

Heatcrete® – ein Spezialbeton für die Hochtemperatur-Wärmespeicherung



Dr. Jörg Dietrich,
Senior Projekt-
ingenieur

**Abt. Engineering
und Innovation**

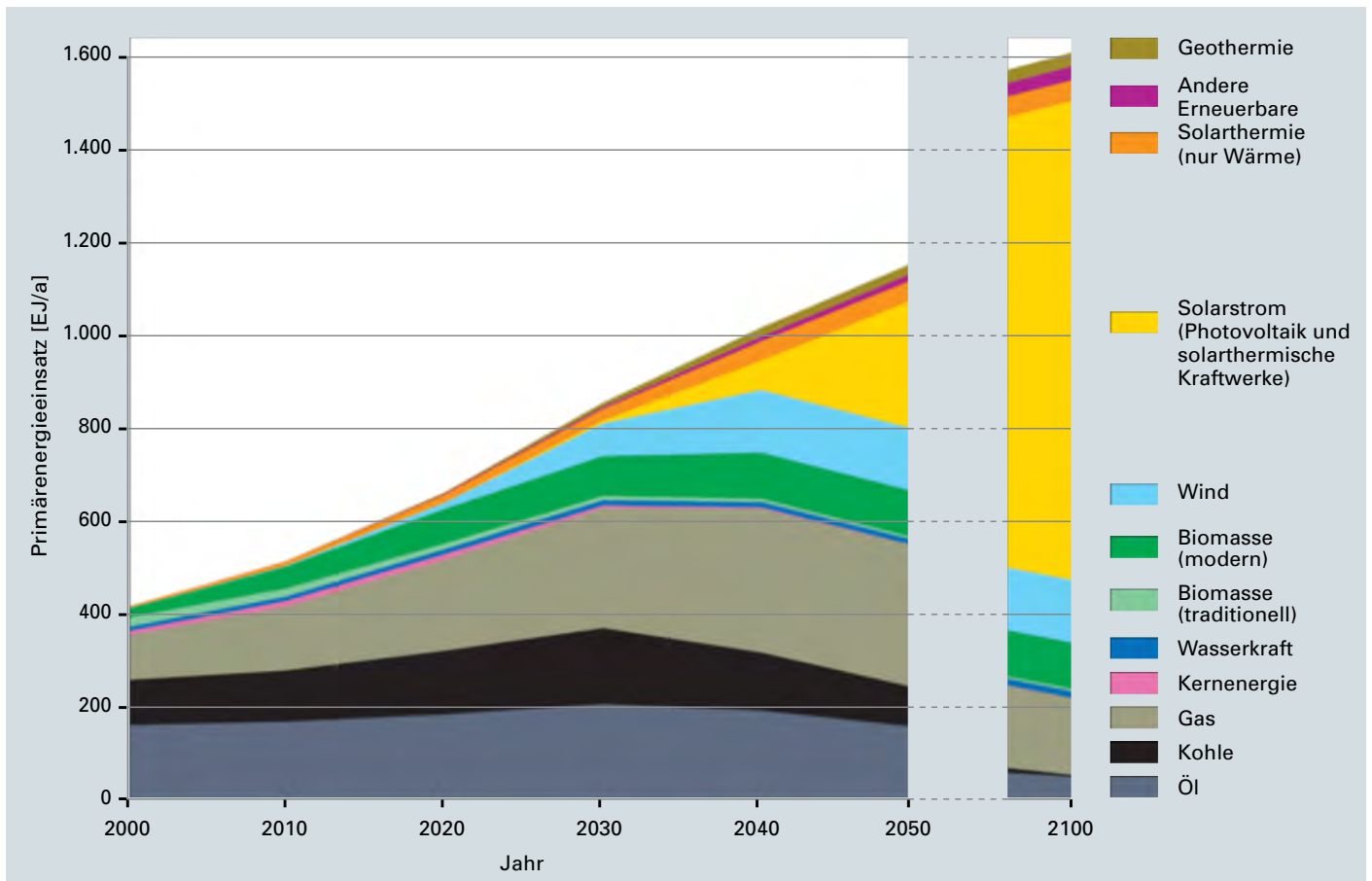
EINLEITUNG

In den letzten Jahren ist in Deutschland der Anteil der Stromproduktion aus regenerativen Energiequellen (z. B. Wind, Wasser, Sonne) stark angestiegen.

Während deutschlandweit die Gewinnung von Windenergie im Vordergrund steht, nimmt international die Solarenergie ebenfalls eine wichtige Rolle ein. Nach Einschätzung des wissenschaftlichen Beirates der Bundesregierung [1] werden zukünftig weltweit Solarkraftwerke und Photovoltaik-Anlagen sogar die vorrangigen Energieträger sein (Abbildung 1).

Parabolrinnenkraftwerke stellen den am häufigsten realisierten Solarkraftwerkstyp dar. Diese Kraftwerke bestehen aus großen Parabolspiegelfeldern. Sonnen-

strahlen, die auf die Spiegel einfallen, werden auf so genannte Absorberrohre gebündelt und erhitzen ein in den Rohren zirkulierendes Thermoöl. Mit dem bis zu 400 °C heißen Thermoöl wird in einem Wärmetauscher Wasser zu Dampf erhitzt. Der so erzeugte Wasserdampf treibt eine Turbine an und produziert hierdurch elektrischen Strom. Ein zentrales Problem, welches bei der Stromgewinnung durch Solarkraftwerke auftritt, ist der Umstand, dass diese nur tagsüber Strom produzieren. Eine breite Verwendung dieser Technik zur Grundlastabdeckung ist so nicht möglich.



↑ Abb.1: Prognose der Veränderung des weltweiten Energiemixes bis 2050/2100 (aus [1])

► Heatcrete® – ein Spezialbeton für die Hochtemperatur-Wärmespeicherung

Gelöst werden kann dieses Problem, wenn das Solarkraftwerk mit einer Einheit zur Wärmespeicherung gekoppelt wird. In dieser Konstellation kann überschüssige Wärme, die tagsüber anfällt und nicht für die Stromproduktion benötigt wird in den Wärmespeicher eingespeist werden. Mit der gespeicherten Wärme wird dann auch während der Nachtstunden Wasserdampf für den Antrieb der Stromturbinen erzeugt. Der Wirkungsgrad des Solarkraftwerks erhöht sich hierdurch drastisch.

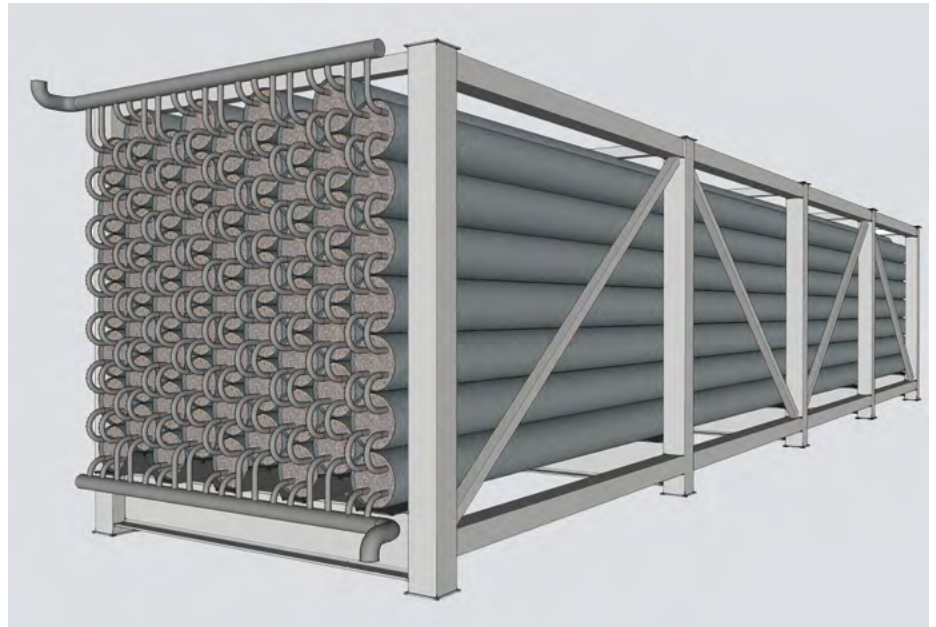
DER EnergyNest WÄRMESPEICHER

Das Wärmespeicherkonzept der Firma EnergyNest aus Norwegen ist genau auf die beschriebene Zwischenspeicherung großer Wärmemengen ausgelegt.

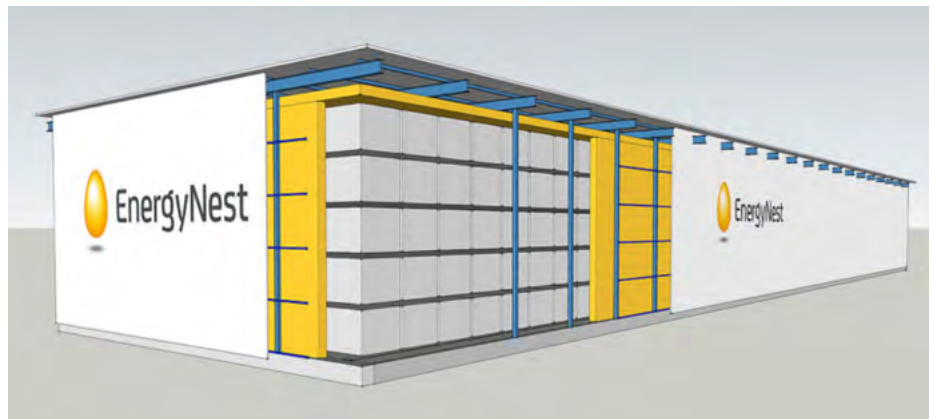
Der Kern des EnergyNest-Wärmespeichers sind Wärmetauschersäulen mit einem Durchmesser von ca. 25 cm und einer Länge von ca. 12 m, die in Stahlkassetten montiert sind (siehe Abbildung 2). Im Innern jeder Speichersäule befinden sich 2 parallele U-förmige Stahlrohre, die in den von HeidelbergCement entwickelten hochwärmeleitfähigen Spezialbeton Heatcrete eingebettet sind.

Beim Aufladen eines Wärmespeichermoduls während des Tages strömt heißes Thermoöl durch die in den Wärmetauschersäulen befindlichen Doppel-U-Rohre und überträgt dabei seine Wärmeenergie auf die Betonfüllung der Säulen. Beim nächtlichen Entladen des Speichers werden die Module mit Öl niedrigerer Temperatur durchströmt und die Betonfüllungen geben ihre Wärmeenergie wieder an das Öl ab. Die einzelnen Wärmetauschersäulen sind dabei parallel- bzw. in Reihe geschaltet, sodass jedes Speichermodul nur einen Zulauf und einen Ablauf benötigt (Abbildung 2).

Der modulare Aufbau ist der entscheidende Vorteil des EnergyNest Wärme-



↑ Abb. 2: EnergyNest-Wärmespeichermodul. Die Wärmetauschersäulen (Durchmesser ca. 25 cm; Länge ca. 12 m) sind mit Heatcrete gefüllt (aus [2]).



↑ Abb. 3: Der EnergyNest-Speicher besteht aus zahlreichen zusammenschalteten Einzelmodulen (aus [2]).

speichers. Die Größe des Gesamtspeichers kann so – wie bei einem Baukasten – einfach durch das Stapeln und Zusammenschalten von Einzelkassetten beliebig skaliert und an den projektspezifischen Speicherbedarf angepasst werden (siehe Abbildung 3).

Bei der Erstellung eines solchen Speichers werden zunächst die vorgefertigten Speichermodule bestehend aus den Stahlkassetten und den noch nicht

verfüllten Wärmetauschersäulen zur Baustelle transportiert und auf einem entsprechenden Fundament senkrecht aufgestellt.

Anschließend wird ein Spezialbeton mit hoher Leitfähigkeit in gut pumpfähiger Konsistenz ($\geq F3$) im Kontraktorverfahren in die Säulen eingebracht und mit Hilfe eines Innenrüttlers verdichtet. Hierdurch wird eine fehlstellenfreie Verfüllung der Wärmespeichersäulen erreicht.

► Heatcrete® – ein Spezialbeton für die Hochtemperatur-Wärmespeicherung

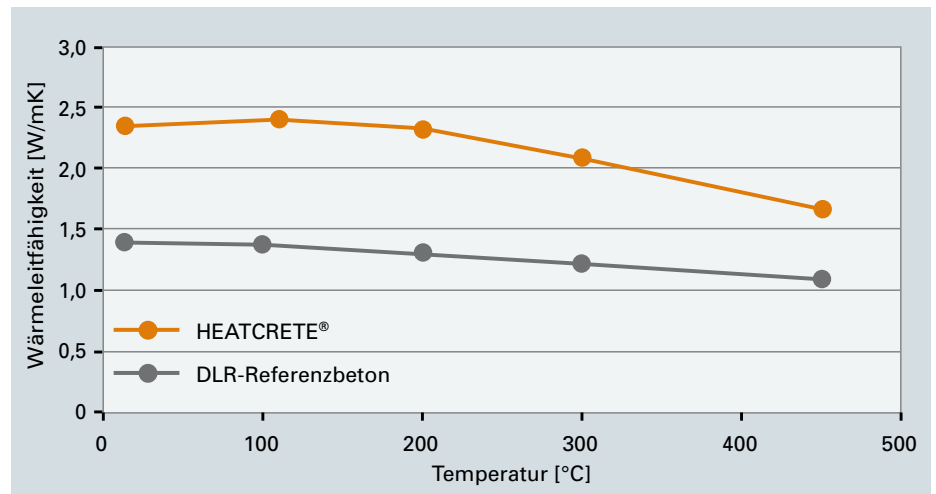
ENTWICKLUNG UND TECHNISCHE EIGENSCHAFTEN VON HEATCRETE®

Die zentrale Anforderung, die bei der Entwicklung eines Spezialbetons für den EnergyNest-Wärmespeicher erfüllt werden musste, war das Erreichen einer deutlich erhöhten Wärmeleitfähigkeit. Je höher die Wärmeleitfähigkeit des Wärmespeicherbetons ist, desto größer ist das Betonvolumen, in das pro Ladezyklus Wärme eingespeichert werden kann und desto größer ist die Effizienz bzw. die Wirtschaftlichkeit des Speichers.

Die Wärmeleitfähigkeit von trockenem Normalbeton beträgt bei Raumtemperatur ca. 1 W/m·K. Die Wärmeleitfähigkeit des vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) als Referenz geltenden Betons mit hoher Wärmeleitfähigkeit beträgt ca. 1,4 W/m·K. Im Zuge der Entwicklung des Spezialbetons Heatcrete konnte dieser Wert auf ca. 2,5 W/m·K gesteigert werden. Wie Abbildung 4 zeigt, übersteigt die Wärmeleitfähigkeit von Heatcrete über das gesamte betrachtete Temperaturspektrum den entsprechenden Wert des Referenzbetons des DLR.

Um auch bei hohen Gebrauchstemperaturen eine gute Wärmeleitfähigkeit zu erreichen, muss der Wasseranteil des Frischbetons möglichst gering gehalten werden. Andernfalls bleiben nach dem Aufheizen des erhärteten Heatcrete-Körpers und dem damit verbundenen Verdunsten des Wasseranteils luftgefüllte Kapillarporen zurück, die stark isolierend wirken.

Im Zuge der Produktentwicklung wurde daher durch entsprechende Optimierungsversuche die Rezeptur des Wärmespeicherbetons so eingestellt, dass bei geringen Wassergehalten eine gut pumpfähige Konsistenz (\geq F3) erreicht wird (siehe Abbildung 5).



↑ Abb.4: Wärmeleitfähigkeit von Heatcrete im Temperaturbereich bis 450 °C; Vergleich mit dem Wärmespeicherreferenzbeton des DLR (aus [2])

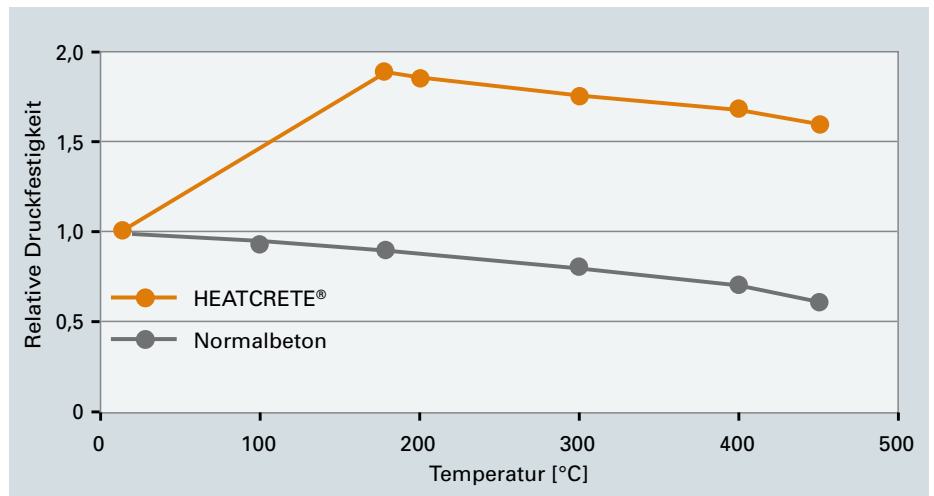


↑ Abb. 5.: Frischbetonkonsistenz Heatcrete

► Heatcrete® – ein Spezialbeton für die Hochtemperatur-Wärmespeicherung

Der erhärtete und getrocknete Heatcrete-Körper muss im Betriebszustand gegenüber Temperaturen zwischen 200 °C und 450 °C stabil sein. Um die Wärmebeständigkeit des Materials zu untersuchen, wurden umfangreiche Temperungsversuche mit Heatcrete-Probekörpern durchgeführt. Nach 28 Tagen Lagerung unter Normbedingungen erreicht Heatcrete eine einaxiale Druckfestigkeit von ca. 50 N/mm². Wird das Material anschließend getempert, so liegt einaxiale Druckfestigkeit nach dem Tempern der Probe deutlich über der Festigkeit vor dem Beginn der Temperung (siehe Abbildung 6). Im Gegensatz zu Normalbeton führt eine erhöhte Temperatur bei Heatcrete demnach zu einer Festigkeitszunahme.

Nach Abschluss der Entwicklungsarbeit im Labormaßstab wurde im Rahmen eines Technikumsversuches sowie eines Feldversuches im TBW Stockstadt (Heidelberger Beton GmbH) die darstellbare Verfüllqualität untersucht. Die zu verfüllenden Wärmetauschersäulen



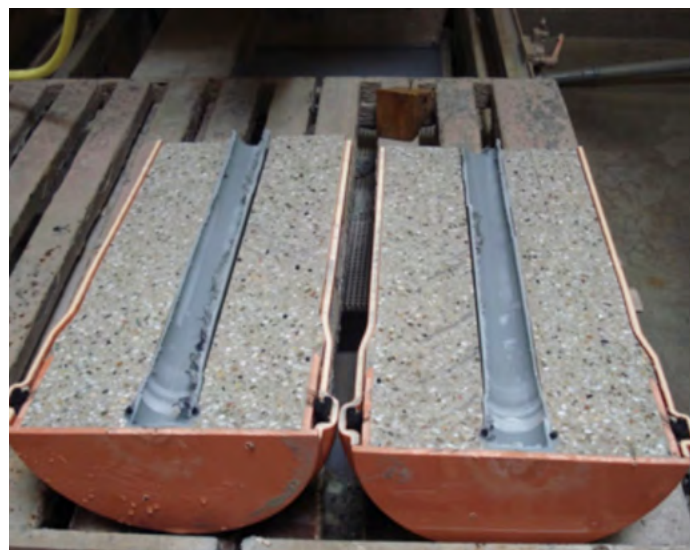
↑ Abb.6: Relative einaxiale Druckfestigkeit von Heatcrete im Temperaturbereich bis 450 °C; Vergleich mit Normalbeton (aus [2])

inklusive der zentralen Registerrohre wurden dabei durch 2 Meter hohe Kunststoffrohre (Durchmesser 25 cm) simuliert, in welche kleinere Rohre (Durchmesser 5 cm) zentrisch eingestellt wurden. Nach Aushärtung der Betonfüllung wurden die Rohre aufgesägt und es konnte in allen Fällen eine vollständige

Verfüllung des Säulenvolumens nachgewiesen werden (siehe Abbildung 7a). Durch den Feldversuch im TBW Stockstadt (siehe Abbildung 7b) konnte zudem nachgewiesen werden, dass sich Heatcrete mit der in Transportbetonwerken standardmäßig vorhandenen Mischtechnik problemlos anmischen lässt.



↑ Abb. 7a: Technikumsversuch zur Überprüfung



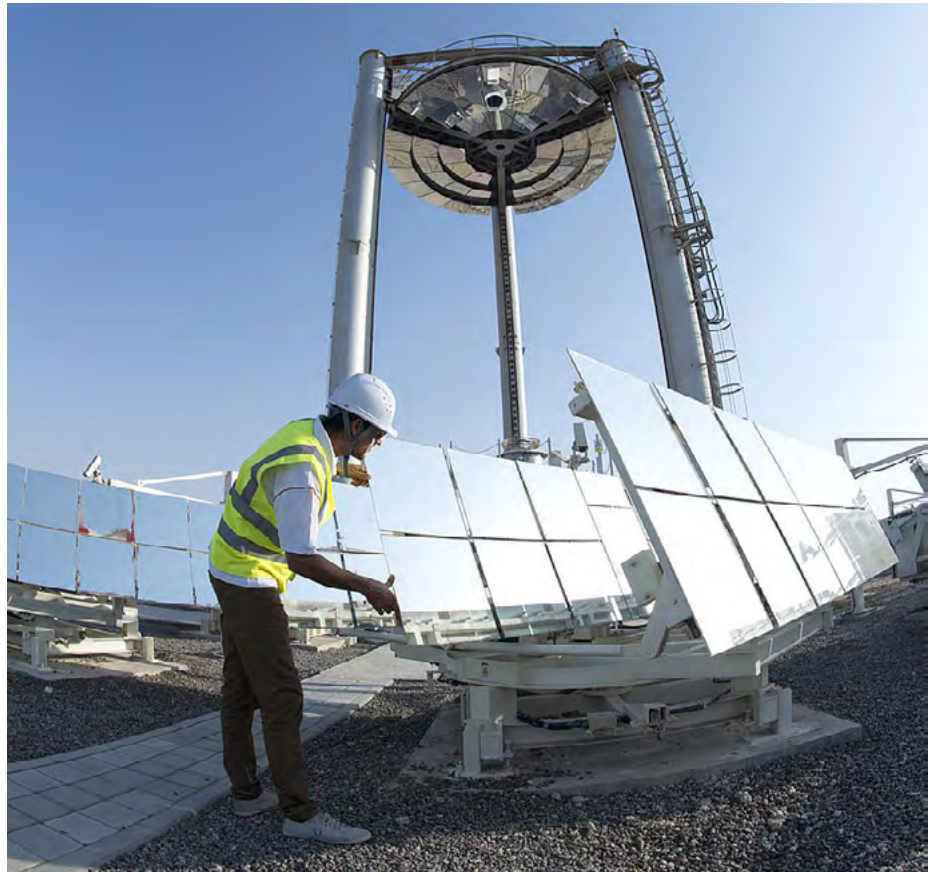
↑ Abb. 7b: Verfüllversuch im TBW Stockstadt der Verfüllqualität

► **Heatcrete®** – ein Spezialbeton für die Hochtemperatur-Wärmespeicherung**PILOTPROJEKT ABU DHABI**

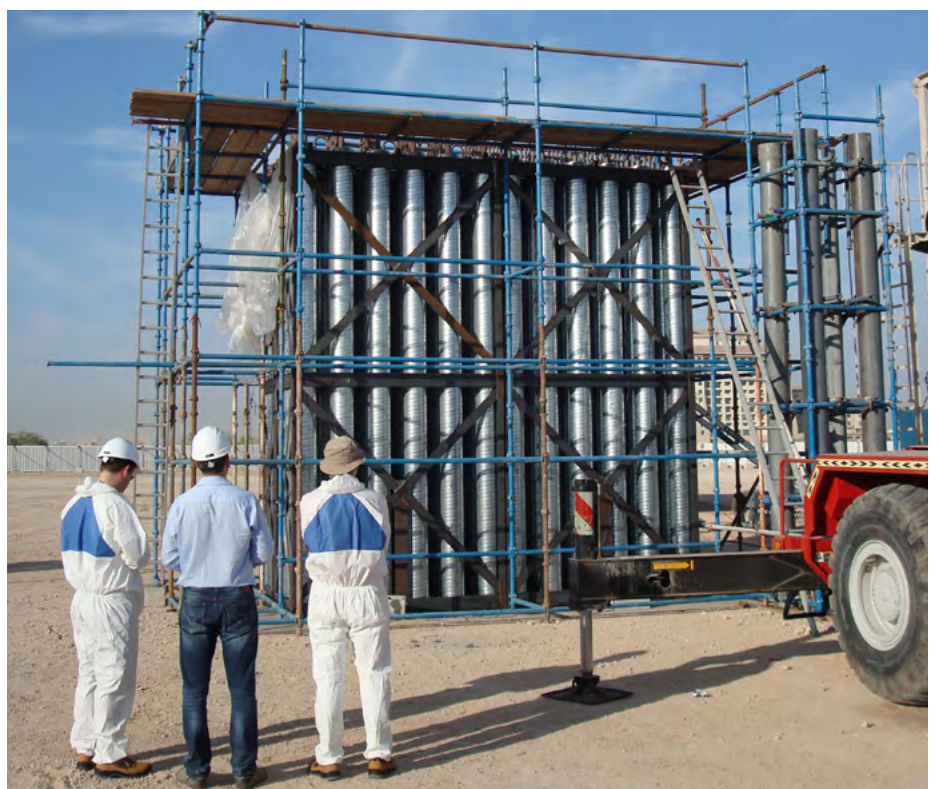
Nach dem erfolgreichen Abschluss der Produktentwicklung wurde in 2015 im Emirat Abu Dhabi ein Pilotprojekt mit einem Heatcrete-basierten EnergyNest-Speicher realisiert.

Direkt neben dem internationalen Flughafen von Abu-Dhabi-City findet derzeit der Bau der weltweit ersten CO₂-neutralen Stadt Masdar-City statt. Der Energiebedarf von Masdar-City soll dabei vorrangig durch Solarenergie gedeckt werden. Neben der größten Photovoltaikanlage im Mittleren Osten wurde ein solarthermisches Forschungskraftwerk errichtet. Kern dieses Solarturmkraftwerkes (siehe Abbildung 8) ist ein an der Oberseite des Solarturms positionierter Hyperbolspiegel, der die Strahlung eines um den Turm gruppierten Spiegelfeldes sammelt und auf die am Boden befindliche Receiver-Einheit (enthält den Dampferzeuger) bündelt.

Der im Bereich des Solarturmkraftwerkes errichtete Speicher besteht aus 4 Modulen, mit insgesamt 96 Wärmetauschersäulen von jeweils 6 m Höhe (Abbildung 9a). Das benötigte Speichervolumen wurde durch EnergyNest im Vorfeld des Projektes durch entsprechende Simulationsberechnungen ermittelt. Die für den Bau des Speichers benötigte Menge Heatcrete wurde als werksfertiger Trockenbeton in Big Bags angeliefert. Vor Ort wurde das Material dann mit Hilfe einer mobilen Betonmischanlage angemischt und im Kontraktorverfahren in die Wärmetauschersäulen eingebracht.



↑ Abb. 8: Solarturmkraftwerk in Masdar-City



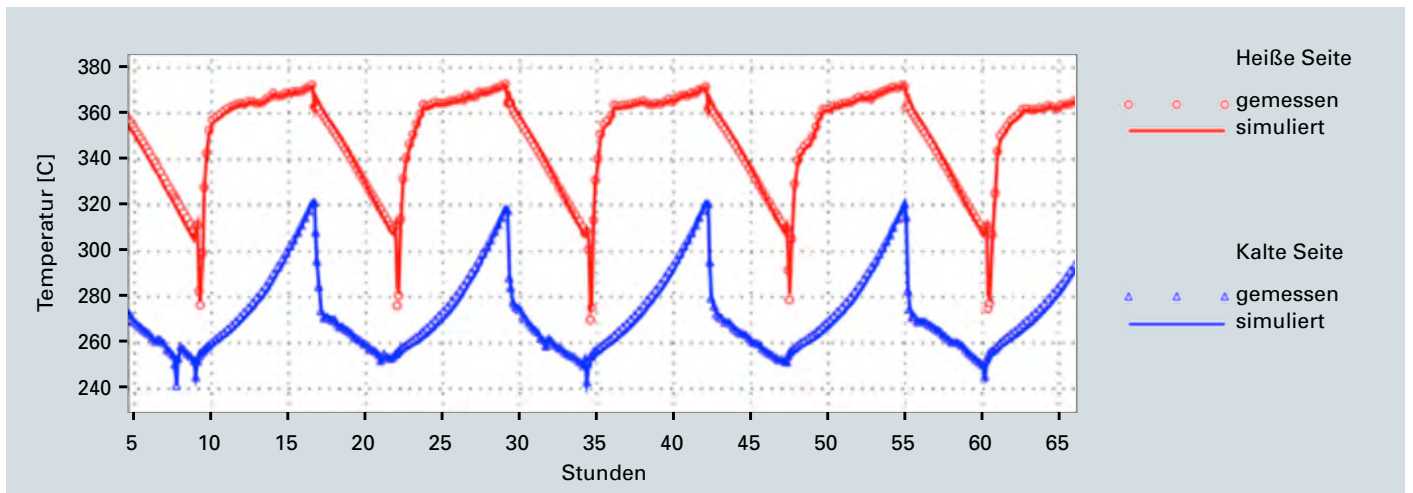
↑ Abb. 9a: EnergyNest-Speicher in Masdar-City während der Bauphase

► Heatcrete® – ein Spezialbeton für die Hochtemperatur-Wärmespeicherung

Nach Abschluss der Bauarbeiten und der vollständigen Erhärtung der Betonfüllung wurde der Speicher dann eingehaust, um die Wärmeverluste möglichst gering zu halten und schließlich an das Solarturmkraftwerk angeschlossen (Abbildung 9b). Am 01.05.2015 erfolgte die Inbetriebnahme der Speichereinheit. Bisher läuft der Speicher störungsfrei. Wie in Abbildung 10 anhand der Gegenüberstellung der vorab berechneten und der tatsächlich gemessenen Ladezyklen zu erkennen ist, liefert der Speicher exakt die angestrebte Performance und zeigt bisher keinerlei Änderungen in der Speicherkapazität.



↑ Abb. 9b: Fertiggestellter EnergyNest-Speicher



↑ Abb. 10: Gegenüberstellung der vorab simulierten sowie der während des Betriebs gemessenen Lade-/Entladezyklen des EnergyNest-Wärmespeichers in Masdar-City (aus [3])

► Heatcrete® – ein Spezialbeton für die Hochtemperatur-Wärmespeicherung

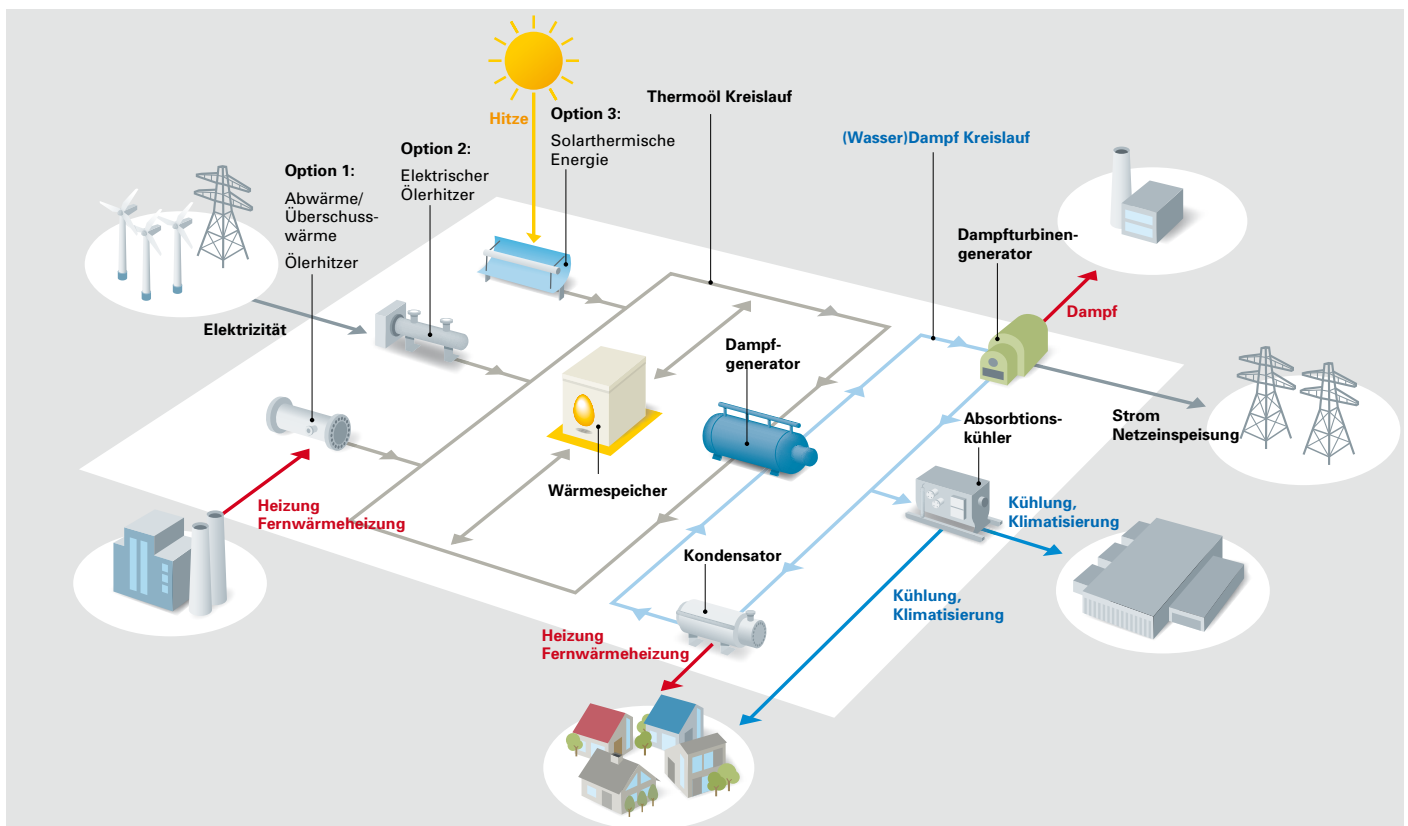
AUSBLICK

Die Anwendungsmöglichkeiten der beschriebenen Speichertechnologie sind nicht auf solarthermische Kraftwerke beschränkt. Insbesondere die Zwischenspeicherung von Abwärme aus energieintensiven Industrieprozessen stellt ein weiteres erfolgversprechendes Feld dar.

Die für Industrieprozesse typischen wechselnden Abwärmehraten können so vergleichmäßig und der Prozess kann somit als konstante Wärme- bzw. Stromquelle genutzt werden.

Zudem kann die im EnergyNest-System gespeicherte Wärmeenergie beispielsweise über Nah- bzw. Fernwärmenetze

verteilt und als Heizungswärme verwendet werden. Eine zusammenfassende Übersicht über die möglichen Anwendungsgebiete der vorgestellten Speichertechnologie (Stromerzeugung, Prozessdampferzeugung, Fernwärme, Klimatisierung/ Kühlung) ist in Abbildung 11 dargestellt.



↑ Abb. 11: Anwendungsmöglichkeiten der EnergyNest-Speichertechnologie

LITERATUR

- [1] WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DER BUNDESREGIEUNG, 2003. Welt im Wandel – Energiewende zur Nachhaltigkeit [online]. Berlin, Heidelberg: Springer [Zugriff am 07.02.2017]. Verfügbar unter: http://www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu.de/templates/dateien/veroeffentlichungen/hauptgutachten/jg2003/wbgu_jg2003.pdf
- [2] ENERGY NEST AS, 2017. Rethink Energy Storage [online]. Billingstad: EnergyNest [Zugriff am 08.02.2017]. Verfügbar unter: http://www.energy-nest.com/fileadmin/user_upload/downloads/EnergyNest_Brochure.pdf
- [3] HØIWIK, Nils, GREINER, Christopher, BELLIDO, Eva, BARRAGAN, Juan, BERGAN, Pål, SKEIE, Geir, BLANCO, Pablo, CALVET, Nicolas, 2016. Demonstration of EnergyNest Thermal Energy Storage (TES) Technology. In: 22nd SolarPACES Conference. Abu Dhabi, 11. bis 14. Oktober 2016.