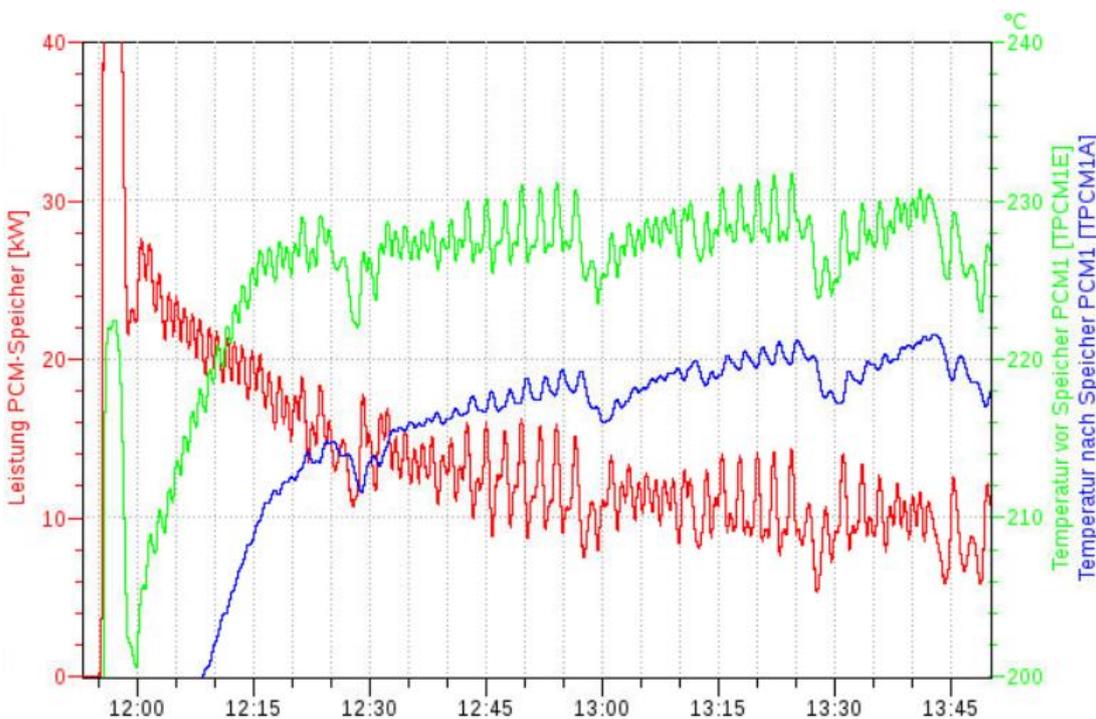


Abbildung 26: Beladung des Polymer-PCM-Speichers aus dem Druckgussprozess. Die beim Erstarren des Aluminiums frei werdende Abwärme wird eingespeichert. Nach der anfänglichen Leistungsspitze beim Beginn des Gussprozesses wird ein Plateau erreicht bei dem das HDPE im Speicher geschmolzen wird.

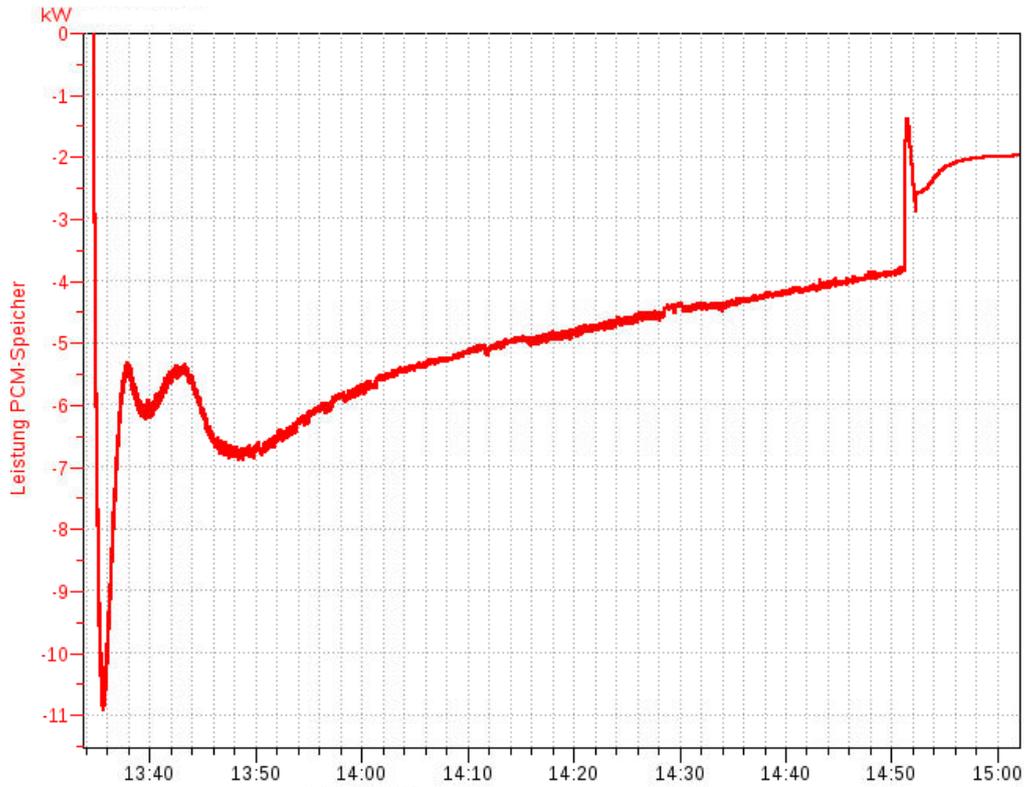
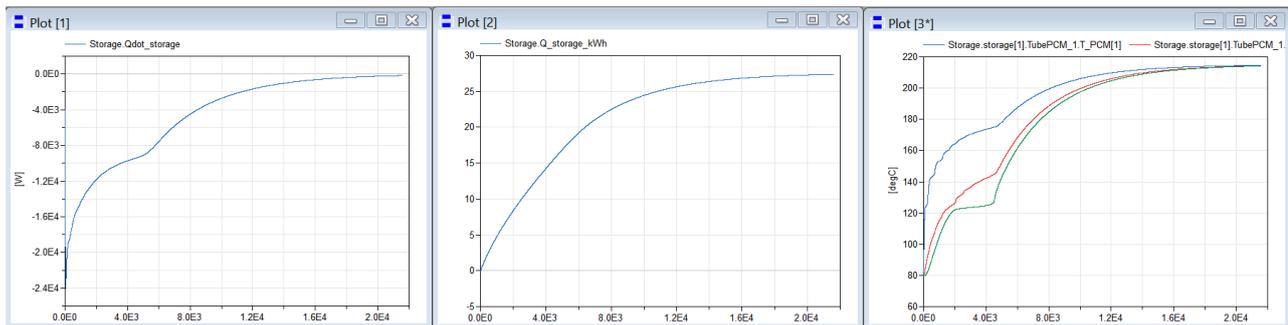
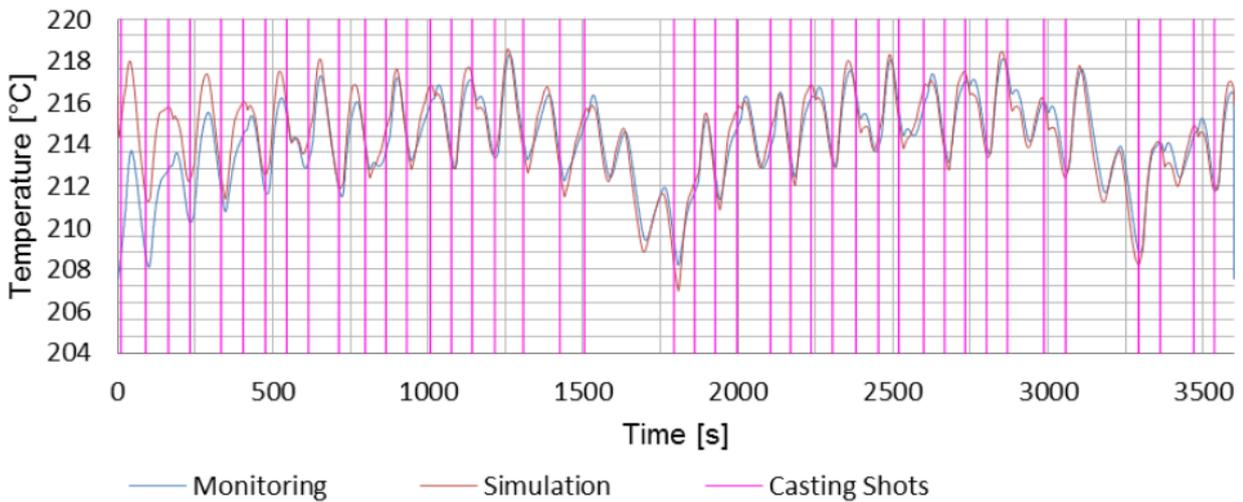
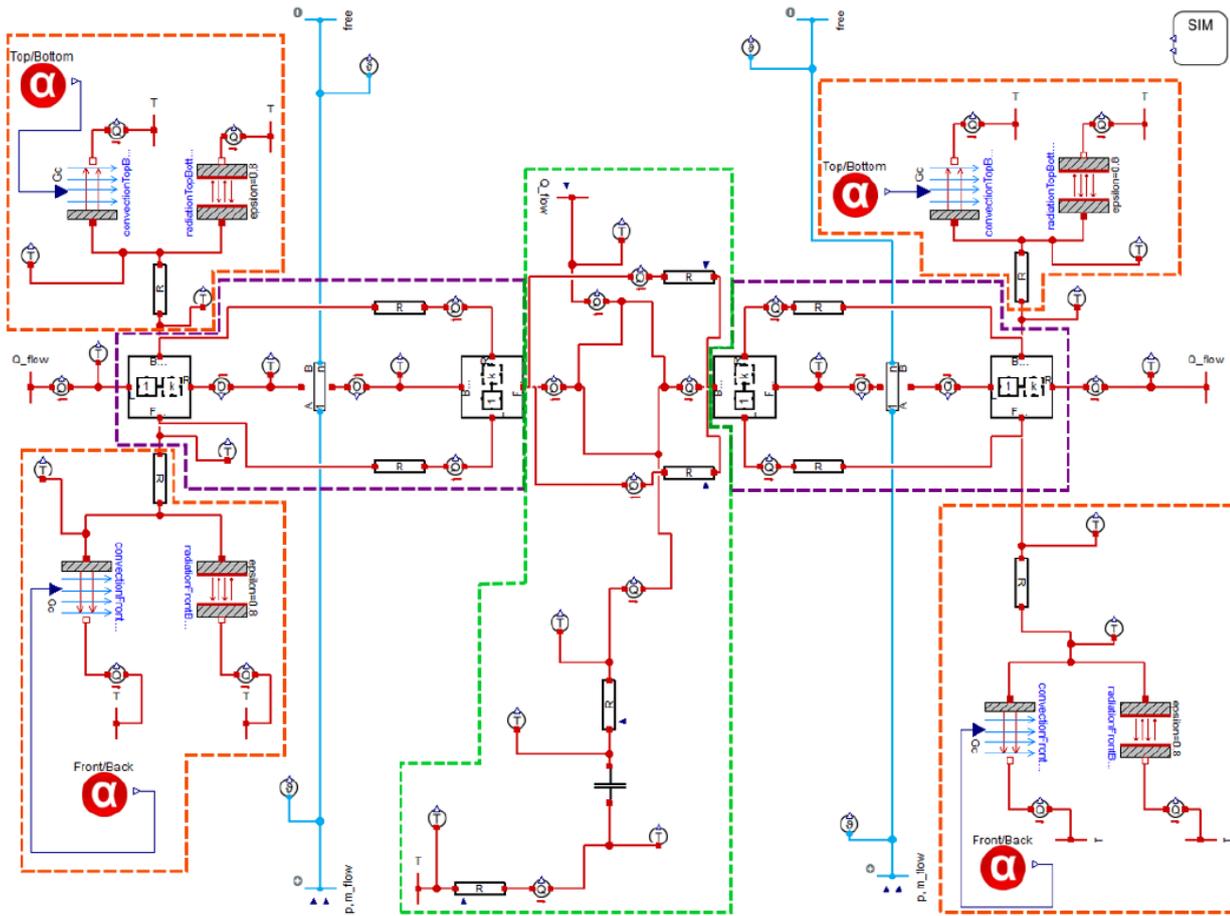


Abbildung 27: Beim Entladen des Speichers wird Wärme für verschiedene Prozesse (z. B. Aluminium- oder Werkzeugvorwärmung) zur Verfügung gestellt. Die Entladeleistung und -temperatur kann über Bypass und Mischer geregelt werden. In diesem Test wurden ca. 10 kWh über einen Zeitraum von etwa 90 Minuten mit einer durchschnittlichen Leistung von ca. 5 kW aus dem Speicher entnommen.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

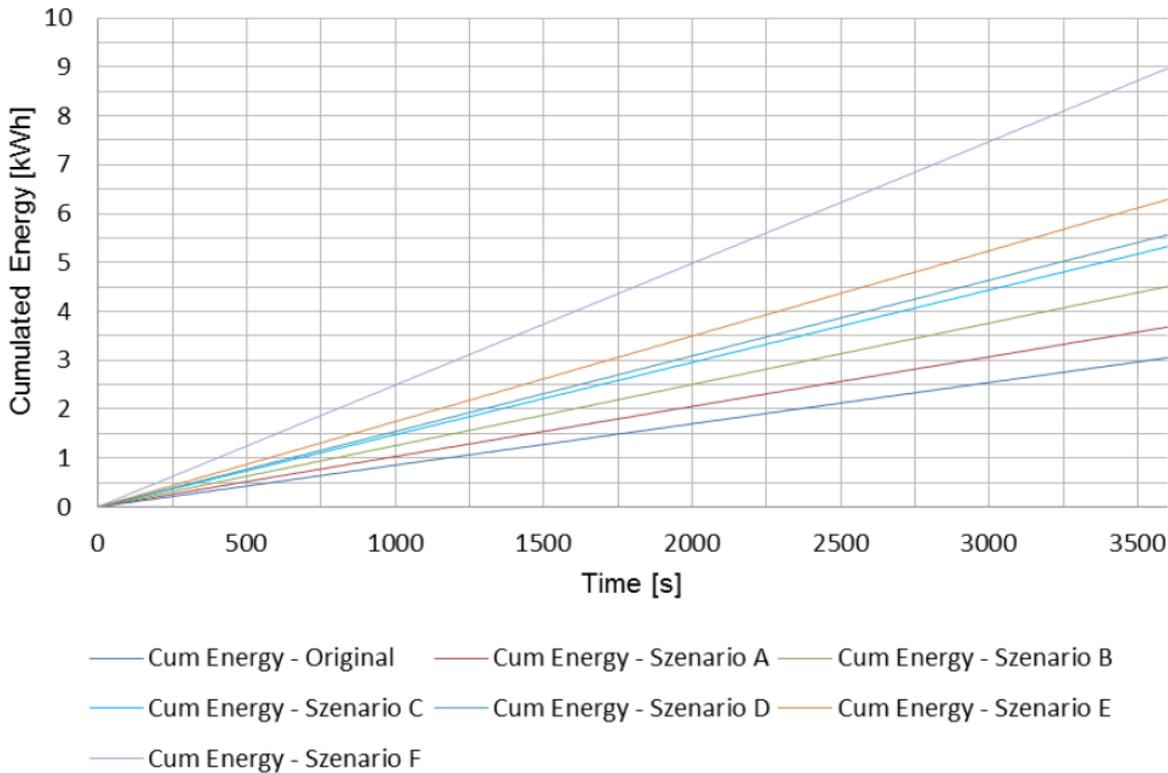
Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Abbildung 28: In der Simulationsumgebung Dymola/Modelica wurde ein physikalisches Modell des Druckgusswerkzeuges (Bild oben) sowie des Polymer-PCM-Speichers erstellt. Diese digitalen Zwillinge können Messdaten aus dem Prozessleitsystem als Eingangsgrößen verwenden und simulierte Werte wieder ins Leitsystem rückmelden (Bild Mitte). Dadurch ist ein genaueres Verständnis der verschiedenen physikalischen Prozessabläufe möglich was die Voraussetzung für eine gezielte Optimierung der Anlagen und des Gesamtsystems darstellt. Zusätzlich sind die Modelle unumgänglich für die genaue Auslegung der Polymer-PCM-Speicher, um ausreichende Speicherkapazität und -leistung für die Prozesse zur Verfügung stellen zu können (Bild unten).



Szenarien	Bestehendes Gusswerkzeug	A	B	C	D	E	F
Einlass Öltemperatur [°C]	213	250	250	250	250	250	250
Isolierplattendicke [m]	0.0065	0.013	0.013	0.026	0.026	0.026	0.026
Oberflächenisolierung	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Temperierkanallänge [m]	3	3	3	3	12	12	12
Aluminium-Einschusszeiten [s]	64	64	64	64	64	64	50
Effektive Wärmeübertragungsfläche [m2]	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021	0.025	0.031

Abbildung 29: Die Simulationsmodelle wurden insbesondere verwendet, um die Auswirkung von möglichen Systemverbesserungen untersuchen zu können und so eine Priorisierung der jeweiligen Optimierungsmaßnahmen vornehmen zu können. Speziell die Erhöhung der Taktzeit wirkt sich stark auf die Wärmeströme und anfallenden Kühllasten aus, was eine notwendige Eingangsgröße für die Auslegung der Beladeleistung der Polymer-PCM-Speicher dargestellt.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

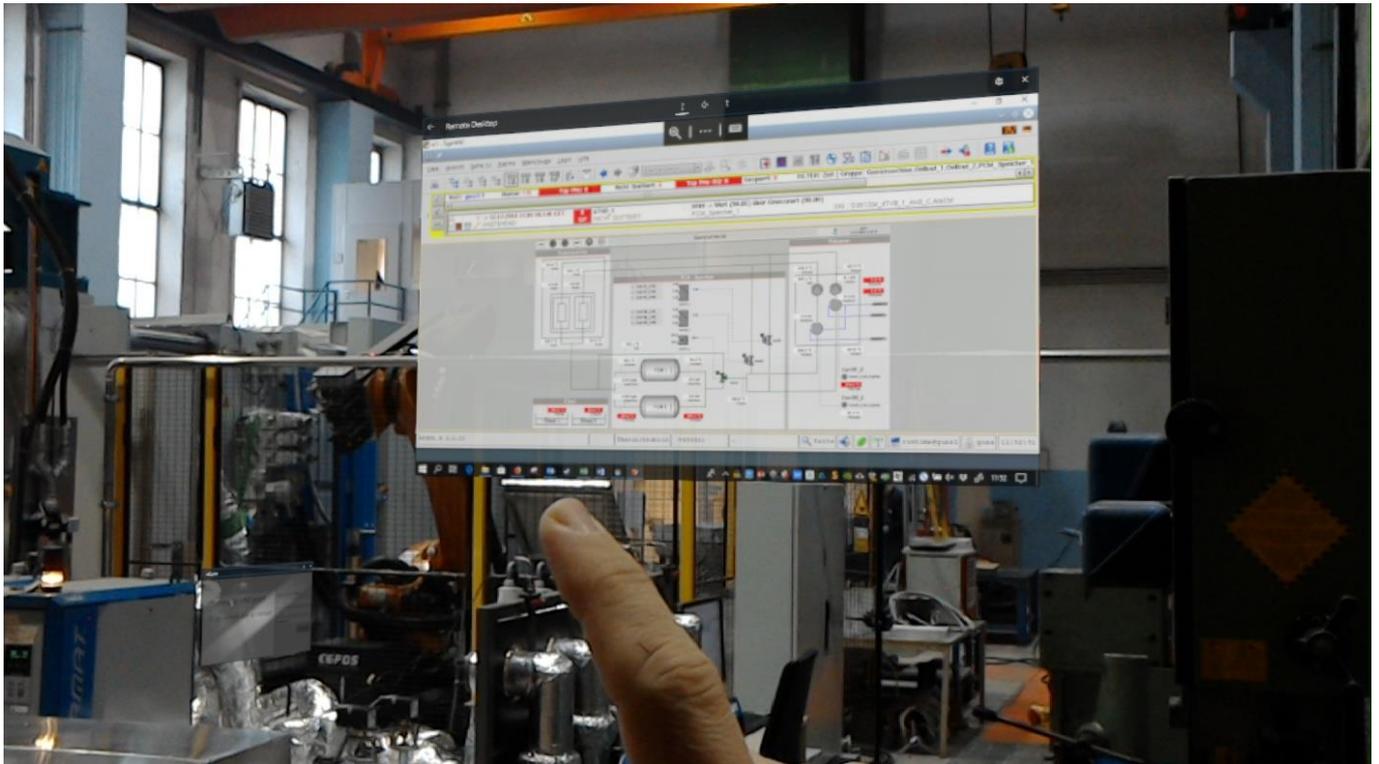


Abbildung 30: Augmented Reality mit Datenbrillen wurde bisher noch nicht für die Steuerung von Anlagen erprobt. Wir haben erstmals eine Lösung für die Microsoft Hololens entwickelt und erfolgreich umgesetzt mit der die gesamte Druckgussanlage mit der Datenbrille durch Gesten und Sprachkommandos gesteuert werden kann. Dabei können beliebige Visualisierungsfenster frei im Raum angeordnet werden, um dem Operator bestmöglichen Anlagenüberblick und -steuerungsmöglichkeit von allen Positionen völlig ohne Hardware-Monitore und -Bedienpanels zu geben.

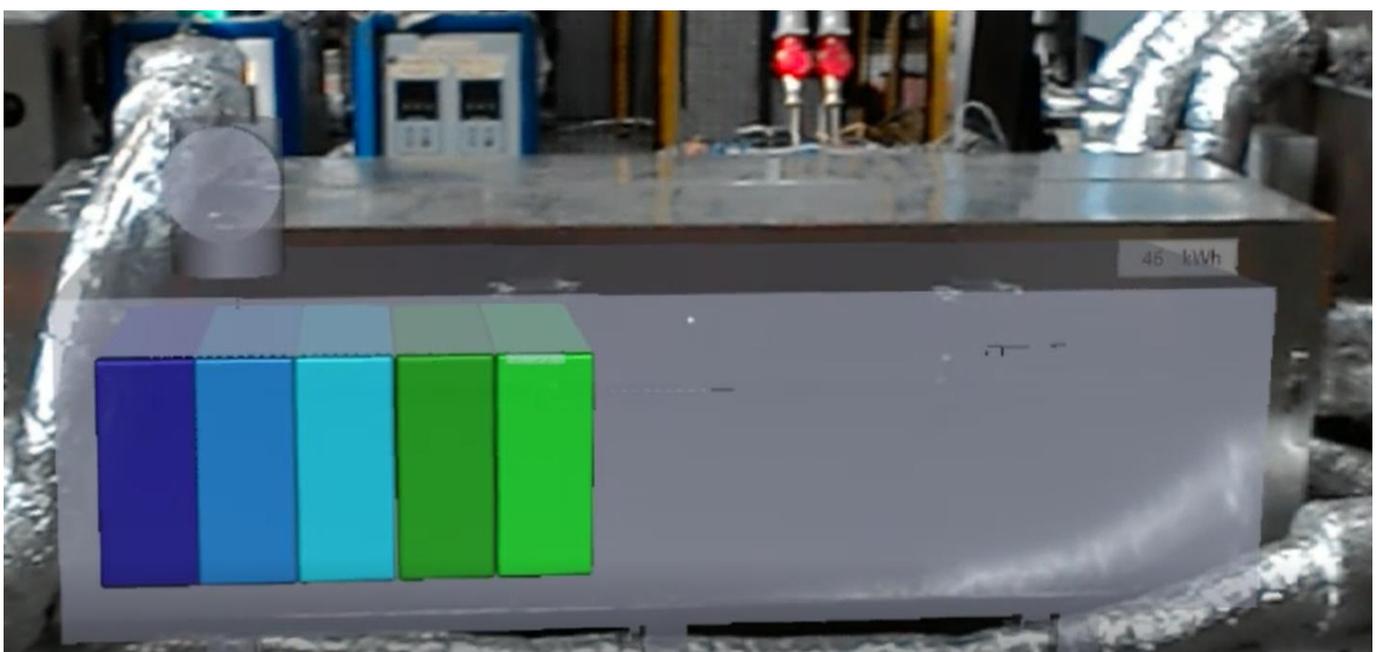


Abbildung 31: Mittels Augmented Reality können wichtige Anlageninformationen virtuell den realen Objekten überlagert werden, um so unterschiedlichen Mitarbeitern (Anlagenbediener, Schichtführer, Ingenieure,

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

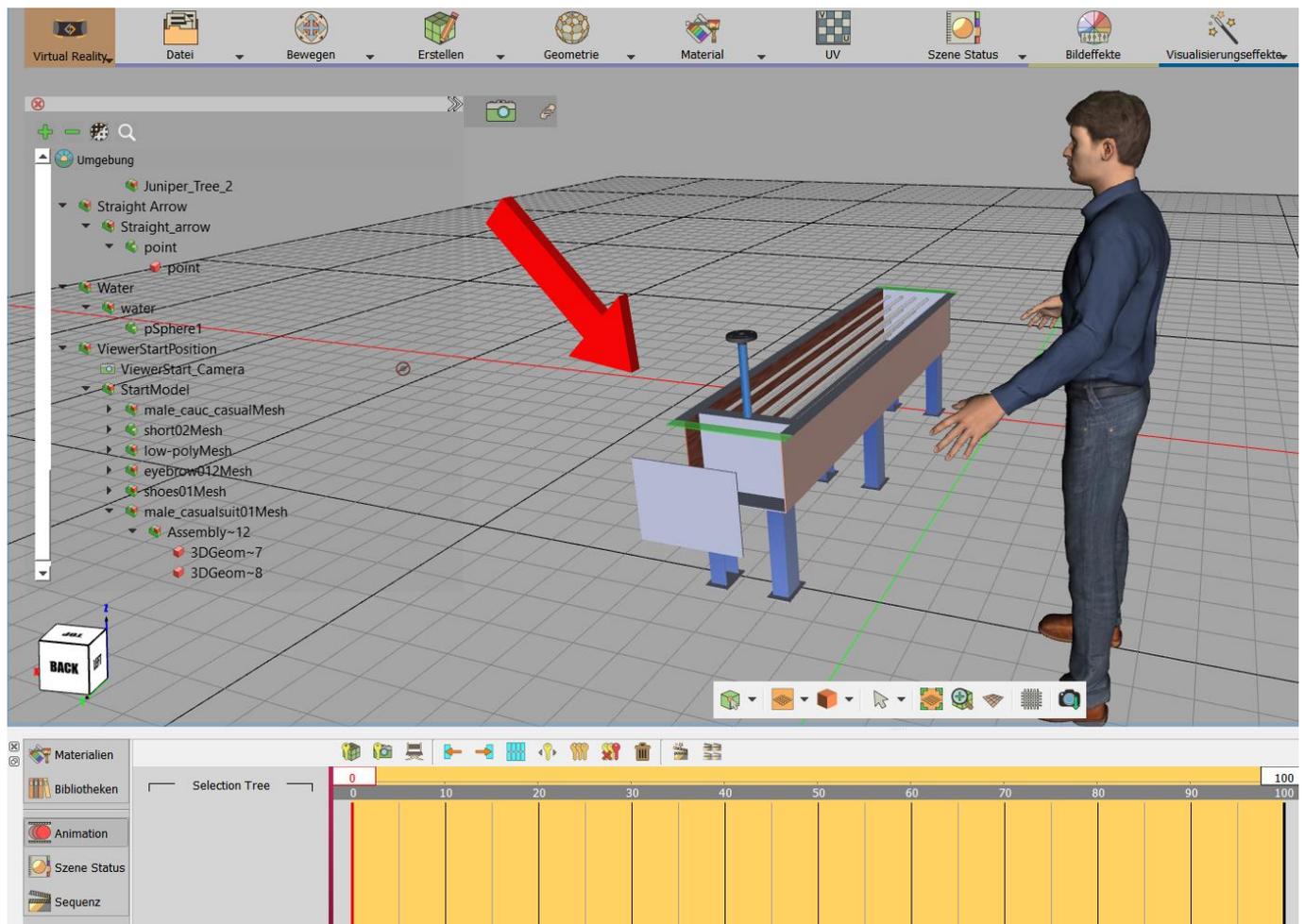


Abbildung 33: Unterschiedliche Softwarelösungen für Arbeitsanweisungen für die Inbetriebnahme, Wartungs- und Reparaturarbeiten sowie Schulungen von komplexen Maschinen mit Hilfe von Augmented und Virtual Reality werden gerade von verschiedenen Unternehmen entwickelt. Speziell interessant für die Endanwender dabei ist, dass durch Augmented Reality eine Fernunterstützung durch Spezialisten erfolgen kann und somit praktisch jeder Mitarbeiter auch komplexere Arbeiten durchführen kann. Wir haben ein konkretes Beispiel, die Inbetriebnahme eines Polymer-PCM-Speichers, konzipiert und mit unterschiedlichen Softwarelösungen, -toolchains und -partner sowie den Brillen Microsoft Hololens (Augmented Reality) und HTC Vive Pro (Virtual Reality) umgesetzt und deren Vor- und Nachteile evaluiert (Unity, Creo, Vuforia Studio, ScopeAR, Augmentir, Solidworks, Simlab Composer (Bild), Microsoft Dynamics 365 Remote Assist).

3.1.2. Kunststoffextrusion

Die zweite TRL5-Polymer-PCM-Speicher-Anlage wurde für die Extrusion in der Kunststoffindustrie entwickelt. Der Projektpartner Geba hat mehrere derartige Anlagen in Betrieb um damit Kunststoffcompounds herzustellen.

Im Projekt wurde analog zum Aluminiumdruckguss vorgegangen und zuerst die Abwärmen in einem Monitoring erhoben, da es dazu ebenso wenig öffentliche Daten wie für den Aluminiumdruckguss gibt. Verschiedene Abwärmequellen und -senken wurden identifiziert und analysiert. Ebenso wie beim

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Druckguss ist es auch bei der Kunststoffextrusion notwendig das Gesamtsystem der Extrusionslinie bzw. vollständiger die gesamte Produktion bestehend aus mehreren parallelen Linien für die optimierte Abwärmenutzung zu betrachten. Erst dadurch können die unterschiedlichen Wärmequellen und -senken ideal vernetzt und rückgewonnene Wärme wieder genutzt werden.

Dem Wärmespeicher kommt auch in diesem Fall eine zentrale Bedeutung zur Erhöhung der Energieeffizienz zu, da die Wärmequellen und -senken zeitlich als auch leistungsmäßig schwanken und nicht übereinstimmen.

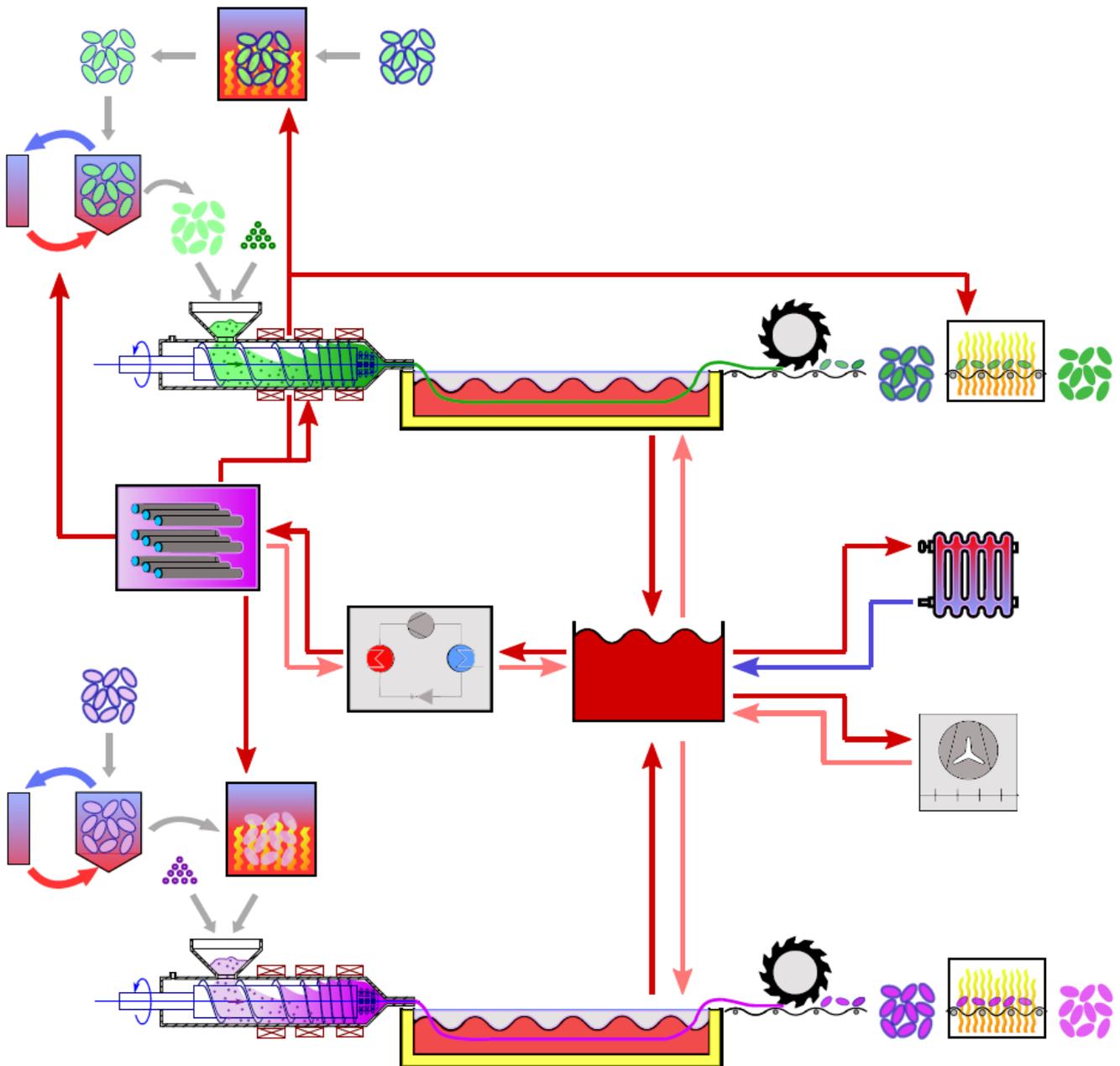


Abbildung 34: Energieeffiziente Extrusionsfabrik mit der erstmals erprobten Kombination aus Hochtemperatur-Wärmepumpe und Polymer-PCM-Speicher als zentralem Element zur Erhöhung der Energieeffizienz. Die Abbildung enthält modifizierte svg-Icons von flaticon.com (Kühler) und Brendan Rockey (Extruder).

Die durchgeführten Untersuchungen und Ergebnisse wurden in einer wissenschaftlichen Publikation detailliert dargestellt und sind im Anhang als Preprint beigefügt (Anhang 4.1.1.1).

3.1.3. Wärmenetze

Zusätzlich zu den beiden industriellen Anwendungsgebieten wurde untersucht, wie Polymer-PCM-Speicher in Nah- und Fernwärmenetzen eingesetzt werden können. Im ersten Schritt wurden dabei folgende mögliche Einsatzszenarien für die Speicher identifiziert:

- **Spitzenlastglättung:** Der Verbrauch von Wärme erreicht am Morgen und am Abend aufgrund des Nutzerverhaltens (Duschen/Baden, Kochen, Reinigung, Heizung) Spitzenlasten. Tagsüber und während der Nachtstunden ist der Verbrauch geringer. Um die Lastspitzen decken zu können sind Pufferspeicher ein probates Mittel. Polymer-PCM-Speicher können als solche dienen.
- **Netzausbau:** Um mehr Kunden ans Netz anschließen zu können, müssen vor allem die Spitzen bei peripheren Kunden abgedeckt werden. Ein Polymer-PCM-Speicher am bestimmten Netzknoten kann das leisten.
- **Power-to-Heat:** Überschussstrom, welcher wahrscheinlich vermehrt in Zukunft anfallen wird (Stichwort: fluktuierende erneuerbare Energieträger), kann entweder direkt oder mittels Wärmepumpe eingespeichert werden.
- **Übergabestationen:** Speicher in Übergabestationen ermöglichen die kleinere Dimensionierung der Wärmeübertrager und damit eine Kostensenkung.
- **(Sommer)abschaltung und Nennlastbetrieb der Kessel:** Im Sommer kann der Kessel für eine bestimmte Zeit in Nennlast betrieben werden um das Netz zu versorgen und mit dem Überschuss den Speicher zu laden. Dieser kann dann im Anschluss für einige Stunden alleine die Wärmeversorgung bewerkstelligen, wodurch der Kessel ganz abgeschaltet werden kann und ineffizienter Teillastbetrieb und/oder Ein/Aus-Schaltzyklen vermieden werden.

Um die Analysen detailliert durchführen zu können, wurde ein spezieller Anwendungsfall ausgewählt, für den ausreichend zugängliche Messdaten zur Verfügung standen:

Für ein kleines Nahwärmenetz in Kärnten wurde untersucht, ob mit Hilfe eines Polymer-PCM-Speichers der zu groß dimensionierte 300 kW Biomassekessel so unterstützt werden kann, dass er nur mehr wenige Stunden aber dafür durchgehend im Betrieb ist (ohne Taktung) oder auf kleinere Leistung rückgebaut werden kann, um die Lastspitzen mit dem Polymer-PCM-Speicher abdecken zu können.

Im Winter 2016 wurde ein genaues Monitoring der Temperaturen, Leistungen und Wärmemengen durchgeführt. Im kalten Jänner müssen bis zu 2000 kWh Wärme ins Netz eingespeist werden. Die Verluste des Netzes sind relativ hoch (bis zu 500 kWh/Tag). Das Netz wird mit einer Vorlauftemperatur von ca. 85 °C und eine Rücklauftemperatur von ca. 40 °C betrieben. Am kältesten Tag des Jahres (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** traten Lastspitzen bis 140 kW auf. Während

der Nachtstunden sank die Netzlast auf bis zu 50 kW. Die Taglast außerhalb der Spitzen beträgt ca. 85 kW.

Mit diesen Monitoringdaten wurde ein Konzept für die Einbindung des Speichers und dessen Betriebsweise für Be- und Entladung entwickelt (Abbildung 36, Abbildung 37). Im Gegensatz zu herkömmlichen Pufferspeichern, bei denen das erhitzte Fernwärmewasser direkt einspeichert wird, fungiert beim Polymer-PCM-Speicher das Fernwärmewasser als Wärmeübertragermedium, welches durch den Speicher gepumpt wird, um das PCM zu schmelzen. Der Polymer-PCM-Speicher verhält sich analog einem herkömmlichen Speicher mit innenliegendem Wärmeübertrager und „Latentwärmeplateau“ (bei der Phasenwechseltemperatur). Dadurch ergeben sich gewisse Vor- und Nachteile für die mögliche hydraulische Einbindung des Speichers, die mittels Computermodellen (Modelica/Dymola) untersucht wurden und zum Zeitpunkt der Berichtslegung noch untersucht werden

Das Szenario wurde in Dymola/Modelica implementiert und unterschiedliche Simulationen durchgeführt. Ein Polymer-PCM-Speicher konnte so hinsichtlich notwendiger Leistung und Speicherkapazität ausgelegt werden. In Abbildung 38 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sind die Simulationsergebnisse für eine derartige Einbindung für die Speicherbeladung dargestellt: der Kessel liefert 95 °C. Ein Teil des Wassers strömt dann durch Speicher und erwärmt/schmilzt das PCM. Je nach Austrittstemperatur des Speichers muss ein gewisser Teil des Massenstroms den Speicher „bypassen“, um dann nach einem Mischventil die benötigte Netzvorlauftemperatur mit dem notwendigen Netzmassenstrom gewährleisten zu können. Durch eine derartige Regelung des Speichermassenstroms auf die Netzvorlauftemperatur ist eine Beladung des Speichers in jenen Zeiten möglich, in denen das Netz eine geringere Last benötigt als der Kessel in Nennlast liefern kann.

Anschließend wurden mögliche Konstruktionen evaluiert und eine erste ökonomische Analyse durchgeführt. Für dieses Szenario wurde festgestellt, dass ein möglicher Polymer-PCM-Speicher etwa gleich teuer wie ein herkömmlicher Wasserspeicher sein würde. Vorteil des Latentwärmespeichers ist die Platzersparnis von etwa 50 %. Am Ende des Projekts wurde seitens der Betreiber noch keine endgültige Entscheidung zum weiteren Betrieb des Netzes und damit zur möglichen Implementierung eines Polymer-PCM-Speichers getroffen.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Abbildung 35: Exemplarischer Lastgang und Temperaturverläufe im Wärmenetz.



Hydraulikschema P1 - ctb Wärmenetz

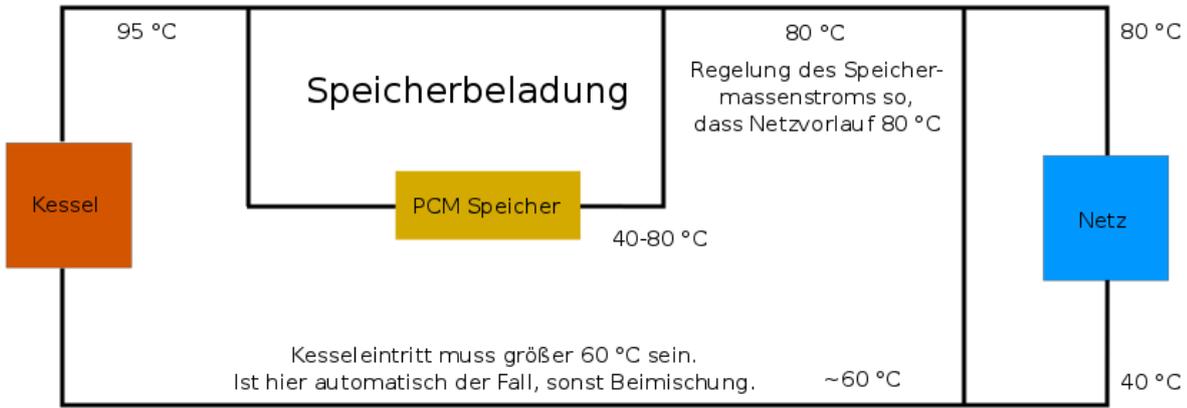


Abbildung 36: Speichereinbindung und Beladestrategie sowie Betriebstemperaturen.



Hydraulikschema P1 - ctb Wärmenetz

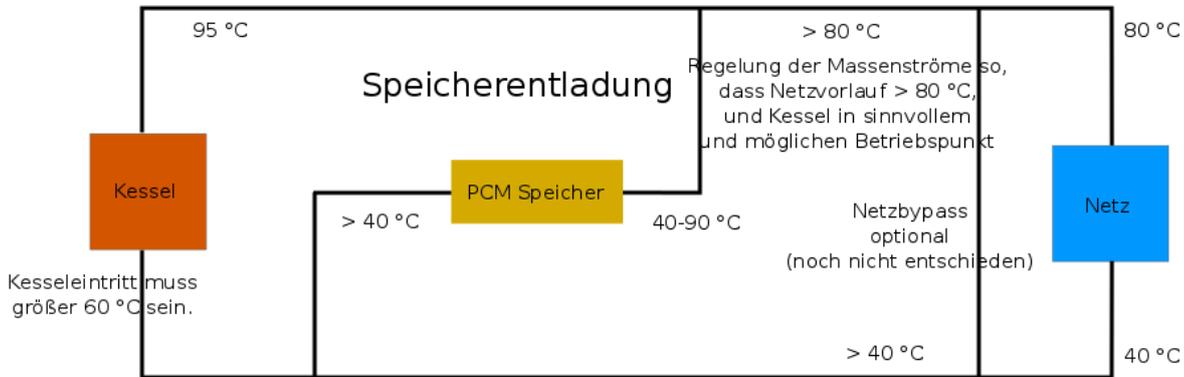


Abbildung 37: Speichereinbindung und Entladestrategie sowie Betriebstemperaturen.

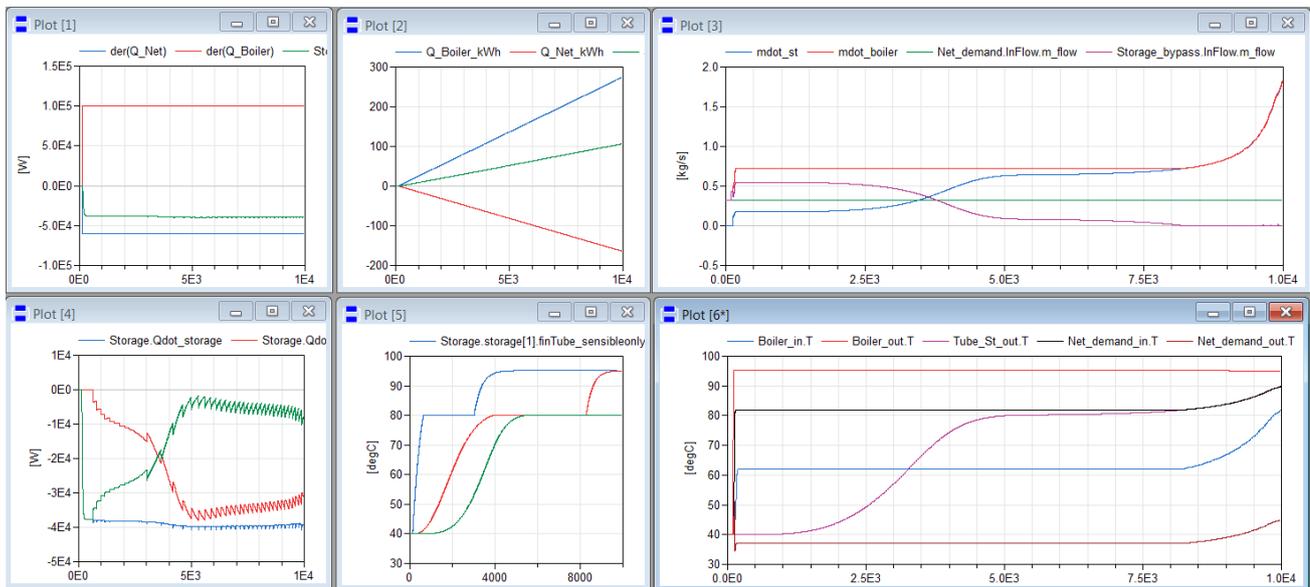


Abbildung 38: Simulationsergebnisse der Speicherbeladung für das Schema „P1“. Oben links: Leistungen Netz, Kessel und Speicher. Oben Mitte: Energien. Oben rechts: Massenströme Speicher (mdot_st), Kessel (mdot_boiler), Netz (Net_demand_InFlow.m_flow), Speicher-Bypass (Storage_bypass.InFlow.m_flow). Unten links: Leistung Speicher (Gesamt: blau, sensibler Anteil: grün, latenter Anteil: rot). Unten Mitte: PCM-Temperaturen an verschiedenen Positionen des Speichers. Unten rechts: Temperaturen an verschiedenen Positionen im Hydraulikschema.

3.2. Laborspeicher und Wärmeübertrager (TRL4) (C. Zauner)

Ein Latentwärmespeicher besteht aus dem Phasenwechselmaterial (PCM), einem Wärmeübertrager (HEX) der die Wärme zwischen PCM und einem Wärmeträgerfluid überträgt, einem Behälter für PCM und HEX sowie einer hinreichenden thermischen Isolierung.

Die Polymer-PCMs werden im Kapitel 3.3 behandelt, hier die HEX sowie die Speicher auf TRL4 und deren Charakterisierung.

Bei den momentanen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und den im Vergleich zu anderen Dienstleistungen und Anlagen sehr niedrigen Energiekosten, die summa summarum an den Produktgestehungskosten nur maximal wenige Prozent ausmachen, muss jegliches Equipment, welches sich hauptsächlich aufgrund von Energieeinsparungen amortisieren muss, möglichst günstig hergestellt werden. Technisch aufwändige Produktionstechnologien oder hochleistungsfähige Materialien sind fast immer zu teuer und ungeeignet um Wärmespeicher in die Breite Anwendung zu bringen. Daher lag der wesentliche Fokus in diesem Projekt, neben der Verwendung von günstigen Polymeren als PCM, auch beim Wärmeübertrager und Speicher auf industriell verfügbaren, skalierbaren und möglichst einfachen Produktionstechnologien sowie relativ günstigen, weit verbreiteten und gut verarbeitbaren Materialien. Die Polymer-PCM-Speicher sollen bis ca. 400 °C dauerhaft einsetzbar sein, weshalb praktisch nur Stähle und Aluminiumlegierungen in Frage kommen, welche daher auch der Fokus in den Untersuchungen dieses Projekts waren.

Um zu gewährleisten, dass die Speicher zugleich kostengünstig als auch einem hohen industriellen Standard entsprechen (inkl. den nötigen Zertifizierungen), wurden keine aufwändigen oder unerprobten Fertigungsmethoden verfolgt.

Ebenso wurde daher insbesondere versucht sich auch beim Design der Wärmeübertrager Speicher möglichst nahe an bereits weit verbreiteten Designs zu orientieren und diese so gut und kostengünstig als möglich für den Einsatz als Polymer-PCM-Speicher zu adaptieren:

- Glattrohrbündelwärmeübertrager in waagrechter Bauweise
- Lamellenrohrbündelwärmeübertrager in waagrechter Bauweise
- Rohrbündelwärmeübertrager in vertikaler Bauweise

3.2.1. Modellierung und Auslegung der TRL4 Speicher

Grundlage für jedes Speicherdesign und die spätere detaillierte Leistungs- und Kapazitätsauslegung sind adäquate Modelle und Auslegungstools. Um eine weite spätere Verbreitung zu ermöglichen, wurde der Fokus auf ausreichend genaue, aber gleichzeitig nicht zu detaillierte Modelle gelegt. So wurden insbesondere aufwändige 3-d-Computational Fluid Dynamics-Berechnungen zwar für ausgewählte Detailprobleme durchgeführt und exemplarisch zur Evaluierung auch für einen gesamten Speicher, das „workhorse“ stellen jedoch 1-d-Modelle dar, die mit der Multiphysik-Software Dymola (basierend auf Modelica) formuliert und entwickelt wurden. Diese Modelle erlauben einerseits eine Speicherauslegung

in einer Rechenzeit vom Sekunden bis Minuten und können zudem in Gesamtanlagensimulationen integriert werden (entweder mit Hilfe von anderen Bibliotheken von Modelica selbst oder in Simulink, Aspen etc. via Modellexport).

Ein 1d-Knotenmodell wurde für die Glattrohrbündel- und Lamellenrohrbündelwärmeübertrager in waagrechter Bauweise erstellt, bei dem das sog. Stefan-Problems (Ausbreitung der Phasenfront) dynamisch gelöst wird. Die Rohr-Finnen-Geometrie wurde zusätzlich in CFD simuliert und mit den Dymola-Simulationen verglichen sowie der genaue Schmelz- bzw. Erstarrungsvorgang im Speicher untersucht (Abbildung 39).

Mit Hilfe der schnellen 1d-Modelle können umfangreiche Parametervariationen durchgeführt werden, um den Einfluss der unterschiedlichen Geometrie- und/oder Materialparameter zu studieren (Abbildung 40). Für den GEA-Speicher wurden ebenfalls CFD Simulationen durchgeführt (inkl. Parametervariationen) und mit den Messergebnissen verglichen. Die Ergebnisse wurden in einer Publikation zusammengefasst, die sich zum Zeitpunkt der Berichtslegung in Begutachtung befindet.

Anschließend wurden für die Rohr-Finnengeometrie Parametervariationen durchgeführt, um den ersten TRL4-Speicher auszulegen. Insbesondere wurden dabei der Einfluss von Finnenabstand, -stärke und –wärmeleitfähigkeit (WLF), Rohr-Rohr-Abstand und PCM-WLF auf die Speicherleistung und Speicherkapazität untersucht (Abbildung 40 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

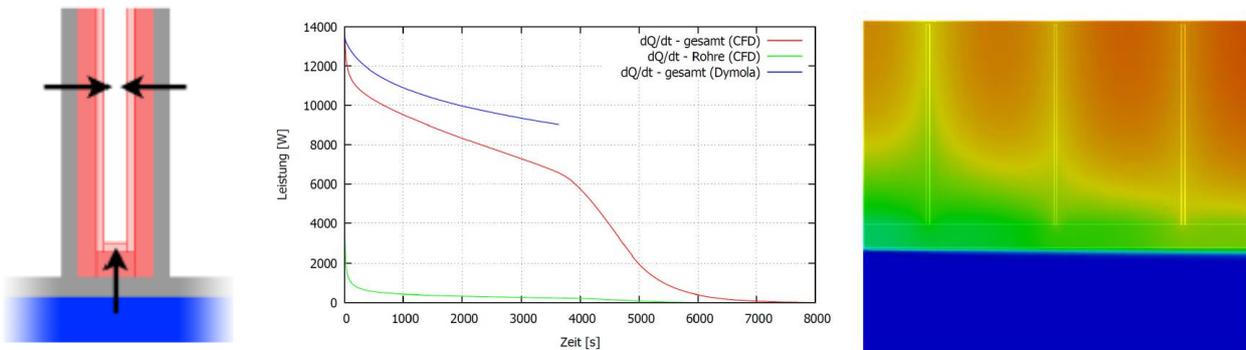


Abbildung 39: Links: Knotenmodell für einen Finnen-Rohr-Speicher. Mitte: Vergleich von CFD mit Dymola. Rechts: Ausbreitung der Phasenfront in CFD.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

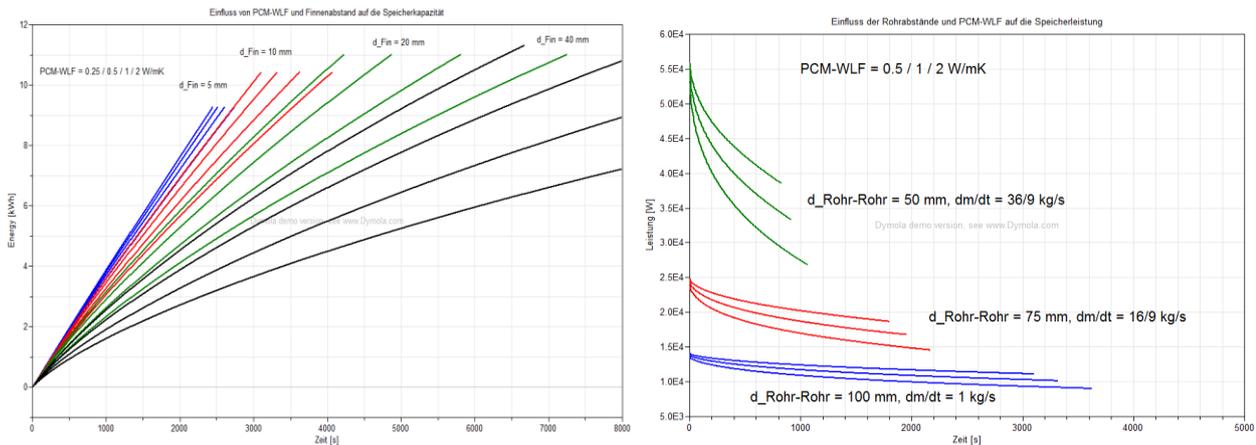


Abbildung 40: Links: Exemplarisches Ergebnis der Parametervariationen in Dymola: Einfluss von PCM-WLF und Finnenabstand auf die Speicherkapazität. Rechts: Einfluss von Rohr-Rohr-Abstand und PCM-WLF.

Zwei weitere Knotenmodelle wurden für Speicher, welche auf Rohrbündel-Geometrie in vertikaler Bauweise basieren, erstellt. Beim sog. Stefan-Problems wird die Ausbreitung der Phasenfront dynamisch gelöst während beim cp(T)-Modell das PCM diskretisiert wird und die Phasenwechselenthalpie mittels einer cp(T)-Funktion beschrieben wird (). Bei beiden Modellen wurden Korrelationen aus der Literatur für den Wärmetransport vom PCM-Rohr ins Thermalöl verwendet. Das Thermalöl selbst speichert ebenfalls Energie, wodurch mit dieser Speichervariante ein Hybridspeicher aus sensibler und latenter Energie realisiert werden kann.

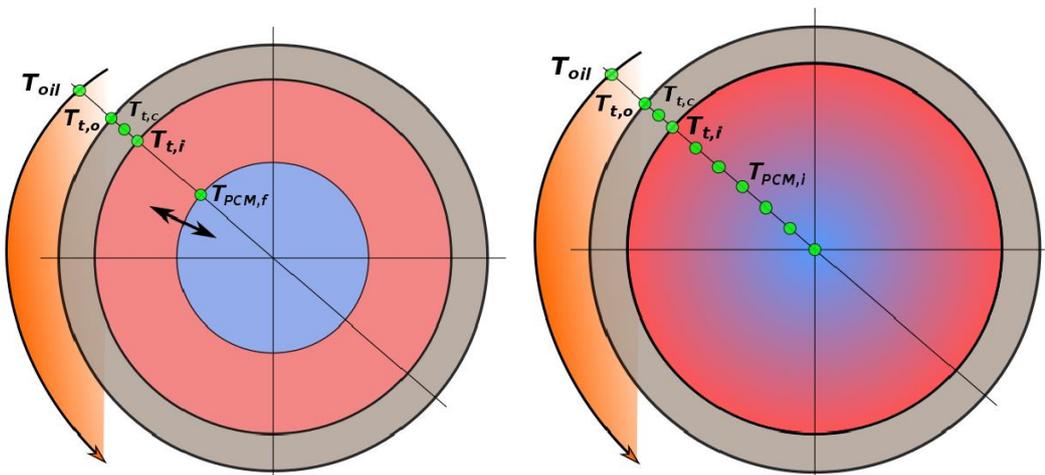


Abbildung 41: Links: Stefan-Modell mit Ausbreitung der Phasenfront. Rechts: cp(T)-Modell mit Diskretisierung im PCM.

Es wurden Modelle des gebauten Speicher CGPT1 (siehe unten) erstellt und Simulationen der Laborcharakterisierung durchgeführt. Aus **Abbildung 42 Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist ersichtlich, dass beide Modelle hervorragend mit den Experimenten übereinstimmen. Weitere Details zu den verschiedenen Modellen und den Simulationsergebnissen sind in folgenden Publikationen ausführlich dargestellt: C. Zauner et al, Applied Energy (2016), Volume 179, 237 – 246; C. Zauner et al Applied Energy (2017), Volume 189, 506 - 519).

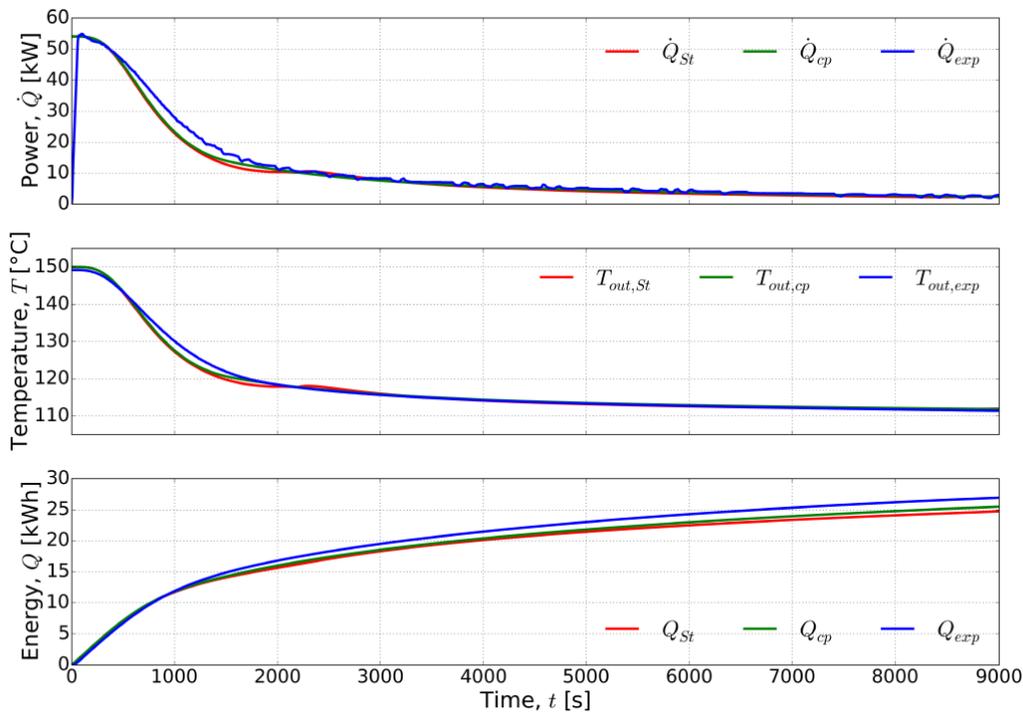


Abbildung 42: Vergleich zwischen den Simulationsmodellen und der experimentellen Vermessung (oben: Leistung, Mitte: Speicheraustrittstemperatur, unten: eingespeicherte Energie).

Zusätzlich mussten für die Speicher BVAM1 und LC1 (siehe unten) Strömungssimulationen am AIT durchgeführt werden, um Konstruktionsdetails auslegen zu können:

- Um ein gleichförmiges Schmelzen/Erstarren des PCMs in den Rohren des BVAM1 gewährleisten zu können, muss das Wärmeträgerfluid gleichmäßig um die Rohre strömen. Dazu wurden an verschiedenen Positionen im Speicher Prallbleche mit unterschiedlichen Durchtrittsöffnungen entwickelt und die genaue Geometrie mittels Strömungssimulation optimiert (Abbildung 43).
- Beim Speicher LC1 wurden Strömungssimulationen durchgeführt, um den Sammler auslegen zu können. Für eine optimale Speicherperformance müssen alle Rohre gleichmäßig durchströmt werden, was durch das entwickelte Kammer-Sammler-Design gewährleistet wird (Abbildung 44).

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

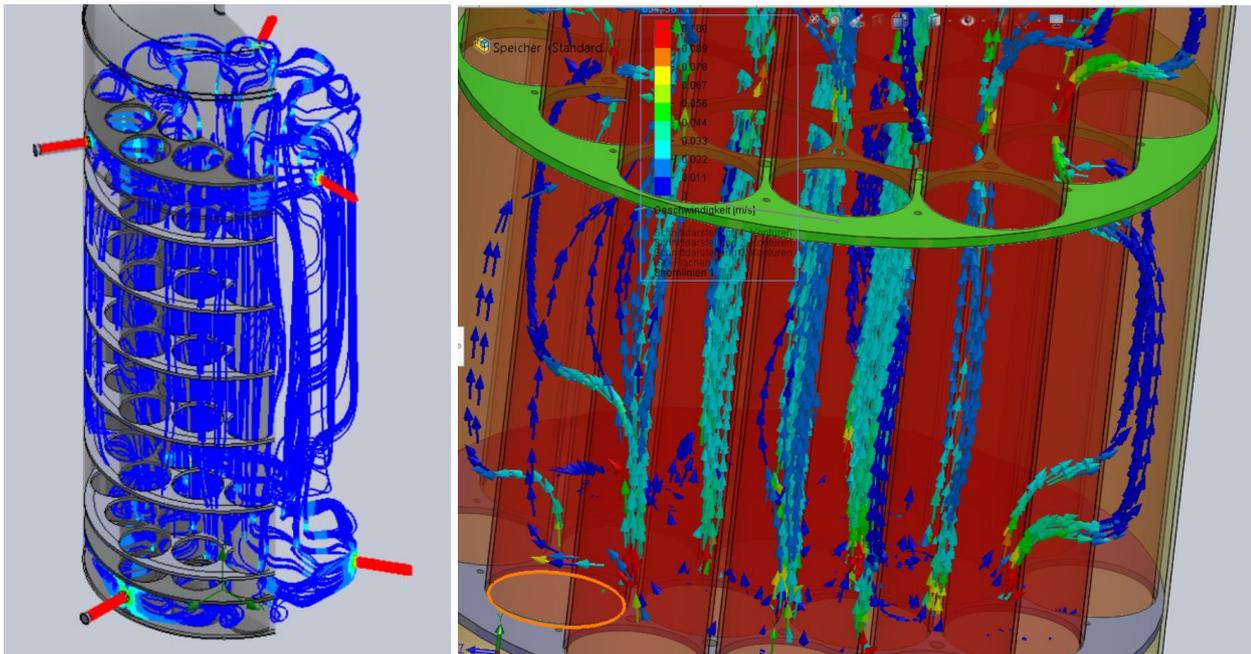


Abbildung 43: Strömungssimulationen für den Speicher BVAM1 zur Auslegung der Positionen und Geometrie der Prallbleche.

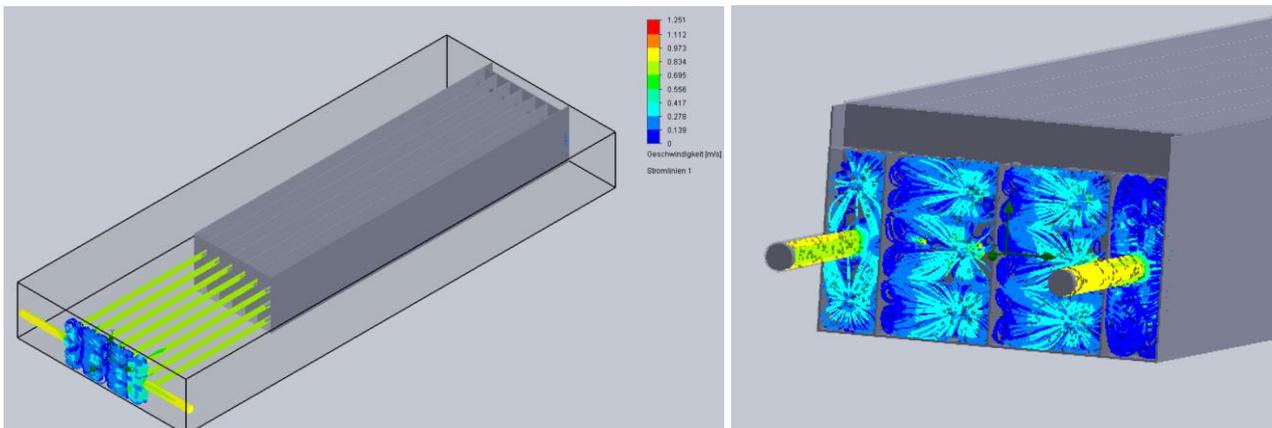


Abbildung 44: Strömungssimulationen für den Speicher LC1 zur Auslegung des Kammer-Sammlers, der eine gleichmäßige Rohrdurchströmung gewährleistet.

Ein im Projekt untersuchtes Wärmetauscherkonzept bedient sich Strangpressprofilen aus Aluminiumlegierungen, die anstelle der Rohre in einem Speicher analog zum LC1-Speicher verwendet werden können. Als sinnvolle Geometrie wurde ein „Plus-Profil“ entwickelt, bei dem das Wärmeträgerfluid im Plus-Innenraum fließt und sich das PCM im Plus-Außenraum befindet. Eine wesentliche Anforderung ist dabei die mechanische Festigkeit bei den erhöhten Speichertemperaturen. Es gibt warmfeste 2000er-Aluminium-Legierungen, die eine mögliche Materialwahl darstellen. Nachteil dieser sind jedoch die hohen Kosten und insbesondere die schwierige Verpressbarkeit (mit unterschiedlichen Firmen wurde dazu Gespräche geführt). Als Alternative wurden 6000er-Legierungen ins Auge gefasst, bei denen jedoch die Warmfestigkeit geringer ist. Mittels FEM-Simulationen am AIT konnte jedoch gezeigt werden, dass eine Lebensdauer von 20 Jahren bei 10 bar Fluid-Überdruck und

150 °C Dauergebrauchstemperatur (HDPE als PCM) mit dem verstrebtten Plus-Profil in Abbildung 45 gewährleistet werden kann.

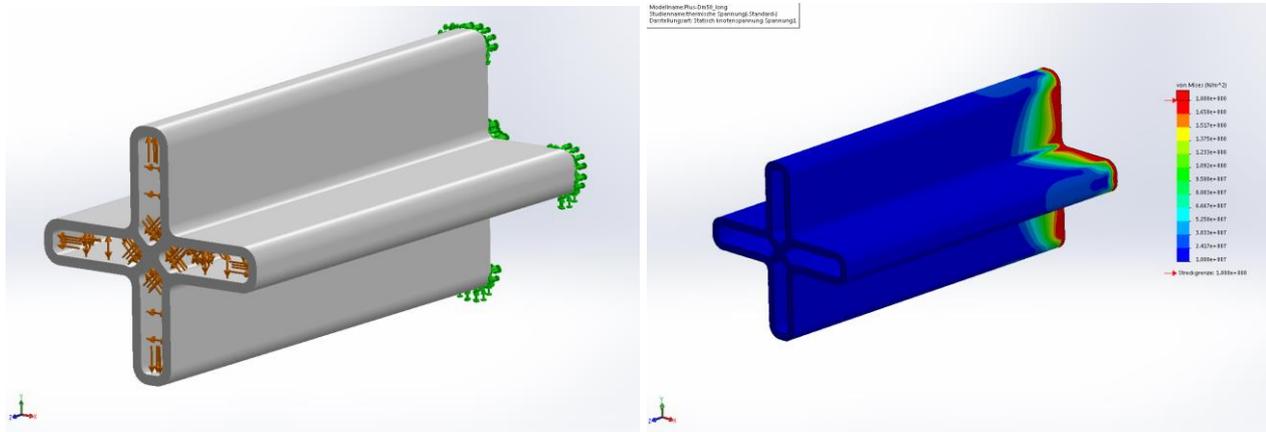


Abbildung 45: Als Randbedingung wurde das Profil auf einer Seite fix eingespannt. Die andere Seite kann sich analog zum LC1 frei ausdehnen. Die auftretenden Spannungen können mit Zeitstandsfestigkeitswerten aus der Literatur für verschiedene Alu-Legierungen verglichen werden, wobei sich zeigt, dass kostengünstige und gut verpressbare 6000er-Legierungen durchaus in Frage kommen.

3.2.2. Konstruktion und Bau der TRL4 Speicher

Nach der Modellerstellung, ausführlichen Parametervariationen und vielen Gesprächen mit unterschiedlichen Wärmeübertrager- und Behälterbauer sowie mögliche späteren Anwendern (Anlagenbauer, Ingenieurbüros) wurde analysiert, welche Speicher sowohl technisch als auch wirtschaftlich die beste Performance liefern können.

Insgesamt wurden schließlich 6 verschiedene Speicher im Detail ausgelegt, konstruiert und gebaut:

- 3 Speicher in Lamellenrohrbündelwärmeübertrager in waagrechter Bauweise (Abbildung 46 - Abbildung 51)
- 1 Glattrohrbündelwärmeübertrager in waagrechter Bauweise (Abbildung 52)
- 2 Rohrbündelwärmeübertrager in vertikaler Bauweise (Abbildung 53, Abbildung 54)

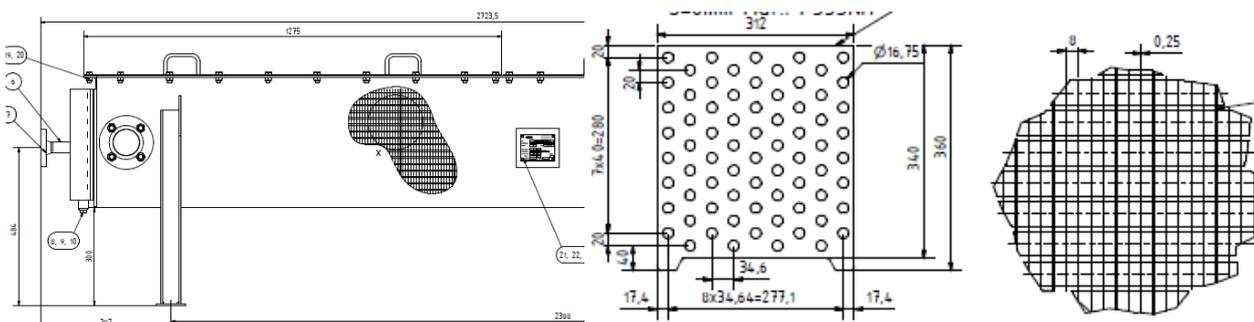


Abbildung 46: Konstruktionszeichnungen für den ersten TRL4-Speicher. Vertikale Aluminiumlamellen sorgen für eine optimierte Wärmeübertragung vom Wärmeträgermedium ins PCM. Als Polymer-PCM wurde ein hochviskoses HDPE mit hoher latenter Wärme verwendet. Ein wesentlicher Vorteil dieses Designs sind die hohen erreichbaren

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Leistungen. Ebenso können die Speicher analog den elektrischen Batteriezellen (fast) beliebig in Serie oder Reihe verschaltet werden (Modularität), wodurch ein weites Spektrum von Speicherleistung/Speicherkapazität abgedeckt werden kann.



Abbildung 47: Laboraufbau des Speichers im neuen Speicherlabor des AIT vor der Befüllung mit PCM und vor der thermischen Isolierung.

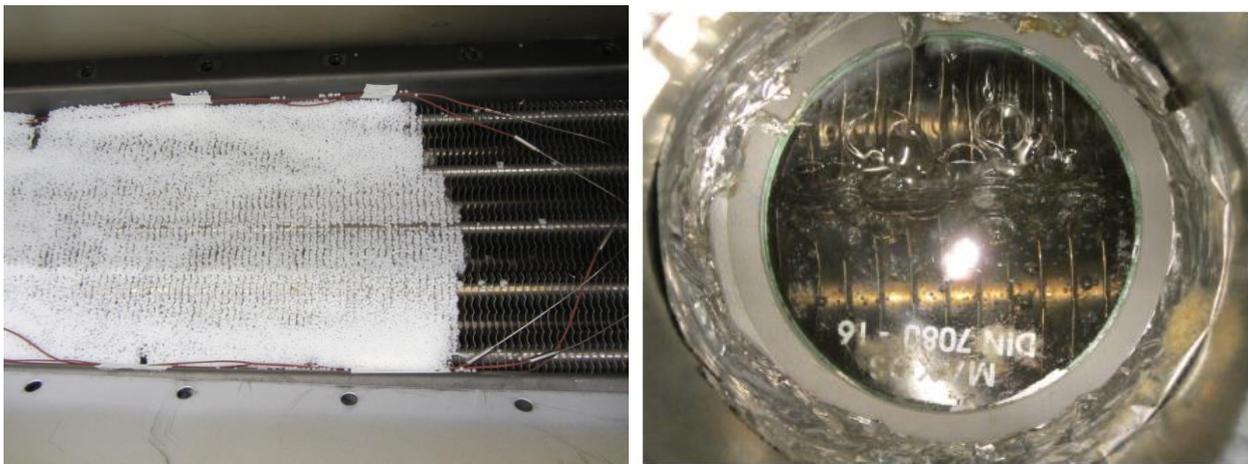


Abbildung 48: Links: Befüllung des Speichers mit dem Polymer-PCM-Granulat (HDPE). Rechts: Geschmolzenes PCM, welches im flüssigen Zustand transparent und hochviskos ist.



Abbildung 49: Der zweite Speicher, der mit Lamellenrohrbündelwärmeübertrager gebaut wurde. Bei diesem Speicher wurde eine erhöhte Festigkeitskonstruktion sowie Abdichtung entwickelt, die eine Überlagerung des Speichers ermöglicht.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Polymer-PCMs (HDPE) mit Inertgas oder eine Evakuierung bis auf wenige Millibar Absolutdruck erlaubt, um den Einfluss von Luftsauerstoff auf das Polymer-PCM auch im TRL4-Speichermaßstab studieren zu können.

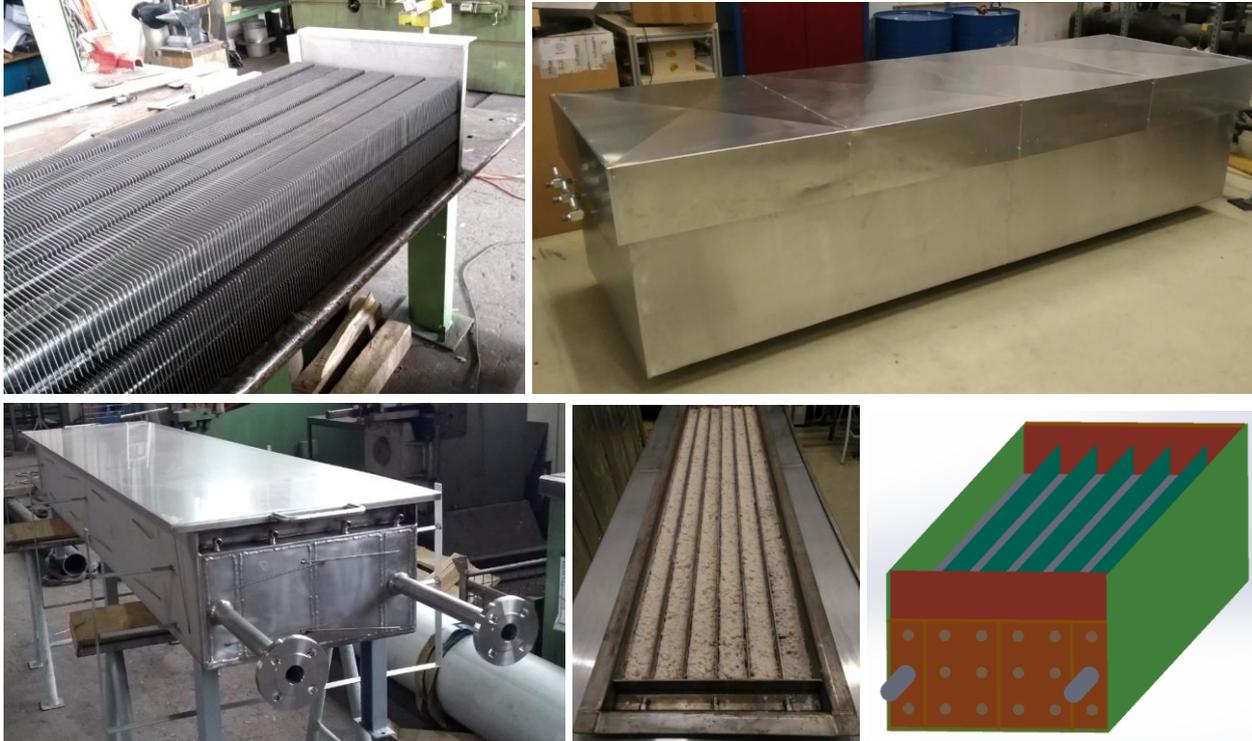


Abbildung 50: Beim dritten Speicher mit Lamellenrohrbündelwärmeübertrager wurden spezielle Edelstahllegierungen sowohl für die Lamellen, als auch die Rohre und den Behälter untersucht, da bei bestimmten Polymeren u. U. korrosive Abbauprodukte in geringen Mengen auftreten können, welche verbesserte Materialien erfordern. Einerseits aus Sicherheitsgründen und andererseits um einen intensiven Test in kurzer Zeit zu ermöglichen, wurde speziell ein hochkorrosives PCM (LiNO₃/KCl) als PCM gewählt.

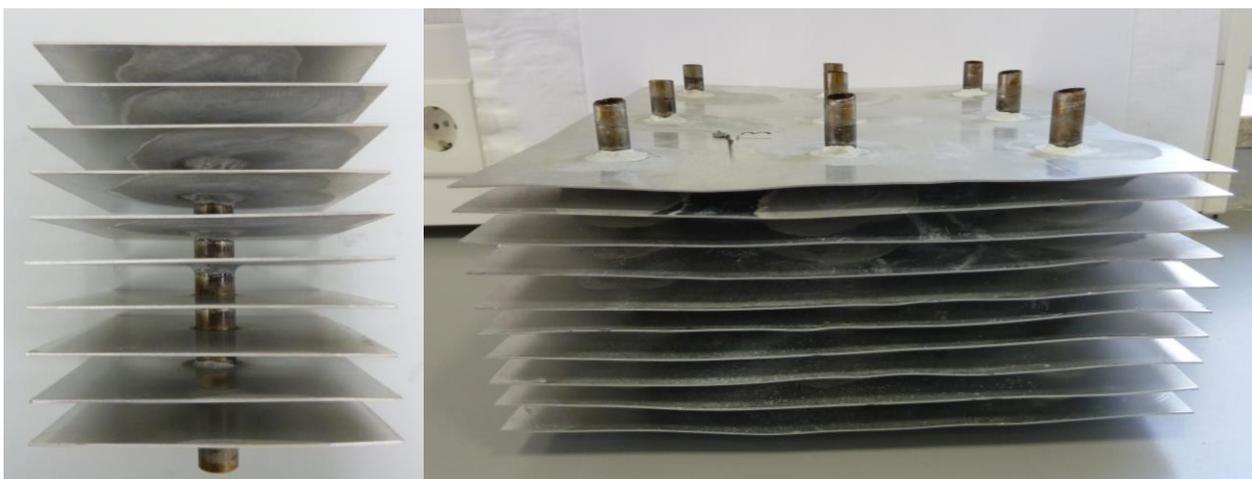


Abbildung 51: Von den Projektpartner AIT und LKR wurde ein für die Lamellenwärmeübertrager ein neues, günstigeres Fertigungsverfahren entwickelt, bei dem Aluminiumlamellen auf Stahlrohre gelötet werden. Gegenüber den herkömmlichen Fertigungsverfahren können damit größere Lamellenabstände und -stärken sowie größere Rohr-Rohr-Abstände mit praktisch beliebigen Rohrdurchmessern realisiert werden, wie sie u. a. für PCM-Speicher notwendig sind. Ebenso ergibt sich für die verwendbaren Aluminiumlegierungen keine Limitierung und es können

Carbon- und Edelstähle verarbeitet werden. An einer patent- und lizenzrechtlichen Verwertung wird momentan gearbeitet.



Abbildung 52: Als Glattrohrbündelwärmeübertrager in waagrechter Bauweise wurde das gleiche Grunddesign wie beim zweiten Lamellenrohrbündelwärmeübertrager gewählt, um ebenfalls Inertgasüberlagerung und Evakuierung testen zu können. Dieses Speicherdesign ist noch günstiger als jenes mit Lamellen und kann insbesondere mit wärmeleitfähigen PCM kombiniert werden, um gleich gute Speicherleistungen erreichen zu können. Viele Anwendungen, insbesondere in der Industrie, benötigen relativ geringe Speicherleistungen, wofür dieses Design die beste ökonomische Performance liefert.



Abbildung 53: In der Literatur sind Latentwärmespeicher basierend auf der vertikalen Rohrbündelgeometrie beschrieben, in denen das Wärmeträgerfluid in relativ dünnen Rohren fließt und sich das PCM außerhalb dieser befindet. Nachteilig dabei ist die hohe Anzahl an Rohren und damit teuren Schweißungen. Ebenso ist der volumetrische Anteil an PCM am Gesamtvolumen und damit die Speicherdichte begrenzt. Daher wurde von uns der invertierte Ansatz mit dem PCM in den Rohren und dem Wärmeträgerfluid außerhalb untersucht. Links ist der Rohrbündelwärmeübertrager dargestellt und rechts der fertige, noch unisolierte Speicher. Die Performance dieses Konzept war hervorragend und wurde in einer Publikation ausführlich dargestellt (C. Zauner et al., Applied Energy (2017), Volume 189, 506 - 519).

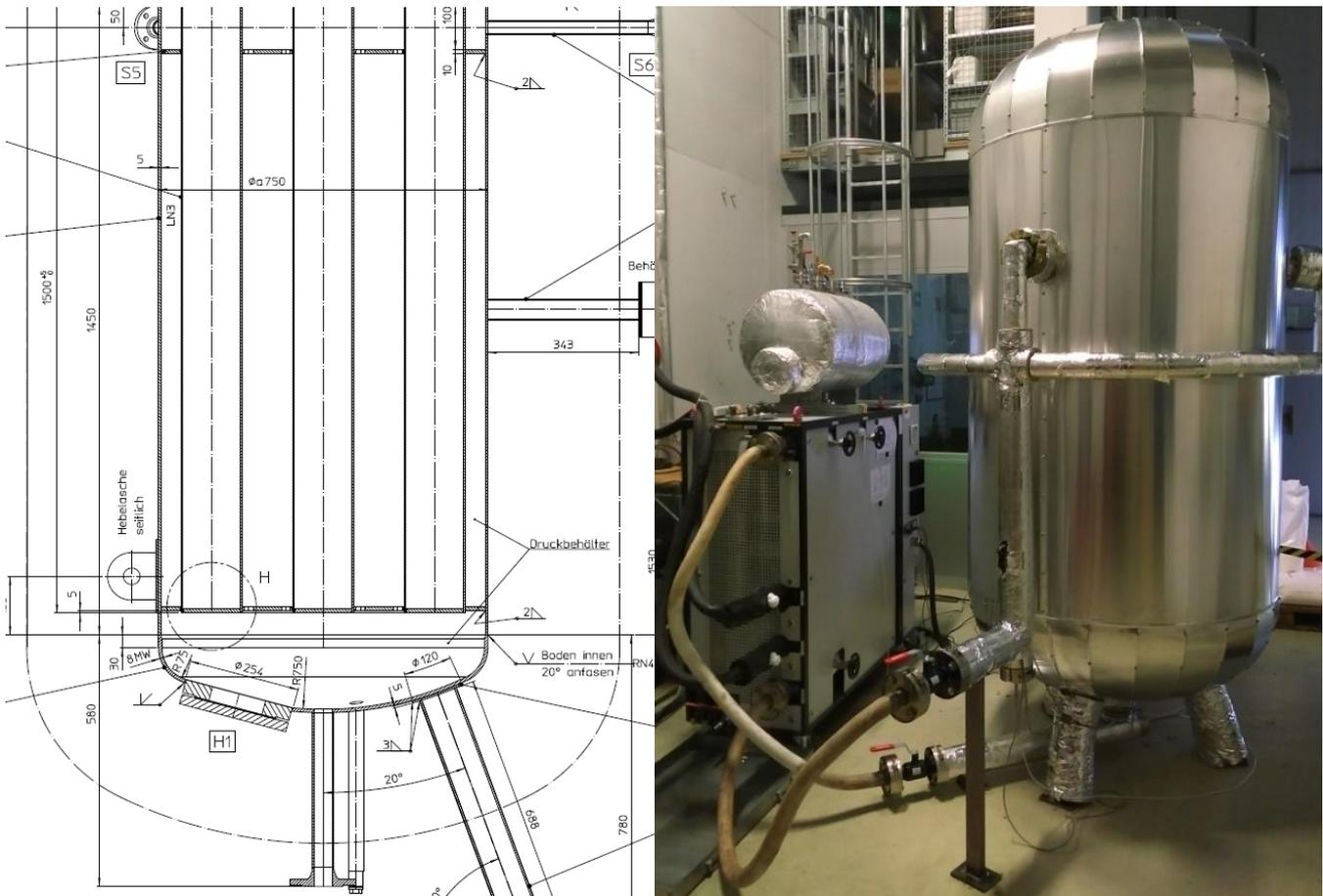


Abbildung 54: Um die Speicherdichte weiter zu erhöhen und gleichzeitig die Kosten zu senken, wurden beim zweiten Speicher mit Rohrbündelwärmeübertrager in vertikaler Bauweise die Durchmesser der PCM-gefüllten Rohre erhöht. Durch die Verwendung von speziellen Wärmeleitstrukturen aus Aluminium in den Rohren, kann weiterhin eine hohe Speicherleistung erreicht werden (ein Patent zu den Wärmeleitstrukturen wird angestrebt). Links: Konstruktionszeichnung. Rechts: Fertiger Speicher im Speicherlabor des AIT zur detaillierten Charakterisierung.

3.2.3. Charakterisierung und Betrieb der TRL4 Speicher

Zur genauen Untersuchung der Polymer-PCM-Speicher wurde am AIT ein eigenes Speicherlabor konzipiert und aufgebaut. Einerseits wurden dadurch die thermophysikalischen Eigenschaften der verschiedenen Materialien (insb. Phasenwechselenthalpie, spezifische Wärme, Wärmeleitfähigkeit, thermische Dehnung) als auch das Schmelz-/Kristallisationseigenschaften auf Heizplatten sowie die thermische Beständigkeit in Öfen untersucht.

Um die Leistung und Speicherkapazität sowie die charakteristischen Temperaturen der TRL4-Polymer-PCM-Speicher detailliert untersuchen zu können wurde ein separater Teststand entwickelt und umgesetzt. Als Wärmeträgermedium kann (Druck)wasser bis 150 °C und Thermoöl bis 350 °C eingesetzt werden. Mittels Heiz-Kühl-Gerät und Kaltwassersatz können die Speicher mit bis zu 100 kW be- und entladen werden. Die Datenaufzeichnung und insb. die Steuerung der unterschiedlichen Komponenten erfolgt durch ein zentrales Leitsystem, wodurch sowohl der Massenstrom durch den Speicher als auch die Ein- bzw. Austrittstemperatur entsprechend gesteuert werden kann. Abbildung 55

zeigt einen der beiden Speicher mit Rohrbündelwärmeübertrager in vertikaler Bauweise auf dem Speicherteststand während der Charakterisierung.

Alle 6 TRL4-Polymer-PCM-Speicher wurden im Labor des AIT aufgebaut und detailliert charakterisiert. Nachdem ein Speicher ein thermisches Gleichgewicht erreicht hat, wurde im ersten Schritt die Eintrittstemperatur des Wärmeträgermedium (annähernd) sprunghaft erhöht bzw. gesenkt, um den Speicher zu be- bzw. entladen. Abbildung 56 zeigt das Resultat eines solchen Versuchs für den ersten Speicher mit Lamellenrohrbündelwärmeübertrager in waagrechter Bauweise. Die PCM-Temperaturen steigen kontinuierlich an und bilden beim Phasenwechsel das für Latentwärmespeicher charakteristische Plateau aus (analog fallen die Temperaturen beim Entladen). Die Speicherleistung zeigt bei dieser Betriebsweise einen Peak zu Beginn, nimmt dann ab und bleibt ebenfalls während des Phasenübergangs auf einem relativ konstanten Niveau, um schließlich weiter abzufallen.

Im Gegensatz zu den meisten elektrischen Speichern, die zwischen zwei konstanten, charakteristischen Spannungsniveaus betrieben werden, hängen die Be- und Entladetemperatur vom System/Prozess ab, für das der Speicher verwendet wird. Bei Vorwärmprozessen beispielsweise (vgl.

Aluminiumvorwärmofen oben), kann der Speicher praktisch bis auf Raumtemperatur entladen werden, während er z. Bsp. für den Betrieb einer Absorptionskältemaschine eine Mindesttemperatur von z.Bsp. 80 °C liefern muss und daher nicht weiter entladen werden kann. Ähnliches gilt für die Speicherbeladung mit unterschiedlichen Wärmequellen, wodurch letztendlich unterschiedliche Speicherbeladetemperatur möglich sind.

Dementsprechend müssen in einer umfassenden Speichercharakterisierung auch Be- und Entladetemperaturen der Speicher variiert werden, um das Speicherverhalten bei unterschiedlichen Bedingungen analysieren zu können. Exemplarisch ist die eingespeicherte Energie für den ersten Speicher mit Lamellenrohrbündelwärmeübertrager in waagrechter Bauweise für unterschiedliche Temperaturpaare in Abbildung 57 dargestellt.

Bei den Speichern mit Rohrbündelwärmeübertrager in vertikaler Bauweise kann das Verhältnis von PCM zu Wärmeträgeröl, welches zugleich auch als sensibles Speichermedium dient, über einen weiten Bereich variiert werden. Der Einfluss der Speicheranfangstemperatur auf das Leistungsprofil und die Kapazität ist für drei Beispiele für eine Sprungantwort in Abbildung 58 dargestellt. Der sensible Anteil an gespeicherter Wärme, welcher vorwiegend vom Thermöl und den Metallkomponenten herrührt, kann bei diesem Hybridspeicherkonzept schnell be-/entladen werden und fungiert damit als Spitzenlastspeicher, während der langsamere latent gespeicherte Anteil für eine Grundlastdeckung geeignet ist.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Abbildung 55: Speicherteststand im eigens entwickelten Speicherlabor am AIT. Be- und Entladeleistungen bis 100 kW sowie Temperaturen bis 350 °C können erreicht werden. Die Steuerung und Datenerfassung erfolgt mittels zentralem Leitsystem.

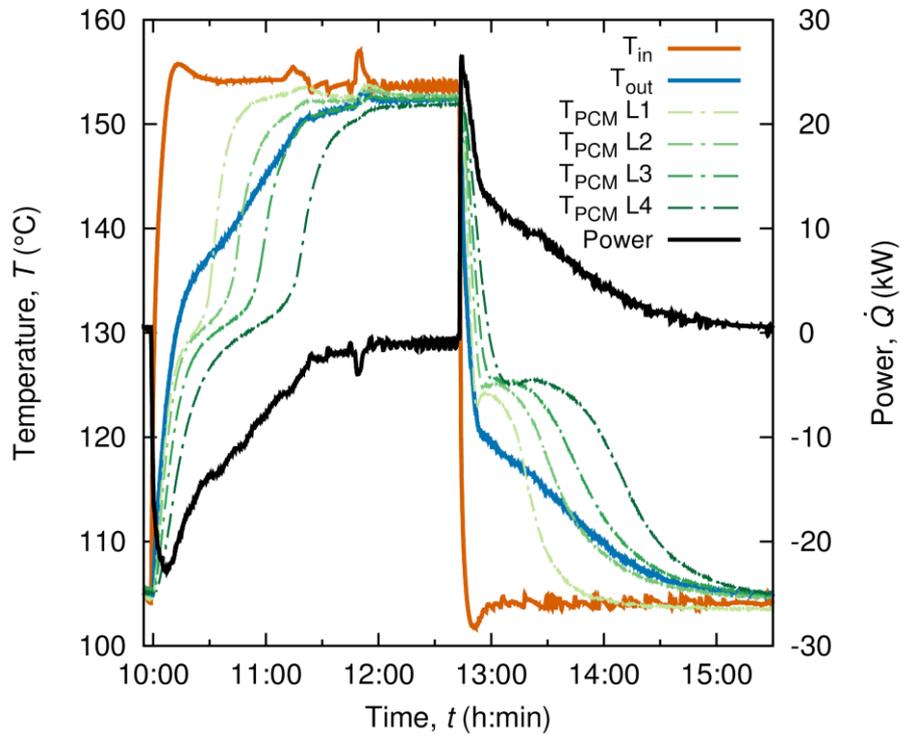


Abbildung 56: Sprungantwort des ersten Speichers mit Lamellenwärmeübertrager mit den für Latentwärmespeicher typischen Plateaus der PCM-Temperatur beim Schmelzen bzw. Erstarren.

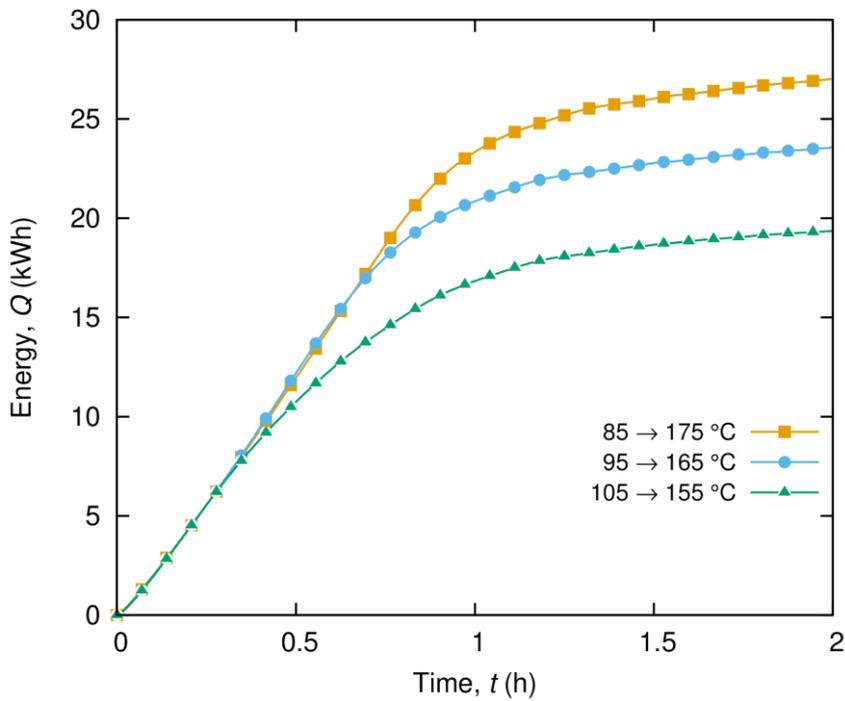


Abbildung 57: Die Energie, die in einem PCM-Speicher gespeichert ist, hängt von der Be- und Entladetemperatur ab. Diese wiederum ergeben sich aus den System-/Prozessanforderungen.

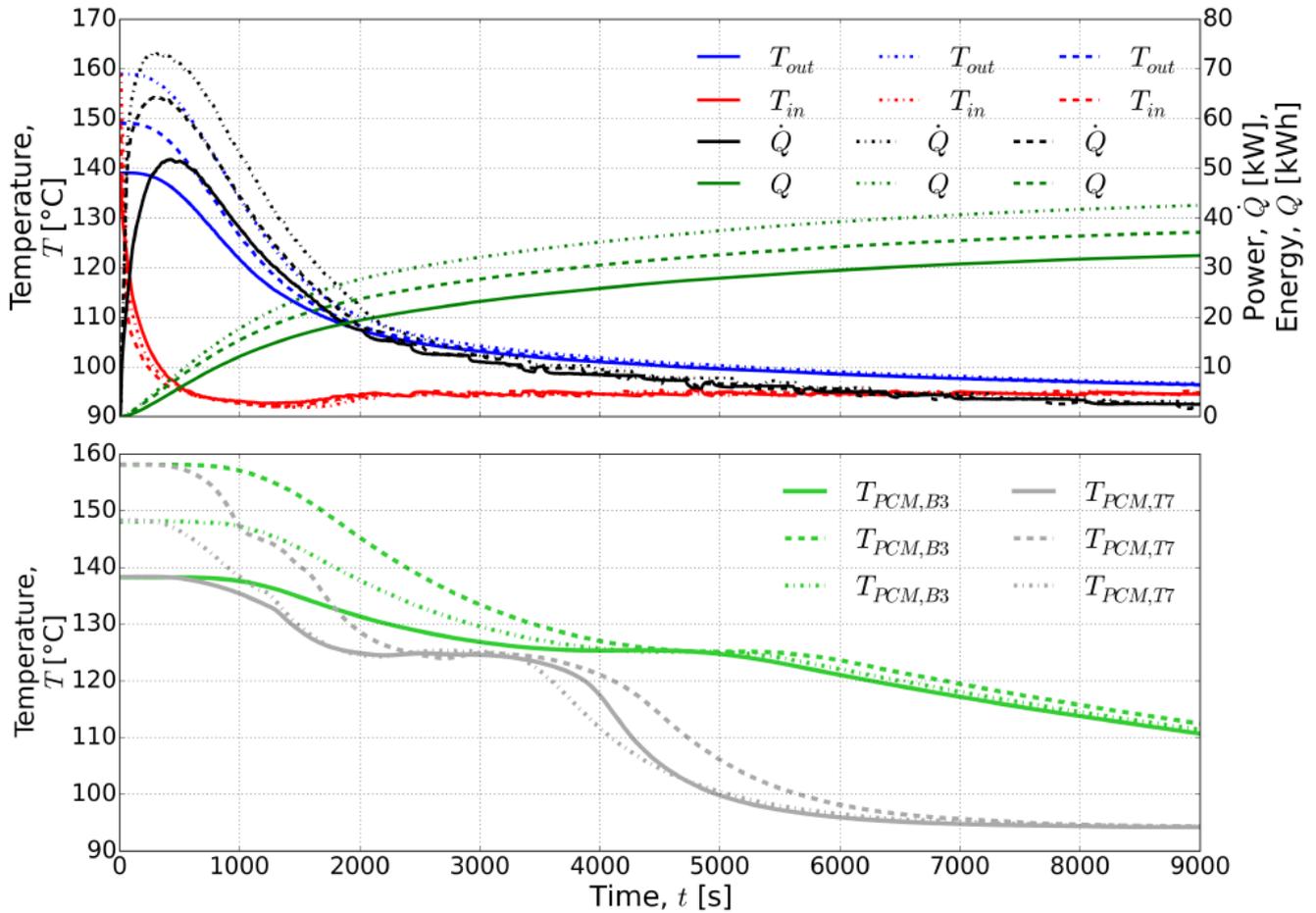


Abbildung 58: Beim neu entwickelten Sensibel-Latent-Hybridspeicher basierend auf dem Rohrbündelwärmeübertrager in vertikaler Bauweise deckt der schnelle sensible Speicheranteil die Spitzenlast und der langsamere latente Anteil die Grundlast ab.

Bei manchen PCMs beträgt der Unterschied zwischen Schmelz- und Kristallisationstemperatur mehrere 10 °C (vgl. Handwärmer). Diese sog. Unterkühlung kann für Speicher für Industrie und Wärmenetze von Nachteil sein und wurde daher eingehend für die Polymer als PCM untersucht. Als wichtiges Resultat konnte gezeigt werden (Abbildung 59), dass es zwar bei Materialuntersuchungen von Kleinstmengen (Milligramm) mit thermophysikalischen Methoden (Differential Scanning Calorimetry) hohe Unterkühlungen geben kann, doch in realen großen Speichern beträgt die Unterkühlung nur mehr wenige Grad Celsius und stellt daher meist kein anlagen- bzw. prozesstechnisches Problem dar. DSC-Messungen können, da mit geringen Aufwand durchführbar, durchaus hilfreich sein, sofern mit Speichertypischen niedrigen Heiz-/Kühlraten gemessen wird.

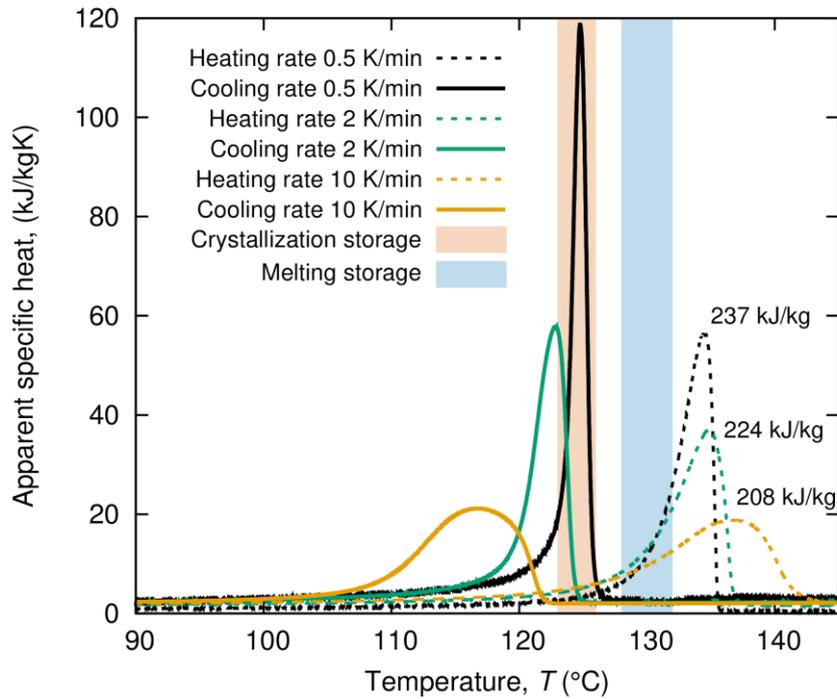


Abbildung 59: Vergleich der Unterkühlung für thermophysikalische Messungen in einer DSC (Milligramm) mit jener an realen Speichern (hunderte Kilogramm) mit dem wichtigen Resultat, dass die Unterkühlung in real großen Speicher sehr gering ist und meist kein technisches Problem darstellt. Bei DSC Messungen ist zudem auf geringe Heiz-/Kühlraten zu achten.

Der Wärmeträgermassenstrom durch den Speicher stellt die wichtigste Regelungsgröße eines Polymer-PCM-Speicher dar. In realen Anlagen kann bzw. muss der Massenstrom durch den Speicher durch geeignete hydraulische Verschaltung (z. B. Bypass) und gesteuerte Armaturen (vgl. R&I-Fließschema der TRL5-Speicher-Anlage am LKR in Abbildung 13) entsprechend geregelt werden. Daher ist die Charakterisierung des Einflusses unterschiedlicher Massenströme durch den Speicher von großer Bedeutung und wurde für alle Speicher im Detail durchgeführt. In ist das Resultat für den ersten Speicher mit Lamellenwärmeübertrager in waagrechter Bauweise exemplarisch für eine Entladung des Speichers von 155 auf 105 °C dargestellt. Die Speicheraustrittstemperatur ändert sich entsprechend, was insbesondere beachtet werden muss, wenn eine gewisse Mindestentladetemperatur im Prozess erreicht werden muss (z. Bsp. mittels Bypass).

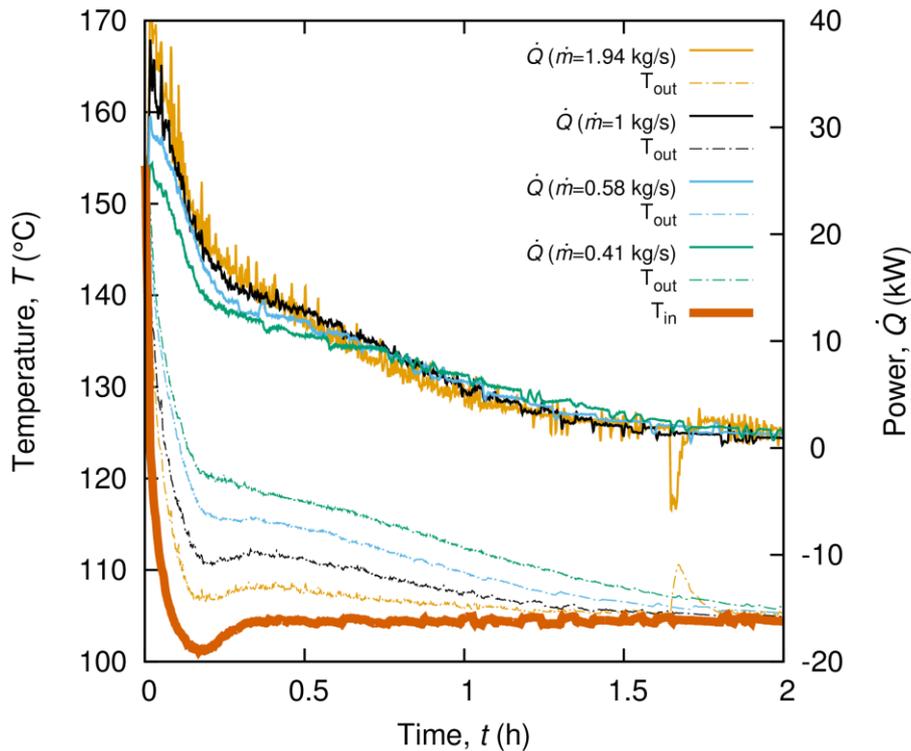


Abbildung 60: Einfluss des Speichermassenstroms auf die Leistung und Speicheraustrittstemperatur.

Insbesondere für den Speicher mit Glattrohrbündelwärmeübertrager wurden ausführliche Parametervariationen der finalen Be- und Entladetemperatur als auch des Massenstroms durchgeführt. Am AIT wurde eine spezielle Auswertemethodik entwickelt, mit der der komplexe Parameterraum visualisiert und analysiert werden kann: in Abbildung 61 ist die Leistung gegenüber der momentanen Speicherkapazität aufgetragen. Dabei sind die hohen Anfangsleistungen zu Be- und Entladebeginn und die folgenden Leistungsplateaus im latenten Bereich erkennbar, die für Großteil der gespeicherten Energie verantwortlich sind.

Unterschiedliche Speichieranwendungen ergeben unterschiedliche Anforderungen an die Latentwärmespeicher hinsichtlich des genauen Be- und Entladeleistungsprofils. Bei manchen Anwendungen ist eine konstante Leistung notwendig, welche durch eine Massenstromregelung des Speichers in Kombination mit geeigneter hydraulischer Einbindung erreicht werden kann. In ist exemplarisch die Entladung des zweiten Speichers mit Rohrbündelwärmeübertrager in vertikaler Bauweise dargestellt. Die Speicherentladeleistung kann über einen weiten Zeitraum konstant gehalten werden, indem der Massenstrom kontinuierlich erhöht wird. Da bei diesem Versuch die Eintrittstemperatur konstant gehalten wurde, nimmt die Austrittstemperatur entsprechend ab. Im Falle einer kombinierten System-/Prozessanforderung von konstanter Entladeleistung und Mindestaustrittstemperatur, muss letztere über eine Bypass-Schaltung oder Beimischung erfolgen. Im realen Anlagenbetrieb sind gewisse maximale Pumpleistungen und damit maximale Massenströme vorgegeben. In einem Experiment wurde eine solche Speicherbeladung experimentell getestet, um den Einfluss von sich ändernden Massenstrombedingungen während des Beladens zu testen (Abbildung 63).

Ebenso können in realen Anlagen rasche Wechsel von Be- und Entladezyklen stattfinden, welche den Speicher jeweils nicht vollständig be- bzw. entladen. Der genaue Phasenzustand des PCM kann dadurch im Speicher lokal sehr unterschiedlich sein. Um den Einfluss eines solchen schnellen Wechsels zu untersuchen, wurde entsprechende Lastgänge am Prüfstand nachgestellt. In Abbildung 64 ist erkennbar, dass der gesamte Speicher als eine Art thermische Tiefpass fungiert und, aufgrund seiner Eigenschaft als Speicher, Schwankungen entsprechend glättet. Speziell wenn der Speicher rund um die Phasenwechseltemperatur betrieben wird, ist eine gute Be- und Entladung auch bei schnell wechselnden Lasten möglich.

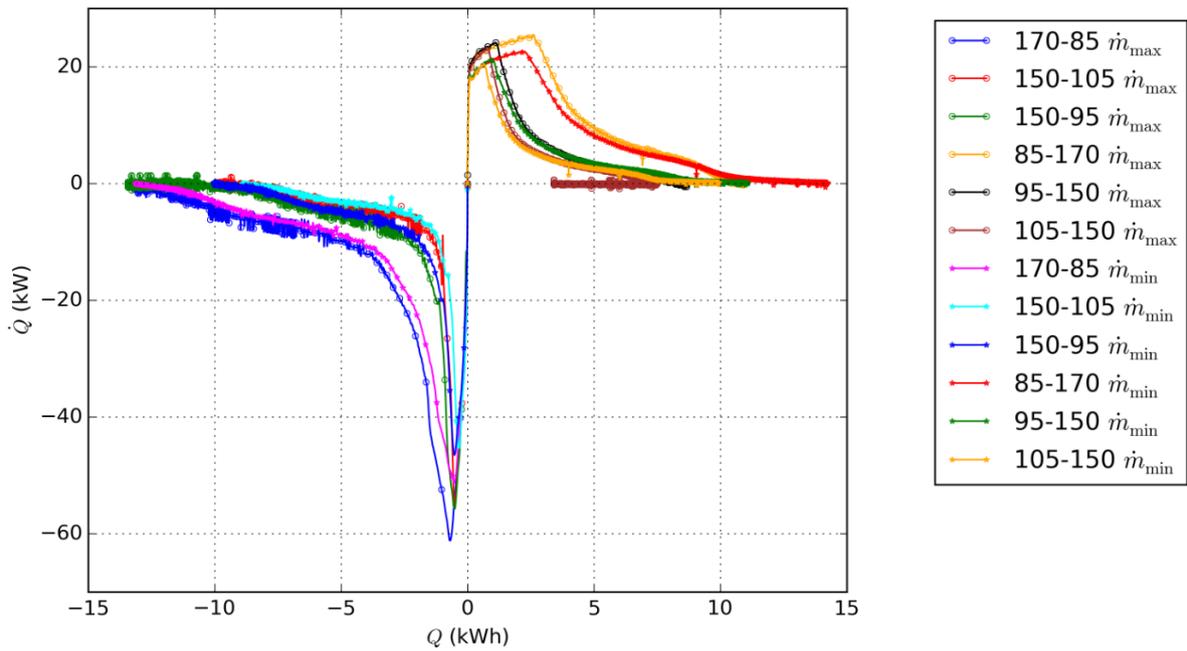


Abbildung 61: Am AIT wurde eine eigene Auswertemethodik entwickelt, um den gesamten Parameterraum aus verschiedenen Be- und Entladetemperaturen und Massenströmen visualisieren und analysieren zu können.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

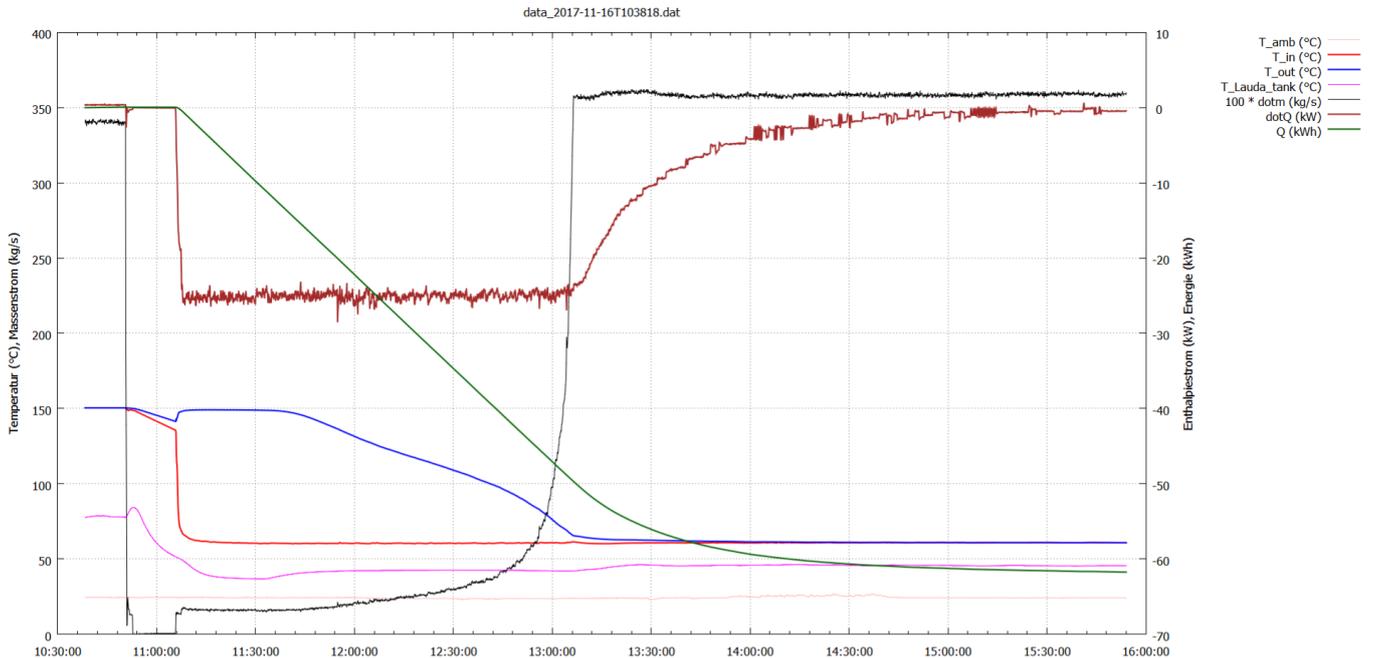


Abbildung 62: Entladung des zweiten Speichers mit Rohrbündelwärmeübertrager in vertikaler Bauweise mit konstanter Leistung (braune Kurve) durch Regelung des Massenstroms. Die im Speicher verbleibende Energie (grün) fällt demensprechend linear in diesem Bereich.

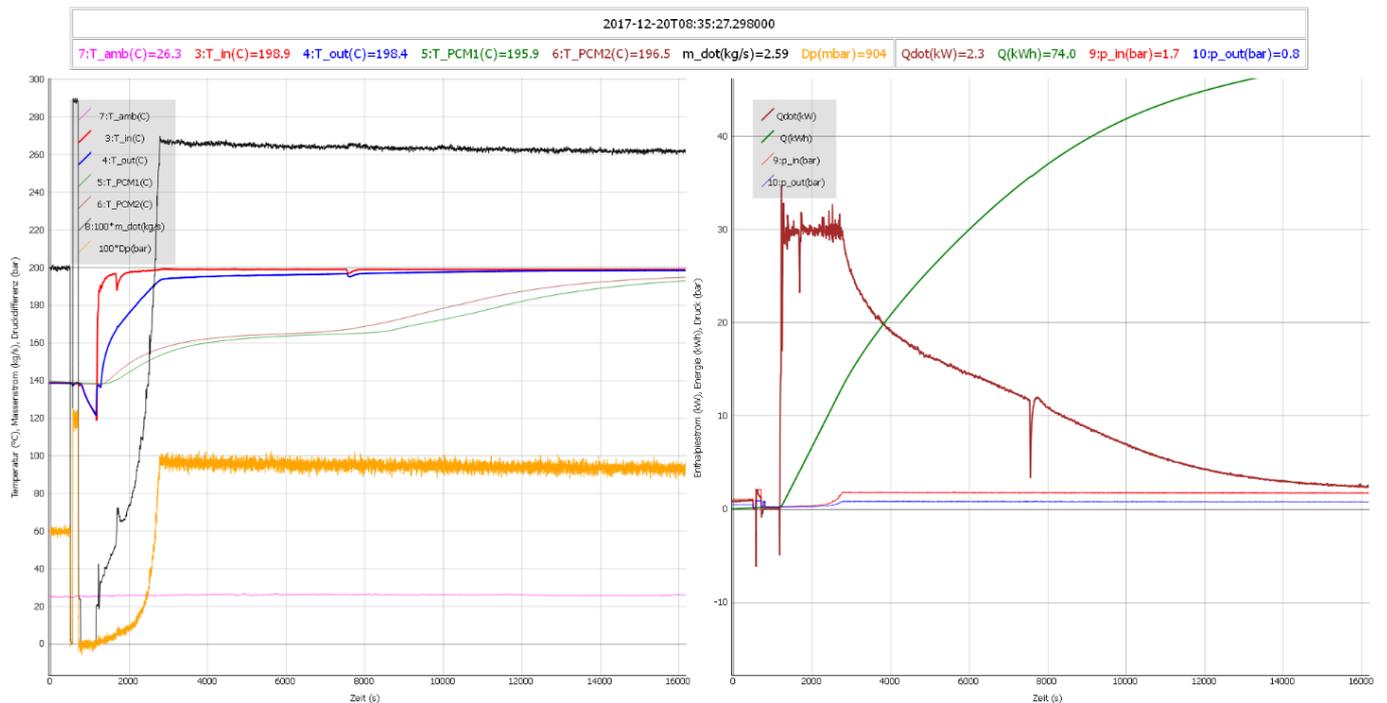


Abbildung 63: Beladung des Speichers mit Lamellenwärmeübertrager in waagrechter Bauweise (mit hochkorrosivem PCM) mit zunächst konstanter Leistung (Plateau der braunen Kurve rechts) und anschließender weiterer Beladung mit konstantem Massenstrom (abfallende Beladeleistung). Die eingespeicherte Energie (grün) steigt demensprechend zuerst linear und danach langsamer.

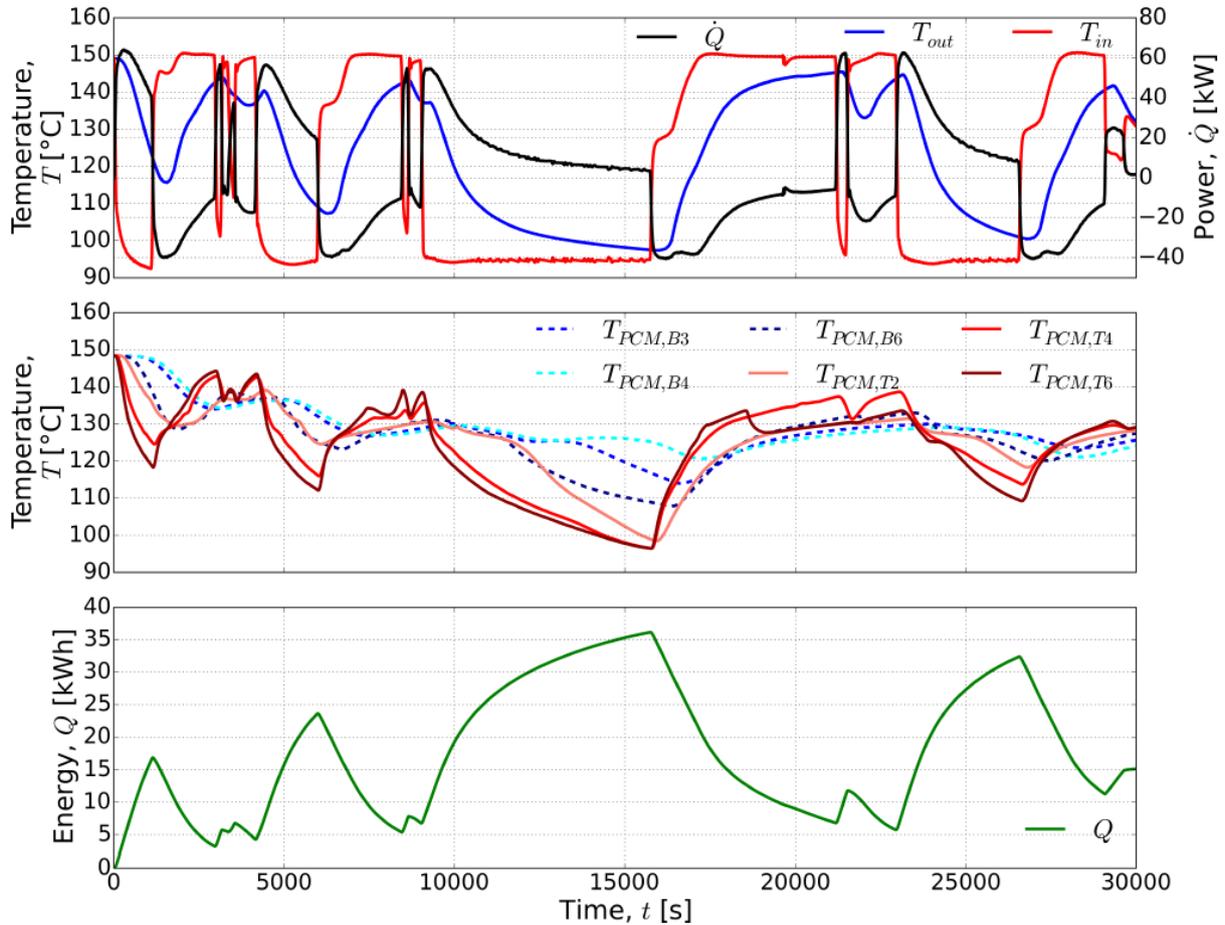


Abbildung 64: Der Speicher glättet schnelle Be- und Entladewechsel und erlaubt somit einen stabilen Betrieb.

Mit Hilfe der komplexen verbauten Sensorik sowie der entwickelten Simulationsmodelle, konnten abschließend die Speicher im Detail analysiert werden und verschiedene charakteristische Kenngrößen ermittelt werden. Im Gegensatz zu elektrischen Speichern, bei denen die Be- und Entladespannung praktisch vorgegeben und für die meisten umgebenden Systeme/Prozesse vergleichbar ist, muss beim thermischen Speicher die Be- und Entladetemperatur genauer im Zuge der Systemauslegung betrachtet und ausgelegt werden. Dementsprechend ergeben sich daraus insbesondere auch unterschiedliche Speicherdichten, da natürlich auch sensible Wärme in den PCM-Speichern gespeichert wird. Ebenso sind die Leistungsprofile von solchen thermischen Speichern komplexer als bei elektrischen Speichern, was bei der Auslegung und Systemintegration beachtet werden muss.

Exemplarisch sind die Ergebnisse für zwei Speicher in Tabelle 1 und Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 1: Charakteristische Speicherkennwerte für den ersten Speicher mit Lamellenwärmeübertrager in waagrechter Bauweise.

$T_{discharged}$ (°C)	$T_{charged}$ (°C)	Q_{2hours} (kWh)	q_{vol} (kWh/m ³)	$q_{mass,PCM}$ (kWh/kg)	$Q_{l,PCM}$ (kWh)	$Q_{s,PCM}$ (kWh)	$Q_{s,st}$ (kWh)	$Q_{s,alu}$ (kWh)	$Q_{s,ins}$ (kWh)	ΔH (kJ/kg)
85	175	27.0	92.7	0.159	12.7	10.6	2.9	0.4	0.5	268.4
95	165	23.6	81.1	0.139	12.4	8.2	2.3	0.3	0.5	261.6
105	155	19.3	66.3	0.114	11.1	5.9	1.6	0.2	0.5	235.8

Tabelle 2: Charakteristische Speicherkennwerte für den ersten Speicher mit Rohrbündelwärmeübertrager in senkrechter Bauweise, welcher als Sensibel-Latent-Hybrid-Speicher ausgelegt ist, wodurch der Fokus auf flexiblen Betrieb (Spitzenlast- und Grundlastabdeckung) und weniger auf optimale Speicherdichte gelegt wurde.

$T_{charged}$ (°C)	$T_{discharged}$ (°C)	\dot{m} (kg/s)	$t_{discharge}$ (h)	Q (kWh)	q_{vol} (kWh/m ³)	$q_{mass,PCM}$ (kWh/kg)	$Q_{l,PCM}$ (kWh)	$Q_{s,PCM}$ (kWh)	$Q_{s,st}$ (kWh)	$Q_{s,oil}$ (kWh)
150	110	1.4	5	29.9	34.1	0.144	9.2	4.7	4.5	11.2
150	110	0.7	5	29.6	33.8	0.142	8.9	4.7	4.5	11.2
150	110	1.4	2.5	28	31.9	0.134	7.3	4.7	4.5	11.2
150	110	0.7	2.5	26.9	30.7	0.129	6.2	4.7	4.5	11.2
150	90	0.7	2.5	40.3	46.0	0.194	9.5	7.3	6.8	16.5
160	95	0.7	2.5	42.5	48.5	0.204	8.7	8.1	7.3	18.1
150	95	0.7	2.5	37.1	42.3	0.178	8.8	6.7	6.2	15.2
140	95	0.7	2.5	32.5	37.1	0.156	9.6	5.3	5.1	12.3

Ein weiterer wesentlicher Aspekt der Polymer-PCM-Speicher betrifft deren Langzeitbeständigkeit. Neben den ausführlichen Untersuchungen auf Materialebene (siehe Kapitel 3.3), wurden einige Speicher auch über längere Zeit im realitätsnahen Betrieb getestet. Insbesondere die gleichzeitige Belastung von hoher Temperatur und Luftsauerstoff stellen eine große Herausforderung an die Polymer und die Wärmeübertrager dar. Der erste Speicher mit Lamellenwärmeübertrager in waagrechter Bauweise wurde mehr als 30 Schmelz- und Kristallisationszyklen unterzogen und befand sich ca. 60 Stunden über dem Schmelzbereich von 130 °C, ca. 80 Stunden zwischen 100 und 130 °C und ca. 30 Stunden zwischen Raumtemperatur und 100 °C. Anschließend wurde der Speicher mittels kaltem Wasserstrahl in unterschiedliche Teile geschnitten, um insbesondere keine Degradation beim Schneiden selbst zu verursachen.

In Abbildung 65 und Abbildung 66 ist erkennbar, dass zwar die dem Luftsauerstoff ausgesetzte Oberfläche des Polymer-PCMs verfärbt und degradiert, jedoch das innere des Speichers noch vollkommen intakt ist. In detaillierten thermophysikalischen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die thermische Belastung alleine zu keiner Verschlechterung der Speicherleistung und -kapazität führt. Ebenso ist ersichtlich, dass auch der Wärmeübertrager selbst keinen Schaden genommen hat und sich insbesondere die geometrische Anordnung der Lamellen, welche entscheidend für die Speicherleistung ist, nicht geändert hat.

Die gleichen positiven Schlussfolgerungen konnten auch für die anderen Speicher gezogen werden, wie beispielhaft für den ersten Speicher mit Rohrbündelwärmeübertrager in vertikaler Bauweise aus Abbildung 67 ersichtlich.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

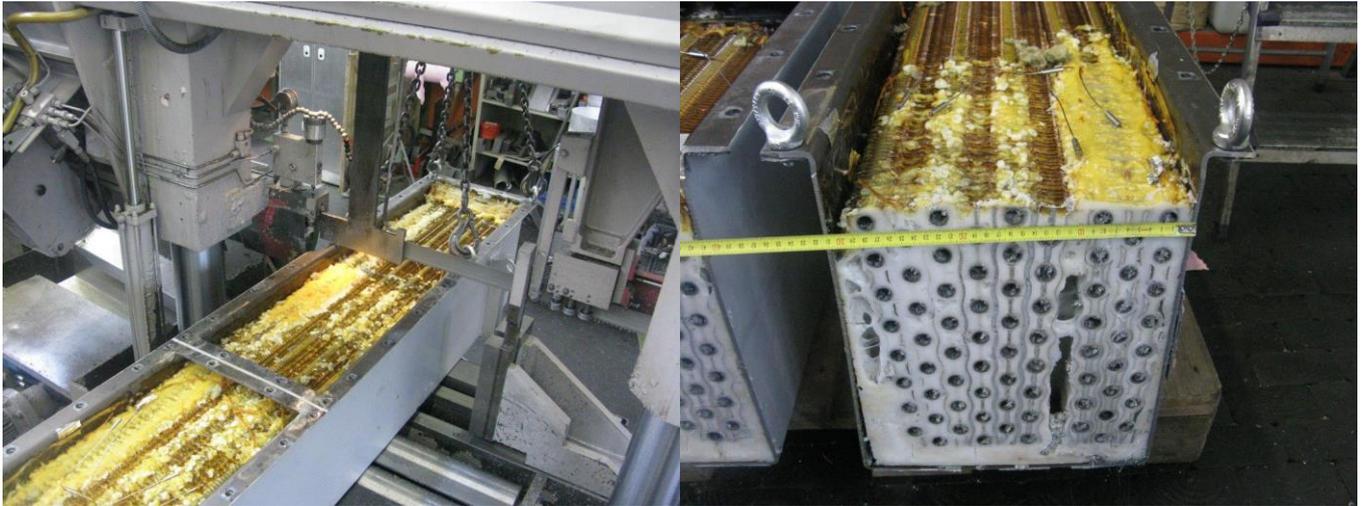


Abbildung 65: Links: Wasserstrahlschneiden des Speichers nach längerem Testbetrieb. Rechts: Oberflächliche Degradation des PCMs, das innere ist jedoch vollständig intakt.



Abbildung 66: Links: Entlang der Außenwand des Speichers konnte offenbar luftsauerstoff eindringen und führte zur Degradation des Polymer-PCMs. Rechts: Das HDPE im inneren des Speichers ist intakt, ebenso ist die Geometrie des Wärmeübertragers unverändert, was entscheidend für die Speicherleistung ist.



Abbildung 67: Links: Das PCM in den Rohren ins vollständig intakt. Rechts: Nahaufnahme des HDPE aus dem Rohr. Keine Verfärbung aufgrund von Degradation ist erkennbar.

In allen Phasen des Projekts wurden laufend ökonomische Analysen der geplanten und schließlich gebauten Speicher durchgeführt. Insbesondere wurden die unterschiedlichen Arbeitsschritte und Fertigungsverfahren sowie deren Anteil an den Gesteungskosten der jeweiligen Speicher analysiert und die Designs entsprechend adaptiert, um möglichst geringe Kosten erreichen zu können. Die Materialkosten für PCM und Rohre für unterschiedliche Geometrien (PCM-Rohrdurchmesser) sind exemplarisch für den Sensibel-Latent-Hybrid-Speicher in Abbildung 68 dargestellt. Sie betragen, je nach anwendungsspezifisch notwendigem Volumenverhältnis PCM/Thermoöl, zwischen 20 und 35 €/kWh.

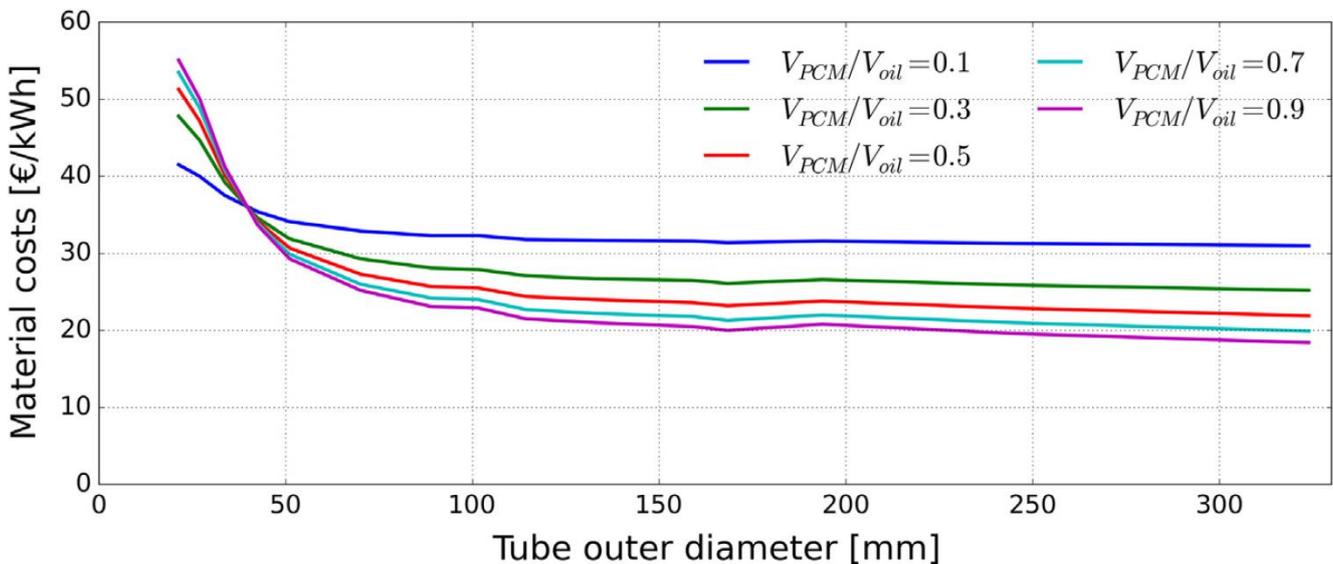


Abbildung 68: Materialkosten für Rohre und PCM für den Sensibel-Latent-Hybrid-Speicher für unterschiedliche Rohrdurchmesser und Volumenverhältnisse PCM/Thermoöl.

Die finalen Produktkosten hängen zusätzlich von den teilweise stark standortabhängigen Fertigungs- und Personalkosten sowie weiteren unternehmensspezifischen Kosten sowie den produzierten Stückzahlen ab, können aber aufgrund der Erfahrungen im Projekt zumindest grob abgeschätzt werden und sind in Tabelle 3 dargestellt. Speicher mit einer hohen Speicherleistung im Vergleich zur Speicherkapazität sind teurer, da entweder wärmeleitfähige PCMs oder leistungsfähige Wärmeübertrager zum Einsatz kommen müssen. Der angestrebte Temperaturbereich hat wenig Einfluss auf die finalen Produktkosten, da es preiswerte PCMs auch für höhere Temperaturen gibt und Stähle bis zu hohen Temperaturen ausreichende Zeitstandsfestigkeit bieten.

Tabelle 3: Abgeschätzte finale Produktkosten für die Polymer-PCM-Speicher.

0.1 > Leistung/Kapazität (Bsp. 1 MWh, 100 kW)	0.1 > Leistung/Kapazität > 10 (Bsp: 1 MWh, 1 MW)	Leistung/Kapazität > 10 (Bsp. 1 MWh, 10 MW)
10 – 50 €/kWh	50 – 100 €/kWh	100 – 300 €/kWh

Teilkristalline Kunststoffe in der Verwendung als PCM werden hoher thermischer Belastung ausgesetzt, da sie in ihrem geschmolzenen Zustand ihre kristalline Struktur verlieren, welche prinzipiell die Luftsauerstoffdiffusion in das Material und somit die Initiierung eines thermo-oxidativen Abbaus hemmt. Der thermo-oxidative Abbau verändert die Morphologie des Kunststoffs, was sich wiederum auf die thermophysikalischen Eigenschaften des Materials auswirken kann. Ein zentrales Eigenschaftskriterium polymerer PCM stellt also deren anwendungsrelevante Langzeitstabilität dar, zu der es bislang keine Daten gibt. Daher wurden eine High-Density Polyethylen (HDPE)-Type, ein POM-Copolymer (POM-C) und eine PA 6-Type im geschmolzenen Zustand in Luft für 15 Tage oberhalb ihrer jeweiligen Schmelztemperaturen ausgelagert. Dabei wurde nur ein oberflächlicher thermo-oxidativer Abbau der ausgelagerten HDPE- und PA 6-Prüfkörper festgestellt, was auf diffusionslimitierte Oxidation zurückgeführt wurde (Abbildung 70). Der Großteil der Speicherkapazität der ausgelagerten Prüfkörper blieb jedoch erhalten.

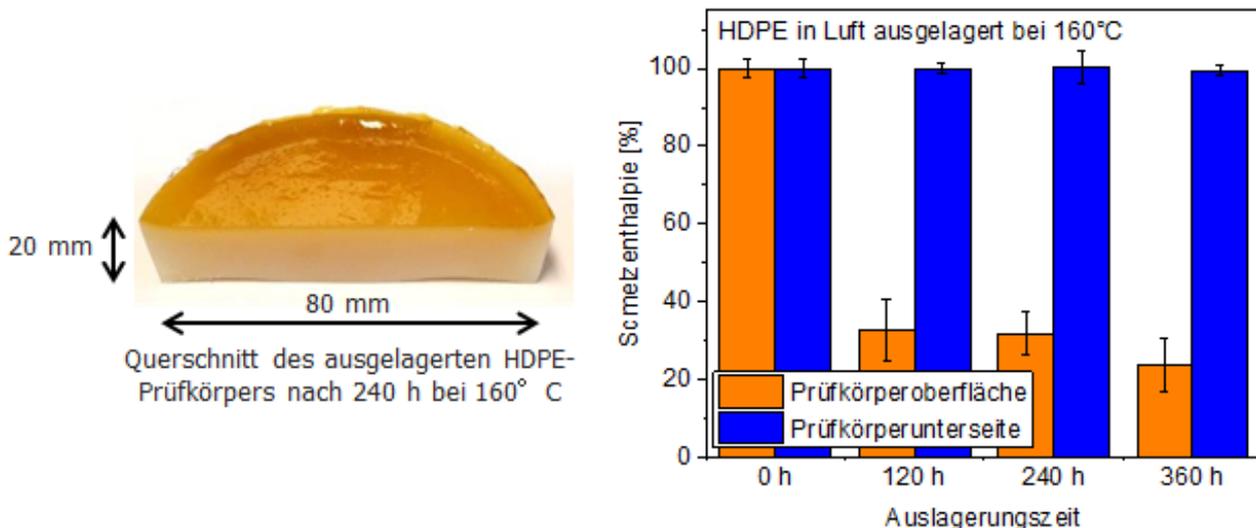


Abbildung 70: HDPE-Prüfkörper und Schmelzenthalpie an der Prüfkörperoberfläche bzw. an der Prüfkörperunterseite nach einer Auslagerung bei 160°C für bis zu 360 Stunden

Das ausgelagerte POM-C hielt den Auslagerungsbedingungen nicht Stand und wurde durch mehrfache Kettenspaltung zu niedermolekularen Substanzen abgebaut. Thermische Zyklentests mit Auflade- und Entladezyklen sowohl unter Stickstoff- als auch unter Luftatmosphäre bewirkten weder beim HDPE noch beim PA6 Änderungen der thermophysikalischen Eigenschaften, wobei sich der Messzeitraum auf bis zu 3000 Zyklen belief (siehe Abbildung 71). Dementsprechend wird mit polymeren PCM (Polyethylen und Polyamiden) ein Speichertemperaturbereich von ca. 100 °C bis 250 °C abgedeckt. Die Ergebnisse dieses Materialscreening sind in folgender wissenschaftlicher Publikation umfassend diskutiert:

Weingrill, H., Zauner, C., Resch-Fauster, K. (2018). *Applicability of Polymeric Materials as Phase Change Materials*, *Macromolecular Materials and Engineering*, DOI: 10.1002/mame.201800355.

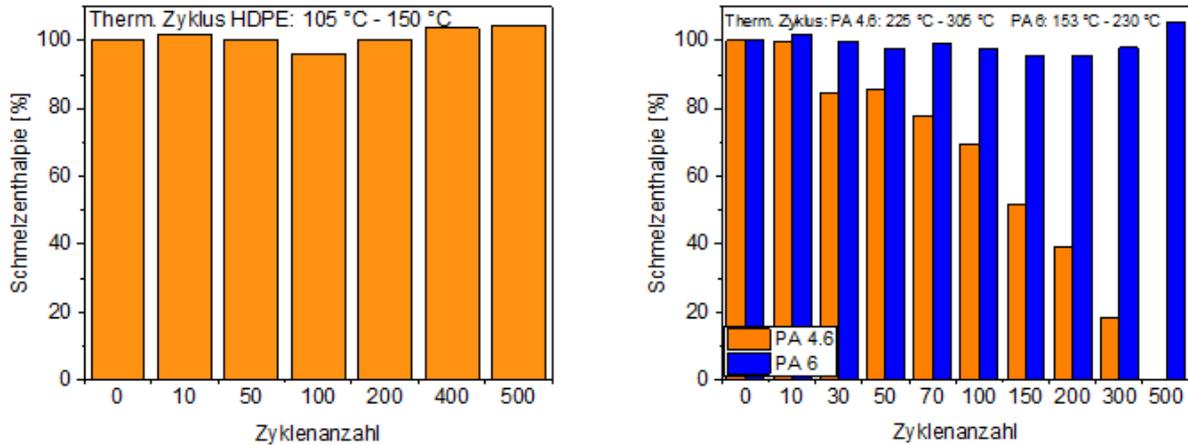


Abbildung 71: Schmelzenthalpie von HDPE (links) und von unterschiedlichen Polyamidtypen (PA4.6; PA6) nach zyklischer thermischer Belastung unter Stickstoffatmosphäre.

Die Auslagerungsparameter wurden im Anschluss für Langzeituntersuchungen weiter an die tatsächliche Anwendung in einem Wärmespeicher angepasst (erhöhte Auslagerungstemperatur und größere Prüfkörperdimensionen), wobei dies am Beispiel von Polyethylen erfolgte. Dafür wurde eine ausgewählte HDPE-Type im Vertriebszustand (PE-1) und mit unterschiedlichen Stabilisatoren zusätzlich gegen thermo-oxidativen Abbau stabilisiert (PE2-5) in Luft für 10 Monate im geschmolzenen Zustand ausgelagert. Während der Auslagerung traten unterschiedliche Werkstoffabbauerscheinungen auf, welche die Herausforderungen bei der Verwendung von Kunststoffen im geschmolzenen Zustand veranschaulichten (siehe Abbildung 72).

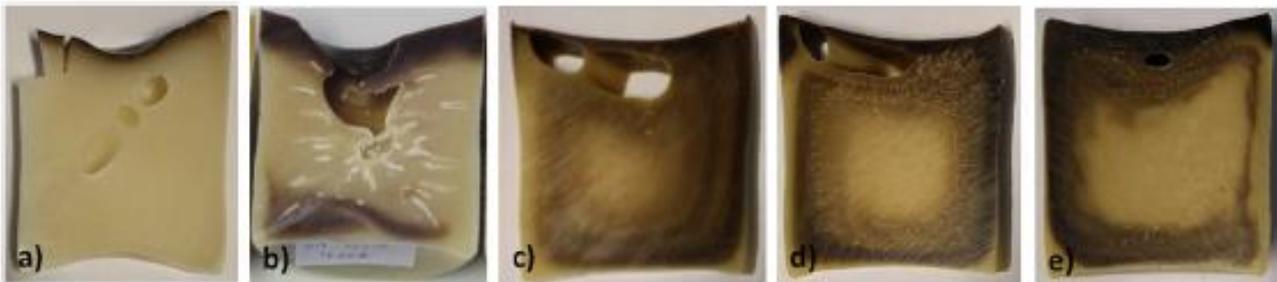


Abbildung 72: Querschnitte von HDPE-Prüfkörpern nach einer statischen thermischen Auslagerung für 765 Stunden bei 160°C; a) PE, b) PE2, c) PE3, d) PE4, e) PE5

Die Kombination aus Schmelzbeweglichkeit und geringer Temperaturgradienten während der Auslagerung führten zu kontinuierlichen Umwälzungen der Schmelze. Mit fortgeschrittener Alterung verlor die Oberfläche der Prüfkörper jedoch ihre Beweglichkeit. Diese versiegelte Prüfkörperoberfläche diente als Fänger für Luftsauerstoff und verhinderte eine weitere Sauerstoffdiffusion in das Prüfkörperinnere. Messungen zur Bestimmung der Oxidationseindringtiefe (OPD für „oxidation penetration depth“) zeigten einen größeren Anteil an oberflächlich abgebauten Material der zusätzlich stabilisierten HDPE-Typen (PE2-5) gegenüber aufgrund einer verzögerten Versiegelung der Prüfkörperoberfläche gegenüber der nicht zusätzlich stabilisierten Type (PE1). Eine zusätzliche

Stabilisierung gegen thermo-oxidativen Abbau wirkte sich somit kontraproduktiv auf den Erhalt der Speicherkapazität aus und wurde als obsolet für die Anwendung als PCM eingestuft, was sich vorteilhaft auf den Materialpreis auswirkt. Nichtsdestotrotz wurde die Speicherkapazität aller ausgelagerten Prüfkörper der unterschiedlich stabilisierten HDPE-Typen nur minimal reduziert, da außerhalb des Prüfkörperbereichs, in den der Luftsauerstoff diffundieren konnte, kein thermo-oxidativer Abbau festgestellt wurde (Abbildung 73). Polymere Werkstoffe eignen sich daher auch in Hinblick auf die Langzeitstabilität als PCM. Die Ergebnisse der Untersuchungen der Langzeitstabilität polymerer PCM sind in folgender wissenschaftlicher Publikation umfassend diskutiert:

Weingrill, H., Resch-Fauster, K., Lucyshyn, T., Zauner, C. (2019). High-density polyethylene as phase-change material: Long-term stability and aging, *Polymer Testing* 76, 433-442.

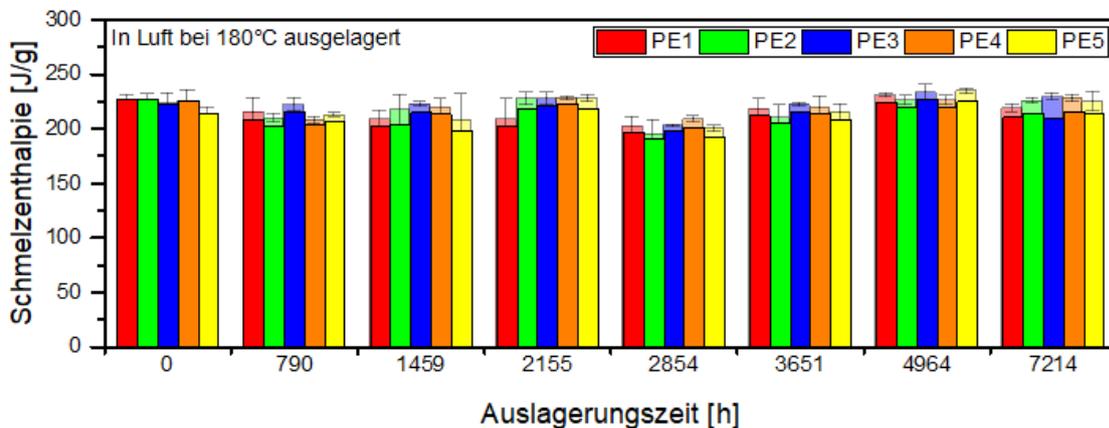


Abbildung 73: Schmelzenthalpie von HDPE-Prüfkörpern (nicht zusätzlich stabilisiert (PE1) und zusätzlich stabilisiert gegen thermo-oxidativen Abbau (PE2-5)) nach einer statischen thermischen Auslagerung für unterschiedliche Zeiten bei 180°C

Nach dem Nachweis der prinzipiellen Eignung von teilkristallinen Kunststoffen als PCM, befassten sich weitere Arbeiten in diesem Arbeitspaket mit der Funktionalisierung der Polymere zur Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit (WLF) durch die Beimengung von hochleitfähigen Partikeln. Dazu erfolgte zunächst eine umfassende Literaturrecherche. Zur Erhöhung der WLF von Kunststoffen eignen sich prinzipiell Metallpulver, Kohlenstoffvariationen, mineralische Füllstoffe sowie Kombinationen dieser Materialien. In der wissenschaftlichen Literatur sind bislang jedoch selten verschiedene Füllstoffe an ein- und demselben Matrixpolymer erprobt bzw. systematisch der Einfluss von Füllstoffgehalt und -geometrie beschrieben. Ebenso wenig sind Systematiken zur Maximierung der Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffen ableitbar. Eine erste Orientierung zu Möglichkeiten und Grenzen der Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit in polymeren Werkstoffen bei Füllgraden unter 30 gew.-% gibt Abbildung 74, wobei der Fokus der Grafik auf PCM-relevante Polymere gelegt wurde. Kernergebnisse der wissenschaftlichen Literatur wurden in einer umfangreichen Excel Datenbank übersichtlich aufbereitet, wobei ein Ranking der Füllstoffe hinsichtlich Leistungseffizienz die Grundlage für die Auswahl von Füllstoffen in der gegenständlichen Studie (siehe unten) bildete.

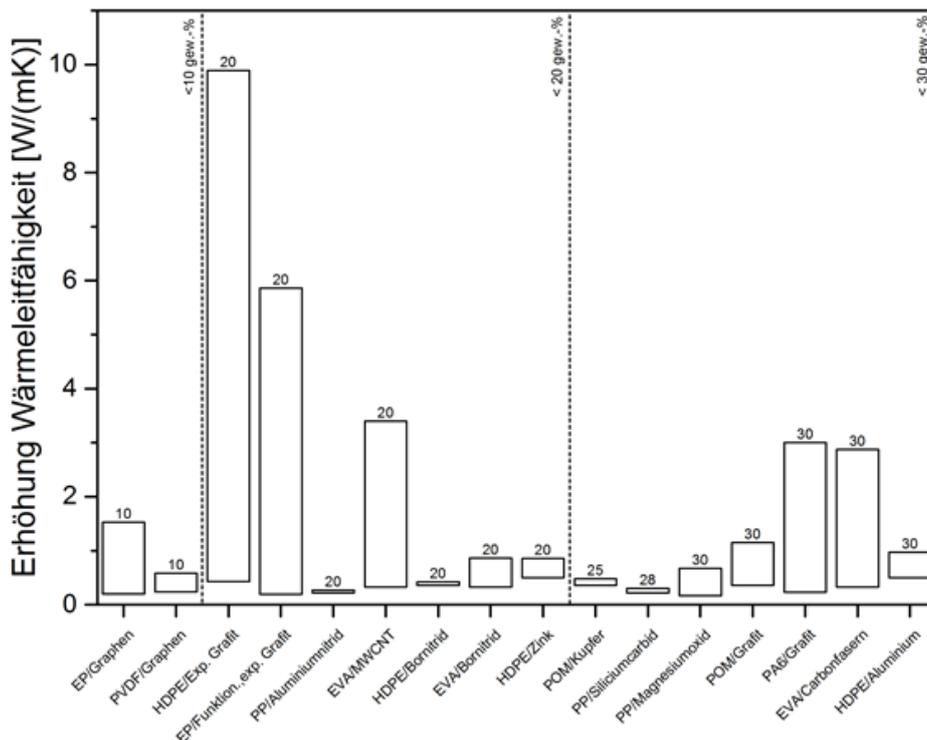


Abbildung 74: Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit in polymeren Werkstoffen durch Füllstoffe bei Füllgraden unter 30 gew.-%.

Die Literaturrecherche zeigte jedoch auch, dass die beschriebenen Ergebnisse unterschiedlicher Studien nicht untereinander vergleichbar sind, da die verwendeten Wärmeleitfähigkeitsmesssysteme in ihrem Funktionsprinzip sehr stark divergieren und mit unterschiedlichen Messsystemen ermittelte Werte daher nur sehr eingeschränkt miteinander vergleichbar sind. Daher widmete sich dieses Arbeitspaket auch der akkuraten Messung der Wärmeleitfähigkeit von (partikelmodifizierten) Kunststoffen. Werkstoffliche Variationsparameter waren die Polymorphologie (zwei Polyethylentypen mit unterschiedlichem Kristallinitätsgrad bei annähernd gleichem molekularem Aufbau), sowie die Füllstoffgeometrie (Plättchen, Kugeln) und der Füllgrad (10, 30 and 50 wt.-%). Als Referenzfüllstoff wurde aufgrund des Preis-Leistungs-Verhältnisses verbunden mit dem geometrischen Variantenreichtum Kupfer ausgewählt. Die Wärmeleitfähigkeit der hergestellten Compounds wurde mittels folgenden Messgeräten analysiert:

- TPS2500S, Hot Disk (Isotropie- und Anisotropiemodul)
- Transient Hot Bridge (THB), Linseis
- DTC-300, TA Instruments
- Laser Flash Analysis (LFA) 427, NETZSCH

Die Ergebnisse zeigten zum einen, dass insbesondere plättchenförmiges Kupfer eine hohe Leistungsfähigkeit zur Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit aufweist. Um eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit zu erzielen, sind Füllmengen von mindestens 30 gew.-% erforderlich. Ebenso wurde eine höhere Wärmeleitfähigkeit für Proben mit einem höheren Kristallinitätsgrad festgestellt. Zum anderen demonstrieren die Resultate, dass sich die mit unterschiedlichen Messgeräten detektierten Wärmeleitfähigkeiten sehr stark unterscheiden, wobei die höchsten Werte mit Hot Disk und THB und die

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

niedrigsten Werte mit LFA und DTC-300 gemessen wurden (siehe Abbildung 75, rechts). Diese Unterschiede sind neben den unterschiedlichen Messprinzipien (Hot Disk und THB versus LFA und DTC-300) insbesondere auf die sensorischen Möglichkeiten, Kalibrierungsoptionen und geeignete Datenauswertungsmodelle zurückzuführen. Es stellte sich heraus, dass für eine akkurate Analyse und Interpretation der WLF morphologische Untersuchungen, die etwaige anisotrope Füllstoffverteilungen aufzeigen, essentiell sind (Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften → Sensorauswahl; siehe Abbildung 75, links). Letztlich richtet sich die Wahl des geeigneten Messgeräts nach der Problemstellung, werkstofflich-präparativen Aspekten sowie Zeit- und Kosteneffizienz. Die Ergebnisse der Studie sind in folgender wissenschaftlicher Publikation detailliert dargestellt und diskutiert:

Weingrill, H., Hohenauer, W. Zauner, C., Resch-Fauster, K. (2019). *Analyzing Thermal Conductivity of Polyethylene-Based Compounds Filled with Copper, Macromolecular Materials and Engineering*, DOI: 10.1002/mame.201800644.

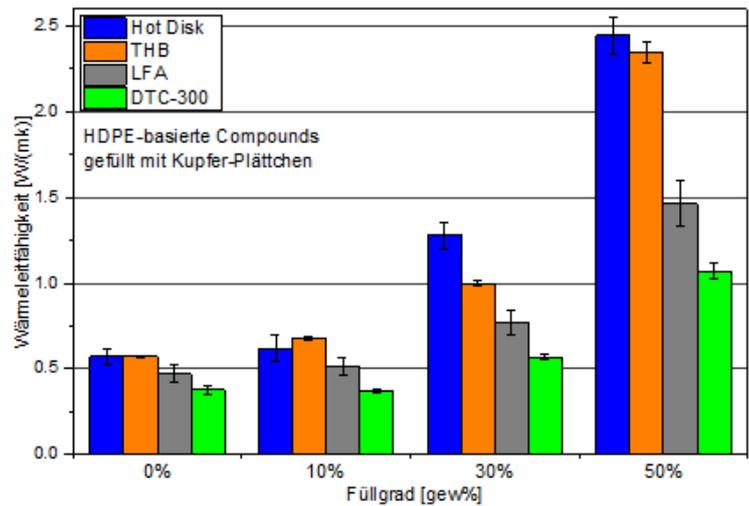
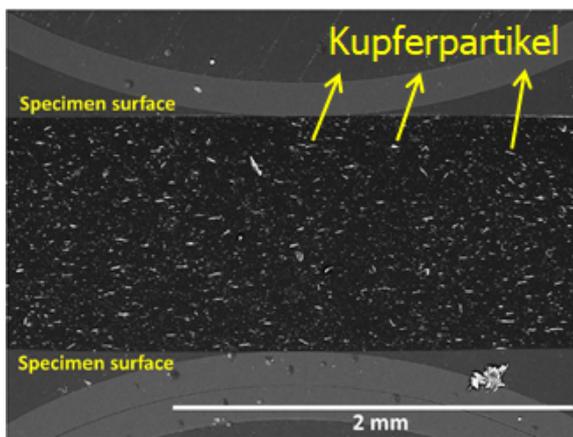


Abbildung 75: links: rasterelektronenmikroskopische Darstellung der Orientierung von plättchenförmigen Füllstoffen in PE; rechts: Wärmeleitfähigkeit von PE-Compounds mit Kupferplättchen bei unterschiedlichen Füllgraden bestimmt mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeitsmesssystemen

Da infrage kommende Partikel zur Erhöhung der WLF im Anwendungsbereich von polymeren PCM keinen Phasenübergang aufweisen, reduzieren sie die Speicherdichte des polymeren Materials im Allgemeinen. Deshalb wurden im Rahmen des Arbeitspakets zuerst jene Füllstofftypen eruiert, welche die WLF des polymeren PCM möglichst effizient steigern. Dazu wurden neun Füllstofftypen mit unterschiedlichen Partikelgrößen und -formen zu verschiedenen Füllgraden in HDPE eingearbeitet und die Wärmeleitfähigkeit dieser Compounds mittels Hot Disk Messung ermittelt (Abbildung 76). Aluminium, Kupfer und expandierter Graphit steigerten die WLF, insbesondere auch bei niedrigen Füllgraden am effizientesten. Der leistungsstärkste Füllstoff ist expandierter Graphit (EG), weshalb HDPE-EG Compounds in weiterer Folge hinsichtlich Type, Partikelgröße und Herstellungsparameter für die Anwendung als PCM optimiert wurden (Abbildung 77).

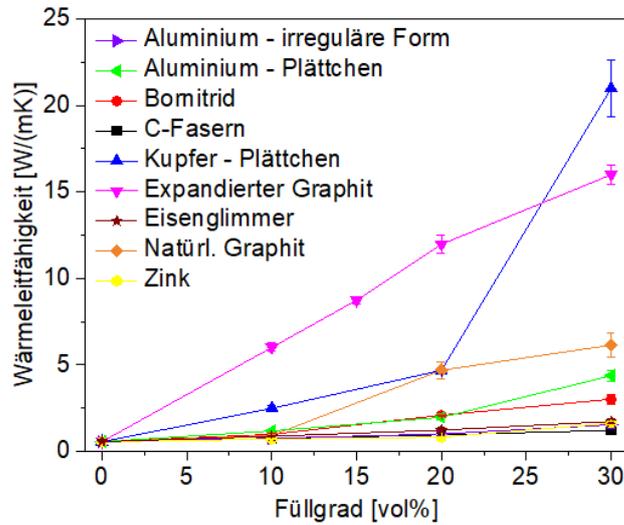


Abbildung 76: Potential unterschiedlicher Füllstoffe zur Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit von HDPE

Zentraler Parameter bei HDPE-EG Compounds ist die Partikelgröße, die aufgrund der hohen Schersensitivität von expandiertem Graphit auch stark vom Verarbeitungsverfahren abhängt: ein direktes Compounding ist daher gegenüber einer Masterbatchverarbeitung, welche die Partikelgröße reduziert, zu bevorzugen. Um die ideale Partikelgröße (Füllstoffauswahl) im Verarbeitungsprozess weitgehend zu erhalten, wurde in umfangreiche Arbeiten auch die Schneckenkonfiguration im Compounder sowie Verarbeitungsprozessparameter (insbesondere die Schergeschwindigkeit) systematisch optimiert.

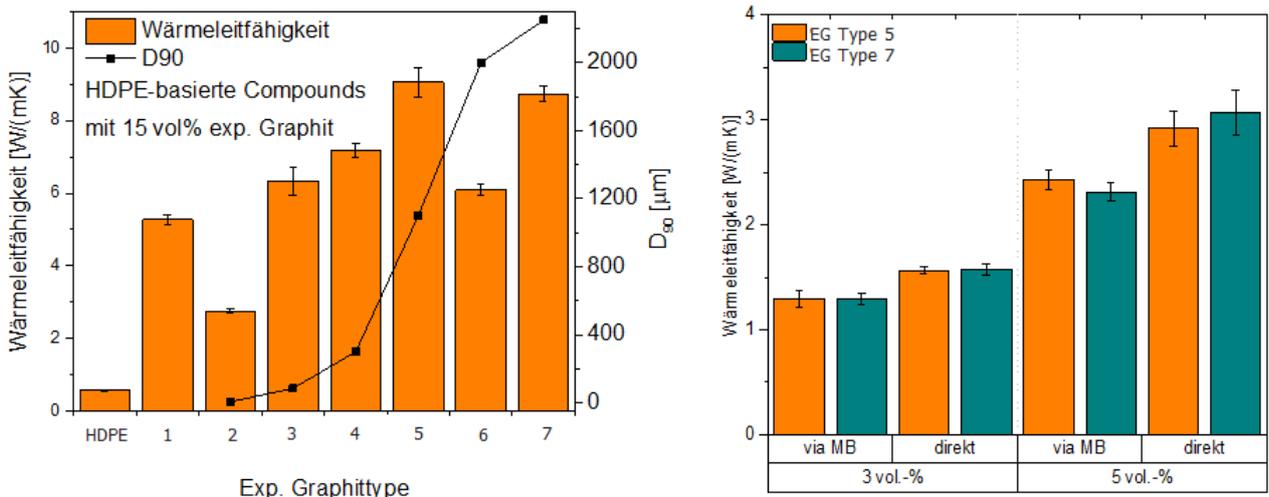


Abbildung 77: links: Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Typen von expandiertem Graphit (Partikelgröße) zur Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit von HDPE; rechts: Einfluss der Verarbeitung auf die Wärmeleitfähigkeit von HDPE-EG Compounds

Abschließend erfolgte im Rahmen dieses Arbeitspakets die Prüfung der Langzeitstabilität von HDPE-Compounds gefüllt mit expandiertem Graphit und Aluminium (analog zu den Untersuchungen des reinen

HDPEs, siehe oben). Während die Füllstoffpartikel das Schmelz- und Kristallisationsverhalten nur minimal beeinflussten, erhöhte ihre Beimengung die Viskosität des Materials wesentlich. Dies trug schlussendlich aber auch dazu bei, dass eine homogene Füllstoffverteilung während der Auslagerung im geschmolzenen Zustand großteils erhalten blieb, da sich durch die erhöhte innere Reibung zwischen den Partikeln selbst sowie zwischen den Partikeln und den Polymerketten eine Form der Fixierung ergeben hatte (Abbildung 79).

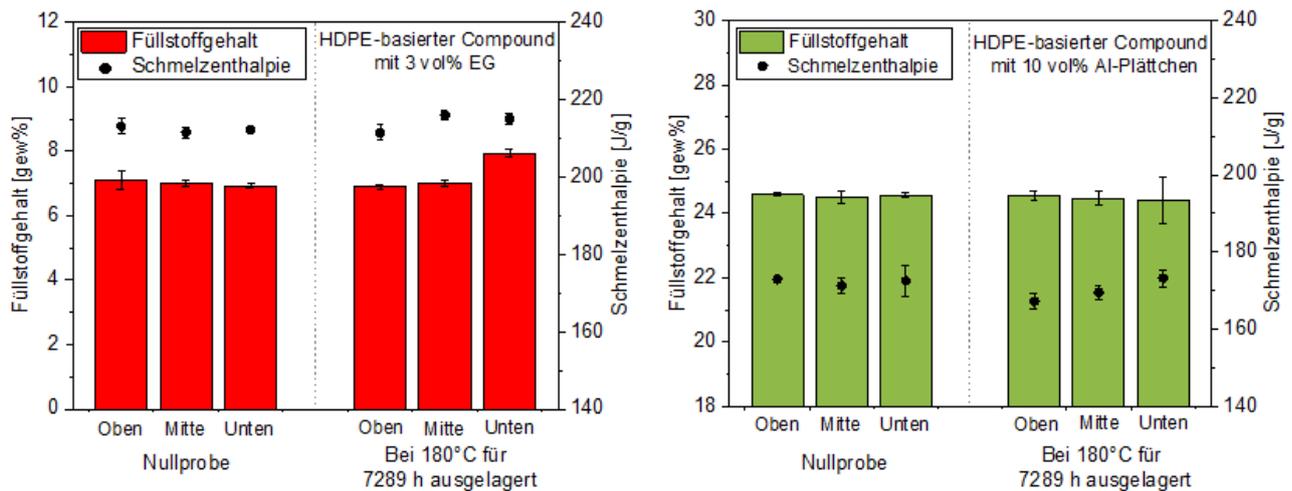


Abbildung 78: Füllstoffverteilung in HDPE-EG (links) und HDPE-Al Compounds (rechts) jeweils vor und nach statischer thermischer Auslagerung bei 180°C

Zusätzlich erhöhten die Partikel die thermo-oxidative Stabilität des Materials (geringere OPD im Vergleich zum ungefüllten HDPE; Abbildung 79). Dies wurde auf die Barrierewirkung der beigemengten Partikel gegenüber der Sauerstoffdiffusion in das Prüfkörperinnere zurückgeführt. Zusammenfassend lässt sich ableiten, dass auch hinsichtlich WLF funktionalisierte Polymere eine ausreichende Langzeitstabilität für den Einsatz als PCM aufweisen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in folgender wissenschaftlicher Publikation umfassend diskutiert:

Weingrill, H., Resch-Fauster, K., Lucyshyn, T., Zauner, C. (2019). *Thermally conductive high-density polyethylene as novel phase-change material: application-relevant long-term stability*, *Journal of Applied Polymer Science*, in press.

Mit diesem Arbeitspaket wurde die ausgezeichnete Eignung von Kunststoffen sowohl in der Form von Reinpolymeren als auch von Compounds mit erhöhter Wärmeleitfähigkeit als neuartige, kosteneffiziente PCM demonstriert. Durch umfassende Untersuchungen wurde die herausragende Stabilität von polymeren Werkstoffen unter einer (der Anwendung entsprechenden) hohen thermischen Belastung in Luft im geschmolzenen Zustand aufgezeigt. Weiters wurde gezeigt, dass und wie die Reinpolymere effizient funktionalisiert werden (z.B. in Hinblick auf Wärmeleitfähigkeit) können um ihre Einsatzfähigkeit in Wärmespeichern weiter zu erhöhen. Darüber hinaus leisten die im Rahmen des Arbeitspakets durchgeführten systematischen Analysen einen signifikanten Beitrag zum vertieften Verständnis der Wärmeleitfähigkeitsermittlung für Kunststoffe.

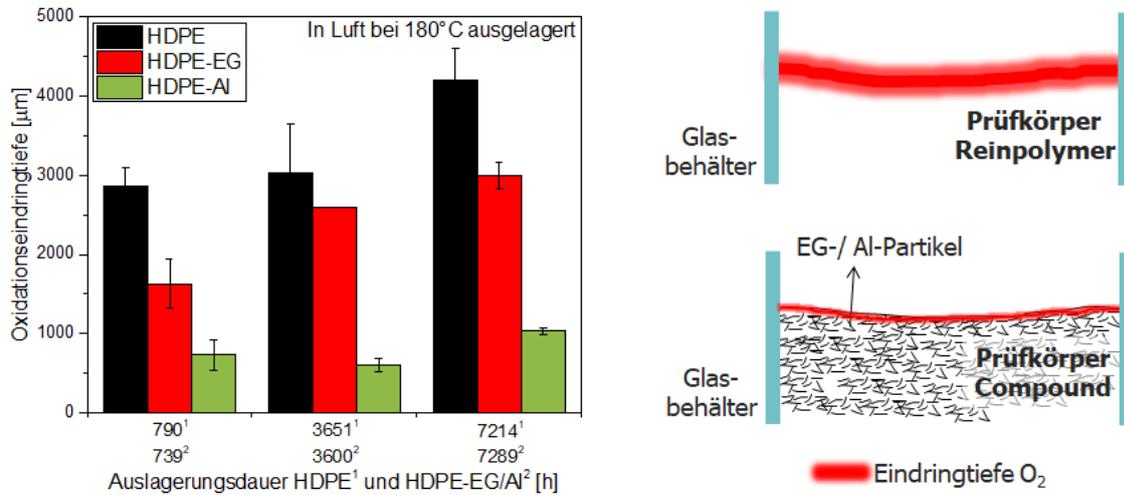


Abbildung 79: links: Oxidationseindringtiefe (OPD) nach statischer thermischer Auslagerung von HDPE-EG bzw. Al-Compounds; rechts: Schematische Darstellung der OPD im Reinpolymer und im Compound

Um die Anwendungsmöglichkeiten polymerer PCM zu verbreitern ist in weiterführenden Arbeiten eine Multifunktionalisierung der entwickelten polymeren PCM anzustreben. Durch die Mischung von zwei Polymeren oder eines Polymers beispielsweise mit Paraffinwachs könnten duale PCM mit zwei unterschiedlichen Speichertemperaturen realisiert werden. Deren Leistungspotenzial und Langzeitstabilität (insb. Entmischungsverhalten) unter anwendungsrelevanten Bedingungen ist eingehend zu untersuchen. Hinsichtlich polymerer PCM mit erhöhter Wärmeleitfähigkeit ist die Einstellung eines entsprechenden Fließverhaltens (bislang nur mit geringen Füllgraden möglich) durch werkstoffliche Modifikationen zu bewerkstelligen. Außerdem stellen Polyamide sehr interessante polymere PCM für höhere Speichertemperaturen dar. In diesem Zusammenhang sind chemische und physikalische Werkstoffmodifikationen zur Verbesserung des Kristallisationsverhaltens sowie der thermo-oxidativen Stabilität erforderlich. Aus wirtschaftlicher Sicht ist eine weitere Kostenreduktion für polymere PCM durch die Anwendung von Rezyklatmaterial bzw. den Einsatz billiger/kosteneffizienter Füllstoffe zur Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit zu prüfen. Entscheidende Parameter bei der Evaluierung von Rezyklat sind die Sortenreinheit (d.h. erreichbarer Speichertemperatur und -kapazität) sowie die thermo-oxidative Stabilität, die ggf. eine Additivierung notwendig macht und der damit einhergehende Preis (€/kWh).

3.4. Messtechnik zur Ladezustandsermittlung (G. Steinmaurer)

Um bei der Verwendung eines PCM-Wärmespeichers ein energieeffizientes Gesamtsystem gewährleisten zu können, muss für dessen Regelung und zur Abschätzung der zur Verfügung stehenden Energiemengen im Speicher eine Ladezustandsbestimmung durchgeführt werden. Es wurden im Berichtszeitraum 3 Messmethoden (Drucksensoren/global; Körperschallausbreitung/global sowie Schwingquarze/lokal) definiert und einer näheren Evaluierung unterzogen.

3.4.1. Laborversuche < TRL4

Um die angedachten Messmethoden und die dazugehörigen Sensoren zu testen, wurde ein Versuchsspeicher gefertigt, mit welchem die Messroutine zur Ladezustandsbestimmung in einer realitätsnahen Einsatzumgebung getestet werden kann. Der Speicher wurde im Wärmetechniklabor der FH Wels aufgebaut und schließlich mit dem PCM-Material befüllt. Die finale Version des Wärmespeichers ist in nachfolgender Abbildung 80 illustriert.



Abbildung 80: Laborspeicher FH Wels

Messmethoden

Druckmessung/global

Durch den Aufschmelzvorgang im PCM und der damit verbundenen Volumenänderung wird verbleibende Restluft im Speicherinneren komprimiert. Es erfolgt ein Druckanstieg. Anhand der Messung des Druckverlaufes bei bekannter Speichergeometrie kann auf den Energieinhalt des Speichers rückgerechnet werden. Die durchgeführten Versuchsreihen erbrachten die Erkenntnis, dass die Volumenänderung im Luftraum des Speichers stark von der Viskosität des PCM-Materials bzw. von der Bildung von Lufteinschlüssen (Lunker) innerhalb des PCM-Materials abhängig ist. Die in Abbildung 81 illustrierten manuell zugeführte Hohlräume im PCM-Material blieben nach einem erneuten Aufschmelz- und Erstarrungsvorgang unverändert.



Abbildung 81: Vorversuch Fließfähigkeit

Dieses Verhalten, also die nachhaltige Bildung von Lufteinschlüssen innerhalb des PCM-Materials, würde die Druckmessung stark verfälschen. Da erwartet wurde, dass ähnliche Probleme auch bei anderen PCM-Materialien auftreten können, wurde diese Messmethode im weiteren Projektverlauf nicht mehr näher untersucht.

Körperschallmessungen/global

Die Anregung des Körperschalls erfolgt durch einen definierten Impulsgeber mit reproduzierbarer Anregung. Als Impulsgeber wurden hierbei ein elektrischer Hubmagnet bzw. ein Körperschallwandler (Bassshaker) eingesetzt. Letzterer bietet die Möglichkeit den Speicher während eines Lade- und Entladezyklus mit verschiedenen Sinus und Rechteck Basssignalen anzuregen. Die Signale unterscheiden sich durch Form, Frequenz und Amplitude. Angesichts dieses Vorteils erfolgten die durchgeführten Messungen des mit PCM gefüllten Speichers überwiegend mit dem Körperschallwandler als Impulsgeber. Die an zwei Seiten der Gehäuseaußenwand befestigten Beschleunigungssensoren detektieren die Abschwächung der physikalischen Erregung auf Grund des unterschiedlichen Dämpfungsverhaltens bei verschiedener Phasenlage des PCM-Materials. Dadurch soll ein für den jeweiligen Ladezustand charakteristisches Verhalten abgeleitet werden. Das grundsätzliche Schema des Messaufbaus ist in Abbildung 82 dargestellt.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

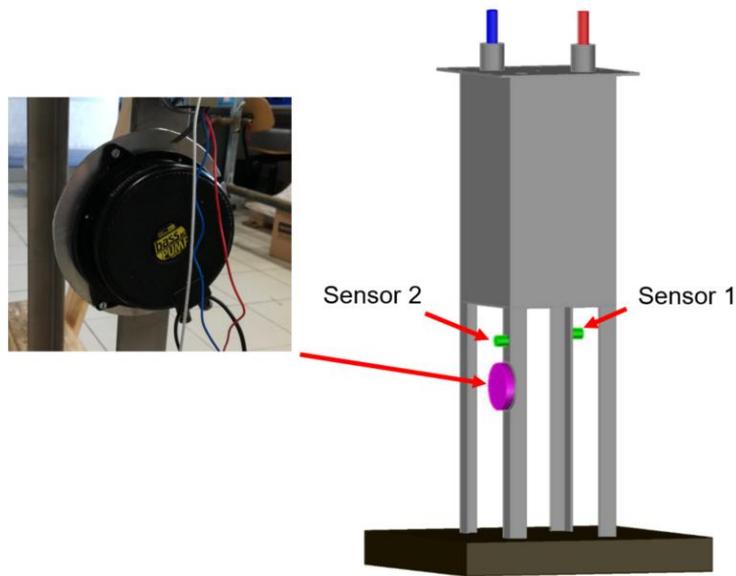


Abbildung 82: Schema Messaufbau Laborspeicher

Der Aufheiz- bzw. Abkühlprozess wurde über das Prozessthermostat des Wärmetechniklabors am Versuchsspeicher sichergestellt. Während dieses Zyklus wurden wiederkehrend 18 verschiedene Bassignale vom Impulsgeber erzeugt und von den Beschleunigungssensoren aufgezeichnet. In Abbildung 83 sind 6 dieser 18 detektierten Spannungssignale aus einer Messung im Zeitbereich dargestellt.

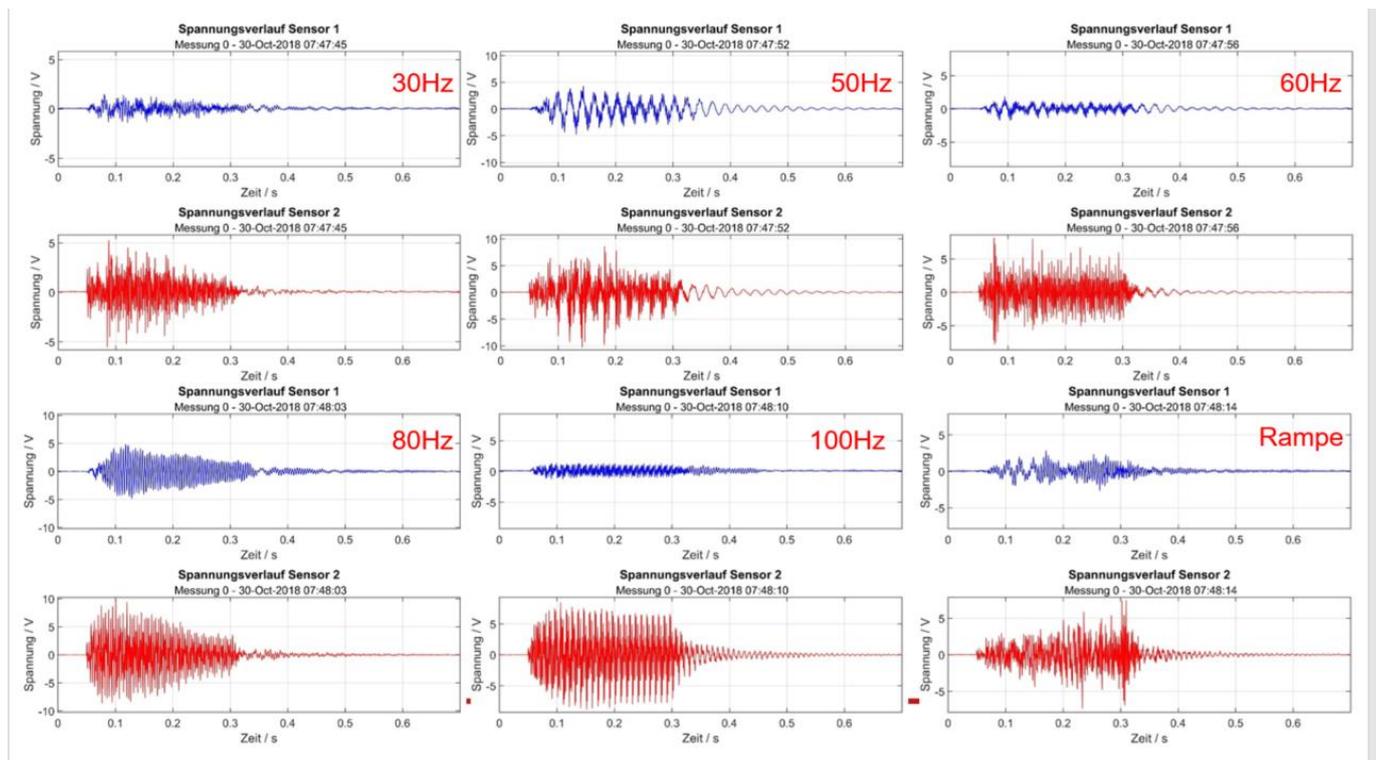


Abbildung 83: Spannungsverlauf im Zeitbereich (Laborspeicher)

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Die aufgezeichneten Daten dienen als Basis zur Entwicklung einer geeigneten Auswertungsmethodik. Im Zeitbereich konnte kein direkter offensichtlicher Zusammenhang zwischen den ermittelten Messwerten und dem Ladezustand des Speichers hergestellt werden. Deshalb erfolgte im nächsten Schritt über eine Fast-Fourier-Transformation (FFT) eine Frequenzanalyse des Messsignals. In Abbildung 84 ist ein charakteristischer Verlauf dieser Analyse für beide Sensoren bei einer Anregung mit 60 Hz dargestellt.

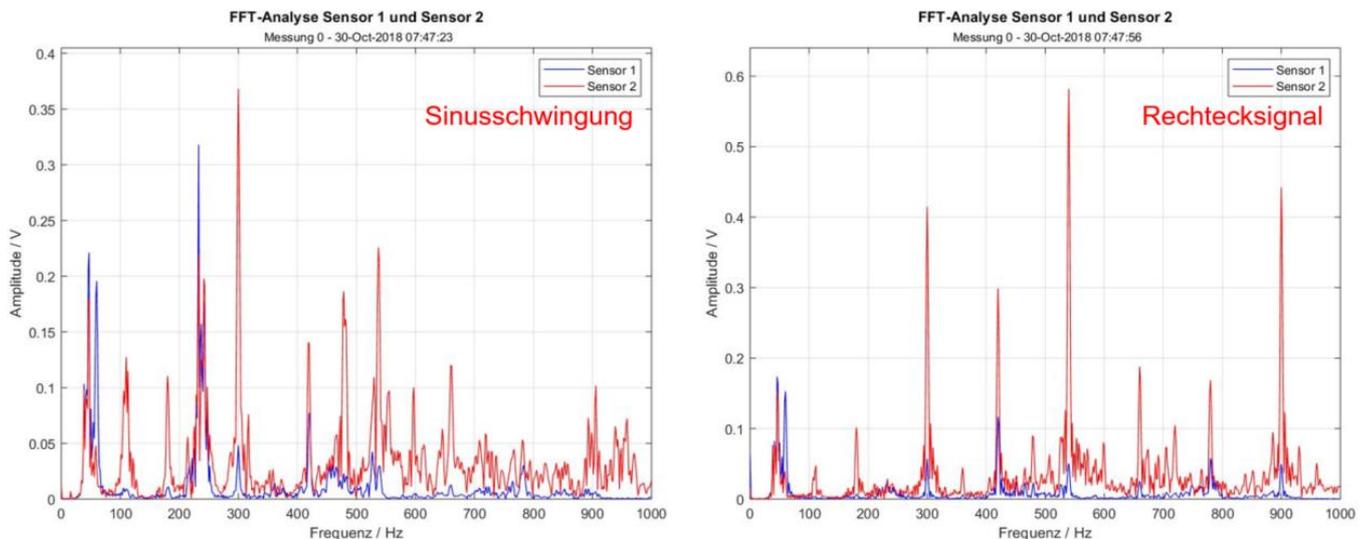


Abbildung 84: FFT-Analyse (Laborspeicher)

Bei genauerer Betrachtung und höherer Auflösung der Frequenzachse sind ausgeprägte Amplituden bei der Anregungsfrequenz und den dazugehörigen Vielfachen zu erkennen. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 85 verdeutlicht.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

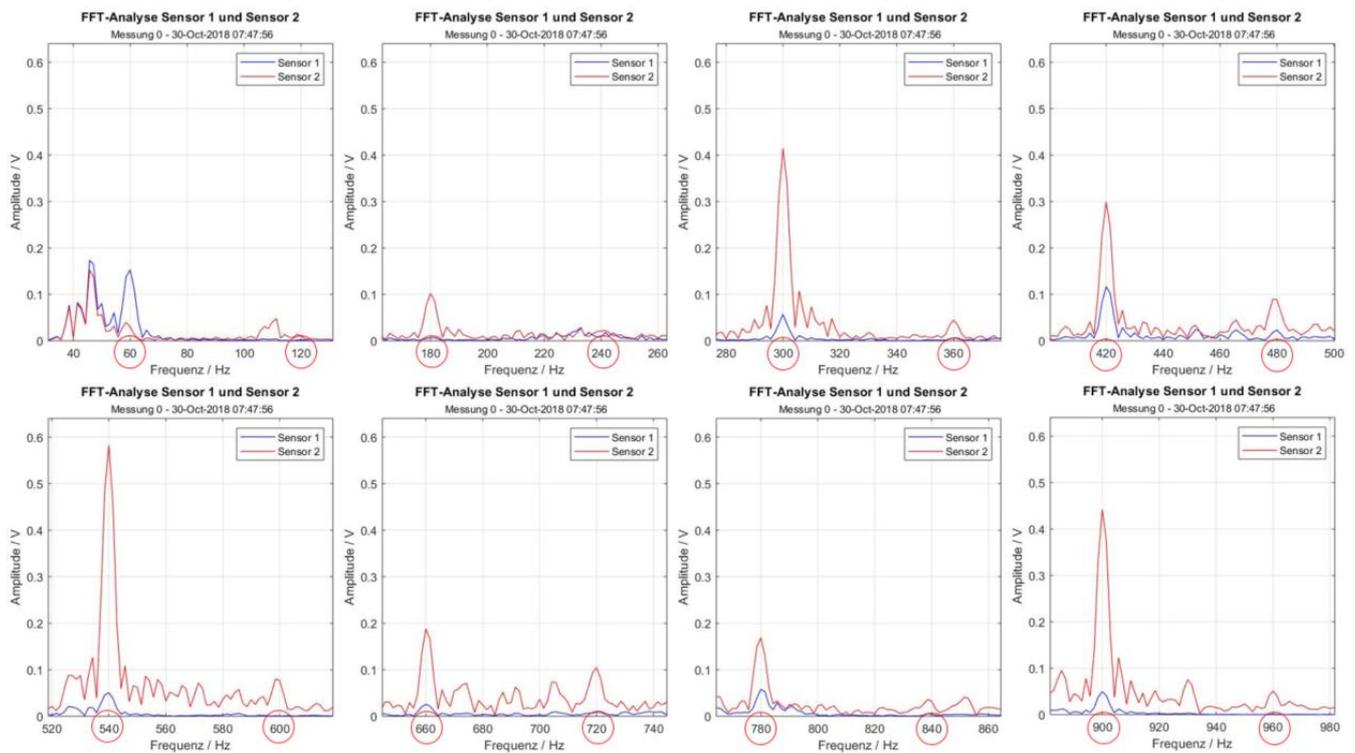


Abbildung 85: FFT-Analyse hohe Auflösung (Laborspeicher)

Bei der weiterführenden Analyse der generierten Messdaten wurden schwerpunktmäßig jene Frequenzbänder bzw. einzelne Frequenzen betrachtet, bei denen diese ausgeprägte Amplituden aufgezeichnet wurden. Zu diesem Zwecke wurde jede Messnummer bzw. Messzeitpunkt einem Ladezustand zugeordnet. Diese Zuordnung erfolgt über die Leistungsmessung des Prozessthermostats des Wärmetechniklabors der FH Wels. Ein charakteristischer Verlauf des über der Leistungsmessung ermittelten Ladezustands ist in Abbildung 86 dargestellt.

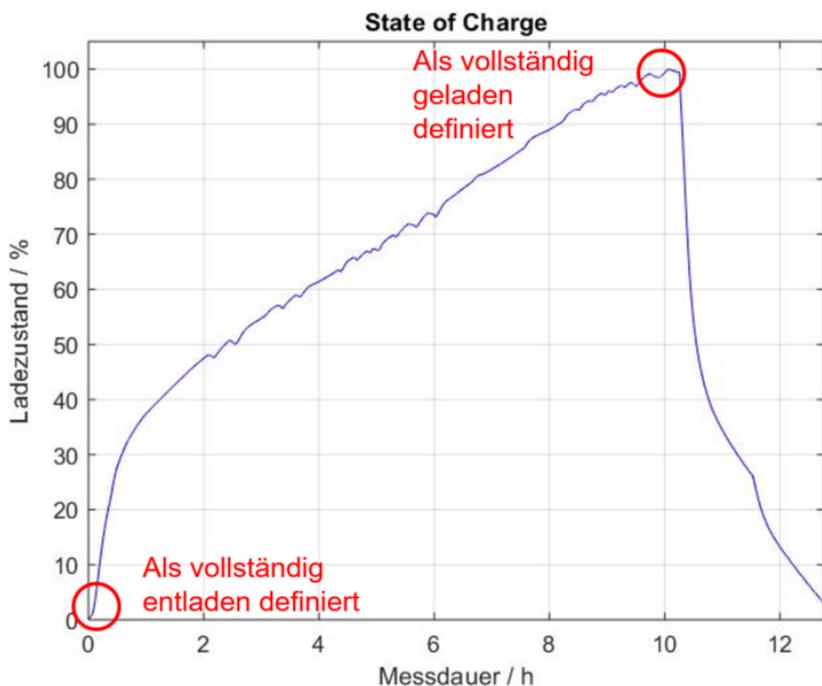


Abbildung 86: Ladezustand des Laborspeichers

Die Bildung des Amplitudenverhältnisses von Sensor 1 zu Sensor 2 über den Ladezustand erwies sich unter den vielen erprobten Auswertungsverfahren als jene mit den besten Ergebnissen. In Abbildung 87 ist diese Auswertung für einen vollständigen Lade- und Entladevorgang dargestellt. Die Darstellung zeigt das Amplitudenverhältnis bei 60 Hz bei einer Anregung mit einem 60 Hz Rechtecksignal.

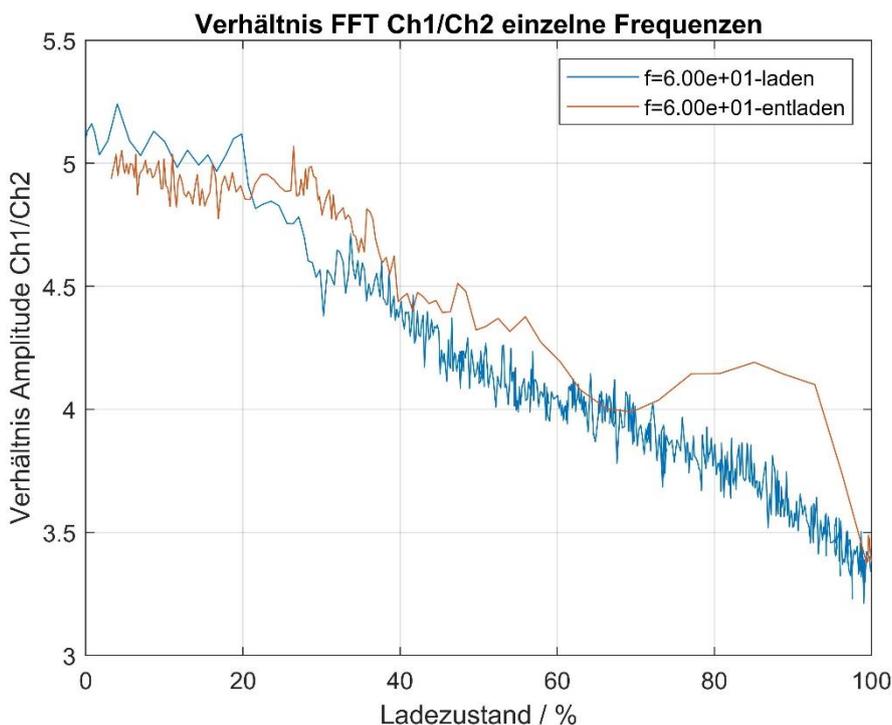


Abbildung 87: Amplitudenverhältnis bei 60 Hz (Laborspeicher)

Mithilfe dieser Auswertungsmethodik konnte ein grundsätzlicher Zusammenhang zwischen Ladezustand und den von der Phasenlage abhängigen Dämpfungseigenschaften des PCM-Materials hergestellt werden.

Schwingquarze/lokal

Abbildung 88 zeigt ein charakteristisches Ergebnis einer Schwingquarzmessung mittels Impedanzanalysators während eines Aufschmelzvorgangs von HD-PE. Im Diagramm ist die Impedanz über die Frequenz dargestellt. Wird eine elektrische Wechselspannung an den Schwingquarz angelegt, welche der Eigenfrequenz entspricht, wird dieser Quarz in Schwingung versetzt. Befindet sich dieser Schwingquarz in ungeschmolzenen PCM-Material, wird diese Schwingung stark gedämpft, wodurch keine Resonanz detektiert werden kann (blauer Verlauf). Während des Phasenübergangs lässt die Dämpfung nach, wodurch ein Resonanzverhalten des Sensor-Quarzes festgestellt werden kann. Je weiter der Aufschmelzvorgang fortschreitet, desto größer wird der Ausschlag der Impedanz bis dieser seinen Maximalwert im flüssigen Zustand erreicht (gelber Verlauf).

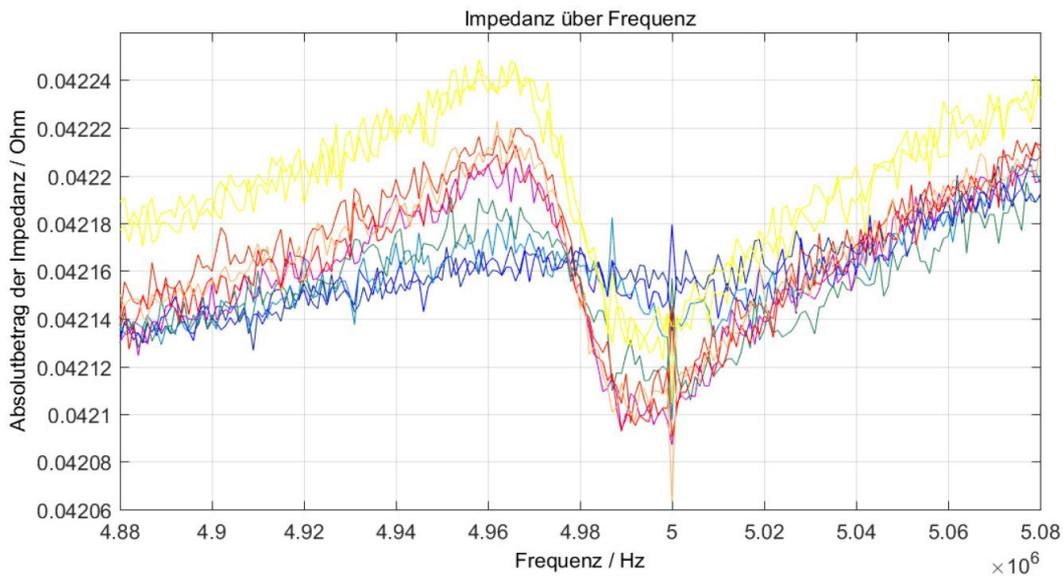


Abbildung 88: Impedanz über Frequenz

Basierend auf diesem Messprinzip wurden im Laufe des Projektes vom Subauftragnehmer JKU (Johannes Kepler Universität) die benötigten Komponenten weiterentwickelt, die für den angedachten Anwendungsfall benötigt werden. Da die Sensor-Quarze bei der realen Anwendung im Wärmespeicher hohen thermischen Belastungen ausgesetzt sind, war die Kontaktierung der Quarzscheiben ein wichtiges Kriterium bei der Sensorentwicklung. Dabei wird der Sensor-Quarz zwischen zwei Elektroden eingeklemmt und durch drei Schrauben fix zusammengepresst. Da die Messergebnisse zum einen stark von der Klemmkraft abhängen und zum anderen zu hohe Klemmkräfte die Quarzscheibe bei hohen thermischen Belastungen an der Ausdehnung hindern und zum Bruch führen kann, wurden Abstandhalter beigelegt. Dadurch werden bei der händischen Fertigung sehr ähnliche Bedingungen geschaffen. Die thermische Belastbarkeit wurde bis 270 °C erprobt.

Die Sensordaten wurden in weiterer Folge mit einer adaptierten Elektronik ausgelesen. Diese implementiert die für die Messungen relevanten Funktionen des kommerziellen Impedanzanalysators, Zum Auslesen mehrerer Sensoren wurde eine Multiplexereinheit entwickelt bzw. erprobt und der verwendete Matlab-Code dementsprechend erweitert. Die gebaute Multiplexereinheit ist in Abbildung 89 illustriert.

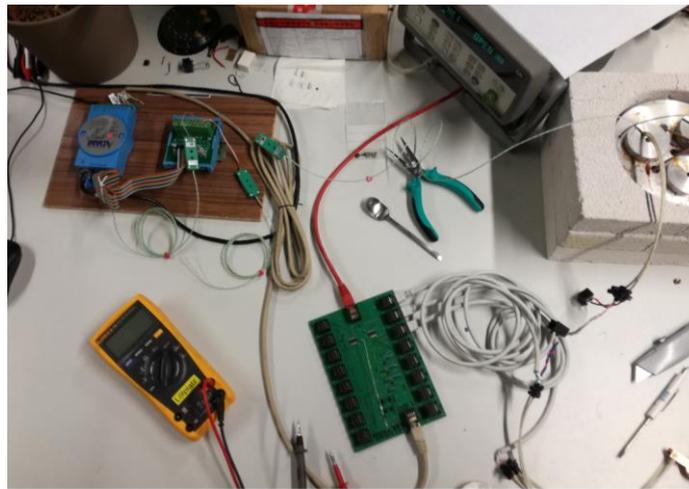


Abbildung 89: Multiplexereinheit

Ein mit Hinblick auf die Ladezustandsbestimmung zweckdienlicher Ansatz ist die Auswertung des Gütefaktors welcher die Dämpfung eines Systems beschreibt. In diesem Diagramm kann klar und anschaulich unterschieden werden, ob das Material in fester oder flüssiger Form vorliegt. Mit den entwickelten Komponenten und den programmierten Matlab-Codes wurden weitreichende Versuche mit den PCM-Materialien Paraffin und HD-PE durchgeführt.

In Abbildung 90 ist ein charakteristischer Verlauf der Güte während eines Aufschmelz-/Erstarrungsprozesses von Paraffin dargestellt. Im nicht aufgeschmolzenen Zustand ist die Güte näherungsweise null. Wird das Material aufgeschmolzen und weiter erwärmt, erreicht die Güte bei einem Temperaturniveau von 130 °C einen Wert von ca. 950. Beim anschließenden Abkühlen und Erstarren des Paraffins wurde das umgekehrte Verhalten aufgezeichnet.

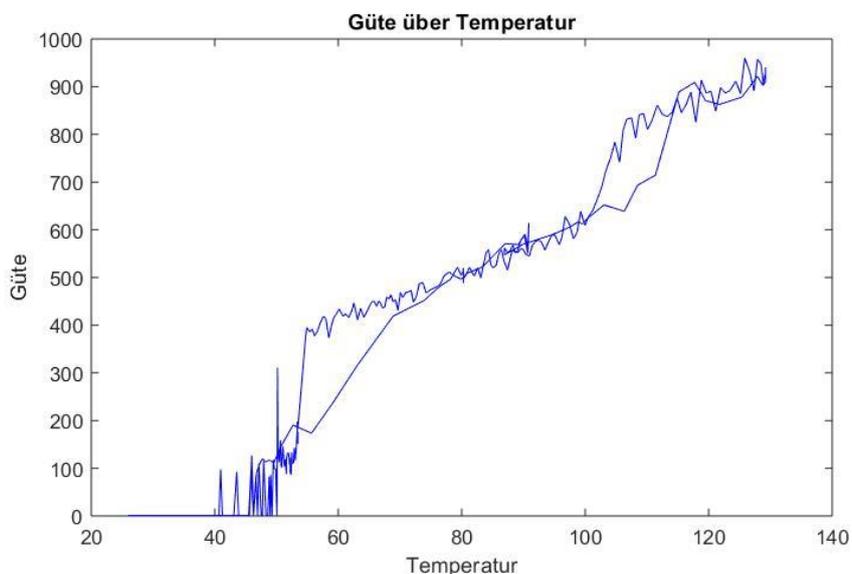


Abbildung 90: Güte über Temperatur Paraffin

Somit eignet sich diese lokale Messmethode für das PCM-Material Paraffin.

Ähnliche Versuche erfolgten auch mit Speichermaterial HD-PE. Die generierten Daten sind in Abbildung 91 illustriert. Hierbei wurde das Material auf 270 °C erwärmt und anschließend wieder abgekühlt. Es wurden sehr hohe Gütefaktoren im Bereich unter 130 °C aufgezeichnet. Ähnliche hohe Gütewerte wurden auch bei Versuchsmessungen der Schwinquarze in Luft festgestellt. Dies deutet auf eine Ablösung des PCM-Materials vom Schwingquarz im festen Zustand hin. Im geschmolzenen Zustand wurden Gütefaktoren zwischen 140 und 200 aufgezeichnet. Für die Detektierung des Aggregatzustands kann näherungsweise darauf geschlossen werden, dass sehr niedrige (<50) bzw. hohe Gütewerte (>500) den festen Phasenzustand des PCMs anzeigen.

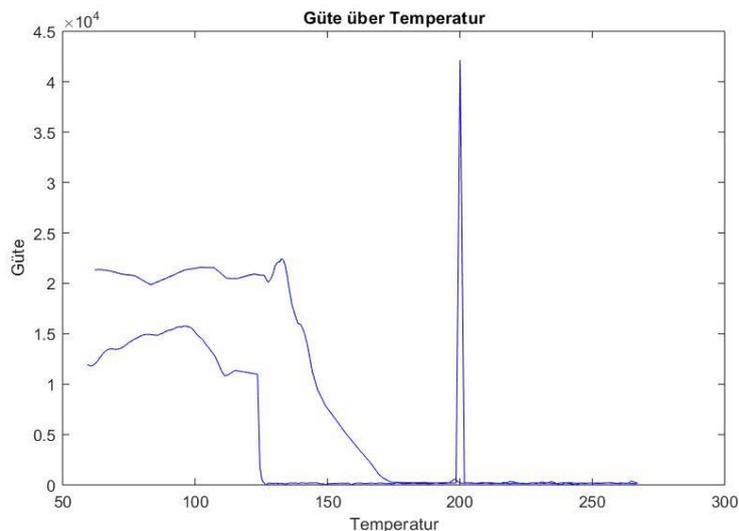


Abbildung 91: Güte über Temperatur HD-PE

Aufgrund der beschriebenen Problematik der Ablösungen erscheint diese Messmethode nur bedingt geeignet zur Detektierung des lokalen Phasenzustands von HD-PE.

3.4.2. Proof of concept Versuch TRL5 am LKR

Nach den umfangreichen im Labor durchgeführten Versuchen der verschiedenen Messmethoden zur Ladezustandsbestimmung eines PCM-Wärmespeichers erschien die globale Körperschallmessung mittels Körperschallwandler (Bassshaker) als jene Methode, die im realen Betrieb die besten Ergebnisse liefern könnte. Zum Einem konnte vielversprechende Resultate während der bereits durchgeführten Tests erzielt werden, zum anderen war diese Methodik die Einzige, die sich mit vertretbarem Aufwand in das bereits fertig installierte Gesamtsystem (mit HD-PE befüllter Wärmespeicher) in Ranshofen integrieren ließ. Somit wurde ein ähnliches Setup bzw. eine ähnliche Vorgehensweise wie bereits in Kapitel 3.4.1 beschrieben, für die Messungen am TRL5-Speicher im LKR verwendet. Das grundsätzliche Schema des Messaufbaus ist Abbildung 92 dargestellt.

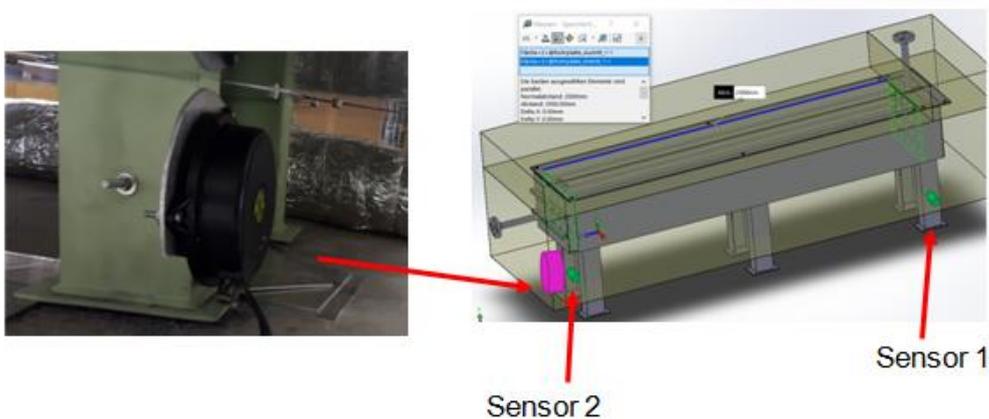


Abbildung 92: Schema Messaufbau TRL5-Speicher

Der Aufheiz- bzw. Abkühlprozess wurde über das im Versuchsaufbau eingebundene Robomatthermostat mit dazugehörigem Thermoölkreislauf sichergestellt. Während dieses Zyklus wurden wiederkehrend 18 verschiedene Basssignale vom Impulsgeber erzeugt und von den Beschleunigungssensoren aufgezeichnet. In Abbildung 93 sind 4 dieser 18 detektierten Spannungssignale aus einer Messung im Zeitbereich dargestellt.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

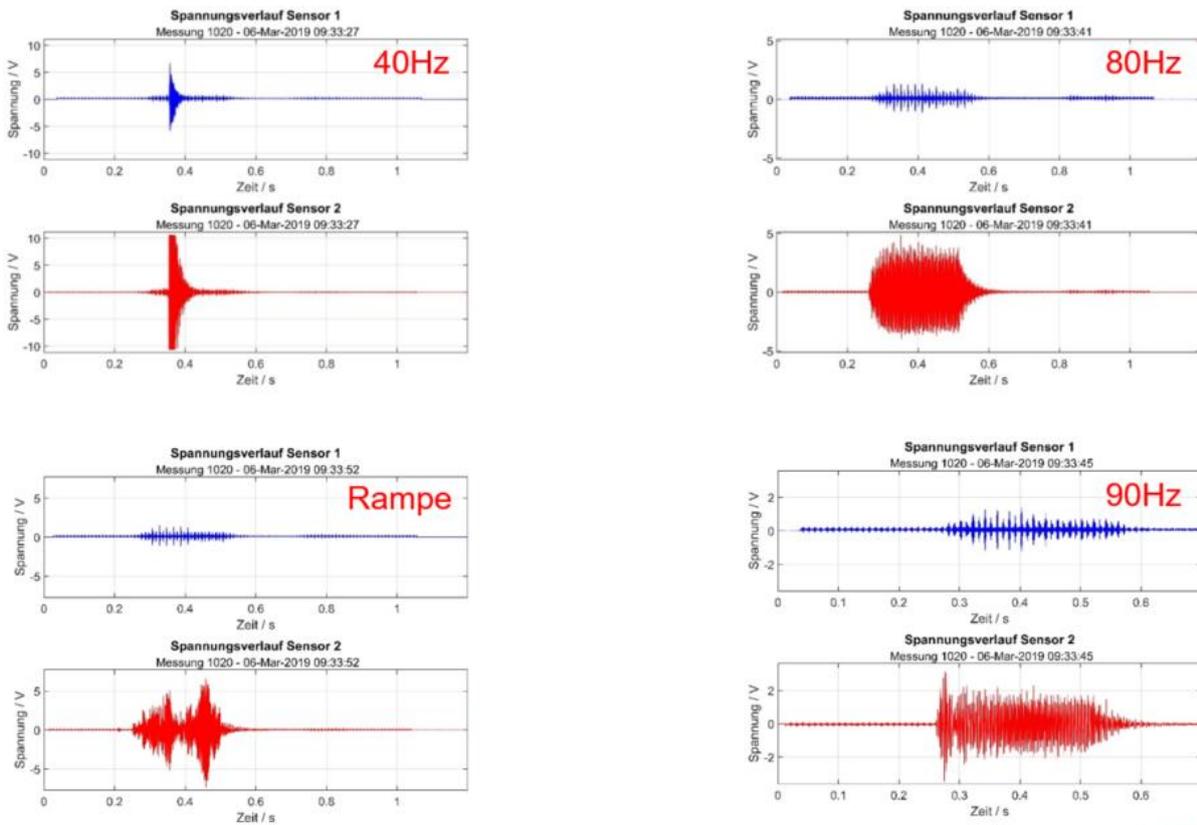


Abbildung 93: Spannungsverlauf im Zeitbereich (TRL5-Speicher)

Ähnlich wie beim Laborspeicher konnte im Zeitbereich kein Zusammenhang zwischen den ermittelten Messwerten und dem Ladezustand des Speichers hergestellt werden. Weiters konnte festgestellt werden, dass die aufgezeichneten Amplituden am TRL5-Speicher in Ranshofen deutlich niedriger als jene vom Versuchsspeicher in Wels sind. Im nächsten Schritt erfolgte über eine Fast-Fourier-Transformation (FFT) wieder die Frequenzanalyse des Messsignals. In Abbildung 94 ist ein charakteristischer Verlauf dieser Analyse für beide Sensoren bei einer Anregung mit 40 Hz dargestellt.

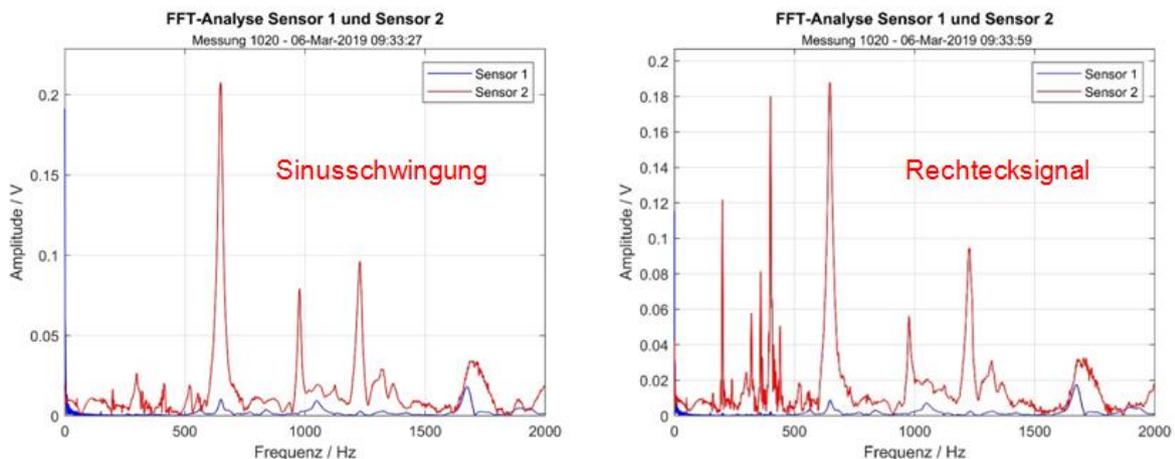


Abbildung 94: FFT-Analyse (TRL5-Speicher)

Abbildung 95 zeigt eine höherer Auflösung der Frequenzachse. Auch im Frequenzbereich wird eine starke Dämpfung der Körperschallamplituden zwischen Sensor 2 und Sensor 1 ersichtlich.

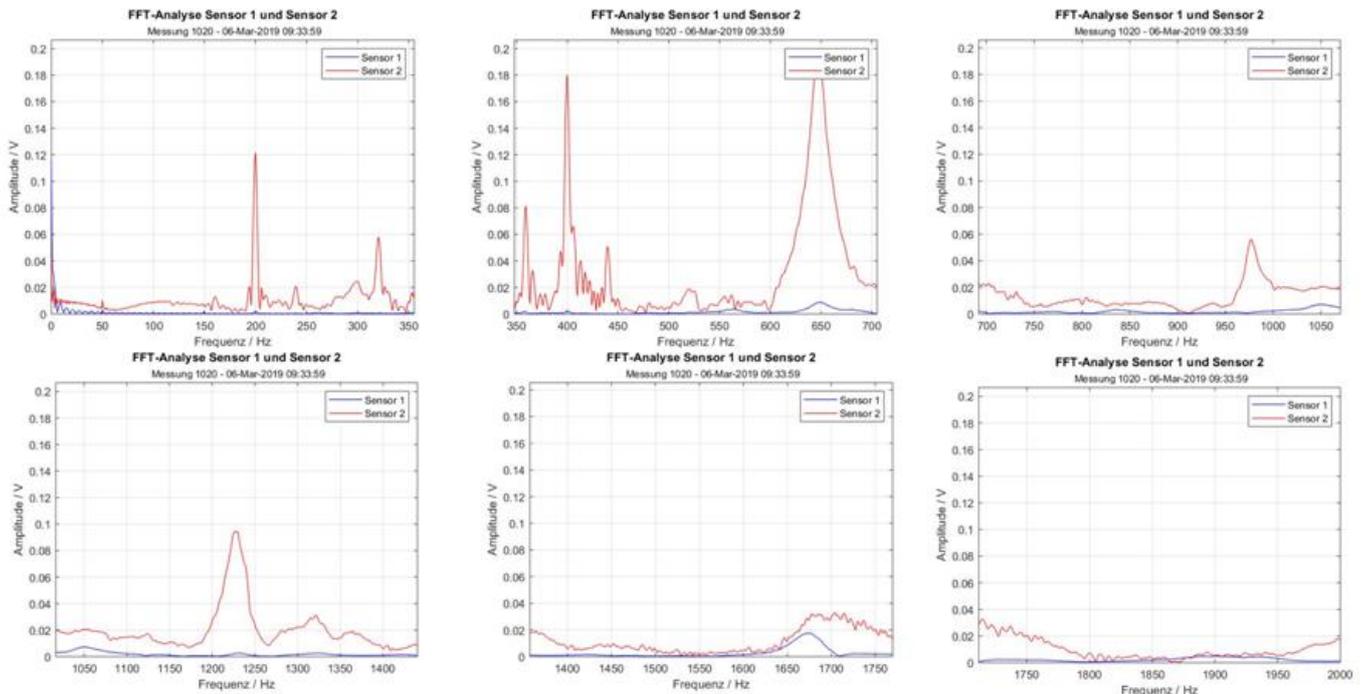


Abbildung 95: FFT-Analyse hohe Auflösung (TRL5-Speicher)

Jede Messnummer bzw. Messzeitpunkt wurde für die weitere Analyse einem Ladezustand zugeordnet. Diese Zuordnung erfolgte über die von der in Ranshofen installierten SPS aufgezeichneten Leistungsmessung des Thermoölkreislaufs. Der Verlauf des über die Leistungsmessung ermittelten Ladezustands ist in Abbildung 96 dargestellt. Durch das limitierte Zeitfenster konnte der Speicher beim durchgeführten Versuch nicht mehr gänzlich entladen werden.

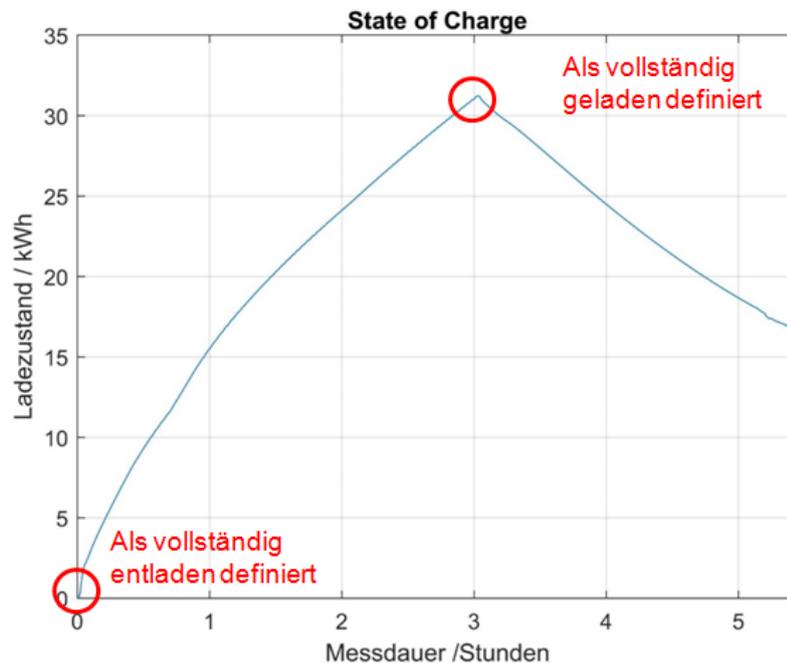


Abbildung 96: Ladezustand des TRL5-Speichers

Ähnlich wie in Kapitel 3.4.1 beschrieben, wurde wieder das Amplitudenverhältnis zwischen Sensor 1 zu Sensor 2 über den Ladezustand gebildet. Diese Methodik erwies sich beim Versuchsspeicher unter den vielen erprobten Auswertungsverfahren als jene mit den besten Ergebnissen. In Abbildung 97 ist diese Auswertung für den in Ranshofen durchgeführten Lade- und Entladezyklus dargestellt. Das illustrierte Diagramm zeigt das Amplitudenverhältnis für das Frequenzband von 1600-1750 Hz bei einer Anregung mit einem 60 Hz Rechtecksignal. Bei der Analyse der generierten Messdaten konnte mit keiner anderen Auswertungsmethodik ein besserer Zusammenhang zum Ladezustand hergestellt werden. Die erhaltenen Ergebnisse sind somit unbefriedigend und die eingesetzte Methodik ist für den TRL5-Speicher folglich nicht geeignet zur Ladezustandsbestimmung.

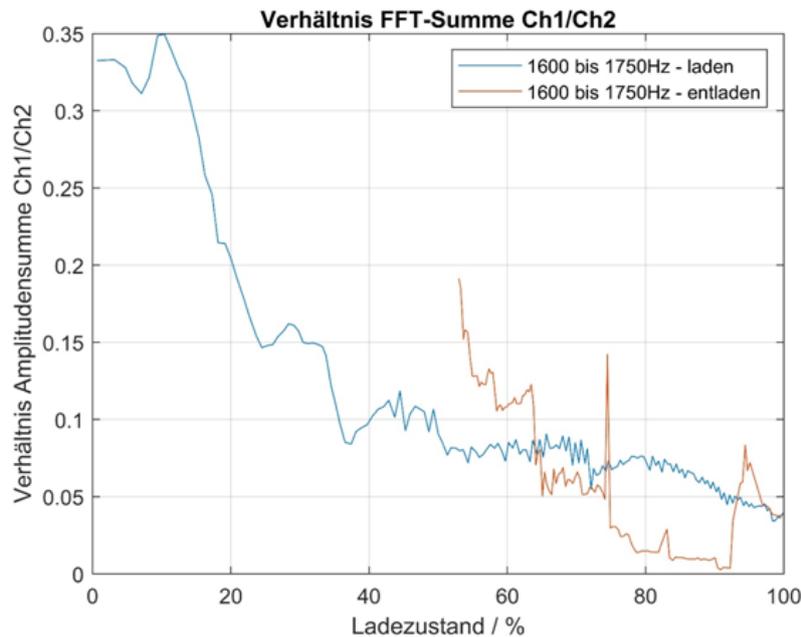


Abbildung 97: Amplitudenverhältnis 1600-1750 Hz (TRL5-Speicher)

Zusammenfassung:

Abschließend erfolgt noch ein kurzer Überblick über die wichtigsten Erkenntnisse die im Zuge der durchgeführten Versuche gewonnen wurden.

Druckmessung, global

- Die mögliche Bildung von Lufteinschlüssen innerhalb des PCM-Materials, würde die Messung des Drucks vom restlichen Luftvolumen und somit auch die Ladezustandsbestimmung stark verfälschen.

Körperschallmessung, global

- Anpassung an Gehäuse notwendig (zeitaufwändig)
- Temperaturbeschränkung der Beschleunigungssensoren => Platzierungsort
- Sensitivität der SOC-Bestimmung hängt (vermutlich) vom Speicheraufbau selbst ab
- Prinzipiell funktionsfähig
- Kosten überschaubar

Schwingquarzmessung, lokal

- Funktion bei Paraffinen einwandfrei
- Sensoren für höhere Temperaturen adaptiert
- Herausforderung bei HDPE (Ablösungen beim Erstarren, ...)
- Funktionsweise ausbaufähig

4 Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen (C. Zauner)

Zu Beginn des Projektes war nicht klar, ob Polymere als PCM geeignet sind. Seitens der einschlägigen Hersteller und Verarbeiter bestand insbesondere deswegen Skepsis, da Kunststoffe in allen bisherigen Anwendungen nicht dauerhaft über deren Schmelzbereich verwendet werden.

Im Projekt konnte jedoch erfolgreich gezeigt werden, dass Polymere als PCM geeignet sind.

Sechs Klassen wurden als vielversprechend identifiziert (HDPE, POM, PA, Compounds, Rezyklate und grüne Polymere) und deren Eigenschaften detailliert charakterisiert.

Unterschiedliche Wärmeübertrager- und Polymer-PCM-Speicherkonzepte wurden untersucht und insbesondere drei Typen als geeignet identifiziert (Lamellenrohr, Glattrohr, Rohrbündel). Aluminium- und Stahllegierungen sind mit den Polymer-PCMs kompatibel und erlauben ausreichend gute und schnelle Speicherbe- und -entladung.

Insgesamt wurden sechs Polymer-PCM-Speicher auf TRL4 erfolgreich konstruiert, simuliert, gebaut und detailliert am Prüfstand charakterisiert. Schnelle, flexible 1-d Simulationsmodelle konnten entwickelt und in Dymola/Modelica implementiert werden, wodurch die Polymer-PCM-Speicher als Anlagenkomponente auch in den gängigen Anlagensimulationsprogrammen zur Verfügung stehen. Die Langzeitbeständigkeit der Speicher konnte sowohl auf Materialebene als auch auf Speicherebene demonstriert werden.

Für den Aluminiumdruckguss als auch für die Kunststoff-Extrusion wurden Gesamtenergiekonzepte für Einzelanlagen als auch ganze Produktionsstandorte entwickelt, die in puncto Energieeffizienz und Digitalisierung weit über den Stand der Technik hinausgehen und Energieeinsparungen von bis zu 50 % ermöglichen.

Die Polymer-PCM-Speicher bilden dabei eine zentrale Komponente zur effizienten Abwärmenutzung. Weltweit erstmalig wurde dazu insbesondere ein System einer Hochtemperaturwärmepumpe und eines PCM-Speichers entwickelt, welches in vielen Industriezweigen eine Nutzung von bisher oft ungenutzter Abwärme im Temperaturbereich von unter 20-90 °C erlaubt.

Die Umsetzbarkeit der Energiekonzepte sowie die Funktionsweise der Polymer-PCM-Speicher wurde abschließend erfolgreich auf TRL5 auf industriellen Anlagen der Kunststoff-Extrusion und des Aluminium-Druckgusses demonstriert.

Durch die konsequente Verwendung von kostengünstigen Materialien und industriellen Fertigungsprozess konnten die Speicher auch hinsichtlich deren Gestehungskosten erfolgreich entwickelt werden. **Amortisationszeiten von wenigen Jahren konnten für unterschiedliche Anwendungsfälle demonstriert werden.**

Die in diesem Projekt durchgeführten Arbeiten zu PCM-Speichern definieren gemeinsam mit den Arbeiten am DLR in Deutschland somit den neuen State-of-the-Art und erweitern diesen insbesondere auch für gesamte Druckguss- und Extrusionproduktionsstandorte in puncto Energieeffizienz und Digitalisierung.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Im nächsten Schritt müssen die Speicher im TRL >5 optimiert werden. Insbesondere sind dabei weitere Detailoptimierungen beim Speicher- und Wärmeübertragerdesign durchzuführen. Ebenso muss die industrielle Fertigung optimiert und weiterentwickelt werden. Die Herstellung (Compoundierung) von insb. wärmeleitfähigen Polymer-PCMs und deren industrielle Produktion muss im großen Tonnenmaßstab in hoher Qualität sichergestellt werden. Insbesondere auch in Hinblick auf die Verwendung von kostengünstigen Rezyklaten.

Weitere Anwendungsgebiete in unterschiedlichen Industriezweigen müssen weiter systematisch gesucht und untersucht werden, um die entwickelten Gesamtenergiekonzepte auch auf andere Industrien zu übertragen. Damit einhergehend ist in vielen Betrieben ein Vorantreiben der Digitalisierung, da erst dadurch ein vollständiges und detailliertes Anlagen- und Prozessverständnis möglich ist, was wiederum Grundvoraussetzung für eine systematische Optimierung ist.

Moderne Methoden wie Augmented/Virtual Reality, Artificial Intelligence, Cloud-Dienste und -Vernetzung und Gamification erlauben neben der Überwachung und Verbesserung der Produktion insbesondere eine Gesamtanlagensteuerung und -optimierung insbesondere in energetischer Hinsicht.

4. Anhang

4.1.1.1. TRL5 Polymer-PCM-Speicher Demo-Anlage Kunststoff-Extrusion

Im Folgenden ist die bei Berichtsabgabe eingereichte Publikation als pre-print angehängt.

Development of an Energy Efficient Extrusion Factory employing a Latent Heat Storage and a High Temperature Heat Pump

Christoph Zauner^{a,*}, Bernd Windholz^a, Michael Lauermann^a, Gerwin Drexler-Schmid^a, Thomas Leitgeb^b

^a*AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Energy Department, Sustainable Thermal Energy Systems, Giefinggasse 2, 1210 Wien, Austria*

^b*Geba Kunststofftechnik GmbH, Industriepark Str. 18, 9300 St. Veit an der Glan, Austria*

Abstract

Waste heat recovery and utilization is critical to cut CO₂ emission in industry. Extrusion is a generic process used to produce many different goods from various raw materials. We developed a completely new Energy Efficient Extrusion Factory concept which can be widely applied. Employing a high temperature heat pump and a latent heat storage we are able to recover otherwise unused waste heat and utilize it within different hot processes as well as space heating. We outline our concept in great detail, describe its main technological components and present experimental and simulation results of a demonstration site at the company Geba Kunststofftechnik in St. Veit, Austria. Finally, we perform economical calculations for an exemplary Energy Efficient Extrusion Factory and show that the return on investment can be less than three years.

Keywords: Extrusion, Waste Heat Recovery, Energy Efficiency, Latent Heat Storage, High Temperature Heat Pump

1. Introduction

A key measure to cut CO₂ emission and thus mitigate climate change is to improve energy efficiency in all regions of the world [1], [2], [3], [4], [5]. This is especially relevant for the industrial sector which is why many authors investigate different countries and industries. For example, EU and national policies in Italy and the UK are reviewed by Malinauskaite et al. [6], China's energy efficiency improvement in iron and steel industry was discussed by Zhang et al. [7] and the energy saving potential of the German chemical industry described by Bühler et al. [8]. Li et al. reviewed energy efficiency policies and methodologies in high energy-consuming industry [9].

Waste heat recovery has been identified as one of the main energy efficiency measures bearing great potential especially in industry [10], [11], [12], [13], [14]. Different methods have been developed to provide guidance in harnessing the waste heat potential such as process site evaluation [15], cascaded energy optimization [16], low temperature waste heat recovery by Varga et al. [17] and new technologies relevant for the EU industry by Agathokleous et al. [18]. A central barrier to low-temperature waste heat recovery has been identified by Xu et al. [19], namely "Mismatches between the waste heat source and the user demand on time, space and energy grade limited the potential of waste heat recovery." A similar conclusion was drawn by Woolley et al. [20] who developed a systematic approach for industrial waste heat recovery

*Corresponding author
Email address: christoph.zauner@ait.ac.at (Christoph Zauner)
URL: <http://www.ait.ac.at> (Christoph Zauner)

29 including the analysis of exergetically and temporarily ap- 63
30 propriate heat sinks and sources. Thus, thermal energy 64
31 storages and heat pumps are a crucial enabling technol- 65
32 ogy to improve waste heat recovery and increase energy 66
33 efficiency.

34 Therefore different authors investigated storages such as 68
35 Ortega-Fernandez et al. [21] for waste heat recovery from 69
36 an electric arc furnace in a steel plant. Due to their high 70
37 energy density and the ability to store and retrieve en- 71
38 ergy at a rather constant temperature level (phase change 72
39 temperature), latent heat storages are especially appeal- 73
40 ing. Moldgy et al. [22] developed a methodology to as- 74
41 sess which phase change materials (PCMs) are suitable 75
42 for waste heat recovery and Li et al. [23] describe a ther- 76
43 mal management scheme for industrial waste heat recovery
44 with PCMs. Royo et al. [24] proposed a latent heat stor- 77
45 age to recover heat from industrial furnaces. Employing 78
46 a thermally conductive graphite-paraffin compound Mer- 79
47 lin et al. [25] developed a phase change storage devoted 80
48 to food industries. A plate type heat exchanger enhanced 81
49 by PCM was investigated by Saeed et al. [26] designed 82
50 for load shifting in cooling applications and Khouya et 83
51 al. [27] studied latent heat storages in combination with 84
52 solar kilns for drying purposes. Also, engine waste heat 85
53 recovery was evaluated employing an organic Rankine cy-
54 cle with integrated PCM storage by Yu et al. [28] and Ji 86
55 et al. [29] performed a transient numerical study on heat 87
56 recovery from low temperature gas flow employing a la- 88
57 tent heat storage. In a previous work we also developed a 89
58 latent heat storage system for waste heat recovery in pulp 90
59 and paper industries [30].

60 For heating and domestic hot water demand in residen- 92
61 tial buildings, the heat pump technology has been devel- 93
62 oped as a standard solution in the past years. In new 94

building construction, the market share of heat pumps on
European level is roughly a third of the total number of
heating systems sold [31]. In 2018, data from 9 European
countries reveals a market growth of 7% with respect to
2017, with more than 12 million heat pumps have been sold
in 2018 [32]. Both [33] and [34] show, heat pumps can
also be used in industrial and commercial applications. As
general integration rule of thumb, low-temperature waste
heat flows are used as heat source in order to return them
back to the process at higher temperature levels. Yet, the
market penetration is still low. The aim of this work is
therefore to provide a show-case for the industry sector
which is said to be reluctant to introduce new, unproven
energy-efficiency technologies.

However, to be able to recover and utilize as much waste
heat as possible, a combined system of a storage and a
heat pump would be ideal due to the possibility of both,
load shifting and energy upgrading, at the same time. In
residential applications for space heating and cooling and
domestic hot water preparation there have been some pub-
lications on such combinations [35], [36], [37], [38], [39],
[40], but we could not find a contribution within the in-
dustrial context.

Thus, we present in this contribution a completely new
energy concept for extrusion factories which employs a
combination of a latent heat storage and a high temper-
ature heat pump to enable waste heat recovery and uti-
lization at different plant sinks. The main components of
our Energy Efficient Extrusion Factory have been demon-
strated at a real production site at the company Geba
Kunststofftechnik in St. Veit, Austria, which will be de-
scribed in the following sections in detail.

95 2. Energy Efficient Extrusion Factory - Concept 129

96 Extrusion is a wide-spread industrial process employed
97 in many sectors such as metals, polymer, food, pharma-
98 ceutical and chemical industries. The raw materials are
99 continuously fed into the extruder, where they are mixed re-
100 sulting in a compound that is finally pushed through a die
101 of various shapes and sizes. In such a way one can produce
102 pipes, rods, foils, plates, fibres and even profiles of many
103 different shapes and materials. Our investigations and es-
104 pecially our newly developed Energy Efficient Extrusion
105 Factory concept focuses on polymer compound extrusion,
106 but can be analogously transferred to other industrial sec-
107 tors and materials. We present and demonstrate new ways
108 of waste heat recovery and energy optimization which is a
109 topic of recent research within the research and industrial
110 community as discussed for cork by Nunes et al. [41] and
111 polymers by Abeykoon et al. [42], [43] and Vera-Sorroche
112 et al. [44].

113 In figure 1 we sketch the main components of a typical
114 state of the art polymer compounding plant. In general,
115 there are different parallel productions lines which process
116 different raw materials and produce different polymer com-
117 pounds at the same time. Also, the production through-
118 put (kilograms of polymer compound produced per hour)
119 and the various processing temperatures vary from line to
120 line. Thus, also the energy demand for both, heating and
121 cooling, differs and varies in time depending on through-
122 put and compound produced. Within the first process
123 step it is necessary for many raw polymer pellets to be
124 dried [45]. The most common dryers are so called desiccant
125 dryers which employ dehumidified hot air to dry the
126 polymer [46]. Electrical energy is required to regenerate
127 the desiccant material as well as to heat the air flow. Of-
128 ten the polymer pellets are directly fed into the extruder,

130 but sometimes due to e.g. logistical reasons they have to
131 be stored in the plant, where they cool down to ambient
132 temperature, which, of course, is not energy efficient. In
133 the second process step, the dried pellets are fed into the
134 extruder along with various additives, which are used to
135 improve mechanical, optical, thermal, chemical and elec-
136 trical properties of the final polymer compound. One or
137 more screws within the extruder are employed to melt the
138 polymer (via friction), admix the additives and push the
139 resulting product through the die. The extruder consists of
140 different zones, which have to be separately heated and/or
141 cooled, which is usually done electrically (heating) or ther-
142 mally (cooling) with chilled water. After passing the die,
143 the compound strands have to be cooled to less than about
144 80°C in order to be able to be pelletized. Thus, they are
145 passed through a water bath which is typically operated
146 around 15–25 °C and then enter the granulator where the
147 strands are cut to the desired sizes. In a final process
148 step it is necessary that some compounds are further dried
149 before they are readily packed and shipped. Often, the
150 heated water of the water bath of different production lines
151 is collected within a water tank, which is then connected
152 to a compression chiller system for re-cooling. In parallel,
153 an office building and production hall space heating sys-
154 tem is in operation using e.g. gas or electricity as primary
155 energy source.

156 Although there are many different cold and hot streams
157 within a typical extrusion plant, it is not state of the art to
158 recover and utilize waste heat. This is also largely related
159 to the fact that the temperature levels of the waste heat
160 sources do not match those of the various possible sinks.
161 Therefore, we developed a new Energy Efficient Extrusion
162 Factory concept (figure 2) which allows for improved waste
163 heat recovery and utilization.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

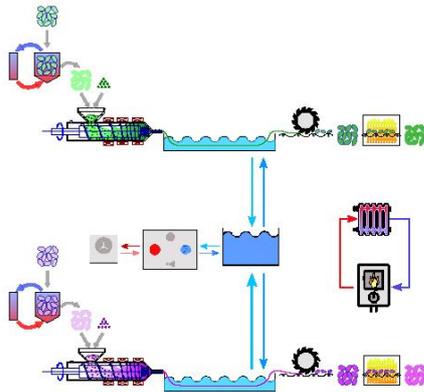


Figure 1: Schematics of a state-of-the-art extrusion factory comprising of various line producing different polymer compounds. Because no waste heat recovery is and utilization is performed, a compression cooling system in necessary for re-cooling. In parallel to the production processes, a separate space heating system is being operated. 163

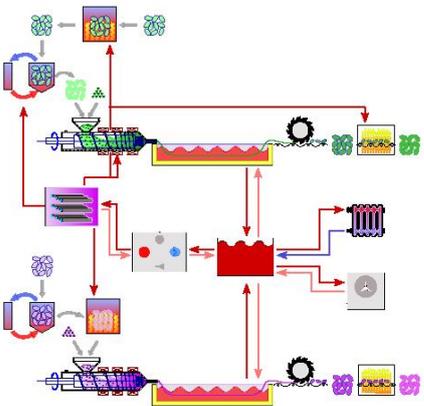


Figure 2: Concept of our newly developed Energy Efficient Extrusion Factory. Waste heat is recovered from the extrusion lines and utilized in space heating and various hot processes enabled by an improved hot water bath, a hot water tank, a high temperature heat pump, and a latent heat storage. 179 180



Figure 3: An improved, insulated hot water bath was developed, which can be operated up to 90°C. Water mass flow control enables cooling of the polymer strands to around 80°C at the water bath exit ensuring proper pelletization.

The first necessary innovation enabling waste heat utilization is an improved, insulated hot water bath (figures 3, 4). As opposed to the state of the art water bath, which is operated around tap water temperature, we developed a system which can be operated around a temperature of 50 – 90°C depending on the polymer type that is being compounded. Because the compound temperature at the exit of the die is as high as 200 – 300°C there is still enough driving temperature difference to be able to cool the strands to around 80°C even with hot water. This is achieved by employing a slightly longer water bath with an appropriately chosen water mass flow to yield a constant temperature difference between inlet and outlet in the range of 10°C. In order to avoid heat losses, the new water bath is insulated with mineral wool and bears a transparent removable top cover. 164 165 166 167 168 169 170 171 172 173 174 175 176 177 178

Also, the central water tank which collects hot water from different production lines is operated at higher temperatures. Conventional space heating system are operated at a maximum flow temperature of 60°C, which can 179 180 181 182

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Figure 4: The polymer strands enter the water bath with temperature between 200–300 °C. Thermal insulation is employed at the bottom and side boards as well as a transparent insulation removable top cover.

183 be supplied directly by the hot water tank, which at the
184 same time serves as a buffer storage to shave waste heat
185 supply and heating demand peaks. Space heating is only
186 required during the cold season and the demand is usually
187 much less than there is waste heat available. Thus, there
188 is a need for additional heat sinks. However, most eligible
189 processes require higher temperatures than available from
190 the central hot water tank. Therefore, we have to employ
191 a high temperature heat pump which uses the hot water
192 tank as the heat source to achieve condenser side temper-
193 atures of up to 150 °C. In that way, we can supply more
194 energy sinks:

- 195 • pre-drying of the raw polymers before entering the
196 desiccant dryer
- 197 • supporting the desiccant dryer by either heating the
198 air, the raw polymer or the desiccant material
- 199 • pre-heating the raw polymer before entering the ex-
200 truder
- 201 • supporting the heating of certain extruder zones
202 which have to be additionally heated
- 203 • drying of the pelletized polymer compound before be-
204 ing packed and shipped

205 In general, the various possible heat sinks do not require
206 constant heating demand but are more or less peaked.
207 Thus, also on the hot heat pump side there is the need
208 for a buffer storage. Due to the high operating tempera-
209 tures and partially small spreads between process flow and
210 return temperature, a latent heat storage is better suited
211 than a pressurized hot water tank. Finally, in the unlikely
212 case that there is still more waste heat available than can
213 be stored or immediately utilized there is the need for an
214 auxiliary cooling system. Due to the high hot water tank
215 temperature however, most likely there is no need for a

216 compression chiller system but free cooling is sufficient,
217 which is economically favorable, of course.

218 3. Energy Efficient Extrusion Factory - Demonstration Site 219

220 In order to proof the feasibility of our new Energy Ef-
221 ficient Extrusion Factory concept, we went on to demon-
222 strate the main and most innovative components of the
223 system at a real industrial production site. Our demo sys-
224 tem was set up at the company Geba Kunststofftechnik
225 in St. Veit, Austria and is shown in Figure 5. It consists
226 of the new improved, insulated water bath working at ap-
227 proximately 50 °C which is employed to cool the polymer
228 strands exiting the extruder. The water bath is connected
229 to a high temperature heat pump on the evaporator side to
230 cool the circulated water. At the condenser side, i.e. hot
231 side, of the heat pump we installed a latent heat storage,
232 which stores the recovered waste heat at a higher tempera-
233 ture level of 60–125 °C. Waste heat utilization for drying
234 polymer granulate was skipped in the first demonstration
235 for the sake of simplicity and due to limited resources. In-
236 stead, a dry cooler was set up to allow a discharging of the
237 latent heat storage.

238 Figure 6 shows a more detailed description of the sys-
239 tem including hydraulics and temperature levels. The em-
240 ployed high temperature heat pump was developed in the
241 course of the Austrian project HighButane 2.0 in a co-
242 operation between AIT and Frigopol. It can provide a
243 maximum heating power of 35 kW at 60 °C source and
244 125 °C sink temperature achieving a COP of 2.5. This co-
245 responds to an evaporator capacity of 21 kW, which can be
246 used to re-cool the hot water bath. To achieve a constant
247 temperature in the water bath, the heat pump was con-
248 trolled in a way to keep the source-side outlet temperature

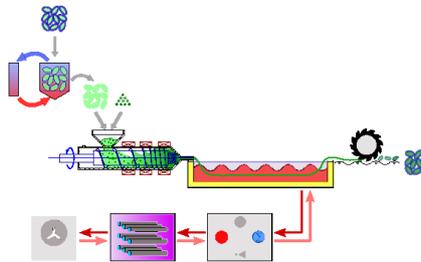


Figure 5: Schematics of the demonstration facility at Geba Kunststofftechnik comprising a hot, insulated water bath, a high temperature heat pump and latent heat storage to utilize waste heat from the polymer extruder.

249 of the evaporator at 45 °C. As described in the previous
250 section, in state of the art extrusion factories, the water
251 bath is operated below 20 °C. To design the new insulated
252 hot water bath, we developed a versatile 1D-model, which
253 discretized the water bath along the water flow direction.
254 The inlet and outlet temperatures of the water bath and
255 the plastic strands are boundary conditions. It was as-
256 sumed that all plastic strands have the same properties,
257 thus a model of a single strand is sufficient. The polymer
258 strand entering the water bath was discretized both in the
259 longitudinal (40 sections) and in the radial direction (4
260 rings). Heat transfer within the polymer could be modeled
261 via conduction only because due to the high viscosity
262 of the polymer no convection occurs. The resulting model
263 is given in equations 1.

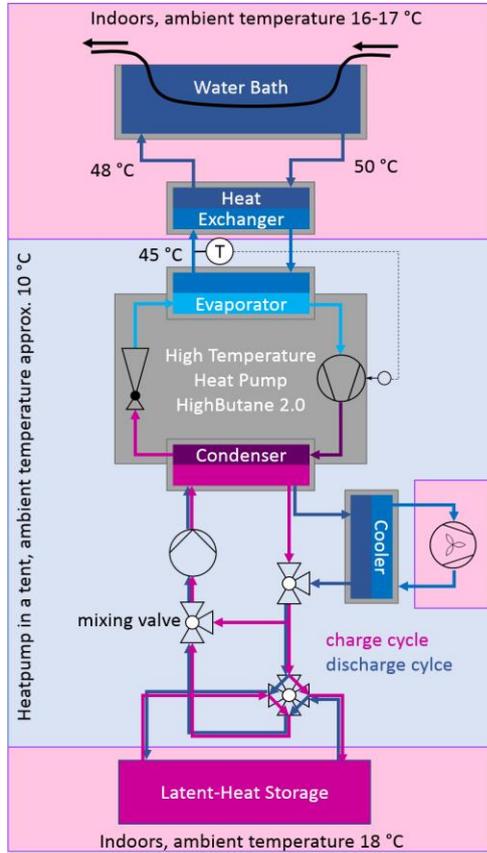


Figure 6: Schematics of the experimental setup with water bath, high temperature heat pump and latent heat storage.

$$T(r_1)_{x+1} = T(r_1)_x - \frac{n \cdot 2\pi \cdot l}{N \cdot \dot{m} \cdot c_p} \cdot \left\{ \frac{T(r_1)_x - T_W}{\frac{1}{\alpha \cdot r_1} + \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{r_1}{r_2}} - \frac{T(r_1)_x - T(r_2)_x}{\frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{r_2}{r_3}} \right\} \quad (1a)$$

$$T(r_i > 1)_{x+1} = T(r_i)_x - \frac{n \cdot 2\pi \cdot l}{N \cdot \dot{m} \cdot c_p} \cdot \left\{ \frac{T(r_i)_x - T(r_{i-1})_x}{\frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{r_i}{r_{i+1}}} - \frac{T(r_i)_x - T(r_{i+1})_x}{\frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{r_{i+1}}{r_{i+2}}} \right\} \quad (1b)$$

$$T(r_{min})_{x+1} = T(r_{min})_x - \frac{n \cdot 2\pi \cdot l}{N \cdot \dot{m} \cdot c_p} \cdot \left\{ \frac{T(r_{min})_x - T(r_{min-1})_x}{\frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{r_{min}}{r_{min+1}}} \right\} \quad (1c)$$

264 where n is the number of strands, l the section length,
 265 $T(r)_x$ the temperature in shell with radius r and in section
 266 x , T_W the water temperature, α the heat transfer
 267 coefficient from water to the strand, λ the thermal conductivity
 268 of the strand, r_1 the radius of the strand, r_i the radii
 269 of different shells, r_{min} the radius of the most inner shell
 270 (cylinder) and N the number of shells due to radial
 271 discretization.

273 In order to validate the model, we first simulated a conventional
 274 cold water bath with polymer strands entering the water bath at a
 275 temperature of 300 °C. After exiting the cooling bath, the strands
 276 have been cooled to 70 °C. At the same time, the water is heated
 277 from 18 °C to 24 °C. With such a configuration, we can cool 204 kg/h
 278 of PC-ABS-compound.

280 In the next step, we performed parameter variations for different
 281 water bath length and outlet temperatures. In order to achieve a
 282 suitable temperature level that serves as the heat source for the
 283 high temperature heat pump, we calculated a water bath length of
 284 6 m at an water outlet temperature of roughly 50 °C (figure 7).
 285 With such a configuration, we can cool 180 kg/h of PC-ABS-compound
 286 from 300 °C to 70 °C. At this throughput rate the experiments
 287 were conducted successfully, with a constant water bath temperature,
 288 a stable heat pump operation and expected charge- and discharge
 289 rates of the latent heat storage device as will be shown in the
 290 next sections.

4. Latent Heat Storage

292 As a next step, we designed the latent heat storage in detail
 293 and created the technical drawings based on models and prototypes,
 294 which were developed and published previously by Zauner et al. [47],
 295 [48]. Two collecting
 296

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

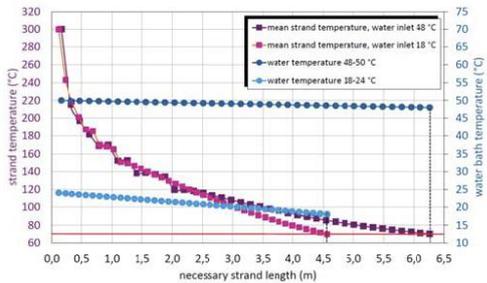


Figure 7: Calculation and comparison of the resulting strand temperatures and water bath temperatures for the state of the art cold water bath (light blue, light pink) and the hot water bath employing the high temperature heat pump for re-cooling (dark blue, dark pink).

297 manifolds at the longitudinal front and back side of the
 298 storage ensure parallel flow through the heat exchanger.
 299 The tube sheets are connected to the pipes, which are all
 300 flown-through in parallel. In total we arranged 36 steel
 301 tubes with an inner diameter of 14 mm, a tube thickness
 302 of 1 mm in a square geometry with a tube pitch of 100
 303 mm as shown in figure 8. In order to ensure appropriate
 304 mechanical resistance to heat transfer fluid pressures up
 305 to 8 bar, we added reinforcement structures to the collect-
 306 ing manifolds. We chose rectangularly shaped hollow
 307 steel profiles which could be easily welded to the collecting
 308 manifolds as shown in figure 9.

309 We employed aluminum fins with a thickness of 1 mm
 310 and a fin-fin distance of 11 mm. In total 177 fins have
 311 been used for the whole heat exchanger, which was finally
 312 manufactured at the Light Metal Competence Center Ran-
 313 shofen, Austria. Figure 10 shows the heat exchanger as it
 314 was produced and shipped to the company HE Technik
 315 in Gilgenberg, Austria. There, the heat exchanger was
 316 welded to the tube sheets and mounted into a steel casing
 317 (figure 11). The final, yet uninsulated storage bearing a
 318 removable cover and piping connections is shown in fig-
 319 ure 12 and was shipped to the demonstration site at Geba

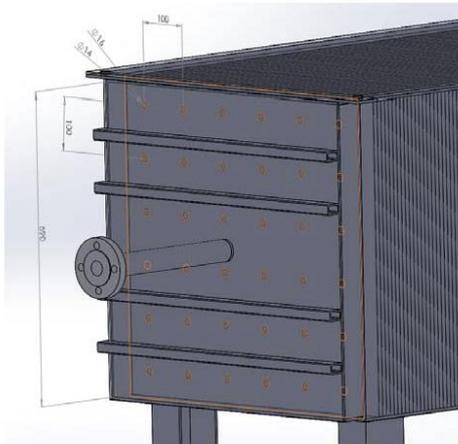


Figure 8: Technical Drawing of the latent heat storage with the tube sheet highlighted showing the arrangement of the 36 parallel steel tubes and aluminum fins.

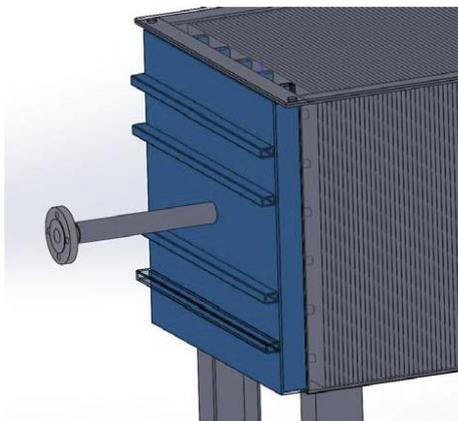


Figure 9: The collecting manifolds of the latent heat storage were reinforced to withstand the heat transfer fluid pressures of up to 8 bar.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

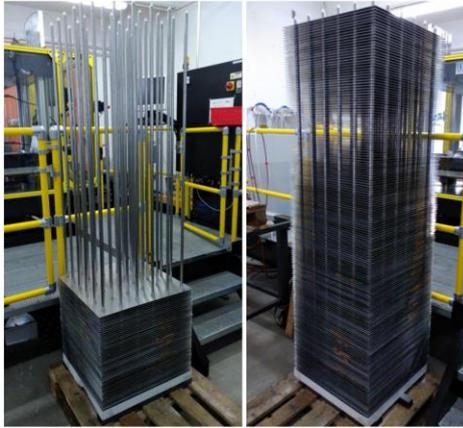


Figure 10: The heat exchanger was produced at the Light Metal Competence Center Ranshofen, Austria.



Figure 11: At the company HE Technik in Gilgenberg, Austria, the heat exchanger was welded to the collecting manifolds and a proper casing was manufactured.

320 Kunststofftechnik.

321 As phase change material we chose Rubitherm RT70 HC
322 with the thermophysical properties summarized in table 1.
323 This paraffin has a high enthalpy of fusion and is relatively
324 easy to handle. The melting point was selected to be only
325 70 °C in order to be able to also test the system with a
326 state of the art extrusion water bath, where the condenser
327 temperatures would be at a maximum of 80–90 °C in order
328 to achieve a reasonable COP. The phase change ma-
329 terial however is stable up to the maximum system design
330 temperature employing also the improved hot water bath,
331 150 °C, and can thus serve as appropriate demonstration
332 material as is shown below.

333 The phase change material was filled into the storage at
334 the company Geba and molten in various steps. In total,
335 525 kg of Rubitherm RT 70HC have been utilized. In a
336 final step, the storage was generously insulated in order to
337 facilitate the characterization phase by minimizing heat
338 losses 13.



Figure 12: The final storage before it was shipped to the demonstration site including protective paint.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

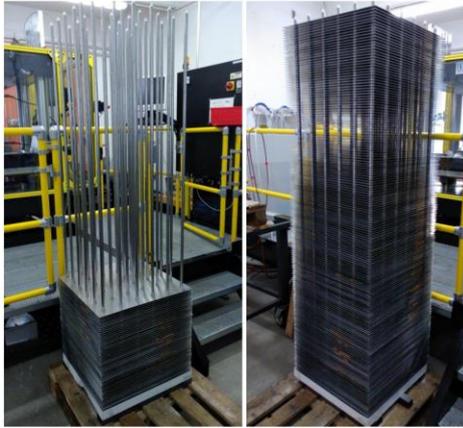


Figure 10: The heat exchanger was produced at the Light Metal Competence Center Ranshofen, Austria.



Figure 11: At the company HE Technik in Gilgenberg, Austria, the heat exchanger was welded to the collecting manifolds and a proper casing was manufactured.

320 Kunststofftechnik.

321 As phase change material we chose Rubitherm RT70 HC
322 with the thermophysical properties summarized in table 1.
323 This paraffin has a high enthalpy of fusion and is relatively
324 easy to handle. The melting point was selected to be only
325 70 °C in order to be able to also test the system with a
326 state of the art extrusion water bath, where the condenser
327 temperatures would be at a maximum of 80 –90 °C in or-
328 der to achieve a reasonable COP. The phase change ma-
329 terial however is stable up to the maximum system design
330 temperature employing also the improved hot water bath,
331 150 °C, and can thus serve as appropriate demonstration
332 material as is shown below.

333 The phase change material was filled into the storage at
334 the company Geba and molten in various steps. In total,
335 525 kg of Rubitherm RT 70HC have been utilized. In a
336 final step, the storage was generously insulated in order to
337 facilitate the characterization phase by minimizing heat
338 losses 13.



Figure 12: The final storage before it was shipped to the demonstra-
tion site including protective paint.

379 cycle, the compressor (2-3) has to overcome less pressure
 380 difference (and therefore less work required) compared to
 381 a standard cycle.

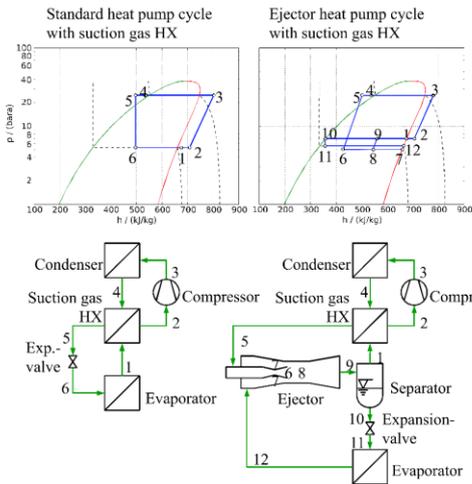


Figure 14: Configuration of a standard heat pump cycle vs. ejector heat pump cycle.

382 The main parts of an ejector include the nozzle, mix-
 383 ing zone and diffuser, as indicated in Fig. 15. The high-
 384 pressure fluid is introduced in the nozzle, where it accel-
 385 erates until the total pressure difference is converted into
 386 the kinetic energy. The low-pressure fluid is being intro-
 387 duced in the mixing zone, where it entrains into the high-
 388 pressure fluid due to its high velocity. In the diffuser an
 389 intermediate pressure level is established, with a simulta-
 390 neous reduction in speed of fluid mixture.

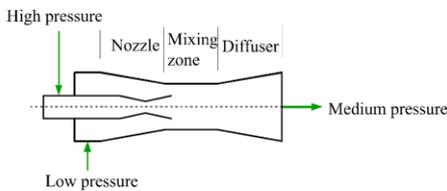


Figure 15: Typical ejector scheme.

5.3. Thermohydraulic design for the Energy Efficient Extrusion Factory

393 The heat pump package can be used for industrial ap-
 394 plications lifting the temperature of a waste heat fluid
 395 from the range of 50–80 °C to industrially usable range
 396 of 100–130 °C. As working fluid, the natural refrigerant
 397 n-Butane (R600) is used. In the process of design-
 398 ing this heat pump, the individual components were
 399 parametrized according to their manufacturer data. Ex-
 400 cept from the ejector - which was manufactured individ-
 401 ually - all of the used components are standard compo-
 402 nents. In the present case for the showcase at GEBA, all
 403 the refrigerant-containing parts of the heat pump are lo-
 404 cated in a vented housing, see Fig. 16. Although the heat
 405 pump is currently a single prototype, the compact layout
 406 with its gross casing dimensions (length x width x height
 in m) of 2.5 x 1 x 1.8 are close to a series product. Table
 2 gives an overview of the design conditions.

6. Energy Efficient Extrusion Factory - Experiment and Simulation

411 The charging process of the latent heat storage during
 412 cooling of the water bath is shown in Figure 17. The top
 413 diagram shows temperature curves. As planned, the con-
 414 trolled temperature at the water bath inlet is stable at
 415 around 48 °C. The course of the latent heat storage tem-
 416 perature clearly shows the phase change, which takes place
 417 in the 70 °C range. As the latent heat storage tempera-
 418 ture rises, the condensation temperature of the heat pump
 419 increases. When the maximum permissible condensation
 420 temperature of approx. 125 °C is reached, the heat pump
 421 switches off and the latent heat storage temperature is ap-
 422 prox. 85 °C. The middle diagram shows the thermal and
 423 electrical outputs (power and energy) of the heat pump.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Heating capacity	50 kW
Source	
Inlet temperature	60 °C
Liquid mass flow	9000 kg/h
Sink	
Inlet temperature	100 °C
Outlet temperature	130 °C
Liquid mass flow	9900 kg/h
Condensing temperature	127 °C
Evaporating temperature	55 °C
Subcooling	
Condenser	5 K
Overall	15 K
Superheating	
Evaporator	0 K
Overall	15 K
Compressor	
Isentropic efficiency	0.7
Volumetric efficiency	0.8
Electrical efficiency	0.9
Ejector efficiency	35 %

Table 2: Design conditions for the high temperature heat pump.



Figure 16: Overview of the High Temperature Heat Pump.

424 The minimal power at the evaporator was not measured,
 425 but derived from the difference of the power at the con-
 426 denser minus the electrical input. Due to thermal losses,
 427 the power at evaporator is higher than shown in the dia-
 428 gram. The evaporator power rises to about 15 kW in order
 429 to keep the controlled temperature at the water bath inlet
 430 as constant as possible. As the condensation tempera-
 431 ture rises, the electrical input power of the heat pump in-
 432 creases, thus increasing the heat output at the condenser.
 433 The bottom diagram shows the coefficient of performance
 434 while cooling, the ratio of evaporator power to electrical
 435 input (kW/kW). It is indirectly proportional to the differ-
 436 ence between condensation and evaporation temperature
 437 and reaches a maximum value of 2.5. If one compares the
 438 coefficient of cooling performance with the coefficient of
 439 performance of a Carnot process between the same tem-
 440 peratures, the Carnot efficiency is obtained. It is relatively
 441 constant at only about 30 % and confirms that this pilot
 442 plant can still be optimized. For example, the circulation
 443 of the refrigerant is restrained due to the relatively high

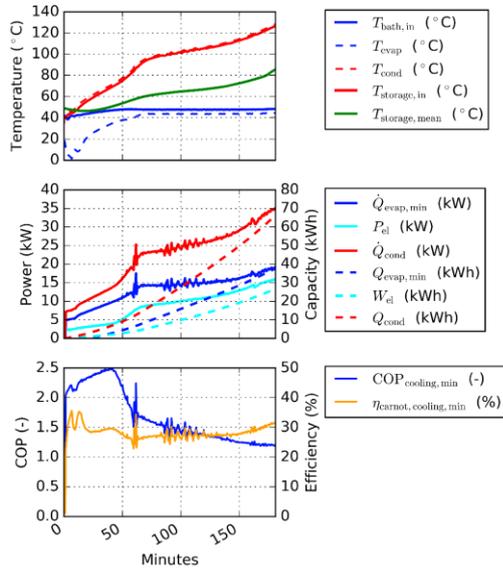


Figure 17: Charging of the latent heat storage via HTHP. Top: Temperatures. Middle: Power and capacity (thermal and electrical). Bottom: Coefficient of performance and Carnot efficiency.

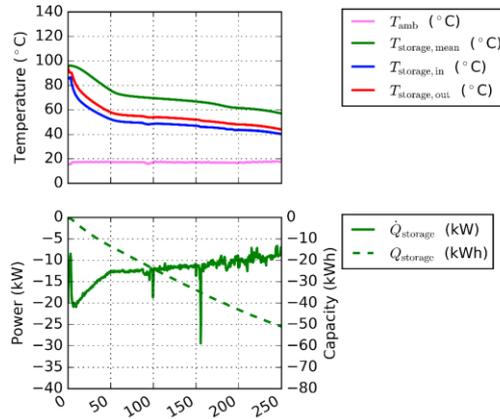


Figure 18: Discharging of the latent heat storage via fan coils. Top: Temperatures. Bottom: Thermal power and capacity.

444 pressure loss of the flow sensors. The performance factor
 445 during the experiment (analogous to seasonal performance
 446 factor), the ratio of the amount of heat absorbed by the
 447 evaporator to the electrical energy required (kWh/kWh),
 448 is approximately 1.4. Since the amount of heat released at
 449 the condenser is stored for later use, the total performance
 450 factor is 3.9.

451 The discharge process of the storage tank is shown in fig-
 452 ure 18. The heat pump is switched off and the heat from
 453 the latent heat storage is discharged into the hall air using
 454 fan coils. The upper diagram shows the usual temperature
 455 curves for latent heat storages. At an almost constant am-
 456 bient air temperature, the storage unit cools comparativly
 457 quickly to around 70 °C by emitting sensitive heat, followed
 458 by the phase transition, at which the storage unit temper-
 459 ature drops much more slowly. The fluid temperature at
 460 the storage tank connections also follows this course. The

461 lower graph in figure 18 shows the thermal output (power
 462 and capacity). The heat output is not actively controlled
 463 and drops from about 21 kW with decreasing temperature
 464 difference between the storage tank and the ambient air to
 465 less than 10 kW at the end of the experiment. At a storage
 466 temperature difference of around 40 K, an energy quantity
 467 of around 50 kWh is extracted.

7. Energy Efficient Extrusion Factory - Economical Considerations

In order to assess the economical potential of our Energy Efficient Extrusion Factory concept, we set up an appropriate example bearing all relevant system components sketched in figure 19: We consider three parallel extrusion lines compounding different polymers: line 1 processes polypropylene (PP), line 2 thermoplastic polyurethane (TPU), and line 3 polycarbonate (PC). PP is supposed to be produced during three shifts (24 hours/day), while TPU and PC during two shifts (16 hours/day). Each extruder works with a throughput of 2000 kg/h. Thus, in total within one day 48 tons of PP and 32 tons of TPU

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

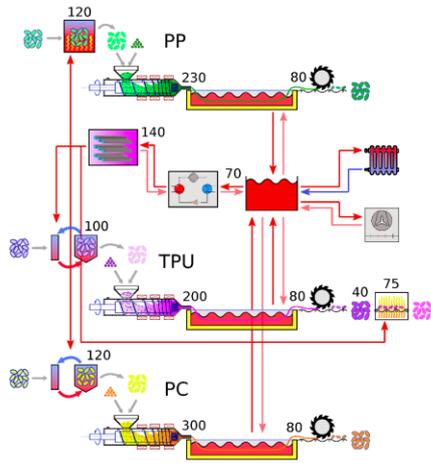


Figure 19: Schematics of the Energy Efficient Extrusion Factory example as it was considered for the economical assessment. Three different polymer compounds (PP, TPU, PC) are supposed to be produced in parallel extrusion lines. Each material requires slightly different processing conditions and thus equipment. Our waste heat recovery and utilization concept is included to supply space heating and various hot processes. The numbers indicate process temperatures in °C as described in the text in detail.

481 and PC are compounded. Each line consists of dedicated 506
 482 equipment that is required by the raw polymer and com-507
 483 pound processing needs. 508

484 Polypropylene is not a hygroscopic polymer which, how-509
 485 ever, may still possess some surface humidity absorbed onto 510
 486 the raw pellets. Within line 1, a pre-heating oven is em-511
 487 ployed to heat the raw polymer from ambient temperature 512
 488 to 120 °C removing surface humidity at the same time. The 513
 489 compounded polypropylene strands leave the extruder die 514
 490 at a temperature of 230 °C and are cooled via a hot water 515
 491 bath operated around 70 °C in such a way that they can be 516
 492 cut by the granulator at an average temperature of 80 °C. 517

493 Line 2 produces a thermoplastic polyurethane com-518
 494 pounds. The raw polymer pellets have to be pre-dried be-519
 495 fore entering the extruder. This is achieved by a desiccant 520
 496 dryer which heats the TPU up to 100 °C. The compounded 521
 497 strands leave the extruder die at 200 °C and are cooled to 522

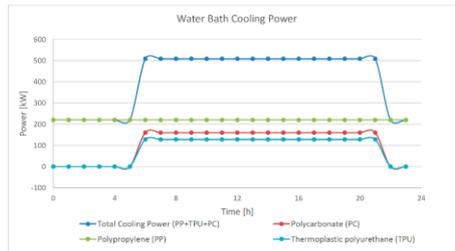


Figure 20: Each polymer has to be compounded at different temperatures and has different thermophysical properties resulting in required cooling power demands for the respective hot water baths.

488 80 °C by a similar hot water bath operated around 70 °C.
 499 After the compound is pelletized, this particular product
 500 has to be dried again before being packed and shipped.
 This is achieved by an additional dryer which heats the
 TPU compound up to and average of 75 °C and dries it
 from 1 to almost 0 % humidity.

505 Polycarbonate is compounded within line 3. The raw
 pellets have to be dried in another desiccant dryer heating
 them up to 120 °C. The strands leave the extruder die at
 a temperature of 300 °C and are also cooled using a sim-
 508 ilar water bath operating around 70 °C and are pelletized
 subsequently.

The resulting cooling power needs for all three hot water
 baths are shown in figure 20. They are all connected to
 a central hot water tank collecting the waste heat from
 the three extruder lines. Space heating demand in winter
 (we assume a heating period of 180 days) serves as a heat
 sink energetically directly connected to the hot water tank.
 Thus, the hot water tank receives excess waste heat from
 the hot water bath and supplies a certain part of that to
 the space heating system as is shown for an average heating
 season day in figure 21.

We want to estimate how much energy can be recovered
 and reused with our Energy Efficient Extrusion Factory
 concept, which is why we chose the space heating demand

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

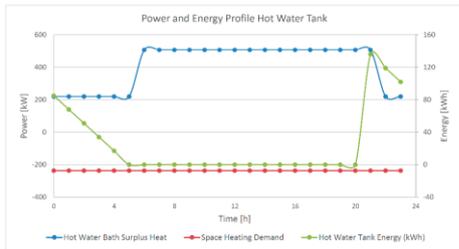


Figure 21: Waste heat from the three hot water bath is directly utilized to supply space heating demand. Excess waste heat is stored in the hot water tank and serves as the heat source for the high temperature heat pump.

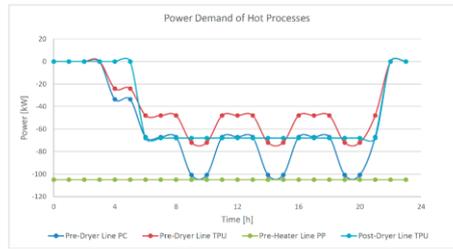


Figure 22: Daily power profile of the various hot processes necessary for proper polymer compound production.

547 heat can be supplied by a suitable pressurized water/air
548 heat exchanger.
549 of our fictional factory such that the residual waste heat is
550 exactly enough to supply the other hot processes shown
551 in figure 19: pre-heating within line 1, pre-drying and
552 product-drying within line 2 and pre-drying within line 3.
553 Any additional space heating demand of a real case would,
554 of course, have to be supplied by an auxiliary heating sys-
555 tem, which is independent of our waste heat recovery sys-
556 tem. All hot processes require heat at a temperature level
557 higher than the water bath temperature which operated
558 around 70 °C. Thus, a high temperature heat pump is re-
559 quired to achieve temperatures up to 140 °C. In addition,
560 because the hot process demand is neither constant in time
561 nor in power as is explained in the next paragraph, there is
562 also the need for a high temperature storage. A PCM stor-
563 age using the polymer high density polyethylene (HDPE)
564 as phase change material with a phase change tempera-
565 ture around 125 °C is perfectly suited. We investigated
566 the suitability of HDPE as PCM for latent heat storages
567 in [50] and [51], developed different HDPE latent heat
568 storages in [47] and [48] and proved the durability on a
569 PCM [52] and storage scale [53].
570 The power demand of the hot processes are shown in
571 figure 22. Polypropylene pre-heating is continuously per-
572 formed in a suitable continuous circulating air oven. Waste

heat can be supplied by a suitable pressurized water/air
heat exchanger.
Within the desiccant dryer there are two processes where
waste heat can be reused: dry air heating and desiccant
regeneration. Air leaving the desiccant section of the dryer
has a temperature around 50 °C, which needs to be heated
up to 100 °C in case of TPU and 120 °C for PC. This can be
achieved via another pressurized water/air heat exchanger
which yields a continuous load. Desiccant regeneration
on the other hand is a batch process which is performed
every few hours for roughly two hours. Fresh air is sucked
in and heated up to 300 °C before it is blown through the
desiccant material to regenerate it. With our system, we
can pre-heat fresh air up to around 120 °C and thus supply
roughly a third of the required demand.

Finally, another pellet drying system is employed to re-
move excess humidity from the compounded TPU product.
In our example, we dry from 1 to 0 % humidity using hot
air heating the polymer at the same to an average tempera-
ture of 75 °C in a continuous process supplied by another
pressurized water/air heat exchanger.

The latent heat storage serves as a high temperature
buffer storage, which supplies all hot processes and is
charged by the high temperature heat pump. The result-
ing charging and discharging power profiles as well as the

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

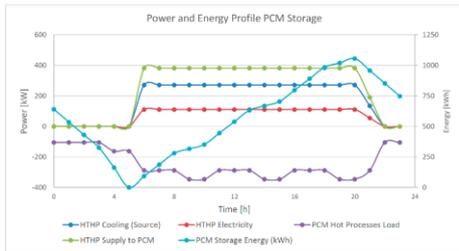


Figure 23: The high temperature heat pump operates in cooling mode to re-cool the hot water baths. The latent heat storage on the condenser side is charged accordingly and supplies the varying hot processes (discharging) resulting in a varying energy content.

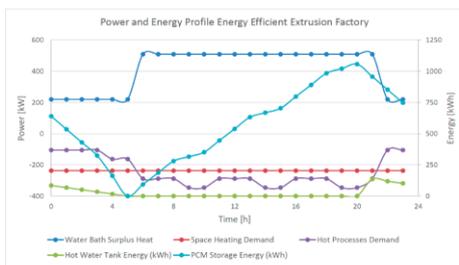


Figure 24: Power and Energy profiles of the main system components as they vary during the day.

572 current storage energy content is shown in figure 23.

573 Figure 24 summarizes the waste heat recovery sources
574 (hot water bath), the low and high temperature sinks
575 (space heating, hot processes) and shows the current stor-
576 age content of the hot water tank as well as the latent heat
577 storage.

578 In the next step, we estimated the costs of the neces-
579 sary process equipment for our exemplary Energy Efficient
580 Extrusion Factory based on our long term experience in
581 similar projects as well as communication with appropri-
582 ate suppliers. We calculate the energy costs for a conven-
583 tional system without waste heat recovery as well as our
584 new system for factory sites in Austria and Germany for
585 comparison. Space heating (180 days heating season) is
586 conventionally achieved by a gas boiler with energy costs
587 of 5 EUR-cents/kWh (Austria and Germany) and total

588 electricity costs are assumed to be 11 EUR-cents/kWh in
589 Austria and 16 EUR-cents/kWh in Germany. Re-cooling
590 is achieved via a compression cooling system with an as-
591 sumed COP of 5 for the conventional system and via free
592 cooling with a COP of 25 for the Energy Efficient Ex-
593 trusion Factory. The results are summarized in table 3
594 and 4. For both systems one can achieve an economically
595 interesting return on investment of less than three years
596 (Austria 2.5 years, Germany 1.9 years). Thus, we con-
597 clude that our Energy Efficient Extrusion Factory concept
598 is also economically interesting and bears great potential
599 for waste heat recovery and utilization.

600 8. Summary

601 In the first section, we describe our Energy Efficient Ex-
602 trusion Factory concept in great detail. Especially, we
603 outline the system configuration and how we can utilize
604 otherwise unused waste heat by employing an improved
605 hot water bath, a high temperature heat pump and a la-
606 tent heat storage. Various hot processes as well as space
607 heating can be supplied by our waste heat recovery system.
608 In order to demonstrate the feasibility of our concept, we
609 set up the main components within a real production fac-
610 tory at the company Geba Kunststofftechnik in St. Veit,
611 Austria, which is presented in section two. Besides the
612 improved hot water bath, the latent heat storage and the
613 high temperature heat pump comprise the key innovation
614 of our system and thus are described in separate sections.
615 Next, we present the experimental as well as simulation
616 results of the demonstration site and summarize the key
617 technological figures. Finally, we investigate the economics
618 of an exemplary Energy Efficient Extrusion Factory for
619 two different locations (Austria, Germany) and show that
620 the return on investment can be less than three years.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

State-of-the-art Extrusion Factory - Austria	(kWh/d)	(EUR/kWh)	(EUR/d)	(kEUR/y)
Space Heating	5688	0.05	284	51.2
Hot Processes	5912	0.11	650	237.4
Re-Cooling	1182.4	0.11	130	47.5
Energy Efficient Extrusion Factory - Austria				
Space Heating	5688	0	0	0
Hot Processes	1714	0.11	189	68.8
Re-Cooling	234	0.11	26	9.4
State-of-the-art Extrusion Factory - Germany				
Space Heating	5688	0.05	284	51.2
Hot Processes	5912	0.16	946	345.3
Re-Cooling	1182.4	0.16	189	69.1
Energy Efficient Extrusion Factory - Germany				
Space Heating	5688	0	0	0
Hot Processes	1714	0.16	274	100.1
Re-Cooling	234	0.16	37	13.7

Table 3: Economical figures of a state-of-the-art extrusion factory compared to our Energy Efficient Extrusion Factory which utilizes a great amount of waste heat. The comparison is performed for two different locations (Austria, Germany).

Equipment	Investment Costs (kEUR)
Latent Heat Storage	105.5
High Temperature Heat Pump	229
3 Hot Water Baths	60
Hot Water Tank	30
2 Heat Exchangers Pre-Dryer	40
Pre-Heating Oven	70
Compound Dryer	70
Piping, Pumps, Valves, Controls	50
Total Investment Costs for Energy Efficient Extrusion Factory	654.5
Annual Savings Austria	257.8
Annual Savings Germany	351.8

Table 4: Cost and saving potential for our Energy Efficient Extrusion Factory Equipment for our example factory. A return on investment of less than three years is achieved for both, Austria and Germany.

621 Author Contributions and Acknowledgments 658

622 The Austrian Research Promotion Agency (FFG) is 659
623 gratefully acknowledged for funding this work under Grant 660
624 No. 848914 (StoreTup-IF). Special thanks to Stephan 661
625 Scheibner and Josef Reiter who manufactured the heat 662
626 exchanger of the latent heat storage. C. Z. conceived, sub- 663
627 mitted and lead the project, developed the Energy Effi- 664
628 cient Extrusion Factory concept, the latent heat storage 665
629 and performed the economical considerations. The high 666
630 temperature heat pump was developed within the project 667
631 Highbutane 2.0 (FFG Grant No. 843935). G.D.S., B.W. 668
632 and C.Z. developed the system of demonstration site at 669
633 Geba. B.W., M.L. and T.L. set up the demonstration 670
634 system. B.W. and M.L. performed the experiments and 671
635 simulations with the help of C.Z. and T.L. 672

636 References 673

637 References 674

638 [1] J. G. Anasis, M. A. K. Khalil, C. Butenhoff, R. Bluffstone, G. G. 681
639 Lendaris, Optimal energy resource mix for the US and China 682
640 to meet emissions pledges, *Applied Energy* 238 (2019) 92–100. 683
641 [2] X. Shi, Setting effective mandatory energy efficiency standards 684
642 and labelling regulations: A review of best practices in the Asia 685
643 Pacific region, *Applied Energy* 133 (2014) 135–143. 686
644 [3] H. He, C. J. Reynolds, L. Li, J. Boland, Assessing net energy 687
645 consumption of Australian economy from 2004–05 to 2014–15: 688
646 Environmentally-extended input-output analysis, structural de- 689
647 composition analysis, and linkage analysis, *Applied Energy* 240 690
648 (2019) 766–777. 691
649 [4] M. Ringel, B. Schломann, M. Krail, C. Rohde, Towards a green 692
650 economy in Germany? the role of energy efficiency policies, 693
651 *Applied Energy* 179 (2016) 1293–1303. 694
652 [5] F. Goekgoez, M. T. Guevercin, Energy security and renewable 695
653 energy efficiency in EU, *Renewable and Sustainable Energy Re- 696
654 views* 96 (2018) 226–239. 697
655 [6] J. Malinauskaitė, H. Jouhara, M. Milani, L. Montorsi, M. Ven- 698
656 turelli, Energy efficiency in industry: EU and national policies 699
657 in Italy and the UK, *Energy* 172 (2019) 255–269. 700

[7] Q. Zhang, X. Zhao, H. Lu, T. Ni, Y. Li, Waste energy recov-
ery and energy efficiency improvement in Chinas iron and steel
industry, *Applied Energy* 191 (2017) 502–520.

[8] F. Buehler, A. Guminski, A. Gruber, T. Nguyen, S. von Roon,
B. Elmegaard, Evaluation of energy saving potentials, costs and
uncertainties in the chemical industry in Germany, *Applied En-
ergy* 228 (2018) 2037–2049.

[9] M. Li, W. Tao, Review of methodologies and polices for eval-
uation of energy efficiency in high energy-consuming industry,
Applied Energy 187 (2017) 203–215.

[10] C. Forman, I. K. Muritala, R. Pardemann, B. Meyer, Estimat-
ing the global waste heat potential, *Renewable and Sustainable
Energy Reviews* 57 (2016) 1568–1579.

[11] M. Papapetrou, G. Kosmadakis, A. Cipollina, U. L. Commare,
G. Micale, Industrial waste heat: Estimation of the technically
available resource in the EU per industrial sector, temperature
level and country, *Applied Thermal Engineering* 138 (2018) 207–
216.

[12] H. Jouhara, N. Khordeghah, S. Almahmoud, B. Delpech,
A. Chauhan, S. A. Tassou, Waste heat recovery technologies
and applications, *Thermal Science and Engineering Progress* 6
(2018) 268–289.

[13] H. Jouhara, A. G. Olabi, Editorial: Industrial waste heat recov-
ery, *Energy* 160 (2018) 1–2.

[14] M. J. S. Zuberi, F. Bless, J. Chambers, C. Arpagaus, S. S.
Bertsch, M. K. Patel, Excess heat recovery: An invisible en-
ergy resource for the Swiss industry sector, *Applied Energy* 228
(2018) 390–408.

[15] G. Oluleye, M. Jobson, R. Smith, S. J. Perry, Evaluating the po-
tential of process sites for waste heat recovery, *Applied Energy*
161 (2018) 627–646.

[16] X. Wang, M. Jin, W. Feng, G. Shu, H. Tian, Y. Liang, Cas-
cade energy optimization for waste heat recovery in distributed
energy systems, *Applied Energy* 230 (2018) 679–695.

[17] Z. Varga, B. Palotai, Comparison of low temperature waste heat
recovery methods, *Energy* 137 (2017) 1286–1292.

[18] R. A. et al., Waste Heat Recovery in the EU industry and pro-
posed new technologies, *Energy Procedia* 161 (2019) 489–496.

[19] Z. Y. Xu, R. Z. Wang, C. Yang, Perspectives for low-temperature
waste heat recovery, *Energy* in press (2019).

[20] E. Woolley, Y. Luo, A. Simeone, Industrial waste heat recovery:
A systematic approach, *Sustainable Energy Technologies and
Assessments* 29 (2018) 50–59.

- 701 [21] I. Ortega-Fernández, J. Rodríguez-Aseguinolaza, Thermal en-744
702 ergy storage for waste heat recovery in the steelworks: The case-745
703 study of the REslag project, *Applied Energy* 237 (2019) 708–746
704 719. 747
- 705 [22] A. Moldgy, R. Parameshwaran, Study on thermal energy storage-748
706 properties of organic phase change material for waste heat re-749
707 covery applications, *Materials Today* 5 (8) (2018) 16840–16848.750
- 708 [23] D. Li, J. Wang, Y. Ding, H. Yao, Y. Huang, Dynamic thermal-751
709 management for industrial waste heat recovery based on phase-752
710 change material thermal storage, *Applied Energy* 236 (2019)753
711 1168–1182. 754
- 712 [24] P. Royo, L. Acevedo, V. J. Ferreira, T. García-Armingol, A. M.755
713 López-Sabirón, G. Ferreira, High-temperature PCM-based ther-756
714 mal energy storage for industrial furnaces installed in energy-757
715 intensive industries, *Energy* 173 (2019) 1030–1040. 758
- 716 [25] K. Merlin, J. Soto, D. Delaunay, L. Traonvouez, Industrial waste-759
717 heat recovery using an enhanced conductivity latent heat ther-760
718 mal energy storage, *Applied Energy* 183 (2016) 491–503. 761
- 719 [26] R. M. Saeed, J. P. Schlegel, R. Sawaft, V. Kalra, Plate type-762
720 heat exchanger for thermal energy storage and load shifting us-763
721 ing phase change material, *Energy Conversion and Management*764
722 181 (2019) 120–132. 765
- 723 [27] A. Khouya, A. Draoui, Computational drying model for solar-766
724 kiln with latent heat energy storage: Case studies of thermal-767
725 application, *Renewable Energy* 130 (2019) 796–813. 768
- 726 [28] X. Yu, Z. Li, Y. Lu, R. Huang, A. P. Roskilly, Investigation-769
727 of organic rankine cycle integrated with double latent thermal-770
728 energy storage for engine waste heat recovery, *Energy* 170 (2019)771
729 1098–1112. 772
- 730 [29] C. Ji, Z. Qin, S. Dubey, F. H. Choo, F. Duan, Three-dimensional-773
731 transient numerical study on latent heat thermal storage for-774
732 waste heat recovery from a low temperature gas flow, *Applied*775
733 *Energy* 205 (2017) 1–12. 776
- 734 [30] C. Zauner, R. Hofmann, B. Windholz, Increasing Energy Effi-777
735 ciency in Pulp and Paper Production by Employing a New Type-778
736 of Latent Heat Storage, *Computer Aided Chemical Engineering*779
737 43 (2018) 1359–1364. 780
- 738 [31] Heat pump market data. 781
739 URL <https://www.chpa.org/market-data/> 782
- 740 [32] European Heat Pump Market and Statistics Report. 783
- 741 [33] S. Wolf, Chancen und Risiken für den Einsatz von Indus-784
742 triewärmepumpen in Deutschland (13. Oktober 2014). 785
- 743 [34] C. Arpagaus (Ed.), *Hochtemperatur-Wärmepumpen*-786
744 Marktübersicht, Stand der Technik und Anwendungspotenziale,
1st Edition, VDE Verlag, 2018.
- [35] A. A. Pardiñas, M. J. Alonso, R. Diz, K. H. Kvalsvik,
J. Fernández-Seara, State-of-the-art for the use of phase-change
materials in tanks coupled with heat pumps, *Energy and Build-
ings* 140 (2017) 28–41.
- [36] A. Real, V. García, L. Domenech, J. Renau, N. Montés,
F. Sánchez, Improvement of a heat pump based HVAC sys-
tem with PCM thermal storage for cold accumulation and heat
dissipation, *Energy and Buildings* 83 (2014) 108–116.
- [37] P. Moreno, A. Castell, C. Solé, G. Zsembinski, L. F. Cabeza,
PCM thermal energy storage tanks in heat pump system for
space cooling, *Energy and Buildings* 82 (2014) 399–405.
- [38] D. Qv, L. Ni, Y. Yao, W. Hu, Reliability verification of a so-
lar-air source heat pump system with PCM energy storage in
operating strategy transition, *Renewable Energy* 84 (2015) 46–
55.
- [39] D. Zou, X. Ma, X. Liu, P. Zheng, B. Cai, J. Huang, J. Guo,
M. Liu, Experimental research of an air-source heat pump water
heater using water-PCM for heat storage, *Applied Energy* 206
(2017) 784–792.
- [40] J. Wu, Z. Yang, Q. Wu, Y. Zhu, Transient behavior and dynamic
performance of cascade heat pump water heater with thermal
storage system, *Applied Energy* 91 (2012) 187–196.
- [41] L. J. R. Nunes, J. C. O. Matias, J. P. S. Catalao, Energy recov-
ery from cork industrial waste: Production and characterisation
of cork pellets, *Fuel* 113 (2013) 24–30.
- [42] C. Abeykoon, A. L. Kelly, J. Vera-Sorroche, E. C. Brown, P. D.
Coates, J. Deng, K. Li, E. Harkin-Jones, M. Price, Process ef-
ficiency in polymer extrusion: Correlation between the energy
demand and melt thermal stability, *Applied Energy* 135 (2014)
560–571.
- [43] C. Abeykoon, A. L. Kelly, E. C. Brown, J. Vera-Sorroche, P. D.
Coates, E. Harkin-Jones, J. Deng, K. Li, M. Price, Investigation
of the process energy demand in polymer extrusion: A brief
review and an experimental study, *Applied Energy* 136 (2014)
726–737.
- [44] J. Vera-Sorroche, A. Kelly, E. Brown, P. Coates, N. Karnachi,
E. Harkin-Jones, K. Li, J. Deng, Thermal optimisation of poly-
mer extrusion using in-process monitoring techniques, *Applied
Thermal Engineering* 53 (2) (2013) 405–413.
- [45] H. F. Giles, J. R. Wagner, E. M. Mount, *Extrusion: The Defini-
tive Processing Guide and Handbook*, William Andrew, 2005.

- 787 [46] O. Kast, C. Bonton, Calculation of the Drying Process of Hy-
788 groskopic Polymer Pellets in Desiccant Dryers and With Ad-
789 ditional Microwave Application, AIP Conference Proceedings
790 2065 (2019) 030037.
- 791 [47] C. Zauner, F. Hengstberger, M. Etzel, D. Lager, R. Hofmann,
792 H. Walter, Experimental characterization and simulation of a
793 fin-tube latent heat storage using high density polyethylene as
794 PCM, Applied Energy 179 (2016) 237–246.
- 795 [48] C. Zauner, F. Hengstberger, B. Mörzinger, R. Hofmann, H. Wal-
796 ter, Experimental characterization and simulation of a hybrid
797 sensible latent heat storage, Applied Energy 189 (2017) 506–
798 519.
- 799 [49] Rubitherm Technologies Gmbh, Berlin, Germany,
800 <https://www.rubitherm.eu/en/>.
- 801 [50] C. Zauner, Endbericht StoreITup! (2014), Tech. rep., AIT Aus-
802 trian Institute of Technology.
- 803 [51] H. M. Weingrill, K. Resch-Fauster, C. Zauner, Applicability of
804 Polymeric Materials as Phase Change Materials, Macromolecu-
805 lar Materials and Engineering 303 (2018) 1800355.
- 806 [52] H. M. Weingrill, K. Resch-Fauster, T. Lucyshyn, C. Zauner,
807 High-density polyethylene as phase-change material: Long-term
808 stability and aging, Polymer Testing 76 (2019) 433–442.
- 809 [53] C. Zauner, F. Hengstberger, M. Etzel, D. Lager, R. Hofmann,
810 H. Walter, Durability of a fin-tube latent heat storage using
811 high density polyethylene as PCM, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci.
812 Eng. 251 (2017) 012123.

Die Abbildungen der Extrusionsanlagen enthalten modifizierte svg-Icons von flaticon.com (Kühler) und Brendan Rockey (Extruder).

4.1.1.2. Publikationen und akademische Arbeiten

Journal- und Konferenzbeiträge:

C. Zauner, R. Hofmann, B. Windholz

Increasing Energy Efficiency in Pulp and Paper Production by Employing a New Type of Latent Heat Storage

Computer Aided Chemical Engineering 43 (2018), 1359-1364

C. Zauner, F. Hengstberger, M. Etzel, D. Lager, R. Hofmann, H. Walter

Durability of a fin-tube latent heat storage using high density polyethylene as PCM

Talk and Proceedings: International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies (2017), Riga, Latvia, Proceedings published in Journal of Physics: Conference Series

C. Zauner, F. Hengstberger, B. Mörzinger, R. Hofmann, H. Walter

Experimental characterization and simulation of a hybrid sensible-latent heat storage

Applied Energy (2017), Volume 189, 506 - 519

F. Hengstberger and C. Zauner

Materials Selection for Thermal Energy Storage: How to Increase the Thermal Conductivity of Phase Change Materials

Talk and Proceedings: SEEP Conference (2017), Bled, Slovenia

C. Zauner

Development of a PCM storage based on polyethylene

Talk, International Energy Agency ECES Annex 30 (2016), Tokyo, Japan

C. Zauner, F. Hengstberger, M. Etzel, D. Lager, R. Hofmann, H. Walter

Experimental characterization and simulation of a fin-tube latent heat storage using high density polyethylene as PCM

Applied Energy (2016), Volume 179, 237 - 246

B. Schmalisch, B. Weber, A. Harrison, R. Gradinger, C. Zauner

Additives Fertigen mit der MPA Technologie am Beispiel eines Druckgusswerkzeuges

Talk, Ranshofener Leichtmetalltage (2016), Bad Ischl, Austria

A. Harrison, R. Gradinger, B. Schmalisch, B. Weber, C. Zauner

Additives Fertigen mit der MPA Technologie am Beispiel eines Druckgusswerkzeuges

Giesserei-Praxis 3/2017, 86 - 92

T. Barz, C. Zauner, D. Lager, D. Lopez Cardenas, F. Hengstberger, M. Bournazou, K. Marx
Experimental Analysis and Numerical Modeling of a Shell and Tube Heat Storage Unit with Phase Change Materials Industrial and Engineering Chemistry Research (2016), Volume 55(29), 8154 - 8164

C. Zauner

PCM-Speicher für industrielle Anwendungen

Talk and Proceedings: IEA Forum – Kompakte thermische Energiespeicher, Wirtschaftskammer Österreich, 2014, Wien

C. Zauner, J. Kowalczyk, M. Schnürch

Entwicklung von neuen organischen Phasenwechselmaterialien und deren Anwendung in Latentwärmespeichern zur Wärmerückgewinnung in industriellen Prozessen

Talk: IEA Forum – Thermische Speicher, Wirtschaftskammer Österreich, 2019, Wien

H. Weingrill, W. Hohenauer, K. Resch-Fauster, C. Zauner.

Analyzing Thermal Conductivity of Polyethylene-Based Compounds Filled with Copper

Macromolecular Materials and Engineering (2019): 1800644

H. Weingrill, K. Resch-Fauster, C. Zauner

Applicability of Polymeric Materials as Phase Change Materials

Macromolecular Materials and Engineering 303.11 (2018): 1800355

H. Weingrill, K. Resch-Fauster, T. Lucyshyn, C. Zauner

High-density polyethylene as phase-change material: Long-term stability and aging

Polymer Testing 76 (2019): 433-442

H. Weingrill, K. Resch-Fauster, T. Lucyshyn, C. Zauner

Thermally conductive high-density polyethylene as novel phase-change material: application-relevant long-term stability

Journal of Applied Polymer Science, in press

H. Weingrill, W. Hohenauer, K. Resch-Fauster, L. Gnegeler, C. Zauner

Thermal conductivity of polymeric materials – finding the appropriate measurement system

3rd International Conference on thermophysical and mechanical Properties of Advanced Materials, Izmir, TR, 2016

H. Weingrill, K. Resch-Fauster, T. Lucyshyn, C. Zauner

Applicability of polymeric materials for heat storages

The III Energy & Materials Research Conference, Lisbon, PT, 2017

H. Weingrill, K. Resch-Fauster, T. Lucyshyn, C. Zauner

Polymers as phase-change materials and application-oriented stability investigations

Danube Vltava Sava Polymer Meeting, Vienna, AT, 2017

H. Weingrill, K. Resch-Fauster, T. Lucyshyn, C. Zauner

Selection and stability of polymeric phase change materials

2nd International Conference on Renewable Energy and Resources, Boston, US, 2018

Diplomarbeiten und Dissertationen:

Diplomarbeit Bente Rathmann – **Entwicklung eines neuartigen Latentwärmespeichers mit organischen Speichermedien zur industriellen Wärmerückgewinnung im Aluminiumdruckguss**, durchgeführt am AIT (Betreuung AIT Christoph Zauner, Betreuung TU Wien Rene Hofmann)

Diplomarbeit Dominik Seliger – **Modellgestützte Entwicklung thermischer Speicherkonzepte zur Optimierung der Energieeffizienz in der Kunststoffextrusion**, durchgeführt am AIT (Betreuung AIT Christoph Zauner, Tilman Barz, Betreuung TU Wien Rene Hofmann)

Diplomarbeit Diplomarbeit Daniel Angerer - **Modellgestützte Entwicklung thermischer Speicherkonzepte zur Optimierung der Energieeffizienz in der industriellen Prozesstechnik**, durchgeführt am AIT (Betreuung AIT Christoph Zauner, Betreuung TU Wien Rene Hofmann)

Diplomarbeit Benjamin Mörzinger – **Planung, Aufbau und Untersuchung eines Latentwärmespeichers auf Basis von makroverkapselten Polymeren**, durchgeführt am AIT (Betreuung AIT Christoph Zauner, Betreuung TU Wien Heimo Walter)

Diplomarbeit Mark Etzel – **Untersuchung von Wärmespeichern mit Phasenwechselmaterialien**, durchgeführt am AIT (Betreuung AIT Christoph Zauner, Betreuung TU Wien Heimo Walter)

Masterarbeit Martin Baader – **Entwicklung von Messverfahren zur Bestimmung des State-of-Charge bei latenten Energiespeichern**, durchgeführt an der FH OÖ (Betreuung FH Wels Gerald Steinmaurer)

Dissertation Helena Weingrill - **Polymeric phase-change materials: applicability, functionalization and long-term stability**, durchgeführt an der Montanuniversität Leoben (Betreuung Montanuniversität Leoben Katharina Resch-Fauster)

Dissertation Christoph Zauner - **Development of Latent Heat Storages using Polymers as Phase Change Material for Applications in Industry, Solar Energy and Heat Networks**, durchgeführt am AIT (Betreuung TU Wien Rene Hofmann)

5. Kontaktdaten

Projektleiter Mag. Dr. Christoph Zauner

AIT Austrian Institute of Technology

Giefinggasse 2

1210 Wien

christoph.zauner@ait.ac.at

+43 (0) 6648251146

<https://www.ait.ac.at/themen/sustainable-thermal-energy-systems/projects/storeitup-if/>

https://www.ait.ac.at/ueber-das-ait/researcher-profiles/?tx_aitprofile_pi1%5Bname%5D=Zauner-Christoph

Montanuniversität Leoben

Assoz. Prof. DI. Dr. Katharina Resch-Fauster

DI Dr. Helena Weingrill

LKR Leichtmetallkompetenzzentrum Ranshofen

DI Rudolf Gradinger

DI Dr. Angela Harrison

FH Technikum Wels (Forschungsgruppe ASIC)

DI Dr. Gerald Steinmaurer

Ctb Automatisierungstechnik

DI Georg Stoisser-Gigacher

Geba Kunststoffcompounds GmbH

CEO Liane Gnegeler

Thomas Leitgeb

Bettina Haves

Technosert electronic GmbH

DI Lukas Schlossinger