

**Raumluftechnik, luftdurchströmte Schotterschüttung, Schotterspeicher, Luft-Erdreich-Wärmeübertrager**

Basierend auf den Ergebnissen des Forschungsprojektes „Erdwärmeübertrager mit luftdurchströmten Schotterschüttungen“, welches im Rahmen des LowEx-Verbundes im Zeitraum 11/2006 bis 04/2010 an der Westsächsischen Hochschule Zwickau, Fachgruppe Versorgungs- und Umwelttechnik, bearbeitet wurde, sind in den zurückliegenden Jahren eine Reihe von Raumluftechnischen Anlagen mit dieser Technologie ausgestattet worden, die durchweg über positive Betriebserfahrungen berichten. Das dieser Veröffentlichung zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem

**Construction, function and operating experience with air flowed gravel bed-systems (gravel storages)**

**air-conditioning systems, air flowed gravel bed, gravel storage, Air-to-ground heat exchanger**

Based on the results of the research project „air flowed gravel bed-systems“, which was developed within the framework of the LowEx network in the period from 11/2006 to 04/2010 at the university of applied sciences in Zwickau, Series of air-conditioning systems have been equipped with this technology, which consistently report on positive operating experience. The project underlying this publication was funded by the Federal Ministry of Economics and Technology on the basis of a decision of the German Congress under the promotion code 0327070W. Responsibility for the content of this publication



**Autor**

**Prof. Dr.-Ing. Mario Reichel**,  
Professor für Technische Gebäudeausrüstung/Regenerative Energiesysteme an der HTW Dresden

# Aufbau, Funktion und Betriebserfahrungen mit luftdurchströmten Schotterschüttungen (Schotterspeicher)

## Einleitung

Die Erhöhung der Energieeffizienz und Schonung der Ressourcen stellen die Herausforderung in sämtlichen Energie wandelnden Prozessen dar. Raumluftechnische Anlagen sind aus energetischer Sicht und zur Komfortsicherung immer häufiger ein unverzichtbarer Bestandteil in Gebäuden. Neben der Wärmerückgewinnung, die überwiegend den Heizfall energetisch unterstützt, ist die Kühlung eine weitere bedeutende Art der Luftaufbereitung.

Für kleine Luftvolumenströme bis ca. 3000 m³/h eignen sich zum Kühlen und Vorwärmen der Außenluft praxisbewährte Wärmeübertrager mit im Erdreich verlegten Rohren (z.B.: AWADUCT Thermo-Luft-Erdwärmetauscher [1]). Für große Luftvolumenströme alternativ eingesetzte Luftbrunnen bewirken nur eingeschränkte Kühlleistungen. Erdwärmeübertrager mit luftdurchströmten Schotterschüttungen stellen vor allem bei mittleren (ca. bis 10.000 m³/h) und großen (ca. bis 100.000 m³/h) Luftvolumenströmen einen geeigneten Kompromiss dar. In der Vergangenheit bereits praktizierte Einsatzfälle, vor allem in der Landwirtschaft, funktionierten – jedoch mangelte es an Dimensionierungs- und Optimierungsalgorithmen. Schwerpunkt der Forschungsarbeit waren Betrachtungen zur Dimensionierung, zur Vorausberechnung des Energieertrages, zur thermischen und hydraulischen Simulation und optimalen Betriebsweise.

In der Literatur existieren bereits einige Publikationen zur Anwendung von Gesteinsschüttungen zur Luftkonditionierung, z.B. in der Stalllüftung, wobei die in [2] ausgewiesenen Untersuchungen die Nutzbarkeit auch in der Raumluftkonditionierung umfassend nachwiesen.

Die wesentlichen Vorteile sind:

- Vorwärmung im Winterbetrieb, keine Frostschutzmaßnahmen für Wärmerückgewinnungssysteme
- im Sommer Luftkühlung mit sporadischer Entfeuchtung möglich, die Bereit-

stellung maschineller Kälte kann meist entfallen

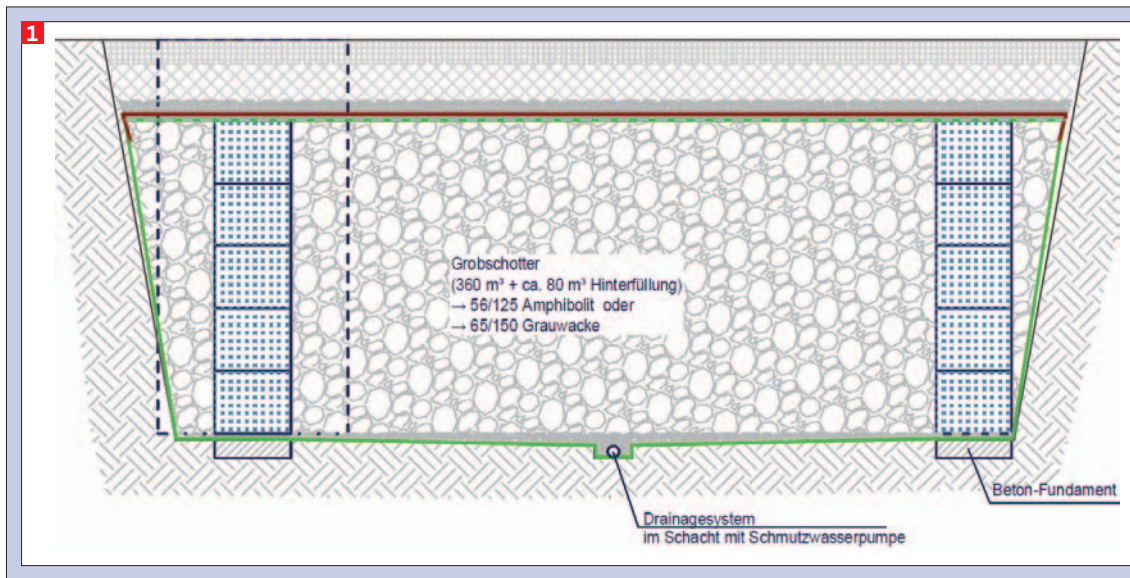
Weitere Vorteile sind:

- einfacherer Aufbau und einfache Integration in den Baukörper
- in der Regel preisgünstige Errichtung
- hohe Energiegewinne, geringe energetische Aufwendungen für zusätzliche Lufttransporte

Zwischenzeitlich konnte eine Vielzahl derartiger Anlagen konzipiert, geplant und gebaut werden, die sich durchweg durch positive Betriebserfahrungen auszeichnen, wenngleich in der Anfangsphase oft ein gewisser Aufwand für die Optimierung der Regelungstechnik von Nöten ist. Auch oftmals angezeigte Bedenken hinsichtlich der Lufthygiene erweisen sich bei korrekter Betriebsweise als unbegründet. Der Autor führt sein 23 Jahren einen Selbstversuch mit einer luftdurchströmten Schotterschüttung in Kombination mit einem kontrollierten Wohnungslüftungssystem ohne Negativmerkmale durch.

## Aufbau von luftdurchströmten Schotterschüttungen

Das Durchströmen von erdreichangekoppelten Schotterschüttungen mit Luft erfüllt mehrere Aufgaben und ermöglicht gleichzeitig eine signifikante Energieeinsparung. Dabei wird im Regelfall eine Grube im Untergrund mit einer bestimmten Geometrie hergestellt, mit wasserableitenden, vor Sedimenteintrag schützenden, luftführenden und ggf. wärmedämmenden Komponenten ausgestattet, mit Grobschotter gefüllt und als Wärmespeicher in ein Luftleitsystem integriert [3] (siehe auch Abb. 1). Der Vorteil ist der geringe Bauaufwand und die Möglichkeit der Lufterwärmung im Winter und der Luftkühlung im Sommer. Dadurch wird eine wesentliche Energieeinsparung erzielt und gibt die Möglichkeit, die nachgeschalteten Luftkonditionierungsapparate kleiner zu dimensionieren.



Konstruktionsquerschnitt luftdurchströmte Schotterschüttung (Beispiel)

nieren bzw. gänzlich weglassen zu können (Kühlung).

Mit Unterstützung der RLT-Anlage durch eine in den Lüftungs- und Klimatisierungsprozess integrierte luftdurchströmte Schotterschüttung soll es möglich sein, auch unter Beachtung hoher Komfortansprüche der Raumnutzer, Reserven konventioneller Energieträger zu schonen, die CO<sub>2</sub>-Bilanz des Gebäudes deutlich zu verbessern sowie Energiekosten zu minimieren. Die Abbildung 2 zeigt den Vergleich zwischen einem konventionellen Heiz- und Kältesystem und einem mit Schotterschüttung ausgestatteten System zur Versorgung einer Raumlufttechnischen Anlage.

Die luftdurchströmte Gesteinsschüttung besitzt eine quaderförmige Geometrie. Das Volumen ist vom Auslegungsluftvolumenstrom und der geforderten Speicherladedauer abhängig. Das Seitenverhältnis Länge x Breite x Höhe ist definiert, jedoch innerhalb bestimmter Grenzen variabel und kann somit an die örtlichen Gegebenheiten angepasst werden. Das System befindet sich regelmäßig unter der Geländeoberkante (GOK) bzw. innerhalb eines eigens dafür vorgesehenen Kellerraumes mit Erdreichankopplung. Es ist darauf zu achten, dass das gesamte Speichervolumen oberhalb des höchsten zu erwartenden Grundwasserspiegels liegt, ansonsten sind zusätzliche Bauaufwendungen (z.B. Weiße Wanne) notwendig. Der unterirdische Ausbau kann unter freiem Gelände aber auch unter Gebäuden mit thermischer Entkopplung erfolgen.

Der Schotterspeicher wird an seinen Seitenflächen durch ein geeignetes

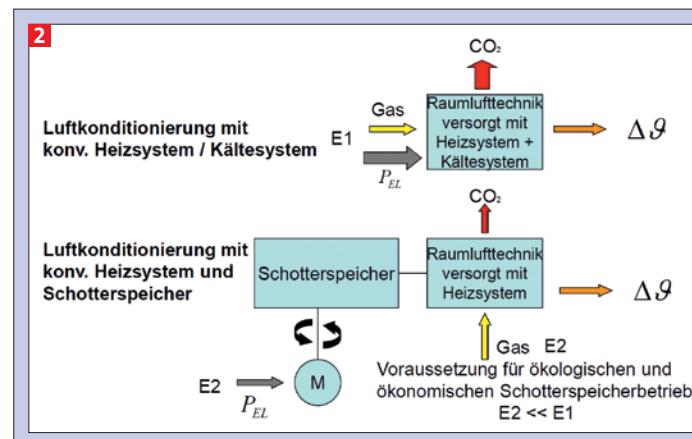
Luftverteilsystem und Luftsammelsystem begrenzt. Die beidseitigen Druckkammern bestehen i.d.R. aus handelsüblichen, luftdurchlässigen Bauelementen. Auf der Oberseite ist der Schotterspeicher mit einer wasserundurchlässigen Folie gegen eindringendes Oberflächen- oder Sickerwasser zu schützen. Die zur Belüftung des Gebäudes benötigte Außenluft wird über ein Luftansaugbauwerk dem Luftverteilsystem zugeführt, durch die Schotterhölräume transportiert und am Austritt des Speichers als thermisch aufbereitete Außenluft gesammelt, über einen Lüftungskanal dem RLT-Gerät zugeführt. Der Zuluftventilator, im Ausnahmefall ein Stützventilator, kompensiert die zusätzlichen Druckverluste. Zur Unterstützung der Regeneration der Schotterschüttung wird ein zusätzlicher Regenerationsventilator benötigt. Während der Regeneration ist die Außenluftzufuhr zum RLT-Gerät über einen Bypass und/oder eine weitere Außenluftansaugung

sicherzustellen. Die Regenerationsluft wird über eine hinreichend entfernte Ausblasöffnung ins Freie transportiert.

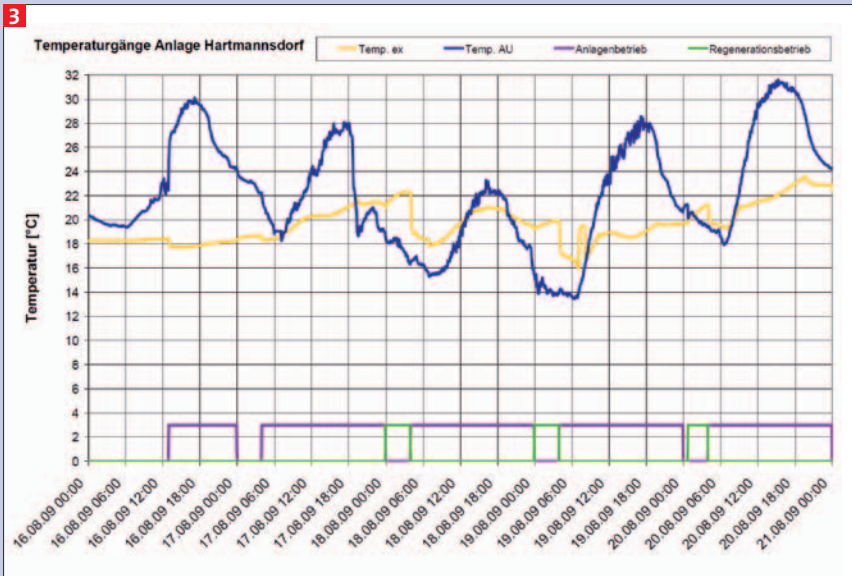
Da die Schotterschüttung üblicherweise seitlich und nach unten nicht hermetisch abgedichtet wird, kann Schichtenwasser in den Speicherkörper eintreten. Die durch den wesentlich größeren Hohlraumanteil bedingte Abnahme der Oberflächenspannung des Wassers führt zu einer Änderung der Fließrichtung. Das eintretende Schichtenwasser sammelt sich somit am Boden des Schotterspeichers und wird dort über entsprechende Drainageröhre abgeleitet.

### Funktionsweise

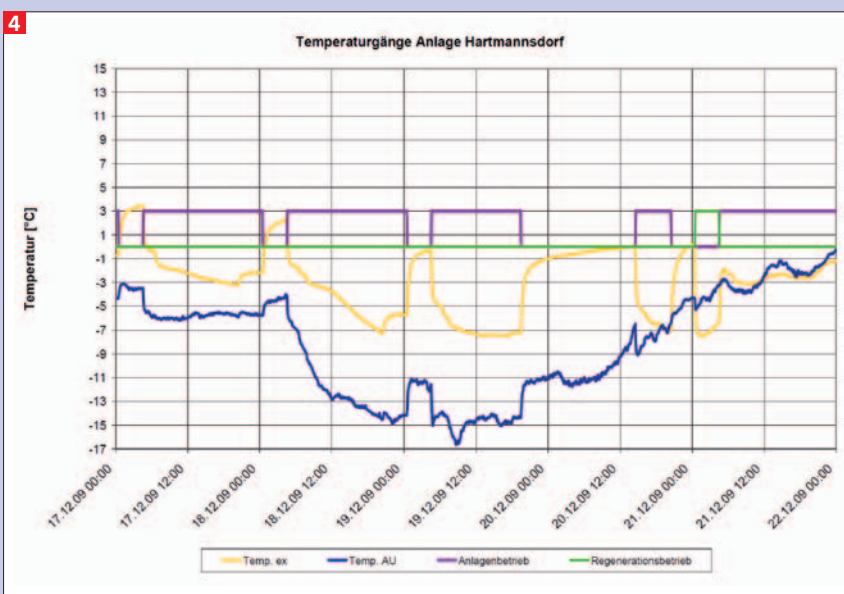
Die Betriebsweise des Systems gemäß [3] ist abhängig vom betrachteten Auslegungszustand. Deshalb muss zwischen den Auslegungszuständen im Sommer, im Winter und in der Übergangsperiode unterschieden werden. An einem Sommertag (Abb. 3) wird warme Außenluft durch die Schotterschüttung transpor-



Blockschaltbild RLT-Anlage ohne bzw. mit luftdurchströmter Schotterschüttung



Luftetrtritts- und Luftaustrittstemperaturen im Sommerfall (Beispiel)



Luftetrtritts- und Luftaustrittstemperaturen im Winterfall (Beispiel)

tiert. Die Gesteinsschüttung nimmt dabei einen Teil des sensiblen Wärmeinhaltes auf. Die Luft kühlt sich ab und kann i.d.R. ohne weitere thermische Aufbereitung dem Lüftungssystem zugeführt werden. In Ausnahmefällen muss die Nachkühlung und Entfeuchtung über konventionelle Komponenten im RLT-Gerät erfolgen. Neben der natürlichen Regeneration durch Wärmetransport in das begrenzende Erdreich kommt es in der Nacht ggf. zur unterstützenden Regeneration mit kühler Nachtluft mit Hilfe des zu aktivierenden Regenerationsventilators.

Im Winter (Abb. 4) erwärmt sich die kalte Außenluft in der Schotterschüttung

bis auf das Temperaturniveau des Vortages. Anschließend wird die so vorgewärmte Luft im RLT-Gerät z.B. durch die Wärmerückgewinnung und den Nacherhitzer auf die erforderliche Zulufttemperatur erwärmt und dem Lüftungssystem zugeführt. Zu Tageszeiten mit milderen Außenlufttemperaturen erfolgt die Unterstützung der natürlichen Regeneration durch den Regenerationsventilator.

In der Übergangsperiode ist es möglich, alle Betriebszustände zu durchlaufen. Das ist abhängig vom Niveau und dem Verlauf der Außenlufttemperatur. Zur Umsetzung des Regelregimes sind entsprechende Temperaturfühler zu po-

sitionieren und der Algorithmus einschließlich der Logik im programmierbaren Regler zu verankern.

In Abbildung 5 ist ein prinzipielles Schema zur Einbindung einer luftdurchströmten Schotterschüttung in ein RLT-Anlagensystem dargestellt.

### Dimensionierung von luftdurchströmten Schotterschüttungen

Um luftdurchströmte Schotterschüttungen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Randbedingungen optimal auslegen zu können, ist es notwendig, eine rechnergestützte Simulation durchzuführen. Basierend auf dem Anlagenentwurf (Vorbemessung) sollte das Optimum an thermischer Leistung sowie thermischer Energie unter Berücksichtigung des Bedarfes an elektrischer Energie zur Überwindung des Druckverlustes für die Simulation zur Verfügung stehen, wobei eine Vielzahl ortsgebundener und ortsunabhängiger Anfangs- und Randbedingungen zu definieren und in der Simulation zu berücksichtigen sind. Allerdings ist der Aufwand für eine thermische Simulation zum Zeitpunkt einer Vorplanung noch nicht gerechtfertigt. Es sollte daher ein Instrument verfügbar sein, mit dem auf einfachste Weise die Größenordnung einer zu entwerfenden luftdurchströmten Schotterschüttung abgeschätzt werden kann. Mit dem überschlägigen Speicherauslegungsverfahren besteht die Möglichkeit, das Volumen der Schotterschüttung zu bestimmen. Dabei werden verschiedene Varianten für definierte Volumenströme verglichen. Grundlage der Auslegung im Abschätzverfahren ist die Darstellung der verschiedenen Austrittstemperaturgänge des Speichers bei einem fest definierten Tagestemperaturgang eines extremen Sommertages. Der Vergleich basiert auf einer Leistungsabschätzung und ist für den Anlagenentwurf sehr hilfreich. Es kann auch eine Entscheidung darüber getroffen werden, ob sich der Bau einer luftdurchströmten Schotterschüttung unter den ortsgegebenen Umständen, wie zum Beispiel dem vorhandenen Baugrund, realisieren lässt. Weiterhin können die Ergebnisse aus dem Speicherauslegungsverfahren als Voraussetzung für die numerische Simulation genutzt werden.

Für die genaue Ermittlung des Einflusses unterschiedlicher (regional verfügbarer) und geeigneter Gesteinsmaterialien und Korngrößenverteilungen (Sieblinie) auf die Energiebilanz des Systems ist die rechnerbasierte Simulation ebenfalls not-



wendig. Die Dimensionierung erfolgt unter der Maßgabe einer Extremlastabdeckung. Grundlage der Auslegung im Abschätzverfahren ist die Darstellung der verschiedenen Austrittstemperaturgänge bei einem fest definierten Tagestemperaturgang eines extremen Sommertages. Für den Vergleich wurde bewusst ein Sommerauslegungszustand gewählt, um die Haupteigenschaft der Schotterschüttung, das Abkühlen der Außenluft tagsüber im Sommer, sicherzustellen.

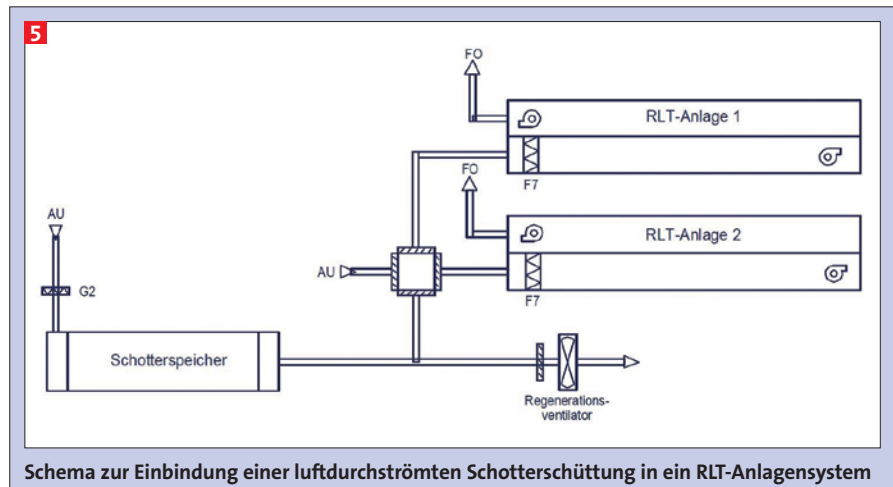
Hierzu wurden folgende Randbedingungen für alle untersuchten Fälle gleichermaßen definiert:

- Tagestemperaturgang der Luft Eintrittstemperatur
- Soll-Austrittstemperatur aus der Schotterschüttung
- Gesteinsanfangstemperatur in der Schotterschüttung
- Gesteinsart und die Korngrößenverteilung

Da es sich bei luftdurchströmten Schotterschüttungen meist um einen Tagesspeicher handelt, ist für die energetische Abschätzung ein Tagesgang als Betrachtungszeitraum hinreichend. Im Sommerauslegungszustand besteht die Funktionsweise der luftdurchströmten

#### 1 Entwurfstag zur Temperaturberechnung

| Extremer Sommertag = Entwurfstag |                 |
|----------------------------------|-----------------|
| Tagesstunde                      | Außentemperatur |
| 1                                | 21,5            |
| 2                                | 20,8            |
| 3                                | 20,4            |
| 4                                | 20,0            |
| 5                                | 20,2            |
| 6                                | 20,5            |
| 7                                | 22,0            |
| 8                                | 24,5            |
| 9                                | 27,0            |
| 10                               | 29,0            |
| 11                               | 31,0            |
| 12                               | 32,0            |
| 13                               | 32,7            |
| 14                               | 33,4            |
| 15                               | 33,8            |
| 16                               | 34,0            |
| 17                               | 33,5            |
| 18                               | 32,0            |
| 19                               | 30,0            |
| 20                               | 27,9            |
| 21                               | 26,0            |
| 22                               | 24,7            |
| 23                               | 23,5            |
| 24                               | 22,0            |



Schema zur Einbindung einer luftdurchströmten Schotterschüttung in ein RLT-Anlagensystem

Schotterschüttung darin, den Wärmeinhalt der Außenluft zu reduzieren und – neben der natürlichen Regeneration – in der Nacht, durch die mechanisch unterstützte Regeneration, wieder an die kühle Außenluft abzugeben. Da die Abkühlung des Schotters während der Nacht durch die Außenluft erfolgt, ist der kühlende Effekt am Tag auch durch das Nachttemperaturniveau begrenzt.

Der für die Auslegung herangezogene Entwurfstag stellt einen Sommertag mit einem extremen Außentemperaturgang dar. Dieser kann z.B. unter Verwendung der DIN 4710 für unterschiedlichste Regionen entwickelt werden.

In nachstehender Tabelle 1 ist das Beispiel eines Entwurfstages der Außenlufttemperatur definiert:

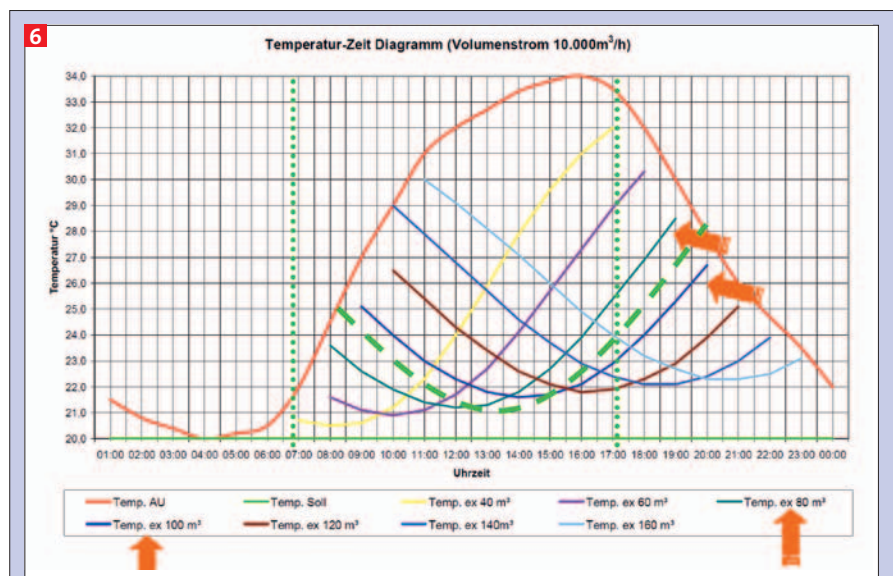
Die Anfangstemperatur der Schotterschüttung beträgt für alle betrachteten

Fälle 18 °C. Als Gesteinsmaterial wurde für das ausgewählte Beispiel Metagrauwacke mit einer Korngröße 45/150 definiert. Metagrauwacke besitzt mittlere wärmetechnische sowie ausgezeichnete materialtechnische Eigenschaften und ist u.a. für luftdurchströmte Schotterschüttungen sehr gut geeignet.

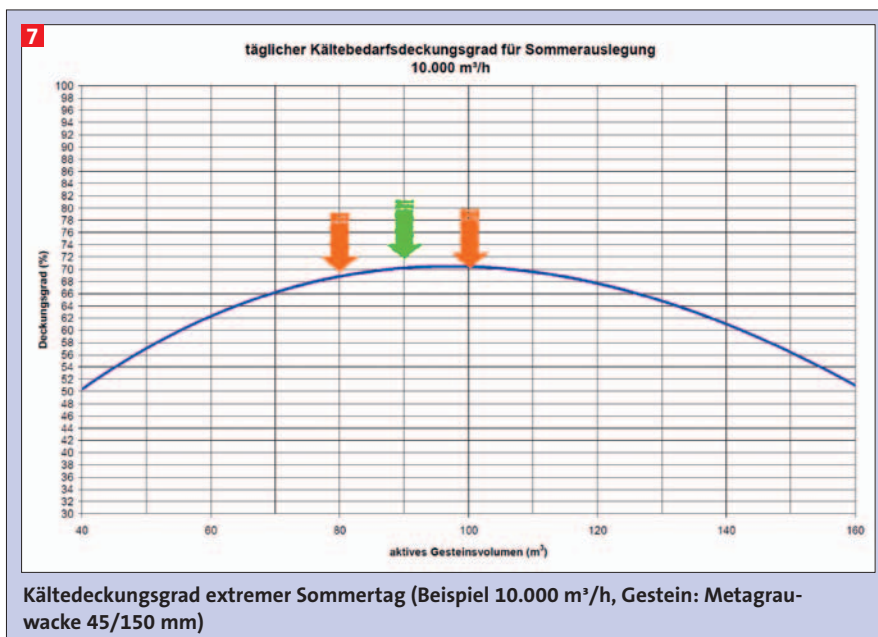
Berechnungen zum optimalen Speichervolumen mit anderen Gesteinsmaterialien zeigten, dass der Einfluss der Materialeigenschaften von typischen Gesteinsarten, im Gegensatz zum Luftvolumenstrom, auf die optimale Speichergröße von geringer Bedeutung ist [5].

Aus diesem Grund können die Ergebnisse des überschlägigen Speicherauslegungsverfahrens auf alle relevanten Gesteinsarten übertragen werden.

Um die energetisch günstigste Anlage zu erhalten, sind im Vorfeld folgende Be-



Auslegungsdiagramm extremer Sommertag (Beispiel 10.000 m³/h, Gestein: Metagrauwacke 45/150 mm)



triebsbedingungen vom Planer bzw. Anlagenbetreiber festzulegen:

- benötigter maximaler Luftvolumenstrom der RLT-Anlage
- notwendige Anforderungen an die Speichernutzdauer

Der Algorithmus zur Bestimmung der Luftaustrittstemperatur ist in [4] ausführlich beschrieben. Das Simulationsmodell betrachtet die Speicherränder als adiabat. Der durch die Simulationsberechnung ermittelte Kältegewinn am Tag resultiert einzig und allein aus dem Enthalpieunterschied zwischen der Tag- und Nachtluft. Die Abbildung 6 verdeutlicht die simulierten Verläufe der Austrittstemperatur für einen Luftvolumenstrom von 10.000 m³/h bei unter-

schiedlichen Schottervolumina. Den erreichbaren täglichen Deckungsgrad am extremen Auslegungstag zeigt das Diagramm in Abbildung 7 beispielhaft.

Zur Berechnung des täglichen Kältebedarfs bzw. der täglich bereitgestellten Kältemenge (Abb. 8) wurden die stündlichen Kältemengen über die tägliche Beladungszeit bei Speicherbetrieb summiert. Der Quotient aus Kälteangebot und Kältebedarf beschreibt den Deckungsgrad im Auslegungsfall.

Nachdem der Volumenstrom für das Gebäude bzw. die Gebäudeeinheit bekannt ist, muss die Kernbetriebszeit (Hauptnutzungszeit) festgelegt werden. So kann diese beispielsweise für ein Wohnhaus zwischen 15:00 Uhr und 21:00 Uhr, für eine Schule von 07:00 Uhr bis 16:00 Uhr oder für einen Bürokomplex

zwischen 08:00 und 19:00 Uhr liegen. Sollte der real benötigte Volumenstrom größer als der zu Grunde liegende Nennvolumenstrom der Berechnungsdiagramme sein, so müssen die geometrischen Verhältnisse des Speicherkörpers entsprechend des Verhältnisses der Volumenströme angepasst werden. Umgedreht gilt Gleiches für niedrigere Volumenströme. Aus dem Temperatur-Zeit-Diagramm des zutreffenden Volumenstromes lassen sich nun anhand der verschiedenen Luftaustrittstemperaturgänge geeignete Gesteinsvolumina zuordnen und der erreichbare Deckungsgrad am extremen Auslegungstag ermitteln.

### Dimensionierungsrichtwerte

Die nachstehenden Auslegungskriterien sind lediglich als Richtwerte für die überschlägige Dimensionierung von luftdurchströmten Schotterschüttungen anzuwenden. Es wird darauf hingewiesen, dass für eine ausführungsgerechte Dimensionierung die im Rahmen des Forschungsprojektes entwickelten Auslegungsunterlagen [7] als notwendig erachtet werden. Die nachfolgenden Richtwerte sind ohne Beachtung von Nutzerbetriebszeiten, Speicherbedauerdauer, Gesteinsmaterial, Untergrundbedingungen, Klimabedingungen, etc. zu verstehen.

Geometrie der Schotterschüttung:

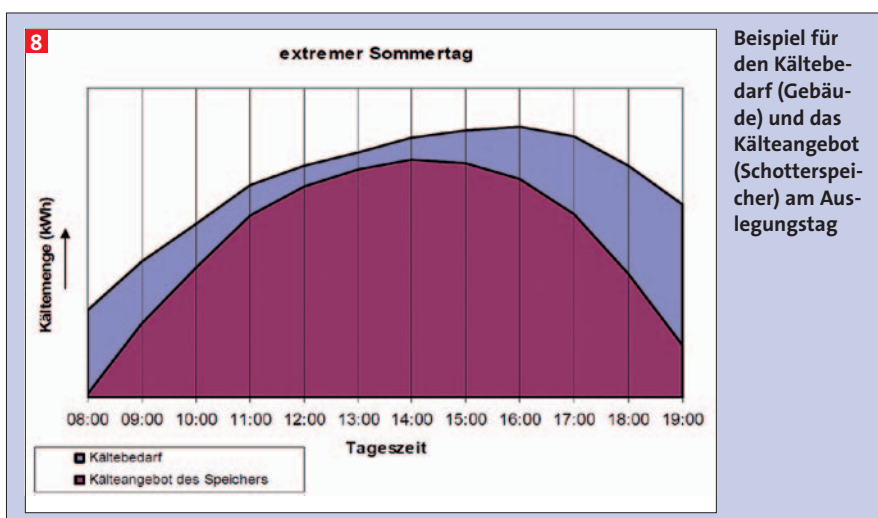
- Speichervolumen = Luftvolumenstrom [m³/h] / 120
- Speicherhöhe zwischen 1,5 m und 4 m
- Speicherbreite zwischen 1 bis 3 mal Speicherlänge
- Speicherlänge (in Strömungsrichtung) 4 m bis 7 m

Investitionskosten:

- Investitionskosten netto [€] = Speichervolumen [m³] x 300 [€/m³]
- In den Investitionskosten sind die durch die Systemanwendung bedingten Planungs-, Material-, Ausführungs- und die Kosten für die Regelungstechnik enthalten

Leistungsfähigkeit:

- zur Luftkühlung ca. 10 bis 12 K unter Maximaltemperatur
- zur Luftvorwärmung ca. 5 K bis 8 K über Minimaltemperatur
- max. Kälteleistung ca. 0,5 kW/m³ Schottervolumen
- max. Vorwärmleistung ca. 0,25 kW/m³ Schottervolumen
- Leistungszahl > 10



Energieeinsparung:

- Ca. 80 ... 90 % des Jahreskälteenergiebedarfes
- Ca. 5 ... 15 % des Jahresheizenergiebedarfes

CO<sub>2</sub>-Einsparung:

- Ca. 150 kg CO<sub>2</sub> pro Jahr auf 1 m<sup>3</sup> Schottervolumen

### Beispielobjekt „Produktionshallenlüftung“

Die luftdurchströmte Schotterschüttung soll der Raumkonditionierung einer Produktionshalle für mechanische Fertigung unter unterschiedlichen Lastbedingungen, insbesondere zur Begrenzung der sommerlichen Raumtemperaturen, dienen.

Für das System wurde das Monitoring über einen Zeitraum von 1 ½ Jahren durchgeführt und liefert so grundlegende Informationen über den Betrieb einer raumluftechnischen Anlage mit vorgeschalteter luftdurchströmter Schotterschüttung. Ziel war es, wesentliche Ergebnisse über das thermische sowie lufthygienische Verhalten und Erfahrungen über die Bautechnik zu sammeln. Die Ergebnisse zum Leistungs- und Ertragsverhalten in Abhängigkeit von der Jahreszeit, das „Erschöpfungsverhalten“ sowie die Betriebscharakteristik waren von wesentlichem Interesse.

Die Anlage ist für einen Nennvolumenstrom von 30.000 m<sup>3</sup>/h ausgelegt. Das dafür dimensionierte Speichervolumen hat eine quaderförmige Kubatur mit folgenden Abmessungen:

Höhe: 2,5 m  
Breite: 14,0 m  
Länge: 6,5 m  
Volumen: 227,5 m<sup>3</sup>

Als Gesteinsfüllung fand Metagrauwacke mit einer Kornverteilung 45/150 Verwendung. Diese wird von der Außenluft saugend durchströmt. Die Regeneration des Speichers erfolgt neben dem erdreichseitigen Wärmetransport mit Hilfe von durchströmender Außenluft. Der Speicherkörper wurde unterhalb der Bodenplatte der neu zu bauenden Produktionshalle eingebaut. Er ist weder thermisch noch hermetisch gegen das umschließende Erdreich abgedichtet. Zur stofflichen Trennung des Systems wurde der Gesamtkörper mit Geotextil umschlossen. Die Anbindung an das Luftleitungssystem erfolgt über monolithisch hergestellte Schächte. Abbildung 5 zeigt das technologische Verfahrensschema



Einbau einer luftdurchströmten Schotterschüttung (Projekt aus dem Jahr 2015 ist adäquat dem beschriebenen Projektbeispiel)

### 2 Regelstrategie Schotterschüttung

| Betriebsart                     | Sommerbetrieb mit Speicher                                                                                                   | Winterbetrieb mit Speicher                                                                                                               |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Temperaturbereich               | $t_{AU} > t_{Soll S}$                                                                                                        | $t_{AU} < t_{Soll W}$                                                                                                                    |
| Anlagenbetrieb                  | Frischluftbetrieb: Beide Ventilatoren sind in Funktion; Abluft ins Freie; die Leistung der Ventilatoren ist frei regulierbar | Mischluftbetrieb: außen-temperaturabhängige Zuschaltung und Drehzahlregelung der Ventilatoren; Abluft wird teilweise als Umluft gefahren |
| Funktionsweise Schotterspeicher | Kühlfunktion: Ist die Speichertemperatur niedriger als die Außentemperatur, so ist der Speicher in Betrieb                   | Vorwärmfunktion: Ist die Speichertemperatur höher als die Außentemperatur, so ist der Speicher in Betrieb                                |
| Regeneration Schotterspeicher   | Speicher wird regeneriert, wenn die Speichertemperatur höher ist als die Außentemperatur                                     | Speicher wird regeneriert, wenn die Speichertemperatur niedriger ist als die Außentemperatur                                             |
| Bemerkung                       | effektive Kühlung gewährleistet                                                                                              | effektive Vorwärmung gewährleistet                                                                                                       |

und Abbildung 9 den Einbauvorgang bevor der obere Abschluss des Speichers gegenüber dem Fußbodenaufbau thermisch entkoppelt überbaut wird. Der hintere Schacht dient als Außenluftansaugbauwerk (außerhalb der Halle), während der diagonal gegenüberliegenden vordere Schacht als Verbindung zur RLT-Zentrale dient. In die Außenluftansaugung ist ein Grobfilter der Klasse G 2 integriert. Die vorkonditionierte Außenluft wird anschließend den RLT-Geräten 1 + 2 zugeführt. Im Regenerationsfall wird

wiederum Außenluft über einen Axialventilator angesaugt und über eine separate Fortluftabführung über Dach abgegeben.

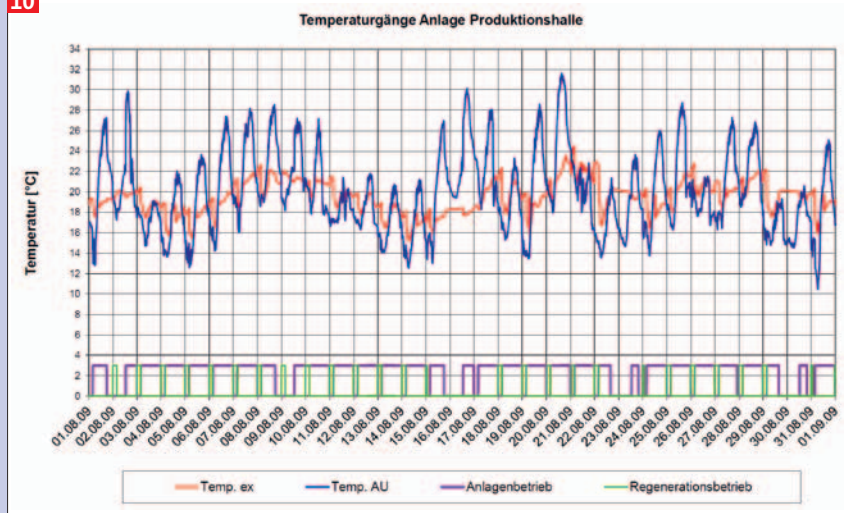
Die zwei gleichen RLT-Geräte 1 + 2 beinhalten je eine Mischkammer, Luftfilter F7, Wärmerückgewinnung, Nacherhitzer und Zuluftventilator und versorgen über das angeschlossene Luftleitungssystem die Produktionshalle. Im Winterfall wird Umluft mit Mindestaußenluftanteil gefahren. Das Betriebsregime erfordert in Tabelle 2 aufgeführte Regelstrategie.

### 3 Abkürzungen Temperaturen

| Abkürzung       | Erklärung                                                                                                           |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Temp. ex        | Schotterschüttungsaustrittstemperatur im Speicherbetriebsfall bzw. Speichereintrittstemperatur im Regenerationsfall |
| Temp. AU        | Außenlufttemperatur                                                                                                 |
| Temp. ZU        | Zulufttemperatur                                                                                                    |
| Speicherbetrieb | Anlage läuft im Speicherbetrieb, d.h. die Schotterschüttung wird in Betriebsrichtung durchströmt                    |

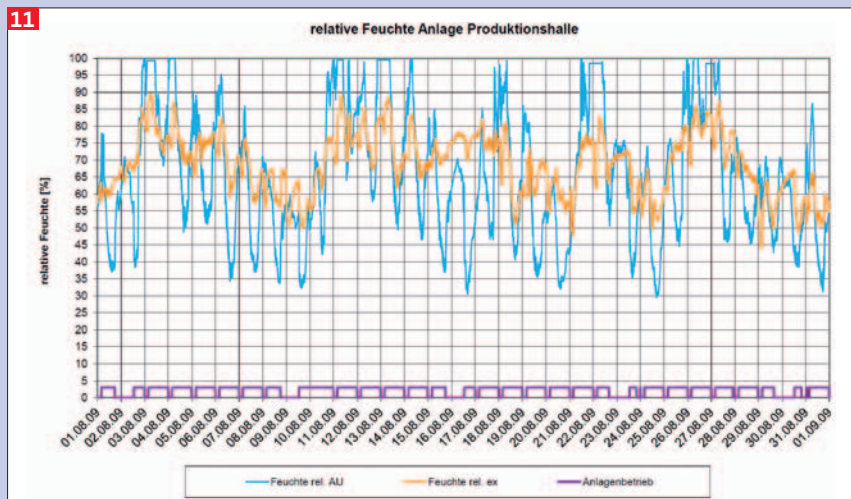


10



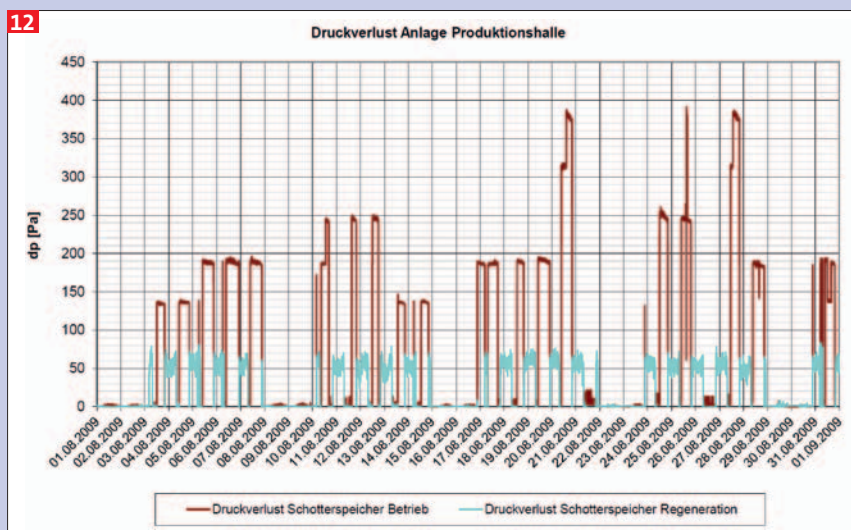
Temperaturverläufe im Monat August 2009 für Projektbeispiel

11



Verlauf der relativen Luftfeuchte im Monat August 2009 für Projektbeispiel

12



Druckverlust in der luftdurchströmten Gesteinsschüttung Monat August 2009 für Projektbeispiel

## Messergebnisse

Um die luftdurchströmte Schotterschüttung hinsichtlich ihres Betriebsverhaltens überprüfen zu können, sind an verschiedenen Stellen Messfühler installiert worden. Folgende Messgrößen bzw. aus Messungen berechnete Größen wurden überwacht:

- Luftvolumenstrom
- Differenzdruck
- Außenlufttemperatur
- Außenlufttemperatur im Ansaugturm über Dach
- Lufttemperatur im Schotterbett
- Gesteinsoberflächentemperatur im Schotterbett
- Gesteinskerntemperatur im Schotterbett
- Schotterspeicheraustrittstemperatur
- Zulufttemperatur
- Relative Luftfeuchte

Die Messwertaufnahme der Temperatur erfolgt kontinuierlich, unabhängig von der Betriebsart der Schotterschüttung bzw. des gesamten RLT-Systems. Die in der Legende benannten Abkürzungen stehen für die in Tabelle 3 näher bezeichneten Temperaturen.

Im Sommerbetrieb sorgt das System für eine deutliche Absenkung der Lufttemperatur, wie das Beispiel in Abbildung 10 zeigt.

In Abbildung 11 ist das Verhalten der relativen Luftfeuchte im gleichen Messzeitraum dargestellt und zeigt, dass praktisch niemals Kondensation auftritt bzw. sporadische Kondensation nur von kurzer Dauer ist. Diese Erfahrung haben auch die nachfolgenden Projekte bestätigt, wodurch die hygienische Unbedenklichkeit untersetzt und durch regelmäßige Hygienemessungen nach VDI-Richtlinie 6022 bisher bestätigt werden konnte.

In kühlen Nachtstunden folgt die Zulufttemperatur der Außenlufttemperatur, da die Anlage die Außenluft direkt ansaugt, so wie es das Regelungskonzept vorsieht.

Als Weiteres wurden die durchströmungsabhängigen Druckverluste gemessen und auszugsweise in Abbildung 12 dokumentiert. Die kurzzeitigen Spitzen sind auf lastbedingtes Hochfahren der Luftvolumenströme beider RLT-Anlagen auf Nennluftmenge zurückzuführen.

## Energetische Auswertung

Nachfolgend sind die Berechnungsergebnisse, basierend auf der Jahresaus-

wertung 2009, hinsichtlich der Kälteenergiebedarfsbewertung sowie der Kälteenergiebereitstellung der luftdurchströmten Schotterschüttung für eine durchschnittliche sommerliche Zulufttemperatur von 20 °C dargestellt. Der Energiebedarf ergibt sich aus der Enthalpiedifferenz zwischen der Außenluft und dem gewünschten Zuluftzustand unter Beachtung des durch die RLT-Anlagen geförderten Zuluftvolumenstromes. Je nachdem, ob die Außenluft wärmer oder kälter als der Sollwert der Zulufttemperatur ist, resultiert ein Wärme- oder Kältebedarf. Wie aus dem Regelungskonzept ersichtlich, kann mit dem Speicher eine aktive Kühlung bzw. Vorwärmung der Außenluft erfolgen.

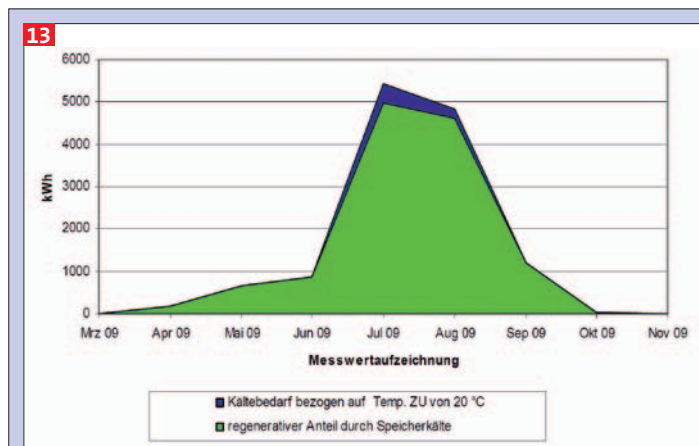
In der Abbildung 13 ist die Kältebedarfsdeckung grafisch aufbereitet. Im folgenden Flächendiagramm sind die monatlichen Energiemengen als Absolutwert aufgetragen. Die Fläche ist dabei nicht integrativ zu verstehen, sondern dient lediglich der besseren Veranschaulichung.

Den berechneten Heizenergiebedarf der RLT-Anlage und die durch die Schotterschüttung bereitgestellte anteilige Bedarfsdeckung für eine Heizperioden-Solltemperatur der Zuluft von 15 °C zeigt Abbildung 14. Defizite sind durch Wärmerückgewinnung, Umluftbeimischung und/oder Nachheizung zu kompensieren.

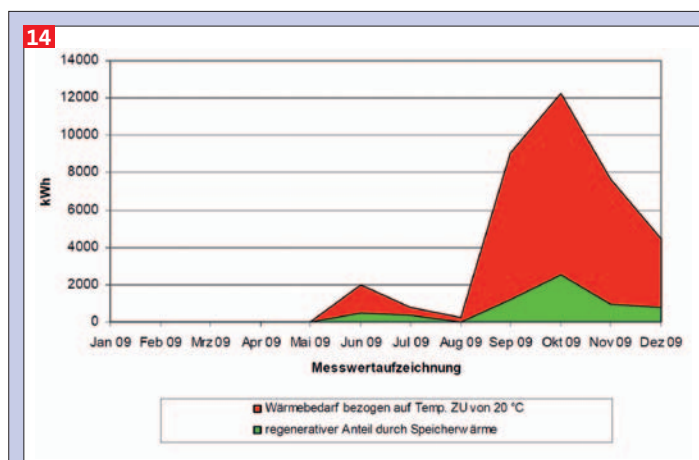
Der Rückgang des Wärmebedarfs in den Monaten November und Dezember ist mit der Reduzierung des Außenluftvolumenstromes begründet, der über den Schotterspeicher geführt wird. Durch den Umluftanteil oder eine effektive Wärmerückgewinnung kann, wie im Fallbeispiel, auf ein Nachheizregister verzichtet werden.

Abschließend soll auf die monatlich ermittelten Arbeitszahlen für die Zulufttemperatur von 20 °C eingegangen werden. Die Ergebnisse zeigen die Darstellungen in Abbildung 15.

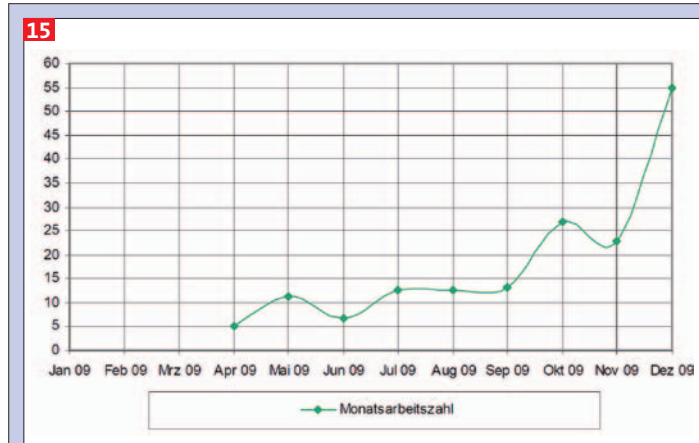
Durch die Aufzeichnung der Volumenströme und die Messung der Druckverluste war es möglich, den für den Zuluftventilator notwendigen Mehraufwand an elektrischer Antriebsenergie zu bestimmen. Dieser resultiert aus den zusätzlichen Druckverlusten im Schotterspeicher und den zusätzlich notwendigen Luftleitungsbauteilen wie Luftverteilsystem, Filter etc. Die monatlich gewonnene Kälte- bzw. Wärmeenergiemenge des Speichers wird durch die zusätzlich aufgewendete Antriebsarbeit



Kältebedarfsdeckung und gespeicherte Kälteenergie im Jahr 2009 für Projektbeispiel



Heizenergiebedarfsdeckung und gespeicherte Wärmeenergie/Kälteenergie im Jahr 2009 für Projektbeispiel



Aus Energiebilanzierung ermittelte monatliche Arbeitszahlen Kälteenergie im Jahr 2009 für Projektbeispiel

des Ventilators dividiert, wodurch die durchschnittliche monatliche Arbeitszahl bestimmt werden konnte.

Im gesamten Betriebszeitraum 2009 arbeitete die luftdurchströmte Schotterschüttung hocheffizient und erwirtschaftete damit eine energetische Einsparung von 18,9 MWh thermischer Nutzenergie. Dem steht ein Mehraufwand von 1415 kWh elektrischer Energie gegenüber. Die Jahresarbeitszahl

des Systems weist einen Wert von 13,3 auf und zeigt, dass der effektive, ökonomisch wirtschaftlich und ökologisch sinnvolle Einsatz von luftdurchströmten Schotterschüttungen bei optimaler Auslegung und Betriebsweise zur Konditionierung von Außenluft möglich ist und hygienische Bedenken bei fachgerechter Betriebsweise unbegründet sind bzw. bisher keine Negativmerkmale aufweisen.



## Zusammenfassung

Die Energieeffizienz von Raumlufttechnischen Anlagen kann durch vorgeschaltete Erdwärmeübertrager mit luftdurchströmten Schotterschüttungen signifikant erhöht werden. Basierend auf bereits existierenden Anwendungen, vor allem in der Landwirtschaft aber auch vereinzelt im Komfortbereich, konnten im Rahmen eines BMWI-geförderten Forschungsprojektes an der Westsächsischen Hochschule Zwickau umfangreiche theoretische und praktische Untersuchungen vorgenommen werden, die die optimierte Dimensionierung, Vorausberechnung und Betreibung von luftdurchströmten Schotterschüttungen zulassen. Neben Betrachtungen zu den thermischen und geometrischen Eigenschaften von Schotterschüttungen konnte durch die Simulation des Be- und Entladevorganges während der Luftdurchströmung eine optimale Speichergeometrie entwickelt und messtechnisch nachgewiesen werden. Weitergehende Betrachtungen zu konstruktiven Lösungen, zum Strömungsverhalten und Druckverlustbestimmung sowie zur Be-

triebsweise und nicht zuletzt hygienische Untersuchungen ermöglichen die praxistaugliche Anwendung.

Dadurch kann nicht nur Heizenergie gespart und das Frostrisiko an Wärmerrückgewinnungseinrichtungen gemindert werden, sondern meist auf den Einsatz von Luftkühleinrichtungen gänzlich verzichtet werden. Bei erhöhten Klimanforderungen reduziert sich jedoch zumindest die Größe und Betriebshäufigkeit von maschinellen Kälteerzeugungsanlagen zur Luftkonditionierung.

Das vorgestellte Vorbemessungsverfahren gestattet die Abschätzung der Speichergröße und der Speicherkosten und dient somit als zweckmäßiges Instrument der konzeptionellen Anlagenplanung. Anhand eines Beispielpjektes, welches eine Schotterschüttung in die RLT-Anlagen zur Konditionierung einer Produktionshalle einbezog, konnten umfangreiche Messungen, Auswertungen und Optimierungen vorgenommen werden. Diese Ergebnisse fanden bereits in vielen nachfolgenden Projekten Anwendung. Die vorliegenden Ergebnisse lassen auf eine energieeffiziente technische

Lösung schließen, die sich durch hohe Wirtschaftlichkeit auszeichnet.

## Literatur

- [1] [www.rehau.de/bau/tiefbau/erdwaerme.geothermie/awadukt.thermo.luft-erdwaermetauscher.shtml](http://www.rehau.de/bau/tiefbau/erdwaerme.geothermie/awadukt.thermo.luft-erdwaermetauscher.shtml)
- [2] „Untersuchungen an luftdurchströmten Erdwärmeübertragern“, Dissertation, Dipl.-Ing. Ulrich Arndt, 1989
- [3] Patentschrift „Luftdurchströmter Speicher zum Kühlen und Vorheizen und damit aufgebaute zentrale Lüftungsanlage“, Aktenzeichen: DE 10 2008 051 270 A1; Anmeldetag: 10.10.2008; Offenlegungstag: 15.04. 2010; Anmelder: Reichel, Mario, Prof., Dr.-Ing., 09244 Lichtenau DE
- [4] Glück, B.: Luftdurchströmter Schotterspeicher – Wärmetechnisches Simulationsmodell, Interner Forschungsbericht von F+E TGA Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück, 2007
- [5] Stieber, R.; Reichel, M.: Materialeigenschaften und Eingabegrößen für die Simulation von Schotterspeichern, HLH Heft 2 – 2009
- [6] Stieber, R.; Reichel, M.: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „Erdwärmeübertrager mit luftdurchströmten Schotterschüttungen“, Thematischer Verbund LowEx, Förderkennzeichen 0327070 W, BMWI – Projektträger Jülich, 2010