

---

ENTWICKLUNG DER KOPPLUNGSTECHNOLOGIE VON KOMPLEXMODELLEN  
FÜR BAUTEIL-, RAUM- UND GEBÄUDESIMULATION MIT  
MODELICA-BASIERTEN ANLAGEN-, REGULINGS- UND NUTZERMODELLEN  
*Abschlussbericht*

Andreas Nicolai, Anne Paepcke

`andreas.nicolai@tu-dresden.de`

14. August 2018

<b>Zuwendungsempfänger</b>	Technische Universität Dresden, Fakultät Architektur, Institut für Bauklimatik
<b>Förderkennzeichen</b>	03ET1215A
<b>Vorhabensbezeichnung</b>	Entwicklung der Kopplungstechnologie von Komplexmodellen für Bauteil-, Raum- und Gebäudesimulation mit Modelica-basierten Anlagen-, Regelungs- und Nutzermodellen
<b>Laufzeit des Vorhabens</b>	1.10.2013 - 30.9.2016 (Verlängert bis 31.12.2017)

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Projektüberblick</b>	<b>3</b>
1.1	Hintergrund und Motivation . . . . .	3
1.2	Kurzüberblick Functional Mockup Interface (FMI) . . . . .	4
1.3	Ausgangspunkt der Projektarbeit . . . . .	4
1.4	Zielsetzung . . . . .	4
1.5	Wichtigste wissenschaftliche und technische Ergebnisse . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Arbeitspakete und Ergebnisberichte</b>	<b>5</b>
2.1	Mathematische Charakterisierung der Teilmodelle . . . . .	5
2.2	Mathematische Algorithmen zur Kopplung großer Simulationsmodelle . . . . .	6
2.3	Entwicklung der Serialisierungstechnologie . . . . .	6
2.4	Implementierung und Test der FMU-Schnittstelle (Export) . . . . .	7
2.5	Definition der physikalischen Kopplungsschnittstelle zwischen Gebäude und Anlage in verschiedenen Komplexitätsstufen je nach Planungsaufgabe . . . . .	8
2.6	Erweiterung der numerischen Rechenkerne in THERAKLES und NANDRAD, sodass erweiterte FMI Funktionalitäten (Rücksetzen, Iteration über Kommunikationsintervalle) unterstützt werden können . . . . .	9
2.7	Spezifikation der Toolkopplung und der Parametrisierung verschiedener gekoppelter FMUs . . . . .	9
2.8	Entwicklung und Implementierung eines OpenSource-Co-Simulationsmasters zur Durchführung der gekoppelten Simulation unter Verwendung neuer Kopplungsalgorithmen . . . . .	10
2.9	Erarbeitung eines Arbeitsablaufs für die Erstellung einer gekoppelten Simulation aus Gebäudemodell und Anlagenmodell und Entwicklung einer Verknüpfungssystematik mit Teilautomatisierung . . . . .	11
2.10	Mitarbeit im Annex 60 Expertengremium zur Entwicklung von standardisierten Konventionen für die FMI-Kopplung und Erarbeitung von Verbesserung-/Erweiterungsvorschlägen für die FMI-Standardisierungsgruppe . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>12</b>
	<b>Literatur</b>	<b>13</b>

# 1 Projektüberblick

## 1.1 Hintergrund und Motivation

Primäre Motivation des *EnTool:CoSim* Projekts war die Schaffung besserer Planungswerkzeuge im Bereich der energetischen Gebäudeplanung und -optimierung. Es existieren bereits viele Planungswerkzeuge, auch Simulationsprogramme, für viele unterschiedliche Aspekte der Gebäudeplanung. In unserem Fachgebiet betrifft das Werkzeuge für die Bewertung der hygrothermischen Bauphysik einschließlich der Berücksichtigung der solaren Einstrahlung, für den Entwurf von Energiekonzepten und für die Detailplanung von Anlagen- und Regelungssystemen.

Die teilweise langjährig entwickelten Programme haben zumeist eine konkrete Zielgruppe von Fachplanern und Ingenieuren und haben einen entsprechendem Normenhintergrund und mathematisches Formelgerüst. Die jeweils anderen Aspekte anderer Fachgebiete werden in solchen traditionellen Simulationsprogrammen meist nur vereinfachend abgeschätzt. Als konkretes Beispiel wäre die Anlagenplanung zu nennen: Hierbei wird ein Lastprofil für einen bestimmten Gebäudetyp vorausgesetzt und dann erfolgt die davon unabhängige Auslegung der Versorgungssysteme. Allerdings wird dabei weder die Rückwirkung des Gebäudes auf die Anlage berücksichtigt, noch können dominierende dynamische Effekte eines Gebäudes, z.B. Aufheizdynamik oder Wärmekapazitäten zur passiven Kühlung einfließen. Damit werden Optimierungspotentiale verschenkt.

Im Bereich der Hochschulforschung sind bereits erste Anwendungen für die fachbereichsübergreifenden Planung entstanden, jedoch haben diese zumeist einen zu großen Abstand zur Planungspraxis und sind nicht produktiv einsetzbar. Vielversprechend ist in diesem Zusammenhang die Kopplung von einzelnen, unabhängig entwickelten Simulationsprogrammen und Modellen.

Daher setzt das Projekt *EnTool:CoSim* zur Unterstützung und Intensivierung des Wissenstransfers aus der Forschung in die Baupraxis auf die Kopplung von Simulationswerkzeugen durch Co-Simulation und Model-Exchange. Durch Kopplung können komplexe Modelle, welche bislang fast ausschließlich in der Forschungswelt verwendet wurden, mit Erfolg in die Praxis überführt werden. Co-Simulation (bzw. Model-Exchange) erlaubt die Kopplung von Modellen aus verschiedenen Bibliotheken, z.B. Modelle für Bauteil-, Raum- und Gebäudesimulation mit Modellen detaillierter Anlagen- und Regelungstechnik. Diese Art der Kopplung wäre in einem einzigen Modell technisch extrem schwierig zu realisieren und würde zu einem erheblichen Entwicklungsmehraufwand führen. Die Kopplungstechnologie, die in *EnTool:CoSim* entwickelt wurde, basiert auf dem bereits standardisierten Functional Mockup Interface für Simulationskopplung und erlaubt die Kopplung von Modellen, die aus unterschiedlichen Entwicklerdomänen stammen.

Der Schwerpunkt des Projektes *EnTool:CoSim* liegt auf der Kopplung von laufzeitoptimierten Modellen zur energetischen/bauklimatischen Gebäudesimulation mit Simulationsmodellen für Anlagen- und Regelungskomponenten. Der Einsatz laufzeitoptimierter Modelle ist vorteilhaft bzw. notwendig bei Problemen mit großen Gleichungssystemen und vielen unbekanntem Variablen. Sensitivitätsstudien bzw. Parameteranalysen und probabilistische Modelle erfordern bei großen Problemen extrem schnelle Lösungen. Für Modelle der Anlagen- und Regelungskomponenten wird vorzugsweise die Modelica-Sprache verwendet, welche enorme Vorteile in Punkto Flexibilität und Reduzierung des Entwicklungsaufwandes aufweist.

Referenzimplementierungen sollen die Kopplungsfähigkeit der Modelle demonstrieren. Dazu sind sowohl die vom IBK entwickelten Programme als auch die Anbindung von Modelica-Modellen in der SimulationX-Entwicklungsumgebung vorgesehen. Erweiterungen hinsichtlich der Anlagen-, Nutzer- und Regelungsmodelle sind in der Green Building Modelica-Bibliothek geplant.

Das Projekt *EnTool:CoSim* gehört gemeinsam mit EnTool:BIM (unter dem Akronym EnEff-BIM eingereicht) zu den Pilotprojekten der EnTool-Plattform. Die Forschungsinitiative EnTool etabliert eine neue Plattform für den Wissenstransfer aus der Forschung in die Praxis im Bereich der Simulation im Bauwesen. Beide Projekte verfolgen einen komplementären Ansatz hinsichtlich ihrer Kopplungstechnologien. Während bei *EnTool:CoSim* die Tool-Kopplung im Vordergrund steht, fokussiert EnTool:BIM auf die datenseitige Kopplung.

*EnTool:CoSim* liefert einen wichtigen Beitrag zur Vernetzung von Modellen und Datenbanken, welche auf einem zentralen EnTool-Server zu einem modularen, extern nutzbaren System von Planungswerkzeugen ausgebaut werden sollen. Die systematische Integration von Forschungstools in eine vernetzte Simulationsumgebung dient der Bereitstellung von wissenschaftlich gesicherten, wirtschaftlich umsetzbaren Referenzlösungen für die Praxis.

## 1.2 Kurzüberblick Functional Mockup Interface (FMI)

Zur Laufzeitkopplung von Simulationskomponenten gibt es verschiedene Technologien, zumeist proprietäre Lösungen oder Tool-Tool-Direktkopplungen. Im Forschungsprojekt MODELISAR (ein ITEA 2 Projekt - Information Technology for European Advancement) wurde eine unabhängige und offene Spezifikation für die Laufzeitkopplung von Simulationskomponenten definiert. Die zu koppelnden Simulationskomponenten werden als *Functional Mockup Units* (FMU) bezeichnet, die eigentliche Programmierschnittstelle wird *Functional Mockup Interface* (FMI) genannt.

Im FMI Standard werden zwei wesentliche Aspekte definiert:

- die Art und Weise einer Beschreibung der Modellkomponenten, sodass Simulationskopplungstools automatisiert die entsprechenden Verknüpfungsregeln und Algorithmen ableiten und verwenden können,
- die Programmierschnittstelle, d.h. Funktionsnamen und Argumente, welche den Datenaustausch während der Simulation und den Simulationsfortschritt kontrollieren.

Je nach Fähigkeit eines Simulationsmodells gibt es zwei unterschiedliche Modi, wie die gekoppelte Simulation durchzuführen ist:

1. Model-Exchange: Die zu koppelnden Simulationskomponenten implementieren die (physikalischen) Modelle, jedoch kein Zeitintegrationsverfahren. Der Simulationsmaster löst einheitlich alle von den gekoppelten Modelle in der Zeit zu integrierenden Gleichungen in einem kompletten gekoppelten System.
2. Co-Simulation: Jede Simulationseinheit enthält einen Zeitintegrator, der problemangepasste Algorithmen enthält. Der Austausch mit anderen Simulationskomponenten erfolgt in definierten Zeitabständen/Kopplungsintervallen.

Für die Verwendung der Simulationskopplung im Gebäudebereich bestehen noch keine Erfahrungen über die bessere Form der Kopplung. Daher sollten als Teil des Technologietests im *EnTool:CoSim* beide Kopplungsmodi unterstützt werden und in verschiedenen Anwendungsbeispielen getestet werden.

Zu Beginn des Forschungsprojekts war Version 2.0 des Standards gerade erschienen. Die wesentlichste Erweiterung gegenüber Version 1.0 besteht in der Möglichkeit, Co-Simulations-Komponenten auf einen früheren Zustand zurückzusetzen. Damit werden erstmals iterierende Co-Simulations-Master-Algorithmen möglich, welche eine höhere Berechnungseffizienz versprechen. Diese Funktionalität sollte im Projekt implementiert und getestet werden.

## 1.3 Ausgangspunkt der Projektarbeit

Zu Beginn des Projekts waren die Simulationsprogramme THERAKLES und NANDRAD alleinstehende Simulationswerkzeuge ohne Kopplungsschnittstelle. Das Modelica-Simulationstool SimulationX hatte eine fast vollständige Implementierung für die FMI Schnittstelle in der Version 1.0. Der von EAS beigesteuerte Simulationsmaster hatte eine prototypische Implementierung der FMI 1.0 Co-Simulations-Importschnittstelle. Allerdings war der Quelltext im Zustand der Portierung von einer älteren Forschungsversion auf eine neue Programmstruktur und eine graphische Eingabeoberfläche war im Prozess des Entstehens.

Die Modelica-Bibliothek GreenBuilding/GreenCity vom Projektpartner EASD war bereits für die Auslegung von Anlagentechnik einsatzfähig und wurde auch in der Ingenieursplanung bereits vielfach eingesetzt. Dabei fanden einfache, in Modelica modellierte Gebäude (wenige Zonen, einfache Gebäudephysik) Verwendung. Jedoch gab es noch keine Schnittstellen für die Anbindung anderer Simulationskomponenten mittels FMI.

## 1.4 Zielsetzung

Im Projekt sollten die technologischen Grundlagen dafür geschaffen werden, dass unabhängig entwickelte, komplexe Simulationsverfahren gemeinschaftlich zur Unterstützung der Planung und Optimierung von Gebäuden eingesetzt werden können. Dies beinhaltet

- die Erweiterung existierender Simulationsprogramme (zur Unterstützung der FMI Schnittstelle) und Erarbeitung von Empfehlungen/Handlungsanleitungen für entsprechende zukünftige Nachrüstung anderer Simulationskomponenten,

- Definition von Kopplungsregeln und physikalischen Schnittstellenparametern (welche Daten werden zwischen den einzelnen Modellen ausgetauscht) und Entwicklung einer Benennungskonvention,
- Entwicklung und Erweiterung von numerischen Methoden und Solvern (Anpassung der numerischen Integrationsverfahren und Modellauswertung für die gekoppelte Simulation),
- Programmoberflächen und Eingabemasken (Definition der Kopplungsparameter, Verknüpfung der Teilm Modelle etc.), sowie
- Definition von Anwendungsfällen zum Test und zur Demonstration der Funktionalität (mit Projekten steigender Komplexität).

Die Erarbeitung und Umsetzung erfolgte im Projektverbund durch intensive Zusammenarbeit der verschiedenen Projektpartner. Nachfolgend sind die Ergebnisse und Arbeitsschritte des Projektpartners TU Dresden/IBK (Institut für Bauklimatik) im Detail beschrieben.

## 1.5 Wichtigste wissenschaftliche und technische Ergebnisse

Folgende Ziele wurden von uns erreicht und die nachfolgend aufgeführten technologische Entwicklungen im Projekt umgesetzt:

- Mathematische und numerische Charakterisierung der Bauteil- und Gebäudesimulationsmodelle (notwendig für Auswahl effizienter Simulationskopplungsalgorithmen),
- Entwicklung der Serialisierungstechnologie (effizientes Abspeichern und Wiederherstellen komplexer Simulatorzustände),
- Implementierung und Test der FMU-Schnittstelle (Export) in die Simulationsprogramme THERAKLES und NANDRAD,
- Definition der physikalischen Kopplungsschnittstelle zwischen Gebäude und Anlage in verschiedenen Komplexitätsstufen je nach Planungsaufgabe,
- Mitarbeit im Annex 60 Expertengremium zur Entwicklung von standardisierten Konventionen für die FMI-Kopplung und Erarbeitung von Verbesserungs-/Erweiterungsvorschlägen für die FMI-Standardisierungsgruppe,
- Erweiterung der numerischen Rechenkerne in THERAKLES und NANDRAD, sodass erweiterte FMI Funktionalitäten (Rücksetzen, Iteration über Kommunikationsintervalle) unterstützt werden können,
- Entwicklung einer Spezifikation für die Definition einer gekoppelten Simulation, der Verknüpfung zwischen FMUs und dem Setzen von Parametern,
- Entwicklung und Implementierung eines OpenSource-Co-Simulationsmasters, zur Durchführung der gekoppelten Simulation unter Verwendung neuer Kopplungsalgorithmen,
- Erarbeitung eines Arbeitsablaufs für die Erstellung einer gekoppelten Simulation aus Gebäudemodell und Anlagenmodell, und Entwicklung einer Verknüpfungssystematik mit Teilautomatisierung,
- Test und Evaluierung der gekoppelten Planungswerkzeuge.

## 2 Arbeitspakete und Ergebnisberichte

Die Bearbeitung der Teilaufgaben erfolgte zumeist überlappend, mit zwischenzeitlichen Tests und probeweisen Anwendung der bereits entwickelten Technologie. Für jedes bearbeitete Arbeitspaket gibt es einen individuellen technischen Bericht (im Anhang, teilweise bereits publiziert). Nachfolgend sind die Teilberichte und wesentlichen Ergebnisse im Überblick beschrieben.

### 2.1 Mathematische Charakterisierung der Teilmodelle

#### *Beitrag zu AP 2.2:*

Numerische Berechnungseffizienz ist und bleibt ein wichtiges Thema für die Entwicklung rechnergestützter Planungshilfsmittel. Aus Mangel an effizienten Algorithmen bzw. deren Umsetzung oder benötigter Hardware

werden häufig Modellreduktionstechniken eingesetzt. Beispiele hierfür sind die R-C (Beuken)-Modelle aus der VDI 6007-1, oder die RF (response factor) (implementiert in DOE-2) bzw. CTF (conduction transfer function), wie sie z.B. in EnergyPlus und TRNSYS eingesetzt werden. Nachteil dieser Methoden sind die eingebauten Annahmen über Wärmeleitfähigkeiten, Wärmekapazitäten, Dimension der Konstruktionen und Randbedingungen. Wird von den bei der Kalibrierung der Methoden angewendeten Annahmen abgewichen, werden die Ergebnisse zunehmend und teils signifikant ungenau. Leider ist es in der Planungspraxis dem Ingenieur häufig nicht möglich, diese Annahmen zu prüfen oder zu anzupassen, wenn z.B. Planungsvorgaben die Randbedingungen oder Konstruktionsaufbauten definieren. Dieses führt in der Praxis zu der Situation, dass der Genauigkeitsgrad der Aussage eines Planungsmodells stark variieren kann und bei sehr starken Abweichungen zum Teil zu unberechtigter Kritik an der Verfahrensweise selbst führt.

Vorteilhafterweise gibt es für fast alle Modellkomponenten genauere Lösungsmethoden, welche auf numerischen Approximationen beruhen. Diese lösen das formulierte mathematische Problem im Rahmen der gewünschten Genauigkeit, wobei mit zunehmender Genauigkeit auch der Rechenaufwand steigt. Je nach mathematischer Problemstellung gibt es geeignete und ungeeignete Lösungsverfahren, deren Auswahl eine elementare Auswirkung auf Rechenzeit und Genauigkeit/bzw. Stabilität hat. Beispielsweise ist bekannt, dass explizite Integrationsverfahren für konvektionsdominierte Problemstellungen bzw. selbst die einfache Wärmeleitung durch ein Bauteil aus Stabilitätsgründen absolut ungeeignet sind. Gleichzeitig sind diese Methoden am leichtesten zu programmieren, was häufig zu der Situation von sehr langen Rechenzeiten führt. Im Ergebnis werden dann häufig die Genauigkeitsanforderungen reduziert, um wieder akzeptable Rechenzeiten zu erhalten. Ein sinnvoller Ansatz wäre, die Auswahl der numerischen Methoden dem mathematischen Charakter des Problems anzupassen, wobei der Einfluss unterschiedlicher Parametrisierung bzw. Geometrie berücksichtigt wird. Die Details zu dieser Untersuchung sind im Teilbericht *Paepcke, A.; „Charakterisierung der numerischen Bauteilsimulation“* (Technischer Bericht im Anhang) zusammengestellt.

Speziell der Modellierung von Strahlungsheizkörpern bzw. Bauteiltemperierung und der Regelung nach der operativen Temperatur ist der Artikel *Anlagenregelung in ODE-Systemen am Beispiel der thermischen Raum- und Gebäudesimulation Paepcke and Nicolai [2014]* gewidmet, in dem auch Anforderungen und mathematische Charakteristika diskutiert werden.

## 2.2 Mathematische Algorithmen zur Kopplung großer Simulationsmodelle

### *Beitrag zu AP 2.3:*

Werden viele Simulationsmodelle miteinander gekoppelt, sodass ein großes komplexes Netzwerk von Einzelkomponenten entsteht, so ist die Ermittlung einer geeigneten Auswertungsreihenfolge sowie die Erkennung von Zyklen eine wichtige und nicht-triviale Aufgabe. Verschiedene Algorithmen existieren hierzu, und deren Auswertungseffizienz hängt stark von der gewählten Implementierungsstrategie und Datenverwaltung ab.

Die entwickelte Technologie findet im Projekt zwei Anwendungen:

- Optimierung der Modellauswertung im NANDRAD Rechenkern,
- Bestimmung einer optimalen Auswertungsreihenfolge im Co-Simulationsmaster

Details des Algorithmus sind im Teilbericht *Algorithmen zur Kopplung großer Paepcke, A.; „Dynamischer Simulationsmodelle mit Anlagenkomponentenmodellen am Beispiel von NANDRAD“* (Technischer Bericht im Anhang) erläutert. Dieser Text enthält auch die Beschreibung über die geeignete Bereitstellung der System-Jacobi-Matrix.

## 2.3 Entwicklung der Serialisierungstechnologie

### *Beitrag zu AP 3.1, 3.2 und in Zusammenarbeit mit Parter ITI zu AP 2.6 und 2.7:*

Ein Teilaspekt der Simulationskopplung ist die Unterstützung der sogenannten Rücksetzfunktionalität (bzw. Serialisierungsfunktionalität). Damit ist gemeint, dass ein Simulationsmodell auf einem beliebigen Zustand (Zeitpunkt) der bisher in der Simulation erreicht wurde, zurückgesetzt werden kann. Dabei müssen alle intern gespeicherten Variablen, physikalischen Größen und numerischen Parameter auf einen vorab gesicherten Zustand zurückgesetzt werden.

Bei modernen Zeitintegratoren, welche mit veränderlicher Methodenordnung, variablen Zeitschritten und flexibel konfigurierbaren Teilalgorithmen (u.a. für lineare Gleichungssysteme) arbeiten, ist dieses recht komplex.

Zudem muss das Sichern und Zurücksetzen eines Modellzustands sehr schnell erfolgen und den Forderungen der FMI-Schnittstelle entsprechen. Letztlich ist auch noch sicherzustellen, dass bei zukünftigen Erweiterungen des Modells oder numerischen Rechenkerns eine Anpassung der Serialisierungsfunktionalität ohne größere Fehleranfälligkeit möglich ist.

Alle diese Anforderungen wurden in der entwickelten technologischen Lösung eingearbeitet und sind im Teilbericht: Nicolai, A.; „Effiziente Implementierung der Serialisierungsfunktionalität entsprechend FMI 2.0 am Beispiel von FMUs mit CVODE-basierten Berechnungsmodellen“ (Technischer Bericht im Anhang) detailliert erläutert.

## 2.4 Implementierung und Test der FMU-Schnittstelle (Export)

### Beitrag zu AP 3.1 und 3.2:

Der Begriff „FMU-Export“ bezeichnet allgemein den Prozess der Erstellung des FMU-Archivs, d.h. dem gepackten Verzeichnis mit Modellbeschreibungsdatei, benötigten Ressourcen/Datenbanken und der Schnittstellenimplementierung (DLL unter Windows, gemeinsame Bibliothek unter Linux/MacOS). Indirekt ist damit auch die Entwicklung der Schnittstellenimplementierung sowie der Vorbereitung der Datenbanken/Programmressourcen gemeint. Konkret im Fall der Simulationsprogramme THERAKLES und NANDRAD waren zahlreiche Erweiterungen im Quelltext nötig:

- Umorganisation der internen Variablen und Erstellung von Schattenvariablen für die von außen zu setzenden FMU-Eingangsvariablen,
- Erweitern der Modellauswertung um die Prüfung von veränderten Eingangsvariablen und Auswertung nur der Modellteile, welche von Variablenänderungen betroffen sind (speziell im Fall von NANDRAD ist diese Erweiterung für eine effiziente Modellexchange-Implementierung wichtig),
- Erweitern der Integrationsschleife und der Integrationskontrollalgorithmen, sodass die Simulation nicht nur von Anfang bis Ende durchläuft, sondern zu beliebigen Zeitpunkten gestoppt und fortgesetzt werden kann,
- Erweitern der Projektdatenstruktur zur Aufnahme der Parameter für den Modellexport,
- Erweitern des Kommandozeilensolvers um Argumente, welche die verschiedenen Exportszenarien definieren und durchführen,
- Generierung von Adapter/Wrapper-Modellen, um die Verwendung der FMUs mit anderen Modellen (u.a. in Modelica-Entwicklungsumgebungen) zu vereinfachen.

Die Details zum FMU-Exportprozedere und zur Datenvorbereitung sind im Teilbericht Paepcke, A.; „Automatisierte Erstellung vom Gebäude FMUs nach Standard FMI 2.0 am Beispiel von THERAKLES und NANDRAD“ beschrieben (Technischer Bericht im Anhang).

In Vorbereitung eines möglichst automatisierten Prozederes ist die Erstellung einer FMU für ein THERAKLES/NANDRAD Gebäudemodell durch folgenden Ablauf möglich:

1. Eintragen der export-Option in die XML-Projektdatei
2. Ausführen der Export-Kommandozeile, z.B.:

```
1 > TheraklesSolver --fmu-export=Raummodell.fmu Raummodell.rmxml
```

Dies erstellt die Functional Mockup Unit `Raummodell.fmu` aus der Projektdatei `Raummodell.rmxml` welche sowohl als Co-Simulations-FMU als auch als ModelExchange-FMU verwendet werden kann, jeweils unter Nutzung der FMI v2.0 Funktionalität.

Die exportierten Modelle wurden nach folgender Methodik getestet und bewertet:

1. Einfache Beispielprojekte mit idealer Heizung/Kühlung wurden mit NANDRAD und THERAKLES alleinstehend gerechnet und so Referenzlösungen erzeugt.
2. ModelExchange-Export - eine gekoppelte Lösung in einem ModelExchange-Simulationsmaster hat (in Rahmen der gewählten Toleranzen) eine korrekte Lösung. Die vorab durch alleinstehende Berechnung generierten Referenzlösung konnten nun mit der gekoppelten Simulation reproduziert werden, wobei die ideale Heizung/Kühlung in Modelica umgesetzt wurde und das Gebäudemodell nur die entsprechende Antwort liefert. Die Ergebnisse wurden dann mit den einfachen Referenzlösungen verglichen.

Im Zuge des Tests wurden noch einige Fehler SimulationX Master behoben werden (vor allem Probleme/Abstürze bei der Modellanalyse) und Performanceoptimierungen eingearbeitet werden, bis die Referenzlösungen korrekt erhalten wurden (siehe auch Abschnitt 2.9).

3. Mittels der bereits getesteten ModelExchange-Funktionalität wurden nun komplexere Anlagen/Gebäudekombinationen erstellt und gerechnet. Die mittels ModelExchange erhaltenen korrekten Lösungen galten nun als Referenzlösung für die CoSimulations-Varianten.
4. CoSimulation-Export, FMI Version 1: Bei dieser Variante werden die einzelnen FMUs nacheinander stückweise integriert und nach Abschluss eines jeden Intervalls werden die Ergebnisgrößen ausgetauscht. Die Genauigkeit und Stabilität des Verfahrens hängt von der Länge der Kommunikationsintervalle ab. Kürzere Kommunikationsintervalle erhöhen die Genauigkeit, verlängern aber auch die Simulationszeit. Bei der Nachrechnung der Testfälle sollte die Länge der Kommunikationsintervalle so angepasst werden, dass keine signifikanten Unterschiede zur Referenzlösung auftreten würden. Bei den ersten Tests ergaben sich größere Abweichungen, Fehler und Abstürze, deren Ursache wegen der parallelen Entwicklung von drei beteiligten Tools (EAS-MasterSim, SimulationX und THERAKLES) nicht eindeutig zuzuordnen war (das gesamte Simulationssystem war eine Blackbox und es gab keine Möglichkeiten der Diagnose). Daher musste ein Möglichkeit gefunden werden, die einzelnen Komponenten und die Kommunikation zwischen Master und FMU-Slaves zu kontrollieren. Dies wurde durch die Entwicklung des OpenSource-Master-Simulators MASTERSIM seitens des IBK ermöglicht (siehe Abschnitt 2.8). Dadurch war auch eine Funktionskontrolle des EAS-Masters möglich. Durch Anwendung des neuen Simulationsmasters konnte die Exportfunktionalität in THERAKLES/NANDRAD korrigiert und getestet werden. Parallel dazu wurden verschiedene Erweiterungen/Korrekturen in SimulationX eingearbeitet. Schließlich war das Nachrechnen der Referenzfälle mit CoSimulation möglich. Für die komplexeren Testfälle wurde zur Verbesserung/Vereinfachung des Arbeitsablaufs (Definition/Export der FMUs und Verknüpfung der FMUs im Master) eine Konzeption und Umsetzung für einen halbautomatischen Arbeitsablauf entwickelt (siehe Abschnitt 2.9).
5. CoSimulation-Export, FMI Version 2: Die in der Version 2 des FMI Standards hinzugekommenen Funktionen zur iterativen Simulatorkopplung werden hier getestet. Für diese Tests war ein entsprechend ausgebauter CoSimulations-Master nötig. Hierbei wurde wiederum der MASTERSIM Integrator weiterentwickelt, da insbesondere bei den NEWTON-Algorithmen die Fehlerdiagnosemöglichkeiten zwingend notwendig waren. Zum Projektende war der Entwicklungsstand des EAS-Masters auch bei FMI 2.0 angekommen, sodass zwischen den Masteralgorithmen auch vergleichende Rechnungen möglich waren. Es zeigte sich auch durch diesen Vergleich unabhängiger Entwicklung, dass noch diverse Unklarheiten und Unstimmigkeiten im FMI Standard enthalten sind. Durch alle Projektpartner wurden dafür Verbesserungsvorschläge erarbeitet und in die Arbeitsgruppe des FMI-Standards eingebracht.

Ein Beispiel für Unklarheiten im FMI-Standard ist die Verwendung einer URL bei Angabe des Ressourcen-Verzeichnisses, d.h. bei lokalen Dateien das Protokoll `file://` Verwendet man dieses Protokoll, ergeben sich Pfade wie:

```
# Linux
file:///home/ich/fmus/Part1/resources
# Windows
file://C:\Users\ich\fmus\Part1/resources
```

Bei Dymola und SimulationX gibt es jedoch Fehler, wenn das Protokoll angegeben wird. Rückfrage in der FMI-Standardisierungs-Mailinglist ergab dann, dass es eigentlich ohne explizite Angabe des `file://` Protokolls gemeint war. Nach Anpassung des FMU-Exports von THERAKLES und NANDRAD war dieses Problem behoben. Viele kleinere Details dieser Art fielen bei der Entwicklung der Exportschnittstelle im Praxistest auf und konnten schließlich behoben oder geeignet umgangen werden.

## 2.5 Definition der physikalischen Kopplungsschnittstelle zwischen Gebäude und Anlage in verschiedenen Komplexitätsstufen je nach Planungsaufgabe

### *Beitrag zu AP 1.4 (in Zusammenarbeit mit Partner EASD):*

Der FMI Standard beschreibt die abstrakte mathematische Schnittstelle und die technische Umsetzung der Simulationskopplung in einer fachgebietsneutralen Formulierung. Für die konkrete Anwendung, z.B. in der Kopplung von Gebäude- und Anlagensimulation bedarf es zusätzlicher Konventionen. Zum Beispiel muss



festgelegt werden, in welcher Einheit eine Temperatur von einem Simulationsmodell an das andere übermittelt wird (z.B. in °C oder K) und ob es sich um eine Raumlufttemperatur oder die operative Temperatur handelt. Bei klimatischen Einwirkungen muss z.B. zwischen Globalstrahlung oder direkter Normalstrahlung und Horizontalstrahlung unterschieden werden.

Bei der Definition der Rückwirkung zwischen Anlage und Gebäude muss klar definiert werden, welcher Heizkörper welche Zone beheizt. D.h. auch eine Benennungskonvention für Gebäude- und Anlagenteile musste entwickelt werden. Auch kann die Grenze zwischen den Modellen verschoben werden. Zum Beispiel kann einmal das Heizverteilsystem als Teil des Anlagenmodells beschrieben werden und das Gebäudemodell erhält für jede Zone lediglich abstrakte Heiz-/Kühllasten. Oder das Verteilsystem kann dem Gebäudemodell zugeordnet werden und die Schnittstelle bildet Vor- und Rücklauf zum Heizungskeller ab.

Die Einführung geeigneter Konventionen bedingt eine Abstimmung mit dem üblichen Definitionen/Regelungen im Planungsprozess. Daher wurden bei der Bearbeitung dieses Arbeitspakets die bisherigen Planungsleistungen und Konventionen des Projektpartners EASD zugrundegelegt und entsprechende Definitionen festgeschrieben. Es hat sich herausgestellt, dass für eine Praxisanwendung der Technologie mit verschiedenen Modellkomponenten und flexibler Simulationskopplung neben dem FMI-Standard zwingend auch eine ebenso eingeführte Benennungs-/Typenkonvention notwendig ist.

Details zu den entwickelten Schnittstellenkonventionen und eine Diskussion der jeweiligen Vor- und Nachteile sind im Teilbericht *Schnittstellen zwischen Gebäude- und Heizungsanlagen-simulation* zu finden (Technischer Bericht im Anhang) und in der Publikation: *Schnittstellen für die Co-Simulationskopplung zwischen Gebäude- und Heizungsanlagen-simulation Paepcke et al. [2016]*.

## 2.6 Erweiterung der numerischen Rechenkerne in THERAKLES und NANDRAD, sodass erweiterte FMI Funktionalitäten (Rücksetzen, Iteration über Kommunikationsintervalle) unterstützt werden können

### *Beitrag zu AP 3.1 und 3.2:*

Die Rechenkerne für die Gebäudesimulationen THERAKLES und NANDRAD verwenden ein modernes implizites Zeitintegrationsverfahren, basierend auf adaptiver Zeitschrittsteuerung, wobei die internen Zeitschritte entsprechend der Genauigkeitsforderungen und des Fehlerschätzers angepasst werden. Die (meist konstanten) Ausgabezeitschritte stimmen im allgemeinen nicht mit den veränderlichen Integrationsschritten überein. Nach Abschluss eines Berechnungsschritts wird daher die Lösung rückwirkend zum Ausgabezeitpunkt durch Interpolation bestimmt.

Im Kontext der stückweisen Ausführung durch einen Co-Simulationsmaster ist dieses Verhalten anzupassen. Auch müssen die Kontrollstrukturen im internen Integrator (Schleifenbegrenzungen, einflussreiche Zustandsvariablen etc.) angepasst werden. Durch die modulare Bibliotheksstruktur sind einige dieser Anpassungen für THERAKLES und NANDRAD gemeinschaftlich in der Integrationskernbibliothek (SolverFramework) umgesetzt. Durch die für beide Programme sehr individuelle Berechnungsfunktionalität für Jacobi-Matrizen und physikalischen Modellkomponenten, sind jedoch viele Details individuell zu implementieren. In der Publikation *Transformation der Gebäudeenergiesimulation NANDRAD mit variablem Zeitschrittlöser in eine FMU für Co-Simulation Nicolai and Paepcke [2016]* (im Anhang) werden die Details der Umsetzung am Beispiel von NANDRAD diskutiert.

## 2.7 Spezifikation der Toolkopplung und der Parametrisierung verschiedener gekoppelter FMUs

### *Beitrag zu AP 1.3 und 4.3:*

Zur Durchführung einer gekoppelten Simulation müssen folgende Daten zusammengestellt werden:

- Welche Simulationseinheiten/FMUs gekoppelt werden sollen,
- wie oft eine Simulationseinheit im gekoppelten Modell vorhanden sein soll (Beispiel: Reihenhaus-siedlung, wo ein Hausmodell mehrfach instanziiert wird) und wie die einzelnen Instanzen benannt werden sollen,
- welche Ein- und Ausgaben der einzelnen Simulationseinheiten miteinander verknüpft werden sollen, und

- Belegung der veröffentlichten Parameter einzelner FMU-Instanzen mit Konfigurationswerten.

Diese Eigenschaften definieren das Simulationsszenario. Weiterhin müssen noch die mathematischen Algorithmen für die gekoppelte Simulation spezifiziert werden:

- Grundlegender Algorithmus zum Abgleich der Ein- und Ausgangsgrößen der FMUs, z.B. GAUSS-JACOBI, GAUSS-SEIDEL, NEWTON,
- nicht-iterierende oder iterierende Algorithmen, im letzteren Fall die maximale Anzahl von Iteration und Konvergenzkriterien,
- konstante Kommunikationsschrittweiten oder variable Schrittweitenanpassung, und
- für die Schrittweitenadaption verwendete Algorithmen und Toleranzgrenzen.

Zuletzt sind von Verwaltungsinformationen zu definieren:

- Verzeichnisse für die Ergebnisdaten, und
- Detaillierungsgrad für Ausgaben und Logdateien.

Für die Definition dieser Ein- und Ausgaben wurde ein Dateiformat entworfen (siehe Zwischenbericht 2014/2015). Während der Projektlaufzeit ist ein Modelica Association Projekt namens System-Structure and Parameterization (SSP)<sup>1</sup> gegründet worden. Wir haben die von uns entwickelte Spezifikation dem MA Projekt zur Verfügung gestellt und informell an der Entwicklung des allgemeingültigen Kopplungsstandards mitgewirkt. Aufgrund der parallelen Entwicklung eines internationalen Standards für die CoSimulationskopplung wurden innerhalb des Projekts keine weiteren Standardisierungsansätze verfolgt. Da die Arbeit am SSP noch nicht abgeschlossen ist, arbeitet der im EnTool-CoSim-Projekt entwickelte Mastersimulator mit einer vereinfachten Prototypen-Spezifikationsdatei. Es wäre sinnvoll, in einem Nachfolgeprojekt nach Abschluss der SSP-Aktivitäten, den CoSimulations-Master zur Verwendung dieses Schnittstellenstandards zu erweitern.

## 2.8 Entwicklung und Implementierung eines OpenSource-Co-Simulationsmasters zur Durchführung der gekoppelten Simulation unter Verwendung neuer Kopplungsalgorithmen

*Beitrag zu AP 2.4 und 2.5 (ursprünglich nicht geplant), und AP 4.5:*

Bei der Entwicklung der FMU Export Funktionalität von THERAKLES und NANDRAD erhielten diese zunächst die Schnittstelle für das Auslagern der Modelle zur Integration im Integrationsmaster (ModelExchange). Durch Verwendung des ModelExchange-Masters SimulationX konnte die Funktionalität des ModelExchange-Exports getestet werden und physikalische Referenzmodelle erstellt werden. Diese sollten dann für die weiteren Kopplungstests als Referenz dienen.

Schwerpunkt der Kopplungsentwicklung war die Unterstützung der CoSimulation-Kopplung unter Verwendung der neuen Funktionen der 2.0 Schnittstelle, konkret des Zurücksetzens und der Möglichkeit, über Kommunikationsschritte zu iterieren um so die Stabilität zu erhöhen. Außerdem ist die Rücksetzfunktionalität notwendig, um eine variable Anpassung der Kommunikationsschrittlänge umzusetzen.

Alle diese Techniken mussten sowohl von den Komponenten/Slaves, d.h. THERAKLES, NANDRAD und SimulationX, als auch von dem CoSimulations-Master unterstützt werden. Während des Ablaufs der gekoppelten Simulation ist die gesamte Kommunikation zwischen Simulations-Master und Slaves im Masterprogramm gekapselt und eine Fehleranalyse gestaltet sich als schwierig. Bei den ersten Tests wurde der CoSimulations-Master von EAS eingesetzt und die neuen Funktionen mit THERAKLES und aus SimulationX exportierten FMUs getestet. Dabei ergaben sich eine Vielzahl an Problemen:

- Abbruch durch interne Fehler im EAS-Master,
- fehlerhafte Initialisierung im THERAKLES,
- Fehlermeldungen seitens EAS-MASTER nach THERAKLES-Initialisierung, obwohl seitens des Slaves kein Problem zu erkennen war (Ursache: falsche Erwartungshaltung durch missverständliche Standardformulierung),
- Fehlermeldung/Abbrüche in SimulationX-FMU (keine detaillierte Fehlermeldung verfügbar, keine Möglichkeit, genauere Ursachen zu ergründen),

<sup>1</sup><https://www.modelica.org/projects> (15.07.2018)

- Fehlermeldungen/Konvergenzfehler bei der Berechnung der Anfangslösung (unklar ob EAS-Master fehlerhafte Algorithmen implementiert hat, oder ob FMUs falsche Werte liefern),
- Abbrüche während der Simulation (ungültige physikalische Größen, Stabilitätsprobleme, Crash durch Speicherzugriffsverletzungen), und
- falsche Ergebnisse (eventuell durch fehlende Verknüpfungen zwischen FMUs oder falschen internen Algorithmen).

Aus Sicht der Entwicklung der Exportfunktionalität in THERAKLES und NANDRAD (siehe Abschnitt 2.6) war die Verwendung des EAS-Masters als Black-Box-Software nicht zielführend. Leider bestand aus lizenzrechtlichen Gründen (Fraunhofer Regelung) keine Möglichkeit, den aktuellen Quelltext zu erhalten und anzupassen (eine freigegebene, frühere Version enthielt noch nicht die neue Funktionalität). Außerdem war zum Zeitpunkt der FMU Exportentwicklung im Projekt die EAS-Master-Entwicklung noch nicht weit genug fortgeschritten, um die FMI 2.0 Funktionalitäten zu testen.

Aus diesen Unzulänglichkeiten ergab sich die Notwendigkeit einer Alternativentwicklung eines CoSimulationsmasters, welcher konsequent als OpenSource-Master unter Verwendung des numerischen Know-Hows am IBK entwickelt und veröffentlicht wurde. Die hierfür vom IBK aufgewendete Zeit war in der Projektplanung nicht vorgesehen und ersetzte damit zum Teil andere Aktivitäten.

Im neuen CoSimulationsmaster MASTERSIM wurden spezifische Funktionen zur Fehleranalyse integriert, sodass das Verhalten der angekoppelten FMUs detailliert untersucht und auf fehlerhafte Funktionalitäten hin untersucht werden kann. Dadurch war es effizient möglich, die Exportschnittstellen von THERAKLES und NANDRAD zu entwickeln, Fehler zu finden und zu bereinigen. Vergleichen mit der Versuch-und-Irrtum-Variante der Blackbox-Mastersimulatorlösung war dies ein elementarer Effizienzgewinn. Bestimmte knifflige Fehler, wie z.B. unvollständiges Zurücksetzen bei der Differenzen-Quotienten-Berechnung der Kopplungs-Jacobimatrix im Newton-Algorithmus, wären sonst vermutlich gar nicht auffindbar gewesen.

Der Teilbericht *MASTERSIM - Open-Source FMI Co-Simulationsmaster mit Unterstützung für FMI 2.0 Nicolai [2018]* beschreibt die Algorithmen, Details der Implementierung und Ausführungsmodalitäten im Detail (Technischer Bericht im Anhang).

## 2.9 Erarbeitung eines Arbeitsablaufs für die Erstellung einer gekoppelten Simulation aus Gebäudemodell und Anlagenmodell und Entwicklung einer Verknüpfungssystematik mit Teilautomatisierung

Bei der Anwendung der entwickelten Technologie auf die Referenz- und Testfälle stellte sich heraus, dass alleine die Konfiguration und Erstellung der FMUs, sowie deren Verknüpfung im Masterprogramm sehr aufwändig und fehleranfällig ist. Parallel zur Entwicklung der Kopplungsalgorithmen und des FMU Exports mussten je nach Entwicklungsstand stets komplexere Beispiele erstellt und das aufwändige Export- und Kopplungsprozedere jeweils erneut durchgeführt werden. Deshalb wurden verschiedene Techniken zur (Halb-)Automatisierung bzw. Vereinfachung dieser Arbeitsschritte untersucht. Details dazu sind in den im Anhang befindlichen Publikationen *Co-Simulation between detailed building energy performance simulation and Modelica HVAC component models Nicolai and Paepcke [2017]* und *Schnittstellen für die Co-Simulationsklopplung zwischen Gebäude und Heizungsanlagensimulation Paepcke et al. [2016]* zu finden. Die chronologische Beschreibung der Entwicklungsschritte, einschließlich der Fehlversuche und als unpraktikabel eingestuften Varianten sind im Teilbericht *Nicolai, A. und Paepcke, A., „Entwicklung eines weitgehend automatisierten und skriptunterstützten Arbeitsflusses bei der FMU Erstellung und Definition von Kopplungsszenarien“* (Technischer Bericht im Anhang) nachzulesen.

## 2.10 Mitarbeit im Annex 60 Expertengremium zur Entwicklung von standardisierten Konventionen für die FMI-Kopplung und Erarbeitung von Verbesserung-/Erweiterungsvorschlägen für die FMI-Standardisierungsgruppe

### *Beitrag zu AP 5.2 und 5.3:*

Parallel zur Projektbearbeitung war das IBK am IEA Annex 60 beteiligt. Die seitens des IBK eingebrachten Themen waren:

- Python-Skripte zur automatisierten Durchführung von Testläufen und Testsimulationen (Regressions-tests), und dazugehörigen Auswertungen,
- Vorschläge zur Erweiterung und Konkretisierung des FMI-Standards, vor allem hinsichtlich der Verwendung von FMUs, welche nicht aus Modelica-Umgebungen generiert werden (zum Zeitpunkt der Projektbearbeitung waren NANDRAD und THERAKLES die weltweit ersten Gebäudesimulationsprogramme mit FMI Unterstützung),
- konkrete Workflows und Automatisierungsvorschläge, um die Einsatz von FMUs, d.h. deren Erstellen, Parametrierung und Verknüpfung, ingenieurstauglich zu gestalten, und
- Analysen und Vergleich der Effizienz von Masterimplementierungen.

Das Annex 60 Gremium war während der Laufzeit des Projekts ideal für Kommunikation und Erfahrungsaustausch und hat für die Projektbearbeitung selbst viele Impulse und Ideen geliefert. Das IBK hat einen nennenswerten Anteil (Activity 1.2 - FMU) zum Annex 60 Bericht [Wetter and van Treeck \[2017\]](#) beigesteuert. Der zum letzten Treffen gehaltene Vortrag zum Thema *NANDRAD FMU Export* ist als Anhang beigefügt.

### 3 Zusammenfassung und Ausblick

Betrachtet man die Ergebnisse des Projekts, kann man, vor allem auch im Hinblick auf die produktive Zusammenarbeit aller Partner, von einem sehr erfolgreichen Projekt sprechen. Die durchaus komplexen und schwierigen technischen Details der Co-Simulationskopplung im Bereich der Gebäudenergie- und Anlagensimulation konnten erforscht, technisch umgesetzt und durch prototypische Implementierung getestet werden. Dabei waren zwei Anwendungsbeispiele aus der realen Planungspraxis dabei, bei denen die gekoppelte Simulation einen deutlichen Genauigkeitsgewinn für die Planung der Anlagentechnik und Regelung und somit für die Entwicklung und Bewertung der betrachteten Energieversorgungskonzepte liefern konnte. Die Simulationszeit war, je nach Wahl der Kopplungsalgorithmen, im Rahmen des im Ingenieurbereich akzeptablen Rahmens (eine bzw. wenige Stunden für eine komplexe Jahressimulation eines Mehrzonen- und Anlagenmodells).

Die wesentlichen technischen und wissenschaftlichen Erfolge des Projekts sind:

- FMI-Exportfunktionalität für moderne Gebäudeenergiesimulationsverfahren wurde entwickelt, exemplarisch an THERAKLES und NANDRAD umgesetzt und getestet und die Erkenntnisse wurden dokumentiert und publiziert.
- Eine Quelltextoffene Bibliothekserweiterung für den Rechenkern CVODE zur Unterstützung der CoSimulations-Rücksetzfunktionalität entwickelt und veröffentlicht.
- Die FMI-Co-Simulationsmastertechnologie einschließlich Unterstützung für FMI 2.0 wurde entwickelt, prototypisch in zwei unabhängigen Masterprogrammen umgesetzt (EAS-Master und quelloffenes MASTERSIM-Programm), dokumentiert und publiziert (MASTERSIM wird inzwischen bereits in Diplomarbeiten/Forschungsprojekten nachgenutzt).
- Konventionen für physikalische Schnittstellendefinition zwischen Gebäudeenergiesimulation und Anlagenmodell wurden entwickelt, standardisiert, in THERAKLES, NANDRAD und GreenCity verwendet, dokumentiert und publiziert (u.a. im Annex 60 Projekt).
- Eine Prozedur und halbautomatische Unterstützungsfunktionalität für den Arbeitsablauf der Erstellung von Simulationseinheiten, Definition der Kopplung und Durchführen der gekoppelten Simulation wurde erarbeitet, an mehreren Praxisbeispielen getestet (und optimiert) und als Best-Practice-Ansatz publiziert.

Natürlich ist die in diesem Projekt entwickelte Technologie auf dem Stand eines Prototypen. Durch die Veröffentlichung der Projektergebnisse könnten jedoch neben Forschungseinrichtungen auch kommerzielle Softwarehersteller ein Teil dieses Know-Hows nachnutzen und dadurch Entwicklungskosten sparen, wodurch die Einführung in die Planungspraxis beschleunigt werden kann. Es ist zu erwarten, dass bei steigender Nachfrage nach Simulationskopplung bei Planungs- und Optimierungsaufgaben die FMI-basierte Kopplung einen hohen Stellenwert einnehmen wird und die Projektergebnisse bei der Etablierung der Technologie behilflich sein können.

Die Programme THERAKLES, NANDRAD und MASTERSIM haben schon in ihrer jetzigen Form einen gewissen Bekanntheitsgrad und es werden bereits aus der Planungspraxis Kopplungsfähigkeiten angefragt. Eine

Weiterentwicklung dieser Programme, vor allem des universal einsetzbaren CoSimulations-Masterprogramms MASTERSIM und Erlangen der Praxisreife dieser Planungstools, wäre eine sinnvolle und wirtschaftlich interessante Fortführung der Projektthemen.

## Literatur

- Andreas Nicolai. MASTERSIM - Open-Source FMI Co-Simulationsmaster mit Unterstützung für FMI 2.0. *Qucosa*, 2018.
- Andreas Nicolai and Anne Paepcke. Transformation der Gebäudeenergiesimulation NANDRAD mit variablem Zeitschrittlöser in eine Co-Simulation. In *Tagungsband zur BauSIM 2016*, 2016.
- Andreas Nicolai and Anne Paepcke. Co-Simulation between detailed building energy performance simulation and Modelica HVAC component models. In *Tagungsband zur Modelica Conference 2017*, 2017.
- Anne Paepcke and Andreas Nicolai. Anlagenregelung in ODE-Systemen am Beispiel der thermischen Raum- und Gebäudesimulation. In *Tagungsband zur BauSIM 2014*, 2014.
- Anne Paepcke, Torsten Schwan, and Andreas Nicolai. Schnittstellen für die Co-Simulationsklopplung zwischen Gebäude und Heizungsanlagensimulation. In *Tagungsband zur BauSIM 2016*, 2016.
- Michael Wetter and Christoph van Treeck. *IEA EBC Annex 60: New Generation Computing Tools for Building and Community Energy Systems*. September 2017. ISBN 978-0-692-89748-5. URL <http://www.iea-annex60.org/pubs.html>.