

Erstarrungszeiten und Phasenfrontgeschwindigkeit im Inneren von Kugeln

In vielen Fällen werden Kugeln in unterschiedlicher Größenordnung zur Verkapselung von Phasenwechselmaterial verwendet. Diese werden in großen Behältern¹ in der Regel zu Kühlzwecken eingesetzt. Das Kühlmedium ist in der Regel Wasser oder ein Wasser/Glykolgemisch, wenn Temperaturen unter null Grad notwendig werden.

Bild 1.1 zeigt unterschiedliche Formen von Kugeln mit verschiedenen PCM-Materialien.

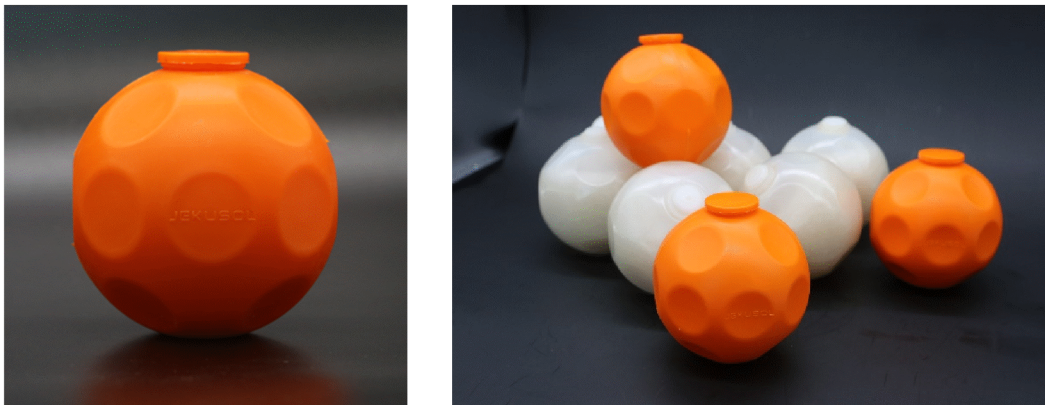


Bild 1.1 Unterschiedliche Kugeln der Größe $R = 85 \text{ mm}$ zur Verkapselung von PCM und Einsatz in großen Kälte- und Wärmespeichern (Quelle JEKUSOL GmbH)

Ein Wachsen der einzelnen festen PCM-Schichten ist im Bild 1.2 in einem farblichen Verlauf dargestellt. Um den zeitlichen Verlauf des Erstarrungsvorgangs in einem Diagramm sinnvoll darzustellen ist die Berechnung einzelner Phasen in zeitlich festen Perioden zu berechnen wie es in Bild 1.2 geschehen ist.

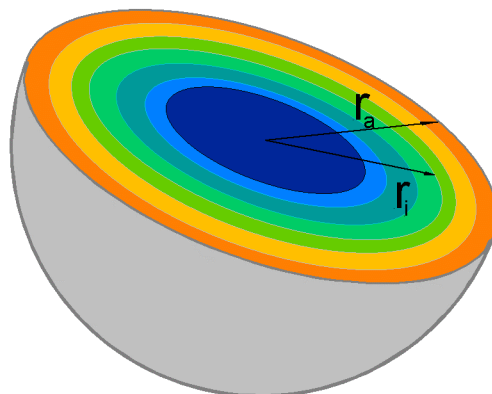


Bild 1.2 Wachstum einzelner PCM-Schichten in einer Kugel

¹ JEKUSOL

In Bild 1.2 sind die Schichten als Kugelschalen dargestellt, die nach und nach den Phasenwechsel vollziehen. Für die Erstarrungszeit von PCM innerhalb einer Kugel erhält man die zugechnittene Gleichung gemäß Baehr & Stephan.²

$$t = \frac{\Delta h \rho s^2}{2 \lambda \Delta T} \left[1 - \frac{2}{3} s^+ + \frac{2\beta}{s^+} \left(1 - s^+ + \frac{1}{3} (s^+)^2 \right) \right] \quad (1.1)$$

In vielen Fällen interessiert gerade die maximale Erstarrungszeit t_{\max} zur Beurteilung der Einsatzmöglichkeiten des verkapselten Materials. Dazu lässt sich die Gleichung 1.1 in der dargestellten Form anwenden, wenn man annimmt, dass die Dicke der Kugelwand d_w näherungsweise zu vernachlässigen ist. Die bei der vorliegenden Kugelwand zu berücksichtigenden Dicke von 1,5 mm lässt sich gegenüber einem Gesamtradius der Kugel von 42,5 mm und einer Wärmeleitfähigkeit von Polypropylen von $\lambda = 2 \text{ W/(mK)}$ vernachlässigen.

Der Kugelradius wird allgemein mit r_a bezeichnet. r_i stellt den vorliegenden Fortschritt der Phasenumwandlung dar. Die Gleichung für β lautet,

$$\beta = \frac{\lambda}{\lambda_w} \frac{d_w}{r_i + d_w} + \frac{\lambda}{\alpha (r_i + d_w)} \frac{r_i}{r_i + d_w} \quad (1.2)$$

Da eine Kugel jedoch quasi dreidimensional vom Wärmeträgermedium umspült wird, erfolgt der eigentliche Energieeintrag wesentlich schneller, wie die nachfolgenden Berechnungen zeigen werden.

Für folgende Materialien wurde die Energieumwandlungszeit berechnet.

Tabelle 1:

PCM Schmelztemp. (°C)	PCM Serie	PCM Typ	Min. Arbeitstemperatur (°C)	Max. Arbeitstemperatur (°C)	Delta T (K)	Speicher-Kapazität (MJ/m ³)	Speicher-Kapazität Ball (KJ)
JEKU-5	C	org.	-50	70	5	175,0	56,1
JEKU-10	C	org.	-50	70	5	176,0	56,4
JEKU-24	C	anorg.	-50	80	10	325,0	104,2
JEKU-58	C	anorg.	0	80	20	356,0	114,0
JEKU-78	C	anorg.	0	100	40	682,0	218,0

² Siehe auch Mehling & Cabeza, Heat and Cold storage with PCM, Springer

PCM Schmelztemp. (°C)	Dichte g/cm ³ (g/cm ³)		Spez. Wärmekapazität (KJ/Kg*K)		Wärmeleitfähigkeit (W/m*K)		Latent- Wärme (KJ/Kg))
	fest	flüssig	fest	flüssig	fest	flüssig	
JEKU-5	0,76	0,76	2,15	2,15	0,04	0,01	220
JEKU-10	0,82	0,82	1,97	1,97	0,25	0,25	205
JEKU-24	1,8	1,50	2,70	2,70	1,10	0,54	190
JEKU-58	1,4	1,28	1,97	3,35	1,10	0,55	225
JEKU-78	2,18	2,18	1,17	1,26	1,30	0,64	265

Die Grundannahme für die Berechnungen sind:

- Der Einfluss der Verkapselung wird vernachlässigt.
- Der äußere Wärmeübergangskoeffizient wird mit 300 W/(m²K) angenommen.
- Die gewählte Temperaturdifferenz liegt ständig und homogen an der Außenseite der Verkapselung an.
- Die Strömungsgeschwindigkeit spielt keine Rolle. Die Erhöhung des Wärmeübergangskoeffizienten durch eine hohe Strömungsgeschwindigkeit ist vernachlässigbar.
- Eine hohe Strömungsgeschwindigkeit sorgt nur dafür, dass die Temperaturdifferenz eingehalten wird und hat deswegen einen Einfluss über den Wärme-/Kältetransport.
- Die Einstellung einer Temperaturdifferenz ist nicht trivial, da in den meisten Fällen keine harte Temperaturgrenze beim Übergang fest/flüssig (Siehe Wasser) vorhanden ist. Es handelt sich in den meisten Fällen um einen Temperaturbereich, in dem die Enthalpie verteilt ist.
- Es wurden nur Übergänge von flüssig nach fest gerechnet, da dieser Übergang zeitkritisch ist. Der Übergang von fest nach flüssig ist in der Regel um den Faktor 2 schneller, da durch Konvektion im geschmolzenen Teil der Kapsel der Wärmetransport stark unterstützt wird.

2. Rechenergebnisse im Einzelnen

Für die Materialien in der obigen Tabelle wurden jeweils die Radien als Maß für die Phasenfront und die Energiezunahme in Abhängigkeit der Zeit aufgetragen. Der typische Verlauf einer Parabel zu Beginn, der Übergang in einen linearen Teil und der schnelle Abschluss bei Erreichen der Kugelmitte ist gut zu erkennen.

Aufgrund der Tatsache, dass vom Rand der Kugel bis zur Mitte immer weniger der Flüssigkeit in den festen Bestandteil umzuwandeln ist, desto schneller verläuft der ganze Vorgang. Im Prinzip lässt sich sagen dass dieser dreimal so schnell abläuft wie bei einer ebenen Platte.

Material Nr.: 1 (JEKU-5)

Innere Kugel

Enthalpie - Phasenwechseltemperatur

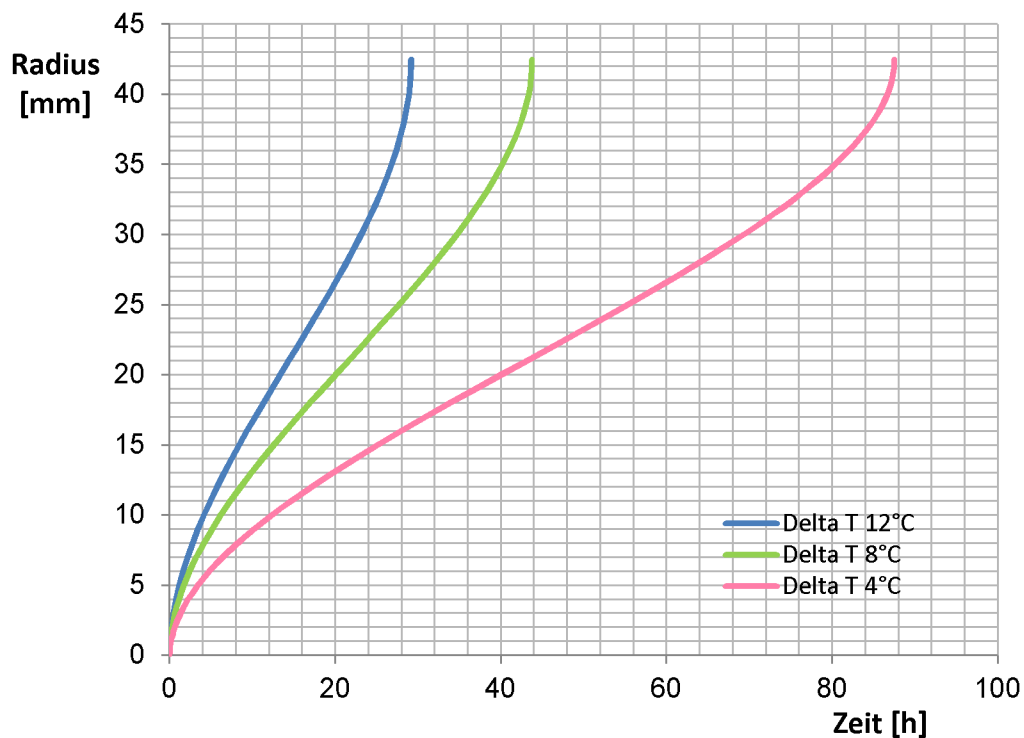


Bild 1.3 Verlauf der Radienzunahme (Phasenfront) in einer Kugel von 85 mm Durchmesser und gefüllt mit dem PCM-Material Nr. 1

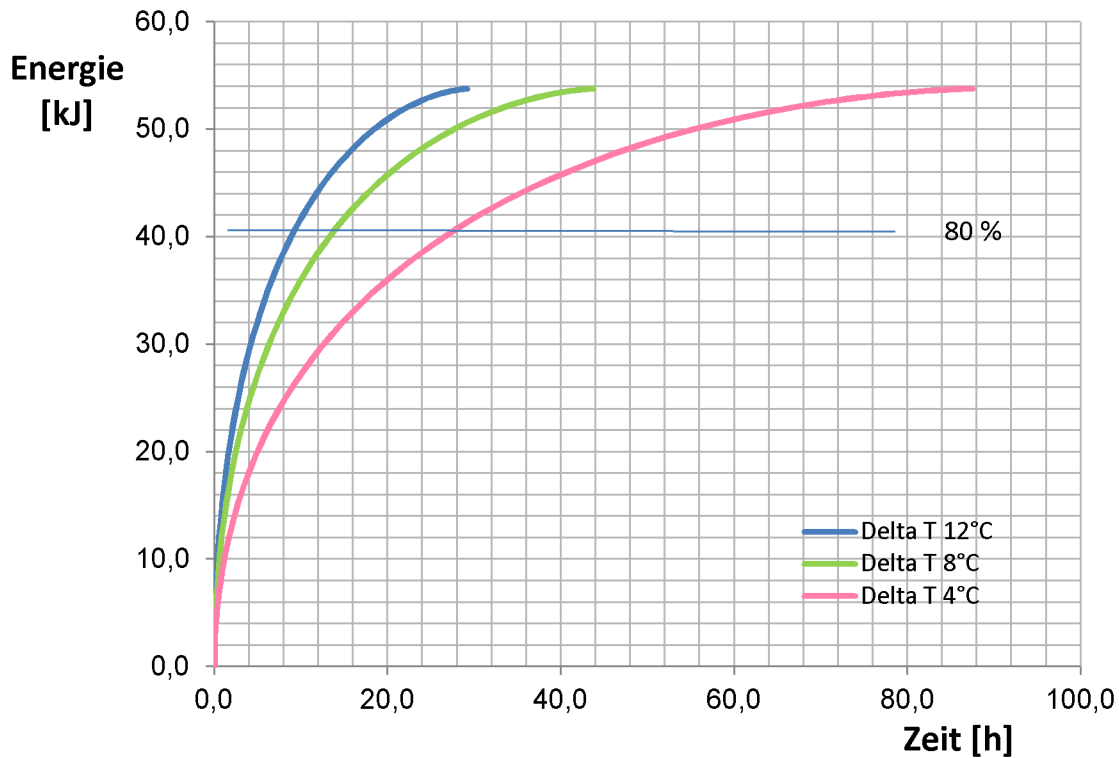
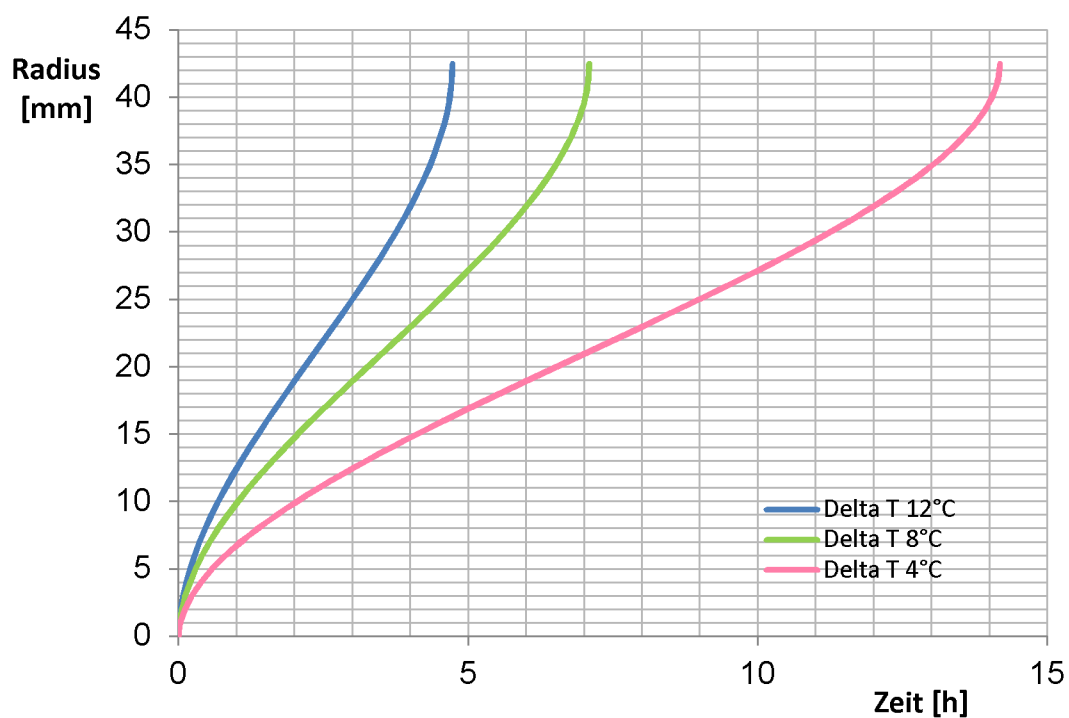


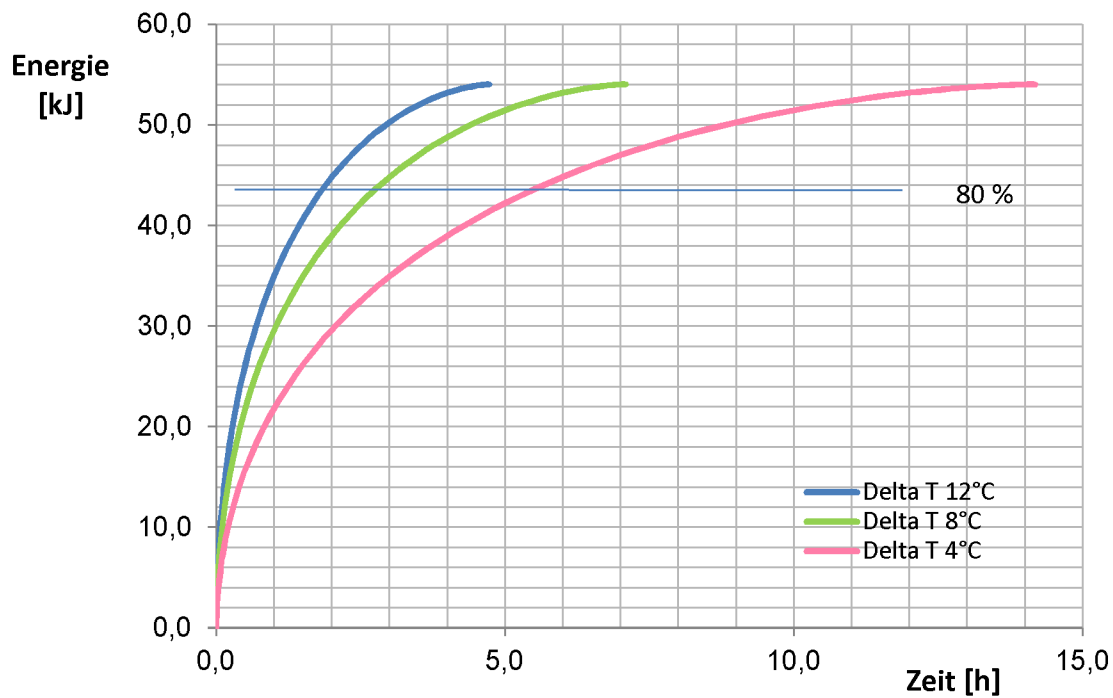
Bild 1.4 Verlauf der Energiezunahme in einer Kugel von 85 mm Durchmesser und gefüllt mit dem PCM-Material Nr. 1 in Abhängigkeit von der Zeit und unterschiedlichen Wärmeträgerfluidtemperaturen

Man erkennt leicht, dass die Füllung einer Kapsel mit 80 % Wärme- oder Kälteinhalt ein Optimum in täglichen

Material Nr.: 2 (JEKU-10)

Innere Kugel PCM-205-10°C





Material Nr.: 3 (JEKU-24)

Innere Kugel PCM-190-24°C

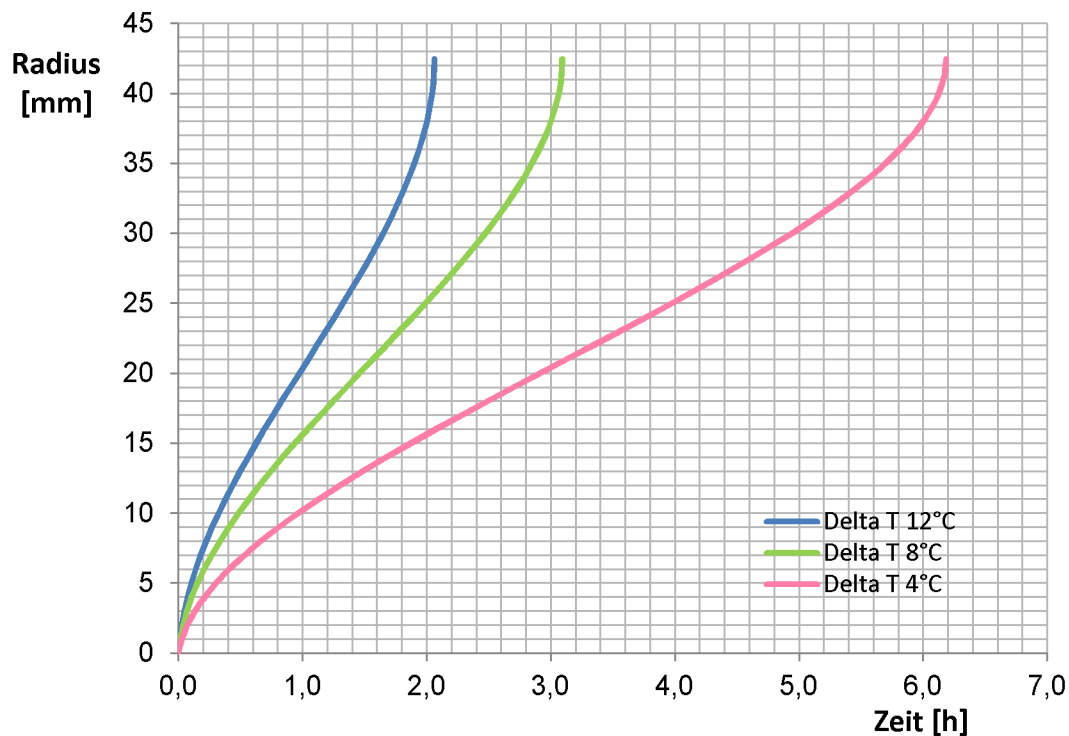
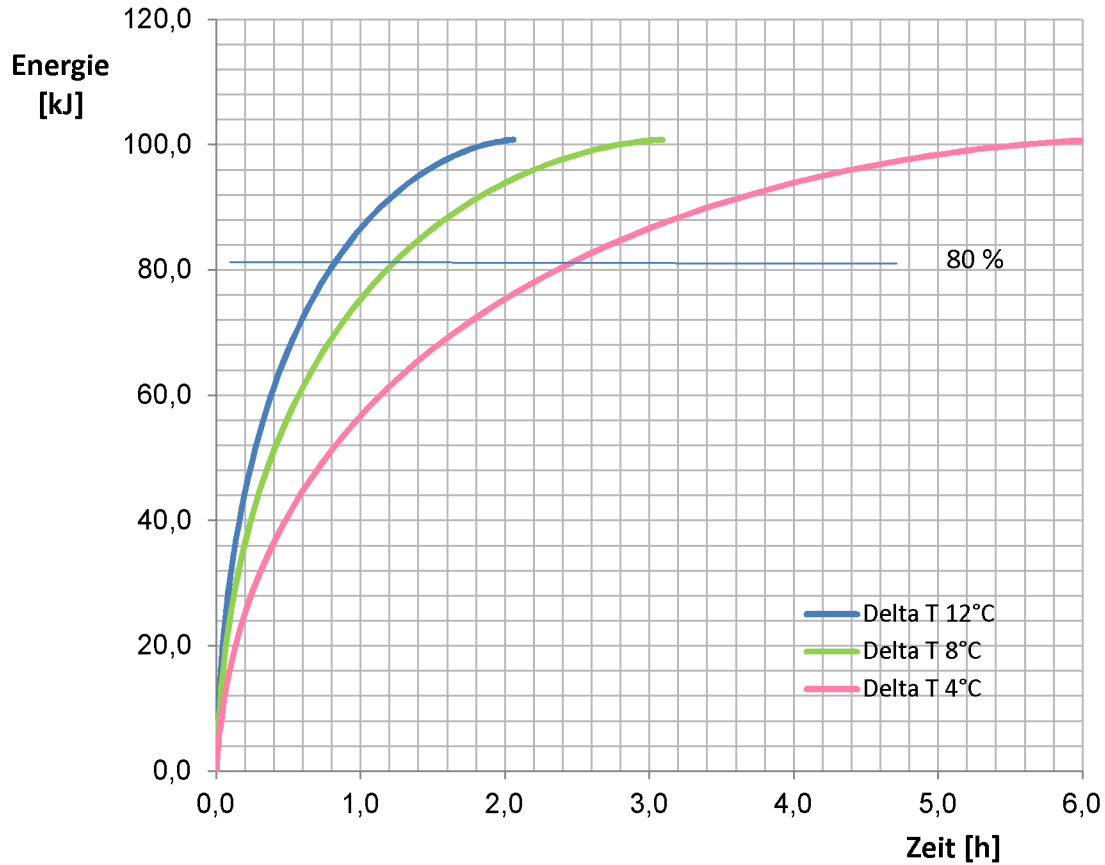
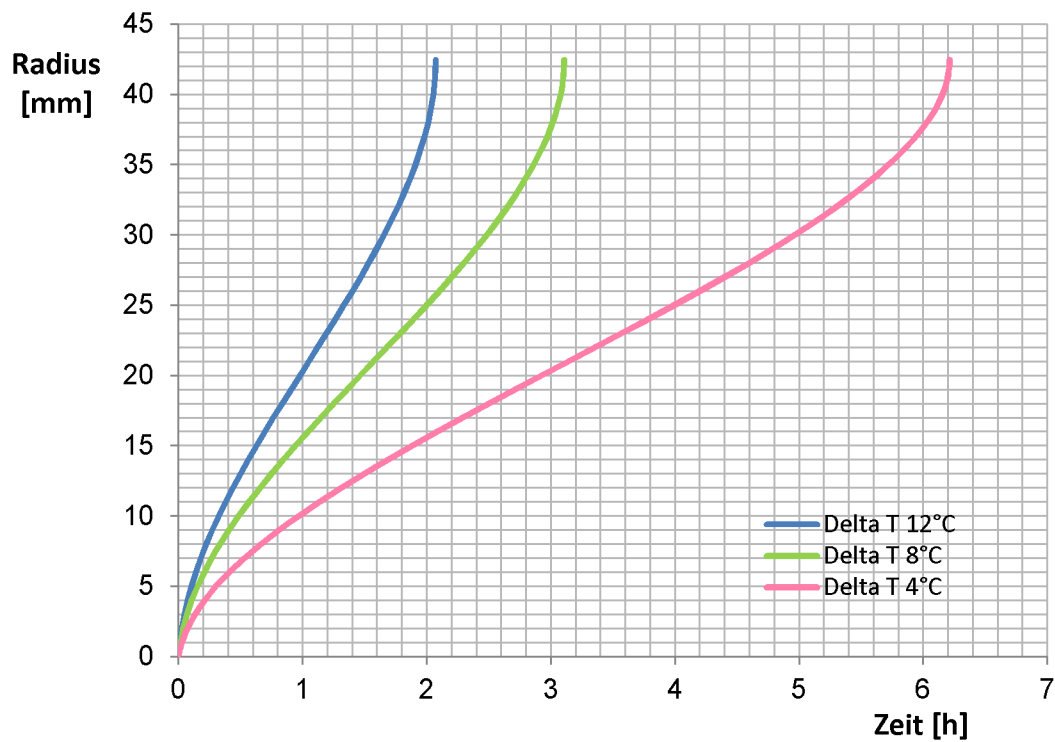


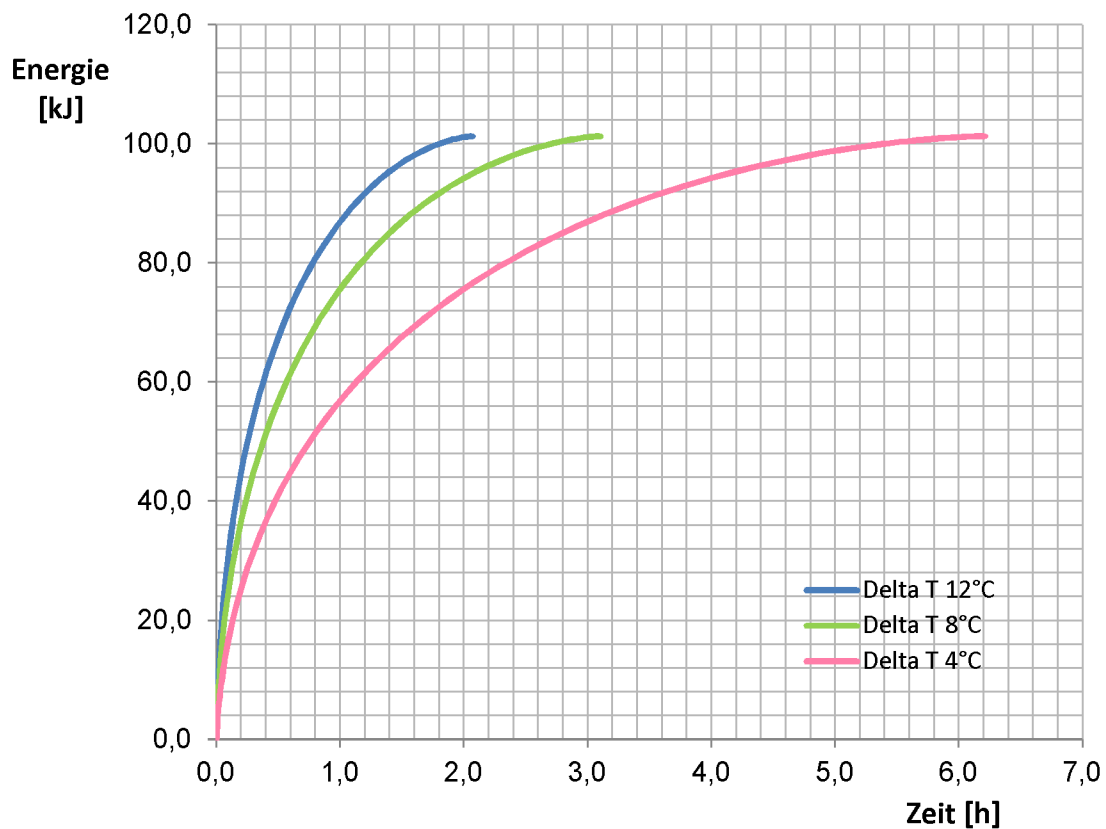
Bild 1.5 Anwachsen der Phasenfront in einer Kugel von 85 mm Durchmesser und gefüllt mit dem PCM-Material Nr. 3 von außen nach Innen



Material Nr.: 4 (JEKU-58)

Innere Kugel PCM-225-58°C





Material Nr.: 5 (JEKU-78)

Innere Kugel PCM-265-78°C

