



## TRNSYS TYPE 401

# Kompressionswärmepumpe inklusive Frost- und Taktverluste

---

## Modellbeschreibung und Implementation in TRNSYS

**Erstellt im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft:  
Kostengünstige Niedertemperaturheizungen  
mit Wärmepumpe**

**M. Wetter, Th. Afjei 9. Juli 1996**

## Type401: Kompressionswärmepumpe

### Allgemeine Beschreibung

Die Wärmepumpe ist als Black-Box modelliert. Die Modellierung ist weitgehend mit derjenigen des YUM-Simulationsprogramms [1, 2] identisch. Die Eingangsgrößen sind die Verdampfer- und Kondensatoreintrittstemperatur, der Verdampfer- und Kondensatormassenstrom sowie das Stell-signal eines extern simulierten Reglers.

Die Kondensator- sowie Verdampferleistung wird auf Grund der von den Herstellern angegebenen Leistungskennfeldern berechnet. Diese Kennfelder weisen die Kondensatorleistung und die elektrische Klemmenleistung in Funktion der Verdampfer-eintritts- sowie Kondensator-austrittstemperatur aus (siehe Abbildung 1). Basierend auf diesen Kennfeldern werden mit dem YUM-Simulationsprogramm die Koeffizienten von biquadratischen Polynomen berechnet, die das Leistungsverhalten über den Betriebsbereich beschreiben.

Da diese Kennfelder nur für den stationären Betrieb gelten, werden zusätzlich die Taktverluste der Wärmepumpe als Lösung einer Differentialgleichung erster Ordnung, in der Regelungstechnik als  $PT_1$ -Element bekannt, mitberücksichtigt.

Die Leistungsminderung infolge Vereisung und Abtaugung des Verdampfers können, falls sie nicht bereits in den Herstellerunterlagen enthalten sind, nach einem halbempirischen Ansatz erfasst werden. Der Zeitpunkt, an dem sich Frost bildet sowie der Zeitpunkt der Verdampferabtaugung kann nicht erfasst werden.

Basierend auf Validationen des YUM-Algorithmus mit Messdaten kann mit folgenden Genauigkeiten gerechnet werden:

	relativer Fehler
Kondensatorenergie	6.6%
Kompressorenergie	12.5%
Arbeitszahl	2.7%

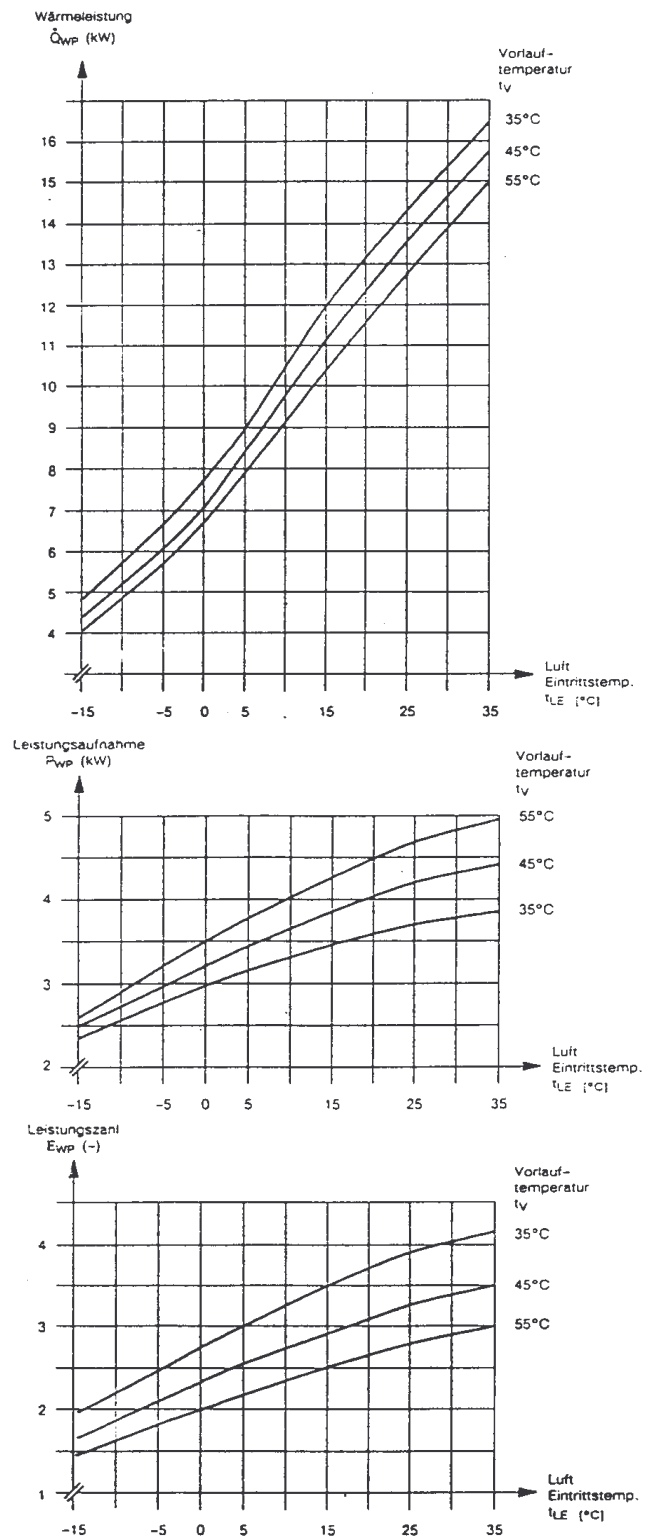


Abbildung 1: Beispiel für Leistungskennfelder einer Wärmepumpe



## Formelzeichen

### Variablen

$\tau$	Zeitkonstante
$\Delta$	Differenz
A	Konstante für Frostverlust
B	Konstante für Frostverlust
bp	Polynomkoeffizient für Kompressorleistung
bq	Polynomkoeffizient für Kondensatorleistung
C	Konstante für Frostverlust
c	spezifische Wärmekapazität
COP	Leistungszahl (coefficient of performance)
D	Konstante für Frostverlust
E	Konstante für Frostverlust
m	Massenstrom
P	elektrische Leistung
Q	Wärmeleistung
T	Temperatur
t	Zeit

### Indizes

c	Kondensator
corr	korrigiert
e	Verdampfer
f	fiktiv
hp	Wärmepumpe
ice	Ver-/Enteisung
icycle	inklusive Taktverluste
in	Eintritt
lb	untere Grenze
m	Mittelwert
n	normalisiert
nom	Nominalwert
off	aus
on	ein
out	Austritt
plug	Klemme (Klemmenleistung)
ss	stationärer Zustand
ub	obere Grenze
wol	ohne Verluste

## Mathematische Beschreibung

Vorzeichenkonvention: zugeführte Leistung respektive Energie ist immer positiv, abgeführte negativ.

### Stationäre Kondensator und Verdampferleistung

Die stationären Leistungen werden mit biquadratischen Polynomen

$$Q_{ss,c,wol} = bq_1 + bq_2 T_{n,e,in} + bq_3 T_{n,c,out} + bq_4 T_{n,e,in} T_{n,c,out} + bq_5 T_{n,e,in}^2 + bq_6 T_{n,c,out}^2$$

Gl. 1

$$P_{ss,plug} = bp_1 + bp_2 T_{n,e,in} + bp_3 T_{n,c,out} + bp_4 T_{n,e,in} T_{n,c,out} + bp_5 T_{n,e,in}^2 + bp_6 T_{n,c,out}^2$$

Gl. 2

berechnet.

Dabei werden normalisierte Temperaturen nach der Beziehung

$$T_n = \frac{T [^\circ C]}{273.15} + 1.0$$

Gl. 3

verwendet.

Die Polynomkoeffizienten können mit dem Simulationsprogramm YUM bestimmt werden.

### Iteration

#### Kondensatoraustrittstemperatur

Für die Leistungsbestimmung nach Gl. 1 und Gl. 2 muss die Kondensatoraustrittstemperatur bekannt sein. Da diese jedoch wiederum von der Kondensatorleistung abhängt, muss sie iterativ bestimmt werden. Die Iteration erfolgt nach dem Algorithmus von Van Wijngaarden-Decker-Brent [3]. Dieser kombiniert die Stabilität der Bisektion mit der Geschwindigkeit der inversen quadratischen Interpolation.

## Taktverluste

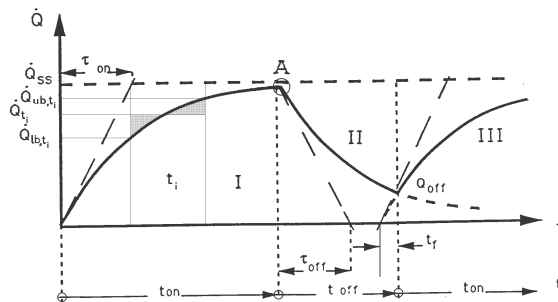


Abbildung 2: Taktverluste mit Beispiel eines diskretisierten Zeitschritts

Beim Einschalten der Wärmepumpe muss zuerst das Wärmepumpenaggregat aufgeheizt sowie die Druckdifferenz zwischen Verdampfer und Kondensator aufgebaut werden. Dies führt beim Einschalten der Wärmepumpe zu einer anfänglichen Leistungsminderung. Der Ansatz für die Beschreibung dieser Minderung beim Start einer vollständig abgekühlten Wärmepumpe (Bereich I) lautet:

$$\Delta \dot{Q}_{on,c} = \dot{Q}_{ss,c} e^{-\frac{t_{on}}{\tau_{on}}} \quad \text{Gl. 4}$$

Ist die Wärmepumpe noch nicht vollständig abgekühlt, so kann die Einschaltzeit entsprechend Abbildung 2 transformiert werden (Bereich III). Gl. 4 lautet nun:

$$\Delta \dot{Q}_{on,c} = \dot{Q}_{ss,c} e^{-\frac{t_f + t_{on}}{\tau_{on}}} \quad \text{Gl. 5}$$

Die effektive Kondensatorleistung (ohne Vereisungs- und Abtauverluste) berechnet sich somit nach:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_c &= \dot{Q}_{ss,c} - \Delta \dot{Q}_{on,c} \\ &= \dot{Q}_{ss,c} \left( 1 - e^{-\frac{t_f + t_{on}}{\tau_{on}}} \right) \end{aligned}$$

Gl. 6

Die Zeitverschiebung  $t_f$  wird bei jeder Einschaltung der Wärmepumpe neu bestimmt. Da die Einschaltzeit  $t_{on}$  zum Zeitpunkt der Einschaltung null ist (Übergang Bereich II in Bereich III), kann die Zeitverschiebung  $t_f$  gemäss Abbildung 2 über die Beziehung

$$\dot{Q}_{lb,c} = \dot{Q}_{ss,c} \left( 1 - e^{-\frac{t_f}{\tau_{on}}} \right) \quad \text{Gl. 7}$$

gewonnen werden. Gl. 7 aufgelöst nach  $t_f$  ergibt

$$t_f = -\tau_{on} \ln \left( 1 - \frac{\dot{Q}_{lb,c}}{\dot{Q}_{ss,c}} \right) \quad \text{Gl. 8}$$

Bei abgeschalteter Wärmepumpe soll sich ihr Energieinhalt nach einem Exponentialgesetz abbauen. Hierzu muss jedoch der Startpunkt der Abkühlkurve (Abbildung 2, Punkt A) bekannt sein. Damit dieser zur Verfügung steht, muss in jedem Zeitschritt, bei der die Wärmepumpe in Betrieb ist, ihre Leistung an der oberen Intervallgrenze nach der Beziehung

$$\dot{Q}_{ub,c} = \dot{Q}_{ss,c} \left( 1 - e^{-\frac{t_f + t_{on,ub}}{\tau_{on}}} \right) \quad \text{Gl. 9}$$

berechnet werden.

Die Abkühlkurve in Abbildung 2 (Bereich II) wird analog zur vor beschriebenen Leistungsminderung mit

$$\dot{Q}_{loss,c} = \dot{Q}_{ss,c,nom} e^{-\frac{t_f + t_{off}}{\tau_{off}}} \quad \text{Gl. 10}$$

berechnet. Beim Abkühlen der Wärmepumpe ist der zeitliche Leistungsverlauf also proportional zu der Nominaleistung der Wärmepumpe (bei 7°C Verdampfer Eintrittstemperatur / 35°C Kondensatoraustrittstemperatur), auf die die Abtauzeitkonstante durch Messungen bezogen ist.

Die Zeitverschiebung  $t_f$  wird wieder analog Gl. 7 berechnet:

$$\dot{Q}_{lb,c} = \dot{Q}_{ss,c,nom} \left( 1 - e^{-\frac{t_f}{\tau_{on}}} \right) \quad \text{Gl. 11}$$

$$t_f = -\tau_{off} \ln \left( 1 - \frac{\dot{Q}_{lb,c}}{\dot{Q}_{ss,c,nom}} \right) \quad \text{Gl. 12}$$

Die Leistung an der unteren Intervallgrenze des aktuellen Zeitschritts  $t$  ist zugleich die Leistung an der oberen Grenze des vorherigen Zeitintervalles  $t-1$ . Diese wurde bereits im letzten Zeitschritt nach Gl. 9 berechnet.

Somit ergibt sich für die Verlustleistung am oberen Ende des momentanen Zeitintervalls, wenn die Zeitspanne zwischen der Abschaltung und der oberen Grenze des aktuellen Zeitintervalles mit  $t_{ub}$  bezeichnet wird

$$\dot{Q}_{ub,c} = \dot{Q}_{ss,c,nom} e^{-\frac{t_f + t_{ub}}{\tau_{off}}} \quad \text{Gl. 13}$$

Dieser Wert wird weiterverwendet, falls die Wärmepumpe im nächsten Zeitschritt wieder eingeschaltet wird.

Die mittlere Kondensatorleistung während dem aktuellen Zeitschritt wird durch Integration der Leistung nach Gl. 6 über den Zeitschritt erhalten:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{m,c} &= \frac{1}{\Delta t} \int_{t_{lb}}^{t_{ub}} \dot{Q}_c dt \\ &= \dot{Q}_{ss,c} \left( 1 + \frac{\tau_{on}}{\Delta t} e^{-\frac{t_f}{\tau_{on}}} \left( e^{-\frac{t_{ub}}{\tau_{on}}} - e^{-\frac{t_{lb}}{\tau_{on}}} \right) \right) \end{aligned} \quad \text{Gl. 14}$$

Für die Leistungszahl unter der Berücksichtigung der Taktverluste gilt somit

$$COP_{icycle} = \frac{-\dot{Q}_{m,c}}{P_{plug}} \quad \text{Gl. 15}$$

## Ver- und Enteisung Verdampfer

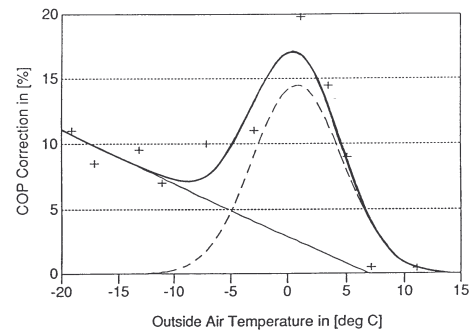


Abbildung 3: Leistungszahlminderung durch Ver- und Enteisung des Verdampfers. (Eingezeichnete Punkte aus Messdaten.)

Die relative Änderung der Leistungszahl, bedingt durch Vereisung und Abtaugung des Verdampfers, wird durch eine modifizierte Gauss Kurve [4] gemäss Abbildung 3 beschrieben.

Der Kurvenverlauf resultiert von der Superposition einer Gauss Kurve mit einer Geraden. Die Gausskurve repräsentiert die maximale Frostbildung zwischen 0°C und +5°C (hohe absolute Luftfeuchte). Die Gerade steht für den mit fallender Aussentemperatur steigenden sensiblen Energieeinsatz, der zur Aufheizung des Verdampfermetalls und des Kältemittels im Verdampfer für die Abschmelzung des angefallenen Eises notwendig ist.

Die relative Änderung der Leistungszahl berechnet sich demzufolge nach

Für  $A + B T_{e,in} > 0$ :

$$\Delta COP_{ice} = A + B T_{e,in} + C e^{-\frac{(T_{e,in} - D)^2}{E}}$$

Für  $A + B T_{e,in} \leq 0$

$$\Delta COP_{ice} = C e^{-\frac{(T_{e,in} - D)^2}{E}}$$

Gl. 16

Folglich gilt für die Leistungszahl unter Berücksichtigung aller Verluste (Taktverluste, Vereisung, Abtaugung):

$$COP_{corr} = COP_{icycle} \left( 1 - \Delta COP_{ice} \right)$$

Gl. 17



## Kondensator und Verdampferleistung

Mit der korrigierten Leistungszahl  $COP_{corr}$  lässt sich nun die über den Zeitschritt mittlere Kondensator- und Verdampferleistung berechnen mit

$$\dot{Q}_{m,c} = - COP_{corr} P_{plug} \quad \text{Gl. 18}$$

$$\text{Für } -(\dot{Q}_{m,c} + P_{comp}) > 0$$

$$\dot{Q}_{m,e} = -(\dot{Q}_{m,c} + P_{comp})$$

$$\text{Für } -(\dot{Q}_{m,c} + P_{comp}) \leq 0$$

$$\dot{Q}_{m,e} = 0$$

Gl. 19

Schlussendlich lassen sich die Austrittstemperaturen des Kondensators und Verdampfer berechnen mit:

$$T_{c,out,corr} = T_{c,in} - \frac{\dot{Q}_{m,c}}{\dot{m}_c c_c}$$

Gl. 20

$$T_{e,out,corr} = T_{e,in} - \frac{\dot{Q}_{m,e}}{\dot{m}_e c_e}$$

Gl. 21

## Wärmepumpenmodus

Die Variable  $hpmode$  wird als Output(12) ausgegeben. Sie ist ein Indikator, in welchem Betriebsmodus sich die Wärmepumpe befindet. Folgende Modi sind möglich:

$hpmode$	Bedeutung
100	Wärmepumpe ein, normal Betrieb
200	Wärmepumpe ausgeschaltet durch externen Regler ( $y_{hp}=0$ )
210	Niederdruckstörung. Verdampfereintrittstemperatur tiefer als Niederdruckthermostat
220	Niederdruckstörung. Verdampferaustrittstemperatur tiefer als Niederdruckthermostat
230	Niederdruckstörung. Kein Massenstrom durch Verdampfer
250	Hochdruckstörung. Kondensatoreintrittstemperatur höher als Hochdruckthermostat
260	Hochdruckstörung. Kondensatoraustrittstemperatur höher als Hochdruckthermostat
270	Hochdruckstörung. Kein Massenstrom durch Kondensator



## Komponenten Konfiguration

Parameter	Fortran Variable	Beschreibung
1	ce	spezifische Wärmekapazität Verdampfermedium
2	cc	spezifische Wärmekapazität Kondensatormedium
3	Pcar	Leistung Carterheizung
4	loprth	Niederdruckthermostat
5	hiprth	Hochdruckthermostat
6	airhp	Flag für Verdampfervereisung (0: Vereisung wird nicht berechnet, 1: Vereisung wird berechnet)
7	COPcorr1	1. COP Correction Wert auf Gerade für Enteisungsverluste
8	COPcorr2	2. COP Correction Wert auf Gerade für Enteisungsverluste
9	COPcorr3	Maximum COP Correction auf der Gauss Kurve ( <i>nicht</i> auf der resultierenden Überlagerung der Gauss Kurve mit der Geraden!)
10	Tdbcorr1	Aussenlufttemperatur bei 1. COP Correction Wert
11	Tdbcorr2	Aussenlufttemperatur bei 2. COP Correction Wert
12	Tdbcorr3	Aussenlufttemperatur bei Maximum der Gauss Kurve
13	Tdbcorr4	Temperaturspreizung (Breite) der Gausskurve auf der Hälfte des Gauss-Maximums
14	tauon	Aufheizkonstante, bezogen auf mittlere Betriebsleistung
15	tauff	Abkühlkonstante, bezogen auf Verdampfereintritt 7°C, Kondensatoraustritt 35°C
16	nchangemax	Maximale Anzahl Ein-/Ausschaltungen der Wärmepumpe pro TRNSYS Iterationsschritt
17	LUNbq	Logical unit number der Datei mit Polynomkonstanten für die Kondensatorleistung
18	LUNbp	Logical unit number der Datei mit Polynomkonstanten für die Kompressorleistung

assign *dateiname* LUNbp

Beide Dateien müssen derart geändert werden, dass die ersten 10 Zeilen 80 Charakter lang sind.

Input	Fortran Variable	Beschreibung
1	mdote	Massenstrom Verdampfer
2	Tein	Eintrittstemperatur Verdampfer
3	mdotc	Massenstrom Kondensator
4	Tcin	Eintrittstemperatur Kondensator
5	yhp	Stellsignal Wärmepumpe (0: aus, 1: ein)
6	ycar	Stellsignal Carterheizung (0: aus, 1: ein)

Output	Fortran Variable	Beschreibung
1	mdote	Massenstrom Verdampfer
2	Teout	Austrittstemperatur Verdampfer
3	mdotc	Massenstrom Kondensator
4	Tcoutc	Austrittstemperatur Kondensator
5	Qdotmc	Mittlere Kondensatorleistung über den Zeitschritt
6	Qdotme	Mittlere Verdampferleistung über den Zeitschritt
7	Pcomp	Kompressorleistung
8	Pcar	Leistung Carterheizung
9	(Pcomp+Pcar)	Summe Kompressor- und Carterleistung
10	COPc	Leistungszahl inkl. Takt- und Frostverluste
11	deltCOP	relative Leistungszahlminderung infolge Frostverluste
12	hpmode	Betriebsmodus Wärmepumpe
13	switch	Anzahl Wärmepumpeneinschaltungen seit Simulationsbeginn
14	timeint	Verstrichene Zeit seit der letzten Einschaltung und dem jetzigen Einschaltbefehl (=0 wenn Wärmepumpe nicht im aktuellen Zeitschritt eingeschaltet wurde)

assign *dateiname* LUNbq



## Literaturverzeichnis

- 1 Afjei Thomas; YUM, A Yearly Utilization Model for Calculating the Seasonal Performance Factor of Electric Driven Heat Pump Heating Systems, Technical Form; Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, IET-LES; Zürich 1989; Schweiz
- 2 Afjei Thomas, Wittwer Dieter; Yearly Utilization Model YUM WP/Holz, Benutzerhandbuch mit Beispielen; INFEL/KRE; Zürich 1995; Schweiz
- 3 Press William H., Flannery Brian P., Teukolsky Saul A., Vetterling William T.; Numerical Recipes, The Art of Scientific Computing; ISBN 0 521 30811 9; Cambridge University Press; Cambridge MA 1987; USA
- 4 Conde M. R.; Progress Report IEA-Annex 10, Air-to-Water Heat Pump, Simple Simulation Model; Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, IET-LES; Zürich 1985; Schweiz