

Wärmerückgewinnung mit Hochtemperaturwärmepumpe in der Keramikindustrie

Veronika Wilk¹, Sabrina Dusek¹, Christian Diendorfer¹

⁽¹⁾AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Giefinggasse 2, 1210 Wien, +43 664 6207794, veronika.wilk@ait.ac.at, www.ait.ac.at

Kurzfassung:

Im Jahr 2019 betrug der Gesamtendenergiebedarf des produzierenden Bereichs rund 87 TWh. Dies entspricht 27% des österreichischen Gesamtendenergieverbrauch. Der Sektor Steine, Erden und Glas gehörte im Jahr 2019 zu den vier Sektoren mit dem größten Anteil am österreichischen Gesamtendenergieverbrauches des produzierenden Bereichs. [1] In der Keramikindustrie, die diesem Sektor zugeordnet ist, wird ein signifikanter Teil der Energie für Trocknungsprozesse eingesetzt, wobei bei diesen Prozessen auch eine große Menge an Abwärme anfällt. Diese Abwärme bleibt oftmals auf Grund des geringen Temperaturniveaus ungenutzt. In diesem Beitrag werden vier unterschiedliche aktive und passive Wärmerückgewinnungsmaßnahmen für Sprühtrockner, die aus verschiedenen Kombinationen von Wärmeübertragern und Wärmepumpen bestehen, untersucht und hinsichtlich des Energie- und CO₂-Einsparungspotential bewertet. Die Maßnahmen erzielen Endenergieeinsparungen von bis zu 28%, was einer Emissionsreduktion von 509 t/a entspricht. Die Amortisationszeiten der untersuchten Maßnahmen liegen zwischen 2 und 6 Jahren und haben daher ein hohes Umsetzungspotential. Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit werden auch steigende CO₂ Preise berücksichtigt. Bei einem CO₂ Preis von 110 €/t können die laufenden Energiekosten durch den Einsatz einer Wärmepumpe um bis zu 120 000 €/a verringert werden. Damit leisten die untersuchten Wärmerückgewinnungsmaßnahmen einen signifikanten Beitrag zur Betriebskostensenkung und zur Dekarbonisierung von Sprühtrocknern.

Keywords: Wärmerückgewinnung, Trocknung, Wärmepumpe, Energieeinsparung

1 Motivation

Um die internationalen Klimaziele zu erreichen, ist eine drastische Reduktion des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen sowie die Umstellung auf eine erneuerbare Energieversorgung erforderlich. Die Dekarbonisierung industrieller Prozesse leistet dabei einen wesentlichen Beitrag. Eine Studie der IEA [2] zeigt die erforderlichen Maßnahmen und technologische Umbrüche auf: Energieeffizienz (Verringerung des Bedarfs, Verbesserung der Performance), Elektrifizierung, Einsatz von Wasserstoff, Bioenergie und anderen Erneuerbaren, sowie die Abscheidung, Nutzung und Speicherung von CO₂ (CCUS). In den nächsten zwei Jahrzehnten werden Energieeffizienzmaßnahmen und der Einsatz erneuerbare

Energien zusammen etwa 70 % der erforderliche CO₂-Emissionseinsparungen leisten können. [2]

Eine aktuelle Studie zeigt, wie die österreichische Industrie zukünftig mit 100% erneuerbarer Energie versorgt werden kann. Dabei werden unterschiedliche Maßnahmen, wie Prozesseffizienzsteigerung, Brennstoffwechsel auf Erneuerbare, Elektrifizierung von Motoren, Wärmepumpen, und die Direktreduktion mit Wasserstoff in der Eisen- und Stahlindustrie in verschiedenen Szenarien untersucht. Dabei zeigt sich, dass zunehmend mehr elektrische Energie zur Versorgung der Industrie eingesetzt wird. Eine wesentliche Rolle kommt dabei Industriewärmepumpen zu, es handelt sich dabei nicht nur um die Bereitstellung von Niedertemperaturwärme mit konventionellen Wärmepumpen, sondern auch um Hochtemperatur-Wärmepumpen, die zur Dampferzeugung und für Industrieöfen, wie zum Beispiel industrielle Trocknungsprozesse, eingesetzt werden. [3]

In diesem Beitrag werden Effizienzpotentiale für Trocknungsprozesse in der keramischen Industrie untersucht. Die keramische Industrie wird dem Sektor Steine, Erden und Glas zugeordnet, der zu den vier Sektoren mit dem größten Anteil am österreichischen Gesamtendenergieverbrauch des produzierenden Bereichs gehört. Abbildung 1 zeigt den typischen Ablauf der Herstellung von keramischen Produkten:

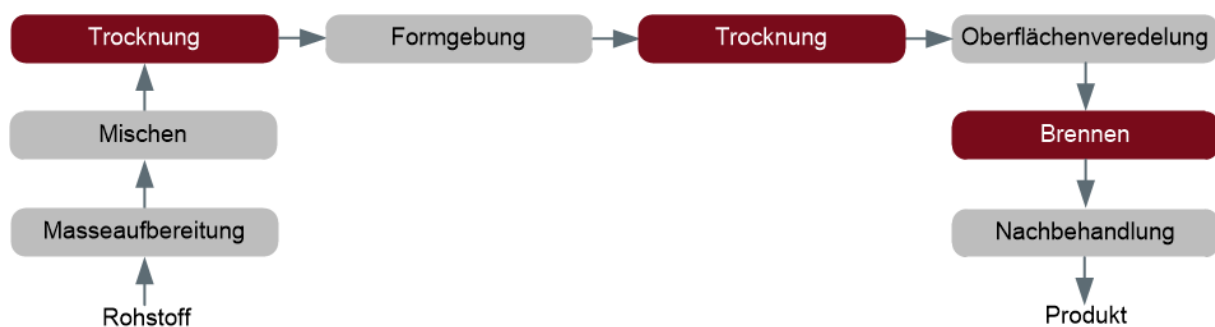


Abbildung 1: Prozessablaufbeispiel für die Herstellung von keramischen Produkten

Thermische Energie wird bei der Trocknung und beim Brennen der Produkte eingesetzt. Bei der Trocknung fällt auch eine große Menge an Abwärme an, oftmals auf Grund des geringen Temperaturniveaus ungenutzt bleibt. In diesem Beitrag werden daher verschiedene Wärmerückgewinnungsmaßnahmen für die Abwärme von Sprühtrocknern untersucht und hinsichtlich des Energieeinsparungspotentials bewertet werden.

2 Methode

Der Sprühtrocknungsprozess, sowie die Integration von Wärmetauschern und Wärmepumpen wurden mit der Simulationssoftware IPSEpro (Integrated Process Simulation Environment) untersucht, die für Prozesssimulationen im Bereich der Kraftwerks- und Energietechnik entwickelt wurde. Es ist ein gleichungsorientiertes Simulationsprogramm für stationäre Fließprozesse. [4]

Der Prozess wird gemäß dem apparatetechnischen Aufbau als Fließbild in IPSEpro abgebildet. Die einzelnen Komponenten (Gasbrenner, Wärmetauscher, Trockner, etc.) sind

durch stoff- und energieführende Leitungen miteinander verbunden. Die Prozesskomponenten werden entsprechend den Erhaltungssätzen für Masse und Energie bilanziert und können entweder der Modellbibliothek der Simulationssoftware entnommen oder selbst angelegt werden. Hier wurden eigens entwickelte Modelle für den Trockner und die Wärmepumpe eingesetzt.

Für die Simulation wurden Prozessdaten basierend auf Herstellerangaben für Sprühtrocknungsanlagen für die keramische Industrie herangezogen. [5] Ausgehend von der Massen- und Energiebilanz des bestehenden Sprühtrockners wurden verschiedene Wärmerückgewinnungsmaßnahmen simuliert und die Auswirkungen auf den Gesamtprozess berechnet. Für die Untersuchungen wird ein vereinfachtes Wärmepumpenmodell basierend auf den Prozesstemperaturen, Carnoteffizienz und einem zu definierenden Gütegrad eingesetzt. Im vereinfachten Modell sind keine detaillierten Informationen zum Aufbau der Wärmepumpe enthalten (z.B. Auswahl des Kältemittels oder Verdichters), es kann in einem beliebigen Temperaturbereich zur Potentialabschätzung eingesetzt und durch die Wahl des Gütegrades an reale Gegebenheiten angepasst werden.

3 Sprühtrocknung für keramische Pulver

Bei der Sprühtrocknung (Abbildung 2) wird der Rohstoff in einer flüssigen Suspension in den Trockner gepumpt und zerstäubt. Die Trocknungsluft wird mit einem Gasbrenner erhitzt und radial in den Trocknungsturm eingebracht, dabei entsteht eine rotierende Strömung, in der die Partikel getrocknet werden. Die getrockneten Partikel fallen zu Boden und werden dort abgezogen. Die feuchte Abluft der Trocknung wird mit Zyklonen und Filtern entstaubt und an die Umgebung abgegeben.

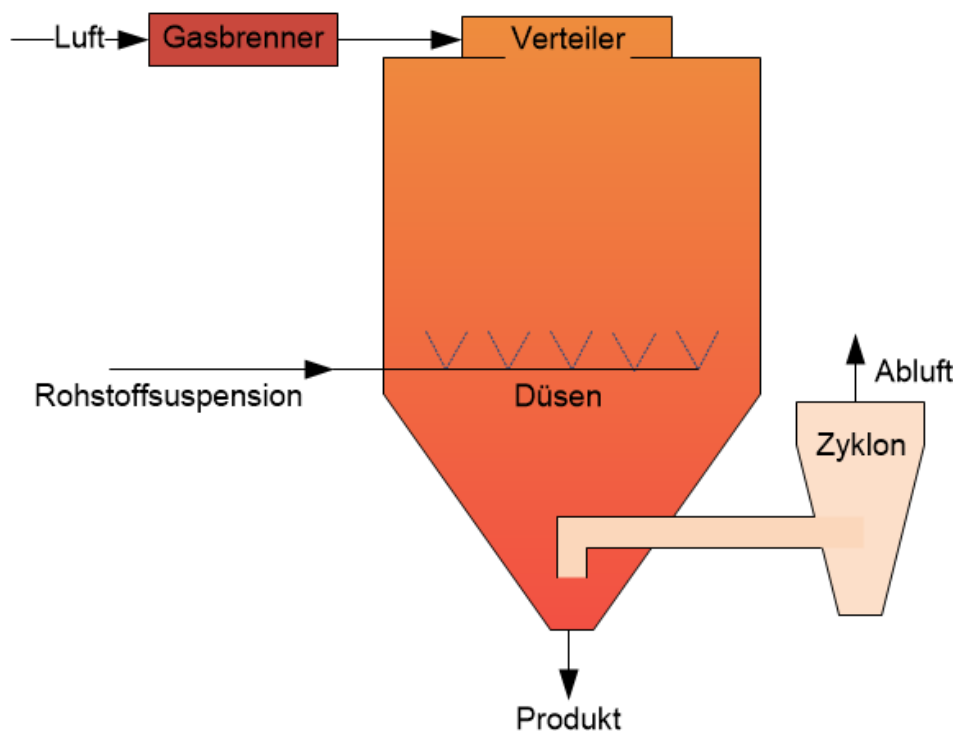


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Sprühtrockners

Für die Simulation des Sprühtrockners werden folgende Randbedingungen herangezogen:

- Trocknungsluft am Eintritt in den Brenner: 20°C, 21% O₂, 78% N₂, 0,0407% CO₂, 0,9593 % Argon
- Erdgas: 10°C, 100% Methan
- Rohstoff: 2,7 t/h, 40% Wasser, 60% Ton
- Abluft: 110°C
- Spezifischer Wärmebedarf des Trockners = 0,9 kWh/l verdampftes Wasser
- Verdampfungsleistung: 1000 l/h

Die Massen- und Energiebilanz ergibt, dass 6,7 t/h feuchte Abluft produziert wird, die 17,5% relative Feuchte enthält, was einer Taupunkttemperatur von 65°C entspricht.

Abbildung 3 zeigt die Summe der heißen und kalten Ströme bei der Sprühtrocknung. Der warme Strom ist die feuchte Abluft, die die Anlage mit 110°C verlässt und die Feuchte des Produktes enthält. Der Taupunkt liegt bei 65°C, was gut an der Veränderung der Steigung im T,Q Diagramm (Abbildung 3) erkennbar ist. Die kalten Ströme sind die Trocknungsluft, die mit 20°C angesaugt wird, sowie der Rohstoff, im Wesentlichen eine Mischung aus Wasser und Ton, die mit 70°C aus den vorgelagerten Prozessteilen kommt. Der überwiegende Teil der Wärme wird im Sprühtrockner für das Verdampfen des Wassers benötigt (konstanter Abschnitt der kalten Summenkurve bei 100°C). Die Integration von Wärmeübertragern trägt auf Grund der benötigten Temperaturen nur einen kleinen Teil zur Wärmerückgewinnung bei, dabei kann die Trocknungsluft oder der Rohstoff erwärmt werden. Das größte Abwärmepotential ist die Kondensation der Feuchte in der Abluft bei <65°C, das mit einer Wärmepumpe nutzbar gemacht werden kann.

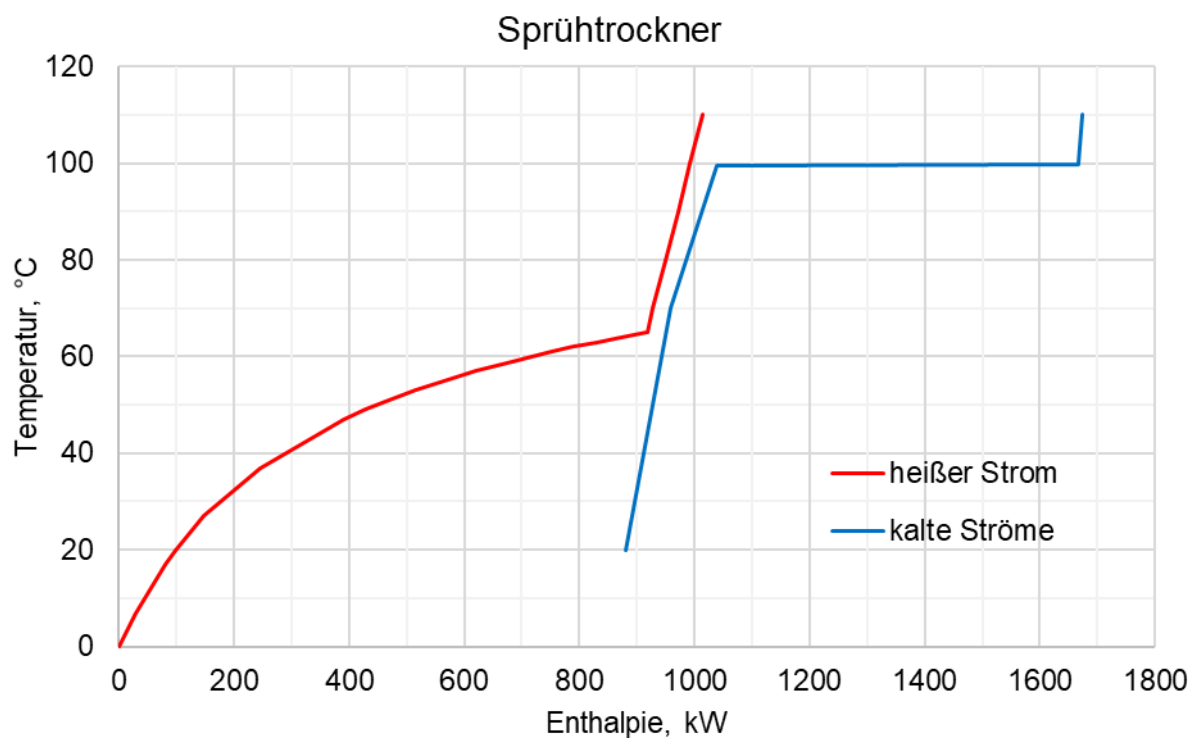


Abbildung 3: T, Q Diagramm des Sprühtrockners (heißer Strom = feuchte Abluft, kalte Ströme = Trocknungsluft und Rohstoffsuspension)

4 Wärmerückgewinnungsmaßnahmen

Es werden im Folgenden vier verschiedenen Wärmerückgewinnungsmaßnahmen untersucht:

- Vorwärmung der Trocknungsluft
- Vorwärmung des Rohstoffes
- Vorwärmung des Rohstoffes mittels Wärmeübertrager und Wärmepumpe
- Vorwärmung des Rohstoffes und der Trocknungsluft mittels Wärmeübertrager und Wärmepumpe

4.1 Vorwärmung der Trocknungsluft

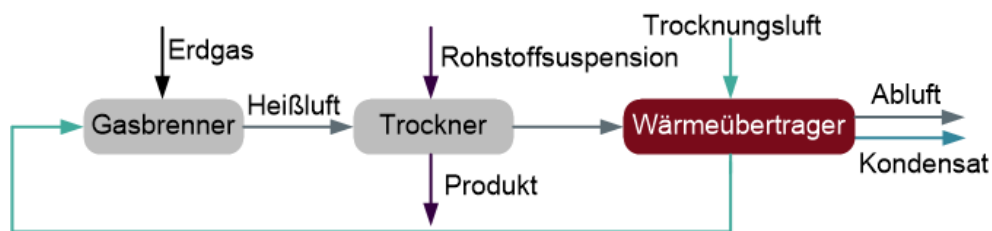


Abbildung 4: Maßnahme zur Vorwärmung der Trocknungsluft mit Wärmeübertrager

In der ersten betrachteten Wärmerückgewinnungsmaßnahme wird die feuchte Abluft mittels Wärmeübertrager, wie in Abbildung 4 dargestellt ist, zur Vorwärmung der Trocknungsluft auf 100°C genutzt. Die Abluft wird dabei auf 64°C abgekühlt, es kommt zur partiellen Kondensation (42 kg/h Kondensat) und es werden 126 kW an die Trocknungsluft übertragen. Damit wird der Endenergieeinsatz des Trockners um 14% verringert.

4.2 Vorwärmung des Rohstoffes

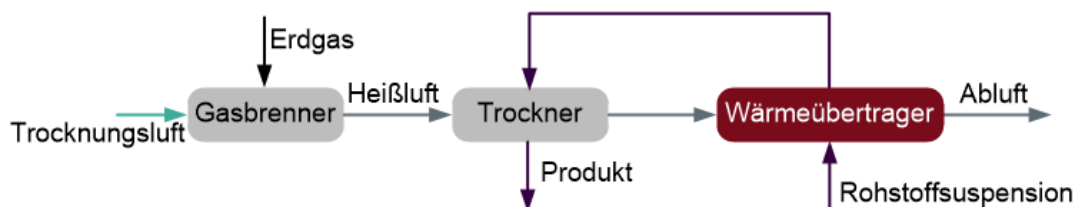


Abbildung 5: Maßnahme zur Vorwärmung des Rohstoffes mit Wärmeübertrager

In einer weiteren untersuchten Wärmerückgewinnungsmaßnahme wird der Rohstoff mit der Abluft mittels Wärmeübertrager (siehe Abbildung 5) bis ca. 100°C vorgewärmt wobei kein Wasser aus dem Rohstoff verdunstet. Bei dieser Maßnahme werden 35 kW eingespart, das entspricht 6,7 % Endenergieeinsparung. In der Abluft kommt es auf Grund der hohen Eintrittstemperatur des Rohstoffes noch nicht zur Kondensation, die Abluft hat eine Temperatur von 93°C, die weiter genutzt werden kann.

4.3 Wärmetauscher und Wärmepumpe für den Rohstoff

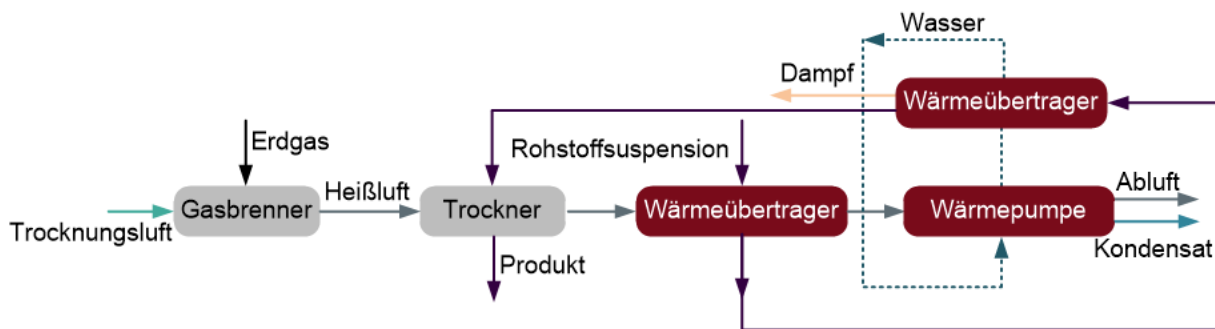


Abbildung 6: Maßnahme zur Vorwärmung des Rohstoffes mit Wärmeübertrager und Wärmepumpe

Nun wird eine Wärmepumpe integriert, die die feuchte Abluft nach der Vorwärmung des Rohstoffes als Quelle nutzt (siehe Abbildung 6). Dabei kommt es zur Kondensation in der Abluft. Die Wärmepumpe liefert heißes Wasser mit 115°C, mit dem der Rohstoff weiter erwärmt wird, sodass das Wasser im Rohstoff verdampft und auf das zulässige Minimum von 30% Wassergehalt vor der Trocknung absenkt wird. Dabei werden 137 kW rückgewonnen. Durch die Wärmerückgewinnung wird weniger Trocknungsluft benötigt (4,06 t/h), dadurch steigt auch der Taupunkt auf 69,8°C. Die Wärmepumpe hat einen COP von 2,88 und eine Heizleistung von 160 kW. Der Gütegrad wird mit 0,45 festgelegt. Mit Berücksichtigung des Strombedarfs der Wärmepumpe von 54 kW, wird der Endenergiebedarf der Trocknung um 21,7% verringert.

4.4 Wärmetauscher und Wärmepumpe für den Rohstoff und die Trocknungsluft

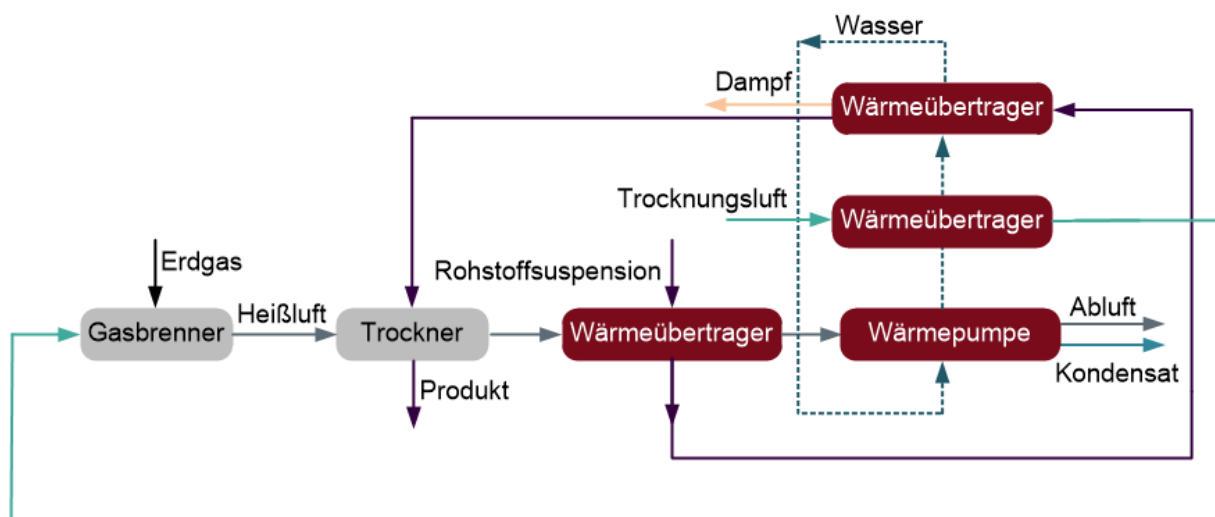


Abbildung 7: Maßnahme zur Vorwärmung des Rohstoffes und der Trocknungsluft mit Wärmeübertrager und Wärmepumpe erste Anordnung

In der in Abbildung 7 dargestellten Wärmerückgewinnungsmaßnahme wird die Wärmepumpe nicht nur zur Verdampfung des Wassers im Rohstoff, sondern auch zur Vorwärmung der Trocknungsluft genutzt. Die Wärmepumpe liefert 120°C heißes Wasser, mit dem Luft auf 110°C vorgewärmt wird. Danach wird der Rohstoff erwärmt. Damit können 194,9 kW

rückgewonnen werden und die Abluft hat nur mehr 66°C. Die Wärmepumpe weist bei einem Gütegrad von 0,45 einen COP von 2,62 und eine Heizleistung von 259 kW auf. Die Endenergieeinsparung beträgt 28,1%.

Verändert man die Anordnung der Wärmetauscher (siehe Abbildung 8) auf der Wärmenutzungsseite der Wärmepumpe und wärmt zunächst den Rohstoff vor, kann die Wärmenutzungstemperatur mit 115°C geringer ausfallen. Der Betrieb der Wärmepumpe wird effizienter. Die Endenergieeinsparung nimmt geringfügig ab und beträgt 27,8%.

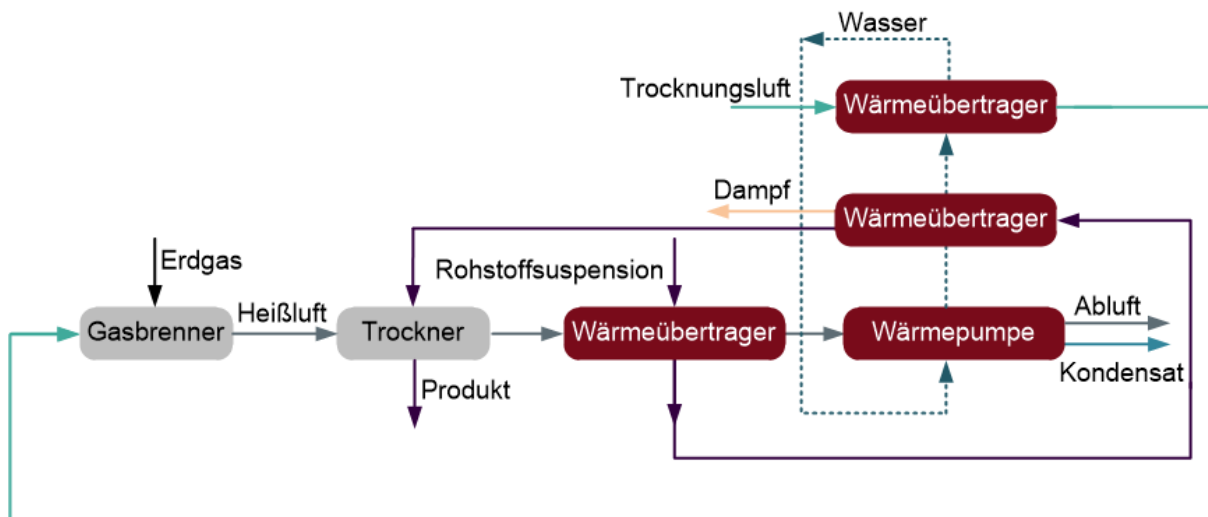


Abbildung 8: Maßnahme zur Vorwärmung des Rohstoffes und der Trocknungsluft mit Wärmeübertrager und Wärmepumpe erste Anordnung

5 Techno-ökonomische Bewertung der Maßnahmen

Um die Wirkung der Maßnahmen zu beurteilen, werden die CO₂ Emissionen, die laufenden Energiekosten, sowie die Investitionskosten und Amortisationszeit berechnet. Als Vergleich dient der Status Quo, der Sprühtrockner ohne Wärmerückgewinnung. Die jährlichen Betriebsstunden belaufen sich auf 7300 h/a.

5.1 CO_{2eq} Emissionen

Derzeit werden bei der Nutzung von elektrischer Energie in Österreich 258 g/kWh CO_{2eq} emittiert, bei der Nutzung von Erdgas 271 g/kWh. [6] Die österreichische Stromerzeugung hat bereits einen sehr hohen Anteil an erneuerbaren Energieträgern, welcher im Jahr 2018 75 % betrug und überwiegend durch Wasserkraft (60 % der Bruttostromerzeugung) bereitgestellt wurde. [7] Für die Zukunft sind die Ziele für die erneuerbare Energieversorgung noch ambitionierter. In der aktuellen Klima- und Energiestrategie hat sich Österreich das Ziel gesetzt, im Jahr 2030 100 % des gesamten nationalen Stromverbrauchs aus erneuerbaren Energieträgern zu decken [8]. Für die CO_{2eq} Emissionen für elektrische Energie im Jahr 2030 wird daher der Wert für das Umweltzeichen „Grüner Strom“ mit 16 g/kWh herangezogen. [6]

Abbildung 9 zeigt, dass der Sprühtrockner derzeit 1778 t/a CO_{2eq} Emissionen verursacht. Mit der Luftvorwärmung können 250 t/a vermieden werden, mit der Integration einer Wärmepumpe sind bis zu 509 t/a möglich, das entspricht einer Reduktion um 28%.

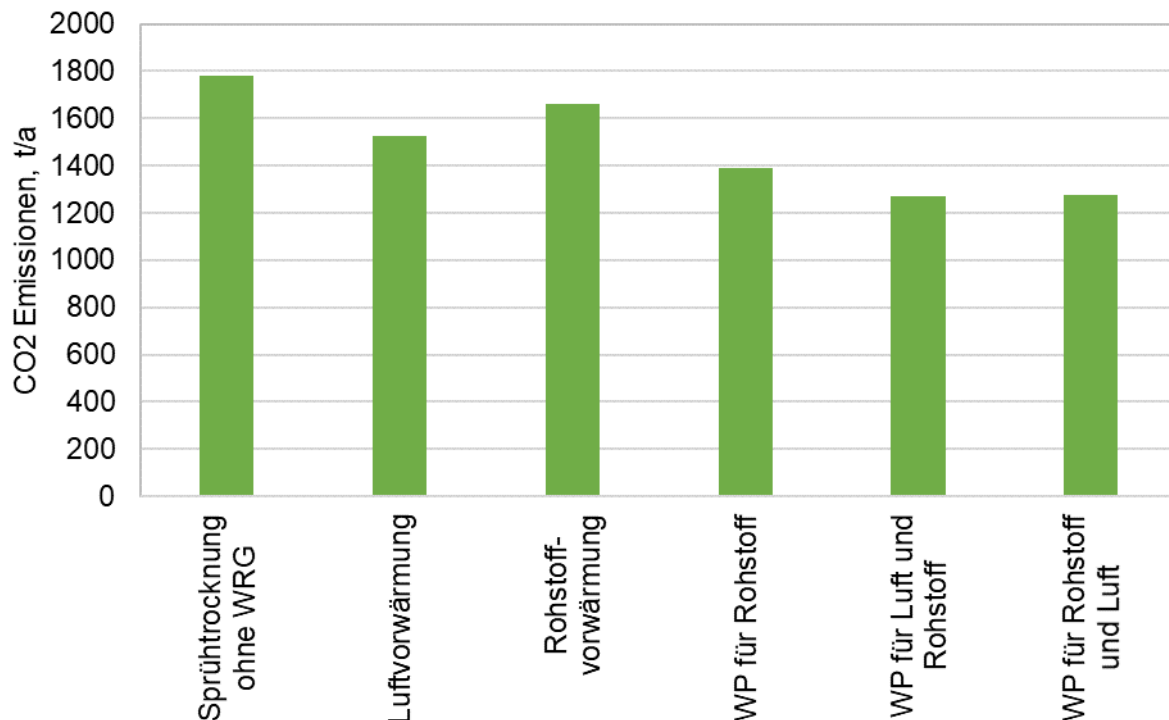


Abbildung 9: Darstellung der CO₂ Emissionen für die untersuchten Maßnahmen

5.2 Energiekosten

Zur Berechnung der Energiekosteneinsparung werden aktuelle Durchschnittswerte für die österreichische Industrie im 2. Halbjahr 2020 herangezogen: 9,86 ct/kWh für Strom für Nicht-Haushaltskunden mit einem Bezug von 70.000 MWh/a – 150.000 MWh/a [9] und 4,069 ct/kWh für Erdgas für Nicht-Haushaltskunden mit einem Bezug von 2.778 MWh/a – 5.595 MWh/a [10]. In Zukunft wird auch der CO₂ Preis einen Einfluss auf die Energiekosten haben. Dazu wird der aktuelle CO₂ Preis von 56,18 €/t CO₂ berücksichtigt [11], sowie eine angenommene Steigerung des CO₂ Preises im Jahr 2030 auf 110 €/t, was dem heutigen CO₂ Preis in Schweden entspricht [12].

Abbildung 10 verdeutlicht die Auswirkung steigender CO₂ Preise auf den Betrieb des Sprühtrockners mit fossilen Brennstoffen. Mit einem CO₂ Preis von 110 €/t steigen die laufenden Energiekosten des konventionellen Sprühtrockners um 60%. Alle untersuchten Maßnahmen verringern die laufenden Energiekosten, mit der Wärmepumpe werden Einsparungen von bis zu 46000 €/a mit den aktuellen Energiepreisen erreicht. Das entspricht einer Reduktion von 16% im Vergleich zum konventionellen Sprühtrockner. Berücksichtigt man den aktuellen CO₂ Preis, steigt die Reduktion auf 21% und, mit dem zukünftigen CO₂ Preis erreicht man 25%. Durch die Nutzung von Abwärme kann der Preissteigerung entgegengewirkt werden, die Wärmepumpe ist damit ein zukunftsicheres Wärmeversorgungssystem.

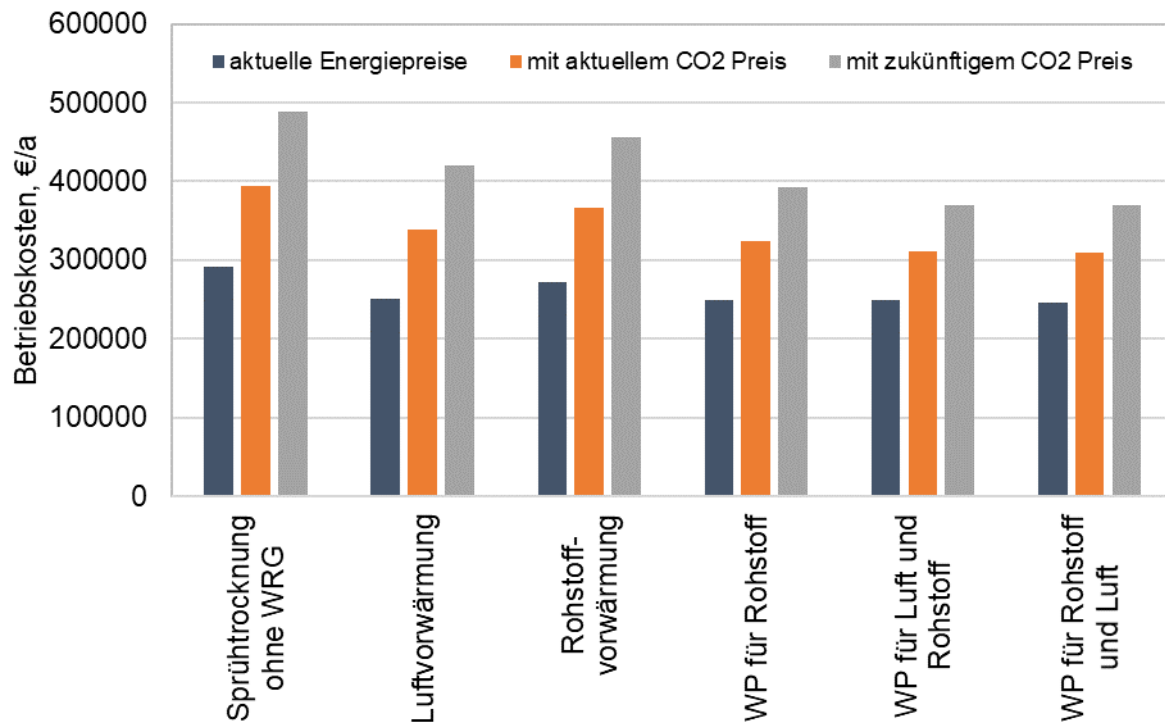


Abbildung 10: Darstellung des Einflusses des CO₂ Preises auf die Betriebskosten für die untersuchten Maßnahmen

5.3 Investitionskosten und Amortisation

Die Investitionskosten werden an Hand der folgenden Daten abgeschätzt: Die Investitionskosten der Wärmepumpe betragen 500 €/kW Heizleistung, die Wärmeübertrager kosten 1000 €/m², zur Berechnung der Wärmeübertragerflächen werden die in Tabelle 1 angeführten Koeffizienten verwendet [13]. Integrationskosten für die Wärmepumpe und die Wärmeübertrager werden hier nicht berücksichtigt.

Tabelle 1: Wärmeübertragungskoeffizienten [13]

Medien	W/(m ² K)
Luft / Luft	40
Luft / Luft mit Kondensation	42,5
Luft / Rohstoffsuspension	42,5
Wasser / Rohstoffsuspension (mit Verdampfung)	1000
Luft / Wasser	42,5

In Abbildung 11 werden die Investitionskosten der untersuchten Maßnahmen gegenübergestellt, sie liegen zwischen 51000 € und 260000 €. Dabei werden folgende Amortisationszeiten erzielt (aktuelle Energiepreise ohne Berücksichtigung des CO₂ Preises): Luftvorwärmung 3,5 a, Rohstoffvorwärmung 2,6 a, Wärmepumpe für die Vorwärmung des Rohstoffes 3,6 a, Wärmepumpe für die Vorwärmung von Luft und Rohstoff 6,0 a und für Rohstoff und Luft 5,5 a.

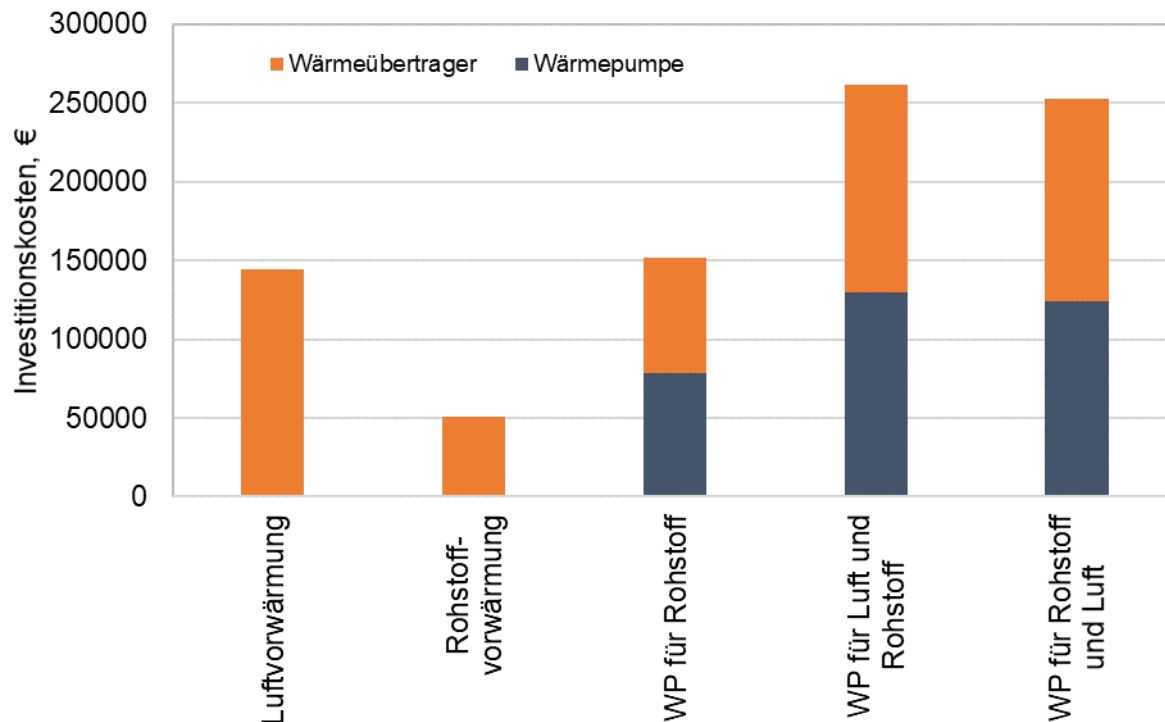


Abbildung 11: Investitionskosten für die untersuchten Maßnahmen

6 Schlussfolgerungen

Vier Wärmerückgewinnungsmaßnahmen werden anhand eines typischen Betriebsfalls für einen Sprühtrockner in der Keramikindustrie untersucht, dabei werden Wärmeübertrager und Wärmepumpen betrachtet. Die Maßnahmen werden hinsichtlich der möglichen Reduktion des Erdgasverbrauches und der damit verbundenen Endenergieeinsparung verglichen. Die Wärmerückgewinnungsmaßnahmen bewirken eine Erdgasreduktion von 7-40% und eine Endenergieeinsparung von bis zu 28%. Die CO₂-Einsparungspotentiale reichen von 118 t/a (Vorwärmung der Rohstoffsuspension mit Wärmeübertrager) bis 509 t/a (Einsatz einer Wärmepumpe zur Vorwärmung von Rohstoffsuspension und Trocknungsluft). Zur Analyse der Investitions- und Betriebskosten werden auch steigende CO₂ Preise berücksichtigt. Der Betrieb des Sprühtrockners wird sich bei einem CO₂ Preis von 110 €/t um 60% verteuern. Mit der Integration einer Wärmepumpe kann dieser Preissteigerung entgegengewirkt werden. Die Amortisationszeiten der untersuchten Maßnahmen liegen zwischen 2 und 6 Jahren und haben daher ein hohes Umsetzungspotential. Die untersuchten Wärmerückgewinnungsmaßnahmen liefern einen signifikanten Beitrag zur Dekarbonisierung und zur Betriebskostensenkung von Sprühtrocknern.

Danksagung

Das Projekt CORES (Projektnummer 871669) im Zuge dessen dieser Beitrag entstanden ist, wird vom österreichischen Klima- und Energiefonds gefördert.

Literatur

- [1] Statistik Austria, Nutzenergieanalyse für Österreich 1993-2019, https://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/energie_und_umwelt/energie/nutzenergieanalyse/index.html, Zugriff am 16 März 2021.
- [2] International Energy Agency (IEA), Energy Technology Perspectives 2020, Frankreich, 2020, <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>, Zugriff am 11 August 2021.
- [3] R. Geyer, S. Knöttner, C. Diendorfer, G. Drexler-Schmid, IndustRiES: Energieinfrastruktur für 100 % Erneuerbare Energie in der Industrie, Klima- und Energiefonds der österreichischen Bundesregierung (Hg.), Wien, 2019.
- [4] E. Perz, A Computer Method for Thermal Power Cycle Calculation, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power **113**(2),1991, S. 184.
- [5] SACMI, ATM Series, [https://www.sacmi.com/SacmiCorporate/media/ceramics/Catalogues/ATM-Sacmi-\(EN-IT-ES\).pdf](https://www.sacmi.com/SacmiCorporate/media/ceramics/Catalogues/ATM-Sacmi-(EN-IT-ES).pdf), Zugriff am 26 Mai 2021.
- [6] Umweltbundesamt, Berechnung von Treibhausgas (THG)-Emissionen verschiedener Energieträger, <https://secure.umweltbundesamt.at/co2mon/co2mon.html>, Zugriff am 13 Mai 2021.
- [7] E-Control, Statistikbroschüre 2019, Österreich, https://www.e-control.at/documents/1785851/1811582/Statbro_deutsch_FINAL.pdf/19cfa4f2, Zugriff am 2 Mai 2020.
- [8] Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus und Bundesministerium für Verkehr, #mission2030: Innovation und Technologie, Österreich, 2018.
- [9] E-Control, Strompreisentwicklung, https://www.e-control.at/documents/1785851/1811618/MStOeN-2020_Preise.xlsx/d2d73f26-621a-08c6-565a-d1b157584991?t=1601530634668, Zugriff am 13 Mai 2021.
- [10] E-Control, Gaspreisentwicklung, <https://www.e-control.at/documents/1785851/1811627/MStErdGas-2020.xlsx/61831b6d-693a-875a-7f17-d0df028563aa?t=1601530664237>, Zugriff am 13 Mai 2021.
- [11] European Energy Exchange AG, Spotmarkt, <https://www.eex.com/de/marktdaten/umweltprodukte/spotmarkt>, Zugriff am 12 August 2021.
- [12] World bank group, Carbon pricing dashboard, https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/map_data, Zugriff 13 Mai 2021.
- [13] B. Zühlsdorf, F. Bühler, M. Bantle, B. Elmegaard, Analysis of technologies and potentials for heat pump-based process heat supply above 150 °C, Energy Conversion and Management: X **2** (2019) 100011.