

# Simulation von Wärmepumpensystemen auf der Grundlage von Korrelationsfunktionen für die Leistungsdaten der Wärmepumpe

**16. Symposium Energieinnovation 2020**

**12. – 14. Februar 2020, TU Graz, Österreich**

Thomas Kemmler M.Sc., Prof. Dr.-Ing. Bernd Thomas  
Reutlinger Energiezentrum (REZ), Hochschule Reutlingen

## Agenda

- 1. Einleitung**
- 2. Entwicklung der Korrelationsgleichungen**
- 3. Ergebnisse der Korrelationsgleichungen**
- 4. Fazit**

## 1. Einleitung: Warum Korrelationsgleichungen?

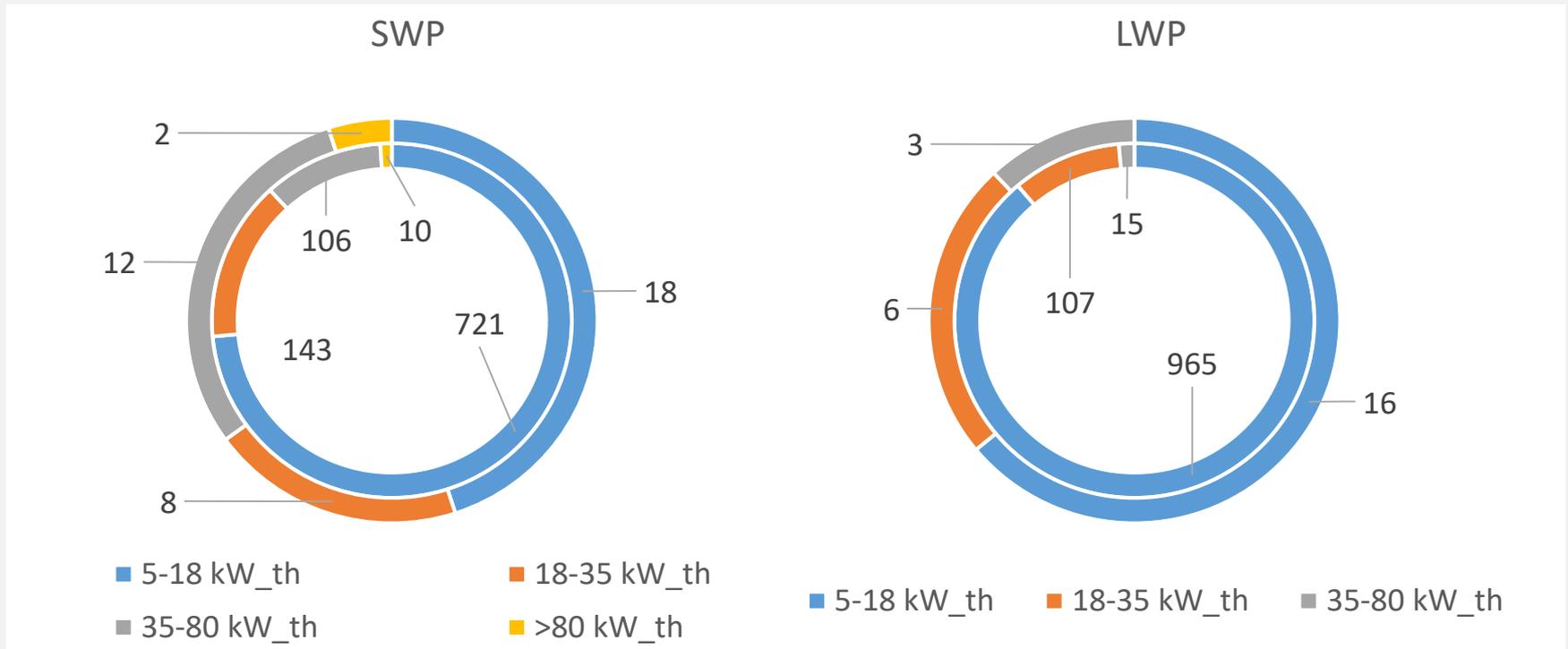
- Sektorenkopplung wichtig für den Einsatz der erneuerbaren Energien  
→ Wärmepumpen zur Kopplung des Strom- und Wärmesektors
- Für Potenzialabschätzung von Wärmepumpen im großflächigen Einsatz ist es unmöglich, eine spezifische und angepasste Dimensionierung für jedes Gebäude durchzuführen, daher:
  - Definition von Referenzgebäuden (Bspw. Wärmeatlas Uni Stuttgart)
  - Mittlere Leistungsdaten von Wärmepumpen für Referenzgebäude auf Basis von Herstellerdaten zur (Energie-)Systemsimulation ermitteln
- Korrelationsgleichungen für  $\dot{Q}_{th}$ ,  $P_{el}$ , COP von Wärmepumpen in Abhängigkeit der Quellen- und Vorlauftemperatur

## 2. Entwicklung der Korrelationsgleichungen

1. Überblick über verfügbare Wärmepumpen mittels BAFA Liste „Wärmepumpen mit Prüfnachweis“ (Stand Dezember 2019)
2. Unterscheidung zwischen Sole-Wasser-Wärmepumpen (SWP) und Luft-Wasser-Wärmepumpen (LWP)
3. Kategorisierung der Wärmepumpen in Leistungsklassen (Heizleistung) gemäß der „Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes“ des Geothermiezentrums Bochum
  - 5-18 kW<sub>th</sub> → Anlagen in EFH
  - 18-35 kW<sub>th</sub> → Anlagen in MFH
  - 35-80 kW<sub>th</sub> → Anlagen im gewerblichen Bereich
  - >80 kW<sub>th</sub> → Sonderlösungen
4. Recherche nach Datenblättern mit Leistungskurven
  - Heizleistung über größeren Temperaturbereich analysierbar und nicht nur an vereinzelt Normpunkten (z.B. B0/W35 oder A7/W35)

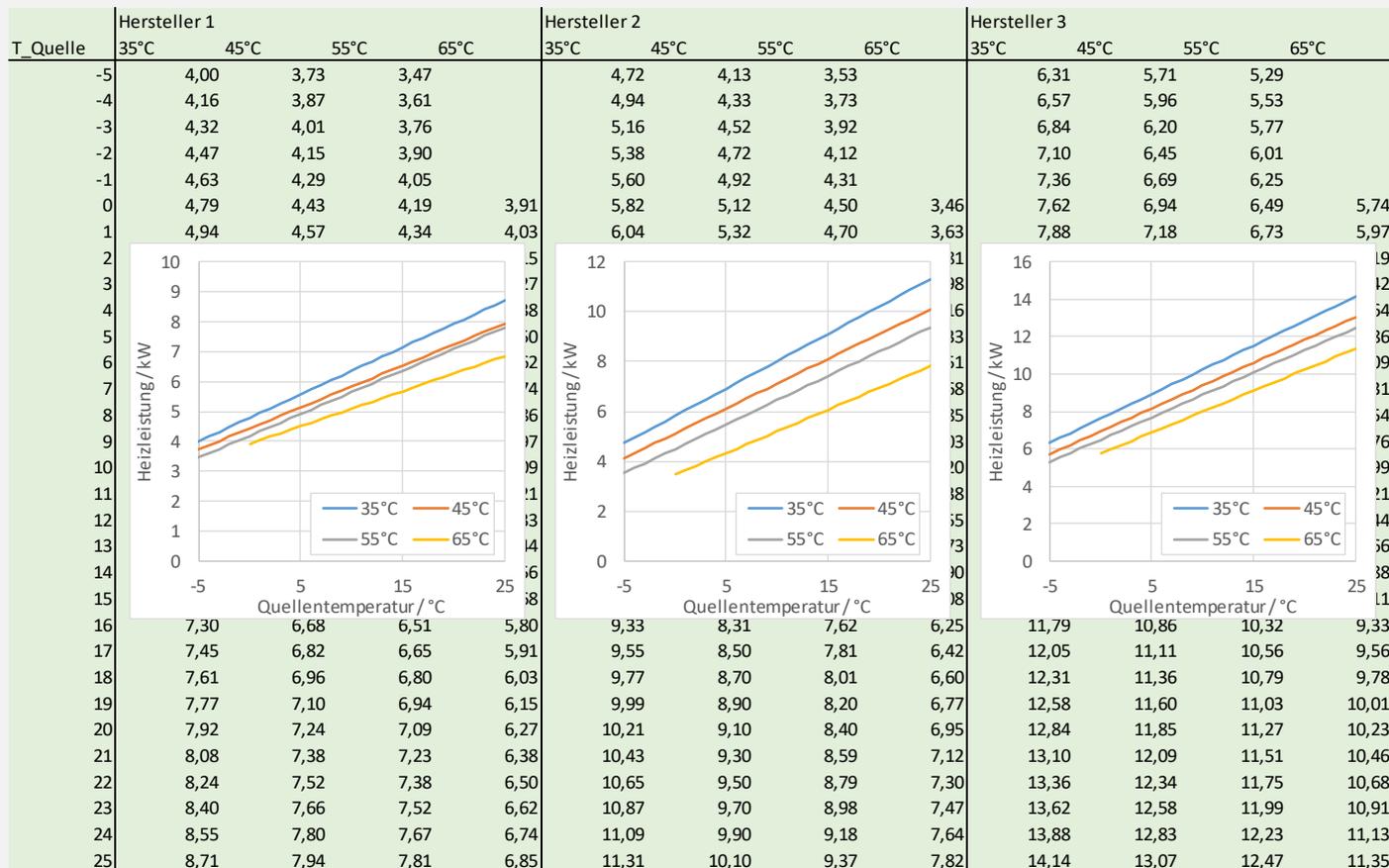
## 2. Entwicklung der Korrelationsgleichungen

### Ergebnisse der Datenblattrecherche



## 2. Entwicklung der Korrelationsgleichungen

### 5. Übertragung der Leistungskurven für $\dot{Q}_{th}$ , $P_{el}$ , COP in Excel-Datenbank



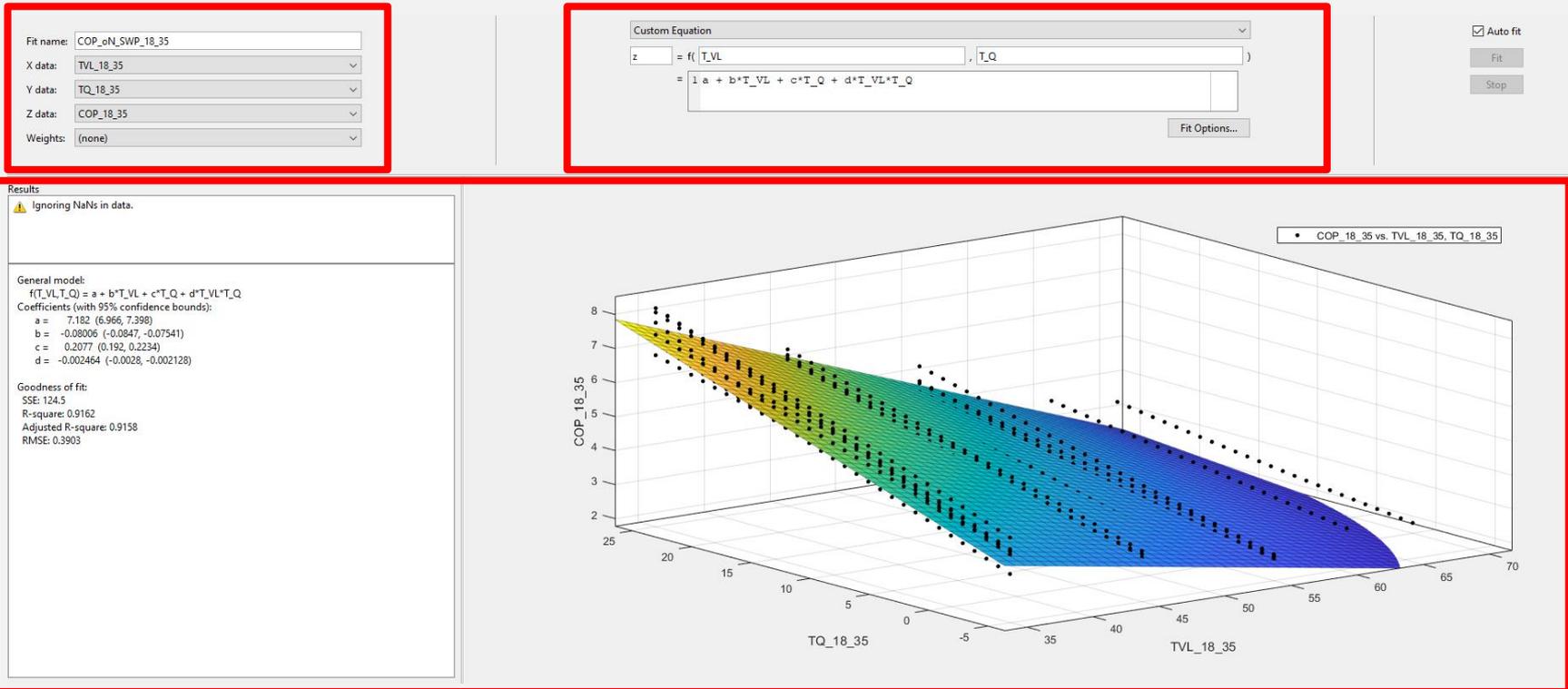
## 2. Entwicklung der Korrelationsgleichungen

### 6. Normierung der Kenndaten für $\dot{Q}_{th}$ und $P_{el}$ auf die Betriebspunkte (SWP B0/W35; LWP A2/W35) gemäß DIN EN 14511

T_Quelle	Hersteller 1				Hersteller 2				Hersteller 3			
	35°C	45°C	55°C	65°C	35°C	45°C	55°C	65°C	35°C	45°C	55°C	65°C
-5	0,84	0,78	0,72		0,81	0,71	0,61		0,83	0,75	0,69	
-4	0,87	0,81	0,75		0,85	0,74	0,64		0,86	0,78	0,73	
-3	0,90	0,84	0,78		0,89	0,78	0,67		0,90	0,81	0,76	
-2	0,93	0,87	0,81		0,92	0,81	0,71		0,93	0,85	0,79	
-1	0,97	0,90	0,84		0,96	0,85	0,74		0,97	0,88	0,82	
0	1,00	0,93	0,88	0,82	1,00	0,88	0,77	0,59	1,00	0,91	0,85	0,75
1	1,03	0,95	0,91	0,84	1,04	0,91	0,81	0,62	1,03	0,94	0,88	0,78
2	1,07	0,98	0,94	0,87	1,08	0,95	0,84	0,65	1,07	0,98	0,91	0,81
3	1,10	1,01	0,97	0,89	1,11	0,98	0,87	0,68	1,10	1,01	0,95	0,84
4	1,13	1,04	1,00	0,92	1,15	1,02	0,91	0,71	1,14	1,04	0,98	0,87
5	1,16	1,07	1,03	0,94	1,19	1,05	0,94	0,74	1,17	1,07	1,01	0,90
6	1,20	1,10	1,06	0,96	1,23	1,09	0,97	0,77	1,21	1,10	1,04	0,93
7	1,23	1,13	1,09	0,99	1,26	1,12	1,01	0,80	1,24	1,14	1,07	0,96
8	1,26	1,16	1,12	1,01	1,30	1,15	1,04	0,83	1,27	1,17	1,10	0,99
9	1,29	1,19	1,15	1,04	1,34	1,19	1,08	0,86	1,31	1,20	1,13	1,02
10	1,33	1,22	1,18	1,06	1,38	1,22	1,11	0,89	1,34	1,23	1,17	1,05
11	1,36	1,25	1,21	1,09	1,42	1,26	1,14	0,92	1,38	1,27	1,20	1,08
12	1,39	1,28	1,24	1,11	1,45	1,29	1,18	0,95	1,41	1,30	1,23	1,11
13	1,43	1,31	1,27	1,14	1,49	1,32	1,21	0,98	1,45	1,33	1,26	1,14
14	1,46	1,34	1,30	1,16	1,53	1,36	1,24	1,01	1,48	1,36	1,29	1,17
15	1,49	1,36	1,33	1,19	1,57	1,39	1,28	1,04	1,51	1,39	1,32	1,20
16	1,52	1,39	1,36	1,21	1,60	1,43	1,31	1,07	1,55	1,43	1,35	1,23
17	1,56	1,42	1,39	1,23	1,64	1,46	1,34	1,10	1,58	1,46	1,39	1,25
18	1,59	1,45	1,42	1,26	1,68	1,50	1,38	1,13	1,62	1,49	1,42	1,28
19	1,62	1,48	1,45	1,28	1,72	1,53	1,41	1,16	1,65	1,52	1,45	1,31
20	1,66	1,51	1,48	1,31	1,75	1,56	1,44	1,19	1,69	1,56	1,48	1,34
21	1,69	1,54	1,51	1,33	1,79	1,60	1,48	1,22	1,72	1,59	1,51	1,37
22	1,72	1,57	1,54	1,36	1,83	1,63	1,51	1,25	1,75	1,62	1,54	1,40
23	1,75	1,60	1,57	1,38	1,87	1,67	1,54	1,28	1,79	1,65	1,57	1,43
24	1,79	1,63	1,60	1,41	1,91	1,70	1,58	1,31	1,82	1,68	1,61	1,46
25	1,82	1,66	1,63	1,43	1,94	1,74	1,61	1,34	1,86	1,72	1,64	1,49

## 2. Entwicklung der Korrelationsgleichungen

### 7. Erstellung der Korrelationsfunktionen mit Hilfe des Curve-Fitting-Tools von MATLAB aus den normierten Datenwerten für jede Leistungsklasse der SWP und LWP



### 3. Ergebnisse der Korrelationsgleichungen

#### Ergebnisse für die SWP

$$\dot{Q}_{th,SWP} = (a + b \cdot T_{VL} + c \cdot T_{Quelle} + d \cdot T_{VL} \cdot T_{Quelle}) \cdot \dot{Q}_{thNenn}$$

$$P_{el,SWP} = (a + b \cdot T_{VL} + c \cdot T_{Quelle} + d \cdot T_{VL} \cdot T_{Quelle}) \cdot P_{elNenn}$$

$$COP_{SWP} = (a + b \cdot T_{VL} + c \cdot T_{Quelle} + d \cdot T_{VL} \cdot T_{Quelle})$$

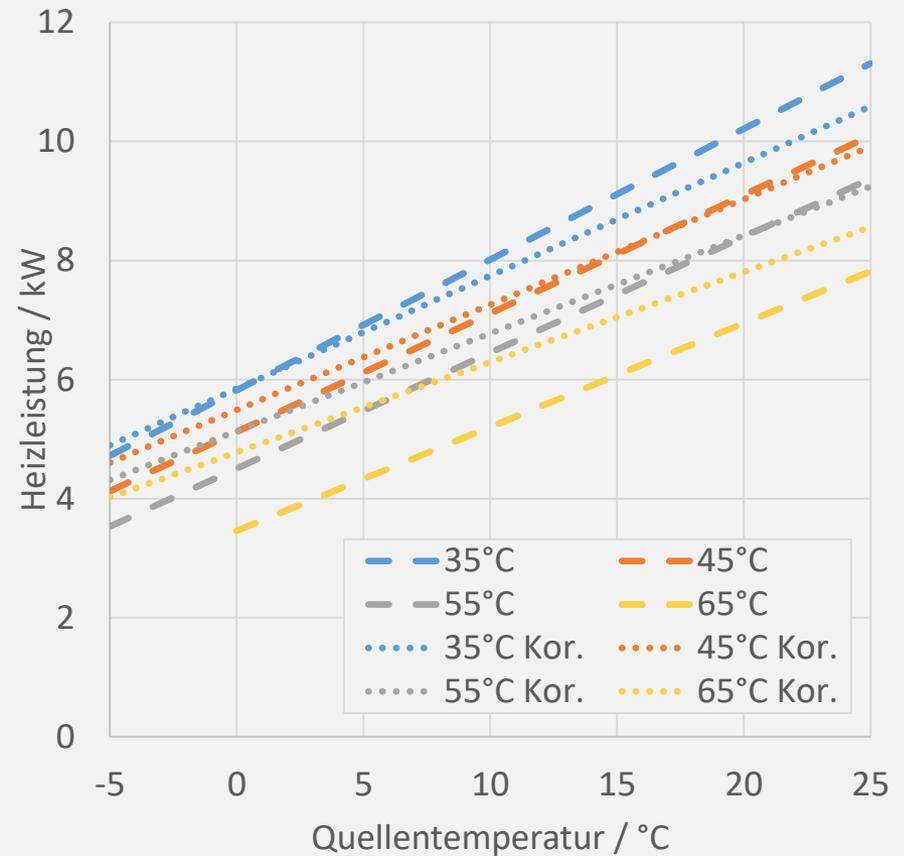
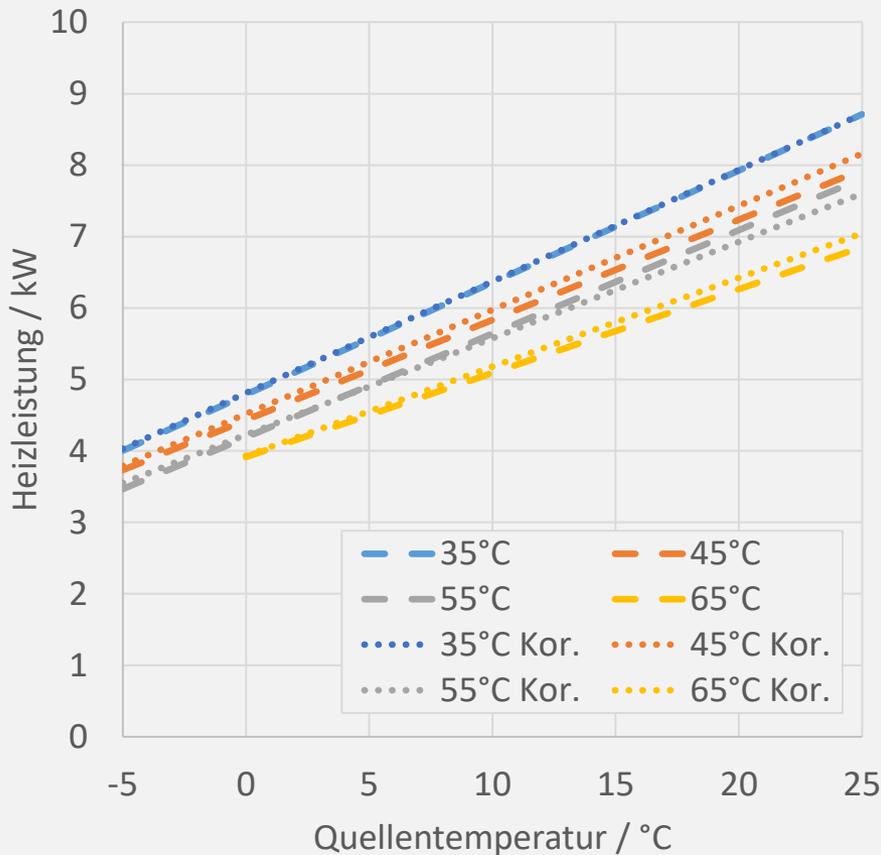
### 3. Ergebnisse der Korrelationsgleichungen

#### Ergebnisse für die SWP

Solewärmepumpen							
5-18 kW <sub>th</sub>	$\dot{Q}_{th}$	$P_{el}$	$COP$	35-80 kW <sub>th</sub>	$\dot{Q}_{th}$	$P_{el}$	$COP$
a / -	1,21865	0,10929	7,68429	a / -	1,10562	0,07925	7,49233
b / 1/°C	-0,00611	0,02536	-0,08818	b / 1/°C	-0,00317	0,02569	-0,08100
c / 1/°C	0,04030	-0,00462	0,25313	c / 1/°C	0,03773	-0,00071	0,18945
d / 1/°C <sup>2</sup>	-0,00022	0,00014	-0,00302	d / 1/°C <sup>2</sup>	-0,00023	0,00009	-0,00210
R <sup>2</sup>	0,9698	0,9405	0,9180	R <sup>2</sup>	0,9371	0,9336	0,9626
<b>18-35 kW<sub>th</sub></b>				<b>&gt;80 kW<sub>th</sub></b>			
a / -	1,13654	0,11708	7,06715	a / -	1,13968	0,15202	7,45334
b / 1/°C	-0,00407	0,02460	-0,07684	b / 1/°C	-0,00415	0,02416	-0,08606
c / 1/°C	0,03898	-0,00359	0,20344	c / 1/°C	0,03389	0,00829	0,15183
d / 1/°C <sup>2</sup>	-0,00023	0,00014	-0,00231	d / 1/°C <sup>2</sup>	-0,00016	-0,00011	-0,00150
R <sup>2</sup>	0,9321	0,9638	0,9162	R <sup>2</sup>	0,9994	0,9982	0,9472

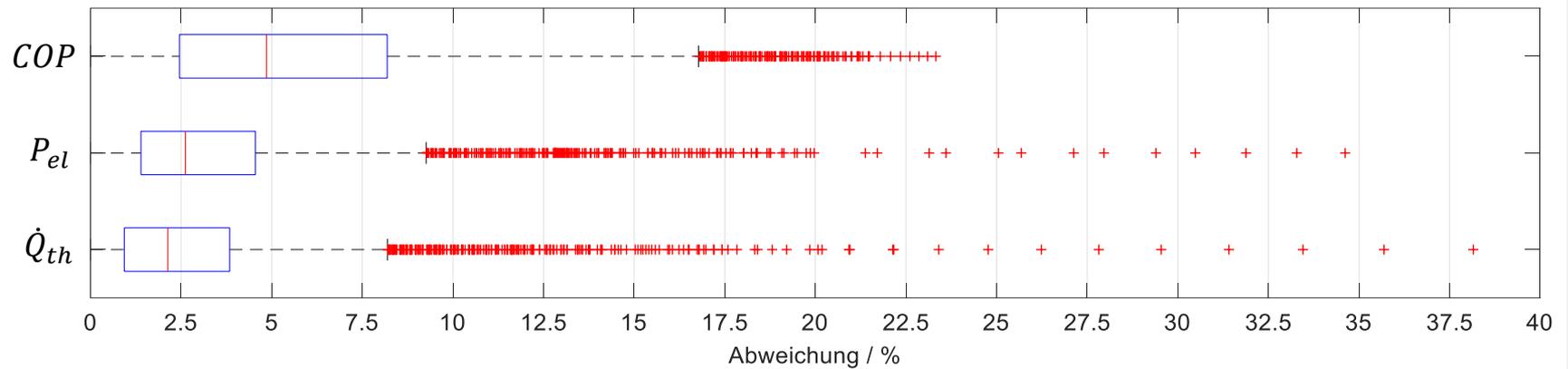
### 3. Ergebnisse der Korrelationsgleichungen

#### Ergebnisse für die SWP



### 3. Ergebnisse der Korrelationsgleichungen

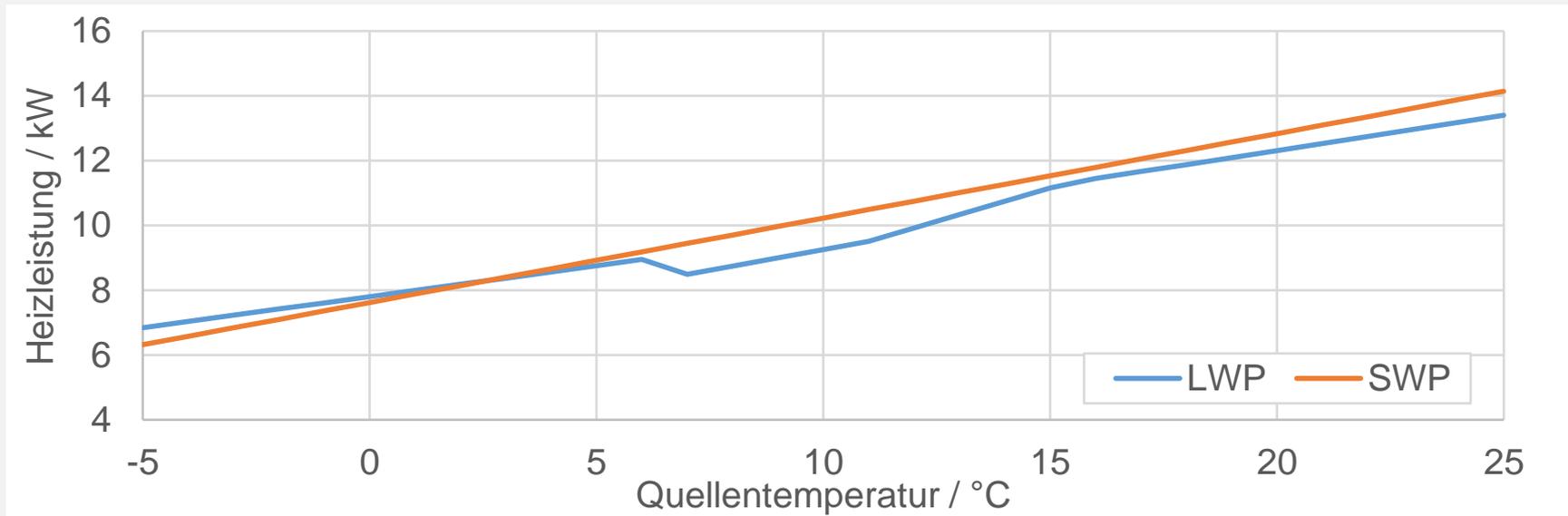
#### Boxplot: Abweichungen der korrelierten Werte zu den Herstellerdaten



### 3. Ergebnisse der Korrelationsgleichungen

#### Ergebnisse für die LWP

- Schwierigkeit: Abbildung des Abtauphänomens bei LWP



### 3. Ergebnisse der Korrelationsgleichungen

#### Ergebnisse für die LWP

- Schwierigkeit: Abbildung des Abtauphänomens bei LWP
  
- Abschnittsweise Korrelation der Kennzahlen von:
  - -5 bis  $<7^{\circ}\text{C}$
  - 7 bis  $10^{\circ}\text{C}$  und
  - $>10$  bis  $25^{\circ}\text{C}$  Außenlufttemperatur
  
- Nichtlineares Verhalten wird z.T. durch Polynome zweiten Grades abgebildet

### 3. Ergebnisse der Korrelationsgleichungen

#### Ergebnisse für die LWP

$$\dot{Q}_{th,LWP} = (a + b \cdot T_{VL} + c \cdot T_{Quelle} + d \cdot T_{VL} \cdot T_{Quelle} + e \cdot T_{VL}^2 + f \cdot T_{Quelle}^2) \cdot \dot{Q}_{thNenn}$$

$$P_{el,LWP} = (a + b \cdot T_{VL} + c \cdot T_{Quelle} + d \cdot T_{VL} \cdot T_{Quelle}) \cdot P_{elNenn}$$

$$COP_{LWP} = (a + b \cdot T_{VL} + c \cdot T_{Quelle} + d \cdot T_{VL} \cdot T_{Quelle} + e \cdot T_{VL}^2 + f \cdot T_{Quelle}^2)$$

### 3. Ergebnisse der Korrelationsgleichungen

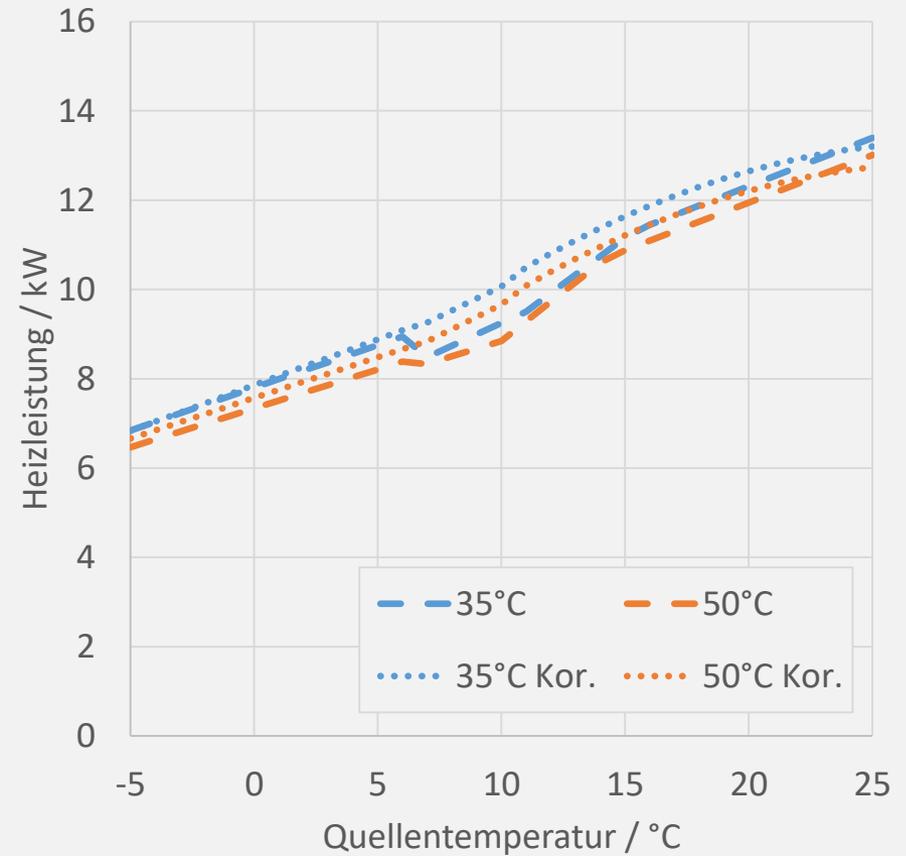
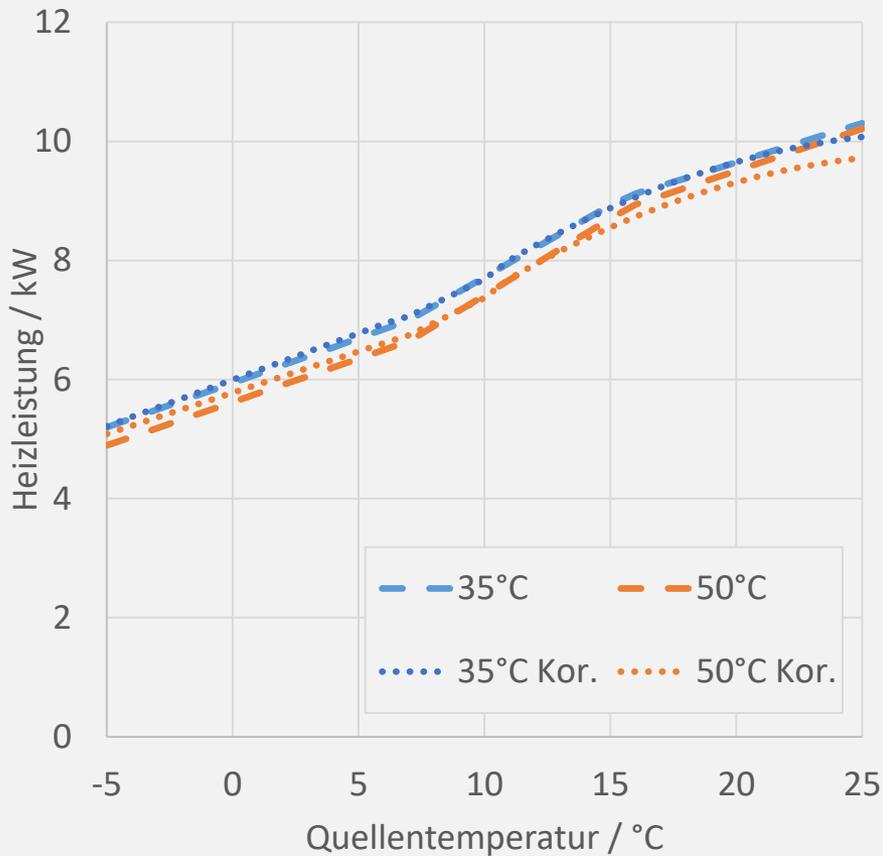
#### Ergebnisse für die LWP

Luftwärmepumpen								
5-18 kW <sub>th</sub>	$\dot{Q}_{th}$	COP	18-35 kW <sub>th</sub>	$\dot{Q}_{th}$	COP	35-80 kW <sub>th</sub>	$\dot{Q}_{th}$	COP
<b>-5 - &lt;7°C</b>			<b>-5 - &lt;7°C</b>			<b>-5 - &lt;7°C</b>		
a / -	1,04213	5,39800	a / -	1,03825	4,79304	a / -	1,10902	6,28133
b / 1/°C	-0,00234	-0,05601	b / 1/°C	-0,00223	-0,04132	b / 1/°C	-0,00478	-0,10087
c / 1/°C	0,03152	0,14818	c / 1/°C	0,02272	0,05651	c / 1/°C	0,02136	0,11251
d / 1/°C <sup>2</sup>	-0,00019	-0,00185	d / 1/°C <sup>2</sup>	0	0	d / 1/°C <sup>2</sup>	0,00019	-0,00097
e / 1/°C <sup>2</sup>	0	0	e / 1/°C <sup>2</sup>	0	0	e / 1/°C <sup>2</sup>	0	0,00056
f / 1/°C <sup>2</sup>	0	0,00080	f / 1/°C <sup>2</sup>	0	0	f / 1/°C <sup>2</sup>	0	0,00069
R <sup>2</sup>	0,8588	0,7945	R <sup>2</sup>	0,7691	0,5986	R <sup>2</sup>	0,9290	0,9926
<b>7 - 10°C</b>			<b>7 - 10°C</b>			<b>7 - 10°C</b>		
a / -	1,02701	6,22734	a / -	0,93526	6,34439	a / -	1,08294	6,23384
b / 1/°C	-0,00366	-0,07497	b / 1/°C	-0,00050	-0,10430	b / 1/°C	-0,00438	-0,09963
c / 1/°C	0,03202	0,07841	c / 1/°C	0,03926	0,07510	c / 1/°C	0,03386	0,11295
d / 1/°C <sup>2</sup>	0,00003	0	d / 1/°C <sup>2</sup>	-0,00021	-0,00016	d / 1/°C <sup>2</sup>	0	-0,00061
e / 1/°C <sup>2</sup>	0	0	e / 1/°C <sup>2</sup>	0	0,00059	e / 1/°C <sup>2</sup>	0	0,00052
f / 1/°C <sup>2</sup>	0	0	f / 1/°C <sup>2</sup>	0	0	f / 1/°C <sup>2</sup>	0	0
R <sup>2</sup>	0,3208	0,8140	R <sup>2</sup>	0,4607	0,5828	R <sup>2</sup>	0,7544	0,9916
<b>&gt;10 - 25°C</b>			<b>&gt;10 - 25°C</b>			<b>&gt;10 - 25°C</b>		
a / -	0,81917	5,59461	a / -	0,79796	5,07629	a / -	1,10262	5,00190
b / 1/°C	-0,00301	-0,06710	b / 1/°C	0,00005	-0,04833	b / 1/°C	-0,00316	-0,04138
c / 1/°C	0,06510	0,17291	c / 1/°C	0,05928	0,09969	c / 1/°C	0,02950	0,10137
d / 1/°C <sup>2</sup>	-0,00003	-0,00097	d / 1/°C <sup>2</sup>	-0,00026	-0,00096	d / 1/°C <sup>2</sup>	-0,00009	-0,00112
e / 1/°C <sup>2</sup>	0	0	e / 1/°C <sup>2</sup>	0	0,00009	e / 1/°C <sup>2</sup>	0	0
f / 1/°C <sup>2</sup>	-0,00112	-0,00206	f / 1/°C <sup>2</sup>	-0,00066	0	f / 1/°C <sup>2</sup>	0,00008	0,00027
R <sup>2</sup>	0,6681	0,8133	R <sup>2</sup>	0,7512	0,5665	R <sup>2</sup>	0,7026	0,9885

	$P_{el}$		
	5-18 kW <sub>th</sub>	18-35 kW <sub>th</sub>	35-80 kW <sub>th</sub>
a / -	0,49369	0,43778	0,27628
b / 1/°C	0,01394	0,01611	0,02061
c / 1/°C	-0,00084	0,00228	-0,00112
d / 1/°C <sup>2</sup>	0,00021	0,00008	0,00012
R <sup>2</sup>	0,8532	0,8470	0,8800

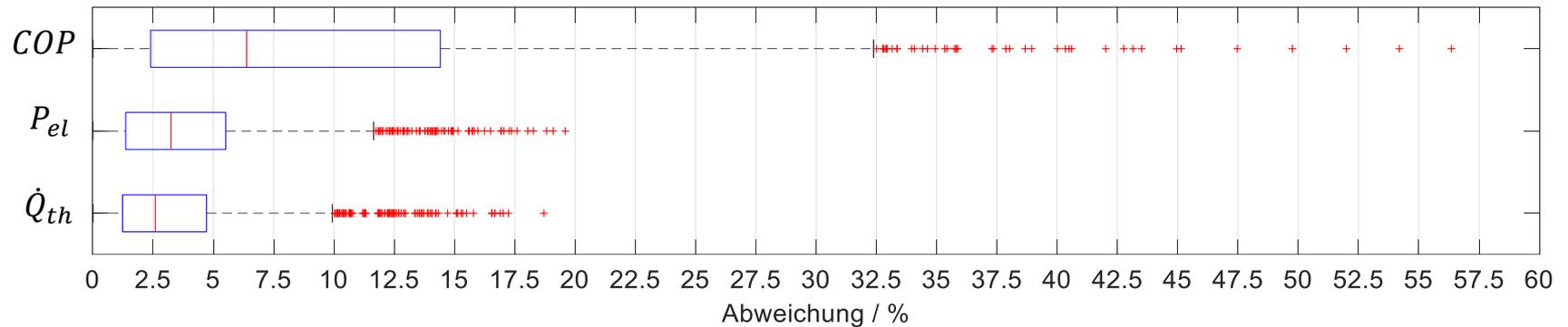
### 3. Ergebnisse der Korrelationsgleichungen

#### Ergebnisse für die LWP



### 3. Ergebnisse der Korrelationsgleichungen

#### Boxplot: Abweichungen der korrelierten Werte zu den Herstellerdaten



## 4. Fazit

- Korrelationsgleichungen können die Kennlinien der Wärmepumpen im Mittel gut darstellen:
  - Abweichungen SWP:  $\dot{Q}_{th} = 2,1\%$ ;  $P_{el} = 2,6\%$ ;  $COP = 4,9\%$
  - Abweichungen LWP:  $\dot{Q}_{th} = 2,6\%$ ;  $P_{el} = 3,2\%$ ;  $COP = 6,4\%$
- Korrelationsgleichungen können verwendet werden, wenn:
  - keine spezielle Wärmepumpe im Fokus steht, oder wenn eine Mehrzahl von Wärmepumpen zur Analyse von Siedlungs- und Netzgebieten untersucht werden sollen
- Korrelationsgleichungen eignen sich nicht, um:
  - einzelne spezielle Wärmepumpen abzubilden
  - Meist aber nicht erforderlich, da in diesem Fall Herstellerdaten zur Verfügung stehen

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**

Thomas Kemmler M.Sc., Prof. Dr.-Ing. Bernd Thomas  
Reutlinger Energiezentrum (REZ), Hochschule Reutlingen  
Mail: [thomas.kemmler@reutlingen-university.de](mailto:thomas.kemmler@reutlingen-university.de), [bernd.thomas@reutlingen-university.de](mailto:bernd.thomas@reutlingen-university.de)