

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](http://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](http://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

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung . . . . .	1
1.2	Zielsetzung . . . . .	3
1.3	Stand der Technik . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>6</b>
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
<b>3</b>	<b>Bewertung der Leistungsfähigkeit</b>	<b>14</b>
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 Kühlobetrieb . . . . .	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 Kühlobetrieb . . . . .	64
3.5	Absolute wirtschaftliche Kennzahlen . . . . .	79
3.5.1	Absolute Energiekosteneinsparung . . . . .	79
3.5.2	Investitionskosten . . . . .	81
3.5.3	Amortisationsdauer . . . . .	82
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung</b> . . . . .	<b>83</b>
4.1	Technische Kennzahlen . . . . .	83
4.2	Relative wirtschaftliche Kennzahlen . . . . .	86
4.3	Absolute wirtschaftliche Kennzahlen . . . . .	90
<b>5</b>	<b>Anwendung</b> . . . . .	<b>92</b>
5.1	Ausgangssituation . . . . .	92
5.2	Direkte Ermittlung von $\hat{E}^H$ . . . . .	94
5.3	Inverse Bestimmung von $\vartheta_S^{\max}$ bei gegebenem $\hat{E}^H$ . . . . .	101
5.4	Direkte Ermittlung von $E(\Delta t_P)$ und $\Delta t_A$ im Heizbetrieb . . . . .	104
5.5	Sensitivität der absoluten wirtschaftlichen Kennzahlen . . . . .	109
5.6	Direkte Ermittlung von $E(\Delta t_P)$ und $\Delta t_A$ im Heiz- und Kühlobetrieb . . . . .	111
5.7	Fazit . . . . .	115
<b>6</b>	<b>Diskussion und Ausblick</b> . . . . .	<b>116</b>
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
	<b>Anhang Diagramme und Tabellen</b> . . . . .	<b>122</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> . . . . .	<b>147</b>

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

(wird fortgesetzt)

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

## Griechische Symbole

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$\Delta T$	°C	Temperaturdifferenz
$\Delta T_{WT}$	°C	charakteristische Temperaturdifferenz in den Wärmetauschern
$\Delta T_{SQ}$	°C	Temperaturdifferenz zwischen Senke und Quelle
$\widehat{\Delta T}$	–	dimensionslose Temperaturdifferenz
$\Delta t$	Jahr o.ä	Zeitintervall
$\Delta t_P$	Jahr o.ä	Betrachtungszeitraum
$\Delta t_i$	Jahr o.ä	Teilintervall von $\Delta t_P$
$\Delta t_A$	Jahr o.ä	Amortisationszeitraum
$\delta$	–	relativer Fehler
$\varepsilon_C$	–	Leistungszahl = maximaler COP
$\eta$	–	Wirkungsgrad
$\eta_C$	–	Carnot-Wirkungsgrad
$\eta_{kon}$	–	Konversionswirkungsgrad der Vergleichstechnologie
$\eta_{WP}$	–	Gütegrad einer Wärmepumpe
$\vartheta$	°C	Temperatur
$\vartheta_1^*$	–	vorgegebenes Tupel
$\vartheta_2^*$	–	abgeleitetes Tupel



# 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.