

# **Modulare Simulation bei der energieorientierten Planung industrieller Heiz- und Kühlsysteme**

## ***Modular Simulation in Energy-oriented Planning of Industrial Heating and Cooling Systems***

Daniel Moog, Fabian Borst, Matthias Weigold, TU Darmstadt, Institut für  
Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW), Darmstadt  
(Germany), d.moog@ptw.tu-darmstadt.de, f.borst@ptw.tu-darmstadt.de,  
m.weigold@ptw.tu-darmstadt.de

**Abstract:** Energy-oriented simulation-based planning of industrial heating and cooling supply systems is an ongoing research topic. The reduction of time and effort for simulation remains a central challenge. In this paper, a three-step approach for thermohydraulic system simulation is presented for this purpose. First, a modular technology model kit is developed in Modelica/Dymola. Then, the Modelica modules are transferred into a model exchange format. Finally, a (partially) automated model generation of system variants as composite models and their co-simulation in Python is performed.

## **1 Einleitung und Motivation**

Industrielle Heiz- und Kühlsysteme wiesen im Jahr 2017 einen Anteil von nahezu 75 Prozent am Endenergieverbrauch der deutschen Industrie auf (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2019). Die betriebliche Kälte- und Wärmeversorgung ist ein zentraler Aspekt der Versorgungstechnik, welche den äußeren Rahmen, sprich die Infrastruktur der Produktion, bildet (Fraunhofer Gesellschaft, 2008). Ihre Planung ist eine Teilaufgabe der Fabrikplanung und somit wichtiger Bestandteil der Planung eines kompletten Produktions- oder Logistikstandorts. Unter anderem bedingt durch politische Rahmenbedingungen gewinnt die Berücksichtigung von Energiezielen bei dieser Planungsaufgabe zunehmend an Bedeutung (Burggräf und Schuh, 2021). Eine systemische Ausschöpfung bspw. von Energieeffizienz- oder Energieflexibilitätpotenzialen kann komplexe Systemtopologien und zugehörige Betriebsstrategien erfordern. Die Simulation als etabliertes Werkzeug im Rahmen der Digitalen Fabrik kann den Planungsprozess derartiger komplexer Systeme unterstützen (VDI 4499, 2008). Die Modellierung industrieller Heiz- und Kühlsysteme und deren Untersuchung in dynamischen Simulationen erfordert jedoch umfangreiches Know-how über die Simulationstechnologie. Weiterhin besteht eine hohe Anzahl möglicher Systemvarianten, welche nur unter hohem

Zeitaufwand modelliert, simuliert und ausgewertet werden können. Im Rahmen einer Auftragsplanung als Teil einer Ingenieur-Dienstleistung bzw. einer Energieberatungsdienstleistung kann daher bedingt durch Zeit, Aufwand und Kosten in der Regel kein dynamisches Simulationsmodell verschiedener Varianten, ausgehend von einzelnen Komponentenmodellen, aufgebaut werden. Nach Fowler und Rose (2004) stellt die Verringerung von Zeit und Aufwand im Kontext der Simulation eine fortwährende Herausforderung dar. Vor diesem Hintergrund wird in dieser Arbeit die Grundlage zur modularen simulationsgestützten Planung industrieller Heiz- und Kühlsysteme basierend auf Modelica/Dymola geschaffen. Es wird ein Technologiemodellbaukasten vorgestellt, der eine modulare und damit zeiteffiziente Modellierung komplexer Systemtopologien industrieller Heiz- und Kühlsysteme innerhalb Modelica-basierter Simulationsumgebungen ermöglicht. Anschließend erfolgt die Befähigung und der Export der Modelica-Module in ein softwareunabhängiges Modellaustauschformat. Darauf aufbauend wird ein strukturbasierter Ansatz zur (teil-)automatisierten Modellerstellung industrieller Heiz- und Kühlsysteme in Python entwickelt, in dem die Module in einem Systemmodell zur Co-Simulation (CS) verbunden werden.

## 2 Stand von Wissenschaft und Technik

Für Zwecke der systemischen Gebäude- und Anlagensimulation steht eine Vielzahl freier und kommerzieller Modellbibliotheken in Modelica zur Verfügung, die eine objektorientierte Modellierung ausgehend von Komponentenmodellen ermöglichen, darunter auch die freie *Modelica Standard Library (MSL)*. Eine weiterführende Übersicht verschiedener Modelica-Modellbibliotheken für die Gebäude- und Anlagensimulation ist bspw. in Müller et al. (2017) dargestellt. Die komponentengetriebene Modellierung industrieller Energiesysteme wurde in der Literatur umfassend beschrieben (siehe bspw. Wischhusen (2005), Panten (2019)). Im Kontext der Simulation gebäudeseitiger Versorgungstechnik entwickeln Flach et al. (2019) erstmalig Modelica-basierte Simulationsmodule, die wiederkehrende Verteilstrukturen in thermohydraulischen Systemen zur Wärme- und Kälteversorgung abbilden.

Trotz der umfassenden Vorarbeiten zur Modellierung gilt die Anwendung der dynamischen Simulation zur Planung industrieller Heiz- und Kühlsysteme als spezialisiert und stellt keinen flächendeckenden Standard in der Planungspraxis dar (vgl. Straßburger et al. (2006)). Aktuelle Forschungsarbeiten fokussieren diesen Ansatz jedoch, insbesondere im Kontext der Planung unter Berücksichtigung energieorientierter Zielgrößen (siehe bspw. Kurlle (2018) und Flum (2021)).

Mit dem *Functional Mock-up Interface (FMI)* steht eine standardisierte Schnittstelle zur Verfügung, gemäß derer Simulationsmodelle als Functional Mockup-Units (FMU) sprach- und umgebungsunabhängig ausgetauscht werden können (Modelica Association, 2020). Die Technologie bietet großes Potenzial, um die Kommunikation zwischen unterschiedlichen Planungswerkzeugen und letztlich auch zwischen den Planungsbeteiligten zu verbessern (Réhault et al., 2017). FMU-Modelle können zudem zur Umsetzung webfähiger Simulationswerkzeuge eingesetzt werden.

Ein Trend in simulationsgestützten Planungsprozessen ist darüber hinaus die automatisierte Modellerstellung mit dem Ziel der Aufwandsreduktion (Bergmann

und Straßburger, 2020). Nach Bergmann und Straßburger (2020) besteht eine Tendenz zur Verwendung von XML-Dokumenten als mögliche Datenquelle für eine automatisierte Modellerstellung.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass umfassende Vorarbeiten im Bereich der Modelica-basierten Simulation industrieller Heiz- und Kühlsysteme bestehen. Deren modulare Modellierung zur Reduktion des Zeit- und Modellierungsaufwands ist bislang jedoch nur im Einzelfall aus Perspektive der Gebäudetechnik untersucht worden. Weiterhin beschäftigen sich aktuelle Forschungsarbeiten mit der Entwicklung simulationsgestützter Tools, die die energieorientierte Planung industrieller Heiz- und Kühlsysteme im Sinne von Assistenzsystemen unterstützen. Eine Kombination mit Ansätzen zur automatisierten Modellerstellung wurde in diesem Bereich jedoch noch nicht umgesetzt.

### 3 Ansatz zur modularen Simulation bei der energieorientierten Planung industrieller Heiz- und Kühlsysteme

Ausgehend vom Stand der Wissenschaft und Technik wurde ein sukzessiver Ansatz mit dem übergeordneten Ziel der Ersparnis von Zeit und Aufwand im Kontext der energieorientierten, simulationsgestützten Planung industrieller Heiz- und Kühlsysteme formuliert (Abb. 1). Die einzelnen Schritte des Ansatzes werden nachfolgend in entsprechenden Unterkapiteln ausgeführt.

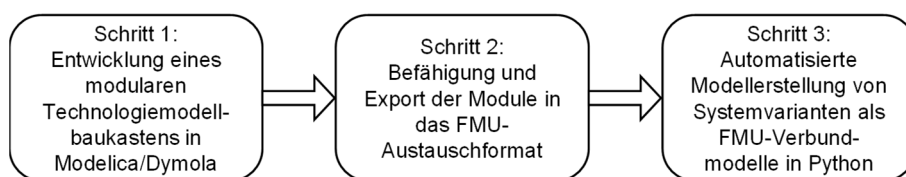


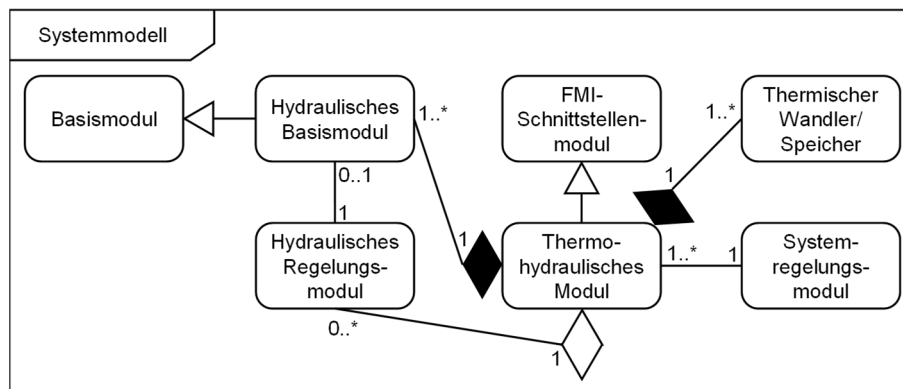
Abbildung 1: Schrittweises Vorgehen im entwickelten Ansatz

#### 3.1 Schritt 1: Entwicklung eines modularen Technologiemodellbaukastens in Modelica/Dymola

Den Ansatz von Flach et al. (2019) aufgreifend wurde ein Technologiemodellbaukasten zur Modellierung industrieller Heiz- und Kühlsysteme entwickelt. In Anlehnung an VDI 2073-1 (2014) sowie VDI 6018 (2018) enthält er Module aus den Funktionsbereichen *Erzeugung*, *Rückkühlung*, *Entkopplung*, *Nutzenübergabe* am Verbraucher und *Wärmerückgewinnung*. Es wurde auf die Modellbasis der *MSL* (Version 3.2.3) zurückgegriffen. Komponentenmodelle versorgungstechnischer Anlagen wurden aus der *ETAFactorySimulationLibrary* (Panten, 2019) verwendet und diese um eigens entwickelte kennfeldbasierte Pumpen- und Rohrmodellklassen erweitert.

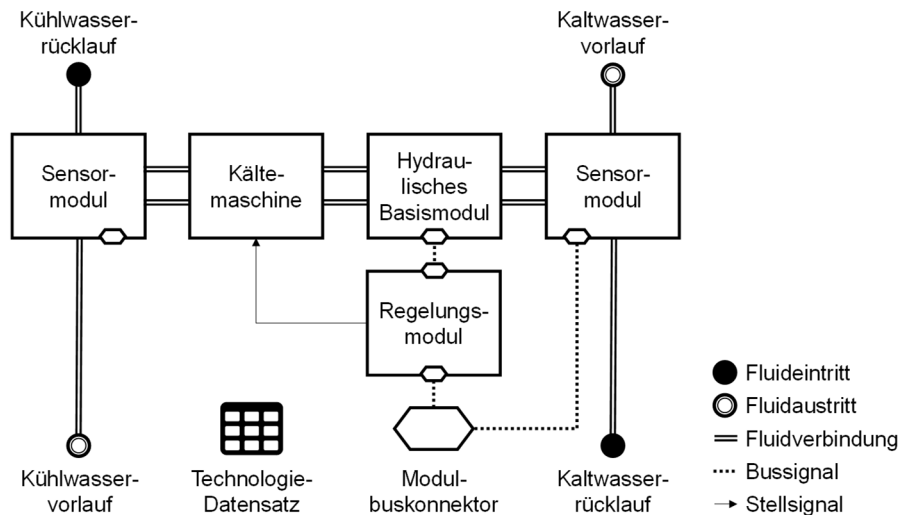
Abbildung 2 zeigt das UML-Klassendiagramm eines Systemmodells. Die kleinste strömungsführende Moduleinheit ist ein partielles *Basismodul*, das über je zwei Fluideingänge und -ausgänge, basierend auf *MSL FluidPorts*, verfügt. Die Anordnung der Fluideinlässe und -auslässe erfolgte so, dass die *Basismodule* die in

hydraulischen Verteilsystemen übliche Einteilung der Strömungsführung in Vorlauf (von Erzeugern zu Verbrauchern gerichtet) und Rücklauf (von Verbrauchern zu Erzeugern gerichtet) aufweisen. Das *Basismodul* ist eine Generalisierung des *hydraulischen Basismoduls*, welches neben Pumpen und Ventiltechnik ein Rohrmodell zur Berücksichtigung von Strömungswiderständen und Wärmeverlusten an die Umgebung enthält. Die Aktoren eines hydraulischen Basismoduls werden durch ein entsprechendes *hydraulisches Regelungsmodul* gesteuert. Hydraulische Basismodule und Regelungsmodule sind elementare Bestandteile eines *thermohydraulischen Moduls*, wobei letzteres aus mehreren dieser Klassen bestehen kann. Darüber hinaus werden darin Komponentenmodelle thermischer Wandler (Erzeuger oder Verbraucher) oder Speicher integriert. Die Regelung thermohydraulischer Module erfolgt über ein *Systemregelungsmodul*. Sofern die Erstellung des Systemmodells in einer softwareunabhängigen Umgebung erfolgen soll, erben thermohydraulische Module die Eigenschaften eines *FMI-Schnittstellenmoduls*, wodurch sie zum Export in das FMU-Modellaustauschformat befähigt werden.



**Abbildung 2:** Vereinfachtes UML-Klassendiagramm des entwickelten, Modelica-basierten Technologiemoellbaukastens

Abbildung 3 zeigt beispielhaft die schematische Modellansicht eines thermohydraulischen Moduls zur Kälteerzeugung. Es hat die Funktion eine gezielte Solltemperatur des Fluids im Kaltwasservorlauf einzustellen. Im Kern beinhaltet es ein Komponentenmodell einer Kompressionskältemaschine sowie ein hydraulisches Basismodul mit integrierter Pumpe und Rohrwiderständen. Die Instanzen der Kompressionskältemaschine sowie der Pumpe werden über vordefinierte Technologiedatensätze mit Herstellerdaten parametrisiert. Die hierfür eingeführten Parameter wurden auf die Modellebene des thermohydraulischen Moduls propagiert. Das Regelungsmodul übergibt Stellsignale an die Kältemaschine und an die Pumpe über ein Bussignal. Über ein weiteres Bussignal werden Sensorwerte vom Sensormodul im Kaltwasservorlauf übergeben.



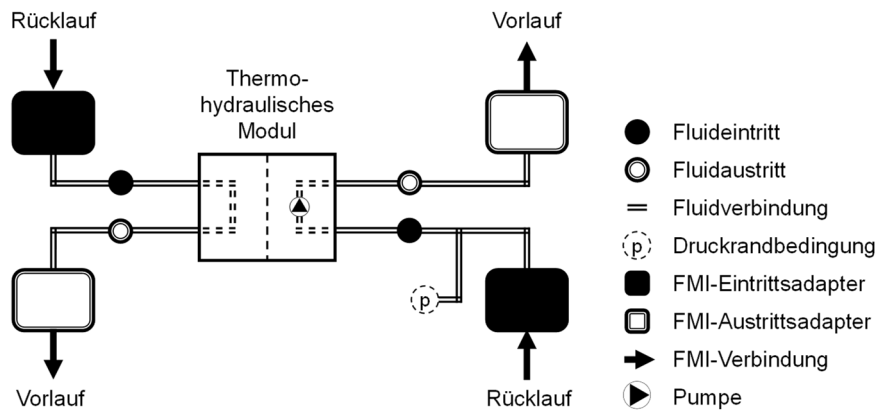
**Abbildung 3:** Schematische Ansicht eines thermohydraulischen Moduls zur Kälteerzeugung

### 3.2 Schritt 2: Befähigung und Export der Module in das FMU-Austauschformat

Im zweiten Schritt des Ansatzes erfolgt die Befähigung der Module zum optionalen Export in das FMU-Modellaustauschformat als Basis für die Python-basierte Simulation. FMU-Modelle können gemäß dem FMI-Standard 2 im Format CS zur gekoppelten Simulation oder Model Exchange (ME) zum reinen Modellaustausch exportiert werden. Die FMI-CS-Spezifikation bietet eine Modelldarstellung, bei der sowohl das Modell als auch ein Integrator innerhalb der FMI-CS gekapselt sind (Modelica Association, 2020). Im industriellen Anwendungskontext wird FMI-CS gegenüber FMI-ME eine größere Bedeutung zugeschrieben, unter anderem weil eine modellspezifische Adaptierung des Integrators bereits erfolgt ist (Ogata et al., 2014).

Auf der Modelica-Seite erfordert der Export als FMU die Einführung von Adapter-Modellen, welche akausale in kausale Signalflüsse transformieren (Hirano et al., 2015). Basierend auf den von Wetter et al. (2015) entwickelten FMI-ME-Adaptoren für Fluid-Konnektoren wurde ein FMI-Schnittstellenmodul entwickelt, das für den Export der thermohydraulischen Module als FMI-CS geeignet ist (Abb. 4). In FMI-CS fehlt grundsätzlich die Funktionalität zur direkten Ausgabe nach Veränderung von Eingangswerten ohne numerische Iteration, woraus sich Einschränkungen für die Berechnung stationärer Thermofluidströmungen in gekoppelten FMI-CS-Modellen ergeben (Wetter et al., 2015). Vereinfachend wurde daher angenommen, dass die Berechnung des Massenstroms am Ein- und Austritt eines Moduls ausschließlich von modulinternen Strömungswiderständen abhängt. Bei der Implementierung wurde in massenstromerzeugende und -empfangende Modulabschnitte unterschieden. Ein massenstromerzeugender Modulabschnitt enthält eine Strömungsmaschine und ein thermohydraulisches Rohrmodell; ein massenstromempfangendes Modul enthält ausschließlich ein thermohydraulisches Rohrmodell. Damit der durch die Strömungsmaschine erzeugte Massenstrom in

Abhängigkeit der Strömungswiderstände des massenstromerzeugenden Modulabschnitts berechnet werden kann, wurde eine Druckrandbedingung eingeführt.



**Abbildung 4:** FMI-Schnittstellenmodul mit einem integrierten thermohydraulischen Modul (linke Seite: massenstromempfangend; rechte Seite: massenstromerzeugend)

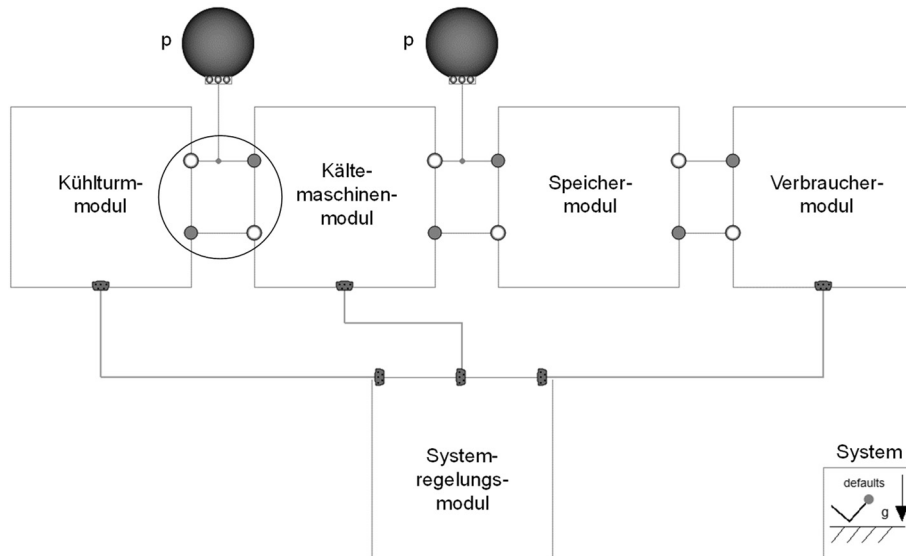
### 3.3 Schritt 3: Automatisierte Modellerstellung von Systemvarianten als FMU-Verbundmodelle in Python

Zur (teil-)automatisierten Modellerstellung wurde ein strukturbasierter Ansatz implementiert, dessen Ausgangspunkt Strukturdaten über das abzubildende System sind (Bergmann und Straßburger, 2020). Die Systemstruktur wird dabei in Anlehnung an den Standard *System Structure and Parameterization* (SSP) 1.0 beschrieben (Modelica Association, 2019). Sie ergibt sich durch physikalische und regelungstechnische Verbindungen zwischen den Moduleingängen und -ausgängen, welche in einem XML-Datenschema hinterlegt sind. Unter Verwendung der freien Python-Bibliothek *FMPy* (Version 0.2.27) wurde eine Funktion zur automatisierten Kopplung mehrerer FMU-CS-Modelle implementiert. Die entwickelte Funktion liest die Verbindungen gemäß XML-Datenschema aus und fügt die einzelnen Module iterativ zu einem FMU-Verbundmodell zusammen. Ein ähnliches Vorgehen wurde von Nouidui (2018) bei der Entwicklung einer Co-Simulationsplattform verfolgt.

## 4 Virtuelle Tests

Als Fallbeispiel dient ein für Betriebe der metallverarbeitenden Industrie repräsentatives zentrales Kälteversorgungssystem. Es beinhaltet ein Modul eines Kälteverbrauchers, eines thermischen Pufferspeichers zur hydraulischen Entkopplung, ein Kältemaschinenmodul zur Kälteerzeugung sowie ein Nasskühlturmmodul zu dessen Rückkühlung. In Abbildung 5 ist das entsprechende Modelica-Systemmodell schematisch dargestellt. Abgesehen von der Instanziierung thermohydraulischer Module wurden im Modell dort, wo hydraulisch geschlossene Kreise auftreten, vorgegebene Drücke aufgeprägt. Eine weitere Modellvariante

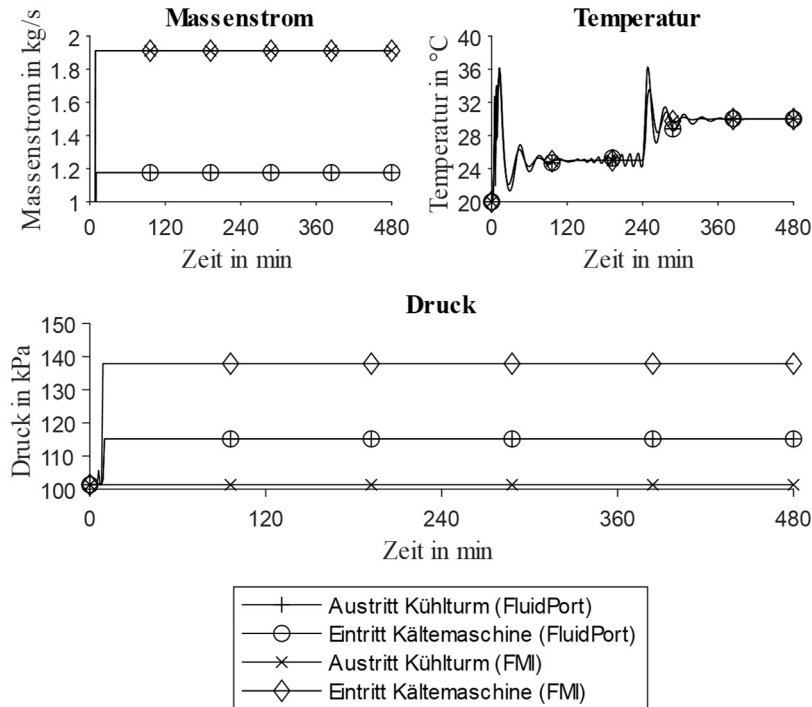
wurde unter Verwendung der in Schritt 2 vorgestellten FMI-Schnittstellenmodule erstellt.



**Abbildung 5:** Schematische, grafische Modellansicht des manuell erstellten Modelica-Systemmodells

Zur Validierung der FMI-Schnittstellenmodule wurden Simulationsläufe mit beiden Systemmodellen (*MSL FluidPorts* bzw. FMI-Schnittstellenmodule) durchgeführt. Abbildung 6 zeigt die Ergebniswerte für Druck, Massenstrom und Temperatur an den Modulkopplungsstellen zwischen Kühlturmmodul und Kältemaschinenmodul (siehe kreisförmige Markierung in Abb. 5). Bei der Berechnung des Massenstroms im Kühlturmmodul werden ausschließlich die modulinternen Strömungswiderstände berücksichtigt. Im Vergleich zu den *FluidPorts* stellt sich daher über die FMI-Schnittstellen ein höherer Massenstrom ein (der modellierte Strömungswiderstand im Kältemaschinenmodul ist ungleich 0). Im Druckverlauf zeigt sich, dass die Aus- und Eintrittsdrücke der Module durch Verwendung der FMI-CS-Schnittstellen nicht mit den Werten an den *FluidPorts* übereinstimmen. Der Druck am Eintritt des Kältemaschinenmoduls (FMI) errechnet sich aus dem vom Kühlturmmodul empfangenen Massenstrom und dem internen Strömungswiderstand des Kältemaschinenmoduls. Die Werte des Temperaturverlaufes unter Systemanregung weichen bei Verwendung der FMI-CS-Schnittstelle geringfügig von den Werten in den entsprechenden *MSL FluidPorts* ab, wobei die relative, mittlere quadratische Abweichung 0,25 % beträgt.

Die FMI-Schnittstellenmodule zeigen das erwartete Verhalten. Im Vergleich zu den *MSL FluidPorts* ergibt sich ein bleibender Fehler im Druckverlauf. Um diesen Fehler möglichst klein zu halten, müssen die dominierenden hydraulischen Widerstände in den massenstromerzeugenden Modulen berücksichtigt werden. Der Fehler verschwindet für den Fall, dass in einem massenstromempfangenden Modul kein Strömungswiderstand vorherrscht.



**Abbildung 6:** Bilanzierung zwischen Eintritt in das Modul zur Kälteerzeugung (Kältemaschine) und Austritt aus dem Modul zur Rückkühlung (Kühlturm)

## 5 Bewertung des Ansatzes

Der Hauptvorteil des im ersten Schritt entwickelten Technologiemoellbaukastens ergibt sich durch die Zeitersparnis für die Modellierung komplexer Systeme im Rahmen simulationsgestützter Planungsprozesse. Durch die Verwendung von Modulen müssen im Vergleich zur Modellierung auf Komponentenbasis deutlich weniger Verbindungen manuell gesetzt werden. Damit sinkt zugleich die Fehleranfälligkeit bei der Modellierung. Im Rahmen einer Vorplanung können somit schneller unterschiedliche Systemvarianten für weitere Analysen aufgebaut werden. Nachteilig ist, dass insbesondere die Modellierung der Regelung noch weitestgehend vom Anwender selbst implementiert werden muss.

Mit dem Export der Module in das softwareunabhängige FMU-Modellaustauschformat im zweiten Schritt wurde die Grundlage für eine (teil-)automatisierte Modellbildung geschaffen. Einschränkend wurde gezeigt, dass ein Export der entwickelten Modelica-Module in das FMU-Modellaustauschformat nicht in allen Fällen ohne Weiteres möglich ist und aus der CS bekannte numerische Herausforderungen mit sich bringen kann (siehe auch Andersson (2016)). In angrenzenden Untersuchungen werden alternative Möglichkeiten der (teil-)automatisierten Modellierung und Simulation ohne Verwendung der FMI-Technologie, z. B. unter Verwendung des Dymola-Python-Interface, betrachtet.



Weiterführend wurde im dritten Schritt des Ansatzes die (teil-)automatisierte Modellbildung von Systemvarianten mit einem strukturbasierten Ansatz implementiert. Die Simulation des erzeugten FMU-Verbundmodells erfolgt in einer Python-basierten CS. Damit besteht die Perspektive für die anwendungsfreundliche Gestaltung softwareunabhängiger Assistenzsysteme zur energieorientierten Planung industrieller Heiz- und Kühlsysteme.

## 6 Fazit und Ausblick

Im Beitrag wurde ein Ansatz zur Verringerung von Zeit und Aufwand für die Simulation in der Planung industrieller Heiz- und Kühlsysteme vorgestellt. Zum einen wurde dies durch einen Technologiemodellbaukasten zur modularen Systemmodellbildung erreicht. Zum anderen wurde ein *Proof of Concept* zur (teil-)automatisierten Modellerstellung industrieller Heiz- und Kühlsysteme in einer Python-basierten CS umgesetzt. Für künftige Arbeiten ist eine Integration der Funktionalitäten in ein Web-fähiges Planungstool sowie dessen Anwendung auf reale Planungsbeispiele vorgesehen. Damit sollen die Hemmnisse zur Nutzung der Simulationstechnologie im Kontext der energieorientierten Planung industrieller Heiz- und Kühlsysteme weiter reduziert werden.

## Danksagung

Der vorgestellte Ansatz entstand im Kopernikus-Projekt „SynErgie“ (Förderkennzeichen 03SFK3A0-2) unter Förderung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Modelle hydraulischer Basiskomponenten wurden im Projekt „ETA im Bestand“ (Förderkennzeichen 03EN2048A-I) unter Förderung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) entwickelt. Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung.

## Literatur

- Andersson, C.: Methods and Tools for Co-Simulation of Dynamic Systems with the Functional Mock-up Interface. Lund, Lund University, Academic Thesis, 2016.
- Bergmann, S.; Straßburger, S.: Automatische Modellgenerierung – Stand, Klassifizierung und ein Anwendungsbeispiel. In: Mayer, G.; Pöge, C.; Spieckermann, S.; Wenzel, S. (Hrsg.): Ablaufsimulation in der Automobilindustrie. Berlin, Heidelberg: Springer 2020, S. 333–347.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): Energieeffizienz in Zahlen. Entwicklungen und Trends in Deutschland 2019, 2019.
- Flum, D.: Eine Methode zur modellbasierten Planung energieoptimierter Kälte- und Wärmeversorgungssysteme in Produktionsbetrieben. Darmstadt, TU Darmstadt, Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW), Dissertation, 2021.
- Fowler, J.W.; Rose, O.: Grand Challenges in Modeling and Simulation of Complex Manufacturing Systems. SIMULATION 80 (2004) 9, S. 469–476.
- Fraunhofer Gesellschaft (Hrsg.): Energieeffizienz in der Produktion: Untersuchung zum Handlungs- und Forschungsbedarf. Unter Mitarbeit von Reimund

- Neugebauer, E. Westkämper, F. Klocke, A. Kuhn, M. Schenk, A. Michaelis et al., 2008, München.
- Hirano, Y.; Shimada, S.; Teraoka, Y.; Seya, O.; Ohsumi, Y.; Murakami, S.; Hirono, T.; Sekisue, T.: Initiatives for acausal model connection using FMI in JSAE. In: Proceedings of the 11th International Modelica Conference, Versailles, France, September 21-23, 2015, S. 795–801.
- Kurle, D.: Integrated planning of heat flows in production systems: Sustainable Production, Life Cycle Engineering and Management. Braunschweig, TU Braunschweig, Dissertation, 2018.
- Matthes, P.; Flach, M.; Schmied, S.; Teichmann, J.; Müller, D.; Glück, F.; Oppermann, J.; Mathis, P.; Knapp, T.; Kümpel, A.; Baranski, M.: Zukünftige hydraulische Systeme für die Verteilung von Wärme und Kälte in modernen neuen oder sanierten Gebäuden mit unterschiedlichen Abnehmern und Erzeugern. Gemeinschaftlicher Abschlussbericht über alle Teilprojekte. 2019.
- Modelica Association: System Structure and Parameterization 1.0, 2019.
- Modelica Association: Functional Mock-up Interface for Model Exchange and Co-Simulation 2.0.2, 2020.
- Müller, D.; Both, P.; Maile, T.; Wimmer, R.; Treeck, C.; Nytsch-Geusen, C.: EnEff-BIM: Abschlussbericht, 2017.
- Nouidui, T.S.; Coignard, J.; Gehbauer, C.; Wetter, M.; Joo, J.-Y.; Vrettos, E.: CyDER - An FMI-based Co-Simulation Platform for Distributed Energy Resources, 2018.
- Ogata, Y.; Loyer, B.; Viel, A.: New trends and methods for the co-simulation of strongly coupled systems using the Functional Mock-up Interface 2.0. In: JSAE Annual Congress, Yokohama, May 23, 2014.
- Panten, N.: Deep Reinforcement Learning zur Betriebsoptimierung hybrider industrieller Energienetze. Darmstadt, TU Darmstadt, Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW), Dissertation, 2019.
- Réhault, N.; Dang, M.; Mitterhofer, M.; Stratbücker, S.; Benndorf, G.: Planung, Auslegung und Betriebsoptimierung von energieeffizienten Neu- und Bestandsbauten durch Modellierung und Simulation auf Basis von Bauwerkinformationsmodellen (EnEff-BIM), 2017.
- Straßburger, S.; Seidel, H.; Schady, R.; Masik, S.: Werkzeuge und Trends der digitalen Fabrikplanung: Analyse der Ergebnisse einer Onlinebefragung. In: Wenzel, S. (Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik 2006. Erlangen: SCS Publ. House 2006.
- VDI 2073-1: Hydraulik in Anlagen der Technischen Gebäudeausrüstung. Hydraulische Schaltungen. Berlin: Beuth 2014.
- VDI 4499: Digitale Fabrik. Blatt 1 - Grundlagen. Berlin: Beuth 2008.
- VDI 6018: Kälteversorgung in der technischen Kälteversorgung in der technischen Gebäudeausrüstung Planung, Bau, Betrieb. Berlin: Beuth 2018.
- Wetter, M.; Fuchs, M.; Nouidui, T.S.: Design Choices for Thermofluid Flow Components and Systems that are Exported as Functional Mockup Units. In: Proceedings of the 11th International Modelica Conference, Versailles, France, September 21-23, 2015, S. 31–41.
- Wischhusen, S.: Dynamische Simulation zur Bewertung von komplexen Energiesystemen. Hamburg, TU Hamburg-Harburg, Dissertation, 2005.