

Jarvis – Ein verteilter Simulator für hoch aufgelöste Systeme des Energiesektors

Paul Kernstock¹, Dr. Peter Lorenzen², Philip Tillmann², Prof. Dr. Hans Schäfers¹

¹ Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

² Wärmewerk GmbH, Hamburg

Abstract

Heutige Anwendungsfälle der technischen Modellierung und Simulation für gekoppelte Energieversorgungssysteme, insbesondere Wärmeversorgungssysteme, stellen hohe Anforderungen an die Performanz von Simulatoren.

Dieses Paper stellt eine neue Architektur für die Modellierung und verteilte Simulation dieser technischen Systeme vor. Der hybride Ansatz kombiniert gleichungsbasierte und Objekt-orientierte Modellierung mit ereignisbasierter verteilter Simulation. Auf Grundlage der spezifischen Struktur eines Modells bietet der Ansatz die Möglichkeit, verteilbare und nicht verteilbare (monolithische) Teile zu separieren und die Berechnung damit effektiv auf Multicore-Rechner und Rechencluster zu verteilen und somit performante Berechnungen durchzuführen.

Das Paper stellt die Struktur der Architektur, die Funktionalitäten des Simulators sowie die informationstechnische Infrastruktur im Detail vor, die die verteilte Simulation ermöglichen. Anhand der Berechnung thermo-hydraulischer Modelle, wie sie für Wärmeversorgungsnetze genutzt werden, wird die verteilte Simulation mit dem beschriebenen Ansatz veranschaulicht und erklärt.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die technische Modellierung und insbesondere die dynamische thermo-hydraulische Simulation von Wärmeversorgungssystemen (WVS) erfüllt eine Reihe von Aufgaben bei der strategischen Planung, Betriebsplanung und im Betrieb dieser Systeme. Die zeitlich hoch aufgelöste Berechnung von Durchflüssen sowie von Temperatur- und Druckverteilungen ermöglicht die technische Bewertung von geplanten Wärmenetzen, Ausbauszenarien, der Integration von erneuerbaren Wärmeerzeugern, alternativen Betriebsweisen und Maßnahmen zur Steigerung der Betriebseffizienz etwa durch die Absenkung von Temperaturen. Die Modellierung und Simulation von Regelungskonzepten in Verbindung mit thermo-hydraulischen Modellen ermöglicht es zusätzlich, innovative Betriebsweisen zu untersuchen und zu bewerten, die eine bedarfsgerechte Versorgung und die Minimierung von Energieverlusten zum Ziel haben.

Neuere Entwicklungen der letzten Jahre nehmen für den Betrieb von WVS zusätzlich die Überwachung und Analyse von aktuellen Betriebszuständen in den Fokus. Häufig unter dem Schlagwort „Digitaler Zwilling“ und häufig auch im Zusammenhang mit Anwendungen des maschinellen Lernens werden Lösungen entwickelt, die es Betreibern ermöglichen sollen, in Echtzeit Messdaten sowie daraus abgeleitete, durch Berechnung, Simulation oder anderweitig maschinell erzeugte Daten eines WVS zu nutzen. Diese virtuellen Repräsentationen der betrieblichen Realität können als Datenplattform fungieren und darüber hinaus die Datengrundlage für Aufgaben der Betriebsplanung wie die Bewertung von geplanten Betriebsweisen oder die Betriebsüberwachung erfüllen. Viele der benötigten Anwendungsfälle können mit Hilfe von thermo-hydraulischer Simulation abgedeckt werden, sie erfordern allerdings Simulatoren, die in der Lage sind, in Echtzeit (oder schneller) Simulationsergebnisse zu erzeugen.

Die Größe und Komplexität von bestehenden und im Rahmen der Energiewende geplanten Wärmenetze erfordern weiterhin Modelle, die neben der zeitlichen Auflösung auch eine Vielzahl von physikalischen und regelungstechnischen Zusammenhängen abbilden können. Bestehende und geplante Wärmenetze insbesondere in Großstädten und Metropolregionen weisen häufig große und komplexe, oft zyklische Topologien auf und verbinden als hydraulische Systeme Wärmeversorger und Verbraucherstationen im drei- bzw. vier- oder fünfstelligen Bereich.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sind Simulationsarchitekturen nötig, die in der Lage sind, heute und in absehbarer Zukunft vorhandene Technologien und insbesondere Rechenressourcen möglichst effizient

zur Berechnung einzusetzen. In diesem Paper wird hierfür ein hybrider Gleichungs- und ereignisbasierter Ansatz für eine verteilte Simulationsarchitektur präsentiert, die die Anforderungen für eine generische, benutzerfreundliche technische Modellierung und hoch performante Simulation nicht nur von WVS, sondern (gekoppelten) Energieversorgungssystemen im allgemeinen erfüllen soll.

1.2 Überblick

Um die Grundlage und Motivation für die in diesem Paper zu beschreibende Simulationsarchitektur weiter zu vertiefen, soll im folgenden Abschnitt 2 detaillierter auf die Anforderungen an die thermo-hydraulische Simulation von WVS eingegangen werden.

In Abschnitt 3 soll der Formalismus dargestellt werden, mit dem die Architektur eine generische Modellierung von technischen Systemen ermöglicht und dabei zugleich die Verteilung der Berechnung während der Simulation bestimmt.

Wie die verteilte Berechnung von hydraulischen und thermischen Größen eines nach diesem Formalismus erstellten Modells funktioniert und wie die vorgestellte Architektur verteilbare und nicht verteilbare Berechnungen unterscheidet, soll in Abschnitt 4 beschrieben werden.

Abschnitt 5 stellt zuletzt die Software- und Hardware-Infrastruktur dar, aus denen das Gesamtsystem des Simulators besteht und bietet einen Überblick darüber, was der Betrieb der vorgestellten Architektur an Infrastruktur erforderlich macht.

2 Anforderungen aus der Simulation von Wärmeversorgungssystemen

Die technische Modellierung und Simulation von Wärmeversorgungssystemen, insbesondere von Wärmenetzen, stellt unter den anderen Sektoren der Energieversorgung eine besondere Herausforderung dar.

Dies liegt zunächst an den physikalischen Zusammenhängen, die in den Modellen abgebildet werden müssen, um die in Abschnitt 1.1 beschriebenen Erkenntnisse gewinnen zu können. Auf die hydraulische Berechnung von Massenstrom, Durchflussgeschwindigkeit und Druck und die thermische Bestimmung von Temperaturen oder Wärmeverlusten soll in Abschnitt 2.1 näher eingegangen werden. Weiterhin wird für einige Anwendungsfälle die Modellierung von Regelungsvorgängen bzw. -komponenten benötigt (s. Abschnitt 2.3).

Die Anwendungsfälle von technischer Modellierung und Simulation von WVS in der Planung und im Betrieb sind vielfältig. Die hydraulische und thermische Analyse von Betriebsszenarien kann die technische Umsetzbarkeit von Ausbauszenarien und die Versorgungssicherheit des gesamten Netzgebietes für Wetterlagen des gesamten Jahresverlaufs bewerten. Von diesen Berechnungen abgeleitet können Prognosen für Versorgungsengpässe oder die Lebensdauer von Komponenten erstellt werden. Mit Hilfe von hydraulischen Simulationen können weiterhin Erzeuger, Rohrabschnitte oder Pumpen dimensioniert werden und damit die Ergebnisse von vorangegangenen Planungsphasen bestätigt oder korrigiert werden.

Im Betrieb können Ursachen von Störungen oder von unvorhergesehener Unterversorgung identifiziert werden oder Handlungsalternativen (Änderungen im Erzeugerfahrplan oder in der Druckhaltung) in diesen Fällen vorab bewertet werden. In Kombination mit einer regelungstechnischen Modellierung können Betriebsszenarien detailliert analysiert werden und Anpassungen für einen möglichst effizienten Betrieb vorab erprobt werden. Zusätzlich ist eine performante thermo-hydraulische Simulation in der Lage, Betriebsgrößen eines Wärmenetzes zu berechnen, für die keine Messdaten vorliegen und damit eine umfassende Datengrundlage für nachgelagerte Analyseaufgaben erzeugen.

Neben den spezifischen Anforderungen für die Simulation von WVS sind allgemeine Anforderungen an die technische Modellierung und Simulation relevant, die in Abschnitt 2.5 beschrieben werden.

2.1 Physikalische Modellierung

Die hydraulische Modellierung von WVS basiert im allgemeinen auf der Anwendung der Navier-Stokes-Gleichung (Gleichung 1) für inkompressible Fluide [1].

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \mu \Delta \mathbf{v} + \mathbf{g} \quad (1)$$

Hierbei stellen ρ die (konstante) Dichte, \mathbf{v} den Geschwindigkeitsvektor (v_x, v_y, v_z), $\frac{\partial}{\partial t}$ das partielle Differenzial nach der Zeit, ∇ den Nabla-Operator, p den statischen Druck, μ die dynamische Viskosität, Δ den Laplace-Operator und g die Gravitationskonstante dar.

Die Modellierung des thermischen Verhaltens basiert auf der Erhaltung thermischer Energie für inkompressible Medien mit konstanter Wärmekapazität, gegeben in Gleichung 2.

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla T \right) = k \Delta T + Q \quad (2)$$

Hierbei stellen c_p die (konstante) spezifische Wärmekapazität, T die Temperatur, k die thermische Leitfähigkeit und Q den Wärmetransport über die Systemgrenze dar. Für das partielle Differenzial der Temperatur nach der Zeit $\frac{\partial T}{\partial t}$ gilt außerdem nach der Wärmeleitungsgleichung für homogene isotrope Medien (Gleichung 3)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \Delta T \quad (3)$$

wobei $a = \frac{k}{\rho c_p}$ die Temperaturleitfähigkeit darstellt.

Für die Anwendung dieser strömungsmechanischen und thermodynamischen Zusammenhänge auf Wärmenetze werden Netztopologien in der Regel in Form von Graphen modelliert, wobei lineare Rohrabschnitte als Kanten und Komponenten wie Verbindungsstücke, Pumpen, Erzeuger(zentralen) oder Verbraucherstationen als Knoten modelliert werden. Für die konkrete Anwendung der physikalischen Zusammenhänge und Gleichungen auf eine solche Netztopologie existieren zahlreiche Ansätze, die allgemein auf nicht-linearen partiellen Differentialgleichungssystemen beruhen (sog. „gleichungsbasierte Ansätze“) und die sich sowohl bezüglich ihrer Berücksichtigung zeitlicher Zusammenhänge und thermischer Ungleichgewichte als auch weiterer getroffener Vereinfachungen und Annahmen unterscheiden lassen [1].

2.2 Unterscheidungskriterien von Modellierungsansätzen

Die Berücksichtigung der zeitlichen Variabilität von physikalische Größen in den o.g. Zusammenhängen mit dynamischer Simulation (häufig auch „transiente Simulation“ genannt) ist allerdings von vordergründiger Bedeutung, da nur hierüber die Abbildung etwa von Speichereffekten und Wärmeverlusten mit hinreichender Genauigkeit möglich ist.

Kuntuarova et al. (2024) unterscheiden Modellierungsansätze für WVS hinsichtlich der gekoppelten oder separaten Berechnung des hydraulischen und thermischen Anteils, der Berücksichtigung von dynamischen (zeitlich variablen) Zusammenhängen, der angewandten „Methode“ sowie der Art der implementierten Regelungsstrategie, sofern vorhanden.

Während bei **gekoppelten** Methoden die Berechnung des hydraulischen und thermischen Anteils in einem Gesamtsystem geschieht, wird bei **entkoppelten** Ansätzen die thermische Berechnung der hydraulischen nachgelagert, was in einigen Fällen eine zusätzliche Iteration der Berechnung der beiden Domänen notwendig macht.

Bezüglich der Fähigkeit zur dynamischen Simulation werden hier drei Typen von Ansätzen unterschieden. Neben **dynamischen** Ansätzen (in manchen Kontexten auch **transient** genannt) existieren **stationäre** bzw. **quasi-stationäre** Ansätze, die sowohl die hydraulische als auch die thermische Dynamik vernachlässigen. Mit Hilfe dieser Ansätze werden physikalische Größen unter der Annahme stationärer Strömung berechnet, was die mathematische bzw. numerische Grundlage stark vereinfacht. So kann etwa unter der zusätzlichen Annahme laminarer Strömung die Navier-Stokes-Gleichung (Gleichung 1) zur – um einen Druckverlustterm erweiterten – Bernoulli-Gleichung (Gleichung 4) vereinfacht werden.

$$\frac{\rho}{2} v_1^2 + p_1 + \rho g z_1 = \frac{\rho}{2} v_2^2 + p_2 + \rho g z_2 + \Delta p_{12} \quad (4)$$

Der Druckverlustterm Δp_{12} wird dabei in der Regel mittels eines empirischen Ansatzes für einen Druckverlustbeiwert ζ mit $\Delta p_{12} = \zeta \frac{\rho v^2}{2g}$ angenähert.

Bei der Berechnung thermischer Größen fällt die Vernachlässigung von dynamischen Effekten ins Gewicht, da Wärmeverluste zwar in guter Näherung stationär modelliert werden können [2], ohne die Berücksichtigung der zeitlichen Zustände von vorangegangenen Simulationsschritten können allerdings Speichereffekte in thermischen Speichern sowie im Netz selbst nicht berücksichtigt werden.

Neben den stationären und dynamischen Ansätzen existieren außerdem sogenannte **quasi-dynamische** Ansätze, die eine dynamische Simulation der Hydraulik mit einer statischen thermischen Berechnung kombinieren.

2.3 Regelungstechnische Modellierung

Neben der Berechnung von physikalischen Größen durch dynamische oder stationäre Simulation ist die Bewertung von regelungstechnischen Ansätzen in WVS ein wichtiger Anwendungsfall in der Planung und im Betrieb. Neben der klassischen Regelung von einzelnen Erzeugern oder Erzeugerverbänden in Energiezentralen geraten auch übergeordnete Regelungsstrategien für den energieeffizienten und bedarfsoptimierten Einsatz von verteilter Wärmebereitstellung in Wärmnetzen in den Fokus. Dies liegt auch in der Notwendigkeit begründet, dass für die Integration von erneuerbaren Wärmequellen in bestehende Netze ein flexiblerer Betrieb eingeführt und niedrigere Betriebstemperaturen erreicht werden müssen [3].

2.4 Zeitliche und technische Auflösung

Weiterhin können viele der zu Beginn dieses Abschnittes beschriebenen Anwendungsfälle nur mit Modellen untersucht werden, die sowohl zeitlich als auch bezüglich des technischen Detailgrads hoch aufgelöst sind. Diese sehr großen Modelle werden nach dem aktuellen Stand der Technik in der Regel nach unterschiedlichen Ansätzen in Form von Gleichungssystemen mathematisch formuliert und diskret unter Verwendung geeigneter Algorithmen gelöst. Aufgrund der hohen Auflösung und der numerischen Natur der entsprechenden Ansätze kann es allerdings zu schlechter Performanz (langen Rechenzeiten) kommen. Im Falle einiger Ansätze (wo zum Beispiel die mathematische Formulierung einen nicht-konvexen Lösungsraum ergibt und bei ungünstig gewählten Anfangswerten oder Randbedingungen) kann es sogar zu numerischer Divergenz und damit zum Fehlschlag der Simulation kommen.

2.5 Modulare und kohärente Modellierung

Neben den spezifischen Anforderungen an die Modellierung und Simulation von WVS soll hier noch auf allgemeine Anforderungen und bewährte Praxis für die technische Modellierung eingegangen werden.

WVS sind als technische Systeme auf mehreren Ebenen aus technischen Komponenten zusammengesetzt, die ihrerseits aus Unterkomponenten bestehen können. Auf der untersten Ebene sind dabei Modelle von Komponenten, die nicht aus Unterkomponenten bestehen und die eine reine mathematische Modellrepräsentation der technischen Realität darstellen. In der Gesamtheit bildet eine solches zusammengesetztes technisches Modell einen hierarchischen Zusammenhang in Form eines Baums.

Gleichzeitig bestehen zwischen Komponenten desselben Typs Ähnlichkeiten in der Modellierung, die die Wiederverwendbarkeit von modellierten Zusammenhängen nahelegen, um die Modellierung des Gesamtsystems zu vereinfachen und Wiederholungen oder Inkonsistenzen zu vermeiden.

In der etablierten Modellierungssprache *Modelica* etwa sind diese Aspekte berücksichtigt, indem Komponententypen als „Modelle“ in einer Objekt-orientierten Vererbungshierarchie zueinander in Beziehung gebracht werden können. Außerdem können Modelle in einem hierarchischen Baum von Subsystemen mit Hilfe von Konnektoren und Verbindungen zusammengesetzt werden. Modelle (Komponententypen) können als Komponenten instanziiert werden und mit Hilfe von Parametern individuell mit Randbedingungen versehen werden.

Um aus vorhandenen Modellen mit unterschiedlichen Parametersätzen wiederverwendbare Simulationen erzeugen zu können, sind darüber hinaus Implementierungen von Szenarien hilfreich. Sie umfassen die Gesamtheit aller als Parameter vergebenen Anfangs- und Randbedingungen eines Gesamtmodells und können ebenfalls hierarchisch strukturiert sein. Somit ermöglichen sie Modularität und Kohärenz auf der Parameter-Ebene und erleichtern die Fallunterscheidung separater Simulationen desselben Modells bis hin zu automatisierten Sensitivitätsanalysen.

3 Modellierung zur verteilten Simulation

An der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg ist im Rahmen von Forschungsprojekten seit 2017 ein Simulator entwickelt worden, mit dem Ziel, die beschriebenen Anforderungen, insbesondere an die Berechnungsperformanz, möglichst gut zu erfüllen. Die entwickelte Modellierungs- und Simulationsarchitektur stellt einen hybriden Ansatz dar, der gleichungsbasierte Modellierung mit einem ereignisbasierten, prozeduralen Ansatz kombiniert um so eine effektive verteilte dynamische Berechnung von thermo-hydraulischen Modellen sowie Modellen von Regelungskomponenten zu ermöglichen. Bevor das technische Prinzip der Simulationsarchitektur und die verteilte Berechnung von thermo-hydraulischen Modellen erläutert werden kann (s. Abschnitt 4), soll in diesem Abschnitt zunächst die formale Struktur der Modellierung dargestellt werden.

Die Erstellung und Bearbeitung von Modellen ist von der grafischen Modellierungsebene für die Modellierungssprache *Modelica* von *OpenModelica* [4] sowie der Simulationssoftware *Simulink* inspiriert und geschieht in **Projekten**, die modular aus Instanzen von **Komponententypen**, sogenannten **Komponenten** zusammengesetzt werden. Wie in Abbildung 1 gezeigt, verfügen Komponenten – wie in *Modelica* – über **Konnektoren**, mit deren Hilfe Komponenten über **Verbindungen** miteinander verbunden werden können. Verbindungen sind Null-dimensional und ermöglichen den Austausch von Outputs bzw. Inputs für die Berechnung zwischen den Komponenten. Auf der informationstechnischen Ebene sind sie in der Tat Kommunikationsschnittstellen, die die Verteilung der Berechnung einzelner Komponenten ermöglichen. Für Konnektoren sind Typen (**Konnektortypen**) spezifiziert, die mögliche Inputs und Outputs als physikalische Größen definieren, die über die Konnektoren ausgetauscht werden können. Zusätzlich sind Konnektoren in sogenannten **Arrays** desselben Typs angeordnet, die es ermöglichen, einzelne Komponenten mit unterschiedlichen Anzahlen von Konnektoren in einem Array zu instanziiieren.

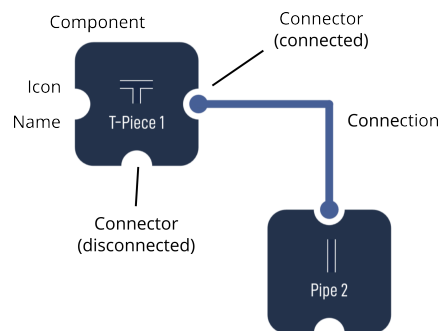


Abbildung 1: Grafische Modellierung von Projekten mit Komponenten und Verbindungen

Die Strukturelemente von Komponententypen sind neben Konnektoren und Konnektor-Arrays Parameter, Methoden, Inputs und Outputs.

Über **Parameter** können für einzelne Komponenten-Instanzen Randbedingungen oder Anfangswerte für die Simulation vorgegeben werden. Sie definieren neben einem Namen die physikalische Größe und einen einfachen numerischen Datentyp und einen optionalen Vorgabewert.

In **Methoden** wird die mathematische Modellierung eines Komponentenmodells umgesetzt. Eine Komponente kann über mehrere Methoden verfügen, die voneinander unabhängige physikalische Zusammenhänge implementieren können, so kann beispielsweise die Berechnung des Druckverlusts in einer durchströmten Komponente separat zur Berechnung von thermischen Verlusten und des Temperaturprofils geschehen.

Methoden spezifizieren wiederum **Inputs**, die sie zur Berechnung benötigen sowie **Outputs**, die sie erzeugen. Sowohl Inputs als auch Outputs repräsentieren analog zu Parametern physikalische Größen und numerische Datentypen. Inputs können entweder intern mit Outputs vorhandener Methoden oder mit Schnittstellen vorhandener Konnektoren verbunden werden, um Werte von externen verbundenen Komponenten zu beziehen. Auf dieselbe Weise können Outputs mit Konnektor-Schnittstellen verbunden werden, um Ergebnisse der Methoden an verbundene Komponenten weiter zu geben.

Innerhalb einer Komponente werden das Empfangen von Inputs, die Berechnung von Methoden sowie das Versenden von Outputs nebenläufig und ereignisbasiert in sogenannten **Prozessoren** ausgeführt. Sobald ein Prozessor über das verteilte System alle erwarteten Daten zur Verarbeitung erhalten hat, verarbeitet er diese – ein Methoden-Prozessor würde beispielsweise die prozedurale Berechnung der hinterlegten Zusammenhänge starten – und versendet anschließend erzeugte Daten an verbundene Prozessoren.

Die interne Struktur eines Komponententyps stellt schematisch und beispielhaft für einen Komponententyp mit zwei Konnektor-Arrays, und zwei Methoden Abbildung 2 dar.

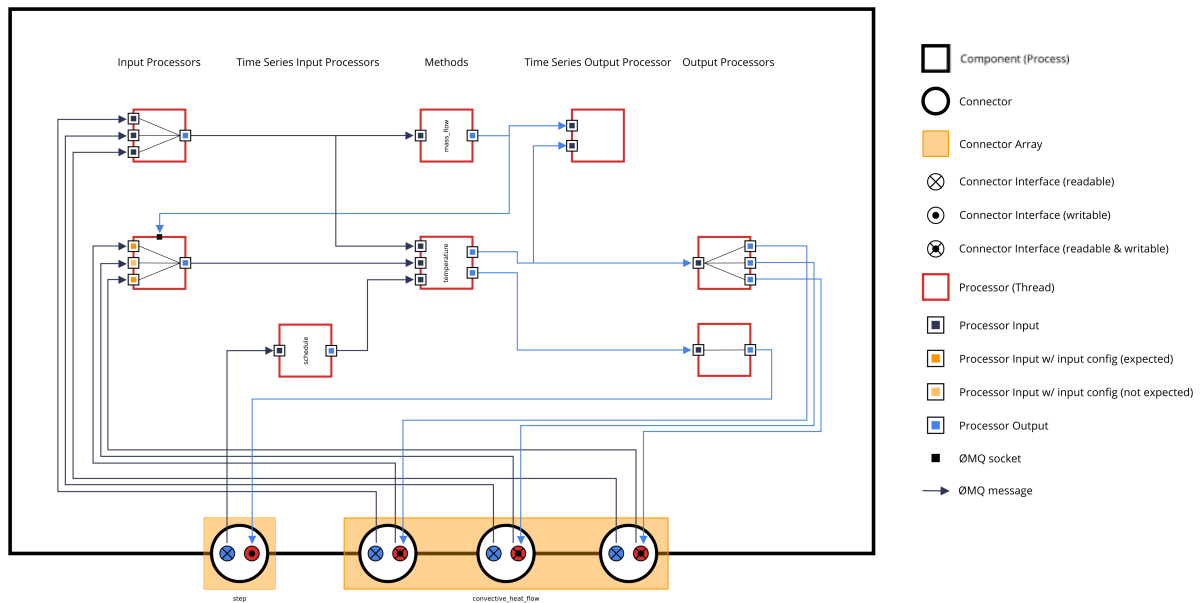


Abbildung 2: Interne Struktur eines Komponententypen

Als zusätzliches Strukturelement für die Modellierung auf Projektebene bieten **Subsysteme** die Möglichkeit zu einer hierarchischen Verkapselung von Komponenten (und Subsystemen). Bei der Modellierung werden nicht verbundene Konnektoren innerhalb eines Subsystems als Konnektoren des Subsystems auf der darüber liegenden Ebene (als Subsystem-Konnektoren) zur Verfügung gestellt. Dies ermöglicht die Zuordnung und Verschachtelung von Komponenten in Baugruppen und eine übersichtliche Modellierung von Projekten.

Im Zuge der der Forschungsprojekte „Smart Heat Grid Hamburg“ [5] und „Reallabor IW₃“ und auf Grundlage dieses Modellierungsansatzes ist eine umfassende Bibliothek von Komponententypen für die Modellierung von WVS entstanden [6].

4 Verteilte thermo-hydraulische Simulation

Bei einer verteilten, ereignisbasierten Simulation von Modellen nach dem in Abschnitt 3 beschriebenen Ansatz muss beachtet werden, dass während einige Zusammenhänge mit gegebenen Eingangsdaten lokal für einzelne Komponenten berechnet werden können, andere, insbesondere physikalische Zusammenhänge nur unter Berücksichtigung der Zustände mehrerer verbundener Komponenten möglich sind. Im Kontext verteilter Systeme werden diese nicht verteilbaren Anteile einer Berechnung „monolithisch“ genannt (Monolith aus dem altgriechischen für „einheitlicher Stein“).

Zu diesen monolithischen Anteilen von verteilbaren Modellberechnungen zählt insbesondere auch die Hydraulik eines aus hydraulischen Komponentenmodellen zusammengesetzten Gesamtsystems. Analog müssen elektrische Systeme aus einzelnen Komponenten wie Schaltkreise oder Netze monolithisch berechnet werden. Eine weitere monolithische Aufgabe fällt der Zeitschrittkoordination in einem verteilten Simulator zu, die sicherstellen muss, dass alle verteilten Elemente zu einem diskreten Zeitschritt die korrekten Eingangsdaten sowie die Information über die zeitliche Schrittweite erhalten.

Zu diesem Zweck bietet die verteilte Architektur Monolithen als eigenständige nebenläufige Instanzen, die auf derselben Hierarchieebene wie Komponenten angesiedelt sind und ebenfalls ereignisbasiert benötigte Inputs von verbundenen Komponenten erwarten und berechnete Outputs an diese kommunizieren (s. Abbildung 3).

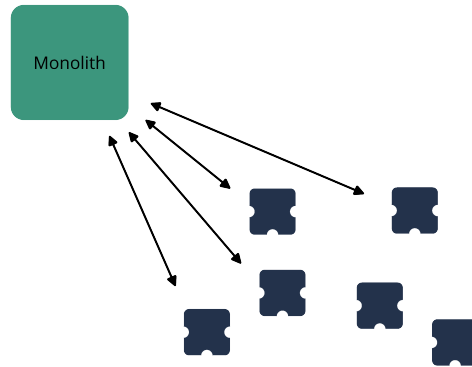


Abbildung 3: Datenkommunikation zwischen Monolithen und Komponenten

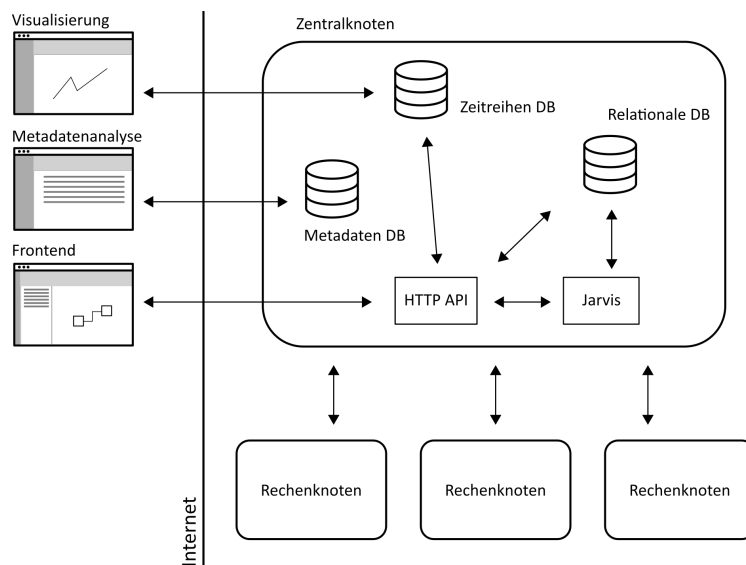
Anders jedoch als bei der Erstellung von Modellen aus Komponenten müssen Monolithen nicht explizit instanziiert werden, sondern sind durch die verwendeten Modelle implizit notwendig und können daher von der Architektur automatisiert erzeugt werden. Die Instanziierung von Monolithen und die Verbindung mit assoziierten Komponenten geschieht daher im Hintergrund.

Für die verteilte thermo-hydraulische Simulation wird die Berechnung des hydraulischen Anteils von einem dedizierten Monolithen übernommen, der bei Anwesenheit von hydraulischen Komponentenmodellen erzeugt wird. In der Initialisierungsphase einer Simulation erzeugt der Monolith auf Grundlage der Verbindungen der hydraulischen Komponenten eine Graphen-Repräsentation des Systems und erstellt daraus eine Inzidenzmatrix und ein nicht-lineares Gleichungssystem für die Berechnung der hydraulischen Größen. Während der Simulation wird in jedem diskreten Zeitschritt und auf Grundlage der Strömungsgrößen des vorherigen Zeitschritts das Gleichungssystem mit einem Solver gelöst. Die berechneten hydraulischen Größen werden anschließend an die Komponenten kommuniziert, die wiederum auf Grundlage dieser Inputs thermische Prozesse oder weitere modellierte Zusammenhänge berechnen können. Hängen aufgrund der Modellierung Methoden nicht von hydraulischen Zuständen ab, können diese gleich zu Beginn eines Zeitschritts verteilt berechnet werden.

Dieses Prinzip ermöglicht eine stark parallelisierte Berechnung der Simulation eines aus Komponenten zusammengesetzten Modells. Zugleich hängt allerdings der Grad der Verteilbarkeit mit der konkreten Modellierung innerhalb der Komponentenmodelle zusammen. Bei der Modellierung von Komponententypen muss daher darauf geachtet werden, dass durch eine geeignete Wahl von Methoden, Inputs, Outputs und der Beziehung zwischen diesen, die nebenläufige Berechnung überhaupt ermöglicht wird. Komponenten etwa mit einer oder wenigen (monolithischen) Methoden zur Berechnung aller Zustände oder starke interne Abhängigkeiten von Outputs und Inputs untereinander verhindern effektiv die Verteilbarkeit der lokalen Berechnung.

5 Infrastruktur

Die Simulationsarchitektur besteht aus mehreren Ebenen, auf denen die Verteilung der Berechnungsaufgaben stattfindet und deren eigene Terminologie im Folgenden erläutert werden soll. Die oberste Ebene, und damit die gesamte Infrastruktur des Simulators zeigt Abbildung 4.



Database icon made by Smashicons from www.flaticon.com

Abbildung 4: Die Jarvis Infrastruktur

Knoten (engl. *nodes*) sind in diesem Zusammenhang physikalische oder virtuelle Rechner in einem Netzwerk, die die Hardware-Infrastruktur für die verteilte Simulation darstellen. Diese Ebene ermöglicht es, sehr große Modelle auf einem verteilten Rechnernetz oder einem HPC-Cluster zu berechnen. **Rechenknoten** sind dabei für die Durchführung der Berechnung zuständig und daher muss für die Berechnung notwendigerweise mindestens ein Rechenknoten vorhanden sein, der sämtliche Aufgaben der Simulation übernimmt. Daneben können Knoten als **Koordinierungsknoten** in die Netzwerk-Topologie eingeführt werden, die die Verteilung von Simulationen auf den Rechenknoten sowie die Bereitstellung von Benutzeroberflächen und Daten übernehmen. In der Regel ist ein zentraler Koordinierungsknoten sinnvoll, auf dem sämtliche Dateninfrastruktur sowie der zentrale Koordinierungsprozess installiert ist.

Die Daten- und Visualisierungs-Infrastruktur besteht aus drei Datenbanken – einer relationalen Datenbank für sämtliche Modell- und Metadaten, einer dedizierten Datenbank für Zeitreihendaten und einer optionalen Dokumentendatenbank für sämtliche Metadaten der laufenden Prozesse (wie z. B. Logging-Daten) sowie einem optionalen Visualisierungsdienst.

Als Programmier-Schnittstelle für die Modellierung und Simulation dient eine HTTP-API die in der Regel auf dem zentralen Koordinierungsknoten installiert ist. Über diese Schnittstelle wird die Web-basierte Benutzeroberfläche („Frontend“) mit dem Simulationsbackend verbunden. Weiterhin können darüber automatisierte Aufgaben wie die Überwachung von Langzeitsimulationen oder die Kopplung mit externen Modellierung- oder Simulationswerkzeugen realisiert werden. Insbesondere ist über die Schnittstelle der Einsatz des Simulators als reines Simulationsbackend möglich.

Als Benutzeroberfläche dient vor allem das Frontend, über das Modelle bearbeitet werden können. Die Steuerung von Simulationen ist zur Zeit der Veröffentlichung dieser Arbeit noch nicht umgesetzt. Um eine vollumfängliche Bedienung des Simulators über das Frontend zu ermöglichen, ist die Funktionalität der Simulationskontrolle dort vorgesehen. Weitere Benutzeroberflächen stellen die Visualisierung von Simulationsdaten sowie die der Metadaten dar. Alle Benutzeroberflächen sind über ein IP-Netzwerk bzw. das Internet in einem geeigneten Browser bedienbar.

Zur Beschreibung der Simulationsarchitektur im engeren Sinne soll sich nun auf die Funktion der **Koordinierungsprozesse**, die auf Knoten installiert werden können, sowie der **Simulationsprozesse**, die die Berechnung von Komponentenmethoden und monolithischen Aufgaben übernehmen, konzentriert werden. Die Verteilung dieser Prozesse zeigt, exemplarisch für eine Knotentopologie mit einem zentralen Koordinierungsknoten und zwei Rechenknoten in einem kleinen HPC-Cluster, Abbildung 5.

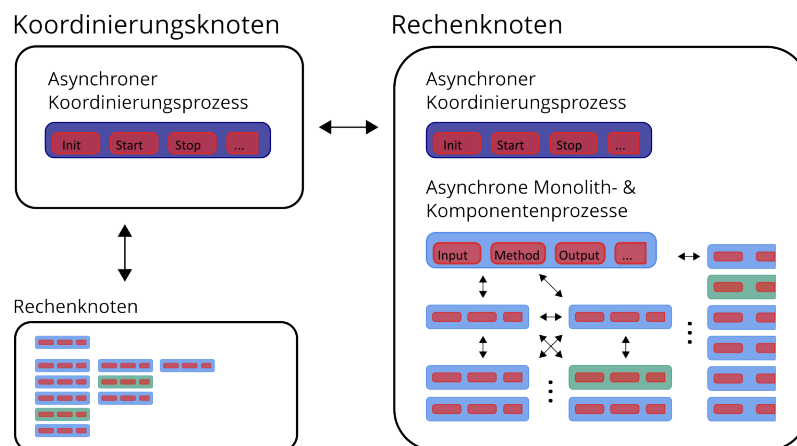


Abbildung 5: Die Jarvis Infrastruktur

Im Grundzustand (ohne laufende Simulationen) sind auf einem Koordinierungsknoten sowie auf jedem Rechenknoten Koordinierungsprozesse vorhanden, die die Kontrolle über die Instanziierung von Komponenten und Monolithen sowie die Initialisierung, den Start und die Beendigung von Simulationen haben. Diese Prozesse sind in sich nebenläufig (asynchron) um Anfragen vom Frontend über die Programmierschnittstelle zum Start, Status oder Abbruch einer Simulation sofort verarbeiten zu können.

Beim Start einer Simulation werden zunächst Komponenten und Monolithen eines Projektes in Form von Prozessen instanziiert („Instanziierung“). Nach der vollständigen Instanziierung erfolgt die Initialisierung der Simulation in der die Kommunikationsschnittstellen von Komponenten und Monolithen miteinander verbunden werden und wo initiale Berechnungen (z. B. die Bestimmung von Anfangswerten) in Modellen und Komponenten stattfinden können. Nach der vollständigen Rückmeldung aller Prozesse wird die Simulation über einen Multicast-Trigger final angestoßen.

Nach Beendigung der Berechnung des letzten Zeitschritts melden Komponenten und Monolithen dies an den jeweiligen Koordinierungsprozess, der nach der letzten eingegangenen Meldung die Beendigung der Simulation an den Koordinierungsknoten weitergibt und alle Simulationsprozesse beendet. Zum vorzeitigen Abbruch einer Simulation verfügen sämtliche Prozesse über eine nebenläufige Instanz, die eine schnelle Beendigung der aktuellen Berechnung ermöglicht.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde eine verteilte Simulator-Architektur für Wärmeversorgungssysteme und -komponenten im speziellen und technische Modelle (z. B. von Energieversorgungssystemen) vorgestellt. Die Implementierung der Architektur *Jarvis* wurde von der Hochschule für Angewandte Wissenschaften 2025 unter einer freien Lizenz veröffentlicht [7].

Die Architektur ermöglicht neben einer benutzerfreundlichen Modellierung und modernen Bedienoberfläche insbesondere eine hochgradig verteilte Berechnung von technischen Modellen und damit eine performante Simulation von Szenarien gekoppelter Energiesysteme auf verteilten Multi-Core-Rechnersystemen. Wie gezeigt wurde, ist die Architektur durch eine tiefgreifende Nebenläufigkeit seiner Prozesse und Unterprozesse in der Lage, die Berechnung geeigneter Modelle von technischen Systemen effizient auf vorhandene Recheninfrastruktur zu verteilen und damit hoch performant zu berechnen. Die Verteilbarkeit und damit die tatsächliche Performanz ist allerdings von der Strukturierung der Modelle, sowohl innerhalb der Modellierung einzelner Komponenten als auch in der Zusammensetzung von Gesamtmodellen aus Komponenten abhängig.

Während die Verteilbarkeit etablierter Ansätze darauf basiert, die mathematische Repräsentation von technischen Modellen in Form von (großen) Gleichungssystemen mit den Methoden geeigneter Solver zur Berechnungszeit zu verteilen, ermöglicht der vorgestellte Ansatz die gezielte und frühzeitige Verteilung mittels

Modellierung. Durch die Isolierung von monolithischen Anteilen können diese wiederum separat und möglichst effizient gelöst werden.

Der Ansatz und seine Implementierung wurden in angewandten Forschungs- und Entwicklungsprojekten der HAW Hamburg in den letzten acht Jahren umfassend erprobt. So konnte etwa eine gekoppelte Langzeitberechnung in Echtzeit von thermo-hydraulischen Zuständen eines Netzmodells in Hamburg auf Grundlage von Messdaten durchgeführt werden [5, S. 180] und auch Simulationen von großen Netzmodellen zeigte Berechnungszeiten, die Echtzeitsimulationen mit Zeitschrittweiten von Sekunden und darunter ermöglichen. Während die bisherige Erprobung vielversprechende Ergebnisse bezüglich der Performanz des Ansatzes zeigte, war im Rahmen bisheriger Projekte noch nicht möglich, diese systematisch zu bewerten oder zu quantifizieren. Die wissenschaftlich fundierte und vergleichbare Bewertung der Rechenperformanz sind als prioritärer Bestandteil in der künftigen Entwicklung des Simulators vorgesehen.

Nachfolgend auf die jüngste Veröffentlichung soll der Simulator der Forschungs- und Entwicklungsgemeinschaft sowie potenziellen Anwender:innen aus der Praxis vorgestellt und dabei mögliche Anwendungsfälle identifiziert werden. Diese Anwendungsfälle sollen gleichzeitig die Finanzierung für geplante Weiterentwicklungen sichern, die in einer Roadmap veröffentlicht wurden [7, Abschn. „Roadmap“].

7 Abkürzungen

API	Programmierschnittstelle, engl. <i>application programming interface</i>	HTTP	Hypertext Transfer Protocol
HPC	Hochleistungsrechner, engl. <i>high-performance computing</i>	WVS	Wärmeversorgungssystem

Bibliografie

- [1] S. Kuntuarova, T. Lickleder, T. Huynh, D. Zinsmeister, T. Hamacher, und V. Perić, „Design and simulation of district heating networks: A review of modeling approaches and tools“, *Energy*, Bd. 305, S. 132189, Okt. 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.132189.
- [2] J. Westphal, J. Brunnemann, und A. Speerforck, „Enabling the dynamic simulation of an unaggregated, meshed district heating network with several thousand substations“, *Energy*, Bd. 322, S. 135434, Mai 2025, doi: 10.1016/j.energy.2025.135434.
- [3] P. Lorenzen, „A Comprehensive Framework and Associated Methodology for the Design, Operative Planning, and Operation of District Heating Systems to Facilitate the Transition Towards a Fully Renewable Heat Supply“, Tesis doctoral, 2022. doi: 10.4995/Thesis/10251/185882.
- [4] P. Fritzson u. a., „The OpenModelica Integrated Environment for Modeling, Simulation, and Model-Based Development“, *Modeling, Identification and Control: A Norwegian Research Bulletin*, Bd. 41, Nr. 4, S. 241–295, 2020, doi: 10.4173/mic.2020.4.1.
- [5] P. Lorenzen u. a., „Smart Heat Grid Hamburg : Abschlussbericht : Projektlaufzeit: 1.1.2017-31.12.2021“, 2022. doi: 10.2314/KXP:1827569859.
- [6] P. Tillmann u. a., „The Jarvis Component Standard Library (CSL)“. Zugegriffen: 14. Januar 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://gitlab.com/jarvis-simulation/jarvis-csl>
- [7] P. Kernstock u. a., „Jarvis – The distributed technical simulator for large (and small) technical systems“. Zugegriffen: 14. Januar 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://gitlab.com/jarvis-simulation/jarvis>