



INSTITUT FÜR
ENERGIETECHNIK UND
THERMODYNAMIK
Institute for Energy Systems
and Thermodynamics

DIGI STEAM

Digitalization in the energy sector:

Identification of digitalization possibilities in the energy sector especially in the field of steam supply systems

Abschlussbericht

VGB Projekt 429

Schlagwörter:

Digitalisierung
Digitaler Zwilling
fünf-dimensionale Modellierung
Dampferzeuger
Betriebs- und
Instandhaltungsoptimierung

Keywords:

digitalization
digital twin
five-dimensional modelling
digital steam generator
operation and maintenance
optimization

DIGI STEAM

Digitalization in the energy sector: Identification of digitalization possibilities in the energy sector especially in the field of steam supply systems

Autoren:

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. René Hofmann ¹

Univ. Ass. Dipl.-Ing. Lukas Kasper ¹

Dipl.-Ing. Thomas Bacher ^{1, *}

Univ. Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Felix Birkelbach ¹

¹ Technische Universität Wien, Institut für Energietechnik und Thermodynamik, Getreidemarkt 9/302, 1060 Wien, Österreich

Dieses Projekt wurde von der VGB-FORSCHUNGSSTIFTUNG ² gefördert.

Projekt-Nummer: 429

² VGB-FORSCHUNGSSTIFTUNG, Deilbachtal 173, 45247 Essen

* Im Rahmen dieses Forschungsprojekts entstand die Diplomarbeit „Entwicklung eines Anwendungskonzeptes für einen Digitalen Zwilling am Beispiel Dampferzeuger“ von Thomas Bacher, eingereicht an der TU Wien.
(<https://permalink.catalogplus.tuwien.at/AC15688873>)

			Auflage 0	Auflage 1
Autoren	René Hofmann Lukas Kasper Thomas Bacher Felix Birkelbach	TU Wien	12.8.2020	12.01.2021
Review		VGB		

Vorwort des VGB PowerTech

Digitalisierung und Industrie 4.0 verändern den Energiesektor tiefgreifend. Für alle Erzeugungstechnologien ergibt sich eine Vielzahl neuer Chancen, um Prozessabläufe zu optimieren, Effizienzpotentiale zu heben, Kosten zu reduzieren und neue Umsatzmöglichkeiten zu erschließen. Ein prominentes Beispiel ist die datengetriebene zustandsbasierte Instandhaltung (predictive maintenance), die gleichermaßen relevant für unterschiedliche Energieerzeugungsanlagen wie Windenergieanlagen und thermische Kraftwerke ist.

Vor diesem Hintergrund hat der Wissenschaftliche Beirat des VGB im Frühjahr 2019 zwei parallele Projekte zur Digitalisierung im Energiesektor angestoßen.

Im Rahmen von DigiPoll@Energy (VGB-Nr. 428) hat der Lehrstuhl für Umweltverfahrens- und Anlagentechnik (Prof. Görner) der Universität Duisburg-Essen den Ist- und Planzustand der digitalen Transformation im Energiesektor bezüglich der Herangehensweise und der Anwendungen analysiert. Basis der Analyse ist eine Umfrage unter den ordentlichen Mitgliedern des VGB (Betreiber von Anlagen zur Erzeugung und Speicherung von Strom und Wärme), die in Abstimmung mit dem Technischen Beirat des VGB durchgeführt wurde. Die Umfrage nutzt ein sechsstufiges digitales Reifegradmodell¹, das an der RWTH Aachen entwickelt wurde.

Reifegradstufen	Fragestellung	Beschreibung
1 Computerisierung	Werden Daten digital erhoben?	Isolierte digitale Erfassung und Verarbeitung von Daten, Schaffung digitaler Schnittstellen für Maschinen und Anlagen, z. B. in Form von Sensoren.
2 Konnektivität	Werden Daten systemübergreifend vernetzt?	Verknüpfung digitaler Komponenten, Schaffung von Schnittstellen zwischen den isolierten Systemen, z. B. über das Internet Protocol.
3 Sichtbarkeit	Kann das vernetzte Unternehmen in Echtzeit beobachtet werden?	Erzeugung eines digitalen Modells des vernetzten Unternehmens („digitaler Schatten“), Einsicht in Prozesse in Echtzeit.
4 Transparenz	Werden vorher unbekannte Wirkungszusammenhänge offensichtlich?	Aufdeckung von Wirkungszusammenhängen durch neue datengetriebene Analyseverfahren, z. B. Big Data.
5 Prognosefähigkeit	Können zukünftige Entwicklungen zuverlässig vorhergesagt werden?	Vorhersagbarkeit von Entwicklungen, Störungen und Planabweichungen, Ableitung von Handlungsempfehlungen („digitaler Zwilling“), z. B. zur vorausschauenden Wartung von Anlagen.
6 Adaptierfähigkeit	Gibt es autonome Prozesse?	Automatische Steuerung und Selbstoptimierung komplexer Prozesse.

Das vorliegende, parallel durchgeführte Projekt DigiSteam (VGB-Nr. 429) ergänzt DigiPoll@Energy in vorbildlicher Weise, indem es sich exemplarisch auf die Entwicklung eines Digitalen Zwillings für einen Dampferzeuger fokussiert. Es stellt

¹ <https://www.acatech.de/publikation/industrie-4-0-maturity-index-die-digitale-transformation-von-unternehmen-gestalten/>

einen Use Case für das fortgeschrittene Digitalisierungsniveau 5 (Prognosefähigkeit) zur Verfügung. Ausgehend davon öffnet der Digitale Zwilling des Dampferzeugers den Weg zum höchsten Digitalisierungsniveau einer automatischen Steuerung und Selbstoptimierung komplexer Prozesse in der Energieerzeugung und ermöglicht dem Betreiber neue Smart Services. Die entwickelte Methodik ist grundsätzlich auf andere Energieerzeugungsanlagen wie Windenergieanlagen übertragbar und verspricht in diesem Bereich ein hohes Kostensenkungspotential.

VGB Powertech,
Essen, am 24.8.2020

Kurzfassung

Die derzeit stattfindende Digitalisierung führt ohne Zweifel zu einer neuerlichen Revolution von Industrie und Gesellschaft. Auslöser dieser Revolution sind die enormen Weiterentwicklungen, die in den letzten Jahrzehnten im Bereich digitaler Basistechnologien, wie beispielsweise dem Internet der Dinge, Cyber-Physical Systems, Big Data oder künstlicher Intelligenz, um nur einige davon zu nennen, stattgefunden haben. Schlagwörter wie Industrie 4.0 (I4.0) und Energie 4.0 (E4.0) zeichnen eine Zukunftsvision von Industrie- und Energiesystemen, die unter dem intensiven Einsatz dieser Basistechnologien arbeiten und einen noch nie dagewesenen Grad an Vernetzung, Flexibilisierung und Automatisierung versprechen. Zentrales Element für die Realisierung dieser Zukunftsvisionen ist die konsequente Integration der realen/physischen Welt in die virtuelle/digitale Welt. Ein Digital Twin oder Digitaler Zwilling (DT) als virtuelles Abbild eines realen Assets verspricht genau diese Konvergenz in einem ganzheitlichen Ansatz umzusetzen.

Der Digitale Zwilling als sogenannte „enabling technology“ kann für Unternehmen ein wichtiges Werkzeug darstellen, um die eintretenden Veränderungen durch eine fortschreitende Digitalisierung handhaben und den Nutzen, die Zuverlässigkeit und die Produktivität eines Industriesystems steigern zu können. Damit Unternehmen bei der Gestaltung und Umsetzung eines DT in der Praxis unterstützt werden können, bedarf es konkreter Anwendungskonzepte oder Referenzarchitekturmodelle, die den DT in eine Struktur einbinden, in der das Zusammenspiel zwischen realer und digitaler Welt ersichtlich wird und der Nutzen dieses Konzepts dadurch sichergestellt werden kann. Bisherige Forschungsbeiträge in diesem Bereich beschäftigen sich zwar mit unterschiedlichen Anwendungskonzepten für unterschiedliche Anlagen, für eine Dampferzeugungsanlage selbst wurde in der Literatur jedoch noch kein vergleichbares Konzept erstellt. Aufbauend auf der Erfassung theoretischer Grundlagen sowie grundlegender Definitionen in den Themengebieten Digitalisierung und DT wurde im Projekt DigiSteam deshalb ein fünfdimensionales DT-Modell (5D-DTM) für die Entwicklung eines digitalen Dampferzeugers vorgestellt. Der Dampferzeuger als klassische wärmetechnische Anlage muss im Rahmen des sich einstellenden Paradigmenwechsels innerhalb der Industrie und des Energiesystems (I4.0 und E4.0) in einem immer dynamischeren Umfeld betrieben werden. Dies führt zwangsläufig zu steigenden Belastungen des Dampferzeugers und bedeutet für Anlagenbetreiber eine große Herausforderung, um den wirtschaftlichen Betrieb ihrer Anlagen trotzdem sicherstellen zu können. Anhand dieser erschwerten Rahmenbedingungen werden die Vorteile des DT anhand konkreter Anwendungsszenarien illustriert. Mit Hilfe des vorgestellten 5D-DTM kann ein ganzheitliches Boiler Prognostics and System Health Management (Boiler-PHM) implementiert und somit die Systemüberwachung, Systemvorhersage und Systemoptimierung schrittweise verbessert werden.

Abstract

Without any doubt, digitalization is revolutionizing every aspect of our society as well as the industrial sector. This revolution has been triggered by the recent developments within the area of digital basic technologies, such as the internet of things, big data, artificial intelligence and cyber-physical systems, to mention a few. Buzzwords like Industry 4.0 (I4.0) or Energy 4.0 (E4.0) picture a vision of the future industry and energy system, which are working under the intense usage of these basic technologies and promise an unprecedented degree of networking, system flexibility and automation. The core concept of these systems is the consequent integration of the real/physical world into the virtual/digital world. The digital twin (DT) as a high-fidelity digital mirror of its physical twin is a promising way to reach this convergence using a holistic approach.

The digital twin as a so-called “enabling technology” provides an important tool for companies in different sectors in order to cope with the changing environment they are currently working in due to the digital revolution, and it enables them to increase the benefits, reliability and productivity of their industrial system. To further support the design and implementation of a DT in practice, concrete application concepts or reference architecture models are needed to integrate the DT into a structure in which the interaction with its physical mirror can be modeled and the utilization of this interaction can be outlined. Previous research within this area deals with different application concepts for different systems, but so far no comparable concept has been developed for a steam generator in literature.

Applying the theoretical fundamentals and basic definitions assessed in this project, a five-dimensional DT-Model (5D-DTM) for a steam generator is developed and presented. A steam generator, as one of the most important thermal energy systems is directly affected by the outlined paradigm shift in the industrial sector as well as the energy system (I4.0 and E4.0) and has to consistently work within these more dynamic settings. For system operators, these increasing loads pose a great challenge to still ensure the economical operation of their systems. Therefore, these difficult conditions are ideally suited to illustrate the advantages of a DT. With the help of the 5D-DTM of a steam generator, a holistic Boiler Prognostics and System Health Management (Boiler-PHM) is illustrated and it is shown that the system monitoring, system prediction and system optimization can be greatly improved.

Projektüberblick

Das Projekt 429 „Identification of digitalization possibilities in the energy sector especially in the field of steam supply systems“, kurz **DigiSteam**, wurde im Juni 2019 von der VGB-FORSCHUNGSSTIFTUNG in Auftrag gegeben und durchgeführt bis 30.6.2020 am Institut für Energietechnik und Thermodynamik (TU Wien) in der Forschungsgruppe Industrielle Energiesysteme unter der Projektleitung von Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. René Hofmann.

Erklärte Projektziele

- Identifikation von Digitalisierungslösungen und sich daraus ergebende Möglichkeiten im Bereich von Dampferzeugungssystem
- Untersuchung und Analyse der mit der Digitalisierung einhergehenden Schwierigkeiten und Potentiale
- Identifikation der Überschneidung zwischen Möglichkeiten durch Digitalisierung und Notwendigkeiten im Dampferzeugungsbereich

Erwarteter Nutzen des Projekts

- Priorisierung für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten
- Basiswissen für die Implementierung von Digitalisierungsmaßnahmen in Dampferzeugungssystemen
- Verbesserte Akzeptanz und klare Darstellung von Digitalisierungsaspekten

Vorgehensweise im Projekt

DigiSteam orientierte sich an einem 4-Step Approach (vgl. Abbildung 2).

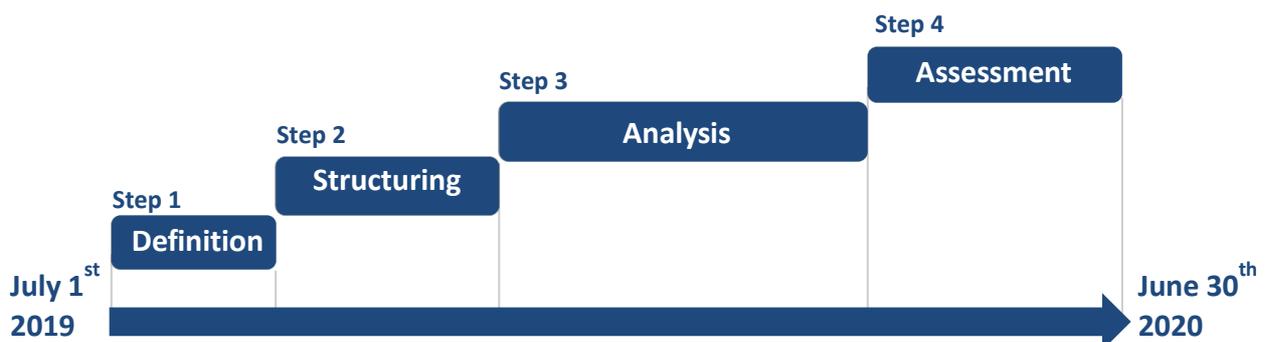


Abbildung 2: 4-Step Approach im Projekt DigiSteam

In Step 1 - Definition wurden die grundlegenden Definitionen im Kontext der Digitalisierung in Hinblick auf die Umsetzung im Dampferzeugungsbereich untersucht. Step 2 - Structuring bildete die Nachforschung nach Implementierungskonzepten von Digitalisierungsaspekten mit dazugehöriger Analyse von Referenzarchitekturmodellen. In Step 3 - Analysis wurden Potentiale, Möglichkeiten

und Schwierigkeiten durch Digitalisierung, aufbauend auf der Evaluierung des aktuellen Stands, identifiziert. Die abschließende Evaluierung der untersuchten Digitalisierungsaspekte in Step 4 – Assessment diene zum Ableiten der aktuellen Hürden möglicher Schwerpunkte für zukünftige Forschung.

Ergebnisse

- **Strukturierung**

In TEIL II1.2 wurden die Referenzarchitekturmodelle SGAM und RAMI4.0 analysiert und auf ihre Anwendbarkeit im Zielsektor untersucht. Als „Verortungsmodelle“ für Digitalisierungsaspekte dienen diese in erster Linie dazu, den Überblick über das Gesamtsystem bei der Entwicklung spezifischer Anwendungsfälle zu behalten, geeignete Normen und Standards bei der Implementierung zu nutzen, und Schnittstellen zu harmonisieren.

- **5D-Digital Twin Modell**

TEIL IIKAPITEL 2 und TEIL III dieses Abschlussberichts widmen sich der Beschreibung des Digitalen Zwillings als Anwendungskonzept im Rahmen der Digitalisierung und seiner Übertragung auf den Dampferzeugungsbereich.

- **Wirtschaftliche Bewertung anhand von Use Cases**

In diesem Projekt wurde in TEIL IIIKAPITEL 3 versucht, eine schrittweise Steigerung des Evolutionsgrades des DT-Konzeptes darzustellen. Aufbauend auf der online Betriebsüberwachung durch den Einsatz von Softsensoren über eine verbesserte Wartungs- und Instandhaltungsstrategie auf Basis der online Betriebsüberwachung bis hin zum komplexen Fall der Gesamtoptimierung der Anlage unter Berücksichtigung aller zuvor beschriebener Aspekte, wie sie in Kapitel 3 vorgestellt wurden, kann so sukzessive der Umfang des Modells gesteigert werden. Der größte Vorteil des 5D-DTM ist deshalb unter anderem auch die Möglichkeit der Skalierbarkeit bzw. die Erweiterbarkeit um weitere Services und Dienstleistungen, beispielsweise in Form von neuen, komplexeren Anwendungsfällen.

→ Betriebsüberwachung

→ Predictive Maintenance

→ Proaktive Betriebssteuerung

→ Ganzheitliches Boiler Prognostics and System Health Management mit dem 5D-DTM (vgl. Abbildung 3)

Anknüpfung an VGB Forschungsprojekt 428

Das 5D-DTM des Dampferzeugers, das in diesem Projekt präsentiert wurde, stellt ein theoretisches Anwendungskonzept dar. Außerdem wurden anhand von einzelnen Use-Case-Szenarien bereits einige potentielle praktische Einsatzmöglichkeiten und deren wirtschaftliche Aspekte skizziert. Für die praktische Umsetzung eines solchen

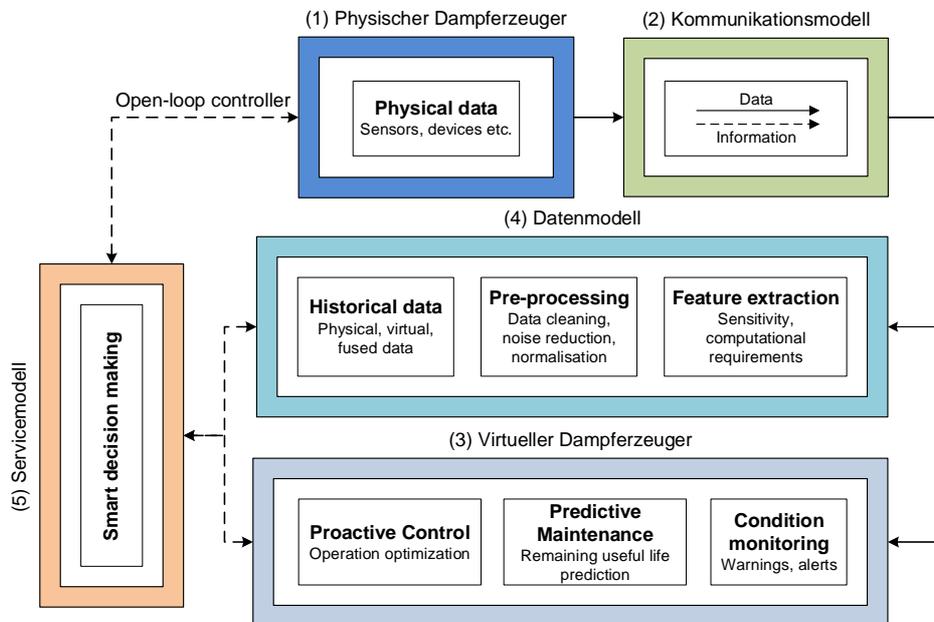


Abbildung 3 - Boiler System Health Management mit dem 5D-DTM (in Anlehnung an [2])

Modells bedarf es jedoch noch weiterer Untersuchungen in diesem Bereich. Ein erster Schritt in Richtung Praxis ist zweifelsohne die Ist-Erhebung des Digitalisierungsgrades von Unternehmen, die im Dampferzeugungssektor tätig sind. Nur so können diese Unternehmen bei der Entwicklung des 5D-DTM an der richtigen Stelle abgeholt und der Aufwand für die Umsetzung des Modells abgeschätzt werden.

Dazu werden die Ergebnisse des VGB-Forschungsprojektes (Projektnummer 428), durchgeführt von der Universität Duisburg in Essen (Deutschland) als Parallelprojekt zu DigiSteam, wichtige Erkenntnisse für die weitere Vorgehensweise zur Umsetzung in die Praxis liefern. Von diesen Ergebnissen können dann gezielt Maßnahmen und Handlungsempfehlungen abgeleitet werden, die eine schrittweise Umsetzung eines DT-Konzeptes ermöglichen können und somit dessen Implementierung erleichtern. Dabei ist es wichtig, den Komplexitätsgrad für die Unternehmen einigermaßen überschaubar zu halten. In diesem Projekt wurde deshalb versucht, eine schrittweise Steigerung des Evolutionsgrades der Digitalisierung und des DT-Konzeptes darzustellen.

Anerkennung

Im Rahmen dieses Projekts entstand die Diplomarbeit „Entwicklung eines Anwendungskonzeptes für einen Digitalen Zwilling am Beispiel Dampferzeuger“ von Thomas Bacher, eingereicht an der TU Wien. Darin wurde konkret die Übertragung des Digitalen Zwillings als Digitalisierungsanwendung auf den Dampferzeugungsbereich untersucht. Damit liefert diese Diplomarbeit einen wesentlichen Beitrag zum Projekt und auch zu diesem Abschlussbericht.

Executive Summary (English)

In this research project, the **consequences of the digital transformation** for industry are assessed. The focus lies on steam supply for process industry as well as for heat and energy supply (**steam supply sector**). The aim of the project is to identify methods and technologies that can facilitate the digitalization of the steam supply sector. The effects that the application of these methods and technologies will have is explored, and the opportunities that they provide are highlighted.

The **Digital Twin (DT)** concept was identified as one of the most promising tools to handle the digitalization and to exploit its benefits. For this reason, it was analyzed in more detail. To successfully design and implement a DT in practice, **application concepts and reference architectures** are required. They help to show the connections between the real and the digital world and illustrate the benefit of a DT. Based on these fundamental definitions and considerations in the subject area “digitalization”, the **five-dimensional digital twin model (5D-DTM)** of a steam supply device is introduced in this project (see, Figure 4).

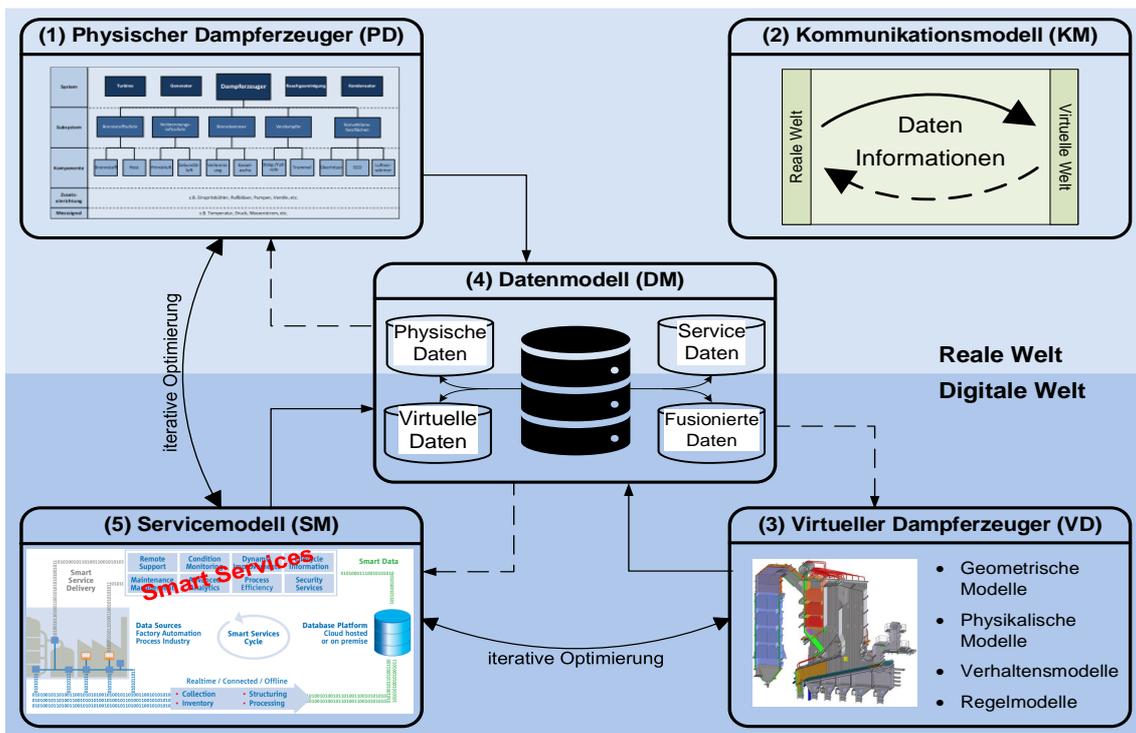


Figure 4: 5D Digital Twin Model of a Steam Generator (in accordance with [1])

Project overview

The research group Industrial Energy Systems at the Institute for Energy System and Thermodynamics (TU Wien) was commissioned with project 429 “Identification of digitalization possibilities in the energy sector especially in the field of steam supply systems”, **DigiSteam** in short, by the VBG-FORSCHUNGSSTIFTUNG. The project was led by Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. René Hofmann and finalized on June 30th 2020.

Objectives

- Identification of opportunities that are provided by novel digitalization technologies in the field of steam supply systems
- Assessment of benefits and challenges of digitalization
- Identification of areas where novel digitalization technologies match with requirements of the steam supply sector

Expected benefit

- Prioritization of future research- and development activities.
- Basic knowledge for the implementation of digitalization technologies in steam supply systems
- Clear presentation of digitalization aspects and thus higher acceptance of digitalization efforts

Approach

In DigiSteam, a four-step approach is employed (see, Figure 5).

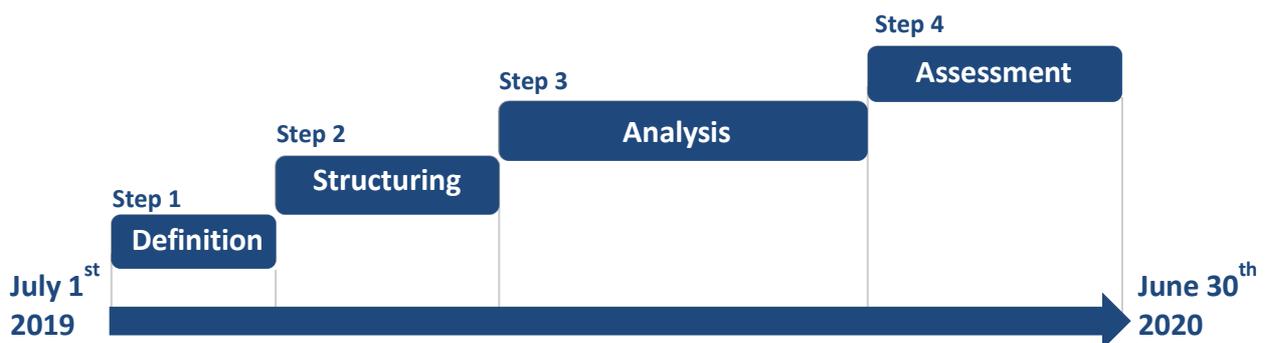


Figure 5: 4-Step Approach in the project DigiSteam

In Step 1 (Definition) the basic definitions of digitalization with regard to the steam supply sector were discussed. Step 2 (Structuring) covered the search for existing applications concepts of digitalization technologies and the analysis of reference architectures. Based on the results of Step 2, the potential and challenges of digitalization were analyzed in Step 3 (Analysis) and opportunities were highlighted. In

Step 4 (Assessment) the findings of the previous steps were evaluated and promising areas for further research were identified.

Results

- **Structuring**

In Part II 1.2 the reference architectures SGAM and RAMI 4.0 were analyzed and their applicability in the steam supply sector was assessed. These architectures help to maintain an overview over the complete system while working on specific aspects, make use of reliable standards and harmonize interfaces.

- **5D-Digital Twin Model**

In Part II 2 and Part III of this final report the Digital Twin concept is described and its transfer to the steam supply sector is discussed.

- **Economic assessment of use cases**

In Part III 3, the stepwise evolution of the DT-concept is presented. Depending on the requirements, the DT can be adapted and extended. DTs can be used for online condition monitoring with soft sensors, to improve maintenance strategies based on said condition monitoring or even to optimize the complete process taking into account the information that the 5D-DT provides. The flexibility that the 5D-DT provides is one of its main advantages and it allows to implement novel or improved services.

- Condition monitoring

- Predictive maintenance

- Proactive operation control

- Holistic boiler prognostics and system health management with the 5D-DTM (see, Figure 6)

Relation to VGB project 428:

This project focused on theoretical considerations such as the 5D-DTM of a steam supply. With the economic assessment of use cases, potential routes for an implementation were pointed out. Though, to successfully implement such a 5D-DTM in practice, a detailed assessment of the current state of digitalization in the steam supply industry is required. This information allows to tailor the 5D-DTM to the requirements of industry partners.

Collecting this information and evaluating the current state in industry is the goal of VGB project 428, which was running simultaneously to this project at the University of Duisburg in Essen (Germany). That project will deliver key insights to develop strategies and recommendations to facilitate the implementation of DT in industry. The goal should be to keep the complexity for corporations to a minimum to increase the acceptance of these novel technologies.

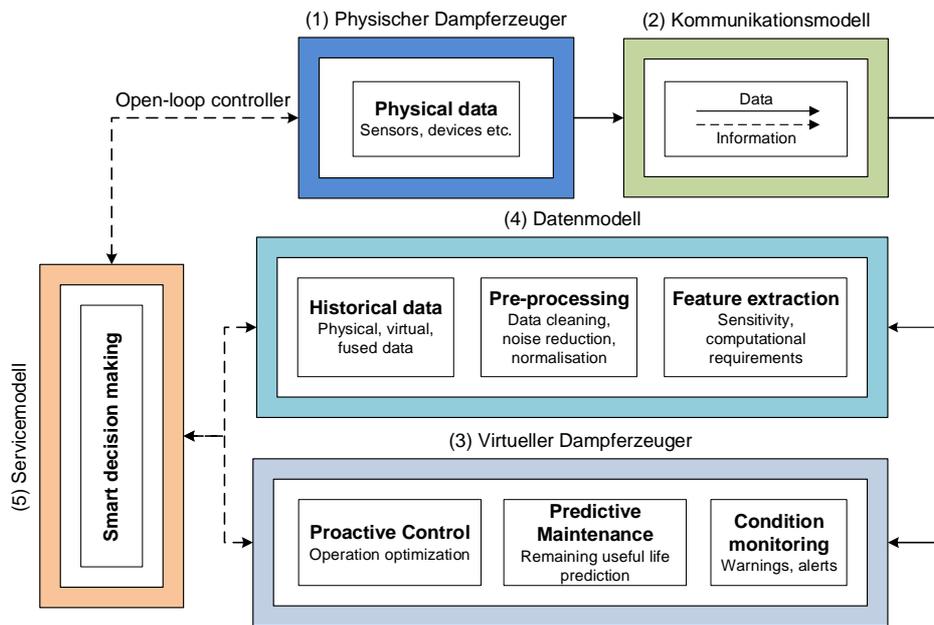


Figure 6 - Boiler System Health Management with the 5D-DTM (according to [2])

Acknowledgement:

As part of this project, Thomas Bacher wrote his master thesis “Development of an application concept for a Digital Twin for a steam supply system”, which was submitted to the faculty of Mechanical and Industrial Engineering at TU Wien. In this thesis, the transfer of a Digital Twin as digitalization concept to the steam supply sector was investigated. Through his work, he contributed considerably to the project and to this final report.

Inhaltsverzeichnis

TEIL I Einleitung	1
TEIL II Theoretische Grundlagen	5
KAPITEL 1 Digitalisierung	7
1.1 Digitale Technologien.....	8
1.1.1 Internet of Things (IoT)	9
1.1.2 Cyber-Physical Systems (CPS)	10
1.1.3 Big Data	11
1.1.4 Künstliche Intelligenz (KI) und maschinelles Lernen (ML).....	13
1.2 Der digitale Wandel.....	15
1.2.1 Industrie 4.0 und Energie 4.0.....	16
1.2.2 Referenzarchitekturmodelle SGAM und RAMI4.0.....	19
KAPITEL 2 Der Digitale Zwilling.....	27
2.1 Definition und Geschichte	28
2.2 Modellierung des Digitalen Zwillings	36
2.2.1 3-dimensionales DT-Modell	37
2.2.2 Building Information Modelling (BIM)	38
2.2.3 RAMI4.0 und SGAM	39
2.2.4 Verwaltungsschale und Industrie 4.0 Komponente	40
2.2.5 Erweiterung des 3-dimensionales DT-Modells.....	42
2.3 5-dimensionales DT-Modell.....	44
TEIL III Untersuchungen am Beispiel Dampferzeuger	54
KAPITEL 1 Der Dampferzeuger – die physische Einheit.....	59
1.1 Modularisierung.....	65
KAPITEL 2 Der Digitale Dampferzeuger in der virtuellen Welt	69
2.1 Kommunikationsmodell	70

2.1.1	OPC-UA	74
2.2	Virtueller Dampferzeuger	77
2.2.1	Methoden und Simulationsmodelle	80
2.3	Datenmodell	87
2.3.1	Datenerfassung und Datenübertragung	89
2.3.2	Datenverarbeitung und Datenspeicherung	89
2.3.3	Datenfusion und Visualisierung	90
2.3.4	Wissensrepräsentation/ Ontologien	92
2.4	Servicemodell.....	94

KAPITEL 3 Beurteilung der Wirtschaftlichkeit des digitalen

Dampferzeugers	97
3.1 Betriebsüberwachung.....	102
3.1.1 Use-Case-Szenario: Unterstützung der Anlagenbetreiber durch verbessertes Monitoring mit Hilfe von Softsensoren	103
3.2 Predictive Maintenance	107
3.2.1 Use-Case-Szenario: Präventive Zustandsüberwachung dickwandiger Bauteile im Dampferzeuger	110
3.3 Proaktive Betriebssteuerung	114
3.3.1 Use-Case-Szenario: Optimierung der Heizflächenreinigung durch eine proaktive Betriebssteuerung	116
3.4 Boiler Prognostics and System Health Management mit dem 5D-DTM .	124

TEIL IV Zusammenfassung126

1.1 Ausblick und Handlungsempfehlungen	130
--	-----

TEIL V Literaturverzeichnis132

TEIL VI Abbildungsverzeichnis142

TEIL VII Formelverzeichnis.....146

TEIL VIII Tabellenverzeichnis148

Abkürzungen

3D-DTM *3-dimensionales DT-Modell*

5D-DTM *5-dimensionales DT-Modell*

AAS *Asset Administration Shell oder Verwaltungsschale*

AI *Artificial Intelligence*

ANN *Artificial Neural Network*

AR *Augmented Reality*

BIM *Building Information Modeling*

CAD *Computer-aided Design*

CHP *Combined Heat and Power*

CPS *Cyber-Physical System*

DD *Digitaler Dampferzeuger*

DER *Distributed Energy Resources*

DFS *Distributed File System*

DL *Deep Learning*

DM *Datenmodell des Dampferzeugers*

DT *Digital Twin oder Digitaler Zwilling*

DTI *Digital Twin Instance*

DTP *Digital Twin Prototype*

E4.0 *Energie 4.0*

FEM *Finite-Elemente Methoden*

I4.0 *Industrie 4.0*

IERC *IoT European Research Cluster*

IIC *Industrial Internet Consortium*

IIoT *Industrial Internet of Things*

IKT *Informations- und Kommunikationstechnik*

IoE *Internet of Energy*

IoT *Internet of Things*

IT *Informationstechnik*

KI *Künstliche Intelligenz*

KM *Kommunikationsmodell*

KNN *Künstliche Neuronales Netzwerk*

KWK *Kraft-Wärme-Kopplung*

MBSE *modellbasierte Systementwicklung*

ML *Maschinelles Lernen oder Machine Learning*

O&M *Operation and Maintenance*

PD *physischer Dampferzeuger*

PEVs *Plug-In Electric Vehicles*

PHM *Prognostics and Health Management*

PLC *Product Life Cycle*

PLM *Product Lifecycle Management*

PPS *Product-Service System*

R&D *Research and Development*

RAMI 4.0 *Referenzarchitektur Industrie 4.0*

RTO *Real-Time Operations Optimization*

RUL *Remaining Useful Life oder Restlebensdauer*

SGAM *Smart Grid Architecture Model*

SM *Servicemodell des Dampferzeugers*

VD *virtueller Dampferzeuger*

VR *Virtual Reality*

WTE *Waste-to-Energy*

3D-DTM *3-dimensionales DT-Modell*

5D-DTM *5-dimensionales DT-Modell*

AAS *Asset Administration Shell oder Verwaltungsschale*

AI *Artificial Intelligence*

ANN *Artificial Neural Network*

AR *Augmented Reality*

BIM *Building Information Modeling*

CAD *Computer-aided Design*

CHP *Combined Heat and Power*

CPS *Cyber-Physical System*

DD *Digitaler Dampferzeuger*

DER *Distributed Energy Resources*

DFS *Distributed File System*

DL *Deep Learning*

DM *Datenmodell des Dampferzeugers*

DT *Digital Twin oder Digitaler Zwilling*

DTI *Digital Twin Instance*

DTP *Digital Twin Prototype*

E4.0 *Energie 4.0*

INHALTSVERZEICHNIS

FEM	<i>Finite-Elemente Methoden</i>
I4.0	<i>Industrie 4.0</i>
IERC	<i>IoT European Research Cluster</i>
IIC	<i>Industrial Internet Consortium</i>
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i>
IKT	<i>Informations- und Kommunikationstechnik</i>
IoE	<i>Internet of Energy</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IT	<i>Informationstechnik</i>
KI	<i>Künstliche Intelligenz</i>
KM	<i>Kommunikationsmodell</i>
KNN	<i>Künstliche Neuronales Netzwerk</i>
KWK	<i>Kraft-Wärme-Kopplung</i>
MBSE	<i>modellbasierte Systementwicklung</i>
ML	<i>Maschinelles Lernen oder Machine Learning</i>
O&M	<i>Operation and Maintenance</i>
PD	<i>physischer Dampferzeuger</i>
PEVs	<i>Plug-In Electric Vehicles</i>
PHM	<i>Prognostics and Health Management</i>
PLC	<i>Product Life Cycle</i>
PLM	<i>Product Lifecycle Management</i>
PPS	<i>Product-Service System</i>
R&D	<i>Research and Development</i>
RAMI 4.0	<i>Referenzarchitektur Industrie 4.0</i>

RTO *Real-Time Operations Optimization*

RUL *Remaining Useful Life oder Restlebensdauer*

SGAM *Smart Grid Architecture Model*

SM *Servicemodell des Dampferzeugers*

VD *virtueller Dampferzeuger*

VR *Virtual Reality*

WTE *Waste-to-Energy*

TEIL I

Einleitung

Das Thema *Digitalisierung* sorgt aktuell in nahezu allen Lebensbereichen für eine fundamentale Veränderung unserer Welt. Natürlich haben sich diese Veränderungen auch in der Industrie und in der betrieblichen Praxis manifestiert und beschreiben dort unter dem Begriff *Industrie 4.0* ein Unternehmensumfeld, das sich am Beginn einer digitalen Transformation (oder eines digitalen Wandels) befindet. Es entstehen Unternehmensnetzwerke, die durch einen hohen Grad an Vernetzung bestechen und auf dem konsequenten Einsatz sogenannter *digitaler Technologien* aus der Informations- und Kommunikationsbranche beruhen.

Neben der Grundlagen der Digitalisierung widmet sich das Projekt DigiSteam speziell der Untersuchung eines sogenannten *Digitalen Zwillings* (DT). Der DT als eine vielversprechende Möglichkeit zur Realisierung der bereits erwähnten digitalen Transformation beruht auf der Integration eines physischen Gegenstandes (in weiterer Folge Asset genannt) in den digitalen oder virtuellen Raum. Durch die Konvergenz dieser beiden Welten entsteht ein digitales Abbild des Assets (digitaler Zwilling), das in weiterer Folge unzählige Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung bieten kann. Das Konzept eines DT wurde bereits von mehreren Forschungsbereichen, aber auch von mehreren Unternehmen aufgegriffen [3]. Besonders Unternehmen aus dem Bereich der Massenproduktion von Gütern und Waren, wie zum Beispiel Automobilhersteller oder Unternehmen aus der Elektronikindustrie, aber auch die Luft- und Raumfahrtindustrie, können als Vorreiter in Sachen Digitalisierung betrachtet werden. Es gibt aber auch Branchen, wie beispielsweise der Sektor der Dampferzeugung, die noch Aufholbedarf haben. Einerseits ist in diesen Bereichen der Forschungs- und Entwicklungsaufwand, was digitale Technologien anbelangt, nicht derart ausgeprägt wie bei den zuvor genannten Vorreitern der Digitalisierung. Andererseits mangelt es in vielen Fällen auch an der grundlegenden digitalen Infrastruktur, um solch umfangreiche Konzepte wie den DT umsetzen zu können. Für diese Unternehmen stellt die Entwicklung und Anwendung des DT eine doppelte Herausforderung dar. Entsprechende Anwendungskonzepte bzw. Referenzarchitekturmodelle können genau in solchen Fällen unterstützend zur Seite stehen und eine Umsetzung des DT-Konzeptes erleichtern.

Deshalb sollen im vorliegenden Bericht bezogen auf den Dampferzeugungssektor folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

- Was versteht man unter Digitalisierung und welche Veränderungen ergeben sich dadurch im Industrie- und Energiesektor?
- Was versteht man unter einem digitalen Zwilling (DT) und wie kann dieser eine konsequente Digitalisierung vorantreiben?
- Was gibt es für Modellierungskonzepte bzw. Referenzarchitekturmodelle, die bei der Umsetzung und Anwendung eines DT unterstützen können?

-
- Welches wirtschaftliche Potential könnte sich durch eine Anwendung dieses DT-Konzeptes im Dampferzeugungssektor ergeben?

Als wissenschaftliche Methodik zur Beantwortung dieser Fragestellungen wird eine systematische Literaturrecherche durchgeführt. Dabei werden die wichtigsten wissenschaftlichen Datenbanken nach Schlüsselwörtern durchsucht, die sich im Rahmen der jeweiligen Themenstellung bzw. zur Beantwortung der darin enthaltenen Fragestellung ergeben haben.

Der vorliegende Bericht ist dabei in drei Teile gegliedert: Auf Teil I (Einleitung) folgt in Teil II, unterteilt in zwei Kapitel, die Bearbeitung der theoretischen Grundlagen. Kapitel 1 beschäftigt sich mit den allgemeinen Aspekten der Digitalisierung. Dabei soll vor allem Konsens bezüglich der wesentlichen Begrifflichkeiten, die in Zusammenhang mit dem Thema Verwendung finden, geschaffen werden. Ausgehend von den fundamentalen neuen digitalen Technologien, die als Auslöser der aktuellen Digitalisierungsbestrebungen gelten, wird der dadurch induzierte Wandel innerhalb von Unternehmens- und Organisationsstrukturen, aber auch die Entwicklung neuer, oftmals disruptiver Geschäftsmodelle skizziert. Damit soll aus einer Makroperspektive ein Blick auf die grundlegenden Entwicklungstendenzen des Industrie- und Energiesektors und eine Verbindung zum DT als sogenannte *enabling technology* im Rahmen der Digitalisierung geschaffen werden.

In Kapitel 2 von Teil II werden die Grundlagen zum DT angeführt. Zuerst wird die geschichtliche Entwicklung und der Ursprung dieses Konzeptes erarbeitet und darauf aufbauend werden entsprechende Definitionen zum DT gegeben. Der Fokus liegt wieder auf einer Vereinheitlichung der Begrifflichkeiten, die in diesem Zusammenhang verwendet werden. Außerdem werden in diesem Kapitel unterschiedliche Modellierungskonzepte und Referenzarchitekturmodelle (3-dimensionales DT-Modell, RAMI4.0, SGAM, BIM, Verwaltungsschale und I4.0-Komponente) einem Vergleich unterzogen und in Hinblick auf ihre Anwendbarkeit in der Betriebs- und Instandhaltungsphase innerhalb des Lebenszyklus eines Assets untersucht. Zwar werden auch potenzielle Anwendungsmöglichkeiten des DT in der Design- und Entwicklungsphase sowie im Fertigungsprozess umrissen, der Fokus dieses Berichts liegt jedoch ganz klar auf der Betriebs- und Instandhaltungsphase. Am Ende von Teil II wird auf Basis der durchgeführten Literaturrecherche ein vielversprechendes Modellierungskonzept des DT ausgewählt und genauer beschrieben. Dabei handelt es sich um ein fünfdimensionales DT-Modell (5D-DTM).

Dieses ausgewählte Anwendungskonzept wird letztlich in Teil III des vorliegenden Berichts auf ein konkretes Asset aus dem Dampferzeugungsbereich, nämlich den Dampferzeuger selbst, angewandt. Kapitel 1 von Teil III dieses Berichts widmet sich der Beschreibung des realen Dampferzeugers und soll dem Leser die elementaren

Grundlagen der Funktionsweise und die wesentlichen Bestandteile des Dampferzeugers vermitteln. Hier wird der Schwerpunkt auf entsprechende Dampferzeugungsanlagen gelegt, welche durch den Einsatz regenerativer Brennstoffe betrieben werden können. Derartige Brennstoffe sind vor allem Biomasse oder Müll. Solche Dampferzeugungsanlagen versprechen auch in Hinblick auf den Klimawandel eine nachhaltige Form der Energie- und Wärmebereitstellung. Diese Grundlagen dienen in weiterer Folge in Kapitel 2 von Teil III dazu, die restlichen vier Dimensionen des 5D-DTM anhand des realen Dampferzeugers zu beschreiben und somit dessen virtuelles Abbild (digitaler Dampferzeuger) zu schaffen. Ziel ist es, die wichtigsten Technologien, die in den jeweiligen Dimensionen des 5D-DTM zum Einsatz kommen, abzuleiten und Beispiele aus dem Dampferzeugungssektor anzuführen. Da auf Basis der Literaturrecherche keine konkreten DT-Konzepte in Zusammenhang mit einem Dampferzeuger bzw. mit dem vorgestellten 5D-DTM ausfindig gemacht werden konnten, soll eine Grundlage dafür geschaffen werden, eine praktische Umsetzung des Anwendungskonzepts für einen Dampferzeuger erleichtern zu können. In Kapitel 3 von Teil III werden zuletzt konkrete Anwendungsbeispiele angeführt, mit denen das Potential des DT-Konzepts in Kombination mit dem 5D-DTM auch aus einer wirtschaftlichen Perspektive untermauert werden kann.

In Teil IV erfolgt eine Zusammenfassung der Projektergebnisse. Außerdem werden in einem Ausblick entsprechende Handlungsempfehlungen für die Umsetzung der Erkenntnisse aus der vorliegenden Literaturrecherche abgeleitet.

TEIL II
Theoretische Grundlagen

In diesem Teil des vorliegenden Berichts werden die theoretischen Grundlagen, unterteilt in drei Kapitel, angeführt. Im ersten Kapitel wird der Begriff *Digitalisierung* allgemein beschrieben. Der Schwerpunkt liegt darauf, ein einheitliches Verständnis dafür zu schaffen, was unter Digitalisierung verstanden wird. Darüber hinaus werden die wichtigsten digitalen Technologien als Auslöser für die Digitalisierung beschrieben, um ein breiteres Verständnis für die Thematik zu erlangen. Darauf aufbauend wird der *digitale Wandel* bzw. die *digitale Transformation* im industriellen Bereich (*Industrie 4.0* - I4.0) und im Energiesektor (*Energie 4.0* – E4.0) beschrieben. Zusätzlich soll gezeigt werden, welche Rolle sogenannte *Referenzarchitekturen* (*Referenzarchitektur Industrie 4.0* - RAMI 4.0 und *Smart Grid Architecture Model* - SGAM) in diesen Bereichen spielen.

Im zweiten Kapitel werden die theoretischen Grundlagen des *Digitalen Zwillings* (*Digital Twin* – DT) beschrieben. Ein DT gilt als eine der wichtigsten befähigenden Technologien (engl. *enabling technologies*) für die digitale Transformation im Bereich Energie und Industrie. Anhand einer Literaturrecherche werden die unterschiedlichen Definitionen eines DT sowie die wichtigsten Modellierungsansätze für ein DT-Konzept erarbeitet und sich vergleichend gegenübergestellt. Auf Basis dieser Recherche wird ein *5-dimensionales Digital Twin Modell* (5D-DTM) als Referenzmodell zur Modellierung des DT-Konzeptes ausgewählt. Zum Abschluss des zweiten Kapitels wird das 5D-DTM anhand eines Beispiels aus der Literatur vorgestellt.

KAPITEL 1

Digitalisierung

Die Digitalisierung gilt aktuell als einer der globalen Megatrends. Die Auswirkungen einer zunehmenden Digitalisierung sind sowohl kurz- als auch langfristig enorm und betreffen alle Bereiche des Alltags sowohl in der Gesellschaft als auch in der Wirtschaft. Nicht selten werden die Veränderungen durch eine Digitalisierung der Welt mit den Veränderungen, die durch die Industrialisierung (industrielle Revolution) in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts eingetreten sind, verglichen. Die Substitution menschlicher Arbeit oder die Energieumwandlung durch die Mechanisierung zu Beginn der Industrialisierung führten damals nicht nur zu einem radikalen Wandel der Wirtschaft (Entstehung neuer Fabrikssysteme durch neue Produktionsformen, die auf einer innerbetrieblichen Arbeitsteilung durch Maschinennutzung beruhte), sondern hatten auch bedeutsame Auswirkungen auf die sozialen Aspekte der damaligen Zeit (z.B. Bevölkerungswachstum und Urbanisierung). Digitalisierung als heutige Revolution verändert abermals das Umfeld, in dem wir leben und in dem Unternehmen zukünftig arbeiten werden. [4]

Die Digitalisierung stellt aus ökonomischer Sicht einen entscheidenden Faktor für die langfristige Überlebensfähigkeit von Unternehmen dar. Damit dieses Potenzial entsprechend genutzt werden kann, muss ausreichend Konsens darüber geschaffen werden, was unter dem Begriff *Digitalisierung* verstanden wird und welche Möglichkeiten, Chancen und Risiken damit verbunden sind.

Eine allgemein gültige Definition des Begriffes *Digitalisierung* existiert nicht. Die nachfolgend angeführten Beschreibungen werden im Kontext einer bestimmten Sichtweise auf die Digitalisierung getroffen:

- Allgemeine technische Sichtweise:
„Digitalisierung beschreibt die Überführung von Information von einer analogen in eine digitale Speicherform.“²

² Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik, Online-Lexikon, <https://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/technologien-methoden/Informatik--Grundlagen/digitalisierung>

Dieser Vorgang wird als *Informatisierung* (engl. *digitization*) bezeichnet. Die in digitaler Form vorliegenden Daten können entsprechend elektronisch weiterverarbeitet werden und sind nicht mehr an ein konkretes Medium gebunden.

- *Sozio-ökonomische Sichtweise:*

„Ziel ist es, nicht nur analoge in digitale Signale umzuwandeln (*digitization*), sondern mit digitalen Inhalten Werte zu schaffen.“ [5]

Im Vergleich zur technischen Sichtweise aus dem vorherigen Punkt steht hier insbesondere die Wertschöpfung, die durch eine Weiterverarbeitung der digitalen Informationen erzielt werden kann, im Vordergrund.

- *Sichtweise im industriellen Kontext:*

„Digitalisierung bezeichnet den Wandel zu neuartigen, häufig disruptiven Geschäftsmodellen mittels Informations- und Kommunikationstechnik. [...] Geschäftsprozesse werden flexibilisiert und automatisiert sowie Technik, Informationen, Dinge und Menschen vernetzt.“ [6]

Disruptiv bedeutet in diesem Zusammenhang, dass ein radikaler Wandel traditioneller Geschäftsmodelle hin zu innovativen Geschäftsmodellen stattfindet. Das wohl prominenteste Beispiel für solch ein innovatives Geschäftsmodell ist das amerikanische Unternehmen *Uber*. Als das größte Taxiunternehmen weltweit besitzt das Unternehmen jedoch kein einziges Taxi, sondern bietet lediglich als Vermittlerplattform die Koordination einer Transportdienstleistung an. [7]

Digitalisierung, wie sie in diesem Bericht verstanden wird, geht also weit über die rein technische Überführung analoger in digitale Informationen hinaus und richtet sich nach der industriellen Sichtweise.

Diese Veränderung, die auch als *digitaler Wandel* oder *digitale Transformation* bezeichnet wird, wird nachfolgend genauer beschrieben. Zuerst werden aber noch die wichtigsten digitalen Technologien aus der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) als Auslöser für die Digitalisierung angeführt.

1.1 Digitale Technologien

Damit die zuvor dargelegte Sichtweise auf die Digitalisierung auch vollumfänglich umgesetzt werden kann, bedarf es einer Reihe grundlegender Basistechnologien (sogenannte *Digitale Technologien* oder *Enabling Technologies*) aus dem Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT). Die rasante Entwicklung dieser IKTs stellt somit die Grundlage für eine Digitalisierung in jedem Bereich dar und sie sind der Auslöser für die nächste Revolutionsstufe in allen Bereichen (X 4.0).

Besonders im Rahmen von Industrie 4.0 (I4.0) und Energie 4.0 (E4.0), deren Bedeutung im nächsten Abschnitt genauer erläutert wird, werden einige dieser IKTs als Voraussetzung für eine Digitalisierung gesehen. Abbildung 7 zeigt beispielhaft einige der wichtigsten *Enabling Technologies*, die im Rahmen von I4.0 eine zentrale Rolle spielen.

Anschließend werden die für diesen Bericht als besonders wichtig angesehenen IKTs aus Abbildung 7 etwas genauer erläutert. Dazu zählen:

- Internet of Things (IoT)
- Cyber-Physical Systems (CPS)
- Big Data
- Künstliche Intelligenz und maschinelles Lernen

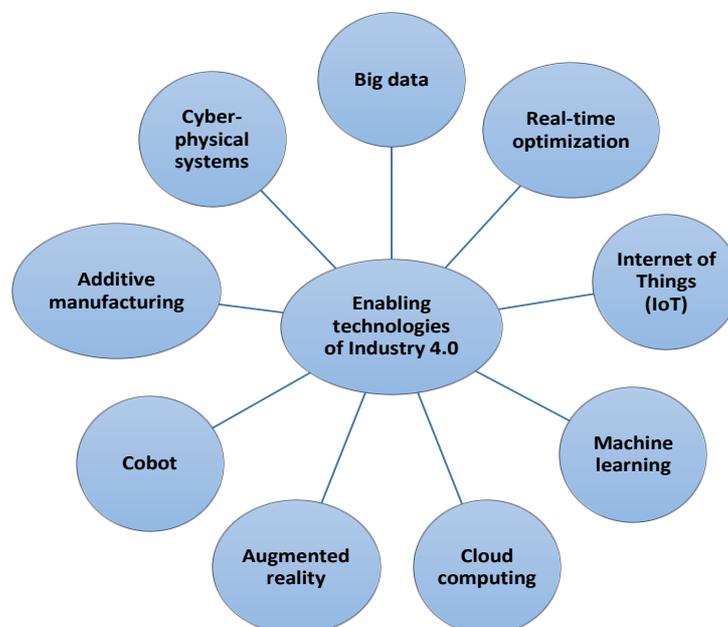


Abbildung 7: "Enabling Technologies" Industrie 4.0 (in Anlehnung an [8])

1.1.1 Internet of Things (IoT)

Basis für jegliche digitale Anwendung ist eine Infrastruktur, die es ermöglicht, alle digitalen Dinge in einem gemeinsamen System abzubilden. Dinge können in diesem Zusammenhang einerseits Zugangs- oder Endgeräte, wie beispielsweise Smartphones, Tablets oder Desktop-Computer sein. Andererseits werden im Zuge der Digitalisierung auch immer mehr Systeme, wie beispielsweise Autos, Gebäude, Maschinen etc. mit Hilfe sogenannter *eingebetteter Systeme (Embedded Systems)* in

diese Netzinfrastruktur eingebunden. In weiterer Folge wird deshalb von sogenannten *Assets* gesprochen, welche Dinge jeglicher Art darstellen. Diese Netzinfrastruktur wird unter dem Namen Internet of Things (IoT), Industrial Internet of Things (IIoT) oder Internet der Dinge und Dienste zusammengefasst.

Der Internet of Things European Research Cluster³ (IERC) definiert den Begriff IoT folgendermaßen:

„IoT is a dynamic global network infrastructure with self-configuring capabilities based on standard and interoperable communication protocols where physical and virtual “things” have identities, physical attributes, and virtual personalities and use intelligent interfaces, and are seamlessly integrated into the information network.“⁵

Dynamisch bedeutet in diesem Zusammenhang, dass sich das Netzwerk immer wieder anpassen, weiterentwickeln oder skalieren kann. Wichtig ist ebenfalls die Einhaltung gewisser Standards bei der Kommunikation und Übertragung von Daten, damit prinzipiell jegliche Art von „Dingen“ im IoT abgebildet werden kann. Grundlegendes Ziel ist es, alle Eigenschaften, die die „Dinge“ in der realen Welt beschreiben (z.B. physikalische Eigenschaften), über intelligente Schnittstellen in die digitale Welt zu übertragen und ihnen somit eine *virtuelle Repräsentanz* zu ermöglichen. Es entsteht ein Informationsnetzwerk, in dem alle Dinge nahtlos integriert werden können und jederzeit von allen Teilnehmern des Netzwerks von überall aus bearbeitet werden können.

Das IoT bietet somit folgende zwei elementare Grundlagen für die Entwicklung eines digitalen Zwillings: [9]

- Ein sicheres Übertragungsnetzwerk für alle Dinge (in weiterer Folge *Assets* genannt) entlang ihres gesamten Lebenszyklus UND
- es stellt Daten zur Verfügung, die in weiterer Folge für eine umfangreiche Analyse oder zur Optimierung der *Assets* genutzt werden können.

1.1.2 Cyber-Physical Systems (CPS)

Ein weiterer Aspekt, der bereits in der Definition des IoT aufgetaucht ist, schafft die Grundlage für die Entwicklung sogenannter *Cyber-Physical Systems* (CPS). Durch das zuvor beschriebene intelligente Informationsnetzwerk (IoT) kommt es zu einer

³ Internet of Things European Research Cluster (IERC), Brüssel: <http://www.internet-of-things-research.eu/>

zunehmenden Verschmelzung der realen Welt und der digitalen oder virtuellen Welt (*cyber-physical fusion*). CPS können nach Cheng et al. [10] folgendermaßen definiert werden:

“Cyber Physical System connects the virtual space with the physical reality, which integrates computing, communication and storage capabilities, and can be real-time, reliable, secure, stable and efficient operation.”

Die drei Kernelemente eines CPS sind demnach folgende:

1. Das physikalische Objekt (z.B. Pumpe, Sensorik etc.)
2. Daten und Modelle der physikalischen Objekte (Virtuelle Repräsentanzen) in einer vernetzten Infrastruktur (z.B. 3D-Modelle, Produktdaten, Dokumente etc.)
3. Neue Produkte und Dienstleistungen, die aus dem Zusammenspiel zwischen physikalischem und virtuellem Objekt entstehen (z.B. analysieren, optimieren etc.)

Wie in „KAPITEL 2 - Der Digitale Zwilling“ gezeigt wird, sind diese drei Bausteine auch die elementaren Bestandteile eines Konzeptes, in dem der Digitale Zwilling (DT) durch Zusammenarbeit mit seinem physischen Gegenstück dem Anwender bestimmte Services bzw. Dienstleistungen in Echtzeit zur Verfügung stellt. Diese Services oder Dienstleistungen unterstützen den Anwender bei der Erreichung eines sicheren, stabilen, zuverlässigen und effizienten Betriebs des Gesamtsystems.

1.1.3 Big Data

Sogenannte *Big Data* spielen bei der Umsetzung der beiden bisher vorgestellten Technologien IoT und CPS eine wichtige Rolle. IoT stellt ein Netzwerk zur Aggregation von Daten zur Verfügung und das CPS beschreibt in weiterer Folge ein Anwendungssystem, bei dem aus der Weiterverarbeitung der aggregierten Daten neue innovative Services für den Systemanwender entstehen. Daten als die wichtigste Informationsquelle in diesem System werden dabei in den Mittelpunkt gestellt.

Die Bedeutung des Begriffs *Big Data* lässt sich am besten mit folgendem Zitat zusammenfassen, das 2017 als Überschrift für einen Bericht der Zeitung „The Economist“⁴ verwendet wurde:

„The world’s most valuable resource is no longer oil, but data.“⁵

⁴ <https://www.economist.com/>

⁵ The Economist, 2017 <https://www.economist.com/leaders/2017/05/06/the-worlds-most-valuable-resource-is-no-longer-oil-but-data>

Hinter Daten verstecken sich also enorme Ressourcen, die bei richtiger Anwendung unzählige Möglichkeiten bieten.

Eine weniger plakative Definition von Big Data kann anhand der sogenannten fünf „V's“ getätigt werden: [11]

Volume:

Das Volumen (*Volume*) bezieht sich dabei auf die massive Menge an Daten, die in einem Informationsnetzwerk (IoT), in dem mehr oder weniger jedes Ding abgebildet und mit anderen Dingen vernetzt ist, erzeugt und gespeichert werden. Dabei entstehen noch nie dagewesene Datenmengen, was beispielsweise durch neue Maßeinheiten wie Zettabyte (10^{15} Megabyte MB) oder sogar Brontobyte⁶ (10^{15} Terabyte TB) augenscheinlich wird.

Velocity:

Dabei handelt es sich um die Geschwindigkeit (*velocity*), in der Daten heutzutage erzeugt, gesammelt und weitergeleitet (*streamen*) werden können. Beispielsweise kann eine Banktransaktion innerhalb weniger Millisekunden getätigt werden.

Variety:

Vielzahl (*variety*) bezieht sich in Zusammenhang mit Big Data auf die Anzahl an unterschiedlichen Datentypen, die verarbeitet werden können. Die erzeugten Daten können dabei strukturiert (z.B. Daten in einer Datenbank oder Tabelle), semi-strukturiert (z.B. textbasierte Datenstruktur wie beispielsweise XML) oder unstrukturiert (z.B. E-Mails, Bilder, Tondateien etc.) sein.

Veracity:

Die Richtigkeit (*veracity*) oder Vertrauenswürdigkeit von Daten ist ein weiteres wesentliches Merkmal von Big Data. Aufgrund der Vielfältigkeit der Daten und der Vielzahl an Daten können Probleme bei der Erfassung der Daten entstehen (Datenrauschen), die die Qualität der aufgezeichneten Daten verschlechtert.

Value:

Der Wert (*value*), den Daten in einer digitalisierten Welt besitzen, ist enorm. Durch die Analyse oder Auswertung der Daten, die innerhalb eines Systems aufgezeichnet werden, können wichtige Erkenntnisse über das System gewonnen werden (z.B.

⁶ Brontobyte in Anlehnung an den größten Dinosaurier der Welt (vgl. <https://www.businessinsider.com/new-big-data-word-brontobytes-2014-6/lightbox?r=AU&IR=T>)

Erkennen von bestimmten Mustern in den Daten, die Rückschlüsse auf das Systemverhalten zulassen).

1.1.4 Künstliche Intelligenz (KI) und maschinelles Lernen (ML)

Künstliche Intelligenz (KI) oder *Artificial Intelligence* (AI) ist eine vergleichsweise neue Disziplin der Wissenschaft und kann doch auf eine recht lange Geschichte zurückblicken. Erste Experimente mit sogenannten *Künstlichen Neuronalen Netzen* (KNN), die vom breiteren Verständnis verteilter neuronaler Prozesse im menschlichen Gehirn inspiriert wurden, fanden bereits in den 1940er-Jahren statt. [12]

Tabelle 1: Ausgewählte Meilensteine in der Entwicklung von KI (vgl. [12])

Heute	<p>ML-basierte Systeme sind inzwischen dazu in der Lage,</p> <ul style="list-style-type: none"> • radiologische Bilder so gut wie Mediziner zu analysieren, • automatisch unklare Bilder zu vervollständigen, • Börsengeschäfte anhand einer Prognose selbständig durchzuführen, • in komplexen Spielen wie beispielsweise Poker gegen Menschen zu gewinnen und • sich selbst Wissen, Spiele und Strategien beizubringen.
2010er	Bedeutende Erfolge mit Deep Learning (DL) (vor allem in der Sprachverarbeitung, Objekterkennung, Mustererkennung, Bioinformatik)
1996	KI gewinnt im Schach gegen den Weltmeister Kasparow (IBM Deep Blue Schachcomputer)
1980er	Stagnation der Forschung und Entwicklung (zu hohe Kapazität und langsame Computer)
1950er	Begriffsprägung der Künstlichen Intelligenz (KI)
1940er	Theorie der Künstlichen Neuronalen Netze (KNN)

Mit der damaligen Computertechnik blieb die Ausdrucksfähigkeit solcher KNN jedoch sehr beschränkt, weshalb das Konzept der KI erst in den 1980er Jahren wieder aufgegriffen wurde. Damals wurden von Experten sogenannte Wissensrepräsentationen in Form von symbolischem Wissen entwickelt, deren Wissensbasis auf der manuellen Eingabe logischer Regeln durch Experten basierte. Auch dabei wurde schnell klar, dass es praktisch unmöglich ist, jegliche Regeln für bestimmte Aktionen im Vorhinein explizit anzugeben. Erst durch die rasante Entwicklung entsprechender Computertechnologien um die Jahrtausendwende begann der eigentliche Durchbruch von KI. [12]

Zu definieren, was genau KI ist, stellt sich als Herausforderung dar. Bereits die Definitionen der Begriffe *künstlich* und *Intelligenz* werfen in Summe mehr Fragen auf, als dass dadurch beantwortet werden. Eine kurze und prägnante Definition von KI nach Rich [13] lautet folgendermaßen:

„Artificial Intelligence is the study of how to make computers do things at which, at the moment, people are better.“

Diese Definition ist deshalb sehr passend, weil sie einen wichtigen Aspekt enthält, der in weiterer Folge zu einer wichtigen Schlüsseltechnologie im Bereich der KI führt. Rich bedient sich in seiner Definition der KI dem Vergleich künstlicher mit menschlicher Intelligenz. Eine besondere Stärke menschlicher Intelligenz ist nämlich die Fähigkeit, Wissen durch Lernen zu erweitern. Diese Lernfähigkeit kann als Vorbild für *Maschinelles Lernen* oder *Machine Learning* (ML) gesehen werden.

„Maschinelles Lernen bezweckt die Generierung von Wissen aus Erfahrung, indem Lernalgorithmen aus Beispielen ein komplexes Modell entwickeln.“ [12]

Ein Modell wird also mit Beispieldaten trainiert und in weiterer Folge auf neue, unbekannte Daten derselben Art angewendet. Ohne dass Experten bestimmte Regeln oder Berechnungsvorschriften im Vorhinein festlegen, lassen sich durch solche Modelle Vorhersagen, Empfehlungen oder Entscheidungen durch künstlich geschaffene Intelligenz treffen. Ohne weiter ins Detail zu gehen sind *Künstliche Neuronale Netze* (KNN) und *Deep Learning* (DL), die im Rahmen von Tabelle 1 erwähnt wurden, letztlich sogenannte ML-Tools, die sich der eben beschriebenen Vorgehensweise zur Modellbildung und -entwicklung bedienen und im Zuge von KI eine immer breitere Anwendung in unterschiedlichen Bereichen des täglichen Lebens finden. [10]

Die in diesem Abschnitt angeführten digitalen Technologien stellen gemeinsam die wesentlichen Konzepte dar, die in weiterer Folge im Rahmen des Digitalen Zwillings

verwendet werden. Der Digitale Zwilling als ein mögliches Anwendungskonzept für die vorgestellten *Enabling Technologies* wird in den kommenden Teilen des vorliegenden Berichts diskutiert. Zuerst werden jedoch noch die Auswirkungen, die durch den Einzug digitaler Technologien in den industriellen Bereich (I4.0) und den Bereich der Energieumwandlung, -verteilung und -bereitstellung (E4.0) entstanden sind, erläutert. Der sich dadurch ergebende Wandel wird auch als *digitaler Wandel* oder *digitale Transformation* bezeichnet.

1.2 Der digitale Wandel

Der digitale Wandel innerhalb eines Unternehmens findet auf mehreren Ebenen statt. Dazu gehören in erster Linie die Prozess-, Organisations- und Geschäftsebene. Diese Veränderungen bieten einerseits die Möglichkeit, Dinge effizienter und lukrativer zu gestalten. Damit gehen aber andererseits auch eine Reihe von Herausforderungen für Unternehmen einher, weil durch die fundamentalen Veränderungen Druck auf den laufenden Betrieb des Unternehmens ausgeübt wird und die Unternehmensstruktur zunehmend komplexer wird. Es geht nicht nur um die digitale Erfassung von Informationen, sondern auch darum, die betriebliche Praxis grundlegend zu überdenken und durch Einbindung digitaler Technologien neue Perspektiven zu schaffen. [4]

Speziell im industriellen Bereich führt dies zu einer Schwerpunktverlagerung. Produzierende Unternehmen werden zunehmend zu Dienstleistungs- bzw. Serviceanbietern (*Service Provider*). Traditionell bieten produzierende Unternehmen ein umfangreiches Angebot an Sachgütern begleitet von einigen kleineren Dienstleistungen oder Services an. Dienstleistungen als sogenannte *Add-Ons* zu den produzierten Waren werden zukünftig jedoch stark an Bedeutung gewinnen. Marktangebote von Unternehmen werden in Zukunft mindestens zur Hälfte aus Sachgut und zur anderen Hälfte aus Dienstleistung bestehen (hybrider Dienstleistungsmix), oder das Marktangebot besteht zum Großteil aus einer Dienstleistung, die zusätzlich durch Waren und andere Dienstleistungen unterstützt wird [14]. Ein derart geändertes Geschäftsmodell wird auch als *Product-Service-System* (PPS) oder unter Einbeziehung eines immer größer werdenden Anteils an digitalen Technologien als *Smart PPS* bezeichnet. [15]

In einem dienstleistungsorientierten Geschäftsmodell wird dem Kunden nicht unbedingt das erzeugte Produkt oder die gelieferte Anlage selbst, sondern vor allem deren Nutzung zur Verfügung gestellt. Der Erzeuger oder Hersteller des Erzeugnisses erwirtschaftet seinen Erfolg dann als Dienstleister über beispielsweise Sharing-, Leasing- oder Contracting-Angebote. Da er selbst Eigentümer des Erzeugnisses

bleibt, steigt auch sein Interesse, Produkte im Hinblick auf Langlebigkeit, Wartungsfreundlichkeit und Offenheit für eine kontinuierliche Einbindung von Innovationen zu optimieren. [16] Außerdem kann durch die Etablierung neuer Dienstleistungsangebote der Verkauf von Waren und die Reaktionsfähigkeit auf Nachfrageschwankungen verbessert werden und zusätzlich können Kundenbeziehungen langfristig gestärkt und Wachstumschancen in ursprünglich fremden Branchen geschaffen werden. [14]

Nachfolgend wird der digitale Wandel im industriellen Bereich und im Energiesektor genauer erläutert.

1.2.1 Industrie 4.0 und Energie 4.0

Industrie 4.0 bezeichnet den zuvor umrissenen Paradigmenwechsel durch die Digitalisierung im industriellen Bereich. Die Industrie entwickelte sich ausgehend von der ersten mechanischen Produktionsanlage Ende des 18. Jahrhunderts (*erste industrielle Revolution*) über die Implementierung der arbeitsteiligen Massenproduktion von Gütern unter Zuhilfenahme elektrischer Energie (*zweite industrielle Revolution*) bis hin zur weiter andauernden Automatisierung von Produktionsprozessen durch eine intensive Nutzung digitaler Technologien aus der IKT-Branche. In Verbindung mit der in „KAPITEL 1 Digitalisierung“ getroffenen Definition stellt die dritte industrielle Revolution den Prozess der *Informatisierung* dar. [17]

Der Zusatz *4.0* in *I4.0* steht für die vierte industrielle Revolutionsstufe. Auslöser für diese Revolution ist der enorme Fortschritt in den letzten Jahrzehnten im Bereich der bereits erwähnten digitalen Technologien oder IKTs. *I4.0* zeichnet eine Zukunftsvision davon, wie intelligente Produktionsstätten (*Smart Factories*) zukünftig arbeiten werden, indem sich Maschinen „smart“ miteinander vernetzen. Außerdem werden die starren und streng definierten Grenzen der Wertschöpfungsketten von heute aufgelöst und zukünftig durch flexible, hochdynamische und global vernetzte Wertschöpfungsnetzwerke ersetzt. Diese Netzwerke werden in einem digitalen Ökosystem zusammenarbeiten (vgl. Abb. 3 in [18]). Es wird also erstmals in der Geschichte eine industrielle Revolution ausgerufen, bevor diese überhaupt stattgefunden hat. Experten aus allen Bereichen sind sich aber einig, dass kein Weg an einer Digitalisierung vorbeiführt und deshalb solch eine Revolution unausweichlich ist. [16]

Der Begriff *Industrie 4.0* stammt ursprünglich aus dem deutschsprachigen Raum und wurde erstmals auf der Hannover Messe im April 2011 vorgestellt.

In Deutschland haben sich die Trägerverbände VDMA⁷, ZVEI⁸ und Bitkom⁹ mit dem Thema I4.0 auseinandergesetzt und die *Plattform Industrie 4.0*¹⁰ gegründet. Von diesem gemeinsamen Lenkungskreis aus werden Aktivitäten innerhalb der deutschen Industrie koordiniert und vernetzt. I4.0 ist aber keineswegs ein rein deutsches Phänomen. In Österreich wurde 2015 die *Plattform Industrie 4.0 Österreich*¹¹ gegründet und gilt als Pendant zur deutschen Initiative. Auf globaler Ebene sei an dieser Stelle das *Industrial Internet Consortium*¹² (IIC) erwähnt. Dabei handelt es sich um eine im Frühjahr 2014 gegründete Partnerschaft aus Industrie, Politik und Wissenschaft, der unter anderem Unternehmen wie Microsoft, IBM, General Electric Company (GE), Cisco und viele weitere angehören. [19]

Im internationalen Kontext gibt es für I4.0 keine allgemein gültige Definition. Die grundlegende Vorstellung von I4.0 kann am besten an Hand der wesentlichen Merkmale einer I4.0 beschrieben werden. Manzei et al. [19] charakterisieren I4.0 über folgende Merkmale:

- Die dynamische Verknüpfung interner und externer digitaler Informationsquellen UND
- die automatische Analyse sowie Weitergabe hierüber generierter (komplexer) Daten
- zur bedarfsgesteuerten Vorbereitung oder Steuerung von Prozessen,
- die an verschiedenen Stellen der Wertschöpfungskette eines Industrieunternehmens ansetzen, um diese insgesamt
 - schneller,
 - kostengünstiger,
 - effizienter,
 - ressourcenschonender,
 - flexibler und
 - kundenorientierter

zu gestalten.

Ähnlich stellt sich der Sachverhalt im Energiesektor unter dem Namen *Energie 4.0* (E4.0) dar. Auch hier müssen Effizienzpotenziale und Flexibilitäten in Prozessen erschlossen werden, um Energieumwandlung, -verteilung und -nutzung optimieren zu können. [20]

⁷ Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA), Frankfurt/Main: <http://www.vdma.org>

⁸ Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e. V. (ZVEI), Frankfurt/Main: <http://www.zvei.org>

⁹ Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V. (Bitkom), Berlin: <http://www.bitkom.org>

¹⁰ <http://www.plattform-i40.de>

¹¹ <https://www.plattformindustrie40.at>

¹² <https://www.iiconsortium.org>

Wie bei I4.0 steht auch bei E4.0 der Zusatz 4.0 für die vierte Generation eines Energiesystems, das sich auf dem Weg hin zu einem System ohne fossile Energieträger entwickelt und unter intensivem Einsatz digitaler Technologien arbeitet.

Zuerst gab es das Zeitalter der Verbrennung fossiler Energieträger zur Energiebereitstellung, welches durch jenen Zeitabschnitt abgelöst wurde, in dem elektrische Energie aus der Umwandlung konventioneller Energieträger gewonnen wurde. Zu den fossilen sowie konventionellen Energieträger zählen in erster Linie Kohle, Erdöl und Erdgas. Bedingt durch die Klimakrise und die Forderung nach einer drastischen Reduktion des CO₂-Ausstoßes befinden wir uns derzeit in Mitten der Energiewende und somit im Zeitalter der erneuerbaren Energien. [21]

Diese Wende führt zu einem Übergang von einer CO₂-intensiven Nutzung fossiler Energieträger hin zu einer nachhaltigen Nutzung erneuerbarer Energieträger zur Energieversorgung. In Deutschland soll dadurch bis 2050 eine Reduktion des Stromverbrauchs um 25% und eine Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien am Strommix auf 80% im Vergleich zum heutigen Stromverbrauch und Anteil erneuerbarer Energien erreicht werden. [7]

Österreich hat unter dem Titel „#Mission2030“¹³ seine Klimapolitik für die kommenden Jahrzehnte vorgestellt. In diesem Positionspapier wird das zentrale Ziel angekündigt, bis 2030 den Ausstoß sogenannter Treibhausgase um 36% gegenüber 2005 zu reduzieren. Bis 2050 wird das globale Ziel einer kompletten Dekarbonisierung der Bundesrepublik Österreich angestrebt.

Der steigende Anteil an dezentralen Energieversorgungsanlagen mit erneuerbaren Energien bedingt ein hohes Maß an Flexibilität im Energiesystem. Durch die starke Fluktuation erneuerbarer Energien wie Wind- und Solarenergie kommt es zu einer zeitlichen Diskrepanz zwischen Energiebereitstellung und Energieverbrauch. Das führt zu einer steigenden Belastung der Energieverteilungsnetze. Damit auch zukünftig ein stabiler Betrieb des Energieverteilungsnetzes gewährleistet werden kann, müssen Verbraucher, Speicher und Erzeuger jeglicher Form von Energie in einem Energiesystem der Zukunft (E4.0) intelligent miteinander vernetzt werden.

Die Bezeichnungen für solch ein Energiesystem sind unterschiedlich. Der in diesem Bericht verwendete Begriff *Energie 4.0* ist nur einer von vielen. In der Literatur werden ebenfalls Begriffe wie *Smart Energy* oder *Smart Energy Systems* [22], *Smart Grid* [23] und *Internet of Energy* (IoE) [21] verwendet. Die Konzepte für das zukünftige Energiesystem, die sich hinter den Begrifflichkeiten verbergen, sind jedoch alle sehr ähnlich. E4.0 steht für einen Paradigmenwechsel im Energiesektor.

¹³ <http://www.mission2030.bmnt.gv.at>

Es geht darum, den Betrieb einer immer größer werdenden Anzahl an Elementen im Energiesystem, wie beispielsweise erneuerbarer Energiequellen, verteilter Erzeugungs-ressourcen (*Distributed Energy Resources (DER)*), Plug-in Elektrofahrzeugen (*plug-in electric vehicles (PEVs)*) oder einer Vielzahl an Energiespeichertechnologien für verschiedene Anwendungen über ein gemeinsames Energie-Ökosystem zu überwachen und zu steuern. Bezogen auf die Ressourcenvielfalt muss ein *Smart Grid* (intelligentes Erzeugungs-, Übertragungs- und Verteilungsnetzwerk) im Energie-Ökosystem in einem breiteren Kontext betrachtet werden, damit beispielsweise auch Zusammenhänge zwischen Gas- und Stromnetz abgebildet werden können. Aus einem Energiesystem der Vergangenheit mit einem zentralen, monopolistischen Systembetreiber und wenigen großen Energieversorgungseinheiten entwickelt sich ein Energiesystem, das bereits heutzutage zusätzlich zu Energie aus konventionellen Energieträgern mit einem steigenden Anteil regenerativer Energie gespeist wird und in Zukunft durch weitere Integration einer Vielzahl an dezentralen Energieerzeugern und Energiespeichern (z.B. *Vehicle-to-Grid (V2G)*) an Komplexität zunehmen wird [21].

Neben der Flexibilisierung des Energiesystems ist es zwingend notwendig, dass Energie effizienter umgewandelt und der Energieverbrauch durch effizienzsteigernde Maßnahmen reduziert bzw. optimiert wird. Nur so können Ressourcen geschont und der CO₂-Ausstoß langfristig verringert werden. Das Energiesystem wird somit zunehmend komplexer und muss sowohl über große überregionale Bereiche als auch über mehrere Ebenen (Erzeugungs-, Übertragungs- und Verteilungsebene) beherrschbar bleiben. Auch für diese Problemstellung stellen digitale Technologien eine vielversprechende Lösungsmöglichkeit dar. Die zunehmende Digitalisierung des Energiesystems verspricht eine flexible Steuerung und soll die diskontinuierliche Energiebereitstellung mit dem Bedarf an elektrischer Energie in Einklang bringen. Deshalb spricht man auch von einer *digitalen Energiewende* hin zum Energiesystem der Zukunft (E4.0). [7]

1.2.2 Referenzarchitekturmodelle SGAM und RAMI4.0

Bei der Umsetzung der Zukunftsvisionen von I4.0 und E4.0 handelt es sich um eine komplexe Gestaltungsaufgabe. Jede Aktivität, die in diesem Rahmen durchgeführt wird, muss in einem ganzheitlichen Zusammenhang gesehen werden und muss in dieses komplexe Gesamtsystem integriert werden. Dies erfordert eine intensive Zusammenarbeit unterschiedlicher Disziplinen wie beispielsweise Elektrotechnik, Maschinenbau oder Informationstechnik (IT). Um dies zu ermöglichen, bedarf es eines hohen Maßes an Standardisierung und international anerkannter Normen. Außerdem

müssen Datenformate angepasst werden, um den Datenaustausch mit externen Stellen einfach und kostengünstig zu gestalten. Referenzarchitekturen helfen dabei, diese einheitlichen und konsistenten Definitionen und Standards in dem zu untersuchenden System zu schaffen und ermöglichen eine Strukturierung, indem sie einheitliche Entwurfsmuster bieten. Eine durchgängige Terminologie soll weiter dafür sorgen, dass spezifische Implementierungen unterschiedlicher Möglichkeiten für unterschiedliche Anwendungsfälle vergleichbar gemacht werden können und dass die dabei verwendeten Technologien im Referenzmodell eingeordnet und zugeordnet werden können. [24]

Das CEN¹⁴, CENELEC¹⁵, und das ETSI¹⁶ haben im Rahmen des Mandats M/490 im Juli 2011 die Arbeitsgruppe CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group (SG-CG)¹⁷ gegründet. Ziel war die Entwicklung einer Referenz-Architektur, die aus technischer Sicht sowie aus Unternehmens-, Standardisierungs- und sicherheitstechnischer Perspektive zur Dokumentation von Smart-Grid-Anwendungsfällen dient, um Lücken bei der Umsetzung und Standardisierung identifizieren zu können.

Als Ergebnis präsentierte die Arbeitsgruppe *Reference Architecture (SG-CG/RA)* 2012 einen Report, in dem das Smart Grid Architecture Modell (SGAM) veröffentlicht wurde [25]. Das SGAM ist ein dreidimensionales Modell und verbindet die Dimension *Interoperabilität*, bestehend aus fünf Ebenen (Business, Funktion, Information, Kommunikation und Komponente) mit den beiden Dimensionen der Smart-Grid-Ebene (siehe Abb. 8). Diese Ebene wird von der Dimension *Zonen* (repräsentiert die hierarchischen Ebenen des Energiesystemmanagements: Prozess, Feld, Station, Betrieb, Unternehmen und Markt) und von der Dimension *Domänen* (deckt die gesamte Energiebereitstellungskette ab: Umwandlung, Übertragung, Verteilung, dezentrale Stromerzeugung und Kundenstandort) gebildet (vgl. Abb. 8).

Der Fokus des Modells liegt speziell darauf, die notwendige Interoperabilität zwischen zwei oder mehreren Systemen (Devices oder Komponenten) zu gewährleisten. Interoperabilität ist in diesem Zusammenhang dann gegeben, wenn diese Systeme in Zusammenarbeit fähig sind, eine spezifische Funktion durch Austausch und Verwendung von Informationen zu erfüllen. Mit diesem Modell kann außerdem gezeigt werden, in welchen *Zonen* des Informationsmanagements Interaktionen zwischen unterschiedlichen *Domänen* stattfinden. [25]

¹⁴ Europäisches Komitee für Normung CEN, Brüssel: <http://www.cen.eu>

¹⁵ Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung CENELEC, Brüssel: <http://www.cenelec.eu>

¹⁶ Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen ETSI, Sophia Antipolis (Frankreich): <http://www.etsi.org>

¹⁷ <http://www.cencenelec.eu>

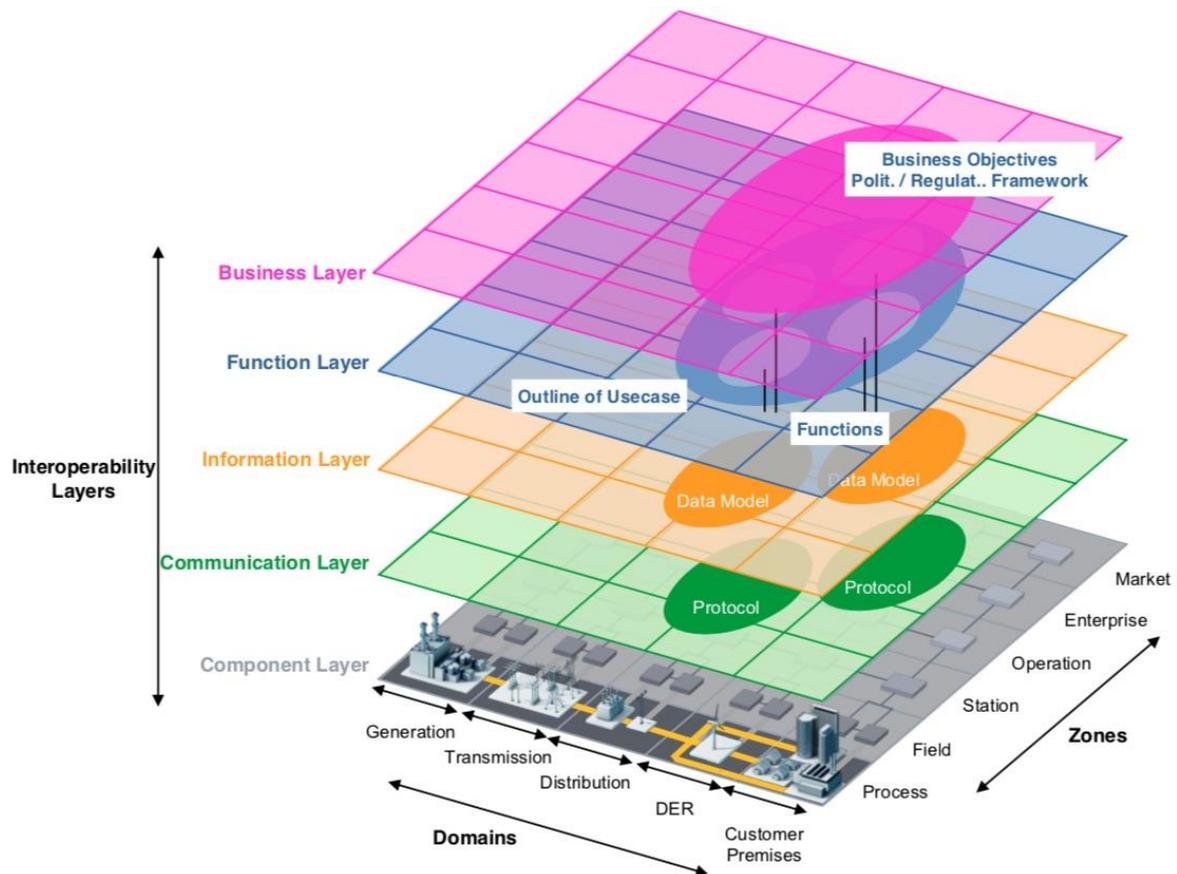


Abbildung 8: Smart Grid Architecture Model SGAM. Quelle: [25]¹⁸

Damit kann der aktuelle Stand der Technik im Bereich der Energieumwandlung, -übertragung und -verteilung im SGAM dargestellt werden und unter Zuhilfenahme der richtigen Technologien und Standards eine Erweiterung auf den gesamten 3-dimensionalen Raum des SGAM durchgeführt werden. Die Entwicklung zukünftiger Smart-Grid-Szenarien kann dadurch verbessert werden. Die entstehenden Lösungen bestehen vor allem durch ihre Unabhängigkeit (lösungs- und technologieunabhängiges Modell), Verortbarkeit im SGAM (Verortung zweier Objekte auf systematische und vergleichbare Art und Weise), Konsistenz (Durchgängigkeit eines Anwendungsfalls über alle Ebenen hinweg), Flexibilität (Anpassungsfähigkeit für zukünftige Anwendungen) und Interoperabilität (Interaktion zwischen Akteuren, Anwendungen, Systemen und Komponenten) durch Anwendung des SGAM. [25]

Ein vergleichbares Modell, das auf Grundlage des SGAM entwickelt wurde, ist das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0). Das RAMI4.0 wurde auf der

¹⁸ © CEN, CENELEC, ETSI, reproduced with permission

Hannover Messe im Jahr 2015 vom Konsortium der *Plattform Industrie 4.0*¹⁹ vorgestellt. Mit der Entwicklung dieses Modells wurde der Versuch unternommen, eine standardisierte Darstellung des I4.0-Raumes zu modellieren.

Döbrich et al. [26] fassen die Zielsetzung bei der Entwicklung des RAMI4.0 folgendermaßen zusammen:

1. Schaffung eines anschaulichen und einfachen Architekturmodells als Referenz für den gesamten I4.0-Lösungsraum.
2. Darstellung anwendungsspezifischer Zusammenhänge mit Normen und Standards:
 - a. Zuordnung geeigneter vorhandener Normen und Standards.
 - b. Minimierung der Zahl der eingesetzten Normen und Standards durch Evaluierung von Überschneidungen und Festlegung von Vorzugslösungen.
 - c. Evaluierung und Schließen von Lücken in Normen und Standards durch neue bzw. veränderte Normen.
3. Evaluierung von Untermengen einer Norm bzw. eines Standards zur schnellen Umsetzung von Teilinhalten für I4.0.

Die entsprechenden Normen (IEC 62890, IEC 62264, IEC 61512) sind in Abbildung 9 für die *Life Cycle Value Stream*-Achse und die *Hierarchy Levels*-Achse eingetragen.

Im Vergleich zum SGAM wurde das RAMI4.0 dahingehend erweitert, dass statt einer Domänen-Achse, die die elektrische Energieverteilung (entspricht einer Wertschöpfung) im SGAM darstellt, eine Wertschöpfungs- und Lebenszyklus-Achse (*Life Cycle Value Stream*) eingeführt wurde. Damit kann zusätzlich zur Wertschöpfung auch der Lebenszyklus der an der Wertschöpfung beteiligten Komponenten abgebildet werden. Außerdem wurde die Komponentenebene des SGAM im RAMI4.0 in eine Asset- und eine Integrationsebene (*Asset* und *Integration*, vgl. Abb. 8 und Abb. 9) aufgeteilt. Durch die Integrationsebene kann der Übergang zwischen realer und digitaler Welt eindeutig abgegrenzt werden (siehe Abb. 10). [26]

¹⁹ <http://www.plattform-i40.de>

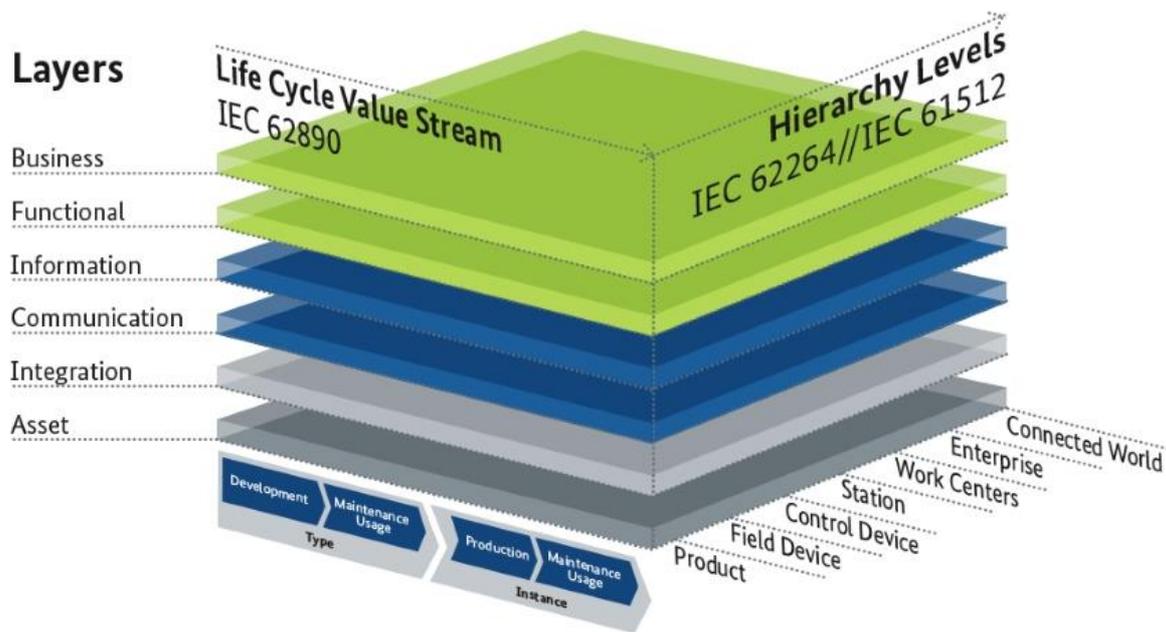


Abbildung 9: Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0). Quelle: [19]²⁰

RAMI4.0 ist ein dreidimensionales Modell und besteht aus einer *Hierarchie-Achse*, einer Achse für den Lebenszyklus und die Wertschöpfung (*Lebenszyklus- und Wertschöpfungs-Achse*) und einer Achse, die aus mehreren Schichten (*Layer-Achse*) zur Beschreibung der IT-Repräsentanz besteht (siehe Abb. 9).

Lebenszyklus- und Wertschöpfungsachse:

Auf Grund der zunehmenden Digitalisierung kommt es in der horizontalen Organisationsebene zu einer immer stärker werdenden herstellerübergreifenden Vernetzung entlang des Lebenszyklus und des Wertschöpfungsnetzwerkes. Wie bereits zuvor im Rahmen von I4.0 beschrieben, werden die traditionell linearen Strukturen der Wertschöpfung zu ineinander verknüpften Wertschöpfungsnetzwerken, in denen digitale Informationen rasch ausgetauscht werden können müssen. Mit der Lebenszyklus- und Wertschöpfungs-Achse wurde versucht, diesen Sachverhalt abzubilden. [26]

Hierarchie-Achse:

Um die vertikale Integration z.B. entlang einer Anlage oder der Fabrik abdecken zu können, wurde die Hierarchie-Achse eingeführt. Aus den bestehenden Normen IEC 62264 und IEC 61512, die eine grobe Orientierung zu Hierarchien innerhalb von Anlagen und Fabriken geben, wurden die wichtigsten Ebenen herausgegriffen und im

²⁰ Mit freundlicher Genehmigung der Geschäftsstelle Plattform Industrie 4.0, Bülowstraße 78, 10783 Berlin, <http://www.plattform-i40.de>

RAMI4.0 verankert. Zentrales Merkmal ist der Übergang von der „klassischen“ Automatisierungspyramide mit einer Kommunikationsstruktur, die von Ebene zu Ebene kommuniziert, hin zu einer funktionalen Kommunikationsstruktur, die es ermöglicht, dass jeder Teilnehmer des Netzwerkes mit jedem anderen beliebigen Teilnehmer kommunizieren kann. [26]

Layer-Achse:

Jede Schicht (engl. *layer*) erstreckt sich dabei sowohl über die Lebenszyklus- und Wertschöpfungsachse sowie über die Hierarchie-Achse, wodurch der dreidimensionale Raum des RAMI4.0 entsteht. Die sechs Schichten (siehe Abb. 10) dienen folgenden Funktionen: [26]

- *Asset-Layer*: Bildet alle Assets in der physischen Welt ab. Alle fünf Schichten darüber gehören zur Informationswelt oder virtuellen Welt (vgl. Abb. 10)
- *Integration-Layer*: Dient als Bindeglied zwischen physischer und virtueller Welt. Als „Übersetzer“ kommt dieser Schicht eine der wichtigsten Funktionen in Richtung einer Industrie 4.0 zu. Beispielsweise kann ein physikalischer Messwert durch einen Analog-Digital-Wandler über die Informationsschicht für die Informationswelt bereitgestellt werden.

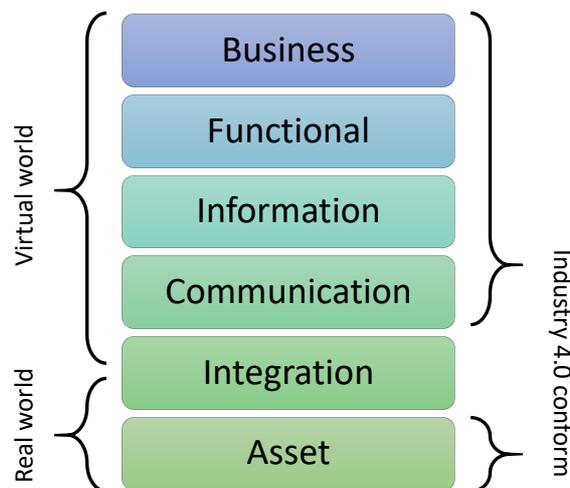


Abbildung 10: Layer-Achse RAMI4.0 (in Anlehnung an [23])

- *Communication-Layer*: Diese Schicht dient der Funktion, jedes Asset mit allen anderen Assets im Netzwerk zu verbinden. Dazu müssen Lösungen aus der industriellen Kommunikation mit Techniken der IKT zusammengeführt werden. Wichtigstes Merkmal dieser Schicht ist ein sicherer, zeitgerechter und unternehmensübergreifender Informationstransport in einer serviceorientierten Architektur.

- *Information-Layer*: Repräsentiert alle Informationen, die die wichtigsten Funktionen des Assets beschreiben. Der Information-Layer bündelt alle relevanten Daten und ordnet sie entsprechenden Funktionen sowie einem Speicherort (z.B. lokal oder öffentlich) zu. Der Information-Layer ist somit auch für eine Abgrenzung der Daten nach außen hin zuständig.
- *Functional-Layer*: Hier befinden sich neue Funktionen und Services, die im Rahmen von I4.0-Anwendungen eingeführt werden können. Diese Funktionen und Services beziehen ihre Daten aus dem Information-Layer und spielen ihre Auswertungen auch wieder dorthin zurück. Durch dieses Vorgehen können beliebige andere Assets auf die Ergebnisse zugreifen und es kommt zu vielen neuen Kooperationsmöglichkeiten innerhalb des Netzwerks.
- *Business-Layer*: In dieser Schicht befinden sich alle Rahmenbedingungen, die nicht unmittelbar zur fachlichen Funktionalität des Assets gehören (z.B. organisatorische Rahmenbedingungen, monetäre Bedingungen, rechtliche und regulatorische Rahmenbedingungen etc.).

Der Fokus des RAMI4.0 liegt stark auf Szenarien der Produktentwicklung und Produktion im Umfeld eines I4.0-Unternehmens. [27]

Die wesentlichen Merkmale des RAMI4.0 in diesem Umfeld kann folgendem Zitat entnommen werden:

„Es muss beschrieben werden, wie Entwicklungsprozesse, Produktionslinien, Fertigungsmaschinen, Feldgeräte und die Produkte selbst beschaffen sind bzw. funktionieren.“ [19]

Das RAMI4.0 ermöglicht letztlich genau diese Zusammenhänge in einem einheitlichen Modell darzustellen und mit Hilfe von Standards zu beschreiben.

Digitalisierung in Zusammenhang mit I4.0 bedeutet also, dass alle Prozesse entlang der horizontalen und vertikalen Organisationsstruktur innerhalb des eigenen Unternehmens, aber auch in Zusammenarbeit mit anderen Unternehmen, integriert werden müssen. Das RAMI4.0 kann die Anwender dabei unterstützen, bestehende Prozesse und Anwendungsfälle zu analysieren und hinsichtlich ihrer I4.0-Kompatibilität zu bewerten. In der praktischen Anwendung zeigen sich aber noch deutliche Hürden beim Zusammenspiel der Schichten (*layers*) und Hierarchie-Ebenen entlang des Lebenszyklus und Wertschöpfungsprozesses. Frysak et al. [28] führen in ihrer Untersuchung eine praktische Studie zur Anwendbarkeit des RAMI4.0 durch. Dabei zeigten sich die Vorteile bei der Identifikation und Lokalisierung einzelner Teilnehmer und Technologien, die bei der Umsetzung konkreter Anwendungsfälle miteinbezogen werden müssen. Ein großer Vorteil des RAMI4.0 liegt dabei in einer Perspektive, die unternehmensübergreifend gesehen werden kann. Aus einer Prozessperspektive innerhalb des eigenen Unternehmens zeigten sich jedoch

Schwierigkeiten. Die erste Hürde stellt bereits die konkrete Zuordnung der Prozesse zu den einzelnen Schichten im RAMI4.0 dar. Prozesse lassen sich sowohl in Hinblick eines prozeduralen Fortschrittes entlang der Lebenszyklus- und Wertschöpfungsachse beschreiben aber auch als zu digitalisierendes Objekt entlang der Schichten. Wird weiter ein Prozess genauer betrachtet, fällt es schwer andere Prozesse, die in enger Verbindung zum betrachteten Prozess stehen und parallel dazu verlaufen miteinzubeziehen. Nach Frysak et al. [28] können das beispielsweise Prozesse zur Qualitätssicherung oder zur Prozessoptimierung eines Fertigungsprozesses sein. Die statische Struktur des RAMI4.0 lässt nur eine Betrachtung eines Prozesses zu. Zuletzt sorgt jener Umstand bei der Anwendung des RAMI4.0 zur Verunsicherung, dass ein Produkt auf der untersten Ebene der Hierarchie-Achse auftaucht, obwohl das Produkt selbst am Ende des Produktionsprozesses steht und selbst einen eigenen Lebens- und Wertschöpfungszyklus besitzt. Das Produkt kann also gleichzeitig ein wesentlicher Bestandteil der Anlage, des Unternehmens oder eines Produktionsprozesses sein. [28][28]

Scharl et al. _CTVL0013bbacfd86acc4e47bab66ebdf9a8fd5e[29] untersuchten anhand der deutschen Industrie die Rolle einer digitalen Industrie (I4.0) innerhalb eines Energiesystems, das sich im Wesentlichen aus erneuerbaren Ressourcen zusammensetzt (E4.0). Referenzarchitekturen wie das RAMI4.0 oder SGAM können dabei helfen, den Überblick über diese komplexen Gestaltungsaufgaben zu behalten und setzen den Fokus auf entsprechende Normen und Standards. Scharl et al. [29] führten teilstrukturierte Experteninterviews mit führenden Branchenmanagern der Industrie und Forschern, die sich mit Themen rund um den Bereich Industrie und Energie befassen, durch. Dabei konnten die folgenden drei Hauptfelder im Fachdiskurs über die Zukunftspotenziale der Industrie und Energie identifiziert werden:

- Erhöhung der Transparenz im Energiesystem
- Flexibilität in der Energiebereitstellung
- Erhöhung der Energieeffizienz

Inwiefern der *Digitale Zwilling* (DT) und in weiterer Folge der Dampferzeuger diesbezüglich eine Rolle spielen, soll in den nachfolgenden Abschnitten dieses Berichts untersucht werden.

KAPITEL 2

Der Digitale Zwilling

In diesem Abschnitt wird das Konzept des *Digitalen Zwillings* (Digital Twin - DT) vorgestellt. Wie bereits in den vorhergehenden Abschnitten zum Thema *Digitalisierung* werden zuerst die verwendeten Begrifflichkeiten genauer definiert, um letztlich ein breites Verständnis für einen DT zu schaffen. Anschließend wird eine ausgewählte Modellvorstellung des DT, welche aus einer umfangreichen Literaturrecherche abgeleitet wurde, beschrieben und dessen wesentlichen Bestandteile angeführt.

Dem DT werden in naher Zukunft enorme Potenziale in einer digitalisierten Welt prophezeit. Er gilt als Schlüsseltechnologie für die Umsetzung der digitalen Zukunft im Energie- und Industriebereich (I4.0 und E4.0), wie sie im vorangegangenen Abschnitt präsentiert wurde [30, 31]. Eine zunehmende Anzahl an Unternehmen und Organisationen sind sich diesem Potenzial bewusstgeworden und investieren enorme Ressourcen in relevante Forschung und die Entwicklung von entsprechenden Anwendungskonzepten für einen DT.

Der sogenannte „Gartner-Hype-Cycle“²¹ kann für eine Bewertung der vielversprechendsten Zukunftstechnologien herangezogen werden. Dabei werden aus einer Fülle von digitalen Technologien jene besonders hervorgehoben, die von führenden Beratungs- und Forschungsunternehmen das Potenzial zugeschrieben bekommen, in den nächsten fünf bis zehn Jahren für einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil in einer digitalisierten Industrie zu sorgen. Der DT wurde bereits 2018 auf die Spitze des „Hypce-Cycles“ gesetzt²². Die Zeit bis zum Erreichen der sogenannten „Hochebene der Produktivität“, in der der DT als angewandtes Konzept innerhalb der Unternehmen eingesetzt wird, wurde darin mit 5 bis 10 Jahren beziffert.

Damit kann einerseits die Bedeutung und das enorme Potential des DT hervorgehoben und unterstrichen werden. Andererseits zeigt dies aber auch, dass sich der DT noch

²¹ <https://www.gartner.com/>

²² <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-emerge-in-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2018/>

in der Entwicklungsphase befindet und derzeit großer Forschungsaufwand betrieben wird, um das Konzept des DT voranzutreiben.

Die rasante Entwicklung im Bereich digitaler Technologien, wie sie zuvor beschrieben wurde, ist zweifelsohne der Auslöser dafür, dass an der Weiterentwicklung und an der Umsetzbarkeit des DT-Konzepts gearbeitet wurde. Insbesondere IoT, CPS und Big Data spielen dabei eine wichtige Rolle, weil sie Daten erfassbar machen, für eine enge Verknüpfung des physischen und virtuellen Raums sorgen und eine Extraktion relevanter Information aus den gesammelten Daten ermöglichen. Nachfolgend werden Definitionen rund um die Begrifflichkeiten, die in Zusammenhang mit einem DT stehen, angeführt und die historische Entwicklung des DT beschrieben.

2.1 Definition und Geschichte

Seine Anfänge hatte der DT noch als physischer Zwillings. Die amerikanische Raumfahrtbehörde NASA²³ baute im Rahmen des Apollo-Raumfahrtprogramms ein Duplikat (Zwillings) ihres Raumfahrzeuges. Das Original wurde im Zuge der Apollo 13-Mission zum Mond geschickt und dessen Replikat verblieb auf der Erde. Dadurch konnten die Ingenieure jegliche Operation des Raumfahrzeuges auf der Erde mit Hilfe des Zwillings testen, bevor der Zustand des Raumfahrzeuges im Weltall verändert wurde. Entscheidend für den Erfolg dieses Konzeptes war, dass die Rahmenbedingungen, in denen das Raumfahrzeug im Weltall und sein Zwillings auf der Erde arbeiteten, spiegelbildlich gehalten wurden. Somit konnte ein in hohem Maße realistisches Simulationsumfeld geschaffen und eine Vergleichbarkeit der Operation erzielt werden. [32]

Das erste Konzept, das als Grundlage für den *digitalen Zwillings* (im Vergleich zum *physischen Zwillings* der NASA) angesehen werden kann, wurde 2003 von Michael Grieves an der Universität von Michigan im Rahmen einer Präsentation zum Thema „Product Lifecycle Management (PLM)“ vorgestellt. [33]

²³ NASA - National Aeronautics and Space Administration, Washington D.C.: <https://www.nasa.gov/>

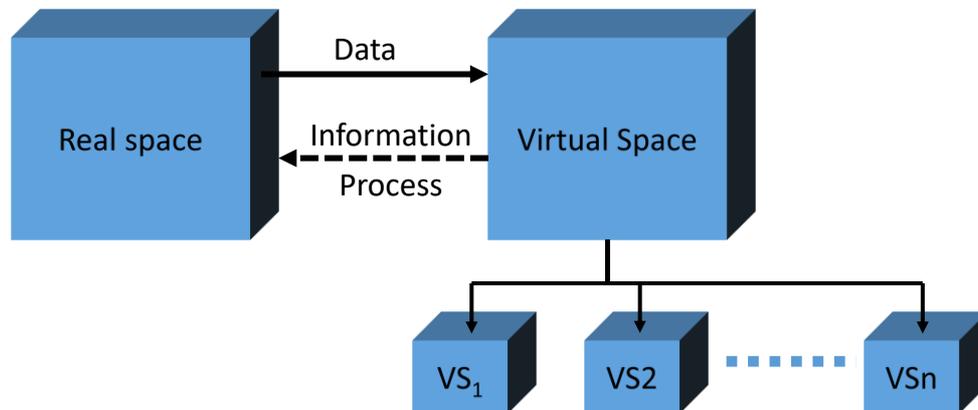


Abbildung 11: Product Lifecycle Management Konzept (in Anlehnung an [33])

Abbildung 11 zeigt das verwendete PLM-Konzept, in dem dargestellt wird, wie physische Objekte in der realen Welt mit digitalen Objekten im virtuellen Raum verbunden werden. Eine Verbindung zwischen beiden Objekten wird einerseits durch Daten, die von der realen in die virtuelle Welt übertragen werden und andererseits durch Informationen, die aus der virtuellen in die reale Welt zurückgeführt werden, hergestellt (vgl. Abb. 11). Ziel ist, es ein Spiegelbild eines real existierenden Systems zu schaffen und es in die digitale Welt zu transferieren, damit alle Aspekte der realen Welt digital abgebildet werden können. Dabei deutet der Titel der Präsentation *Product Lifecycle Management* bereits eine wesentliche Eigenschaft an. Im Vergleich zu einem statischen Abbild geht es beim PLM-Konzept vor allem darum, den Zustand der virtuellen Repräsentanz eines physischen Systems über den gesamten Lebenszyklus mit dem realen System konsistent zu halten (vgl. Version 1 (VS₁), ... , VS_n in Abb. 11). [33]

Basistechnologien aus der IKT waren zu diesem Zeitpunkt jedoch noch nicht derart fortgeschritten, dass das vorgestellte PLM-Konzept wirtschaftlich umgesetzt werden konnte. Erst im Jahr 2012 wurde das PLM-Konzept wieder aufgegriffen und von der NASA unter dem Namen *Digitaler Zwilling* weiterverfolgt. Diese war es auch, die die erste Definition eines DT veröffentlichte:

„The DT as an integrated multi-physics, multi-scale, probabilistic simulation of a vehicle or system that uses the best available physical models, sensor updates, fleet history, etc. to mirror the life of its flying twin. The digital twin is ultra-realistic and may consider one or more important and interdependent vehicle systems.“ [34]

Die angeführte Definition beschreibt den DT als multiphysikalisches, skalierbares und probabilistisches digitales Abbild (Simulationsmodell) eines Flugobjektes, das eine Reihe von integrierten Submodellen enthält, welche dazu dienen, bestimmte Aspekte

des realen Objektes abzubilden. Unter Berücksichtigung von stochastischen-, historischen- und Sensordaten kann die Interaktion des Modells mit dem realen System dargestellt werden. Dabei wurde in erster Linie ein diagnostischer bzw. prognostischer Einsatzzweck während des Verwendungszeitraums des Systems verfolgt, um beispielsweise die mechanische Struktur eines Flugobjektes zu überwachen. [34]

Neben dieser Beschreibung sind eine Vielzahl an weiteren Definitionen eines DT in der Literatur zu finden. Diese unterscheiden sich in ihrer grundlegenden Aussage jedoch kaum, weshalb für weitere Definitionen auf die entsprechende Literatur verwiesen wird. [35–38]

Seit der ersten wissenschaftlichen Publikation zum DT der NASA 2012 hat sich in diesem Themengebiet einiges bewegt. Abbildung 12 zeigt auf Basis einer Literaturauswertung den nahezu exponentiellen Anstieg der Anzahl an wissenschaftlichen Publikationen zum Thema DT für den Zeitraum von 2012 bis 2019.

Für die in Abbildung 12 gezeigte Darstellung wurden Publikationen in deutscher und englischer Sprache berücksichtigt, die die Wörter „Digital Twin“ oder „Digitaler Zwilling“ im Titel, Abstract oder in den Keywords enthalten. Dabei war es unerheblich, in welchem Zusammenhang diese Wortkombination verwendet wurde. Die Suchergebnisse der drei Literaturplattformen Scopus²⁴, Web of Science²⁵ und ScienceDirect²⁶ wurden zusammengeführt und die Anzahl an Publikationen pro Jahr ausgewertet. Stichtag für die berücksichtigten Ergebnisse der Literatursuche war der 19.10.2019. Der Zeitraum zwischen 2003 und 2012 wurde in Abbildung 12 nicht berücksichtigt, weil es in dieser Zeit, wie bereits erwähnt, kaum nennenswerte Publikationen zum Thema DT gegeben hat.

²⁴ <https://www.scopus.com/>

²⁵ <http://www.webofknowledge.com/>

²⁶ <https://www.sciencedirect.com/>

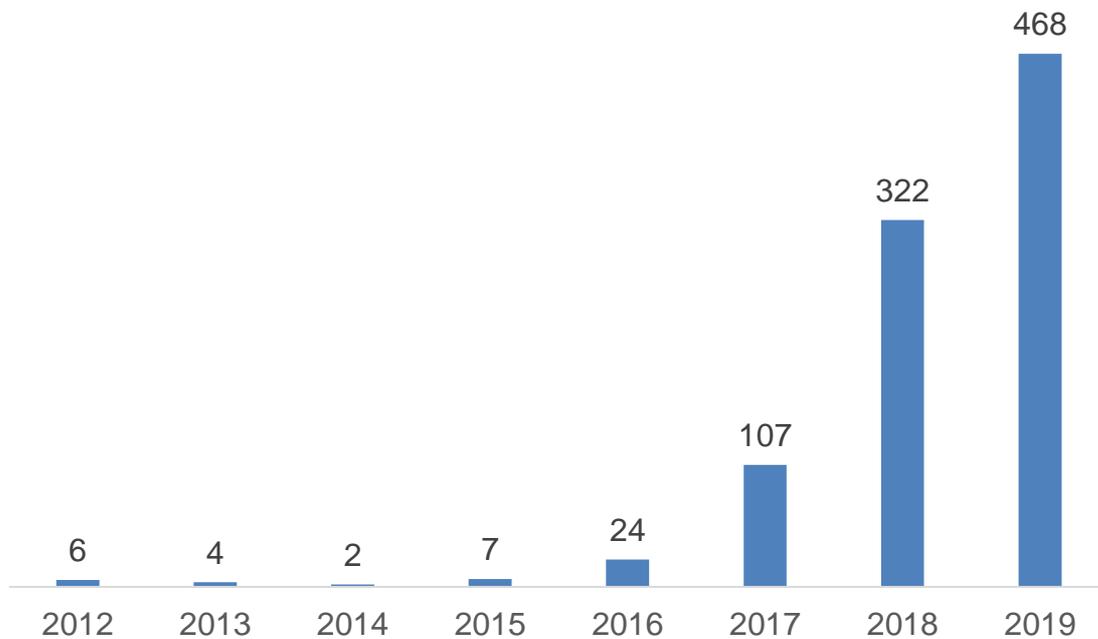


Abbildung 12: Wissenschaftliche Publikationen im Zeitraum von 2012-2019 zum Thema DT

Nach einer kurzen Inkubationszeit wurde das Konzept 2015/2016 in weiteren Bereichen und Branchen aufgegriffen und weiterentwickelt. Besonders in Zusammenhang mit I4.0 und *Smart Manufacturing* wird die Rolle des DT in aktuellen Definitionen in einem wesentlich allgemeineren Zusammenhang gesehen:

„A Digital Twin is the digital representation of a unique asset (product, machine, service, product service system or other intangible asset), that compromises its properties, condition and behavior by means of models, information and data.“ [39]

Ein DT ist demnach nicht zwangsläufig an ein physisches/reales Objekt (Asset) gebunden, sondern kann ebenso ein digitales Abbild eines immateriellen Objektes sein. Außerdem kann ein DT auch als Abbild eines Prozesses (Herstellungs-, Energieumwandlungsprozess etc.) implementiert werden.

Aufgrund dieser Vielseitigkeit des DT-Begriffs herrscht nach wie vor ein unvollständiges Verständnis dafür, was einen DT eigentlich charakterisiert und was die Begrifflichkeiten, die in diesem Zusammenhang verwendet werden, bedeuten. Deshalb ist es sinnvoll, den DT in Unterkategorien anhand seiner Ausprägung zu unterteilen. Nach Kritzinger et al. [38] kann der DT in folgende Unterkategorien unterteilt werden:

- Digitales Modell oder Digital Master:

Unter einem digitalen Modell wird die digitale Repräsentation eines existierenden oder sich in der Planung befindlichen physischen Objektes verstanden, das jedoch noch keinen automatischen Austausch von Daten zwischen physischem und digitalem Objekt ermöglicht. Entscheidendes Merkmal des digitalen Modells ist, dass eine Änderung des physischen Objektes keine automatische Änderung des digitalen Objektes bewirkt. (vgl. Abb. 13(a))

- Digitaler Schatten:

Im Vergleich zum digitalen Modell besitzt der digitale Schatten zwar eine automatisierte Verbindung zwischen physischem und digitalem Objekt, jedoch werden Daten nur vom realen zum virtuellen Objekt übertragen und nicht umgekehrt. Im digitalen Schatten werden beispielsweise Betriebs- und Zustandsdaten, Prozessdaten etc. abgelegt. (vgl. Abb. 13(b))

- Digitaler Zwilling:

Findet ein bidirektionaler Datenaustausch zwischen physischem Objekt und digitalem Objekt statt, so kann von einem digitalen Zwilling gesprochen werden. Änderungen des physischen Objektes führen auf direktem und automatisiertem Weg zu einer entsprechenden Veränderung des digitalen Objektes. (vgl. Abb. 13(c))

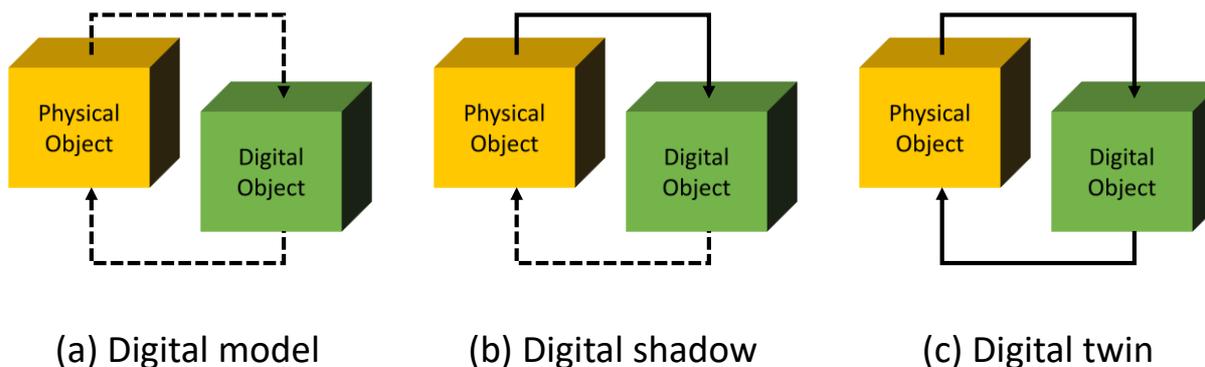


Abbildung 13: Unterkategorien des DT nach Kritzinger et al. [38], (a) Digitales Modell, (b) Digitaler Schatten, (c) Digitaler Zwilling

Ein digitaler Zwilling, wie er auch in diesem Projekt verstanden wird, entsteht also erst durch eine intelligente Verknüpfung eines oder mehrerer digitaler Mastermodelle oder digitaler Modelle (universelle, individuell anpassbare Simulationsmodelle) eines physischen Systems und dessen digitalen Schattens, der jegliche Form von operativen und objektbezogenen Daten enthält. [39, 40]

Computergestützte (oder IT-gestützte) Modellsimulation spielt dabei eine unverzichtbare Rolle. In den letzten Jahrzehnten hat sich die Modellsimulation ausgehend von einem Spezialtool, welches nur einer Handvoll Experten zur Verfügung stand, hin zu einem Standardtool entwickelt, das heutzutage Ingenieuren täglich bei der Beantwortung spezifischer design- und ingenieurwissenschaftlicher Fragestellungen unterstützt. Die meisten Simulationstools werden jedoch nach wie vor hauptsächlich in den Forschungs- und Entwicklungsabteilungen (R&D) im Rahmen von Produkt- und Systementwicklungstätigkeiten (Model-based System Engineering (MBSE)) verwendet. Die Weiterentwicklung im Bereich der Modellsimulation, nicht zuletzt ausgelöst durch das DT-Konzept, zeigt zukünftig folgenden Trend: Ziel ist die Integration von Modellsimulationen als Kernfunktion innerhalb eines Systems, um eine lückenlose Unterstützung entlang des gesamten Produktlebenszyklus durch das digitale Simulationsmodell gewährleisten zu können. [40, 41]

Nur durch Entwicklung eines höchst präzisen (*high fidelity*), dynamischen und echtzeitfähigen Modells kann ein DT derart umfangreich umgesetzt werden, wie es in seinen Beschreibungen dargestellt wird. Dank der enormen Entwicklung in den letzten Jahren im Bereich digitaler Technologien wie beispielsweise IoT, CPS, Big Data etc. können solche Modelle mittlerweile mit vertretbaren Kosten realisiert werden. [41]

Da der DT als Verbindung zwischen realer und digitaler Welt entlang des gesamten Lebenszyklus eines Assets betrachtet werden sollte, sich jedoch in jeder Phase unterschiedliche Anforderungen und Ausprägungen des DT ergeben, ist eine Unterteilung in zwei Phasen, in denen der DT existiert, zweckmäßig. Wie bereits im RAMI4.0, das in Abschnitt 1.2.2 vorgestellt wurde, kann der gesamte Produktlebenszyklus und somit auch jener des DT-Lebenszyklus in folgende Phasen unterteilt werden: [33]

- Digital Twin Prototyp (DTP):

In diesem Stadium beschreibt der DTP den Prototypen des abzubildenden und sich in der Entwicklung befindlichen Assets. Der DT in dieser Phase besteht also lediglich aus dem DTP und keinem realen Asset. Alle relevanten Evaluierungsmethoden werden direkt am DTP getestet und es muss kein physisches Asset erzeugt werden. Der DTP enthält mindestens so viel Informationen, dass das Asset vollständig beschrieben und hergestellt werden kann (As-Designed-Phase, vgl. Eigner et al. [42]). Beispiele für solche Informationen sind Anforderungen, vollständige 3D-Modelle, Stücklisten (inklusive Materialspezifikationen), Prozessstrukturlisten etc.

- Digital Twin Instance (DTI):

In diesem Stadium beschreibt die DTI ein spezifisches physisches Asset, mit dem ein individueller DT verbunden bleibt, und zwar über den gesamten

Einsatzzeitraum des physischen Assets. Der DT enthält in dieser Phase das physische Asset sowie die DTI. Die Informationen, die im DTI enthalten sind, hängen wiederum stark vom Einsatzzweck des physischen Assets bzw. dessen DT ab. Beispiele für solche Informationen sind 3D-Modelle, die geometrische Dimensionen und Toleranzen enthalten sowie alle Prozessinformationen bezüglich des Herstellungsprozesses des Assets inklusive aller Mess- und Testdaten mit umfangreichen Stücklisten, die sowohl alle ehemaligen als auch alle aktuellen Bestandteile des Assets listen (As-Build, vgl. Eigner et al. [39]). Des Weiteren werden im DTI alle relevanten Instandhaltungsinformationen bezüglich ausgetauschter oder wieder instandgesetzter Komponenten hinterlegt, die im Rahmen einer Instandhaltungstätigkeit bearbeitet wurden (As-Maintained, vgl. Eigner et al. [42]).

Mit dem so definierten DT kann im Verlauf des Lebenszyklus eines Systems, Produktes, Prozesses oder sonstigen industriellen Assets unter anderem folgender Mehrwert erzielt werden: [37]

Darstellung von Assets im virtuellen Raum:

Der DT ermöglicht durch die Echtzeit-Synchronisierung eine hochauflösende (hochgenaue) dreidimensionale Darstellung des physischen Assets in der digitalen Welt. Dadurch können Anwender auf einfache Art und Weise bei Überwachung des Assets unterstützt werden. Der entscheidende Vorteil einer virtuellen Repräsentanz eines physischen Assets liegt in der Standortunabhängigkeit. Im Vergleich zur physischen Einheit kann der DT per Remote-Access von überall zugänglich gemacht werden.

- Optimierung der Design- und Entwicklungsphase:
Einerseits kann der DT Unternehmen dabei unterstützen, die Wettbewerbsfähigkeit in einem schnelllebigen Wettbewerbsumfeld mit einer Vielzahl an Produktentwicklungen in kurzer Zeit durch eine deutliche Reduktion der Entwicklungszeiten zu ermöglichen. Andererseits können durch einen DT als hochauflösendes digitales Abbild bereits Benutzererfahrungen im virtuellen Raum gesammelt werden ohne, dass ein physischer Prototyp erzeugt wurde. Diese Nutzererfahrungen können noch in der Entwicklungsphase eingearbeitet werden.
- Optimaler Betrieb des Assets:
Durch die Verbindung zwischen physischem Asset und digitalem Abbild können Betriebszustände jederzeit analysiert und Anpassungen in Echtzeit vorab simuliert werden, um letztlich das Erreichen eines optimalen Betriebszustandes sicherzustellen. Dadurch können die Herausforderungen einer flexiblen

Betriebsweise überwacht werden, ohne dass sicherheitskritische Zustände erreicht werden.

- Reduktion des Energieverbrauchs:
Durch die Echtzeit-Analyse der Betriebszustände kann jegliche Form der Abweichung vom optimalen Betriebszustand sofort erkannt werden und ein erhöhter Energieverbrauch vermieden werden.
- Reduktion der Instandhaltungskosten:
Probleme bei der kontinuierlichen Aufrechterhaltung der Funktionsweise des Assets können frühzeitig erkannt oder prädiziert werden. Instandhaltungskosten können somit durch einen optimal gewählten Instandhaltungszeitpunkt reduziert werden. Außerdem können Instandhaltungsarbeiten in der virtuellen Umgebung vorab getestet und optimiert werden, was zu einer Reduktion der Servicezeiten führt.

Die angeführte Aufzählung soll lediglich beispielhaft einige Potenziale des DT aufzeigen und erhebt keinesfalls Anspruch auf Vollständigkeit. Ausgewählte Punkte der angeführten Aufzählung werden im letzten Abschnitt dieses Berichts am Beispiel eines Dampferzeugers noch genauer diskutiert. Dabei wird der Fokus hier sehr stark auf eine Optimierung der Betriebsphase im Lebenszyklus eines Dampferzeugers unter Zuhilfenahme des DT-Konzeptes gelegt. Eine entsprechende Modellierung des DT-Konzeptes wird im nächsten Kapitel beschrieben.

2.2 Modellierung des Digitalen Zwillings

Um den DT von der theoretischen Beschreibung durch Definitionen in eine praxistauglichere Form zu bringen, wurden in der Literatur bereits unterschiedliche Modellierungskonzepte eines DT-Konzepts erarbeitet. Eine Modellierung soll dabei helfen, die komplexen Zusammenhänge zwischen DT und dem realen Asset besser darstellen zu können, und sorgt für eine entsprechende Konvergenz zwischen realer und virtueller Welt. Der DT muss in eine Struktur eingebunden werden, die ein Zusammenspiel des physischen Assets 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 Assets 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 zum Modell hinzugefügt und innerhalb des Modells erzeugt, verarbeitet oder weitergeleitet werden.
- Darstellung eines direkten **Nutzens** aus dem Zusammenspiel von physischem Objekt, seinem virtuellen Spiegelbild und allen Daten.

Ziel ist es, ein klar definiertes, möglichst allgemein gültiges und gut organisiertes Rahmenwerk (*Framework*) zu schaffen, das bei der Konstruktion, der raschen Umsetzung und der Verwendung eines DT hilft.

Zur Abgrenzung der bisherigen Vorstellung des DT als Spiegelbild eines physischen Assets wird der DT im weiteren Verlauf dieses Berichts als Bestandteil eines Modells betrachtet, das als DT-Modell, DT-Konzept oder DT-Framework (wobei die drei Begriffe synonym zueinander verstanden werden) bezeichnet wird.

Nachfolgend werden die wichtigsten bereits existierenden Modelle aus der Literatur hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für ein entsprechendes DT-Konzept, das die wesentlichen, zuvor definierten Merkmale erfüllt, untersucht. In den letzten Jahren wurden diverse wissenschaftliche Publikationen veröffentlicht, die sich mit solch einem Konzept zur Fusionierung der realen und virtuellen Welt (DT-Konzept) beschäftigen. Die Modellvorstellungen, die diesen Konzepten zu Grunde liegen, wurden dabei meist in Hinblick auf einen individuellen Einsatzzweck formuliert.

2.2.1 3-dimensionales DT-Modell

Abbildung 14 zeigt nochmals das DT-Konzept in Anlehnung an das von Grieves und Vickers [33] vorgestellte PLM-Konzept von 2003.

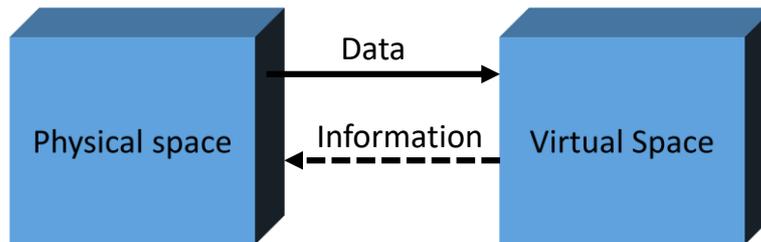


Abbildung 14: 3-dimensionales DT-Modell nach Grieves (in Anlehnung an [43])

Das dreidimensionale DT-Modell (3D-DTM) nach Abbildung 14 unterteilt sich in folgende drei Dimensionen: [44]

1. Das physische Objekt in der realen Welt:

Die physische Einheit existiert im Wesentlichen zur Erfüllung einer konkreten, vordefinierten Funktion und besitzt die Fähigkeit, einen Output zu liefern.

2. Das digitale Objekt in der virtuellen Welt (digitaler Zwilling):

Die virtuelle Einheit besteht aus einer Fülle an Modellen, die die physische Einheit aus verschiedenen spezifischen Perspektiven abbilden können. Neben einem geometrischen Modell sind das vor allem physikalische Modelle und Verhaltensmodelle.

3. Eine Verbindung durch Daten und Informationen:

Diese Verbindungen verknüpfen die Dimensionen 1 und 2 miteinander. Einerseits werden Echtzeitdaten, die in der physischen Einheit erhoben werden, an die virtuelle Einheit weitergeleitet. Mit diesen Daten kann die virtuelle Einheit aktualisiert und gegebenenfalls kalibriert werden. Andererseits werden wertvolle Informationen aus den Simulationsmodellen an die physische Einheit übermittelt, um diese in einem optimalen Betriebszustand zu halten. In einer geschlossenen Schleife werden so immer wieder Daten und Informationen zwischen realer und virtueller Welt ausgetauscht.

Diese drei Dimensionen entsprechen den grundlegenden Bestandteilen eines DT-Modells und zeigen die grundsätzliche Funktionsweise des Modells. Allerdings lässt sich mit diesen Dimensionen nicht darstellen, inwiefern sich aus diesem Konzept neuartige Dienstleistungen extrahieren lassen. Außerdem werden Daten nur als Verbindungsglied zwischen der realen Welt und der virtuellen Welt dargestellt. Wie

diese Daten verarbeitet werden und inwiefern sich daraus Informationen ableiten lassen, wird jedoch nicht abgebildet.

2.2.2 Building Information Modelling (BIM)

BIM entstand aus der grundlegenden Idee heraus, ein Informationsmodell für ein Bauwerk zu schaffen, das eine durchgängige Nutzung von digitalen Bauwerksmodellen über alle Bereiche des Baugewerbes hinweg ermöglicht. Eine allgemeine Definition des BIM kann nach Egger et al. [45] folgendermaßen getroffen werden:

„Building Information Modeling (BIM) ist eine Planungsmethode im Bauwesen, die die Erzeugung und die Verwaltung von digitalen virtuellen Darstellungen der physikalischen und funktionalen Eigenschaften eines Bauwerks beinhaltet. Die Bauwerksmodelle stellen dabei eine Informationsdatenbank rund um das Bauwerk dar, um eine verlässliche Quelle für Entscheidungen während des gesamten Lebenszyklus zu bieten, von der ersten Vorplanung bis zum Rückbau.“ [45]

BIM verfolgt somit die gleiche Idee wie das DT-Konzept und versucht durch Anwendung digitaler Technologien im Baugewerbe eine Konvergenz zwischen realer Welt und dem virtuellen Raum zu schaffen. Ziel ist die Implementierung eines intelligenten digitalen Gebäudemodells, das von allen Beteiligten eingesehen und gemeinschaftlich bearbeitet werden kann. Änderungen am Gebäudemodell werden sofort neu berechnet und analysiert und stehen allen Beteiligten wie beispielsweise Architekten, Fachplanern, Bauherren und Facility Managern umgehend als Datenpaket oder Zeichnung zur Verfügung. Alle Beteiligten können damit eine Änderung der wesentlichen Parameter für ihren Teilbereich umgehend evaluieren.

Da bei einer Bauunternehmung die Prozess- und Wertschöpfungskette auf eine Vielzahl unterschiedlicher Unternehmen verteilt ist, die sich in der Regel nur für ein einziges Bauvorhaben zusammenschließen, treten hierbei besonders erschwerte Randbedingungen auf. Die BIM-Methode setzt genau dort an und ermöglicht durch einen hohen Grad an Standardisierung und offener Schnittstellen den unternehmensübergreifenden Austausch von Informationen in digitalisierter Form. Der bislang enorme Informationsverlust, der durch die Übergabe von analogen Zeichnungen im Rahmen einer Gebäudeerrichtung gang und gäbe war, kann durch die BIM-Methode nahezu gestoppt werden. Erfolgt eine Koordination der Planung, die Steuerung des Bauablaufs und die Übergabe von Gebäudeinformationen an den Betreiber über das digitale Gebäudemodell, kommt es zu einer enormen Steigerung

der Produktivität und der Qualität durch den Wegfall von Neuangaben und eine konsequente Weiternutzung digitaler Informationen. [46]

Die Anwendung der BIM-Methode ist prinzipiell für den gesamten Gebäudelebenszyklus angedacht. In der Praxis zeigt sich jedoch, dass die Methode hauptsächlich in der Design- und Konstruktionsphase des Gebäudelebenszyklus genutzt wird. Obwohl aktuell in Literatur und Praxis große Bestrebungen stattfinden, die Umsetzung der BIM-Methode auf die Betriebs- und Instandhaltungsphase (Operation and Maintenance - O&M) zu erweitern, zeigen sich die Defizite der BIM-Methode aus technologischer, organisationstechnischer und informationstechnischer Sicht. Ebenfalls beziehen sich die meisten Standards, die im Rahmen von BIM entwickelt wurden, auf die Gebäudeplanung und -errichtung. [47]

Die BIM-Methode kann somit als Vorbild in Sachen Datenaustausch und offener Schnittstellen für ein DT-Modell, aber nicht als Rahmenwerk oder Referenzarchitektur für ein DT-Konzept eingesetzt werden. Für ein umfassendes Betriebsdatenmanagement und für die tägliche Entscheidungsfindung in komplexen O&M-Situationen während des laufenden Gebäudebetriebs ist die BIM-Methode nicht ausreichend weit entwickelt.

2.2.3 RAMI4.0 und SGAM

Die beiden Referenzarchitekturen RAMI4.0 und SGAM werden ebenfalls hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für die Modellierung eines DT-Konzepts untersucht. Im Nachfolgenden werden einige Punkte angeführt, die zeigen sollen, dass sowohl das RAMI4.0 als auch das SGAM eher im Sinne eines „Verortungsmodells“ genutzt werden können. Wie bereits in Abschnitt 1.2.2 gezeigt, dienen das RAMI4.0 und das SGAM dazu, ein hohes Maß an Standards für jegliche Form von neuen Anwendungen im Zuge von I4.0 und E4.0 einzuhalten. Deuter und Pethig [45] zeigen in ihrer Arbeit, wie beispielsweise DTs im RAMI4.0 verortet werden können (siehe. Abb. 15). Der DT „schwebt“ demzufolge im RAMI4.0-Raum und existiert einerseits entlang der gesamten „Life Cycle & Value Stream“-Achse, verbindet andererseits die unterschiedlichen Schichten der „Layers“-Achse miteinander und wirkt ebenfalls in allen „Hierarchy Levels“ (vgl. Abb. 15).

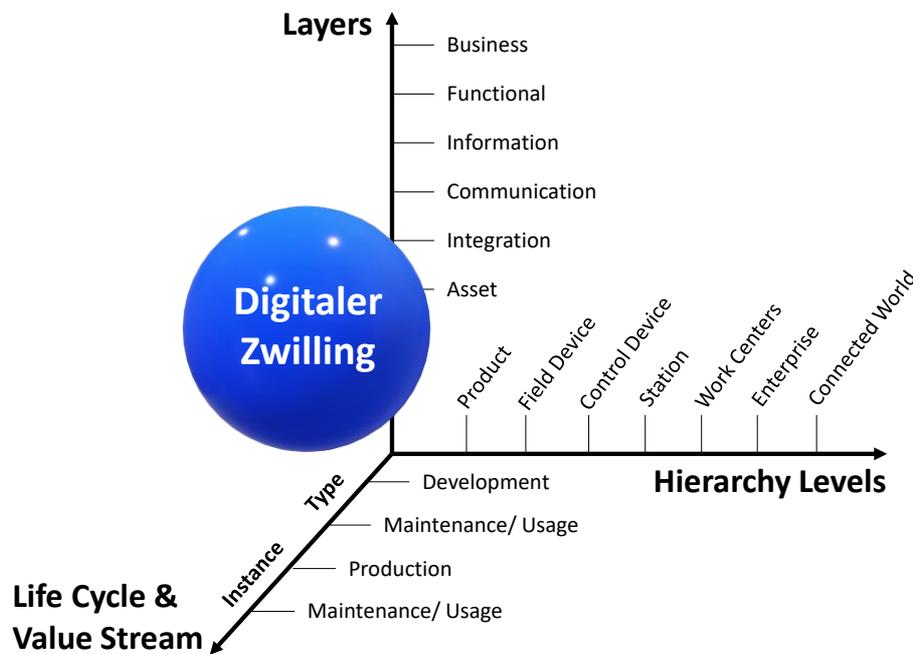


Abbildung 15: RAMI4.0 und der Digitale Zwilling (in Anlehnung an [48])

Ähnlich wie zuvor beim BIM ist auch in diesem Fall der Nutzen für eine Anwendung des DT-Konzeptes in Form eines Anwendungskonzeptes nicht gegeben. Für den Einsatz des RAMI4.0 in der operativen Phase eines beliebigen Assets fehlen in diesem Rahmenwerk ebenfalls entsprechende Werkzeuge, die den Umgang mit Daten und den daraus resultierenden Dienstleistungen ermöglichen. Eine ähnliche Darstellung wie in Abbildung 15 würde sich auch für das SGAM ergeben, weshalb auch dieses Referenzmodell für das DT-Konzept ausscheidet. Beide Konzepte dienen, wie bereits erwähnt, vor allem dazu, einen Überblick über die komplexen Zusammenhänge, die im Rahmen von I4.0- und E4.0-Anwendungen entstehen, zu behalten und sorgen für die Einhaltung von Standards bei der Umsetzung solcher Anwendungen.

2.2.4 Verwaltungsschale und Industrie 4.0 Komponente

Im Zuge von I4.0 wird anstatt des DTs das Modell der sogenannten *Verwaltungsschale* (Asset Administration Shell (AAS)) eingeführt [49]. Diese Verwaltungsschale sorgt wie

der DT für eine Verbindung der realen mit der virtuellen Welt. Die Verwaltungsschale wird im Rahmen der Plattform Industrie 4.0 folgendermaßen definiert:²⁷

Verwaltungsschale: „Virtuelle digitale und aktive Repräsentanz einer *I4.0-Komponente* im *I4.0-System*“

Industrie 4.0-Komponente: „weltweit eindeutig identifizierbarer kommunikationsfähiger Teilnehmer bestehend aus Verwaltungsschale und Asset mit digitaler Verbindung (entspricht CP24, CP34 oder CP44) eines *I4.0-Systems*, der dort Dienste mit definierten QoS (Quality of Service) Eigenschaften anbietet“

Industrie 4.0-System: „System aus *I4.0-Komponenten* und *Komponenten* geringerer *CP-Klassifizierung*, das einem bestimmten Zweck dient, definierte Eigenschaften aufweist und standardisierte Dienste und Zustände unterstützt“

CP-Klassifikation: „Klassifikation der Kommunikations- und Identifikationsfähigkeit“

Innerhalb des *I4.0-Netzwerks* einer Organisationseinheit ist die *AAS* also ein logischer Satz aller verfügbarer Informationen (virtuelle digitale Repräsentanz) und die administrative Schnittstelle für den Zugang zu einem spezifischen Asset (*I4.0-Komponente*). Die *AAS* ist immer an ein spezifisches Asset im *I4.0-System* gekoppelt, macht Assets innerhalb dieses *I4.0-Systems* auffindbar und organisiert den Zugang und die Manipulation der darin enthaltenen Information (*CP-Klassifikation*). Die *AAS* kann in einem 3-schichtigen *CPS* eingeordnet werden. Diese Darstellung entspricht im Grunde einer Erweiterung des *3D-DTMs* aus Abschnitt 2.2.1. Die *ASS*, bestehend aus *Administration* und *Data*, bildet das virtuelle Objekt in der digitalen Welt mit der Erweiterung um entsprechende *Services* ab. Wird das *Asset* als weitere Dimension hinzugefügt, bilden *Administration*, *Data* und *Asset* ein 3-schichtiges oder 3-dimensionales Modell, in dem die *AAS* mit dem physischen Objekt in der realen Welt interagiert. Dieses Modell wird auch als *I4.0-Komponente* bezeichnet. [49]

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das Konzept der *I4.0-Komponente* der Forderung nachkommt, einen direkten Nutzen aus der Verknüpfung zwischen *Data* und *Asset* durch das *Administration Interface* zu generieren. Ebenfalls werden Daten als eigener Bestandteil in das Modell integriert. Es wird jedoch nicht dargestellt, wie eine Verbindung zwischen *Asset*, *Data* und *Administration* ausgestaltet werden muss,

²⁷ Plattform Industrie 4.0, Glossar, <https://www.plattform-i40.de/PI40/Navigation/DE/Industrie-40/Glossar/glossar.html>

wie dies beispielsweise durch die 3. Dimension (*Verbindungen*) im 3D-DTM aus Abschnitt 2.2.1 gezeigt wird.

2.2.5 Erweiterung des 3-dimensionalen DT-Modells

Um die Vorteile des 3D-DTMs (Darstellung der *Verbindungen* zwischen dem physischen Objekt und dem virtuellen Spiegelbild) und die Vorteile der I4.0-Komponente (Darstellung des Nutzens durch das *Administration Interface*) miteinander zu verknüpfen, scheint es grundsätzlich sinnvoll zu sein, eine Erweiterung des 3D-DTM anzustreben. Ein weiteres Merkmal, welches bei der Umsetzung des DT-Modells noch berücksichtigt werden muss, sind Daten. Die rasante Entwicklung digitaler Technologien und dabei vor allem die allgegenwärtige Verfügbarkeit von Daten und Diensten sind zusätzliche Gründe für eine Erweiterung des 3D-DTM von Grieves [40]. Weitere Anforderungen für eine Modellerweiterung des 3D-DTM, die sich seit der Veröffentlichung 2014 ergeben haben, können wie folgt zusammengefasst werden: [43, 44]

- *Neue Anforderungen aus Sicht der Anwendbarkeit:*
Das 3D-DT-Modell stammt ursprünglich aus der Raumfahrtindustrie und wurde speziell dafür entwickelt, militärische Produkte der Luft- und Raumfahrttechnik zu digitalisieren. Diese Industrie ist jedoch im Vergleich zu anderen Industrien eine besonders in sich geschlossene Industrie mit sehr eingeschränktem Zugang zum Internet (kein Bedarf an offenen Schnittstellen) und andererseits umfangreichen finanziellen Mitteln bei der Entwicklung neuer Assets, wie dies in vielen anderen Industrien nicht der Fall ist. In den vergangenen Jahren wurde die Umsetzung eines DT jedoch in einem breiteren Anwendungsgebiet angedacht, beispielsweise in der Automobil- und Fertigungsindustrie, im land- und forstwirtschaftlichen Bereich oder im Gesundheitswesen. Das Konzept findet somit immer mehr Anwendungsfelder für Produkten, die im alltäglichen Leben verwendet werden, und muss deshalb einfach und benutzerorientiert einsetzbar sein. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, muss ein allgemeineres Modell zur Verfügung gestellt werden.
- *Neue Anforderungen durch die Entwicklung neuer digitaler Technologien:*
Das Internet der Dinge (IoT) ermöglicht eine intelligente Vernetzung aller Assets im physischen Raum und damit eine intelligente Betriebsweise. Daten und Informationen aus der realen Welt können aufgegriffen und mit Hilfe des IoT in den virtuellen Raum übertragen werden (vgl. CPS). In der Cloud können sie gespeichert und weiterverarbeitet werden und mit Methoden wie künstlicher

Intelligenz oder Big Data Analytics können wertvolle Informationen aus den Daten generiert werden. Diese Informationen können mit Hilfe einzelner Dienstleistungen oder Services aufbereitet und in einer geschlossenen Schleife bedarfsgerecht dem Anwender im physischen Raum zur Verfügung gestellt werden. Durch diese geschlossene Schleife zwischen physischem und virtuellem Raum kann eine deutliche Leistungssteigerung erzielt werden. Neue digitale Technologien müssen nahtlos in das DT-Konzept integrierbar sein, um ihre Vorteile vollumfänglich nutzen zu können.

- Neue Anforderungen aus Sicht des zu modellierenden Objektes:

Daten und Dienstleistungen in Zusammenhang mit dem DT-Konzept spielen eine zentrale Rolle aus Sicht des zu modellierenden Objektes. Eine Fülle an Informationen, die für die Modellierung, Simulation, Optimierung und Vorhersage des Verhaltens des Objektes unabdingbar sind, müssen aufgegriffen, gespeichert und verarbeitet werden. Durch neue Technologien sind diese Daten und Informationen zudem in Umfang, Inhalt und in ihrer Auflösung sowohl im physischen als auch im virtuellen Raum gewachsen. Das DT-Konzept muss eine widerspruchsfreie Einbindung aller Echtzeitdaten und historischer Betriebsdaten ermöglichen und eine Fusion unterschiedlicher Daten wie operativer- und Umgebungsdaten aus dem physischen Raum sowie Simulationsdaten und prädiktive Daten aus dem virtuellen Raum ermöglichen. Dem Anwender müssen die entsprechenden Dienstleistungen, die mit Hilfe dieser Daten erzeugt werden können, benutzerorientiert dargestellt und eine einfache Interaktion mit dem DT-Konzept ermöglicht werden. Die Anwender des DT-Konzeptes stammen aus unterschiedlichen industriellen Bereichen und bringen teilweise nicht das Domänenwissen mit, das für den korrekten Umgang mit dem DT notwendig wäre. Deshalb sollte das DT-Konzept die Funktionen des DT in einzelnen standardisierten Dienstleistungen oder Services zusammenfassen und diese dann dem Anwender über benutzerfreundliche Schnittstellen auf Anfrage zur Verfügung stellen können. Daher muss das DT-Konzept aus Sicht des zu modellierenden Objektes bezüglich Daten und Services weiterentwickelt werden.

- Neue Anforderungen aus Sicht der Modellierungsmethoden:

Damit ein vollständiges digitales Spiegelbild des physischen Gegenstücks erstellt werden kann, müssen Modellierungsmethoden angewandt werden, die unterschiedliche Variablen, Maßstäbe und Fähigkeiten synchron bearbeiten können. Nur so kann eine physische Einheit akkurat durch das virtuelle Gegenstück abgebildet werden. Obwohl es bereits umfangreiche Möglichkeiten im Bereich der geometrischen und physikalischen Modellierung gibt, muss in den Bereichen Verhaltensmodellierung und Modellierung basierend auf Regeln

weitere Forschungsarbeit geleistet werden. Letztlich müssen diese unterschiedlichen Modellierungsmethoden zusammengeführt werden können, um die physische Einheit aus diversen Perspektiven betrachten zu können. Nur wenn diese Anforderungen erfüllt werden können, entsteht ein komplettes, hochauflösendes Abbild des physischen Gegenstandes im virtuellen Raum.

Diese neuen Anforderungen können berücksichtigt werden, wenn das ursprüngliche 3D-DTM um zwei zusätzliche Dimensionen erweitert wird. Einerseits müssen Daten in den Mittelpunkt gestellt werden, weil sie als sogenannte Wissensbasis (*Knowledge-Base*) das zentrale Element für das DT-Konzept darstellen. Durch die Fusion von Daten aus der physischen Einheit und der virtuellen Einheit können Informationen umfangreicher und genauer erfasst werden. Außerdem müssen die extrahierten Dienstleistungen oder Services, die sich aus der Funktion des DT ergeben, in einer eigenen Dimension, dem Dienstleistungs- oder Servicemodell, eingebettet werden. Damit kann der Umgang mit und der Nutzen aus solch einem DT-Konzept weiter erleichtert und die Benutzerfreundlichkeit verbessert werden. Eine Auslagerung der Funktionen des DT in ein eigenes Service- oder Dienstleistungsmodell ermöglicht es dem Nutzer, die einzelnen Services oder Dienstleistungen als On-Demand-Services (z.B. Pay-per-Service) zur Verfügung zu stellen. Die Dimension des Servicemodells kann somit auch die bereits beschriebene Änderung traditioneller Geschäftsmodelle von Industrieunternehmen im Sinne eines digitalen Wandels (produktorientierte Logik hin zur service- oder dienstleistungsorientierten Logik), wie in Abschnitt TEIL I1.1 erläutert, berücksichtigen.

Im Folgenden wird der Inhalt und das Zusammenspiel der einzelnen Dimensionen eines erweiterten 5-dimensionalen DT-Modells (5D-DTM) genauer untersucht, bevor in TEIL III des vorliegenden Berichts dieses Modell auf einen Dampferzeuger übertragen wird.

2.3 5-dimensionales DT-Modell

Das 5D-DTM kann anhand von bereits vorliegenden Modellen aus der Literatur beschrieben werden [1, 9, 44, 50–53]. In erster Linie wird in diesem Bericht das von Tao et al. [1][1] vorgestellte Modell als Referenzmodell verwendet. Darin wird das 5D-DTM beispielhaft für eine Windturbine beschrieben. Anhand von zwei konkreten Anwendungsfällen für dieses Modell können die Abläufe innerhalb des Modells veranschaulicht werden. Das 5D-DTM eignet sich besonders als Anwendungskonzept für die Betriebsphase komplexer Systeme und wird in weiterer Folge hinsichtlich dieses Aspekts beschrieben. Die Anwendbarkeit ist aber grundsätzlich nicht nur auf

die Betriebsphase des Assets im Lebenszyklus beschränkt. Das 5D-DTM lässt sich als Anwendungskonzept des DT über den gesamten Lebenszyklus eines Assets erweitern. Prinzipiell gilt: Je früher ein DT im Lebenszyklus eines Assets zum Einsatz kommt, desto umfangreicher kann dieser im weiteren Verlauf angewendet werden [54]. Ziel ist es, eine geschlossene Rückführungsschleife aller Erfahrungen, die während des Betriebs eines Assets gesammelt werden, zu schaffen, damit diese direkt in die Entwicklung neuer Assets oder in die Weiterentwicklung bestehender Assets einfließen können und somit für eine stetige Weiterentwicklung der Assets sorgen. Umgekehrt müssen die Modelle, die bei der Entwicklung verwendet werden, nahtlos in die Betriebsphase übertragen werden können, um einen zusätzlichen Schritt in der Modellentwicklung zu vermeiden und eine schnelle Umsetzung des DT-Konzepts zu gewährleisten.

Abbildung 16 zeigt das 5D-DTM am Beispiel einer Windturbine. Dieses Modell wurde von Tao et al. [1] in ihrer Publikation mit dem Titel „Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment“ vorgestellt.

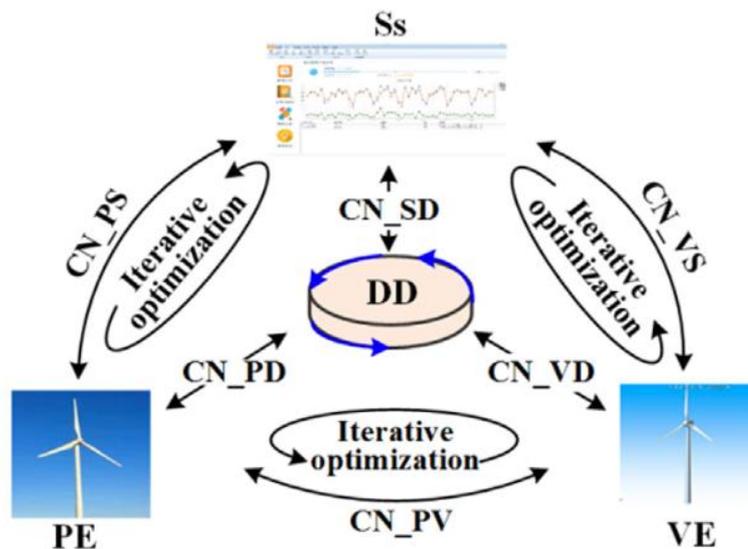


Abbildung 16: 5-dimensionales DT-Modell nach Tao et al. Quelle: [1]²⁸

In Abbildung 16 bezeichnet PE die physikalische Einheit (*physical entity*), VE die virtuelle Einheit (*virtual entity*), Ss die Dimension der Services für PE und VE (*service*), DD das DT-Datenmodell (*DT data*) und CN die Verbindungen (*connection*) zwischen PE, VE, Ss und DD (siehe Gleichung II.1).

²⁸ Reprinted from CIRP Annals - Manufacturing Technology, 67/1, Fei Tao, Meng Zhang, Yushan Liu, A.Y.C. Nee, Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment, 169-172, © (2018), with permission from Elsevier

$$M_{DT} = (PE, VE, Ss, DD, CN) \quad (II.1)$$

Für ein besseres Verständnis der 5 Dimensionen werden diese nun einzeln anhand der Windturbine aus Abbildung 16 beschrieben: [1]

Physische Einheit PE (Windturbine):

Generell besteht die physische Einheit oder das physische Asset aus allen funktionalen Subsystemen und jeglicher Sensorik, die im Gesamtsystem verbaut ist. Diese Subsysteme dienen in funktionaler Zusammenarbeit der Ausführung einer zuvor definierten Aufgabe. Zusammenarbeit der Subsysteme bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der Ausfall oder die Fehlfunktion eines der Subsysteme zum Ausfall oder zur Fehlfunktion des Gesamtsystems führt. Die verbaute Sensorik dient der Erfassung betriebsbegleitender Daten wie beispielsweise des Betriebszustandes. Bezogen auf eine Windturbine besteht PE zum Beispiel aus den Rotorblättern, dem Generator, dem Getriebe, der Windnachführung etc. und besitzt eine entsprechende Sensorik beispielsweise zur Messung der Getriebevibration, Turbinenleistung oder der Temperatur des Getriebes (siehe Abb. 17 (a)). Alle Subsysteme der Windturbine dienen in erster Linie in ihrer Zusammenarbeit der Umwandlung mechanischer Energie (Bewegungsenergie der Rotorblätter induziert durch Windenergie) in elektrische Energie (Generatorleistung induziert durch Rotation der Getriebewelle).

Virtuelle Einheit VE der Windturbine:

Damit VE die PE als hochgenaue (*high-fidelity*) digitale Repräsentanz widerspiegeln kann, muss VE zumindest aus 4 Modellierungsebenen bestehen (vgl. Abb. 17 (b), Gl. (II.2)).

$$VE = (Gv, Pv, Bv, Rv) \quad (II.2)$$

Dazu gehören:

- Ein geometrisches Modell (Gv), das die Form und Größe sowie die Position und Beziehung der Submodelle zueinander (Baugruppenbeziehung) beschreibt. Für die Windturbine entspricht das geometrische Modell einem 3D-CAD Festkörpermodell.
- Ein physikalisches Modell (Pv), das die physikalischen Eigenschaften und Belastungen von PE widerspiegelt. Gemeinsam mit den Daten aus dem

geometrischen Modell können so physikalische Zusammenhänge, die auf die Windturbine einwirken (z.B. Deformationen des Rotorblattes, Zahnradbelastungen im Getriebe oder Temperaturbelastungen der Wälzlager), simuliert werden. Für den Fall der Windturbine kommt dafür beispielsweise die Finite-Elemente-Methode (FEM) für die Festigkeits- und Verformungsuntersuchung zum Einsatz.

- Ein Verhaltensmodell (Bv), das das Verhalten von VE unter bestimmten Einflussfaktoren oder Störfaktoren in Konvergenz mit PE widerspiegelt. Für die Windturbine beinhaltet das Verhaltensmodell beispielsweise die Leistungserzeugung durch das Windrad und den Generator, einen Drehmechanismus zur Windrichtungsnachführung (Giersystem, *yawing*) oder ein Drehzahlregelsystem (*pitching*) für eine optimale Leistungsabgabe der Turbine.
- Ein Regelmodell (Rv), das alle Regeln für mögliche Beschränkungen, Zusammenhänge oder Verluste modelliert. Mit diesem Regelmodell kann innerhalb der VE ein gewisser Grad an „Intelligenz“ erzeugt werden. Durch Anwendung der hinterlegten Regeln im Regelmodell können Entscheidungen getroffen, evaluiert und optimiert werden und zusätzlich zukünftige Zustände prädiziert werden. Ein Beispiel für eine Beschränkung im Regelmodell der Windturbine sind entsprechende Grenzwerte für die Windgeschwindigkeit, die die Belastbarkeit der Rotorblätter an einen grenzwertigen Zustand bringen würden.

Datenmodell DD der Windturbine:

Das Datenmodell (DD) beinhaltet und verwaltet Daten aus 5 unterschiedlichen Datenquellen (siehe Abb. 17(c), Gl. (II.3)).

$$DD = (Dp, Dv, Ds, Dk, Df) \quad (II.3)$$

Dazu gehören:

- Daten aus PE (Dp), wie beispielsweise Windgeschwindigkeit, Leistung der Windkraftanlage etc.
- Daten aus VE (Dv), wie beispielsweise Simulationsergebnisse für die berechnete Windgeschwindigkeit, Leistung der virtuellen Windkraftanlage, Ergebnisse von Deformationsanalysen etc.
- Fachwissen, das in Form von Daten gespeichert wird (Dk). Für eine bestimmte Windturbine können dies beispielsweise Daten von anderen Turbinen sein, die unter gleichen Bedingungen arbeiten.

- Daten aus S_s (D_s), die die entsprechende Dienstleistung oder den Service beschreiben.
- Fusionierte Daten (D_f), die durch eine Kombination der Daten aus D_p , D_v , D_f , und D_k den Datenbestand in DD erheblich bereichern. Zur Datenfusion kommen vor allem intelligente Algorithmen wie zum Beispiel *Künstliche Neuronale Netze* (KNN) oder Artificial Neural Networks (ANN) oder Kalman-Filter in Frage.

Servicemodell S_s der Windturbine:

Das Servicemodell oder Dienstleistungsmodell der Windturbine enthält entsprechende Leistungen (Service- oder Dienstleistungen) für PE und VE. Diese Leistungen können beispielsweise für die Betriebsoptimierung der PE genutzt werden oder sorgen für einen ständigen Modellabgleich zwischen PE und VE, um dauerhaft eine hochgenaue Repräsentanz der PE durch VE zu gewährleisten. Eine entsprechende Serviceabfrage enthält nach Gleichung II.4 die Bestandteile Funktion, Eingang, Ausgang, Quality of Service (QoS) und Zustand.

$$S_s = (\text{Funktion}, \text{Eingang}, \text{Ausgang}, \text{QoS}, \text{Zustand}) \quad (\text{II.4})$$

Eine entsprechende Serviceabfrage für die Betriebsdatenüberwachung der Windturbine könnte dann beispielsweise Folgendes beinhalten:

S_s _Betriebsüberwachung =

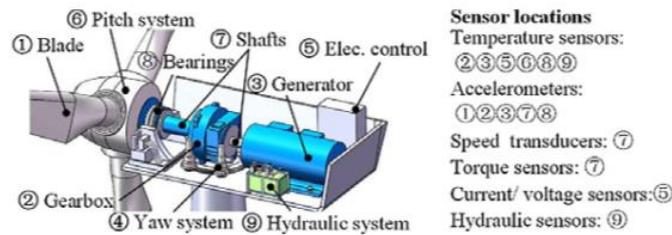
- Funktion: Überwachung_Leistung
- Eingang: Windgeschwindigkeit, Leistung_PE, Leistung_VE
- Ausgang: Zustand_Leistung
- QoS: Zeit, Kosten, Zuverlässigkeit
- Zustand: Betrieb, Stillstand, Versagen

Verbindungen CN:

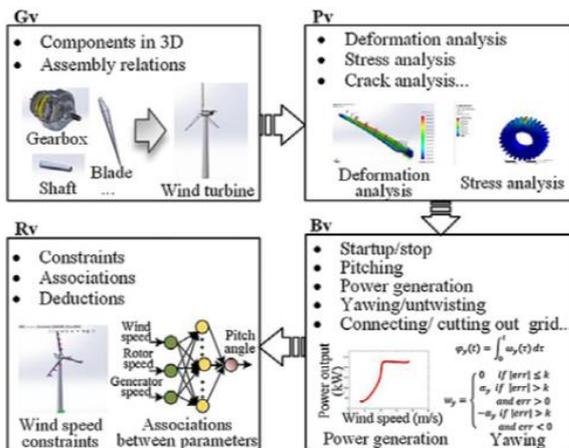
Zuletzt müssen die vier Dimensionen PE, VE, S_s , und DD untereinander verbunden werden. Es handelt sich dabei um bidirektionale Verbindungen zwischen S_s und DD (CN_SD), PE und DD (CN_PD), VE und DD (CN_VD), PE und S_s (CN_PS), VE und S_s (CN_VS) und PE und VE (CN_PV), wie in Gleichung II.5 dargestellt.

$$CN = (CN_SD, CN_PD, CN_VD, CN_PS, CN_VS, CN_PV) \tag{II.5}$$

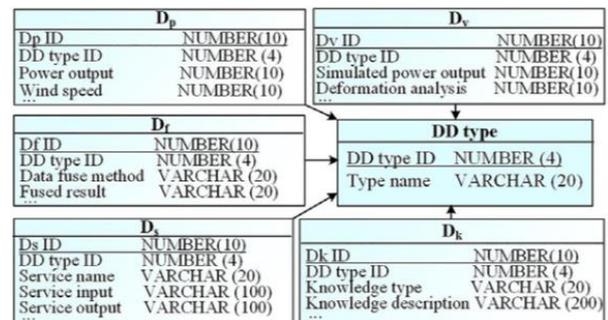
$$CN_{XX}X = (Datenquelle, Einheit, Wert, Bereich, Intervall) \tag{II.6}$$



(a)



(b)



(c)

Abbildung 17: (a) PE, (b) VE und (c) DD einer Windturbine nach Tao et al. [1]²⁹

Wird zum Beispiel eine Datenabfrage über CN aus PE bezüglich des aktuellen Gierwinkels (*yaw angle*) ausgeführt, liefert die allgemein formulierte Gleichung II.6 nach Tao et. al. [55] beispielsweise folgende Werte:

CN_PC_Gierwinkel =

- Datenquelle: PE
- Einheit: Grad (Winkel)

²⁹ Reprinted from CIRP Annals - Manufacturing Technology, 67/1, Fei Tao, Meng Zhang, Yushan Liu, A.Y.C. Nee, Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment, 169-172, © (2018), with permission from Elsevier

- Wert: z.B. 10
- Bereich: z.B. 0-100
- Intervall: 10s (Abtastrate für die Messwerterfassung)

Ein mögliches Anwendungsbeispiel für das beschriebene 5D-DTM stellt die Systemzustandsüberwachung und Systemzustandsvorhersage (*Prognostics and Health Management* PHM) dar. Anhand dieses Anwendungsbeispiels werden im Folgenden die Aufgaben und das Zusammenspiel der einzelnen Dimensionen des 5D-DTM beschrieben, damit aus bestimmten Eingabedaten die entsprechenden Ausgabedaten und -services für das PHM der Windturbine generiert werden können. Ein entsprechendes Ablaufmodell für diesen Anwendungsfall zeigt Abbildung 18.

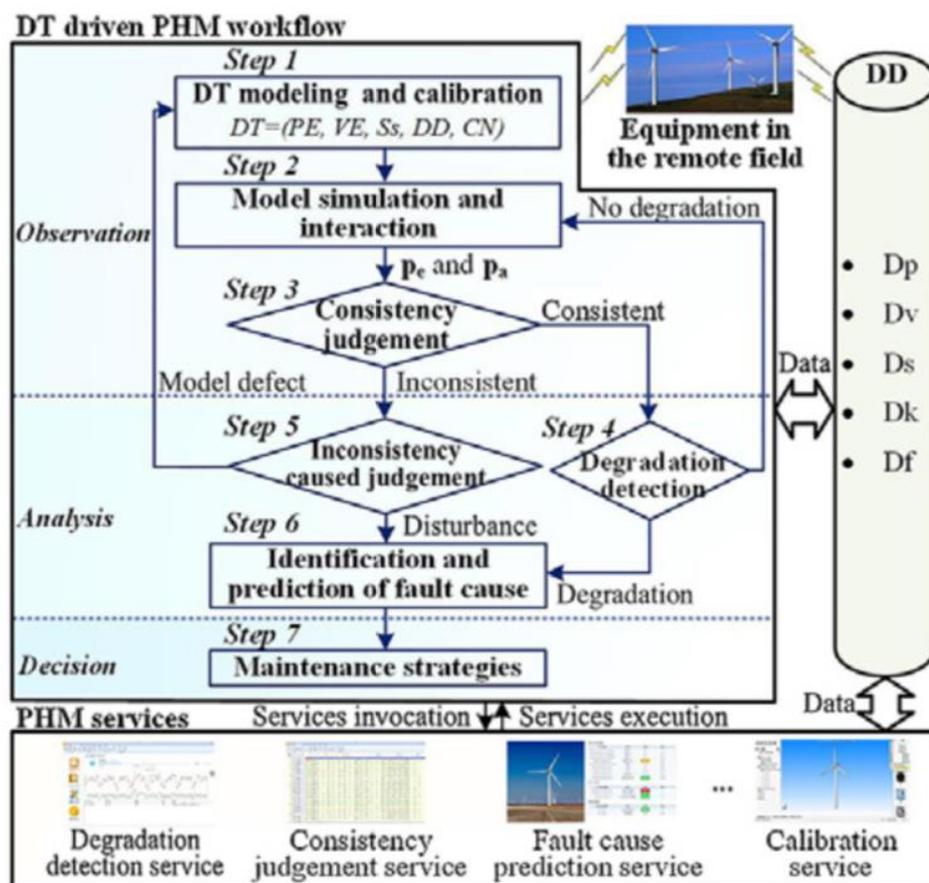


Abbildung 18: Ablaufmodell PHM einer Windturbine [53]³⁰

³⁰ Reprinted from CIRP Annals - Manufacturing Technology, 67/1, Fei Tao, Meng Zhang, Yushan Liu, A.Y.C. Nee, Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment, 169-172, © (2018), with permission from Elsevier

Grundsätzlich dient die PHM-Methode dazu, den optimalen Betriebszustand der Windturbine (PE) für den momentanen Zeitpunkt zu gewährleisten und für ein bestimmtes Zeitintervall in die Zukunft zu prognostizieren. Das grundsätzliche Vorgehen bei der PHM-Methode kann in 3 Stufen unterteilt werden ([55, 56], vgl. Abb. 18):

1. Überwachen:

Zur Überwachung der Windkraftanlage werden die Echtzeit-Betriebsdaten der PE (Dp) über CN_PD in die Datenbank DD geladen. Dort werden diese Daten entsprechend aufbereitet, damit sie sich in einem optimalen Zustand für eine Weiterverarbeitung befinden. Aus DD werden diese Daten weiter über CN_VD der virtuellen Einheit VE zur Verfügung gestellt. VE kann damit entsprechend der Zustandsdaten von PE modelliert und initialisiert (*Step 1*) und dann simuliert werden (*Step 2*). Durch dieses Vorgehen kann sichergestellt werden, dass sich beide Dimensionen (PE und VE) zu Beginn der Simulation in gleichem Systemzustand befunden haben. Zum Abschluss der Überwachungsphase werden Simulationsergebnisse (Dv) mit den Echtzeit-Daten (Dp) der Windturbine verglichen und zuvor definierten Grenzwerten (Dk) für die zulässige Abweichung gegenübergestellt (*Step 3*). Dazu wird ein entsprechender Service aus SS aufgerufen (über CN_PS und CN_VS), der die Beurteilung der Konsistenz der beiden Systeme liefert.

2. Analysieren:

Für das weitere Vorgehen kommen zwei Möglichkeiten in Frage.

- (a) Wird im letzten Schritt der Überwachungsphase keine Inkonsistenz zwischen PE und VE festgestellt, wird ein Service aus Ss über CN_SD aufgerufen, der die natürlichen Abnutzungen von PE im Normalbetrieb (geringfügiger Verschleiß, Materialalterung etc.) beurteilt (*Step 4*). Liegt für das untersuchte Zeitfenster keine wesentliche Abnutzung vor, wird erneut eine Systemüberwachung aufgerufen und die „Überwachungsschleife“ geschlossen.
- (b) Die zweite Möglichkeit tritt ein, wenn unter Schritt 3 (*Step 3*) eine Inkonsistenz zwischen PE und VE festgestellt wird. Ein weiterer Service aus Ss wird wieder über CN_SD aufgerufen und beurteilt dann die Ursachen für diese Inkonsistenz (*Step 5*). Durch den Vergleich von historischen Zeitreihendaten von PE mit VE (Df) unter denselben Betriebsbedingungen wie im vorliegenden Fall kann festgestellt werden, ob die Abweichung aus PE oder aus VE stammt.
 - i. Zeigt der Vergleich zwischen historischen und aktuellen Simulationsergebnissen aus VE eine ausreichende Übereinstimmung, liegt die Ursache für die Inkonsistenz in einem

plötzlich aufgetretenen Fehler innerhalb von PE. Zu diesem Zeitpunkt ist der Fehler modelltechnisch jedoch noch nicht in VE abgebildet und führt zu keiner Änderung der Simulationsergebnisse.

- ii. Zeigt der Vergleich historischer mit aktuellen Betriebsdaten (*Df*) von PE eine ausreichende Übereinstimmung, liegt die Ursache für den Fehler in VE und die Modelle müssen neu modelliert werden (*Step 1*).
- iii. Existieren Abweichungen für PE und VE, müssen die Modelle neu kalibriert werden (*Step 1*).

Der letzte Schritt der Analysephase der PHM-Methode (*Step 6*) dient der Fehlerbewertung. Der Fehler kann einerseits schleichend eintreten. Das bedeutet, dass die natürliche Abnutzung aus Schritt 4 (*Step 4*) im Laufe der Zeit zu einem Fehler führen kann. Um letztlich den Ausfall durch eine fortschreitende Abnutzung von Komponenten präzisieren zu können, werden entsprechende Modelle trainiert. Mit Hilfe historischer Daten, die in der Vergangenheit zu Fehlern geführt haben, können diese Modelle trainiert und das Systemverhalten prädictiert werden. Andererseits kann ein plötzliches Auftreten eines Fehlers zu einem abrupten Systemausfall führen. Durch einen Vergleich von PE und VE auf Komponentenebene kann der Fehler im System verortet und identifiziert werden.

3. Entscheiden:

In der letzten Stufe der PHM-Methode werden Instandhaltungsstrategien entsprechend der zuvor identifizierten Fehlerursachen abgeleitet. Das DT-Konzept bietet hier den großen Vorteil, dass gleich mehrere Maßnahmen entwickelt und an VE getestet werden können. So kann letztlich die beste Maßnahme ausgewählt und umgesetzt werden.

Die Anwendung der PHM-Methode zeigt, dass alle Funktionen, die zur Ausführung dieser Methode verwendet werden (z.B. Beurteilung der Konsistenz zwischen PE und VE, Beurteilung der Fehlerursache etc.) in einzelnen „abgekapselten“ Services im Ss hinterlegt sind. Diese Services können in weiterer Folge beliebig neu kombiniert werden, um andere Anwendungsfälle oder Methoden im Rahmen des DT-Konzepts abzudecken (z.B. Betriebsoptimierung). Während der Ausführung der PHM-Methode im vorliegenden Beispiel werden immer wieder Daten über eine Verbindung zu PE, VE oder Ss geleitet. Umgekehrt werden Daten von PE, VE und Ss zum Datenmodell gesendet und dort einerseits abgelegt (gespeichert) und andererseits in Form von fusionierten Daten weiter aufbereitet und mit zusätzlichen Informationen gefüllt. Für viele Anwendungsfälle (*Use-Cases*) kann ein entsprechender Mehrwert der Methode erst durch die neuen Informationen, die im Zuge der Datenfusionierung oder -

auswertung gewonnen werden, realisiert werden. Das vorgestellte 5D-DTM von Tao et al. [44] ermöglicht durch seinen 5-dimensionalen Aufbau eben genau diese Fusion von Daten und ist deshalb auch herkömmlichen Methoden zur Prädiktion von Fehlern und deren Ursachen überlegen. Traditionelle Methoden verwenden hauptsächlich Daten aus PE und können den Sachverhalt deshalb auch nicht aus der Perspektive von PE und VE beurteilen.

Die dargelegten Inhalte zum 5D-DTM werden nun auf ein anderes komplexes System übertragen. Wie im Nachfolgenden gezeigt wird, kann das 5D-DTM auch auf einen Dampferzeuger angewendet werden. Ein Dampferzeuger stellt ebenfalls ein komplexes System dar, welches unter dem Aspekt entwickelt wurde, über viele Jahre unter erschwerten Betriebsbedingungen (hohe Temperaturen und Drücke, hohe Temperatur- und Druckgradienten etc.) betrieben zu werden [33, 57]. Digitale Technologien können dabei helfen, die Verfügbarkeit eines Dampferzeugers auch unter dem Einfluss der geänderten Aspekte eines Energiesystems E4.0 oder im industriellen Kontext I4.0 hoch zu halten.

TEIL III
Untersuchungen am Beispiel
Dampferzeuger

In diesem Teil des vorliegenden Berichts wird das zuvor beschriebene DT-Konzept, angewendet für einen Dampferzeuger, präsentiert. Der Dampferzeuger kann ebenfalls, wie eine Windturbine, als komplexes System betrachtet werden. Ein komplexes System, ein komplexes Asset oder eine komplexe Anlage kann durch folgende Merkmale charakterisiert werden:

- Eine komplexe Struktur,
- viele Bestandteile,
- heterogene und multifunktionale Materialien
- und inhomogene Degeneration einzelner Komponenten.

Außerdem arbeiten solch komplexe Systeme über mehrere Jahrzehnte hinweg unter erschwerten Betriebsbedingungen und eine physische Überwachung des Systems ist nicht immer möglich. Durch eine Fehlfunktion jeglicher Art kann es zu unnötigen Systemverlusten wie einer nicht optimalen Betriebsweise oder zu Ausfällen des Systems kommen. Das kann wiederum zu finanziellen Verlusten für den Betreiber des Systems führen oder im schlimmsten Fall sicherheitskritische Folgen für den Menschen haben. Aus diesen Gründen ist es grundsätzlich sinnvoll, bestimmte Maßnahmen für den Betrieb derartiger Systeme zu setzen. Das bedeutet einerseits, dass bereits in der Design- und Entwicklungsphase ein entsprechender Sicherheitsfaktor bei der Auslegung der Komponenten berücksichtigt wird, um auch ungeplante Systemzustände, die eventuell zu einem Sicherheitsrisiko führen könnten, kurzfristig betreiben zu können. Unter Anwendung des in Teil II vorgestellten Digitalisierungskonzepts des DT besteht aber andererseits auch die Möglichkeit einer betriebsbegleitenden Systemüberwachung und sogar einer Systemvorhersage unter vorgegebenen Betriebsbedingungen. Anstatt eventuelle Risiken durch erhöhte Sicherheitsfaktoren bereits im Vorhinein abzudecken und eine Überdimensionierung zu vermeiden, erfolgt hier eine individuelle Beurteilung jedes Systemzustandes auf Basis dessen Kosten-Nutzen-Relation. Folglich müssen nicht bereits bei der Auslegung alle möglichen Systemzustände berücksichtigt werden und die dafür notwendigen Sicherheitspuffer können reduziert werden.

Die eigentliche Funktion des Dampferzeugers, nämlich die Umwandlung von flüssigem Wasser in überhitzten Wasserdampf auf einem erhöhten Druckniveau, wird durch ein komplexes Zusammenspiel aus mehreren Subsystemen realisiert. Welche Subsysteme dabei genau zum Einsatz kommen, soll in Kapitel 1 Teil III gezeigt werden. Ein Dampferzeuger ist darauf ausgelegt, über viele Jahre hinweg bei mehr oder weniger konstanter Belastung seine Funktion zu erfüllen. Er ist somit grundsätzlich dafür konzipiert, eine konstante Last im Bereich der Dampfbereitstellung abzudecken. Der bereitgestellte Dampf wird dann in weiterer Folge als Prozessdampf oder zur Bereitstellung elektrischer Energie über eine Dampfturbine und einen Generator eingesetzt. Insbesondere konventionelle thermische Kraftwerke sind darauf

ausgelegt, eine möglichst hohe Effizienz im Betrieb unter konstanter Belastung zu erreichen und sind nicht hinsichtlich einer flexiblen Betriebsweise (z.B. viele Anfahrvorgänge, schnelle Lastwechsel etc.) optimiert [58].

Im Zuge der Digitalisierung in der Industrie und der Energieversorgung ändern sich die Rahmenbedingungen aber auch für einen Dampferzeuger bzw. generell für konventionelle thermische Kraftwerke, zu dessen Bestandteilen ein Dampferzeuger gehört. In Abschnitt 1.1 Teil II wurden bereits die wesentlichen Rahmenbedingungen angeführt (vgl. Scharl et al. [29]):

1. Transparenz:

Ein nachhaltiges Energiesystem fordert, dass alle Akteure innerhalb dieses Systems einen digitalen Zugang (vor allem einen Zugang zu Daten) ermöglichen. Daraus ergibt sich eine nahtlose Dokumentation der beteiligten Prozesse und Pfade von möglichen Fehlern oder Risiken können bereits im Vorhinein genauer hinsichtlich des Gesamtsystems analysiert werden.

2. Flexibilität:

Der Ausbau der Energiebereitstellung auf Basis erneuerbarer Ressourcen führt zu einer schwankenden und diskontinuierlichen Einspeisung von Energie ins Netz. Für Kraftwerke, die diese Schwankungen ausgleichen müssen (z.B. thermische Kraftwerke mit Biomasse- oder Abfallverbrennung), ergeben sich so dynamischere Betriebsbedingungen als zuvor.

3. Energieeffizienz:

Der Klimawandel und damit ein Umdenken in der Klimapolitik führt nicht nur zum intensiveren Einsatz von erneuerbaren Energieressourcen zur Energiebereitstellung, sondern fordert auch entsprechende Fortschritte bei der Umwandlung, Verteilung und Nutzung der Energie von Produzenten über Netzbetreiber bis hin zu den Verbrauchern.

Deshalb wird nachfolgend ein Digitalisierungskonzept anhand eines Digitalen Zwillings für einen Dampferzeuger vorgestellt. Dieser *digitale Dampferzeuger* (DD) wird weiter anhand des zuvor in Abschnitt 0 Teil II vorgestellten 5D-DTM in ein Anwendungskonzept eingebunden, in dem der bereits beschriebene Nutzen durch Systemüberwachung, Systemoptimierung und Systemprädiktion erfüllt werden kann. Abbildung 19 zeigt das 5D-DTM eines Dampferzeugers. Die fünf Dimensionen des Modells sind folgende (vgl. Abb. 19):

1. *Physischer Dampferzeuger* (PD)
2. *Kommunikationsmodell* (KM)
3. *Virtueller Dampferzeuger* (VD)
4. *Datenmodell des Dampferzeugers* (DM)
5. *Servicemodell des Dampferzeugers* (SM)

Im ersten Kapitel von Teil III dieses Berichts wird zuerst die physische Einheit, also der Dampferzeuger selbst, beschrieben. Zur einfacheren Beschreibung der komplexen Gesamtstruktur des Dampferzeugers wird seine Struktur mit Hilfe eines Modularisierungsansatzes in einzelne Subsysteme unterteilt. Diese Methode stammt ursprünglich aus der Informatik und soll die Programmierung von Systemen erleichtern (objektorientierte Programmierung OOP). Der vorgestellte Ansatz wird am Beispiel eines Standard-Dampferzeugers mit einer sogenannten Rostfeuerung, auf der Biomasse oder Müll verbrannt wird, beschrieben. Diese Arten von Brennstoff für die Befuerung des Dampferzeugers zählen zu den erneuerbaren Ressourcen und können somit als zukunftsfähige Brennstoffe angesehen werden.

Im zweiten Kapitel von Teil III wird zunächst die Kommunikations-Infrastruktur des Dampferzeugers (KM) als Schnittstelle zur digitalen Welt beschrieben. Dabei werden die gängigsten Kommunikationstechniken angeführt und beschrieben und entsprechende Einsatzmöglichkeiten innerhalb eines Kraftwerks diskutiert. Danach werden die Dimensionen der virtuellen Welt beschrieben. Die Dimensionen drei bis fünf der vorherigen Aufzählung (DM, VD, SM) bilden gemeinsam den digitalen Dampferzeuger (DD). Auch für diese Dimensionen des digitalen Dampferzeugers werden entsprechende Technologien diskutiert, die eine Umsetzung des 5D-DTM des Dampferzeugers ermöglichen.

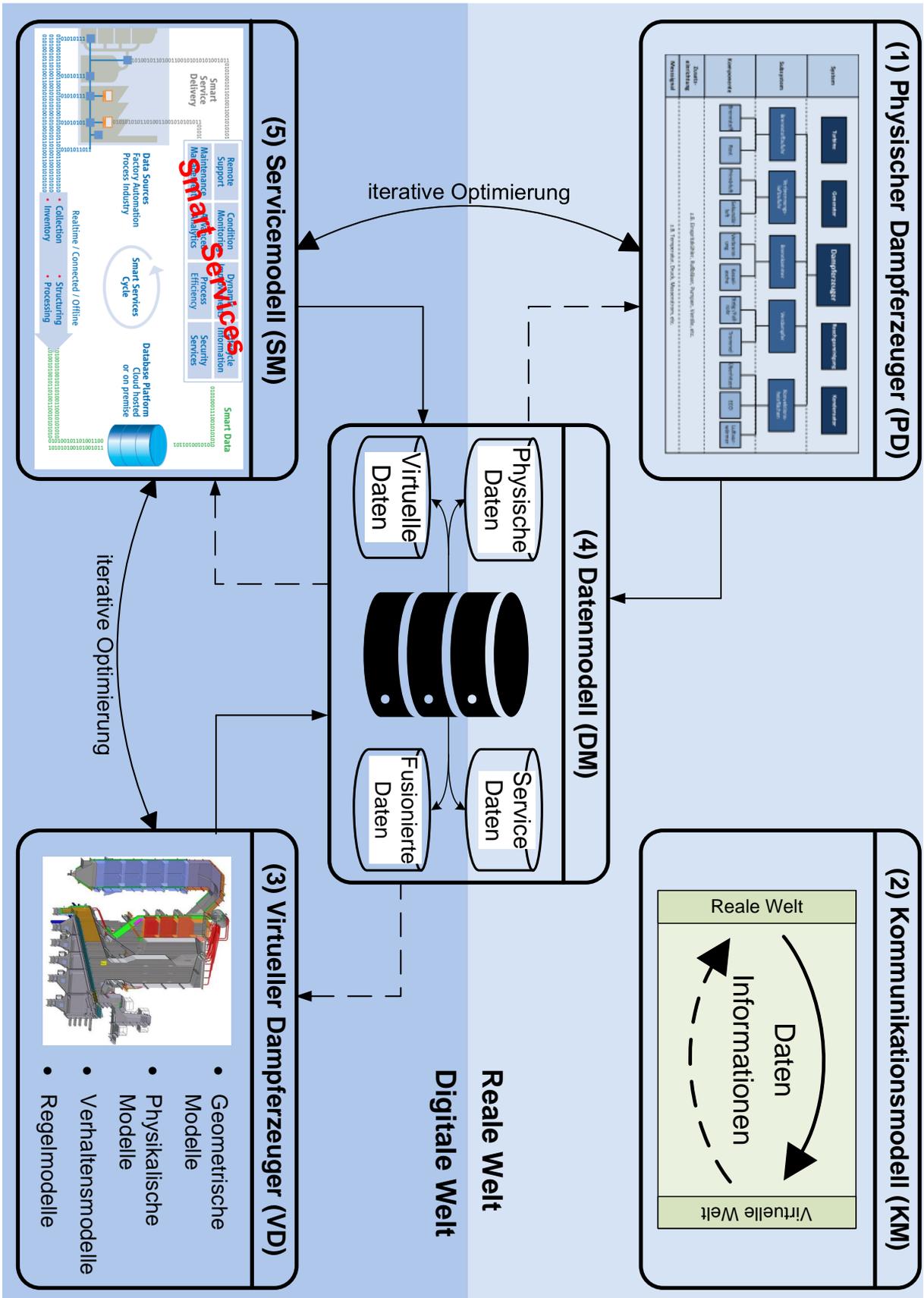


Abbildung 19: 5D-DTM am Beispiel eines Dampferzeugers (in Anlehnung an [1])

KAPITEL 1

Der Dampferzeuger – die physische Einheit

Ein Dampferzeuger dient, wie der Name bereits vermuten lässt, der Umwandlung eines Mediums aus dem flüssigen Zustand bei Umgebungs- oder moderatem Druck in den dampfförmigen Zustand bei erhöhtem Druck. In diesem Bericht wird ausschließlich die Verdampfung von Wasser als Verdampfungsmedium betrachtet. Natürlich kann aber nahezu jedes beliebige Medium vom flüssigen Aggregatzustand in den dampfförmigen Zustand (*Verdampfung*³¹) überführt werden, indem dem Medium Wärme zugeführt wird. Wasserdampf entsteht, wenn Wasser, das unter einem bestimmten (aber konstanten) Druck steht, Wärme zugeführt wird. Bevor die ersten Dampftropfen entstehen, muss das Wasser auf die dem Druck entsprechende Siedetemperatur ϑ_S erwärmt werden. Die zugeführte Wärme wird Flüssigkeitswärme genannt. Der zur Siedetemperatur ϑ_S gehörende Druck wird als Siededruck P_S bezeichnet. Mit steigendem Druck steigt auch die entsprechende Siedetemperatur des Wassers. Wird dem Wasser weiter Wärme (Verdampfungswärme) zugeführt, kommt es zur Verdampfung und es entsteht ein Gemisch aus Wasser und Dampftropfen, das als Nassdampf bezeichnet wird. Dieser Vorgang wird als Sieden bezeichnet. Im sogenannten Nassdampfgebiet steigt der spezifische Dampfgehalt X des Nassdampfes von 0 bis 1 (bzw. 0% bis 100%). Die Temperatur des Mediums bleibt bei diesem Vorgang konstant³², das Volumen erhöht sich jedoch (unter der Annahme, dass der Druck nach wie vor konstant gehalten wird). Die Temperatur des Gemisches steigt erst dann wieder, wenn das gesamte Wasser in den dampfförmigen Zustand übergeführt wurde. Dieser Zustand des Dampfes wird als gesättigter Dampf oder Sattedampf ($X=1$) bezeichnet. Bei weiterer Zufuhr von Wärme (Überhitzungswärme) wird der Dampf überhitzt und die Temperatur steigt entsprechend an. Der so

³¹ Verdampfung entspricht einem Phasenübergang von flüssig nach dampfförmig

³² Vorausgesetzt der Siededruck P_S ist niedriger als der kritische Druck für Wasser $P_{krit.}$ (liegt bei ca. 225 bar)

entstandene Dampf wird als Heißdampf oder überhitzter Dampf bezeichnet und besitzt dann die Temperatur $\vartheta_{\dot{U}}$. [59][59]

In einem Dampferzeuger findet genau dieser Vorgang in einem mehrstufigen Prozess statt. Dampferzeuger (auch Dampfkessel genannt) können hinsichtlich unterschiedlicher Merkmale eingeteilt werden (vgl. [60, 61]):

1. Betriebsort
 - a. Landdampfkessel (fest oder beweglich)
 - b. Binnenschiffskessel
 - c. Seeschiffskessel
2. Druckniveau
 - a. Niederdruck-Dampfkessel
 - b. Hochdruck-Dampfkessel
3. Bauart
 - a. Großwasserraumkessel
 - b. Wasserrohrkessel mit Schräg- oder Steilrohrführung
 - i. Naturumlaufkessel
 - ii. Zwangsumlaufkessel
 - iii. Zwangsdurchlaufkessel
4. Brennstoff
 - a. Flüssig oder gasförmig
 - i. Ölkessel
 - ii. Gaskessel
 - iii. Abhitzekeessel
 - b. Feststoff
 - i. Kohlekessel
 - Staubfeuerung
 - ii. Müllverbrennungs- oder Biomassekessel
 - Rostfeuerung
 - Wirbelschichtfeuerung
5. Verwendungszweck
 - a. Kleindampferzeuger und Zwergdampfkessel
 - b. Flammrohr-/Rauchrohr-Kessel
 - c. Industriekessel
 - d. Kraftwerkskessel
 - e. Heizungskessel

Wesentliche Einflussfaktoren, die die Bauform und Konstruktion des Dampferzeugers beeinflussen, sind nach Linke et. al. [61] :

- Das zu erhitzende Medium (Wärmeträgermedium),

- das gewünschte Druck- bzw. Temperaturniveau des erzeugten Dampfes,
- die Leistung des Dampferzeugers und
- die Brennstoffart.

Im weiteren Verlauf dieses Berichts wird der Fokus stark auf feststehende Hochdruckdampferzeuger in der Bauform Steilrohr-Wasserrohrkessel mit Natur- oder Zwangsumlauf gelegt. Als Brennstoff für das Verbrennungssystem der hier relevanten Dampferzeuger wird hauptsächlich Biomasse oder Müll angedacht, weil es sich dabei um alternative Brennstoffe handelt, die eine nachhaltige Befeuerung garantieren. Der Betriebsdruck solcher Dampferzeuger liegt über dem atmosphärischen Druck (ca. 1 bar) und die Temperaturen des erhitzten Mediums liegen über 110°C. Außerdem sind diese Dampferzeuger fix an einem Ort (meist in einem sogenannten *Kesselhaus*) installiert und werden als Industrie- oder Kraftwerkskessel zur Bereitstellung von Prozesswärme (z.B. für chemische Prozesse oder für die Herstellung von Papier) oder Prozessdampf (z.B. zum Antrieb einer Dampfturbine in einem thermischen Kraftwerk, siehe Abb. 20) verwendet. Bei der Bauform Wasserrohr-Dampferzeuger handelt es sich um einen Dampferzeuger, bei dem Wasser, welches innerhalb von Rohren geführt wird, von außen durch die bei der Verbrennung freiwerdende Wärme beheizt wird. Die Wärmeübertragung zwischen Rauchgas/Flamme und Wasser erfolgt dabei über Strahlung (Gasstrahlung oder Flammenstrahlung), Konvektion (Berührung zwischen Gas und Rohr und zwischen Rohrrinnenwand und Wasser/Dampf) und Leitung (Wärmeleitung zwischen Rohraußen- und Rohrrinnenwand).

Abbildung 20 zeigt beispielhaft, wie ein Dampferzeuger in das Prozessschema eines konventionellen Dampfkraftwerkes eingeordnet werden kann.

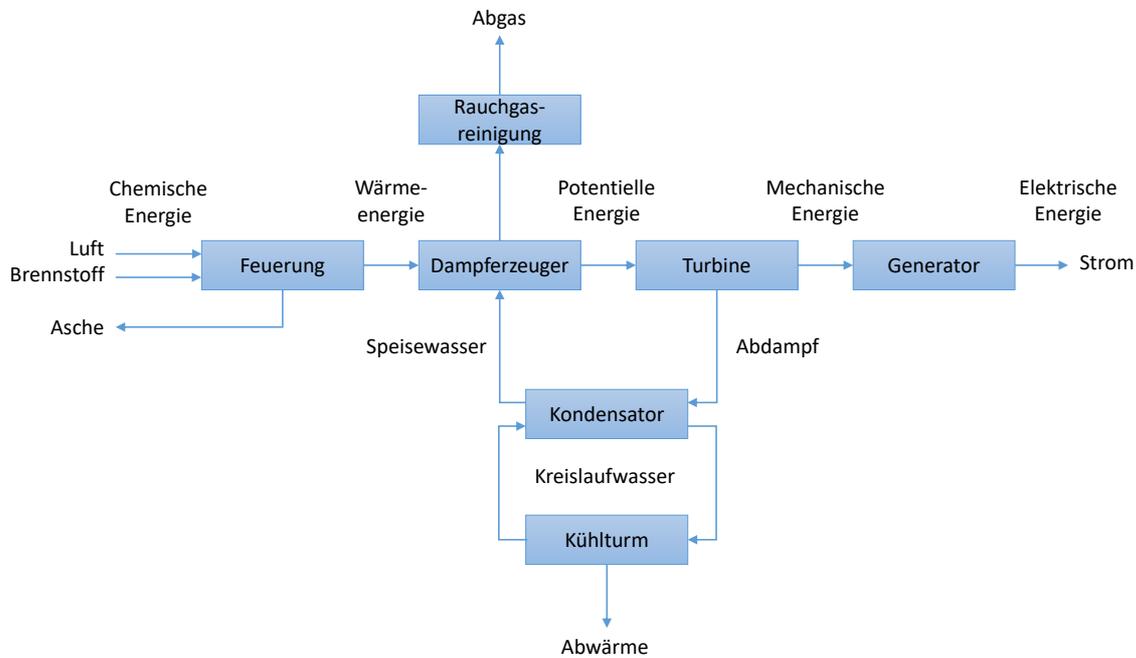


Abbildung 20: Schema eines Dampfkraftwerkes (in Anlehnung an [62])

Im Regelfall besteht ein Dampferzeuger, der den zuvor gewählten Merkmalen entspricht, aus einer Feuerung, einem Verdampfer, dem Überhitzer und einem Vorwärmer (Speisewasser- und/oder Verbrennungsluftvorwärmer). Abbildung 21 zeigt beispielhaft einen 3-Zug Naturumlauf-Dampferzeuger mit einer Rostfeuerung. Anhand von Abbildung 21 und Abbildung 22 werden nachfolgend die wesentlichen Bestandteile des Dampferzeugers und ihre grundlegenden Funktionen beschrieben. Für eine ausführlichere Beschreibung des Systems eines Dampferzeugers sei an dieser Stelle auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen. [61, 63–65]

Die Feuerung des Dampferzeugers findet in der Brennkammer durch Verbrennung des Brennstoffes statt. Die in Abbildung 21 dargestellte Feuerung entspricht einer Rostfeuerung. Der Brennstoff wird entlang des Rostes in mehreren Verbrennungszonen durch Zufuhr von bereits vorgewärmter Verbrennungsluft verbrannt. Ein mit Biomasse beheizter Dampferzeuger unterscheidet sich durch die Verbrennungsreaktion von anderen Dampferzeugern, die mit konventionellen Brennstoffen wie Öl, Gas oder Kohle befeuert werden. Die Verbrennung der Biomasse in der Brennkammer nimmt eine Zeit von mehreren Minuten in Anspruch. Im Vergleich dazu läuft die Verbrennung von konventionellen Brennstoffen innerhalb von Sekunden ab. Dies führt zu einer verzögerten Verbrennungsreaktion.

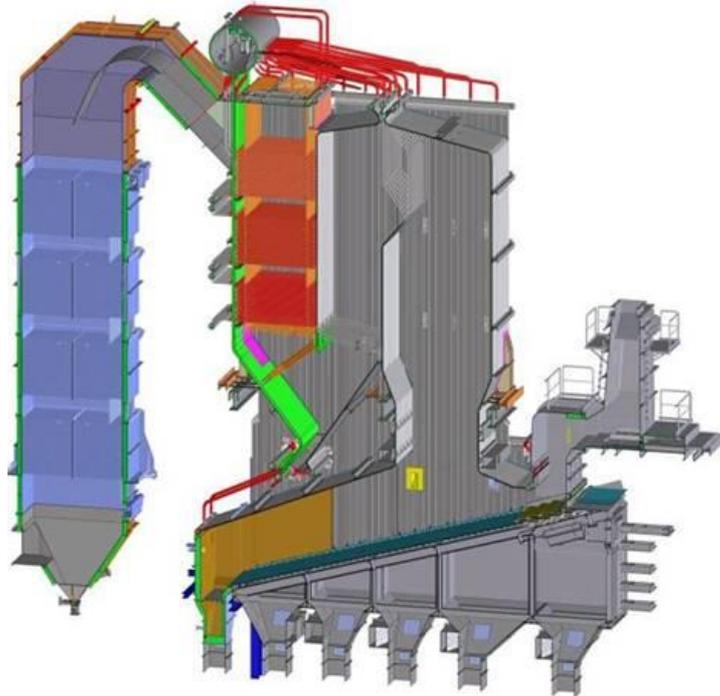


Abbildung 21: 3D-Modell 4-Zug Naturumlauf-Dampferzeuger mit Rostfeuerung³³

Diese verzögerte Verbrennungsreaktion in einem mit Biomasse betriebenen Dampferzeuger macht dessen Betrieb deshalb wesentlich komplexer und schwieriger zu regeln und steuern. [66]

Die Verbrennungswärme (Flammenstrahlung, Gasstrahlung und Rauchgas) wird dem Verdampfer und Überhitzer sowie dem Vorwärmer zugeführt. Das Rauchgas wird ausgehend von der Brennkammer mehrmals umgelenkt, durch mehrere aneinander gereihete Rauchgaskanäle (auch Zug genannt) geführt und gibt dabei Wärme an die umliegenden Heizflächen ab.

³³ Mit freundlicher Genehmigung der Bertsch Energy GmbH & Co KG, Bludenz, Österreich, <https://www.bertsch.at/>

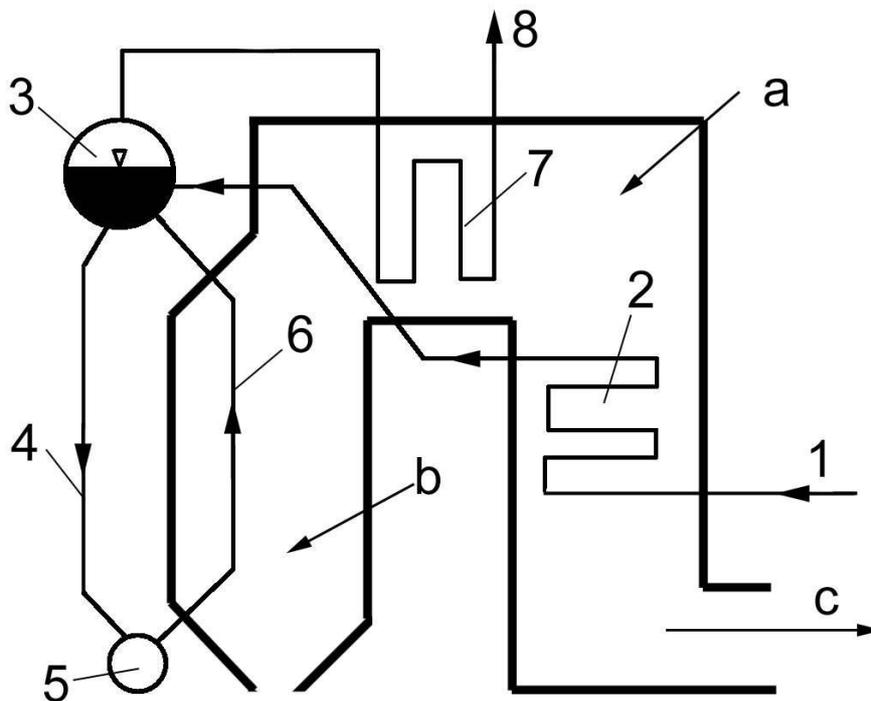


Abbildung 22: Prinzipskizze eines Naturumlauf-Dampferzeugers in 2-Zug Bauweise: (a) Rauchgaskanal (Zug), (b) Brennkammer, (c) zur Rauchgasreinigung, (1) Speisewasserzulauf, (2) Economiser, (3) Dampftrammel, (4) Fallrohr, (5) Sammler, (6) Steigrohr, (7) Überhitzer, (8) überhitzter Dampf. Quelle: ³⁴

Der in Abbildung 22 dargestellte Verdampfer besteht aus sogenannten Steigrohren (6), Fallrohren (4), Sammler (5) und einer Dampftrammel (3). Das vorgewärmte Speisewasser, welches als Arbeits- oder Wärmeträgermedium dient, wird ausgehend von der Dampftrammel (liegt oberhalb der Verdampfungseinheit) in die Fallrohre geleitet und in den unteren Teil der Verdampfungseinheit geführt. Dort wird das Speisewasser in einem sogenannten Sammler gesammelt und in die Steigrohre (6) verteilt. Die Steigrohre bilden als sogenannte Membranwand eine Umschließung der Rauchgaskanäle, die auch als Zug bezeichnet werden (Zug I-III in Abb. 21 oder Zug I+II in Abb. 22). Die Steigrohre werden einerseits vom heißen Rauchgas angeströmt (Konvektion) und andererseits durch Wärmestrahlung (Flamm- und Gasstrahlung) beheizt. Das Wasser in den Steigrohren wird dadurch verdampft. Am Ende der Steigrohre wird der Nassdampf ($X < 1$) wieder in die Trommel zurückgeführt. Dieser sogenannte Umlauf kann entweder als Naturumlauf oder als Zwangsumlauf ausgeführt werden. Im Fall eines Naturumlafs findet die Zirkulation des Wassers einzig durch dessen Dichteunterschied zwischen Fall- und Steigrohr statt. Im Steigrohr

³⁴ Naturumlauf-Dampferzeuger (<https://de.wikipedia.org/wiki/Naturumlaufkessel>) © by Sagr. licensed under Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license.

sinkt durch die Verdampfung die Dichte des Wasser-/Dampfgemisches und es tritt eine natürliche Zirkulation ein. Dieses Prinzip funktioniert nur bis zu einem Druck von ca. 160 bis 180 bar, weshalb es noch das Zwangsumlaufprinzip gibt. Bei einem Zwangsumlauf wird am Ende der Fallrohre eine Pumpe eingebaut, die künstlich für eine Zirkulation sorgt. In der Dampftrommel findet durch entsprechende Einbauten eine Trennung des Wassers vom gesättigten Dampf statt. Das abgeschiedene Wasser und nachfließendes frisches Speisewasser werden wieder in die Fallrohre geleitet. Der Dampf wird entsprechend des Fließschemas aus Abbildung 22 in einem Rohrsystem weiter zum Überhitzer geführt.

Der Überhitzer in Abbildung 21 kann sich aus mehreren Überhitzerstufen zusammensetzen. Die Überhitzerheizflächen werden in die Rauchgaskanäle des Dampferzeugers gehängt. Die Wärmeübertragung zwischen Rohraußenwand und Rauchgas erfolgt in diesem Teil des Dampferzeugers hauptsächlich durch Konvektion. Deshalb werden diese Heizflächen meist auch als Konvektionsheizflächen bezeichnet. Hinter jeder Überhitzerstufe befindet sich ein weiterer Sammler und ein Einspritzkühler. Der Einspritzkühler dient der Temperaturregelung. Durch das Einspritzen von kaltem Wasser in den überhitzten Dampf kann die Dampftemperatur vor jeder weiteren Überhitzerstufe bzw. letztlich nach der letzten Überhitzerstufe auf ein entsprechendes Temperaturniveau geregelt werden. Der überhitzte Dampf wird nach dem Überhitzer entweder einem Industrieprozess zur Wärmeversorgung zur Verfügung gestellt oder an eine Dampfturbine weitergeleitet, die thermische in mechanische Energie und über einen Generator letztlich in elektrische Energie umwandelt (vgl. Abb. 20).

Damit dem Rauchgas am Ende des Prozesses weiter Wärme entzogen wird und somit der Gesamtwirkungsgrad des Dampferzeugers verbessert werden kann, umströmt das Rauchgas am Ende des letzten Zuges in Abbildung 21 noch einen Speisewasservorwärmer. Der Speisewasservorwärmer (auch als *Economiser* bezeichnet) wird ebenfalls als Konvektionsheizfläche ausgeführt und in den Rauchgaszug eingehängt. Einige Systeme besitzen außerdem noch einen oder mehrere Verbrennungsluftvorwärmer. Hierfür kommen unterschiedliche Bauarten von Wärmetauschern zum Einsatz, die sich stark nach den Prozessparametern richten.

1.1 Modularisierung

Zur Darstellung und zur Modellierung des Dampferzeugers im 5D-DTM wird seine komplexe Gesamtstruktur durch die Methodik der Modularisierung in einzelne Subsysteme unterteilt. Damit die nachfolgende Modellierung des Dampferzeugers in der virtuellen Einheit optimiert werden kann, wird die modulare Struktur des

Dampferzeugers so gewählt, dass die jeweiligen Module auf Basis der Ausgangsdaten des vorherigen Moduls berechnet werden können. Die sich dabei ergebenden, weniger komplexen Module lassen sich einfacher beschreiben und wieder zu einem Gesamtsystem zusammenfügen. Solch eine modulares Gesamtsystem schafft letztlich den Vorteil, dass die Struktur gegebenenfalls erweitert oder skaliert werden kann und dass neue Bestandteile einfacher integriert werden können. Für den Dampferzeuger wird somit das Ziel angestrebt, die modulare Grundstruktur für unterschiedliche Konfigurationen des Gesamtsystems beliebig erweitern und anpassen zu können. So können beispielsweise unterschiedliche Verbrennungssysteme oder eine beliebige Zusammenstellung und Anzahl der Konvektionsheizflächen oder Vorwärmsysteme einfacher integriert werden. Das derart untergliederte Gesamtsystem besteht aus unterschiedlichen Subsystemen und den Komponenten der Subsysteme. Die einzelnen Komponenten und Subsysteme können einfacher modelliert werden, der Komplexitätsgrad wird reduziert und die Flexibilität des Systems kann gesteigert werden.

Abbildung 23 zeigt beispielhaft hierfür eine hierarchische Struktur des zuvor beschriebenen Dampferzeugers mit Rostfeuerung

Systemebene:

Die Systemebene stellt der Dampferzeuger selbst dar. Andere Bestandteile der Systemebene für ein thermisches Kraftwerk sind beispielsweise Speisewasseraufbereitungsanlage, Rauchgasreinigungsanlage, Turbine, Stromgenerator oder Kondensator.

Subsystemebene:

Zu dieser Ebene zählen die bereits zuvor erläuterten wesentlichen Bestandteile des Dampferzeugers, die zur Ausführung der spezifischen Funktion im industriellen Bereich oder innerhalb eines thermischen Kraftwerks dienen. Dazu gehören:

- Brennstoffzufuhr
- Verbrennungsluftzufuhr
- Brennkammer
- Verdampfer
- Überhitzer
- etc.

Komponentenebene:

Die Subsysteme können weiter in einzelne Komponenten zerlegt werden. Auch diese Subsystemkomponenten dienen in ihrer Zusammenarbeit der Erfüllung einer zuvor definierten Funktion. Diese Komponenten müssen in der virtuellen Einheit modelliert

und simuliert werden, um das Gesamtsystem abzubilden. Die Verdampfereinheit, als Subsystem des Dampferzeugers, kann beispielsweise in die wesentlichen Komponenten Steig- und Fallrohre sowie Dampftrommel unterteilt werden.

Zusatzeinrichtungen:

Zu den Zusatzeinrichtungen zählen unter anderem Hilfs- und Regeleinheiten wie beispielsweise Rußbläser, Einspritzkühler, Sammler, Pumpen oder Ventile. Diese Bestandteile des Dampferzeugers müssen selbst nicht modelliert werden. Sie entsprechen nicht der zuvor angeführten Beschreibung einer komplexen Einheit. Sie müssen aber sehr wohl in der Gesamtstruktur des Dampferzeugers dargestellt werden, weil sie wichtige funktionelle Eigenschaften für das Gesamtsystem besitzen.

Signalebene:

Zuletzt kann einer Komponente noch ein Signal oder Messwert zugeordnet werden. Diese Messwerte können mit den Simulationsergebnissen verglichen und dadurch kann die Modellgüte bestimmt werden. In einem Dampferzeuger befinden sich zahlreiche Messstellen. Dazu zählen in erster Linie Druck- und Temperaturmessgeräte sowie Durchflusssensoren. Viele dieser Messstellen sind heute noch als analoge Messstellen verbaut (z.B. Manometer) und Messwerte können nur vor Ort abgelesen werden. Im Rahmen einer konsequenten *Informatisierung* im Bereich Dampferzeuger müssen diese Messstellen in digitale Messstellen umgewandelt und ihre Messwerte entsprechend im Prozessleitsystem digital verarbeitet werden können. Nur so können in weiterer Folge hochgenaue digitale bidirektionale Abbildungen der unterschiedlichen Komponenten und Sub- bzw. übergeordneten Systeme geschaffen werden.

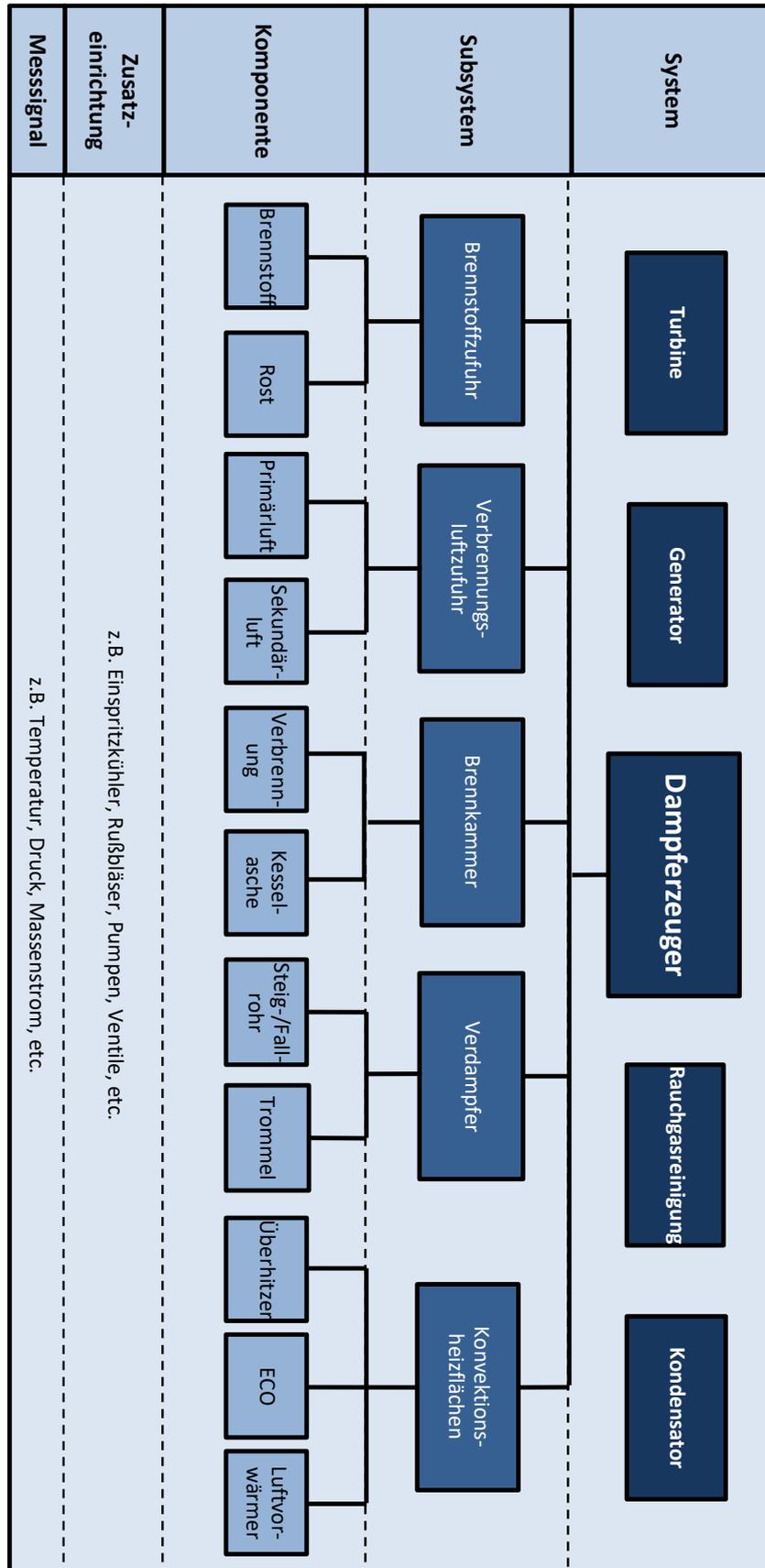


Abbildung 23: Beispielhafte hierarchische Strukturierung eines Dampferzeugers ausgehend vom Gesamtsystem in Subsysteme und Komponenten bis zur Sensorik

KAPITEL 2

Der Digitale Dampferzeuger in der virtuellen Welt

Wie bereits in der Einleitung von Teil III erwähnt, kann der digitale oder virtuelle Teil des Dampferzeugers (der digitale Dampferzeuger) im 5D-DTM aus den Bestandteilen Datenmodell (DM), virtuelle Einheit (VD) und dem Servicemodell (SM) zusammengesetzt werden. Das Kommunikationsmodell (KM) bildet das Bindeglied zwischen physischer und virtueller Welt. In diesem Kapitel werden diese Bestandteile hinsichtlich aktueller Technologien aus den entsprechenden Bereichen untersucht. Der Fokus liegt natürlich darauf, die jeweiligen Standards aus der Industrie herauszuarbeiten und hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeiten im Bereich des Dampferzeugers zu untersuchen.

Entsprechend der realen Prozessstruktur werden dazu ausgehend von der physischen Einheit des Dampferzeugers zuerst die etablierten Technologien im Bereich industrieller Kommunikationssysteme untersucht. Diese Modellebene des 5D-DTM dient der Integration des PD in die digitale oder virtuelle Welt. Die Kommunikationswege sorgen dafür, dass physische Größen digital weiterverarbeitet werden können. Die Weiterverarbeitung erfolgt dann über das DM, den VD und das SM. Über das DM werden die Daten aufbereitet und weiterverarbeitet, bevor sie dem VD oder SM zur Verfügung gestellt werden. Aus den Rohdaten werden somit Informationen gewonnen. Das bedeutet, dass die Daten durch eine Weiterverarbeitung im VD und SM um entsprechendes Wissen erweitert und dementsprechend ihr Informationsgehalt deutlich erhöht wird. Diese Informationen gehen wieder zurück ans DM, wo sie in Form von historischen Daten gespeichert werden. Zuletzt werden Regelanweisungen über das KM wieder in die physische Welt gespielt, wo sie den Systemzustand regeln und steuern.

2.1 Kommunikationsmodell

Die Dimension des Kommunikationsmodells (KM) im 5D-DTM erfüllt die grundlegende Aufgabe, eine Verbindung zwischen realer und virtueller Welt herzustellen. Das bedeutet, dass an dieser Stelle durch eine Verbindung ein Kommunikationspfad hergestellt wird, der zum Austausch von Daten und Informationen genutzt werden kann. Außerdem entsteht erst durch diese Kommunikationsinfrastruktur die Möglichkeit, einen Zugriff auf die Daten aus dem PD zu erhalten und die Daten digital zu Informationen weiterverarbeiten zu können.

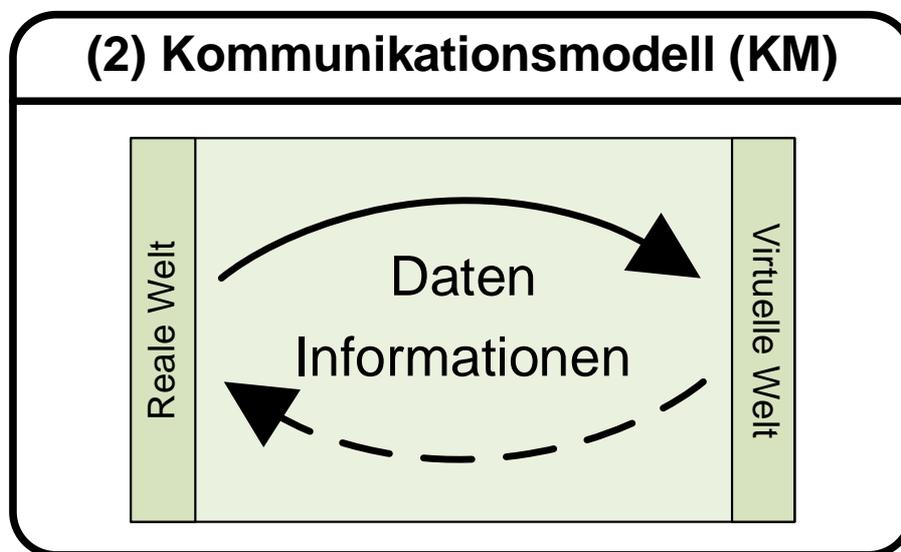


Abbildung 24: Kommunikationsmodell im 5D-DTM

Abbildung 24 zeigt in einer Detailansicht das KM aus Abbildung 19. Das KM beinhaltet alle Verbindungen zwischen PD, VD, DM und SM. Am Beispiel der Verbindung zwischen PD und VD kann der Unterschied zwischen Daten (durchgezogener Pfeil in Abb. 24) und Informationen (strichlierter Pfeil in Abb. 24) nochmals verdeutlicht werden. Daten bezeichnen Werte mit geringem Informationsgehalt. Das sind für PD beispielsweise Messwerte, die von PD aufgegriffen und über KM weitergeleitet werden. Im Vergleich dazu bezeichnen Informationen Werte, die durch eine Verarbeitung der zuvor übermittelten Daten generiert werden können. Im vorliegenden Beispiel sind das unter anderem Steuerungs- und Regelungsinformationen, die über KM an PD nach entsprechender Verarbeitung im DM, VD und SM zurückgesandt werden.

Wesentliche Eigenschaften, die diese Kommunikationsinfrastruktur erfüllen muss, sind folgende: [67]

- Echtzeit-Kommunikation
- Integration heterogener Endgeräte
- Skalierbarkeit
- Sicherheit

Da sich vor allem Betriebsdaten aus der physischen Welt im laufenden Betrieb des Systems in Echtzeit ändern, muss die Kommunikationsinfrastruktur für einen Datenaustausch in Echtzeit sorgen. Dieser Umstand stellt die zentrale Forderung an das KM dar. Ein weiterer Aspekt, der beim Entwurf von entsprechenden Kommunikationsschnittstellen zu beachten ist, betrifft die Systemheterogenität. Wie bereits in Kapitel 1 von Teil III ausführlich diskutiert, besteht ein Dampferzeuger aus einer Reihe von Subsystemen, die sich wiederum aus Komponenten und Zusatzeinrichtungen sowie entsprechender Sensorik zusammensetzen. Dabei kommen Komponenten, Zusatzeinrichtungen und Sensoren zum Einsatz, die von unterschiedlichen Herstellern mit unterschiedlichen Standards stammen. Für das Gesamtsystem entsteht somit ein Mix aus heterogenen Bestandteilen. Die Kommunikationsinfrastruktur muss mit dieser Heterogenität umgehen können und muss es ermöglichen, diese Heterogenität durch die Anwendung einheitlicher Übertragungsstandards zu homogenisieren. Damit das System laufend erweitert werden kann, muss das KM nach oben skalierbar sein. Das bedeutet, dass die Struktur derart ausgestaltet sein muss, dass sie beliebig um zusätzliche Schnittstellen erweitert werden kann. Zuletzt darf der sicherheitstechnische Aspekt nicht vernachlässigt werden. Das Kommunikationsmodell muss einerseits einen gewollten Zugriff auf die Steuerung, Regelung und Überwachung der Prozessparameter des Systems ermöglichen, andererseits muss jedoch ein unbefugter Zugriff auf Prozessdaten verhindert werden.

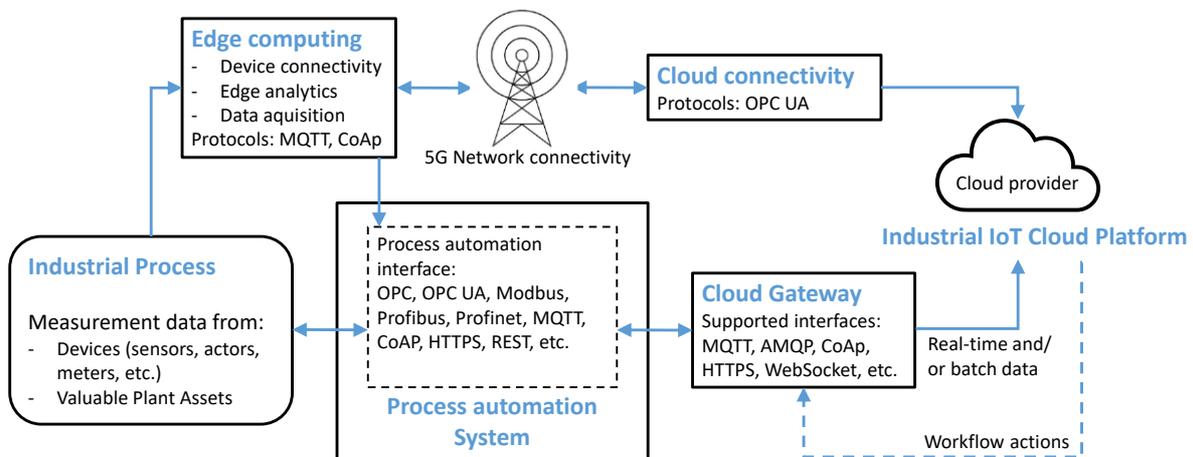


Abbildung 25: Darstellung einer Kommunikationsinfrastruktur im Sinne von I4.0 (in Anlehnung an [68])

Abbildung 25 zeigt beispielhaft die Kommunikationsinfrastruktur eines Industrieprozesses mit den entsprechenden Schnittstellen (OPC-UA, Modbus etc.) und Übertragungsprotokollen (MQTT, CoAP, REST, HTTP etc.), die eine Datenerfassung und -übertragung im Sinne von I4.0 ermöglichen. Durch die direkte Anbindung der verwendeten Assets im Industrieprozess an das Internet bzw. das *Industrial IoT* (IIoT) handelt es sich eindeutig um eine moderne Kommunikationsinfrastruktur, die den Anforderungen von I4.0 entspricht. Die Verarbeitung der Daten erfolgt dabei in der *IIoT Cloud Platform* (siehe. Abb. 25). Dadurch können die Daten aus der lokalen Netzwerkinfrastruktur herausgelöst und von nahezu überall durch das Internet zugänglich gemacht werden. Der Übertragungsweg der Daten und Informationen hin zum IIoT kann dabei über unterschiedliche Technologien durchgeführt werden. In Abbildung 25 gibt es dafür die Möglichkeit des *Edge Computing* oder die Möglichkeit einer Verbindung über *Cloud Gateways*. Edge Computing bedeutet in diesem Zusammenhang, dass nicht alle Daten im IIoT weiterverarbeitet werden, sondern teilweise direkt im lokalen Industrienetzwerk (am Rand (*edge*) zwischen lokalem Netz und IIoT) bearbeitet werden [69]. Das ist besonders dann von Vorteil, wenn die zu übertragenden Datenpakete die verfügbare Übertragungsrate (Bandbreite) übersteigen würden und somit die Echtzeitfähigkeit nicht mehr gewährleistet werden kann. Das *Cloud Gateway* wiederum dient der Anbindung des physikalischen Netzwerks der unterschiedlichen Sensoren innerhalb des Industrieprozesses an das Internet im Sinne von IoT oder IIoT und sorgt damit für die Allgegenwärtigkeit der Daten im Internet [70].

Abbildung 26 zeigt beispielhaft die Automatisierungshierarchie (Automatisierungspyramide) innerhalb eines Kraftwerks. Die Hierarchie erstreckt sich dabei über verschiedene Ebenen und umfasst am Beispiel einer Abfalls- oder

Biomasseverbrennungsanlage gezeigt nach Schneider und Gierend [71] folgende Ebenen mit den entsprechenden Zuständigkeiten (siehe Abb. 26):

- Die Feldebene, zuständig für I/O-Signale bzw. Sensoren und Aktoren.
- Die Prozessleitebene, zuständig für die Maschinen- und Anlagensteuerung mit dezentraler Peripherie und kleinen Verarbeitungsgeräten wie z.B. Speicherprogrammierbarer Steuerung SPS oder Programmable Logic Controller PLC. Sie dient mit entsprechenden Mensch-Maschine-Schnittstellen (MMS) oder Human-Machine Interface (HMI) und dem SCADA-System (Supervisory Control and Data Acquisition - SCADA) als Bedien- und Beobachtungssystem.
- Die Betriebsleitebene, zuständig für die elektronische Datenverarbeitung der Betriebsleitung (Prozessleitsystem oder Manufacturing Execution System - MES).
- Die Produktionsebene, in der die Prozessleitwarte mit ihren Kontroll-PCs sitzt.

In der derzeitigen Automatisierungshierarchie kommen auf unterschiedlichen Ebenen meist unterschiedliche herstellereigenspezifische Kommunikationsprotokolle zum Einsatz. Eine nahtlose Kommunikation entlang dieser Ebenen ist jedoch nur durch normierte Schnittstellen möglich. [71]

Ein Übertragungsstandard, der viele der wesentlichen Eigenschaften für das KM erfüllt, ist OPC bzw. OPC-UA. Dieser wird nachfolgend stellvertretend für andere I4.0-fähige Übertragungsformate beschrieben.

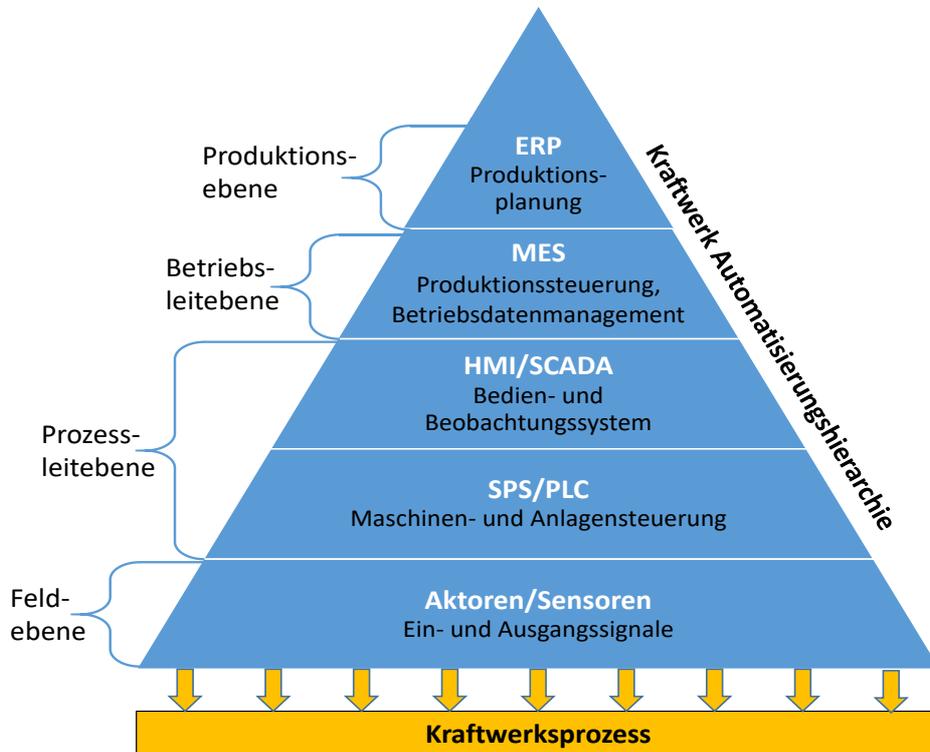


Abbildung 26: Automatisierungshierarchie innerhalb eines Kraftwerks (in Anlehnung an [71])

2.1.1 OPC-UA

OPC-UA steht für *Open Platform Communication – Unified Architecture* und stellt eine Weiterentwicklung des Standards OLE for Process Control (OPC) der OPC Foundation³⁵ dar. OPC wird von der OPC Foundation folgendermaßen definiert:

“OPC is the interoperability standard for the secure and reliable exchange of data in the industrial automation space and in other industries. It is platform independent and ensures the seamless flow of information among devices from multiple vendors. The OPC Foundation is responsible for the development and maintenance of this standard.”³⁶

Der OPC-Standard wurde erstmals 1996 veröffentlicht und diente damals als Vermittler (*middleware*) der Abstraktion spezifischer Datenübertragungsprotokolle der Speicher-Programmierbaren Steuerung (SPS) (z.B. Modbus, Profibus etc.) in eine Standardschnittstelle. Lese- und Schreibzugriffe aus in der Automatisierungspyramide höher gelegenen Schnittstellen (z.B. Benutzerschnittstelle (Mensch-Maschine-

³⁵ <https://opcfoundation.org/>

³⁶ <https://opcfoundation.org/about/what-is-opc/>

Schnittstelle (HMI)), Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) etc. , vgl. Abb. 26) wurden entsprechend dem OPC-Standard in das SPS-spezifische Protokoll übersetzt und umgekehrt. Der OPC-Standard war zu dieser Zeit nur für Windows-basierte Betriebssysteme verfügbar. Nicht nur diese grundlegende Einschränkung des OPC-Standards führte letztlich 2010 zur Veröffentlichung des neuen OPC Unified Architecture (OPC-UA) Standards. [72]

Die Funktionalitäten der Vorgängerversion wurden übernommen und um folgende Zusätze erweitert: [72]

- Plattformunabhängigkeit durch Verwendung von Webservices und TCP-basierten Protokollen
- Bereitstellung von leistungsfähigen Security-Mechanismen
- Objektorientiertes Modell zur Abbildung von Systemen jeglicher Struktur und Komplexität
- Semantische Erweiterung der Prozessdaten (z.B. Informationen zu physikalischen Einheiten oder Aussagen über Datengüte)

OPC-UA ist also nunmehr ein hersteller- und plattformunabhängiger Kommunikationsstandard und wurde speziell für den Einsatz im industriellen Bereich konzipiert. Das Prinzip, das hinter OPC-UA steckt, funktioniert so, dass den Herstellern verschiedener Technologien OPC Treibermodule zur Verfügung gestellt werden, die als einheitliche OPC Schnittstelle implementiert werden können. Dadurch müssen die verschiedenen Technologien nicht jeweils eine spezifische Schnittstelle für alle anderen Technologien bereitstellen. Zwei Geräte können miteinander kommunizieren, ohne die Kommunikationsmöglichkeiten des jeweils anderen Geräts zu kennen, mit dem kommuniziert werden sollte. Diese unabhängige Plattform wird dann für einen sicheren und zuverlässigen Austausch von Daten und Informationen entlang der horizontalen und vertikalen Prozessebenen genutzt. Der Datenaustausch wird dabei über die Interaktion sogenannter *Server* und *Clients* organisiert. Jedes System enthält dabei mehrere solcher Clients und Server. Abbildung 27 zeigt die im Rahmen von OPC-UA umgesetzte serviceorientierte Architektur.

In der in Abbildung 27 gezeigten Architektur bietet jeweils ein Server (z.B. SPS oder PLC in Abb. 27) eine entsprechende Dienstleistung oder einen Service im Netzwerk an. Ein oder auch mehrere Clients (z.B. ein Monitor als Benutzerschnittstelle oder Panel PLC in Abb. 27) können dann auf diese Services zugreifen und entsprechende Daten abfragen.

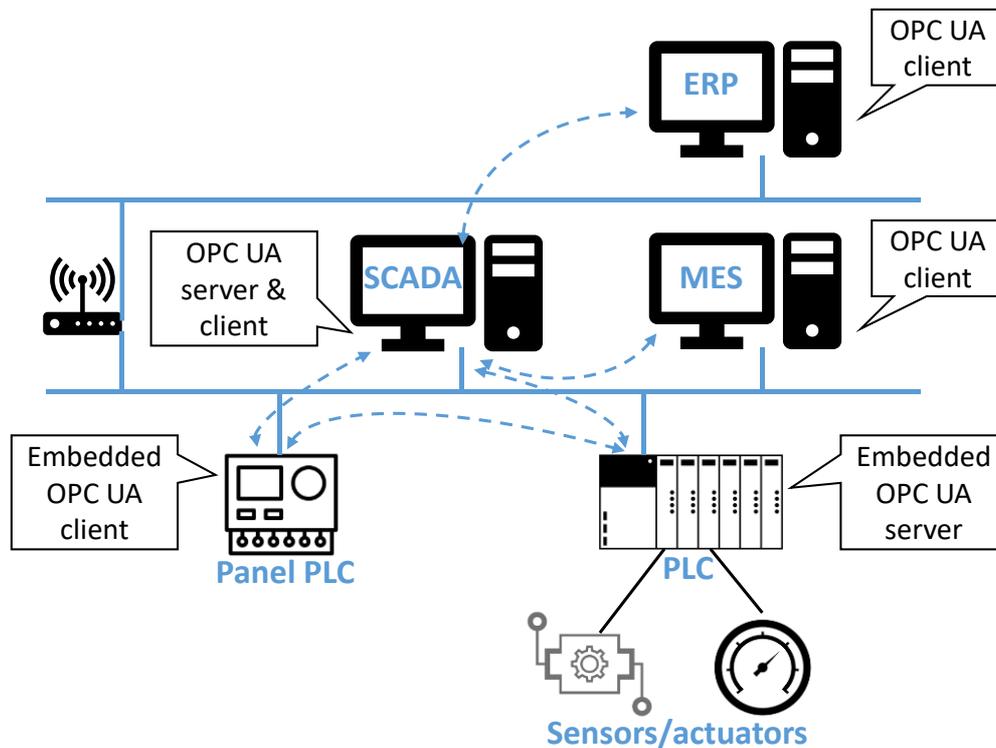


Abbildung 27: OPC-UA Architektur am Beispiel eines Automatisierungssystems innerhalb des Kraftwerks (in Anlehnung an [73])

Für eine detailliertere Beschreibung von OPC-UA sei an dieser Stelle auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen [74]. Eine weitere Vertiefung in Richtung Automatisierungstechnik würde den Rahmen dieses Projektberichts übersteigen.

Zusammengefasst erfüllt OPC-UA die wesentlichen Merkmale für das KM. Durch die zuvor beschriebene Unabhängigkeit der Technologie können beliebige Endgeräte in die OPC-UA Architektur integriert werden. Neben dem hersteller- und plattformunabhängigen Kommunikationskanal von OPC-UA kann diesem Kommunikationsstandard ein erweitertes Metamodell (Informationsmodell oder eine ontologische Beschreibung des Systems) hinterlegt werden. Neben der Datenübertragung kann dadurch auch die Datenstruktur (Semantik) beschrieben werden. Mit Hilfe des Informationsmodells lassen sich einfache Sensoren bis hin zu komplexen Anlagen auf eine objektorientierte und semantisch bedeutsame Art und Weise beschreiben [75]. Das hinterlegte Informationsmodell ermöglicht weiter eine beliebige Erweiterung und somit Skalierbarkeit des Systems. In Kombination mit entsprechenden Bussystemen wie zum Beispiel Time-Sensitive Networking (TSN) ist

auch eine Echtzeit-Kommunikation möglich³⁷. Die Hauptaufgabe von TSN ist es, allen verbundenen Endgeräten ein einheitliches Zeitverständnis aufzuprägen.

Um die Übertragungssicherheit gewährleisten zu können, wurde bei OPC-UA ein eigenes Security-Modell eingeführt. Eine Kommunikation zwischen Server und Client ist nur über die Ausstellung eines entsprechenden digitalen Zertifikates über das Security-Modell möglich [76].

Nicht zuletzt aufgrund der angeführten Merkmale der OPC-UA wurde dieses Kommunikationsmodell vom Industrie 4.0 - Konsortium im RAMI4.0 als der Kommunikationsstandard für den Information-Layer definiert:

„[...] any product being advertised as “Industrie 4.0-enabled” must be OPC UA capable (either integrated or via a gateway).” [77]

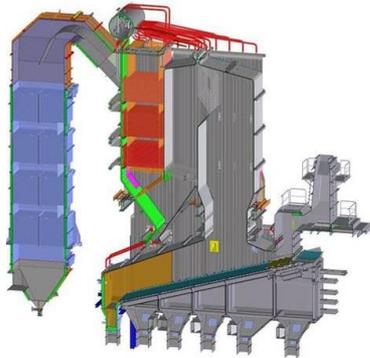
2.2 Virtueller Dampferzeuger

Es gibt mittlerweile verschiedene Möglichkeiten für die Modellierung und Simulation von Maschinen und Anlagen unterschiedlichster Art. Im Zeitalter der Digitalisierung und der damit verbundenen Allgegenwärtigkeit von Daten sind es besonders datengetriebene Modellierungsansätze, deren Einsatz aktuell stark forciert wird. Andererseits haben sich auch die Möglichkeiten zur physikalischen Modellierung von Maschinen und Anlagen in Form von algebraischen Gleichungen im Laufe der Zeit weiterentwickelt. Dieser Abschnitt widmet sich den aktuellen Trends in Sachen Modellierung und Simulation von Assets im Bereich der Kraftwerkstechnik und speziell im Bereich des Dampferzeugers. Grundlage für die Modellierung eines beliebigen Assets ist dessen Modularisierung, wie sie bereits in Abschnitt 1 Teil III dieses Berichts präsentiert wurde. Darin wurden die wesentlichen Komponenten des physischen Dampferzeugers vorgestellt und somit das System Dampferzeuger mit seinen Systemgrenzen definiert. Dieses System mit seinen Subsystemen und Komponenten wird nun in weiterer Folge durch Methoden der Modellierung und Modellsimulation in Form des virtuellen Dampferzeugers beschrieben.

Abbildung 28 zeigt nochmals die Modellierungsebenen des virtuellen Dampferzeugers aus dem 5D-DTM.

³⁷ <https://opconnect.opcfoundation.org/2017/06/there-is-no-industrie-4-0-without-opc-ua/>

(3) Virtueller Dampferzeuger (VD)



- Geometrische Modelle
- Physikalische Modelle
- Verhaltensmodelle
- Regelmodelle

Abbildung 28: Virtueller Dampferzeuger im 5D-DTM

Das geometrische-, physikalische-, Verhaltens- und Regelmodell sollen gemeinsam ein zuverlässiges Replikat des Dampferzeugers aus der realen Welt erzeugen. Die Modellierung und Simulation stellen dabei die zentralen Säulen des digitalen Dampferzeugers dar. Nur durch ein hochgenaues Modell des realen Dampferzeugers können zuverlässige Aussagen zur Systemüberwachung, -optimierung und -vorhersage im Rahmen des 5D-DTM getroffen werden.

Grundsätzlich dient eine Simulation dazu, die Zusammenhänge eines physikalischen Vorgangs, eines technischen Prozesses oder eines ökonomischen Einflusses wiederzugeben. Eine bereits etwas ältere, aber dennoch gültige Definition zum Thema Simulation, die von Motard et al. [78] 1975 getroffen und von Marquardt [79] 1999 übernommen wurde, lautet folgendermaßen:

„Simulation ist die Abbildung eines Prozesses durch ein mathematisches Modell und dessen (numerische oder analytische) Lösung, um Informationen über den Prozess und das Prozessverhalten zu gewinnen.“
(vgl. Eppe et al. [80])

Zur Modellierung generell werden unterschiedliche Hardware-Ressourcen, Daten-Ressourcen, aber auch spezifisches Wissen aus den entsprechenden Bereichen benötigt. Auf Basis dieser Ressourcen können über die vier Modellierungsebenen des VD dessen Funktionen modelliert und simuliert werden, die wiederum zur Überwachung oder Vorhersage des Systemverhaltens herangezogen werden können. Da es sich bei der Modellbildung generell, aber speziell bei der Modellbildung des Dampferzeugers und auch beim physikalischen Dampferzeuger selbst um ein überaus dynamisches und komplexes System handelt, kommt der Modellvalidierung, -

verifizierung und -akkreditierung eine wichtige Aufgabe zu. Nur wenn die Modellgüte innerhalb einer bestimmten Toleranz liegt, können systemtechnische Aussagen auf Basis des Systemmodells getroffen werden. Dieser Vorgang stellt somit sicher, dass die Genauigkeit und Zuverlässigkeit dem zugrundeliegenden Anwendungsfall entsprechen. [81]

Das geometrische Modell eines Systems, Subsystems oder einer Komponente beschreibt dessen hardwaretechnische Ausführung. Für den Dampferzeuger sind das beispielsweise Komponenten wie Rohre, Dampftrommel, Sammler sowie Ab- und Zuleitungen, das Gerüst, in dem der Dampferzeuger eingehängt wird, diverse Fördersysteme für die Brennstoffzufuhr, Ventilatoren und Pumpen für die Luft- und Wasser-/Dampfförderung, aber auch Messsensoren und Regelventile, wie beispielsweise Strömungswächter und Temperatursensoren oder Einspritzkühler. Das geometrische Modell legt die Form, Größe, Position und Relationen dieser einzelnen Subsysteme oder Komponenten zueinander und im Gesamtsystem fest. Zusätzlich zu bestimmten Abmessungen und Relationen können dem System, den Subsystemen oder den einzelnen Komponenten im geometrischen Modell ebenfalls physikalische Eigenschaften in Form von Stoff- oder Materialeigenschaften hinzugefügt werden. Beispielsweise kann im geometrischen Modell der Werkstoff der einzelnen Rohrleitungen oder Bündelheizflächen definiert werden. Außerdem können Informationen zu bestimmten Toleranzen, wie beispielsweise Form- oder Lagetoleranzen, beigefügt werden. Im geometrischen Modell werden jedoch noch keine funktionalen Eigenschaften oder Beschränkungen hinterlegt [81]. Die gängigsten Tools, die bei der geometrischen Modellierung zum Einsatz kommen, basieren auf 3D-CAD Systemen. CAD steht in diesem Zusammenhang für *Computer-aided Design* und beschreibt die rechnergestützte Konstruktion, also die Unterstützung von konstruktiven Aufgaben durch Technologien aus der IKT-Branche. Gängige Programme für die 3D-CAD-Modellierung sind z.B. *SolidWorks* oder *CATIA* der französischen Firma *Dassault Systèmes*³⁸ oder *AutoCAD* des amerikanischen Software-Entwicklers *Autodesk*³⁹.

Auf Basis des geometrischen Modells des Dampferzeugers können nun die physikalischen Modelle und in weiterer Folge auch Verhalts- und Regelmodelle beschrieben werden. Wie bereits in der Einleitung dieses Abschnittes erwähnt, kommen dafür verschiedene Methoden und Simulationsmodelle zum Einsatz.

³⁸ <http://www.3ds.com/de>

³⁹ <https://www.autodesk.de/>

2.2.1 Methoden und Simulationsmodelle

Das physikalische, das Verhaltens- sowie das Regelmodell des Dampferzeugers dienen dazu, in abstrahierter Art und Weise die physikalischen Vorgänge, zustandsspezifische Verhaltensmuster sowie das Regelverhalten des Gesamtsystems Dampferzeuger widerzuspiegeln. Diese Modelle müssen somit einerseits alle möglichen Einflussgrößen und deren Wechselwirkungen sowie das Steuerungs- und Regelverhalten des Systems so akkurat wie möglich und andererseits so genau wie nötig abbilden können. Für die Modellierung oder Modellbildung kommen unterschiedliche Methoden zum Einsatz:

Theoretische Modellbildung oder White-Box-Modeling:

Die theoretische Modellbildung bedient sich mathematischer und analytischer Gleichungen sowie empirischer Korrelationen, die aus Untersuchungen und Experimenten abgeleitet wurden. Diese dienen der akkuraten Beschreibung des zu untersuchenden Systems. Die physikalischen Vorgänge und das Systemverhalten können durch diese Gleichungen und Korrelationen mehr oder weniger vollständig beschrieben werden. Für die Modellierung und Simulation des thermischen Verhaltens des Dampferzeugers sind es in erster Linie Bilanzgleichungen, die dessen Systemverhalten beschreiben. Die wichtigsten Bilanzgleichungen, die innerhalb des Dampferzeugers auftreten, sind: [82]

- Massenbilanzen
- Stoffbilanzen
- Impulsbilanzen
- Energiebilanzen

Die Komplexität dieser Gleichungen hängt einerseits vom Zustand des Vorgangs, oder im Fall des Dampferzeugers der Strömung, ab. Dabei unterscheidet man folgende Zustände: [83]

- Statische Zustände: Für die Modellierung statischer Zustände fallen alle Terme bezüglich der zeitlichen Ableitungen innerhalb der Bilanzgleichung aus dem Gleichungssystem heraus. Insbesondere in der Designphase des Dampferzeugers können so konkrete statische Zustände simuliert werden.
- Dynamische Zustände: Bei dieser Form der Modellierung werden nicht nur statische, sondern auch dynamische Zustände des Systems modelliert. Die zeitliche Änderung des Systems und somit die zeitlichen Ableitungen (das sind in erster Linie Speicherterme) innerhalb der Bilanzgleichungen müssen in diesem Fall berücksichtigt werden. Für Modellierung und Simulation solcher

Systemzustände steigt der Rechenaufwand und die Rechenleistung sehr stark mit dem gewünschten Detaillierungsgrad des Systems an.

- Quasistationäre Zustände: Zuletzt gibt es noch die quasistationäre Modellierung und Simulation. Dabei werden die zeitlichen Ableitungen lediglich bei einigen Komponenten vernachlässigt. Dieser Fall kann dann auftreten, wenn für einige Komponenten innerhalb des Systems die Energie- und / oder Massenspeicherterme im Unterschied zu anderen Komponenten sehr klein sind.

Andererseits spielt für die Modellierung des Systemverhaltens die räumliche Ausprägung der Modellierung bezüglich der Komplexität der Bilanzgleichungen eine wichtige Rolle. Für den Dampferzeuger unterscheidet man Probleme n-dimensionaler Art. Kommt es zu keiner örtlichen Diskretisierung, handelt es sich um ein 0-dimensionales Modell. Beispielsweise kann das Modell des Wärmeübertragers (Verdampfer, Überhitzer etc.) für den stationären 0-dimensionalen Zustand über sogenannte Zustandsgrößen der Ein- und Austrittsparameter (Druck, Temperatur, Enthalpie, Massenstrom etc.) ausgedrückt werden. Erfolgt eine 1-dimensionale Ortsdiskretisierung, beispielsweise entlang einer Strömung, so ergeben sich die jeweiligen Zustandsgrößen an diskreten Stellen der Strömung, die durch ein sogenanntes numerisches Netz festgelegt werden. Für 2- oder 3-dimensionale Modellierungen ergibt sich entsprechend ein n-dimensionales numerisches Netz, welches nicht nur in Strömungsrichtung diskretisiert wird. [83]

Der digitale Dampferzeuger kann nur dann ein entsprechend hochgenaues Abbild des realen Dampferzeugers darstellen, wenn für die Modellierung mehrdimensionale dynamische Systemsimulationen zum Einsatz kommen.

Ein Beispiel für ein dynamisches mathematische Modell eines Dampferzeugers kann der Publikation von Bilde et al. [66] entnommen werden. Dabei wurde ein dynamisches Modell entwickelt, welches den instationären Startvorgang eines mit Biomasse befeuerten Naturumlauf-Dampferzeugers simuliert. Im Unterschied zu anderen dynamischen Modellen wurde dieses Modell dazu befähigt, den Phasenübergang im Verdampfer akkurat darzustellen und auch das sogenannte Unterkühlen (*Subcooling*), das eine wichtige Rolle bei Startvorgängen spielt, zu berücksichtigen. Die Fähigkeit zur Echtzeit-Simulation des Startvorganges wurde in dieser Publikation leider nicht explizit erläutert, weshalb der Einsatz des dynamischen Modells innerhalb des DT fraglich bleibt.

Trojan [84] untersuchte in seiner Arbeit aus 2019 mehrere mathematische Modellierungsmethoden für einen Dampferzeuger und stellte diese einander vergleichend gegenüber. Ebenso entwickelte er ein nichtlineares mathematisches Modell des gesamten Dampferzeugers, das dessen instationäre Zustandsänderungen

in einem Online-Modus in Echtzeit simuliert. Mit Hilfe des entwickelten Modells können die Temperaturen der Verdampfer- und Überhitzerrohre sowohl auf der Innen- als auch auf der Außenseite simuliert werden. Ebenfalls lassen sich mit dem vorgestellten Modell die Oberflächentemperaturen der Ablagerungen auf den Rohren an bestimmten Stellen bestimmen. Im letzten Kapitel der vorliegenden Arbeit wird das vorgestellte Modell genauer betrachtet. Dieses nichtlineare dynamische Modell zeigt die Echtzeitfähigkeit eines Simulationsmodells für einen Dampferzeuger auf. Bei den angeführten Untersuchungen durch Trojan [84] wurde jedoch ein kohlebefeuerter Dampferzeuger als Referenzkessel gewählt. Bei einer Übertragung auf einen Biomassekessel sollte somit jedenfalls noch darauf geachtet werden.

Ein Überblick über die gängigsten numerischen Simulationsprogramme, die für die Berechnung der thermischen und strömungstechnischen Zustände innerhalb des Dampferzeugers oder eines thermischen Kraftwerks zum Einsatz kommen, kann **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** entnommen werden.

Tabelle 2: Übersicht kommerzieller und aus der Forschung stammender Simulationsprogramme (vgl. [82])

Programm	Entwickler
APROS	Technical Research Centre of Finland (VTT), Imatran Voima Co (IVO)
Aspen	Aspen Technology, Inc.
Dampfessel-Simulator	Christian Daublebsky
DBS	TU Wien, Institut für Energietechnik und Thermodynamik
DANN/PREFUR	TU of Denmark, Department of Energy Engineering
Dora	ALSTOM
Dymola (Modelica)	Dynasium
Epsilon	Softbid GmbH
E600	ALSTOM
ENBIPRO	TU Braunschweig, Institut für Wärme- und Brennstofftechnik
Gate Cycle	GE Enter Software LLC
GT PRO-GT MASTER	Thermoflows, Inc.
IPSEpro	SimTech Simulation
KPRO	CADIS Informationssysteme
KRAWAL	Siemens
MASSBAL	Open Models Inc.
MATLAB	The MathWorks, Inc.
MISTRAL	TU Darmstadt, Fachgebiet Energiesysteme und Energietechnik
PEPSE	SCIENTECH, Inc.
Proates	POWERGEN, Power Technology
Prosium	EnDat Finland

STEAM PRO-STEAM	Thermoflow, Inc.
Master Thermoflex	
Vali	BTB-Jansky GmbH
WÄSCHERE	Techn. Software Entwicklung Prof. Rabek

Die angeführten Programme unterscheiden sich im Wesentlichen durch ihr Anwendungsgebiet. Die meisten Programme werden von Herstellern von Dampferzeugern zur Auslegungsrechnung in der Entwicklungsphase verwendet. Im Rahmen des Digitalen Dampferzeugers muss deshalb überprüft werden, inwiefern diese Programme auch in der operativen Phase des Dampferzeugers weiterverwendet werden können. Eine umfangreiche Auflistung und Beschreibung der wichtigsten dynamischen Prozesssimulationsprogramme inklusive ihres Anwendungsgebiets kann der weiterführenden Literatur entnommen werden [83].

Zur Modellierung und Simulation des mechanischen oder strukturtechnischen Verhaltens gibt es bereits eine Reihe an etablierten Methoden, die alle im Wesentlichen auf sogenannten Finite-Elemente-Methoden (FEM) beruhen. In vielen Fällen sind diese Methoden bereits in den 3D-CAD- Programmen zur geometrischen Modellierung von Anlagen hinterlegt. Beispielsweise können mit dem Modellierungsprogramm CATIA von *Dassault Systèmes* ebenfalls FEM-Analysen bezüglich mechanischer Spannungen aufgrund verschiedener Belastungsszenarien (z.B. Temperatur- und Druckspannungen) durchgeführt werden.

Experimentelle Modellbildung oder Black-Box- und Grey-Box-Modeling:

Die experimentelle Modellbildung beruht auf der Auswertung der Messdaten, die bei diversen Experimenten an den jeweiligen zu modellierenden Anlagen erfasst wurden. Deshalb wird dieser Art der Modellbildung auch datengetriebene Modellierung genannt. Somit kann auch schon ein wesentlicher Unterschied zur vorher beschriebenen mathematischen Modellierung definiert werden. Für die experimentelle Modellbildung müssen zuerst physische Systeme erzeugt werden, die die entsprechenden Daten liefern, bevor datengetriebene Modelle erstellt werden können. Somit fallen datengetriebene Modelle für die Entwicklung neuer Assets erst einmal weg. Diese Methode der Modellierung kann aber wesentliche Vorteile für die Modellierung der operativen Prozessvorgänge liefern. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal liegt im Grad des Wissens über konkrete Vorgänge innerhalb des Modells. Für eine reine Black-Box-Modellierung muss dem Modellersteller prinzipiell kein genaues Wissen über konkrete (z.B. physikalische) Vorgänge innerhalb des Modells bekannt sein. Die inneren Zusammenhänge, die diesen Vorgängen zu Grunde liegen, werden somit als unbekannt angesehen. Es wird lediglich das Verhältnis bestimmter Ein- und Ausgangsgrößen zueinander betrachtet. Die Modellbildung kann dadurch relativ einfach und schnell durchgeführt werden,

allerdings sind die Modellparameter immer auch an ein konkretes System gebunden, weshalb eine Übertragung auf andere, ähnliche Systeme nur beschränkt durchgeführt werden kann.

Für die datengetriebene Modellierung kommen intelligente Modellierungsmethoden aus dem Bereich *Maschinelles Lernen* oder *Machine Learning* (ML) zum Einsatz [85]. Ein Beispiel für solch einen ML-Algorithmus oder ML-Tool sind sogenannte *Künstliche Neuronale Netzwerke* (KNN) oder *Artificial Neural Networks* (ANN). Abbildung 29 zeigt ein Beispiel für ein KNN.

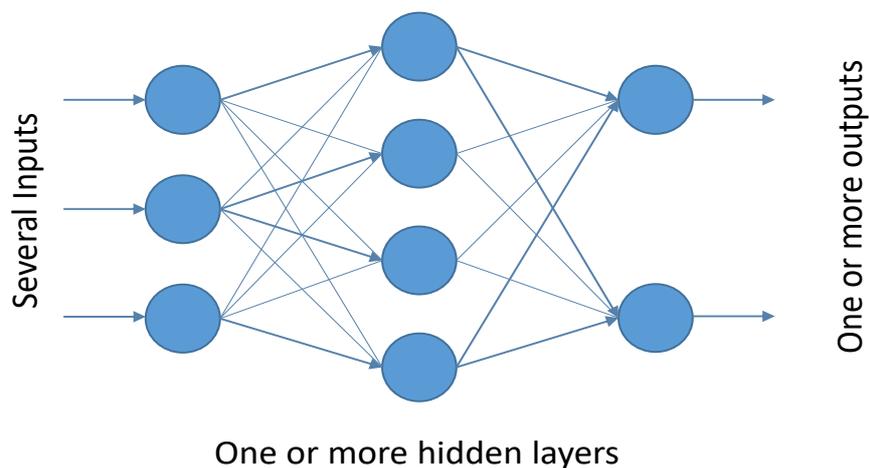


Abbildung 29: Feed-Forward Künstliches Neuronales Netzwerk

Vorbild für solche KNN sind die Übertragungsnetze von natürlichen Neuronen, wie sie im menschlichen Gehirn vorkommen. Grundlegendes Prinzip dahinter stellt die Entwicklung einer Form von Intelligenz dar in dem ein Lerneffekt durch die Verknüpfung einzelner Neuronen zu einem Netzwerk erzeugt wird. Ein künstliches Neuron verarbeitet dabei, ähnlich wie ein natürliches Neuron im menschlichen Gehirn, mehrere Inputvariablen zu einer Outputvariable. Dazu werden, wie in Abbildung 29 beispielhaft gezeigt, in einem Netzwerk, das aus mehreren Schichten (hidden oder internal layers, vgl. Abb. 29) bestehen kann, diese Neuronen miteinander verbunden. Dabei unterscheidet man weiter Netzwerke, die die Informationen nur „nach vorne“ (Feed-Forward ANN, siehe Abb. 29) vom Input zum Output weitergeben oder Netzwerke, die Informationen auch wieder vom Output in Richtung Eingang „zurückspielen“ (Recurrent ANN, siehe Abb. 30). Anhand von Beispieldaten werden die KNN darauf trainiert, die Informationen innerhalb des KNN richtig zu analysieren und zu klassifizieren. Dabei passt sich jedes einzelne Neuron während des Trainings immer weiter an die richtige Verarbeitung der Informationen aus den Inputdaten an. Deshalb ist das Einsatzgebiet von KNN insbesondere darauf bedacht, wo es offensichtlich einen physikalischen Zusammenhang zwischen bestimmten Ein- und

Ausgangsgrößen nur sehr schwer beschreiben lässt bzw. die Beschreibung mit großem numerischem Aufwand verbunden ist. Weiterführende Informationen zu KNN können dem Anhang von Udono [86] entnommen werden. [86]

Das sogenannte Grey-Box-Modeling stellt zuletzt eine Mischform der theoretischen und reinen experimentellen Modellbildung dar. In den meisten Anwendungsfällen wird für die Modellierung von Prozessen nach wie vor die mathematische Modellierung bevorzugt. Vorausgesetzt, die Struktur des Modells und die Modellparameter wurden richtig abgeschätzt, erlauben es mathematische Modelle, zuverlässige Aussagen in einem großen Gültigkeitsbereich zu treffen. Für einige Vorgänge innerhalb des Systems kann jedoch keine genaue Beschreibung durch mathematische Gleichungen durchgeführt werden. Mögliche Gründe dafür können sein [87]:

- Probleme bei der Beschreibung der Beziehung bestimmter Parameter zueinander. Meistens auf Grund von unbekanntem Phänomenen, komplexer nicht-linearer Beziehungen oder wenn auf Grund fehlender technischer Mittel eine Messung bestimmter Variablen, die zur Anpassung des Modells benötigt werden, nicht durchführbar ist.
- Wenn mit Hilfe der erreichbaren Rechenkapazität die gewünschte Modellierungsgenauigkeit nicht umgesetzt werden kann.

In diesen Fällen wurden in den letzten Jahren immer wieder sogenannte hybride Modellierungsmethoden (Grey-Box-Modellierung) angewandt. Im Unterschied zur Modellierung rein auf Basis von Daten kann durch diese Methodik die Zuverlässigkeit durch Einbeziehung von physikalischem Wissen bei verhältnismäßig geringem Modellierungsaufwand erheblich gesteigert werden. [88] Jene Vorgänge innerhalb des abzubildenden Modells, die bekannt sind, werden mit Hilfe der grundlegenden mathematischen Gleichungen (z.B. Bilanzgleichungen) beschrieben und mit datengetriebenen Modellen ergänzt, die für die Modellierung komplexerer Vorgänge zuständig sind.

Abbildung 30 zeigt ein Grey-Box-Modell das aus einem Black-Box-Modell, welches rein auf Basis von Eingangs- und Ausgangsgrößen modelliert wird, besteht und um ein physikalisches Modell erweitert wird. Für das dargestellte Modell in Abbildung 30 können für den Fall einer reinen Black-Box-Modellierung die Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgang nicht mit der gewünschten Genauigkeit dargestellt werden. Wird das Modell jedoch um sogenannte rückgekoppelte Zustandsvariablen (Feedback State Variables, vgl. Abb. 30) aus einem physikalischen Modell oder auf Basis von Messungen ergänzt, steigt die Zuverlässigkeit der Simulation des Modells erheblich. Mit Hilfe der Zustandsvariablen wird das dynamische Modell um zeitabhängige Zustände auf Basis von Messdaten oder Berechnungen ergänzt und vervollständigt. [85]

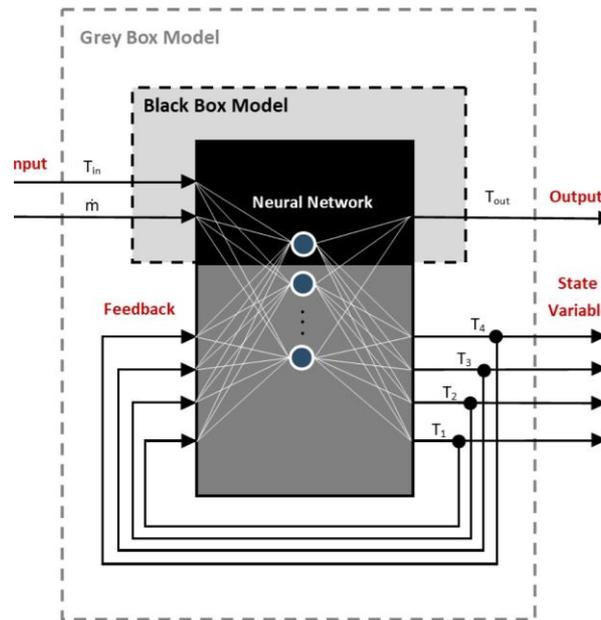


Abbildung 30: Grey-Box-Modellierung. Quelle: [88]⁴⁰

Fallbeispiele für die Grey-Box-Modellierung im Bereich des Dampferzeugers werden im letzten Kapitel dieses Berichts an Hand konkreter Anwendungsbeispiele gezeigt. An dieser Stelle sei jedoch bereits auf die Vorteile datengetriebener Modelle bei der Simulation von Verbrennungsvorgängen von Biomasse oder Müll oder bei der Modellierung von Verunreinigung an den Heizflächen durch Flugasche und Staub im Dampferzeuger hingewiesen. In beiden Fällen können die physikalischen Vorgänge, die sich hinter diesen Phänomenen verbergen, durch theoretische Modelle nicht oder nicht vollständig abgebildet werden. Wie in Kapitel 3 des dritten Teils dieses Berichts gezeigt wird, können diese Probleme mit Hilfe datengetriebener Modellierungsmethoden zumindest teilweise gelöst werden.

Die unterschiedlichen Voraussetzungen, die erforderlichen Ressourcen sowie die jeweiligen Vor- und Nachteile der beschriebenen Modellierungsmethoden werden in Tabelle 3 zusammengefasst. Außerdem werden Anwendungsbeispiele der jeweiligen Methodik im Rahmen des 5D-DTM angeführt. Eine umfangreiche Beschreibung der Anwendungsfälle wird in Kapitel 3 durchgeführt. Generell lässt sich bei der Prozessmodellierung ein deutlicher Trend in Richtung Grey-Box-oder Black-Box-Modellierung erkennen. Einen Überblick über moderne datengetriebene Ansätze zur Modellierung des Dampferzeugers kann beispielsweise Nikula et al. [89] entnommen werden. Basis für diese Methoden sind jedoch in erster Linie umfassende Betriebs-

⁴⁰ Reprinted from IFAC-PapersOnLine, 52/16, V. Halmschlager, M. Koller, F. Birkelbach, R. Hofmann, Grey Box Modeling of a Packed-Bed Regenerator Using Recurrent Neural Networks, 765-770, © (2019), with permission from Elsevier

oder Auslegungsdatensammlungen, die in vielen Bereichen jedoch noch nicht vorliegen. Deshalb sollte in jedem Fall eine Erweiterung des Datenbestandes angestrebt werden und es müssen entsprechende Strukturen zur Datenverarbeitung implementiert werden, damit auf dieser Grundlage datengetriebene Modelle weiterentwickelt werden können.

Tabelle 3: Vergleich zwischen theoretischer und experimenteller Modellbildung (vgl. [85])

	theoretische Modellbildung	experimentelle Modellbildung
Vorraussetzungen	Explizites physikalisches Prozesswissen	Umfangreiche Betriebsdatenbasis
Erforderliche Ressourcen	<ul style="list-style-type: none"> • Numerische Simulationssoftware • Validierungsdaten 	<ul style="list-style-type: none"> • Numerische Simulationssoftware • ML-Tools • Umfangreiche Datenbanken
Vorteil	Großer Gültigkeitsbereich und Übertragbarkeit auf andere ähnliche Systeme	Geringer Modellierungsaufwand und Rechenkapazität
Nachteil	Hoher Modellierungsaufwand und hohe Rechenkapazität bei entsprechender Genauigkeit	Beschränkte Gültigkeit (abhängig von Datenbasis), kaum auf andere ähnliche Systeme übertragbar und teilweise unzureichende Zuverlässigkeit
Anwendungsbeispiele im 5D-DTM (siehe Kapitel 3)	Berechnung der Materialermüdung dickwandiger Bauteile durch Temperatur- und Druckgradienten	Bestimmung des Biomasse-Heizwertes Beurteilung des Heizflächenverschmutzungsgrades

2.3 Datenmodell

Wie bereits in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt wurde, spielen Daten im Rahmen des DT eine wesentliche Rolle. Daten können als Quelle für neues Wissen dienen und werden auch im Bereich der Modellierung und Simulation immer stärker forciert. Die Erfassung und Auswertung aller Daten, die im Laufe des Lebenszyklus des DT entstehen und der Beschreibung von Gesetzmäßigkeiten und der Anhäufung von Wissen dienen, wird zukünftig zweifelsohne zur Schlüsseldisziplin im Rahmen des

DT werden. Dabei kann im Datenmodell des 5D-DTM im Wesentlichen zwischen folgenden Datenquellen differenziert werden (siehe Abb. 31):

- Betriebs-, Geometrie- oder Strukturdaten des physischen Dampferzeugers
- Simulationsdaten und Modellparameter aus dem virtuellen Dampferzeuger
- Daten aus dem Servicemodell (z.B. Optimierungsdaten, Eingabedaten aus dem Betriebsmanagement etc.)
- Fusionierte Daten, die sich aus einer Kombination der zuvor genannten Daten ergeben

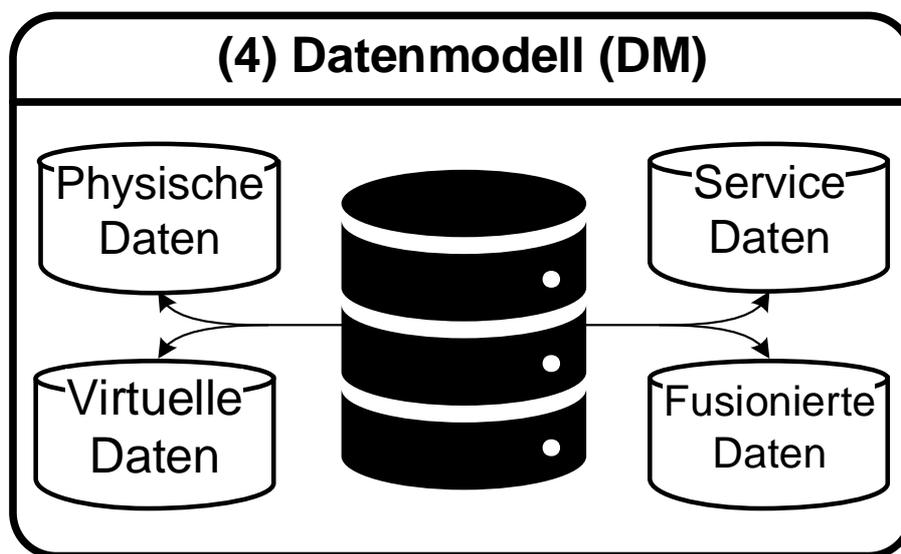


Abbildung 31: Datenmodell des 5D-DTM

Die große Herausforderung bei der Modellierung des DT-Datenmodells liegt vor allem darin, mit dieser Heterogenität durch unterschiedliche Datenquellen umgehen zu können. Heterogenität liegt dabei nicht nur durch unterschiedliche Datenquellen vor, sondern ist auch in einer zeitlichen Dimension vorhanden. Es müssen einerseits statische Daten zur Beschreibung unterschiedlicher Attribute der physischen Einheit und andererseits dynamische Zustands- sowie Betriebsdaten verarbeitet werden. Zusätzlich muss das Datenmodell bzw. die Wissensrepräsentation dazu befähigt werden, spezifisches Domänenwissen von Experten oder aus vorliegenden Daten zu extrahieren und im DM abrufbar zu machen. [81]

Nach Qi et al. [81] kann das Datenmanagement innerhalb des DT in folgende Schritte unterteilt werden:

- Datenerfassung
- Datenübertragung
- Datenspeicherung

- Datenverarbeitung
- Datenfusion
- Datenvisualisierung

Das Datenmodell selbst unterliegt einer iterativen Optimierung durch die Interaktion zwischen unterschiedlichen Datenarten. Historische Daten werden durch die Integration von Echtzeitdaten ständig aktualisiert und erweitert, während Echtzeitdaten auf Basis der generierten Information aus historischen Daten getestet und gegebenenfalls korrigiert werden können. Außerdem können Messdaten aus der physischen Welt mit Hilfe simulierter Daten evaluiert werden und durch eine Gegenüberstellung kann die Modellgüte ausgewertet werden. [51]

2.3.1 Datenerfassung und Datenübertragung

Die der eigentlichen Datenspeicherung und -verarbeitung vorgelagerten Prozesse sind die Datenerfassung und Datenübertragung. Diese wurden bereits im Rahmen des Kommunikationsmodells des 5D-DTM, welches in Abschnitt 2.1 Teil III untersucht wurde, erläutert. Dabei werden an jenen Stellen, wo Messsysteme vorhanden sind, Betriebsdaten und Umgebungsdaten einer Anlage mit Hilfe diverser Sensoren erfasst und über Schnittstellen des zu Grunde liegenden Kommunikationssystems zur Datenkonvertierung weitergeleitet. Die Übertragung der Daten kann im Wesentlichen durch kabelgebundene oder kabellose Technologien (Wireless) erfolgen. Die Weiterverarbeitung der Daten sollte im Sinne von I4.0 auf einer IoT-Plattform erfolgen, um eine hohe Verfügbarkeit der Daten zu ermöglichen (vgl. Abb. 25).

2.3.2 Datenverarbeitung und Datenspeicherung

Die größte Herausforderung für die Datenverarbeitung liegt darin, aus der großen Fülle an erfassten und weitergeleiteten Daten nun das gewünschte Wissen oder die gewünschte Information zu extrahieren. Die Rohdaten befinden sich zu diesem Zeitpunkt in einem Zustand, in dem sie teilweise unvollständig, unstrukturiert und von mehr oder weniger starkem Datenrauschen überlagert werden [81]. Die Zeitreihendaten, die aus den Messsystemen der Anlage stammen, liegen in unterschiedlichen Zeitzyklen, in denen Messwerte erfasst werden, vor. Außerdem kommt es zu Zeitverzögerungen zwischen Ereignissen und deren Auswirkungen auf das System [88]. Beispielsweise entsteht bei der Verbrennung der Biomasse im Dampferzeuger durch die Natur der Verbrennungsreaktion und des

Verbrennungssystems eine Verzögerung zwischen der Beschickung des Verbrennungssystems mit Brennstoff und der Umwandlung in Verbrennungsenergie. Deshalb muss durch eine vorgelagerte Vorverarbeitung der Daten eine entsprechende Struktur in die Roh- bzw. Messdaten gebracht werden. Dazu gehört auch das Entfernen von redundanten, irrelevanten, irreführenden, inkonsistenten oder doppelt vorliegenden Daten. Anwendbare Technologien für diesen Schritt sind beispielsweise Datenbereinigung und Datenglättung oder Datenreduktion und Datentransformation [81]. Min et al. [90] stellen in ihrer Arbeit am Beispiel der petrochemischen Industrie dar, wie die unterschiedliche Frequenz von Zeitreihendaten aneinander angeglichen werden kann. Dabei wird eine Reihe an Zeitdaten als Richtwert genommen und die anderen Zeitreihendaten durch einfache Methoden, wie beispielsweise die lineare Mittelwertbildung, daran angeglichen. Ein ähnliches Vorgehen schlagen die Autoren für die Schließung der Zeitlücken in den Zeitreihendaten vor. Eine ausführliche Beschreibung der Methodik kann Min et al. [90] entnommen werden.

Die Analyse der nun aufbereiteten Daten kann in weiterer Folge durch die bereits angeführten datengetriebenen Methoden und MI-Algorithmen, wie beispielsweise statistische Methoden oder KNN, durchgeführt werden. Die Speicherung der Daten erfolgt ebenfalls entweder in lokalen oder cloudbasierten Datenbanken. Die Datenspeicherung stellt einen weiteren wichtigen Aspekt des Datenmanagements dar, da durch die Speicherung der Daten die Einbeziehung historischer Daten ermöglicht wird. Moderne Technologien wie zum Beispiel ein verteiltes Datensystem (Distributed File System - DFS) ermöglichen die Umsetzung eines einheitlichen Datenbanksystems, das neben der Speicherung auch die Verwaltung von Daten auf mehreren verteilten Servern ermöglicht.

2.3.3 Datenfusion und Visualisierung

Der Nutzen der Datenfusion besteht darin, eine Integration und Konvergenz zwischen physischen Daten und virtuellen Daten zu schaffen.

Die Fusion der unterschiedlichen Daten wird durch einen Vergleich, eine Assoziation, eine Kombination oder durch eine Klassifizierung (Clustering) der Daten von PD aus dem physischen Raum und den virtuellen Daten, die aus dem VD oder dem SM des Dampferzeugers stammen, gebildet. Fusionierte Daten könnten für einen Dampferzeuger zum Beispiel folgendermaßen gebildet werden: Physikalische Messwerte bezüglich der Rohrabnutzung aus dem Dampferzeuger werden einerseits um FEM-Simulationsdaten bezüglich Spannung, Deformation und Festigkeit erweitert und andererseits mit Daten aus dem Servicemodell, wie beispielsweise Wartungsdaten, kombiniert (vgl. Tao et al. [51]). Durch die Zusammenführung dieser

physischen und virtuellen Daten entstehen, im Vergleich zu jenen Daten, die nur einen dieser Aspekte berücksichtigen, Informationen, die in ihrer Konsistenz, Genauigkeit und Vergleichbarkeit erheblich bereichert werden können. Auch dafür gibt es unterschiedliche Technologien und Algorithmen wie beispielsweise Kalman-Filter, KNN oder Fuzzylogik. [51]

Ein weiteres Beispiel für die Anwendung von fusionierten Daten kann Finn et al. [91] entnommen werden. Die Autoren verwendeten fusionierte Daten zur Systemüberwachung eines Kraftwerks mit Kraft-Wärme-Kopplung KWK (Combined Heat and Power CHP). Die Analyse des Phasenraums (Menge aller möglichen Zustände eines dynamischen Systems) mit Hilfe fusionierter Daten, die aus einer Kombination von unterschiedlichen Messdaten der Gasturbine zusammengesetzt wurden, bietet die Möglichkeit der visuellen Überwachung von Betriebsanomalien und kann für Diagnosezwecke bezüglich der Überschreitung von festgesetzten Grenzwerten herangezogen werden. [91]

Die Visualisierung der aufgezeichneten, verarbeiteten und fusionierten Daten bildet den Abschluss des Datenmanagements und stellt eine wichtige Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine dar. Unter Datenvisualisierung versteht man generell jegliche Handlungen, die mit der graphischen Darstellung der grundlegenden Prinzipien, Gesetzmäßigkeiten und der Logik, die in den Daten enthalten sind, verbunden ist [81]. Auch hierfür steht eine große Palette an Möglichkeiten zur Verfügung. Einerseits bieten unterschiedliche Arten und Formen von Diagrammen bestens etablierte Möglichkeiten zur Visualisierung der Daten. Andererseits entstehen im Rahmen von I4.0 immer komplexer werdende Methoden wie beispielsweise Augmented Reality (AR) oder Virtual Reality (VR). Diese beiden Formen der Visualisierung unterscheiden sich lediglich im Grad der Digitalisierung. Das bedeutet, dass im Unterschied zu VR im Rahmen von AR die physische Welt lediglich um einige virtuelle Elemente ergänzt wird. Das Konzept der VR geht einen Schritt weiter und stellt eine durchwegs virtuelle Welt dar. Beispiele für AR und VR im Zusammenhang mit Datenvisualisierung können Zhu et al. [92] oder Schröder et al. [93] entnommen werden.

Im Rahmen des 5D-DTM gehört die Visualisierung der Daten eigentlich zum Aufgabenbereich des Servicemodells und wird durch die im Servicemodell implementierten Dienstleistungen abgedeckt. Diese Dienstleistungen können jedoch nur dann zur Verfügung gestellt werden, wenn die Daten in der gewünschten Qualität vorliegen und durch die zuvor beschriebenen Schritte im Zuge des Datenmanagements bereinigt und aufbereitet wurden.

Zuletzt sei noch der Aspekt der Datensicherheit erwähnt. Durch Implementierung von Sicherheitsaspekten in Zusammenhang mit Daten muss gewährleistet werden, dass der Datenschutz und der unautorisierte Zugang zu jeglicher Form von Daten im

Rahmen des Digitalen Dampferzeugers ausgeschlossen oder zumindest minimiert werden kann.

2.3.4 Wissensrepräsentation/ Ontologien

Für ein allgemein einsetzbares DT-Modell 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. [94] Einen vielversprechenden Ansatz bieten hier Methoden der Informationsmodellierung und der Wissensrepräsentation (Knowledge Representation) bzw. der Ontologie.

Bei der Datenanbindung von Digitalen Zwillingen an ihr reales Gegenstück über industrielle Informationssysteme steht man vor der Herausforderung alle relevanten Echtzeitdaten aus heterogenen Datenquellen zusammenzuführen, um sie einheitlich im Digitalen Zwilling zu verwalten. Viele dieser Datenquellen stammen in der Regel von vorhandenen Komponenten und bieten keine einheitlichen Schnittstellen. Datenkonvertierung erfolgt oft über systemspezifische Gateways mit großer Fehleranfälligkeit und geringer Wiederverwendbarkeit. Um diesen Herausforderungen zukünftig wirklich 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.

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. 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 um die Konsistenz der Schnittstellen zu gewährleisten. Als herstellerunabhängiger Ansatz ist man dabei auch nicht auf Datenmodelle einzelner Hersteller beschränkt, womit essentiell eine breite Wiederverwendbarkeit gewährleistet sein sollte.

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 [31], Product Information Modeling (PIM) im Rahmen des Product Lifecycle Management [95] oder generell mithilfe von Ontologien, um strukturiertes Wissen für das Semantic Web [96] zu beschreiben. Informationsmodelle sind im Bereich der industriellen Energiesysteme noch nicht verbreitet, aus ersten Ansätzen und Vorarbeiten haben sich noch keine allgemeinen Standards etabliert. [97] Das liegt nicht zuletzt auch daran, dass die ontologische Modellierung von Energiesystemen aufgrund der großen Anlagenvielfalt und ihrer Variabilität eine schwierige Aufgabe ist. [94] Mögliche Ansätze wären hier unter anderem IEC Common Information Model (CIM, IEC 61970/61968) [98], RDF/OWL [99] bzw. IEEE P1600.1 Standard Upper Ontology (SUO) working group [100]. 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 Digitale Zwillinge notwendig ist. Es fehlt allgemein an verfügbaren Referenzmodellen für DT. [94]

Zentrales Element eines DT sollte ein Informationsmodell darstellen, das aus wiederverwendbaren Ontologien für eine konkrete Applikation (Objekt) als Knowledge Graph instanziiert werden kann. Dieses Informationsmodell integriert alle relevanten Daten aus unterschiedlichen Datenquellen und stellt sie, gemeinsam mit ihrer semantischen Beschreibung, zentral und strukturiert zur Verfügung. Die Anbindung von Echtzeitdaten kann zur leichteren Datenintegration mit OPC UA erfolgen. Für die Client/Server-Kommunikation oder Publish/Subscribe-Variante über OPC UA wird ein spezialisiertes Informationsmodell benötigt, das aus der bestehenden Ontologie mittels Transformationsprozessen automatisiert abgeleitet werden soll. Low-level Datenpunkte werden dabei mit Semantik angereichert und in die Ontologie „gemappt“. Die Datenpunkte, speziell Messreihen, werden in eigens dafür vorgesehenen Datenbanken (z.B. Zeitreihendatenbanken, Time series databases) abgelegt und mittels OBDA-Methoden (Ontology-based Data Access) an die Ontologie angebunden (speziell Mapping der Ontologie auf die Datenbankstruktur) und darüber verwaltet. Auf ähnliche Weise können auch weitere Datenquellen angebunden werden. Speziell von Interesse sind hier historische Daten aus Datenbanken, Tabellen, Trends etc. sowie Auslegungsdaten (die für eine Designoptimierung interessant sind), um die Echtzeitdaten zu einem vollständigen Gesamtbild zu ergänzen.

Aufbauend auf diesem zentralen Datenmanagement im 5D-DT können schließlich Services zur Verfügung gestellt werden, über die sich die Funktionalität des 5D-DT modular erweitern lässt. So können auch Simulationsmodelle und Optimierungsalgorithmen angebunden werden, welche in einer bidirektionalen Kommunikation auf der einen Seite notwendige Daten konsistent und

maschinenlesbar zur Verfügung gestellt bekommen, und andererseits Simulationsergebnisse und Resultate (z.B. Zeitreihenprädiktionen) zurückführen können, um das Informationsmodell weiter anzureichern oder die Datenqualität zu verbessern. Die Simulationen sind dadurch immer mit den aktuellsten Inputdaten versorgt, was essentiell ist, um eine korrekte Performance und akkurate Prädiktionen basierend auf dem aktuellen Realzustand des Objektes zu gewährleisten. Die Ontologie fungiert dabei als Middleware für die Datenintegration, mit Hilfe derer eine zuverlässige Basis für Daten- und Simulationsanalysen geschaffen werden kann, um die semantische Interoperabilität zwischen den Komponenten zu fördern. Ein systematisches Management der Kompatibilität und Interoperabilität ist essentiell für eine verteilte und interdisziplinäre Entwicklung von Funktionalitäten im 5D-DT.

Die semantische Modellierung erlaubt es außerdem „Reasoning“ auf den Daten durchzuführen. So können z.B. fehlende Datenpunkte vervollständigt oder Abhängigkeiten inferiert werden, beispielsweise zur methodischen Realisierung von „Soft Sensors“ oder um im Rahmen einer Diagnose fehlerhafte Daten zu erkennen.

Zusammenfassend können Ontologien als eine der neuen aufstrebenden Technologien maßgeblich zur Digitalisierung industrieller Energiesysteme beitragen. Als eine formale Beschreibung der betrachteten Anwendungsdomäne liefern sie eine integrierte Sichtweise, die nicht nur eine simple Datenstruktur darstellt, sondern eine semantische Beschreibung der relevanten Konzepte und deren Beziehungen. Diese erhöht die Aussagekraft und Datenkonsistenz und damit die Datenqualität, die einen kritischen Faktor bei der Bereitstellung von hochwertigen Informationsdiensten darstellt.

2.4 Servicemodell

Wie bereits im zweiten Teil des vorliegenden Berichts beschrieben wurde, entwickelt sich die modernen Handelsformen der Industrie immer mehr in Richtung eines serviceorientierten Produkt-Service-Systems (PPS), in dem Dienstleistungen oder Services in Zusammenhang mit physischen Produkten eine immer wichtigere Rolle einnehmen. [101]

Abbildung 32 zeigt das Servicemodell des Dampferzeugers im 5D-DTM mit einigen beispielhaft grafisch dargestellten Servicefunktionen.

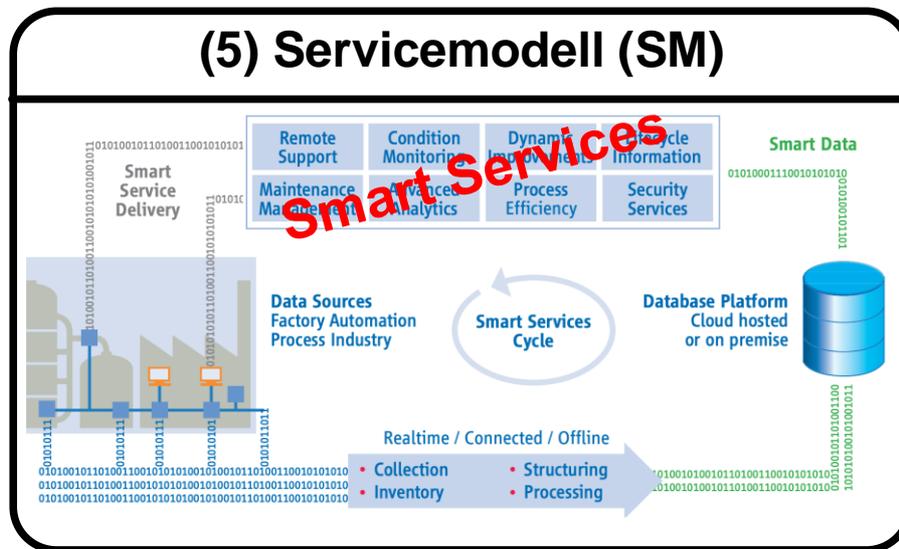


Abbildung 32: Servicemodell des 5D-DTM. Quelle: [102] © ZVEI, reproduziert mit Genehmigung

Die Wichtigkeit des Servicemodells im Rahmen des DT wurde ebenfalls bereits im zweiten Teil dieses Berichts erläutert. Zusammengefasst lassen sich drei wesentliche Aspekte, die für die Implementierung des Servicemodells sprechen, identifizieren: [81]

- Das Servicemodell bietet dem Benutzer anwendungsorientierte Services. Dazu gehören zum Beispiel die Modellsimulation, Modellevolution, Betriebsüberwachung, Optimierung, Diagnostik und Prognostik oder Zustandsvorhersage.
- Bereits bei der Entwicklung eines DT bedarf es unterschiedlicher Dienstleistungen von Drittanbietern, um überhaupt ein funktionstüchtiges Anwendungskonzept erstellen zu können. Diese Dienstleistungen können zum Beispiel bestimmte Datenservices betreffen.
- Zuletzt wird für den wirtschaftlichen und individualisierten Betrieb des DT die Unterstützung durch unterschiedliche Plattformdienste benötigt, damit auch für den Kunden eine kundenspezifische Softwareentwicklung, Modellbildung und Servicebereitstellung ermöglicht werden kann.

Werden die angeführten Aspekte berücksichtigt, entstehen innovative *Smart Services*, die dem Kunden entsprechend seinen Anforderungen zur Verfügung gestellt werden können. Einige dieser Smart Services, die im Rahmen der Prozessautomatisierung oder Fabrikautomation Anwendung finden könnten, zeigt Abbildung 33.

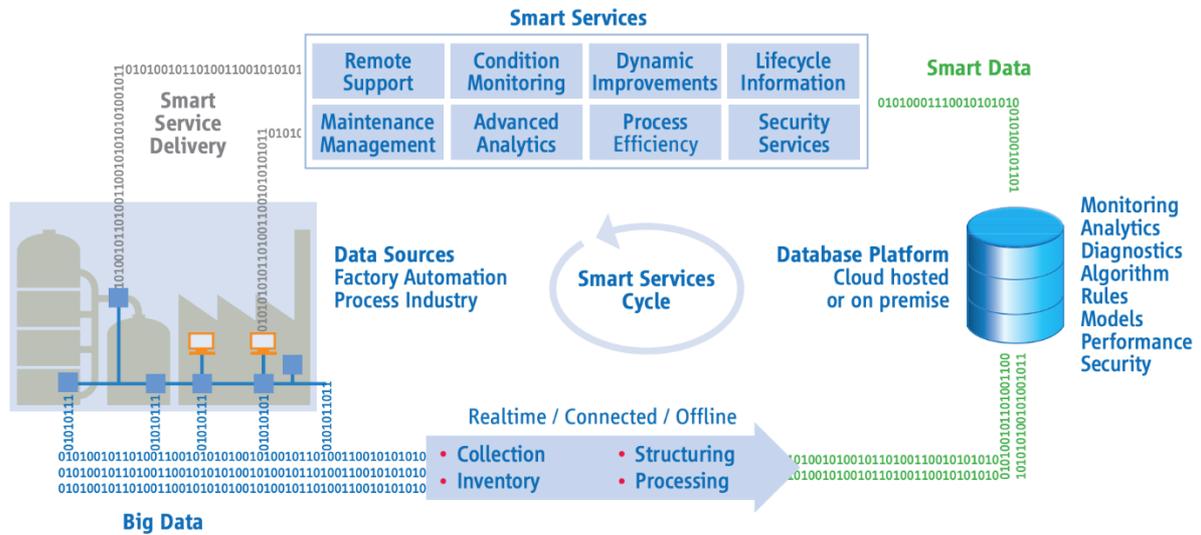


Abbildung 33: Smart Services und Ablaufmodell im 5D-DTM. Quelle: [102] © ZVEI, reproduziert mit Genehmigung

Durch die Dimension des Servicemodells ergibt sich letztlich der eigentliche Nutzen für den Anwender des 5D-DTM. Systeme und Anlagen, die mit Services wie beispielsweise Zustandsüberwachung, dynamischer Optimierung oder Instandhaltungsmanagement (vgl. Abb. 33) ausgestattet werden, bestehen durch eine erhöhte Sicherheit, Verfügbarkeit und Produktivität, was sich für den Anwender schlussendlich in einem monetären Mehrwert zu Buche schlagen wird. [102]

Einige Beispiele dieser Services werden nun im letzten Kapitel dieses Berichts im Rahmen von Wirtschaftlichkeitsanalysen unter Zuhilfenahme von spezifischen Anwendungsfällen für den digitalen Dampferzeuger und das 5D-DTM besprochen.

KAPITEL 3

Beurteilung der Wirtschaftlichkeit des digitalen Dampferzeugers

In diesem Kapitel soll gezeigt werden, wie das vorgestellte 5D-DTM den Anwender bei der Erbringung eines wirtschaftlichen Mehrwerts unterstützen kann. Wie in den vorangegangenen Abschnitten dieses Berichts ausführlich diskutiert wurde, ermöglicht das 5D-DTM grundsätzlich einen deutlich tiefergehenden Informationsstand bezüglich des Anlagenzustandes durch eine konsequente Datenerfassung und -auswertung zu gewinnen. Durch die Kombination der realen oder physischen Welt mit der virtuellen oder digitalen Welt wird ein weitaus umfassenderer Einblick in Vorgänge oder spezifische (teilweise physikalisch nur schwer erfassbare) Phänomene erhalten, der wiederum die Durchführung von Reglungs- und Steuerungsentscheidungen der Systeme oder Anlagen erheblich verbessern kann. Welche Möglichkeiten es für die Effizienzsteigerung eines Dampferzeugers mit Hilfe eines digitalen Dampferzeugers und des 5D-DTM gibt, soll in diesem Abschnitt anhand konkreter Anwendungsszenarien (Use-Case-Szenario) gezeigt werden. Wie eingangs erwähnt, liegt bei der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit des digitalen Dampferzeugers in diesem Projekt der Schwerpunkt auf Anwendungsbeispielen innerhalb der Betriebs- und Instandhaltungsphase des Dampferzeugers. Natürlich bleibt die Anwendbarkeit des vorgestellten 5D-DTM eines Dampferzeugers jedoch nicht nur auf diese Phase des Lebenszyklus beschränkt. Deshalb werden im Nachfolgenden kurz einige Ideen vorgestellt, die auch in den übrigen Lebenszyklusphasen des Dampferzeugers zu einer erheblichen Effizienzsteigerungen der Wertschöpfungsprozesse führen können.

Abbildung 34 zeigt den gesamten Produktlebenszyklus (Product Life Cycle - PLC), den ein beliebiges technisches Asset erfährt.

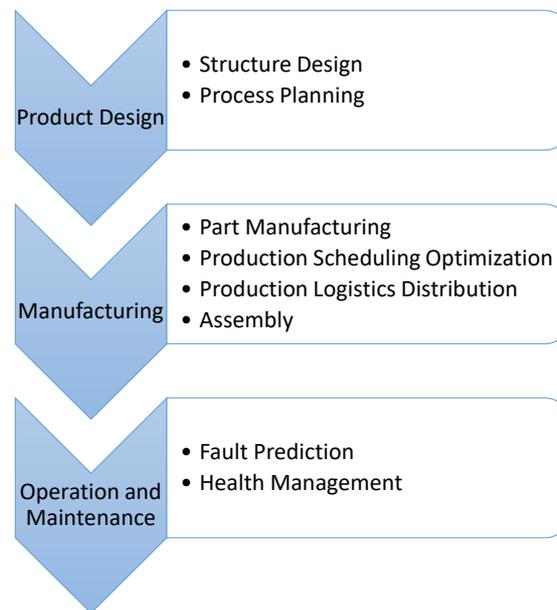


Abbildung 34: Produktlebenszyklus eines technischen Assets (in Anlehnung an [53])

Außerdem werden in Abbildung 34 beispielhaft einige Prozessschritte in den jeweiligen Lebenszyklusphasen dargestellt. Grundsätzlich unterscheidet man folgende Stadien im PLC eines technischen Assets: [53]

Produktdesign:

Einer der elementaren Schritte in der Produktdesignphase ist die Entwicklung einer Struktur in Form eines strukturellen Entwurfs des Assets (*Structure Design* in Abb. 34). Die charakteristischen Merkmale, die diese Struktur erfüllen muss, ergeben sich in erster Linie aus den Anforderungen des Kunden, die dieser an den Hersteller oder Entwickler der Anlage stellt. Außerdem ist diese Struktur die Grundlage für das Layout des späteren Herstellungsprozesses (*Process Planning* in Abb. 34). Ein DT in dieser PLC-Phase bietet den Produktentwicklern erhebliche Vorteile bei der kontinuierlichen Verbesserung und Anpassung des Strukturdesigns. Durch die Integration von Leistungs-, Test- oder Betriebsdaten aus der operativen PLC-Phase bereits bestehender Produkte und einem bidirektionalen Datenaustauschkanal zwischen virtueller und realer Welt hilft der DT dabei, die Lücke zwischen realen Assets und den Annahmen, die während der Designphase getroffen werden, zu schließen. Durch eine derartige Vorgehensweise lässt sich letztlich die Qualität der Produktdesignphase erheblich steigern. [53]

Produktherstellung:

Das 5D-DTM in dieser PLC-Phase sorgt vor allem für mehr Zuverlässigkeit, Flexibilität und Vorhersagbarkeit des Produktionsprozesses [36]. Betrachtet man

Produktionsprozesses, so kann durch das 5D-DTM vor allem die Überwachung einzelner Prozessschritte verbessert werden. Durch das Monitoring von Echtzeit-Produktionsdaten können Prozesse besser visualisiert und analysiert werden. Außerdem können Arbeiter im Produktionsprozess durch zusätzliche Produktinformationen aus dem 5D-DTM bei der Komponentenfertigung (*Part Manufacturing* in Abb. 34) und beim Zusammenbau von Komponenten (*Assembly* in Abb. 34) unterstützt werden. So kann im Fall des Dampferzeugers durch eine durchgängige Verfügbarkeit der Informationen entlang des Herstellungsprozesse über den digitalen Raum zum Beispiel der Prozess der Endmontage und Inbetriebnahme der Dampferzeugungsanlage beim Kunden verkürzt und verbessert werden. Ein weiterer Vorteil des 5D-DTM für Kesselhersteller liegt in der Integrierbarkeit der gesamten Wertschöpfungskette des Herstellungsprozesses in das Modell. Die Vielzahl an unterschiedlichen Komponentenhersteller, die Komponenten für einen Dampferzeuger bereitstellen, können in den Produktionsprozess integriert werden und somit die Produktionsplanung (*Production Scheduling* in Abb. 34) und die Produktionslogistik und -verteilung (*Production Logistics and Distribution* in Abb. 34) optimiert werden. Das wiederum führt für den Hersteller zu kürzeren Durchlaufzeiten und einer flexibleren Produktionsplanung. [103]

Betriebs- und Instandhaltungsphase:

Die Betriebs- und Instandhaltungsphase spielt für den Dampferzeuger eine besonders wichtige Rolle. Wie bereits in Kapitel I Teil III festgehalten wurde, ist ein wesentlicher Aspekt eines komplexen Systems der Zeitraum, in dem das System seine Funktion erfüllen muss. Komplexe Systeme werden grundsätzlich dafür ausgelegt, über einen möglichst langen Zeitraum mit wenigen Ausfallszeiten einen funktionstüchtigen Zustand aufrecht zu erhalten. Der wirtschaftliche Erfolg eines solchen Systems ist direkt mit den geleisteten Betriebsstunden verbunden. Deshalb wird der Betriebsüberwachung, Optimierung von Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen und der Betriebsoptimierung selbst eine wichtige Rolle im Lebenszyklus des Dampferzeugers zugeschrieben. Bezugnehmend auf das DT-Konzept lässt sich die Anwendung des DT in der Betriebs- und Instandhaltungsphase weiter in verschiedene Evolutionsstufen unterteilen. Diese Stufen können anhand der Komplexität des DT-Konzepts in aufsteigender Reihenfolge folgendermaßen eingeteilt werden: [104]

- **Offline-Betriebsüberwachung und reaktive Steuerung:**
Diese Form der Anwendung eines DT stellt den einfachsten Fall dar. Ein digitales Modell der Anlage existiert quasi im Hintergrund (offline) des bestehenden realen Systems. Die Betriebsdaten, die in der realen Welt erfasst werden, werden dementsprechend als historische Daten in einer Offline-Simulation durch das Ingenieursteam ausgewertet. Steuerungs- und Regelungsbefehle werden dann als reaktive Maßnahmen aus dieser

Auswertung abgeleitet und in die reale Welt gespielt. Das bedeutet, dass diese Maßnahmen nicht in Echtzeit zur Systemkonfiguration und -kontrolle eingesetzt werden können. Dieser Anwendungsfall beschreibt im Prinzip den derzeitigen Stand, wie die Regelung und Steuerung des Dampferzeugers in vielen Fällen durchgeführt wird. Die Menge an erfassten und in den digitalen Raum übertragenen Daten ist eher gering und die Betriebs- und Umgebungsbedingungen sind überwiegend bekannt und stabil. Das Gesamtsystem und seine digitalen Komponenten wurden bereits im Vorhinein konfiguriert und eine Anpassung mit Hilfe von Echtzeitdaten findet kaum nicht statt.

- **Online-Betriebsüberwachung:**
Diese zweite Form der Anwendung des DT-Konzepts besitzt bereits einen umfangreicheren Grad an Systemkomplexität, was dessen Umsetzung betrifft. Die Menge an erfassten und in den digitalen Raum übermittelten Daten ist deutlich umfangreicher und es bestehen Datenaustauschkanäle, die eine Kommunikation zwischen realer und virtueller Welt in Echtzeit ermöglichen. Im Unterschied zum vorherigen Anwendungsszenario sind die Betriebszustände und Umgebungsbedingungen nach wie vor überwiegend stabil und bekannt, die Systemkonfiguration kann aber während der Laufzeit angepasst werden.
- **Zustandsbasierte vorausschauende Instandhaltung (Predictive Maintenance):**
Dieser Anwendungsfall beschreibt erstmals die Vision einer proaktiven Handlung, um zukünftige potenzielle Probleme vorhersagen zu können oder Störungen oder Anomalien generell zu vermeiden. Es wird also nicht wie zuvor auf eine Systemveränderung rückwirkend reagiert, sondern es wird versucht, durch eine kontinuierliche Überwachung des Systems entsprechende Vorhersagen über potenziell in der Zukunft auftretende Probleme zu treffen. Für diese Evolutionsstufe des Konzeptes bedarf es der intensiven Nutzung der bereits mehrfach erwähnten digitalen Technologien aus der IKT-Branche. Nur mit Hilfe intelligenter Datenverarbeitung und -auswertung kann die bei diesem Szenario erfasste und übermittelte Datenflut bewältigt werden und Informationen aus den Rohdaten durch eine Datenanalyse abgeleitet werden. Bezüglich der Betriebszustände und Umgebungsbedingungen werden bei diesem Szenario bestimmte Annahmen getroffen, die aus der Auswertung historischer Daten und Informationen resultieren. Mit diesen Daten können die Datenmodelle des DT trainiert werden und die Qualität der prädiktiven Vorhersagen wird kontinuierlich verbessert. Bei diesem Anwendungsszenario tritt eine hohe Systemkomplexität auf und die Ausgestaltung des 5D-DTM ist entsprechend anspruchsvoll.
- **Proaktive Betriebssteuerung:**
Dieses letzte Szenario weist den umfangreichsten Komplexitätsgrad auf und beschreibt somit die höchste Evolutionsstufe eine DT-Anwendung. Das

intelligente System kann auf Basis vordefinierter zu erreichender Ziele seinen Zustand selbstständig optimieren und anpassen und reagiert in Eigenregie auf sich verändernde und neue Betriebsbedingungen. Die Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit der aktuell ausgeführten Betriebsstrategie zur Erreichung des Ziels wird durch das 5D-DTM in regelmäßigen Zyklen auf eine intelligente Art und Weise selbstständig hinterfragt und gegebenenfalls verbessert. Verhaltensmodelle werden kontinuierlich weiterentwickelt, um noch effizienter auf Systemveränderungen reagieren zu können. Für dieses Szenario ist beispielsweise die Verbindung mehrerer DTs eine erfolgsversprechende Strategie. So können die Systeme voneinander lernen und die Datengrundlage für die Weiterentwicklung von Simulations- und Datenmodellen kann schneller erweitert werden.

Im letzten Abschnitt dieses Berichts werden nun jeweils einzelne Anwendungsbeispiele für den Digitalen Dampferzeuger in den angeführten Entwicklungsstufen der Online-Betriebsüberwachung, zustandsbasierten vorrausschauenden Instandhaltung und proaktiven Betriebssteuerung bzw. -Optimierung skizziert.

3.1 Betriebsüberwachung

Die Betriebsführung und die Überwachung eines Dampferzeugers mit Biomasseverbrennung stellt die Anlagenbetreiber derzeit vor große Herausforderungen. Noch immer sind nicht alle Wechselwirkungen innerhalb des Verbrennungsprozesses bzw. der Einfluss wesentlicher Prozessparameter auf die Prozessqualität bei der Verbrennung von schwierigen Brennstoffen, wie zum Beispiel Abfall oder Biomasse, bekannt [105]. Beckmann und Rostkowski [105] geben folgende wesentliche Verbesserungen an, die durch eine zusätzliche Überwachung der Verbrennungsvorgänge schwieriger Brennstoffe erreicht werden können:

- Senkung der Abgasströme
- Abbau von Schadstoffen
- Verbesserung der Aschequalität
- Steigerung des Gesamtwirkungsgrades
- Verminderung von Korrosion

Für die Anlagenbetreiber ist eine umfassende Kenntnis des Anlagen-Istzustandes unabdingbar, damit die aufgezählten Verbesserungen bei der Prozessführung umgesetzt werden können. Der Anlagen-Istzustand kann im Wesentlichen durch konstruktive Parameter, die Anlagentechnik selbst und durch betriebliche Parameter charakterisiert werden. Bezüglich der betrieblichen Parameter werden für die meisten Anlagen derzeit nur jene Parameter aktiv erfasst, die für den Nachweis einzuhaltender gesetzlicher Grenzwerte, für sicherheitskritische Belange oder für die grobe Regelung der Anlage relevant sind. Beispiele dafür sind nach Beckmann und Rostkowski [105] der Sauerstoffgehalt des Abgases oder der Massenstrom des produzierten Frischdampfes.

Neben der Kontrolle der Verbrennung schwieriger Brennstoffe und der damit einhergehenden Überwachung der Rauchgasemissionen stellt die Verschmutzung und Korrosion der Heizflächen die Anlagenbetreiber vor weitere Herausforderungen. Ein großes Problem bei der Verbrennung von Biomasse im Vergleich zu konventionellen Brennstoffen wie Kohle oder Öl liegt in der Variabilität der Zusammensetzung der Biomasse und dem dadurch teilweise stark schwankenden Heizwert. Besonders die anorganischen Bestandteile der Biomasse einen negativen Einfluss und führen zu einer stärkeren Verschmutzung der Heizflächen. Der hohe Anteil alkalihaltiger Erdmetalle in Kombination mit anderen Bestandteilen der Biomasse wie Siliziumoxid, Schwefel und Chlor führen zu unerwünschten Reaktionen bei der Verbrennung der Biomasse und dementsprechend zu kritischen

Zusammensetzungen des Rauchgases. Obwohl der Heizwert von Biomasse im Allgemeinen jenem von beispielsweise Kohle unterlegen ist, wird zukünftig Biomasse als Brennstoff aufgrund seiner CO₂-Neutralität bevorzugt werden, weshalb eine umfangreichere Überwachung von Biomasseverbrennungsanlagen forciert werden sollte. [106]

Um entsprechend auf die angeführten Herausforderungen reagieren zu können, müssen dem Anlagenbetreiber umfangreichere Daten bezüglich des Anlagen-Istzustandes zur Verfügung gestellt werden. Außerdem liefert die Erfassung umfangreicher Betriebsdaten die grundlegende Basis für weitere Anwendungsfälle wie Predictive Maintenance oder für eine proaktive Betriebsführung.

Ein Ansatz für die Verbesserung dieser Problematik ist zum Beispiel die Entwicklung neuartiger Sensorik, die den schwierigen Betriebsbedingungen, die bei einer Verbrennung herrschen, standhält und außerdem zuverlässige Messwerte liefern kann. Lockwood [107] untersuchte diesbezüglich Sensorik der nächsten Generation, die diesen Anforderungen entsprechen könnte. Unter anderem wurde hierfür die Anwendung spezieller optischer Sensoren oder Hochtemperatur-Mikrosensoren angedacht. Getestet wurden diese Sensorsysteme allerdings an einem mit Kohle befeuerten Dampferzeuger, dessen Verbrennungssystem unter anderen Bedingungen betrieben wird.

Im Rahmen der Digitalisierung und des DT werden sogenannte Softsensoren (*Soft Sensors*) oder datengetriebene bzw. virtuelle Sensoren immer häufiger in Betracht gezogen. Deshalb wird im Nachfolgenden der Einsatz dieser Art der virtuellen Sensorik anhand konkreter Anwendungsfälle für einen Dampferzeuger beschrieben.

3.1.1 Use-Case-Szenario: Unterstützung der Anlagenbetreiber durch verbessertes Monitoring mit Hilfe von Softsensoren

In der Literatur finden sich einige Beispiele, in denen Softsensoren entwickelt wurden, um den Heizwert von Brennstoffen aus Biomasse zur Energieversorgung zu erfassen. Grundsätzlich kommen dabei unterschiedliche Methoden für die Entwicklung der Softsensoren in Frage. Ähnlich wie bereits in Teil III Abschnitt 2.2.1 bei der Modellierung und Simulation des virtuellen Dampferzeugers beschrieben, kommen auch für virtuelle Sensoren mathematische Modelle, datengetriebene Modelle oder hybride Formen der Modellierung zum Einsatz.

Ein Beispiel für einen Softsensor zur Bestimmung des Heizwerts der Biomasse auf Basis eines dynamischen, nichtlinearen mathematischen Modells kann der

Untersuchung von Kortela et al. [108] entnommen werden. Die Autoren haben in ihrer Untersuchung eine verbesserte Strategie zur Bestimmung der Biomassequalität entwickelt. Unter Berücksichtigung des Sauerstoffverbrauchs und der gesamten Verbrennungsluftmenge kann die verbrannte Biomasse bestimmt und die Biomassezufuhr entsprechend gesteuert werden. Mit Hilfe des dynamischen Modells des Überhitzers der zweiten Stufe (Bestimmung der Verbrennungsleistung) kann in weiterer Folge auf die Brennstoffzusammensetzung (Softsensor) rückgerechnet werden. Damit kann letztlich der Verbrennungsprozess dynamisch geregelt werden und Oszillationen der Heißdampf Temperatur und des Heißdampfdrucks können reduziert werden. Einzelheiten zur verwendeten Methodik können der entsprechenden Literatur [108] entnommen werden. Im Unterschied zu herkömmlichen Regelverfahren zeigt sich, dass das von Kortela et al. [108] vorgestellte Verfahren zur Regelung der Verbrennung im Dampferzeuger mit Hilfe von Softsensoren zu einer deutlichen Reduktion der Temperatur- und Druckschwankungen bei einer plötzlichen Änderung der Brennstoffqualität (Ausschlag nach ungefähr der ersten und zweiten Betriebsstunde in Abb. 35) oder der Kesselleistung (Ausschlag nach ungefähr einer Betriebsstunde in Abb. 36) führt.

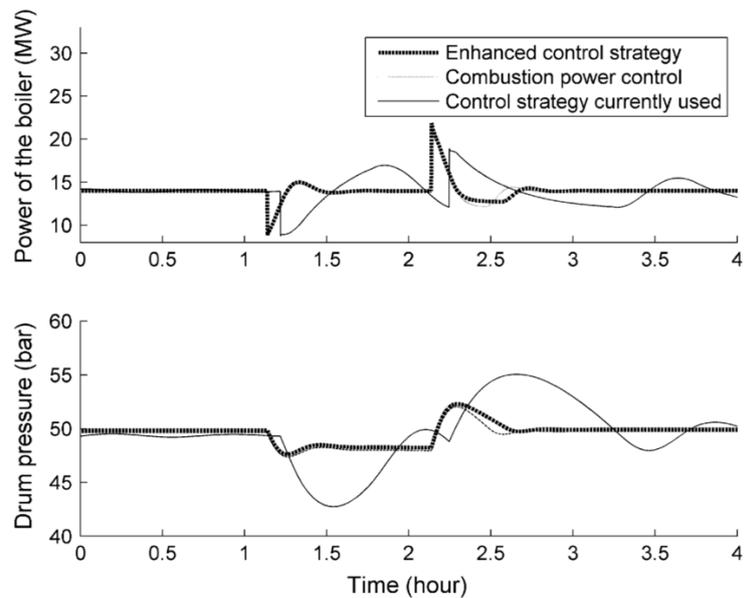


Abbildung 35: Kesselleistungs- und Druckschwankungen bei Änderungen der Biomassequalität (Erhöhung der Feuchtigkeit der Biomasse von 55% auf 65%). Quelle: [108]⁴¹

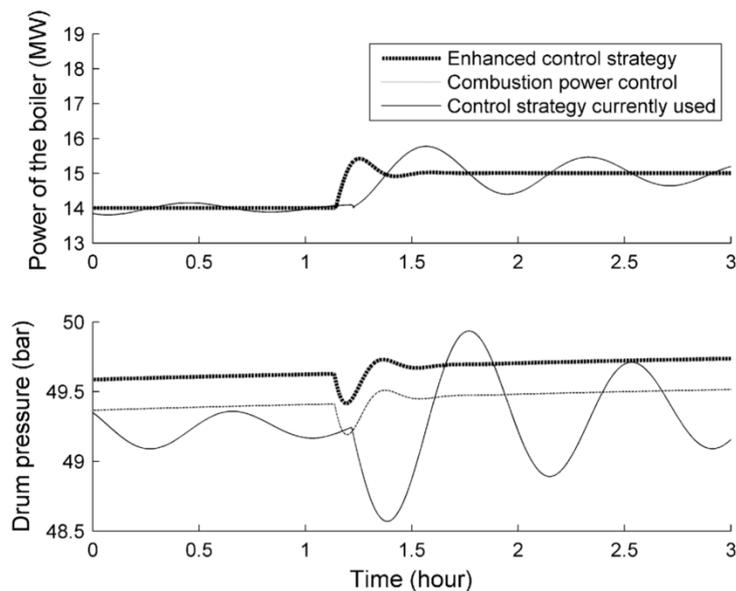


Abbildung 36: Kesselleistungs- und Druckschwankungen bei Änderungen des Leistungsbedarfs von 14 MW auf 15 MW (bei einer konstanten Feuchtigkeit der Biomasse von 57%). Quelle: [108]⁴¹

Durch die dargestellte Stabilisierung des Verbrennungsprozesses mit Hilfe der entwickelten, verbesserten Verbrennungsregelungsstrategie durch den Softsensor

⁴¹ Reprinted from International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 42/1, J. Kortela, S.-L. Jämsä-Jounela, Fuel-quality soft sensor using the dynamic superheater model for control strategy improvement of the BioPower 5 CHP plant, 38-48, © (2012), with permission from Elsevier

kann letztlich die Belastung der Anlagenteile durch Vermeidung unnötiger Druck- und Temperaturschwankungen reduziert und deren Lebensdauer verlängert werden.

Kabugo et al. [68, 109] führten eine Fallstudie am Beispiel eines sogenannten Ersatzbrennstoffkraftwerks (Waste-to-Energy (WTE) Plant) durch. Dabei untersuchten sie die Anwendung von datengetriebenen Softsensoren, um den Heizwert des zur Verbrennung verwendeten Synthesegases und die Rauchgastemperaturen nach der Verbrennung zu bestimmen. Bei dem untersuchten Kraftwerk treten durch die variable Zusammensetzung des Synthesegases ähnliche Probleme wie bei der Biomasse-Direktverbrennung auf. Im Unterschied zur Direktverbrennung der Biomasse wird im untersuchten Kraftwerk die Feststoffbiomasse in einem der Verbrennung vorgeschalteten Vergasungsprozess in ein Synthesegas umgewandelt. Dieses Synthesegas dient anschließend als Brenngas für den eigentlichen Verbrennungsprozess. Die Quantifizierung des Synthesegasheizwertes ist mit den aktuell zur Verfügung stehenden Hardwareressourcen unter annehmbarem wirtschaftlichem Aufwand kaum durchführbar. Deshalb wurde mit Hilfe von datengetriebenen Softsensoren versucht, eine qualitativ hochwertige Aussage über diese Prozessvariablen treffen zu können. Die Autoren verwendeten vier verschiedene ML-Algorithmen zur Implementierung des datengetriebenen Softsensors:

- Lineare Mehrfachregression (MLR)
- Hauptkomponentenregression (PCR)
- Regression der partiellen kleinsten Quadrate (PLSR)
- Nichtlineares autoregressives KNN mit externen Eingangsvariablen (NN-NARX)

Die Betriebsdaten, die für die Untersuchung verwendet wurden, stammen aus einer Simulationssoftware der Firma Outotec⁴² und wurden für einen Zeitraum von 3 Monaten simuliert. Diese Daten wurden manuell in Trainingsdaten, Validierungsdaten und Testdaten unterteilt. Bevor die Modelle erstellt werden konnten, wurden die Daten außerdem in einer Daten-Vorverarbeitungsphase von Ausreißern befreit, gefiltert und skaliert. Die Prozessvariablen zur Modellvorhersage wurden manuell mit Hilfe von Korrelationsanalysen und durch entsprechendes Prozesswissen von Experten ausgewählt. Das genauere Vorgehen kann der entsprechenden Literatur [100] entnommen werden.

Die Untersuchungsergebnisse von Kabugo et al. [109] zeigen, dass das NN-NARX Modell sehr gut für die Beschreibung des dynamischen Verbrennungsprozesses herangezogen werden kann. Im Vergleich zu den statisch-linearen Modellen (MLR,

⁴² <https://www.outotec.com/>

PCR und PLSR) ist das dynamisch-nichtlineare NN-NARX-Modell weniger abhängig von der Wahl der unabhängigen Eingangsvariablen.

Im Unterschied zu Methoden, die auf der Berechnung von Massen- und Energiebilanzen beruhen, können datengetriebene Softsensoren speziell dort zu einer verbesserten Prozessüberwachung führen, wo das spezifische Wissen bezüglich der physikalischen Phänomene des darzustellenden Prozesses fehlt. Im Vergleich zur Modellierung des Synthesegasheizwertes mittels stationärer Energiebilanzen zeigt sich, dass das datengetriebene NN-NARX-Modell eine eindeutige Verbesserung bei der Übereinstimmung zwischen Mess- und Testwerten liefert. [109]

Für die prädiktive Datenanalyse in der Prozessindustrie sind virtuelle Sensoren somit von unschätzbarem Wert, um Einblicke in den Zustand von Prozessabläufen zu erhalten. Das gilt insbesondere für Anwendungsfälle, bei denen sich die direkte Messung wichtiger Prozessvariablen äußerst schwierig gestaltet, unzuverlässig oder sogar nahezu unmöglich ist. [68]

3.2 Predictive Maintenance

Wie bereits in der Einleitung zu Kapitel III aufgezeigt, ist das Ziel einer Systemvorhersage, Anomalien oder potentielle Fehler in der Betriebsführung frühzeitig zu erkennen und Maßnahmen für die Zukunft zur Vermeidung eines Ausfalls oder einer Betriebsabweichung abschätzen, beurteilen und planen zu können. Um dies umzusetzen, gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten. Es können kritische Betriebszustände grundsätzlich vermieden werden, indem eine optimale Betriebssteuerung in Hinblick auf die Abnutzung von Systemkomponenten gewählt wird. Diese Herangehensweise wird im letzten Teil dieses Kapitels genauer erläutert. Es handelt sich dabei um ein äußerst komplexes Zusammenspiel unterschiedlichster Systemkomponenten zur Erreichung eines Gesamtoptimums. Treten Abweichungen von einem als Ziel definierten Betriebszustand auf, so werden sofort Maßnahmen getroffen, die dieser Abweichung entgegenwirken und dadurch können Fehler vermieden werden. Die zweite Möglichkeit in Hinblick auf eine vorrausschauende Betriebssteuerung ist jene, bei der zwar kritische Betriebszustände dort in Kauf genommen werden, wo sie sich nicht vermeiden lassen, aber durch eine bewusste Wahrnehmung und Dokumentation dieser Zustände bestimmte Risiken, die sich für Systemkomponenten ergeben, abgeschätzt und beurteilt werden können.

In diesem Abschnitt des vorliegenden Berichts wird auf die prädiktive Systemvorhersage in Bezug auf die Wartungs- und Instandhaltungsplanung des Dampferzeugers genauer eingegangen. Ein Begriff, der in jüngster Zeit häufig in diesem Zusammenhang verwendet wird, ist *Predictive Maintenance*. Predictive Maintenance fasst genau die zuvor als zweite Möglichkeit der Betriebssteuerung beschriebene Vorgehensweise zusammen und zielt auf einen proaktiven Umgang mit Betriebsstörungen ab.

Abbildung 37 zeigt die unterschiedlichen Arten der Instandhaltung nach DIN EN 13306⁴³. Grundsätzlich lässt sich die Instandhaltung folgendermaßen definieren:

„Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus eines Objekts, die dem Erhalt oder der Wiederherstellung seines funktionsfähigen Zustands dient, sodass es die geforderte Funktion erfüllen kann.“⁴⁴

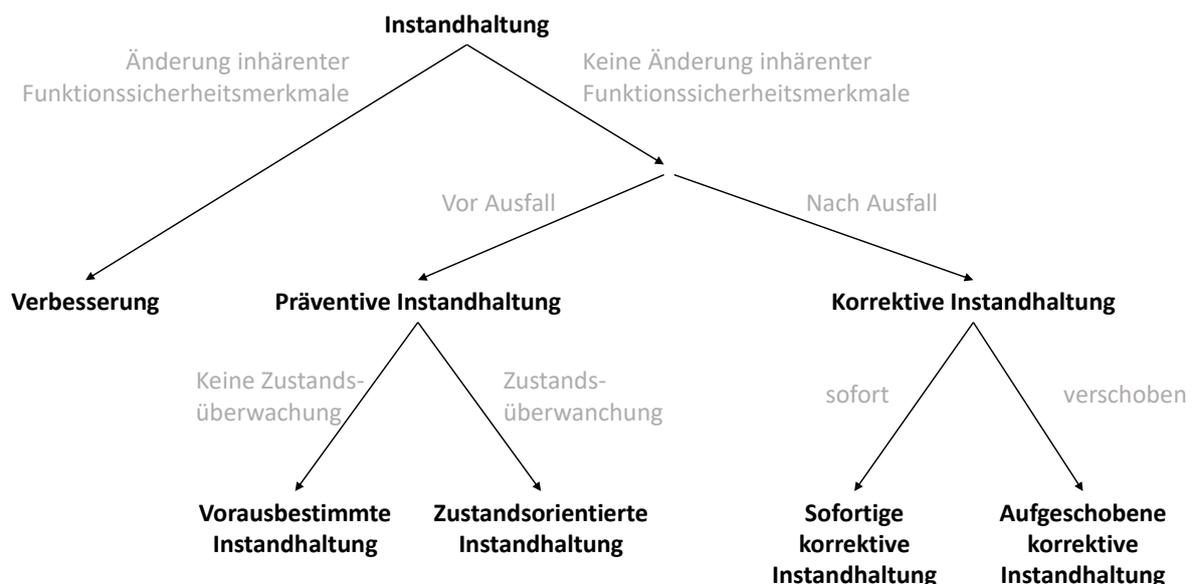


Abbildung 37: Arten der Instandhaltung (in Anlehnung an DIN EN 13306³⁹)

Instandhaltung lässt sich nach Abbildung 37 also in folgende Arten unterteilen:

- **Korrektive Instandhaltung:** Diese Art der Instandhaltung stellt die einfachste Strategie für die Instandhaltung eines Systems dar. Sie erfordert keinerlei Planung oder Zustandsüberwachung des Systems. Treten Fehler im System auf, werden die entsprechenden Maßnahmen abgeleitet, die das System wieder

⁴³ DIN EN 13306:2018-02, Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung

⁴⁴ DIN EN 13306:2018-02, Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung

in einen funktionstüchtigen Zustand rückführen. Bis zur Rückführung kommt es aber zu einem Systemausfall. Dieser Instandhaltungsansatz kann den Anlagenbetreiber finanziell stark belasten, da er hohe Kosten im Bereich von Betriebsausfall, Komponenten, Arbeit für die Wiederinstandsetzung und Lebensdauer des Systems verursacht. [110]

- Präventive Instandhaltung: Diese Art der Instandhaltung reduziert die Anzahl der Systemausfälle durch das Auftreten von Fehlern auf ein Minimum oder im Optimalfall auf null. Das Ziel der präventiven Instandhaltung ist es, die Entwicklung und Ausbreitung von potenziellen Fehlfunktionen des Systems zu überwachen und einem Fehler, noch bevor dieser eintritt, durch eine entsprechende Instandhaltungsmaßnahme entgegenzuwirken. Dabei können an dieser Stelle zwei unterschiedliche Formen der präventiven Instandhaltung unterschieden werden:
 - Vorausbestimmte präventive Instandhaltung: Diese Form der präventiven Instandhaltung stellt prinzipiell die derzeit gängigste Form der Instandhaltung eines Dampferzeugers dar. In regelmäßigen Intervallen, die gesetzlich durch die Dampfkesselbetriebsverordnung vorgegeben werden, müssen Dampferzeugungsanlagen gewartet und gegebenenfalls instandgesetzt werden. Dabei wird der eigentliche Zustand der Anlage jedoch nur in geringem Ausmaß berücksichtigt. Die Frequenz der Wartungsintervalle wird so gewählt, dass sich statistisch gesehen der Zustand der Anlage zwar verschlechtert hat, aber noch keine Fehler zu erwarten sind. Mit dieser Instandhaltungsstrategie kann im Vergleich zu der zuvor beschriebenen Herangehensweise bereits ein wesentlicher Fortschritt bezüglich der Anlagenzuverlässigkeit bei geringeren Wartungs- und Instandhaltungskosten erzielt werden. [110]
 - Zustandsorientierte präventive Instandhaltung: Durch ein entsprechendes Betriebsüberwachungssystem, wie es im vorangegangenen Abschnitt vorgestellt wurde, können bei dieser Form der Instandhaltung auf Basis des aktuellen Anlagenzustandes auf eine vorausschauende Art und Weise die verbleibende Funktionstüchtigkeit abgeschätzt und die durchzuführenden Instandhaltungsmaßnahmen geplant werden. Damit kann theoretisch das volle Potential einer Komponente ausgeschöpft werden und ein Austausch oder eine Instandsetzung erfolgt erst dann, wenn der weitere Betrieb unmittelbar zum Versagen der Komponente führen würde. [110]

Bei der zustandsbasierten vorausschauenden Instandhaltungsplanung (*Predictive Maintenance*) handelt es sich einerseits um ein Vorgehen, bei dem die Wartungsplanung von Anlagen dahingehend verbessert wird, dass der aktuelle und vorausschauend (*predictive*) der zukünftige Anlagenzustand in die Planung von

Instandhaltungsmaßnahmen miteinfließen können. Andererseits wird damit auch ein intelligentes Betriebsmanagement gewährleistet, indem neben der Diagnose und Vermeidung von Funktionsausfällen auch die Zuverlässigkeit und die Restlebensdauer (Remaining Useful Life RUL) von Komponenten und damit der gesamten Anlage oder des gesamten Systems beurteilt und gesteigert werden kann [2].

Auch für diesen Fall stellt der DT erhebliche Anwendungspotentiale durch die Integration der realen Welt in die virtuelle oder digitale Welt dar. Am Beispiel eines konkreten Anwendungsfalls soll dies im nachfolgenden Abschnitt beschrieben werden.

3.2.1 Use-Case-Szenario: Präventive Zustandsüberwachung dickwandiger Bauteile im Dampferzeuger

Der Umgang mit dynamischen Start- und Stoppvorgängen und die Abschätzung der Auswirkungen auf die Abnutzung bestimmter Systemkomponenten des Dampferzeugers ist aktuell ein wichtiges Thema für Anlagenbetreiber. Dampferzeuger werden grundsätzlich für konstante Lasten ausgelegt und erreichen ihren höchsten Wirkungsgrad, wenn sich die Betriebsweise über einen längeren Zeitraum kaum ändert. Der steigende Anteil erneuerbarer Energien am derzeitigen Energiemix und der damit verbundenen starken Fluktuation bei der Energieeinspeisung, bedeutet für die Betreiber von konventionellen Dampferzeugungsanlagen eine Flexibilisierung ihrer Betriebsstrategie. Dies führt unter anderem zu einer zunehmenden Anzahl an Anfahrvorgängen ihrer Erzeugungsanlagen und drängt sie deshalb dazu, zunehmend mehr Dynamiken (und in diesem Fall mehr kritische Betriebszustände) in Kauf zu nehmen. Besonders dickwandige Bauteile im Dampferzeuger, wie beispielsweise die Dampftrommel, leiden unter dieser flexiblen Betriebsweise. Die steigende Anzahl an Lastwechseln und die damit einhergehenden hohen Temperatur- und Druckgradienten wirken sich negativ auf die Werkstofffestigkeit solcher Bauteile aus und könnten letztlich auch zu einem Materialversagen führen. Die Art der Betriebsführung hat somit einen großen Einfluss auf die Lebensdauer dieser Komponenten und eine Abschätzung der verbleibenden Lebensdauer zu einem bestimmten Zeitpunkt kann für Anlagenbetreiber entscheidende Vorteile bringen.

Ein einfaches Beispiel für eine Methodik, die eine risikobasierte Entscheidungshilfe bezüglich der Inspektion und Instandhaltung ermöglicht, ist die RIMAP-Methode (*Risk Based Inspection and Maintenance Procedures for European Industry*) [111]. Diese branchenübergreifende Prozedur/Richtlinie ermöglicht einen optimalen Geschäftsprozess für die Wartung von Systemkomponenten und Anlagenteilen und lässt sich auch auf Druckbehälter wie beispielsweise eine Dampftrommel übertragen

[112]. Mit Hilfe der RIMAP-Methode kann in verschiedenen Detaillierungsstufen das Risiko ausgewählter Komponenten ermittelt und eine Optimierung der Inspektions- und Instandhaltungsplanung durchgeführt werden. In einer ersten Screening-Phase (vereinfachte Analyse) können Komponenten schnell bezüglich ihres Risikos abgeschätzt und eingeordnet werden. Auf Basis der bauteilbezogenen Auslegungsdaten (Abmessung, Werkstoff, Betriebstemperatur und -druck) können mit Hilfe des TRD-Regelwerks⁴⁵ die Erschöpfungskennwerte des Bauteils (Kriecherschöpfung und Ermüdung) unter Berücksichtigung der aktuellen Betriebsdaten bestimmt werden. In einer Intermediate-Phase erfolgt für die reale Betriebsbeanspruchung eine Verknüpfung der quantitativ ermittelten Ausfallwahrscheinlichkeit PoF (*Probability of Failure*) mit einer Abschätzung der Konsequenzen der Schadensereignisse CoF (*Consequences of Failure*), wie beispielsweise die Betrachtung finanzieller Kosten durch Reparaturmaßnahmen und Betriebsausfälle. Dadurch kann das Risiko einzelner Komponenten im Gesamtsystem eingeordnet und in einer Risikomatrix dargestellt werden. Ein Beispiel für solch eine Risikomatrix für entsprechend „risikoführende“ Bauteile zeigt Abbildung 38. In farblich hervorgehobenen Bereichen wird das Risiko von vernachlässigbarem Risiko (weißer Bereich in Abb. 38) bis extremes Risiko (roter Bereich in Abb. 38) für einzelne Komponenten (gelbe Quadrate in Abb. 38) eingeteilt und dargestellt. Für Hochrisiko-Bauteile kann in weiterer Folge eine detailliertere Analyse (z.B. probabilistische Risswachstumsanalyse) durchgeführt werden, um weitere Informationen bezüglich eines Komponentenversagens erhalten zu können. Ein Beispiel für die Vorgehensweise zur Bestimmung der PoF und CoF und zum Aufbau der Risikomatrix nach der RIMAP-Methode kann Jovanovic et. al. [113] entnommen werden.

Untersuchungen der RIMAP-Methode angewandt für einen Dampferzeuger haben gezeigt, dass sich ein Großteil des Risikos (90% für das Beispiel in [112]) der Gesamtanlage auf wenige Komponenten (sieben für das Beispiel in [112]) reduzieren lässt und somit durch eine Überwachung dieser Komponenten bereits ein großer Einfluss erzielt werden kann. Durch die Anwendung dieser Methodik und eine monetäre Bewertung der Konsequenzen kann beispielsweise das Risiko als Produkt aus PoF und CoF vor und nach einer Instandhaltungsmaßnahme den Prüf- und Instandhaltungskosten gegenübergestellt und somit die Instandhaltungsplanung optimiert werden. [112, 114]

⁴⁵ DIN EN 12952-4:2011-10, Wasserrohrkessel und Anlagenkomponenten – Teil 4: Betriebsbegleitende Berechnung der Lebensdauererwartung

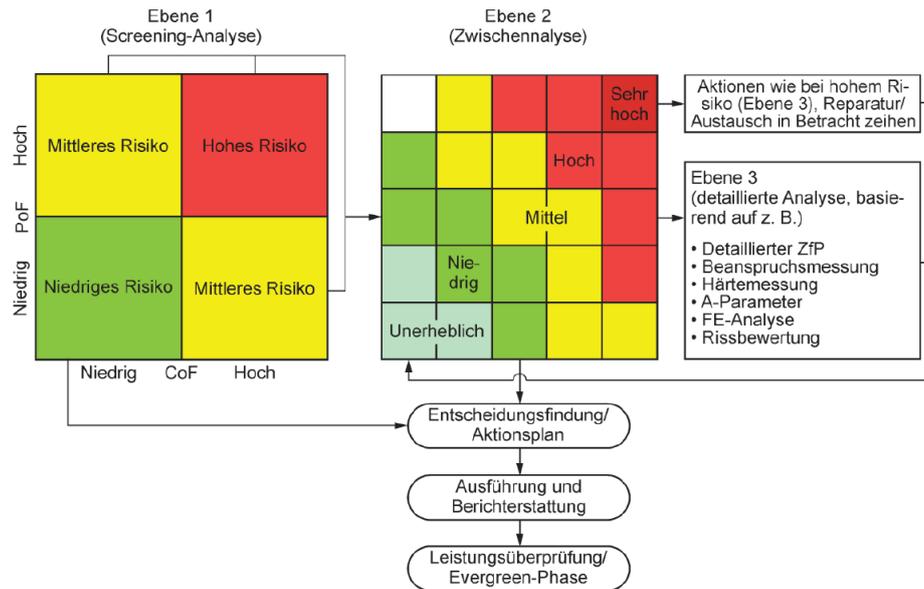


Abbildung 38: Beispiel für eine Risikomatrix nach der RIMAP-Methode. Quelle: [114]⁴⁶

Der entscheidende Vorteil der dargestellten Methodik liegt in der Transparenz des Entscheidungsprozesses und der optimierten Instandhaltungspolitik des Betreibers des Dampfzerzeugers, die durch eine Einbeziehung des aktuellen Anlagenzustandes und des aktuellen Risikos der wesentlichen Anlagenkomponenten erreicht werden kann [115]. Die Dargestellte RIMAP-Methode lässt sich wieder auf einfache Art und Weise in ein 5D-DTM des Dampfzerzeugers integrieren und die Risikomatrix kann als Service über das SM dem Anwender bereitgestellt werden. Im Datenmodell sind die Ermüdungskennwerte der einzelnen Komponenten abgelegt, werden im virtuellen Dampfzerzeugermodell um die Kennwerte unter den realen Betriebsbedingungen erweitert und über das Risikomodell der RIMAP-Methode (CoF und PoF) in die Risikomatrix integriert.

Ein weiteres Beispiel für eine deutliche Produktivitätssteigerung durch eine prädiktive Instandhaltungsstrategie zeigt das Beispiel von Macek et al. [116]. Dabei wurde vor allem die Integration des prognostizierten Wärmebedarfs in die Planung von Instandhaltungsmaßnahmen untersucht. Die Autoren beschreiben eine langfristige Strategie für die Umsetzung von Instandhaltungsmaßnahmen. Aus empirischen Betriebsdaten werden in einem modellbasierten Ansatz die Dynamik des Kesselwirkungsgrades und die Erwartungen bezüglich des Wärmebedarfs in einem Optimierungsmodell mit einem dynamischen Programmieralgorithmus gelöst. Ziel ist die Bestimmung der optimalen Instandhaltungsmaßnahmen über einen längeren Zeitraum hinweg, sodass letztlich die gesamten Betriebskosten des Dampfzerzeugers

⁴⁶ Mit freundlicher Genehmigung der VGB PowerTech Service GmbH

optimiert werden können. In einer Studie wurde unter Verwendung von realen Betriebsdaten eines Biomasse-Dampferzeugers, der zur Energieversorgung eines Gebäudes genutzt wird, der praktische Nutzen der entwickelten Methodik untersucht. Die Auswertung der Ergebnisse zeigt wieder ein erhebliches Potential zur Energieeinsparung, wenn bei der Planung von Instandhaltungsmaßnahmen nicht nur der Anlagenzustand, sondern auch die Entwicklung des zukünftigen Wärmebedarfs berücksichtigt wird. Als Instandhaltungsmaßnahme wird in diesem Beispiel eine manuelle Reinigung der Wärmeübertragungsflächen im Dampferzeuger angewendet. Der Vergleich von unterschiedlichen Instandhaltungsstrategien wird in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Einsparungspotentiale durch Predictive Maintenance über einen Prädiktionshorizont von 10 Jahren (vgl. [116])

Strategie	Gesamtkosten	IH-Maßnahmen	Einsparung durch DP
Dynamische Programmierung (DP)	50.675 €	26	0%
Jährliche Reinigung	55.385 €	10	8.50 %
Halbjährliche Reinigung	56.474 €	20	10.27 %
Keine Maßnahmen	129.490 €	0	60.87 %

Es zeigt sich eine deutliche Energie- und Kosteneinsparungen über einen Betrachtungszeitraum von 10 Jahren durch Anwendung des entwickelten dynamischen Programmieralgorithmus. Ein großer Vorteil der dargestellten Instandhaltungsstrategie ist jener, dass die Grenzwerte, die für die Entscheidung relevant sind, ob Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden oder nicht, automatisch vom Optimierungsmodell vorgegeben werden und nicht durch einen Experten bestimmt werden. Dadurch können umfangreichere Informationen, die dem Optimierungsmodell bekannt sind, in die Entscheidung mit aufgenommen werden und die Beurteilung der Instandhaltungsstrategie beruht nicht mehr rein auf dem derzeitigen Anlagenzustand und einer Experteneinschätzung. [107]

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Beispiele zu Predictive Maintenance sollen letztlich zeigen, wie durch einen gezielten Einsatz der in Teil II Kapitel 1 formulierten Grundlagen zum Thema künstlicher Intelligenz bzw. maschinelles Lernen mit Hilfe numerischer Methoden Anlagenbetreiber dabei unterstützt werden können, sowohl sicherheitstechnische Aspekte als auch wirtschaftliche Aspekte bei der Planung der

Wartungs- und Instandhaltungsstrategie ihrer Anlagen und Systemkomponenten durch eine zustandsorientierte und vorausschauende Herangehensweise zu berücksichtigen.

3.3 Proaktive Betriebssteuerung

Der umfangreichste und komplexeste Anwendungsfall des DT-Konzeptes stellt die proaktive Betriebssteuerung dar. Ziel ist es, durch Betrachtung aller Aspekte des Systems eine Optimierung des Gesamtsystems zu erreichen. Dazu werden die Erkenntnisse der vorangegangenen Anwendungsbeispiele, wie beispielsweise die tiefgehende Beurteilung des Anlagen-Istzustandes durch die Anwendung von Softsensoren und die prädiktive Zustandsbeurteilung unter Berücksichtigung und Beurteilung der Wirkung von Instandhaltungsmaßnahmen, in die Optimierungsrechnung miteinbezogen.

Einer der entscheidenden Aspekte der Betriebsoptimierung ist die Echtzeit-Betriebsoptimierung (Real-time Operations Optimization - RTO). Nur durch eine direkte Anbindung der Optimierungsergebnisse an den realen Prozess in Form einer Prozessregelung können entscheidende Zugewinne bei der Betriebsführung gemacht werden. Dadurch kann der Betriebspunkt immer im optimalen Zustand oder zumindest in der Nähe eines Optimums gehalten werden und Verluste werden reduziert oder gar vermieden. Nach Yip und Marlin [117] werden bei einer Echtzeit-Betriebsoptimierung in einer geschlossenen Schleife vier Subprozesse durchlaufen. Abbildung 39 zeigt die einzelnen Prozessschritte für eine erfolgreiche RTO in einer geschlossenen Prozessschleife. Die angeführte RTO-Schleife kann für jede beliebige Komponente, für jedes beliebige Subsystem oder für das Gesamtsystem eingesetzt werden. Für einen Dampferzeuger können die Subprozesse folgendermaßen in das 5D-DTM integriert werden:

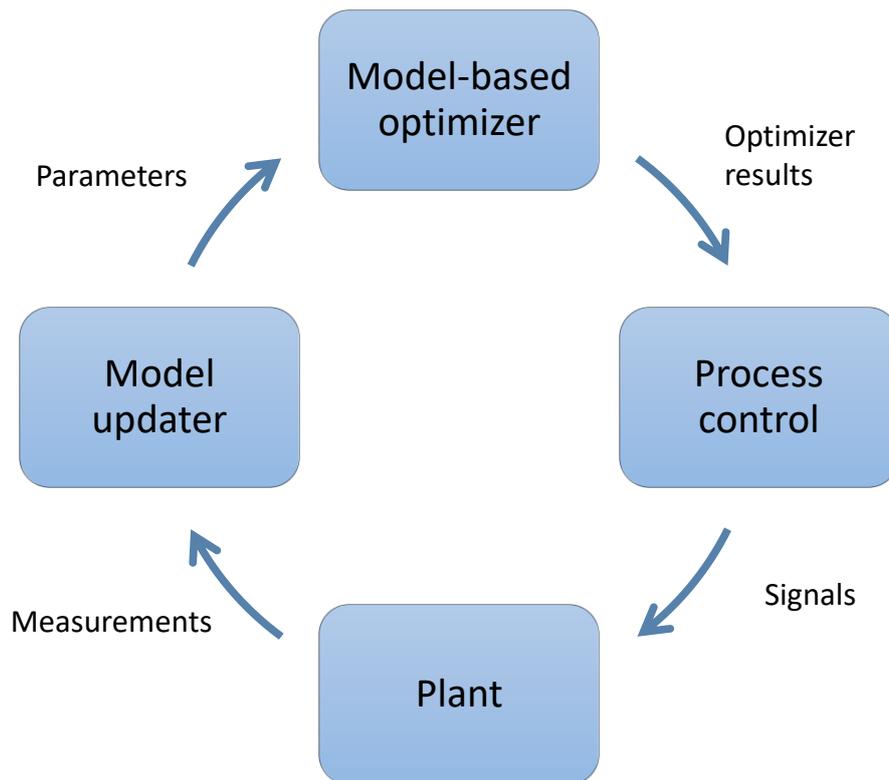


Abbildung 39: Prozessschritte für Real-time Operations Optimization (RTO) nach Yip und Marlin [117]

- Prozessmessung: Zu Beginn der Schleife werden im laufenden Prozess Echtzeit-Daten des realen Dampferzeugers durch Messsysteme aufgezeichnet und entsprechend über das KM zum DM übertragen. Ebenso werden Simulationsergebnisse der Softsensoren aus Abschnitt 3.1 zum DM weitergeleitet. Das DM übernimmt die Validierung, Bereinigung und Speicherung der Daten (siehe Abschnitt 2.3). Die Speicherung der Daten ist dabei entscheidend, damit in nachfolgenden Optimierungsschleifen ebenfalls historische Betriebsdaten des PD und VD für die Optimierung herangezogen werden können.
- Modellaktualisierung: Die aufbereiteten Daten aus dem DM werden dafür verwendet, die Modellparameter des Optimierungsmodells im VD zu aktualisieren. Dieser Vorgang stellt sicher, dass im Optimierungsmodell der tatsächliche Anlagenzustand als Basis für die Optimierung herangezogen wird. Für diesen Schritt stellt das SM des 5D-DTM einen Service zur Verfügung, der für die Aktualisierung der Modellparameter im VD herangezogen werden kann.
- Optimierung des aktualisierten Modells: Das aktualisierte Modell wird nun entsprechend des Optimierungsalgorithmus an den optimalen Betriebszustand herangeführt. Als Ergebnis der Modellsimulation ergeben sich die

entsprechenden Regel- bzw. Steuerparameter, die den Dampferzeuger in einem optimalen Betriebszustand halten.

- Prozessregelung: Die Steuerungs- bzw. Regelbefehle werden zuletzt über KM dem PD und dem VD zur Verfügung gestellt und die entsprechenden Betriebsparameter eingestellt. So wird einerseits der reale Dampferzeuger eingestellt, andererseits der VD spiegelbildlich zu PD gehalten, um ein bestmögliches Abbild der realen Anlage zu gewährleisten.

Die Qualität des Optimierungsmodells hängt nach Yip und Marlin [117] in erster Linie von zwei Faktoren ab. Einerseits ist dies der Unterschied zwischen PD und dem VD im Simulationsmodell. Der Unterschied entsteht vor allem durch den strukturellen Unterschied zwischen dem Simulationsmodell und dem realen Systemverhalten und durch dementsprechend fehlerhafte Modellparameter. Diese Unterschiede gilt es durch eine iterative Modelloptimierung zu minimieren. Andererseits existiert in den meisten Messsystemen aber auch ein Messrauschen, das bereits bei der Messwerterfassung einen Fehler induziert. Dieser Fehler pflanzt sich in der Optimierungsschleife weiter fort und führt zu weiteren Schwankungen der Abbildungsgenauigkeit. Auch ein Messrauschen kann durch eine Implementierung von entsprechenden Datenaufbereitungsschritten (*data pre-processing*) gefiltert und bestmöglich reduziert werden. Ein hochwertiges Optimierungsmodell kann letztlich nur durch hochgenaue Systemmodelle und eine entsprechend präzise und vertrauenswürdige Messwerterfassung erreicht werden. [117]

Im Folgenden wird anhand eines konkreten Beispiels eine Echtzeit-Betriebsoptimierung für den Dampferzeuger dargestellt.

3.3.1 Use-Case-Szenario: Optimierung der Heizflächenreinigung durch eine proaktive Betriebssteuerung

Die Verunreinigung der Heizflächen in Dampferzeugern, die mit Biomasse befeuert werden, ist eine der häufigsten Komplikationen, die im laufenden Betrieb auftreten können. Diese müssen möglichst rasch beseitigt werden, um einen sicheren und wirtschaftlichen Betrieb der Anlagen gewährleisten zu können [118]. Durch die Ablagerung von Flugasche und anderen Partikeln, die sich nach der Verbrennung noch im Rauchgas befinden, wird nicht nur die Leistung des Dampferzeugers und damit seine Effizienz reduziert, sondern es kommt folglich auch zu schlechteren Emissionswerten, die letztlich auch zu einer Belastung des Klimas führen können.

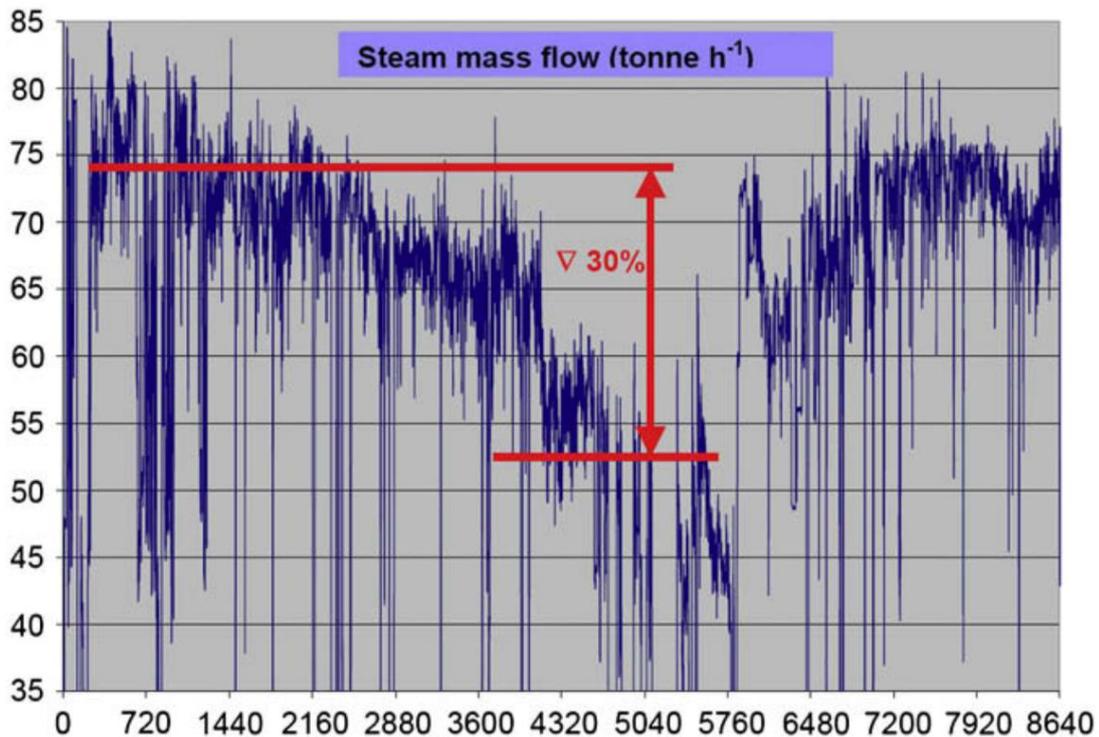


Abbildung 40: Wirkungsgradverluste durch Ablagerungen an Heizflächen im Dampferzeuger über zwei Betriebsperioden (Abszisse: Dampfmassenstrom in [t/h], Ordinate: Betriebsstunden in [h]). Quelle: [119]⁴⁷

Abbildung 40 zeigt selbsterklärend die massiven Wirkungsgradverluste von über 30%, die im zeitlichen Verlauf durch Ablagerungen an den Heizflächen im Rauchgaszug eintreten können. [119]

Untersuchungen zum Thema Heizflächenverschmutzungen konzentrieren sich nach Romeo und Garetta [119] vor allem auf zwei Aspekte bei der Beurteilung der Verschmutzungsneigung:

Einerseits wird versucht, die Verschmutzungsneigung durch genaue Analyse der Biomassezusammensetzung zu reduzieren. Anwendungen, wie beispielsweise die in Abschnitt 3.1 vorgestellten Softsensoren zur Heizwertberechnung der Biomasse, sollen Anlagenbetreiber dazu befähigen, durch eine genauere Bestimmung der Zusammensetzung der Biomasse den Anteil an kritischen Komponenten zu reduzieren. Derzeit kommen aber häufig noch empirische Korrelationen zur Analyse der Biomasse zum Einsatz, die zum Großteil auf Untersuchungen an Kohle als Brennstoff zurückgehen. Aus diesem Grund wird dieser Ansatz eher für die Auswahl der Biomasse als die Beurteilung der Verschmutzungsneigung herangezogen [119].

⁴⁷ Reprinted from Biomass and Bioenergy, 33/5, Luis M. Romeo, Raquel Garetta, Fouling control in biomass boilers, 854-861, © (2009), with permission from Elsevier

Beispielsweise zeigen die Untersuchungen von Tang et al. [118], wie durch den Einsatz von datengetriebenen Modellen eine Charakterisierung der Brennstoffe anhand ihres Verschmutzungsfaktors (*Fouling factor index*) durchgeführt und somit die Langzeitverschmutzung der Heizfläche durch eine intelligente Auswahl der Brennstoffe reduziert werden kann. Die dargestellte Methodik wurde allerdings an einem Abhitze-Dampferzeuger für unterschiedliche Zusammensetzungen von Kohle als Brennstoff entwickelt, weshalb die Übertragbarkeit auf Biomasseverbrennungsanlagen weiterer Untersuchungen bedarf. Das grundsätzliche Vorgehen lässt sich jedoch auf andere Verbrennungssysteme übertragen und zeigt die Vorteile bei der Auswahl der Brennstoffzusammensetzung unter Anwendung von datengetriebenen Methoden und Modellen.

Auf der anderen Seite wurden aber auch viele Vergleichsstudien zur Biomasseverbrennung durchgeführt, damit das Verständnis für die chemischen Vorgänge bei der Bildung von Ablagerungen an Heizflächen vertieft und deren Konsequenzen auf den Leistungsabfall des Dampferzeugers beurteilt werden können. Damit wird lokal eine hohe Auflösung der kritischen Ablagerungsstellen an Heizflächen innerhalb des Rauchgaszuges ermöglicht und es kann eine gezielte Abtragung dieser Verschmutzungen durchgeführt werden. Im Unterschied zum zuvor beschriebenen Ansatz wird hier der Schwerpunkt auf den optimalen Einsatz des Reinigungssystems gelegt. Auch heutzutage noch werden die Anlagenbetreiber mit relativ wenigen Informationen zum aktuellen Verschmutzungsgrad im Rauchgaszug unterstützt, weshalb der Einsatz von Reinigungssystemen (z.B. Rußbläser) entweder zyklisch oder individuell vom Anlagenbetreiber gewählt wird. Außerdem werden in den meisten Fällen die Langzeitauswirkungen durch den Einsatz von Reinigungszyklen bei der Betriebsoptimierung nicht berücksichtigt. [120]

Im Nachfolgenden wird ein Optimierungsmodell für den optimalen Einsatz der Rußbläser skizziert. Anhand von einzelnen Untersuchungsbeispielen, die grundsätzlich in ein Optimierungsmodell im Rahmen des DT-Konzepts eingebunden werden können, soll das Potenzial der proaktiven Betriebsführung unter dem Aspekt einer optimalen Reinigungsstrategie für den Dampferzeuger dargestellt werden.

Für ein besseres Verständnis der Thematik wird zuerst noch kurz auf die systemtechnischen Eigenschaften eines typischen Reinigungssystems für Heizflächen eingegangen. Abbildung 41 zeigt eine mögliche geometrische Verteilung der einzelnen Rußbläser vor oder nach den jeweiligen Bündel- oder Überhitzerheizflächen im ersten und zweiten Zug eines Biomassedampferzeugers. Die Verschmutzungen können je nach Zone im Rauchgaszug in *Slagging* („verschmolzene“ Ablagerungen vor allem im Strahlungsraum) oder *Fouling* („gesinterte“ Ablagerungen im Konvektionsraum) unterteilt werden [84]. Beide Arten der Ablagerungen lassen sich durch den Einsatz von Rußbläsern größtenteils reduzieren. Dabei wird ein Teil des Prozessdampfes oder

des vorgewärmten Speisewassers über ein Düsensystem unter erhöhtem Druck auf die Heizflächen gesprüht, um die Verschmutzungen zu lösen und von der Oberfläche der Wärmeübertragungsflächen abzutragen. Der bestmögliche Zeitpunkt für die Durchführung eines Rußbläserzyklus stellt somit ein klassisches Optimierungsproblem dar. Eine Verbesserung der Wärmeübertragung an den Heizflächen durch Aktivierung der Rußbläser steht den Prozessdampfverlusten und somit den erhöhten Betriebskosten gegenüber. [120]

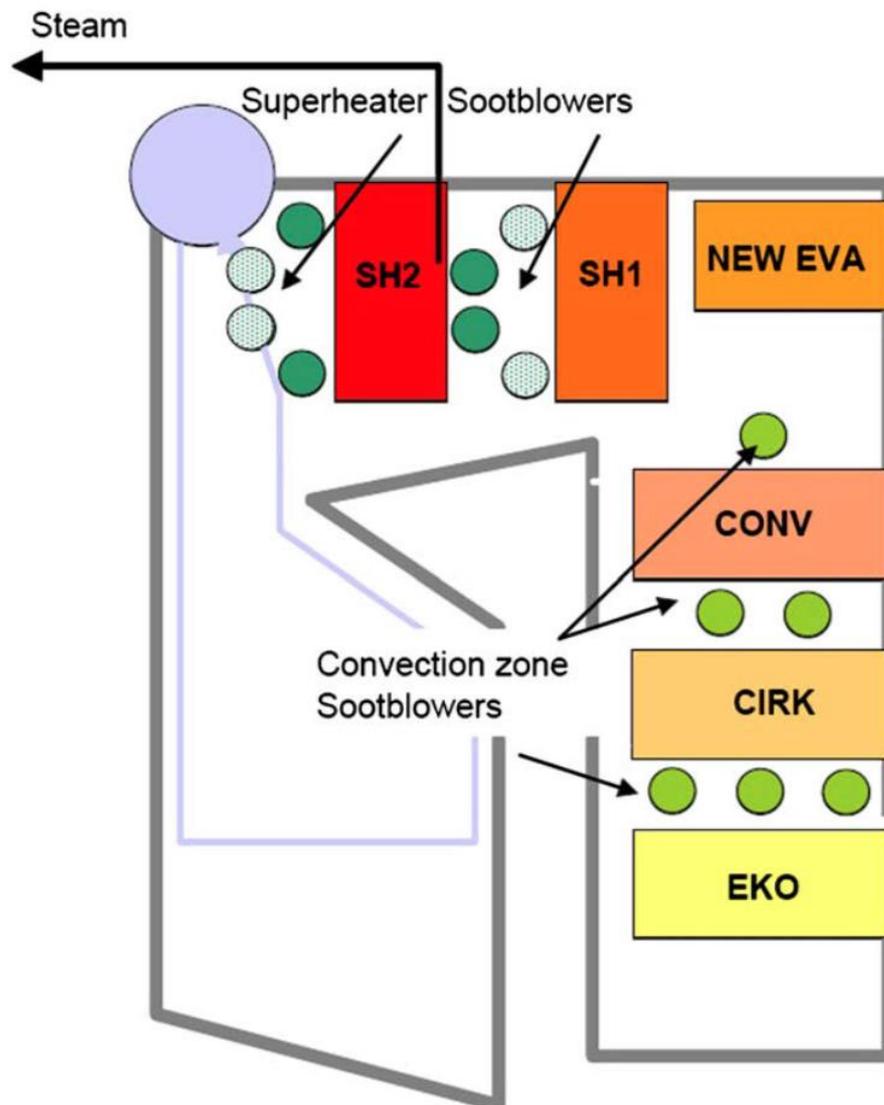


Abbildung 41: Verteilung der Rußbläser im Rauchgaszug eines Biomasse-Dampferzeugers.
Quelle: [119]⁴⁸

⁴⁸ Reprinted from Biomass and Bioenergy, 33/5, Luis M. Romeo, Raquel Garet, Fouling control in biomass boilers, 854-861, © (2009), with permission from Elsevier

Ein einfaches Beispiel für die Optimierung der Heizflächenreinigung unter Verwendung einer Kombination aus zusätzlichen physischen Messwerten aus der Anlage und berechneten Messwerten aus einer Online-Betriebsüberwachung kann Beckmann und Rostkowski [105] entnommen werden. Für die Lokalisierung der Verschmutzungen an den jeweiligen Heizflächen verwenden sie einerseits eine Gewichtsmessung der Heizflächenpakete, die in den Rauchgasstrom gehängt werden. Andererseits werden mit Hilfe der Online-Betriebsüberwachungssoftware die aktuellen Wärmedurchgangszahlen der Heizflächen bestimmt. Dadurch ergibt sich eine in Zonen unterteilte Darstellung des Dampferzeugers. Mit Hilfe des derart in Zonen aufgeteilten Dampferzeugers und der gemessenen Gewichtszunahme sowie der berechneten Wärmeübergangszahl der einzelnen Heizflächenpakete kann die Verschmutzung örtlich lokalisiert und das Reinigungssystem entsprechend selektiv angesteuert werden. Dieses Beispiel beschreibt eine grundsätzlich mögliche Vorgehensweise zur Optimierung der Heizflächenreinigung auf Basis des jeweiligen Istzustandes der Anlage. Es wurde jedoch keine proaktive Betriebsoptimierung für das Reinigungssystem unter weiteren Aspekten der Betriebsführung berücksichtigt.

Romeo und Garetta [119] gehen in ihren Untersuchungen zur Optimierung der Heizflächenreinigung einen Schritt weiter und beschreiben eine Methode, die weitere Faktoren bei der Auswahl des optimalen Reinigungszeitpunktes berücksichtigt. Dazu verwenden die Autoren ein datengetriebenes Modell zur Auswahl der optimalen Reinigungsstrategie unter der Voraussetzung, dass es zu einer Maximierung der Wärmeübertragung zwischen Rauchgas und Wasser/Dampf über den betrachteten Zeithorizont kommt. Abbildung 42 zeigt die von den Autoren entwickelte Vorgehensweise zur Bestimmung des optimalen Reinigungszeitpunktes.

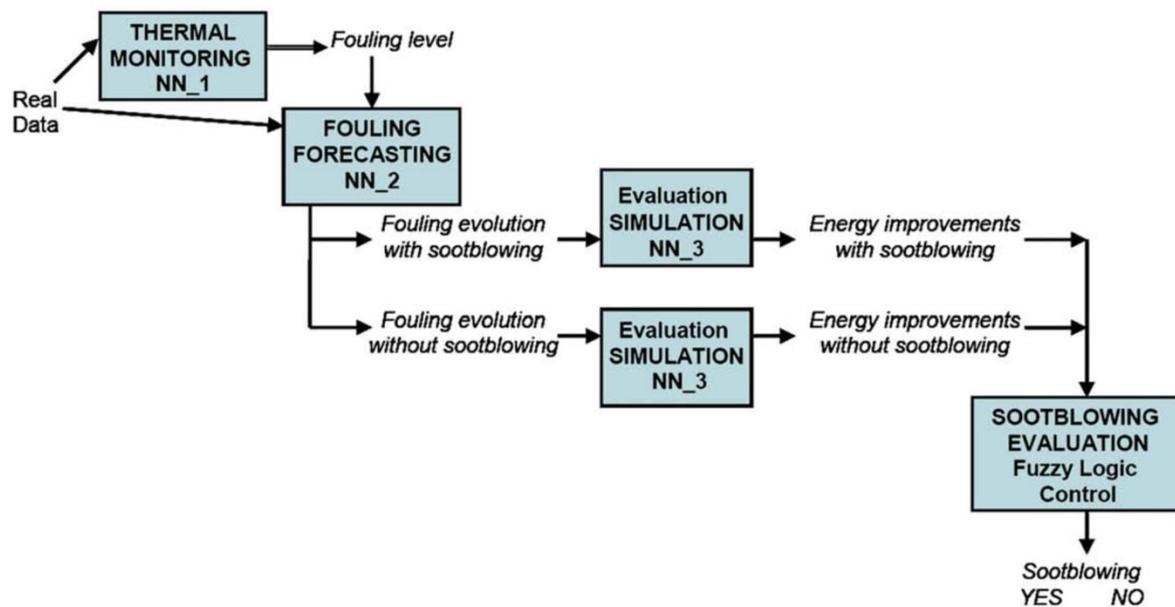


Abbildung 42: Vorgehensweise bei der Auswahl einer optimalen Reinigungsstrategie nach Romeo und Garetá. Quelle: [119]⁴⁹

Auf Basis von Echtzeitdaten aus dem Dampferzeuger werden im dargestellten Fall unter Einsatz von datengetriebenen Modellen die Entscheidungsgrundlagen für den Einsatz der Rußbläser verbessert und der optimale Reinigungszeitpunkt evaluiert. In mehreren Schritten wird mit Hilfe von künstlichen neuronalen Netzen (NN_1 bis NN_3 in Abb. 42) das Ausmaß der aktuellen Verschmutzung bestimmt, eine Vorhersage zur Entwicklung des Verschmutzungsgrades auf der Grundlage historischer Betriebsdaten mit und ohne Einsatz von Rußbläsern modelliert und letztlich die Effekte beider Strategien auf den energetischen Gesamtwirkungsgrad der Anlage beurteilt. Die Auswertung der KNN dient dann als Input für ein Fuzzy Logic Expert System (FLES), das als Steuerungsmethode auf der Basis einer zuvor definierten regelbasierten Struktur die Entscheidung trifft, ob ein Reinigungszyklus durchgeführt wird oder nicht. In einer automatisierten Vorgehensweise werden dementsprechend die Energiekosten eines Reinigungszyklus mit den zu erwartenden thermischen Verbesserungen durch eine Reinigung der Heizflächen verglichen und auf dieser Grundlage wird die Entscheidung getroffen, ob eine Aktivierung des Reinigungssystems durchgeführt wird oder nicht. Die Autoren beziffern die dadurch erzielte Leistungssteigerung des Dampferzeugers im Vergleich zu einer herkömmlichen Reinigungsstrategie mit festen Zyklen mit einer Verbesserung um 3.5%.

⁴⁹ Reprinted from Biomass and Bioenergy, 33/5, Luis M. Romeo, Raquel Garetá, Fouling control in biomass boilers, 854-861, © (2009), with permission from Elsevier

Eine sehr ähnliche Untersuchung wurde von Pattanayak et al. [120] durchgeführt. Ihr Anwendungsbeispiel zeigt ebenfalls, wie durch eine proaktive Betriebssteuerung des Reinigungssystems und somit alleine durch eine Optimierung des Reinigungszyklus oder Reinigungszeitpunktes unter Berücksichtigung mehrerer wirtschaftlicher und technischer Faktoren die Gesamteffizienz des Dampferzeugers gesteigert werden kann. Für diesen Anwendungsfall fallen keine Kosten für zusätzliche Sensorik oder für eine technische bzw. mechanische Optimierung des Reinigungssystems an. Das Optimierungsmodell für das Rußblärsystem beruht ebenfalls auf einem KNN und wird mit einem mathematischen Modell in Verbindung mit Messwerten aus dem Prozessleitsystem kombiniert (hybrides Modell). Die optimierte Abfolge von Reinigungszyklen über einen Zeithorizont von einer Woche kann Abbildung 43 entnommen werden.

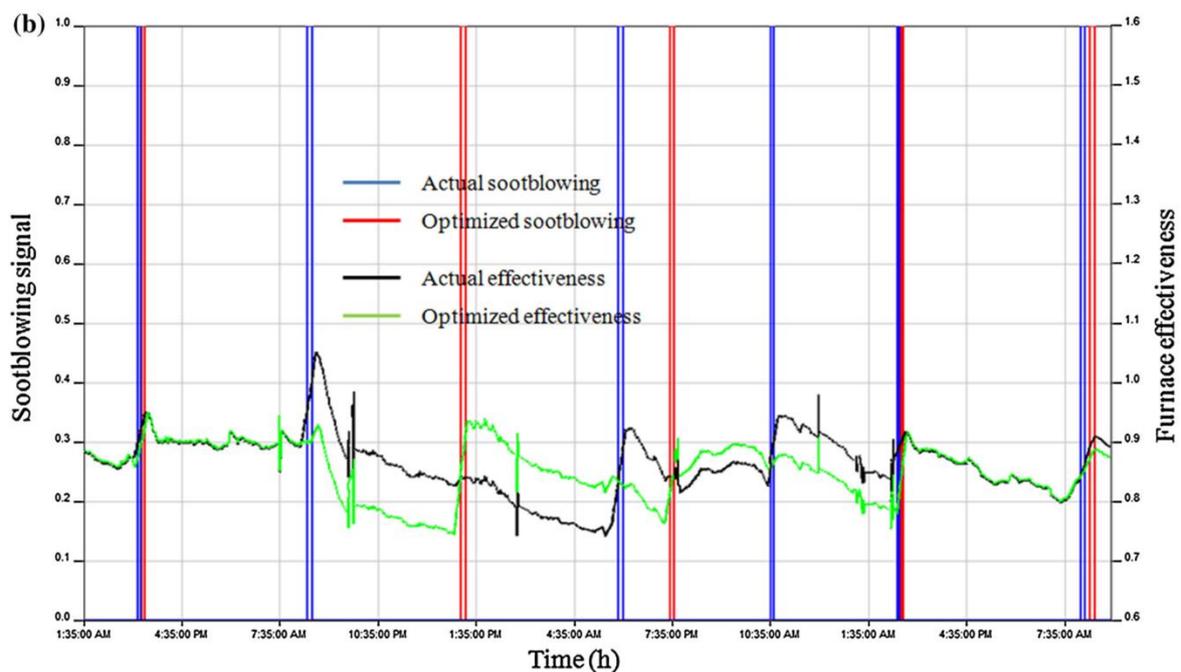


Abbildung 43: Auswirkungen einer Rußbläseroptimierung auf den Wirkungsgrad des Dampferzeugers. Quelle: [120]⁵⁰

In dem von Pattanayak et al. [120] entwickelten Optimierungsmodell wurde nicht nur die Reinigungsfrequenz verbessert, sondern auch der Gesamtwirkungsgrad optimiert (siehe Abb. 43). Ebenfalls konnte eine Verbesserung der Dampftemperatur, Einspritzkühlung, Wärmeübertragung sowie der Emission von Schadstoffen bei gleichzeitig minimalen Kosten für den Verbrauch an Frischdampf für das Reinigungssystem erreicht werden. Trotz einer Reduktion von sechs Rußbläserzyklen

⁵⁰ Reprinted by permission from Springer Nature: Clean Technologies and Environmental Policy, Lalatendu Pattanayak et al., Optimization of sootblowing frequency to improve boiler performance and reduce combustion pollution, © 2015

auf fünf konnte die Wärmeübertragung im Verdampfer und im Konvektionsraum um 8-10% gesteigert werden. [120]

3.4 Boiler Prognostics and System Health Management mit dem 5D-DTM

Ein Ablaufmodell für die Integration der beschriebenen Anwendungsbeispiele aus den letzten Abschnitten in das 5D-DTM Konzept, wie es im dritten Teil Kapitel I und II vorgestellt wurde, kann Abbildung 44 entnommen werden.

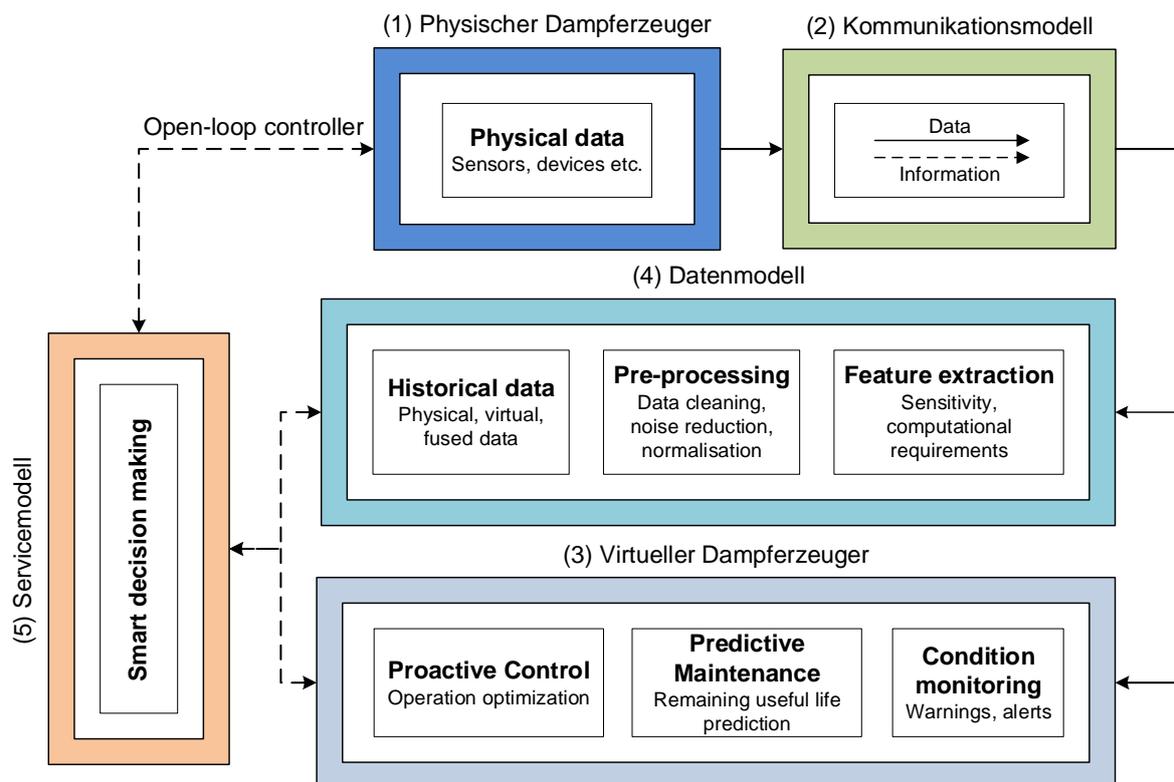


Abbildung 44: Boiler System Health Management mit dem 5D-DTM (in Anlehnung an [2])

Abbildung 44 zeigt die allgemeine Struktur für ein System Health Management wie sie von Khan et. al. [2] vorgestellt wurde und in diesem Bericht mit Hilfe des 5D-DTM auf ein ganzheitliches Boiler-PHM-Modell übertragen werden kann. Mit diesem Modell lässt sich letztlich eine konsequente Systemzustandsüberwachung und Systemzustandsvorhersage ermöglichen. Ziel ist die Erarbeitung von Handlungsvorschlägen unter Berücksichtigung der Benutzeranforderungen, um aus den aufgezeichneten (relevanten) Daten aus physischen und virtuellen Sensoren oder historischen Daten die entsprechenden Hauptmerkmale herausfiltern, Fehlerdiagnosen erstellen und Vorhersagen treffen zu können. [2]

Das in diesem Projekt vorgestellte fünfdimensionale Modell eines DT-Konzepts erfüllt alle wichtigen Aspekte, die für die Umsetzung des Boiler-PHM benötigt werden. Im Zeitalter der Digitalisierung muss vor allem eine konsequente Integration von allen vorhandenen Daten in das Modell forciert werden. Nur durch diese Vorgehensweise können die fortgeschrittenen Modellierungsmethoden mit Hilfe datengetriebener Ansätze, wie sie mehrfach in diesem Projekt skizziert wurden, in das Modell aufgenommen werden. Die Datenerfassung und deren Weiterleitung in den virtuellen Raum aus der physischen Einheit (*Physical data* in Abb. 44) kann über das KM durchgeführt werden. Die Vorverarbeitung bzw. Aufbereitung und Speicherung der Daten (*Pre-processing, Feature extraction, Historical data* in Abb. 44) erfolgt im DM des 5D-DTM. Auf Basis von physikalischen Modellen und datengetriebenen Modellierungsmethoden mit Hilfe von KI wird durch den virtuellen Dampferzeuger eine digitale Abbildung (digitaler Zwilling) erzeugt. Durch diese virtuelle Abbildung können die zuletzt vorgestellten Anwendungsbeispiele umgesetzt werden. Über das SM können die Ergebnisse der Auswertungen präsentiert werden und es findet ein Austausch mit dem Systemanwender statt. Dadurch kann letztlich die Entscheidungsgrundlage für viele Maßnahmen in Zusammenhang mit Boiler-PHM erheblich verbessert werden (*Smart decision making* in Abb. 44).

Das vorgestellte Modell zeigt, wie Anlagenbetreiber bei der Beurteilung des Anlagenzustandes und bei einer proaktiven Betriebsweise ihres Gesamtsystems unterstützt werden können. Mit Hilfe der skizzierten Anwendungsbeispiele wurde der Versuch unternommen, zu zeigen, dass einzelne Verbesserungsmodelle für den Dampferzeuger bereits existieren und dass diese mit Hilfe des 5D-DTM in ein gemeinsames Modell integriert werden können. Das bietet insbesondere den Vorteil, dass das 5D-DTM schrittweise um neue Services erweitert werden kann und somit die Komplexität auch schrittweise gesteigert wird. Im Endeffekt entsteht ein umfangreiches, ganzheitliches Modell, das den DT immer intelligenter werden lässt und zukünftig auch für eine Selbstoptimierung eingesetzt werden kann.

TEIL IV
Zusammenfassung

Der aktuelle Trend hin zu einer zunehmenden Digitalisierung jeglicher Lebensbereiche führt auch für Unternehmen zu einer gewaltigen Veränderung der Umgebung, in der sie tätig sind. Digitalisierung bedeutet nicht nur die reine Informatisierung bestehender Prozesse durch Überführung analoger in digitale Signale. Vielmehr lassen sich dadurch die bestehenden Unternehmensprozesse zunehmend in einer digitalen Version ihrer selbst abbilden und es erfolgt eine Neugestaltung bzw. Überarbeitung bestehender Unternehmensprozesse. Indem diese Prozesse unter dem Blickwinkel der Digitalisierung neu betrachtet werden, entstehen neue, häufig disruptive Geschäftsmodelle. Betrachtet man die Digitalisierung als Überbegriff für eine Revolution ähnlich der Industrialisierung, so spielen digitale Technologien eine ebenso bedeutende Rolle, wie sie damals die Mechanisierung gespielt hat (vgl. Teil II, Kapitel 1).

Für Unternehmen bedeutet das eine *digitale Transformation* hin zu einer ganz neuen Organisationsstruktur, die unter dem intensiven Einsatz digitaler Technologien eine neue Art der Wertschöpfung entdecken muss. Besonders im industriellen Bereich hat diese Transformation enorme Auswirkungen auf die betriebliche Praxis. Die sich überschneidenden Zukunftsvisionen einer Industrie 4.0 und eines Energiesystems 4.0, wie sie in diesem Projekt vorgestellt wurden, zeichnen beide das Bild eines noch nie dagewesenen Grades an Vernetzung von Dingen und Diensten im Internet der Dinge und Dienste (IoT). Es werden Systeme geschaffen und Erzeugnisse erstellt (zusammengefasst unter dem Begriff *Smart Assets*), die einen hohen Grad an Vernetzung, Flexibilität und Automatisierung besitzen. Die reale und digitale Welt konvergieren zunehmend zu *Cyber-Physical Systems* (CPS) und die dabei anfallenden *Big Data* können mit Hilfe von *künstlicher Intelligenz* (KI) analysiert werden. Dadurch soll nicht nur innerhalb der eigenen Organisationsstruktur die Effizienz gesteigert werden, sondern es können auch externen Partnern neue Services bzw. Dienstleistungen angeboten werden. In diesen neuen Strukturen dient der digitale Zwilling (DT) als befähigende Technologie. Zusammenfassend zeigt Abbildung 45, wie der DT im Rahmen der Digitalisierung eingeordnet werden kann. Dabei verdeutlicht Abbildung 45 die Bedeutung digitaler Technologien, insbesondere des DT als befähigende Technologie, zur Realisierung des bereits mehrfach umrissenen Paradigmenwechsels im industriellen Bereich und im Energiesektor (I4.0 und E4.0) und zur Umsetzung von Industrietrends.

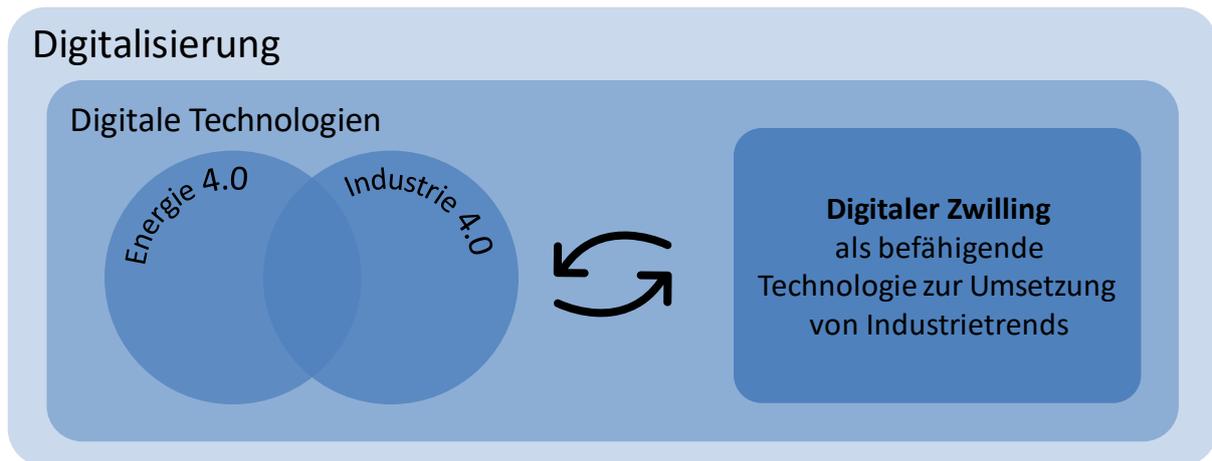


Abbildung 45: Einordnung der DT-Technologie im Rahmen der Digitalisierung

Der DT schafft eine Verbindung zwischen der realen und einer zunehmend digitalisierten Welt und kann dabei helfen, die Potenziale einer Digitalisierung auszuschöpfen, aber auch die dadurch entstehende Komplexität des Gesamtsystems zu bewältigen. Dazu muss er in eine Struktur integriert werden, die eine möglichst benutzerfreundliche Anwendung ermöglicht und den Nutzen eines solchen DT-Konzeptes sicherstellt. Entsprechende Anwendungskonzepte bzw. Referenzarchitekturmodelle können Unternehmen und Entwickler dabei unterstützen, das DT-Konzept in die Realität umzusetzen. In der Vergangenheit wurde deshalb eine Vielzahl solcher Modelle entwickelt. Bei den meisten Modellen lag der Fokus auf einem spezifischen Industriezweig und die Anwendbarkeit der entwickelten Modelle bleibt dementsprechend oftmals auf diesen beschränkt. So wurde beispielsweise ein digitales Gebäudemodell (BIM) im Bausektor entwickelt, das den unterschiedlichen Akteuren dieser Branche dabei helfen kann, die Effizienz ihrer Zusammenarbeit zur gemeinsamen Errichtung eines Bauwerkes erheblich zu steigern. Auch in anderen Sektoren wurden Modelle entwickelt, wie beispielsweise das RAMI4.0 im Industriebereich oder SGAM im Energiesektor. Diese beiden Modelle dienen in Form eines „Verortungsmodells“ in erster Linie dazu, den Überblick über das Gesamtsystem bei der Entwicklung spezifischer Anwendungsfälle zu behalten und entsprechende Normen und Standards bei der Implementierung zu nutzen, damit Schnittstellen harmonisiert werden können. Nur so entstehen Lösungen, die dem Schwerpunkt des RAMI4.0 gerecht werden und ihren Fokus auf die Abbildung der gesamten Wertschöpfungskette eines Industrieunternehmens legen. Das RAMI4.0 kann deshalb nicht nur dazu genutzt werden, mögliche Schnittstellen zwischen unterschiedlichen Bereichen innerhalb des eigenen Unternehmens zu identifizieren, sondern kann auch unternehmensübergreifend entlang der gesamten Wertschöpfungskette eingesetzt werden.

Die Untersuchungen im Rahmen des vorliegenden Projekts haben jedoch gezeigt, dass die Anwendung solcher Referenzarchitekturmodelle derzeit auf die Entwicklungs- oder Konzeptionsphase von entsprechenden Anwendungsfällen beschränkt bleibt. Referenzarchitekturmodelle wie das RAMI4.0 können zwar dazu genutzt werden, einheitliche Technologien sowie Normen und Standards in den unterschiedlichen Bereichen zu identifizieren und einzusetzen. Für die Umsetzung eines DT-Konzeptes bedarf es jedoch dynamischerer Modelle, die nicht nur der rein statischen Abbildung von Prozessketten dienen, sondern in Form von Anwendungskonzepten den gewinnbringenden Einsatz des DT vor allem innerhalb der Betriebs- und Instandhaltungsphase ermöglichen. Das ursprünglich vorgestellte 3D-DTM und die von der Plattform Industrie 4.0 vorgestellte Verwaltungsschale einer I4.0-Komponente zeigen beide ebenfalls Schwächen bei der Abbildung der derzeitigen Anforderungen, die an ein DT-Konzept gestellt werden. Allerdings ergibt sich durch die Kombination der jeweiligen Vorteile der einzelnen Modelle ein neues, erweitertes Modell, das diesen Anforderungen gerecht werden kann. Das in diesem Projekt vorgestellte 5D-DTM am Beispiel eines Dampferzeugers besteht aus den Dimensionen Physischer Dampferzeuger (PD), Kommunikationsmodell (KM), Virtueller Dampferzeuger (VD), Datenmodell des Dampferzeugers (DM) und Servicemodell des Dampferzeugers (SM). Für die einzelnen Dimensionen wurden entsprechende Technologien erarbeitet, die im Zeitalter der Digitalisierung und im Rahmen von I4.0 und E4.0 die notwendigen Voraussetzungen für eine erfolgreiche Anwendung erfüllen. Besonders die Erfassung, Weiterleitung, Verarbeitung und Analyse von Daten spielt dabei eine wesentliche Rolle.

Da sich in der Literatur und in der Praxis derzeit noch kein konkretes 5D-DTM für einen Dampferzeuger finden lässt, wurde in diesem Bericht der Versuch unternommen, konkrete wirtschaftliche Vorteile, die sich durch die Anwendung des vorgestellten Modells innerhalb der Betriebs- und Instandhaltungsphase des Dampferzeugers ergeben könnten, anhand von einzelnen Anwendungsbeispielen zu verdeutlichen. In der Literatur finden sich sehr wohl einzelne, isoliert betrachtete Use-Case-Szenarien, die zum Beispiel eine tiefgreifende Betriebsüberwachung, eine prädiktive Instandhaltung oder eine proaktive Betriebsführung und Optimierung des Dampferzeugers beschreiben. Bei all den in diesem Bericht vorgestellten Use-Case-Szenarien geht es im Grunde darum, den Betreibern von Anlagen neue Werkzeuge in Form von unterschiedlichen Services und Dienstleistungen in die Hand zu geben, damit diese ihre Anlagen durch Erhöhung der Produktivität, Effektivität und Effizienz wirtschaftlicher betreiben können. Nur so gelingt es Unternehmen, deren betriebswirtschaftlicher Erfolg auf der Erzeugung von Dampf mit Hilfe des Dampferzeugers beruht, im Rahmen der in diesem Projekt skizzierten digitalen Transformation handlungsfähig und vor allem wettbewerbsfähig zu bleiben. Durch eine umfangreiche Auswertung der erfassten Echtzeit-Betriebsdaten, Kombination dieser

Daten mit historischen Daten, Integration dieser Daten in neue Simulationskonzepte (z.B. datengetriebene Modelle) und Ableitung von Informationen aus dem dadurch generierten Wissen kann ein umfassendes Boiler Prognostics and Health Management System mit Hilfe des 5D-DTM, wie es in diesem Projekt vorgestellt wurde, erzeugt werden. Das 5D-DTM bietet mit seinen fünf Dimensionen dem Anwender alle notwendigen Voraussetzungen für die praktische Umsetzung eines solchen Boiler PHM. Es gibt jedoch auch gewisse Anforderungen, die an die digitale Infrastruktur der Unternehmen selbst gestellt werden, damit das 5D-DTM überhaupt realisiert werden kann.

1.1 Ausblick und Handlungsempfehlungen

Das 5D-DTM des Dampferzeugers, das in diesem Projekt präsentiert wurde, stellt ein theoretisches Anwendungskonzept dar. Außerdem wurden anhand von einzelnen Use-Case-Szenarien bereits einige potentielle praktische Einsatzmöglichkeiten und deren wirtschaftliche Aspekte skizziert. Für die praktische Umsetzung eines solchen Modells bedarf es jedoch noch weiterer Untersuchungen in diesem Bereich. Ein erster Schritt in Richtung Praxis ist zweifelsohne die Ist-Erhebung des Digitalisierungsgrades von Unternehmen, die im Dampferzeugungssektor tätig sind. Nur so können diese Unternehmen bei der Entwicklung des 5D-DTM an der richtigen Stelle abgeholt und der Aufwand für die Umsetzung des Modells abgeschätzt werden. Dazu könnten die Ergebnisse des VGB-Forschungsprojektes (Projektnummer 428), durchgeführt von der Universität Duisburg-Essen (Deutschland) als Parallelprojekt zu DigiSteam, wichtige Erkenntnisse für die weitere Vorgehensweise zur Umsetzung des Modells in die Praxis liefern. Von diesen Ergebnissen können dann gezielt Maßnahmen und Handlungsempfehlungen abgeleitet werden, die eine schrittweise Umsetzung eines DT-Konzeptes ermöglichen können und somit dessen Implementierung erleichtern. Dabei ist es wichtig, den Komplexitätsgrad für die Unternehmen einigermaßen überschaubar zu halten. In diesem Projekt wurde deshalb versucht, eine schrittweise Steigerung des Evolutionsgrades des DT-Konzeptes darzustellen. Aufbauend auf dem wahrscheinlich einfachsten Anwendungsfall der online Betriebsüberwachung durch den Einsatz von Softsensoren über eine verbesserte Wartungs- und Instandhaltungsstrategie auf Basis der online Betriebsüberwachung bis hin zum komplexesten Fall der Gesamtoptimierung der Anlage unter Berücksichtigung aller zuvor beschriebener Aspekte, wie sie in Kapitel 3 vorgestellt wurden, kann so sukzessive der Umfang des Modells gesteigert werden. Der größte Vorteil des 5D-DTM ist deshalb unter anderem auch die Möglichkeit der Skalierbarkeit bzw. die Erweiterbarkeit um weitere Services und Dienstleistungen, beispielsweise in Form von neuen, komplexeren Anwendungsfällen. Die Autoren Schneider und Gierend [71]

postulieren in ihrer Arbeit jedenfalls, dass sich der finanzielle Aufwand für Unternehmen zur Entwicklung solch eines Modells branchenunabhängig lohnen wird, um zukünftige technische und wirtschaftliche Interessen zu vertreten. Dabei handelt es sich aber immer um eine Investition in die Zukunft und nicht in die Gegenwart. Unternehmen müssen folglich bereit sein, kurzfristig hohe Investitionen zu tätigen, um einen langfristigen Mehrwert erzielen zu können.

Auch führende Unternehmensberatungen wie beispielsweise Deloitte⁵¹ oder Tata Consultancy Services⁵² sind sich diesem Potenzial bewusst. Für sie stellt sich nicht mehr die Frage, ob es sich lohnt, solch ein Modell in die Praxis umzusetzen, sondern eher, wo ein Unternehmen beginnen sollte, um in kürzester Zeit den maximal möglichen Output erhalten und weiter an der Spitze des Wettbewerbs bleiben zu können. [121, 122]

Es gibt bereits erste Unternehmen, die sich mit der Entwicklung eines DT in ihrem Unternehmensumfeld beschäftigen. So hat beispielsweise General Electric (GE)⁵³ einen DT auf ihrer eigenen IIoT-Predix-Plattform vorgestellt [123]. Ein weiteres Beispiel für einen DT stammt von Emerson⁵⁴ [124]. Diese Beispiele zeigen einerseits, wie groß der praktische Nutzen des DT tatsächlich sein kann, verdeutlichen aber andererseits auch den enormen Aufwand, der betrieben werden muss, um dieses komplexe Vorhaben realisieren zu können. Jedoch deutet derzeit alles darauf hin, dass sich der Aufwand lohnen wird:

„Power leaders who understand how data and analytics can help them finally control their operations, financial decisions and market strategies to a level not yet seen understand the competitive and business growth advantages of the Digital Twin.“ [123]

⁵¹ <https://www.deloitte.com/>

⁵² <https://www.tcs.com/>

⁵³ <https://www.ge.com/>

⁵⁴ <https://www.emerson.com/>

TEIL V
Literaturverzeichnis

- [1] Tao, F., Zhang, M., Liu, Y., and Nee, A. Y. C. 2018. Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment. *CIRP Annals* 67, 1, 169–172.
- [2] Khan, S. and Yairi, T. 2018. A review on the application of deep learning in system health management. *Mechanical Systems and Signal Processing* 107, 241–265.
- [3] Tao, F., Zhang, M., and Nee, A. Y. C. 2019. *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*. Academic Press.
- [4] Parviainen, P., Tihinen, M., Kääriäinen, J., and Teppola, S. 2017. Tackling the digitalization challenge: How to benefit from digitalization in practice. *International journal of information systems and project management* 5, 1, 63–77.
- [5] Kemmerich, M. and Storch, H. 2016. Process heat recovery and digitalisation in sulphuric acid plants. *Procedia Engineering* 138, 220–230.
- [6] Hanschke, I. 2018. *Digitalisierung und Industrie 4.0 - einfach und effektiv : systematisch und lean die digitale Transformation meistern. Digitalisierung und Industrie 4.0 - einfach & effektiv*. München : Hanser, München.
- [7] Irlbeck, M. 2017. Digitalisierung und Energie 4.0 - Wie schaffen wir die digitale Energiewende? In *Herausforderung Utility 4.0: Wie sich die Energiewirtschaft im Zeitalter der Digitalisierung verändert*, O. D. Doleski, Ed. Springer Fachmedien Wiesbaden, 135–148. DOI=10.1007/978-3-658-15737-1_8.
- [8] Bortolini, M., Ferrari, E., Gamberi, M., Pilati, F., and Faccio, M. 2017. Assembly system design in the Industry 4.0 era: a general framework. *IFAC-PapersOnLine* 50, 1, 5700–5705.
- [9] Cheng, J., Zhang, H., Tao, F., and Juang, C.-F. 2020. DT-II: Digital twin enhanced Industrial Internet reference framework towards smart manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 62, 101881.
- [10] G. Cheng, L. Liu, X. Qiang, and Y. Liu. 2016. Industry 4.0 Development and Application of Intelligent Manufacturing. In *2016 International Conference on Information System and Artificial Intelligence (ISAI)*, 407–410. DOI=10.1109/ISAI.2016.0092.
- [11] Iqbal, R., Doctor, F., More, B., Mahmud, S., and Yousuf, U. 2017. Big Data analytics and Computational Intelligence for Cyber–Physical Systems: Recent trends and state of the art applications. *Future Generation Computer Systems*.
- [12] 2020. *Fraunhofer-Gesellschaft (2018): Maschinelles Lernen. Eine Analyse zu Kompetenzen, Forschung und Anwendung*. <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-497408.html>. Accessed 14 December 2020.
- [13] Rich, E. 1983. *Artificial intelligence*. New York [u.a.] : McGraw-Hill.
- [14] Kotler, P. and Keller, K. 2000. Marketing management: The millennium edition. *Marketing management* 23, 6, 188--193.

- [15] Zheng, P., Wang, Z., Chen, C.-H., and Pheng Khoo, L. 2019. A survey of smart product-service systems: Key aspects, challenges and future perspectives. *Advanced Engineering Informatics* 42, 100973.
- [16] Deerberg, G., Franke, M., Reh, K., Kroop, S., Mrotzek-Blöß, A., and Müller, T. 2016. Industrie 4.0–Bedeutung für die Abfallwirtschaft. In *Energie aus Abfall, Band 13*, 3–26.
- [17] Paul, H. 2020. *Industrie 4.0: Annäherung an ein Konzept, Forschung Aktuell*.
- [18] Kagermann, H., Wahlster, W., and Helbig, J. *Securing the future of German manufacturing industry* 199.
- [19] Manzei, C., Schleupner, L., and Heinze, R. 2016. *Industrie 4.0 im internationalen Kontext : Kernkonzepte, Ergebnisse, Trends*. VDE Verlag GmbH Beuth.
- [20] Rehtanz, C. 2015. Energie 4.0 – Die Zukunft des elektrischen Energiesystems durch Digitalisierung. *Informatik-Spektrum* 38, 1, 16–21.
- [21] Shahinzadeh, H., Moradi, J., Gharehpetian, G. B., Nafisi, H., and Abedi, M. 2019. Internet of Energy (IoE) in Smart Power Systems. In , 627–636. DOI=10.1109/KBEI.2019.8735086.
- [22] Lund, H., Østergaard, P. A., Connolly, D., and Mathiesen, B. V. 2017. Smart energy and smart energy systems. *Energy* 137, 556–565.
- [23] Cao, J. and Yang, M. 2013 - 2013. Energy Internet - Towards Smart Grid 2.0. In *2013 Fourth International Conference on Networking and Distributed Computing*. IEEE, 105–110. DOI=10.1109/ICNDC.2013.10.
- [24] Iordache, O. 2017. Industrial Systems. In *Implementing Polytope Projects for Smart Systems*. Springer International Publishing, 139–157. DOI=10.1007/978-3-319-52551-8_8.
- [25] CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group. 2012. *Smart Grid Reference Architecture*. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/xpert_group1_reference_architecture.pdf. Accessed 19 December 2020.
- [26] Döbrich, U., Hankel, M., Heidel, R., Hoffmeister, M., and e. V, D. I. N. 2017. *Basiswissen RAMI 4.0 : Referenzarchitekturmodell und Industrie 4.0-Komponente Industrie 4.0*. Beuth Verlag, Berlin, GERMANY.
- [27] Mourtzis, D., Gargallis, A., and Zogopoulos, V. 2019. Modelling of Customer Oriented Applications in Product Lifecycle using RAMI 4.0. *Procedia Manufacturing* 28, 31–36.
- [28] Frysak, J., Kaar, C., and Stary, C. 2018 - 2018. Benefits and pitfalls applying RAMI4.0. In *2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*. IEEE, 32–37. DOI=10.1109/ICPHYS.2018.8387633.
- [29] Scharl, S. and Praktijnjo, A. 2019. The Role of a Digital Industry 4.0 in a Renewable Energy System. *International Journal of Energy Research* 43, 8, 3891–3904.
- [30] Kuhn, T. 2017. Digitaler Zwilling. *Informatik-Spektrum* 40, 5, 440–444.

- [31] Kamel, E. and Memari, A. M. 2019. Review of BIM's application in energy simulation: Tools, issues, and solutions. *Automation in Construction* 97, 164–180.
- [32] Soni, R., Bhatia, M., and Singh, T. 2019. Digital Twin: Intersection of Mind and Machine. *International Journal of Computational Intelligence & IoT* 2, 3.
- [33] Grieves, M. and Vickers, J. 2017. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*, F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt and A. Alves, Eds. Springer International Publishing, Cham, 85–113. DOI=10.1007/978-3-319-38756-7_4.
- [34] Glaessgen, E. H. and Stargel, D. S. 2012. The digital twin paradigm for future NASA and U.S. air force vehicles. In . DOI=10.2514/6.2012-1818.
- [35] Negri, E., Fumagalli, L., and Macchi, M. 2017. A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. *Procedia Manufacturing* 11, 939–948.
- [36] Tao, F., Zhan, H., Liu, A., and Nee, A. Y. C. 2019. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *Ieee Transactions on Industrial Informatics* 15, 4, 2405–2415.
- [37] Tao, F., Zhang, M., and Nee, A. Y. C. 2019. Chapter 1 - Background and Concept of Digital Twin. In *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*, F. Tao, M. Zhang and A. Y. C. Nee, Eds. Academic Press, 3–28. DOI=10.1016/B978-0-12-817630-6.00001-1.
- [38] Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., and Sihn, W. 2018. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine* 51, 11, 1016–1022.
- [39] Stark, R., Kind, S., and Neumeyer, S. 2017. Innovations in digital modelling for next generation manufacturing system design. *CIRP Annals* 66, 1, 169–172.
- [40] Rodič, B. 2017. Industry 4.0 and the New Simulation Modelling Paradigm. *Organizacija* 50, 3, 193–207.
- [41] Rosen, R., Wichert, G. von, Lo, G., and Bettenhausen, K. D. 2015. About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. *IFAC-PapersOnLine* 48, 3, 567–572.
- [42] Eigner, M., Detzner, A., Schmidt, P. H., and Tharma, R. 2019. Definition of the digital twin in the product lifecycle. *ZWF Zeitschrift fuer Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 114, 6, 345–350.
- [43] Grieves, M. 2014. Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication. *White paper*, 1–7.
- [44] Tao, F., Zhang, M., and Nee, A. Y. C. 2019. Chapter 3 - Five-Dimension Digital Twin Modeling and Its Key Technologies. In *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*, F. Tao, M. Zhang and A. Y. C. Nee, Eds. Academic Press, 63–81. DOI=10.1016/B978-0-12-817630-6.00003-5.
- [45] Egger, M., Hausknecht, K., Liebich, T., and Przybylo, J. 2020. *BIM-Leitfaden für Deutschland. Information und Ratgeber. Endbericht.*

- [46] Borrmann, A., König, M., Koch, C., and Beetz, J. 2015. Einführung. In *Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*, A. Borrmann, M. König, C. Koch and J. Beetz, Eds. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 1–21. DOI=10.1007/978-3-658-05606-3_1.
- [47] Lu, Q., Xie, X., Heaton, J., Parlikad, A. K., and Schooling, J. 2020. From BIM Towards Digital Twin: Strategy and Future Development for Smart Asset Management. In . Springer International Publishing, 392–404. DOI=10.1007/978-3-030-27477-1_30.
- [48] Deuter, A. and Pethig, F. 2019. The Digital Twin Theory. *Industrie 4.0 Management* 2019, 27–30.
- [49] Wagner, C., Grothoff, J., Epple, U., Drath, R., Malakuti, S., Grüner, S., Hoffmeister, M., and Zimmermann, P. 2018. The role of the Industry 4.0 asset administration shell and the digital twin during the life cycle of a plant. In . Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 1–8. DOI=10.1109/ETFA.2017.8247583.
- [50] Josifovska, K., Yigitbas, E., and Engels, G. 2019. Reference Framework for Digital Twins within Cyber-Physical Systems. In . Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 25–31. DOI=10.1109/SEsCPS.2019.00012.
- [51] Tao, F. and Zhang, M. 2017. Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing. *Ieee Access* 5, 20418–20427.
- [52] Tao, F., Liu, W., Liu, J., Liu, X., Liu, Q., Qu, T., Hu, T., Zhang, Z., Xiang, F., Xu, W., Wang, J., Zhang, Y., Liu, Z., Li, H., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., Sui, F., He, L., Yi, W., and Cheng, H. 2018. Digital twin and its potential application exploration. *Jisuanji Jicheng Zhizao Xitong/Computer Integrated Manufacturing Systems, CIMS* 24, 1, 1–18.
- [53] Duan, B., Umeda, K., Hwang, W., Hu, C., Gao, W., Xu, C., and Ben, K., Eds. 2020. *Study on the application of digital twin technology in complex electronic equipment. 7th Asia International Symposium on Mechatronics, AISM 2019* 589. Springer Verlag.
- [54] Boschert, S. and Rosen, R. 2016. Digital Twin—The Simulation Aspect. In *Mechatronic Futures: Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and their Designers*, P. Hehenberger and D. Bradley, Eds. Springer International Publishing, Cham, 59–74. DOI=10.1007/978-3-319-32156-1_5.
- [55] Tao, F., Zhang, M., and Nee, A. Y. C. 2019. Chapter 7 - Digital Twin-Driven Prognostics and Health Management. In *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*, F. Tao, M. Zhang and A. Y. C. Nee, Eds. Academic Press, 141–167. DOI=10.1016/B978-0-12-817630-6.00007-2.
- [56] Jouin, M., Gouriveau, R., Hissel, D., Péra, M.-C., and Zerhouni, N. 2013. Prognostics and Health Management of PEMFC – State of the art and remaining challenges. *International Journal of Hydrogen Energy* 38, 35, 15307–15317.

- [57] Zhu, L., Jin, X., Burkhart, C., and Roham, S. 2019. Reliability Engineering for High-Value Low-Volume Complex Equipment. In *2019 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*. IEEE, [S.I.], 1–7. DOI=10.1109/RAMS.2019.8769223.
- [58] Wittenburg, R., Hübel, M., Prause, H., Gierow, C., Reißig, M., and Hassel, E. 2019. Effects of rising dynamic requirements on the lifetime consumption of a combined cycle gas turbine power plant. *Energy Procedia* 158, 5717–5723.
- [59] Scholz, G. 2013. Grundlagen der Energiewirtschaft und Energieerzeugung. In *Heisswasser- und Hochdruckdampfanlagen: Planungshandbuch für Industrie- und Fernwärmeversorgung*, G. Scholz, Ed. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1–66. DOI=10.1007/978-3-642-36589-8_1.
- [60] Scholz, G. 2013. Wärme- und Dampferzeuger, einschließlich Feuerungseinrichtungen und Brennstofflager. In *Heisswasser- und Hochdruckdampfanlagen: Planungshandbuch für Industrie- und Fernwärmeversorgung*, G. Scholz, Ed. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 203–304. DOI=10.1007/978-3-642-36589-8_4.
- [61] Linke, W., Mayr, F., and Gritsch, T. 2009. *Handbuch der Kesselbetriebstechnik : Kraft- und Wärmeerzeugung in Praxis und Theorie. Kesselbetriebstechnik*. Gräfelfing : Resch, Gräfelfing.
- [62] Strauss, K. 2016. Nutzung erneuerbarer Energiequellen. In *Kraftwerkstechnik: zur Nutzung fossiler, nuklearer und regenerativer Energiequellen*. Springer Berlin Heidelberg, 453–506. DOI=10.1007/978-3-662-53030-6_18.
- [63] Diepenseifen, K. and Karpf, R. 2011. Brennstoff, Dampf, Rauchgas. *Verlag Lührs & Röver*.
- [64] Noot, W. 2010. *Vom Kofferkessel bis zum Großkraftwerk-die Entwicklung im Kesselbau: Grundlagen, Konstruktion, Anwendungen*. Oldenbourg Industrieverlag.
- [65] Dolezal, R. 2013. *Dampferzeugung: verbrennung, feuerung, dampferzeuger*. Springer-Verlag.
- [66] Bilde, K. G., Sørensen, K., and Condra, T. 2019. Mathematical model of natural circulation biomass boilers during start-up. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 143, 118477.
- [67] Yun, S., Park, J. H., and Kim, W. T. 2017. Data-centric middleware based digital twin platform for dependable cyber-physical systems. In . IEEE Computer Society, 922–926. DOI=10.1109/ICUFN.2017.7993933.
- [68] Kabugo, J. C., Jämsä-Jounela, S., Schiemann, R., and Binder, C. 2019. Process Monitoring Platform based on Industry 4.0 tools: a waste-to-energy plant case study. In , 264–269. DOI=10.1109/SYSTOL.2019.8864766.
- [69] Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., and Xu, L. 2016. Edge Computing: Vision and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal* 3, 5, 637–646.

- [70] Petrolo, R., Morabito, R., Loscrì, V., and Mitton, N. 2017. The design of the gateway for the Cloud of Things. *Annals of Telecommunications* 72, 1, 31–40.
- [71] Schneider, U. and Gierend, C. 2019. Computergestützte Kraftwerkstechnik: Mit dem digitalen Zwilling in die Zukunft. In *Energie aus Abfall Band 16*, S. Thiel, E. Thomé-Kozmiensky, P. Quicker and A. Gosten, Eds. Neuruppin : TK, Neuruppin.
- [72] Pauker, F. 2019. *OPC UA Information Model Design : OPC UA Informationsmodellierung für Cyber-Physical Production Systems*. OPC UA Information Model Design - Information Modelling for Cyber-Physical Production Systems, Wien.
- [73] Tuan, D. and Renaud, A. 2011. Opc Ua. In *The Industrial Electronics Handbook*. CRC Press.
- [74] Mahnke, W., Leitner, S.-H., and Damm, M. 2009. *OPC unified architecture*. Springer Science & Business Media.
- [75] Steindl, G., Frühwirth, T., and Kastner, W. 2019. Ontology-Based OPC UA Data Access via Custom Property Functions. In , 95–101. DOI=10.1109/ETFA.2019.8869436.
- [76] Wei, M., Mo, L., Zhuang, Y., and Kim, K. 2018. *Secure Framework and Key Agreement Mechanism for OPC-UA in Industrial IoT*. *Proceedings of the 12th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication*. Association for Computing Machinery, Langkawi, Malaysia.
- [77] Usländer, T. and Epple, U. 2020-01-28t18:28:39.451+01:00. *Reference model of Industrie 4.0 service architectures*. *At - Automatisierungstechnik* 63 63, 858. <https://www.degruyter.com/view/j/auto.2015.63.issue-10/auto-2015-0017/auto-2015-0017.xml>.
- [78] Motard, R. L., Shacham, M., and Rosen, E. M. 1975. Steady state chemical process simulation. *AIChE Journal* 21, 3, 417–436.
- [79] Marquardt, W. 1999. Von der Prozeßsimulation zur Lebenszyklusmodellierung. *Chemie Ingenieur Technik* 71, 10, 1119–1137.
- [80] Epple, B., Leithner, R., Linzer, W., and Walter, H. 2012. Einleitung. In *Simulation von Kraftwerken und Feuerungen*, B. Epple, R. Leithner, W. Linzer and H. Walter, Eds. Springer Vienna, Vienna, 1–16. DOI=10.1007/978-3-7091-1182-6_1.
- [81] Qi, Q., Tao, F., Hu, T., Anwer, N., Liu, A., Wei, Y., Wang, L., and Nee, A. Y. C. 2019. Enabling technologies and tools for digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*.
- [82] Leithner, R., Witkowski, A., and Zindler, H. 2012. Kraftwerkssimulation — Modelle und Validierung. In *Simulation von Kraftwerken und Feuerungen*, B. Epple, R. Leithner, W. Linzer and H. Walter, Eds. Springer Vienna, Vienna, 585–687. DOI=10.1007/978-3-7091-1182-6_7.

- [83] Alobaid, F., Mertens, N., Starkloff, R., Lanz, T., Heinze, C., and Epple, B. 2017. Progress in dynamic simulation of thermal power plants. *Progress in Energy and Combustion Science* 59, 79–162.
- [84] Trojan, M. 2019. Modeling of a steam boiler operation using the boiler nonlinear mathematical model. *Energy* 175, 1194–1208.
- [85] Hofmann, R., Halmschlager, V., Koller, M., Scharinger-Urschitz, G., Birkelbach, F., and Walter, H. 2019. Comparison of a physical and a data-driven model of a Packed Bed Regenerator for industrial applications. *Journal of Energy Storage* 23, 558–578.
- [86] Udono, K. and Sitte, R. 2008. Modeling seawater desalination powered by waste incineration using a dynamic systems approach. *Desalination* 229, 1, 302–317.
- [87] Prada, C. de, Hose, D., Gutierrez, G., and Pitarch, J. L. 2018. DEVELOPING GREY-BOX DYNAMIC PROCESS MODELS. *IFAC-PapersOnLine* 51, 2, 523–528.
- [88] Halmschlager, V., Koller, M., Birkelbach, F., and Hofmann, R. 2019. Grey Box Modeling of a Packed-Bed Regenerator Using Recurrent Neural Networks. *IFAC-PapersOnLine* 52, 16, 765–770.
- [89] Nikula, R.-P., Ruusunen, M., and Leiviskä, K. 2016. Data-driven framework for boiler performance monitoring. *Applied Energy* 183, 1374–1388.
- [90] Min, Q., Lu, Y., Liu, Z., Su, C., and Wang, B. 2019. Machine Learning based Digital Twin Framework for Production Optimization in Petrochemical Industry. *International Journal of Information Management* 49, 502–519.
- [91] Finn, J., Wagner, J., and Bassily, H. 2010. Monitoring strategies for a combined cycle electric power generator. *Applied Energy* 87, 8, 2621–2627.
- [92] Zhu, Z., Liu, C., and Xu, X. 2019. Visualisation of the digital twin data in manufacturing by using augmented reality. In . Elsevier B.V, 898–903. DOI=10.1016/j.procir.2019.03.223.
- [93] Schroeder, G., Steinmetz, C., Pereira, C. E., Muller, I., Garcia, N., Espindola, D., and Rodrigues, R. 2017. Visualising the digital twin using web services and augmented reality. In . Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 522–527. DOI=10.1109/INDIN.2016.7819217.
- [94] Andryushkevich, S. K., Kovalyov, S. P., and Nefedov, E. 2019 - 2019. Composition and Application of Power System Digital Twins Based on Ontological Modeling. In *2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. IEEE, 1536–1542. DOI=10.1109/INDIN41052.2019.8972267.
- [95] Sudarsan, R., Fenves, S. J., Sriram, R. D., and Wang, F. 2005. A product information modeling framework for product lifecycle management. *Computer-Aided Design* 37, 13, 1399–1411.
- [96] TIM BERNERS-LEE, JAMES HENDLER, and ORA LASSILA. 2001. THE SEMANTIC WEB. *Scientific American* 284, 5, 34–43.

- [97] Kim, H. and Anderson, K. 2013. Energy Modeling System Using Building Information Modeling Open Standards. *J. Comput. Civ. Eng.* 27, 3, 203–211.
- [98] Uslar, M., Specht, M., Rohjans, S., Trefke, J., and González, J. M. 2012. *The Common Information Model CIM: IEC 61968/61970 and 62325-A practical introduction to the CIM*. Springer Science & Business Media.
- [99] Dean, M. 2004. Owl web ontology language reference, w3c recommendation. <http://www.w3.org/TR/2004/REC-owl-ref-20040210>.
- [100] Niles, I. and Pease, A. 2001. Origins of the IEEE standard upper ontology. In *Working notes of the IJCAI-2001 workshop on the IEEE standard upper ontology*, 4–10.
- [101] Tao, F. and Qi, Q. 2019. New IT Driven Service-Oriented Smart Manufacturing: Framework and Characteristics. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* 49, 1, 81–91.
- [102] Koschnick, G. 2020. *Industrie 4.0: Smart Services*, ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V., Frankfurt am Main.
- [103] Lim, K. Y. H., Zheng, P., and Chen, C.-H. 2019. A state-of-the-art survey of Digital Twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives. *Journal of Intelligent Manufacturing*.
- [104] Bauer, T., Antonino, P. O., and Kuhn, T. 2019. Towards Architecting Digital Twin-Pervaded Systems. In , 66–69. DOI=10.1109/SESoS/WDES.2019.00018.
- [105] Beckmann, M. and Rostkowski, S. 2010. Optimierung von Biomasse- und Abfallverbrennungsanlagen durch Monitoring. In *Energie aus Abfall - Band 7*, K. J. Thomé-Kozmiensky and M. Beckmann, Eds. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 3–18.
- [106] Demirbas, A. 2005. Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Progress in Energy and Combustion Science* 31, 2, 171–192.
- [107] Lockwood, T. 2015. Advanced sensor and smart controls for coal-fired power plant. *IEA Clean Coal Center*, 21.
- [108] Kortela, J. and Jämsä-Jounela, S. L. 2012. Fuel-quality soft sensor using the dynamic superheater model for control strategy improvement of the BioPower 5 CHP plant. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 42, 1, 38–48.
- [109] Kabugo, J. C., Jämsä-Jounela, S.-L., Schiemann, R., and Binder, C. 2020. Industry 4.0 based process data analytics platform: A waste-to-energy plant case study. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 115, 105508.
- [110] Alazemi, Ahmed S. Kh R. Q., Ali, M. Y., and Daud, M. R. C. 2019. Preventive Maintenance of Boiler: A Case of Kuwait Industry. *International Journal of Engineering Materials and Manufacture* 4, 2, 48–58.

- [111] Kauer, R., Jovanovic, A., Angelsen, S., and Vage, G. 2004. *Plant Asset Management: RIMAP (Risk-Based Inspection and Maintenance for European Industries) - The European Approach*.
- [112] VGB Richtlinie. *Zustandsüberwachung und Prüfung der Komponenten von Dampfkesselanlagen und Wasser oder Dampf führende Hochdruckleitungen, Zweite Auflage (2012), VGB-S-506-00-2019-02-DE*. VGB Powertech.
- [113] Jovanovic, A., Auerkari, P., and Bareiss, J. M. 2014. 11 - Practical determination of probability of failure in risk-based inspection and life management of coal power plants. In *Coal Power Plant Materials and Life Assessment*, A. Shibli, Ed. Woodhead Publishing, 288–317. DOI=10.1533/9780857097323.2.288.
- [114] VGB Richtlinie. *Zustandsüberwachung und Prüfung der Komponenten von Dampfkesselanlagen, Druckbehälteranlagen und Wasser oder Dampf führenden Rohrleitungen in Wärmekraftwerken. 3. Auflage, 2019, VGB-S-506-R-00;2012-03.DE*. VGB Powertech.
- [115] Bareiß, J., Buck, P., Matschecko, B., Jovanovic, A., Balos, D., and Perunicic, M. 2004. RIMAP demonstration project. Risk-based life management of piping system in power plant Heilbronn. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 81, 10, 807–813.
- [116] Macek, K., Endel, P., Cauchi, N., and Abate, A. 2017. Long-term predictive maintenance: A study of optimal cleaning of biomass boilers. *Energy and Buildings* 150, 111–117.
- [117] Yip, W. S. and Marlin, T. E. 2004. The effect of model fidelity on real-time optimization performance. *Computers & Chemical Engineering* 28, 1, 267–280.
- [118] Tang, S.-Z., Li, M.-J., Wang, F.-L., He, Y.-L., and Tao, W.-Q. 2020. Fouling potential prediction and multi-objective optimization of a flue gas heat exchanger using neural networks and genetic algorithms. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 152, 119488.
- [119] Romeo, L. M. and Gareta, R. 2009. Fouling control in biomass boilers. *Biomass and Bioenergy* 33, 5, 854–861.
- [120] Pattanayak, L., Ayyagari, S. P. K., and Sahu, J. N. 2015. Optimization of sootblowing frequency to improve boiler performance and reduce combustion pollution. *Clean Technologies and Environmental Policy* 17, 7, 1897–1906.
- [121] 2017. *Industry 4.0 and the digital twin*. Deloitte, Deloitte.
- [122] *Translating Ideas for IoT Initiatives into Dollars and Cents*. https://sites.tcs.com/bts/wp-content/uploads/2019/08/TCS_IoT_PoV_FINAL.pdf.
- [123] GE. *GE Digital Twin: Analytic Engine for the Digital Power Plant*. <https://www.ge.com/digital/applications/digital-twin>. Accessed 14 December 2020.
- [124] EMERSON. 2019. *Emerson Digital Twin: A Key Technology for Digital Transformation. White Paper*. <https://www.emerson.com/documents/automation/emerson-digital-twin-a-key-technology-for-digital-transformation-en-5262472.pdf>. Accessed 14 December 2020.

TEIL VI

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: 5D Digital Twin Modell am Beispiel eines Dampferzeugers (in Anlehnung an [1]) vi

Abbildung 2: 4-Step Approach im Projekt DigiSteam vii

Abbildung 3 - Boiler System Health Management mit dem 5D-DTM (in Anlehnung an [2]) ix

Figure 4: 5D Digital Twin Model of a Steam Generator (in accordance with [1]) x

Figure 5: 4-Step Approach in the project DigiSteam..... xi

Figure 6 - Boiler System Health Management with the 5D-DTM (according to [2]) .. xiii

Abbildung 7: "Enabling Technologies" Industrie 4.0 (in Anlehnung an [8]) 9

Abbildung 8: Smart Grid Architecture Model SGAM. Quelle: [25]..... 21

Abbildung 9: Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0). Quelle: [19]..... 23

Abbildung 10: Layer-Achse RAMI4.0 (in Anlehnung an [23]) 24

Abbildung 11: Product Lifecycle Managment Konzept (in Anlehnung an [33]) 29

Abbildung 12: Wissenschaftliche Publikationen im Zeitraum von 2012-2019 zum Thema DT..... 31

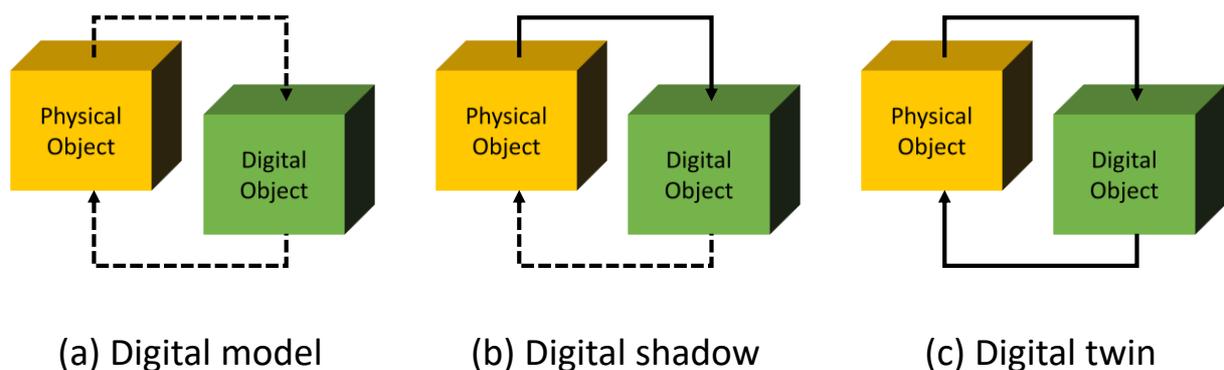


Abbildung 13: Unterkategorien des DT nach Kritzinger et al. [38], (a) Digitales Modell, (b) Digitaler Schatten, (c) Digitaler Zwilling..... 32

Abbildung 14: 3-dimensionales DT-Modell nach Grieves (in Anlehnung an [43]) 37

Abbildung 15: RAMI4.0 und der Digitale Zwilling (in Anlehnung an [48])..... 40

Abbildung 16: 5-dimensionales DT-Modell nach Tao et al. Quelle: [1] 45

Abbildung 17: (a) PE, (b) VE und (c) DD einer Windturbine nach Tao et al. [1]	49
Abbildung 18: Ablaufmodell PHM einer Windturbine [53]	50
Abbildung 19: 5D-DTM am Beispiel eines Dampferzeugers (in Anlehnung an [1])... 58	
Abbildung 20: Schema eines Dampfkraftwerkes (in Anlehnung an [62])	62
Abbildung 21: 3D-Modell 4-Zug Naturumlauf-Dampferzeuger mit Rostfeuerung.....	63
Abbildung 22: Prinzipskizze eines Naturumlauf-Dampferzeugers in 2-Zug Bauweise: (a) Rauchgaskanal (Zug), (b) Brennkammer, (c) zur Rauchgasreinigung, (1) Speisewasserzulauf, (2) Economiser, (3) Dampftrommel, (4) Fallrohr, (5) Sammler, (6) Steigrohr, (7) Überhitzer, (8) überhitzter Dampf. Quelle:	64
Abbildung 23: Beispielhafte hierarchische Strukturierung eines Dampferzeugers ausgehend vom Gesamtsystem in Subsysteme und Komponenten bis zur Sensorik	68
Abbildung 24: Kommunikationsmodell im 5D-DTM	70
Abbildung 25: Darstellung einer Kommunikationsinfrastruktur im Sinne von I4.0 (in Anlehnung an [68])	72
Abbildung 26: Automatisierungshierarchie innerhalb eines Kraftwerks (in Anlehnung an [71])	74
Abbildung 27: OPC-UA Architektur am Beispiel eines Automatisierungssystems innerhalb des Kraftwerks (in Anlehnung an [73])	76
Abbildung 28: Virtueller Dampferzeuger im 5D-DTM.....	78
Abbildung 29: Feed-Forward Künstliches Neuronales Netzwerk.....	84
Abbildung 30: Grey-Box-Modellierung. Quelle: [88].....	86
Abbildung 31: Datenmodell des 5D-DTM	88
Abbildung 32: Servicemodell des 5D-DTM. Quelle: [102] © ZVEI, reproduziert mit Genehmigung	95
Abbildung 33: Smart Services und Ablaufmodell im 5D-DTM. Quelle: [102] © ZVEI, reproduziert mit Genehmigung	96

Abbildung 34: Produktlebenszyklus eines technischen Assets (in Anlehnung an [53])	98
Abbildung 35: Kesselleistungs- und Druckschwankungen bei Änderungen der Biomassequalität (Erhöhung der Feuchtigkeit der Biomasse von 55% auf 65%). Quelle: [108]	105
Abbildung 36: Kesselleistungs- und Druckschwankungen bei Änderungen des Leistungsbedarfs von 14 MW auf 15 MW (bei einer konstanten Feuchtigkeit der Biomasse von 57%). Quelle: [108]	105
Abbildung 37: Arten der Instandhaltung (in Anlehnung an DIN EN 13306 ³⁹).....	108
Abbildung 38: Beispiel für eine Risikomatrix nach der RIMAP-Methode. Quelle: [114]	112
Abbildung 39: Prozessschritte für Real-time Operations Optimization (RTO) nach Yip und Marlin [117].....	115
Abbildung 40: Wirkungsgradverluste durch Ablagerungen an Heizflächen im Dampferzeuger über zwei Betriebsperioden (Abszisse: Dampfmassenstrom in [t/h], Ordinate: Betriebsstunden in [h]). Quelle: [119].....	117
Abbildung 41: Verteilung der Rußbläser im Rauchgaszug eines Biomasse-Dampferzeugers. Quelle: [119].....	119
Abbildung 42: Vorgehensweise bei der Auswahl einer optimalen Reinigungsstrategie nach Romeo und Garetta. Quelle: [119]	121
Abbildung 43: Auswirkungen einer Rußbläseroptimierung auf den Wirkungsgrad des Dampferzeugers. Quelle: [120].....	122
Abbildung 44: Boiler System Health Management mit dem 5D-DTM (in Anlehnung an [2])	124
Abbildung 45: Einordnung der DT-Technologie im Rahmen der Digitalisierung	128

TEIL VII
Formelverzeichnis

TEIL II:

Gleichung II.1: Modellgleichung des 5D-DTM [47] 46

Gleichung II.2: Modellgleichung virtuelle Einheit VE [47]..... 46

Gleichung II.3: Modellgleichung Datenmodell DD [47] 47

Gleichung II.4: Modellgleichung Serviceabfrage im Servicemodell Ss (vgl. [47]) 48

Gleichung II.5: Modellgleichung Verbindungsmodell CN (vgl. [47]) 49

Gleichung II.6: Modellgleichung eines Datenaustauschs in CN (vgl. [47])..... 49

TEIL VIII
Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausgewählte Meilensteine in der Entwicklung von KI (vgl. [12])	13
Tabelle 2: Übersicht kommerzieller und aus der Forschung stammender Simulationsprogramme (vgl. [82]).....	82
Tabelle 3: Vergleich zwischen theoretischer und experimenteller Modellbildung (vgl. [85])	87
Tabelle 4: Einsparungspotentiale durch Predictive Maintenance über einen Prädiktionshorizont von 10 Jahren (vgl. [116]).....	113