

# GEBÄUDE- UND ANLAGENSIMULATION FÜR HÖHERE QUALITÄT IN TGA-PLANUNG, AUTOMATION UND BETRIEB – IMPULSE AUS DEM MONITORING EINES PRODUKTIONSGBÄUDES

Karl Walther<sup>1</sup>, Karsten Voss<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bergische Universität Wuppertal, Deutschland, E-Mail: [kwalther@uni-wuppertal.de](mailto:kwalther@uni-wuppertal.de)

## Kurzfassung

Im Mittelpunkt des Beitrages steht der Vergleich von Simulations- und Messdaten für thermische und elektrische Energieverbräuche von Lüftungsanlagen eines 2020 fertiggestellten Produktionsgebäudes. Am Beispiel zweier Lüftungsanlagen in einem ausgewählten Produktionsbereich wird detailliert auf Unterschiede zwischen gemessenen und simulierten Werten und den Ursachen sowohl in der Modellbildung als auch im Anlagenbetrieb eingegangen. Aus den Projekterfahrungen werden Wege für eine höhere Qualität in der TGA-Planung und der Gebäudeautomation aufgezeigt.

## Motivation & Ausgangslage

Ausgangspunkt der Arbeiten ist das in vielen Projekten festgestellte „Performance Gap“ zwischen geplanten und gemessenen Größen (Wilde 2014). Für die Einordnung des Performance Gap sind Zielgrößen aus der Planung als Referenz und deren Abgleich im Monitoring erforderlich. Dabei entstehen aktuell vermehrt Geschäftsmodelle für technisches Monitoring, bei denen Messdaten aus Gebäudeautomationssystemen herangezogen werden. Diese Methoden treffen auf relativ starre Planungsleistungen der technischen Gebäudeausrüstung (TGA), deren Detaillierungsgrad oft der Komplexität anspruchsvoller Projekte nicht gerecht wird. Zum einen ist ein Betriebsmonitoring ohne die Definition von Sollbetrieb und Referenzgrößen wenig effektiv, zum anderen lassen sich Gebäudefehlfunktionen teilweise nicht durch Optimierungen der Regelung, sondern erst durch ungleich aufwändigere Umbauten an der Hydraulik beheben.

Die Güte des Betriebes kann in die Erfüllung von Anforderungen an Funktionalität, Robustheit, Effizienz und Netzdienlichkeit hierarchisiert werden (vgl. Abb. 2). Dabei ist zu beobachten, dass Betreiber von Gebäuden heute vielfach mehr als nur einen funktionalen Betrieb („es wird warm“) erwarten. Die zunehmende Implementierung von Zählern zur Erfassung von thermischen und elektrischen Energien ermöglicht eine Kennwertbildung von Nutzungszonen und Verbrauchern über die abgerechnete Endenergie hinaus. Dazu können auch moderne Pumpen, mit integrierter Wärmemengenzählfunktion einen Beitrag leisten.

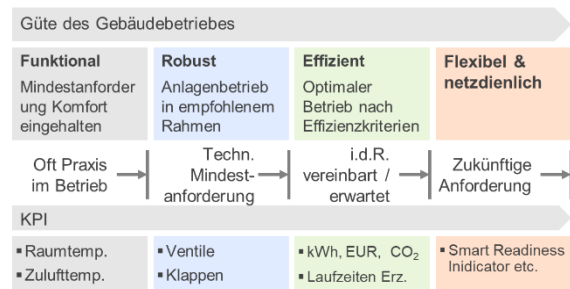


Abb. 1: Zielhierarchie Gebäudebetrieb

Auftraggeber müssen in die Lage versetzt werden, Gebäudesysteme in Betrieb zu nehmen, deren Gesamtfunktionsfähigkeit und Effizienz, wenn nicht durch nachgewiesene erfolgreiche Anwendungen, dann durch eine angemessen detaillierte Planung nachvollziehbar gemacht wird. Eine höhere Planungsqualität ist mit einer besseren Verbindung von Hydraulik und Automation mit geeigneten Simulationsmodellen möglich. Da Gebäude- und Anlagensimulationen Entwurf und Prüfung beider Aufgaben ermöglichen erscheint es zielführend, dass aus Simulationen Vorgaben für TGA-Entwurf, Gebäudeautomation (GA), Inbetriebnahme und Betrieb abgeleitet werden (vgl. Abb. 1).

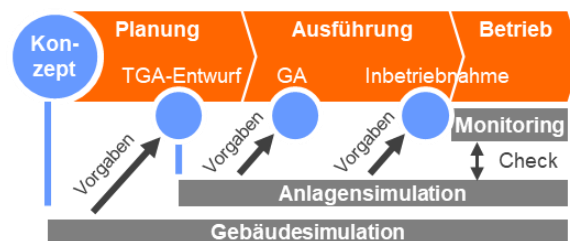


Abb. 2: TGA-Planung, Automation und Simulation

Vor diesem Hintergrund zeigt die vorliegende Studie auf, welchen Beitrag Simulationen künftig für eine höhere Qualität der Planung leisten können. Im Fokus stehen Gebäude und Anlagen, die aufgrund ihrer Größe oder Komplexität eine individuelle Planung erfordern und für die aktuell keine Plug & Play-Lösungen für Gesamtsysteme zur Heizung, Lüftung und Kühlung (HLK) verfügbar sind. Einen übergreifenden Ansatz mit einem Simulationsmodell als zentrale Instanz über Gewerke und Leistungsphasen beschreibt dazu beispielsweise das Projekt OpenBuildingControl (Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) 2020).

## Methodik

Anhand zweier RLT-Anlagen und einem daran angeschlossenen Produktionsbereich (vgl. Abb. 4) wird detailliert auf Unterschiede zwischen Simulation und Messung eingegangen. Zum Abgleich mit den Monitoringdaten werden Messwerte von Außenklima und Abwärmeprofilen von Beleuchtung und Produktion sowie Einstellwerte aus der Gebäudeautomation in das Modell implementiert (vgl. Abb. 3). Die implementierten Betriebs- und Regelungskonzepte sind Ergebnis eines Planungs- und Inbetriebnahmeprozesses und keine Vorgaben aus dem Forschungsprojekt. Der Vergleich von Messung und Simulation erfolgt für Wärme- und Temperaturprofile sowie elektrische Energie.

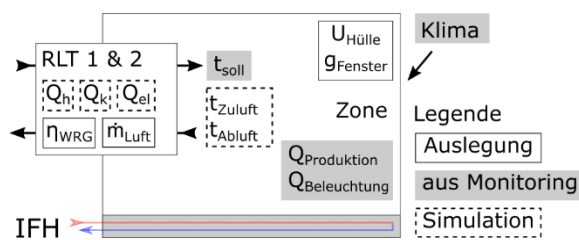


Abb. 3: Implementierung Messdaten in Simulation

Die Gebäudesimulation soll die raumseitigen Prozesse vor allem unter dem Einfluss der Produktionsprozesse maßstabsgetreu abbilden. Im Mittelpunkt steht das Verständnis der anlagenseitigen Regelungsabläufe und der Regelungscharakteristik. Daraus werden im Forschungsprojekt übertragbare Methoden, Abläufe und Anforderungen für bessere Planungs-, Inbetriebnahme- und Betriebsprozesse von HLK-Systemen abgeleitet.

## Demonstrationsobjekt

Grundlage für die vorliegende Studie sind Arbeiten im Rahmen des Projektes „VEProB – Vernetzte Energieströme von Produktions- und Bürogebäuden“. Demonstrationsobjekt ist der Campus eines Industrieunternehmens mit einem Produktions- und einem Verwaltungsgebäude (Walther und Voss 2020). Die vorliegende Studie untersucht einen ausgewählten Fertigungsbereich im Produktionsgebäude mit einer Nettogrundfläche von 50.000 m<sup>2</sup> und einem Nettovolumen von 450.000 m<sup>3</sup> (Abb. 4).

Die Beheizung, Kühlung und Lüftung der Produktionsbereiche erfolgt im Wesentlichen über insgesamt 24 zentrale und 7 dezentrale Lüftungsgeräte, die sich in 8 verschiedene Typen je nach Luftbehandlungsfunktionen (Heizen, Kühlen, Befeuchten, Entfeuchten, Mischluft, adiabatische Abluftbefeuchtung), Art der Wärmerückgewinnung (Platten- oder Rotationswärmetauscher oder, Kreislaufverbundsystem) sowie der Führungsgröße (Zuluft- oder Ablufttemperatur/-feuchte) unterscheiden. Die Lüftungsanlagen werden durch eine Industrieflächenheizung (IFH) ergänzt.

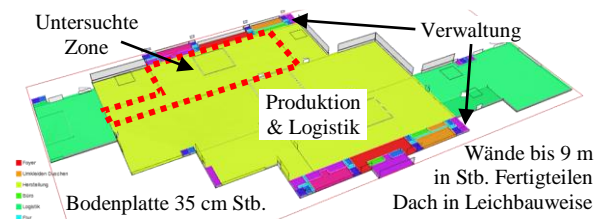


Abb. 4: Gebäudemodell mit untersuchter Zone

Bei Industriegebäuden sind bauphysikalische und betriebliche Besonderheiten zu beachten (Überblick vgl. (Oschatz et al. 2011)).

- Geometrisch überwiegen große Grundflächen und Volumina mit raumumschließenden Flächen in leichter Bauweise mit Ausnahme von Bodenplatten.
- Bedingt durch große Raumhöhen ergeben sich Temperaturschichtungen, die in einem 1-Knoten-Modell nur näherungsweise abbildbar sind.
- Die Lüftung ist gegenüber den Hüllflächen dominant für den Energieaustausch. Das betrifft Infiltration, Tore und Lüftungsanlagen.
- Bezogen auf die Grundfläche oder das Volumen ist die Wärmeabgabe durch Personen in der Regel gegenüber der Abwärme aus Maschinen untergeordnet.
- In Logistikbereichen spielen die Öffnungsfrequenz und die Abschirmung von externen Toren eine wesentliche Rolle (Hausladen et al. 2013).

## Monitoring

Im Projekt werden insgesamt ca. 8.500 Datenpunkte ausgewertet. Dabei ist ein hoher Aufwand zur Absicherung der Datenverfügbarkeit und Qualität erforderlich, da keine automatisierten Systeme z.B. mit Alarm bei Datenausfall umgesetzt sind. Die Analyse erfolgt für einen Zeitraum vom 7.1.2022 bis 31.3.2022.

### Klima

Das lokale Klima inklusive Globalstrahlungsmessung wird über zwei Wetterstationen erfasst. Die Messdaten ermöglichen die Erstellung von Datensätzen zum Import in die Simulation.

### Energieströme

Die implementierte Zählerinfrastruktur erlaubt eine separate Ausweisung von Energieströmen nach Anwendungen oder Nutzungsbereichen. Die Erfassung der Wärmeströme erfolgt über 91 geeichte Wärmemengenzähler und 78 Pumpen mit Wärmezählfunktion. Zur Plausibilisierung werden im Projekt verschiedene Methoden angewendet (vgl. Abb. 5): 1. Bildung von Prüfsummen 2. Messung mit 2 Geräten z.B. Wärmemengenzähler und Pumpe 3. Korrelation z.B. von Pumpenbetrieb, Temperaturdifferenz und Ventilstellung und 4. Vergleich z.B. mit Simulationen.

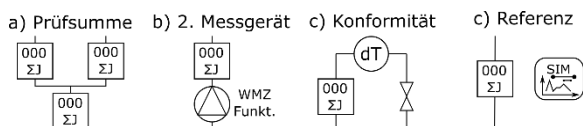


Abb. 5: Plausibilisierung von Wärmeströmen

166 Stromzähler ermöglichen die separate Erfassung von elektrischen Energien u.a. für Beleuchtung, Produktion, Luftförderung und Kälte. Bei Produktionsstätten sind vor allem das Produktionsprofil und die örtliche Verteilung von Abwärme relevant. Dabei entspricht die räumliche Auflösung der Messtechnik nicht immer den baulichen Volumina und damit den Zonen des Simulationsmodells, wodurch bei der Abschätzung der Zuordnung Ungenauigkeiten entstehen. Darüber hinaus unterscheidet sich der Umfang des wärmeseitig raumwirksamen Stromverbrauchs: Während bei den meisten Anlagen der gesamte Stromverbrauch voll raumwirksam wird, führen einzelne Anlagen einen Teil oder fast vollumfänglich die Maschinenabwärme über separate Lüftungsanlagen nach außen ab. Eine genaue räumliche Zuordnung und Quantifizierung dieser Effekte ist Gegenstand laufender Untersuchungen. Der gemessene flächenspezifische Stromverbrauch bewegt sich im oberen Bereich der Referenzwerte nach DIN V 18500-10 (Deutsches Institut für Normung (DIN) 2018) und dem Teilenergiekennwerteverfahren (Ritter et al. 2019).

### Raumtemperaturen

Die Erfassung der Raumtemperaturen erfolgt zum einen als Mittelwert über die Ablufttemperatur der RLT-Anlagen und zum anderen über verteilte Raumtemperatursensoren im Aufenthalts- und Deckenbereich der Produktionszonen.

### Modellbildung

Die Simulation von Gebäude und RLT-Anlagen erfolgt in IDA ICE 4.8 (EQUA Simulation AB). Das Modell umfasst insgesamt 44 Zonen inkl. dem untersuchten Produktionsbereich mit 6.500 m<sup>2</sup> Grundfläche und 9 m Raumhöhe (vgl. Abb. 4).

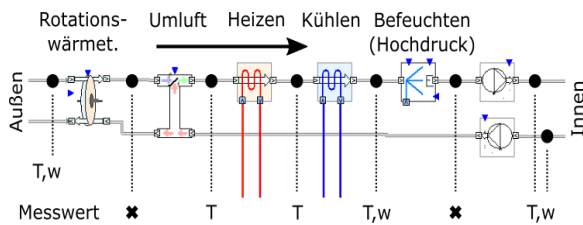


Abb. 6: Konfiguration RLT-Anlage in IDA ICE und verfügbare Mess- und Sollwerte

Die beiden baugleichen RLT-Anlagen verfügen über Rotationswärmetauscher, Umluftklappen, Heiz- und Kühlregister und Hochdruckbefeuchtung in der Zuluft sowie eine adiabatische Abluftbefeuchtung (vgl. Abb. 6 ohne Abluftbefeuchtung). Filter und

Schalldämpfer bleiben unberücksichtigt. Die Simulation erfolgt ohne Massen und luftseitige Druckverluste. Die verfügbaren Messwerte für Temperatur (T) und Feuchte (w) sind markiert. Durch die Sensoranordnung können die Temperaturänderungen durch Wärmetauscher, Umluftklappe und Ventilatoren nicht separat ausgewiesen werden. Zwar sind die Umluftklappen im Untersuchungszeitraum dauerhaft geschlossen, es muss allerdings von Leckagen ausgegangen werden.

Das Betriebskonzept sieht für diese Anlagen eine Regelung auf konstante Zulufttemperatur und -feuchte vor. Die Sollwerte können über die Gebäudeleittechnik verändert werden. In der Winterperiode ist insbesondere der Wärmebedarf zur Befeuchtung relevant. In Verbindung mit einer Hochdruckbefeuchtung muss das Heizregister dabei die Luft so erhitzen, dass nach der Befeuchtung Solltemperatur und -feuchte erreicht werden (vgl. auch Abb. 12). Aus der Gebäudeautomation waren für den Analysezeitraum nur die Sollwerte für die Zuluft, aber keine Informationen über die inneren Zusammenhänge der Regelung z.B. in Form von Regelschemata verfügbar.

### Vergleich Simulation & Monitoring

#### Wärmeprofile

Abb. 7 stellt die Wärmeprofile der Heizregister beider RLT-Anlagen dar. Bei RLT\_1 folgen beide Kurven dem gleichen Verlauf, allerdings liegen die simulierten Werte deutlich über den gemessenen.

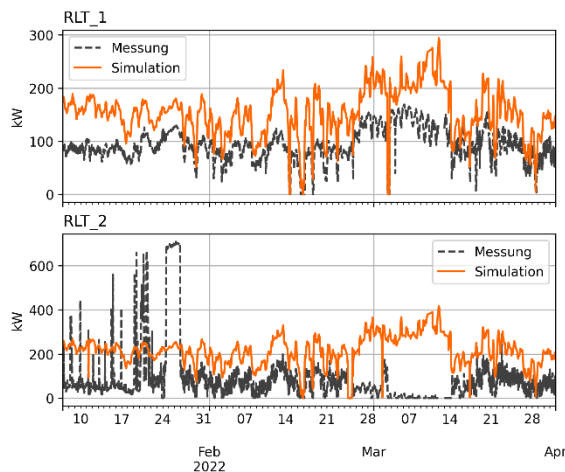


Abb. 7: Wärmeprofile

Diese Abweichung tritt auch bei RLT\_2 im Februar und ab Mitte März auf. Ursache für die extrem hohen gemessenen Werte im Januar war eine Fehlfunktion „Heizen gegen Kühlen“ durch eine fehlerhaft umgekehrte Laufrichtung eines Motors am Ventil zum Kühlregister. Ausgehend von den vergleichenden Simulationen konnte diese Fehlfunktion aufgezeigt und behoben werden. In einem Zeitraum von Ende Februar

bis Mitte März wurde in der realen Anlage keine Befeuchtung mehr durchgeführt, wodurch nahezu kein Wärmebedarf am Heizregister erforderlich war.

Das Kennfeld „Monitoring vs. Simulation“ (Abb. 8) verdeutlicht zum einen, dass simulierte Werte systematisch über gemessenen liegen. Zum anderen ist eine starke Streuung festzustellen. Ursache sind Schwankungen im Betrieb des Heizregisters (Erläuterung siehe Abschnitt „Temperaturprofile“).

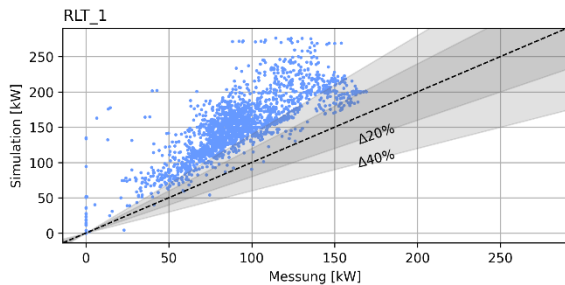


Abb. 8: Kennfelder Messung vs. Simulation

### Luftmengen

Abb. 9 zeigt die Verteilung gemessener Luftmengen. In der Simulation entsprechen diese den Auslegungswerten.

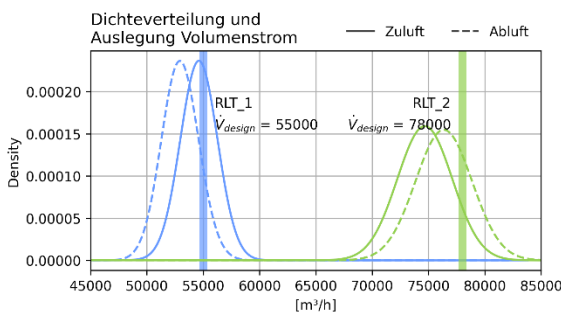


Abb. 9: Volumenströme

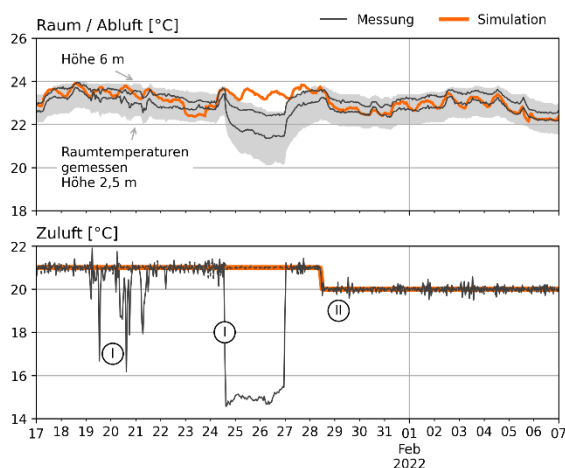


Abb. 10: Zuluft-/Abluft-Raumtemperatur

### Temperaturprofile

Simulierte und gemessene Raum- bzw. Ablufttemperaturen liegen auf vergleichbarem Niveau zwischen 22

und 24 °C (vgl. Abb. 10 oben). Dies lässt auf eine realitätsnahe Verteilung der gemessenen Produktionsabwärme auf die Modellzonen schließen. Die innerhalb des Raumvolumens verteilte in der Fläche und in unterschiedlichen Höhen gemessenen Temperaturen werden durch den grauen Bereich (Abb. 10) dargestellt und decken einen Bereich von ca. 2 K ab. Diese Raumtemperaturen sind dabei geringeren Schwankungen im Tagesgang unterworfen als die Ablufttemperaturen, was auf die Sensormontage auf Betonstützen zurückzuführen ist. Ursache für Abfälle der gemessenen Temperaturen ist die genannte Fehlfunktion „Heizen gegen Kühlen“ von Anlage RLT\_2. Die simulierte Zulufttemperatur (vgl. Abb. 10 unten) folgt ohne die Berücksichtigung von Trägheiten exakt dem Sollwert, der Ende Januar durch den Betreiber von 21 auf 20 °C verringert wurde (Marker „I“). Die gemessene Zulufttemperatur unterschreitet abschnittsweise deutlich den Sollwert (Marker „II“) und erfüllt damit nicht umfassend die funktionalen Anforderungen.

Abb. 11 verdeutlicht die unterschiedliche Dynamik raum- und anlagenseitiger Temperaturen für einen Tagesverlauf. Die gemessenen und simulierten raumseitigen Ablufttemperaturen (oben) verlaufen stabil und gleichförmig und folgen dem Tagesprofil von Produktionsabwärme und Klima. Demgegenüber zeigen sich bei den Zulufttemperaturen deutliche Unterschiede (Mitte): Während die simulierten Temperaturen exakt dem eingestellten Sollwert folgen, oszillieren die gemessenen Werte in einem Bereich von bis zu 4 K. Ursachen dafür sind Schwankungen in der versorgungsseitigen Vorlauftemperatur zum Heizregister und die Regelungscharakteristik des 3-Wege-Mischventils am Heizregister.

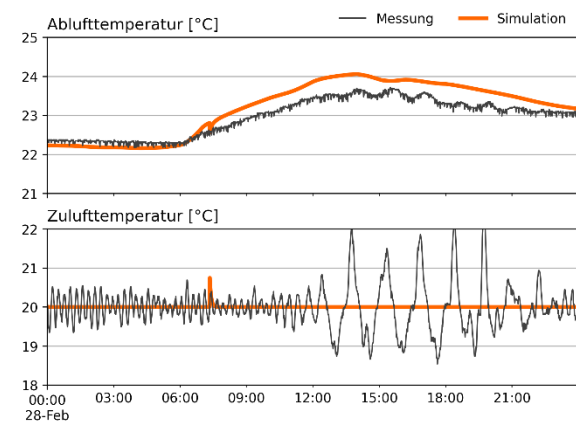


Abb. 11: Tagesverlauf (Werte im Minutenintervall)

### Luftbehandlung im hx-Diagramm

Differenzen bei den Wärmeprofilen sind zu einem erheblichen Teil auf den Befeuchtungsprozess zurückzuführen. Abb. 10 verdeutlicht Unterschiede und Zusammenhänge exemplarisch für einen Luftzustand im hx-Diagramm. Ausgehend vom Außenluftzustand (unten links) und der Abluft sind zunächst deutliche Unterschiede im Feuchterückgewinnungsgrad über



den Verbund von Rotor und Umluft festzustellen ( $\Delta\eta_{WRG}$ ), die dazu führen, dass im simulierten System mehr Heizleistung aufgebracht werden muss.

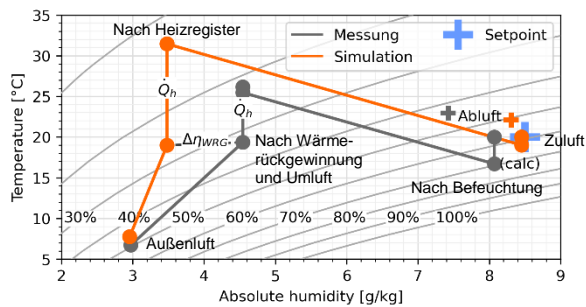


Abb. 12: Luftbehandlung im hx-Diagramm

Ursache für eine höhere Feuchterückgewinnung in der Praxis können zum einen Verschmutzungen auf der Oberfläche des Rotors sein, die zu einer besseren Feuchterückgewinnung beitragen. Zum anderen ist davon auszugehen, dass die Mischluftklappe nicht vollständig dicht schließt und Leckage durch die Druckunterschiede auf der Zu- und Abluftseite entsteht. In Abhängigkeit der Drehgeschwindigkeit steigt auch die Leckage über den Rotor selbst. Diese Effekt werden in der Simulation, wo ein Modell nach DIN EN 16798-5-1 (Deutsches Institut für Normung (DIN) 2017b) hinterlegt ist, nicht berücksichtigt. Da zwischen Befeuchter und Zuluftventilator keine Temperaturmessung vorhanden ist, kann der entsprechende Zustand nur durch Verschiebung auf der Isenthalpen ermittelt werden („calc“). Dadurch ergäbe sich bei den gemessenen Werte eine unrealistisch hohe Temperaturerhöhung durch Ventilator, Schalldämpfer, Filter und Raumeffekte von ca. 4 K, was auf Messfehler insbesondere bei der Feuchte schließen lässt. In diesem Zustand ergeben sich durch unterschiedliche Zieltemperaturen für das Heizregister deutliche Unterschiede in der Leistung  $\dot{Q}_h$ .

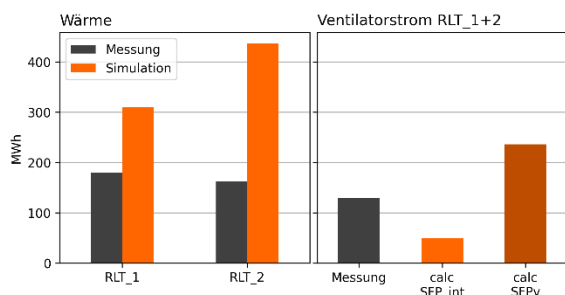


Abb. 13: Energieverbräuche

### Wärme und elektrische Energie

Die Wärmemengen für den Betrachtungszeitraum liegen in der Simulation für RLT\_1 aus den zuvor erläuterten Gründen um den Faktor 1,7 und für RLT\_2 zusätzlich wegen des zeitweisen Ausfalls der Befeuchtung um den Faktor 2,7 über den gemessenen Wert

ten (vgl. Abb. 13 links). Aus Vorarbeiten zur Plausibilisierung der Wärmestromerfassung (Walther und Voss 2021) kann die Unsicherheit der Messwerte mit etwa  $\pm 10\%$  abgeschätzt werden.

Der gemessene Stromverbrauch für Luftförderung wird mit zur Verfügung stehenden Werten der spezifischen Ventilatorleistung (SFP) verglichen (Luftmengen vgl. Abb. 9). Wird nur die RLT-Anlage ohne das Verteilnetz einbezogen (SFP<sub>int</sub> nach EU-Ökodesign-Richtlinie (Europäische Union 2014)), liegen berechnete Werte 60 % unter gemessenen. Der vereinfachte SFP-Wert für die gesamte Anlage (SFP<sub>v</sub> nach DIN 16798-3 (Deutsches Institut für Normung (DIN) 2017a)) ergibt 80 % höhere Verbräuche.

### Impulse in die Planungspraxis

Der Abgleich von Messwerten und Simulation im Betrieb ist als Referenz zur Fehlererkennung zwar anzustreben, dem gegenüber stehen aber ein hoher Aufwand zur Aufbereitung und Zuordnung der Messdaten, die oft lange „Leerlaufphase“ zwischen Planung und Betrieb und den damit verbundenen organisatorischen Brüchen sowie begrenzte Ressourcen mit dem erforderlichen Fachwissen aus TGA und Automation entgegen. Dazu kommt vor allem bei Industriegebäuden der dominierende Einfluss von Produktionsabwärme, der stark fluktuieren kann.

Die Hauptanwendung für Simulationen liegt in der Planungsphase. Umso wichtiger erscheint es, dort den generierten Mehrwert zur Steigerung der Qualität in TGA-Planung und Automation zur Unterstützung der Betriebsführung zu nutzen. Voraussetzung für den wirtschaftlichen Einsatz von v.a. Anlagensimulationen ist die Bereitstellung von standardisierten Subkomponenten, wie z.B. Lüftungsanlagen, bei denen in der Praxis eine große Bandbreite an Kombinationen von Luftbehandlungsfunktionen und Regelungsstrategien zu finden ist. Dies erfordert entsprechende Standards zwischen Komponentenherstellern, Systemintegratoren und Simulationentwicklern.

Aus den Erfahrungen im Projekt kann die Ableitung von Betriebsvorgaben aus der Simulation für die Gebäudeautomation und Betriebsführung als Priorität identifiziert werden. Dabei entstehen Verschiebungen von Zuständigkeiten (Gewährleistung) gegenüber der aktuellen Praxis. Die erforderliche Detailtiefe von Vorgaben ist zu definieren, mindestens sind aber Betriebszustände, Regelgrößen und Sollwerte vorzugeben. Reglerparameter können sich unter Umständen zwischen Simulation und Ausführung unterscheiden. Diese Aspekte werden in nachfolgenden Schritten weiter ausformuliert. Des Weiteren ist in der Planungsphase zu definieren, welche Datenpunkte für Monitoringanwendungen bereitgestellt werden müssen. Dies muss alle Datenpunkte umfassen, die zum Verständnis der internen Abläufe eines Systems notwendig sind (vgl. Abb. 6). Das ist dann wirtschaftlich vertretbar, wenn es sich um große Anlagen handelt.

Zur Steigerung der Effizienz von Monitoringanwendungen ist die Entwicklung bzw. Anwendung einer Taxonomie zur Klassifizierung von Datenpunkten und deren semantische Anreicherung (vgl. z.B. Metadatenchema „Brick“ (Bhattacharya et al. 2015)) notwendig. Manuelle Verfahren sind bei zunehmender Verfügbarkeit von Datenpunkten nicht wirtschaftlich. Des Weiteren sind Leistungen zur Qualitätssicherung und automatisierten Kontrolle der Sensorik zu entwickeln und auszuschreiben.

## Zusammenfassung

Der Vergleich von gemessenen und simulierten Werten gibt einen detaillierten Einblick in Unterschiede in der Modellbildung und tatsächlichem Betrieb inkl. Regelung. Dabei wird die erforderliche Detailkenntnis aus technischer Gebäudeausrüstung und Automation zur Interpretation von Messwerten und zur Anwendung von Simulationen und deren Interpretation mit Vertrauensintervallen deutlich. Die untersuchten Anlagen ohne Umluftanteil, mit konstanten Luftmengen und Regelung auf die Zulufttemperatur stellen eine noch vergleichsweise einfache Aufgabe dar. Es konnten Anlagenfehlfunktionen nachgewiesen werden (Heizen gegen Kühlen, Ausfall Befeuchtung, instabile Regelung Heizregister). Dies ist aber auch mit Monitoringwerkzeugen ohne Simulationsmodell möglich und wird im Forschungsprojekt durch technisches Monitoring zur Qualitätssicherung umgesetzt.

Zur Steigerung der Qualität von TGA-Planung und Automation wird aus den Erfahrungen im Projekt prioritär die Ableitung von Betriebsvorgaben aus der Simulation in die Automation gesehen. Dieser Prozess soll im weiteren Projektverlauf für Betriebskonzepte mit Ablufttemperaturregelung, variablen Luftmengen und Umluftanteil demonstriert werden. Vollständig simulations-integrierte Ansätze, wie sie im Projekt *OpenBuildingControl* entworfen werden, erscheinen faszinierend, es bleibt aber fraglich, ob diese bei den – zumindest auf dem deutschen Markt – sehr fragmentierten Planungsdienstleistungen umsetzbar sein werden. Folgende Untersuchungen konzentrieren sich daher auf die Frage, welche Kompromisse in der Detaillierung von Beschreibungen zur Betriebsführung möglich und realistisch sind.

## Danksagung

Das diesem Beitrag zu Grunde liegende Vorhaben „VEProB – Vernetzte Energieströme von Produktions- und Bürogebäuden“ wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) unter dem Förderkennzeichen 03ET1446B gefördert. Die Autoren danken dem Mittelgeber für die Unterstützung und dem Projektträger Jülich (PtJ) für die Betreuung des Vorhabens.

## Literatur

Bhattacharya, A.; Ploennigs, J.; Culler, D. 2015: Analyzing Metadata Schemas for Buildings. The

Good, the Bad, and the Ugly: In: Proceedings of the 2nd ACM International Conference on Embedded Systems for Energy-Efficient Built Environments. Seoul. New York, NY: ACM, S. 33–34.

Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN EN 16798-3: Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden, November 2017a.

Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN EN 16798-5-1: Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden, November 2017b.

Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN V 18599-10: Energetische Bewertung von Gebäuden, September 2018.

EQUA Simulation AB: IDA ICE. Version 4.8. Schweden. <https://www.equa.se/de/ida-ice>.

Europäische Union: Verordnung 1253/2014: Ökodesign-Richtlinie, 2014.

Hausladen, G.; Klimke, K. et al. 2013: Unterschiedliche Torsysteme in Industriegebäuden unter Berücksichtigung energetischer, bauklimatischer und wirtschaftlicher Aspekte. Endbericht. Stuttgart.

Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) (Hg.) 2020: Open Building Control. Working Report.

Oschatz, B.; Rosenkranz, J. et al. 2011: Gesamtanalyse Energieeffizienz von Hallengebäuden. Abschlussbericht. Hg. v. Bert Oschatz. Stuttgart (Forschungsinitiative Zukunft Bau F).

Ritter, V.; Bagherian, B. et al. 2019: Vergleichswerte für den Energieverbrauch von Nichtwohngebäuden. Hg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). Bonn.

Walther, K.; Voss, K. 2020: Impulse aus der Gebäude- und Anlagensimulation für die Betriebsführung eines Kraft-Wärme-Kälte-Verbundes: In: BauSIM 2020. Graz, S. 386–393.

Walther, K.; Voss, K. 2021: Heat flow metering in building practice. A critical field study for a large industrial building complex: In: CISBAT 2021. Lausanne.

Wilde, P. de 2014: The gap between predicted and measured energy performance of buildings. A framework for investigation. In: *Automation in Construction* 41, S. 40–49. DOI: 10.1016/j.autcon.2014.02.009.