

Abschlussbericht zum Projekt

Projekttitle:

„Energiereduzierung durch Optimierung und Einsatz neuer Prozessführender Komponenten an einer Erwärmungseinrichtung für Gesenkschmiedeteile“

Akz.: 26836-24/0

Gesenk- und Freiformschmiede
Ing. Stefan Kutsche

Otto-Kirchhof-Straße 5
09217 Burgstädt
Tel.: 03724/ 1865 11
Fax: 03724/ 1865 19

E-Mail: service@gesenkschmiede-kutsche.de
Internet: <http://www.gesenkschmiede-kutsche.de/>

1. Projektverlauf

Das bei der Deutsche Bundesstiftung Umwelt geförderte Projekt mit dem Titel „Energiereduzierung durch Optimierung und Einsatz neuer Prozessführender Komponenten an einer Erwärmungseinrichtung für Gesenkschmiedeteile“ wurde am 30.06.2010 erfolgreich abgeschlossen werden.

Die geplanten vier Arbeitspakete wurden erfüllt. Sie trugen durch die klare Strukturierung auch in Verbindung mit den kooperierenden Projektpartnern Westsächsische Hochschule Zwickau (FH) Professur Wärmetechnik, Firma Fbb Engineering Feuerfest- und Brennerbau GmbH, Firma METACON und Firma Bachmann zum positiven Ergebnis des Vorhabens bei.

Auf der Basis der in AP 1 erarbeiteten theoretischen Vorlagen wurde der Demonstrator untergliedert nach den Schwerpunkten

Ofen mit Brenner- und Brennkammer
Rekuperator
Fördersystem mit Teilezuführung und Entnahme

entwickelt.

Die theoretischen Grundlagen und Berechnungen dazu lieferte die Westsächsische Hochschule Zwickau (FH) Professur Wärmetechnik.

Die kompletten Konstruktionsunterlagen zum Demonstrator konnten im Meilenstein 1 termingerecht vorgelegt und verteidigt werden. Das betraf die Einzelkomponenten wie Brenner, Brennkammer, Rekuperator und Zuführung sowie die Unterlagen für das Gesamtsystem.

Bei der praktischen Umsetzung der theoretischen Vorgaben im Demonstrator während des zweiten Arbeitsschwerpunktes wurde festgestellt, dass Detaillösungen zum Rekuperator und der Zuführungseinrichtung nicht ohne fachliches Spezialwissen aus den entsprechenden Branchen realisiert werden konnten.

Dem Ziel folgend, ein qualitativ anspruchsvolles Projektergebnis zu erreichen hatte sich der Projektleiter daher entschlossen, einige der im Antrag geplante Eigenleistungen an in diesen Bereichen spezialisierten Fremdfirmen zu vergeben. Diese Entscheidung wurde aufgrund des im Vorhaben erarbeiteten Kenntnisstandes folgerichtig getroffen und zeitnah umgesetzt. Das Finden geeigneter Partner und deren Heranführung an die Problematik verzögerte das Projekt um 3 Monate. Die DBU stimmte einem entsprechenden Umwidmungsantrag zu.

Diese nicht vorhersehbare Entwicklung der zeitlichen Verzögerung des Vorhabens wurde durch ein qualitativ anspruchsvolles Vorhabensergebnis kompensiert. Dabei ist hervorzuheben, dass durch die kreative Mitarbeit besonders durch den Partner Firma Bachmann Lösungsansätze für den Demonstrator erarbeitet wurden, die neue Einsatzmöglichkeiten aufzeigten und die Basis für weitere Entwicklungsstufen z.B. eine nach Projektende durchzuführenden erfolgreichen Produktentwicklung darstellten.

Die Ergebnisse der gefertigten Einzelkomponenten für den Aufbau des Demonstrators konnten im Meilenstein 2 erfolgreich präsentiert werden.

Das Arbeitspaket 3 beinhaltete die Erprobung der Demonstratoranordnung im Zusammenspiel aller Einzelkomponenten.

Nach dem erfolgreichen Einzeltest der Komponenten wurde der Gesamtdemonstrator aufgebaut. Die Schwerpunkte bildeten dabei die Optimierung der Brennkammer, der Rekuperator und die Zuführungseinrichtung in Zusammenhang mit den Schnittstellen zu den Einzelkomponenten.

Die Führungseinrichtung für die Schmiedeteile im Rekuperator musste dabei so angepasst werden, dass mit vertretbarem zeitlichem Aufwand eine schnelle Anpassung auf geänderte Teilegeometrien erfolgen konnte. Weiterhin bestand eine große Herausforderung in der segmentübergreifenden Führung der Teile über die gesamte Rekuperatorlänge unter Gewährleistung geringster Tolleranzen an den Segmentschnittstellen unter extremen Temperaturbelastungen. Die drei Rekuperatorsegmente waren so anzupassen, dass geringste Verluste bei der Wärmeführung und eine extrem hohe Passgenauigkeit bei den Führungssegmenten erreicht werden konnte.

Die Zuführungseinrichtung realisiert in Verbindung mit ihrem Greifer die Teilezufuhr für den Rekuperator. Die Herausforderung bestand in der Erfassung der Schmiedeteile und positionsgenauen Ablage in den Rekuperator bei wechselnden Geometrien der Teile. Umgebungsbedingte Einflüsse wie Staub und hohe Temperaturen waren dabei zu berücksichtigen.

Die adaptive Steuerung der Zuführungseinrichtung in Zusammenhang mit der massenbezogenen Taktfrequenz ermöglicht die Optimierung der Ausnutzung der im Rekuperator bereitgestellten Wärmemenge. Unter Berücksichtigung der im Unternehmen verarbeiteten Schmiedeteilgeometrien wurde eine minimale Taktfrequenz von 30 Sekunden definiert.

Die im Arbeitspaket vorgesehenen Systemtests haben gezeigt, dass die Zuführungseinrichtung bisher nur eine Taktfrequenz von derzeit gemessenen 50 Sekunden realisieren kann.

Darüber hinaus wurde bei den Tests festgestellt, dass der Druckluft betriebene Greifer systembedingt nicht reproduzierbar die Teile mittig erfasst. Das hat zur Folge, dass die Einführung der vorzuwärmenden Schmiedeteile in den Rekuperator nicht zu jedem Zeitpunkt sichergestellt werden kann.

Im Arbeitspaket 4, der Validierung der Gesamtergebnisse auf der Basis der Testergebnisse aus Arbeitspaket 3 lag der besondere Schwerpunkt auf der Optimierung der Zuführungseinrichtung und des Greifers. Nach einer Überarbeitung des am Demonstrator erarbeiteten Lösungsvorschlages der Zuführung und des Greifers durch die Firma METAKON konnte bisher noch kein allseits befriedigendes Ergebnis erzielt werden. Die angestrebten minimalen Taktzeiten für Teile mit variierendem Durchmesser sind deshalb noch nicht erreichbar, was eine abschließende umfassende Betrachtung des Gesamtwirkungsgrades des Systems erschwert.

2. Ergebnisse

Im Projekt wurden die in Abbildung 1 farbige dargestellten Bereiche erfolgreich als Demonstrator aufgebaut. Das beinhaltet u.a.:

- Brenner mit Steuerung
- Schmeldeofen mit Brennkammer/ Arbeitsraum
- Anbindung des Arbeitsraumes mit dem Rekuperator
- Rekuperator mit Schmiedeteilführung zur prozessvorbereitenden Wärmenutzung
- Äußere Zuführungseinrichtung

Darüber hinaus wurden durch die Firma Haustechnik Bachmann Anwendungsszenarien des Rekuperators diskutiert und aufgezeigt, welche mit einer geringfügigen Modifizierung des aufgebauten Demonstrators weitere Anwendungsschnittstellen bedienen können. So z.B. für die Warmwasseraufbereitung, die Betriebsstättenheizung- und Kühlung, die Wärmespeicherung und Elektroenergiegewinnung.

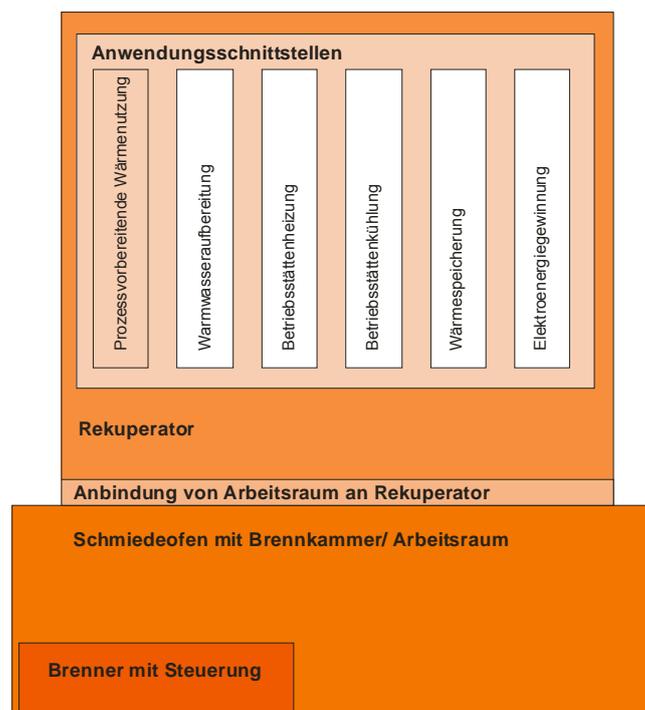


Abbildung 1: Prinzipsskizze der im Projekt zu entwickelnden Lösung. Die farbig hinterlegten Themenbereiche wurden im Demonstrator entwickelt und realisiert.

Das Zusammenspiel der Einzelkomponenten konnte in der Demonstratoranordnung weitestgehend nachgewiesen werden.

Wie bereits im Arbeitspaket 4 diskutiert, konnte bis Projektende leider keine endgültige befriedigende Lösung für den Teilgreifer und die Teilezuführung umgesetzt werden. Die bisher durchgeführten Tests an der installierten Lösung haben gezeigt, dass diese beiden Komponenten für den geplanten Einsatz überarbeitet werden müssen um die geforderte Taktzeit und Positioniergenauigkeit zu erreichen. Hauptprobleme sind dabei:

Greifer: Unter Beibehaltung der Flexibilität bei Aufnahme variierender Teilegeometrien, ist ein sicheres und reproduzierbares symmetrisches Erfassen der Schmiedeteile sicherzustellen.

Zuführung: In Abhängigkeit der Teilegeometrien sind zur Aufrechterhaltung des hohen Wirkungsgrades Gesamtsystems die Taktzeiten der Zuführung weiter zu erhöhen. Besonders bei kleineren Bauteilen ist die Zuführungszeit von derzeit erreichten 50 Sekunden auf 30 Sekunden zu verringern.

Anhand von durchgeführten Messreihen konnte der prognostizierte Wirkungsgrad für Brennkammer und Rekuperator nachgewiesen werden. Der Nachweis für das Gesamtsystem steht derzeit aufgrund der vorgenannten Probleme bei der Zuführung noch aus.

Patent

In Zusammenhang mit den während der Projektlaufzeit erfolgten Entwicklungsarbeiten am Demonstrator wurde durch die Firma Gesenk- und Freiformschmiede Kutsche am 13.10.2009 beim Deutschen Patent- und Markenamt ein Patent mit dem Titel: „Durchlaufofen für eine Hochtemperaturerwärmung einzelner metallischer Elemente oder eines metallischen Strangs“ eingereicht. Es wird derzeit unter dem Akz. 10 2009 049 678.5-24 geführt und liegt zur Veröffentlichung bereit.

Umweltpreis

In Zusammenhang mit dem erarbeiteten Lösungsvorschlag in dem durch die DBU geförderten Projektes, mit dem Titel „Energiereduzierung durch Optimierung und Einsatz neuer Prozessführender Komponenten an einer Erwärmungseinrichtung für Gesenkschmiedeteile“, wurde das Unternehmen Stefan Kutsche im August 2010 mit dem Umweltpreis der Handwerkskammer Chemnitz ausgezeichnet.

Demonstratoraufbau

Im Ergebnis des Projektes wurde ein Demonstrator aufgebaut, an dem das Zusammenspiel der Einzelkomponenten und die Wirksamkeit für die Wärmerückgewinnung nachgewiesen werden sollte. Die Abbildung 2 zeigt die Konstruktionsskizze der Brennkammer mit Schnittstelle zum Rekuperator. Sie Abbildungen 3 bis 6 zeigen den aufgebauten Demonstrator sowie Details zu Einzelkomponenten.

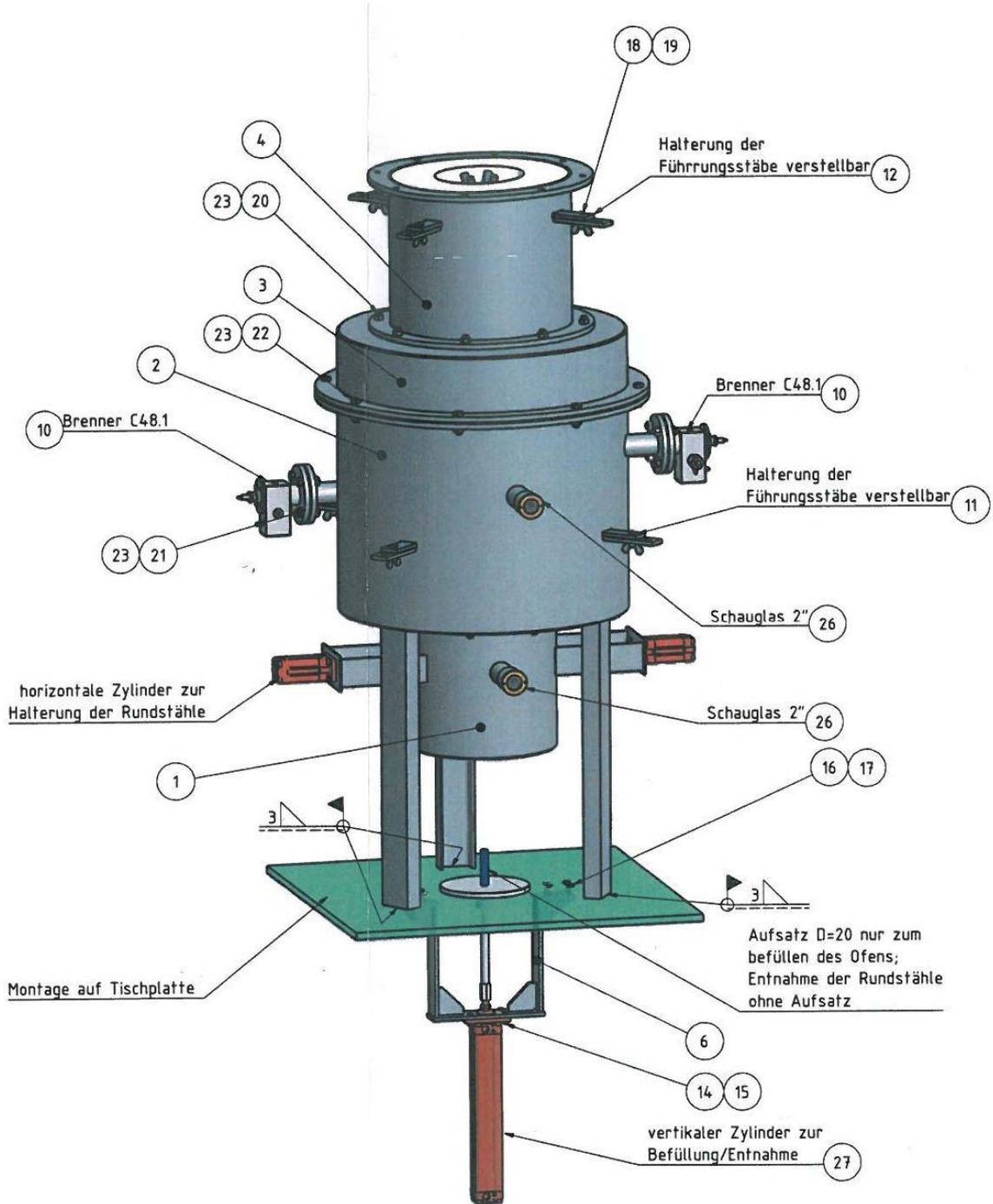


Abbildung 2: Konstruktionsskizze für Brennkammer, Befüllung/ Entnahmeeinrichtung und Schnittstelle zum Rekuperator



Abbildung 3: Schmiedeofen mit Brennkammer, Rekuperator und Teilezuführung

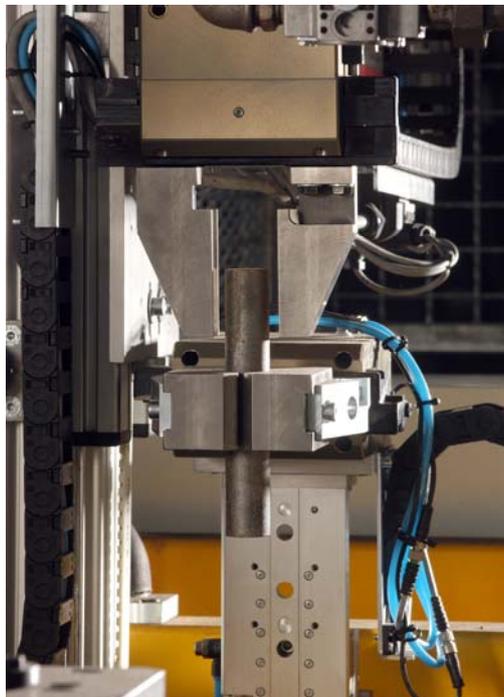


Abbildung 4: Greifeinrichtung zur Teileförderung



Abbildung 5: Transporteinrichtung der Schmiedeteilezuführung in den Rekuperator

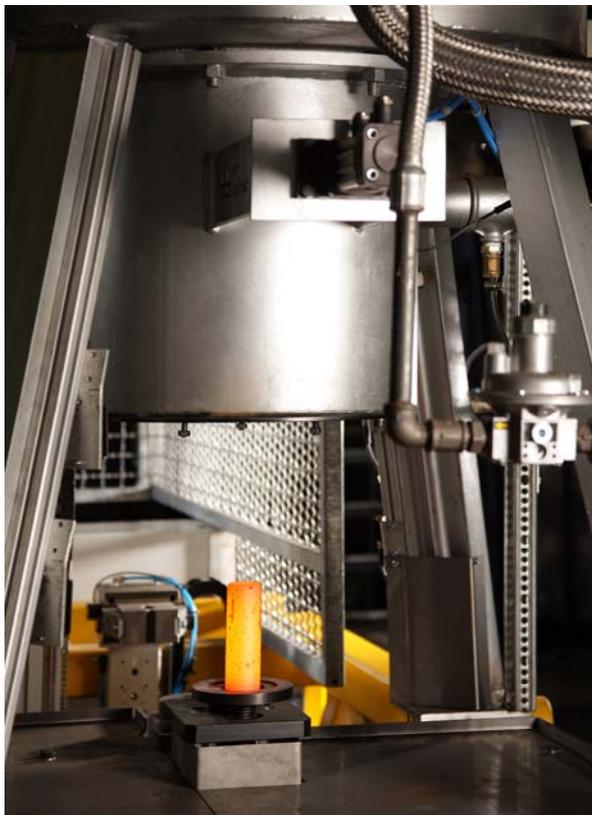


Abbildung 6: Erhitztes Schmiedeteil auf der Entnahmebühne nach dem Durchlauf von Rekuperator und Schmeldeofen

Messungen

Wie bereits in Kapitel 1 und 2 ausführlich dargestellt konnte aufgrund des nicht zufriedenstellenden Ergebnisses bei der Lösung der Teilezuführung incl. Greifer die durchgeführten Messungen nur ohne Berücksichtigung des Optimierungspotentials dieser Komponenten erfolgen.

Entsprechend konnten nur Messungen an den Hauptkomponenten des Demonstrators, der Brennkammer und dem Rekuperator durchgeführt werden. Die Zusammenfassung der durchgeführten Messreihen wurde in nachfolgenden Tabellen übersichtsweise dargestellt.

1. Abgasmessungen in der Mitte des Wärmetauschers

	Zeitpunkt t=20 min	Zeitpunkt t=45 min	Zeitpunkt t=1:30 h
Temperatur T_{Mitte}	123,9 °C	181 °C	309 °C
CO₂ - Gehalt	9,5 %	14,9 %	15,3 %
O₂ - Gehalt	1,0 %	0,7 %	0,7 %
qA - Abgaswärmestrom	5,4 %	6,2 %	10,9 %

2. Abgasmessung am oberen Austritt des Wärmetauschers

	Zeitpunkt t=1:30 h
Temperatur T_{Oben}	124,3 °C
CO₂ - Gehalt	14,8 %
O₂ - Gehalt	0,7 %
qA - Abgaswärmestrom	3,8 %

3. Messungen in der Brennkammer

- Außentemperatur in mittlerer Wärmetauscherhöhe: 28,6°C
- Temperatur im Inneren der Brennerbuchse nach 1:30 Stunden: 1175°C
(gemessen mit Strahlungspyrometer durch Herausnehmen des Brenners)
- Temperatur der Schmiedeteile nach dem Herausnehmen: 1145°C
(gemessen mit Strahlungspyrometer, $\Delta\tau \approx 25$ min)

Die nachstehende Abbildung 7 zeigt die Wärmeverteilung über der Anordnung. Dabei ist auf der linken Seite der Abbildung die schrittweise Erwärmung der Schmiedeteile dargestellt, rechts ist die Abnahme der abgegebenen Wärmemenge über die Segmente des Rekuperators zu erkennen. Am oberen Ende des Abschnittes 1 wird nach der Übertragung der Wärmeenergie auf das Schmiedeteil eine gemessene Wärme von 124,3 °C abgegeben (bei 1:30 Stunden Betriebszeit).

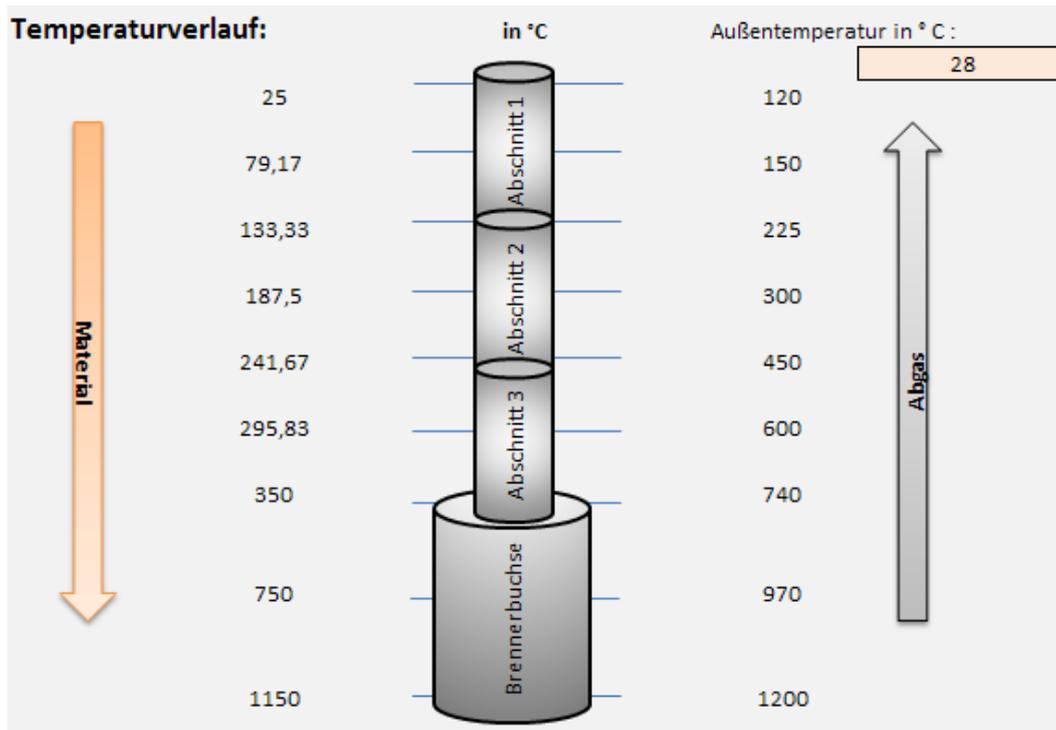


Abbildung 7: Gemessener Temperaturverlauf über die Anordnung des Demonstrators mit Brennkammer und Rekuperator, ohne Berücksichtigung der wärmetechnischen Optimierung durch die gesteuerte Teilezuführung.

3. Bewertung

- Anlass des Vorhabens

Derzeit erhitzen 5 Schmiedeöfen im Unternehmen Stahlteile auf eine Schmiedetemperatur von 1150°C. Im Jahr werden auf diese Weise in etwa 1400 t Stahl zu Gesenkschmiedeteilen verarbeitet. Die Wärmeenergie wird ausschließlich durch verbrennen von Heizöl gewonnen. Unsere Firma benötigt dafür im Jahr etwa 250.000l Heizöl für ca. 175.000 €.

Die bei der Erwärmung der Schmiedeteile entstehende Abwärme wird zurzeit ungenutzt in die Fertigungshalle abgegeben. Der Ölbrenner führt unabhängig von der Schmiedeteilgeometrie eine fixe Größe an Wärmeenergie dem Ofen zu, wobei das Schmiedeteil lokal unterschiedlich erwärmt wird.

Die Abbildungen 8 und 9 dokumentieren den bisherigen Stand im Unternehmen. Die zur Erwärmung der Teile genutzten Öfen besitzen derzeit noch keine Einrichtung zur Wärmerückgewinnung.



Abbildung 8/9: Derzeit im Unternehmen eingesetzte Schmiedeöfen ohne Wärmerückgewinnung.

- Beitrag zur Umweltentlastung

Ziel des Projektes war es, durch geeignete Maßnahmen den Ölverbrauch drastisch zu reduzieren, damit das Unternehmen wettbewerbsfähiger zu machen und einen eigenen Beitrag zum Umweltschutz zu leisten.

Dieses Ziel wurde erreicht durch eine Veränderung des eingesetzten Brenners, mit einem effizienteren Wärmeübergang zwischen Flamme und Schmiedeteil. In Verbindung damit durch die Optimierung der Wärmeströmung in der Brennkammer und der strömungsinduzierten Abwärmenutzung im Ofen konnte eine bessere Energieausnutzung erreicht werden. Durch die Möglichkeit der adaptiven Anpassung des Brenners auf unterschiedliche Schmiedeteilgeometrien und durch eine bedarfsgerechte elektronische Steuerung der Teilezuführung in Abhängigkeit der Schmiedeteilgeometrie konnte sichergestellt werden, dass bei Wechsel der zu fertigenden Serie immer die optimale Wärmeenergieausnutzung im System erhalten bleibt. Der dadurch prognostizierte Gesamtwirkungsgrad der Anlage von ca. 70% – 90% an Primärenergie konnte durch Messungen mit einem Wert von 89,4% belegt werden.

Die Differenz von 20% Wirkungsgrad im Ergebnis der Untersuchung resultiert aus der nutzungsbedingten Betrachtungsweise. Der untere Wert bezieht sich dabei auf einen Wirkungsgrad unter Berücksichtigung der Aufwärmzeit des Ofens bei Arbeitsbeginn, während der obere Wert bei kontinuierlicher Arbeitsweise der Anlage, ohne Betrachtung des Aufwärmvorganges von dem Temperaturniveau der Umgebungstemperatur erreicht wird.

Mit dem derzeit nachgewiesenen Wirkungsgrad an der Demonstratoranlage wird bei der Umsetzung des Lösungsvorschlages an allen Öfen des Unternehmens der nachfolgende Effekt erreicht:

Erhöhung des Wirkungsgrades von:	14%	auf:	89,4%
Reduzierung des Heizölbedarfs von:	250.000 l/ Jahr	auf:	35.952 l/ Jahr
Verringerung der CO ₂ Emissionen von:	675 t/ Jahr	auf:	97 t/ Jahr

Vergleich der prognostizierten Werte vor Projektbeginn zu derzeit am Demonstrator gemessenen Werten (ohne Berücksichtigung der Zuführungseinrichtung)

Unter Bezugnahme auf alle Schmiedeöfen im Unternehmen wurde im Projektantrag bezogen auf den derzeitigen Heizölverbrauch in der Abbildung 10 dargestellte Prognose fixiert. Dabei ist der rote Balken unter 1 der Ausgangswert ohne zusätzliche Maßnahmen. Unter 2 wurde der prognostizierte Wert im Projektantrag angegeben, welcher mit der Umsetzung der Projektidee erreicht werden sollte. Der unter 3 dargestellte Wert bezieht sich auf das nach Abschluss des Projektes am Demonstrator messtechnisch nachgewiesene Ergebnis. Dabei ist anzumerken, dass aufgrund der Probleme mit der Zuführungseinrichtung nur der Brenner und Rekuperator in der Messung Berücksichtigung fanden. Weiteres Einsparpotential ist deshalb bei optimaler Funktion dieser Komponente noch zu erwarten.

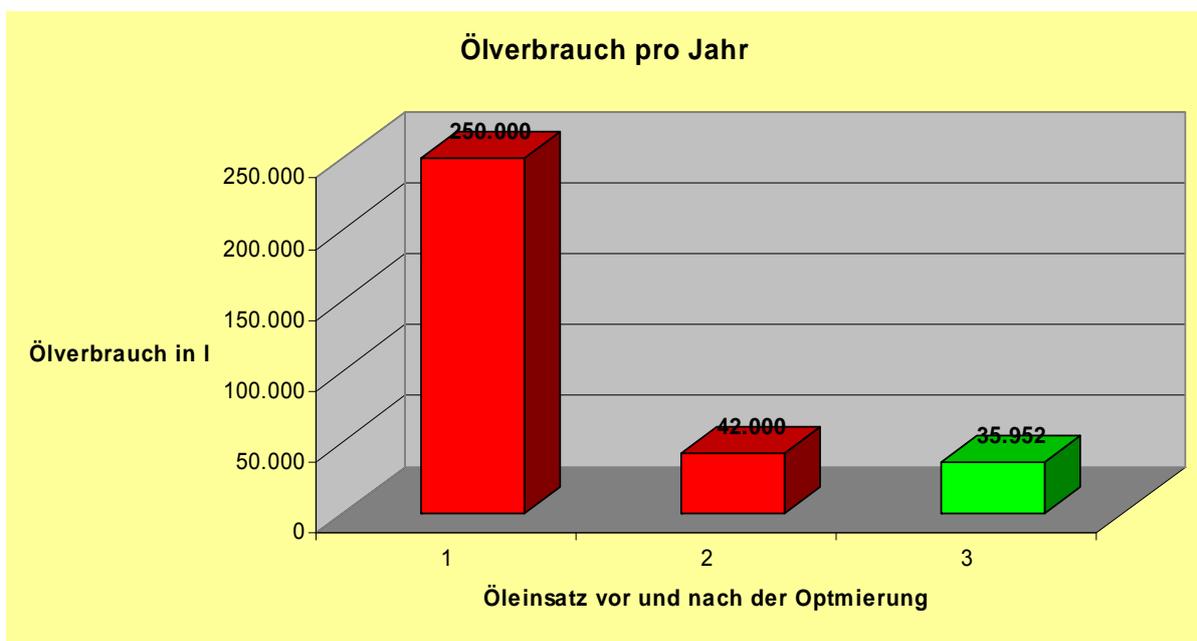


Abbildung 10: Gesamtölverbrauch des Unternehmens; 1- Ausgangswert ohne Wärmerückgewinnung, 2- im Projektantrag prognostizierter Wert, 3- zu Projektende am Demonstrator gemessener Wert (ohne Berücksichtigung der Zuführungseinrichtung)

Bezogen auf die Ausgangswerte des CO₂ Ausstoßes bedeutet das eine Reduzierung der Werte wie in Abbildung 11 angegeben. Auch hier sind die Werte auf das Gesamtunternehmen bezogen. 1- der Ausgangswert ohne zusätzliche Maßnahme, 2- der im Projektantrag prognostizierte Wert, 3- der messtechnisch nachgewiesene Wert (ohne Berücksichtigung der Zuführungseinrichtung)

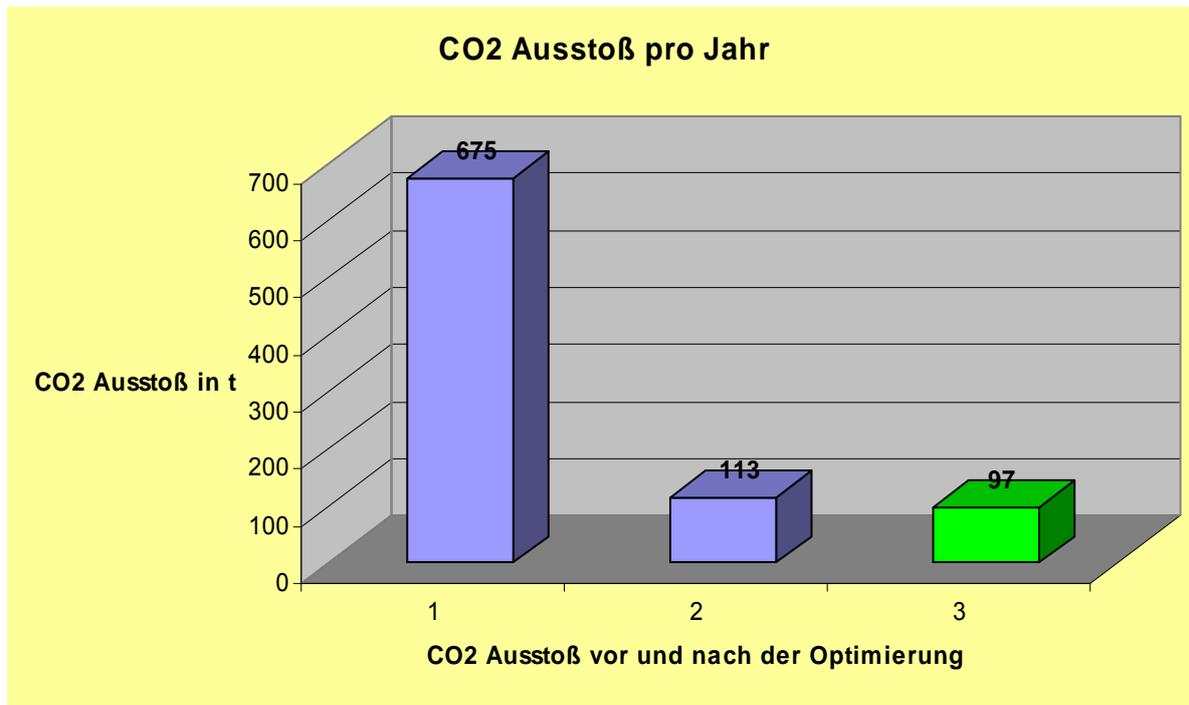


Abbildung 11: Gesamt-CO₂ - Ausstoß des Unternehmens; 1- Ausgangswert ohne Wärmerückgewinnung, 2- im Projektantrag prognostizierter Wert, 3- zu Projektende am Demonstrator gemessener Wert (ohne Berücksichtigung der Zuführungseinrichtung)

Der im Projektantrag prognostizierte 5-Jahres Vergleich für den Heizölverbrauch und die CO₂ Emission würde sich unter Beibehaltung der Ausgangswerte vom Projektantrag (jährliche Produktionssteigerung von 4%) nach den Ergebnissen wie in Abbildung 12 und 13 skizziert darstellen. Auch hier unter Zugrundelegung der gleichen Messbedingungen wie vor beschrieben und unter Ausblendung des Optimierungspotentials für die Teilezuführung. Reihe 1- Entwicklung ohne Wärmerückgewinnung, Reihe 2- im Projektantrag prognostizierter Wert, Reihe 3- am Demonstrator gemessener Wert (ohne Berücksichtigung der Zuführungseinrichtung)

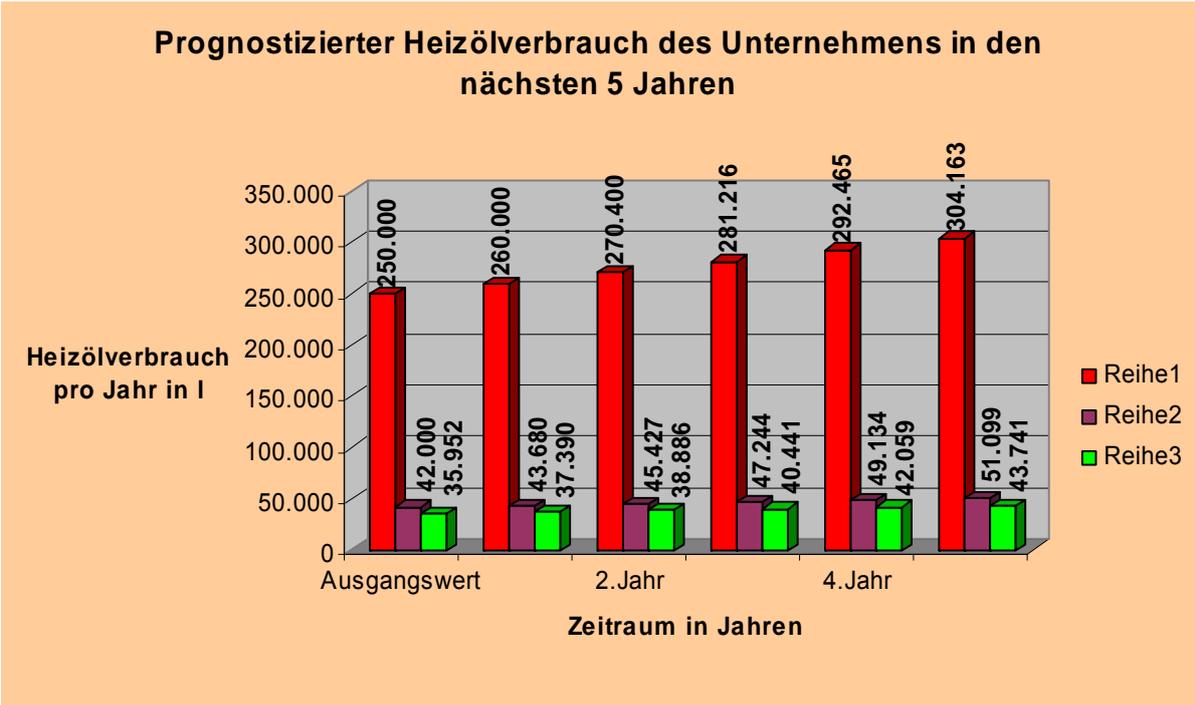


Abbildung 12: Entwicklung des Gesamtölverbrauches des Unternehmens; 1- Ausgangswert ohne Wärmerückgewinnung, 2- im Projektantrag prognostizierter Wert, 3- zu Projektende am Demonstrator gemessener Wert (ohne Berücksichtigung der Zuführungseinrichtung)

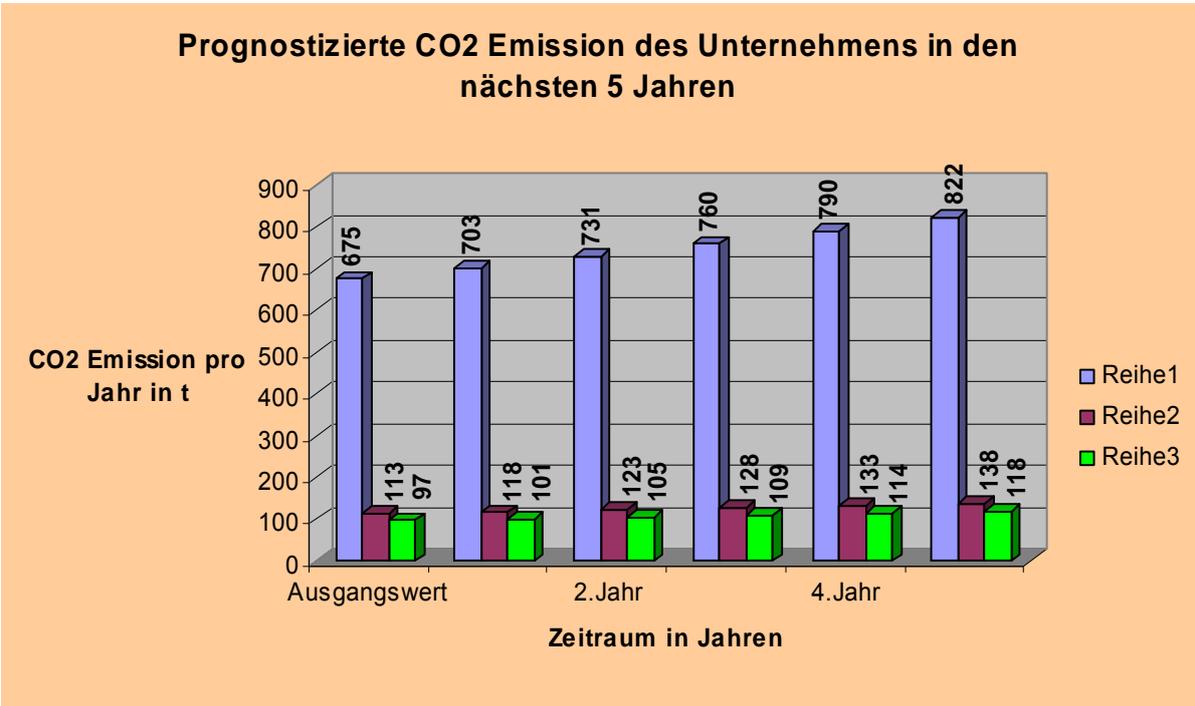


Abbildung 13: Entwicklung des Gesamt-CO₂ - Ausstoßes des Unternehmens; 1- Ausgangswert ohne Wärmerückgewinnung, 2- im Projektantrag prognostizierter Wert, 3- zu Projektende am Demonstrator gemessener Wert (ohne Berücksichtigung der Zuführungseinrichtung)

- Modellcharakter des vorgeschlagenen Lösungsweges

Der Modellcharakter des vorgeschlagenen Lösungsweges konnte aufgrund des aufgebauten und getesteten Demonstrators erfolgreich bestätigt werden. Mit der Erarbeitung weiterer Anwendungsschnitt-

stellen konnte gezeigt werden, dass auf der Basis der erarbeiteten Lösung neues Anwendungs- und damit Marktpotential vorhanden ist.

Auf der Basis der gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse am Demonstrator erfolgt in der bereits begonnenen Langzeittestphase die Erarbeitung einer Fertigungslösung, die im eigenen Unternehmen umgesetzt und Interessenten der Branche angeboten werden soll.

- Innovativer Charakter des Projektes

Die Innovation des Projektes liegt in der Umsetzung des synergischen Zusammenspiels von Brenner, Wärmeleitung in der Brennkammer und Abwärmerückgewinnung durch Vorwärmung sowie der bedarfsgerechten Zuführung von Schmiedeteilen in Schmiedeöfen kleinerer und mittlerer Größe. Mit der adaptiven Flammanpassung des Brenners sowie durch die bedarfsgerechte Steuerung der Zuführung bei wechselnden Schmiedeteilgeometrien wird sichergestellt, dass zu jedem Zeitpunkt eine optimale Ressourcennutzung gewährleistet wird.

Die im Projekt erarbeitete Lösung ist zum Patent angemeldet worden und wird unter dem Akz. 10 2009 049 678.5-24 geführt.

- Maßnahmen zur Lösung des Umweltproblems

Durch die Intensivierung der Arbeiten am Demonstrator, dem messtechnischen Nachweis und der nach Projektende bereits begonnenen Optimierung der Anlage, soll durch Erreichen der Fertigungsreife die Umweltwirksamkeit möglichst schnell erreicht werden. Die am Demonstrator nachgewiesenen Ergebnisse werden auf alle Öfen des Unternehmens angewendet. Mit dem Angebot an kleine und mittlere Unternehmen der Branche diese Lösung nachzunutzen, wird eine Multiplikation des Effektes und die weite Einsparung von wertvollen Umweltressourcen erreicht.

4. Ausblick und Weiterführung nach Projektende

Die während der Projektlaufzeit erarbeiteten theoretischen und praktischen Ergebnisse werden in einer nachfolgenden Produktentwicklung umgesetzt.

Die Anlagen sollen nicht nur im eigenen Unternehmen sondern vor allem für den Einsatz in anderen Unternehmen mit ähnlichen technologischen Abläufen eingesetzt werden. Dazu ist in der Folge ein Entwicklungs- und Fertigungsverbund aufzubauen, da die einzelnen Komponenten mit jeweils auf ihrem Gebiet führenden Unternehmen entwickelt und zum Gesamtsystem gefügt werden müssen. Es sind weiterhin Reparatur- und Wartungsstrategien zu entwickeln, um einen stetigen reibungslosen Einsatz bei den Kunden zu sichern. Die Marktchancen für diese Anlagen sind als gut einzuschätzen. Weitere Untersuchungen zu arbeitsteiligen Prozessen, Potenzen, Absatzmärkten, Vermarktungsstrategien, usw. sind in einem noch folgenden Projekt durchzuführen.

Dazu sollen in einem bereits begonnenen Langzeittest von 6 Monaten am erarbeiteten Demonstrator mögliche Schwachstellen aufgezeigt werden, welche während eines Fertigungseinsatzes auftreten könnten und bei der Entwicklung des Serienproduktes berücksichtigt bzw. verändert werden müssen.

Die bisher erkannten Probleme bei Greifer und Teilezuführung sind zu beheben und einer fertigungsgerechten Lösung zuzuführen.

Weiteres Optimierungspotential besteht in der Reduzierung der Rekuperatorhöhe in einer fertigungsreifen Lösung. In Abhängigkeit der anfallenden Wärmemenge, der Werkstückgeometrien und der minimal erreichbaren Zuführungszeiten durch die Transporteinrichtung kann die Länge des Rekuperators von derzeit etwa 7 Metern Höhe ggf. weiter reduziert werden.