



Hochschule **RheinMain**  
University of Applied Sciences  
Wiesbaden Rüsselsheim



# DER EINSATZ VON PCM IN WÄRMEPUMPEN VON ELEKTROFAHRZEUGEN

**STEFAN RUSCHE<sup>1</sup>, DANIELA DIMOVA<sup>1</sup>, MICHAEL SONNEKALB<sup>2</sup>, PASCAL BEST<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> HOCHSCHULE RHEINMAIN, INSTITUT FÜR NACHHALTIGE MOBILITÄT UND ENERGIE (INME), AM BRÜCKWEG 26,  
65428 RÜSSELSHEIM, DEUTSCHLAND  
[STEFAN.RUSCHE@HS-RM.DE](mailto:STEFAN.RUSCHE@HS-RM.DE), [DANIELA.DIMOVA@HS-RM.DE](mailto:DANIELA.DIMOVA@HS-RM.DE)

<sup>2</sup> KONVEKTA AG, AM NORDBAHNHOF 5, 34613 SCHWALMSTADT, DEUTSCHLAND  
[MICHAELSONNEKALB@KONVEKTA.COM](mailto:MICHAELSONNEKALB@KONVEKTA.COM)



Hochschule **RheinMain**  
University of Applied Sciences  
Wiesbaden Rüsselsheim



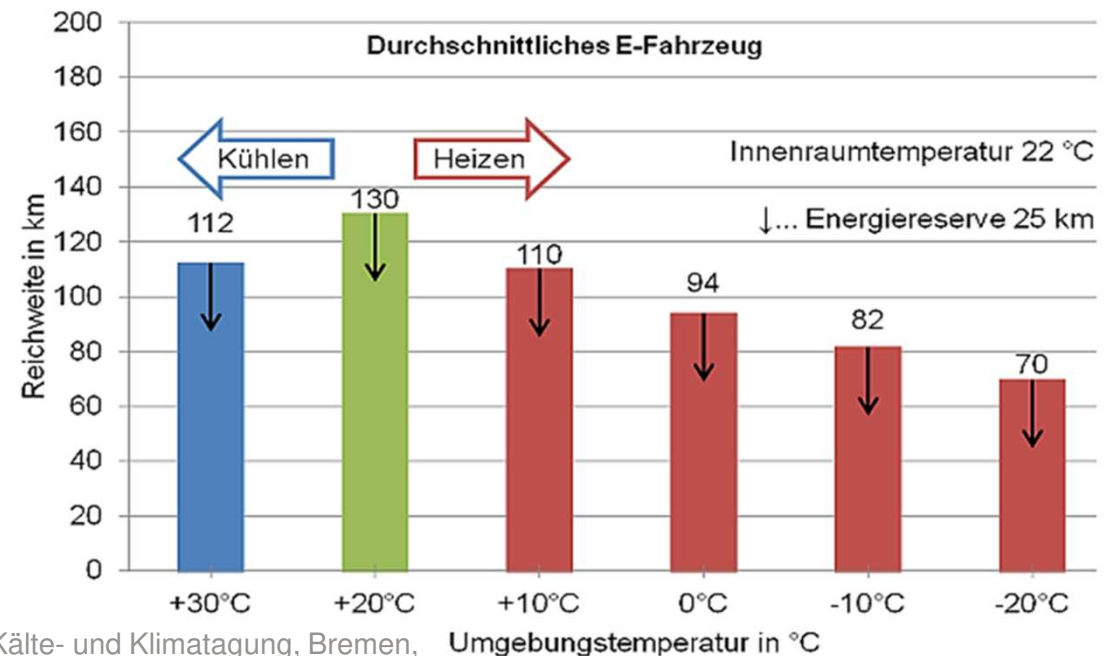
# INHALT

- 1 Zielsetzung
- 2 Das Konzept mit Wärmepumpe und PCM
- 3 Erste Resultate
- 4 Änderungen am Konzept
- 5 Bestimmung rheologischer Eigenschaften möglicher PCS
- 6 Schlussfolgerungen, weiteres Vorgehen



# 1 ZIELSETZUNG

- Wärmepumpen vergrößern die Reichweite von Elektrofahrzeugen insbesondere bei extremeren Umgebungstemperaturen
- Die Kombination aus Wärmepumpentechnik und thermischen Speichern ermöglicht noch längere Fahrstrecken
- Geringe Energiedichte thermischer Speicher erfordert die kombinierte Nutzung latenter und sensibler Wärme
- Herausfordernd ist die Suche nach geeigneten PCM für dieses Konzept (Wärmepumpe mit Latentwärmespeichern), insbesondere bei der Verwendung des Kältemittels CO<sub>2</sub>



[Bildquelle: Geringer, B; Tober, W.:  
Batterieelektrische Fahrzeuge in der Praxis. Studie  
des Österreichischen Vereins für  
Kraftfahrzeugtechnik, OEKV, Wien 2012]



Hochschule **RheinMain**  
University of Applied Sciences  
Wiesbaden Rüsselsheim

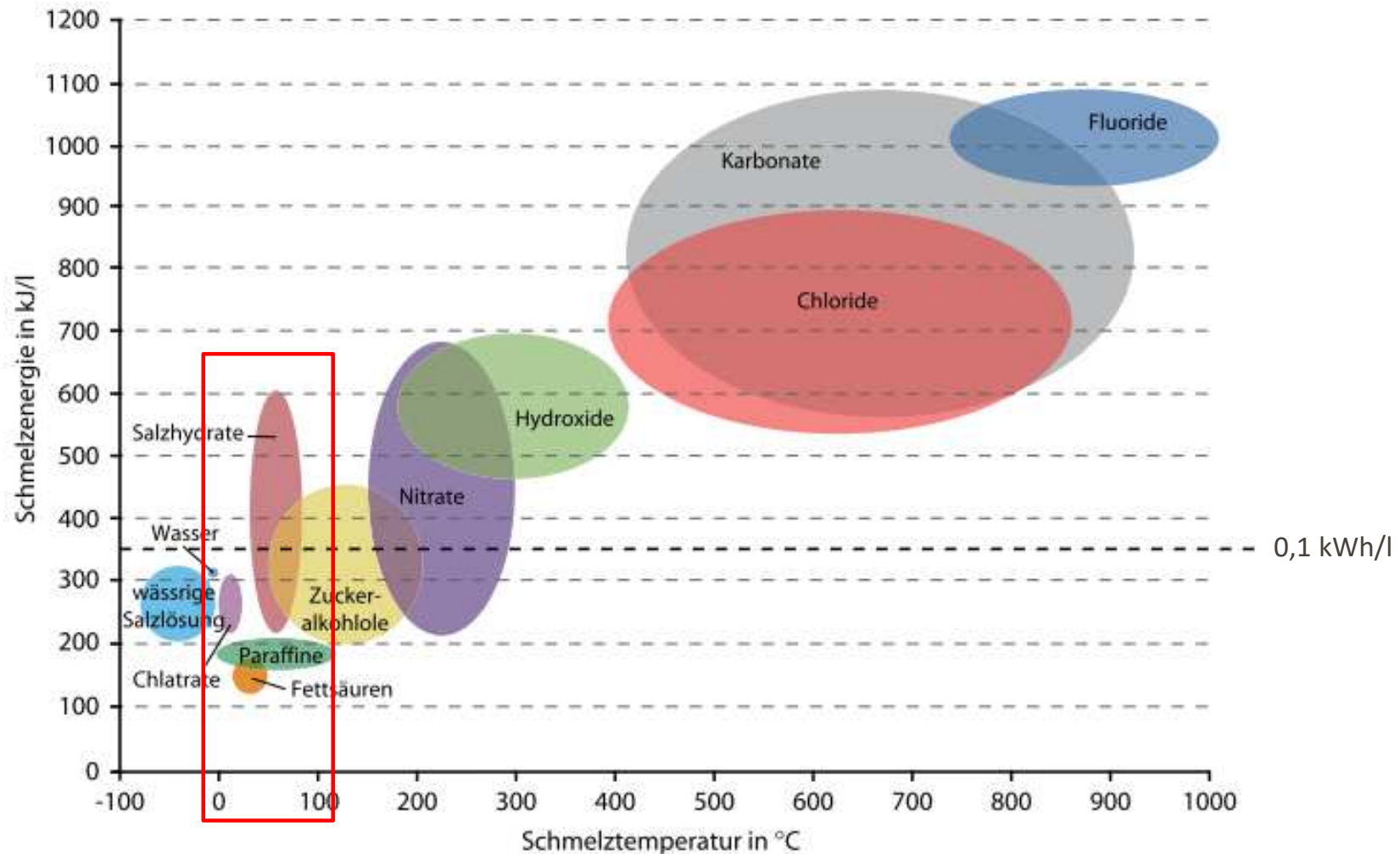


## 2 DAS KONZEPT MIT WÄRMEPUMPE UND PCM



# PHASENWECHSELMATERIALGRUPPEN

Bildquelle: M. Sterner und I. Stadler, Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2014.



# WESENTLICHE VERWENDUNGSVORAUSSETZUNGEN



Hochschule **RheinMain**  
University of Applied Sciences  
Wiesbaden Rüsselsheim



- Möglichst hohe Phasenwechselenthalpie
- Möglichst hohe Wärmeleitfähigkeit
- Nicht giftig, brennbar oder korrosiv
- Günstig und gut verfügbar
- Phasenwechseltemperaturniveau muss für Kühl- und Beheizungs Zwecke geeignet sein
- Phasenwechseltemperaturen müssen bei der Wärmeübertragung zu Temperatur- und Druckniveau des verwendeten Kältemittels passen



# STOFFDATEN AUSGESUCHTER PCM

PCM Name	molare Masse	Dichte	Schmelztemp.	Wärmespeicherkapazität	Wärmeleitfähigkeit	
	[kg/kmol]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[°C]	[kJ/kg]	[W/(mK)]	
Palmitinsäure (C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub> )	256,42	0,85 (flüssig, 65 °C)	64	185,4	0,162 (flüssig, 68,4 °C)	[1, 2]
		0,847 (flüssig, 80 °C)	61	203,4	0,159 (flüssig, 80,1 °C)	[1, 2]
		0,989 (fest, 24 °C)	63	187	0,165 (flüssig, 80 °C)	[2]
Stearinsäure (C <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> )	284,48	0,848 (flüssig, 70 °C)	69	202,5	0,172 (flüssig, 70 °C)	[1]
		0,965 (fest, 24 °C)	60 – 61	186,5	-	[1, 2]
			70	203	-	1, 2]
Rubitherm RT64HC	-	0,88 (fest, 20°C)	63 – 65	250 (± 7,5%)	0,2	[3]
		0,78 (flüssig, 80°C)				
Stearylalkohol (C <sub>18</sub> H <sub>38</sub> O)	270,5	0,83 (fest 20 °C)	55 – 60	166,7		[4, 11]

[1] S. S. K. Sharma, „Latent heat storage materials and systems: A review,“ *International Journal of Green Energy*, pp. 1-56, Vol.2, 2005.

[2] B. Zalba, J. M. Marin, L. Cabeza und H. Mehling, „Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications,“ *Applied Thermal Engineering* 23, p. 251–283, 2003.

[3] „Technisches Datenblatt RT 64 HC,“ Rubitherm Technologies GmbH, [Online]. Available: [www.rubitherm.com](http://www.rubitherm.com). [Zugriff am 27. Sept. 2016].

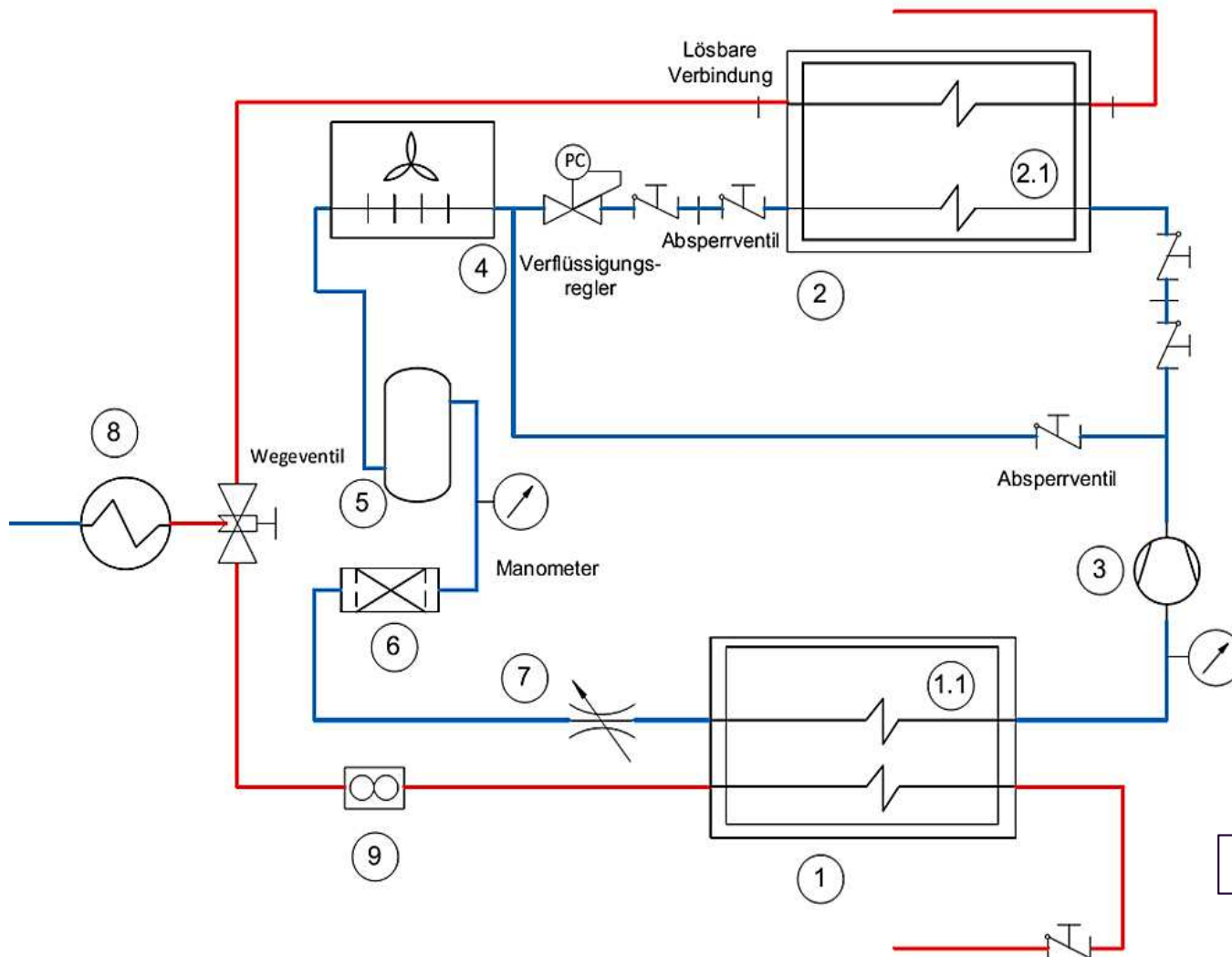
[4] „NIST Standard Reference Data,“ National Institute of Standards and Technology, [Online]. Available: <http://webbook.nist.gov>. [Zugriff am 28. Sept. 2016]

[5] „Sicherheitsdatenblatt Stearylalkohol,“ [Online]. Available: [www.carlroth.com](http://www.carlroth.com). [Zugriff am 27. Sept. 2016].

# ANLAGENSHEMA



Hochschule **RheinMain**  
University of Applied Sciences  
Wiesbaden Rüsselsheim



1. NT-Speicher
- 1.1. Verdampfer
2. HT-Speicher
- 2.1. Kondensator
3. Verdichter
4. Kondensator (luftgekühlt)
5. Sammler
6. Filter
7. Expansionsventil
8. Durchlauferhitzer
9. Durchflussmessgerät

R134a Wasser

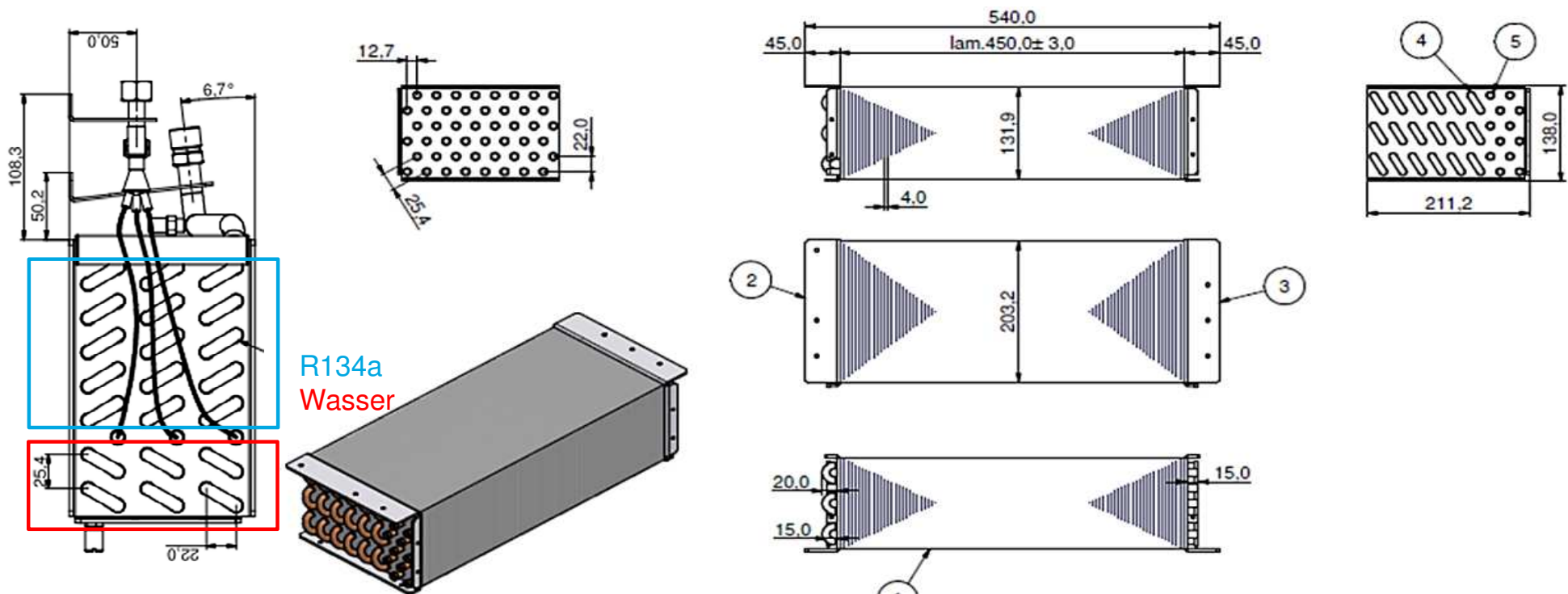




# VERDAMPFER

- 8 Reihen Cu-Rohrbögen (9.52 x 0.3 mm)
- parallel angeordnete Rippen mit einer Materialstärke von 0.2 mm und einem Abstand von 4 mm untereinander

PCM: Wasser

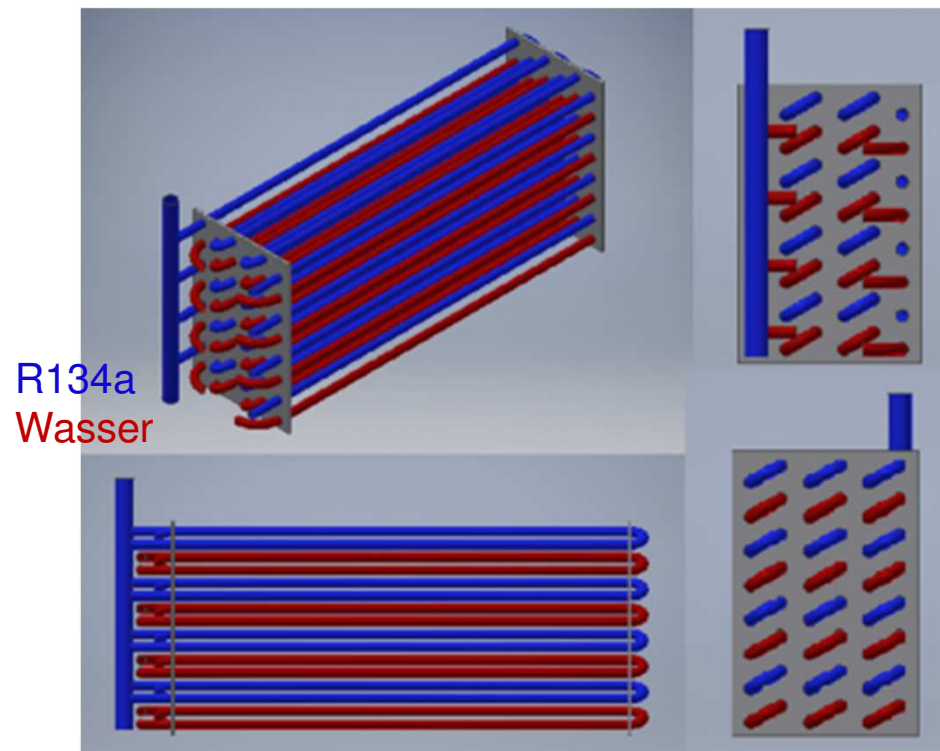




# KONDENSATOR

- 8 Reihen Cu-Rohrbögen (9.52 x 0.3 mm)
- parallel angeordnete Rippen mit einer Materialstärke von 0,2 mm und einem Abstand von 2 mm untereinander

PCM: zunächst Palmitinsäure





Hochschule **RheinMain**  
University of Applied Sciences  
Wiesbaden Rüsselsheim



# 3 ERSTE RESULTATE

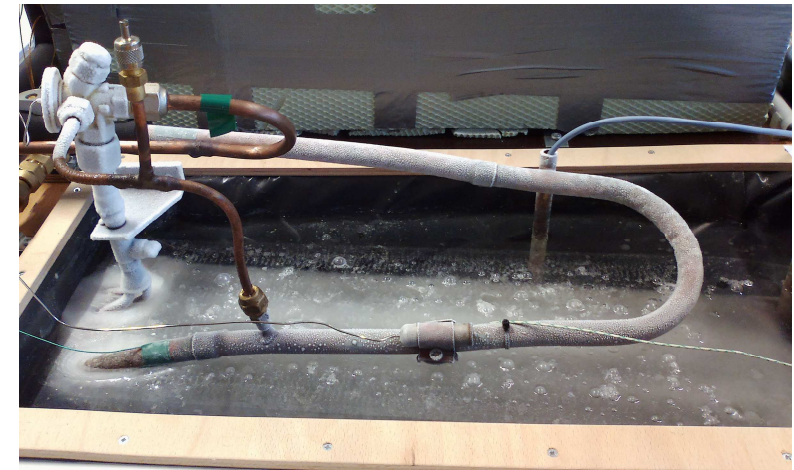
# FUNKTIONALITÄT



Hochschule **RheinMain**  
University of Applied Sciences  
Wiesbaden Rüsselsheim



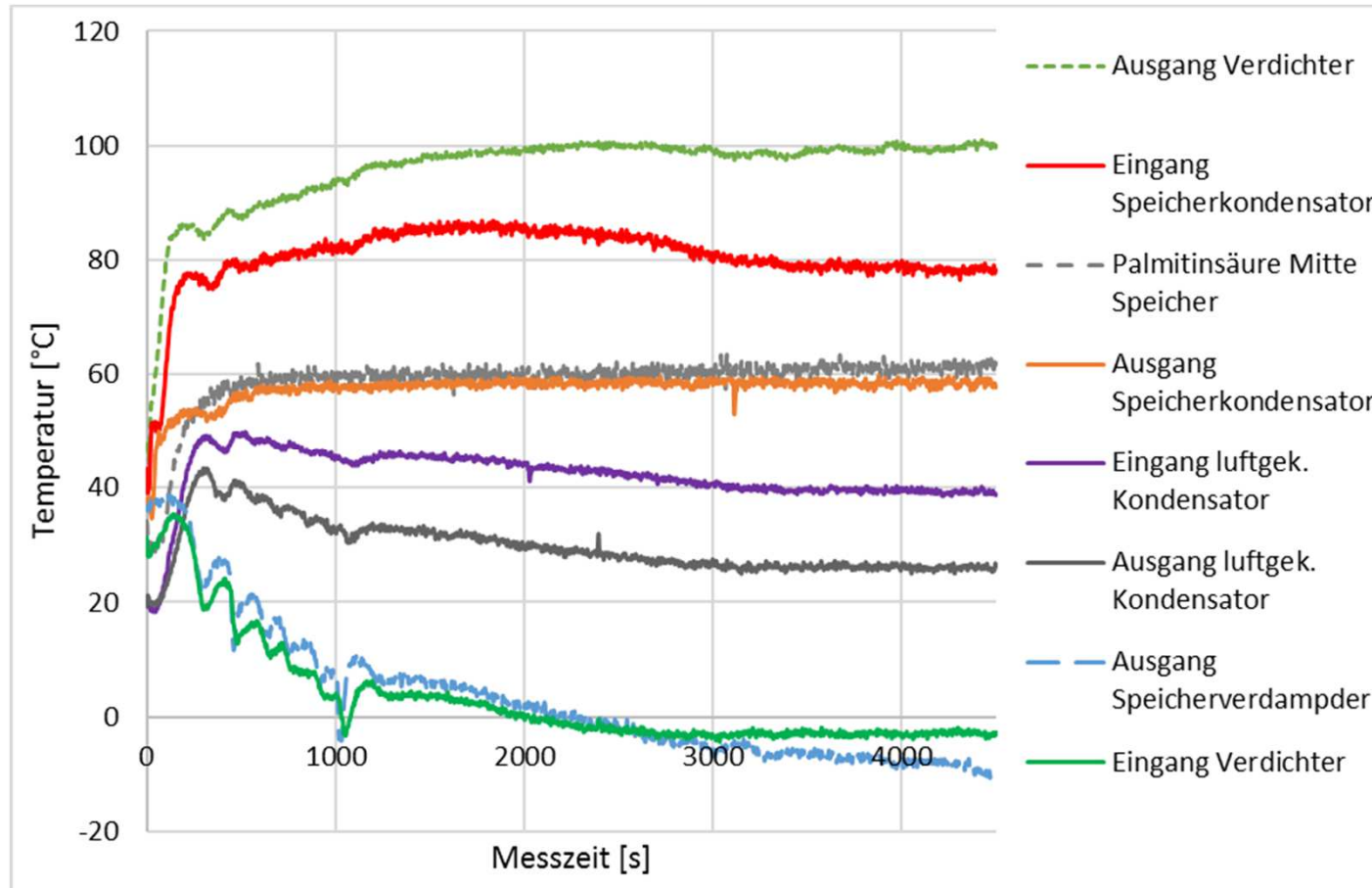
- Speicherverdampfer funktioniert problemlos
- Wird die dort aufgenommene Wärme am Speicherkondensator nicht vollständig abgenommen, wird sie über den luftgekühlten Kondensator (möglichst in Fahrgastraum) abgegeben
- Vorkonditionierung der Speicher erhöht die nutzbaren Wärmemengen
- Konzept bietet Möglichkeit zur Beladung der thermischen Speicher während der Beladung der Traktionsbatterie, also vor Fahrtantritt (entweder über Betrieb der Wärmepumpe oder über elektrische Heizer)





# TEMPERATURVERLÄUFE

(hier: Laden des Speicherkondensators, gefüllt mit Palmitinsäure)



(Starttemperatur Wasser 40 °C, Starttemperatur Palmitinsäure 30 °C)

- Niedertemperaturspeicher nach ca. 35 min komplett vereist
- Wärmeaufnahme im Speicherkondensator ist auch nach 75 min noch nicht abgeschlossen
- Zu viel Wärme wird über Luftkondensator aus Kältemittel abgegeben



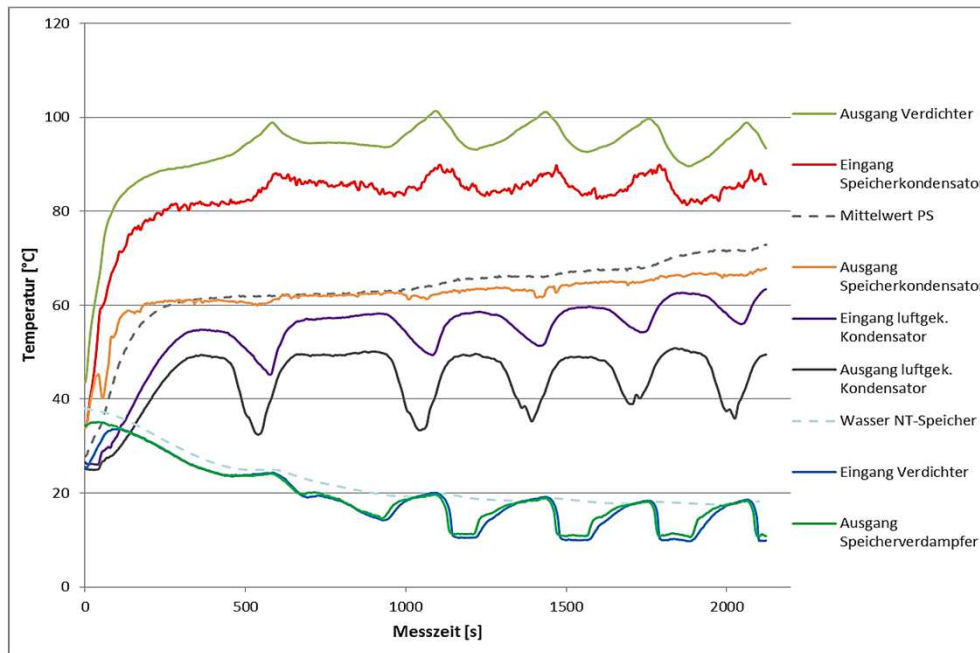
# TEMPERATURVERLÄUFE



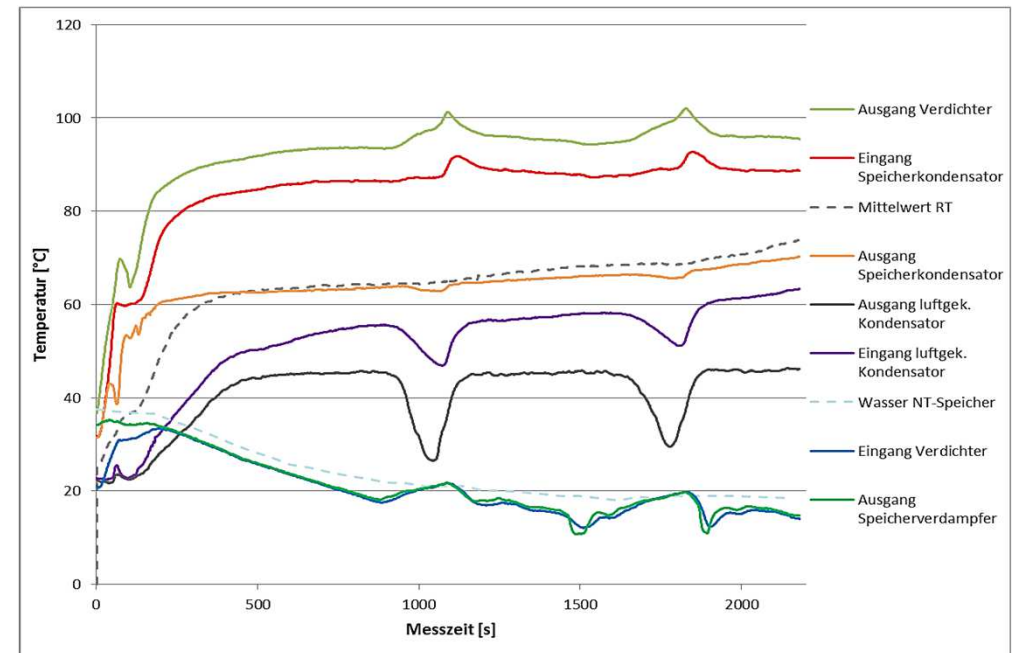
Hochschule RheinMain  
University of Applied Sciences  
Wiesbaden Rüsselsheim



Palmitinsäure (Füllmenge: 11,5 kg)



Rubitherm RT64HC (Füllmenge: 10 kg)



(Starttemperatur Wasser 35 °C, Starttemperatur Palmitinsäure bzw. Rubitherm RT64HC 25 °C, Wärmezufuhr zum Speicherverdampfer mit Wasser während des Versuchs,  $t_{\text{Wasser}} = 45 \text{ °C}$ )

Bei Entladung gemessene Wärmemenge: 782 Wh

Bei Entladung gemessene Wärmemenge: 837 Wh



## SCHLÜSSE

- Die Wärmeaufnahme am Speicherkondensator dauert im Wärmepumpenbetrieb zu lange, größere Wärmeübertragungsflächen wären hilfreich
- Die im Vergleich zu Palmitinsäure höhere Wärmeleitfähigkeit und höhere Wärmekapazität des Materials RT64HC lassen sich durch Messungen belegen
- Problematisch sind die Lufteinschlüsse im Speichermaterial Palmitinsäure, die infolge der Volumenkontraktion beim Abkühlen entstehen - Rubitherm RT64HC weist dieses Verhalten nicht auf
- Zur schnelleren Beladung des Speicherkondensators vor Fahrtantritt kann ein elektrischer Heizer unterstützend oder auch alternativ sinnvoll eingesetzt werden



Hochschule **RheinMain**  
University of Applied Sciences  
Wiesbaden Rüsselsheim



# 4 ÄNDERUNGEN AM KONZEPT



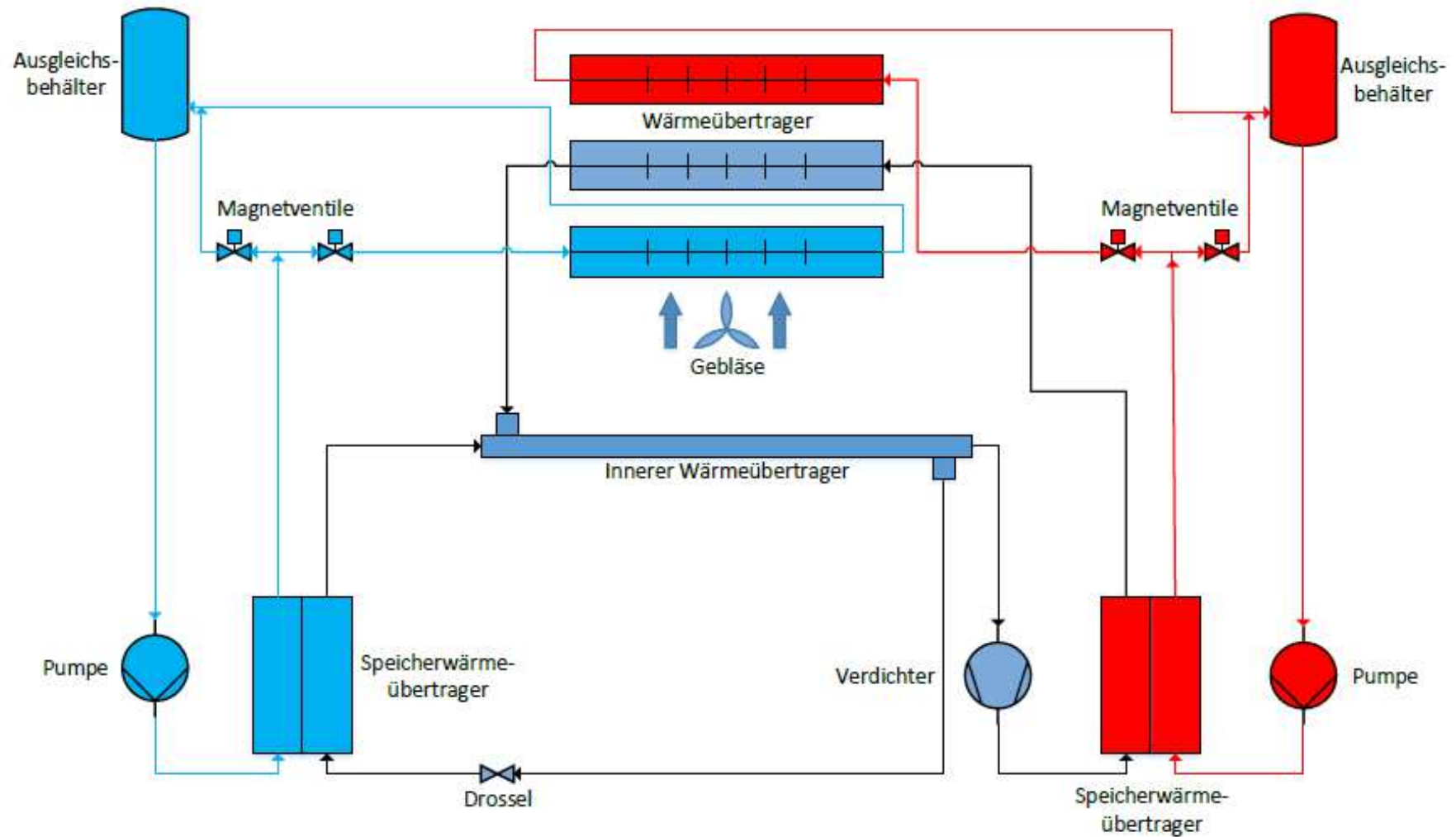
# ÄNDERUNGEN

- Statt der PCM-Speicher können Heiz- und Kühlkreisläufe verwendet werden, in denen das Speichermaterial in gekapselter Form in den Fluiden mitgeführt wird
- Speichermaterial Rubitherm RT64HC wird durch Fa. MikroCaps d.o.o. verkapselt und in unterschiedlicher Konzentration in Heizkreis verwendet
- Statt des nicht mehr zulässigen Kältemittels R134a soll nun R744 (Kohlendioxid CO<sub>2</sub>) verwendet werden

# ANLAGENSHEMA



Hochschule **RheinMain**  
University of Applied Sciences  
Wiesbaden Rüsselsheim

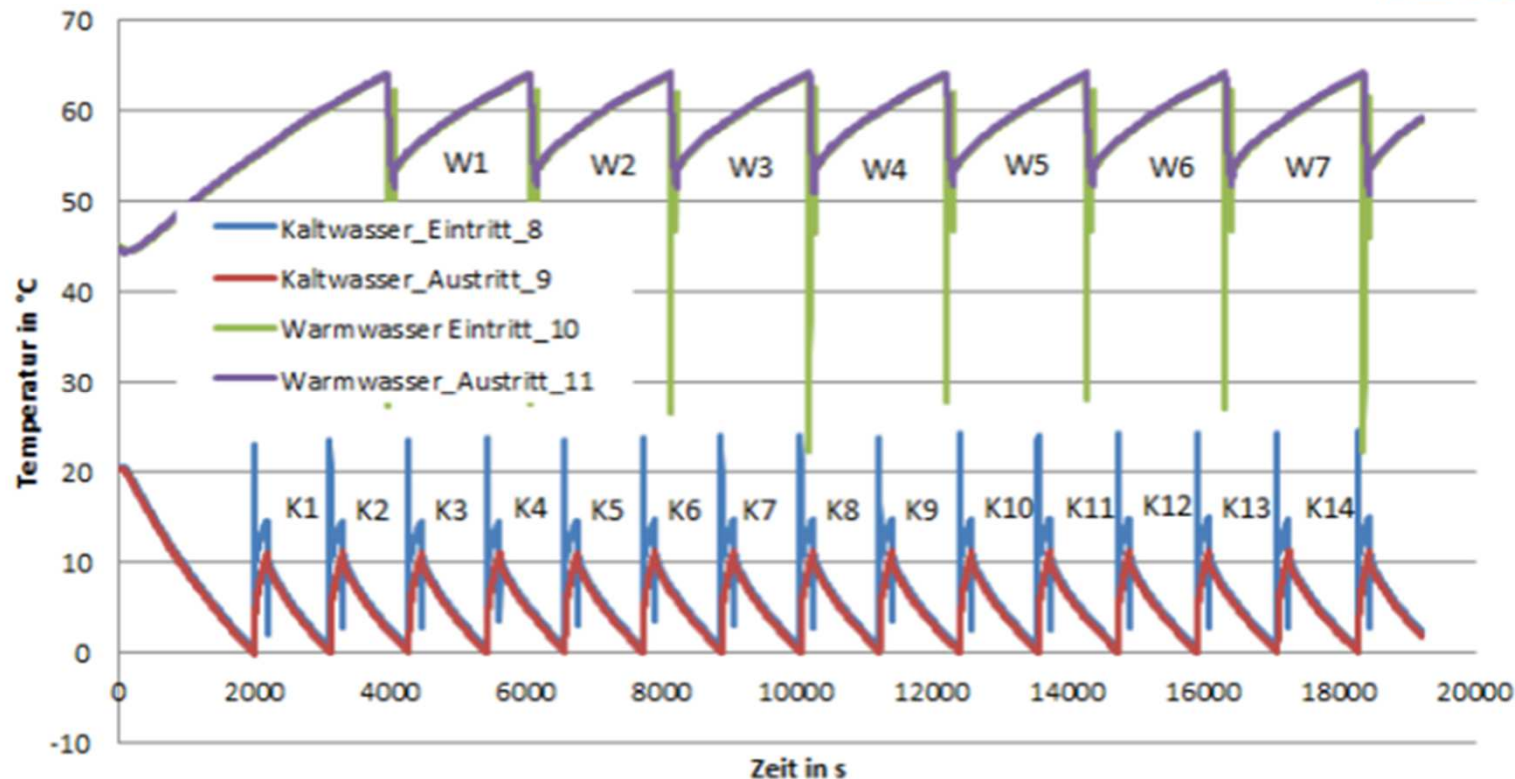


Deutsche Kälte- und Klimatagung, Bremen,  
22.-24.11.2017

# TEMPERATURVERLÄUFE BEI BETRIEB MIT WASSER BZW. WASSER/GLYKOL



Hochschule RheinMain  
University of Applied Sciences  
Wiesbaden Rüsselsheim



- Verhalten entspricht den Erwartungen
- Zykluszeiten im Heizkreis bei identischen Wärmeüberträgern deutlich länger als im Kühlkreis, Wärmekapazität der Glykol-Wassermischung ist um ca. 25 % niedriger
- Höhere Temperaturen im Heizkreis sorgen für größere Verluste
- Füllung mit PCS steht noch aus



Hochschule **RheinMain**  
University of Applied Sciences  
Wiesbaden Rüsselsheim



# 5 BESTIMMUNG RHEOLOGISCHER EIGENSCHAFTEN MÖGLICHER PCS

# EIGENSCHAFTEN DES VERKAPSELTEN PCS RT64HC (HERSTELLERANGABEN)



Hochschule **RheinMain**  
University of Applied Sciences  
Wiesbaden Rüsselsheim



- Durch das Verkapseln des PCM in Melaminharz entsteht eine Emulsion mit unterschiedlichen PCM-Konzentrationen, ein sog. „Phase Change Slurry“ (PCS)
- Die Kapselhüllen sind (in Grenzen) dehnbar und materialundurchlässig
- Verkapselungen sind in unterschiedlichen Durchmessern erhältlich
- Nicht alle für diese Anwendung wichtigen Kenndaten sind bekannt

<b>PCM Inhalt in Dispersion</b>	26,8%	26,5%
<b>PCM Inhalt in trockener Kapsel</b>	76,3%	76,1%
<b>Fester Inhalt</b>	35,4%	35,6%
<b>Wärmespeicherkapazität von trockenen Kapseln</b>	176,4 kJ/kg	176,3 kJ/kg
<b>Dichte</b>	0,92 g/cm <sup>3</sup>	0,91 g/cm <sup>3</sup>
<b>Viskosität bei 25 °C</b>	314 cPs	730 cPs
<b>Durchschnittliche Teilchengröße</b>	12,6 µm	2,7 µm

MikroCaps d.o.o., *Certificate of Analysis*  
"MikroCaps PCM 64 - slurry" mit  
Produktionschargennummer 250216 und 310317,  
Ljubljana, 2015 und 2017

# TEMPERATURABHÄNGIGE DICHTEN DER SLURRIES

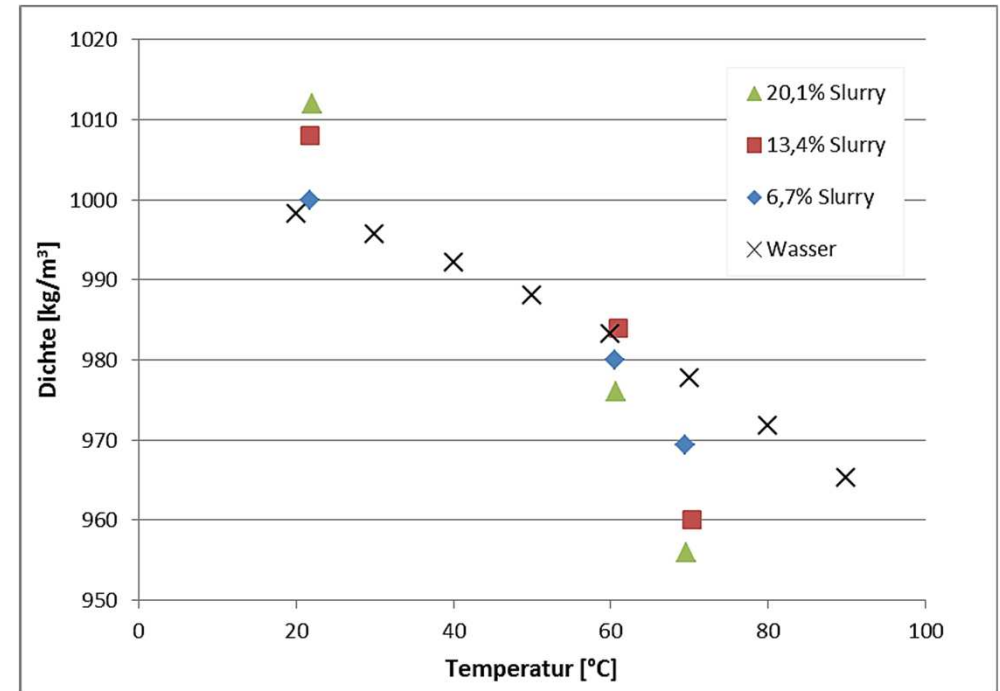
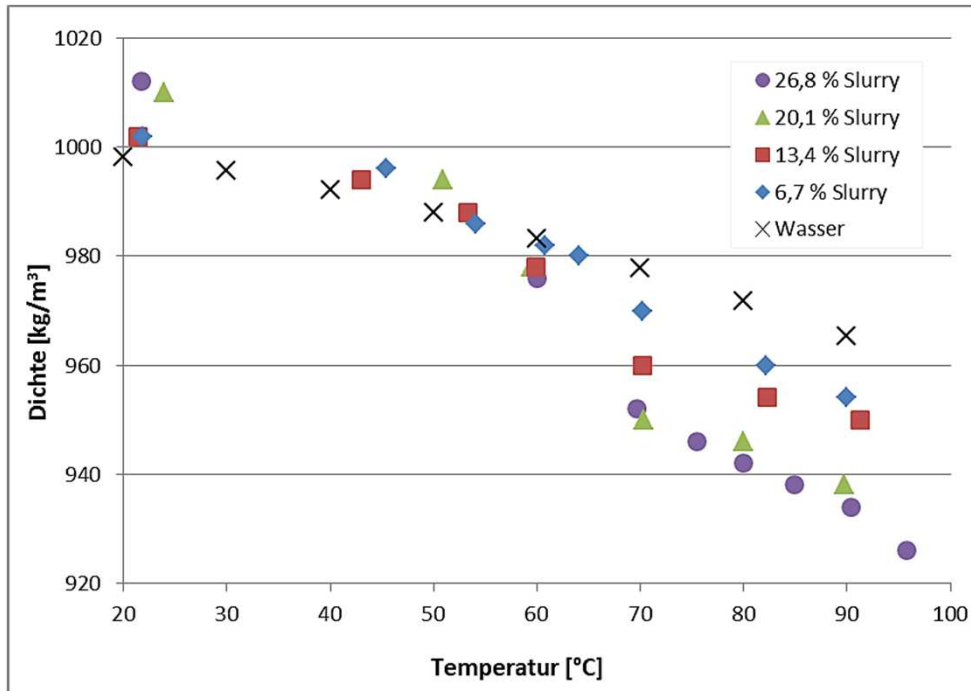


Hochschule RheinMain  
University of Applied Sciences  
Wiesbaden Rüsselsheim



Durchschnittliche Kapseldurchmesser 12,6  $\mu\text{m}$

Durchschnittliche Kapseldurchmesser 2,7  $\mu\text{m}$



# TEMPERATURABHÄNGIGE DYNAMISCHE VISKOSITÄT DER SLURRIES

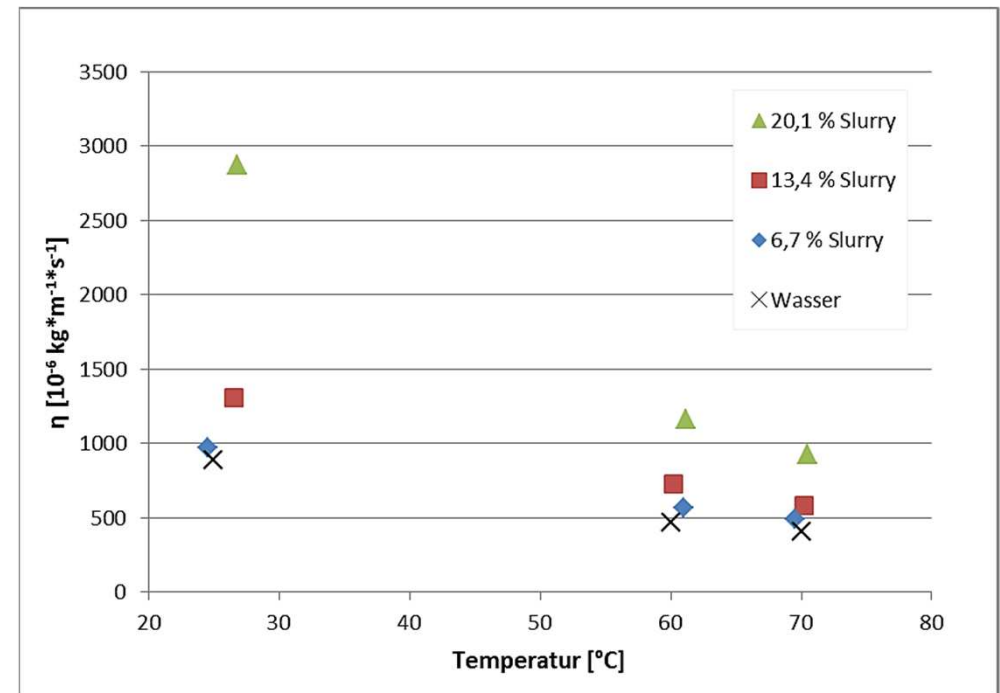
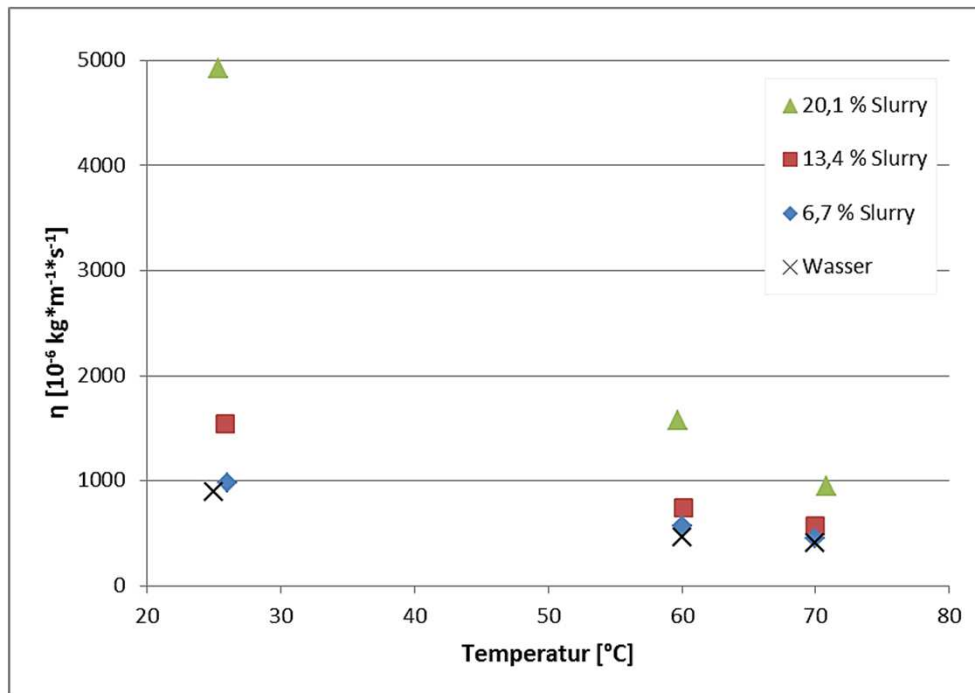


Hochschule RheinMain  
University of Applied Sciences  
Wiesbaden Rüsselsheim



Durchschnittliche Kapseldurchmesser 12,6  $\mu\text{m}$

Durchschnittliche Kapseldurchmesser 2,7  $\mu\text{m}$



# TEMPERATURABHÄNGIGE DICHTE UND VISKOSITÄT



Hochschule **RheinMain**  
University of Applied Sciences  
Wiesbaden Rüsselsheim



- Dichte sinkt erwartungsgemäß mit zunehmender Temperatur
- Phasenwechsel zwischen 60 und 70 °C ist erkennbar, aber nicht sehr deutlich
- Mit zunehmender Konzentration wird der Gradient größer
- Dichte ist bei gleicher Konzentration unabhängig von Kapseldurchmesser
- Viskosität sinkt erwartungsgemäß mit zunehmender Temperatur, unterscheidet sich aber bei gleichem PCM-Massenanteil, wenn die Kapseldurchmesser variieren
- Widerspruch zwischen Messungen und Angaben auf Produktdatenblatt der Fa. MikroCaps d.o.o. (gemessene Viskosität bei kleineren Kapseln niedriger)

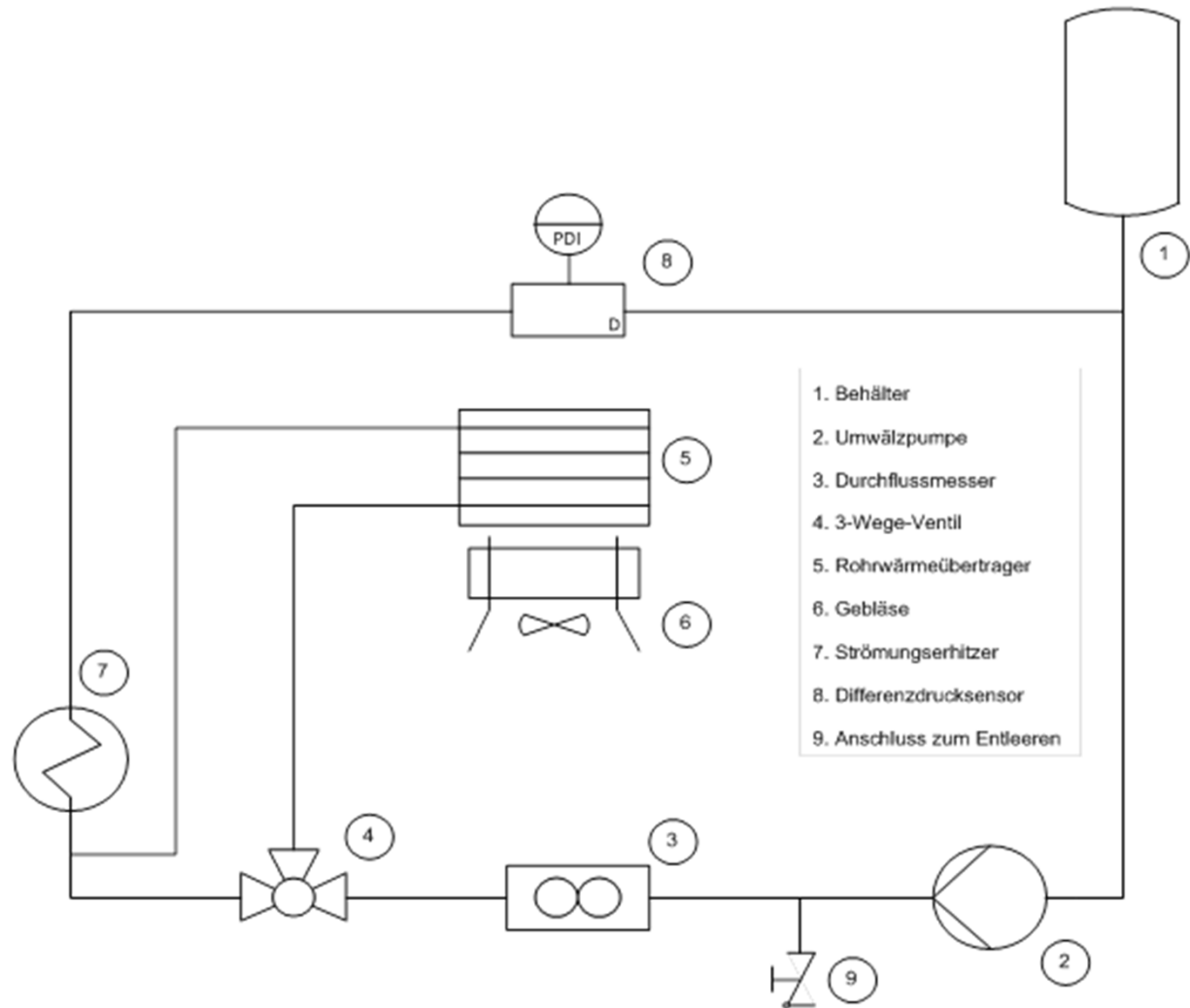
# ANLAGE ZUR UNTERSUCHUNG DER ZYKLENFESTIGKEIT VON PCS



Hochschule **RheinMain**  
University of Applied Sciences  
Wiesbaden Rüsselsheim



Technical leadership starts with ideas.

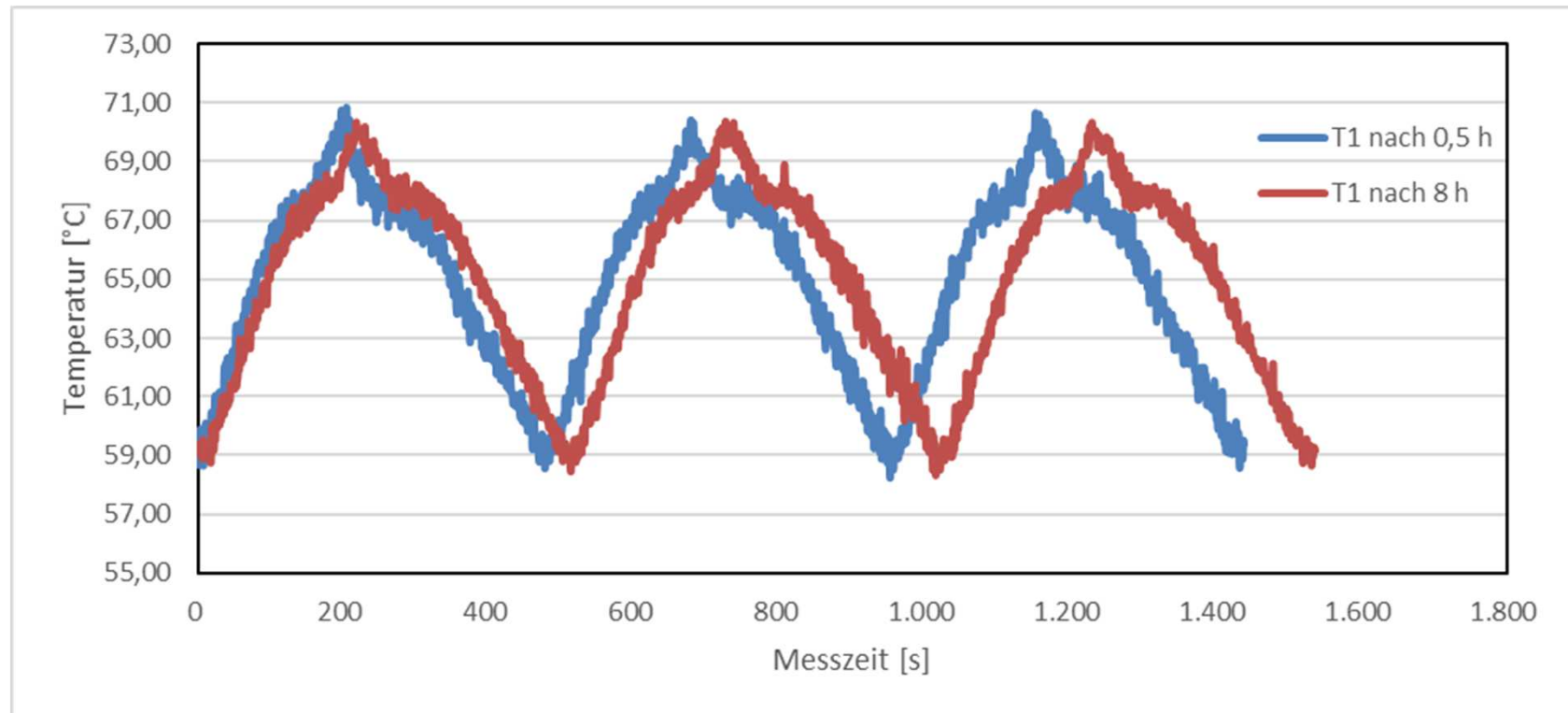


# TEMPERATURVERLAUF DES PCS IM DAUER-VERSUCH

20,1 % Konz.,  
2,7  $\mu\text{m}$  Kapseldurchm.



Hochschule **RheinMain**  
University of Applied Sciences  
Wiesbaden Rüsselsheim



- Aufschmelzen und Erstarren des PCM ist erkennbar
- Zyklusdauer verlängert sich über den Tag um ca. 7,5 %
- Ziel ist hohe Zyklenfestigkeit

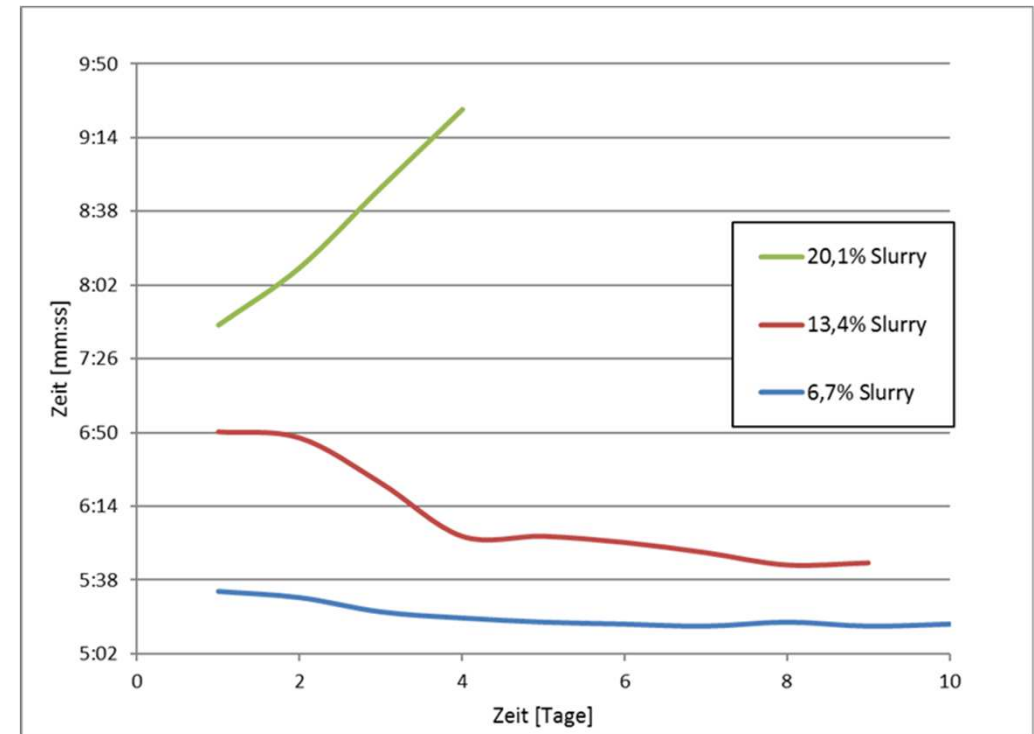
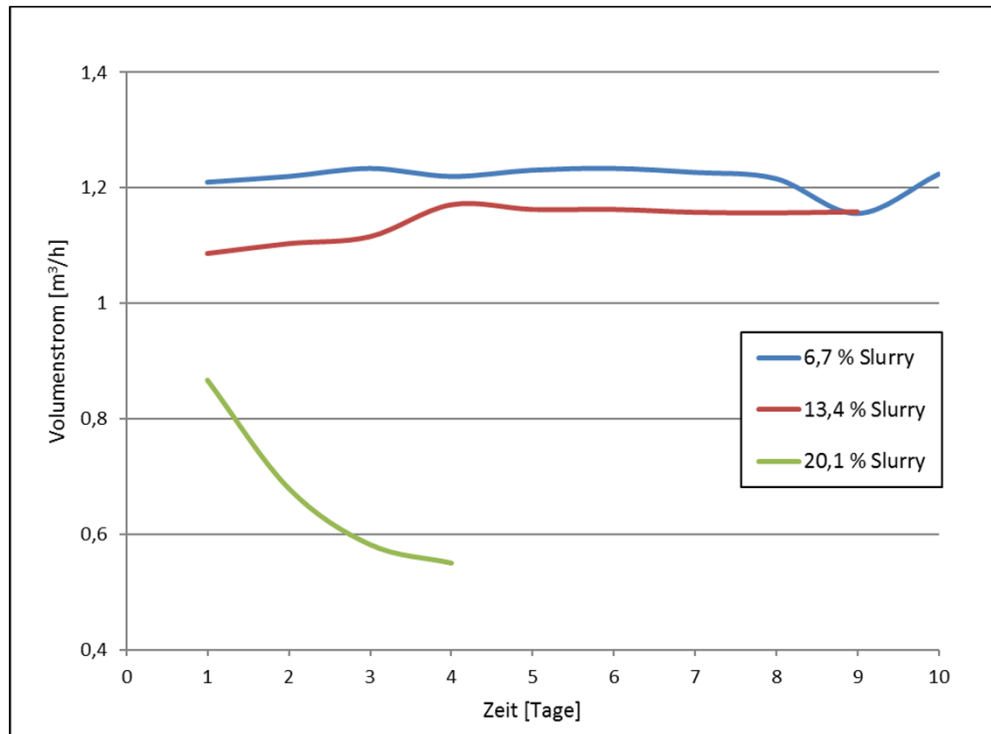
# DIE ENTWICKLUNG VON VOLUMENSTROM UND ZYKLENDAUER



Hochschule RheinMain  
University of Applied Sciences  
Wiesbaden Rüsselsheim



12,6  $\mu\text{m}$  Kapseldurchm.

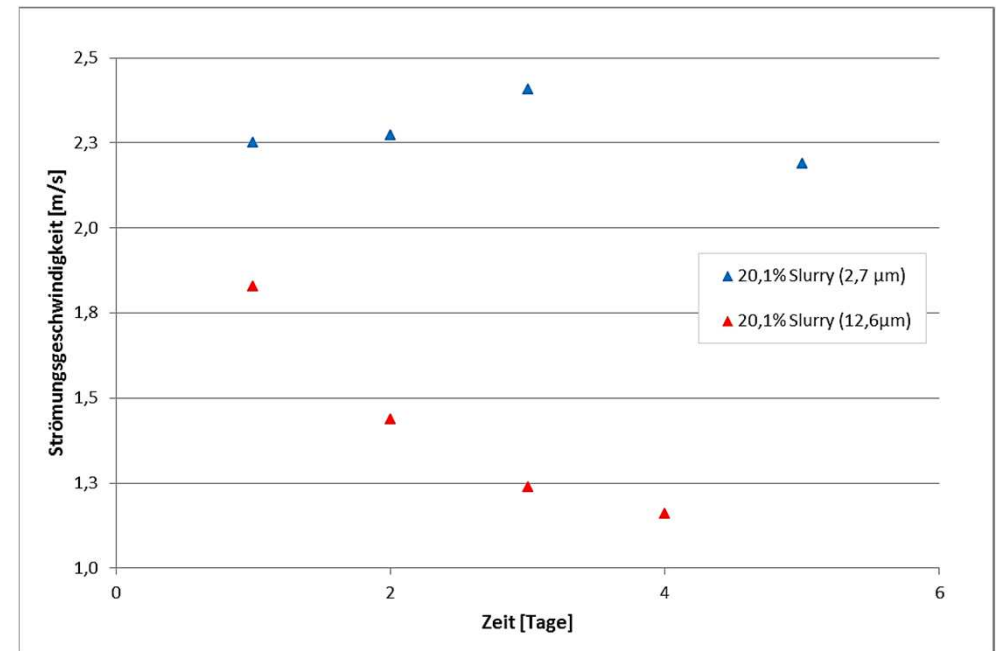
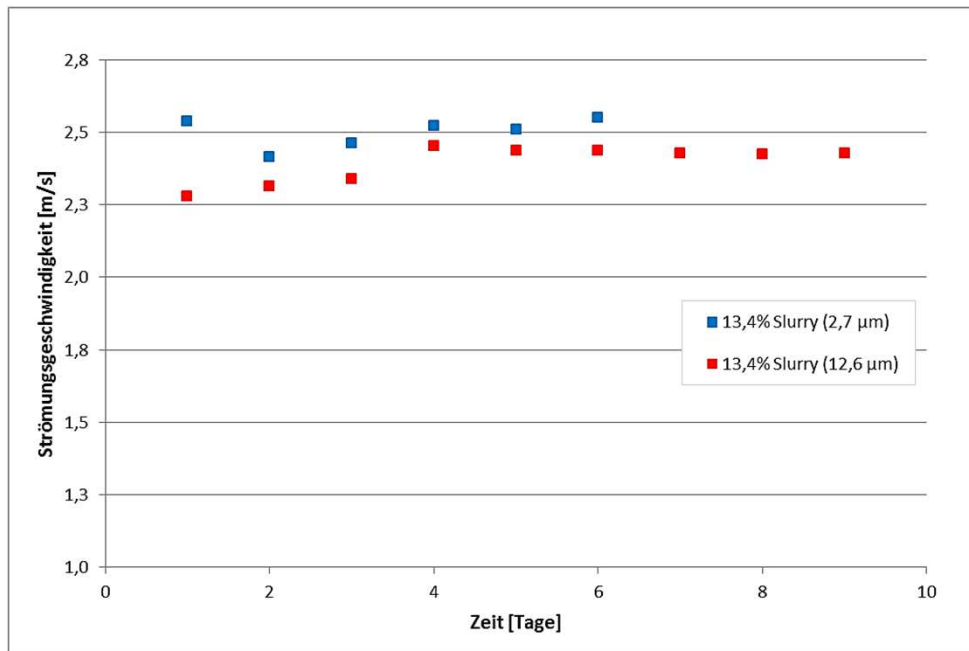


- Slurry mit geringer PCM-Konzentration arbeitet dauerhaft stabil
- Volumenstrom steigt bei mittlerer Konzentration infolge von Verklumpung durch Überhitzung (Reduktion der Flächenbelastung an der Beheizung schafft Abhilfe)
- Volumenstrom sinkt und Zyklusdauer steigt bei hoher Konzentration mit Versuchsdauer (Trennung von Wasser und Kapseln an Pumpe)

# STRÖMUNGSGESCHWINDIGKEITEN BEI UNTERSCHIEDLICHEN KASPELDURCHMESSERN



Hochschule RheinMain  
University of Applied Sciences  
Wiesbaden Rüsselsheim



- Mit kleinen Kapseldurchmessern bleiben die Strömungsgeschwindigkeiten auch bei hohen Konzentrationen über Tage konstant
- Gleichbleibende Eigenschaften bei PCS hoher Konzentrationen über einen Zeitraum von mehr als fünf Tagen konnten noch nicht beobachtet werden (Anlagendefekt).



Hochschule **RheinMain**  
University of Applied Sciences  
Wiesbaden Rüsselsheim



## 6 SCHLUSSFOLGERUNGEN, WEITERES VORGEHEN

# SCHLUSSFOLGERUNGEN



Hochschule **RheinMain**  
University of Applied Sciences  
Wiesbaden Rüsselsheim



- Konzept der Kombination von Wärmepumpe mit Latentwärmespeichern funktioniert
- Nicht alle PCM mit scheinbar passenden Daten sind für den Einsatz geeignet
- Hohe Kapselkonzentration in PCS vergrößert die Speicherkapazität, kann jedoch zu geringerer Zyklenstabilität führen (Vorteile bei PCS mit geringen Kapseldurchmessern)
- CO<sub>2</sub>-Wärmepumpe mit Heiz- und Kühlkreis funktioniert mit Wasser bzw. Wasser/Glykol, mit PCS in den Kreisläufen ist die Speicherkapazität zu steigern



## GEPLANTES EINSATZFELD



Geplant ist die Entwicklung eines Prototypen für den Einsatz in Flughafenvorfeldbussen:

- Große, meist offene Türen führen zu großem Wärmebedarf
- Feste, überschaubare Routen
- Gute Ladeinfrastruktur aufbaubar
- Instandhaltung und Überwachung leicht möglich

Mit einigen Systemmodifikationen ist ein Einsatz im öffentlichen Nahverkehr denkbar. Baustellen-, Lager- und Auslieferungsfahrzeuge könnten ebenso gut ausgestattet werden. Bei weiteren Fortschritten in Bezug auf die Reduktion von Baugröße und Gewicht ist es möglich, das System auch bei Elektro-PKW einzusetzen.



**LOEWE**

Exzellente Forschung für  
Hessens Zukunft



Hochschule **RheinMain**  
University of Applied Sciences  
Wiesbaden Rüsselsheim



Dieses Projekt (HA-Projekt-Nr.: 519/17-01)  
wird im Rahmen von Hessen Modellprojekte aus  
Mitteln der LOEWE – Landes-Offensive zur  
Entwicklung Wissenschaftlich-ökonomischer  
Exzellenz, Förderlinie 3: KMU-Verbundvorhaben  
gefördert.



**HessenAgentur**

HA Hessen Agentur GmbH

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!