

ERHÖHUNG DER ENERGIEEFFIZIENZ INDUSTRIELLER TROCKNUNGSPROZESSE DURCH DEN EINSATZ VON WÄRMEPUMPEN

Veronika WILK (*)¹, Michael HARTL¹, Thomas FLECKL¹, Raphael PRIESNER²,
Emmerich HAIMER³, Marnik WASTYN⁴

¹ AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Giefinggasse 2, 1210 Wien,
+43 50550-6494, veronika.wilk@ait.ac.at, www.ait.ac.at

² AGRANA Stärke GmbH, Conrathstrasse 7, 3950 Gmünd

³ AGRANA Stärke GmbH, Industriegelände, 3435 Pischelsdorf

⁴ AGRANA Research & Innovation Center GmbH, Josef-Reither-Straße 21-23, 3430 Tulln

Kurzfassung: Trocknungsprozesse sind in hohem Maße energieintensiv. Durch die Integration einer Kompressionswärmepumpe, die die Trocknungsabluft oder andere lokal verfügbare Wärmequellen nutzt, kann die Energieeffizienz dieser Prozesse deutlich erhöht werden. In diesem Beitrag wird ein industrieller Flugstromtrockner zur Herstellung von Stärke untersucht. An Hand von realen Prozessdaten wird die Einbindung der Wärmepumpe in den Prozess simuliert, dabei werden verschiedene Quellen und Senken miteinander verglichen. Die Simulationen zeigen, dass die Wärmepumpe eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Effizienzmaßnahme darstellt, die zu einer Wirkungsgradsteigerung auf bis zu 105% führen kann.

Keywords: Trocknung, Abwärmenutzung, Prozesssimulation, Prozessintegration, Wärmepumpe

1 Einleitung

Trocknungsprozesse zählen zu den wichtigsten Verfahrensschritten in der chemischen Industrie und der Lebensmittelproduktion. In diesen Prozessen wird Wasser aus einem Produkt entfernt, um dem Verderb vorzubeugen, die Lagerfähigkeit zu erhöhen und die Transportkosten zu minimieren. Sie sind in hohem Maße energieintensiv und machen in Industrienationen rund 25% des industriellen Energieverbrauchs aus. [1] Der hohe Energieverbrauch liegt zum einen an der hohen Verdampfungsenthalpie des Wassers, zum anderen am meist geringen thermischen Wirkungsgrad der Trockner, der bei konvektiven Verfahren sogar unter 50% liegen kann. Konvektive Trockner kommen in 85% aller Trocknungsprozesse zum Einsatz; hier wird ein heißer Luftstrom als Wärmeträger eingesetzt. Die heiße und feuchte Abluft wird üblicherweise ungenutzt an die Umgebung abgegeben. Da das verdampfte Wasser aus dem Produkt den Trockner mit der Abluft verlässt, kommt es zu signifikanten sensiblen und latenten Wärmeverlusten. [2]

Eine bedeutende Variante der konvektiven Trocknung ist die Flugstromtrocknung (pneumatische Trocknung), die bevorzugt bei hitzeempfindlichen Stoffen, wie Lebensmitteln

eingesetzt wird. Bei diesem Verfahren wird das Produkt mit dem heißen Luftstrom mitgerissen, während des Transports getrocknet und danach durch einen Zyklon abgeschieden. Die Verweilzeit der Partikel im heißen Luftstrom ist kurz. Es handelt sich um einen kontinuierlichen Prozess, der gut für körnige, pulverförmige Materialien geeignet ist. Da bei der Flugstromtrocknung mehr Trocknungsluft als bei anderen Verfahren benötigt wird, ist der thermische Wirkungsgrad vergleichsweise geringer. Daher sind Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz von großer Bedeutung. [3]

Um die Energieeffizienz von Trocknern zu verbessern, gibt es im Wesentlichen drei Handlungsfelder: das zu trocknende Gut, die Energiebereitstellung für den Trocknungsprozess und die Trocknungsanlage. Der Energiebedarf kann durch mechanisches Entfeuchten des Trocknungsgutes in einem vorgelagerten Verfahrensschritt (Zentrifuge, Filterpresse, etc.) deutlich reduziert werden. Auch eine verbesserte Isolierung verringert Wärmeverluste der Trocknungsanlage durch Strahlung, Leitung und Konvektion. Großes Energiesparpotential bietet die Abwärmerückgewinnung, bei der die heiße Abluft weiter genutzt wird. Neben dem direkten Wärmeaustausch zur Vorwärmung der Trocknungsluft werden auch Kompressionswärmepumpen¹ zur Abwärmenutzung eingesetzt. [2 bis 4]

Bereits in den 1980er Jahren wurden Wärmepumpen in Trocknungsprozessen eingesetzt, die erste Anwendung war die Getreidetrocknung, weite Verbreitung fanden sie in der Holzverarbeitung. [5, 6] Durch die begrenzten Wärmenutzungstemperaturen von ca. 90°C, war die Wärmepumpentrocknung auf wenige Anwendungsfelder limitiert und wurde zur Konditionierung der Trocknungsluft oder zur Entwässerung der Abluft eingesetzt. Die Nutzung der Abwärme war dabei nicht von besonderer Bedeutung.

Durch die in Entwicklung befindlichen Hochtemperatur-Wärmepumpen, die Wärmenutzungstemperaturen in der Höhe von rund 160°C ermöglichen, erweitern sich die Anwendungsfelder auf zahlreiche andere Trocknungsprozesse, wie zum Beispiel in der Papier- und Zellstoff-, Petrochemie- und nichtmetallischen Mineralindustrie und in der Lebensmittelindustrie. Abbildung 1 zeigt einen Überblick über die erforderlichen Lufttemperaturen zur Trocknung verschiedener Lebensmittel, die üblicherweise zwischen 100-200°C liegen. Die Lufttemperatur hängt von der Art des Trockners ab und ist üblicherweise höher als die Temperatur des Trocknungsgutes. Eine weitere Möglichkeit zur Steigerung der Energieeffizienz ist daher die Absenkung der erforderlichen Lufttemperatur durch Entfeuchtung der Trocknungsluft.

Derzeit sind bereits Wärmepumpen am Markt verfügbar, die eine nutzbare Temperatur von 90 bis 125°C erreichen [7, 8]. Bereits 2011 wurden Arbeiten an einer Hochtemperaturwärmepumpe mit Wärmenutzungstemperaturen von bis zu 155°C und einem Kältemittel mit geringem Treibhauspotential vorgestellt [9]. Der experimentelle Nachweis konnte mit einer Auswahl an neuen synthetischen Kältemitteln und nutzbare Temperaturen von bis zu 155°C ebenfalls schon erbracht werden [10 bis 12]. Diese hohen Temperaturen wurden in experimentellen Wärmepumpenanlagen erreicht, von denen man ausgehen kann, dass sie in den nächsten Jahren Marktreife erreichen werden.

¹ Im Folgenden werden Kompressionswärmepumpen kurz als Wärmepumpen bezeichnet, da andere Formen der Wärmepumpen wie Absorptionssysteme hier nicht betrachtet werden.

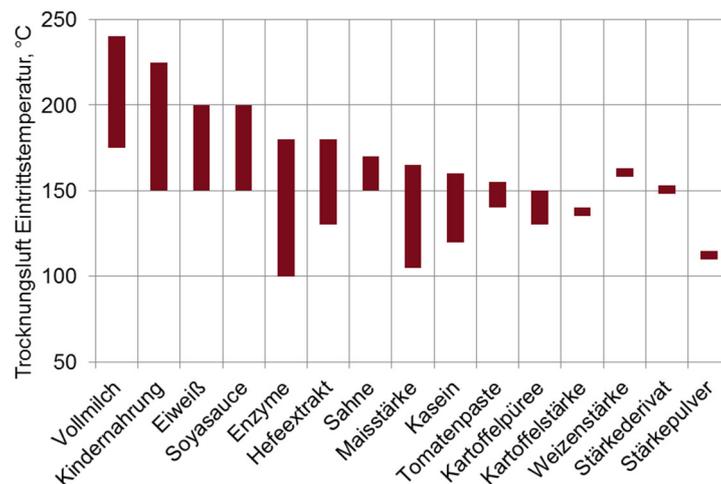


Abbildung 1: Trocknungstemperaturen verschiedener Lebensmittel, nach [13]

Bezieht man die Entwicklung der Wärmepumpe in die Überlegungen zur Energieeffizienzsteigerung von Trocknungsprozessen mit ein, ergeben sich neue und innovative Lösungsansätze zur prozessinternen Wärmenutzung und damit zur direkten Energiekosteneinsparung.

In diesem Beitrag wird ein industrieller Flugstromtrocknungsprozess zur Herstellung von Stärke untersucht. An Hand von realen Prozessdaten werden Potentiale für die Integration von Hochtemperatur-Wärmepumpen analysiert, dazu kommen Leistungszahlberechnungen (coefficient of performance, COP) basierend auf Carnoteffizienzen und Gütegrad zur Anwendung. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Einbindung der Wärmepumpe in den Prozess gelegt, es werden verschiedene Kombinationen von Quellen und Senken betrachtet.

2 Methode

Der Trocknungsprozess und die Einbindung der Wärmepumpe wurden mit der Simulationssoftware IPSEpro (Integrated Process Simulation Environment) berechnet, die für Prozesssimulationen im Bereich der Kraftwerks- und Energietechnik entwickelt wurde. Es ist ein gleichungsorientiertes Simulationsprogramm für stationäre Fließprozesse. [14]

Der Prozess wird gemäß dem apparatetechnischen Aufbau als Fließbild in IPSEpro abgebildet. Die einzelnen Komponenten (Gebläse, 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 reale Prozessdaten herangezogen, die von AGRANA Stärke GmbH zur Verfügung gestellt wurden. Ausgehend von der Massen- und Energiebilanz der bestehenden Trocknungsanlage wurden verschiedene Varianten der Einbindung der Wärmepumpe simuliert und die Auswirkungen auf den Gesamtprozess berechnet.

Die Wärmepumpe wurde als eigene Prozesskomponente in IPSEpro angelegt. Dabei handelt es sich um ein Black-Box-Modell, das an Hand von den Prozesstemperaturen, Carnoteffizienz und einem zu definierenden Gütegrad die möglichen Leistungszahlen berechnet und damit den Strombedarf, die Wärme, die der Quelle entnommen wird und die nutzbare Wärme, die bereitgestellt wird, angibt. Da das Black-Box-Modell noch keine Auswahl des Kältemittels und des Verdichters benötigt, kann es in einem beliebigen Temperaturbereich zur Potentialabschätzung eingesetzt werden. Durch die Wahl des Gütegrades kann die Rechnung aber auch gut an reale Gegebenheiten angepasst werden.

3 Integration einer Wärmepumpe in einen industriellen Stärketrocknungsprozess

AGRANA Stärke GmbH verarbeitet und veredelt Mais, Kartoffeln und Weizen zu einer Vielzahl von Stärkeprodukten für die Nahrungsmittelproduktion und für industrielle Anwendungen. Am Standort Pischelsdorf wird Bioethanol zum Einsatz als umweltfreundlicher Treibstoff, sowie Futtermittel, Stärke und Gluten produziert.

In dieser Arbeit wird der Stärketrockner behandelt, der in Abbildung 2 dargestellt wird. Es handelt sich um einen Flugstromtrockner, in dem Stärke im heißen Luftstrom getrocknet wird. Die Trocknungsluft wird dazu in zwei Schritten aufgeheizt. Sie wird zuerst durch einen Warmwasserkreis, der durch Abwärme eines anderen Trockners gespeist wird, vorgewärmt. Das Warmwasser wird dabei von 90°C auf 70°C abkühlt und liefert 3,7 MW Wärme an die Trocknungsluft. Danach folgt ein Dampfregister, das die Trocknungsluft auf die Zieltemperatur von ca. 160°C erhitzt. Dazu wird Dampf mit einer Leistung von 4,3 MW benötigt. Die Stärkepartikel kommen mit der heißen Trocknungsluft in Kontakt und werden in Zyklonen abgeschieden. Die mit dem Wasser aus der Stärke beladene Trocknungsluft hat eine Temperatur von 52°C und 48% relative Feuchte. Sie wird derzeit nicht genutzt, da Wärme auf diesem Temperaturniveau nicht benötigt wird.

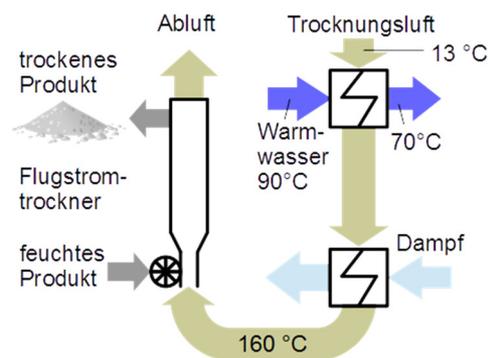


Abbildung 2: Flugstromtrocknungsanlage zur Produktion von Stärke

Die feuchte Abluft des Trocknungsprozesses ist eine mögliche Wärmequelle für die Wärmepumpe. Der Warmwasserkreis stellt ebenfalls eine mögliche Wärmequelle dar, dem durch die Wärmepumpe noch mehr Wärme entzogen werden kann. Nach dem Vorwärmen der Trocknungsluft hat der Warmwasserkreis noch 70°C.

Es werden neben den beiden Wärmequellen zwei verschiedene Wärmesenken betrachtet: Die Wärmepumpe kann entweder Wärme zur direkten Vorwärmung der Trocknungsluft

bereitstellen oder Heißwasser mit höherer Temperatur als der Warmwasserkreis produzieren. Dadurch wird weniger Dampf im Dampfregister benötigt; bei einer entsprechend hohen Wärmenutzungstemperatur der Wärmepumpe kann das Dampfregister vollständig entfallen. Abbildung 3 und Abbildung 4 illustrieren die Kombinationen der Senken und Quellen, die im Folgenden simuliert und verglichen werden.

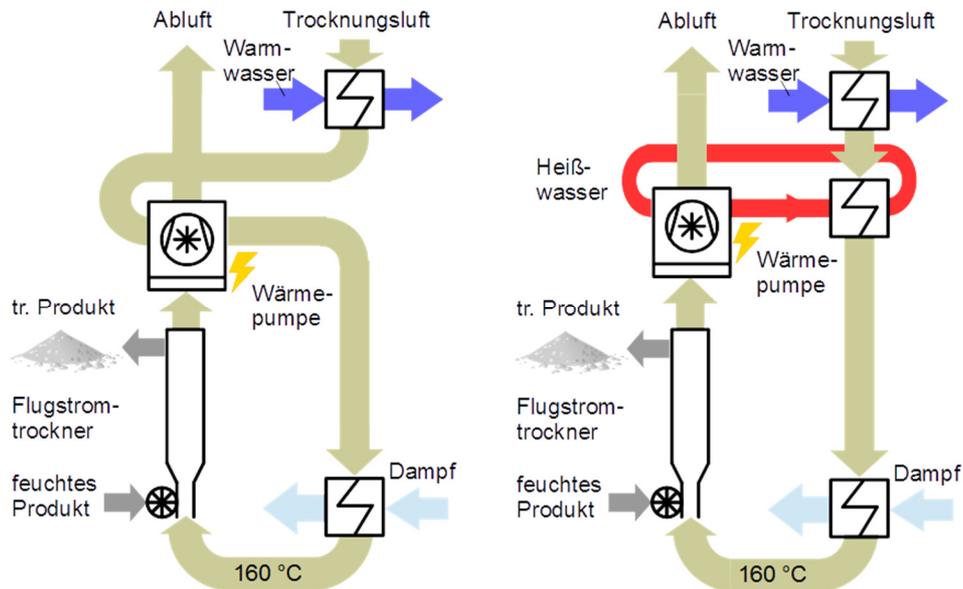


Abbildung 3:

links: Nutzung der feuchten Abluft zur Vorwärmung der Trocknungsluft, (Luft/Luft)

rechts: Nutzung der feuchten Abluft zur Herstellung von Heißwasser (Luft/Wasser)

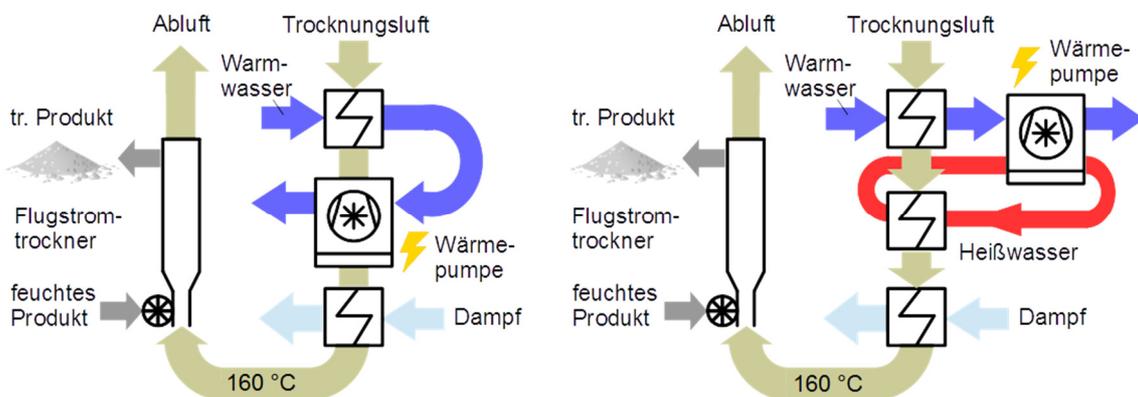


Abbildung 4:

links: Nutzung des Warmwasserkreises zur Vorwärmung der Trocknungsluft (Wasser/Luft)

rechts: Nutzung des Warmwasserkreises zur Herstellung von Heißwasser (Wasser/Wasser)

In den Simulationen werden verschiedene Wärmenutzungstemperaturen der Wärmepumpe berechnet. Bei den Varianten, die die Trocknungsluft als Senke nutzen (Luft/Luft und Wasser/Luft), wurde die Trocknungslufttemperatur am Austritt der Wärmepumpe im Bereich von 100 – 160°C variiert. Wird mit der Wärmepumpe Heißwasser produziert (Luft/Wasser und Wasser/Wasser), wurde die Lufttemperatur nach dem Heißwasserwärmetauscher im selben Bereich variiert.

Das Simulationsmodell der Wärmepumpe kann durch Wahl des Gütegrades an reale Gegebenheiten angepasst werden um genauere Abschätzungen zu erhalten. Es wurde ein Gütegrad von 0.55 gewählt, da der Vergleich mit Labormessungen gezeigt hat, dass damit gute Vergleichbarkeit mit Messwerten in dem betrachteten Temperaturbereich erreicht wird. [15]

4 Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 5 zeigt, wie sich die Leistungszahl der Wärmepumpe in Abhängigkeit von der jeweiligen Trocknungstemperatur ändert. Die Leistungszahl (COP, coefficient of performance) beschreibt die Effizienz der Wärmepumpe und ist das Verhältnis von thermisch nutzbarer Leistung zu elektrisch am Verdichter zugeführter Leistung. Sie wird im Wesentlichen von den Temperaturen der Wärmequelle und -senke und dem Gütegrad bestimmt. Mit zunehmender Trocknungslufttemperatur sinkt die Leistungszahl, da die Temperaturdifferenz zwischen Quelle und Senke zunimmt. Der Warmwasserkreis ist im Vergleich zur feuchten Abluft die effizientere Wärmequelle, da die Wärme auf einem höheren Temperaturniveau vorliegt.

Vergleicht man die beiden Wärmesenken, zeigt sich vor allem bei niedrigen Trocknungslufttemperaturen der Einfluss des Heißwasserwärmetauschers. Bei gleicher Trocknungslufttemperatur muss die Wärmepumpe eine etwas höhere Temperatur an den Heißwasser-Zwischenkreis liefern, um den Wärmeübergang am Wärmetauscher zu gewährleisten. Daher ist die Leistungszahl geringer, wenn Heißwasser als Senke genutzt wird.

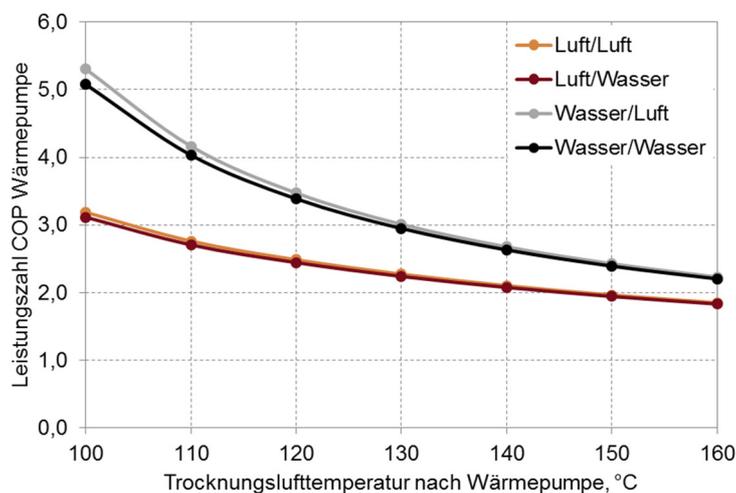


Abbildung 5: Leistungszahl in Abhängigkeit von der Trocknungslufttemperatur

Durch die Integration der Wärmepumpe nimmt der Wirkungsgrad der Trocknungsanlage zu, wie in Abbildung 6 illustriert wird. Der Trocknungswirkungsgrad ist das Verhältnis von benötigter Verdampfungsenthalpie zu zugeführter Leistung. Der Flugstromtrockner weist einen Wirkungsgrad von 71% auf. Da Stärkemenge und Wassergehalt in der Simulation konstant gehalten wurden, ändert sich die erforderliche Verdampfungsenthalpie nicht. Bereits die Integration einer Wärmepumpe, die die Trocknungsluft auf 100°C vorwärmt, führt zu einer Wirkungsgradsteigerung von 13%. Mit zunehmender Trocknungslufttemperatur steigt der Trocknungswirkungsgrad, weil durch die Wärmepumpe weniger Leistung zugeführt

werden muss. Ab einer Trocknungslufttemperatur von 150°C beträgt der Trocknungswirkungsgrad durch die Nutzung von Abwärme mehr als 100%.

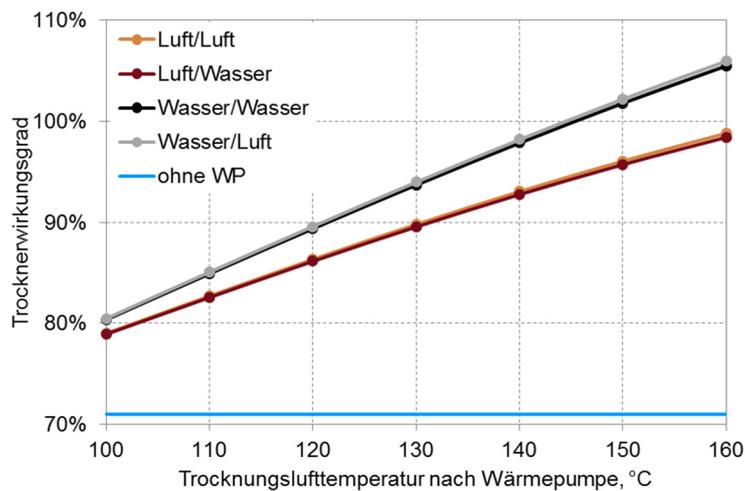


Abbildung 6: Trocknungswirkungsgrad in Abhängigkeit von der Trocknungslufttemperatur

Zur Betrachtung der Umweltauswirkungen werden die CO₂-Emissionen und der Primärenergieeinsatz herangezogen. Die Berechnung erfolgte mit Faktoren für Erdgasnutzung und für den elektrischen Strommix in Österreich im Jahr 2011, die GEMIS entnommen wurden. [16, 17] Dampf wird im Modell von einem erdgasbefeuerten Dampfkessel bereitgestellt. Durch den Einsatz der Wärmepumpe wird weniger Dampf im Dampfreister, aber dafür elektrischer Strom für den Verdichter benötigt.

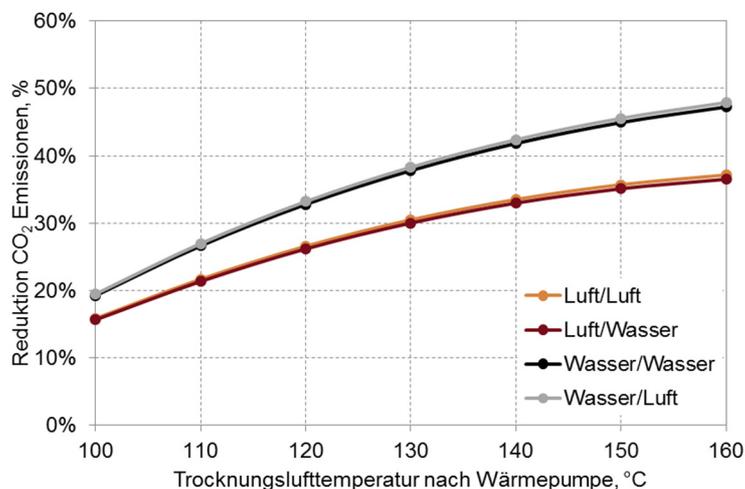


Abbildung 7: CO₂-Emissionseinsparung in Abhängigkeit von der Trocknungslufttemperatur

Aus Abbildung 7 und Abbildung 8 ist ersichtlich, dass die CO₂-Emissionen und der Primärenergiebedarf der Trocknungsanlage insgesamt durch die Integration der Wärmepumpe verringert werden. Die Wärmepumpe liefert je nach Trocknungslufttemperatur das Zwei- bis Fünffache der Verdichterleistung als Wärme (siehe auch Leistungszahl in Abbildung 5) und ist damit aus ökologischer Sicht effizienter als der Gaskessel. Je mehr Wärme durch die Wärmepumpe erzeugt wird, desto höher fallen die CO₂- und Primärenergieeinsparungen aus. Bei vollständiger Substitution des Dampfes (Trocknungslufttemperatur von 160°C) werden bis zu 48% der CO₂-Emissionen vermieden.

Das entspricht je nach Integrationsvariante 3200 – 4200 t CO₂ jährlich. Die Primärenergieeinsparungen betragen bis zu 62% oder 25000 – 29000 MWh pro Jahr.

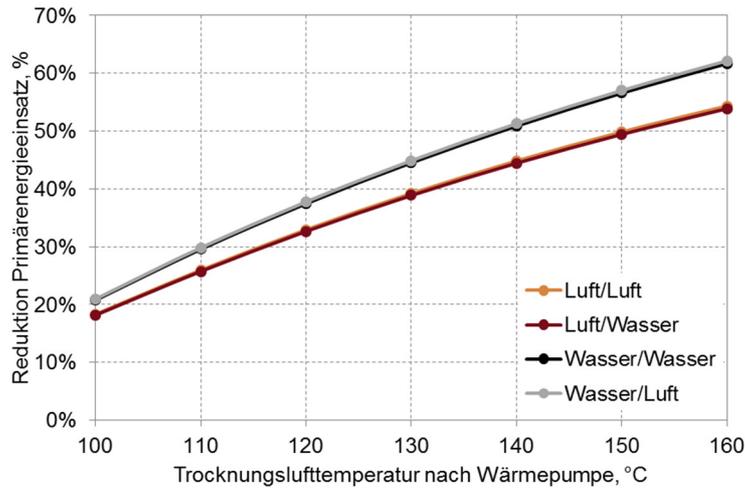


Abbildung 8: Primärenergieeinsparung in Abhängigkeit von der Trocknungslufttemperatur

Zur Beurteilung der Energiekosten ist das Preisverhältnis von elektrischem Strom und Gas maßgeblich. Hier wurde mit einem Preisverhältnis von 1,7 gerechnet. Durch die Wärmepumpe werden die laufenden Energiekosten reduziert. Wenn die Kosteneinsparungen maximiert werden sollen, ist es nicht sinnvoll, den Dampf vollständig durch die Wärmepumpe zu substituieren. Mit Luft als Wärmequelle für die Wärmepumpe wird das Einsparungsmaximum bei einer Trocknungslufttemperatur von 130°C erreicht. Mit Wasser als Wärmequelle liegt das Maximum bei 140°C. Eine weitere Erhöhung der Trocknungslufttemperatur hat vor allem positive Auswirkungen auf die Umwelt, führt aber zu höheren Kosten, was auch die unterschiedlichen Amortisationszeiten in Abbildung 10 zeigen. Die Amortisationszeit wurde ohne Berücksichtigung von Zinsen und mit Investitionskosten von 350 €/kW Heizleistung für die Wärmepumpe berechnet. Dieser Wert liegt in der Mitte eines typischen Bandes, das von Herstellern für Industriewärmepumpen ohne Prozesseinbindung angegeben wird (ca. 250 – 400 €/kW).

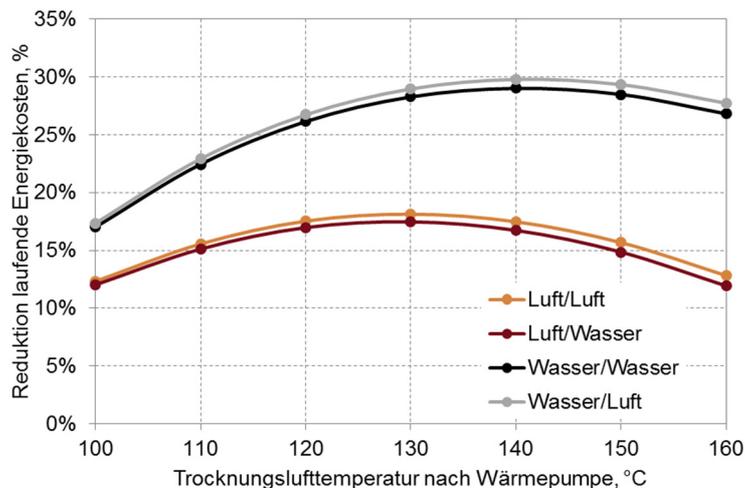


Abbildung 9: Betriebskosteneinsparung in Abhängigkeit von der Trocknungslufttemperatur

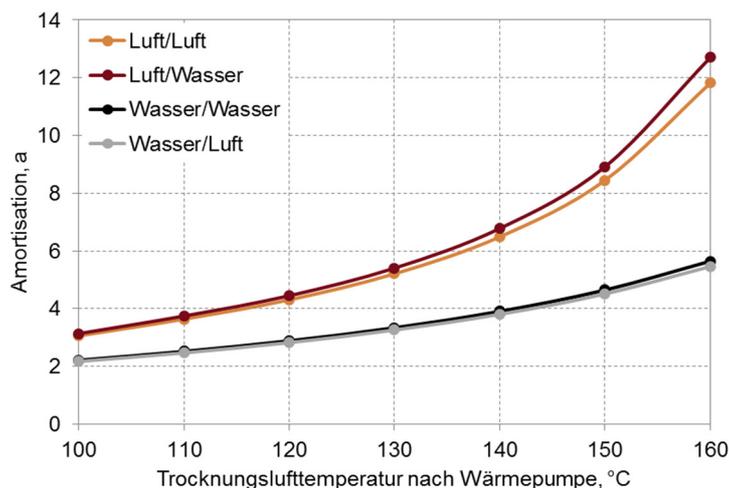


Abbildung 10: Amortisationszeit in Abhängigkeit von der Trocknungslufttemperatur

5 Schlussfolgerungen

Die Integration einer Wärmepumpe in den Stärketrocknungsprozess ist eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Effizienzsteigerungsmaßnahme, die zu einer Wirkungsgradsteigerung auf bis zu 105% führen kann.

Die effizienteste Einbindung der Wärmepumpe ist die Nutzung des Warmwasserkreises als Quelle zur direkten Luftvorwärmung. Der Warmwasserkreis stellt eine günstige lokale Gegebenheit am Standort der AGRANA Stärke GmbH dar und ist ebenfalls ein Ergebnis konsequenter Abwärmenutzung. An Standorten ohne so einen Warmwasserkreis ist die Nutzung der feuchten Abluft eine interessante Energiesparmaßnahme. Sie ist zwar nicht so effizient wie die Nutzung des Warmwasserkreises, aber dafür gut multiplizierbar, da zahlreiche derartige Trockner betrieben werden.

Betrachtet man die Leistungszahl, ist die direkte Nutzung der Wärme zur Luftherhitzung sinnvoller als der Umweg über einen Heißwasserkreislauf. Wird die Wärme direkt genutzt, so wird der Trocknungsluftwärmetauscher vom Kältemittel der Wärmepumpe durchströmt. Je nach lokalen Rahmenbedingungen kann der Aufstellungsort der Wärmepumpe so weit von dem Wärmetauscher entfernt sein, dass große Mengen an Kältemittel benötigt werden. Durch die direkte Nutzung können so höhere Kosten, aber auch offene Fragen zur Anlagen- und Lebensmittelsicherheit auftreten. Bei brennbaren Kältemitteln wie Butan ist beispielsweise die Füllmenge wegen Explosionsgefahr beschränkt. [18]

Die Simulationen haben gezeigt, dass es durch die Weiterentwicklung der Wärmepumpe großes Potential in Trocknungsprozessen gibt und dadurch neue und interessante Anwendungen erschlossen werden. Die Einbindung von bislang ungenutzter Abwärme durch Wärmepumpen wird einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der ambitionierten Effizienzziele der Industrie leisten.

6 Danksagung

Diese Publikation ist im Rahmen des Projektes „DryPump“ entstanden, an dem Wienerberger AG, AGRANA Research & Innovation Center GmbH, AMT Kältetechnik

GmbH, Bitzer Kühlmaschinenbau GmbH, TU Wien, Institut für Energietechnik und Thermodynamik, Institut für Ziegelforschung Essen e.V. und AIT Austrian Institute of Technology GmbH beteiligt sind. Dieses Projekt wird aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Energieforschungsprogramms 2015 durchgeführt.



7 Literaturangaben

- [1] Vasile Minea: Industrial Heat Pump Drying. In: Larsen, M. E. (Hrsg.): Refrigeration. Theory, technology, and applications. Mechanical engineering theory and applications. New York: Nova Science Publishers 2011
- [2] Kemp, I. C.: Fundamentals of Energy Analysis of Dryers. In: Tsotsas, E. (Hrsg.): Modern drying technology. Weinheim: Wiley-VCH 2012, S. 1–45
- [3] Borde, I. u. Levy, A.: Pneumatic and Flash Drying. In: Mujumdar, A. S. (Hrsg.): Handbook of industrial drying. Boca Raton, FL: CRC 2007
- [4] Sattler, K. D.: Thermische Trennverfahren. Grundlagen, Auslegung, Apparate. Weinheim: Wiley-VCH 2001
- [5] Mujumdar, A. S.: Principles, Classification, and Selection of Dryers. In: Mujumdar, A. S. (Hrsg.): Handbook of industrial drying. Boca Raton, FL: CRC 2007
- [6] Jangam, S. V. u. Mujumdar, A. S.: Heat Pump Assisted Drying Technology - Overview with Focus on Energy, Environment and Product Quality. In: Tsotsas, E. (Hrsg.): Modern drying technology. Weinheim: Wiley-VCH 2012, S. 121–162
- [7] Application of Industrial Heat Pumps. IEA Industrial Energy-related Systems and Technologies Annex 13 IEA Heat Pump Programme Annex 35 HPP-AN35, IEA Heat Pump Centre, Boras 2014
- [8] Wolf, S., Fahl, U., Blesl, M., Voß, A. u. Jakobs, R.: Analyse des Potenzials von Industriewärmepumpen in Deutschland (2014)
- [9] Kontomaris, K.: Low GWP Working Fluid for High Temperature Heat Pumps: DR2; Chemical Stability at High Temperatures. In: European Heat Pump Summit, Nuremberg, October 15, 2013
- [10] Fukuda, S., Kondou, C., Takata, N. u. Koyama, S.: Low GWP refrigerants R1234ze(E) and R1234ze(Z) for high temperature heat pumps. International Journal of Refrigeration 40 (2014), S. 161–173
- [11] Reissner, F., Gromoll, B., Schäfer, J., Danov, V. u. Karl, J.: Experimental performance evaluation of new safe and environmentally friendly working fluids for high temperature heat pumps. European Heat Pump Summit. 2013
- [12] Thomas Fleckl, Michael Hartl, Franz Helminger, Konstantinos (Kostas) Kontomaris u. Julian Pfaffl: Performance testing of a lab-scale high temperature heat pump with HFO-1336mzz-Z as the working fluid. In: European Heat Pump Summit 2015, Nuremberg, Germany, October 20-21

- [13] Gehrman, D., Esper, G. J. u. Schuchmann, H.: Trocknungstechnik in der Lebensmittelindustrie. Hamburg: Behr 2009
- [14] Perz, E.: A Computer Method for Thermal Power Cycle Calculation. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 113 (1991) 2, S. 184
- [15] Helminger, F., Kontomaris, K., Pfaffl, J., Hartl, M. u. Fleckl, T.: Hochtemperatur-Wärmepumpen. Messergebnisse einer Laboranlage mit HFO-1336mzz-Z bis 160°C Kondensationstemperatur. In: Proceedings des 14. Symposium Energieinnovation 2016. 2016
- [16] GEMIS. EI-KW-Park-A+Importe-2011
- [17] GEMIS. Gas-Kessel-A-Konversionsfaktoren
- [18] EN 378; 2012-08. *Kälteanlagen und Wärmepumpen - Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen*