Hochschule Niederrhein

University of Applied Sciences

SWK E²

Institut für Energietechnik und Energiemanagement

Institute of Energy Technology and Energy Management

Doktoranden-Tagung
„Innovative Energiesysteme und Energieeffizienz“

Industrielle Abwärmenutzung durch Wärmeintegration

Düsseldorf, 02. Dezember 2019

Simon Möhren, SWK E² Hochschule Niederrhein

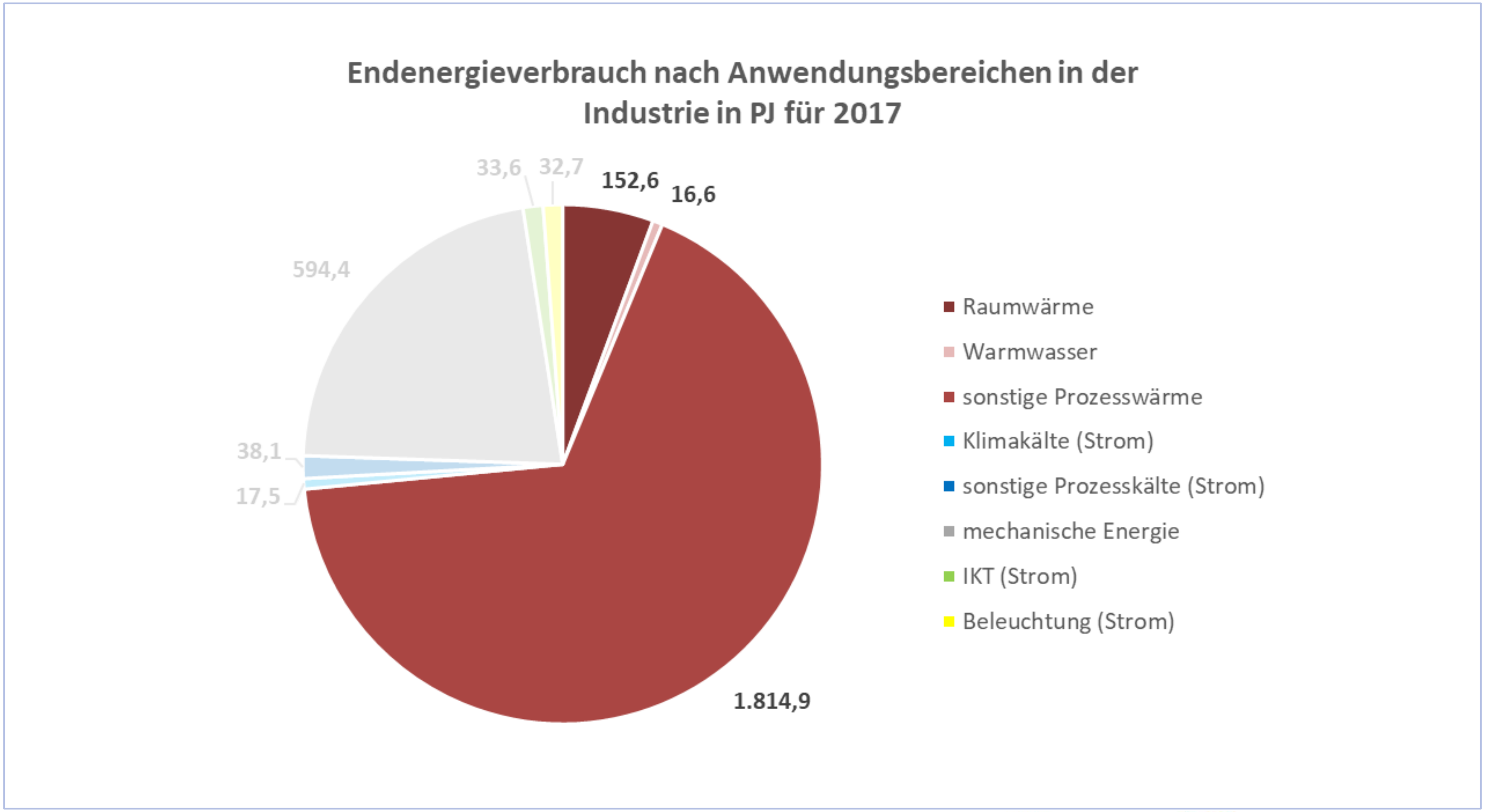
Inhalt

Inhalt

1. Ausgangslage

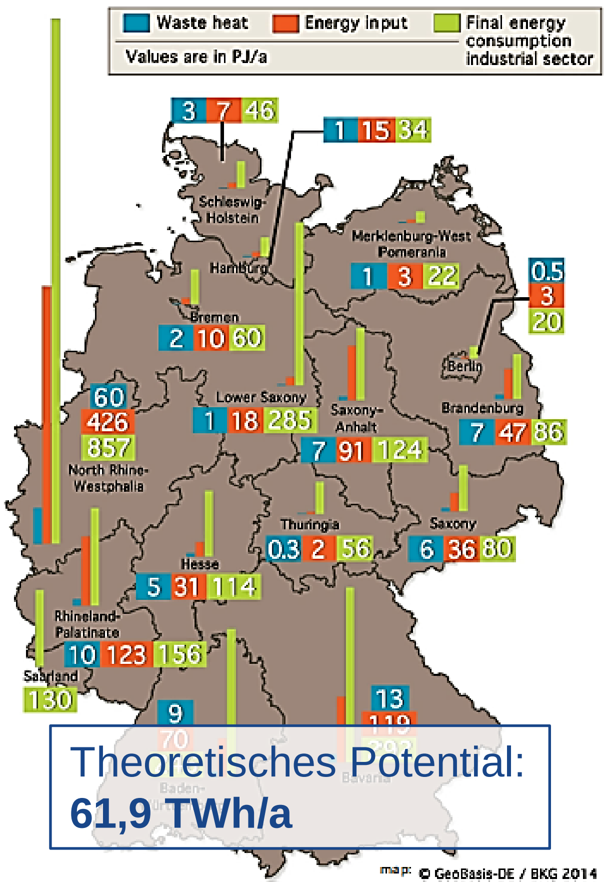
Endenergieverbrauch nach Anwendungsbereichen in der Industrie in PJ

Quelle: BMWi Energiedaten, Stand Jan 2019



Inhalt

2. Stand der Forschung
Theoretisches Abwärmepotential (Bottom-up)

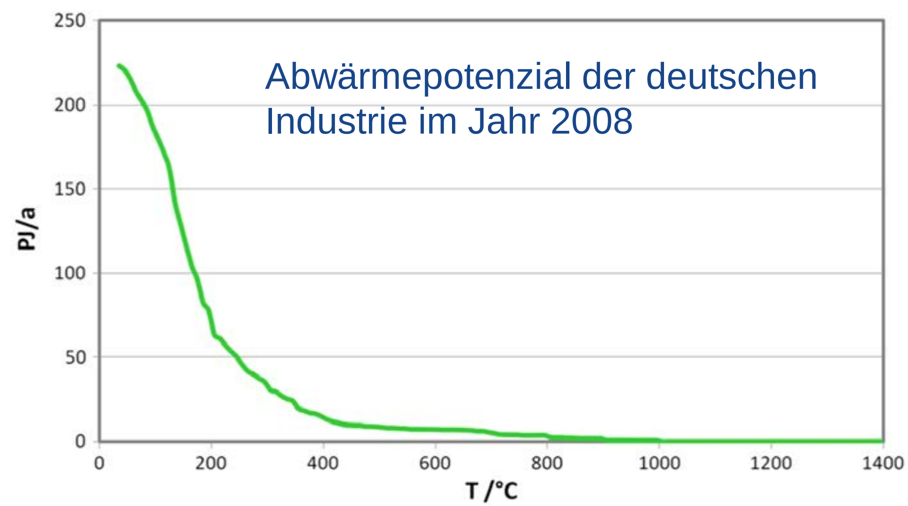


Theoretisches Potential:
61,9 TWh/a

Theoretisches Potential

Technisch nutzbares Potential

Wirtschaftlich nutzbares Potential



Quelle: Brueckner et al. 2017

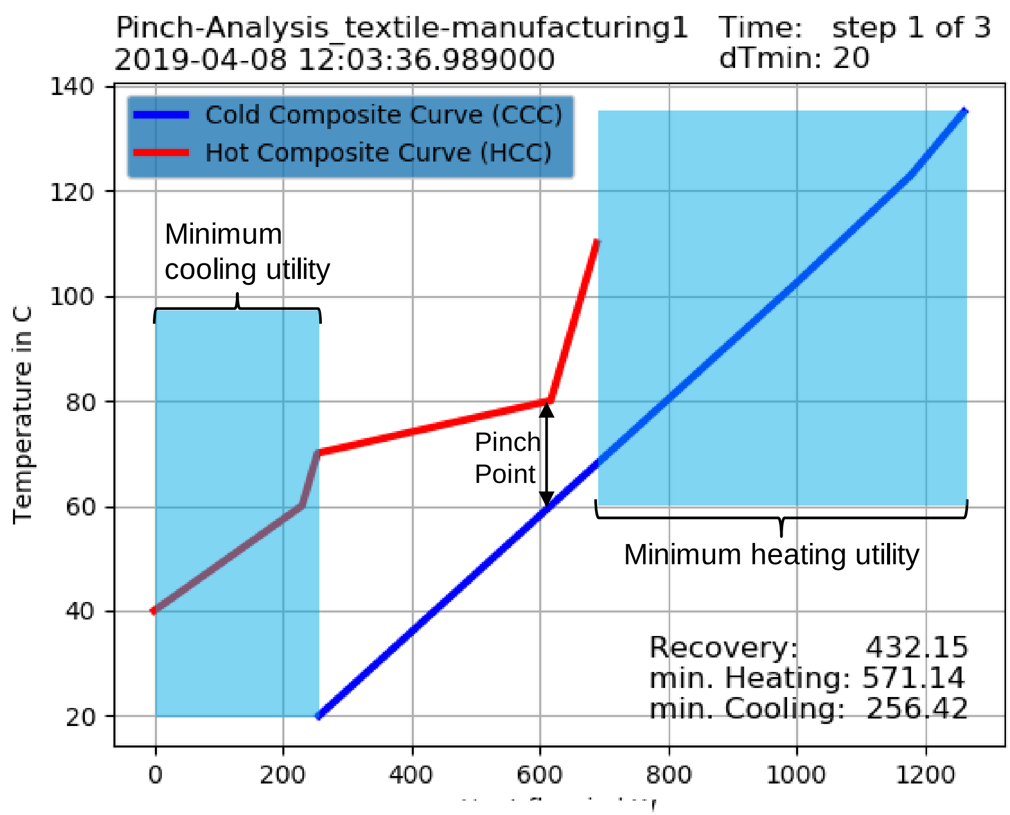
Hochschule Niederrhein
University of Applied Sciences

2. Stand der Forschung
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 ΔT_{min}



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

Nach *Linnhoff & Flower (1978)*
Klemes et al. 2011;
Klemes et al. 2018

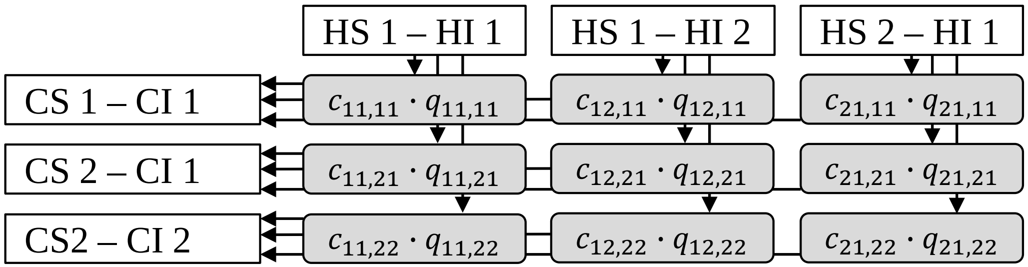
2. Stand der Forschung
Lineares Wärmetransportproblem (LP)

Problem:

- Wärme soll mit möglichst geringen Kosten von der Wärmequelle ***j*** in den Temperaturintervallen ***l*** 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 $c_{ik,jl}$ transportiert werden.

Zielfunktion:

$$\underset{q_{ik,jl}}{\mathrm{Min}} \sum_{i=1}^{CS} \sum_{k=1}^{CI} \sum_{j=1}^{HS} \sum_{l=1}^{HI} c_{ik,jl} \cdot q_{ik,jl}$$



Randbedingungen:

- Nichtnegativitätsbedingung: $q_{ij} \geq 0 \; f\ddot{u}r \; alle \; i, j, k, l$
- Wärme der Quellen: $\sum_{j=1}^{n} q_{ij} \leq a_i \; (i = 1, \dots, m)$
- Wärme der Senken: $\sum_{i=1}^{m} q_{ij} \leq b_j \; (j = 1, \dots, n)$

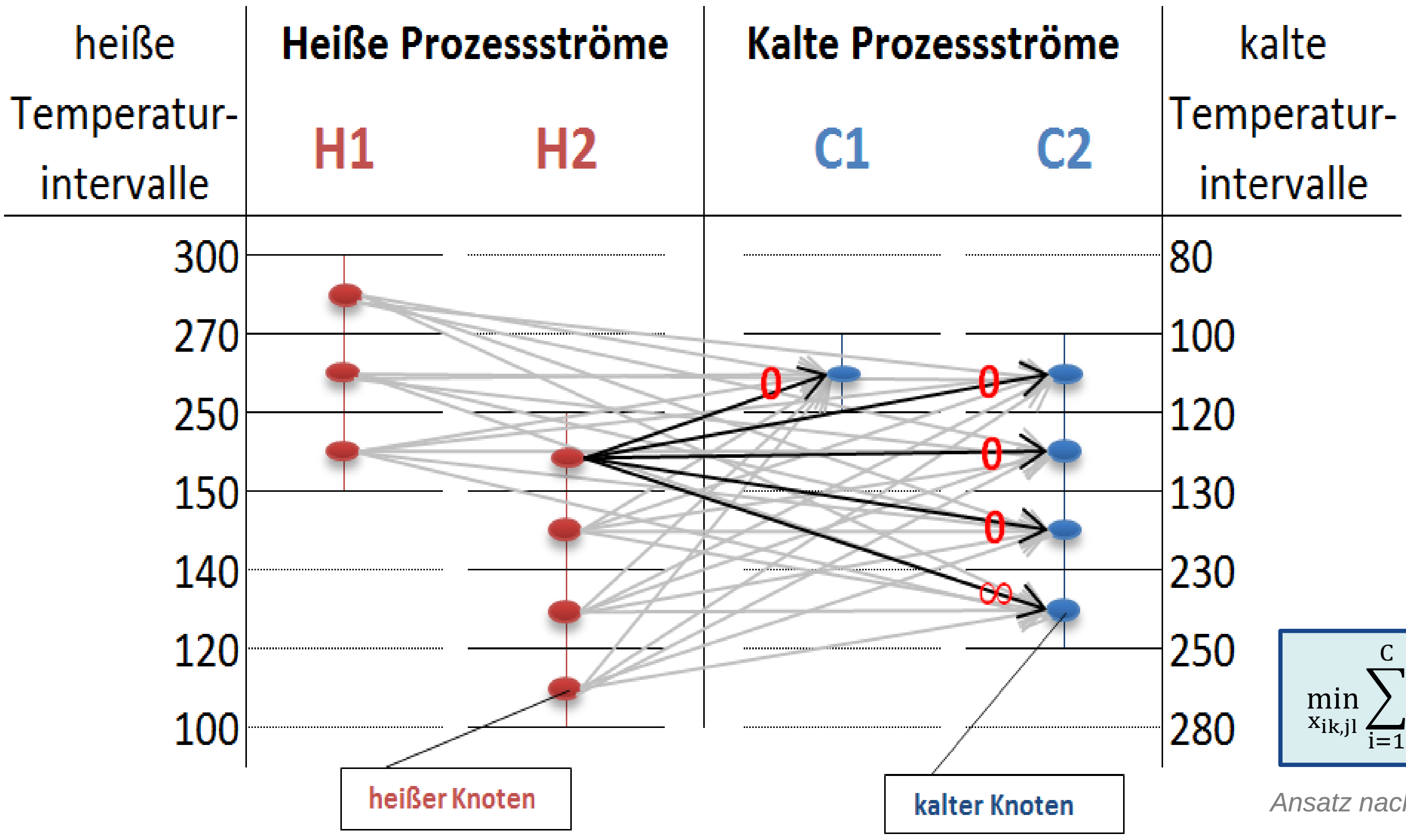
Ausgeschrieben:

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

Ansatz nach Cerda et al. (1983)

2. Stand der Forschung

Verknüpfung und Gewichtung aller Knoten in der Zielfunktion



$$\min_{x_{ik,jl}} \sum_{i=1}^{C} \sum_{k=1}^{L} \sum_{j=1}^{H} \sum_{l=1}^{L} c_{ik,jl} q_{ik,jl}$$

Ansatz nach Linnhoff & Flower (1978)
Und Cerda et al. (1983)

2. Stand der Forschung
Gewichtungsmatrix

$$\min_{x_{ik,jl}} \sum_{i=1}^{C} \sum_{k=1}^{L} \sum_{j=1}^{H} \sum_{l=1}^{L} c_{ik,jl} q_{ik,jl}$$

	Kalt	C1.1	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	CU
Heiß	Temp.	100 – 120	100 – 120	120 – 130	130 – 230	230 - 250	
H1.1	300 – 270	0	0	0	0	0	1
H1.2	270 – 250	0	0	0	0	0	1
H1.3	250 – 150	0	0	0	0	∞	1
H2.4	120 – 100	∞	∞	∞	∞	∞	1
HU		1	1	1	1	1	0

Energetische Optimierung:
- WÜ zwischen Strömen
  - Zulässig → 0
  - Nicht zulässig → ∞
- Einsatz der Utility → 1
- Zwischen Utilities → 0

Ökonomische Optimierung:
→ Einführen von Kostenfaktoren

Ökologische Optimierung:
→ Einführen von Emissionsfaktoren

Ansatz nach Cerda et al. (1983)

Inhalt

4. Fragestellung, Methode und Ergebnisse
I. Globale Optimierung

Fragestellung:

1. Kann anhand der Methode nach Cerda et al., (1983) das globale Minimum oder nur ein lokales Minimum bestimmt werden?
2. Welcher Solver liefert die besten Ergebnisse mit der besten Performance?

Vorgehen:

1. Bestimmen der optimalen Lösung mit der graphischen Pinch-Analyse.
2. Errechnen der optimalen Lösung mit dem Wärmetransportalgorithmus nach Cerda et al., (1983) und Vergleich der Lösungen.
3. Lösen des gleichen Problems mit unterschiedlichen Solvern und Vergleich der Performance.

4. Methode und Ergebnisse
I. Globale Optimierung
Graphische Lösung mit der Pinch-Analyse

Daten der Fallstudie 1 ($\Delta T_{min} = 10K$):

Strom	$T_{ein}\ [°C]$	$T_{aus}\ [°C]$	$\dot{m}c_p\ [kW/K]$	$k\ [kW/°C \cdot m^2]$
HS1	270	160	18	1
HS2	220	60	22	1
CS1	50	210	20	1
CS2	160	210	50	1
HU	250	250		1
CU	15	20		1

Ergebnis (optimale Lösung):

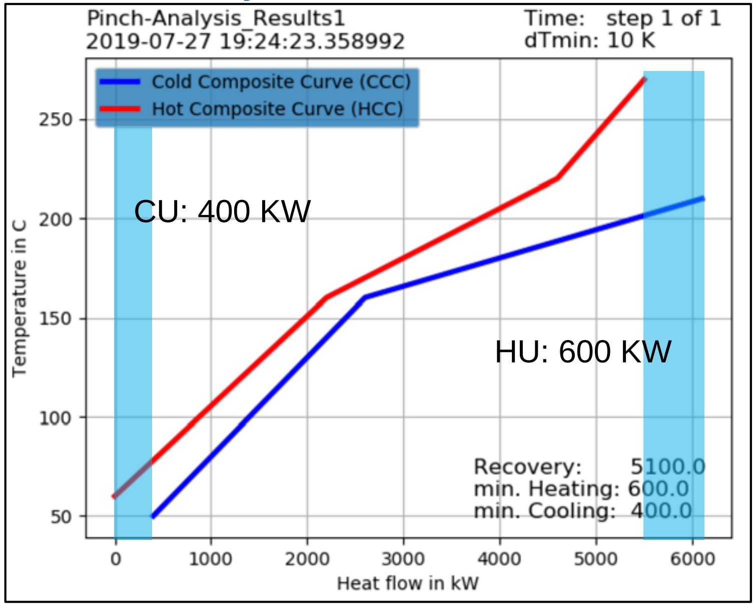
Minimale Wärmeleistung: 600 kW

Minimale Kälteleistung: 400 kW

Min. Utility gesamt: **1.000 kW**

Max. Abwärmenutzung: 5.400 kW

Pinch-Analyse:

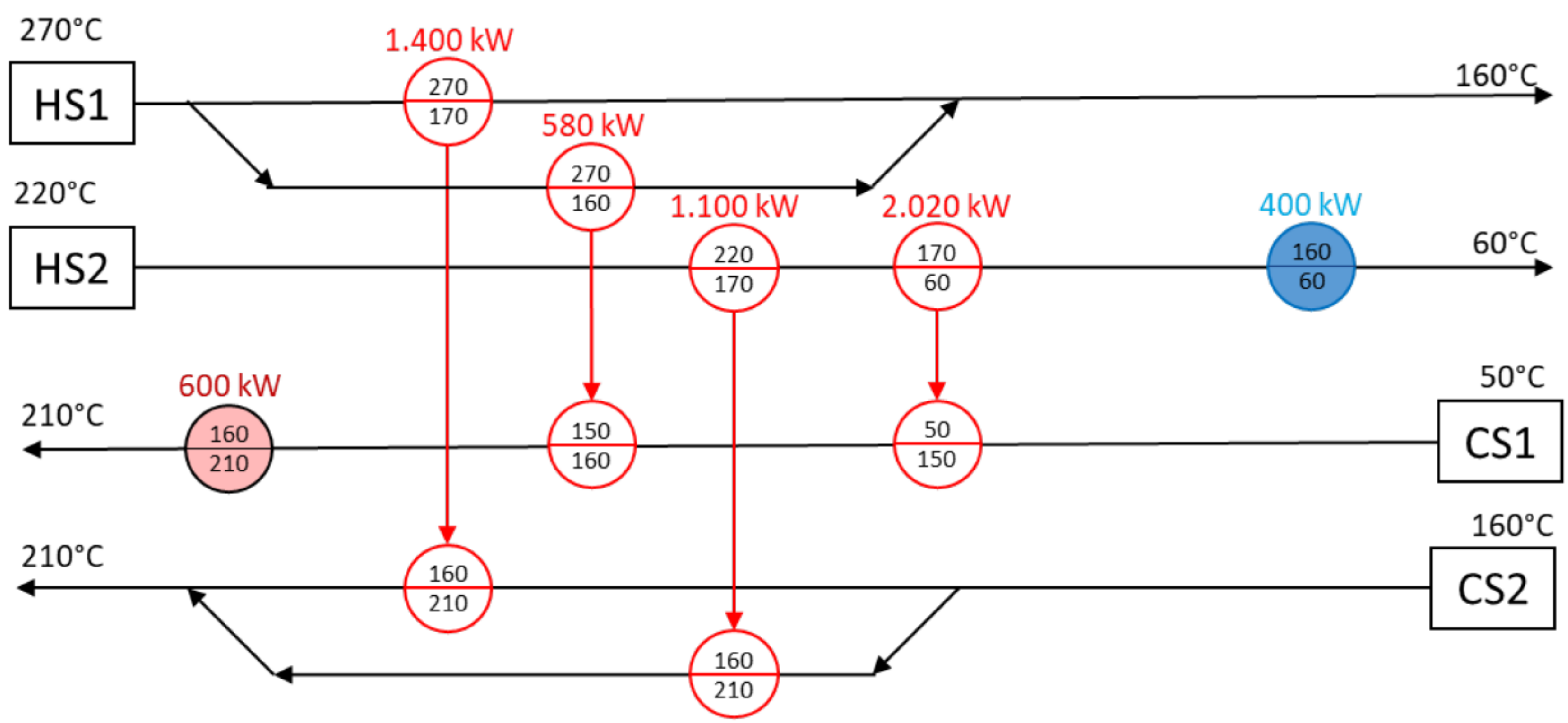


4. Methode und Ergebnisse
I. Globale Optimierung
Mathematische Lösung

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

* Berechnung nur bis maximal 6 HS und 6 CS möglich

4. Methode und Ergebnisse
I. Globale Optimierung
Optimales Wärmeübertrager-Netzwerk (HEN)



4. Methode und Ergebnisse
II. Mehrperiodische Probleme

Fragestellung:

1. Wie kann die Methode auf mehrperiodische Probleme angewendet werden?
2. Kann auch für mehrperiodische Probleme weiterhin das globale Optimum ermittelt werden?

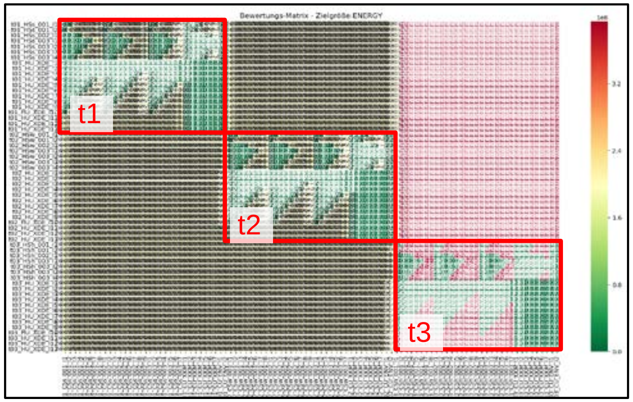
Vorgehen:

1. Anpassung der Zielfunktion und Randbedingungen für mehrperiodische Probleme.
2. Erproben an Mehrperiodischen Problemen.

4. Methode und Ergebnisse
II. Mehrperiodische Probleme
Anpassen der Zielfunktion

Zielfunktion:

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

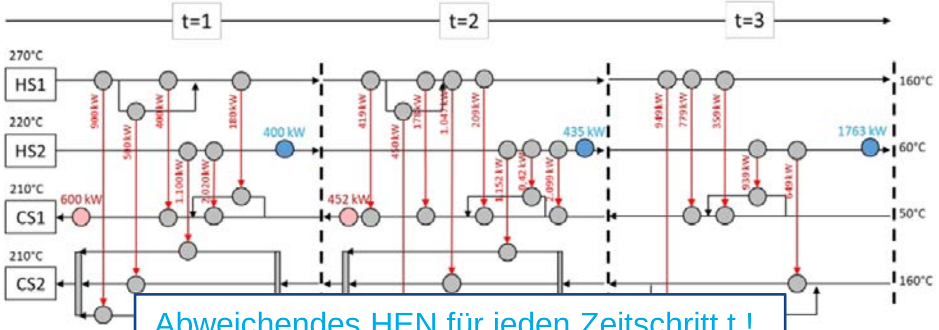


Randbedingungen:

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

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

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

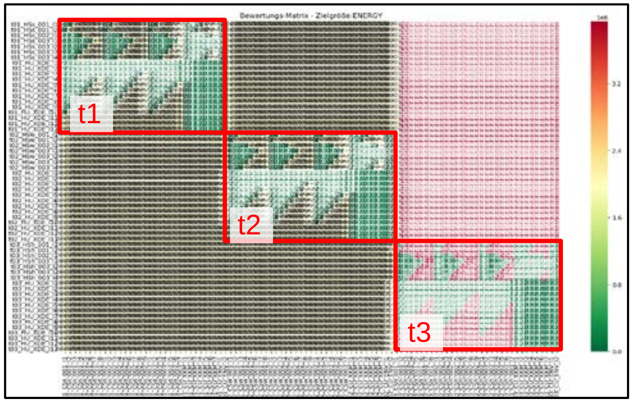


Abweichendes HEN für jeden Zeitschritt t !

4. Methode und Ergebnisse
II. Mehrperiodische Probleme
Anpassen der Randbedingungen

Zielfunktion:

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



Randbedingungen:

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

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

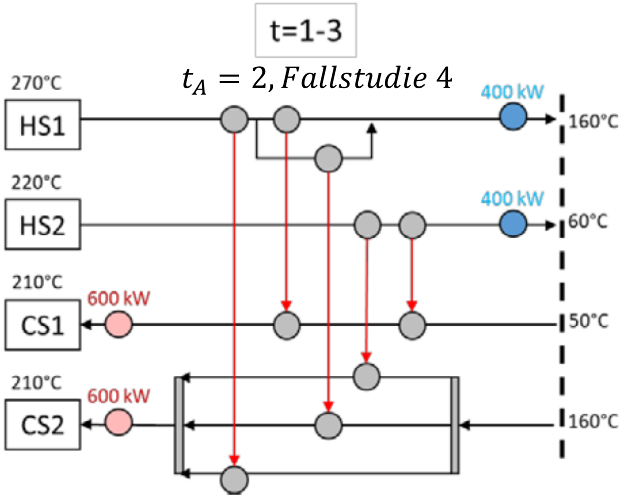
Wärme der Senken: $\sum_{i=1}^{m} q_{ij} \leq b_j \; (j = 1, \dots, n)$

Kein Wärmetransport zwischen Zeitschritten:

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

Übertragen des HEN von einem Auslegungszeitpunkt t_A:

$\dot{Q}_{tik,tjl} \leq \dot{Q}_{t_A ik, t_A jl} \cdot f_{Teillast} \qquad mit \; z.B. \, f_{Teillast} = 1$



4. Methode und Ergebnisse
II. Mehrperiodische Probleme

Prozess Daten (t)
Utility Daten

ΔT_{min}

Simultaneous Synthesis

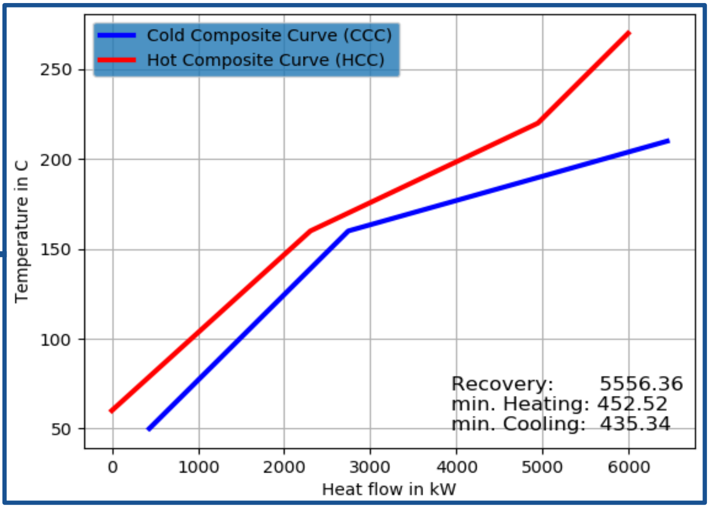
Intervallzerlegung

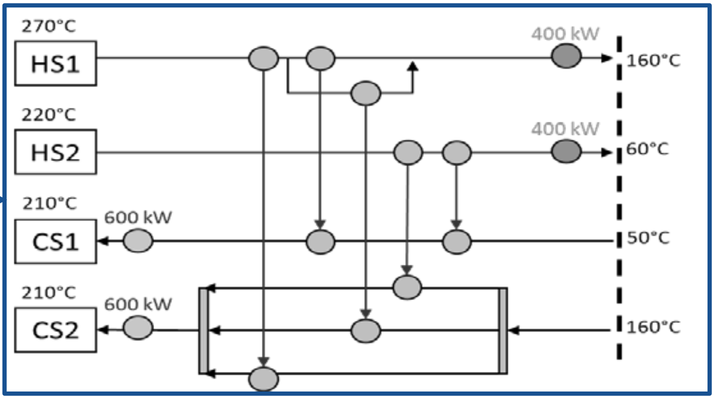
Erstellen der Kostenmatrix C

Pinch-Analyse für jeden Zeitschritt
→ Bester Auslegungszeitpunkt t_A

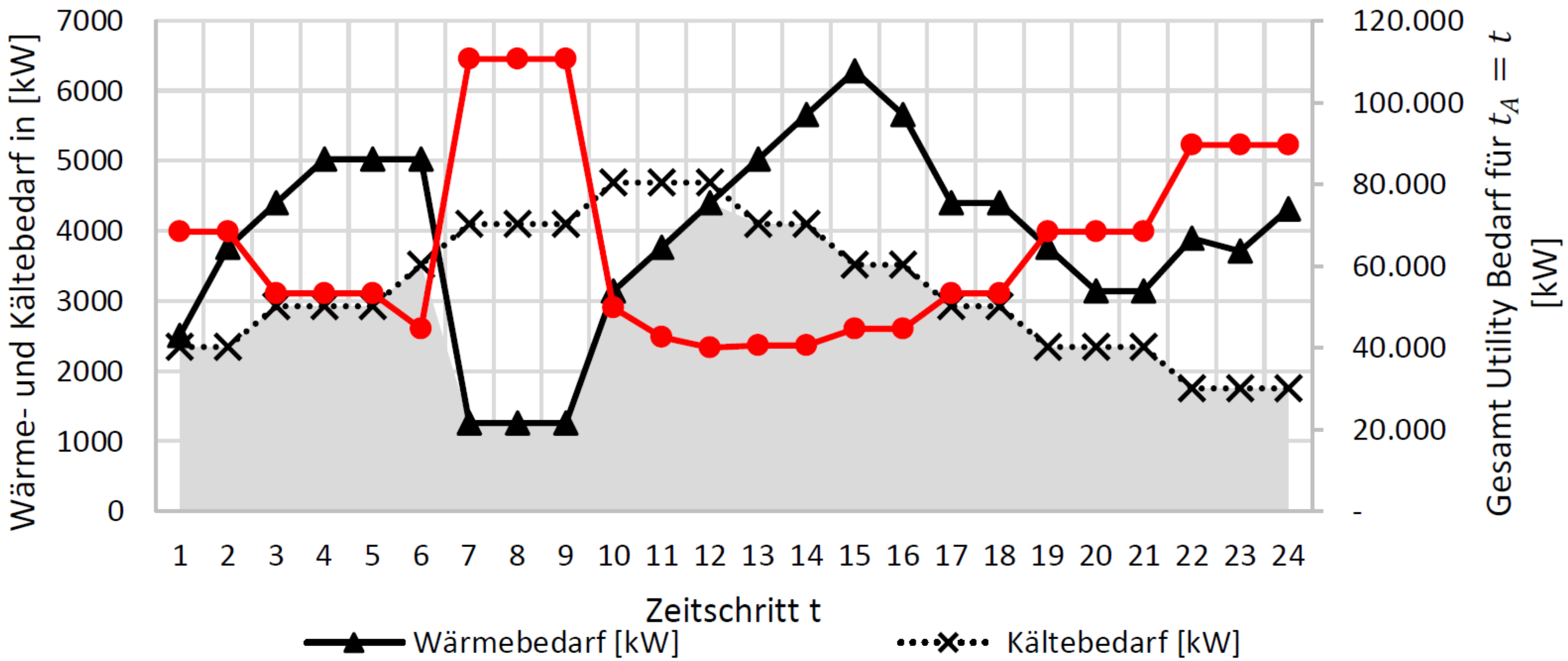
Lösen des mehrperiodischen LP Problems

Wärmeübertrager Netzwerk (HEN)





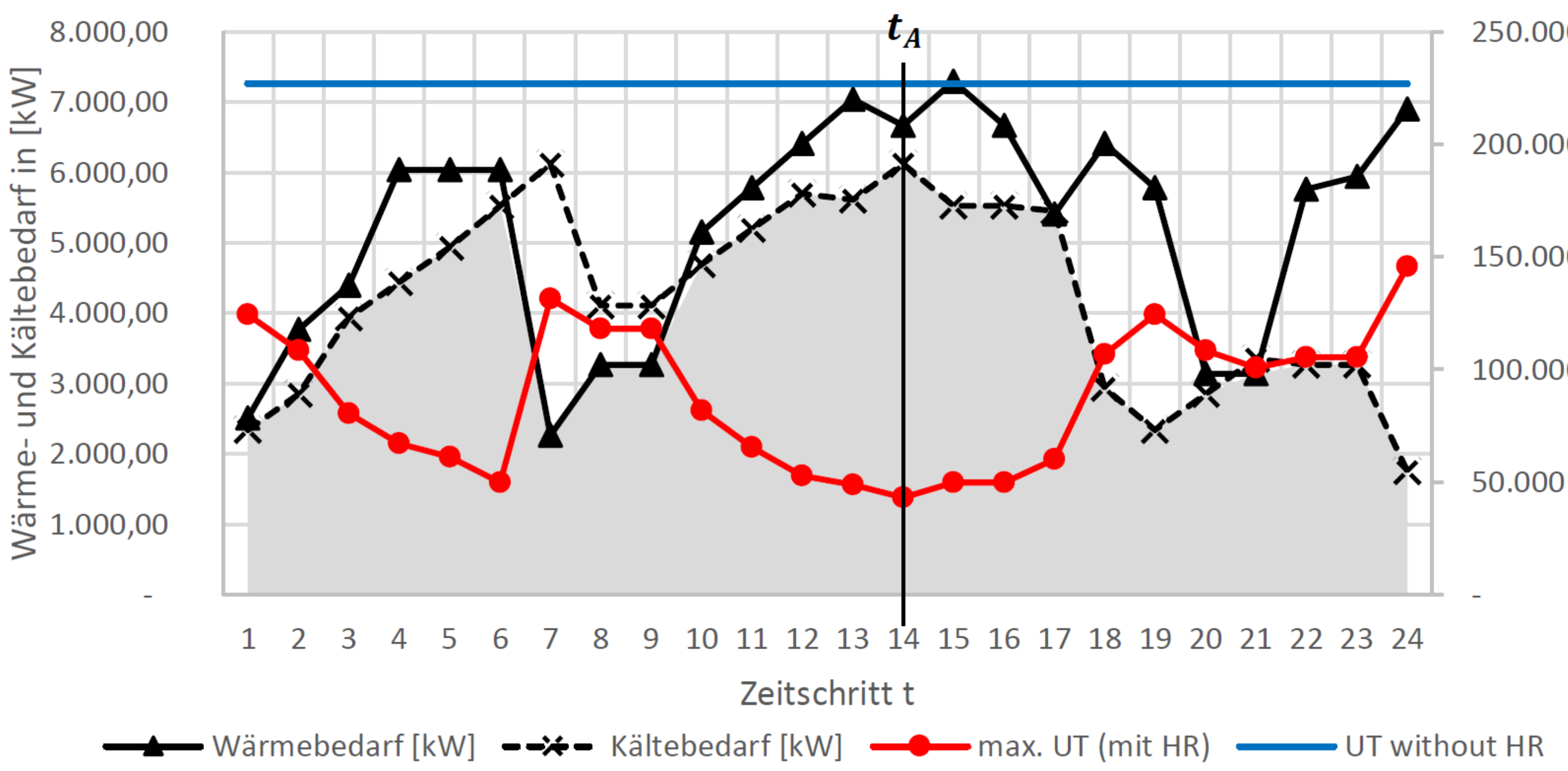
4. Methode und Ergebnisse
II. Mehrperiodische Probleme
Bestimmen des besten Auslegungszeitpunktes



4. Methode und Ergebnisse

II. Mehrperiodische Probleme

Bestimmen des besten Auslegungszeitpunktes



Inhalt

5. Zusammenfassung

- **Optimum:** Mit dem mathematischen Ansatz nach Cerda et al.(1982) kann das globale Optimum für LP Wärmetransportprobleme bestimmt werden.
- **Solver:** Für kleine Probleme besitzt der CPLEX Solver (IBM) und für größere Probleme der CBC Solver die beste Performance. Alle drei getesteten Solver lösen das LP Problem optimal.
- **Mehrperiodische Probleme:** Durch Kombination der Pinch-Analyse mit dem Wärmetransportalgorithmus können „gute“ Lösungen für mehrperiodische Probleme berechnet werden. Auch komplexe Probleme sind mit der Methodik lösbar.
  - In der Regel wird eine „gute“ aber nicht die „optimale“ Lösung bestimmt.
  - Variation der Temperaturen durch einfügen zusätzlicher Ströme und Variation der Massenströme.

Inhalt

6. Ausblick

- Einfügen von **Speicher** in mehrperiodische Probleme.
- **Ökologische** und **Ökonomische** Optimierung:
  - Kosten- und CO_2-Funktionen für HU und CU
  - Kosten- und CO_2-Funktionen für Technologien zur Nutzung von Abwärme (WÜ, ORC, Kalina, WP, TEG, AKM)
- Anwendung auf **Fallstudien** und **Praxisbeispiele** in der **Ernährungsindustrie**
- Weiterentwicklung der **GUI** und der Ausgabemöglichkeiten

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!
Kontakt

SWK E²
Institut für Energietechnik und Energiemanagement
Obergath 79 (Gebäude J)
47805 Krefeld

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

Hochschule Niederrhein
University of Applied Sciences

SWK E²

Institut für Energietechnik und Energiemanagement
Institute of Energy Technology and Energy Management

Backup
Umsetzung im Python-Tool

1 Dateneingabe
Excel python

Prozessdaten:
- Quellen
- Senken

Standortdaten:
- Längen-/Breitengrad
- Höhe

Randbedingungen:
- Technisch
- Wirtschaftlich

Technologiedatenbank:
- Abwärmenutzung
- Wärmeerzeugung

Stoffdatenbank:
- VDI-Wärmeatlas

2 Zielfunktion und Randbedingungen
python

Für Zeitschritt t = 0 bis t = T mit Dauer $\tau_t [h]$

Intervallzerlegung:
- Temperaturlisten
- Stromzerlegung

Transportmatrix aufstellen:
- Wärmeströme
- Gewichtungsfaktoren

Bestimmen des besten Auslegungszeitpunkts:

t_A

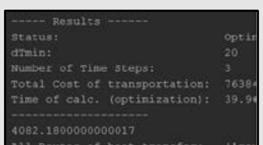
Zielfunktion:

$$\min_{x_{tik,tjl}} \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{C}\sum_{k=1}^{L}\sum_{j=1}^{H}\sum_{l=1}^{L} c_{tik,tjl}\cdot q_{tik,tjl}\cdot \tau_t$$

Randbedingungen

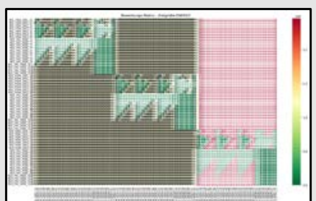
3 Lösen der Zielfunktion unter Berücksichtigung der Randbedingungen
python

4 Datenausgabe
Excel python



Daten Export

Pinch-Analyse



Gewichtungs-Matrix

Wärmetransport-Matrix

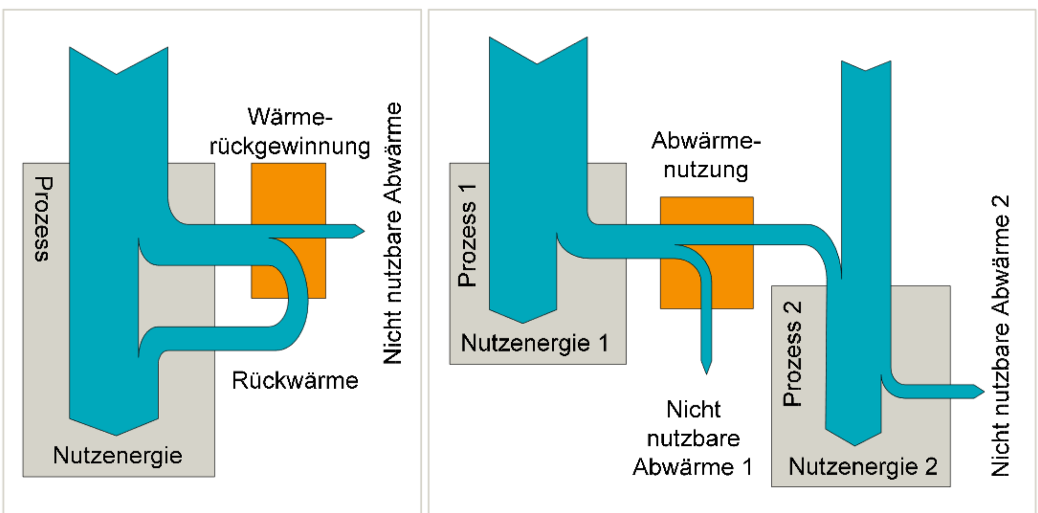
Wärmetransport-Netzwerk

TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERGAKADEMIE FREIBERG
SWK
Hochschule Niederrhein
University of Applied Sciences

Backup
Begriffsdefinition Abwärme

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

Abgrenzung Wärmerückgewinnung / Abwärmenutzung:

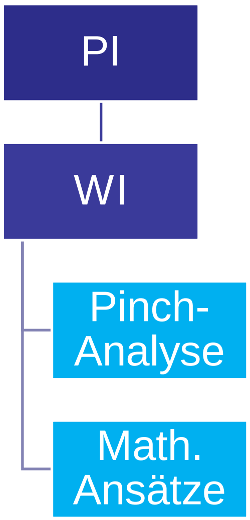


Quelle: Hirzel et al. 2013

Nutzung von Abwärme

Backup
Begriffsdefinitionen

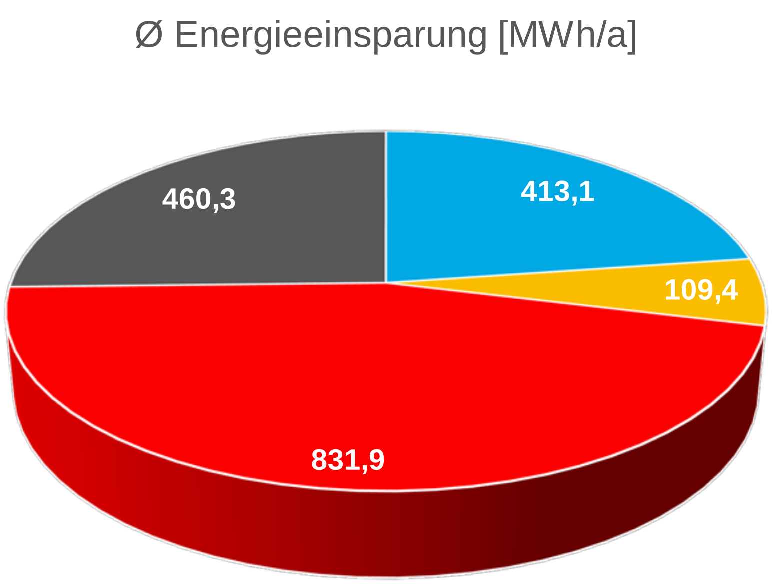
- **Prozessintegration (PI):** Methoden der ganzheitlichen Prozessoptimierung. PI ist der Oberbegriff für systemorientierte, ganzheitliche Ansätze industrielle Prozesse und Anlagen in Bezug auf Kosten, Energieverbrauch oder Emissionen zu Optimieren.
- **Wärmeintegration (HI):** Eine Technik der PI, Entwickelt 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 PI.
- **Mathematische Ansätze:** Seit 1980 wurden diverse Ansätze zur math. Optimierung von Wärmeübertrager Netzwerken (HEN) entwickelt (LP, NLP, MILP, MINLP)

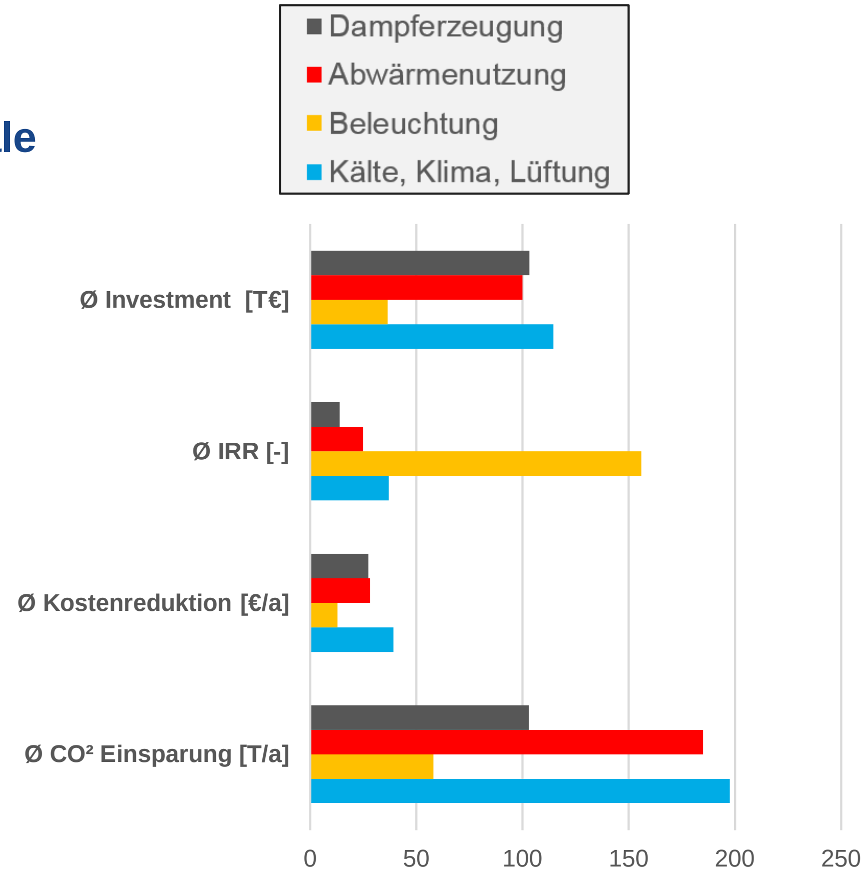


Quelle: Klemes et al. 2011; Klemes et al. 2018

Backup
Hohes Einsparpotential durch Abwärmenutzung

**Studie: 30 Effizienz-Netzwerke -
„What makes them work“ 2018
Auswertung der größten Einsparpotentiale**





Quelle: 30 Effizienz-Netzwerke – „What makes them work“ 2018

Hochschule Niederrhein
University of Applied Sciences