Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436–4980–2023–11–12–41

Wärmebedarfsdeckung in einer bestehenden industriellen Energieversorgungsinfrastruktur

Vergleich einer Wärmepumpe mit einem Blockheizkraftwerk

A. Mages, L. Willer, A. Sauer

ZUSAMMENFASSUNG In diesem Beitrag wird die Integration einer Wärmepumpe und eines Blockheizkraftwerks in eine bestehende Energieversorgungsinfrastruktur am Beispiel eines Kleinunternehmens ökonomisch und ökologisch für zwei historisch stark unterschiedliche Energiepreisszenarien für variable installierte Kapazitäten bewertet. Als Ergebnis konnte mit tendenziell größeren CO_2-Einsparungen für die Wärmepumpe eine starke, für das BHKW eine nur moderate Abhängigkeit der Amortisationszeiten auf unterschiedliche Energiepreisentwicklungen festgestellt werden.

STICHWÖRTER

Investitionsplanung, Fabrikplanung, Energieeffizienz

Comparison of a heat pump with a combined heat and power unit

ABSTRACT In this paper, the integration of a heat pump and a combined heat and power plant into an existing energy supply infrastructure is evaluated economically and ecologically for two historically strongly different energy price scenarios and variable installed capacities using the example of a small company As a result, a strong dependence of the payback periods on different energy price developments could be determined with a tendency towards greater CO_2 savings for the heat pump, and only a moderate dependence for the combined heat and power plant.

1 Einleitung

Im Jahr 2021 hat die Bundesregierung die nationalen Klimaschutzziele im Rahmen des Bundes-Klimaschutzgesetzes nachgeschärft und das Ziel der Klimaneutralität bis 2045 verankert. Bis 2030 sollen die Treibhausgasemissionen um 65 % und bis 2040 um 88 % im Vergleich zu 1990 reduziert werden [1]. Mit einem Anteil von 72 % an Erdgas und -öl in der Nettowärmeerzeugung in Deutschland setzte der Großteil der Wärmeerzeuger 2021 auf fossile Energiequellen [2]. Ein Wechsel auf nachhaltigere und ökologischere Wärmeerzeugertechnologien ist damit ein signifikanter Hebel zur Reduktion der Treibhausgasemissionen im Wärmesektor. Mit der Wärmepumpe und dem Blockheizkraftwerk (BHKW) oder daraus kombinierten Systemen stehen heute geeignete Alternativen zur Verfügung, die einen höheren Gesamtenergieausnutzungsgrad aufweisen und damit eine teilweise oder vollständige Dekarbonisierung ermöglichen [3, S. 2 – 3, 4].

Der Einsatz dieser Technologien ist mit zahlreichen Vorteilen verbunden. Jedoch birgt die Integration in industrielle Wärmeversorgungssysteme, unter anderem aufgrund der Unsicherheit bezüglich der Preisentwicklung von Energieträgern, ein erhebliches Investitionsrisiko. Der Ausbau der Erneuerbaren Energien sowie das wiederholte Auftreten exogener Schocks stellen die Unternehmen in Deutschland zunehmend vor Herausforderungen. In Folge der Corona-Pandemie sowie des russischen Angriffskrieges auf die Ukraine im Jahr 2022 erreichten die Energiepreise für Strom und Gas ein Anstieg im Vergleich zum Vorjahr von zeitweise um mehr als das Zehnfache [5, S. 3 – 22]. Mit dem Ziel eine Investitionsentscheidung hinsichtlich unsicherer Energiepreise zu unterstützen, wird in diesem Beitrag ein Vorgehen beschrieben mit welchem die Wirtschaftlichkeit einer Wärmepumpe sowie eines BHKWs für zwei Energiepreisszenarien bewertet werden kann. Zudem wird das CO_2-Minderungspotenzial der beiden Technologien anhand der Scope 1 und 2 Emissionen verglichen.

2 Charakterisierung des Wärmeversorgungssystems

In diesem Kapitel werden zunächst die grundlegenden Charakteristika industrieller Wärmeversorgungssysteme aufgezeigt und relevante Technologien beschrieben. Anschließend wird das in diesem Beitrag untersuchte Wärmeversorgungssystem beschrieben und letztlich die betrachteten Versorgungsvarianten „Wärmepumpe“ und „BHKW“ detailliert erläutert.

2.1 Allgemeine Charakterisierung des Wärmeversorgungssystems

In einer Fabrik ist die Wärmeversorgung zur Erzeugung, Bereitstellung und Verteilung von Wärme an den Verbraucher zuständig, wobei sich die bereitgestellte thermische Energie zwischen System- und Raumwärme aufteilen lässt. Die Systemwärme kann in einen Systembetriebs- und einen Prozesswärmeanteil aufgeteilt werden. Ersterer wird zum Betrieb und Erhalt des Flusssystems zum Verbraucher benötigt, der Prozesswärmeanteil beschreibt die nötige Wärme zur Durchführung technologischer

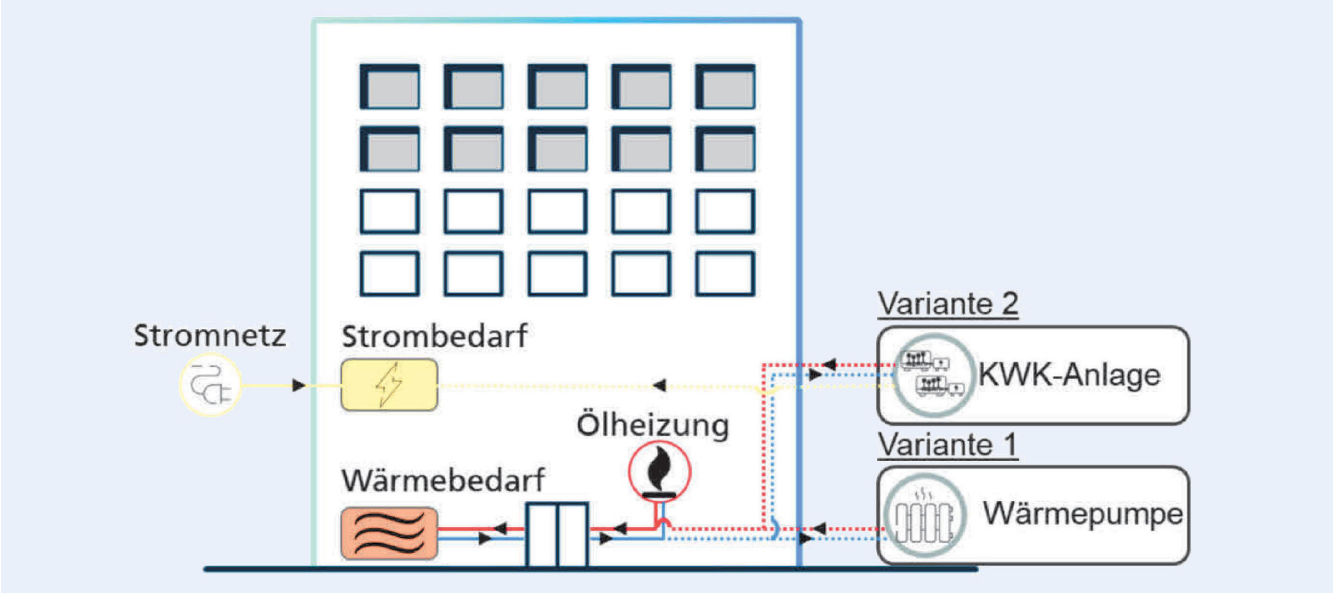


Bild 1. Wärmeversorgungsstruktur (schematisch) im Beispielunternehmen und die betrachteten Versorgungsvarianten. *Grafik: EEP*

Verfahren wie Trocknungs-, Aufschmelz- oder Reinigungsprozesse [6, S. 1435 – 1445].

Die Raumwärme ist die Wärmelast, die zum Erreichen einer geforderten Raumtemperatur nötig ist und wird im Niedertemperaturbereich (<100 °C) übertragen [6, 7]. In den unterschiedlichen Prozessen wird die Wärmeversorgung auf unterschiedlichen Temperaturniveaus gefordert, welche sich neben dem Niedertemperaturbereich (<100 °C) in einen mittleren Temperatur- (100 °C – 500 °C) und Hochtemperaturbereich (> 500 °C) klassifizieren lassen. Für die Niedertemperaturwärme können unter anderem Heiz-, Elektrodenkessel, KWK-Anlagen, Wärmepumpen, Solarthermie oder Geothermie eingesetzt werden. Die Bereitstellung von Hochtemperaturwärme über 500 °C erfolgt in der Regel durch die Verbrennung fossiler Energieträger wie Erdgas oder Heizöl oder direkt aus Elektrowärme. Zukünftig können regenerative Brennstoffe wie zum Beispiel grüner Wasserstoff eingesetzt werden [7–10]. Im mittleren Temperaturbereich kann die Wärme abhängig vom Temperaturniveau aus dem Technologiebereich der Nieder- beziehungsweise Hochtemperaturwärme bereitgestellt werden [11 S. 11].

Heizsysteme können auch mit zwei oder mehreren Erzeugeranlagen ausgestattet sein und somit den Wärmebedarf aus unterschiedlichen Energieträgern decken. Diese Systeme werden als bivalent beziehungsweise multivalent bezeichnet [12]. Beispiele solcher Systeme sind die Kombination aus Elektroden- und Gasheizkessel oder einer Wärmepumpe und einem Gasheizkessel. Der Betrieb solcher Anlagen kann entweder bivalent alternativ, das heißt die Wärme wird immer nur von einer Technologie bereitgestellt, oder bivalent parallel, also einem gleichzeitigen Betrieb, erfolgen. Die jeweilige Betriebsweise richtet sich üblicherweise nach der Wirtschaftlichkeit [13, S. 7 – 19, 14].

2.2 Funktionsweise von Wärmepumpe und BHKW

Wärmepumpen heben Umgebungswärme in einem Kreisprozess unter Einsatz technischer Arbeit aus einer Wärmequelle wie Luft oder Grundwasser von einem niedrigen Temperaturniveau auf ein Höheres. Die Wärme kann zur Versorgung von Raum- oder Prozesswärme eingesetzt werden. Die Nutzung der Umgebungswärme im Prozess ermöglicht hierbei Wirkungsgrade größer 100 % und wird als Coefficient of Performance (COP) bezeichnet. Dieser gibt das Verhältnis zwischen abgegebener Wärmeleistung zu eingesetzter elektrischer Leistung an und liegt in der Praxis zwischen 3 und 5 [7 S. 28, 22].

BHKWs arbeiten nach dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). Kraft-Wärme-Kopplung bezeichnet die gemeinschaftliche Produktion von Strom und Wärme und ist mit einer erheblichen Steigerung der Primärenergieeffizienz verbunden. Im Vergleich zur konventionellen beziehungsweise getrennten Strom- und Wärmeerzeugung können Primärenergieeinsparungen von bis zu 36 % erzielt werden. Gleichzeitig wird der Ausstoß an klimaschädlichen Emissionen wie CO_2 reduziert [15 S. 8, 9]. BHKW können anhand ihrer Antriebskonzepte, Leistungsbereiche sowie der eingesetzten Brennstoffe klassifiziert werden. Als Antriebsaggregat dienen Verbrennungsmotoren, (Mikro-) Gasturbinen, Stirlingmotoren oder Brennstoffzellen. Im industriellen Umfeld gelten verbrennungsmotorische BHKW als Stand der Technik. Oftmals werden gasförmige Brennstoffe wie Erd- oder Biogas in Ottomotoren verbrannt, um Strom über einen Generator zu erzeugen. Die Motorabwärme sowie die Wärme im Abgas werden mittels Wärmetauscher ausgekoppelt und auf einem Temperaturniveau von circa 85–95 °C nutzbar gemacht. Dabei werden elektrische Wirkungsgrade von rund 40 % und Gesamtwirkungsgrade von über 90 % erreicht [16, 17, S. 211].

2.3 Ausgangssituation und Varianten des Wärmeversorgungssystems

Bild 1 zeigt die aktuelle Energieversorgungsstruktur im Beispielunternehmen sowie die betrachteten Versorgungsvarianten. Die Wärme wird ausschließlich im Niedertemperaturbereich zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser benötigt und zentral in einer Ölheizung erzeugt und über ein Rohrleitungssystem an die jeweiligen Verbraucher verteilt. Diese Konfiguration entspricht der Mehrzahl bestehender Wärmeversor-

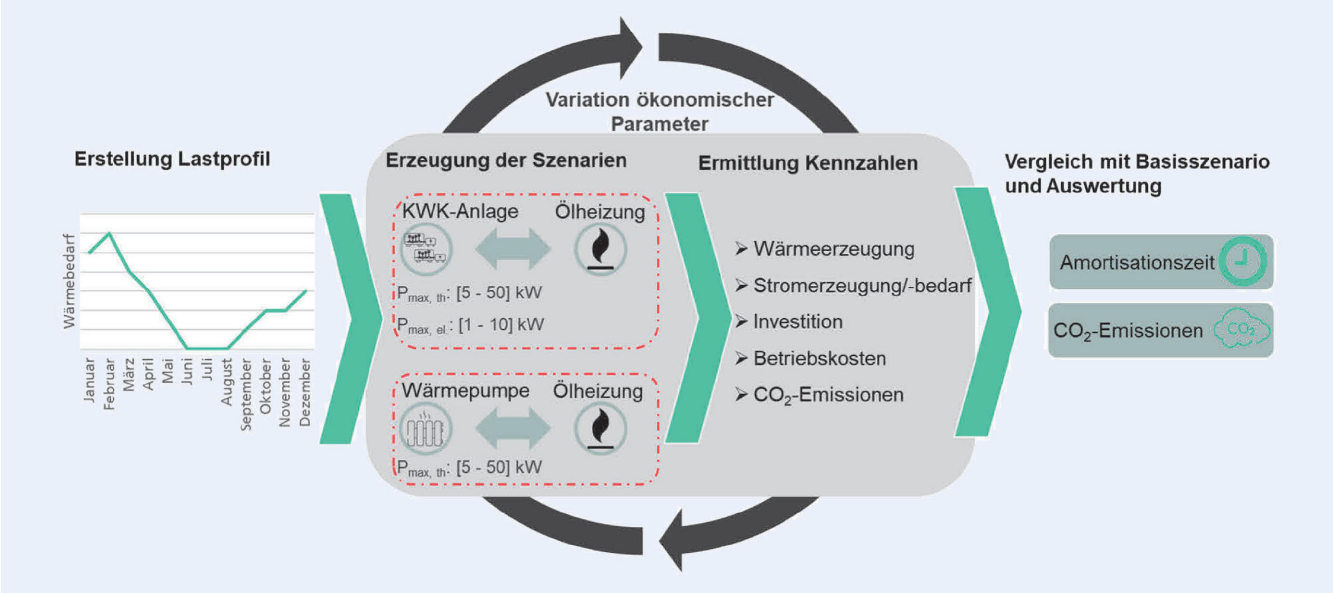


Bild 2. Vorgehen zur Bestimmung der ökonomischen und ökologischen Kennwerte im mono- und bivalent parallelen Betrieb. *Grafik: EEP*

gungsysteme und beschreibt damit einen typischen Aufbau einer Gebäudeheizung [18 S. 202]. Aufgrund von Produktionsvorgaben wird die Fertigungshalle das ganze Jahr bei 25 °C gehalten, woraus sich ein hoher Jahresraumwärmebedarf ergibt. Strom wird festpreisgebunden über einen Anbieter bezogen, Öl bei Bedarf zu zeitpunktbezogenen Preisen.

Mit den Versorgungsvarianten soll untersucht werden inwiefern diese ökonomisch und ökologisch die Bestandstechnologie Ölheizung ergänzen können. Hierfür werden im folgenden Lösungsvorgehen beide Varianten bivalent parallel mit variabler Heizleistung betrachtet. Im Kontext stark schwankender Energiepreise, die einen großen Einfluss auf die Amortisationsrechnung und damit der Investitionsentscheidung haben, werden zudem zwei stark unterschiedliche Preisszenarien ausgewertet. In der Versorgungsvariante 1 wird eine Wärmepumpe ergänzt. Als Wärmequelle dient die Abwärme ganzjährig kontinuierlich betriebener Ölreinigungs- und Temperieranlagen sowie von Druckluftkompressoren. In der 2. Variante wird ein erdgasbefeuertes BHKW bivalent parallel mit der Ölheizung zur Wärmebedarfsdeckung betrieben, wobei diese zusätzlich ein Teil des Strombedarfs abdeckt. Beide Varianten werden ökonomisch und ökologisch für variable Heizleistungen sowie Preisszenarien hinsichtlich der Amortisationszeiten und relativen CO_2-Einsparungen ausgewertet. Im Folgenden werden das Lösungsvorgehen und die verwendeten techno-ökonomischen und ökologischen Kennwerte für die Auswertung beschrieben.

3 Beschreibung der Methode zur Quantifizierung des ökologischen und ökonomischen Potenzials

Bild 2 skizziert das Lösungsvorgehen. In diesem wird davon ausgegangen, dass entsprechend der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Ausgangssituation eine Ölheizung zur vollen Wärmebedarfsdeckung zur Verfügung steht und abhängig von der Versorgungsvariante entweder eine Wärmepumpe oder eine KWK-Anlage bivalent parallel als Neuinvestition integriert wird. Die Auswertung erfolgt für variable Kapazitäten, wobei sich die maximale Kapazität nach der maximal erforderlichen Jahresleistung richtet, welche über ein Referenzwärmelastprofil ermittelt werden kann. Im betrachteten Industriebetrieb wird diese auf 50 kW_{th} beziffert. Für die minimale Kapazitätsgrenze werden 10 % der maximalen Kapazität, also 5 kW_{th} festgelegt. Zudem wird in beiden Versorgungsvarianten eine Teillastfähigkeit von 50 % berücksichtigt.

Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit werden Amortisationszeiten berechnet, welche sich nach [19] bis 3 Jahren in wirtschaftliche, bis 8 Jahre in möglicherweise wirtschaftliche und darüber hinaus in unwirtschaftliche Investitionen einordnen assen. Zur Berechnung dieser werden für die festgelegte Kapazitäten nach Formel 1 die Investitionsausgaben ($K_{Invest.i}$ durch die Betriebs- und Brennstoffkostendifferenz ($\Delta K_{Betrieb.i.i}$ und $\Delta K_{Betrief.i.i}$) für das jeweilige Energiepreisszenario i beziehungsweise der Versorgungsvariante j dividiert. Für die KWK-Anlage berücksichtigt der Parameter $\Delta K_{Betrief.i.i}$ neben der Kosteneinsparung in der Wärme- auch die der Stromerzeugung, wobei zu jedem Zeitpunkt von einer Eigenverbrauchsquote von 100 % ausgegangen werden kann

$$t_{Am,i,j} = \frac{K_{Invest,j}}{\Delta K_{Betrieb,i,j} + \Delta K_{Brennstoff,i,j}}. \quad (1)$$

Die Integrationskosten sind über die Investitionsausgaben berücksichtigt. Um die Sensitivität der Amortisationszeiten auf unterschiedliche Energiepreisentwicklungen zu bewerten, wurden zudem zwei stark unterschiedliche Energiepreisszenarien (Marktpreise 2018 und 2022 in **Tabelle 1**) erstellt.

Zur Bewertung des Treibhausgasminderungspotenzials werden die prozentualen Scope 1 und 2 CO_2-Emissionseinsparungen $\Delta E_{CO2,i}$ der betrachteten Versorgungsvarianten j verglichen mit dem Ist-Zustand (vgl. Bild 1) nach Formel 2 ausgewertet

$$\Delta E_{CO2,j} = \frac{E_{Ist} - E_j}{E_{Ist}}. \quad (2)$$

Hierfür wird die Differenz der auftretenden CO_2-Emissionen durch den Wärme- und Strombedarf im Ist-Zustand E_{Ist} zu dem der Szenarien gebildet E_i und mit E_{Ist} normiert. Für den strominduzierten CO_2-Ausstoß wird der durchschnittliche CO_2-Aus-

Tabelle 1. In der Auswertung verwendete Energiepreise.

Energiepreisszenario	Strompreis [€/kWh]	Ölpreis [€/kWh]	Gaspreis [€/kWh]	Quellen
Marktpreise 2018	0,216	0,0644	0,0524*	[20–22]
Marktpreise 2022	0,257	0,1237	0,0769*	
*Für das jeweilige Jahr geltende Mehrwertsteuer berücksichtigt				

Tabelle 2. Berücksichtigte Investitionen, Betriebs- und Brennstoffkosten.

	Spez. Investitionsaufwand in €/kW$_{th}$	Wirkungsgrad in % / COP	CO_2-Emissionen in kg/kWh	Betriebskosten in €/a bzw. €/(kWh$_{el}$ a)	Quellen
Ölkessel	-	80*	0,266	160	[23–25]
Wärmepumpe	$K(Q_{th})^{**} = -29{,}7*Q_{th}+2308{,}6$	4*	0,434/COP	140	[23, 25, 26, S. 768, 27]
KWK-Anlage	$K(P_{el})^a = 9.585*P_{el}^{-0{,}542}$ $K(P_{el})^b = 5.438*P_{el}^{-0{,}351}$	90	0,201	$K(P_{el})^a = 0{,}0326*P_{el}^{0{,}1866}$ $K(P_{el})^b = 0{,}0666*P_{el}^{-0{,}25}$	[16, 23, 28]
*Mittelwert aus Spannweite in Literatur gewählt, ** lineares Verhalten angenommen, Kostenfunktion ohne Kombispeicher, [a] Leistungsbereich 1–10 kW$_{el}$, [b] Leistungsbereich 10–100 kW$_{el}$,					

stoß aus dem Jahr 2022 verwendet. Die in der Formeln 1 – 2 verwendeten techno-ökonomischen Kennwerte sind in **Tabelle 2** aufgelistet.

4 Auswertung

Bild 3 zeigt die nach dem Vorgehen in Bild 2 bestimmten Amortisationszeiten und das prozentuale CO_2-Einsparpotenzial unterschiedlicher installierter Heizleistungen der beiden Versorgungsvarianten Wärmepumpe und BHKW.

Betrachtet man die Wärmepumpe im linken Bild, sind die kürzesten Amortisationszeiten von etwa 3,7 Jahren bei der kleinsten Kapazität für die Marktpreise von 2022 zu beobachten. Anschließend steigt die Amortisationszeit mit steigender Kapazität stark auf etwa 40 Jahre an, was einen abnehmenden Ausnutzungsgrad beschreibt, der den Skaleneffekt geringerer spezifischer Investitionsausgaben überwiegt. Im Marktpreisszenario 2018 ist hingegen eine deutliche Abnahme der Wirtschaftlichkeit zu beobachten. Hierbei zeigen die Amortisationszeiten einen stark erhöhten Startwert von etwa 12,5 Jahren mit einem überproportional steilen Verlauf, was die starke Abhängigkeit der Amortisationszeiten von den Energiepreisen widerspiegelt. In der unteren Grafik ist der Verlauf des prozentualen CO_2-Einsparungen dargestellt. Diese steigen von etwa 4,6 % bei 5 kW$_{th}$ konstant auf 8,6 % bei einer Heizleistung von etwa 20 kW$_{th}$ an. Darüber hinaus erfolgt ein kontinuierlicher Rückgang der eingesparten Emissionen, was die begrenzte Teillastfähigkeit von 50 % widerspiegelt. Hierbei kann die höhere installierte Heizleistung den niedrigeren Ausnutzungsgrad verursacht durch die Teillastfähigkeit nicht auffangen.

Bild 3 rechts zeigt die Amortisationszeiten und CO_2-Einsparungen der KWK-Anlage für die in Kapitel 2 festgelegten Leistungsklassen und Energiepreisszenarien. Für das mit Erdgas betriebene BHKW können bis zu einem Leistungsbereich von 30 kW$_{th}$ über beide Preisszenarien Amortisationszeiten von unter 10 Jahren erzielt werden. Dabei weist das BHKW die kürzeste Amortisationszeit von 3,9 Jahren bei einer Leistung von 12 kW$_{th}$ und Marktpreisen aus dem Jahr 2022 auf. Werden Energiepreise aus dem Jahr 2018 zugrunde gelegt, beläuft sich die Amortisation bei identischer Anlagengröße auf 6,7 Jahre. Der erneute Abfall der Amortisationszeiten im Leistungsbereich von etwa 25 kW$_{th}$ ist auf den Wechsel der Kostenfunktion bei den Investitions- und Wartungskosten leistungsstärkerer BHKW zurückzuführen, welcher bei der Marktrecherche unterschiedlicher Leistungsklassen (vgl. Tabelle 2) identifiziert wurde. Aufgrund der Begrenzung im Teillastbereich auf 50 % der Nennlast ist bei größeren Kapazitäten mit einer verringerten Betriebsdauer zu rechnen, was in einem starken Anstieg der Amortisationszeit im steigenden Leistungsbereich resultiert.

Im Hinblick auf die CO_2-Bilanz können in der zweiten Versorgungsvariante durch die Substitution geringer Leistungen signifikante Einsparungen erzielt werden. Bezogen auf die gesamten Scope 1 und 2 Emissionen des Beispielunternehmens können durch den kombinierten Einsatz von BHKW und Heizölkessel prozentuale Einsparungen von maximal 7,4 % bei einer installierten thermischen Leistung von 20 kW$_{th}$ erzielt werden. Das geringe Einsparpotenzial im oberen Leistungsbereich ist ebenso wie die steigenden Amortisationszeiten auf die begrenzte Teillastfähigkeit der KWK-Anlage zurückzuführen.

Im Vergleich zur Wärmepumpe zeigt sich eine wesentlich geringere Sensibilität gegenüber Energiepreisschwankungen und nahezu konstante Amortisationszeiten von 4 beziehungsweise 7 Jahren bis etwa 20 kW$_{th}$. Im Energiepreisszenario 2022 weist die Wärmepumpe bis zu einer Kapazität von etwa 7 kW$_{th}$ vergleichbare Amortisationszeiten im Bereich von 4 Jahren auf, während diese anschließend im Vergleich zur KWK-Anlange kontinuierlich ansteigen. Bei den Marktpreisen aus Jahr 2022 ist aufgrund des stark erhöhten Startwerts von 12,5 Jahren hingegen kein wirtschaftlich vergleichbarer Heizleistungsbereich zu identifizieren. Die geringere Sensibilität im KWK-Fall lässt sich insbesondere auf die gekoppelte Strom- und Wärmeproduktion zurückzuführen, da die Energiekosteneinsparungen neben der Wärmegestehungskosten- auch von der Stromkostendifferenz aus Eigenerzeugung und Einkauf abhängen. So halbieren sich die Wärmegestehungskosten von 2022 auf 2018 für die Ölheizung nahezu

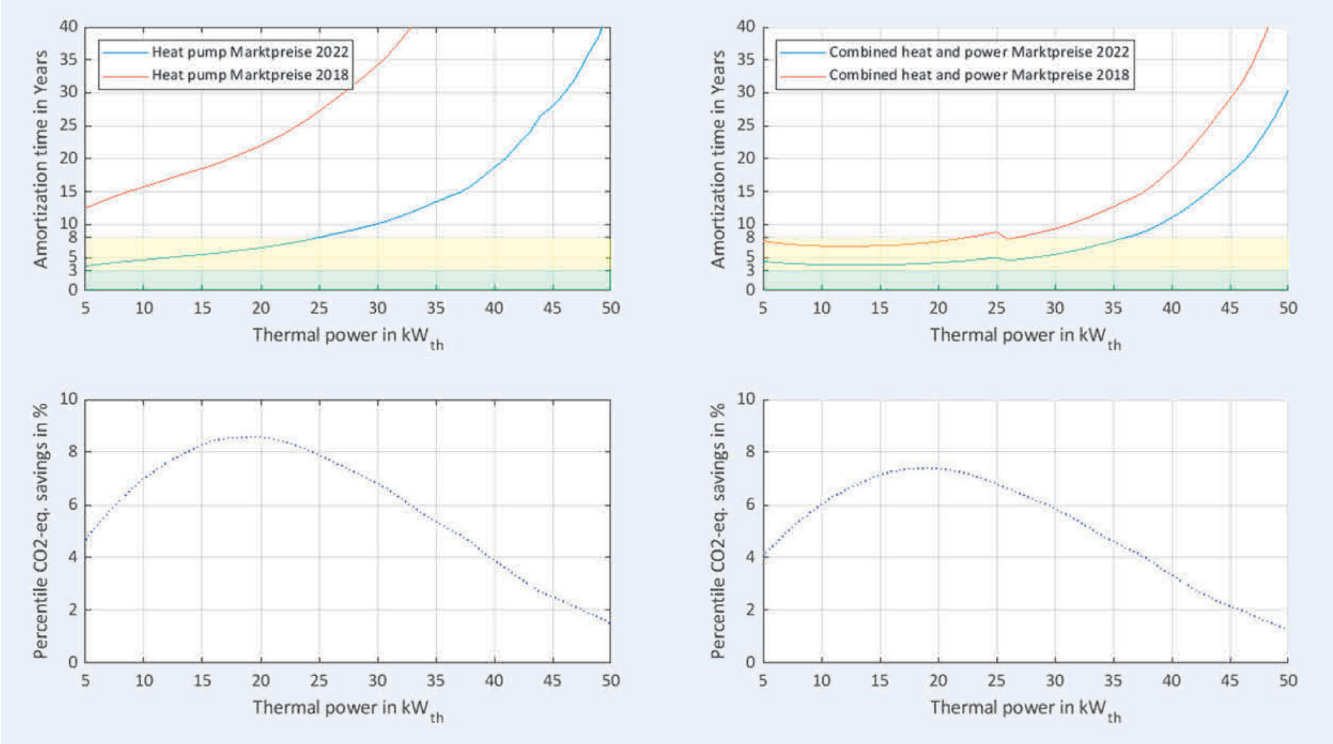


Bild 3. Amortisationszeiten und CO_2-Einsparungen bei variablen Energiepreisen sowie installierten Kapazitäten. *Grafik: EEP*

(vgl. Tabelle 2), was die Wärmepumpe in diesem Preisszenario für alle Heizleistungen unwirtschaftlich macht. Dahingegen profitiert diese überproportional stark von steigenden Ölpreisen, wohingegen sich bei der KWK-Anlage die Wirtschaftlichkeit nur moderat steigert.

Ordnet man die Amortisationszeiten beider Versorgungsvarianten in die in Kapitel 3 festgelegten Wirtschaftlichkeitsbereiche ein, kann für die Wärmepumpe im Marktpreisszenario 2022 bis zu einer Heizleistung von etwa 22 kW_{th} eine teilweise Rentabilität ermittelt werden. Größere Heizleistungen und das gesamte Preisszenario 2018 ist als unwirtschaftlich einzuordnen. Dahingegen kann eine KWK-Anlage bei Preisen aus dem Jahr 2022 bis zu 36 kW_{th} beziehungsweise für Energiepreise aus 2018 bis 27 kW_{th} ein möglicherweise rentables Investment sein. Aufgrund der höheren Preisstabilität identifiziert sich die KWK-Anlage damit als sichereres Investment, zudem können größere Heizleistungen wirtschaftlich integriert werden.

Vergleicht man das CO_2-Einsparpotenzial beider Varianten, ist ein ähnlicher Verlauf mit steigender CO_2-Einsparung bis 19 kW_{th} von 8.6 % (Wärmepumpe) und 7.4 % (KWK-Anlage) zu beobachten, wonach dieser aufgrund der begrenzten Teillastfähigkeit konstant abfällt. Die prozentuale CO_2-Einsparung liegt bei der Wärmepumpe für gleiche Anlagenleistungen etwa einen Prozentpunkt über der KWK-Anlage. Den Wirtschaftlichkeitsbereichen zugeordnet können diese Einsparpotenziale im Marktpreisszenario 2022 von beiden Versorgungsvarianten als teilweise rentabel bewertet werden, wohingegen bei den Energiepreisen aus dem Jahr 2018 dies ausschließlich mit der KWK-Anlage möglich ist. Aufgrund des höheren CO_2-Einsparpotenzials identifiziert sich die Wärmepumpe als nachhaltigeres Investment, welches aufgrund der stärkeren Energiepreissensitivität als deutlich unsicherer einzustufen ist. Damit muss aus Investitionssicht abgewogen werden, ob eine maximale CO_2-Einsparung oder eine höhere Wirtschaftlichkeit beziehungsweise eine größere Investitionssicherheit hinsichtlich Energiepreisschwankungen gefordert ist.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde die Integration einer Wärmepumpe sowie einer KWK-Anlage mit einer Teillastfähigkeit von 50 % in eine bestehende Wärmeversorgungsinfrastruktur für einen bivalent parallelen Betrieb ökonomisch und ökologisch bewertet. Die wirtschaftliche Bewertung erfolgte anhand der Amortisationsdauer. Für den ökologischen Vergleich wurde das prozentuale Scope 1 und 2 CO_2-Minderungspotenzial herangezogen. Zudem wurden beide Technologien hinsichtlich ihrer Preissensitivität anhand von zwei stark unterschiedlichen Energiepreisszenarien untersucht.

Als Ergebnis konnte für die Wärmepumpe mit kleinster Leistung die größte Wirtschaftlichkeit ermittelt werden, welche mit steigender Installationskapazität kontinuierlich abnahm. Zudem wurde mit den Marktpreisszenarien eine starke Energiepreissensitivität ermittelt, womit sich die Wärmepumpe bis etwa 22 kW_{th} ausschließlich für das Marktpreisszenario 2022 im Bereich teilweiser Rentabilität bewegt. Dahingegen zeigt die Wirtschaftlichkeitsbewertung der KWK-Anlage eine deutlich geringere Sensibilität gegenüber Energiepreisschwankungen sowie nahezu konstante Amortisationszeiten bis etwa 20 kW_{th}. Dies führt dazu, dass für beide betrachteten Preisszenarien die KWK-Anlage ein rentables Investment sein kann und sich damit sicherer hinsichtlich schwankender Energiepreise identifiziert.

Zudem lassen sich die Scope 1 und 2 Emissionen durch die Integration einer Wärmepumpe oder KWK-Anlage signifikant um bis zu 8.6 % beziehungsweise bis zu 7.4 % reduzieren. Aus Investitionssicht muss daher abgewogen werden, ob eine maximale CO_2-Einsparung oder eine höhere Wirtschaftlichkeit und Sicher-

heit bezüglich Energiepreisschwankungen gefordert ist. Perspektivisch ist mit einem verstärkten Ausbau der erneuerbaren Energien und einem Absenken des strominduzierten CO_2-Ausstoßes zu rechnen, welches das CO_2-Einsparpotenzial der Wärmepumpe signifikant steigern wird. Im Fall des BHKWs ist das absolute Einsparpotenzial dahingegen aufgrund der brennstoffbasierten Erzeugung von Strom und Wärme unabhängig vom CO_2-Ausstoß der Stromerzeugung. Ein Wechsel auf treibhausgasneutralere Brennstoffe kann hier ein Hebel sein die Emissionen weiter zu reduzieren.

Die vorgestellten Ergebnisse basieren auf Literaturwerten und den in Kapitel 2 getroffenen Annahmen und können sich daher von den Bedingungen vor Ort signifikant unterscheiden. Dies macht eine Einzelfallprüfung unumgänglich, wobei insbesondere der Investitionsaufwand, die zu realisierende Anlagenauslastung und die Energiekosteneinsparungen zum Ist-Stand geprüft werden müssen.

FÖRDERHINWEIS

Dieser Beitrag ist im Rahmen des Forschungsprojekts „SynErgie II“ (Förderkennzeichen: 03SFK3K1–2) entstanden, welches mit den Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wird.

Literatur

[1] Bundesrepublik Deutschland, Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG). Internet: https://www.gesetze-im-internet.de/impressum.html. Zugriff am 23. Mai 2023

[2] Statistisches Bundesamt, Nettowärmeerzeugung in Deutschland nach ausgewählten Energieträgern in den Jahren 2020 und 2021. Internet: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/250059/umfrage/waermeerzeugung-in-deutschland-nach-energietraeger. Zugriff am 30. Mai 2023

[3] Glaesmann, N.: Wärmepumpenheizungen: Planungshilfe und Ratgeber für Neubauten und Bestandsgebäude, 1st ed. Wiesbaden: Springer Fachmedien; Imprint Springer Vieweg, 2022

[4] Emde, A.; Bogdanov, I.; Königer, M.; Sauer, A.: Effizienzbetrachtung eines gekoppelten Energieversorgungssystems in der Industrie, ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 113 (2018) 10, pp. 673–677, doi: 10.3139/104.111976

[5] Die Energiewende in Deutschland: Stand der Dinge 2021. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2022, Agora Energiewende, Berlin, 2022

[6] Helbing, K. W.: Handbuch Fabrikprojektierung, Springer-Verlag, 2018

[7] Paschotta, R.: Raumwärme. Internet: https://www.energie-lexikon.info/raumwaerme.html. Zugriff am 1. Juni 2023

[8] Fisch, S.; Otter, P.; Nast, M.; Pehnt, M.: Prozesswärme im Marktanreizprogramm: Des Marktanreizprogramms, Perspektivische Weiterentwicklung. Internet: https://www.researchgate.net/publication/259902979_Prozesswarme_im_Marktanreizprogramm_MAP/link/0c960534449ae4f98d000000/download Zugriff am 25. Mai 2022

[9] Naegler, T.; Simon, S.; Gils, H. C.; Klein, M.: Potenziale für erneuerbare Energien in der industriellen Wärmeerzeugung. Internet: https://elib.dlr.de/104723/

[10] Paschotta, R.: Heizungsanlage. Internet: https://www.energie-lexikon.info/heizungsanlage.html. Zugriff am 1. Juni 2023

[11] Maaß, C.; Sandrock M.; Fuß, G.: Strategische Optionen zur Dekarbonisierung und effizienteren Nutzung der Prozesswärme und -kälte. Internet: https://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Studien/20180405_BEE-Kurzgutachten_Strategische_Optionen_zur_Dekarbonisierung_und_effizienteren_Nutzung_der_Prozesswaerme_und_kaelte.pdf. Zugriff am 11. März 2020

[12] Stich, D.: Multivalente Wärmekonzepte: Moderne Bauten erfordern das Zusammenspiel verschiedener Energieträger. Internet: https://www.heizungsjournal.de/multivalente-waermekonzepte_1933. Zugriff am 2. Juni 2023

[13] Flum, D.; Neuberger, N.: Untersuchungsergebnisse zur Energieoptimierung der Wärmeversorgung eines Maschinenbauunternehmens. Internet: https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/11467. Zugriff am 25. Mai 2022

[14] VdZ – Wirtschaftsvereinigung Gebäude und Energie e.V., Meine Heizung von A-Z: Bivalent. Internet: https://intelligent-heizen.info/lexikon-heizung/bivalent. Zugriff am 2. Juni 2023

[15] Arbeitsgemeinschaft für Sparsamen und Umweltfreundlichen Energieverbrauch, BHKW-Grundlagen. Internet: https://asue.de/sites/default/files/asue/themen/blockheizkraftwerke/2010/broschueren/06_06_10_bhkw-grundlagen-2010.pdf. Zugriff am 16. Juni 2023

[16] Energas BHKW GmbH, Grundlagen des Gasmotors im BHKW – Funktion und Eigenschaften. Internet: https://www.energas-gmbh.de/gasmotor-bhkw. Zugriff am 16. Juni 2023

[17] Dehli, M.: Energieeffizienz in Industrie, Dienstleistung und Gewerbe: Energietechnische Optimierungskonzepte Für Unternehmen. Wiesbaden: Springer Fachmedien GmbH, 2020. Internet: https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6156004

[18] Bohne, D.: Technischer Ausbau von Gebäuden: Und nachhaltige Gebäudetechnik, 11th ed. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019

[19] Arpagaus, C.: Hochtemperatur-Wärmepumpen: Marktübersicht, Stand der Technik und Anwendungspotenziale, 2019

[20] Bundesnetzagentur, Gaspreise* für Gewerbe- und Industriekunden in Deutschland in den Jahren 2012 bis 2022 (in Euro-Cent pro Kilowattstunde). Internet: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/168528/umfrage/gaspreise-fuer-gewerbe-und-industriekunden-seit-2006. Zugriff am 22. Juni 2023

[21] Bundesnetzagentur, Strompreise für Gewerbe- und Industriekunden in Deutschland in den Jahren 2012 bis 2022 (in Euro-Cent pro Kilowattstunde). [Online]. Available: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/154902/umfrage/strompreise-fuer-industrie-und-gewerbe-seit-2006/ Zugriff am 22. Juni 2023

[22] en2x, Durchschnittlicher Verbraucherpreis für leichtes Heizöl in Deutschland in den Jahren 1960 bis 2023 (in Cent pro Liter). Internet: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2633/umfrage/entwicklung-des-verbraucherpreises-fuer-leichtes-heizoel-seit-1960/ Zugriff am 22. Juni 2023

[23] co2online gemeinnützige Beratungsgesellschaft mbH, Heizungswartung: Kosten, Pflichten & Regelmäßigkeit. Internet: https://www.heizspiegel.de/heizkosten-senken/heizungswartung. Zugriff am 15. Juni 2023

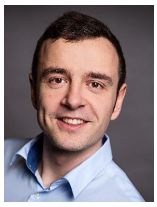
[24] Quaschning, V.: Spezifische Kohlendioxidemissionen verschiedener Brennstoffe. Internet: https://www.volker-quaschning.de/datserv/CO2-spez/index.php. Zugriff am 15. Juni 2023

[25] Reiche, F.: Wirkungsgrad der Heizung – wichtige Kennzahl für die Effizienz des Heizgeräts. Internet: https://www.thermondo.de/info/rat/vergleich/wirkungsgrad-der-heizung. Zugriff am 15. Juni 2023

[26] Kaltschmitt, M.; Streicher, W.; Wiese, A.: Eds., Erneuerbare Energien: Systemtechnik · Wirtschaftlichkeit · Umweltaspekte, 6th ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2020. Internet: https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6382002

[27] Umweltbundesamt, CO_2-Emissionen pro Kilowattstunde Strom stiegen in 2022.Internet: https://www.umweltbundesamt.de/themen/co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom-stiegen-in. Zugriff am 15. Juni 2023

[28] Arbeitsgemeinschaft für Sparsamen und Umweltfreundlichen Energieverbrauch, BHKW-Kenndaten 2014/15. Internet: https://www.asue.de/blockheizkraftwerke/broschueren/309754_bhkw-kenndaten_2014-15 Zugriff am 16. Juni 2023



Alexander Mages, M. Sc.
Foto: Autor

Lukas Willer, B. Sc.

Prof. Dr.-Ing. Dipl. Kfm. Alexander Sauer

Institut für Energieeffizienz in der Produktion
Universität Stuttgart
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
Tel. +49 711 / 970-3679
alexander.mages@ieep.uni-stuttgart.de
www.eep.uni-stuttgart.de

LIZENZ

Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)