

TECHNO-ÖKONOMISCHE ANALYSE VON WÄRMEPUMPEN FÜR DIE INDUSTRIELLE TROCKNUNG MIT MONTE-CARLO-SIMULATIONEN

Veronika WILK¹, Michael LAUERMANN¹, Michael HARTL¹, Raphael PRIESNER²,
Stefan PUSKAS³

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 Wienerberger AG, Wienerbergstraße 11, 1100 Wien

Kurzfassung: In dieser Arbeit wird eine techno-ökonomische Bewertung für Wärmepumpen für die industrielle Trocknung durchgeführt und mit einer globalen Sensitivitätsanalyse gezeigt, bei welchen Randbedingungen die Integration einer Wärmepumpe ökologisch und wirtschaftlich sinnvoll ist. Es werden verschiedene Szenarien wie steigende oder fallende Energiekosten betrachtet. Steigende Energiekosten wirken sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit einer Wärmepumpe aus. Im Vergleich zum Basisfall rechnen sich ca. 70% der Fälle bei steigenden Energiekosten früher, da die laufenden Energiekosteneinsparungen höher ausfallen. Ist das Verhältnis von Strom- und Gaspreis hoch, haben die Investitionskosten einen größeren Einfluss auf die Amortisationszeit. Die Integration von Wärmepumpen in Trocknungsprozesse ermöglicht eine deutliche Verringerung der CO₂-Emissionen. In Abhängigkeit von den CO₂-Faktoren liegen die Emissionseinsparungen zwischen 20 und 70%.

Keywords: Wärmepumpe, Energieeffizienz, Zukunftsszenarien, Investition

1 Einleitung

Die Effizienzsteigerung industrieller Prozesse ist von großer Aktualität. Dadurch sollen signifikante Energie- und Kosteneinsparungen erzielt werden, die zu einer Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit und der Umweltfreundlichkeit führen. Die Erhöhung der Energieeffizienz ist auch ein zentrales Element der Klimaziele der EU.

Industrielle Trocknungsprozesse können durch die Integration von Wärmepumpen energieeffizienter gestaltet werden. Wärmepumpen nutzen Abwärmeströme als Wärmequelle und liefern Wärme auf einem höheren Temperaturniveau für den Trocknungsprozess. Industriewärmepumpen, die Wärmenutzungstemperaturen von rund 150°C im industriell relevanten Leistungsbereich bereitstellen können, werden derzeit entwickelt und erprobt. Die Marktreife dieser Technologie wird in den nächsten Jahren erwartet. [1–5]

Die techno-ökonomische Analyse spielt vor allem bei neuen Technologien und den damit verbundenen Investitionsentscheidungen eine große Rolle. Sie dient der Beurteilung der Umweltauswirkungen und der Wirtschaftlichkeit. In diese Berechnungen gehen auch

zahlreiche Parameter ein, die mit Unsicherheiten behaftet sind, wie die künftige Entwicklung der Energiepreise oder der Investitionskosten. Mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse können die Auswirkungen von Änderungen verschiedener Parameter auf die Umweltauswirkungen und die Wirtschaftlichkeit untersucht und bewertet werden.

In dieser Arbeit wird eine techno-ökonomische Bewertung für Wärmepumpen für die industrielle Trocknung durchgeführt und mit Sensitivitätsanalysen gezeigt, bei welchen Randbedingungen die Integration einer Wärmepumpe ökologisch und wirtschaftlich sinnvoll ist. Diese Arbeit baut auf den Ergebnissen experimenteller Untersuchungen von Wärmepumpen für die Ziegel- und Stärketrocknung auf, die im Forschungsprojekt „DryPump“ durchgeführt wurden. Dabei wurden Wärmepumpen zur industriellen Trocknung in enger Abstimmung mit den Industriepartnern konzipiert, als Funktionsmuster gebaut und betrieben.

2 Methode

Zur Beurteilung der Umweltauswirkungen werden die CO₂-Emissionen betrachtet. Sie hängen von der Effizienz der Wärmepumpe und der fossilen Wärmebereitstellung, die ersetzt wird, ab. Auch der Kraftwerkspark, der die elektrische Energie für die Wärmepumpe bereitstellt, ist wesentlich. Dazu werden die CO₂-Emissionen für den Prozess vor und nach der Integration der Wärmepumpe berechnet und gegenübergestellt. Vor der Integration der Wärmepumpe wird Prozesswärme mit Erdgasbrennern oder in Form von Dampf aus erdgasbefeuerten Kesseln bereitgestellt. Durch den Einsatz der Wärmepumpe wird der Erdgasbedarf reduziert, aber dafür elektrischer Strom für den Verdichter benötigt. Der CO₂-Emissionsfaktor f_{CO_2} beschreibt, wie viel CO₂ pro Einheit an Endenergie, die als Prozesswärme verfügbar ist, in die Atmosphäre abgegeben wird. Dabei werden neben den CO₂-Emissionen auch andere treibhauswirksame Gase, wie Methan oder Lachgas, berücksichtigt (CO₂-Äquivalent). Die CO₂-Emissionen hängen maßgeblich von der Zusammensetzung des elektrischen Stroms ab, die der Berechnung zu Grunde liegt. Basierend auf dem elektrischen Strommix in Österreich werden 300 g CO₂/kWh bei der Nutzung von Strom emittiert, bei der Nutzung von Erdgas werden 249 g/kWh emittiert [6, 7] (Bezugsjahr 2011).

Die wichtigste Kenngröße für die Wirtschaftlichkeit ist die Amortisationszeit, die maßgeblich vom Strompreis, dem Preis für den fossilen Energieträger, sowie von den Investitionskosten der Wärmepumpe abhängt. Die Amortisationszeit ist das Verhältnis der Investitionskosten zur jährlichen Betriebskostenreduktion durch die Wärmepumpe, sie wird ohne Berücksichtigung von Zinsen berechnet. Die Energiepreise wurden Veröffentlichungen der Statistik Austria und der E-Control entnommen. Der Strompreis für Industriekunden, die mehr als 150 GWh/a abnehmen, betrug im ersten Halbjahr 2017 5.4 ct/kWh [8]. Der Jahresdurchschnittspreis für Erdgas (Industrie) betrug 0.038 €/kWh im Jahr 2015 [9].

Die Investitionskosten der Wärmepumpen unterscheiden sich je nach Bauart und Wärmenutzungstemperatur. Sie beruhen auf den Erfahrungen der Projektpartner und den Versuchsaufbauten. Es wurden zwei verschiedene Wärmepumpen getestet. Die spezifischen Investitionskosten der Wärmepumpe mit R245fa als Kältemittel liegen bei rund 350 €/kW Heizleistung, die der R134a-Wärmepumpe bei 300 €/kW. Die R134a-Wärmepumpe ist etwas billiger, weil hier wegen den geringeren Prozesstemperaturen Standardteile verwendet werden können. Die Einbindung der Wärmepumpe in den Trocknungsprozess wird bei den

Investitionskosten nicht berücksichtigt. Diese Kosten hängen stark von den lokalen Gegebenheiten ab (räumliche Anordnung, Leitungslängen, Fundamente, etc.).

Tabelle 1: Überblick über die Parameter der techno-ökonomischen Bewertung

Parameter		Einheit	Wert
CO ₂ -Emissionsfaktor	Strom	g/kWh	300
	Gas	g/kWh	248
Energiepreis	Strom	€/kWh	0.054
	Gas	€/kWh	0.038
Spezifische Investitionskosten	R245fa	€/kW Heizleistung	350
	R134a	€/kW Heizleistung	300

Mit den oben beschriebenen Parametern wird die Emissions- und Wirtschaftlichkeitsrechnung für den Basisfall durchgeführt. Die Sensitivitätsanalyse zeigt, wie sich eine Änderung dieser Parameter auf die Umweltauswirkungen und die Wirtschaftlichkeit der Wärmepumpe auswirkt. Die Sensitivitätsanalyse wird als globale Analyse mit Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt [10]. Dazu werden den Parametern, die mit Unsicherheit behaftet sind, Wahrscheinlichkeitsverteilungen zugeordnet, die die Unsicherheit beschreiben. In diesem Fall sind das die Strom- und Gaspreise, die Investitionskosten der Wärmepumpe, die CO₂-Emissionen der Stromerzeugung und der Strombedarf der Wärmepumpe. Die Strom- und Gaspreise und die CO₂-Emissionen der Stromerzeugung werden als gleichverteilte Zufallszahlen abgebildet. Die Grenzen der Gleichverteilung werden so gewählt, dass sie verschiedenen Zukunftsszenarien entsprechen.

Die folgenden Szenarien werden betrachtet:

- 1) Die Energiepreise sind billiger als im Basisfall
- 2) Die Energiepreise sind teurer als im Basisfall
- 3) Die CO₂-Emissionen der Stromerzeugung ändern sich

In allen Szenarien werden die Investitionskosten als gleichverteilte Zufallszahlen abgebildet, sie können um bis zu 20% niedriger und bis zu 20% höher ausfallen. Der Strombedarf der Wärmepumpen wird als normalverteilte Zufallsvariable abgebildet, deren Mittelwert der errechnete Wert des Basisfalls ist. Als Standardabweichung wurde 5% gewählt.

Mit diesen Zufallszahlen wird die Emissions- und Wirtschaftlichkeitsrechnung 9000 Mal durchgeführt (random sampling), um dann statistische Aussagen für die drei Szenarien treffen zu können. Die Unsicherheiten der Emissions- und Wirtschaftlichkeitsrechnung werden als Histogramme dargestellt. Punktdiagramme zeigen den Einfluss der jeweiligen Parameter auf das Ergebnis. Im Unterschied zu lokalen Sensitivitätsanalysen, wo immer nur ein Parameter variiert wird, während die anderen konstant gehalten werden, ändern sich bei der globalen Sensitivitätsanalyse alle Parameter gleichzeitig, wodurch auch Abhängigkeiten der Parameter mitberücksichtigt werden.

3 Wärmepumpen für die industrielle Trocknung (Basisfall)

3.1 Ziegel Trocknung

Bei der Ziegelherstellung werden die Ziegelrohlinge zunächst getrocknet und dann im Ofen gebrannt. Abbildung 1 (links) zeigt die schematische Darstellung einer Trockenkammer, in der die Rohlinge chargenweise mit angewärmter Luft umströmt werden. Üblicherweise werden die Kammern mit heißer Abluft aus dem Brennofen und mit Erdgasbrennern beheizt. Die feuchte Abluft weist Taupunkte im Bereich von 30-65°C auf und wird an die Umgebung abgegeben.

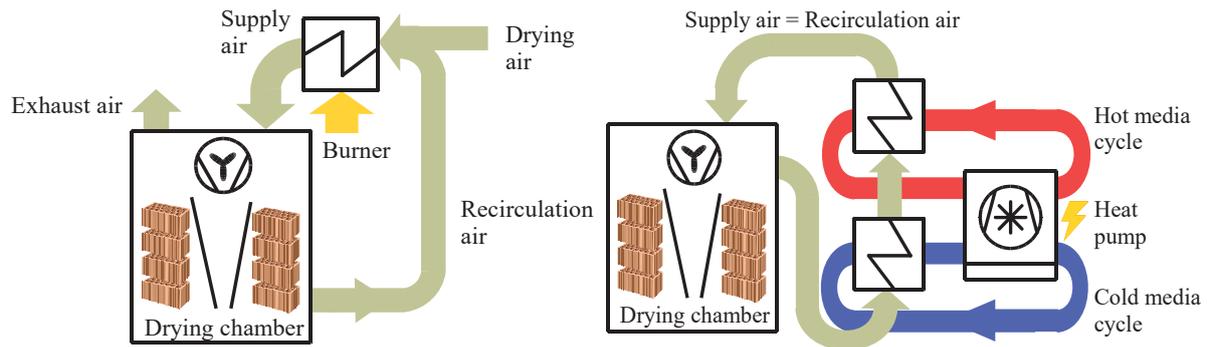


Abbildung 1: Kammer Trockner (links: fossil beheizt, rechts: Umluftbetrieb mit Wärmepumpe), [11]

Durch die Integration einer Wärmepumpe kann die Kammer im Umluftbetrieb betrieben werden. Die beladene Kammerluft dient als Wärmequelle und wird von der Wärmepumpe abgekühlt, bis der Taupunkt erreicht ist und Wasser als Kondensat anfällt. Die Wärmepumpe erwärmt den getrockneten Luftstrom wieder auf die benötigte Kammer Temperatur. Der Wärmepumpenprozess wird durch Zwischenkreise von der Luftströmung getrennt (Abbildung 1, rechts). Dieser Umluftbetrieb mit Wärmepumpe wurde in einem Laborkammertrockner am Produktionsstandort der Wienerberger AG in Haiding realisiert. Der Labortrockner, in dem 24 Ziegel getrocknet werden können, verhält sich wie eine industrielle Trocknungskammer und liefert daher gut übertragbare Ergebnisse. Die Wärmepumpe erreicht im Auslegungspunkt eine Heizleistung von 50 kW, es wurden ein Kolbenverdichter und das Kältemittel R134a eingesetzt. Auf Grund des Kältemittels liegt die maximale Wärmenutzungstemperatur bei 90°C, die typische Wärmenutzungstemperatur beträgt 50-60°C. Variiert man die Temperatur der Trocknungsluft, verändern sich die Prozessdauer und damit der Durchsatz. Da der Wirkungsgrad des Trocknungsprozesses, der Wärmepumpe und des Gesamtsystems stark vom Betriebspunkt abhängen, wurden verschiedene Prozessparameter, wie der Zuluftmassenstrom in die Trockenkammer, die Zirkulation der Luft in der Kammer und die Temperatur der Trocknungsluft in den Versuchsreihen variiert, um die optimale Betriebsweise zu bestimmen. Detaillierte Ergebnisse der Versuche wurden in [11] veröffentlicht.

Die Versuchsergebnisse, sowie Überlegungen zur Optimierung des Kammer Trockners mit der Wärmepumpe sind die Grundlage für ein Konzept einer großtechnischen Anwendung. Dabei wird ein Ziegelwerk mittlerer Größe, in dem 10 t/h Ziegel produziert werden, betrachtet. In Tabelle 2 werden die Kennzahlen, die für die Emissionsrechnung und die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung benötigt werden, zusammengefasst.

Tabelle 2: Kennzahlen Ziegel Trocknung

Mittlerer spezifischer elektrischer Energiebedarf (SEC)	kWh/kg Wasser	0.36
Elektrischer Energiebedarf	kW	923
Betriebsstunden	h/a	8280
Mittlerer spezifischer fossiler Energiebedarf	kWh/kg Wasser	1
Heizleistung	kW	2418

3.2 Stärketrocknung

Stärke wird in einem kontinuierlich betriebenen Flugstromtrockner getrocknet. Dabei kommen die Stärkepartikel mit heißer Luft in Kontakt und werden in Zyklonen abgeschieden. In dem betrachteten Stärketrockner der AGRANA Stärke GmbH wird die Trocknungsluft in zwei Stufen erhitzt, zuerst mit Warmwasser, das durch Abwärme anderer Anlagen bereitgestellt wird, anschließend mit Dampf, um die benötigte Temperatur von 158°C zu erreichen (Abbildung 2, links). In [12] wurden verschiedene Varianten zur Einbindung einer Wärmepumpe in den Stärketrocknungsprozess untersucht. Die bevorzugte Variante zeigt Abbildung 2, rechts. Die Wärmepumpe nutzt den Warmwasserkreis als Wärmequelle und erwärmt die Trocknungsluft über einen Heißwasserkreis. Diese Wärmepumpe wurde im kleinen Maßstab als Funktionsmuster gebaut und auf dem Prüfstand vermessen. Es handelt sich um eine einstufige Kompressionswärmepumpe mit R245fa als Kältemittel und einem Schraubenverdichter von Bitzer, die bei Quellentemperaturen von bis zu 90°C und Nutzungstemperaturen von bis zu 130°C betrieben kann. Das Funktionsmuster hat eine Heizleistung von bis zu 363 kW und wurde am Prüfstand erfolgreich im angestrebten Betriebsbereich betrieben. [13]

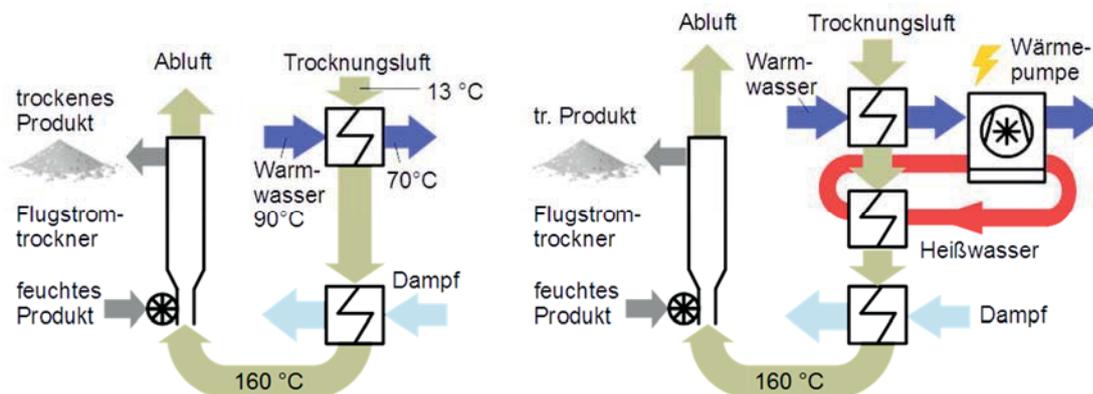


Abbildung 2: Stärketrocknungsprozess (links ohne Wärmepumpe, rechts mit Wärmepumpe), [12]

Mit den Messergebnissen, sowie weiteren Überlegungen zur Optimierung wird ein Simulationsmodell erstellt, das eine Wärmepumpe industriellen Maßstabs für die Stärketrocknung abbildet. Mit der Wärmepumpe wird Luft auf 128°C erwärmt. Um die erforderliche Lufttemperatur von 158°C zu erreichen, wird die Luft mit Dampf weiter erhitzt. Tabelle 3 fasst die Kennzahlen dieses Stärketrocknungsprozesses zusammen, die für die weiteren Betrachtungen benötigt werden.

Tabelle 3: Kennzahlen Stärketrocknung

Leistungszahl der Wärmepumpe (COP)	-	2.25
Heizleistung der Wärmepumpe	kW	2658
Elektrischer Energiebedarf	kW	1179
Betriebsstunden	h/a	8280
Wirkungsgrad Dampferzeugung	%	93

3.3 Ergebnisse des Basisfalls

Für die beiden industriellen Konzepte wurden die Endenergie-, die CO₂-Emissions- und Energiekosteneinsparungen, sowie die Investitionskosten und die Amortisationszeit nach Kapitel 2 berechnet und in Tabelle 4 zusammengefasst. Im Ziegel Trocknungsprozess können mit der Wärmepumpe 54% der CO₂-Emissionen vermieden werden, der Endenergieeinsatz wird um 62% verringert. Die Amortisationszeit liegt bei 2 Jahren. Den Investitionskosten von rund 725 000 € für die Wärmepumpe stehen Einsparungen von ca. 343 000 €/a gegenüber.

Bei der Stärketrocknung werden höhere Temperaturen benötigt, die Wärmepumpe verbraucht daher mehr Strom und die relativen Einsparungen fallen etwas geringer aus. Die CO₂-Emissionen werden um 50%, die Energiekosten um 41% verringert. Die Amortisationszeit liegt bei 2.5 Jahren.

Tabelle 4: Ergebnisse Basisfall

Emissionsrechnung		Ziegel	Stärke
Endenergieeinsparung	kWh/a	12379	13901
	%	62	59
CO ₂ -Einsparungen	t/a	2668	2934
	%	54	50
Wirtschaftlichkeit			
Energiekosteneinsparung	€/a	343043	365963
	%	45	41
Investitionskosten Wärmepumpe	€	725400	930150
Amortisationszeit Wärmepumpe	a	2.11	2.54

4 Sensitivitätsanalyse

Die Ergebnisse des Basisfalls verdeutlichen, dass die Integration einer Wärmepumpe ökologisch und ökonomisch sinnvoll und mit einer Amortisationszeit von rund 2 Jahren vielversprechend ist. Das Ziel der Sensitivitätsanalyse ist es nun, festzustellen, welche Parameter großen Einfluss auf das Ergebnis haben und zu zeigen, wie sich unterschiedliche Szenarien auswirken.

Szenario 1: Energiepreise sind geringer als im Basisfall

Tabelle 5 zeigt die Bandbreite der Strom- und Gaspreise für dieses Szenario. Das Maximum entspricht dem Basisfall, das Minimum ist um 30% geringer als der Basisfall. Die Histogramme in Abbildung 3 stellen die Verteilung der Häufigkeiten der 9000 Simulationen dar.

Tabelle 5: Grenzen der gleichverteilten Zufallsvariablen für Strom- und Gaspreis

		Minimum	Maximum
Strom	ct/kWh	3.8	5.4
Gas	ct/kWh	2.6	3.8

Bei der Stärketrocknung wurde im Basisfall eine Amortisationszeit von 2.54 Jahren erzielt. Geht man von niedrigeren Energiepreisen aus, liegt die Amortisationszeit in 31% der Fälle darunter. 77% der Fälle rechnen sich in weniger als 4 Jahren. Bei der Ziegelrocknung ist die Amortisationszeit in 29% der Fälle geringer als im Basisfall. In 91% der Fälle ist sie geringer als 4 Jahre.

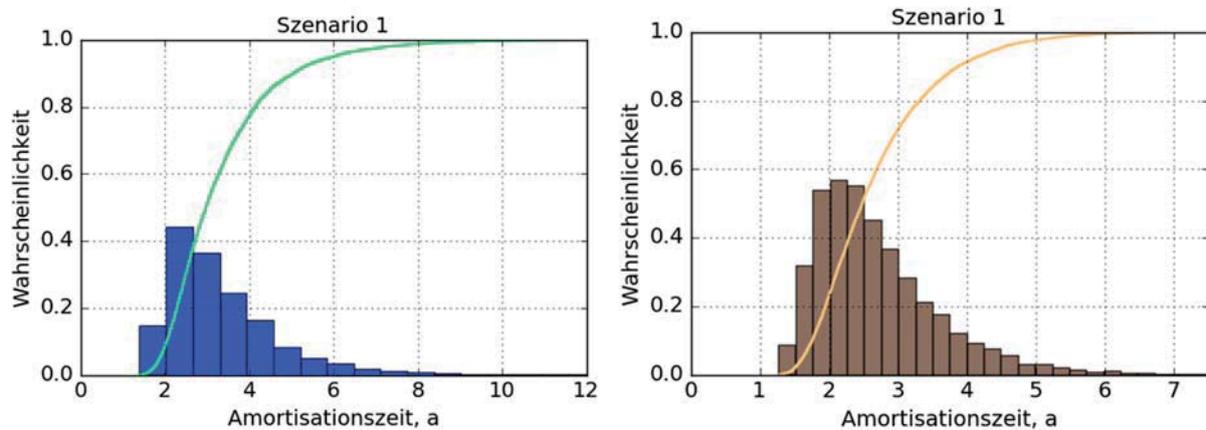


Abbildung 3: Histogramme und Summenkurven, links: Stärketrocknung (blau), rechts: Ziegelrocknung (braun)

Die folgenden Punktdiagramme zeigen den Einfluss verschiedener Parameter auf die Amortisationszeit. In Abbildung 4 werden die Auswirkungen von Strom- und Gaspreis dargestellt. Der Schnittpunkt der schwarzen Linien kennzeichnet den Basisfall (Strompreis 5.4 ct/kWh). Dass der Basisfall nicht in der rechten unteren Ecke der Punktwolke liegt, macht den Einfluss der anderen Zufallsparameter deutlich.

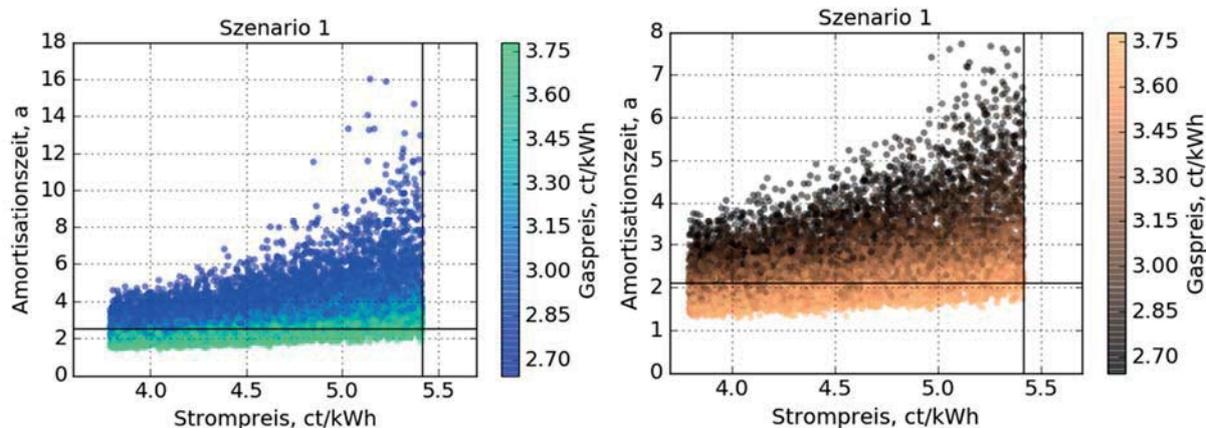


Abbildung 4: Einfluss von Strompreis und Gaspreis, links: Stärketrocknung (blau), rechts: Ziegelrocknung (braun)

Ist der Gaspreis hoch (grüne und orange Punkte), nimmt die Amortisationszeit mit sinkendem Strompreis nur wenig ab. Wird der Gaspreis geringer (blaue und braune Punkte), steigt die Amortisationszeit deutlich. Je geringer die laufenden Energiekosten sind, umso länger braucht

es, bis die Energiekosteneinsparungen die Investitionskosten abdecken. Bei niedrigsten Strom- und Gaspreis beträgt die Amortisationszeit ca. 4.5 Jahre bei der Stärketrocknung und rund 3.5 Jahre bei der Ziegelrocknung.

In Abbildung 5 werden Strom- und Gaspreis als Verhältnis betrachtet (S/G Preisverhältnis). Die Farben verändern sich in Abhängigkeit von den spezifischen Investitionskosten der Wärmepumpe, die ebenfalls als gleichverteilte Zufallsvariablen $\pm 20\%$ des Basisfalls betragen. Im Basisfall liegt das S/G Preisverhältnis bei 1.4. Je niedriger die Investitionskosten (blau und braun), desto geringer ist die Amortisationszeit. Obwohl die Energiepreise in diesem Szenario um bis zu 30% geringer sein können, kann die Amortisationszeit trotzdem zunehmen. Die obere Grenze der Punktwolke beschreibt eine gekrümmte Kurve, die bei der Stärketrocknung zwischen rund 2 bis 10 Jahren liegt, in wenigen Fällen kann die Amortisationszeit auch bis zu 16 Jahre betragen. Im Fall der Ziegelrocknung liegt die gekrümmte Kurve zwischen 2 und 6 Jahren und ist jedenfalls geringer als 8 Jahre. Wegen den geringeren Wärmenutzungstemperaturen ist die Amortisationszeit geringer als bei der Stärketrocknung. Die Investitionskosten der Wärmepumpe sind vergleichsweise niedriger, durch den geringeren Temperaturhub ist der Betrieb der Wärmepumpe effizienter.

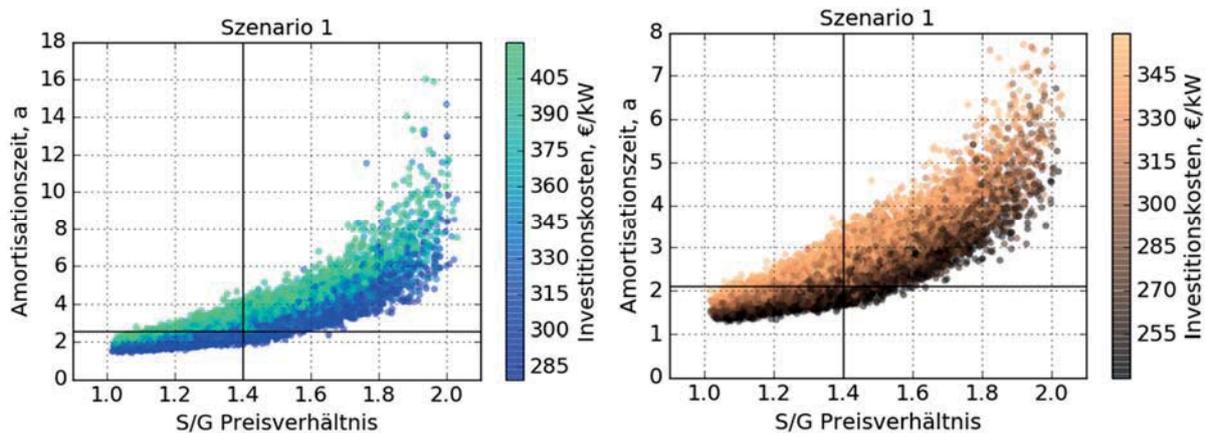


Abbildung 5: Einfluss von S/G Preisverhältnis und Investitionskosten, links: Stärketrocknung (blau), rechts: Ziegelrocknung (braun)

Szenario 2: Energiepreise sind höher als im Basisfall

Nun können die Energiepreise um bis zu 50% höher sein als im Basisfall (Tabelle 6). Bei der Stärketrocknung liegt die Amortisationszeit in 70% der Fälle unter 2.54 Jahren (Basisfall). 92% der Fälle rechnen sich in weniger als 4 Jahren. Bei der Ziegelrocknung ist die Amortisationszeit in 72% der Fälle geringer als im Basisfall. In 98% der Fälle beträgt sie weniger als 4 Jahre. Der Vergleich mit Szenario 1 zeigt, dass sich steigende Energiepreise positiv auf die Wirtschaftlichkeit von Energieeffizienzmaßnahmen auswirken und die Amortisationszeit abnimmt.

Tabelle 6: Grenzen der gleichverteilten Zufallsvariablen für Strom- und Gaspreis

		Minimum	Maximum
Strom	ct/kWh	5.4	8.1
Gas	ct/kWh	3.8	5.7

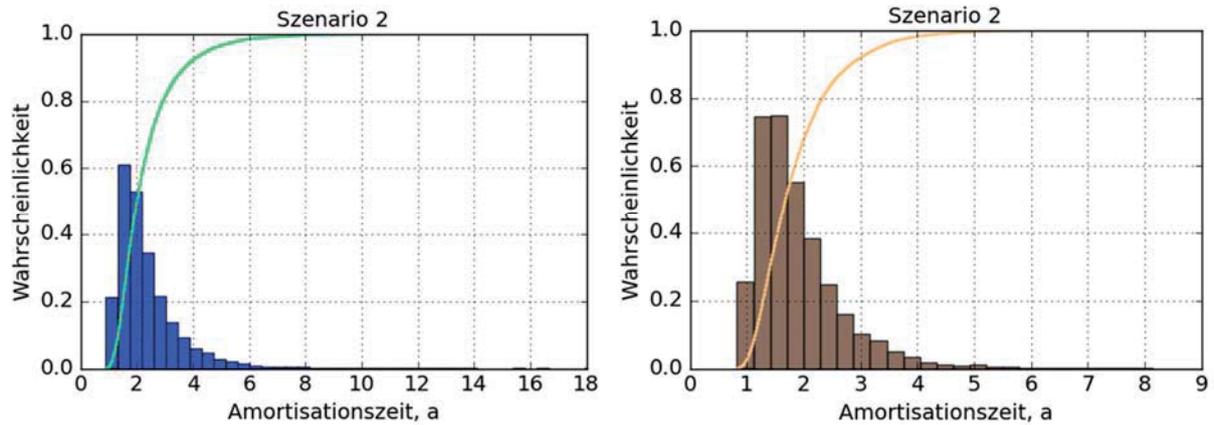


Abbildung 6: Histogramme und Summenkurven, links: Stärketrocknung (blau), rechts: Ziegel Trocknung (braun)

Mit steigenden Energiepreisen rechnet sich die Investition in eine Wärmepumpe früher. In Abbildung 7 ist der Basisfall in der linken oberen Ecke der Punktwolke und wird durch den Schnittpunkt der schwarzen Linien angezeigt. Steigende Gaspreise, die als grüne und orange Punkte dargestellt werden, verringern die Amortisationszeit. Steigende Strompreise haben bei hohen Gaspreisen keinen großen Einfluss auf die Amortisationszeit. Bei niedrigeren Gaspreisen sind Amortisationszeiten von rund 7 Jahren bei der Stärketrocknung wahrscheinlich, in wenigen Fällen bis zu 18 Jahren. Abbildung 7 (links) zeigt die Ergebnisse für die Ziegel Trocknung. Hier betragen die Amortisationszeiten meist unter 4 Jahren, in wenigen Fällen bis zu 10 Jahren.

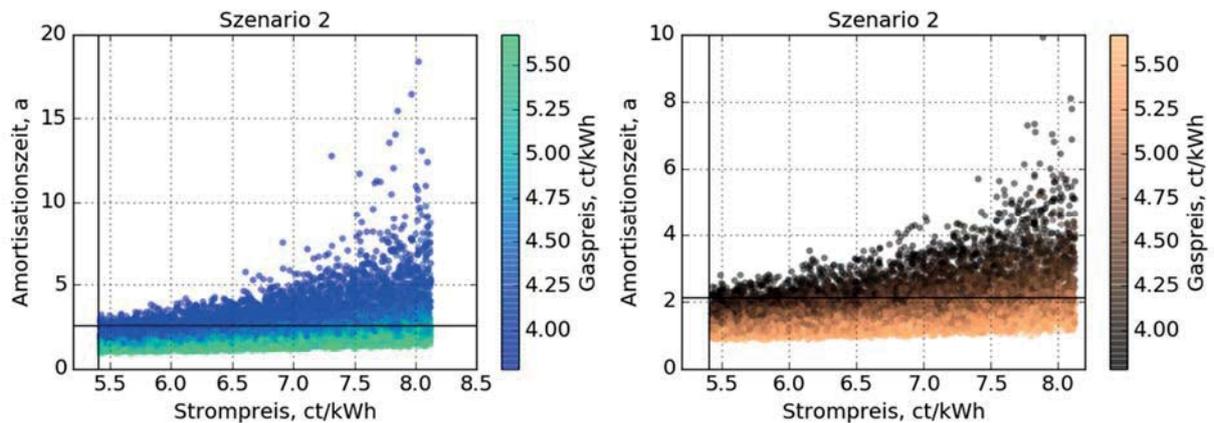


Abbildung 7: Einfluss von Strompreis und Gaspreis, links: Stärketrocknung (blau), rechts: Ziegel Trocknung (braun)

Abbildung 8 verdeutlicht, dass die Investitionskosten größeren Einfluss auf die Amortisationszeit haben, wenn das Preisverhältnis hoch ist (hoher Strompreis, geringer Gaspreis).

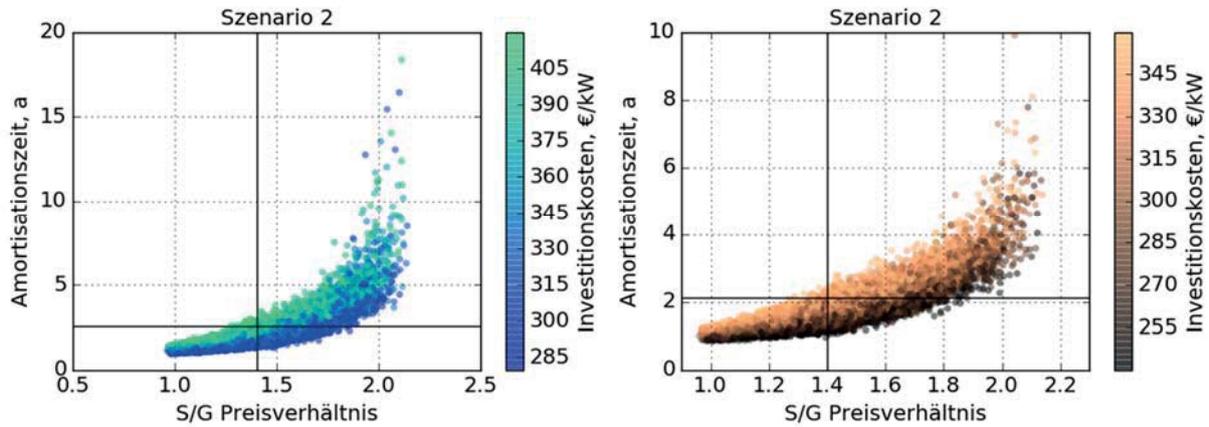


Abbildung 8: Einfluss von S/G Preisverhältnis und Investitionskosten, links: Stärketrocknung (blau), rechts: Ziegelrocknung (braun)

Szenario 3: Die CO₂-Emissionen der Stromerzeugung ändern sich

In diesem Szenario wird der Emissionsfaktor der Stromerzeugung um bis zu 40% verringert und erhöht. Der Emissionsfaktor wird durch den Erzeugermix des Stroms bestimmt. Wird ein größerer Anteil des Stroms durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen erzeugt, steigt der Emissionsfaktor. Ein höherer Anteil von erneuerbaren Stromerzeugern, wie Photovoltaik, Wasserkraft und Windkraft, verringert den Emissionsfaktor. Der Emissionsfaktor der Gaserzeugung wird hier nicht variiert.

Tabelle 7: Grenzen der gleichverteilten Zufallsvariablen für die CO₂-Emissionen der Stromerzeugung

		Basisfall	Minimum	Maximum
CO ₂ -Emissionsfaktor	g/kWh	300	180	420

In die Emissionsrechnung geht neben dem Emissionsfaktor noch der Strombedarf als normalverteilte Zufallsvariable ein. Daher entspricht das Histogramm in Abbildung 9 der Gleichverteilung des Emissionsfaktors, überlagert mit der Normalverteilung des Strombedarfs. Die CO₂-Einsparungen liegen zwischen 20% und 74% bei der Stärketrocknung und zwischen 26% und 76% bei der Ziegelrocknung.

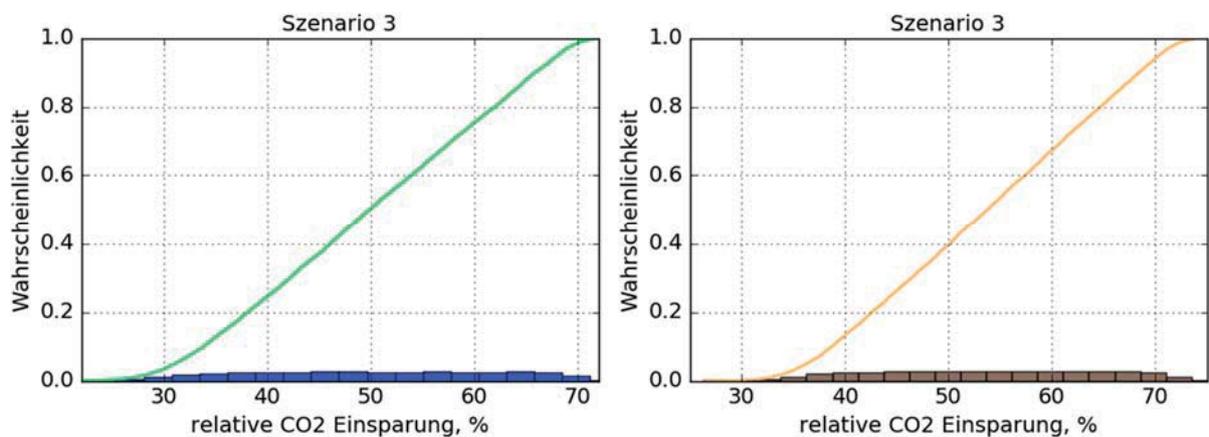


Abbildung 9: Histogramme und Summenkurven, links: Stärketrocknung (blau), rechts: Ziegelrocknung (braun)

In diesem Szenario liegt der Basisfall (Schnittpunkt der schwarzen Linien) in der Mitte der Punktwolke. Die Farben zeigen die absoluten Werte der CO₂-Einsparungen an. Bei der Stärketrocknung können je nach Strommix zwischen 1200 t/a und 4300 t/a Emissionen vermieden werden. Bei der Ziegelrocknung fallen die absoluten Einsparungen wegen der geringeren Heizleistung der Wärmepumpe etwas geringer aus und betragen 1300 – 3800 t/a.

Durch den CO₂-Zertifikathandel kann die CO₂-Emissionsreduktion monetär bewertet werden. Derzeit liegen die Zertifikatspreise bei rund 8 €/t, was keine großen Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit von derartigen Umweltschutzmaßnahmen hat. Langfristig soll der CO₂-Preis durch Verknappung der Zertifikate steigen. Beträgt der Zertifikatspreis 30 €/t, so erhöht sich die Einsparung im Basisfall der Stärke- und der Ziegelrocknung um ein Viertel und kann damit die Investitionsentscheidung für eine Wärmepumpe begünstigen.

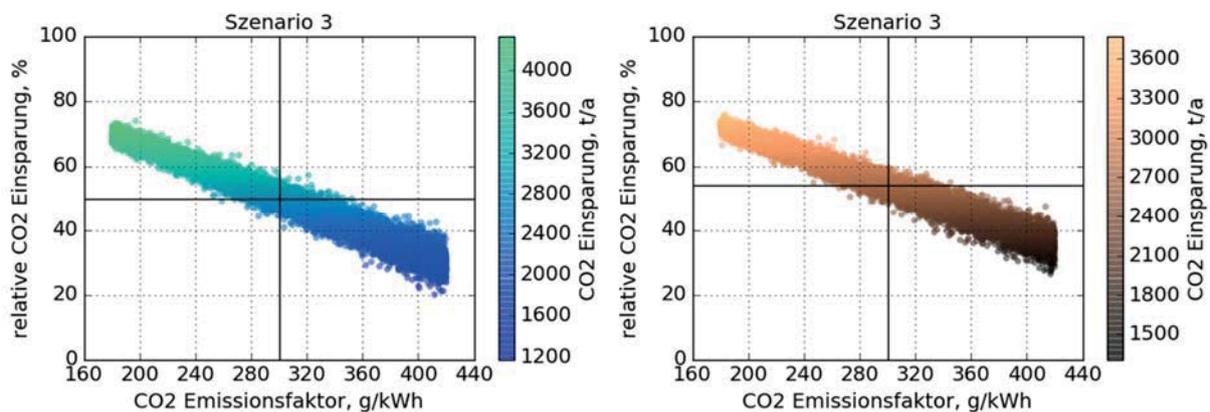


Abbildung 10: Einfluss des CO₂-Emissionsfaktors, links: Stärketrocknung (blau), rechts: Ziegelrocknung (braun)

5 Schlussfolgerungen

Die verschiedenen Szenarien zeigen, dass sich steigende Energiekosten positiv auf die Wirtschaftlichkeit einer Wärmepumpe auswirken. Die Verteilung der Amortisationszeiten wird zwar breiter, die größte Häufigkeit tritt aber bei niedrigen Amortisationszeiten auf. Im Vergleich zum Basisfall rechnen sich ca. 70% der Fälle bei steigenden Energiekosten früher, da die laufenden Energiekosteneinsparungen höher ausfallen. Bei niedrigeren Energiekosten sind es nur rund 30% der Fälle, dafür ist die Verteilung der Amortisationszeiten weniger breit. Ist das Verhältnis von Strom- und Gaspreis hoch, haben die Investitionskosten einen größeren Einfluss auf die Amortisationszeit.

In Abhängigkeit von den CO₂-Faktoren liegen die Einsparungen zwischen 20 und 70%. Die Integration von Wärmepumpen in Trocknungsprozesse ermöglicht jedenfalls eine Verringerung der CO₂-Emissionen und hat damit positive Auswirkungen auf die Umwelt.

Die Szenarien sind eine Visualisierung einer möglichen zukünftigen Entwicklung und können dadurch als Entscheidungshilfe für Investitionen dienen.

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, Institut für Energietechnik und Thermodynamik der TU Wien,

Institut für Ziegelforschung Essen e.V. und AIT Austrian Institute of Technology GmbH beteiligt sind. Dieses Projekt wurde aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Energieforschungsprogramms 2015 durchgeführt.



7 Literatur

- [1] Drexler-Schmid, G.; Lauermann, M.; Popovac, M. et al.: Messung und Simulation einer 50 kW Butan-Hochtemperaturwärmepumpe mit Ejektor. In: Deutsche Kälte- und Klimatagung. DKV, Kassel, 2016.
- [2] Hartl, M.: High temperature heat pumps for drying. Chillventa Congress, 2016.
- [3] Adler, B.; Mauthner, R.: Rotation Heat Pump (RHP). In: 12th IEA Heat Pump Conference, Rotterdam, 2017.
- [4] Reissner, F.; Gromoll, B.; Schäfer, J. et al.: Experimental performance evaluation of new safe and environmentally friendly working fluids for high temperature heat pumps. In: European Heat Pump Summit, Nuremberg, 15.-16. October, 2013.
- [5] Nilsson, M.; Nes Risla, H.; Kontomaris, K.: Measured performance of a novel high temperature heat pump with HFO-1336mzz(Z) as the working fluid. In: 12th IEA Heat Pump Conference, Rotterdam, 2017.
- [6] GEMIS. Gas-Kessel-A-Konversionsfaktoren.
- [7] GEMIS. EI-KW-Park-A+Importe-2011.
- [8] Energie-Control Austria: Preisentwicklung Nicht-Haushalte - halbjährliche Aktualisierung, 2017.
- [9] Statistik Austria: Jahresdurchschnittspreise und Steuern für die wichtigsten Energieträger 2015, 2017.
- [10] Helton, J. C.: Sampling-Based Methods for Uncertainty and Sensitivity Analysis. In: Hanson, K. M.; Hemez, F. M. (Hrsg.): Sensitivity Analysis of Model Output. 4th International Conference on Sensitivity Analysis of Model Output (SAMO 2004), Santa Fe, New Mexico, Los Alamos, S. 221–229, 2005.
- [11] Fraubaum, M.; Lauermann, M.; Hartl, M. et al.: Experimental Evaluation of Brick Drying Using a Compression Heat Pump. In: EuroDrying. 6th European Drying Conference, Liege, 2017.
- [12] Wilk, V.; Hartl, M.; Fleckl, T. et al.: Erhöhung der Energieeffizienz industrieller Trocknungsprozesse durch den Einsatz von Wärmepumpen. In: 14. Symposium Energieinnovation, Graz, 2016.
- [13] Tretau, A.; Kraxner, D.; Pfaffl, J. et al.: DryPump - Effiziente Trocknung mit Kompressionswärmepumpen. Publizierbarer Endbericht, 2018.