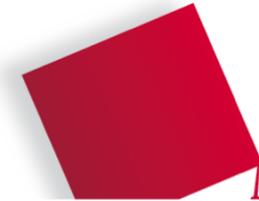




CENERGIE



HOCHSCHULE
FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN
MÜNCHEN

Modell-Basierte Optimierung von Kälteversorgungssystemen

Jörg Bentz
Christian Schweigler

Hochschule München
Fakultät 05: Versorgungs- und Gebäudetechnik
CENERGIE: Competence Center Energieeffiziente Gebäude und Quartiere

Agenda

- **Motivation**
- **Betriebsoptimierung im Kälteversorgungssystem**
- **Quadratische Optimierung**
- **Potentialabschätzung**
- **Energieoptimierungssystem (ENOS)**
- **Modellierung Systemkomponenten**
- **Ausblick**



CENERGIE



15. Symposium Energieinnovation
TU Graz

Seite 2
15. Feb. 2018

Motivation

- **Kälteversorgungssysteme sind sehr komplex und haben eine hohe Anzahl an Freiheitsgraden**
- **Eine Betriebsoptimierung eines Kältesystems erfordert ein hohes Maß an Anlagenkenntnissen**
- **Optimierungssysteme werden meist nur für große Energiesysteme (z.B. Kraftwerke) individuell aufgesetzt**



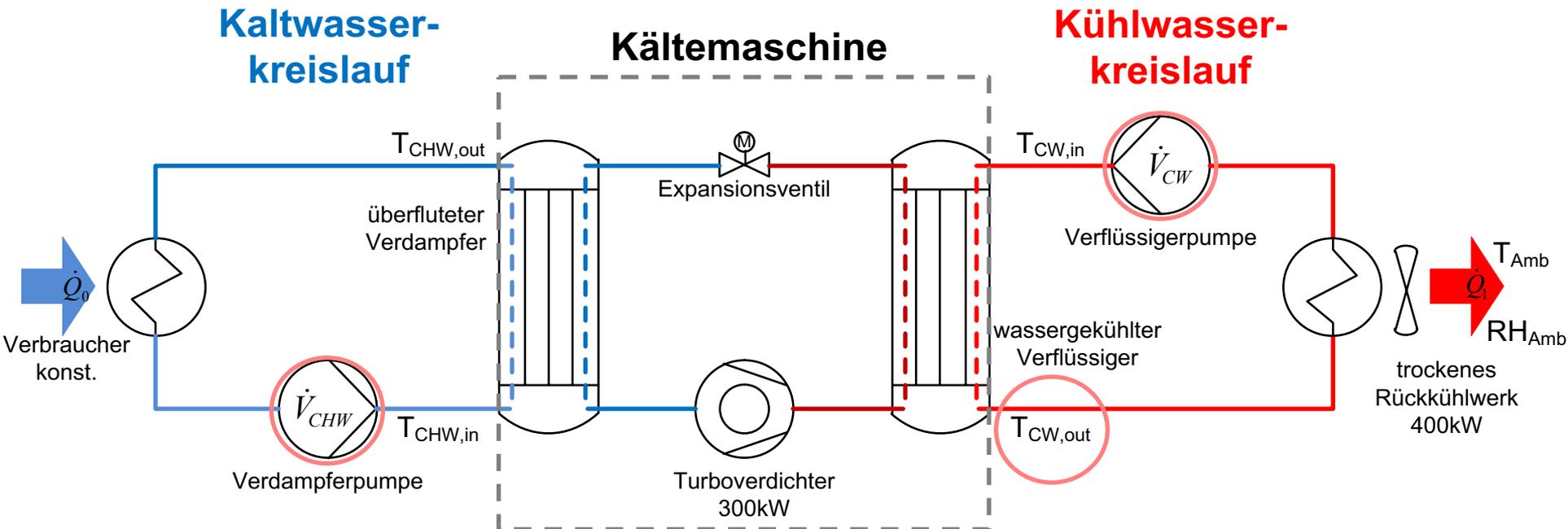
Betriebsoptimierung im Kältesystem

- Minimierung der elektrischen Leistungsaufnahme aus Kältemaschine, Rückkühlwerk und Pumpen

Randbedingungen:

$$\dot{Q}_{Evap} = konst.$$

$$T_{Evap} = konst.$$



Optimierung des Referenzsystems

Formulierung Quadratische Optimierung

Generalform:

$$\min_x \{f^T x | Ax \leq b, A_{eq}x = b_{eq}, lb \leq x \leq ub\}$$

Zielfunktion:

$$\min_{T_{CWS}, \dot{V}_{CHW}, \dot{V}_{CW}} P_{EL,t} = P_{EL,CH} + P_{EL,CT} + P_{EL,PU_0} + P_{EL,PU_1}$$

mit:

$$P_{EL,CH} = C_{Parameter} + C_1 \cdot T_{CWS} + C_2 \cdot \dot{V}_{CHW} + C_3 \cdot \dot{V}_{CW} + C_4 \cdot T_{CWS}^2 + C_5 \cdot \dot{V}_{CHW}^2 + C_6 \cdot \dot{V}_{CW}^2 + C_7 \cdot T_{CWS} \cdot \dot{V}_{CHW} + C_8 \cdot T_{CWS} \cdot \dot{V}_{CW} + C_9 \cdot \dot{V}_{CHW} \cdot \dot{V}_{CW}$$

$$P_{EL,CT} = C_{Parameter} + C_1 \cdot T_{CWR} + C_2 \cdot \dot{V}_{CW} + C_3 \cdot T_{CWR}^2 + C_4 \cdot \dot{V}_{CW}^2 + C_5 \cdot T_{CWR} \cdot \dot{V}_{CW}$$

$$P_{EL,PU_0} = C_{Parameter} + C_1 \cdot \dot{V}_{CHW} + C_2 \cdot \dot{V}_{CHW}^2$$

$$P_{EL,PU_1} = C_{Parameter} + C_1 \cdot \dot{V}_{CW} + C_2 \cdot \dot{V}_{CW}^2$$

Randbedingungen:

$C_{parameter} = konst.$

(alle nicht optimierten Variablen)



CENERGIE



HOCHSCHULE
FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN
MÜNCHEN

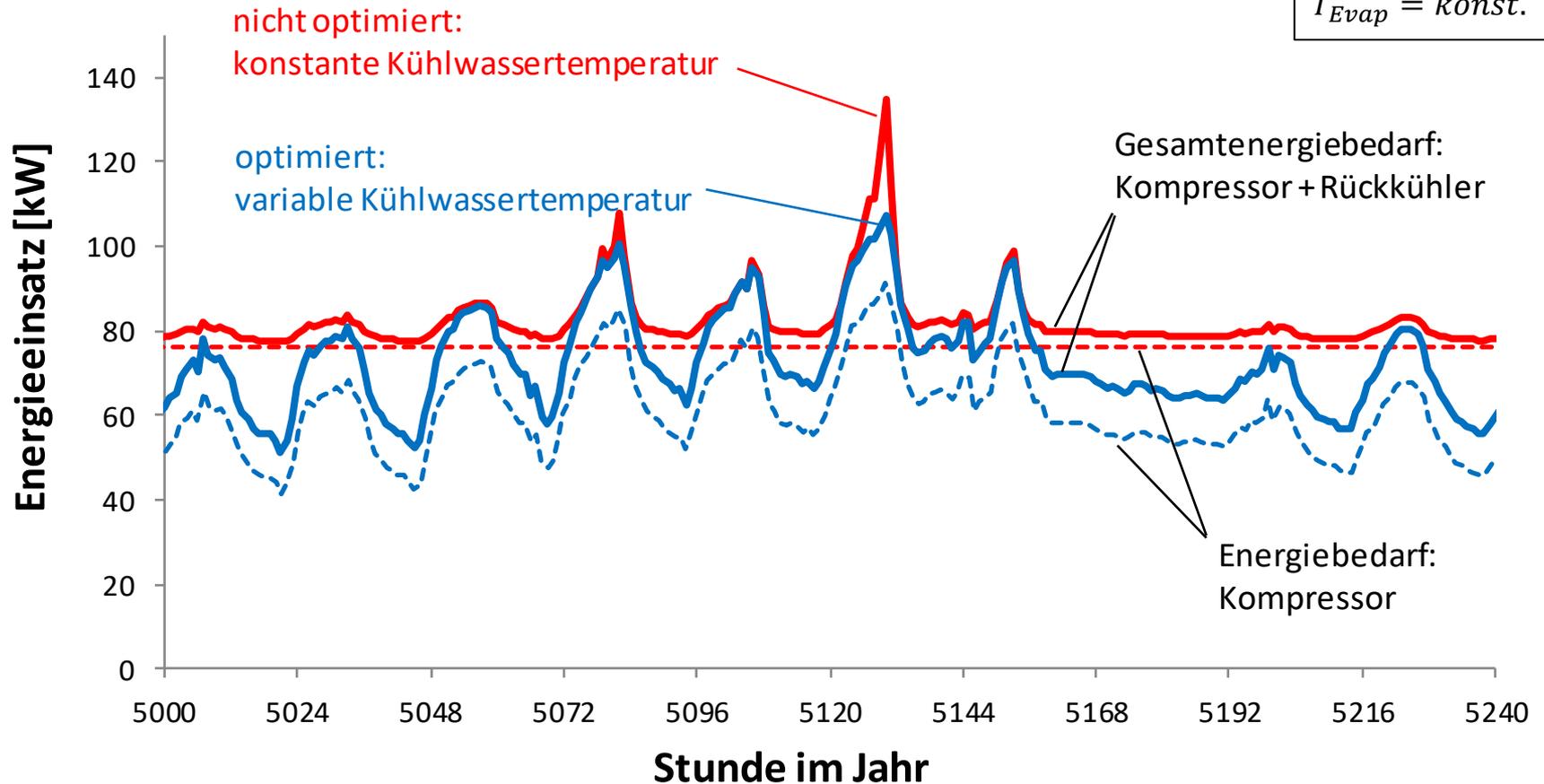
15. Symposium Energieinnovation
TU Graz

Seite 5
15. Feb. 2018

Potentialabschätzung

- Betrachtung über 10 Betriebstage

Randbedingungen:
 $\dot{Q}_{Evap} = konst.$
 $T_{Evap} = konst.$



CENERGIE



15. Symposium Energieinnovation
TU Graz

Seite 6
15. Feb. 2018

Potentialabschätzung

■ Ergebnis Jahressimulation

Kälteleistung
290 kW

Kältemittel R 134a

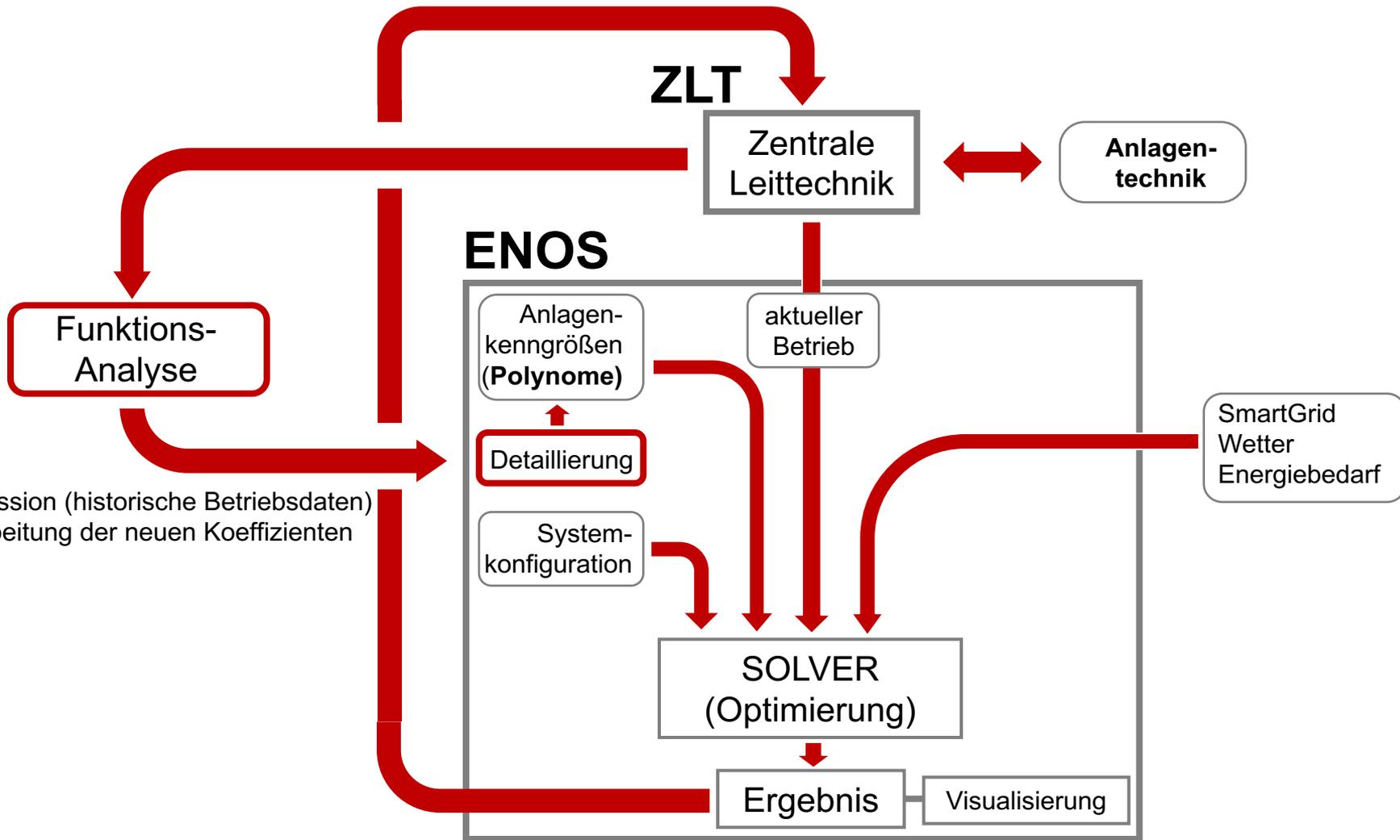
Freie Kühlung (Aussentemp. < 4°C)
2802 h/a

Kältemaschineneinsatz
5958 h/a

Energieeinsatz	nicht opt. MWh	optimiert MWh	Einsparung %
Kältemaschine	453,0	307,3	32,2
Rückkühler	25,8	64,3	-149,7
Gesamt	478,8	371,6	22,4
Kälteenergie	1728	1728	
EER	3,61	4,65	



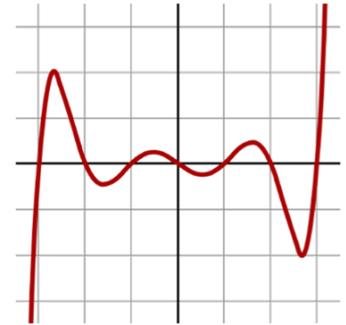
Energieoptimierungssystem (ENOS)



ENOS Workflow vereinfacht

$$EER_{Comp} = \frac{T_0}{T_1 - T_0} \cdot \eta_{Comp}^*$$

	Q_{Evap} [kW]	η_{ic}	T_{Evap} [°C]	$T_{Evap,Simple}$	T_{Dew} [°C]	T_{Cond} [°C]
Run 1	150	0.61	5.044	5.016	6	32.95
Run 2	160.1	0.618	4.979	4.95	6	33
Run 3	170.1	0.618	4.915	4.884	6	33.06
Run 4	180.2	0.618	4.851	4.818	6	33.12
Run 5	190.3	0.618	4.787	4.752	6	33.19
Run 6	200.3	0.6	4.723	4.686	6	33.25
Run 7	210.4	0.6	4.659	4.62	6	33.32
Run 8	220.5	0.6	4.595	4.554	6	33.39
Run 9	230.5	0.6	4.531	4.488	6	33.46
Run 10	240.6	0.6	4.467	4.422	6	33.54
Run 11	250.7	0.56	4.402	4.356	6	33.62
Run 12	260.7	0.56	4.338	4.29	6	33.7
Run 13	270.8	0.56	4.274	4.224	6	33.79
Run 14	280.9	0.56	4.21	4.158	6	33.88
Run 15	290.9	0.56	4.146	4.091	6	33.97
Run 16	301	0.54	4.082	4.025	6	34.07



vereinfachte Modelle

Simulation

Simulationsdaten

Regression

Polynome

Messdaten

Betriebsdaten



CENERGIE



HOCHSCHULE
FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN
MÜNCHEN

15. Symposium Energieinnovation
TU Graz

Seite 9
15. Feb. 2018

Modellierung der Systemkomponenten

- **Auslegungsprogramm**
 - real vermessene Maschinen / Komponenten
- **komplexes semi-empirisches Modell**
 - Mischung aus physikalischer Formulierung und Herstellerdaten
 - Validiert durch Auslegungsprogramm
- **vereinfachtes Modell**
 - auf grundlegende Zusammenhänge reduziertes Modell
 - nur wenige Parameter zur Anpassung notwendig

Komplexität



Modellaufbau (Kältemaschine)

komplexes Modell

- Verdichter (Polynome nach EN12900)

$$EER = \frac{\dot{Q}_0}{P_{el}}$$

$$P_{el} = C_1 + C_2 \cdot T_0 + C_3 \cdot T_1 + C_4 \cdot T_0^2 + C_5 \cdot T_0 \cdot T_1 + C_6 \cdot T_1 + C_7 \cdot T_0^3 + C_8 \cdot T_1 \cdot T_0^2 + C_9 \cdot T_0 \cdot T_1^2 + C_{10} \cdot T_1^3$$

- Wärmetauscher (2 teilig / 3 teilig)

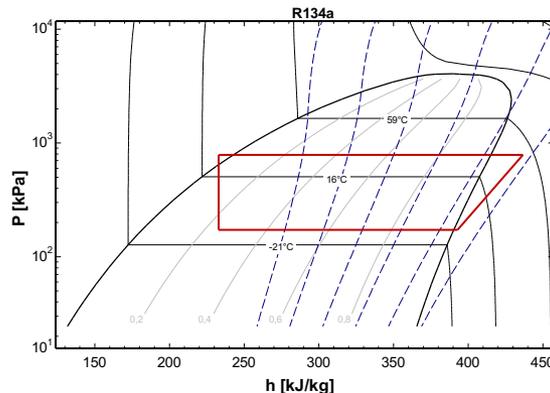
aussen:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot LMTD$$

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta t$$

innen:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{ref} \cdot \Delta h$$



vereinfachtes Modell

- Verdichter

$$EER = \frac{T_0}{T_1 - T_0} \cdot \eta^*$$

$$\eta^* = C_1 + C_2 \cdot \dot{Q}_0 + C_3 \cdot \dot{Q}_0^2$$

- Wärmetauscher (Grädigkeiten)

$$T_0 = T_{CHWS} - \Delta t_0$$

$$T_1 = T_{CWS} + \Delta t_1$$

$$\Delta t_0 = \Delta t_{0,Nenn} \cdot PLF_0$$

$$\Delta t_1 = \Delta t_{1,Nenn} \cdot PLF_1$$

$$PLF_0 = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}_{0,Nenn}}$$

$$PLF_1 = \frac{\dot{Q}_1}{\dot{Q}_{1,Nenn}}$$



Modellanalyse (Kältemaschine)

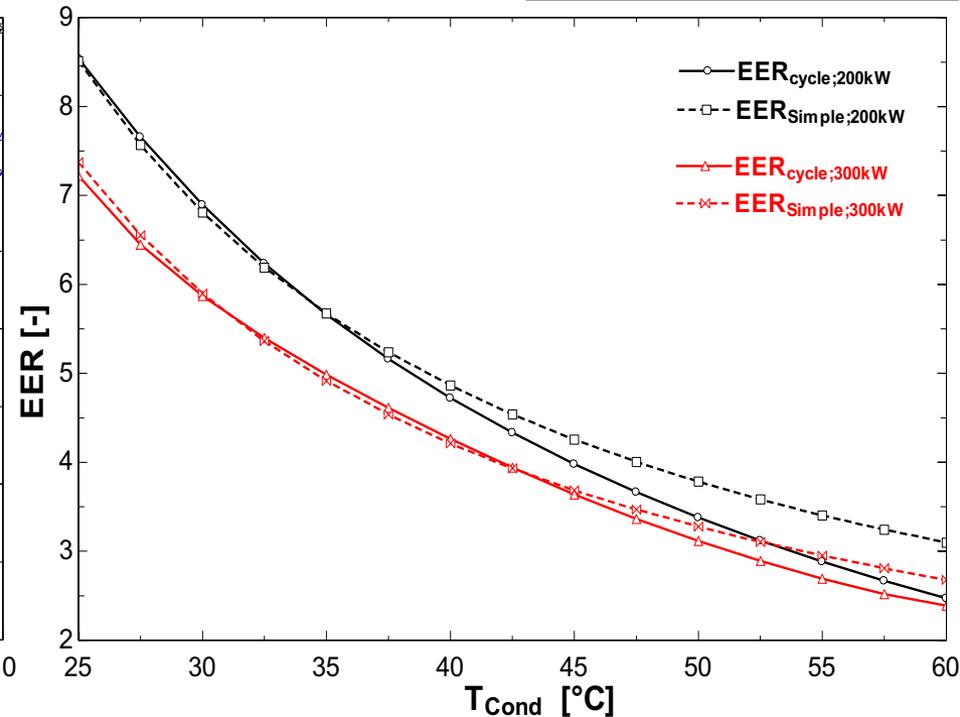
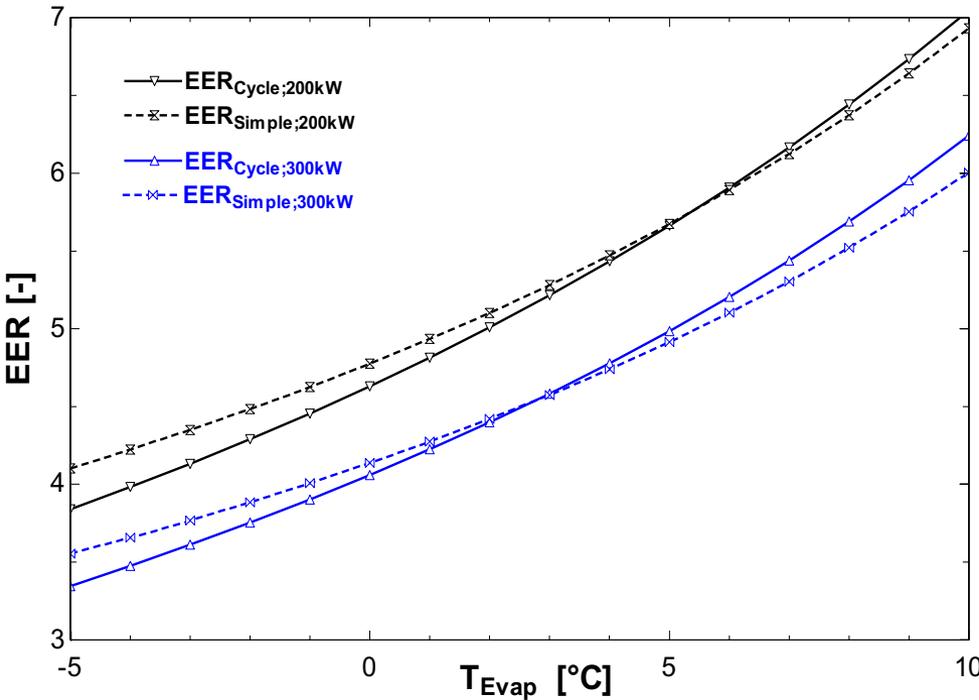
■ EER Verlauf des Verdichters über interne Temperaturen

Randbedingungen:

$$\dot{Q}_{Evap} = konst.$$

$$T_{Cond} = konst. (Bild 1)$$

$$T_{Evap} = konst. (Bild 2)$$



CENERGIE



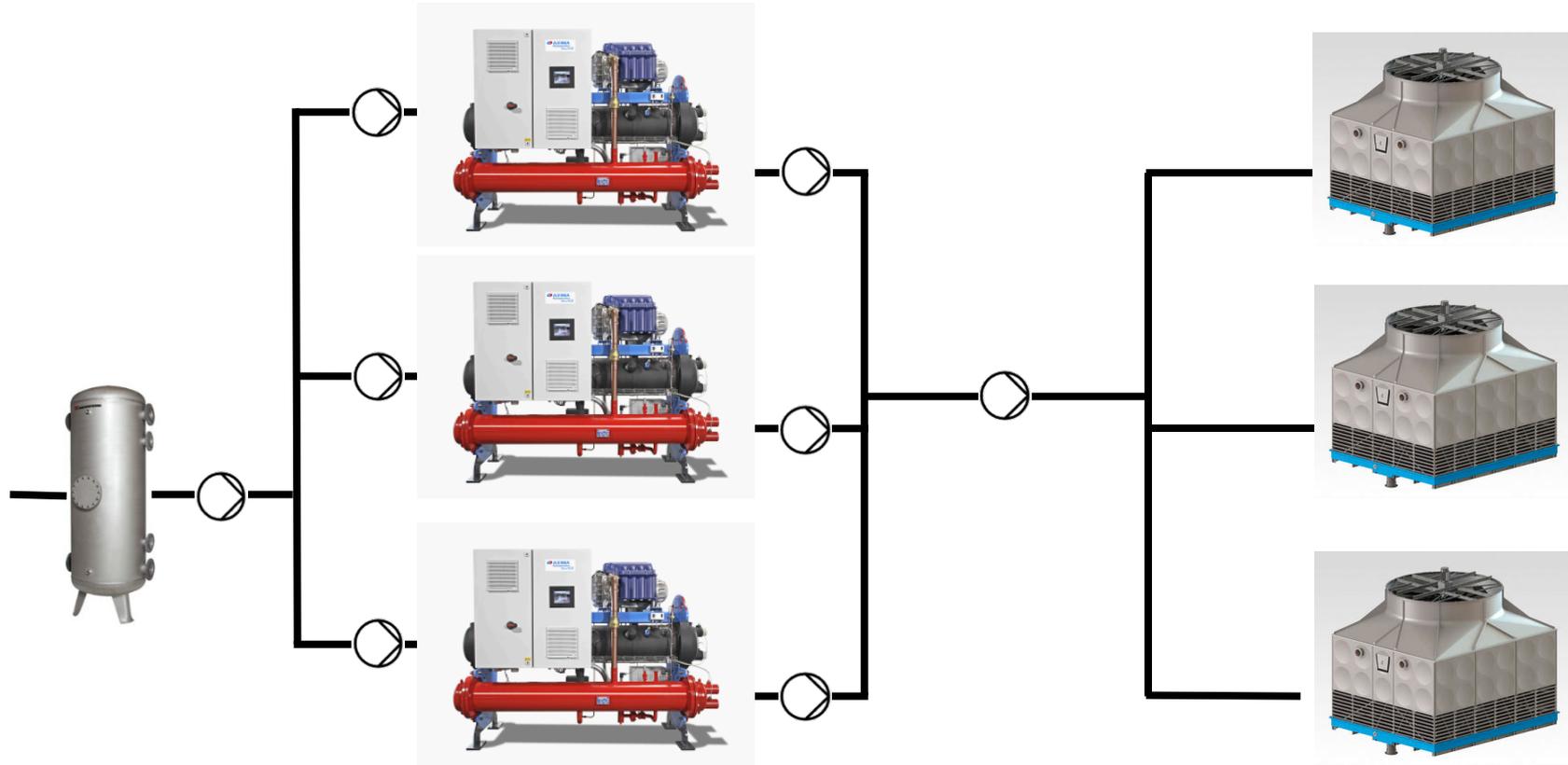
HOCHSCHULE
FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN
MÜNCHEN

15. Symposium Energieinnovation
TU Graz

Seite 12
15. Feb. 2018

Ausblick

■ Gemischt Ganzzahlige Quadratische Optimierung



Quelle: www.engie.de

Quelle: www.directindustry.de



CENERGIE



HOCHSCHULE
FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN
MÜNCHEN

15. Symposium Energieinnovation
TU Graz

Seite 13
15. Feb. 2018

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Kontakt an der Hochschule München

M.Sc. Jörg Bentz
Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Raum: T 4.031
80636 München
Dachauer Str. 100a

Tel.: +49 (0) 89 12 65 - 43 84
Fax: +49 (0) 89 12 65 - 43 90
E-Mail > joerg.bentz@hm.edu



CENERGIE



15. Symposium Energieinnovation
TU Graz

Seite 14
15. Feb. 2018