

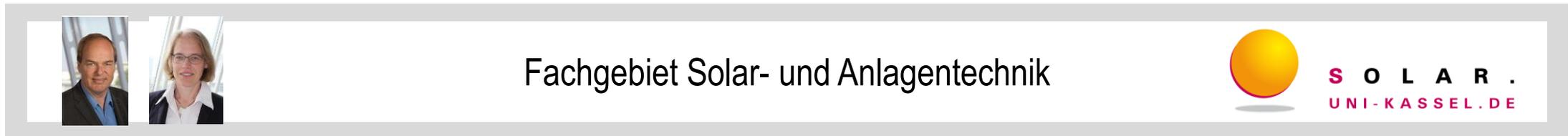
Fachforum F16

25. Nov. 2022, 13:30 – 14:30 Uhr

# CO<sub>2</sub> - arme Wärmeversorgung in der Industrie

1. Industrielle Wärmelastprofile
  2. Wärmepumpen in der Industrie
  3. Fernwärme für Industrie mit hohen RL-Temperaturen
- } (Mateo Jesper)
- (Felix Pag)

- Angewandte Forschung und Entwicklung zu thermischen Energiesystemen
- ca. 25 Mitarbeiter:innen, dazu Studierende
- Koordinierung Masterstudiengang „Regenerative Energien und Energieeffizienz“
- Beteiligung an Arbeitsgruppen der internationalen Energieagentur, VDI-Gremien, Beratung von BMWK, Bafa & KfW



## Fernwärme & kommunale Wärmeplanung

- Netzmodellierung
- Wärmekataster
- Erzeugerstrategie
- Quartiere: Neubau & Bestand
- Saisonale Erdbeckenspeicher

## Bereich Prozesswärme



- Integration von Wärmepumpen und Solarthermie in Industrie und Gewerbe
- Energieeffizienz in der Industrie
- Gasdruck-Regelanlagen
- Lastprofilanalyse



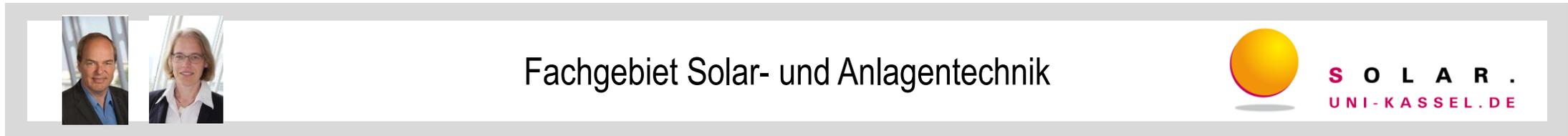
## Fehlerdiagnose

- Systemoptimierung
- automatisierte Fehlerdetektion

## Sorptionsprozesse

- Offene Flüssig-sorptionsanlagen
- Sorptionsrotoren

- Angewandte Forschung und Entwicklung zu thermischen Energiesystemen
- ca. 25 Mitarbeiter:innen, dazu Studierende
- Koordinierung Masterstudiengang „Regenerative Energien und Energieeffizienz“
- Beteiligung an Arbeitsgruppen der internationalen Energieagentur, VDI-Gremien, Beratung von BMWK, Bafa & KfW



## Fernwärme & kommunale Wärmeplanung

- Netzmodellierung
- Wärmekataster
- Erzeugerstrategie
- Quartiere: Neubau & Bestand
- Saisonale Erdbeckenspeicher

## Bereich Prozesswärme



- **Integration von Wärmepumpen und Solarthermie in Industrie und Gewerbe**
- **Energieeffizienz in der Industrie**
- **Gasdruck-Regelanlagen**
- **Lastprofilanalyse**



## Fehlerdiagnose

- Systemoptimierung
- automatisierte Fehlerdetektion

## Sorptionsprozesse

- Offene Flüssig-sorptionsanlagen
- Sorptionsrotoren

# Forschung und Entwicklung

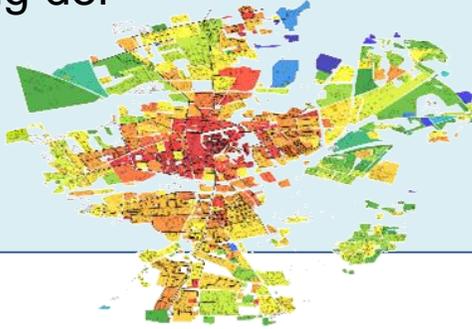
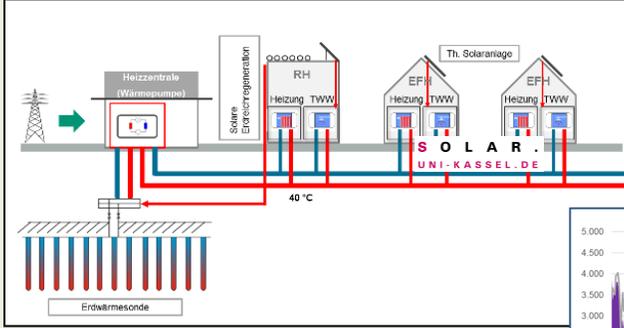
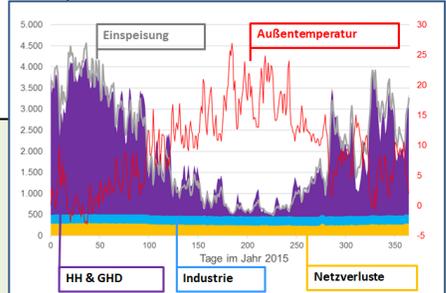
- Wärmeversorgung: Fernwärme & Quartiere
- Industrielle Prozesswärme



- Wärmeerfassung
- Potentiale zur Einbindung reg. Energien
- Wärmeversorgungskonzepte



Strategische Entwicklung der Fernwärme Kassel / Wärmeleitplanung

- Quartierslösungen
- Wärmeatlas
- Wärmenetze

# Herausforderungen der Wärmewende

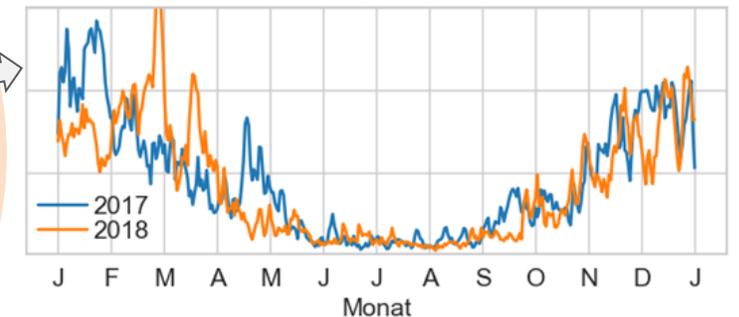
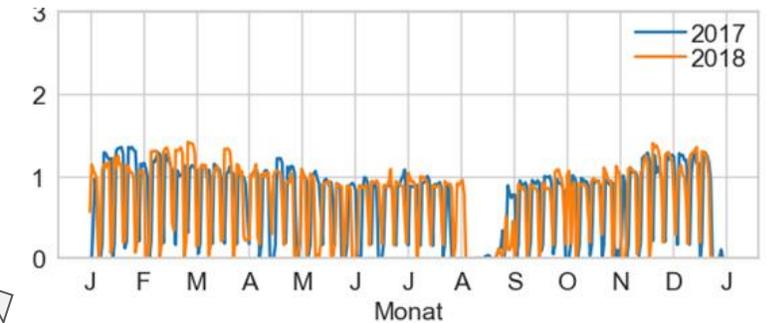
## in der Industrie

- Energie
- Leistung
- Temperatur



## Industrielle Wärmelastprofile

Täglicher Wärmeverbrauch (normiert)

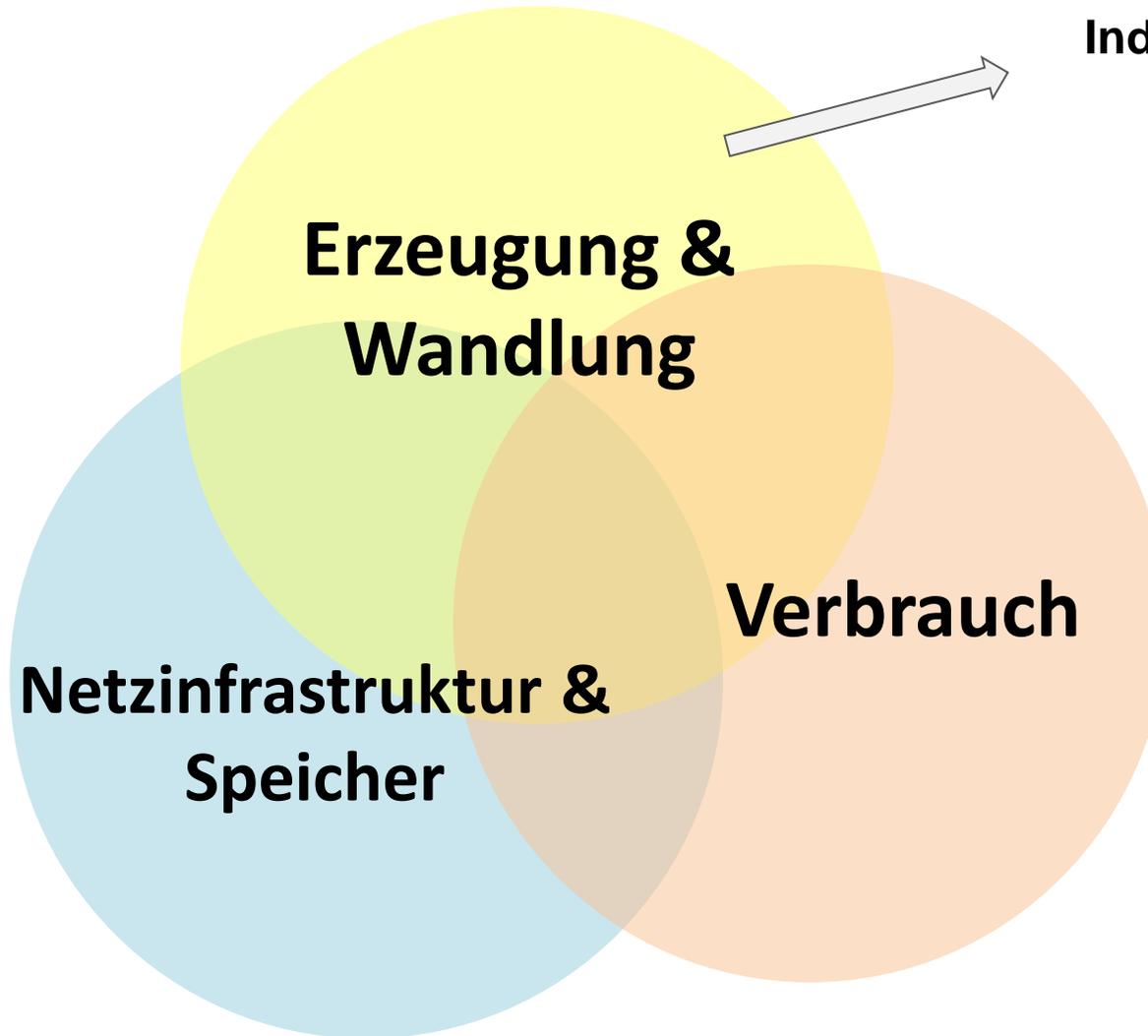


- Klassifizierung von Lastprofilen
- Branchen-Zuordnung
- Generierung standardisierter Profile

# Herausforderungen der Wärmewende

## in der Industrie

- Energie
- Leistung
- Temperatur



## Industrielle Großwärmepumpen

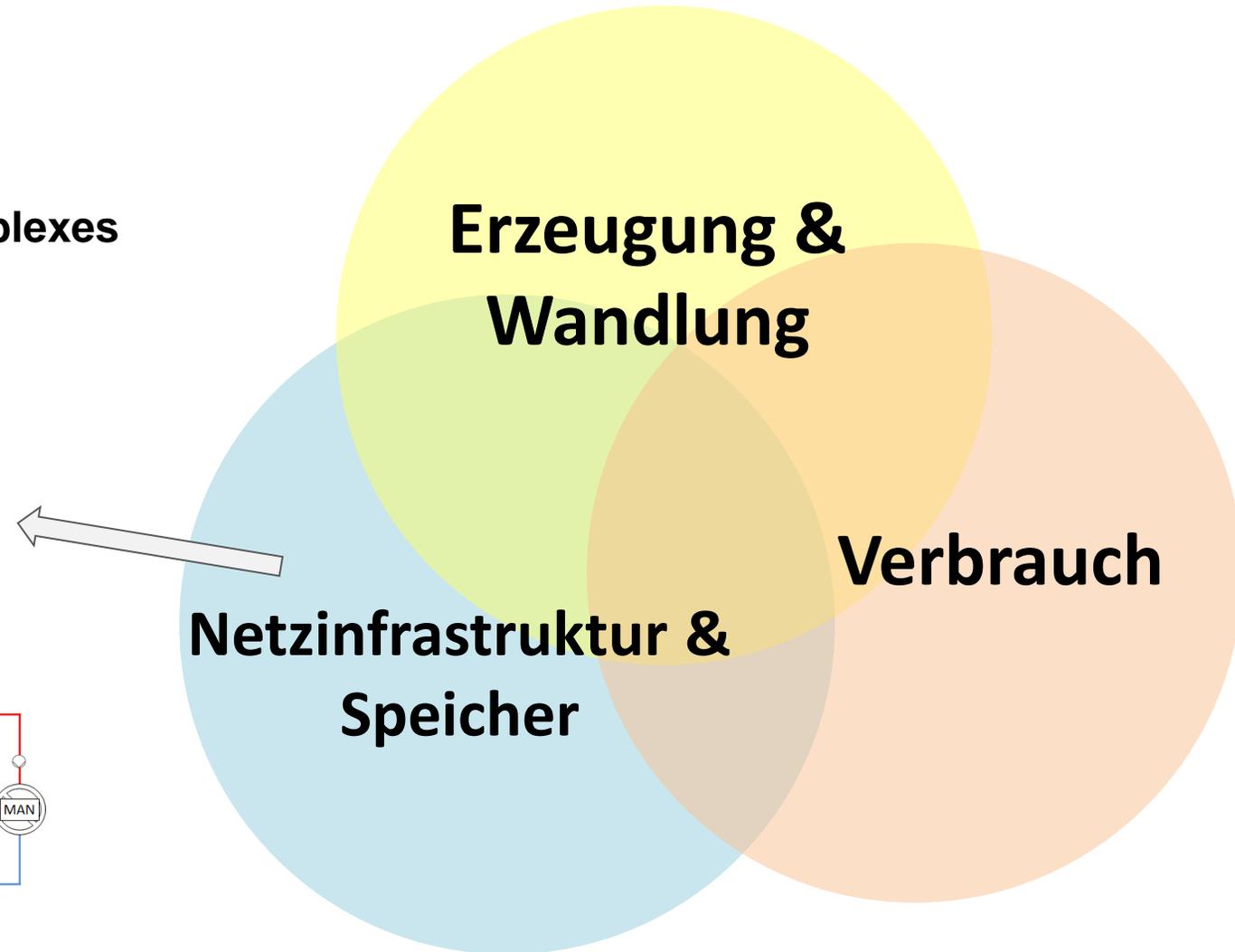
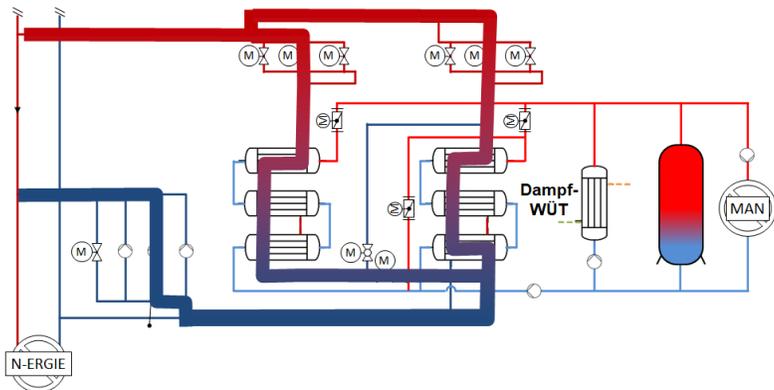
- Wirtschaftlichkeit
- Spritzguss
- Automotive



## in der Industrie

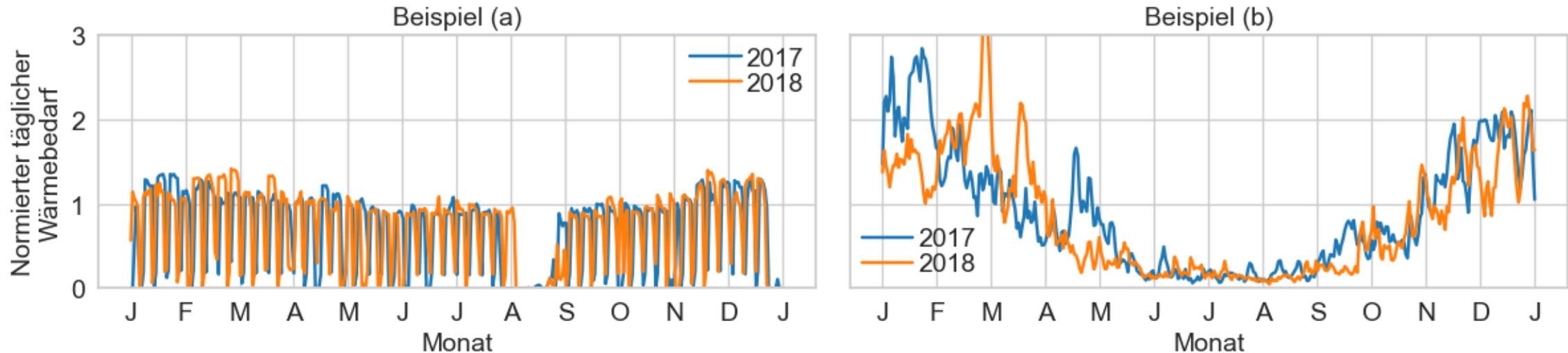
### Anschluss eines Industriekomplexes an die Fernwärme

- Wärmeübergabestation
- hohe Temperaturen ( $\downarrow$ )
- Netzeinspeisung in VL/RL?  
→ Netzanschluss



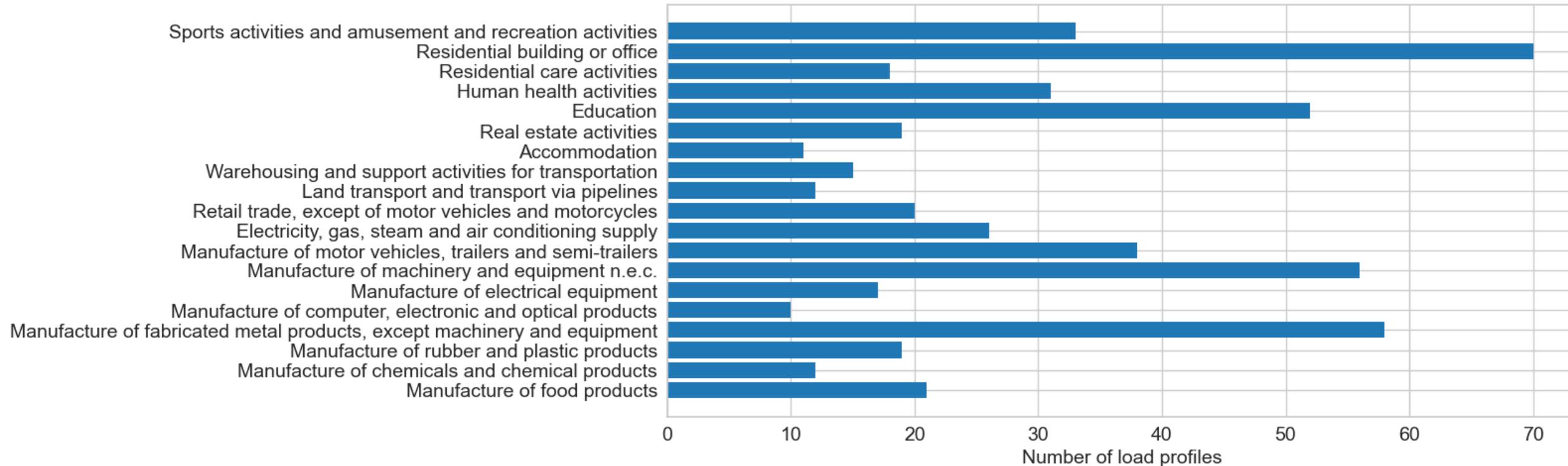
# Industrielle Wärmelastprofile

## Beispielunternehmen aus dem Maschinenbau:



- Industriewärmelastprofile sind nicht immer flach
- Lastprofile können selbst innerhalb einer Branche stark unterschiedlich sein
- Registrierende Leistungsmessung i.d.R. erst aber 500 kW bzw. 1,5 GWh/a, SLP nicht anwendbar
- Die ungefähre Kenntnis des Lastprofils wird immer wichtiger, bspw. für:
  - Planung von Wärmeversorgungssystemen mit volatilen Quellen
  - Prädiktive Regelung
  - Energienetzbetrieb

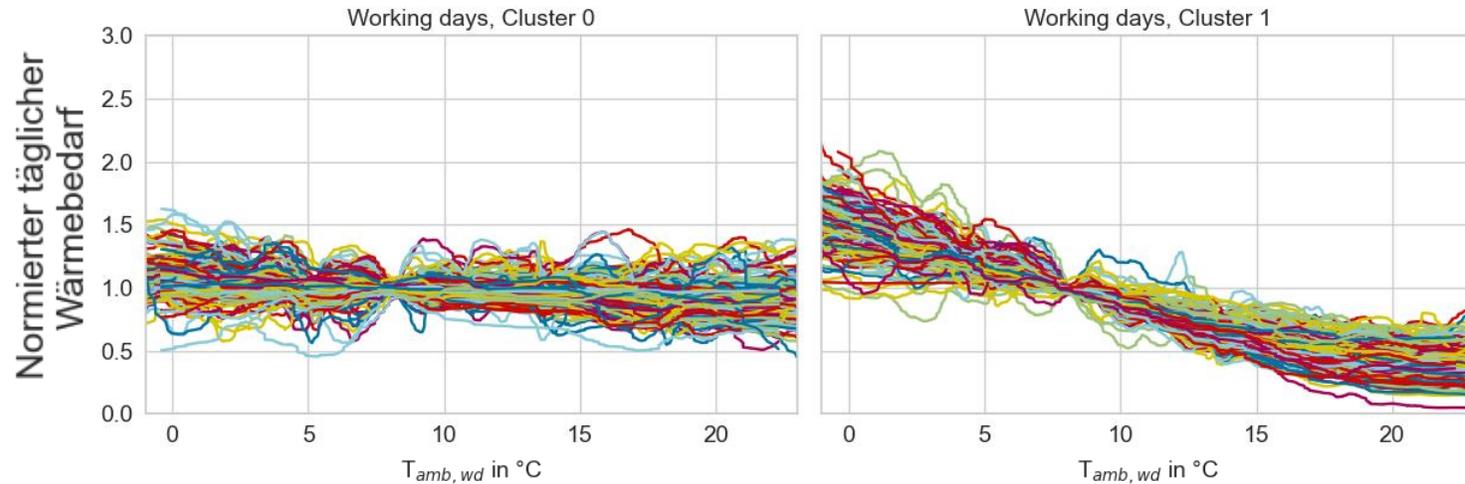
## Alle Branchen mit mehr als 10 Lastprofilen in Datenbank



- Sammlung von knapp 800 Gaslastprofilen von Gasnetzbetreiber:innen
- Branche über online Recherche nach NACE REV. 2 – Systematik (Eurostat) zugeordnet

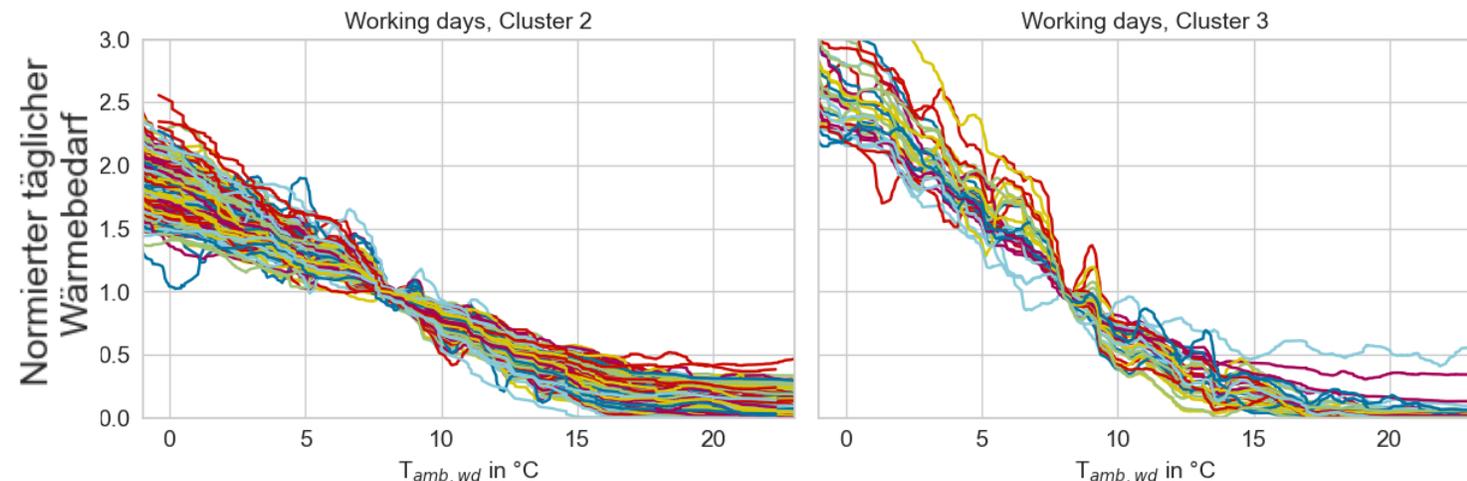
# KI-Clusteranalyse von 800 Gaslastprofilen

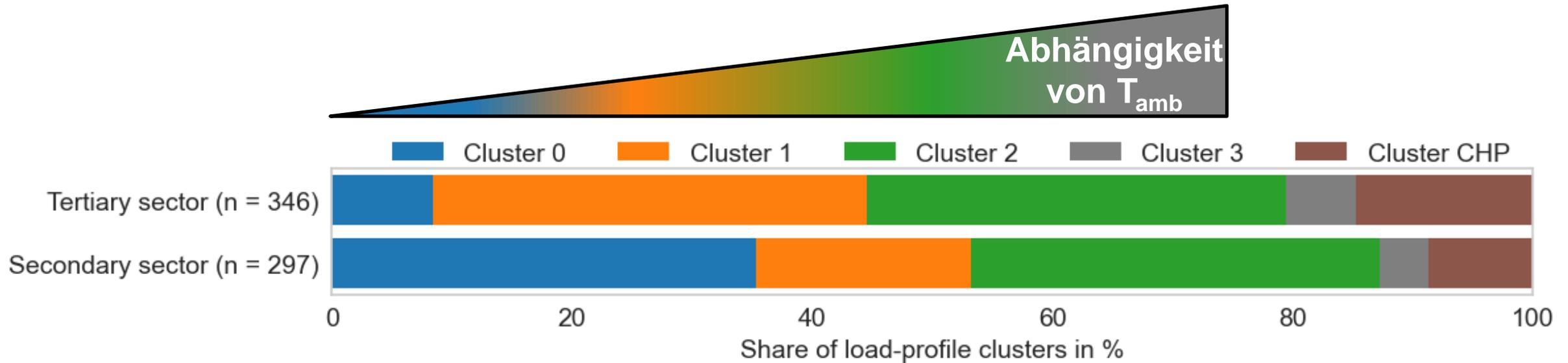
Abhängigkeit  
von  $T_{amb}$



Darstellung von  
gleitenden Mittelwerten.

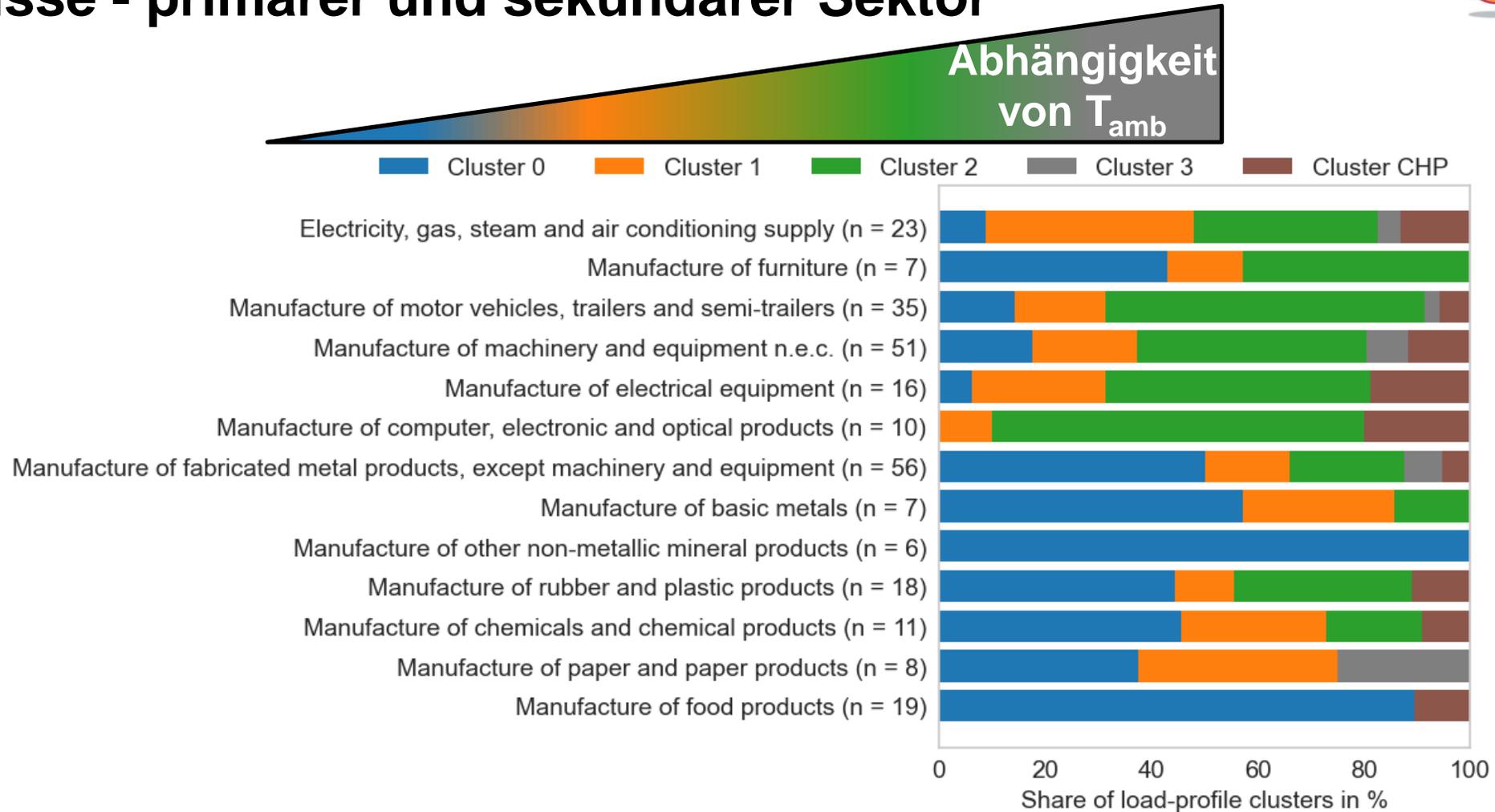
Cluster 0 bis Cluster 3:  
steigende Abhängigkeit  
von Außentemperatur





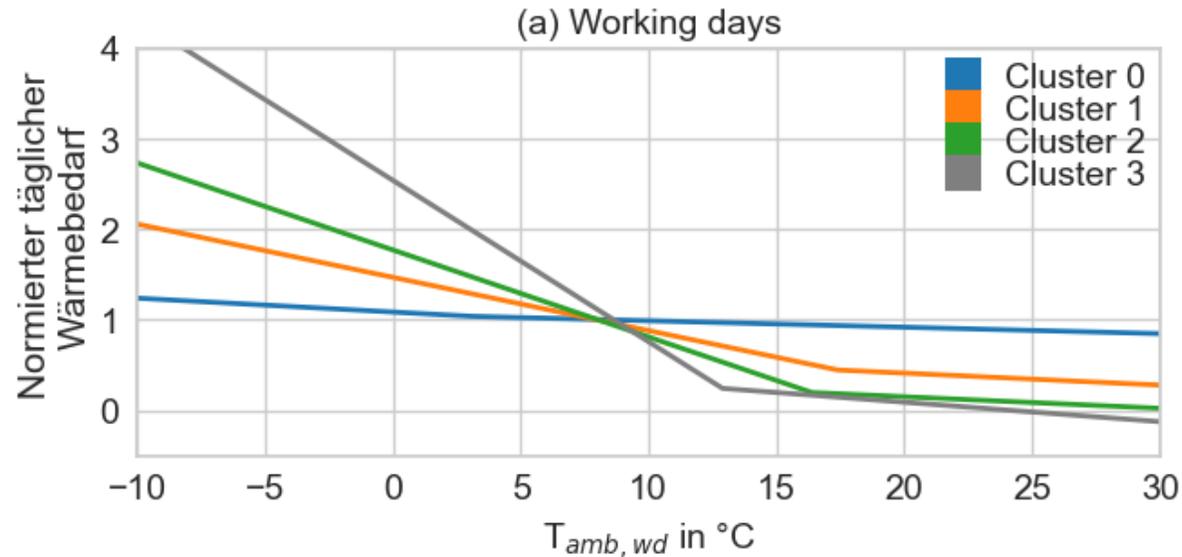
- Tertiärer Sektor: Hauptsächlich Heizwärme
- Nur in drei Branchen tritt ausschließlich ein Cluster auf (Lebensmittelherstellung, Getränkeherstellung, Herstellung von Keramik)
- Die meisten Unternehmen haben einen außertemperaturabhängigen Wärmebedarf (auch in der Industrie)

# Ergebnisse - primärer und sekundärer Sektor

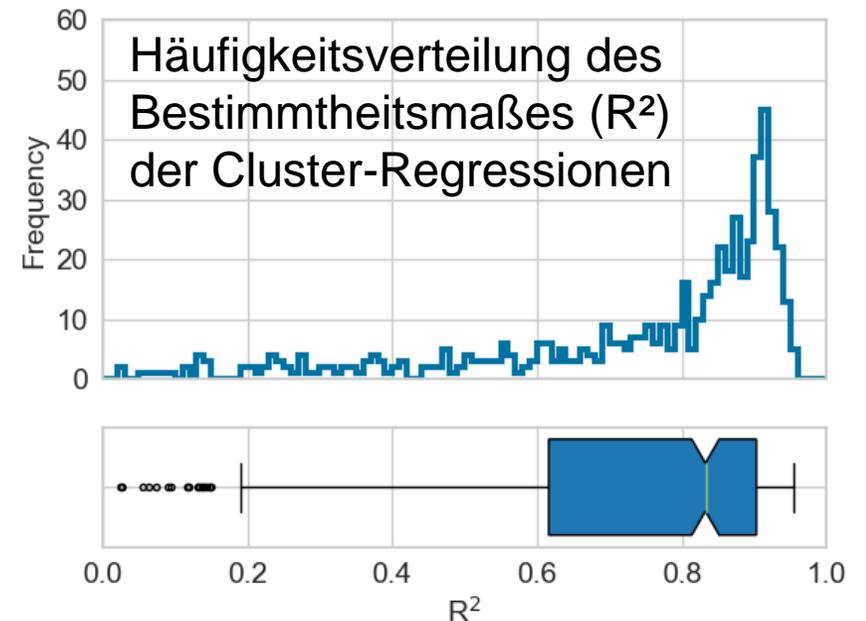


- Unternehmen mit einer KWK-Anlage (CHP) wurden nicht berücksichtigt
- Cluster 0: Papier, Metall, Steine und Erden, Nahrungsmittel, Chemie
- Cluster 1-3: Maschinenbau, Automotive, Elektronik

# Cluster-Regressionsfunktionen vs. Individuelle Funktionen



- Unterschiedliche Cluster für Werkstage und Wochenenden
- Hohe Genauigkeit der Cluster Regressionen (Median  $R^2 = 0.83$ )



# Weitere Informationen

Journal Paper (kostenlos):  
<https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100085>

Excel-Tool (kostenlos): <https://task64.iea-shc.org/>

Energy Conversion and Management X 10 (2021) 100085

Contents lists available at ScienceDirect

Energy Conversion and Management X

Journal homepage: [www.elsevier.com/locate/energy-conversion-and-management-x](http://www.elsevier.com/locate/energy-conversion-and-management-x)

Annual Industrial and Commercial Heat Load Profiles: Modeling Based on k-Means Clustering and Regression Analysis

Mateo Jesper\*, Felix Pag, Klaus Vajen, Ulrike Jordan

University of Kassel, Institute of Thermal Engineering, Department of Solar and System Engineering, Kurt-Wilber-Str. 3, 34123 Kassel, Germany

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Keywords: Annual heat load profiles; Industry; Commercial; k-Means clustering; Standard load profiles

1. Introduction and objective

Renewable heat generators like solar thermal or heat pumps are key technologies to decarbonize the heating sector. Heat generation accounts for the largest share of global final energy consumption but is still dominated by fossil fuels [1]. Renewable heat generators besides biomass, such as solar thermal or heat pumps, accounted for only 3.5% of total heat consumption in 2019 [1]. One reason for the low market penetration, especially in large-scale applications, is the relative high complexity of renewable heating systems in comparison to conventional heating systems. For example, Lauterbach et al. [2] highlight the variety of possible heat sinks in industry causing a broad range of possible hydraulic set ups and components to be used in solar thermal heating systems. Moreover, Schmitt [3] emphasizes that pre-dimensioning and yield assessment of a solar heating system can be very complex and time-consuming. The same applies to large-scale heat pumps. The lack of knowledge of important installers and decision-makers about the requirements of a broad range of possible heat sinks is regarded as an important barrier to market acceptance [4].

The main requirements for heating systems, determined by the respective composition of heat sinks at a consumer's site, are the temperature level of heat supply and the temporal course of the heat load (load profile). While sufficient information on the temperature level of common large-scale heat sinks is available [5,6], little has been published on load profiles of common large-scale applications, especially in manufacturing industry. The literature on annual heat load profiles is limited to residential and small or non-manufacturing commercial consumers. For these types of consumers, the Standard Load Profile (SLP) methodology allows utilities to predict gas consumption for the next few days based on a weather forecast. Another topic that has gained importance in studies on load profiles in recent years is load profile clustering. Many studies have been published on clustering based daily pattern recognition in residential load profiles. The aim of most of these studies is to support the development of advanced building control, fault detection, or demand side management by improving the understanding of energy demand characteristics of various consumer groups.

The objective of this study is to develop a methodology to predict heat load profiles of large-scale heat consumers in commercial, industrial, public or residential sectors with a focus on manufacturing industry. Since the heat load is usually not measured, acquiring a comprehensive database on heat load profiles is a major challenge. In

\* Corresponding author.  
 E-mail address: [jesper@uni-kassel.de](mailto:jesper@uni-kassel.de) (M. Jesper).

<https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100085>  
 Received 19 March 2021; Received in revised form 3 May 2021; Accepted 13 May 2021  
 Available online 20 May 2021  
 2590-1745/© 2021 The Author(s). Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

UNI KASSEL UNIVERSITÄT

SOLAR UNI-KASSEL.DE

SHC SOLAR HEATING & COOLING PROGRAMME INTERNATIONAL ENERGY AGENCY

This tool was developed within Subtask A "Integrated Energy System" of IEA SHC Task 64 "Solar Process Heat". The underlying database and methodology is described in the Deliverable D. A1 "Reference applications for renewable heat". It can be used to define an annual heat load profile with a daily resolution for industrial consumers.

How to use this tool?

Enter all required information to the yellow marked cells. Choose from four possible clusters for working days (wd) and five possible clusters for weekends and holidays (wknd). The respective location can be chosen by inserting an annual ambient temperature profile. The dependency of daily heat demand on ambient temperature is increasing from clusters 0 to 3 or 0 to 4 (see Figure 1).

Fig. 1: Load profile cluster regressions.

Reference applications for renewable heat

Reference applications for renewable heat

This is a report from SHC Task 64 / SolarPACES Task IV: Solar Process Heat and work performed in Subtask A: Integrated Energy Systems

F. Pag, M. Jesper, U. Jordan / University of Kassel, Institute of Thermal Engineering, Department of Solar and System Engineering, Kurt-Wilber-Straße 3, 34123 Kassel, Germany  
 25 January 2021  
 100085-100085-100085  
 DOI: 10.1016/j.ecmx.2021.100085  
 https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100085

Cluster Auswahl  
 Jährlicher Wärmebedarf  
 Jahr

Mittlere tägliche Umgebungstemperatur

Ergebnisse

Enter load profile parameters.	
wd cluster	2
wknd cluster	3
Q <sub>year</sub> [MWh/a]	300
Year	2018

Enter an annual ambient temperature profile	
Day	Mean Daily ambient temperature in °C
01.01.2018	4.6
02.01.2018	1.8
03.01.2018	0.7
04.01.2018	0.1
05.01.2018	3.8
06.01.2018	1.8
07.01.2018	3.1
08.01.2018	4.3
09.01.2018	1
10.01.2018	5.6
11.01.2018	4.5
12.01.2018	4.8
13.01.2018	3.8
14.01.2018	2
15.01.2018	1.5

Results	
Q <sub>year,wd</sub>	Q <sub>year,wknd</sub>
0.96	1.04
1.18	1.26
1.70	1.83
1.76	1.89
1.41	1.51
1.60	1.72
1.47	1.58
0.99	1.06
1.24	1.33
1.23	1.33
1.34	1.44
1.31	1.41
1.41	1.51
1.58	1.70
1.20	1.29

Fig. 2: Predicted load profile based on cluster regressions and entered information.

Input and Output | Calculation | Lin\_parameters\_wd | Lin\_parameters\_wknd

- Die meisten der knapp 800 untersuchten Unternehmen aus dem sekundären und tertiären Sektor haben einen außentemperaturabhängigen Wärmebedarf 
- Clusteranalyse getrennt für Werktage (vier Cluster) und Wochenenden (fünf Cluster) 
- Je nach Branche sind die jeweiligen Cluster unterschiedlich häufig, bspw.:  
*Metall, Lebensmittel* → Cluster 0 (keine Außentemperaturabhängigkeit)  
*Logistik, Elektronik* → Cluster 2 (große Außentemperaturabhängigkeit) 
- Cluster-Regressionsfunktionen haben hohe Genauigkeit und können bspw. zur Profilerzeugung für Machbarkeitsabschätzungen genutzt werden 
- Wenn Stromverbrauch bekannt: Nutzer:innenverhalten mittels KI vorhersagbar; dadurch deutlich höhere Genauigkeit erreichbar, bspw. für Anomalieerkennung in Energiemonitoring (mehr Infos: <https://doi.org/10.3390/su14074033>)

# Neubewertung von Wärmepumpen-Projekten nach Energiepreisinflation

# Wirtschaftlichkeit Industrielle Großwärmepumpen

$$COP(\text{Leistungszahl}) = \frac{\text{Bereitgestellte Wärmeleistung}}{\text{Verbrauchte Endenergieleistung}}$$

- Wärmepumpe:

$$COP_{WP} = 2 \text{ bis } 5$$

- Gaskessel:

$$\eta_{Kessel} < 1$$

- Wärmegestehungskosten:  
(statisch, nur Energieverbrauchskosten)

$$LCOH \approx \frac{c(\text{Energiekosten})}{COP}$$

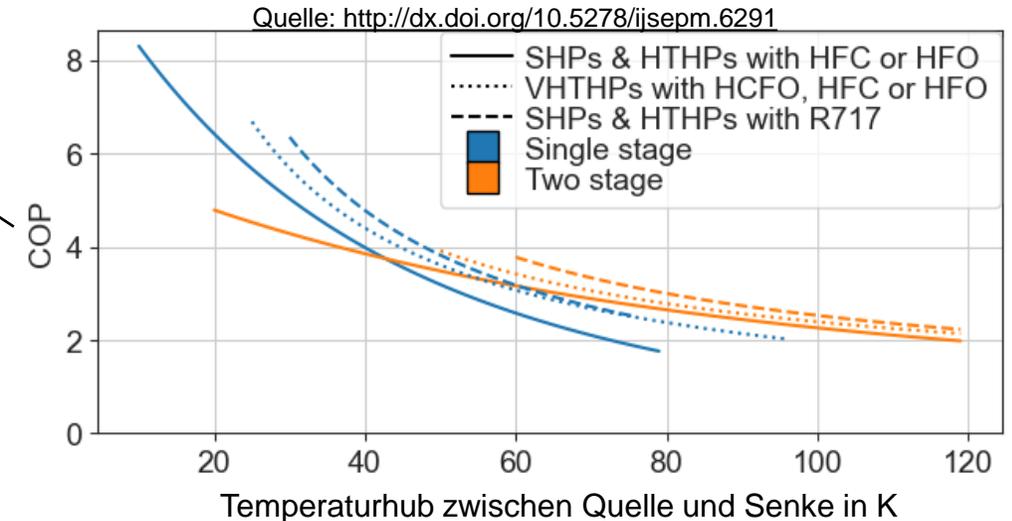
- $LCOH_{WP} < LCOH_{Kessel}$

$$\rightarrow \frac{c_{el}}{COP_{WP}} < \frac{c_{Gas}}{\eta_{Kessel}} \quad \eta_{Kessel} \rightarrow 1 \quad COP_{WP} > \frac{c_{el}}{c_{Gas}}$$

- Vor Ukraine Krieg:  $\frac{c_{el}}{c_{Gas}} > 3$

Aktuell große Varianz! Häufig:  $\frac{c_{el}}{c_{Gas}} \approx 2 \text{ bis } 3$

Energiepreisbremse (netto):  $\frac{130 \text{ €/MWh}_{el}}{70 \text{ €/MWh}_{Gas}} = 1,9$



# Wirtschaftlichkeit

## Dynamische Betrachtung:

- Stand 2020:
  - DE: WP selten konkurrenzfähig
  - SWE: jedes WP-Projekt konkurrenzfähig
- Zukunft (DE):
  - Steigende Gaskosten
  - Streichung EEG-Umlage
  - CO<sub>2</sub>-Preis
  - WP wird immer attraktiver

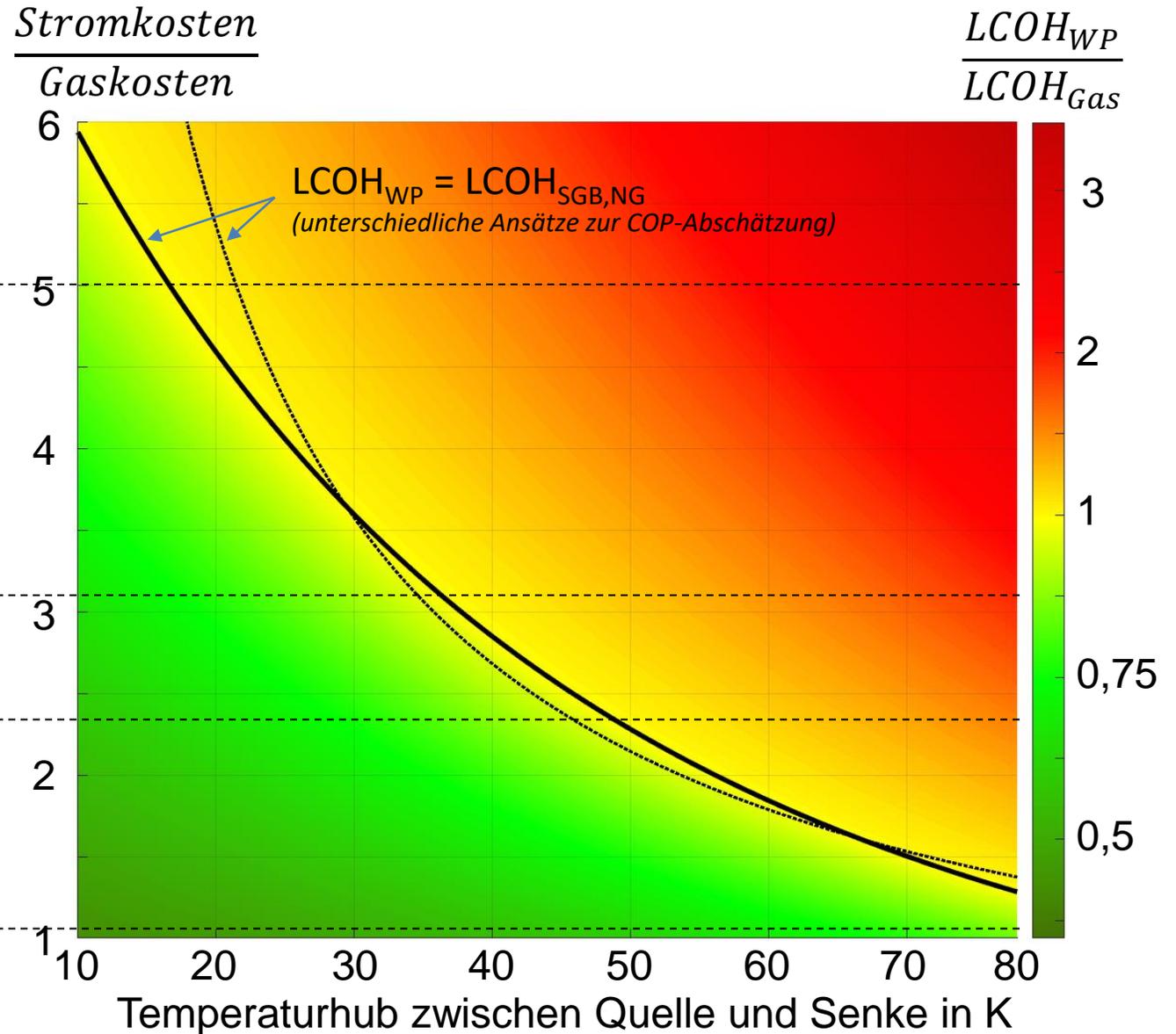
Stand 2020

Deutschland

Österreich

Frankreich

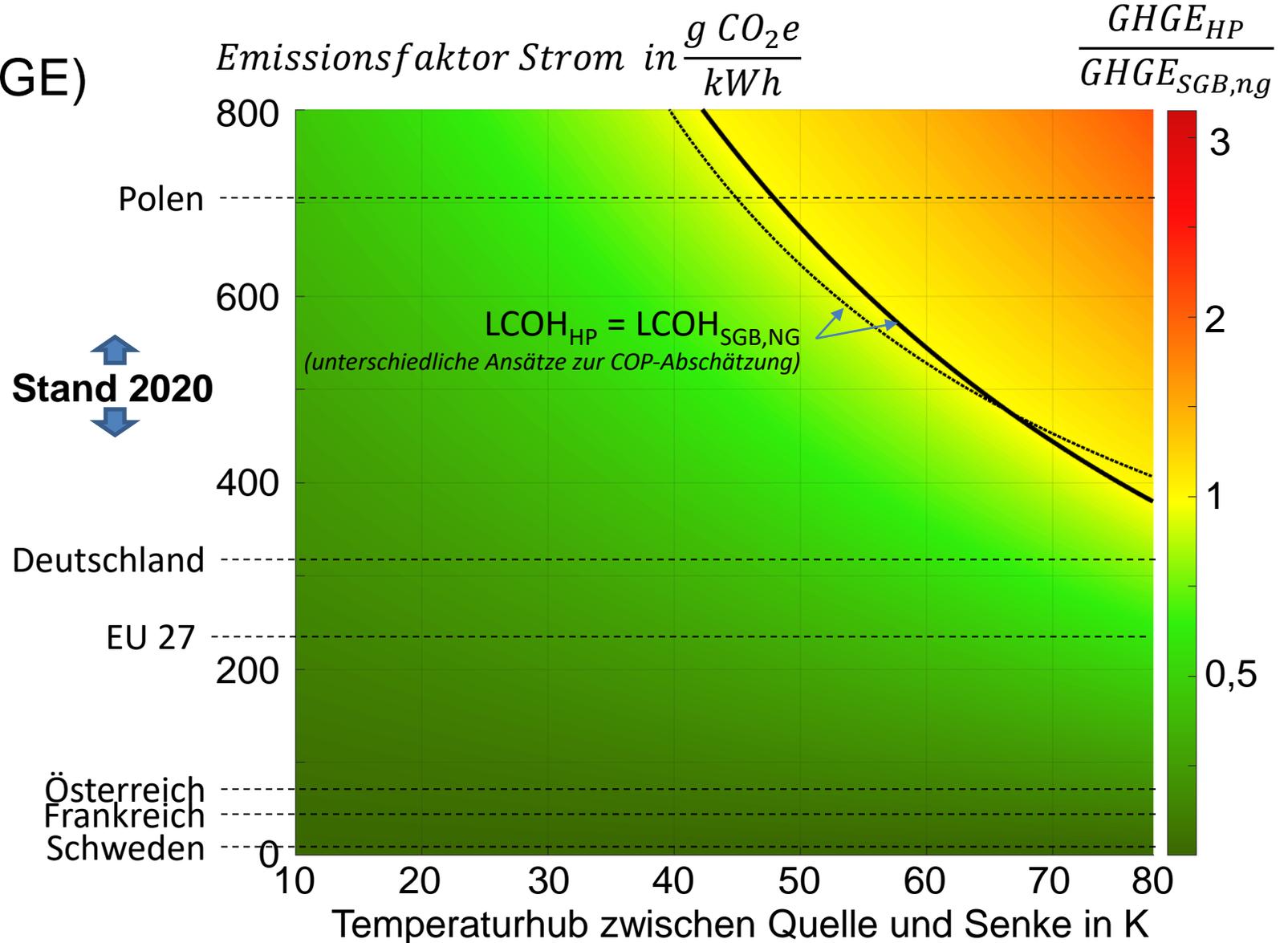
Schweden



Quelle: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2020.110646> (als Preprint kostenlos)

## Treibhausgasemissionen (GHGE) von Wärmepumpe (WP) und Gaskessel (Gas):

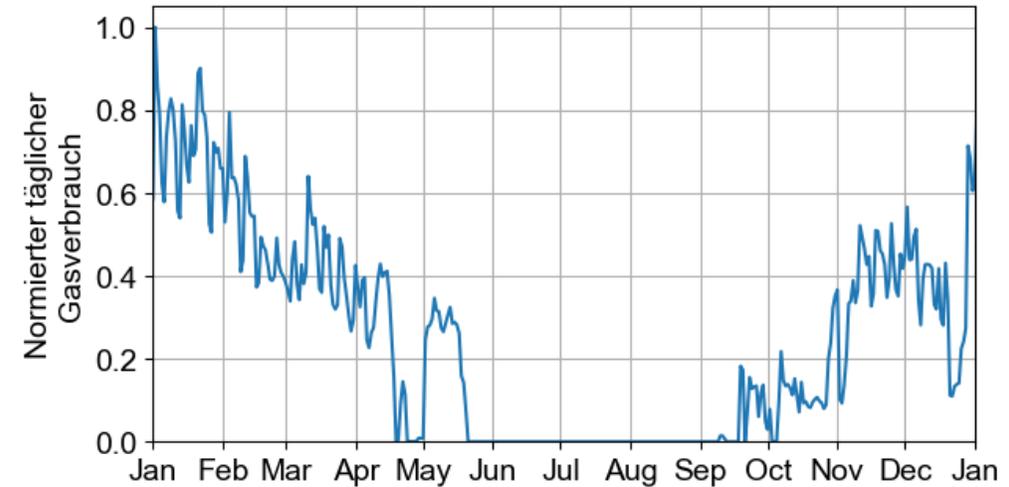
- Stand 2020:
  - WP sind mit Netzstrom fast immer ökol. sinnvoll
- Zukunft:
  - Vorteil von WP wird sich weiter ausbauen



Quelle: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2020.110646> (als Preprint kostenlos)

# Beispiel 1: Kunststoffspritzguss

- Wärmebedarf sehr saisonal
  - Keine wassergeführte Prozesswärme (nur elektrische Beheizung des Kunststoffs)
  - Rel. Geringer Raumwärmebedarf (ca. 80 kWh/m<sup>2</sup>) durch große diffuse Abwärmemengen
- Heizungsnetz 70/40 °C mit 4,5 MW Gaskesseln
- Zwei Kältenetze
  - 17/15 °C (Werkzeugkühlung)
  - 32/27 °C (Hydraulikkühlung)
  - 300 kW Freikühler
  - 300 kW Kältemaschinen



# Beispiel 1: Kunststoffspritzguss

	Hydraulikkreis	Werkzeugkreis
Wärmequelle in °C	32/27	17/15
COP	4,9	3,5
Wärmeleistung in kW	214	98
Eingespeiste Wärme in MWh/a	723	314
Spezifische Inv. Kosten in €/kWh	490	650

Vorgaben bzw. Annahmen:

- Kalkulationszinssatz: 8 %
- Laufzeit: 20 a
- Förderung: 40 %
- Keine Preissteigerungen

**Vor Energiepreisinflation:**

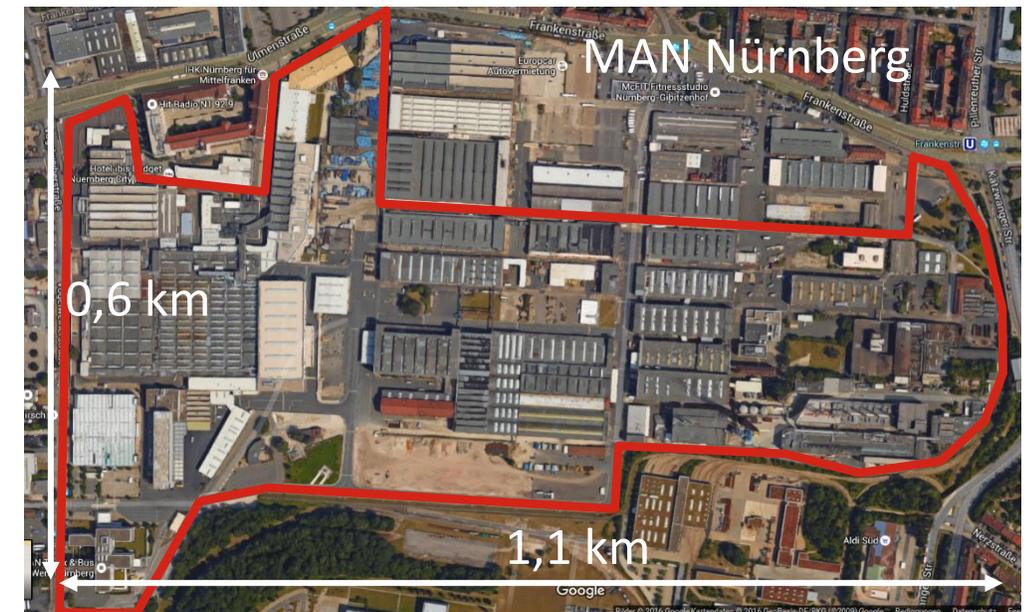
- Wärmepumpen kaum wirtschaftlich

**Jetzt:**

- Nur rund 3.000 Vollbetriebsstunden
- Trotzdem:  
Rund 1/3 des Wärmebedarfs mit Wärmepumpen wirtschaftlich versorgbar.

# Beispiel 2: Automotive

- Wärmebedarf sehr saisonal, wenig Prozesswärme
- Fernwärme
- Heizungsnetz 80/60 °C
- Im Rückbau befindliches Dampfnetz (Gaskessel)
- Zahlreiche Abwärmequellen, hier vorgestellt:
  - Druckluftkompressoren (25/20 °C)
  - Prozesse (bspw. Schleifemulsion) (25/20 °C)



# Beispiel 2: Automotive

	Druckluftkompressoren	Schleifemulsion
Wärmequelle in °C	25/20	25/20
COP	3,4	3,4
Wärmeleistung in kW	790	170
Eingespeiste Wärme in MWh/a	3.800	790
Spezifische Inv. Kosten in €/kWh	440	530

Vorgaben bzw. Annahmen:

- Kalkulationszinssatz: 10 %
- Laufzeit: 20 a
- Keine Förderung
- Keine Preissteigerungen

**Vor Energiepreisinflation:**

- Keine Amortisation

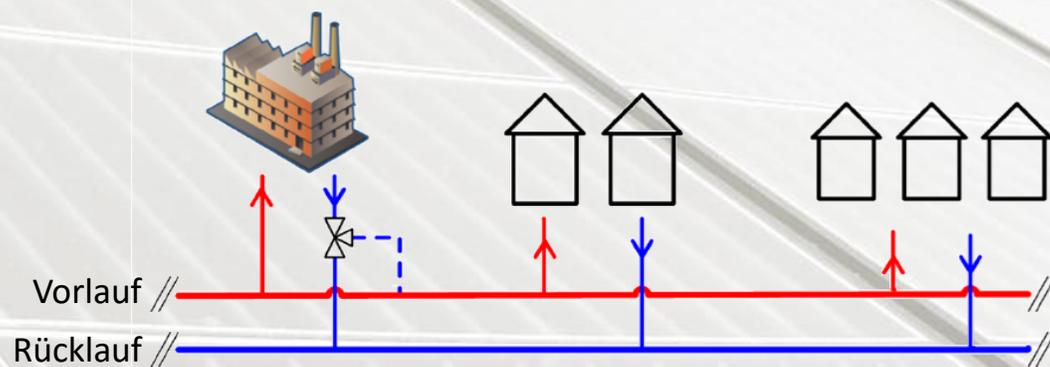
**Jetzt:**

- Amortisation nach einem Jahr

- Wirtschaftlichkeit von Wärmepumpen wird durch zwei Parameter bestimmt
  - Technisch: Temperaturhub zwischen Wärmequelle und Senke (→ COP)
  - Ökonomisch: Preisverhältnis Strom/Referenzenergieträger
- Fast jedes Wärmepumpenprojekt ist bereits gegenwärtig ökologisch sinnvoll (gegenüber Gaskellen bei aktuellem Netzstrommix)
- Hohes Strom/Gaspreisverhältnis hat in der Vergangenheit dazu geführt, dass kaum Wärmepumpen in der Industrie umgesetzt wurden
- Bereits relativ kleine Änderungen des Preisverhältnisses können einen starken Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit haben
- Strom/Gaspreisverhältnis im Bereich der Energiepreisbremse (1,9), wird zu sehr wirtschaftlichen Großwärmepumpenprojekten führen



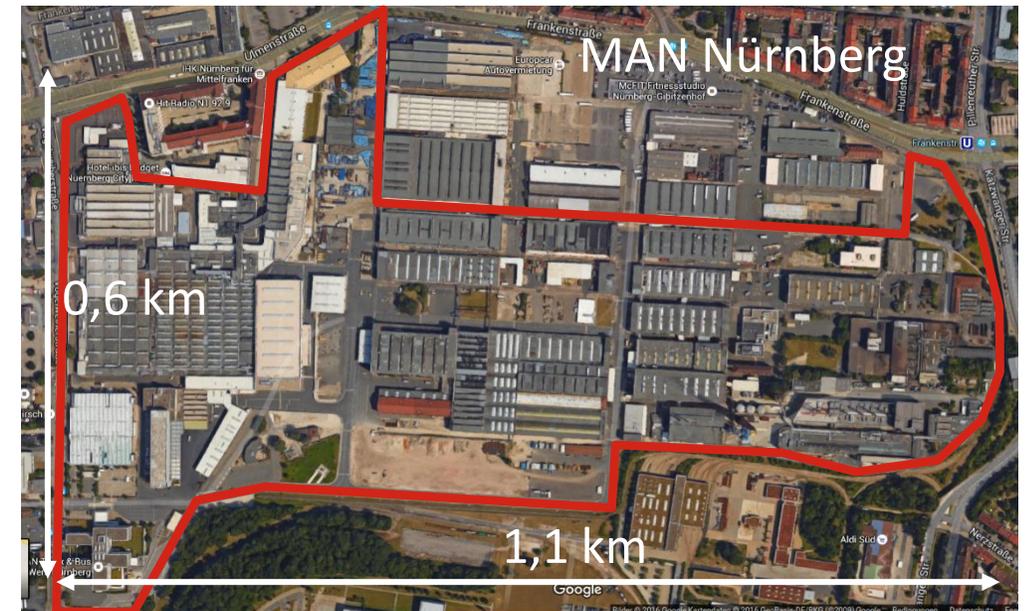
# Innovativer Dreileiterfernwärmeanschluss



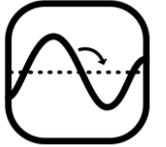
URBAN  
HEAT

# Forschungsprojekt „urbanHeat“

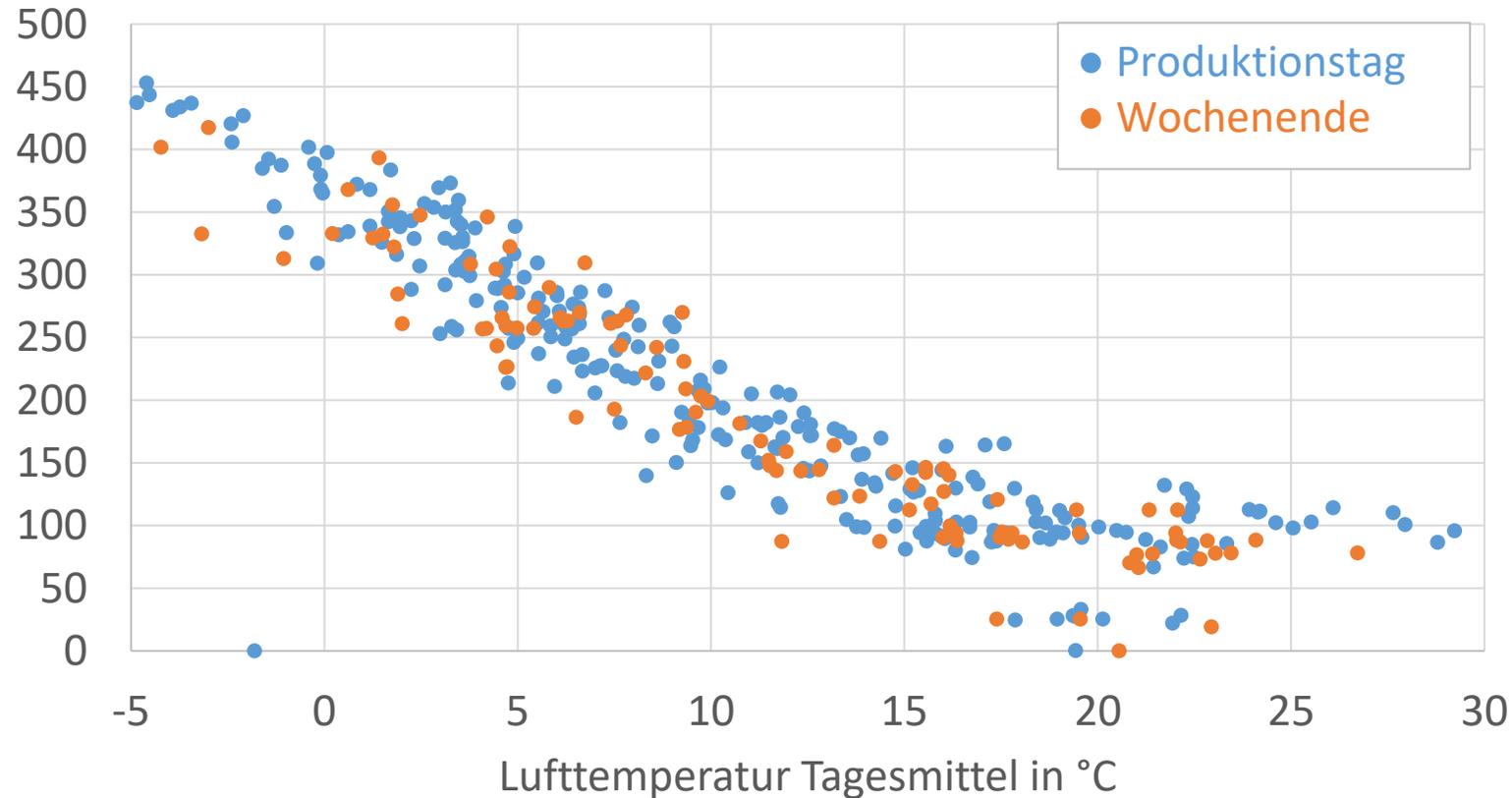
- 07/2020 – 06/2024
- Jährlicher Wärmebedarf: 80 GWh/a
- Raumwärme dominiert
- Ziele des Forschungsprojekts
  - Identifizierung des Effizienzpotentials
  - Analyse Abwärmequellen
  - Erhebung von EE-Potentials
- Roadmap zur Dekarbonisierung Wärmebedarf



# Analyse (Raum-)Wärmebedarf



Täglicher Wärmebedarf in MWh/d

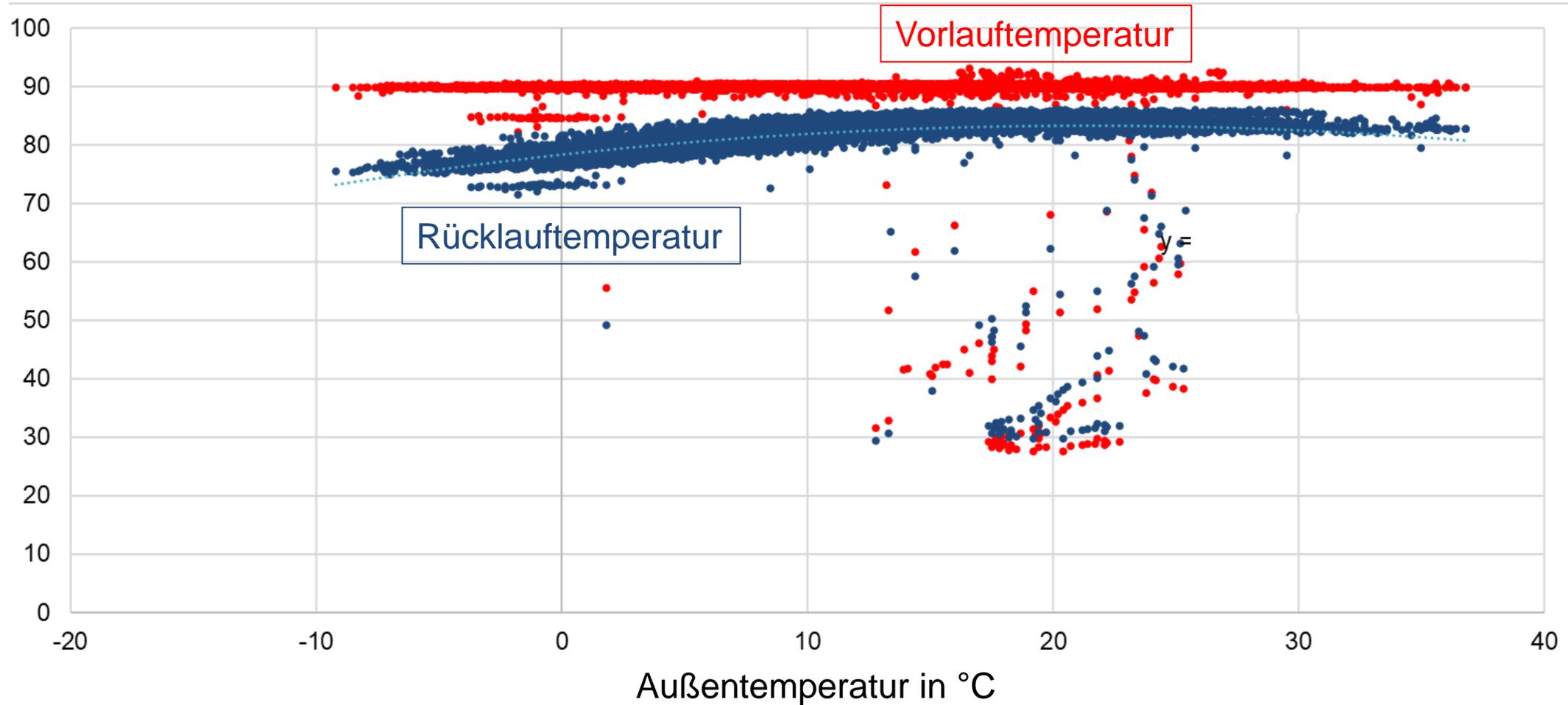


- Hoher Anteil von Lüftungsanlagen ohne WRG
- Hohe Luftwechselraten sorgen für
- und keine Abschaltung

# Temperaturen MAN

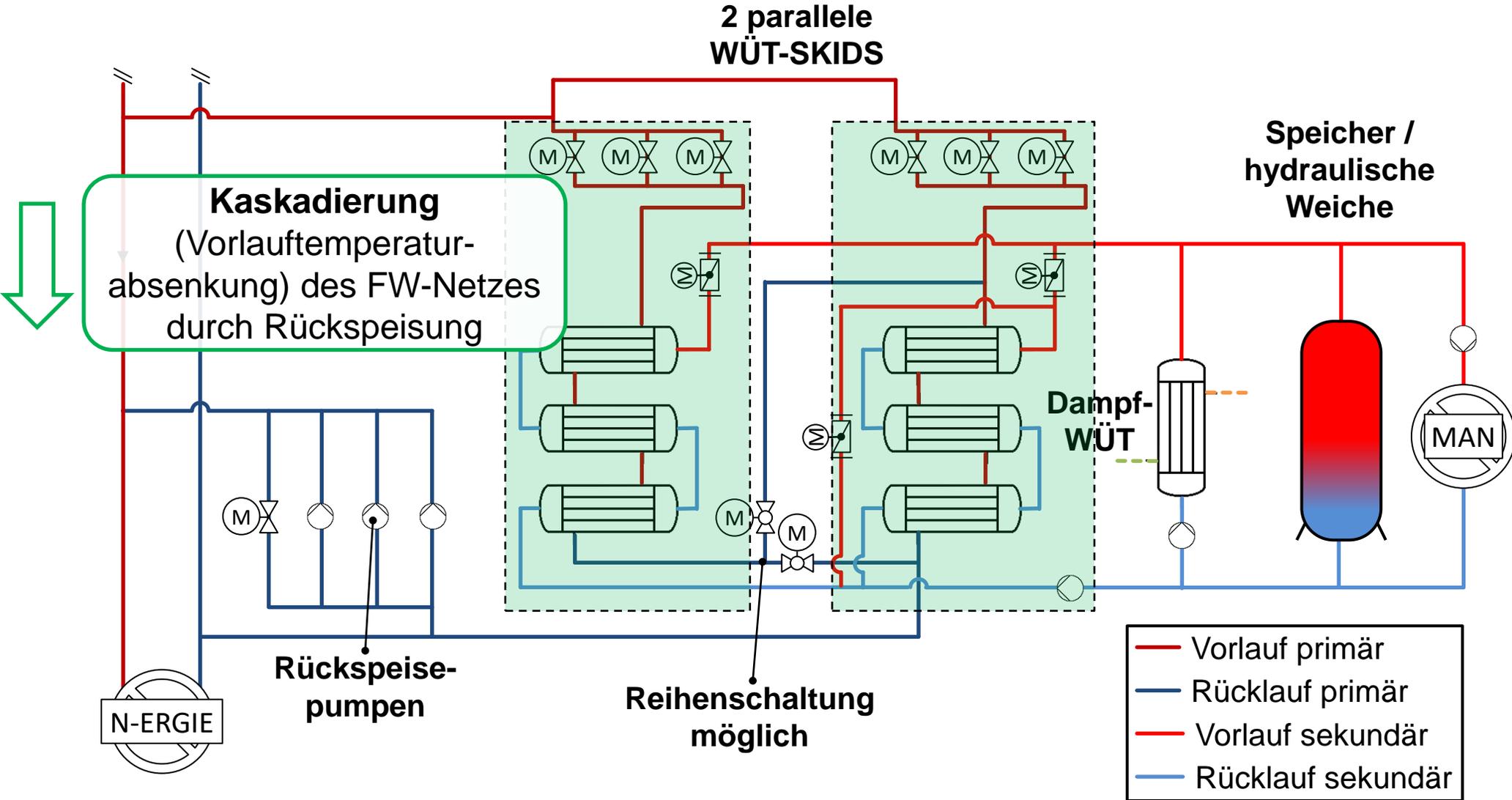


Temperaturen in °C



# Kaskadierender FW-Anschluss MAN

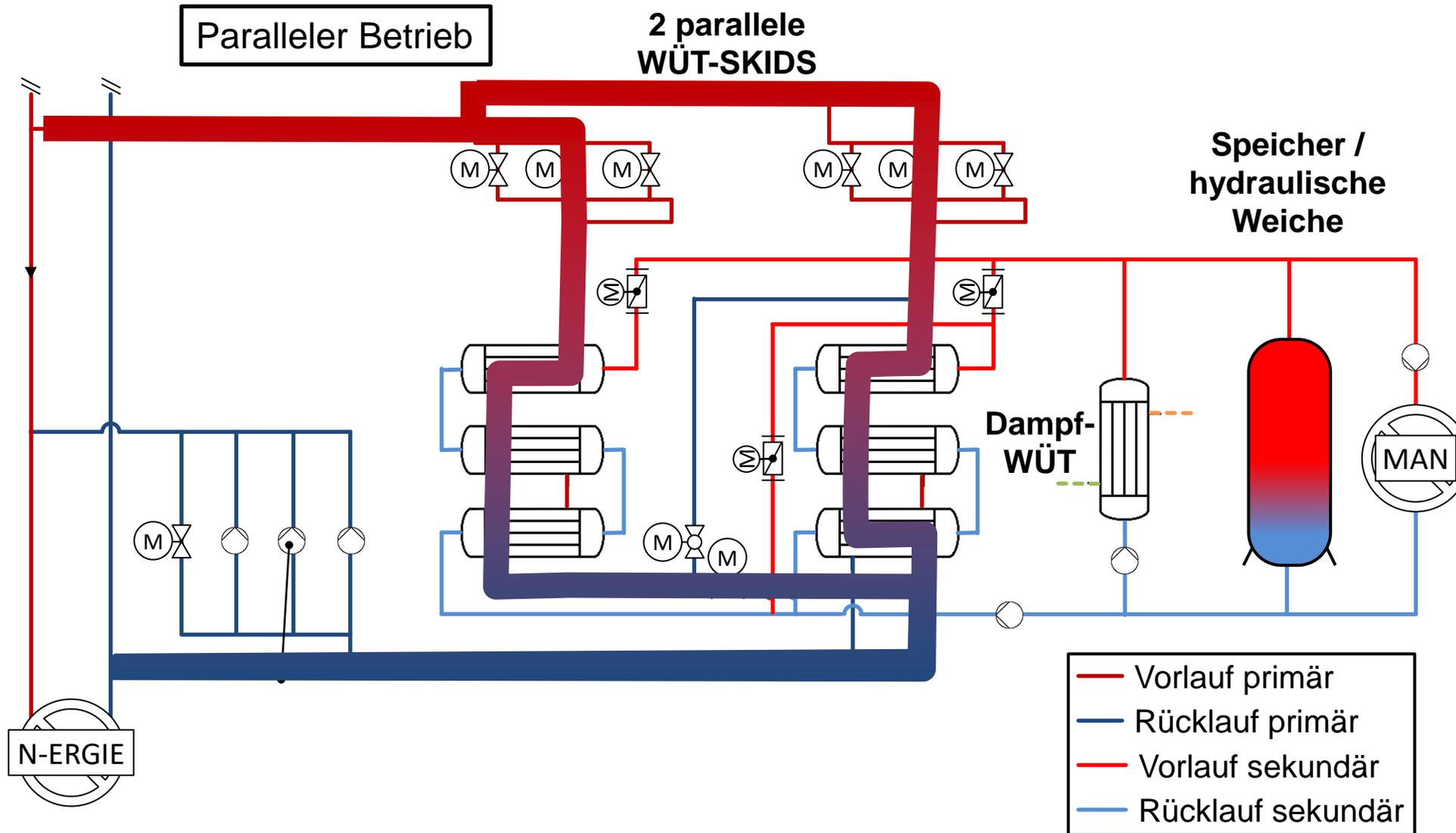
Schema



Anordnung der WÜT

# Kaskadierender FW-Anschluss MAN

Schema



Anordnung der WÜT

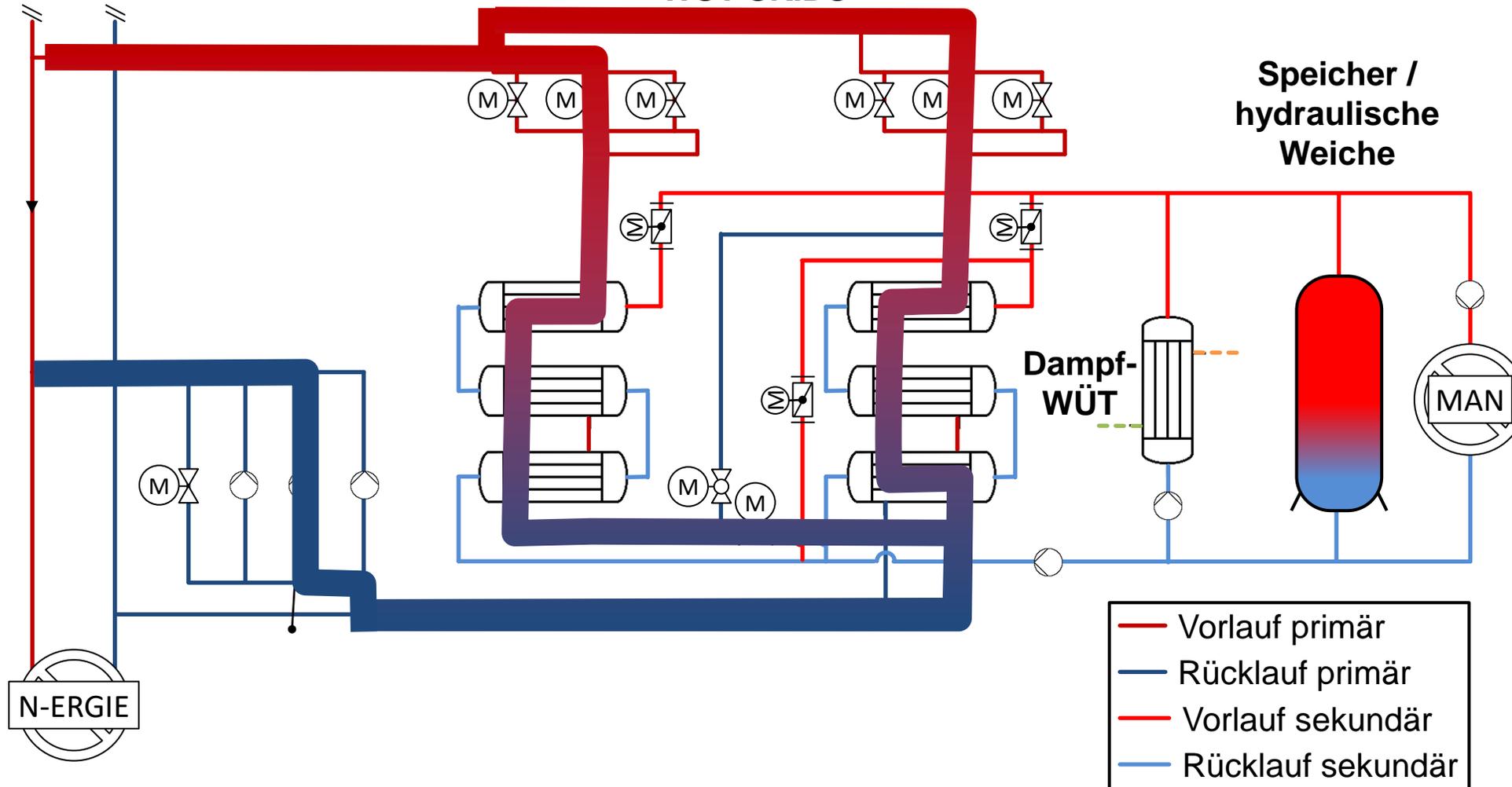
# Kaskadierender FW-Anschluss MAN

Schema



Paralleler Betrieb mit Rücklaufeinspeisung

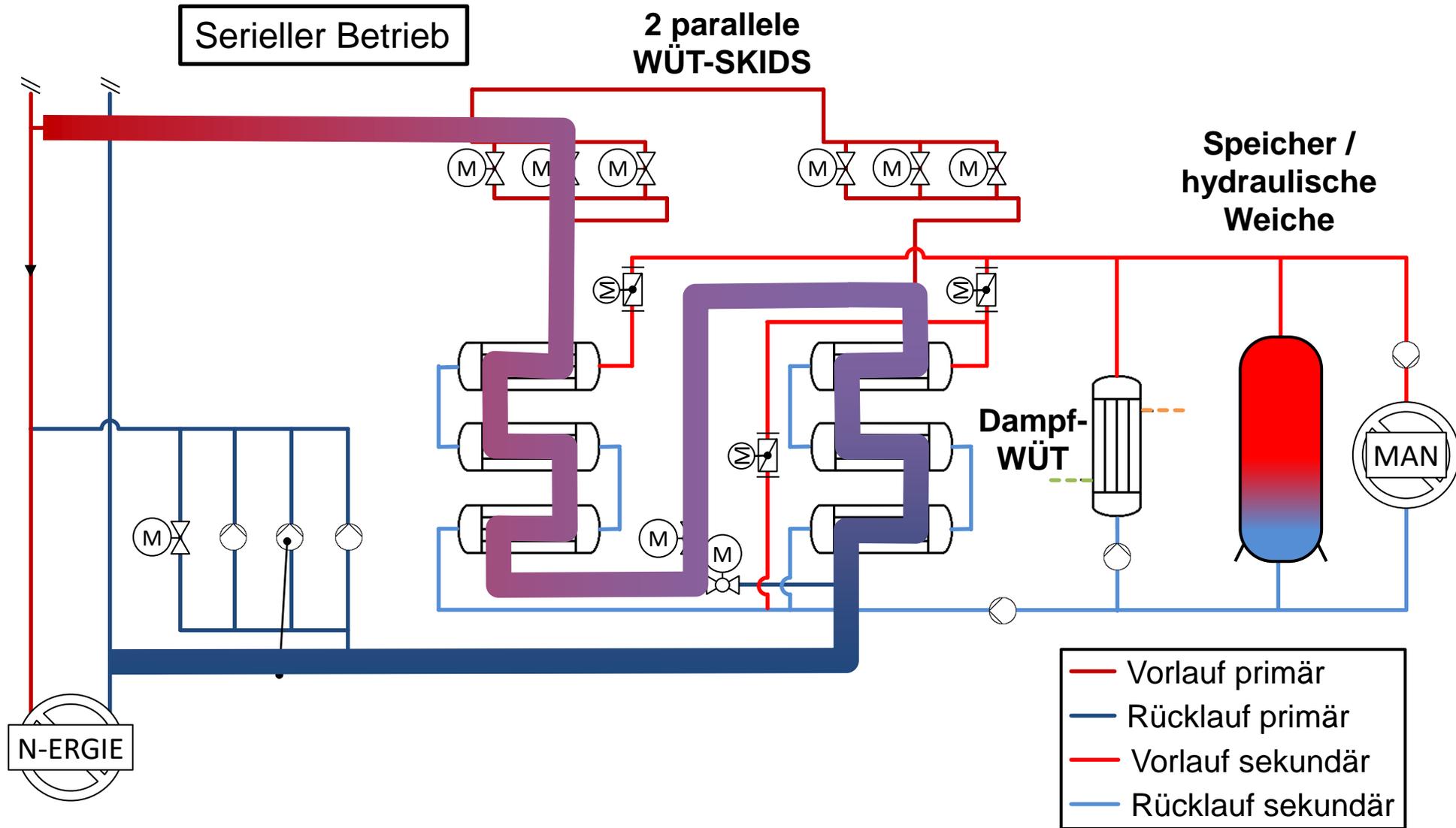
2 parallele  
WÜT-SKIDS



Anordnung der WÜT

# Kaskadierender FW-Anschluss MAN

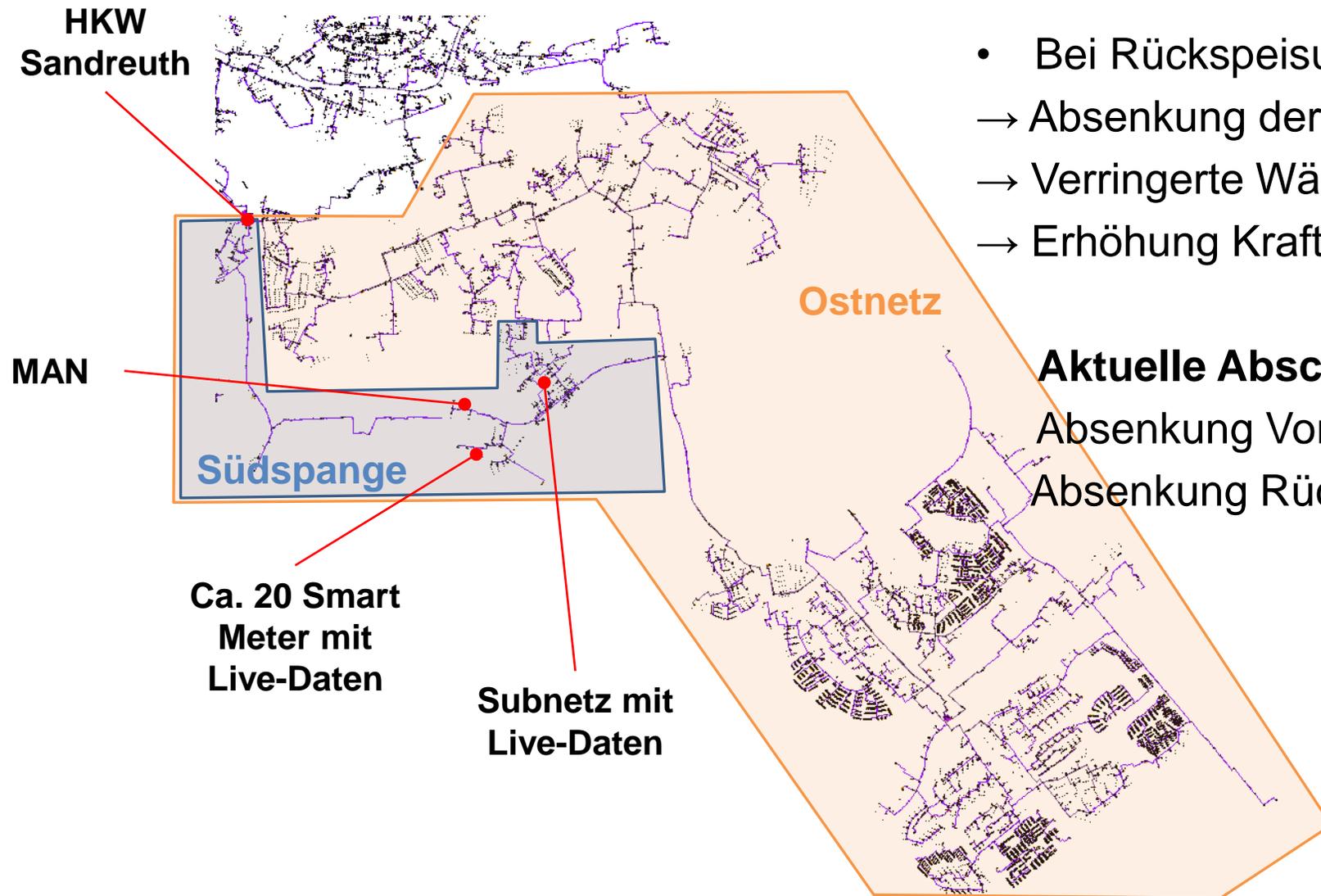
Schema



Anordnung der WÜT

# MAN-Anschluss im Gesamtnetz

Bilanzgrenzen



- Bei Rückspeisung in den Vorlauf:
  - Absenkung der nachgelagerten  $T_{VL}$
  - Verringerte Wärmeverluste
  - Erhöhung Kraftwerkwirkungsgrad



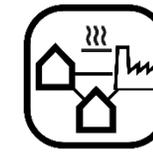
## Aktuelle Abschätzung:

Absenkung Vorlauftemperatur: 7,3 K

Absenkung Rücklauftemperatur: 1,1 K



# Fazit



- Fernwärmeversorgung für innerstädtische Unternehmen wichtige Option zur Dekarbonisierung
- Innovativer Dreileiteranschluss ermöglicht Anschluss bei hohen Rücklauftemperaturen ohne die Rücklauftemperatur des Netzes negativ zu beeinflussen
- Seit November 2022: Wasserbasiertes Heizungsnetz bei MAN allein über FW versorgt (Braunkohleausstieg!)
- Monitoring und Betriebsoptimierung in 2023 und 2024

