

WÄRMEPUMPEN ALS DIGITALER ZWILLING

Lars Haupt¹, Joachim Seifert², Thomas Hackensellner³

¹TU Dresden, Helmholtzstr. 14, 01069 Dresden, 0351/46334557, Lars.Haupt@tu-dresden.de

²TU Dresden, Helmholtzstr. 14, 01069 Dresden, 0351/46334909, Joachim.Seifert@tu-dresden.de

³Glen Dimplex Deutschland GmbH, Am Goldenen Feld 18, 95326 Kulmbach, 09221/709100, Thomas.Hackensellner@glendimplex.de

Kurzfassung: Die Digitalisierung ist ein Beschleuniger für viele technische Bereiche – so auch für die Energietechnik. Entwicklungsprozesse und Verfahren zur Betriebsüberwachung werden zunehmend durch Digitale Zwillinge begleitet, die den Entwicklungsprozess deutlich verkürzen, da Erkenntnisse nicht erst über aufwändige Messungen zu generieren sind. Auch in der Betriebsführung und Betriebsüberwachung werden digitale Abbilder der realen Anlagen eingesetzt und können frühzeitig zur Fehlererkennung beitragen. Im nachfolgenden Artikel wird ein Framework, als Modellbaukasten für die Energietechnik, am Beispiel einer Wärmepumpe detailliert vorgestellt.

Keywords: Wärmepumpe, Digitaler Zwilling, FIWARE, DZWi

1 Einleitung

Entwicklungszeiten von Anlagen in der Gebäudeenergietechnik verkürzen und deren realen Betrieb optimieren: Dies sind Ziele des aktuell laufenden und in Kürze abgeschlossenen Vorhabens „Digitaler Zwilling von Wärmeerzeugersystemen als Wegbereiter für die Entwicklung emissionsarmer Gebäudeenergietechnik“ (FKZ: [03EN1022A-D](#), kurz: [DZWi](#)). Dazu entwickelten die Partner Glen Dimplex Deutschland GmbH und Viessmann Climate Solutions SE sowie die RWTH Aachen und die TU Dresden digitale Abbilder (Digitale Zwillinge) von Wärmepumpen und Brennstoffzellen und führten erste erfolgreiche Tests durch. Das Vorgehen in diesem Projekt ist sehr stark durch die Veränderungen der energetischen Versorgungsstrukturen geprägt. Angesichts des durch die Energiewende bedingten Wandels von zentralen hin zu dezentralen energetischen Wandlungseinheiten (Abb. 1, links) und der damit einhergehenden Herausforderung des multidirektionalen, expandierenden (Abb. 1 - rechts) Lastflussmanagements setzt das Projekt von Beginn an auf eine modulare und skalierbare Infrastruktur. Kern dieser Infrastruktur ist ein Cloud-System, in dem Digitale Zwillinge entwickelt und betrieben werden können. Durch die Modularität und Skalierbarkeit können Digitale Zwillinge zu jedem Zeitpunkt generisch erweitert und in ein systemübergreifendes Regelungskonzept integriert werden. Es besteht bereits jetzt die Möglichkeit, einzelne Komponenten oder ganze Systeme von Energiewandlungsmaschinen zu einem systemischen Digitalen Zwilling zusammen zu schalten.

Da bereits zu Beginn des Projektes im Jahr 2020 die Wertigkeit von Wärmepumpen in Deutschland stark zugenommen hatte (vgl. Abb. 2), fokussiert das Projekt auf die Realisierung

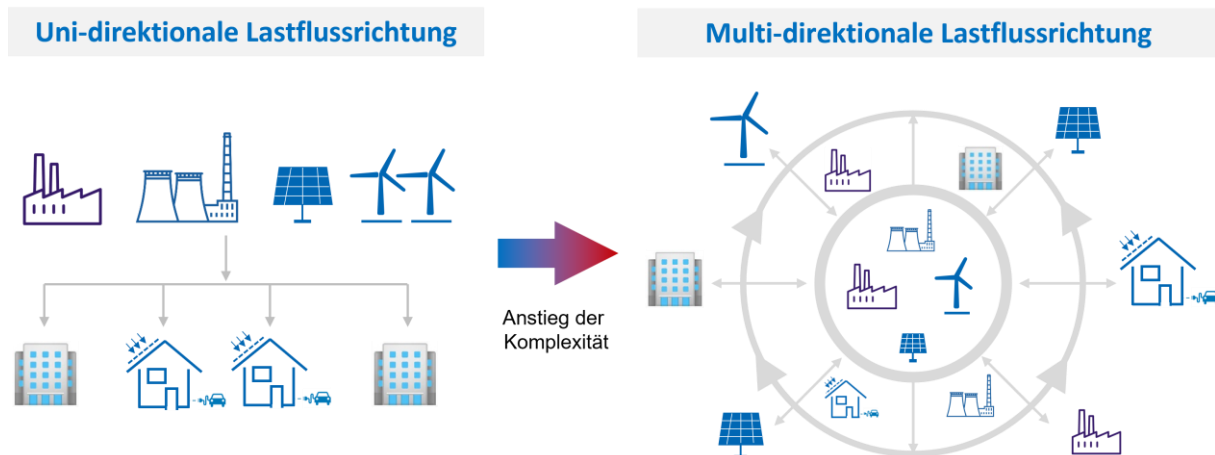


Abb. 1: Klassische uni- (links) und zukünftig multidirektionale (rechts) Lastflussrichtung im Energiesystem

eines Digitalen Zwillings für Wärmepumpen. Zusätzlich wurde das Konzept auch auf Brennstoffzellen, was letztendlich die Übertragbarkeit des Ansatzes belegt. Für die Entwicklungsphase wurden alle relevanten Komponenten von Wärmepumpen und Brennstoffzellen modelliert. Damit wurden mathematische Abbildungen des physikalischen Verhaltens von Wärmepumpen (Kältemittelkreisläufen) und Brennstoffzellen unter stationären und transienten Randbedingungen entwickelt. Diese detaillierten Abbildungen wurden gegen experimentelle Daten validiert. Basierend auf den detaillierten und validierten Modellen können wieder vereinfachte Modelle abgeleitet werden, die beispielsweise eine geringere Berechnungsintensität aufweisen. Eine geringe Berechnungsintensität ist notwendig, um in der Betriebsphase möglichst effiziente Lösungen für die Integration in eine Cloud bereitstellen zu können. Im Projekt [DZWi](#) existieren daher diverse Modellierungstiefen, von physikalischen Ansätzen bis hin zu datengetriebenen Modellen, die mit Hilfe künstlicher Intelligenz entwickelt wurden.

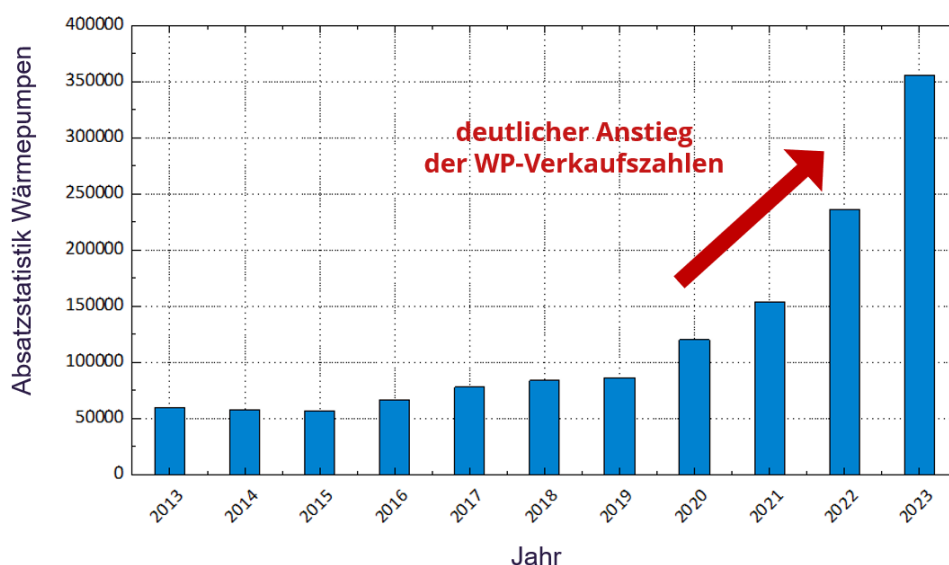


Abb. 2: Anzahl der in Deutschland in den Jahren 2013 – 2023 abgesetzten Wärmepumpen

Den Ergebnissen der Modellvorhersage Digitaler Zwillinge können Online-Daten aus dem Feld gegenübergestellt und analysiert werden. Bei zu starken Abweichungen zwischen Digitalem Zwilling und realem Gerät können Eingriffsgrenzen definiert werden, die langfristig zu innovativen Geschäftsmodellen wie automatischer Fehlererkennung und Diagnose genutzt werden können. Sämtliche Analysen werden live in einer Cloud-Plattform ausgeführt. Die Plattform basiert auf einer Open Source Software, die folglich auch für andere Anwendende frei zur Verfügung steht, so dass beispielsweise weitere Produkte oder deren Digitale Zwillinge ergänzt werden können. Damit können Geräte der Energietechnik langfristig überwacht und optimiert werden. Ein weiterer Anwendungsfall kann die Erweiterung der Fehlererkennung an Anlagen sein, in dem Hersteller oder Betreiber automatisiert informiert werden und somit ein Instrumentarium besitzen, um Fehler schneller zu beheben und um Anlagen kontinuierlich zu optimieren.

2 Der Digitale Zwilling

Auch wenn der Begriff „Digitaler Zwilling“ vor allem in anderen Industriezweigen bereits seit Dekaden geläufig ist, existieren immer noch vielfältige Interpretationen von dessen Definition. Insbesondere vor dem Hintergrund der stetig voranschreitenden Digitalisierung und den immer größer werdenden Möglichkeiten die das Cloud-Computing¹ (Skalierbarkeit, KI-Unterstützung, usw.) bietet, sollte der Digitale Zwilling speziell für die Gebäudetechnik per se in enger Verzahnung mit Cloud-Ressourcen gedacht und aufgebaut werden. Das Ziel ist die Bereitstellung einer Cloud-Plattform für die Verbindung von Digitalem Zwilling und realer Hardware. Im vorliegenden Artikel wird folgende Definition (Abb. 3) verwendet:

„Unter einem Digitalen Zwilling wird ein System aus Cloud-Infrastruktur, numerischen Modellen und Schnittstellen zu realen Geräten verstanden, das 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.“

¹ Cloud Computing ist ein Modell, das es erlaubt bei Bedarf, jederzeit und überall bequem über ein Netz auf einen geteilten Pool von konfigurierbaren Rechnerressourcen (z. B. Netze, Server, Speichersysteme, Anwendungen und Dienste) zuzugreifen, die schnell und mit minimalem Managementaufwand oder geringer Serviceprovider-Interaktion zur Verfügung gestellt werden können. [\[BSI\]](#)

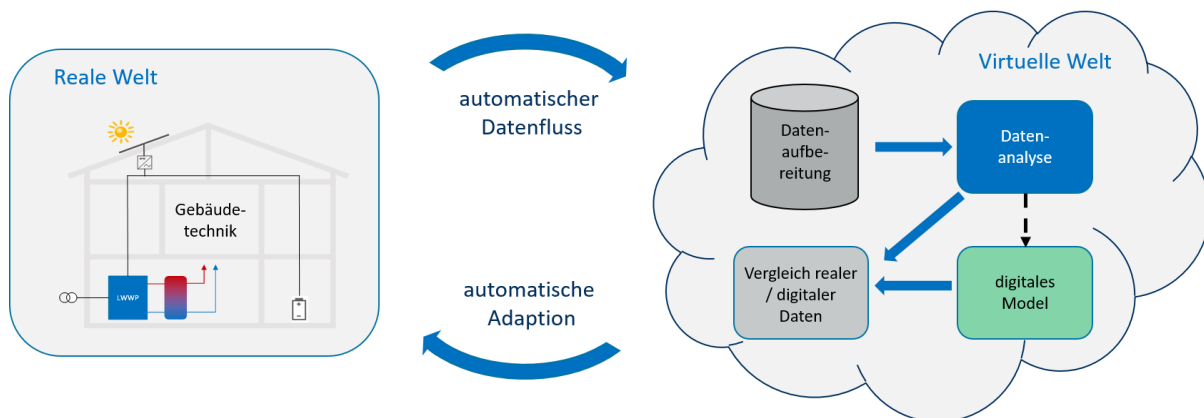


Abb. 3: Cloud fokussierte Definition des Digitalen Zwillings

3 Ohne Cloud geht nichts!

Der im Folgenden am Beispiel einer Wärmepumpe vorgestellte Digitale Zwilling (Abb. 3) kann prinzipiell auch ohne Cloud-Infrastruktur realisiert werden, die damit einhergehenden Einschränkungen bzgl. Skalierbarkeit, Redundanz, Resilienz, usw. sind jedoch nicht zu unterschätzen und nicht mehr zeitgemäß. Die in diesem Artikel vorgestellten Arbeiten beruhen auf der in Abb. 4 skizzierten Cloud-Infrastruktur, die im Wesentlichen auf dem Open Source Framework FIWARE² basiert. Die einzelnen Komponenten des Frameworks (hellgrau) werden hier als so genannte Container-Anwendungen bereitgestellt, die mit Hilfe von Kubernetes³ orchestriert werden. Die Erfahrung zeigt, dass die Verwendung der FIWARE Komponenten recht einfach ist, wobei hingegen die Orchestrierung via Kubernetes eine hohe Einstiegshürde darstellt. Anwendern mit eingeschränktem Zugriff auf IT-Spezialisten sei diesbezüglich die alternative Verwendung von Docker Swarm⁴ in Kombination mit Portainer⁵ nahegelegt. Die Einstiegshürden fallen hier erfahrungsgemäß deutlich niedriger aus. Die eigentlichen numerischen Modelle zur Realisierung (dunkelgrau) der digitalen Abbildung der Wärmepumpe wie auch die Methoden zur Auswertung, Optimierung und Steuerung sind ebenfalls containerisiert und als sogenannte Micro Services implementiert. Eine detailliertere Erläuterung der Einzelkomponenten ist [2, 3] zu entnehmen.

² [FIWARE](#) (Future Internet Ware) - Eine Sammlung von offenen APIs, Datenmodellen und Plattformdiensten, die es Entwicklern erleichtern, IoT-Anwendungen zu erstellen

³ [Kubernetes](#) – Komplexe Container-Orchestrierungsplattform zur Verwendung mehrerer Hosts (Maschinen)

⁴ [Docker Swarm](#) – Einfache Container-Orchestrierungsplattform zur Verwendung mehrerer Hosts (Maschinen)

⁵ [Portainer](#) – Eine Management-Oberfläche für Docker-Container und -Dienste (Docker Swarm, Kubernetes, ...)

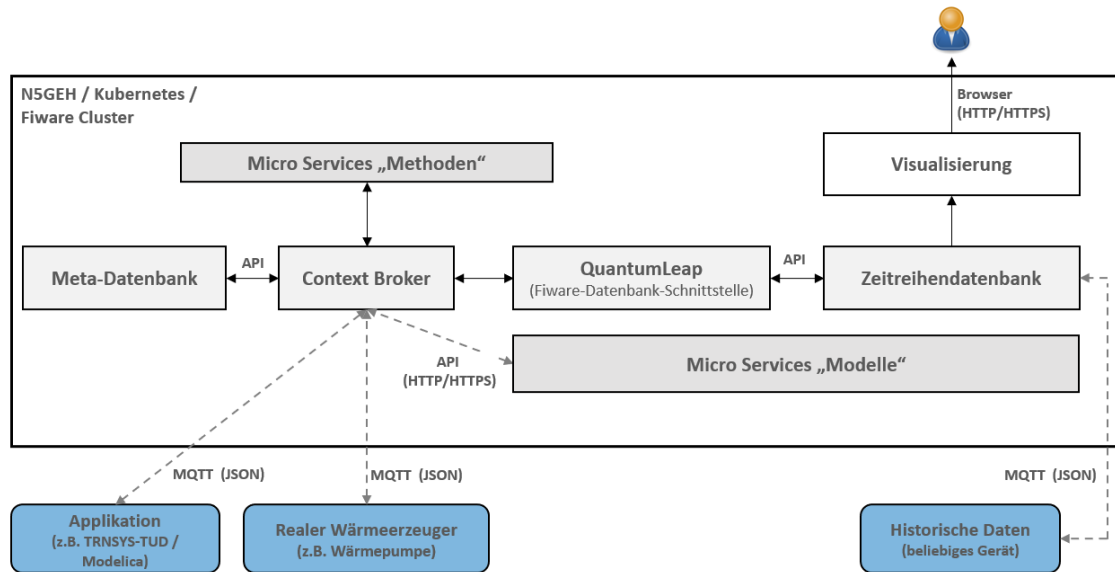


Abb. 4: Cloud-Struktur des Digitalen Zwillings auf Basis von FIWARE (vereinfachte, generalisierte Darstellung)

Hinsichtlich der einzelnen tatsächlich im Cluster verwendeten FIWARE Komponenten sei angemerkt, dass diese bei gleicher Funktionalität jedoch unter anderem Namen analog bei den prädestinierten, kommerziellen Cloud-Plattform Anbietern verfügbar sind. Dies wurde von den beiden im Projekt involvierten Industriepartnern, die auch auf kommerzielle Cloud-Plattform Anbieter setzen, bestätigt.

4 Zwillingsystem Wärmepumpe

Ziel des Projektes ist die vollumfängliche digitale Abbildung (Digitaler Zwilling) realer Luft/Wasser-Wärmepumpen (physischer Zwilling), wie diese bei Glen Dimplex Deutschland oder Viessmann Climate Solutions bereits in hohen Stückzahlen an Kunden verkauft werden. Um diese digitale Abbildung möglichst detailgetreu anfertigen zu können, ist ein umfangreiches Wissen über den Ist-Zustand des realen Systems unerlässlich. Auch wenn die Geräte beider Partner bereits mit einer Vielzahl von Sensoren bestückt sind, zeigte sich schnell, dass die Anlagen aus der Serienfertigung nicht ausreichend Informationen zur Verfügung stellen, um vollständig physikalische Abbildungen zu kalibrieren. Starker Kostendruck unter den Mitbewerbern führt dazu, dass für die Kalibrierung wichtige aber kostspielige Sensoren, wie etwa Durchflussmesser zur Bestimmung des Kältemittelmassenstroms, nicht in Serienprodukte integriert werden. Um dennoch aussagekräftige Ergebnisse erzielen zu können, wurden diese prototypisch bei einzelnen Laborgeräten nachgerüstet und ausgewertet. Die im Folgenden mit dem digitalen Zwilling in Verbindung gebrachten Services und Möglichkeiten können diesbezüglich nicht alle direkt auf die Geräte der Serienfertigung übertragen werden. Deshalb wurden neben physikalischen Modellen auch datengetriebene Modellierungsansätze untersucht, die eine vereinfachte Übertragbarkeit sicherstellen sollen. Generell wurden das System und die Methoden damit derart ausgelegt und entwickelt, dass der gesamte Produktlebenszyklus (vgl. Abb. 5) der Wärmepumpe und auch deren systemische Integration adressiert werden kann.

Das Hauptaugenmerk der bisherigen Arbeiten lag auf der Bereitstellung einer hinreichend genauen Modellierung bestehender Wärmepumpen. Daher besaß bisher die konkrete Modellierung der Einzelkomponenten der Wärmepumpe (Abb. 6 links) die höchste Relevanz. Um auch auf der Modellebene eine größtmögliche Flexibilität beizubehalten, wurde die gesamte Wärmepumpe und damit der gesamte Kältemittelkreislauf modular (Eingangs- und Ausgangsschnittstelle – vgl. Abb. 6 rechts) modelliert. Neben dem Vorteil variierender Modellgenauigkeiten und austauschbarer Modellansätze können somit auch gänzlich unterschiedliche Programmiersprachen und Bibliotheken (Modelica/ TIL-Suite, TRNSYS-TUD, Python, usw.) zur Realisierung verwendet werden.

Das genaue Vorgehen zur Modellierung und zur Abstraktion aller Einzelkomponenten ist Stand der Technik und wird hier aus Gründen der Kompaktheit nicht weiter ausgeführt. Der interessierte Leser findet insbesondere in [4, 6] eine ausführliche Übersicht zur Modellierung sämtlicher Komponenten.

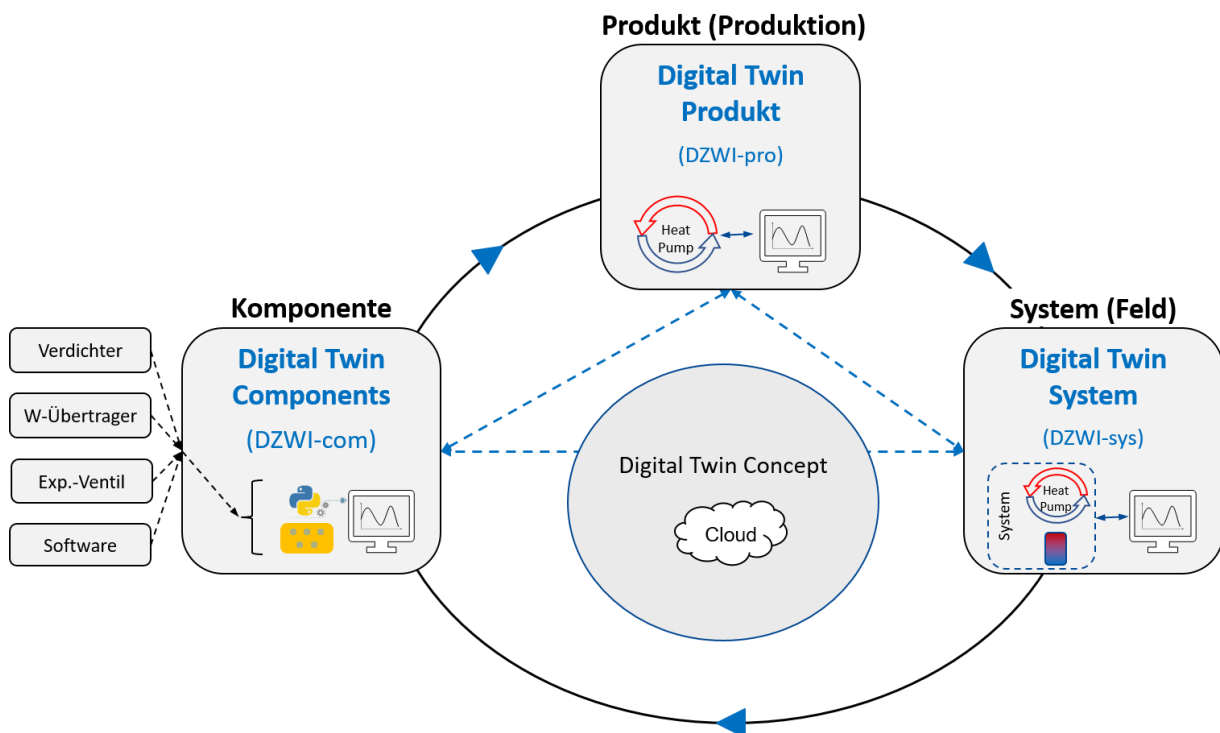


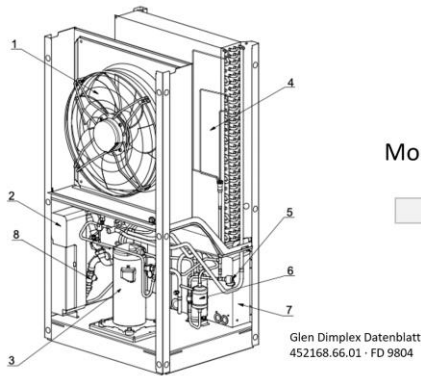
Abb. 5: Struktur des Digitalen Zwillings für Wärmepumpensysteme (DZWi-com⁶ / DZWi-pro⁷ / DZWi-sys⁸)

⁶ DZWi-com - Digitaler Zwilling-Component (Komponenten)

⁷ DZWi-pro - Digitaler Zwilling-Product (Produkt)

⁸ DZWi-sys - Digitaler Zwilling-System (System)

Reales Gerät (Beispiel)



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

Modellierung / Abstraktion



Digitaler Zwilling

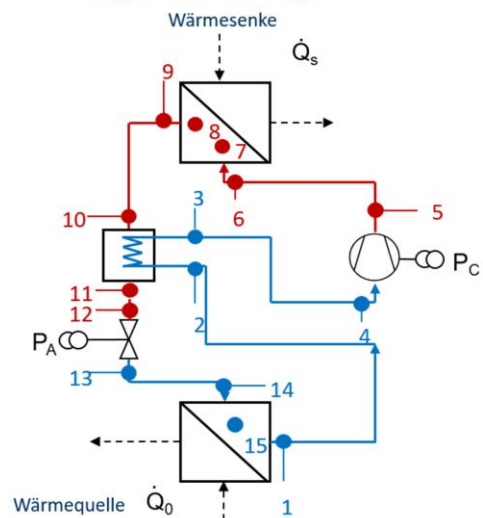


Abb. 6: Komponenten-basierte Modellierung des Kältekreislaufs

5 Validierung

Unabhängig von der Art des für jede Komponente gewählten Modells, besteht die große Herausforderung darin, sicher zu sein, dass das Modell auch das reale Verhalten der jeweils modellierten Komponente hinreichend genau nachbildet. Dieser Nachweis lässt sich zum Beispiel anhand eigens durchgeführter Messkampagnen unter Normbedingungen (DIN EN 14511) erbringen. Die hierfür notwendigen Versuchsstände und Messkabinen wurden insbesondere zu Beginn des Projektes durch die Industriepartner bereitgestellt. Aufgrund Corona-bedingter Kapazitätsengpässe war es jedoch unabdingbar, auch in den Hochschulen entsprechende Kapazitäten aufzubauen bzw. zu erweitern. Die Abb. 7 zeigt exemplarisch die Versuchsstände an der TU-Dresden (links) bzw. an der RWTH Aachen (rechts).



Abb. 7: Fotografie (links) des Combined Energy Labs 2.0 der TU Dresden und CAD Skizze (rechts) des HiL-Prüfstands der RWTH-Aachen

Aufgrund der an mehreren Standorten und an mehreren Versuchsständen nachgewiesenen Übereinstimmung (Abweichung im Mittel ca. 2 - 3 %, vgl. Abb. 8) von Messwerten und Simulationsdaten gilt die Validität der einzelnen Komponentenmodelle und damit des gesamten Digitalen Zwilling als gesichert (siehe auch [2, 5]).

6 Einsatzszenarien

Das Spektrum möglicher Einsatzszenarien für den digitalen Zwilling Wärmepumpe ist sehr vielfältig. Um jedoch den realen Nutzen greifbar zu machen, seien hier beispielhaft zwei konkrete Anwendungsfälle „Autokalibrierung“ und „Fehlerdetektion“ skizziert.

6.1 Autokalibrierung des Verdichters

Der einfachste Ansatz zur Modellierung des Verdichters (siehe Abb. 6, links, Komponente 3) beruht auf den sogenannten Herstellerpolynomen (nach AHRI Standard 540), die auf Basis der Verdampfungs- und Kondensationstemperatur bei konstanter Drehzahl der Verdichterwelle den Kältemittelmassstrom und die elektrische Antriebsleistung liefern. Hierbei ist t_V die Verdampfungs- und t_K die Kondensationstemperatur, die Parameter C_0 bis C_9 stellen die vom jeweiligen Verdichter Hersteller bereitgestellten Polynomkoeffizienten dar.

$$X = C_0 + C_1 \cdot t_V + C_2 \cdot t_K + C_3 \cdot t_V^2 + C_4 \cdot t_V \cdot t_K + C_5 \cdot t_K^2 + C_6 \cdot t_V^3 + C_7 \cdot t_K \cdot t_V^2 + C_8 \cdot t_V \cdot t_K^2 + C_9 \cdot t_K^3$$

Eine Einschränkung bei der Verwendung dieser Polynome ist, dass diese in der Regel ein mittleres Verhalten über eine Produktionscharge hinweg darstellen. Das bedeutet, dass je nach Charge auch Verdichter verbaut werden, deren Verhalten bis zu 15 % von dem durch die Polynome vorhergesagten Verhalten abweicht [7]. Mit Hilfe der digitalen Abbildung der Wärmepumpe wird diese Abweichung erkannt, und ein Micro Service „Rekalibrierung“ (siehe Abb. 4, Micro Service Methoden, u.a. in Anlehnung an [8]) gestartet, der hier die Koeffizienten C_1 bis C_{10} des Verdichterpolynom's anhand von neu erfassten Messwerten recalibriert. Diese Art der Rekalibrierung gewährleistet, dass jeder Wärmepumpe ein eigens zugeschnittener und damit hochpräziser digitaler Zwilling zugeordnet wird. Abb. 8 zeigt die Abweichung des Digitalen Zwilling von den Messdaten für drei unterschiedliche Verdichtermodelle ohne Autokalibrierung (links), wobei die Komplexität bzw. die Detailtreue der Modelle mit ansteigender Nummerierung zunimmt. Im Vergleich hierzu wurde bei Modell 1 (Koeff.) die Autokalibrierung aktiviert. Aus Gründen der Übersicht wurde auf die Anzeige der ähnlich verbesserten Ergebnisse des Modells 2 und 3 verzichtet. Der mit der Autokalibrierung einhergehende Verbesserung aller untersuchten Kenngrößen ist klar erkennbar.

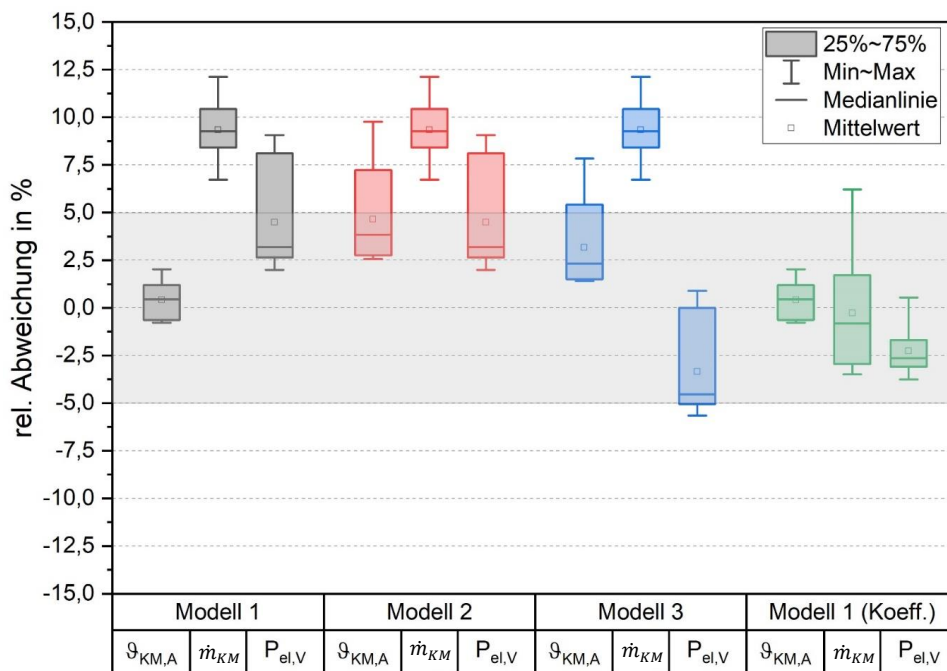
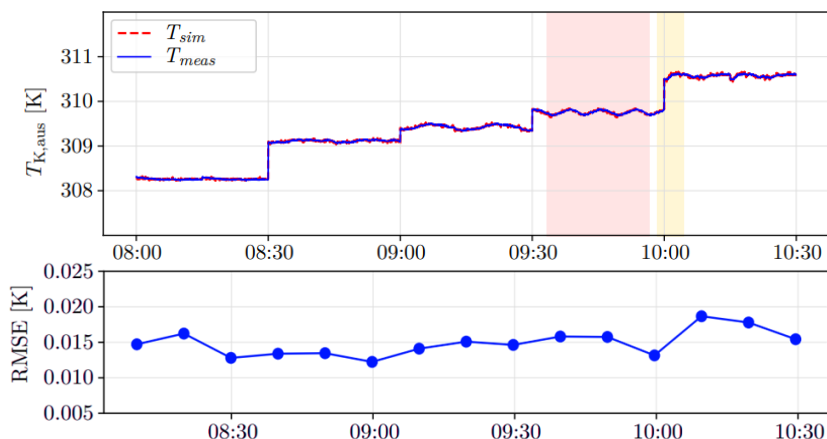


Abb. 8: Relative Abweichung des virtuellen Zwillings in Prozent bei Verwendung unterschiedlicher Verdichtermodelle. Modell 1 – 3 ohne und Modell 1 (Koeff.) mit Autokalibrierung. ($\vartheta_{KM,A}$ - Temperatur des Kältemittels am Verdichteraustritt; \dot{m}_{KM} - Kältemittelmassestrom; $P_{el,V}$ - elektrische Antriebsleistung)

6.2 Fehlererkennung am Verdampfer

Im ungestörten Betrieb des Zwillingsystems Wärmepumpe liegen die simulierten und gemessenen Werte für die Vorlauftemperatur (Abb.9 links oben) nahezu ideal übereinander. Dem entsprechend zeigt auch ein potenziell angewendeter Fehlerschätzer (hier RMSE⁹) einen Wert nahe Null (Abb. 9 – links unten). Sobald es jedoch zu einer Störung im System kommt, laufen die Kurven der gemessenen und der simulierten Werte auseinander. Eine mögliche und recht häufige Ursache für eine Störung ist das sogenannte Fouling von Verdampfern, das etwa



⁹ RMSE - Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers

Abb. 9: Beispielhafter Verlauf der simulierten und gemessenen Vorlauftemperatur (oben) und des dazugehörigen RMSE (unten). Verdampfer mit reduzierter Luftanströmfläche (rechts).

durch die Verringerung der freien Strömungsfläche auf der Luftseite des Verdampfers emuliert werden kann [9]. Diese Störung (Abb. 9 - rechts) wurde im Projekt künstlich durch anbringen von einfachem Karton (weiß) erzwungen. Zeitgleich mit dem Auftreten des Fehlerereignisses steigt auch der RMSE zwischen Digitalem Zwilling und realer Anlage an. Sobald dieser Wert einen zuvor festgelegten Schwellwert (beruht aktuell auf Erfahrungswerten) überschreitet (Abb. 10 – $RMSE_{limit}$), wird dies vom überwachenden Service erkannt und entsprechend eine Warnung vom System generiert, die per SMS an die Nutzenden versandt wird. Direkt im Anschluss können so Maßnahmen zur Behebung des Fehlers eingeleitet werden.

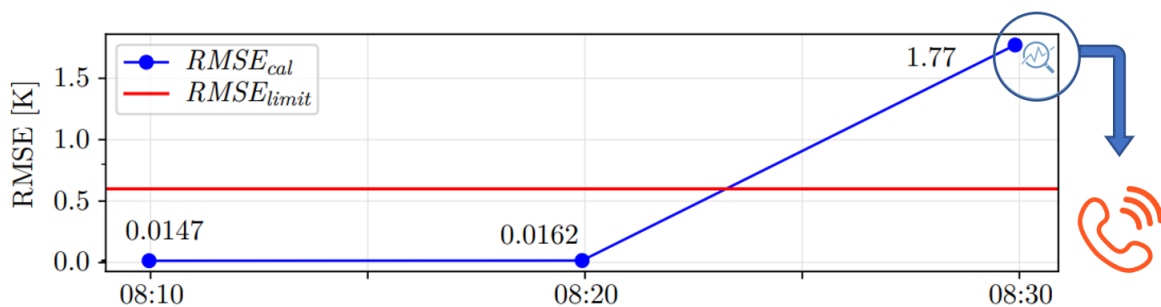


Abb. 10: Änderung des RMSE nach dem Eintritt einer erzwungenen Störung um 08:20 Uhr, inklusive Detektion und Benachrichtigung um 08:30 Uhr.

7 Fazit

Neukonzeptionen von Wärmepumpen und Fragestellungen zur Systemoptimierung finden heute nach wie vor in einer Entwicklungsabteilung und im Labor statt. Die Ergebnisse münden in einen Prototyp, der anschließend unterschiedliche Testphasen durchläuft. Diese Entwicklung ist häufig noch iterativ und damit zeit- und kostenintensiv. Mit Hilfe von digitalen Zwillingen ist es möglich, den gesamten Entwicklungsprozess digital zu begleiten, zu beschleunigen und erst zu einem sehr späten Zeitpunkt die aufwändigen und kostenintensiven Messungen mittels Prototypen durchzuführen. Die digitale Abbildung von realen Anlagen bietet zudem die Möglichkeit, diese im Betrieb einer automatisierten Fehlerfrüherkennung zu unterziehen und Effizienzverluste und womöglich hohe Reparaturkosten zu vermeiden. Zusätzlich wird durch eine gezielte Digitalisierung die Möglichkeit geschaffen, Erkenntnisse aus dem Feld direkt in die Entwicklung von neuen Produkten zu integrieren. Das verkürzt die Entwicklungszeiten und stärkt sowohl die Innovationskraft der Unternehmen als auch die Energieeffizienz von Anlagen im Feld.

Der im Rahmen dieser Veröffentlichung vorgestellte Ansatz des „Digitalen Zwillings“ ist skalierbar und soll in weiteren Arbeiten auf andere Komponenten und Systeme in der Energietechnik übertragen werden. Hierzu werden nach dem Projekt wesentliche Komponenten der Fachöffentlichkeit als Open Source Quellcode zur Verfügung gestellt.

Diese Veröffentlichung wäre ohne die Hilfe der im Folgenden genannten Kolleginnen und Kollegen nicht möglich gewesen: Dr.-Ing. M. Knorr¹, Dipl.-Ing. L. Schinke¹, Dr.-Ing. P. Seidel¹,

Dr.-Ing. A. Perschk¹, Dipl.-Ing. S. Hohenthal¹, Dipl.-Ing. F. Valentin¹, Dr.-Ing. Andreas König Hagen², Dr.-Ing Christian Vering³, M. Sc. Sebastian Borges³, M. Sc. Fabian Wüllhorst³, M. Sc. Stephan Göbel³, M. Sc. Florian Will³, M. Sc. Hannah Romberg³, M. Sc. Tim Klebig³, Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller³, Dr.-Ing. Karsten Spreitzer⁴, M. Sc. Christian Grozescu⁴, M. Sc. Arno Eggert⁴

¹ TU Dresden, Professur für Gebäudeenergie-technik und Wärmeversorgung

² Glen Dimplex Deutschland GmbH

³ RWTH Aachen, E.On Research Center, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatetechnik

⁴ Viessmann Climate Solutions SE

8 Literatur

- [1] Jones D., Snider C., Nassehi A., Yon J., Hicks B., Characterising the Digital Twin: A systematic literature review, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Volume 29, Part A, 2020, doi: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002
- [2] Seifert, J.; Knorr, M.; Haupt, L.; P. Seidel; Schinke, L.; Perschk, A.; Wiemann, S.; Hackensellner, T.; Kuboth, S.; Borges, S.; Wüllhorst, F.; Vering, C.; Müller, D.; Spreitzer, K.; Eggert, A.; Grozescu, C.; Langner, P., Systemplattform für Digitale Zwillinge am Beispiel von Wärmepumpen – ein ganzheitlicher Ansatz, Deutsche Kälte-Klima-Tagung, DKV-Tagungsbericht, Magdeburg, 16.-18. November 2022.
- [3] Baranski, M; Storek, T.; Kümpel, A; Blechmann, S.; Streblov, R.; Müller, D; Groß, S; Guarnieri, C.; Haghgoo, M.; Sowa, I.; Monti, A.; Knorr, M. Wiemann, S; Haupt, L. ; Seifert, J; Sychev, I.; Fitzek, F; Krahmer, S.; Gasch, E.; Schegner, P; Farac, R; Williams, F.: National 5G Energy Hub – Application of the Open-Source CloudPlatform FIWARE for Future Energy Management Systems. Whitepaper, RWTH Aachen – EBC Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate 2020
- [4] Hackensellner, Th.; Wärmepumpen in Haushalt, Gewerbe und Industrie: Grundlagen-Simulation-Auslegung. VDE Verlag, 2023.
- [5] Haupt, L.; Seifert, J.; Knorr, M.; Seidel, P.; Schinke, L.; Perschk, A.; Hackensellner, T.; König-Haagen, A.; Borges, S.; Wüllhorst, F.; Vering, C.; Göbel, S.; Romberg, H.; Klebig, T.; Müller, D.; Spreitzer, K.; Eggert, A.; Grozescu, C.: Systemplattform für Digitale Zwillinge am Beispiel von Wärmepumpen – ein ganzheitlicher Ansatz, TGA-Kongress, Kongressband, Berlin, p. 58-59, 23.-24. Mai 2023.
- [6] Vering, C. et al., Open-Source vapor compression library (VCLib): Heat pump modeling for education and research, In: Computer applications in engineering education, Band: 30, Heft: 5, Seite(n)/Artikel-Nr.: 1498-1509.
- [7] Vering, C. et al., Towards optimal compressor design and operation: Analyses of loss mechanisms for positive displacement machines (Work in Progress Poster), International Congress of Refrigeration 2023, Paris, France.
- [8] Vering, C. et al., Digital Twin Design with On-Line Calibration for HVAC Systems in Buildings, 17th International Conference of the International Building Performance Simulation Association (BS 2021): 1-3 September 2021, Bruges, Belgium / International Building Performance Simulation Association.

- [9] Borges, S. et al., Optimal Selection of Features for Heat Pump Models based on artificial neural networks, 18th International Conference of the International Building Performance Simulation Association (BS 2023): 4-8 September 2023, Shanghai, China / International Building Performance Simulation Association.