

Abschlussbericht zur Projektphase 1

**„Entwicklung eines neuen Ofens
zur Reduzierung des Energieverbrauchs
bei der Härtung von Schleif- und Trennscheiben“**
(Kurztitel „*neuer Härteofen für Schleifscheiben*“)

gefördert unter dem Aktenzeichen 26427 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Laufzeit: 15.05.2008 – 31.12.2009 (Projektphase 1)

durchgeführt von: DRONCO AG AG
Wiesenmühle 1
95632 Wunsiedel



Projektleiter: Dipl. Ing. Stefan Mohr

Wunsiedel im Januar 2010

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	26427-21/2	Referat	Fördersumme	96.500 €
----	-------------------	---------	-------------	-----------------

Antragstitel **Entwicklung eines neuen Ofens zur Reduzierung des Energieverbrauchs bei der Härtung von Schleif- und Trennscheiben (1. Phase)**

Stichworte

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
12 + 7 Monate	15.05.2008	31.12.2009	2

Zwischenberichte

Bewilligungsempfänger	Dronco AG Wiesenmühle 1 95632 Wunsiedel	Tel	09232/609-177
		Fax	09232/609-159
		Projektleitung	Dipl.-Ing. Stefan Mohr
		Bearbeiter	

Kooperationspartner

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Die bisher in der Serienfertigung von phenolharzgebundenen Schleif- und Trennscheiben eingesetzten Öfen werden mit sehr großen Brennräumen ausgestattet, die große Mengen an Material bei der im Herstellungsprozess notwendigen Aushärtung der Scheiben wärmebehandeln können. Der Einsatz dieser großen Öfen mit einer Brennkammer erfolgt auch vor dem Hintergrund der vordergründig geringen Investitionskosten pro Ofen. Die Reduzierung des Energieverbrauchs und die Nutzung von Abwärme sind in diesen Konzepten meist nicht enthalten oder werden dann wegen des hohen Aufwandes für die Installation von Wärmetauscher oder Wärmespeicher nicht weiterverfolgt.

Durch Umsetzung eines neuen Ofenkonzeptes, das eine neuartige Prozessführung beim Härten der Scheiben (Mehrkammerofen mit kleineren Brennstapeln, kleineren Losgrößen, optimale Energierückgewinnung) vorsieht, strebt die Firma DRONCO AG an, die Eigenenergieaufnahme des Ofens deutlich zu reduzieren, eine Abwärmenutzung ohne verlustreiche Wärmetauscherkomponenten zu verwirklichen und auch die Umgebungsbedingungen (optimierte Abluftreinigung, Einsatz energiearmer Brennhilfsmittel, usw.) hinsichtlich Energieeinsparung zu optimieren.

Projektaufgabe ist es, einen Härteofen zu entwickeln, der maximale Energieeinsparungen durch optimale Prozessführung und Wärmerückgewinnung ermöglicht und dennoch so einfach konstruiert ist, dass damit die benötigten Anschaffungskosten pro Ofen nicht zu hoch werden.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Das Projekt ist in 2 Phasen unterteilt:

- Schwerpunkt der 1. Projektphase war die Entwicklung eines geeigneten Aufbaus des Ofens (Ein-Kammer-System) und der Nachweis dadurch erzielbarer Energieeinsparungen (angestrebt: 50 %).
- In der 2. Phase soll das System dann zu einem Mehrkammeraufbau weiterentwickelt werden, um durch wärmetechnische Kopplung der einzelnen Brennkammern die Abluft einer im Abkühlprozess befindlichen Kammer zum Aufheizen einer anderen Kammer zu nutzen und so weitere Energieeinsparungen zu erzielen. Ferner sollen dann optimale Temperaturprofile zum Härten der Scheiben, die thermischen Verhältnisse in den Kammern, die Einflüsse verkürzter Brennprozesse auf die Qualität der Schleifscheiben und die max. möglichen Energieeinsparungen ohne Beeinträchtigungen (möglichst mit Verbesserungen!) der Schleifscheibenqualität untersucht werden.

Ergebnisse und Diskussion

Die 1. Projektphase wurde Ende 2009 erfolgreich abgeschlossen. Es entstand ein neues Ofensystem zur Härtung von Schleif- und Trennscheiben. Der neue Ofenaufbau besteht aus mehreren Röhren und wird als „Orgelpfeifenofen“ bezeichnet. Bei der Systementwicklung wurde konsequent auf Leichtbau geachtet, um die neben den eigentlichen Produkten (Schleif- und Trennscheiben) aufzuheizende Masse möglichst gering zu halten. Dazu wurden auch neue Brennstapel entwickelt, die ebenfalls zu erheblichen Einsparungen unnötig aufzuheizender Masse führten. Ferner ergab sich eine Reduzierung der Lüfterleistung, welche ursprünglich als zweitrangig eingestuft wurde.

An dem im Projekt errichteten neuen Ofen wurden Vergleichstests zu einem herkömmlichen Ofen durchgeführt, in denen eine Energieeinsparung von 56 % nachgewiesen werden konnte. Die tatsächlich erzielte Energieeinsparung lag somit deutlich über den anspruchsvollen Zielen des Antrages (50 %).

Weiter wurden erste Konzepte für die Kopplung mehrerer Orgelpfeifenöfen miteinander entworfen. Diese ermöglichen eine optimale Nutzung der beim Brennverfahren erzeugten heißen Abluft sowie eine zentrale Aufbereitung der entstandenen Abgase.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Zurzeit befindet sich das Projekt in der Planung der 2. Projektphase. Veröffentlichungen sind erst nach Abschluss der 2. Phase vorgesehen.

Fazit

Aufgrund der hervorragenden Ergebnisse der 1. Phase wurde die 2. Projektphase geplant und zur Förderung beantragt. Hier soll ein Mehrkammeraufbau der neuen Öfen realisiert und Konzepte zur wärmetechnischen Kopplung und Wiederverwendung der Wärme beim Abkühlen der Ofenkammern untersucht werden. Hierdurch sollen weitere Energieeinsparungen realisiert werden. Weiterhin soll untersucht werden, in wie weit die Brenndauer der Scheiben reduziert werden kann.

Hierdurch sollen zum Projektabschluss erhebliche Vorteile sowohl in Bezug auf die Umwelt (Energieverbrauch, CO₂-Emissionen, Abgasreinigung) als auch Wirtschaftlichkeit (Minimierung der Produktionskosten, Verbesserung der Qualität und Prozessautomatisierung) nachgewiesen werden. Das Projekt soll so einen wichtigen Beitrag zur Sicherung der Konkurrenzfähigkeit der Schleifscheibenfertigung am Standort Deutschland leisten.

Inhaltsverzeichnis

VERZEICHNIS VON BILDERN, ZEICHNUNGEN, GRAFIKEN UND TABELLEN	5
1. ZUSAMMENFASSUNG	6
2. EINLEITUNG / ZIELSTELLUNG	7
3. ENTWICKLUNGSARBEITEN UND ERREICHTE ERGEBNISSE	11
3.1. Aufbau eines horizontalen Mehrkammerofens	11
3.2. Entwicklung des Orgelpfeifenofens	15
3.3. Entwicklung neuer Brenndorne für den Orgelpfeifenofen	20
3.4. Entwicklung neuer Brennscheiben	22
3.5. Versuche am Orgelpfeifenofen	24
4. FAZIT	28

Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

Abbildung 1:	a) Trennscheiben-Komponenten b) gepresster Rohling (nicht planar).....	7
Abbildung 2:	Ofengestell mit fertigen Rohlingsstapeln angeordnet in Rechteckform.....	8
Abbildung 3:	Ofen bestückt mit zwei Gestellen (Ofen-Innenmaße: 1,65 x 2,4 x 1,85 m = 7,3 m ³)	8
Abbildung 4:	Konzept des Mehrkammerofens.....	11
Abbildung 5:	Konstruktion einer horizontalen Ofenkammer.....	12
Abbildung 6:	Schaltschrank Innenansicht	13
Abbildung 7:	Horizontaler Versuchsaufbau der Ofenkammer mit Schaltschrank.....	13
Abbildung 8:	Bauweise des Orgelpfeifenofens mit Brennkammer und Grundgestell	15
Abbildung 9:	Ansicht von oben auf die Brennkammer.....	16
Abbildung 10:	a) schematische Darstellung der Ventilator-kammer, b) Verschlussmechanismus für Dorne.....	16
Abbildung 11:	Isolation zwischen Ofenkammer und Grundgestell.....	17
Abbildung 12:	Ofenkammer mit Brennröhren.....	17
Abbildung 13:	Isolation der Brennröhren und des Ofens.....	18
Abbildung 14:	a) konstruktiver Aufbau eines Brenndorns in Leichtbauweise, b) fertiggestellter Dorn.....	20
Abbildung 15:	FEM-Berechnung zur Leichtbauauslegung des Dorns und Prüfung der realisierbaren Belastungen	21
Abbildung 16:	befüllte Brenndorne in Leichtbauweise (2 Stück übereinander).....	21
Abbildung 17:	Konzept für den Aufbau einer Mehrschicht-Brennplatte	23
Abbildung 18:	Vergleich Energieaufnahme des Orgelpfeifenofens zum Reinhardt-Ofen für die beiden Versuchsprogramme ohne Beladung.....	25

1. Zusammenfassung

In der 1. Phase des Förderprojektes wurde ein neuartiger Temperierofen zum Härten von phenolharzgebundenen Schleif- und Trennscheiben bis zu einem ersten Versuchsmuster entwickelt und erfolgreich erprobt. Im Vergleich zu den bisher genutzten Öfen mit einem großen Brennraum, die weder in Bezug auf Isolierung, noch Ofenmasse und Temperatursteuerung bzw. Abluftnutzung optimiert sind, wurde ein neuartiger Aufbau in Form eines Orgelpfeifenofens unter konsequenter Nutzung des Leichtbaupotenzials realisiert. Der neue Ofenaufbau ist durch mehrere Röhren gekennzeichnet, in die die Brennstapel eingeschoben und dort unter gleichmäßigen Strömungs- und Temperierbedingungen gehärtet werden. Ferner wurde eine wesentliche Reduzierung der Lüfterleistung erreicht, welche ursprünglich als zweitrangig eingestuft wurde, jedoch einen maßgeblichen Beitrag zur Reduzierung des Energieverbrauchs ermöglichte. Auch wurden neue Brennstapel entwickelt, die ebenfalls zu Einsparungen der unnötig aufzuheizenden Sekundärmasse führten.

An dem im Projekt errichteten neuen Versuchsofen wurden Vergleichstests zu einem herkömmlichen Ofen durchgeführt, in denen eine Energieeinsparung von 56 % nachgewiesen werden konnte. Diese erzielte Energieeinsparung lag somit deutlich über den anspruchsvollen Zielen des Antrages (50 %).

Weiter wurden erste Konzepte für die Kopplung mehrerer Orgelpfeifenöfen miteinander entworfen. Diese sollen eine optimale Nutzung der beim Brennverfahren erzeugten heißen Abluft sowie eine Aufbereitung entstandener Abgase ermöglichen.

Aufgrund dieser hervorragenden Ergebnisse wurde die 2. Projektphase geplant und zur Förderung beantragt. Hier sollen die Konzepte zur wärmetechnischen Kopplung mehrerer Brennkammern umgesetzt und Verfahren zur Nutzung der Wärme beim Abkühlen der Ofenkammern zum Vorheizen einer anderen Brennkammer entwickelt werden. Weiterhin soll untersucht werden, in wie weit die Brenndauer der Scheiben ohne Qualitätsbeeinträchtigungen reduziert werden kann. Hierdurch sollen weitere Energieeinsparungen realisiert werden.

Zusammenfassend soll das Ofensystem nach Abschluss der 2. Phase seine Tauglichkeit im Produktionseinsatz und dabei deutliche Energieeinsparungen und eine kostengünstigere Produktionsweise nachweisen.

2. Einleitung / Zielstellung

Die Herstellung von phenolharzgebundenen Schleif- und Trennscheiben besteht im Wesentlichen aus den Prozessschritten zur Herstellung der Schleifmasse, dem Pressen der einzelnen Komponenten zu einem Rohling und dem anschließenden Härten der Rohlinge in einem Härteofen. Die einzelnen Komponenten und deren Verarbeitung zu einer Trennscheibe sind im Folgenden näher beschrieben:

Zuerst werden Glasgewebe, eine Masse die das Schleifkorn (Aluminiumoxid oder Siliziumcarbid) und das Bindemittel enthält, das Etikett und ein Ring aus Weißblech unter hohem Druck zu Schieberohlingen verpresst (siehe Abbildung 1).

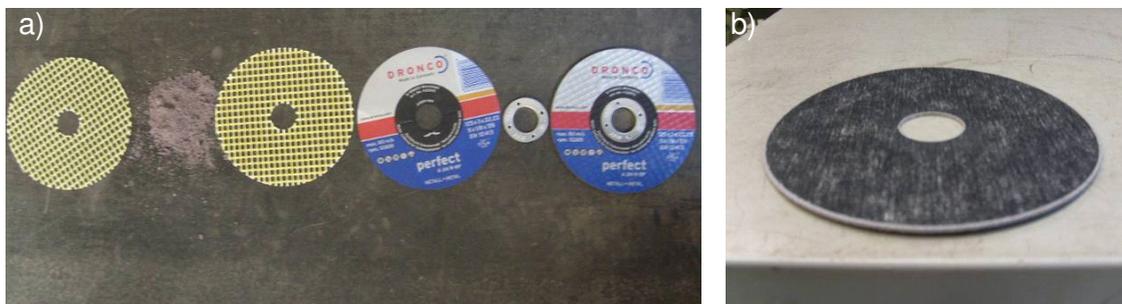


Abbildung 1: a) Trennscheiben-Komponenten (v.l.: Glasgewebe, Masse, Glasgewebe, Etikett, Ring), b) gepresster Rohling (nicht planar).

Anschließend werden die noch sehr weichen und von der Form her nicht ebenen Scheibenrohlinge abwechselnd mit sog. Brennplatten auf Dornen abgelegt. Die Brennplatten werden benötigt, um die Planheit der Scheiben sicherzustellen und eine gleichmäßige Wärmeverteilung in den Scheiben zu gewährleisten. Ein Beschwerungsgewicht, am oberen Ende des Brenndorns, sorgt für eine konstante Kraft auf dem Brennstapel.

In einem weiteren Fertigungsschritt, dem so genannten Brennen oder Härten, werden die harzhaltigen Anteile der Rohlinge unter erhöhter Temperatur (ca. 210 °C) verflüssigt und die einzelnen Komponenten zum Endprodukt verschmolzen. Dazu werden die Brennstapel auf Ofengestellen gesammelt (siehe Abbildung 2). Jeweils zwei übereinander gestapelte Ofengestelle werden in einem Ofen untergebracht (siehe Abbildung 3).



Abbildung 2: Ofengestell mit fertigen Rohlingsstapeln angeordnet in Rechteckform



Abbildung 3: Ofen bestückt mit zwei Gestellen
(Ofen-Innenmaße: $1,65 \times 2,4 \times 1,85 \text{ m} = 7,3 \text{ m}^3$)

Die hierbei verwendeten Öfen sind weder in Bezug auf ihre Wärmedämmung, noch auf die optimale Ausnutzung und Verteilung der Wärme für diesen Produktionsschritt optimiert. Es bestehen folgende wesentliche Nachteile:

- Große Losgrößen pro Ofenbrand.
- Der gesamte Ofen muss auch bei kleineren Produktionslosgrößen erwärmt werden.
- Hoher Energieaufwand um Umluftstrom im Ofen zu erzeugen.
- Ungleichmäßige Bedingungen im Ofen selbst: Durch die Anordnung der Brenndorne auf einem rechteckigen Ofengestell gibt es unterschiedliche Luftgeschwindigkeiten zwischen den außen stehenden und den innen stehenden Dornen, wodurch eine unterschiedliche Wärmeübertragung auftritt.

- Abkühlung der Scheiben ist unregelmäßig: Auch durch die abgegebene Wärmestrahlung zwischen den Dornen selbst wird eine gleichmäßige Temperierung der Scheiben erschwert, was zu Qualitätsabweichungen führt.
- Es ist eine sehr große Masse (neben den Scheiben auch Brennplatten, Dorne, Beschwerungsgewichte, Ofengestelle und Ofenkammer) aufzuheizen, woraus ein hoher Energieverbrauch folgt (Gesamt-Anschlussleistung aktueller Öfen: 83 kW, davon 72 kW Heizung, unterteilt in 2 Heizgruppen, Rest v.a. Ventilator).
- Energie beim Abkühlen der Scheiben geht vollständig verloren.
- Mitarbeiterbelastung durch thermische Einflüsse (Wärme, Kälte)
- Viel Aufwand durch Transporttätigkeit zwischen den Arbeitsstationen.
- Transporttätigkeiten zwischen den Pressen und den Ofenanlagen führen zu erhöhtem Ausschuss bei den unausgehärteten Scheiben.
- Schwierige Ermittlung von Qualitätsproblemen, da Öfen mit Rohlingen aus verschiedensten Pressen bestückt sind.

Sowohl aus Gründen der Ressourcenschonung als auch des zunehmenden Wettbewerbs, vor allem aus dem asiatischen und dem osteuropäischen Raum, ist es von besonderem Interesse die Herstellungskosten am Produktionsstandort Deutschland zu senken. **Ein wesentlicher Ansatz des geplanten Projektes der Firma DRONCO AG bestand dazu in dem Ziel, den Energieverbrauch beim Härtingprozess der Schleifscheiben signifikant zu senken.**

Dazu wurden zwei Lösungsansätze verfolgt:

- a) Durch umfangreiche Grundlagenversuche zum Brennyklus von Schleif- und Trennscheiben, aus bereits durchgeführte Forschungsarbeiten im Rahmen eines vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie geförderten Verbundprojektes „Verschleißfeste Schleifprodukte“ (Förderkennzeichen: B21092, durchgeführt im Projektraum 01.01.2002 – 31.05.2005), wurde das Ziel abgeleitet, die Brenndauer der Scheiben im Ofen deutlich zu verkürzen (von 21 auf 15 Stunden).
- b) Ferner bestand das Ziel in der Entwicklung eines neuen, energieeffizienteren Mehrkammerofens, der eine gleichmäßige Temperierung der Scheiben ermöglicht sowie durch wärmetechnische Kopplung der einzelnen Kammern eine Wiederverwertung der Prozesswärme beim Abkühlen einer Kammer zum Aufheizen einer anderen Kammer gestattet.

Schwerpunkt der 1. Projektphase war die Entwicklung des neuen Härteofens, zunächst noch als 1-Kammersystem. Dabei sollte die Machbarkeit einer deutlichen Reduzierung des Energieverbrauchs nachgewiesen werden. In der 2. Phase sollte dann die Weiterentwick-

lung zum Serientauglichen Mehrkammerofen, die Entwicklung der wärmetechnischen Vernetzung und Wärmenutzung sowie die Verkürzung der Brennprogramme folgen.

Die Energieeinsparung im Vergleich zu den herkömmlichen Öfen sollte zwischen 35 % bis 50 % liegen. Hierdurch könnten bei einer Umrüstung allein der vorhandenen Öfen bei der DRONCO AG Energieeinsparungen von bis zu 1,5 Mio. kWh pro Jahr erzielt werden. Dadurch ließen sich bis zu 900 t CO₂ im Jahr einsparen (Annahme: Energie aus Strom, CO₂ Multiplikator = 0,622 kg/kWh) und die Produktionskosten pro Jahr deutlich senken.

3. Entwicklungsarbeiten und erreichte Ergebnisse

3.1. Aufbau eines horizontalen Mehrkammerofens

Zum Start des Projektes wurden Grundlagenversuche zum Härten von Schleif- und Trennscheiben an einem vorhandenen, handelsüblichen Laborofen durchgeführt. Dieser Laborofen konnte zwei Brenndorne aufnehmen. Die Versuche zeigten, dass eine Wärmeübertragung nur durch Strahlungswärme zwar grundsätzlich möglich ist, aber die Temperaturunterschiede zwischen dem oberen und dem unteren Bereich der Ofenkammer bis zu 15 °C betragen können.

Die Ergebnisse aus diesen Grundlageversuchen zeigten, dass der für die industrielle Produktion benötigte Mehrkammerofen nur mit einer Umluftheizung sinnvoll betrieben werden kann.

Es wurde deshalb ein erster Entwurf des neuen Härteofens erstellt, der auf dem im Antrag präsentierten Konzept mehrerer horizontal angeordneter Ofenkammern basierte (siehe Abbildung 4). Hierzu wurden Zeichnungen zur Auslegung des Versuchsofens angefertigt (siehe Abbildung 5).

Brennkammer 1	Brennkammer 2	Brennkammer 3	Brennkammer 4
Brennkammer 5	Brennkammer 6	Brennkammer 7	Brennkammer 8
Brennkammer 9	Brennkammer 10	Brennkammer 11	Brennkammer 12

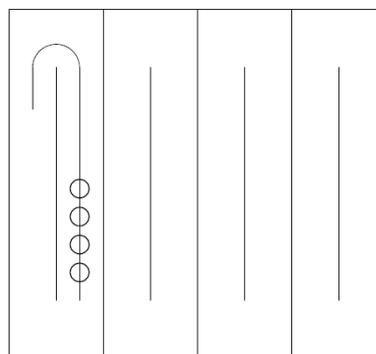


Abbildung 4: Konzept des Mehrkammerofens

Anhand der Zeichnungen wurde die Ofenkammer mit sämtlicher Peripherie, u.a. auch einem Schaltschrank mit der Leistungselektronik und der Steuerung bei DRONCO AG geplant und überwiegend aus vorhandenen Komponenten zusammengebaut (siehe Abbildung 6 und Abbildung 7).



Abbildung 6: Schaltschrank Innenansicht

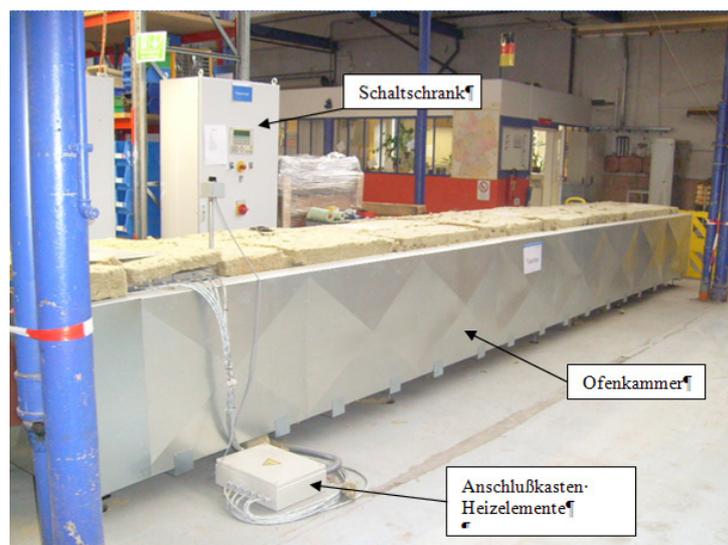


Abbildung 7: Horizontaler Versuchsaufbau der Ofenkammer mit Schaltschrank

An diesem Versuchsaufbau wurden umfangreiche Versuche zur Inbetriebnahme, Funktionstests und Temperierversuche durchgeführt. Zusammenfassend zeigte sich dabei, dass bei den großen Dimensionen der Ofenkammer (Länge 10.000 mm, Breite 1.000 mm) ein Lufttemperaturunterschied von 7 °C zwischen Ein- und Austritt der Luft in die Heizung auftrat. Dieser Temperaturunterschied lässt sich auf Wärmbrücken zurückführen, da bei dieser Versuchsanordnung der Rahmen des Ofens nicht vollständig von der heißen Luft entkoppelt werden konnte. Ferner ergaben sich weitere erhebliche Probleme durch thermische Degradation, die darauf zurückzuführen waren, dass die Anschlüsse der Heizung vom Hersteller nicht ordnungsgemäß ausgelegt wurden.

Aus den Versuchsreihen mit dem horizontalen Ofen ergaben sich folgende Erkenntnisse:

- Durch die horizontale Lage der Brenndorne im Ofen ist ein zusätzlicher Aufwand für die Fördertechnik zu leisten.
- Die horizontale Lage der Brenndorne ermöglicht keine gleichmäßige Gewichtsverteilung durch die Beschwerungsgewichte.
- Die Zuführung des Materials in den Ofen war kompliziert und erschwerte eine angestrebte Automatisierung des Produktionsschrittes.
- Zur Behebung der oben genannten Lufttemperaturunterschiede, aufgrund der Länge des Ofensystems, wäre eine Installation von zusätzlichen Heizstäben notwendig. Die angestrebten Energieeinsparungen würden hierdurch in Frage gestellt.

Aus diesen Untersuchungsergebnissen wurde die Schlussfolgerung gezogen, dass die angestrebten Ziele mit dem horizontalen Konzept des Ofensystems nicht zu erreichen sind. Es wurde daher das gesamte Konzept des Mehrkammerofens überarbeitet. Hieraus entstand das Konzept des sog. Orgelpfeifenofens, welches im folgenden Kapitel näher erläutert wird.

3.2. Entwicklung des Orgelpfeifenofens

a) Konzeption und Konstruktion des Orgelpfeifenofens

Die am horizontalen Ofenaufbau durchgeführten Untersuchungen führten zu dem Ergebnis, dass eine senkrechte Bauweise des Ofens weitaus effektiver und leistungsfähiger ist. Aus diesem Grund wurde das Konzept des horizontalen Ofensystems verworfen und der Schwerpunkt der F&E-Arbeit auf die Entwicklung eines senkrechten Ofensystems gelegt.

Als Resultat dieser Arbeiten entstand ein neuartiger Aufbau für eine Brennkammer zum Härten für Schleif- und Trennscheiben. Der neu konzipierte Vertikalofen besitzt die Form eines „Orgelpfeifenofens“, der aus zwei Hauptbaugruppen besteht, dem Grundgestell und der Brennkammer (siehe Abbildung 8).

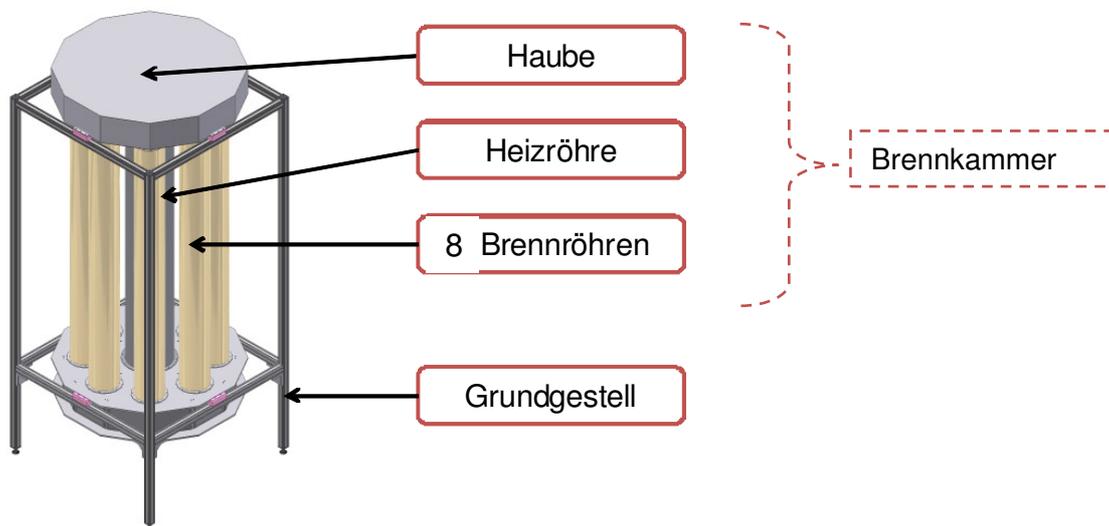


Abbildung 8: Bauweise des Orgelpfeifenofens mit Brennkammer und Grundgestell

Der Brennereich ist aus 9 vertikalen Röhren aufgebaut, von denen die 8 äußeren als Brennröhren und die mittlere als Heizröhre dienen (siehe Abbildung 9). Den oberen Abschluss der Röhren bildet eine Haube, die alle 9 Röhren miteinander verbindet und somit den Rückstrom der Luft gewährleistet. Außerdem lassen sich über die Hauben mehrere Brennkammern miteinander verbinden, so dass ein Mehrkammerofensystem aufgebaut werden kann. Die elektrische Luftheizung ist von oben in die Heizröhre eingehängt (siehe Abbildung 9) und somit, beispielsweise zu Wartungs- und Reparaturzwecken, leicht demontierbar.

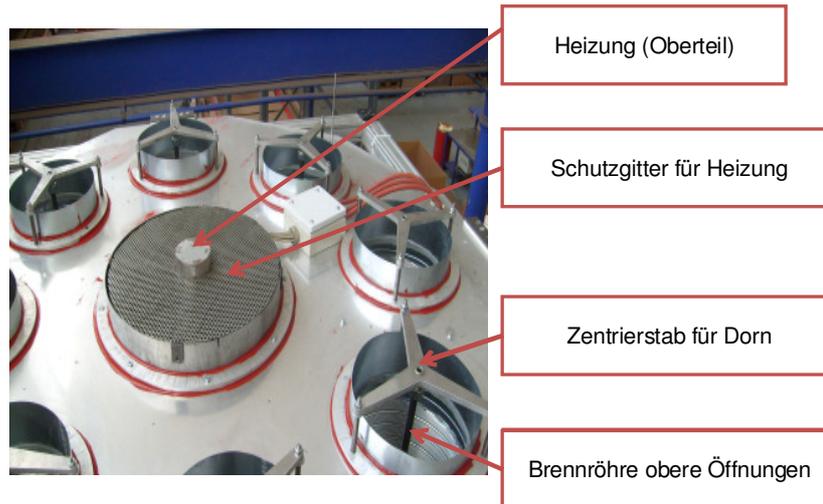


Abbildung 9: Ansicht von oben auf die Brennkammer

Im unteren Bereich der Ofenkammer befindet sich die Ventilorkammer (siehe Abbildung 10 a). In ihr sind der Radial-Ventilator und die Beladeöffnungen (siehe Abbildung 10 b) inkl. der Verschlussklappen untergebracht.

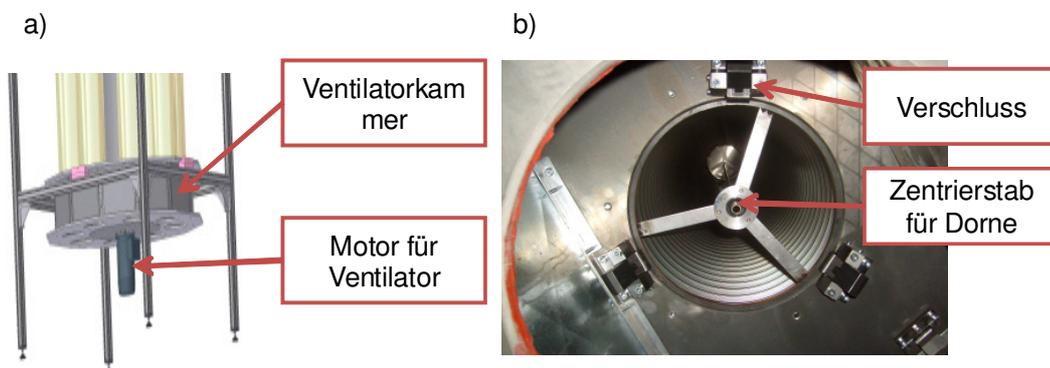


Abbildung 10: a) schematische Darstellung der Ventilorkammer, b) Verschlussmechanismus für Dorne

Der Ventilator saugt über den Luftherhitzer (Heizröhre) die Luft an und presst diese über die 8 röhrenförmigen Brennkammern und über die Haube wieder zurück in den Luftherhitzer. Durch die ringförmige Anordnung der Brennkammern um die in der Mitte befindliche Heizkammer, wird eine gleichmäßige Luftverteilung gewährleistet. Die Befüllung des Ofens erfolgt von unten über ein XY-Portal, welches die Dorne in die Brennkammer hebt und durch Drehen verriegelt.

Die thermische Entkoppelung der Ofenkammer vom Gestell erfolgt mittels eines Hochtemperatur-Isolierkunststoffes (siehe Abbildung 11). Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffs wird der Wärmeverlust durch Kontakt mit dem Gestell erheblich vermindert.

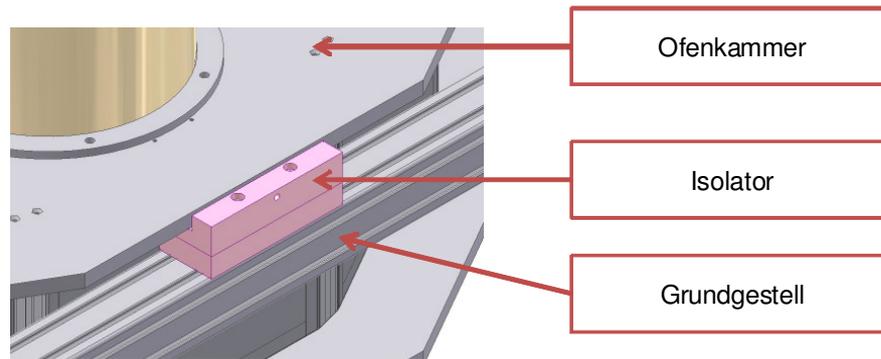


Abbildung 11: Isolation zwischen Ofenkammer und Grundgestell

Die Brennröhren der Ofenkammer (siehe Abbildung 12) wurden aus einem speziellen Wickelstahlblech gefertigt. Da die Röhren nicht tragfähig konzipiert wurden, konnte die Materialdicke deutlich reduziert und somit die Eigenenergieaufnahme wiederum erheblich gesenkt werden.

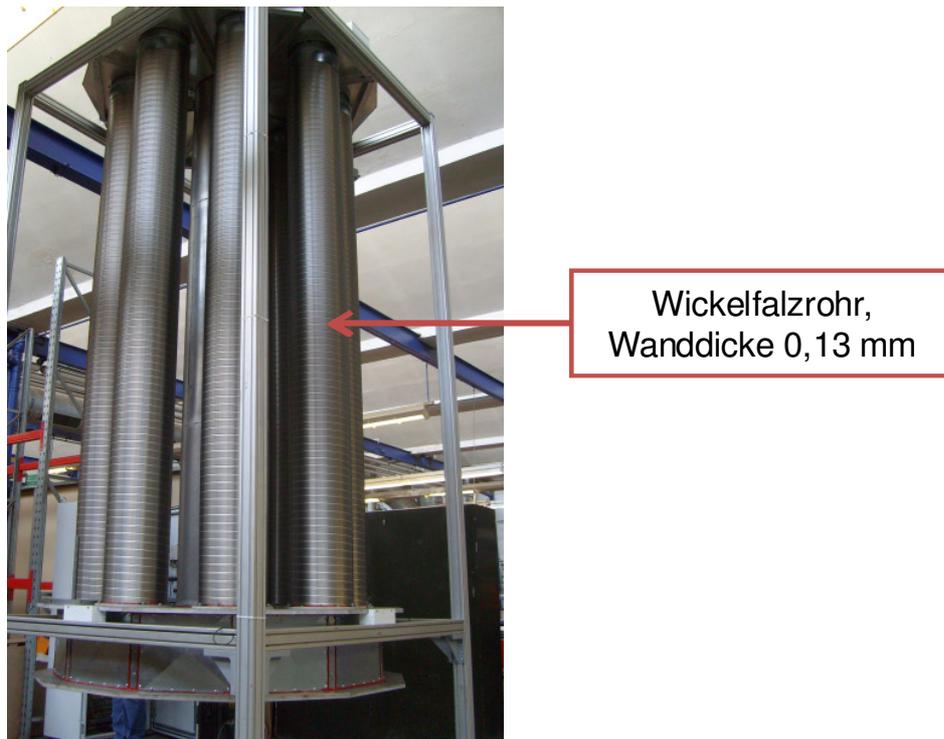


Abbildung 12: Ofenkammer mit Brennröhren

Die Isolierungen (siehe Abbildung 13) der einzelnen Röhren zueinander sowie der Ofen selbst bestehen aus einer ca. 100 bis 150 mm dicken Isolierwolle.

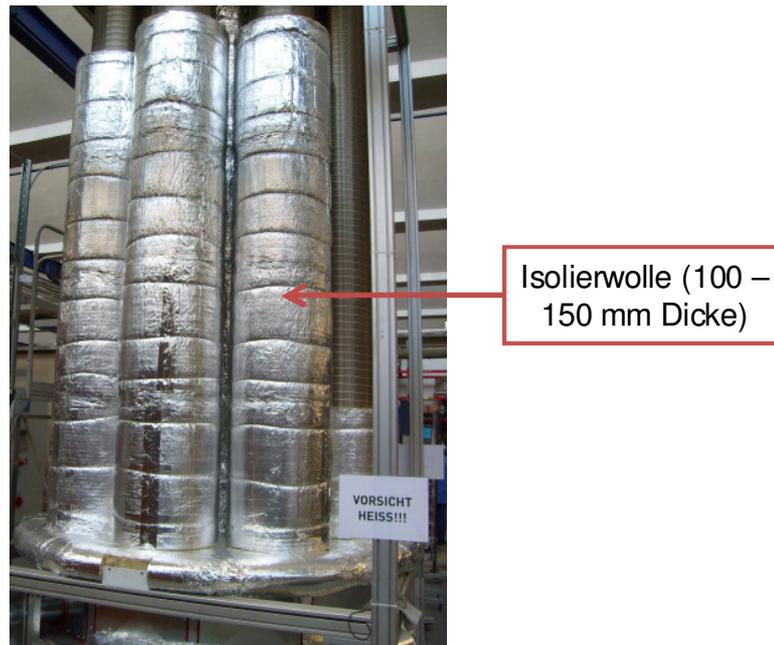


Abbildung 13: Isolation der Brennröhren und des Ofens

b) Technische Daten

Die technischen Daten des Orgelpfeifenofensystems sind wie folgt:

- Abmessungen (L x B x H): 2 m x 2 m x 5 m
- Heizleistung: 36 kW
- Scheibengröße: 115 mm – 230 mm
- Scheibenkapazität pro Ofen: 2.400 Stück bis 9.600 Stück

Momentan müssen im neuen Ofen folgende Materialien aufgeheizt und abgekühlt werden.

- Ofenkammer komplett: 500 kg
- Ventilator: 76 kg
- Heizung: 10 kg
- Haube: 40 kg
- Summe: 626 kg**

Damit würden, im Vergleich zu den herkömmlichen Öfen, ca. 350 kg weniger Ofenmaterial aufgeheizt und abgekühlt werden. Weitere Optimierungspotentiale, vor allem bei den unteren Trägerplatten sowie den Ventilatorrohren in der Mitte der Öfen, sind vorhanden.

c) Vor- und Nachteile des Orgelpfeifenofens

Die Vorteile des neuartigen Ofenaufbaus sind im Folgenden stichpunktartig zusammen gefasst:

- Einfacher Aufbau, d.h. sehr wenig bewegliche Teile im Ofeninneren.
- Hohe Strömungsgeschwindigkeiten und somit gute Verwirbelung der Heißluft in den Brennkammern.
- Luftheizung sitzt in der Ofenmitte → keine Wärmeverluste.
- Komplette thermische Entkopplung der Ofenkammer vom Gestell → es werden nur die notwendigen Teile aufgeheizt.
- Kein zusätzliches Vorspannen der befüllten Dorne notwendig.
- Mehrere Einzelöfen können zu einer Ofenbatterie verbunden werden, die mit einem einzigen Ladeverfahren bedient werden kann.
- Verbindung der Einzelöfen möglich, um die Restwärme eines ausgeschalteten Ofens zum Aufheizen eines anderen Ofens zu nutzen.
- Zentrale Aufreinigung der kontaminierten Abluft möglich.
- Optimales Anströmen jedes einzelnen Dornes.

Als nachteilhaft hat sich herausgestellt, dass die alten Brenndorne für das neue Ofensystem nicht verwendet werden können, sondern neu konzipierte Brenndorne (vgl. Abschnitt 3.3) verwendet werden müssen. Dies erhöht die Anschaffungskosten für das Orgelpfeifenofensystem. Durch eine konsequente Leichtbauweise der neuen Brenndorne sind diese aber aus energetischer Sicht wirtschaftlicher als die alten Dorne. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Brennröhren für den Betrieb der Orgelpfeifenöfen vollständig befüllt sein müssen, da ansonsten keine Vorspannung der Brenndorne möglich ist.

3.3. Entwicklung neuer Brenndorne für den Orgelpfeifenofen

Um weiteres Gewicht zu reduzieren und eine bessere Gewichtsverteilung auf die zu härtenden Schleif- und Trennscheiben zu erreichen, wurden umfangreiche Grundlagenversuche mit neuen Brenndorn-Aufbauten durchgeführt. Als Ergebnis aus diesen Untersuchungen wurde ein neues Konzept für den Aufbau der Brenndorne entwickelt und gefertigt, welches kleinere und deutlich leichtere Dorne zur Folge hatte.

Die spezielle Konstruktion der Dorne gestattet dabei, dass durch entsprechende Abstützung der Dorne auf dem Mittelrohr und Federn an der Grundplatte auf jeden Dorn, immer das gleiche Gewicht lastet (siehe Abbildung 14). Dadurch lassen sich die Produktionsparameter besser kontrollieren und somit ein höherer Qualitätsstandard erreichen.

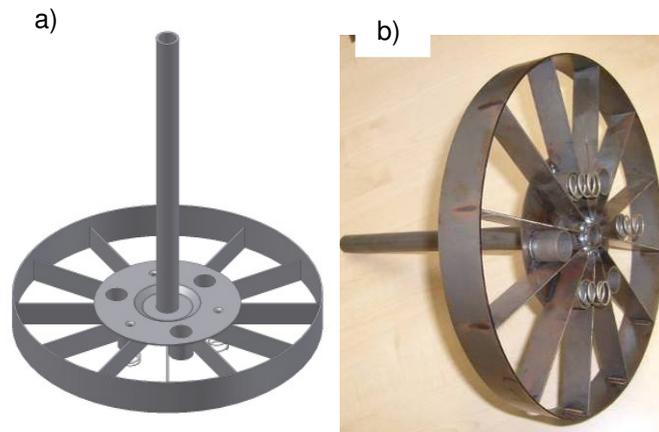


Abbildung 14: a) konstruktiver Aufbau eines Brenndorns in Leichtbauweise, b) fertiggestellter Dorn

Die neuen Brenndorne wurden mit Hilfe von FEM-Methoden hinsichtlich ihrer Stabilität unter Belastung untersucht (siehe Abbildung 15). Anhand der Ergebnisse konnte keine Beeinträchtigung des Materials unter Last festgestellt werden.

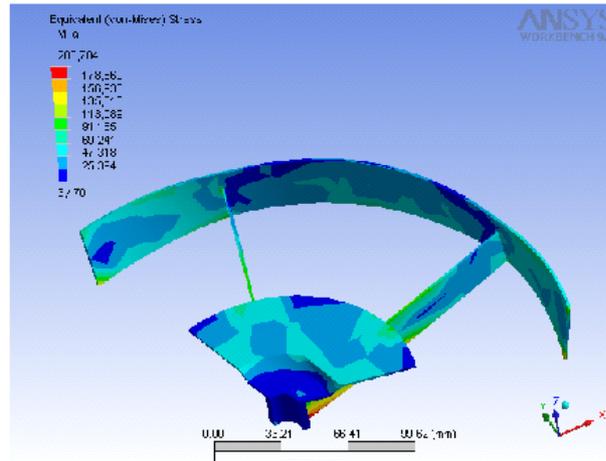


Abbildung 15: FEM-Berechnung zur Leichtbauauslegung des Dorns und Prüfung der realisierbaren Belastungen

Bedingt durch das senkrechte Aufeinandersetzen der Dorne im Ofen konnte auch auf einen gewissen Teil der Beschwerungsgewichte verzichtet werden, da sich die Brenndorne gegenseitig beschweren.



Abbildung 16: befüllte Brenndorne in Leichtbauweise (2 Stück übereinander)

Durch den neuen Aufbau der Dorne konnte das Gewicht pro Dorn inkl. Beschwerungsgewicht (für die Menge von 30 Stück Scheiben mit einem Durchmesser von 230 mm) von 20 kg/Dorn auf 3 kg/Dorn reduziert werden. Dies entspricht einer Gewichtseinsparung von 85 %. Im herkömmlichen Ofensystem werden pro Ofenbrand ca. 50 Dorne á 48 Scheiben gebrannt. Daraus ergibt sich eine nochmalige Gewichtseinsparung von 850 kg Stahl (17 kg

x 50 Dorne). Um diese Menge Material von 30 °C auf 210 °C aufzuheizen, werden 21 kWh benötigt, die in Zukunft eingespart werden können. Dies zeigt das Energiesparpotenzial, welches durch die konsequent verfolgte Leichtbauweise des Orgelpfeifenofens verwirklicht werden konnte.

3.4. Entwicklung neuer Brennscheiben

In Phase 1 des Projektes wurden mehrere Grundlagenversuche mit unterschiedlichen Brennscheibenmaterialien durchgeführt. Die Brennscheiben werden zwischen die zu Härtenden Schleif- und Trennscheiben gelegt, um ein Verkleben und Verformen des Produktes zu vermeiden und eine bessere Wärmeverteilung zu gewährleisten.

Ziel der Untersuchungen war es einerseits, die im Ofen zu erwärmende Masse weiter zu reduzieren und andererseits die Energieeinleitung in die Brennstapel zu verbessern, wodurch sich eine Brennzeitverkürzung erhofft wird.

Bei den Testreihen wurden Aluminium-, Stahl-, Teflon- und Graphittrennscheiben eingesetzt. Bei den Teflonscheiben handelt es sich um einen mit Glasfasern verstärkten Verbundwerkstoff. Ob ein bestimmtes Material als Brennscheibe geeignet ist hängt von mehreren Faktoren ab. Nach jedem Produktionsschritt müssen die Scheiben leicht vom Dorn und von den Schleif- und Trennscheiben zu entfernen sein. Das Material darf keine Ermüdungserscheinungen zeigen, um in einer Vielzahl von Brennvorgängen zum Einsatz zu kommen. Weiter dürfen die Brennscheiben nicht das Aussehen oder die Qualität des Produktes beeinflussen.

Zu jedem Material wurden mehrere Brennversuche durchgeführt. Gegenüber den Aluminiumplatten, die als Standardbrennscheiben Verwendung finden, zeigten sich vor allem die Platten aus Teflon konkurrenzfähig. Bei den ersten Versuchen ließen sich die Kunststoffplatten leichter vom Dorn und den Schleifscheiben trennen und wiesen eine gute Etikettenhaftung sowie keinerlei Randausbrüche auf. Es stellte sich jedoch heraus, dass sich die Teflonscheiben nach längerem Gebrauch verformten und durch das verwendete Reinigungsmittel Rückstände an den Schleif- und Trennscheiben auftraten, die die Optik des Endproduktes negativ beeinträchtigten. Ein weiterer Nachteil ist die, bedingt durch die schlechte Wärmeleitfähigkeit des Teflons, schlechte Temperatureaufnahme und Abgabe. So dauerte es länger bis die Kunststoffscheiben beim Aufheizen die gewünschte Temperatur erreichten und in der Abkühlphase speicherten sie die Wärme länger als die Aluminiumplatten. Teflonplatten sind somit in der hier verwendeten Form nicht als Brennscheibenmaterial

geeignet. Ein Einsatz des Teflons als Beschichtung oder für das unten beschriebene Mehrschichtensystem wird für weitere Versuche in Erwägung gezogen.

Die aus Graphit gepressten Brennscheiben ließen sich ebenfalls leicht vom Dorn entfernen, jedoch stellte sich heraus, dass aufgrund der hohen Klebeineigung der Platten mit dem Produkt das Material für diese Zwecke ungeeignet ist.

Die Stahlplatten hatten die Vorteile der hohen Formstabilität und guten Wärmeleitfähigkeit. Sie waren aber auf Grund ihres Gewichtes und der optischen Beeinträchtigung des Produkts nicht geeignet.

Derzeit wird ein Konzept aus Aluminium Sandwichplatten oder geschäumten Aluminiumplatten favorisiert, deren Erprobung Bestandteil der Projektphase 2 sein wird. Weitere Forschungsarbeiten werden dabei hinsichtlich eines Mehrschichtenaufbaus mit gezielt angeordneten Löchern betrieben (siehe Abbildung 17). Hierbei werden die ermittelten Lösungsansätze aus Phase 1 mit in die Konzeptplanung einfließen.

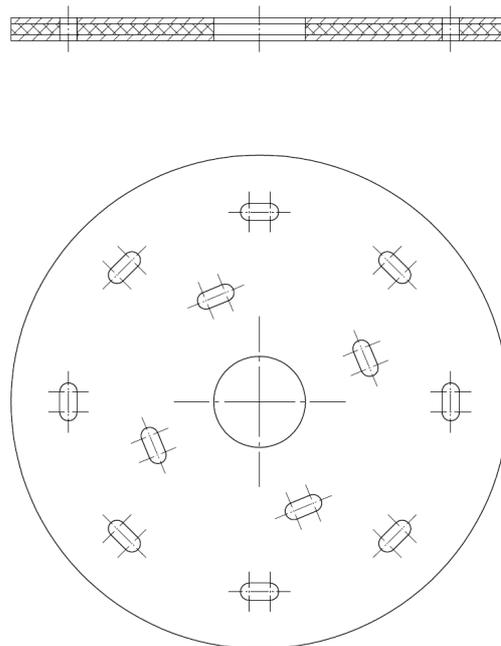


Abbildung 17: Konzept für den Aufbau einer Mehrschicht-Brennplatte

3.5. Versuche am Orgelpfeifenofen

a) Vergleichsmessungen unbelasteter Öfen

Nach Aufbau und erfolgreicher Inbetriebnahme des ersten Versuchsmusters des Orgelpfeifenofens wurden Funktionstests und Temperierversuche durchgeführt. Anschließend führten wir Vergleichsmessungen zwischen einem unbelasteten Reinhardt-Ofen (Kammerofen gemäß Stand der Technik) und dem unbelasteten Orgelpfeifenofen durch. Dabei wurden identische Temperaturprofile gefahren und der Energieverbrauch der beiden Öfen bestimmt. Da die Messungen ohne Beladung durchgeführt wurden, konnte somit der Einfluss der Isolierung und der Leichtbauweise des Orgelpfeifenofens ermittelt werden.

Im ersten Versuchsprogramm wurden die zwei unbelasteten Öfen mit einer konstanten Aufheizrate von 1,5 °C/min (30 °C auf 210 °C) erhitzt und anschließend für weitere zwei Stunden auf der Temperatur von 210 °C gehalten.

Im zweiten Versuchsprogramm wurden die Öfen unter den gleichen Bedingungen (1,5 °C/min, $T_{\text{start}} = 30 \text{ °C}$, $T_{\text{end}} = 210 \text{ °C}$) aufgeheizt und dann eine Haltezeit bei 210 °C von 6 Stunden gewählt.

Die Versuchsergebnisse beider Messungen sind in Tabelle 1 und Tabelle 2 zusammen gefasst und in Abbildung 18 schematisch gegenüber gestellt.

<u>Orgelpfeifenofen</u>				
	Zeit [h]	Heizung [kWh]	Lüfter [kWh]	Gesamt [kWh]
Aufheizen	2	22	10	32
Haltezeit	2	2	10	12
Summe	4	24	20	44
<u>Reinhardt-Ofen</u>				
Aufheizen	2	58	24	82
Haltezeit	2	24	24	48
Summe	4	82	48	130

Tabelle 1: erstes Versuchsprogramm zur Ermittlung des Energieverbrauch der Öfen (ohne Beladung, Heizrate = 1,5 °C/min, $\Delta T = 180 \text{ °C}$)

<u>Orgelpfeifenofen</u>				
	Zeit [h]	Heizung [kWh]	Lüfter [kWh]	Gesamt [kWh]
Aufheizen	2	22	10	32
Haltezeit	6	6	30	12
Summe	8	28	40	44
<u>Reinhardt-Ofen</u>				
Aufheizen	2	58	24	82
Haltezeit	6	72	72	48
Summe	8	82	96	130

Tabelle 2: zweites Versuchsprogramm zur Ermittlung des Energieverbrauch der Öfen (ohne Beladung, Heizrate = 1,5 °C/min, $\Delta T = 180$ °C)

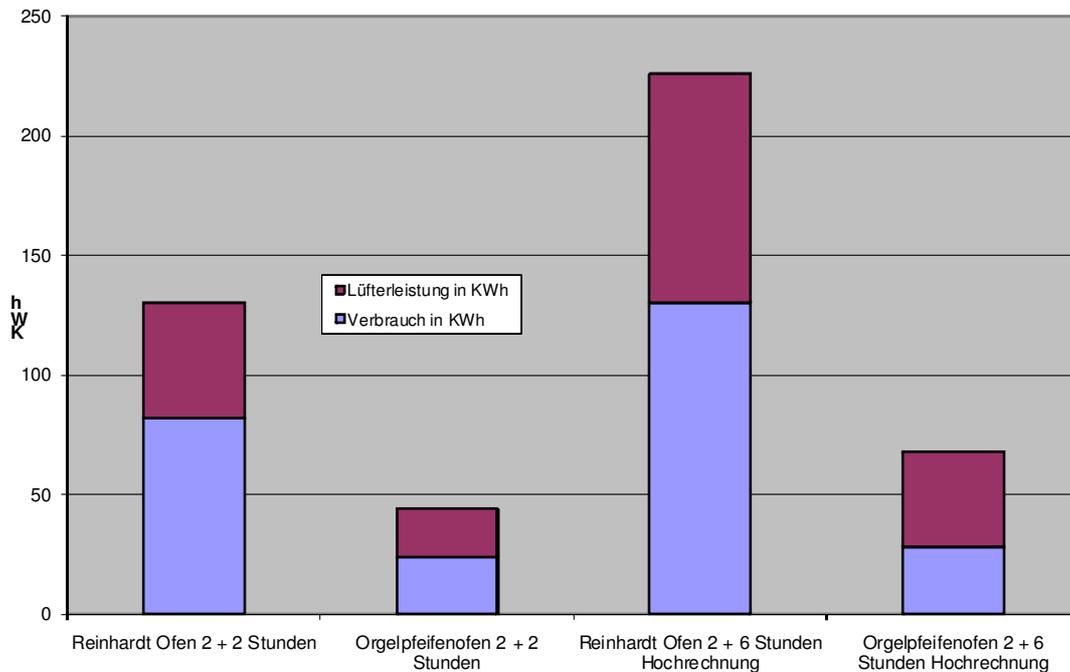


Abbildung 18: Vergleich Energieaufnahme des Orgelpfeifenofens zum Reinhardt-Ofen für die beiden Versuchsprogramme ohne Beladung

Aus den Messdaten lässt sich erkennen, dass die Energieeinsparungen im Vergleich zum Reinhardt-Ofen sowohl die Heizung als den Lüfter betreffen und mehr als 50 % betragen. Die Reduzierung des Energieverbrauchs für die Heizung beträgt in der Aufheizphase 62 % und in der Haltephase sogar 72 %. Diese Einsparungen sind sowohl auf die verbesserte Isolierung der Brennkammer von der Umgebung, als auch auf die konsequente Umsetzung des Leichtbauprinzips bei der Konstruktion des Orgelpfeifenofens zurückzuführen.

Beim Verbrauch des Lüfters konnte sowohl in der Aufheiz- als auch in der Haltephase eine Ersparnis von 58 % erzielt werden. Diese Einsparungen sind auf die verbesserten Luftströmungsbedingungen durch den neuartigen Aufbau zurückzuführen.

Insgesamt konnte somit eine Gesamtenergieeinsparung des neuen Ofenaufbaus für Betrieb von Heizung und Lüfter von 56 % im Vergleich zu herkömmlichen Reinhardt-Öfen nachgewiesen werden.

b) Vergleichsmessung beladener Öfen

Um die Energieeinsparung des Orgelpfeifenofens unter Anwendungsbedingungen zu testen, wurde ein Versuchsprogramm unter Beladung (mit Schleifscheiben) durchgeführt. Sowohl der Reinhardt-Ofen als auch der Orgelpfeifenofen wurden mit identischer Beladung bestückt. Dabei wurden beim Orgelpfeifenofen zwei gegenüber liegende Röhren mit je 10 Dornen, beladen mit Trennscheiben AS60V 115x1x22,23 und Ablageplatten Durchmesser 135 mm, gefüllt. Die weiteren 6 Röhren des Ofens wurden jeweils mit 10 Dornen, auf welchen sich nur Ablageplatten Durchmesser 230 mm befanden, bestückt (insgesamt 2.380 Ablageplatten, 320 Scheiben). Das Gesamtgewicht der Ablageplatten und der Scheiben betrug 1.730 kg. Für die Brenndauer wurde das derzeit übliche Ofenprogramm von 23 Stunden verwendet.

Der Temperaturverlauf in den Scheiben wurde mit zwei Temperaturfühlern aufgezeichnet.

Es zeigte sich, dass der Temperaturverlauf in den Trennscheiben während der Aufheizphase und Haltezeit dem von Brennprogramm vorgegebenen Temperaturverlauf exakt folgt, während der Ofen in der Abkühlphase langsamer abkühlt, als das Ofenprogramm vorgibt.

Bei der durchgeführten Vergleichsmessung ergab sich für den Reinhardt-Ofen ein Energiebedarf von 430 kWh. Die Energieaufnahme des Orgelpfeifenofens betrug nur 186 kWh. **Somit konnte eine Energieeinsparung von 244 kWh erzielt werden, was einer Reduzierung des Verbrauchs um 56 % entspricht.**

c) Qualitätstests der im neuen Ofen gehärteten Schleifscheiben

Mit den im Orgelpfeifenofen gehärteten Schleif- und Trennscheiben wurden anschließend Qualitätstests, sog. Standzeittests, durchgeführt. Dabei wurden Trennscheiben ausgewählt, die ein Gewicht von 25,3 – 25,6 g aufwiesen. In den Standzeittests wurden mit einem Winkelschleifer A+S 1400 W Stahl-Winkelprofile (St37, 25 mm x 25 mm x 3 mm) solange mit einer Scheibe getrennt, bis kein vollständiger Schnitt durch das Profil mehr möglich war (Durchmesser der Scheiben < 85,8 mm).

Das Ergebnis der Standzeittests verdeutlichte, dass die Standzeit der im Orgelpfeifenofen gehärteten Trennscheiben mit 75 Schnitten über den Werten in herkömmlichen Öfen gehärteter Scheiben (71 Schnitte) und höher als im Laborofen gehärteter Scheiben (70 Schnitte) lagen. Der Vergleich der aus den unterschiedlichen und Dornen Röhren stammenden Scheiben ergab, dass die mittlere Schnittanzahl ungefähr gleich (72 zu 71 Schnitte) war.

Somit bestehen keine Unterschiede zu den im herkömmlichen Prozess gehärteten Produkten. Sowohl bei den Standzeitvergleichen und den Schneidvergleichen als auch den Sprengwerten ließen sich keinen Beeinträchtigungen in der Qualität feststellen.

4. Fazit

Im Rahmen der Phase 1 des geförderten Entwicklungsprojektes der DBU konnte ein neuartiges Ofensystem der Härtung von phenolharzgebundenen Schleif- und Trennscheiben entwickelt werden. Dieser Temperierofen wird als Orgelpfeifenofen bezeichnet, da er aus mehreren Rohren besteht, die zur Aufnahme von übereinander angeordneten Brennstackeln ausgelegt sind. Die Brennstackeln wurden ebenfalls neu entwickelt und gestatten eine gegenseitige Abstützung und ein Beschweren ohne zusätzliche Gewichte. Bei der Entwicklung wurde besonderes Augenmerk auf Gewichtseinsparung und Leichtbau gelegt, um Wärmeverluste für die aufzuheizende sekundäre Masse des Ofens und der Brennhilfsmittel im Vergleich zum Stand der Technik deutlich zu reduzieren.

Zum Nachweis der erzielbaren Energieeinsparungen des Orgelpfeifenofens wurden Vergleichstests unter identischen Bedingungen mit einem Kammerofen des aktuellen Standes der Technik (Fabrikat Fa. Reinhardt) ohne und mit Beladung (Härtung von Schleifscheiben) durchgeführt. Dabei konnten **Energieeinsparungen von 56 %** nachgewiesen werden, die somit deutlich über den anspruchsvollen Zielen des Projektes bei Antragstellung lagen (50 %).

Würde die Firma DRONCO alle in der Produktion benötigten Öfen auf das neue Orgelpfeifenofensystem umrüsten, so ergibt eine Vergleichsrechnung für 20 Ofenbrände pro Tag und 300 Arbeitstage pro Jahr, eine theoretische Einsparung von ca. 1,46 Mio. kWh (inklusive Lüfter). Dies entspräche einer Reduzierung des CO₂-Ausstoßes von ca. 900 t pro Jahr (Annahme: Energie aus Strom; Multiplikator = 0,622 kg/kWh). Hierin sind weitere mögliche Einsparungen durch Brennzeitverkürzung, leichtere und effizientere Brennhilfsmittel sowie Energierückgewinnung durch Kopplung mehrerer Brennkammern noch nicht berücksichtigt.

Auch aus Sicht des Umwelt- und Klimaschutzes zeigt das Projekt somit einen bedeutenden Fortschritt in der Produktion von Schleif- und Trennscheiben auf. Durch die Reduzierung des Energieverbrauchs lässt sich sowohl der Ausstoß von CO₂ als auch die Menge an umweltgefährdenden Abgasen (z.B. Ammoniak, Phenole), die aufwändig aufbereitet werden müssen, deutlich reduzieren.

Aufgrund dieser hervorragenden Ergebnisse wurde die 2. Projektphase geplant und zur Förderung beantragt. Dazu wurden Konzepte entworfen, die es ermöglichen, mehrere Brennkammern miteinander zu verbinden. Durch Vernetzung der einzelnen Brennkammern soll sich die Restwärme einer Ofenkammer zum Vorheizen einer anderen Ofenkammer oder aber zur Heizung von Räumen verwenden lassen. Dieses Konzept bietet auch den Vorteil, dass die belastete Abluft zentral aufgenommen und gereinigt werden kann. Weiter ermöglicht dieses Konzept, die Herstellung der Trennscheiben für die Großproduktion zu

automatisieren und somit wirtschaftlicher zu gestalten. Das Projekt kann daher auch zu einem erheblichen Wettbewerbsvorteil der deutschen Schleifmittelindustrie führen, die unter einem starken Kostendruck aus Billiglohnländern steht.

Die Energieeinsparung und kostengünstigere Produktionsweise soll es so der Firma DRONCO AG in Zeiten der Globalisierung und damit verbundener Produktionsauslagerungen in Länder mit niedrigerem Lohnniveau ermöglichen, am Wirtschaftsstandort Deutschland qualitativ hochwertige Produkte wettbewerbsfähig zu produzieren sowie einen Beitrag zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes zu leisten.