

Professur für Gebäudeenergie-technik und Wärmeversorgung

Flexibler Wärmenetzbetrieb und abnehmerseitiges Wärmelastmanagement

26. Dresdner Fernwärme-Kolloquium

Paulick, Boß, Matthees, Felsmann, Rochau

29. September 2021

Überlegung

Lässt sich der in der Elektroenergieversorgung etablierte ZELLULARE Ansatz auf Wärmenetze übertragen?

- dezentrale Einspeisung
- Bilanzkreisverantwortung
- flexibler Netzbetrieb

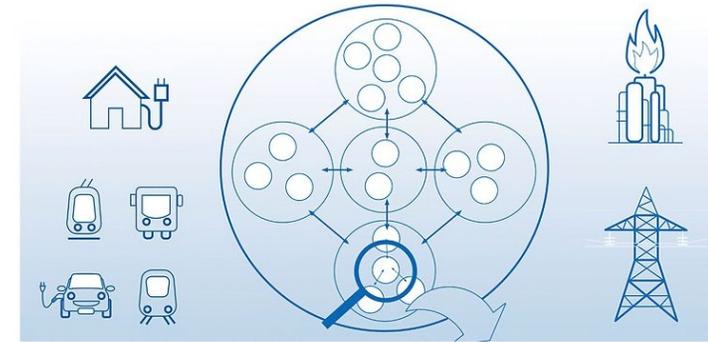
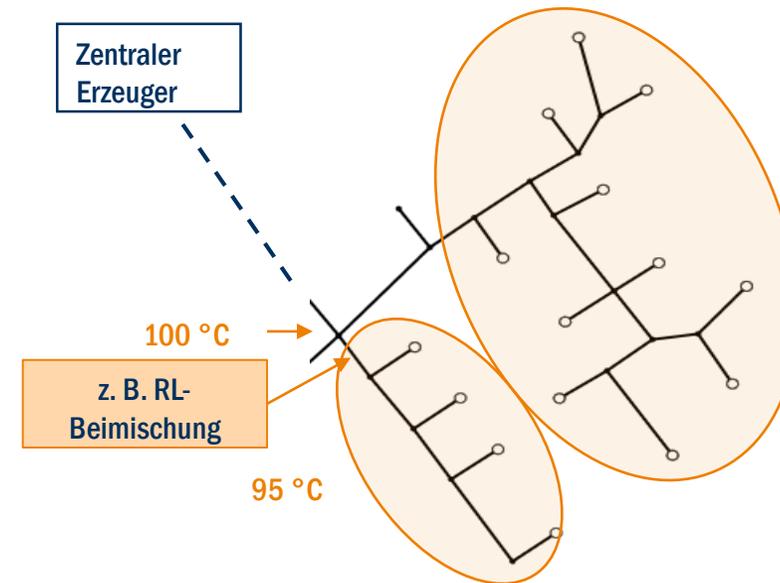
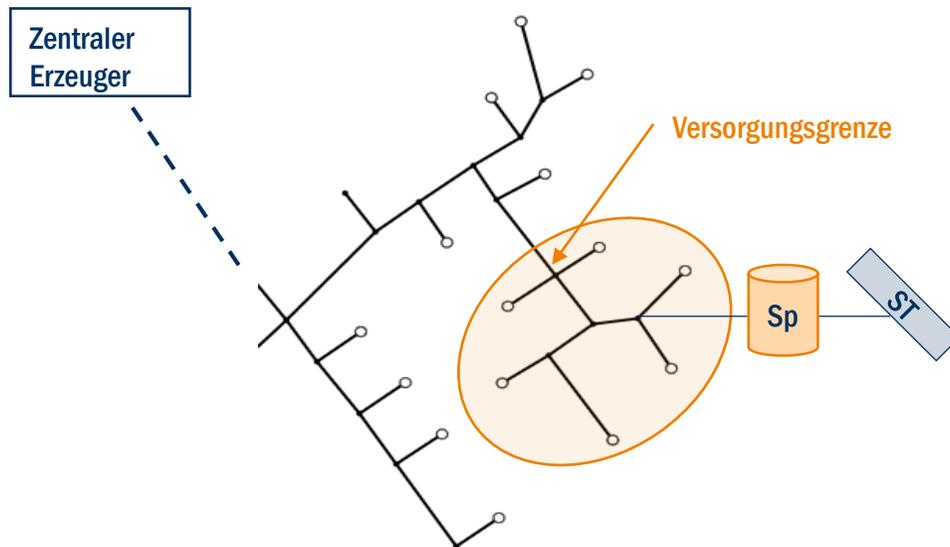


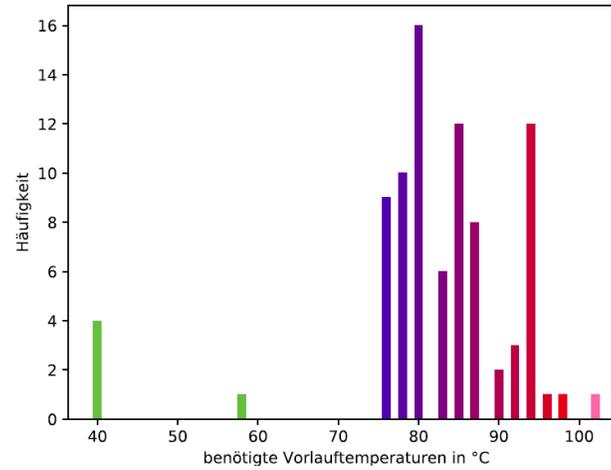
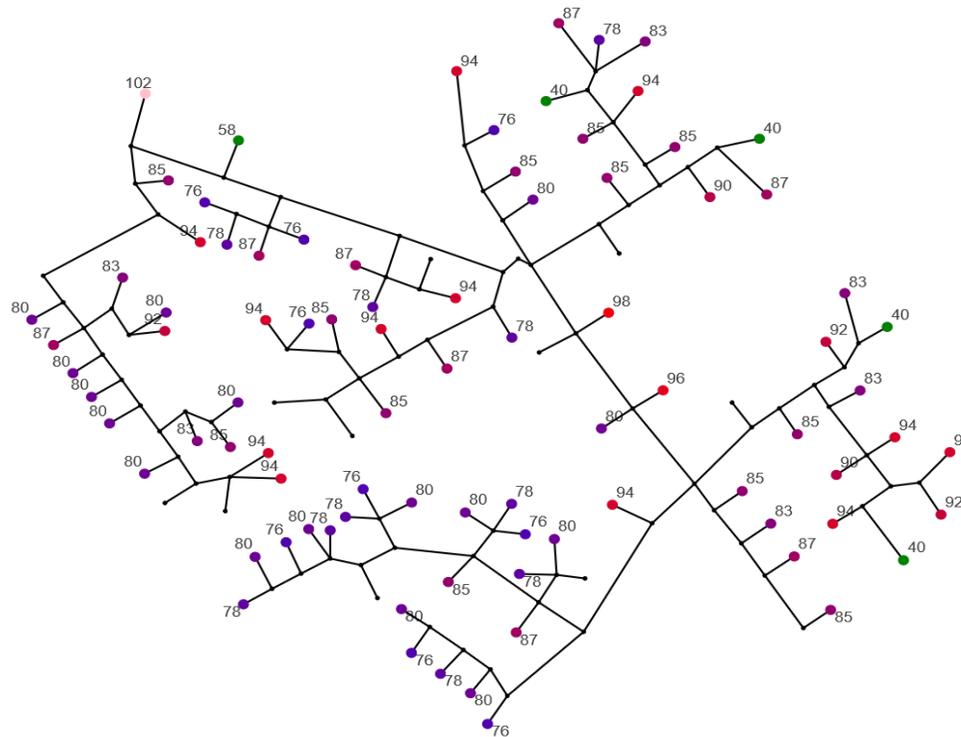
Bild: VDE



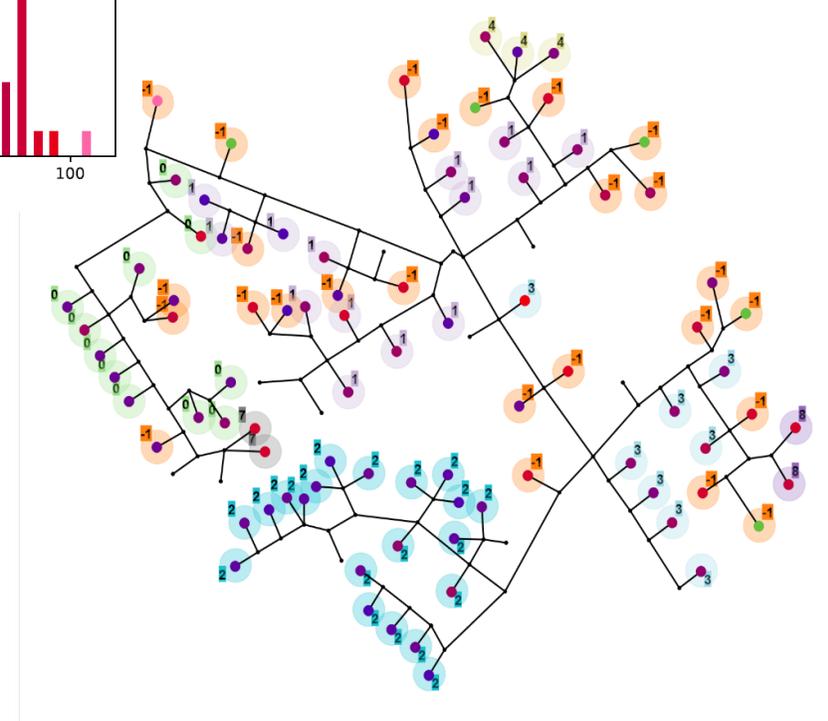
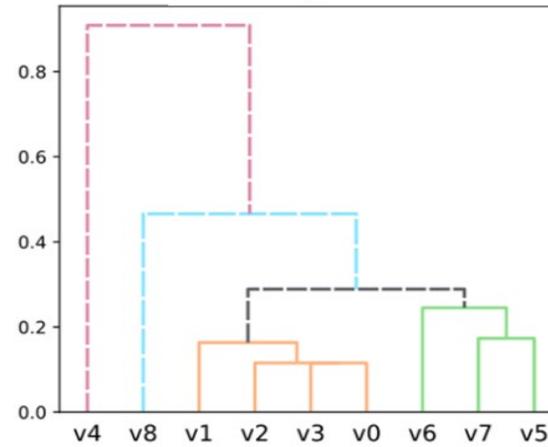
Das Clustering

Netzbereiche mit gleichen Eigenschaften (=Zellen) finden und clustern (=zusammenfassen).

Beispiel: kundenseitige Soll-Vorlauftemperatur



Dendrogram



→ Zellen + Flexibler Betrieb = ZellFlex

Flexibler Wärmenetzbetrieb

Zwischenergebnisse aus dem Forschungsprojekt „ZellFlex“

Gefördert durch:

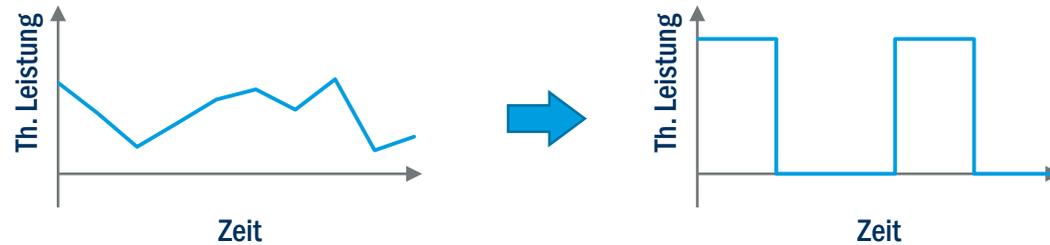


aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Forschungsvorhaben gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie auf
Grund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages FKZ: 03EN3001

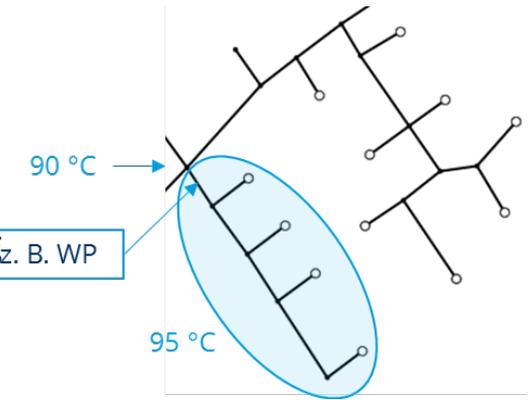
Übersicht Flexibilisierungsmaßnahmen im Projekt ZellFlex

Pulsbetrieb: Vorübergehendes Abschalten von Zellen durch Speicher + intelligente Regelung; Ziel: Wärmeverl. verringern

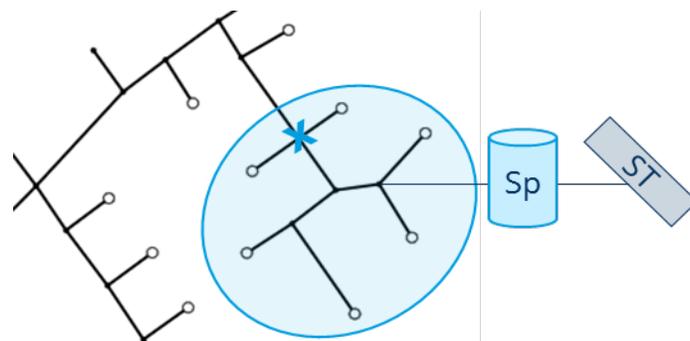


Örtliche Flex. der VL-Temperatur: Untersuchung der Vorlauf-Temperatur-Anforderungen; Zellbildung (Clustering);

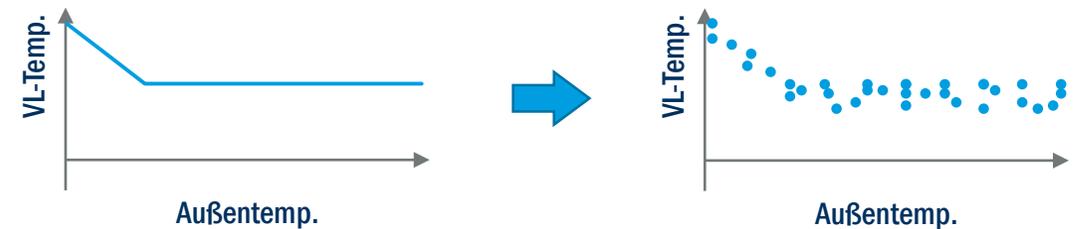
Ziel: Temperaturabsenkung (Verringerung Wärmeverluste)



Dezentrale Wärmehaltung: Einsatz dezentraler Speicher; Ziel: Verringerung Wärme-Transportaufwand bei hoher Einspeiseleistung

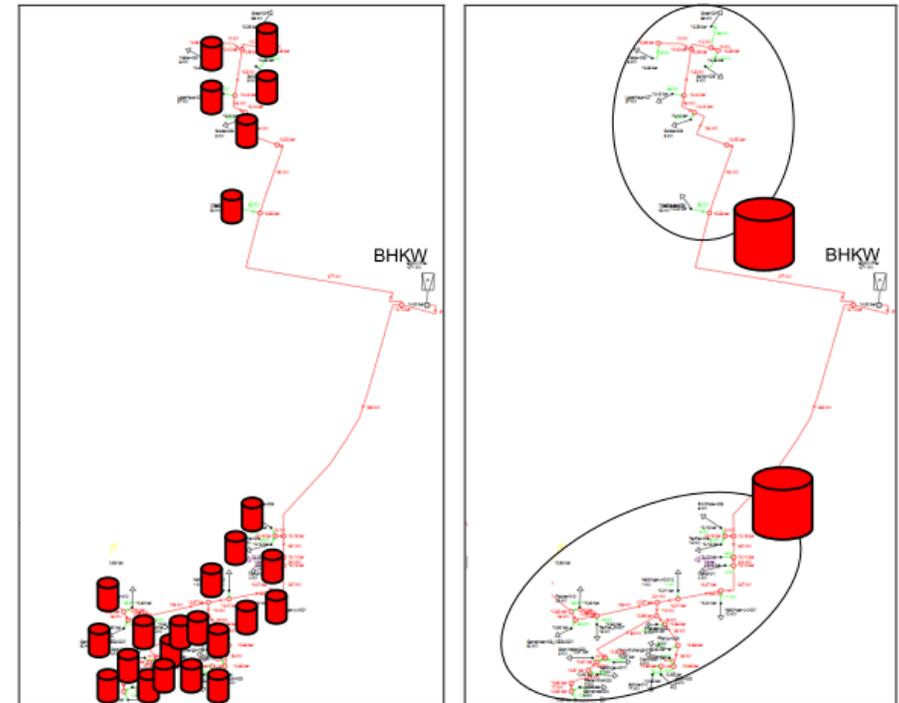


Zeitl. Flex. der VL-Temperatur: Abgleich tatsächlicher Temperaturen im Netz mit TAB/Abnehmeranforderungen; Ziel: Temperaturabsenkung (Verringerung Wärmeverluste)



Pulsbetrieb allgemein

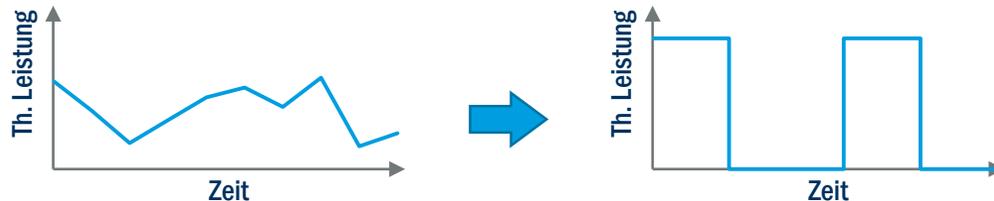
- Ziel: Reduktion von Wärmeverlusten
- Grundprinzip:
 - zeitgleiches Beladen von Pufferspeichern (jeder Abnehmer), oder gemeinsamer Pufferspeicher für Abnehmergruppe
 - Geordnete Beladung & zeitweise Selbstversorgung der Abnehmer / -gruppen
 - → „Stillstand“ im Netz → Reduktion der Wärmeverluste
 - effektiv bei langen Zuleitungen
- Umsetzung:
 - Häufig von „Enerpipe“ umgesetzt
 - ähnliche Variante: Einleiter-Netze



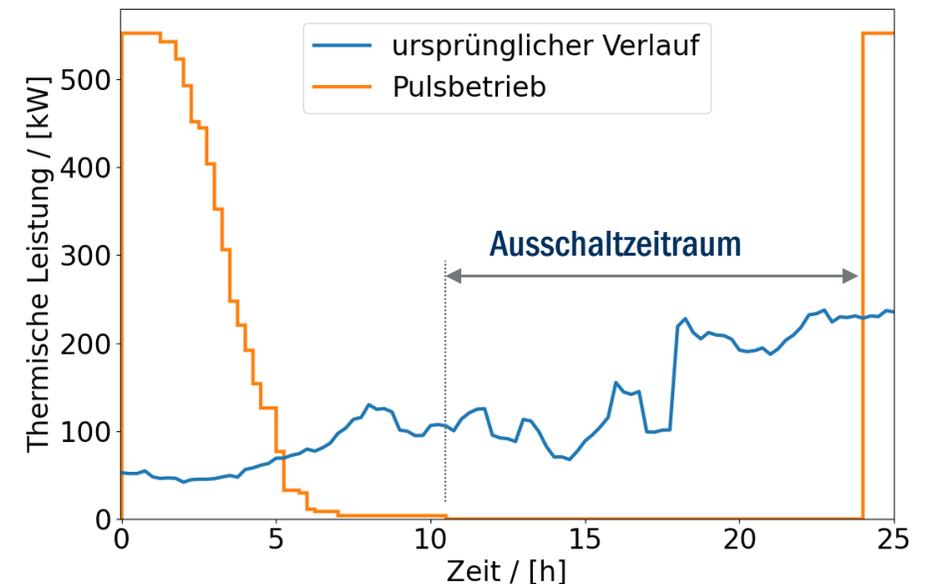
Quelle: Kienberger et. al., „Temperaturflexibilisierung im Schwachlastbereich des Betriebs von Nahwärmenetzen Tflex“, 2018

Pulsbetrieb im Projekt ZellFlex

- Betrachtung großer Bestandsnetze im städtischen Bereich (hohe Wärmemengeniendichte)
- Ziel: Identifikation von Netzabschnitten (Zellen), in denen Pulsbetrieb sinnvoll ist
→ Offene Frage: Welche Kennzahlen eignen sich zur Identifikation?
- Betrachteter Zeitraum: 05. Juni bis 05. Juli (30 Tage im Sommer)
- Dezentrale Speicher (1 pro Abnehmer) mit 0,5 m³ bis 2 m³ Volumen und 52 K Spreizung
- Vereinfachte Betrachtung durch Rechteckverläufe, jeder Puls eines Abnehmers im gesamten Zeitraum hat die gleiche Länge und „Höhe“ (Puls-Leistung):

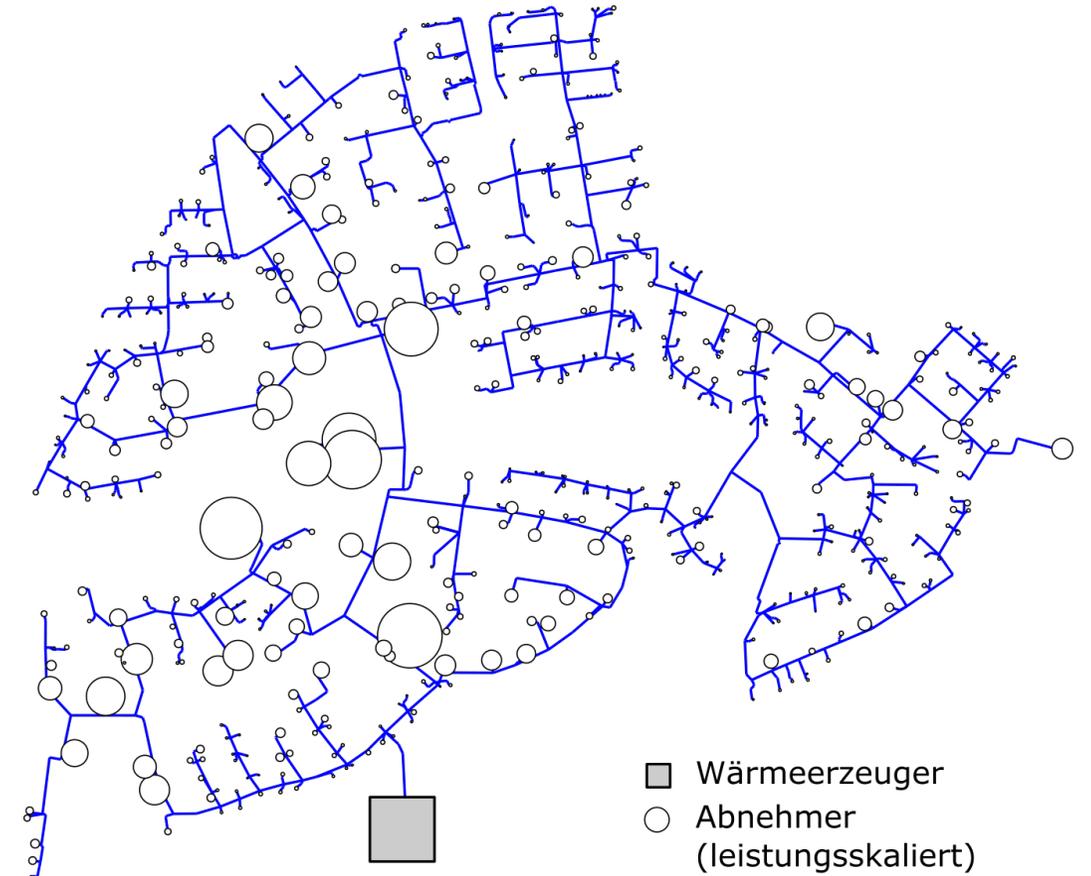


Lastverlauf an der Grenze einer Beispiel-Zelle (30 Pulse in 30 Tagen)



Betrachtetes Referenznetz

- Innerstädtisches Fernwärmenetz der 2. Generation
- mehrfach vermascht
- 556 Abnehmer
- 28,5 MW Anschlussleistung
- Fahrkurve 85..125 °C
- vorwiegend Wohnbebauung mit Infrastruktur
- keine Industrie

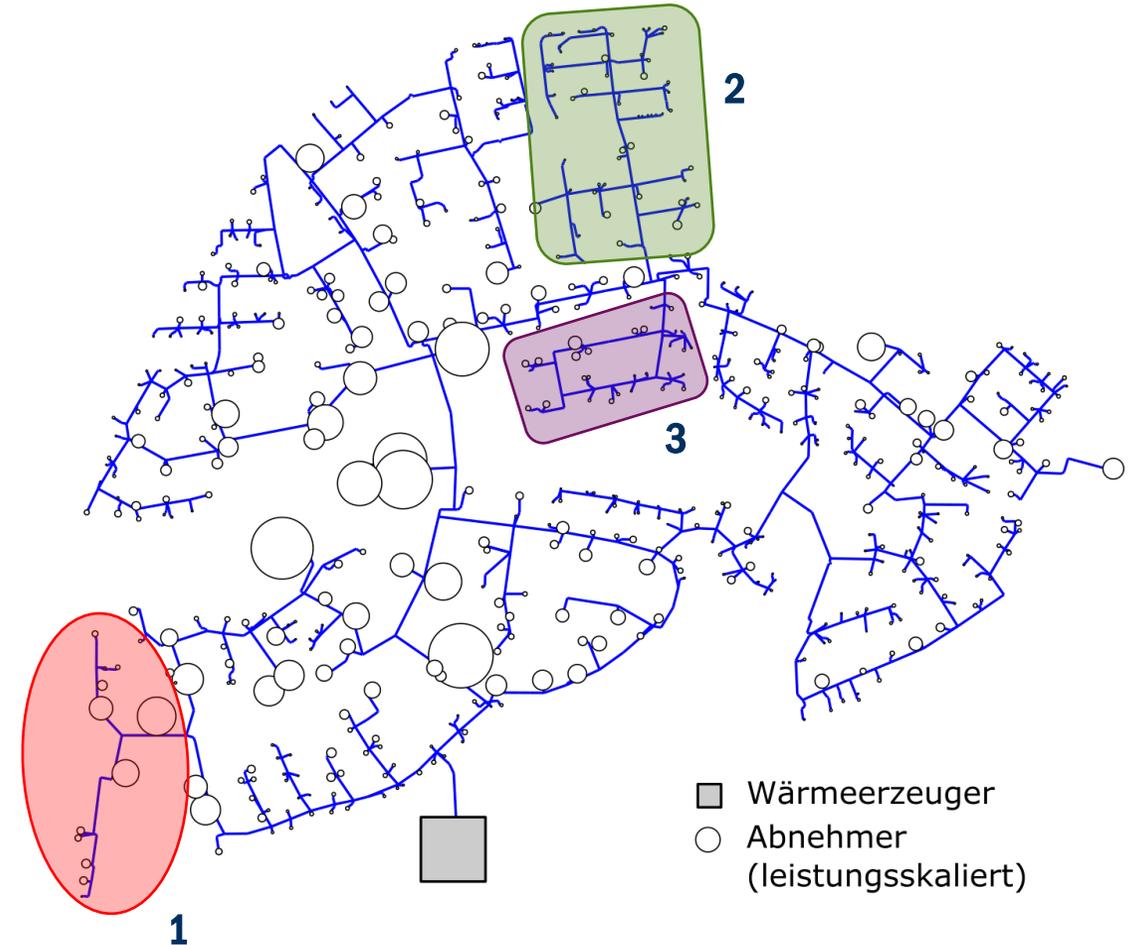


Pulsbetrieb – Simulationsstudie

zellulare Betrachtung

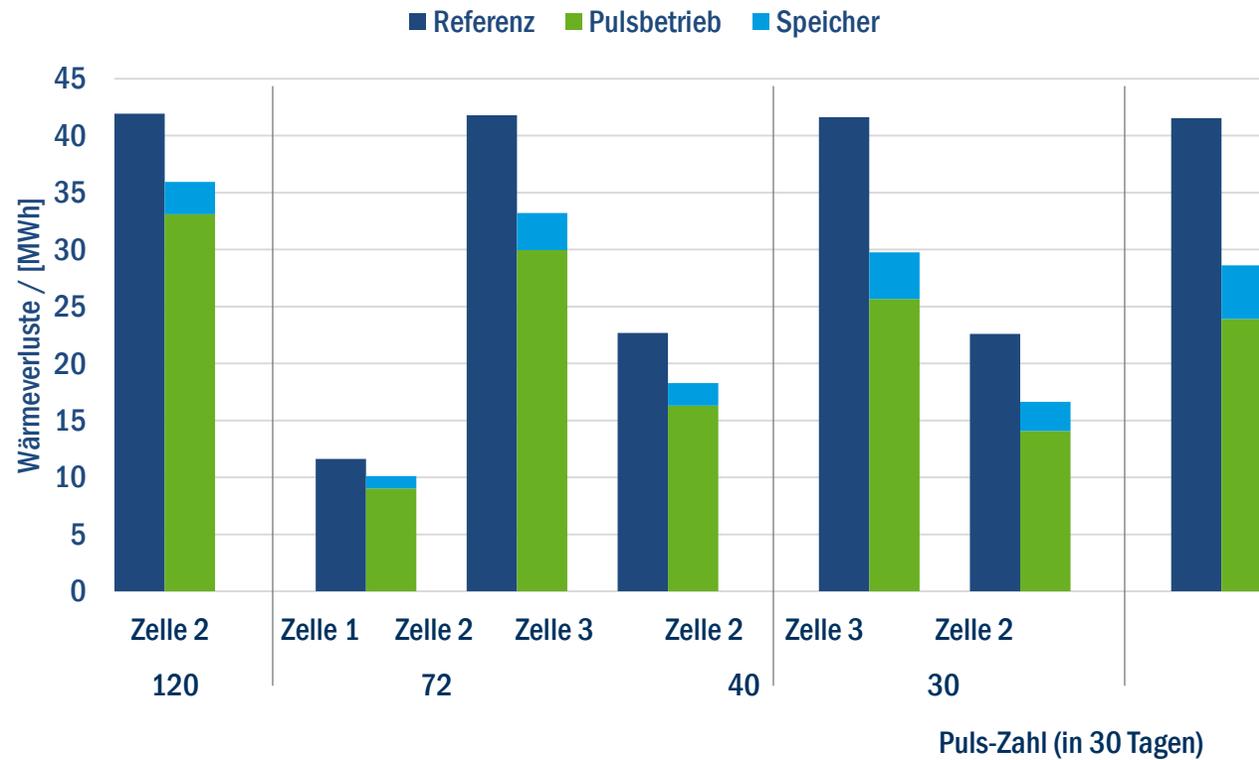
- Betrachtung verschiedener Zellen untersch. Struktur, Leistung, Homogenität, Trassenlänge
 - Zelle 1:
 - 12 Abnehmer mit 1,13 MW
 - Zelle 2:
 - 54 Abnehmer mit 1,45 MW
 - Zelle 3:
 - 29 Abnehmer mit 1,12 MW
- Simulierte Varianten:

Puls-Anzahl (in 30 Tagen)	120	72	40	30
Zelle 1		X		
Zelle 2	X	X	X	X
Zelle 3		X	X	



Wärmeverlustreduktion durch Pulsbetrieb

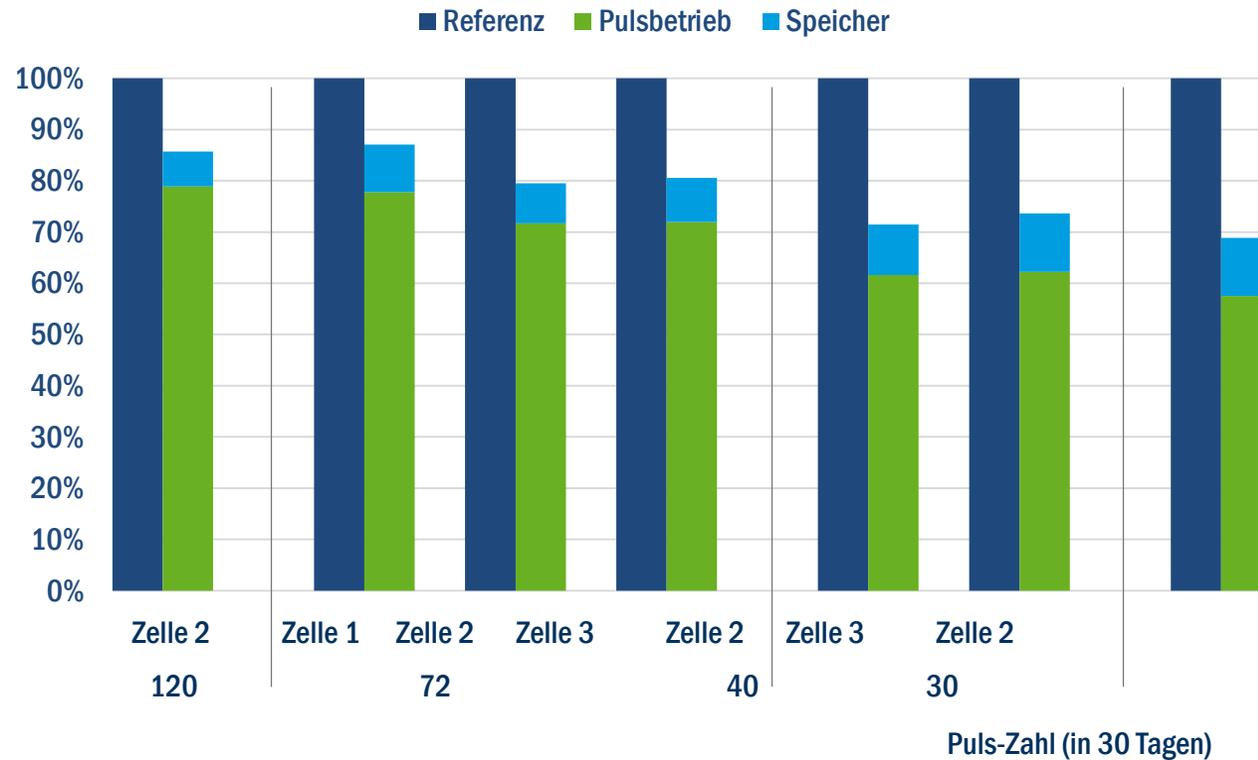
Wärmeverluste der jeweiligen Zellen im Referenzfall sowie im Pulsbetrieb



- In allen betrachteten Fällen können die Wärmeverluste insgesamt reduziert werden
- Absolute Wärmeverluste sowie Einsparungen in Zelle 2 am höchsten, da Trassenlänge am größten

Wärmeverlustrückführung durch Pulsbetrieb

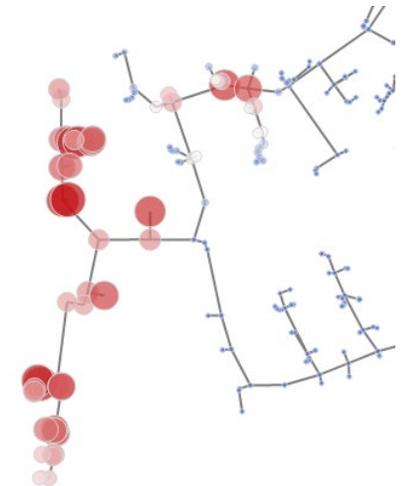
Wärmeverluste bezogen auf die Netz-Wärmeverluste der jeweiligen Zelle im Referenzfall



- Auch bei Betrachtung der Relativwerte sind die Einsparungen in Zelle 2 am größten, in Zelle 1 am geringsten
- Grund: Homogenität

Weitere Wirkungen des Pulsbetriebs

- Die Simulationen ergeben geringfügige Reduzierungen(!) der mech. Pumpenarbeit von 20 bis 30 kWh innerhalb des betrachteten Zeitraums von 30 Tagen → vernachlässigbar
- ABER zu beachten:
 - Keine der Zellen enthielt hydraulisch kritische Punkte bzw. den Druckschlechtpunkt
→ Pulsbetrieb verursachte keine Erhöhung des Pumpen-Differenzdrucks
 - Zellen klein im Verhältnis zum restlichen Netz ($\approx 4..5\%$ der Anschlussleistung)
→ Erhöhung des Volumenstroms während eines Pulses hat kaum Auswirkungen auf Gesamtnetz
- Es ergeben sich weitere Fragestellungen:
 - Was passiert, wenn mehrere Zellen gleichzeitig im Pulsbetrieb sind?
 - Mögliches Kriterium für Zellbildung: Druckschlechtpunkt bzw. hydraulischer Engpässe
 - Volumenstrombegrenzer deaktivieren?
- Rohrbeanspruchung als Resultat der Temperaturwechsel
(in Anlehnung an AGFW 401 – Teil 10)
→ Betrachtung der Volllastwechsel: therm. Rohrbeanspruchung, Schadenfall?



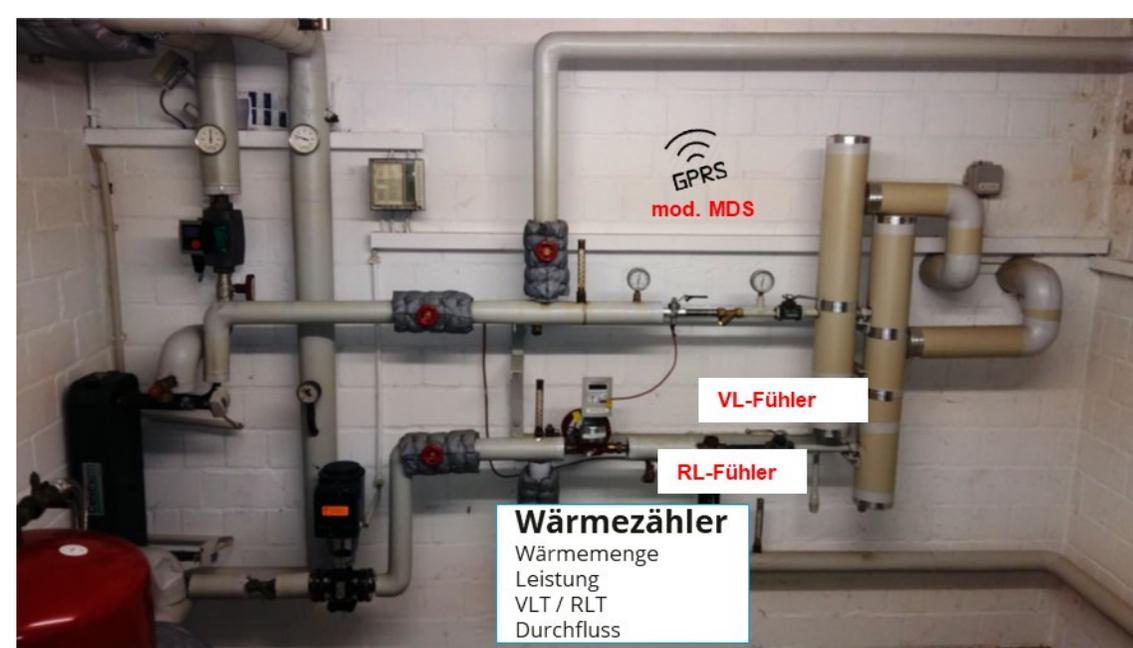
Gebäudemonitoring

→ Abnehmerseitiges Wärmelastmanagement

BaltBest

Projekt-Erkenntnisse:

1. Die Einführung eines Monitorings ist sinnvoll und notwendig.
 - a) Auswertung durch fachkundiges Personal
 - b) Erstellung von Anlagendokumentationen
 - c) Einschränkung des Zugangs zu den Heizzentralen
2. Ohne die Optimierung der Anlagenhydraulik ist ein effizienter Betrieb nicht möglich.
3. Der bedarfsgerechten Leistungsdimensionierung der Wärmeerzeuger wird beim Austausch selten Rechnung getragen.
4. Teiloptimierungen führen nicht zum Optimum des Gesamtsystems.
5. Die Effizienz des Wärmeerzeugers ist **nur** eine notwendige jedoch keine hinreichende Bedingung für Energieeinsparungen. → Erweiterte Betrachtungen



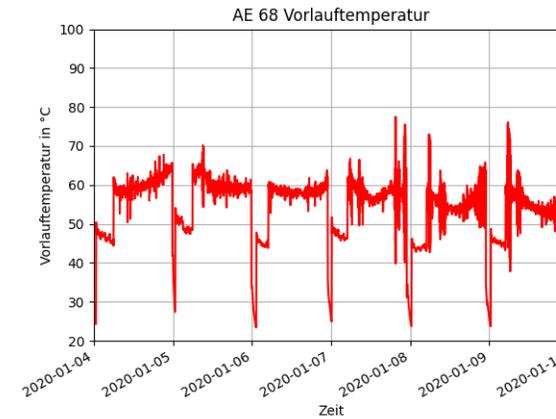
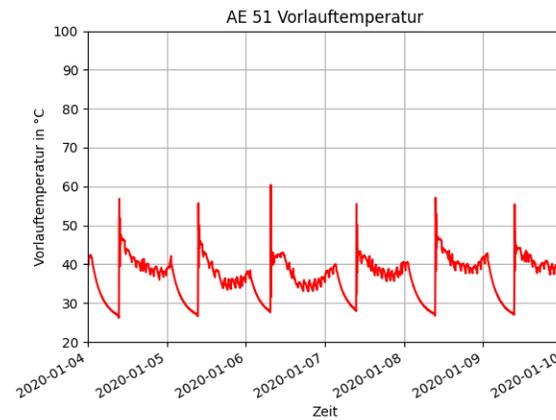
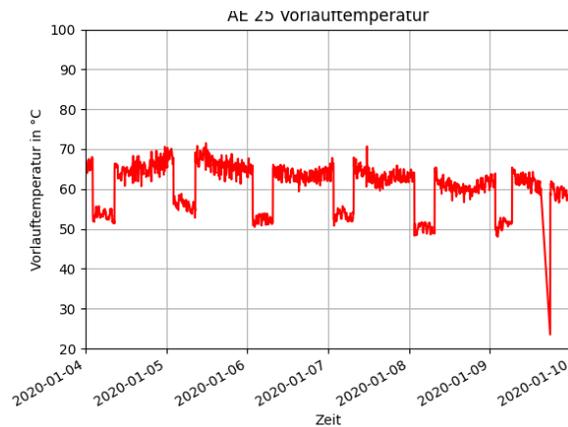
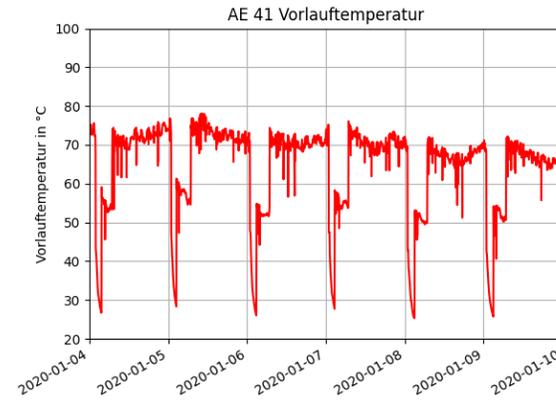
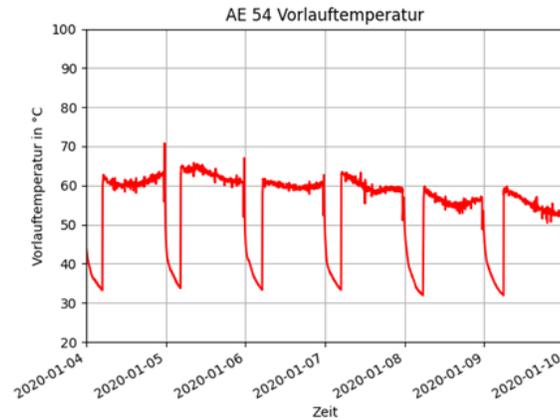
Messgrößen Fernwärme Liegenschaften:

- Nutzwärme Gebäude
- Vor- und Rücklauftemperaturen
- Volumenströme Heizmedium
- HK-Temperaturen (aus HK-Verteiler)

Zeitliche Auflösung 3 Minuten seit der HP 2018/2019

Auswertung Messdaten: Beispiel Kiel

- nahezu baugleiche Liegenschaften
- beheizte Fläche 650 ... 850 m² Flächenbezogene Heizlasten: 100 – 109 W/m²
- mit (AE 54/41) und ohne (AE 25,51,68) TWE

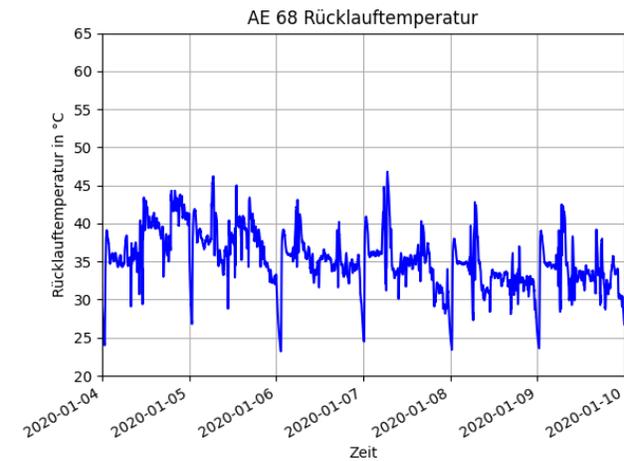
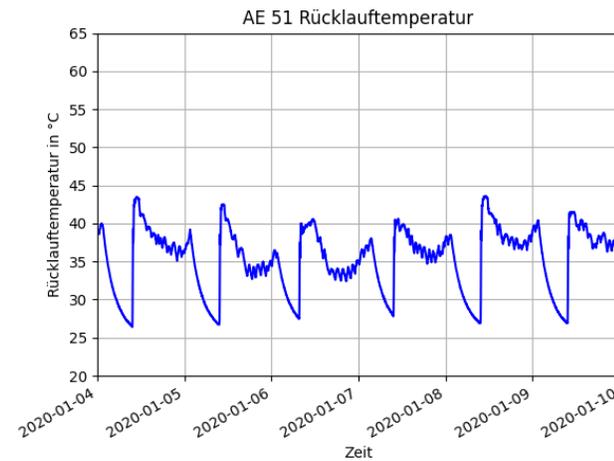
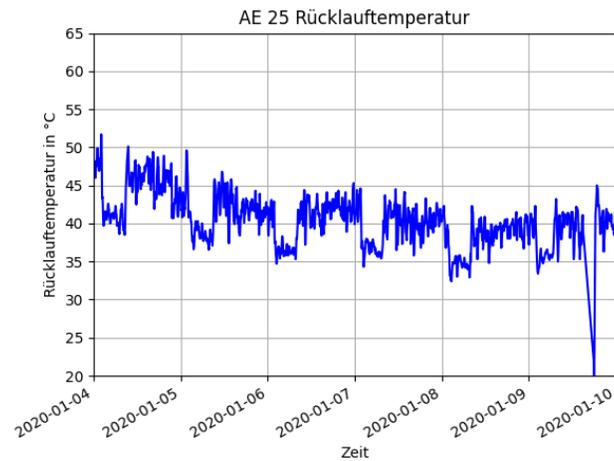
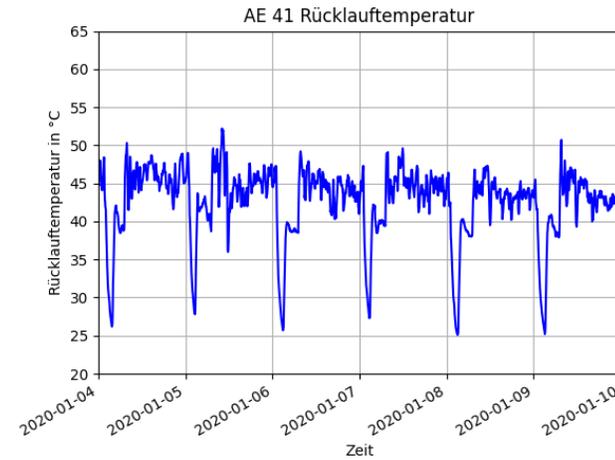
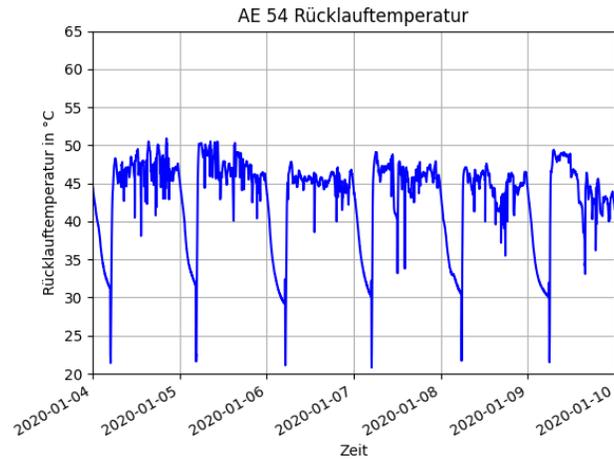


<https://mapio.net>



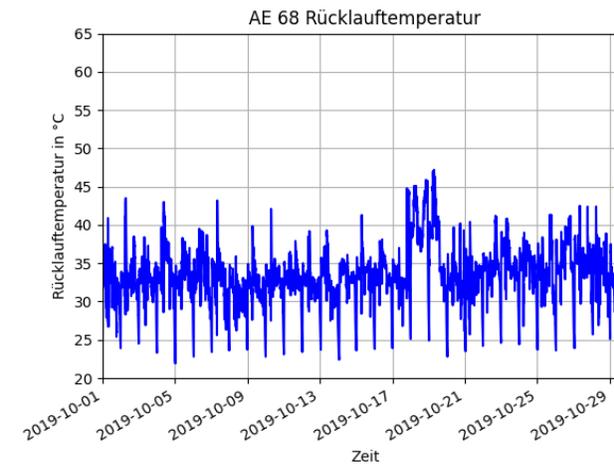
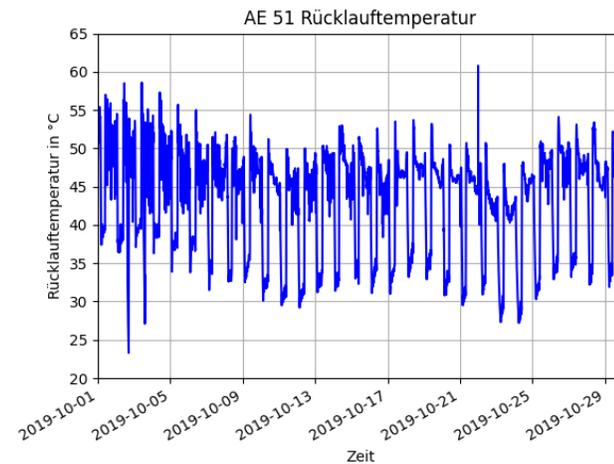
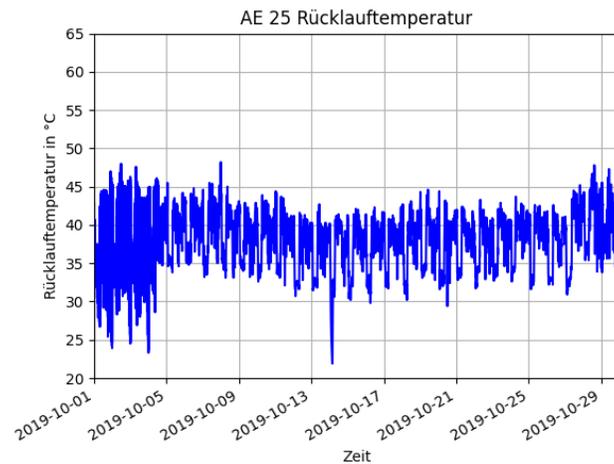
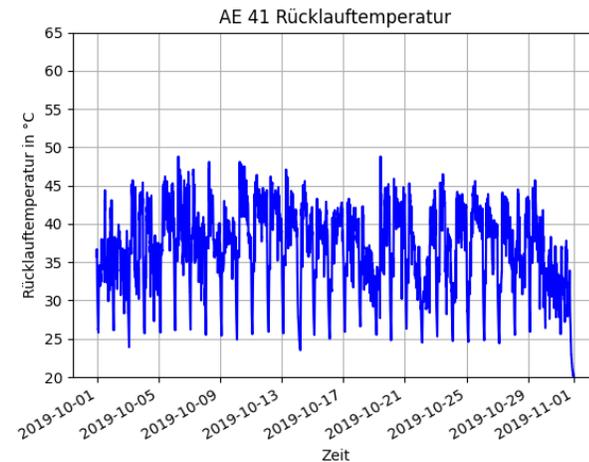
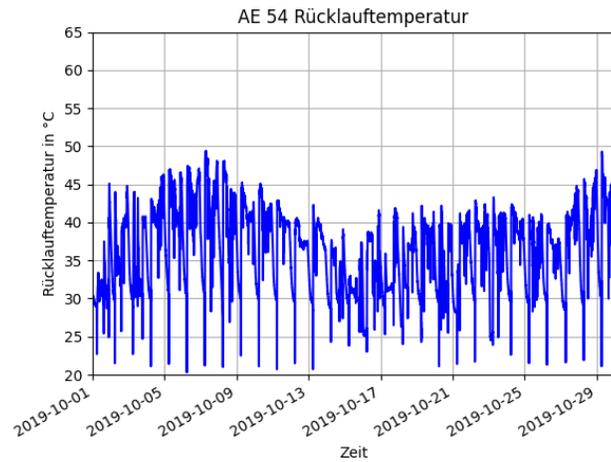
Auswertung Messdaten: Beispiel Kiel

Rücklauftemperaturen im Januar 2020



Auswertung Messdaten: Beispiel Kiel

Rücklauftemperaturen im Oktober 2019



Abnehmermodelle

Die Abnehmermodelle basieren auf einer multiplen linearen Regressionsanalyse realer Messdaten, deshalb ist auf ergebnisverfälschende Extrapolationseffekte bei Anwendung z.B. in der Netzsimulation zu achten.

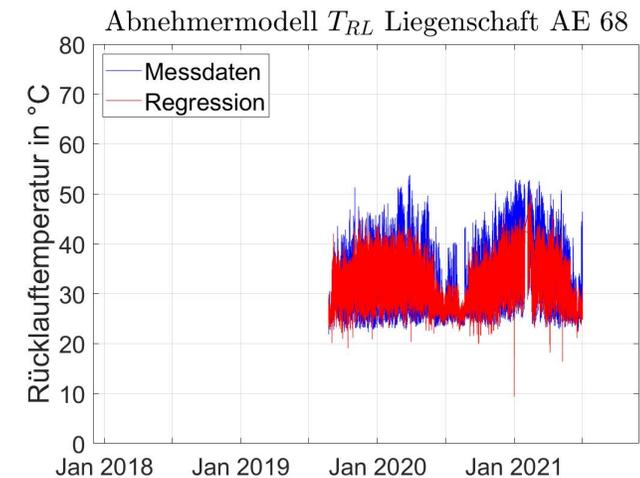
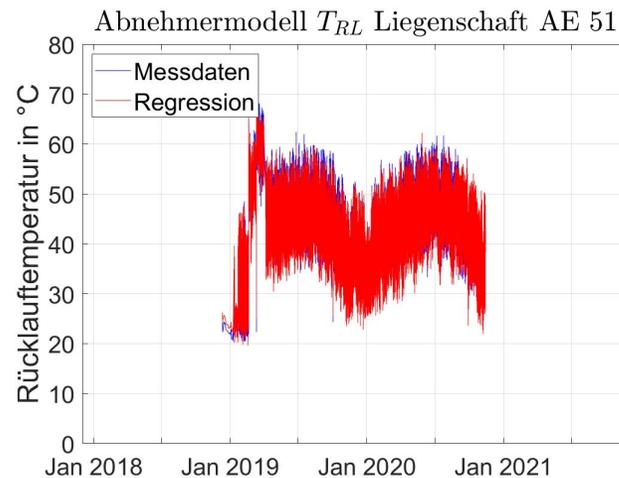
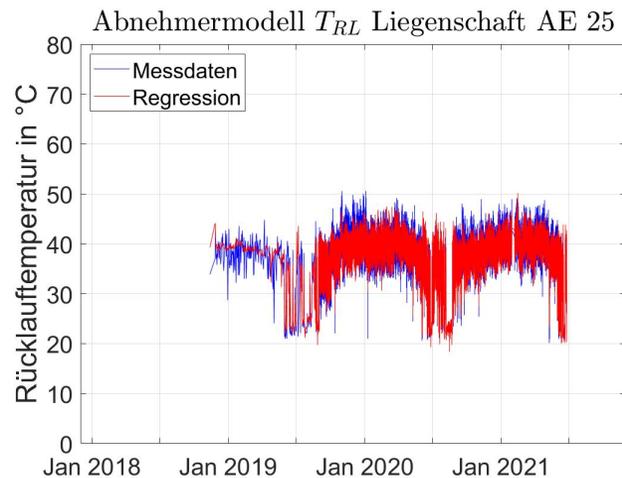
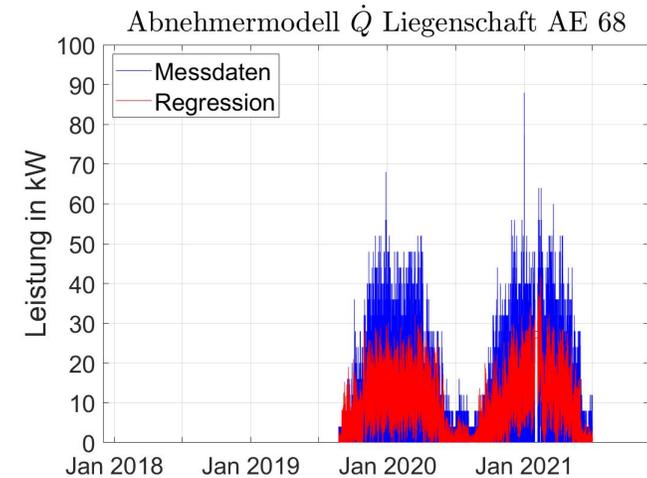
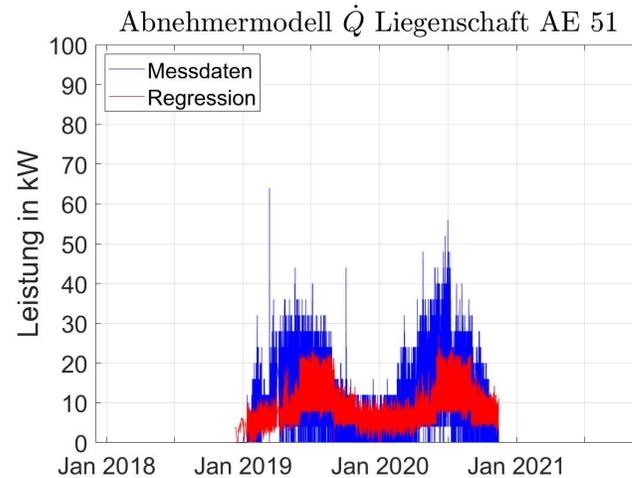
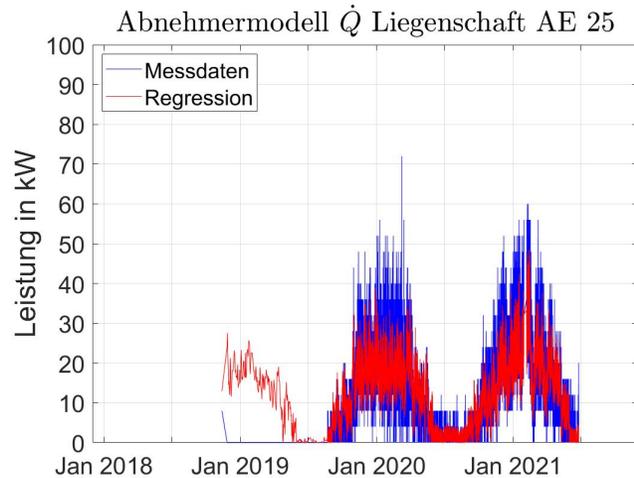
$$\dot{Q}_{\tau, h_p} = k_{1, \tau, h_p} + k_{2, \tau, h_p} \tilde{\vartheta}_a + k_{3, \tau, h_p} \tilde{\vartheta}_a^2 + k_{4, \tau, h_p} D$$

$$\vartheta_{RL, \tau, h_p} = p_{1, \tau, h_p} + p_{2, \tau, h_p} \vartheta_{VL} + p_{3, \tau, h_p} \tilde{\vartheta}_a + p_{4, \tau, h_p} \tilde{\vartheta}_a^2 + p_{5, \tau, h_p} \dot{\varphi}_{typ} + p_{6, \tau, h_p} D$$

	Wärmelast	Rücklauftemperatur
Input	Tagesart (Werktag/nicht-Werktag) Zeitstempel (Lokalzeit) Außentemperatur Heizperiode (ja/nein) Anschlussleistung*, Jahreswärmebedarf*	Tagesart (Werktag/nicht-Werktag) Zeitstempel (Lokalzeit) Außentemperatur Heizperiode (ja/nein) Anschlussleistung*, Jahreswärmebedarf*
optional		Vorlauftemperatur Wärmelast separate TWW-Daten
Output	Wärmebedarf Lastgang in 15 Min. Auflösung, beliebige Länge	Rücklauftemperatur Zeitreihe in 15 Min. Auflösung, beliebige Länge
Software	Matlab / Excel / Integriert in TrnsysType 57 / Python	Matlab / Excel / Integriert in TrnsysType 57 / Python

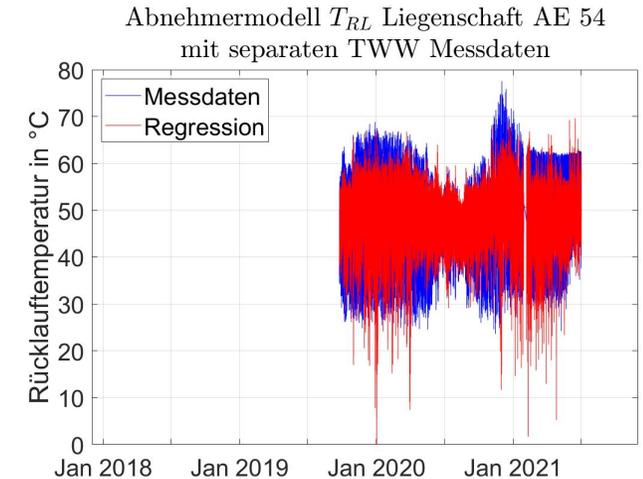
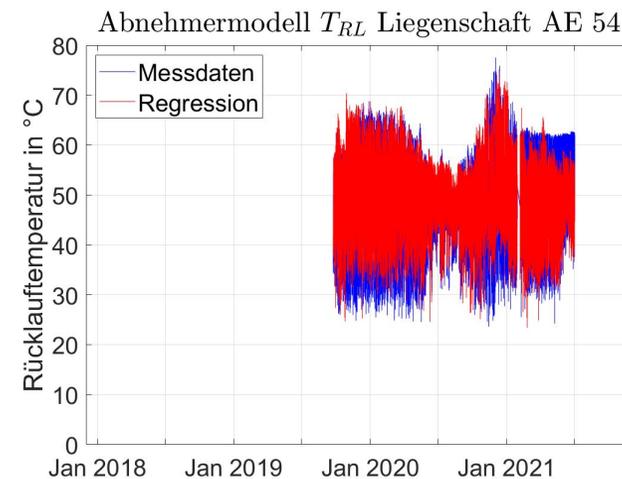
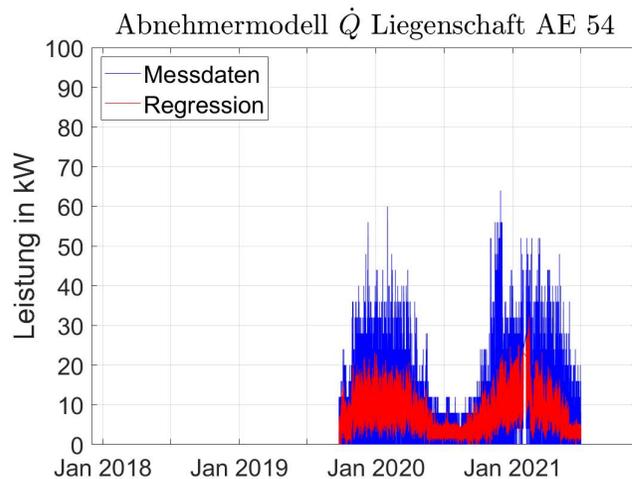
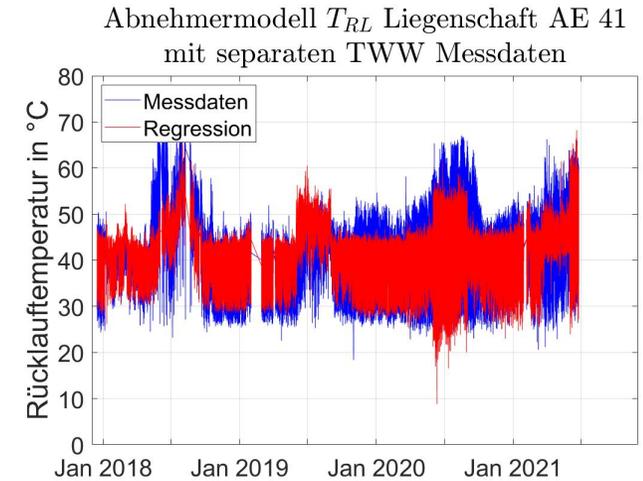
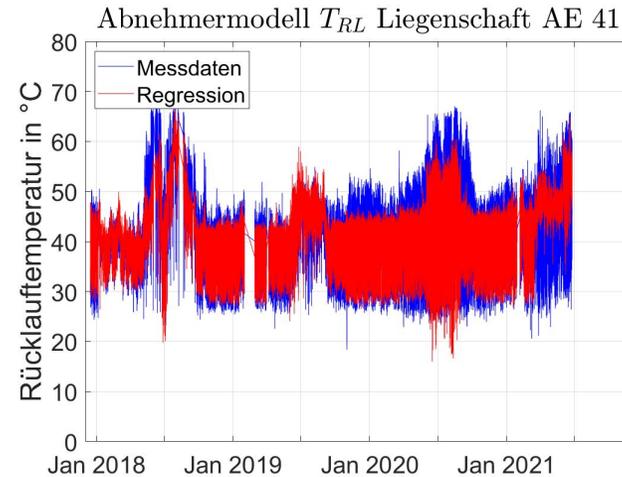
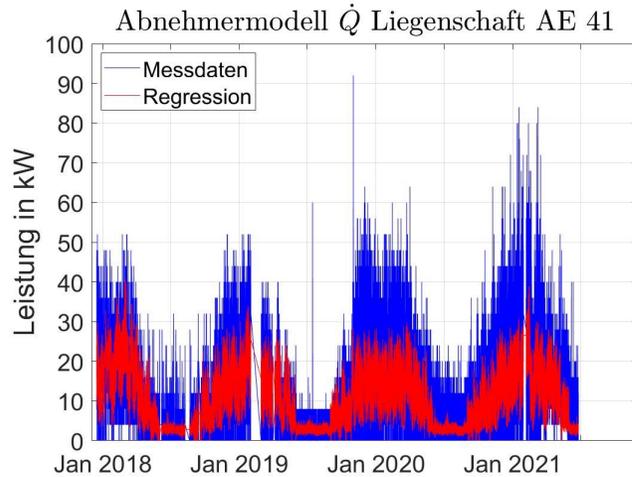
* optionale, skalare Größe, zu Skalierungszwecken bei Modellanwendung

Abnehmermodelle Liegenschaften AE 25, AE 51 und AE 68



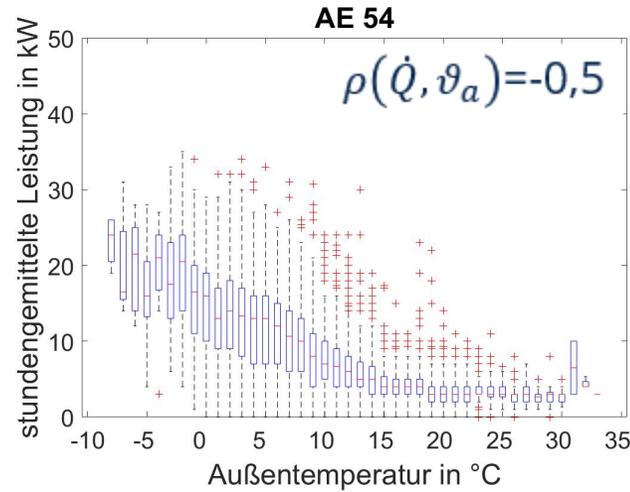
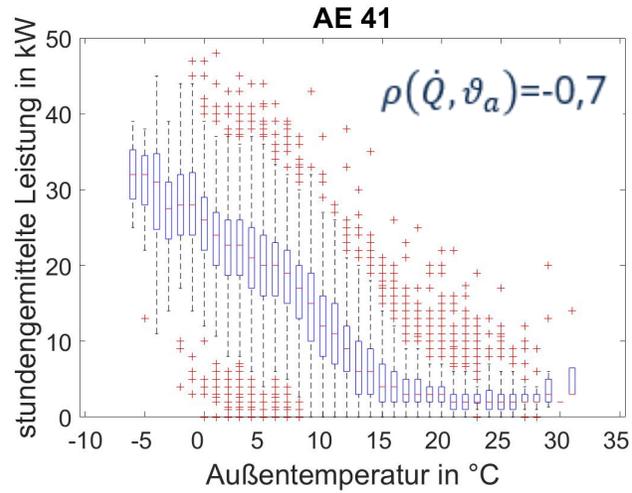
- AE 25 und AE 68 zeigen einen erwartbaren Verlauf (im Winter höherer Wärmebedarf als im Sommer)
- AE 51 vermutlich mit falschem Zeitstempel, daher scheinbare saisonale Verschiebung des Lastgangs

Abnehmermodelle Liegenschaft AE 41 und AE 54 mit separater TWW



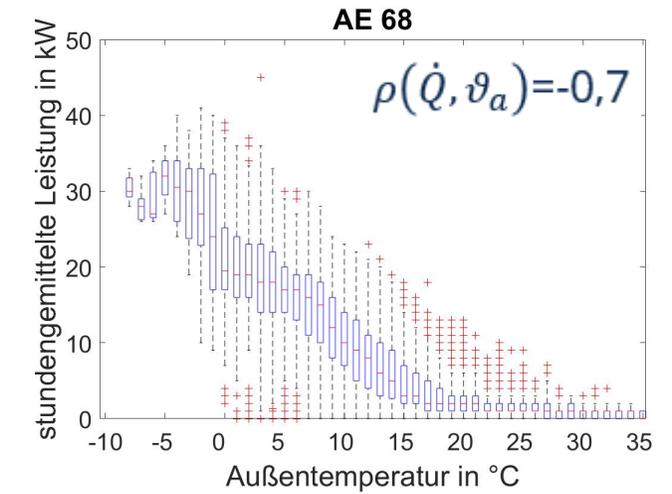
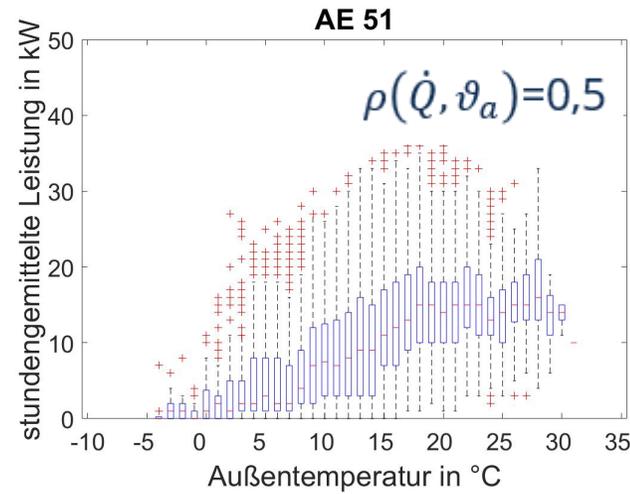
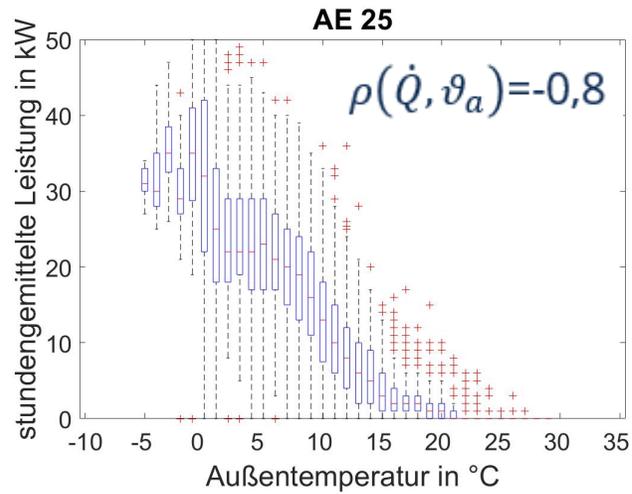
→ für die Abnehmermodelle benötigt man eine ausreichend große Messdatengrundlage, langer Messzeitraum mit hoher Auflösung, separate TWW Messdatenerfassung führt zu verbessertem Abnehmermodell

Box-Plots + Korrelationskoeffizienten



$$\rho(A, B) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{A_i - \mu_A}{\sigma_A} \right) \left(\frac{B_i - \mu_B}{\sigma_B} \right)$$

- wie bereits die Abnehmermodelle gezeigt haben ist AE 51 ungeeignet
- gut geeignet sind die Liegenschaften AE 41, AE 25 und AE 68



Fazit

- **Flexibilisierung der Wärmenetze zunehmend erforderlich um:**
 - Effizienz zu steigern
 - dezentrale Wärmebereitstellung zu fördern
 - Anteil erneuerbarer Energien erhöhen

- **Netzflexibilisierung erfordert:**
 - Kenntnis + ggf. Regelzugriff auf die Abnehmer
 - Kenntnis über den Netzzustand an (betriebsführungs-) relevanten Punkten
 - zuverlässige Last- und Einspeiseprognose
 - Zunehmende Digitalisierung (bspw. iHAST)

- **Bedarfs- und (Fehl-)Verhaltensanalyse im Gebäude:
Wärmelieferant als Kümmerer mit Eigeninteressen.**

Vielen Dank!

Fragen? Diskussion?

Kontakt:

Prof. Clemens Felsmann

Professur für Gebäudeenergie-technik und Wärmeversorgung

clemens.felsmann@tu-dresden.de

+49 351 463 32145