

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

06/2022

NextHyb2

Next Generation hybrider Modellierung für die Analyse und Optimierung integrierter, intelligenter
Energiesysteme

Projektnummer: 881150

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	6. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01/02/2021
Projektende	31/01/2022
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	12 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	Graz University of Technology AEE INTEC
Ansprechpartner	Gerald Schweiger
Postadresse	Inffeldgasse 16, 8010 Graz
Telefon	
Fax	
E-mail	gerald.schweiger@tugraz.at
Website	

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

NextHyb2

Next Generation hybrider Modellierung für die Analyse und Optimierung integrierter, intelligenter
Energiesysteme

AutorInnen:

Schweiger Gerald, Basak Falay, Sandra Wilfling, Ingo Leusbrock

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis.....	5
2	Einleitung.....	6
3	Inhaltliche Darstellung.....	6
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	7
5	Ausblick und Empfehlungen	13
6	Literaturverzeichnis.....	14
7	Kontaktdaten	14

2 Einleitung

Intelligente Energiesysteme umfassen das gesamte Energiesystem über mehrere Sektoren wie Elektrizität, Heizung, Kühlung, Gebäude, Transport und Industrie sowie Synergien zwischen diesen Sektoren¹. Diese intelligenten Systeme werden ein hohes Maß an Flexibilität und Effizienz aufweisen müssen, um einen zuverlässigen und nachhaltigen Betrieb zu ermöglichen. In zukünftigen Systemen wird es daher zu einem Paradigmenwechsel kommen, indem die Nachfrage dem Angebot intelligent folgen wird. Die Organisation und Regelung des Systems wird sich von der Erzeugungs- auf die Verbrauchsseite verlagern müssen, ohne jedoch Einbußen in der Versorgungssicherheit, Komfort und Verfügbarkeit nach sich zu ziehen. Diese Ziele können durch eine systematische Einbettung von Cyber-Technologien erreicht werden, die in der Lage sind, die physischen Systeme zu überwachen, die Kommunikation zwischen verschiedenen Subsystemen zu ermöglichen sowie diese zu regeln. Dieser Übergang führt dazu, dass sich zukünftige integrierte regionale Energiesysteme zu komplexen cyber-physikalischen Energiesysteme entwickeln, mit starken Wechselwirkungen zwischen dem Energie-, Kommunikations- und urbanen Regelsystem².

3 Inhaltliche Darstellung

Cyber-Physikalische Systeme (CPS) bezeichnen die Integration von softwaretechnischen Komponenten und physikalischen Prozessen³. Ein Trend in der modellbasierten Analyse und Optimierung von CPS ist die zunehmende Komplexität der betrachteten Systeme, wodurch etablierte Methoden an ihre Grenzen stoßen. Im Bereich integrierter regionaler Energiesysteme ist die zunehmende Komplexität auf das Aufkommen des *Internet Of Things* und die damit verbundenen Möglichkeiten der Kommunikation und die Verfügbarkeit großer Datenmengen, sowie auf die Verschränkung der verschiedenen Sektoren Strom, Gas, Wärme, Kälte, Mobilität, etc. zurückzuführen.

Key Message: Die Digitalisierung integrierter regionaler Energiesysteme führt zur Etablierung von Cyber-Physikalischen Energiesystemen, welche auf der Integration von softwaretechnischen Komponenten und physikalischen Prozessen aufbaut. In der Analyse und Optimierung dieser Systeme sind Methoden und Werkzeuge der Modellierung und Simulation von zentraler Bedeutung. Dabei sind sowohl physikalische Modelle als auch datenbasierte Modelle – und vor allem die Kombination beider – von zentraler Bedeutung.

¹ Lund et al. 4th Generation district heating (4GDH) integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems, Energy, 2014.

² Rasmussen et al. A review of cyber-physical energy system security assessment," 2017 IEEE Manchester PowerTech. 2017.

³ Lee. Cyber Physical Systems: Design Challenges, 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing, 2008.

Im Projekt NextHyb2 werden Möglichkeiten und Einschränkungen im Bereich hybrider Co-Simulation analysiert.

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Das Projekt analysierte bestehende Standards, Werkzeuge und Methoden für "hybride Co-Simulation" auf der Grundlage einer *taxonomiebasierten* Analyse der Veröffentlichungen im Bereich Co-Simulation von 2018 bis 2021 (Alfalouji, et al., 2022). Abbildung 1 zeigt die Trends im Bereich von Co-Simulation nach den ausgewählten Anwendungen (Gebäude, intelligente Netze, Energiesysteme und cyber-physische Energiesysteme).

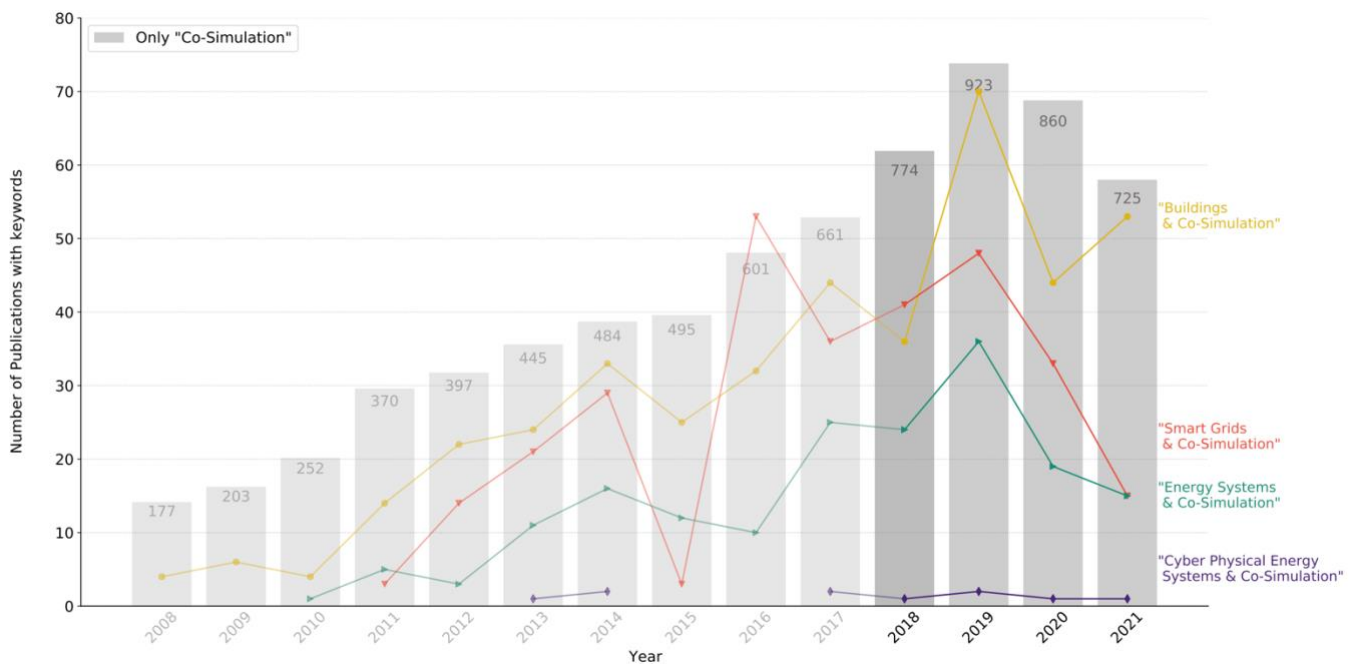


Abbildung 1: Trend der veröffentlichten Artikel zwischen 2008 und 2021 für Co-Simulation für Gebäude, Smart Grids, Energiesysteme und cyber-physische Energiesysteme gemäß der Scopus-Suche.

Die regionale Verteilung der evaluierten Veröffentlichungen (Abbildung 2) zeigt, dass Forschungseinrichtungen weltweit am Thema Co-Simulation forschen.

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

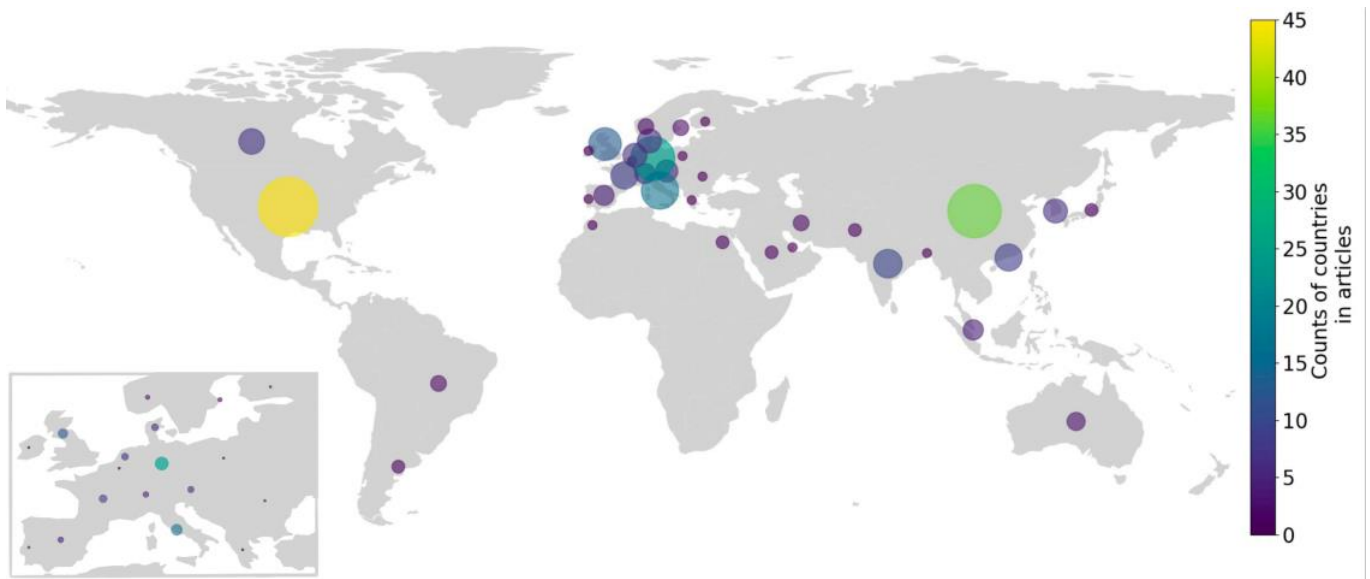


Abbildung 2: Regionale Verteilung der evaluierten Veröffentlichungen

Abbildung 3 zeigt Anwendungen und Bereiche von Co-Simulation im Bereich von Smart Energy Systems. Hier zeigt sich, dass der größte Teil der Veröffentlichungen sich auf die Optimierung existierender Systeme (78% *operational optimization*) bezieht. Mehr als die Hälfte der Arbeiten verwenden reale Anwendungsfälle (und nicht virtuelle). Der häufigste Anwendungsfall ist im Bereich von HLK Systemen.

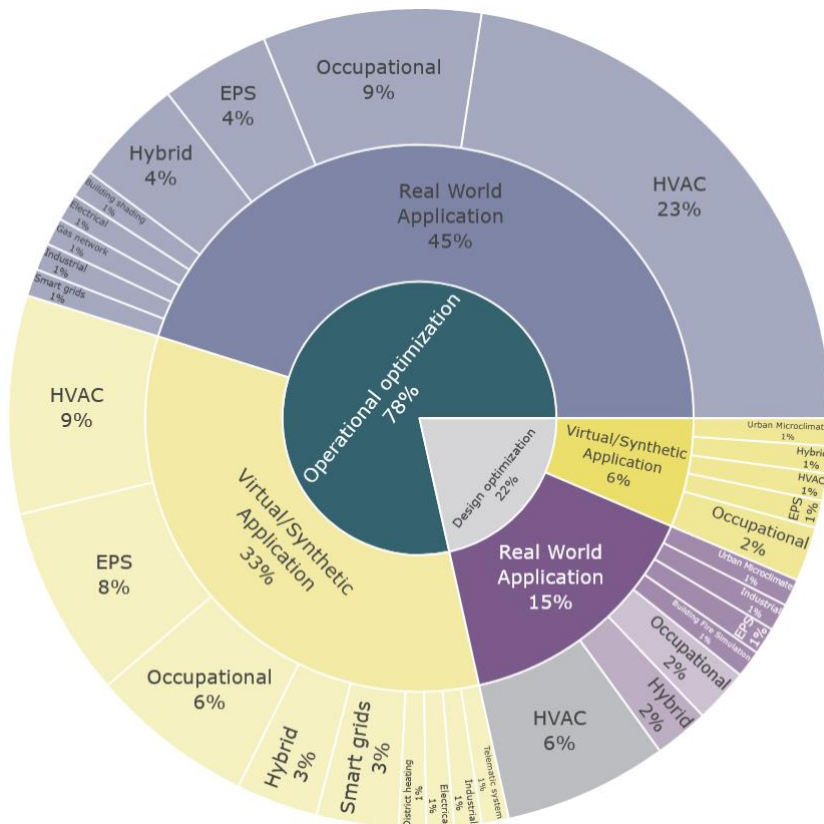


Abbildung 3: Anwendungen und Bereiche von Co-Simulation in den analysierten Veröffentlichungen

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ein kritischer Punkt im Bereich wissenschaftlicher Publikationen ist die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Abbildung 4 und Abbildung 5 zeigen die Reproduktionsmöglichkeiten der evaluierten Veröffentlichungen. In den meisten Fällen werden sowohl Daten als auch Modelle nicht offen publiziert. Weiteres wird der Aufbau und die Konfigurationen der Modelle nicht klar kommuniziert.

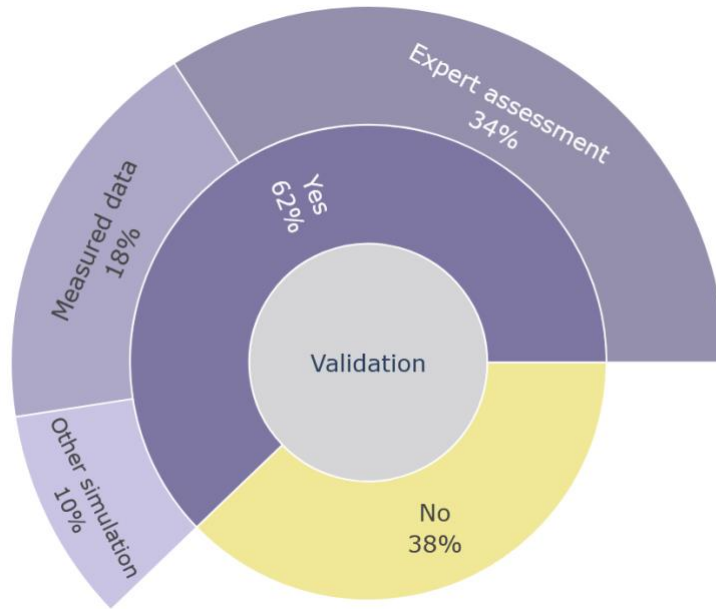


Abbildung 4: Methoden zur Validierung der Simulationsresultate.

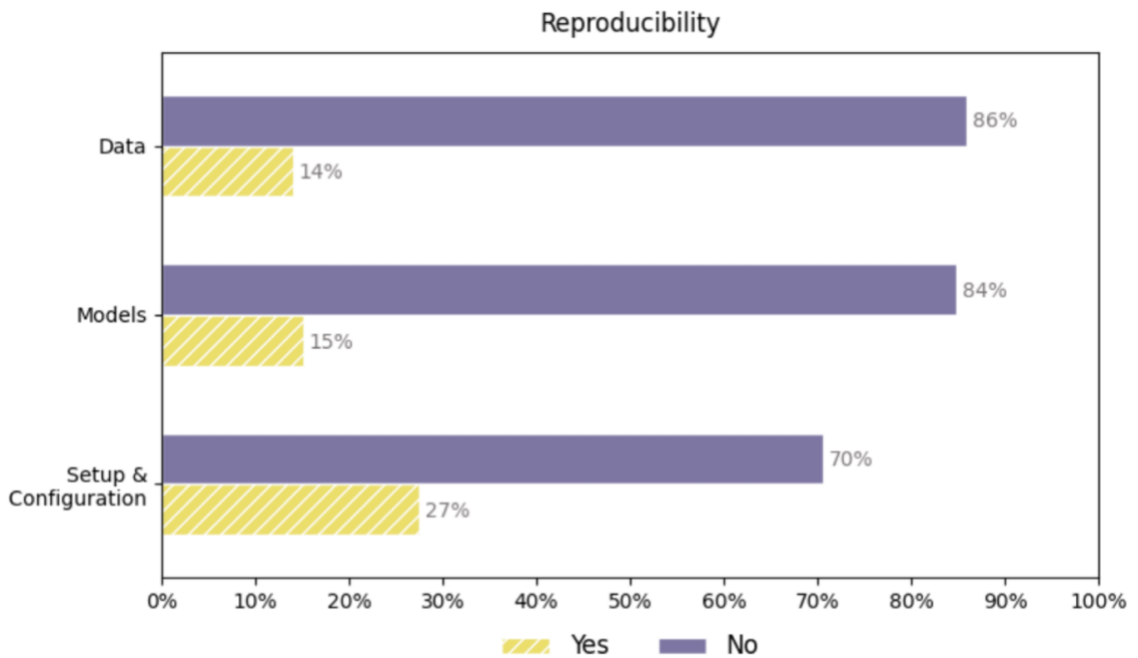


Abbildung 5: Reproduktionsmöglichkeiten basierend auf der Reproduzierbarkeit von Daten, Modellen und Konfiguration.

Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Abbildung 6 zeigt weit verbreitete Tools im Bereich Co-Simulation für verschiedene Anwendungsbereiche. Die am häufigsten verwendeten Tools sind Modelica und Energyplus.

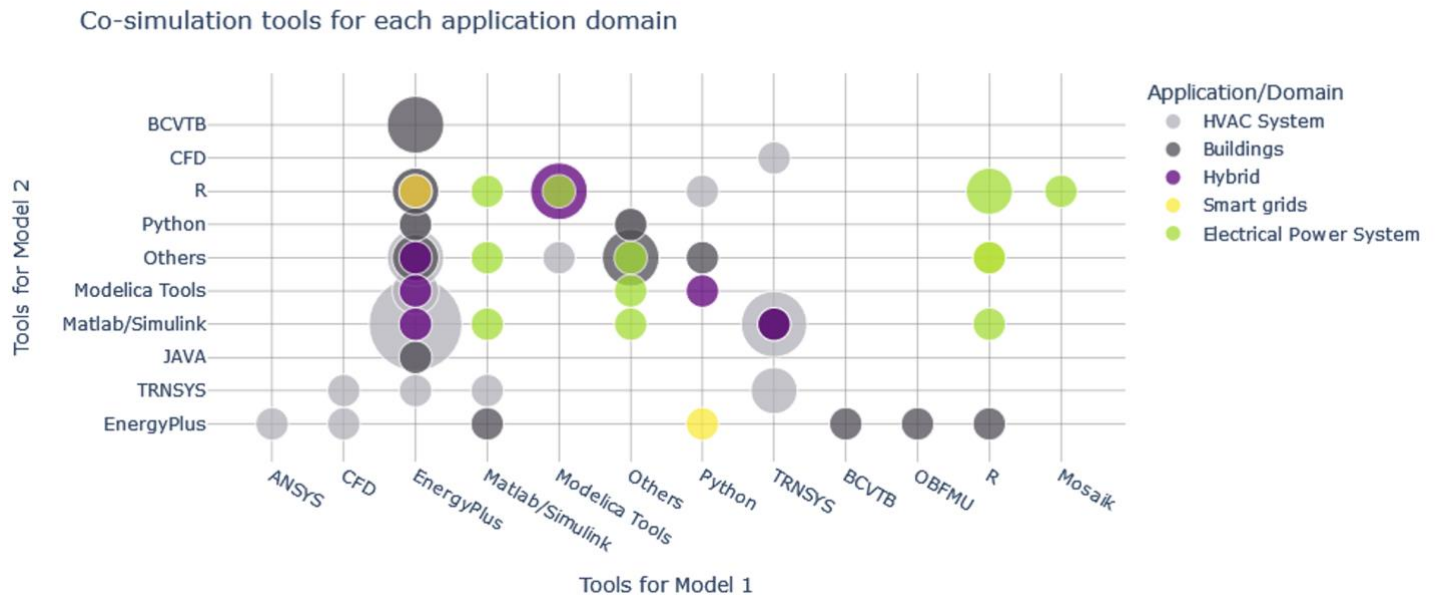


Abbildung 6: Co-Simulationswerkzeuge für jeden Anwendungsbereich

Das Proof of Concept

In (Falay, et al., 2021) wird das Proof of Concept hybrider Co-Simulation dargestellt; dazu wurde das Heizsystem eines Einfamilienhauses mit 180m² Wohnfläche analysiert. Abbildung 7 gibt einen Überblick über die zentralen Komponenten des Heizsystems.

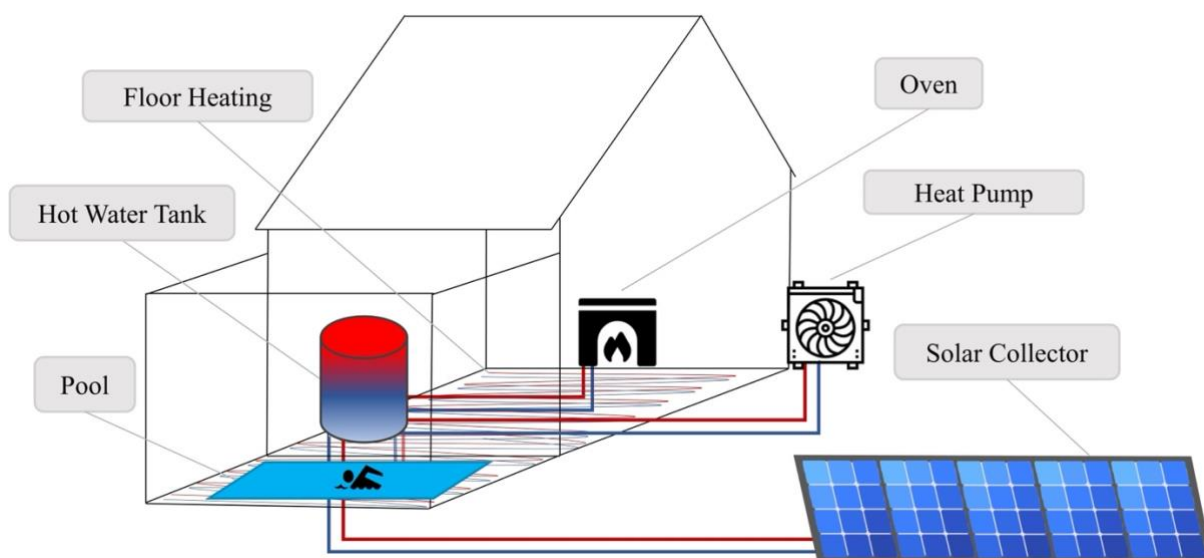


Abbildung 7: Proof of Concept Einfamilienhaus

Das Haus ist mit einer Fußbodenheizung ausgestattet und verfügt über drei verschiedene Wärmequellen:

- Solarkollektor mit 46m² Flachkollektorfläche
- Kaminofen
- Luft-Wasser-Wärmepumpe
- Speicher

Das physikalische Modell der Wärmeversorgung wurde in Modelica implementiert; das Machine Learning (ML) Modell des Speichers in Python. Das ML Modell berechnet die vier Temperaturschichten des Speichers basierend auf statischen und dynamischen Inputs. Die statischen Inputs sind Temperaturen und Massenströme von Solarkollektor, Wärmepumpe, Fußbodenheizung und Ofen. Dynamische Inputs sind die vier Temperaturschichten des Speichertanks mit einem 1-stündigen *look-back* Intervall. Um das ML Modell des Speichers in die Modelica Simulationsumgebung Dymola zu integrieren, wurde das Modell mittels UniFMU als FMU exportiert. Abbildung 8 zeigt die Simulationsergebnisse; der erste Subplot zeigt die Temperaturniveaus des Speichers für einen Zeitraum von 32 Tagen. Der zweite Subplot zeigt, welche Komponenten eingeschaltet sind und der dritte zeigt den Lastzustand des Speichers.

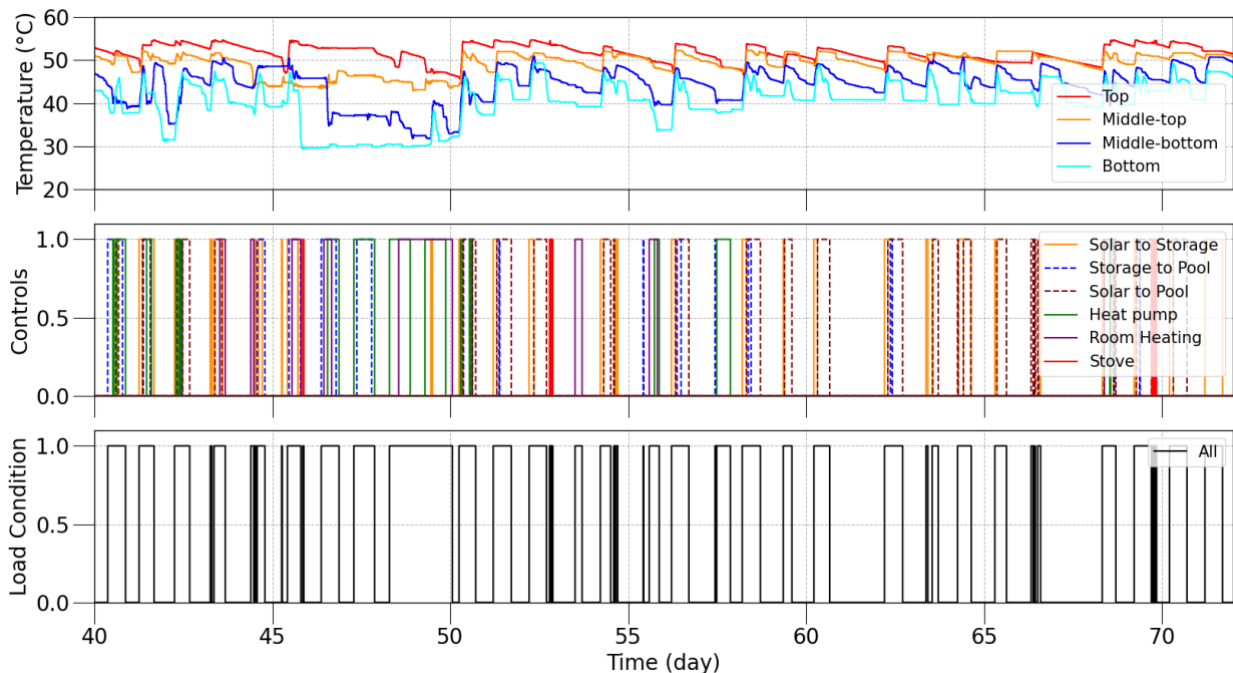


Abbildung 8: FMU-ML Systemsimulation

In einem zweiten Use-Case – publiziert in (Wilfling, et al., 2022) - wurde das Thema Surrogate Models adressiert. Surrogate Models sind eine weit verbreitete Methode, um das Verhalten komplexer Systeme durch vereinfachte Modelle anzunähern. Durch Surrogate Models ist es möglich, bestimmte Komponenten eines Systems durch Platzhalter (*surrogates*) zu ersetzen; diese Surrogates können während der Laufzeit

der Simulation ausgetauscht werden. In unserem Use-Cases wurde der Solarkollektors sowohl physikalisch in Modelica, als auch durch ein ML basierend auf Messdaten modelliert.

Der Austausch der Modelle sollte basierend auf bestimmten Kriterien erfolgen, um verschiedene Szenarien darstellen zu können, z.B. mithilfe der *Scheduling* – Methode (Austausch zu bestimmten Zeitpunkten) oder der *Threshold* – Methode (Austausch basierend auf bestimmten Werten). Ein schematischer Überblick dieses Konzepts ist in Abbildung 9 dargestellt.

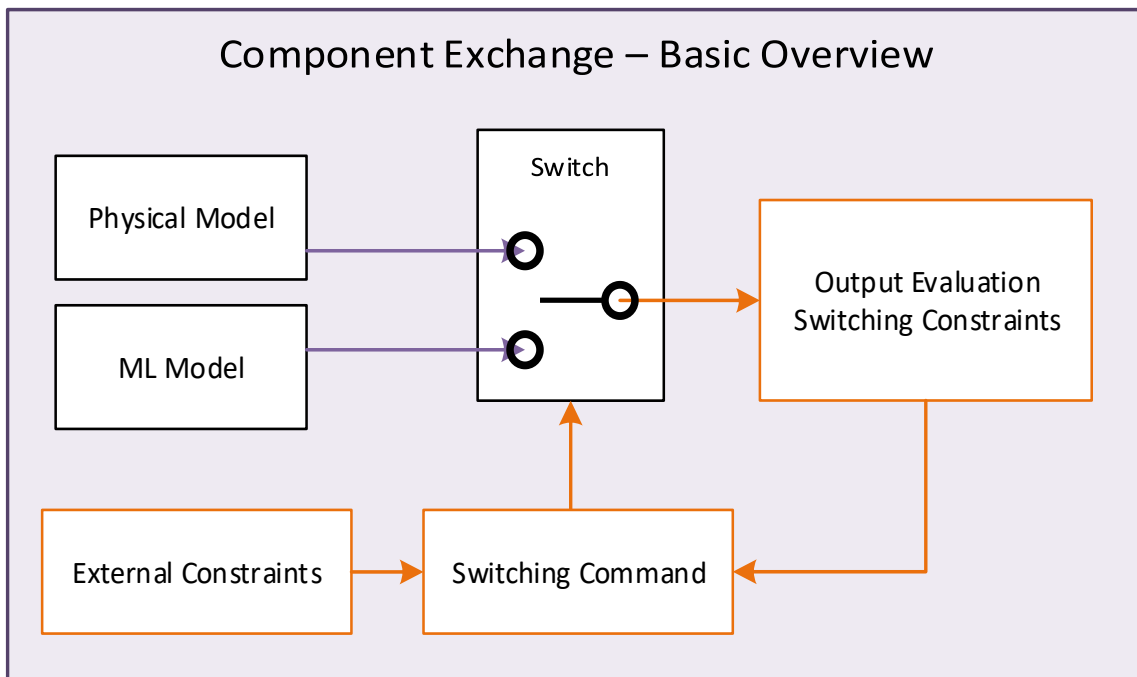


Abbildung 9: Grundkonzept des Komponentenaustauschs

Abbildung 10 zeigt die Simulationsergebnisse des Komponentenaustauschs mithilfe der *Scheduling*-Methode innerhalb eines Zeitraums von 7 Tagen. Durch diese Methode kann zusätzlich die Simulationszeit signifikant reduziert werden.

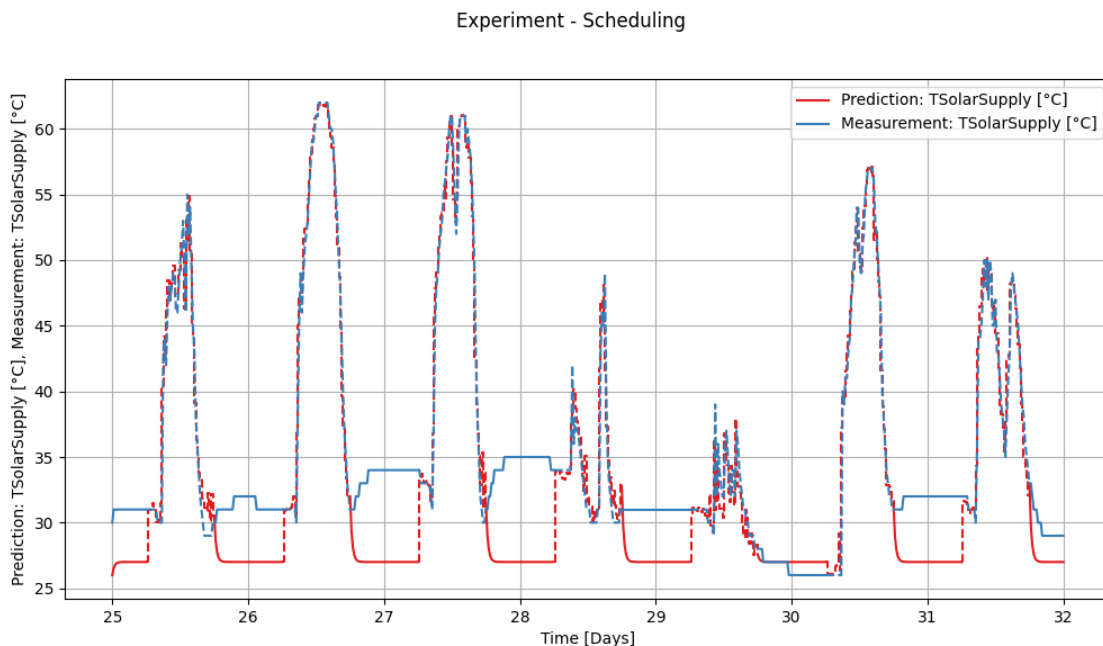


Abbildung 10: Resultate des Komponentenaustauschs für physikalisches und datengetriebenes Modell.

5 Ausblick und Empfehlungen

Im Projekt wurde eine Potenzialanalyse für Anwendungen im Bereich hybrider Co-Simulation für intelligenter Energiesysteme sowie eine kritische Analyse bestehender Methoden durchgeführt.

- Die Ergebnisse des Projektes zeigen, dass die meisten Arbeiten nicht reproduzierbar sind. Die Ergebnisse zeigen weiter, dass es sich bei vielen Arbeiten um keine Co-Simulation handelt, sondern um sequentielle Simulationen, die keine Co-Simulation im klassischen Sinne erfordern. Eine enge Zusammenarbeit zwischen den Disziplinen (Informatik, Ingenieurwesen, etc.) ist notwendig, um die Qualität der Arbeit zu verbessern.
- Um die zukünftige Forschung im Bereich von hybrider Co-Simulation zu beschleunigen, sind offene Modelle und Daten von großer Bedeutung.
- Es werden automatisierte und robuste Workflows zur Erstellung von (hybriden) Co-Simulationen benötigt; der Support von Docker für UniFMU ist ein wichtiger Schritt in diese Richtung (Schranz, et al., 2021).
- Die Einbindung von Surrogate-Modellen in verschiedenen Bereichen der Co-Simulation kann zur Verbesserung der Genauigkeit verschiedener Modelle beitragen. Zusätzlich gibt es Potenzial für die Reduzierung der Laufzeit rechenintensiver Simulationen.
- Die Version 3.0 des FMI Standards verbessert die Möglichkeiten hybrider Co-Simulation; FMI 3.0 unterstützt die Aktualisierung von Parametern wesentlich effizienter als frühere Versionen, was vor

allein für ML Modelle wichtig ist. Es ist notwendig, dass bestehende Frameworks wie UniFMU Unterstützung für die Version 3.0 bieten.

- Ein wichtiges Forschungsfeld für Anwendungen im Bereich intelligenter Energiesysteme ist die Integration von physikalischem Wissen in ML Modelle; dazu gibt es laufenden Forschungsarbeiten im Bereich Domain-informed ML, physics-informed ML, oder theory-guided ML.

6 Literaturverzeichnis

- Alfalouji, Q., Wilfling, S., Falay, B., Exenberger, J., Schranz, T., Gomes, C., & Schweiger, G. (2022). Hybrid Co-Simulation in Smart Energy Systems - A Taxonomic Review. *Submission in Progress*.
- Falay, B., Wilfling, S., Alfalouji, Q., Exenberger, J., Schranz, T., Legaard, C., . . . Leusbrock, I. (2021). Coupling physical and machine learning models: case study of a single-family house. *Proceedings of 14th Modelica Conference 2021*. Linköping, Sweden.
- Schranz, T., Legaard, C., Tola, D., & Schweiger, G. (2021). Portable runtime environments for Python-based FMUs: Adding Docker support to UniFMU. *Proceedings of 14th Modelica Conference 2021*. Linköping, Sweden.
- Wilfling, S., Alfalouji, Q., Falay, B., Exenberger, J., Schranz, T., & Schweiger, G. (2022). Smart Energy Systems Modelling - Component Exchange during Simulation. *2nd International Sustainable Energy Conference - ISEC*. Graz.

7 Kontaktdaten

Projektleiter: Gerald Schweiger

Institut: Graz University of Technology

Kontaktadresse: Inffeldgasse 16, 8010 Graz, gerald.schweigertugraz.at

Kooperationspartner: AEE Intec