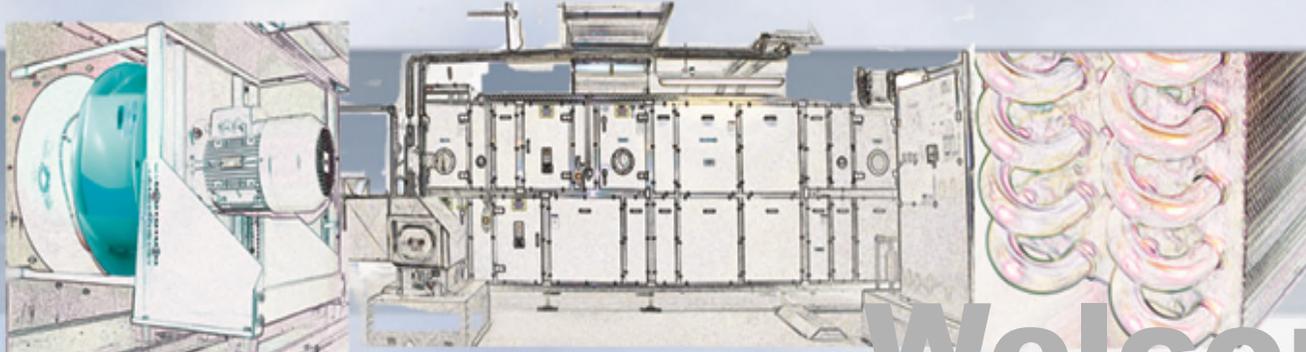


Willkommen



Welcome

Bienvenue

Die mehrdimensionale Optimierung der Wärmerückgewinnung

Ökonomische und ökologische Optimierung der WRG

Prof. Dr.-Ing. Dr. Christoph Kaup

c.kaup@umwelt-campus.de



Umwelt-Campus
Birkenfeld

H O C H
S C H U L E
T R I E R

WRG Zustände

AL °C	RL °C	ETA %	WRG °C	ZL °C	dT °C	Q WRG kW	Q zus. kW	Q ext. kW	Status
-10,5	20,0	65,6	9,5	20,5	20,0	96,5	53,1	0,0	V
-9,5	20,0	67,8	10,5	20,5	20,0	96,5	48,2	0,0	V
-8,5	20,0	70,2	11,5	20,5	20,0	96,5	43,4	0,0	V
-7,5	20,0	72,7	12,5	20,5	20,0	96,5	38,6	0,0	V
-6,5	20,0	73,0	12,8	20,5	19,3	93,3	36,9	0,0	
-5,5	20,0	73,0	13,1	20,5	18,6	89,8	35,6	0,0	
-4,5	20,0	73,0	13,4	20,5	17,9	86,3	34,3	0,0	
-3,5	20,0	73,0	13,7	20,5	17,2	82,7	33,0	0,0	
-2,5	20,0	73,0	13,9	20,5	16,4	79,2	31,7	0,0	
-1,5	20,0	73,0	14,2	20,5	15,7	75,7	30,4	0,0	
-0,5	20,0	73,0	14,5	20,5	15,0	72,2	29,1	0,0	
0,5	20,0	73,0	14,7	20,5	14,2	68,7	27,8	0,0	
1,5	20,0	73,0	15,0	20,5	13,5	65,1	26,5	0,0	
2,5	20,0	73,0	15,3	20,5	12,8	61,6	25,2	0,0	
3,5	20,0	73,0	15,5	20,5	12,0	58,1	23,9	0,0	
4,5	20,0	73,0	15,8	20,5	11,3	54,6	22,6	0,0	
5,5	20,0	73,0	16,1	20,5	10,6	51,1	21,3	0,0	
6,5	20,0	73,0	16,4	20,5	9,9	47,5	20,0	0,0	
7,5	20,0	73,0	16,6	20,5	9,1	44,0	18,7	0,0	
8,5	20,0	73,0	16,9	20,5	8,4	40,5	17,4	0,0	
9,5	20,0	73,0	17,2	20,5	7,7	37,0	16,1	0,0	
10,5	20,0	73,0	17,4	20,5	6,9	33,4	14,8	0,0	
11,5	20,0	73,0	17,7	20,5	6,2	29,9	13,5	0,0	
12,5	20,0	73,0	18,0	20,5	5,5	26,4	12,2	0,0	
13,5	20,0	73,0	18,2	20,5	4,7	22,9	10,9	0,0	
14,5	20,0	73,0	18,5	20,5	4,0	19,4	9,6	0,0	
15,5	20,0	73,0	18,8	20,5	3,3	15,8	8,3	0,0	
16,5	20,0	73,0	19,1	20,5	2,6	12,3	7,0	0,0	
17,5	20,0	73,0	19,3	20,5	1,8	8,8	5,7	0,0	
18,5	20,0	73,0	19,6	20,5	1,1	5,3	4,4	0,0	
19,5	20,0	73,0	19,9	20,5	0,4	1,8	3,1	0,0	
20,5	20,5	0,0	20,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	AUS
21,5	21,5	0,0	21,5	21,5	0,0	0,0	-9,6	0,0	AUS
22,5	22,5	0,0	22,5	22,5	0,0	0,0	-14,5	0,0	AUS
23,5	23,5	0,0	23,5	23,5	0,0	0,0	-19,3	0,0	AUS
24,5	24,5	0,0	24,5	24,5	0,0	0,0	-24,1	0,0	AUS
25,5	25,5	0,0	25,5	25,5	0,0	0,0	-28,9	0,0	AUS
26,5	26,0	73,0	26,1	19,5	-0,4	-1,8	-32,0	0,0	
27,5	26,0	73,0	26,4	19,5	-1,1	-5,3	-33,3	0,0	
28,5	26,0	73,0	26,7	19,5	-1,8	-8,8	-34,6	0,0	
29,5	26,0	73,0	26,9	19,5	-2,6	-12,3	-35,9	0,0	
30,5	26,0	73,0	27,2	19,5	-3,3	-15,8	-37,2	0,0	
31,5	26,0	73,0	27,5	19,5	-4,0	-19,4	-38,5	0,0	
32,5	26,0	73,0	27,8	19,5	-4,7	-22,9	-39,8	0,0	
33,5	26,0	73,0	28,0	19,5	-5,5	-26,4	-41,1	0,0	

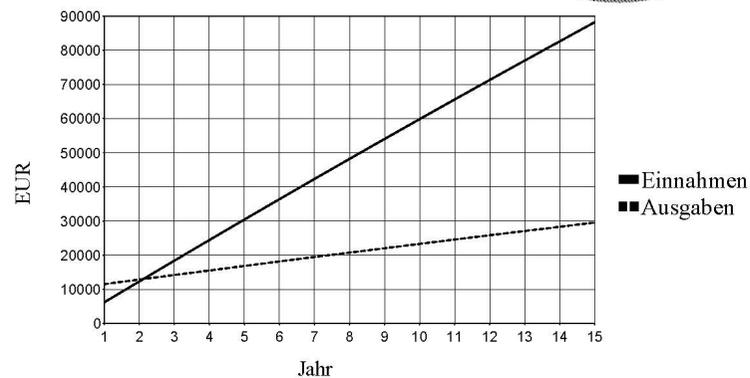
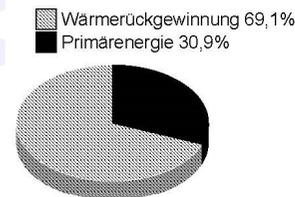
V = Eisschutz / E = Nachheizen / K = Nachkühlen / S = Stufe(n) / F = frei Kälte / B = Brauchwasser
 L = Leistungsanpassung / AL = Aussenlufttemp. / RL = Raumlüfttemp. (nach Bef.) / ZL = Zulufttemp.
 Simulation unter konstanten Bedingungen nur trocken !

Energien thermisch

AL	Q WRG	Stunden	Stunden	Wärme	Kälte	Wärme	Kälte	Freie	Brauch-	Wasser
°C	kW	Tag	Nacht	Gesamt	Gesamt	WRG	WRG	Kälte	wasser	m³
		h/°C	h/°C	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	
< -9,5	96,5			21		18				
-9,5	96,5	2	2	393		294				
-8,5	96,5	14	3	2.099		1.489				
-7,5	96,5	3	3	656		515				
-6,5	93,3	7	7	1.321		1.049				
-5,5	89,8	20	5	2.777		2.061				
-4,5	86,3	25	8	3.497		2.622				
-3,5	82,7	23	18	3.739		2.922				
-2,5	79,2	52	17	6.733		5.031				
-1,5	75,7	72	26	9.019		6.763				
-0,5	72,2	66	39	8.668		6.649				
0,5	68,7	81	44	9.912		7.564				
1,5	65,1	100	43	11.149		8.389				
2,5	61,6	109	42	11.259		8.419				
3,5	58,1	99	51	10.262		7.769				
4,5	54,6	114	61	11.172		8.460				
5,5	51,1	141	52	12.132		9.008				
6,5	47,5	139	67	11.620		8.704				
7,5	44,0	155	62	11.680		8.653				
8,5	40,5	141	61	9.951		7.371				
9,5	37,0	154	63	9.861		7.259				
10,5	33,4	172	60	9.757		7.097				
11,5	29,9	147	57	7.632		5.541				
12,5	26,4	156	55	7.086		5.089				
13,5	22,9	134	53	5.413		3.869				
14,5	19,4	151	55	5.161		3.644				
15,5	15,8	128	45	3.625		2.496				
16,5	12,3	148	46	3.306		2.201				
17,5	8,8	133	37	2.198		1.389				
18,5	5,3	141	35	1.517		868				
19,5	1,8	134	33	722		281				
20,5	0,0	145	29							
21,5	0,0	142	25		1.484					
22,5	0,0	123	15		1.902					
23,5	0,0	116	10		2.330					
24,5	0,0	100	7		2.503					
25,5	0,0	54	4		1.623					
26,5	-1,8	28	4		1.024		56			
27,5	-5,3	24	2		965		134			
28,5	-8,8	18	1		806		165			
29,5	-12,3	14	1		689		178			
30,5	-15,8	15			781		233			
31,5	-19,4	9			496		166			
32,5	-22,9	3			161		59			
> 32,5	-26,4	3			174		68			
Gesamt	Meteon.	3.754	1.251	194.321	14.930	143.469	1.056			
Jahr	Mannhei									
	m									
						4.113 h	718 h			

Ökonomische Betrachtung

Energiekosten Wärme	0,043 € / kWh
Energiekosten Kälte	0,041 € / kWh
Energiekosten Elektro	0,091 € / kWh
Wasserkosten (inkl. Abwasser)	6,00 € / m ³
Kalkulationszinsfuß	2,40 %
Preissteigerungsrate	1,70 %
Klimazone/ Standort	Mannheim
Nutzungsdauer der Anlage	15 a
Betriebstage pro Woche	6 d / w
Betriebsstunden pro Tag	12 h / d
Betriebsstunden pro Nacht	4 h / d
Volumenstrom am Tag	100 % / V max
Volumenstrom in der Nacht	50 % / V max
Investitionskosten der WRG	21.351 €
Mehr-/Minderinvestition für die WRG	0 €
Min.investition für Wärmeerzeugung	-11.194 € / (116 € / kW)
Min.investition für Kälteerzeugung	0 € / (0 € / kW)
Zusatzkosten je Jahr	0 €
Rückgewinn der WRG Wärme	6.169 € / a
Rückgewinn der WRG Kälte	43 € / a
Elektroenergiekosten für die WRG	1.164 € / a
Kapitalkosten für die WRG	814 € / a
Wartungs- und Unterhaltungskosten	203 € / a
Jährliche Differenzkosten	4.031 € / a
Kapitalwert der Ersparnisse	58.673 €
Kalkulationszinsfuß	50,1 %
Amortisation	2,1 a
Jahresnutzungsgrad (bezogen auf Energien)	69,1 %
Jahresarbeitszahl nach EN 13053	11,3
Leistungszahl nach EN 13053	21,1
Effektiver Jahreswirkungsgrad EN 13053	69,5 %

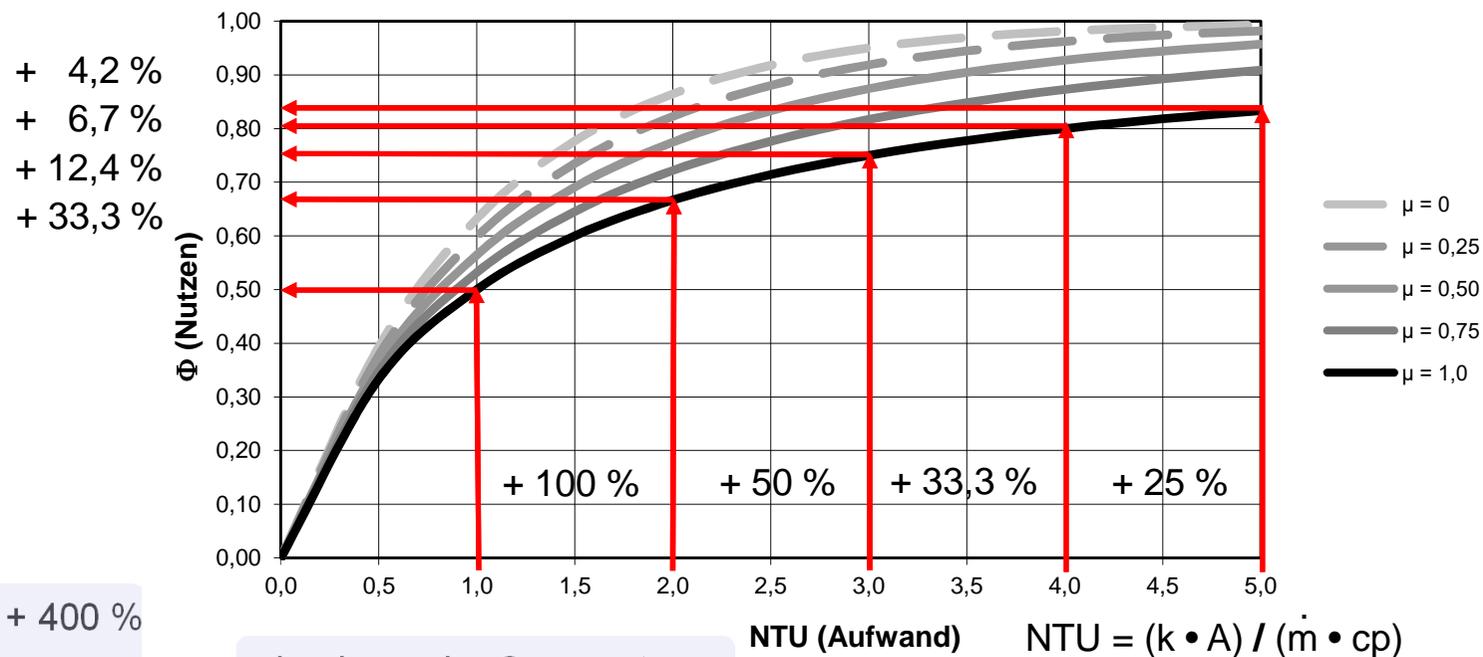


Übertragungsgrad im Gegenstrom

$$\Phi = (1 - e^{[(\mu - 1) \cdot NTU]}) / (1 - \mu \cdot e^{[(\mu - 1) \cdot NTU]}) \quad \text{bei } \mu <> 1$$

$$\Phi = NTU / (NTU + 1) \quad \text{bei } \mu = 1$$

Gegenstrom



NTU + 400 %

Φ + 67 %

abnehmender Grenznutzen

Änderungen einer Dimension (Bautiefe in Luftrichtung)

- k-Zahl ist konstant
 - Anströmfläche konstant
 - Luftgeschwindigkeit konstant

Startbedingung

$$NTU_s = \Phi / (1 - \Phi) \quad \text{mit: } \mu = 1$$

$$\text{und: } NTU_s = k \cdot A_s / \dot{W}$$

NTU proportional zur Tiefe [$NTU_i = f(l)$]

$$\text{mit: } NTU = k \cdot A / (m \cdot c_p)$$

$$\Phi_i = NTU_i / (NTU_i + 1) \quad \text{mit: } \mu = 1$$

$$\text{und: } NTU_i = k \cdot A_i / \dot{W}$$

Nutzen: $C_N = f(\Phi_i)$

Aufwand: $C_A = f(NTU_i)$

Ökonomische 1D Optimierung

WRG-SYSTEME OPTIMIERUNG (ökonomisch / WRG Anströmfläche konstant)

Effizienz WRG	Bautiefe zur Auslegung	Nutzen €	Aufwand €	Ertrag €
30,0 %	15,9 %	36.267 €	1.862 €	34.405 €
35,0 %	19,9 %	42.312 €	2.753 €	39.559 €
40,0 %	24,7 %	48.356 €	3.919 €	44.437 €
45,0 %	30,3 %	54.401 €	5.438 €	48.963 €
50,0 %	37,0 %	60.445 €	7.413 €	53.032 €
55,0 %	45,2 %	66.490 €	9.997 €	56.493 €
60,0 %	55,5 %	72.534 €	13.419 €	59.115 €
65,0 %	68,7 %	78.579 €	18.038 €	60.541 €
67,0 %	75,1 %	80.996 €	20.343 €	60.654 €
70,0 %	86,3 %	84.623 €	24.452 €	60.171 €
75,0 %	111,0 %	90.668 €	33.739 €	56.929 €

1D Optimum

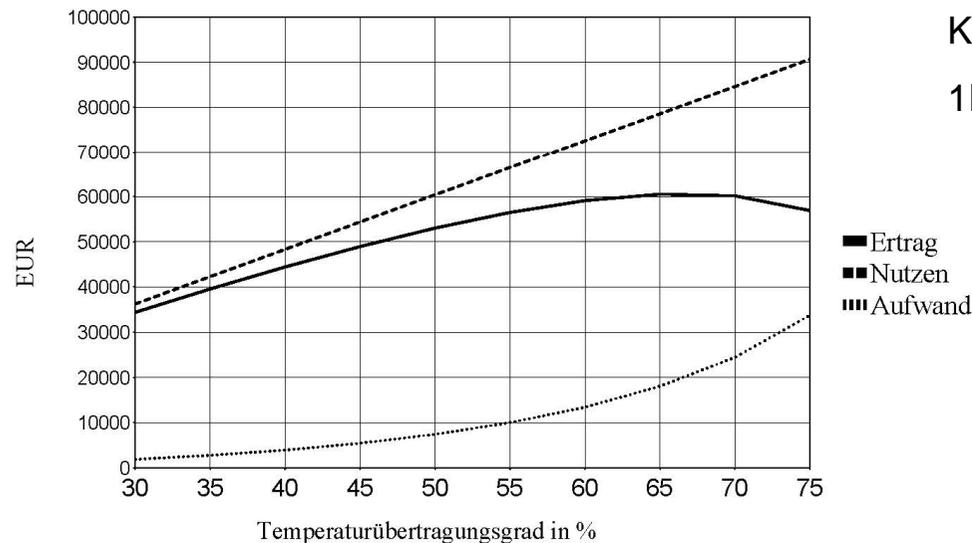
Kosten (Nutzen, Aufwand und Ertrag der WRG) pro Jahr

Auslegung mit einer Luftgeschwindigkeit im Zu- und Abluftgerätequerschnitt 1,50 m /s - 73,0 %

CO2 Einsparung im Optimum 31,1 to./a

Optimale Rückwärmzahl der WRG **67 % (63 - 70 %)**

Berechnung auf Basis der Wirtschaftlichkeitsberechnung und deren Rahmenbedingungen (Toleranzband ± 1 % der Kosten)



Kapitalwert Auslegung: 58.673 €

1D Kapitalwert: 60.654 €

Änderungen mehrdimensional (Anströmfläche)

- k-Zahl ist nicht konstant
 - Luftgeschwindigkeit ist nicht konstant

Startbedingung

$$NTU_s = \Phi / (1 - \Phi) \quad \text{mit: } \mu = 1$$

NTU ändert sich linear mit der Anströmfläche und mit der k-Zahl [$NTU_i = f(A, k)$]

$$\Phi_i = NTU_i / (NTU_i + 1) \quad \text{mit: } \mu = 1$$

Änderung k-Zahl (Näherungsgleichung relativ zu Re)

$$k_{\text{korr}} = k_s \cdot (w_{1\text{korr}} / w_{1s})^{0,4} \cdot (w_{2\text{korr}} / w_{2s})^{0,4}$$

Nutzen: $C_N = f(\Phi_i)$ Aufwand: $C_A = f(NTU_i)$

Änderungen mehrdimensional (Anströmgeschwindigkeit)

- ΔP Änderung in Abhängigkeit der Luftgeschwindigkeit
 - Luftgeschwindigkeit ist nicht konstant

Startbedingung

ΔP_S und PeI_S aus der Auslegung des WÜ

ΔP Änderung mit Exponent 1,6 (empirische Gleichung)

$$\Delta P_i = \Delta P_S / Arel(ETA_i)^{1.6} = \Delta P_S \cdot (w_{korr} / w_s)^{1.6}$$

PeI Änderung damit mit Exponent 2,6

$$PeI_i = PeI_S / Arel(ETA_i)^{2.6} = \Delta P_S \cdot (w_{korr} / w_s)^{2.6}$$

Ökonomische 2D Optimierung

WRG-SYSTEME OPTIMIERUNG (ökonomisch / WRG Bautiefe konstant)

Effizienz WRG	Q.-Fläche bez. 2 m/s	w in m/s	Nutzen €	Aufwand €	Ertrag €
64,3 %	88,8 %	2,25 m/s	77.726,0 €	52.809,8 €	24.916,1 €
67,7 %	103,2 %	1,94 m/s	81.810,2 €	38.879,1 €	42.931,1 €
71,0 %	120,8 %	1,66 m/s	85.837,1 €	31.463,9 €	54.373,2 €
74,3 %	142,8 %	1,40 m/s	89.866,0 €	29.331,8 €	60.534,2 €
76,4 %	159,3 %	1,26 m/s	92315,2 €	30.560,8 €	61.754,5 €
77,7 %	172,2 %	1,16 m/s	93.974,3 €	32.579,1 €	61.395,2 €
81,3 %	214,3 %	0,93 m/s	98.278,4 €	43.418,4 €	54.860,0 €
85,2 %	283,8 %	0,70 m/s	102.991,3 €	70.282,6 €	32.708,7 €

2D Optimum

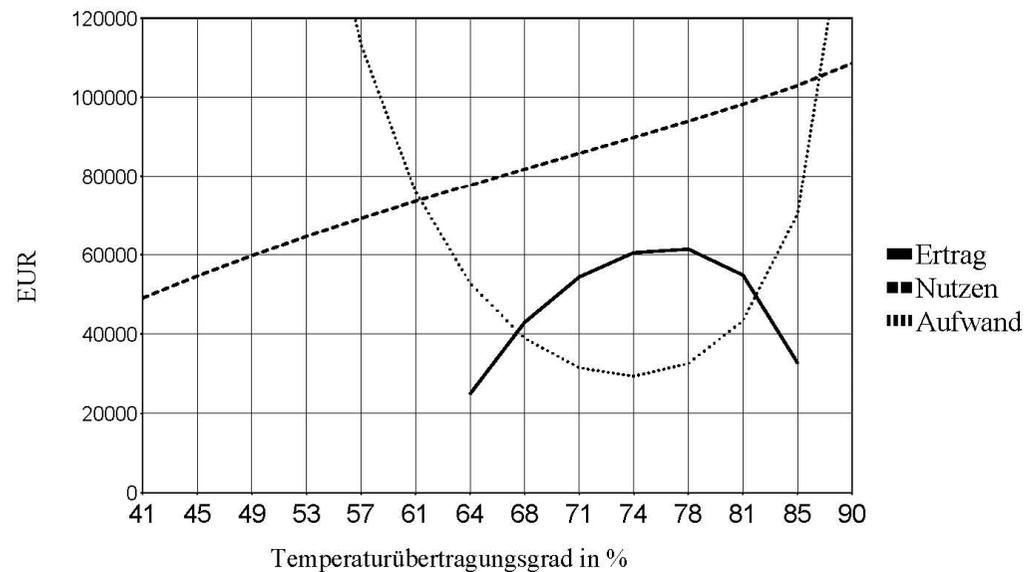
Geometrie in % der Ursprungsfläche der Auslegung. Kosten (Nutzen, Aufwand und Ertrag der WRG) pro Jahr. Exponent zur Änderung des dP 1,6

Auslegung mit einer Luftgeschwindigkeit im Zu- und Abluftgerätequerschnitt 1,50 m/s - 73,0 %

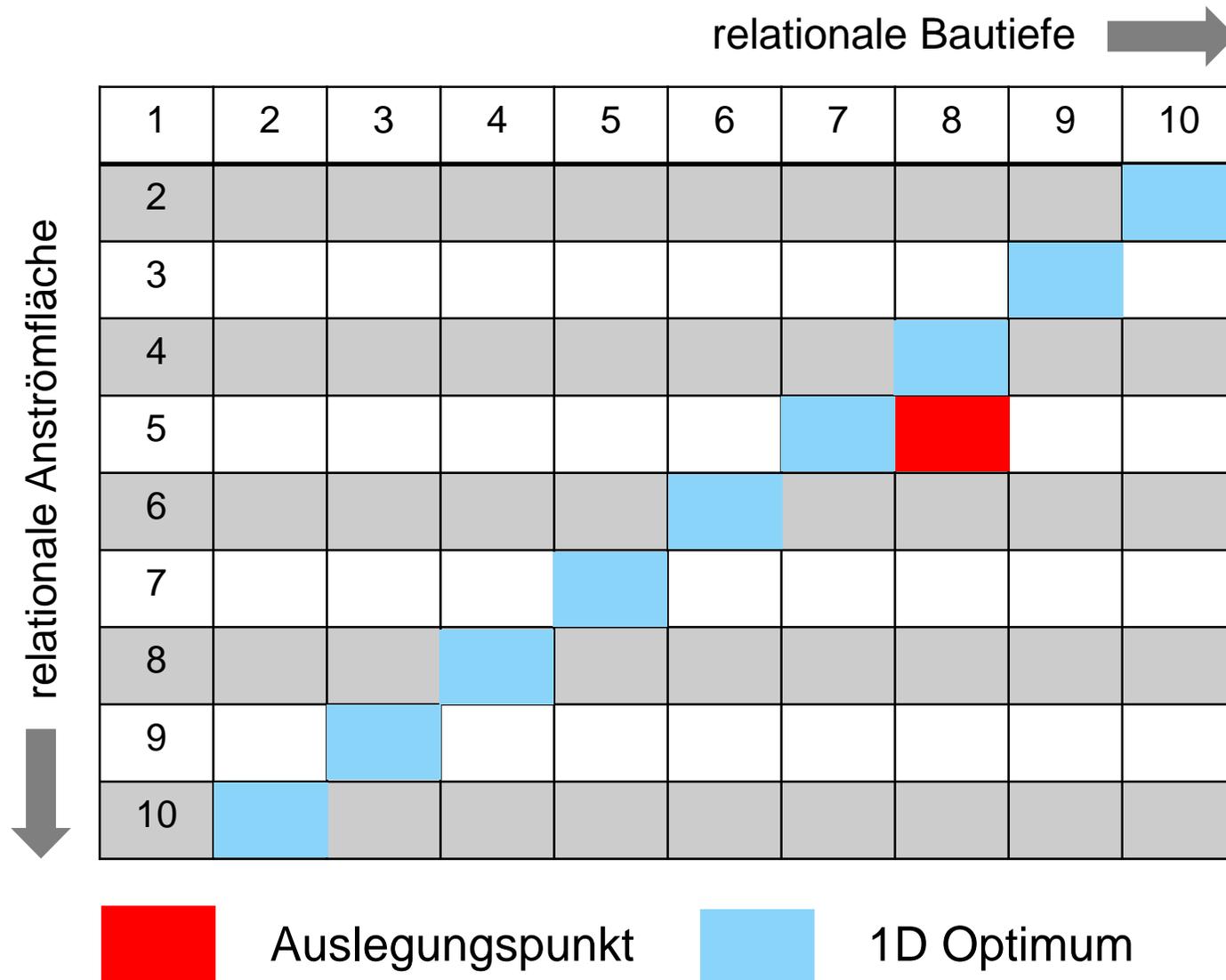
CO2 Einsparung im Optimum 35,0 to./a

Optimale Rückwärmzahl der WRG **76,4 % (75,0 - 77,7 %)**

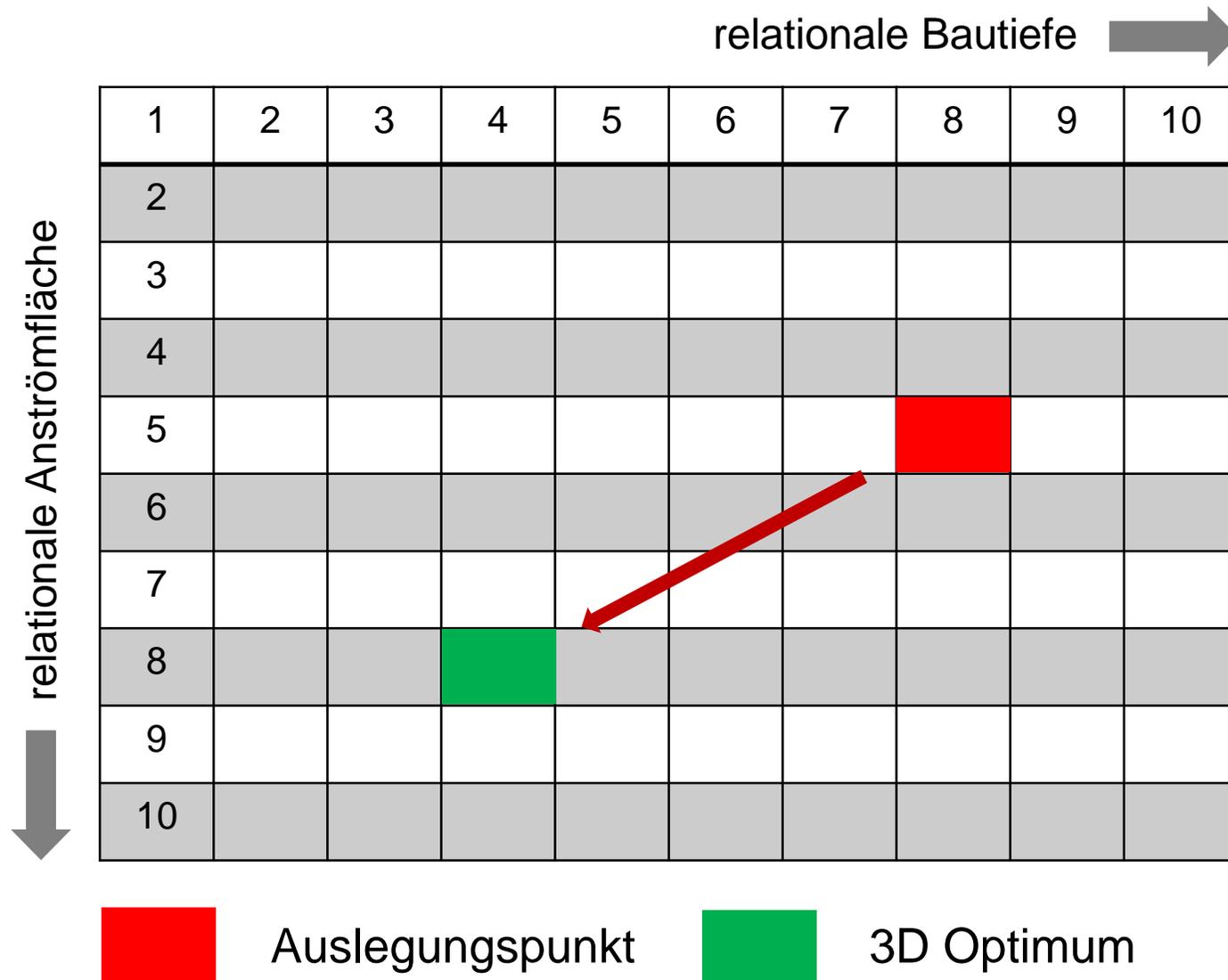
Berechnung auf Basis der Wirtschaftlichkeitsberechnung und deren Rahmenbedingungen (Toleranzband $\pm 1\%$ der Kosten)



3D Optimierung



3D Optimierung



Ökonomische 3D Optimierung

WRG-SYSTEME OPTIMIERUNG (ökonomisch / mehrdimensional)

Effizienz WRG	Q.-Fläche bez. 2 m/s	w in m/s	Bautiefe zur Auslegung	Nutzen €	Aufwand €	Ertrag €
16,7 %	66,0 %	3,03 m/s	11,2 %	20.148 €	16.254 €	3.895 €
37,5 %	76,6 %	2,61 m/s	30,4 %	45.334 €	28.168 €	17.166 €
50,0 %	88,8 %	2,25 m/s	46,3 %	60.445 €	28.050 €	32.395 €
58,3 %	103,2 %	1,94 m/s	59,3 %	70.519 €	24.649 €	45.871 €
64,3 %	120,8 %	1,66 m/s	70,0 %	77.715 €	21.543 €	56.172 €
67,7 %	142,8 %	1,40 m/s	75,1 %	81.893 €	18.951 €	62.942 €
69,7 %	172,2 %	1,16 m/s	75,5 %	84.257 €	17.934 €	66.323 €
max.: 69,7 %	195,3 %	1,02 m/s	71,6 %	84.257 €	17.409 €	66.847 €
69,7 %	214,3 %	0,93 m/s	69,0 %	84.257 €	17.671 €	66.586 €
67,7 %	283,8 %	0,70 m/s	57,1 %	81.893 €	18.295 €	63.598 €

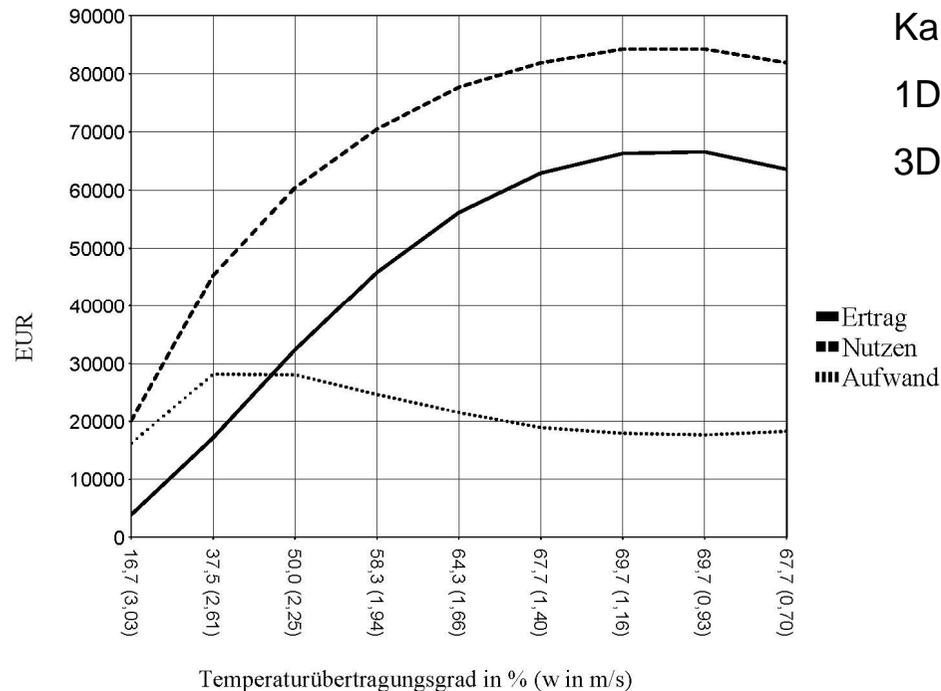
3D Optimum

Geometrie in % der Ursprungsfläche der Auslegung. Kosten (Nutzen, Aufwand und Ertrag der WRG) pro Jahr. Exponent zur Änderung des dP 1,6

Auslegung mit einer Luftgeschwindigkeit im Zu- und Abluftgerätequerschnitt 1,50 m/s - 73,0 %

CO2 Einsparung im Optimum 36,1 to./a

Berechnung auf Basis der Wirtschaftlichkeitsberechnung und deren Rahmenbedingungen (Toleranzband ca. 2 % der max. Erträge)



Kapitalwert Auslegung: 58.673 €

1D Kapitalwert: 60.654 €

3D Kapitalwert: 66.847 €

Ökologische 1D Optimierung

WRG-SYSTEME OPTIMIERUNG (ökologisch / WRG Anströmfläche konstant)

Effizienz WRG	Bautiefe zur Auslegung	Nutzen kg CO2/a	Aufwand kg CO2/a	Reduktion kg CO2/a
30,0 %	15,9 %	15.976	892	15.084
35,0 %	19,9 %	18.639	1.135	17.504
40,0 %	24,7 %	21.302	1.422	19.880
45,0 %	30,3 %	23.964	1.766	22.198
50,0 %	37,0 %	26.627	2.184	24.443
55,0 %	45,2 %	29.290	2.700	26.589
60,0 %	55,5 %	31.952	3.353	28.600
65,0 %	68,7 %	34.615	4.198	30.417
70,0 %	86,3 %	37.278	5.334	31.943
75,0 %	111,0 %	39.941	6.935	33.005
79,0 %	139,1 %	42.071	8.773	33.297
80,0 %	147,9 %	42.603	9.349	33.254
85,0 %	209,6 %	45.266	13.389	31.877

1D Optimum

CO2-Emissionen (Einsparung, Aufwand und Nettoertrag der WRG)

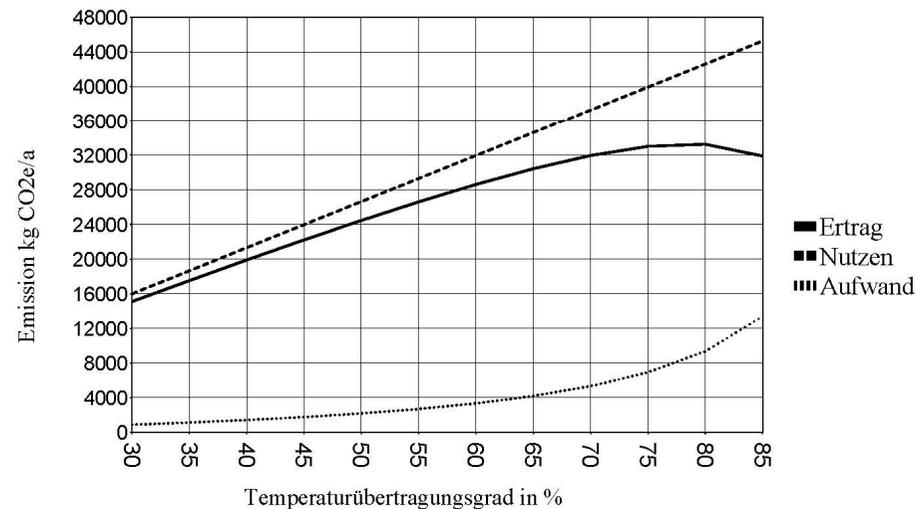
CO2e-Äquivalente pro Jahr berechnet mit 270 g/kWh Wärme, 460 g/kWh Strom, sowie 500 g/€ WRG Invest und sonstige Betriebskosten 220 g/€

Auslegung mit einer Luftgeschwindigkeit im Zu- und Abluftgerätequerschnitt 1,50 m/s - 73,0 %

Auslegung mit einer CO2 Einsparung von 32,7 to./a

Optimale Rückwärmzahl der WRG 79 % (75 - 82 %)

Berechnung auf Basis der Wirtschaftlichkeitsberechnung und deren Rahmenbedingungen (Toleranzband ± 1 % der CO2-Emissionen)



Ökologische 3D Optimierung

WRG-SYSTEME OPTIMIERUNG (ökologisch / mehrdimensional)

Effizienz WRG	Q.-Fläche bez. 2 m/s	w in m/s	Bautiefe zur Auslegung	Nutzen kg CO2/a	Aufwand kg CO2/a	Reduktion kg CO2/a
23,1 %	56,6 %	3,53 m/s	26,1 %	12.289	10.116	2.174
37,5 %	66,0 %	3,03 m/s	44,8 %	19.970	12.259	7.711
50,0 %	76,6 %	2,61 m/s	64,4 %	26.627	12.622	14.005
61,5 %	88,8 %	2,25 m/s	88,9 %	32.772	12.626	20.146
68,8 %	103,2 %	1,94 m/s	105,1 %	36.612	10.889	25.723
75,6 %	120,8 %	1,66 m/s	126,6 %	40.265	9.632	30.633
80,4 %	142,8 %	1,40 m/s	141,5 %	42.812	7.980	34.832
84,4 %	172,2 %	1,16 m/s	154,7 %	44.933	6.635	38.298
87,2 %	214,3 %	0,93 m/s	156,5 %	46.427	5.477	40.949
88,9 %	283,8 %	0,70 m/s	139,0 %	47.337	4.766	42.571
max.: 89,1 %	356,6 %	0,56 m/s	113,4 %	47.466	4.616	42.849
88,9 %	437,6 %	0,46 m/s	90,2 %	47.337	4.749	42.588

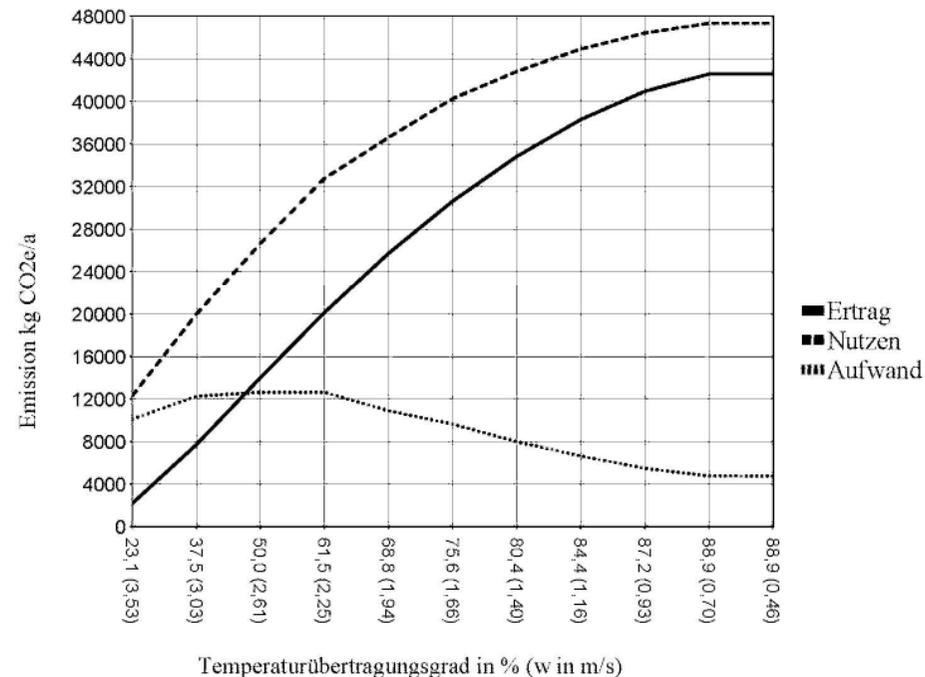
3D Optimum

Geometrie in % der Ursprungsfläche der Auslegung. CO2e (Nutzen, Aufwand und Reduktion der WRG) pro Jahr. Exponent zur Änderung des dP 1,6

Auslegung mit einer Luftgeschwindigkeit im Zu- und Abluftgerätequerschnitt 1,50 m/s - 73,0 %

Auslegung mit einer CO2 Einsparung von 32,7 to./a

Berechnung auf Basis der Wirtschaftlichkeitsberechnung und deren Rahmenbedingungen (Toleranzband ca. 2 % der max. CO2 Reduktion)

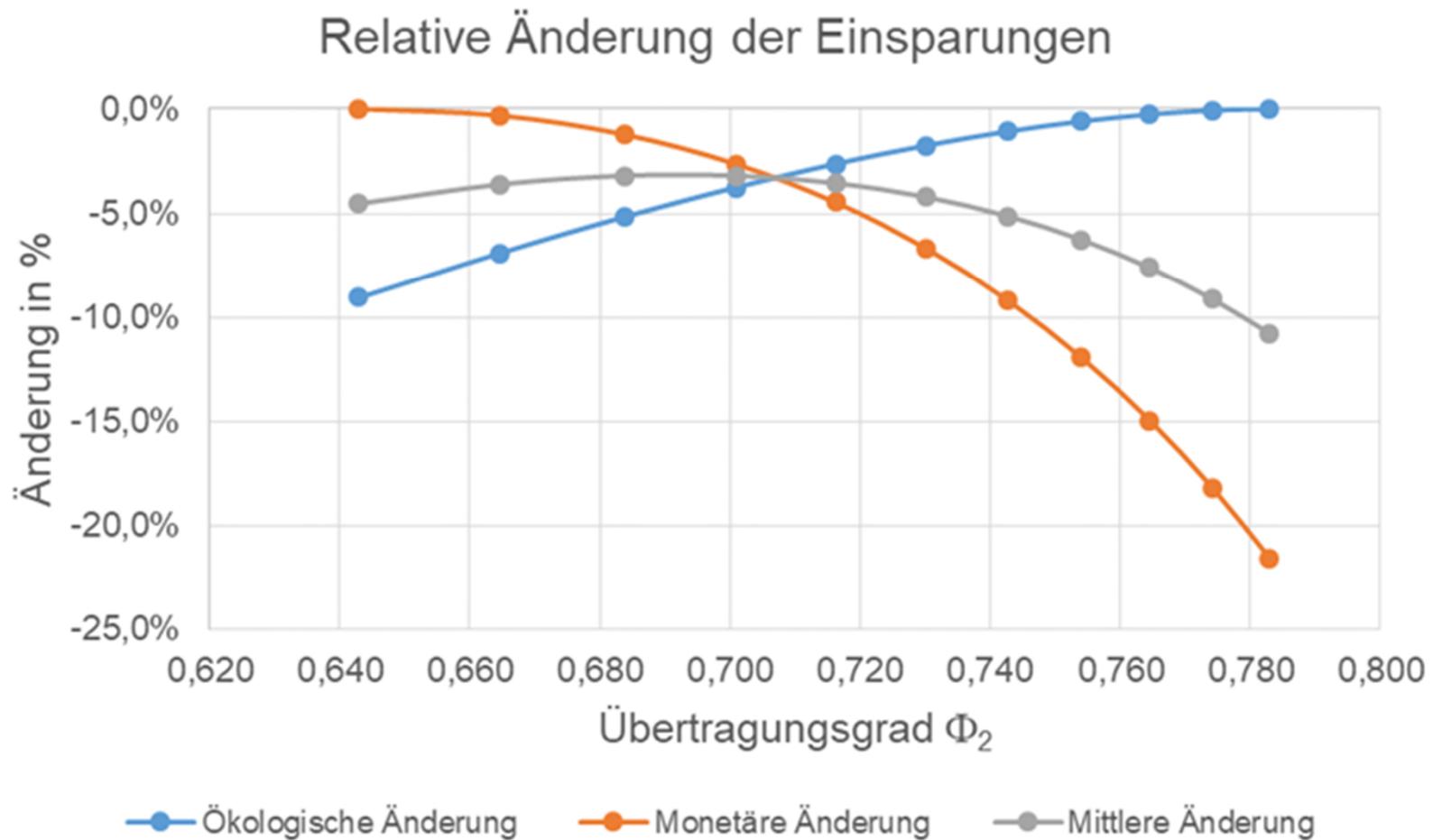


Vergleich der Optima

		Monetäre Betrachtung		Ökologische Betrachtung	
Φ bei:	1,16 m/s	0,643		0,783	
Nutzen	€/a	5.471	kgCO ₂ /a	41.677	
Aufwand	€/a	1.936	kgCO ₂ /a	8.964	
Ertrag	€/a	3.535	kgCO ₂ /a	32.713	
NTU		1,801		3,608	
NTU ₂		3,608		1,801	
Φ_2		0,78		0,64	
Nutzen ₂	€/a	6.662	kgCO ₂ /a	34.225	
Aufwand ₂	€/a	3.879	kgCO ₂ /a	4.474	
Ertrag ₂	€/a	2.784	kgCO ₂ /a	29.751	
	%	-21,3%	%	-9,1%	

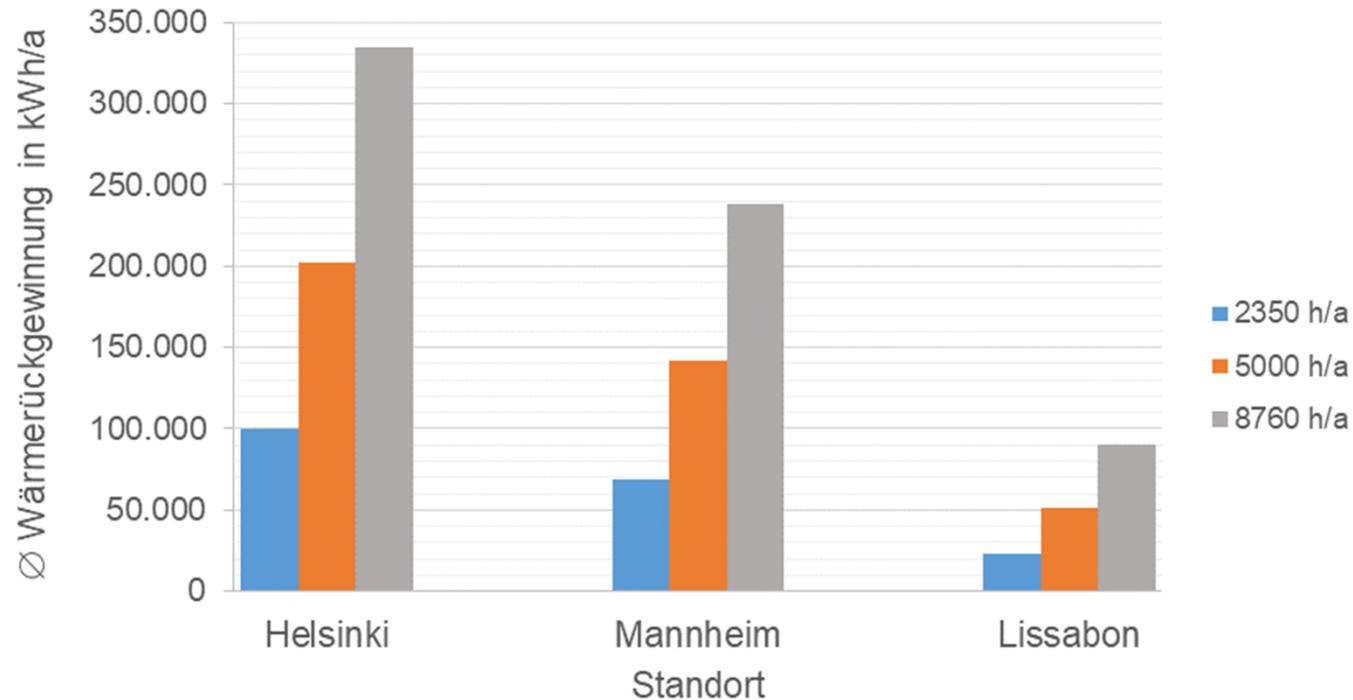
Berücksichtigung der CO₂-Emissionenminderung mit 25 €/t. entspricht 74 €

Vergleich der Optima

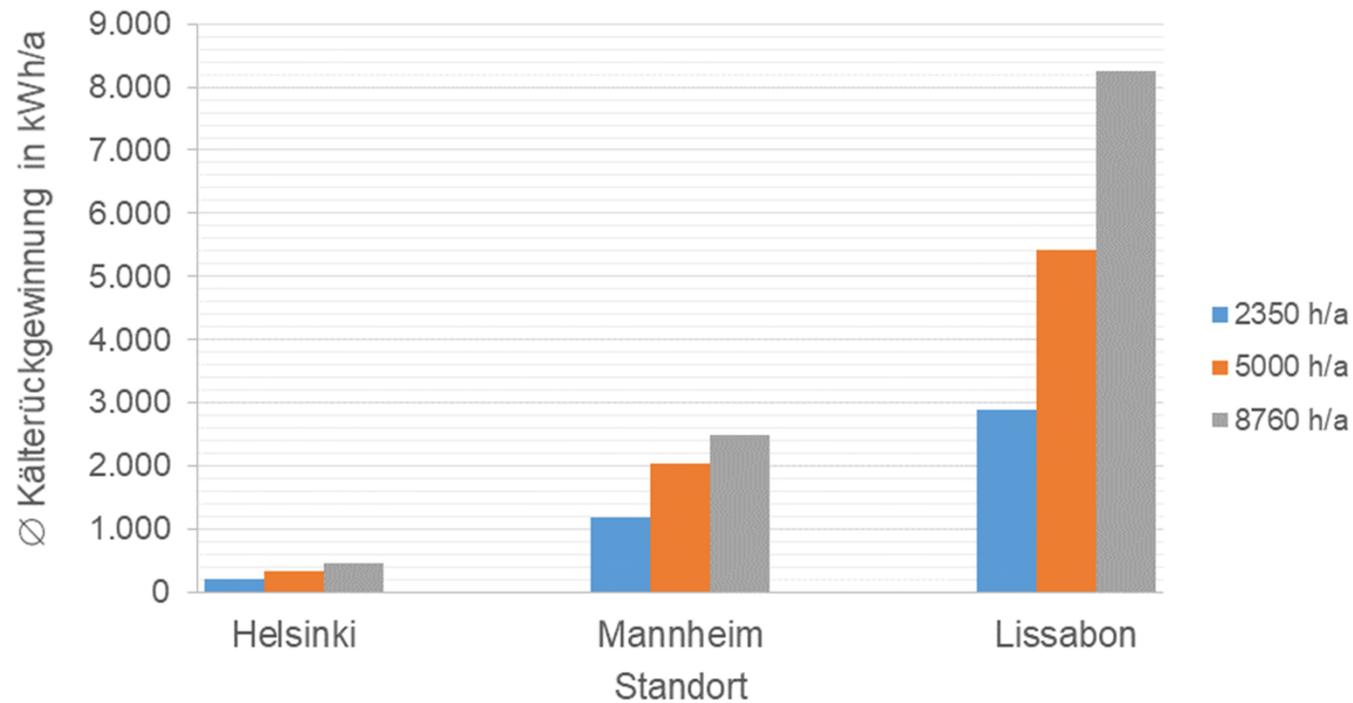


Rahmenbedingungen

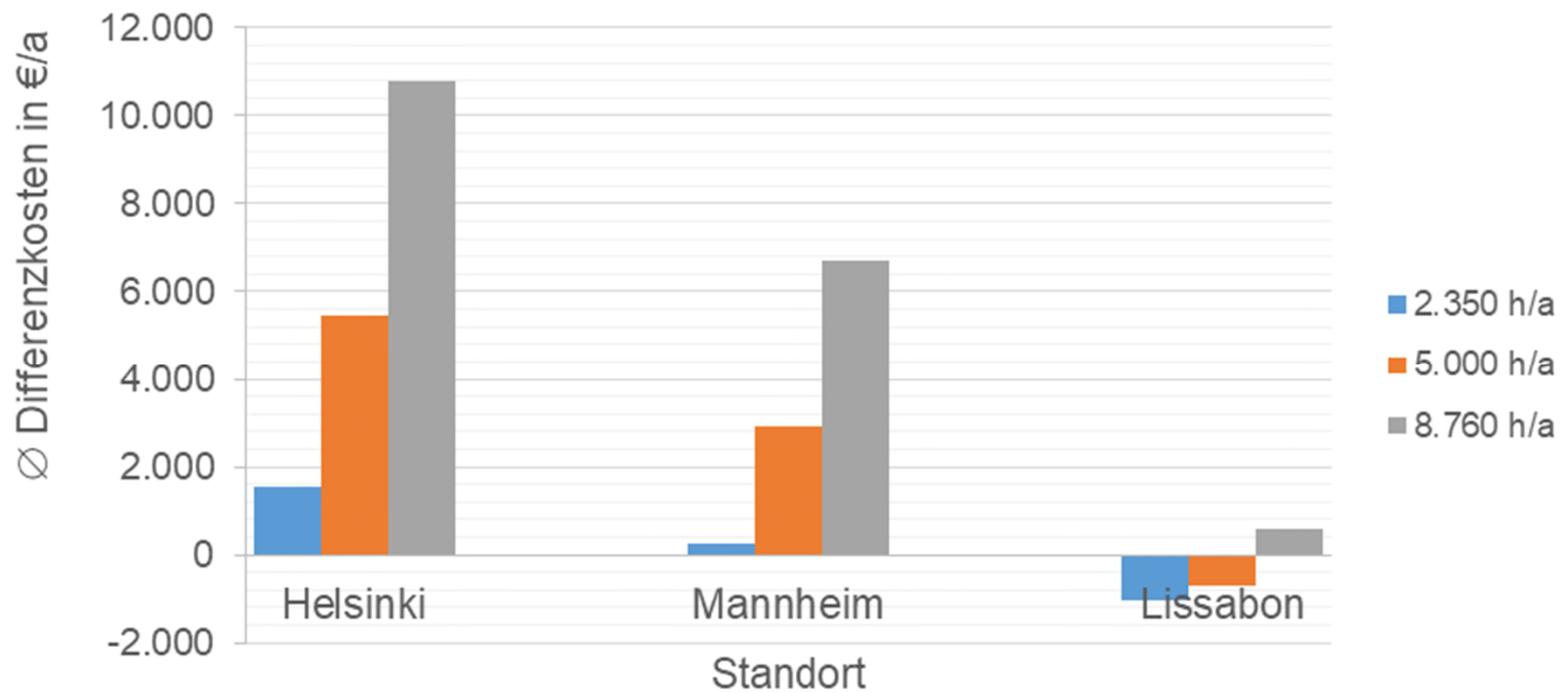
- ca. 3.300 Geräte wurden analysiert
- Reale Geräte (LV basiert) von 2015 bis 2018
- Berechnung mit Projektauslegungswerten
- Simulationen erfolgte mit folgenden Mittelwerten:
 - **Wärmeenergie 0,043 €/kWh** (Mittelwert EU 28 von 2008 bis 2017 ohne Steuern)
 - **Elektroenergie 0,091 €/kWh** (Mittelwert EU 28 von 2008 bis 2017 ohne Steuern)
 - **Kälteenergie 0,041 €/kWh** (Mittelwert EU 28 von 2008 bis 2017 ohne Steuern)
 - **CO₂-Emissionen** mit 270 g/kWh (Gas), 460 g/kWh (Strom) 500 g/€ (Invest) und 220 g/€ (Dienstleistung)
 - **Zins 2,4 %** und **Preissteigerungsrate 1,7 %** (Mittelwert von 2008 bis 2017)
 - **Lebensdauer** der Geräte mit **15 a**
 - **Ablufttemperatur 20° C (Winter)** und **26° C (Sommer)**, **Zulufttemperatur 20° C**
 - **Last am Tag 100 %** und **50 %** während der **Nacht - Teillastbetrieb (70 % / 40 %)**
 - Laufzeitmodelle **2.350, 5.000** und **8.760 h/a**
 - 3 Orte in Europa mit Meteonorm 7.1 (**Lissabon, Helsinki** und **Mannheim**)



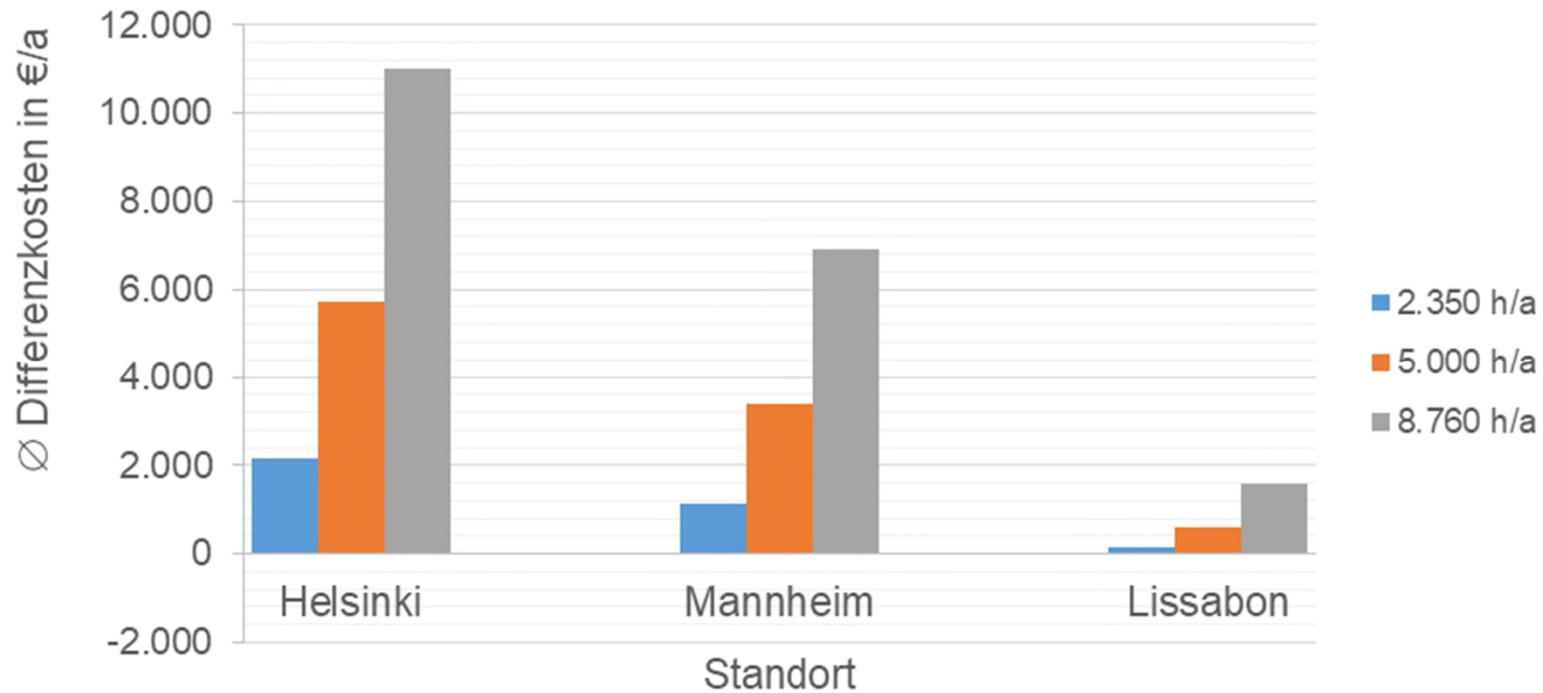
Wärmerückgewinnung (Winter) in Abhängigkeit des Standortes und der Laufzeit



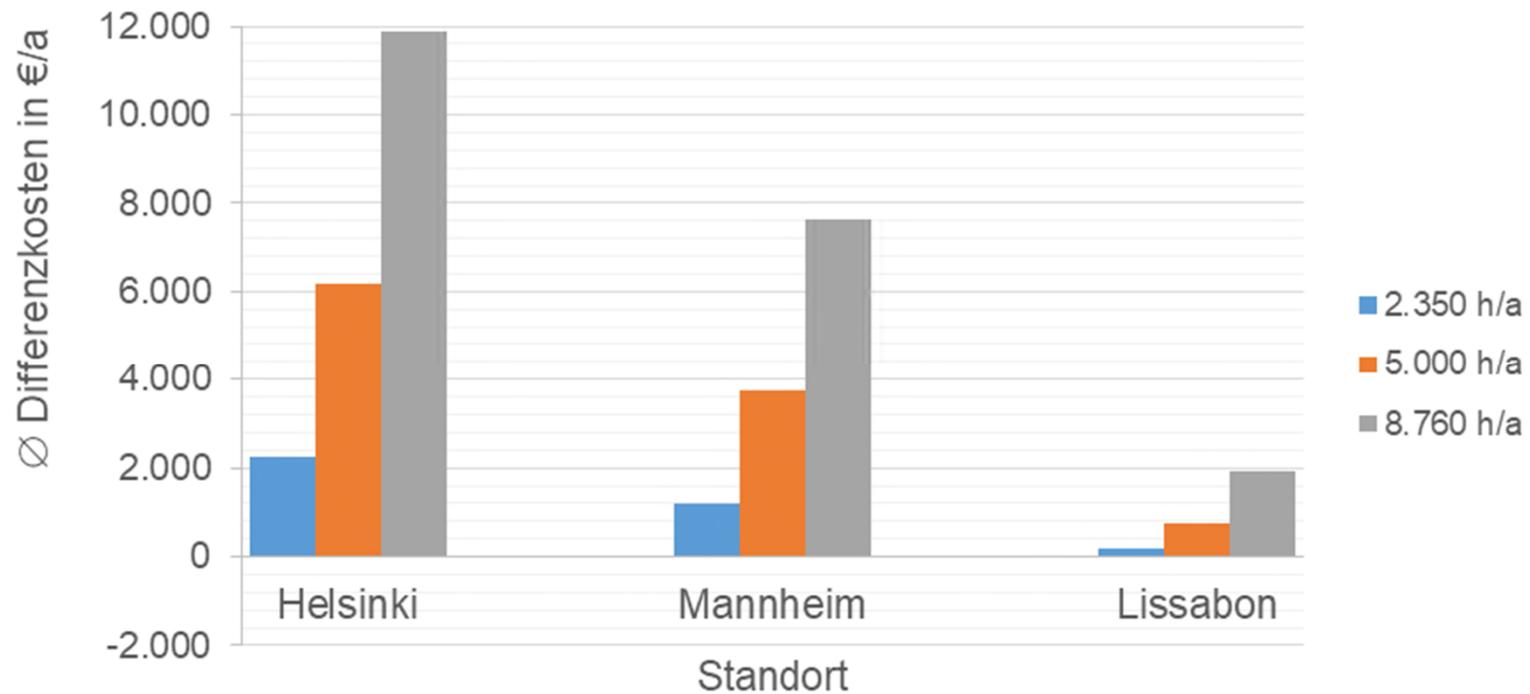
Wärmerückgewinnung (Sommer) in Abhängigkeit des Standortes und der Laufzeit



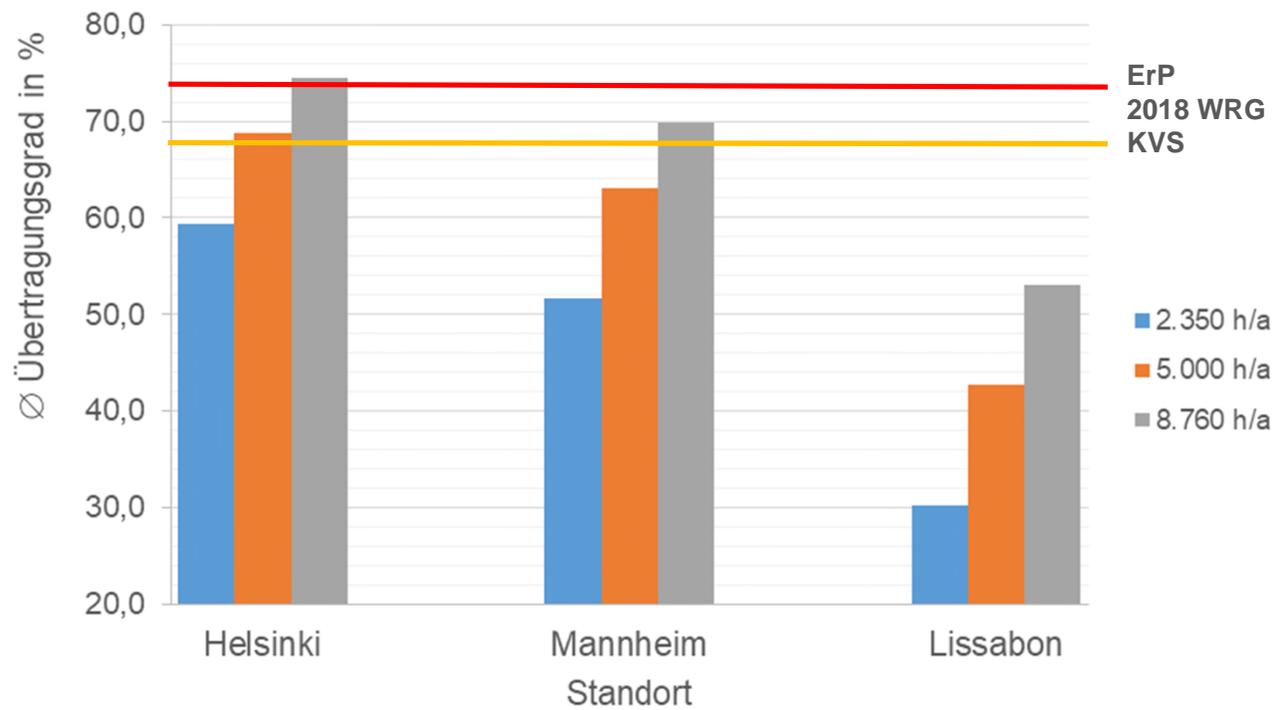
Annuität (Differenzkosten) bei Auslegungsbedingungen



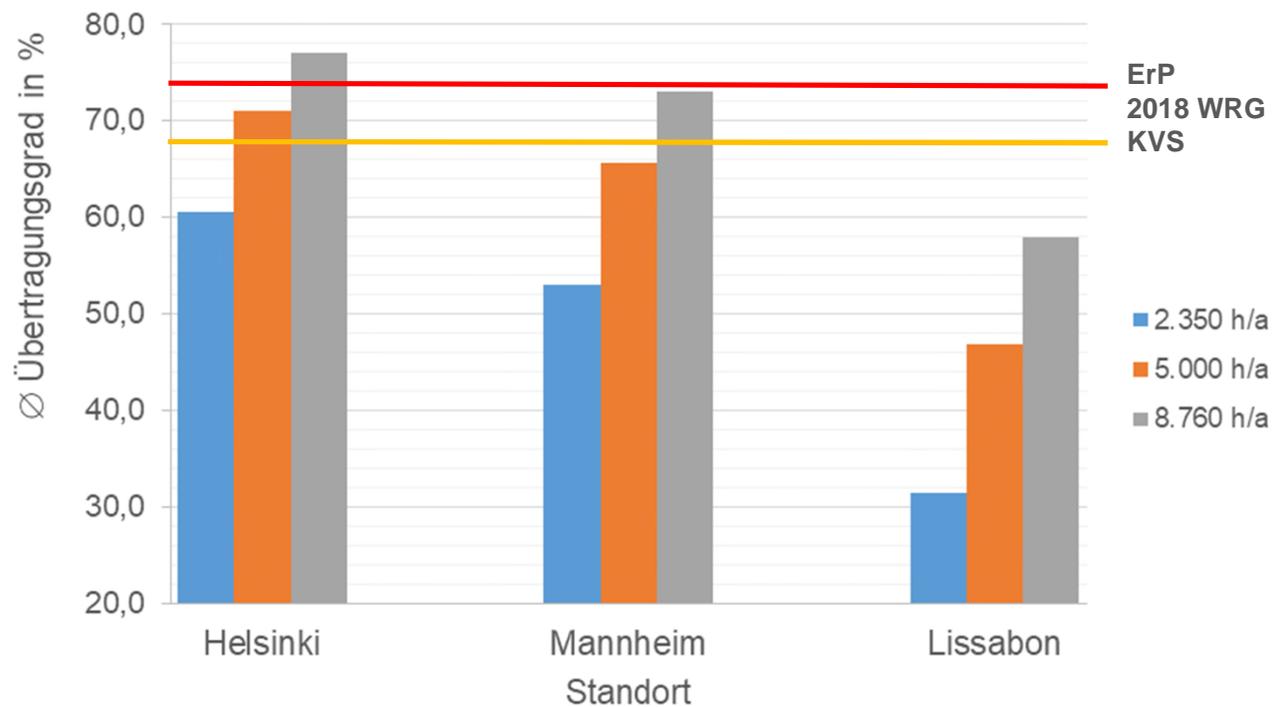
Annuität (Differenzkosten) nach 1D Optimierung



Annuität (Differenzkosten) nach 3D Optimierung



Temperaturübertragungsgrad nach 1D Optimierung



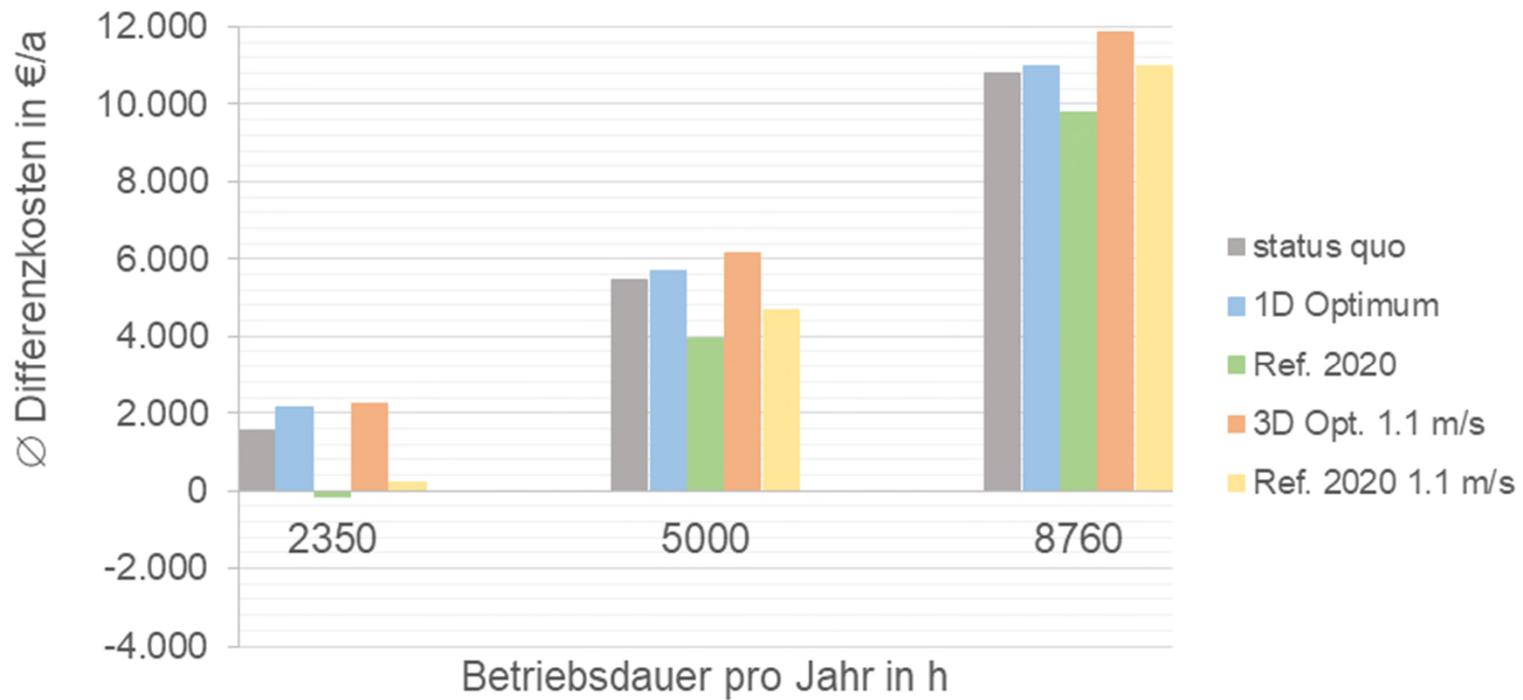
Temperaturübertragungsgrad nach 3D Optimierung



Benchmarks 2020 nach EU 1253/2014:

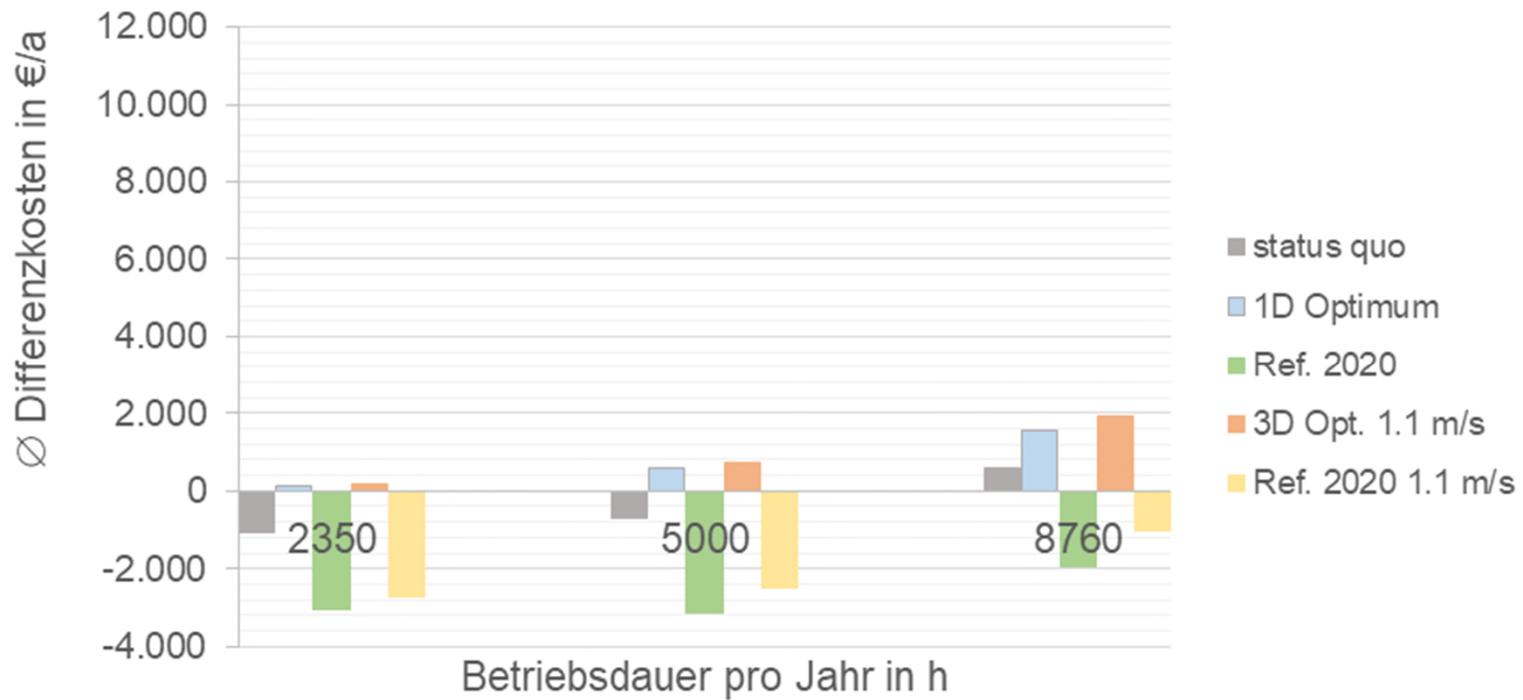
- **Temperaturübertragungsgrade:**
 - **80 % KV-System** (NTU = 4,00)
aktuell 68 % (NTU = 2,13 with **F = 1,88**)
 - **85 % andere Systeme** (NTU = 5,67)
aktuell 73 % (NTU = 2,70 with **F = 2,10**)

EU WRG Studie 2019



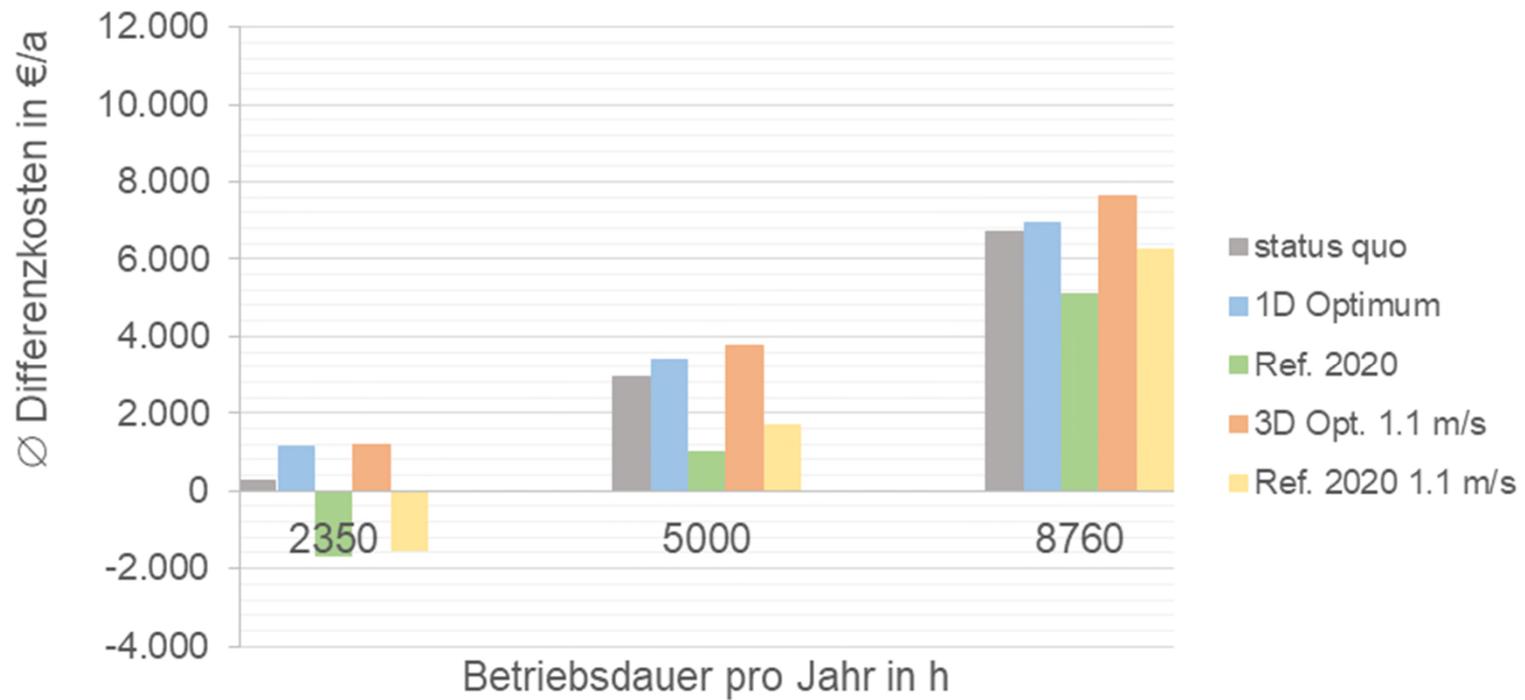
Ergebnisse für Helsinki

EU WRG Studie 2019



Ergebnisse für Lissabon

EU HR Study 2019



Ergebnisse für Mannheim

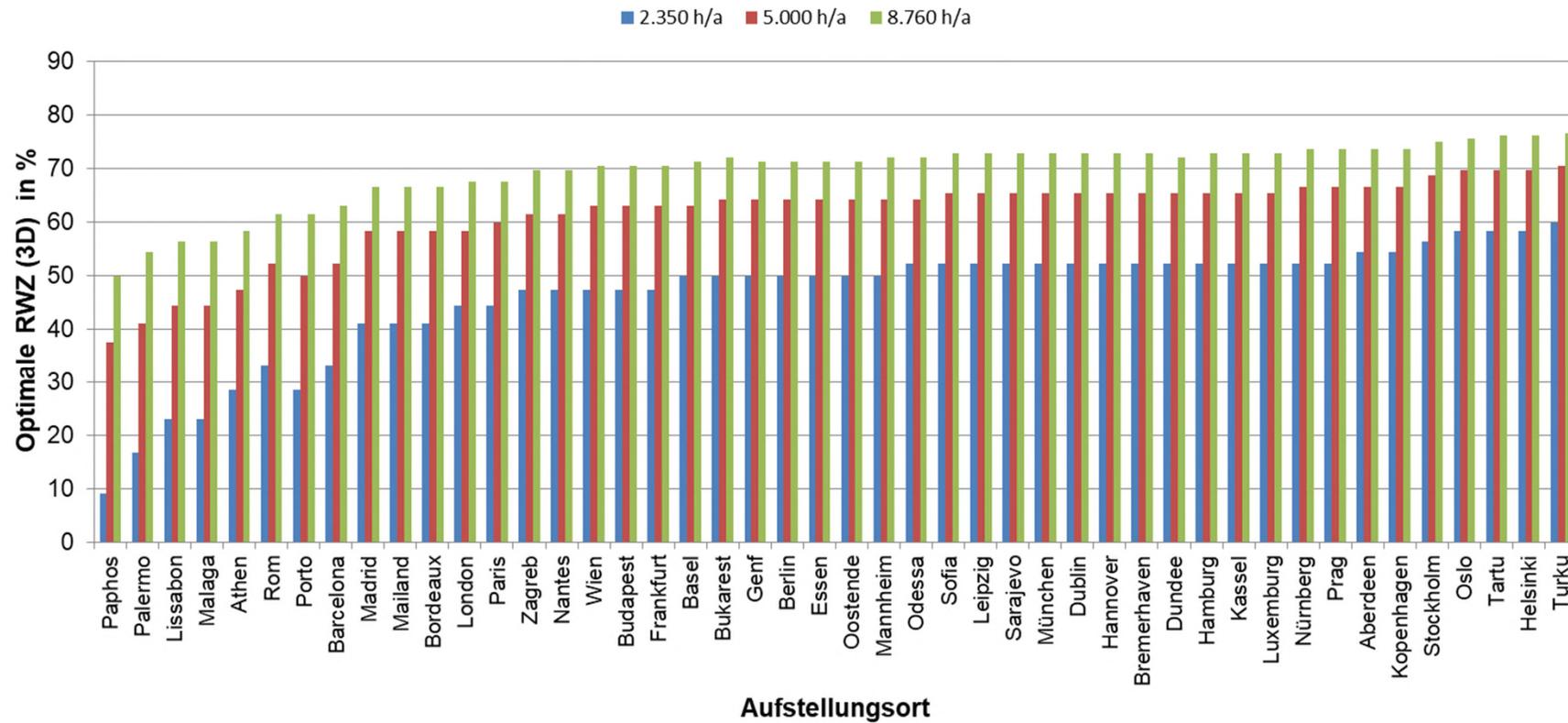


Ergebnisse monetär

		3D-Optimum	Annuität	ΔP	w
		%	€/a	Pa	m/s
2.350 h/a					
Norden	Helsinki	61	2.251	58	1,22
Mitte	Mannheim	53	1.204	42	1,22
Süden	Lissabon	31	172	15	1,18
5.000 h/a					
Norden	Helsinki	71	6.155	72	1,09
Mitte	Mannheim	66	3.741	56	1,09
Süden	Lissabon	47	742	25	1,08
8.760 h/a					
Norden	Helsinki	77	11.882	87	1,03
Mitte	Mannheim	73	7.641	70	1,03
Süden	Lissabon	58	1.920	35	1,02

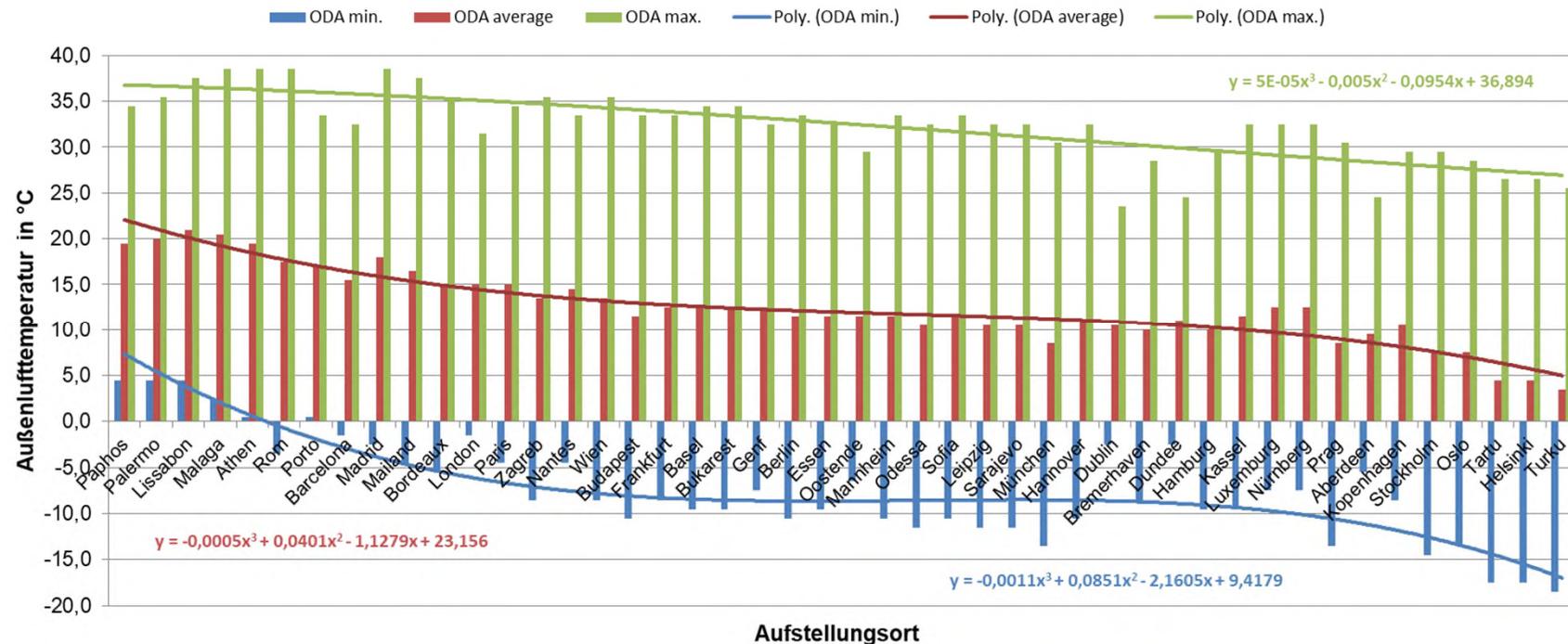
Optima basierend auf den Studienergebnissen

Meteorologischer Einfluss



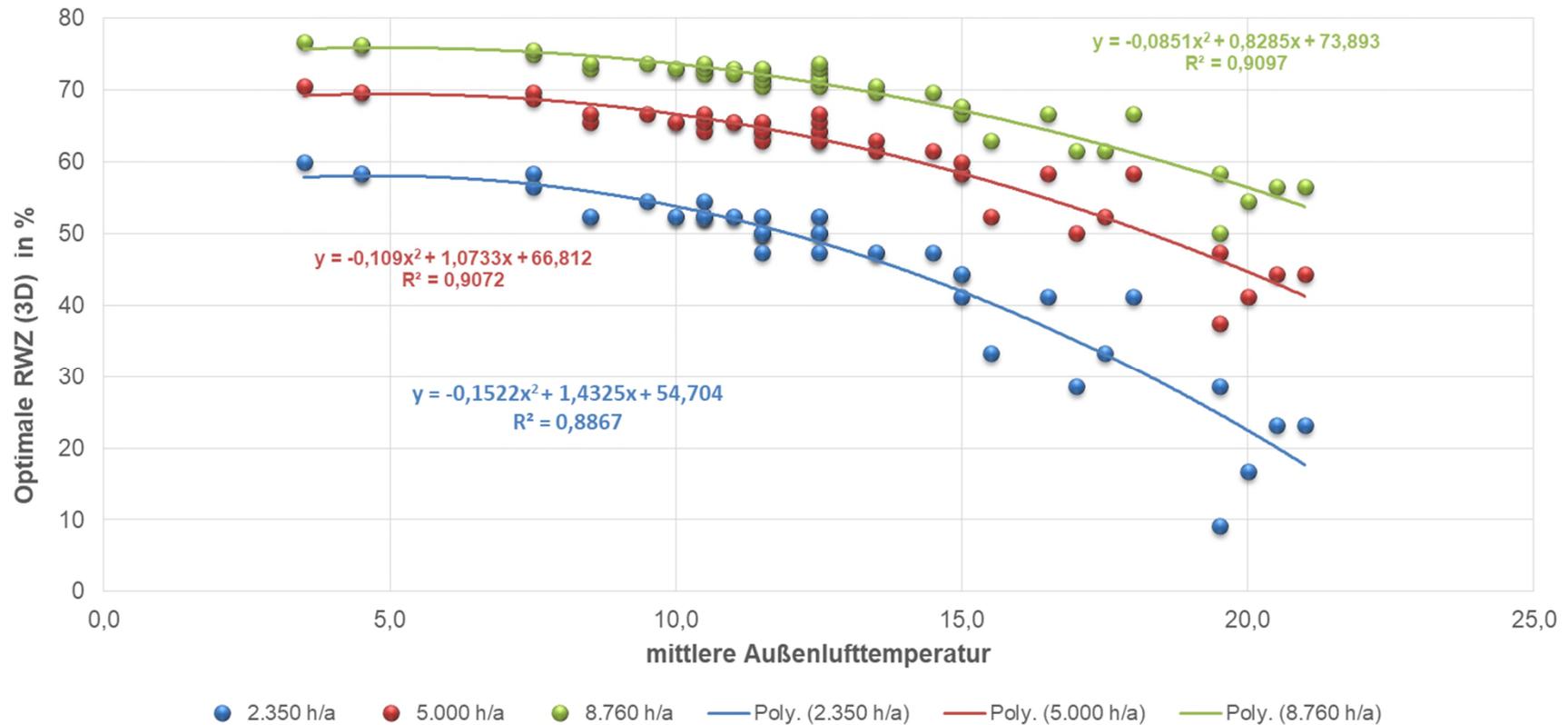
Temperaturübertragungsgrad (3D optimiert)

Meteorologischer Einfluss



Außenlufttemperaturen (Nord-Süd-Gefälle)

Meteorologischer Einfluss



Temperaturübertragungsgrad (3D optimiert) zur Außenlufttemperatur (Winter)

Multiple nicht lineare Regressionen (Wertepaare Φ_{opt} und SFP_{max})

EU 1253/2014 Vorschlag

(Preparatory Review Study Phase 1.1 and 1.2 Final Report TASK 6. Options)

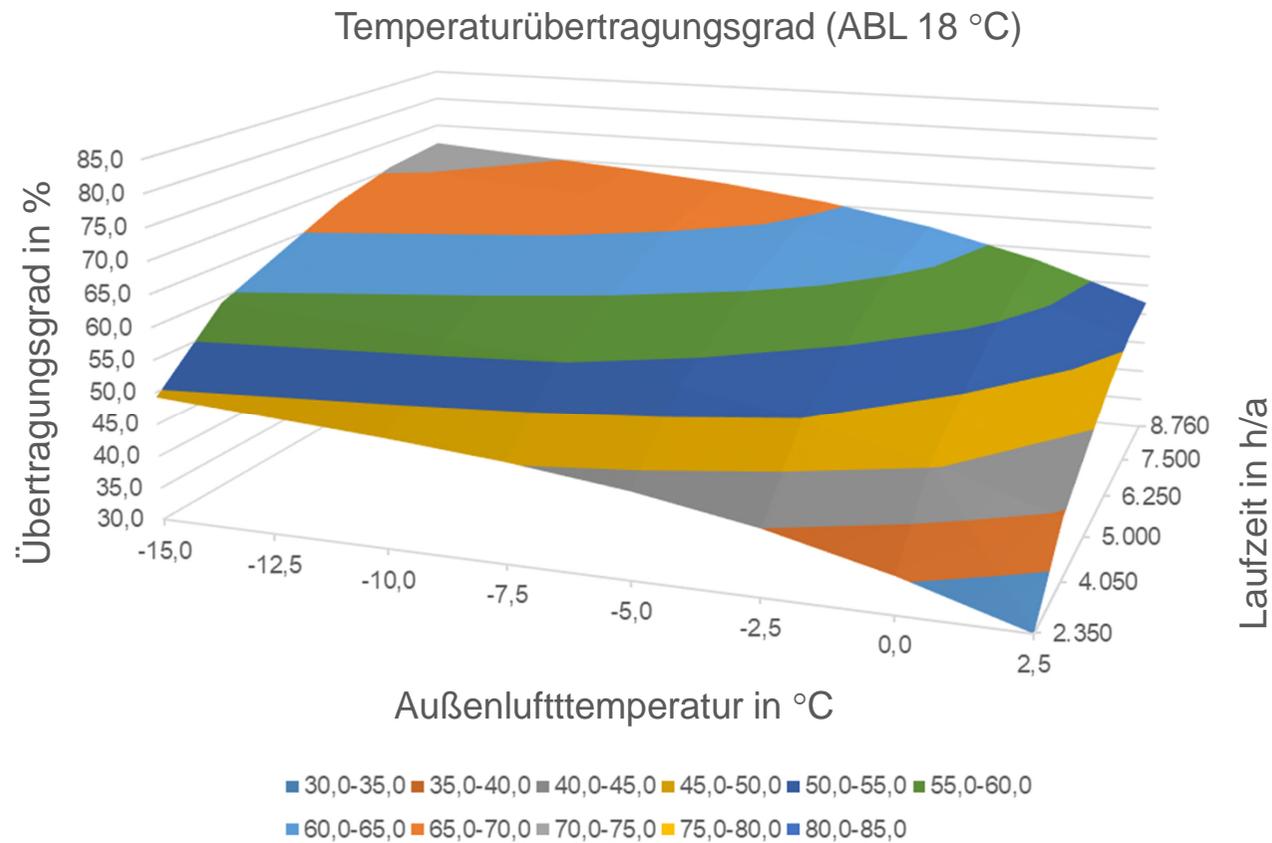
$$\Phi_{opt} = AUL1 \cdot AUL + AUL2 \cdot AUL^2 + AUL3 \cdot AUL^3 + \\ ABL1 \cdot ABL + ABL2 \cdot ABL^2 + LZ1 \cdot LZ + LZ2 \cdot LZ^2$$

Multiple Regression Volllast mit erweiterter Bilanzgrenze und monetärer Bewertung der CO₂-Emissionen (25 €/to.)

Übertragungsgrad $aR^2 = 0,935 / \Delta P$ und $SFP aR^2 = 0,879$

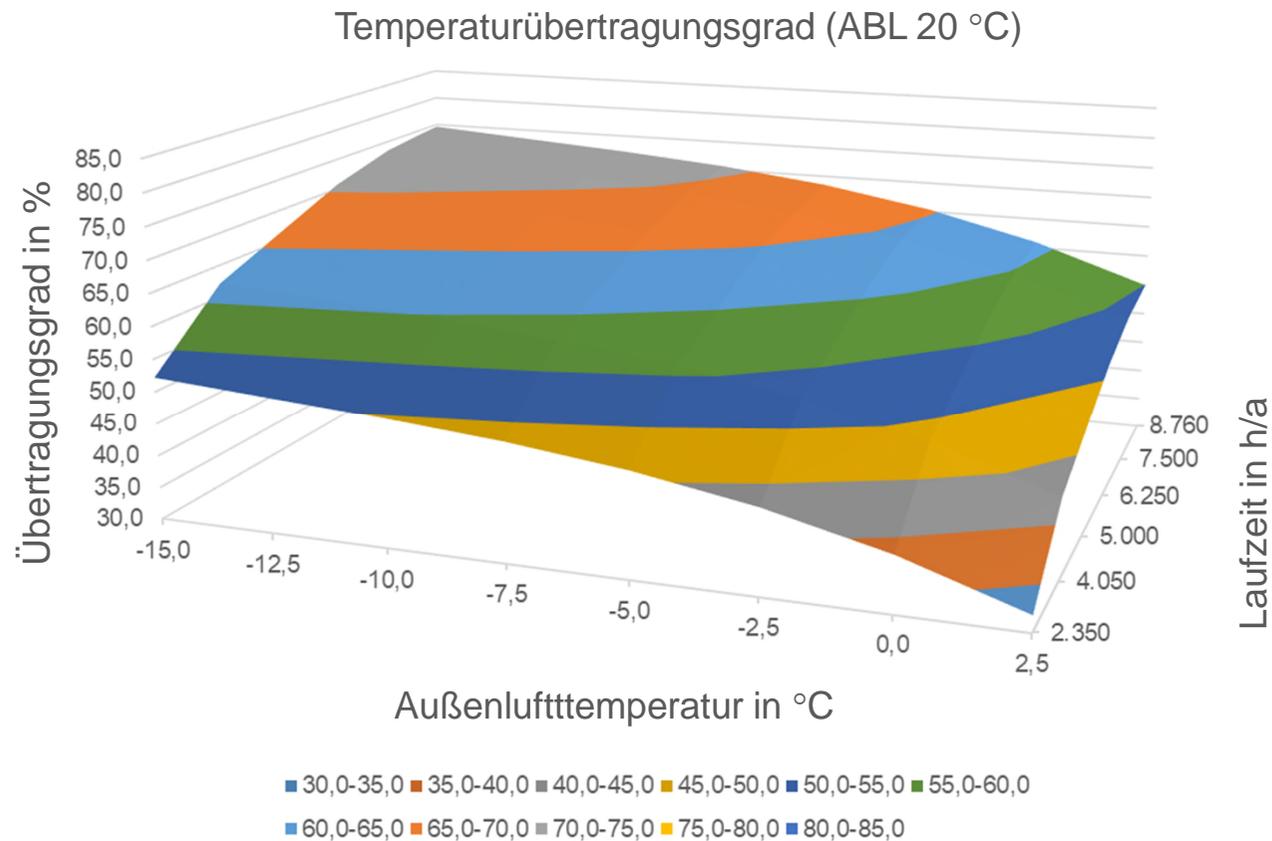
Φ	Parameter	Δp	Parameter	SFP	Parameter
AUL1	-1,023019239	AUL1	-3,85574	AUL1	-15,42298
AUL2	-0,058134369	AUL2	-0,22693	AUL2	-0,90772
AUL3	-0,001337963	AUL3	-0,00807	AUL3	-0,03227
ABL1	3,936274173	ABL1	-0,81031	ABL1	-3,24124
ABL2	-0,07118307	ABL2	0,11246	ABL2	0,44985
LZ1	0,004494335	LZ1	0,00812	LZ1	0,03247
LZ2	-2,34533E-07	LZ2	-2,37392E-07	LZ2	-9,496E-07

Multiple Einflussfaktoren



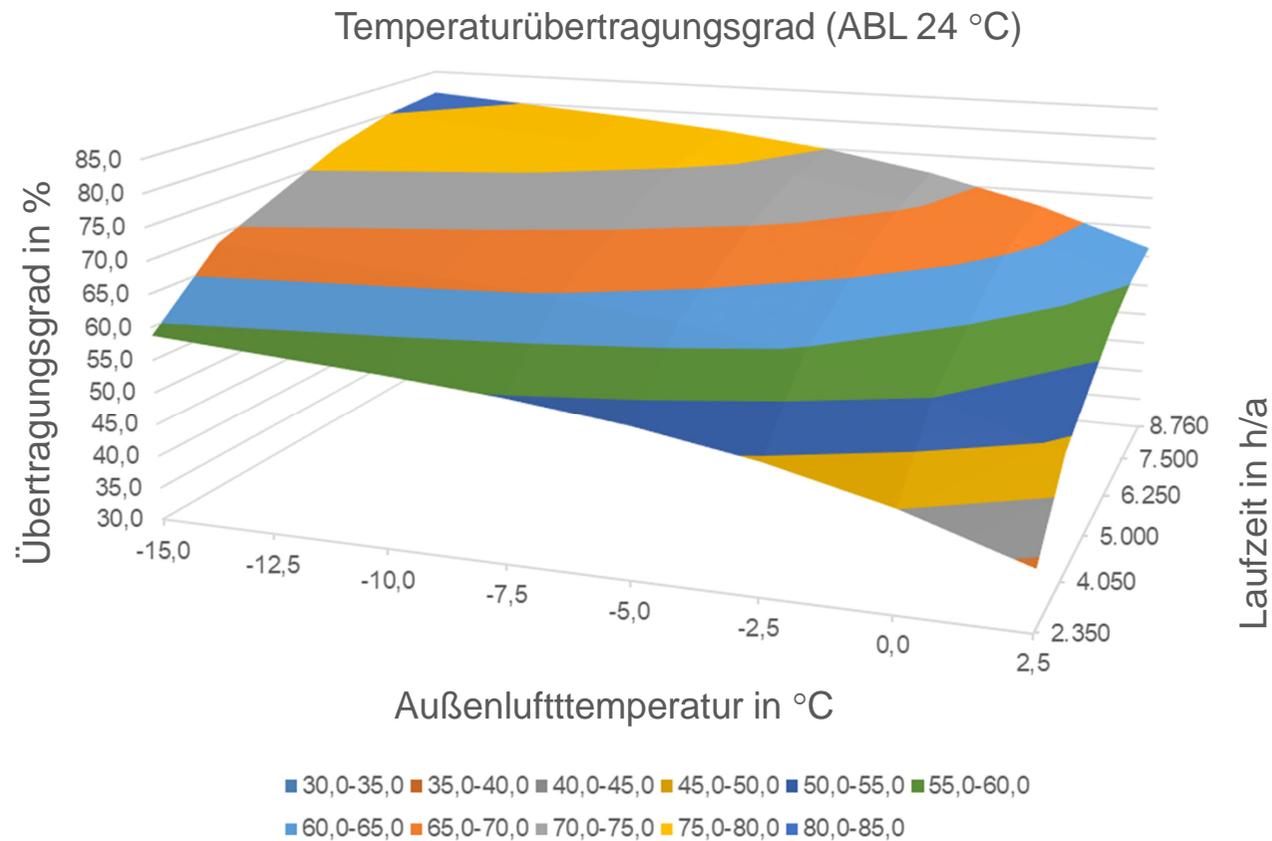
3D Optimum

Multiple Einflussfaktoren



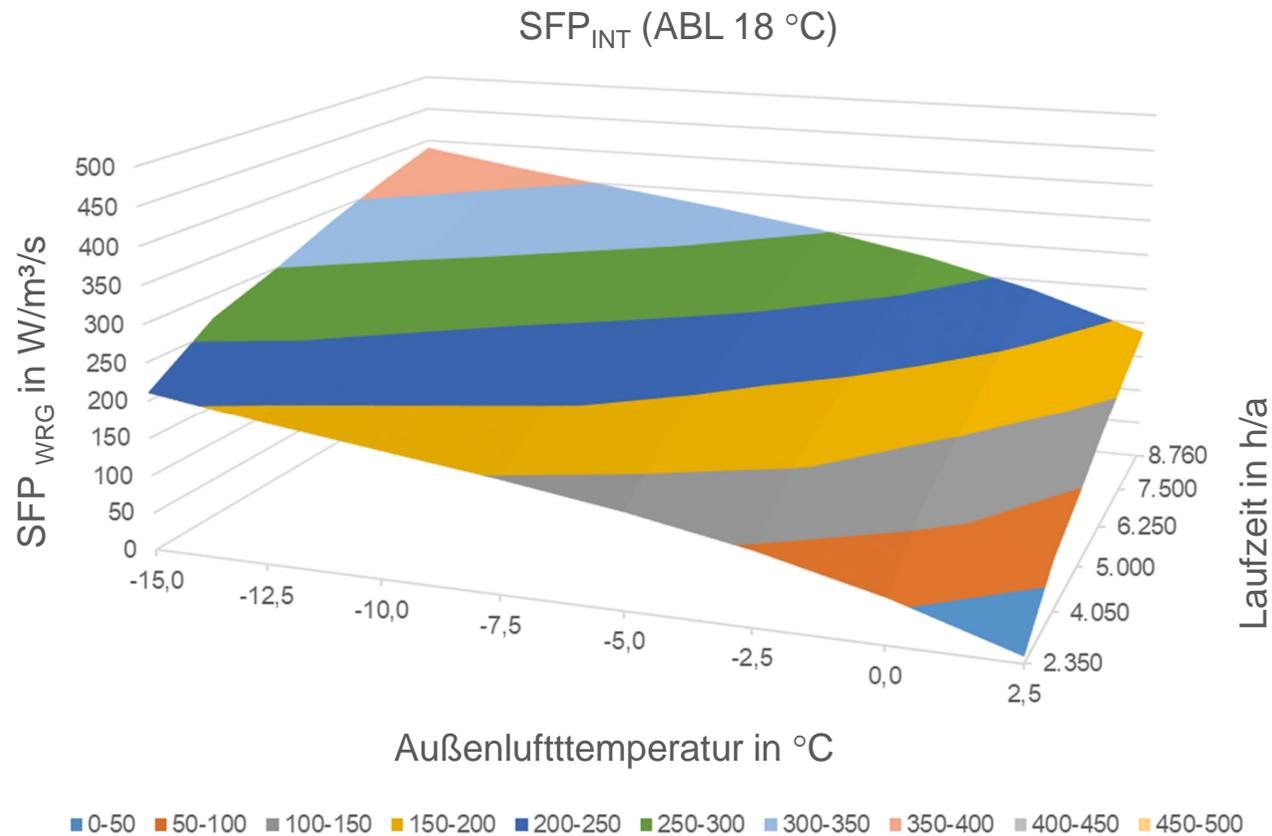
3D Optimum

Multiple Einflussfaktoren



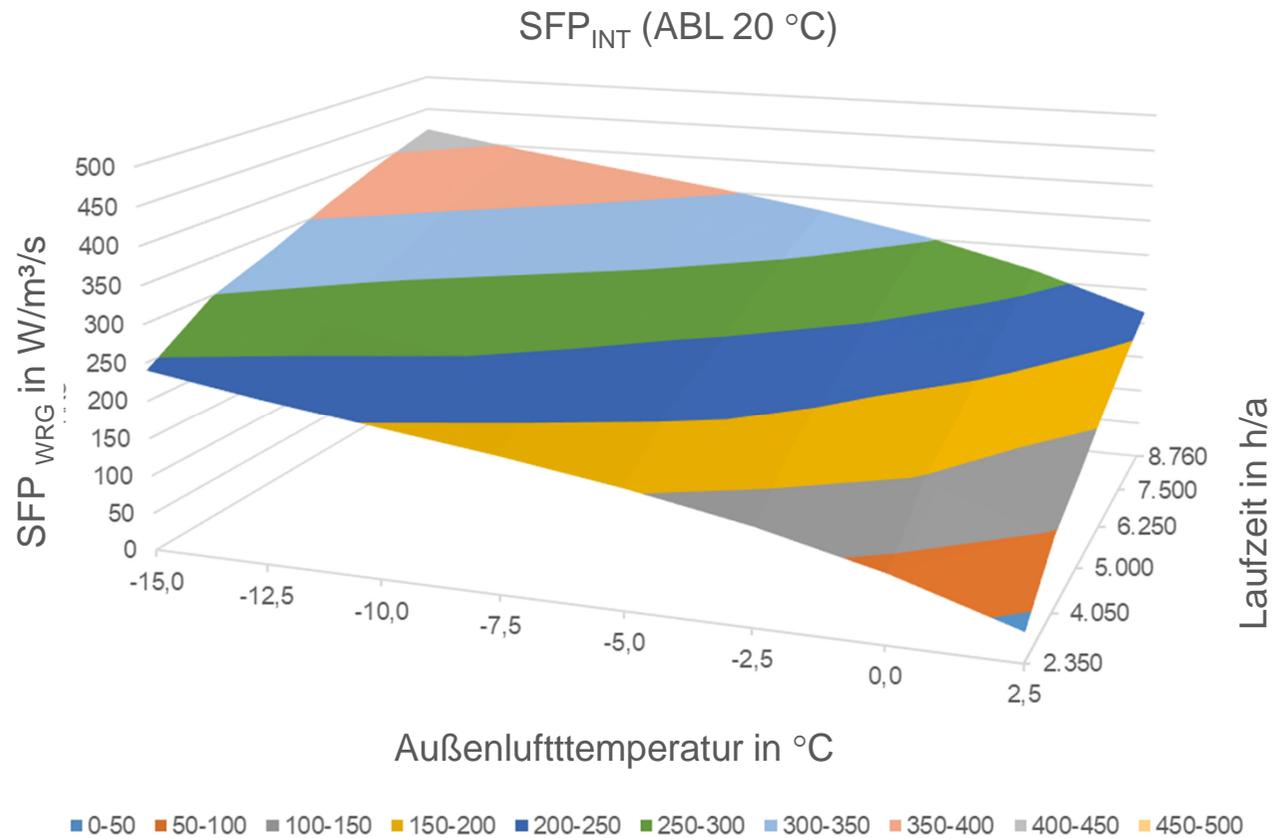
3D Optimum

Multiple Einflussfaktoren



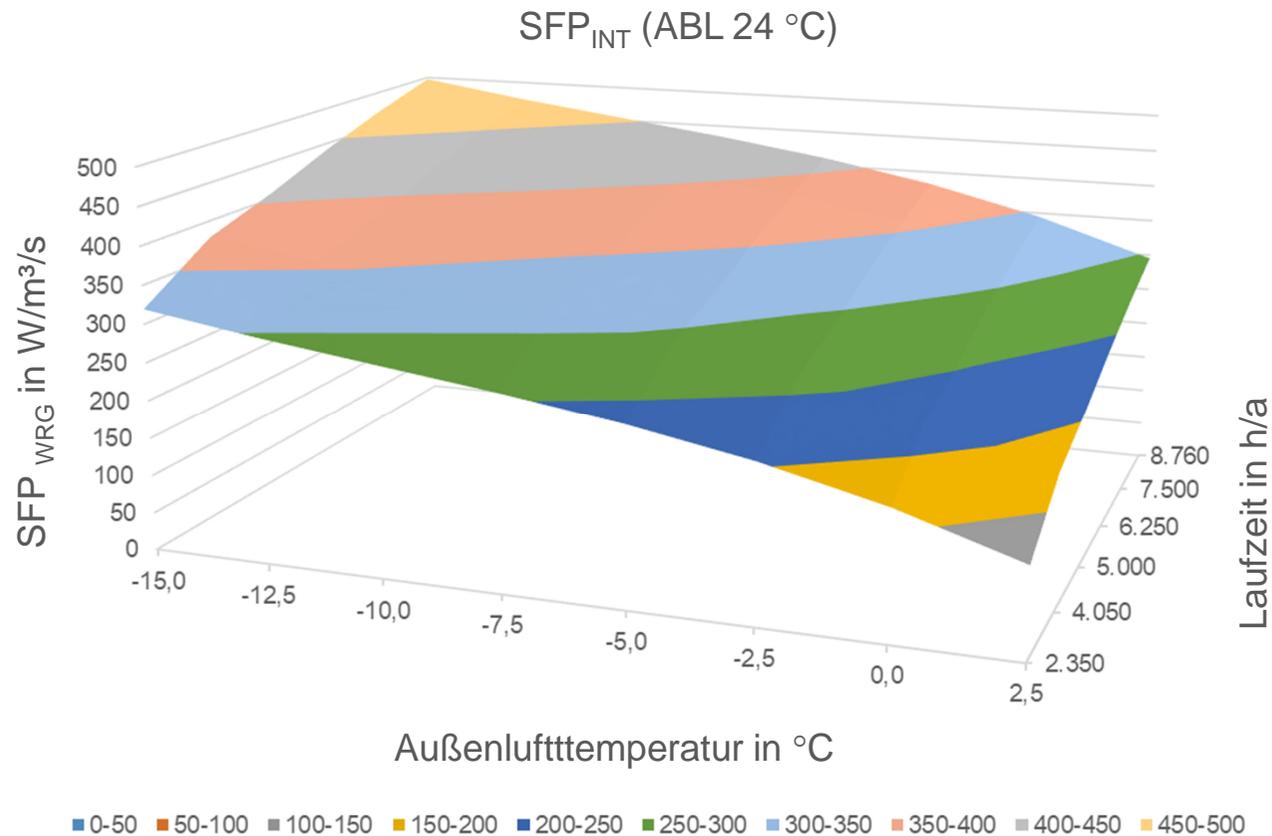
3D Optimum

Multiple Einflussfaktoren



3D Optimum

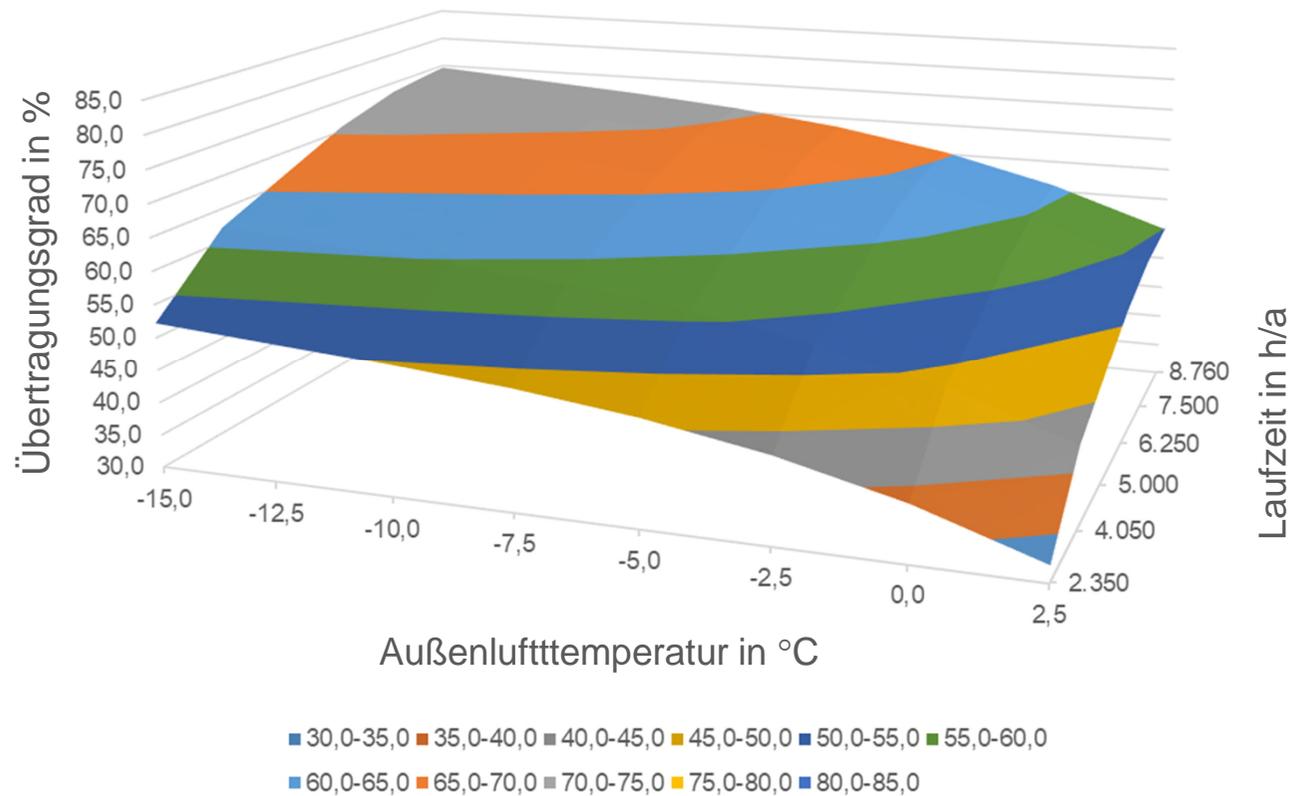
Multiple Einflussfaktoren



3D Optimum

Multiple Einflussfaktoren (Bilanzgrenze nur WRG)

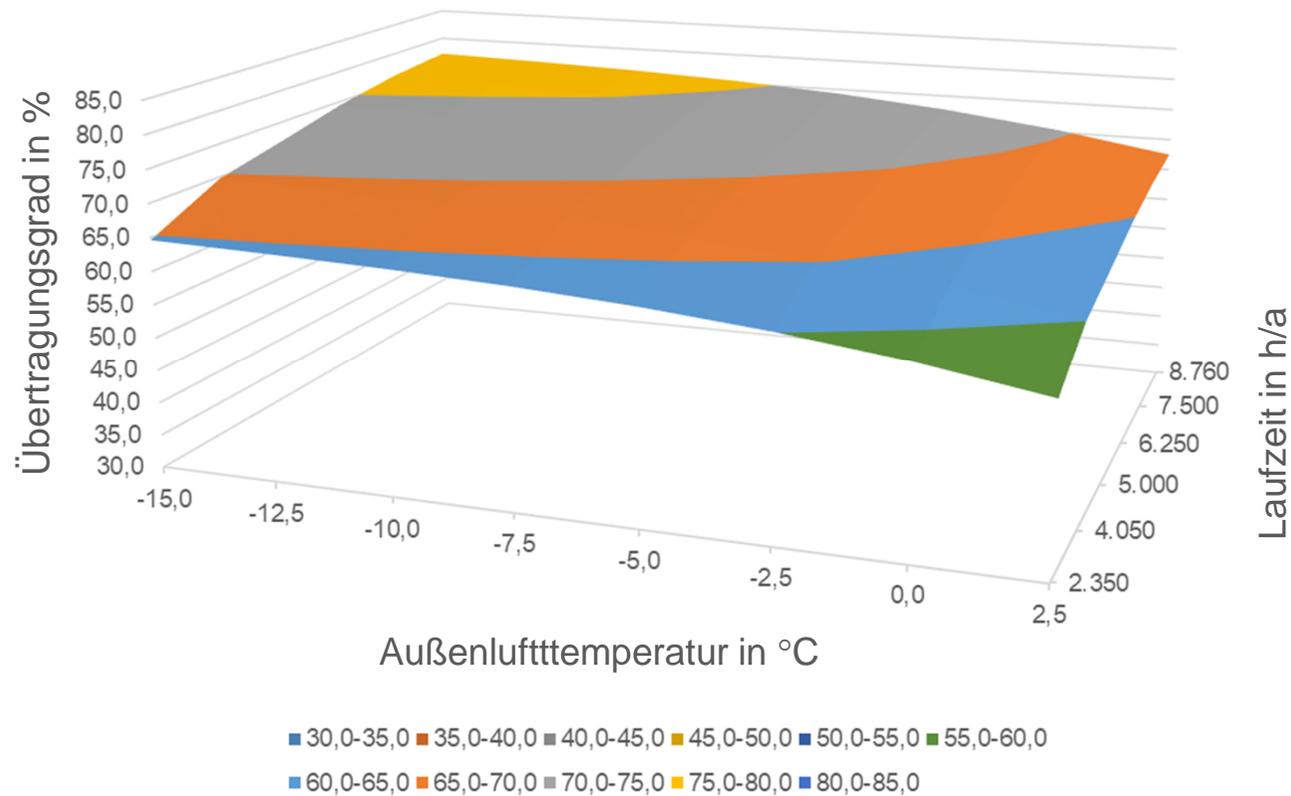
Temperaturübertragungsgrad (ABL 20 °C)



3D Optimum

Multiple Einflussfaktoren (mit erweiterter Bilanzgrenze)

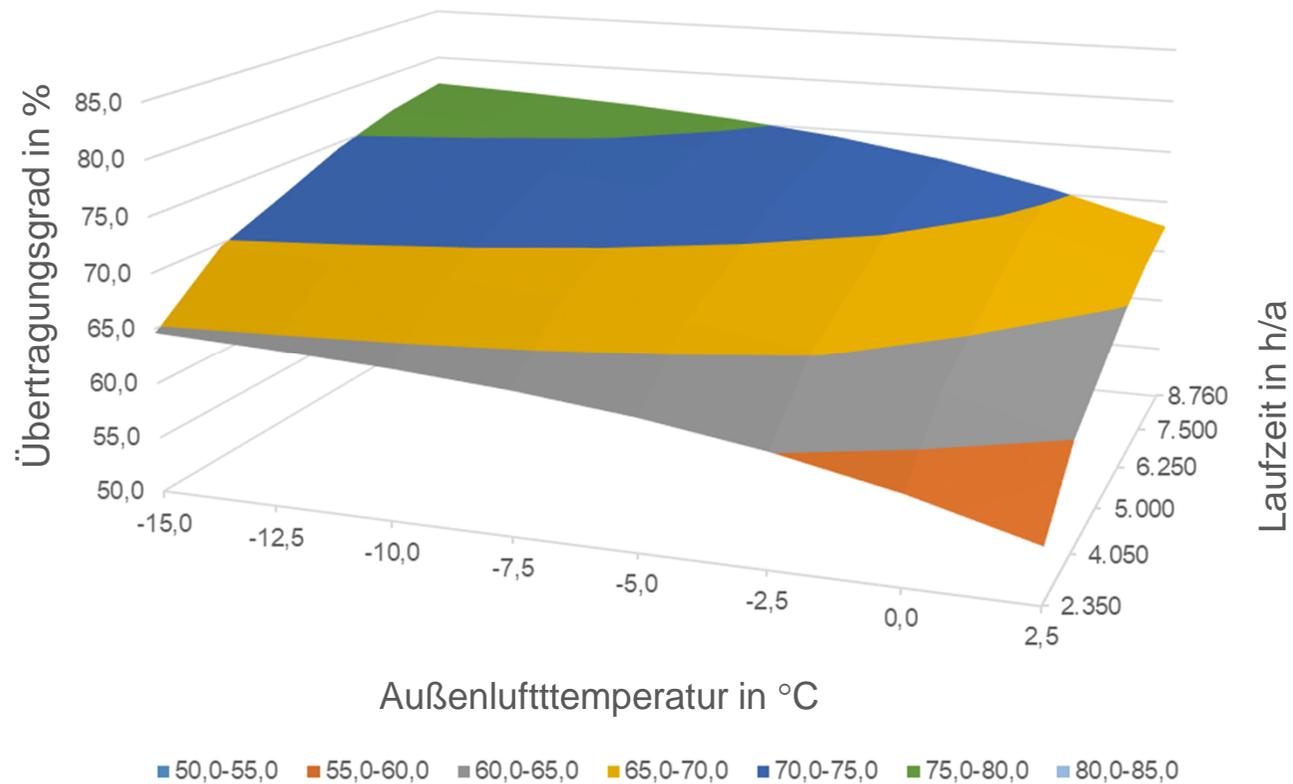
Temperaturübertragungsgrad (ABL 20 °C)



3D Optimum

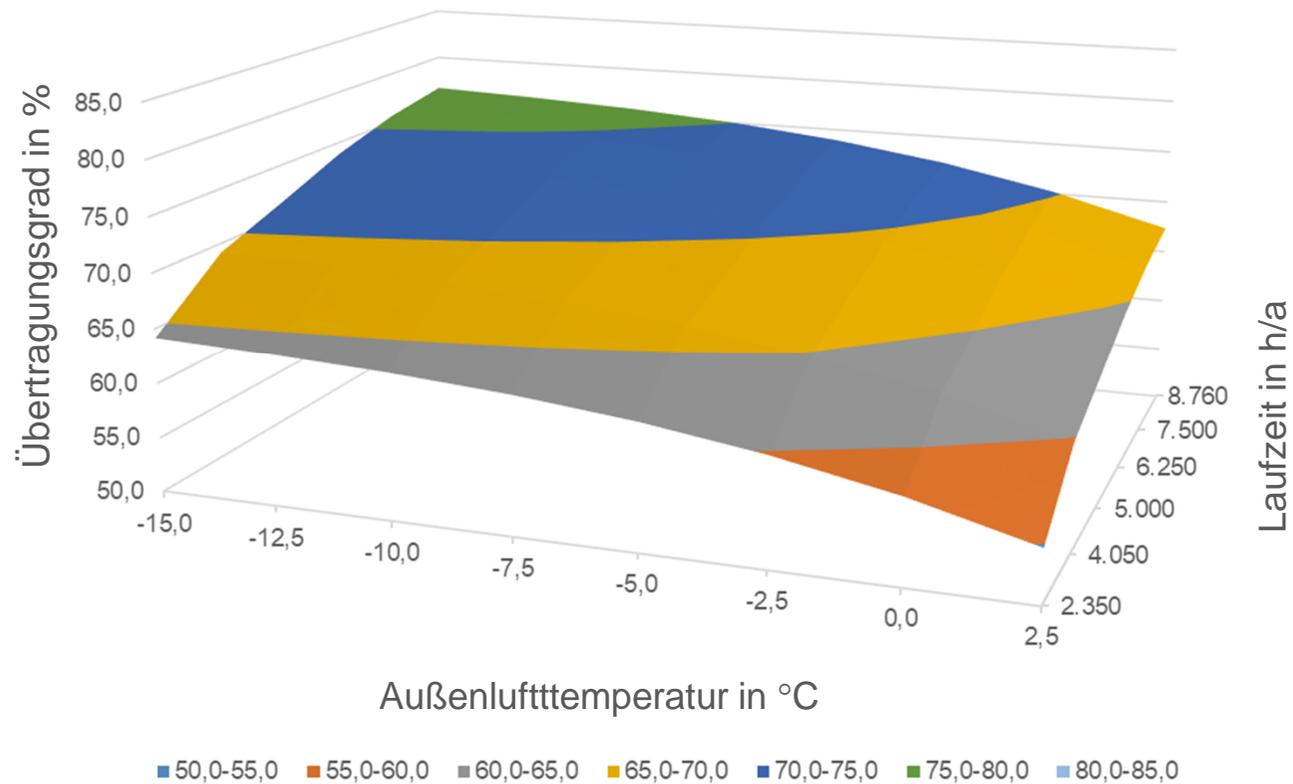
Multiple Einflussfaktoren (Vollastbetrieb)

Temperaturübertragungsgrad (ABL 20 °C)

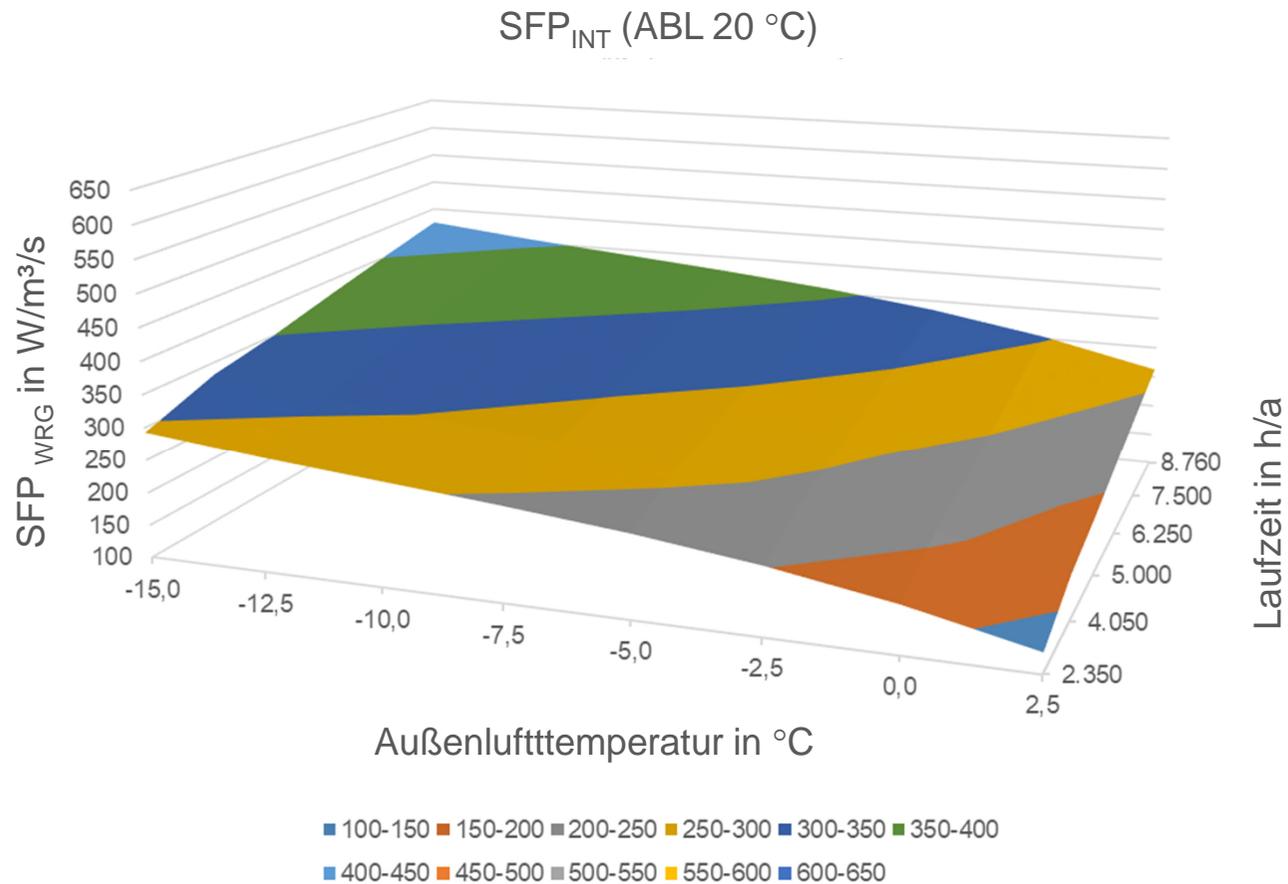


Multiple Einflussfaktoren (Teillastbetrieb)

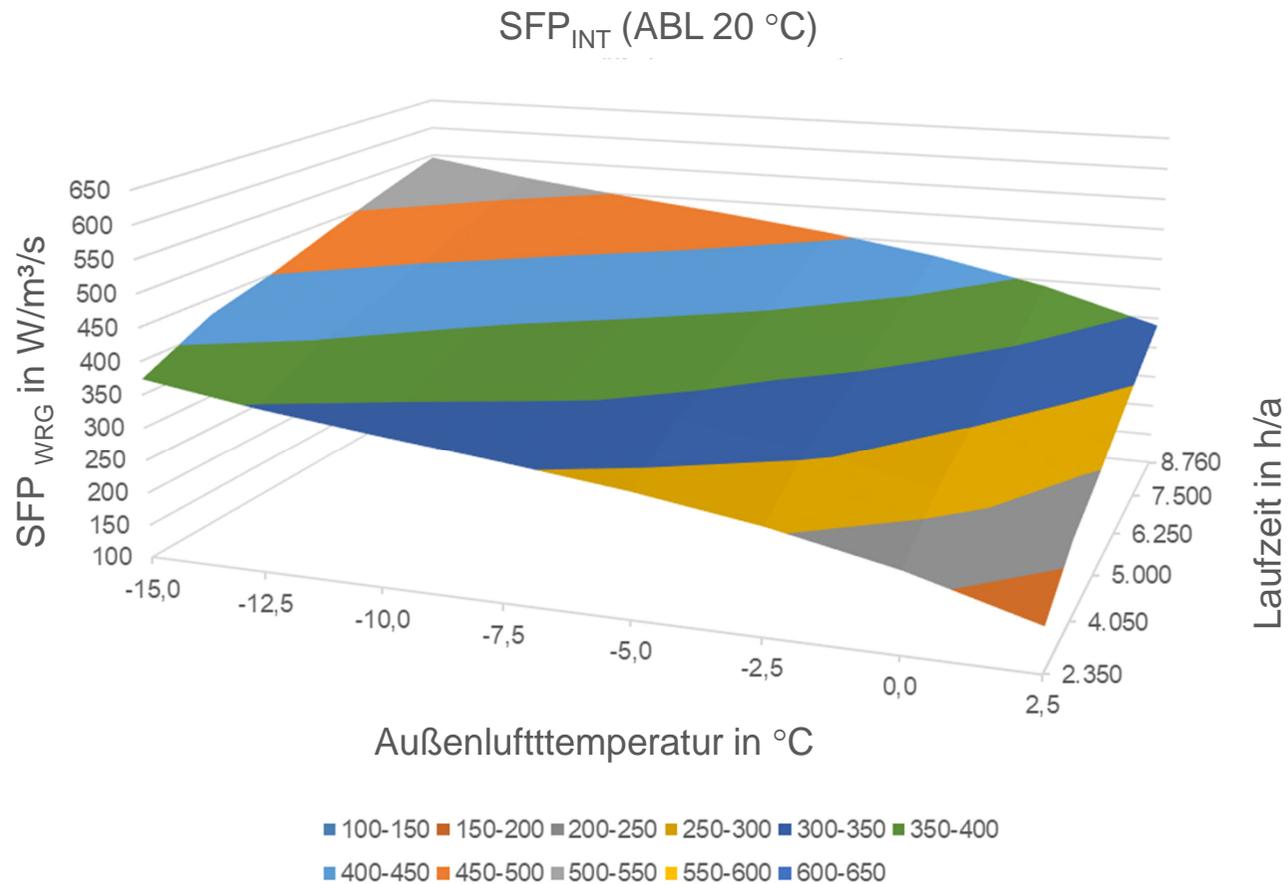
Temperaturübertragungsgrad (ABL 20 °C)



Multiple Einflussfaktoren (Vollastbetrieb)

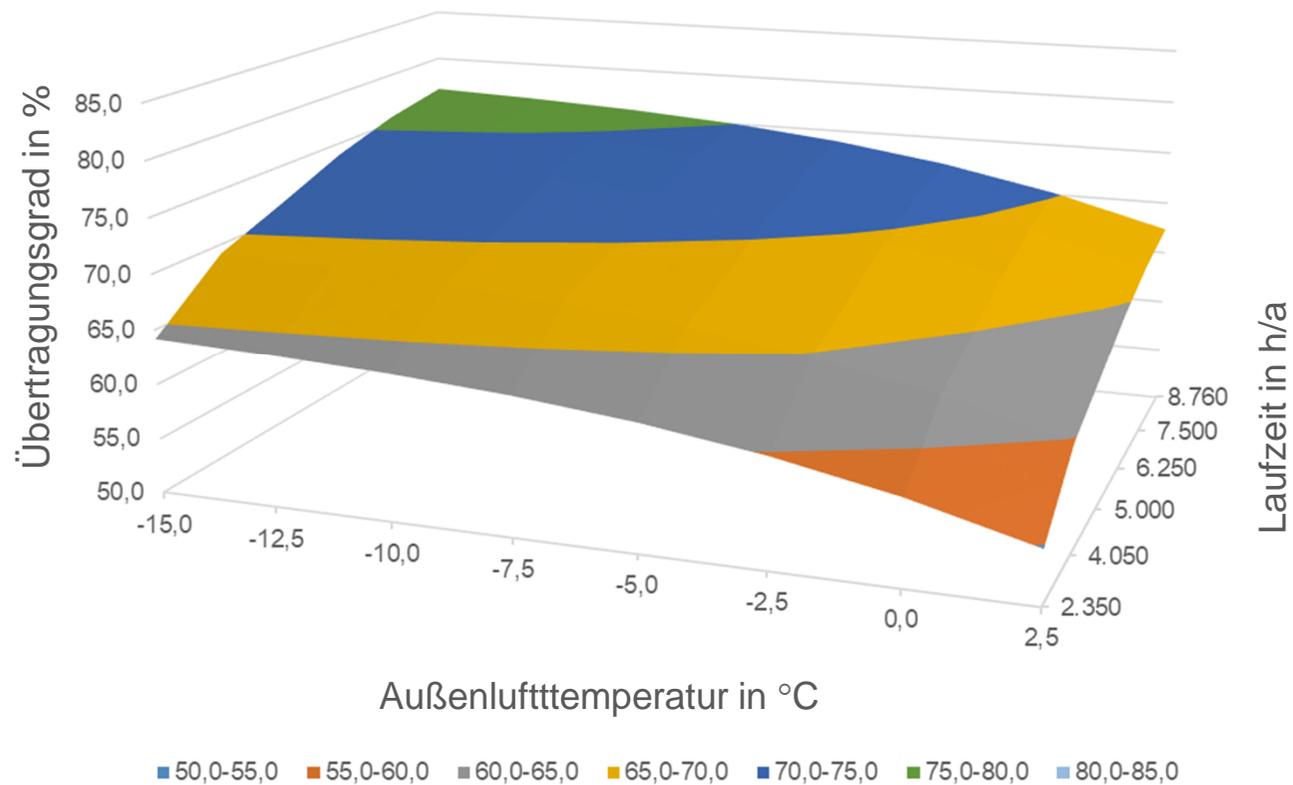


Multiple Einflussfaktoren (Teillastbetrieb)



Multiple Einflussfaktoren (ohne CO₂ Emissionen)

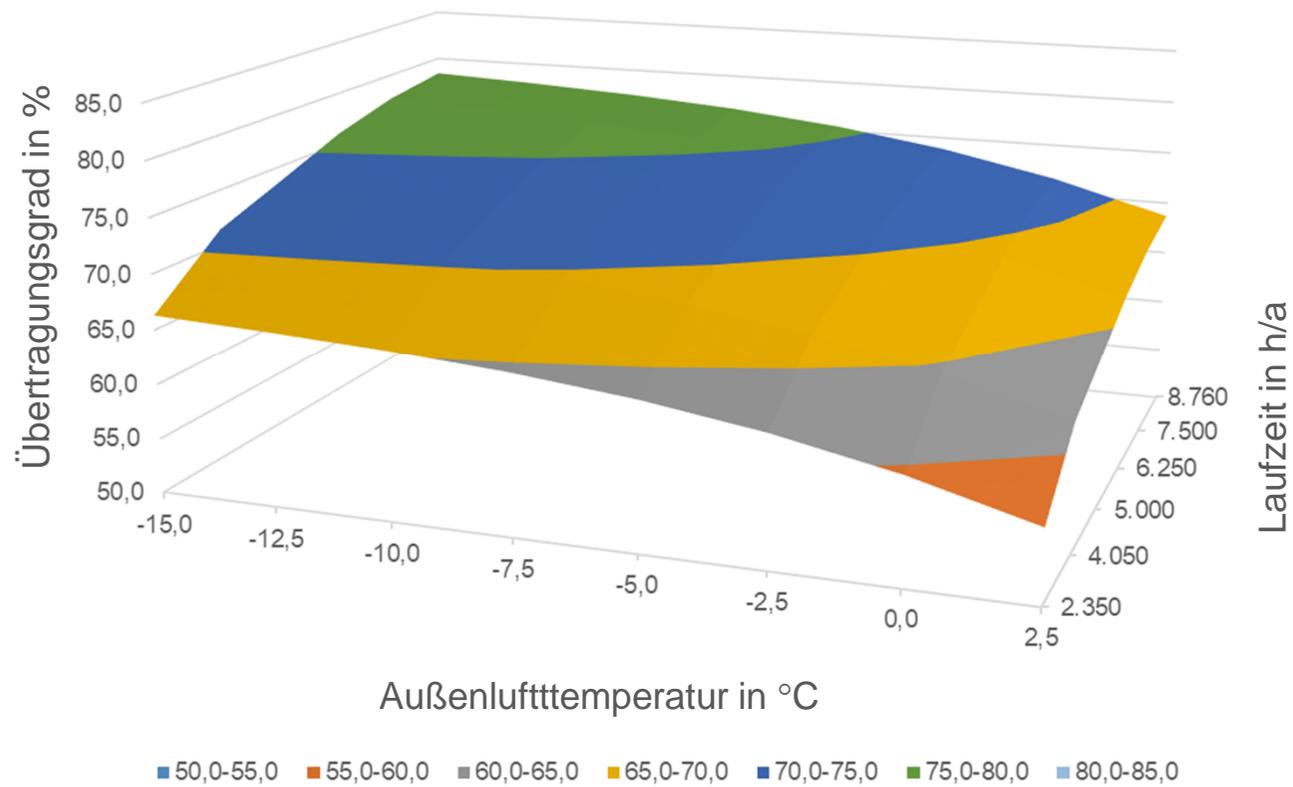
Temperaturübertragungsgrad (ABL 20 °C)



3D Optimum

Multiple Einflussfaktoren (mit CO₂ Emissionen - 25 €/t.)

Temperaturübertragungsgrad (ABL 20 °C)



3D Optimum

Optima beschrieben durch multiple Regressionen (Wertepaare)

Temperaturübertragungsgrad $\Phi_t = f(\vartheta_{AUL}, \vartheta_{ABL}, t)$

Spezifische Ventilatorleistung $SFP_{WRG}(\Delta p) = f(\Phi_t)$

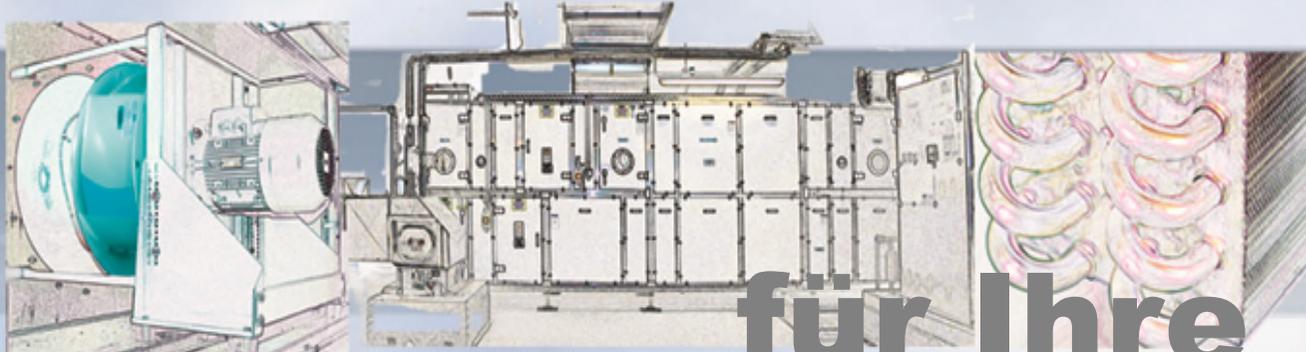
Physikalische Einflussfaktoren zur Optimierung

- Außenlufttemperatur (ϑ_{AUL})
- Ablufttemperatur (ϑ_{ABL}) (auch Zulufttemperatur (ϑ_{ZUL}))
- Laufzeit (t)

Ökonomische oder ökologische Einflussfaktoren

- Investment und Energien (Wärme, Strom, CO₂) (€)

Danke



für Ihre Aufmerksamkeit

Die mehrdimensionale Optimierung der Wärmerückgewinnung

Ökonomische und ökologische Optimierung der WRG

Prof. Dr.-Ing. Dr. Christoph Kaup

c.kaup@umwelt-campus.de



Umwelt-Campus
Birkenfeld

H O C H
S C H U L E
T R I E R