

Effizienzsteigerung von Haushaltskühlgeräten durch polymergebundene Phasenwechselmaterialien

zur Erlangung des akademischen Grades
DOKTOR DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
Dipl.-Wirt.-Ing. Gerrit Sonnenrein
aus Paderborn

Tag des Kolloquiums: 14. Juli 2021
Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Jadran Vrabec
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Henning Meschede

Zusammenfassung

Obwohl der Stromverbrauch von einzelnen Kühlgeräten gering erscheint, weisen sie aufgrund ihrer nahezu vollständigen Marktdurchdringung und ihrer meist ganzjährigen Laufzeit in der Summe ein großes Energieeinsparpotenzial auf. Da der Energiebedarf des Kälteprozesses letztlich von der Differenz zwischen Verflüssigungs- und Verdampfungstemperatur bestimmt wird, lassen sich durch den Einsatz von Phasenwechselmaterialien (Phase Change Materials, PCM), die große Wärmemengen bei nahezu konstanter Temperatur aufnehmen, sowohl die Verflüssigungstemperatur absenken als auch die Verdampfungstemperatur anheben. Im ersten Teil der vorliegenden Arbeit werden die grundlegenden Probleme wie die geringe Wärmeleitfähigkeit, Unterkühlungseffekte, Toxizität der PCM sowie die Kosten ihrer Verkapselung zur Auslaufsicherheit behandelt, die einer praktischen Anwendung bislang entgegenstanden. Hierfür wurden im Weiteren formstabile Block-Copolymer-gebundene PCM entwickelt, deren Wärmeleitfähigkeit von 0,19 W/(mK) durch Additivierung mit expandierten Grafiten zielgerichtet um bis zu einem Faktor von 20 auf 3,95 W/(mK) erhöht werden konnte. Der zweite Teil der Arbeit zeigt, wie durch deren Integration sowohl auf der Verflüssiger- als auch der Verdampferseite die Energieaufnahme von Haushaltskühlgeräten jeweils um ca. 10 % reduziert, in Kombination sogar bis 17 % reduziert werden kann. Darüber hinaus konnten im Hinblick auf den neuen „global standard“ (IEC 62552:2015) mit den dort erstmals eingeführten Funktionsprüfungen die Abkühlleistung um 33 % und die Zeit bis zum kritischen Temperaturanstieg im Störfall um 145 % gesteigert werden.

Abstract

Although power consumption of a single household refrigeration appliance appears to be low, the savings potential of the entire fleet is considerable due to its continuous operation and almost complete market penetration. Since the energy demand of refrigeration processes is ultimately determined by the temperature difference between condensation and evaporation, both the condenser temperature can be lowered, and the evaporator temperature be raised with phase change materials (PCM). These materials absorb large amounts of heat at almost constant temperature. The first part of this work addresses the basic challenges related to PCM, such as low thermal conductivity and supercooling effects. Moreover, the toxicity of PCM requires cost-efficient encapsulation for leakage safety. These issues have so far limited the PCM application in household refrigeration appliances. To address these, dimensionally stable block-copolymer bonded PCM are developed, whose thermal conductivity of 0.19 W/(mK) is increased by a factor of up to 20 to 3.95 W/(mK) through the incorporation of expanded graphite. The second part of this work shows how their integration on both the condenser and the evaporator can reduce power consumption of household refrigerators by about 10 % in each case, and in combination by as much as 17 %. Furthermore, with regard to the new so-called “global standard” (IEC 62552:2015), the cooling capacity is increased by 33 % and the temperature rise time in case of a power failure by up to 145 %.

Publikationsliste

- Japs, E., Sonnenrein, G., Steube, J., Vrabec, J., Kenig, E., Krauter, S., 2013. Technical Investigation of a photovoltaic module with integrated improved phase change material. Conference: 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition At: Paris (France), 500–502.
DOI: 10.4229/28thEUPVSEC2013-1CV.2.19
- Japs, E., Peters, S., Sonnenrein, G., Krauter, S., 2014. Energy-economic comparison of photovoltaic modules equipped with a layer of conventional and improved phase-change material. IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2014, 1348–1352, 6925167.
DOI: 10.1109/PVSC.2014.6925167
- Japs, E., Sonnenrein, G., Krauter, S., Vrabec, J., 2016. Experimental study of phase change materials for photovoltaic modules: Energy performance and economic yield for the EPEX spot market. Solar Energy, 140, 51–59.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.10.048>
- Paul, A., Baumhögger, E., Elsner, A., Moczarski, L., Reineke, M., Sonnenrein, G., Hueppe, C., Stamminger, R., Hoelscher, H., Wagner, H., Gries, U., Freiberger, A., Becker, W., Vrabec, J., 2021. Determining the heat flow through the cabinet walls of household refrigerating appliances. International Journal of Refrigeration, 121, 235–242.
DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2020.10.007
- Sonnenrein, G., Elsner, A., Baumhögger, E., Fieback, K., Morbach, A., Vrabec, J., 2015. Reducing the power consumption of household refrigerators through the integration of latent heat storage elements in wire-and-tube condensers. International Journal of Refrigeration, 51, 154–160.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.12.011>
- Sonnenrein, G., Baumhögger, E., Elsner, A., E., Fieback, K., Morbach, A., Paul, A., Vrabec, J., 2015. Copolymer-bound phase change materials for household refrigerating appliances: experimental investigation of power consumption, temperature distribution

and demand side management potential. *International Journal of Refrigeration*, 60, 166–173.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.06.030>

Sonnenrein, G., Elsner, A., Fieback, K., Lesmmann, K., Morbach, A., Vrabec, J., 2015. Effizienzsteigerung von Haushaltskühlgeräten durch polymergebundene Phasenwechselmaterialien. *Deutsche Kälte- und Klimatagung 2015*, Dresden, 18.–20.11.2015, DKV-Tagungsbericht 2015, Dresden, Deutsche Kälte- und Klimatechnischer Verein e. V., ISBN: 978-3-932715-51-8.

Sonnenrein, G., Baumhögger, E., Elsner, A., Morbach, A., Neukötter, M., Paul, A., Vrabec, J., 2020. Improving the performance of household refrigerating appliances through the integration of phase change materials in the context of the new global refrigerator standard IEC 62552:2015. *International Journal of Refrigeration*, 119, 448–456.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.07.025>

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	III
Abstract	IV
Publikationsliste	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XII
Abkürzungsverzeichnis	XIII
1 Einleitung	1
2 Polymergebundene PCM mit erhöhter Wärmeleitfähigkeit	7
3 Effizienzsteigerung von Haushaltskühlgeräten	15
4 Fazit	33
5 Literaturverzeichnis	35
6 Wissenschaftliche Publikationen	39
6.1 Reducing the power consumption of household refrigerators through the integration of latent heat storage elements in wire-and-tube condensers	40
6.2 Copolymer-bound phase change materials for household refrigerating appliances: experimental investigation of power consumption, temperature distribution and demand side management potential	48
6.3 Improving the performance of household refrigerating appliances through the integration of phase change materials in the context of the new global refrigerator standard IEC 62552:2015	57
6.4 Experimental study of phase change materials for photovoltaic modules: Energy performance and economic yield for the EPEX spot market	67
7 Weitere Publikationen und Patente	77
8 Wissenschaftliche Vorträge	78
Erklärung zur Zitation von Inhalten aus studentischen Arbeiten	80

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Typische Schmelzenthalpien und Temperaturbereiche von Materiaklassen zur Latentwärmespeicherung	7
Abbildung 2:	Aufladezeiten eines exemplarischen Latentwärmespeichers mit unterschiedlicher Speicherstärke in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit.....	10
Abbildung 3:	Grafit-schuppe (links) und expandierter Grafit (rechts).....	11
Abbildung 4:	Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit eines Alkan(C22)-basierten Polymer-Compounds in Abhängigkeit des Grafitanteils (GFG600)	12
Abbildung 5:	Styrol-basierte Block-Copolymer-Netzwerke mit eingebundenen Alkanen; links: SEBS, rechts: SEBS + SEP	13
Abbildung 6:	Beispiele entwickelter Polymer-Compounds bzw. formstabiler Latentwärmespeicherelemente	14
Abbildung 7:	Haushaltskühlgerät mit und ohne Latentwärmespeicher; links: Temperatur-Entropie-Diagramm, rechts: schematische Darstellung	15
Abbildung 8:	Draht-Rohr-Verflüssiger des Miele K-9252i-1; links: bestückt mit formstabilem Polymer-Compound, rechts: mit Kettenbeuteln aus einer Aluminium-Verbundfolie (gefüllt mit Wasser oder reinem Paraffin).....	16
Abbildung 9:	Temperaturverlauf der spezifischen Enthalpie des Polymer- Compounds (durchgezogen) im Vergleich zum reinen Paraffin (gestrichelt) beim Phasenwechsel	18
Abbildung 10:	Temperaturverlauf an verschiedenen Positionen des Verflüssigers (Eintritt, geometrische Mitte, Austritt) beim Referenzgerät, mit sensiblem Wärmespeicher (Wasser) und mit Polymer- Compound	19

- Abbildung 11: Temperaturverteilung am Verflüssiger; oben: vor Beginn der Verdichterlaufzeit, mittig: am Ende der Verdichterlaufzeit, unten: 15 Minuten nach Stopp des Verdichters; Spalte 1: ohne Wärmespeicher, Spalte 2: mit sensiblem Wärmespeicher (Wasser), Spalte 3: mit PCM und PE-HD-Folie, Spalte 4: mit PCM und Aluminium-Verbundfolie, Spalte 5: mit Polymer-Compound..... 20
- Abbildung 12: Stromverbrauch bzw. -reduzierung im Vergleich zum Referenzgerät; links: mit unterschiedlichen (Latent-)Wärmespeichern im Verflüssiger, rechts: in Abhängigkeit der Beladung des Verflüssigers mit Polymer-Compound 21
- Abbildung 13: Verdampfertypen mit Polymer-Compound; links: eingeschäumter Verdampfer; mittig: freihängender Rollbond-Verdampfer, rechts: Lamellen-Verdampfer 22
- Abbildung 14: Enthalpieverlauf des Paraffin-Derivats (durchgezogen) für die Verdampferseite im Vergleich zu einer Wasser-Salz-Lösung gemäß der DIN EN 15502 (gestrichelt)..... 23
- Abbildung 15: Temperaturverlauf im Kühlfach des K 12020 (T1, T2, T3) und des (eingeschäumten) Verdampfers (TV) ohne (gestrichelt) und mit Polymer-Compound (durchgezogen)..... 24
- Abbildung 16: Temperaturverlauf im Kühlfach des Kühlgeräts K 12020 (T1, T3) und des M-Pakets (TM) ohne (gestrichelt) und mit PCM (durchgezogen) 25
- Abbildung 17: Temperaturverlauf im Kühlfach des Kühlgeräts K 32122 (T1, T2, T3), des Rollbond-Verdampfers (TV) und des Verflüssigers (TK) ohne (gestrichelt) und mit PCM an Verdampfer und Verflüssiger (durchgezogen) 26
- Abbildung 18: Temperaturverlauf im Kühlfach des Kühlgeräts K 12020 bei verschiedenen Regelstrategien: a) ohne PCM, b) Minimierung

	der Temperaturschwankungen, c) Minimierung des Stromverbrauchs, d) Last erhöhen, e) Last reduzieren	27
Abbildung 19:	Regelleistungskonzept für Haushaltskühlgeräte als virtueller Großverbraucher und Ansteuerung durch Cell Broadcast Services	28
Abbildung 20:	Kühlfach mit Polymer-Compound und Temperaturmesspositionen sowie die Befüllung und Verteilung von Test- und M-Paketen gemäß IEC 62552:2015.....	29
Abbildung 21:	Temperaturverlauf der spezifischen Enthalpie des Polymer-Compounds für Kühlfächer (links) und Transparenz über den Phasenwechsel (rechts)	30
Abbildung 22:	Temperaturverlauf der M-Pakete während eines Kühlleistungstests (links), ohne (blau) und mit PCM (orange), sowie Abkühlzeiten der untersuchten Kühlgeräte (rechts)	31
Abbildung 23:	Temperaturverlauf der M-Pakete während einer Störfallprüfung (links), ohne (blau) und mit PCM (orange), sowie Aufwärmzeiten der untersuchten Kühlgeräte (rechts)	31

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Eigenschaften der entwickelten (Latent-)Wärmespeicher- elemente	17
------------	--	----

Abkürzungsverzeichnis

CBS	Cell Broadcast Services
COP	coefficient of performance
DSC	Differential scanning calorimetry
DSM	Demand-Side-Management
GSM	Global System for Mobile Communications
IEC	International Electrotechnical Commission
PCM	Phase Change Materials/Phasenwechselmaterialien
PEHD	Polyethylen hoher Dichte
PMMA	Polymethylmethacrylat
PP	Polypropylen
SEBS	Styrol-Ethylen-Butylen-Styrol
SEP	Styrol-Ethylen-Propylen
VIP	Vakuumisoliations-Paneele
WOTKA	wärmestromoptimierte Temperaturkurvenanalyse

1 Einleitung

Die vorliegende kumulative Dissertation fasst die Publikationen zusammen, die der Autor im Rahmen seiner Forschungsarbeit zu polymergebundenen Phasenwechselmaterialien (PCM) sowie insbesondere deren Integration in Haushaltskühlgeräte verfasst hat. Kapitel 1–5 geben neben dem Stand der Technik die Motivation für diese Arbeit an und zeigen auf, dass die einzeln behandelten Themengebiete der Anwendungsintegration und der zugrunde liegende Materialentwicklung in einem engen Zusammenhang stehen und einen wichtigen Beitrag zur Effizienzsteigerung von Kühlgeräten, aber auch diversen weiteren Anwendungen liefern. Die Inhalte und Ergebnisse der einzelnen Publikationen werden dabei in einen Gesamtkontext gestellt und übergreifend diskutiert. Kapitel 6 beinhaltet die zugrunde liegenden einzelnen Publikationen mit jeweils einer kurzen Zusammenfassung.

Obwohl der Stromverbrauch von Kühlgeräten gering erscheint, weisen sie in der Summe aufgrund ihrer nahezu vollständigen Marktdurchdringung und der meist ganzjährigen Laufzeit ein großes Energieeinsparpotenzial auf. Im Durchschnitt werden in den OECD-Mitgliedstaaten 13,4 % des Stromverbrauchs privater Haushalte durch das Kühlen und Gefrieren von Lebensmitteln verursacht (IEA, 2003). In Deutschland liegt dieser Anteil sogar bei etwa 20 %, was ca. 7 % des gesamten Stromverbrauchs entspricht (Barthel et al., 2005).

In den vergangenen Jahren konnte der Stromverbrauch von Haushaltskühlgeräten bereits beträchtlich gesenkt werden, was nicht zuletzt auf die mittlerweile in vielen Ländern verordnete plakative Etikettierung mit einem Energielabel zurückzuführen ist. Dadurch ist die Energieeffizienz für Verbraucher*innen inzwischen zum ausschlaggebenden Kriterium bei der Neuanschaffung geworden (Faber et al., 2007). Um den Energiebedarf (weiter) zu senken, kann sowohl die Kältelast reduziert als auch die Umsetzung der elektrischen Energie in verfügbare Kälteleistung optimiert werden, sodass sich die Maßnahmen grob in drei Kategorien einteilen lassen.

1) *Verbesserung der Isolation von Gehäuse und Tür zur Verringerung des eintretenden Wärmestroms*

Durch den inzwischen zum Standard avancierten Polyurethan-Schaum anstelle der bis in die 1980er Jahre gängigen Polystyrol-Isolierung konnte die Kältelast bereits um ca. 30 % reduziert werden. Ähnliche Größenordnungen lassen sich noch einmal durch den Einsatz von Vakuumisulations-Paneelen (VIP) erzielen, dem stehen aber die nach wie vor hohen Kosten im preissensiblen Segment der

Haushaltskühlgeräte entgegen (Philipp, 2002). Und einfach die Wandisolierung dicker zu wählen, hat den Nachteil, dass dies in vielen Fällen zu einem geringeren Nutzinhalt führt.

2) *Einsatz effizienterer bzw. drehzahl geregelter Verdichter*

Drehzahl geregelte Verdichter ermöglichen einen Übergang vom üblichen intermittierenden Betrieb durch eine Ein/Aus-Regelung hin zu einem kontinuierlichen und geregelten Betrieb. Durch entsprechend geringere Reibungs- und Drosselungsverluste im Verdichter, höhere Verdampfungs- sowie niedrigere Verflüssigungstemperaturen und Vermeidung der Kältemittelverlagerung, die durch den Druckausgleich während der Stillstandzeiten erfolgt, kann der Stromverbrauch um bis zu 30 % gesenkt werden (Binneberg et al., 2002). Gegen einen Einsatz in einfachen Haushaltskühlgeräten sprechen bisher jedoch auch hier die nach wie vor erheblichen Mehrkosten.

3) *Optimierung der Wärmeübertragung an Verdampfer bzw. Verflüssiger*

Der maximal mögliche Wirkungsgrad des Kälteprozesses wird durch die Verflüssigungs- und Verdampfungstemperatur bestimmt. Die Absenkung der Verflüssigungstemperatur um 1 °C führt zu einer Verringerung des Stromverbrauchs von 2–3 %, die Erhöhung der Verdampfungstemperatur um 1 °C reduziert diesen bereits um 3–4 %. Eine einfache Möglichkeit ist z. B. die 50%ige Vergrößerung der Verflüssiger- bzw. Verdampferoberfläche, wodurch der Stromverbrauch um 6 % bzw. 10 % gesenkt werden kann (DKV, 1985). Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz von Ventilatoren zur Verbesserung des konvektiven Wärmeübergangs, wobei jedoch auch stets der Eigenverbrauch des Ventilators im Verhältnis zur Gesamtleistung zu berücksichtigen ist (Roth, 2008).

Die Integration von Latentwärmespeichern, die im Rahmen dieser Dissertation diskutiert wird, fällt in die dritte Kategorie. Es ist bekannt, dass PCM während der Phasenumwandlung eine große Wärmemenge bei nahezu konstanter Temperatur aufnehmen. Daher lassen sich durch die Integration von PCM Temperaturschwankungen in einer Vielzahl von Anwendungen reduzieren, was z. B. in der Gebäudetechnik, in Transportboxen für sensible Güter wie Medikamente oder auch in Wärmesenken für elektronische Bauteile bereits erfolgreich implementiert wurde (Mehling und Cabeza, 2008).

Ebenso ist die Einbindung von PCM in Haushaltskühl- und Gefriergeräte seit Jahren Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. Bereits 1989 integrierte Onyejekwe (1989) einen einfachen Latentwärmespeicher auf der Basis einer eutektischen NaCl/H₂O-Mischung in ein Haushaltsgefriergerät. Wang et al. (2007a, b, c) entwickelten einen Prototypen, mit dem der Einfluss eines PCM an unterschiedlichen Stellen im Kältesystem, beispielsweise zwischen Verdichter und Verflüssiger, untersucht wurde, und konnten so den Wirkungsgrad um 6 bis 8% verbessern. Durch Ankopplung einer PCM-Schicht direkt an den Verdampfer eines Haushaltskühlgeräts zeigten Azzouz et al. (2008, 2009), dass sich die Leistungszahl (COP) durch die höhere Verdampfertemperatur um 5 bis 15 % steigern lässt und sich die Anzahl der Ein- und Ausschaltvorgänge des Verdichters deutlich reduziert. Cheralathan et al. (2007) untersuchten ein industrielles Kühlsystem mit verkapseltem PCM und haben neben der Steigerung der Effizienz insbesondere auch die Möglichkeit der Lastverschiebung in z. B. kostengünstige Nachttarife nachgewiesen. Darüber hinaus konnten Gin und Farid (2010) durch die Integration von PCM-Paneele in ein Haushaltsgefriergerät eine gesteigerte Lagerqualität gefrorener Lebensmittel durch die Temperaturstabilisierung sowie einen verringerten Stromverbrauch während Abtau-Zyklen bzw. Tür-Öffnungen (Gin et al., 2010) feststellen. Zusammen mit der längeren Zyklendauer, also insbesondere der deutlich längeren Ausschaltzeit des Verdichters, prädestiniert dies Kühl- und Gefriergeräte mit einem zusätzlichen Latentwärmespeicher für ein zukünftiges Demand-Side-Management (DSM). Mit DSM wird die gezielte Steuerung der Stromnachfrage bezeichnet, um beispielsweise den zunehmenden Bedarf von Regelenergie zur Stabilisierung des Netzbetriebs aufgrund des steigenden Anteils stark fluktuierender, erneuerbarer Energien zu decken (Kohler et al., 2010). So konnten Bagriyanik und Zehir (2012) bereits mit handelsüblichen Kühlgeräten zeigen, dass sich ein Großteil des Energiebedarfs von Spitzenlastzeiten in andere Zeiten verschieben lässt, wobei sich dieser Effekt durch den gezielten Einsatz von PCM zukünftig noch deutlich verstärken ließe.

Der Wärmeübergang vom Verflüssiger in die Umgebung basiert bei den meisten Haushaltskühlgeräten auf freier Konvektion und Wärmestrahlung. Die intermittierende Betriebsweise der Haushaltskühlgeräte, wobei das Ein/Aus-Verhältnis typischerweise bei ca. 1:2 liegt, führt dadurch zu relativ hohen Verflüssigungstemperaturen während der Verdichterlaufzeiten. Gelingt es, die Temperaturzunahme des Verflüssigers während des Betriebs des Verdichters zu verringern und die Wärmeabgabe an die Umgebung zu einem großen Teil auf die Stillstandzeiten des Verdichters zu verlagern, so kann die Effizienz signifikant verbessert werden. Marchi Neto et al. (2009) schlugen hierzu in einer experimentellen Studie einen separaten Warmwasserspeicher vor, mit dem sich der Gesamtwirkungsgrad zwar erhöhen lässt, der mit

einem Volumen von 122 Litern in der Praxis allerdings in dieser Form nicht wirtschaftlich ausführbar wäre.

Die vorliegende Arbeit adressiert daher ebenfalls die grundlegenden materialspezifischen Probleme, welche bislang einer Integration von Latentwärmespeichern in Haushaltskühlgeräte in der Praxis entgegenstanden:

- Geringe Lade- und Entladeleistungen von Latentwärmespeichern aufgrund unzureichender Wärmeleitfähigkeit limitieren die effektiv nutzbaren Schichtdicken und damit Speichermassen.
- Aufgrund unzureichender Kristallisationsauslösung auftretende Unterkühlungseffekte verhindern eine temperaturgenaue Be- und Entladung und damit einen energieeffizienten Betrieb.
- Die Volumenänderung beim Phasenwechsel und die damit verbundene Unsicherheit durch Auslaufen im Fall der Beschädigung der Verkapselung.

Zur Lösung konnten im Rahmen dieser Dissertation formstabile Latentwärmespeicherelemente auf Basis Block-Copolymer-gebundener PCM mit erhöhter Wärmeleitfähigkeit sowie entsprechende Integrationskonzepte für die hier gängigen Verdampfer- und Verflüssigertypen entwickelt werden. Im Versuchsbetrieb wurde der Funktionsnachweis erbracht, sodass die Energieeffizienzsteigerung analysiert und optimiert werden konnte. Die Einbindung von PCM in eine polymere Matrix wie Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) oder Polymethylmethacrylat (PMMA) ist seit Jahren Gegenstand der Forschung. So gelang Chen et al. (2011) durch die Andickung eines Paraffins mit einem Polyethylen erstmals die Integration auf der Verflüssigerseite eines Haushaltskühlgeräts. Aufgrund des für Polyolefine typischen geringen Füllgrads konnten hier mit einem PCM-Anteil von knapp 40 % jedoch nur relativ geringe Speicherkapazitäten von ca. 100 kJ/kg erreicht werden. Zudem war das entwickelte Polymer-Compound nur für zusätzlich zur Atmosphäre verkapselte, d. h. eingeschäumte, Verflüssiger verwendbar, da die zumeist eingesetzten Draht-Rohr- bzw. Lamellen-Verflüssiger aufgrund der direkten Zugänglichkeit auf der Geräterückseite deutlich höhere Ansprüche an Auslaufsicherheit und Formbeständigkeit des PCM stellen. Aus diesem Grund wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit Compounds auf Basis von Block-Copolymeren entwickelt und dadurch deutlich höhere PCM-Anteile und damit Speicherkapazitäten bei gleichzeitig höherer Form- und Zyklusstabilität realisiert. Zudem wurde durch experimentelle Studien zur Additivierung mit verschiedenen Grafitexpandaten die Wärmeleitfähigkeit gezielt auf die vorher anhand von Simulationsmodellen für die jeweilige Integrationsvariante ermittelte

optimale Wärmeleitfähigkeit um bis zu einem Faktor von 20 erhöht. Neben der experimentellen Bestimmung der thermophysikalischen Stoffdaten der entwickelten Compounds wurde deren Funktionsnachweis auch im umfangreichen Versuchsbetrieb erbracht.

Die Arbeit präsentiert den detaillierten Aufbau der entwickelten Integrationskonzepte für die bei Haushaltskühlgeräten heute gängigen Verdampfer- und Verflüssigertypen, insbesondere

- eingeschäumte Rohr- sowie (freihängende) Rollbond-Verdampfer,
- Lamellenverdampfer
- sowie eingeschäumte Rohr- und freihängende Draht-Rohr-Verflüssiger,

deren praktische Umsetzung neben der Fokussierung auf einen möglichst hohen thermischen Wirkungsgrad auch im Hinblick auf umwelt-, sicherheits- sowie vor allem produktionstechnische Aspekte durchgeführt wurde. Durch experimentelle Studien unter Berücksichtigung der diesbezüglich einschlägigen Norm- und Prüfbedingungen, insbesondere auch bereits im Hinblick auf den neuen sogenannten global standard (IEC 62552:2015) mit den dort erstmals eingeführten Funktionsprüfungen, konnten neben der Funktionalität wesentliche Verbesserungspotenziale aufgezeigt werden, insbesondere konnten

- der Stromverbrauch um bis zu 17 % reduziert,
- die Temperaturschwankungen im Kühlgut von bis zu 4 K auf unter 0,5 K reduziert,
- das (positive wie auch das negative) Lastverschiebungspotenzial verdoppelt,
- die Abkühlleistung um 33 % und
- die Zeit bis zum kritischen Temperaturanstieg im Störfall um 145 % gesteigert werden.

Vor dem Hintergrund, dass experimentelle Studien zur auch produktionstechnisch umsetzbaren Integration vom PCM in Haushaltskühlgeräte kaum vorhanden sind, liefert die vorliegende Dissertation wichtige praktische Erkenntnisse über die Auslegung und das Betriebsverhalten solcher Geräte für die heute verwendeten Verdampfer- und Verflüssigertypen.

2 Polymergebundene PCM mit erhöhter Wärmeleitfähigkeit

Die Ausnutzung der großen Enthalpie bei der Phasenumwandlung zur (latenten) Wärmespeicherung ist nicht neu – bereits die Römer nutzen vor über 2000 Jahren das Schmelzen von Eis, also den Phasenwechsel von fest zu flüssig, um Lebensmittel zu kühlen. Neben der im Vergleich zur sensiblen Wärmespeicherung vergleichsweise hohen Energiedichte erfolgt der Phasenwechsel bei praktisch nahezu konstanter Temperatur, also idealerweise auch der Wärmetransport am Verdampfer bzw. Verflüssiger, was sich dementsprechend positiv auf die Effizienz des Kältekreislaufs auswirkt. Für die erfolgreiche Integration von Phasenwechselmaterialien in Haushaltskühlgeräte mussten jedoch zunächst Latentwärmespeicher entwickelt werden, welche auch die hohen technischen und ökonomischen Anforderungen einer Massenproduktion erfüllen.

Generell lassen sich Phasenwechselmaterialien in organische und anorganische PCM unterteilen, wobei in dem für die vorliegende Arbeit relevanten Temperaturbereich vor allem wässrige Salzlösungen, Salzhydrate, Paraffine und Fettsäuren in Betracht kommen. Einen Überblick über die in den jeweiligen Temperaturbereichen grundsätzlich infrage kommenden Materialklassen mit ihren typischen Schmelzenthalpien gegenüber ihren Schmelztemperaturen gibt Abbildung 1.

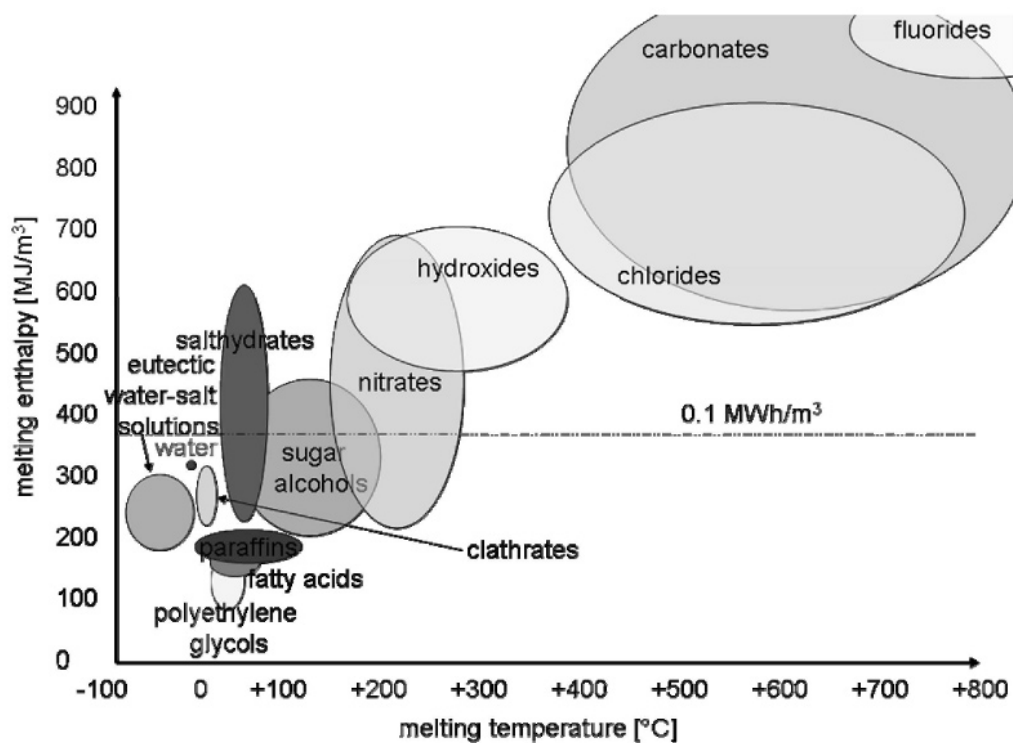


Abbildung 1: Typische Schmelzenthalpien und Temperaturbereiche von Materialklassen zur Latentwärmespeicherung (Mehling et al., 2008)

Bei der Auswahl geeigneter PCM sind neben oft anwendungsspezifischen technischen und ökonomischen Auswahlkriterien vor allem

- die passende Phasenwechseltemperatur,
- eine möglichst hohe Schmelzenthalpie,
- eine geringe Unterkühlung und
- die Zyklenstabilität

von besonderer Bedeutung. Insbesondere die beiden letztgenannten Anforderungen spielen im Hinblick auf die Anwendung in Haushaltskühlgeräten eine entscheidende Rolle. Kritisch, insbesondere auf der Verdampferseite, ist die für die Initiierung des Phasenwechsels notwendige Unterkühlung bei den in diesem Temperaturbereich eigentlich naheliegenden Salzlösungen. Hierbei handelt es sich um die Differenz zwischen Schmelz- und Erstarrungstemperatur, die bei wässrigen Salzlösungen typischerweise bei ca. 8 bis 10 K liegt (vgl. Abbildung 14), wodurch auch die Verdampfertemperatur beim Beladen des Speichers und damit auch die Energieeffizienz dementsprechend sinken. Hinsichtlich der Zyklenstabilität stellt vor allem die Phasenseparation aufgrund der Dichteunterschiede der einzelnen Komponenten ein zentrales Problem anorganischer PCM dar. Hierdurch können sich durch die Zyklisierung Phasen mit unterschiedlicher Zusammensetzung und damit im Laufe der Zeit gänzlich andere thermophysikalische Eigenschaften ausbilden. Aus einer heute für Haushaltskühlgeräte typischen Zykluszeit von ca. 1 h und einer üblichen (permanenten) Laufzeit von 10 Jahren ergibt sich für die Anwendung damit eine (Mindest-)Zyklenzahl von ca. 90 000, womit grundsätzlich nur organische PCM in Betracht kommen.

Als Ausgangsbasis für die materialspezifischen Entwicklungen im Rahmen dieser Arbeit dienten daher paraffinische Materialien bestehend aus n-Alkanen (gesättigte Kohlenwasserstoffe) der allgemeinen Summenformel C_nH_{2n+2} . Dabei nimmt die Schmelztemperatur mit steigender Kettenlänge zu, weswegen im hier relevanten Temperaturbereich vor allem die höheren Alkane einer C-Anzahl von C10 bis C22 mit Schmelztemperaturen im Bereich von -30 °C bis 44 °C und typischen Schmelzenthalpien von 200 kJ/kg bis 260 kJ/kg im Fokus der Betrachtungen standen. Diese sind aufgrund ihres kongruenten Schmelzverhaltens grundsätzlich zyklens stabil und weisen nahezu keine Unterkühlung auf. Zudem können diese mittlerweile auch in unterschiedlichen Schnittbreiten auch aus regenerativen Rohstoffen gewonnen werden und sind daher nicht nur ökonomisch, sondern auch ökologisch interessant. In Reinform sind sie aufgrund der Aspirationsgefahr jedoch ein kennzeichnungspflichtiger Gefahrstoff. Das wesentliche Problem bei der technischen Integration ist aber ihre geringe

Wärmeleitfähigkeit von typischerweise 0,2 bis 0,3 W/(mK). Da die Wärmestromdichte proportional zur Quadratwurzel der Wärmeleitfähigkeit ist, führt dies mit wandernder Phasenfront zu steigenden Temperaturdifferenzen und damit einem energetisch zunehmend ineffizienteren Kälteprozess.

Die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit von Phasenwechselmaterialien (und auch Polymeren) ist daher seit Längerem Gegenstand der Forschung. In Betracht kommen dabei sowohl Füllstoffe wie Keramiken, Metalle, Oxide, Salze und Kohlenstoffe in Pulver- oder Faserform als auch die Einbringung des PCM in eine feste Struktur wie Schaum oder ein Gewebe, wodurch abhängig vom Füllgrad beispielsweise im Fall von offenporigen Metallschäumen (allerdings anisotrope) Wärmeleitfähigkeiten von bis zu 50 W/(mK) realisiert werden konnten (Meinert, 2009). Allerdings verhindert die resultierende Steifigkeit dieser Verbundstoffe oft eine optimale thermische Kopplung an die typischen (aber im Einzelfall stark variierenden) Verdampfer- und Verflüssigergeometrien von Haushaltskühlgeräten. Noch wesentlicher für die Materialentwicklung im Rahmen dieser Arbeit waren jedoch die in diesem Marktsegment strikt vorgegebenen Kostenstrukturen für Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz in der Produktentwicklung mit einem branchenspezifischen Durchschnitt von 1 € je Prozent Stromverbrauchsreduktion, wobei dies sowohl die Materialkosten für PCM bzw. Verbundstoff inklusive Verkapselung sowie den Mehraufwand bei der Produktion der Kühlgeräte beinhaltet.

Ziel im Rahmen der Arbeit war es damit zunächst, auch hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit des PCM ein Kosten-Nutzen-Optimum für die verschiedenen Latentwärmespeichergeometrien zu eruieren und dieses anschließend zielgerichtet in einem Verbundstoff zu realisieren, wofür in einem ersten Schritt die Rahmenbedingungen für die Speichergeometrie und abzudeckenden Betriebszustände analysiert wurden. Dabei konnte gezeigt werden,

- dass die Aufladezeit, d. h. die unterbrechungsfreie Laufzeit des Verdichters (abhängig von den Umgebungsbedingungen), auf maximal 60 bis 100 Minuten begrenzt ist, da es ansonsten im unteren Bereich des Kühlgeräts zum Unterschreiten der Gefriergrenze kommt und somit die eingelagerten Lebensmittel durch zeitweises Einfrieren irreversibel geschädigt werden;
- dass verdampferseitig die Speicherstärke auf maximal 20 mm begrenzt ist, da der positive Effekt des Speichers ansonsten aufgrund der reduzierten Isolationsstärke im besonders sensiblen Bereich zwischen Verdampfer und Verflüssiger konterkariert wird;

- dass verflüssigerseitig die Speicherstärke für eine vollständige Integration konstruktiv bedingt auf maximal 5 mm begrenzt ist, da ansonsten der negative Einfluss auf die üblicherweise freie Konvektion überwiegt.

Aus den Randbedingungen (Speicherstärke, Schmelzenthalpie und Temperaturdifferenz) konnte so für die einzelnen Applikationen aus dem Laufweg der Phasenfront in Abhängigkeit der Zeit jeweils eine (Mindest-)Wärmeleitfähigkeit im Bereich von 0,5 bis 4 W/(mK) abgeleitet und damit als Zielgröße definiert werden, wie Abbildung 2 exemplarisch verdeutlicht.

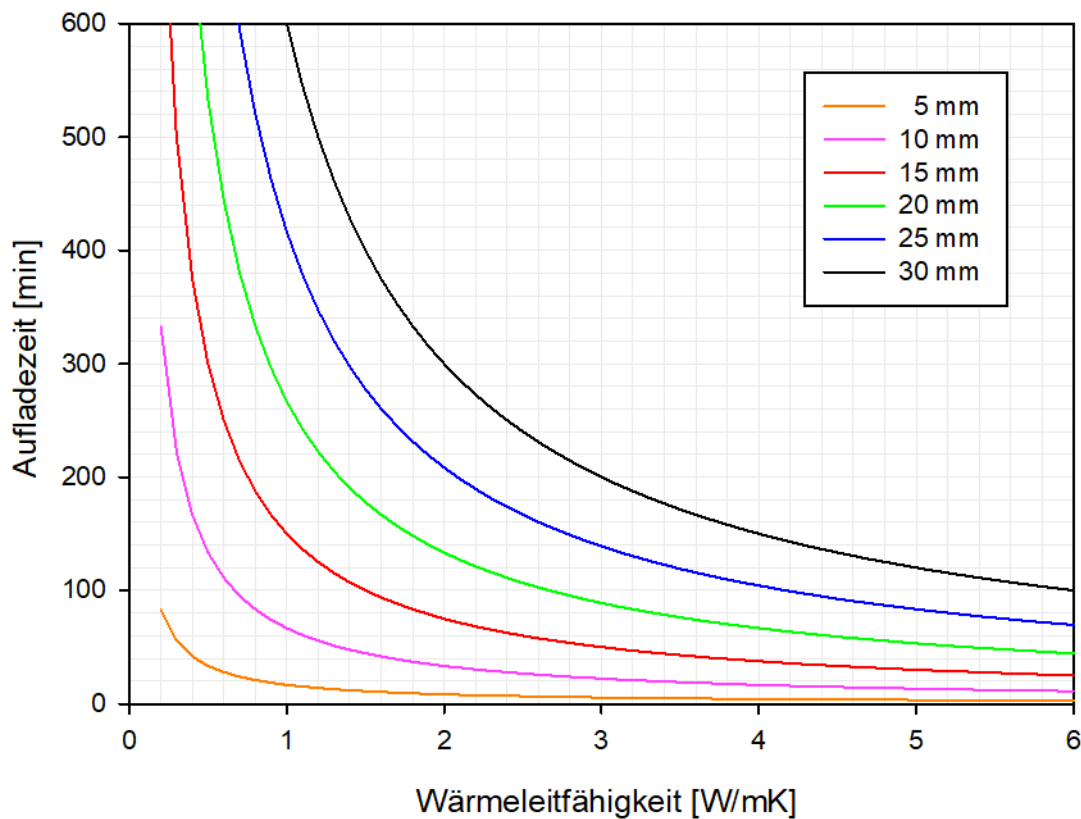


Abbildung 2: Aufladezeiten eines exemplarischen Latentwärmespeichers mit unterschiedlicher Speicherstärke in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit

Als Ausgangsmaterial diente im Weiteren expandierter Grafit, auf dessen Basis durch Vakuum-Druck-Infiltration von offenporigen Matrizen bereits Latentwärmespeicherelemente mit Wärmeleitfähigkeiten von bis zu 25 W/(mK) realisiert werden konnten (Mehling et al., 2000). Expandierter Grafit ist ein Derivat des natürlichen Grafits, welcher über eine Interkalationsverbindung hergestellt wird. Hierbei wird zunächst ein starkes Oxidationsmittel, in der Praxis zumeist ein Schwefel-Salpeter-Gemisch, in das Grafitgitter eingebracht und dann

schockartig bei 700 bis 1000 °C verdampft, wodurch sich der Grafit aufbläht und hochporöse Expandate entstehen, die auch Blähgrafit genannt werden (siehe Abbildung 3). Durch die Ausgangsgröße der Grafitsschuppen und Variation der Prozessparameter, wie Interkalationsdauer und (Schock-)Temperatur, kann die Größe der entstehenden Partikel beeinflusst werden. Diese können zur Bildung wärmeleitfähiger Strukturen dann entweder zu Formkörpern mit verschiedenen Dichten und Porositäten kompaktiert und mit PCM infiltriert werden (vgl. Mehling et al., 2000) oder wie in der vorliegenden Arbeit im Hinblick auf einen vereinfachten Herstellungsprozess als Füllstoff in das PCM eingebracht werden.

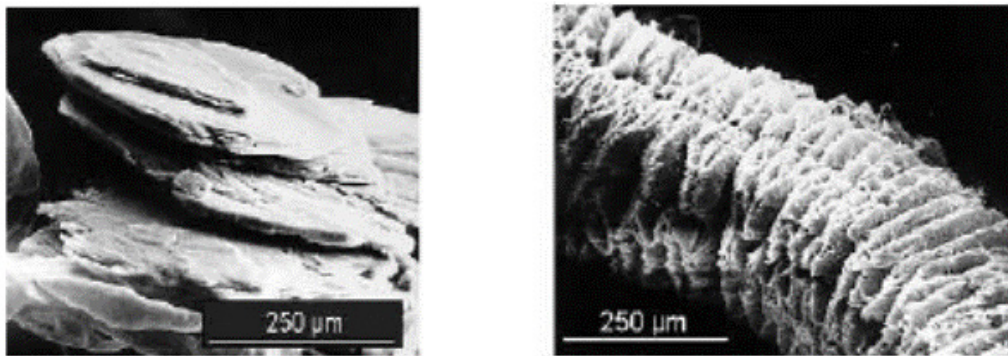


Abbildung 3: Grafitsschuppe (links) und expandierter Grafit (rechts)

Deswegen wurde im Weiteren der Einfluss von Grafitexpandaten mit verschiedenen Korngrößen bei unterschiedlichen Massenanteilen im Hinblick auf die zielgerichtete Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit untersucht. Hierfür wurden Mischungen mit Grafitanteilen bis $\omega = 0,1$ g/g sowohl mit kommerziellen Grafitexpandaten (SGL SIGRATHERM® GFG5, GFG200, GFG600, GFG1000) als auch mit daraus durch Siebung klassifizierten Korngrößen von 200, 400, 600, 800 und 1000 µm hergestellt und die Wärmeleitfähigkeit der Proben mittels Guarded-Hot-Plate-Verfahren experimentell ermittelt. So konnte gezeigt werden, dass neben dem Massenanteil auch die Partikelgröße grundsätzlich einen positiven Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit hat. Bei den kommerziell erhältlichen Typen lieferte das GFG1000 hier jedoch schlechtere Ergebnisse als das GFG600, was bei genauer Untersuchung der Korngrößenverteilung auf die wesentlich größere Streuung um einen vergleichbaren Medianwert und damit auch deutlich höheren Anteil kleinerer Partikel zurückgeführt werden konnte. Für die weiteren Entwicklungen wurde deswegen GFG600 als Additiv verwendet. Abbildung 4 zeigt exemplarisch die so im Rahmen dieser Arbeit erzielte Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit anhand eines höheren Alkans (C22).

Ein generelles Problem bei der praktischen Integration von PCM ist die langfristige Gewährleistung der Auslaufsicherheit, gerade auch vor dem Hintergrund der Volumenänderung

beim Phasenwechsel. Infrage kommt hier grundsätzlich die Verkapselung des PCM, sowohl makroskopisch als auch mikroskopisch, oder auch die Einbindung in eine Polymermatrix. Da bei der Mikroverkapselung bei typischen Korngrößen von 2 bis 20 μm aufgrund des relativ hohen Massenanteils der polymeren Hülle ($\omega \approx 0,5 \text{ g/g}$) nur geringe Speicherkapazitäten bis um ca. 100 kJ/kg realisiert werden können, wurde dieser Ansatz nicht verfolgt und für die ersten Untersuchungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit zunächst auf eine Makroverkapselung in Form von diffusionsdichten Verbundfolien zurückgegriffen. Diese erwiesen sich jedoch für die Anwendung in Haushaltskühlgeräten schnell als nicht ausreichend zyklenstabil, weswegen im Weiteren gezielt hochkapazitive polymergebundene PCM auf der Basis von Block-Copolymeren entwickelt wurden.

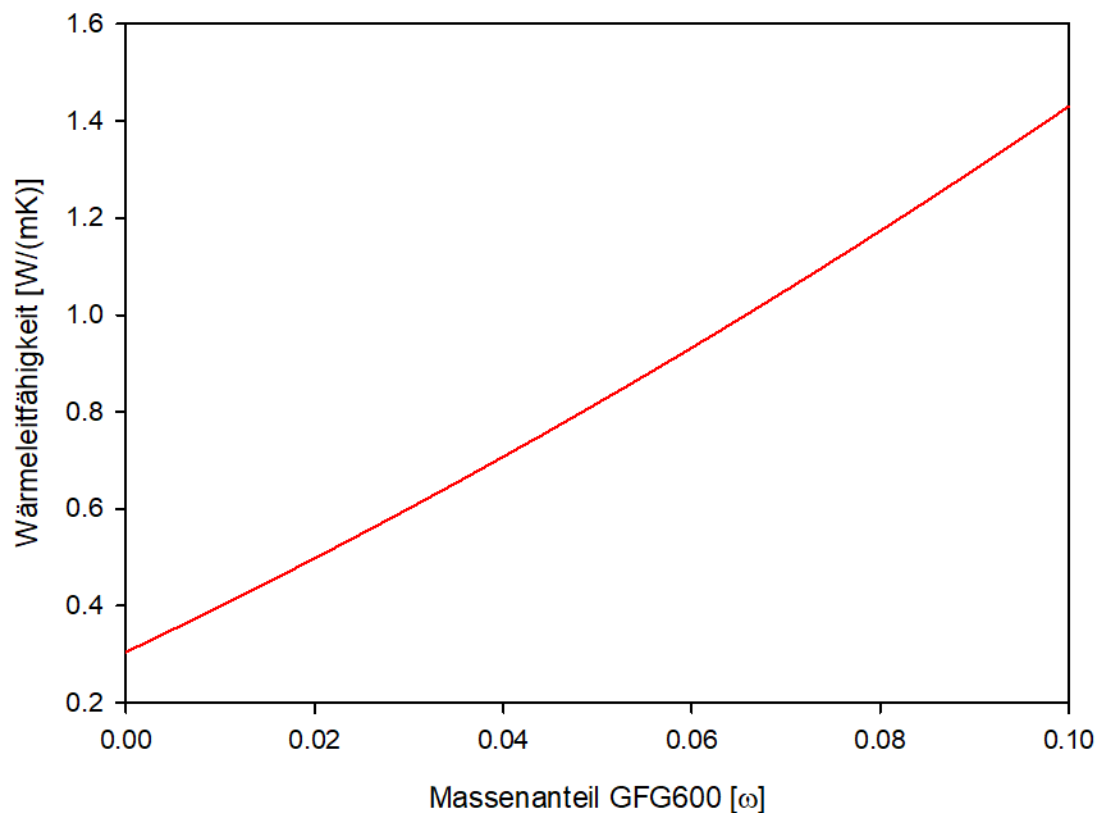


Abbildung 4: Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit eines Alkan(C22)-basierten Polymer-Compounds in Abhängigkeit des GFG600

Die Einbindung von PCM in eine polymere Matrix wie Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) oder Polymethylmethacrylat (PMMA) ist seit Jahren Gegenstand der Forschung, so gelangen Chen et al. (2011) durch die Andickung eines Paraffins in einem Polyethylen erstmals die Integration auf der Verflüssigerseite eines Haushaltskühlgeräts. Aufgrund des PCM-Anteils von knapp 40 % weist das Compound jedoch lediglich eine Speicherkapazität von ca. 100 kJ/kg auf, was sich auch mit anderen Veröffentlichungen zur Einbindung von PCM in

Polyolefinen mit hier maximal realisierbaren Massenanteilen von 50 bis 70 % deckt (Ahmet, 2004; Alkan 2009).

Basierend auf verschiedenen Di- und Tri-Block-Polymeren wurden im Rahmen dieser Arbeit Compounds mit PCM-Anteilen von 75 bis 95 % entwickelt, deren thermophysikalische Stoffdaten experimentell ermittelt wurden. Der Funktionsnachweis wurde im Labor- und Versuchsbetrieb erbracht. Die verwendeten Styrol-basierten Block-Polymere wie Styrol-Ethylen-Propylen (SEP) oder Styrol-Ethylen-Butylen-Styrol (SEBS) bilden hierbei ein Netzwerk aus, in das die Alkane eingebunden werden, wie Abbildung 5 schematisch zeigt.

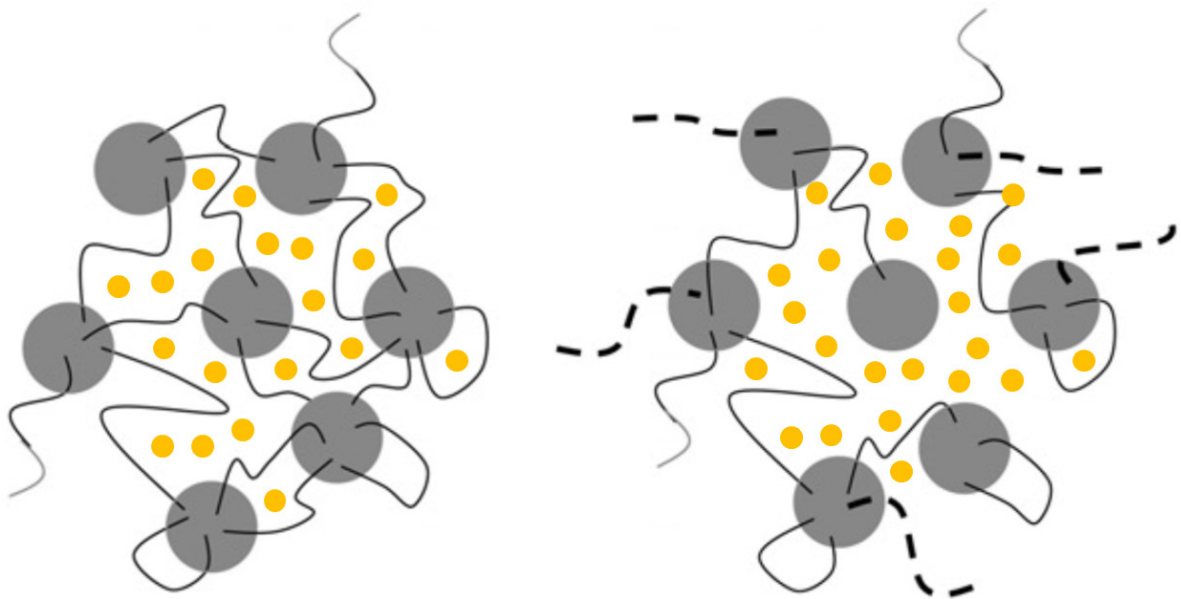


Abbildung 5: Styrol-basierte Block-Copolymer-Netzwerke mit eingebundenen Alkanen; links: SEBS, rechts: SEBS + SEP (nach Kalcioğlu et al., 2011, modifiziert)

Durch Variation des Di-/Tri-Block-Verhältnisses sowie der jeweiligen Styrol-Anteile konnten so Alkane verschiedener Kettenlänge bis zu einem Massenanteil von $\omega = 0,95$ g/g zyklisch stabil eingebunden und dadurch hochkapazitive Polymer-Compounds mit Schmelzpunkten von -5 °C bis 44 °C entwickelt und daraus (formstabile) Latentwärmespeicherelemente zur Integration in Haushaltskühlgeräte hergestellt werden. Abbildung 6 zeigt einige Beispiele.

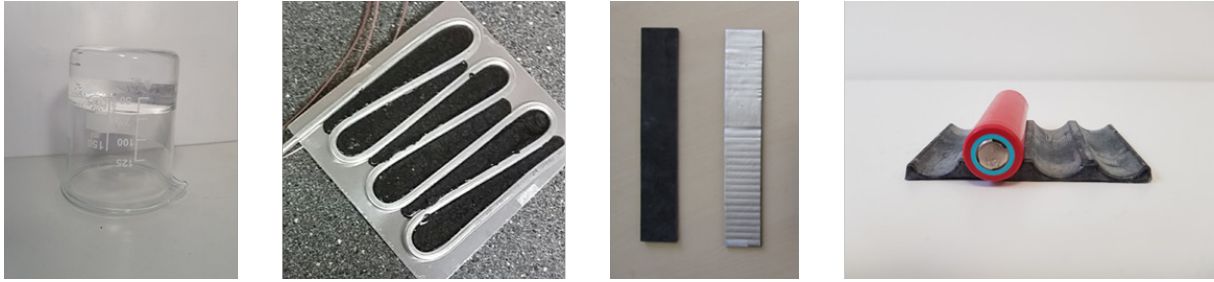


Abbildung 6: Beispiele entwickelter Polymer-Compunds bzw. formstabiler Latentwärmespeicherelemente

3 Effizienzsteigerung von Haushaltskühlgeräten

Der Energiebedarf von Haushaltskühlgeräten, wie in Abbildung 7 anhand eines Temperatur-Entropie-Diagramms dargestellt, wird letztlich von der Differenz zwischen Verflüssigungs- und Verdampfungstemperatur bestimmt. Die Absenkung der Verflüssigungstemperatur um 1 °C führt zu einer Verringerung des Stromverbrauchs von 2–3 %, die Erhöhung der Verdampfungstemperatur um 1 °C reduziert diesen um 3–4 %. Die hierfür erforderliche Optimierung der Wärmeüberübertragung an Verdampfer bzw. Verflüssiger wurde in zahlreichen Veröffentlichungen untersucht, beispielsweise durch die Vergrößerung der Verflüssiger- bzw. Verdampferoberfläche (DKV, 1985) oder auch wie im Fokus dieser Dissertation durch die Integration von Latentwärmespeichern (Onyejekwe [1989]; Wang et al. [2007a, b, c]; Azzouz et al. [2008, 2009]).

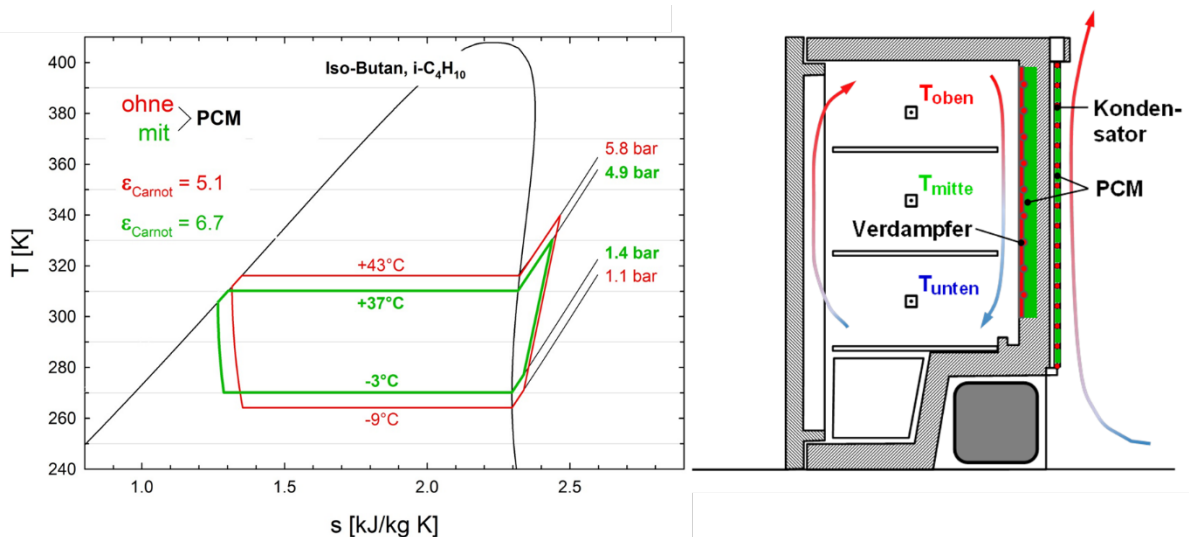


Abbildung 7: Haushaltskühlgerät mit und ohne Latentwärmespeicher; links: Temperatur-Entropie-Diagramm; rechts: schematische Darstellung

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Effizienzsteigerung von Haushaltskühlgeräten durch die verdampfer- und verflüssigerseitige Integration der dafür ebenfalls im Rahmen der Dissertation entwickelten Latentwärmespeicherelemente. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Haushaltskühlgeräte mit den typischen Verdampfer- und Verflüssigertypen unter realen Produktionsbedingungen entsprechend modifiziert und hinsichtlich Energieeffizienz und Betriebsverhalten untersucht.

Die verflüssigerseitige Integration wird exemplarisch anhand eines vollintegrierten Einbaukühlgeräts des Typs Miele K-9252i-1 mit einem Nutzinhalt von 152 Litern und einem Stromverbrauch von 98 kWh/Jahr (Energieeffizienzklasse A++) beschrieben. Die Wärme wird bei diesem Gerät über einen Draht-Rohr-Verflüssiger mit 455×655 mm (Gesamtbreite \times -höhe) abgegeben. Zur Vergrößerung der Wärmeübertragungsfläche sind auf einer Breite von 400 mm Drähte (Stärke: 1 mm, Abstand: 5 mm) senkrecht auf die horizontal verlaufenden Rohre (Außendurchmesser: 4,75 mm, lichter Abstand: 40 mm) geschweißt, sodass der daraus resultierende Zwischenraum zur Integration von (Latent-)Wärmespeicherelementen genutzt werden kann. In Abbildung 8 ist der Verflüssiger des Geräts rechts mit Kettenbeuteln (also aneinandergereihten, fest verbundenen Folienbeuteln) und links mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Polymer-Compound bestückt. Auf diese Weise konnte jeweils eine Masse von 500 g der verschiedenen Speichermaterialien nachträglich in den Standard-Draht-Rohr-Verflüssiger integriert werden.

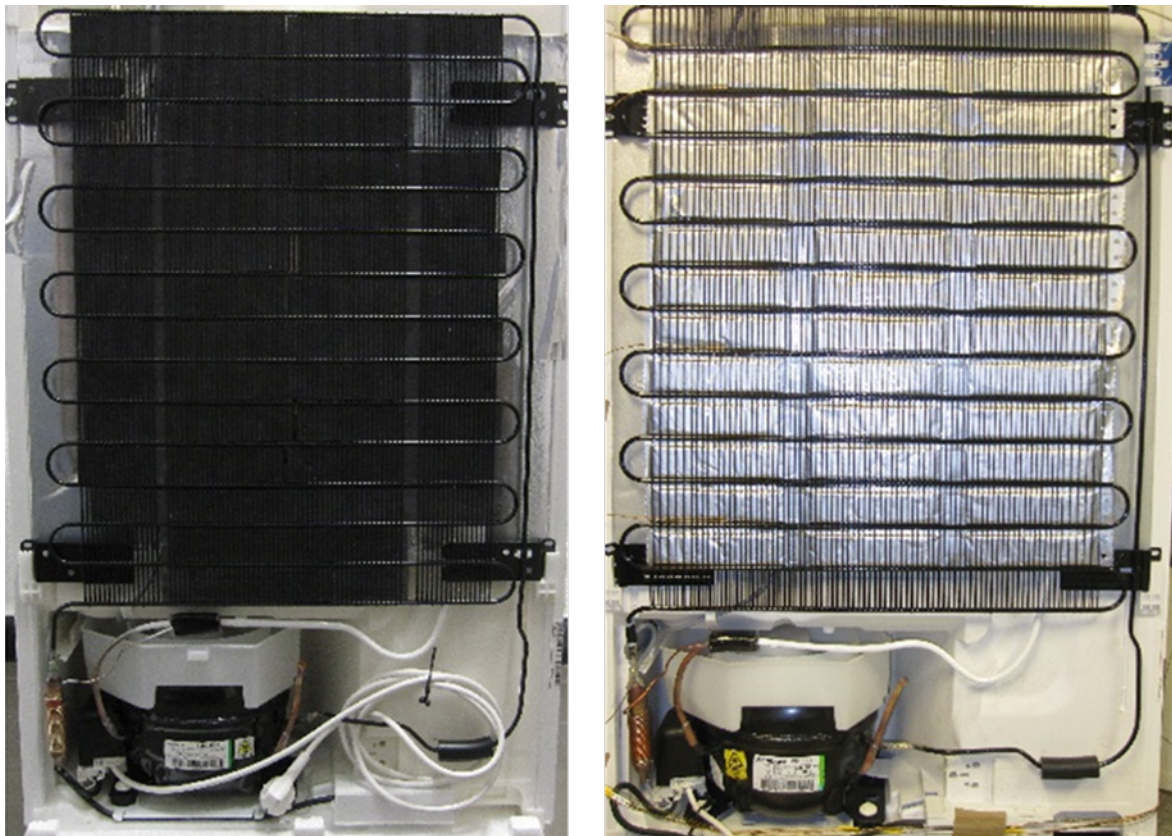


Abbildung 8: Draht-Rohr-Verflüssiger des Miele K-9252i-1; links: bestückt mit formstabilem Polymer-Compound, rechts: mit Kettenbeuteln aus einer Aluminium-Verbundfolie (gefüllt mit Wasser oder reinem Paraffin)

Anhand dieses Geräts wurden unterschiedliche Speichermaterialien (Wasser, Paraffin und polymergebundenes PCM) sowie unterschiedliche Verkapselungen (PE-HD-Folie und Aluminium-Verbundfolie) untersucht. Einen Überblick über wichtige physikalische Eigenschaften gibt Tabelle 1. Neben den Wärmespeichern aus handelsüblichen Komponenten (Wasser und Paraffin sowie PE-HD- und Aluminium-Verbundfolie) wurden formstabile Latentwärmespeicherelemente auf der Basis Block-Copolymer-gebundener organischer PCM entwickelt. Deren Wärmeleitfähigkeit von $0,19 \text{ W/(mK)}$ konnte hierbei durch Additivierung mit Grafitexpandat abhängig vom Massenanteil ω um bis zu einem Faktor von 20 auf $3,95 \text{ W/(mK)}$ (bei $\omega \approx 0,3 \text{ g/g}$) erhöht werden (vgl. Kapitel 2). Für die weitergehenden Untersuchungen wurde jedoch aufgrund der konstruktionsbedingt auf ca. 4 mm begrenzten Schichtdicke der Speicherelemente ein Polymer-Compound mit einer Wärmeleitfähigkeit von mindestens $0,6 \text{ W/(mK)}$ und dafür einer entsprechend höheren Speicherkapazität als optimal ermittelt und realisiert.

Tabelle 1: Eigenschaften der entwickelten (Latent-)Wärmespeicherelemente

	Speichertyp			
	Wasser [A]	PCM [B]	PCM [C]	Copolymer-compound [D]
Masse [kg]	0.5	0.5	0.5	0.5
Dichte [kg l^{-1}]	1.0	0.76	0.76	0.89
Phasenwechseltemperatur [$^{\circ}\text{C}$]	0	34	34	34
Speicherkapazität $25\text{-}40^{\circ}\text{C}$ [kJ kg^{-1}]	63	251	251	182
Wärmeleitfähigkeit [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]	0.6	0.19	0.19	0.64
Verkapselung	Al-Verbund	PE-HD	Al-Verbund	-

Der wesentliche Unterschied zu bisherigen Ansätzen war hier die Formstabilität und Auslaufsicherheit auch im „flüssigen“ Zustand, wodurch die ansonsten notwendige Verkapselung entfällt. Allerdings haben Langzeituntersuchungen gezeigt, dass hierfür aufgrund der direkten Zugänglich- und damit Sichtbarkeit des Verflüssigers ein relativ hoher Polymeranteil von $\omega \approx 0,2 \text{ g/g}$ für die Formbeständigkeit erforderlich ist. Abbildung 9 zeigt den resultierenden Temperaturverlauf der spezifischen Enthalpie des Polymer-Compounds im Vergleich zum reinen PCM. Die Messungen wurden mit einem speziell zur Analyse von PCM entwickelten wärmestromgeführten 3-Schicht-Kalorimeter (WOTKA) durchgeführt, welches im Vergleich zu handelsüblichen DSC-Geräten wesentlich größere Probenmengen und damit eine wesentlich genauere Bestimmung der Phasenwechseltemperatur erlaubt. Im Vergleich zum reinen PCM sinkt die Speicherkapazität des Compounds aufgrund des Polymer- und Grafitanteils im Temperaturbereich des Verflüssigers von 25°C bis 40°C um ca. 25 % von 251 kJ/kg auf 182 kJ/kg , der Temperaturbereich der Phasenumwandlung bleibt hierbei

jedoch unbeeinflusst. Im direkten Vergleich zu dem von Chen et al. (2011) vorgeschlagenen Paraffin-Polyethylen-Compound weist das hier entwickelte Speichermaterial somit eine fast zehnfach größere Wärmespeicherkapazität im relevanten Temperaturbereich auf.

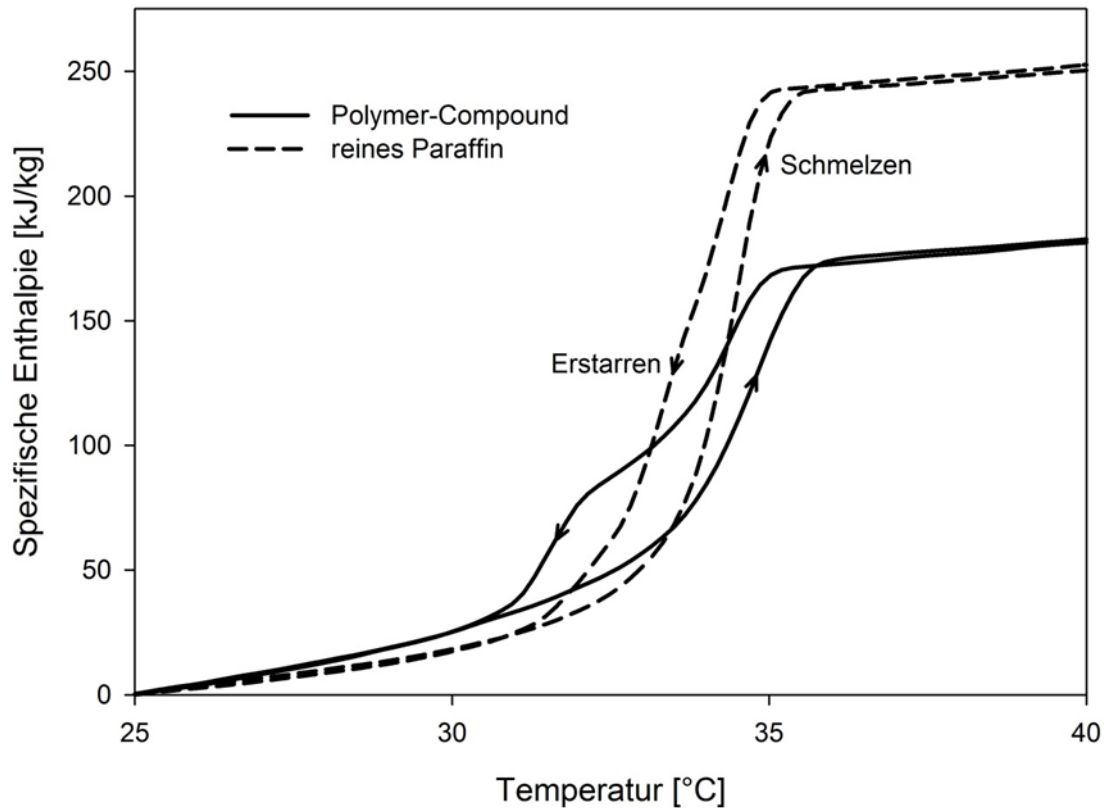


Abbildung 9: Temperaturverlauf der spezifischen Enthalpie des Polymer-Compounds (durchgezogen) im Vergleich zum reinen Paraffin (gestrichelt) beim Phasenwechsel

Den grundsätzlichen Einfluss der Wärmespeicher auf den Temperaturverlauf am Verflüssiger des Haushaltskühlgeräts zeigt Abbildung 10. Die Temperatur wird sowohl in ihrem Maximalwert als auch im zeitlichen und örtlichen Mittel während der gesamten Laufzeit des Verdichters signifikant reduziert. Dadurch wird ein größerer Teil der Wärmeabgabe in die Stillstandzeiten verlagert. So kann die Maximaltemperatur am Eintritt des Verflüssigers zum Ende der Verdichterlaufzeit bereits durch einen sensiblen Wärmespeicher (Wasser) um ca. 3 K von ca. 47 °C auf 44 °C, mit dem polymergebundenen Latentwärmespeicher sogar um ca. 8 K auf nur noch ca. 39 °C reduziert werden. Ähnlich verhält es sich in der geometrischen Mitte des Verflüssigers, wo sich die Temperatur zu diesem Zeitpunkt durch den sensiblen Wärmespeicher um ca. 5 K und mit dem Latentwärmespeicher sogar um ca. 10 K auf nur noch ca. 37 °C verringert, und auch die Austrittstemperatur sinkt von ca. 39 °C auf ca. 34 °C

(Wasser) bzw. 31 °C (Polymer-Compound). Durch diese Verringerung der Verflüssigungstemperatur und damit einhergehend des Verflüssigungsdrucks steigt insgesamt die Kälteleistung des Kühlgeräts, sodass sich unter sonst gleichbleibenden Rahmenbedingungen die Verdichterlaufzeit verkürzt. Hieraus resultiert bei gleichbleibender Stillstandzeit auch eine leichte Verkürzung der Zykluszeit und somit eine Verringerung der relativen Einschaltdauer.

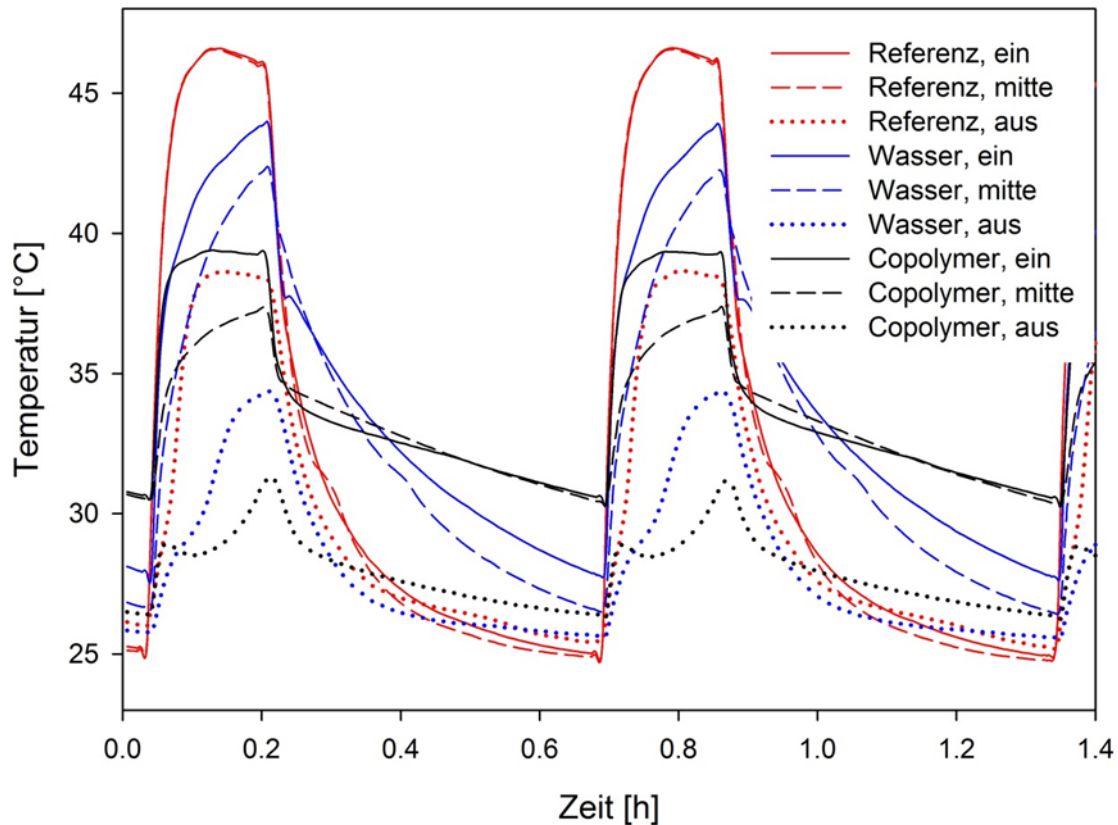


Abbildung 10: Temperaturverlauf an verschiedenen Positionen des Verflüssigers (Eintritt, geometrische Mitte, Austritt) beim Referenzgerät, mit sensiblen Wärmespeicher (Wasser) und mit Polymer-Compound

Die im Rahmen dieser Arbeit zur Optimierung der thermischen Ankopplung durchgeführten thermografischen Analysen verdeutlichen die Temperaturverteilung am Verflüssiger zu verschiedenen Zeitpunkten im Ein/Aus-Schaltzyklus des Verdichters, jeweils oben vor dem Start des Verdichters, mittig beim Erreichen der Maximaltemperatur zum Ende der Verdichterlaufzeit und unten 15 Minuten nach dem Stopp des Verdichters, also während der Abkühlphase. Bereits der Einsatz eines sensiblen Wärmespeichers mit Wasser (Abbildung 11, Spalte 2) führt im Vergleich zum Referenzgerät ohne Wärmespeicher (Spalte 1) zu einer deutlich verringerten maximalen Verflüssigertemperatur, wohingegen während der Abkühlphase bis kurz vor Beginn der Verdichterlaufzeit die Temperatur aufgrund der zusätzlichen

thermischen Masse des Wassers merklich höher liegt. Vor dem Start des Verdichters ist auch der Unterschied zwischen dem sensiblen (Spalte 2) und den latenten Wärmespeichern (Spalten 3 bis 5) am deutlichsten zu erkennen, indem die latenten Wärmespeicher aufgrund der erheblich größeren gespeicherten Wärmemenge noch eine wesentlich höhere Temperatur aufweisen. Dies gilt nahezu für die gesamte Abkühlphase des Verflüssigers, wodurch in den Stillstandzeiten wesentlich höhere Wärmemengen an die Umgebung abgegeben werden können und gleichzeitig die Maximaltemperatur auch gegenüber dem sensiblen Wärmespeicher noch einmal deutlich gesenkt wird. Der Vergleich des PCM-Speichers mit PE-Verkapselung (Spalte 3) mit dem Speicher mit Alu-Verbund-Verkapselung (Spalte 4) unterstreicht an dieser Stelle den Einfluss der Wärmeleitfähigkeit, verdeutlicht durch die wesentlich homogenere Temperaturverteilung während aller Phasen des Kälteprozesses. Die homogenste Temperaturverteilung und damit auch die niedrigste Maximaltemperatur, insbesondere auch der Verflüssigerrohre, konnte jedoch mit dem optimierten Polymer-Compound erzielt werden (Spalte 5).

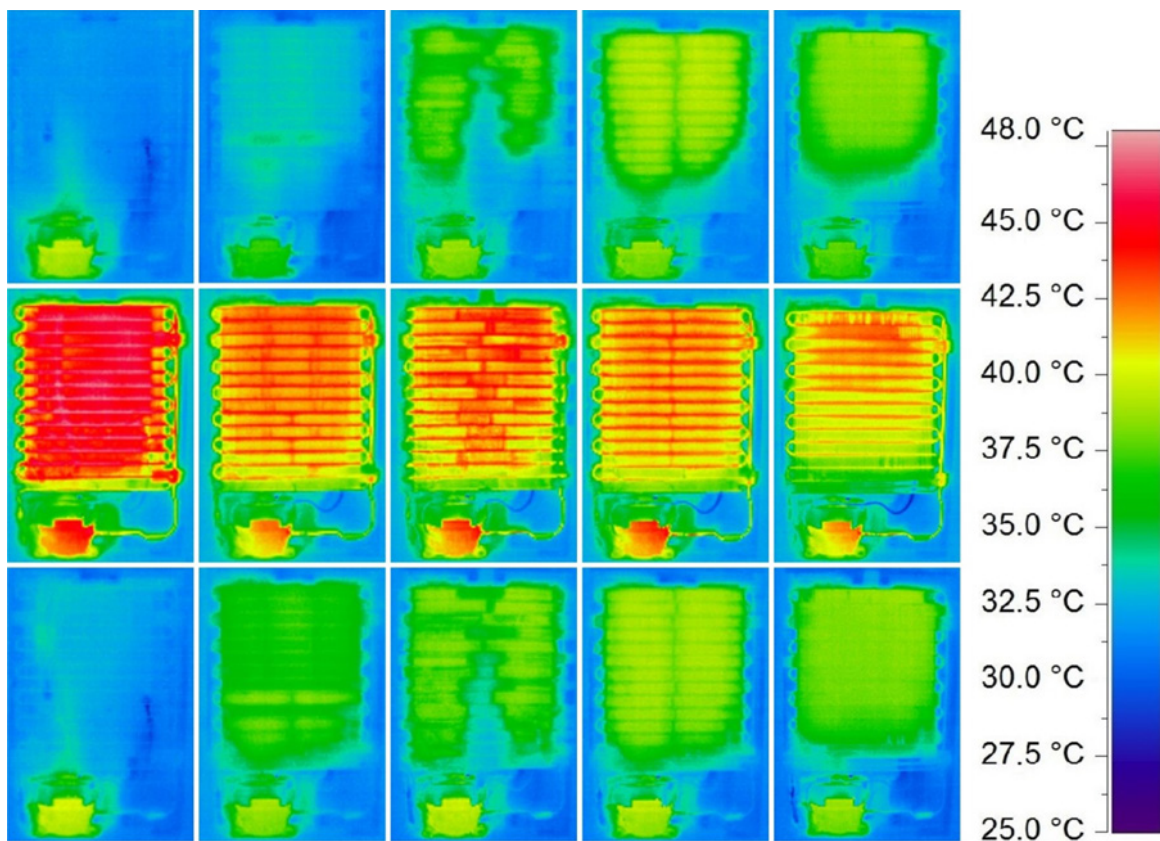


Abbildung 11: Temperaturverteilung am Verflüssiger; oben: vor Beginn der Verdichterlaufzeit, mittig: am Ende der Verdichterlaufzeit, unten: 15 Minuten nach Stopp des Verdichters; Spalte 1: ohne Wärmespeicher, Spalte 2: mit sensiblem Wärmespeicher (Wasser), Spalte 3: mit PCM und PE-HD-Folie, Spalte 4: mit PCM und Aluminium-Verbundfolie, Spalte 5: mit Polymer-Compound

Diese Temperaturverteilungen spiegeln sich auch in den durchgeführten Untersuchungen zur Normenergieaufnahme wider, die in Abbildung 12 zusammengefasst sind. So führt im Vergleich zum Referenzgerät bereits die Verbindung des handelsüblichen Draht-Rohr-Verflüssigers mit dem sensiblen Wärmespeicher (Wasser mit Aluminium-Verbundfolie) zu einer Verringerung des Stromverbrauchs von ca. 3 %. Mit dem einfachen Latentwärmespeicher reduziert sich je nach Verkapselung des reinen Paraffins (RT35HC) der Stromverbrauch zwischen ca. 5 % (PE-HD-Folie) und 7 % (Aluminium-Verbundfolie), mit dem neu entwickelten Polymer-Compound sogar um 10 %. Ein wesentlicher Vorteil dieser modular einsetzbaren PCM-Wärmespeicherelemente ist, dass durch Variation der Bestückung (d. h. Anzahl der Speicherelemente) die Verbrauchsreduktion auch noch gegen Ende der Produktentwicklung individuell eingestellt werden kann, um z. B. die nächsthöhere Energieeffizienzklasse zu erreichen (siehe Abbildung 12, rechts).

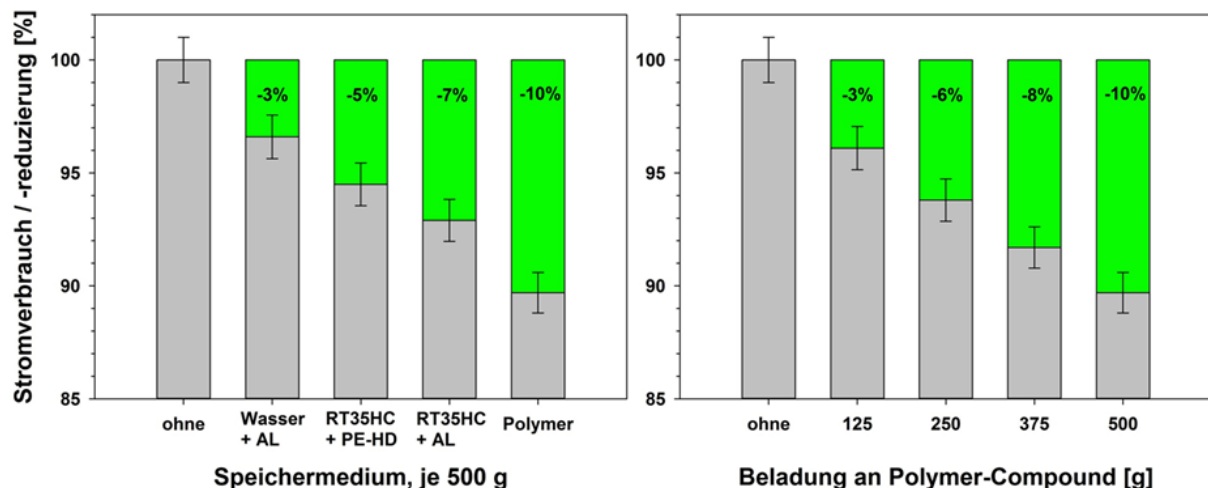


Abbildung 12: Stromverbrauch bzw. -reduzierung im Vergleich zum Referenzgerät; links: mit unterschiedlichen (Latent-)Wärmespeichern im Verflüssiger, rechts: in Abhängigkeit der Beladung des Verflüssigers mit Polymer-Compound

Für die verdampferseitige Integration wurden im Rahmen dieser Arbeit Integrationskonzepte für die bei Haushaltskühlgeräten typischen Verdampfertypen entwickelt. Abbildung 13 zeigt einige der hier realisierten Varianten. Die Untersuchungen werden exemplarisch anhand vollintegrierter Einbaukühlgeräte des Typs Miele K 12020 S-1 mit einem Nutzinhalt von 163 Litern und einem Stromverbrauch von 123 kWh/Jahr (Energieeffizienzklasse A+) sowie anhand des Typs Miele K 32122 i mit einem Nutzinhalt von 151 Litern und einem Stromverbrauch von 98 kWh/Jahr (Energieeffizienzklasse A++) beschrieben. Das erstgenannte Kühlgerät verfügt über eingeschäumte Verdampferrohre, in deren Zwischenräume ca. 600 g Polymer-Compound integriert wurden, sowie einen Lamellen-Verflüssiger, während das

zweite einen freihängenden Rollbond-Verdampfer aufweist, auf den ca. 150 g PCM in Form einer 1 mm starken Polymer-Compound-Folie aufgebracht wurden. Die Wärme wird bei diesem Gerät über einen Draht-Rohr-Verflüssiger abgeführt, in dessen Zwischenräume wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben zusätzlich 500 g Polymer-Compound integriert wurden.

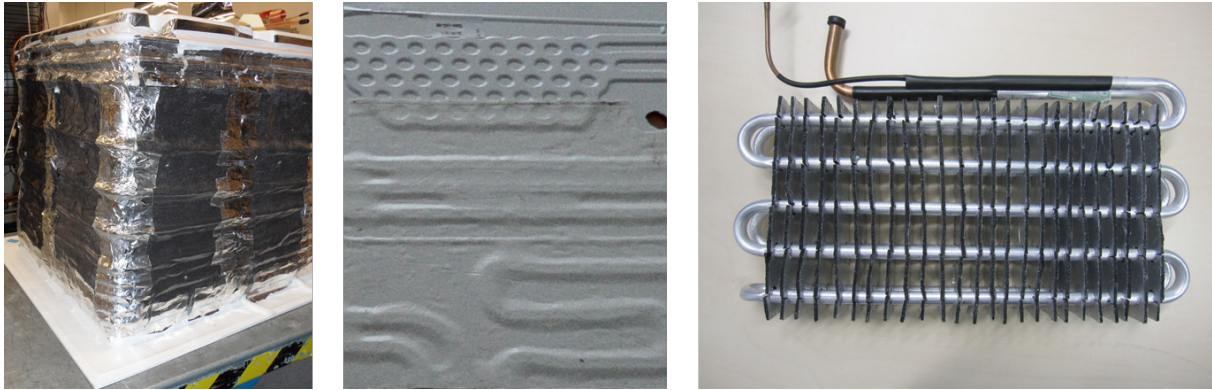


Abbildung 13: Verdampfertypen mit Polymer-Compound; links: eingeschäumter Verdampfer; mittig: freihängender Rollbond-Verdampfer, rechts: Lamellen-Verdampfer

Abbildung 14 zeigt den Temperaturverlauf der spezifischen Enthalpie eines für die Verdampferseite entwickelten Polymer-Compounds im Vergleich zu einer beispielhaften Wasser-Salz-Lösung gemäß DIN EN 15502. Auf den ersten Blick beträgt die Speicherkapazität des Compounds auf Basis eines Paraffin-Derivats mit ca. 200 kJ/kg nur ca. 3/4 der Speicherkapazität bisheriger Ansätze auf Basis wässriger Salzlösungen. Ganz deutlich wird hier jedoch das Kernproblem der Integration von Speichern auf Wasser-Salz-Basis auf der Verdampferseite: Die für den Phasenwechsel notwendige Unterkühlung, also die Temperaturdifferenz zwischen Schmelzen und Erstarrung, beträgt mehr als 10 K. Dagegen weist das Paraffin-Derivat nahezu keine Unterkühlung auf, wodurch die Verdampfertemperatur für den Erstarrungsprozess des PCM wesentlich höher liegt, was letztlich der entscheidende Faktor für die Erhöhung des Wirkungsgrads ist.

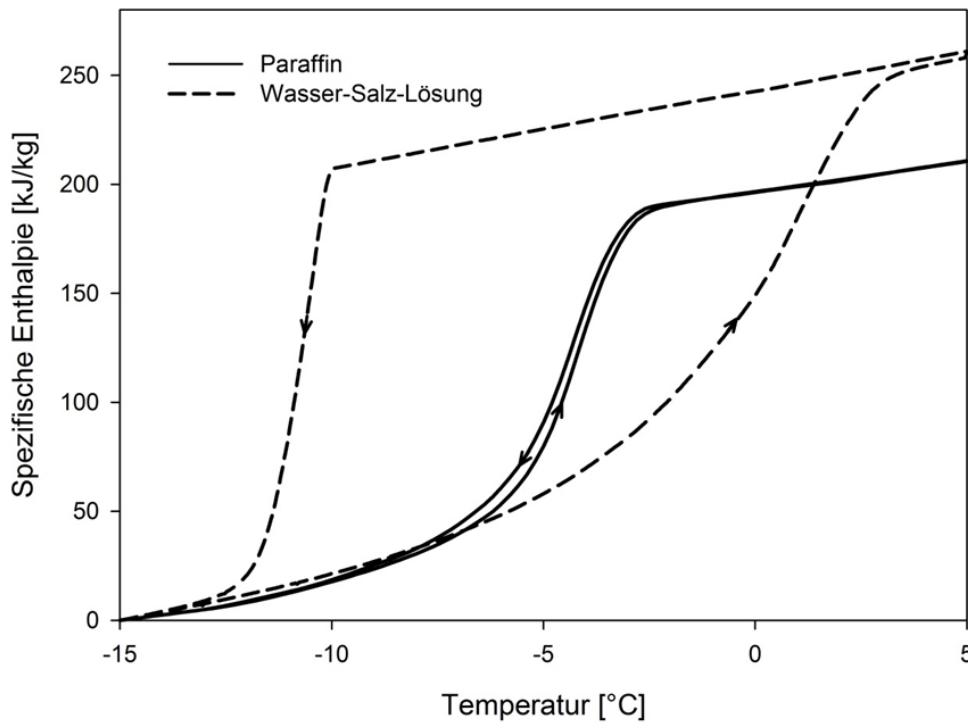


Abbildung 14: Enthalpieverlauf des Paraffin-Derivats (durchgezogen) für die Verdampferseite im Vergleich zu einer Wasser-Salz-Lösung gemäß der DIN EN 15502 (gestrichelt)

Den typischen Einfluss eines Latentwärmespeichers auf die Verdampfer- und Kühlfachtemperaturen eines handelsüblichen Haushaltskühlgeräts zeigt Abbildung 15. Bereits mit 600 g des entwickelten Polymer-Compounds kann die Verdampfertemperatur T_v bei vergleichbaren Kühlfachtemperaturen (T_1 , T_2 , T_3) signifikant erhöht werden, wobei sich die Zyklendauer ungefähr verdreifacht und die relative Laufzeit des Verdichters von ca. 27 % auf 21 % sinkt. Im Minimum lässt sich die Verdampfertemperatur um ca. 10 K von $-22,6\text{ °C}$ auf $-12,5\text{ °C}$ erhöhen und im zeitlichen und örtlichen Mittel während der Laufzeit des Verdichters um 8 K von ca. $-14,2\text{ °C}$ auf $-6,2\text{ °C}$. Insgesamt führt das zu einer Verringerung des Stromverbrauchs von bis zu 12 %.

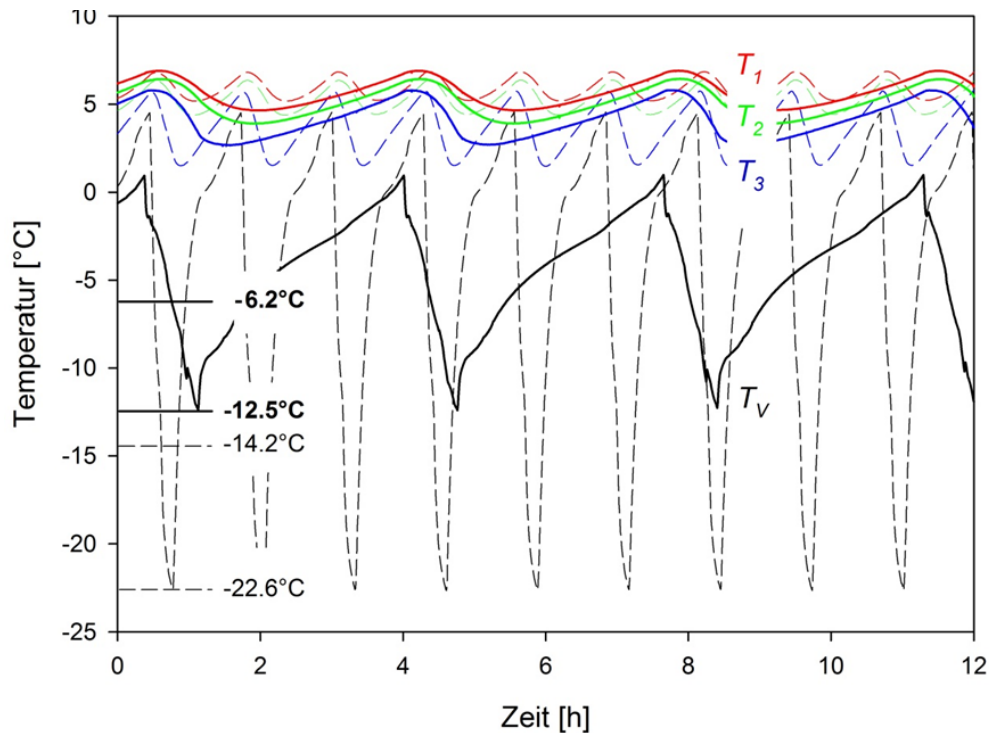


Abbildung 15: Temperaturverlauf im Kühlfach des K 12020 (T_1 , T_2 , T_3) und des (eingeschäumten) Verdampfers (T_V) ohne (gestrichelt) und mit Polymer-Compound (durchgezogen); Zahlenwerte geben die minimale und mittlere Verdampfertemperatur während der Kompressorlaufzeit an

Vorangegangene eigene Untersuchungen, aber auch z. B. die von Azzouz (2008, 2009), haben ergeben, dass sich die Zyklendauer durch Vergrößerung der PCM-Masse auf bis zu 10 h erhöhen lässt. Wie Abbildung 16 zeigt, führt das jedoch bei näherer Betrachtung trotz gleicher Temperaturamplitude im Kühlfach (T_1 , T_3), welche typischerweise die Regelgröße bei Haushaltskühlgeräten ist, zu einer deutlich größeren Temperaturamplitude im eingelagerten Kühlgut (T_M , hier simuliert durch ein 250 g M-Paket), was sich negativ auf die Lagerqualität auswirkt. Aufgrund der hohen Anforderungen an moderne Haushaltskühlgeräte werden hier jedoch üblicherweise Temperaturschwankungen des Kühlguts im Kühlfach von maximal $\pm 0,5$ °C, im Kaltlagerfach sogar von maximal $\pm 0,1$ °C angestrebt. Unter diesen Randbedingungen wird die maximale Zyklendauer bei Haushaltskühlgeräten mit einfacher Ein/Aus-Regelung und freier Konvektion deutlich limitiert, im hier betrachteten Fall beim K 12020 beispielsweise auf unter 4 h.

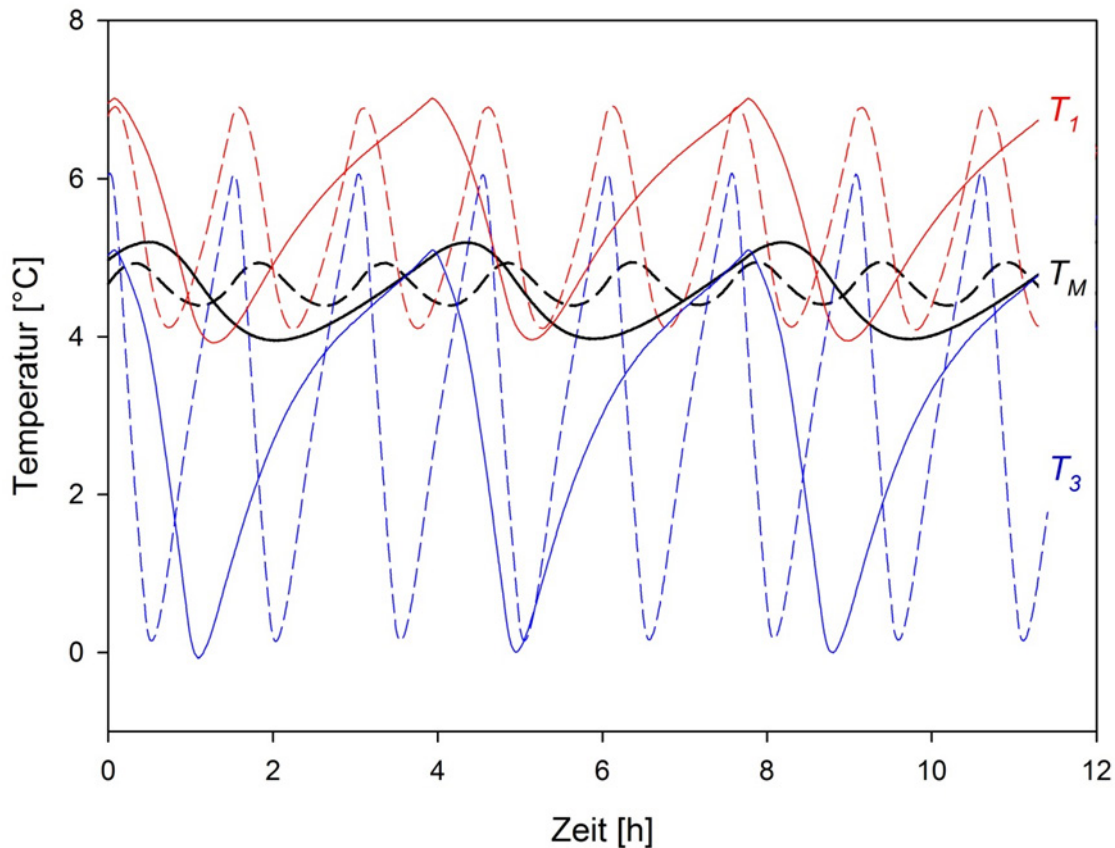


Abbildung 16: Temperaturverlauf im Kühlfach des Kühlgeräts K 12020 (T_1 , T_3) und des M-Pakets (T_M) ohne (gestrichelt) und mit PCM (durchgezogen)

Abbildung 17 zeigt den Temperaturverlauf bei einer Kombination von PCM auf der Verdampfer- und auf der Verflüssigerseite eines Haushaltskühlgeräts, in diesem Fall eines K 32122 i. Durch die Bauform des freihängenden Rollbond-Verdampfers dieses Geräts liegen die Verdampfertemperaturen insgesamt auf einem höheren Niveau als beim eingeschäumten Verdampfer des K 12020 (vgl. Abbildung 15). Doch auch hier lässt sich durch die Integration des PCM die Verdampfertemperatur T_V im Minimum um ca. 6 K (von ca. -16 °C auf -10 °C) und im Mittel während der gesamten Laufzeit des Verdichters von ca. -9 °C auf -3 °C erhöhen. Die Verflüssigertemperatur T_K wird im Maximum um ca. 8 K (von ca. 48 °C auf 40 °C) und im Mittel während der Laufzeit des Verdichters um ca. 6 K (von ca. 43 °C auf 37 °C) abgesenkt. Die relative Laufzeit des Verdichters sinkt von ca. 24 % auf 20 %, sodass sich der Stromverbrauch insgesamt um ca. 17 % reduziert.

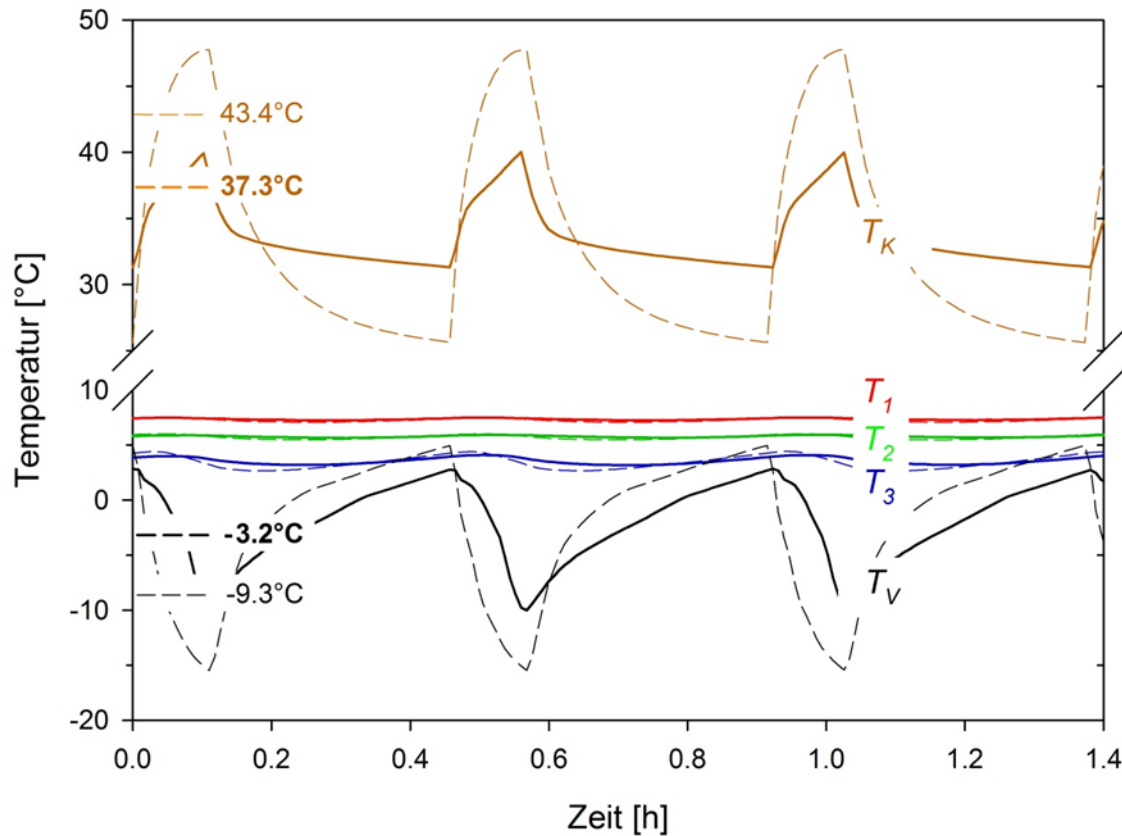


Abbildung 17: Temperaturverlauf im Kühlfach des Kühlgeräts K 32122 (T_1 , T_2 , T_3), des Rollbond-Verdampfers (TV) und des Verflüssigers (TK) ohne (gestrichelt) und mit PCM an Verdampfer und Verflüssiger (durchgezogen)

Des Weiteren wurden im Rahmen dieser Arbeit die einzelnen Kühlgeräte durch Modifikation der Regelparameter, also z. B. Regelung der Verdampfertemperatur um die Phasenwechseltemperatur des Polymer-Compounds, jeweils hinsichtlich der folgenden Zielparameter optimiert:

- Stromverbrauch,
- Temperaturschwankungen im Kühlfach (und damit im Kühlgut),
- Demand-Side-Management (Last erhöhen/reduzieren).

Abbildung 18 zeigt exemplarisch die Temperaturverläufe im Kühlfach des Kühlgeräts K 12020 mit 600 g PCM bei unterschiedlichen Regelstrategien für eine mittlere Kühlfachtemperatur von 5 °C. Das Referenzgerät (ohne PCM) weist bei einer Zyklendauer von ca. 1,25 h Temperaturschwankungen von bis zu 4 K im Kühlfach auf, siehe (a). Durch den Einsatz von PCM lassen sich diese bei einer vergleichbaren Zyklendauer auf unter 0,5 K redu-

zieren, siehe (b). Im Betriebspunkt des minimalen Stromverbrauchs, der bei einer Zyklendauer von ca. 1,7 h liegt, und als Ausgangsbasis für ein Demand-Side-Management dienen kann, haben sich die Temperaturen gegenüber (b) nur unwesentlich verändert, siehe (c). In diesem Fall ließe sich das Kühlgerät gezielt in einen Modus „Last aufnehmen“ schalten, um so für zusätzliche ca. 0,6 h Energie, z. B. bei einem Überangebot, aus erneuerbaren Energien einzuspeichern, ohne dass es zu einem Unterschreiten des Gefrierpunkts im Kühlfach kommt, siehe (d). Oder umgekehrt, z. B. in Spitzenlastzeiten, kann es für 1,8 h in einem Modus „Last reduzieren“ zur Entlastung vom elektrischen Netz entkoppelt werden, bis die gemittelte Kühlfachtemperatur die in der Norm als Obergrenze festgelegten 8 °C erreicht, siehe (e).

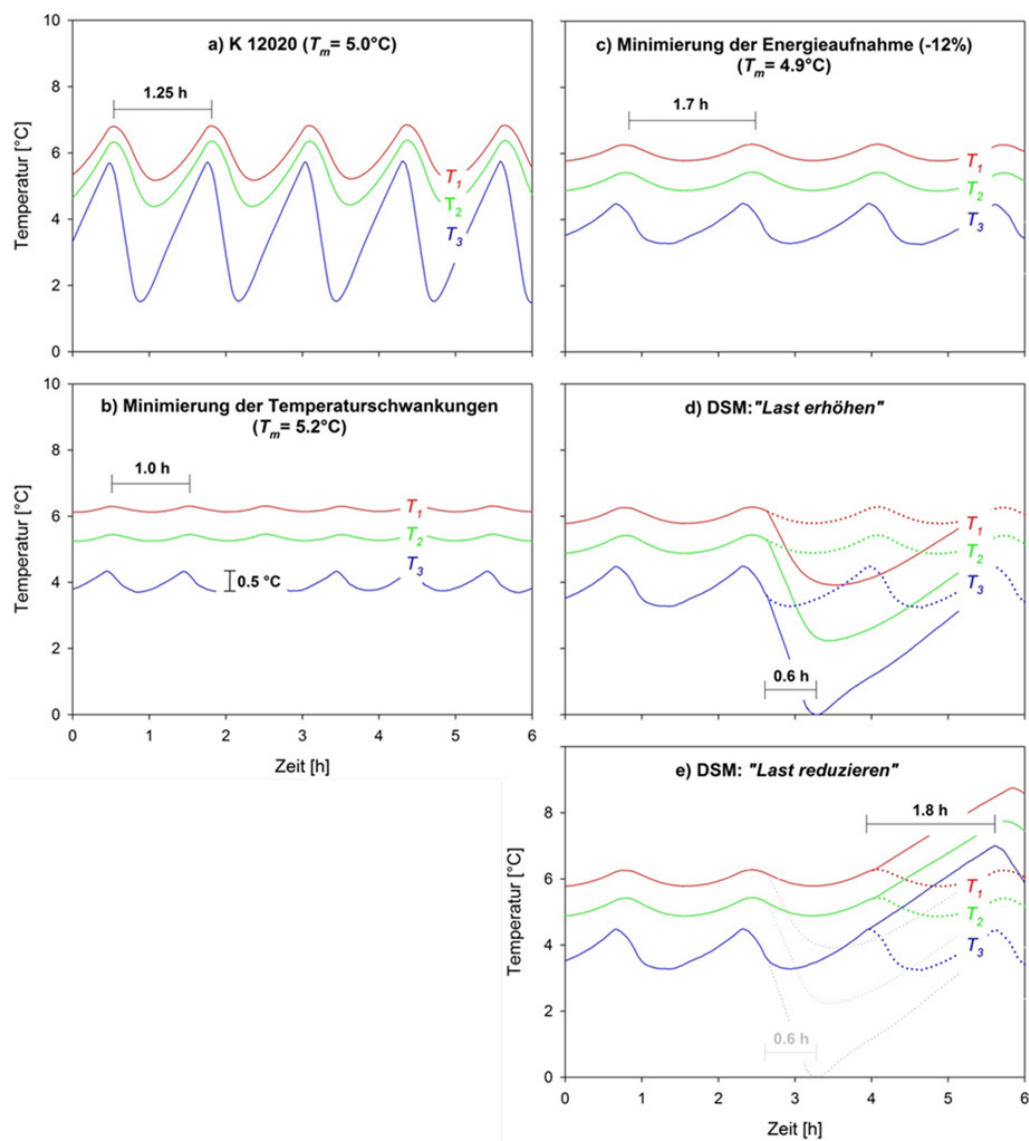


Abbildung 18: Temperaturverlauf im Kühlfach des Kühlgeräts K 12020 bei verschiedenen Regelstrategien: a) ohne PCM, b) Minimierung der Temperaturschwankungen, c) Minimierung des Stromverbrauchs, d) Last erhöhen, e) Last reduzieren

Diese Ergebnisse wurden anschließend von einer Arbeitsgruppe aus der Elektrotechnik im Rahmen eines von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Forschungsprojekts genutzt, um die modifizierten Kühlgeräte auf die Tauglichkeit als Anbieter von Regelleistung zu überprüfen. Im Rahmen der Analyse des Lastmanagements durch Virtuelle Großverbraucher konnte das hohe Potenzial aufgrund der regelungsbasierten Steuerung, der großen Anzahl in Haushalten und ihrer ständigen Verfügbarkeit erwiesen werden. Anschließend wurde eine erarbeitete Kommunikationsmöglichkeit über Cell Broadcast Services (CBS) analysiert, wie in Abbildung 19 schematisch dargestellt (Vrabec et al., 2014). Durch die sehr hohe Flächendeckung, schnelle Erreichbarkeit und einzeln ansteuerbare GSM-Funkzellen, wurde diese Kommunikationsmöglichkeit in Kombination mit unidirektionalen Broadcast-Nachrichten als bestmögliche verfügbare Kommunikationsstruktur für Kühlgeräte eingestuft. Durch die Simulation aggregierter Lastprofile und der Einsatzmöglichkeiten im Sekundärregelleistungsmarkt konnte ebenfalls eine Lösung für die hohen Anlaufströme der Kühlgeräte bei der Aufnahme von Leistung erarbeitet werden, die auch das aggregierte Einschalten von Kühlgeräten ermöglicht. Abschließend erfolgte im Rahmen dieser Arbeit die praktische Validierung der entwickelten Steuerung bei Eingriffen zur gezielten Leistungseinsparung oder Leistungsaufnahme der modifizierten Kühlgeräte.

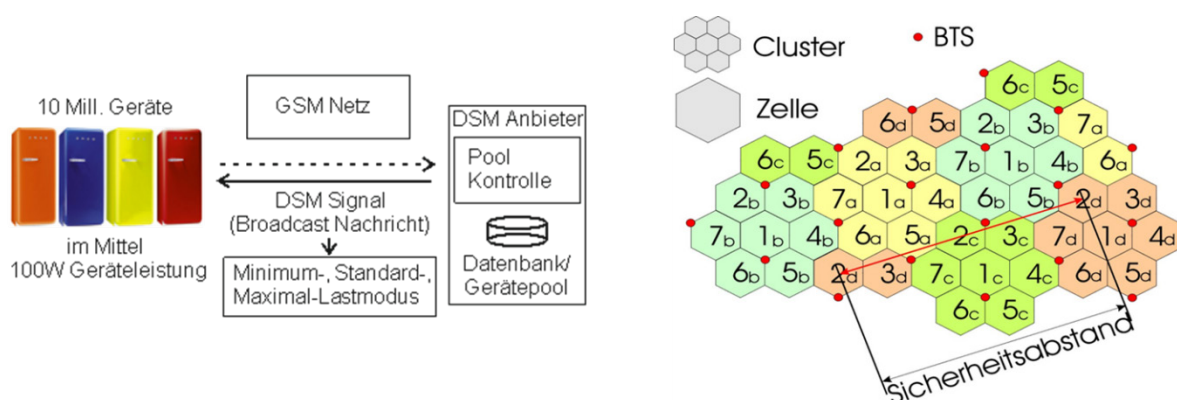


Abbildung 19: Regelleistungskonzept für Haushaltskühlgeräte als virtueller Großverbraucher und Ansteuerung durch Cell Broadcast Services

Des Weiteren ist durch die internationale Einführung von plakativen Energielabeln die Energieeffizienz inzwischen für die Verbraucher*innen zum ausschlaggebenden Kriterium bei der Neuanschaffung von Haushaltskühlgeräten geworden (Faber et al., 2007), weswegen deren Stromverbrauch nicht nur Gegenstand der Forschung ist, sondern damit zwangsläufig auch im Fokus bei der Produktentwicklung steht. Nicht alle im Hinblick auf die Messung unter Normbedingungen in jüngster Vergangenheit eingeführten Maßnahmen führen jedoch zwangsläufig auch zu einer Verbesserung der Geräteigenschaften in der Praxis. So hat sich

beispielsweise durch die Optimierung der Isolierung in den letzten Jahrzehnten die Kältelast deutlich reduziert. Damit wurde zwar der Einsatz leistungsschwächerer Verdichter ermöglicht, wodurch sich aber wiederum direkt auch die in der Praxis zur Verfügung stehende Kälteleistung reduziert. Während dieser Umstand in den national bislang stark variierenden Normprüfungen nicht oder nur teilweise für bestimmte Geräteklassen berücksichtigt wurde, sind aufgrund der letztlich entscheidenden Bedeutung für die Nutzer*innen sogenannte Funktionsprüfungen seit Langem fester Bestandteil entsprechender Tests von Verbraucherorganisationen. Mit der Einführung des neuen sogenannten global standard (IEC 62552:2015) zur Harmonisierung der internationalen Prüfverfahren halten nun auch entsprechende Funktionsprüfungen wie beispielsweise zur Abkühlleistung oder auch der Temperaturanstieg im Störfall Einzug in die Norm.

Im Hinblick darauf wurden im Rahmen der Dissertation erstmals ein für die direkte Integration in Kühlfächer geeignetes Polymer-Compound entwickelt und der Einfluss auf

- die Kühlleistung und
- Temperaturanstieg im Störfall

bei acht handelsüblichen Haushaltskühlgeräten systematisch bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen gemäß der IEC 62552:2015 untersucht und optimiert. Abbildung 20 zeigt den nach Norm standardisierten Versuchsaufbau und die Temperaturmesspositionen sowie die Befüllung und Verteilung von Test- und M-Paketen in einem Kühlfach.

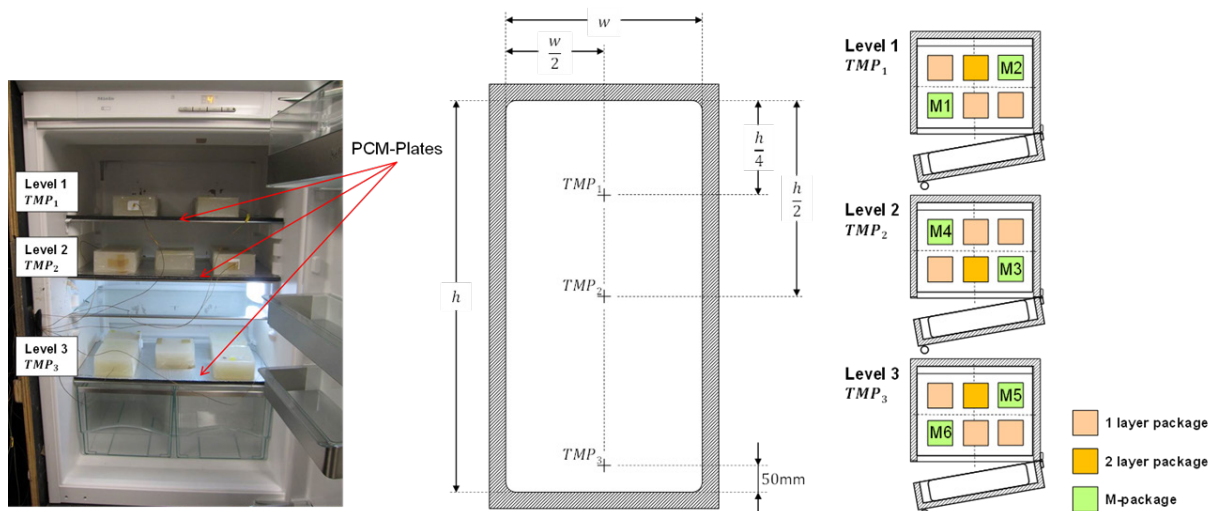


Abbildung 20: Kühlfach mit Polymer-Compound und Temperaturmesspositionen sowie die Befüllung und Verteilung von Test- und M-Paketen gemäß IEC 62552:2015

Abhängig von der Größe des Kühlfachs und der Anzahl der Einlegeböden konnten zwischen 1,8 und 3 kg PCM in die Kühlgeräte eingebracht und so spezifische PCM-Dichten von 0,7 bis 1,4 kg pro 100 l Volumen realisiert und untersucht werden. Den Temperaturverlauf der spezifischen Enthalpie des hierfür entwickelten Polymer-Compounds mit einer nahezu unterkühlungsfreien Phasenwechseltemperatur von ca. 9 °C zeigt Abbildung 21. Aufgrund des hier im Hinblick auf die direkte Zugänglichkeit sowie die notwendige Formbeständigkeit erforderlichen höheren Polymeranteils von $\omega \approx 0,2$ g/g verringert sich die Speicherkapazität auf ca. 150 kJ/kg. Das Polymer-Compound lässt sich aber aufgrund seiner optischen Eigenschaften sowie der somit entfallenden Kennzeichnungspflicht (als Gefahrstoff, im Gegensatz zum reinen PCM) direkt in die Ablageflächen integrieren.

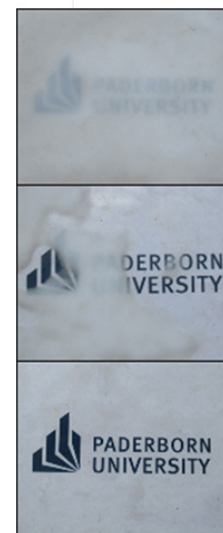
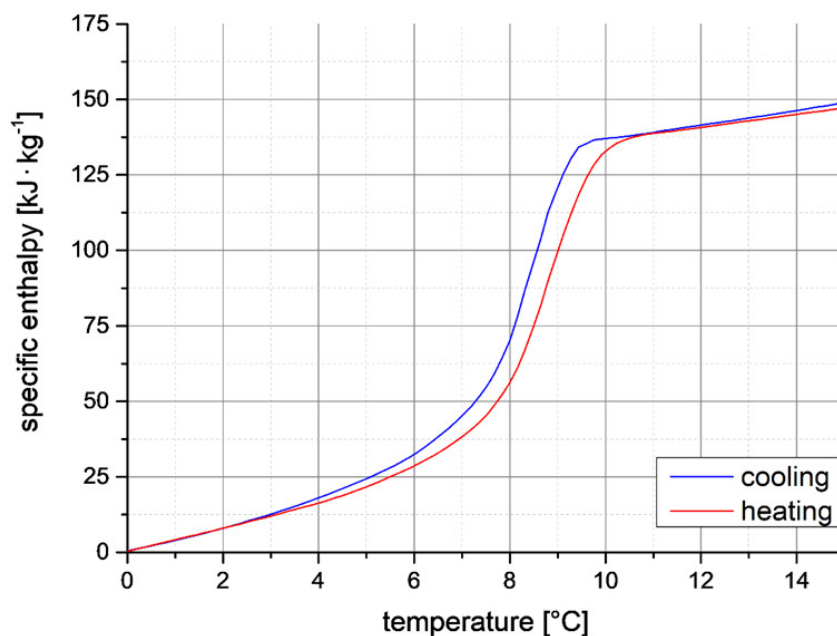


Abbildung 21: Temperaturverlauf der spezifischen Enthalpie des Polymer-Compounds für Kühlfächer (links) und Transparenz über den Phasenwechsel (rechts)

Bei der Prüfung der Kühlleistung nach IEC 62552:2015 wird die Zeit ermittelt, die benötigt wird, um ein definiertes Kühlgut von 25 °C auf 10 °C abzukühlen. Dazu wurden die Kühlgeräte mit jeweils 4,5 kg pro 100 l (Kühlfach-Volumen) mit genormten Test- und M-Paketen nach einem vorgegebenen Beladungsplan beladen (vgl. Abbildung 20). Zudem wurde der Zeitpunkt ermittelt, an dem das arithmetische Mittel der Temperaturen aller M-Pakete 10 °C erreicht hat. Der Einfluss des entwickelten Polymer-Compounds auf die Kühlleistung ist in Abbildung 22 dargestellt, wobei die Abkühldauer bei allen Kühlgeräten deutlich verkürzt werden konnte, d. h. absolut zwischen 0,55 bis 2,00 h und relativ zwischen 16 bis 33 %.

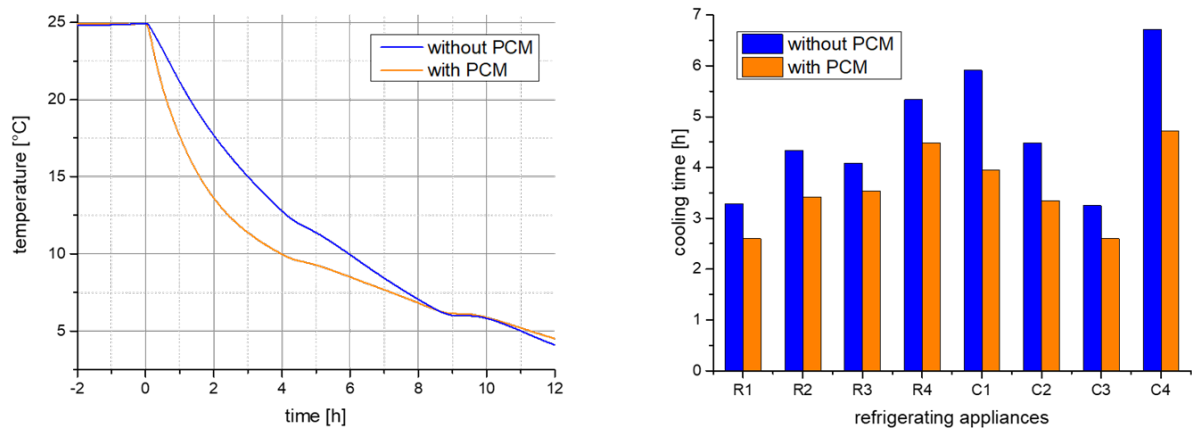


Abbildung 22: Temperaturverlauf der M-Pakete während eines Kühlleistungstests (links), ohne (blau) und mit PCM (orange), sowie Abkühlzeiten der untersuchten Kühlgeräte (rechts)

Analog dazu wurde im Rahmen der Arbeit auch der Einfluss von PCM auf den Temperaturanstieg im Störfall gemäß IEC 62552:2015 ermittelt, welcher letztlich auch im Fall einer externen Abschaltung ein entscheidender Faktor im Rahmen des Einsatzes von Kühlgeräten für ein zukünftiges Lastmanagement sein wird. Hierzu wurde nach Erreichen stabiler Betriebsbedingungen die Stromversorgung abgeschaltet und die Zeit bestimmt, in der das arithmetische Mittel der Temperaturen aller M-Pakete von 8 °C auf 11 °C ansteigt. Der Einfluss der im Kühlfach integrierten Latentwärmespeicher auf den Temperaturanstieg ist beispielhaft in Abbildung 23 dargestellt, wobei die Zeit bis zum Erreichen der kritischen Temperatur durch das entwickelte Polymer-Compound bei allen Kühlgeräten deutlich erhöht werden konnte, d. h. absolut zwischen 2,15 bis 4,48 h und relativ zwischen 75 bis 145 %.

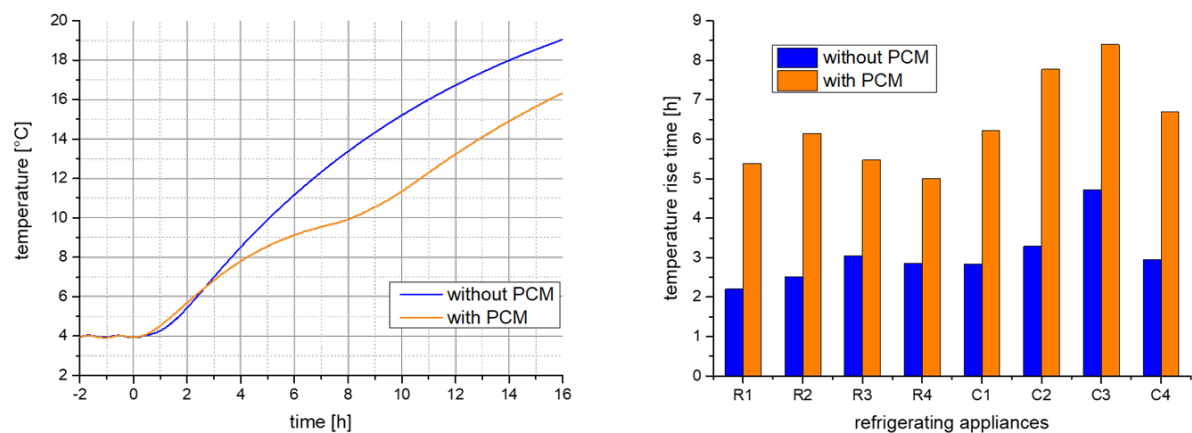


Abbildung 23: Temperaturverlauf der M-Pakete während einer Störfallprüfung (links), ohne (blau) und mit PCM (orange), sowie Aufwärmzeiten der untersuchten Kühlgeräte (rechts)

4 Fazit

Die vorliegende Arbeit befasst sich zum einen mit der Integration von Phasenwechselmaterialien in Haushaltskühlgeräte und deren Einfluss auf Energieeffizienz und Betriebsverhalten, zum anderen mit der grundlegenden Materialentwicklung hinsichtlich technischer und ökonomischer Fragestellungen sowie deren thermophysikalischer Charakterisierung und praktischer Validierung.

Im ersten Teil dieser Dissertation (Kap. 2) werden die grundlegenden Probleme von Phasenwechselmaterialien wie die geringe Wärmeleitfähigkeit, Unterkühlungseffekte und Zyklenstabilität sowie ökonomische und ökologische Aspekte behandelt, die einer praktischen Anwendung bislang entgegenstanden. Auf Basis umfangreicher experimenteller Untersuchungen sowohl mit kommerziellen Grafitexpandaten als auch durch Siebung klassifizierter Korngrößen konnten grundlegende Zusammenhänge gefunden und so die Wärmeleitfähigkeit von 0,19 W/(mK) durch entsprechende Additivierung zielgerichtet um bis zu einem Faktor von 20 auf 3,95 W/(mK) erhöht werden. Des Weiteren konnten im Rahmen dieser Arbeit mittels Styrol-basierter Di- und Tri-Block-Polymere PCM-Massenanteile bis zu $\omega = 0,95$ g/g zyklenstabil eingebunden und so hochkapazitive Polymer-Compounds mit Schmelzpunkten von -5 °C bis 44 °C entwickelt werden. Neben der experimentellen Bestimmung der thermophysikalischen Stoffdaten der entwickelten Compounds konnten hieraus erfolgreich formstabile Latentwärmespeicherelemente zur Integration in Haushaltskühlgeräte hergestellt und im Weiteren der Funktionsnachweis im Versuchsbetrieb erbracht werden.

Der zweite Teil der Arbeit (Kap. 3) präsentiert den detaillierten Aufbau der entwickelten Integrationskonzepte für die bei Haushaltskühlgeräten gängigen Verdampfer- und Verflüssigertypen, deren praktische Umsetzung neben einem hohen thermischen Wirkungsgrad vor allem auch im Hinblick auf umwelt-, sicherheits- und vor allem produktionstechnische Aspekte durchgeführt wurde. Durch experimentelle Studien unter Berücksichtigung der diesbezüglich einschlägigen Norm- und Prüfbedingungen, insbesondere auch bereits im Hinblick auf den neuen sogenannten global standard (IEC 62552:2015) mit den dort erstmals eingeführten Funktionsprüfungen, konnten neben dem Nachweis der Funktionalität auch wesentliche Verbesserungspotenziale aufgezeigt werden, insbesondere konnten

- der Stromverbrauch um bis zu 17 % reduziert,
- die Temperaturschwankungen im Kühlgut von bis zu 4 K auf unter 0,5 K reduziert,

- das (positive wie auch das negative) Lastverschiebungspotenzial verdoppelt,
- die Abkühlleistung um 33 % und
- die Zeit bis zum kritischen Temperaturanstieg im Störfall um 145 % gesteigert werden.

Vor dem Hintergrund, dass experimentelle Studien zur auch produktionstechnisch umsetzbaren Integration von PCM in Haushaltskühlgeräte kaum vorhanden sind, liefert die vorliegende Arbeit wichtige praktische Erkenntnisse über die Auslegung und das Betriebsverhalten solcher Geräte für die heute gängigen Verdampfer- und Verflüssigertypen.

Damit liefert die vorliegende Arbeit nicht nur wichtige praktische Erkenntnisse über das Betriebsverhalten von Haushaltskühlgeräten mit integriertem PCM, sondern auch wesentliche Beiträge in Bezug auf die Auslegung bei den hier gängigen Verdampfer- und Verflüssigertypen im Hinblick auf zukünftige Effizienzsteigerungen. Auch konnte das Potenzial entsprechend modifizierter Geräte in Bezug auf ein Lastmanagement eindeutig gezeigt werden, hier benötigt es für eine zukünftige (ökonomische) Ausnutzung allerdings vor allem zunächst einmal entsprechende politische bzw. gesetzliche Rahmenbedingungen. Darüber hinaus erweitern die materialspezifischen Entwicklungen aber auch signifikant die potenziellen Anwendungsmöglichkeiten. So konnten im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Polymer-Compounds inzwischen erfolgreich in eine Vielzahl von praktischen Anwendungen überführt werden, von mobilen Kühlgeräten über die Elektronik Kühlung bis hin zum temperaturgeführten Pharmatransport.

5 Literaturverzeichnis

- Ahmet, S., 2004. Formstable paran/high density polyethylene composites as solid-liquid phase change material for thermal energy storage: Preparation and thermal properties. *Energy Convers. Manag.* 45, 2033–2042.
- Alkan, C.; Kaya, K.; Sarı, A., 2009. Preparation, thermal properties and thermal reliability of formstable paran/polypropylene composite for thermal energy storage. *J. Polym. Environ.* 17, 254–258.
- Azzouz, K., Leducq, D., Gobin, D., 2008. Performance enhancement of a household refrigerator by addition of latent heat storage. *Int. J. Refrig.* 31, 892–901.
- Azzouz, K., Leducq, D., Gobin, D., 2009. Enhancing the performance of household refrigerators with latent heat storage: an experimental investigation. *Int. J. Refrig.* 32, 1634–1644.
- Bagriyanik, M., Zehir, M. A., 2012. Demand side management by controlling refrigerators and its effects on consumers. *Energy Convers. Manag.* 64, 238–244.
- Barthel, C., Hohmeyer, O., Irrek, W., Thomas, S., 2005. Energieeffiziente Kühl- und Gefriergeräte. (Energy efficient refrigerators and freezers). Endbericht, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie. Available from: <http://www.wupperinst.org>.
- Binneberg, P., Kraus, E., Quack, H., 2002. Reduction in power consumption of household refrigerators by using variable speed compressors. 14th Int. Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, Paper 615, <http://docs.lib.purdue.edu/iracc>.
- Chen, W.-L., Mei, B.-J., Liu, Y.-N., Huang, Y.-H., Yuan, X.-D., 2011. A novel household refrigerator with shape-stabilized PCM (Phase Change Material) heat storage condenser: An experimental investigation. *Energy* 36, 5797–5804.
- Cheralathan, M., Velraj, R., Renganarayanan, S., 2007. Performance analysis on industrial refrigeration system integrated with encapsulated PCM-base cool thermal energy storage system. *Int. J. Energy Res.* 31, 1398–1413.

- DKV, 1985. Möglichkeiten der Energieeinsparung bei Haushaltskühl- und Gefriergeräten. (Opportunities of energy savings for household refrigerators and freezers). Statusbericht 1, sec. ed., Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein (DKV) e. V., Stuttgart.
- Faberi, S., Esposito, R., Mebane, W., Presutto, M., Sciadoni, R., Stamminger, R., 2007. Preparatory studies for eco-design requirements of EuPs: Final report domestic refrigerators & freezers. TREN/D1/40-2005.
- Gin, B., Farid, M. M., 2010. The use of PCM panels to improve storage condition of frozen food. *J. Food Engineering* 100, 372–376.
- Gin, B., Farid, M. M., Bansal, P. K., 2010. Effect of door opening and defrost cycle on a freezer with phase change panels. *Energy Convers. Manag.* 51, 2698–2706.
- IEA, 2003. COOL APLIANCES: Policy strategies for energy efficient Homes. Organisation for Economic Cooperation and Development, OECD.
- Kalcioglu, Z. I., Qu, M., Strawhecker, K., Shazly, T., Edelman, E., Vanlandingham, M., Smith, J., van Vliet, K., 2011. Dynamic impact indentation of hydrated biological tissues and tissue surrogate gels. *Phil. Mag.* 91, 1339–1355.
- Kohler, S., 2010. Integration of renewable energy sources in the german power supply system from 2015–2020 with an outlook to 2025. dena Grid Study II, Deutsche Energie-Agentur. Available from: <http://www.dena.de/publikationen/energiesysteme/dena-netzstudie-ii.html>.
- Marchi Neto, I., Padilha, A., Scalón, V. L., 2009. Refrigerator COP with thermal storage. *Appl. Therm. Eng.* 29, 2358–2364.
- Mehling, H., Hiebler, S., Ziegler, F., 2000. Latent heat storage using a PCM-graphite composite material, in: *Proceedings of Terrastock 2000 – 8th International Conference on Thermal Energy Storage*, Stuttgart, Germany, pp. 375–380.
- Mehling, H., Cabeza, L. F., 2008. Heat and cold storage with PCM. An up to date Introduction into basics and applications. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

- Meinert, J., 2009. Zelluläre Metalle und Verbundwerkstoffe zur Optimierung des Be- und Entladeverhaltens thermischer Energiespeicher, Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und angewandte Materialforschung, Dresden.
- Onyejekwe, D., 1989. Cold storage using eutectic mixture of NaCl/H₂O: an application to photovol-taic compressor vapour freezers. *Sol. Wind Tech.* 6, 11–18.
- Philipp, J., 2002. Optimierung von Haushaltskühlgeräten mittels numerischer Simulation. (Optimizing of household devices via numerical simulation). Forschungsbericht des DKV Nr. 65, Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein (DKV) e. V., Stuttgart.
- Roth, P., 2008. Energy saving on the high pressure side of a refrigerating plant. *KI 03/2008*, 30–35.
- Vrabec, J., Sonnenrein, G., Elsner, A., Lessmann, K., Pfäffel, S., Morbach, A., Prior, D., Grau, C., Machado, S., 2014. Effizienzsteigerung von Haushaltskältegeräten durch Integration von Hochleistungs-Verbundwerkstoffen zur Latentwärmespeicherung. Abschlussbericht zum DBU-Projekt AZ 28626.
- Sonnenrein, G., Elsner, A., Baumhögger, E., Morbach, A., Fieback, K., Vrabec, J., 2015a. Reducing the power consumption of household refrigerators through the integration of latent heat storage elements in wire-and-tube condensers. *Int. J. Refrig.* 51, 154–160.
- Sonnenrein, G., Elsner, A., Baumhögger, E., Morbach, A., Fieback, K., Vrabec, J., 2015b. Copolymer-bound phase change materials for household refrigerating appliances: Experimental investigation of power consumption, temperature distribution and demand side management potential. *Int. J. Refrig.* 60, 166–173.
- Wang, F., Maidment, G., Missenden, J., Tozer, R., 2007a. The novel use of phase change materials in refrigeration plant. Part 1: experimental investigation. *Appl. Therm. Eng.* 27, 2893–2901.
- Wang, F., Maidment, G., Missenden, J., Tozer, R., 2007b. The novel use of phase change materials in refrigeration plant. Part 2: dynamic simulation model for the combined system. *Appl. Therm. Eng.* 27, 2902–2910.

- Wang, F., Maidment, G., Missenden, J., Tozer, R., 2007c. The novel use of phase change materials in refrigeration plant. Part 3: PCM for control and energy savings. *Appl. Therm. Eng.* 27, 2911–2918.

6 Wissenschaftliche Publikationen

Publikationen, die im Rahmen der vorliegenden Dissertation angefertigt wurden:

- I. Reducing the power consumption of household refrigerators through the integration of latent heat storage elements in wire-and-tube condensers. Sonnenrein, G., Elsner, A., Baumhögger, E., Fieback, K., Morbach, A., Vrabec, J. *International Journal of Refrigeration*, 2015, 51, pp. 154–160.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.12.011>
- II. Copolymer-bound phase change materials for household refrigerating appliances: experimental investigation of power consumption, temperature distribution and demand side management potential. Sonnenrein, G., Baumhögger, E., Elsner, A., E., Fieback, K., Morbach, A., Paul, A., Vrabec, J., *International Journal of Refrigeration*, 2015, 60, pp. 166–173.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.06.030>
- III. Improving the performance of household refrigerating appliances through the integration of phase change materials in the context of the new global refrigerator standard IEC 62552:2015. Sonnenrein, G., Baumhögger, E., Elsner, A., Morbach, A., Neukötter, M., Paul, A., Vrabec, J., *International Journal of Refrigeration*, 2020, 119, pp. 448–456.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.07.025>
- IV. Experimental study of phase change materials for photovoltaic modules: Energy performance and economic yield for the EPEX spot market. Japs, E., Sonnenrein, G., Krauter, S., Vrabec, J., *Solar Energy*, 2016, 140, pp. 51–59.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.10.048>

6.1 Reducing the power consumption of household refrigerators through the integration of latent heat storage elements in wire-and-tube condensers

Sonnenrein, G., Baumhögger, E., Elsner, A., E., Fieback, K., Morbach, A., Paul, A., Vrabec, J., International Journal of Refrigeration, 2015, 60, pp. 166–173.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.12.011>

Mit Erlaubnis von Elsevier entnommen aus „International Journal of Refrigeration“ (Copyright 2015).

Diese Studie untersucht den Einfluss von (Latent-)Wärmespeichern auf die Verflüssigungstemperatur und den Energieverbrauch eines handelsüblichen Haushaltskühlgeräts. Hierfür wurden die Zwischenräume des Standard-Draht-Rohr-Verflüssigers mit unterschiedlichen Speicherelementen (Wasser, Paraffin, Polymer-Compound) bestückt und der Energieverbrauch und die Temperaturverteilung unter Normbedingungen ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich insbesondere durch den Einsatz von Phasenwechselmaterialien (PCM) die Verflüssigungstemperatur deutlich senken und damit einhergehend der Stromverbrauch signifikant reduzieren lässt. Der größte Effekt konnte hierbei mit einem im Rahmen der Studie entwickelten hochkapazitiven Polymercompound mit erhöhter Wärmeleitfähigkeit erzielt werden, bei dem aufgrund der Auslauf- und Ausschwitzsicherheit auch im „flüssigen“ Zustand eine aufwendige Verkapselung entfallen kann. Zudem wurde ermittelt, wie durch Variation der Bestückung des Verflüssigers eine definierte Verbrauchsreduktion eingestellt werden kann, und somit insgesamt eine effiziente Methode entwickelt, mit der selbst noch gegen Ende der Produktentwicklung beispielsweise gezielt die nächsthöhere Energieeffizienzklasse erreicht werden kann.

Der Autor dieser Dissertation hat die vorliegende Publikation verfasst, die (Latent-)Wärmespeicher entwickelt und die Versuche durchgeführt und ausgewertet. Andreas Elsner und Elmar Baumhögger haben an der Messtechnik für die Versuchsdurchführung mitgewirkt und Dr. Andreas Morbach und Dr. Klaus Fieback die Erstellung der Versuchsaufbauten durch die Übernahme administrativer Aufgaben unterstützt. Prof. Jadran Vrabec hat den Autor während der gesamten Arbeit betreut und an der Revision des Manuskripts mitgewirkt.



www.iifir.org

Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ijrefrig

Reducing the power consumption of household refrigerators through the integration of latent heat storage elements in wire-and-tube condensers

G. Sonnenrein ^a, A. Elsner ^a, E. Baumhögger ^a, A. Morbach ^b, K. Fieback ^c,
J. Vrabec ^{a,*}

^a Thermodynamics and Energy Technology, University of Paderborn, Warburger Str. 100, 33098 Paderborn, Germany

^b Miele & Cie. KG, Carl-Miele-Straße 29, 33332 Gütersloh, Germany

^c Dr. Fieback PCM-innovativ GmbH, Am Fichtenberg 2, 14552 Michendorf, Germany

ARTICLE INFO

Article history:

Received 14 October 2014

Received in revised form

15 December 2014

Accepted 16 December 2014

Available online 24 December 2014

Keywords:

Household refrigerator

Power consumption

Condenser

Thermal storage

Phase change material

Polymer bound

ABSTRACT

This study evaluates the influence of latent heat storage elements on the condenser temperature of a commercial household refrigerator. In order to determine the power consumption and the temperature distribution, a standard wire-and-tube condenser is equipped with different heat storage elements (containing water, paraffin or copolymer compound). The results indicate that particularly the application of phase change materials (PCM) lowers the condenser temperature, which leads to a significantly reduced power consumption.

© 2014 Elsevier Ltd and IIR. All rights reserved.

Réduction de la consommation d'électricité de réfrigérateurs domestiques par l'intégration d'accumulateurs de chaleur latente dans des condenseurs à tubes et fils métalliques

Mots clés : Réfrigérateur domestique ; Consommation d'électricité ; Condenseur ; Accumulation thermique ; Matériau à changement de phase ; Lien à un polymère

* Corresponding author.

E-mail address: jadran.vrabec@upb.de (J. Vrabec).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.12.011>

0140-7007/© 2014 Elsevier Ltd and IIR. All rights reserved.

Nomenclature

λ	Thermal conductivity
ω	Carbon mass fraction

1. Introduction

Although the power consumption of individual refrigerators seems to be low today, these home appliances still have a large potential for energy saving because of their vast number. They have an almost complete market penetration and they operate continuously throughout the year. The largest share of the electrical power consumption by private households in the OECD member states is caused by refrigeration (IEA, 2003). In Germany this share is about 20%, translating to about 7% of the total national electric power consumption (Barthel et al., 2005). In recent years, the power consumption of household refrigerators has been reduced considerably by the manufacturers, who responded to market pressure due to the bold labeling of energy efficiency that is prescribed in many countries. Nowadays, energy efficiency has become the decisive criterion for the consumer upon appliance replacement decisions (Faber et al., 2007). For a further reduction of power consumption, both cooling load and the conversion of electric energy to cooling capacity can be optimized. The according technical developments can be divided into three categories:

- 1) *Improvement of casing and door*: By using polyurethane foam, which has long become standard, instead of polystyrene insulation, which has been common up into the 1980s, the cooling load was reduced by about 30%. Similar additional progress can be achieved through the application of e.g. vacuum insulated panels, but they are hardly used due to their high production cost in this price sensitive segment (Philipp, 2002). However, a simple increase of the polyurethane insulation thickness is mostly not effective because of the reduced net storage volume.
- 2) *Improvement of compressor efficiency*: The application of variable speed compressors enables for a transition from their common intermittent operation by on/off control towards a continuous and variably controlled operation. Less friction losses, a higher evaporation and a lower condensation temperature as well as a reduction of losses associated with the pressure equalization during compressor off times can be achieved. These effects may lead to a reduction of power consumption by up to 30% (Binneberg et al., 2002). However, variable speed compressors are usually not used in simple household refrigerators because of their substantially higher costs.
- 3) *Improvement of heat transfer performance of evaporator or condenser*: The maximum efficiency of cooling processes is determined by the difference between evaporator and condenser temperature. Reducing the condenser temperature resp. raising the evaporator temperature by 1 °C typically leads to a power consumption that is reduced by about 2–4%. E.g., enlarging the effective heat transfer surface area of condenser or evaporator by approximately

50% reduces the power consumption by 6% or 10%, respectively (DKV, 1985). Another option is to use ventilators for the improvement of the convective heat transfer. However, the power consumption of such ventilators themselves must be put in relation to the overall performance gain (Roth, 2008).

The use of thermal heat storages, which is discussed in the present study, falls into the third category. Phase change materials (PCM) can absorb large quantities of heat at almost constant temperature. Thereby, temperature fluctuations can be reduced, which is interesting for numerous applications. PCM have already been successfully implemented in construction technology, transport boxes for sensible goods like medication or in heat sinks for electronic components (Mehling and Cabeza, 2008).

For many years, the integration of PCM in household refrigerators and freezers is a subject of scientific investigation. In 1989, Onyejekwe (1989) integrated a simple latent heat accumulator on the basis of an eutectic NaCl/H₂O mixture in a refrigerator. Wang et al. (2007a,b,c) developed a prototype, in which the influence of PCM at different places in the cooling system was studied, e.g. between compressor and condenser, and achieved a 6–8% improvement of efficiency. By connecting a layer of PCM directly onto the evaporator of a household cooling device, Azzouz et al. (2008, 2009) were able to demonstrate that the coefficient of performance (COP) can be increased by around 5–15% due to a higher evaporator temperature and a reduced number of on/off compressor cycles. Cheralathan et al. (2007) examined an industrial cooling system with encapsulated PCM and were able to show an increase of efficiency as well as the option to transfer power consumption, e.g., into cost-effective night tariffs. Gin and Farid (2010) found better storing quality for frozen goods because of stabilized temperatures due to the integration of PCM panels into a household freezing device. Moreover, they achieved lower power consumption during defrosting cycles and door openings (Gin et al., 2010). Oró et al. (2012) found consistent results for commercial freezers.

In most European household cooling devices, the heat transfer from the condenser to the environment is based on free convection and radiation only, which leads at the given temperatures to a low heat flux. Combined with the intermittent operational mode of these refrigerators, where the relation of on and off time is approximately 1:2, this leads to a fairly high condenser temperature during the compressor runtime. If a lower temperature of the condenser during the compressor runtime can be achieved by shifting a significant part of the heat transfer into the environment to the compressor off time, the COP can be improved. In an experimental study, Marchi Neto et al. (2009) therefore suggested a separate water reservoir by which the overall efficiency was increased. However, they used a volume of 122 L which is not practical. Some appliance manufacturers already tried to integrate PCM into condensers. They encountered problems like volume extension during phase change and particularly the involved leak security contradicted a practical implementation so far. Only recent successes in producing dimensionally stable, polymer-bound PCM seem to open promising routes to the solution of these problems. E.g., Chen

et al. (2011) achieved a power consumption reduction of almost 12% with the use of a paraffin-polyethylene compound in a cooling device with an integrated hot wall condenser. However, this strong effect can partly be traced back to the greater influence of the condenser temperature due to the higher heat flow into the refrigerant compartment, depending on the construction of this condenser type, and thereby lower efficiency. Therefore, wire-and-tube or plate-and-tube condensers are predominantly used today in Europe and Asia. Because of their larger heat transfer surface area they provide a better heat transfer under typical installation conditions (Bansal and Chin, 2003). Due to the direct accessibility of the condenser at the back side of the appliance, leak security and dimensional stability of the deployed PCM are of greatest importance.

2. Methodology

Since directive 94/2/EG took effect in the European Union, manufacturers are obliged to indicate the power consumption of household cooling and freezing devices. In Europe, the determination of power consumption is controlled by DIN EN 153. All measurements and tests carried out in this study are in accordance with these guidelines. With respect to the detailed test methods and conditions we refer to the relevant paragraphs in DIN EN 153 of DIN EN ISO 15502.

3. Test setup

3.1. Cooling device

A completely integrated built-in off-the-shelf cooling device of type Miele K-9252i-1 with a storage volume of 152 L and a

power consumption of 98 kWh year^{-1} , corresponding to energy efficiency class A++, served as the basis for the present study. The heat discharge of this appliance was realized by a wire-and-tube condenser with an overall width of 455 mm and an overall height of 655 mm. To enlarge the heat transfer surface area, wires were welded vertically over a width of 400 mm and strength of 1 mm in a distance of 5 mm onto the horizontally passing tubes. Thus the tubes with an outer diameter of 4.75 mm were fixed at a distance of 40 mm from each other such that the resulting space between them can be used for the integration of (latent) heat storage elements. Note that these features are all according to the off-the-shelf standard. Fig. 1 shows that condenser equipped with a taped bag and also equipped with a copolymer compound, which was developed in this work. In both cases, a heat storage mass of approximately 500 g was integrated into the standard wire-and-tube condenser in our lab subsequently to the production of the refrigerator.

3.2. Storage materials

Different heat storage materials (water, paraffin and copolymer-bound PCM) as well as different macro-encapsulations (PE-HD foil and aluminum-composite film) were considered with respect to their influence on power consumption. Table 1 provides an overview. In addition to the standard heat storage components (water and paraffin as well as PE-HD foil and aluminum-compound film), a high-capacity, dimensionally stable PCM panel was developed on the basis of a block copolymer fixed organic paraffin derivative. The thermal conductivity of this copolymer compound itself of $\lambda = 0.19 \text{ W (m}^{-1} \text{K}^{-1})$ was increased by adding graphite (THERMOPHIT GFG, SGL GROUP). Upon addition of graphite to a mass fraction of $\omega \approx 0.3 \text{ g g}^{-1}$, the thermal conductivity of

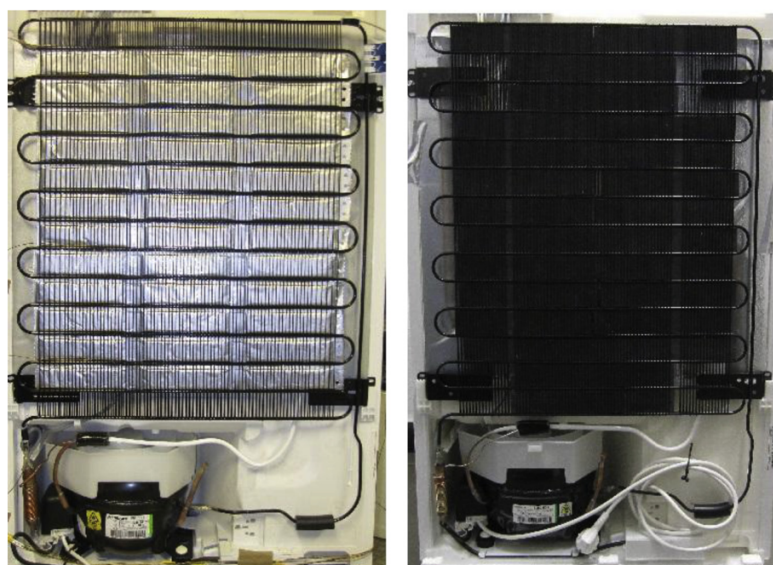


Fig. 1 – Wire-and-tube condenser, equipped with taped bags out of aluminum-composite film (left) or copolymer compound (right).

Table 1 – Physical characteristics for different experimental heat storages.

Characteristics	Heat storage type			
	Water [A]	PCM [B]	PCM [C]	Copolymer compound [D]
Mass [kg]	0.5	0.5	0.5	0.5
Density [kg L ⁻¹]	1.0	0.76	0.76	0.89
Approx. phase change temperature [°C]	0	34	34	34
Storage capacity 25–40 °C [kJ kg ⁻¹]	63	251	251	182
Thermal conductivity [W m ⁻¹ K ⁻¹]	0.6	0.19	0.19	0.64
Encapsulation	Al composite	PE-HD	Al composite	None

the compounded material was higher by a factor of 20, i.e. $\lambda = 3.95 \text{ W (m}^{-1} \text{ K}^{-1})$ was achieved.

Due to constructional constraints given by the chosen refrigerator, the heat storage element thickness was limited to approximately 4 mm. Therefore, a copolymer compound with a graphite mass fraction of $\omega \approx 0.1 \text{ g g}^{-1}$ and a thermal conductivity of $0.64 \text{ W (m}^{-1} \text{ K}^{-1})$ was chosen to achieve a higher heat storage capacity. In contrast to prior approaches, this compound material is dimensionally stable and in its “liquid” state it is secure against leakage and exudation. Therefore, encapsulation is not necessary. Another advantage of the developed heat storage element is the crucially lower installation effort during the production process, resulting in a cost-effective implementation of manufacturer requirements.

Fig. 2 shows the temperature dependence of the specific enthalpy of the developed copolymer compound ($\omega \approx 0.1 \text{ g g}^{-1}$) in comparison with the pure PCM. The underlying measurements were carried out by Differential Scanning Calorimetry (DSC, SETARAM TG-DSC 111) and a heat flow 3-layer-calorimeter (W&A, WOTKA) specifically developed for the analysis of PCM. In comparison to common DSC devices, WOTKA allows much greater sample quantities up to 100 g to determine the phase change temperature. The heat storage capacity of the compounded material is lower than that of the pure PCM due to its significant graphite and copolymer content. Over the temperature range that is important for the condenser (from 25 °C to 40 °C) the heat

storage capacity is reduced by approximately 25% from 250 kJ kg^{-1} to 180 kJ kg^{-1} (cf. Table 1). The melting temperature remains unaffected at approximately 34 °C. In comparison to the paraffin-polyethylene compound suggested by Chen et al. (2011), the present copolymer compound exhibits a storage capacity that is larger by a factor of six in the relevant temperature range.

3.3. Measurement of temperature and power consumption

The present test setup and all procedures followed the norms DIN EN 153 resp. DIN EN ISO 15502. Temperature was sampled by thermocouple differential measurements, each against a reference thermo element per measuring point in a mixture of ice and water. The employed data acquisition module OMB-DAQ 55/56 (Omega Technologies) was complemented with the pre-amplifier LTC1049 (Linear Technology), which limited the offset error caused by zero point drift to $\pm 0.025 \text{ K}$. The typical error of thermocouples of $\pm 1\% \times \Delta T$ could thus be lowered to $\pm 0.5\% \times \Delta T$ by batch consistency of the deployed thermocouples and a polynomial calibration. The temperatures of the condenser were measured under standard conditions (average cold storage temperature 5 °C, environment temperature 25 °C and humidity 50%). For the measurement of the power consumption, energy counters of

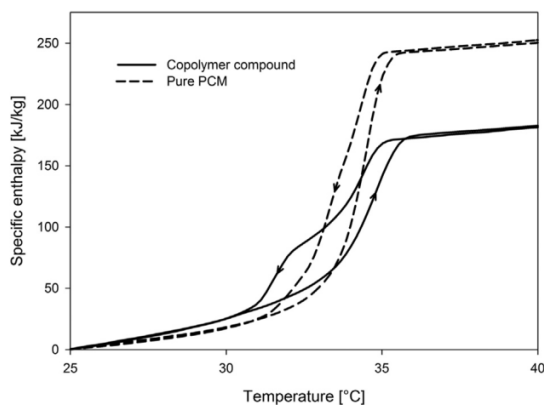


Fig. 2 – Specific enthalpy as a function of temperature of pure PCM (dashed lines) compared to the copolymer compound (solid lines).

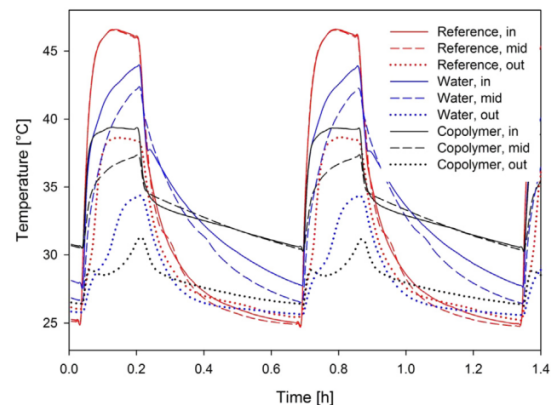


Fig. 3 – Temperature of the condenser over time at the entry (in), its geometric center (mid) and its exit (out) of the reference refrigerator, with sensible heat storage (water) and with latent heat storage (copolymer).

type EZI 1 (Zimmer Electronic Systems) with a resolution of 25 impulses per Wh were used. The relative measurement error of the considered standard power consumption was approximately 1%. For the visualization of the temperature distribution of the condenser, a thermographic camera of type MIDAS 320L (DIAS Infrared) with a resolution of 320×240 pixels was employed for the long-wave infrared spectral range from 8 to 14 μm .

4. Results and discussion

4.1. Condenser temperature

The influence of a heat storage on the condenser temperature of the refrigerator is shown in Fig. 3. The condenser temperature was significantly reduced in all its sections during the entire runtime of the compressor. Therefore, a large part of the heat discharge was taking place during the compressor off time.

With a sensible heat storage (water), the maximum temperature was reduced at the entry of the condenser towards the end of the compressor runtime by $\sim 3^\circ\text{C}$ from approximately 47°C to 44°C , with the latent (copolymer compound) heat storage even by $\sim 8^\circ\text{C}$ to approximately 39°C . In the geometric center of the condenser, the temperature was reduced by the sensible heat storage by $\sim 5^\circ\text{C}$ and with the latent heat storage even by $\sim 10^\circ\text{C}$ to just 37°C . The condenser outlet temperature was reduced from 39°C to 34°C (water) or 31°C (copolymer compound). This decrease of the condenser temperature, together with the associated lower refrigerant pressure, leads to an increase of the refrigerator's COP. The

compressor runtime is thus shorter under otherwise constant conditions. As a result, the duration of the complete operating cycle was also somewhat shorter, because the compressor off time remained constant.

Fig. 4 shows infrared images of the condenser, indicating its temperature distribution at different stages of the cooling cycle: immediately before the start of the compressor, at the end of the compressor runtime when the maximum temperature is reached, and 15 min after the end of the compressor runtime during the cool down phase. In comparison with the reference device without heat storage, all studied heat storage types lead to a significantly lower maximum condenser temperature. During the compressor off time the condenser temperature is higher due to the thermal storage mass. Before the start of the compressor the difference between sensible and latent heat storage can be seen most clearly, i.e. the condenser with sensible heat storage cooled off much more. Latent heat storage exhibits a higher temperature during the entire cool down phase of the condenser, thus utilizing the compressor off time substantially more for heat discharge to the environment. In addition, the maximum temperature during compressor runtime is lower than in case of sensible heat storage.

Comparing PCM elements in PE-HD encapsulation with the PCM elements in aluminum-compound film highlights the influence of thermal conductivity. The aluminum-compound encapsulation exhibits a more homogeneous temperature distribution during all stages of the cooling processes. However, the most homogeneous temperature distribution, and therefore the lowest maximum temperature, was achieved by the copolymer compound developed in this work.

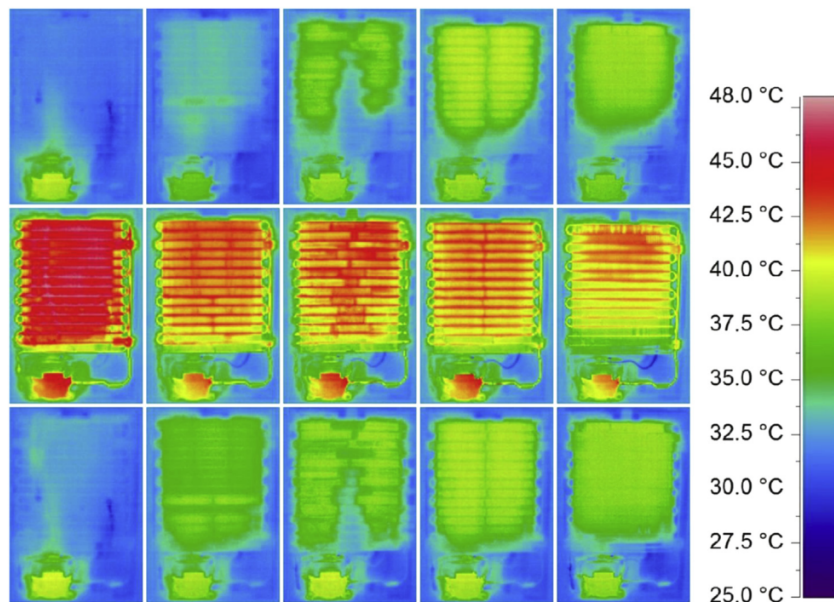


Fig. 4 – Temperature distribution of the condenser; top: immediately before compressor runtime, center: at the end of compressor runtime, bottom: 15 min after the end of compressor runtime; column 1: without heat storage (reference), column 2: with sensible heat storage (water), column 3: with PCM in PE-HD foil, column 4: with PCM in aluminum-compound film, column 5: with copolymer compound.

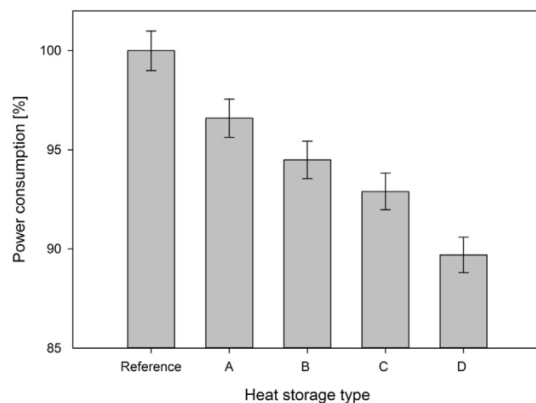


Fig. 5 – Power consumption relative to the reference refrigerator for different (latent) heat storages (A: sensible water heat storage, B: PCM and PE-HD foil, C: PCM and aluminum-compound film, D: copolymer compound); the vertical bars represent measurement uncertainties.

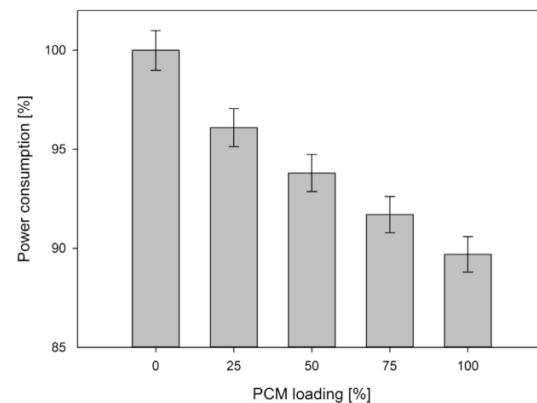


Fig. 6 – Power consumption depending on the loading of the condenser with copolymer compound elements; the vertical bars represent measurement uncertainties.

4.2. Power consumption

The measured temperature distribution is reflected in the power consumption, cf. Fig. 5. The use of a sensible heat storage in a common wire-and-tube condenser compared with the reference device leads to a reduction of the energy input of ~3%. With the straightforward form of a latent heat storage, depending on the encapsulation, ~5% (PE-HE foil) or ~7% (aluminum-compound film) was saved. Employing the copolymer compound developed in this work, the power consumption was reduced by ~10%.

An important advantage of the present PCM concept for manufacturers of household cooling and freezing devices is that by variation of the loading (i.e. number of heat storage elements per condenser) the reduction of the power consumption can be adjusted even at the end of product development. That may be of interest, e.g. if a defined power consumption reduction must be realized to achieve a higher energy efficiency class. Fig. 6 shows the influence of the loading on the power consumption. Loading only 25% of the condenser surface with copolymer compound leads to a reduction of ~4%, loading the entire condenser to ~10%.

5. Conclusion

In this experimental study, a standard wire-and-tube condenser was equipped with different sensible and latent heat storage elements and their impact on power consumption was compared to the corresponding off-the-shelf household refrigerator. The results show a significant impact of heat storage on the condenser temperature and consequently on power consumption. This effect is much more pronounced for latent than for sensible heat storage. By integrating a copolymer compound heat storage, power consumption was reduced by up to 10%. Up to this limit, a defined

power consumption reduction can be achieved by customized loading of the condenser with PCM. Due to the leak and exudation security even in its “liquid” state, encapsulation of the copolymer compounded PCM is not necessary. Due to their stable spatial dimensions, the heat storage elements developed in this work can be integrated with considerably less logistics and assembly effort into the production process than encapsulated ones. Because they have a large storage capacity of 180 kJ kg^{-1} , only little storage mass of about 0.5 kg is required for a significant effect. In summary, a cost-effective method of reducing the power consumption of household refrigerators was presented.

Acknowledgment

This work was supported by Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU, AZ 28626).

REFERENCES

- Azzouz, K., Leducq, D., Gobin, D., 2008. Performance enhancement of a household refrigerator by addition of latent heat storage. *Int. J. Refrigeration* 31, 892–901.
- Azzouz, K., Leducq, D., Gobin, D., 2009. Enhancing the performance of household refrigerators with latent heat storage: an experimental investigation. *Int. J. Refrigeration* 32, 1634–1644.
- Bansal, P.K., Chin, T., 2003. Heat transfer characteristics of wire-and-tube and hot-wall condensers. *HVAC&R Res.* 9 (3), 277–290.
- Barthel, C., Hohmeyer, O., Irrek, W., Thomas, S., 2005. Energieeffiziente Kühl- und Gefriergeräte (Energy Efficient Refrigerators and Freezers). Endbericht. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie. Available from: <http://www.wupperinst.org>.
- Binneberg, P., Kraus, E., Quack, H., 2002. Reduction in power consumption of household refrigerators by using variable

- speed compressors. In: *Int. Refrigeration and Air Conditioning Conference*, Paper 615. Available from: <http://docs.lib.purdue.edu/iracc>.
- Chen, W.-L., Mei, B.-J., Liu, Y.-N., Huang, Y.-H., Yuan, X.D., 2011. A novel household refrigerator with shape-stabilized PCM (Phase Change Material) heat storage condenser: an experimental investigation. *Energy* 36, 5797–5804.
- Cheralathan, M., Velraj, R., Renganarayanan, S., 2007. Performance analysis on industrial refrigeration system integrated with encapsulated PCM-base cool thermal energy storage system. *Int. J. Energy Res.* 31, 1398–1413.
- DKV, 1985. Möglichkeiten der Energieeinsparung bei Haushaltskühl- und Gefriergeräten (Opportunities of Energy Savings for Household Refrigerators and Freezers). Statusbericht 1, second ed. Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein (DKV) e.V., Stuttgart.
- Faber, S., Esposito, R., Mebane, W., Presutto, M., Sciadoni, R., Stamminger, R., 2007. Preparatory Studies for Eco-design Requirements of EuPs. Final Report Domestic Refrigerators & Freezers. TREN/D1/40-2005.
- Gin, B., Farid, M.M., 2010. The use of PCM panels to improve storage condition of frozen food. *J. Food Eng.* 100, 372–376.
- Gin, B., Farid, M.M., Bansal, P.K., 2010. Effect of door opening and defrost cycle on a freezer with phase change panels. *Energy Convers. Manag.* 51, 2698–2706.
- IEA, 2003. Cool Appliances: Policy Strategies for Energy Efficient Homes. Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD.
- Marchi Neto, I., Padilha, A., Scalon, V.L., 2009. Refrigerator COP with thermal storage. *Appl. Therm. Eng.* 29, 2358–2364.
- Mehling, H., Cabeza, L.F., 2008. *Heat and Cold Storage with PCM. An up to Date Introduction into Basics and Applications*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Onyejekwe, D., 1989. Cold storage using eutectic mixture of NaCl/H₂O: an application to photovoltaic compressor vapours freezers. *Sol. Wind Tech.* 6, 11–18.
- Oró, E., Miró, L., Farid, M.M., Cabeza, L.F., 2012. Improving thermal performance of freezers using phase change materials. *Int. J. Refrigeration* 35, 984–991.
- Philipp, J., 2002. Optimierung von Haushaltskühlgeräten mittels numerischer Simulation (Optimizing of Household Devices via Numeric Stimulation). Forschungsbericht des DKV Nr. 65, Stuttgart.
- Roth, P., 2008. Energy Saving on the High Pressure Side of a Refrigerating Plant. *KI 03/2008*, pp. 30–35.
- Wang, F., Maidment, G., Missenden, J., Tozer, R., 2007a. The novel use of phase change materials in refrigeration plant. Part 1: experimental investigation. *Appl. Therm. Eng.* 27, 2893–2901.
- Wang, F., Maidment, G., Missenden, J., Tozer, R., 2007b. The novel use of phase change materials in refrigeration plant. Part 2: dynamic simulation model for the combined system. *Appl. Therm. Eng.* 27, 2902–2910.
- Wang, F., Maidment, G., Missenden, J., Tozer, R., 2007c. The novel use of phase change materials in refrigeration plant. Part 3: PCM for control and energy savings. *Appl. Therm. Eng.* 27, 2911–2918.

6.2 Copolymer-bound phase change materials for household refrigerating appliances: experimental investigation of power consumption, temperature distribution and demand side management potential

Sonnenrein, G., Elsner, A., Baumhögger, E., Fieback, K., Morbach, A., Vrabec, J. International Journal of Refrigeration, 2015, 51, pp. 154–160.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.07.025>

Mit Erlaubnis von Elsevier entnommen aus „International Journal of Refrigeration“ (Copyright 2015).

Diese Studie untersucht den Einfluss von Latentwärmespeichern auf die Verdampfer- und Verflüssigertemperatur sowie das Betriebsverhalten handelsüblicher Haushaltskühlgeräte. Hierfür wurden verschiedene Verdampfer- und Verflüssigertypen mit im Rahmen der Studie entwickelten polymergebundenen PCM mit erhöhter Wärmeleitfähigkeit bestückt und die Energieaufnahme und Temperaturverteilung unter Normbedingungen analysiert. Die Ergebnisse zeigen, wie sich durch den Einsatz von PCM die Verdampfertemperatur deutlich erhöhen bzw. die Verflüssigertemperatur senken und damit einhergehend der Stromverbrauch signifikant reduzieren lässt. Darüber hinaus konnten die Kühlgeräte durch Modifikation der Regelstrategien auch in Bezug auf weitere Zielparameter optimiert werden, sowohl hinsichtlich einer deutlichen Reduzierung der Temperaturschwankungen im Kühlfach als auch einer Vervielfachung der Zyklendauer, und dadurch das Potenzial für ein Lastmanagement aufgezeigt werden.

Der Autor dieser Dissertation hat die vorliegende Publikation verfasst, die (Latent-)Wärmespeicher und Integrationskonzepte entwickelt sowie die Versuche durchgeführt und ausgewertet. Andreas Paul und Dr. Andreas Morbach haben an dem Aufbau der Kühlgeräte, Andreas Elsner und Elmar Baumhögger an der Mess- und Regeltechnik für die Versuchsdurchführung mitgewirkt, Dr. Klaus Fieback die Erstellung der Versuchsaufbauten durch die Übernahme administrativer Aufgaben unterstützt. Prof. Jadran Vrabec hat den Autor während der gesamten Arbeit betreut und an der Revision des Manuskripts mitgewirkt.

Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ijrefrig

Copolymer-bound phase change materials for household refrigerating appliances: experimental investigation of power consumption, temperature distribution and demand side management potential



G. Sonnenrein ^a, E. Baumhögger ^a, A. Elsner ^a, K. Fieback ^b,
A. Morbach ^c, A. Paul ^a, J. Vrabec ^{a,*}

^a Thermodynamics and Energy Technology, Universität Paderborn, Warburger Str. 100, 33098 Paderborn, Germany

^b PCM-innovativ GmbH, Am Fichtenberg 2, 14552 Michendorf, Germany

^c Miele & Cie. KG, Carl-Miele-Str. 29, 33332 Gütersloh, Germany

ARTICLE INFO

Article history:

Received 28 April 2015

Received in revised form 22 June 2015

Accepted 29 June 2015

Available online 30 July 2015

Keywords:

Household refrigerator

Power consumption

Thermal storage

Phase change material

Demand side management

ABSTRACT

This study presents the results of an experimental investigation of the influence of latent thermal heat storage elements on the power consumption as well as the temperature distribution of commercial household refrigerators. Two evaporator types and a standard wire-and-tube condenser are equipped with copolymer-bound phase change materials (PCM) and the performance is determined under standard conditions. The results show that refrigerating appliances equipped with PCM can be optimized through modifications of the control strategy to achieve different targets: (a) Power consumption can be significantly reduced by increasing the evaporator and decreasing the condenser temperature. (b) Temperature fluctuations in the refrigerator's fresh-food compartment during the cooling cycle can be reduced from 4 °C to 0.5 °C. (c) The cooling cycle duration can be tripled without compromising the fresh-food compartment conditions. The latter may help to meet the growing demand for balancing power consumption to stabilize the power grid, e.g. if the share of highly fluctuating, sustainable energy supply is large.

© 2015 Elsevier Ltd and International Institute of Refrigeration. All rights reserved.

Les matériaux à changement de phase copolymères pour les appareils frigorifiques domestiques: étude expérimentale de la consommation d'énergie, de la distribution de température et du potentiel de gestion de la demande

* Corresponding author. Thermodynamics and Energy Technology, Universität Paderborn, Warburger Str. 100, 33098 Paderborn, Germany. Tel.: +49 5251604139; Fax: +49 5251603522.

E-mail address: jadran.vrabec@upb.de (J. Vrabec).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.06.030>

0140-7007/© 2015 Elsevier Ltd and International Institute of Refrigeration. All rights reserved.

Mots clés : Réfrigérateur domestique ; Consommation d'électricité ; Stockage thermique ; Matériau à changement de phase ; Gestion de la demande

Nomenclature

h	specific enthalpy (kJ kg^{-1})
T	Temperature (K)
λ	thermal conductivity ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
ω	mass fraction (g g^{-1})

1. Introduction

Despite the fact that power consumption of a single household refrigerating appliance seems to be low, the energy saving potential of the entire fleet is significant due to its almost complete market penetration and its typical all-year runtime. On average, 13.4% of the power consumption of private households in the OECD member states is caused by cooling and freezing of food (IEA, 2003). In Germany, that share is 20%, which corresponds to about 7% of the overall national power consumption (Barthel et al., 2005). In recent years, the power consumption of household refrigerators and freezers was substantially reduced, where the major driver was the labelling of energy efficiency that became mandatory in many countries. Power efficiency has thus become a decisive criterion for consumers when purchasing new household equipment (Faberi et al., 2007).

Lower power consumption can be achieved by reducing the thermal load or by optimizing the refrigeration process. An option for the former is enhancing the isolation, e.g. by replacing polystyrene that was used up into the 1980s with polyurethane foam that is standard today, the thermal load was reduced by about 30%. A further significant reduction of the thermal load can be achieved through the extensive use of vacuum insulated panels (VIP), but their high costs are still an argument against their introduction in this price-sensitive segment (Philipp, 2002). One option for the latter is the use of speed-controlled compressors. Household refrigerators and freezers are usually operating intermittently through a simple on/off control. The application of speed-controlled compressors would enable for a transition to a sustained operation. This would decrease friction and throttling losses in the compressor, increase the evaporator temperature and decrease the condenser temperature, avoid shifting of the refrigerant due to pressure equilibration during standstill and result in a reduction of power consumption by up to 30% (Binneberg et al., 2002). However, also in this case, substantially higher costs impede the use of speed-controlled compressors in simple household refrigerators. Another possibility is to optimize heat transfer at the evaporator and condenser, because the maximum efficiency of refrigeration processes is determined by their temperatures. Increasing the evaporator temperature by 1 °C typically leads to a reduction of power consumption of 3–4%, decreasing the condenser temperature by 1 °C reduces power consumption by 2–3% (Dalkilic and Wongwises, 2010). In the most basic case, this can be achieved by larger evaporator and condenser surface areas. For example, surfaces that are enlarged by 50% reduce power consumption by about

10% and 6%, respectively (DKV, 1985). Ventilators also enhance convective heat transfer, however, their own power consumption must be taken into account (Roth, 2008). The latent heat storage elements studied in this work also optimize heat transfer.

Phase change materials (PCM) can absorb large amounts of heat at almost constant temperature and are thus particularly well suited for heat storage. By implementing PCM, temperature fluctuations were reduced successfully in a variety of applications, e.g. transport boxes for sensitive goods or heat sinks for electronic devices (Mehling and Cabeza, 2008). The integration of PCM in cooling devices has been a matter of scientific analysis for many years now. In 1989, Onyejekwe (1989) installed a simple latent heat accumulator based on a eutectic NaCl/H₂O mixture in a cooling device. Wang et al. (2007a, 2007b, 2007c) examined the influence of PCM at various locations in the cooling system, i.e. between the compressor and condenser, and were able to raise their prototype's efficiency by 6–8%. A direct connection of a PCM-layer to the evaporator of a household refrigerating appliance allowed Azzouz et al. (2008, 2009) to achieve a 10–15% increase of the coefficient of performance (COP) through a higher evaporator temperature and a considerable reduction of the on/off switch control frequency. Integrating PCM into the refrigerator compartment evaporator of a domestic refrigerator/freezer appliance, Visek et al. (2014) showed an increase in evaporation temperature by 2 °C that led to an improvement of approx. 6% in the energy consumption during the refrigeration cycle. In addition to the increase of energy efficiency via encapsulated PCM in an industrial device, Cheralathan et al. (2007) were able to prove the potential of charge shifting into cost-effective power night-rates. Through the integration of PCM panels into a household freezer, Gin and Farid (2010) found an improved storage quality due to the temperature stabilization and a lower power consumption during defrosting cycles and door openings (Gin et al., 2010). Oró et al. (2012a) found consistent results for commercial freezers and also evaluated the thermal response when subjected to refrigeration system failure (Oró et al., 2012b).

Refrigeration devices with latent heat storages are well suited for future Demand Side Management (DSM) concepts, because their compressor off-time can be considerably longer and also can be varied. DSM in general refers to the specific control of power use in order to meet a fluctuating power supply, which is crucial when the share of renewable energy is growing (Kohler et al., 2010). For example, Bagriyanik and Zehir (2012) demonstrated even for customary refrigerators that a large fraction of their power demand can be displaced in time, where this effect can be boosted significantly with the use of PCM.

The heat discharge to the environment via the condenser of most household refrigerating appliances is based on free convection and radiation, which results in a moderate heat flux. Their intermittent operational mode with a typical on/off relation of about 1:2 thus results in comparatively high condenser temperatures during compressor runtime. Lowering the temperature of the condenser during the runtime of the compressor and a partial shift of the heat discharge into the downtime of

Table 1 – Experimental test setups.

Refrigerator type	Heat storage type	
	Condenser	Evaporator
K-9252i-1 (Sonnenrein et al., 2015)	PCM, 35 °C	–
	Sensible (water)	–
K-12020S-1 (foamed evaporator)	–	PCM, –2 °C
	–	PCM, –4 °C
	–	PCM, –6 °C
K-32122i (rollbond evaporator)	PCM, 35 °C	PCM, –4 °C

the compressor has the potential for considerable improvement. For this purpose, Marchi Neto et al. (2009) experimentally studied a liquid water storage with a volume of 122 l, which is hardly feasible in practice.

In the past, refrigerator manufacturers also attempted to integrate PCM into their appliances. However, problems like volume expansion upon temperature variation and particularly PCM leakage protection were impeding practical implementation. Recent successes in producing dimensionally stable, polymer-bound PCM seem to be promising for solving these problems. Chen et al. (2011) were able to reduce the power consumption of a refrigerator/freezer combination with a paraffin–polyethylene compound on the integrated, i.e. foamed, condenser by up to 12%. However, the quantification of the really achieved reduction is not clear, because of the different storage temperatures in the fresh-food compartments of the tested appliances. In Europe and Asia mainly wire-and-tube or plate-and-tube condensers are employed, which allow for a considerably better heat transfer because of their larger surface area even under installation conditions (Bansal and Chin, 2003). Due to the direct access to the condenser on the back side of the appliance, leakage protection of the PCM elements is of vital importance in the long term.

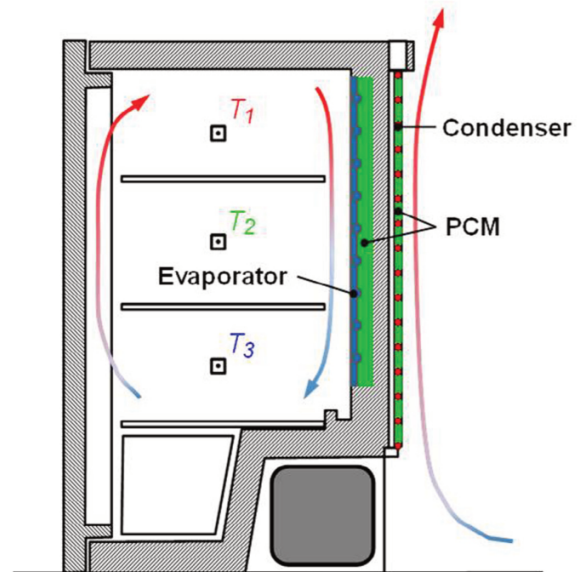
In a previous study (Sonnenrein et al., 2015), we were able to reduce the power consumption by about 10% through an installation of a newly developed copolymer-bound PCM into a standard wire-and-tube condenser. It was shown that power consumption can be reduced in a defined manner by variation of the condenser's PCM loading.

Here, the results of experimental work on combined integration of copolymer-bound PCM in evaporator and condenser as well as in different evaporator types are presented. Power consumption and temperature distribution in the fresh-food compartment were investigated with respect to their potential for future DSM concepts (cf. Table 1 and Fig. 1).

2. Test setup

2.1. Methodology

All manufacturers must specify the power consumption of household refrigerators and freezers since the directive 94/2/EG came into force. Since 2014 in European countries the respective power consumption measurements are regulated by the norm DIN EN 62552, according to which the present study was carried out. Details on the test methods and conditions are given in DIN EN 62552, which are mostly congruent with the preceding norm DIN EN ISO 153 in accordance with DIN EN ISO 15502.

**Fig. 1 – Schematic test setup.**

2.2. Measurement of temperatures and power consumption

The test setup and all executed measurement procedures were in accordance with the norms mentioned above under standard conditions. Temperature sampling was performed by thermocouple differential measurements, each measuring point with a reference junction in an ice water bath. Fig. 1 schematically shows the standard temperature measurement positions T_1 , T_2 and T_3 in the fresh-food compartment. The utilized acquisition interface OMB-DAQ 55/56 (Omega Technologies) was combined with a pre-amplifier LTC1049 (Linear Technologies), which limits the offset conditioned by zero-point drift to ± 0.025 °C. The typical error of thermo-elements of $\pm 1\% \times \Delta T$ in other work was reduced to $\pm 0.5\% \times \Delta T$ by batch consistency and polynomial calibration. For determining the power consumption under standard conditions (average temperature of the fresh-food compartment $T_m = 5$ °C, ambient temperature $T_a = 25$ °C and humidity 50%), energy meters type EZI 1 (Zimmer Electronic Systems) with 25 pulses/Wh were used, leading to a relative measurement error of about <1%. Table 2 summarizes the measured quantities and the associated uncertainties.

2.3. Refrigerating appliances

The present work is based on a free-standing refrigerator of type Miele K-12020S-1 with a volume capacity of 163 l and a

Table 2 – Uncertainties of measurements.

Measured quantity	Measuring device	Uncertainty
Temperature	Thermocouples	± 0.1 °C
Power	Energy meters	± 0.05 W
Time	Personal computer	± 0.1 s/d

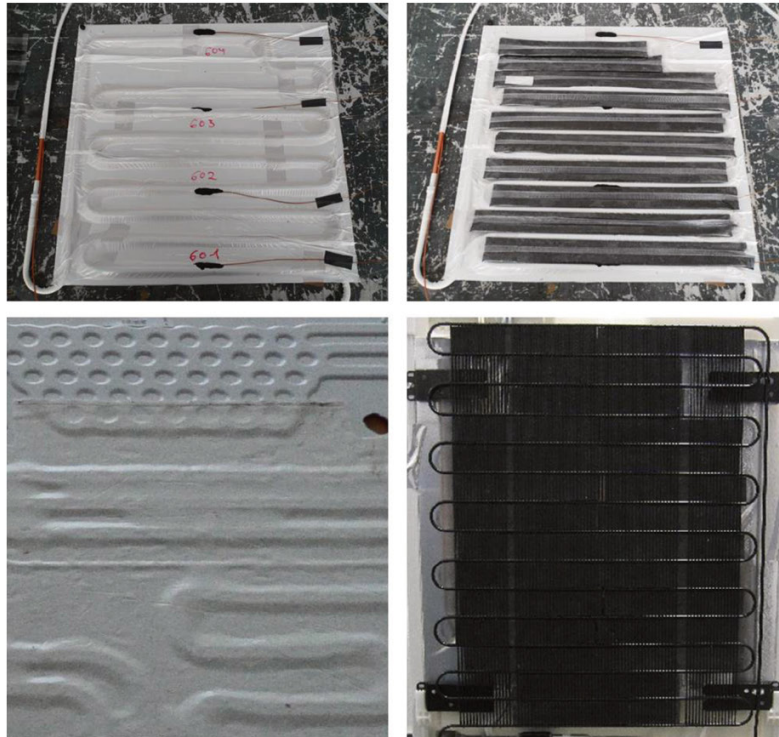


Fig. 2 – Foamed evaporator of K-12020S-1 (top, left), equipped with PCM elements (top, right), rollbond evaporator of K-32122i equipped with PCM foil (bottom, left), condenser of K-32122i equipped with PCM elements (bottom, right).

power consumption of 123 kWh a^{-1} (energy efficiency class A+) and fully integrated built-in type Miele K-32122i with a volume capacity of 151 l and a power consumption of 98 kWh a^{-1} (energy efficiency class A++). K-12020S-1 has a meander-shaped, foamed evaporator (see Fig. 2) and a plate-and-tube condenser. K-32122i has a free hanging rollbond evaporator and a wire-and-tube condenser.

2.4. Heat storage materials

High-capacitive, form-stable latent heat storage elements based on block copolymer-bound organic paraffin derivatives were developed in this study. They were integrated in evaporators and condensers and examined with respect to their influence on performance and power consumption. Fig. 3 shows the temperature dependence of the specific enthalpy h of the compound developed for the evaporator in comparison to a typical salt-water mixture based test-package composition according to DIN EN 62552. Measurements were done with Differential Scanning Calorimetry (DSC, SETARAM TG-DSC 111) and also with a heat flow three-layer calorimeter (W&A, WOTKA), developed specifically for analyzing PCM. The latter allows for a considerably larger sample quantity than commercial DSC devices and therefore yields the phase change temperature more precisely. The specific enthalpy h of the compound in the temperature range from -15°C to 5°C is approximately 200 kJ/kg and thus has only about 2/3 to 3/4 of the storage capacity of typical salt-water-based approaches.

However, Fig. 3 demonstrates the main problem when integrating salt-water or glycol solutions, particularly into the evaporator: The subcooling necessary for initiating solidification, thus the difference between melting and freezing temperature, is typically between 5°C and 15°C . For this reason relatively large amounts of nucleate agents, like silver iodine, have to be added to increase the freezing onset temperature,

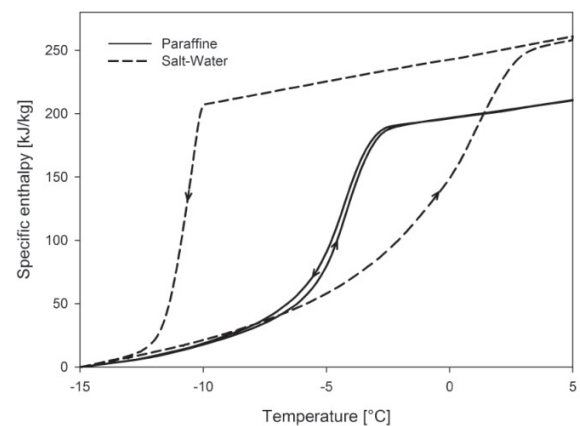


Fig. 3 – Specific enthalpy as a function of temperature of the paraffin derivative (solid lines) compared to a salt-water mixture according to DIN EN 62552 (dashed lines).

whereas a significant subcooling is unavoidable (Lu and Tassou, 2013). For example, Khan and Afroz (2015) integrated a eutectic aqueous NaCl solution ($\omega = 0.1$ g/g) with a melting temperature of -5 °C in the evaporator of a household refrigerator, but for initiating the solidification evaporator coil temperatures below -12 °C were necessary. By comparison, the present paraffin derivative shows no significant sub-cooling. In this case, the temperature of the evaporator, where the PCM undergoes solidification, can be higher, which is crucial for performance increase. An additional advantage of polymerization is form-stability of the PCM elements. Moreover, it avoids leaking of the PCM in its “liquid” state so that macro-encapsulation is not necessary. Finally, the thermal conductivity of the PCM of $\lambda = 0.19$ W/(m K) was increased by adding a specific graphite (THERMOPHIT GFG, SGL GROUP), depending on its mass fraction ω by up to a factor of 20 to $\lambda = 3.95$ W/(m K) for $\omega = 0.3$ g/g.

In a first step, the optimum melting temperature of the PCM to meet an average temperature T_m of about 5 °C as well as a maximum temperature of 8 °C in the fresh-food compartment for determining the power consumption under standard conditions in accordance to DIN EN 62552 had to be found. Fig. 4 shows the results for the integration of different PCM in a K-12020S-1 with phase change temperatures of -2 °C, -4 °C and -6 °C, cf. Fig. 3. The comparable evaporator temperature amplitudes are the result of the same thermostat settings, whereas the switch-on has to ensure automatic defrosting (i.e. >0 °C) of the evaporator and at switch-off the different PCM had to be solidified (i.e. <-8 °C). As expected, the average fresh-food compartment temperature T_m raises with the phase change temperature, and in this case a phase change temperature of -4 °C is sufficient to reach an average temperature in the fresh-food compartment of 5 °C as well as a maximum temperature below 8 °C (see also Fig. 5).

Of course, a lower average temperature T_m could be achieved with the -2 °C PCM, but consequently the evaporator temperature would have to be reduced too, which hinders the intended energy performance enhancement. These results are consistent with the experimental investigations of Azzouz et al. (2009), where the influence of a water storage and a eutectic aqueous

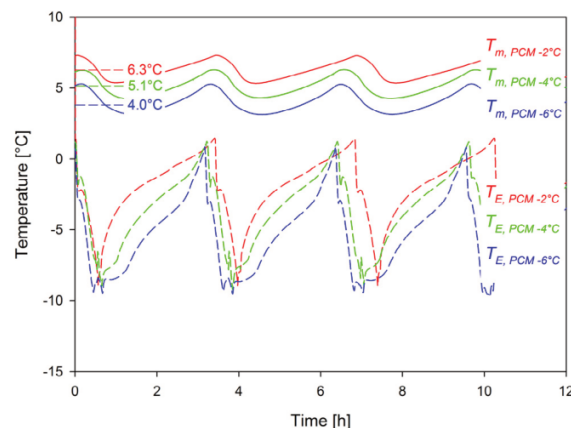


Fig. 4 – Influence of different PCM melting points on the average temperature in the fresh-food compartment (T_m) of K-12020S-1 (solid lines) at the same evaporator temperature amplitude (T_E).

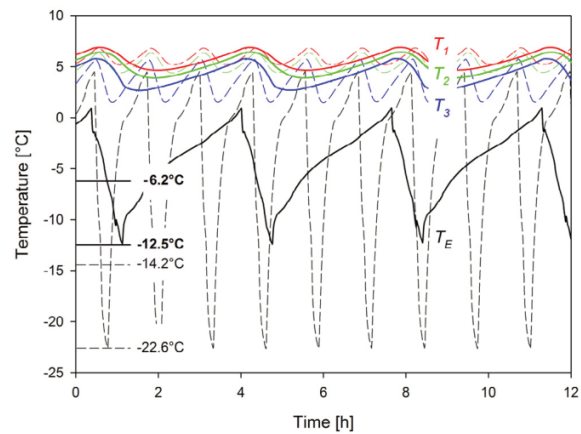


Fig. 5 – Temperature of the fresh-food compartment of K-12020S-1 (T_1 , T_2 , T_3) and of the (foamed) evaporator (T_E) without (dashed lines) and with PCM (solid lines); numerical values indicate minimum and average evaporator temperatures during compressor runtime.

solution with a phase change temperature of -3 °C was discussed. Under norm conditions the compartment temperature remained lower with the eutectic solution than in case of water as PCM and reached the required average of 5 °C, whereas the also required maximum of 8 °C was exceeded.

Details on the compound integrated in the condenser are given in our preceding study (Sonnenrein et al., 2015).

3. Results and discussion

Experimental tests with copolymer-bound PCM attached to two different evaporator types and a standard wire-and-tube condenser were carried out to investigate the power consumption and the temperature distribution in the fresh-food compartment. The aim of this work was to improve the energy efficiency as well as to study the potential for future DSM concepts without compromising the fresh-food compartment conditions.

3.1. Temperature distribution and power consumption

The influence of the latent heat storage elements integrated into the spaces of the meander-shaped, foamed evaporator of refrigerator K-12020S-1 (see Fig. 2, top) on the evaporator temperature (T_E) and the fresh-food compartment temperatures (T_1 , T_2 and T_3) is shown in Fig. 5. Six hundred grams of PCM was sufficient to significantly increase the evaporator temperature, approximately triple the cooling cycle duration and lower the compressor's relative runtime from 27% to 21% under comparable fresh-food compartment and environment conditions. With the latent heat storage, the minimum temperature of the evaporator was increased by ~ 10 °C from -22.6 °C to -12.5 °C and averaged over compressor runtime by ~ 8 °C from -14.2 °C to -6.2 °C. Altogether, this leads to a reduction of power consumption of up to 12%.

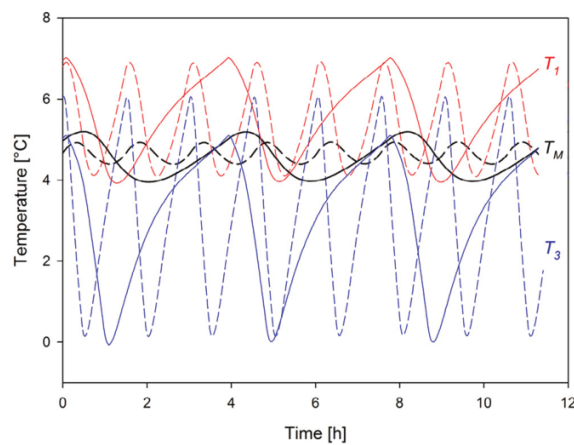


Fig. 6 – Temperature of the fresh-food compartment of K-12020S-1 (T_1 , T_3) and the M-package (T_M) without (dashed lines) and with PCM (solid lines).

Prior studies, e.g. by [Azzouz et al. \(2008, 2009\)](#), demonstrated that the cooling cycle duration can be increased with more PCM mass up to 10 h with average air temperatures between 0 °C and 10 °C in the fresh-food compartment. However, examined in more detail, as shown in [Fig. 6](#), this results in a considerably larger temperature amplitude of chilled goods, which adversely affects storage quality. To evaluate these temperature amplitudes a 250 g test-package according to DIN EN 62552 equipped with a thermocouple, a so called M-package, was placed in the geometric center of the fresh-food compartment to simulate chilled goods (T_M). Although the temperature amplitude in the fresh-food compartment (T_1 , T_3) remained the same, the temperature amplitude of the M-Package increased from 0.5 °C to 1.3 °C due to the longer cycle duration and thus longer warming-up and cooling-down periods of the thermal mass. Due to high expectations towards modern household refrigerating appliances, temperature fluctuations of the cooled goods in the fresh-food compartment are expected to have a maximum of ± 0.5 °C, and in chill compartments even only of ± 0.1 °C. Under these conditions the cooling cycle duration of refrigerators with a simple on/off control and free convection is significantly limited, in case of K-12020S-1 to less than 4 h.

In our preceding study, the integration of a copolymer-bound PCM larger a standard wire-and-tube condenser

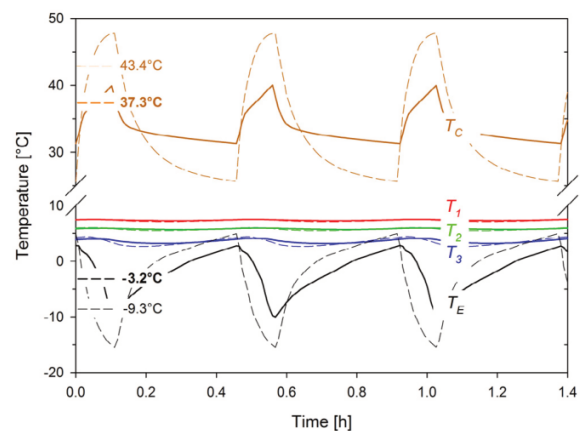


Fig. 7 – Temperature of the fresh-food compartment of K-32122i (T_1 , T_2 , T_3), of the rollbond evaporator (T_E) and of the condenser (T_C) without (dashed lines) and with PCM on evaporator and condenser (solid lines); numerical values indicate average evaporator and condenser temperatures during compressor runtime.

was considered ([Sonnenrein et al., 2015](#)). [Fig. 7](#) shows the results for a combined integration of 150 g PCM foil into the evaporator and 500 g PCM elements into the spaces of the condenser of a commercial refrigerator, i.e. K-32122i (see [Fig. 1](#), bottom). Compared to the foamed evaporator of K-12020S-1, the construction of the refrigerator's free hanging rollbond evaporator a priori leads to a higher evaporator temperature.

The thermostat settings were throughout adjusted to reach the required average temperature T_m in the fresh-food compartment of about 5 °C. In this case, the cycle duration of both appliances is nearly the same, but the relative runtime decreases from approx. 24% to 20% with the PCM (cf. [Table 3](#)). Also the minimum evaporator temperature was increased with the integration of PCM by ~ 6 °C from about -16 °C to -10 °C and on average during the runtime of the compressor by ~ 6 °C from about -9.3 °C to -3.2 °C. The maximum condenser temperature T_C was reduced by ~ 8 °C from about 48 °C to 40 °C and on average during the runtime of the compressor by ~ 6 °C from 43.4 °C to 37.3 °C. Altogether, this leads to a reduction of power consumption by about 17%.

Table 3 – Summary of measured test results.

	Refrigerator	PCM [°C] Evaporator/Condenser	T_m [°C]	Runtime [h]	Off time [h]	Cycle duration [h]	Relative runtime [%]	Temperature amplitude [°C]
Fig. 4	K-12020S-1	-2/-	6.3	0.63	2.77	3.40	18.5	2.7
		-4/-	5.1	0.65	2.55	3.20	20.3	2.5
		-6/-	4.0	0.68	2.49	3.17	21.5	2.9
Fig. 5	K-12020S-1	-/-	5.0	0.32	0.93	1.25	25.6	4.3
		-4/-	5.0	0.75	2.89	3.64	20.5	2.7
Fig. 7	K-32122i	-/-	5.0	0.11	0.35	0.46	24.2	1.8
		-4/35	5.0	0.10	0.37	0.47	20.4	0.9
Fig. 8b	K-12020S-1	-4/-	5.2	0.19	0.41	1.00	19.0	0.5
Fig. 8c		-4/-	4.9	0.32	1.38	1.70	18.8	1.2

3.2. Control strategies

Through the modification of control parameters, e.g. keeping the evaporator temperature close to the phase change temperature of the latent heat elements, refrigerating appliances can be optimized with respect to the following target parameters:

- power consumption
- temperature fluctuations in the fresh-food compartment (and the cooled goods)
- DSM potential (increase/decrease power load)

Fig. 8 shows the temperature profiles of the fresh-food compartment of refrigerator K-12020S-1 with 600 g PCM under different control strategies for an average fresh-food compartment temperature T_m of about 5 °C. The reference refrigerator (without PCM) exhibits a temperature fluctuation in the fresh-food compartment of up to 4 °C over the cooling cycle duration (Fig. 8a). By use of PCM, these fluctuations can be reduced to less than 0.5 °C with a comparable cooling cycle duration (Fig. 8b). Fig. 8c shows the temperature profiles at an operating point of minimum power consumption with a cooling cycle duration of about 1.7 h that could serve as a basis for future DSM concepts. In this case, the refrigerator can be triggered to switch into an “increase load” mode in order to store for additional 0.6 h energy during power oversupply, e.g. from renewable sources (Fig. 8d), without decreasing the low temperature limit (0 °C) in the fresh-food compartment. Conversely, during power shortage (or in case of power failure) it can be decoupled from the electric network for up to 1.8 h in a “reduce load” mode (Fig. 8e), without breaching the high temperature limit (8 °C) in the fresh-food compartment. Of course, for a real life DSM implementation the system and especially the possible shifting times have to be evaluated at different ambient temperatures in a next step. Nevertheless, because of the high starting current switching a fleet of refrigerators is not trivial so that future work on designing control algorithms and evaluating their effects on the power grid has to be done as well.

A summary of the results obtained during the experiments of this study is given in Table 3. In all cases with PCM, the results show that the temperature amplitude in the fresh-food compartment as well as the relative runtime was decreased.

4. Conclusions

Different copolymer-bound PCM were developed and integrated in evaporators as well as condensers of commercial household refrigerating appliances. In the present experimental study, their influence on power consumption and fresh-food compartment temperatures was studied.

The results show a considerable influence on evaporator and condenser temperatures, directly impacting power consumption. Through the integration into an appliance with a foamed evaporator, power consumption was reduced by 12% and in a combined integration into an appliance with a rollbond evaporator and a wire-and-tube condenser even by 17%. In addition, temperature amplitudes in the fresh-food compartment were significantly reduced, in case of comparable cooling cycle durations from 4 °C to less than 0.5 °C.

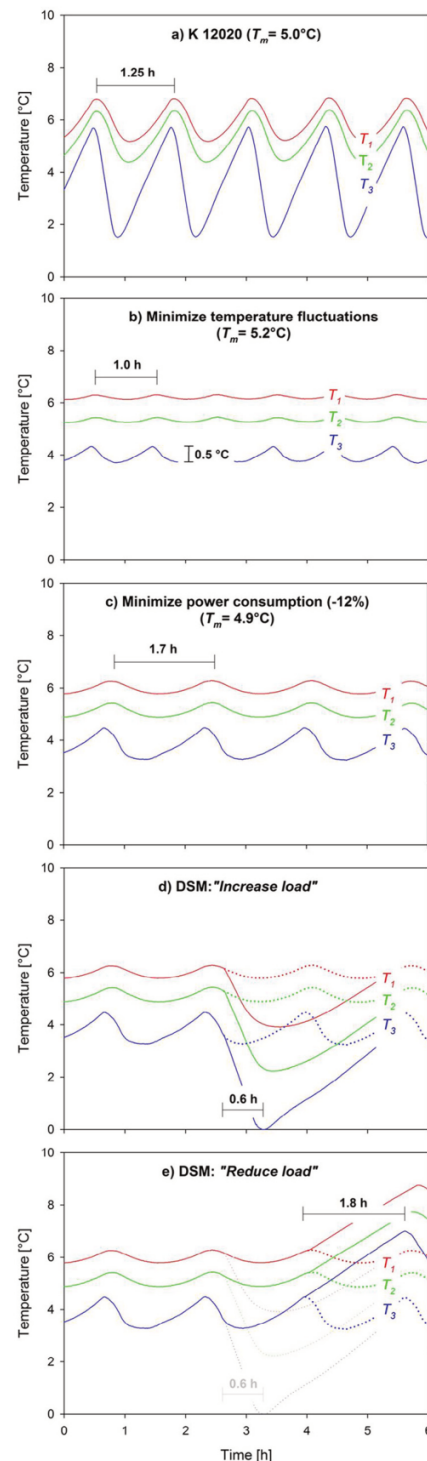


Fig. 8 – Temperature of the fresh-food compartment of K-12020S-1 for different control strategies: (a) without PCM, standard control, (b) with PCM, minimizing temperature fluctuations, (c) with PCM, minimizing power consumption, (d) with PCM, increasing load, (e) with PCM, reducing load.

Given the leak proof and form stable characteristics of the developed copolymer compounds, their integration into household refrigerator production processes is much easier than encapsulated PCM from prior work.

Furthermore, the potential for future DSM concepts with respect to the temperature amplitudes in the fresh-food compartment and chilled goods was evaluated. The results indicate that the cooling cycle duration under these restrictions is much shorter than previous studies had projected, but the shown possible tripling of the on- and off-times of the compressor may still provide great benefits for that type of application. Nevertheless, future work on designing control algorithms and evaluating their effects on the power grid is necessary.

Acknowledgments

This work was supported by Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU, AZ 28626).

REFERENCES

- Azzouz, K., Leducq, D., Gobin, D., 2008. Performance enhancement of a household refrigerator by addition of latent heat storage. *Int. J. Refrigeration* 31, 892–901.
- Azzouz, K., Leducq, D., Gobin, D., 2009. Enhancing the performance of household refrigerators with latent heat storage: an experimental investigation. *Int. J. Refrigeration* 32, 1634–1644.
- Bagriyanik, M., Zehir, M.A., 2012. Demand side management by controlling refrigerators and its effects on consumers. *Energy Convers. Manag.* 64, 238–244.
- Bansal, P.K., Chin, T., 2003. Heat transfer characteristics of wire-and-tube and hot-wall condensers. *HVAC&R Res.* 9 (3), 277–290.
- Barthel, C., Hohmeyer, O., Irrek, W., Thomas, S., 2005. Energieeffiziente Kühl- und Gefriergeräte (Energy Efficient Refrigerators and Freezers). Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie, Endbericht. <<http://www.wupperinst.org>>.
- Binneberg, P., Kraus, E., Quack, H., 2002. Reduction in power consumption of household refrigerators by using variable speed compressors. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, Paper 615. <<http://docs.lib.purdue.edu/iracc>>.
- Chen, W.-L., Mei, B.-J., Liu, Y.-N., Huang, Y.-H., Yuan, X.D., 2011. A novel household refrigerator with shape-stabilized PCM (phase change material) heat storage condenser: an experimental investigation. *Energy* 36, 5797–5804.
- Cheralathan, M., Velraj, R., Renganarayanan, S., 2007. Performance analysis on industrial refrigeration system integrated with encapsulated PCM-base cool thermal energy storage system. *Int. J. Energy Res.* 31, 1398–1413.
- Dalkilic, A.S., Wongwises, S., 2010. A performance comparison of vapour compression refrigeration system using various alternative refrigerants. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 37, 1340–1349.
- DKV, 1985. Möglichkeiten der Energieeinsparung bei Haushaltskühl- und Gefriergeräten (Opportunities of Energy Savings for Household Refrigerators and Freezers), Statusbericht 1, second ed. Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein (DKV) e.V., Stuttgart.
- Faberi, S., Esposito, R., Mebane, W., Presutto, M., Sciadoni, R., Stamminger, R., 2007. Preparatory studies for eco-design requirements of EuPs: final report domestic refrigerators & freezers. TREN/D1/40-2005.
- Gin, B., Farid, M.M., 2010. The use of PCM panels to improve storage condition of frozen food. *J. Food Eng.* 100, 372–376.
- Gin, B., Farid, M.M., Bansal, P.K., 2010. Effect of door opening and defrost cycle on a freezer with phase change panels. *Energy Convers. Manag.* 51, 2698–2706.
- IEA, 2003. COOL APLIANCES: Policy Strategies for Energie Efficient Homes. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD).
- Khan, I., Afroz, H., 2015. Effect of phase change material on compressor on-off cycling of a household refrigerator. *Sci. Technol. Built Environ.* 21, 462–468.
- Kohler, S., Agricola, A., Seidl, H., 2010. dena Grid Study II – Integration of Renewable Energy Sources in the German Poer Supply System from 2015–2020 with an Outlook to 2025. Deutsche Energie-Agentur. <<http://www.dena.de/publikationen/energiesysteme/dena-netzstudie-ii.html>>.
- Lu, W., Tassou, S.A., 2013. Characterization and experimental investigation of phase change materials for chilled food refrigerated cabinet applications. *Appl. Energy* 112, 1376–1382.
- Marchi Neto, I., Padilha, A., Scalón, V.L., 2009. Refrigerator COP with thermal storage. *Appl. Therm. Eng.* 29, 2358–2364.
- Mehling, H., Cabeza, L.F., 2008. Heat and Cold Storage with PCM. An up to Date Introduction into Basics and Applications. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Onyejekwe, D., 1989. Cold storage using eutectic mixture of NaCl/H₂O: an application to photovoltaic compressor vapours freezers. *Sol. Wind Tech.* 6, 11–18.
- Oró, E., Miró, L., Farid, M.M., Cabeza, L.F., 2012a. Improving thermal performance of freezers using phase change materials. *Int. J. Refrigeration* 35, 984–991.
- Oró, E., Miró, L., Farid, M.M., Cabeza, L.F., 2012b. Thermal analysis of a low temperature storage unit using phase change materials without refrigeration system. *Int. J. Refrigeration* 35, 1709–1714.
- Philipp, J., 2002. Optimierung von Haushaltskühlgeräten Mittels Numerischer Simulation (Optimizing of Household Devices via Numerical Simulation). Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein (DKV) e.V., Stuttgart. Forschungsbericht des DKV Nr. 65.
- Roth, P., 2008. Energy saving on the high pressure side of a refrigerating plant. *KI* 03/2008, 30–35.
- Sonnenrein, G., Elsner, A., Baumhögger, E., Morbach, A., Fieback, K., Vrabec, J., 2015. Reducing the power consumption of household refrigerators through the integration of latent heat storage elements in wire-and-tube condensers. *Int. J. Refrigeration* 51, 154–160.
- Visek, M., Joppolo, C.M., Molinaroli, L., Olivai, A., 2014. Advanced sequential dual evaporator domestic refrigerator/freezer: system energy optimization. *Int. J. Refrigeration* 43, 71–79.
- Wang, F., Maidment, G., Missenden, J., Tozer, R., 2007a. The novel use of phase change materials in refrigeration plant. Part 1: experimental investigation. *Appl. Therm. Eng.* 27, 2893–2901.
- Wang, F., Maidment, G., Missenden, J., Tozer, R., 2007b. The novel use of phase change materials in refrigeration plant. Part 2: dynamic simulation model for the combined system. *Appl. Therm. Eng.* 27, 2902–2910.
- Wang, F., Maidment, G., Missenden, J., Tozer, R., 2007c. The novel use of phase change materials in refrigeration plant. Part 3: PCM for control and energy savings. *Appl. Therm. Eng.* 27, 2911–2918.

6.3 Improving the performance of household refrigerating appliances through the integration of phase change materials in the context of the new global refrigerator standard IEC 62552:2015

Sonnenrein, G., Baumhögger, E., Elsner, A., Morbach, A., Neukötter, M., Paul, A., Vrabec, J., International Journal of Refrigeration, 2020, 119, pp. 448–456.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.07.025>

Mit Erlaubnis von Elsevier entnommen aus „International Journal of Refrigeration“ (Copyright 2020).

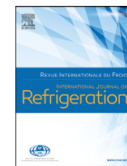
In dieser Studie wird der Einfluss von PCM auf die Kühlleistung und den Temperaturanstieg im Störfall von Haushaltskühlgeräten im Hinblick auf den neuen sogenannten global standard (IEC 62552:2015) mit den dort entsprechend eingeführten Funktionsprüfungen untersucht. Hierfür wurden acht handelsübliche Haushaltskühlgeräte mit im Rahmen der Studie entwickelten Latentwärmespeicherelementen ausgestattet und deren Leistungsfähigkeit unter den neuen Prüfbedingungen ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, dass durch den Einsatz von PCM sowohl die Kühlleistung als auch die Zeit bis zum Erreichen der kritischen Temperatur bei allen Kühlgeräten signifikant erhöht werden konnte, ohne hierbei den Stromverbrauch zu beeinflussen.

Der Autor dieser Dissertation hat die vorliegende Publikation verfasst, die (Latent-)Wärmespeicher entwickelt sowie die Versuche durchgeführt und ausgewertet. Andreas Paul und Moritz Neukötter haben bei der Versuchsdurchführung, Andreas Elsner und Elmar Baumhögger an der Mess- und Regeltechnik für die Versuchsdurchführung mitgewirkt. Dr. Andreas Morbach, Andreas Elsner und Prof. Vrabec haben an der Überarbeitung des Manuskripts mitgewirkt, außerdem Prof. Jadran Vrabec den Autor während der gesamten Arbeit betreut.



Contents lists available at ScienceDirect

International Journal of Refrigeration

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ijrefrig

Improving the performance of household refrigerating appliances through the integration of phase change materials in the context of the new global refrigerator standard IEC 62552:2015



G. Sonnenrein^a, E. Baumhögger^a, A. Elsner^a, A. Morbach^b, M. Neukötter^a, A. Paul^a, J. Vrabec^{c,*}

^a Thermodynamics and Energy Technology, University of Paderborn, Warburger Str. 100, 33098 Paderborn, Germany

^b Miele & Cie. KG, Carl-Miele-Str. 29, 33332 Gütersloh, Germany

^c Thermodynamics and Process Engineering, Technical University of Berlin, Ernst-Reuter-Platz 1, 10587 Berlin, Germany

ARTICLE INFO

Article history:

Received 20 May 2020

Revised 19 July 2020

Accepted 28 July 2020

Available online 1 August 2020

Keywords:

Household refrigerator

Thermal storage

Phase change material

Cooling capacity

Temperature rise

ABSTRACT

The influence of latent heat storage elements on the cooling performance and the temperature rise time of household refrigerating appliances is studied experimentally in the context of the “new global refrigerator standard” IEC 62552:2015. In addition to the daily energy consumption, this international standardization introduced performance tests for cooling capacity and temperature rise time. While the cooling capacity has long been anchored in various test procedures of consumer organizations, the temperature rise time, which has only been tested on freezers so far, will be a decisive factor in the future. Moreover, the need for so-called “smart appliances” that may balance power consumption is increasing since such devices may compensate the volatility of renewable energies and thus stabilize the power grid. Against this background, eight commercial household refrigerators and refrigerator-freezers are equipped with polymer-bound phase change materials (PCM) and their performance is determined under the new standard test conditions. The results show that the introduction of PCM increases the cooling capacity by up to 33 % and also increases the temperature rise time by up to 145 %, without affecting power consumption, as compared to the unmodified refrigeration appliances.

© 2020 Elsevier Ltd and IIR. All rights reserved.

Amélioration des performances des équipements frigorifiques domestiques par l'intégration de matériaux à changement de phase dans le cadre de la nouvelle norme mondiale IEC 62552:2015 relative aux réfrigérateurs

Mots-clés: Réfrigérateur domestique; Accumulation thermique; Matériau à changement de phase; Puissance frigorifique; Élévation de la température

1. Introduction

Although the power consumption of a single household refrigeration appliance appears to be low, the savings potential of the entire fleet is considerable due to the almost complete market penetration and typical continuous operation. In total, over 1.5 billion household refrigerators and freezers are in use worldwide, accounting for approximately 4 % of global electricity consump-

tion (Coloumb et al., 2015), annually causing 480 million tons of CO₂ equivalent (Barthel and Götz, 2012). As a result, test standards with sometimes striking energy labels were developed in many countries from as early as the 1990s. Meanwhile, energy efficiency has become a decisive purchase criterion for consumers (Faberi et al., 2007). However, these often very different standards and regulations require specific tests for the regional distribution of these products, which is costly and time consuming. To mitigate this problem, e.g. Bansal (2003) called for the creation of a single, consolidated testing standard. The development of this so-called “global standard” already began in 2006

* Corresponding author.

E-mail address: vrabec@tu-berlin.de (J. Vrabec).

<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.07.025>

0140-7007/© 2020 Elsevier Ltd and IIR. All rights reserved.

Nomenclature

h	specific enthalpy (kJ kg ⁻¹)
T	temperature (°C)
TMP_i	temperature measurement point
T_{ama}	time averaged ambient temperature (°C)
T_i	instantaneous refrigerator compartment temperature (°C)
T_{ma}	time averaged refrigerator compartment temperature (°C)
T_{Mi}	instantaneous M-package temperature (°C)
$T_{M,a}$	arithmetic average of all instantaneous M-package temperatures (°C)
$T_{M,max}$	instantaneous temperature of the warmest M-package (°C)
M_i	M-package number

and led to the new IEC 62552:2015 "Household refrigerating appliances – characteristics and test methods", which is currently being adapted into national standards in many countries and regions. In addition to the standardization of power consumption measurement, performance tests for cooling capacity and temperature rise time have recently been introduced. Table 1 provides an overview of the different test conditions for the daily energy consumption measurements of some of the most important international standards.

The positive influence of PCM, both on power consumption and temperature stability of household refrigeration appliances, has been known for a long time and has been the subject of scientific research in recent years, cf. Azzouz et al. (2008, 2009),

Khan et al. (2015), Oró et al. (2012a, 2012b), Sonnenrein et al. (2015a, 2015b) and references therein. PCM can absorb large amounts of heat at almost constant temperature and are thus particularly well suited for heat and cold storage. By implementing PCM, temperature fluctuations were reduced successfully in a variety of applications, e.g. transport boxes for sensitive goods or heat sinks for electronic devices. Mehling and Cabeza (2008) provide a general overview.

Already Onyejekwe (1989) attached a simple latent heat accumulator based on an eutectic NaCl/H₂O mixture to the evaporator to increase the coefficient of performance (COP) of a refrigerator. Wang et al. (2007a, 2007b, 2007c) examined the influence of PCM at various locations in the cooling system and were able to raise their prototype's efficiency by 6 % to 8 %. Besides an increase of energy efficiency by 3 % to 4 % through a 1°C increase of evaporator temperature, Cheralathan et al. (2007) were able to prove the potential of load shifting into cost-effective power night-rates of an industrial cooling device. A direct connection of different PCM-layers to the evaporator of a household refrigerator allowed Azzouz et al. (2008, 2009) to achieve a 10 to 15 % increase of the COP through a higher evaporator temperature and simultaneously a considerable reduction of the on/off switch control frequency. Through PCM in contact with the refrigerator compartment evaporator of a domestic refrigerator/freezer appliance, Visek et al. (2014) showed an improvement of about 6 % in terms of energy consumption during the refrigeration cycle.

In a preceding study Sonnenrein et al. (2015) were able to reduce the power consumption by up to 12 % through the integration of polymer-bound PCM into foamed as well as roll-bond evaporators. Yusuffoglu et al. (2015) achieved similar energy savings of about 10 % in their studies on the integration of different PCM in foamed evaporators. Niyai et al. (2017) located PCM in a roll-bond evaporator of a domestic refrigerator

Table 1
Overview of different test conditions for energy consumption measurements.

Region	Europe	Australia / New Zealand	USA	USA	Japan	Global standard
Standard	EN 62552:2013	AS/NZS 4474.1:2007	ANSI/AHAM HRF-1(2007)	AHAM HRF-1(2008)	JIS C 9801 (2006)	IEC 62552:2015
Energy consumption test						
Ambient temperature	25°C	32°C	32.2°C	32.2°C	15°C & 30°C	16°C & 32°C
Fresh food compartment temperature	5°C	3°C	3.3 / 7.22°C	3.9°C	4°C	4°C
Frozen food compartment temperature	-18°C	-15°C	-15 / -17.8°C	-17.8°C	-18°C	-18°C
Loading of frozen food compartment	yes	no	no (No-frost) yes (static cooling)	no (No-frost) yes (static cooling)	no (No-frost) yes (static cooling)	no
Door openings and insertion of warm load	no	no	no	no	yes (No-frost)	no
Performance test at varying ambient temperatures						
Ambient temperature	10/16 to 32/38/43°C	10/32/43°C	12.8/21.1 / 32.2/43.3°C	-	15/30°C	10/16 to 32/38/43°C
Fresh food compartment temperature	0 to 4°C	0.5 to 6°C	1.1 to 5°C	-	0 to 4°C	0 to 4°C
Frozen food compartment temperature	≤-18°C	≤-15°C	≤-15 / -17.8°C	-	≤-18°C	≤-18°C
Loading of frozen food compartment	Yes	yes	yes	-	yes	yes
Freezing test	yes	no	no	no	yes	yes
Temperature rise test	yes	no	yes (freezers only)	no	yes	yes
Pull-down test	no	yes	yes	no	yes	yes
Automatic ice-making test	yes	yes	yes	no	yes	yes

and were able to reduce its compressor running time significantly. Cofré-Toledo et al. (2018) studied the integration of two eutectic PCM and could also show an improved COP through an increase of the evaporator temperature, but the temperature of the refrigerator compartments was affected negatively. Investigations of Berdja et al. (2019) showed similar results. Maiorino et al. (2019) integrated water as a PCM in contact with the evaporator of a household refrigerator and showed a reduced switching frequency and lower temperature fluctuations in the refrigerator compartment. Ben-Abdallah et al. (2019) came to similar conclusions by integrating PCM into the evaporator of an open display cabinet. Although the most commonly studied PCM configuration is the integration into the evaporator, another possibility is the integration into the condenser. Cheng et al. (2011) were able to reduce the power consumption of a refrigerator/freezer combination by up to 12 % through the integration of a paraffin-polyethylene compound on the integrated, i.e. foamed, condenser. In another investigation Sonnenrein et al. (2015) studied different options of sensible and latent heat storage elements integrated into standard wire-and-tube condensers and were able to reduce the power consumption by about 10 % with a newly developed PCM polymer compound.

The third possibility is to integrate PCM inside the freezer or refrigerator to reduce temperature fluctuations or to slow down the temperature rise, e.g. in case of a power failure. Gin et al. (2010a, 2010b) studied the temperature rise in a household freezer with integrated PCM panels during power loss, defrosting cycles as well as door openings and found an improved storage quality and a significantly slower temperature increase inside the freezer. Oró et al. (2012a) found consistent results for commercial freezers and also observed a significantly slower temperature rise in case of a refrigeration system failure (Oró et al., 2012b). Liu et al. (2017) placed a NaCl/H₂O mixture in the freezer and water as a PCM in the air duct of the fresh food chamber of an air-cooled frost-free refrigerator and found a decreased temperature rise in the fresh food and freezing compartments, but noticed an increase of power consumption depending on the operating mode. More studies about the application of PCM in refrigerators/freezers can be found in the reviews of Mastani Joybari et al. (2015) or Bista et al. (2018).

Together, these studies provide a good insight into the general advantages of PCM in refrigerators and freezers, such as the positive influence on COP, temperature fluctuations and on/off ratio. However, none examined the effects on the new standardized functional test procedures introduced internationally by the IEC 62552:2015. With this standard, cooling capacity and temperature rise time can now be quantified in the same way as the energy consumption and will thus play a comparable role in the future. Therefore, this paper studies the effect of a polymer-bound PCM on (1) the cooling capacity and (2) the energy consumption according to the IEC 62552:2015 of eight commercially available household refrigerators. Moreover, the effects on the (3) temperature rise time in the refrigerator compartment were determined. For this purpose, a test procedure was developed that is analogous to the IEC test for freezers in order to examine the refrigerators' suitability as future smart appliances.

2. Test setup

2.1. Methodology

The tests in this study were performed according to the IEC 62552:2015. The cooling capacity test determines the time required to cool a specific load (4.5 kg per 100 l volume) from 25°C down to 10°C; details can be found in Part 2 of the IEC standard. The original temperature rise test in the IEC standard determines the time interval for the temperature of a specific load to increase

Table 2

Measured properties and their uncertainties.

Measured quantity	Measuring device	Uncertainty
Temperature	Thermocouples	±0.1 K
Power	Energy meters	±0.05 W
Time	Personal computer	±0.1 s/day

by a certain amount. In case of a three- or four-star freezer compartment, this would be from -18°C to -9°C, once the operation of the refrigeration system has been interrupted, details can be found in Part 2 of the IEC standard. Analogously, in this study the time interval was determined during which the temperature of a specific load in the refrigerator compartment rises from 8°C to 11°C. Following Part 3 of the IEC standard, all power consumption tests were also performed at an ambient temperature of 25°C. Although the standard mentions energy consumption tests at 16 and 32°C ambient temperature and an interpolation of the measurements results to 25°C, the method can in principle be applied at any other ambient temperature.

2.2. Measurement of temperatures and power consumption

The test setup and all executed measurement procedures were in accordance with the IEC standard mentioned above. Fig. 1 schematically shows the standard temperature measurement positions TMP_1 , TMP_2 and TMP_3 as well as the filling and distribution of test packages and M-packages (M1 to M6) in a fresh-food compartment.

Temperature sampling was carried out by thermocouple differential measurements, each measuring point with a reference junction in an ice water bath. The utilized acquisition interface OMB-DAQ 55/56 (Omega Technologies) was combined with a pre-amplifier LTC1050 (Linear Technologies), which limits the offset conditioned by zero-point drift to ±0.025 K. The typical error of thermo-elements of ±1% × ΔT in other work was reduced to ±0.5% × ΔT by batch consistency and polynomial calibration. For determining the power consumption under standard conditions (average temperature of the fresh-food compartment $T_{ma} = 4^\circ\text{C}$, ambient temperature $T_{ama} = 25^\circ\text{C}$ and humidity 50 %), energy meters type EZI 1 (Zimmer Electronic Systems) with 25 pulses/Wh were used, leading to a relative measurement error of < 1%. Table 2 summarizes the measured quantities and their associated uncertainties.

2.3. Refrigerating appliances

A total of eight commercially available refrigerators and refrigerator-freezers with volume capacities of the fresh food compartment between 158 l and 320 l were analyzed. Power consumption, cooling capacity and temperature rise tests were first performed with the appliances in their original state and subsequently with PCM. Table 3 summarizes the essential technical data of the examined appliances. Fig. 2 shows the setup of a fresh-food compartment equipped with PCM and M-packages.

2.4. Heat storage materials

High-capacitive, dimensionally stable latent heat storage elements based on polymer-bound organic paraffin derivatives were developed in this study. In contrast to prior approaches, this compound material is dimensionally stable and in its "liquid" state it is secure against leakage and exudation. Therefore, an elaborate encapsulation is not necessary and the PCM compound was processed into foil-laminated sheets and integrated on top of the shelves of the refrigerating appliances, in order to examine their

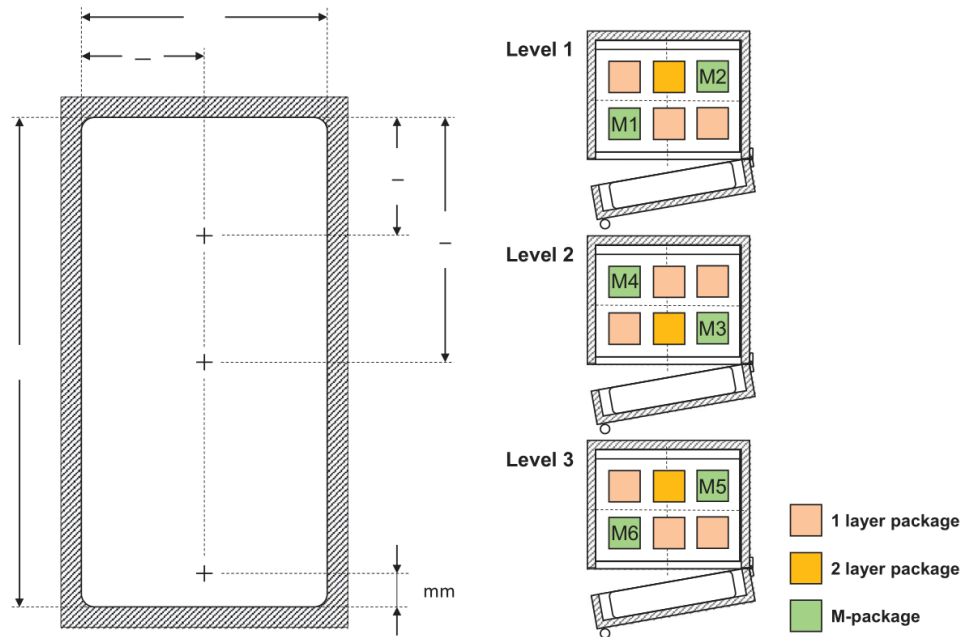


Fig. 1. Standard temperature measurement positions $TMP1$, $TMP2$ and $TMP3$ (left) and the filling and distribution of test packages and M-packages in a fresh-food compartment (right).

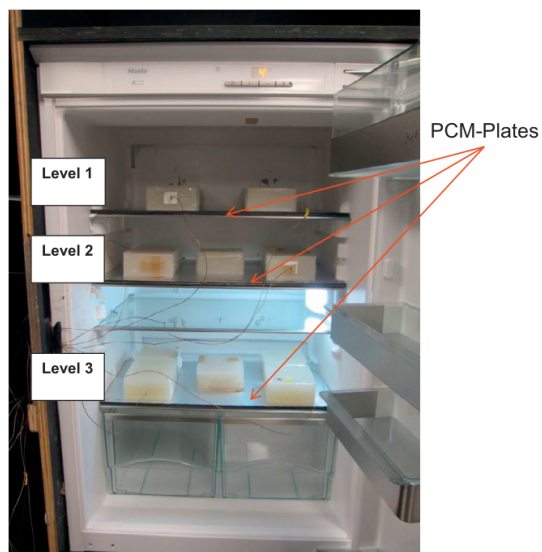


Fig. 2. Fresh-food compartment of a tested appliance equipped with PCM and M-packages.

influence on performance and power consumption. Depending on the size of the fresh-food compartment and the number of shelves, between 1.79 kg and 2.96 kg of PCM were placed in the refrigerating appliances, corresponding to specific PCM densities of 0.72 kg to 1.41 kg per 100 l volume.

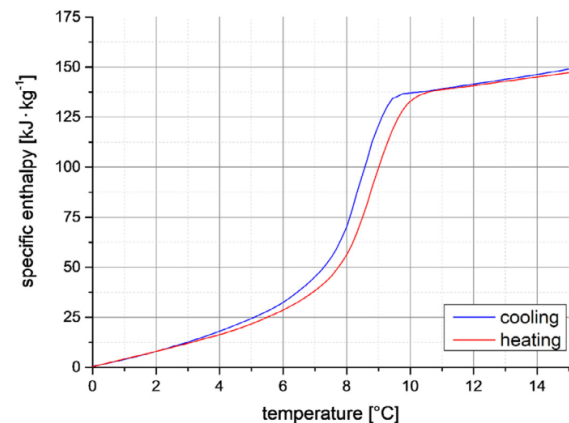


Fig. 3. Specific enthalpy as a function of temperature of the developed PCM polymer compound.

Fig. 3 shows the temperature dependence of the specific enthalpy h of the compound developed for the integration in fresh-food compartments of refrigerating appliances. Measurements were done with Differential Scanning Calorimetry (DSC, SETARAM TG-DSC 111) and also with a heat flow three-layer calorimeter (W&A, WOTKA), developed specifically for analyzing PCM. The latter allows for a considerably larger sample quantity than commercial DSC devices and therefore yields the phase change temperature more precisely. The specific enthalpy h of the dimensionally stable polymer compound in the temperature range of from 0 $^{\circ}\text{C}$ to 15 $^{\circ}\text{C}$ is about 150 kJ/kg and the phase change temperature is around 9 $^{\circ}\text{C}$.

Table 3
Technical data of the examined refrigerating appliances.

Test device	R1	R2	R3	R4	C1	C2	C3	C4
Combined refrigerator-freezer	no	no	no	no	yes	yes	yes	yes
Refrigerator model	K9252i-1	K12020 S-1	KRIE 2183	K37272 iD	CUPesf 3503	KD12622 S edt/cs	KG39 EA40	BCD-185TNG
Manu-facturer	Miele	Miele	Bau-knecht	Miele	Liebherr	Miele	Siemens	Haier
Dimensions (HxBxT) [mm]	872 × 540 × 550	850 × 628 × 601	1770 × 535 × 540	1772 × 560 × 550	1817 × 631 × 600	1623 × 637 × 600	2010 × 650 × 600	1900 × 700 × 680
Fridge storage volume [l]	158	167	320	216	232	199	247	185
Total storage volume [l]	158	167	320	216	323	253	339	243
Refrigerant	35 g R600a	22 g R600a	55 g R600a	60 g R600a	90 g R600a	48 g R600a	78 g R600a	42 g R600a
Energy label	A++	A+	A++	A++	A++	A++	A+++	A++



Fig. 4. Transparency of the present polymer compound from solid (top) to liquid (bottom).

Fig. 3 also shows a significant advantage of the present polymer compound compared to the salt-water or glycol solutions often used in other studies. The subcooling that is necessary for initiating solidification of these liquids, i.e. the difference between melting and freezing temperature, is typically between 5 K and 15 K, whereas the present polymer compound does not undergo significant subcooling. This is crucial for the use in the fresh food compartment, where only very small temperature differences are available for solidification and melting of the PCM. A further advantage of the present polymer compound is its transparency (or milky transparency), which also enables simple integration into the (e.g. double-walled) shelves in later practice, cf. Fig. 4.

3. Results and discussion

Experimental tests with eight commercially available household refrigerators and refrigerator-freezers, cf. Table 3, equipped with PCM polymer compound were carried out to investigate the effect

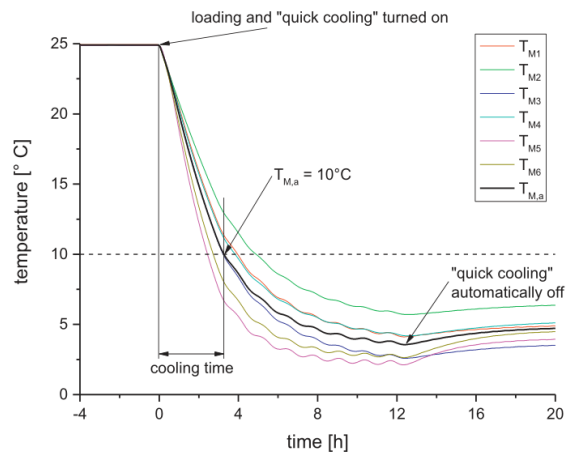


Fig. 5. Temperatures of the M-packages during the cooling capacity test according to IEC 62552:2015.

on cooling capacity, temperature rise and daily energy consumption following the global standard (IEC 62552:2015, 2015).

3.1. Cooling capacity

The cooling capacity test according to IEC 62552:2015 determines the time required to cool a specific load (4.5 kg per 100 l volume) from 25°C down to 10°C. For this purpose, the refrigerating appliances were each loaded with 4.5 kg per 100 l (fresh-food compartment) volume with defined test- and M-packages (IEC 62552:2015, Part 1, Annex C) according to a defined filling plan (IEC 62552:2015, Part 2, Chapter 7), cf. Fig. 1. Loading started when stable operating conditions with a mean temperature $T_{ma} = +4^\circ\text{C} \pm 0.5\text{ K}$ have been attained. In order to achieve comparable and reproducible results, loading always took place exactly at the start of a compressor cycle. And as defined in the standard, if the appliance had a “quick cooling” function, this was activated at the moment when the load was inserted. Fig. 5 shows an exemplary temperature curve of such a cooling capacity test, where the cooling time was measured by determining the time between loading and when the arithmetic mean of the temperatures of all M-packages ($T_{M,a}$) had reached 10°C.

The influence of the latent heat storage elements integrated into the fresh-food compartment on the cooling time is exemplarily shown in Fig. 6. The cooling time of the refrigerator-freezer C1 equipped with PCM was reduced by 33 % from 5.9 to 3.9 h. Fig. 7 summarizes the results of all cooling capacity measurements. The cooling time could be significantly shortened by the PCM for all refrigerating appliances, i.e. between 0.55 to 2.00 h in absolute terms and between 16 to 33 % in relative terms.

3.2. Temperature rise

The temperature rise time in case of (external) switch-off, only tested on freezers so far, will in the future be a decisive factor in the context of the use of refrigerators as “smart appliances” for energy peak shaving. Although network connectivity of household refrigerators/freezers is currently not a commercial reality, they might play a role here in the future due to their large number. The European Commission is currently engaged in a “horizontal preparatory study” on this subject (LOT 33, 2019). The actual temperature rise test in the IEC standard (IEC 62552:2015, Part 2, An-

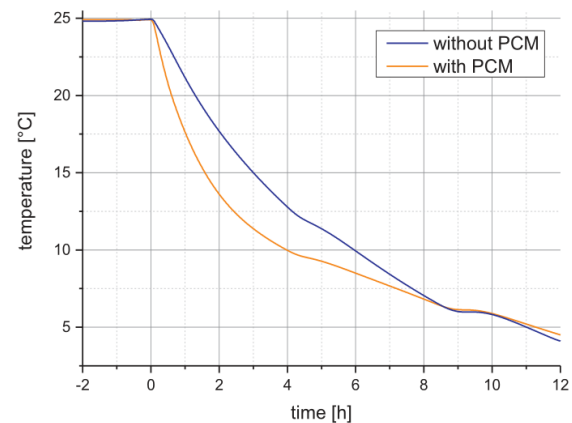


Fig. 6. Mean temperatures of M-packages ($T_{M,a}$) during the cooling capacity test of refrigerating appliance C1 without PCM (blue) and with PCM (orange). Fig. 7. Cooling capacity test of the studied refrigerating appliances without (blue) and with PCM (orange).

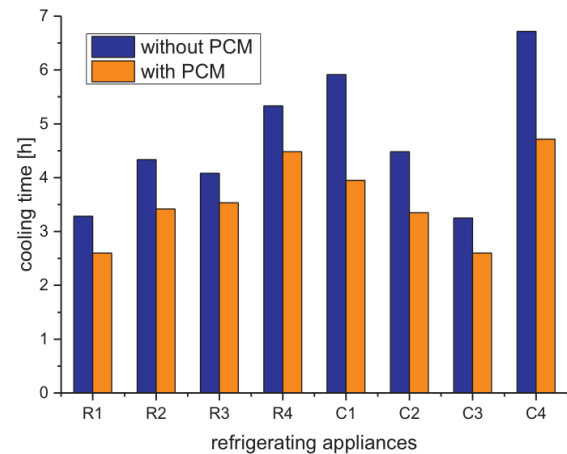


Fig. 7. Cooling capacity test of the studied refrigerating appliances without PCM (blue) and with PCM (orange).

nex C) determines the time taken for the temperature of a specific load in the freezer compartment to rise from -18°C to -9°C after power is disconnected. Analogously, in this study the temperature rise time was determined in which a specific load in the refrigerator compartment rises from $X^\circ\text{C}$ to $Y^\circ\text{C}$.

Because -18°C is clearly defined as the maximum permissible temperature in the compartment of a three- or four-star freezer (IEC 62552:2015, Part 2, Table 2), the lower temperature limit ($X^\circ\text{C}$) can be defined analogously as the maximum permissible temperature of 8°C in the fresh-food compartment. The upper temperature limit of -9°C stated in the original freezer test is more or less arbitrary, i.e. not defined anywhere else (two-star freezer $< -12^\circ\text{C}$, one-star freezer $< -6^\circ\text{C}$). The only remaining definition is that during a defrost period, which is comparable to a switch-off, the temperature may rise by up to 3 K. Following this analogy, the upper temperature limit $Y^\circ\text{C}$ for determining the temperature rise time in fresh food compartments was set to 11°C in this study. Like in Section 3.1, the refrigerating appliances were loaded with 4.5 kg

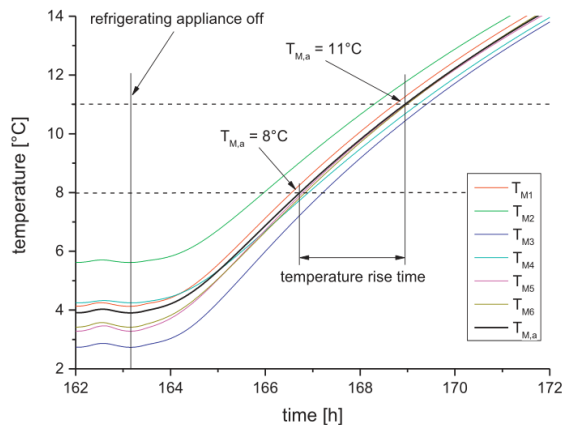


Fig. 8. Temperatures of the M-packages during the temperature rise time test in analogy to IEC 62552:2015.

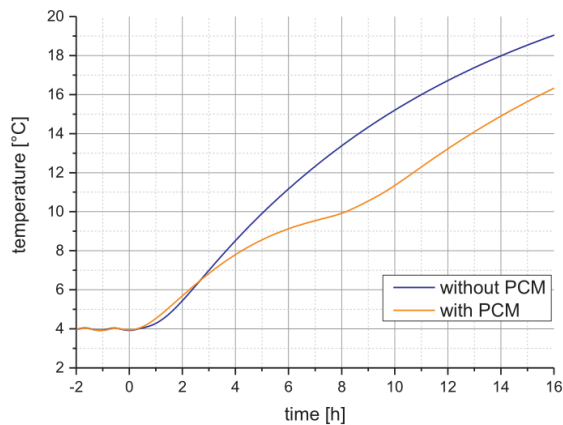


Fig. 9. Mean temperatures of M-packages ($T_{M,a}$) during the temperature rise time test of refrigerating appliance R1 without PCM (blue) and with PCM (orange).

test and M-packages per 100 l (fresh-food compartment) volume according to the filling plan. In analogy to the freezer temperature rise test, the power supply was switched off once stable operating conditions were achieved, and the temperature rise time was determined as the time during which the arithmetic mean of the temperatures of all M-packages $T_{M,a}$ rises from 8°C to 11°C.

Fig. 8 shows exemplary temperature curves of the M-packages of such a measurement. The influence of the latent heat storage elements integrated into the fresh-food compartment on the temperature rise time is exemplarily shown in Fig. 9. While the temperature of the warmest M-package without PCM rises continuously, the temperature curve with PCM shows a clear temperature plateau in the range of the melting temperature. Thereby, the temperature rise time of refrigerator R1 equipped with PCM was increased by 145 % from 2.2 to 5.4 h. It is also evident that when considering an upper temperature limit of $T_{M,a} = 12^\circ\text{C}$ instead of $T_{M,a} = 11^\circ\text{C}$, the increase would even be greater.

Fig. 10 summarizes the results of all temperature rise time measurements. The temperature rise time could be significantly increased by the PCM for all refrigerating appliances, i.e. between

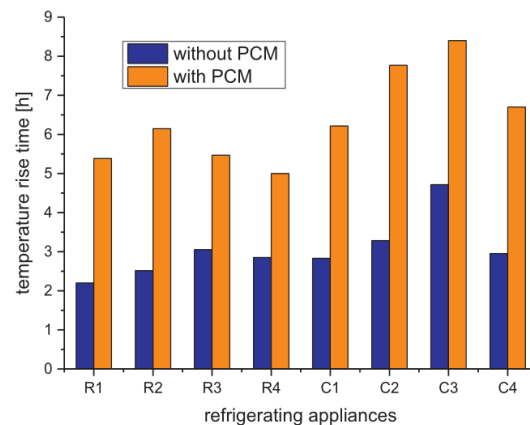


Fig. 10. Temperature rise time of the studied refrigerating appliances without PCM (blue) and with PCM (orange).

2.15 to 4.48 h in absolute terms and between 75 % to 145 % in relative terms.

3.3. Energy consumption

Even though performance tests have now been internationally standardized with the global standard IEC 62552:2015, the daily energy consumption remains the most important technical specification of a refrigerating appliance. Therefore, the effects of all modifications on power consumption were measured to facilitate their later implementation into practice. A summary of the results including the energy consumption measurements obtained with the present experiments is given in Tables 4 and 5. In all cases with PCM, the results show that the cooling capacity as well as temperature rise time was increased without affecting energy consumption. The maximum deviations found here are all within the range of the uncertainty of the energy consumption measurement.

4. Conclusions

A polymer-bound PCM with a phase change temperature around 9°C was developed and integrated into the fresh-food compartment of different commercially available household refrigerating appliances. In this experimental study, their influence on daily energy consumption, cooling capacity and temperature rise time according to the global standard IEC 62552:2015 was studied.

The results show a considerable positive influence on the performance indicators cooling capacity and temperature rise, without negatively impacting energy consumption. Through the integration of PCM into the appliances, the cooling capacity was increased by up to 33 % and temperature rise time even by up to 145 %.

Given that the present polymer compound is leak proof and (milky) transparent, a direct integration into the fresh-food compartment shelves of household refrigerators/freezers can also be easily implemented into practice. It was shown that this also enhances the suitability of refrigerators/freezers as "smart appliances" to meet the growing demand for balancing energy to compensate the growing volatility of renewable energy.

Nevertheless, future work on developing polymer-bound PCM with lower phase change temperatures and evaluating their effects on cooling capacity and temperature rise time has to be done.

Table 4
Test results of the studied refrigerators.

Test device		R1 refrigerator	R2 refrigerator	R3 refrigerator	R4 refrigerator
Fridge storage volume	[l]	158	167	320	216
Thermostat set point		3°C	4°C	3°C	4°C / b5
PCM mass	[g]	2235	2271	2297	2360
Cooling time	[kg/100l]	1.41	1.36	0.72	1.09
	without PCM	3.28	4.33	4.08	5.33
	with PCM	2.60	3.42	3.53	4.48
	difference	-0.68	-0.92	-0.55	-0.85
	relative	126%	127%	116%	119%
Temperature rise time	[h]	2.20	2.52	3.05	2.85
(average)	with PCM	5.38	6.15	5.47	5.00
	difference	3.18	3.63	2.42	2.15
	relative	245%	244%	179%	175%
Daily energy consumption	without PCM	0.377	0.437	0.384	0.375
	with PCM	0.371	0.431	0.384	0.379

Table 5
Test results of the studied refrigerator-freezers.

Test device		C1 combination	C2 combination	C3 combination	C4 combination
Fridge storage volume	[l]	232	199	247	185
Thermostat set point		1°C	5	4°C / -16°C	3.6
PCM mass	[g]	2963	2814	2235	1791
	[kg/100l]	1.28	1.41	0.90	0.97
Cooling time	without PCM	5.92	4.48	3.25	6.72
	with PCM	3.95	3.35	2.60	4.72
	difference	-1.97	-1.13	-0.65	-2.00
	relative	150%	134%	125%	142%
Temperature rise time	without PCM	2.83	3.28	4.72	2.95
(average)	with PCM	6.22	7.77	8.40	6.70
	difference	3.38	4.48	3.68	3.75
	relative	219%	237%	178%	227%
Daily energy consumption	without PCM	1.146	0.716	0.479	0.426
	with PCM	1.164	0.710	0.475	0.423

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements
This work was supported by Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU, AZ 28626).

References

- Azzouz, K., Leducq, D., Gobin, D., 2008. Performance enhancement of a household refrigerator by addition of latent heat storage. *Int. J. Refrig.* 31, 892–901.
- Azzouz, K., Leducq, D., Gobin, D., 2009. Enhancing the performance of household refrigerators with latent heat storage: an experimental investigation. *Int. J. Refrig.* 32, 1634–1644.
- Barthel, C., Götz, T., 2012. The overall worldwide saving potential from domestic refrigerators and freezers. Wuppertal (Germany). http://www.bigee.net/media/filer_public/2012/12/04/bigee_doc_2_refrigerators_freezers_worldwide_potential_20121130.pdf.
- Ben-Abdallah, R., Leducq, D., Hoang, H.M., et al., 2019. Experimental investigation of the use of PCM in an open display cabinet for energy management purposes. *Energy Conv. Manag.* 198.
- Berdja, M., Hamid, A., Sari, O., 2019. Characteristics and thickness effect of phase change material and frost on heat transfer and thermal performance of conventional refrigerator: theoretical and experimental investigation. *Int. J. Refrig.* 97, 108–123.
- Bista, S., Hosseini, S.E., Owens, E., Phillips, G., 2018. Performance improvement and energy consumption reduction in refrigeration systems using phase change material (PCM). *Appl. Therm. Eng.* 142, 723–735.
- Cheralathan, M., Velraj, R., Renganarayanan, S., 2007. Performance analysis on industrial refrigeration system integrated with encapsulated PCM-base cool thermal energy storage system. *Int. J. Energy Res.* 31, 1398–1413.
- Cofré-Toledo, J., Vasco, D.A., Isaza-Roldán, C.A., Tangarife, J.A., 2018. Evaluation of an integrated household refrigerator evaporator with two eutectic phase-change materials. *Int. J. Refrig.* 93, 29–37.
- Coulomb, D., Dupon, J.L., Pichard, A., 2015. The role of refrigeration in the global economy. http://www.iifir.org/clientBookline/service/reference.asp?INSTANCE=exploitation&OUTPUT=PORTAL&DOCID=IFD_REFDOC_0016453&DOCBASE=IFD_REFDOC_EN&SETLANGUAGE=EN.
- Faberi, S., Esposito, R., Mebane, W., Presutto, M., Sciadoni, R., Stamminger, R., 2007. Preparatory Studies for Eco-design Requirements of EuPs: Final Report Domestic Refrigerators & Freezers. *TREN/D1/40-2005*.
- Gin, B., Farid, M.M., Bansal, P.K., 2010a. Effect of door opening and defrost cycle on a freezer with phase change panels. *Energy Convers. Manag.* 51, 2698–2706.
- Gin, B., Farid, M.M., 2010b. The use of PCM panels to improve storage condition of frozen food. *J. Food Eng.* 100, 372–376.
- IEC 62552:2015, 2015. IEC 62552:2015 Household Refrigerating Appliances –Characteristics and Test Methods. International Electrotechnical Commission (IEC).
- Joybari, Mastani, M., Haghighat, F., Moffat, J., Sra, 2015. Heat and cold storage using phase change materials in domestic refrigeration systems: the state-of-the-art review. *Energy Build.* 106, 111–124.
- Khan, I., Afroz, H., 2015. Effect of phase change material on compressor on-off cycling of a household refrigerator. *Sci. Technol. Built Environ.* 21 (4), 462–468.
- Liu, Z., Zhao, D., Wang, Q., Chi, Y., Zhang, L., 2017. Performance study on air-cooled household refrigerator with cold storage phase change materials. *Int. J. Refrig.* 79, 130–142.
- Maiorino, A., Duca, M.G., Mota-Babiloni, A., Greco, A., Aprea, C., 2019. The thermal performances of a refrigerator incorporating a phase change material. *Int. J. Refrig.* 100, 255–264.
- Mehling, H., Cabeza, L.F., 2008. Heat and Cold Storage with PCM. An up to Date Introduction into Basics and Applications. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Onyejekwe, D., 1989. Cold storage using eutectic mixture of NaCl/H₂O: an application to photovoltaic compressor vapours freezers. *Sol. Wind Tech.* 6, 11–18.
- Oró, E., Miró, L., Farid, M.M., Cabeza, L.F., 2012a. Improving thermal performance of freezers using phase change materials. *Int. J. Refrig.* 35, 984–991.

- Oró, E., Miró, L., Farid, M.M., Cabeza, L.F., 2012b. Thermal analysis of a low temperature storage unit using phase change materials without refrigeration system. *Int. J. Refrig.* 35, 1709–1714.
- Sonnenrein, G., Baumhögger, E., Elsner, A., Fieback, K., Morbach, A., Paul, A., Vrabec, J., 2015. Copolymer-bound phase change materials for household refrigerating appliances: experimental investigation of power consumption, temperature distribution and demand side management potential. *Int. J. Refrig.* 60, 166–173.
- Sonnenrein, G., Elsner, A., E., Baumhögger, A., Morbach, K., Fieback, Vrabec, J., 2015. Reducing the power consumption of household refrigerators through the integration of latent heat storage elements in wire-and-tube condensers. *Int. J. Refrig.* 51, 154–160.
- Visek, M., Joppolo, C.M., Molinaroli, L., Olivai, A., 2014. Advanced sequential dual evaporator domestic refrigerator/freezer: System energy optimization. *Int. J. Refrig.* 43, 71–79.
- Wang, F., Maidment, G., Missenden, J., Tozer, R., 2007a. The novel use of phase change materials in refrigeration plant. Part 1: experimental investigation. *Appl. Therm. Eng.* 27, 2893–2901.
- Wang, F., Maidment, G., Missenden, J., Tozer, R., 2007b. The novel use of phase change materials in refrigeration plant. Part 2: dynamic simulation model for the combined system. *Appl. Therm. Eng.* 27, 2902–2910.
- Wang, F., Maidment, G., Missenden, J., Tozer, R., 2007c. The novel use of phase change materials in refrigeration plant. Part 3: PCM for control and energy savings. *Appl. Therm. Eng.* 27, 2911–2918.
- Yusufoglu, Y., Apaydin, T., Yilmaz, S., Paksoy, H.O., 2015. Improving performance of household refrigerators by incorporating phase change materials. *Int. J. Refrig.* 57, 173–185.

6.4 Experimental study of phase change materials for photovoltaic modules: Energy performance and economic yield for the EPEX spot market

Japs, E., Sonnenrein, G., Krauter, S., Vrabec, J., Solar Energy, 2016, 140, pp. 51–59.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.10.048>

Mit Erlaubnis von Elsevier entnommen aus „Solar Energy“ (Copyright 2016).

Die Studie untersucht den Einfluss von PCM mit verschiedener Wärmeleitfähigkeit auf den Wirkungsgrad von Photovoltaik-Modulen und analysiert umfassend die ökonomischen Rahmenbedingungen einer solchen passiven Kühlung. Hierfür wurden PV-Module mit im Rahmen der Studie entwickelten PCM-Compounds ausgestattet und die Leistungsdaten über eine Sommerperiode experimentell untersucht und die Wirtschaftlichkeit im Hinblick auf die damit am Spotmarkt realisierbaren Preise bewertet. Die Ergebnisse zeigen einen ökonomischen Vorteil nur in einzelnen Fällen, technisch jedoch eindeutig die durch die Kühlung realisierbare Effizienzsteigerung, vor allem im Fall einer höheren Wärmeleitfähigkeit des PCM.

Der Autor dieser Dissertation hat bei der Ausarbeitung der vorliegenden Publikation mitgewirkt, insbesondere die PCM-Compounds mit verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten entwickelt und thermophysikalisch charakterisiert sowie beim Aufbau der Versuchsanlagen unterstützt. Die Erkenntnisse der vorliegenden Publikation führten des Weiteren zu dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Forschungsprojekt „SoLifE“, in dem eine Gemeinschaft aus mehreren Arbeitsgruppen inzwischen erfolgreich den Wirkungsgrad sowie die Lebensdauer von PV-Modulen durch die Integration von ebenfalls vom Autor entwickelten Polymer-Compounds erhöhen konnte.



Contents lists available at ScienceDirect

Solar Energy

journal homepage: www.elsevier.com/locate/solener

Experimental study of phase change materials for photovoltaic modules: Energy performance and economic yield for the EPEX spot market

Ewald Japs^a, Gerrit Sonnenrein^b, Stefan Krauter^{a,*}, Jadran Vrabec^b^a University of Paderborn, Electrical Energy Technology – Sustainable Energy Concepts, 33098 Paderborn, Germany^b University of Paderborn, Thermodynamics and Energy Technology, 33098 Paderborn, Germany

ARTICLE INFO

Article history:

Received 19 July 2016

Received in revised form 21 October 2016

Accepted 26 October 2016

Keywords:

Phase change material
Electricity spot market
Photovoltaic module
Cooling measure

ABSTRACT

Cooling of photovoltaic (PV) devices increases voltage and power output, but in standard applications, cooling measures are only beneficial if the associated costs are lower than the cumulative profit. A technical and economic analysis of a passive cooling measure based on phase change materials (PCMs) is conducted here. Three PV modules, one standard reference module and two equipped with PCMs, are studied experimentally. Although both have the same melting temperature, one of the PCMs has a significantly higher thermal conductivity and a lower heat storage capacity than the other. The analysis of the present experimental data considers the energy price variation at the European Power Exchange (EPEX) spot market during the day without considering any costs. Because additional power is supplied before noon for PCM charging, favorable results are observed during this period. However, higher operating temperatures of the PV modules occur later in the day due to the thermal insulation effect of the PCM layer attached to the back side of the modules. In total, this results in a negative economic yield on most days. The PCM with a higher thermal conductivity had significantly lower temperatures after charging and a corresponding higher yield.

© 2016 Published by Elsevier Ltd.

1. Introduction

The negative effect of elevated operating temperatures on the conversion efficiency of crystalline silicon solar cells is well known (Radziemski, 2006). Interventions to reduce operating temperatures are usually considered to increase the electrical energy yield. Low operating temperatures of photovoltaic (PV) modules also have a positive effect on degradation (Meyer and van Dyk, 2004; Junsangsri and Lombardi, 2010). Furthermore, a damping of short-term temperature fluctuations may increase PV module lifetimes (Köntges et al., 2014).

Both active cooling measures, such as water cooling on the module back (Bahaidarah et al., 2013; Moharram et al., 2013) or front side (Krauter, 2004), and passive cooling measures adapted from latent heat storage consisting of selected phase change materials (PCMs) have been investigated (Norton et al., 2011; Hasan et al., 2014). The scientific interest in using PCM for the thermal management of PV modules has increased rapidly over the last decade. Numerous experimental and computational studies have

been conducted for the use of PCM to manage the temperature issues of electronic devices such as PV modules (Browne et al., 2015). Meanwhile, it is well known that the operating temperature of PV modules can be decreased significantly due to the melting of the attached PCM. However, at high temperatures, PCM layers may cause unwanted and significant thermal insulation due to their typically low thermal conductivity. One possibility of combating this problem is to mix the PCM with expanded graphite (Mehling and Cabeza, 2008).

The first investigation into integrating PCM with a PV module was conducted in 1978; this study showed that the beneficial cooling effect of PCM can be enhanced by increasing its thermal conductivity and increasing the heat transfer from the PV module to the PCM at the thermal interface (Stultz and Wen, 1977). Recently, one of the main research objectives of Huang et al. (2011) was to promote the heat transfer into and out of PCM using fins within the aluminum container encapsulation. They also developed a validated numerical model for a PV-PCM module. Hasan et al. (2015) compared the effects of two different PCMs encapsulated in an aluminum container with internal fins for two different climate conditions (Dublin, Ireland and Vehari, Pakistan) using outdoor measurements and simulations using the numerical model from Huang et al. (2011). Two main conclusions were drawn: First, the deviation between the simulation and experiment results was very

* Corresponding author.

E-mail addresses: Ewald.Japs@upb.de (E. Japs), Gerrit.Sonnenrein@upb.de (G. Sonnenrein), Stefan.Krauter@upb.de (S. Krauter), Jadran.Vrabec@upb.de (J. Vrabec).

Nomenclature**Symbols**

c_p	average specific isobaric heat capacity (kJ/(kg K))
E	energy yield (W h)
e	relative energy yield difference (%)
h	specific enthalpy of fusion (20–30 °C) (kJ/kg)
P	electrical power output (W _p)
r	energy price (€/kW h)
t	time (s)
Y	economic yield (€)
y	relative economic yield difference (%)
γ	temperature coefficient of P_{max} (%/K)
η	conversion efficiency (%)
θ	temperature (°C)
λ	thermal conductivity (W/(m K))
ρ	specific density (kg/m ³)
ω	mass fraction (g/g)
Δ	difference

Index

d	based on a daily trading period
eq	equipped with PCM or PCM ⁺
i	counting variable
j	15 min or 1 h time block energy price
m	melting point
max	maximum point
n	summation limit
ref	reference
uq	unequipped (no PCM or PCM ⁺)

Abbreviation

EPEX	European Power Exchange
ISFH	Institute for Solar Energy Research Hamelin
MPP	maximum power point
PV	photovoltaic
PCM	phase change material
PCM ⁺	phase change material with improved thermal conductivity
STC	standard test conditions

low in terms of the average temperatures of the front surface of both PV-PCM modules. Second, the highest temperature drop was approximately 21 K compared to the reference PV module was observed in Vehari for a PV-PCM module based on a salt hydrate.

Laboratory experiments combined with a computational study were conducted by Jay et al. (2010). Two PV-PCM systems, a PV module with a thermally insulated back side and a reference PV module, were simultaneously exposed to three different insolation intensities (600, 800 and 1000 W/m²) using a solar simulator. Both paraffin-based PCMs (with melting temperatures of 27 °C and 45 °C) were filled into a honeycomb aluminum structure, which was closed on both sides by an aluminum plate to promote heat transfer from the PV module. A 15–25 % increase in energy yield compared to the reference PV module due to temperature regulation was measured.

The combination of PCM-infused graphite and finned heat sinks for the thermal management of PV modules (Atkin and Farid, 2015) achieved a 13% increase in energy yield through reduced peak temperatures and a temporary time shift in the temperature rise.

In the present work, a commercial paraffin RUBITHERM[®] RT 28 HC with an improved thermal conductivity of $\lambda = 2.4$ W/(m K) and the same PCM compound with the standard thermal conductivity of $\lambda = 0.19$ W/(m K) were studied. The high thermal conductivity was achieved by adding expanded graphite to the PCM compound. Although the improved PCM (hereafter referred to as PCM⁺) has a reduced heat storage capacity because of a decreased mass fraction of the effective phase change material, it promises better performance and applicability. Therefore, one PV module was equipped with PCM⁺ and another PV module was equipped with the conventional PCM; both were compared with a standard reference PV module, simultaneously measured at outdoor summer conditions during the year 2013 in Paderborn, Germany. A technical comparison of the two PV-PCM modules was conducted to assess the temperature development and energy yield.

In general, due to the rapid decrease of PV module costs, cooling interventions are often less cost-effective in terms of direct power gain. On the other hand, the typical power generation shift to the morning hours with PV-PCM modules may nonetheless be favorable, considering the higher electricity prices before noon on the European Power Exchange (EPEX) spot market, cf. Fig. 1. In this

investigation, no costs were considered, and the economic analysis focused exclusively on the yield differences due to the use of PCM and PCM⁺.

2. Measurement setup**2.1. Characterization of PCM and PCM⁺**

The applied PCM was hermetically encapsulated in bags consisting of an aluminum-polymer composite film with 500 g of PCM each. The thermal conductivity of the RUBITHERM[®] RT 28 HC alone was $\lambda = 0.19$ W/(m K); this was significantly increased by adding expanded graphite (THERMOPHIT[®] GFG, SGL GROUP), following the work by Sonnenrein et al. (2015). After adding graphite with a mass fraction of $\omega \approx 0.2$ g/g, the thermal conductivity of PCM⁺ increased by more than a factor of 12. Therefore a thermal conductivity of $\lambda = 2.4$ W/(m K) has been measured by applying the stationary method as described in Mehling et al. (2000). Fig. 2 shows the temperature dependence of the specific enthalpy of PCM⁺ compared with that of pure PCM. The underlying measurements were conducted with heat flow 3-layer-calorimeter (WOTKA, W&A) (Kenfack and Bauer, 2014) specifically developed for analyzing PCM and for validation additionally with Differential Scanning Calorimetry (DSC, TG-DSC 111, SETARAM) (Sarwar and Mansoor, 2016). Compared to common DSC devices, WOTKA allows increased sample quantities of up to 100 g what is of particular importance to determine the phase change temperature of composites. Therefore, the study shows in the following the experimental results of the 3-layer-calorimeter measurements.

The heat storage capacity of the compounded material is lower than that of pure PCM due to its significant graphite content. Over the temperature range of 20–35 °C, the specific heat storage capacity was thus reduced by approximately 28%, from 260 kJ/kg to 185 kJ/kg. The melting temperature remained unaffected at approximately 28 °C. It should be noted that the paraffine used here shows no significant sub-cooling, unlike common salt hydrates. Based on the measured PCM properties, the amount of storable heat per PV module over the temperature range of 20–35 °C was approximately 391 kJ for PCM and approximately 275 kJ for PCM⁺ (cf. Fig. 2 and Table 1).

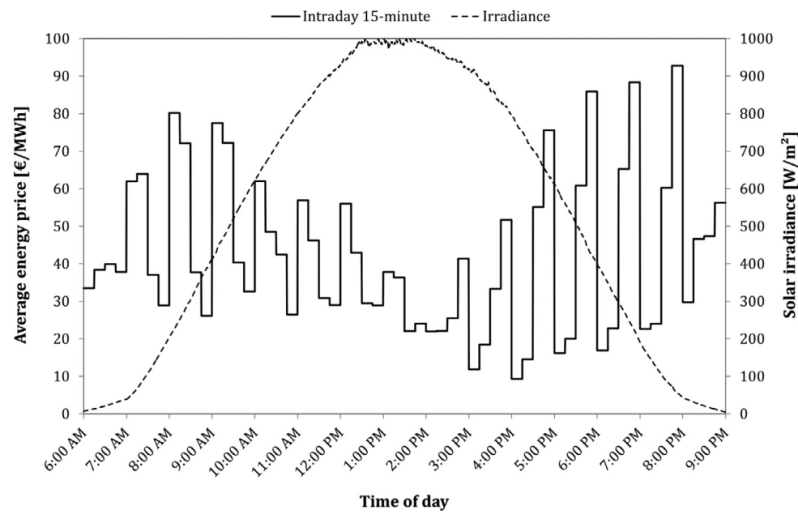


Fig. 1. Price development on the EPEX spot market (EPEX Spot SE, 2013), showing real data for Friday, August 2nd, 2013. The solar irradiance on that nearly perfect summer day as measured in Paderborn, Germany is superimposed on the graph.

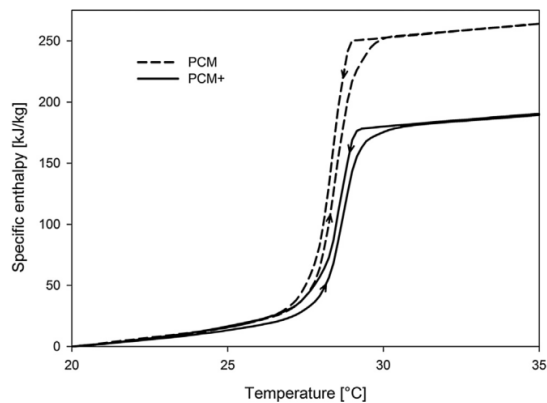


Fig. 2. Specific enthalpy as a (hysteresis) function of temperature for PCM and PCM+.

2.2. Modules and measurement setup

Two of the three technically identical multi-crystalline silicon PV modules were equipped with three PCM bags each. First, one Pt100 foil resistance thermometer with an accuracy of about ± 0.5 K (class B according to IEC 60751:2008) was attached via a thermally conductive paste, positioned at the center of a solar cell, to the back side of each PV module, as indicated in Fig. 3. Next, three macro encapsulated PCM bags were attached next to each

other, where they covered approximately 80% of the solar cell area on the back side of the PV module. Another Pt100 foil resistance thermometer was placed on the air-facing surface of the PCM below the first resistance thermometer. Finally, an aluminum grid was fixed with screws at the back side of the PV module frame to tightly press the PCM bags to the PV modules. In addition, an aluminum plate was fixed below the PV outdoor laboratory framework, covering the projected area under the three PV modules at a free distance of 8 cm. However, horizontal fixation bars inhibited natural convection along the whole module, cf. Fig. 4. This measure was added to equalize convective heat transfer i.e., to reduce the impact of wind blowing along the back side of the module. Moreover, this condition simulated a PV rooftop installation. Measurements were conducted from early July to mid-August of 2013.

The three modules were installed in the PV outdoor laboratory of the University of Paderborn, Germany ($51^{\circ}45'23.87''\text{N}$, $8^{\circ}38'38.43''\text{E}$) with an inclination of 30° to the horizontal and an azimuth of 0° , as shown in Fig. 3. In addition to the surface temperatures, the short-circuit current, open-circuit voltage and MPP power output were measured and logged simultaneously every 10 s for each PV module by an in-house developed electrical load with a MPPT-error of about $\pm 1\%$. Furthermore, global irradiance in the plane of the PV modules was measured using a calibrated pyranometer (CMP 21, Kipp & Zonen).

Prior to their installation, the PV modules were measured under standard test conditions (STC) at the Institute for Solar Energy Research Hamelin (ISFH). All relevant parameters of the investigated PCM and modules are listed in Tables 1 and 2.

Significant differences in the temperature coefficient of the power output and conversion efficiency were detected among

Table 1
Properties of the investigated PCMs.

Property	Symbol	PCM	PCM+	Units
Specific enthalpy of fusion (20–30 °C)	h	235	158	kJ/kg
Average specific isobaric heat capacity	c_p	2.3	2.2	kJ/(kg K)
Specific density	ρ	760	890	kg/m ³
Thermal conductivity	λ	0.19	2.4	W/(m K)
Melting temperature	θ_m	28	28	°C

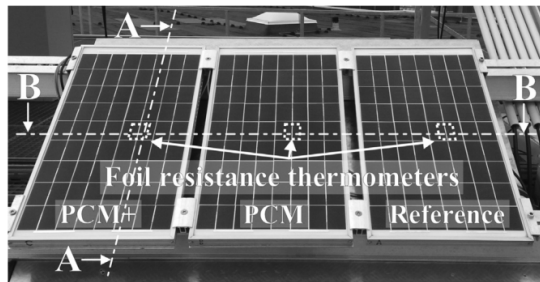


Fig. 3. Experimental setup in Paderborn, Germany, cf. Fig. 4 for cross sections A-A and B-B.

the three PV modules, so the measured energy yield of the PV-PCM modules cannot be directly compared. Therefore, the following basic assumptions were made to ensure a satisfactory comparability of the results:

- All three PV modules have the same operating temperature at identical operating conditions.
- Differences between the measured temperature values are caused exclusively by the attached PCM or PCM⁺ bags.
- The temperature values measured by the thermometers Ref, PCM_{In} and PCM_{Out} represent the operating temperature of the corresponding module.

The measured temperature of the Ref thermometer was used as a reference value for comparison. Thus, the measured electrical power output of the PCM module as well as that of the PCM⁺ module was adjusted according to the measured temperature of the Ref thermometer and the temperature coefficient of the PCM and PCM⁺

modules given in Table 2. A detailed description of these adjustments is given in Section 3.2.

3. Energy performance and economic yield

3.1. Influence of PCM on temperature

Due to the strong influence of the PCM on the temperature of the PV modules, a detailed analysis of the measured diurnal temperature variations is necessary. For this purpose, two days with high insolation and very clear sky conditions were selected. Both conditions were fulfilled on the 1st and 2nd of August 2013. The surface temperatures measured on these days are shown in Fig. 5 as a function of time.

Fig. 5 shows that the modules equipped with PCM and PCM⁺ exhibit temperature variations with significantly lower fluctuations than the reference PV module. As expected, the operating temperatures decreased during the melting of the PCM, as indicated by “charging” in Fig. 5. Coincidentally, the melting processes of PCM and PCM⁺ terminated at approximately the same time. After complete melting, the PCM temperature increased more rapidly than that of PCM⁺ due to the higher thermal resistance to heat transfer through the PCM package; both temperatures increased above the temperature of the reference PV module. During the saturation stage, a smaller difference occurred between PCM_{In} and the PCM_{Out} surface temperatures compared to the temperature difference between PCM_{In} and PCM_{Out}, cf. Fig. 5. In addition, it can be concluded that the increased thermal conductivity of PCM⁺ leads to significantly lower operating temperatures after complete melting. Finally, it was observed that PCM needed approximately 4 h for complete solidification, whereas PCM⁺ needed only approximately 3 h, which means that approximately 25% more mass of PCM⁺ can be solidified overnight compared to PCM.

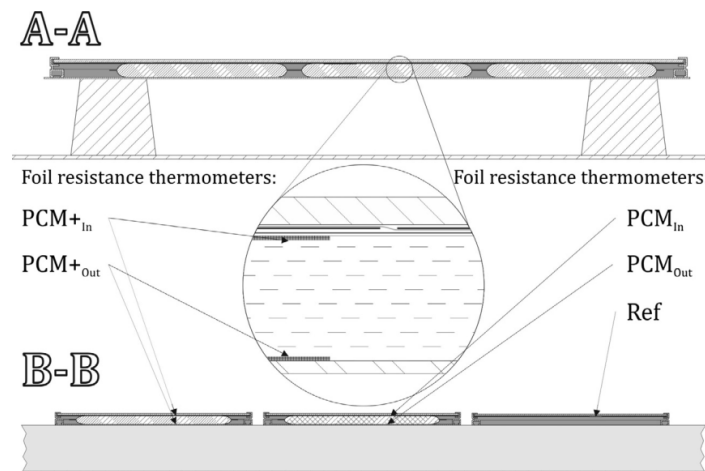


Fig. 4. Cross section schematic of the measurement setup, as illustrated in Fig. 3, indicating the positions of the foil resistance thermometers.

Table 2

Parameters of the investigated PV modules under STC.

Electrical parameter	Symbol	Reference	PCM	PCM ⁺	Units
Maximum power output	P_{max}	28.3	26.6	28.8	W _p
Conversion efficiency	η	12.1	11.4	12.4	%
Temperature coefficient of P_{max}	γ	−0.41	−0.40	−0.42	%/K

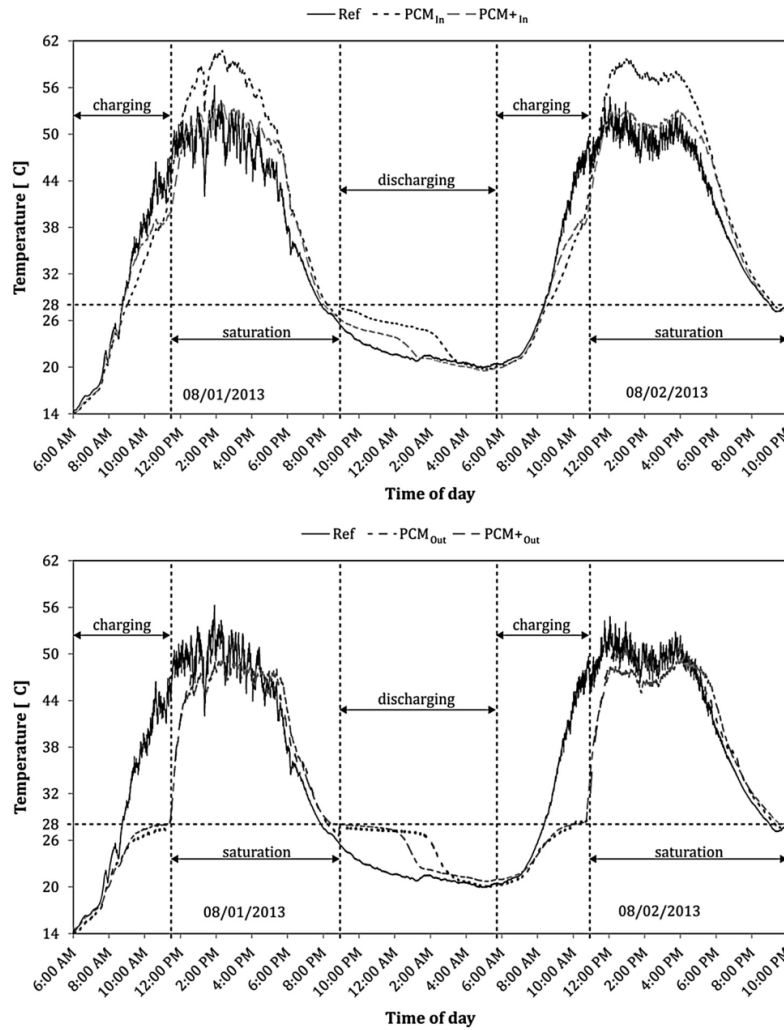


Fig. 5. Surface temperatures of the reference module and the inner (top) and outer (bottom) surface temperatures of the PCM and PCM* modules on August 1st and 2nd, 2013.

3.2. Temperature dependent energy yield

As mentioned in Section 2.2, the surface temperature θ_{ref} of Ref was used as a reference value for calculating the power differences caused by PCM and PCM*. Explicitly considering the differences between the electrical parameters of the studied modules (cf. Table 2), the hypothetical electrical power output P_{uq} of the PCM and PCM* modules *without* the attached phase change material was determined according to Eq. (1). The temperature variation due to the presence of the phase change material ($\theta_{eq} - \theta_{ref}$) was measured by the thermometers PCM_{in} and Ref or PCM*_{in} and Ref. The measured electrical power output of the modules is denoted by P_{eq}

$$P_{uq} = P_{eq} - \gamma \cdot P_{max} \cdot (\theta_{eq} - \theta_{ref}) \quad (1)$$

where γ is the temperature coefficient of maximum power output. Based on these power output values, all days within the measurement period were analyzed by applying the following three steps:

- First, the temperature dependent energy differences were determined.
- Second, they were weighted with the EPEX spot market price.
- Third, four energy economic difference values for the comparison of the PV-PCM modules were defined for each day.

Because the measured data were recorded every $\Delta t = 10$ s, it was necessary to assume constant values until the next sampling. Thus, the power output values P_{eq} and P_{uq} were multiplied by Δt to obtain the generated energy E_{eq} and E_{uq} over Δt . Subsequently, the E_{eq} and E_{uq} values were then added into the 15 min blocks \bar{E}_{eq} and \bar{E}_{uq} , consisting of 90 energy values each

$$\bar{E}_k = \sum_{i=1}^n E_{k,i} \quad \text{with } k = eq \text{ or } uq. \quad (2)$$

To compare the PCMs, the relative energy yield difference e was determined by

$$e = \frac{\bar{E}_{eq} - \bar{E}_{uq}}{\bar{E}_{uq}}. \quad (3)$$

Illustrating the applied procedures, the measured data of August 2nd, 2013 were used for an example comparison. The resulting diurnal variation of the relative contribution of PCM and PCM⁺ on the energy yield as well as of the insolation at the PV module level is shown in Fig. 6.

3.3. Economic evaluation

For the second step, the following boundary conditions were considered in the present evaluation:

- Electrical energy is traded on the EPEX intraday spot market of Germany and Austria.
- Electrical energy is preferably traded in 15-min periods; 1-h period trades are also allowed.
- The generated photovoltaic electrical power equals the actual traded power at all times.
- The daily trading period ranges from 6 a.m. to 9 p.m.

Moreover, the studied modules were linearly scaled up to 10 MW_p plants to comply with the prequalification requirements for EPEX trading such that the minimum trading increment volumes of 0.1 MW could be offered. Therefore, the 15-min energy blocks \bar{E}_{eq} and \bar{E}_{uq} were multiplied by the ratio of the assumed peak power of the PV plant and the maximum power P_{max} of the PV module. In addition, the upscaled energy blocks were monetarily weighted by real average energy prices retrieved from the EPEX online database (EPEX Spot SE, 2013)

$$Y_{kj} = \bar{E}_{kj} \cdot \frac{10 \text{ MW}_p}{P_{max}} \cdot r_j \quad \text{with } k = eq \text{ or } uq, \quad (4)$$

where the index j indicates whether a 15-min or a 1-h period was chosen. The resulting economic yield $Y_{uq,j}$ of the PV power plant was subtracted from the resulting economic yield $Y_{eq,j}$ of the PV-PCM power plant. Finally, the economic yield difference values ΔY_j were calculated by

$$\Delta Y_j = Y_{eq,j} - Y_{uq,j}, \quad (5)$$

to isolate the contribution of PCM and PCM⁺ in terms of economic profit or loss.

By considering the boundary conditions mentioned above, the example diurnal variations of energy economic comparisons of the PCM plant and the PCM⁺ plant are shown in Fig. 7. Due to the low energy yields in the morning and evening on August 2nd, the periods from 6 a.m. to 7 a.m. and from 8 p.m. to 9 p.m. were traded in 1-h blocks; the remainder was traded in 15-min blocks.

3.4. Daily energy economic comparison

These yield differences were used to determine two comparison values for each plant configuration and day. Therefore, the energy yields \bar{E}_{eq} and \bar{E}_{uq} as well as the economic yields $Y_{eq,j}$ and $Y_{uq,j}$ were summed for the daytime period from 6 a.m. to 9 p.m.

$$\bar{E}_{k,d} = \sum_{i=6 \text{ a.m.}}^{9 \text{ p.m.}} \bar{E}_{k,i} \quad \text{with } k = eq \text{ or } uq. \quad (6)$$

$$Y_{k,d} = \sum_{i=6 \text{ a.m.}}^{9 \text{ p.m.}} Y_{k,i} \quad \text{with } k = eq \text{ or } uq. \quad (7)$$

Thus, the daily energy yield of the PV power plant was subtracted from the daily energy yield of the PV-PCM power plant. To obtain the relative comparison value e_d , the particular difference was divided by the daily energy yield of the PV power plant

$$e_d = \frac{\bar{E}_{eq,d} - \bar{E}_{uq,d}}{\bar{E}_{uq,d}} \quad (8)$$

The second relative comparison value y_d was determined analogously, i.e., using the daily economic yield values instead

$$y_d = \frac{Y_{eq,d} - Y_{uq,d}}{Y_{uq,d}}. \quad (9)$$

In addition to these daily values, the four comparison values were calculated individually for the charging and saturation stages on August 2nd, 2013, as shown in Fig. 8. It should be noted that the relative differences shown in Fig. 8 are normalized by the total yields of the corresponding stages, as shown in Fig. 5.

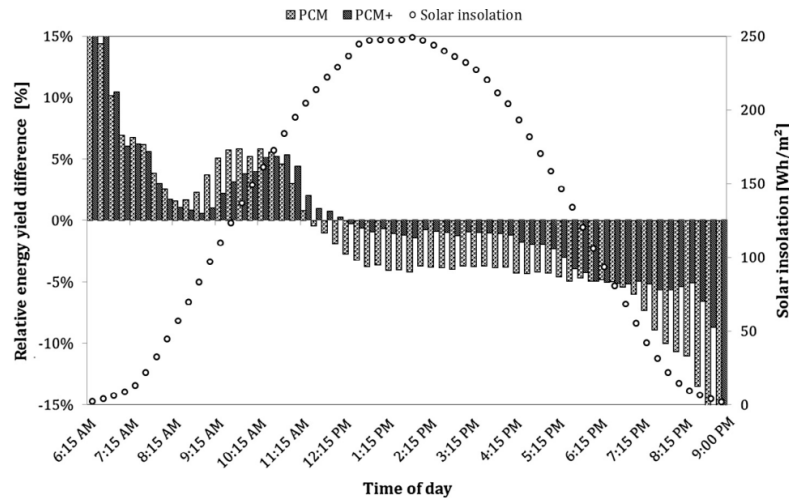


Fig. 6. Example daytime dependent relative energy yield differences of PV modules equipped with PCM or PCM⁺ vs. the reference PV module (baseline) on August 2nd, 2013. The cumulative solar insolation values over 15 min are plotted in superposition.

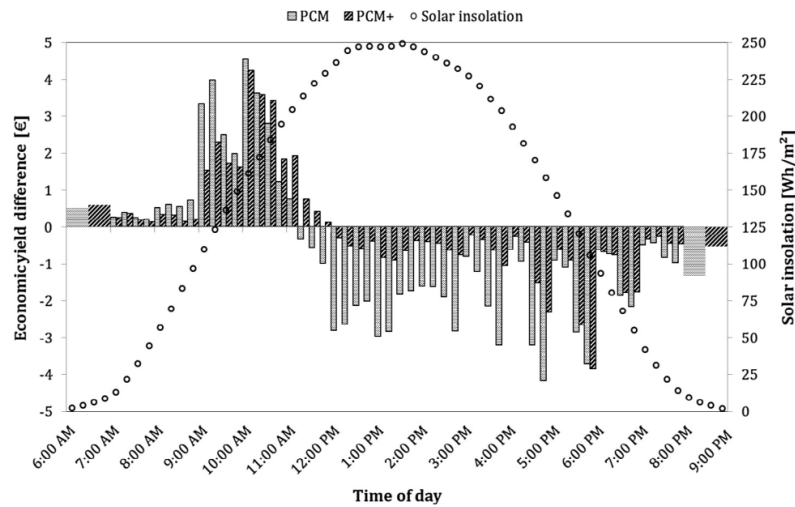


Fig. 7. Exemplary daytime dependent economic yield differences for a 10 MW_p power plant of PV modules equipped with PCM or PCM⁺ vs. the reference PV module (baseline) on August 2nd, 2013. The solar insolation values accumulated over 15 min are superimposed on the graph.

To compare the use of the different PCMs in terms of profitability, the economic yield was accumulated over the day trading period, cf. Fig. 9. Although the PCM⁺ plant achieved a smaller profit than the PCM plant before noon, over the entire trading period, the PCM⁺ plant was generating more profit than the PCM plant for almost 4 h.

The PCM-related increase due to high energy prices before noon on the one hand and the temperature-related power yield reduction in the afternoon due to the thermal insulation effect on the other hand is clearly visible.

4. Results and discussion

All of the days within the measurement period were evaluated in the same way as described above. A summarized overview of the results for each day and the daily solar insolation at the PV module level is given in Fig. 10.

The main findings of this comparison are as follows:

- Regarding the cumulative daily solar insolation and the yield differences, no significant interdependency has been observed.
- A decrease in energy yield was observed for both PCM and PCM⁺ during almost the entire measurement period. For two days only, PCM⁺ indicated a slight increase in energy yield.
- PCM⁺ yielded more energy than PCM on 28 of the 32 days because of its higher thermal conductivity producing a lower temperature.
- A decrease in economic yield was observed for both PCM and PCM⁺ during almost the entire measurement period. For two days only, PCM⁺ indicated a slight increase in economic yield.
- Higher energy prices before noon lead to a better economic yield of PCM during that period on 16 of the 32 days. The same holds for PCM⁺ for 14 of the 32 days.

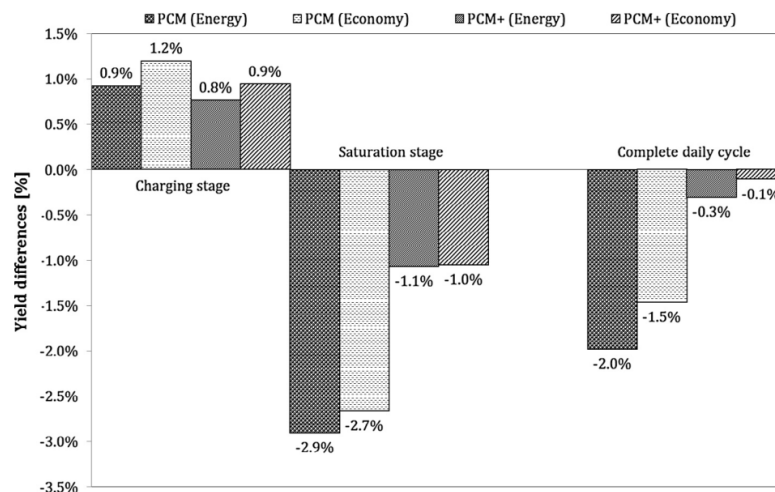


Fig. 8. Exemplary relative energy and economic yield differences for a 10 MW_p power plant of PV modules equipped with PCM or PCM⁺ vs. the reference PV module (baseline) on August 2nd, 2013.

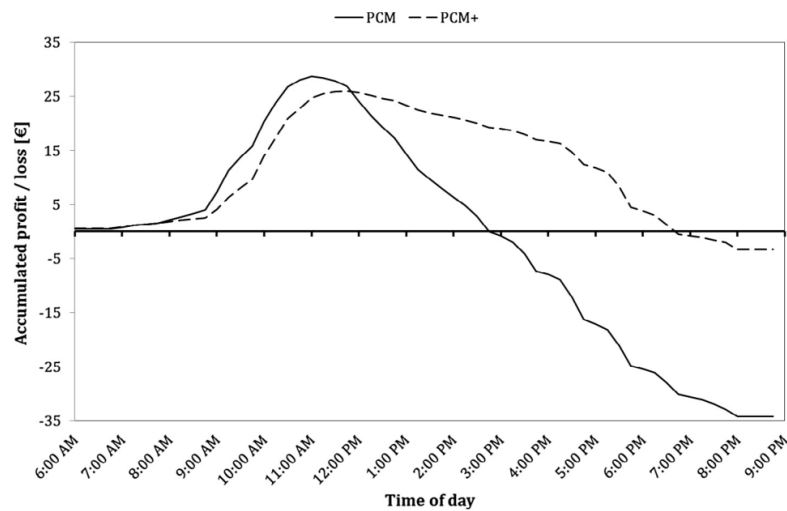


Fig. 9. Accumulated economic profit or loss of a 10 MW_p PCM and PCM⁺ plant according to EPEX spot market prices on August 2nd, 2013.

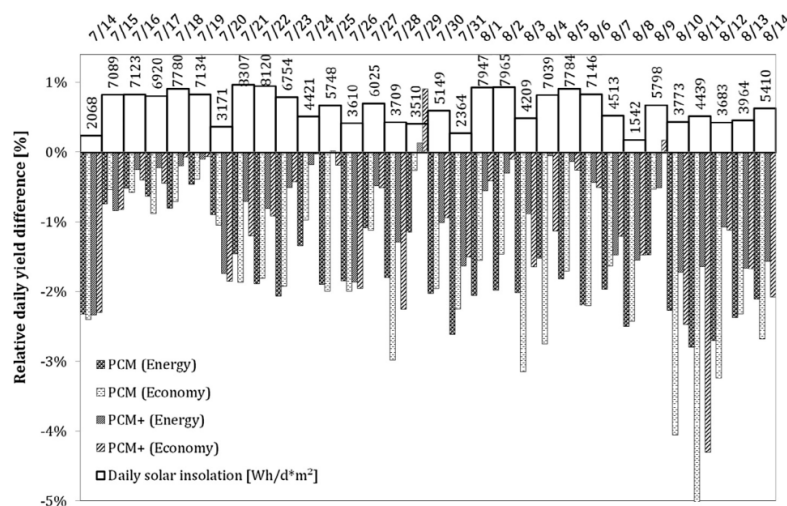


Fig. 10. Relative daily energy and economic yield differences comparing the reference PV modules with PCM and PCM⁺ modules during the period of July 14th, 2013 to August 14th, 2013. The cumulative daily solar insolation is illustrated with an additional bar graph.

As an additional layer on the back of the PV module, both PCM and PCM⁺ act as a partial thermal insulation to the environment. Therefore, their operating temperatures increased above the temperature of the reference PV module after the PCM melted. In this light, an increase in thermal mass could be considered. However, further improvements of the thermal conductivity or optimization of the heat transfer on the back side of the PV-PCM module seems to be more appropriate. A short study, exemplified for both days discussed above, is showing that: The minimum mass increase of PCM, respectively PCM⁺, to reach the economic threshold has been assessed: To do so, the measured operating temperature curves of the charging stages of PCM and PCM⁺ have been linearly interpolated. As a result, a minimum mass increase of about 50% has been found for the PCM⁺. In addition, it was found out that under those circumstances PCM never may reach an economic feasible thresh-

old. Therefore, a maximum mass increase of about 70% has been identified; that limit is given by the intercept point of the reference temperature and the trend line of the operating temperature. Using those numbers, the following improvements in relative daily economic yield occur: 01/08/2013: PCM from -1.55% to -1.07%; PCM⁺ from -0.41% to 0.001%. 02/08/2013: PCM from -1.46% to -0.87%; PCM⁺ from -0.1% to 0.278%.

5. Conclusion

The assumption that a PV module equipped with a layer of phase change material on its back side can achieve a better economic yield than a standard PV module was evaluated for a specific configuration. Despite promising results before noon, the resulting

daily energy and economic yields were almost all negative. In the studied configuration, higher prices for electricity on the spot market in the morning combined with the higher energy yield during that period are not sufficient for profitability. However, the phase change material with a higher thermal conductivity is more appropriate for a PV module application than a conventional phase change material. Next, higher energy prices on the EPEX spot market in the morning provide better results than considering the sum of daily generated electricity only.

To further investigate the economic feasibility of different configurations, the energy-economic tradeoff between thermal conductivity, heat storage capacity and resulting layer thickness as well as the back side heat transfer of the PCM with respect to the related costs should be investigated and optimized via computational simulations and evaluated based on enhanced prototypes.

References

- Atkin, P., Farid, M.M., 2015. Improving the efficiency of photovoltaic cells using PCM infused graphite and aluminium fins. *Sol. Energy* 114, 217–228.
- Bahaidarah, H., Subhan, A., Gandhidasan, P., Rehman, S., 2013. Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions. *Energy* 59, 445–453.
- Browne, M.C., Norton, B., McCormack, S.J., 2015. Phase change materials for photovoltaic thermal management. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 47, 762–782.
- EPEX Spot SE, 2013. EPEX Intraday Market Data <<https://www.epexspot.com/en/market-data/>> (accessed 26 June 2016).
- Hasan, A., McCormack, S., Huang, M., Norton, B., 2014. Energy and cost saving of a photovoltaic-phase change materials (PV-PCM) system through temperature regulation and performance enhancement of photovoltaics. *Energies* 7 (3), 1318–1331.
- Hasan, A., McCormack, S.J., Huang, M.J., Sarwar, J., Norton, B., 2015. Increased photovoltaic performance through temperature regulation by phase change materials: materials comparison in different climates. *Sol. Energy* 115, 264–276.
- Huang, M., Eames, P., Norton, B., Hewitt, N., 2011. Natural convection in an internally finned phase change material heat sink for the thermal management of photovoltaics. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 95 (7), 1598–1603.
- Jay, A., Clerc, S., Boillot, B., Bontemps, A., Jay, F., 2010. Use of phase change material in order to maintain the temperature of integrated PV modules at a reasonable level. In: *Proceedings of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*. WIP Renewable Energies, pp. 4125–4128.
- Junsangsi, P., Lombardi, F., 2010. Time/temperature degradation of solar cells under the single diode model. In: *Proceedings of the IEEE 25th International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems (DFT)*. IEEE, pp. 240–248.
- Kenfack, F., Bauer, M., 2014. Innovative phase change material (PCM) for heat storage for industrial applications. *Energy Proc.* 46, 310–316.
- Köntges, M., Kurtz, S., Packard, C., Jahn, U., Berger, K.A., Kato, K., Friesen, T., Iseghem, M. Van, 2014. Review of Failures of Photovoltaic Modules Report IEA-PVPS T13-01:2014. <http://www.isfh.de/institut_solarforsch/task13.php> (accessed 26 June 2016).
- Krauter, S., 2004. Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 82 (1–2), 131–137.
- Mehling, H., Cabeza, L.F., 2008. Heat and Cold Storage with PCM. An up to Date Introduction into Basics and Applications. Springer, p. 316.
- Mehling, H., Hiebler, S., Ziegler, F., 2000. Latent heat storage using a PCM-graphite composite material. In: Benner, M. (Ed.), *Proceedings of TERRASTOCK 2000*. 8th International Conference on Thermal Energy Storage, Stuttgart, pp. 375–380.
- Meyer, E.L., van Dyk, E.E., 2004. Assessing the reliability and degradation of photovoltaic module performance parameters. *IEEE Trans. Rel.* 53 (1), 83–92.
- Moharram, K.A., Abd-Elhady, M.S., Kandil, H.A., El-Sherif, H., 2013. Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling. *Ain Shams Eng. J.* 4 (4), 869–877.
- Norton, B., Eames, P.C., Mallick, T.K., Huang, M.J., McCormack, S.J., Mondol, J.D., Yohanis, Y.G., 2011. Enhancing the performance of building integrated photovoltaics. *Sol. Energy* 85 (8), 1629–1664.
- Radziemska, E., 2006. Effect of temperature on dark current characteristics of silicon solar cells and diodes. *Int. J. Energy Res.* 30 (2), 127–134.
- Sarwar, J., Mansoor, B., 2016. Characterization of thermophysical properties of phase change materials for non-membrane based indirect solar desalination application. *Energy Convers. Manage.* 120, 247–256.
- Sonnenrein, G., Elsner, A., Baumhögger, E., Morbach, A., Fieback, K., Vrabec, J., 2015. Reducing the power consumption of household refrigerators through the integration of latent heat storage elements in wire-and-tube condensers. *Int. J. Refrig.* 51, 154–160.
- Stultz, J.W., Wen, L.C., 1977. Thermal performance testing and analysis of photovoltaic modules in natural sunlight LSA Task Report 5101-31. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California.

7 Weitere Publikationen und Patente

- Determining the heat flow through the cabinet walls of household refrigerating appliances. A. Paul, E. Baumhögger, A. Elsner, L. Moczarski, M. Reineke, G. Sonnenrein, C. Hueppe, R. Stamminger, H. Hoelscher, H. Wagner, U. Gries, A. Freiburger, W. Becker, J. Vrabec, International Journal of Refrigeration, 2021, 121, pp. 235–242.
- Energy-economic comparison of photovoltaic modules equipped with a layer of conventional and improved phase-change material. Japs, E., Peters, S., Sonnenrein, G., Krauter, S., 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2014, 2014, pp. 1348–1352, 6925167.
- Technical Investigation of a photovoltaic module with integrated improved phase change material. Japs, E., Sonnenrein, G., Steube, J., Vrabec, J., Kenig, E., Krauter, S., Conference: 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition At: Paris (France) pp. 500–502.
- Effizienzsteigerung von Haushaltskühlgeräten durch polymergebundene Phasenwechselmaterialien. Sonnenrein, G., Elsner, A., Fieback, K., Lesmmann, K., Morbach, A., Vrabec, J., Deutsche Kälte- und Klimatagung 2015, Dresden, 18.–20.11.2015, DKV-Tagungsbericht 2015, Dresden, Deutsche Kälte- und Klimatechnischer Verein e. V., ISBN: 978-3-932715-51-8.
- Device and method for cooling a liquid and use of the device as a component for a storage arrangement, Sonnenrein, G., WO2017085224.
- Zusammensetzung für ein Phasenwechselmaterial, Kühlakku mit einem Phasenwechselmaterial und Transportbox. Sonnenrein, G., DE102021102138.
- Kühlakku, Verfahren zur Herstellung eines Kühlakkus, sowie Transportbox zum Transport temperaturempfindlichen Guts mit einem Kühlakku. Sonnenrein, G., DE102020120807.
- Kühlakku und Verfahren zu dessen Herstellung. Sonnenrein, G., DE102020118581.
- Latentspeichermaterial und Verfahren zur Wärmespeicherung, Sonnenrein, G., DE102020100112.
- Temperierungsmittel für den Transport temperaturempfindlicher Güter und Verfahren zur Temperierung temperaturempfindlicher Güter während deren Transport. Sonnenrein, G., DE102020100111.

8 Wissenschaftliche Vorträge

- G. Sonnenrein, A. Elsner, K. Fieback, K. Lessmann, A. Morbach, J. Vrabec, Effizienzsteigerung von Haushaltskühlgeräten durch polymergebundene Phasenwechselmaterialien, Thermodynamik Kolloquium 2014, Stuttgart, Deutschland.
- G. Sonnenrein, E. Baumhögger, A. Elsner, K. Fieback, K. Lessmann, A. Morbach, J. Vrabec, Effizienzsteigerung von Haushaltskühlgeräten durch polymergebundene Phasenwechselmaterialien, DKV-Jahrestagung 2015, Dresden, Deutschland.

Erklärung zur Zitation von Inhalten aus studentischen Arbeiten

In Ergänzung zu meinem Antrag auf Zulassung zur Promotion in der Fakultät für Maschinenbau der Universität Paderborn erkläre ich gemäß §11 der Promotionsordnung und unter Beachtung der Regelung zur Zitation studentischer Arbeiten:

Die von mir vorgelegte Dissertation habe ich selbstständig verfasst, und ich habe keine anderen als die dort angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Es sind keine Inhalte studentischen Ursprungs (studentische Arbeiten) in dieser Dissertation enthalten.

Ich habe die verwendeten Arbeiten entsprechend der Regelung „Zitation aus studentischen Arbeiten in Dissertationen“ zitiert.

Paderborn, 29.03.2021