AUTOMATISIERTE GENERIERUNG VON DIGITALEN ANLAGENSCHEMATA

Jan Mattmüller, Gesa Angelika Benndorf

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg

Peter Preintner

Special Software Solutions GmbH & Co. KG

ABSTRACT

Die Steigerung der Sanierungsrate ist eine notwendige Maßnahme, um die klimapolitischen Ziele im Gebäudesektor zu erreichen. Ein zentrales Forschungsfeld in diesem Zusammenhang ist die automatisierte Erfassung von Bestandsgebäuden. Für eine energetische Sanierung ist insbesondere die Identifikation der gebäudetechnischen Anlagen (TGA) von Bedeutung. Hier beschreiben wir einen Ansatz, der es ermöglicht, auf Grundlage eines Satzes von Hauptkomponenten (Erzeuger, Speicher und Übergabesysteme) automatisiert valide Anlagenkonfigurationen inklusive eines Hydraulikschemas abzuleiten. Dabei verfolgen wir einen zweistufigen Ansatz: Im ersten Schritt werden die Komponenten zu einem schlüssigen Energieflussschema verbunden. Dieses kann bereits zur Analyse und ggf. Simulation von Systemvarianten verwendet werden. Im zweiten Schritt werden die hydraulischen Komponenten (Ventile, Pumpen, Klappen) hinzugefügt und praxisrelevante Hydraulikschemata generiert. Ziel ist es, auf Basis der ermittelten und digital repräsentierten Anlagenkonfigurationen eine detaillierte Planung, Dimensionierung und anschließend eine automatisierte Angebotserstellung erfolgen zu lassen. Das entwickelte Konzept berücksichtigt bei der Generierung der Anlagenkonfigurationen sowohl energetische und thermische Randbedingungen als auch hydraulische Grundschaltungen. Eine prototypische Implementierung des Ansatzes ist für die Identifizierung von Anlagen im Bestand ausgelegt. Als weiterer Anwendungsfall ist die automatisierte Analyse und Auswahl von Sanierungskonzepten geplant.

EINLEITUNG

Die energetische Sanierung von Bestandsgebäuden ist noch immer eine große Herausforderung, da der manuelle Aufwand für die Erfassung der Bestandsanlagen sehr hoch ist. In den meisten Fällen gibt es keine aktuellen Pläne oder eine Dokumentation der Anlagen und das beauftragte Handwerksunternehmen muss sich vor Ort beim Kunden einen Eindruck der Ist-Situation verschaffen. Die Bestandserfassung ist somit mit hohem Zeitaufwand verbunden und erfordert sehr erfahrene Mitarbeiter. Hinzu kommt, dass jede Anlage individuell konfiguriert und an die technischen Gegebenheiten des Gebäudes und die Gewohnheiten der Nutzer angepasst werden muss. Dies führt häufig zu einer Überlastung der Betriebe und zu langen Wartezeiten für die Kunden. Vielfach werden vorzugsweise bestehende Öl- und Gasheizungen durch Brennwertanlagen ersetzt, anstatt z.B. Wärmepumpen, Pelletheizungen oder solar unterstützte Hybridsysteme anzubieten, um dem Zeitdruck nachzukommen und den Budgetrahmen des Kunden zu erfüllen [1]. Zudem werden in der Praxis zur Beschleunigung der Bearbeitung teilweise alte Angebote und Aufträge kopiert, wobei es immer wieder zu Fehlern und mitunter zu einer suboptimalen Anlagenkonfiguration kommt. In den kommenden Jahren wird die beschriebene Problematik durch einen weiter zunehmenden Fachkräftemangel noch verschärft werden [2].

Im Projekt DiBesAnSHK wird ein Lösungsansatz entwickelt, um den Angebotsprozess für SHK-Betriebe zu vereinfachen, zu standardisieren und zu digitalisieren und somit eine höhere Planungsqualität und die Umsetzung energieeffizienterer Anlagen zu erreichen. Im Kern des Lösungsansatzes steht eine vereinfachte digitale Erfassung der Ist-Situation. Dazu gehört die Erfassung der einzelnen TGA-Komponenten, sowie deren hydraulische Verknüpfung (TGA-Schema). Hier beschreiben wir einen Ansatz, der es erlaubt unter Vorgabe von TGA-Komponenten automatisiert Anlagenschemata zu generieren. In Zusammenhang mit einer automatisierten Objekterkennung, die ebenfalls im Projekt DiBesAnSHK entwickelt wird, kann somit die Bestandsanlage schnell ermittelt und digital repräsentiert werden. Das digitale Anlagenschema kann dann als Basis für die Konfiguration eines Sanierungsvorschlages verwendet werden. Auch für die Angebotserstellung, oder im Nachhinein zur Dokumentation des Umbaus kann das digitale Anlagenschema genutzt werden.

Den Autoren sind keine bereits am Markt verfügbaren Werkzeuge zur automatisierten Generierung von digitalen Anlagenschemata bekannt. Im Forschungsprojekt VEOTOP wurde ein ähnlicher Ansatz zur Topologie-Optimierung von einzelnen Komponenten

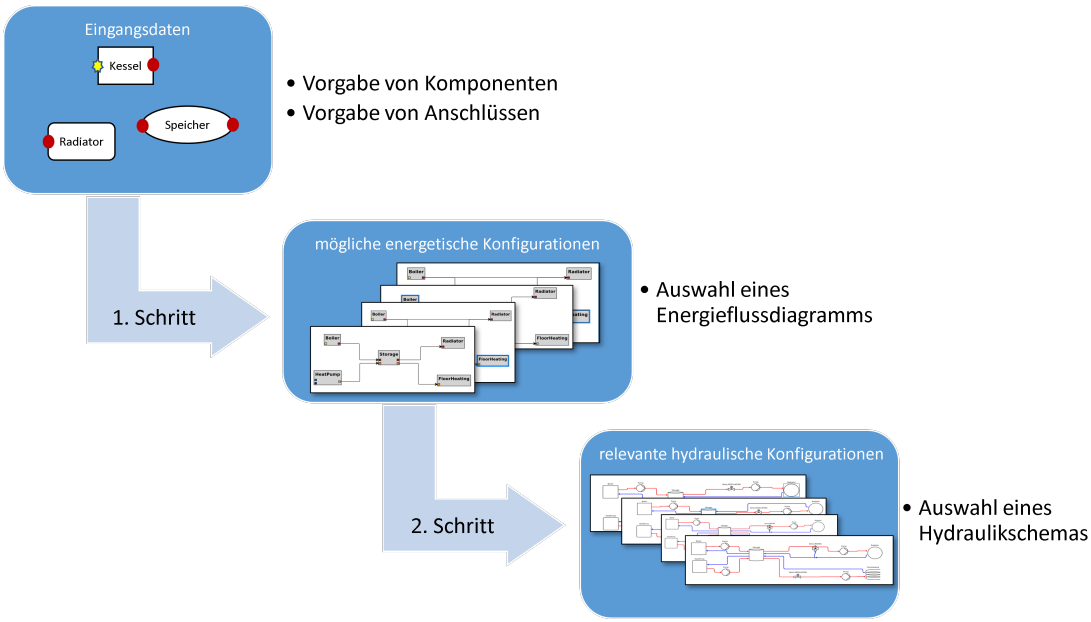

Abbildung 1: Schematische Übersicht über das Konzept für den Anlagengenerator.

verfolgt, welcher auf einer dynamischen Simulation aller Teilkomponenten, sowie deren Regelung beruht [3]. Der Ansatz wurde nicht für gebäudetechnische Anlagen, bestehend aus mehreren Komponenten, umgesetzt und ein Export der resultierenden Topologie in einer digitalen Repräsentation zur Weiterverwendung war nicht vorgesehen. Weiterhin gibt es Arbeiten zum automatisierten Entwurf der Gebäudeautomation [4]. Die Anlagentopologie wird hier nicht adressiert.

METHODIK

Ausgangspunkt für die Generierung von Anlagenschemata ist die Spezifikation der enthaltenen Hauptkomponenten, sowie deren Anschlüsse. Es wird festgelegt, welche Energieerzeuger und welche Übergabesysteme enthalten sind, bzw. sein sollen und ob beispielsweise zusätzlich ein Speicher oder ein Wärmetauscher vorhanden ist. Für jede dieser Komponenten wird vorgegeben, welches Medium in die Komponente eintritt und welches Medium aus der Komponente austritt. Es können je Komponente mehrere Ein- und Ausgänge definiert werden. Als Medium kann beispielsweise Heizungswasser, Kühlwasser oder Trinkwarmwasser angegeben werden, aber auch Strom, Gas oder Sole. Diese initialen Informationen können aus einer manuellen Eingabe stammen oder aus einer KI-gestützten Objektidentifikation mittels Video- und Bildaufnahmen des Heizungskellers automatisch erzeugt werden. Letzteres wird ebenfalls im Projekt DiBesAnSHK entwickelt, in diesem Artikel jedoch nicht weiter ausgeführt. Aus den Informationen über die Komponenten und ihre Anschlüsse werden dann im ersten Schritt alle Konfigurationen ermittelt, die energetisch möglich sind.

Energieflussschema

Die Ermittlung der möglichen Energieflussdiagramme besteht in der Generierung von Graphen. Dabei entsprechen die Knoten des Graphen den Hauptkomponenten. Die Verbindungen (Links) zwischen den Knoten stellen Energieflüsse zwischen den Komponenten dar.

Bei der Erstellung der Energieflussdiagramme werden jeweils Anschlüsse vom gleichen Typ (Medium), aber unterschiedlicher "Richtung" (Eingang/Ausgang) durch einen gerichteten Link verbunden. Ein Ausgang kann mehrere Links zu Eingängen verschiedener Komponenten haben. Analog können Links von den Ausgängen verschiedener Komponenten zu einem Eingang führen. Es kann auch mehrere Links zwischen den selben Knoten geben, wenn unterschiedliche Medien ausgetauscht werden. Gerichtete Kreise (Zyklen) innerhalb der Graphen sind aus energetischen Gründen ausgeschlossen. Alle sich ergebenden Energieflussdiagramme entsprechen somit, mathematisch gesehen, gerichteten, azyklischen Multigraphen.

Es werden automatisiert alle möglichen Varianten für Energieflussdiagramme nach den hier beschriebenen Kriterien erzeugt. Bereits bei einer relativ geringen Anzahl an vorgegebenen Komponenten (z.B. 7) kann die Anzahl der Möglichkeiten sehr groß werden (mehr als 1000 Varianten). Aus diesem Grund können zusätzliche Einschränkungen in einer Konfigurationsdatei definiert werden, die bei der Generierung der Energieflussdiagramme berücksichtigt werden. Das bedeutet, zusätzlich zum Typ und zur Richtung eines Anschlusses wird eine Zahl übergeben, welche eine Obergrenze für die Anzahl an Verbindungen darstellt. Auf diese Weise kann beispielsweise folgende Einschränkung gemacht werden: "der Heizwasseranschluss am Kessel hat maximal zwei ausgehende

Verbindungen".
Die generierten Energieflussdiagramme entsprechen in etwa der Vorplanung einer Anlage in Leistungsphase 2 nach HOAI und können bereits zur Analyse oder Simulation einer Anlage herangezogen werden. Aus den möglichen Varianten kann anschließend manuell ein Energieflussdiagramm ausgewählt und weiterverarbeitet werden. Falls bestimmte Randbedingungen oder Einschränkungen vordefiniert wurden, kann die Auswahl eines Energieflussdiagramms auch automatisiert erfolgen.

Hydraulikschema

In einem weiteren Schritt können, ausgehend von einem ausgewählten Energieflussdiagramm, dazugehörige Hydraulikschemata ermittelt werden. Dabei werden zusätzliche Knoten für Pumpen, Ventile und Verzweigungen automatisiert hinzugefügt und zusätzliche Verbindungen für Vorlauf und Rücklauf geschaffen. Die resultierenden Hydraulikschemata entsprechen weiterhin gerichteten Multigraphen, enthalten nun jedoch in der Regel Zyklen. In diesem Schritt wird Expertenwissen, welches in Form von Regeln hinterlegt ist, über hydraulische Prinzipien verwendet. Dabei wurde hier zunächst der Fokus auf einfache, im Bestand weit verbreitete, haustechnische Systeme gelegt. Die Lüftungstechnik, sowie Kältebereitung wurde bisher nicht betrachtet. Komplexere Systeme werden im weiteren Verlauf der Entwicklungen adressiert.
Eine schematische Übersicht des gesamten entwickelten Ansatzes ist in Abb. 1 dargestellt. Das zweistufige Verfahren wurde in Python implementiert. Die Eingangsdaten (Informationen über Komponenten und Anschlüsse) und ggf. zu berücksichtigende Einschränkungen werden mittels einer Konfigurationsdatei an das Programm übergeben. Die ermittelten Energieflussschemata und Hydraulikschemata liegen in einer digitalen Repräsentation vor, die je nach Anwendungsfall in unterschiedlichen Formaten exportiert werden kann. In den unten gezeigten Beispielen wurde ein Export in ein JSON-Format vorgenommen, um die generierten Graphen mittels einer Javascript-Bibliothek im Browser zu visualisieren. Die Visualisierung ermöglicht gewisse interaktive Elemente, wie das Anordnen der Komponenten durch den Nutzer oder das Anzeigen zusätzlicher Informationen mittels Hover-Effekt.

Komponente	Anschluss	Richtung
Kessel	Gas	Eingang
	Heizungswasser HT	Ausgang
Solarthermie	Sole	Ausgang
Speicher	Sole	Eingang
	Heizungswasser HT	Eingang
	Trinkwarmwasser	Ausgang
Radiator	Heizungswasser HT	Eingang
Trinkwasser	Trinkwarmwasser	Eingang

Tabelle 1: Eingangsdaten für Beispiel 1, HT steht für Hochtemperatur.

ANWENDUNGSBEISPIELE

Als Anwendungsbeispiele wurden zwei haustechnische Systeme gewählt, die häufig im Bestand anzutreffen sind, bzw. nach einer Sanierungsmaßnahme vorliegen.

Beispiel 1

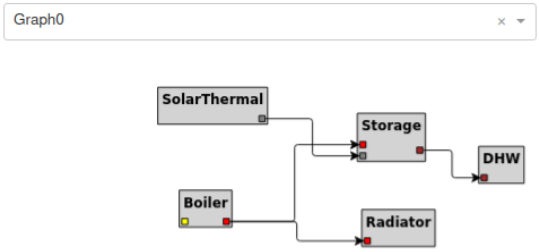

Abbildung 2: Ein mögliches Energieflussschema für Beispiel 1

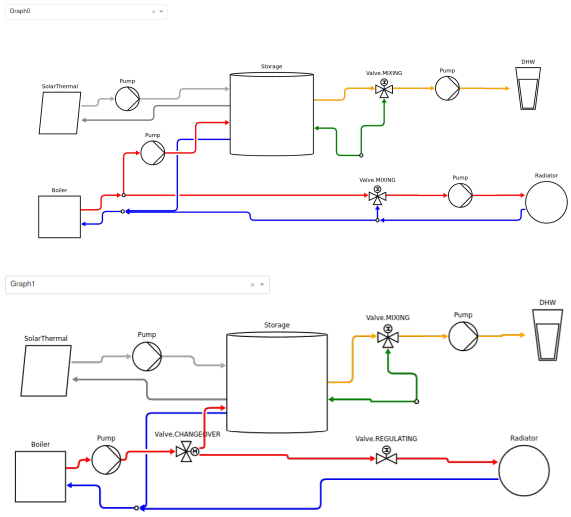

Abbildung 3: Zwei mögliche Hydraulik-Varianten für das Energieflusschema aus Abb. 2.

Das erste Beispiel bildet eine Konfiguration, die dank ihrer einfachen Hydraulik bei kleinen Anlagen im Bestand weit verbreitet ist: Ein regelbarer Brenner (Gas oder Öl) bedient entweder direkt die Heizkreise oder erwärmt über einen internen Wärmetauscher den

[1] Eine zweite theoretisch mögliche Variante unterscheidet sich nur dadurch, dass sie keine Verbindung zwischen Kessel und Speicher enthält.

Trinkwasser-Pufferspeicher. Im Speicher kann optional eine Solarthermie-Anlage über einen weiteren internen Wärmetauscher eingebunden werden. Auf der Seite der Raumwärmebereitstellung ist kein Speicher erforderlich, da derartige Wärmeerzeuger eine hohe Leistungsmodulation zulassen. Die Komponenten des ersten Beispieles samt ihrer Anschluss-Informationen sind in Tab. 1 aufgeführt.

Es ergeben sich in diesem Fall zwei mögliche energetische Konfigurationen. Eine davon ist in Abb. 2 dargestellt[1]. Die gerichteten Verbindungen (Energieflüsse) zwischen den Komponenten sind als Pfeile dargestellt und die Anschlüsse entsprechend ihres Typs farblich gekennzeichnet. Beispielsweise entsprechen die roten Anschlüsse dem Medium "Heizungswasser HT" oder die grauen Anschlüsse dem Medium "Sole". In der Browser-Ansicht der Graphen wird das Medium als Hover-Effekt angezeigt. Für die Visualisierung wurden die Python-Bibliothek Dash und eine Javascript-Bibliothek verwendet.

Im nächsten Schritt werden, ausgehend von dem Energieflussschema, alle gängigen hydraulischen Konfigurationen ermittelt. Die sich ergebenden Hydraulikschemata sind in Abb. 3 gezeigt. Die beiden Konfigurationen unterscheiden sich dadurch, dass im oberen Fall ein Mischkreis, im unteren Fall ein ungemischter Heizkreis zum Verbraucher vorliegt. In der Realität trifft man in den meisten Fällen die untere (ungemischte) Konfiguration an. Durch die Anordnung mit einer Verzweigung nach dem Brenner kommt die Anlage im diesem Fall mit einer einzigen Heizungspumpe aus. Im Vergleich zu Abb. 2 sind in den Hydraulikschemata Vorlauf- und Rücklaufleitungen, Pumpen, Ventile und Verzweigungen integriert. Ein thermischer Verbrühschutz (Mischventil zwischen Speicher und Entnahmestelle) sorgt für eine Begrenzung der Zapftemperatur. Die verschiedenen Medien sind nun den Farben der entsprechenden Leitungen zu entnehmen, welche sich an der gängigen Farbzuordnung für TGA-Schemata orientieren (z.B. Heizungswasservorlauf/-rücklauf in rot/blau). Es ist zu beachten, dass die Anschlusspositionen der Leitungen im visualisierten Schema nicht den physikalischen Positionen entsprechen.

Komponente	Anschluss	Richtung
Wärmepumpe	Strom	Eingang
	Außenluft	Eingang
	Heizungswasser HT	Ausgang
	Heizungswasser MT	Ausgang
Speicher	Heizungswasser HT	Eingang
	Heizungswasser MT	Eingang
	Heizungswasser HT	Ausgang
	Heizungswasser MT	Ausgang
Frischwasser-station	Heizungswasser HT	Eingang
	Trinkwarmwasser	Ausgang
Fußboden-heizung	Heizungswasser MT	Eingang
Trinkwasser	Trinkwarmwasser	Eingang

Tabelle 2: Eingangsdaten für Beispiel 2, HT steht für Hochtemperatur, MT für Mitteltemperatur.

Beispiel 2

Im zweiten Beispiel wird eine Luft-Wärmepumpe als Wärmeerzeuger eingesetzt. In diesem Fall sind alle Erzeuger- und Verbraucherkreise durch einen zentralen Kombi-Speicher gekoppelt. Die Brauchwassererwärmung erfolgt über eine Frischwasserstation. Die Komponenten des zweiten Beispieles samt ihrer Anschluss-Informationen sind in Tab. 2 aufgeführt.

Für dieses Beispiel ergeben sich insgesamt vier mögliche energetische Konfigurationen, welche in Abb. 4 dargestellt sind. In der ersten Konfiguration ("Graph 0") geht die Wärme vom Erzeuger ausschließlich in den Speicher. Die anderen Konfigurationen enthalten jeweils zusätzliche direkte Verbindungen zwischen Erzeuger (Wärmepumpe) und Verbraucher, bzw. Frischwasserstation. Eine zu "Graph 0" gehörende hydraulische Konfiguration ist in Abb. 5 gezeigt. Analog zu Beispiel 1 sind im Hydraulikschema wiederum Pumpen, Ventile, Verzweigungen und Vor- und Rücklaufleitungen berücksichtigt. Die Wärmepumpe ist so eingebunden, dass durch eine Umschalthydraulik die Entnahme- und Einleitungshöhe verändert, bzw. zwischen Trinkwasser- und Heizungsniveau umgeschaltet werden kann. Vor- und Rücklauf der Frischwasserstation zirkulieren, analog zu den Heizkreisen, direkt über den Speicher. Eine weitere mögliche hydraulische Konfiguration beinhaltet einen direkten Heizkreis an Stelle des Mischkreises. In den hier gezeigten Beispielen ist die Anzahl der möglichen energetischen Konfigurationen überschaubar und es müssen keine zusätzlichen Einschränkungen für die Generierung der Schemata übergeben werden. Weitere (komplexere) Anwendungsfälle können beispielsweise einen zusätzlichen externen Wärmetauscher für die Solarthermie-Einbindung oder weitere Erzeuger, Speicher oder Verbraucher enthalten. Die Auswahl einer Variante kann manuell oder, auf Basis bestimmter Vorgaben, automatisiert erfolgen. Im Fall der Energieflussdiagramme können Einschränkungen bzgl. Ver-

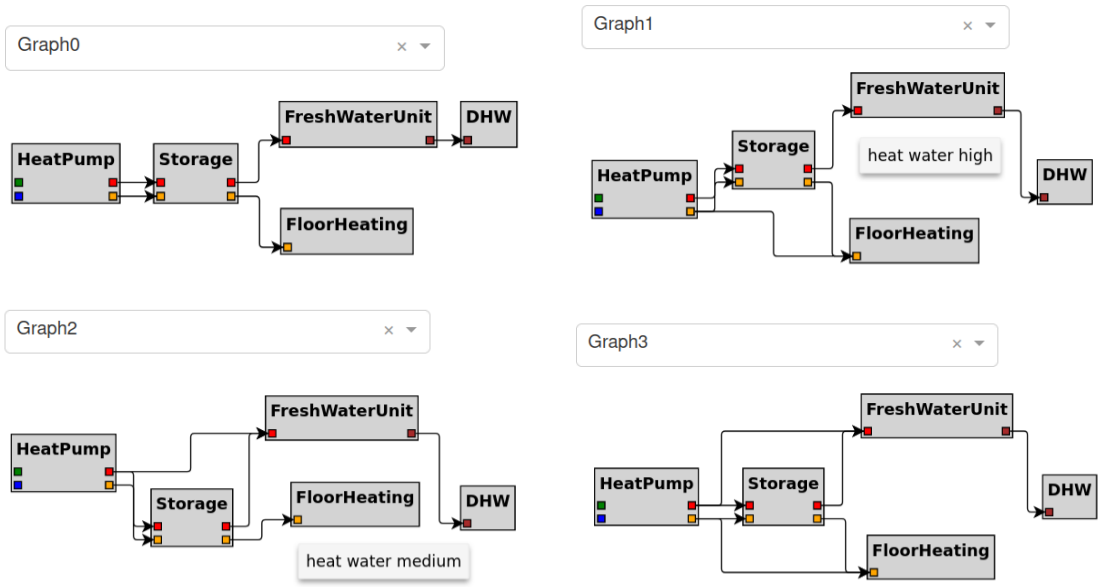

Abbildung 4: In Beispiel 2 ergeben sich vier mögliche Varianten für das Energieflussdiagramm.

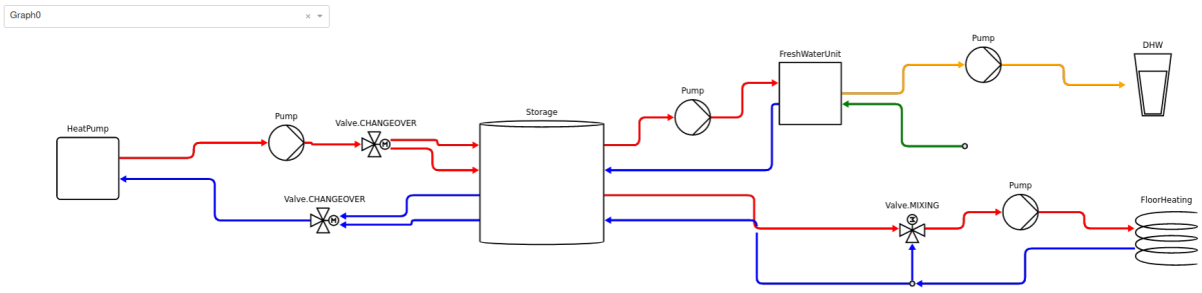

Abbildung 5: Hydraulikschema in Beispiel 2 - eine mögliche Variante.

bindungen zwischen bestimmten Komponenten formuliert werden, etwa: “Kessel und Speicher sind nicht direkt verbunden”. Im Fall der hydraulischen Konfigurationen können initiale Vorgaben zu Mischkreisen gemacht werden. Für bestimmte Anwendungsfälle kann die Ausgabe der Energieflussschemata gänzlich übersprungen werden. Derzeit erfolgt die Vorgabe der Komponenten und eventueller Einschränkungen an Hand von Konfigurationsdateien, die an das Programm übergeben werden. Im weiteren Verlauf des Projektes werden derartige Funktionalitäten in eine bedienungsfreundliche Oberfläche integriert.

ZUSAMMENFASSUNG

Im vorliegenden Artikel wird ein Werkzeug beschrieben, welches, ausgehend von Informationen über die Hauptkomponenten, automatisiert digitale Anlagenschemata generiert. Dies geschieht in einem zweistufigen Prozess, in welchem zunächst alle möglichen energetische Konfigurationen und anschließend entsprechende hydraulische Schemata ermittelt werden. Die generierten Schemata können visualisiert und weiterbearbeitet werden oder zur digitalen Dokumentation einer bestehenden Anlage dienen. Das entwickelte Konzept wurde an Hand mehrerer praxisrelevanter Beispiele demonstriert.

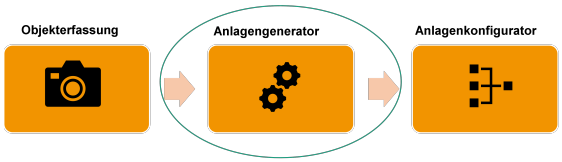

Abbildung 6: Bezug des Anlagengenerators zu vor- und nachgelagerten Prozessschritten.

AUSBLICK

Im weiteren Verlauf des Projektes wird das bestehende Konzept dahingehend erweitert, dass zusätzliche hydraulische Konfigurationen für komplexere Fälle berücksichtigt werden können. Zudem werden die Schnittstellen zu den vor- und nachgelagerten Prozessschritten definiert und erprobt (siehe Abb. 6). Das bedeutet, es wird eine einheitliche Ontologie erarbeitet, welche sowohl die Komponenten als auch die Topologie beschreibt und eine Verknüpfung mit Artikelnummern für die Angebotserstellung erlaubt. Auch weitere

Schnittstellen zu standardisierten Datenmodellen, beispielsweise IFC, werden untersucht.
Ziel ist es, im weiteren Projektverlauf, die Eingangsdaten für den Anlagengenerator (zumindest teilweise) automatisiert an Hand von Bild- und Videoaufnahmen, sowie 3D-Scans des Heizungskellers zu ermitteln. Dafür kommen Methoden aus dem maschinellen Lernen und der Bilderkennung zum Einsatz. Die erkannten Komponenten und Informationen können durch den Nutzer geprüft und ergänzt werden.
Die vom Anlagengenerator erzeugten Schemata dienen als Eingangsdaten für den Anlagenkonfigurator. Im Anlagenkonfigurator werden den zunächst allgemeingültigen Komponenten reale Produkte zugeordnet, so dass am Ende eine Bestellung erfolgen kann. Durch die bereits übermittelte Grundstruktur der Anlage aus dem Anlagengenerator können manuelle Schritte zur Konfiguration der Anlage eingespart werden.
Des Weiteren wird das bidirektionale Zusammenspiel zwischen dem hier vorgestellten Anlagengenerator und dem Anlagenkonfigurator weiter untersucht. Damit können Änderungen der Konfiguration zur erneuten Generierung von energetischen und/oder hydraulischen Schemata führen. Zudem sollen durch diese Rückkopplung energetische oder hydraulische Fehlkonfigurationen vermieden werden.
Eine Weiterentwicklung des bestehenden Konzeptes besteht außerdem darin, die hinterlegten Algorithmen und Regeln dahingehend zu erweitern, dass sie für die Generierung von Sanierungsvorschlägen genutzt werden können. Dazu werden, ausgehend von einem bestehenden System, mögliche und energetisch sinnvolle Ersetzungen von Komponenten untersucht.

DANKSAGUNG

Dieser Beitrag wurde im Rahmen des vom BMBF geförderten Projektes “DiBesAnSHK” (FKZ:02K20D010) verfasst.

Literatur

[1] Jürgen Dispan. *Branchenanalyse Heizungsindustrie: Strukturwandel, Entwicklungstrends, Herausforderungen*. Studie der Hans-Böckler-Stiftung, 2016.

[2] Prognos. *Fachkräftebedarf für die Energiewende in Gebäuden*. im Auftrag von Spitzenverband der Gebäudetechnik, 2018.

[3] Andreas Varchmin, Maximilian Hebeler, Florian Hans, Andreas Schulte, Wilhelm Te-gethoff, Jonathan Kistner, Steffen Lampke, Nina Wunder, Walter Schumacher, and Jürgen Köhler. Verfahren zur optimalen Synthese und Topologieoptimierung komplexer thermischer Energiesysteme. *Abschlussbericht zum Projekt VEOTOP*, 2022.

[4] Henrik Dibowski, Jörn Plönnigs, and Klaus Kabitzsch. Automatisierter Entwurf von Gebäudeautomationssystemen. *atp edition*, 50(04):58–67, 2008.