

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK IBP

**MAGNESIA HSM – EIN NEUER ÖKOLOGISCHER SCHAMOTTERSATZ;
ENTWICKLUNG EINER NEUARTIGEN WÄRMESPEICHERGUSSFORM
UND ANALYSEVERFAHREN**

**ABSCHLUSSBERICHT ÜBER EIN FORSCHUNGSPROJEKT GEFÖRDERT DURCH
„ZENTRALES INNOVATIONSPROGRAMM MITTELSTAND“ (ZIM) DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (BMWI) – FUE-
KOOPERATIONSPROJEKTE (ZF4109001HF5)**

Dr.-Ing. Mohammad Aleyssa

Prof. Dr.-Ing. Philip Leistner

Stuttgart, 09. Juni 2017

Vorwort:

Der vorliegende Abschlussbericht zum Thema „MagnesiaHSM – Ein neuer ökologischer Schamottersatz; Entwicklung einer neuartigen Wärmespeichergussform und Analyseverfahren“ entstand im Fachgebiet Verbrennungssysteme des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP im Rahmen des Projekts mit dem Förderkennzeichen ZF4109001HF5 von November 2015 bis April 2017.

Unser herzlichster Dank geht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie BMWi und an den Projektträger AiF Projekt GmbH für die administrative und finanzielle Unterstützung zur Durchführung dieses Projekts.

Danken möchten wir auch der ARGE K33.AI in München, die dieses Projekt sowohl fachlich als auch technisch unterstützt und mit durchgeführt hat.

Ferner gilt unser Dank allen involvierten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sowie Diplomanden und Doktoranden des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP für ihre kooperative und produktive Zusammenarbeit.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Gefördert durch:

AiF Projekt GmbH
ZIM - Kooperationsprojekte
Tschaikowskistraße 49
13156 Berlin



Kooperationspartner:

ARGE K33.AI

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	10
2	Ziele und Inhalt des Projekts	11
3	Stand des Wissens und der Technik	13
3.1	Spezifische Wärmekapazität c_p	13
3.2	Wärmeleitfähigkeit λ	14
3.3	Speichermaterialien im Bereich von Holzfeuerungen	14
4	Technische Einrichtungen für die Laboruntersuchungen	17
4.1	Differenzthermoanalyse – Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität	17
4.2	Plattengerät zur Prüfung der Wärmeleitfähigkeit λ	20
4.3	Prüfstand mit den entsprechenden Abgasmesssystemen, Datenerfassungs- und Auswerteprogrammen	20
5	Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen und anderer wesentlicher Ergebnisse	22
5.1	Ergebnisse im Rahmen der Laboranalysen	22
5.2	Ergebnisse aus dem Versuchsstand	26
5.3	Validierungsmessungen an einer realen Einzelraumfeuerungsanlage - freistehender Raumheizer gemäß DIN EN 13240 (indirekte Variante bzw. Wärmeübertragung)	49
5.4	Validierungsmessungen an realen Feuerungsanlagen – Herd nach DIN EN 12815 (direkte Variante bzw. Wärmeübertragung)	63
5.5	Temperaturwechselbeständigkeit/Langzeitbeständigkeit	69
6	Zusammenfassung	77

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	DSC 404 zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität.	19
Abbildung 2:	Plattengerät zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit.	20
Abbildung 3:	Kalorimeterraum des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP.	21
Abbildung 4:	Links: Versuchsstand des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP für Messungen unter reproduzierbaren Bedingungen zur Entwicklung ökologischer Speichersteine als Schamottersatz für den Einsatz in biomassebetriebenen Einzelraumfeuerungsanlagen. Rechts: CAD-Schnittzeichnung des Versuchsstands.	28
Abbildung 5:	Gussform/Verschalung zur Herstellung der Probekörper.	30
Abbildung 6:	Im Versuchsstand installierte Probekörper; links: Probekörper-HBO+ (Höhe=1,08 m; Gewicht=80,8 kg), rechts: gegossener Probekörper-HSM79A (Höhe=1,08 m; Gewicht=82,7 kg).	31
Abbildung 7:	Wärmebilder der untersuchten Speichersteine; Untersuchungsparameter: Variante I (Speicherstein ist direkt mit dem Heizmedium in Kontakt), Strömungsgeschwindigkeit von 1,0 m/s, Unterdruck von 12 Pa, Probeneintrittstemperatur von 200 °C und einer Aufheizphase von 8 h; Anmerkung: links = HBO+, rechts = HSM 79A.	41
Abbildung 8:	Im Versuchsstand installierter Probekörper-91F.2 (Höhe=1,08 m; Gewicht=85,2 kg).	46
Abbildung 9:	Für die Versuche eingesetzter Raumheizer mit einem Wärmespeichermodul; Anmerkung: im Originalzustand (Schamott) sowie in der EcoMag-Variante (Feuerraumauskleidung mit der feuerfesten Mischung 91Z und 4x Speichersteine aus 99A).	50
Abbildung 10:	EcoMag Feuerraumauskleidung FFS 91Z; Anmerkung: links: Rohzustand; rechts: Nach dem ersten Heizbetrieb.	51
Abbildung 11:	Original Speichermodul aus Schamott (2 von insgesamt 8 Speichersteinen).	57
Abbildung 12:	Hergestellte Speichermodule; Anmerkung: linke Seite = HSM 99A sowie die Gussform für den Probekörper (Masse: 35,1 kg bestehend aus zwei Teilen); rechte Seite = HSM 99B (Masse: 23,0 kg bestehend aus vier Teilen).	58
Abbildung 13:	Im Nachheizkasten des Raumheizers installierte Speichermodule; Anmerkung: oben = original	

	Speichermodul (Masse: 34,5 kg), unten = EcoMag HSM 99A Speichermodul (Masse: 35,1 kg).....	60
Abbildung 14:	Auf dem Herd installierte Speichermodule (direkte Wärmeübertragung); Anmerkung: links = Schamott(HSM)-Speichermodul (Masse: 50,1 kg), rechts = EcoMag 79A-Speichermodul (Masse: 42,2 kg), nicht abgebildet = EcoMag 91.F-Speichermodul (Masse: 43,5 kg).....	64
Abbildung 15:	Proben bei 1.000 °C im Muffelofen.	69
Abbildung 16:	EcoMag FFS 91Z (nicht konditioniert) nach dem 1. Anheiz- und Abkühlzyklus (Entfärbung, deutliche Rissbildung).....	70
Abbildung 17:	EcoMag FFS 91Z (nicht konditioniert) nach dem 2. Anheiz- und Abkühlzyklus (Zerstörung der Proben).....	71
Abbildung 18:	EcoMag FFS 91Z (konditioniert) nach dem 2. Anheiz- und Abkühlzyklus (Zerstörung der Probe).....	71
Abbildung 19:	Schamotte HBO+ (konditioniert) nach dem 1. Anheiz- und Abkühlzyklus (oberflächliche, kleine Risse).	72
Abbildung 20:	Schamotte HBO+ (konditioniert) nach dem 2. Anheiz- und Abkühlzyklus (unverändert im Vergleich zu Zyklus 1, Probe intakt).....	72
Abbildung 21:	Schamotte HSM (nicht konditioniert) nach dem 1. Anheiz- und Abkühlzyklus (Ausschwemmung von Feinteilen, leichter Ausbruch an den Kanten).....	73
Abbildung 22:	Schamotte HSM (nicht konditioniert) nach dem 2. Anheiz- und Abkühlzyklus (unverändert im Vergleich zu Zyklus 1, Probe intakt).....	73
Abbildung 23:	EcoMag HSM 79A (konditioniert) nach dem 1. Anheiz- (350 °C) und Abkühlzyklus (Abplatzen von einzelnen Körnern und Feinanteil).	74
Abbildung 24:	EcoMag HSM 79A (konditioniert) nach dem 10. Anheiz- (350 °C) und Abkühlzyklus (Abplatzen von einzelnen Körnern und Feinanteil, Probe intakt).....	74
Abbildung 25:	EcoMag FFS 91F.2 (konditioniert) nach dem 1. Anheiz- und Abkühlzyklus (Entfärbung, Geruchentwicklung, oberflächliche kleine Risse).	75
Abbildung 26:	EcoMag FFS 91F.2 (konditioniert) nach dem 4. Anheiz- und Abkühlzyklus (Probe zerstört).	75

Diagrammverzeichnis

Diagramm 1:	Verlauf der drei DSC-Messkurven Basislinie (Leermessung), Saphir (Kalibrierung), Probe und der resultierenden spezifischen Wärmekapazität c_p am Beispiel der Probe EcoMag-Variante 79A (2. Aufheizung).	19
Diagramm 2:	Spezifische Wärmekapazität in Abhängigkeit der Proben­temperatur. Ergebnisse der untersuchten Mischungen und Ausgangsstoffe sowie einer Probe aus Schamotte (HBO+).	23
Diagramm 3:	Wärmekapazität in Abhängigkeit der Proben­temperatur. Ergebnisse der untersuchten Mischungen und Ausgangsstoffe sowie einer Probe aus Schamott (HBO+).	24
Diagramm 4:	Aufgezeichnete Temperaturdifferenzen (Probeneintrittstemperatur und Probenaustrittstemperatur); Untersuchungsparameter: Variante I (Speicherstein ist direkt mit dem Heizmedium in Kontakt), Strömungsgeschwindigkeit von 0,5 m/s, Unterdruck von 12 Pa, Probeneintrittstemperatur von 200 °C und einer Aufheizphase von 5 h 30 min.; oben: Probekörper=HBO+(Schamott), unten: Probekörper=HSM79.	33
Diagramm 5:	Aufgezeichnete Temperaturdifferenzen (Probeneintrittstemperatur und Probenaustrittstemperatur); Untersuchungsparameter: Variante I (Speicherstein ist direkt mit dem Heizmedium in Kontakt), Strömungsgeschwindigkeit von 1,0 m/s, Unterdruck von 12 Pa, Probeneintrittstemperatur von 200 °C und einer Aufheizphase von 8 h; oben: Probekörper=HBO+(Schamott), unten: Probekörper=HSM79A.	34
Diagramm 6:	Verlauf der Oberflächentemperatur der Speichersteine; Untersuchungsparameter: Variante I (Speicherstein ist direkt mit dem Heizmedium in Kontakt), Strömungsgeschwindigkeit von 1,0 m/s, Unterdruck von 12 Pa, Probeneintrittstemperatur von 200 °C und einer Aufheizphase von 8 h; Anmerkung: TE=Thermoelement; WBK=Wärmebildkamera; oben: Probekörper=HBO+(Schamott), unten: Probekörper=HSM79A.	36
Diagramm 7:	Direkter Vergleich der Oberflächentemperatur der untersuchten Speichersteine; Untersuchungsparameter: Strömungsgeschwindigkeit von 1,0 m/s, Unterdruck	

	von 12 Pa, Probeneintrittstemperatur von 200 °C und einer Aufheizphase von 8 h; Anmerkung: TE=Thermoelement.	38
Diagramm 8:	Pulverröntgendiffraktometrie (XRD) der Probe Schamotte_4Seas_EcoMagFire.	44
Diagramm 9:	Pulverröntgendiffraktometrie (XRD) der Probe Schamotte_69A.2.	44
Diagramm 10:	Pulverröntgendiffraktometrie (XRD) der Probe Schamotte_71A.1.	45
Diagramm 11:	Aufgezeichnete Temperaturdifferenzen (Probeneintrittstemperatur und Probenaustrittstemperatur); Untersuchungsparameter: Strömungsgeschwindigkeit=1,0 m/s, Unterdruck=12 Pa, Probeneintrittstemperatur=ca. 500 °C und einer Aufheizphase=8h; oben: Probekörper=HBO+(Schamott), unten: Probekörper=91F.2.	47
Diagramm 12:	Direkter Vergleich der Oberflächentemperatur der untersuchten Probekörper; Untersuchungsparameter: Strömungsgeschwindigkeit von 1,0 m/s, Unterdruck von 12 Pa, Probeneintrittstemperatur=ca. 500 °C und einer Aufheizphase von 8 h; Anmerkung: TE=Thermoelement.	48
Diagramm 13:	Direkter Vergleich der Kerntemperatur der untersuchten Speicherstein-Varianten beim Einsatz in einem Raumheizer (indirekte Variante bzw. Wärmeübertragung).	52
Diagramm 14:	Aufheizphase der Schamott-Speichersteine bis zur Erreichung des stationären Zustandes (Beharrung) der Kerntemperatur beim Einsatz in einem Raumheizer (indirekte Variante bzw. Wärmeübertragung).	53
Diagramm 15:	Aufheizphase der EcoMag HSM_99A-Speichersteine bis zur Erreichung des stationären Zustandes (Beharrung) der Kerntemperatur beim Einsatz in einem Raumheizer (indirekte Variante bzw. Wärmeübertragung).	53
Diagramm 16:	Direkter Vergleich des Verlaufs der Kerntemperatur während der Entladephase der untersuchten Speicherstein-Varianten beim Einsatz in einem Raumheizer (indirekte Variante bzw. Wärmeübertragung).	54
Diagramm 17:	Kerntemperaturverlauf der Schamotte- Speichersteine während der Entladephase von der max. zu erreichenden Temperatur im stationären	

	Betrieb und einer Abkühlung bis auf ein Temperaturniveau von 40 °C (indirekte Variante bzw. Wärmeübertragung).....	55
Diagramm 18:	Kerntemperaturverlauf der EcoMag HSM 99A- Speichersteine während der Entladephase von der max. zu erreichenden Temperatur im stationären Betrieb und einer Abkühlung bis auf ein Temperaturniveau von 40 °C (indirekte Variante bzw. Wärmeübertragung).....	56
Diagramm 19:	Direkter Vergleich der Kerntemperatur der untersuchten Wärmespeichermodule beim Einsatz in einem Raumheizer (indirekte Variante bzw. Wärmeübertragung).....	62
Diagramm 20:	Direkter Vergleich der Oberflächentemperatur der untersuchten Wärmespeichermodule beim Einsatz in einem Raumheizer (indirekte Variante bzw. Wärmeübertragung).....	63
Diagramm 21:	Kerntemperaturverlauf der untersuchten Wärmespeichermodule in der Abkühlphase beim Einsatz eines Herdes (direkte Variante bzw. Wärmeübertragung).....	65
Diagramm 22:	Oberflächentemperaturverlauf der untersuchten Wärmespeichermodule in der Abkühlphase beim Einsatz eines Herdes (direkte Variante bzw. Wärmeübertragung).....	66
Diagramm 23:	Kerntemperaturverlauf der untersuchten Wärmespeichermodule während einer definierten Anheizphase (4 Auflagen) sowie der darauffolgenden Entladephase beim Einsatz eines Herdes (direkte Variante bzw. Wärmeübertragung).	67
Diagramm 24:	Oberflächentemperaturverlauf der untersuchten Wärmespeichermodule während einer definierten Anheizphase (4 Auflagen) sowie der darauffolgenden Entladephase beim Einsatz eines Herdes (direkte Variante bzw. Wärmeübertragung).	68

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Erläuterung der Kurzzeichen.	18
Tabelle 2:	Druckspannungsfestigkeit nach DIN EN 993-5 verschiedener EcoMag-Mischungen.	25
Tabelle 3:	Biegezugfestigkeit nach DIN EN 993-6.	25
Tabelle 4:	Ergebnistabelle (Zusammenfassung).	26
Tabelle 5:	Geräteparameter und Messeinstellungen des Bruker 2D Phasen-Diffraktometers.	43
Tabelle 6:	Ergebnisse aus den Versuchen zur Bestimmung der Temperaturwechselbeständigkeit.	70

1 Einleitung

Sensible Wärmespeicher sind die am meisten verbreitete und oftmals kostengünstigste Art von Wärmespeichern. Die Wärme wird durch Temperaturänderung des Speichermaterials gespeichert. Für eine hohe Speicherdichte sollte daher die spezifische Wärmekapazität des Speichermediums möglichst hoch sein. Je größer die mögliche Temperaturänderung ist, desto mehr Wärme kann in einer definierten Masse gespeichert werden. Da Speicherelemente gerade in der Anheizphase viel Wärme aufnehmen, minimieren sie die Wärmeenergieverluste. Dabei reagieren unterschiedliche Speichermaterialien durchaus unterschiedlich. Stahl, Speckstein z. B. mit einer hohen Wärmeleitfähigkeit nehmen die angebotene Wärme schnell auf, geben diese aber genauso zügig wieder ab. Keramik, Sandstein oder ähnliche Materialien mit geringerer Wärmeleitfähigkeit brauchen länger für den Temperaturanstieg, geben aber entsprechend lang anhaltend die Energie wieder ab. Allgemein bekannt sind keramische Wärmespeicher wie Schamott. Diese speichern die eingespeiste Wärme und geben die gespeicherte Wärme als Strahlungswärme an die Umgebung ab. Die Wärmespeicher in handelsüblichen Kachel-/Kaminöfen bestehen aus Keramik (zusätzlich mit Schamott ausgekleidet) oder werden komplett mit Schamottsteinen ummantelt. Die Verwendung von Schamotte ist jedoch auch mit einigen Nachteilen verbunden, beispielsweise ist der Herstellungsprozess sehr energieintensiv, da ein feuerfester Schamottstein bei Prozesstemperaturen zwischen 1.250 °C und 1.500 °C gebrannt werden muss (DIDIER, 1997). Die benötigte Energie zur Herstellung geht zudem mit dementsprechenden Produktionskosten sowie einer nicht zu vernachlässigenden Umweltbelastung durch den Ausstoß von CO₂ bei der Produktion einher. Darüber hinaus ist mit dem Einsatz von Schamotte im Bereich der Wärmespeicherung lediglich eine geringe Wärmespeicherung, durch die limitierte Wärmespeicherkapazität von ca. 0,7 – 1,0 kJ/(kg·K) (letzter Wert wird nur bei einer maximalen Temperatur von 1.000 °C erreicht), erreichbar. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass eine flexible Formproduktion nur durch den Einsatz von teuren Schamotte-Gießmörteln zu erreichen ist. Im Rahmen dieses Projekts wurde ein neues Material untersucht, mit welchem europaweit verbesserte, günstigere und energiesparende Heiz- und Speichersysteme errichtet werden sollen. Das neue Wärmespeichermaterial soll die gegenwärtigen ökologischen und sozialen Ansprüche erfüllen, da es mindestens 30 % effektiver, 30 % leichter (günstige Transportkosten und ideal für Renovierungen und Sanierungen in Altbauten) und mindestens 30 % günstiger in der Herstellung, als Schamott, ist.

2 Ziele und Inhalt des Projekts

Das Ziel des Kooperationsprojektes ist die Entwicklung eines praxistauglichen Wärmespeichermaterials, das insbesondere auf einem exotherm aushärtenden, neuen Rohstoff basiert. Das Material soll sich dadurch auszeichnen, dass es aufgrund der überlegenen Wärmespeicher- und Wärmeabgabefunktion, deren Dauerhaftigkeit und des flexiblen Herstellungsverfahrens in vielfältigen Anwendungen eingesetzt werden kann. Im Rahmen des Projektes sollte zunächst der Einsatz in Kaminöfen untersucht werden. Um das Projektziel eines wärmespeichernden, hitzeresistenten, preisgünstigen, schadstofffreien und immissionsminimierten Produktes auf der Basis einer energiesparenden und CO₂-emissionsarmen Technologie zu erreichen, sollte im Rahmen dieses Vorhabens u. a. folgende Entwicklungsschwerpunkte erfolgreich durchgeführt werden:

- Entwicklung einer geeigneten Rohstoff- und Materialzusammensetzung,
- Entwicklung von Analyseverfahren für reale Rahmen-, Einsatz- und Betriebsbedingungen,
- Entwicklung der Reaktionsparameter für das Wärmespeichermaterial,
- Entwicklung thermodynamischer und kinetischer Reaktionsprozesse,
- Entwicklung eines ökobilanzierten Herstellungsverfahrens,
- Entwicklung des Verarbeitungsprozesses.

Das Material soll folgende theoretischen Eigenschaften im Vergleich zum Schamott erfüllen:

- 50 % höhere Wärmeleitfähigkeit (die Wärmeleitfähigkeit ist in der Aufheizphase, also bis mindestens 50 °C um 50 % höher. Dann stagniert sie bei 100 °C auf dem Wert von Schamott und beginnt über 100 °C aufgrund des hohen Magnesit-Anteils wieder auf Ursprungsniveau zu sinken.),
- 75 % höhere Wärmekapazität,
- 30 % geringere Rohdichte,
- Druckfestigkeit der Leichtbetonklasse (8.4 N / mm²) zu optimieren bis zur Betonklasse B20 (20 N / mm²),
- Kosteneinsparung je nach Anwendung von ca. 33 % (als Schamott-Ersatz) bis zu 90 % (als Schamott-Giessmörtel-Ersatz) in der Produktion und 30 % im Transport,
- Senkung des Energieverbrauchs um ca. 70 %,
- CO₂ Einsparung von ca. 300.000 t / a,

- leichte Verarbeitung/Herstellung (manuell und industriell),
- flexible Formgebung durch Gießverfahren (Gießmörtel),
- multifunktionale Anwendungen.

Das Entwicklungsprojekt gliedert sich im Wesentlichen auf die zwei Projektpartner mit ihren Entwicklungsschwerpunkten. Die Entwicklungsschwerpunkte des Fraunhofer-Institutes für Bauphysik IBP sind im Folgenden detaillierter dargestellt.

Ein bedeutsamer Entwicklungsschritt ist das Mischungsverhältnis der verwendeten Komponenten. Hierbei soll das Material analysiert werden, um eine zielgerichtete Mischrezeptur zu entwickeln und das Wärmematerial anschließend zu charakterisieren. Im Rahmen der Materialanalyse sind Untersuchungen zu allen Materialeigenschaften, die für den Einsatz in den zu untersuchenden Feuerungsanlagen und Wärmespeichereinrichtungen relevant sind durchzuführen. Die folgenden Eigenschaften wie Wärmespeicherkapazität, Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit, Feuchtigkeit, chemische Aspekte, Gasdurchlässigkeit, thermische, mechanische und chemische Beständigkeit, Dauerhaftigkeit sind zu untersuchen. Dabei sollen die Zustände unterschiedlicher Betriebsphasen und Anwendungen berücksichtigt werden. Es werden unterschiedliche Rezepturen in Abhängigkeit der geplanten Anwendungen entwickelt und unter Labor- und Praxisbedingungen getestet. Die Materialanalyse umfasst sowohl den Neuzustand des Wärmespeichermaterials als auch den Einsatz in Einzelraumfeuerungsanlagen oder Speichereinrichtungen in unterschiedlichen Nutzungsphasen. Ein weiterer Entwicklungsschritt beinhaltet ein Analyseverfahren für reale Rahmen-, Einsatz- und Betriebsbedingungen. Hierfür wurden wärmespeichernde Steinplatten in unterschiedlichen Dicken und Formen konstruiert. Diese Steinplatten wurden in realen Einzelraumfeuerungsanlagen (freistehende Raumheizer, Kamineinsätze und Speichereinzelfeuerstätten) und Speichereinrichtungen (z. B. Nachtspeicher) eingebaut und bei unterschiedlichen Betriebszuständen wie Nennlastbetrieb, Überlastbetrieb gemäß der geltenden Prüfnormen (wie beispielsweise DIN EN 13240, DIN EN 13229 und DIN EN 15250) bezüglich bestimmter Parameter getestet. Diese Parameter werden im Laufe des Projektes festgelegt. Dabei werden die Art der Wärmeabgabe sowie die Speicherfähigkeit der Einzelraumfeuerungsanlagen bzw. der Speichereinrichtungen in einem speziellen Kalorimeterraum unter realen Betriebsbedingungen messtechnisch untersucht. Beim Einsatz in biomassebetriebenen Einzelraumfeuerungsanlagen wurde der Einfluss der Wärmespeichersteine auf das Verbrennungs- und Emissionsverhalten untersucht.

3 Stand des Wissens und der Technik

In diesem Abschnitt werden die Materialeigenschaften, welche für eine gute Wärmespeicherung relevant sind, sowie gängige Speichermaterialien, die nach dem heutigen Stand der Technik im Bereich von Holzfeuerungen zur Wärmespeicherung eingesetzt werden, vorgestellt. Die Wärmeaufnahme eines Materials, seine Oberflächentemperatur und die Wärmeausbreitung im Material selbst (Kerntemperatur), sind von dessen Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität abhängig. Diese Faktoren bestimmen die in der Aufheizphase aufgenommene Wärmemenge und zugleich die zeitgleich messbare Oberflächen- und Kerntemperatur. Misst man Temperatur und Abkühlzeit an der Oberfläche und im Kern über einen bekannten Zeitraum - idealerweise gleitend - zeigt die sinkende Oberflächentemperatur, in Relation zur Zeit, die aufgenommene Wärmemenge bis zur Abkühlung auf Raum-/Umgebungstemperatur. Dies zeigt auch praktikabel die spezifische Wärmekapazität (WKAP) im Zusammenhang mit der Wärmeleitfähigkeit (WLZ) auf, d. h. die tatsächlich gespeicherte Wärmemenge kann auch anhand von Temperaturverlauf und Abkühlzeit direkt verglichen werden.

3.1 Spezifische Wärmekapazität c_p

Bei der Zufuhr von thermischer Energie, durch die Wärmemenge Q gekennzeichnet, stellt sich in allen Körpern eine Temperaturerhöhung ΔT ein. Verschiedene Materialien reagieren auf die Zufuhr identischer Wärmemengen mit unterschiedlichen Temperaturanstiegen. Die nachfolgende Gleichung beschreibt diesen Zusammenhang:

$$Q = c_p \cdot m \cdot \Delta T \quad (\text{Gl. 1})$$

Dabei ist Q (in J) die zugeführte Wärmemenge, c_p die spezifische Wärmekapazität (in $\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})$), die Masse m des zu erwärmenden Materials und ΔT der Temperaturanstieg. Unter der spezifischen Wärmekapazität (c_p) eines Stoffes versteht man die Wärmemenge die notwendig ist, um bei konstantem Druck die Temperatur von 1 g Substanz um 1 K zu erhöhen. Der Energiegehalt eines sensiblen Wärmespeichers ist proportional zur Masse des Speichermediums, dessen spezifische Wärmekapazität und den Temperaturen bei der Beladung. Bei der kapazitiven Wärmespeicherung verändert sich bei Zu- bzw. Abfuhr von Energie die Temperatur des jeweiligen Speichermediums. Die Speicherung von thermischer Energie quantifiziert sich somit in einer Änderung der Temperatur des jeweiligen Stoffes. Durch die Erhöhung der Temperatur eines Stoffes erhöht sich gleichzeitig auch dessen innere Energie. Die spezifische Wärmekapazität variiert material- und auch temperaturabhängig und ist somit ein wesentlicher Parameter für die Wahl eines geeigneten Wärmeträgers.

3.2 Wärmeleitfähigkeit λ

Der Transport thermischer Energie in einem Festkörper wird als Wärmeleitung bezeichnet. Innerhalb mineralischer Baustoffe, die heterogen aufgebaut sind, erfolgt die Wärmeübertragung aber nicht nur durch Leitung, sondern auch durch Konvektion und Strahlung in Abhängigkeit der vorhandenen Porenräume, der Temperatur, der Temperaturdifferenz sowie der Strömungsgeschwindigkeit um die Wichtigsten zu benennen. Die Messgröße für die Wärmeübertragung ist die Wärmeleitfähigkeit λ mit der Einheit W/m·K. Sie gibt an, welche Wärmeenergie durch ein Volumen von 1 m² Fläche und 1 m Dicke bei einem Temperaturunterschied von 1 K in einer Zeiteinheit von der wärmeren zur kälteren Seite geleitet wird. Die Wärmeleitfähigkeit wird maßgeblich durch folgende Eigenschaftsmerkmale beeinflusst:

- Rohdichte
Je höher die Rohdichte, desto höher die Wärmeleitfähigkeit. Je geringer das Produkt aus Rohdichte und spezifischer Wärmekapazität, desto niedriger die Wärmeleitfähigkeit und das Wärmespeichervermögen.
- Porosität
Je niedriger die Porosität desto höher die Wärmeleitfähigkeit. Gasgefüllte Poren besitzen im Verhältnis zum Feststoff eine sehr niedrige Wärmeleitfähigkeit.
- Chemische Zusammensetzung
Die Wärmeleitfähigkeit steht im Zusammenhang mit der molekularen Bindung und ist werkstoffabhängig.
- Mineralogische Zusammensetzung
Je geringer die Korngrenzen, desto größer die Wärmeleitfähigkeit. An den Korngrenzen oder innerhalb gestörter Gitterstrukturen wird die Leitung unterbrochen.
- Kornaufbau
Je dichter die Packungsdichte der Körnung, desto höher die Wärmeleitfähigkeit.
- Porenstruktur
Je kleiner die Porenräume, desto niedriger die Wärmeleitfähigkeit.

3.3 Speichermaterialien im Bereich von Holzfeuerungen

In Abhängigkeit vom eingesetzten Speichermaterial und den damit einhergehenden differenzierten Eigenschaften, verfügt beispielsweise Stahl sowie Speckstein über eine hohe Wärmeleitfähigkeit, sodass diese Materialien die zur Verfügung stehende Wärme sehr schnell aufnehmen können, dementsprechend aber auch genauso schnell wieder abgeben. Materialien mit niedrigerer Wärmeleitfähigkeit, wie z. B. Sandstein oder Keramik, benötigen für die Aufnahme der identischen Wärmemenge einen längeren Zeitraum. Das Gleiche gilt auch für den Zeitraum der

Wärmeabgabe. Des Weiteren gilt grundsätzlich, umso mehr Masse und Oberfläche ein Speichermodul besitzt und je länger dieses aufgeheizt wird, desto mehr Wärmeenergie kann pro Zeit aufgenommen sowie abgegeben werden und desto länger ist die Dauer der Entladephase. Durch den Einsatz von Wärmespeichern wird keine Erhöhung der Effizienz einer Einzelraumfeuerungsanlage erreicht, da sich die Energieeffizienz einer Einzelraumfeuerungsanlage über die Energieausbeute, die der Brennraum in der Lage ist aus dem Brennstoff in den Aufstellraum abzugeben, definiert. Ob die Wärmeenergie direkt über Konvektion und Wärmestrahlung oder über einen Umweg durch die Zwischenspeicherung in einem Wärmespeichermodul freigesetzt wird, ist dabei irrelevant. Darüber hinaus wird die abgegebene Wärme von Speichermodulen, aus Keramik oder Naturstein, als besonders angenehm empfunden. Generell gilt, je schneller die Wärmeübertragung, d. h. je höher die Wärmeleitfähigkeit eines Materials, desto kurzweiliger ist die Wärmespeicherung und umgekehrt, je zeitverzögerter die Wärmeübertragung, desto langweiliger ist die Wärmestrahlung. Für das Ergebnis einer effektiven und angenehmen Speicherwärme ist nicht ausschließlich die Intensität und die Schnelligkeit im Zuge einer hohen Wärmeleitfähigkeit ausschlaggebend, sondern viel mehr eine gleichmäßige, nicht zu hohe Strahlungswärme des Körpers. Im Allgemeinen ist die Zuladung von Speichermasse bei Kaminöfen nur sehr eingeschränkt umsetzbar, da das Volumen solcher Kleinanlagen eine ausreichende Zuladung für die benötigte Speichermasse oftmals nicht gewährleistet.

Schamott

Unter den Baustoffen aus Tongut sind feuerfeste Erzeugnisse wie keramische Stoffe, die Temperaturen bis zu etwa 1.700 °C ohne Deformation ertragen. Zu den gebräuchlichsten feuerfesten Baustoffen gehören die Schamott- oder Feuerleichtsteine, die in aluminiumsilikatische Feuerleichtsteine, Silikatleichtsteine, Zirkonleichtsteine und Korundleichtsteine unterteilt werden. Die größte Bedeutung und Verbreitung kommt den Aluminiumsilikatsteinen (Schamott- und Mullitsteine) zu. Zur Herstellung werden Rohstoffe auf der Basis von Al_2O_3 , SiO_2 und eventuell CaO verwendet. Als Tonerdeträger werden Rohstoffe wie Ton, Kaolin, Schamotte, Sillimanit, Andalusit, Kyanit und Mullit sowie Tonerde, Tonerdehydrat und Korund eingesetzt. Neben den feinkörnigen Rohstoffen kommen auch grobkörnige, poröse Rohstoffe wie Leichtschamotte und Hohlkugeln aus Korund und Mullit zur Anwendung.

Es ist allgemein bekannt, dass der Brenn- bzw. Sinterprozess beim Herstellen von Schamott sehr energieintensiv, teuer und umweltbelastend ist. Dies ist abhängig von zwei Hauptverfahren, dem Brennen (1.500 °C) und dem Sintern (1.250 °C) und einem zwischengeschalteten Zerkleinerungsprozess. Dieser Prozessablauf ist nicht ohne schweres Gerät wie Tunnelöfen und Mahlwerke und einem enormen Kosten- und Energieaufwand in Elektrizität und Kraftstoffe realisierbar. Ein einziger Brennvorgang verbraucht über 2.200 kWh / t Rohton (Institut für Anorganische Materialwissenschaften für

Glas und Keramik, Rheinland-Pfalz, Deutschland). Zusätzlich erfolgt ein Rohstoffmasseverlust von mindestens 20 %, während des Brennprozesses summiert sich der Gesamtenergieeinsatz auf über 5.000 kWh / t Schamott.

Bei einer Hochrechnung der jährlichen Schamottproduktion von 200.000 t und einer Energieeinsparungssumme von über einer Terawattstunde (10^9 kWh) ergibt sich eine Bilanzsumme von 135 Mio. €.

Der CO₂-Ausstoss beim Sintern beträgt ca. 0,67 kg CO₂ je kg Sintervorgang und Rohstoff, d. h. er liegt im Bezug zum Endprodukt nochmals um ca. 20 % höher (0,81 kg). Die zur Ofenherstellung benötigten Schamotte werden zweimal gesintert, ergeben also einen CO₂-Ausstoss von mind. 1,5 kg je kg Schamott. Dies ergibt einen umweltbelastenden CO₂-Ausstoss von 1,5 t je t Schamott x 200.000 t = 300.000 t CO₂ / a bei Holzöfen. Bei Nachtspeicheröfen (Radiatoren) ergibt sich ein noch deutlicheres Bild: 200.000 t Schamott in Öfen vs. 2,5 Mio. t Schamott in Radiatoren bedeuten 3,3 – 3,75 Mio. t CO₂ / a, die eingespart werden können - dies entspricht in etwa dem CO₂-Ausstoss der in Deutschland noch laufenden Kohlekraftwerke.

Naturstein

Darüber hinaus werden auch verschiedenste Natursteine als Wärmespeichermaterial, vorwiegend für die Verkleidung von Kaminöfen, eingesetzt. Zu den beliebtesten Materialien zählen hierbei Speckstein, Sandstein, Granit und Serpentinsteine. Speckstein ist unter den Natursteinen der am meisten verwendete Speicherstein. Die Optik und das Gefühl des Anwenders ein Naturprodukt zu verwenden sind meist die Hauptargumente bei der Entscheidung für Natursteine.

4 Technische Einrichtungen für die Laboruntersuchungen

In diesem Kapitel werden die mess- und versuchstechnischen Einrichtungen, die für die Versuchsdurchführung und Auswertung eingesetzt wurden, beschrieben. Die versuchstechnischen Einrichtungen beinhalten ein DSC 404 zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität der Proben, ein Plattengerät zur Prüfung der Wärmeleitfähigkeit λ sowie ein Prüfstand mit den entsprechenden Abgasmesssystemen und Datenerfassungs- und Auswerteprogrammen. Im Folgenden werden die technischen Einrichtungen detailliert erläutert.

4.1 Differenzthermoanalyse – Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität

Die Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität c_p erfolgt in Anlehnung an ISO 11357-4: 2005-09. Nach ISO 11357-1:1997 [1] versteht man unter Differenzthermoanalyse eine „thermoanalytische Methode, bei der ein thermischer Effekt einer Probe im Vergleich zu einer Referenzsubstanz gemessen wird.“ Mit dieser Methode können unter anderem kalorische Größen wie die spezifische Wärmekapazität c_p ermittelt werden. Verwendet man dabei eine Vergleichsprobe bekannter spezifischer Wärmekapazität, so lassen sich Differenzmessungen mit kontinuierlichem Aufheizbetrieb zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität einer unbekanntenen Probe als Funktion der Temperatur oder Zeit durchführen. Dafür ist die Erfassung von

- 1.) Basis- oder Grundlinie,
- 2.) Standard (Kalibrierung),
- 3.) und Probe unter den gleichen Versuchsbedingungen notwendig [2, 3].

Die spezifische Wärmekapazität der Probe resultiert aus folgender Gleichung:

$$c_{p,T}(\text{Pr}) = \frac{m_{\text{STA}}}{m_{\text{Pr}}} \times \frac{\text{DSC}_{\text{Pr}}(T) - \text{DSC}_{\text{BAS}}(T)}{\text{DSC}_{\text{STA}}(T) - \text{DSC}_{\text{BAS}}(T)} \times c_{p,T}(\text{STA}) \quad (1).$$

Die Erläuterung der verwendeten Abkürzungen befindet sich in Tabelle 1. In Abbildung 1 sind die Verläufe der drei DSC-Messkurven und die resultierende c_p -Kurve am Beispiel der untersuchten EcoMag Variante 79A (2. Aufheizung) in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt.

Tabelle 1: Erläuterung der Kurzzeichen.

Kurzzeichen	Erläuterung	SI-Einheit
$c_{p,T}(\text{Pr})$	Spezifische Wärme der Probe bei der Temperatur T	$\frac{\text{J}}{\text{g} \times \text{K}}$
$c_{p,T}(\text{STA})$	Spezifische Wärme des Standards bei der Temperatur T	$\frac{\text{J}}{\text{g} \times \text{K}}$
mSTA	Einwaage des Standards	mg
mPr	Einwaage der Probe	mg
DSCPr	DSC-Signalwert bei Temperatur T aus Probenkurve	μV
DSCSTA	DSC-Signalwert bei Temperatur T aus Standardkurve	μV
DSCBAS	DSC Signalwert bei Temperatur T aus der Basislinie	μV

Die geforderten Messläufe wurden im Gerät DSC 404 der Firma Netzsch (vgl. Abbildung 1) unter Verwendung von Platintiegeln mit Platindeckel bei folgenden Randbedingungen durchgeführt:

Starttemperatur: RT

Dynamische Phase: RT bis -30 °C mit -5 K/min

Isotherme Phase: 15 min bei -30 °C

Dynamische Phase: -30 °C bis 220 °C mit 5 K/min

Atmosphäre: Helium, 50 ml/min

Als Standard mit bekannter spezifischer Wärmekapazität wurde eine Scheibe aus synthetischem Saphir mit einer Masse von 25,5 mg verwendet. Die Einwaage der Probe EcoMag-Variante 79A betrug 25,6 mg. Wichtig für die Messung ist, dass die zu untersuchende Probe in dem zu untersuchenden Temperaturbereich keine, mit einer Wärmetönung einhergehende, Reaktionen aufweist.

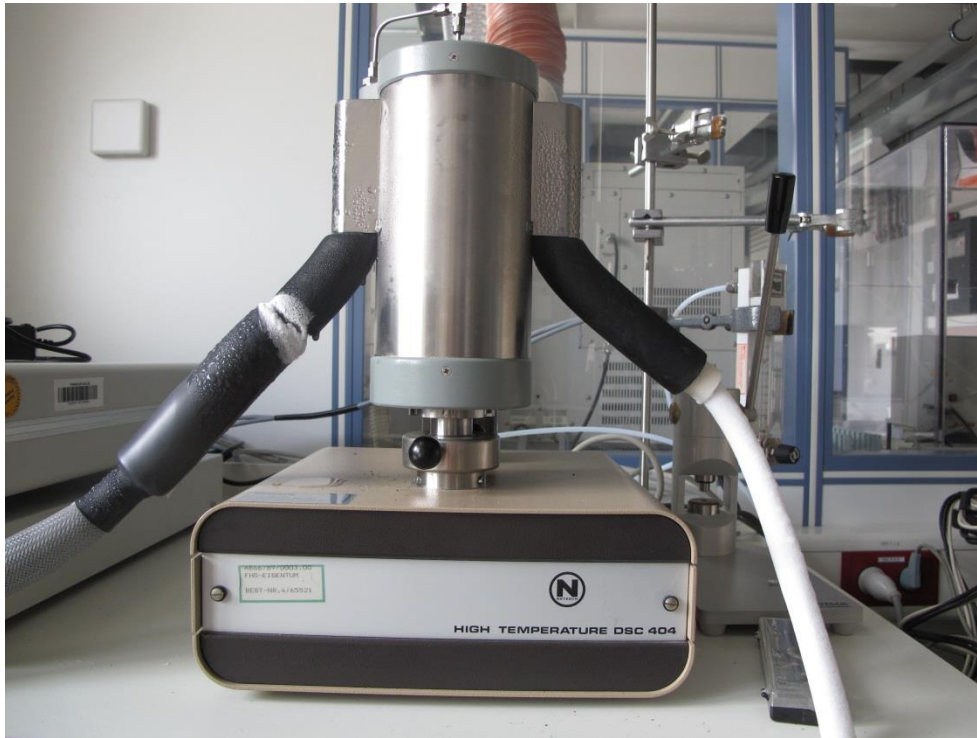


Abbildung 1: DSC 404 zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität.

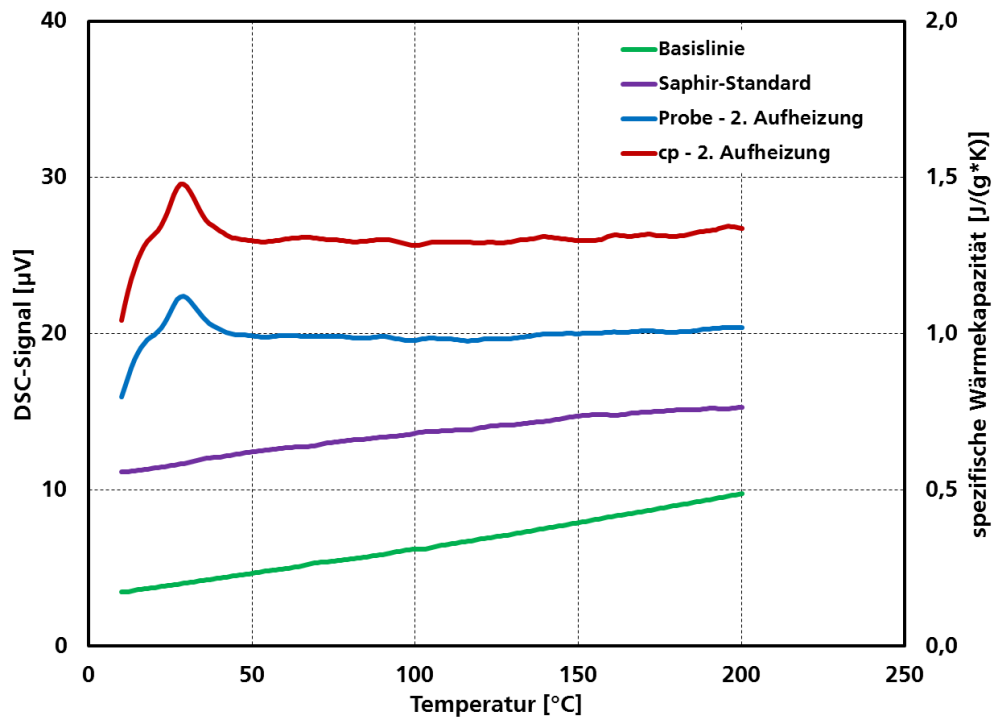


Diagramm 1: Verlauf der drei DSC-Messkurven Basislinie (Leermessung), Saphir (Kalibrierung), Probe und der resultierenden spezifischen Wärmekapazität c_p am Beispiel der Probe EcoMag-Variante 79A (2. Aufheizung).

4.2 Plattengerät zur Prüfung der Wärmeleitfähigkeit λ

Mit dem Plattengerät (vgl. Abbildung 2) kann die Wärmeleitung homogener Platten und inhomogener Probekörper bestimmt werden, sofern es sich um ebene, plattenförmige Proben handelt. Beispiele: poröse, fasrige oder körnige Stoffe, senkrecht und waagrecht zum Wärmestrom geschichtete Bauteile, Profilplatten, Verglasungen, Mauersteinabschnitte, Schüttungen. Die Proben werden zwischen Heiz- und Kühlplatten angeordnet. Im stationären Temperaturzustand fließt ein konstanter Wärmestrom durch die Proben. Die Wärmeleitfähigkeit wird bestimmt aus elektrischer Leistung, der mittleren Temperaturdifferenz zwischen den Probenoberflächen und den Abmessungen der Proben. Die Prüfungen können bei Mitteltemperaturen von -160 °C bis $+250\text{ °C}$ und bei Bedarf auch unter Vakuum oder Schutzgasatmosphäre durchgeführt werden. In der Regel sind die Proben waagrecht angeordnet, mit Hilfe von schwenkbaren Geräten ist eine Messung auch in senkrechter Lage möglich.



Abbildung 2: Plattengerät zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit.

4.3 Prüfstand mit den entsprechenden Abgasmesssystemen, Datenerfassungs- und Auswerteprogrammen

Der im Rahmen des Projekts konzipierte Versuchsstand sowie die Validierungsmessungen an einer realen Einzelraumfeuerungsanlage - freistehender Raumheizer gemäß DIN EN 13240 (indirekte Variante bzw. Wärmeübertragung) erfolgt in einem begehbaren Kalorimeterraum. Durch dessen Aufbau werden Transmissionswärmeverluste möglichst gering gehalten. Dabei können die Brennstoffmassen, die Tripelpunkt-Abgastemperatur, der Förderdruck, die Abgastemperatur, Abgasanalysen hinsichtlich Kohlenstoffmonoxid,

Kohlenstoffdioxid, Kohlenwasserstoffe, Stickstoffoxid, Staub, die Rückwand-, Seitenwand-, Zuluft-, Abluft-, Raumluft-, resultierende Raumtemperatur und der Abluftvolumenstrom bestimmt werden. Mit Hilfe dieser Parameter ist es möglich, durch die Berechnungen sowohl Aussagen über Wirkungsgrade, Wärmeleistungen und Schadstoffemissionen als auch über die thermische Belastung von brennbaren Aufstellflächen und der thermischen Be- und Entladung der Einzelraumfeuerungsanlage zu treffen.



Abbildung 3: Kalorimeterraum des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP.

Die Versuchsverbrennungsanlage ist über einen Abgasstutzen mit der Messstrecke verbunden. In der Messstrecke befinden sich die Messstellen für den Abgasförderdruck und die mittlere Abgastemperatur sowie die Abgasprobenentnahme für die Abgasanalysen. Die gravimetrischen Staubbmesssysteme nach VDI 2066 und die Abgasprobenentnahme für das Staubzählverfahren erfolgen nach der Abgasprobenentnahme für die Gasanalyse mit welcher die gasförmigen Bestandteile gemessen werden können (Gesamtkohlenwasserstoffe, Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid, Stickstoffoxide).

5 Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen und anderer wesentlicher Ergebnisse

5.1 Ergebnisse im Rahmen der Laboranalysen

Im Rahmen des Arbeitspakets für die Konzeption und Auslegung des Materials für den Einsatz in ausgesuchten Einzelraumfeuerungsanlagen ist die Entwicklung eines geeigneten Mischungsverhältnisses der verwendeten Komponenten ein bedeutsamer Entwicklungsschritt. Hierzu wurden die von K33 durchgeführten empirischen Grundlagenuntersuchungen bezüglich der Materialrezeptur von der Arbeitsgruppe Wärmekennwerte und labortechnische Klimasimulation wissenschaftlich erforscht, um eine zielgerichtete Mischrezeptur zu entwickeln und das Wärmespeichermaterial anschließend zu charakterisieren. Im Zuge dessen wurden Prüfungen zur Untersuchung der wichtigsten Materialeigenschaften, wie Wärmespeicherkapazität, Wärmeleitfähigkeit, chemische Aspekte und mechanische Festigkeit durchgeführt. Als wichtigster Parameter des neuen Speichersteins kann die Wärmekapazität angesehen werden. Die Wärmekapazität wurde beim Fraunhofer IBP in Valley an verschiedenen Mischungen und Ausgangstoffen gemessen. Die Messungen erfolgten mit der Differenzthermoanalyse gemäß ISO 11357-1 an pulverisierten Proben. Grundsätzlich steigt die Wärmekapazität mit der Temperatur an. Daher ist es wichtig beim Vergleich von verschiedenen Materialien die Angaben zur Wärmekapazität auf die gleiche Temperatur zu beziehen. Bei den Untersuchungen konnte bestätigt werden, dass Brucit und somit das daraus hergestellte EcoMag eine deutlich höhere Wärmekapazität als typische Schamotte besitzt. Nur eine Versuchsmischung (Probe 70B) liegt mit der Wärmekapazität unter dem Messwert der Schamott-Probe.

Bei allen EcoMag-Proben wurde kein linearer Anstieg der Wärmekapazität mit der Proben temperatur gemessen, sondern eine steigende und wieder fallende Kurve. Dieser Verlauf lässt sich mit Umwandlungsvorgängen in den Proben erklären. Bei chemischen Bindungs- oder physikalischen Phasenübergangsprozessen wird Wärme „eingespeichert“ oder freigesetzt. Die genauen Prozesse, die in den EcoMag-Proben stattfinden, konnten nicht ermittelt werden. Allerdings wurde bei mehreren Durchläufen der Messung festgestellt, dass die Vorgänge reversibel sind und auch nach mehrmaligem Aufheizen ähnlich ablaufen. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass EcoMag eine deutlich höhere Wärmekapazität als Schamott (HBO+) aufweist und dass diese höhere Wärmekapazität auch nach mehrmaligem Aufheizen erhalten bleibt. Im nachfolgenden Diagramm 2 sind die Ergebnisse der gemessenen spezifischen Wärmekapazitäten aller im Projektverlauf getesteten Materialszusammensetzungen zusammengetragen.

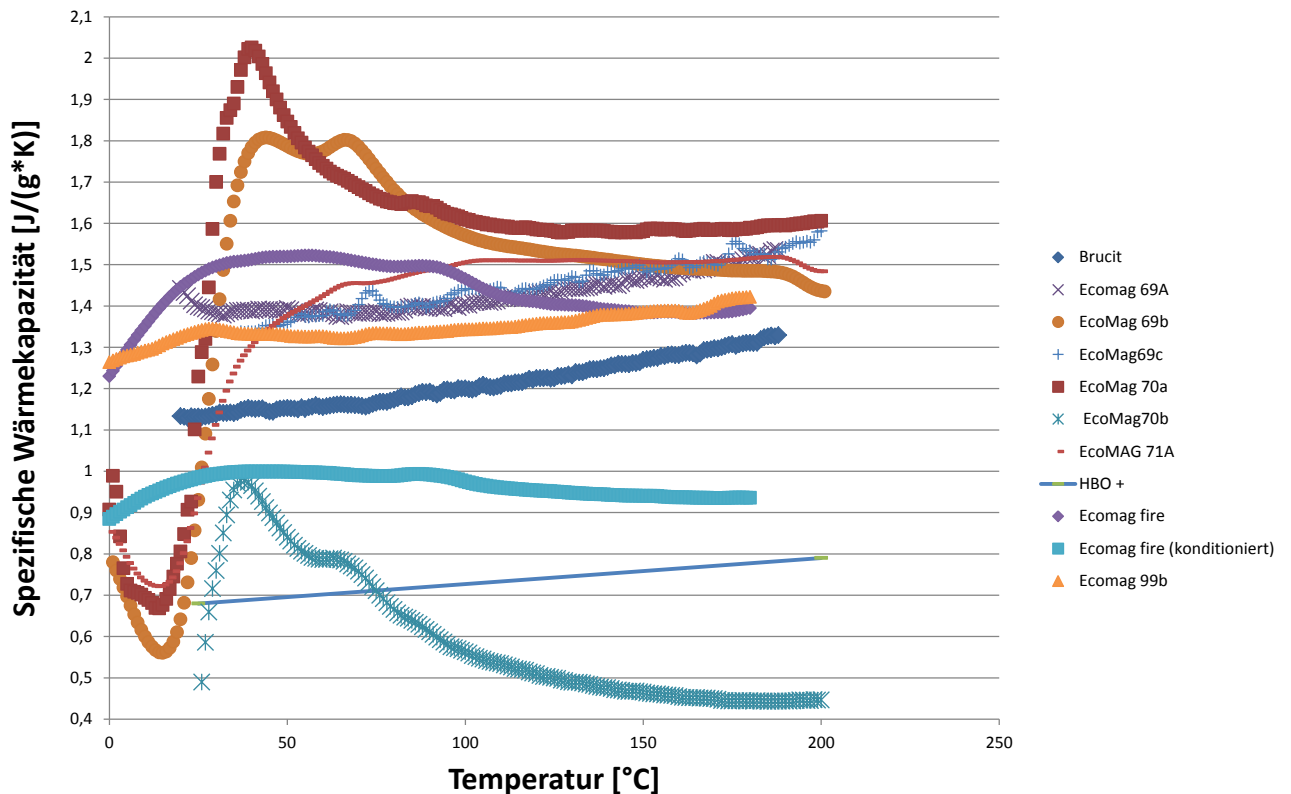


Diagramm 2: Spezifische Wärmekapazität in Abhängigkeit der Probestemperatur. Ergebnisse der untersuchten Mischungen und Ausgangsstoffe sowie einer Probe aus Schamotte (HBO+).

Neben der Wärmekapazität spielt für die Anwendung von EcoMag als Speicherstein die Wärmeleitfähigkeit eine wichtige Rolle. Je höher die Wärmeleitfähigkeit ist, desto schneller kann die Wärme eingespeichert und wieder abgerufen werden. Die Messung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte in einem Plattengerät nach DIN EN 12664. Diese Messung stellt das einzige direkte Verfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit dar. Für die Messung wurden Platten mit einer Probendicke von ca. 50 mm verwendet. Um auch hier die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Probestemperatur zu bestimmen, wurden Messungen über einen Temperaturbereich von 10 °C bis 200 °C durchgeführt. Es zeigte sich allerdings, dass die Probestemperatur nur einen geringen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit hat. Zudem ist der Zusammenhang nicht linear, da die Wärmeleitfähigkeit mit steigender Temperatur leicht ansteigt und dann wieder leicht fällt. Da der Einfluss der Probestemperatur untergeordnet ist, wurde bei den letzten Messungen nur noch die Wärmeleitfähigkeit bei 100 °C gemessen. Man kann davon ausgehen, dass der bei 100 °C gemessene Wert für den Bereich von Raumtemperatur bis 200 °C für Berechnungen verwendet werden kann. In Diagramm 3 sind die Messergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessung für alle EcoMag und eine Probe aus Schamott (HBO+) zusammengefasst. Die Wärmeleitfähigkeiten der EcoMag-Mischungen liegen zwischen dem Wert

der Schamott-Probe von 0,5 W/(m·K) und dem Höchstwert von 2,0 W/(m·K). Dementsprechend lässt sich ein sehr weiter Bereich der Wärmeleitfähigkeit über unterschiedliche Rezepturen einstellen. Allein über die Menge des Anmachwassers lassen sich w/z-Wert, Druckfestigkeit, Rohdichte, Porosität, Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität einstellen. Bei größerer Sieblinie können eine Wärmeleitfähigkeit von 2,2 bei einer spezifischen Wärmekapazität von 1,3 erreicht werden.

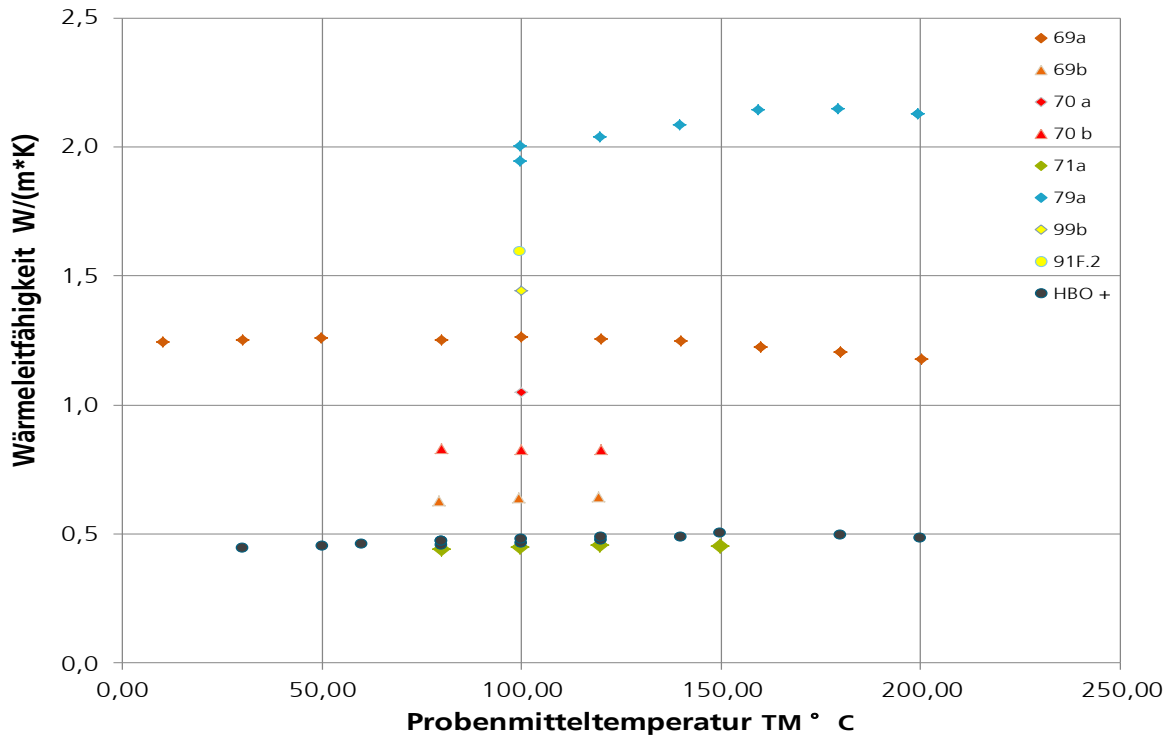


Diagramm 3: Wärmekapazität in Abhängigkeit der Proben temperatur. Ergebnisse der untersuchten Mischungen und Ausgangsstoffe sowie einer Probe aus Schamott (HBO+).

Zusätzlich zu den wärmetechnischen Kennwerten wurden auch mechanische Eigenschaften gemessen. Als erstes Kriterium wurde die Druckspannungsfestigkeit von Zylindern bzw. Würfeln aus EcoMag nach DIN EN 993-5 geprüft. Anhand der Druckfestigkeit kann abgeschätzt werden wie viel Last die Speichersteine tragen können bzw. wie gut die Steine zu bearbeiten sind. In Tabelle 2 sind die Ergebnisse für die geprüften Mischungen von EcoMag aufgeführt. Einige der Mischungen erzielten sehr gute Festigkeiten von über 10 N/mm². Diese Werte entsprechen einem Beton der Klasse C10 bzw. der Mauerwerksfestigkeitsklasse 10. Die Proben 69B, 71A und 71B waren deutlich weniger fest. Bei diesen Mischungen war auch die Vorbereitung der Probekörper schwierig, da die Proben z.T. beim Sägen zerbrachen. Die Proben 69A, 70A, 70B, 79A sollten für die weitere Auswahl verwendet werden.

Tabelle 2: Druckspannungsfestigkeit nach DIN EN 993-5 verschiedener EcoMag-Mischungen.

EcoMag-Mischung:	Minimalwert aus 5 Messungen:	Mittelwert aus 5 Messungen:
	[N/mm ²]	[N/mm ²]
69A	14,0	17,9
69B	4,5	6,4
70A	10,6	12,0
70B	11,0	13,1
71A	6,1	7,2
71B	2,8	3,7
79A	10,2	13,4

Zusätzlich zur Druckfestigkeit wurde auch die Biegezugfestigkeit nach DIN EN 993-6 an einer Probe geprüft. Die Biegezugfestigkeit ist relevant für die Berechnung der Festigkeit von Platten, die in einen Ofen eingebaut werden sollen. In Tabelle 2 ist die ermittelte Biegezugfestigkeit aufgeführt. Die Festigkeit von 1,5 N/mm² liegt ebenfalls Bereich eines Betons der Klasse C10.

Tabelle 3: Biegezugfestigkeit nach DIN EN 993-6.

EcoMag-Mischung:	Minimalwert aus 5 Messungen:	Mittelwert aus 5 Messungen:
	[N/mm ²]	[N/mm ²]
79A	1,5	1,9

Zur besseren Veranschaulichung werden die erzielten Ergebnisse nachfolgend mit Hilfe einer Ergebnistabelle, welche alle Ergebnisse der durchgeführten Analysen umfasst, zusammengetragen.

Tabelle 4: Ergebnistabelle (Zusammenfassung).

	Wärmeleitfähigkeit	spezifische Wärmekapazität	Druckfestigkeit	Biegezugspannung
	W/(m·K)	(J/g·K)	N/mm²	N/mm²
EcoMag-Mischung:	100 °C	100 °C	Mittelwert	Mittelwert
69A	1,3	1,4	17,9	XX
69B	0,6	1,6	6,4	XX
69C	XX	1,4	XX	XX
70A	1,0	1,6	12,0	XX
70B	0,8	0,6	13,1	XX
71A	0,5	1,5	7,2	XX
71B	XX	XX	3,7	XX
79A	2,0	1,3	13,4	1,9
Schamott (HBO+)	0,5	0,7	XX	XX
99B	1,3 – 1,5 (20 °C – 200 °C)	1,3 – 1,5 (20 °C – 200 °C)	10,0 – 20,0	XX
91F.2	1,6	1,4	XX	XX

5.2 Ergebnisse aus dem Versuchsstand

Im weiteren Projektverlauf wurden die im Labor untersuchten und favorisierten Mischungen in einem Versuchsstand unter wiederholbaren und reproduzierbaren Betriebsbedingungen validiert. Handbeschickte Einzelraumfeuerungsanlagen haben die Besonderheit, dass sie bisher aus Vermarktungsgründen ohne Stromversorgung sowie ohne jegliche Art automatischer Steuerung oder Regelung betrieben werden können. Der Betrieb von Einzelraumfeuerungsanlagen ist von diversen Betriebsparametern abhängig, welche das Verbrennungsverhalten in Feuerungsanlagen beeinflussen können. Im Folgenden werden die wichtigsten Einflussfaktoren auf den Betrieb solcher Feuerungsanlagen dargestellt:

- Beschickungsregime der Feuerungsanlage,
 - Brennstoffauswahl (Art und die verbrennungstechnischen Eigenschaften, vor allem Feuchtegehalt),
 - Brennstoffmenge pro Auflage,
 - Anzahl, Größe, Länge und Form der beschickten Holzscheite,
 - Zeitpunkt und Dauer der Beschickung,
 - Ordnung bzw. Stapelung der Holzscheite im Feuerraum usw.
- Einstellung der Verbrennungsluft und des Naturzugs,
- Wartung und Pflege der Feuerungsanlage.

Der Verbrennungsprozess ist ein sehr variabler Prozess, welcher nur sehr schwer unter wiederholbaren und reproduzierbaren Betriebsbedingungen durchgeführt werden kann. Im Besonderen sind physikalische Größen wie beispielsweise die Feuerraumtemperatur, die

Abgastemperatur und der Unterdruck im System, welcher die Abgasfördergeschwindigkeit beeinflusst, kaum in dem Maße zu kontrollieren, sodass aussagekräftige Ergebnisse mit einer hohen Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit zu erzielen sind. Für die Entwicklung einer zielgerichteten Mischrezeptur sowie einer Charakterisierung des Wärmespeichermaterials musste eine Einrichtung entworfen werden, welche eine Untersuchung unter konstanten Betriebsbedingungen gewährleisten kann. Das Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP hat einen Versuchsstand konzipiert und aufgebaut, der es ermöglicht, die wichtigsten physikalischen Randbedingungen bei der Verbrennung von Holz in Einzelraumfeuerungsanlagen unter wiederholbaren und reproduzierbaren Betriebsbedingungen zu simulieren und gleichzeitig eine praxisnahe, vergleichbare Basis bei der Untersuchung des neuen Materials als wärmespeichernde Ofenummantelung sowie für den Einsatz als temperaturstabile Brennraumauskleidung von Einzelraumfeuerungsanlagen zu schaffen. Der Versuchsstand sowie sein Aufbau werden in Abbildung 4 dargestellt.

- (1) PVC-Rohr mit Kugelhahn: Ermöglicht eine Grobeinstellung der Luftzufuhr und kann als Systemverschluss verwendet werden. Des Weiteren kann die zugeführte Luftmenge (Luftvolumenstrom) in Kombination mit (2) bestimmt werden.
- (2) Hitzdrahtanemometer (HDA) ist im PVC-Rohr verbaut und wird zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit der zugeführten Zuluft verwendet.
- (3) Stromversorgung und Steuereinheit.
- (4) Heizelement (zur Beheizung der Zuluft wird ein regelbares Heizgebläse eingesetzt).
- (5) Regelbares Gebläse zur Sicherstellung der geforderten Luftmenge
- (6) Stabilisierungszone (Drahtgestrick aus Edelstahl) + der darüberliegenden Messtechnik (Netzmessung Probeneingang – 5 Thermolemente Typ K; zur Bestimmung der Temperatur am Probeneintritt).
- (7) Probekörper.
- (8) Messtechnik (16 Thermolemente Typ T; zur Bestimmung der Oberflächentemperatur der Probe).
- (9) Messtechnik (Netzmessung Probenausgang – 5 Thermolemente Typ K; zur Bestimmung der Temperatur am Probenaustritt) + einer darüberliegenden Stabilisierungszone (Drahtgestrick aus Edelstahl).



Abbildung 4: Links: Versuchsstand des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP für Messungen unter reproduzierbaren Bedingungen zur Entwicklung ökologischer Speichersteine als Schamottersatz für den Einsatz in biomassebetriebenen Einzelraumfeuerungsanlagen. Rechts: CAD-Schnittzeichnung des Versuchsstands.

Im Rahmen eines definierten Versuchsprogramms wurden vorab alle relevanten Betriebsparameter festgelegt, sodass für die durchgeführten Untersuchungen möglichst praxisnahe Betriebsbedingungen gewährleistet werden können und alle Untersuchungen unter vergleichbaren Rahmenbedingungen ablaufen. Als Einstellung für den Unterdruck im System zur Abfuhr der erwärmten Abluft wird ein Saugzuggebläse eingesetzt, über welches, gemäß den existierenden Prüfnormen für Einzelraumfeuerungsanlagen, ein Unterdruck von 12 Pa eingestellt wurde. Das verwendete Heizelement wurde so geregelt, dass die Probeneintrittstemperatur der Abluft 200 °C beträgt. Das gewählte Temperaturniveau der Abluft von 200 °C spiegelt gemäß den Erfahrungen des Fachgebiets Verbrennungssysteme des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP das durchschnittliche Abgasniveau im Bereich von Holzfeuerungen wider. Die Strömungsgeschwindigkeit von Abgasen in Einzelraumfeuerungsanlagen kann in Abhängigkeit diverser Parameter variieren (Förderdruck, Brennstoffmenge, Geometrie der Abgaswege), daher wurden die Versuche mit zwei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten (0,5 m/s | 1,0 m/s) durchgeführt, um die Speichersteine in Bezug auf ihre Flexibilität gegenüber der Strömungsgeschwindigkeit zu untersuchen. Die Dauer der Aufheizphase

wurde dabei auf 8 h festgelegt. Nach Ablauf dieser Zeit wird das Heizgebläse-System sowie das Saugzuggebläse zur Beförderung der Abluft abgeschaltet und der Kugelhahn, an der Öffnung des PVC-Rohrs, verschlossen, sodass der Probekörper nicht mehr aktiv durchströmt wird. Der Versuch wurde beendet, sobald der Probekörper wieder annähernd seine Ausgangstemperatur erreicht hat. Nachfolgend werden die definierten Betriebsparameter zusammengefasst:

- Dauer Aufheizphase: 8 h
- Unterdruck: 12 Pa
- Lufttemperatur am Probeneintritt: 200 °C
- Strömungsgeschwindigkeit des Mediums: 0,5 m/s | 1,0 m/s

Darüber hinaus wurden die Untersuchungen der Speichersteine im Versuchsstand in zwei unterschiedliche Varianten unterteilt. Variante I umfasste dabei die direkte Variante, welche sich dadurch kennzeichnet, dass der Probekörper direkt mit dem Heizmedium in Kontakt ist. Diese Variante soll den Praxisfall simulieren, bei dem die Speichersteine als eine Art Rauchgaszug in einer separaten Kammer über dem Feuerraum eingesetzt werden. Bei der Variante II wird die erwärmte Luft durch ein Abgasrohr, welches mittig im Probekörper angeordnet ist, geleitet. Der Speicherstein ist hierbei indirekt mit dem Heizmedium in Kontakt.

Bei der Versuchsdurchführung wird Luft über ein Gebläse angesaugt und mit Hilfe eines Heizelements erhitzt, sodass das Medium im Bereich des Probeneintritts ein Temperaturniveau von 200 °C aufweist und anschließend bei einer definierten Strömungsgeschwindigkeit den Probekörper durchströmt. Unmittelbar vor dem Eintritt in den Probekörper werden auftretende Turbulenzen durch eine Stabilisierungszone möglichst begrenzt. Die installierte Netzmessung erfasst am Probeneintritt das durchschnittliche Temperaturniveau, über den gesamten Querschnitt, des Mediums. Nachdem das Medium den Probekörper durchströmt hat, wird am Austritt der Probe erneut das Temperaturniveau gemessen. Basierend auf dem ermittelten Temperaturunterschied (Δt) der Temperatur am Probeneintritt und der Temperatur am Probenaustritt, können Rückschlüsse auf die durch die untersuchten Speichersteine aus dem Abluftstrom ausgekoppelte Wärmemenge getroffen werden.

Für die Untersuchung und im Rahmen der Entwicklung eines MagnesiaHSM-Speichersteins als neuer ökologischer Schamottersatz hat sich durch die von der Arbeitsgruppe Wärmekennwerte und labortechnische Klimasimulation zuvor durchgeführte Materialanalyse verschiedener Mischrezepturen und Materialzusammensetzungen eine favorisierte Rezeptur (HSM69A) mit geeigneten Materialeigenschaften für den Anwendungsbereich als Wärmespeichermaterial (HSM – Heat Storing Material) zum optimierten Einsatz als wärmespeichernde Ofenummantelung herauskristallisiert. Als

Referenzprobe für die Untersuchung im Versuchsstand wurde die gebräuchlichste Schamott-Qualität HBO+ als Zugformsteine mit einem Nut- und Federsystem ausgewählt, da diese relativ einfach zu einem Probekörper aufgebaut werden können. Ein einzelner Zugformstein hat die Maße 270 mm x 270 mm x 270 mm (lxbxh) und einen Innenquerschnitt von 180 mm / 180 mm. Der Probekörper besteht aus vier Zugformsteinen, das entspricht einer Gesamthöhe von 108 m. Für eine Vergleichsmessung im Versuchsstand musste im Anschluss eine Gussform mit den identischen Maßen des Probekörper Schamotte-Zugformstein-HBO+, entwickelt und hergestellt werden. Hierzu wurde eine Schalung aus vier beweglichen Teilen, damit die Form flexibel gießbar sowie leicht ausschaltbar ist, entworfen (vgl. Abbildung 5).



Abbildung 5: Gussform/Verschaltung zur Herstellung der Probekörper.

Die darauffolgende Herstellung des HSM 79A-Probekörpers erfolgte anschließend in Kooperation mit K33. K33 hat die konstruierte Schalung mit der Materialmischung 69A befüllt und nach einer Aushärtezeit von ca. 3-4 Wochen den fertigen Probekörper mit der neuen Bezeichnung HSM 79A

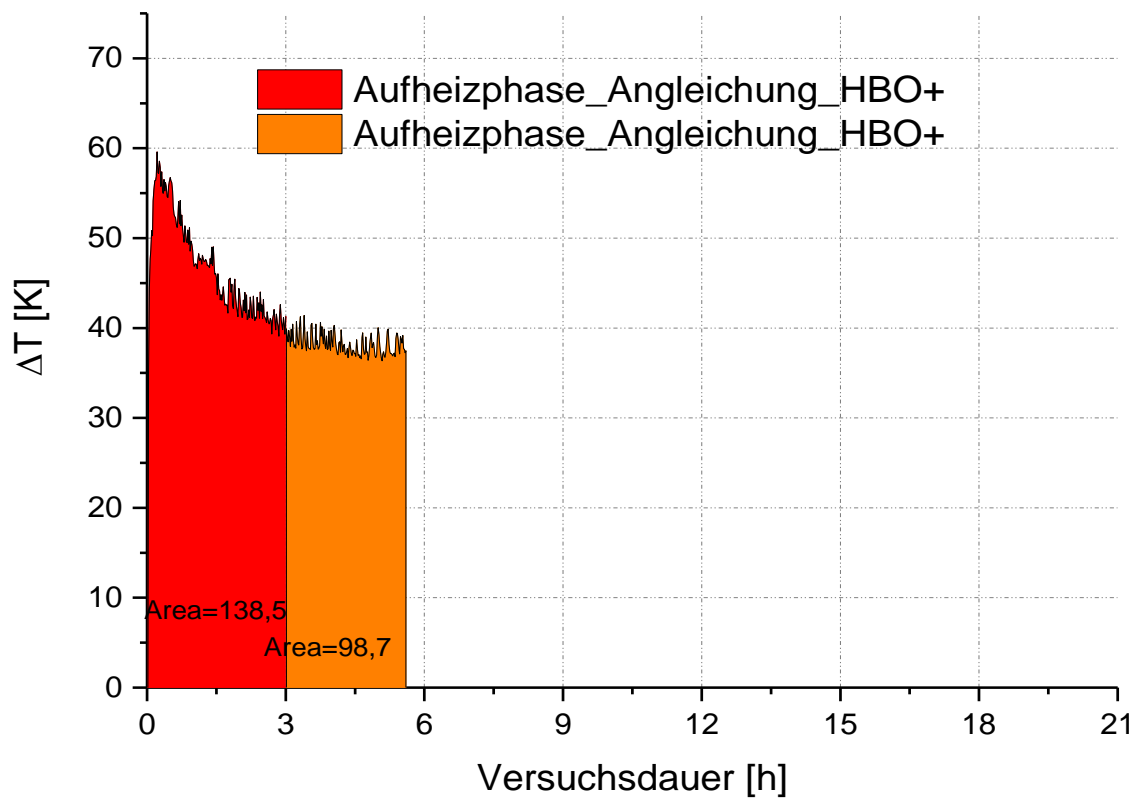
(69A=79A) dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP für die Untersuchung im Versuchsstand zur Verfügung gestellt. In der nachfolgenden Abbildung 6 sind die beiden im Versuchsstand eingebauten Probekörper dargestellt.



Abbildung 6: Im Versuchsstand installierte Probekörper; links: Probekörper-HBO+ (Höhe=1,08 m; Gewicht=80,8 kg), rechts: gegossener Probekörper-HSM79A (Höhe=1,08 m; Gewicht=82,7 kg).

Der gegossene Probekörper-HSM 79A ist als reiner Wärmespeicher zu betrachten, als Feuerfeststein ist das Material ungeeignet, da beim Überschreiten der Temperaturgrenze von Brucit (350 °C) unerwartete Stoffumwandlungen im Material hervorgerufen werden können. In Diagramm 4 werden die aufgezeichneten Temperaturdifferenzen von Probeneintrittstemperatur und Probenaustrittstemperatur des Speichersteins-HBO+ dargestellt. Die Untersuchung wurde mit der zuvor beschriebenen Variante I (Speicherstein ist direkt mit dem Heizmedium in Kontakt), einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,5 m/s, einem Unterdruck von 12 pa, einer Probeneintrittstemperatur von 200 °C und einer Aufheizphase von 5 h 30 min. durchgeführt. Die Abluftstrecke ist durch die identische Höhe der Probekörper ebenfalls identisch. Über die ermittelten Temperaturdifferenzen während des Versuchs, können relative Rückschlüsse auf die durch die untersuchten Speichersteine aus dem Abluftstrom ausgekoppelte Wärmemenge getroffen werden. Zu Beginn der Untersuchungen, innerhalb der Versuchsstunden 1-3 (Angleichung), ist zu sehen, dass die

Temperaturdifferenz kontinuierlich sinkt bevor sie sich anschließend auf einem konstanten Temperaturniveau einschwingt (Beharrung) und dieses bis zum Ende der Heizphase (bis Versuchsstunde 5,5 h) beibehält. Im Verlauf des Versuchs gleichen sich die Probeneintrittstemperatur und die Probenaustrittstemperatur zunehmend an. Ab Versuchsstunde 3 stellt sich ein Gleichgewicht bei ca. $\Delta t=46,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ein. Um einen relativen Vergleich zwischen den Probekörpern, bezüglich der dem Abluftstrom entzogenen Wärmemenge herstellen zu können, wurden die jeweiligen Flächen unterhalb der Diagrammlinien (farblich markierte Bereiche) integriert (vgl. Diagramm 4).



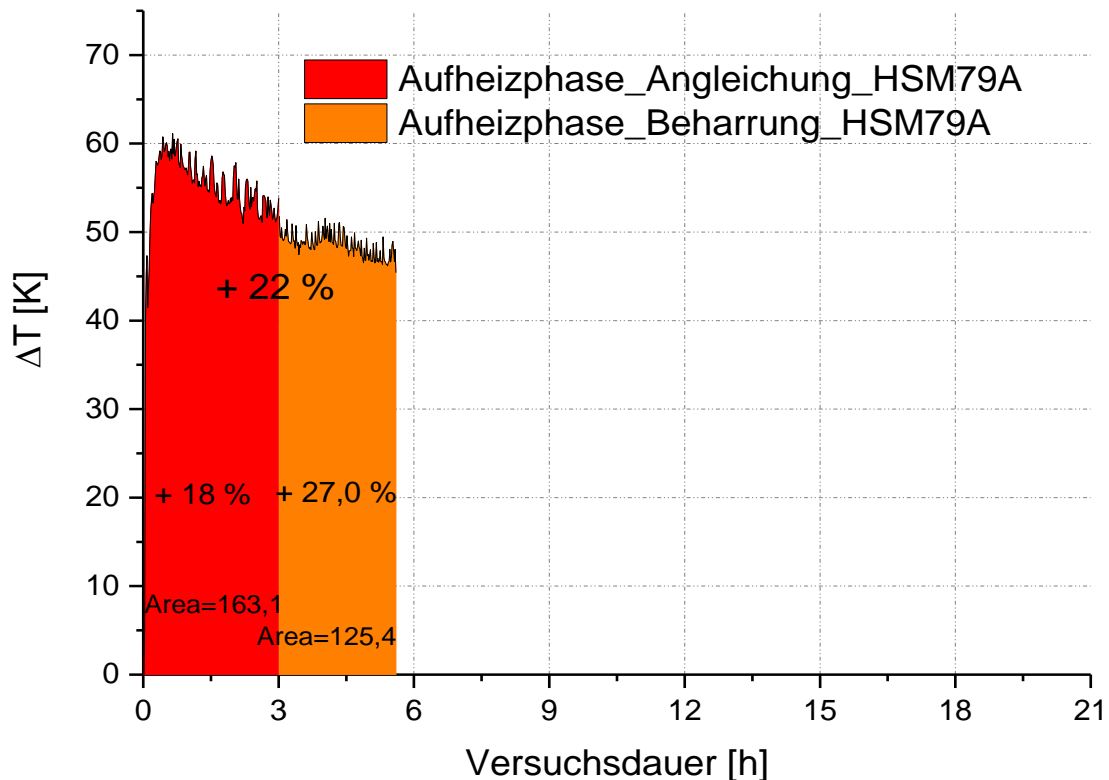


Diagramm 4: Aufgezeichnete Temperaturdifferenzen (Probeneintrittstemperatur und Probenaustrittstemperatur); Untersuchungsparameter: Variante I (Speicherstein ist direkt mit dem Heizmedium in Kontakt), Strömungsgeschwindigkeit von 0,5 m/s, Unterdruck von 12 Pa, Probeneintrittstemperatur von 200 °C und einer Aufheizphase von 5 h 30 min.; oben: Probekörper=HBO+(Schamott), unten: Probekörper=HSM79.

Die aufgezeichneten Messergebnisse des Verlaufs der Temperaturdifferenzen im Rahmen der Untersuchung des Probekörpers-HSM79A sind im Vergleich nicht unwesentlich höher. Bei einer direkten Gegenüberstellung ist die integrierte Fläche der Aufheizphase des Probekörpers-HSM79A, in Relation und unter identischen Rahmenbedingungen, um 22,0 % größer (vgl. Diagramm 4). Somit nimmt der Speicherstein-HSM79A aus der erwärmten Abluft, innerhalb des definierten Zeitraums, eine 22,0 % größere Wärmemenge auf.

Diagramm 5 veranschaulicht die aufgezeichneten Temperaturdifferenzen des Speichersteins-HBO+ im Rahmen der Variante I (Speicherstein ist direkt mit dem Heizmedium in Kontakt), einer Strömungsgeschwindigkeit von 1,0 m/s, einem Unterdruck von 12 Pa, einer Probeneintrittstemperatur von 200 °C sowie einer Aufheizphase von 8 h. Durch die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit von 0,5 m/s auf 1,0 m/s verkürzt sich die Aufenthaltszeit des erwärmten Mediums in der Probe maßgeblich, was sich durch die niedrigeren Temperaturdifferenzen zeigt (vgl. Diagramm 5).

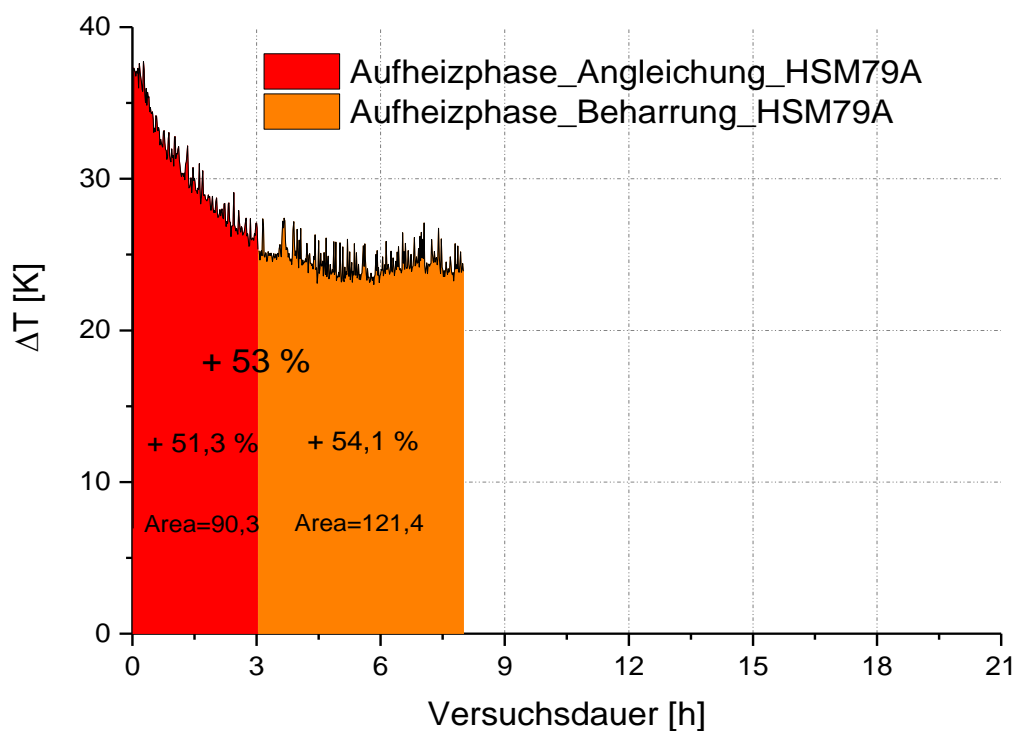
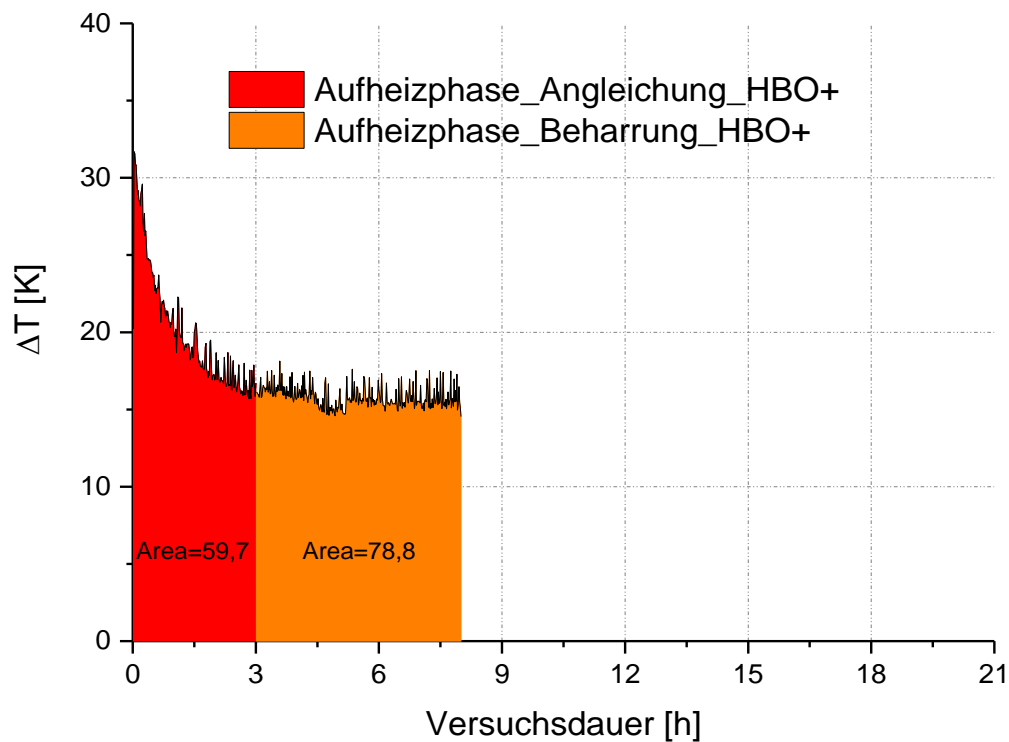


Diagramm 5: Aufgezeichnete Temperaturdifferenzen (Probeneintrittstemperatur und Probenaustrittstemperatur); Untersuchungsparameter: Variante I (Speicherstein ist direkt mit dem Heizmedium in Kontakt), Strömungsgeschwindigkeit von 1,0 m/s, Unterdruck von 12 Pa, Probeneintrittstemperatur von 200 °C und einer Aufheizphase von 8 h; oben: Probekörper=HBO+(Schamott), unten: Probekörper=HSM79A.

Bei einem erneuten Vergleich der Flächenintegrale kann festgestellt werden, dass sich die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit auf 1 m/s negativ auf den Probekörper-HBO+ ausgewirkt hat. Die integrierte Fläche der Aufheizphase des Probekörpers-HSM79A, in Relation und unter identischen Rahmenbedingungen, ist in diesem Versuch um 53 % größer. Daraus kann abgeleitet werden, dass das Speichermaterial-HSM79A deutlich flexibler in Bezug auf die Änderung der Strömungsgeschwindigkeit reagiert, was speziell beim Einsatz als Speicherstein im Bereich von Holzfeuerungen als sehr positiv zu bewerten ist.

Zusätzlich im Rahmen des Selben Versuchs werden nachfolgend mit Diagramm 6 Ergebnisse aufgezeigt, welche das Aufheizverhalten sowie das Abkühlungsverhalten der beiden untersuchten Probekörper darstellen. Die grüne Linie (Temperaturverlauf_HBO+_TE) zeigt den Mittelwert der Oberflächentemperatur der Probe (Mittelwert aus 16 Thermoelementen auf der Außenseite des Speichersteins). Diese steigt kontinuierlich während der Aufheizphase bis auf 64,5 °C. Nach ca. 6 h hat der Probekörper sein maximales Temperaturniveau erreicht und befindet sich in einem stationären Zustand, d. h. die zugeführte Wärmemenge ist identisch mit der abgestrahlten Wärmemenge. Bis einschließlich Versuchsstunde 8 verhält sich das Temperaturniveau konstant. Nach 8 Versuchsstunden wird das Heizgebläse sowie das Saugzuggebläse zur Beförderung der Abluft abgeschaltet und der Kugelhahn, an der Öffnung des PVC-Rohrs, verschlossen, sodass der Probekörper nicht mehr aktiv durchströmt wird. Der Probekörper befindet sich jetzt in der Wiederabkühlungsphase, seine Oberflächentemperatur sinkt. Nach etwa 15 Versuchsstunden hat der Speicherstein-HBO+ wieder seine Ausgangstemperatur erreicht. Die im Diagramm 7 dargestellten schwarzen Messpunkte (Temperaturverlauf_HBO+_WBK) entsprechen der Oberflächentemperatur der Probe, welche zusätzlich parallel unter der Verwendung einer Wärmebildkamera stündlich aufgenommen wurden. Diese spiegeln den erfassten Temperaturverlauf durch die auf der Oberfläche des Probesteins angebrachten Thermoelemente wider. Die zu sehenden blauen Messpunkte (Wandtemperatur_WBK) zeigen den Temperaturverlauf der Wand im Versuchsraum. Diese wurden ebenfalls stündlich von der installierten Wärmebildkamera erfasst. Die schwarze Linie zeigt die aufgenommene Raumtemperatur, welche durch ein freihängendes Thermoelement mit Strahlungsschutz aufgezeichnet wurde.

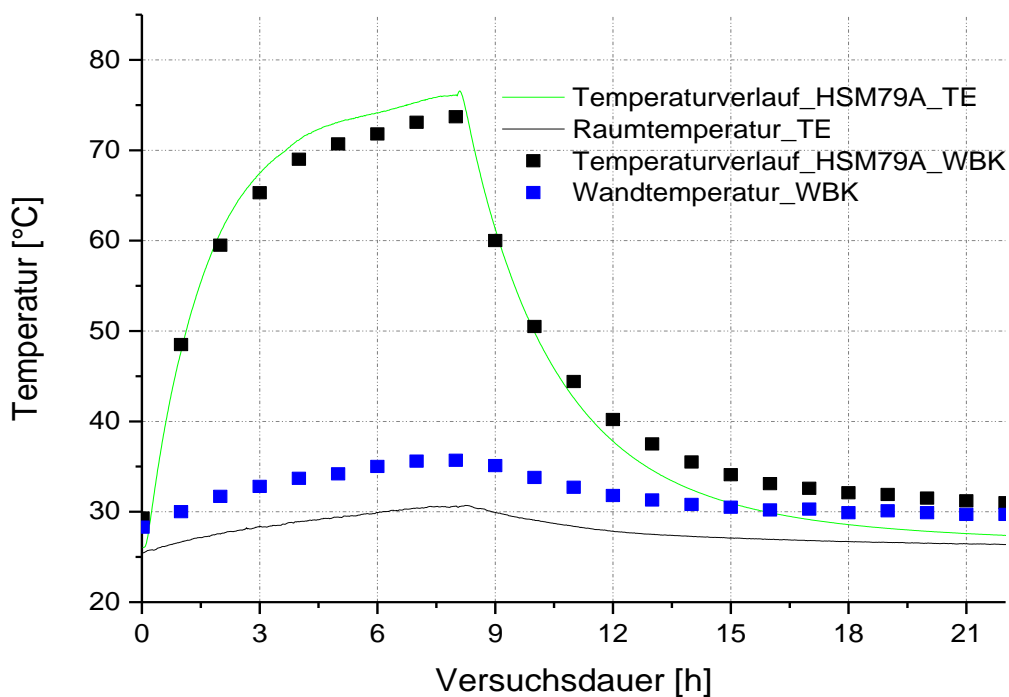
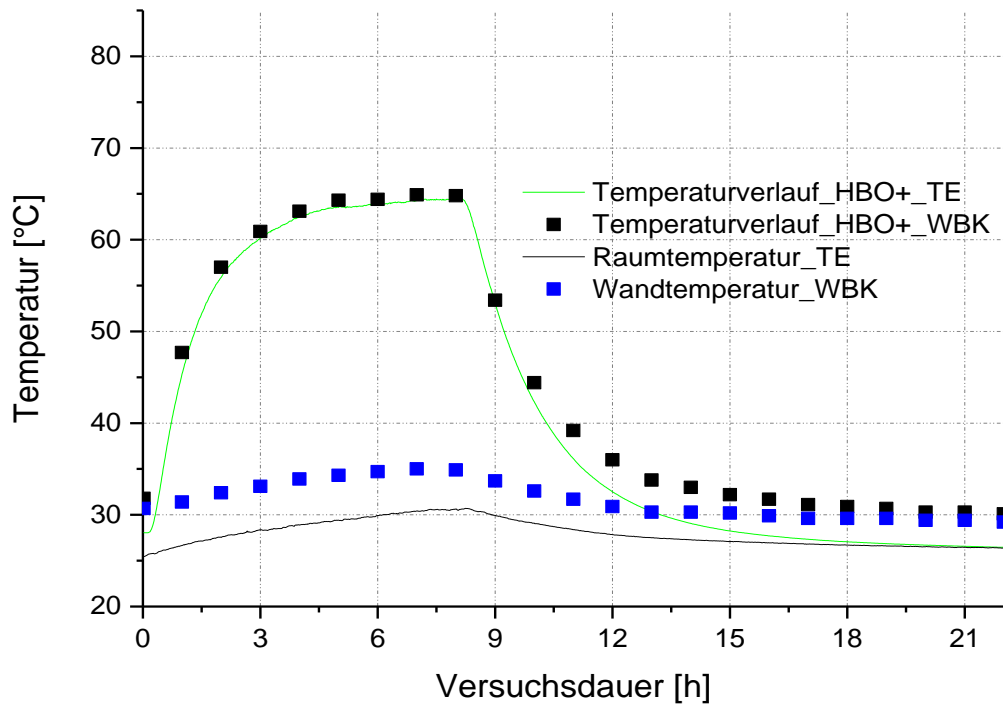


Diagramm 6: Verlauf der Oberflächentemperatur der Speichersteine; Untersuchungsparameter: Variante I (Speicherstein ist direkt mit dem Heizmedium in Kontakt), Strömungsgeschwindigkeit von 1,0 m/s, Unterdruck von 12 Pa, Probeneintrittstemperatur von 200 °C und einer Aufheizphase von 8 h; Anmerkung: TE=Thermoelement; WBK=Wärmebildkamera; oben: Probekörper=HBO+(Schamott), unten: Probekörper=HSM79A.

Diagramm 6 (unten) stellt die erhaltenen Messergebnisse dar, die bei der Untersuchung mit dem Probekörper-HSM79A, unter identischen Rahmenbedingungen, erzielt wurden. Die Oberflächentemperatur des Probekörpers-HSM liegt zu Beginn des Versuchs mit 26,0 °C ca. 2,5 °C unterhalb der Oberflächentemperatur des Probekörpers-HBO+, wodurch der HSM-Speicherstein in der Ausgangssituation minimal benachteiligt wird. Die grüne Linie (Temperaturverlauf_HSM_TE) zeigt den Mittelwert der Oberflächentemperatur der Probe (Mittelwert aus 16 Thermoelementen auf der Außenseite des Speichersteins). Diese steigt kontinuierlich während der Aufheizphase bis auf den maximalen Wert von 76,5 °C. Bis zum Zeitpunkt der Abschaltung (ab Versuchsstunde 8) des Heizelements hat sich die Temperatur im Anstieg befunden.

Im Folgenden werden die jeweiligen Temperaturverläufe der beiden Probekörper übereinandergelegt um einen direkten Vergleich zu ermöglichen. Es wird deutlich, dass die Oberflächentemperatur des Speichersteins-HSM79A sich schneller erwärmt wie bei dem Schamott-Probekörper. Nach einer Versuchsdauer von 3 h beträgt die Oberflächentemperatur des Speichersteins-HSM79A 67,5 °C, die Probe-HBO+ hingegen 60,2 °C. Dies ist auf die höhere Wärmeleitfähigkeit (Faktor 4) des HSM79A-Materials zurückzuführen, trotz der gleichzeitig höheren spezifischen Wärmespeicherkapazität. Beim Zeitpunkt von Versuchsstunde 8 beträgt das Oberflächentemperaturniveau des Speichersteins- HSM79A 76,1 °C und die HBO+-Probe bei 64,4 °C ($\Delta t=11,7$ °C). In der Abkühlungsphase nach dem Abschalten des Heizgebläses beträgt die Temperatur nach 12 Versuchsstunden (4 h nach Abschaltung des Heizgebläses) noch 37,8 °C bei der HSM79A-Probe sowie 32,5 °C ($\Delta t=5,3$ °C) bei der HBO+-Probe. Das Temperaturniveau von 32,5 °C, erreicht der HSM79A-Speicherstein nach 14 Versuchsstunden (6 h nach Abschaltung des Heizgebläses). Aufgrund der bereits angesprochenen höheren Wärmeleitfähigkeit gibt der HSM79A-Speicherstein die gespeicherte Wärme ebenfalls schneller wieder ab. Die schnellere Wärmeabgabe muss über eine ebenfalls höhere Wärmespeicherkapazität, in dem Maß kompensiert werden, sodass der Referenzspeicherstein-HBO+, hinsichtlich der Wärmeentladezeit, übertroffen werden kann. Das realisierte höhere Temperaturniveau dient hierbei als zeitlicher Puffer um die schnellere Wärmeabgabe überkompensieren zu können (vgl. Diagramm 7).

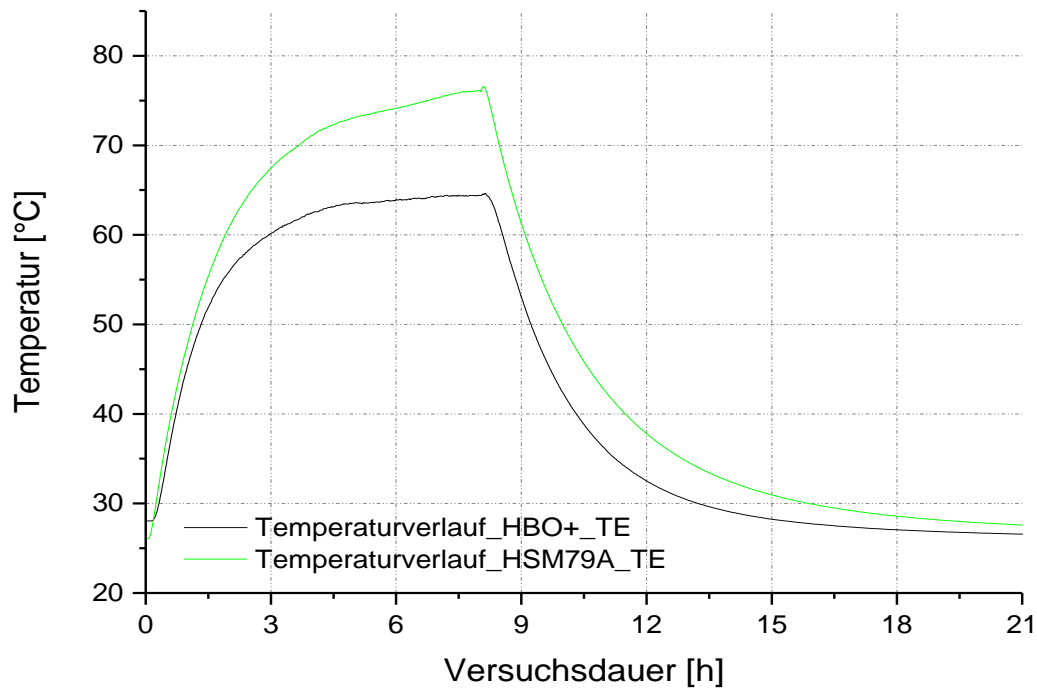
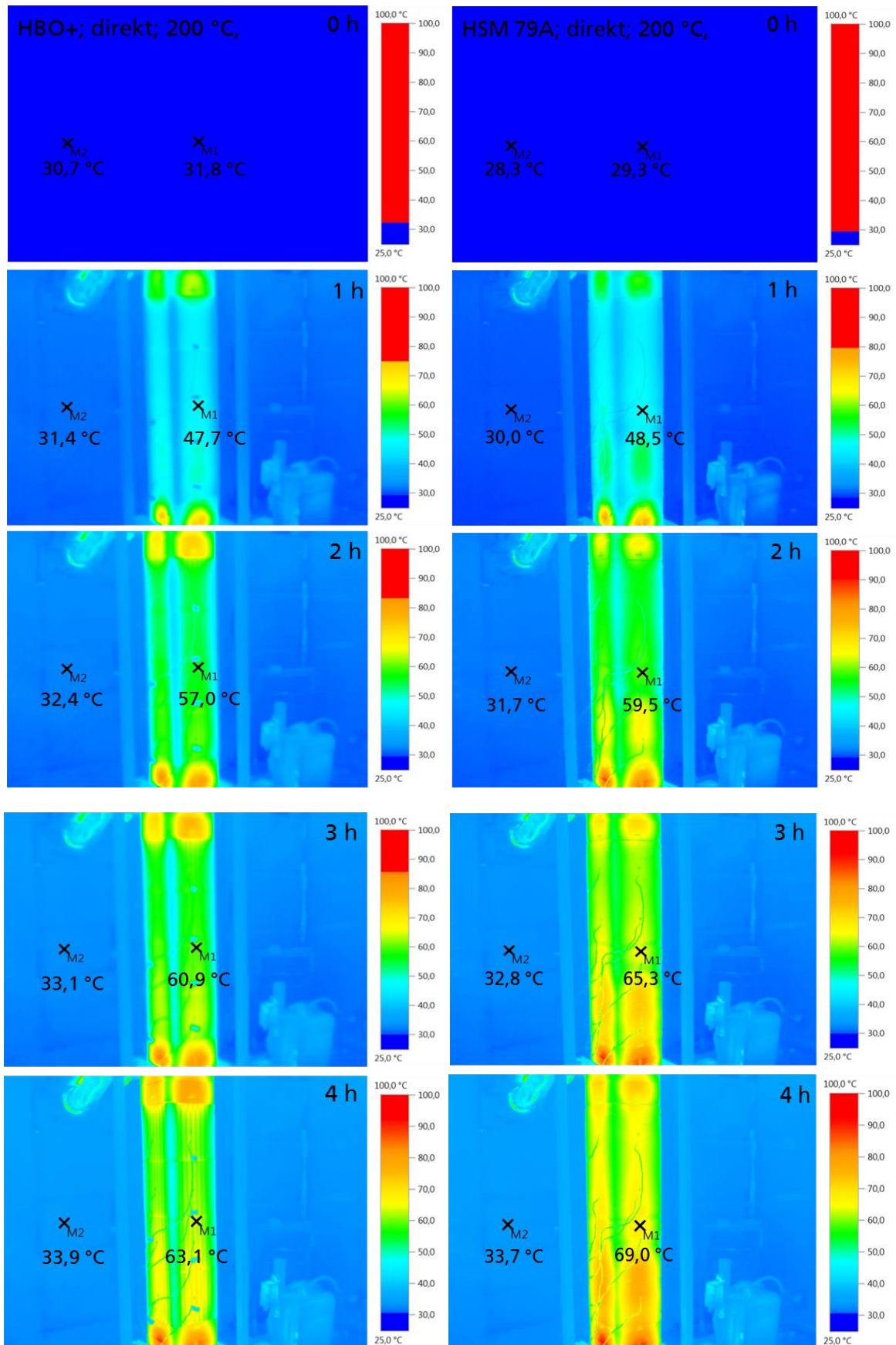
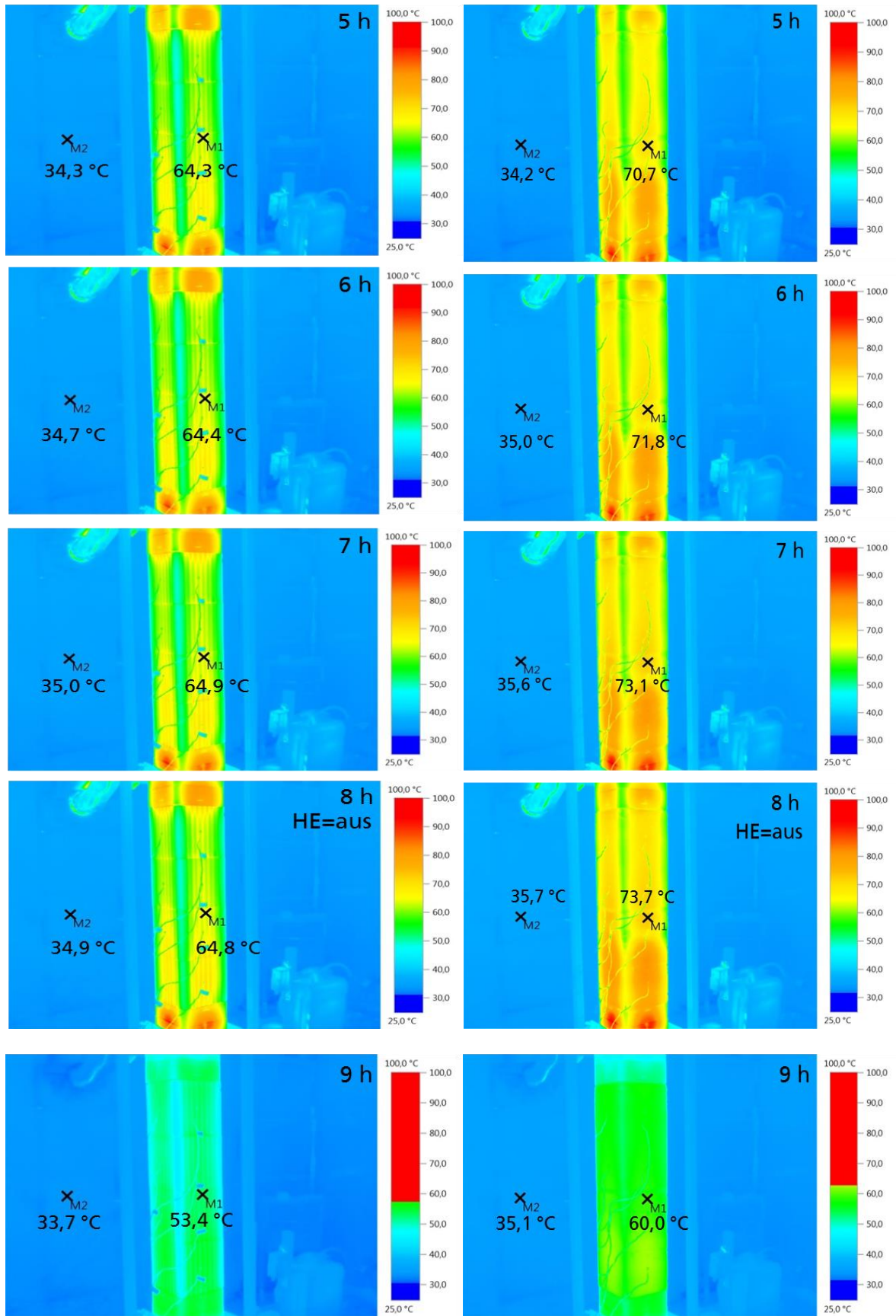


Diagramm 7: Direkter Vergleich der Oberflächentemperatur der untersuchten Speichersteine; Untersuchungsparameter: Strömungsgeschwindigkeit von 1,0 m/s, Unterdruck von 12 Pa, Probeneintrittstemperatur von 200 °C und einer Aufheizphase von 8 h; Anmerkung: TE=Thermoelement.

Anschließend werden zusätzlich zu diesem Versuch noch die dazugehörigen aufgenommenen Wärmebilder der Speichersteine dargestellt, wodurch das Aufheizverhalten, das Speicherverhalten sowie die Phase der Abkühlung visualisiert werden. In der nachfolgenden Abbildung 7 werden die erzeugten stündlichen thermografischen Aufnahmen der HBO+-Probe sowie der HSM79A-Probe dargestellt. Auf die Darstellung der Wärmebilder der Versuchsstunden 14-18 wird aufgrund zu niedriger Oberflächentemperaturen verzichtet und stattdessen die Oberflächentemperaturen der Messpunkte aufgeführt.





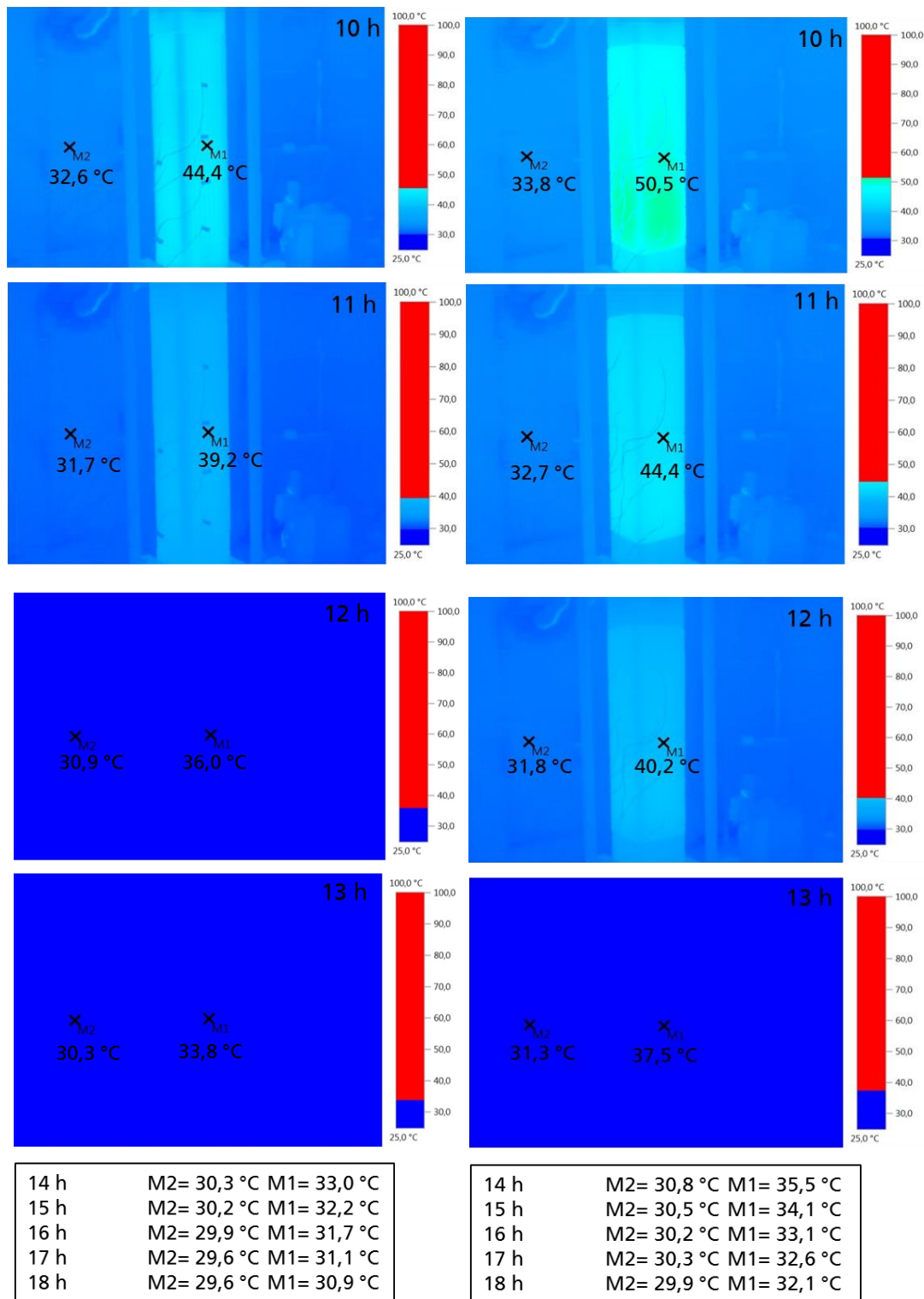


Abbildung 7: Wärmebilder der untersuchten Speichersteine; Untersuchungsparameter: Variante I (Speicherstein ist direkt mit dem Heizmedium in Kontakt), Strömungsgeschwindigkeit von 1,0 m/s, Unterdruck von 12 Pa, Probeneintrittstemperatur von 200 °C und einer Aufheizphase von 8 h; Anmerkung: links = HBO+, rechts = HSM 79A.

Darüber hinaus erfolgte in enger Zusammenarbeit mit den Baustoff/Bauchemie-Experten des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP in Valley die Weiterentwicklung des neuen Materials zum Einsatz als Feuerfeststein zur Brennraumauskleidung und zum Material für Feinstaubkatalysatoren. Hierbei kam die Frage seitens K33 auf, warum Mischungen mit feiner Sieblinie und Zitronensäuremonohydrat nach Brand bei ca. 900 °C auch ohne Tonerdeschmelzzement eine geeignete Festigkeit aufweisen. Es wurde die These aufgestellt, dass eine durchgängige Karbonatisierung der Grund dafür ist, die mittels einer Phasenanalyse mittels Pulverröntgendiffraktometrie (XRD) nachweisbar wäre. Ist keine durchgängige Karbonatisierung festzustellen, könnte die Mischungsrezeptur von einer 2-komponentigen Mischung zu einer erheblich günstigeren und leichter zu verarbeitenden 1-komponentigen Mischung optimiert werden, um eine passende Rezeptur bezüglich der Weiterentwicklung des neuen Materials zum Einsatz auch als Feuerfeststein zu weisen. Anschließend wurde an drei ausgewählten Proben durch die Arbeitsgruppe Betontechnologie und funktionale Baustoffe des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP eine qualitative Phasenanalyse mittels Pulverröntgendiffraktometrie (XRD) durchgeführt. Die Aufbereitung des Materials erfolgte, indem die Proben zunächst händisch zerkleinert und anschließend mittels einer Planetenkugelmühle (FRITSCH Pulverisette 6) mit Wolframcarbid Kugeln gemahlen wurden. Das Pulver wurde anschließend in Kunststoffprobenhalter gefüllt, leicht angedrückt und mit Hilfe von Glas-Objektträgern wurde eine möglichst ebene Oberfläche erzeugt. Die Messungen wurden mit Hilfe eines D2 Phaser-Geräts (Bruker AXS) durchgeführt. Zur Messung wurde Kupfer $K\alpha$ -Strahlung mit einer Wellenlänge von 0,15418 nm verwendet. Es wurde bei allen Messungen mit einer Schrittweite von $0,02^\circ 2\Theta$ und einer Messdauer von 3 Sekunden pro Schritt über einen Winkelbereich von insgesamt $5 - 65^\circ 2\Theta$ gemessen. Eine ausführliche Übersicht der verwendeten Messparameter ist in Tabelle 5 gegeben.

Tabelle 5: Geräteparameter und Messeinstellungen des Bruker 2D Phasen-Diffraktometers.

Parameter	Wert
Wellenlänge	Cu-K α
Spannung	30 kV
Stromstärke	10 mA
Messbereich	5-65° 2 Θ
Schrittweite	0,02° 2 Θ
Messzeit pro Schritt	3 s
Messzeit pro Range	2,5 h
Rotationsgeschwindigkeit	15 U/min
Divergenzblende	0,2 mm
Monochromator	Ni-Filter
Detektor	Silicon Strip Detektor

Zur qualitativen Auswertung der gemessenen Spektren wurde das Programm DIFFRAC.EVA V 4.2 (Bruker AXS) verwendet, welches auf die PDF-2 Strukturdatenbank des ICCD (International Centre for Diffraction Data) zurückgreift.

Die qualitativen Auswertungen der erzeugten Beugungsdiagramme ergaben, dass die Probe „EcoMag Fire“ Brucit (Mg(OH)₂), Magnesit (MgCO₃), Calcit (CaCO₃), Dolomit (CaMg(CO₃)₂), Quarz (SiO₂), Anhydrit (CaSO₄), Katoit (Ca₃Al₂(OH)₁₂) und Brownmillerit (Ca₂(Al,Fe+3)2O₅) enthält. Die Proben 69A und 71A weisen folgenden Mineralbestand auf: Brucit (Mg(OH)₂), Magnesit (MgCO₃), Calcit (CaCO₃), Dolomit (CaMg(CO₃)₂), Quarz (SiO₂), Anhydrit (CaSO₄), Brownmillerit (Ca₂(Al,Fe+3)2O₅) und Periklas (MgO).

Die untenstehenden Grafiken zeigen die erzeugten Beugungsdiagramme der Proben. Ein quantitativer Vergleich der Messungen ist nicht möglich, ebenso lässt sich keine Aussage über eine Phasenentwicklung treffen, die während des Brennvorgangs möglicherweise ablaufen könnte. Der deutliche Unterschied zwischen den Proben 69A bzw. 71A und der Probe „EcoMag Fire“ liegt in der Phase Periklas (MgO), der bei „EcoMag Fire“ nicht vorhanden ist.

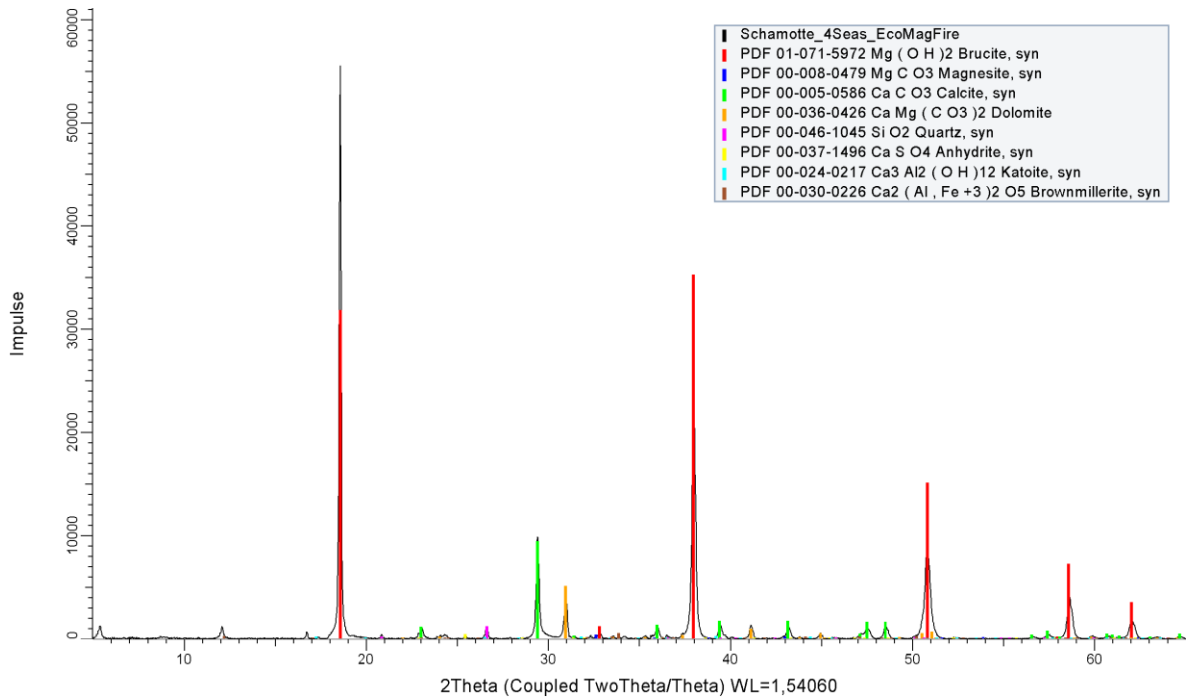


Diagramm 8: Pulverröntgendiffraktometrie (XRD) der Probe Schamotte_4Seas_EcoMagFire.

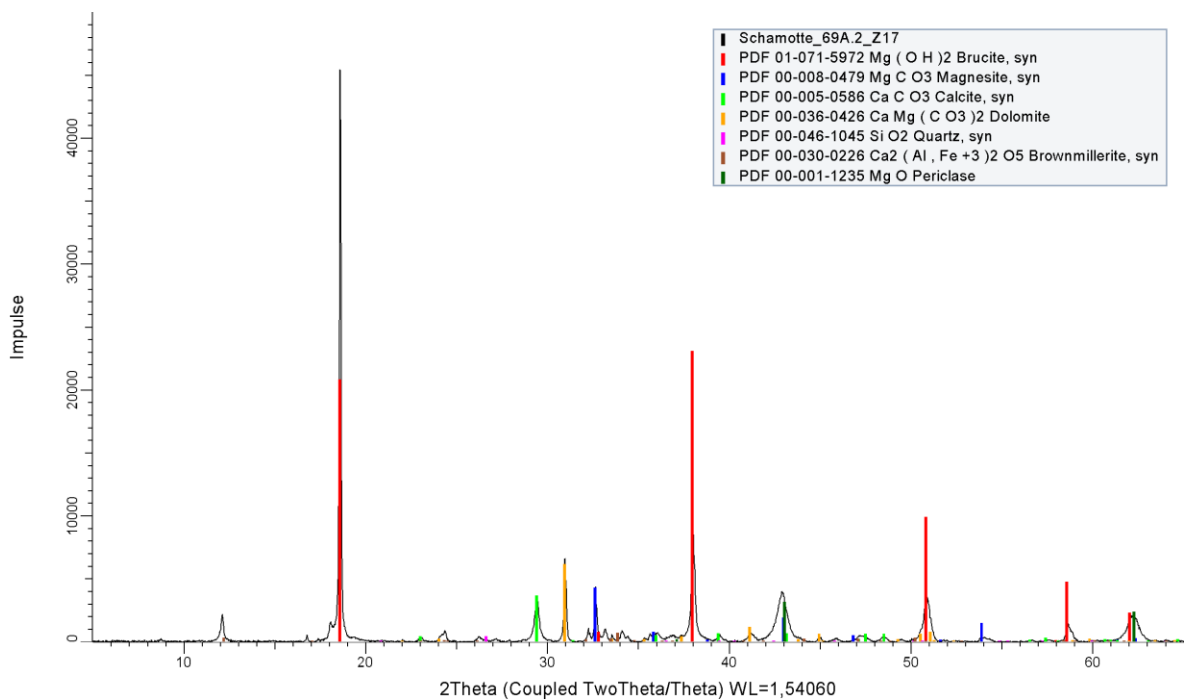


Diagramm 9: Pulverröntgendiffraktometrie (XRD) der Probe Schamotte_69A.2.

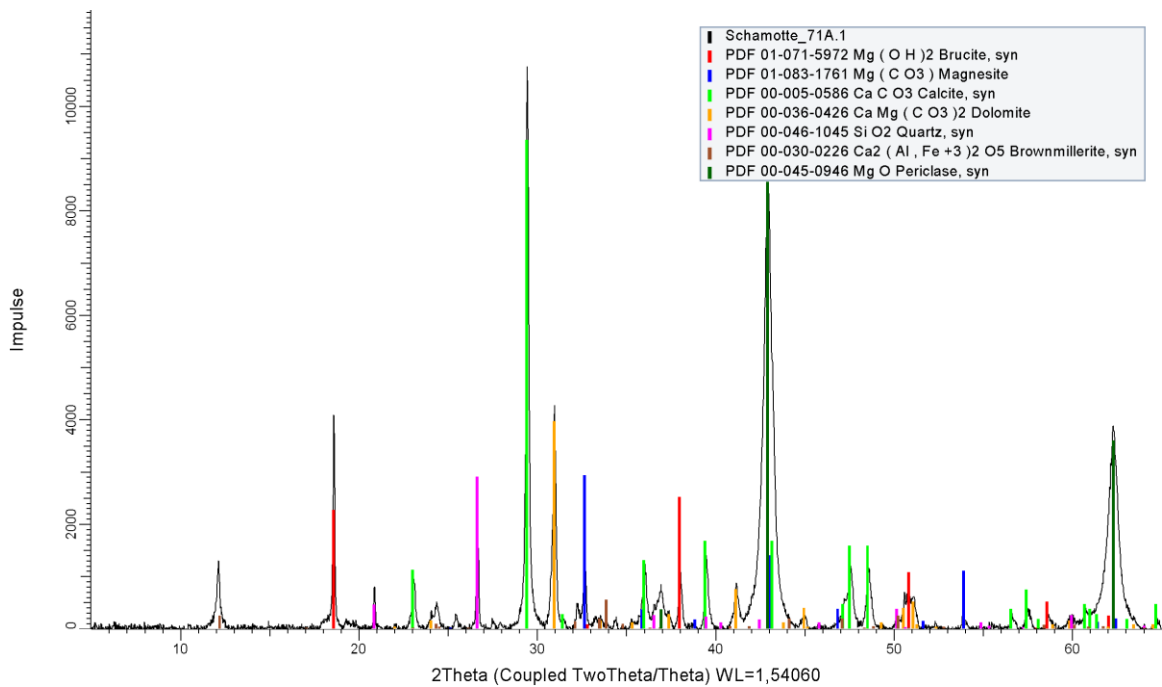


Diagramm 10: Pulverröntgendiffraktometrie (XRD) der Probe Schamotte_71A.1.

Auf Basis der erhaltenen Ergebnisse konnte keine durchgängige Karbonatisierung nachgewiesen werden, sodass durch K33 eine optimierte EcoMagFire-Rezeptur für die Entwicklung eines Feuerfeststeins zum Einsatz in einem Hochtemperaturanwendungsbereich innerhalb eines Feuerraums angefertigt werden konnte. Die Ergebnisse der Untersuchung des gegossenen Feuerfeststeins 91F.2 (vgl. Abbildung 8), auf Basis der EcoMagFire-Rezeptur, im Versuchsstand werden nachfolgend dargestellt.



Abbildung 8: Im Versuchsstand installierter Probekörper-91F.2 (Höhe=1,08 m; Gewicht=85,2 kg).

Als Referenzprobekörper wurde erneut, aufgrund seiner Eigenschaften, der HBO+-Probekörper ausgewählt, da diese Schamott-Qualität in allen Bereichen des Ofens, auch bei hohen Temperaturen, einsetzbar ist. In Diagramm 11 werden die aufgezeichneten Temperaturdifferenzen, von Probeneintrittstemperatur und Probenaustrittstemperatur der Speichersteine dargestellt. Die Untersuchung wurde mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 1,0 m/s, einem Unterdruck von 12 Pa, einer erhöhten Probeneintrittstemperatur von ca. 500 °C und einer Aufheizphase von 8 h durchgeführt. Die aufgezeichneten Messergebnisse des Verlaufs der Temperaturdifferenzen im Rahmen der Untersuchung des Probekörpers-91F.2 sind, bezogen auf die gesamte Versuchsdauer, im relativen Vergleich bei einer 5 % höheren Speichermasse, um 19 % höher als bei der getesteten HBO+-Probe. Der Probekörper-91F.2 entzieht dem erzeugten aufgeheizten Abluftstrom mehr Wärme als der Vergleichsprobekörper und kühlt diesen effizienter. Damit könnte MagnesiaHSM auch bei kleinen Öfen zu einer deutlichen Senkung der Abgastemperatur und verbesserter Speicherung genutzt werden. Da das Material flexibel auf Temperaturwechsel und unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten

reagiert, wird auch das Raumklima (Behaglichkeit) positiv beeinflusst da Temperaturspitzen (z.B. Anheizphase) ausgeglichen werden können.

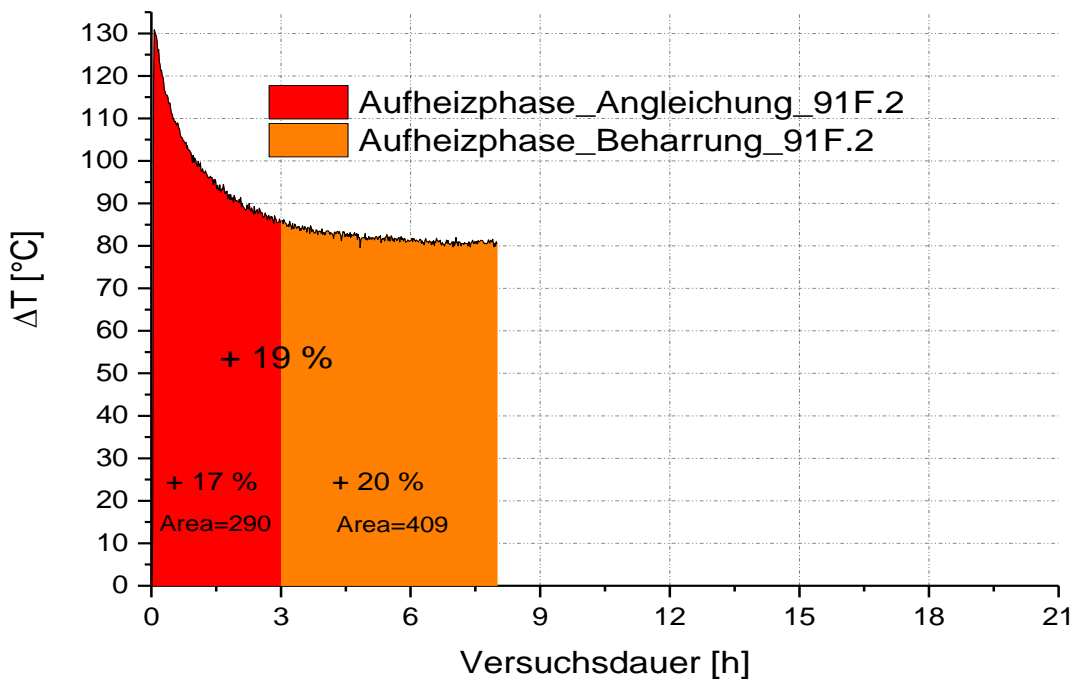
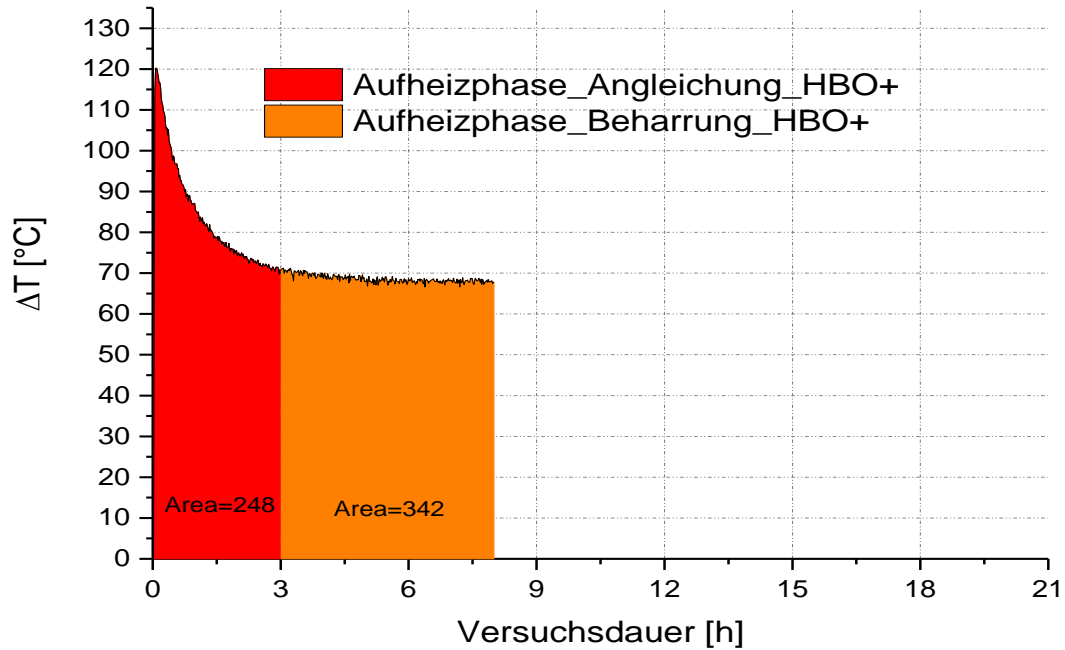


Diagramm 11: Aufgezeichnete Temperaturdifferenzen (Probeneintrittstemperatur und Probenaustrittstemperatur); Untersuchungsparameter: Strömungsgeschwindigkeit=1,0 m/s, Unterdruck=12 Pa, Probeneintrittstemperatur=ca. 500 °C und einer Aufheizphase=8h; oben: Probekörper=HBO+(Schamott), unten: Probekörper=91F.2.

Im nachfolgenden Diagramm 12 sind die jeweiligen Oberflächentemperaturverläufe der beiden Probekörper dargestellt. Es wird deutlich, dass die Oberflächentemperatur des Feuerfeststeins schneller ansteigt, als die des Probekörpers-HBO+ aus Schamott. Die deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit der 91F.2 beschleunigt den Wärmetransport von der Innenseite zur Oberfläche des Probekörpers. Nach einer Versuchsdauer von 3 h beträgt die Oberflächentemperatur des Feuerfeststeins-91F.2 ca. 127 °C, bei der Probe-HBO+ hingegen 107 °C. Beim Zeitpunkt von Versuchsstunde 8 beträgt das Oberflächentemperaturniveau des Steins-91F.2 ca. 141 °C, bei der HBO+-Probe 113 °C ($\Delta t=28$ °C). In der Abkühlungsphase beträgt die Temperatur nach 12 Versuchsstunden (4 h nach Abschaltung des Heizgebläses) 48,8 °C bei der 91F.2-Probe sowie 36,5 °C ($\Delta t=12,3$ °C) bei der HBO+-Probe (vgl. Diagramm 12).

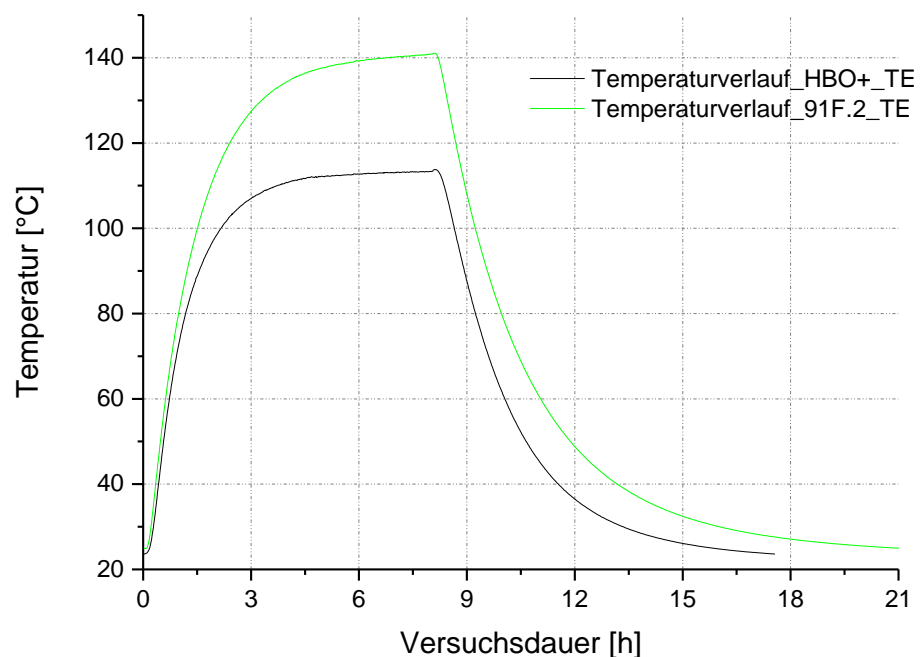


Diagramm 12: Direkter Vergleich der Oberflächentemperatur der untersuchten Probekörper; Untersuchungsparameter: Strömungsgeschwindigkeit von 1,0 m/s, Unterdruck von 12 Pa, Probeneintrittstemperatur=ca. 500 °C und einer Aufheizphase von 8 h; Anmerkung: TE=Thermoelement.

Die erzielten Ergebnisse des Feuerfeststeins, im Rahmen der Untersuchung für einen höheren Temperaturbereich >350 °C sind als positiv zu bewerten. Am Probekörper 91F.2 konnten im Anschluss an die thermische Belastung keine Veränderungen (Rissbildung, Brüchigkeit usw.) festgestellt werden. Ergänzend hierzu wurden Untersuchungen für einen Temperaturbereich >500 °C sowie eine Prüfung der Dauerhaftigkeit des Materials durchgeführt werden.

5.3 Validierungsmessungen an einer realen Einzelraumfeuerungsanlage - freistehender Raumheizer gemäß DIN EN 13240 (indirekte Variante bzw. Wärmeübertragung)

Im Rahmen des Arbeitspakets für die Messungen auf Grundlage realer Untersuchungsbedingungen beim Einsatz in Einzelraumfeuerungsanlagen wurden insgesamt zwei Einzelraumfeuerungsanlagen ausgewählt, durch welche die gesamte Produktpalette im Bereich von Einzelraumfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe abgedeckt werden kann. Zur Ermittlung der praktischen Umsetzbarkeit der entwickelten Speichersteine sollen zwei unterschiedliche Anlagentypen von Einzelraumfeuerungsanlagen untersucht werden. Mit diesen Anlagentypen werden hinsichtlich der Betriebsweise alle gängigen Einzelraumfeuerungsanlagen berücksichtigt. Bei dem ersten Anlagentyp handelt es sich um eine Feuerungsanlage mit einer schnellen Wärmeabgabe im Aufstellraum, wie beispielsweise freistehende Raumheizer gemäß DIN EN 13240 sowie Kamineinsätze und offene Kamine gemäß DIN EN 13229. Um den Wärmebedarf zu decken, werden diese in der Regel alle 35 Minuten bis 60 Minuten mit Holz beschickt. Zum anderen Anlagentyp gehören Feuerungsanlagen mit einer langsamen Wärmeabgabe im Aufstellraum, wie z. B. Grund- und Speicheröfen gemäß DIN EN 15250. Der ausgewählte Anlagentyp mit der schnellen Wärmeabgabe ist im Originalzustand mit einer Vermiculite-Feuerraumauskleidung ausgestattet sowie mit Schamotte-Speichersteinen im Abgaszug. Mit Hilfe der in diesem Kooperationsprojekt entwickelten Gussformen wurden für die Vermiculite-Feuerraumauskleidung identische Feuerfeststeine auf Basis der entwickelten und optimierten EcoMagFire-Rezeptur produziert. Für die Schamotte-Speichersteine im Abgaszug wurden dementsprechende Speicherplatten auf Basis der HSM 79A-Rezeptur hergestellt. Für die Bewertung der HSM-Speichersteine sowie der Feuerfeststeine soll die Einzelraumfeuerungsanlage im Originalzustand und mit den erzeugten Steinen betrieben werden (vgl. Abbildung 9). Die Durchführung der Verbrennungsversuche soll unter einheitlichen und reproduzierbaren Bedingungen mit einem Prüfstand in Anlehnung an DIN EN 13240 für Raumheizer mit den entsprechenden Abgasmesssystemen und Auswerteprogrammen ablaufen. Der Prüfaufbau erfolgt im begehbaren Kalorimeterraum. Durch dessen Aufbau werden Transmissionswärmeverluste möglichst gering gehalten. Dabei können die Brennstoffmassen, die Tripelpunkt-Abgastemperatur, der Förderdruck, die Abgastemperatur, Abgasanalysen hinsichtlich Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Kohlenwasserstoffe, Stickoxid, Staub, die Rückwand-, Seitenwand-, Zuluft-, Abluft-, Raumluft-, resultierende Raumtemperatur und der Abluftvolumenstrom bestimmt werden. Mit Hilfe dieser Parameter ist es möglich, durch die Berechnungen sowohl Aussagen über Wirkungsgrade, Wärmeleistungen und Schadstoffemissionen als auch über die thermische Belastung von brennbaren Aufstellflächen und der thermischen Be- und Entladung der Einzelraumfeuerungsanlage zu machen. Die Einzelraumfeuerungsanlage sowie der Prüfstand wurden soweit vorbereitet,

sodass im nächsten Schritt und weiteren Verlauf des Kooperationsprojekts „MagnesiaHSM – Ein neuer ökologischer Schamottersatz; Entwicklung einer neuartigen Wärmespeichergussform und Analyseverfahren“, die Messungen unter realen Untersuchungsbedingungen beim Einsatz in Einzelraumfeuerungsanlagen durchgeführt werden konnten. Das eingesetzte Testgerät ist ein geprüfter Raumheizer nach DIN EN 13240 mit einer Nennwärmeleistung von 10 kW und einem Wärmespeichermodul, bestehend aus vier Speichersteinen, welche oberhalb des Brennraums in eine Art Nachheizkasten vertikal eingebaut werden (vgl. Abbildung 9).

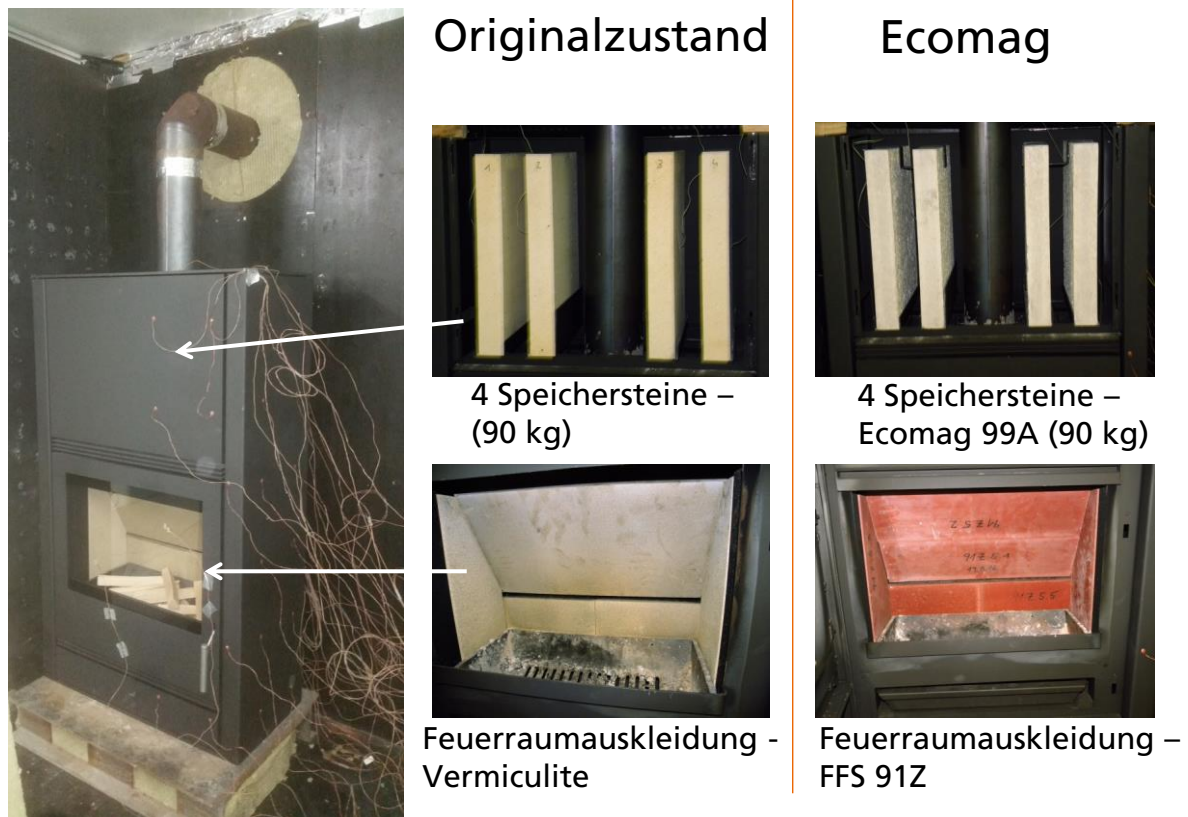


Abbildung 9: Für die Versuche eingesetzter Raumheizer mit einem Wärmespeichermodul; Anmerkung: im Originalzustand (Schamott) sowie in der EcoMag-Variante (Feuerraumauskleidung mit der feuerfesten Mischung 91Z und 4x Speichersteine aus 99A).

Der eingesetzte Raumheizer wurde bei beiden Varianten mit Nennwärmeleistung betrieben. Dabei wurden folgende Rahmenbedingungen für die Versuche festgelegt:

- Anheizen: 2,6 kg Kleinholz
- Brennstoff/Auflage: 2,6 kg (Prüfholz, homogen, identischer Wassergehalt, 3x 25 cm Scheite)
- Abbranddauer: 45 min./Auflage

- Stufe Primärluftöffnung: 0
- Stufe Sekundärluftöffnung: 2
- Unterdruck in der Abgasanlage: 12 Pa

Bereits nach dem ersten Heizbetrieb war bei der EcoMag-Variante eine deutliche Entfärbung der Feuerfeststeine festzustellen (vgl. Abbildung 10). Des Weiteren wurde im Rahmen der ersten Auflage eine erhöhte Staubkonzentration gemessen, welche mit dem Ausbrennen und dem Entfärben der Speichersteine einhergeht. Bei den nachfolgenden Auflagen war die Staubkonzentration wieder auf einem normalen Niveau und mit der Originalvariante vergleichbar. Generell konnten im Rahmen der Abgasanalyse (CO , CO_2 , C_nH_m , NO_x) keine Unterschiede zwischen der Original-Variante und der EcoMag-Variante festgestellt werden. Bei einer anschließenden Überprüfung der Festigkeit der im Feuerraum verbauten FFS 91Z-Variante ließ sich auch nach mehreren Heizversuchen keine Brüchigkeit oder Rissbildung am Material erkennen.



Abbildung 10: EcoMag Feuerraumauskleidung FFS 91Z;
Anmerkung: links: Rohzustand; rechts: Nach dem ersten Heizbetrieb.

Diagramm 13 stellt den jeweiligen erfassten Temperaturverlauf der Kerntemperatur der getesteten Speicherstein-Varianten dar. Bei diesem Versuch mit einer indirekten Wärmeübertragung, d. h. das Abgas ist nicht unmittelbar mit der Speichereinheit in Kontakt, sondern strömt indirekt durch das Abgasrohr, wobei die Wärmeübertragung über Wärmestrahlung stattfindet, wurde solange Brennstoff nachbeschickt bis sich die Speichersteine in einem stationären Zustand (Beharrung) befunden haben. Es ist zu erkennen, dass die Kerntemperatur der Schamott-Probe, trotz einer niedrigeren Wärmeleitfähigkeit, schneller ansteigt und eine höhere max. Kerntemperatur aufweist, was auf eine geringere spezifische Wärmekapazität des Speichermaterials zurückzuführen ist.

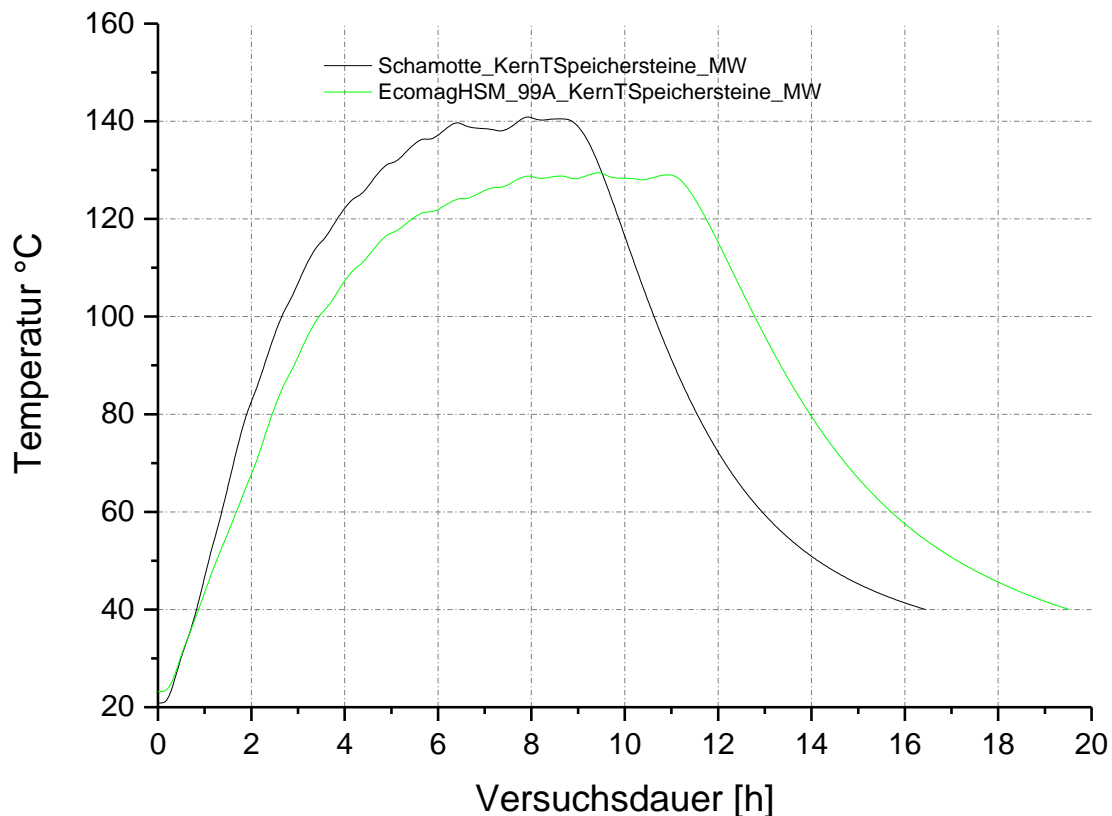


Diagramm 13: Direkter Vergleich der Kerntemperatur der untersuchten Speicherstein-Varianten beim Einsatz in einem Raumheizer (indirekte Variante bzw. Wärmeübertragung).

Die Schamott-Speichersteine des Originalzustands erreichen den stationären Zustand (Beharrungszustand) mit ca. 140 °C nach 6,3 h (6 h 18 min.) (vgl. ausgefüllter Bereich in Diagramm 14). Im Rahmen der weiteren Brennstoffauflagen bis einschließlich etwa Versuchsstunde 9 steigt das Temperaturniveau lediglich nur noch weniger als 2 °C und wurde daher nicht mehr in der Anheizphase berücksichtigt. Ab ca. Versuchsstunde 9 wurde die Brennstoffzufuhr beendet und die Untersuchung geht in die Abkühlphase (Entladephase) über. Der HSM 99A-Speicherstein benötigt ca. 8 h um den stationären Zustand zu erreichen, dabei beträgt die max. Kerntemperatur ca. 129 °C (vgl. ausgefüllter Bereich Diagramm 15). Über die Anheizphase hinaus wurde die Einzelraumfeuerungsanlage weiterhin mit Brennstoff beschickt (Versuchsstunde 8 h – ca. Versuchsstunde 11 h), das Temperaturniveau der Kerntemperatur blieb dabei unverändert (Beharrung). Ab ca. Versuchsstunde 11 geht die Untersuchung in die Abkühlphase über (Brennstoffzufuhr wurde beendet).

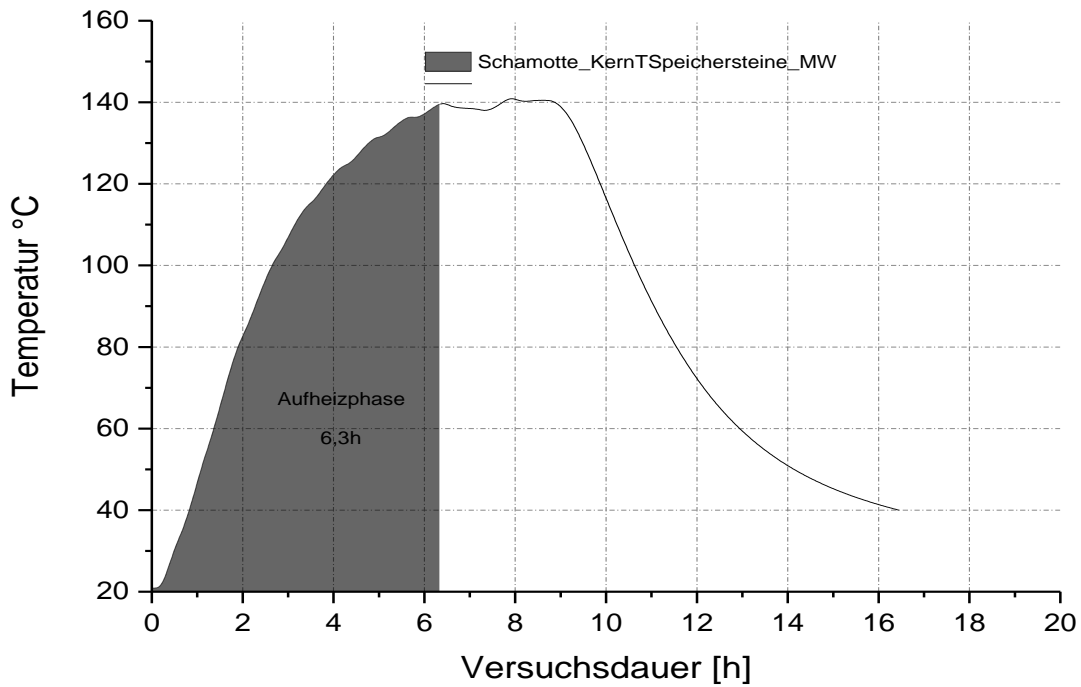


Diagramm 14: Aufheizphase der Schamott-Speichersteine bis zur Erreichung des stationären Zustandes (Beharrung) der Kerntemperatur beim Einsatz in einem Raumheizer (indirekte Variante bzw. Wärmeübertragung).

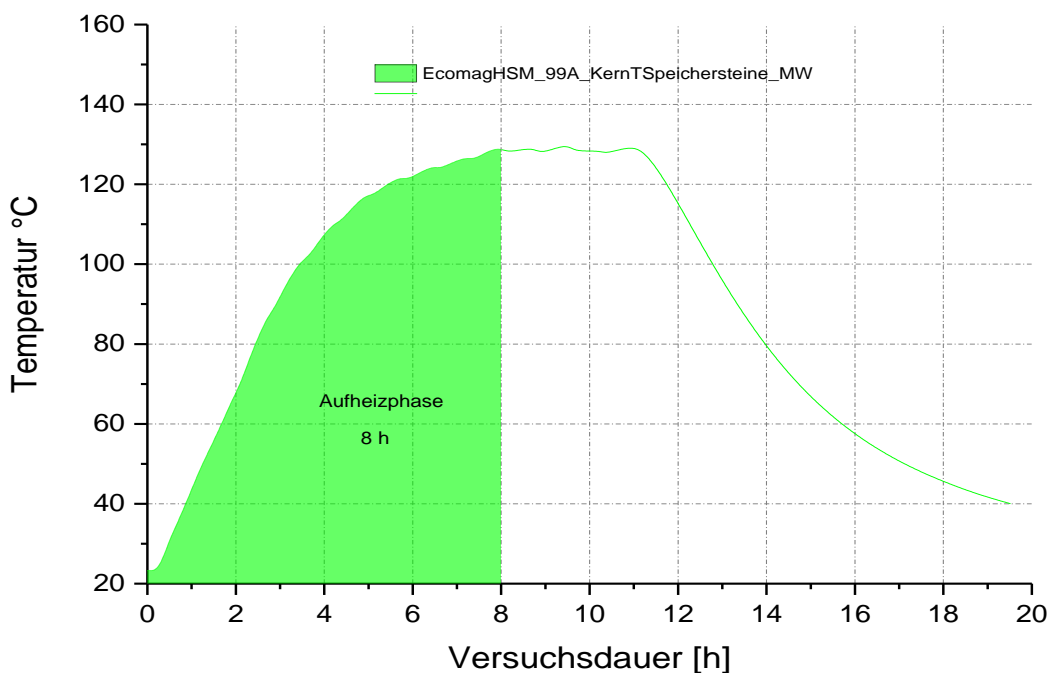


Diagramm 15: Aufheizphase der EcoMag HSM_99A-Speichersteine bis zur Erreichung des stationären Zustandes (Beharrung) der Kerntemperatur beim Einsatz in einem Raumheizer (indirekte Variante bzw. Wärmeübertragung).

Im Folgenden Diagramm 16 wird der jeweilige Startzeitpunkt der Abkühlphase der beiden Speicherstein-Varianten, um eine Vergleichbarkeit herzustellen, auf den identischen Startzeitpunkt gesetzt, da die jeweiligen stationären Phasen eine unterschiedliche Dauer aufweisen. Es wird der Temperaturverlauf während der Abkühlphase von der max. erreichten Temperatur bis zu einem Temperaturniveau von 40 °C über die Zeit dargestellt. Die Raumtemperatur wurde während der Untersuchung geregelt, um bei den Untersuchungen ein vergleichbares Temperaturniveau im Untersuchungsraum zu gewährleisten.

Das Diagramm zeigt, dass der Temperaturverlauf von EcoMag HSM 99A, trotz eines niedrigeren max. Temperaturniveaus bereits nach ca. 1 h den Temperaturverlauf der Schamott-Speichersteine überschneidet, da die Kerntemperatur der Schamott-Speichersteine, aufgrund der niedrigeren spezifischen Wärmekapazität und der damit verbundenen geringeren gespeicherten Wärmeenergie pro Kelvin, schneller sinkt.

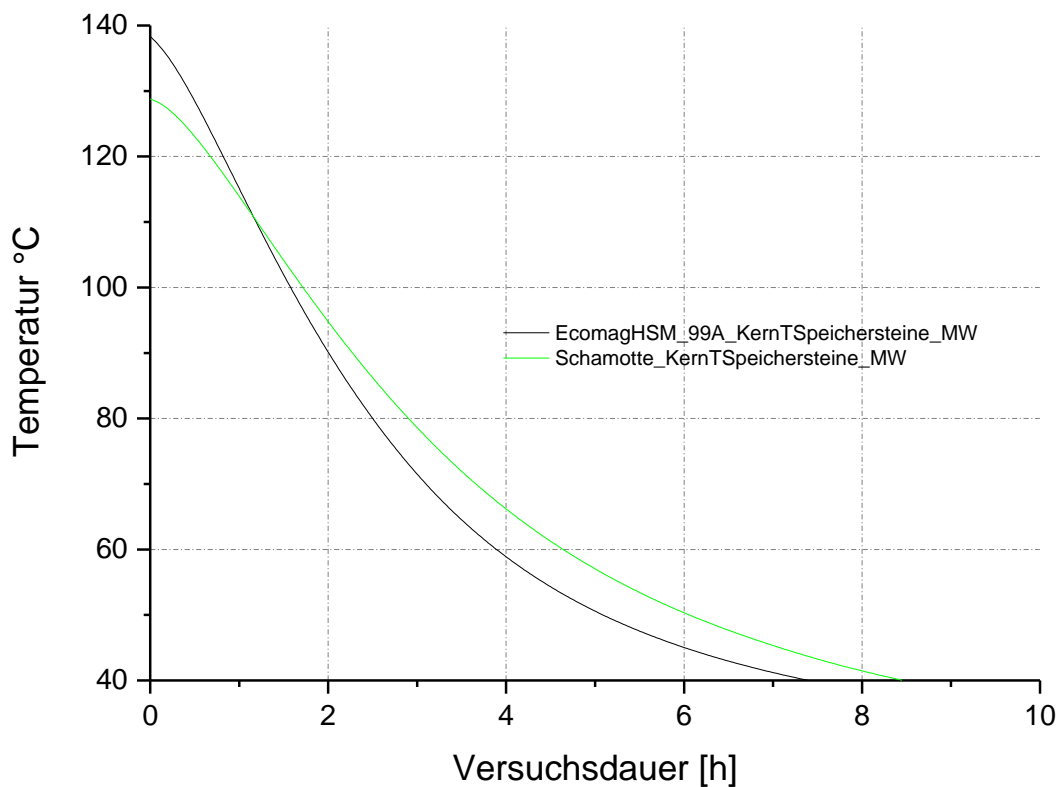


Diagramm 16: Direkter Vergleich des Verlaufs der Kerntemperatur während der Entladephase der untersuchten Speicherstein-Varianten beim Einsatz in einem Raumheizer (indirekte Variante bzw. Wärmeübertragung).

Die Kerntemperatur des Schamott-Speichersteins sinkt im Rahmen der Entladephase innerhalb von 7,4 h von der max. erreichten Temperatur auf 40 °C (vgl. Diagramm 17). EcoMag HSM 99A sinkt im Rahmen der Entladephase innerhalb von 8,5 h von der max. erreichten Temperatur auf 40 °C (vgl. Diagramm 18). Die größere Wärmespeicherkapazität der EcoMag

HSM 99A ist gegenüber den Schamott-Steinen soviel höher, dass die ebenfalls höhere Wärmeleitzahl und eine damit einhergehende schnellere Wärmeabgabe überkompensiert werden kann. Aus den erhaltenen Ergebnissen ergibt sich für die EcoMag HSM 99A-Variante eine relative, um 15 % längere Entladephase, ausgehend von der unter diesen Betriebsbedingungen max. zu erreichenden Kerntemperatur im stationären Betrieb bis zu einer Abkühlung der Kerntemperatur auf 40 °C.

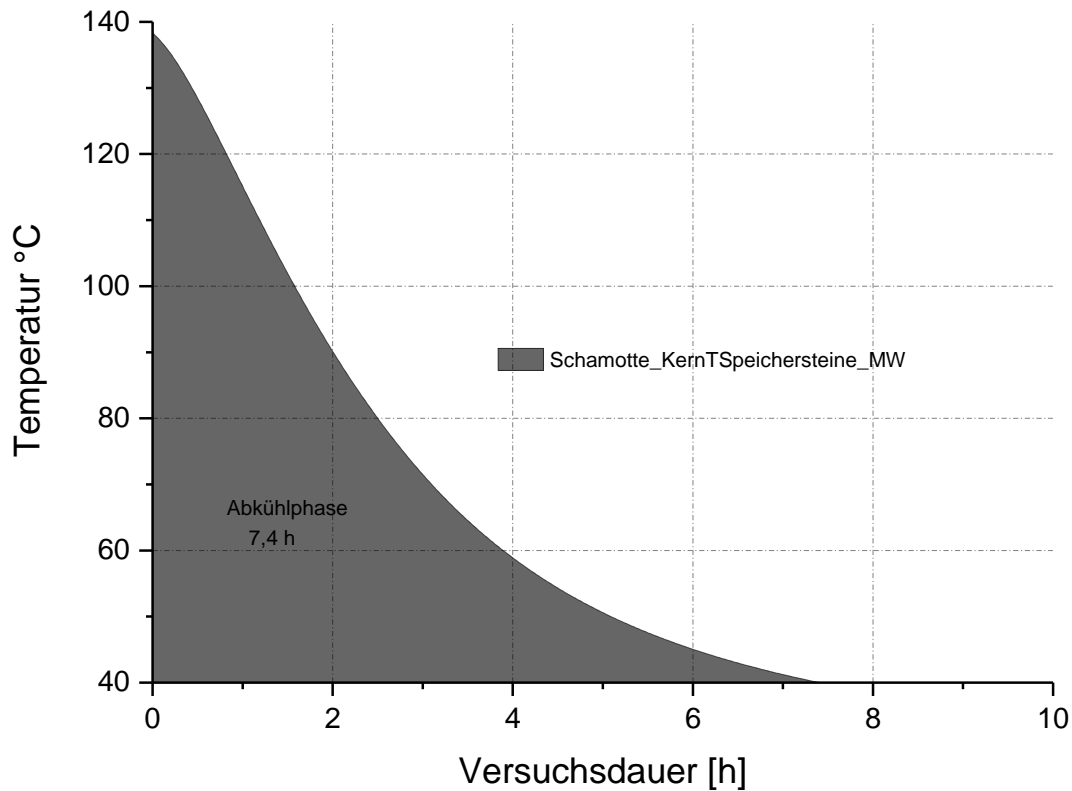


Diagramm 17: Kerntemperaturverlauf der Schamotte-Speichersteine während der Entladephase von der max. zu erreichenden Temperatur im stationären Betrieb und einer Abkühlung bis auf ein Temperaturniveau von 40 °C (indirekte Variante bzw. Wärmeübertragung).

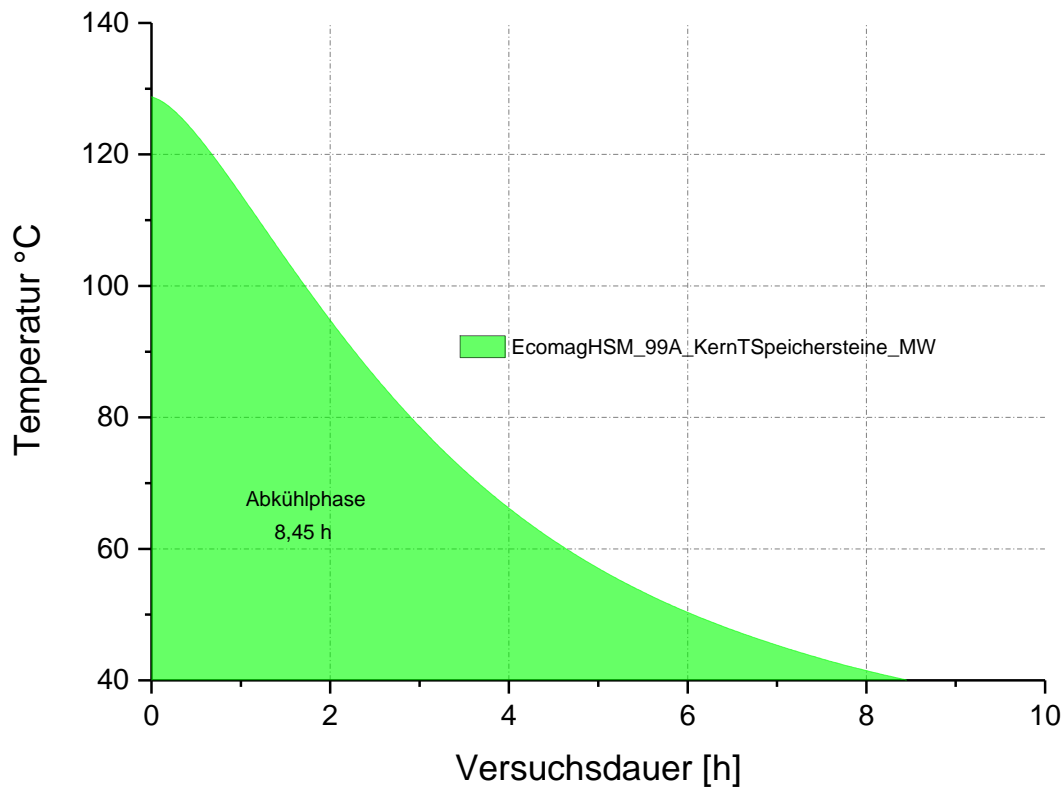


Diagramm 18: Kerntemperaturverlauf der EcoMag HSM 99A-Speichersteine während der Entladephase von der max. zu erreichenden Temperatur im stationären Betrieb und einer Abkühlung bis auf ein Temperaturniveau von 40 °C (indirekte Variante bzw. Wärmeübertragung).

Im weiteren Projektverlauf wurde ein weiteres Speichermodul im Nachheizkasten des Versuchsraumheizers untersucht. Dieses Speichermodul besteht aus mehreren halbrunden Speichersteinen, welche durch die Bauform das Ofenrohr direkt umschließen. Im Originalzustand ist das Speichermodul aus Schamott mit einem Gesamtgewicht von 34,5 kg. Mit Abbildung 11 wird der untere Teil des Speichermoduls dargestellt.



Abbildung 11: Original Speichermodul aus Schamott (2 von insgesamt 8 Speichersteinen).

Für eine Vergleichsmessung im Versuchsstand wurde eine weitere Gussform, mit den identischen Maßen des originalen Speichermoduls, entwickelt und hergestellt. Die darauffolgende Herstellung des optimierten HSM 99A-Speichermoduls erfolgte anschließend in Kooperation mit K33. K33 hat die konstruierte Gussform mit der optimierten Materialmischung 99A befüllt und nach einer ausreichenden Aushärtezeit den kalt gegossenen Probekörper mit der Bezeichnung HSM 99A dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP für die Untersuchung zur Verfügung gestellt. Zusätzlich wurde parallel von K33 ein weiteres Speichermodul mit einer optimierten feuerfesten Materialmischung mit der Bezeichnung 99B hergestellt und nachträglich für einen direkten Vergleich im Rahmen dieser Untersuchung bereitgestellt. Für die Herstellung konnte aus Zeitmangel nicht die identische Gussform verwendet werden, sodass der Probekörper 99B eine nicht zu vernachlässigende geringere Speichermasse aufweist. In der nachfolgenden Abbildung 12 werden die hergestellten Speichermodule dargestellt.



Abbildung 12: Hergestellte Speichermodule; Anmerkung: linke Seite = HSM 99A sowie die Gussform für den Probekörper (Masse: 35,1 kg bestehend aus zwei Teilen); rechte Seite = HSM 99B (Masse: 23,0 kg bestehend aus vier Teilen).

Für die Versuchsdurchführung wurde erneut der Nachheizkasten des bereits zuvor verwendeten Raumheizers verwendet. Die Bestandteile der Speichermodule wurden um das Ofenrohr angeordnet und die jeweilige Oberflächentemperatur sowie die Kerntemperatur der Versuche erfasst. Die nachfolgend aufgeführten Massen der Speichermodule entsprechen dem konditionierten Zustand, d. h. nach mehreren Heizversuchen.

- Original Speichermodul: 34,5 kg
- HSM 99A-Speichermodul: 35,1 kg

- HSM 99B-Speichermodul: 23,0 kg

Die durchgeführten Heizversuche wurden so oft wiederholt bis die aufgezeichneten Temperaturverläufe keine weitere Steigerung der Temperaturverläufe erfuhren und wiederholbare und reproduzierbare Ergebnisse erreicht wurden. Dieses Vorgehen ist insbesondere bei den kalt gegossenen EcoMag Speichermodulen wichtig, da diese nach der Herstellung einen hohen Wasseranteil enthalten, der im Rahmen der ersten Versuche durch Verdampfen sinkt und die aufgezeichneten Temperaturverläufe beeinträchtigt. Der eingesetzte Raumheizer wurde mit Nennwärmeleistung betrieben, die Parameter für die Versuchsdurchführung wurden folgendermaßen festgelegt:

Parameter für die Heizversuche:

- Brennstoff/Auflage: 2,6 kg (1. Auflage anheizen mit Kleinholz / 4 Auflagen aufheizen / Abkühlphase)
- Abbranddauer: 45 min.
- PL: 0;
- SL: 2;
- p: 12 Pa

Abbildung 13 zeigt die im Nachheizkasten eingesetzten Speichermodule sowie die temperaturbeständigen installierten Thermoelemente zur Erfassung der gegenwärtigen Temperaturen. Die getesteten Speichermodule haben nahezu die identische Masse (0,6 kg Massendifferenz) sowie die gleichen Abmessungen. Wie bereits mit der Parameteraufzählung aufgeführt, wurde ein Heizversuch mit 2,6 kg Buchen-Kleinholz angeheizt und anschließend insgesamt vier Auflagen (1 Auflage = Abbranddauer: 45 min.) mit 2,6 kg Buchenscheitholz (3 Scheite) nacheinander beschickt. Im Anschluss an die letzte Auflage (4. Auflage) wurde beim Erreichen eines Restkohlenstoffdioxidgehalts von 4 Vol.-% im Abgas, d. h. bei verbliebener Grundglut ohne sichtbare Flamme, die Sekundärluftzufuhr sowie die Abgasklappe geschlossen, um den Wärmeverlust über den Abgasweg zu verhindern. Dieses Versuchsregime wurde bei allen Heizversuchen angewendet.

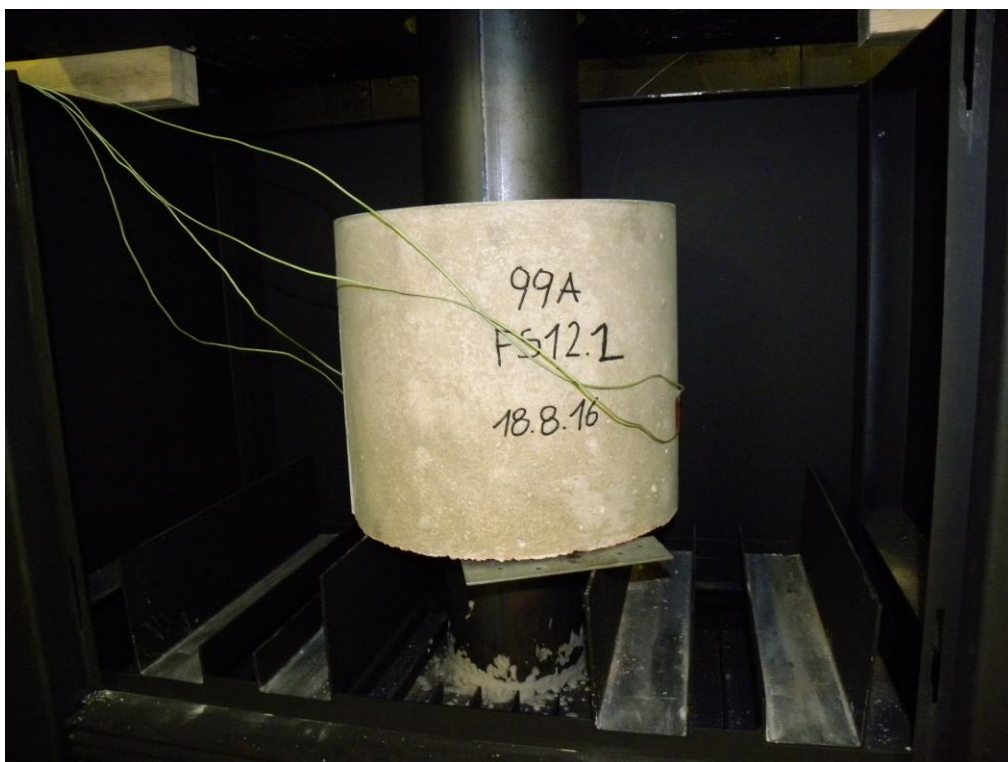
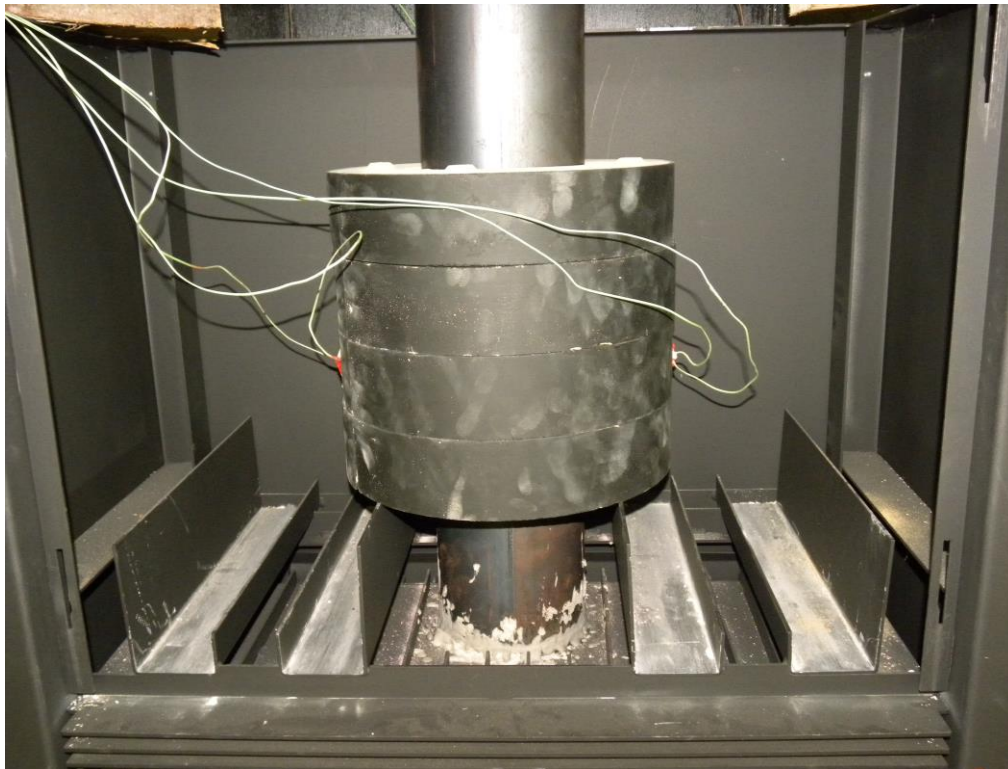


Abbildung 13: Im Nachheizkasten des Raumheizers installierte Speichermodule; Anmerkung: oben = original Speichermodul (Masse: 34,5 kg), unten = EcoMag HSM 99A Speichermodul (Masse: 35,1 kg).

Der Temperaturverlauf im Kern der drei getesteten Wärmespeichermodule ist Diagramm 19 zu entnehmen. Die blaue Diagrammlinie des originalen Speichermoduls und die rote Diagrammlinie der 99B-Probe weisen einen vergleichbaren Temperaturverlauf während der Aufheizphase und der Entladephase auf. Das Speichermodul 99B besitzt lediglich ca. 66 % der Speichermasse des Original-Speichermoduls und weist daher zusätzlich eine geringere Oberfläche auf. Bezüglich des Speichervermögens gilt grundsätzlich, je mehr Masse und Oberfläche ein Speicherkörper hat, desto mehr Wärme kann dieser pro Zeiteinheit aufnehmen und abgeben. Die Entladephase im Rahmen dieser Untersuchung gilt bei einer Unterschreitung von 40 °C als beendet. Die Definition der Entladephase bis zur Abkühlung der Probe auf ein Temperaturniveau von 20 °C sowie leicht oberhalb von 20 °C (Raumtemperatur) wurde als ungeeignet betrachtet, da bei Oberflächentemperaturen oder Kerntemperaturen des Speichermoduls von leicht oberhalb von 20 °C keine ausreichende Heizleistung mehr gewährleistet werden kann. Es lässt sich die Aussage treffen, dass das Speichermodul 99B die Differenz der Speichermasse von 11,5 kg (34 %) mit einer höheren spezifischen Wärmekapazität kompensiert und im Rahmen dieser Untersuchung mit einem Defizit an Speichermasse vergleichbare Wärmespeichereigenschaften realisieren kann. Die Temperatur des Speichermoduls 99A (grüne Diagrammlinie) steigt am langsamsten an und erreicht nach der 4. Auflage Brennholz eine max. Kerntemperatur von ca. 145 °C, was dem niedrigsten Temperaturniveau der drei untersuchten Speichermodule und somit gleichzeitig der höchsten spezifischen Wärmekapazität (Wärmespeicher) entspricht, da mehr Wärmeenergie für einen Temperaturanstieg von 1 K einer definierten Masse des Materials benötigt wird. Betrachtet man die Dauer der jeweiligen Entladephase der drei Speichermodule lässt sich feststellen, dass diese beim Speichermodul 99A um ca. 2 h und somit um 33 % im Vergleich zu den beiden anderen untersuchten Speichermodulen (Original-Speichermodul und Speichermodul-99B) länger andauert. Im Rahmen von identischen Versuchsbedingungen, d. h. gleicher Anheizdauer sowie Brennstoffmasse, kann das Wärmespeichermodul 99A eine dementsprechend größere Wärmemenge aufnehmen und schlussfolgernd ebenfalls über einen längeren Zeitraum (Entladephase) wieder abgeben. Der Probekörper 99B zeigt durch eine 34 % geringere Speichermasse eine ebenfalls um diesen Betrag verringerte Entladephase auf.

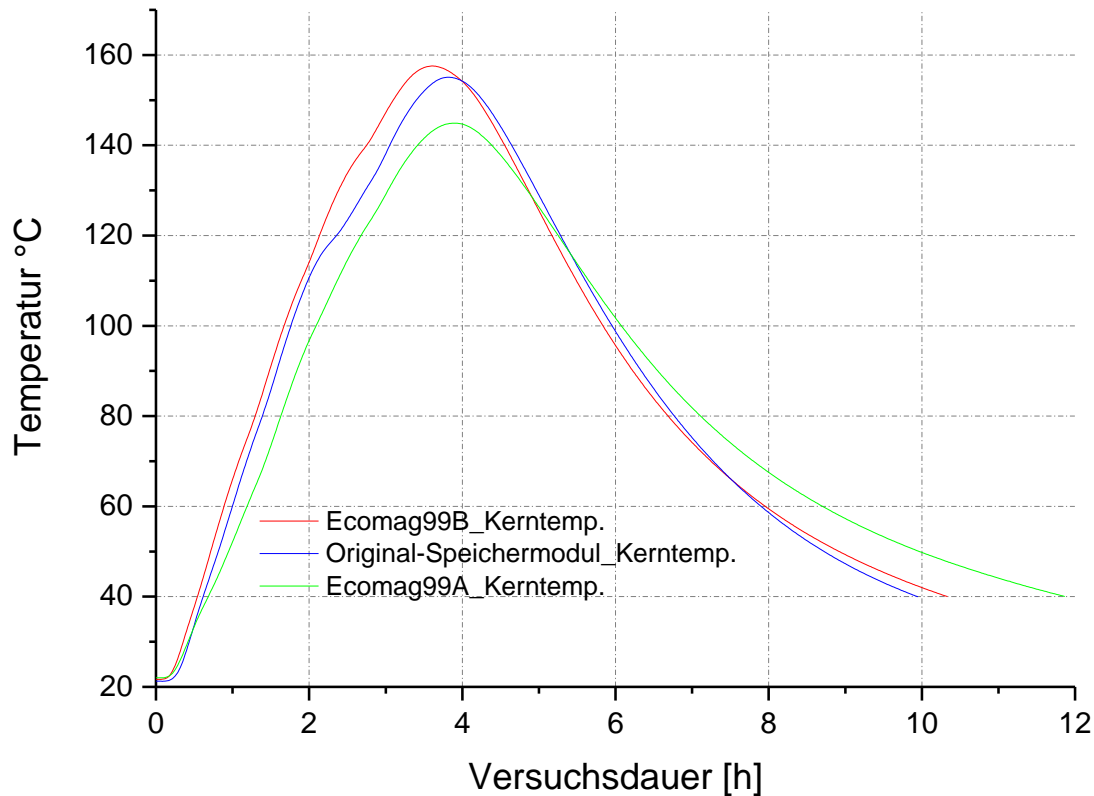


Diagramm 19: Direkter Vergleich der Kerntemperatur der untersuchten Wärmespeichermodule beim Einsatz in einem Raumheizer (indirekte Variante bzw. Wärmeübertragung).

Die jeweilige Oberflächentemperatur der drei getesteten Wärmespeichermodule, welche bei identischen Versuchsregimen erfasst wurden, ist Diagramm 20 zu entnehmen. Generell sind die Oberflächentemperaturen etwas niedriger als die aufgezeichneten Kerntemperaturen, da die Oberflächentemperatur eine Art Mischtemperatur zwischen der Kerntemperatur und der Umgebungstemperatur darstellt. Die Kerntemperatur wird in der Regel von der Umgebungstemperatur nicht beeinflusst. Die dargestellten Oberflächentemperaturen zeigen einen ähnlichen Temperaturverlauf wie die bereits zu sehenden Verläufe der Kerntemperaturen aus Diagramm 19. Die EcoMag-Wärmespeichermodule weisen im Vergleich zu dem originalen Speichermodul eine länger andauernde Entladephase auf. Als zeitliche Differenz zwischen der Entladephase (Beginn: Versuchsstunde 4 bis zum Erreichen einer Temperatur von 40 °C) der Probe EcoMag 99A und dem Original-Speichermodul beträgt, wie bereits bei den Temperaturverläufen der aufgezeichneten Kerntemperaturen, ca. 2 h. Der direkte Vergleich der Länge der Entladephase von EcoMag 99A (8 h) und dem Original-Speichermodul (6 h) zeigt erneut eine um 33 % verlängerte Entladephase bei identischen Versuchsparametern.

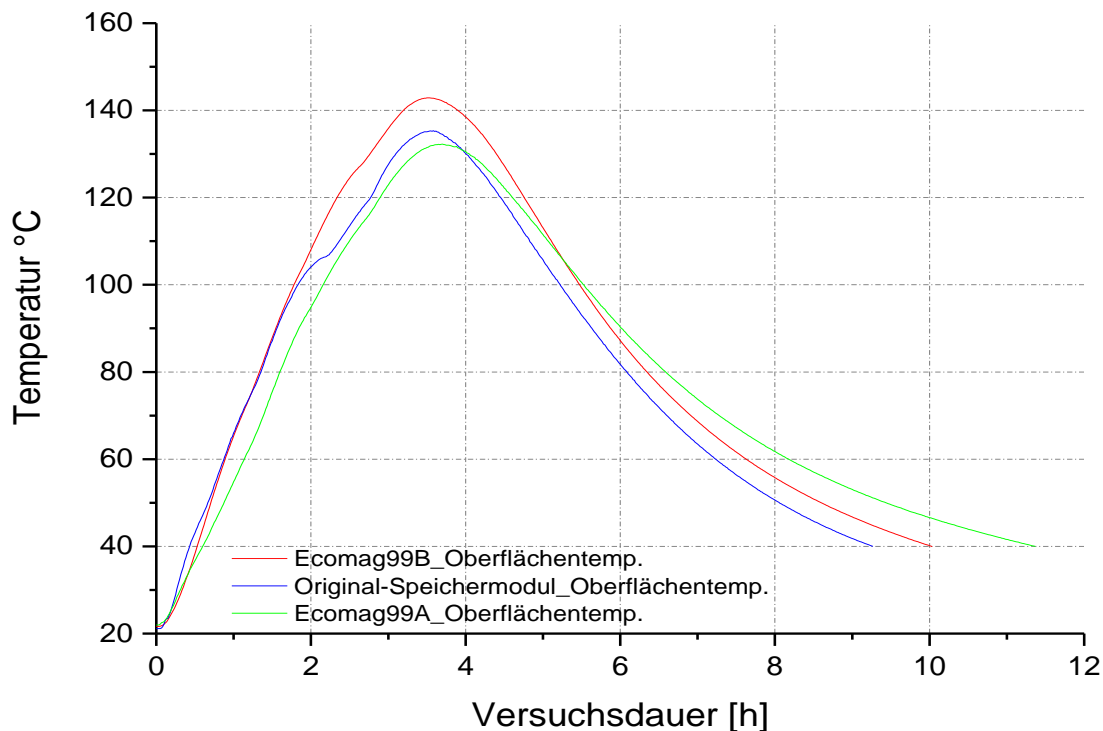


Diagramm 20: Direkter Vergleich der Oberflächentemperatur der untersuchten Wärmespeichermodule beim Einsatz in einem Raumheizer (indirekte Variante bzw. Wärmeübertragung).

5.4 **Validiermessungen an realen Feuerungsanlagen – Herd nach DIN EN 12815 (direkte Variante bzw. Wärmeübertragung)**

Der geplante Aufgabenbereich dieses Kapitels umfasste ursprünglich den Einsatz der EcoMag-Speichersteine in einer realen Speichereinzelfeuerstätte mit einer langsamen Wärmeabgabe im Aufstellraum, wie z. B. Grund- und Speicheröfen gemäß DIN EN 15250. Diese Anlagentypen besitzen normalerweise die Kapazität für eine Zuladung an Speichersteinen von >500 kg. Leider hat sich der Bedarfszeitraum mit einem gleichzeitig auftretenden Engpass der Materialien für die Herstellung der EcoMag-Speichersteine in der dafür benötigten Menge überschritten. Aus diesem Grund konnte die Untersuchung an einer realen Speichereinzelfeuerstätte nicht durchgeführt werden. Anstelle dessen wurde ein alternatives Versuchsprogramm zur Durchführung der Untersuchung mit einer direkten Variante bzw. Wärmeübertragung umgesetzt. Zum Einsatz kam hierbei ein nach DIN EN 12815 geprüfter Herd. Dieser Feuerstättentyp zählt ebenfalls zu den Einzelraumfeuerungsanlagen und bietet neben der Heizleistung die weitere Funktion einer Kochstelle. Auf den Abgasstutzen des Herds wurde die Messstrecke, bestehend aus dem Probekörper und den Stabilisierungszonen (vor und nach dem Probekörper), installiert.

Unmittelbar vor dem Eintritt in den Probekörper werden auftretende Turbulenzen durch die erwähnte Stabilisierungszone möglichst begrenzt. Des Weiteren wurden auf halber Höhe des Probekörpers Temperaturmessstellen zur Erfassung der Oberflächentemperatur sowie der Kerntemperatur angebracht. Wie aus Abbildung 14 zu entnehmen ist strömt das Abgas durch den Probekörper und wird anschließend abgeleitet. Das Abgas ist direkt mit dem jeweiligen Speicherblock in Kontakt (direkte Variante bzw. Wärmeübertragung).



Abbildung 14: Auf dem Herd installierte Speichermodule (direkte Wärmeübertragung); Anmerkung: links = Schamott(HSM)-Speichermodul (Masse: 50,1 kg), rechts = EcoMag 79A-Speichermodul (Masse: 42,2 kg), nicht abgebildet = EcoMag 91.F-Speichermodul (Masse: 43,5 kg).

Im Rahmen dieser Versuchsreihe erfolgte ein Vergleich der EcoMag-Varianten mit der Schamottqualität HSM. Dieser ist ein spezieller Speicherschamott für den Festbrennstoff Holz. Diesen Schamotttyp zeichnet besonders eine hohe Dichte sowie eine gleichbleibende Wärmeleitfähigkeit aus, jedoch sind sie für den Einsatz im Feuerraum ungeeignet. Der Schamottspeicherblock-HSM ist ebenfalls geriffelt zur Vergrößerung der Oberfläche und gleichzeitigen Verbesserung des Wärmeübergangs auf der Außenseite und verzeichnet mit den gleichen Maßen eine im Vergleich zu den anderen Probekörpern um 15 % - 19 % größere Speichermasse. Die Untersuchung setzt sich maßgeblich aus zwei verschiedenen Teilen zusammen. Diagramm 21 und Diagramm 22 zeigen jeweils die Temperaturverläufe der Kerntemperatur sowie der Oberflächentemperatur der drei untersuchten Proben während der Abkühlphase (Entladephase). Im

ersten Teil der Untersuchung wurde der Herd solange mit Holz beschickt bis sich die Speichermodule sowohl bezüglich der Kerntemperatur sowie der Oberflächentemperatur in einem stationären Zustand (Beharrung) befunden haben, d. h. keine weiteren Temperaturanstiege zu verzeichnen und somit, unter den gegebenen Versuchsparametern, vollständig beladen waren. Die durchgeführten Heizversuche sind unter identischen Parametern abgelaufen. Der Herd wurde mit Nennwärmeleistung betrieben und mit 1,5 kg Buchen-Kleinholz angeheizt sowie fortlaufend mit 1,5 kg Buchenscheitholz pro Auflage (2 Scheite) nacheinander beschickt. Nach dem Erreichen eines stationären Zustands und eines Kohlenstoffdioxidgehalts von 4 Vol.-% im Abgas, d. h. bei verbliebener Grundglut ohne sichtbare Flamme, wurde die Sekundärluftzufuhr sowie die Abgasklappe geschlossen, um den Wärmeverlust über den Abgasweg zu verhindern. Dieses Versuchsregime wurde bei allen Heizversuchen angewendet. Die nachfolgend dargestellten Temperaturverläufe zeigen die Wärmeabgabe, vom max. Temperaturniveau bis zur Entladung auf 40 °C, der untersuchten Speicherblöcke über die Versuchszeit und geben Aufschluss über einen relativen Vergleich der Probekörper bei einer max. Auslastung der Wärmespeicherkapazität. Die abgebildeten Temperaturverläufe zeigen eine um 10 % – 20 % längere Entladephase bei den EcoMag-Probekörpern trotz einer 15 % - 19 % geringeren Speichermasse, was auf eine höhere spezifische Wärmekapazität zurückzuführen ist.

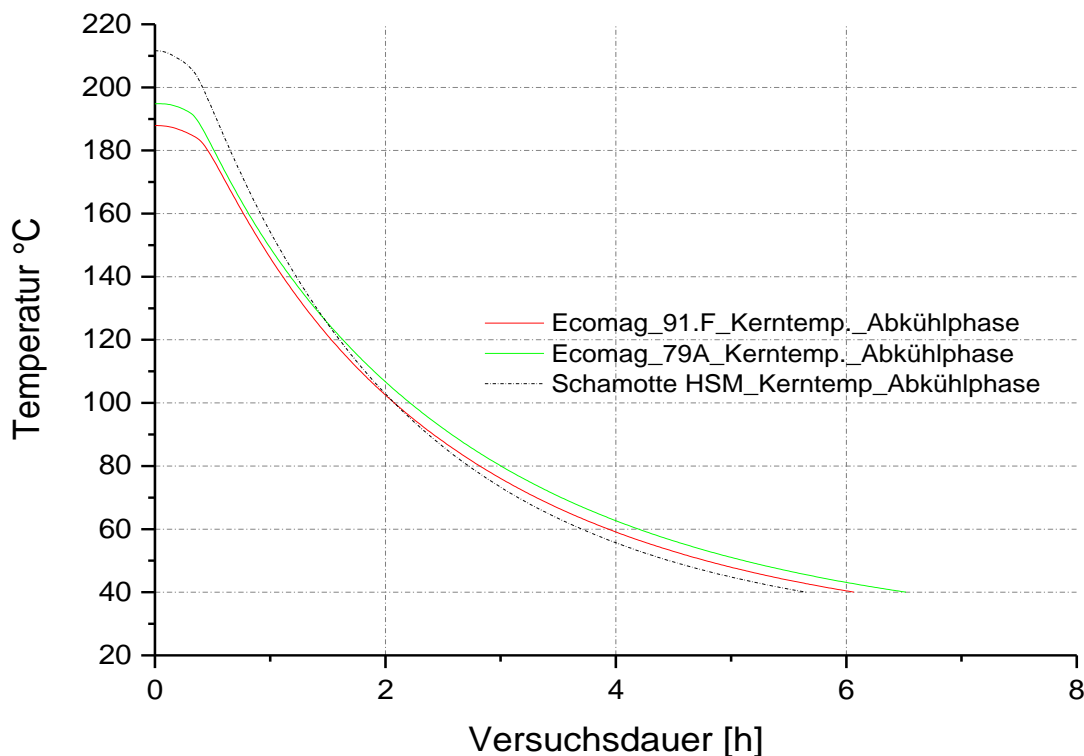


Diagramm 21: Kerntemperaturverlauf der untersuchten Wärmespeichermodule in der Abkühlphase beim Einsatz eines Herdes (direkte Variante bzw. Wärmeübertragung).

Durch die Beeinflussung der Oberflächentemperatur durch die Raumtemperatur befinden sich diese generell auf einem niedrigeren Temperaturniveau (vgl. Diagramm 22). Die Dauer der Wärmeabgabe bis zum Erreichen einer Oberflächentemperatur von 40 °C ist in diesem Fall bei den EcoMag-Speichersteinen deutlich um bis zu 18 % - 26 % länger.

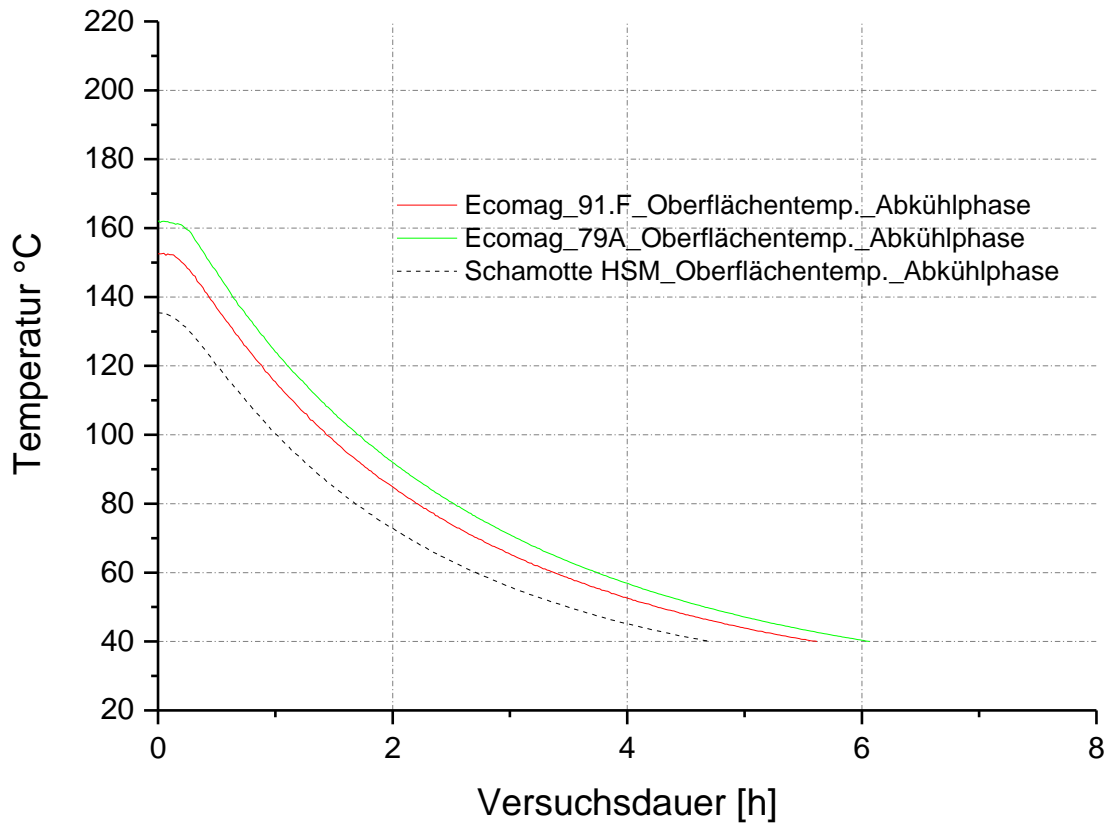


Diagramm 22: Oberflächentemperaturverlauf der untersuchten Wärmespeichermodule in der Abkühlphase beim Einsatz eines Herdes (direkte Variante bzw. Wärmeübertragung).

Der zweite Teil der Untersuchung ist mit dem oben dargestellten ersten Teil identisch, lediglich die Anzahl der beschickten Brennstoffauflagen wird auf insgesamt vier Auflagen beschränkt. Daraus resultiert eine identische Zufuhr der Brennstoffmasse sowie Dauer der Anheizphase. Das Diagramm 23 beinhaltet die erhaltenen Kerntemperaturverläufe der untersuchten Speicherblöcke und zeigt einen Temperaturanstieg bis ca. Versuchsstunde 3, an diesem Versuchszeitpunkt ist die Brennstoffzufuhr beendet (4 Auflagen beschickt). Die Kerntemperatur des Schamott-Probekörpers steigt deutlich schneller an, als die der EcoMag-Probekörper. Aufgrund der ebenfalls niedrigeren Wärmeleitfähigkeit von Schamott wird hierdurch erneut eine geringere spezifische Wärmekapazität bestätigt. Der Temperaturverlauf der EcoMag-Proben ist sehr ähnlich. Im Anschluss an die Versuchsstunde 3 und dem langsamen Absinken der Kerntemperaturen folgt die Entladephase. Die Entladephase endet bei der Schamott-HSM-Probe nach ca. 7,8 h, bei EcoMag_91.F nach ca. 8,0 h (+ 3 %) und bei EcoMag 79A nach

ca. 8,3 h (+ 7 %), bei einer 15 % (91.F) - 19 % (79A) geringeren Speichermasse.

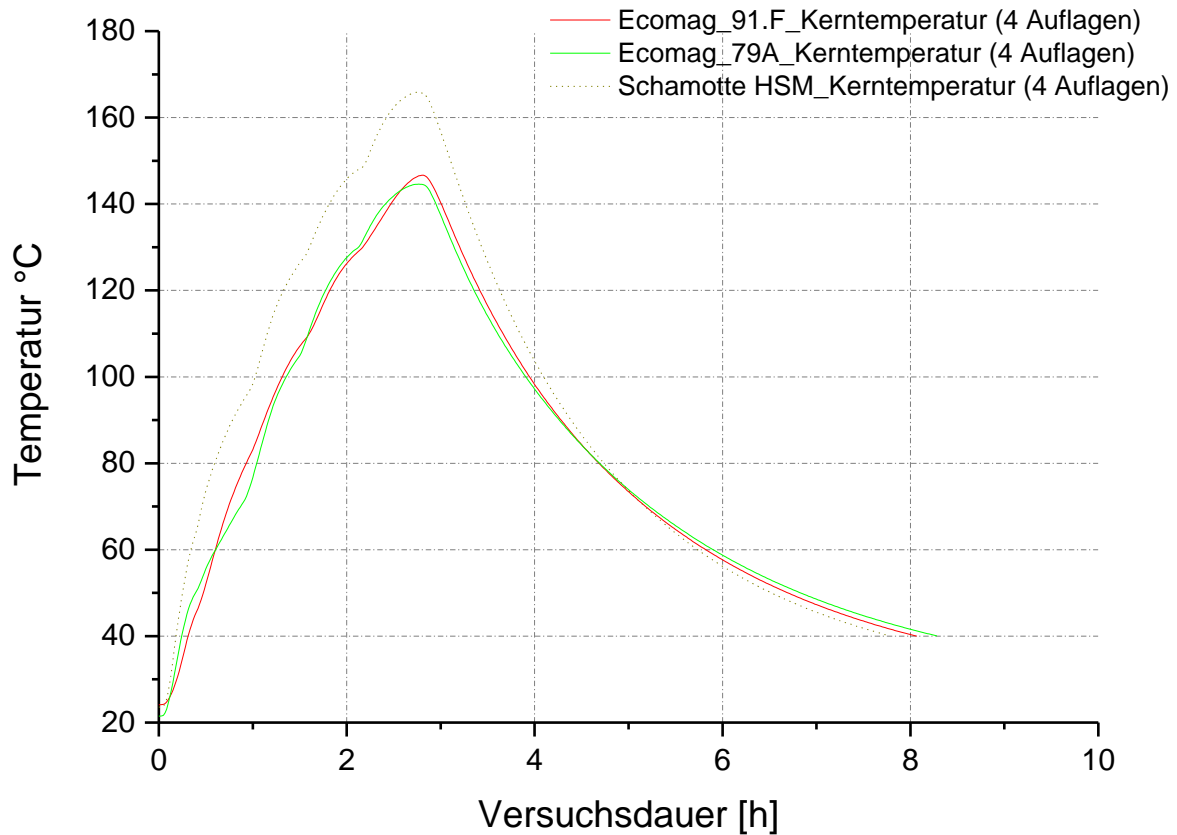


Diagramm 23: Kerntemperaturverlauf der untersuchten Wärmespeichermodule während einer definierten Anheizphase (4 Auflagen) sowie der darauffolgenden Entladephase beim Einsatz eines Herdes (direkte Variante bzw. Wärmeübertragung).

Die im Vergleich zur Schamottprobe höhere Wärmeleitfähigkeit der EcoMag-Probekörper leitet die Wärmeenergie schneller von der erwärmten Innenseite zur Außenseite und lässt die Oberflächentemperatur, wie in Diagramm 24 zu erkennen, schneller ansteigen. Die Oberflächentemperatur eines Körpers ist für die abgegebene Wärmestrahlung in den Raum sehr entscheidend. Das Stefan-Boltzmann-Gesetz besagt, dass die Strahlungsleistung eines schwarzen Körpers proportional zur vierten Potenz seiner absoluten Temperatur ist. Eine Verdopplung der Temperatur bewirkt, dass die abgestrahlte Leistung um den Faktor 16 ansteigt. Der Verlauf der Oberflächentemperaturen der EcoMag-Proben ist erneut sehr ähnlich und erreicht am Ende der Anheizphase, nach drei Versuchsstunden, einen max. Wert von ca. 120 °C. Im Anschluss an die dritte Versuchsstunde und dem langsamen Absinken der Oberflächentemperaturen folgt die Entladephase. Die Entladephase endet bei der Schamott-HSM-Probe nach ca. 7,1 h, bei

EcoMag_91.F nach ca. 7,6 h (+ 7 %) und bei EcoMag 79A nach ca. 7,9 h (+ 11 %), bei einer um 15 % (91.F) - 19 % (79A) geringeren Speichermasse.

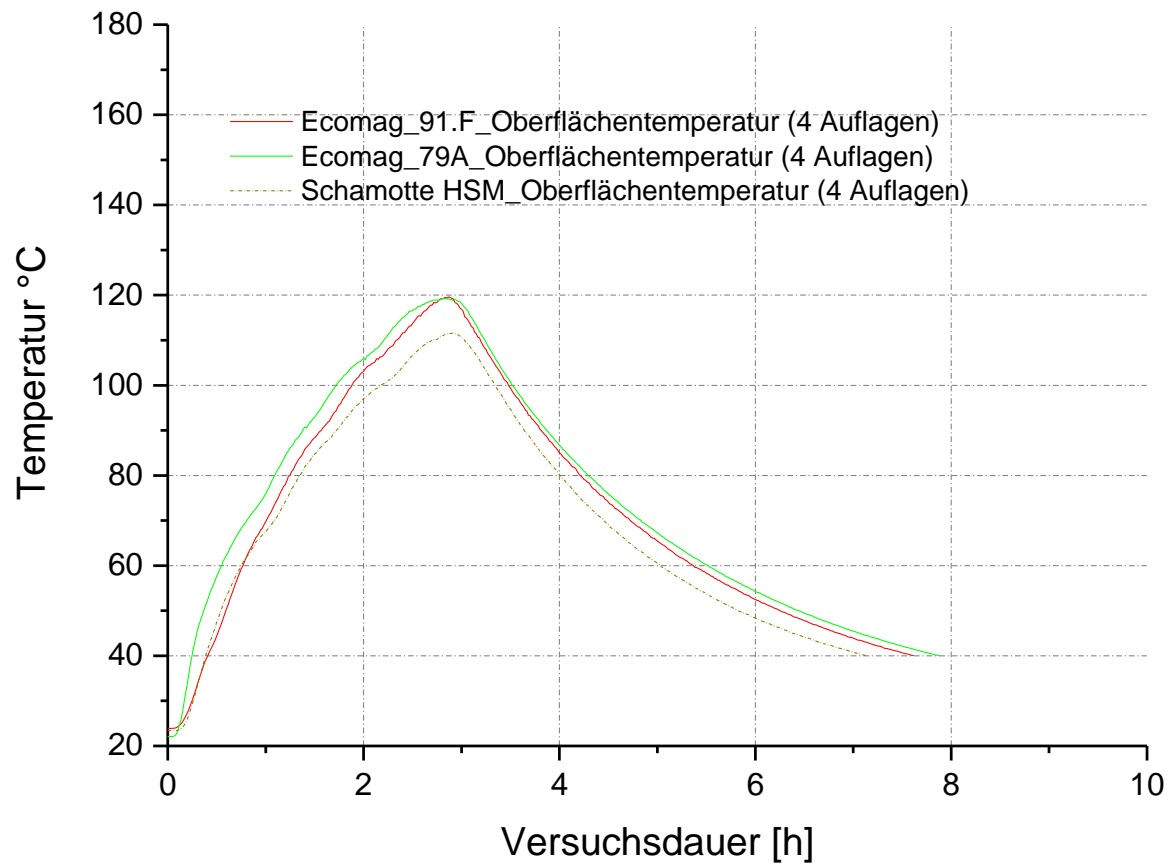


Diagramm 24: Oberflächentemperaturverlauf der untersuchten Wärmespeichermodule während einer definierten Anheizphase (4 Auflagen) sowie der darauffolgenden Entladephase beim Einsatz eines Herdes (direkte Variante bzw. Wärmeübertragung).

5.5 Temperaturwechselbeständigkeit/Langzeitbeständigkeit

Wie im nachfolgenden Abschnitt beschrieben wurden die eingesetzten Proben auf ihre Temperaturwechselbeständigkeit untersucht, diese Prüfung kann in eingeschränkter Weise einen mehrjährigen Einsatz der Probensteine simulieren. Hierfür wurden in Anlehnung an die DIN 51068:2008-11 (Prüfung keramischer Roh- und Werkstoffe – Bestimmung der Temperaturwechselbeständigkeit – Wasserabschreckverfahren für feuerfeste Steine) Versuche durchgeführt. Das Wasserabschreckverfahren ist eine Methode zur Bestimmung der Temperaturwechselbeständigkeit von feuerfesten ungebrauchten gebrannten Steinen. Dabei werden die Prüfkörper einer thermischen Behandlung (Muffelofen) bei ca. 1.000 °C mit definierter Verweildauer (20 min.) unterzogen; anschließend aus dem Muffelofen entnommen und in Wasser getaucht sowie anschließend getrocknet. Dieser Ablauf wird solange wiederholt, bis die Prüfkörper in zwei oder mehrere große Stücke zersprungen sind oder die Proben 30 Abschreckungen ohne Zerstörung standgehalten haben. Für die getesteten nicht feuerfesten Materialmischungen wurde die Temperatur für die thermische Behandlung auf 350 °C, welche der maximalen Einsatztemperatur dieser Steine entspricht, festgelegt. In der nachfolgenden Tabelle 6 werden die erhaltenen Ergebnisse sowie des Weiteren die dazugehörigen Abbildung 16 - Abbildung 26 dargestellt. Der konditionierte Zustand besagt, dass der Probestein im Rahmen der vorangegangenen Untersuchungen im Prüfstand oder in den Einzelraumfeuerungsanlagen eingesetzt wurde und bereits einige Anheiz- und Abkühlvorgänge erfahren hat.

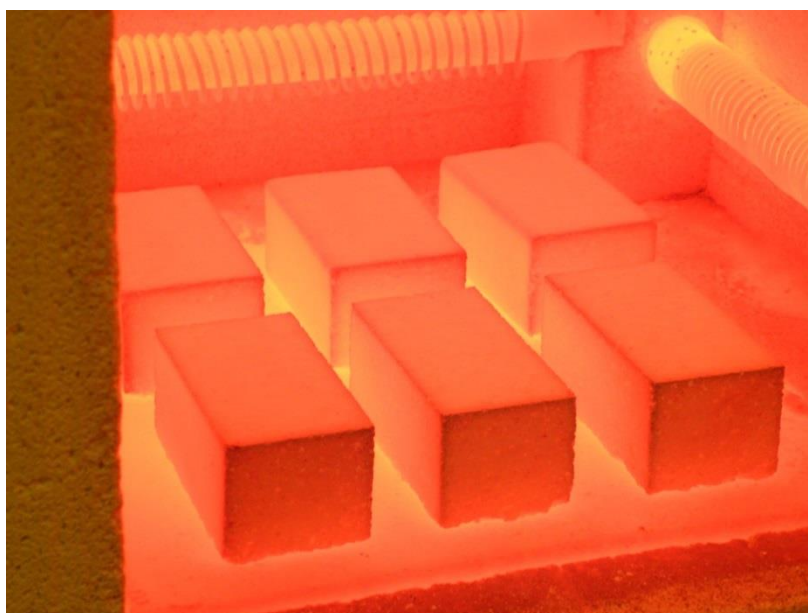


Abbildung 15: Proben bei 1.000 °C im Muffelofen.

Tabelle 6: Ergebnisse aus den Versuchen zur Bestimmung der Temperaturwechselbeständigkeit.

Mischung:	Temperatur:	Zyklus:	Bemerkung:
91 Z (nicht konditioniert)	1000 °C	1	Entfärbung, deutliche Rissbildung
	1000 °C	2	Zerstörung der Proben
91 Z (konditioniert)	1000 °C	1	deutliche Rissbildung
	1000 °C	2	Zerstörung der Proben
Schamotte HBO+ (konditioniert)	1000 °C	1	Ausschwemmung von Feinteilen, oberflächliche feine Risse
	1000 °C	2	Ausschwemmung von Feinteilen, Probe intakt
Schamotte HSM (konditioniert)	1000 °C	1	Ausschwemmung von Feinteilen, leichter Ausbruch an den Kanten
	1000 °C	2	Leichter Ausbruch an den Kanten, Probe intakt
HSM 79A (konditioniert)	350 °C	1	Abplatzen von einzelnen Körnern und Feinanteil
	350 °C	2	Abplatzen von einzelnen Körnern und Feinanteil
	350 °C	3	Abplatzen von einzelnen Körnern und Feinanteil
	350 °C	4	Abplatzen von einzelnen Körnern und Feinanteil
	350 °C	5	Abplatzen von einzelnen Körnern und Feinanteil
	350 °C	6	Abplatzen von einzelnen Körnern und Feinanteil
	350 °C	7	Abplatzen von einzelnen Körnern und Feinanteil
	350 °C	8	Abplatzen von einzelnen Körnern und Feinanteil
	350 °C	9	Abplatzen von einzelnen Körnern und Feinanteil
	350 °C	10	Abplatzen von einzelnen Körnern und Feinanteil, Probe intakt
91F.2 (konditioniert)	1000 °C	1	Entfärbung, Geruchentwicklung
	1000 °C	2	feine Risse
	1000 °C	3	deutliche Risse
	1000 °C	4	Zerstörung der Proben

- EcoMag FFS 91Z (nicht konditioniert):



Abbildung 16: EcoMag FFS 91Z (nicht konditioniert) nach dem 1. Anheiz- und Abkühlzyklus (Entfärbung, deutliche Rissbildung).



Abbildung 17: EcoMag FFS 91Z (nicht konditioniert) nach dem 2. Anheiz- und Abkühlzyklus (Zerstörung der Proben).

- EcoMag FFS 91Z (konditioniert):

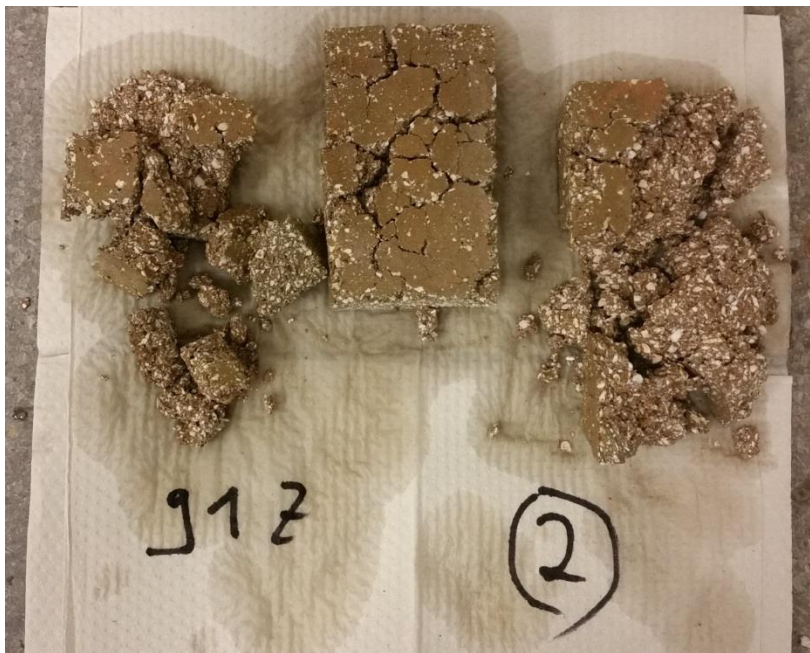


Abbildung 18: EcoMag FFS 91Z (konditioniert) nach dem 2. Anheiz- und Abkühlzyklus (Zerstörung der Probe).

- Schamotte HBO+ (konditioniert):

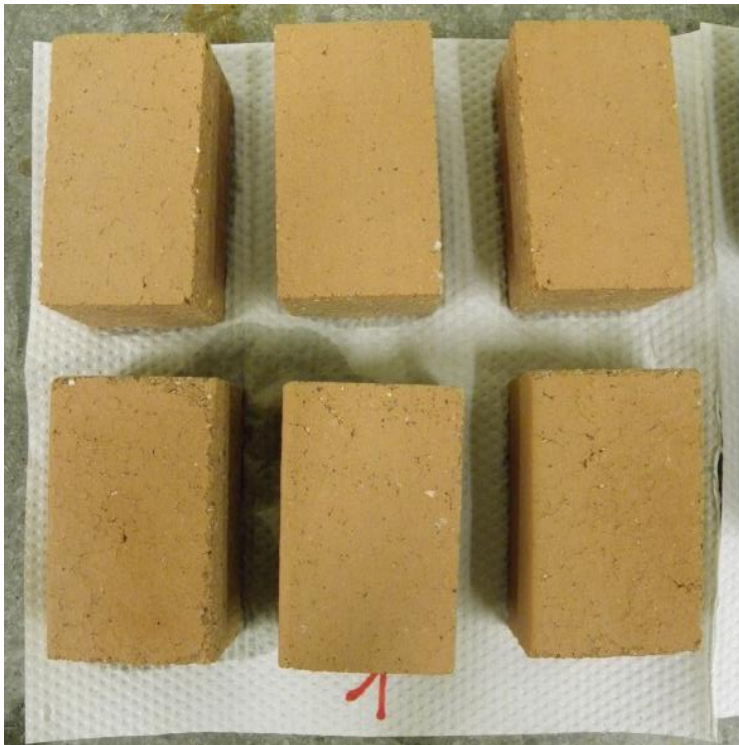


Abbildung 19: Schamotte HBO+ (konditioniert) nach dem 1. Anheiz- und Abkühlzyklus (oberflächliche, kleine Risse).



Abbildung 20: Schamotte HBO+ (konditioniert) nach dem 2. Anheiz- und Abkühlzyklus (unverändert im Vergleich zu Zyklus 1, Probe intakt).

- HSM (nicht konditioniert):

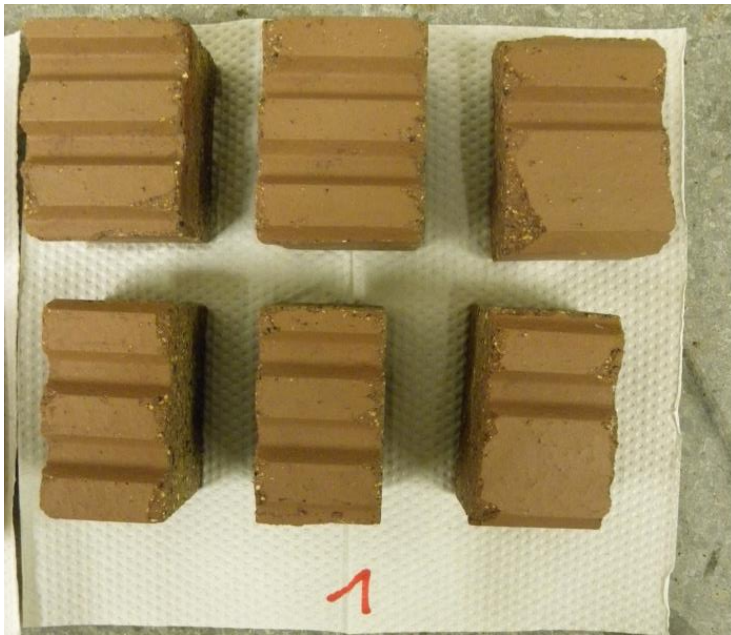


Abbildung 21: Schamotte HSM (nicht konditioniert) nach dem 1. Anheiz- und Abkühlzyklus (Ausschwemmung von Feinteilen, leichter Ausbruch an den Kanten).

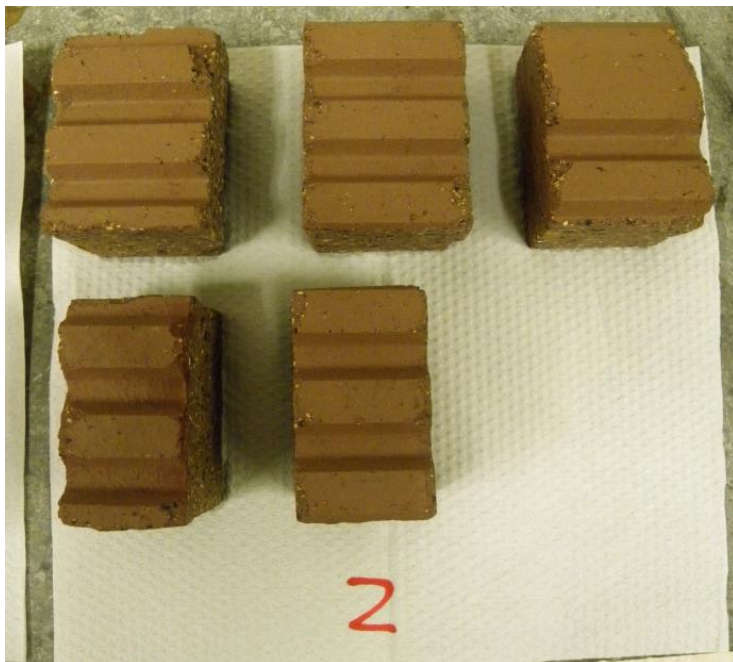


Abbildung 22: Schamotte HSM (nicht konditioniert) nach dem 2. Anheiz- und Abkühlzyklus (unverändert im Vergleich zu Zyklus 1, Probe intakt).

- EcoMag HSM 79A (konditioniert):



Abbildung 23: EcoMag HSM 79A (konditioniert) nach dem 1. Anheiz- (350 °C) und Abkühlzyklus (Abplatzen von einzelnen Körnern und Feinanteil).



Abbildung 24: EcoMag HSM 79A (konditioniert) nach dem 10. Anheiz- (350 °C) und Abkühlzyklus (Abplatzen von einzelnen Körnern und Feinanteil, Probe intakt).

- EcoMag FFS 91F.2 (konditioniert):



Abbildung 25: EcoMag FFS 91F.2 (konditioniert) nach dem 1. Anheiz- und Abkühlzyklus (Entfärbung, Geruchentwicklung, oberflächliche kleine Risse).



Abbildung 26: EcoMag FFS 91F.2 (konditioniert) nach dem 4. Anheiz- und Abkühlzyklus (Probe zerstört).

Aus den erhaltenen Ergebnissen lässt sich ableiten, dass die getesteten Schamotte der thermischen Belastung uneingeschränkt standhalten und wie bereits aus der Praxis bekannt ist auch bei einem langjährigen Einsatz im Ofen beständig sind. Die getesteten EcoMag-Proben HSM 79A (Speicherstein) sind bezüglich ihrer maximalen Einsatztemperatur von 350 °C auch nach 10 Zyklen unverändert sowie intakt und damit unter den getesteten Einsatzbedingungen als langzeitbeständig einzustufen. Die bei einer Temperatur von 1.000 °C getesteten Feuerfeststeine EcoMag 91Z,

weder im nicht konditionierten, noch im konditionierten Zustand, sowie die Proben 91F.2 haben keine zuverlässige Beständigkeit gegenüber diesen Bedingungen aufweisen können. Darüber hinaus bleibt nochmals zu erwähnen, dass die Methode des Wasserabschreckverfahrens im Bereich von feuerfesten ungebrauchten gebrannten Steinen herangezogen wird, da diese durch das Sintern generell hydrophob sind. Bei den EcoMag-Proben besteht die Problematik, dass sich EcoMag z. T. in wasserlösliches MgO umwandelt, was im Feuerraum durch den Karbonatisierungs-Kreislauf unproblematisch ist. Aus diesem Grund ist diese Methode zur Prüfung der Temperaturwechselbeständigkeit der EcoMag-Proben nicht optimal geeignet, als Tendenz aber dennoch zu verwerten.

6 Zusammenfassung

Das ZIM-Projekt "MagnesiaHSM ein ökologischer Schamottersatz" wurde erfolgreich abgeschlossen. Die optimierte Rezeptur speichert Wärme dauerhaft und effizienter als alle geprüften Schamottmischungen. EcoMagHSM kann auch bei weniger umweltbewussten Verbrauchern aufgrund Beständigkeit, günstiger Anschaffung und kurzer Amortisation eine hohe Nachfrage erzeugen. Aufgrund der Analysen durch das Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP konnte das Material in mehr als 100 Testreihen hinsichtlich Verarbeitung und Eigenschaften optimiert werden. Die empirischen Versuche zur spezifischen Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Rohdichte, Druckfestigkeit, etc. konnten verifiziert werden. Mit Hilfe der durchgeführten Untersuchungen konnten die im Labor bestimmten Materialeigenschaften der Speichersteine aus EcoMag auch im Praxisbetrieb bestätigt werden. Für die EcoMag-Speichersteine konnte im Rahmen der durchgeführten Aufheiz- und Entladeversuche, welche maßgeblich das Verhalten der Wärmeleitfähigkeit in Kombination mit der spezifischen Wärmekapazität eines Materials abbilden, eine unter den eingestellten definierten Untersuchungsparametern relative, um 20 % - 30 % effizientere Wärmespeicherung, als bei den untersuchten Speichersteinen aus Schamott festgestellt werden. Die im Projekt eingesetzten Probekörper, Speichersteine sowie die Platten für die Feuerraumauskleidung wurden im Rahmen des Projekts über mehrere Monate untersucht und haben dementsprechend viele Anheiz- und Entladezyklen erfahren. Die Gesamtheit der EcoMag-Prüfkörper war im Anschluss an die Untersuchungen in einem voll funktionsfähigem Zustand. Somit kann durch die im Rahmen dieses Projekts gesammelten Erfahrungen eine positive Aussage in Bezug auf die Beständigkeit der eingesetzten EcoMag Speicher- und Feuerfeststeine, im dafür vorgesehenen Temperatur Anwendungsbereich, getroffen werden.

Literatur

- [1] ISO 11357-1:1997 (E), Differential scanning calorimetry – Part 1: General principles
- [2] W.F: Hemminger, H. K: Cammenga, Methoden der Thermischen Analyse, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 1989
- [3] ISO 11357-4: 2005 (E), Differential scanning calorimetry – Part 4: Determination of specific heat capacity