## 16. Symposium Energieinnovation – TU Graz Wege zur klimaneutralen und kosteneffizienten Wärme- und Kälteversorgung von Industriestandorten

Graz, 13. Februar 2020

Simon Möhren, SWK E<sup>2</sup> Hochschule Niederrhein



#### **Inhalt**

- 1. Einleitung
- 2. Methode
  - 2.1 Mehrperiodische Wärmeintegration
  - 2.2 Gewichtungsfaktoren
- 3. Fallbeispiel
- 4. Zusammenfassung und Ausblick

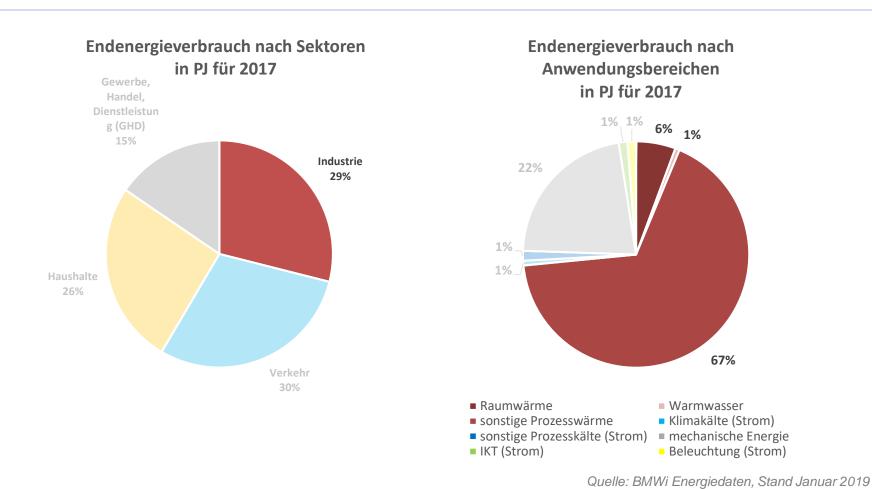


#### Inhalt

- 1. Einleitung
- 2. Methode
  - 2.1 Mehrperiodische Wärmeintegration
  - 2.2 Gewichtungsfaktoren
- 3. Fallbeispiel
- 4. Zusammenfassung und Ausblick



## Endenergieverbrauch der deutschen Industrie in PJ



## Theoretisches Abwärmepotential für Deutschland (Bottom-up)

#### **Grafik** Brueckner et al. (2017)

Theoretisches Potential: 61,9 TWh/a

# Theoretisches Potential Technisch nutzbares Potential Wirtschaftlich nutzbares Potential

- Das theoretische Potential zur Abwärmenutzung in Deutschland beträgt 61,9 TWh pro Jahr [1]
- Dies entspricht knapp 12 % des Prozesswärmebedarfs der deutschen Industrie [2]
- Ein Großteil des Potentials ist bislang ungenutzt [3]

[1] Brueckner et al. (2017) [2] BMWI Energiedaten, (2019) [3] Dütschke et al. (2018)



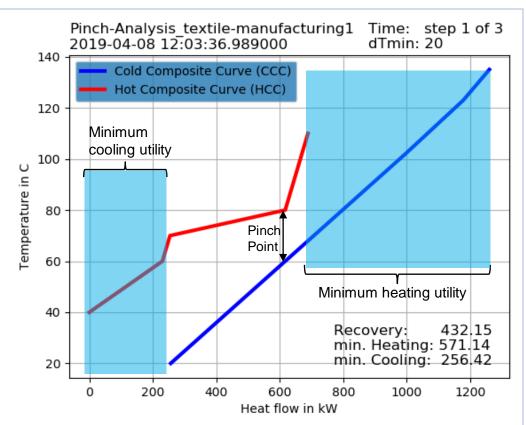


### Pinch-Analyse als graphisches Verfahren

Zusammenfassen der kalten (CS) und heißen Ströme (HS) durch intervallweise Addition der Wärmeströme  $\dot{Q}$ 

$$\dot{Q}_{j,i} = \sum_{j=1}^{H} \sum_{l=1}^{L} \dot{m}_j \cdot c_{p_j} \cdot (T_{in_l} - T_{out_l})$$

**Ziel:** Errechnen der maximal möglichen Abwärmenutzung für  $\Delta T_{min}$ 



- Wie sieht das optimale Wärmeübertrager Netzwerk (HEN) aus?
- Wo sind andere Technologien zur Abwärmenutzung sinnvoll?

Quelle: Linnhoff & Flower (1978) Klemes et al. (2011) Klemes et al. (2018)





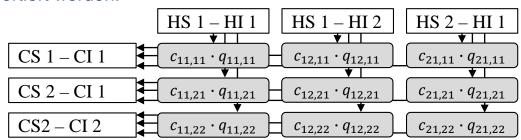
## Mathematische Optimierung Beispiel: Lineares Wärmetransportproblem (LP)

#### **Problem:**

- Wärme soll mit möglichst geringen Kosten von der Wärmequelle j in den Temperaturintervallen I zu Wärmesenken i in den Temperaturintervallen k transportiert werden.
- $a_{ik}$  ist der Wärmebedarf von Strom i im Intervall k und  $b_{jl}$  die verfügbare Wärme von Strom j im Intervall l.
- Jeder mögliche Transportweg bildet einen Knoten. Über ihn kann die Wärme  $q_{ik,jl}$  mit den spezifischen Kosten  $c_{ik,il}$  transportiert werden.

#### Zielfunktion:

$$\min_{\mathbf{q}_{\mathrm{ik,jl}}} \sum_{i=1}^{\mathrm{CS}} \sum_{k=1}^{\mathrm{CI}} \sum_{i=1}^{\mathrm{HS}} \sum_{l=1}^{\mathrm{HI}} c_{\mathrm{ik,j}l} \cdot q_{\mathrm{ik,j}l}$$



#### Randbedingungen:

- Nichtnegativitätsbedingung:  $q_{ij} \ge 0$  für alle i, j, k, l
- Wärme der Quellen:  $\sum_{i=1}^{n} q_{ij} \le a_i \ (i=1,...,m)$
- Wärme der Senken:  $\sum_{i=1}^{m} q_{ij} \leq b_i \ (j = 1, ..., n)$

#### Ausgeschrieben:

$$c_{11,11} \cdot q_{11,11} + c_{12,11} \cdot q_{12,11} + c_{21,11} \cdot q_{21,11} + c_{11,21} \cdot q_{11,21} + c_{12,21} \cdot q_{12,21} + c_{21,21} \cdot q_{21,21} + c_{11,22} \cdot q_{11,22} + c_{12,22} \cdot q_{12,22} + c_{21,22} \cdot q_{21,22}$$

Quelle: Cerda et al. (1983)





#### **Inhalt**

- 1. Einleitung
- 2. Methode
  - 2.1 Mehrperiodische Wärmeintegration
  - 2.2 Gewichtungsfaktoren
- 3. Fallbeispiel
- 4. Zusammenfassung und Ausblick



## 2.1 Mehrperiodische Wärmeintegration Zielfunktion und Nebenbedingungen

#### **Zielfunktion:**

$$\min_{\dot{Q}_{tik,tjl}} \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{C} \sum_{k=1}^{L} \sum_{j=1}^{H} \sum_{l=1}^{L} C_{tik,tjl} \cdot \dot{Q}_{tik,tjl} \cdot \tau_{t}$$

#### Nebenbedingungen:

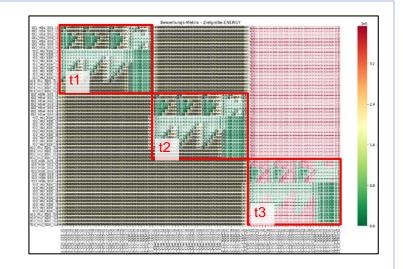
Nichtnegativitätsbedingung:  $q_{ij} \ge 0$  für alle i, j, k, l

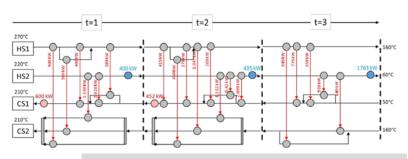
Wärme der Quellen:  $\sum_{j=1}^{n} q_{ij} \le a_i \ (i = 1, ..., m)$ 

Wärme der Senken:  $\sum_{i=1}^{m} q_{ij} \leq b_i$  (j = 1, ..., n)

#### Kein Wärmetransport zwischen Zeitschritten:

 $\dot{Q}_{tik,til} = 0$  wenn t nicht identisch in  $a_{tik}$  und  $b_{til}$ 





Abweichendes HEN für jeden Zeitschritt t

Quelle: Cerda et al. (1983), Aydemir et al. (2016)







## 2.1 Mehrperiodische Wärmeintegration Einheitliches Wärmeübertrager-Netzwerk (HEN)

#### **Zielfunktion:**

$$\min_{\dot{Q}_{tik,tjl}} \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{C} \sum_{k=1}^{L} \sum_{j=1}^{H} \sum_{l=1}^{L} C_{tik,tjl} \cdot \dot{Q}_{tik,tjl} \cdot \tau_{t}$$

#### Nebenbedingungen:

Nichtnegativitätsbedingung:  $q_{ij} \ge 0$  für alle i, j, k, l

Wärme der Quellen:  $\sum_{j=1}^{n} q_{ij} \le a_i \ (i = 1, ..., m)$ 

Wärme der Senken:  $\sum_{i=1}^{m} q_{ij} \leq b_i$  (j = 1, ..., n)

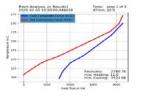
#### Kein Wärmetransport zwischen Zeitschritten:

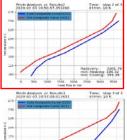
 $\dot{Q}_{tik,tjl} = 0$  wenn t nicht identisch in  $a_{tik}$  und  $b_{tjl}$ 

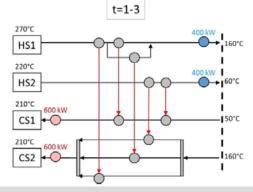
Übertragen des HEN von einem Auslegungszeitpunkt  $t_A$ :

 $\dot{Q}_{tik,tjl} \leq \dot{Q}_{t_Aik,t_Ajl} \cdot f_{Teillast}$  mit z. B.  $f_{Teillast} = 1$ 

#### Bestimmen von $t_A$ mit der Pinch-Analyse







Einheitliches HEN für jeden Zeitschritt t

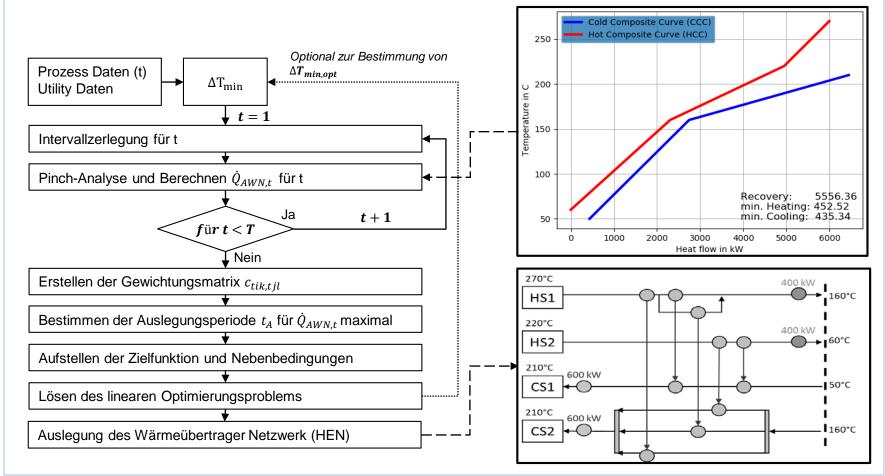
Quelle: Cerda et al. (1983), Aydemir et al. (2016)







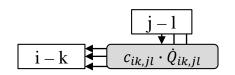
## 2.1 Mehrperiodische Wärmeintegration - Kombination aus linearer Optimierung und Pinch Analyse



## 2.2 Gewichtungsfaktoren Energetische und Ökologische Optimierung

#### **Energetische Optimierung:**

$$c_{Energie,tik,tjl} \begin{cases} 0 & i \ und \ j \ sind \ Prozessstr\"{o}me, W\"{a}rmetransport \ zul\"{a}ssig \\ i \ und \ j \ sind \ Utilities \\ i \ oder \ j \ ist \ eine \ Utility \\ M & t \ von \ HS \ \neq t \ von \ CS \ (M \ ist \ eine \ große \ Zahl) \\ M & in \ allen \ anderen \ F\"{a}llen \ (M \ ist \ eine \ große \ Zahl) \end{cases}$$



#### Ökologische Optimierung:

$$c_{CO2,tik,tjl} \begin{cases} 0 & i \ und \ j \ sind \ Prozessstr\"{o}me, W\"{a}rmetransport \ zul\"{a}ssig \\ i \ und \ j \ sind \ Utilities \\ c_{CO_2,UT,tik,tjl} & i \ oder \ j \ ist \ eine \ Utility \\ M & t \ von \ HS \ \neq t \ von \ CS \ (M \ ist \ eine \ große \ Zahl) \\ M & in \ allen \ anderen \ F\"{a}llen \ (M \ ist \ eine \ große \ Zahl) \end{cases}$$

mit

Quelle: Cerda et al. (1983)



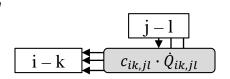




## 2.2 Gewichtungsfaktoren Ökonomische Optimierung

#### Ökonomische Optimierung:

$$c_{Kosten,tik,tjl} \begin{cases} c_{W\ddot{\text{U}},tik,tjl} & i \ und \ j \ sind \ Prozessstr\"{\text{o}}me, \ W\"{\text{a}}rmetransport \ zul\"{\text{a}}ssig \\ i \ und \ j \ sind \ Utilities \\ c_{UT,tik,tjl} & i \ oder \ j \ ist \ eine \ Utility \\ M & t \ von \ HS \ \neq t \ von \ CS \ (M \ ist \ eine \ große \ Zahl) \\ M & in \ allen \ anderen \ F\"{\text{a}}llen \ (M \ ist \ eine \ große \ Zahl) \end{cases}$$



#### mit Wärme- bzw. Kältegestehungskosten nach VDI 6025

$$c_{UT,tik,tjl} = \frac{\left(A_{0,t} \cdot (1 - f_{F\ddot{o}rder}) + \sum_{n=1}^{T_{Nutz}} \frac{A_{n,t}}{q^n}\right)}{Q_t} \cdot a_{T_{Nutz}}$$

$$A_{0,t} = a_0 \cdot \dot{Q}_t \cdot f_{Instal}$$

$$A_{n,t} = \begin{bmatrix} k_{Personal} \cdot \tau_{Bedienung} + A_{0,t} \cdot (f_{Inst} + f_{W+Insp}) \end{bmatrix} \cdot a_n \cdot b_{Betrieb,n} + \underbrace{\frac{\dot{Q}_t \cdot \tau_t}{\eta_{th}} \cdot k_{Preis} \cdot a_n \cdot b_{Bedarf,n}}_{Bedarfsgebundene Zahlungen}$$

$$Betriebsgebundene Zahlungen$$

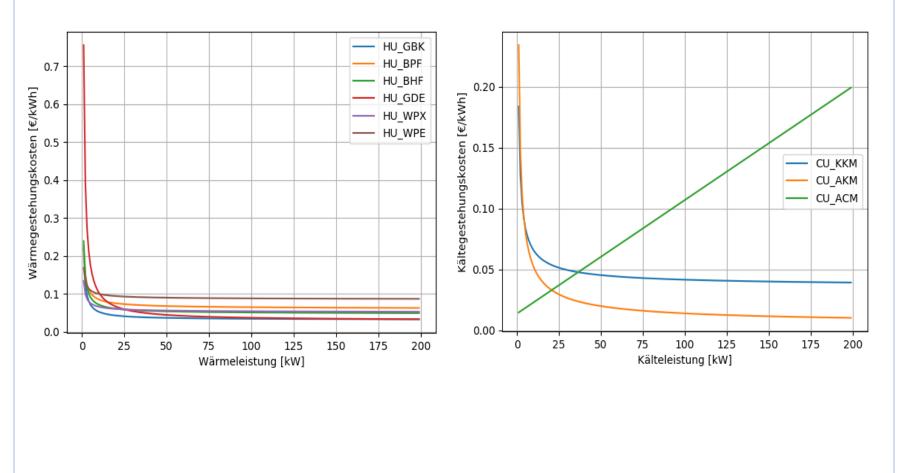
$$Bedarfsgebundene Zahlungen$$

#### mit spezifischen Kosten der Wärmeübertrager

$$c_{\text{WÜ,tik},tjl} = \frac{A_{0,t} + \sum_{\text{n=1}}^{T_{Nutz}} \left( \frac{A_{0,t} \cdot \left( f_{Inst} + f_{\text{w}+Insp} \right) \cdot a_n \cdot b_{\text{Betrieb},n}}{q^n} \right)}{\dot{Q}_t} \cdot a_{T_{Nutz}}$$



## 2.2 Gewichtungsfaktoren Wärme- und Kältegestehungskosten in €kWh



#### Inhalt

- 1. Einleitung
- 2. Methode
  - 2.1 Mehrperiodische Wärmeintegration
  - 2.2 Gewichtungsfaktoren
- 3. Fallbeispiel
- 4. Zusammenfassung und Ausblick



## 3. Fallbeispiel Problemschreibung

#### **Problembeschreibung:**

- 4 Wärmequellen (HS)
- 3 Wärmesenken (CS)
- 3 Perioden
- Alle verfügbaren Anlagen zur Energiebereitstellung

	Tein	Taus	$\dot{m}_1c_{\mathfrak{p},1}$	$\dot{m}_2 c_{p,2}$	$\dot{m}_3 c_{p,3}$
Ströme	[° <i>C</i> ]	[° <i>C</i> ]	[kW/K]	[kW/K]	[kW/K]
HS1	160	110	8,790	7,032	10,548
HS2	249	138	10,550	8,440	12,660
HS3	227	106	14,770	11,816	17,724
HS4	271	146	7,000	7,000	8,400
CS1	96	160	7,620	9,144	6,096
CS2	116	217	6,080	7,296	4,864
CS3	140	250	15,000	18,000	12,000

Periode 1

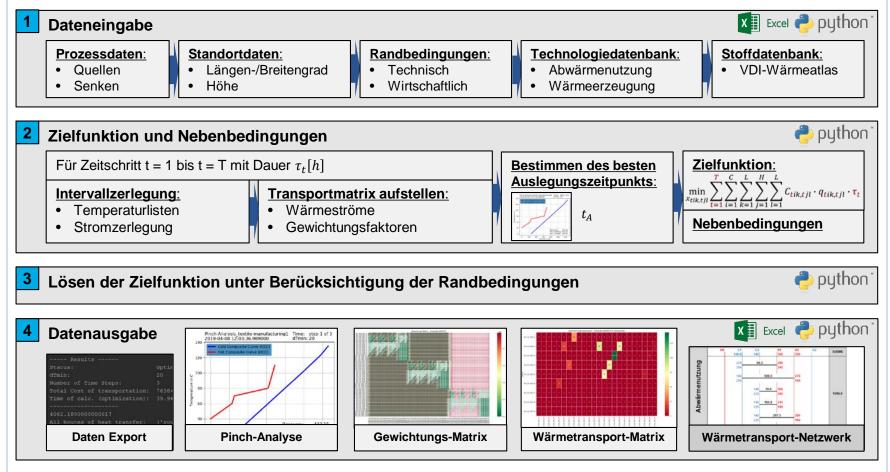
#### **Fragestellung:**

- Wie müssen die Wärmequellen (HS) und Wärmesenken (CS) für alle drei Perioden verknüpft werden, damit:
  - → Der externe Energiebedarf möglichst gering ist?
  - → Die Gesamtkosten des Systems minimal sind?
  - → Die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Systems minimal sind?
- Welche Anlagen zur Energiebereitstellung sollten genutzt werden?

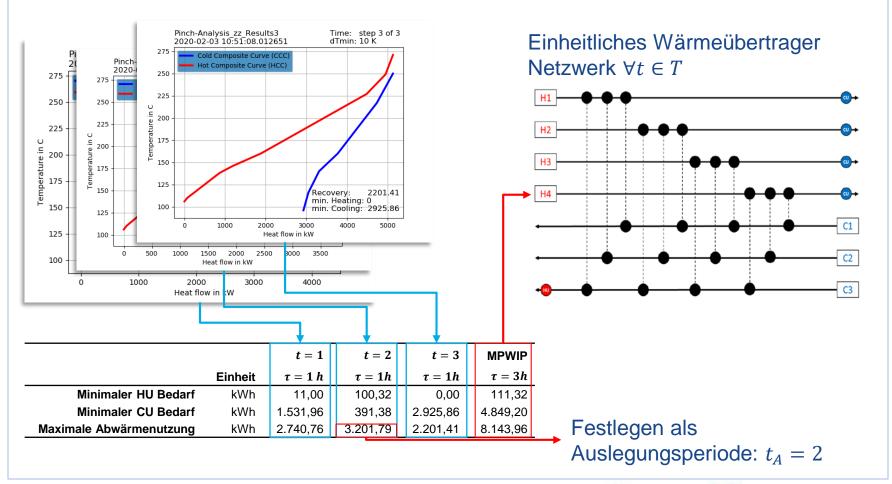


Periode 2 Periode 3

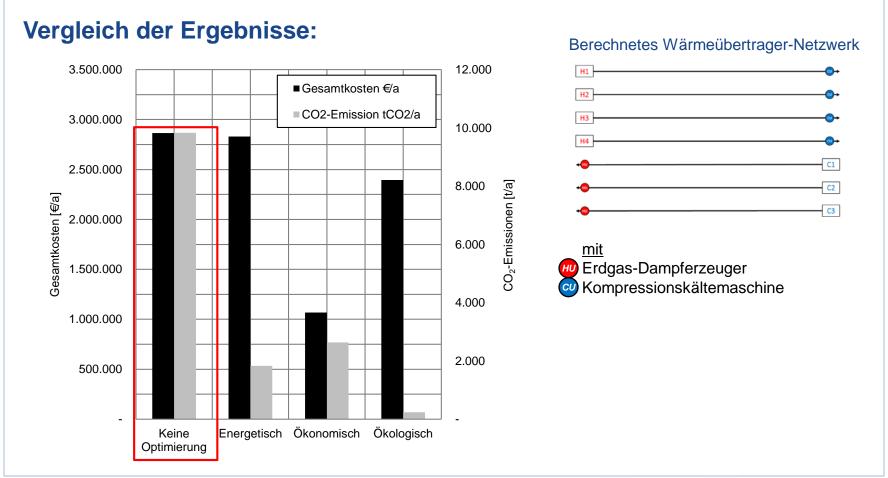
## Implementierung in Python



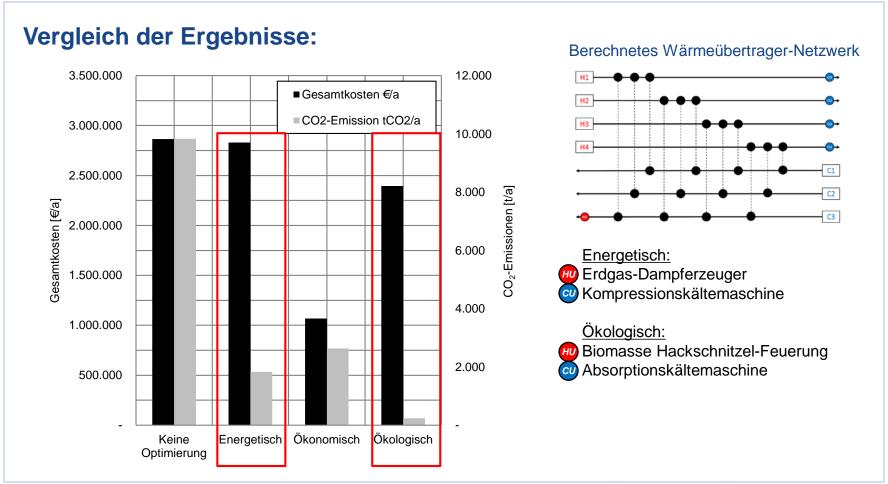
## Minimierung des externen Energiebedarfs



### Minimierung der Kosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen

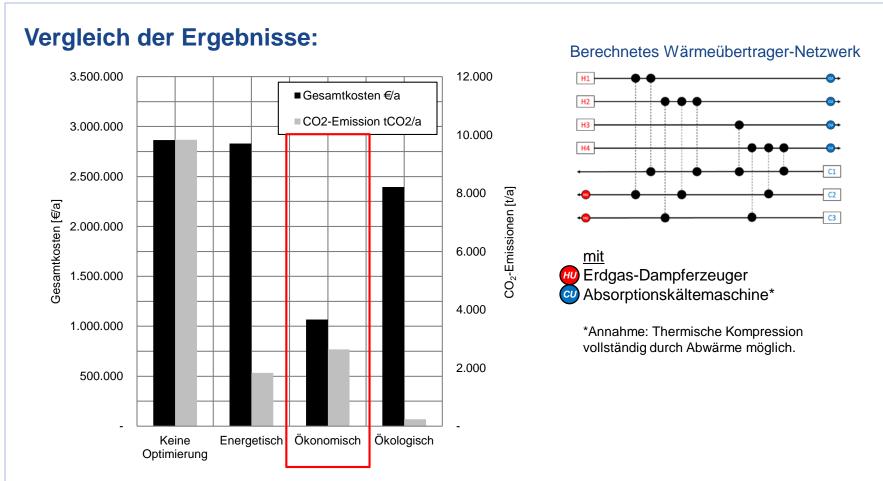


## Minimierung der Kosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen





## Minimierung der Kosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen



#### Inhalt

- 1. Einleitung
- 2. Methode
  - 2.1 Mehrperiodische Wärmeintegration
  - 2.2 Gewichtungsfaktoren
- 3. Fallbeispiel
- 4. Zusammenfassung und Ausblick



## 4. Zusammenfassung und Ausblick

- Durch die systematische Nutzung industrieller Abwärme kann der Endenergiebedarf, die Kosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen der Industrie signifikant reduziert werden.
- Bei kostenoptimaler Auslegung des mehrperiodischen Fallbeispiels nach Floudas & Grossmann, (1986) ist eine Reduzierung der Kosten um 62 % und der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 73 % möglich.
- Bei CO2-optimaler Auslegung kann eine Reduzierung der Emissionen um 97,6 % erzielt werden. Eine vollständige CO<sub>2</sub>-Neutralität ist auf Basis der verwendeten Technologien und Annahmen nicht möglich.\*

#### Weitere Betrachtungsfelder:

- Einbindung von thermischen Energiespeichern und Wärmepumpen
- Berücksichtigung von Rohrleitungskosten und Wärmeverlusten
- Auswirkungen einer CO<sub>2</sub>-Bepreisung auf die Kosten

\*Berechnung mit spezifischen CO<sub>2</sub>-Faktoren nach BAFA - Merkblatt zu den CO<sub>2</sub>-Faktoren 2019; Mögliche Vorketten-Emissionen bleiben unberücksichtigt; Wärmepumpe mit regenerativem Strom aufgrund der erforderlichen Temperaturen der CS nicht einsetzbar.



### Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

## Hochschule Niederrhein SWK E<sup>2</sup>

Obergath 79 (Gebäude J) 47805 Krefeld

#### Simon Möhren, M.Sc.

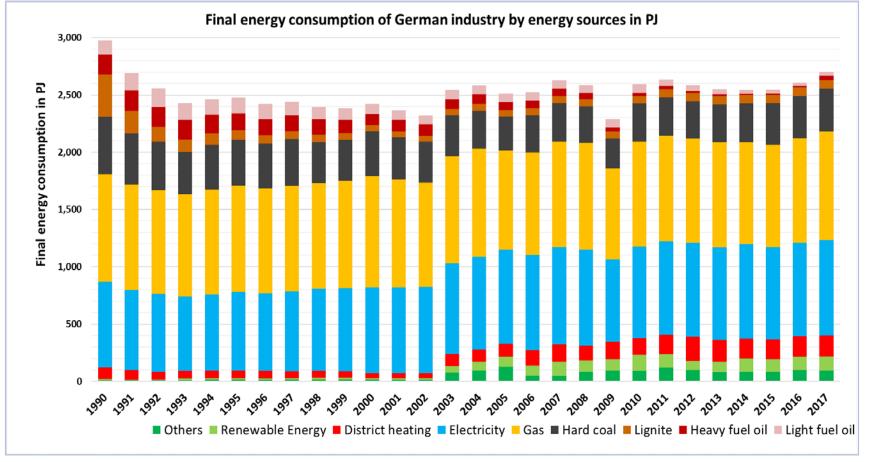
Simon.moehren@hs-niederrhein.de Tel: +49 (0)2151 822-6698





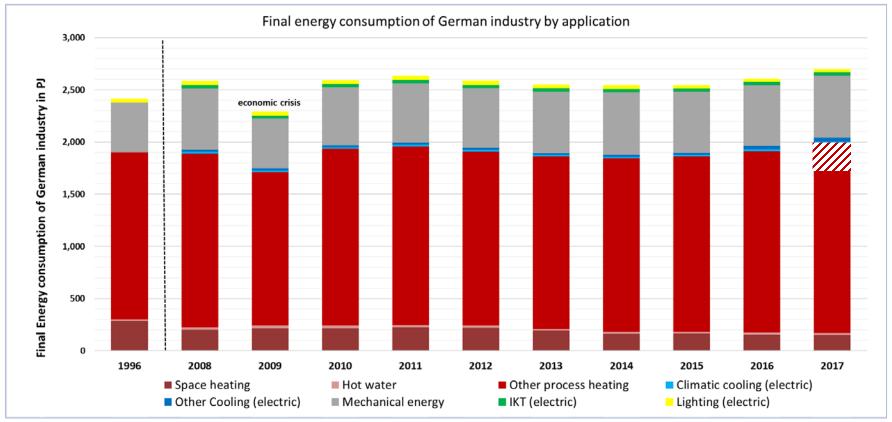
## Endenergieverbrauch nach Energieträgern in der Deutschen Industrie in PJ

Quelle: BMWi Energiedaten, Stand Jan 2019



## Endenergieverbrauch nach Anwendungsbereichen in der Deutschen Industrie in PJ

Quelle: BMWi Energiedaten, Stand Jan 2019



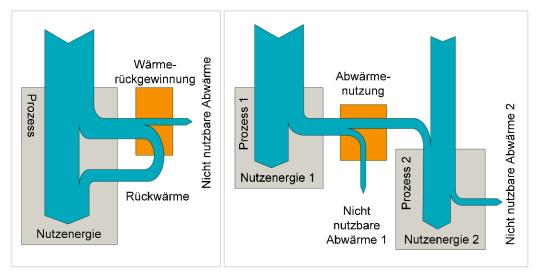
Theoretisches Einsparpotential durch Abwärmenutzung 61,9 TWh/a



## **Begriffsdefinition Abwärme**

**Definition Abwärme:** Abwärme ist die an die Umgebung abgeführte Wärme (Stephan et al.,2007).

#### Abgrenzung Wärmerückgewinnung / Abwärmenutzung:



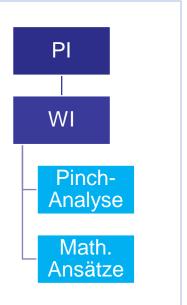
Quelle: Hirzel et al. 2013

Nutzung von Abwärme



## **Backup Begriffsdefinitionen**

- Prozessintegration (PI): Methoden der ganzheitlichen Prozessoptimierung. PI ist der Oberbegriff für systemorientierte, ganzheitliche Ansätze industrielle Prozesse und Anlagen in Bezug auf Kosten, Energieverbrauch oder Emissionen zu Optimieren.
- Wärmeintegration (HI): Eine Technik der PI, Entwickelt von Linnhoff und Flower 1978 mit dem Ziel die einem Prozess zugeführte Wärme und Kühlung zu reduzieren.
- Pinch-Analyse: Das am weitesten verbreitete graphische Verfahren der Pl.
- Mathematische Ansätze: Seit 1980 wurden diverse Ansätze zur math. Optimierung von Wärmeübertrager Netzwerken (HEN) entwickelt (LP, NLP, MILP, MINLP)



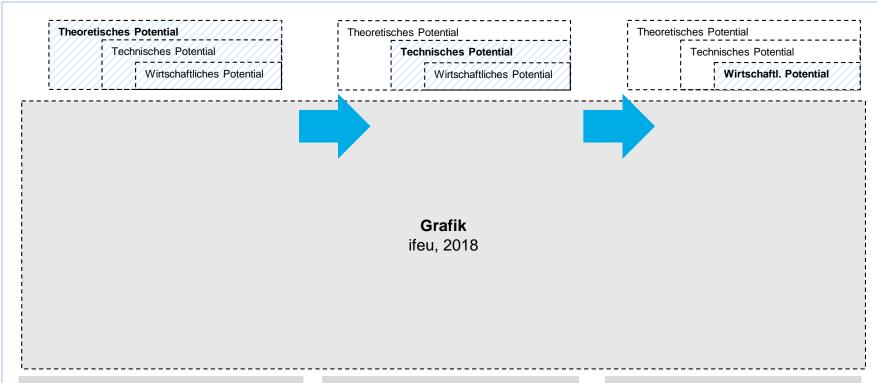
Quelle: Klemes et al. 2011; Klemes et al. 2018







## Theoretisches, technisches und wirtschaftliches Potential



#### **Theoretisches Potential:**

62,6 TWh/a

8,3 % des Endenergieverbrauchs der Industrie (2017)

#### **Technisches Potential:**

28,9 TWh/a

3,9 % des Endenergieverbrauchs der Industrie (2017)

#### Wirtschaftliches Potential:

19,2 TWh/a

2,6 % des Endenergieverbrauchs der Industrie (2017) Quelle: ifeu, 2018

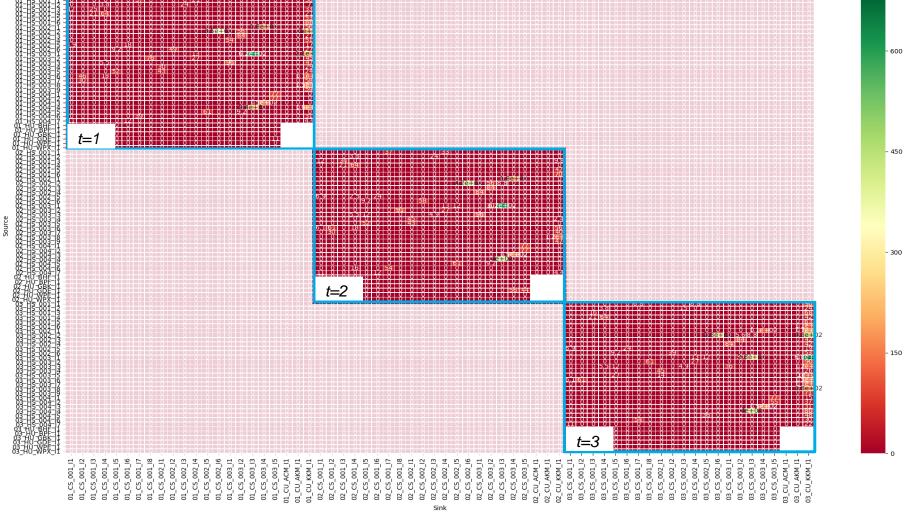






## Wärmetransportmatrix (Energetische Optimierung)

Optimaler Wärmetransport - MIN: ENERGY, Timesteps: all





## **Backup Vergleich der Ergebnisse**

		u,	Wahl der Gewichtungsfaktoren				
	Einheit	Ohne Nutzung von Abwärme	Energetisch <sup>1</sup>	Ökonomisch	Ökologisch		
Externer Energiebedarf	MWh/a	62.045,4	14.484,7	34.909,0	14.484,7		
Min. HU Wärmeleistung	kW	2.751,76	37,11	1.202,88	37,11		
Min. CU Kälteleistung	kW	4.331,05	1.616,40	2.782,17	1.616,40		
Max. Abwärmeleistung	kW	-	2.714,65	1548,88	2.714,65		
Gesamtkosten	T€/a	2.864,6	2.830,1	1.068,9	2.395,0		
CO <sub>2</sub> -Emission	t <sub>CO2</sub> /a	9.829,38	1.824,90	2.632,60	237,03		
Kosteneinsparung	%	-	1,21	62,68	16,39		
CO <sub>2</sub> -Einsparung	%	-	81,43	73,22	97,59		

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>HU: Erdgas-Dampfkessen; CU: Kompressionskältemaschine



## Berechnung der Gewichtungsfaktoren

	Rechnerische Nutzungsdauer¹	Aufwand für Instandsetzung¹	Aufwand für Wartung & Inspektion¹	Aufwand für Bedienen¹	Spezifischer Investitionsbetrag	Nutzungsgrad / Gütegrad/ Leistungszahl <sup>7</sup>	Förderfaktor <sup>2</sup>	Vorlauftemperatur
	Т	$\mathbf{f}_{Inst}$	f <sub>w+lnsp</sub>	t <sub>Aufwand</sub>	$a_0(\dot{Q})$	$\eta_{th}$ / $G_{WP}$ /EER	$f_{F\"{o}rderung}$	$T_{max}$
	[a]	[%]	[%]	[h/a]	[€/kW]	[%]	[-]	[°C]
Anlagen zur Wärmeerzeugung								
Gas-Brennwertkessel	20	1	2	20	$374,09 \cdot \dot{Q}^{-0,307}$	0,87	0,00	110
Holzpellet-Festbettfeuerung	15	3	3	15	1513,7 $\cdot \dot{Q}^{-0,430}$	0,86	0,45 / 0,55	500
Hackschnitzel-Festbettfeuerung	15	3	3	20	777,03 · $\dot{Q}^{-0,295}$	0,76	0,45 / 0,55	500
Gas-Flammrohr-Dampfkessel 10 bar	25	2	1,5	80	$203,46 \cdot Q^{-0,248}$	0,95	0,00	250 <sup>4</sup>
Wärmepumpe Wasser/Wasser	20	1	1,5	5	$2610,2 \cdot \dot{Q}^{-0,558}$	$0,45^{3}$	0,45 / 0,55	120
Solarthermie Flachkollektor	20	0,5	1	5	$2450,4 \cdot \dot{Q}^{-0,134}$	-	0,45 / 0,55	80
Solarthermie Vakuum-Röhrenkollektor	18	0,5	1	5	$3097,3 \cdot \dot{Q}^{-0,121}$	-	0,45 / 0,55	120
Anlagen zur Kälteerzeugung								
Kompressionskälteanlage (Turbo)	15	2	1,5	1	$4991,34 \cdot \dot{Q}^{-0,68} + 179,63$	$0,45^{3}$	0,00	6
LiBr Absorptionskälteanlage	18	1,5	1,5	0	$14740,21 \cdot \dot{Q}^{-0,685} + 3,29$	33,35	0,50	6
Luftkühler (Trocken, Horizontale Bauweise)	20	2	1,5	0	$37,419 \cdot \dot{Q} + 312,93$	22,76	0,00	35

<sup>1</sup> VDI 2067





<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Förderung in Deutschland nach Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft- Modul 2: Förderung 45% für nicht KMU + 10% für KMU; für ausgewählte Kälteanlagen nach der BAFA Kälte-Klima-Richtlinie bis maximal 50%

 $<sup>^3</sup>$  Berechnung der realen Leistungszahl:  $\varepsilon_{real} = G_{WP} \cdot \frac{T_2}{T_1 - T_2} \min \left( T_1 - Verfl "ussiger, T_2 - Verdampfer" \right)$ 

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Bei überhitztem Dampf kann die Sattdampftemperatur bis zu 100 K überschritten werden [37]

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Bei Absorptionskälteanlagen wird üblicherweise der COP zur Beurteilung der Effizienz eingesetzt. Dieser setzt die Nutzkälte ins Verhältnis zur benötigten Antriebswärme. Die benötigte elektrische Energie für Pumpen und weitere Komponenten ist vergleichsweise gering. Nach [44] kann  $\dot{Q}_{Kalte,Nutz}/P_{et} = 27kW/0,6kW = 33,3$  bestimmt werden. [44]

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Zur Bereitstellung der Nennkälteleistung werden im Durchschnitt 4,4% der Nennkälteleistung zum Betrieb der Ventilatoren und der Solepumpe benötigt. [43]

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Bei den Kälteanlagen wird die bereitgestellte Kälteleistung ins Verhältnis zur aufgebrachten elektrischen Leistung gesetzt  $EER = Q_{th}/P_{el}$ .

## Probe der Identifizierung des globalen Optimums Solver-Vergleich

Fallstudie	Dimensionen der			Minimaler Utility	Mittlere
	Transportmatrix			Einsatz [kW]	Rechenzeit [s]
1	7 x 5	Pinch-Analyse		1.000	-
		Lineare	CBC	1.000	0,02434
$\Delta T_{\text{min}} = 10 \text{K}$		Optimierung	CPLEX	1.000	0,01721
		(LP)	GUROBI	1.000	0,02709
		Pinch-Analyse		15.425	-
2	58 x 64	Lineare	CBC	15.425	1,68908
$\Delta T_{\text{min}} = 10 \text{K}$	36 X 04	Optimierung	CPLEX	*	*
		(LP)	GUROBI	15.425	1,93403
		Pinch-Analyse		10.050	-
$3 \\ \Delta T_{\min} = 5 K$	209 227	Lineare	CBC	10.050	733,442
	308 x 227	Optimierung	CPLEX	*	*
		(LP)	GUROBI	10.050	740,096

<sup>\*</sup> Berechnung nur bis maximal 6 HS und 6 CS möglich

