

IMPULSE AUS DER GEBÄUDE- UND ANLAGENSIMULATION FÜR DIE BETRIEBSFÜHRUNG EINES KRAFT-WÄRME-KÄLTE-VERBUNDES

K. Walther¹ und K. Voss¹

¹Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal, Deutschland

KURZFASSUNG

Die vorliegende Studie zeigt das Zusammenwirken von Simulation und Monitoring anhand eines Gebäudeensembles mit Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung im industriellen Maßstab.

Die Gebäudesimulation umfasst ein Modell in IDA ICE unter Berücksichtigung der Logistik- und Produktionsprozesse innerhalb der Gebäude. Das hydraulische System mit der Betriebsführung und Regelung der Erzeuger wird in einer Anlagensimulation abgebildet.

Ein Fokus liegt auf einer systematischen Form der Beschreibung der Betriebsführungsstrategie der Wärme- und Kälteerzeugung, die der regelungstechnischen Komplexität eines Kraft-Wärme-Kälte-Verbundes gerecht wird. Anhand der Wärmeversorgung wird beispielhaft dargestellt, wie Erkenntnisse aus Gebäudesimulationen in eine Betriebsführungsstrategie umgesetzt und in der Anlagensimulation geprüft werden.

ABSTRACT

This study shows the interaction of simulation and monitoring on the basis of a building ensemble with combined heat, power and cooling on an industrial scale.

The building simulation in IDA ICE includes a model taking into account the running logistics and production processes. The hydraulic system with the operational management and control of the producers is represented in a plant simulation.

One focus is on a systematic way of describing the operation management strategy of the heating and cooling generation, which takes into account the complexity of a combined heat, power and cooling system. Using the heat supply as an example, it is shown how findings from building simulations are implemented in an operation management strategy and tested in the plant simulation.

EINLEITUNG

Vor dem Hintergrund der Anforderungen an Energieeffizienz, die Integration erneuerbarer Energien und die zunehmende Interaktion von Gebäuden mit ihren Versorgungsnetzen ist eine steigende Komplexität gebäudetechnischer Systeme zu verzeichnen. Multivalente Systeme mit unterschiedlichen Temperaturniveaus (z.B. Wärmepumpe vs. BHKW) oder Energieträgern (z.B. Gas vs. Solarthermie) erfordern besondere Sorgfalt in ihrer Planung und Automation. Gebäude mit komplexen technischen Konzepten erreichen im Betrieb vielfach nicht vollumfänglich ihre in der

Planung definierten energetischen Ziele. Dabei lassen sich die Anforderung an den Gebäudebetrieb in drei aufbauenden Stufen formulieren.

1. *Stabilität und Versorgungssicherheit:* Die Erzeuger sind im Regelbetrieb frei von Störungen zu betreiben und erfüllen die Leistungsanforderungen der Verbraucher.
2. *Energieeffizienz, Ökologie und Kosten:* Erzeuger- und Verbrauchersysteme sind entsprechend den Anforderungen des Bauherrn mit optimalen Temperaturniveaus und aufeinander abgestimmten Zeitprofilen eingestellt.
3. *Netzdienlichkeit:* Gebäude erfüllen zukünftig Anforderungen an die Interaktion mit übergeordneten Netzen, vgl. Smart Readiness Indicator (SRI) in der EPBD (Europäische Union 2018).

Die Stufen 2 und 3 sind dabei eng mit Fragen der Wirtschaftlichkeit verknüpft. Im Mittelpunkt der vorliegenden Studie stehen die zur Bewältigung dieser Anforderungen in Planung, Inbetriebnahme und Betrieb eingesetzten Methoden und Werkzeuge.

Am Beispiel einer Anlage mit Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) im industriellen Maßstab wird das strukturierte Zusammenwirken von Gebäude- und Anlagensimulation als Planungsinstrumente mit anschließendem Betriebsmonitoring und digitalen Prüfmethode zur Unterstützung einer geordneten Inbetriebnahme dargestellt.

Entwickelte Strategien zur Betriebsführung basieren u.a. auf dem Einsatz neuentwickelter, wärmemengenzählender Pumpen in Verbraucherkreisen. Diese zusätzliche Funktion ist für Nassläuferpumpen bereits verfügbar und kann in Zukunft einen relevanten Beitrag für intelligente Betriebsführungsstrategien in multivalenten Systemen liefern.

AUSGANGSLAGE

Simulationen sind etabliertes unterstützendes Werkzeug in allen Lebenszyklusphasen von Gebäuden. Dabei wird insbesondere in Planungsphasen erhebliches Detailwissen erarbeitet. Da Gebäude im Betrieb vielfach ihre in der Planung definierten Ziele nicht erreichen (performance gap), rückt die Überprüfung von Betriebszuständen der technischen Komponenten zunehmend in den Fokus von Wissenschaft und Praxis. Grundlage für einen nachvollziehbaren und prüfbareren Gebäudebetrieb ist eine eindeutige und systematische Beschreibung der Gebäudeautomation.

Abbildung 1 skizziert, wie Gebäude-, Anlagensimulation und Monitoring so ineinandergreifen, dass die Anforderungen an stabilen, optimierten und netzdienlichen Betrieb erreicht und überprüft werden können.

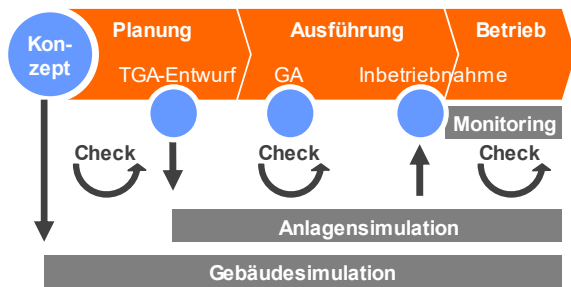


Abbildung 1: Impulse aus Gebäude- und Anlagensimulationen im Lebenszyklus

Gebäudesimulation

Simulationen zur Ermittlung von Lastprofilen sind bei komplexen Gebäuden neben Komfortsimulationen zur Regel in den Vorentwurfs- und Entwurfsphasen geworden. Sie dienen in erster Linie der Beratung von Bauherren und Architekten zur Optimierung von Geometrie, Bauphysik, Nutzung etc. und idealerweise als Grundlage des TGA-Entwurfs.

Aus Lastprofilen lassen sich bereits ohne Anlagensimulation eine Vielzahl von Hinweisen für den stabilen und energieeffizienten Betrieb, die Dimensionierung von Erzeugern sowie deren Aufteilung auf Grundlast und Spitzenlast und passende Temperaturniveaus ableiten. Erkenntnisse aus Gebäudesimulationen werden aktuell noch selten in Anleitungen zur Betriebsführung für Nutzer und Betreiber von Gebäuden aufbereitet. Dadurch bleiben wesentliche Arbeitsergebnisse und Erkenntnisse vielfach ungenutzt.

Anlagensimulation

Im Gegensatz zur thermischen Gebäudesimulation ist die Simulation von Anlagen zur Wärme- und Kälteversorgung über Forschungsvorhaben hinaus in der Planungspraxis weniger verbreitet. Gründe dafür sind fehlende Verpflichtungen, zusätzlicher Aufwand für den Bauherren und erforderliches Expertenwissen bei der Bedienung der Software.

Planungsbegleitende Anlagensimulationen sind in hohem Maße von den verfügbaren Angaben der technischen Komponenten abhängig. Aus diesem Grund können sie sinnvoll erst zur Begleitung der TGA-Entwurfsplanung erstellt werden. Angaben wie detaillierte Erzeugerkennlinien liegen in der Regel herstellerseitig nicht vor und können erst durch Messungen im Betrieb ermittelt werden.

Ziel einer Anlagensimulation sind auch Vorgaben für die Automation der Anlagenkomponenten und Kontrolle von Planung und Ausführung.

Gebäudeautomation und digitale Prüfung

Die Ausführung der Gebäudeautomation und Inbetriebnahme von HVAC-Systemen basieren in der

Regel auf textlichen Regelungsbeschreibungen als Planungsleistung. Normative Grundlage für die Darstellung von Regelungsaufgaben in der Gebäudeautomation ist VDI 3814-6 (VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2008). Bereits darin wird einleitend festgestellt, dass „die bisher häufig verwendete textliche Beschreibung schon bei einfachen Aufgabenstellungen schnell an ihre Grenzen“ stößt. Dennoch ist die textliche Funktionsbeschreibung die Regel in Planung und Ausführung. Eine ausführliche Darstellung der Sachverhalte enthält (Plesser 2013).

Ebd. wurde ausgehend vom Zustandsgraphen nach VDI 3814-6 eine als „Aktive Funktionsbeschreibung“ bezeichnete Methodik zur strukturierten, systematischen Beschreibung von Regelungsaufgaben vorgestellt. Diese Methodik wird nachfolgend für Erzeugersysteme angewandt, gilt aber für Verbraucher gleichermaßen.

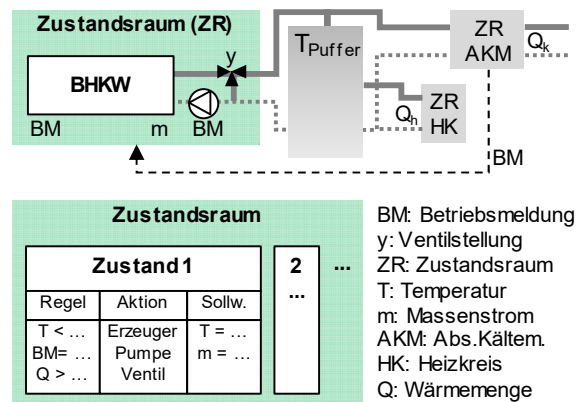


Abbildung 2: Zustandsräume und Zustände in Anlehnung an VDI 3814-6 und (Plesser 2013)

Zunächst sind die Komponenten eines Versorgungsschemas in Zustandsräume (ZR) aufzuteilen. Prinzipiell kann ein gesamtes Versorgungssystem aus Erzeugern und Verbrauchern inkl. Speichern, Pumpen und Ventilen als ein Zustandsraum betrachtet werden. Mit steigender Anzahl zu berücksichtigter Komponenten nehmen allerdings die möglichen Zustandskombinationen exponentiell zu. In (Rehbein et al. 2014) wurde eine Systematik zum Zerlegen von Energieversorgungssystemen und RLT-Anlagen vorgestellt. Danach sollte ein Zustandsraum einzelne Erzeuger und deren Peripherie aus Pumpen und Ventilen umfassen. In Abbildung 2 bilden BHKW, Pumpe und Mischventil einen Zustandsraum.

Ein Zustandsraum umfasst die Gesamtheit aller Betriebszustände, die ein System annehmen kann. Bei Erzeugern sind dies in der Regel die Zustände „An“ und „Aus“. Weitere Zustände sind nur dann erforderlich, wenn mit ihnen abweichende Betriebsregeln, Aktionen und Sollwerte verbunden sind.

Betriebsregeln (BR) bestimmen, ob ein Betriebszustand eintritt. Für Erzeuger erfolgt dies in der Regel auf Basis von Pufferspeichertemperaturen oder Betriebsmeldungen anderer Komponenten.

Aktionen definieren das Verhalten von Erzeugern, Pumpen, Ventilen und Reglern. Sollwerte stellen pro Betriebszustand einzuhaltende physikalische Größen (Temperaturen, Durchflüsse etc.) dar. Eine nach diesem Muster strukturierte Funktionsbeschreibung (Soll-Werte) ist mit Daten aus der Gebäudeautomation (Ist-Werte) im Betrieb unmittelbar prüfbar.

Bei Abhängigkeiten von Zustandsräumen untereinander (vgl. Abbildung 2: AKM fordert BHKW via Betriebsmeldung an), ergeben sich z.T. komplexe Wechselwirkungen. Bei Differenzierung möglicher Lastfälle lässt sich mit einer strukturierten Beschreibung noch ein geordneter Anlagenbetrieb beschreiben, ohne allerdings die dynamische Abfolge von Betriebszuständen sowie deren Dauer (Relevanz) bewerten zu können. Planungsbegleitende Gebäude- und/oder Anlagensimulationen schließen diese Wissenslücke und können als Nachweis der Funktionsfähigkeit einer Betriebsführungsstrategie dienen.

Als weitere grafische Darstellungsform bieten Programmablaufpläne (Beispiel vgl. (Klein et al. 2014)) den Vorteil, dass die Abfolge von Zuständen und deren Übergangsbedingungen leicht nachvollziehbar sind. Allerdings ist die Erstellung bei komplexen Systemen aufwändig, die Abbildungen werden in Abhängigkeit der berücksichtigten Komponenten sehr umfangreich und müssen im Zuge der Programmierung wieder „zurückübersetzt“ werden.

Strukturierte Beschreibungen werden in der Gebäudeautomation nicht flächendeckend umgesetzt, was auf Sparsamkeit, Zeit- und Kompetenzprobleme zurückzuführen ist (Fisch et al. 2017).

Betriebsführung und KWKK

Im Betrieb von Gebäuden und technischen Anlagen sind Betreiber nach einer Übergabe und Einweisung in der Regel darauf angewiesen, Zusammenhänge neu zu verstehen. Ein „Gebäudehandbuch“, in dem Betriebszustände dargestellt werden und das Erkenntnisse z.B. aus den Gebäudesimulationen enthält liegt in der Regel nicht vor.

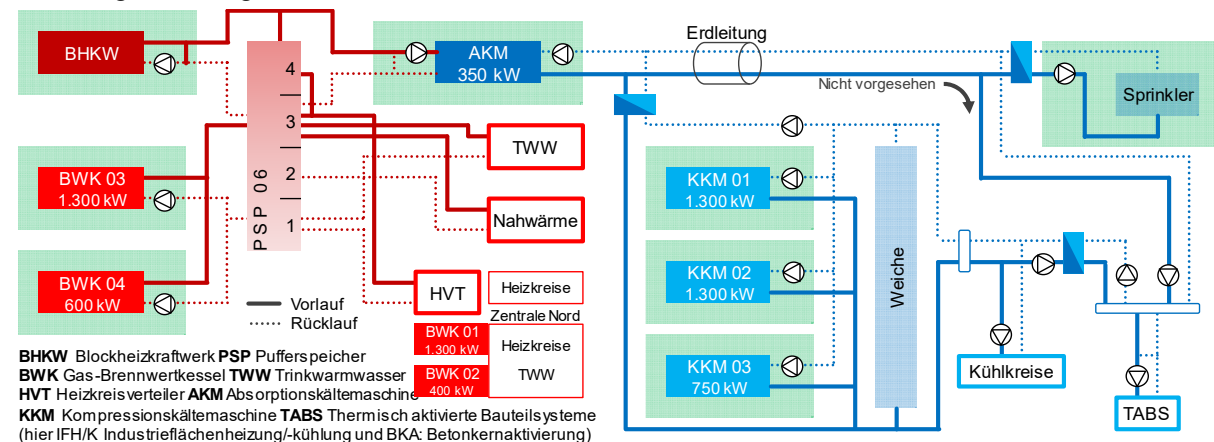


Abbildung 3: Vereinfachtes Schema der Wärme- und Kälteerzeugung

Betriebsregeln für Erzeuger basieren üblicherweise auf Speichertemperaturen (Abbildung 2: T_Puffer). Bei Kombination mehrerer Erzeuger unterschiedlicher Leistung wird in textlichen Funktionsbeschreibungen häufig eine Erzeugersequenz bei steigender Verbraucherlast angegeben. Eine unmittelbare Kopplung zwischen Verbraucherlast und Erzeugerleistung liegt also nicht vor und ist bei Standard-Schaltungen mit ausreichenden Wärmespeichern auch nicht erforderlich. Da Gebäude außerhalb von Forschungsprojekten vielfach nicht über Wärmemengenzähler verfügen, ist eine Abstimmung von Last und Erzeugerleistung unüblich. Speziell Kraft-Wärme-Kälte-Verbünde müssen nicht selten in den Jahren nach Inbetriebnahme kontinuierlich angepasst werden, was bei Misserfolg in der Stilllegung ganzer Anlagen enden kann. Gründe dafür sind in der Regel Konflikte der Temperaturniveaus bei nicht aufeinander abgestimmten Kombinationen von BHKW und AKM. Dokumentierte funktionierende Projekte finden sich z.B. in (Wuschig 2015) oder (Klein et al. 2017).

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, auf dem aktuell ein Produktions- und ein Verwaltungsgebäude und zukünftig Erweiterungsbauwerke entstehen. Die Wärme und Kälteerzeugung erfolgt zentral im Produktionsgebäude, alle weiteren Liegenschaften inkl. Verwaltungsgebäude sind über ein Nahwärme- und -kältenetz angeschlossen. Die Arbeiten in VEProB beschränken sich auf die Interaktion von Produktions- und Verwaltungsgebäude.

Im Mittelpunkt der Anlagen steht ein Kraft-Wärme-Kälte-Verbund mit BHKW (504 kW_{th}, 405 kW_{el}) und Absorptionskältemaschine (AKM, 348 kW). Abbildung 3 zeigt ein vereinfachtes Schema der Wärme- und Kälteversorgung.

Das BHKW kann in den Pufferspeicher zur Wärmeversorgung einspeisen oder die AKM bedienen. Eine definierte Aufteilung von Volumenströmen ist nicht vorgesehen. Gasbrennwertkessel unterschiedlicher Leistung (400 – 1.300 kW) dienen als Spitzenlastherzeuger.

Die AKM speist entweder in einen Sprinklertank, der in die Versorgung der Industrieflächenkühlung und Betonkerntemperierung eingebunden ist, oder in den Kälteverteiler, ein. 3 Kompressionskältemaschinen unterschiedlicher Leistung (750 – 1.300 kW) dienen als Spitzenlastherzeuger.

Neben dem BHKW als schaltbarem Wärmeerzeuger ist auf dem Dach des Produktionsgebäudes eine 1 MW_p PV-Anlage installiert. Darüber hinaus erfolgt die Auskopplung von Abwärme aus Fertigungsprozessen, die aber unmittelbar an Verbrauchern eingespeist wird.

Die Untersuchungen in dieser Studie bauen auf einer abgeschlossenen TGA-Planung auf und bilden den Status zum Ende von Planungs- und Bauphase ab. Abgleich und Kalibrierung der Simulationsmodelle erfolgen sobald Messwerte vorliegen. Das Produktions- und Verwaltungsgebäude werden im Laufe des Jahres 2020 vollständig in Betrieb genommen.

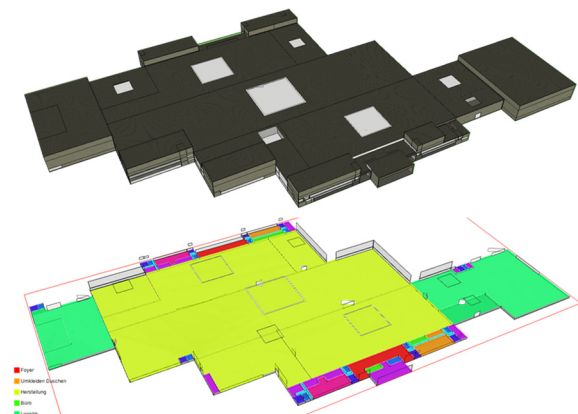


Abbildung 4: Simulationsmodell (oben) und Zonierung (unten) in IDA ICE (Produktionsgebäude)

Gebäudesimulation

Das Demonstrationsobjekt verfügt über ein hoch aufgelöstes Mess- und Zählkonzept mit ca. 140 Wärmemengenzählern und ca. 240 Stromzählern. Als Referenz für Energie- und Emissionsbilanzierung sowie Studien zur Gebäude-Stromnetz-Interaktion und Raumklimaanalysen dient ein Simulationsmodell in IDA ICE.

Die Modellierung berücksichtigt neben Randbedingungen aus Standort, Geometrie und

Bauphysik, Einflüsse aus Produktionsprozessen (Abwärme) sowie Logistik (Toröffnungen) und bildet unterschiedliche Raumsysteme zur Beheizung und Kühlung, insbesondere Industrieflächenkühlung, und 22 mechanische Lüftungsanlagen ab. Das Modell umfasst rund 60 Zonen, um der räumlichen Auflösung der Wärmemengenzähler zu entsprechen.

Die Gebäudesimulation dient zunächst zur Ermittlung von Lastprofilen, die Eingangsgröße für die Anlagensimulation sind. Eine Kopplung von Gebäude- und Anlagensimulation bzw. Messwerten ist möglich.

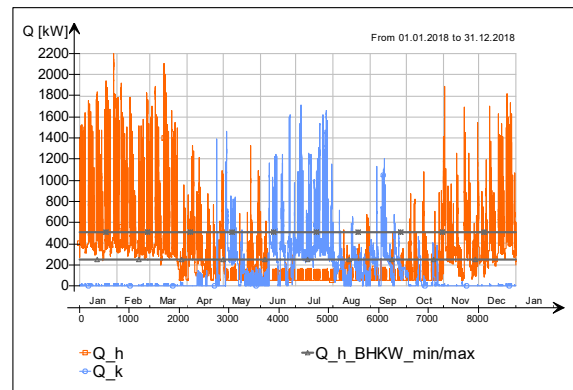


Abbildung 5: Jahresprofil Wärme und Kälte

Jahresprofil und Dauerlinie des Wärme- bzw. Kältebedarfes weisen darauf hin, dass Lasten im Teillastbereich des BHKW und in insbesondere in der Übergangszeit unterhalb der Mindestleistung zu erwarten sind. Die Lastprofile stellen jedoch, solange keine Messwerte vorliegen, nur eine qualifizierte Annahme dar, da sie erheblich durch die Auslastung der Produktion, Schichtarbeitsprofile und Laufzeiten von Lüftungsanlagen beeinflusst werden. Erweiterungsbauwerke über Produktions- und Verwaltungsgebäude hinaus sind ebenfalls noch nicht enthalten.

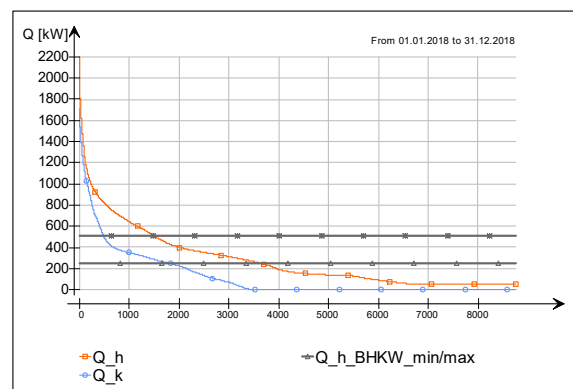


Abbildung 6: Jahresdauerlinie Wärme und Kälte

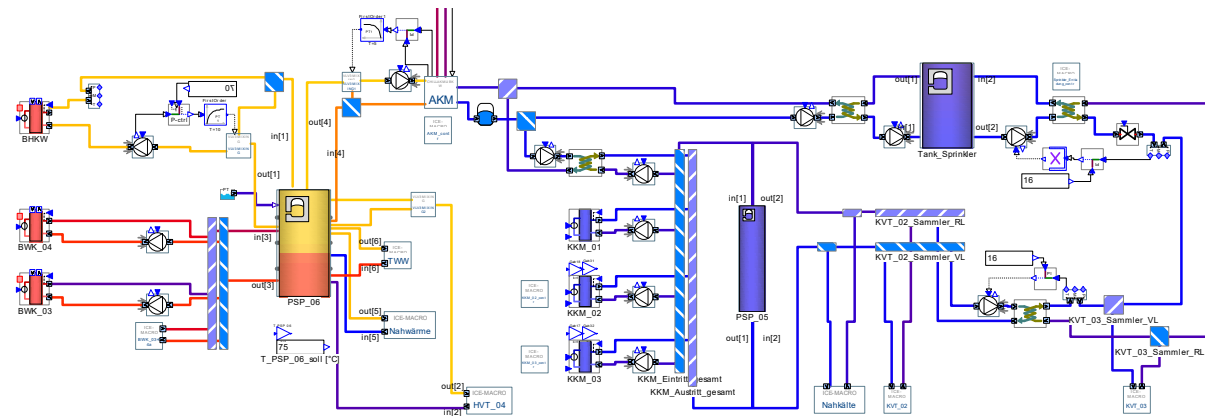


Abbildung 7: Anlagensimulation in IDA ICE

Analyse

Vor der Erstellung von Betriebsführungsstrategien sollten übergeordnete, zu berücksichtigende Grundsätze formuliert werden. Dazu zählen im Falle von Kraft-Wärme-Kälte-Verbänden allgemein:

- Maximierung der Laufzeit des BHKW und Vermeidung von häufigen Schaltvorgängen
- BHKW zur Wärmeversorgung in der Regel wirtschaftlicher als zur Kälteversorgung über AKM
- Berücksichtigen der Ankopplung des BHKW an das übergeordnete Stromnetz (Einspeisung und Eigenverbrauch)
- Zusammenhängende Laufzeiten der AKM im Grundlastbetrieb.

Aus den in Abbildung 3 dargestellten Zusammenhängen und der durchgeführten Gebäudesimulation lassen sich für das Demonstrationsobjekt ergänzend hinzufügen:

- Die Strategie der Wärmeversorgung muss Teillastbetrieb des BHKW berücksichtigen.
- Beladung des Sprinklertanks durch die AKM und Entladung müssen sowohl seinen Ladezustand als auch aktuellen bzw. zukünftigen Kältebedarf am TABS-Verteiler berücksichtigen.
- Minimierung von Speicherverlusten, d.h. Verbrauch von gespeicherter Energie prioritär gegenüber erneuter Einspeicherung.

Anlagensimulation

Zur Bewertung unterschiedlicher Betriebsführungsstrategien dient ein Modell des hydraulischen Systems in IDA ICE (vgl. Abbildung 7), das die in Abbildung 3 dargestellten Komponenten umfasst. Die Lastprofile sind aus der Gebäudesimulation übernommen.

Die Anlagensimulation basiert auf einer Reihe von Annahmen und Idealisierungen wie zum Beispiel:

- Alle Sensoren sind in einer umfassenden Automation verfügbar. In Realität existieren üblicherweise neben der Sensorik der übergeordneten Gebäudeautomation (z.B.

Temperatursensoren im Pufferspeicher) Fühler, die unmittelbar Erzeugern z.B. zur Überwachung von Betriebsgrenzen (Temperaturen, Durchflüsse) zugeordnet sind. Gebäudeautomation und interne Anlagenregelungen können dabei über unterschiedliche Sensoren mit unterschiedlichen Genauigkeiten verfügen.

- Dies erfordert in der Simulation eine robuste Regelung mit ausreichenden Temperaturbändern zur Berücksichtigung von Toleranzen.
- Da weder Kennlinien der Erzeuger noch Messwerte vorliegen, fließen erzeugerspezifische Kennlinien von Leistungs- und/oder Temperaturverläufen aktuell noch nicht in die Simulation ein.
- Das dynamische Verhalten von Erzeugern kann detailliert erst durch Messungen berücksichtigt werden.

Die nachfolgend untersuchten Betriebsführungsstrategien konzentrieren sich zunächst auf das Subsystem der Wärmeversorgung mit BHKW und Kessel an den Pufferspeicher.

Dazu wird eine typische Strategie aus der Planungspraxis in der Anlagensimulation für einen beispielhaften Wintertag untersucht und einer optimierten und strukturiert beschriebenen Betriebsweise gegenübergestellt.

BETRIEBSFÜHRUNG STANDARD

Als üblicher Systemvorschlag wird eine Erzeugersequenz bei steigender Verbraucherlast wie folgt angenommen:

1. BHKW (Grundlast)
2. BHKW + Kessel klein
3. BHKW + Kessel groß
4. BHKW + Kessel klein + Kessel groß

Zielgröße ist eine Solltemperatur im Pufferspeicher von 75 °C. Erkenntnisse aus einer Gebäudesimulation zum Lastprofil werden bewusst ausgeklammert.

Betriebsverhalten Simulation

Abbildung 8 zeigt das Profil von Wärmelast und Erzeugerleistungen für einen beispielhaften Wintertag. Dabei wird Takten als typisches Problem im BHKW-Betrieb deutlich. Auslöser ist die Abschaltung bei Überschreitung der maximalen BHKW-Eintrittstemperatur (83 °C). Begünstigt wird dies durch eine Soll-Austrittstemperatur des BHKW (98 °C), die im Heizfall deutlich höher ist, als das erforderliche Temperaturniveau im Pufferspeicher (75 °C), vgl. Abbildung 9.

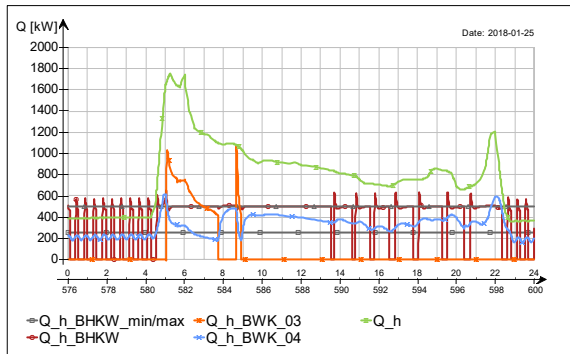


Abbildung 8: Betriebsführung Standard, Leistungsprofil Erzeuger

Darüber hinaus wirkt sich der Kesselbetrieb in den Tagesrandbereichen negativ auf das Teillastverhalten des BHKW aus; auch hier kommt es zum Takten.

Das Betriebsverhalten ließe sich durch optimierte Wahl von Parametern (z.B. Absenkung der Soll-Austrittstemperatur aus dem BHKW) verbessern, ohne grundlegend eine optimale Aufteilung von Erzeugern auf die Last zu erlauben.

Das Ergebnis verdeutlicht, dass bei vereinfachten Regelstrategien in Verbindung mit pessimistischen Kriterien (z.B. maximale BHKW-Eintrittstemperatur) gerade in Teillastzuständen die Anforderungen an stabilen Betrieb ggfs. nicht erfüllt werden.

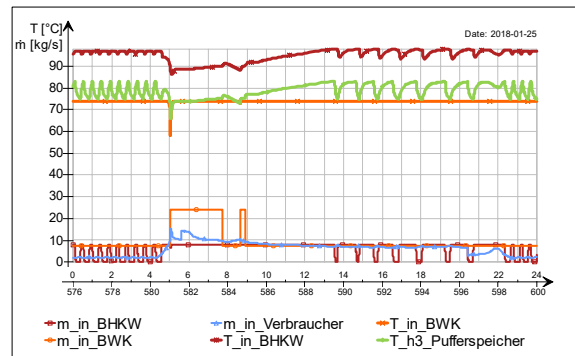


Abbildung 9: Betriebsführung Standard, Temperatur und Durchfluss im Pufferspeicher

BETRIEBSFÜHRUNG OPTIMIERT

Wie eingangs formuliert, erfordern komplexe Versorgungssysteme eine systematisch strukturierte Betriebsführungsstrategie unter Einbeziehung begleitender Simulationen. Dementsprechend wird nachfolgend aufbauend auf den Erkenntnissen der Gebäudesimulation zunächst eine an der Methodik der Aktiven Funktionsbeschreibungen orientierte Betriebsführungsstrategie entwickelt und anschließend in der Anlagensimulation überprüft.

Zustandsräume

In Anlehnung an die in (Rehbein et al. 2014) genannten Prinzipien wird eine Aufteilung in Zustandsräume und Zustände nach Tabelle 1 vorgenommen (vgl. auch Abbildung 3).

Tabelle 1: Zustandsräume, Zustände, Regeln, Aktionen und Sollwerte (BM = Betriebsmeldung, Q_h: Heizlast, Q_k: Kühllast, SOC: State of Charge, Ladezustand)

ZUSTANDSRÄUME	BETRIEBSZUSTÄNDE	BETRIEBSREGELN	AKTIONEN	SOLLWERTE
BWK klein	Aus	$Q_h > Q_{h_BHKW_min}$ UND $Q_h < Q_{h_BHKW_max}$	Erzeuger: Aus Pumpe: Aus	BM = Aus $m = 0 \text{ kg/s}$
BWK groß (analog)	An	$Q_h < Q_{h_BHKW_min}$ ODER $Q_h > Q_{h_BHKW_max}$	Erzeuger: An Regler: T_out so, dass $T_{Puffer_h3} = 75 \text{ °C}$ Pumpe: An	BM = An $T_{Puffer_h3} = 75 \text{ °C}$ $m = m_{nenn} \text{ (kg/s)}$
BHKW	Aus	$Q_h < Q_{h_BHKW_min}$ ODER $T_{BHKW_in} > 83 \text{ °C}$	Erzeuger: Aus Pumpen: Aus	BM = Aus $m = 0 \text{ kg/s}$
	BHKW_Wärme	$Q_h > Q_{h_BHKW_min}$	Erzeuger: An Pumpe: An	BM = An $T_{out} = 90 \text{ °C}$ $m = m_{nenn} \text{ (kg/s)}$
	BHKW_Kälte	Noch festzulegen	Erzeuger: An Pumpe: An	BM = An $T_{out} = 98 \text{ °C}$ $m = m_{nenn} \text{ (kg/s)}$
weitere				
AKM Sprinkler Entladung KKM		SOC_Sprinkler Q_k_TABS / Zukunft Zukünftig: Netzsignal		

Betriebszustände

Für jeden Zustandsraum erfolgt eine Festlegung von Betriebszuständen. In der Regel sind dies die Zustände „An“ und „Aus“. Für das BHKW werden neben „Aus“ die Zustände „Wärme“ und „Kälte“ definiert, da hier unterschiedliche Austrittstemperaturen vorgesehen sind (vgl. folgender Abschnitt „Aktionen und Sollwerte“).

Betriebsregeln

Die Definition der Betriebsregeln muss nun, aufbauend auf den Erkenntnissen der Gebäudesimulation und unter Einbeziehung einer begleitenden Anlagensimulation so erfolgen, dass zunächst ein stabiler und energieeffizienter Betrieb erreicht wird.

Da das Demonstrationsobjekt mit Wärmemengenzählern an relevanten Abgängen und Erzeugern ausgestattet ist, lassen sich deren Informationen in die Betriebsführungsstrategie einbinden. Insbesondere in multivalenten Systemen lassen sich so in Abhängigkeit der Gebäudelast gezielt Erzeuger sperren oder freigeben, was die Sequenzierung vereinfacht. Dabei ist zu beachten, dass ein sinnvoller Integrationszeitraum zu wählen ist. Dieser Aspekt ist im Rahmen des Monitorings weiter zu untersuchen.

Im Gegensatz zum statischen Ansatz werden die Betriebsregeln und Aktionen wie folgt gewählt (vgl. Tabelle 1):

- Freigabe des BHKW erst ab Verbraucherleistungen oberhalb der BHKW-Mindestleistung zur Vermeidung von Taktbetrieb
- Sperrung der Brennkessel zwischen BHKW-Mindest- und Maximalleistung
- Freigabe der Brennkessel unterhalb der BHKW-Mindestleistung und oberhalb der BHKW-Maximalleistung, um Einflüsse der Kessel auf den BHKW-Teillastbetrieb zu vermeiden.

Aktionen und Sollwerte

Aktionen und Sollwerte umfassen die in Tabelle 1 dargestellten Aktoren und Variablen. Aus den Erkenntnissen der begleitenden Anlagensimulation werden folgende Sollwerte festgelegt:

- Variable Austrittstemperaturen des BHKW: Im Heizfall geringe Austrittstemperatur, damit der Pufferspeicher im Teillastbetrieb nicht die maximale BHKW-Eintrittstemperatur erreicht und im Kühlfall maximale Austrittstemperatur zur Versorgung des Absorbers.
- Ausregelung der Temperatur im Pufferspeicher über Brennkessel mit variabler Austrittstemperatur.

Betriebsverhalten Simulation

Abbildung 10 zeigt die Aufteilung von Erzeugerleistungen im optimierten Ansatz. Es zeigt sich, dass das Takten des BHKW vermieden und eine

sinnvolle Aufteilung der Erzeuger auf Verbraucherleistungen erreicht wird.

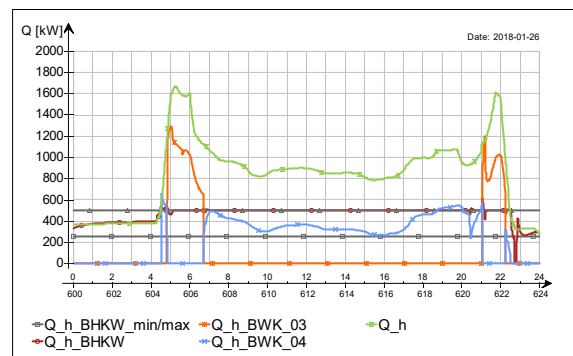


Abbildung 10: optimierter Ansatz: Aufteilung Wärmeleistung BHKW und BWK

Abbildung 11 verdeutlicht die Vorteile des entworfenen Konzeptes anhand der Temperaturen im Pufferspeicher. Maßgeblich ist die Temperatur des Sensors T_h3 im Pufferspeicher (Kammer 3, vgl. Abbildung 3). Dieser muss mindestens auf dem zur Wärmeversorgung erforderlichen Temperaturniveau liegen und darf gleichzeitig 83 °C nicht überschreiten, da auf diesem Niveau das BHKW versorgt wird. Beide Bedingungen werden erfüllt. Der Verlauf von „T_in_BWK“ zeigt die variable Austrittstemperatur der Brennkessel mit dem Ziel eine Temperatur von 75 °C in Kammer 3 zu erreichen.

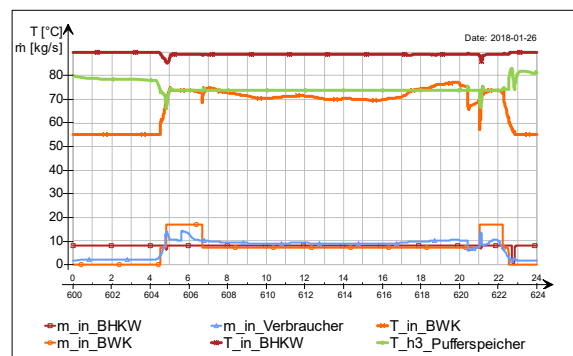


Abbildung 11: optimierter Ansatz: Temperaturen und Durchflüsse im Pufferspeicher Wärme

ZUSAMMENFASSUNG

Am Beispiel der Wärmeversorgung konnte in der Simulation nachgewiesen werden, dass durch Zusammenwirken von Gebäudesimulation, Anlagensimulation und strukturierter Funktionsbeschreibung ein stabiler und energieeffizienter Anlagenbetrieb zu erreichen ist. Demgegenüber ist bei pessimistischen d.h. strengen Annahmen, wie festen Temperaturgrenzen, instabiler Anlagenbetrieb nicht auszuschließen.

In der Diskussion mit Planern und Errichtern wird darauf hingewiesen, dass z.B. BHKWs in der Praxis nach einem entsprechenden Einregulierungsprozess robuster reagieren und größere Temperaturbänder der Eintrittstemperatur abdecken können. So verfügt das

BHKW über interne Regelungen (z.B. kurzfristige Veränderung von Volumenströmen und Austrittstemperaturen), die ein unmittelbares Abschalten bei Überschreiten einer Eintrittstemperatur verhindern. Dieses detaillierte Anlagenverhalten lässt sich mit Standardkomponenten in der Anlagensimulation kaum verlässlich vorhersagen und erfordert einen Abgleich mit Messdaten unter Einbeziehung von Messgenauigkeiten, Regelstrecken etc., was Gegenstand weiterer Untersuchungen sein wird.

Darüber hinaus sind die tatsächlichen Lastprofile, die im Falle von Produktionsstätten deutlich schwieriger vorherzusagen sind als z.B. in Verwaltungsbauten, von erheblicher Bedeutung.

AUSBLICK

Im Mittelpunkt des Forschungsvorhabens steht die Energie- und Emissionsbilanzierung der gesamten Liegenschaft, die Gegenstand der beginnenden Monitoringphase ist. Die Betriebsführung muss dazu zunächst einen stabilen und nachvollziehbaren und anschließend effizienten Anlagenbetrieb erreichen.

Das Simulationsmodell beinhaltet Vereinfachungen bei der Modellbildung von Komponenten und Reglern, die dem Wissensstand aus Planung und Ausführung geschuldet und durch Messwerte zu vervollständigen sind. Dazu werden im Rahmen der Inbetriebnahme Prüfabläufe zur Bewertung des Kraft-Wärme-Kälte-Verbundes durchgeführt.

Die Beschreibung in Zustandsräumen für technische Anlagen ist in der Forschung etabliert, findet aber in der Planungspraxis, z.B. in Funktionsbeschreibungen, kaum Anwendung. Die vorgestellte Methodik soll daher exemplarisch auf das gesamte Erzeugersystem und komplexe Verbraucher erweitert werden, um die Chancen eines systematischen Zusammenwirkens von Simulation und Monitoring zur Definition und Überprüfung von Zielwerten aufzuzeigen. Dazu gehört auch eine intelligente Strategie zur Beladung des Sprinklertanks nach folgenden Prinzipien:

- Beladung nur, wenn zukünftig Kältebedarf am TABS-Verteiler zu erwarten ist.
- Vorrang der Entladung des Sprinklertanks vor Beladung.

Die Bereitstellung von Flexibilitätsoptionen stellt eine zukünftige Anforderung an Gebäude dar, die sich im Demonstrationsobjekt auf unterschiedlichen Ebenen untersuchen lässt: Zum einen bietet das Nahwärme- und Kältenetz die Möglichkeit campusinterner Wärme-Flexibilitätsoptionen. Zum anderen stellt das BHKW als schaltbarer Wärmeerzeuger eine Verbindung zum übergeordneten Stromnetz dar. Bei der Analyse dient die aufgebaute Simulationsumgebung als Referenz.

Die im Rahmen des Forschungsprojektes gewonnenen Erkenntnisse sollen Anwendung auf die Erweiterungsbauwerke auf dem Campus finden.

DANKSAGUNG

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

LITERATUR

- Europäische Union (2018): Directive (EU) 2018/ of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency. EPBD (156), zuletzt geprüft am 18.09.2019.
- Fisch, Norbert; Plesser, Stefan; Wussler, Maik; Saus, David 2017: Spec&Check Gebäudeautomation. Entwicklung und Erprobung einer Methodik zur Beschreibung, Abnahme und Überwachung von Funktionen der Gebäudeautomation. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (Forschungsinitiative Zukunft Bau, F 3043).
- Klein, K.; Gschwander, S. et al. 2017: Latentwärmespeicher in netzreaktiven Gebäuden. LaNeGe. Abschlussbericht. Freiburg.
- Klein, K.; Wahl, A. et al. 2014: Optimierter Betrieb von KWKK-Systemen mit Speichern - Case Study am Beispiel einer Liegenschaft. In: van Treeck, C. und Müller, D. (Hg.): BauSIM 2014. Human-centred building(s). Proceedings of the 5th German-Austrian IBPSA Conference. Aachen, 22.-24. September. RWTH Aachen University, S. 402–409.
- Plesser, S. 2013: Aktive Funktionsbeschreibungen zur Planung und Überwachung des Betriebs von Gebäuden und Anlagen. Dissertation. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig. IGS – Institut für Gebäude- und Solartechnik.
- Rehbein, C.; Plesser, S.; Fisch, N. 2014: Application of Active Funktional Specifications for HVAC Systems. In: van Treeck, C. und Müller, D. (Hg.): BauSIM 2014. Human-centred building(s). Proceedings of the 5th German-Austrian IBPSA Conference. Aachen, 22.-24. September. RWTH Aachen University, S. 497–502.
- VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.: VDI 3814-6 Gebäudeautomation (GA) Grafische Darstellung von Steuerungsaufgaben, Juli 2008.
- Wuschig, C. 2015: Energetisch und wirtschaftlich optimierte Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung. Abschlussbericht. ZAE Bayern Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V.