

Entwicklung eines Tools zur planerischen Unterstützung bei industriellen Wärmepumpensystemen

Automatisierte Auslegung von industriellen Wärmepumpen

B. Seyed Sadjadi, L. Schmiedel, A. Sauer

Im Zuge der Dekarbonisierung industrieller Produktionssysteme spielt die Elektrifizierung von Prozessen eine wichtige Rolle. Wärmepumpen nehmen dabei aufgrund ihres Funktionsprinzips und der resultierenden Effizienz eine Schlüsselposition ein. Die vergleichsweise komplizierten Einbindungskonzepte und der geringe Bekanntheitsgrad hemmen die weitere Ausbreitung in der Produktion. Dieser Beitrag stellt ein Planungs- und Bewertungstool für Wärmepumpen vor, welches in Produktionssystemen genutzt werden kann.

STICHWÖRTER

Energieeffizienz, Entwicklung, Simulation

Automated design of heat pumps in production systems

The electrification of processes plays an important role in decarbonizing industrial production systems. Heat pumps are key due to their operating principle and the resulting efficiency. What prevents a more widespread implementation of this technology in manufacturing is that it is not particularly well-known and rather difficult to integrate. This paper presents a tool for planning and evaluating heat pumps, which can be applied in production systems.

1 Einleitung

Im Europäischen Green Deal hat die EU-Kommission erklärt, bis 2050 klimaneutral sein zu wollen. Zur Erreichung dieses Ziels muss der Anteil erneuerbarer Energien im Stromnetz bis 2030 um 40 % erhöht werden [1]. Im produzierenden Gewerbe müssen laut einer Studie von eurelectric [2] 50 % der industriellen Prozesse elektrifiziert werden, um diese Ziele zu erreichen. Unter Einbezug der Zahlen aus dem Jahre 2019 entspricht dies einer jährlich zu elektrifizierenden Energiemenge von 352 TWh [3].

Industrielle Wärmepumpen können durch elektrifizierte Bereitstellung von thermischer Energie mit einer Temperatur von bis zu 150 °C zu diesem Ziel beitragen [4]. Als größte Hemmnisse der weiteren Verbreitung von Wärmepumpen in der Industrie gelten laut Arpagaus [5] hohe Amortisationszeiten, mangelndes Wissen über Integrationsmöglichkeiten und der geringe Bekanntheitsgrad der technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten der Wärmepumpentechnologie. Zusätzlich hemmt der Mangel an Know-how zur Umsetzung und Planung von Wärmepumpensystemen die Ausbreitung in der Industrie [6].

Dieser Aufsatz stellt ein Tool zur automatisierten Auslegung und wirtschaftlichen Grobbewertung von Wärmepumpen in industriellen Produktionssystemen vor. Dabei soll zusätzlich das Thema der Energieflexibilität Einzug in den Planungsprozess von Wärmepumpensystemen erhalten, da thermische Wandlungssysteme insbesondere in Kombination mit einem Energiespeicher in der Lage sind, Energieflexibilität bereitzustellen [7].

2 Stand der Forschung und Technik

2.1 Auslegung und Bewertung von industriellen Wärmepumpen

Die Auslegung von Wärmepumpen in industriellen Energiesystemen wird durch die thermischen Leistungen auf der Quellen- und auf der Senkenseite charakterisiert. Die thermische Leistung auf der Quellenseite ist der Kälteleistung $Q_{Kälte}$ zuzuordnen, wobei die thermische Leistung auf der Senkenseite der Wärmeleistung $Q_{Wärme}$ zuzuweisen ist. Die Leistungszahl der Wärmepumpe (Coefficient of Power, COP) ergibt sich aus dem Quotienten aus der Wärmeleistung $Q_{Wärme}$ und der zugeführten elektrischen Leistung P_{el} . Diese ist durch den Carnot-Wirkungsgrad und den Temperaturhub beschränkt [5]. Da die Bereitstellung der Kälte in Wärmepumpenanwendungen zumeist passiv erfolgt und die Wärmebereitstellung priorisiert wird, werden die Systeme größtenteils anhand der anzulegenden Wärmeleistung ausgelegt. Die Quelle wird hinsichtlich Temperatur und Leistung ausgelegt, sodass die benötigte Quellenleistung bereitgestellt werden kann und der Temperaturhub zwischen Quelle und Senke möglichst gering ist.

2.2 Tools zur automatisierten Auslegung von Wärmepumpen

Heutige Lösungen zur automatisierten Auslegung und Bewertung von Wärmepumpen beschränken sich zumeist auf den häuslichen Bereich [8]. Erweitert werden diese Tools durch kommerzielle Simulationstools, die in der Arbeit von Wolf [8] aufgelistet sind und für den industriellen Bereich angewendet werden kön-

Tabelle. Anforderungen an das Tool.

Eingabedaten	Ausgabedaten	Berechnungsmethodik
<ul style="list-style-type: none"> - Energetische, ökonomische und ökologische Parameter - Energetische Randbedingungen (Temperatur, Lastgang der Quelle/Senke) - Energetische Kenngrößen der Peripherie (PV-Anlage, Energiespeicher) 	<ul style="list-style-type: none"> - Energetische Kennzahlen der Wärmepumpe (COP, Betriebsstunden) - Ökonomische und ökologische Bewertungsgrößen (z.B. Amortisationszeit, ausgestoßene Emissionen) - Kennzahlen der Peripherie (Ertrag der PV-Anlage, Beladungszustand des Energiespeichers) 	<ul style="list-style-type: none"> - Änderbar bezüglich verschiedener Wärmepumparten (Kältemittel, Kompressor, Kaskadierung) - Einbezug verschiedener Betrachtungsweisen (statischer und dynamischer Betrieb)

nen. Diese weisen jedoch nur bedingt Möglichkeiten zur automatisierten Systemauslegung auf und bedürfen einer aufwendigen Modellierung, welche sich je nach Anwendungsfall unterscheidet.

Zur automatisierten Auswahl von Wärmepumpentechnologien wurde das Tool „HPint“ von *Wolf* [8] entwickelt. Neben der Auswahl einer geeigneten Wärmepumpenart kann dieses Tool Auslegungsgrößen des Wärmepumpensystems bestimmen und eine Abschätzung des COP ausgeben. Zudem werden kapital- und betriebsgebundene Kosten berücksichtigt, wobei konstante Energiepreise angenommen werden. Zusätzlich existieren Tools zur Bestimmung der optimalen Integration von Wärmepumpen durch eine automatisierte Pinch-Analyse [9]. Sie geben aber weder Auskunft über Auslegungsparameter, noch weisen sie Möglichkeiten zur Bewertung des Wärmepumpensystems auf.

Erweitert wird diese Auswahl durch ein Tool von *Schlosser* [10], welches ein grafisches Vorgehen zur Bewertung verwendet. Bei diesem Tool steht die Auswahl und die Bewertung möglicher Integrationspunkte der Wärmepumpe im industriellen Umfeld im Fokus. Beide Tools nutzen konstante Temperaturen und konstante Energiepreise. Energieflexible Betriebsweisen, wie ein strompreisgeführter Betrieb in Kombination mit der Auslegung eines Energiespeichers, wurden in beiden Softwarelösungen nicht berücksichtigt.

3 Erstellung des automatisierten Auslegungs- und Bewertungstools

3.1 Anforderungen

Vor der Erstellung und Konzeptionierung werden die Anforderungen an das Tool definiert. Diese Anforderungen beschreiben die Zielgrößen und die theoretischen Grundlagen, welche das Tool abbilden soll. Diese lassen sich in die Unterpunkte Eingabedaten, Ausgabedaten und Berechnungsmethodik untergliedern und können der **Tabelle** entnommen werden.

Die Eingabedaten sollen energetische, ökonomische und ökologische Parameter umfassen. Neben den energetischen Randbedingungen wie Temperatur und Lastgang der Quelle und der Senke sollen auch energetische Kenngrößen wie die Leistung einer PV (Photovoltaik)-Anlage und die Größe eines Energiespeichers einbezogen werden. Bei den Lastgängen soll es sowohl die Möglichkeit geben, Realdaten einzubinden als auch charakteristische Lastgänge für bestimmte Zeiträume zu generieren.

Neben den energetischen und technischen Kennwerten sollen auch ökonomische Faktoren wie Investitionen und Energiepreise einbezogen werden. Es soll vor allem die Möglichkeit bestehen, zwischen verschiedenen Preisstrukturen (wie Festvertrag, Day-Ahead, Intraday) zu wählen. In den Arbeiten von *Bianchini et al.* [11, 12] konnte gezeigt werden, dass insbesondere die Teilnahme

am Day-Ahead-Markt wirtschaftliche Vorteile im produzierenden Gewerbe bringen kann. Innerhalb des preisgeführten Betriebs soll bei der zusätzlichen Einbindung eines thermischen Energiespeichers die Leistungsbereitstellung der Wärmepumpe angepasst werden und so zur Flexibilisierung der Energiebereitstellung beitragen. Zudem soll die Möglichkeit der Einbindung von Emissionsfaktoren geschaffen werden, um den ökologischen Nutzen aufzuzeigen.

Die Ausgabedaten sollen für den jeweiligen Anwendungsfall die energetischen, ökonomischen und ökologischen Ergebnisse darstellen. In Bezug auf die Auslegungsparameter des Systems umfasst dies die benötigte thermische Leistung der Wärmepumpe, die bereitgestellte thermische Energie, den COP-Jahresverlauf und das energetische Verhalten der Peripherie (wie Strombereitstellung der PV-Anlage, Auslastung des Energiespeichers). Neben den Auslegungsparametern und den energetischen Kenngrößen sollen die ökonomischen und ökologischen Ergebnisse ausgegeben werden. So sollen neben der Ausweisung der jährlichen Energie- und Betriebskosten auch Aussagen zu Amortisationszeiten und Kosteneinsparungen im Vergleich zu einem Referenzsystem getroffen werden. Zudem sollen die ausgestoßenen Emissionen und die Emissionseinsparungen im Vergleich zum Referenzsystem ausgewiesen werden.

Die Berechnungsmethodik in diesem Tool sollte verschiedene Wärmepumparten berücksichtigen, die sich beispielsweise beim eingesetzten Kältemittel oder beim eingesetzten Kompressor unterscheiden. Die COP-Berechnungsmethodik soll so anpassbar sein, dass verschiedene Wärmepumparten ausgelegt und miteinander verglichen werden können. Dabei sollte auch zwischen Volllast- und Teillastverhalten unterschieden werden, um dynamische Lasten abbilden zu können. So können unterschiedliche Anwendungsfälle für die energetisch und ökonomisch sinnvollste Konfiguration zwischen Wärmepumpenart, Peripherie und Energiebezug identifiziert werden.

3.2 Implementierung und Vorgehen

Die Implementierung des Tools zur automatisierten Auslegung und Bewertung von Wärmepumpenanwendungen in Produktionsystemen wird nach der in **Bild 1** vorgestellten Methodik durchgeführt.

Es wird ein iterativer Ansatz verfolgt, der zwischen Zuständen, Handlungen und if/else Abfragen unterscheidet. Nachdem der Nutzer des Tools die energetischen, ökonomischen und ökologischen Rahmenbedingungen eingetragen hat, wird der Anwendungsfall bestimmt. Neben einer Bereitstellung von Wärme kann auch eine gleichzeitige Bereitstellung von Kälte untersucht werden. Nach der Auswahl des Betriebsmodus wird die Wärmepum-

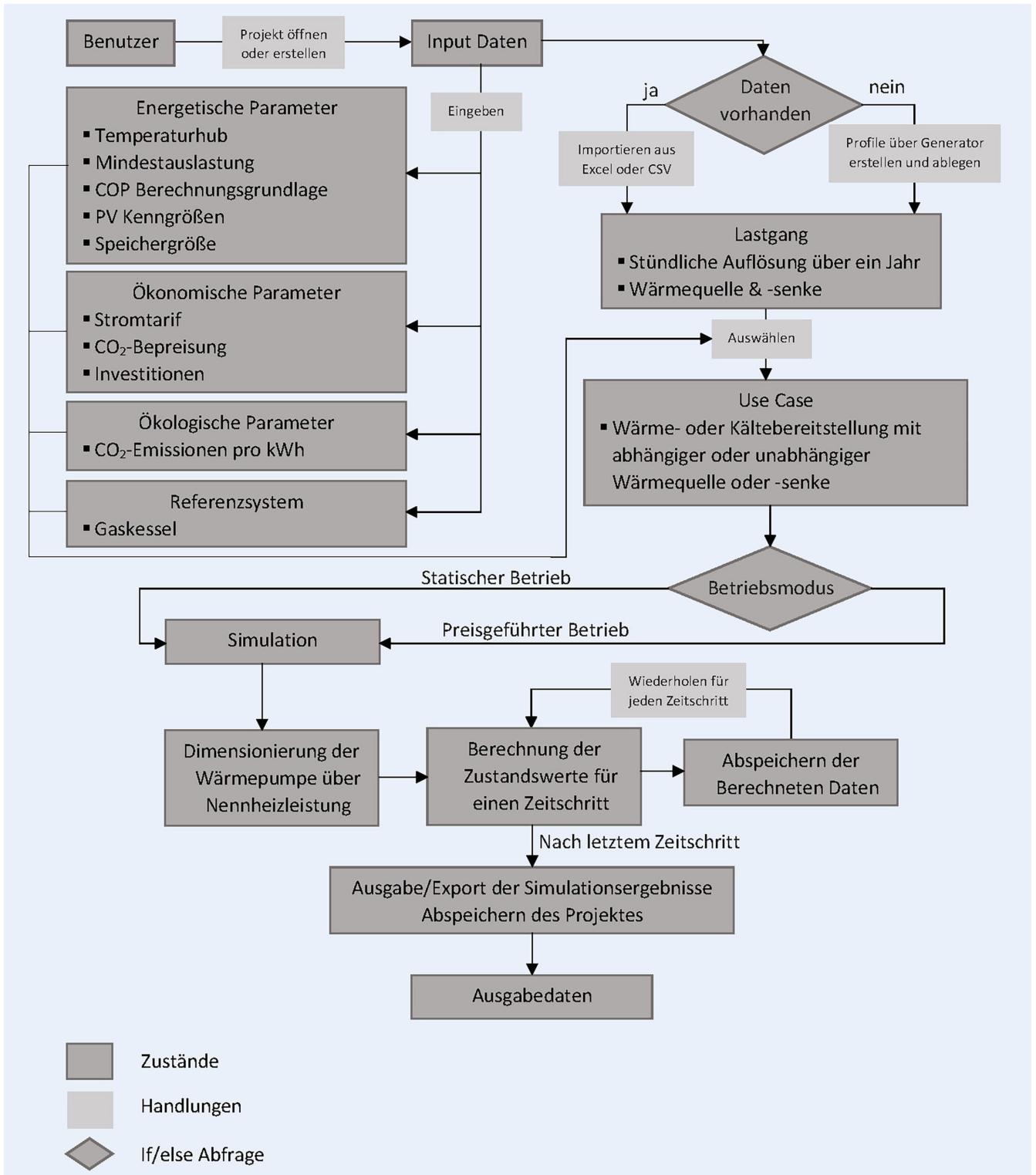


Bild 1. Auslegungs- und Bewertungsmethodik. Grafik: EEP Universität Stuttgart

pe ausgelegt und charakteristische Kennwerte für die Zeitreihe berechnet. Nach Abschluss der Simulation werden die Ergebnisse grafisch ausgegeben. Die Implementierung des Tools wird in einer Python-Umgebung durchgeführt, sodass in diesem Anwendungsbeispiel nur auf frei verfügbare Software zurückgegriffen wird.

4 Fallbeispiel

Nachfolgend wird das Vorgehen anhand eines Fallbeispiels beschrieben. Dabei wurden zuerst die automatisierte Auslegung anhand eines Trocknungsprozesses durchgeführt und charakteristische Kennwerte ausgegeben. Im nachfolgenden Schritt wurden unterschiedliche Betriebsweisen miteinander verglichen.

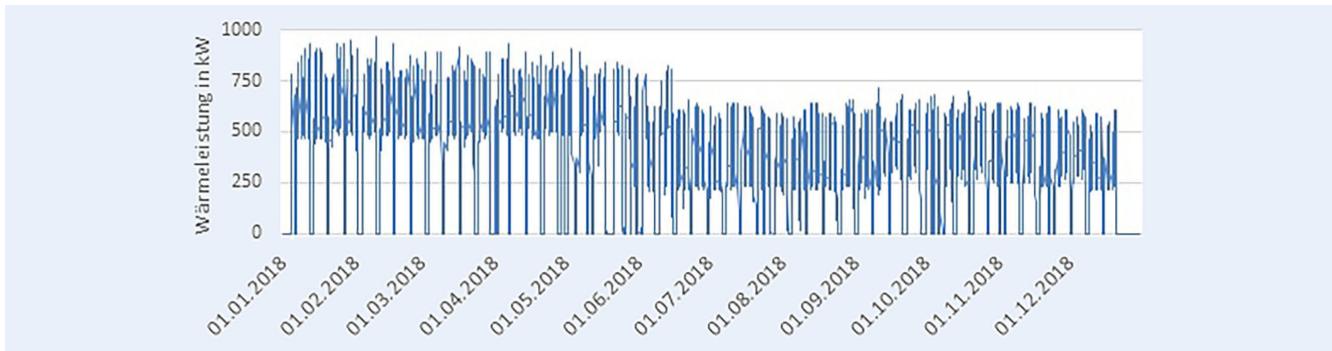


Bild 2. Thermischer Lastgang eines Trocknungsprozesses. *Grafik: EEP Universität Stuttgart*

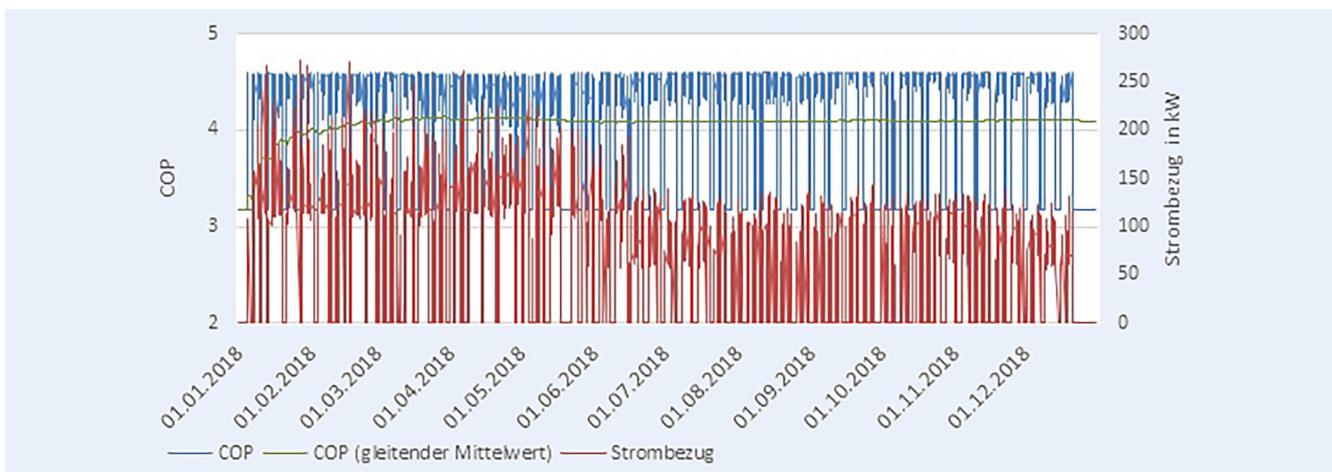


Bild 3. COP (Coefficient of Power)-Verlauf und Jahresstrombezug der Wärmepumpe. *Grafik: EEP Universität Stuttgart*

4.1 Automatisierte Auslegung

Die automatisierte Auslegung wurde anhand eines thermischen Lastgangs für einen industriellen Trocknungsprozess durchgeführt, der in **Bild 2** dargestellt ist.

Für die Spezifizierung der Leistungsdaten der Wärmepumpe wurden eine konstante Abwärmequelle von 60 °C – welche beispielsweise aus der Drucklufterzeugung oder aus industriellem Abwasser resultieren kann und so ausgelegt wird, dass diese zu jeder Zeit die Wärmepumpe speisen kann – und eine Vorlauftemperatur im Trocknungsprozess von 105 °C angenommen. Die Auslegungsheizlast $Q_{\text{Wärme}}$, die sich an der Lastspitze orientiert, betrug 930 kW, wobei der COP der Wärmepumpe variierte. Der COP-Verlauf der Wärmepumpe für diesen Anwendungsfall und der Strombezug über das Jahr sind in **Bild 3** dargestellt.

Bei dieser Konfiguration betrug der COP im Mittel 4,1, der maximale COP 4,6 und der minimale COP 3,2. Da die Temperaturen in der Quelle und in der Senke konstant waren, ergaben sich die unterschiedlichen COP aus der Auslastung der Wärmepumpe. Durch die Abbildung des gleitenden Mittelwertes des COP war zusätzlich zu erkennen, dass, nach einem anfänglichen Tiefpunkt, der COP über das Jahr gesehen einen konstanten Wert von über 4 aufweist. Durch die Einbindung eines Wärmepumpen-Auslastungsfaktors ergab sich ein dynamischer COP-Verlauf. Es war zu erkennen, dass die Wärmepumpe im Teillastbetrieb nicht in ihrem optimalen Arbeitspunkt arbeitet. Für die Bereitstellung von 2.999 MWh thermischer Energie wurde 677 MWh elektrische Energie benötigt.

4.2 Variantenvergleich

Für den Variantenvergleich wurden drei unterschiedliche Szenarien betrachtet und hinsichtlich der Energiekosten miteinander verglichen. Im ersten Szenario wurde ein rein tariflicher und statischer Strombezug sichergestellt. Dieses Szenario bildet damit den in der Industrie gängigsten Anwendungsfall ab. Dabei wurde ein mittlerer Industriestrompreis von 21,38 ct/kWh aus dem Jahre 2021 angenommen [13].

In Szenario 2 wurde der Strom über den Day-Ahead-Markt eingekauft, wobei hierfür die zeitlich aufgelösten Preise aus dem Jahre 2021 angenommen wurden. Dafür wurde der über die jeweilige Stunde gemittelte Börsenstrompreis angenommen [14] und mit zusätzlichen Abgaben und Steuern beaufschlagt. So wurden für die Beaufschlagung die durchschnittlichen Steuern und Abgaben für die Industrie aus dem Jahr 2021 mit 7,54 ct/kWh, zuzüglich einer mittleren Stromsteuer von 1,54 ct/kWh und mittleren Netzentgeltern in Höhe von 2,64 ct/kWh angenommen [13, 15]. Darüber hinaus wurde in diesem Szenario kein Energiespeicher eingebunden, sodass keine Betriebsoptimierung durchgeführt wurde.

In Szenario 3 wurde zusätzlich zum tariflichen Strombezug eine PV-Anlage mit 400 kWp und einem Modulwirkungsgrad von 16 % eingebunden. Es wird angenommen, dass ein Viertel des produzierten Stroms der Residuallast entsprechen und zum Betrieb der Wärmepumpe genutzt wird. Auch wird angenommen, dass der Strom, welcher nicht in der Wärmepumpenanwendung verbraucht wird, anderweitig verbraucht und nicht eingespeist

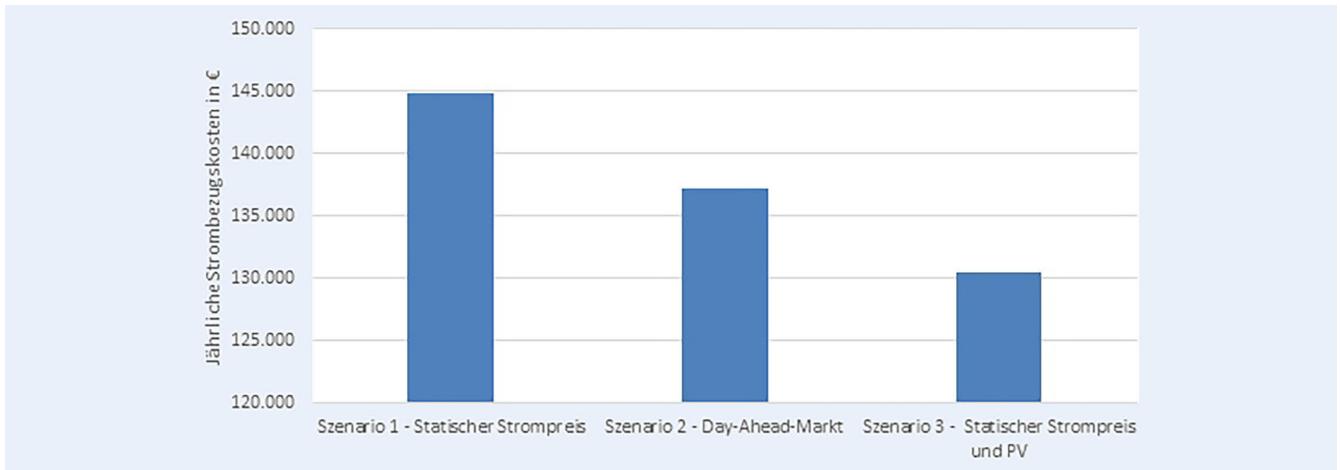


Bild 4. Jährliche Energiekosten für unterschiedliche Szenarien. Grafik: EEP Universität Stuttgart

wird. Der Vergleich zwischen den anfallenden Energiekosten ist in **Bild 4** dargestellt.

Beim Vergleich der jährlichen Strombezugskosten in Bild 4 ist zu sehen, dass Szenario 2 im Vergleich zum statischen Strombezug aus Szenario 1 wirtschaftliche Vorteile bringen kann. Der Tarifbezug und die zusätzliche Einbindung einer PV-Anlage weisen die niedrigsten jährlichen Energiepreise auf. Das heißt, dass eine Nutzung volatiler Strompreise unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen auch ohne eine energieflexible Steuerung und ohne die Nutzung eines Energiespeichers und der damit einhergehenden optimierten Betriebsführung die Wirtschaftlichkeit steigern kann. In Szenario 3 ist zu sehen, dass der Eigenverbrauch der Residuallast durch die Wärmepumpe zu attraktiven jährlichen Energiekosten führt. Dieses Szenario stellt für diesen Anwendungsfall eine wirtschaftlich attraktive Lösung dar.

5 Fazit und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde ein Tool zur automatisierten Auslegung und Bewertung von Wärmepumpenanlagen in Produktionssystemen vorgestellt. Neben den Auslegungsparametern konnte ein jährlicher Verlauf des COP für den Anwendungsfall eines industriellen Trocknungsprozesses dargestellt werden. Zudem wurde untersucht, inwieweit verschiedene Szenarien, wie die Strombeschaffung am Day-Ahead-Markt und die Einbindung einer PV-Anlage, die jährlichen Strombezugskosten beeinflussen. Es konnte gezeigt werden, dass der reine Strombezug bei einer industriellen Wärmepumpenanwendung über den Day-Ahead-Markt wirtschaftlich sein kann. Insbesondere Ungenauigkeiten bei der Prognose von Day-Ahead-Markt Preisen und der aktuelle Preistrend bei den Börsenpreisen wurden in dieser Arbeit nicht einbezogen und können die Wirtschaftlichkeit erheblich beeinflussen.

In weiterführenden Arbeiten sollten diese Faktoren daher berücksichtigt und die zusätzliche Einbindung von Energiespeicher und die Variation der Vorlauftemperatur analysiert werden, um weitere energieflexible Betriebsstrategien, wie etwa Lastspitzenkappung oder die Bereitstellung von Systemdienstleistungen, untersucht werden. Zudem sollen die Residuallast und die Gleichzeitigkeit von Verbrauch und Erzeugung von PV-Strom berücksichtigt werden.

Literatur

- [1] European Commission: The European Green Deal. Communication from the commission to the European parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee and the Committee of the regions. Stand: 11.12.2019. Internet: eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=celar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_1&format=PDF. Zugriff am 27.01.2023
- [2] eurelectric: Decarbonisation pathways. Full study results. Stand: 2018. Internet: cdn.eurelectric.org/media/3558/decarbonisation-pathways-all-slideslinks-29112018-h-4484BB0C.pdf. Zugriff am 27.01.2023
- [3] Umweltbundesamt: Energieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren. Internet: www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietaegern-sektoren. Zugriff am 27.01.2023
- [4] Kosmadakis, G.: Estimating the potential of industrial (high-temperature) heat pumps for exploiting waste heat in EU industries. *Applied Thermal Engineering* 156 (2019), pp. 287–298
- [5] Arpagaus, C.: Hochtemperatur-Wärmepumpen. Marktübersicht, Stand der Technik und Anwendungspotenziale. Berlin: VDE Verlag GmbH 2019
- [6] Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP): Energieeffizienz-Index EEI: Ungünstige Ausgangslage für Dekarbonisierung. Stand: 2021. Internet: www.eep.uni-stuttgart.de/dokumente/EEI-Sommer-2021/Energieeffizienz_Index_Sommer_2021_PM-final_upd.pdf. Zugriff am 30.01.2023
- [7] Seyed Sadjjadi, B.; Emde, A.; Sauer, A.: Energieflexibler Kältedemonstrator. Funktionalitätsvalidierung im Labormaßstab. *wt Werkstatttechnik online* 112 (2022) 01–02, S. 9–15. Internet: www.werkstatttechnik.de. Düsseldorf: VDI Fachmedien
- [8] Wolf, S.: Integration von Wärmepumpen in industrielle Produktionsysteme: Potenziale und Instrumente zur Potenzialerschließung. Dissertation, Universität Stuttgart, 2017
- [9] D. Olsen, A. Egli, B. Wellig: PinCH: An Analysis Tool for the Process Industries. 23rd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS) (2010)
- [10] Schlosser, F.: Integration von Wärmepumpen zur Dekarbonisierung der industriellen Wärmeversorgung. Dissertation, Universität Kassel, 2021. Internet: kobra.uni-kassel.de/bitstream/123456789/12737/1/kup_9783737609425.pdf. Zugriff am 27.01.2023
- [11] Bianchini, I.; Zimmermann, F.; Torolsan, K. et al.: Market Options for Energy-flexible Industrial Consumers. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1008 (2022) 1, pp. 12015
- [12] Bianchini, I.; Sauer, A.; Torolsan, K.: Flexibility management for industrial energy systems, 17. Symposium Energieinnovation, Graz/Austria, 2022. Internet: www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/tugrazExternal/738639ca-39a0-4129-b0f0-38b384c12b57/files/IIf/Sessions_C6/364_LF_Bianchini.pdf. Zugriff am 27.01.2023
- [13] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: BDEW-Strompreisanalyse Juli 2022. Internet: www.bdew.de/media/documents/220727_BDEW-Strompreisanalyse_Juli_2022.pdf. Zugriff am 27.01.2023
- [14] Bundesnetzagentur SMARD.de: SMARD Strommarktdaten. Internet: www.smard.de/home/downloadcenter/download-marktdaten#!?downloadAttributes=%7B%22selectedCategory%22:false,%22selectedSubCategory%22:false,%22selectedRegion%22:fal-

se,%22from%22:166474800000,%22to%22:1665698399999,%22selectedFileType%22:false%7D. Zugriff am 27.01.2023

[15] Bundesnetzagentur: Stromnetzentgelte im Bundesschnitt 2021 weitgehend konstant. Stand: 2021. Internet: www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2021/20210114_Netzentgelte.html. Zugriff am 27.01.2023



B i j a n S e y e d S a d j j a d i , M.Sc.

Foto: Fraunhofer IPA

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. A l e x a n d e r S a u e r

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik
und Automatisierung IPA sowie
Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP)
Universität Stuttgart
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
Tel. +49 711 / 970-1338
bijan.seyed.sadjjadi@ipa.fraunhofer.de
www.ipa.fraunhofer.de

L e o S c h m i e d e l

Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP)
Universität Stuttgart
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
leo.schmiedel@web.de
www.eep.uni-stuttgart.de

L I Z E N Z



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