

---

# 1 Einleitung

## 1.1 Allgemein

Die Digitalisierung ist eine der wichtigsten Herausforderungen in der Gebäude- und Energietechnik in den nächsten Jahren und wird die weitere Integration (Ausbau) der erneuerbaren Energien maßgeblich beeinflussen. Welchen Einfluss diese speziell auf die systemkritischen Anwendungen der Gebäudetechnik besitzt, wird aktuell in verschiedenen Projekten analysiert. Zu nennen ist in diesem Zusammenhang das National 5G Energy Hub, welches als BMWK<sup>1</sup> Projekt das Monitoring sowie die Steuerung/Regelung von komplexen Gebäudeenergiesystemen zum Inhalt hat. Fokus des Projektes sind im Wesentlichen aktuelle und zukünftige energetische Anwendungen. Nicht adressiert wird in diesem Zusammenhang der Prozess der Entwicklung von Geräten in der Gebäudeenergietechnik, im Speziellen im direkten Zusammenhang mit dem Gebäude an sich und dem assoziierten Energiebedarf. Aktueller Stand in diesem Bereich ist, dass Entwicklungsfragestellungen in den Konstruktionsabteilungen der Unternehmen bearbeitet werden und die Ergebnisse in einem Prototyp enden, der anschließend unterschiedliche Testphasen durchläuft. Diese Entwicklung ist jedoch sehr personal- und zeitintensiv und kann keinen direkten Zusammenhang mit dem Gebäude berücksichtigen. Aus der Automobilbranche sind alternative Entwicklungswerkzeuge bekannt, mit denen es möglich ist, den gesamten Entwicklungsprozess digital zu begleiten und den größeren Zusammenhang des Gesamtsystems (z.B. Gebäude-Anlagentechnik) durchgehend zu betrachten.

Vor diesem Hintergrund besteht der Hauptfokus des Forschungsvorhabens darin, eine digitale Abbildung unterschiedlicher Wärmeerzeugungssysteme für Gebäude im Detail zu entwickeln (auf Grund der Generizität des gewählten Ansatzes, ist dieser ohne weiteres auch auf Wärmeprozesse erweiter- und anwendbar), mit dessen Hilfe Forschungs- und Entwicklungszeiten deutlich verkürzt werden können und der Systemgedanke im Gebäudekontext berücksichtigt werden kann. Die digitale Abbildung soll die realen physikalischen Gegebenheiten möglichst exakt abbilden. Mit der digitalen exakten Abbildung werden neben dem Entwicklungsprozess weitere Zielfunktionen verfolgt. Durch die digitale Abbildung ist eine Integration in die Methodik des BIM<sup>2</sup> unmittelbar möglich. Weiterhin ist die Ankopplung an numerische Simulationsprogramme gegeben, wodurch das digitale Gerät sofort unter einer Vielzahl von Einsatzbedingungen getestet und im Gesamtsystemzusammenhang betrachtet werden kann. Zusätzlich zu nennen ist, dass mittels des Digitalen Zwillings neue Mess- und Steuerungskonzepte entwickelt werden können. Begonnen werden sollen die Arbeiten mit den energetischen Wandlungssystemen

- Wärmepumpe sowie
- Brennstoffzelle.

Diese Systeme werden von den Verfassern des Berichtes als wesentlich für die dezentrale Energieversorgung in den nächsten Jahren angesehen. Der Abgleich des Digitalen Zwillings, der möglichst flexibel parametrierbar ist, soll mit realen Messergebnissen erfolgen die in HiL-Umgebungen an der RWTH Aachen sowie an der TU Dresden gewonnen werden können.

Zu Beginn der Arbeiten am Projekt war eine paritätische Analyse von Wärmepumpe und Brennstoffzelle avisiert. Im Laufe der Projektlaufzeit wurde jedoch mit Zustimmung der beteiligten Kreise der Fokus auf das System Wärmepumpe gelegt und diese deutlich umfassender behandelt als das System Brennstoffzelle, was der wirtschaftlichen Entwicklung der beiden energetischen

---

<sup>1</sup>Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

<sup>2</sup>Building Information Modeling

Wandlungseinheiten in den zurückliegenden Jahren Rechnung trägt. Für die Brennstoffzelle wurden daher nur vereinfachte Black-Box-Modelle entwickelt (vgl. Anhang B), wohingegen für die Wärmepumpe eine größere Bandbreite der Modellentwicklung vom Grey-Box- bis hin zum Black-Box-Modell eingesetzt wurde.

### 1.2 Digitale Zwillinge

Bereits seit den Anfängen digitaler Prozesse wird versucht mit deren Hilfe reale Prozesse abzubilden [2]. Bei der industriellen Fertigung, im Mobilitätssektor und der Medizin findet dieses Konzept bereits einige Verbreitung. Im Bereich der Wärmeversorgung hat dieses Konzept bisher noch Neuheitswert. Die Simulation (z.B. in Dymola/Modelica, TRNSYS) unterschiedlichster Wärme-/Kältekreisläufe gehört zwar zum Standardprozedere im Entwicklungsprozess einzelner Komponenten und Systeme der meisten Hersteller<sup>3</sup>. Die kombinierte, cloudbasierte Anwendung dieser im Zusammenspiel mit realen Geräten im Feld wurde bisher jedoch nicht final umgesetzt. 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-Computing<sup>4</sup> (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. Für den im Forschungsprojekt DZWi verwendeten digitalen Zwilling, gilt folgende Definition (vgl. Abb. 1.1):

*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.*

Im vorliegenden Abschlussbericht wird ein Digitaler Zwilling in der oben beschriebenen Weise für eine Wärmepumpe (Luft/Wasser-Wärmepumpe) ausführlich beschrieben.

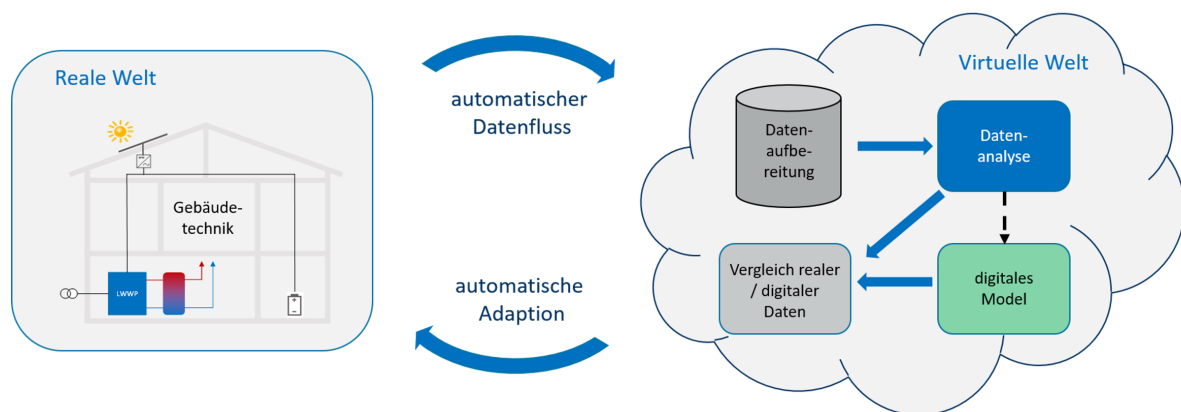


Abb. 1.1: Im Projekt DZWi verwendete Definition eines digitalen Zwillings.

<sup>3</sup>vgl. <https://www.uibk.ac.at/bauphysik/aktuell/news/carnot-user-meeting-2022.html.de>

<sup>4</sup>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 - Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik

Bezugnehmend auf die im Projekt verwendete Definition eines Digitalen Zwillings besteht dieser aus:

- einer Cloud Infrastruktur mit zentraler Recheneinheit,
- Schnittstellen (Sensoren/Aktoren) zu realen Geräten,
- einer multi-direktionalen Kommunikationsstruktur,
- einem numerischen Abbild (Modell) des realen, physikalischen Systems
- sowie hinterlegten Services wie Verfahren zur Optimierung, Fehlerdetektion und Anpassung des numerischen Modells (Rekalibrierung).

### **Digitale Zwillinge für Wärmepumpen**

Zum Thema Digitale Zwillinge für Wärmepumpen wurden insgesamt 30 Veröffentlichungen recherchiert und davon 18 als relevant angesehen. Digitale Zwillinge realer Systeme werden in der Industrie immer häufiger eingesetzt. Diese Tatsache wird durch die zunehmende Anzahl an wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu Digitalen Zwillingen von Wärmepumpensystemen verdeutlicht. In der Literatur wurden bereits zahlreiche solcher Modelle etabliert und validiert. Die Anwendungsgebiete von Wärmepumpen lassen sich beispielsweise in den privaten, gewerblichen und industriellen Bereich unterteilen. Für Anwender von Wärmepumpen zur Heizung und/oder Kühlung stellen Prognosen zum Betriebsverhalten eines Gesamtsystems, bestehend aus Wärmepumpe, Heiz-/Kühlkreislauf und Verbrauchern eines der wesentlichen Kriterien bei der Kaufentscheidung dar. Es wird für eine Lebensdauer des Gesamtsystems nicht nur eine ordnungsgemäße Dimensionierung aller Systemkomponenten erwartet, sondern auch eine jährliche Energieeinsparung verglichen mit einem herkömmlichen Versorgungssystem zur Heizung oder Kühlung. Zusätzliche Berechnungen zur Emissionsminderung werden zukünftig stärker bei der Entscheidung für ein Versorgungssystem in Betracht gezogen werden müssen. Die hierfür erforderlichen Berechnungen sind komplex und zeitintensiv, da eine Vielzahl von physikalischen Größen (z.B. Außenlufttemperatur) und technischen Daten des Gesamtsystems zu verwenden sind. Durch die Einführung von anwendungsbezogenen Modellen zu Wärmepumpenanwendungen kann der mathematische und zeitliche Aufwand für die durchzuführenden Berechnungen zu Parameterstudien erheblich reduziert werden. Voraussetzung ist jedoch, dass die Simulationsmodelle speziell auf die jeweilige Anwendung zugeschnitten bzw. angepasst sind, um anwendungsspezifische Kriterien zu berücksichtigen. Erst durch speziell zugeschnittene Simulationsmodelle können stationäre oder transiente Berechnungen praxisnahe Ergebnisse liefern. Je nach Aufgabenstellung sind an das Simulationsmodell unterschiedliche Anforderungen bezüglich Detaillierungsgrad und Simulationsdauer zu stellen. Bei den instationären Modellen werden zusätzliche konstruktive Eigenschaften wie z.B. die Dichte einzelner Komponenten und deren spezifische Wärmekapazität benötigt, um die zeitliche Abhängigkeit von Ausgabegrößen ermitteln zu können. Modellierung zu Wärmepumpenanwendungen wurden recherchiert zu:

- Gebäuden für privaten Gebrauch
- Kühlschrank
- Hotels
- Schwimmbad
- Fahrzeuge

- Abwassernutzung
- Prozesswärmebereitstellung
- Destillation
- Käseproduktion
- Milchpasteurisierung
- Trocknung von Lebensmitteln
- Ziegeltrocknung
- Modellprädiktive Regelung.