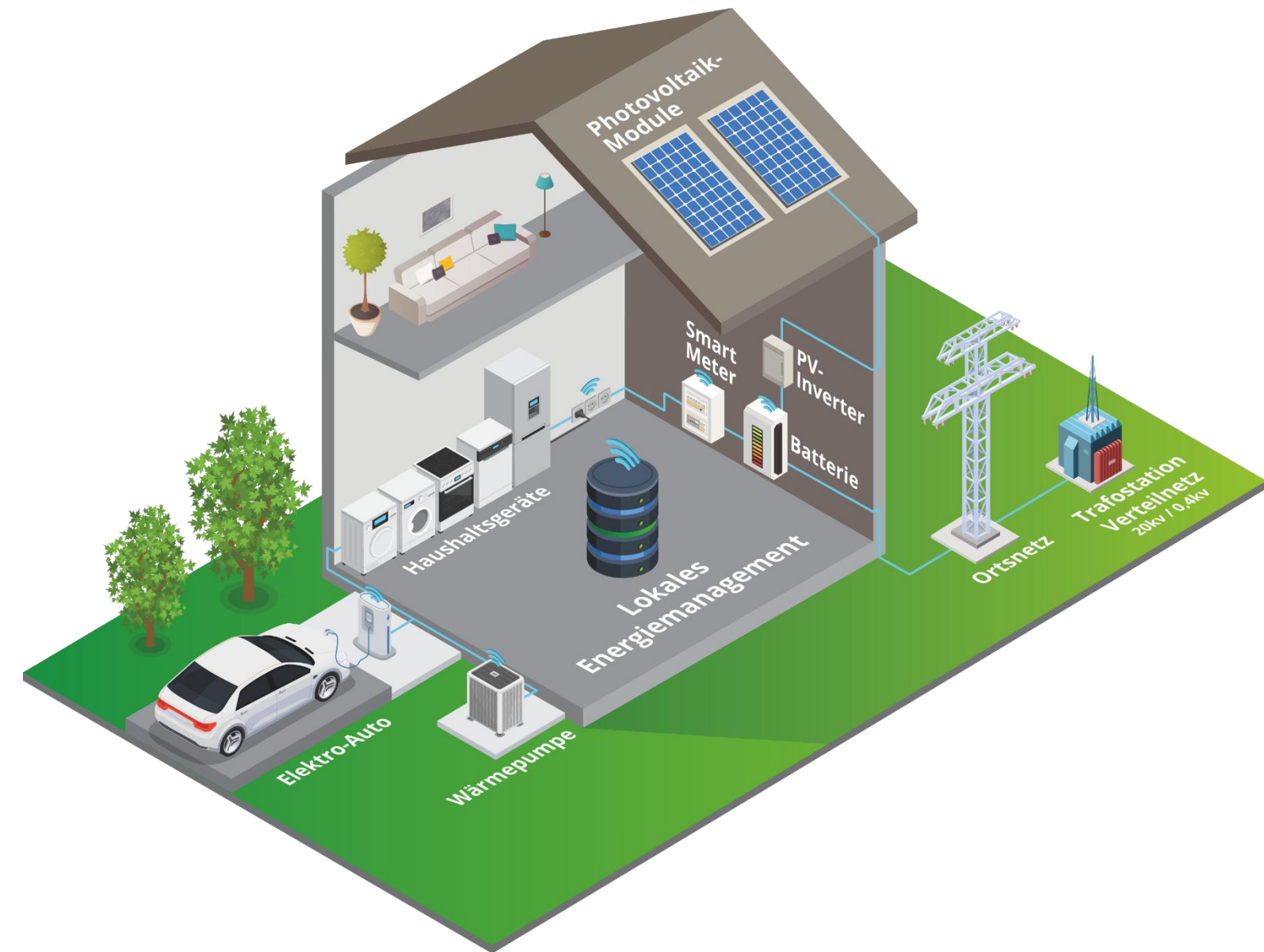


FlexHP: KI-gestützte Regelungsmodelle für die Flexibilitätsoptimierung von Wärmepumpen zur Entlastung des Stromnetzes

Symposium Energieinnovation 2026

DI Dr. Magdalena Wolf

*Institut für Verfahrens- und Energietechnik
BOKU University*



Agenda



- Motivation und Zielsetzung
- Systemarchitektur
- Methodischer Ansatz und Modellierung
- Erprobung im LivingLab Stinatz
- Ergebnisse und Validierung
- Nächste Schritte


Motivation und Zielsetzung



Herausforderung

- Wärmepumpen als zentrale Zukunftstechnologie
- Großes Flexibilitätspotenzial im Gebäudesektor
- Aktuelle Regelungen kaum netzdienlich

Forschungslücke

- KI-Ansätze meist rein datengetrieben
 - Physikalische Modelle oft zu komplex
 - Fehlende praxistaugliche Hybridlösungen
- 



Projektziel

- Hybride, prognosebasierte Regelungsstrategie
- Kombination aus Physik & KI
- Nutzung thermischer Speicher zur Flexibilisierung

Motivation und Zielsetzung

- Konzeption eines **dynamischen Energiemanagementsystems (DEMS)**, für Wärmepumpenbetrieb
- Entwicklung eines **Vorhersagemodells** für Gebäudeenergiesysteme
- Integration von **PV-, Verbraucher-** und **Wärmepumpenmodell** mit Gebäudemodell
- **Hybridmodellierung:** physikalischer Modelle + Machine Learning
- **Validierung** in realem Testbed

Struktur von DEMS

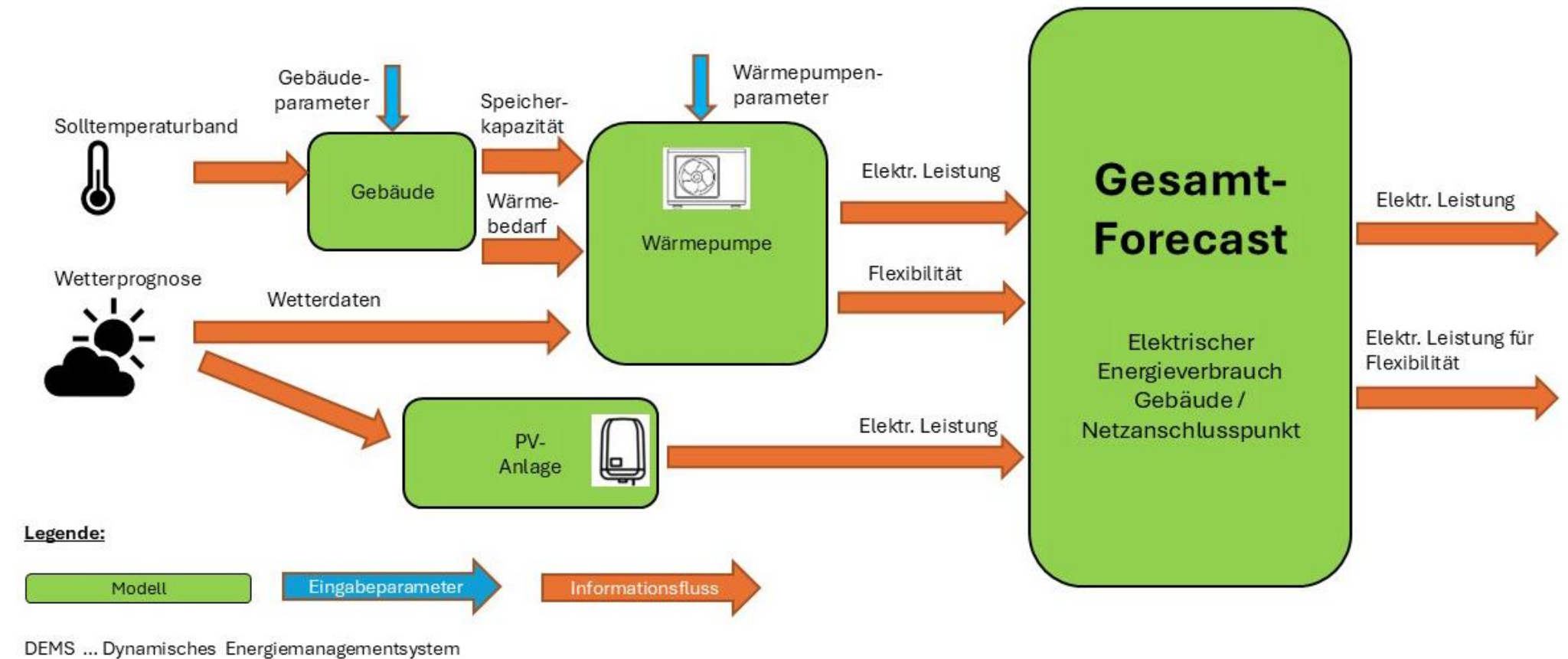
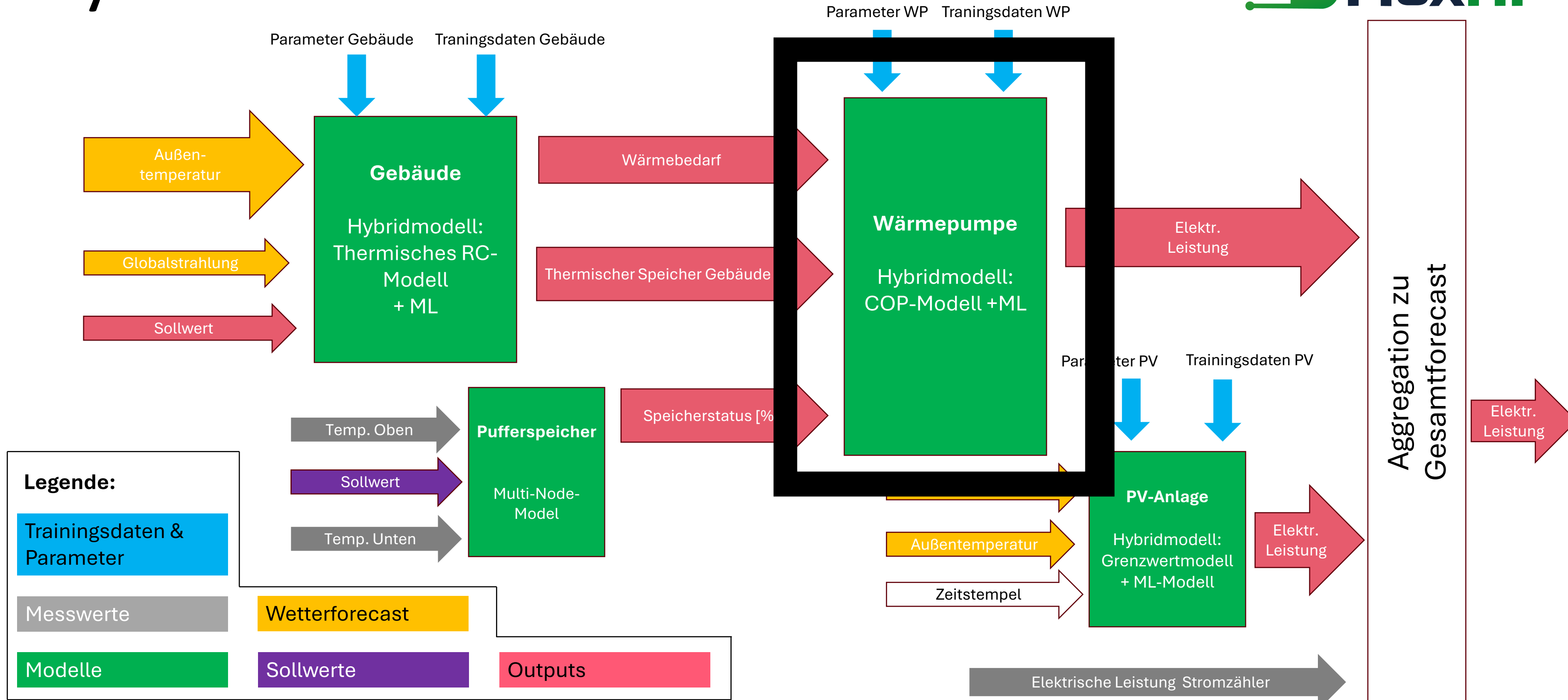


Abb. 1: Grafische Darstellung des geplanten dynamischen Energiemanagementsystems (DEMS) mit den verknüpften Einzelkomponentenmodellen

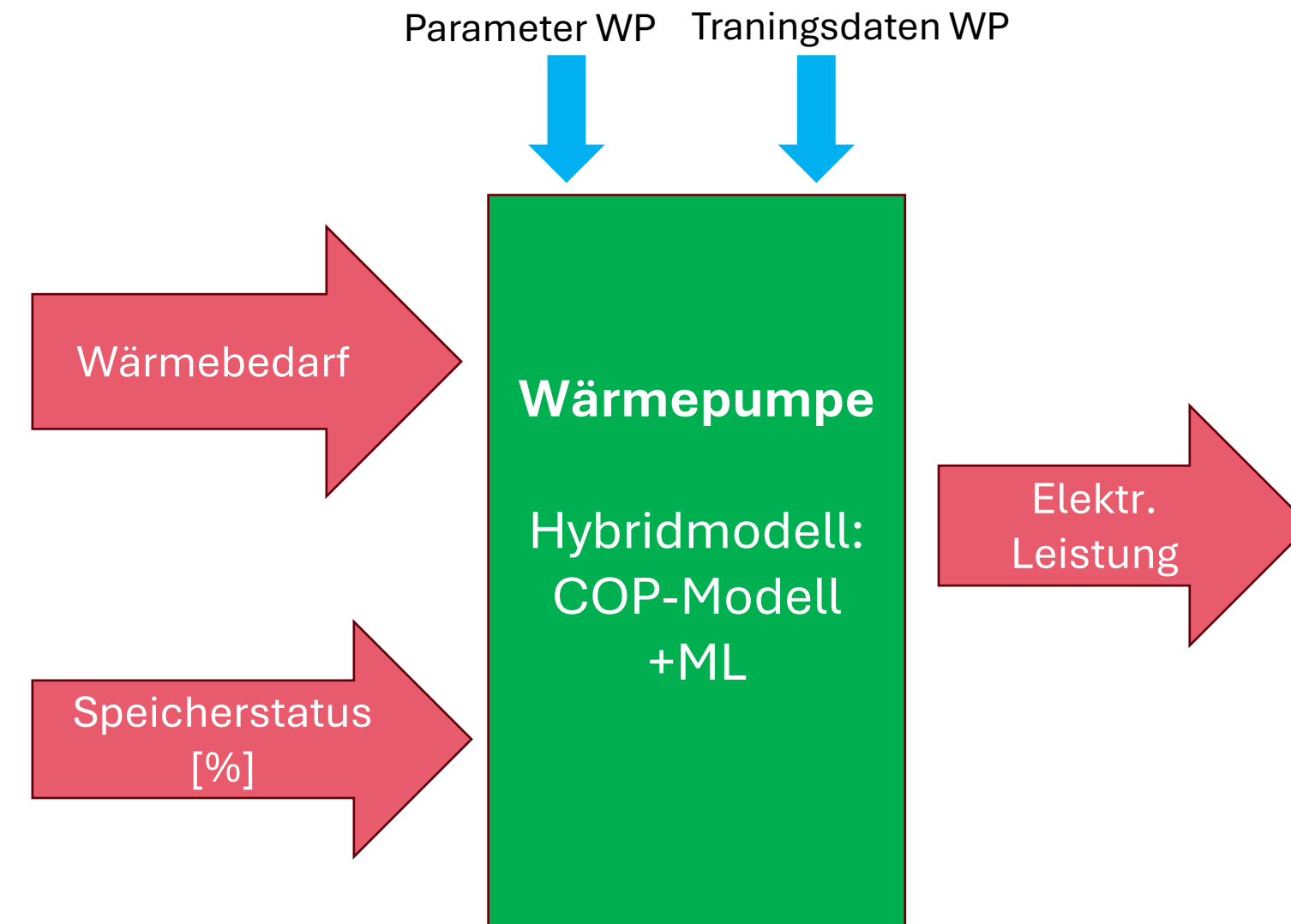
Systemarchitektur



Systemarchitektur

Hybride Modellierung:

- **Physikalische Modelle (COP-Modell):** bilden den Baseline-Verlauf ab, und liefern Grenzen für ML-Vorhersagen,
- **Machine Learning-Modelle (ML):** korrigieren Vorhersagen (anlagenspezifische / standortspezifische Details) und Nutzungsmuster



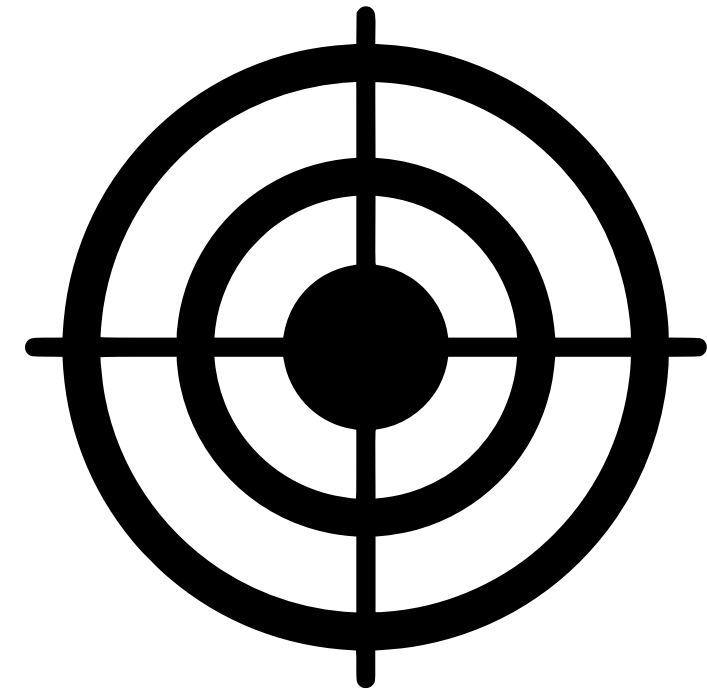
Methodischer Ansatz und Modellierung der Wärmepumpe

Hauptziel des Modells:

- Prognose des COP in Abhängigkeit weniger, einfach zu erfassender Eingangsgrößen

Nebenziele:

- Kompromiss zwischen Modellgenauigkeit und Rechenleistung
- Plattformunabhängig und Schnittstellenoffen
- Ableitung von Regressionsgleichungen aus Modellergebnissen
- Einbindung der Regressionsgleichungen in Regelungsalgorithmus (Python-basiert)



Methodischer Ansatz und Modellierung der Wärmepumpe

- Simulation einer Wärmepumpe in IPSEpro
- Abbildung eines einfachen Wärmepumpenkreises auf Komponentenebene
- Stoffdaten Kältemittel: NIST REFPROP V10
- Statische Abbildung (Einschaltvorgänge, Regelverhalten vernachlässigt)
- Set an definierten Annahmen
- Parametervariation ausgewählter Einflussgrößen
- **Zielgröße:** COP (Heizleistung / elektr. Leistung)

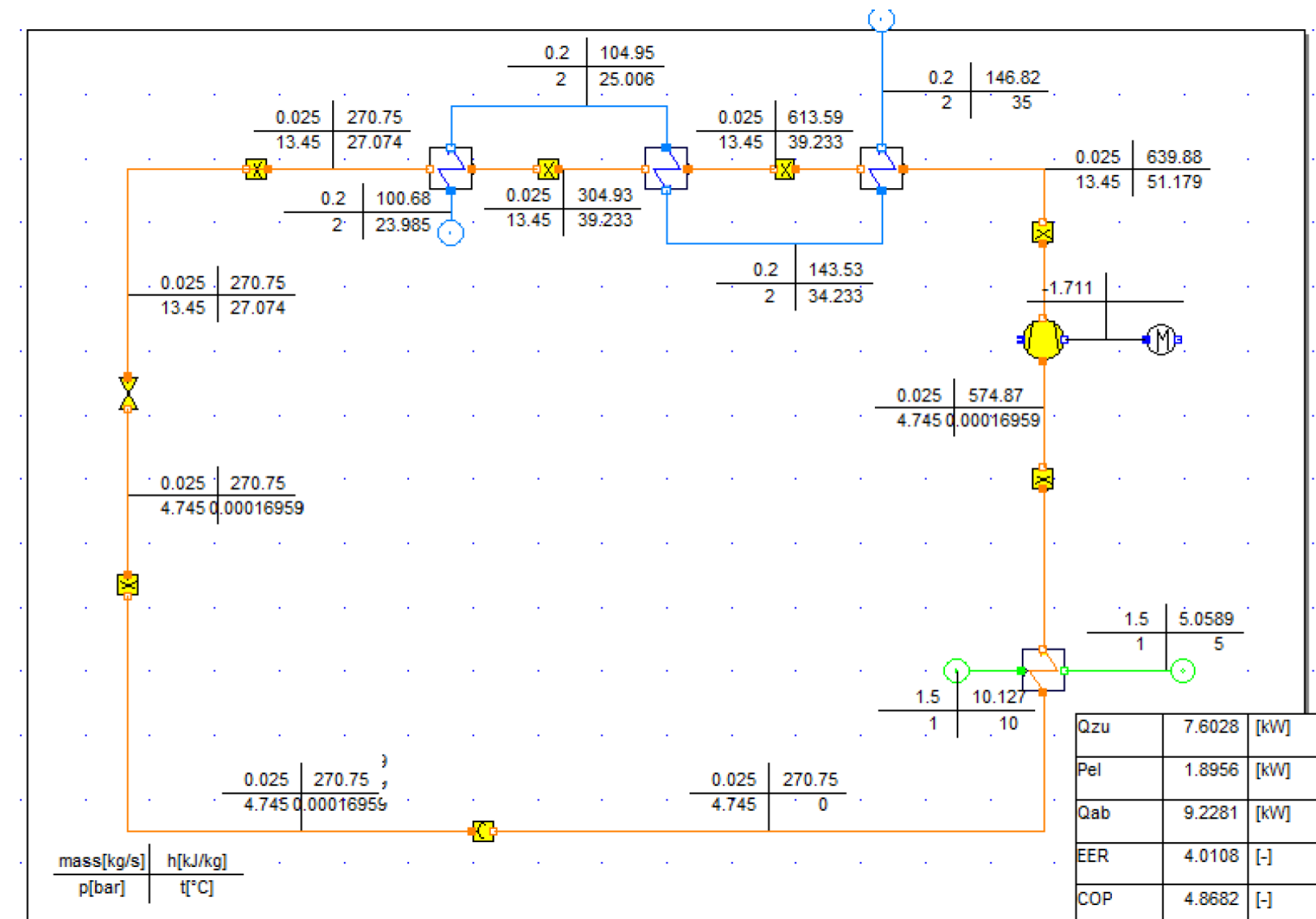


Abb. 3: Darstellung des Wärmepumpenmodells in IPSEpro

Methodischer Ansatz und Modellierung - Parameterstudie

Eindimensionale Parametervariation

Quelltemperatur

- -15°C bis +20°C
- 5 K-Schritte

Senktemperatur

- +25°C bis +60°C
- 5 K-Schritte

Isentroper Verdichterwirkungsgrad

- 0,40 bis 0,85
- 0,5-Schritte

Kältemittel

- R407C
- R290
- R600a
- R1234zE

Zweidimensionale Parametervariation

Temperaturhub

- Änderung Quelltemperatur -15°C bis +20°C
- Änderung Senktemperatur +25°C bis +60°C

Erprobung im LivingLab Stinatz

- LivingLab in Stinatz im Südburgenland
- Pflegestützpunkt mit 2 Geschoßen
- Mischnutzung: Betreuung (EG) und Wohnen (1. OG)
 - Gemeinschafts- und Ordinationsräume
 - 6 Wohneinheiten
- Baujahr 2024
- BGF: 542 m²
- HWB_{Ref,RK}: 26,1 kWh/m²a
- 14,7 kWp Photovoltaik



Abb. 4: Gartenansicht auf das LivingLab – Pflegestützpunkt Stinatz

Erprobung im LivingLab Stinatz

Heizungs- /Kühlanlage

• Haustechnische Grundlagen:

- Luft-Wasser-Wärmepumpe (28 kW (L2W35))
- Fußbodenheizung
- Deckenkühlung (EG)
- Dezentrale elektrische Warmwasserbereitung (hygienische Gründe)

• Messtechnik:

- Elektrische Verbräuche (Smartmeter, 15-Minuten-Intervall)
- PV-Erzeugung (Volleinspeisung)
- Raumtemperaturen (je 1x EG und 1x 1. OG)
- Wärmeströme Fußbodenheizung / Deckenkühlung
- Vorlauftemperaturen
- Außentemperaturen

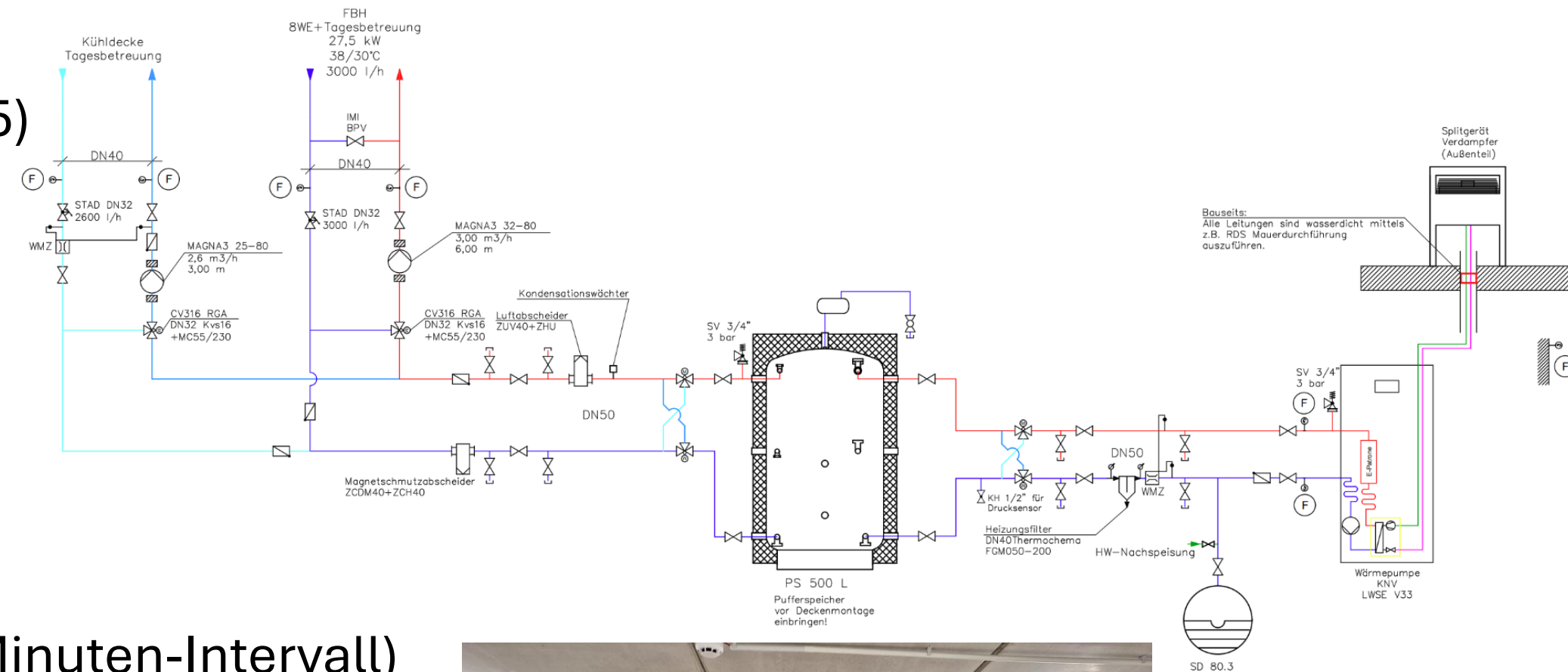
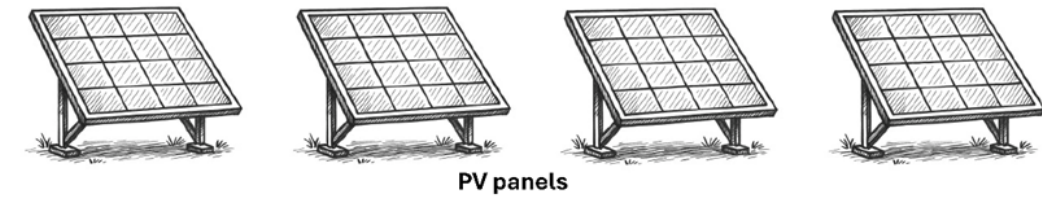


Abb. 5 (oben): HKLS-Schema der Heizungsanlage

Abb. 6 (links): Foto der Haustechnikzentrale im LivingLab

Erprobung im LivingLab Stinatz



• Systemaufbau LivingLab:

- Primäre Schnittstelle: Modbus – RTU
- Voraussetzung: Modbus-fähige Geräte
 - Schnittstellen an Wärmepumpe ergänzt
 - Einbindung Smartmeter über SHRDZM
- Einspielung der Daten in Cloud
- Weiterverarbeitung mittels MQTT, Visualisierung (Grafana) und Datenverarbeitung

• Erwartete Ergebnisse:

1. Messdaten für Modellvalidierung und Trainingsdaten für ML-Modelle
2. Tests zur Regelung der Vorlauftemperatur der Wärmepumpe in Abhängigkeit der Modellergebnisse

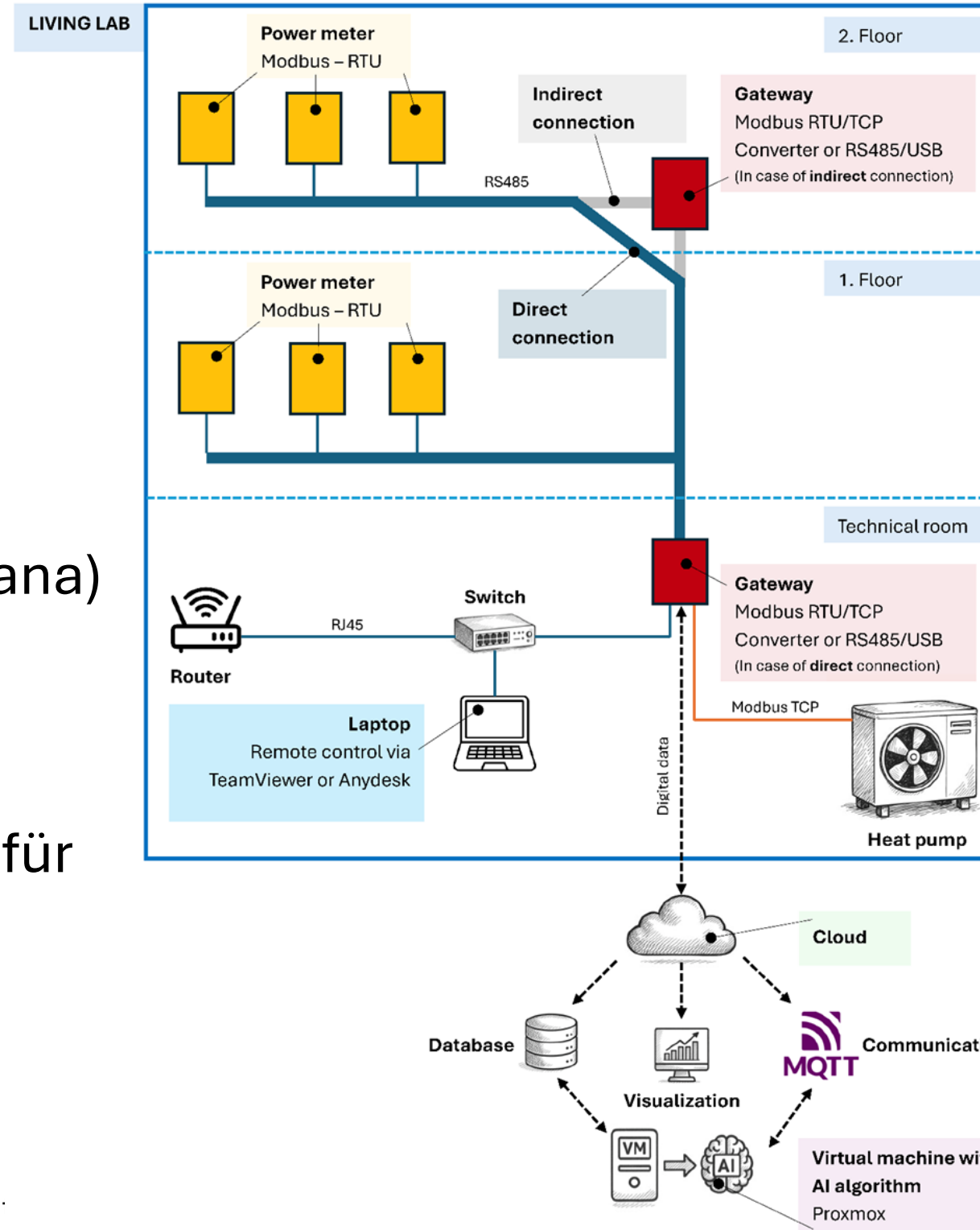


Abb. 7: Skizze des Messaufbaus und der Datenübertragung im LivingLab

Ergebnisse und Validierung

Eindimensionale Parametervariation:

- Bekannte (und zu erwartende) Ergebnisse:
 - COP steigt mit steigender Quelltemperatur
 - COP sinkt mit steigender Senktemperatur
- Ableitung von Polynomfunktionen 2. Grades für jedes Kältemittel und jede Variation

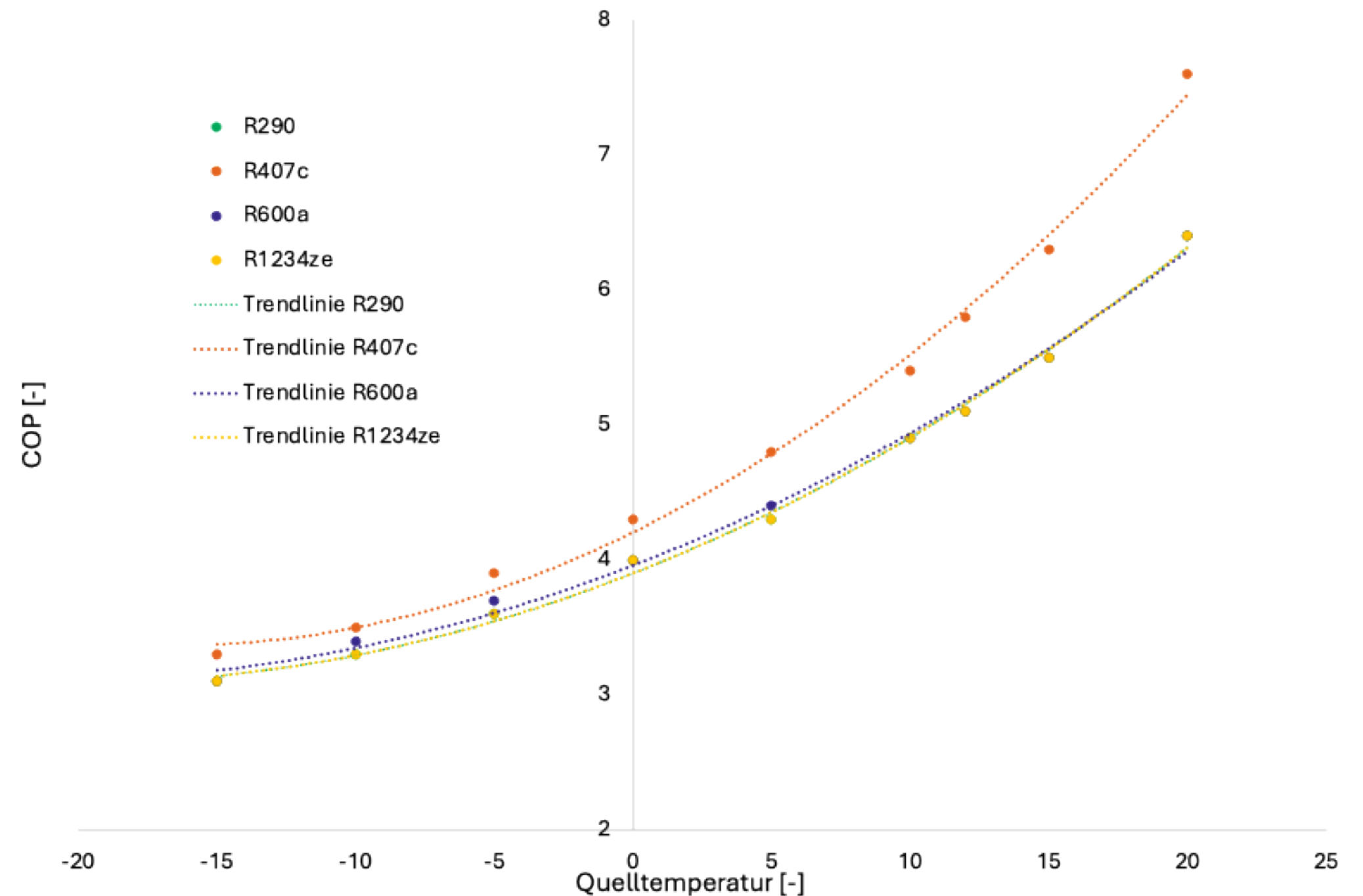


Abb. 8: Änderung des COP in Abhängigkeit von der Quelltemperatur

Ergebnisse und Validierung

Zweidimensionale Parametervariation:

- COP in Abhängigkeit von Kondensations- und Verdampfungstemperatur
- COP-Kennfeld
- Ableitung bivariater quadratischer Regressionsmodelle mit Interaktionsterm für jedes betrachtete Kältemittel

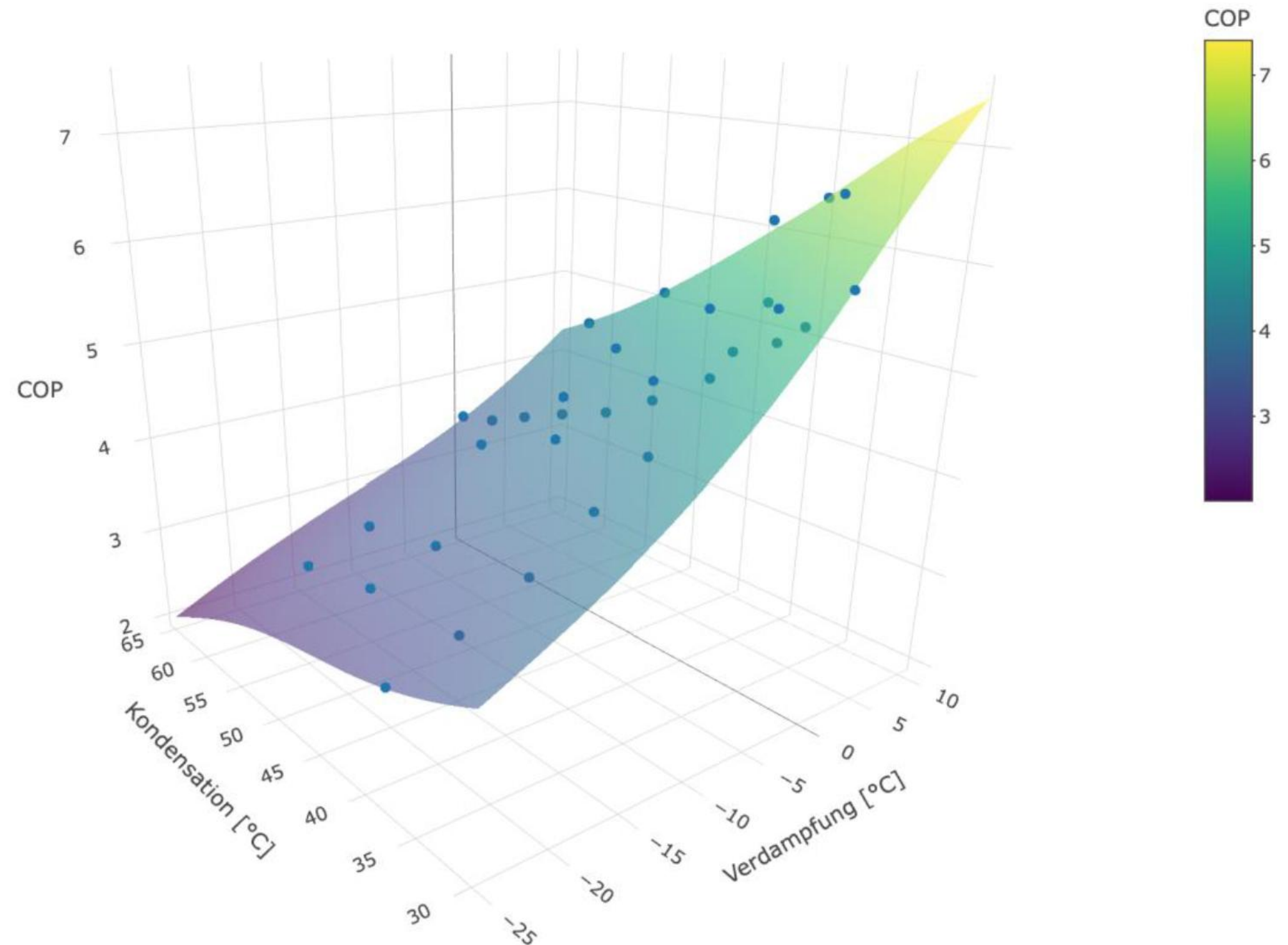


Abb. 9: Zusammenhang zwischen Verdampfungs- und Kondensationstemperatur und dem COP exemplarisch für das Kältemittel R290

Ergebnisse und Validierung

Tab. 1: Zusammenfassung der abgeleiteten bivariaten quadratischen Regressionsmodelle mit Interaktionsterm der betrachteten Kältemittel

Kältemittel	Bivariate quadratische Regressionsmodelle	R ²
R407C	$\text{COP} = 10.8213 + 0.2768 \cdot T_{\text{Verd}} - 0.2526 \cdot T_{\text{Kond}} + 0.002607 \cdot T_{\text{Verd}}^2 + 0.00197 \cdot T_{\text{Kond}}^2 - 0.004252 \cdot T_{\text{Verd}} \cdot T_{\text{Kond}}$	0,994
R290	$\text{COP} = 10.2121 + 0.2495 \cdot T_{\text{Verd}} - 0.1771 \cdot T_{\text{Kond}} + 0.00208 \cdot T_{\text{Verd}}^2 + 0.001146 \cdot T_{\text{Kond}}^2 - 0.003057 \cdot T_{\text{Verd}} \cdot T_{\text{Kond}}$	0,985
R600a	$\text{COP} = 10.7852 + 0.2121 \cdot T_{\text{Verd}} - 0.2014 \cdot T_{\text{Kond}} + 0.001602 \cdot T_{\text{Verd}}^2 + 0.001381 \cdot T_{\text{Kond}}^2 - 0.002479 \cdot T_{\text{Verd}} \cdot T_{\text{Kond}}$	0,996
R1234ze	$\text{COP} = 10.7564 + 0.2211 \cdot T_{\text{Verd}} - 0.2041 \cdot T_{\text{Kond}} + 0.001684 \cdot T_{\text{Verd}}^2 + 0.001431 \cdot T_{\text{Kond}}^2 - 0.002652 \cdot T_{\text{Verd}} \cdot T_{\text{Kond}}$	0,996

COP ... Coefficient of Performance [-]

T_{Verd} ... Verdampfungstemperatur [°C]

T_{Kond} ... Kondensationstemperatur [°C]

Ergebnisse und Validierung

Validierung:

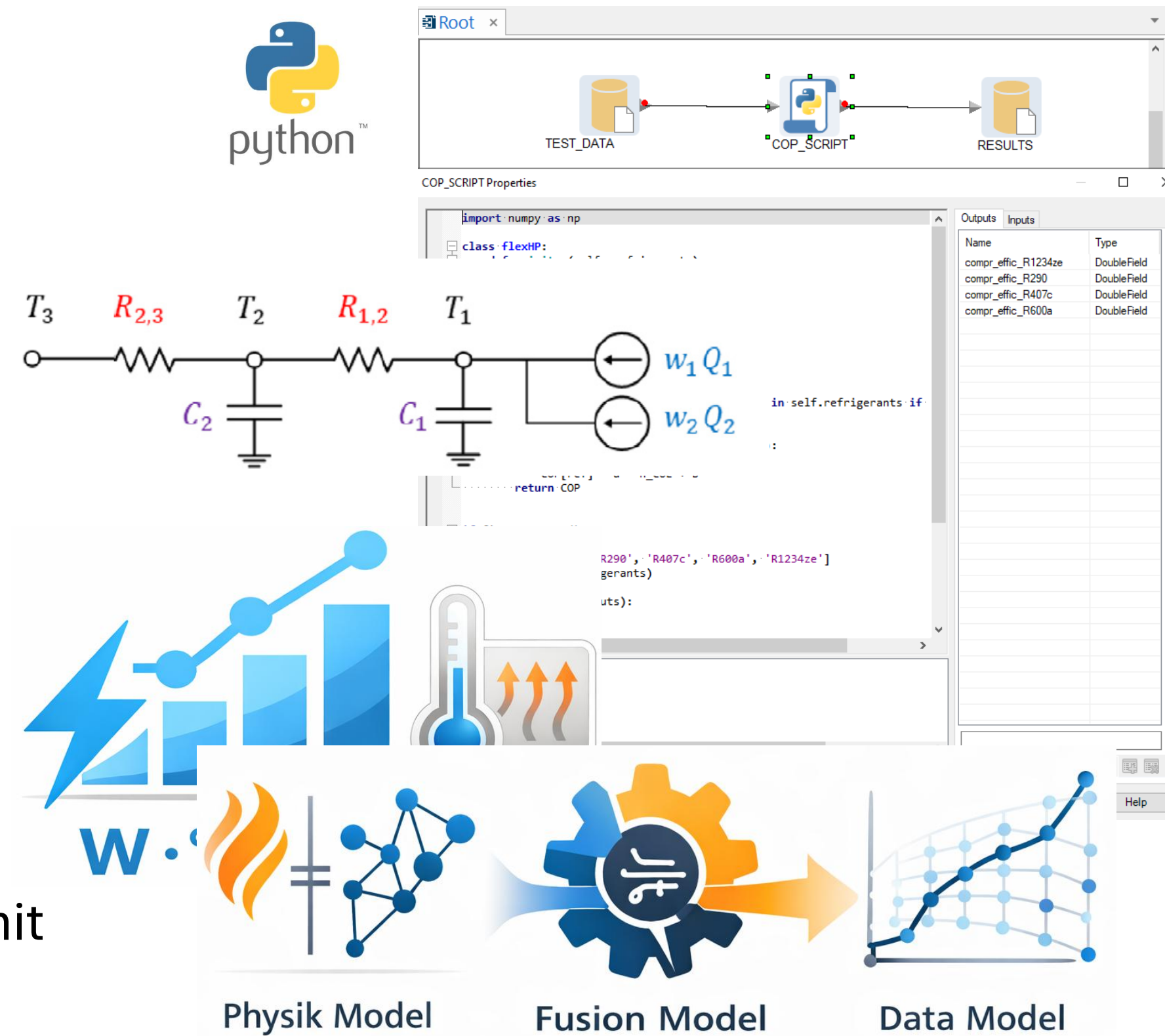
- Punktuelle Validierung der Modelle mittels Herstellerdaten
- Vollständige Validierung auf Basis der Messdaten aus dem LivingLab (noch ausständig)

Kältemittel	Anzahl der Vergleichspunkte	typische relative Abweichung	max. relative Abweichung
R290	6	meist <10%	ca. 23%
R600a	4	ca. 6-10%	ca.10%
R1234ze	6	< 7%	ca. 7%
R407c	6	ca. 10-20%	ca. 23%

*Abb. 10: Tabellarische Übersicht über die Ergebnisse der Validierung mittels Herstellerdaten.
Quelle: Neumüller L. (2026): Simulation von Wärmepumpen und Entwicklung vereinfachter COP-Modelle als Grundlage für intelligente Energiemanagementsysteme*

Nächste Schritte...

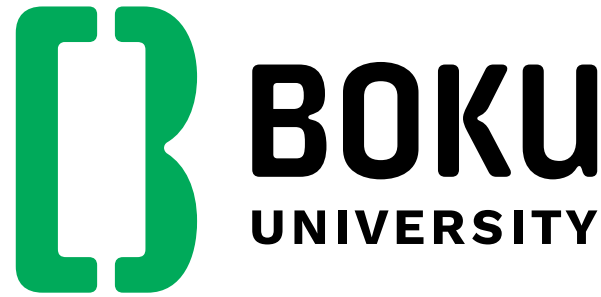
- ... Implementierung und Integration der Regressionsmodelle in eine Python-basierte Entwicklungsumgebung
- ... Erstellung eines Gebäudemodells mittels RC Modellen
- ... Modellvalidierung und Sammlung von Trainingsdaten aus dem LivingLab
- ... Verschmelzung der physikalischen Modelle mit den ML-Modellen und Integration ins DEMS



The diagram shows a thermal RC circuit with nodes T_3 , T_2 , and T_1 . Resistors $R_{2,3}$ and $R_{1,2}$ connect the nodes. Capacitors C_2 and C_1 are connected to ground at nodes T_2 and T_1 respectively. Heat sources $w_1 Q_1$ and $w_2 Q_2$ are shown at node T_1 .

The Python code snippet shows a class `flexHP` with a list of refrigerants: `['R290', 'R407c', 'R600a', 'R1234ze']`.

The bottom diagram illustrates the process: **Physik Model** (Physical Model) + **Fusion Model** (Machine Learning) = **Data Model**.



DI Dr. Magdalena Wolf

Senior Scientist / Senior Lecturer

Institut für Verfahrens- und Energietechnik

T +43 1 47654-89315

M + 43 664 780 041 83

magdalena.wolf@boku.ac.at

BOKU University

Muthgasse 107, 1190 Wien

<https://short.boku.ac.at/buildings>



Das Projekt wird von der österreichischen **Forschungsförderungsgesellschaft FFG** im Rahmen der Ausschreibung *Technologien und Innovationen für die klimaneutrale Stadt (TIKS) 2024 - Urbane Technologien* gefördert.



 Bundesministerium
Innovation, Mobilität
und Infrastruktur

[Merci BOKU]