

e!MISSION.at

Publizierbarer Endbericht



Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

23/01/2015

Projekttitle: StoreITup!

Projektnummer: 838669

Dieses Projekt wurde aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms „Energy Mission Austria“ durchgeführt.

e!MISSION.at - 1. Ausschreibung

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

Ausschreibung	1. Ausschreibung e!MISSION.at
Projektstart	01.04.2013
Projektende	30.06.2014
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	15 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	AIT – Austrian Institute of Technology
AnsprechpartnerIn	Mag. Christoph Zauner
Postadresse	Giefinggasse 2, 1210 Wien
Telefon	0664 8251146
Fax	
E-mail	Christoph.zauner@ait.ac.at
Website	http://www.ait.ac.at/research-services/research-services-energy/solarthermie/industrielle-forschung-solarthermie/

StoreITup!

Neuartige thermische Speicher bis 300°C

Projektleiter:

Christoph Zauner (AIT)

Projektmitarbeiter:

AIT: Florian Hengstberger, Daniel Lager, Wolfgang Hohenauer, Mark Etzel, Benjamin Mörzinger, Mirza Popovac, Peter Petschovitsch, Annemarie Schneeberger, Thomas Fleckl, Michael Monsberger

AIT-LKR: Gradinger Rudolf, Reiter Josef

MUL: Katharina Resch, Katharina Bruckmoser, Andrea Klein, Stephan Laske, Hannelore Mattausch, Bernd Haar, Gerald Pinter

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis.....	4
2	Technisch-wissenschaftliche Beschreibung der Arbeit.....	5
2.1	Projektabriss	5
2.2	Inhalte und Ergebnisse des Projektes.....	6
2.2.1	Ausgangssituation/Motivation und Zielsetzung des Projektes	6
2.2.2	Durchgeführte Arbeiten im Rahmen des Projektes inkl. Methodik und Ergebnisse.....	7
2.3	Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen	15
3	Verwertung.....	18
4	Ausblick.....	20
5	Kontaktdaten	21

2 Technisch-wissenschaftliche Beschreibung der Arbeit

2.1 Projektabriss

Kurzbeschreibung des Projektes - Ausgangssituation, Zielsetzung, Methodik, Arbeiten, Ergebnisse, Schlussfolgerungen, Ausblick:

Da etwa die Hälfte des EU-Gesamtenergieaufkommens in Form von thermischer Energie benötigt wird, sind thermische Speicher von besonderer Bedeutung, da diese eine zeitliche Entkoppelung von Wärmeangebot und –nachfrage erlauben. Dadurch wird eine erhöhte Nutzung von diskontinuierlicher Abwärme als auch eine vermehrte Einbindung von zeitlich fluktuierender Solarenergie ermöglicht. Momentan sind zwar bereits einige Speichertechnologien in verschiedenen Entwicklungsstadien verfügbar, diese haben jedoch unterschiedliche Nachteile hinsichtlich Kosten, Langzeitbeständigkeit, oder Umweltverträglichkeit. Vor allem im Bereich über 100°C erfordert das Standardmedium Wasser/Dampf erhöhten technischen und damit ökonomischen Aufwand, weshalb gerade hier Technologiesprünge notwendig sind. Latentwärmespeicher sind sensiblen Speichertechnologien überlegen, da diese, aufgrund des physikalischen Funktionsprinzips, genau das bewerkstelligen: während des Phasenüberganges bleibt die Temperatur des Speichers nahezu konstant und trotzdem sind hohe Leistungen möglich, da die Phasenwechselenthalpien sehr hoch sind.

Die bisher untersuchten Latentwärmespeicher im angestrebten Temperaturbereich (mind. 50 bis 300°C) basieren hauptsächlich auf kleineren organischen Molekülen oder anorganischen Salzen, wobei einige davon das Demonstrationsstadium erreicht haben.

In diesem Projekt wurden nun eine praktisch völlig neue Klasse an Phasenwechselmaterialien (PCMs) untersucht: In diesem Projekt wurden 70 Polymere gescreent und thermophysikalisch vermessen. Die Haupte Erkenntnis ist, dass es mindestens 6 potentiell interessante Polymer-Klassen gibt, die hohes technisches und ökonomisches Potential für Polymer-PCM-Speicher haben. Alle Stoffe sind Massenkunststoffe und somit gut verfügbar (was bei vielen herkömmlichen PCMs nicht der Fall ist).

Kritisch für den wirtschaftlichen Erfolg neuartiger Polymer-PCM-Speicher sind zudem leistungsfähige Wärmetauscherkonzepte. Es wurden daher verschiedenste Ansätze verfolgt und schließlich 5 vom Prinzip unterschiedliche Konzepte identifiziert und teilweise in Vorversuchen charakterisiert.

Diese Vielfalt an Polymeren erlaubt letztendlich den Einsatz von Polymer-PCM-Speichern in vielseitigen Anwendungsgebieten. 4 große Branchen konnten identifiziert werden: Prozesswärme, Solarthermie, Wärmenetze und Kraftwerke (insb. Power-to-Heat).

Ein Ziel der Sondierung war der Aufbau eines kleinen Polymer-PCM-Speichers im Labormaßstab, um den „proof-of-concept“ zu erbringen, was letztendlich auch erreicht wurde. Dadurch konnten insb. die

wesentlichen nächsten notwendigen Entwicklungsschritte abgeleitet werden: PCM (weiter)entwicklung, Entwicklung von massenfertigbaren und leistungsfähigen Wärmeübertragern, Finden von ersten konkreten Anwendungsfällen, Erstellung von Einbindungskonzepten inkl. entsprechender MSR-Technik.

Ein weiteres Ziel war das Finden von geeigneten Projektpartnern, mit denen diese nächsten Entwicklungsschritte gegangen werden können. Auf der Seite der PCM-Entwicklung konnten die Fa. Geba und mehrere Institute der Montanuni Leoben gewonnen werden. Für die Wärmetauscher stellt Aluminium einen idealen Werkstoff dar. Das LKR Ranshofen sowie die Fa. Gruber und Kaja / HTI sind auf diesem Gebiet Experten. Für die MSR sind das ASIC sowie die Fa. Technosert optimale Partner, da diese einerseits bereits Forschungsprojekte auf diesem Themengebiet durchgeführt haben und andererseits jahrelange Industrieerfahrung mitbringen.

Im September 2014 wurde mit obigen Partnern ein Folgeprojekt beantragt und glücklicherweise auch genehmigt. Die Arbeiten werden im Rahmen von StoreITup-IF ab dem Frühjahr 2015 weiterverfolgt mit dem Ziel erste Speicher in konkreten Anwendungen zu testen.

2.2 Inhalte und Ergebnisse des Projektes

2.2.1 Ausgangssituation/Motivation und Zielsetzung des Projektes

Um die 2020-Ziele der EU hinsichtlich Energieeffizienz als auch Steigerung des Anteils von Erneuerbaren zu erreichen, kommt Energiespeichern eine zentrale Rolle zu. Da etwa die Hälfte des EU-Gesamtenergieaufkommens in Form von thermischer Energie benötigt wird, sind thermische Speicher von besonderer Bedeutung. Mit dieser Technologie lässt sich eine zeitliche Entkoppelung von Wärmeangebot und –nachfrage erreichen, wodurch eine erhöhte Nutzung von diskontinuierlicher Abwärme als auch eine vermehrte Einbindung von zeitlich fluktuierender Solarenergie möglich wird.

Momentan sind zwar bereits einige Speichertechnologien in verschiedenen Entwicklungsstadien verfügbar, diese haben jedoch unterschiedliche Nachteile hinsichtlich Kosten, Langzeitbeständigkeit, oder Umweltverträglichkeit. Vor allem im Bereich über 100°C erfordert das Standardmedium Wasser/Dampf erhöhten technischen und damit ökonomischen Aufwand, weshalb gerade hier Technologiesprünge notwendig sind.

Die meisten industriellen Prozesse als auch (urbanen) Wärmenetze benötigen Energie auf einem zeitlich konstanten Temperaturniveau. Hier sind Latentwärmespeicher den gängigeren sensiblen Speichertechnologien überlegen, da diese, aufgrund des physikalischen Funktionsprinzips, genau das bewerkstelligen: während des Phasenüberganges bleibt die Temperatur des Speichers nahezu konstant und trotzdem sind hohe Leistungen möglich, da die Phasenwechselenthalpien sehr hoch sind.

Die bisher untersuchten Latentwärmespeicher im angestrebten Temperaturbereich (mind. 50 bis 300°C) basieren hauptsächlich auf kleineren organischen Molekülen oder anorganischen Salzen, wobei einige davon das Demonstrationsstadium erreicht haben.

In diesem Projekt wurde nun eine praktisch völlig neue Klasse an Phasenwechselmaterialien (PCMs) untersucht: Polymere. Obgleich Polymere in nahezu allen technischen Anwendungen vielseitigen Eingang gefunden haben, wurde diese Materialklasse für PCM-Speicher über 80°C überhaupt nicht

beachtet (bis 80°C gibt es ebenfalls nur wenige Arbeiten). Es gibt jedoch eine Vielzahl an Polymeren, welche im angestrebten Temperaturbereich Phasenübergänge mit durchaus mit Salzen vergleichbaren Enthalpien aufweisen. Zusätzlich sind Kunststoffe in riesigen Mengen und großtechnischer Qualität zu günstigen Preisen erhältlich. Speziell wurden in diesem Projekt auch recycelte Polymere untersucht werden, wodurch sich ein besonderer zusätzlicher ökonomischer und ökologischer Nutzen ergeben kann, da manche recycelte Polymere sehr preisgünstig sind und durch die Verwendung in PCM-Polymer-Speichern länger als Produkt in Verwendung bleiben können.

Ziel des Projektes war es daher zu untersuchen, inwieweit Polymere als PCM-Materialien für Polymer-PCM-Speicher geeignet sind und wo die wesentlichen technischen und ökonomischen Herausforderungen dabei liegen. Da von vornherein nicht klar ist, welche Polymere und Wärmeübertragerkonzepte im Endeffekt am besten geeignet sind, wurde in dieser Sondierung bewusst auf Industriepartner verzichtet, um sich auf keine spezielle Produktklasse festlegen zu müssen. Ein weiteres wesentliches Ziel des Projektes war daher, geeignete Partner aus Kunststoffindustrie und Anlagen/Speicherbau zu identifizieren, um gemeinsam in Folgeprojekten an einer großtechnischen Umsetzung zu arbeiten.

Ziel war ebenfalls, dass am Ende des Projekts klar ist, ob Polymere tatsächlich eine neue, geeignete Stoffklasse für Latentwärmespeicher darstellen, und welche weiteren Schritte und österreichischen Industriepartner aus der Kunststoffbranche und dem Anlagen/Speicherbau notwendig sind, um marktfähige Produkte im Rahmen von Folgeprojekten erfolgreich zu entwickeln.

2.2.2 Durchgeführte Arbeiten im Rahmen des Projektes inkl. Methodik und Ergebnisse

AP1: Projektmanagement, Disseminierung

Es wurden mehrere Projekttreffen abwechselnd beim Antragsteller AIT, als auch beim Projektpartner MUL abgehalten.

Neben der reinen Projektplanung, war besonders die Diskussion und Abstimmung der Arbeiten im PCM-Arbeitspaket notwendig. Insb. da bestimmte Charakterisierungsmethoden (insb. DSC-Messung) erst erarbeitet bzw. adaptiert werden mussten und so entsprechende Messroutinen ausgetauscht werden mussten.

Die im Projekt resultierenden Disseminierungsmaßnahmen werden im entsprechenden Abschnitt „Verwertung“ unten beschrieben.

Neben den dort aufgelisteten Beiträgen, fanden auch Disseminierungsarbeiten in den IEA SHC Tasks 39 – Polymeric Solar Systems, IEA SHC Task 49 - Solar Process Heat (inkl. Buchbeitrag) und IEA 42/29 statt.

Die Erfahrungen dieses Projekts hinsichtlich Speichercharakterisierung fanden zudem natürlichen Eingang in das Angebot der Projektpartner im Bereich der Auftragsforschung. Insbesondere gilt das für die thermophysikalische Materialcharakterisierung und die Speichervermessungen.

AP2: Polymere für PCM-Speicher

Zu Beginn des Projekts wurde eine erneute Literaturrecherche durchgeführt und dabei folgende Arbeiten identifiziert, auf die im Projekt aufgebaut wurde:

- „Effiziente Wärmespeicher für den Temperaturbereich 100 – 150 °C“ (ZAE Bayern und BTD Behältertechnik¹) PEX als formstabilem Polymer-PCM wurden untersucht und Speicher auf TRL 4 gebaut und vermessen²
- „ENFoVerM“ (ZAE Bayern): Neuartige, formstabile PCMs und PCM-Verbundmaterialien mit verbesserter Wärmeleitfähigkeit werden entwickelt³
- Schließlich wurden noch, auf expliziten Jury-Hinweis in der Beurteilung des Sondierungsprojekts hin, Projekte am ILK Dresden gefunden, die sich unter anderem mit makroverkapseltem Polyethylen beschäftigen⁴.

Etwa 70 verschiedene Polymere und Compounds⁵ von 15 Herstellern wurden von den Projektpartnern organisiert und thermophysikalisch (Schmelz- und Kristallisationsbereich, Unterkühlung, Schmelz- und Erstarrungsenthalpie, Wärmeleitfähigkeit) charakterisiert. Zudem wurden Heizplattenversuche mit Kleinmengen (bis zu einigen Kilogramm) durchgeführt, um das Schmelzverhalten zu analysieren. Die vielversprechendsten Polymere wurden Zyklentests mit Differential Scanning Calorimetry (DSC) unterzogen, um die Langzeitstabilität unter verschiedenen Umweltbedingungen zu testen.

Abbildung 3 zeigt zusammenfassend eine Beurteilung einer repräsentativen Auswahl auf Basis der ökonomischen, thermophysikalischen und rheologischen Eigenschaften der Polymere.

Die Hauptidee ist, dass es mindestens 6 potentiell interessante Polymer-Klassen gibt, die hohes technisches und ökonomisches Potential für Polymer-PCM-Speicher haben. Alle Stoffe sind Massenkunststoffe und somit gut verfügbar (was bei vielen herkömmlichen PCMs nicht der Fall ist):

- **PE:** Schmelzpunkte zwischen 80 und 130 °C einstellbar⁶; hohe Enthalpie
- **POM:** Schmelzpunkte um 170 °C; sehr hohe Enthalpie⁷
- **PA:** Schmelzpunkt zwischen 210 und 280 °C einstellbar; gute Enthalpie
- **Rezyklate (Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. links):** Von allen potentiell geeigneten Polymeren wurden auch Regranulate und sogenannte Mahlgüter untersucht, da diese mitunter wesentlich günstiger als Neuware sind. Obwohl alle Hersteller skeptisch bezüglich der Zyklenstabilität und Enthalpie waren, konnte gezeigt werden, dass bestimmte Rezyklate ein

¹ http://www.umwelttechnik-fe.de/de/download/BUT024_Abschlussbericht.pdf

² Mit einem Autor des Projekts wurde Kontakt aufgenommen und Erfahrungen ausgetauscht. Nach seinen Aussagen hält er Polymer-PCM-Speicher für ökonomisch und technisch realisierbar, es gäbe jedoch noch entsprechenden F&E-Bedarf. Bei positiver Projektbewilligung soll enger zusammengearbeitet werden.

³ Auch hier wurde mit den zuständigen Personen ein beiderseitiger Erfahrungsaustausch vereinbart.

⁴ Mit dem ILK Dresden wurde Kontakt aufgenommen und auf Basis einer wissenschaftlichen Kooperation begonnen Speicher-Konzepte für makroverkapseltes Polyethylen zu entwickeln. Die Finanzierung der notwendigen Arbeiten am AIT soll auch durch dieses Forschungsvorhaben erfolgen.

⁵ Ein wesentlicher Vorteil von Polymeren ist, dass diese (industriell) mit unterschiedlichen Füllstoffen und Additiven gemischt werden können, um die physikalischen Eigenschaften zu modifizieren. Von speziellem Interesse ist die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit (siehe unten), weshalb solche Compounds gesucht wurden.

⁶ Wie bei allen Makromolekülen, die in realen Proben mit unterschiedlicher Kettenlänge vorkommen, beobachtet man einen mehr oder minder ausgedehnten Schmelzbereich. Der Schmelzpeak an sich kann ebenfalls über die Kettenlänge eingestellt werden.

⁷ Das Homopolymer hätte theoretisch 340 J/g bei 100 % Kristallinität. Diese Werte wurden mit unseren Proben jedoch nicht erreicht, da die idealen Sorten noch nicht untersucht werden konnten.

wesentlich besseres Preis-Leistungs-Verhältnis haben (eine Verbesserung um einen Faktor von 10 ist realistisch).

- **Formstabile Polymere** (Abbildung 1 rechts) wie UHMW-PE, PEX: Diese Materialien behalten beim Schmelzen ihre geometrische Form (z.B. Rohr, Kugel, Stab, Platte, Folie, Granulat), die Schmelzenthalpie wird aber dennoch freigesetzt⁸. Diese PCMs erlauben extrem kostengünstige Speicherbauarten (siehe unten).
- **Compounds:** Polymere haben gegenüber anderen Materialien den Vorteil, dass es jahrzehntelange Erfahrung im Beimischen von verschiedenen Füllstoffen und Additiven gibt. Dadurch können elektrische, thermische, magnetische, optische, rheologische und Beständigkeitseigenschaften über viele Größenordnungen geändert werden. Auch dadurch werden ganz neue Speicherkonzepte möglich.

In dieser Sondierung wurden bereits einige marktverfügbare Polymercompounds untersucht und deren Eigenschaften charakterisiert. Wesentliche Erkenntnis war, dass einerseits durch geeignete Zusatzstoffe gleichzeitig die im Speicher unerwünschte Unterkühlung reduziert und gleichzeitig auch die Wärmeleitfähigkeit erhöht werden konnte (Abbildung 4).

Schließlich wurden noch Zyklentests in der Labor-DSC durchgeführt, um erste Hinweise auf das Langzeitverhalten und die Dauergebrauchsbeständigkeit zu erhalten. Resultat war, dass HDPE mindestens 3000 Zyklen⁹, POM-Copolymer mindestens 200 Zyklen in Inert-Atmosphäre und PA46 und PA6 mindestens 130 Zyklen in Inert-Atmosphäre stand halten (Abbildung 2). Bei einem Be- und Entlade-Zyklus am Tag bedeutet das schon jetzt, dass HDPE-PCM-Speicher eine potentielle Lebensdauer von mindestens 10 Jahren haben.



Abbildung 1: Links: Probenkörper aus PA6 Mahlgut, bei dem die Schmelzbarkeit unter drucklosen Bedingungen (wie in einem PCM-Speicher gewünscht) getestet wurde. Rechts: Formstabilen PEX. Bei Erhitzen des in Rohrform verfügbaren Materials bleibt es in seiner ursprünglichen Form. Es kann zwar deformiert werden, ist aber elastisch, sodass es seine Ursprungsform wieder annimmt.

⁸ Bei UHMW-PE sind die Polymerketten so lang, dass sie quasi ineinander verhakt sind und so beim Schmelzen nicht auseinanderfließen können. Bei PEX sind die Ketten durch kovalente Bindungen quervernetzt.

⁹ Der Versuch läuft beim Zeitpunkt der Einreichung noch, um die maximale Zyklenanzahl zu ermitteln.

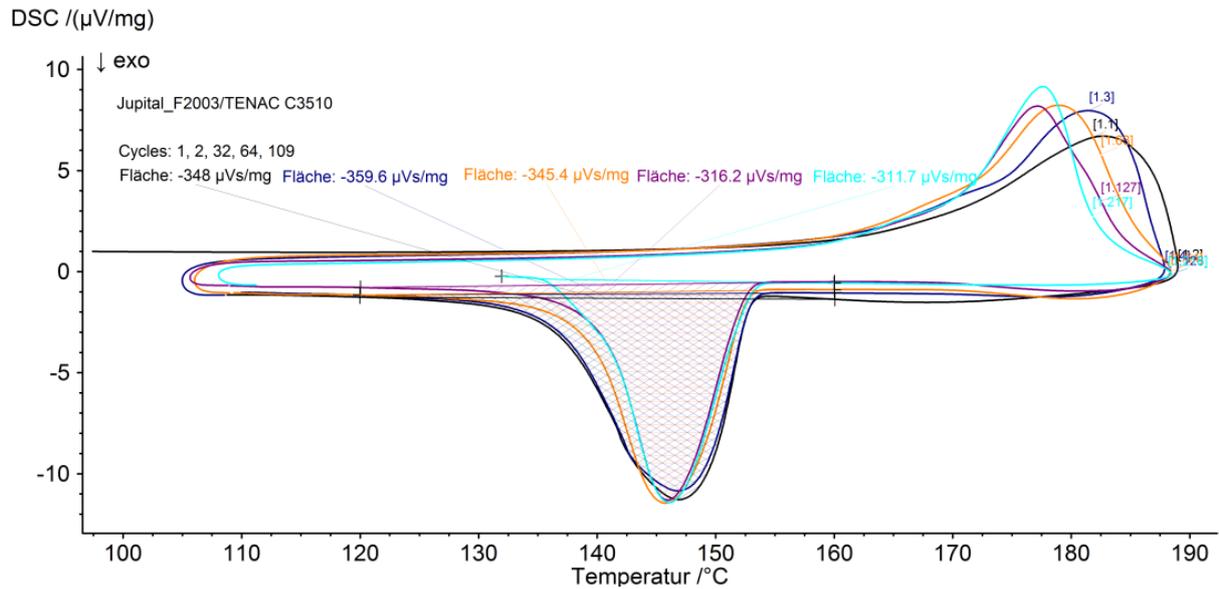


Abbildung 2: An unterschiedlichen, potentiell geeigneten Polymeren wurden Zyklentests in der Labor-DSC durchgeführt. Hier handelt es sich um ein POM-Rezyklat, welches nur 1/5 des Neumaterials kostet, aber sogar eine höhere Enthalpie aufweist und nach 110 Zyklen unter Inert-Atmosphäre nur 10% Enthalpie verloren hat.

Material	Her- steller	Preis pro kg	DSC - Resultate				THB (20C)	Heiz- platte	Kommentar	Be- wertung
			T_melt [C]	T_cryst [C]	H_m [J/g]	H_c [J/g]				
GebaPOM roh (POM copo)	Geba		169	143	119	181	0.4	y	Enthalpie gut, Unterkühlung mittels Füller reduzierbar, WLF-Erhöhung mittels Füller nur gering	grün
POM Gebaform WLF			167	152	116	161	0.7	y		
PE Ineos Rigidex HD6070EA			136	117	148	230	0.6	y		
PE Gebaflex WLF			136	120	167	207	0.8	y		
PP Ineos HPP HCW-280			169	124	68	116	0.3	y	Unterkühlung sehr groß	gelb
PP Gebaprop WLF			167	126	67	106	0.4	y		
PBT Pocan B1300			225	181	39	65	0.3	y	Enthalpie sehr gering	rot
PBT Gebadur WLF			225	195	35	54	0.5	y		
PET Arnite			247	201	44	47	0.3	y		
GebaPET WLF			252	218	29	46	0.6	y		
PA66 Durethan A30S	263	234	51	46		n	kristallisierte bei Heizplattenversuchen in "Schaumform" und irreversibel	rot		
PA66 Gebamid A WLF	263	232	46	42		n				
Kebablend TC FE 130903/1 (POM copo)	Barlo B Plasti		183	155	156	165	1.0	y	Enthalpie bei guter WLF noch hoch, kristallisiert jedoch in Schaumform	grün
Mahlgut Jupital F2003 / Tenac C 3510 bunt (POM copo)	Parap ack	0.55	181	151	204	196	0.4	y	110 Zyklen unter O2-Ausschluss führt zu 10% Enthalpieabnahme, Enthalpie sehr gut, Rezyklat	grün
Terez PA6 7100	TER HELL		222	167	72	51	-	y	Enthalpie gering, WLF aber gut, Füllergehalt 65% lt. Hersteller	rot
Terez PA6 7500WL65			221	187	20	20	1.2	schwer		
S0012 PA6 unverstärkt	Aurora	0.3	221	193	100	90			Enthalpie gut, Rezyklat (billig)	grün
PA 46 ex Stanyl TW341		1.2	285	253	89				Enthalpie geringer, aber Preis teurer als Neuware	rot
PA 6I/6T ex Grivory HTV-4H		0.55	299	262	23				Enthalpie zu gering	rot
PPS natur ex Forton 1200L1		0.8	276	211	35					
PPA GF33 ex A-Model A1133HS		0.55	307	261	39					
PA46 Neuware Stanyl KS 411	Pal Plast	<1	282	250	130	80 (84) (95)			Enthalpiewerte in "(j)" sind von späteren Zyklen (Abnahme)	grün
HDPE Palthene R HD 100 Black Regranulat		0.85	136	119	183				Enthalpie gut, Rezyklat (billig)	grün
HDPE Mahlgut bunt MFI 6.92	RSH Poly mere	0.8	136	117	183				Enthalpie gut, Rezyklat (billig)	grün
HDPE Mahlgut ex Rohr bunt		0.8	131	117	127				Enthalpie nicht gut, Rezyklat (billig)	rot
UHMW-PE	Celan ese		ähnlich HDPE (lt. Literatur (ILK Dresden), Messwerte						formstabil	grün
PEX	Agru		ähnlich HDPE (aus ZAE Projekt, Messwerte fehlen						formstabil, in versch. Geometrien verfügbar, billiger als UHMW-PE	grün
LLDPE	noch kein Kontakt		45-125C lt. Literatur (Messung ausständig)		10-30% weniger als HDPE lt. Literatur				für Anwendungen mit niedrigerer Temperatur geeignet, Rezyklate billig verfügbar	grün

Abbildung 3: Repräsentative Auswahl aus den untersuchten Polymeren mit ökonomischen, thermophysikalischen und rheologischen Parametern sowie den Beobachtungen und einer Bewertung (grün: geeignet, gelb: möglicherweise geeignet, rot: nicht geeignet).

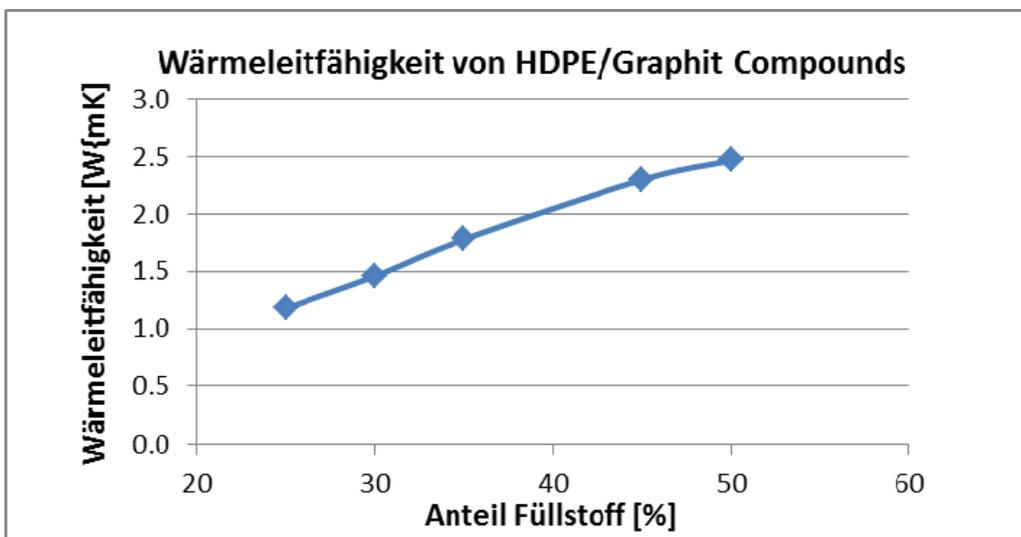


Abbildung 4: Verschiedene Füllgrade von HDPE mit einer speziellen Graphit-Art wurden getestet und die Wärmeleitfähigkeit vermessen.

AP3: HEX für PCM-Speicher

Wärmeübertrager (HEX) und Wärmespeicher mit Polymer-PCMs

Die wesentliche Herausforderung beim Design von PCM-Wärmeübertragern ist ein großindustriell günstig produzierbares Konzept mit möglichst geringem, aber effizienten Materialeinsatz zu finden, bei dem trotz der schlechten Wärmeleitfähigkeit der PCMs¹⁰ eine ausreichend hohe Be- und Entladeleistung des Speichers, bei gleichzeitig hoher Speicherkapazität gewährleistet werden kann.

Müller-Steinhagen¹¹ zeigt drei verschiedene mögliche Wärmetauscher/PCM-Konfigurationen, welche für unterschiedliche PCM-Wärmeleitfähigkeiten geeignet sind: Integrierter Wärmeübertrager, Mikroverkapselung und Sandwichstruktur mit externen Wärmeleitelementen. Ebenfalls sind parallele Rohrregister (Rohrbündel-Typ) möglich, wobei hier die Anzahl der notwendigen Rohre, und damit HEX-Kosten, (für eine bestimmte, gewünschte Leistungsdichte kW/m³) stark von der Wärmeleitfähigkeit des PCMs abhängt (siehe Abbildung 5).

Bei den bisher erwähnten Konzepten „durchdringt“ der Wärmetauscher praktisch das gesamte PCM-Volumen. Eine Erhöhung der Gesamtspeicherkapazität geht mit eine Erhöhung des PCM-Volumens und damit auch einer Vergrößerung des Wärmetauschers einher. Falls eine Trennung von Speicherkapazität und Speicherleistung gelingt, kann mittels eines kompakten Wärmetauschers eine hohe Be- und Entladeleistungen (als Analogon zur Brennkammer bei „konventionellen“ Heizungen) bei gleichzeitig hoher Speicherkapazität (Analogon wäre der Brennstoff-Vorratsraum) erreicht werden. Ein mögliches derartiges Konzept auf Basis von Förderschnecken ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt.

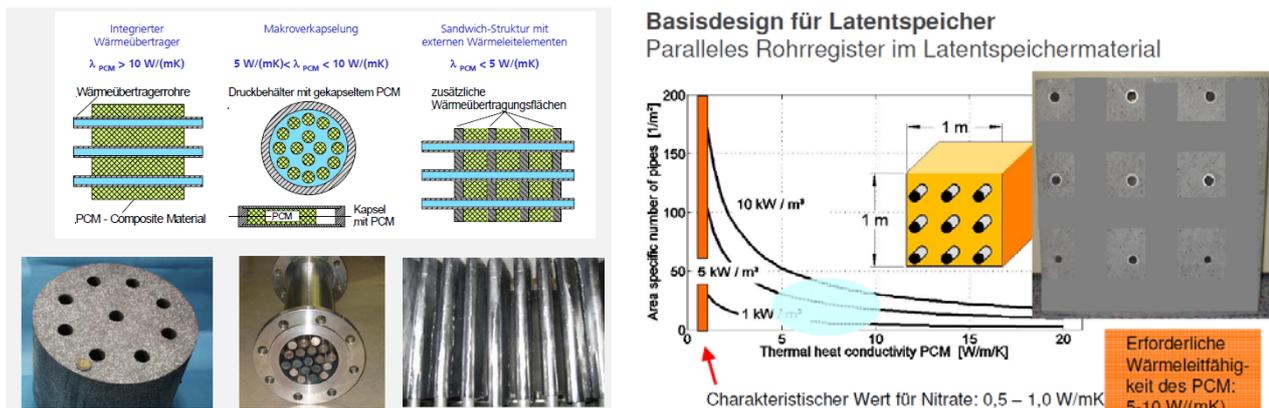


Abbildung 5:

Links: Übersicht möglicher Wärmeübertragerkonzepte, die bereits vor Beginn des Sondierungsprojekts aus der Literatur bekannt waren¹¹. Rechts: Auslegungsüberlegungen für Rohrregisterwärmeübertrager für PCM-Speicher¹².

¹⁰ Bis auf die Metalle gilt das auch für praktisch alle anderen bisher betrachteten PCMs

¹¹ Müller-Steinhagen, Vortrag zu Grundlagen thermischer Energiespeicher, Bürgerzentrum Waiblingen 2008.

¹² Laing D., Tamme R., Speichertechnik nicht nur für Solarenergie, DLR, 4. Solartagung Rheinland-Pfalz, 11.9.2008



Abbildung 6: Speicherkapazität und Speicherleistung sind bei diesem Kompakt-Wärmetauscherkonzept getrennt und erlauben so potentiell günstige Hochleistungs-PCM-Speicher¹³.

Im Projekt wurde mit verschiedenen der oben genannten HEX-Typen experimentiert. Insbesondere wurden unterschiedliche Polymere mit verschiedenen möglichen Wärmeleit-Strukturen kombiniert und in Vorversuchen die Kompatibilität (thermische Dehnung, vollständige Befüllbarkeit und Materialverträglichkeit) getestet. Die makroverkapselte Variante wird gemeinsam mit dem ILK Dresden studiert (Abbildung 7).

Ein wesentlicher Fokus bei der Auswahl von HEX-Konzepten wurde von Anfang an auf die Berücksichtigung der ökonomischen Rahmenbedingungen gelegt¹⁴. Insbesondere sollten die in Frage kommenden Wärmetauscher prinzipiell großindustriell fertigbar sein und aus leicht verfügbaren Materialien aufgebaut sein. Aluminium-Legierungen haben sich aufgrund ihrer guten Wärmeleitfähigkeit, Verarbeitbarkeit und Verfügbarkeit als vielversprechend herausgestellt. Ebenso attraktiv sind (vor allem für höhere Temperaturen) Stähle, wenn die Wärmeleitfähigkeit des PCMs entsprechend hoch ist.

Es wurden Modelle mit Dymola und ANSYS Fluent erstellt, um leistungsfähige Wärmetauschergeometrien auslegen zu können. Bei Wärmeleitstrukturen stellt sich heraus, dass kleine Rohrdurchmesser mit großflächigen Finnen zu sehr guten Ergebnissen führen. Da es am Markt solche Geometrien aber leider nicht kostengünstig gibt, wurden Vorversuche zu automatisierbaren Fertigungsverfahren (unter anderem zur Verbinden von Aluminium und Stahl) mit Industriepartnern durchgeführt (siehe Abbildung 7).

¹³ Projekt SALSA – Aktive Latentwärmespeicher in solarthermischen Kraftwerken, Fraunhofer ISE (BRD)

¹⁴ Ein wesentliches Hindernis für die weite Verbreitung von PCM-Speichern sind die bisher sehr hohen Speicherkosten. Neben dem PCM muss vor allem auch der Wärmetauscher „relativ günstig“ produzierbar sein. Auch wenn für Labormuster oder Prototypen aufwändigere Fertigungsverfahren und teurere Materialien „versucht“ werden können, so ist der Ansatz in diesem Vorhaben, von Anfang an in Richtung großindustriell erprobter Fertigungsverfahren und Materialien zu arbeiten.



Abbildung 7: Links: Tests von verschiedenen Polymer-Wärmeleitstruktur. Mitte: Makroverkapselte PCM-Rohre werden von einem Wärmeträgerfluid umströmt; unterschiedliche Rohregeometrie und Anordnung erlaubt einstellbare Leistungen und Speicherdichte. Rechts: Das Konzept des Proof of Concepts ist eine Kombination aus Aluminium-Wärmeleit-Strukturen und C-Stahl-Rohren.

AP4: Proof-of-Concept-Speicher

Mit Polymeren lassen sich also sehr viele unterschiedliche Speicherkonzepte realisieren. In Abbildung 8 sind 5 vom Prinzip verschiedene Varianten dargestellt, die für unterschiedliche Anwendungsfälle eingesetzt werden können.

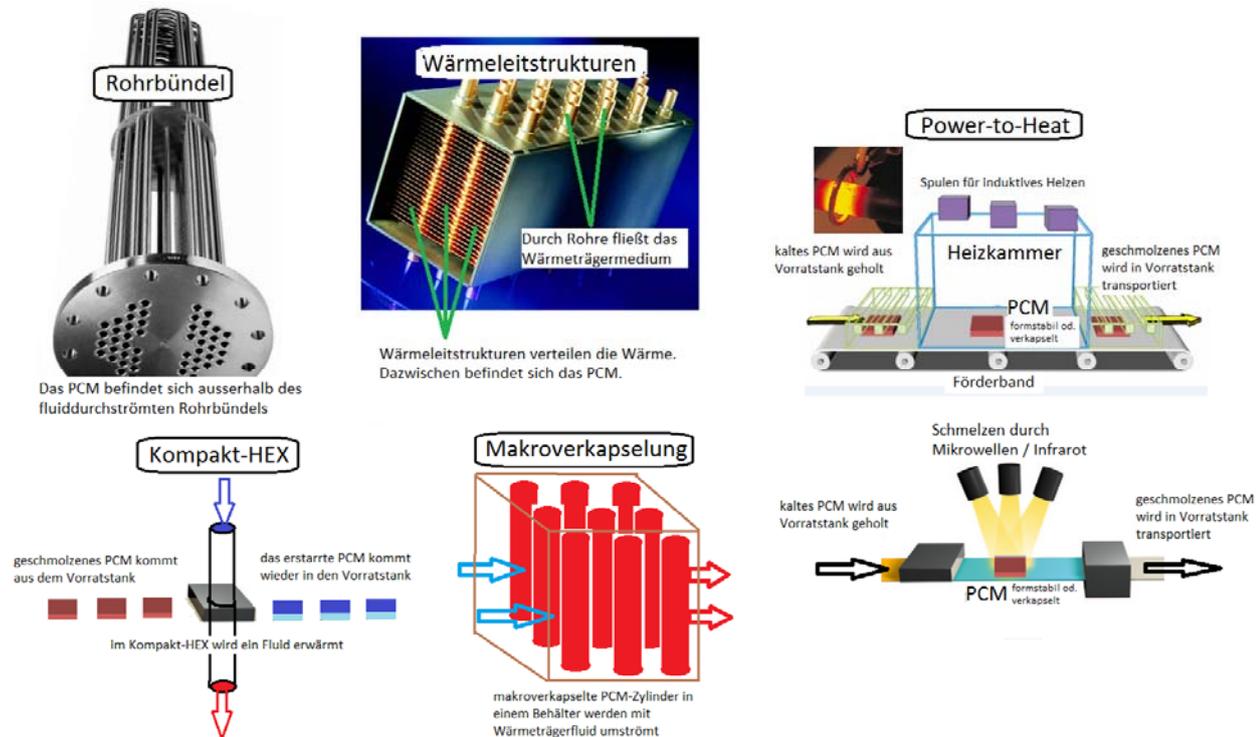


Abbildung 8: 5 verschiedene Wärmeübertrager-Konzepte werden durch die vielfältigen Polymercompounds ermöglicht. Dadurch können sehr viel kostengünstigere und leistungsfähigere Speicher gebaut werden, als mit herkömmlichen, nicht modifizierbaren PCMs

Für den finalen Proof-of-Concept-Speicher wurde schließlich ein Konzept mit Wärmeleitstrukturen aus Aluminium-Finnen und gut fließendem HDPE (ohne erhöhte Wärmeleitfähigkeit) gewählt (siehe Abbildung 9).

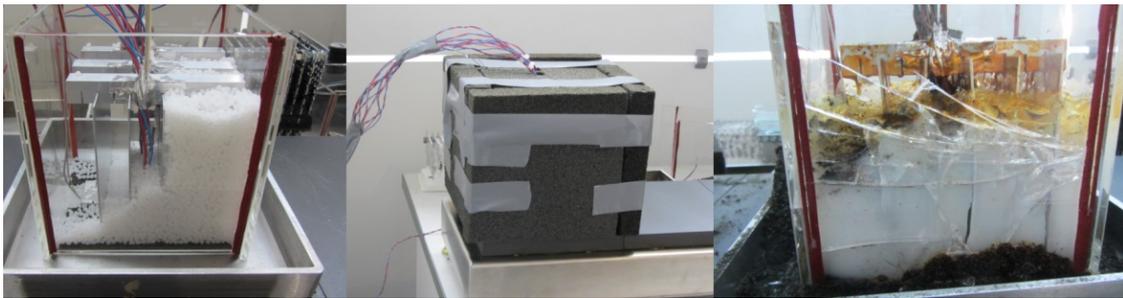


Abbildung 9: Proof-of-Concept-Experiment. Links: Aluminium-Finnen, Messtechnik und HDPE-Granulat beim Befüllen. Mitte: Der isolierte Speicher wird auf der Heizplatte be- und entladen. Rechts: Nach Versuchsende war das PCM an der Oberfläche leicht degradiert. Der Glasbruch wurde bewusst in Kauf genommen, um den Schmelzvorgang gut beobachten zu können.

In Abbildung 10 sieht man sowohl an den Temperaturen als auch den Wärmeflüssen die für PCMs typischen Plateaus beim Phasenübergang. Dadurch ist klar, dass mit geeigneten Polymeren und Wärmetauschern neue Polymer-PCM-Speicher gebaut werden können.

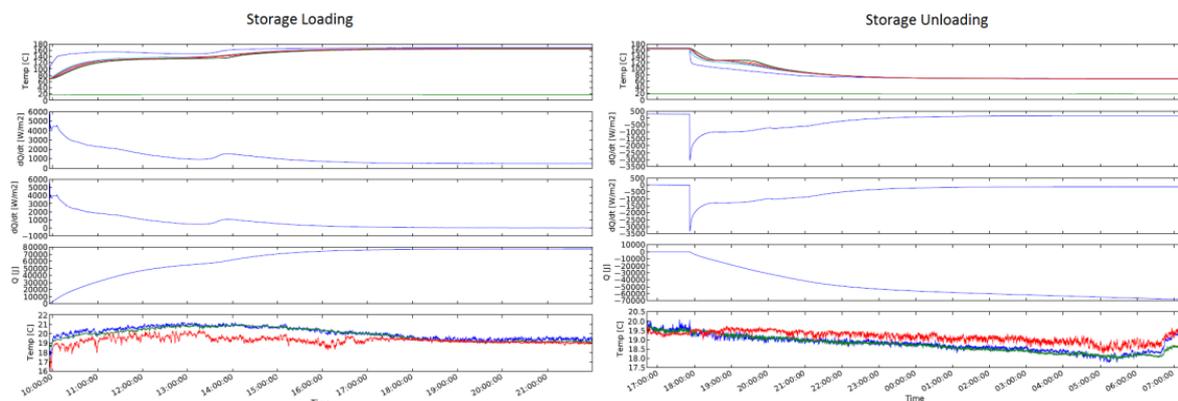


Abbildung 10: Links: Messkurven beim Schmelzen. Rechts: Messkurven beim Kristallisieren. Messgrößen von oben nach unten: Temperaturen im PCM, Wärmefluss in/aus dem Speicher, Wärmefluss abzüglich Verluste in/aus dem Speicher, Gesamtenergie beim Laden/Entladen, Umgebungstemperaturen.

2.3 Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen

Wie in der inhaltlichen Beschreibung dargestellt, sind Polymere als PCM prinzipiell geeignet und es gibt kompatible Wärmetauscher- und Speicherkonzepte. Ebenfalls wurden erste mögliche Anwendungsfälle identifiziert. Ein Folgeantrag wurde daher erfolgreich eingereicht. Im Nachfolgeprojekt StoreITup-IF sollen die notwendigen Weiterentwicklungen bearbeitet werden, welche sich im Arbeitsplan entsprechend widerfinden (Abbildung 11). Partner aus der Kunststoffindustrie, dem Wärmetauscher- und Speicherbau sowie mögliche Anwender konnten gefunden werden, wie bereits oben dargestellt wurde.

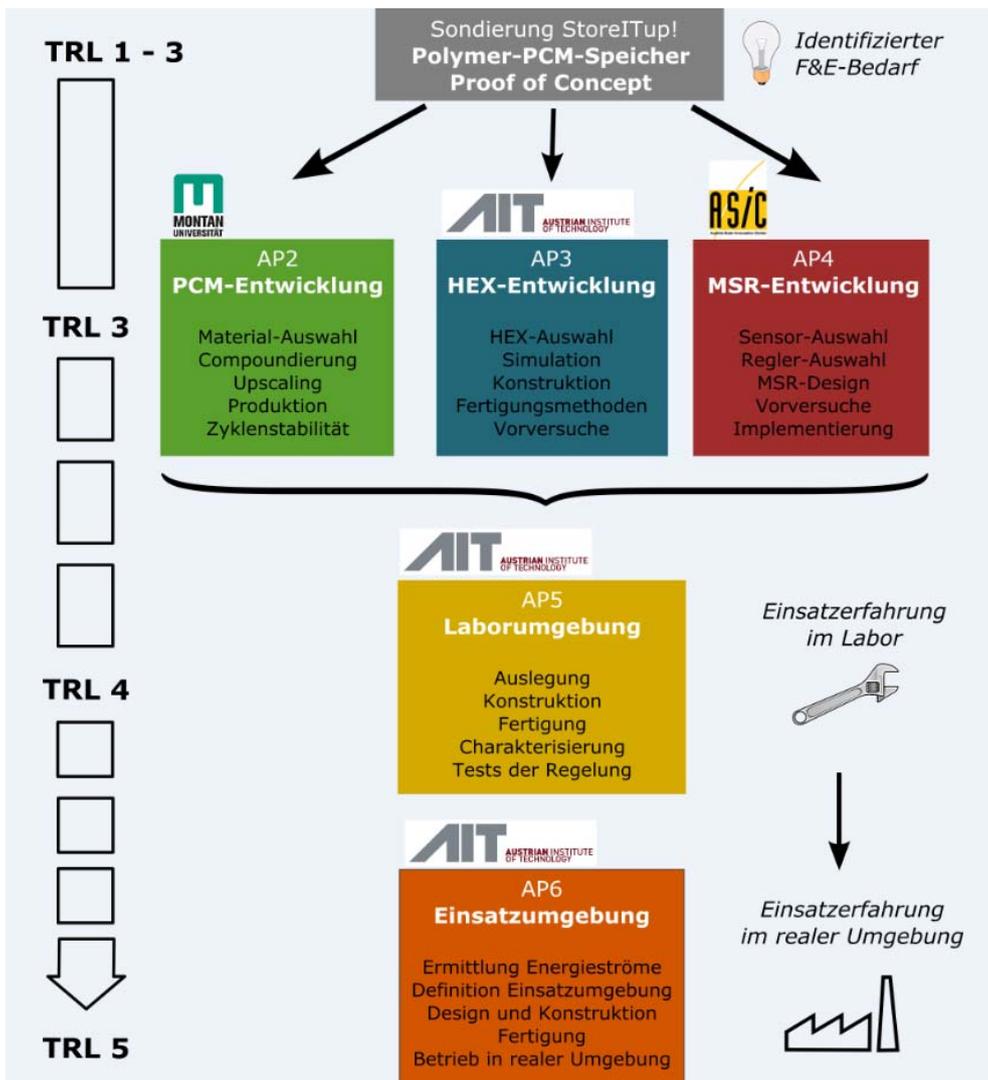


Abbildung 11: Die technische Problemstellung der Polymer-PCM-Speicher-Entwicklung, die im Nachfolgerprojekt bearbeitet werden soll, spiegelt sich in den Arbeitspaketen sowie in der TRL Entwicklung wider

Etwas detaillierter können die notwendigen Arbeiten wie folgt dargestellt werden:

Problemstellung „PCM-Entwicklung“:

Im Vorprojekt wurden zwar sehr viele (ca. 70) Polymere und Polymercompounds von 15 verschiedenen Herstellern getestet, ein optimales Compound wurde allerdings nicht gefunden. Die am Markt befindlichen Produkte und auch die zugehörigen Herstellungsverfahren sind einfach nicht für eine derartige Anwendung optimiert. So müssen die Eigenschaften, die für Speicher relevant sind, wie Enthalpie, Kristallisationsverhalten (Unterkühlung), Wärmeleitfähigkeit, rheologische Eigenschaften, Dauergebrauchs- und Zyklenbeständigkeit und insbesondere für Power-to-Heat Anwendungen elektrische, magnetische und/oder optische Eigenschaften optimiert werden. Dazu müssen entsprechend gute Polymere und Füllstoffe gefunden und Verfahren zur optimalen Compoundierung zunächst im Labormaßstab entwickelt werden. Um die für die anvisierten Anwendungen relevanten Energiemengen (10 kWh bis hunderte MWh) speichern zu können, müssen schließlich Polymer-PCM-

Compounds im Tonnen-Maßstab industriell in konstanter Qualität und preiswert hergestellt werden können.

Problemstellung „HEX-Entwicklung“:

Mitentscheidend für eine weite Verbreitung von Polymer-PCM-Speichern wird die Entwicklung von kostengünstigen, leistungsfähigen und industriell fertigmachen Wärmeübertragern sein. Im Vorprojekt wurden 5 mögliche Konzepte gefunden (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**), die mit Polymer-PCMs kompatibel sind bzw. die durch die Verwendung von Polymeren als PCM überhaupt erst möglich werden¹⁵. Die Problemstellung liegt darin Designs, Materialien und Fertigungsverfahren zu finden und zu entwickeln, mit denen die Wärmeübertrager kostengünstig produziert werden können.

Problemstellung „Mess-, Steuer- und Regelungstechnik-Entwicklung“:

Reale Polymer-PCM-Speicher werden in ein größeres Energiesystem eingebunden und müssen dort „auf Anfrage“ Energie einspeichern oder bereitstellen können. Dazu muss stets der momentane Zustand (insb. Ladezustand, Temperaturen) des Speichers detailliert erfasst werden und es braucht eine Steuer- und Regelungstechnik, mit der es möglich ist die variierenden Leistungsanforderungen, sowohl beim Be- als auch beim Entladen, zu erfüllen.

Problemstellung „Versuchsspeicher im Labormaßstab (TRL 4) und Versuchsspeicher in Einsatzumgebung (TRL 5)“:

Die Problemstellung beim Speicherdesign besteht darin die Geometrie und Materialien der Wärmeübertrager so auf die Eigenschaften der Polymere abzustimmen, dass die gewünschte Speicherkapazität und -leistung auf dem benötigten Temperaturniveau über alle Betriebszustände gewährleistet werden kann. Zusätzlich müssen natürlich die ökonomischen Rahmenbedingungen eingehalten werden. Obgleich es bisher einige Projekte gab, in denen PCM-Speicher im Labormaßstab gebaut und vermessen wurden, schafften nur fast keine den nächsten Schritt in die reale Einsatzumgebung, da obige Problemstellung sehr komplex und vielschichtig ist.

Für das Nachfolgeprojekt wurde daher gezielt nach Anwendungsfällen gesucht, bei denen obige Vorgehensweise erprobt und erste reale Betriebserfahrung gesammelt werden kann. Aufgrund ihres hohen Markt- und Energieeinsparungspotentials, sowie der guten Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf andere Industriezweige¹⁶, wurden „Abwärme im Aluminium-Guss (Metallverarbeitung)“, „Abwärme von Extrudern (Kunststoffindustrie)“ und „effizientere Wärmenetzen“ (z.B. Glättung Morgenspitze, Netzausbau durch Speicher, kleinere Speicher in Übergabestation) ausgewählt. Im Teil 2.2.2. Innovationsgehalt wird detailliert beschrieben, wie die Speicher eingesetzt werden sollen.

¹⁵ Im Gegensatz zu den meisten anderen PCMs, gibt es mit Polymeren langjährige Erfahrungen bei der Optimierung von versch. physikalischen Eigenschaften. Wird beispielsweise die Wärmeleitfähigkeit stark erhöht, kann auf Wärmeleitstrukturen verzichtet werden und der billigere Rohrbündel-HEX reicht aus. Wenn man etwa die elektrische Leitfähigkeit anpasst, können die Polymer-PCMs elektrisch geschmolzen werden und Power-to-Heat-Speicher werden möglich. Mit formstabilen Polymeren, die im geschmolzenen Zustand ihre Geometrie behalten, können Speicher gebaut werden, bei denen Kapazität und Leistung getrennt werden können, was wesentlich leistungsfähigere Speicher bei gleichen Kosten erlauben sollte.

¹⁶ Extrusion wird in der Metall- (Strangpressen) und Lebensmittelbranche eingesetzt. Gießen ist ein in der gesamten Metallindustrie verbreiteter Prozess, in der Kunststoffindustrie ist der ähnliche Spritzguss verbreitet.

3 Verwertung

Publikationen:

Ob der Neuheit der Forschungen wurde bewusst auf eine zu frühe, zu breite und zu detailreiche Dissemination in einschlägigen Fachmagazinen verzichtet, um die kommerzielle Verwertung nicht zu gefährden. Momentan ist eine Publikation in Vorbereitung, bei der erste Ergebnisse publiziert werden sollen.

Im Rahmen der Veranstaltung „Kompakte thermische Energiespeicher“ an der Wirtschaftskammer Wien, wurde erstmals über einige Entwicklungen informiert. Der Vortrag ist unter folgendem Link zugänglich:

<http://www.aee-intec.at/0uploads/dateien1029.pdf>

Weiters flossen Recherche-Erkenntnisse als auch bestimmte Messergebnisse in einen Buchbeitrag ein, der gerade im Rahmen des IEA SHC Task 49 – Solar Process Heat erstellt wird.

Im Rahmen des Projekts wurde eine Diplomarbeit durchgeführt, welche allerdings aus verwertungstechnischen Gründen gesperrt ist.

Markt:

Die Polymer-PCM-Speicher lassen sich in Wärmenetzen (Glättung Lastspitzen, Netzausbau durch Speicher, kleinere Speicher in Übergabestation) und Kraftwerken (direkte Wärmeauskopplung, Power-to-Heat) einsetzen. In Bereich industrieller Prozesswärme werden die Speicher benötigt um Energieeffizienzpotentiale durch Abwärmenutzung zu heben. Im Folgeprojekt wird Kunststoff-Extrusion und Alu-Guß als Anwendungsprozess untersucht. Diese beiden Prozesse treten in vielen energieintensiven Branchen (Metall, Chemie und Kunststoff, Lebensmittel, Maschinenbau) auf und sind dadurch ideale Testanwendungen für spätere Märkte. Durch den Ausgleich von zeitlichen Schwankungen (PCM-Speicher Stunden/Tagesspeicher) kann der Anteil Erneuerbarer Energieträger erhöht werden.

Das Marktpotential von Polymer-PCM-Speichern wird nachfolgend exemplarisch für industrielle Abwärmenutzung sowie für solare Prozesswärme abgeschätzt. Dazu kommen noch Kraftwerksanwendungen und Wärmenetze, die in ähnlicher Größenordnung liegen.

Gemäß einer aktuellen KPC Studie¹⁷ im Rahmen derer die 1.450 wichtigsten österreichischen Industriebetrieben befragt wurden, liegt das technische Potential extern nutzbarer Abwärme im Bereich 50-100°C bei 823 GWh/a und über 100°C bei 734 GWh/a. Die höchsten Potentiale die Metallindustrie (3245 GWh/a), Papier (2960 GWh/a), Chemie (2246 GWh/a), Baustoffe (2188 GWh/a), Lebensmittel (1750 GWh/a) und Maschinenbau (700 GWh/a) auf. Für die deutsche Industrie wird in einer Studie¹⁸ ein

¹⁷ http://www.publicconsulting.at/uploads/abwrmepotenzialerhebung_2012_presentation_webseite.pdf

¹⁸ IFEU, Fraunhofer ISE, Prognos, GWS et al, Endbericht: Energieeffizienz: Potenziale, volkswirtschaftliche Effekte und innovative Handlungs- und Förderfelder für die Nationale Klimaschutzinitiative, Oktober 2011

technisches Abwärmepotential von 6% (26.7 TWh/a; im Bereich 60-140°C) und weitere 12% (53.3 TWh/a, >140°C) des gesamten industriellen Energieeinsatzes errechnet.

Laut dem Endbericht des Projekts „PROMISE“¹⁹ beträgt das Potential für Solare Prozesswärme in Industrie und Gewerbe (Raum- und Prozesswärme bis 250°C) 13 TWh. Um einen entsprechend hohen solaren Deckungsgrad zu erreichen sind thermische Speicherkapazitäten von etwa 10% davon eine realistische Schätzung.

Unter der Annahme, dass zukünftig 10% (150 GWh) des nationalen nutzbaren Abwärmepotentials über 50°C in PCM-Polymer-Speichern zwischengespeichert wird, und der Verkaufserlös bei 30-50 €/kWh liegt, dann bedeutet das ein **Marktpotential** von **EUR 4,5 bis 7,5 Mrd.** Das Potential in der solaren Prozesswärme²⁰ ist analog ca. **EUR 39 bis 65 Mrd.** Zusätzliche Umsätze werden im Bereich der Industrieanlagenplanung und Anlagenerrichtung erzielt. Weitere Marktpotentiale für PCM-Polymer Speicher ergeben sich im Zusammenhang mit dem Einsatz in Fernwärmenetzen und Kraftwerken, die sich wohl in ähnlicher Größenordnung bewegen werden.

In der folgenden Tabelle wird speziell die Anzahl an Firmen dargestellt, die in der Kunststoff-Extrusion einsetzen oder im Metall-Gießen arbeiten. Nimmt man an, dass die Ergebnisse aus AP6 auf ¾ der Firmen übertragbar sind, hat man 176 potentielle Kunden.

Tabelle 1: Anzahl an möglichen Firmen, die die gleichen Prozesse, wie in AP6 untersucht, verwenden.

Firmen in Österreich		Potential
Kunststoff - Extrusion ²¹	Hersteller von Kunststoffen in Primärform: 7 Hersteller von Kunststoffwaren: 185	Man kann grob annehmen, dass ¾ der Firmen (=144) ähnliche Extruder benutzen, und daher Polymer-PCM-Speicher zur Erhöhung der Energieeffizienz einsetzen können.
Metallindustrie Gießereien ²¹	42 Gießereien: 11 – Eisen, 20 Leichtmetall 11 - Buntmetall	Man kann grob annehmen, dass ¾ der Firmen (=32) geeignete Abwärme für Polymer-PCM-Speicher haben.

Patente:

Im Berichtszeitraum wurden keine Patentmeldungen durchgeführt, werden aber momentan geprüft.

¹⁹ T. Müller et al, Produzieren mit Sonnenenergie, Potentialstudie zur thermischen Solarenergienutzung in österr. Gewerbe- und Industriebetrieben, Berichte aus Energie- und Umweltforschung, Schriftenreihe: 01/2004

²⁰ Annahme 10% der solaren Prozesswärme wird gespeichert

²¹ Statistik Austria, Hauptergebnisse der Leistungs- und Strukturstatistik 2012 nach Klassen der ÖNACE 2008

4 Ausblick

In allen künftigen Energieszenarien spielen Speicher eine zentrale Rolle in der Flexibilisierung von Energie-Erzeugern und der Harmonisierung von Energieangebot und –nachfrage. Obwohl der Großteil der Endenergie als Wärme anfällt, dreht sich auch die Speicherdiskussion, wie die Energiediskussion an sich, meist nur um elektrische Speicher. Diese sind zwar zweifelsohne in Zukunft notwendig, um die Energieversorgung 24/7 zu sichern, allerdings mit Sicherheit nicht immer die beste oder gar günstigste Möglichkeit.

Es gibt neben PCM-Speichern noch andere vielversprechende thermische Speichermöglichkeiten (z. B. thermochemische Speicher), die insb. dann sinnvoll eingesetzt werden sollten, wenn die Verbraucher Wärme und nicht Strom benötigen. Speziell in Kombination mit Energieeffizienztechnologien wie Wärmepumpen können Wärmespeicher auch zum vielzitierten Demand-Side-Management (via Power-to-Heat) beitragen.

Ebenso sind Wärmespeicher unumgänglich, wenn ernsthaft der Anteil an Solarwärme gesteigert werden soll. PCM-Speicher eignen sich besonders als Stunden- und Tagesspeicher, da sie sich dann aufgrund der hohen Zyklenzahl schnell amortisieren.

Notwendig ist, wie in fast allen Entwicklungsbereichen, eine stetige Weiterentwicklung von Materialien und die Erprobung neuer Konzepte. Beim Speicher kommt natürlich der Wärmetauscherentwicklung eine zentrale Rolle zu. Hier sind insbesondere massenfertigbare Konzepte zu entwickeln, damit leistungsfähige und vor allem preisgünstige Speicher gebaut werden können.

Ein PCM-Speicher alleine spart natürlich an sich noch keine Energie, weshalb ein zentraler Punkt die Suche nach *konkreten* Anwendungsfällen ist. Insbesondere große Wärmespeicher müssen immer sehr speziell auf die Anwendung abgestimmt sein und gut in den Prozess / in das Netz eingebunden werden. Industrie-übliche Planungstools können neuartige Speicher nicht abbilden, geschweige denn gibt es robuste MSR-Konzepte. Dadurch wird eine breite Verbreitung dieser Energieeffizienztechnologie sehr erschwert.

Die ersten konkreten Anlagen im (semi-)industriellen Maßstab sind zeit- und geldaufwändig zu planen und zu realisieren. Hier sind eine gewisse Anzahl an geförderten Demo-Projekten notwendig, in denen die wichtigsten technischen und nicht-technischen Barrieren identifiziert und abgebaut werden, um eine weitere breite Marktdurchdringung vorzubereiten.

5 Kontaktdaten

Projektleiter: Mag. Christoph Zauner

Institut/Unternehmen: AIT Austrian Institute of Technology

Kontaktadresse: Giefinggasse 2, 1210 Wien, christoph.zauner@ait.ac.at, +43 (0) 664 8251146

<http://www.ait.ac.at/research-services/research-services-energy/solarthermie/industrielle-forschung-solarthermie/>

Partnerin:

Dr. Katharina Resch

Montanuniversität Leoben, Department Kunststofftechnik, Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe

Kontaktadresse: Otto Glöckel-Strasse 2, A-8700 Leoben, +43 3842 402 2105,

katharina.resch@unileoben.ac.at, www.kunststofftechnik.at