

# Digitaler Zwilling (DZWi)

## WÄRMEPUMPEN ALS DIGITALER ZWILLING

Lars Haupt, Joachim Seifert, Thomas Hackensellner

18. Symposium Energieinnovation

14.-16.02.2024, Graz/Austria



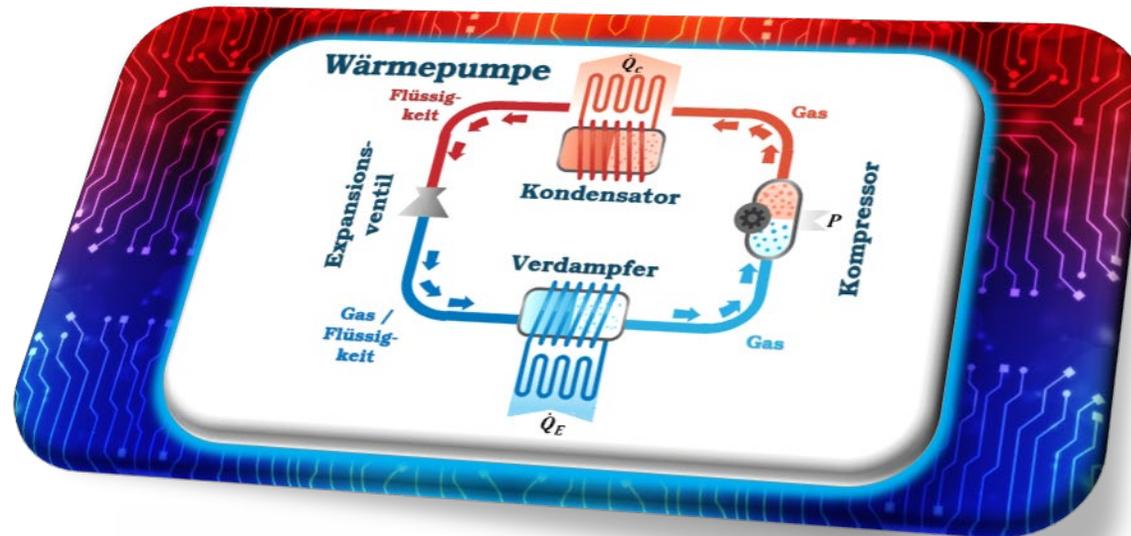
# Digitaler Zwilling (DZWi)

<https://dzwi-waerme.de>



Joachim Seifert  
Lars Haupt  
Martin Knorr  
Lars Schinke  
Paul Seidel  
Alf Perschke  
Felix Valentin

Christian Vering  
Sebastian Borges  
Fabian Wüllhorst  
Stephan Göbel  
Tim Klebig  
Florian Will  
Dirk Müller



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Digitaler Zwilling von Wärmeerzeugersystemen als Wegbereiter für die Entwicklung emissionsarmer Gebäudeenergie-technik (DZWi)“



Thomas Hackensellner  
Andreas König-Haagen

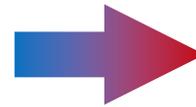
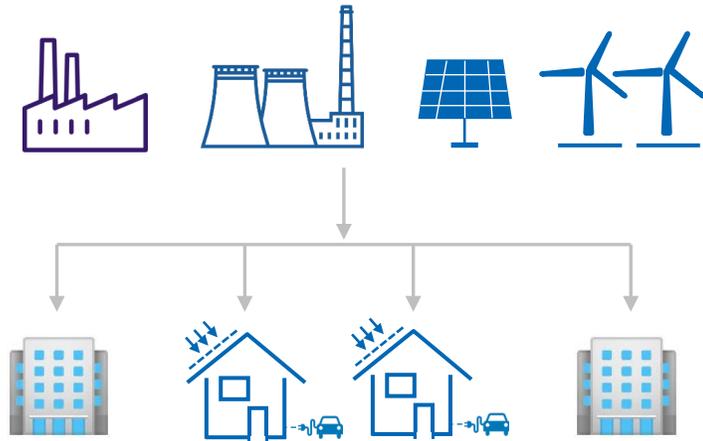


Karsten Spreitzer  
Christian Grozescu  
Arno Eggert

Die Energiewende führt zu einem deutlichen Wandel der Versorgungsstrukturen.

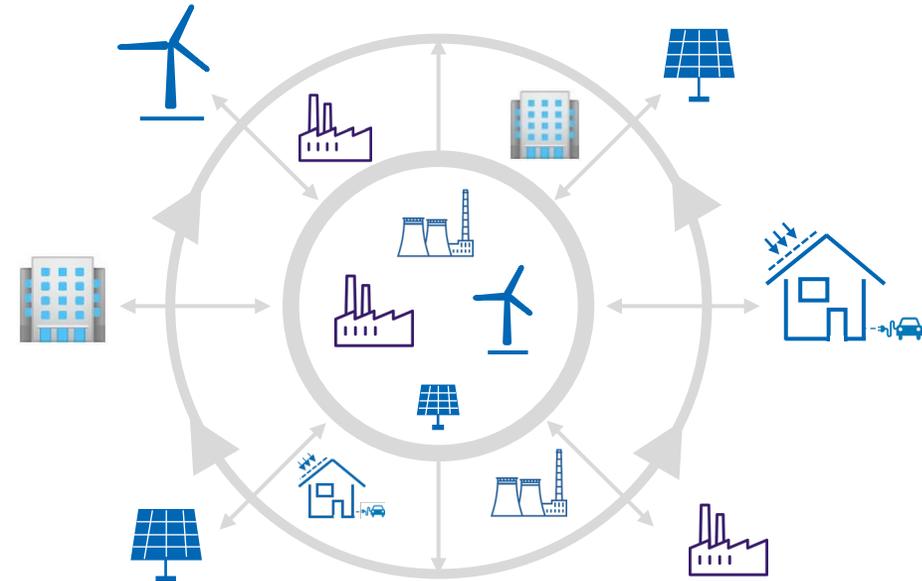
- Weniger Großkraftwerke, weniger überregionale energetische Wandlungseinheiten
- Deutlich mehr dezentrale Versorgungssysteme!

## Uni-direktionale Lastflussrichtung



Anstieg der Komplexität

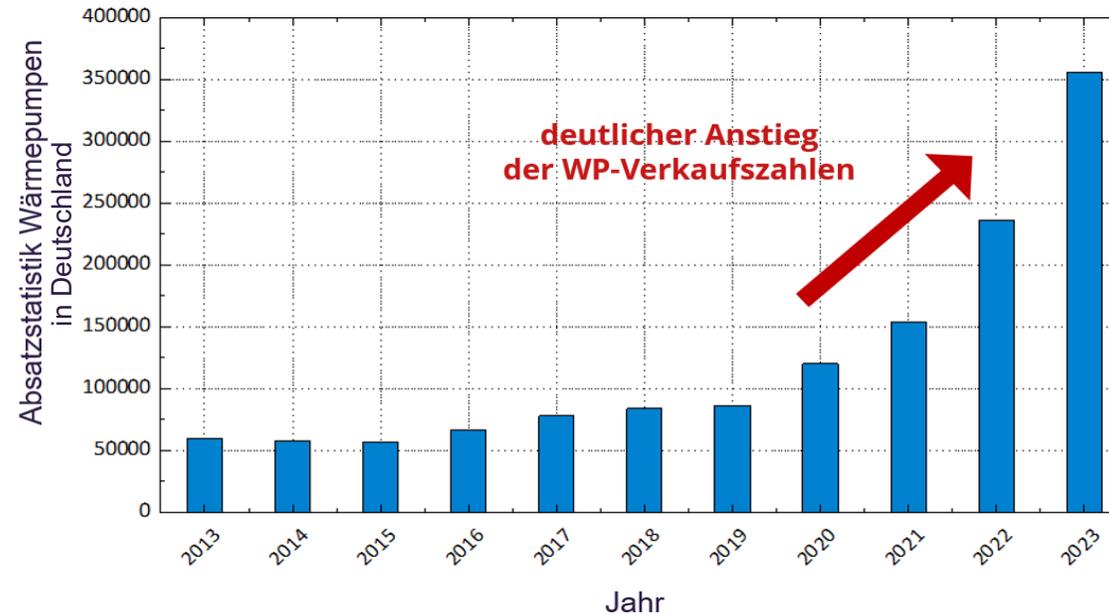
## Multi-direktionale Lastflussrichtung



Klassische uni- (links) und zukünftig multidirektionale (rechts) Lastflussrichtung im Energiesystem

Maßgeblich für diesen Wandel in der Energietechnik ist die Anzahl der schon heute zugebauten Anlagen auf der Ebene der Nutzenden.

- PV-Systeme, PV-Speichersysteme, E-Fahrzeuge, Wärmepumpen

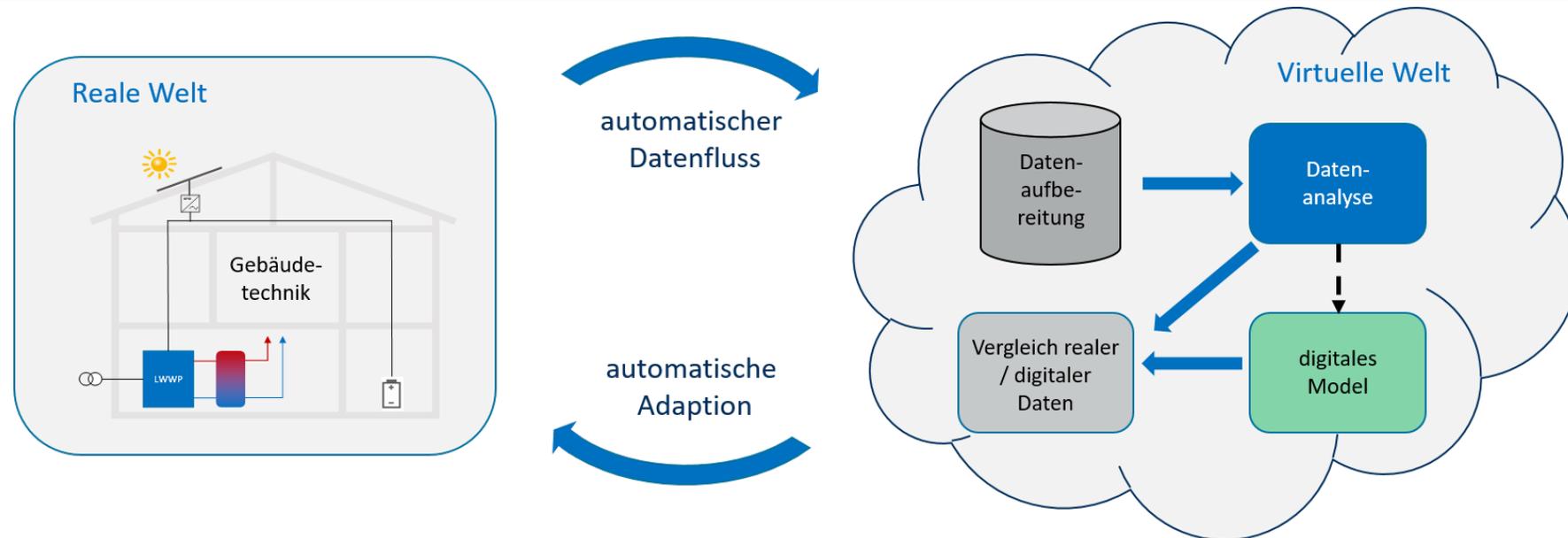


Es werden Planungs- und Betriebssysteme benötigt, die das energetische, dynamische Verhalten der eingesetzten Wandlungs-, Speicher- und Übergabeeinrichtungen abbilden können und die interaktiv anzusteuern sind.

Digitale Zwillinge stellen für diese Aufgabe ein geeignetes Werkzeug dar!

## Definition eines digitalen Zwillings aus Sicht des Projektes DZWi

*Unter einem Digitalen Zwilling wird ein System aus Cloud-Infrastruktur, numerischen Modellen und Schnittstellen zu realen Geräten aufgefasst, welches automatisch einen bidirektionalen Datenfluss zwischen physischem (realem System) und virtuellem Objekt (virtuellem System) ermöglicht, mit dem Ziel aus der Cloud eine automatische Anpassung / Optimierung der realen Systeme vornehmen zu können.*



Digitaler Systemzwilling - Definition

## Ohne Cloud geht nix!

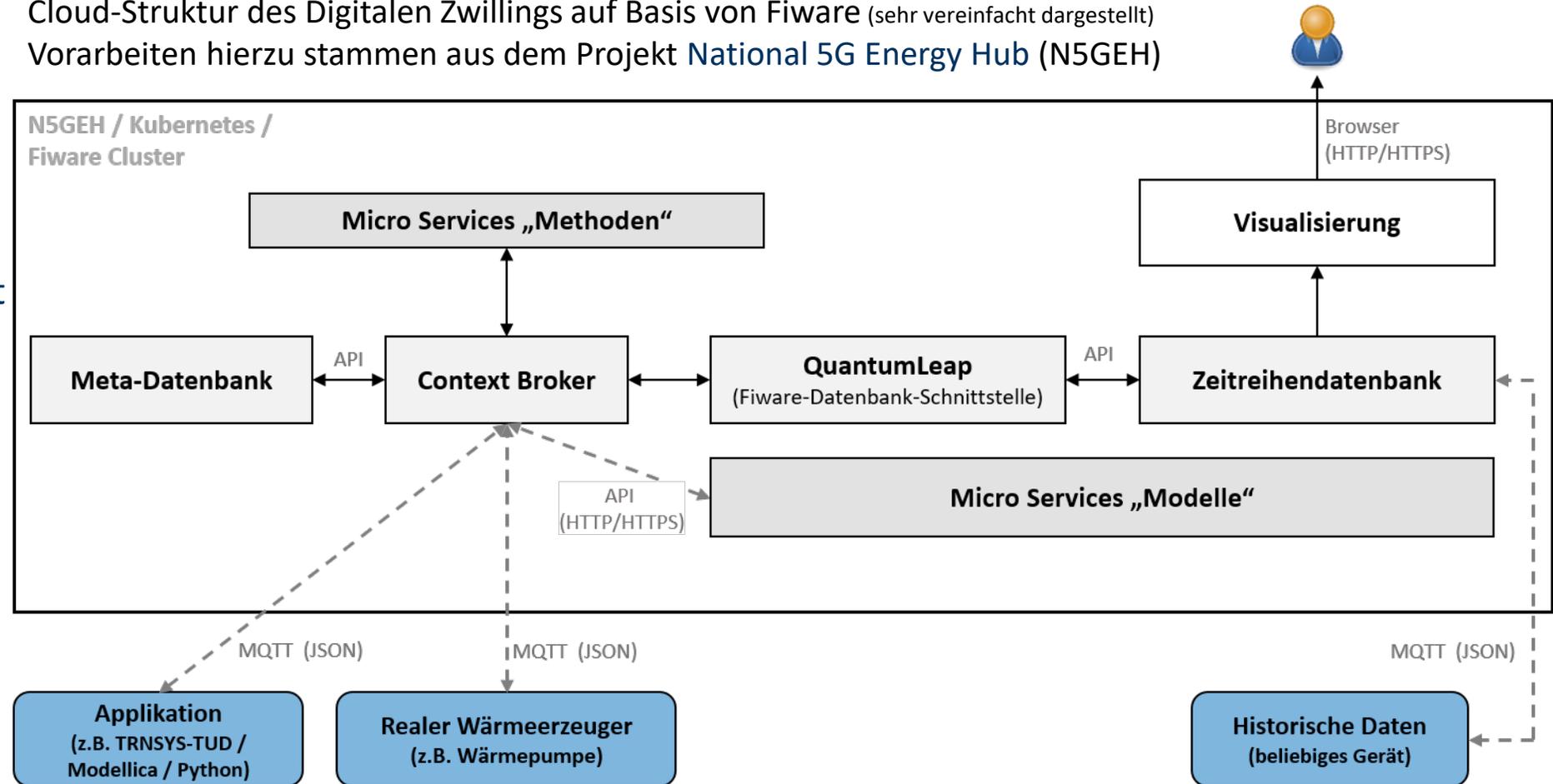
### Vorteile:

- Skalierbarkeit
- Redundanz
- Austauschbarkeit der genutzten Services
- Weltweite Erreichbarkeit der Sensoren/Aktoren
- Hohe Verfügbarkeit

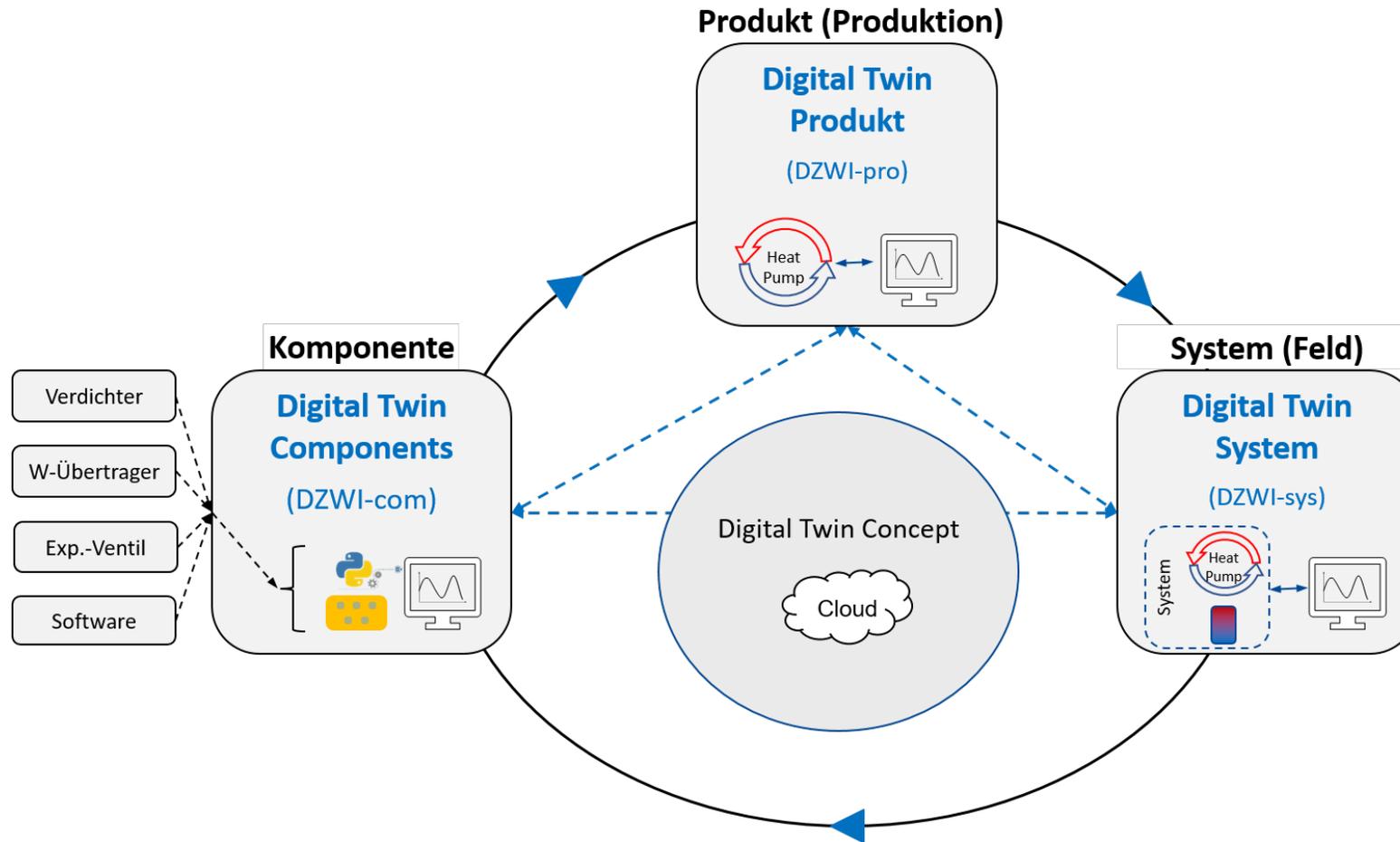
### Fiware:

- Open Source Platform for the Smart Digital Future.

Cloud-Struktur des Digitalen Zwillings auf Basis von Fiware (sehr vereinfacht dargestellt)  
Vorarbeiten hierzu stammen aus dem Projekt National 5G Energy Hub (N5GEH)



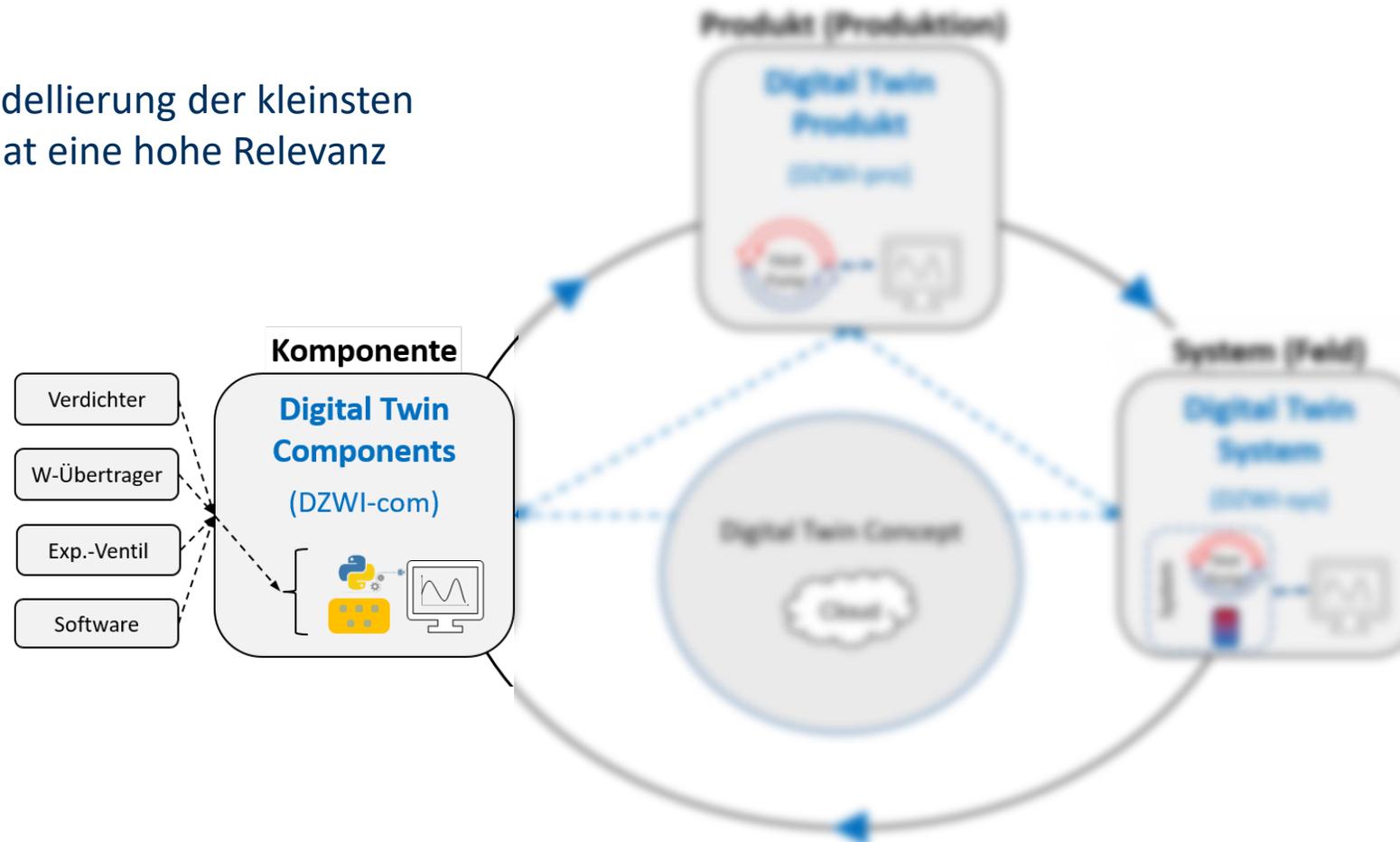
Digitale Zwillinge können in verschiedenen Phasen des Produktlebenszyklus eingesetzt werden.



Digitale Zwillinge können in verschiedenen Phasen des Produktlebenszyklus eingesetzt werden.

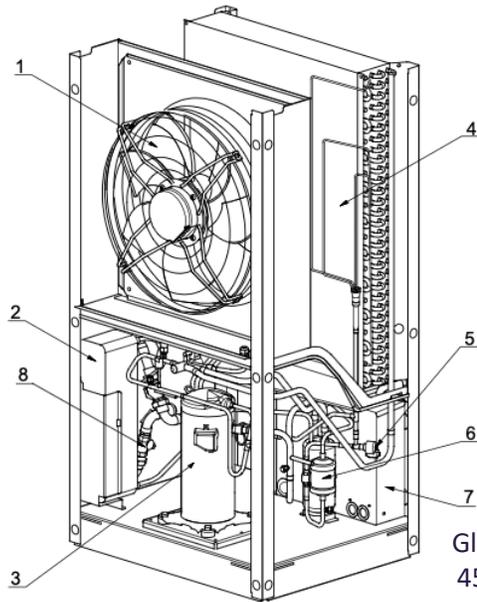
## Bisheriger Fokus:

- die korrekte Modellierung der kleinsten Komponenten hat eine hohe Relevanz



Essentiell für den virtuellen Zwilling ist die detaillierte Modellbildung auf Basis des realen Zwillings.

## Realer Zwilling (Beispiel)



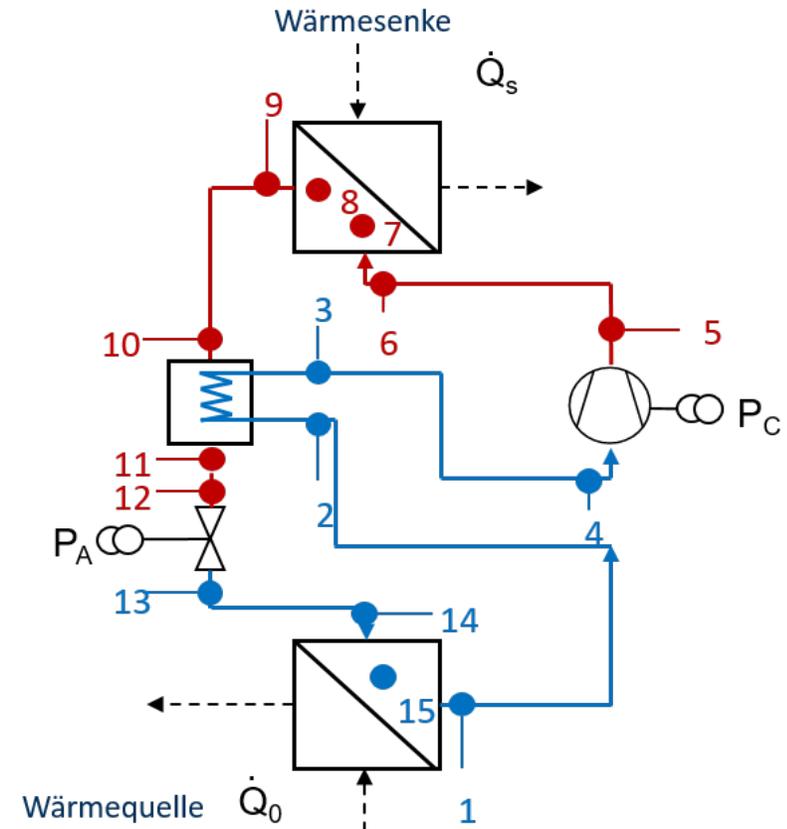
Glen Dimplex Datenblatt  
452168.66.12 · FD 0107

- |                 |                     |
|-----------------|---------------------|
| 1) Ventilator   | 5) Expansionsventil |
| 2) Verflüssiger | 6) Filtertrockner   |
| 3) Verdichter   | 7) Schaltkasten     |
| 4) Verdampfer   | 8) Schmutzfänger    |

Modellierung / Abstraktion



## Virtueller Zwilling



Um eine möglichst korrekte Abbildung des realen Zwillings erstellen zu können, braucht es zusätzliche Sensorik an der realen Wärmepumpe.

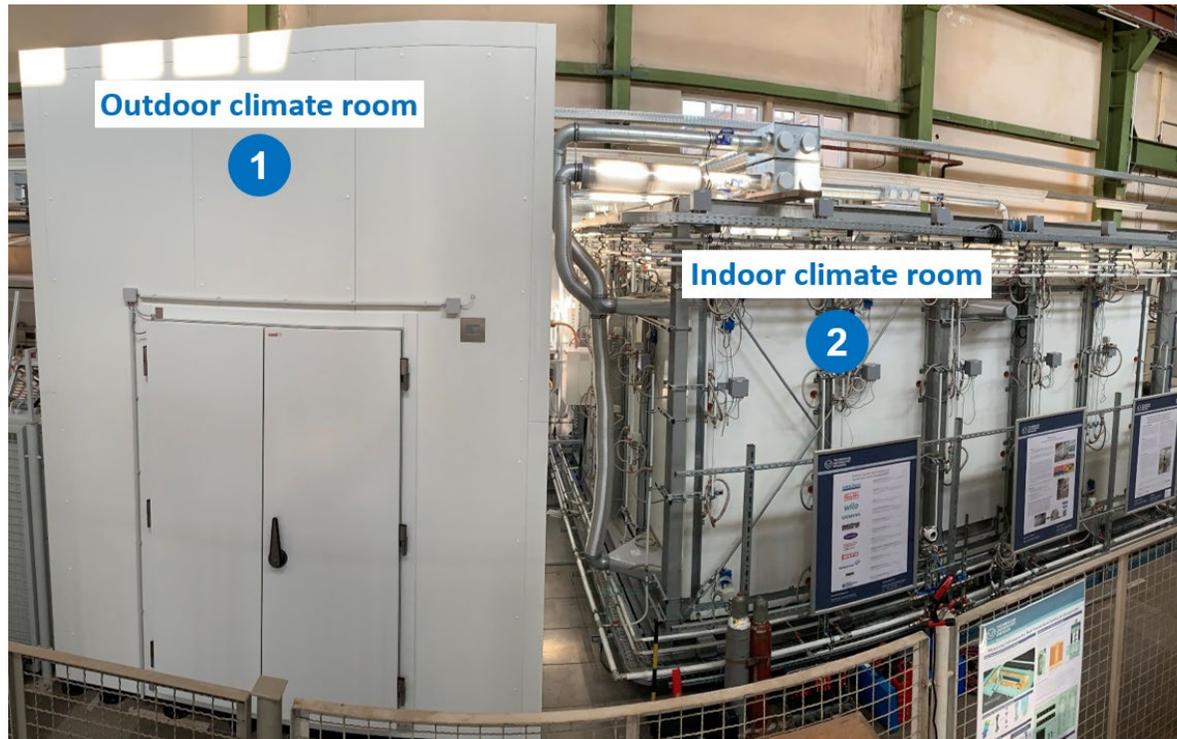
## Beispiel:

- Ertüchtigung via  
Volumenstromsensor

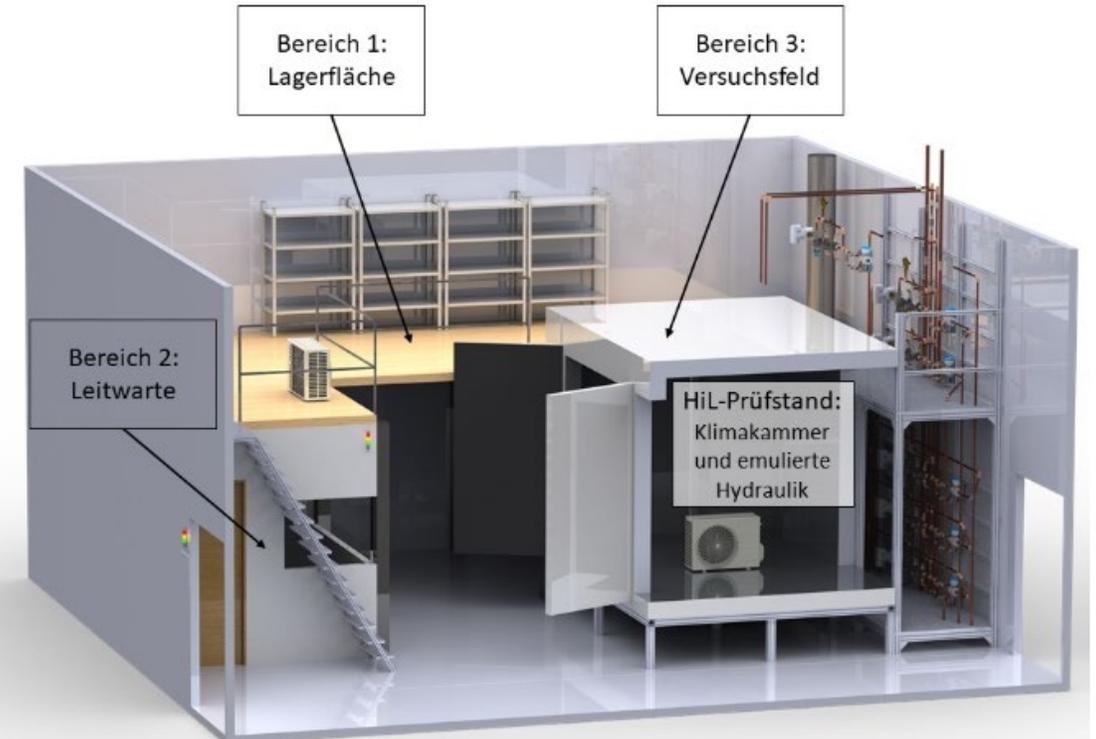


## Simulieren geht nicht ohne Validieren!

- Die detaillierte Vermessung verschiedener Zustände des realen Zwillings ist zwingend notwendig.
- Es wurden vielfältige Messungen in den Laboren aller vier Partner durchgeführt.



Fotografie des Combined Energy Labs 2.0 an der TU Dresden



CAD Skizze des HiL-Prüfstands an der RWTH-Aachen

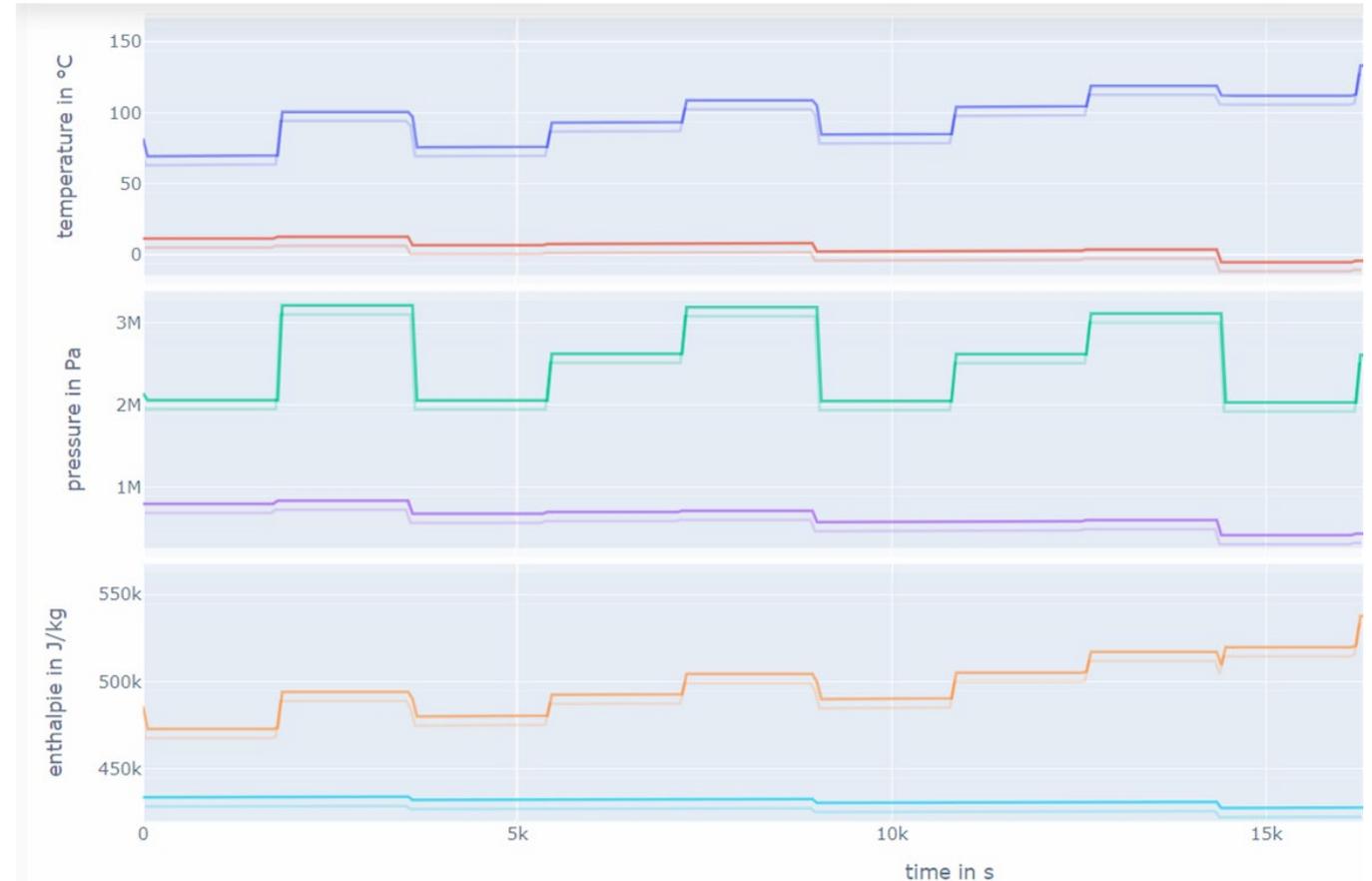
Die Validierung erfolgt von der einzelnen Komponente bis hin zum gesamten Kreislauf.

## Grundlage:

- Im Labor aufgebaute Wärmepumpe
  - Mehrere Messreihen
  - Variierende Auslegungspunkte
- Ausgewählte Daten für die Validierung genutzt
  - Nutzung von Mittelwerten
- Aufbereitete Daten als Input für den digitalen Zwilling

## Ergebnis:

Der Digitale Zwilling Wärmepumpe ist grundlegend Einsatzbereit, einzelne Modelle werden im Rahmen des Projektes noch verbessert bzw. erweitert.



Schematische Darstellung von an der realen Wärmepumpe gemessenen (satte Farben) und via digitalem Zwilling berechneten Kenngrößen (matte Farben) – Achtung: Idealisierte Darstellung

## Microservice: Automatische Kompressor Kalibrierung

### Motivation:

- Die von den Verdichter Herstellern angegebenen Polynome entspringen in der Regel einem Best-Case-Szenario.
- Es wird zum Teil eine starke Abweichung (max. 15%) von den Ergebnissen der Herstellerpolynomen beobachtet.

### Idee:

- Die Koeffizienten (c) der Herstellerpolynome (nach AHRI Standard 540) mit Hilfe von Versuchsdaten selbst bestimmen und damit den Digitalen Zwilling rekalisieren ( $value := \text{Massestrom/elektrische Leistung}$ ,  $e := \text{evaporator}$ ,  $c := \text{condensator}$ ,  $T := \text{Temperatur}$ ).

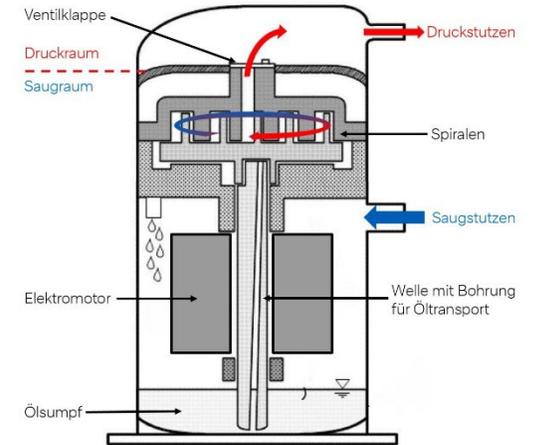
$$value = c_0 + c_1 \cdot T_e + c_2 \cdot T_c + c_3 \cdot T_e^2 + c_4 \cdot T_e \cdot T_c + c_5 \cdot T_c^2 + c_6 \cdot T_e^3 + c_7 \cdot T_e^2 \cdot T_c + c_8 \cdot T_e \cdot T_c^2 + c_9 T_c^3$$

### Umsetzung:

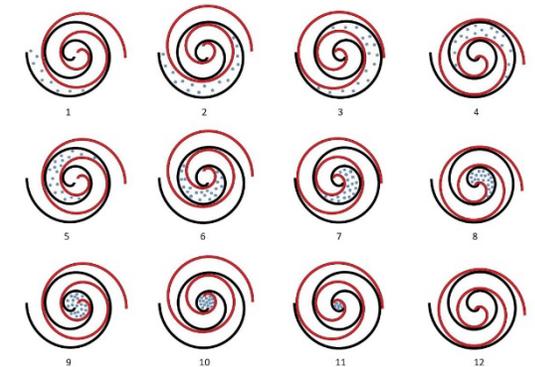
- Mikro-Service (Python-Script) das automatisiert die Messergebnisse einliest und die Koeffizienten bestimmt.
- Bereitstellung eines Autokalibrierungsservices für sämtliche Kompressoren.

### Ergebnisse:

- Die Bestimmung der Koeffizienten erfolgt schnell und effizient.
- Die rel. Abweichung der Simulationsergebnisse konnte durch die neuen Koeffizienten deutlich gesenkt werden.
- Die Automatische Kalibrierung ist aktuell nicht im Feld realisierbar, da die dort verbaute Sensorik zu wenig Informationen liefert.



Skizze nach Navarro-Peris, E.; Corberan Salvador, JM.; Martínez-Galvan, IO.; Gonzalez Marcia, J.: Oil sump temperature in hermetic compressors for heat pump applications. In: International journal of refrigeration, Bd. 35, Nr. 2, S. 397–406, 2012



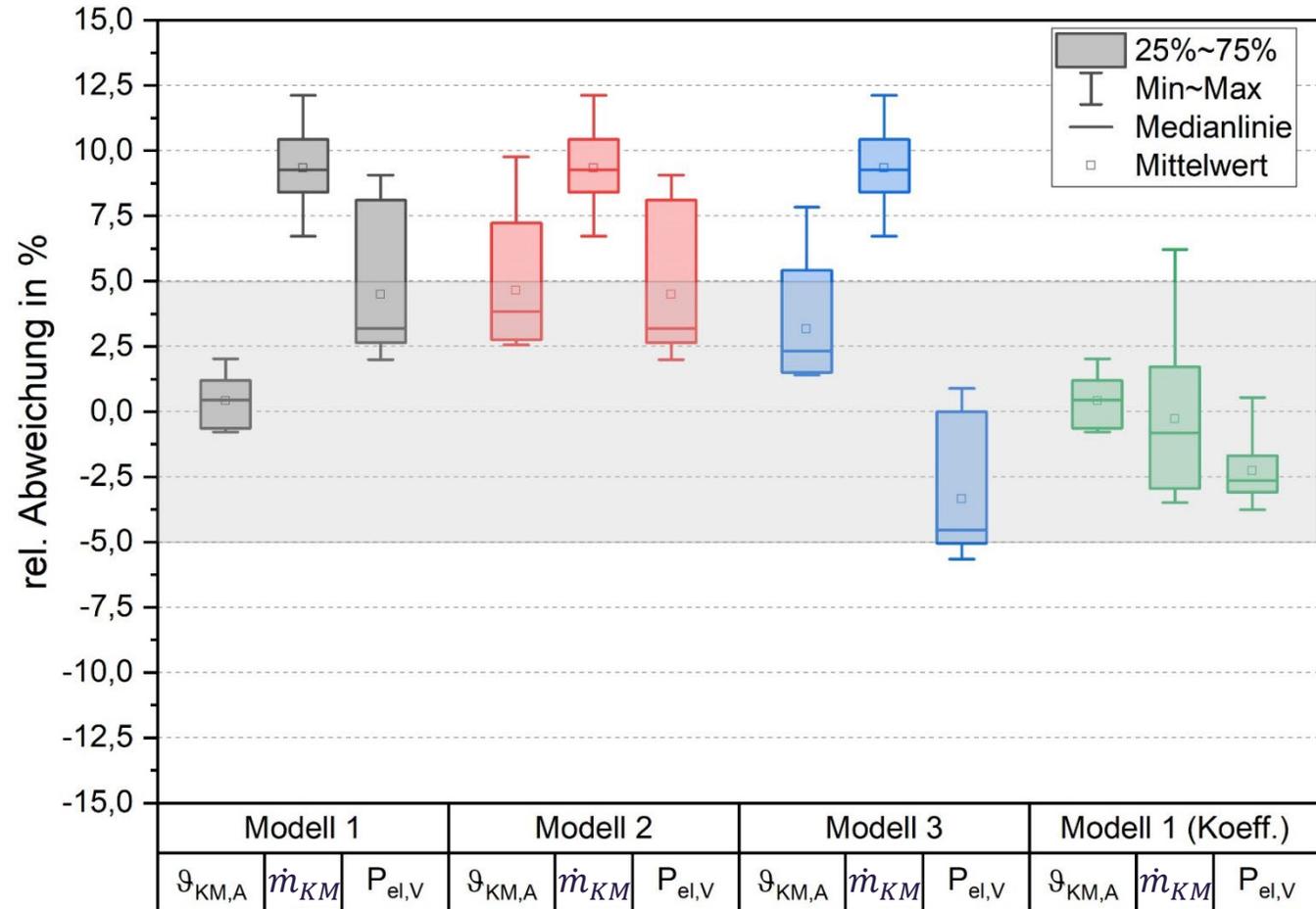
Skizze siehe Taubenreuther, P.: Interne Mitteilung. Glen Dimplex Deutschland GmbH, 23.06.2022

## Microservice: Automatische Kompressor Kalibrierung

### Grundlage:

- Drei Kompressor Modelle im Einsatz (Jeweils mit Standardparametern vom Hersteller aufgesetzt)
- Autokalibrierung exemplarisch am Modell 1 umgesetzt (parametriert auf Messdaten)
- Input: Messdaten einer realen Wärmepumpe im Labor
- Kontrolle der Outputparameter
  - Austrittstemperatur  $\vartheta_{KM,A}$
  - Kältemittelmassestrom  $\dot{m}_{KM}$
  - Elektrische Leistung des Verdichters  $P_{el,V}$

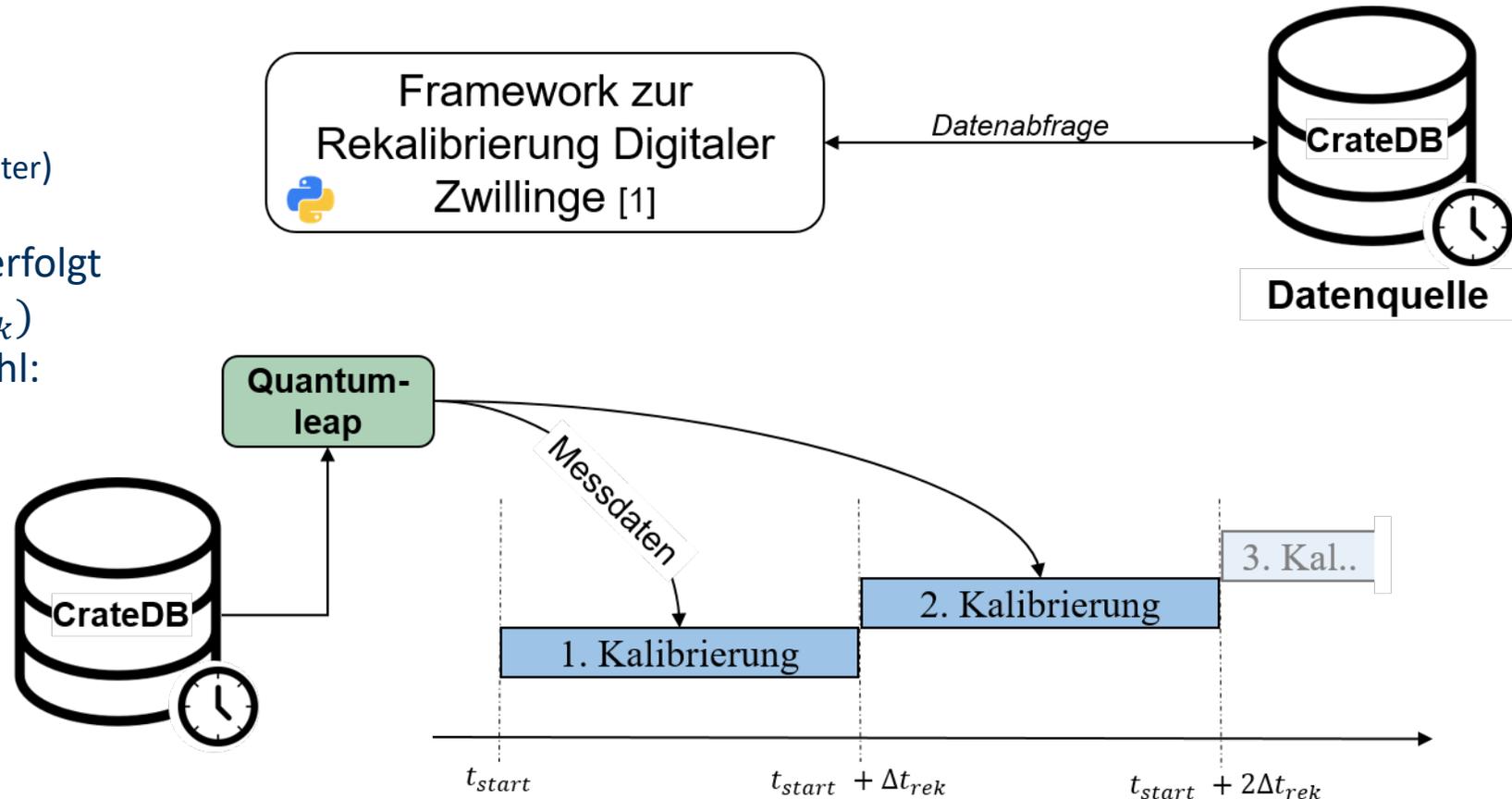
**Ergebnis:** Eine Automatische Korrektur der Hersteller-Polynome führt zu einer deutlichen Verbesserung der Ergebnisse und wird somit empfohlen.



Erst in Verbindung mit den richtigen Micro Services, wird der Digitale Zwilling zu einem wertvollen Werkzeug!

## Micro Service – Fehlererkennung:

- Datenquelle des Service:  
CrateDB (Zeitreihen Datenbank im Fiware Cluster)  
Quantumleap (Datenbankschnittstelle)
- Kalibrierung des virtuellen Zwillings erfolgt in regelmäßigen Zeitabständen ( $\Delta t_{rek}$ )
- Mehrere Metriken stehen zur Auswahl:
  - RMSE  
(Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers)
  - CVRMSE  
(Variationskoeffizient des mittleren quadratischen Fehlers)
  - ...

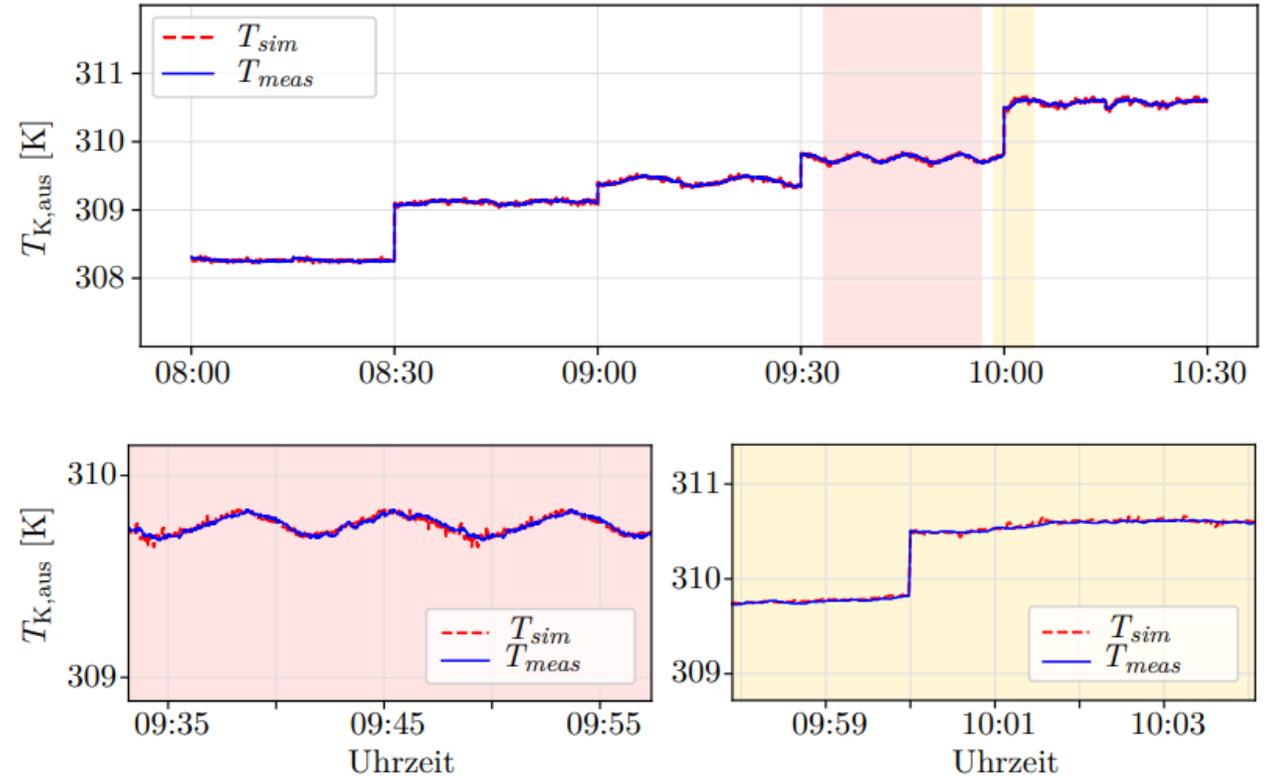


[ 1 ] Borges, S.; Atwani, W.; Vering, C.; Müller, D.: Development of a Scalable Cloud-based Framework for Automated Calibration of Digital Twins, BauSim, Weimar, 2022.

Ein zyklisch rekaliert virtueller Zwilling ermöglicht die Fehlerdetektion im realen Zwilling.

Simulation	
Zielgröße	Vorlauftemperatur $T_{K,aus}$
Metrik	
Fehlermaß	RMSE
Toleranzgrenze	0,6 K
Zeitschrittweite	10 Minuten
	5 Minuten

RMSE - Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers



Ein zyklisch rekaliert virtueller Zwilling ermöglicht die Fehlerdetektion im realen Zwilling.

Simulation	
Zielgröße	Vorlauftemperatur $T_{K,aus}$
Metrik	
Fehlermaß	RMSE
Toleranzgrenze	0,6 K
Zeitschrittweite	10 Minuten 5 Minuten

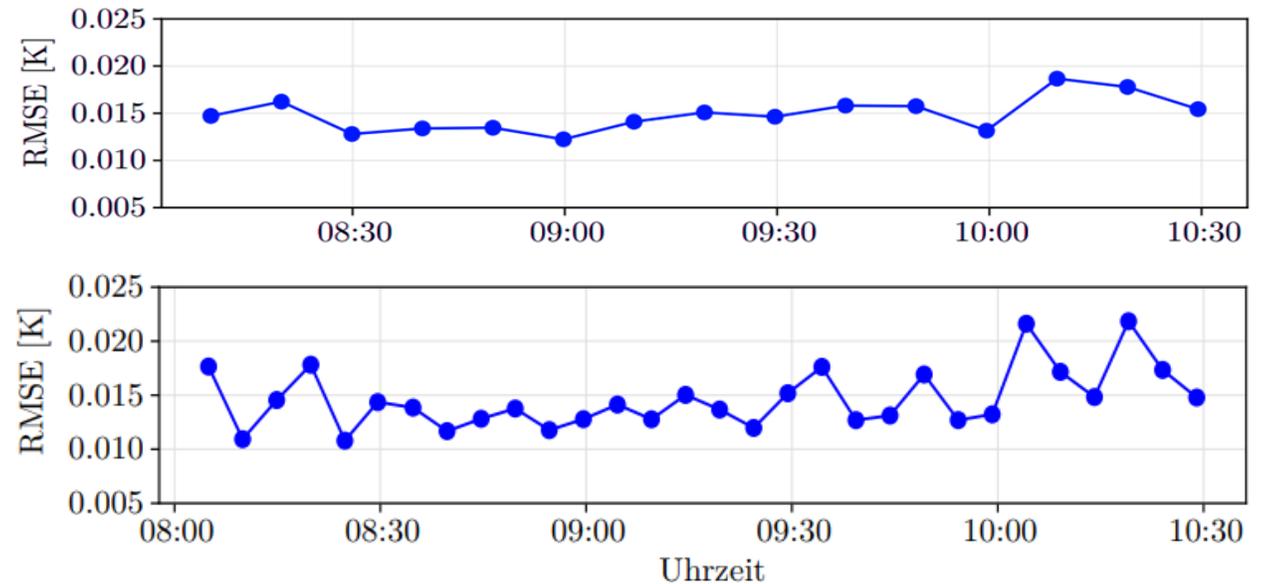
RMSE - Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers

! RMSE liegt im Bereich zwischen 0,01 K und 0,023 K.

! Keine Fehlerbenachrichtigung

RMSE für unterschiedliche Zeitschrittweiten

- 10 min (Abbildung oben)
- 5 min (Abbildung unten)



Ein zyklisch rekaliert virtueller Zwilling ermöglicht die Fehlerdetektion im realen Zwilling.

Simulation	
Zielgröße	Vorlauftemperatur $T_{K,aus}$
Metrik	
Fehlermaß	RMSE
Toleranzgrenze	0,6 K
Zeitschrittweite	10 Minuten
	5 Minuten

RMSE - Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers

! Manipulation der gemessenen Zielgröße im Zeitraum von 08:24 bis 08:30 Uhr.



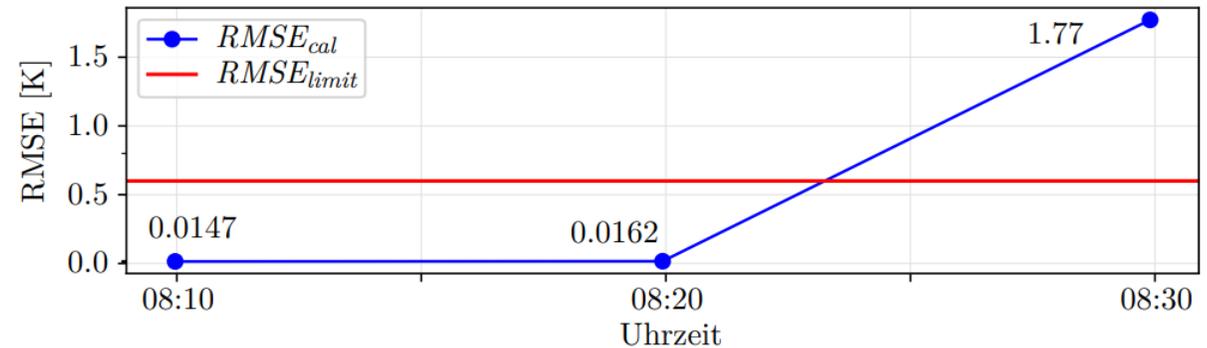
Abgedeckter Verdampfer

Ein zyklisch rekaliert virtueller Zwilling ermöglicht die Fehlerdetektion im realen Zwilling.

Simulation	
Zielgröße	Vorlauftemperatur $T_{K,aus}$
Metrik	
Fehlermaß	RMSE
Toleranzgrenze	0,6 K
Zeitschrittweite	10 Minuten 5 Minuten

RMSE - Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers

! Manipulation der gemessenen Zielgröße im Zeitraum von 08:24 bis 08:30 Uhr.



Ein zyklisch rekaliert virtueller Zwilling ermöglicht die Fehlerdetektion im realen Zwilling.

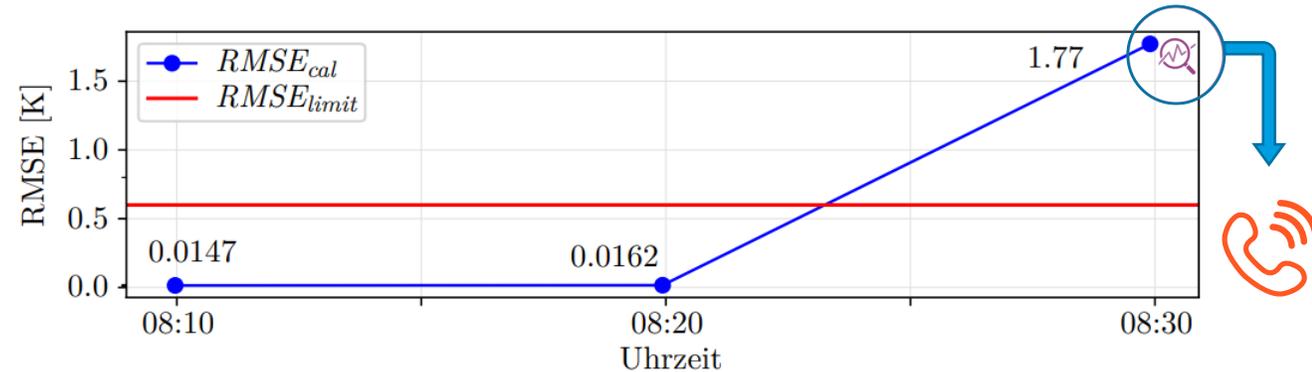
Simulation	
Zielgröße	Vorlauftemperatur $T_{K,aus}$
Metrik	
Fehlermaß	RMSE
Toleranzgrenze	0,6 K
Zeitschrittweite	10 Minuten 5 Minuten

RMSE - Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers

! Manipulation der gemessenen Zielgröße im Zeitraum von 08:24 bis 08:30 Uhr.

! Grenzwert wird überschritten und Warnung wird ausgegeben.

**! WARNUNG**  
Fehlerhaftes Verhalten der Wärmepumpe detektiert im Zeitintervall zwischen **08:20** und **08:30** am 28.06.2021 überschreitet der RMSE den vorgegebenen Grenzwert.



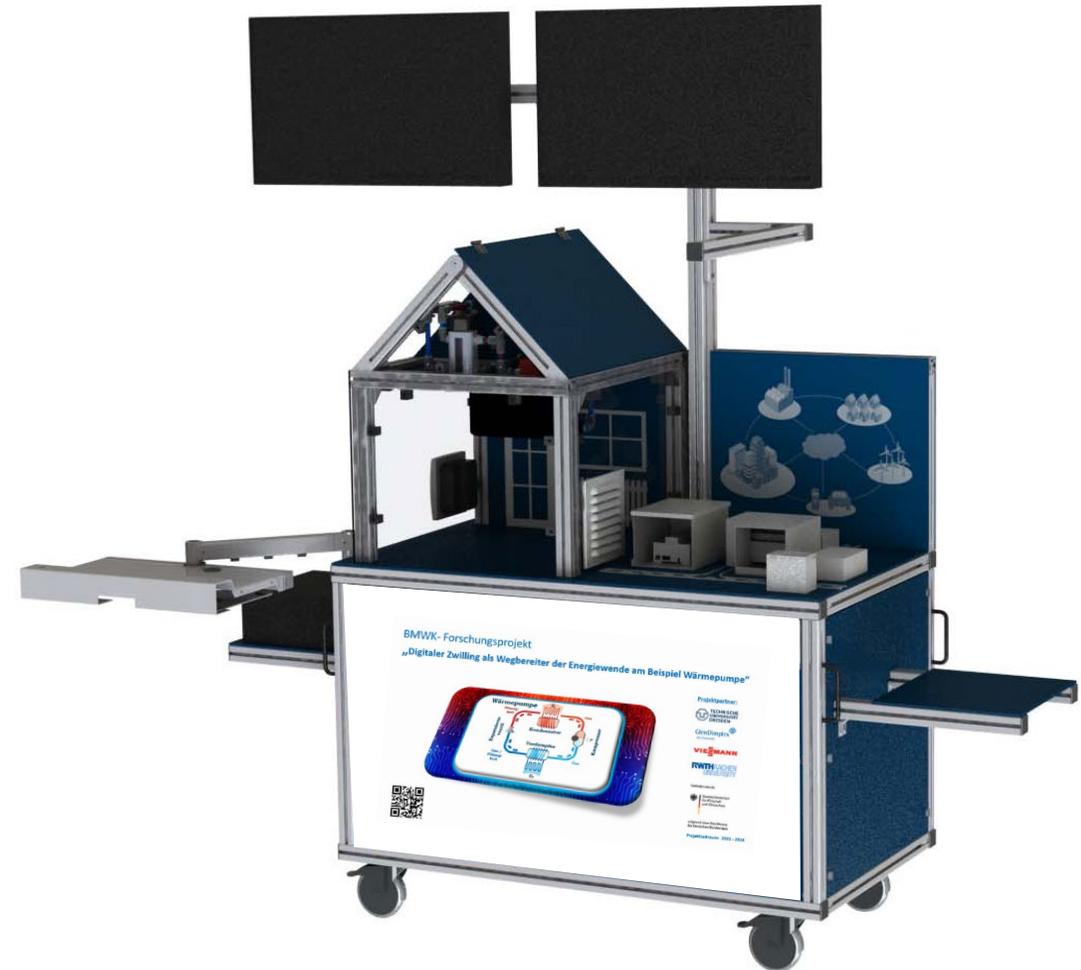
## Endbericht in Vorbereitung

### DZWi / Digitalisierungs-Demonstrator im Aufbau:

- Manuelle Störung von physischem und digitalem Zwilling möglich
- Erlebbarkeit des Informationsflusses im Backend  
(Welche Messages werden wann und in welcher Form gesendet)
- Erlebbarer Kopplung von Wärmepumpe, PV-Anlage, Gebäude und anderen Komponenten

### Diverse Live-Demos von Anwendungsszenarien in Vorbereitung:

- Auto-Rekalibrierung von Wärmepumpenkomponenten
- Fehlererkennung im Feld



Es wurde ein Cloud-basierter Digitaler Zwilling für Wärmepumpen geschaffen.

- Der Datenaustausch zwischen realem und virtuellem Zwilling erfolgt automatisiert.
- Es wurden mehrere, variierende Komponentenmodelle entwickelt, implementiert und validiert.
- Das Konzept wird mit Hilfe von Demonstratoren visuell und erlebbar aufbereitet.

Mit Hilfe des Zwillings besteht bereits jetzt die Möglichkeit diverse Fehlerszenarios zu adressieren bzw. konkrete Fehler zu identifizieren.

Es wird weiterhin daran gearbeitet:

- verschiedene Komponentenmodelle für unterschiedliche Wärmepumpenkonfigurationen zu implementieren und zu validieren,
- weitere Microservices zur Fehlererkennung bzw. Optimierung der Wärmepumpe zu schaffen

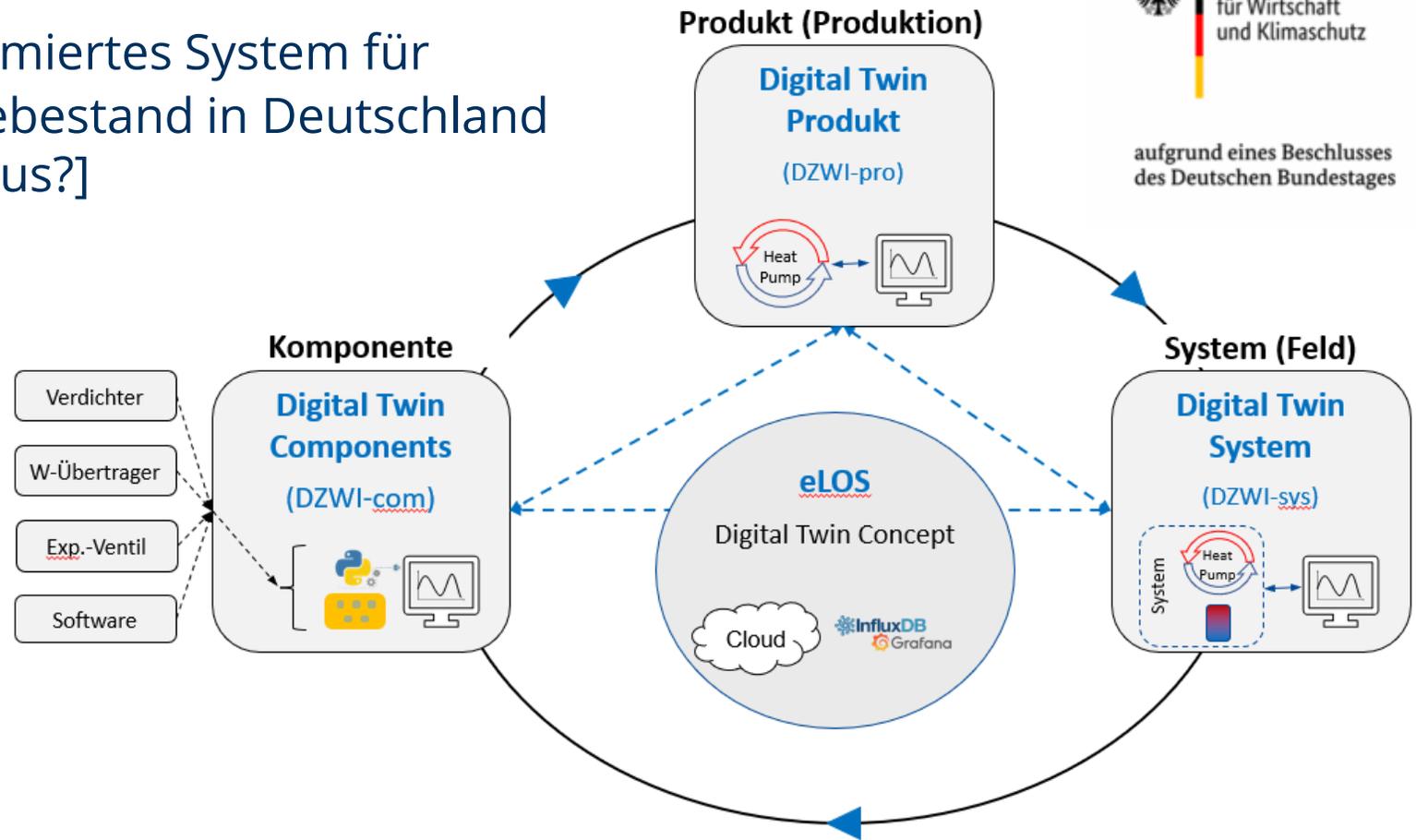
## Überführung und Weiterführung der Projektergebnisse in Folgeprojekte

- **eLOS** – Energetisch Lokal Optimiertes System für einen emissionsarmen Gebäudebestand in Deutschland mittels Digitalen Zwillingen [Status?]

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



## Überführung und Weiterführung der Projektergebnisse in Folgeprojekte

- **PIEZOdevice** – Energieeffiziente Wärmepumpen durch die Kombination aktiver und passiver Anti-Eis Strategien; Teilvorhaben: Optimierung passiver Anti-Eis Oberflächen zur Kombination mit aktiven Strategien, Digitaler Zwilling und internes Regelungskonzept [\[03EN4066A-F\]](#)

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestage



# Digitaler Zwilling (DZWi)

## WÄRMEPUMPEN ALS DIGITALER ZWILLING

Lars Haupt, Joachim Seifert, Thomas Hackensellner

18. Symposium Energieinnovation

14.-16.02.2024, Graz/Austria