

DER DIGITALE ZWILLING IN DER ENERGETISCHEN GEBÄUDE- UND ANLAGENSIMULATION

C. Nytsch-Geusen¹, W. Kaul¹ und S. Kharraz²

¹Universität der Künste Berlin, Institut für Architektur und Städtebau, Berlin, Germany

²Technische Universität Berlin, Institut für Energietechnik, Berlin, Germany

Email: nytsch@udk-berlin.de, w.kaul@udk-berlin.de, sina@kharraz.com

KURZFASSUNG

Im internationalen Wettbewerb Solar Decathlon Europe 2014 (SDE 2014) wurde ein solares Plusenergiegebäude als Dachaufsatz für den Gebäudebestand entwickelt und baulich realisiert, welcher die ganzjährige Klimatisierung und Energieversorgung der Wohneinheit ermöglicht. Für dieses Gebäude wurde auf Grundlage der Modellierungssprache Modelica ein detailliertes 1:1 Systemmodell der Gebäudehülle, der Gebäudetechnik und der Gebäudeautomation als sogenannter „digitaler Zwilling“ erstellt. Die Korrektheit des digitalen Abbilds des realen Gebäudes soll über zahlreiche im Baukörper und in der Gebäudetechnik verteilte Sensoren überprüft werden, die an gleicher Stelle auch als virtuelle Sensoren im Simulationsmodell zu finden sind. In einer mehrjährigen energetischen Monitoring-Phase soll die Qualität des Simulationsmodells überprüft und seine Abbildungsgenauigkeit stetig verbessert werden. Der Beitrag stellt sowohl das reale Rooftop-Gebäude inkl. seinem Monitoring-Konzept sowie seinen digitalen Zwilling vor.

ABSTRACT

Within the international competition Solar Decathlon Europe 2014 (SDE 2014) a solar plus energy building as a rooftop living unit for the building stock was being developed and constructional realised, which is able to air-condition and supply it with energy all the year around. For this building, a detailed 1:1 system

model of the building envelope, the HVAC system and the building automation control system was formulated as a so called "digital twin" based on the modelling language Modelica. The correctness of the digital image from the real building should be verified with the help of numerous sensors, distributed in the building construction and the HVAC system, which are also present as virtual sensors at the same place in the simulation model. During a multi-annual energetic monitoring phase, the quality of the simulation model should be evaluated and its model precision continuously be improved. The contribution presents the real Rooftop building incl. the monitoring concept and also its digital twin.

EINLEITUNG

Im Lexikon der Gesellschaft für Informatik wird der digitale Zwilling als digitale Repräsentanz von Dingen aus der realen Welt definiert (GI Lexikon, 2018). Häufig wird der digitale Zwilling über ein Simulationsmodell repräsentiert, welches physische und funktionale Eigenschaften eines Systems aus der realen Welt präzise abbildet. Wird der digitale Zwilling mit realen Daten (Modellparameter, Randbedingungen des dynamischen Betriebs) simuliert, verhält er sich idealer Weise genauso wie sein Gegenstück aus der Realität. Nach der Definition im Gabler Wirtschaftslexikon, 2018 erfordert ein digitaler Zwilling drei Elemente: Das abzubildende reale Objekt, sein digitales Abbild im virtuellen Raum und Informationen, die beide miteinander verbinden. So kann z.B. in einem

realen Objekt mit einem Sensor eine physikalische Systemgröße ermittelt werden (z.B. die Durchflussmenge in einer Rohrleitung), welche im digitalen Zwilling über einen virtuellen Sensor ebenso bestimmt wird.

Digitale Zwillinge werden heute in der Entwicklung von Produkten in den Bereichen Luft- und Raumfahrt, Automotive und bei Produktionssystemen verwendet und begleiten idealerweise den gesamten Produktlebenszyklus. Für die Domäne des Bauwesens wird in Fraunhofer IBP, 2017 der digitale Zwilling als neuer Ansatz beschrieben, bei dem im Gebäudebetrieb dem realen Gebäude ein digitales Datenmodell zur Seite gestellt wird, welches BIM-Datenstrukturen nutzt, Schnittstellen zur Messdatenerfassung des Gebäudes besitzt und durch eine physikalisch begründete Simulation das historische, aktuelle und prognostizierte Gebäudeverhalten des echten Gebäudes beschreiben kann.

Der vorliegende Beitrag fokussiert auf die Erstellung und Verwendung von digitalen Zwillingen im Kontext der energetischen Gebäude- und Anlagensimulation. Als Basis der Erstellung des digitalen Zwillings wird die Modellierungssprache Modelica (Modelica, 2017) verwendet, welche durch ihren objektorientierten Ansatz gut geeignet ist, die Strukturen realer technischer Systeme wie z.B. dem Baukörper eines Gebäudes und die auf Einzelkomponenten basierende Anlagentechnik abzubilden (Nytsch-Geusen et al., 2012). Die Gleichungsorientierung von Modelica unterstützt die Abbildung des physikalischen und funktionalen Verhaltens des realen Gebäudesystems (das Gesamtsystem aus Baukörper und Anlagentechnik), insbesondere in einem detaillierten, äußerst realitätsnahen Simulationsmodell, dem digitalen Zwilling.

Der methodische Ansatz des digitalen Zwillings in der energetischen Gebäude- und Anlagensimulation wurde am Beispiel des Rooftop-Gebäudes aus dem SDE 2014-Wettbewerb prototypisch realisiert und getestet. Das Rooftop-Gebäude eignet sich besonders gut für diesen Zweck, da es einerseits eine ähnliche Gebäudetechnik sowie viele Merkmale des Energiemanagements von deutlich größeren Gebäuden aufweist (Energieproduktion von Strom und Wärme aus Solar- und Umweltenergie, Energiespeicherung in

elektrischen- und thermischen Speichern, dynamischer Wärme-, Kälte- und Strombedarf durch die Gebäudenutzung). Andererseits kann es durch seine Größe von nur 55 m² Nutzfläche in seinem energetischen Verhalten in einem Monitoring nahezu vollständig im Detail erfasst werden. Der Gebäudeentwurf liegt als dreidimensionales BIM-Modell vor und seine Baukonstruktion inkl. der genutzten Gebäudetechnik ist umfangreich dokumentiert (Team Rooftop, 2014). Das Rooftop-Gebäude wurde 2017/2018 auf dem Gelände des Hochschulcampus Berlin-Charlottenburg für Zwecke der Forschung und Lehre wiederaufgebaut und in Betrieb genommen und mit zusätzlicher Sensorik (u.a. für Temperatur, Feuchte, Durchfluss, Solarstrahlung, elektrische Leistung) versehen. Hierdurch sind gute Voraussetzungen für die Erstellung und Parametrierung des digitalen Zwillings in Modelica und seinem Vergleich mit dem realen Gebäude unter Einbeziehung echten Nutzerverhaltens gegeben.

ROOFTOP-GEBÄUDE



Abbildung 1: Konzept des Rooftop-Gebäudes als solarer Dachaufsatz für den Gebäudebestand (Quelle: Team Rooftop)



Abbildung 2: Gebautes Rooftop-Gebäude in Versailles, Frankreich während des SDE 2014 (Quelle: Team Rooftop)

Das Rooftop-Gebäude wurde als solarer Plusenergie-Dachaufsatz für Bestands-Wohngebäude innerhalb des internationalen Wettbewerbs SDE 2014 von einem Berliner

Team aus ca. 40 Studierenden der UdK Berlin und der TU Berlin konzipiert, geplant (vgl. Abb. 1) und baulich umgesetzt (vgl. Abb. 2).

Gebäudehülle

Die individuell verstellbaren, gedämmten und mit Fotovoltaik-Modulen belegten Fassadenelemente auf beiden Gebäudelängsseiten ermöglichen je nach Tages- und Jahreszeit und Gebäudenutzung die gezielte Nutzung passiver solarer Gewinne bzw. eine Sonnenschutzfunktion für den Innenraum oder einen optimierten Fotovoltaik-Ertrag durch eine einachsige Modul-Nachführung (vgl. Abb. 3).

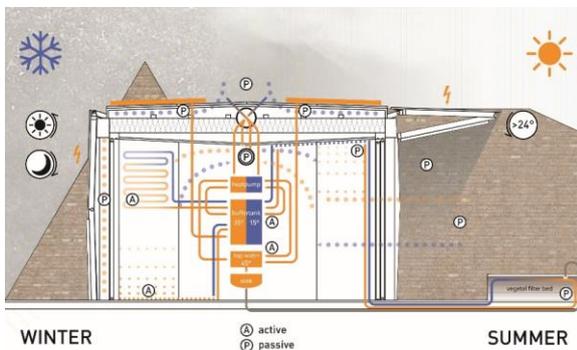


Abbildung 3: Konzept der tages- u. jahreszeitlich adaptiven Fassaden beim Rooftop-Gebäude (Quelle: Team Rooftop)

Der gesamte Baukörper ist als hochgedämmte Holzleichtbaukonstruktion mit hoher Energieeffizienz ausgeführt. Die U-Werte der Fassade, der Dach- und der Bodenelemente liegen im Bereich von 0,112 bis 0,134 W/m²K, die der Glasschiebetüren mit Dreifachverglasung in der der Süd- und Nordfassade bei 1,1 W/m²K.

Die insgesamt 55 m² Nutzfläche des Gebäudes teilt sich in einen großen Wohnraum inkl. offenen Küchenbereich, einem Schlafzimmer und einem dazwischenliegenden kleinen Bad auf. Innerhalb eines in der Mitte liegenden Kernmoduls wird die zentrale Gebäudetechnik (Wärmepumpe, thermische und elektrische Speicher) zusammengefasst (vgl. Abb. 4).

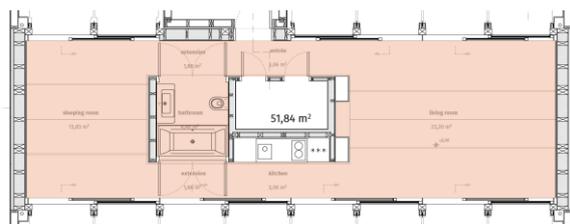


Abbildung 4: Grundriß und funktionale Aufteilung des Rooftop-Gebäudes (Quelle: Team Rooftop)

Gebäudetechnik

In Abb. 5 ist die energetische Gebäudetechnik des Rooftop-Gebäudes visualisiert. Die Dach- und Fassadenfläche des Gebäudes sind mit insgesamt 84 Dünnschicht-Fotovoltaikmodulen mit einer Gesamtleistung von 9,6 kW_{peak} bedeckt. Zwei Drittel der Module ist starr auf dem unbeweglichen Dach montiert und ein Drittel auf den verstellbaren Fassadenelementen. Über eine reversible Luft/Wasser-Wärmepumpe der Firma Viessmann (Type LWZ 304 SOL) mit 4,3 kW Heizleistung (A2/W35) und 3,6 kW Kühlleistung (A35/W7), einem internen Warmwasserspeicher von 235 Litern und einem externen thermischen Pufferspeicher von 200 Litern kann das Gebäude über eine Fußbodenheizung im Winter beheizt und über Kühldecken im Sommer aktiv gekühlt werden. Eine kleine thermische Solaranlage mit 2 Vakuumröhrenkollektoren mit einer Gesamtfläche von 3,2 m² dient zur Warmwasserbereitung und in der Übergangszeit zur Unterstützung der Heizfunktion der Wärmepumpe (vgl. Anlagenschaubild in Abb. 6).

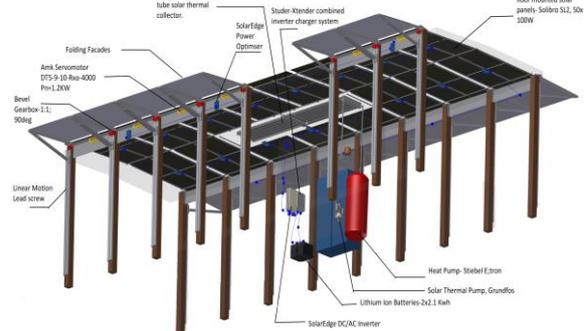


Abbildung 5: Energetische Gebäudetechnik des Rooftop-Gebäudes (Quelle: Team Rooftop)

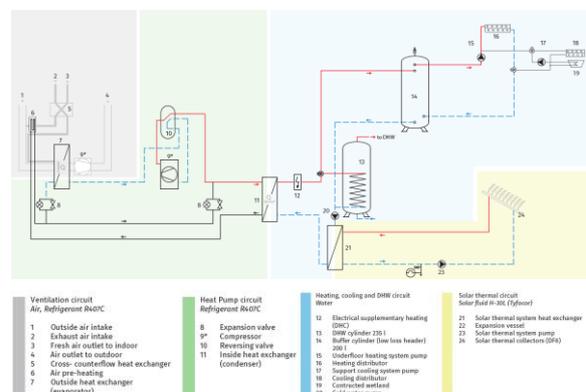


Abbildung 6: Thermisches Energieversorgungssystem des Rooftop-Gebäudes (Quelle: Team Rooftop)

Eine elektrische Batterie mit ca. 5 kWh nutzbarer Kapazität ermöglicht ein Energiemanagement zwischen PV-Stromproduktion, Einspeisung und Entnahme aus dem öffentlichen Stromnetz sowie Eigenbedarf an Wärmepumpen- und Haushaltstrom.

Die Gebäudeleittechnik im Rooftop-Gebäude basiert auf einem OpenHAB-Server in Kombination mit einem Raspberry Pi. Das OpenHAB-Framework zur Gebäudeautomation (<https://openhab.org>) erlaubt eine Integration der Erfassung und Ansteuerung untereinander nicht standardisierter Gebäudetechnikkomponenten auf einer abstrakten Softwareebene, auf der die übergeordnete Steuerungs- und Regelungslogik des Gebäudes implementiert ist.

Wiederaufbau am Hochschulcampus Berlin-Charlottenburg u. energetisches Monitoring

Im Laufe des Jahres 2017 wurde des Rooftop-Gebäude auf dem Gelände des Hochschulcampus Berlin-Charlottenburg wiederaufgebaut (vgl. Abb. 7), wo es zukünftig von der UdK Berlin zusammen mit der TU Berlin für Forschungs- und Lehrzwecke genutzt wird.



Abbildung 7: Wiederaufbau des Rooftop-Gebäudes auf dem Hochschulcampus Berlin-Charlottenburg

Beim Wiederaufbau wurden eine Reihe zusätzlicher Sensoren im Baukörper, im Innenraum und für die Gebäudetechnik ergänzt, um den Zustand des gesamten Gebäudesystems im energetischen Monitoring umfangreich zu erfassen und so eine Vielzahl von Vergleichswerten für das Simulationsmodell des digitalen Zwillinges zu erhalten. Das Außenklima wird über Sensoren für die Lufttemperatur und -feuchte, die Solarstrahlung und die Windgeschwindigkeit und -richtung gemessen. Das Innenraumklima wird über eine Vielzahl

verteilter kombinierter Temperatur- und Feuchtesensoren erfasst. Im Baukörper selbst sind ebenfalls Temperatur- und Feuchtesensoren integriert, so dass auch bauphysikalische Zustände im Monitoring ermittelt werden können (vgl. Abb. 8).



Abbildung 8: Messeinrichtung zur Erfassung der Bauteiltemperaturen und -feuchten in drei Positionen des Querschnitts der Fußbodenkonstruktion

Die thermohydraulischen Kreisläufe der Fußbodenheizungen, Kühldecken und der thermischen Solaranlage sind mit Durchflussmessern und Sensoren zur Erfassung der Vor- und Rücklauftemperaturen ausgestattet, wodurch eine separate Bilanzierung dieser thermischen Teilsysteme möglich ist. Der Zustand der reversiblen Wärmepumpe und der beiden thermischen Speicher wird ebenfalls über Temperatursensoren sowie weiteren Signale, die den Betriebsmodus beschreiben, im Monitoring erfasst. Die Fotovoltaikanlage, die Wechselrichter und die Hausbatterie liefern zahlreiche elektrische Strom-, Spannungs- und Leistungssignale, die zur Energiebilanzierung genutzt werden können.

DIGITALER ZWILLING

Für das Rooftop-Gebäude wurde auf Grundlage von Modelica ein detailliertes Systemmodell der Gebäudehülle, der Gebäudetechnik und der Gebäudeautomation als „digitaler Zwilling“ erstellt. Die Geometrie und die räumliche Gliederung der Gebäudehülle (thermische Zonierung, Anzahl und Position der Wände, Türen und Fenster) sowie die Struktur der Anlagentechnik (z.B. hydraulisches Schema der Heiz- und Kühlkreisläufe) ist hierbei in möglichst

großer Ähnlichkeit zum realen Gebäude im Modelica-Modell nachempfunden.

Modelica-Modellbibliotheken

Grundlage der Modellerstellung ist die kombinierte Nutzung von drei Modellbibliotheken, der Modelica-Standard-Library (<https://github.com/modelica/ModelicaStandardLibrary>), der aus der Annex 60-Bibliothek (Wetter et al., 2015) hervorgegangenen IBPSA 1-Library und der BuildingSystems-Bibliothek (Nytsch-Geusen et al., 2016), in welcher die IBPSA 1-Library integriert ist. Das Simulationsmodell des digitalen Zwillings verwendet insgesamt 41 unterschiedliche Modellklassen aus diesen drei Bibliotheken sowie 4 anwendungsspezifische Modellklassen auf höherer Abstraktionsebene.

Gesamtsystem

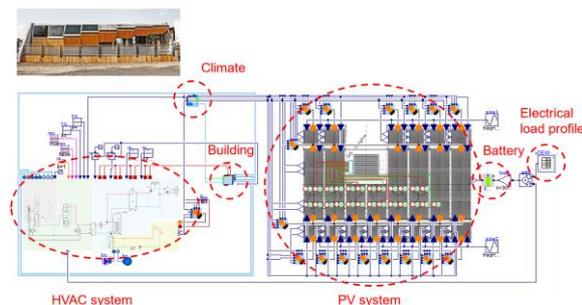


Abbildung 9: Übergeordnetes Systemmodell des Rooftop-Gebäudes

In Abb. 9 ist das übergeordnete Modelica-Systemmodell für das gesamte Rooftop-Gebäude dargestellt. Es besteht aus den Teilmodellen des Außenklimas (Climate), des Gebäudes (Building), des Heizungs- und Klimatisierungssystems (HVAC) und des Fotovoltaiksystems (PV system), der elektrischen Batterie (battery) und dem elektrischen Lastprofil für den Haushaltsstrombedarf (Electrical load profile). Die Gliederung des komplexen Gesamtmodells in diese Teilmodelle trägt zur Übersichtlichkeit der Struktur des digitalen Zwillings bei und ermöglicht die einfache Wiederverwendung dieser immer noch komplexen Teilmodelle in einem anderen Zusammenhang.

Teilsystem Gebäude

Das Teilmodell für die Gebäudehülle ist in Abb. 10 illustriert. Das Gebäudemodell ist in vier thermische Zonen (Zone models) differenziert, entsprechend den vier Räumen des realen Rooftop-Gebäudes.

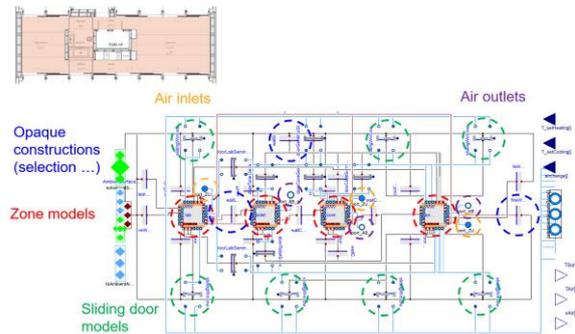


Abbildung 10: Mehrzoniales Teilmodell der Gebäudehülle

Zwischen den Zonen und als Abgrenzung zur Gebäudeumgebung befinden sich die nichttransparenten Baukonstruktionen (Opaque constructions) und die gläsernen großflächigen Schiebetüren auf der Nord- und Südseite des Gebäudes (Sliding door models). Weiterhin enthält das Gebäudemodell Schnittstellen zu den drei Zuluft- (Air inlets) und drei Abluftkanälen (Air outlets), mit denen die Verbindung zu dem Teilmodell der Heizungs- und Klimatechnik hergestellt wird.

Teilsystem Heizungs- und Klimatechnik

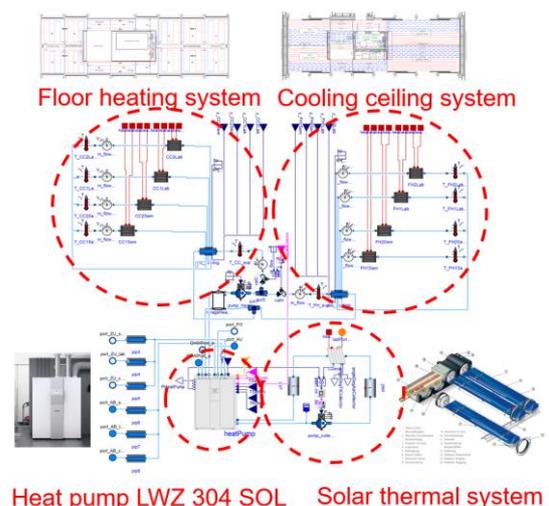


Abbildung 11: Teilmodell der Heizungs- und Klimatechnik

Im Teilmodell der Heizungs- und Klimatechnik sind alle gebäudetechnische Komponenten, die thermische Energie bereitstellen, zusammengefasst (vgl. Abb. 11). Es enthält jeweils vier thermohydraulische Modelle für die Kreisläufe der Fußbodenheizungen (Floor heating system) und der Kühldecken (Cooling ceiling system), weiterhin des herstellerspezifischen Wärmepumpenmodells (Heat pump LWZ 304 SOL), den thermischen Pufferspeicher, die Luftkanalmodelle sowie der thermischen Solaranlage (Solar thermal system).

Teilsystem Fotovoltaikanlage

Das Teilmodell der Fotovoltaikanlage (Abb. 12) repräsentiert die Stromerzeugung über die 84 MPP-geregelte Dünnschichtmodule.

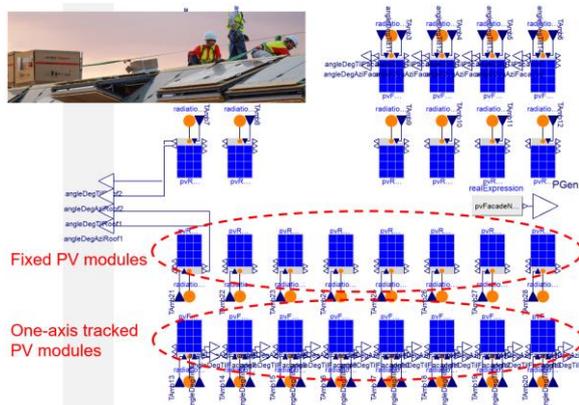


Abbildung 12: Teilmodell der Fotovoltaikanlage

Hierbei werden unterschiedliche Arten von Modulmodellen unterschieden: starre Dachmodule, deren Orientierung (Neigung- und Azimutwinkel) über feste Parameter festgelegt sind und 1-achsig nachgeführte Fassadenmodule, welche pro Fassadenelement eine zusätzliche zeitvariable Eingangsgröße, den Neigungswinkel, aufweisen. So wird auf Systemebene über individuelle Modelle zur Strahlungsumrechnung der jeweils passende Strahlungswert dem Fassadenmodul zugewiesen.

Vergleich reales Gebäude u. digitaler Zwilling

Für einen genauen Vergleich müssen das reale Gebäude und sein digitaler Zwilling auch vergleichbare Systemvariablen besitzen. Hierzu wurden im Simulationsmodell an gleicher Stelle der realen Sensoren virtuelle Sensoren ergänzt, wodurch ein direkter Vergleich berechneter mit gemessenen Werten erfolgen kann.

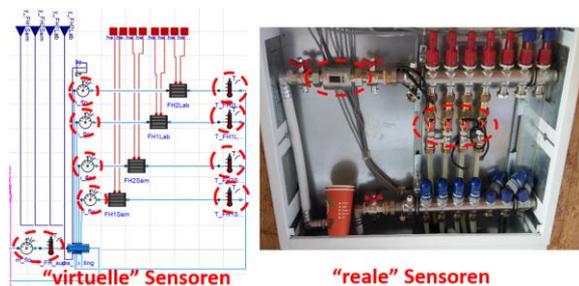


Abbildung 13: Sich entsprechende Sensoren im digitalen Zwilling und im realen Gebäude

Abbildung 13 zeigt beispielsweise die einander entsprechenden Temperatur- und Durchflusssensoren im digitalen Zwilling (links) und im Heizkreisverteiler des realen Gebäudes.

ERGEBNISANALYSE UND DISKUSSION

Messungen am realen Gebäude

In einem mehrjährigen energetischen Monitoring soll die Güte des Simulationsmodells an Hand der Messdaten des realen Gebäudes überprüft und in seiner Abbildungsgenauigkeit stetig verbessert werden. Auf diese Weise soll ein hochwertiges Gebäude- und Anlagenmodell eines realen Gebäudes inkl. seiner Nutzungscharakteristik entstehen, welches z.B. für die energetische Systemanalyse, für des Innenraumklima- und Anlagenmonitoring und für die Entwicklung von prognosebasierten Betriebsführungsstrategien verwendet werden kann.

Im Dezember 2017 wurde das Fußbodenheizungssystem des Gebäudes in Betrieb genommen und erste Messungen zur Erfassung des Innenraumklimas begonnen. Abb. 14 zeigt exemplarisch die gemessene Lufttemperatur im Seminarraum in einer Winterwoche bei laufender Wärmepumpe im Heizmodus, Abb. 15 die gemessene Lufttemperatur während einer Frühlingswoche bei ausgeschalteter Wärmepumpe.

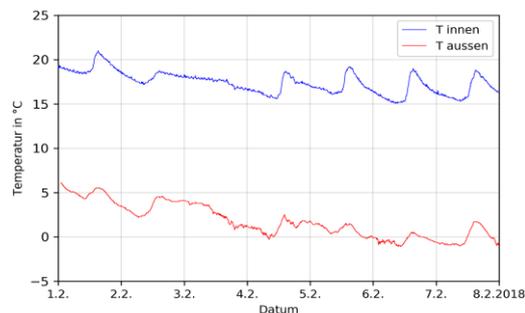


Abbildung 14: gemessene Innenlufttemperatur im Seminarraum des Rooftop-Gebäudes und Außenlufttemperatur während einer Winterwoche (1.2. bis 8.2.2018)

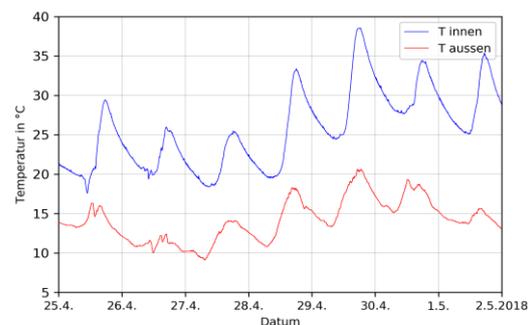


Abbildung 15: gemessene Innenlufttemperatur im Seminarraum des Rooftop-Gebäudes und Außenlufttemperatur während einer Frühlingswoche (25.4. bis 2.5.2018)

Die Messwerte der Winterwoche zeigen an Hand der zwischen 15 und 21 °C schwankenden Raumtemperatur, dass die Leistungsregelung

der Fußbodenheizung noch nicht optimal eingestellt ist. Der Verlauf der Raumtemperatur im Frühling verdeutlicht, dass das frei schwingende Innenraumklima auf Grund des hohen Dämmstandards der Gebäudehülle bei nicht vorhandener Abschattung der Fassaden (die adaptiven Fassadenelemente waren zurzeit der Messkampagne noch nicht montiert) zum Überhitzen neigt (Spitzenwerte bis 38 °C).

Simulationsanalyse (digitaler Zwilling)

Für das Modelica-Simulationsmodell des digitalen Zwillings wurde als Plausibilitätstest eine Jahressimulation mit Dymola 2018 FD1 mit einem Meteonorm-Wetterdatensatz für den Standort Berlin-Tempelhof durchgeführt, wofür auf einem aktuellen PC ca. 1 Stunde Rechenzeit erforderlich ist. In diesem Simulationsszenario wird das Gebäude im Winter beheizt, aber noch nicht im Sommer aktiv gekühlt.

Abb. 16 zeigt den jährlichen Verlauf der Solarstrahlung sowie der Außenluft- und Himmelstemperatur, welche für die Energiebilanz des Gebäudes, die Effizienz der Luft-Wasser-Wärmepumpe und dem solaren Ertrag der PV-Anlage entscheidend sind.

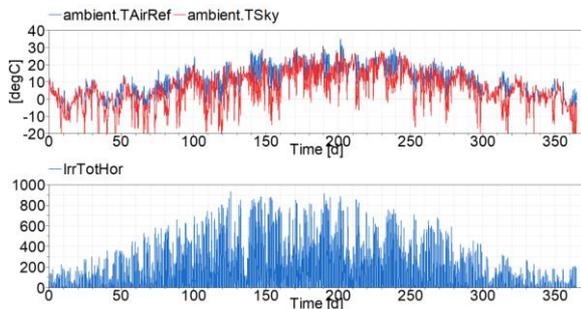


Abbildung 16: Klimarandbedingungen der Simulation, Außenluft- und Himmelstemperatur (oben) sowie Gesamtstrahlung horizontal (unten)

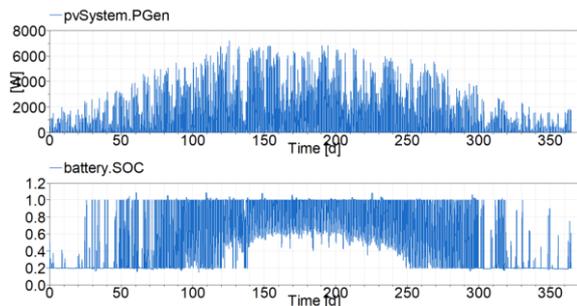


Abbildung 17: Simulierte Leistung des PV-Generators (oben) sowie Ladezustand (SOC) der Batterie (unten)

Abb. 17 verdeutlicht den hohen Energiegewinn der PV-Anlage im Sommer und die deutlich reduzierte Stromproduktion in der Heizperiode,

weshalb die Hausbatterie jahreszeitlich sehr unterschiedliche Ladezustände zeigt. Abb. 18 zeigt die jährliche Entwicklung der Lufttemperaturen im Seminarraum und im Laborbereich sowie die benötigte Heizleistung in beiden Räumen, wobei während der Simulationsrechnung die verstellbaren Fassadenelemente immer geöffnet und die Schiebetüren geschlossen waren.

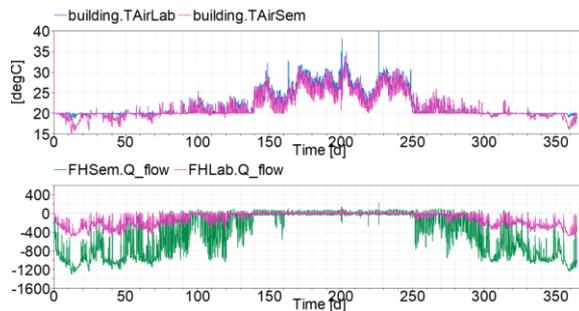


Abbildung 18: Simulierte Raumlufttemperaturen (oben) und abgegebene Leistung der Fußbodenheizungen (unten)

Die sommerlichen hohen Innenlufttemperaturen zeigen, wie wichtig eine abgestimmte Lüftungs- und Verschattungsstrategie für das Rooftop-Gebäude ist.

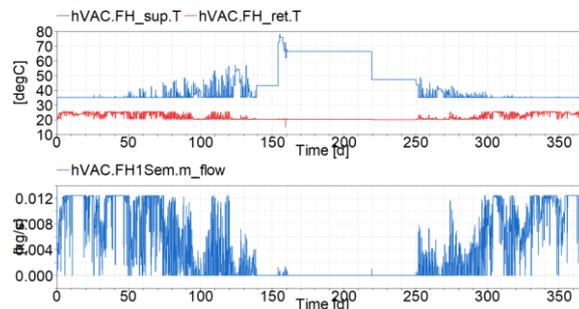


Abbildung 19: Simulierte Vor- u. Rücklauftemp. (oben) und Massenstrom eines Fußbodenheizkreislafs (unten)

Der Verlauf der Vor- und Rücklauftemperaturen in Abb. 19 zeigt, dass die solare Vorwärmung des Heizkreislaufes im Frühling zu einem höheren Temperasturniveau als die 35°C Solltemperatur für die Wärmepumpe. Der Massenstrom in der Fußbodenheizung unbd damit auch die Heizleistung ist außerhalb der Heizperiode i.d.R. null, was auch Abb. 18 widerspiegelt. Die genauere Betrachtung einer Woche im März noch in der Heizperiode in Abb. 20 veranschaulicht das Energiemanagement der Hausbatterie. Während am Vormittag die Batterie noch geladen werden kann, wird danach der Überschussstrom ins Netz eingespeist. Am Abend wird zunächst die Batterie entladen, bevor während der Nacht Strom nach Entladung der Batterie aus dem Netz Strom zum Betrieb der Wärmepumpe bezogen wird.

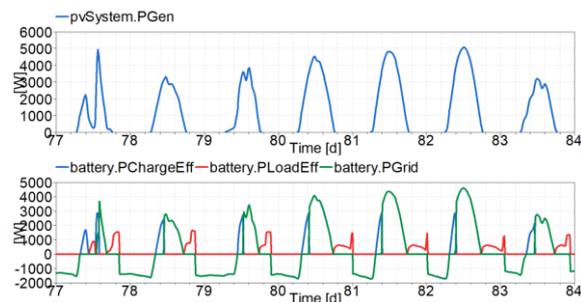


Abbildung 20: Simulierte Leistung des PV-Generators (oben), elektr. Ladeleistung (blau) und elektrische Last (rot) an der Batterie sowie Netzbezug/-einspeisung (grün) in einer Frühlingswoche (unten)

ZUSAMMENFASSUNG

Auf Grundlage bestehender Modelica-Modellbibliotheken wurde ein digitaler Zwilling in Form eines detaillierten, gleichartig strukturierten Simulationsmodells eines realen Forschungsgebäudes (Rooftop-Gebäude des SDE 2014) modelliert. In diesem Simulationsmodell ist eine Vielzahl an virtuellen Sensoren integriert, welche als physikalischen Sensoren ebenfalls im realen Gebäude wiederzufinden sind. Hierdurch ist eine direkte Vergleichbarkeit des realen und des virtuellen Systems gegeben.

Die Messkampagne im realen Gebäude hat Ende 2017 mit einem noch beschränkten Umfang an Sensoren begonnen, deren Art und Anzahl im Jahr 2018 für die Gebäudehülle, das Innenraumklima und das gesamte Spektrum der Gebäudetechnik stetig erweitert werden wird. In der zweiten Jahreshälfte 2018 werden dann voraussichtlich erstmals ausreichend Messdaten zur Verfügung stehen, um das reale Gebäude und seinen digitalen Zwilling umfassend zu vergleichen.

AUSBLICK

Es ist geplant, in der jetzt begonnenen mehrjährigen Messkampagne möglichst viele mit dem digitalen Zwilling vergleichbare Systemgrößen aufzuzeichnen, um dessen Modellqualität und Prognosefähigkeit kontinuierlich zu verbessern. Hierbei sollen insbesondere auch die Einflüsse des Nutzerverhaltens des Gebäudes auf dessen Energiebilanz detailliert analysiert werden.

DANKSAGUNG

Ein Teil der in diesem Beitrag dargestellten Forschungsergebnisse wurden im Projekt

WaveSave – Planung und Steuerung von dezentralen Energiesystemen in Gebäuden zur nachhaltigen, ressourcenschonenden wirtschaftlichen Strom- u. Wärmeversorgung erarbeitet (Förderkennzeichen: 03ET1312B, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie).

LITERATUR

- Fraunhofer IBP 2017. Digital Twin: https://www.bau.fraunhofer.de/content/dam/bau/de/documents/BAU2017/IBP_261_DigitalTwins_rz_web.pdf (abgerufen am 3.5.2018)
- GablerWirtschaftslexikon 2018. Digitaler Zwilling: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/digitaler-zwilling-54371> (abgerufen am 3.5.2018)
- GI-Lexikon 2018. Digitaler Zwilling: <https://gi.de/informatiklexikon/digitaler-zwilling> (abgerufen am 3.5.2018)
- Modelica 2017. Modelica – A unified object-oriented language for system modeling. Language specification. Version 3.4, Modelica Association.
- Nytsch-Geusen, C.; Huber, J.; Ljubijankic, M.; Rädler, J. 2012: Modelica BuildingSystems - Eine Modellbibliothek zur Simulation komplexer energietechnischer Gebäudesysteme. Conference Proceedings BAUSIM 2012, Berlin, Deutschland.
- Nytsch-Geusen, C.; Banhardt, C.; Inderfurth, A.; Mucha, K.; Möckel, Jens; R., Jörg; Thorade, M.; Tugores, C. 2016. BuildingSystems – Eine modular hierarchische Modell-Bibliothek zur energetischen Gebäude- und Anlagensimulation. Conference Proceedings BAUSIM 2016 IBPSA. Dresden, Deutschland.
- Team Rooftop 2014, Deliverable 6 & 7 im Solar Decathlon Europe 2014. Wettbewerbsdokumentation des Team Rooftop-Projekts. Universität der Künste Berlin und Technische Universität Berlin, Deutschland.
- Wetter, M.; Fuchs, M.; Grozman, P.; Helsen, L.; Jorissen, F.; Lauster, M.; Müller, D.; Nytsch-Geusen, C.; Picard, D.; Sahlin, P.; Thorade, M. 2015. IEA EBC Annex 60 Modelica Library - An international collaboration to develop a free open-source model library for buildings and community energy systems. Proceedings Building Simulation Conference 2015, Hyderabad, Indien.