

Bericht Nr.: 3100.055

Abschlussbericht über ein Forschungsvorhaben
gefördert unter dem AZ 35464/01-24/0 durch die
Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Untersuchung des Potenzials zur Energieeffizienzsteigerung von Industrieöfen durch Anpassung der Temperaturmessung und Ofenregelung beim Einsatz von reflektierenden Coatings für Ofenwände (VeRefCo)

Von:

C. Rein, B. Stranzinger, BFI
R. Caminades, Avion

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

Düsseldorf, Oktober 2022

www.dbu.de



VDEh-Betriebsforschungsinstitut
GmbH



VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH

40237 Düsseldorf, Sohnstraße 65

Forschungsvorhaben gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt unter dem Aktenzeichen: 35464-01

UNTERSUCHUNG DES POTENZIALS ZUR ENERGIEEFFIZIENZSTEIGERUNG VON INDUSTRIE-ÖFEN DURCH ANPASSUNG DER TEMPERATURMESSUNG UND OFENREGELUNG BEIM EINSATZ VON REFLEKTIERENDEN COATINGS FÜR OFENWÄNDE (VEREFCO)

von

C. Rein, B. Stranzinger, BFI
R. Caminades, AVION

Schlussbericht

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Laufzeit des Forschungsvorhabens: 01.05.2019 – 31.07.2022

Bericht Nr.: 3100.055

Kurzfassung

Die Wärmeübertragung erfolgt in Thermoprozessanlagen oberhalb von 500 °C zum größten Teil über Strahlung. Sie wird wesentlich durch die spektralen Strahlungseigenschaften der Flamme, der Ofenwände, des Nutzgutes und der Ofenatmosphäre bestimmt. Die Wände des Ofengefäßes und des Nutzgutes strahlen überwiegend als graue Strahler. Die Aufnahme und Abgabe von Strahlungswärme findet dabei im Wellenlängenbereich der Infrarotstrahlung statt. Bei den betrachteten Prozessen ist der Wellenlängenbereich im Bereich von 0 -15 µm relevant.

Die dominierenden strahlenden Bestandteile der Ofenatmosphäre sind Kohlendioxid und Wasserdampf, die jeweils in diskreten Banden strahlen. Der Strahlungsaustausch im Ofen ist ein komplexer Prozess, der mit den derzeit zur Verfügung stehenden Simulationswerkzeugen nur unzureichend beschrieben werden kann. Flamme, Ofenwand, Ofenatmosphäre und Nutzgut emittieren und absorbieren Strahlung in unterschiedlichen Strahlungsbanden.

Während bei Absorption der Strahlung an der Ofenwand die Strahlung wieder in temperatur- und materialabhängigen Wellenlängen emittiert wird, wird die Strahlung bei Reflexion genau in der Wellenlänge zurückgeworfen, in der sie auf die Wand getroffen ist. Eine hohe Reflexion an der Ofenwand kann also die technisch bedeutenden Banden von CO₂ und H₂O zurückwerfen, bei denen das Nutzgut (Stahl) gut Strahlung absorbiert.

Dies ist das zu Grunde gelegte Prinzip, welches hier durch reflektierende Coatings verfolgt werden soll, um die Aufheizung von Stahl in Industrieöfen zu beschleunigen und somit die Energieeffizienz der Nutzguterwärmung zu steigern.

Im Rahmen dieses F&E-Vorhabens wurde das Potenzial eines strahlungsreflektierenden Coatings für Ofenwände für Effizienzsteigerungen untersucht. Hierzu wurde der Einfluss eines reflektierenden Coatings auf Erwärmungsprozesse unter Versuchsbedingungen untersucht.

Mit überraschender Deutlichkeit konnte gezeigt werden, dass die Reflexion der Ofenwände oberhalb von Temperatur von 1.000°C einen sehr hohen Einfluss auf die Durchwärmung von Stahlblöcken hat. Im Technikumsversuch konnten Stahlblöcke 25 % schneller und bei niedrigerer Gaszufuhr erwärmt werden.

Inhaltsverzeichnis	Seite
Kurzfassung	IV
Einleitung	3
1. Erarbeitung theoretischer Grundlagen und Simulation von Erwärmungsprozessen mit verschiedenen Wandaufbauten und Coatings	4
2. Auswahl bzw. Bestimmung der notwendigen Zusammensetzung des wärmereflektierenden Coatings	9
3. Durchführung von Technikumsversuchen	15
4. Entwicklung eines Verfahrens zur Energieeffizienzsteigerung am untersuchten Industrieofen	27
5. Diskussion der Ergebnisse	28
Literaturverzeichnis	VI

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abbildung 1: Herdwagen-Schmiedeofen	3
Abbildung 2: Emissionsspektrum von Kohlendioxid (durchgezogene Linie 5 cm Schichtdicke, gestrichelt 100 cm) und Wasserdampf (durchgezogene Linie 100 cm Schichtdicke, gestrichelt 32 cm) bei Umgebungstemperatur und Atmosphärendruck	5
Abbildung 3: Spektraler Emissionsgrad von einigen Stahlsorten	6
Abbildung 4: Randbedingungen einer Beispielberechnung zum Wärmestrom durch die gezeigte Ofenwand	7
Abbildung 5: Verlauf der Ofenraumtemperatur eines Schmiedeofens bei Aufheizung	7
Abbildung 6: Verlauf der Innenwandtemperatur bei Aufheizung auf 1.250 °C Ofenraumtemperatur bei einem Wandemissionsgrad von 0,9 bzw. 0,5	8
Abbildung 7: Konsistenz und Verarbeitung des Coatings	10
Abbildung 8: Thermische Erweichung der feuerfesten Masse im Erhitzungsmikroskop bis 1.550 °C	11
Abbildung 9: Thermische Ausdehnung der feuerfesten Masse im Temperaturbereich bis 1400°C	12
Abbildung 10: Coating nach Erwärmung auf verschiedenen Temperaturen	14
Abbildung 11: Gesamtreflexionsgrad von Schamott und zwei Coating-Rezepturen	15
Abbildung 12: Unbeschichtete Brennkammer, zugestellt mit Alsitra 1600 Fasermatte	16
Abbildung 13: Stahlblöcke in der Brennkammer	17
Abbildung 14: Skizze der Draufsicht der Brennkammer	18
Abbildung 15: Emissionsgrad Fasermatte	19
Abbildung 16: Emissionsgrad der Coating-Rezeptur C.100	20
Abbildung 17: Versuchsergebnisse Blockerwärmung ohne Coating	21
Abbildung 18: Detailauswertung Versuchsdaten ohne Coating	22

Abbildung 19: Beschichtung der Brennkammer mit dem Coating	23
Abbildung 20: Versuchsergebnisse der Blockerwärmung nach Coating	24
Abbildung 21: Detailauswert Versuch mit Coating	25
Abbildung 22: Vergleich des Versuchs mit und ohne Coating	26
Abbildung 23: Detailvergleich mit und ohne Coating	27

Einleitung

Um den erheblichen Primärenergiebedarf von Industrieöfen effizient und nachhaltig zu senken, sind Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Energieeinsparung, zur Minderung von Schadstofffreisetzung sowie zur nachhaltigen Senkung des Ressourcenverbrauchs notwendig. **Abbildung 1** zeigt einen Schmiedeofen mit Herdwagen. In diesem Ofen (Innenraumabmessungen ca. 12 x 2 x 2 m) werden Stahlblöcke mit einem Gewicht von bis zu 30 t von Raumtemperatur auf 1.250 °C erwärmt, um sie anschließend zu schmieden. Solche Herdwagenöfen haben Anschlussleistungen von ca. 3 MW und einen jährlichen Erdgasverbrauch von 600.000 m³.



Abbildung 1: Herdwagen-Schmiedeofen

Um Verluste über die Ofenwände zu vermindern, sind solche Industrieöfen mit feuerfesten Materialien gedämmt. Die Wärmedämmmaterialien sind im Ofenbetrieb hohen Temperaturbelastungen, Temperaturwechseln, aggressiven Atmosphären und Staubbelastungen ausgesetzt. Im Laufe des Ofenbetriebs muss die Wärmedämmung regelmäßig geprüft und instandgesetzt sowie bei Bedarf ausgetauscht werden. Bei der Wahl der Materialien wurde bisher überwiegend auf eine niedrige Wärmeleitfähigkeit geachtet. Der Emissions- und Reflexionsgrad der Ofenwand, deren jeweilige Einfluss auf den Aufheizungsverlauf des Nutzgutes und auf die Wärmedämmung sowie die Wärmeverluste spielen meist eine untergeordnete Rolle oder werden gar nicht betrachtet.

Mit wärmereflektierenden keramischen Beschichtungen (Coatings) kann die Oberfläche der Wärmedämmung vor dem Strahlungseinfluss der Ofenatmosphäre geschützt werden. Dies führt zu einer geringeren Temperaturbelastung des Wärmedämmmaterials. Zusätzlich bildet eine Wandbeschichtung eine Barriere zwischen korrosiv wirkenden Komponenten (Kohlenmonoxid (CO), Wasserstoff (H₂), alkalische Bestandteile, metallische Stäube) der

Ofenatmosphäre und der Wärmedämmung. Beide Effekte führen zu einer erhöhten Lebensdauer der Wärmedämmung.

Die Strahlungskorrelation von Ofenwänden und Ofenatmosphäre mit dem Nutzgut beeinflusst zudem den Wärmeeintrag in das Nutzgut und somit die Aufheizzeit und den Energiebedarf des Ofenprozesses.

Bislang wurde der Einfluss auf die Nutzguterwärmung und die Wärmeverluste in Industrieöfen durch den Einsatz wärmereflektierender Coatings unzureichend untersucht. Hersteller von Coatings zur Änderung des Emissions- und Reflexionsgrades werben mit Energieeinsparungen, welche von einigen Anlagenbetreibern bestätigt werden, von anderen nicht Insbesondere für instationäre Ofenprozesse und bei großen Temperaturunterschieden zwischen Ofenwand, Nutzgutoberfläche und Gasatmosphäre wurde von Energieeinsparungen berichtet.

Die installierte Mess- und Regeltechnik an Thermoprozessanlagen erfasst den Strahlungsaustausch im Ofengefäß nicht. Änderungen von Emissions- und Reflexionsgrad an den Ofenwänden und deren Auswirkungen auf die Nutzguterwärmung werden nicht abgebildet. Die Ofentemperatur wird nicht optimal erfasst und geführt. Der Brenngasbedarf, die Aufheizzeit und Emissionsfreisetzung von Abgasen für Nutzgüter können damit höher ausfallen, als es erforderlich wäre. Im Rahmen des geplanten Vorhabens werden diese Aspekte näher betrachtet.

1. Erarbeitung theoretischer Grundlagen und Simulation von Erwärmungsprozessen mit verschiedenen Wandaufbauten und Coatings

Eine notwendige Voraussetzung für eine optimale Regelung der betrachteten Ofenprozesse ist, dass interpretierbare Messsignale und Informationen zum Wärmeeintrag in das Nutzgut zur Verfügung stehen. Eine Anpassung der Ofenregelung auf veränderte Bedingungen ist für das Erreichen einer maximalen Energie- und Emissionseinsparung erforderlich. Aufgrund der vielen Einflussgrößen ist eine Berechnung des Einflusses auf die Beheizungsqualität, auf die Aufheizzeit und den Energiebedarf des Ofenprozesses bisher nicht möglich. Daher werden Coatings zur Beeinflussung des Emissionsgrades in Deutschland bisher kaum eingesetzt.

Wärmestrahlung kann von einem Körper absorbiert, reflektiert oder durchgelassen werden. Beschrieben wird dieses Verhalten durch den Absorptions- (α), den Reflexions- (ρ) und den Transmissionsgrad (τ). Die Summe dieser drei Größen ist eins. Der Absorptionsgrad wird dabei gleich dem Emissionsgrad (ϵ) gesetzt. In einem Industrieofen kommt es zum Strahlungsaustausch zwischen dem Gas, dem Nutzgut, welches erwärmt werden soll (z.B. Stahl) und der Ofenwand. Das Gas einer Verbrennung im Industrieofen transmittiert, absorbiert und reflektiert einen Teil der Strahlung im Ofenraum. Dies erfolgt größtenteils über die

strahlungsaktiven Komponenten Kohlendioxid (CO_2) und Wasser (H_2O) in der Ofenatmosphäre. Diese sind sogenannte Bandenstrahler, d.h. sie strahlen ihre Wärme in bestimmten Wellenlängenbereichen aus. In **Abbildung 2** ist dargestellt in welchen Wellenlängenbereichen CO_2 und H_2O Wärme absorbieren und auch wieder emittieren. Dies drückt der spektrale Emissionsgrad aus.

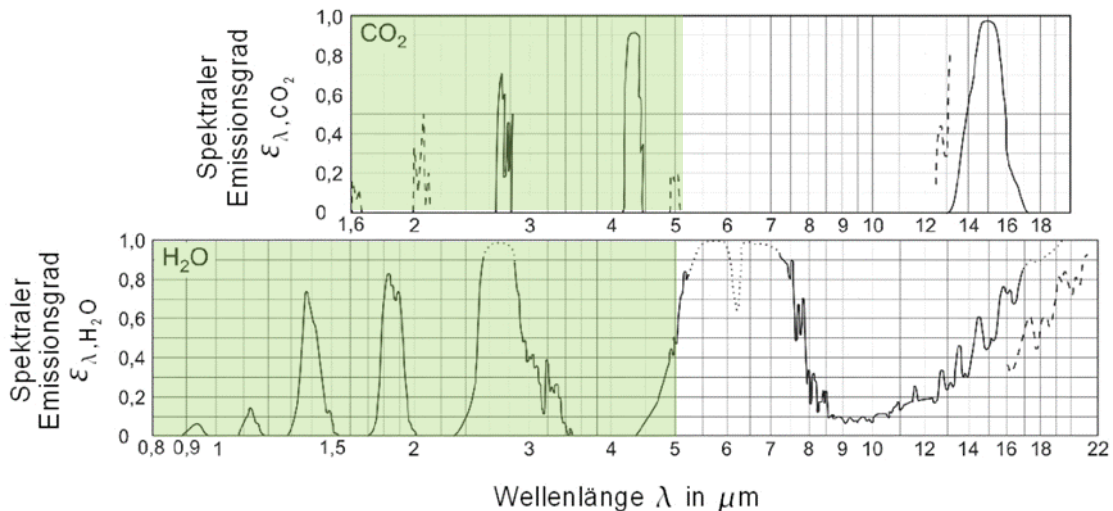


Abbildung 2: Emissionsspektrum von Kohlendioxid (durchgezogene Linie 5 cm Schichtdicke, gestrichelt 100 cm) und Wasserdampf (durchgezogene Linie 100 cm Schichtdicke, gestrichelt 32 cm) bei Umgebungstemperatur und Atmosphärendruck [1]

Im Bereich von ,5 bis 8 μm strahlt H_2O nur innerhalb einzelner Banden. Für Wärmestrahlung oberhalb 15 μm besitzt Wasserdampf dagegen ein sehr hohes Absorptionsvermögen. Kohlendioxid besitzt 5 Absorptionsbanden. Dieses Gas besitzt erheblich weniger und engere Banden als H_2O und absorbiert daher vergleichsweise weniger Strahlung. Für die technische Wärmestrahlung sind nur die beiden Banden 4,1 bis 4,45 μm und 12,9 bis 17,1 μm von Bedeutung.

Im Bereich von 8 bis 12 μm absorbieren und emittieren weder Wasserdampf noch Kohlendioxid Strahlung. Diesen Bereich nennt man das atmosphärische Fenster.

Bei Festkörpern, die nicht transparent sind, ist die Transmission null. D.h. diese absorbieren/emittieren oder reflektieren ausschließlich. Der Reflexionsgrad ist hier $1 - \epsilon$. In **Abbildung 3** ist der Emissionsgrad einiger Stähle dargestellt. Dieser ist vor allem im Bereich kleiner Wellenlängen ($< 5 \mu\text{m}$) wesentlich höher als bei größeren Wellenlängen. Dies bedeutet, dass Stähle sich bei Bestrahlung mit Wärmestrahlung bei kleineren Wellenlängen schneller aufheizen als bei großen Wellenlängen. In diesem Wellenlängenbereich wird deutlich mehr Wärmestrahlung absorbiert.

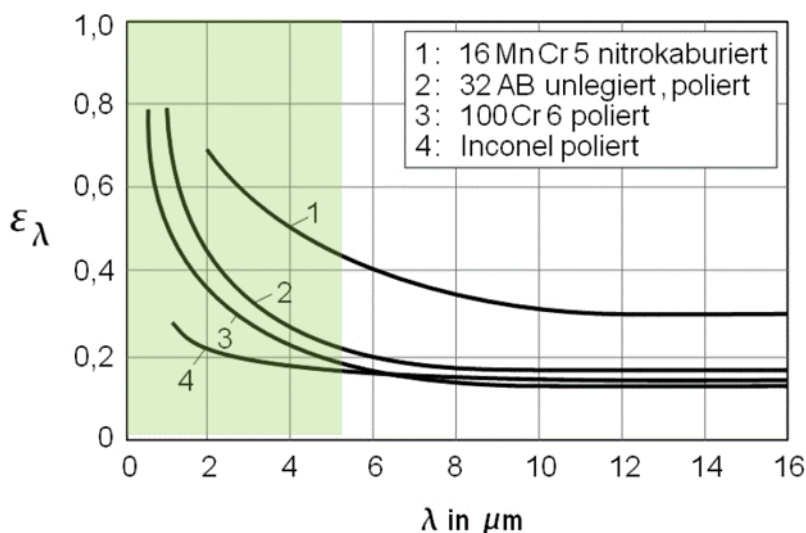


Abbildung 3: Spektraler Emissionsgrad von einigen Stahlsorten [1]

Im Ofen hat zudem die Wand einen enormen Strahlungseinfluss. Hier lässt sich das Strahlungsverhalten zwischen den beteiligte Partnern Nutzgut und Gas beeinflussen. Während bei Absorption der Strahlung an der Ofenwand die Strahlung wieder in temperatur- und materialabhängigen Wellenlängen emittiert wird, wird die Strahlung bei Reflexion genau in der Wellenlänge zurückgeworfen, in der sie auf die Wand getroffen ist. Eine hohe Reflexion an der Ofenwand kann also die technisch bedeutenden Banden von CO_2 und H_2O unterhalb von $5 \mu\text{m}$ zurückwerfen, bei denen der Stahl gut Strahlung absorbiert.

Dies ist das zu Grunde gelegte Prinzip, welches hier durch reflektierende Coatings verfolgt werden soll, um die Aufheizung von Stahl in Industrieöfen zu beschleunigen und somit die Energieeffizienz der Nutzguterwärmung zu steigern und die Freisetzung von Abgasemissionen zu vermindern.

Zudem wird bei instationärer Aufheizung weniger Wärme durch Strahlung in die Wand abgeführt (geringerer Wandwärmeverlust). Durch die höhere Reflexion heizt sich die Wand langsamer auf und die Wandwärmeverluste werden in dieser Phase geringer. Je länger der Prozess voranschreitet, desto niedriger wird der Effekt, bis er auf nahezu null herabsinkt. Nachfolgend wird der Effekt eines niedrigeren Wandemissionsgrades anhand einer Beispielberechnung dargestellt. **Abbildung 4** zeigt den berechneten beispielhaften Wandaufbau eines Industrieofens mit einer feuerfesten Dämmschicht von ca. 300 mm und einem Stahlmantel.

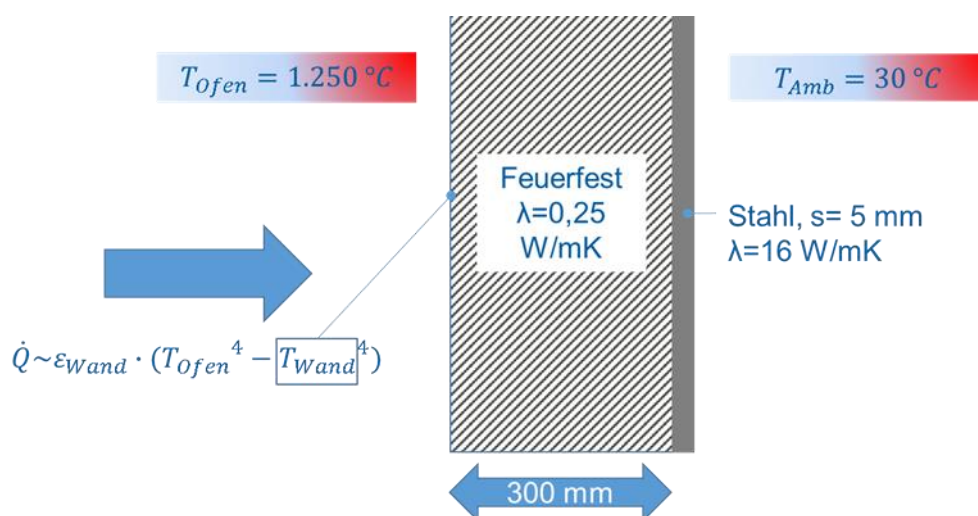


Abbildung 4: Randbedingungen einer Beispielberechnung zum Wärmestrom durch die gezeigte Ofenwand

Der Strahlungswärmestrom an die Ofenwand ist hierbei stark abhängig von dessen Emissionsgrad (ϵ_{Wand}) und dessen Temperatur (T_{Wand}). In Aufheizphasen kann, durch geringere Emissionsgrade der Ofenwand, der Wandwärmestrom verringert werden.

Abbildung 5 zeigt eine vom BFI an einem produzierenden Schmelzofen aufgenommene Aufheizkurve. Diese stellt den Verlauf der Ofentemperatur dar.

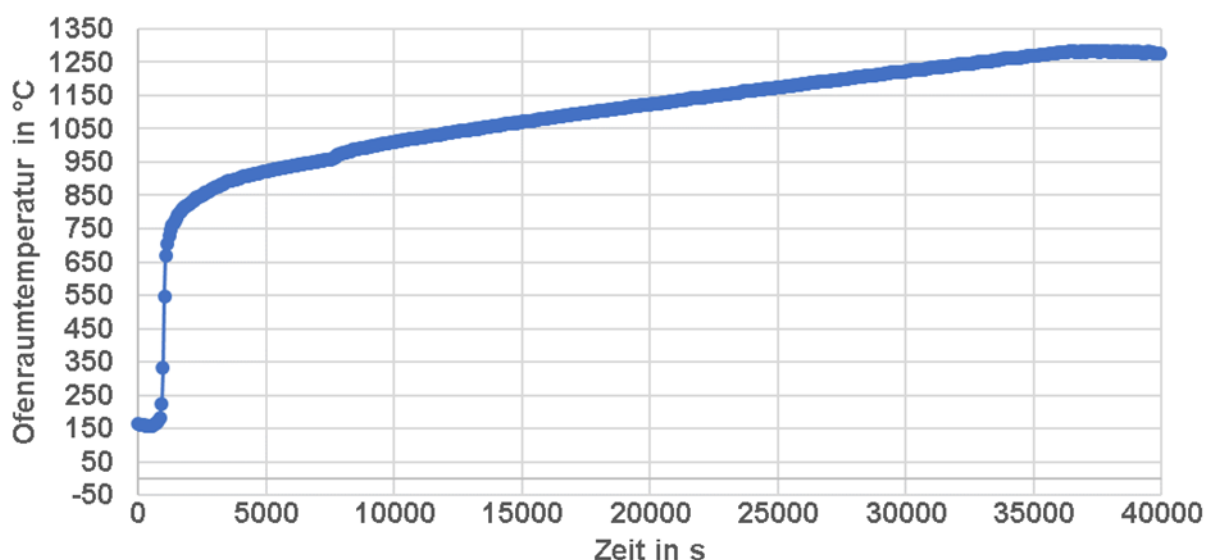


Abbildung 5: Verlauf der Ofenraumtemperatur eines Schmelzofens bei Aufheizung

In einer Finite-Element-Simulation wurde die Wandwärmestromdichte und der Temperaturverlauf an der Innenwand des Ofens bei einem Wandemissionsgrad von 0,9 (bspw. Schamotte / Ziegel als Feuerfest) und 0,5 berechnet. **Abbildung 6** zeigt die Berechnungsergebnisse.

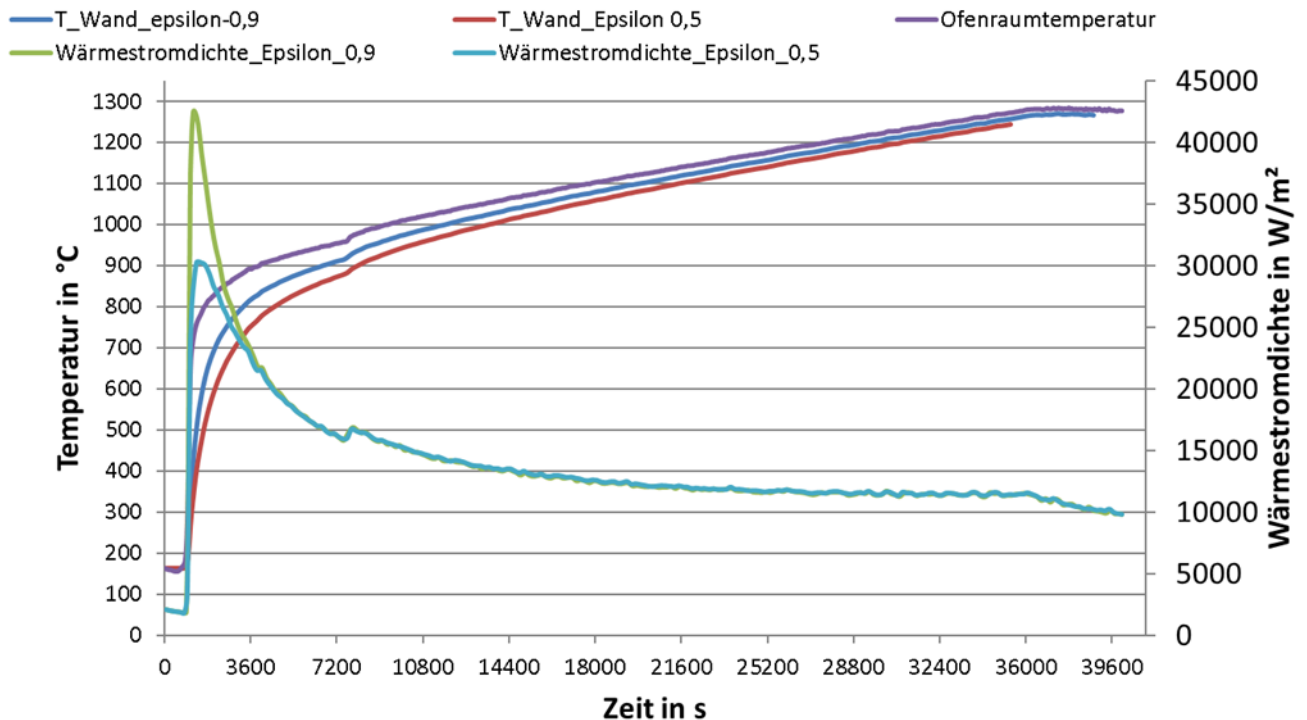


Abbildung 6: Verlauf der Innenwandtemperatur bei Aufheizung auf 1.250 °C Ofenraumtemperatur bei einem Wandemissionsgrad von 0,9 bzw. 0,5

Blau ist der Verlauf der Innenwandtemperatur bei einem Emissionsgrad von 0,9. Rot entsprechend der Verlauf bei einem Emissionsgrad von 0,5. Grün und hellblau sind die Wärmestromdichten in W/m^2 bei den entsprechenden Emissionsgraden dargestellt. Man erkennt, dass bei einem niedrigeren Emissionsgrad die Innenwand sich zeitverzögert aufheizt. Daher sinkt die Wärmestromdichte in der Aufheizzeit deutlich auf in diesem Fall ca. 1 - 1,5 h.

Auf den gesamten Ofenprozess gesehen entsprechen die gesenkten Wandwärmeverluste ca. 2 % pro Ofenreise, was bei solchen Industrieöfen ca. 290 - 430 GJ im Jahr entspricht. Diese Prozentwerte sind aber im Industrieprozess aufgrund der verwendeten Messtechnik nicht ausreichend gut zu erfassen. Hinzu kommt, dass die Messtechnik bei Änderung der Strahlungseigenschaften im Ofenraum neu kalibriert werden sollte, was bisher bei Verwendung solcher Coatings nicht gemacht wurde.

Ein weitaus höherer Effekt wird beim Wärmestrom ins Nutzgut erwartet, welcher für die produzierenden Unternehmen von größerer Bedeutung ist. Dieser Einfluss wurde bisher theoretisch beschrieben und soll im Vorhaben detailliert untersucht werden.

Durch die erhöhte Reflexion der Wärmestrahlung wird der Strahlungseinfluss auf die vorhandene Messtechnik im Ofen beeinflusst. Dies muss durch eine erneute Kalibrierung oder durch weitere Thermoelemente berücksichtigt werden, um den Prozess wieder optimal an die neuen Strahlungsverhältnisse anzupassen. Aufheizkurven (Aufheizdauer und Haltezeiten) von Nutzgütern wurden bislang beibehalten, wodurch es nicht möglich war, einen aussagenkräftigen Wert zur möglichen Energieeinsparung zu dokumentieren. Zudem ist der Strahlungswärmeaustausch aufgrund der Temperatur- und Wellenlängenabhängigkeit nicht ausreichend genau numerisch darstellbar, um auf Basis von Simulationsrechnungen mittels vorhandener kommerzieller Programmpakete Aussagen treffen zu können.

2. Auswahl bzw. Bestimmung der notwendigen Zusammensetzung des wärme-reflektierenden Coatings

Bei dem wärme-reflektierenden Coating sind vor allem drei Faktoren wichtig:

- › Standfestigkeit bei hohen Temperaturen,
- › Reflexionsgrad und
- › Verarbeitung (spritz- und streichfähig).

Die eigentliche Masse des Coatings ist feinkörnig und besteht aus einer definierten Mischung von Mullit-Keramik mit Metalloxiden. Dieses wird mit Bindemittel und Anmachwasser übersättigt. Ab 45°C wird die Masse hart und verfestigt sich. **Abbildung 7** zeigt die Konsistenz des Coatings vor dem Umrühren und Erwärmen sowie den erwärmten Endzustand. Die Fa. Avion unternahm zahlreiche Versuche und veränderte die Rezeptur, bis eine leicht spritz- und streichbare Masse entstand. Für einen hohen Reflexionsgrad sollte der Anteil der Metalloxide und Mullit relativ hoch liegen, was die Verarbeitungsqualität negativ beeinflusst. Hier galt es das optimale Verhältnis zu finden.



Abbildung 7: Konsistenz und Verarbeitung des Coatings

Bestimmung der thermischen Beständigkeit unter dem Erhitzungsmikroskop

Die angemischte feuerfeste Masse wurde im Auftrag von Avion unter einem Erhitzungsmikroskop bis auf 1.550 °C erwärmt und zeigt dabei keinerlei Konturveränderungen, **Abbildung 8**.

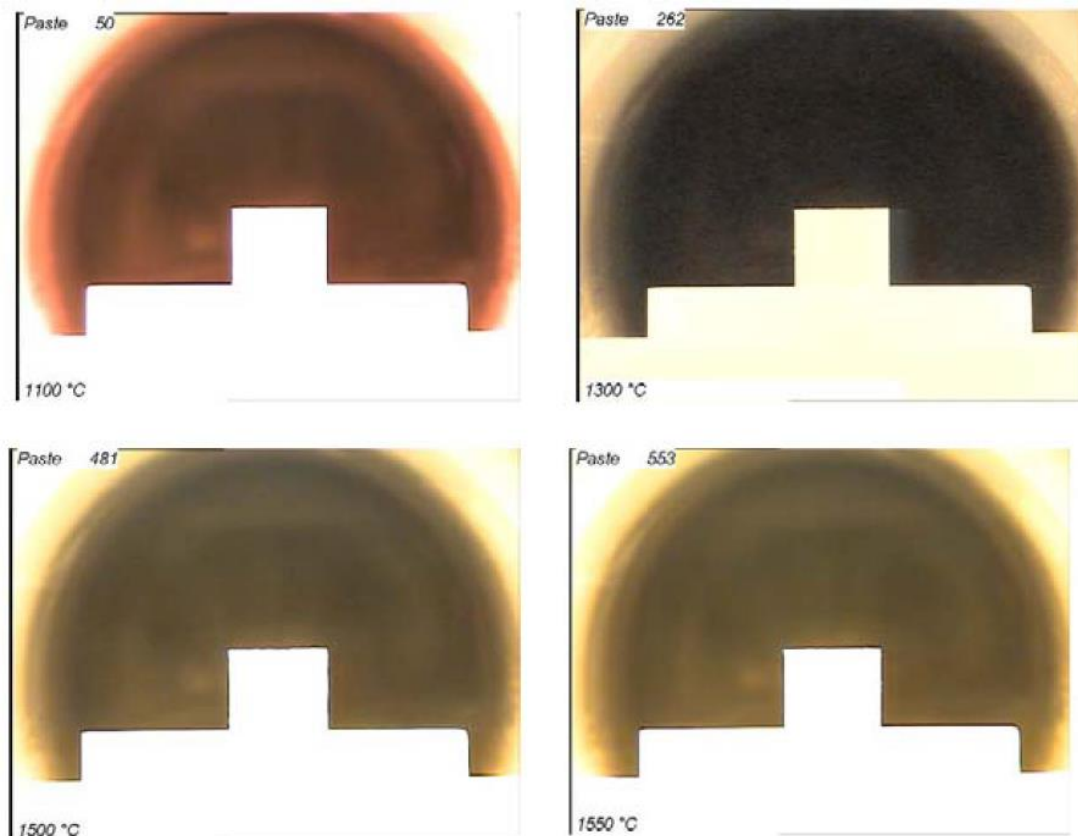


Abbildung 8: Thermische Erweichung der feuerfesten Masse im Erhitzungsmikroskop bis 1.550 °C

Des Weiteren wurde im Zuge der Untersuchung die Veränderung der thermischen Ausdehnung des Coatings untersucht. Für die thermische Ausdehnung des Coatings im Temperaturbereich von ca. 1.100°C bis 1.400° geht aus hervor (blaue Kurve: Aufheizung; rote Kurve: Abkühlung):

- › Schwindung zeigt sich beim Aufheizen ab ca. 900°C und setzt sich bis ca. 1.300°C fort und erreicht insgesamt ca. 0,6 %, gegenüber dem Ausgangszustand des Coatings beträgt sie bei 1.300°C ca. 0,3 %. Ursache dieser Schrumpfung sind in erster Linie strukturelle Veränderungen der Schicht durch Sinterung sowie die Bildung neuer Verbindungen.
- › Zwischen ca. 1.300°C und 1.400°C setzt ein starkes „Wachsen“ des Coatings von mehr als 1,2 % ein. Ursachen dieses „Wachsens“ sind die verstärkte Umwandlung von SiO₂ in eine andere Kristallform, sowie die Zersetzung weiterer Oxide.

- › Zu Beginn der Abkühlung ab 1.400°C setzt sich das Wachstum der Masse weiter fort und erreicht bei 1.317°C einen Maximalwert, der 2 % über dem Ausgangszustand des Coatings liegt.
- › Anschließend folgt eine fast lineare Abnahme der Dehnung des gesinterten Coatings von ca. 0,7 % zwischen 1.317°C und Raumtemperatur, was relativ günstig ist. Das bei 1.400°C gesinterte Coating weist damit gegenüber dem Ausgangszustand ein bleibendes Wachstum von ca. 1,3 % auf.

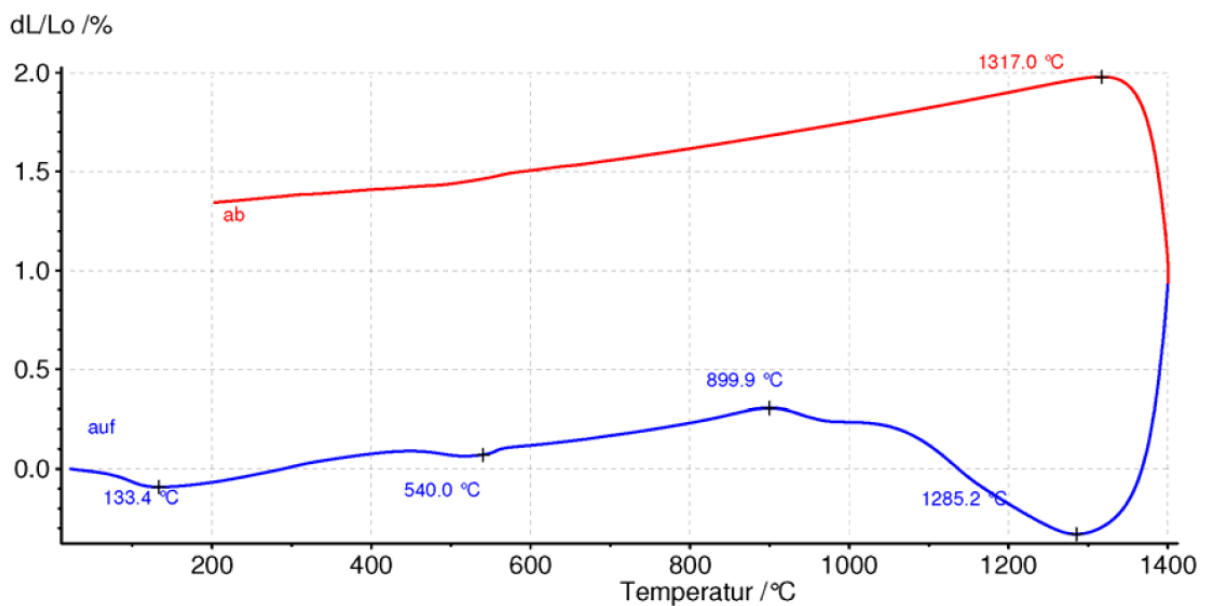


Abbildung 9: Thermische Ausdehnung der feuerfesten Masse im Temperaturbereich bis 1.400°C

Zusammenfassend ist die relative lineare Ausdehnung und Schrumpfung unterhalb von 1.300 °C positiv zu beurteilen für die Haltbarkeit.

Bindemittel und Anmachwasser liegen nach der Erhitzung auf über 1.300°C so gut wie nicht mehr vor. Sie sind ausschließlich für die anfängliche Verarbeitung wichtig.

Die mineralogische Zusammensetzung ändert sich während der Erwärmung, die chemische Zusammensetzung des Coatings dagegen kaum. Die mineralogische Zusammensetzung keramischer Substanzen beschreibt, im Gegensatz zur chemischen Zusammensetzung, die tatsächlich in den Stoffen vorliegenden Verbindungen. Diese können sich bei der

Erwärmung und beim Brand der Werkstoffe, trotz unveränderter chemischer Zusammensetzung, ändern und sind maßgeblich für die Gebrauchseigenschaften. Ursachen der temperaturabhängigen Veränderungen sind z.B. thermische Zersetzungen von Verbindungen, Änderungen der Kristallformen gleicher chemischer Stoffe und Neubildung von Verbindungen aus bereits vorhandenen Stoffen durch Festkörperreaktionen. Es ist deshalb unbedingt notwendig, die mineralogische Zusammensetzung des Coatings in Abhängigkeit von der Temperatur zu kennen, insbesondere auch wegen der unterschiedlichen Anwendungstemperaturen beim Einsatz in industriellen Prozessen.

Die mineralogische Zusammensetzung der feuerfesten Masse verändert sich stark während der Aufheizung, was höchstwahrscheinlich einen großen Einfluss auf den Reflexionsgrad hat. Mineralogische Veränderung treten bei dem Coatings erst ab 800°C ab. Es kommt hierbei zur Veränderung von Kristallformen sowie bei sehr hohen Temperaturen zu Verglasung.

Hinweis: Genauere Ergebnisse und die detaillierte Zusammensetzung des Coatings möchte die Fa. Avion, aus firmenpolitischen Gründen, an dieser Stelle nicht bekanntgeben.

Im Auftrag der Fa. Avion wurden daher die Emissionsgrade des Coatings untersucht, nachdem das Coating bei verschiedenen Temperaturen gesintert bzw. erwärmt wurde.

Abbildung 10 zeigt das Coating nach Erwärmung und Sinterung bei verschiedenen Temperaturen. Die niedrigsten Emissionsgrade erreicht das Coating bei Temperaturen zwischen 1.100 °C und 1.300 °C. Bei über 1.400 °C steigt der Emissionsgrad des Coatings und es verliert seine hohe Reflexion.



Abbildung 10: Coating nach Erwärmung auf verschiedenen Temperaturen

Die Fa. Avion hat weiterhin verschieden „Coating-Rezepturen“ entwickelt und miteinander verglichen.

Nachfolgende **Abbildung 11** zeigt den Vergleich anhand des Gesamtreflexionsgrads von:

- › Schamott IK45, von Fa. C. Otto,
- › IK45 + Top C. 296A (Coating-Rezeptur 1) und
- › IK45 + C.100 (Coating Rezeptur 2).

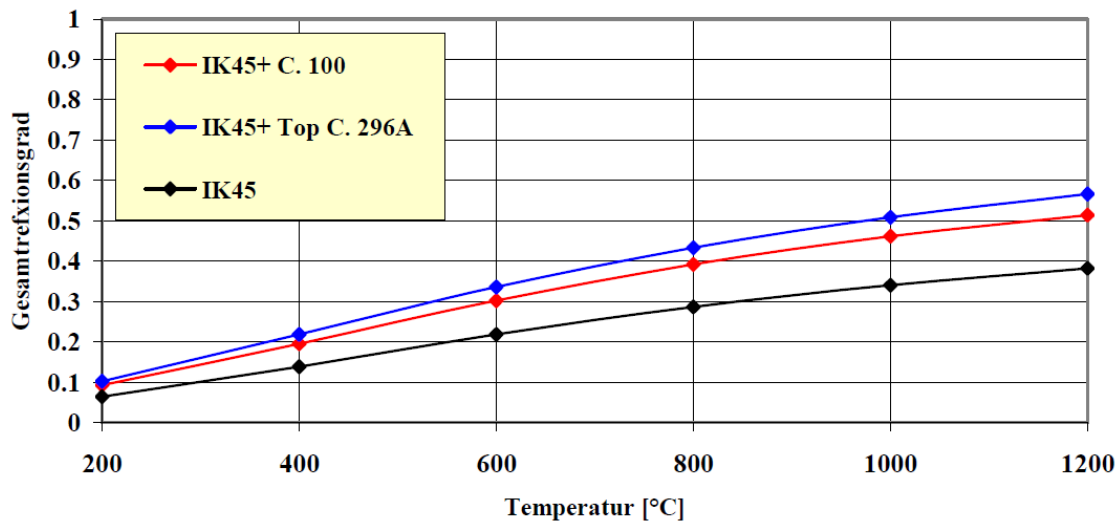


Abbildung 11: Gesamtreflexionsgrad von Schamott und zwei Coating-Rezepturen

Beide Coating-Rezepturen erhöhen den Reflexionsgrad, vor allem bei hohen Ofenraumtemperaturen. Bei 1.200 °C liegen die Emissionsgrade 25 % - 37,5 % höher als beim Schamott. Auswirkungen auf Erwärmungsprozesse in Industrieöfen sind somit wahrscheinlich.

Die Coating Rezeptur C.100 stellte sich als die mit der höchsten Reflexion heraus und wurde in unserem F&E-Projekt für weitere Versuche verwendet. Die Verarbeitung war bei beiden Varianten in etwa gleich gut zu bewerten.

3. Durchführung von Technikumsversuchen

Um die Coating Rezeptur C.100 unter realitätsnahen Bedingungen zu testen wurde ein Versuchsaufbau mit zwei rd. 300 kg schweren Stahlblöcke an der Technikumsanlage des BFIs hergestellt. **Abbildung 12** zeigt die Technikumsanlage von innen vor der Beschichtung mit dem Coating. Die Brennkammer ist ausgekleidet mit der Feuerfestfaser Alsitra 1.600.



Abbildung 12: Unbeschichtete Brennkammer, zugestellt mit Alsitra 1.600 Fasermatte

Mittig in der Brennkammer wurden die Stahlblöcke auf den Boden gelegt (**Abbildung 13**). Die Thermoelemente wurden in verschiedenen Abständen jeweils mittig im Block positioniert. Diese messen die Materialtemperatur an der entsprechenden Position im Block. Die mittige Position wies wie erwartet bei den späteren Versuchen die niedrigste Temperatur bei der Erwärmung auf. Dies ist dadurch zu erklären, dass sich die Position mittig im Block und in Bodennähe der Brennkammer befindet. Hier ist der Wärmeübergang am niedrigsten.



Abbildung 13: Stahlblöcke in der Brennkammer

Abbildung 14 zeigt eine Skizze der Draufsicht der Brennkammer mit der Position der Blöcke und der einzelnen Block-Thermoelemente (TK_01-10) sowie der Position der Ofentemperaturmessung (T_BK_02).

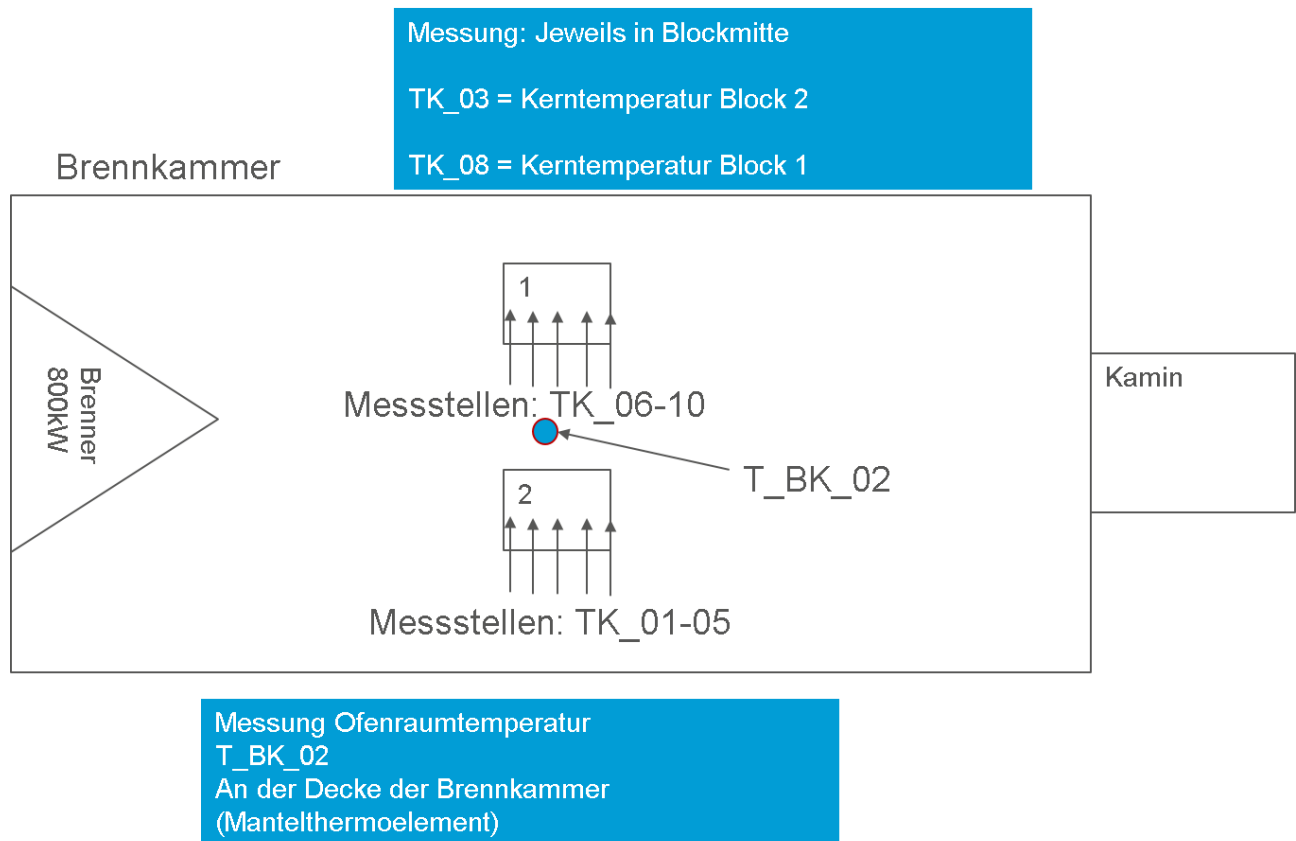


Abbildung 14: Skizze der Draufsicht der Brennkammer

Für die Untersuchung ist es vorab wichtig zu wissen, inwiefern sich die Emissionsgrade der beiden Oberflächenmaterialien (Alsitra 1.600 und Coatingrezeptur C.100) unterscheiden. **Abbildung 15** zeigt den Emissionsgrad von Fasermatten in Abhängigkeit der Rohdichte.

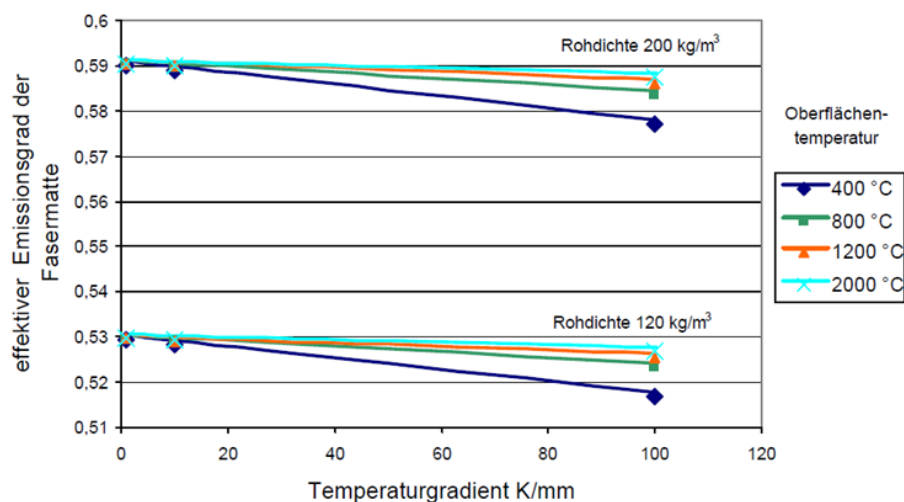


Abbildung 15: Emissionsgrad Fasermatte [2]

Der Emissionsgrad typischer Fasermatten liegt zwischen 0,51 und 0,59, der Reflexionsgrad entsprechend bei 0,41 - 0,49. (Reflexion = 1 – Transmission (0) – Emission)

Abbildung 16 zeigt den im Auftrag von Avion gemessenen Emissionsgrad der Coating-Rezeptur C.100. Bei einmaliger Erwärmung bis auf 400°C (rote Kurve) zeigt sich, dass das Coating bestenfalls einmal über 800 °C erhitzt werden sollten, damit es entsprechend niedrige Emissionsgrade erreicht. Die hellblaue Kurve zeigt den Coating Emissionsgrad bei 400°C und vorheriger Erhitzung auf über 800°C.

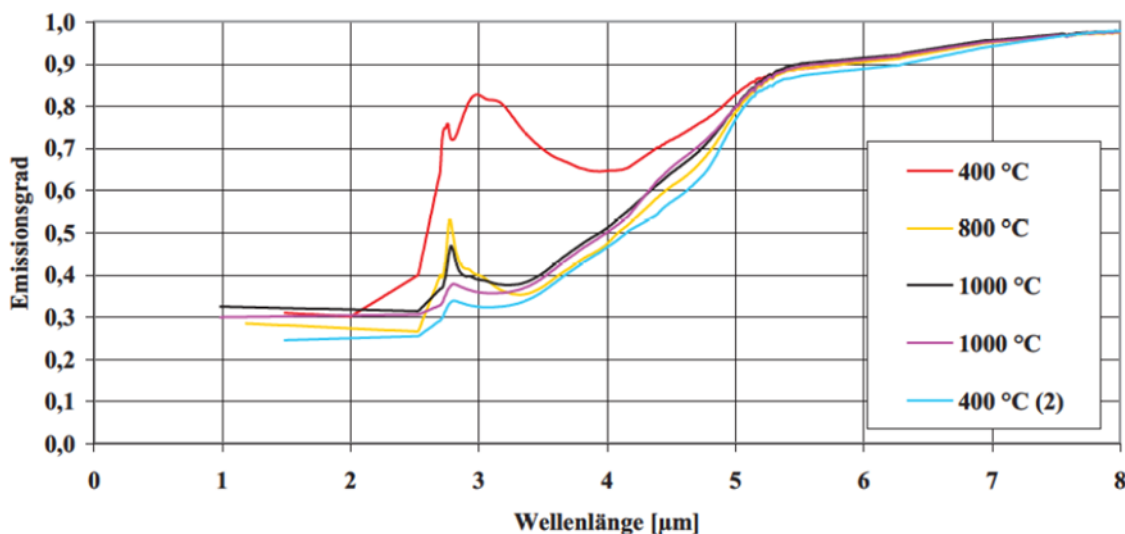


Abbildung 16: Emissionsgrad der Coating-Rezeptur C.100

Der Emissionsgrad des Coatings liegen bis zu einer Wellenlänge von 5 µm unter dem Emissionsgrad der Fasermatte. Bei höheren Wellenlängen steigt dann der Emissionsgrad deutlich an und liegt oberhalb des Emissionsgrads von der Fasermatte.

Der Einfluss auf die Blockerwärmung kann hiermit noch nicht vorausgesagt werden, weil auch der Emissionsgrad bzw. Absorptionsgrad des Nutzgutes wellenlängenabhängig ist und man analytisch nicht abschätzen kann inwieweit die vom Coating reflektierte Strahlung vom Block auch absorbiert werden kann. **Abbildung 17** zeigt den Versuchsablauf eines Versuchs zur Blockerwärmung ohne Coating. Zieltemperatur im Ofenraum ist 1.300 °C und niedrigste Zieltemperatur im Block ist 1.250 °C. In der Brennkammer ohne Coating wurde beide Zieltemperaturen nach etwa 4 h erreicht. Als niedrigste Temperatur im Block konnte TK_08 identifiziert werden.

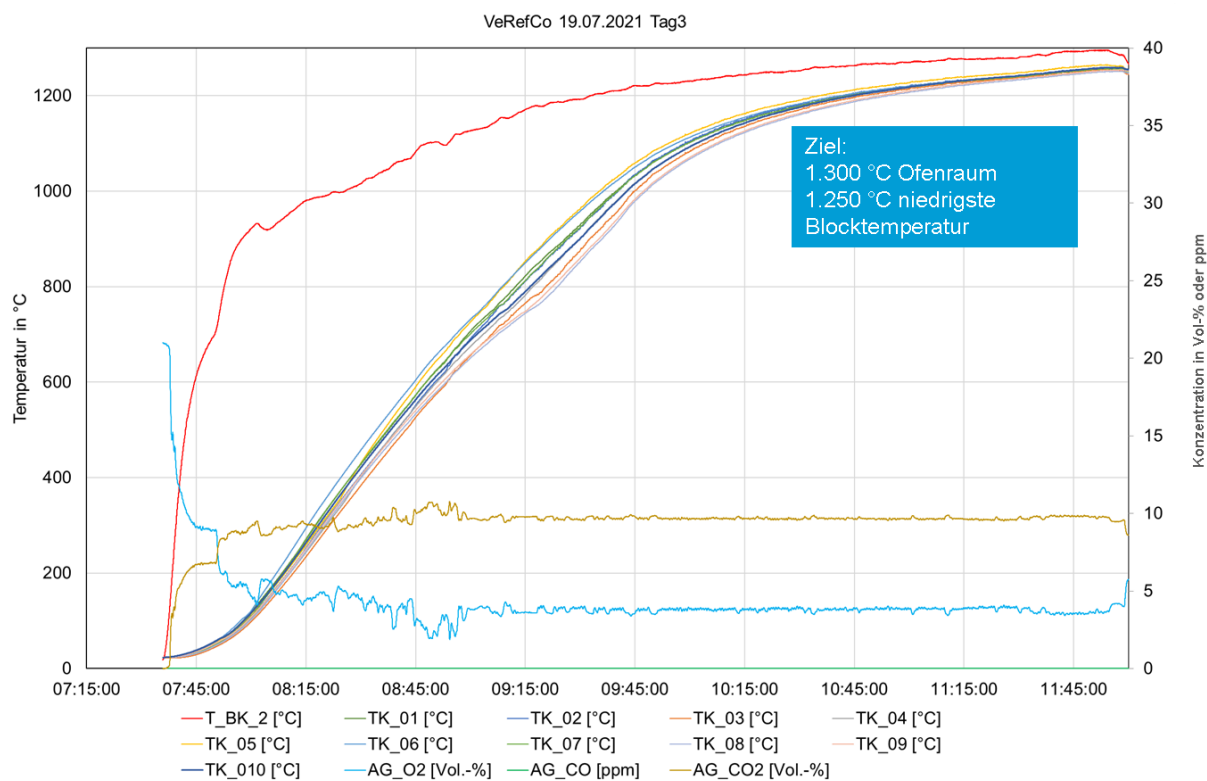


Abbildung 17: Versuchsergebnisse Blockerwärmung ohne Coating

Abbildung 18 zeigt das Ende der aufgenommenen Versuchsergebnisse im Detail. Die Blocktemperatur von 1.250 °C wurde bei einer Ofenraumtemperatur von 1.296 °C nach 4 h Aufheizdauer erreicht.

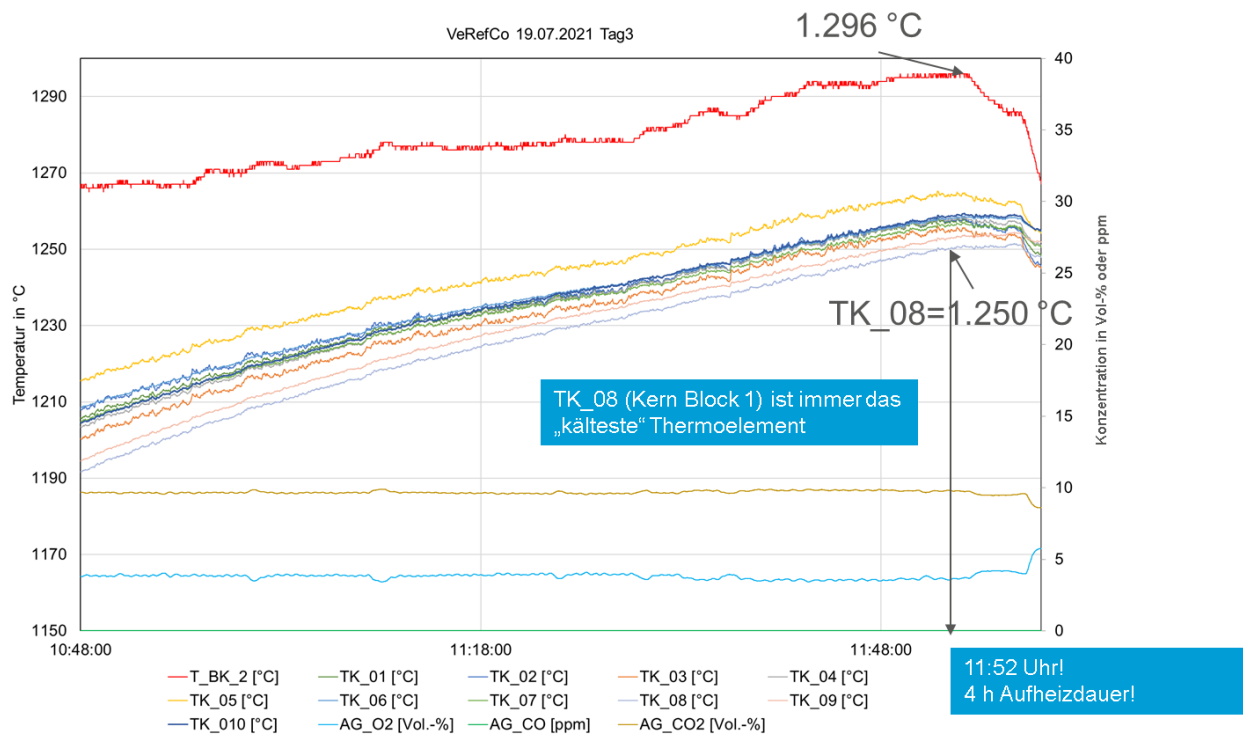


Abbildung 18: Detailauswertung Versuchsdaten ohne Coating

An drei Versuchstagen konnte das Ergebnis bestätigt werden. Es ergaben sich zwischen den Versuchen nur geringfügige Unterschiede, so dass die Versuchsergebnisse als reproduzierbar angesehen werden können. Im Anschluss wurde die Brennkammer mit dem ausgewählten Coating beschichtet. **Abbildung 19** zeigt Fotografien vom ersten Tag der Beschichtung. Das Coating weist eine leicht gräuliche / silbrige Farbe bei der Beschichtung auf. Das Coating wurde auf alle Wand-, Decken und Bodenfläche aufgebracht.



Abbildung 19: Beschichtung der Brennkammer mit dem Coating

Nach dem Coating (und der erforderlichen Trocknungszeit von mindestens 3 Tagen) wurden die Versuche zur Blockerwärmung mit exakt demselben Versuchsaufbau wiederholt.

Abbildung 20 zeigt den Erwärmungsverlauf der Brennkammer und der Blocktemperaturen nach dem Auftragen des Coatings in der Brennkammer. Die Minimaltemperatur konnte wieder am Thermoelement TK_08 gemessen werden. TK_08 wies nun aber bereits nach etwa 3 h die gesetzte Zieltemperatur von 1.250 °C auf. Die Ofenraumtemperatur (T_BK_02) überschritt nun bereits vorab die 1.300 °C Zieltemperatur.

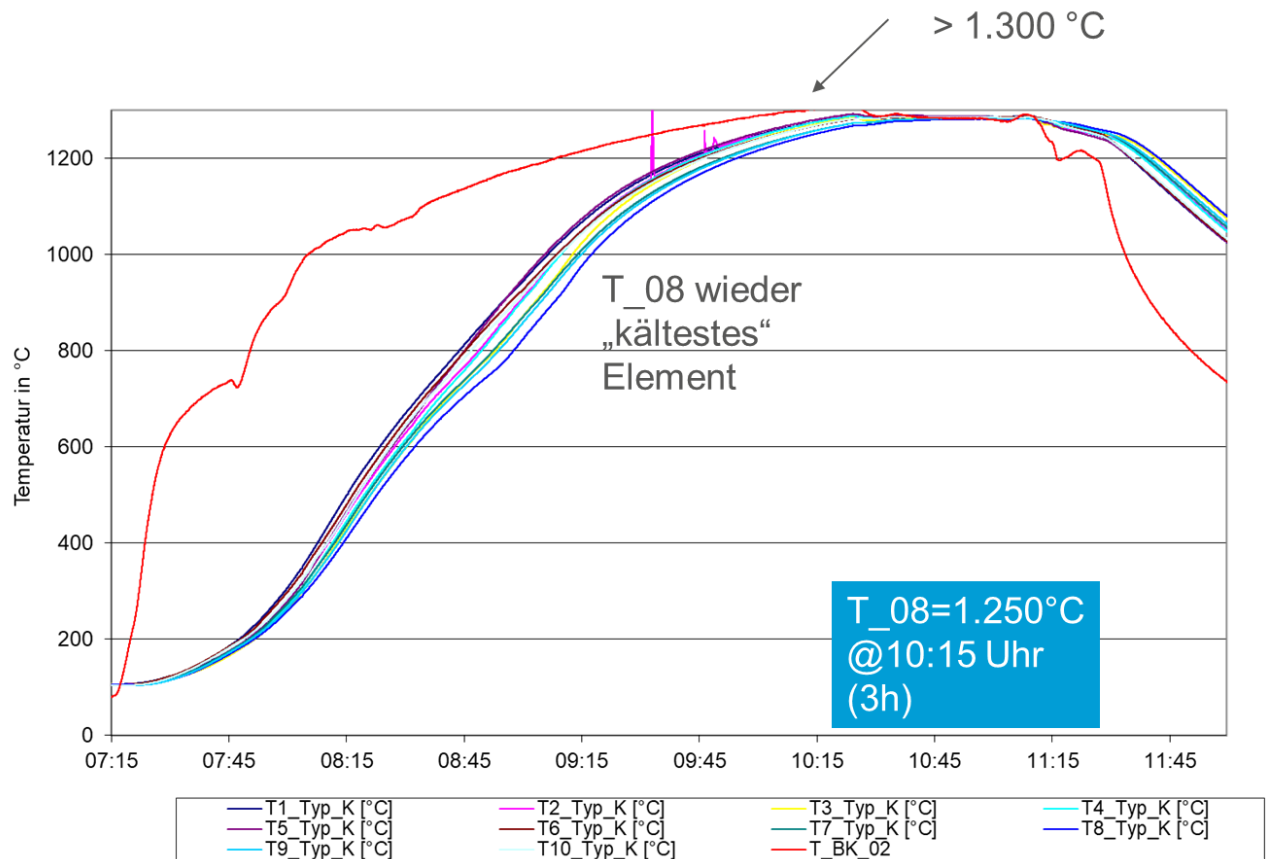


Abbildung 20: Versuchsergebnisse der Blockerwärmung nach Coating-Beschichtung

Die Detaildarstellung in **Abbildung 21** zeigt, dass die Ofenraumtemperatur nach etwa 3 h bereits oberhalb von 1.300 °C liegt. Kurz darauf erreicht auch Thermoelement 8 die Zieltemperatur von 1.250 °C.

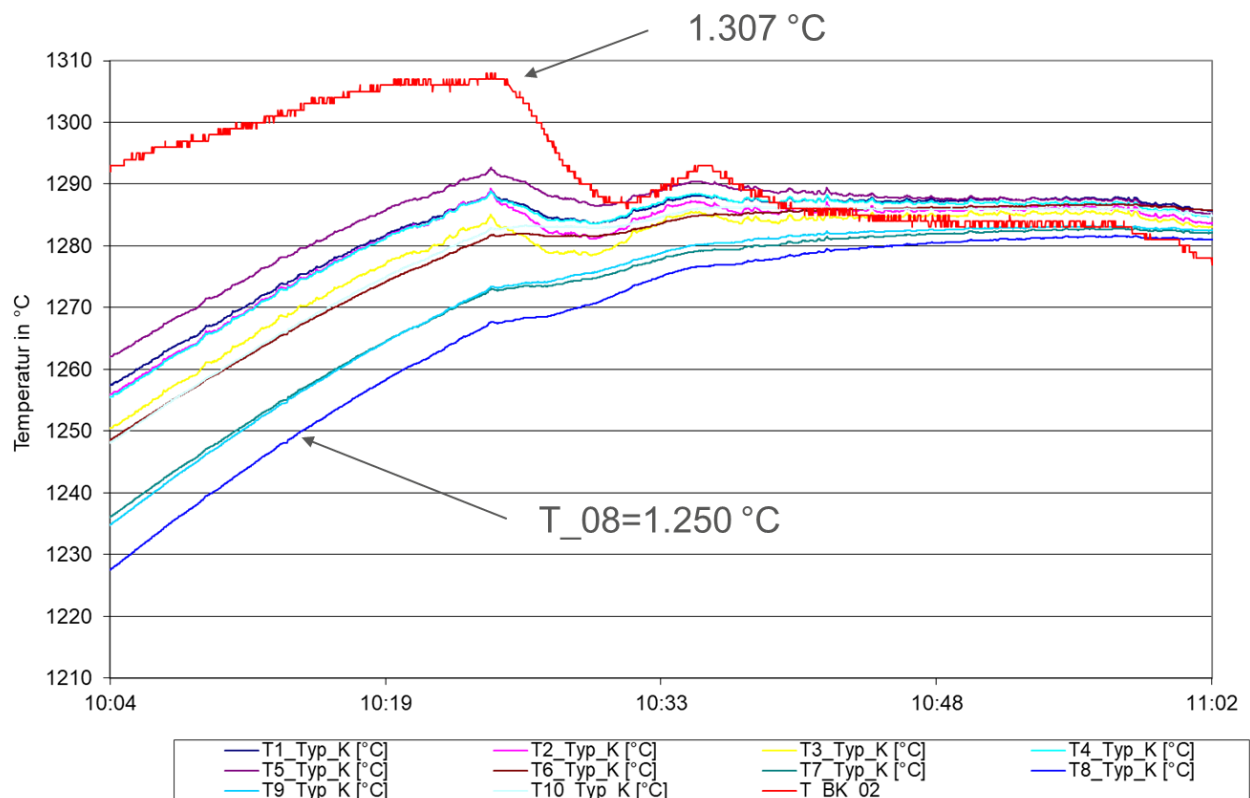


Abbildung 21: Detailauswertung Versuch mit Coating

In **Abbildung 22** sind nun beide Erwärmungsverlaufskurven gegenübergestellt. Gestrichelt und dünn sind die Kurven vor der Beschichtung der Brennkammer dargestellt. Die „fetten“ Kurven zeigen den Erwärmungsverlauf nach der Beschichtung. Orange ist hier auch der Gasverbrauch in m^3 dargestellt. Die Brennkammerregelung lässt zum Schutz der feuerfesten Einbauten nur eine maximale Aufheizrate zu, diese wurde mit dem Coating nach 1,5 h überschritten, weshalb die Gaszufuhr heruntergeregelt wurde. Die Blockerwärmung verlief trotz der geringeren Gaszufuhr schneller ab. Es zeigt sich deutlich, dass ab Temperaturen oberhalb von 1.000 °C im Ofenraum sowohl die Ofenraumtemperatur selbst als auch die Temperaturen in den Blöcken deutlich steiler und schneller ansteigen. Dies deutet auf eine deutlich bessere Wärmeübertragung zwischen Ofenwand, Ofenatmosphäre und den Stahlblöcken bei einer Temperatur oberhalb von 1.000 °C hin. Dies belegt, dass es durch das Coating zu einem veränderten Strahlungsverhalten kommt, welches sich positiv auf die Erwärmung der Stahlblöcke auswirkt. Die errechnete Einsparung

auf Basis der Versuchsergebnisse liegt bei 25 % Zeitersparnis und bis zu 50 % Gaseinsparung zur Aufheizung der beiden Stahlblöcke.

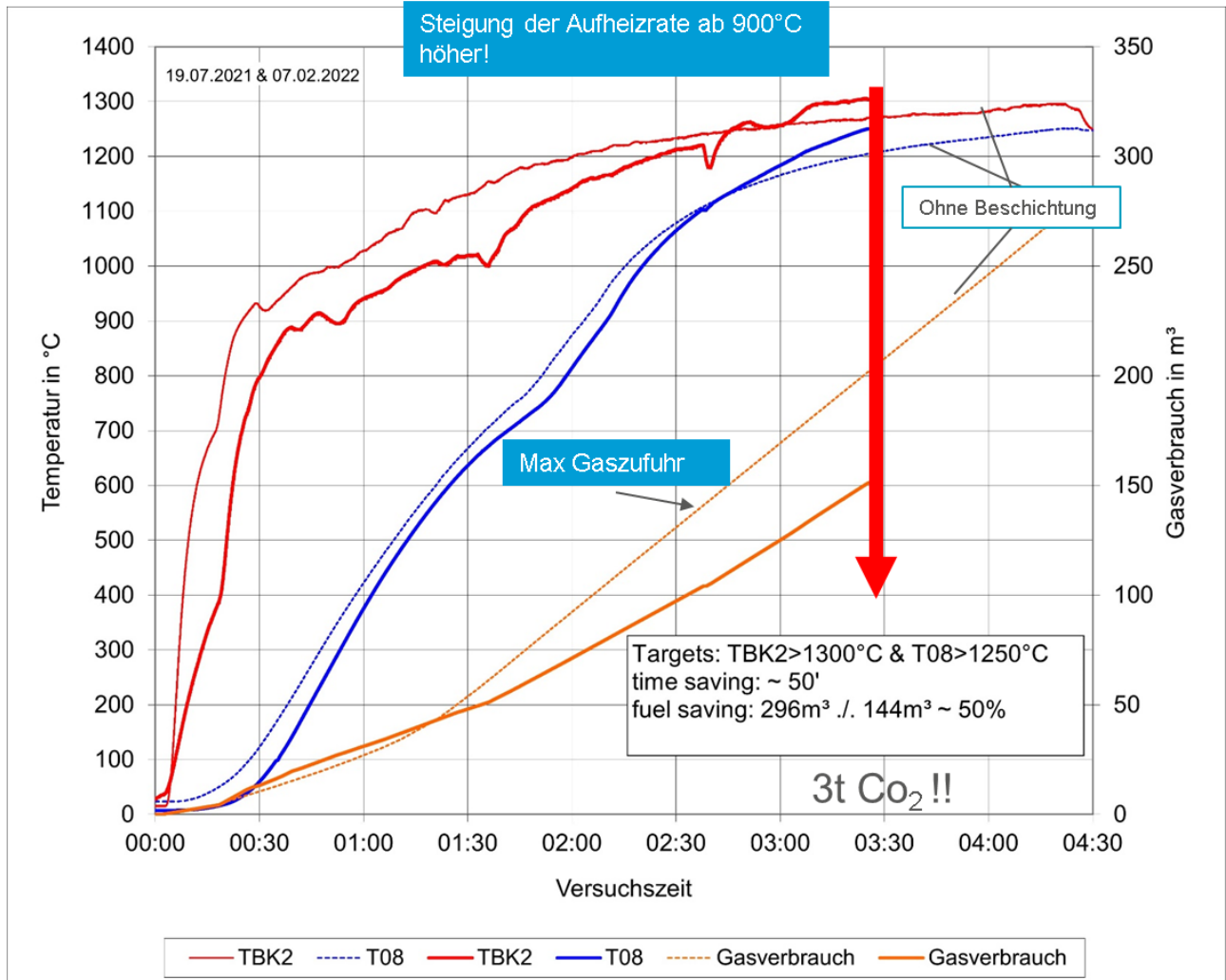


Abbildung 22: Vergleich des Versuchs mit und ohne Coating

Abbildung 23 zeigt im Detail den Verlauf der Ofenraumtemperatur und der Blocktemperatur vor und nach der Beschichtung der Brennkammer. Man erkennt hier deutlich den Unterschied in der Steigung der Kurven. Die Aufheizrate bei der Ofenraumtemperatur und vor allem der Blocktemperatur ist wesentlich höher, obwohl zu diesem Zeitpunkt die Gaszufuhr bereits gedrosselt wurde im Vergleich zum Versuch ohne Coating. Dies ist nur mit geringeren Wärmeverlusten und einer effektiveren Wärmeübertragung zu erklären.

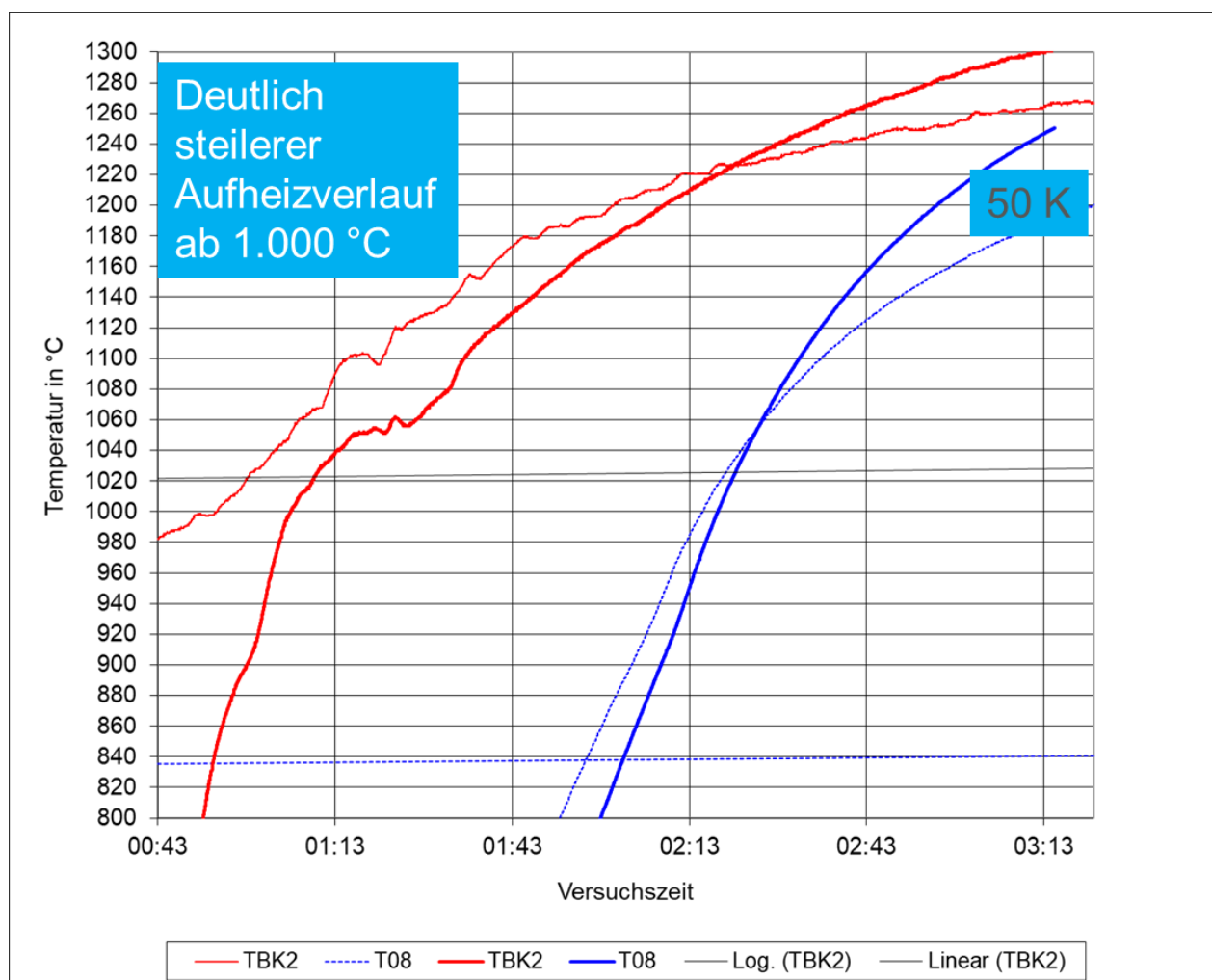


Abbildung 23: Detailvergleich mit und ohne Coating

4. Entwicklung eines Verfahrens zur Energieeffizienzsteigerung am untersuchten Industrieofen

Prinzipiell sollten vor Einsatz des Coatings die Einsatztemperaturen der Ofenanlage betrachtet werden. Diese sollten, um einen Effekt durch das Coating zu erzielen, oft im Temperaturbereich von $> 1.000 \text{ }^\circ\text{C}$ liegen.

Im durchgeführten Versuch an der Technikumsanlage wurde die Brennkammertemperatur bzw. der Temperaturgradient (Anstieg der Brennkammertemperatur) vorgegeben und der Gasdurchfluss geregelt. Dies entspricht der Betriebsweise an Industrieöfen. Durch das

Coating steigen die Werte für die Ofenraumtemperatur und den Aufheizgradienten ab Temperaturen von über 800°C deutlich an, obwohl der Gasdurchfluss automatisch, infolge der Regelvorgabe (fester Temperaturgradient und feste Brennkammertemperatur), vermindert wurde. Die Regelung an der Technikumsanlage ist mit einer starken Dämpfung versehen und konnte die schnellere Aufheizung der Ofenatmosphäre nicht komplett kompensieren. Bei einer schnelleren Regelung würde der Erdgasvolumenstrom weiter abgesenkt werden. Die Regeleinheiten an Industrieöfen sind in der Regel in der Lage, den vorgegebenen Temperaturwerten und Gradienten besser zu folgen, als dies in den Technikumsversuchen möglich war. Sollte dieses nicht möglich sein, kann mit einer Anpassung der Regelung leicht Abhilfe geschaffen werden.

Mit den Untersuchungen wurde gezeigt, dass die Stahlblöcke die Zieltemperatur schneller erreichen bei gleichzeitig gesenktem Erdgasvolumenstrom. Es ergibt sich bereits eine Erdgaseinsparung bei gleichbleibender Dauer der Ofenreise. Eine zusätzliche Einsparung ist möglich, wenn die Dauer der Ofenreise der neuen Durchwärmungszeit angepasst wird.

Normen und Lastenhefte geben aber meist feste Aufheiz- und Haltezeiten vor. Die Vorgaben zur Erwärmung von Stahlbauteilen aus Normen und Kundenlastenheften sind dementsprechend anzupassen. Hier besteht Handlungsbedarf. Die erforderlichen Abstimmungen sollten zwischen den Anlagenbetreibern und deren Kunden durchgeführt werden.

Eine Möglichkeit wäre, Abnahmemessungen mit dem Coating im Kundenlastenheft zu berücksichtigen und evtl. auch in die Aktualisierungsprozesse bestehender Normen mit einfließen zu lassen. Hier besteht noch Abstimmungs- und Überzeugungsbedarf.

5. Diskussion der Ergebnisse

Im durchgeführten F&E-Projekt wurde ein Coating für Ofenwände von Industrieöfen hergestellt und in einem Technikumsofen unter betriebsnahen Bedingungen getestet. Der Emissionsgrad der Ofenwände wurde im Bereich von kleinen Wellenlängen und bei hohen Temperaturen stark verringert. Die Verringerung kann wie in Kapitel 3 (Abbildung 15 und 16) beschrieben mit etwa 50% abgeschätzt werden.

Bei Stahlblöcken, welche im Bereich niedriger Wellenlängen Wärmestrahlung absorbieren, führt dies zu einem höheren Wärmeeintrag in die Nutzgutoberfläche und dies zu einer schnelleren Aufheizung des Nutzgutes.

Der geringere Wärmeeintrag in die Wärmedämmung des Ofengefäßes senkt die Wärmeverluste durch die Ofenwand lt. analytischer Berechnung in Kapitel 1 um 2-3%. Der erforderliche Erdgasstrom zur Aufheizung des Ofengefäßes wird damit direkt gesenkt. Die analytisch nicht berechenbare, schnellere Aufheizung des Nutzgutes führt zu einer Verringerung der Dauer einer Ofenreise. Eine Durchwärmung des Nutzgutes wird früher erreicht. Dies führt zu einer weiteren Senkung des Erdgasbedarfes.

Diese Theorie, die bereits im Forschungsantrag beschrieben wurde, wurde für den Technikumsofen bestätigt. Bei den Untersuchungen im BFI-Technikum war überraschenderweise eine schnellere Aufheizung von 25 % und eine Gaseinsparung von bis zu 50 % messbar. Die Versuche wurde insgesamt 3-mal mit den gleichen Ergebnissen wiederholt.

Eine Übertragung auf die Verhältnisse in Industrieöfen ist allerdings nur begrenzt möglich. Der Technikumsofen konnte nur mit einer sehr geringen Beladung versehen werden. In Industrieöfen sind die Ofengefäße deutlich stärker beladen mit Nutzgutgewichten von z. T. über einer Tonne, was einen wesentlichen Einfluss auf den Wärmeübergang durch Strahlung hat, was wiederum Einfluss auf die Aufheizzeit des Nutzgutes hat.

Zudem wurde in den Versuchen am Technikum der Ofen aus dem kalten Zustand aufgeheizt, bis die Zieltemperatur in den Blöcken erreicht war. In Industrieöfen sind die Wände in der Regel durchwärmt. Die Temperatur im Ofengefäß ist bei kontinuierlich betriebenen Öfen nahezu konstant und schwankt bei diskontinuierlich betriebenen Wärmöfen der Stahlindustrie zwischen ca. 600°C und Ziehtemperatur häufig über 1.000°C. Dies hat einen Einfluss auf die Wandwärmeverluste.

Die Ergebnisse lassen kaum Rückschlüsse auf das Aufwärmverhalten in anderen Industriezweigen zu, wie bspw. in der Glas-, Keramik- oder Zementindustrie. Der Emissionsgrad der Oberflächen von dort eingesetzten Produkten unterscheidet sich vom Emissionsgrad von Stahl und Stahllegierungen. Zudem weichen Stoffwerte wie Wärmeleitkoeffizient, Dichte und spezifische Wärmekapazität erheblich ab und damit der daraus gebildete Temperaturleitkoeffizient. Der in das Nutzgut eingebrachte Wärmestrom unterscheidet sich erheblich in den unterschiedlichen Materialien. Dies beeinflusst die Zeit, die für eine Durchwärmung des Nutzgutes benötigt wird. Weiterhin gibt es von Material und Geometrie abhängige Begrenzungen für den Aufheizgradienten und andere Werte für die Zieltemperatur . Für eine

Beurteilung der Auswirkungen in diesen Industriezweigen sind weitere Untersuchungen z.B. in einem Folgevorhaben zwingend erforderlich.

Weiterhin ist die Wärmeübertragung durch Strahlung auch abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit des Nutzguts. Eine ebenfalls spiegelnde (reflektierende) Oberfläche würde bspw. einen negativen Effekt auf die Aufheizzeit des Nutzguts haben.

Durch den flächendeckenden Einsatz des Coatings in der Stahlindustrie sowie in entsprechenden Prozessen könnten Brennstoffeinsatz und Abgasemissionen (z.B. CO₂) eingespart werden. Ein Einsparpotenzial konnte für eine Technikumsanlage mit Faserzustellung und geringer Beladung ermittelt werden. Weitere Untersuchungen an Industrieöfen bei typischer Produktion sind erforderlich, um die erreichbaren Potenziale in der industriellen Praxis zu ermitteln. Es wird dringend die Durchführung eines Folgevorhabens zur praktischen Erprobung des Coatings in einem Industrieofen empfohlen. Weitere Anwendungsbereiche in anderen Prozessindustrien sollten in weiteren F&E-Vorhaben untersucht werden, um dort die Einsparpotenziale zu ermitteln.

Das Coating ist schnell und einfach aufzutragen. Einsparpotenziale können leicht erschlossen werden. Da es sich bei den Thermoprozessanlagen um zentrale Anlagen handelt und Einschränkungen oder gar Ausfälle erheblichen Einfluss auf die Produktion haben, besteht eine große Hemmung bezüglich Anpassungen in der Technik. Negative Auswirkungen auf die Nutzgutqualität oder die kostenintensive Wärmedämmung der Anlagen werden befürchtet. Ohne weitere Untersuchung werden die Hemmnisse vermutlich zu groß sein, um die neue Technik industriell einzusetzen.

Literaturverzeichnis

- [1] Specht, E.: Wärme- und Stoffübertragung in der Thermoprozesstechnik. Vulkan-Verlag GmbH, 2014.
- [2] Rézné Kovács Andrea: „Bestimmung effektiver Strahlungseigenschaften von Faserbauteilen“, Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 2003.

Bericht Nr.: 3100.055 / U.-Nr.: 80.380

Alle Rechte, auch das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten.
Ohne ausdrückliche Genehmigung des BFI ist es auch nicht gestattet, diesen Bericht
oder Teile daraus auf photomechanischem oder anderem Wege zu vervielfältigen.