

Reihe 19

Wärmetechnik/
Kältetechnik

Nr. 163

Dipl.-Ing. Daniel Lange / Ao. Univ. Prof.
Dipl.-Ing. Dr. techn. Karl Ponweiser
Wien

Bewertung der Leistungsfähigkeit von Wärmepumpen im Heiz- und Kühlbetrieb

Bericht aus dem Institut für
Energietechnik und Thermodynamik
der TU Wien

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 19

Wärmetechnik/
Kältetechnik

Dipl.-Ing. Daniel Lange / Ao. Univ. Prof.
Dipl.-Ing. Dr. techn. Karl Ponweiser
Wien

Nr. 163

Bewertung der Leistungsfähigkeit von Wärmepumpen im Heiz- und Kühlbetrieb

Bericht aus dem Institut für
Energietechnik und Thermodynamik
der TU Wien

VDI verlag

Lange, Daniel; Ponweiser, Karl

Bewertung der Leistungsfähigkeit von Wärmepumpen im Heiz- und Kühlbetrieb

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 19 Nr. 163. Düsseldorf: VDI Verlag 2020.

158 Seiten, 72 Bilder, 4 Tabellen.

ISBN 978-3-18-316319-9, ISSN 0178-9465,

€ 57,00/VDI-Mitgliederpreis € 51,30.

Für die Dokumentation: Wärmepumpe – Prozesswärme – Prozesskälte – Energieeffizienz

Die vorliegende Arbeit wendet sich an Ingenieure, Energiemanager aber auch Wissenschaftler aus dem Bereich industrieller Energiesysteme. Im Rahmen der Arbeit wird ein kompakter, größtenteils auf Diagrammen basierender Ansatz zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Wärmepumpen im Heiz- und Kühlbetrieb hergeleitet und exemplarisch auf ein Fallbeispiel angewendet. Der vorgestellte Bewertungsansatz erlaubt eine schnelle und vor allem nachvollziehbare Beantwortung der Fragestellung, was eine Wärmepumpe, eingebettet in die realen technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen eines Unternehmens, zu leisten vermag.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at www.dnb.de.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2020

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9465

ISBN 978-3-18-316319-9

Vorwort

Diese Arbeit ist am Institut für Energietechnik und Thermodynamik der TU Wien im Rahmen eines Forschungsschwerpunkts zur Bereitstellung von industrieller Prozesswärme unter Verwendung erneuerbarer Energiequellen entstanden. In dem Kontext dieses Forschungsschwerpunkts sind u.a. die folgenden, vom Klima- und Energiefonds geförderten, Projekte eingebunden:

- **EnPro**

FFG-Projektnummer 848818

Erneuerbare Prozesswärme - Integration von Solarthermie und Wärmepumpen in industrielle Prozesse

- **CORES**

FFG-Projektnummer 871669

Integration kombinierter, erneuerbarer Energiesysteme in die Industrie

Diese Projekte stellen die Grundlage der vorliegenden Arbeit dar.

Herrn Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Karl Ponweiser sei für seine wertvolle Unterstützung dieser Arbeit und die jahrelange vertrauensvolle Zusammenarbeit herzlich gedankt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	3
1.3	Stand der Technik	4
2	Grundlagen	6
2.1	Aufbau einer Wärmepumpe	6
2.2	Idealer Wärmepumpenprozess	7
2.2.1	Kennzahlen des idealen Wärmepumpenprozesses	8
2.3	Theoretischer Wärmepumpenprozess	10
2.4	Realer Wärmepumpenprozess	11
2.4.1	Kennzahlen des realen Wärmepumpenprozesses	12
2.5	Wärmequelle und Wärmesenke	13
3	Bewertung der Leistungsfähigkeit	14
3.1	Einführung	14
3.2	Annahmen	15
3.3	Technische Kennzahlen	20
3.3.1	Maximaler COP im Heizbetrieb	20
3.3.2	Alternativer Ansatz zur Ermittlung von COP_{\max}^H	33
3.3.3	Realer COP im Heizbetrieb	43
3.3.4	Realer COP im Heiz- und Kühlbetrieb	46
3.3.5	Quotient der Nutzwärmeströme	47
3.3.6	COP einer Kälteanlage	49
3.4	Relative wirtschaftliche Kennzahlen	50
3.4.1	Wirtschaftlichkeitsgrenze im Heizbetrieb	50

3.4.2	Relative Energiekosteneinsparung im Heizbetrieb	61
3.4.3	Relative Kosteneinsparung im Heiz- und Kühlbetrieb	64
3.5	Absolute wirtschaftliche Kennzahlen	79
3.5.1	Absolute Energiekosteneinsparung	79
3.5.2	Investitionskosten	81
3.5.3	Amortisationsdauer	82
4	Zusammenfassung	83
4.1	Technische Kennzahlen	83
4.2	Relative wirtschaftliche Kennzahlen	86
4.3	Absolute wirtschaftliche Kennzahlen	90
5	Anwendung	92
5.1	Ausgangssituation	92
5.2	Direkte Ermittlung von \hat{E}^H	94
5.3	Inverse Bestimmung von ϑ_s^{\max} bei gegebenem \hat{E}^H	101
5.4	Direkte Ermittlung von $E(\Delta t_P)$ und Δt_A im Heizbetrieb	104
5.5	Sensitivität der absoluten wirtschaftlichen Kennzahlen	109
5.6	Direkte Ermittlung von $E(\Delta t_P)$ und Δt_A im Heiz- und Kühlbetrieb	111
5.7	Fazit	115
6	Diskussion und Ausblick	116
6.1	Technische Kennzahlen	116
6.2	Wirtschaftliche Kennzahlen	118
6.2.1	Relative wirtschaftliche Kennzahlen	118
6.2.2	Absolute wirtschaftliche Kennzahlen	120
6.3	Allgemeine Punkte	120
	Anhang Diagramme und Tabellen	122
	Literaturverzeichnis	147

Nomenklatur

Lateinische Symbole

Zeichen	Einheit	Bedeutung
A	$^{\circ}\text{C}$	Faktor zur Ermittlung von \overline{COP}
COP	–	Coefficient of Performance
COP_{\max}	–	maximaler COP = Leistungszahl
COP_{real}	–	realer COP
\overline{COP}	–	mittlerer COP
COP_0	–	COP bei $\Delta T_{\text{WT}} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$
\hat{E}	–	relative Einsparung
E	€ o.ä.	absolute Einsparung
\overline{E}	€/Jahr o.ä.	mittlere absolute Einsparung
F_{B}^{A}	–	Gesamteinflussfaktor - Technologie A und B
F_{ges}	–	Gesamteinflussfaktor
GK	€ o.ä.	Gesamtkosten
h	J/kg	spezifische Enthalpie
IK	€ o.ä.	Investitionskosten
K	€/kWh o.ä.	spezifische Kosten Heizen bzw. Kühlen
K^{IK}	€/kW o.ä.	spezifische Investitionskosten
P	–	Kennzeichnung eines Betriebspunkts
p	N/m^2	absolute Druck
Q	J	Wärme
\dot{Q}	W	Wärmestrom
\hat{Q}	–	Quotient der Nutzwärmeströme
s	J/(kg K)	spezifische Entropie
T	K	absolute Temperatur
T_{N}	K	hohe Temperatur des idealen Wärmepumpenkreislaufs
T_{H}	K	niedrige Temperatur des idealen Wärmepumpenkreislaufs
W	J	Arbeit

(wird fortgesetzt)

Zeichen	Einheit	Bedeutung
\dot{W}	W	Arbeitsstrom
X_H	–	Heizkostenfaktor
X_K	–	Kühlkostenfaktor
X_T	–	Temperaturfaktor

Griechische Symbole

Zeichen	Einheit	Bedeutung
ΔT	°C	Temperaturdifferenz
ΔT_{WT}	°C	charakteristische Temperaturdifferenz in den Wärmetauschern
ΔT_{SQ}	°C	Temperaturdifferenz zwischen Senke und Quelle
$\widehat{\Delta T}$	–	dimensionslose Temperaturdifferenz
Δt	Jahr o.ä	Zeitintervall
Δt_P	Jahr o.ä	Betrachtungszeitraum
Δt_i	Jahr o.ä	Teilintervall von Δt_P
Δt_A	Jahr o.ä	Amortisationszeitraum
δ	–	relativer Fehler
ε_C	–	Leistungszahl = maximaler COP
η	–	Wirkungsgrad
η_C	–	Carnot-Wirkungsgrad
η_{kon}	–	Konversionswirkungsgrad der Vergleichstechnologie
η_{WP}	–	Gütegrad einer Wärmepumpe
ϑ	°C	Temperatur
ϑ_1^*	–	vorgegebenes Tupel
ϑ_2^*	–	abgeleitetes Tupel

Index - tiefgestellt

A	Größe der Technologie A
B	Größe der Technologie B
N	Nutzen
Q	Größe der Wärmequelle
S	Größe der Wärmesenke
WP	Größe der Wärmepumpe
el	elektrische Größe
kon	Größe der Vergleichstechnologie
max	maximaler Wert
min	minimaler Wert
ij	Größe zwischen den Punkten i und j, z.B. \dot{Q}_{12}

Index - hochgestellt

1	Größe des vorgegebenen Tupels
2	Größe des abgeleiteten Tupels
i	Größe des idealen Prozesses
r	Größe des realen Prozesses
H	Heizen
K	Kühlen
H + K	Heizen und Kühlen
Kv	Kühlen mit Vergleichstechnologie

Kurzfassung

Der Einsatz von Kaltdampf-Kompressionswärmepumpen zur Bereitstellung von Prozesswärme ist ein aktuell viel diskutiertes Thema, dem mehrere nationale und internationale Forschungsprojekte gewidmet sind und es ist nur eine Frage der Zeit, bis die mit einer Wärmepumpe technisch realisierbare Wärmenutzungstemperatur den betrieblichen Anforderungen mehrerer Industriezweige genügen wird. Die erforderlichen begleitenden Maßnahmen um den wissenschaftlichen Fortschritt auch in die Anwendung transferieren zu können, hinken der allgemeinen Entwicklung jedoch hinterher. So existiert beispielsweise kein zufriedenstellendes Werkzeug, das eine schnelle und vor allem nachvollziehbare Beantwortung der elementaren Fragestellung, was eine Wärmepumpe, eingebettet in die realen technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen eines Unternehmens, zu leisten vermag, erlaubt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist der Versuch unternommen worden, zur Schließung dieser Lücke einen Beitrag zu leisten. Aufbauend auf den allgemein bekannten Kennzahlen einer Kompressionswärmepumpe sind größtenteils diagrammbasierte Ansätze zur Ermittlung der wesentlichen technischen und wirtschaftlichen Größen eines Wärmepumpenkreislaufs bis hin zur relativen Energiekosteneinsparung im Heiz- und Kühlbetrieb abgeleitet und, unter Berücksichtigung formelbasierter Zusammenhänge für die absoluten wirtschaftlichen Größen, anhand eines Fallbeispiels dokumentiert und validiert worden.

Die vorliegende Arbeit versteht sich als Diskussionsgrundlage, um die Bewertung der Leistungsfähigkeit eines Wärmepumpenkreislaufs zu vereinheitlichen mit dem Ziel, Hemmnisse auf Seiten der Anwendung abzubauen und im gleichen Zug die Akzeptanz von Wärmepumpen im industriellen Umfeld zu erhöhen.