

CHILLVENTA eSPECIAL

Refrigeration | AC & Ventilation | Heat Pumps

13.–15.10.2020

CONNECTING
EXPERTS.



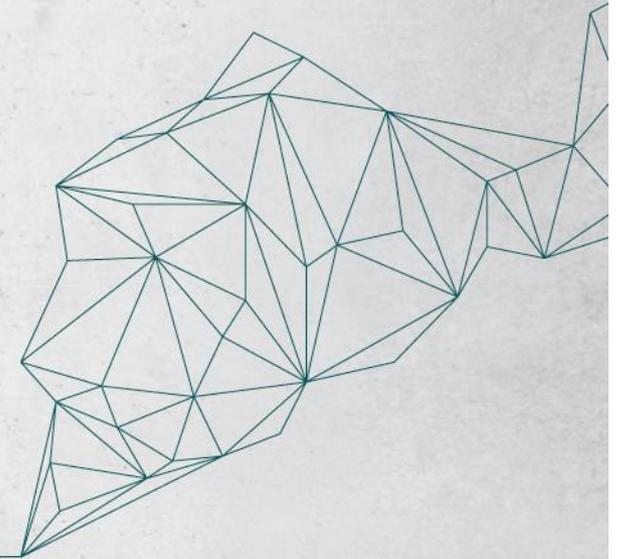
NÜRNBERG MESSE

Einsatz von Optimierungsmodellen zur kostenoptimalen Wärmepumpenintegration

Anton Beck
Austrian Institute of Technology GmbH



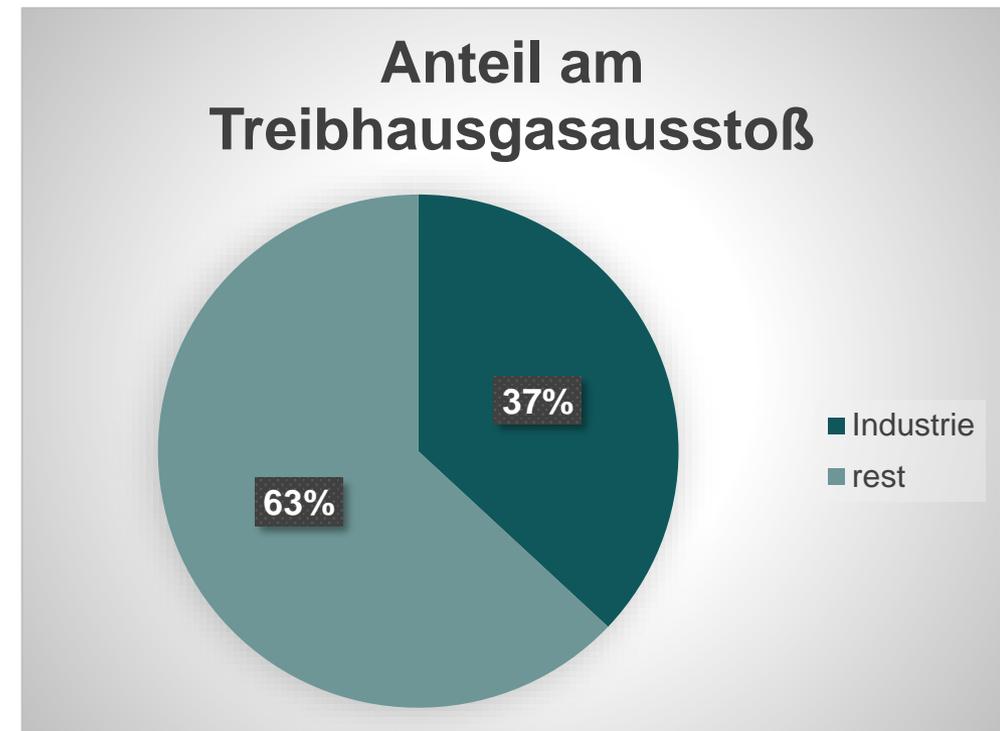
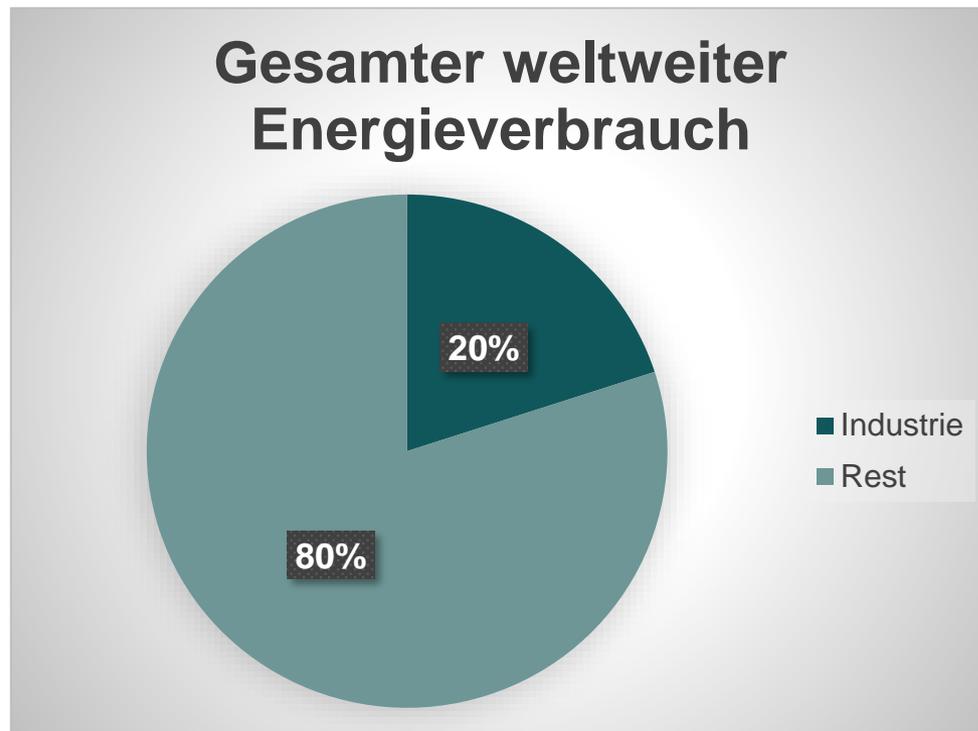
CONNECTING
EXPERTS.



Motivation

Industrieller Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen

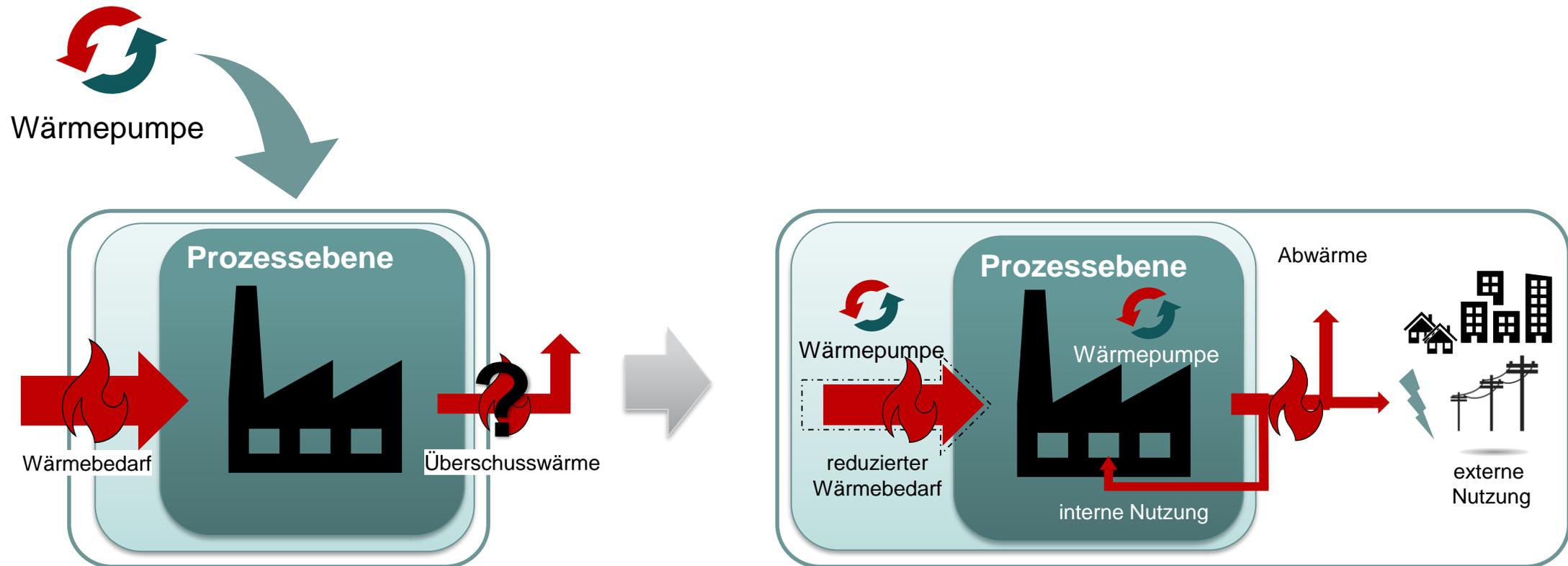
- Wichtiges Ziel der nächsten Jahre ist die Dekarbonisierung der Industrie
- Industrie ist verantwortlich für 20% oder mehr des gesamten Energieverbrauchs und für ca. 1/3 der gesamten Treibhausgasemissionen



Motivation

Wärmepumpen zur Wärmerückgewinnung und -versorgung

- **Wärmepumpen** sind **wesentliche Technologie** zur **Dekarbonisierung** der industriellen Prozesswärme
- **WPs können auf zwei unterschiedlichen** Ebenen im Industrieprozess eingesetzt werden
 - **Wärmerückgewinnung** – Gleichzeitiges Heizen/Kühlen bzw. Nutzung von nichtgenutzter Abwärme
 - **Wärmebereitstellung** mit externer Quelle (z.B. Geothermie, Außenluft,...)



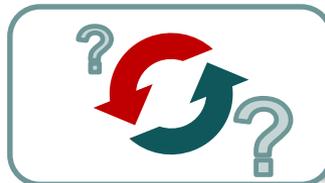
Motivation

Wo können Wärmepumpen kosteneffizient eingesetzt werden?

- Identifikation von Integrationsmöglichkeiten für Wärmepumpen
- Wirtschaftliche Betrachtungen (Amortisationszeit, Investitions- und Betriebskosten)
- Optimale Komponentenauslegung

Ziele:

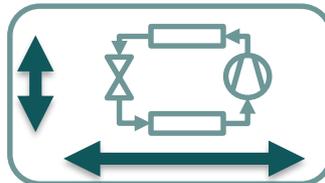
Vorantreiben der **Elektrifizierung** → **Dekarbonisierung**



Identifikation passender Quellen & Senken



Kostenoptimierte Integration und Betrieb



Optimierte Dimensionierung der Wärmepumpe

CONNECTING
REFRIGERATION
EXPERTS.

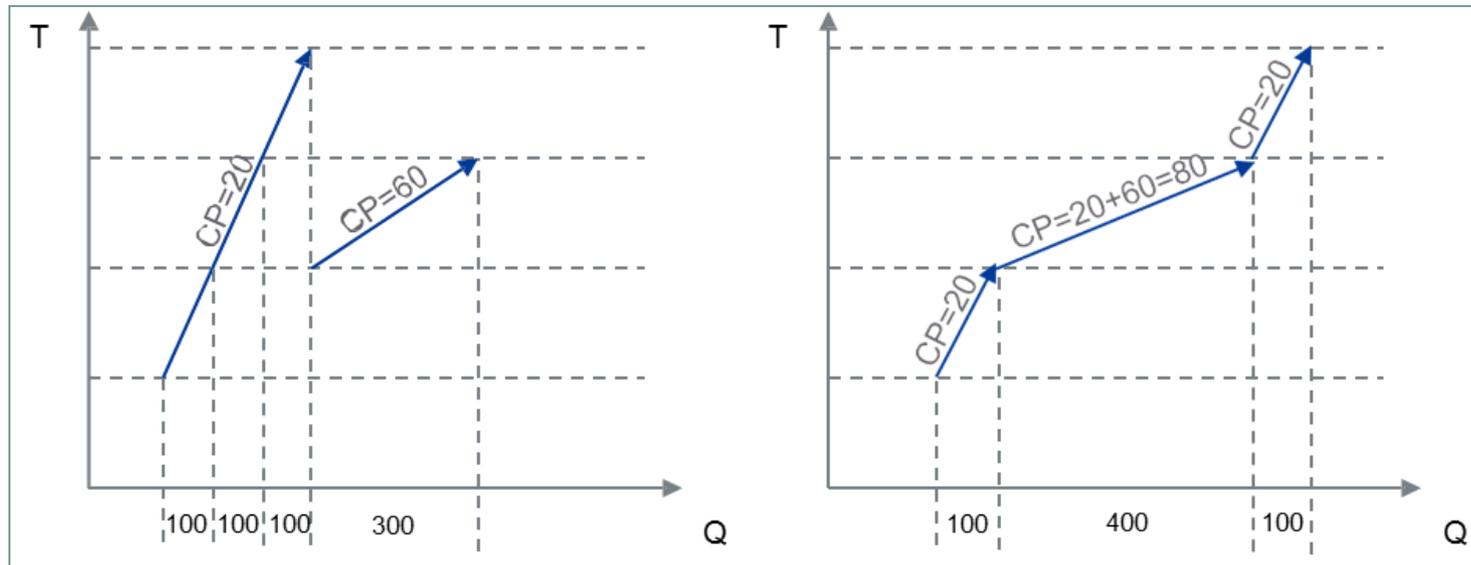


Pinch Analyse

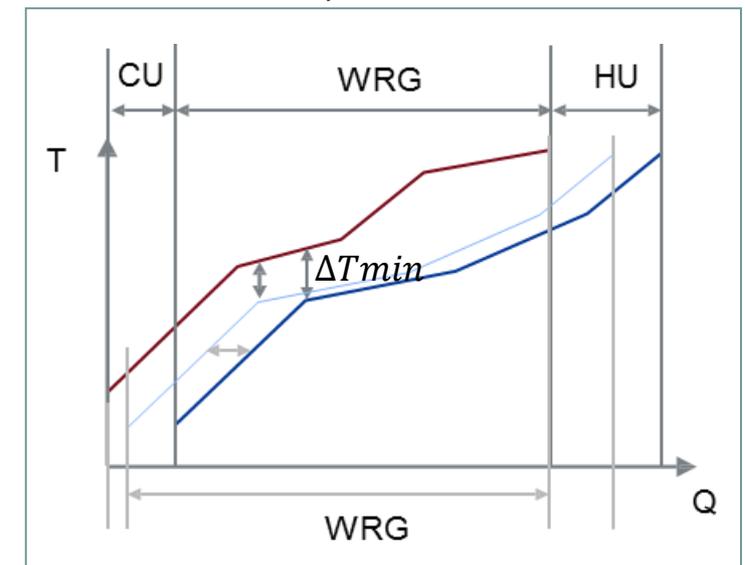
Grundlagen

- **Pinch Analyse** ist ein u.a. graphischer Ansatz zur **Identifikation von Wärmerückgewinnungspotentialen**
- Darstellung aller heißen und kalten Prozessströme in s.g. heiße und kalte **Composite Curves**

Erstellung der Composite Curves (Überlagerung aller kalten/heißen Prozessströme)



Heiße und kalte Composite Curves



CU/HU: Cold / Hot Utility bzw. Kühl- und Heizbedarf
WRG: Wärmerückgewinnung

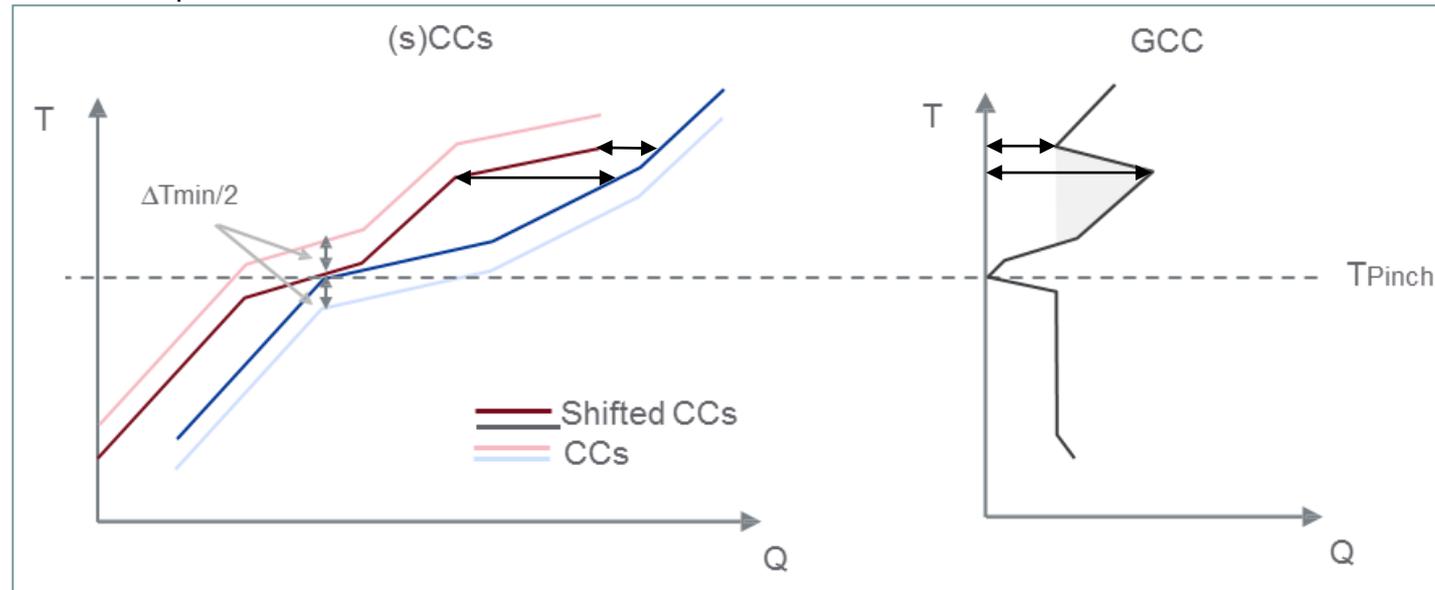
Pinch Analyse

Grundlagen und Wärmepumpenintegration

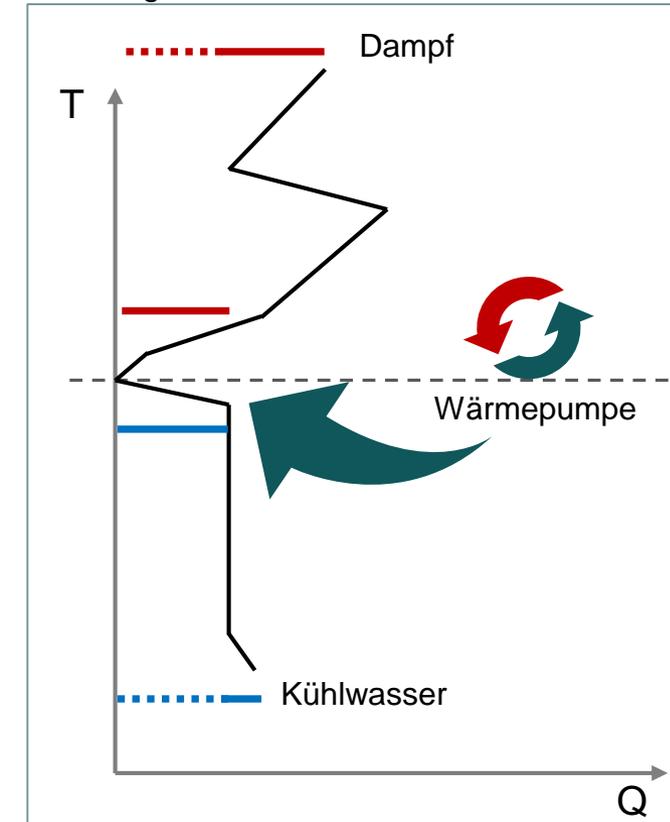
Aus CCs Ableitung von **Grand Composite Curve**

- Heiß-/Kühlbedarf oberhalb und unterhalb des Pinch Punktes
- Hilfe bei Auslegung eines **passenden Utility-System**

Grand Composite Curves



WP Integration mittels GCC



Oftmals nicht notwendig gesamte Kühl- bzw. Heizleistung am höchsten bzw. niedrigsten Temperaturniveau bereitzustellen!

Pinch Analyse

Zusammenfassung

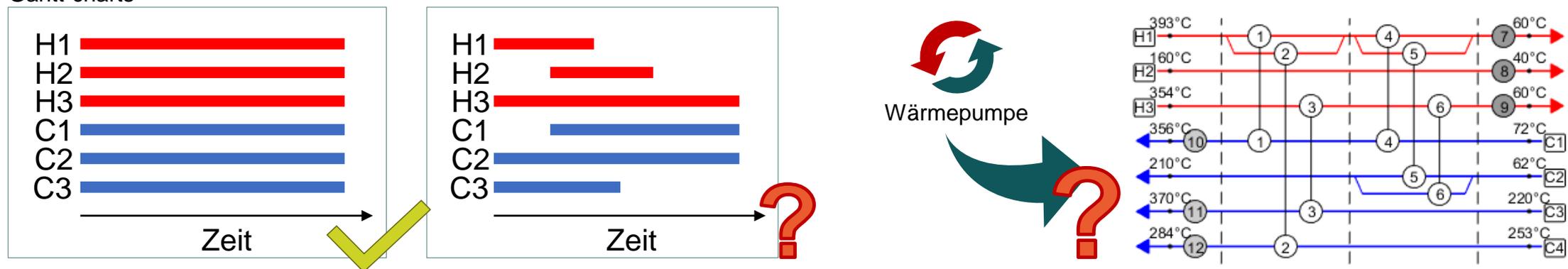
– Was geht?

- Bestimmung des **theoretischen Potentials** für Wärmerückgewinnung für vorgegebenes ΔT_{min}
- Ermitteln des **Wärmeübertragernetzwerk** mit „Pinch Design Method“
- **Manuelles** (usergeführtes) **Anpassen des Netzwerks**, um Kosten zu reduzieren

– Was geht nicht?

- Direkte Wärmepumpeneinbindung
- **Kostenoptimale Integration** (Trade-Off zwischen Investitionskosten und Betriebs-/Energiekosten)
- „Verbieten“ von bestimmten Quellen & Senken
- Direkte Berücksichtigung von **zeitlich variablen** Quellen & Senken / Energiepreisen / Umgebung (z.B. Außentemperatur)
- Direkte Berücksichtigung des Status-Quo (bereits installierte WRG)

Gantt-charts



→ Möglich mittels **Mathematical Programming Modellen**

Wärmepumpenintegration mittels Mathematical Programming

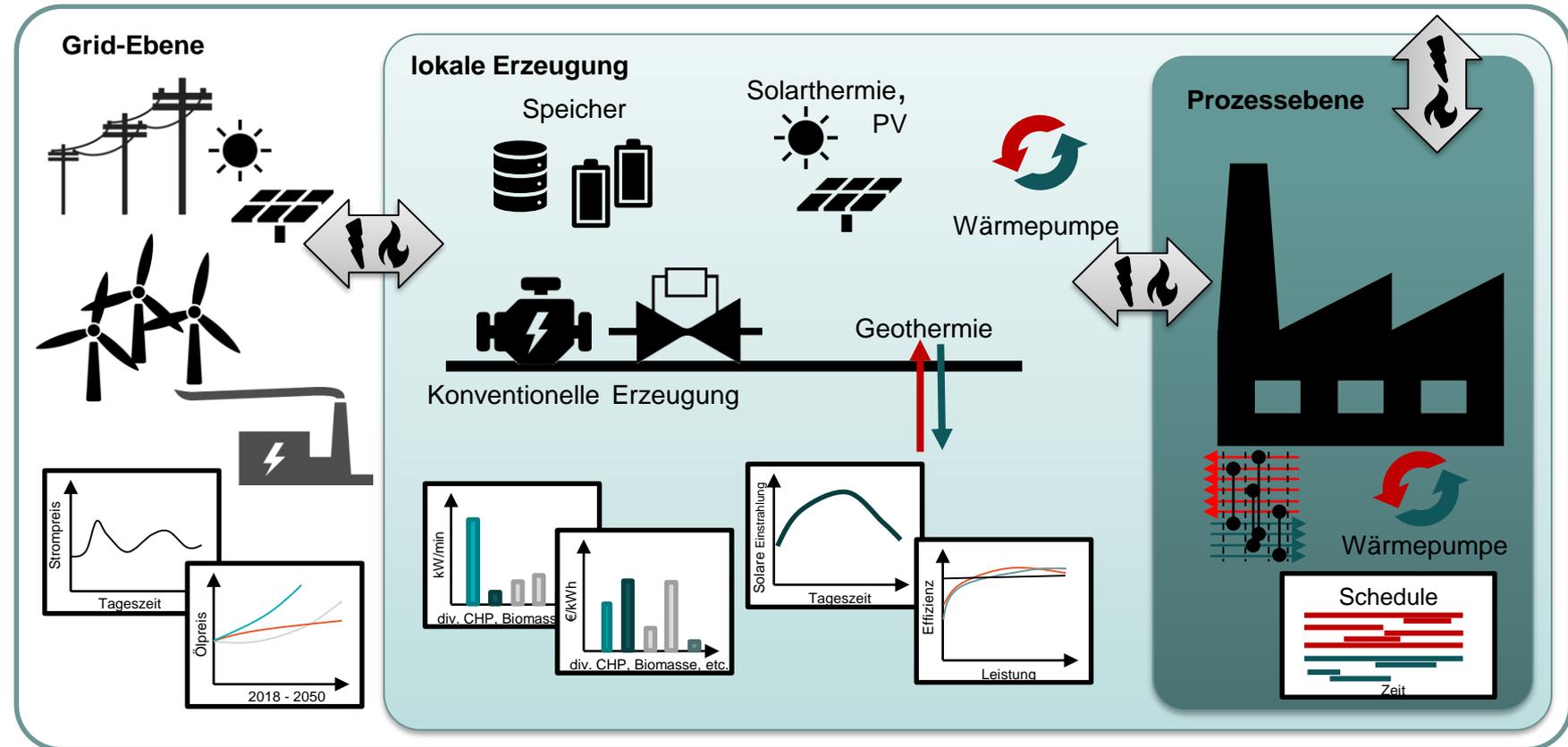
CONNECTING
AC & VENTILATION
EXPERTS.



WRG & Wärmebereitstellung

Gekoppelte Betrachtung mit mathematischer Programmierung

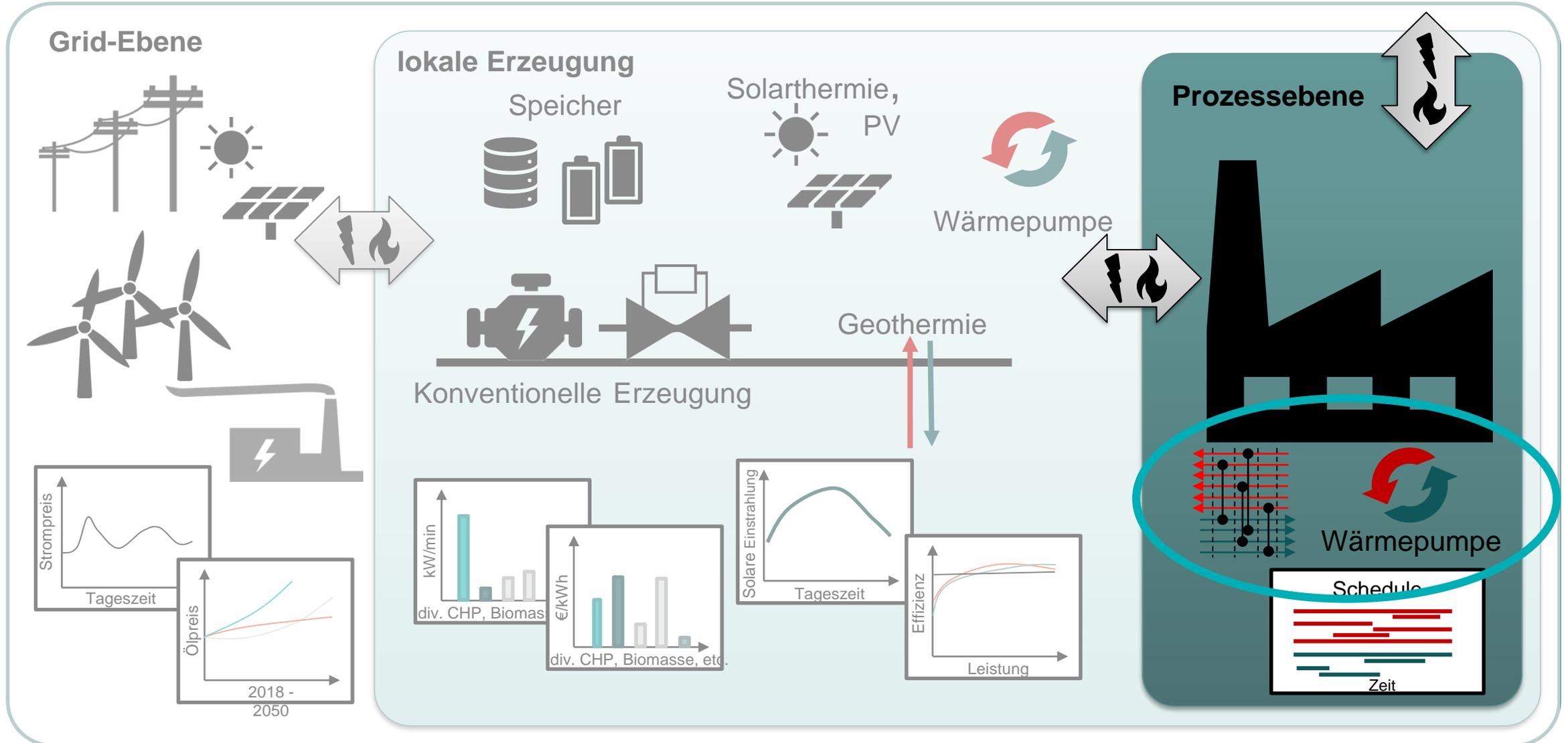
- Forschungsprojekt **SINFONIES** (unter der Leitung der TU Wien)
- Prozessebene / Versorgungsebene
- Nichtkontinuierlicher Betrieb abbildbar (z.B. für Batchprozesse)
- Gemeinsame Optimierung von Versorgungsanlagen & WRG
 - Optimale Speichergröße
 - PV / Batteriespeicher
 - Beschränkungen (begrenzte Anschlussleistung, begrenzte Dachflächen für PV)
 - Strompreisprofile



Mathematical Programming

Systemgrenzen industrieller Energiesysteme

SINFONIES Framework mit Schnittstellen



Mathematical Programming

Superstructure für Wärmerückgewinnung

- Optimierung auf Basis von mathematischen Gleichungen
- Modelle basieren auf dem Konzept der **Superstructure** (gleichzeitige Berücksichtigung aller Varianten)
- Modelle können flexibel erweitert werden

MINLP Superstructure Modell

$$\begin{aligned} \min TAC = & \underbrace{\sum_i c_{cui} q_{cui}}_{\text{energy costs}} + \underbrace{\sum_j c_{hu} q_{huj}}_{\text{energy costs}} + \underbrace{\sum_i \sum_j \sum_k c_{fzijk} + \sum_i c_{fzcui} + \sum_j c_{fzhuj}}_{\text{step-fixed investment costs}} \\ & + \underbrace{\sum_i \sum_j \sum_k c \left(\frac{q_{ijk}}{U_{ij} LMTD_{ijk}} \right)^\beta}_{A_{ijk}} + \underbrace{\sum_i c \left(\frac{q_{cui}}{U_{cui} LMTD_{cui}} \right)^\beta}_{A_{cui}} + \underbrace{\sum_j c \left(\frac{q_{huj}}{U_{huj} LMTD_{huj}} \right)^\beta}_{A_{huj}} \end{aligned}$$

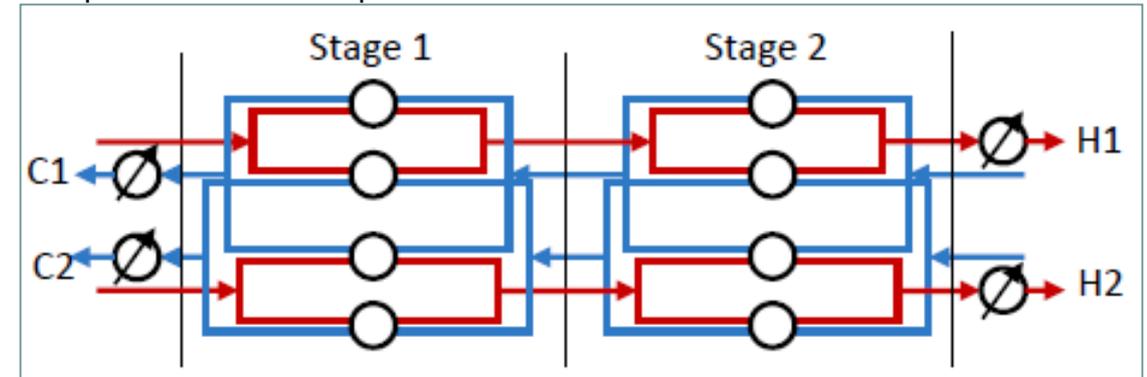
variable investment costs
subject to

$$\left. \begin{aligned} \sum_j \sum_k q_{ijk} + q_{cui} &= F_i (T_i^{in} - T_i^{out}), i \in HP \\ \sum_i \sum_k q_{ijk} + q_{huj} &= F_j (T_j^{out} - T_j^{in}), j \in CP \end{aligned} \right\} \text{stream-wise energy balance}$$

$$\left. \begin{aligned} \sum_i q_{ijk} &= F_i (T_{ik} - T_{i,k+1}), i \in HP \\ \sum_j q_{ijk} &= F_j (T_{jk} - T_{j,k+1}), j \in CP \end{aligned} \right\} \text{energy balance for each stage}$$

$$T_{i,k-1} = T_i^{in}, T_{j,k-NOK} = T_j^{in} \quad \text{assignment of inlet temperatures}$$

Beispiel für einfache Superstructure



Ziel der Optimierung ist z.B.

- Minimierung der **jährlichen Gesamtkosten** (annualisierte Investitionskosten + Energie- und Betriebskosten)
- Minimierung des **CO₂-Ausstoßes**

Mathematical Programming

Erweiterte Superstructure für Wärmepumpenintegration

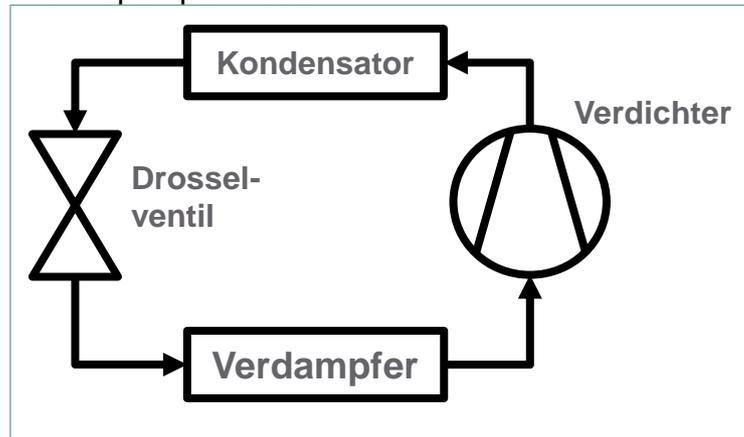
Wärmepumpenmodell

- Wärmeübertragerflächen (Kondensator, Verdampfer) sind direkt abgebildet
- Verdichter indirekt über Leistung

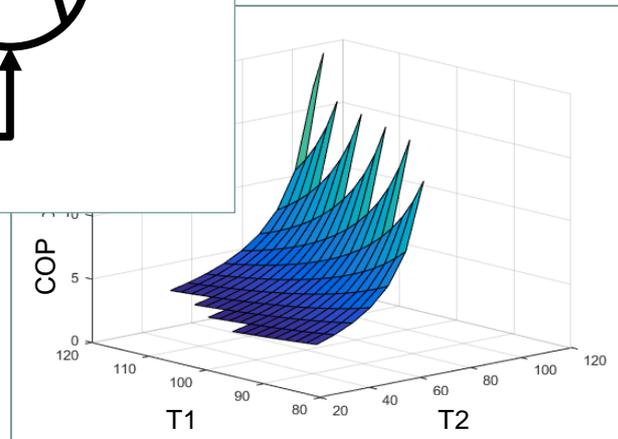
$$\dot{Q}_{Senke} = \dot{Q}_{Quelle} + P_{el}$$

- sprungfixe Kosten für Integration
- COP entweder über Carnot-Modell oder Kennfeld

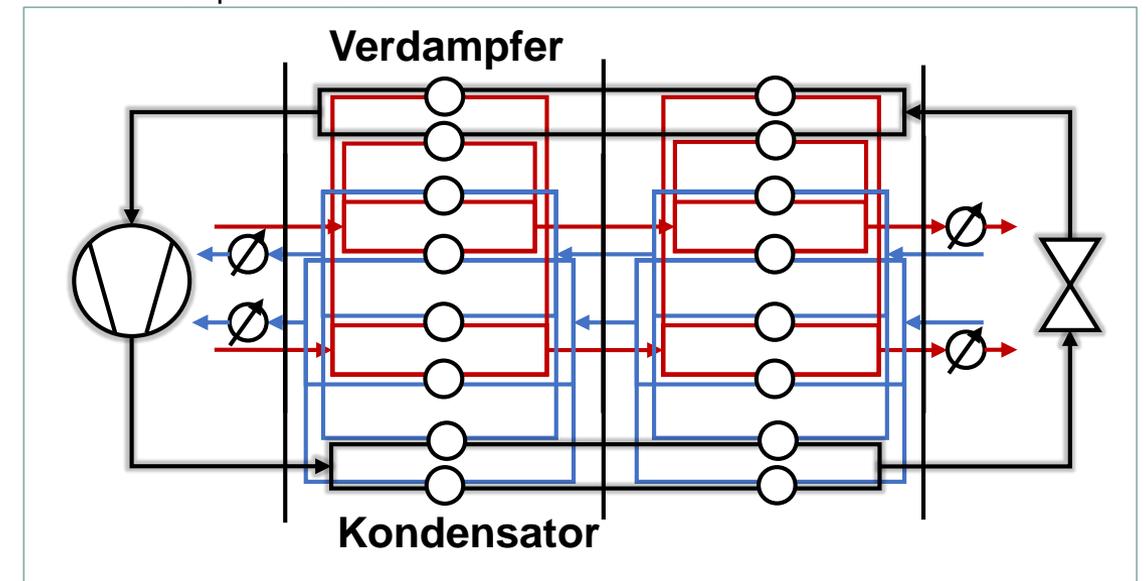
Wärmepumpenmodell



Carnot-Modell



Erweiterte Superstructure



Mathematical Programming

Beispiel für Wärmepumpenintegration

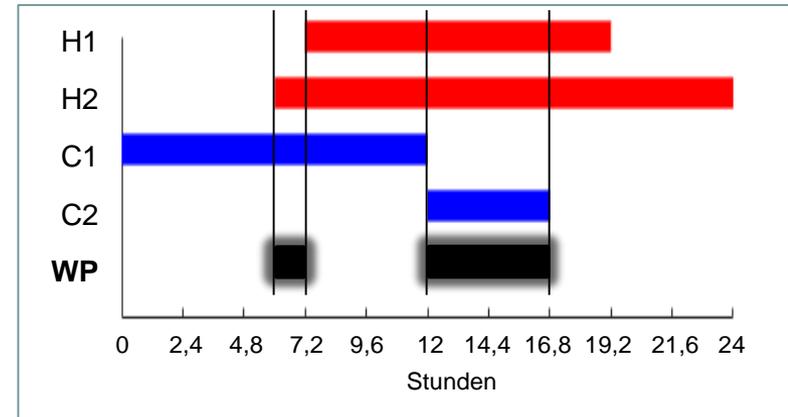
Beispiel

- 2 Quellen
- 2 Senken
- Zeitlich variabel

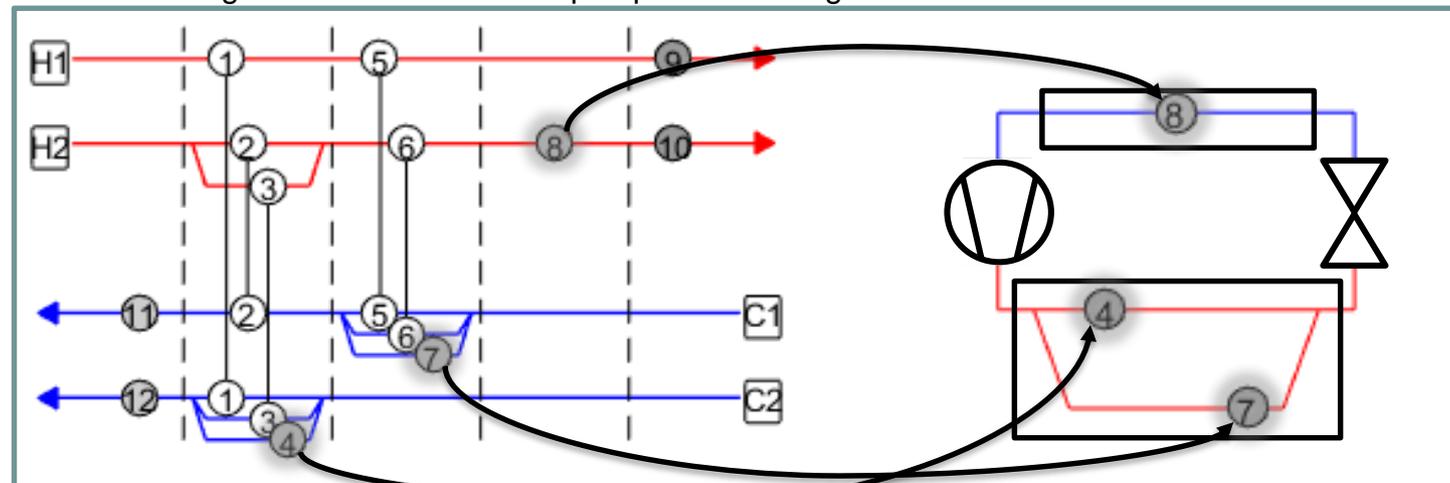
Ergebnis der Optimierung

- Kostenoptimales Wärmerückgewinnungssystem
 - Wärmeübertragernetzwerk
 - Wärmepumpeneinbindung
- Optimierter Betrieb

Gantt Chart



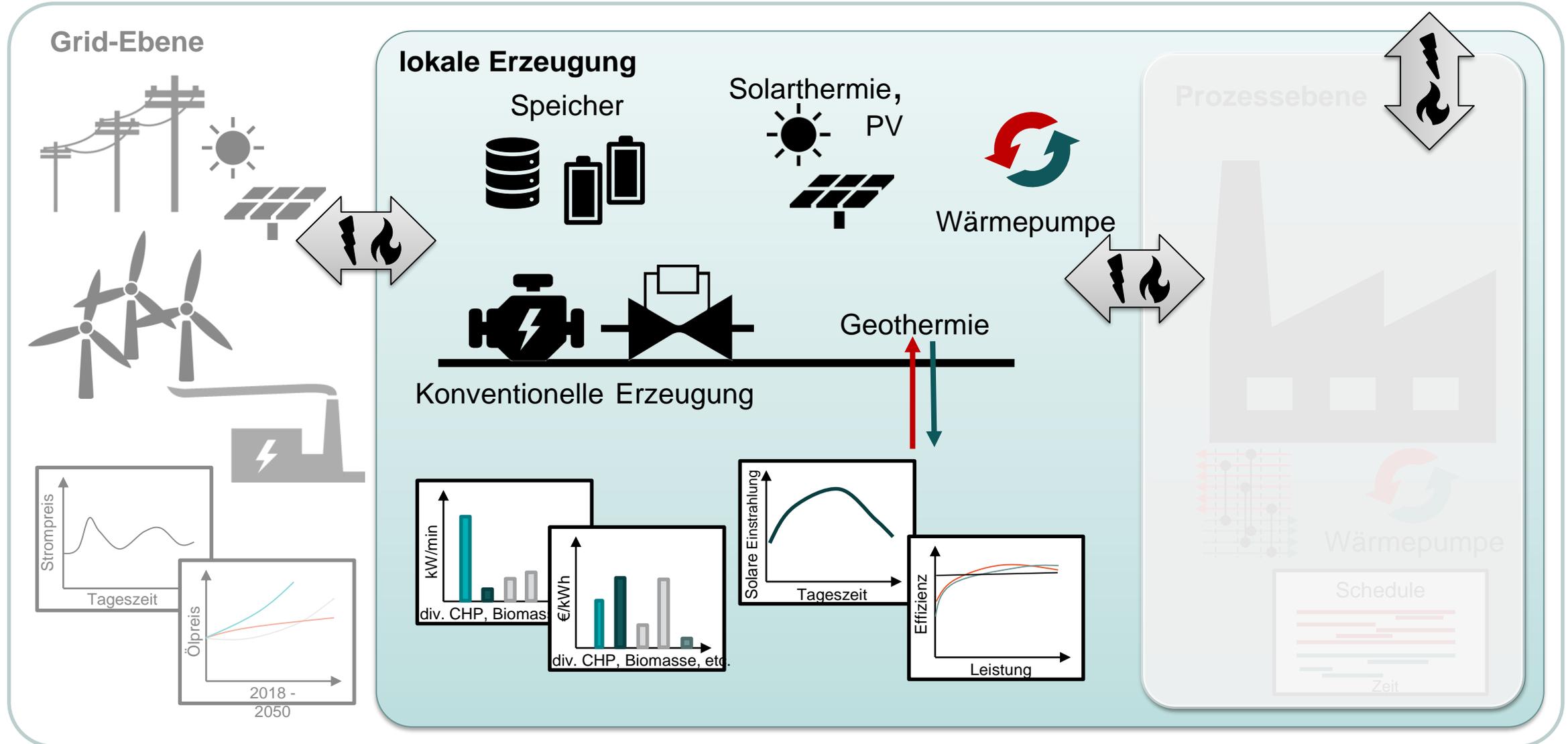
Wärmeübertragernetzwerk und Wärmepumpeneinbindung



Mathematical Programming

Systemgrenzen industrieller Energiesysteme

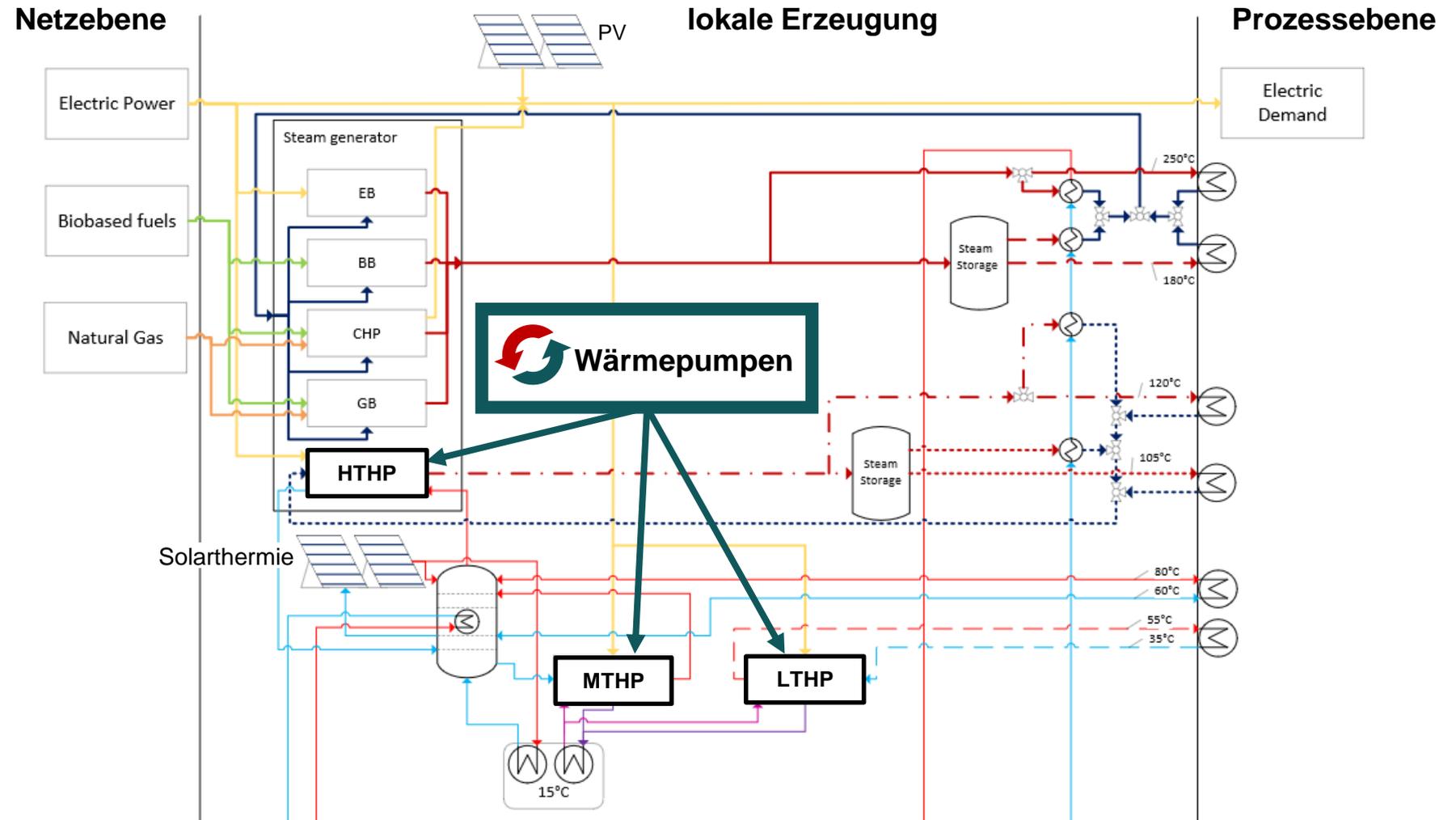
SINFONIES Framework mit Schnittstellen



WRG & Wärmebereitstellung

Systemgrenzen industrieller Energiesysteme

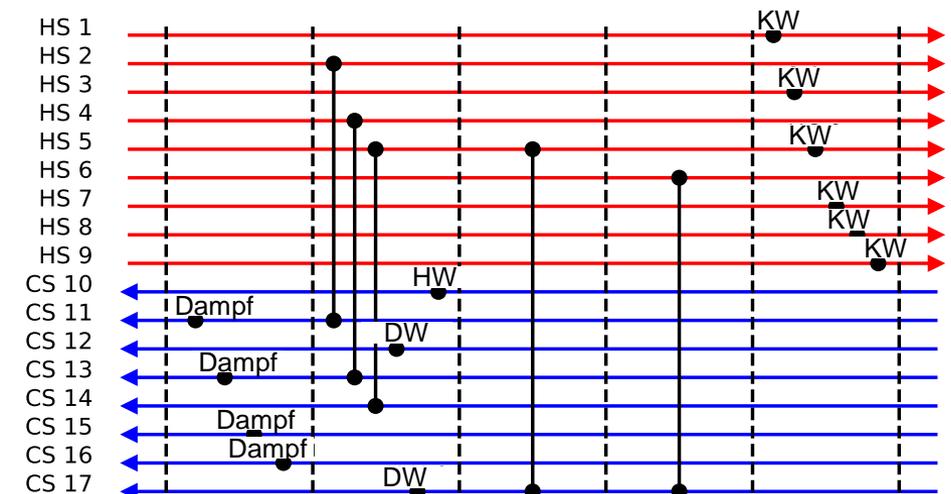
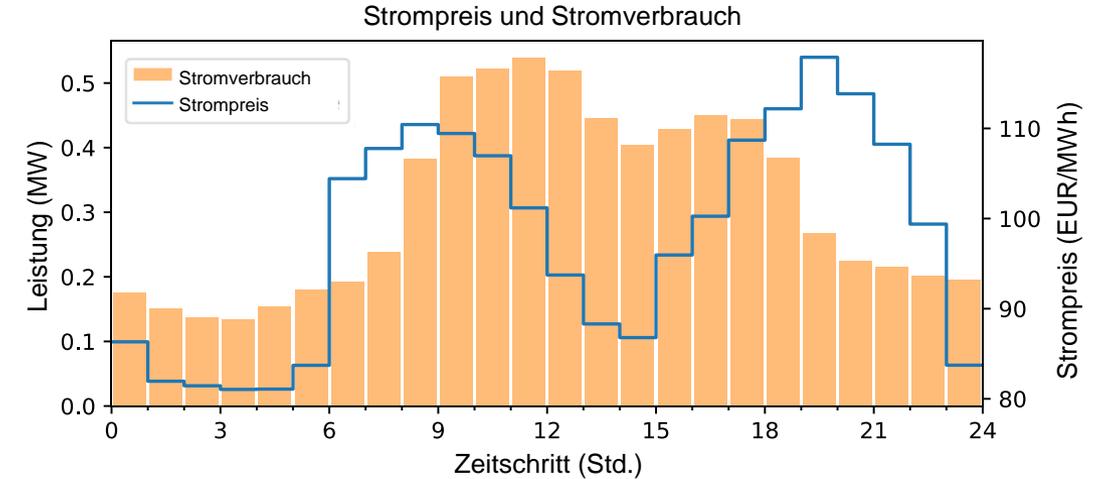
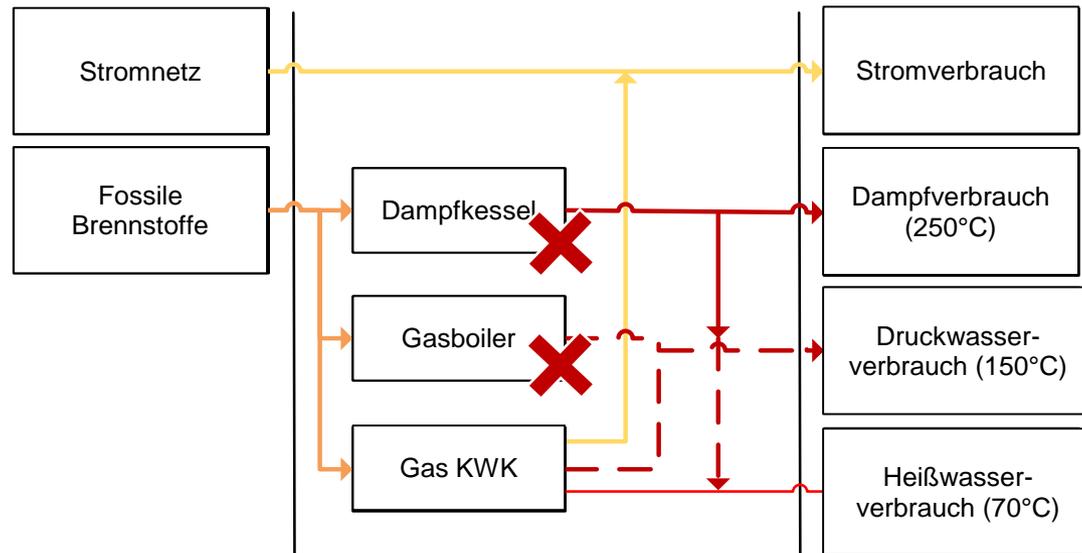
- **Superstructure** für Wärme- und Stromversorgung
- Schnittstellen zur Prozess- und Netzebene
- **Wärmepumpenmodelle:**
 - **Hochtemperatur-Wärmepumpe** (Quelle: Prozessabwärme, Solarthermie)
 - **Mittel- und Niedertemperaturwärmepumpen** (Quellen: Luft / Geothermie, Niedertemperaturabwärme)
- PV zur Stromversorgung
- Div. Speicher und Dampferzeuger



WRG & Wärmebereitstellung

Beispiel*

- Bestehende gasgefeuerte Dampferzeuger müssen ersetzt werden
- Gasmotor KWK weiterhin in Betrieb
- **Superstructure:** Biomasseboiler, Biogas KWK, Elektroboiler, Solarthermie, HT-Wärmepumpe, Geothermiewärmepumpe, Luftwärmepumpe.
- PV und Solarthermie gemeinsam begrenzt auf 5000 m²
- Thermische Energiespeicher



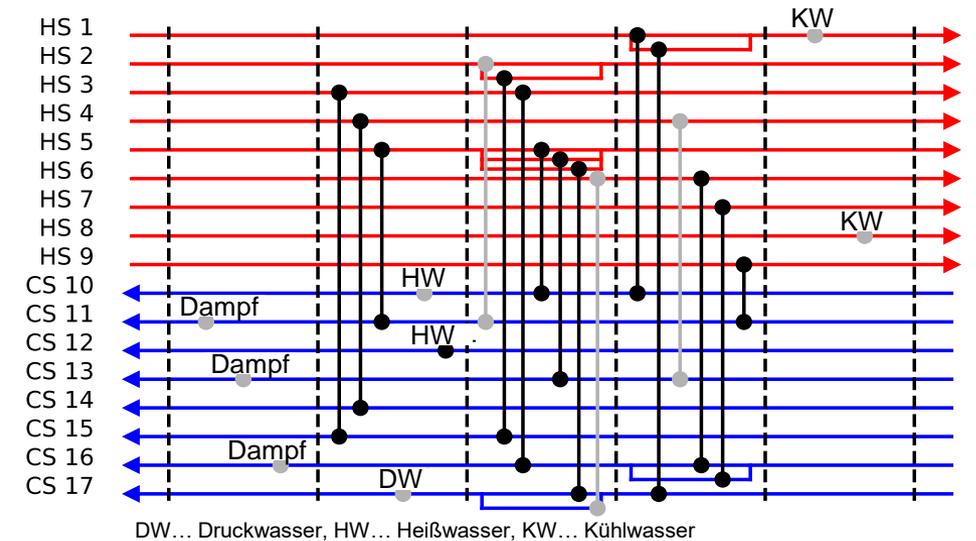
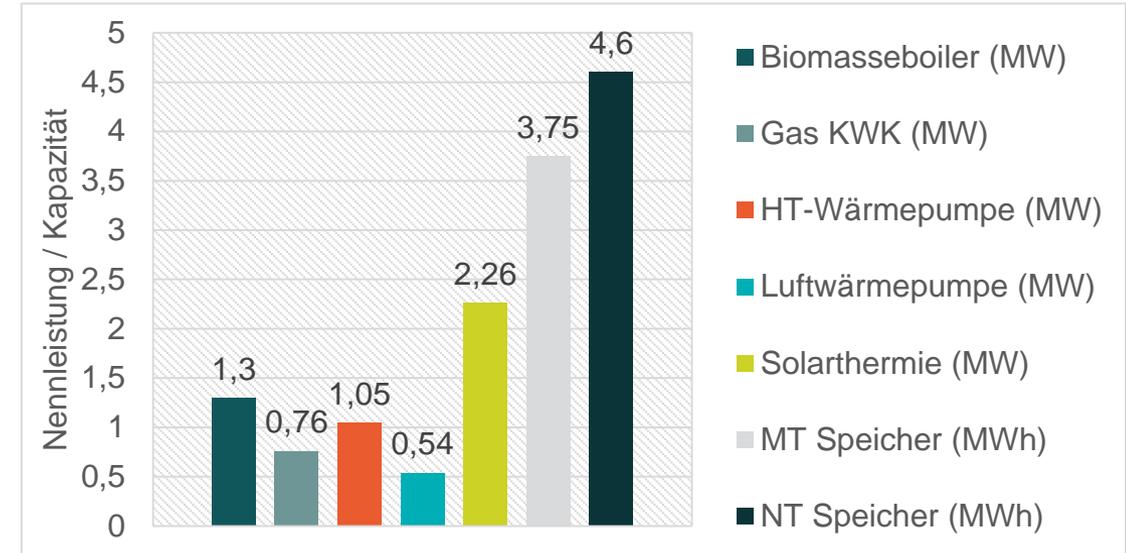
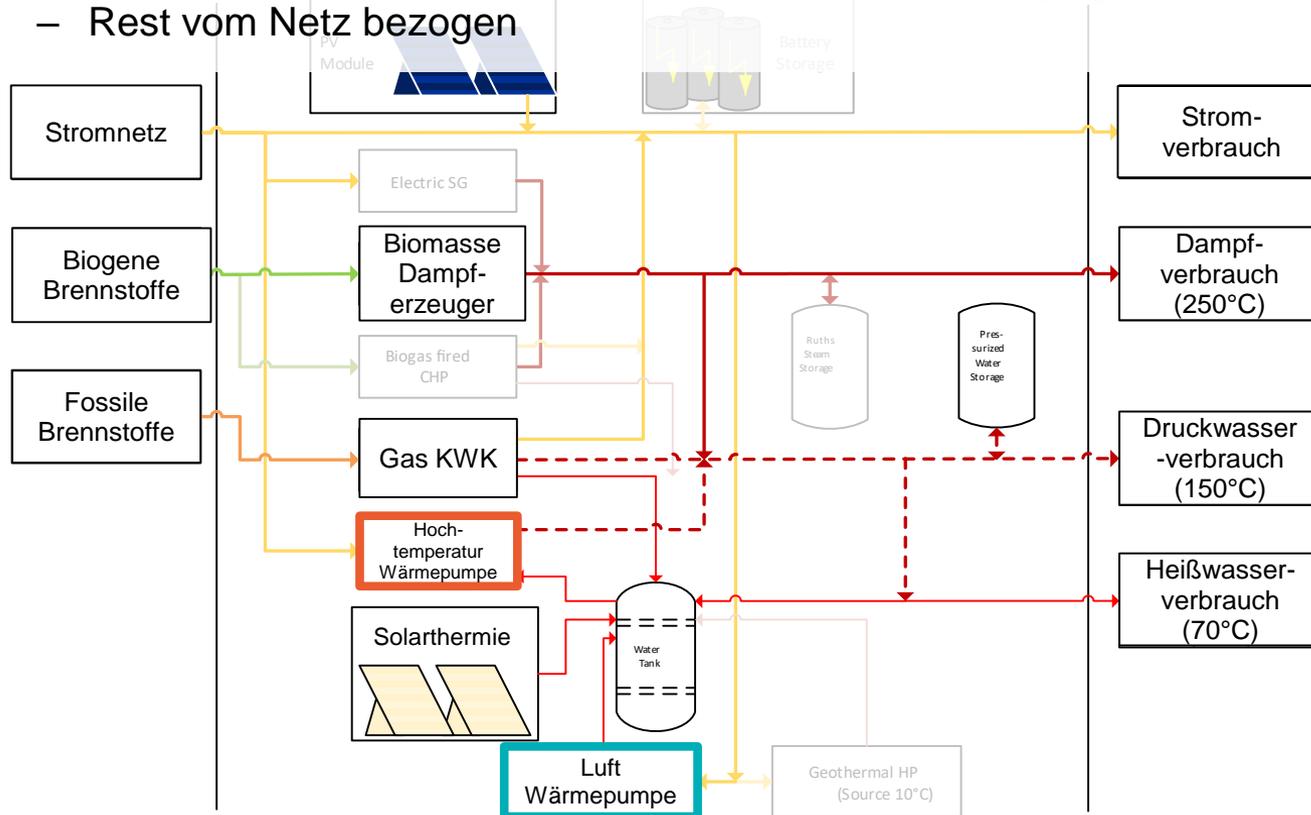
* Halmschlager, Beck, Koller, Knöttner, Hofmann, *Combined Optimization for Retrofitting of Heat Recovery and Thermal Energy Supply in Industrial Systems*, presented at „Applied Energy Symposium: MIT A+B August 12-14, 2020 • Cambridge, USA”

WRG & Wärmebereitstellung

Systemgrenzen industrieller Energiesysteme

- Hochtemperatur (250°C): neuer Biomasseboiler
- Mitteltemperaturwärme (150°C): HT-Wärmepumpe und Gas KWK
- Niedertemperatur (70°C): Solarthermie und Luftwärmepumpe
- Große Energiespeicher auf Nieder- und Mitteltemperatur

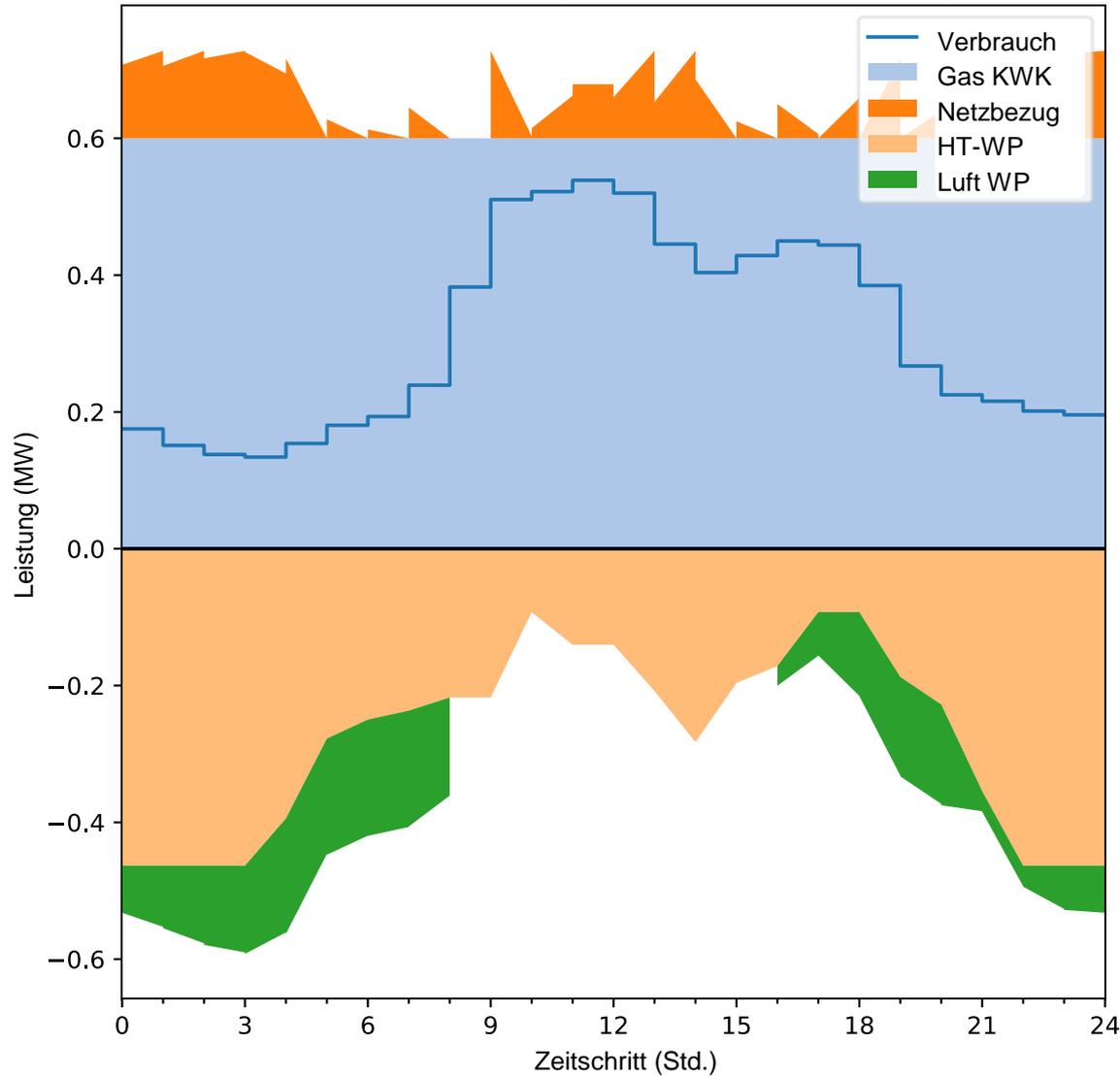
- Strombedarfs Großteils durch bestehende KWK-Anlage gedeckt,
- Rest vom Netz bezogen



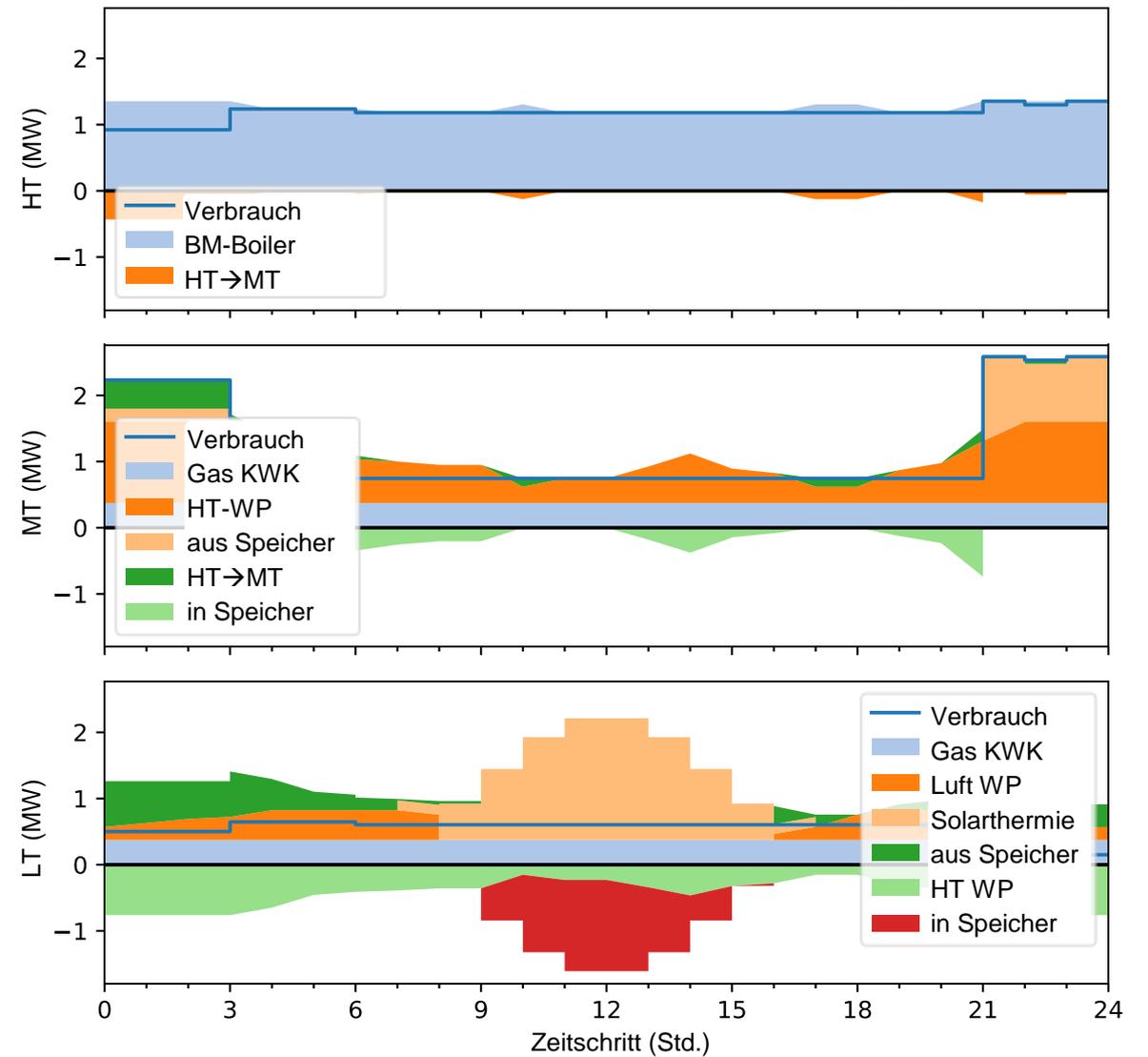
WRG & Wärmebereitstellung

Systemgrenzen industrieller Energiesysteme

Elektrische Leistung (Verbrauch und Bereitstellung)



Prozesswärme (Verbrauch und Bereitstellung)



**CONNECTING
AC & VENTILATION
EXPERTS.**

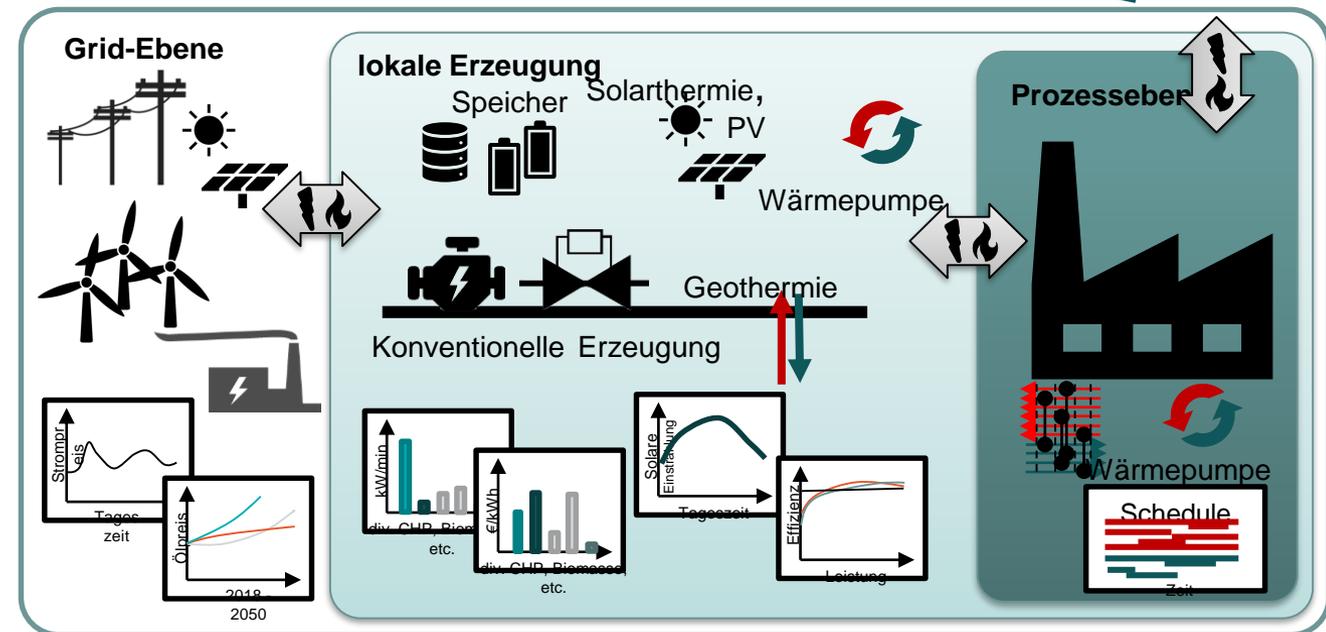


Datengrundlage

Gekoppelte Betrachtung mit mathematischer Programmierung

Prozessebene (Wärmerückgewinnung)

- Wärmequellen & Senken
 - Start & Ziel**temperatur** (bzw. bei Abgas/Waste-Streams Temperatur, auf die abgekühlt werden kann (Stichwort NOx, Rauchgaskondensation), **Leistung**)
 - *Optional: Verortung der Wärmequellen & Senken*
 - **Wärmeübergangskoeffizienten** für Quellen & Senken (z.B. Wärmeübergang von Rauchgasstrom auf Stahl)
- **Wärmeübertragerkosten** (ggf. aus Datenbank)
- *Optional: Bestehende WRG (Wärmeübertrager, Wärmepumpen, Speicher)*
- **Wärmepumpen**
 - **Einsatzbereich** (min./ max. Hub, Temperaturniveaus)
 - **Effizienz** (Gütegrad, COP-Funktion)
 - **Kosten** (Investition (€), Betrieb/Wartung (€/kWh, €/Jahr))
 - *Optional: Cycling-spezifische Kosten (€/Anfahrvorgang)*

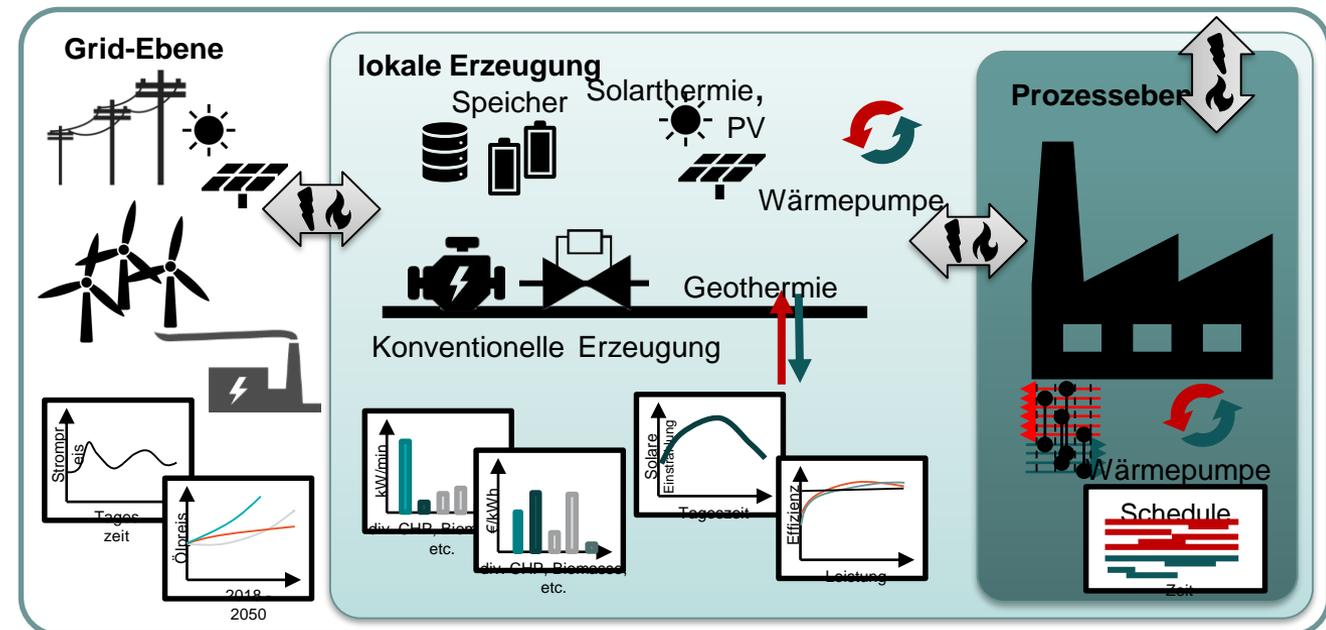


Datengrundlage

Gekoppelte Betrachtung mit mathematischer Programmierung

Lokale Erzeugung

- **Standortspezifische mögliche Anlagenkonfiguration** (Geothermie, Tiefensonden, Sondenfeld, Einstrahlungsprofil, räumliche Gegebenheiten)
- **Standortspezifische Energiequellen** (Solar, Biomasse, Biogas, Fernwärme, etc.) inkl. Verfügbarkeitsprofile (z.B. solare Einstrahlung)
- **Energiekosten** (Strom, Gas, Biogas, Biomasse,...)
 - Je nach Kostenstruktur zeitliche Verläufe
 - Sonst konstante Werte oder auch Prognosen
- **Anlagenkosten** (PV, Gaskessel, Wärmepumpen, Speicher, etc.)
- **Temperaturniveaus** für Wärmebedarf (Warmwasser, Druckwasser, Dampf)



Datengrundlage

Gekoppelte Betrachtung mit mathematischer Programmierung

Je nach Verfügbarkeit von Daten **können auch einzelne Bereiche separat betrachtet werden**

Beispiel:

- Keine detaillierten Informationen zu Wärmequellen & Senken verfügbar
- Temperaturniveaus für bestehende Versorgung bekannt
- Es können **alternative Versorgungsanlagen** (Biogas, Wärmepumpen, Solarthermie, PV) betrachtet werden

oder

- Es sind **keine Neuinvestitionen** auf Erzeugerebene geplant
- Laständerungsverhalten bestehender Anlagen bekannt
- **Potentiale für Wärmerückgewinnung** unter **Berücksichtigung der Erzeugerseite** können ermittelt werden

Grundsätzlich gilt:

Je detaillierter die Kosten- und Prozessinformationen sind, umso aussagekräftiger sind die Ergebnisse!

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

Anton Beck
anton.beck@ait.ac.at

Austrian Institute of Technology GmbH



CONNECTING
EXPERTS.

