

# Energieforschungsprogramm

## Publizierbarer Endbericht

**Programmsteuerung:**

Klima- und Energiefonds

**Programmabwicklung:**

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

23.08.2024

# 5D Digital Twin für industrielle Energiesysteme

Projektnummer: 881140

# Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

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

Ausschreibung	6. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01.02.2021
Projektende	31.05.2024
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	39 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	Institut für Energietechnik und Thermodynamik, Technische Universität Wien
AnsprechpartnerIn	Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. René Hofmann
Postadresse	Getreidemarkt 9/E302, 1060 Wien
Telefon	+43 1 58801 302327
Fax	-
E-mail	rene.hofmann@tuwien.ac.at
Website	<a href="https://www.tuwien.at/mwbw/iet">https://www.tuwien.at/mwbw/iet</a>

# 5D Digital Twin für industrielle Energiesysteme

**AutorInnen:**

Institut für Energietechnik und Thermodynamik, TU Wien

Paul Schwarzmayr

Lukas Kasper

Felix Birkelbach

René Hofmann

Institut für Computer Engineering

Gernot Steindl

Wolfgang Kastner

evon GmbH

Martin Kureck

Alexander Hehenberger

Gerald Hirschmann

Andreas Leitner

voestalpine Stahl Donawitz GmbH

Florian Javernik

Michael Schwaiger

## 1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis .....	4
2	Einleitung.....	5
2.1	Aufgabenstellung .....	8
2.2	Schwerpunkt des Projekts.....	10
2.3	Einordnung in das Energieforschungs-Programm .....	11
2.4	Methoden.....	11
2.4.1	Modellierungsmethoden für die Abbildung der virtuellen Einheit.....	11
2.4.2	Wissensrepräsentation/-management in maschinenlesbarer Form .....	13
2.4.3	Micro-Services/-dienste.....	13
2.5	Aufbau der Arbeit.....	15
3	Inhaltliche Darstellung.....	15
3.1	Entwicklung der 5DIndustrialTwin Plattform .....	16
3.1.1	Verbindungsdimension.....	17
3.1.2	Physische Einheit.....	18
3.1.3	Virtuelle Einheit .....	19
3.1.4	Datendimension .....	19
3.1.5	Service dimension.....	20
3.2	Labora Aufbau und industrieller Use-Case .....	21
3.3	Demonstration des Frameworks: Softsensor-Service.....	26
3.4	Evaluierung des 5DIndustrialTwin Frameworks: Adaptive Betriebsoptimierung des industriellen Use-Cases .....	30
3.4.1	MILP-UC-Modell für die Betriebsoptimierung .....	30
3.4.2	5DIndustrialTwin Framework und Micro-Services für die Evaluierung .....	33
3.4.3	Workflows und Kommunikationsflüsse für den Informationsaustausch.....	40
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	41
4.1	Demonstration des Frameworks: Softsensor-Service.....	41
4.2	Evaluierung des 5DIndustrialTwin Frameworks: Adaptive Betriebsoptimierung des industriellen Use-Cases .....	42
5	Ausblick und Empfehlungen.....	46
6	Literaturverzeichnis.....	48
7	Kontaktdaten.....	54

## 2 Einleitung

Die Digitalisierung gilt als globaler Trend, welcher die Effizienz von Prozessen über alle Branchen hinweg auf ein neues Level heben kann und damit auch zur fortschreitenden Dekarbonisierung des Industriesektors beitragen wird. Oft wird dabei auch von der „vierten industriellen Revolution“ gesprochen. Heute stellt die rasante Entwicklung grundlegender Basistechnologien (sogenannter Digitaler Technologien oder „Enabling Technologies“) die treibende Kraft der vierten industriellen Revolution hin zur Industrie 4.0 (I4.0) und Energie 4.0 (E4.0) dar [1]. Der Digitale Zwilling, oder Digital Twin (DT), gilt als Schlüsseltechnologie, der eine solche Transformation in diesen Bereichen ermöglicht und damit enorme Potenziale offenlegt. Unter „Digital Twinning“ versteht man im Allgemeinen den Prozess der Abbildung eines physikalischen Objekts auf eine digitale Plattform. Mit der exzellenten Skalierbarkeit des DT und dem rasanten Wachstum des Internet of Things (IoT) werden eine große Anzahl an Anwendungsmöglichkeiten, wie Energieoptimierung, Performance Tuning, Predictive Maintenance und Optimierung von Produkten, über den gesamten Lebenszyklus offengelegt [2]. Um das Potential dieser einzelnen, bereits existierenden, Möglichkeiten optimal auszuschöpfen, bedarf es jedoch einer ganzheitlichen Betrachtung.

Die Idee des DT wurde abgeleitet vom Konzept des physikalischen Zwillings, welches von der amerikanischen Raumfahrtbehörde NASA<sup>1</sup> im Rahmen des Apollo-Raumfahrtprogramms eingeführt wurde, indem Operationen an einem Replikat auf der Erde getestet wurden. Erst im Jahr 2012 wurde das Konzept von der NASA wieder aufgegriffen und unter dem Namen Digital Twin weiterverfolgt [3]. Seitdem wurde ein nahezu exponentieller Anstieg der Anzahl an wissenschaftlichen Publikationen zum Thema DT verzeichnet, wie eine umfangreiche Literaturrecherche zeigt. In der Definition der NASA wird der DT als multiphysikalisches, skalierbares und probabilistisches Abbild (Simulationsmodell) eines physischen Objektes oder Systems beschrieben, das dazu dient, unter Berücksichtigung von historischen- und Echtzeit-Sensordaten bestimmte Aspekte des realen Objekts abzubilden. Im Fachbereich herrscht jedoch nach wie vor Uneinigkeit über die exakte Definition des DT, wobei laut allgemeinem Konsens erst durch den bidirektionalen Datenaustausch zwischen physischem und digitalem Objekt in Echtzeit von einem DT gesprochen werden kann. Nach dem Aufgriff des DT-Konzepts durch die NASA im Jahr 2012 wurde Forschung und Entwicklung zum DT vor allem im Bereich der Luftfahrt vorangetrieben [4], [5]. In jüngster Vergangenheit fand der DT den Weg in immer mehr Branchen, wie Automotive, Öl&Gas und Healthcare&Medicine [6].

Zumindest gewisse Formen von DT-Implementierungen lassen sich auch bereits in nationaler Industrie finden. Die VERBUND AG stellte vor Kurzem das Projekt „Hydropower 4.0 - Digitales Wasserkraftwerk“ vor, in dem ein DT einer Pilotanlage erstellt wird, der u.a. Anomalie-

---

<sup>1</sup> NASA - National Aeronautics and Space Administration, Washington D.C.: <https://www.nasa.gov>

Detektion und Predictive Maintenance ermöglichen und eine Basis für Designoptimierung und Benutzerschulung darstellen soll [7]. ANDRITZ entwickelte einen DT für die Pulp&Paper-Branche, der vor allem Online-Prozessoptimierung, Designoptimierung über den gesamten Lebenszyklus und wiederum fortschrittliche Benutzerschulung ermöglichen soll [8]. Auch aus dem nationalen Innovationssystem sind Forschungsprojekte zu nennen, die sich mit ersten Ansätzen zum Thema Digitalisierung und speziell DT beschäftigen: „IoT4CPS“[9], „DigiFact Performance“[10], „DigiTwinPV“[11], „DigitalEnergyTwin“[12]. Während sich „IoT4CPS“ als Leitprojekt im Bereich des automatisierten Fahrens mit der Entwicklung innovativer Konzepte beschäftigt und „DigiFact Performance“ auf Konzeptualisierung und prototypische Entwicklung in der produzierenden Industrie abzielt, wollen in den beiden letztgenannten Projekten DT-Implementierungen mit realen Anwendungsfällen in Energiesystemen entwickelt werden. Das Projekt „DigiTwinPV“ zielt mit seinem DT-Konzept auf die Früherkennung von Fehlern in Photovoltaik-Modulen in einer Hardware-in-the-Loop-Umgebung ab. In „DigitalEnergyTwin“ soll ein Softwaretool zur Betriebs- und Designoptimierung industrieller Energiesysteme am Beispiel eines Leiterplattenherstellers entwickelt werden.

Trotz der vielversprechenden Ansätze bisheriger und laufender Entwicklungen ist allgemein ein Mangel an tiefgehender Forschung am DT zu erkennen. In einer umfangreichen Literaturstudie stellten Tao et al. (2019) [13] das Fehlen einer einheitlichen DT-Modellierungsmethode als besonders kritisch fest. Während also DT-Implementierungen hohes Potential zugeschrieben wird, besteht, neben der Vereinheitlichung von Schnittstellen und Kommunikationsprotokollen, vor allem der Bedarf einer einheitlichen DT-Modellierung, um ihre praktische Einführung in industrielle Energiesysteme zu ermöglichen.

Um den DT von der theoretischen Beschreibung durch Definitionen in eine praxistauglichere Form zu bringen, wurden in der Literatur unterschiedliche Modellierungsdesigns erarbeitet. Der DT muss in eine Struktur eingebunden werden, die ein Zusammenspiel des physischen Objekts mit seinem DT ermöglicht und gleichzeitig einen Nutzen aus diesem Zusammenspiel generieren kann. Nutzen in diesem Zusammenhang kann vor allem aus den generierten Daten des DT und des physischen Objekts gezogen werden. Die wesentlichen Merkmale, die ein DT-Konzept somit aufweisen sollte, sind die folgenden:

- Darstellung der Interoperabilität zwischen physischem Objekt und virtueller Repräsentanz.
- Darstellung der Verarbeitung von Daten, die von außen in das Modell hinzugefügt und/oder innerhalb des Modells erzeugt, verarbeitet oder weitergeleitet werden.
- Darstellung eines direkten Nutzens aus dem Zusammenspiel von physischem Objekt, seinem virtuellen Abbild und allen Daten.

Ein frühes DT-Modell von Grieves (2014) [14] ist durch einen dreidimensionalen Ansatz gekennzeichnet (3D-DT). Der DT wird dabei über folgende drei Dimensionen beschrieben.

- (1) Das physikalische Objekt, oder physische Objekt bzw. System, in der realen Welt
- (2) Das digitale Objekt bzw. System in der virtuellen Welt, auch virtuelle Einheit genannt
- (3) Die Verbindung zwischen physikalischem und digitalem Objekt durch Daten und Information (verknüpft die anderen Dimensionen miteinander)

Das 3D-DT-Modell nach Grieves zeigt die grundsätzliche Modellierungsweise des DT. Allerdings lässt sich mit diesen Dimensionen nicht darstellen, inwiefern sich aus dem Konzept neuartige Dienstleistungen extrahieren lassen. Außerdem werden Daten nur als Verbindungsglied zwischen realer und virtueller Welt verstanden. Wie diese Daten verarbeitet werden und inwiefern sich daraus Informationen ableiten lassen, wird nicht dargestellt. Um diese Aspekte miteinzubinden, muss das Modell um die folgenden zusätzlichen Dimensionen zu einem 5D-DT erweitert werden:

- (4) Das Daten-Modell, in dem die Daten aus allen Quellen gesammelt und verwaltet (fusioniert) werden sowie in nutzbare Information aufbereitet werden.
- (5) Das Service-Modell enthält extrahierte Dienstleistungen oder Services, die sich aus der Funktion des DT ergeben und stellt diese dem Nutzer des DT zur Verfügung.

Das Daten-Modell (4) beinhaltet dabei Daten aus physischen und virtuellen Quellen, daraus fusionierten Daten, sowie Domänenwissen und Informationen aus dem Service-Modell (5). Demgegenüber sind im digitalen Objekt (2) mehrere Ebenen aus Modellen zur Simulation, Klassifizierung und Optimierung hinterlegt, welche auch dort ausgeführt werden. Die extrahierten DT-Services können durch die Einführung von (5) von den Funktionen des DT abgekapselt werden, um einheitliches Management und on-demand Nutzung zu ermöglichen.

Durch diese geschlossene Schleife und Bidirektionalität zwischen physikalischem und virtuellem Raum im 5D-DT Modellierungsansatz können damit alle Komponenten optimiert und eine deutliche Leistungssteigerung über die extrahierten Services erzielt werden. Der 5D-DT Ansatz wurde jüngst in der Literatur in einigen Beiträgen behandelt (Tao et al. (2017) [15], Tao et al. (2018) [16], Tao et al. (2019) [17], Josifovska et al. (2019) [18], Cheng (2020) [19], Hu et al. (2020) [20]) und seine Nützlichkeit und Allgemeingültigkeit durch Konzeptualisierung für unterschiedlichste Anwendungsfälle aufgezeigt.

### 2.1 Aufgabenstellung

Wie in der Einleitung dargelegt wurde, gibt es großes Anwendungspotential für DT, vor allem auch in der energieintensiven Industrie. Durch die rasante Entwicklung digitaler Technologien in den letzten Jahren entwickelte sich eine Vielzahl neuer Möglichkeiten, um Kosten- und Energieeffizienz industrieller Anlagen zu forcieren, diese nachhaltiger zu betreiben und die Produktivität zu erhöhen. Predictive Maintenance, Remaining Useful Lifetime (RUL) Prediction, Design- und Betriebsoptimierung und intelligente Methoden zur Fehlerprädiktion sind nur einige dieser innovativen Praktiken, die aus der Digitalisierung industrieller Energiesysteme entspringen.

Viele verschiedene Ausführungen der oben genannten Digitalisierungslösungen werden bereits heute in unterschiedlichen Branchen, Anlagen und Prozessen. Während Machbarkeit und Nutzen dieser Einzelanwendungen unbestritten sind, stellt sich viel mehr die Frage nach der ganzheitlichen Betrachtung. Oftmals liefern intelligente Datenverarbeitungstools zwar unbestreitbaren Mehrwert, wie zum Beispiel eine genaue Prognose zur Restlebensdauer bestimmter Komponenten, jedoch wird diese Information im Allgemeinen nur als Indikator herangezogen und nicht in einer ganzheitlichen Optimierung genutzt. Genau hier werden DT eingreifen, um alle generierten Informationen effizient weiterzuverarbeiten, um optimales Design und optimalen Betrieb des gesamten Prozesses über den gesamten Lebenszyklus zu garantieren.

Im Bereich der Modellbildung kann heutzutage und in Zukunft auf eine breite Palette verschiedener Ansätze zurückgegriffen werden. Wie bereits oben ausgeführt, reicht diese von physikalischen Modellen über grey box models bis hin zu rein datengetriebenen Modellen. Im Allgemeinen lässt sich aber keine Universallösung ableiten, da jeder dieser Ansätze Vor- und Nachteile mit sich bringt und unterschiedliche Anwendungsmöglichkeiten liefert. Die Schwierigkeit für Anwender liegt vor Allem darin, die unterschiedlichen Charakteristiken zu erfassen und zu erkennen und um diese möglichst effizient zur Generierung von Information nutzen zu können. Verschiedene Oberflächen und Programmiersprachen sowie auch grundlegend andere Datenstrukturen machen die einheitliche Verwendung schwierig. Hier wird ein DT helfen, unterschiedliche Modelle über ein gemeinsames Framework zu verknüpfen und in der virtuellen Einheit im DT-Konzept zusammenzufassen.

Um alle Potentiale der Digitalisierung auszunutzen und so die postulierten Verbesserungen für industrielle Energiesysteme zu ermöglichen, ist ein durchgängiges Framework, wie im DT, notwendig. Wie schon in der Einleitung geschildert, fehlt es in diesem rasant wachsendem Forschungs- und Entwicklungsfeld an einer einheitlichen DT-Modellierung. Während sich viele Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Innovationsprojekte einzelnen Wertschöpfungs-

Aspekten in DT widmen, wird der Frage nach einem grundlegenden Framework dafür augenscheinlich wenig Anstrengung zugewendet.

Um jedoch die praktische Einführung von DT in industrielle Energiesysteme zu ermöglichen, muss zuerst diese grundlegende Problematik geklärt werden. Modellierungsmethoden wie der 5D-DT ([15], [16], [17], [18], [19], [20], [21]) gelten in dieser Hinsicht als besonders vielversprechend. Es bedarf jedoch insbesondere noch der experimentellen Erprobung dieser Methodik, um die praktische Anwendbarkeit und den Nutzen zu demonstrieren. Zusätzlich dazu sollte die Vereinheitlichung von Schnittstellen und Kommunikationsprotokollen vorangetrieben und die Entwicklung im Bereich der informationstechnischen Abbildung industrieller Anlagen forciert werden.

Bei der Datenanbindung von DT an ihr reales Gegenstück über industrielle Informationssysteme steht man vor der Herausforderung alle relevanten Echtzeitdaten aus heterogenen Datenquellen zusammenzuführen, um sie einheitlich im DT zu verwalten. Viele dieser Datenquellen stammen oft von bestehenden Automationskomponenten verschiedener Hersteller und bieten keine einheitlichen Schnittstellen. Datenkonvertierung erfolgt oft über systemspezifische Gateways mit großer Fehleranfälligkeit und geringer Wiederverwendbarkeit. Um diesen Herausforderungen zukünftig gerecht zu werden, bedarf es nicht nur eines konzeptuellen Modells des Gesamtsystems, das alle Informationen konsistent, kohärent, und umfassend verwaltet und zur Verfügung stellt, sondern darüberhinausgehend einer systematischen Methode, um derartige Informationsmodelle im industriellen Umfeld zu entwickeln [22].

Informationsmodelle als zentrale Elemente der Architektur von DT können helfen alle relevanten Daten aus verschiedensten Datenquellen zu integrieren und einheitlich aufzubereiten. Im Rahmen der Informationsmodellierung werden dabei Konzepte erstellt, deren Eigenschaften und Beziehungen systematisch erfasst und ihre Semantik formalisiert werden, um Mehrdeutigkeiten zu vermeiden. Ursprünglich implizites und verstreutes Domänenwissen wird explizit zugänglich gemacht und klar kommuniziert, um den Entwickler/innen ein einheitliches Verständnis dessen zu liefern, was die ausgetauschten Daten repräsentieren, und die Konsistenz der Schnittstellen zu gewährleisten. Als herstellerunabhängiger Ansatz ist man nicht auf Datenmodelle einzelner Hersteller beschränkt, womit eine breite Wiederverwendbarkeit gewährleistet ist. Ontologische Modelle sind im Bereich der industriellen Energiesysteme noch nicht verbreitet, aus Vorarbeiten haben sich noch keine allgemeinen Standards etabliert. Das liegt nicht zuletzt auch daran, dass die ontologische Modellierung von Energiesystemen aufgrund großer Anlagenvielfalt und ihrer Variabilität eine schwierige Aufgabe ist.

### 2.2 Schwerpunkt des Projekts

Konkret wird in 5DIndustrialTwin ein DT eines thermischen Energiesystems im beschriebenen 5D-Modellierungsansatz entwickelt. Die physische Einheit bildet dabei ein bestehender und zu adaptierender Versuchsaufbau an der TU Wien. Der vertikale Festbettwärmespeicher (engl. packed bed thermal energy storage (PBTES)) als thermischer Speicher wird dabei in ein Energiesystem eingebunden, der mit Heißluft und mit elektrischem Strom über ein Heizregister versorgt wird. Die Anbindung von Fernwirktechnik ermöglicht dabei die Ausnutzung von Flexibilitäten in der Stromversorgung, welche insbesondere durch Einbindung erneuerbarer Versorgung entstehen.

Der Schwerpunkt von 5DIndustrialTwin liegt dabei vorrangig in der Methodenentwicklung und anschließenden erstmaligen experimentellen Erprobung. Dabei wird das entwickelte 5D-Twin-Framework möglichst adaptiv auf verschiedenste industrielle Energiesysteme übertragbar erstellt. Der Schwerpunkt dieses Projekts ist somit qualitativer Natur, kann aber über die Definition mehrerer Ziele quantitativ bewertet werden.

Um die tatsächliche Anwendbarkeit im industriellen Maßstab zu prüfen ist die experimentelle Erprobung nötig, welche auch die Inkludierung von Wertschöpfungs-Aspekten miteinschließt. Einzelne Methoden zur Wertschöpfung aus dem DT sollen im 5D-Twin-Framework auf den Use-Case zugeschnitten entwickelt und getestet werden.

1) Entwicklung eines geeigneten Daten- und Informationsmodells für die 5D-DT-Modellierung industrieller Energiesysteme: Erst durch ein vollständiges Informationsmodell wird die 5D-Modellierung eines DT und damit die Ausschöpfung des Potentials durch die Digitalisierung für industrielle Energiesysteme möglich. Dies stellt damit einen Kernbestandteil des DT dar und ein wesentliches Ziel im 5DIndustrialTwin Projekt.

2) Generierung datengetriebener und physikalischer Simulationsmodelle, sowie Optimierungsansätze und Klassifizierungs-Modelle, ausgelegt auf die Bidirektionalität des DT: Entscheidend für den Nutzen eines 5D-DT ist die Ausprägung der 2.Dimension, also der virtuellen Einheit. Erst durch umfangreiche Modelle variabler Komplexität und unterschiedlichen Typs (white-box, grey-box, black-box) ist es möglich, eine Echtzeit-Repräsentation eines realen Prozesses zu schaffen, die alle wesentlichen Charakteristiken erfassen kann. Hier steht auch die Bidirektionalität im Vordergrund und dementsprechend die Möglichkeit der Modelle zur Adaption auf geänderte Realbedingungen. Eine weitere Notwendigkeit, um Wertschöpfung aus dem DT zu generieren, ist die Entwicklung bzw. Adaption von Optimierungs- und Klassifizierungsansätzen, welche im Projekt evaluiert und aufbereitet werden.

3) Identifizierung und Entwicklung von Schnittstellen zur Kombination, Auswahl und Generierung von Komponentenmodellen zur automatischen Anwendung im 5D-DT Framework: Die Kombination multipler Sub-Modelle verschiedenen Typs, Ausprägung und Anwendungsfalls während dem laufenden Betrieb des DT stellt eine Herausforderung dar, die eine Definition von Schnittstellen zwischen den Modellen im 5D-DT-Framework nötig macht. Diese Aufgabe wird im Projekt vor Allem hinsichtlich der Erweiterbarkeit und Adaptierbarkeit auf andere Prozesse bearbeitet. Dafür wird auf dem zu entwickelnden Informationsmodell (Ziel 1) aufgebaut.

4) Auswertung und Darstellung der Verbesserungen (monetär, energetisch) durch den 5D-DT: Die Bewertung der Verbesserungen durch den 5DIndustrialTwin-Ansatz gegenüber einem Referenzprozess kann nach experimenteller Erprobung erfolgen. Wertschöpfungs-Aspekte, die durch Implementierungen als Services im ganzheitlichen 5D-DT-Framework ermöglicht werden (z.B. Betriebs-überwachung und -optimierung, Fehlerprädiktion, Predictive Maintenance) können quantifiziert werden und tragen damit zur Gesamtbewertung des 5DIndustrialTwin-Ansatzes bei. Monetäre und energetische Verbesserungen werden anhand eines Use Case in der Stahlerzeugung demonstriert.

### **2.3 Einordnung in das Energieforschungs-Programm**

Durch den innovativen 5D-DT Modellierungsansatz in 5DIndustrialTwin wird die Grundlage für die Implementierung von Digital Twins für energietechnische Komponenten und Systeme geschaffen. Durch die erstmalige experimentelle Erprobung in einem System zur Wärmebereitstellung und Speicherung wird der entwickelte Ansatz demonstriert und evaluiert. Die Möglichkeit der Skalierbarkeit auf kommerzielle Großanlagen wird durch einen Use-Case bei Projektpartner voestalpine Stahl Donawitz GmbH dargestellt. Die allgemeine Übertragbarkeit der entwickelten Methodik und das damit entstehende Exportpotenzial der Ergebnisse stehen im Vordergrund des Projektvorhabens. Durch den signifikanten technologischen Fortschritt wird ein ganzheitlich optimiertes Zusammenspiel von Wertschöpfungsprozessen, Marktakteuren und KundInnen im Energiesystem der Zukunft ermöglicht.

### **2.4 Methoden**

#### **2.4.1 Modellierungsmethoden für die Abbildung der virtuellen Einheit**

Eine computergestützte Modellsimulation spielt für den DT, und insbesondere seine virtuelle Einheit, eine unverzichtbare Rolle. Die meisten Simulationstools werden jedoch nach wie vor hauptsächlich in Forschung & Entwicklung im Rahmen von Produkt- und

Systementwicklungstätigkeiten verwendet. Die Weiterentwicklung im Bereich der Modellsimulation, nicht zuletzt ausgelöst durch das DT-Konzept, zeigt den zukünftigen Trend: Ziel ist es, die Modellsimulationen als Kernfunktion innerhalb eines Systems zu gewährleisten [21].

Nur durch die Entwicklung höchst präziser (high fidelity), dynamischer und echtzeitfähiger Komponentenmodelle kann ein DT derart umfangreich umgesetzt werden, wie es seine Beschreibung darstellt. Hier können je nach Gebrauch verschiedene Ansätze zum Einsatz kommen. Man unterscheidet grundsätzlich zwischen Modellierungsansätzen, die auf physikalischen Grundlagen, auf reinen Daten oder gemischten Ansätzen basieren. Im Folgenden werden diese und deren Vor- und Nachteile erläutert.

Eine Möglichkeit zur Modellierung virtueller Objekte bzw. Systeme im 5D-DT Konzept bieten physikalische Ansätze, auch white box models genannt. Diese basieren auf deterministischen physikalischen Zusammenhängen und erfordern tiefgehendes ingenieurwissenschaftliches Verständnis des zu modellierenden Prozesses oder Objektes. Physikalische Modelle erfordern oft hohen rechnerischen Aufwand, können aber im Gegenzug komplexe Betriebsszenarien abbilden. Diese Art der Modellierung ist deshalb nicht optimal geeignet für Anwendungen wie Echtzeit-Optimierung, kann allerdings zur Generierung von Trainingsdaten für datengetriebene Ansätze, sowie zur Validierung der Ergebnisse anderer Modelle herangezogen werden.

Physikalische Modelle von PBTES wurden unter anderem von Opitz & Treffinger (2014) [23], Oró et al. (2013) [24] und Anderson et al. (2015) [25] publiziert. Ein validiertes 1-D Finite-Differenzen Modell des PBTES, der in diesem Projekt als Laborobjekt herangezogen wird, wurde von Walter et al. (2018) [26] entwickelt.

Mit der immer größer werdenden Menge verfügbarer Daten und der gegenwärtigen Fortschritte im Bereich des maschinellen Lernens (Machine Learning, ML) gewinnt die datengetriebene Modellierung zunehmend an Bedeutung. Solche rein auf existierenden Daten aufbauende Modelle, auch black box models genannt, können einfach anwendbar sein, im Betrieb geringeren rechnerischen Aufwand als white box models aufweisen und bieten oft die Möglichkeit sehr komplexe nichtlineare Zusammenhänge hinreichend genau abzubilden.

Sogenannte grey box models kombinieren physikalische und datengetriebene Ansätze. So können physikalische Grundrelationen mit der datengetriebenen Optimierung von Parametern verwendet werden. Solche Ansätze versprechen große Vorteile gegenüber herkömmlichen Methoden - der rechnerische Aufwand, sowie die Komplexität der Modellierung können verringert werden, während die Modelle einen weitaus besseren Einblick in das innere Systemverhalten liefern können als black box Modelle [27].

### 2.4.2 Wissensrepräsentation/-management in maschinenlesbarer Form

Für ein allgemein einsetzbares DT-Framework ist eine systematische Lösung notwendig, um die Komplexität der heterogenen Datenintegration in der Praxis zu bewältigen. DT benötigen eindeutig interpretierbare zuverlässige Daten in standardisierten maschinenlesbaren Formaten [28]. Einen vielversprechenden Ansatz bieten hier Methoden der Informationsmodellierung und der Wissensrepräsentation (Knowledge Representation). Informationsmodelle, im Gegensatz zu konventionellen Datenmodellen, erfassen systematisch die zugrundeliegende Semantik der unterschiedlichen Datenpunkte und ermöglichen dadurch einen semantischen Abgleich und Abstraktion weg von herstellerspezifischen Datenmodellen. Informationsmodelle stellen alle integrierten Daten in einem einheitlichen Format maschinenlesbar zur Verfügung, um damit den Informationsaustausch zwischen verschiedenen Stakeholdern zu erleichtern.

Informationsmodellierung findet in einigen Ingenieursdisziplinen bereits Verwendung und demonstriert dort deutliches Potential zur Verbesserung von datenintensiven Prozessen, z.B. Building Information Modeling (BIM) für die integrale Gebäudeplanung, Product Information Modeling (PIM) im Rahmen des Product Lifecycle Management [29] oder generell mithilfe von Ontologien, um strukturiertes Wissen für das Semantic Web [30] zu beschreiben. Informationsmodelle sind im Bereich der industriellen Energiesysteme noch nicht verbreitet, aus ersten Ansätzen und Vorarbeiten haben sich noch keine allgemeinen Standards etabliert [31]. Das liegt nicht zuletzt auch daran, dass die ontologische Modellierung von Energiesystemen aufgrund der großen Anlagenvielfalt und ihrer Variabilität eine schwierige Aufgabe ist [29]. Einzelne verfügbare Ansätze sollen im Zuge des Projektes auf ihre Eignung hin evaluiert werden, u.a. IEC Common Information Model (CIM, IEC 61970/61968) [32], RDF/OWL [33], IEEE P1600.1 Standard Upper Ontology (SUO) working group [34]. In der industriellen Automation setzen beispielsweise OPC UA und andere Technologien ebenfalls Informationsmodellierung ein. Deren Einsatzgebiet deckt allerdings industrielle Energiesysteme nur unvollständig ab und sie sind auch nicht ausgelegt für derart umfangreiches high-level Datenmanagement, wie es für DT notwendig ist. Es fehlt allgemein an verfügbaren Referenzmodellen für DT.

### 2.4.3 Micro-Services/-dienste

Ziel eines DT ist es ein vollständiges digitales Abbild eines real existierenden Systems oder Objekts zu schaffen, woraus sich diverse Aspekte zur Wertschöpfung für Anlagenbauer, -betreiber und auch Energieversorger und Netzbetreiber ergeben. Folgende, bereits einzeln bestehende, Methoden können als Services im DT implementiert werden. Durch Umsetzung in einem 5D-DT mit seinem bidirektionalen Datentransfer werden diese miteinander verknüpft, ganzheitlich optimiert und so effektiver eingesetzt.

Die Modellierung eines 5D-DT ermöglicht den laufenden Abgleich zwischen physischer und virtueller Einheit und damit die automatische Feststellung von Prozessabweichungen. Dies wird unter anderem für Fehlerfrüherkennung (Deckers (2014) [35]) und Beurteilung der Fehlerursache (Mourtzis et al. (2014) [36]) verwendet. Durch Vergleich mit Simulationen bekannter Fehlerszenarios kann so die Ursache der Fehler identifiziert werden. Fortschrittliche Methoden zur Fehlererkennung und -eliminierung in DT-basierten Systemen wurden unter anderem von Wang et al. (2018) [37] und Xu et al. (2019) [38] entwickelt.

Durch das 5D-DT Framework kann eine weitere fortschrittliche Wertschöpfungsmöglichkeit durch sogenannte Soft Sensors genutzt werden. Mit der virtuellen Einheit können Datenpunkte geschaffen und zum Anlagen-Monitoring genutzt werden, die auf Grund der Prozesseigenschaften nicht real messbar sind. Durch Kombination mit historischen Daten und Simulationsmodellen ermöglicht der DT dadurch Services wie Predictive Maintenance und Betriebsplanung unter Berücksichtigung von Remaining Useful Lifetime (RUL) Prediction [39].

Anstatt dem bloßen Detektieren von Abweichungen ergeben sich durch die Fusion aus historischen und Echtzeit-Daten Möglichkeiten über die Anwendung von Predictive Maintenance, bzw. Prognostics and Health Management (PHM), oder auch Remote Diagnostics. Dies kann massiv dazu beitragen, die jährlichen Vollkosten einer Anlage zu minimieren. Beispielsweise konnten in einem Anwendungsfall an einem Biomasse-Dampferzeuger Vollkosteneinsparungen von 8,5% gegenüber jährlicher Wartung und von rund 61% gegenüber gar keiner Wartung erzielt werden [40]. Neben der Möglichkeit physikalische Daten über deterministische Modelle zu verarbeiten, können Wartungsentscheidungen auch über datengetriebene Ansätze getroffen werden, wie beispielsweise beschrieben von Deutsch & He (2018) [41].

Gerade durch die Integration erneuerbarer Energie und der Kombination effizienter, aber auch konventioneller Technologien in der Industrie, wird die Optimierung einer Anlage sowohl in der Auslegung als auch während des Betriebs notwendig. Die optimale Einsatzweise speziell einer thermischen Erzeugungs- oder Speichereinheit wird typischerweise über ein Unit Commitment (UC) Problem beschrieben. Koller & Hofmann veröffentlichten Lösungsansätze für dieses Optimierungsproblem angewandt auf einen FBR, der in ein einfaches Referenzenergiesystem eingebunden wurde, einerseits über quadratische und nichtlineare Optimierungsansätze und auch über das vielversprechende Mixed Integer Linear Programming (MILP) [42]. Speziell MILP-Ansätze stellen durch ihre Adaptierbarkeit eine gute Option für die Anwendung in realen Energiesystemen und die Implementierung für Services im 5D-DT dar.

## 2.5 Aufbau der Arbeit

In den weiteren Kapiteln dieses Berichts werden alle Inhalte, die im Zusammenhang mit den unter Abschnitt 2.2 präsentierten Forschungsschwerpunkten erarbeitet wurden, vorgestellt. In Kapitel 3 wird zuerst das Framework des digitalen Zwillings, welches auf dem 5D-Ansatz von Tao et al. [17] basiert, präsentiert und dessen fünf Dimensionen im Detail erklärt. Danach werden der Laboraufbau eines vertikalen Festbettwärmespeichers, sowie der industrielle Use-Case, welche für die Evaluierung des entwickelten Frameworks verwendet wurden, beschrieben. Am Anschluss daran werden in der zweiten Hälfte von Kapitel 3 zwei experimentelle Versuchsläufe, die für die Evaluierung des Frameworks gedient haben, präsentiert. Dabei handelt es sich um das automatisierte Training von Softsensoren bei einer Fehlfunktion von physischen Sensoren und die automatisierte Modelladaption mit anschließender Betriebsoptimierung bei einer kontinuierlichen Änderung des Betriebsverhaltens des Versuchsstandes. Nach der detaillierten Beschreibung der Vorgehensweise für diese beiden Versuche in Kapitel 3 wird in Kapitel 4 auf die konkreten Ergebnisse und Schlussfolgerungen, die aus den Experimenten hervorgegangen sind, eingegangen. Abschließend wird in Kapitel 5 in diesem Bericht auf mögliche zukünftige Forschungsfragen und -richtungen eingegangen, die auf den Ergebnissen dieses Projekts aufbauen können.

## 3 Inhaltliche Darstellung

Die im folgenden Abschnitt präsentierten Inhalte sind eine Zusammenfassung aus einer Vielzahl von bereits publizierten wissenschaftlichen Beiträgen. Für eine detaillierte Darstellung aller in diesem Projekt erarbeiteten Forschungsergebnisse verweisen wir an dieser Stelle auf unsere Publikationen:

- [1] L. Kasper, F. Birkelbach, P. Schwarzmayr, G. Steindl, D. Ramsauer, und R. Hofmann, „Toward a Practical Digital Twin Platform Tailored to the Requirements of Industrial Energy Systems“, *Applied Sciences*, Bd. 12, Nr. 14, Art. Nr. 14, Jan. 2022, doi: 10.3390/app12146981.
- [2] P. Schwarzmayr, F. Birkelbach, L. Kasper, und R. Hofmann, „Development of a Digital Twin Platform for Industrial Energy Systems“, in *Accelerated Energy Innovations and Emerging Technologies*, Cambridge, USA: Energy Proceedings, 2022. doi: 10.46855/energy-proceedings-9974.
- [3] P. Schwarzmayr, F. Birkelbach, H. Walter, und R. Hofmann, „Study on the Standby Characteristics of a Packed Bed Thermal Energy Storage: Experimental Results and Model Based Parameter Optimization“, gehalten auf der ASME Power Applied R&D 2023, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, Sep. 2023. doi: 10.1115/POWER2023-108578.
- [4] F. Birkelbach, L. Kasper, P. Schwarzmayr, und R. Hofmann, „Operation Planning with Thermal Storage Units Using MILP: Comparison of Heuristics for Approximating Non-Linear Operating Behavior“, in *Proceedings of ECOS 2023, Las Palmas De Gran Canaria, Spain, 2023*, S. 1345–1350. doi: 10.52202/069564-0122.

- [5] L. Kasper, „Improving thermal energy storage via storage retrofit and digital twin technology“, Thesis, Technische Universität Wien, 2023. Zugegriffen: 30. Oktober 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://repositum.tuwien.at/handle/20.500.12708/187946>
- [6] L. Kasper, P. Schwarzmayr, F. Birkelbach, F. Javernik, M. Schwaiger, und R. Hofmann, „A digital twin-based adaptive optimization approach applied to waste heat recovery in green steel production: Development and experimental investigation“, *Applied Energy*, Bd. 353, S. 122192, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.122192.

Die Wärmeerzeugung im Industriesektor ist für etwa 20% der weltweiten vom Menschen verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich. Dieser Anteil steigt auf über 40%, wenn man die Emissionen aus dem Strombedarf der Industrie mit einbezieht.

Eine wichtige Strategie zur Verringerung des Primärenergieverbrauchs ist die Verbesserung der Energieeffizienz. Die Rückgewinnung von Abwärme, zum Beispiel durch thermische Energiespeicher (TES), um Energieangebot und -nachfrage auszugleichen, ist ein vielversprechender Ansatz. Aufgrund von Schwierigkeiten hinsichtlich der wirtschaftlichen Durchführbarkeit sowie der erhöhten Komplexität und der Betriebsrisiken ist die Industrie jedoch zögerlich, wenn es um den Einsatz von TES für die Abwärmenutzung geht.

Um das Potenzial von TES in vollem Umfang nutzen zu können, ist eine effektive Modellierung und Optimierung von Energiesystemen von entscheidender Bedeutung. Genaue Modelle aller physischer Einzelkomponenten und des Gesamtsystems sind für einen optimierten Betrieb unerlässlich. In Industrieanlagen arbeiten Anlagenkomponenten unter herausfordernden Bedingungen, die ihre Eigenschaften und ihr Verhalten beeinflussen. Daher ist die Automatisierung der Anpassung komplexer Betriebsoptimierungsmodelle an ein sich ständig änderndes Verhalten von physischen Komponenten eine anspruchsvolle Aufgabe.

### 3.1 Entwicklung der 5DIndustrialTwin Plattform

Auf der Grundlage des 5D-DT-Konzepts wurde eine DT-Plattform entwickelt, die auf die spezifischen Anforderungen von industriellen Energiesystemen (IES) [43] zugeschnitten ist.

Die Architektur der entwickelten Plattform ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Verbindungsdimension steht im Mittelpunkt dieser Plattform, was ihre Funktion als zentrale Kommunikationseinheit unterstreicht. Alle Teile des DT können über einen sogenannten Message Broker kommunizieren. Die physische Einheit (ganz links in Abbildung 1) ist über das Überwachungs- und Datenerfassungssystem (SCADA) mit dem virtuellen Raum verbunden. Neue Daten- und Messpunkte werden an den Broker gesendet, und Steuersignale werden von diesem empfangen. Die virtuelle Einheit (ganz rechts in Abbildung 1) ist über die Modellverwaltungseinheit verbunden. Über diese Modellverwaltungseinheit werden die Modelle den anderen Dimensionen des DT zur Verfügung gestellt. Jedes Modell ist mit einem Identifikator verbunden, und Modelle können hinzugefügt, aktualisiert und abgerufen werden.

# Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

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

Die Datendimension (Kasten unten in der Mitte von Abbildung 1) bietet eine einheitliche Schnittstelle und semantische Strukturierung für die verschiedenen Datenquellen im DT. Abfragen werden vom Message Broker empfangen, verarbeitet und das Ergebnis wird über den Broker an den anfragenden Client zurückgegeben. In der Service-Dimension (obere Mitte in Abbildung 1) kann sich jeder Service (Dienst) direkt mit dem Message Broker verbinden. Die Services (Dienste) können Anfragen für Modelle an die virtuelle Einheit senden und Datenabfragen an die Datendimension senden. Die Koordination der verschiedenen Dienste und die Realisierung komplexer Abläufe wird durch den Service Orchestrator realisiert.

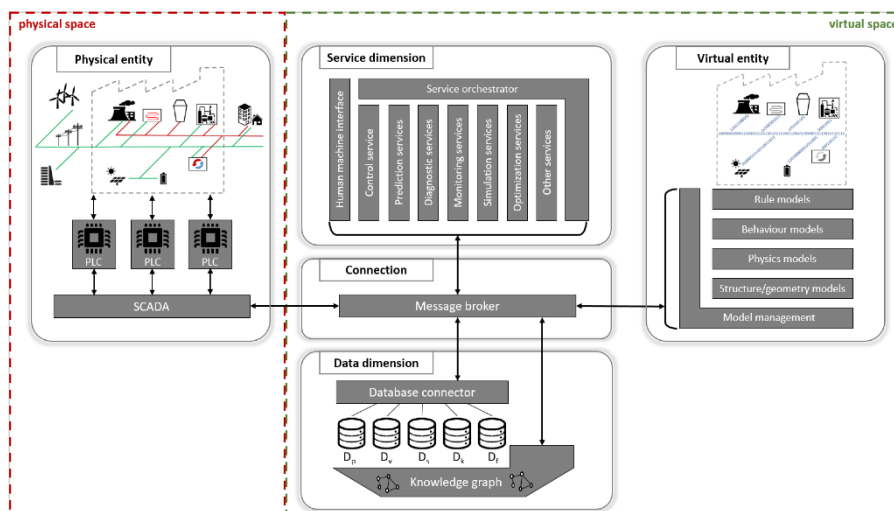


Abbildung 1: 5D Industrial Twin Framework basierend auf dem 5-dimensionalen Modellierungsansatz von Tao et al. [17] und der generischen Architektur für digitale Zwillinge von Steindl et al. [44] (Quelle: Kasper et al. [43]).

In den folgenden Abschnitten gehen wir auf die Implementierung der einzelnen Dimensionen des DT ein und schlagen universelle, aber gleichzeitig auch konkrete Ansätze zur Lösung dieser Probleme vor.

## 3.1.1 Verbindungsdimension

Die Hauptaufgabe der Verbindungsdimension ist es, die Kommunikation zwischen allen Teilen des DT zu ermöglichen. Das Ziel unserer DT-Plattform ist es, leistungsfähige und dennoch vielseitige Standards bereitzustellen, die einfach verwendet werden können und gleichzeitig die Implementierung von effizienteren Alternativen für Anwendungen mit speziellen Anforderungen ermöglichen. Die Implementierung verschiedener Kommunikationskanäle zwischen den Teilen des DT würde zu einer unnötig komplizierten Architektur führen. Stattdessen sollte der Hauptkommunikationskanal so gestaltet werden, dass er mit allen Teilen des DT interoperabel ist. Wir haben daher MQTT als Standard-Kommunikationsprotokoll für unsere DT-Plattform gewählt.

Jede der anderen vier Dimensionen des DT ist in der Verbindungsdimension als Client mit dem MQTT Message Broker verbunden und kann Nachrichten zu verschiedenen Topics veröffentlichen und abonnieren. Diese Topics werden vom MQTT Message Broker definiert und verwaltet. Der Broker ist dafür verantwortlich, alle Nachrichten zu empfangen, die Nachrichten zu filtern, festzustellen, wer welches Topic abonniert hat, und die Nachrichten an diese abonnierten Clients zu senden. Auf einer noch abstrakteren Ebene können alle Teile des DT als eine Art Dienst betrachtet werden, und der gesamte DT kann in Analogie zu einem Microservice-Framework modelliert werden (siehe z. B. [45]). Durch die Anwendung eines Message Brokers auf diese Weise wird die Verbindungsdimension zu einem zentralen Kommunikationsknotenpunkt.

Jeder Client, der eine Nachricht an den Broker sendet, muss eine MQTT-Topic-Namenskonvention einhalten, die vom Typ der Nachricht abhängt. Dadurch wird sichergestellt, dass die veröffentlichten Nachrichten eine definierte Payload haben, so dass die abonnierten Clients die empfangenen Nachrichten entsprechend verarbeiten können. Die DT-Plattform erfordert jedoch ein Request/Response-Muster, das von MQTT nicht unterstützt wird, da es dem Publish/Subscribe-Muster folgt. Daher mussten Überlegungen angestellt werden, wie ein solcher Request/Response-Nachrichtenmechanismus implementiert werden kann. Es gibt zwei Möglichkeiten der Implementierung: (1) ein MQTT-Topic für Request- und Response-Nachrichten oder (2) ein MQTT-Topic für eine Request-Nachricht und ein MQTT-Topic für die zugehörige Response-Nachricht. Der erste Ansatz erfordert die Definition des Nachrichtentyps innerhalb der Payload zusammen mit einem eindeutigen Identifikator, um Nachrichten zu korrelieren. Alternativ könnte der eindeutige Identifikator an das MQTT-Topic angehängt werden, um die Payload zu reduzieren, aber dies würde das Parsen des MQTT-Topsics erfordern, um den Identifikator abzurufen. Daher haben wir uns für den zweiten Ansatz entschieden, bei dem der Typ der Nachricht durch das MQTT-Topic definiert wird; daher muss nur der eindeutige Bezeichner an die Payload angehängt werden. Eine Anwendung müsste dann das Topic parsen, um den Typ der Nachricht und den Identifier für die Nachrichtenkorrelation zu erhalten. Dieser Ansatz ermöglicht den Austausch von Nachrichten und erlaubt gleichzeitig die Verwendung beliebiger Nutzdaten/Payloads.

### **3.1.2 Physische Einheit**

Bei einem typischen DT-Einsatzszenario für IES kann davon ausgegangen werden, dass bereits ein System vorhanden ist, das zumindest eine grundlegende Schnittstelle zu der physischen Einheit herstellt. Verschiedene Messwerte werden typischerweise über eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) mit einem modernen SCADA-System verbunden. Unsere DT-Plattform baut auf solchen SCADA-Systemen auf; daher verorten wir sie innerhalb der Dimension der physischen Einheit. Solche SCADA-Systeme (oder auch nur SPS) können

dann über standardmäßige industrielle IoT-Protokolle mit dem DT verbunden werden. Im Falle unserer DT-Plattform ist dies MQTT.

Für unsere DT-Implementierung wurde XAMControl<sup>2</sup> als SCADA-Plattform verwendet, die die Definition, Visualisierung, Programmierung und Konfiguration von SPS ermöglicht. Um dieses System in die vorgeschlagene Architektur zu integrieren, ermöglicht eine Prototypversion der Serversoftware das Veröffentlichen und Empfangen von Nachrichten an und von dem MQTT-Broker. Diese Nachrichten können dann von jeder interessierten Anwendung verarbeitet werden, indem das entsprechende MQTT-Topic abonniert wird.

### 3.1.3 Virtuelle Einheit

Eines der Hauptmerkmale eines DT ist, dass die virtuelle Einheit den Zustand der physischen Einheit zu jedem Zeitpunkt repräsentieren kann. Dies setzt voraus, dass die Modelle oder die Modellparameter an Änderungen in der physischen Einheit angepasst werden. Eine Anpassung der Modelle in der virtuellen Einheit ist beispielsweise erforderlich, wenn sich die Prozessleistung durch Degradation ändert, wenn Teile bei einem Wartungseingriff ausgetauscht oder überholt wurden oder wenn neue Komponenten zur Modernisierung des IES installiert wurden. Die Aufgabe der DT ist es, diese Änderungen zu verfolgen und die verschiedenen Versionen jedes Modells/Parametersatzes zu verwalten.

In unserer Plattform wird diese Anforderung durch die Modellverwaltung in der virtuellen Einheit erfüllt. Sie führt im Wesentlichen eine Datenbank mit allen verfügbaren Modellinstanzen und speichert Informationen zu jedem Modell in einem lokalen Wissensgraphen. Zu den Informationen gehören (neben anderen Faktoren) die URI (Uniform Resource Identifier), der Anwendungsbereich, die Eingangsdaten, die Ausgangsdaten, die Gültigkeitsbereiche, die Genauigkeit und der Zeitraum der Gültigkeit. Die Modellverwaltung betreibt einen MQTT-Endpunkt, über den Modelle abgefragt und anschließend verarbeitet werden können. Die Modelle können somit für bestimmte Dienste bereitgestellt werden.

### 3.1.4 Datendimension

In unserer DT-Plattform verwenden wir einen so genannten Wissensgraphen, ein wissensbasiertes System, das aus einer Ontologie und einem integrierten Reasoner besteht, der in der Lage ist, externe Informationsquellen zu erfassen und zu integrieren. Dieser Wissensgraph besteht aus mehreren Ontologien, die Informationen über Anlagenausrüstung, Topologie, Instrumentierung usw. enthalten. Die Laufzeitdaten aus dem IES, die in der Regel in relationalen Datenbanken gespeichert sind, werden über ontologie-basierten Datenzugriff (OBDA) in den Wissensgraphen integriert. Durch die Definition von Mappings zwischen der

---

<sup>2</sup> XAMControl ist eine Prozesssteuerungs- und Automatisierungssoftware die von Projektpartner [evon GmbH](#) für dieses Projekt zur Verfügung gestellt und im Zuge dieses Projekts auch weiterentwickelt wurde.

relationalen Datenbankstruktur und den Ontologien wird das implizite Wissen über die Datenmodelle explizit gemacht. Somit fungiert der Wissensgraph als semantische Abstraktionsschicht, wobei die Daten in der ursprünglichen lokalen Datenbank verbleiben können, z.B. in einer SQL-Datenbank des SCADA-Systems. Die Daten werden nur geladen, wenn auf sie zugegriffen wird, was auch die Leistungsfähigkeit verbessert.

Für die praktische Nutzung der Ontologie, d.h. die Instanzierung der Konzepte und die Herstellung der Beziehungen zwischen ihnen, bietet ein Triplestore die Möglichkeit, die Ontologie ähnlich wie eine Datenbank zu speichern. Ein semantisches Tripel besteht aus drei Einheiten, nämlich Subjekt, Prädikat und Objekt, und stellt eine Beziehung zwischen ihnen dar. Auf diese Weise kann Wissen in einer maschinenlesbaren und standardisierten Weise strukturiert werden. Für die Implementierung wird das RDF-Framework RDF4J [46] verwendet, das eine Vielzahl gängiger Ontologie-Dateiformate unterstützt und einen SPARQL-Endpoint für den Datenzugriff bereitstellt. Für den ontologie-basierten Datenzugriff ermöglicht Ontop [47] die Anbindung einer SQL-Datenbank an den Wissensgraphen, so dass die Daten in der Datenquelle verbleiben, ohne verschoben zu werden. Ein Wrapper-Dienst, der MQTT-Anfragen in SPARQL-Abfragen umwandelt, ermöglicht die Integration in die DT-Plattform.

### 3.1.5 Servicedimension

Die Dienste innerhalb unserer Servicedimension sind in Übereinstimmung mit der Generic Digital Twin Architecture (GDTA) [44] gruppiert. Wir betrachten verschiedene Formen von Kontroll-, Vorhersage-, Diagnose-, Überwachungs- und Simulationsdiensten, die in unserer Plattform implementiert werden können, sowie potenzielle nicht kategorisierte Dienste, die für DTs von IES relevant sind. Dienste, die Modelle benötigen, können die aktuellen Modellzustände über den MQTT Message Broker von der virtuellen Einheit abrufen. Zusätzlich betrachten wir die Mensch-Maschine-Schnittstelle (engl. human machine interface (HMI)) als einen wichtigen Dienst in dieser Dimension, da Menschen über den aktuellen Zustand der physischen Einheit sowie des DT selbst informiert sein müssen, um mit ihm zu interagieren. Dies ist über die Workflow-Engine der Plattform möglich. Verschiedene HMIs für den alleinigen Zweck der Überwachung der physischen Einheit, die im SCADA-System angesiedelt sind, sind ebenfalls denkbar.

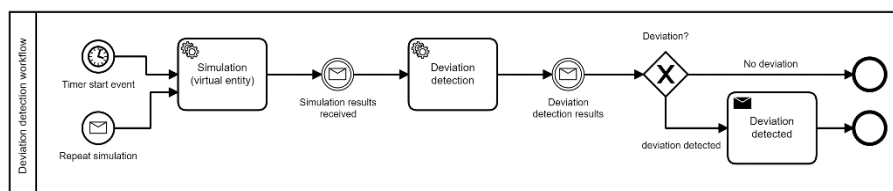


Abbildung 2: BPMN-Darstellung eines exemplarischen Workflows für einen Fehlererkennungsdienst. (Quelle: Kasper et al. [43]).

Wie in Abbildung 1 dargestellt, verwendet die DT-Plattform eine BPMN-Workflow-Engine (BPMN – Business Process Modeling Notation) als Service-Orchestrator, nämlich Zeebe [48]. Sie ermöglicht das Laden von BPMN-Dateien und deren Erweiterung mit Metadaten, die für die Verbindung mit MQTT erforderlich sind. Diese erweiterten BPMN-Dateien decken insbesondere MQTT-Anfrage- und Antwortthemen ab. Abbildung 2 zeigt einen einfachen beispielhaften Arbeitsablauf/Workflow. Dieser Workflow wird entweder durch einen Timer, d.h. in einem vordefinierten Intervall, oder manuell durch die Anfrage eines Benutzers oder eines anderen Dienstes ausgelöst. Die Aktivitäten in diesem Workflow ("Simulation (virtual entity)" und "Deviation detection") beschreiben die Dienste, die die Workflow-Engine über ihr entsprechendes MQTT-Request-Topic aufruft. Im Falle der Aktivität "deviation detected" löst diese Sendeaktivität einen weiteren Workflow aus, der die Klassifizierung der Abweichung für die weitere Verarbeitung übernimmt, z.B. um mögliche Fehler zu erkennen. Die Zwischenereignisse ("Simulation results received" und "Deviation detection results") zeigen an, dass der Workflow auf diese Ereignisse warten muss, bis die Dienste ihre Verarbeitung erfolgreich abgeschlossen haben und ein Ergebnis auf dem entsprechenden MQTT-Antwort-Topic zurückgeben. Andere Anwendungskategorien können auf ähnliche Weise modelliert und integriert werden.

### 3.2 Laboraufbau und industrieller Use-Case

PBTES-Systeme sind eine spezielle Art von TES-Systemen, die ein Festbett aus Gestein oder anderen geeigneten Feststoffen als Speichermaterial verwenden. Um einen PBTES aufzuladen, wird heißes Wärmeträgerfluid (HTF), in den meisten Fällen Luft, durch das Bett geleitet und liefert Wärme an das Speichermaterial. Zur Rückgewinnung der gespeicherten Wärme wird die Strömungsrichtung im Speicher umgekehrt und kaltes HTF wird verwendet, um Wärme aus dem Speichermaterial zu extrahieren. Da das HTF in direktem Kontakt mit dem Festbett steht, steht eine große Oberfläche für die Wärmeübertragung im Speicher zur Verfügung. Dies führt zu sehr hohen Leistungen, einer ausgeprägten Temperaturschichtung im Festbett und damit zu einer allgemeinen Verbesserung der Systemeffizienz. Temperaturschichtung bedeutet, dass das Speichervolumen in einen heißen und einen kalten Abschnitt unterteilt ist. Diese beiden Abschnitte sind durch eine dünne Volumenschicht – die Thermokline – getrennt, in der der gesamte Temperaturgradient konzentriert ist. Während des Ladevorgangs drückt heißes HTF die Thermokline zu einem Ende des Speichers und dehnt so den heißen Abschnitt aus. Während des Entladevorgangs drückt kaltes HTF die Thermokline in die entgegengesetzte Richtung. Zur Charakterisierung von Thermoklinen verweisen wir auf die Arbeit von Orò et al. [49], in der Methoden zur Beschreibung der Schichtung in TES diskutiert werden. Theoretisch ist die Entladetemperatur eines PBTES bei idealer Thermokline genau so hoch wie die Ladetemperatur für den gesamten Prozess. In der Realität führen irreversible Effekte wie Wärmeverluste an die Umgebung, Wärmeleitung und

## Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

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

natürliche Konvektion innerhalb des Festbetts zu einer Verschlechterung der Thermokline und damit zu einer verringerten Effizienz des Speichers. Eine umfassende Übersicht über Erfahrungsberichte und numerische Modellierung von PBTES-Systemen wurde von Esence et al. [50] zusammengestellt, in der sie auf die Bedeutung der Aufrechterhaltung einer Hochtemperaturschichtung in einem PBTES hinweisen, um die Exergieeffizienz und Speicherkapazität zu maximieren.

Für experimentelle Untersuchungen wurde im Labor der TU Wien ein Laborteststand eines PBTES aufgebaut. Wie in Abbildung 3 zu sehen ist, handelt es sich bei dem Teststand um einen vertikalen PBTES, dessen Speichertank aus einem konischen Stahlbehälter besteht. Als Speichermaterial wurde LD-Schlacke mit einer Körnung von 16 – 32 Millimetern gewählt. Die LD-Schlacke, die ein Nebenprodukt des LD-Prozesses ist, besteht aus unregelmäßig geformten und porösen Gesteinen. Diese Eigenschaften führen zu hohen Leistungen, homogener und gleichmäßiger Durchströmung des Festbetts und einer hohen Temperaturschichtung im Speichermaterial. Der Teststand ist an eine Luftversorgungseinheit (engl. air supply unit (ASU)) angeschlossen, die heiße Luft mit Temperaturen von bis zu 400°C und einem Massenstrom von maximal 400kg/h liefert. Zusätzlich ist der Teststand mit mehreren Regelventilen ausgestattet, mit denen Verstopfungen des Festbetts und Lecks in den Luftleitungen simuliert werden können. Die wichtigsten Eigenschaften des Testaufbaus und des Speichermaterials sind in TABELLE I zusammengefasst.

Tabelle 1: Wichtige Eigenschaften des experimentellen Aufbaus und des verwendeten Speichermaterials.

Experimenteller Aufbau		Speichermaterial	
<b>Typ</b>	Vertikaler PBTES	<b>Typ</b>	LD-Schlacke
<b>Tankmaterial</b>	Stahl (P295)	<b>Korngröße</b>	16 – 32 mm
<b>Tankdurchmesser</b>	350-650 mm	<b>Partikeldichte</b>	3800 kg/m <sup>3</sup>
<b>Tankhöhe</b>	2050 mm	<b>Porosität</b>	0.42
<b>Speichervolumen</b>	0.405 m <sup>3</sup>	<b>Schüttdichte</b>	2200 kg/m <sup>3</sup>
<b>Wärmedämmung</b>	180mm (0.05 W/mK)	<b>Wärmekapazität</b>	750-900 J/kgK

Um den PBTES für den Einsatz als physische Einheit in einem digitalen Zwilling vorzubereiten, ist er mit 49 PT100-Temperatursensoren im Inneren des Festbetts und 8 PT100-Temperatursensoren auf der Oberfläche des Speicherbehälters ausgestattet. Die genaue Position dieser Sensoren innerhalb des Festbetts ist in Abbildung 3 dargestellt. Diese große

## Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

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

Anzahl an Sensoren ermöglicht eine detaillierte Messung des Temperaturfelds – insbesondere der Lage und Form der Thermokline – innerhalb des PBTES.

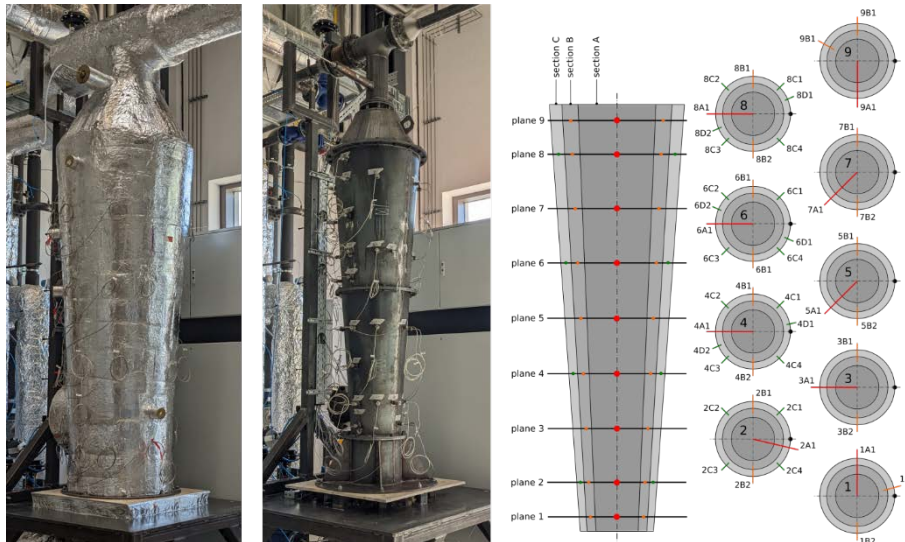


Abbildung 3: Laboraufbau eines vertikalen Festbettwärmespeichers mit Wärmedämmung (links), ohne Wärmedämmung (Mitte) und Instrumentierung (rechts) (Quelle: Schwarzmayr et al. [51]).

Der in diesem Projekt betrachtete Use-Case ist ein Stahlproduktionsprozess und die anschließende Abgaswärmerückgewinnung. Die Eisen- und Stahlindustrie ist für etwa 8 % der jährlichen globalen anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich [52]. Diese Emissionen müssen drastisch reduziert werden, um das aktuelle 1,5-°C-Ziel des Pariser Abkommens zu erreichen. Und das trotz der von der Internationalen Energieagentur prognostizierten wachsenden Stahlnachfrage von rund 1,9 Milliarden Tonnen im Jahr 2019 auf über 2,5 Milliarden Tonnen im Jahr 2050 [53]. Daher sind bahnbrechende Dekarbonisierungstechnologien wie Elektrolichtbogenöfen (engl. electric arc furnace (EAF)) von entscheidender Bedeutung [54]. Allerdings verlässt immer noch etwa ein Drittel der gesamten Energiezufuhr den EAF über die Restwärme des Abgases [55], [56]. Daher besteht ein enormes Potenzial für die Energierückgewinnung [57]. Angesichts der erheblichen Kosten, die mit der Umsetzung neuer emissionsarmer Strategien verbunden sind, ist die Installation von Wärmerückgewinnungssystemen ein praktikabler Ansatz für Betreiber von Stahlwerken, um deutliche Fortschritte in Richtung einer umweltfreundlichen Stahlproduktion zu erzielen [56]. Für einen Überblick über die Abwärmerückgewinnung in der Eisen- und Stahlindustrie verweisen wir auf eine aktuelle Analyse von Inayat [58].

## Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

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

Das österreichische Unternehmen voestalpine Stahl Donawitz GmbH<sup>3</sup> gab kürzlich die Baugenehmigung für einen neuen Lichtbogenofen an seinem Standort in Leoben, Österreich, als Teil seines Transformationspfads „greentec steel“ bekannt [59].

Das Ziel des Unternehmens ist eine Reduzierung der aktuellen CO<sub>2</sub>-Emissionen um 30 % ab 2027 und eine CO<sub>2</sub>-neutrale Stahlproduktion bis 2050. Im ersten Transformationsschritt wird eine der beiden aktuellen Stahlrouten mit jeweils einem Hochofen und einem LD-Konverter durch einen Lichtbogenofen ersetzt. In unserer Arbeit betrachten wir daher den Wärmerückgewinnungsprozess der Lichtbogenofenroute separat, obwohl er an das bestehende industrielle Energiesystem am Standort angeschlossen wird. Dies entspricht den aktuellen mittelfristigen Anpassungsplänen.

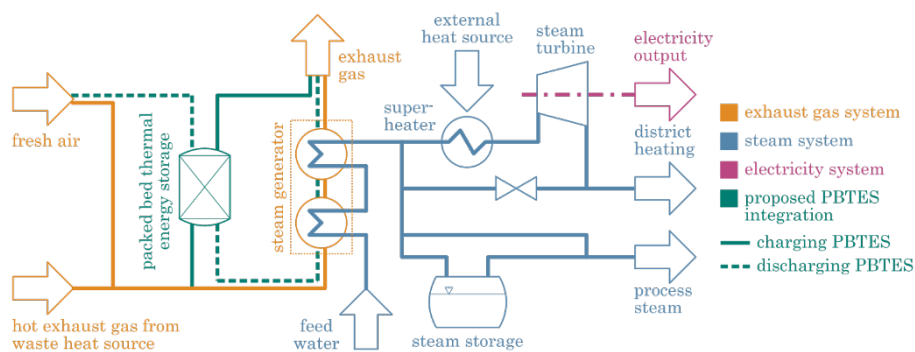


Abbildung 4: Use-Case aus der Eisen- und Stahlindustrie: Geplantes Energiesystem für die Abwärmenutzung des neuen Elektrolichtbogenofens bei voestalpine Stahl Donawitz GmbH in Leoben (Quelle: Schwarzmayr [60]).

Im betrachteten Use-Case des Energiesystems, dargestellt in Abbildung 4, wird die thermische Energie des heißen Abgases des Lichtbogenofens in einem Abhitzeessel zurückgewonnen. Ein ähnliches System, das speziell für die Dampferzeugung aus EAF-Abgasen entwickelt wurde, wurde von Steinparzer et al. [61] als fünfzügiges Durchlauf-System mit Strahlungsheizflächen, Verdampfungsplatten, Verdampfungsbündeln und einem Economizer zum Vorwärmen des Speisewassers entwickelt. Wir werden dieses System von hier an auf seinen grundlegenden Zweck reduzieren und es einfach Dampferzeuger (engl. steam generator (SG)) nennen. Der erzeugte Dampf ist für mehrere Zwecke wertvoll. Erstens wird eine große Menge gesättigten Dampfes für die weitere Metallverarbeitung am Standort benötigt. Zweitens kann Wärme mit niedrigerer Temperatur aus dem Dampfsystem ausgekoppelt werden, um die Anlagenheizung vor Ort und Fernwärme für die angrenzende Stadt bereitzustellen. Drittens kann gesättigter Dampf im vorhandenen SG überhitzt und in eine Turbine eingespeist werden, um Strom zu erzeugen. Da der EAF als Batch-Prozess

<sup>3</sup> Das Unternehmen *voestalpine Stahl Donawitz GmbH* ist Teil des weltweit führenden Stahl- und Technologiekonzerns voestalpine AG und ist spezialisiert auf die Erzeugung von hochwertigem Qualitätsstahl.

## Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

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

betrieben wird, weist sein heißer Abgasstrom nicht nur eine hohe Volatilität, sondern auch Unterbrechungsperioden auf [61], [62]. Der SG hingegen muss Leistungsrampen-Constraints einhalten und sollte idealerweise nie vollständig abgeschaltet werden. Wird ein SG einer zu stark schwankenden Eingangsleistung ausgesetzt, kann dies aufgrund von Druck- und Temperaturgradienten sowie einer Vielzahl anderer potenziell lebensdauerbegrenzender Faktoren innerhalb des Systems zu übermäßigen Materialbeanspruchungen führen [63]. Steinparzer et al. [61] und Keplinger et al. [56] argumentieren, dass diese Herausforderung durch die Integration eines TES zwischen dem EAF und dem SG gelöst werden sollte. Während Abgasspitzen kann der TES geladen werden, und während EAF-Ausfallzeiten oder Perioden mit geringerem Wärmefluss, z. B. während der anfänglichen Erwärmung des Rohmaterials, kann der TES entladen werden, um dem SG eine konstante Eingangsleistung bereitzustellen. Manente et al. [64] haben kürzlich ein Verfahren zur Ermittlung der besten TES-Option für die Wärmerückgewinnung von diskontinuierlichem Rauchgas bei der Stahlproduktion zur Dampferzeugung vorgestellt. Sie fanden heraus, dass ein Festbett-Wärmespeicher (PBTES) mit Gestein als Speichermedium aus technisch-wirtschaftlicher Sicht die optimale Wahl ist. In unserem Anwendungsfall wird daher ein PBTES in Betracht gezogen, um den stark schwankenden Abgasstrom des EAF zu glätten und so den Lastanforderungen des SG gerecht zu werden.

Eine weitere große Herausforderung für EAF-Wärmerückgewinnungssysteme sind die hohen Gasgeschwindigkeiten im Einlasskanal und die hohe Staubbelastung der EAF-Abgase [61]. Während hohe Gasgeschwindigkeiten zu erhöhter Oberflächenerosion führen [68], können sie auch genutzt werden, um eine höhere Wärmeübertragung zu erreichen. Das Problem kann durch das Design (z. B. Querschnitte) von Rohren und Wärmetauschern moduliert werden. Beispielsweise führten Marti et al. [69] eine PBTES-Designoptimierung durch, bei der unterschiedliche Geschwindigkeiten und der induzierte Druckabfall bei unterschiedlichen Querschnitten berücksichtigt wurden. Eine typische Eisenoxidstaubkonzentration im EAF-Abgas ist etwa 15 bis 25 kg Staub pro Tonne produzierten Stahls [70]. Aus diesem Grund wird typischerweise nach dem Einlasskanal der Heißgasleitung eine Abscheidebox angeordnet, die die groben Staubpartikel durch Schwerkraft abscheidet [56], [57]. Der Großteil des EAF-Staubs besteht jedoch aus Partikeln mit einer Größe von weniger als 20  $\mu\text{m}$  [70]. Dies wirft die Frage auf, wie sich das staubhaltige Abgas, das als Wärmeträgerflüssigkeit (HTF) verwendet wird, auf die Leistung des PBTES auswirkt. Es ist davon auszugehen, dass sich die kleinen Partikel im Festbett des PBTES ansammeln [72]. Es ist bekannt, dass Staubablagerungen den Luftdruckabfall über einem Festbett erhöhen [73], [74]. Daher schlussfolgern wir, dass die verfügbaren Lade-/Entladeleistungen des PBTES aufgrund des staubbedingten Druckabfalls und einer maximalen Luftgebläseleistung am Ende des Heißgaskanals allmählich abnehmen. Dies ist ein wichtiger Effekt neben z. B. der abnehmenden Wärmekapazität des PBTES-Speichermediums [75]. Diese Verschlechterungseffekte führen nicht nur zu

Designherausforderungen für das Wärmerückgewinnungssystem, sondern erfordern auch intelligente Betriebsansätze, die die reduzierte PBTES-Leistung berücksichtigen.

### 3.3 Demonstration des Frameworks: Softsensor-Service

Im Zuge der ersten Demonstration des Frameworks besteht die Datendimension aus einer relationalen PostgreSQL-Datenbank [76] und zwei Ontologien, auf die über einen föderierten Abfrageendpunkt namens FedX [46] zugegriffen werden kann. FedX föderiert mehrere Endpunkte des SPARQL-Protokolls und der RDF-Abfragesprache (SPARQL), die die Zugriffspunkte zu in verschiedenen Ontologien gespeicherten Informationen sind, unter einem einzigen virtuellen Endpunkt. Dies ermöglicht Benutzern und Diensten den Zugriff auf alle in einer Ontologie innerhalb des DT gespeicherten Informationen über einen einzigen Endpunkt. Die relationale Datenbank wird zur Speicherung von Laufzeitdaten der physischen Einheit und einiger wichtiger Metriken wie der Leistungsrate oder des Ladezustands (SOC) verwendet, die aus den Laufzeitdaten berechnet werden. Die Ontologien sind für die Wissensdarstellung und für die Verbesserung der Datenzugänglichkeit innerhalb des DT verantwortlich.

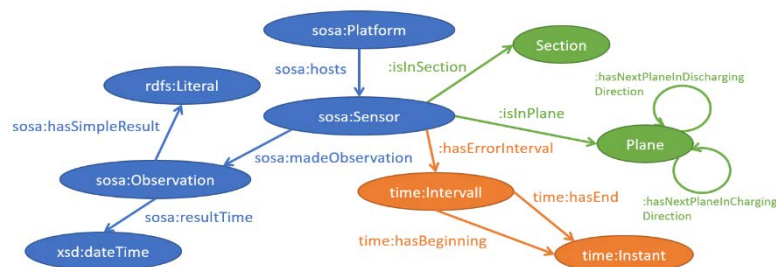
Um den Laufzeitdaten in der relationalen Datenbank Kontextinformationen und Semantik hinzuzufügen, wird eine vorhandene Ontologie, die Sensor-, Beobachtungs-, Proben- und Aktuator-Ontologie (SOSA), wiederverwendet und erweitert. Um die Daten der relationalen Datenbank der SOSA-Ontologie zuzuordnen, wird das Ontop Framework [47] verwendet. Ontop stellt den Inhalt relationaler Datenbanken als virtuelle Wissensgraphen dar, ohne sie in eine andere Datenbank zu verschieben. Auf die Daten der relationalen Datenbank kann daher über OBDA zugegriffen werden. Basierend auf den Zuordnungen in der Ontologie übersetzt Ontop SPARQL-Abfragen in strukturierte Abfragesprachen-Abfragen (SQL), die von der relationalen Datenbank ausgeführt werden. Um zusätzliche Informationen über die Position der Sensoren innerhalb des Festbetts relativ zueinander hinzuzufügen, wurde die SOSA-Ontologie speziell für den vorliegenden Anwendungsfall erweitert. Dazu wird das Speichervolumen in neun horizontale Ebenen und drei radiale Abschnitte unterteilt. Jeder Sensor wird der Ebene und dem Abschnitt zugeordnet, in dem er sich befindet. Auf diese Weise können Kontextinformationen wie die Nachbarn eines bestimmten Sensors aus der Ontologie extrahiert werden. Um Informationen über Sensorausfälle bereitzustellen und zu speichern, wird ein RDF4J-Triple-Store [46] verwendet, der die vorhandene owl-Time-Ontologie [77] verwendet. Diese Ontologie ermöglicht die Dokumentation von Fehlerereignissen sowie deren Start- und Endzeit. Falls ein anderer Benutzer oder Dienst innerhalb des DT diese Informationen benötigt, können diese wiederum durch Abfragen des föderierten Abfrageendpunkts abgerufen werden. Abbildung 5 zeigt die Struktur aller implementierten Ontologien in einer Grafik zusammengefasst. Der blaue Zweig stellt alle Konzepte dar, die aus der SOSA-Ontologie wiederverwendet werden konnten. Die

## Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

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

Erweiterung der SOSA-Ontologie für den vorliegenden Anwendungsfall ist im grünen Zweig zu sehen und der orangefarbene Zweig zeigt die Strukturen und Konzepte, die wir aus der owl-time-Ontologie wiederverwendet haben.

Um auf die in den Ontologien verfügbaren Kontextinformationen zuzugreifen, müssen Benutzer und Dienste eine SPARQL-Abfrage an den Endpunkt des föderierten Abfrageendpunkts senden. Eine beispielhafte SPARQL-Abfrage, die Informationen darüber erhalten soll, welche Sensoren die nächsten Sensoren (d. h. die Nachbarn in Lade-/Entladerichtung) zum Sensor FBR-TE-4A1 sind, ist in der unteren Hälfte von Abbildung 5 dargestellt.



```
SELECT ?neighborSensors
WHERE {
  :FBR-TE4A1 :isInSection ?section;
            :isInPlane ?plane.
  ?plane :hasNextPlaneInDischargingFlowDirection |
         :hasNextPlaneInChargingFlowDirection ?neighborPlanes.
  ?neighborSensors :isInSection ?section;
                  :isInPlane ?neighborPlanes.
}
```

Abbildung 5: Struktur der entwickelten Ontologie (oben, blau: Konzepte aus der SOSA-Ontologie | oben, orange: Konzepte aus der owl-time Ontologie | oben, grün: neu entwickelter Teil der Ontologie) und exemplarische SPARQL-Abfrage (unten) für Kontextinformationen zu benachbarten Sensoren (Quelle: Schwarzmayr et al. [51]).

Um die Vorteile deutlicher hervorzuheben und das vorgeschlagene DT-Framework zu bewerten, wird die Interaktion und Kommunikation innerhalb des DT anhand eines beispielhaften Szenarios dargestellt.

Für die Vorhersage des Speicherverhaltens und für ein angemessenes Speichermanagement ist der Ladegrad (engl. state of charge (SOC)) eine wichtige Kennzahl. Betrachten wir ein Szenario, in dem ein Temperatursensor innerhalb des PBTES beschädigt wird und einen konstanten Wert von null Grad Celsius liefert. Unter normalen Bedingungen könnte dieser Ausfall eine Zeit lang unbemerkt bleiben und zu einem erheblichen Fehler in der SOC-Berechnung führen. Dieser Fehler überträgt sich auf andere Dienste und Auswertungen und macht einen wirtschaftlichen Betrieb des Speichers unmöglich. In diesem Abschnitt wird

# Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

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

dargestellt, wie der in Abschnitt 3.1 vorgeschlagene digitale Zwilling dazu beitragen kann, diese Probleme anzugehen und zu überwinden.

Abbildung 6 zeigt alle beteiligten Workflows, die als BPMN-Workflows notiert sind, und ihre Kommunikation über die Ontologie. Das obere Kästchen in Abbildung 6 stellt die Ontologie dar, die nicht Teil der BPMN ist, aber trotzdem einbezogen wird, um ihre Interaktion mit den BPMN-Workflows zu verdeutlichen. Die durchgezogenen Pfeile definieren die Workflows, und die gestrichelten Pfeile veranschaulichen den Informationsfluss zwischen Serviceaufgaben und der Ontologie.

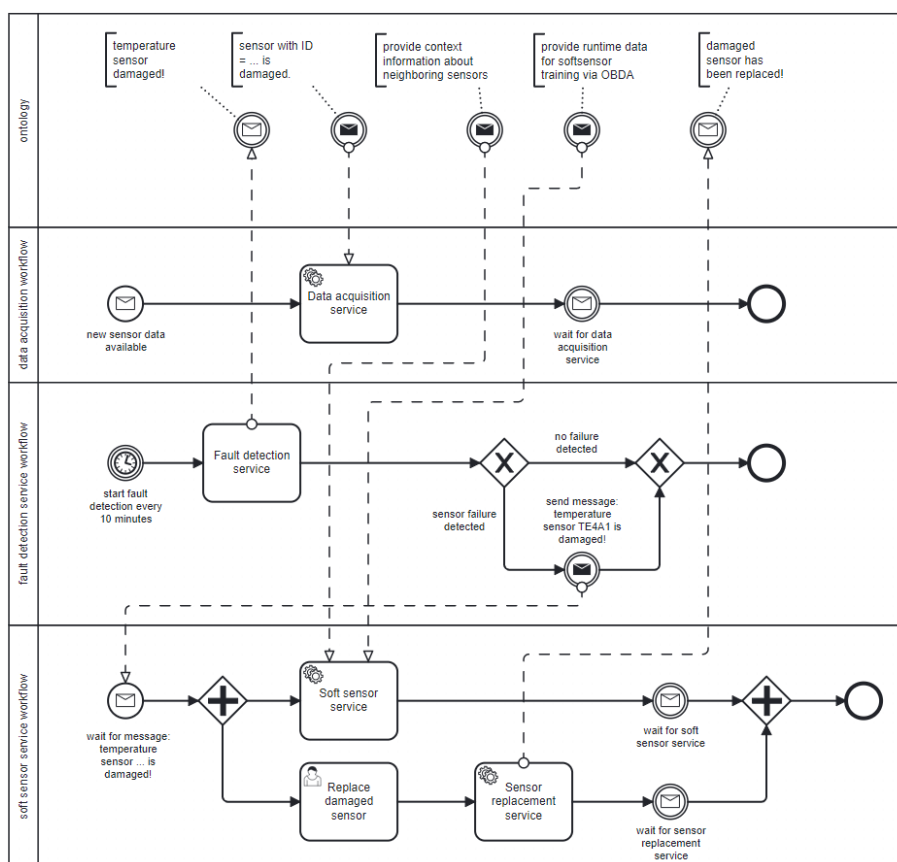


Abbildung 6: Kommunikation zwischen Datenerfassungs-Service und Softsensor-Service über die Ontologie und den MQTT-Broker (Quelle: Schwarzmayr et al. [51]).

Die zweite Box in Abbildung 6 enthält den Datenerfassungsworkflow. Dieser Workflow wird gestartet, wenn eine MQTT-Nachricht mit dem Topic *temperaturesensorvalues* veröffentlicht wird. In der aktuellen Implementierung wird dies vom OPC-UA-Aggregationsserver durchgeführt, der Teil der physikalischen Einheit ist. Jede Minute holt der OPC UA Aggregations-Server die Messwerte jedes Temperatursensors in der physikalischen Einheit über OPC UA ab und veröffentlicht sie in dem zuvor erwähnten MQTT-Topic als Attribut-Wert-

## Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

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

Paare in der Payload der Nachricht. Im nächsten Schritt dieses Workflows veröffentlicht die Workflow-Engine eine MQTT-Nachricht an das Topic *dataacquisition/request*, die den Datenerfassungsdienst startet. Der Datenerfassungsdienst nimmt ein Array von Temperaturwerten aus dem Nachrichten-Payload als Eingabe, berechnet darauf basierend einige charakteristische Metriken und speichert die Ergebnisse in der DT-Datenbank. Bevor diese Berechnungen durchgeführt werden, sendet der Datenerfassungsdienst eine SPARQL-Abfrage an den föderierten Abfrageendpunkt der Ontologien, um zu prüfen, ob es einen Datensatz eines beschädigten Sensors gibt. Wenn es einen beschädigten Sensor gibt, antwortet der föderierte Abfrageendpunkt mit einer MQTT-Nachricht, die die ID des beschädigten Sensors enthält. Mit dieser Information holt der Datenerfassungsdienst einen Soft-Sensor für den beschädigten Sensor von der virtuellen Einheit, um den wahren Sensorwert zu reproduzieren. Wenn der Datenerfassungsdienst mit seinen Berechnungen fertig ist, veröffentlicht er eine MQTT-Nachricht zum Topic *dataacquisition/response*, die diesen Workflow fortsetzt und beendet.

In der dritten Box in Abbildung 6 ist ein prototypischer Fehlererkennungsdienst dargestellt. Im Gegensatz zum Datenerfassungsworkflow wird dieser Workflow alle 10 Minuten von der Workflow-Engine gestartet, indem eine MQTT-Nachricht zum Topic *faultdetection/request* veröffentlicht wird. Wenn der Fehlererkennungsdienst gestartet wird, fordert er Laufzeitdaten der letzten 10 Minuten von den Ontologien an und prüft, ob Abweichungen vorliegen. Wenn keine Abweichung erkannt werden konnte, wird dieser Workflow ohne weitere Aktion beendet. Wenn der Fehlererkennungsdienst jedoch einen beschädigten Sensor erkennt, dokumentiert er dies in der Ontologie durch eine SPARQL-Update-Abfrage und veröffentlicht gleichzeitig eine MQTT-Nachricht zum Topic *temperaturesensordamaged*. Die Payload dieser Nachricht vom Fehlererkennungsdienst umfasst die ID des beschädigten Sensors und den Zeitpunkt, zu dem der Fehler aufgetreten ist.

Wie in Abbildung 6 dargestellt, startet diese MQTT-Nachricht automatisch den Soft-Sensor-Workflow. Nach dem Message-Start-Event teilt sich dieser Workflow in zwei Zweige auf und löst im ersten Zweig den Soft-Sensor-Dienst und im zweiten Zweig eine Benutzeraufgabe aus. Der Soft-Sensor-Dienst beginnt mit der Abfrage der Ontologien nach Kontextinformationen darüber, welche Sensoren die Nachbarn des beschädigten Sensors sind. Nach Erhalt der Antwort von den Ontologien fordert der Soft-Sensor-Dienst über OBDA-Laufzeitdaten vom beschädigten Sensor und seinen Nachbarn an, mit denen er ein datengesteuertes Regressionsmodell trainiert. Dieses Modell, das wir als Soft-Sensor bezeichnen, wird in der virtuellen Einheit gespeichert und kann von anderen Diensten verwendet werden, um echte Messungen des beschädigten Sensors zu reproduzieren. Wenn der Soft-Sensor-Dienst mit all seinen Aufgaben fertig ist, veröffentlicht er eine MQTT-Nachricht zum Topic *softsensor/response*, die den ersten Zweig dieses Workflows abschließt. Im zweiten Zweig

führt die Benutzeraufgabe zu einem Popup auf dem Bildschirm des Maschinenbedieners mit der Aufforderung, den beschädigten Sensor bei der nächsten geplanten Wartung auszutauschen. Der Sensoraustauschdienst wird fortgesetzt, wenn der/die MaschinenbedienerIn den Austausch des beschädigten Sensors bestätigt hat. Der Zweck des Sensoraustauschdienstes besteht darin, diese Informationen in der Ontologie aufzuzeichnen, indem das Fehlerintervall des zuvor beschädigten und jetzt ausgetauschten Sensors geschlossen wird. Wenn dies erledigt ist, veröffentlicht der Sensoraustauschdienst eine MQTT-Nachricht zum Topic *sensorreplacement/response* und beendet damit den zweiten Zweig, der den gesamten Workflow beendet.

### 3.4 Evaluierung des 5DIndustrialTwin Frameworks: Adaptive Betriebsoptimierung des industriellen Use-Cases

Der vorgestellte Use-Case der Abwärmerückgewinnung wird über MILP modelliert. Das Unit-Commitment-Modell ist in Abbildung 7 zusammen mit relevanten Leistungsvariablen dargestellt. Hier werden die Grundannahmen und grundlegenden Modellierungsansätze vorgestellt. Im weiteren Verlauf dieses Dokuments bezeichnen wir diesen virtuell modellierten industriellen Anwendungsfall als virtuelles Energiesystem (VES). In diesem Dokument betrachten wir das Design des VES als fest.

Das VES wird in einer Unit-Commitment-Formulierung (UC) innerhalb einer endlichen Anzahl  $n$  diskreter Zeitschritte bei einer äquidistanten Zeitschrittweite  $\Delta t$  modelliert. Energieflüsse im VES werden auf Wärmeflüsse reduziert, d.h. Temperaturniveaus werden vernachlässigt. Dies ist ein gängiger Ansatz bei UC-Problemen industrieller Energiesysteme, bei denen Temperaturniveaus in den unteren hierarchischen Steuerungsebenen berücksichtigt werden. Daher wird jede Einheit über ihre thermische Leistung als Entscheidungsvariable in jedem Zeitschritt modelliert. In diesem Bericht werden Entscheidungsvariablen in Kleinschreibung und Parameter in Großbuchstaben geschrieben.

#### 3.4.1 MILP-UC-Modell für die Betriebsoptimierung

Das Ziel des MILP-UC-Problems dieses Use-Cases ist die Maximierung der Zielfunktion

$$J_{UC} = \sum_{t \in \mathcal{T}} \left( c_t^{el} p_t^{turb} + C^{DH} (\dot{q}_t^{sat,DH} + \dot{q}_t^{turb,out}) - C^{gas} \frac{\dot{q}_t^{gas}}{\eta_{gas}} - c_t^{slack} \right)$$

welche aus der Vergütung aus Strom- und Fernwärmeverkäufen abzüglich der Kosten für den zusätzlichen Gasbrenner unter Berücksichtigung der Preisparameter  $c_t^{el}$ ,  $C^{DH}$  und  $C^{gas}$  besteht. Zusätzlich wird eine Slack-Variable  $c_t^{slack}$  für die Implementierung zusätzlicher Betriebsstrafen hinzugefügt. In diesem Anwendungsfall werden die Einschränkungen

# Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

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

$$c_t^{slack} \geq A^{slack}(s_{crit}^{TES} - s_t^{TES}) \quad \text{und} \quad 0 \leq c_t^{slack}$$

hinzugefügt, um die Verletzung eines kritischen RSS-Speicherniveaus  $s_{crit}^{TES}$  mit einem Slack-Parameter  $A^{slack}$  zu bestrafen.

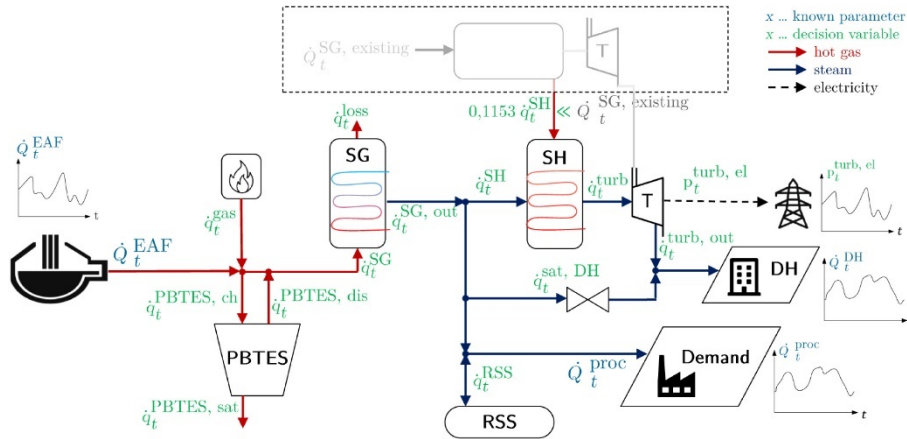


Abbildung 7: Virtuelles Energiesystem des industriellen Use-cases für die Evaluierung des digitalen Zwillings (Quelle: Kasper et al. [78])

Auf der Heißgasseite, dargestellt auf der linken Seite von Abbildung 7, verbindet die Energiebilanz

$$\dot{Q}_t^{EAF} + \dot{q}_t^{gas} = \dot{q}_t^{PBTES,ch} + \dot{q}_t^{PBTES,sat} - \dot{q}_t^{PBTES,dis} + \dot{q}_t^{SG} + \dot{q}_t^{loss} \quad \forall t \in \mathcal{T}$$

mit  $\dot{q}_t^{loss} \geq 0$  die Versorgungseinheiten mit dem PBTES und dem Dampferzeuger (SG). Während der EAF-Abwärmestrom  $\dot{Q}_t^{EAF}$  fest ist, bietet ein herkömmlicher Gasbrenner mit Wärmeleistung  $\dot{q}_t^{gas}$  Flexibilität auf der Heißgasseite. Der SG wird so modelliert, dass er gesättigten Dampf  $\dot{q}_t^{SG}$  bei konstantem Wirkungsgrad  $\eta_{SG}$  erzeugt, d. h.

$$\dot{q}_t^{SG} = \frac{\dot{q}_t^{SG,out}}{\eta_{SG}} \quad \forall t \in \mathcal{T}.$$

Ein Teil des Sattdampfes  $\dot{q}_t^{SH}$  kann in einem vorhandenen Abhitzekegel vor Ort weiter überhitzt werden, um überhitzten Dampf bei 25 bar bereitzustellen. Dabei gilt die Energiebilanz<sup>4</sup>

$$\dot{q}_t^{turb} = 1.1153 \dot{q}_t^{SH} \quad \forall t \in \mathcal{T}.$$

<sup>4</sup> Ein Anteil von 0.1153 der Sattdampfenthalpie wird zusätzlich vom vorhandenen Überhitzer des Abhitzekegels geliefert. Dies wird als gering angesehen. Der Anteil ergibt sich aus der Enthalpiedifferenz zwischen Sattdampf bei 25 bar und überhitztem Dampf bei 25 bar bei 100 K über dem Sättigungspunkt.

## Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

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

Die in unserem Anwendungsfall betrachtete Turbine ist eine vorhandene Kondensationsdampfturbine. Ein Teil des der Turbine zugeführten Dampfes kann bei niedrigem Druck entnommen werden, um den Wärmebedarf zu decken, während der Rest durch Dampfexpansion zur Stromerzeugung verwendet werden kann. Das Entnahmeverhältnis kann variiert werden, daher werden Wärme- und Stromerzeugung entkoppelt. Somit wird die Energiebilanz zwischen dem Turbineneingang  $\dot{q}_t^{turb}$  und der entnommenen Wärme  $\dot{q}_t^{turb,out}$  und erzeugtem Strom  $p_t^{turb,el}$  über die typische Formulierung

$$\dot{q}_t^{turb} = \frac{\dot{q}_t^{turb,out}}{\eta_{turb,out}} + \frac{p_t^{turb,el}}{\eta_{turb,el}} \quad \forall t \in \mathcal{T}$$

mit den konstanten Wirkungsgraden für die thermische Wärmeproduktion  $\eta_{turb,out}$  und die Stromerzeugung  $\eta_{turb,el}$  modelliert. Falls die elektrische Turbinenleistung bereits auf dem Markt zugesagt wurde, wird sie über

$$p_t^{turb,el} = P_j^{el,fixed} \quad \forall \{t \mid t \in \mathcal{T}, j \in \mathcal{J}: t = j\}$$

festgelegt, wobei  $\mathcal{J}$  die Menge der Zeitschritte ist, für die eine feste elektrische Leistung  $P_j^{el,fixed}$  angegeben wird.

Innerhalb des Sattdampfsystems gilt die Energiebilanz

$$\dot{q}_t^{SG,out} - \dot{q}_t^{SH} + \dot{q}_t^{RSS} = \dot{Q}_t^{prod} + \dot{q}_t^{sat,DH} \quad \forall t \in \mathcal{T}$$

mit dem RSS-Speicherstrom  $\dot{q}_t^{RSS}$ , dem festen Sattdampfbedarf für die weitere Produktion  $\dot{Q}_t^{prod}$  und einem Anteil  $\dot{q}_t^{sat,DH}$  ( $\geq 0$ ), der für zusätzliche Fernwärme genutzt werden kann. Hier wird der Fernwärmebedarf  $\dot{Q}_t^{DH}$  eher als obere Grenze, anstatt als harte Beschränkung betrachtet, daher:

$$\dot{q}_t^{sat,DH} - \dot{q}_t^{turb,out} \leq \dot{Q}_t^{DH} \quad \forall t \in \mathcal{T}$$

Darüber hinaus wird durch

$$\dot{q}_t^{SG,out} - \dot{q}_t^{SH} \geq 0 \quad \forall t \in \mathcal{T}$$

sichergestellt, dass kein aus dem RSS abgelassener Dampf mit niedrigerem Druck in das Hochdrucksystem zurückgeführt wird.

In unserem experimentellen Betrieb wird nur der PBTES physisch betrieben, während der Rest des VES simuliert werden muss. Die PBTES-Leistungswerte während des realen Betriebs

können niemals genau dem Betriebsplan entsprechen, der sich aus dem MILP-UC-Problem ergibt. Die Kombination der tatsächlichen PBTES-Leistungswerte mit dem VES-Betriebsplan der verbleibenden (virtuellen) Komponenten während desselben Zeitraums würde mit den Energiebilanzen in Konflikt geraten. Daher emulieren wir ein Low-Level-Steuerungsverfahren, um die Energiebilanzen im resultierenden simulierten VES-Betrieb einzuhalten.

Dieses Low-Level-Steuerungsverfahren basiert auf denselben MILP-Einschränkungen wie das UC-Problem, wobei die PBTES-Leistungswerte auf diejenigen festgelegt sind, die experimentell realisiert wurden. Das Ziel ist in diesem Fall jedoch nicht ein kosteneffizienter Betrieb, sondern die Einhaltung des zuvor vorhergesagten wirtschaftlichen Betriebsplans. Daher besteht die Zielfunktion aus Abweichungstermen der geplanten Leistung der VES-Einheiten (Gasbrenner, SG, RSS und Turbine) in Form von festen Parametern und der zu bestimmenden Leistung dieser Einheiten als Variablen. Die einzelnen Abweichungsterme werden entsprechend gewichtet.

Die Minimierung dieser Zielfunktion ergibt einen „simulierten“ VES-Zeitplan, der die Energiebilanzen einhält und gleichzeitig kosteneffiziente Trajektorien beibehält. Dieses „Simulationsverfahren“ des VES repliziert die Steuerung der Einheiten auf niedriger Ebene gemäß dem Betriebsplan in einem realen Energiesystem. Das Verfahren wurde als vorbereitender Schritt aufgenommen, der mit dem Dienst „Model Predictive Control“ (MPC) verknüpft ist und vor dessen Aufruf ausgeführt wird. Beim Aufruf wird das beschriebene MILP-UC-Problem nur für den aktuellen historischen Zeitraum gelöst, der noch nicht durch die Simulation festgelegt wurde.

Die realisierten Leistungswerte sowie die Speicherkapazität des PBTES-Teststands werden im VES um einen konstanten Faktor hochskaliert. Ebenso werden die Ergebnisse des VES-MILP-UC-Problems herunterskaliert, bevor Leistungswerte auf dem Teststand geplant werden. Dieser Faktor beträgt 3.000 und resultiert aus den physischen und betrieblichen Einschränkungen des Teststands und einer groben PBTES-Skalierung im Anwendungsfall.

### **3.4.2 5DIndustrialTwin Framework und Micro-Services für die Evaluierung**

Die instanziierte DT-Plattform ist in Abbildung 8 dargestellt. Sie folgt dem grundlegenden fünfdimensionalen DT-Konzept, das von Tao et al. [17] eingeführt wurde. Demnach besteht sie aus der physischen Einheit, der virtuellen Einheit, der Verbindungsdimension, der Datendimension und der Servicedimension. Die physische Einheit ist über speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) und das Überwachungs- und Datenerfassungssystem (SCADA) mit dem virtuellen Raum verbunden. Neue Datenpunkte werden an den Nachrichtenbroker (Verbindungsdimension) gesendet und Steuersignale empfangen. Die virtuelle Einheit sollte in der Lage sein, das Verhalten und die Eigenschaften

# Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

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

der physischen Einheit genau darzustellen. Dies kann durch verschiedene Arten virtueller Modelle erreicht werden. Die Datendimension bietet eine semantische Strukturierung aller Daten in der DT-Plattform und einen zentralen Zugriffspunkt für die dezentrale Datenspeicherung. Den Kern bildet ein Wissensgraph, der aus mehreren Ontologien und einem eingebauten Reasoner besteht. Wir haben hierfür das Ontop-Framework angewendet. Mit unserer Implementierung der Datendimension ist es möglich, beliebige Informationen im Rahmen des DT von einem einzigen Endpunkt aus abzufragen und zu empfangen, indem das SPARQL-Protokoll und die RDF-Abfragesprache (SPARQL) verwendet werden. Ziel der Servicedimension ist es, verschiedene Funktionalitäten des DT in Mikrodienste zu kapseln, die benutzerfreundliche Schnittstellen bieten und eine einfache On-Demand-Nutzung und -Anpassung ermöglichen. Die zeitliche und sequenzielle Koordination verschiedener Serviceinstanzen wird mit einem Service-Orchestrator realisiert.

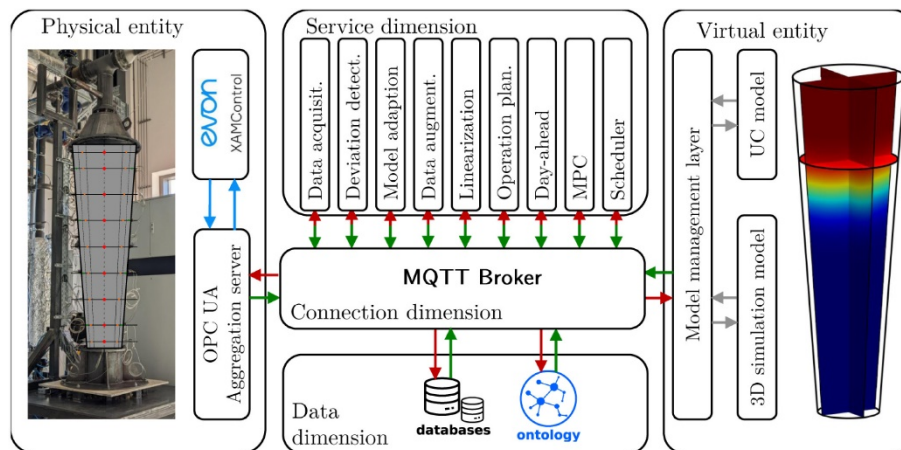


Abbildung 8: 5-dimensionales Framework des digitalen Zwillings mit allen Submodellen und Micro-Services die für die Erprobung entwickelt wurden (Quelle: Kasper et al. [78]).

Die fünfdimensionale DT-Plattform, die erstmals in [43] vorgeschlagen und in diesem Bericht kurz vorgestellt wurde, wurde mit zusätzlichen Funktionen in Form von Mikrodiensten und Workflows ausgestattet.

Alle Dienste wurden in den Sprachen MATLAB® R2023b und/oder Python 3.10 implementiert und in gekapselten Containern über Docker unter Verwendung der Docker Engine 20 virtualisiert. Für die Dienste, die das MILP-UC-Problem lösen, wurde der Parser YALMIP R20210331 verwendet und GUROBI® 10.0.0 wurde als Solver verwendet. Die physische Maschine, auf der alle Dienste gehostet wurden, ist ein 64-Kern-Linux-System (AMD EPYC 7702P) mit 256 GB RAM. Für Implementierungsdetails auf der grundlegenden DT-Plattform verweisen wir auf unsere früheren Veröffentlichungen [43], [51].

Services/Dienste enthalten die Hauptfunktionalität der DT-Plattform, zugeschnitten auf anwendungsbezogene Ziele. Aufbauend auf früheren Arbeiten haben wir zusätzliche Mikroservices entwickelt. Im folgenden Abschnitt wird die Funktion jedes Services/Dienstes und die darin implementierten Methoden kurz erläutert.

### **Datenerfassungsdienst (data acquisition service)**

Während das SCADA-System, das als Teil der physischen Einheit betrachtet wird, als primäre Schicht der Datenerfassung fungiert, erfüllt der Datenerfassungsdienst den Zweck der Datenkorrektur und -speicherung. In unserer Implementierung berechnet dieser Dienst die Leistungsraten der geladenen und entladenen HTF des Prüfstands und schätzt den SOC des PBTES. Darüber hinaus verarbeitet der Datenerfassungsdienst die Betriebszustände der Luftversorgungseinheit und speichert diese Informationen in einer SQL-Datenbank. So können Dienste wie MPC und Betriebsplanungsdienst Anfangszustände sowie Informationen zu verbleibenden Ausfallzeiten oder vergangenen Umschaltvorgängen abrufen.

### **Fehlererkennungsdienst (deviation detection service)**

Der Dienst zur Erkennung von Abweichungen wurde als Mock-up auf unserer DT-Plattform implementiert. Methoden zur robusten Erkennung von Abweichungen wurden separat entwickelt und getestet. Der Dienst soll Abweichungen zwischen dem beobachteten Verhalten der physischen Komponente und den Modellen ihrer virtuellen Einheit erkennen. Er muss Abweichungen erkennen und, wenn sie als signifikant angesehen werden, beurteilen, ob die Ursache Fehler der physischen Einheit oder Abweichungen des virtuellen Modells sind. Natürlich sollte auch die Klassifizierung physischer Fehler berücksichtigt werden. Für komplexere Verfahren könnte eine stärker getrennte Funktionskapselung hilfreich sein.

### **Modellanpassungsdienst (model adaption service)**

Der Modellanpassungsdienst basiert hauptsächlich auf experimentellen Live-Daten und einem Finite-Volumen-Simulationsmodell des PBTES-Teststands. Das Finite-Volumen-Simulationsmodell wurde von Schwarzmayr et al. [79] entwickelt und validiert, um als virtuelle Einheit in einem DT-Framework verwendet zu werden. Der Modellanpassungsdienst verwendet Temperaturmessungen des PBTES-Teststands als Anfangswerte und einen Parametersatz, um das thermische Verhalten des Teststands für einen gegebenen Zeitplan vorherzusagen/rekonstruieren. Der Parametersatz umfasst mehrere Wärmeübergangskoeffizienten, die die Wärmeverluste an die Umgebung beschreiben, die effektive Wärmeleitfähigkeit des Füllkörperbetts, den Wärmeübergangskoeffizienten zwischen HTF und Speichermaterial sowie die thermischen Wirkungsgrade  $\eta_+$  und  $\eta_-$  für den Lade- und

Entladevorgang, die für die Auswertungen in dieser Studie am wichtigsten sind. Diese beiden Wirkungsgrade werden wie folgt definiert:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{pb}}{\dot{Q}_{htf}}$$

wobei  $\dot{Q}_{htf}$  die thermische Leistungsrate ist, die voraussichtlich von der ASU geliefert wird, und  $\dot{Q}_{pb}$  die tatsächliche Leistungsrate ist, die von der ASU geliefert wird. Für einen PBTES mit sauberem Festbett und ohne allmähliche Verschlechterung der thermischen Leistung sind diese beiden Leistungsrate gleich (unter Vernachlässigung von Wärmeverlusten) und der Wirkungsgrad  $\eta$  liegt sowohl beim Laden als auch beim Entladen bei einem konstanten Wert von 1. Da sich das Verhalten der physischen Einheit im Laufe der Zeit nicht ändert, kann dieses Finite-Volumen-Modell mit einem statischen Parametersatz das Verhalten der physischen Einheit mit hoher Genauigkeit vorhersagen. Falls sich das thermische Verhalten der physischen Einheit jedoch im Laufe der Zeit allmählich verschlechtert (wie dies bei uns der Fall ist), muss der Parametersatz  $\theta$  ständig aktualisiert werden, um das Verhalten des Finite-Volumen-Modells an das Verhalten der physischen Einheit anzupassen. Zu diesem Zweck entnimmt der Modellanpassungsdienst experimentelle Daten vom Prüfstand für die letzten 12 Betriebsstunden und verwendet das Finite-Volumen-Modell, um das experimentell gemessene Verhalten der physikalischen Einheit zu rekonstruieren. Um den optimalen Parametersatz  $\tilde{\theta}$  zu finden, lösen wir das nichtlineare Optimierungsproblem

$$\tilde{\theta} = \arg(\min_{\theta} J(\theta))$$

mit der Zielfunktion

$$J(\theta) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (w_T e_{T,i}^2 + w_{SOC} e_{SOC,i}^2)}$$

wobei  $e_{T,i}$  der Fehler zwischen gemessenen und rekonstruierten Temperaturen im Festbett und  $e_{SOC,i}$  der Fehler zwischen dem gemessenen und dem rekonstruierten Ladezustand (SOC) des TES ist.  $w_T$  und  $w_{SOC}$  sind empirisch ermittelte Gewichte, die die Größenordnung von  $e_{T,i}$  und  $e_{SOC,i}$  anpassen. Das definierte Optimierungsproblem wird mit dem nichtlinearen Solver *fmincon* von MATLAB® gelöst, der mit dem Parametersatz initialisiert wird, der das Ergebnis des letzten Optimierungslaufs war. Dies garantiert eine schnelle und zuverlässige Konvergenz. Der vom Solver gefundene neue optimale Parametersatz  $\tilde{\theta}$  wird zusammen mit seinem Gültigkeitszeitraum in der Datendimension des DT gespeichert, wo er von jedem Dienst des DT abgerufen werden kann.

### **Datenauswertungsdienst (data augmentation service)**

Der Datenauswertungsdienst wird immer dann ausgelöst, wenn ein virtuelles Modell vom Modellanpassungsdienst angepasst wird, und fungiert als vorbereitender Schritt vor dem Linearisierungsdienst. Da es unzuverlässig wäre, ein stückweise linearisiertes Modell basierend auf einer kleinen Menge historischer Daten anzupassen, haben wir uns für den Ansatz entschieden, den gesamten SOC-Betriebsbereich mit dem maximalen Massenstrom des PBTES mit dem aktuellen, genauen Finite-Volumen-Modell zu simulieren, das aus der virtuellen Einheit abgerufen wird. Der Dienst simuliert zunächst einen vollständigen Zyklus des PBTES, d. h. das Laden von SOC = 0 bis zum Erreichen von SOC = 1 mit der maximal verfügbaren Leistung und das Entladen in gleicher Weise. Anschließend durchläuft er eine gleichmäßig gerasterte Zeitreihe des Anfangszyklus und simuliert das Laden/Entladen beginnend bei verschiedenen SOC-Stufen, bis der endgültige SOC erreicht ist. Dieser Ansatz liefert einen hochauflösenden Datensatz des PBTES-Verhaltens für die anschließende Linearisierung (siehe Abbildung 9).

### **Linearisierungsdienst (linearization service)**

Dieser Dienst automatisiert die Anpassung von MILP-geeigneten stückweise linearen Modellen des nichtlinearen Betriebsverhaltens von Systemkomponenten. Der Dienst wird ausgelöst, wenn neue Daten vom Datenauswertungsdienst verfügbar sind, und stellt ein aktuelles, genaues Modell für den Betriebsplanungsdienst und den MPC-Dienst bereit. In unserer Implementierung wird die nichtlineare Abhängigkeit der maximalen PBTES-Lade-/Entladeleistung sowie die Abhängigkeit der Sättigungsverluste vom Ladezustand linearisiert. Der Ansatz basiert auf der von Koller et al. [42] vorgestellten Modellformulierung. Wir haben einen neuartigen Algorithmus implementiert, der von Birkelbach et al. [80] entwickelt und auf GitLab veröffentlicht wurde und eine robuste Anpassung mit Hyperebenen in einer oder zwei konvexen Regionen ermöglicht. Während Koller et al. die Linearisierung manuell an den Datensatz angepasst haben, kann unser Linearisierungsdienst automatisch die Trennung der beiden konvexen Regionen wählen und sie mit Hyperebenen approximieren. Die Hyperebenenparameter werden dann auf Kosten zusätzlicher binärer Variablen und Big-M-Beschränkungen in MILP-Beschränkungen umgewandelt. Für Einzelheiten verweisen wir auf Birkelbach et al. [80]. Darüber hinaus führt der Dienst eine grundlegende Machbarkeitsprüfung der Näherung im Betriebsbereich durch, um sicherzustellen, dass bei der nachfolgenden Anwendung der Modelle keine Undurchführbarkeitsprobleme auftreten. Abbildung 9 zeigt einen beispielhaften Linearisierungslauf dieses Dienstes für die maximale PBTES-Ladeleistung. Bei der Auswertung dieser Arbeit haben wir eine feste Anzahl von zehn Hyperebenen für die Näherung verwendet.

# Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

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

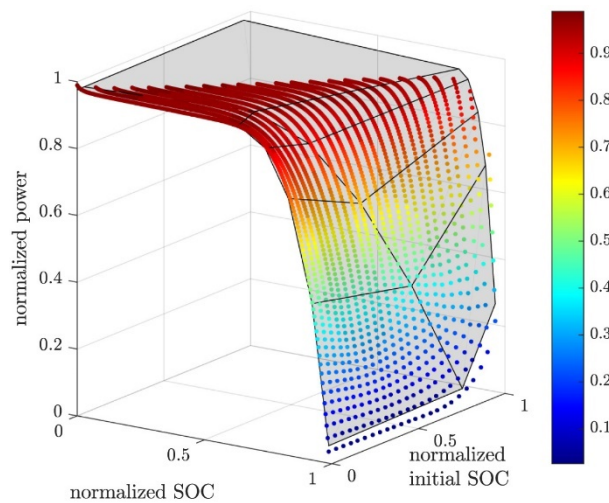


Abbildung 9: Stückweise lineare Näherung des nicht linearen Verhaltens des PBTES mit zehn Hyperebenen und zwei konvexen Teilbereichen (Quelle: Kasper et al. [78]).

## Betriebsplanungsdienst (operation planning service)

Die Betriebsoptimierung des physikalischen Systems ist in zwei Teile aufgeteilt: einen Betriebsplanungsdienst mit höherer Hierarchie, der einen optimalen Betriebsplan für einen mehrtägigen Zeithorizont bereitstellt, und einen MPC-Dienst mit niedrigerer Hierarchie, der eine schnelle optimale Steuerung des VES ermöglicht. Beide Dienste bauen auf derselben MILP-Modellformulierung auf, unterscheiden sich jedoch in der Länge des Prognosehorizonts und zusätzlichen Randbedingungen. Ein solches hierarchisches Energiemanagement oder auch eine mehrschichtige Optimierung wurde in den letzten Jahren von mehreren Autoren vorgeschlagen (siehe beispielsweise Dias et al. [81], Fuhrmann et al. [82], Valibeygi et al. [83] oder Polimeni et al. [84]). Zu Demonstrationszwecken haben wir eine sehr einfache hierarchische Steuerungsstrategie implementiert. Für Einzelheiten zum aktuellen Stand der Technik verweisen wir auf die oben angegebene Fachliteratur.

In unserer Implementierung wird der Betriebsplanungsdienst alle 6 Stunden ausgelöst und optimiert den Betriebsplan für die nächsten 48 Stunden. Jeder UC-Lauf erfordert die aktuellen Zustände sowohl des VES als auch der physischen Einheit als Anfangswerte. Um die Anfangswerte zu erhalten, kann der Dienst die Datendimension der DT-Plattform über OBDA abfragen und entweder die Werte selbst oder die Adresse zum Abrufen dieser Werte erhalten. Das UC-Problem dieses Dienstes umfasst 9693 kontinuierliche und 3982 binäre Variablen mit einer Einschränkungsmatrix von 36530 Zeilen und 13675 Spalten, von denen 140115 ungleich Null sind. Jeder Optimierungslauf erreichte die vordefinierte MILP-Lücke von 1% zur Obergrenze der optimalen Lösung, bevor die maximale Zeit von 5 Stunden erreicht wurde.

### **MPC-Dienst (MPC service)**

Wie oben beschrieben, ist der MPC-Dienst so konfiguriert, dass er mit einer höheren Frequenz als der Betriebsplanungsdienst arbeitet, um eine optimale Steuerung des VES zu gewährleisten. In unserer Implementierung wird der MPC-Dienst alle 5 Minuten ausgelöst und optimiert den Betriebsplan für die nächsten 12 Stunden. Der PBTES-SOC nach dem letzten Zeitschritt ist auf den entsprechenden SOC aus dem Betriebsplanungsdienstplan zum Zeitpunkt  $t_{n+1}$  beschränkt. Dies stellt die Einhaltung des langfristigen Plans des Betriebsplanungsdienstes sicher. Für die anderen Komponenten des VES werden keine weiteren endgültigen Beschränkungen festgelegt, da ihre Dynamik als relativ schnell angesehen wird. Der SOC des Dampfspeichers ist auf einen kritischen Wert beschränkt, d.h. auf einen etwas niedrigeren Wert als der Betriebsplanungsdienst, da der MPC-Dienst eine kürzere Wiederholungsfrequenz hat. Abgesehen von den hier genannten Beschränkungen ist das MILP-UC-Problem identisch mit dem des Betriebsplanungsdienstes. Die Anfangswerte werden äquivalent zum Betriebsplanungsdienst abgerufen. Das UC-Problem dieses Dienstes umfasst 2352 kontinuierliche und 960 binäre Variablen mit einer Constraint-Matrix von 8453 Zeilen und 3312 Spalten, von denen 32433 ungleich Null sind. Jeder Optimierungsdienstlauf erreichte die vordefinierte MILP-Lücke von 0,01% zur Obergrenze der optimalen Lösung, bevor die maximale Zeit von 4 Minuten erreicht wurde.

### **Day-ahead-Dienst (day-ahead service)**

Der implementierte Dienst folgt einem sehr einfachen Verfahren. Er wird jeden Tag um 12:00 Uhr Ortszeit durch einen entsprechenden Workflow aufgerufen. Beim Aufruf holt der Dienst den letzten bekannten VES-Zeitplan ab, der vom Betriebsplanungsdienst prognostiziert wurde, und legt die elektrische Turbinenleistung, die sich aus diesem Zeitplan ergibt, für die 24 Stunden des nächsten Tages fest. Die in der Datenbank festgelegte elektrische Leistung wird dann im UC-Problem behandelt. Dies simuliert das typische Verfahren der Strombeschaffung und -vermarktung von Industrieunternehmen, d.h. das Senden der Prognose an den Energieversorger und damit die Bindung der Anlage an dieses Lastprofil. Dieser DT-Dienst könnte erweitert werden, um auch die automatisierte Lastprofilübertragung an den Energieversorger bei der Anwendung in industriellen Anwendungen zu erfüllen.

### **Zeitplanungsdienst (scheduler service)**

Der Zeitplanungsdienst ist dafür verantwortlich, die aktuellen Sollwerte des optimierten Betriebsplans an das SCADA-System zu senden. Er wird alle 60 s aufgerufen, holt den neuesten Fahrplan des MPC-Dienstes ab und sucht nach den Werten zum letzten Zeitschritt vor der aktuellen Zeit. Leistungswerte werden basierend auf dem HTF-Massenstrom und der Temperatur zwischen dem PBTES-Auslass und einer festen Ladetemperatur in eine

# Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

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

Enthalpiedifferenz umgewandelt. Die entsprechenden Werte werden dann in den OPC UA-Server des SCADA-Systems geschrieben, das die physische Einheit direkt steuert. Dies wurde in diesem Dienst über Python OPC UA implementiert. Das OPC UA-Informationsmodell kann einmalig auf eine Ontologie in der Datendimension der DT-Plattform abgebildet werden. Danach können die Knoten-IDs der jeweiligen Steuervariablen mit einer einfachen SPARQL-Abfrage aus der Datendimension abgerufen werden. Dies wurde von Steindl et al. [85] demonstriert und ermöglicht eine sehr flexible und skalierbare Softwareimplementierung.

### 3.4.3 Workflows und Kommunikationsflüsse für den Informationsaustausch

Die Laufzeitverwaltung der DT-Dienste und die Interaktion zwischen ihnen wird von einer Workflow-Engine orchestriert. Abbildung 10 zeigt die implementierten Workflows und ihre Kommunikation mit der Ontologie als BPMN-Darstellung. Das rechte Kästchen in Abbildung 10 stellt die Ontologie dar, die nicht Teil von BPMN ist, aber einbezogen wird, um die kritische Interaktion zwischen den einzelnen Diensten und der Ontologie hervorzuheben. Die durchgezogenen Pfeile definieren die Workflows und die gestrichelten Pfeile visualisieren den Informationsfluss zwischen den Diensten und der Ontologie.

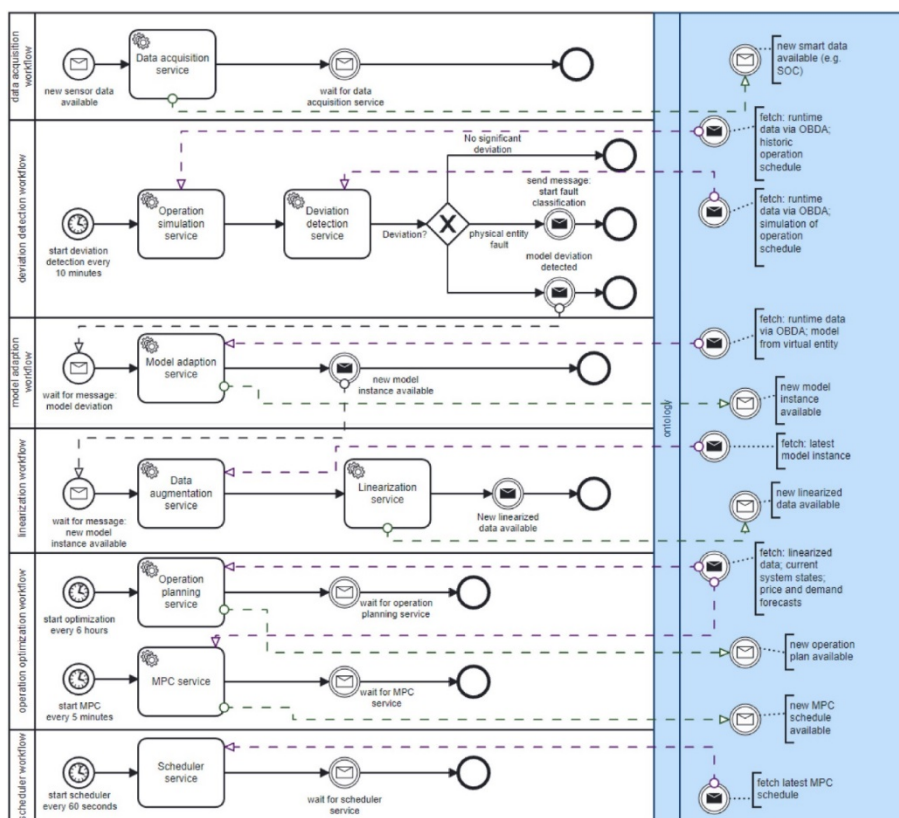


Abbildung 10: BPMN-Diagramm der Workflows die während dem Betrieb im digitalen Zwilling ablaufen. Der rechte, blau hinterlegte Teil dieser Grafik soll den Informationsaustausch mit der Ontologie darstellen (Quelle: Kasper et al. [78]).

## 4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

### 4.1 Demonstration des Frameworks: Softsensor-Service

Die Auswertungsergebnisse des Softsensordienstes aus Abschnitt 3.3 sind in Abbildung 11 dargestellt.

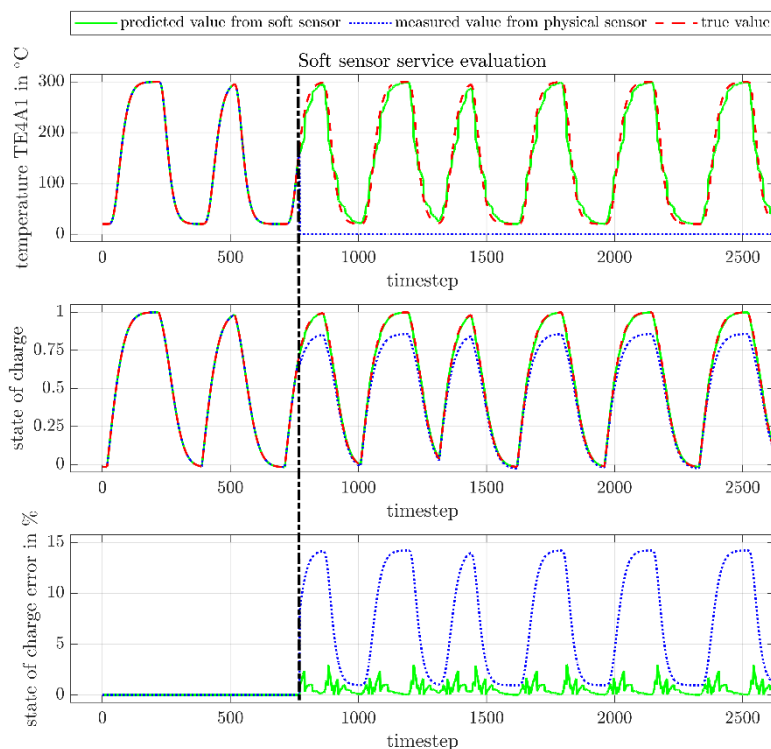


Abbildung 11: Evaluierung des entwickelten Frameworks mit dem Softsensor-Service für eine verbesserte Berechnung des Ladegrades des Speichers (Quelle: Schwarzmayr et al. [51]).

Der PBTES wurde zwei Tage lang nach einem vordefinierten Zeitplan (acht Lade-/Entladezyklen) betrieben. Auf der x-Achse jedes Diagramms wird die Zeit seit Beginn des Experiments angezeigt. Die Grafik zeigt den Verlauf des Temperatursensors FBR-TE 4A1, der der zentrale Sensor in Ebene 4 ist (vgl. Abbildung 3). Im mittleren Diagramm wird der vom Datenerfassungsdienst berechnete Ladegrad (engl. state of charge (SOC)) angezeigt. Die rote gestrichelte Linie zeigt den wahren Wert des Temperatursensors FBR-TE-4A1, der sich in den ersten 770 Minuten des Experiments mit dem gemessenen Wert (blau gepunktet) überschneidet. Folglich ist der Fehler in der SOC-Berechnung, der im unteren Diagramm dargestellt ist, während dieses Zeitintervalls Null. Nach Ablauf von 770 Minuten wird der gemessene Wert von FBR-TE-4A1 in XAMControl manuell mit einem konstanten Wert von 0 Grad Celsius überschrieben, um einen Sensorfehler zu simulieren. Unter normalen Bedingungen (ohne DT) würde dieser Sensorfehler zu einem erheblichen Fehler in der SOC-

Berechnung führen. Dieser Fehler wird in Abbildung 7 über den Verlauf der blau gepunkteten Linien im mittleren und unteren Diagramm visualisiert. Mit dem vorgeschlagenen DT-Framework kann dieser Fehler sofort vom Fehlererkennungsdienst erkannt werden, der weitere Arbeitsabläufe auslöst, wie zuvor in diesem Abschnitt beschrieben. Wie aus Abbildung 7 ersichtlich, reproduziert der automatisch trainierte Softsensor den wahren Wert von FBR-TE-4A1 mit hoher Genauigkeit. Dadurch lässt sich der SOC-Fehler (bezogen auf SOC = 1) von bisher knapp 15 Prozent auf maximal drei Prozent reduzieren.

### **4.2 Evaluierung des 5DIndustrialTwin Frameworks: Adaptive Betriebsoptimierung des industriellen Use-Cases**

Der in Abschnitt 3.2 vorgestellte Anwendungsfall bietet die Möglichkeit zum experimentellen Testen der entwickelten DT-Dienste und -Workflows für die adaptive Betriebsoptimierung. Es wurde von einer Woche typischem Betrieb des industriellen Energiesystems ausgegangen. Die Leistungs- und SOC-Werte des PBTES-Teststands werden mit einem konstanten Faktor auf das MILP-UC-Problem skaliert und umgekehrt. Wir haben feste Temperaturen von 200 °C und 50 °C für das Laden bzw. Entladen verwendet. Der Zeitplanungsdienst berechnet den für einen angeforderten Leistungswert erforderlichen Massenstrom basierend auf der Temperaturdifferenz. Diese Werte werden dann im SCADA-System über PID-Regler gesteuert. Um die kontinuierliche Verschlechterung des PBTES in unserem Labor zu simulieren, haben wir einen künstlichen Fehler eingeführt. Dieser Fehler reduziert den angeforderten Leistungswert und damit den Massenstrom um einen zunehmenden Faktor. Der Faktor steigt linear von 0 zu Beginn des Experiments auf 0,6 nach 7 Betriebstagen. Der künstliche Fehler wurde dem Zeitplanungsdienst hinzugefügt, aber an keiner anderen Stelle innerhalb der DT-Plattform angegeben.

Wie in Abschnitt 3.4.2 erläutert, reagiert der Modellanpassungsdienst auf Abweichungen zwischen dem Verhalten der physischen Einheit und dem Verhalten der virtuellen Einheit, indem er einen Satz von Parametern  $\theta$  anpasst. Basierend auf dem künstlichen Fehler, der den von der ASU bereitgestellten Massenstrom reduziert hat, erwarten wir, dass die beiden Parameter  $\eta_+$  und  $\eta_-$ , die Teil von  $\theta$  sind, mit der Zeit allmählich abnehmen. Wir haben nur diese beiden Parameter von  $\theta$  während der Auswertung als variabel betrachtet und die anderen auf vorab identifizierte Werte festgelegt. In Abbildung 12 ist dieses erwartete Verhalten eines perfekt funktionierenden Modellanpassungsdienstes als schwarze durchgezogene Linie dargestellt. An dieser Stelle sollte erwähnt werden, dass der Modellanpassungsdienst in Wirklichkeit immer hinter dieser schwarzen Linie zurückbleiben wird, da der Anpassungsvorgang nur mit historischen Daten durchgeführt werden kann. Dieses Verhalten ist in Abbildung 12 an den blauen und orangefarbenen Punkten zu beobachten. Diese Punkte stellen die Werte von  $\eta_+$  und  $\eta_-$  dar, die vom

## Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

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

Modellanpassungsdienst bei jeder Ausführung angepasst wurden. Obwohl die Modellanpassung etwas hinterherhinkt, erkennt sie die Verschlechterung der thermischen Leistung des TES immer noch mit akzeptabler Genauigkeit. Während der Modellfehler eines statischen Modells im Verlauf von 7 Betriebstagen auf 60 % ansteigen würde, bleibt der Modellfehler durch die Modellanpassung deutlich unter 25 %. Diese Informationen können von den anderen Mikrodiensten des DT verwendet werden, um die Qualität und Genauigkeit ihrer Ausgabe zu verbessern.

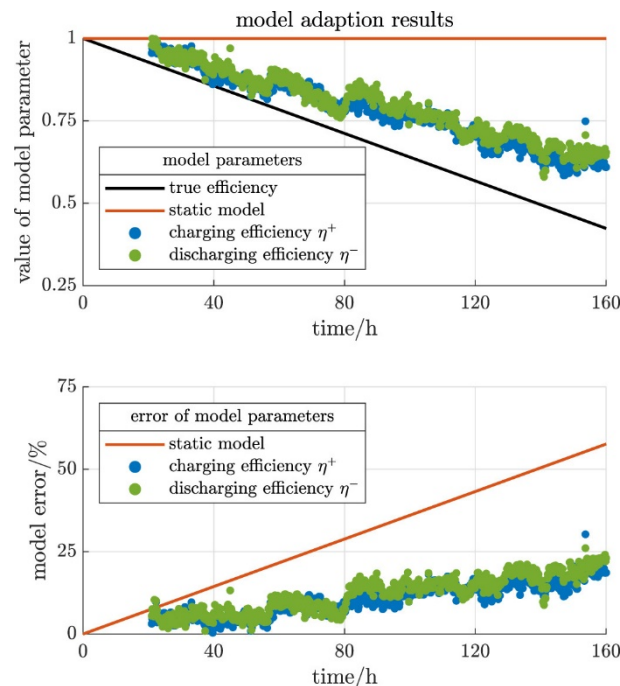


Abbildung 12: Versuchsergebnisse des Modelladaptiondienstes. Oben: Werte der Modellparameter, unten: Modellfehler (Quelle: Kasper et al. [78]).

Abbildung 13 zeigt 12 Stunden VES-Betrieb, 2.5 Tage nach Beginn des Experiments. Die Abbildung zeigt die Wärmeströme und Energiebilanzen an den in Abbildung 7 angegebenen Hauptumwandlungspunkten in einzelnen Teildiagrammen (im Folgenden von oben nach unten nummeriert). Das oberste Teildiagramm 1 zeigt die Energiebilanz des heißen Abgases. Teildiagramm 2 zeigt den PBTES-Betrieb. Die Energiebilanz innerhalb des Sattdampfsystems gilt für die Teildiagramme 3, 4 und 6. Teildiagramm 3 visualisiert die Gesamtausgangsleistung der SG und das Verhältnis dieser Leistung, die dem Sattdampfsystem und dem Überhitzer zur anschließenden Turbinenexpansion zugeführt wird. Teildiagramm 4 zeigt die Deckung des Prozessdampfbedarfs mit direkter Sattdampfproduktion und dem RSS. Die Funktionsweise der RSS ist im Teildiagramm 5 dargestellt. Die von Turbine und Dampfsystem ausgekoppelte Wärme ist im Teildiagramm 6 dargestellt. Die elektrische Leistungsabgabe der Dampfturbine sowie der aktuelle Strompreis sind im Teildiagramm 7 dargestellt.

# Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

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

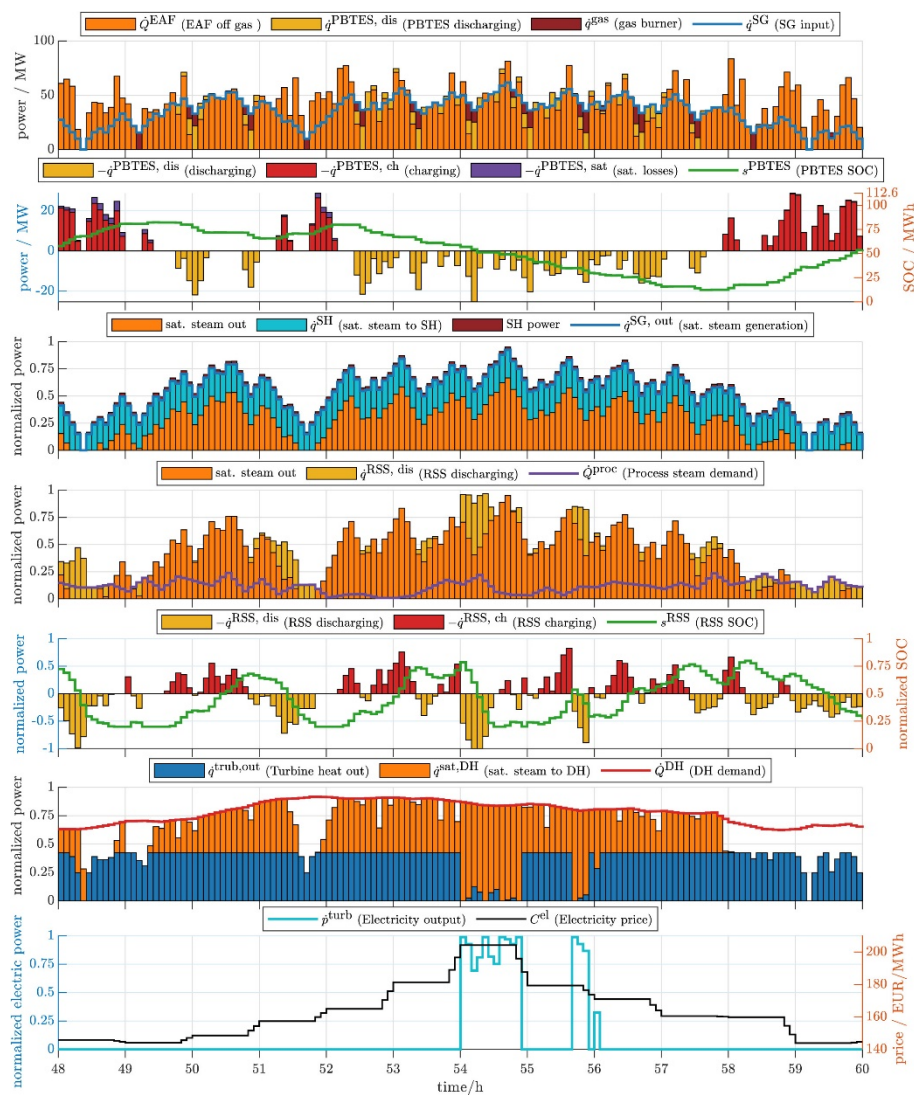


Abbildung 13: Exemplarischer Auszug (12h) aus dem VES Betrieb während der experimentellen Evaluierung (Quelle: Kasper et al. [78]).

Die erfolgreiche Modellanpassung während unseres experimentellen Betriebs bildet die Grundlage für den effizienten Betrieb des VES über lange Zeiträume. Abbildung 14 zeigt den prognostizierten und erzielten Ertrag während einer Woche VES-Betrieb. Dabei entspricht der prognostizierte Ertrag zu einem bestimmten Zeitpunkt der mittleren Ertragsprognose des MPC-Dienstes, die 12 Stunden zuvor für seinen Prognosehorizont erstellt wurde. Der angegebene erzielte Ertrag ist der gleitende Durchschnitt über dasselbe 12-Stunden-Fenster, der sich aus der tatsächlichen VES-Simulation gemäß dem PBTES-Teststandbetrieb ergibt. Der VES-Betrieb wird für einen beispielhaften Zeitraum in Abbildung 13 detailliert visualisiert. Es ist ersichtlich, dass der Prognosefehler während des Betriebszeitraums trotz der Verschlechterung der PBTES-Leistung in einer typischen Größenordnung von 10 bis 20 % bleibt. Der abnehmende absolute Wert des VES-Ertrags gegen Ende der Woche kann nicht direkt auf die reduzierten PBTES-Fähigkeiten zurückgeführt werden, sondern wird

## Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

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

hauptsächlich durch schwankende Strompreise und Wärmebedarfe beeinflusst. Eine weitere Reduzierung des Prognosefehlers des MPC-Dienstes ist durch die Verbesserung der experimentellen Steuerung möglich. Beispielsweise beobachteten wir einige Verzögerungen bei der Steuerung der ASU des Prüfstands. Ein verfeinertes Intervall des Scheduler-Dienstes (das auf 60 s eingestellt war) konnte eine genaue Werteinstellung gemäß dem Betriebsplan garantieren. Darüber hinaus ist die PID-Regelung der HTF-Temperatur, die in den PBTES bei variierendem Massenstrom eintritt, aufgrund der thermischen Trägheit nicht trivial und führt zu weiteren Schwankungen zwischen den eingestellten Leistungswerten und den erreichten Werten. Diese Effekte werden durch die notwendige Ausschaltzeit unseres PBTES-Prüfstands verstärkt. Teildiagramm 1 in Abb. 8 zeigt, dass wir einige PBTES-Entladeüberschreitungen gemessen haben, die durch die beschriebenen Verzögerungen verursacht wurden. In ähnlicher Weise wurde der Hilfgasbrenner in der VES-Simulation aktiviert, wenn eine bestimmte Ladeleistung nicht erreicht werden konnte.

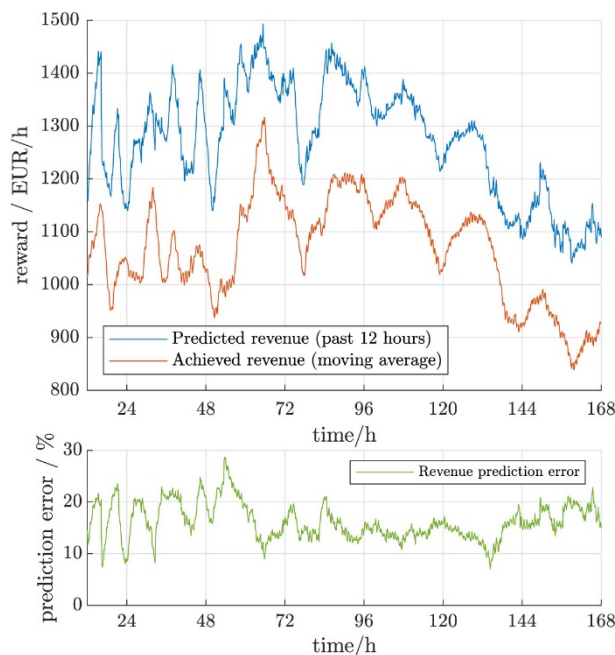


Abbildung 14: Ergebnisse der einwöchigen Dauerversuche (Quelle: Kasper et al. [78]).

Trotz der beschriebenen Optionen für weitere Verbesserungen lieferten unsere experimentellen Tests einen erfolgreichen Proof of Concept für die DT-basierte MILP-Modellanpassung. Die automatisierte Anpassung des PBTES-MILP-Modells im MPC- und Betriebsplanungsdienst stellte sicher, dass die effiziente Betriebsplanung nicht beeinträchtigt wurde. Auch wenn für einen Transfer aus der Laborumgebung in die industrielle Anwendung noch weitere methodische Details der DT-Dienste verbessert werden müssen, liegen die Vorteile des DT-Ansatzes klar auf der Hand. Wie in unserer früheren Arbeiten an der hier angewandten DT-Plattform [43], [78] hervorgehoben, erleichtern ein Message Broker als

zentraler Kommunikationsknoten und ein Microservice-Framework zur Verwaltung von Inter-Service-Workflows die Interoperabilität zwischen verschiedenen Anwendungen sowie den Zugriff auf und die Wartung verteilter Datenquellen. Adaptive Betriebsoptimierungs-Frameworks sind komplex, und hier übertrifft die Kapselung in Microservices monolithische Softwareimplementierungen. Die Wartung wird durch die Nutzung modernster Softwareentwicklungsframeworks wie Docker erleichtert. Diese Kapselung in Kombination mit einem übergreifenden Workflow-Management fördert die Skalierbarkeit, beispielsweise die Integration neuer Dienste, weiter. Daher argumentieren wir, dass die in dieser Arbeit entwickelte DT-Servicestruktur eine Implementierungsvorlage für zumindest grundlegende wirtschaftliche Energiemanagementanwendungen bieten könnte.

## 5 Ausblick und Empfehlungen

DTs sind ein großartiges Ergebnis der rasanten Digitalisierung und I4.0-Entwicklungen. Nach einem anfänglichen Hype könnten DTs bald eine weitverbreitete Anwendung in industriellen Energiesystemen finden. Die in dieser Arbeit vorgestellte DT-Plattform bietet hierfür eine skalierbare Implementierungsvorlage. Es gibt bereits viele Methoden und Anwendungen zur Verbesserung der Betriebsleistung von Komponenten industrieller Energiesysteme, z. B. basierend auf mathematischer Modellierung oder maschinellem Lernen. Der Hauptvorteil des DT-Ansatzes ist jedoch die enge Integration und Interaktion all dieser intelligenten Dienste. DTs erleichtern die Integration ansonsten eigenständiger digitaler Dienste wie z. B. Zustandsüberwachung, vorausschauende Wartung und Betriebsoptimierung. Der DT dient als Plattform für diese Dienste, die ihnen Zugriff auf eine gemeinsame Wissensbasis und bidirektionale Kommunikation mit der physischen Einheit ermöglicht. Daher können DTs den Mehrwert einzelner Lösungen maximieren, indem sie Synergien nutzen und gleichzeitig Interoperabilität, Robustheit und Skalierbarkeit erhöhen. Dieses Potenzial wurde für einen Anwendungsfall im Bereich Dampfversorgungssysteme skizziert. Zudem wurde eine erste konzeptionelle DT-Umsetzung vorgestellt und Empfehlungen abgeleitet.

Auf qualitativer Ebene definieren DTs klare Schnittstellen, um die Arbeit von Energiesystemingenieuren und Informatikexperten zu trennen. Durch die effiziente Servicekapselung der vorgeschlagenen DT-Plattform können Energiefachexperten ihre Arbeit auf die Serviceentwicklung, virtuelle Entitätsmodelle und den optimalen Betrieb von Energiesystemen konzentrieren. Gleichzeitig können Informatiker ihr Fachwissen zur Skalierbarkeit, Zuverlässigkeit und Sicherheit der DT-Plattform sowie zur Herstellung der Interoperabilität auf technischer, syntaktischer, semantischer und betrieblicher Ebene nutzen. Einerseits erleichtert dies die weit verbreitete Anwendung neuartiger Methoden direkt aus der angewandten Forschung in nur kurzer Entwicklungszeit. Andererseits können mehr Industrieanlagen diese komplexen Methoden nutzen, indem ihre Implementierung über DT-

## Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

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

Technologie erleichtert wird. Quantitative Vorteile entstehen durch die enge Integration einzelner Digitalisierungslösungen zusammen mit semantischer Webtechnologie in der Daten- und Verbindungsdimension von DTs. Somit kann die Nutzung bestehender Methoden verbessert werden. Dies wurde experimentell anhand verschiedener Anwendungsfälle validiert. Zuerst wurde vorgestellt, wie ein DT, der mit der Fähigkeit ausgestattet ist, automatisch Softsensoren zu erstellen, den durch Temperatursensorfehler verursachten Fehler in der SOC-Berechnung eines TES effektiv beseitigen kann. Somit bleibt der kosten- und energieeffiziente Betrieb des Systems ungestört. Darüber hinaus wurde eine Methodik für automatische Modellanpassungs- und Linearisierungsdienste vorgestellt, die auf einer DT-Plattform integriert sind. Die Verwendung dieser DT-Dienste stellt sicher, dass die effiziente Betriebsoptimierung nicht durch veraltete Komponentenmodelle beeinträchtigt wird.

DT-Dienste, die verifizierte Methoden beinhalten, sind also für DTs unerlässlich, um Mehrwert zu generieren. Während die Integration und Skalierbarkeit von Diensten in DT-Plattformen erleichtert wird, muss die methodische Forschung zu Energiesystemdiensten fortgesetzt werden. Wichtige Forschungsaspekte in diesem Zusammenhang, unabhängig von der spezifischen Anwendung, sind Automatisierung und Zuverlässigkeit.

Beispielsweise basieren die meisten datengetriebenen Modellierungsmethoden immer noch auf der manuellen Verifizierung von Trainingsdaten oder zumindest auf der fachkundigen Festlegung entsprechender historischer Zeitfenster. Daher ist die zuverlässige Automatisierung solcher Modelltrainingsaufgaben innerhalb von DTs von großer Bedeutung. Dasselbe gilt für Fehlererkennungsdienste. Die Erkennung von Abweichungen und Fehlern sowie deren Klassifizierung ist ein anspruchsvolles Thema, selbst wenn sie manuell durchgeführt wird. Für ihre Automatisierung könnten sich beispielsweise ontologie-basierte Schlussfolgerungsansätze als geeignet erweisen. Die automatische Generierung solcher Informationsmodelle aus vorhandenen Rohrleitungs- und Instrumentierungsdiagrammen (R&I) wurde bereits demonstriert und könnte ein leistungsfähiges Werkzeug zur Förderung der Automatisierung darstellen. Basierend auf Ontologien können dynamische datengetriebene Modelle von Energiesystemen vollständig automatisch identifiziert werden. Es wäre wünschenswert, diesen Ansatz für die automatisierte Identifizierung von Optimierungsmodellen anzuwenden. In den letzten Jahren haben mehrere Forschungsteams modulare MILP-basierte Energiemanagementansätze eingeführt. Dies bietet eine Grundlage für eine weitere Automatisierung durch ontologie-basierte Modellidentifikation und erleichtert so die noch immer mühsame Entwicklung von Optimierungsmodellen noch mehr. Die Weiterentwicklung spezifischer Ontologien und verwandter Ansätze wird jedoch in den kommenden Jahren die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Informatikern und Energiesystemexperten erfordern. DTs könnten auch eine großartige Plattform für Transfer-learning und Energiesystemsteuerung durch Reinforcement-learning bieten. Einerseits bietet

eine genaue digitale Darstellung den klaren Vorteil, dass weniger oder sogar kein Training dieser maschinellen Lernmethoden an der physischen Einheit erforderlich ist. Andererseits wird die Modellanpassung auf der Grundlage der neuesten Betriebsdaten und die Bereitstellung dieser Modelle für die tatsächliche Steuerung durch eine DT-Plattform erleichtert. Dies könnte auch eine schnellere Entwicklung zuverlässiger Fehlererkennungsdienste fördern. Die ersten Machbarkeitsstudien zu diesem Ansatz mit experimenteller Validierung sind jedoch erforderlich, um die zukünftige Forschung zu leiten. In diesem Zusammenhang sind hybride physikalische und datengetriebene Modellierungsmethoden sowie Modelle reduzierter Ordnung sehr vielversprechend.

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] M. Bortolini, E. Ferrari, M. Gamberi, F. Pilati, und M. Faccio, „Assembly system design in the Industry 4.0 era: a general framework“, *IFAC-PapersOnLine*, Bd. 50, Nr. 1, S. 5700–5705, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1121.
- [2] G. E. Modoni, E. G. Caldarola, M. Sacco, und W. Terkaj, „Synchronizing physical and digital factory: benefits and technical challenges“, *Procedia CIRP*, Bd. 79, S. 472–477, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.procir.2019.02.125.
- [3] E. Glaessgen und D. Stargel, „The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles: in 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference“, Jan. 2012, doi: 10.2514/6.2012-1818.
- [4] E. J. Tuegel, A. R. Ingraffea, T. G. Eason, und S. M. Spottswood, „Reengineering Aircraft Structural Life Prediction Using a Digital Twin“, *International Journal of Aerospace Engineering*, Bd. 2011, S. 1–14, Jan. 2011, doi: 10.1155/2011/154798.
- [5] K. Reifsnider und P. Majumdar, „Multiphysics Stimulated Simulation Digital Twin Methods for Fleet Management“, in *54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, in Structures, Structural Dynamics, and Materials and Co-located Conferences. , American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2013. doi: 10.2514/6.2013-1578.
- [6] F. Tao, M. Zhang, und Nee, A. Y. C., *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*. Academic Press, 2019. doi: 10.1016/C2018-0-02206-9.
- [7] „VERBUND präsentiert das ‚Digitale Wasserkraftwerk 4.0‘“. Zugegriffen: 1. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.verbund.com/>
- [8] A. AG, „TechNews: IDEAS Digital Twin in Process Industries“. Zugegriffen: 1. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.andritz.com/spectrum-en/latest-issues/issue-38/technews-ideas-digital-twin-in-process-industries>
- [9] „IoT4CPS“. Zugegriffen: 1. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://projekte.ffg.at/projekt/2851050>
- [10] „DigiFact Performance“. Zugegriffen: 1. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://projekte.ffg.at/projekt/3446311>
- [11] „DigiTwinPV“. Zugegriffen: 1. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://projekte.ffg.at/projekt/3218144>
- [12] „DigitalEnergyTwin“. Zugegriffen: 1. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://projekte.ffg.at/projekt/3308396>

- [13] F. Tao, H. Zhan, A. Liu, und Nee, A. Y. C., „Digital Twin in Industry: State-of-the-Art“, *IEEE Trans. Ind. Inform.*, Bd. 15, Nr. 4, S. 2405–2415, Jan. 2019, doi: 10.1109/tii.2018.2873186.
- [14] M. Grieves, „Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication“, *White paper*, S. 1–7, Jan. 2014.
- [15] F. Tao und M. Zhang, „Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing“, *IEEE Access*, Bd. 5, S. 20418–20427, Jan. 2017, doi: 10.1109/access.2017.2756069.
- [16] F. Tao, M. Zhang, Y. Liu, und Nee, A. Y. C., „Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment“, *CIRP Annals*, Bd. 67, Nr. 1, S. 169–172, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.cirp.2018.04.055.
- [17] F. Tao, M. Zhang, und A. Y. C. Nee, „Chapter 3 - Five-Dimension Digital Twin Modeling and Its Key Technologies“, in *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*, F. Tao, M. Zhang, und A. Y. C. Nee, Hrsg., Academic Press, 2019, S. 63–81. doi: 10.1016/B978-0-12-817630-6.00003-5.
- [18] K. Josifovska, E. Yigitbas, und G. Engels, „Reference Framework for Digital Twins within Cyber-Physical Systems“, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2019, S. 25–31. doi: 10.1109/SEsCPS.2019.00012.
- [19] J. Cheng, H. Zhang, F. Tao, und C.-F. Juang, „DT-II: Digital twin enhanced Industrial Internet reference framework towards smart manufacturing“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Bd. 62, S. 101881, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.rcim.2019.101881.
- [20] C. Hu, W. Gao, C. Xu, und K. Ben, „Study on the Application of Digital Twin Technology in Complex Electronic Equipment“, in *Proceedings of the Seventh Asia International Symposium on Mechatronics*, B. Duan, K. Umeda, und W. Hwang, Hrsg., Singapore: Springer, 2020, S. 123–137. doi: 10.1007/978-981-32-9441-7\_14.
- [21] S. Boschert und R. Rosen, „Digital Twin—The Simulation Aspect“, in *Mechatronic Futures: Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and their Designers*, P. Hehenberger und D. Bradley, Hrsg., Cham: Springer International Publishing, 2016, S. 59–74. doi: 10.1007/978-3-319-32156-1\_5.
- [22] J. L. G. Dietz, Hrsg., „What is Enterprise Ontology?“, in *Enterprise Ontology: Theory and Methodology*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2006, S. 7–13. doi: 10.1007/3-540-33149-2\_2.
- [23] F. Opitz und P. Treffinger, „Packed bed thermal energy storage model – Generalized approach and experimental validation“, *Applied Thermal Engineering*, Bd. 73, Nr. 1, S. 245–252, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.07.057.
- [24] E. Oró, J. Chiu, V. Martin, und L. F. Cabeza, „Comparative study of different numerical models of packed bed thermal energy storage systems“, *Applied Thermal Engineering*, Bd. 50, Nr. 1, S. 384–392, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2012.07.020.
- [25] R. Anderson, L. Bates, E. Johnson, und J. F. Morris, „Packed bed thermal energy storage: A simplified experimentally validated model“, *Journal of Energy Storage*, Bd. 4, S. 14–23, Dez. 2015, doi: 10.1016/j.est.2015.08.007.
- [26] H. Walter, N. Strohmayer, und M. Hameter, „One dimensional mathematical model for a thermocline energy storage device“, *International Journal of Mechanical Engineering*, Bd. 3, Nr. 2367–8968, Jan. 2018.
- [27] Z. Cen, J. Wei, und R. Jiang, „A Grey-Box Neural Network based identification model for nonlinear dynamic systems“, in *2011 Fourth International Workshop on Advanced Computational Intelligence (IWACI 2011): Wuhan, China, 19 - 21 October 2011*, Piscataway, NJ: IEEE, 2011, S. 300–307. doi: 10.1109/IWACI.2011.6160021.

- [28] S. K. Andryushkevich, S. P. Kovalyov, und E. Nefedov, „Composition and Application of Power System Digital Twins Based on Ontological Modeling“, in *2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, IEEE, 2019, S. 1536–1542. doi: 10.1109/INDIN41052.2019.8972267.
- [29] R. Sudarsan, S. J. Fenves, R. D. Sriram, und F. Wang, „A product information modeling framework for product lifecycle management“, *Computer-Aided Design*, Bd. 37, Nr. 13, S. 1399–1411, Jan. 2005, doi: 10.1016/j.cad.2005.02.010.
- [30] TIM BERNERS-LEE, JAMES HENDLER, und ORA LASSILA, „THE SEMANTIC WEB“, *Scientific American*, Bd. 284, Nr. 5, S. 3443, Jan. 2001.
- [31] H. Kim und K. Anderson, „Energy Modeling System Using Building Information Modeling Open Standards“, *J. Comput. Civ. Eng.*, Bd. 27, Nr. 3, S. 203–211, Jan. 2013, doi: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000215.
- [32] M. Uslar, M. Specht, S. Rohjans, J. Trefke, und J. M. González, *The Common Information Model CIM: IEC 61968/61970 and 62325-A practical introduction to the CIM*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [33] M. Dean, „Owl web ontology language reference, w3c recommendation“, <http://www.w3.org/TR/2004/REC-owl-ref-20040210>, Jan. 2004, [Online]. Verfügbar unter: <http://www.w3.org/TR/2004/REC-owl-ref-20040210>
- [34] I. Niles und A. Pease, „Origins of the IEEE standard upper ontology“, in *Working notes of the IJCAI-2001 workshop on the IEEE standard upper ontology*, 2001, S. 410.
- [35] J. Deckers, *Dem Defekt einen Schritt voraus: Drehmoment-Schwingungsüberwachung vermeidet Getriebebeschäden: VDI-Fachtagung; Leonberg bei Stuttgart, 20. und 21. Mai 2014*, Nichtred. Ms.-Dr., Bd. 2227. in VDI-Berichte, vol. 2227. Düsseldorf: VDI-Verl., 2014.
- [36] D. Mourtzis, A. Gargallis, und V. Zogopoulos, „Modelling of Customer Oriented Applications in Product Lifecycle using RAMI 4.0“, *Procedia Manufacturing*, Bd. 28, S. 31–36, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2018.12.006.
- [37] J. Wang, L. Ye, R. X. Gao, C. Li, und L. Zhang, „Digital Twin for rotating machinery fault diagnosis in smart manufacturing“, *International Journal of Production Research*, Bd. 57, Nr. 12, S. 3920–3934, Jan. 2018, doi: 10.1080/00207543.2018.1552032.
- [38] Y. Xu, Y. Sun, X. Liu, und Y. Zheng, „A Digital-Twin-Assisted Fault Diagnosis Using Deep Transfer Learning“, *IEEE Access*, Bd. 7, S. 19990–19999, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2890566.
- [39] K. Sivalingam, M. Sepulveda, M. Spring, und P. Davies, „A Review and Methodology Development for Remaining Useful Life Prediction of Offshore Fixed and Floating Wind turbine Power Converter with Digital Twin Technology Perspective“, in *2018 2nd International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA)*, IEEE, 2018, S. 197–204. doi: 10.1109/ICGEA.2018.8356292.
- [40] K. Macek, P. Endel, N. Cauchi, und A. Abate, „Long-term predictive maintenance: A study of optimal cleaning of biomass boilers“, *Energy and Buildings*, Bd. 150, S. 111–117, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.05.055.
- [41] J. Deutsch und D. He, „Using Deep Learning-Based Approach to Predict Remaining Useful Life of Rotating Components“, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern, Syst.*, Bd. 48, Nr. 1, S. 11–20, Jan. 2018, doi: 10.1109/TSMC.2017.2697842.
- [42] M. Koller, R. Hofmann, und H. Walter, „MILP model for a packed bed sensible thermal energy storage“, *Computers & Chemical Engineering*, Bd. 125, S. 40–53, Juni 2019, doi: 10.1016/j.compchemeng.2019.03.007.
- [43] L. Kasper, F. Birkelbach, P. Schwarzmayr, G. Steindl, D. Ramsauer, und R. Hofmann, „Toward a Practical Digital Twin Platform Tailored to the Requirements of Industrial

- Energy Systems“, *Applied Sciences*, Bd. 12, Nr. 14, Art. Nr. 14, Jan. 2022, doi: 10.3390/app12146981.
- [44] G. Steindl, M. Stagl, L. Kasper, W. Kastner, und R. Hofmann, „Generic Digital Twin Architecture for Industrial Energy Systems“, *Applied Sciences*, Bd. 10, Nr. 24, S. 8903, Jan. 2020, doi: 10.3390/app10248903.
- [45] G. Steindl und W. Kastner, „Semantic Microservice Framework for Digital Twins“, *Applied Sciences*, Bd. 11, Nr. 12, S. 5633, Jan. 2021, doi: 10.3390/app11125633.
- [46] E. R. developers, „Federation With FedX · Eclipse RDF4J™ | The Eclipse Foundation“, Eclipse RDF4J. Zugegriffen: 30. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://rdf4j.org/documentation/programming/federation/>
- [47] „Ontop“. Zugegriffen: 30. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://ontop-vkg.org/>
- [48] „Zeebe“, Camunda. Zugegriffen: 30. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://camunda.com/platform/zeebe/>
- [49] E. Oró, A. Castell, J. Chiu, V. Martin, und L. F. Cabeza, „Stratification analysis in packed bed thermal energy storage systems“, *Applied Energy*, Bd. 109, S. 476–487, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.12.082.
- [50] T. Esence, A. Bruch, S. Molina, B. Stutz, und J.-F. Fourmigué, „A review on experience feedback and numerical modeling of packed-bed thermal energy storage systems“, *Solar Energy*, Bd. 153, S. 628–654, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.03.032.
- [51] P. Schwarzmayr, F. Birkelbach, L. Kasper, und R. Hofmann, „Development of a Digital Twin Platform for Industrial Energy Systems“, in *Accelerated Energy Innovations and Emerging Technologies*, Cambridge, USA: Energy Proceedings, 2022. doi: 10.46855/energy-proceedings-9974.
- [52] Y. Sun, S. Tian, P. Ciais, Z. Zeng, J. Meng, und Z. Zhang, „Decarbonising the iron and steel sector for a 2 °C target using inherent waste streams“, *Nat Commun*, Bd. 13, Nr. 1, S. 297, Jan. 2022, doi: 10.1038/s41467-021-27770-y.
- [53] „Iron and Steel Technology Roadmap – Analysis“, IEA. Zugegriffen: 4. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>
- [54] P. Wang u. a., „Efficiency stagnation in global steel production urges joint supply- and demand-side mitigation efforts“, *Nat Commun*, Bd. 12, Nr. 1, S. 2066, Apr. 2021, doi: 10.1038/s41467-021-22245-6.
- [55] M. Kirschen, V. Risonarta, und H. Pfeifer, „Energy efficiency and the influence of gas burners to the energy related carbon dioxide emissions of electric arc furnaces in steel industry“, *Energy*, Bd. 34, Nr. 9, S. 1065–1072, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.energy.2009.04.015.
- [56] T. Keplinger, M. Haider, T. Steinparzer, A. Patrejko, P. Trunner, und M. Haselgrübler, „Dynamic simulation of an electric arc furnace waste heat recovery system for steam production“, *Applied Thermal Engineering*, Bd. 135, S. 188–196, Mai 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.02.060.
- [57] G. Nardin, A. Meneghetti, F. Dal Magro, und N. Benedetti, „PCM-based energy recovery from electric arc furnaces“, *Applied Energy*, Bd. 136, S. 947–955, Dez. 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.07.052.
- [58] A. Inayat, „Current progress of process integration for waste heat recovery in steel and iron industries“, *Fuel*, Bd. 338, S. 127237, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2022.127237.
- [59] „greentec steel - voestalpine Stahl Donawitz GmbH“. Zugegriffen: 4. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.voestalpine.com/stahldonawitz/en/quality-and-environment/greentec-steel/>
- [60] P. Schwarzmayr, „Efficient operation of a packed bed thermal energy storage for waste heat recovery in the iron and steel industry“, Thesis, Technische Universität Wien,

2024. [Online]. Verfügbar unter:  
<https://repositum.tuwien.at/handle/20.500.12708/197545>
- [61] T. Steinparzer, M. Haider, A. Fleischanderl, A. Hampel, G. Enickl, und F. Zauner, „Heat exchangers and thermal energy storage concepts for the off-gas heat of steelmaking devices“, *J. Phys.: Conf. Ser.*, Bd. 395, Nr. 1, S. 012158, Nov. 2012, doi: 10.1088/1742-6596/395/1/012158.
- [62] F. Dal Magro, S. Savino, A. Meneghetti, und G. Nardin, „Coupling waste heat extraction by phase change materials with superheated steam generation in the steel industry“, *Energy*, Bd. 137, S. 1107–1118, Okt. 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.04.051.
- [63] G. L. Bostick, „14 - Operation and controls“, in *Heat Recovery Steam Generator Technology*, V. L. Eriksen, Hrsg., Woodhead Publishing, 2017, S. 287–319. doi: 10.1016/B978-0-08-101940-5.00014-2.
- [64] G. Manente, Y. Ding, und A. Sciacovelli, „A structured procedure for the selection of thermal energy storage options for utilization and conversion of industrial waste heat“, *Journal of Energy Storage*, Bd. 51, S. 104411, Juli 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.104411.
- [65] A. Gautam und R. P. Saini, „A review on sensible heat based packed bed solar thermal energy storage system for low temperature applications“, *Solar Energy*, Bd. 207, S. 937–956, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.07.027.
- [66] A. Gautam und R. P. Saini, „A review on technical, applications and economic aspect of packed bed solar thermal energy storage system“, *Journal of Energy Storage*, Bd. 27, S. 101046, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.est.2019.101046.
- [67] B. Xie, N. Baudin, J. Soto, Y. Fan, und L. Luo, „Thermocline packed bed thermal energy storage system: a review“, in *Renewable Energy Production and Distribution*, Bd. 1, M. Jeguirim, Hrsg., in *Advances in Renewable Energy Technologies*, vol. 1, Academic Press, 2022, S. 325–385. doi: 10.1016/B978-0-323-91892-3.24001-6.
- [68] H. Zhang, G. Li, X. An, X. Ye, G. Wei, und A. Yu, „Numerical study on the erosion process of the low temperature economizer using computational fluid dynamics-discrete particle method“, *Wear*, Bd. 450–451, S. 203269, Juni 2020, doi: 10.1016/j.wear.2020.203269.
- [69] J. Marti, L. Geissbühler, V. Becattini, A. Haselbacher, und A. Steinfeld, „Constrained multi-objective optimization of thermocline packed-bed thermal-energy storage“, *Applied Energy*, Bd. 216, S. 694–708, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.12.072.
- [70] A.-G. Guézennec, J.-C. Huber, F. Patisson, P. Sessiecq, J.-P. Birat, und D. Ablitzer, „Dust formation in Electric Arc Furnace: Birth of the particles“, *Powder Technology*, Bd. 157, Nr. 1, S. 2–11, Sep. 2005, doi: 10.1016/j.powtec.2005.05.006.
- [71] P. Schwarzmayr, F. Birkelbach, H. Walter, F. Javernik, M. Schwaiger, und R. Hofmann, „Packed bed thermal energy storage for waste heat recovery in the iron and steel industry: A cold model study on powder hold-up and pressure drop“, *Journal of Energy Storage*, Bd. 75, S. 109735, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.est.2023.109735.
- [72] X. F. Dong, D. Pinson, S. J. Zhang, A. B. Yu, und P. Zulli, „Gas–powder flow and powder accumulation in a packed bed: I. Experimental study“, *Powder Technology*, Bd. 149, Nr. 1, S. 1–9, Nov. 2004, doi: 10.1016/j.powtec.2004.09.040.
- [73] K. G. T. Hollands und H. F. Sullivan, „Pressure drops across rock bed thermal storage systems“, *Solar Energy*, Bd. 33, Nr. 2, S. 221–225, Jan. 1984, doi: 10.1016/0038-092X(84)90241-X.
- [74] H. Singh, R. P. Saini, und J. S. Saini, „A review on packed bed solar energy storage systems“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 14, Nr. 3, S. 1059–1069, Apr. 2010, doi: 10.1016/j.rser.2009.10.022.

- [75] K. Knobloch, T. Ulrich, C. Bahl, und K. Engelbrecht, „Degradation of a rock bed thermal energy storage system“, *Applied Thermal Engineering*, Bd. 214, S. 118823, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118823.
- [76] P. G. D. Group, „PostgreSQL“, PostgreSQL. Zugegriffen: 30. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.postgresql.org/>
- [77] W3C, „W3C Recommendation. Time Ontology in OWL“. Zugegriffen: 30. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.w3.org/TR/owl-time/>
- [78] L. Kasper, P. Schwarzmayr, F. Birkelbach, F. Javernik, M. Schwaiger, und R. Hofmann, „A digital twin-based adaptive optimization approach applied to waste heat recovery in green steel production: Development and experimental investigation“, *Applied Energy*, Bd. 353, S. 122192, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.122192.
- [79] P. Schwarzmayr, F. Birkelbach, H. Walter, und R. Hofmann, „Study on the Standby Characteristics of a Packed Bed Thermal Energy Storage: Experimental Results and Model Based Parameter Optimization“, gehalten auf der ASME Power Applied R&D 2023, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, Sep. 2023. doi: 10.1115/POWER2023-108578.
- [80] F. Birkelbach, L. Kasper, P. Schwarzmayr, und R. Hofmann, „Operation Planning with Thermal Storage Units Using MILP: Comparison of Heuristics for Approximating Non-Linear Operating Behavior“, in *Proceedings of ECOS 2023*, Las Palmas De Gran Canaria, Spain, 2023, S. 1345–1350. doi: 10.52202/069564-0122.
- [81] L. S. Dias, R. C. Pattison, C. Tsay, M. Baldea, und M. G. Ierapetritou, „A simulation-based optimization framework for integrating scheduling and model predictive control, and its application to air separation units“, *Computers & Chemical Engineering*, Bd. 113, S. 139–151, Mai 2018, doi: 10.1016/j.compchemeng.2018.03.009.
- [82] F. Fuhrmann, B. Windholz, A. Schirrer, S. Knöttner, K. Schenzel, und M. Kozek, „Energy management for thermal batch processes with temporarily available energy sources– Laboratory experiments“, *Case Studies in Thermal Engineering*, Bd. 39, S. 102473, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.csite.2022.102473.
- [83] „Predictive Hierarchical Control of Power Flow in Large-Scale PV Microgrids With Energy Storage | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore“. Zugegriffen: 8. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9113322>
- [84] S. Polimeni, L. Meraldi, L. Moretti, S. Leva, und G. Manzolini, „Development and experimental validation of hierarchical energy management system based on stochastic model predictive control for Off-grid Microgrids“, *Advances in Applied Energy*, Bd. 2, S. 100028, Mai 2021, doi: 10.1016/j.adapen.2021.100028.
- [85] G. Steindl, T. Frühwirth, und W. Kastner, „Ontology-Based OPC UA Data Access via Custom Property Functions“, 2019, S. 95–101. doi: 10.1109/ETFA.2019.8869436.

## Energieforschungsprogramm - 6. Ausschreibung

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

### 7 Kontaktdaten



INSTITUT FÜR  
ENERGIETECHNIK UND  
THERMODYNAMIK  
Institute for Energy Systems and Thermodynamics

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. René Hofmann  
Forschungsbereich für Industrielle Energiesysteme  
Institut für Energietechnik und Thermodynamik  
Technische Universität Wien  
Getreidemarkt 9/E302 | 1060 Wien  
+43 1 58801 302327 | [rene.hofmann@tuwien.ac.at](mailto:rene.hofmann@tuwien.ac.at)  
<https://www.tuwien.at/mwbw/iet>



## Informatics

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Wolfgang Kastner  
Forschungsbereich Automation Systems  
Institut für Computer Engineering  
Technische Universität Wien  
<https://www.auto.tuwien.ac.at/>



Dipl.-Ing. Andreas Leitner  
Geschäftsführung  
evon GmbH  
<https://evon-automation.com/>

## voestalpine

ONE STEP AHEAD.

Dipl.-Ing. Michael Schwaiger  
Leitung Energiebetrieb  
voestalpine Stahl Donawitz GmbH  
<https://www.voestalpine.com/stahldonawitz/>