



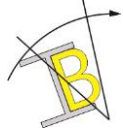
Deutsche Bundesstiftung Umwelt

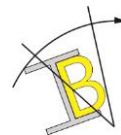
**Entwicklung eines neuartigen, energieeffizienten Verfahrens zur
Herstellung von feuerfesten Auskleidungen in Gießereigefäßen**

ABSCHLUSSBERICHT

THORSTEN BIERKÄMPER
BIERKÄMPER ENGINEERING
MOULD-TEC.COM
CARL ZEISS STR. 5
59077 HAMM

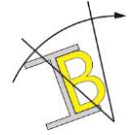






Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Stand der Technik	4
2.1	Schlämmstutzen	4
2.2	Rieseln mit Heißluft beheizter Form	5
2.3	Ermittlung der Istdaten für den aktuellen Stand der Technik	7
2.4	Zusammenfassung der Datenerhebung	11
3	Entwicklungsprozess	11
3.1	Allgemeine Ansätze	11
3.2	Entwicklung der Heizelemente	14
3.3	Energieversorgung	15
4	Einsatz in der Praxis	19
4.1	Erprobungsbetrieb	19
4.2	Einsparungen durch Nebeneffekte	22
5	Ergebnisse	24
5.1	Gegenüberstellung der Ergebnisse	24
5.2	Vergleichsrechnung der Ergebnisse	25
6	Schlussbetrachtung	26
7	Veröffentlichungen	26



1 Einleitung

Bei der Rohstoffherzeugung und -veredelung werden Grundstoffe regelmäßig erhitzt und im flüssigen Zustand transportiert bzw. weiterverarbeitet. Hierbei kommen üblicherweise Gefäße aus Stahl zum Einsatz, die mit einer feuerfesten Auskleidung zum Schutz der Stahlwand versehen sind.

Das Ziel dieses Projekts ist es, den Herstellungsprozess von feuerfesten Auskleidungen in Gießereigefäßen zu untersuchen und zu optimieren. Es handelt sich hierbei um etablierte Prozesse, die in der Regel sehr energieintensiv sind. Die feuerfeste Auskleidung besteht in der Regel aus mehreren Schichten.

Für die nachfolgenden Ausführungen wurde als Beispiel die Herstellung einer feuerfesten Auskleidung in einem Stranggussverteiler gewählt, nachfolgend auch Verteiler oder Thundish genannt. Dabei handelt es sich um ein Ausgleichsgefäß in einer Stranggussanlage mit einem Fassungsvermögen von, je nach Anlagenform, 30t bis 80t.

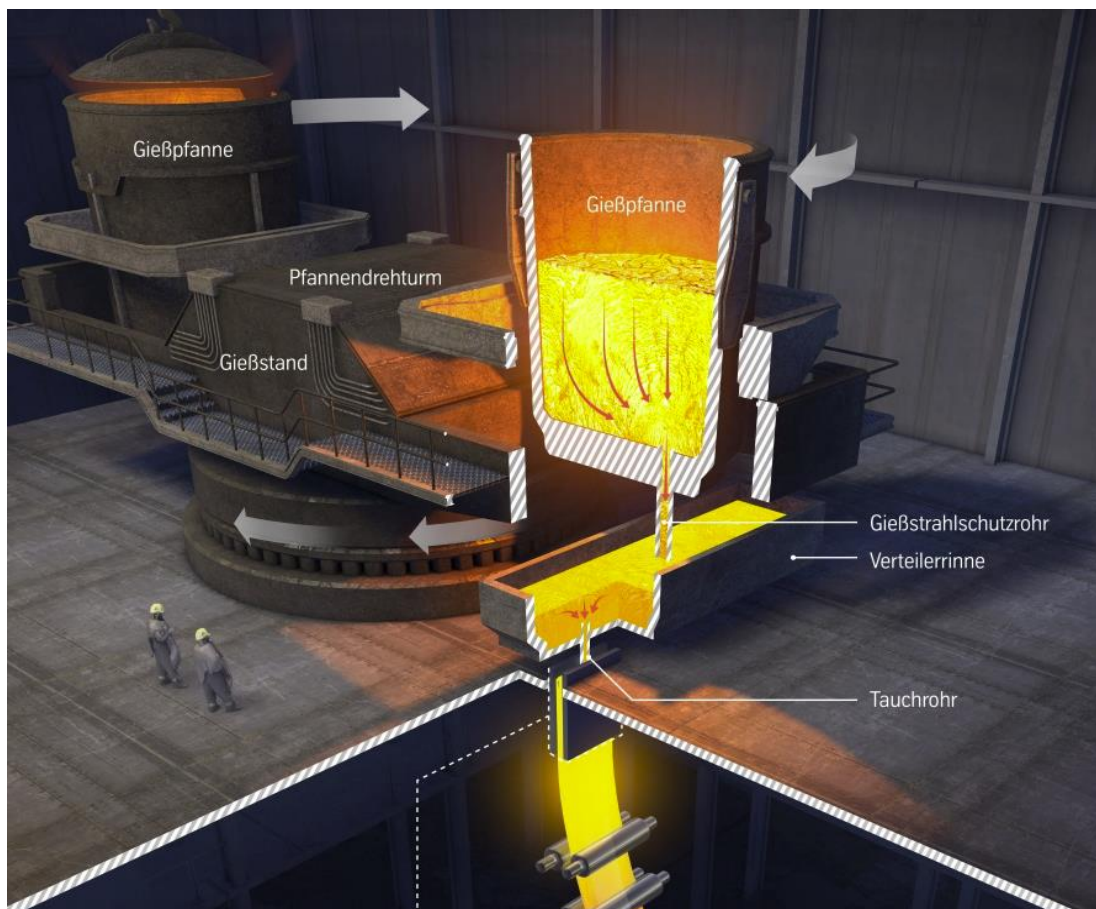
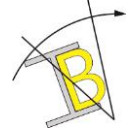


Bild 1 - Schema Stranggüßanlage - © Thyssen Krupp



2 Stand der Technik

Im Laufe der Nutzungsdauer verschleißt die feuerfeste Auskleidung und muss daher regelmäßig erneuert werden. Um diesen Erneuerungsprozess zu begrenzen, besteht die Auskleidung oft aus zwei Schichten. Der äußeren Schicht, auch Dauerfutter genannt, die direkt an der Gefäßwand anliegt, sowie der inneren Schicht, auch Arbeitsfutter genannt, die mit dem flüssigen Stahl in direktem Kontakt steht.

Das Dauerfutter hat eine Stärke von 100mm bis 150mm und eine Standzeit von etwa einem Jahr. Das Arbeitsfutter hingegen hat eine Stärke von 40mm bis 60mm und eine Standzeit von 6 bis 9 Stunden. Es dient neben der thermischen Isolierung auch als Verschleißschicht, um die angrenzenden Bauteile vor erhöhtem Verschleiß und Beschädigungen zu schützen.

Im Folgenden wird die Herstellung des Arbeitsfutters genauer untersucht. Die Ergebnisse sind auch auf die Herstellung des Dauerfutters anwendbar, jedoch bedarf es dafür einiger Anpassungen.

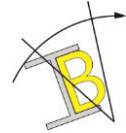
Das Arbeitsfutter wird üblicherweise auf zwei Arten hergestellt. Das ältere Verfahren des Schlämmspritzens und das neuere Verfahren des Rieselns, welches das Schlämmspritzen mehr und mehr ablöst.

2.1 Schlämmspritzen

Beim Schlämmspritzen wird eine feuerfeste Masse mit Wasser angerührt und mithilfe einer Spritzmaschine auf die Verteilerwand aufgetragen. Da es sich hierbei um ein handgeführtes Verfahren handelt, ist die Einhaltung vorgegebener Mindestschichtstärken nur bedingt möglich. Aus diesem Grund werden die Schichten üblicherweise dicker aufgetragen. Das Schlämmspritzen stammt ursprünglich aus der Bauindustrie und wird dort zum Auftragen von Putz auf Wänden angewendet.

Aus diesem Grund stammen auch die eingesetzten Werkzeuge und Maschinen aus dem Bereich der Bauindustrie und sind nicht optimal auf die Verarbeitung feuerfester Werkstoffe ausgelegt. Das führt zu diversen technischen Nachteilen, auf die hier jedoch nicht weiter eingegangen werden soll.

Ein großer Nachteil besteht darin, dass die Spritzschicht Wasser enthält, welches mit hohem energetischem Aufwand entfernt werden muss. Zum einen ist dies für den Abschluss der Binderreaktion erforderlich, zum anderen würde sich das Wasser beim Einfüllen des heißen Stahls schlagartig in Wasserdampf umwandeln. Die dabei auftretende Volumenzunahme könnte zu einer Verpuffung führen. Aus diesem Grund werden die Gefäße nach dem Spritzen über mehrere Stunden mit Hilfe von großen Gasbrennern getrocknet. Hierbei wird der



größte Teil der erzeugten Wärmeenergie über den Abgasstrom ungenutzt an die Umgebung abgegeben.



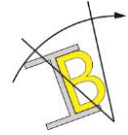
Bild 2 - Schlämmspritzen

2.2 Rieseln mit Heißluft beheizter Form

Neben dem Schlämmspritzen hat sich im Laufe der Zeit das Verfahren des „Rieselns“ etabliert. Dieses Verfahren wurde eigens für das Erstellen von feuerfesten Auskleidungen in Gefäßen entwickelt und löst das Schlämmspritzen mehr und mehr ab.

Dabei wird eine Form (nachfolgend auch Schalung oder Schablone genannt) in das Verteilergefäß, auch Thundish genannt, eingesetzt. Die Form hat einen definierten Abstand zur Wand, welcher der gewünschten Mindestwandstärke des Arbeitsfutters entspricht. Dieser Hohlraum wird dann mit einer sandförmigen Masse, auch Rieselmasse genannt, verfüllt. Die Masse besteht aus mehreren feuerfesten Komponenten wie Magnesit, Dolomit, Olivin oder Bauxit sowie einem Binderzusatz, vornehmlich auf Harzbasis.

Anschließend wird mithilfe eines externen Gasbrenners heiße Luft erzeugt, die über ein Rohrleitungssystem in das Innere der Schablone geleitet wird. Die Heißluft durchströmt die Schablone und tritt dann am oberen Ende mit einer Restwärme von mehr als 300°C aus, ohne weiter genutzt zu werden.



Die warme Schablone gibt ihre Energie nun an die daran anliegende Rieselmasse ab. Ab einer Temperatur von ca. 150°C beginnt der in der Rieselmasse enthaltende Binder zu reagieren. Dadurch bildet sich eine dreidimensionale Netzstruktur, wodurch am Ende ein hochfeuerfester Monolith entsteht. Während der gesamten Reaktionszeit muss die Schablone ständig beheizt werden, da ihr Energie entzogen wird.

Je nach Form und Menge der Rieselmasse sowie dem Aufbau und der Art des Schablonen- und des Heizsystems dauert dieser Backprozess zwischen 1,5 und 5 Stunden. Zum Schluss wird die Schablone mit kalter Luft heruntergekühlt, wodurch diese schrumpft und sich von der gebackenen Rieselmasse ablöst. Abschließend kann die Schablone herausgezogen werden, und der Herstellungsprozess der feuerfesten Auskleidung ist damit abgeschlossen.

Das Bild 4 zeigt einen Verteiler mit eingerieselter Schablone im Backbetrieb, die über einen Rohrbogen an den darunter befindlichen Heißluftherzeuger angeschlossen ist. Das Ergebnis des Backprozesses, die fertig gebackene Rieselmasse, ist in Bild 3 zu sehen. Zur Verdeutlichung ist in Bild 5 noch ein Schnitt durch das CAD Modell dieser Anlage dargestellt.



Bild 4 - Verteiler mit Schablone im Heizstand



Bild 3 - gebackene Rieselmasse

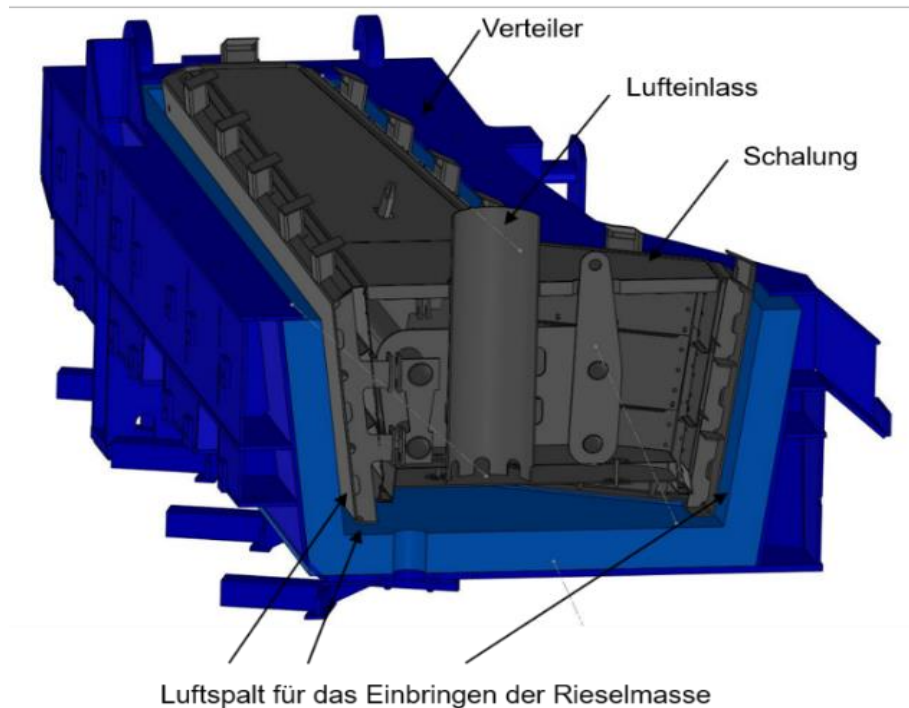
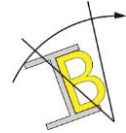


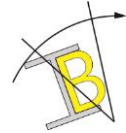
Bild 5 - CAD Modell, Schablone im Verteiler

2.3 Ermittlung der Istdaten für den aktuellen Stand der Technik

Für die Datenermittlung standen vier Werke für das Schlämmspritzen und fünf Werke für das Rieserverfahren zur Verfügung. Es ist zu beachten, dass sich Werk 4 derzeit in einer Umbauphase befindet und daher beide Verfahren dort angewendet werden. In Werk 5 war bereits eine strömungsoptimierte Schablone verbaut, was zu etwas besseren Ergebnissen führte.

Alle Anlagen wiesen unterschiedliche Ausbaustände sowie Verteilergrößen und -formen auf. Um die Messdaten dennoch vergleichen zu können, wurden diese auf die Oberfläche der erstellten feuerfesten Schicht (pro m²) umgerechnet.

Zusätzlich wurde das Gewicht der eingebrachten feuerfesten Masse ermittelt. So konnte die für die chemische Reaktion tatsächlich erforderliche Energie berechnet werden, woraus sich der Wirkungsgrad der Anlagen ableiten lässt.



Kunde	allgemeine Daten			Energetische Verbräuche			
	Oberfläche [m ²]	Heizzeit [h]	FF Produkt [kg]	Gas [kWh]	elektrisch [kWh]	Gesamt [kWh]	pro m ² [kWh/m ²]
Werk 1	23	12,0	1.925	10.560	482	11.042	480
Werk 2	24	12,0	2.065	12.180	533	12.713	530
Werk 3	17	8,0	1.663	5.760	298	6.058	356
Werk 4 a	12	7,0	980	4.970	271	5.241	437
Mittelwert							451

Tabelle 1 - Datenerhebung Schlämmspritzen

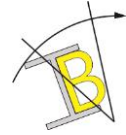
Kunde	allgemeine Daten			Energetische Verbräuche			
	Oberfläche [m ²]	Heizzeit [h]	FF Produkt [kg]	Gas [kWh]	elektrisch [kWh]	Gesamt [kWh]	pro m ² [kWh/m ²]
Werk 5	29	1,5	2.511	1.550	83	1.633	56
Werk 6	28	2,5	2.363	2.250	80	2.330	83
Werk 7	22	3,5	1.916	2.450	64	2.514	114
Werk 8	21	3,0	1.960	2.400	76	2.476	118
Werk 4b	12	3,0	980	1.700	74	1.774	148
Mittelwert							104

Tabelle 2 - Datenerhebung Heißluftbacken von Rieselmassen

Es ist ein deutlicher Unterschied zwischen dem Schlämmspritzen und dem Rieserverfahren erkennbar. Da es für das Schlämmspritzen aus physikalischen Gründen keine nennenswerten Spielräume für Optimierungen gibt, wurde dieses Verfahren im Folgenden auch nicht weiter untersucht.

In der Tabelle für das Rieseln ist zu erkennen, dass Werk 5 wesentlich effizienter arbeitet als die anderen Werke. Das liegt daran, dass dort bereits ein Schablonensystem verbaut wurde, welches strömungstechnisch optimiert wurde, um eine möglichst gute Wärmeübertragung zu gewährleisten.

In der Tabelle 3 wurde der Wirkungsgrad für die Werke des Rieserverfahrens berechnet. Hierfür wurde der rechnerische (theoretische) Energiebedarf ermittelt, der für den reinen Aufheizvorgang benötigt wird. Es ist zu beachten, dass allein das Aufheizen der Schablone mehr Energie erfordert als die chemische Reaktion während des Backvorgangs. Die Schablone ist eine notwendige Hilfsmasse für den Prozess, aber im weiteren Sinne den



Verlusten zuzuordnen. Aus diesem Grund wurde in der letzten Spalte des Wirkungsgrades der gesamte Energieverbrauch in Bezug zur Backenergie gesetzt. Die Ergebnisse zeigen die hohen Verluste auf, wie auch noch einmal in dem Energieflussdiagramm unter 5.1 (Bild 20) veranschaulicht wurde.

Kunde	Energiebedarf rechnerisch				Wirkungsgrad	
	Backen [kWh]	Schablone [kWh]	Gesamt [kWh]	pro m ² [kWh/m ²]	Gesamt	pro Back prozess
Werk 5	209	233	442	15,2	27%	13%
Werk 6	197	229	426	15,2	18%	8%
Werk 7	160	179	339	15,4	13%	6%
Werk 8	163	188	351	16,7	14%	7%
Werk 4b	82	125	207	17,3	12%	5%
Mittelwert				16,0	17%	8%

Tabelle 3 - Heißluftbacken, Wirkungsgrad

Im Werk 7 wurde ein Heißluftherzeuger mit geringerer Anschlussleistung verbaut als in den übrigen Werken. Eine Umrechnung der Oberfläche ergab eine um 26% geringere Leistung. Dies führte zu einer längeren Heizdauer und einem höheren Energiebedarf für die chemische Backreaktion. Weitere Details dazu finden sich in Punkt 4.2. Für die weiteren Betrachtungen ist nachfolgend noch eine Aufheizkurve der heißluftbeheizten Rieselschablone aus dem Werk 8 aufgeführt.

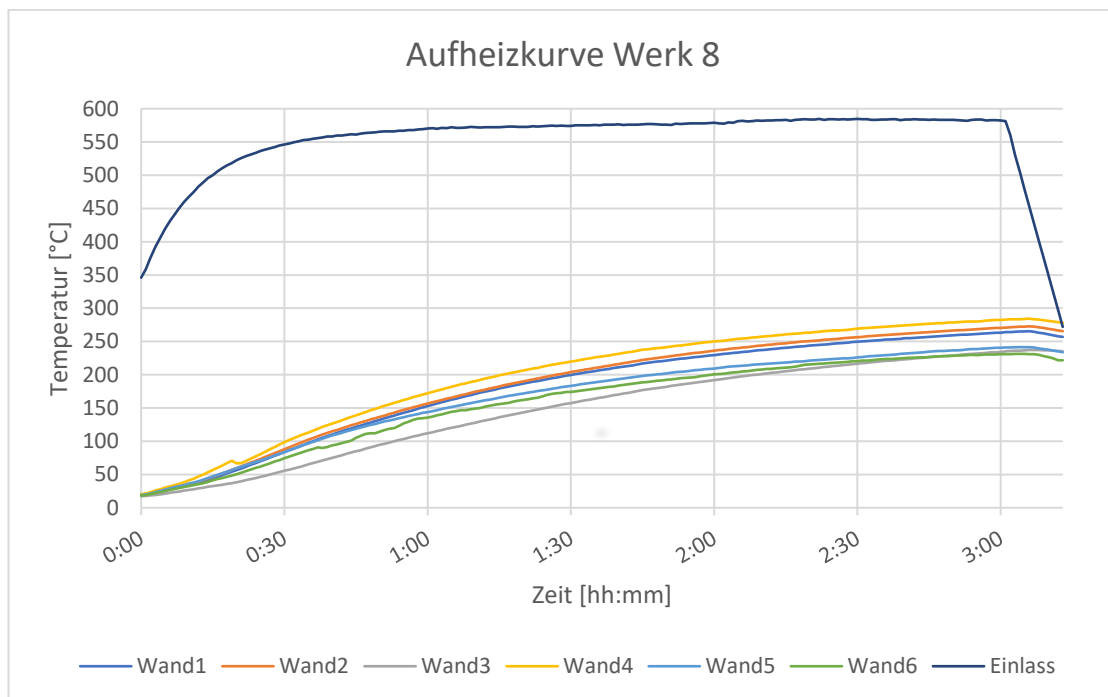
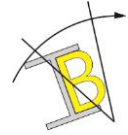


Bild 6 - Aufheizkurve Heißluftbacken



Es sind deutliche Temperaturunterschiede an den verschiedenen Wänden zu erkennen, wie auch in Bild 7 und 8 in der Strömungsanalyse berechnet wurde. Die Messungen wurden immer auf derselben horizontalen Höhe durchgeführt, so dass im Diagramm nur die Unterschiede über die Länge der Schablone zu sehen sind. Hier stellten sich bereits Temperaturunterschiede von 80°C ein.

Die nachfolgende Strömungssimulation der Ausgangslage zeigt die Wärmeverteilung an der Schablonenwand infolge der einströmenden Heißluft. Die Wände werden sehr unterschiedlich erwärmt. Auch wenn das System strömungstechnisch optimiert wird (Bild 9), so bleibt doch immer noch eine unterschiedliche Erwärmung der Außenwand übrig.

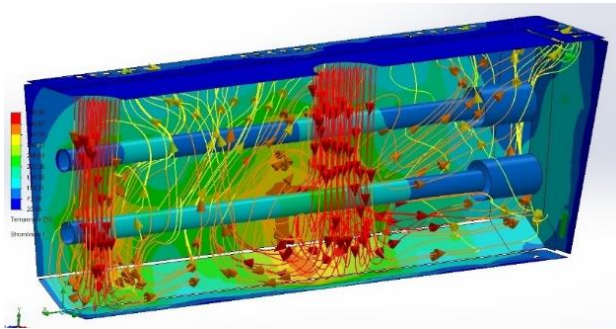


Bild 8 - Strömungssimulation 1

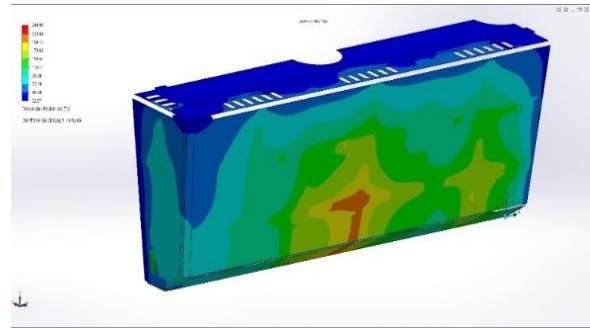


Bild 7 - Strömungssimulation 1

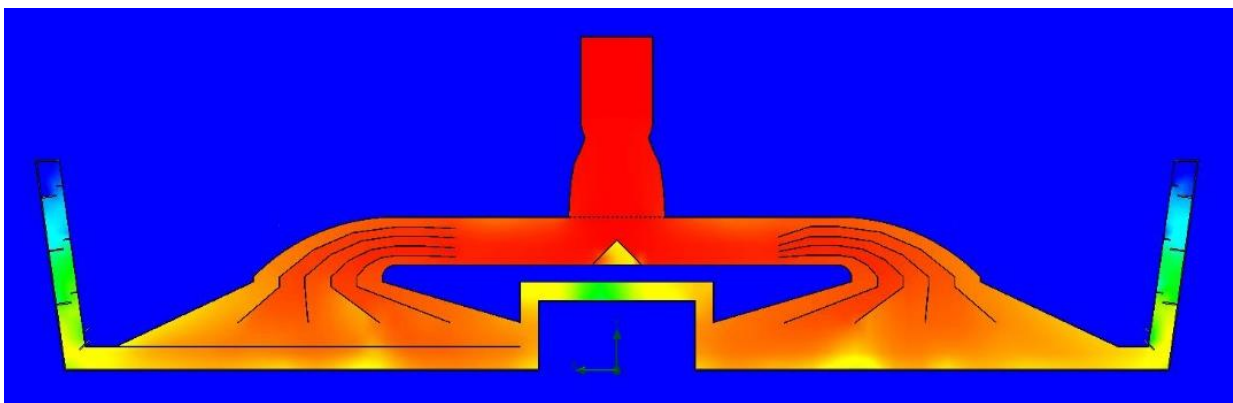
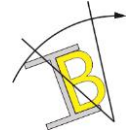


Bild 9 - Strömungssimulation 3



2.4 Zusammenfassung der Datenerhebung

Das Schlämmspritzen weist im Verhältnis zum Rieseln im Wesentlichen die folgenden Nachteile auf:

- Der Rohstoffverbrauch beim Schlämmspritzen ist etwa 20% höher als der beim Rieseln.
- Der Energiebedarf für das Schlämmspritzen ist deutlich höher.
- Der Zeitbedarf für das Schlämmspritzen ist deutlich höher.

Für das Rieseln mit Heißluftbacken wurde die folgende Prozesskette, sowie deren Verlustquellen ermittelt:

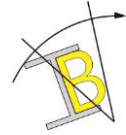
- Die Heißluft wird in einem Gasbrenner erzeugt – Wirkungsgradverluste
- Die Heißluft muss über Rohrleitungen zur Schablone gelangen – Leitungsverluste
- Die Heißluft strömt durch die Schablone und erwärmt Diese dabei – Wirkungsgradverluste
 - Die Schablone muss komplett mit erwärmt werden – notwendige Hilfsmasse
 - Je nach Ausbildung der Strömung, laminar oder turbulent, ist der Wärmeübergang in der Schablone besser oder schlechter.
 - Die Schablone erwärmt sich auf Grund ihrer Form und der Strömungsverhältnisse sehr unterschiedlich. Es entstehen Hot- und Coldspots, wobei für den Reaktionsprozess an der kältesten Stelle min. 200°C erreicht werden müssen.
- Die Heißluft tritt mit hoher Restwärme aus der Schablone aus – Abgasverluste
- Ist die Energiemenge (Heißluftmenge) zu gering bildet sich an der Schablonenwand eine Isolierschicht aus. Der Energiebedarf für die dahinter liegenden Rieselmasse erhöht sich.

Siehe auch Energieflussbild unter 5.1, Bild 20.

3 Entwicklungsprozess

3.1 Allgemeine Ansätze

Aufgrund des hohen Energiebedarfs, der aus physikalischen Gründen nur wenig Spielraum für Optimierungen lässt, wurde das Schlämmspritzverfahren nicht weiter betrachtet.



Die weiteren Ansätze und Betrachtungen konzentrieren sich ausschließlich auf die Optimierung des Backens von Rieselmassen, wobei der anschließende Verbesserungsprozess die folgenden Ziele hatte:

- Verkürzung der Prozesskette zur Vermeidung von Verlusten.
- Verringerung der benötigten Hilfsenergie durch Reduzierung der Hilfsmasse.
- Gleichmäßigeres Aufheizen der Wände, so dass die erforderliche Arbeitstemperatur gesenkt werden kann.

Um ein CO₂-neutrales System realisieren zu können, wurde Gas als Energieträger ausgeschlossen. Eine Umstellung der Brennersysteme auf Wasserstoff als Alternative hätte immer noch die zahlreichen Verlustglieder beinhaltet und nur wenige Ansatzmöglichkeiten für weitere Optimierungen geboten. Aus diesem Grund wurde dieser Weg ebenfalls nicht weiterverfolgt.

Die weiteren Betrachtungen konzentrierten sich daher auf Strom als Energieträger. Hierbei kamen die folgenden beiden Systeme in Betracht:

- Induktive Erwärmung der Schablone
- Einbau von widerstandsbeheizten Elementen in eine Schablone.

Die induktive Erwärmung wurde aufgrund der großen Magnetfelder frühzeitig aufgegeben, da diese zu zahlreichen Nachteilen und konstruktiven Problemen führte. Außerdem enthält die Rieselmasse magnetische Bestandteile, so dass Magnetfelder zu einer Entmischungsbewegung innerhalb der Rieselmasse geführt hätten. Ebenso wenig wäre eine Reduzierung der Hilfsmasse möglich gewesen.

In den weiteren Entwicklungsschritten wurden die widerstandsbeheizten Elemente weiterverfolgt. Es wird hier nicht weiter auf die Zwischenschritte sowie deren Versuchsansätze während der Entwicklung eingegangen, da diese nicht erfolgversprechend waren.

Die folgenden Bilder zeigen den ersten Versuchsaufbau eines elektrisch beheizten Wandelements mit dessen Backergebnis. Es sollte herausgefunden werden, ob die theoretischen Ansätze auch in der Praxis umsetzbar waren. Dazu wurde ein altes Widerstandsschweißgerät umgebaut und mit einem Schalungssegment verbunden.

Im Rahmen dieses Versuchs konnten ebenfalls erste Daten zum Energieverbrauch ermittelt werden. Um Vergleiche ziehen zu können, bestand die Wand aus Bauteilen mit Originalabmessungen und einer Backoberfläche von 1m². In dem Versuch wurde an mehreren Punkten der Wand die Temperatur, sowie primär- und sekundärseitig Strom und Spannung gemessen.

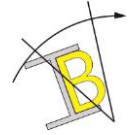
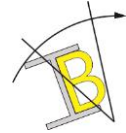


Bild 10 – Versuchsaufbau Widerstandsheizung

In einem zweiten Durchlauf wurde die reine Erwärmung der Wand ohne Rieselmasse gemessen, um den Energiebedarf für das reine Aufheizen der Schablone zu ermitteln. Anhand beider Ergebnisse sowie des Gewichts der Rieselmasse konnte der für die Backreaktion erforderliche Energiebedarf berechnet werden. Dadurch ließ sich der Wirkungsgrad ermitteln und die theoretischen Ansätze überprüfen.



Bild 11 – Backergebnis des Versuchsaufbaus



Die ermittelten Werte wurden mithilfe der Wandfläche hochgerechnet und mit den unter Punkt 2.3 ermittelten Werten verglichen. Bereits in diesem frühen Stadium zeigten sich erhebliche Einsparungen bei dem Energieverbrauch. Diese waren so groß, dass selbst bei Verwendung von nicht regenerativ erzeugtem Strom noch ein erhebliches Einsparpotenzial gegenüber dem Stand der Technik vorhanden war. Die Versuche zeigten aber auch, dass die Bauteile der Schablone noch erheblich an die physikalischen Gesetzmäßigkeiten angepasst werden mussten.

Im weiteren Verlauf wurde nach Ansätzen gesucht, um die erforderliche Hilfsmasse, also das Schablonengewicht, zu reduzieren, da diese bei jedem Backvorgang mit erwärmt werden muss. Derzeit bedeutet dies, dass etwa das Dreifache des Gewichts der Rieselmasse zusätzlich erwärmt werden muss. Die handelsüblichen Widerstandsheizelemente stießen hier allerdings an ihre Grenzen, weshalb in der Folge speziell auf diesen Anwendungsbereich zugeschnittene Heizelemente entwickelt wurden.

3.2 Entwicklung der Heizelemente

Aus zahlreichen Vorversuchen entstand schließlich ein Sandwich-Heizelement. Dabei wurde ein Isolator mit einer wärmeerzeugenden Schicht versehen, der sowohl thermisch als auch elektrisch isolierend war. Der Wärmewiderstand des Isolators wurde so gewählt, dass ein thermisches Gefälle hin zur Rieselmassenschicht entsteht. Mit dieser Konstruktion befindet sich der Ort der Wärmeerzeugung nun direkt an der angrenzenden Rieselmassenschicht. Das bedeutet, dass alle Verlustglieder in der Übertragungskette nun eliminiert wurden.

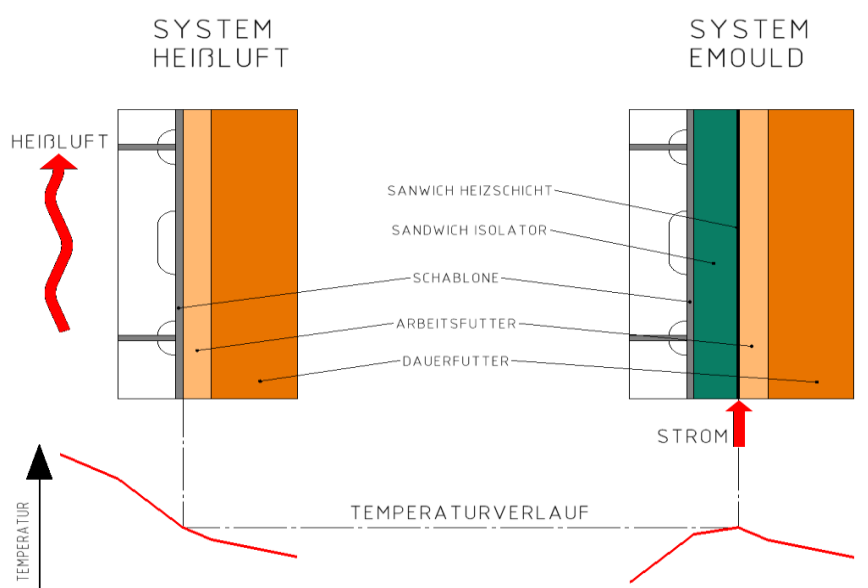
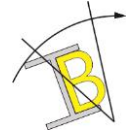


Bild 12 - Wandaufbau mit Wärmefluss



Diese Sandwichelemente können auf einer tragenden Unterkonstruktion aneinandergereiht und befestigt werden, wobei die Unterkonstruktion die dabei auftretenden Kräfte ableitet. Durch die thermische Isolationswirkung des Isolators in dem Heizelement ist die Unterkonstruktion vom Heizprozess selbst ausgeschlossen. Dadurch konnte die erforderliche Hilfsmasse deutlich reduziert und der Wirkungsgrad erhöht werden. Gleichzeitig konnte die Unterkonstruktion nun beliebig ausgelegt und an die Kundenbedürfnisse angepasst werden. Im weiteren Verlauf galt es, das optimale Verhältnis der Elementabmessungen herauszufinden. Dazu wurden verschiedene Materiallegierungen für die Heizschicht getestet.

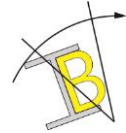
Im Ergebnis entstand ein standardisiertes Heizelement. Das hatte aus fertigungstechnischer Sicht noch den Vorteil, dass die Elemente nunmehr unabhängig von der Verteiler- bzw. Schablonenform vorgefertigt werden konnten.

3.3 Energieversorgung

Die standardisierten Heizelemente wurden im Anschluss in einem Elektromaschinenlabor mit Hilfe einer großen Laborstromquelle getestet. In Bild 13 ist ein solches Heizelement zu sehen. Darunter befindet sich ein Behälter mit einer 40mm dicken Rieselmassenschicht.



Bild 13 – Versuchsaufbau Elektromaschinenlabor



Ziel dieser Versuche war es, das Verhalten der Baugruppen sowie deren Wechselwirkungen mit der Rieselmasse zu erforschen. Zudem wurde dabei die ideale Stromstärke in Abhängigkeit von den eingesetzten Leiterwerkstoffen, als auch dem Idealen Leiterquerschnitt für den späteren Betrieb ermittelt. Das Diagramm zeigt die Temperaturverläufe bei verschiedenen Stromstärken für den jeweiligen Werkstoff. In Abhängigkeit zu der chemischen Reaktionsgeschwindigkeit des bei dem jeweiligen Produkt eingesetzten Bindersystems konnte mit Hilfe des Diagramms der ideale Strom ermittelt werden. So dass sich im Anschluss aus den Messkurven der Energiebedarf für die chemische Reaktion des Harzbinders in Abhängigkeit von der Aufheizzeit ableiten ließ. Außerdem wurde dabei die für einen sichern Prozessablauf erforderliche Mindestenergie bestimmt.

Gegenüberstellung Stromstärken

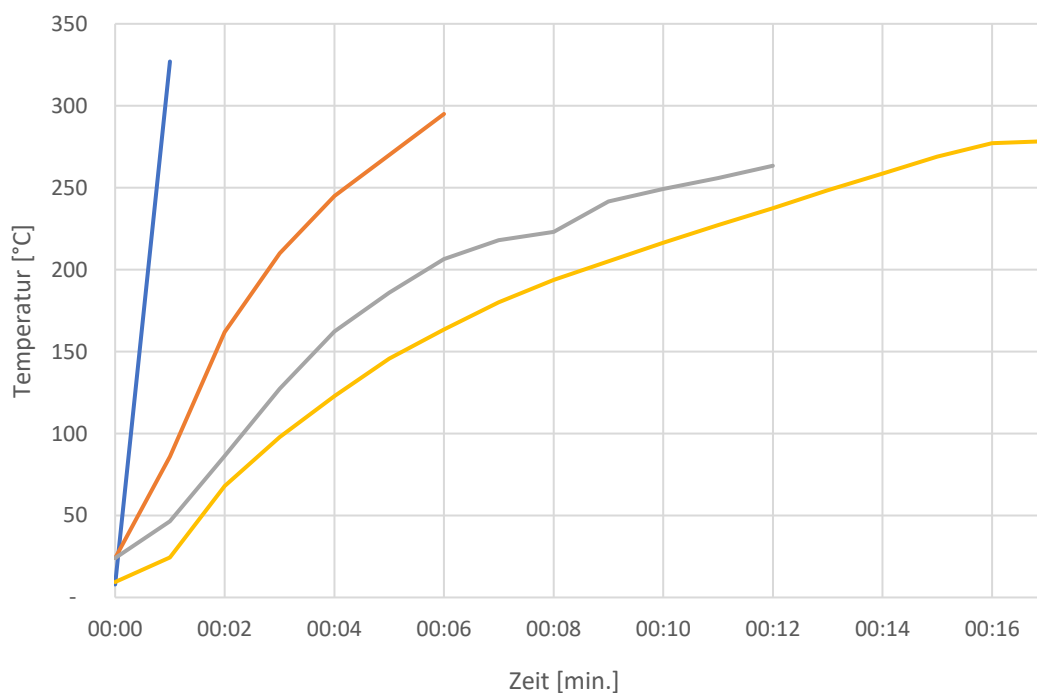


Bild 14 – Aufheizkurven aus dem Laborversuch

Im Rahmen der Versuchsreihen wurden ebenfalls verschiedene Varianten der Stromversorgung erprobt, darunter Gleichstrom, Wechselstrom und gepulste Stromquellen. Die Ergebnisse ermöglichten die Auslegung der erforderlichen Stromquelle sowie die Dimensionierung und Fertigung der Heizelemente.

Die folgenden Bilder zeigen die Montage der Nullserienbaugruppen. In Bild 15 ist im oberen Bereich die Tragkonstruktion der Schablone zu sehen, und im unteren Bereich befinden sich die Sandwichelemente der Bodenbaugruppe vor der dem Einbau.

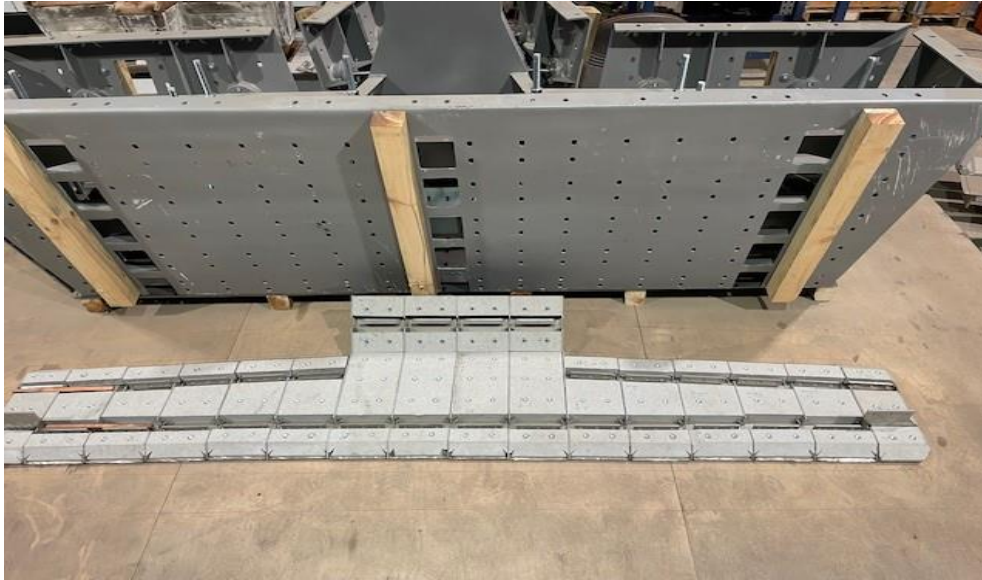
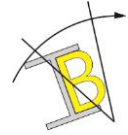


Bild 15 – Teile der Montage

Bild 16 zeigt den Aufbau der elektrischen Anlage. Links sind die Eingangsbaugruppen zu sehen und in der Mitte befinden sich die Schaltnetzteile. Auf der rechten Seite ist die SPS-Steuerung zusammen mit den Leistungsschaltern für die Ausgänge verbaut.



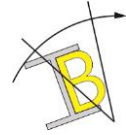
Bild 16 – Schaltschrankaufbau der Stromversorgung



Des Weiteren ist im Bild 17 noch die Eingabeoberfläche des Bedienfeldes mit der Statusanzeige der Schablone zu sehen. Weiterhin sind hier die Temperaturmessfelder zu erkennen, die über den Querschnitt der Schablone von oben nach unten verteilt sind. In diesem Fall wurde der Querschnitt in fünf Messbereiche (TF 1 bis TF 5) aufgeteilt. In der Steuerung kann eingestellt werden, welche Temperatur als Führungsgröße für das jeweilige Programm dienen soll. Alternativ kann auch ein Mittelwert aus mehreren Temperaturmessungen gebildet, und als Führungsgröße verwendet werden.



Bild 17 – Übersichtsseite der Steuerung



4 Einsatz in der Praxis

4.1 Erprobungsbetrieb

Für einen umfangreichen Testbetrieb wurde das unter Punkt 2 genannte Werk 4 ausgewählt, da es sich zum einen um einen überschaubaren Betrieb handelte und zum anderen Daten sowohl aus dem Schlämmspritzverfahren als auch aus dem Rieselfverfahren vorlagen, so dass ein direkter Vergleich aller drei Verfahren möglich war.

Nach dem Einbau aller Komponenten bei dem Testkunden wurden zahlreiche Versuchsreihen mit unterschiedlichen Parametern durchgeführt, bis schließlich die optimalen Einstellungen gefunden waren. Die Grafik in Bild 19 zeigt die Aufheizkurve der Elektroschablone, sowie einen Vergleich zur klassischen Heißluftschablone, die im Rahmen der Istdatenerhebung unter Punkt 2.2 ermittelt wurde.

Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurde auch hier das eMould-System mit 300°C als Zieltemperatur betrieben, obwohl die weiteren Versuche zeigten, dass eine Zieltemperatur von 230°C ausreichend gewesen wäre. Der Grund hierfür war, dass die Heißluftsysteme an der Außenwand die bereits erwähnten hohen Temperaturunterschiede (Hot- und Coldspots) aufwiesen.

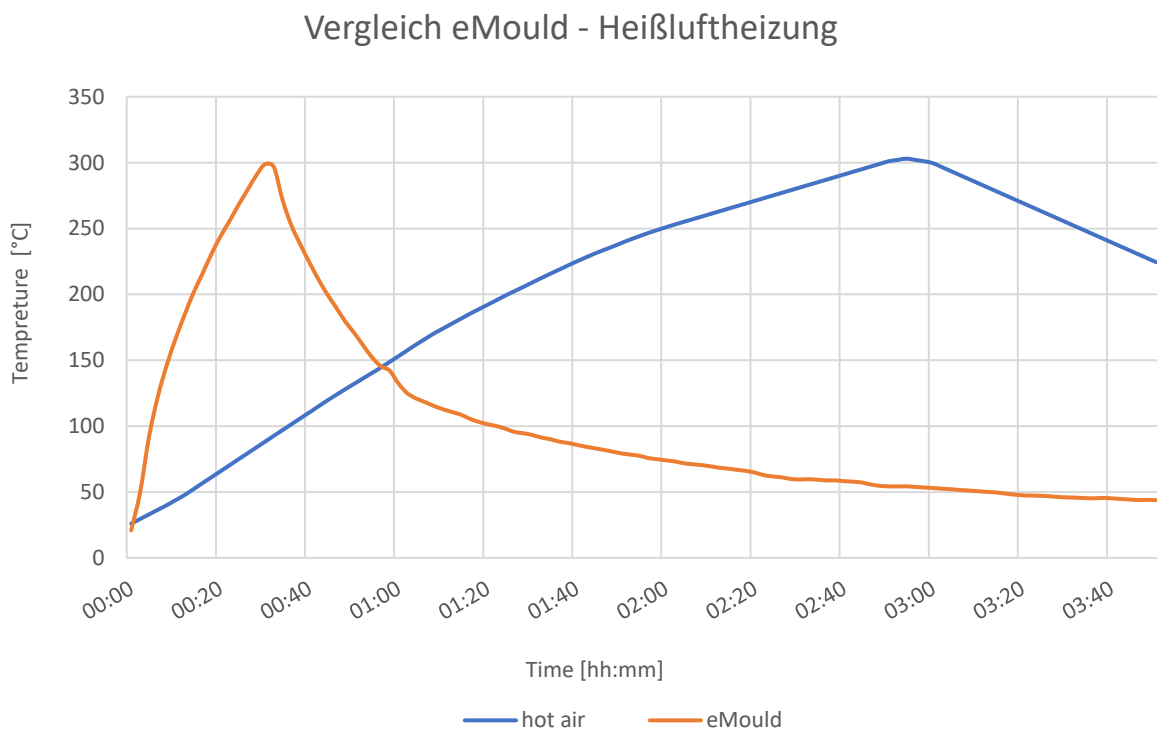
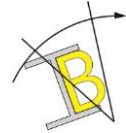


Bild 19 – Vergleich der Aufheizkurven eMould – Heißluft



Die Wärmebildaufnahme in Bild 20 zeigt, wie gleichmäßig mit dem eMould System die Wände der Schablone nun aufgeheizt werden können. Die helleren Bereiche in den Trennfugen entstanden durch die unterschiedlichen Werkstoffe. Für eine korrekte Darstellung hätte die beiden Bereiche mit einem unterschiedlichen Emissionsgrad gemessen und die einzelnen Aufnahmen entsprechend überlagert werden müssen. Die mit einem Handthermometer gemessenen Temperaturunterschiede waren kleiner 10°K.

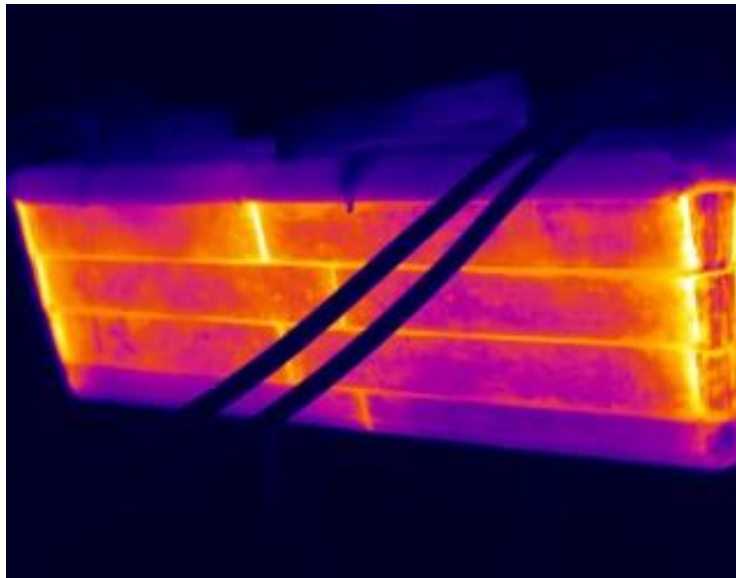


Bild 20 – Wärmebild eMould

Das gleichmäßige Aufheizen der eMould spiegelte sich auch in dem Backergebnis wider. In Bild 21 ist der sehr gleichmäßige Wärmeeintrag in die Rieselmasse erkennbar. In dem Fall wurde bereits mit einer Temperatur von 230°C gearbeitet.

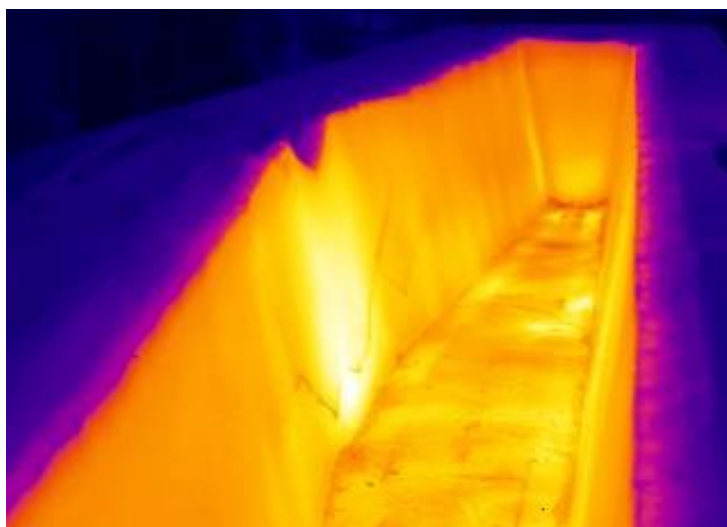
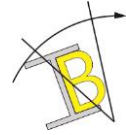


Bild 21 – Wärmebild Rieselmasse



Auch die Aufheizkurve in Bild 22 zeigt den nun sehr geringen Wärmeunterschied an den einzelnen Messpunkten der eMould. Das bestätigt noch einmal die Wärmebildaufnahmen aus den Bildern 20 und 21. Im weiteren Verlauf der Versuchsreihen konnte die Arbeitstemperatur problemlos um 70°C herabgesetzt werden.

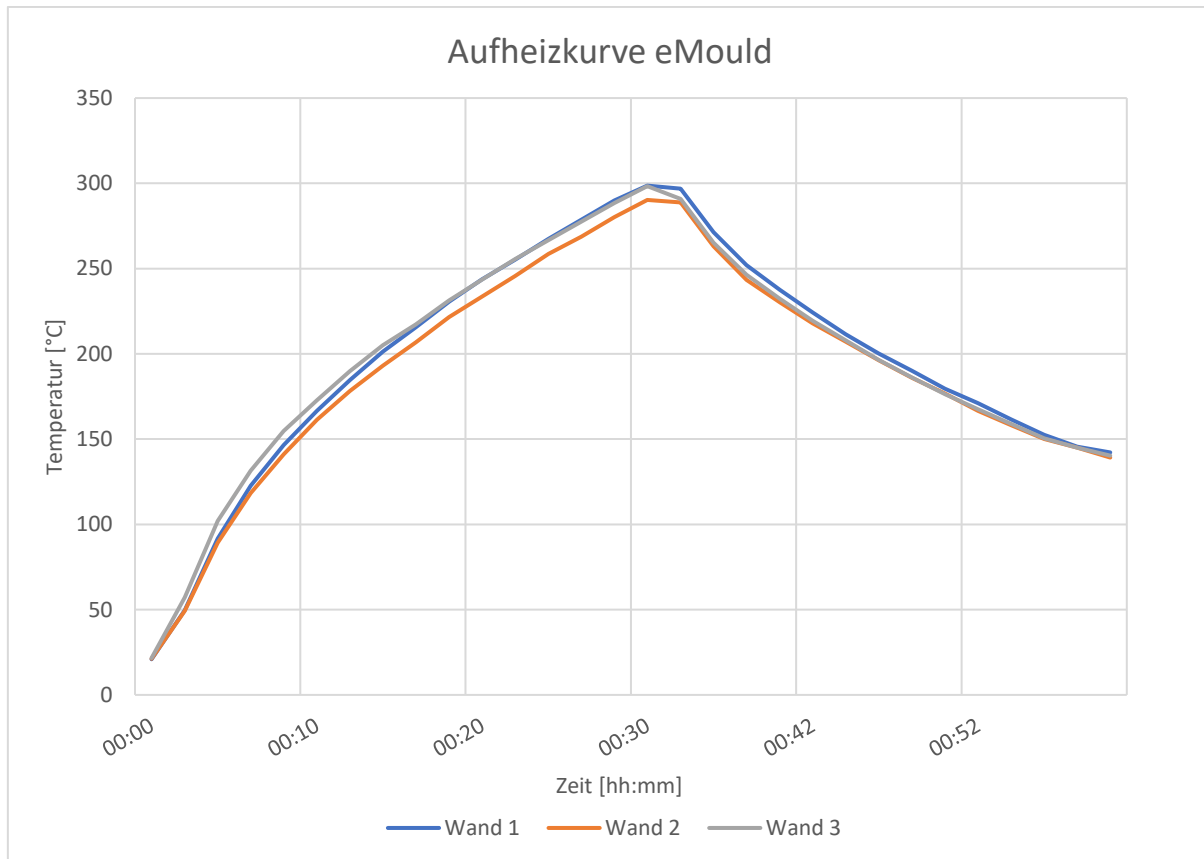
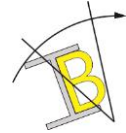


Bild 22 – Aufheizkurve eMould

Es ist zu erwarten, dass mit Hilfe des eMould Systems zukünftig auch verbesserte Binderrezepturen zum Einsatz kommen können, die eine weitere Herabsetzung der Arbeitstemperatur ermöglichen.

Neben der energetischen Verbesserung konnte aber auch die erforderliche Arbeitszeit deutlich reduziert werden, wie in der Gegenüberstellung in Bild 19 bereits zu erkennen war. Die genaue Höhe der Zeiteinsparung hing zwar von der Effizienz des bestehenden Systems ab. Jedoch kann überschlägig davon ausgegangen werden, dass das eMould System nur 1/3 der bisherigen Prozesszeit benötigt. Somit wird bei einem Einsatz der eMould auch die Wirtschaftlichkeit der bestehenden Prozessstrukturen deutlich verbessert.



Bei den Testläufen wurde der Trafo mit 281 kVA eingespeist, und 30 min. lang betrieben, woraus sich ein primärseitiger Energieverbrauch von 141 kWh ergibt. Aus den Verwiegungen der Einzelgewichte im Rahmen der Versuche lässt sich damit der folgende Energiebedarf ermitteln:

Bezeichnung	Gewicht [kg]	Energie [kWh]
Rieselmasse	816	71
Heißleiter	203	10
Isolator	567	39
Summe		120

Somit ergibt sich ein Gesamtwirkungsgrad von 85 %. Bezogen auf die Wandoberfläche ergeben sich 11,75 kWh / m². Zur besseren Übersicht sind nachfolgend noch einmal die Werte aus allen drei Prozessen gegenübergestellt.

Verfahren	Energieverbrauch [kWh/m ²]	Dauer [h]
Schlämmspritzen	437	7,0
Backen mit Heißluft	148	3,0
Backen mit eMould	12	0,5

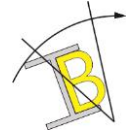
Gegenüber dem Backen mit Heißluftheizung, was den aktuellen Stand der Technik darstellt, werden also 136 kWh/m² eingespart, was 1.632 kWh pro Backvorgang entspricht. Im Vergleich zu dem Schlämmspritzen werden sogar 425 kWh/m² eingespart.

4.2 Einsparungen durch Nebeneffekte

Durch die nun deutlich optimierte Prozesskette verkürzte sich auch die Prozessdauer erheblich. Hierdurch konnte noch ein weiterer Punkt Berücksichtigung finden.

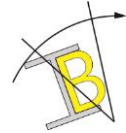
Im Rahmen der unter Punkt 2.3 stattgefundenen Datenerhebung zeigte sich bei den längeren Aufheizkurven ein deutlich höherer Energiebedarf für die reine Binderreaktion als bei den kürzeren Aufheizzeiten.

Dies begründet sich darin, dass es sich bei dem Backprozess schließlich um die Herstellung einer wärmeisolierenden Schicht handelt. Detailliertere Versuchsreihen hierzu zeigten, dass die spezifische Wärmekapazität der unverarbeiteten Rieselmasse erheblich geringer war als



die der fertig gebackenen Masse. So dass aus der allgemein gültigen Gleichung $Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$ für c_p eine von ΔT und t abhängige Variable in Form einer nicht linearen Funktion wurde.

Dieser Sachverhalt floss schließlich noch in die Entwicklung der Steuerungssoftware mit ein, und wird nun bei den entsprechenden Aufheizkurven je nach Rohstoffzusammensetzung mitberücksichtigt.



5 Ergebnisse

5.1 Gegenüberstellung der Ergebnisse

Die Gegenüberstellung der Energieflussdiagramme veranschaulicht noch einmal die deutlichen Verbesserungen innerhalb der Prozesskette.

Heißluftbeheizte Schalung

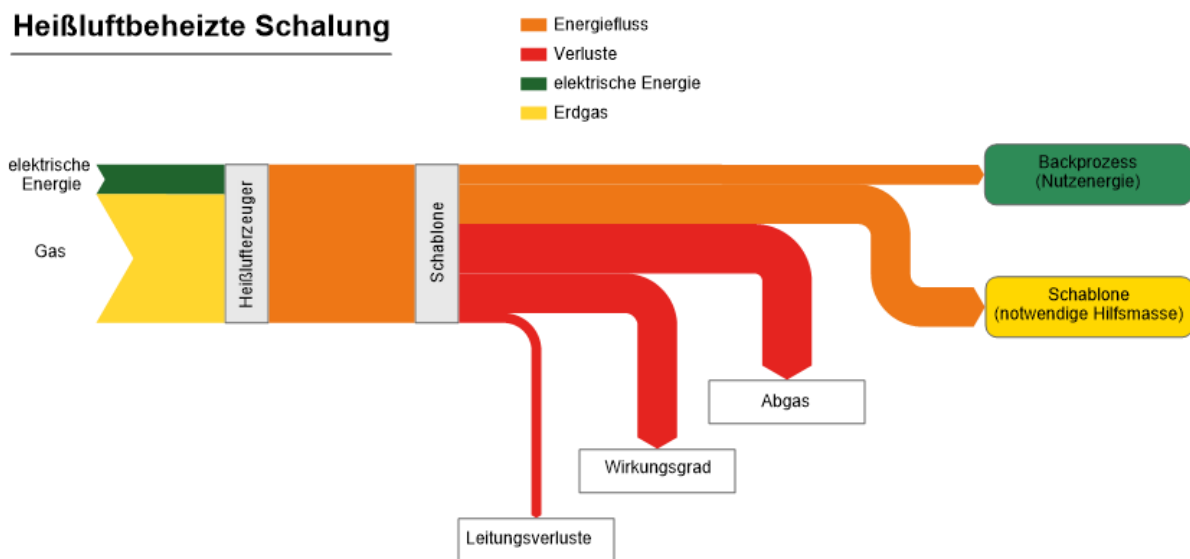


Bild 23 - Energieflußdiagramm Heißluft – vor der Optimierung

elektrische Schalung

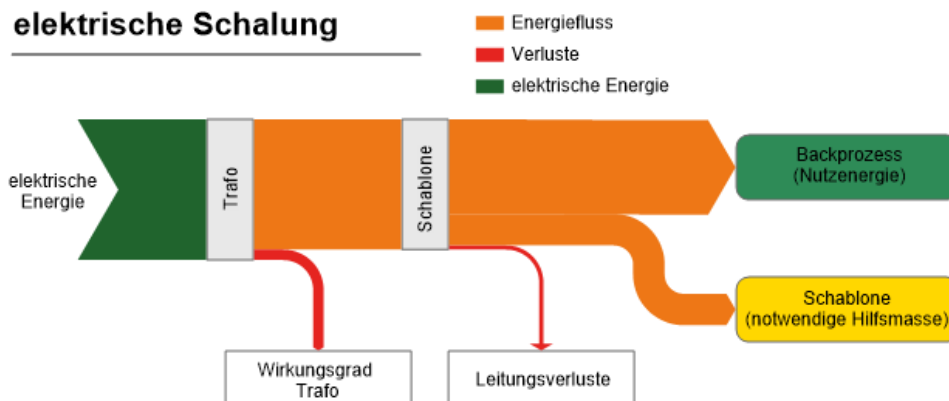
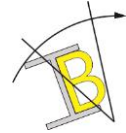


Bild 24 - Energieflußdiagramm eMould – nach der Optimierung



5.2 Vergleichsrechnung der Ergebnisse

Die unter Punkt 2.3 ermittelten Werte wurden mit Hilfe der unter Punkt 4 ermittelten Daten über die Schablonenoberfläche hochgerechnet, und sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Kunde	Oberfläche [m ²]	Backen mit Heißluft		Backen mit eMould		Ersparnis pro Bckvorgang	
		Heizzeit [h]	Energiebedarf [kWh]	Heizzeit [h]	Energiebedarf [kWh]	Heizzeit [h]	Energiebedarf [kWh]
Werk 5	29	1,5	1.633	0,6	348	0,9	1.285
Werk 6	28	2,5	2.330	0,6	336	1,9	1.994
Werk 7	22	3,5	2.514	0,5	264	3,0	2.250
Werk 8	21	3,0	2.476	0,5	252	2,5	2.224
Werk 4	12	3,0	1.774	0,5	144	2,5	1.630

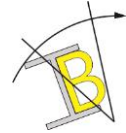
Tabelle 4 - Umrechnung eMould Energieverbrauch

Legt man nun die durchschnittlichen Produktionszahlen der vergangenen Drei Jahre zu Grunde so kann mit Hilfe der jährlich produzierten Gefäße eine Hochrechnung erfolgen. Die Ergebnisse dazu sind in der Tabelle 5 aufgeführt. Zusätzlich wurde noch die äquivalente Gasmenge der Bestandssysteme mit aufgeführt.

Kunde	Gefäße pro Jahr [Stk/Jahr]	Ersparnis pro Jahr		bisheriger Gasverbrauch [m ³ /Jahr]
		Heizzeit [h/Jahr]	Energiebedarf [MWh/Jahr]	
Werk 5	4.900	4.410	6.297	800.170
Werk 6	4.200	7.980	8.375	978.600
Werk 7	2.640	7.920	5.940	663.696
Werk 8	2.000	5.000	4.448	495.200
Werk 4	1.500	3.750	2.445	266.100
Summe			27.504	3.203.766

Tabelle 5 - jährliches Einsparvolumen eMould

Allein bei den oben betrachteten Werken könnten somit 27,5 GWh Energie pro Jahr eingespart werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass diese Prozesse nun rein elektrisch betrieben werden können, und somit die Grundlage für einen CO₂ neutralen Betrieb darstellen. Insofern würden bei der Verwendung von rein regenerativ erzeugtem Strom 3.203.766 m³ Gas pro Jahr eingespart werden.



6 Schlussbetrachtung

Aus der Datenerhebung wird deutlich, dass bei den derzeit am Markt befindlichen Anlagen aufgrund der sehr geringen Wirkungsgrade dringender Handlungsbedarf besteht. Aufgrund der hohen Energiemengen, die dabei zum Einsatz kommen, wird auch das zu erwartende Gesamteinsparvolumen entsprechend hoch sein.

Zwar könnte der Wirkungsgrad bestehender Anlagen durch strömungstechnische Optimierungen um ca. 10 % verbessert werden, der technische Aufwand dafür kommt dabei jedoch einem Neubau sehr nahe, weshalb solche Schritte nicht sehr sinnvoll erscheinen.

Es hat sich aber auch gezeigt, dass durch eine Verkürzung der Prozesskette die Durchlaufzeiten deutlich reduziert werden können, wodurch die Produktivität des Zustellbetriebes entsprechend gesteigert werden kann.

In Zusammenarbeit mit den Kunden wurden entsprechende Investitionsrechnungen durchgeführt, die eine Amortisationszeit von weniger als zwei Jahren ergaben. Aus diesem Grund sehen wir für die Zukunft sehr gute Vermarktungschancen für dieses System.

7 Veröffentlichungen

Die ersten Ergebnisse wurden im letzten Jahr auf der Thermprocess 2023 in Düsseldorf erstmalig präsentiert.

Eine weitere Präsentation, speziell für das Fachpublikum, fand auf der „Unified international technical conference on refractories“ am 27.09.2023 in Frankfurt statt. Dabei handelt es sich um eine internationale Fachtagung für Anwender und Nutzer von feuerfesten Produkten aus der Rohstoffindustrie.

Parallel dazu wird momentan ein möglicher Einsatz in der Glas- und Aluminiumherstellung geprüft.