



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Institut für
Fertigungstechnik und
Photonische Technologien



Diplomarbeit

Entwicklung eines Digitalen Zwillings

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-
Ingenieurs (Master of Science) unter der Leitung von

a.o. Univ.-Prof. Dr. Kittl

(Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien)

Univ. Ass. Dr. Dipl.Ing. Thomas Trautner

(Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Christoph Lachauer, B.Sc.

01528423

Wien, im Oktober 2022

Christoph, Lachauer

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Wien, im Oktober 2022

Christoph Lachauer

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei einigen Personen bedanken, die mich besonders intensiv während meines Studiums und dieser Abschlussarbeit unterstützt haben.

Zuerst gebührt mein Dank meinem Betreuer Univ. Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Thomas Trautner, der mir stets mit Ratschlägen zur Seite stand und dazu beigetragen hat in mir die Faszination für das Internet der Dinge zu wecken. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Burkhard Kittl, der diese Arbeit am Institut für Fertigungstechnik an der Technischen Universität Wien ermöglicht hat.

Außerdem möchte ich mich ganz besonders bei meiner Familie bedanken, die mich vor und während meines Studiums finanziell und moralisch unterstützt hat und mir immer tatkräftig zur Seite stand.

Kurzfassung

Lieferengpässe, eine immer individuellere Nachfrage bis hin zur Losgröße 1 sowie die wachsende Konkurrenz in Schwellenländern stellen die europäische Industrie vor eine Vielzahl von Herausforderungen. Um diesen Problematiken erfolgreich zu begegnen, ist ein möglichst flexibler Produktionsprozess erforderlich. Da eine Erhöhung der Agilität durch zusätzliche Maschinen und spezifisch geschultes Personal mit hohen Kosten verbunden ist, sollen digitale Technologien dazu beitragen, das Problem der sich ständig ändernden Produktionsumgebungen unter Einhaltung hoher Qualitätsstandards zu lösen.

Jedoch ist das Personal im Bereich der Produktionsplanung nur bedingt mit spezifischen IT-Kenntnissen ausgestattet. Zudem besteht in Europa ein Mangel an IT-Fachkräften, wodurch sich die Umsetzung für viele Unternehmen schwierig gestaltet. Der Einsatz von 3D-Simulationen ist in der Produktion bereits ein gängiges Werkzeug und findet dort seit über zwei Jahrzehnten Anwendung. Das Ziel dieser Arbeit ist es, auf Basis von dreidimensionalen Simulationen an einem bestehenden Produktionsprozess Optimierungsmöglichkeiten aufzuzeigen.

Als erster Schritt wird in dieser Arbeit ein Digitales Modell erstellt, auf Basis dessen sowohl ein Software-in-the-Loop als auch Hardware-in-the-Loop Ansatz realisierbar sind. Daraufhin wird dieses um einen einseitigen vollautomatisierten Datenfluss erweitert, wodurch ein Digitaler Schatten entsteht. Die Daten werden durch Sensoren aufgegriffen und mit dem IoT-Kommunikationsprotokoll MQTT weiter an die Middleware Node-RED geleitet und über einen Webservice in die Simulation übertragen.

Im nächsten Schritt werden im Digitalen Modell Bereiche mit spezifischen Eigenschaften definiert, um eine digitale Steuerung der Anlage zu ermöglichen. Der Fokus liegt dabei vor allem auf den Geschwindigkeiten der Roboter und der Vorbeugung von Kollisionen. Auf Basis dieser Variante lässt sich unter anderem ein Plug & Produce Konzept realisieren. Alles in allem werden die Möglichkeiten der Simulationssoftware ABB RobotStudio für eine digitale Steuerung beleuchtet, die dazu beitragen sollen, den Prozess flexibler zu gestalten. Abschließend wird der Einsatz einer 3D-Simulation für einen Digitalen Zwilling kritisch hinterfragt und Vorschläge für eine optimale Software auf Basis der Erkenntnisse dieser Arbeit aufgezeigt.

Abstract

Supply bottlenecks, increasingly individualized demand up to batch size 1, and growing competition in emerging markets present European industry with a variety of challenges. In order to successfully counter these issues, a production process that is as flexible as possible is required. Since increasing agility through additional machines and specifically trained personnel is associated with high costs, digital technologies are intended to help solve the problem of constantly changing production environments while maintaining high quality standards.

However, personnel in the area of production planning are only equipped with specific IT knowledge to a limited extent. In addition, there is a shortage of IT specialists in Europe, which makes implementation difficult for many companies. The use of 3D simulations is already a common tool in production and has been applied there for more than two decades. The aim of this work is to show optimization possibilities on the basis of three-dimensional simulations on an already existing production process.

The first step in this work is to create a digital model on the which enables both a software-in-the-loop and a hardware-in-the-loop approach. Furthermore, this will be extended by a one-way fully automated data flow, resulting in a so called digital shadow. The data is picked up by sensors and forwarded to the middleware Node-RED using the IoT communication protocol MQTT and transferred to the simulation via a web service.

In the next step, areas with specific properties are defined in the digital model to enable digital control of the plant. The focus here is primarily on the speeds of the robots and the prevention of collisions. Among other things, a plug & play concept can be realized on the basis of this concept. All in all, the possibilities of the simulation software ABB RobotStudio for a digital control which should help to make the process more flexible, are highlighted. Finally, the use of a 3D simulation for a digital twin is critically questioned and suggestions for an optimal software based on the findings of this thesis are presented.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Entwicklung und Trends in der Produktion.....	7
1.2	Herausforderungen	8
1.3	Problemstellungen	8
1.4	Aufbau der Arbeit	10
2	Grundlagen	11
2.1	Die Entstehung des Begriffs „Digitaler Zwilling“	11
2.2	Definitionen von Digitalen Zwillingen	12
2.3	Modellierung.....	14
2.3.1	Systemtheorie.....	14
2.3.2	Black-Box, White Box und Grey Box Ansatz	17
2.3.3	Das Digitale Modell für physische Objekte	18
2.3.4	Physikalische Modellierung	19
2.3.5	Datengetriebene Modellierung	20
2.3.6	Echtzeitfähigkeit versus Detailierungsgrad.....	21
2.4	Digitaler Schatten.....	21
2.4.1	Das Konzept Digitaler Schatten.....	21
2.4.2	Cyber-physische Produktionssysteme	22
2.4.3	Externe Aspekte der IoT Kommunikation - Sensoren und Aktoren	24
2.4.4	Interne Aspekte der IoT Kommunikation - Kommunikationsprotokolle..	26
2.5	Simulation	29
2.5.1	Simulationsprinzipien.....	29
2.5.2	Die vier Wellen der Computersimulation	30
2.5.3	Virtuelle Inbetriebnahme.....	31
2.5.4	Zusammenfassung des Modellbildungs- und Simulationsprozess.....	31
2.6	Der Digitale Zwilling	33
2.6.1	Ein Begleiter entlang des gesamten Produktlebenszyklus.....	33
2.6.2	Das Konzept.....	34
2.6.3	Aufbau Digitaler Zwillinge	35
2.6.4	Erster Standardisierungsansatz für den Aufbau von DZ	37

3	Entwicklung eines Digitalen Schatten in der Pilotfabrik Industrie 4.0.....	38
3.1	Physische Komponenten, Aufbau und Ablauf des Produktionsprozesses...	38
3.1.1	Anordnung der Maschinen und Anlagen	38
3.1.2	Vorstellung der Maschinen und Anlagen.....	39
3.1.3	Ablauf des Produktionsprozesses und Pfad des Werkstücks	41
3.2	Digitales Modell.....	43
3.2.1	Import der Dateien für das Digitale Modell	43
3.2.2	Systemkonzepte	44
3.2.3	Implementierung der Logik	46
3.2.4	Virtuelle Inbetriebnahme auf Basis eines SiL und HiL Ansatzes.....	52
3.3	Digitaler Schatten.....	54
3.3.1	Kopplung der virtuellen und realen Steuerung für den ABB IRB 6620..	55
3.3.2	Übertragung der Maschinendaten in die virtuelle Steuerung	55
3.3.3	Kommunikationsübersicht	56
3.3.4	Zusammenfassung und Beurteilung des Digitalen Schatten.....	57
4	Digitale Zwillingkonzepte mit RobotStudio	59
4.1.1	Zonen mit spezifisch definierten Eigenschaften	59
4.1.2	Roboter und Anlagen für Produktionsvorgang justieren.....	60
5	Ist der Digitale Zwilling die Schlüsselkomponente in der Industrie 4.0?	62
5.1	Zusammenfassung.....	62
5.2	Kritik	63
5.3	Ausblick.....	64
6	Literaturverzeichnis	65
7	Abbildungsverzeichnis	72
8	Tabellenverzeichnis	74
9	Abkürzungsverzeichnis	75

1 Einleitung

1.1 Entwicklung und Trends in der Produktion

Die Fertigung physischer Produkte hat seit dem Ende des 18. Jahrhundert einen entscheidenden Einfluss auf die Leistungsfähigkeit von Volkswirtschaften und trägt vor allem maßgeblich zur Beschäftigung bei [1]. Jedoch verlor der Anteil der Industrie am Bruttoinlandsprodukt (BIP) durch die Entstehung des Dienstleistungssektors in hochentwickelten Ländern vermehrt an Gewicht. Dieser Trend ist allgemein unter dem Begriff Deindustrialisierung bekannt und führte vor allem in Frankreich, England und den USA zu einem massiven Rückgang der Produktion [1].

Deutschland stellt seit seiner Wiedervereinigung mit einem konstanten Produktionsanteil von ungefähr 25% bezogen auf das BIP [2] unter den hochentwickelten und bevölkerungsreichen Ländern die Ausnahme dar. Österreich stellt mit einem noch höheren Anteil von ca. 28% [3] unter den kleineren europäischen Staaten einen weit überdurchschnittlich hohen Industrieanteil bezogen auf das BIP dar. Was vor der Weltwirtschaftskrise in den Jahren 2008/2009 von einer Vielzahl an Wirtschaftsexperten als rückständig ausgelegt wurde, wird heute als Hauptgrund für die schnelle Erholung dieser Länder aus der Krise betrachtet [1]. Deswegen versuchen, eine Vielzahl von Volkswirtschaften die Industrie wiederzubeleben beziehungsweise zu reindustrialisieren. Die Hauptziele sind dabei vor allem die Sicherung des wirtschaftlichen Wachstums und der Erhalt der Arbeitsplätze [1].

Um die europäische Industrie weltweit wettbewerbsfähiger zu machen und die offene strategische Autonomie Europas zusätzlich zu stärken, steht die Prozesstechnologie insbesondere vor folgenden Herausforderungen [1]:

- Demographischer Wandel
- Urbanisierung
- Globalisierung
- Wirtschaftswachstum in Schwellenländern
- Nachhaltigkeit
- Individualisierung

Diese sollen vor allem durch IT-Lösungen in der Fertigung bewältigt werden. Somit wurde die vierte industrielle Revolution in die Wege geleitet, durch die eine Optimierung verschiedener Faktoren für produzierende Unternehmen durch Vernetzung erfolgen soll [4].

1.2 Herausforderungen

Grundsätzlich besteht bei vielen Unternehmen Interesse an dem Einsatz der Technologien der Industrie 4.0. Genauer betrachtet, betonen laut einer aktuellen Bitkom Studie 91 Prozent der Unternehmen, dass Industrie 4.0 für deren Produktion unverzichtbar ist [5]. Vor allem Unternehmen mit mehr als 500 Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen sehen sich als Vorreiter in der Industrie 4.0. Bei Unternehmen mit einer kleineren Belegschaft sieht dies jedoch anders aus. 58 Prozent der Unternehmen mit 100-499 Angestellten sehen sich in diesem Bereich als Nachzügler [5]. Gründe dafür sind laut einer Bitkom Studie aus dem Jahr 2022 vor allem [5]:

- fehlende finanzielle Mittel (81 %),
- Anforderungen an Datenschutz (67 %),
- IT-Sicherheit (58 %),
- fehlende Fachkräfte (51 %),
- Störanfälligkeit der Systeme (40 %) und
- fehlender Austausch anderen Unternehmen mit gleichen Herausforderungen (29 %).

Um geeignete Konzepte und Strategien für diese Herausforderungen zu entwickeln, wurden Forschungsprojekte von der EU und den jeweiligen europäischen Ländern ins Leben gerufen. Eine dieser Einrichtungen, die solche Demonstrationsverfahren realisiert, ist die TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0. Zu den Schlüsseltechnologien für die Verwirklichung der Industrie 4.0 und die damit verbundene vollständige Digitalisierung von Produktion und Wirtschaft zählt die Simulation [6]. Populär wurden solche Konzepte im Zusammenhang mit der Industrie 4.0 unter dem Namen Digitaler Zwilling [7].

1.3 Problemstellungen

Um die genannten Herausforderungen mit der technologischen Weiterentwicklung im Kontext von Industrie 4.0 zu bewältigen, stehen Unternehmen vor unterschiedlichen Problemstellungen [8]. Zu beachten, ist dabei immer die jeweilige Ausgangsbasis. Zumeist enthalten Fertigungsprozesse automatisierte Systeme bzw. Prozessautomatisierungssysteme. Solche bestehen laut Vogel-Heuser et al. [9] aus einem technischen System (technisches Produkt oder technische Anlage), in dem ein technischer Prozess abläuft, einem Rechner- und Kommunikationssystem zur Erfassung, Verarbeitung und Darstellung von Informationen und dem Prozessbedienpersonal. Die technischen Systeme bestehen oftmals aus Industrierobotern und der Rechner und das Kommunikationssystem ist eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS).

Die Dauer der Lebenszyklen der in den Fertigungsprozessen eingesetzten Maschinen, Automatisierungstechnischen Hardware und der Software unterscheiden sich jedoch

stark. Während die Maschinen oftmals 5 - 25 Jahre betrieben werden, die Automatisierungstechnische Hardware alle 5 - 10 Jahre ausgetauscht wird, beträgt der Zyklus der Software maximal 6 bis 12 Monate [10]. Da Software oftmals kostengünstiger und schneller anpassbar ist als Hardware, wird diese zumeist verändert, um der großen Variantenvielfalt zu begegnen [10]. Daraus resultierende flexible Automatisierungskonzepte beruhen auf dem Zusammenwirken aus Robotik und Automatisierungstechnik [11]. Die Automatisierung der Roboter wird durch den Einsatz einer SPS ermöglicht [11]. Um das vorwiegend in kleineren Unternehmen fehlende spezifische IT-Wissen für die Softwareupdates zu kompensieren, bieten sich digitale 3D-Modelle und 3D-Simulationen an, da der Umgang mit solcher Software aus dem CAD Umfeld bereits einem Großteil des Personals in der Fertigungsplanung bekannt ist.

Modelle werden in den Ingenieurwissenschaften eingesetzt, um Rückschlüsse auf die Wirklichkeit zu erlangen [12]. Zu spät erkannte oder fehlerhafte Anforderungen innerhalb von Prozessen wirken sich oftmals langfristig schwerwiegend auf den weiteren Projektverlauf aus und können hohe Kosten verursachen [13]. Um dies zu vermeiden, empfiehlt es sich für Unternehmen, Prozesse vorab virtuell in Betrieb zu nehmen. Der Digitale Zwilling lässt sich als die am meisten fortgeschrittene Variante der Simulation einordnen [14] und ermöglicht unter anderem eine digitale Steuerung von physischen Objekten [15]. Die dreidimensionale visualisierte digitale Zwillingssimulation basiert auf Digitalen Modellen mit eingepflegter Kinematik sowie einem Digitalen Schatten (DS) [15]. Auf Basis dieser Simulationen sollen unter anderem weniger fehleranfällige, flexiblere und effizientere Fertigungsszenarien entstehen. Die Rekonfigurierbarkeit für Automatisierungssysteme wird effizienter, wenn die Zeit für das Hinzufügen neuer Ressourcen reduziert wird. Ein System, welches diesen Vorgang automatisch erledigt, wird als Plug & Produce (P&P) bezeichnet [16]. Damit ist es möglich, dem Trend zu individuelleren Produkten bis hin zur Losgröße 1 zu bewältigen.

Funktionen, die eine Rückkopplung vom digitalen auf das reale Modell ermöglichen, sind von der dreidimensionalen virtuellen Simulation direkt mit der speicherprogrammierbaren Steuerung gekoppelt. Bei dem Einsatz von Digitalen Zwillingen als dreidimensional visualisierte Simulation ergeben sich dabei folgende Probleme:

1. Die Roboterproduzenten entwickeln unterschiedliche Konzepte und Varianten für den Einsatz des Digitalen Zwilling auf den herstellereigenen Steuerungen. Diese Ansätze sind ausschließlich mit der dazugehörigen Simulationssoftware des Herstellers anwendbar.
2. Die direkte Integration aller Steuerungen in die Simulationssoftware ist oftmals nur bei Übereinstimmung des Herstellers möglich. Andernfalls ist es entweder notwendig die Signale der Sensoren und Aktoren über eine Middleware und

einen Webservice in die Simulation zu integrieren bzw. mehrere Programme einzusetzen. Denn die Entwicklungsumgebung und Steuerungen bilden in diesem Fall ein geschlossenes System.

3. Außerdem entsteht durch den langfristig geplanten Einsatz einer Software eine Abhängigkeit vom Hersteller. Diese wirkt sich entscheidend auf das Innovationspotential und die beim Einsatz verursachten Kosten aus.

Folglich müssen die Konzepte eines dreidimensionalen, virtuellen, Digitalen Zwillings den bei der Entwicklung entstehenden Aufwand rechtfertigen.

1.4 Aufbau der Arbeit

Im Grundlagenteil dieser Arbeit werden verschiedene Sichten des Begriffs Digitaler Zwilling beleuchtet. Daraufhin werden die Konzepte Digitales Modell (DM) und Digitaler Schatten, als wichtigste Grundlagen für den Digitalen Zwilling vorgestellt. Der letzte Abschnitt der Theorie stellt verschiedene Konzepte des Digitalen Zwillings detaillierter vor und definiert den Begriff für den weiteren Verlauf dieser Arbeit. Auf Basis der vorgestellten Inhalte wird in Kapitel 3 ein Digitales Modell für einen Produktionsvorgang entwickelt. Darauf aufbauend wird ein Digitaler Schatten installiert. Mithilfe dieser beiden Konzepte folgt in Kapitel 4 die Vorstellung von zwei Varianten, durch die ein Digitaler Zwilling in der virtuellen dreidimensionalen Simulationssoftware entsteht. Abschließend werden alle entwickelten Konzepte zusammengefasst, kritisch hinterfragt, und es wird ein Ausblick für den Digitalen Zwilling in die Zukunft gewagt.

2 Grundlagen

Dieser Abschnitt behandelt die theoretischen Grundlagen, anhand deren ein Verständnis für den darauffolgenden praktischen Abschnitt entstehen soll.

2.1 Die Entstehung des Begriffs „Digitaler Zwilling“

Das Konzept, welches unter dem Begriff Digitaler Zwilling Bekanntheit in den Ingenieurwissenschaften erlangte, wurde von Michael Grieves während seines Doktorandenprogramms Ende der 90er Jahre an der Case Western Reserve University in Cleveland unter dem Namen „**Doubleganger**“ entwickelt [17]. Im Jahr 2002 stellte er ein erstes Konzept an der University of Michigan vor. Allerdings hatte er zu diesem Zeitpunkt den ursprünglichen Namen bereits verworfen, und der Titel seiner Präsentation trug den simplen Namen „**Conceptual Ideal for PLM**“ [17]. Dieser Ansatz zeigte ein **virtuelles Abbild**, welches alle Informationen eines **physischen Produkts** besitzt und dieses innerhalb des gesamten Produktlebenszyklus spiegelt [17].

Dieses Konzept definierte Grieves wie folgt:

„Digital Twin is a set of virtual information constructs that fully describes a potential or actual physical manufactured product from the micro atomic level to the macro geometrical level. At its optimum, any information that could be obtained from inspecting a physical manufactured product can be obtained from its Digital Twin“ [18].

Das von Grieves beschriebene **digitale Simulationsmodell** zeigt den aktuellen Zustand eines physischen Modells durch seinen DZ. Dieses Konzept bietet vor allem den Vorteil, die genauen Informationen eines physischen Objektes trotz großer Distanzen zu erhalten. Zusammengefasst besteht das Konzept von Grieves aus **drei Instanzen** [19]: dem **physischen Gegenstand** (engl. physical entity), seiner **virtuellen Repräsentanz** (engl. physical space) und der **Verbindung der Beiden** mittels Daten und Informationen. Größere Aufmerksamkeit erlangte diese Simulation erstmals im Jahr 2010 bei der NASA (engl. National Aeronautics and Space Administration), jedoch unter einem neuen Begriff, dem „Digitalen Zwilling“ [20]. Damals wurde der Digitale Zwilling als „sehr realistische, stark skalierbare Simulation, welche die bestmöglichen physischen Modelle, Sensordaten und historische Daten für die Spiegelung verwendet“ [21] definiert.

Basierend auf der Definition der NASA können drei wesentliche Eigenschaften für den digitalen Zwilling hervorgehoben werden [20]:

- **Vorhersagen** – Durchführen eines Systems bevor es in der Realität existiert
- **Sicherheit** – Überwachen eines laufenden Systems
- **Diagnosen** – Analyse und Vorhersage möglicher Störungen

Der Name ist auf ein Zwillingkonzept, der NASA aus den 1960er Jahren zurückzuführen. Bei diesem Projekt wurden mindestens zwei identische Raumfahrzeuge gebaut, um die Bedingungen während des Flugs spiegeln zu können [22], weswegen eines der Flugzeuge auf der Erde zurückblieb [23]. Dadurch gelang es, die Flugdaten so genau wie möglich abzubilden und so die Astronauten in der Umlaufbahn in kritischen Situationen zu unterstützen [22]. So fand der Begriff Zwilling ursprünglich Einzug in die Ingenieurwissenschaften.

Populär wurde dieser Ansatz, welcher im Jahr 2010 von der NASA genutzt wurde, durch das Aufkommen von Industrie 4.0 [23]. Durch den damit verbundenen technischen Fortschritt entstanden eine Vielzahl an neuen Möglichkeiten in der Computersimulation. Vor allem die neuen Kommunikationsmöglichkeiten zwischen Maschinen und dem Digitalen Modell führten zu einer schnellen Weiterentwicklung des ursprünglichen Konzepts von Grieves. Erhalten blieb jedoch der Name Digitaler Zwilling, da sich dieser optimal zur Vermarktung von Computersimulation für Unternehmen eignete und somit einen hohen Bekanntheitsgrad erreichte [23]. Dies führte dazu, dass eine sehr **heterogene Definitionslandschaft** für den Digitalen Zwilling entstand, da der Name für unterschiedliche technische Konzepte Anwendung gefunden hatte [23]. Die Entwicklung des Verständnisses für den Begriff Digitaler Zwilling hin zu einer aktuellen Definition wird im nächsten Abschnitt vorgestellt.

2.2 Definitionen von Digitalen Zwillingen

Um die aktuell gängigsten Definitionen eines Digitalen Zwillings nachvollziehen zu können, ist es sinnvoll, die Entwicklung dieser Definitionen zu verstehen. Deswegen werden in diesem Abschnitt Gemeinsamkeiten, welche über die Jahre hinweg erhalten geblieben sind, hervorgehoben und im Anschluss erklärt.

Tabelle 2.1: Definitionen von Digitalen Zwillingen.

Definition	AutorInnen	Institution	Jahr
„Ein virtuelles Abbild, das alle Informationen eines physischen Produkts besitzt und dieses innerhalb des gesamten Produktlebenszyklus spiegelt.“	Grieves, Michael [17]	Western Reserve Univ.	2002
„A cradle-to-grave model of an aircraft structure’s ability to meet mission requirements, including submodels of the electronics, the flight controls, the propulsion system , and other subsystems .“	Tuegel, [24]	E.J. Air Force Research Laboratory	2012

„Very realistic models of the process current state and its behavior in interaction with the environment in the real world.“	Rosen et al. [22]	Siemens	2015
In its simplest form, the concept of digital twin posits that the flow of data, process and decision is captured in a software avatar that mimics the operation.	Datta, Shoumen [25]	MIT	2016
The Digital Twin in its original form is described as a digital informational construct about a physical system , created as an entity on its own and linked with the physical system in question. The digital representation should optimally include all information concerning the system asset that could be potentially obtained from ist thorough inspection in the real world.	Grieves, Michael [26]	Florida Institute of Technology	2017
Ein computergestütztes Modell eines materiellen oder imateriellen Objektes, welches für verschiedene Zwecke verwendet werden kann.	Grösser, Stefan [27]	FH Bern	2016
The Digital Twin can exist at any stage of the life-cycle and aims leverage aspects of the virtual environment (high-fidelity, multi-physics, external data sources, etc.), computational techniques (virtual testing, optimisation, prediction, etc.), and aspects of the physical environment (historical performance, customer feedback, cost, etc.) to improve elements of the product (performance, function, behaviour, manufacturability, etc.) over the life-cycle.	Jones, D.E.; Snider, Chris; Lee, Kent; Hicks, Ben; [28]	Univ. of Bristol	2019
A digital twin is a digital representation of an active unique product (real device, object, machine, service, or intangible asset) or unique product-service system (a system consisting of a product and a related service) that comprises its selected characteristics, properties, conditions, and behaviors by means of models , information, and data	Weigold, Matthias; Metternich, Joachim [29]	TU Darmstadt	2019

within a single or even across multiple life cycle phases.

Die zeitlich chronologisch aufgelisteten Definitionen unterscheiden sich in ihrem **Umfang**, dem **Detailierungsgrad** sowie den **Fokussen** auf die spezifischen **Einsatzgebiete**. Während die Überlegungen von Grieves auf dem Gebiet des Produktlebenszyklusmanagements angesiedelt waren, wurde das Interesse der NASA am Digitalen Zwilling durch die Notwendigkeit motiviert, physische Systeme im Weltraum zu betreiben, zu warten und zu reparieren. Sowohl die Gestaltung des kompletten Produktlebenszyklus mithilfe des Digitalen Zwillings als auch die Gewinnung von Informationen über eine weite Distanz ist den Definitionen erhalten geblieben. Weitere Begriffe, welche häufig Anwendung finden, sind das **System**, das **Modell** und die **Simulation**. Diese Konzepte werden in den nächsten Abschnitten vorgestellt.

2.3 Modellierung

Das Modell ermöglicht eine vereinfachte Darstellung der Wirklichkeit und basiert auf einem System, welches die erforderlichen Ein- und Ausgänge festlegt. Sowohl für das Erstellen des Systems (Abbildung 2.2) als auch für die darauf aufbauende Modellierung eignen sich verschieden Vorgehensweisen.

2.3.1 Systemtheorie

Der erste Schritt bei der Erstellung eines Modells ist die Definition eines Systems, welches das Model beschreibt [30]. Ein solches System besteht laut Bastian [31] aus **interagierenden Entitäten**. Der Duden definiert eine solche Entität als eindeutig identifizierbare Größe, über die Informationen gespeichert wird [32]. Die verschiedenen Komponenten/Entitäten interagieren über Signale und tauschen somit Informationen aus und legen dadurch die Zusammenhänge einzelner Teile fest.

Der **Gesamtzustand** eines System wird somit durch die Gesamtheit der Entitäten dargestellt, welche durch eine **Menge von Zustandsvariablen** beschrieben werden [31]. Diese Betrachtungsweise eines Systems spiegelt eine in der Informatik bekannte Ansicht von Oberkampf und Roy wieder, welche ein System wie folgt definieren [33]:

„Eine Reihe von physisch vorhandenen Dingen, die miteinander interagieren und beobachtbar sind. Sie können eine Menge von Teilchen sein oder ganze Körper im Raum.“ In dieser Definition fehlt jedoch die genaue Eingrenzung des Systems, um eine klare Abgrenzung zur Umgebung zu erkennen.

Schrempf und Zauner inkludieren dieses Kriterium in ihrer Definition [34]: „Ein System ist eine Menge miteinander in Beziehung stehender Teile/Komponenten, die durch eine Systemgrenze von der Umgebung abgegrenzt werden kann.“

Daraus lässt sich auf einen wesentlichen Unterschied bei der Betrachtung von Systemen schließen. Denn die **Systemgrenze** entscheidet darüber, ob es sich um ein offenes oder ein geschlossenes System handelt [31], siehe Abbildung 2.1.

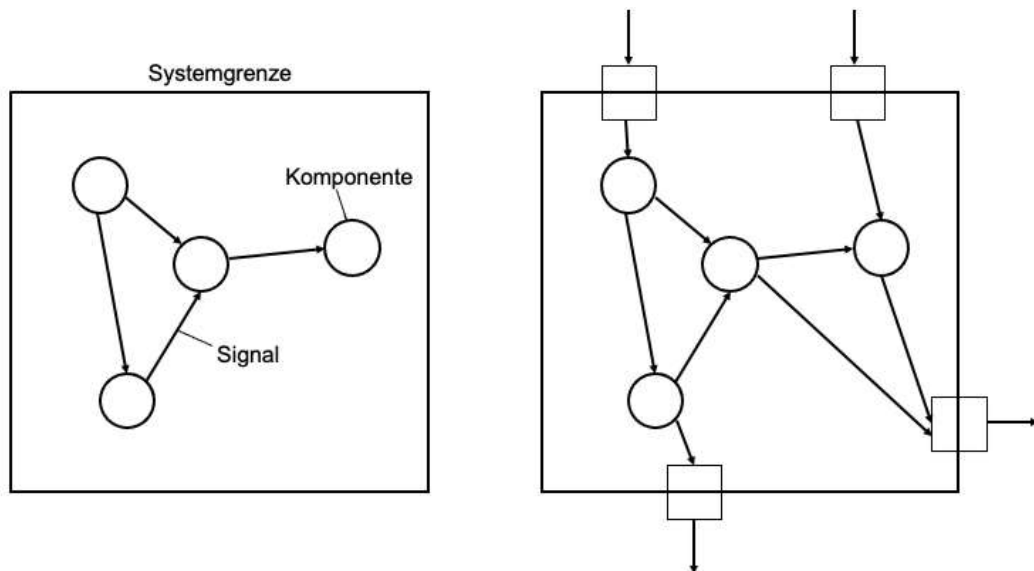


Abbildung 2.1: Geschlossenes und offenes System [31].

Bei der auf dem System aufbauenden Modellbildung werden nur jene Vorgänge berücksichtigt, die innerhalb der Systemgrenzen liegen. Deswegen kommt dem genauen Ausarbeiten des Systems eine sehr hohe Bedeutung auf dem Weg zur Simulation zu. Das System stellt unter anderem die Grundlage für die mögliche Veränderungen eines Modells dar.

Das **funktionale Konzept** ist eine Variante, um diesen Vorgang zu ermöglichen und wird durch Ein- und Ausgänge sogenannte Inputs und Outputs geprägt [35], [36]. Unter dem Input versteht man die Beeinflussung aller im System vorkommenden Variablen [30]. Das System verarbeitet die vom Input kommenden Eingaben und der Output stellt das Ergebnis der Systemverarbeitung dar [30].

Eine andere Betrachtungsweise auf ein System bietet das **strukturele Konzept**, bei dem der Fokus auf miteinander verknüpfte Elemente gelegt wird [36]. Die Eigenschaften des Systems resultieren hierbei aus einem Zusammenspiel der einzelnen Elemente [36], weshalb das System als eine Ganzheit miteinander verknüpfter Elemente zu betrachten ist [35]. Im Fokus dieses Ansatzes stehen zum einen die Vielfalt möglicher Beziehungsgeflechte und zum anderen die Beschaffenheit der Elemente, welche die Integrationsfähigkeit der Elemente in das System bestimmt [35]. Resümieren lässt sich das strukturele Systemdenken auf den Grundsatz, dass Teile nicht abgekapselt und losgelöst von ihrem Kontext betrachtet werden dürfen, jedoch in ihrer Interdependenz mit anderen Teilen innerhalb des Systems charakterisiert werden [35].

Der dritte Systemansatz, das **hierarchische Konzept**, besagt, dass jedes Element eines Systems selbst ein System darstellt und somit zum Subsystem eines **übergeordneten Systems** wird [36]. Somit existieren mehrere Stufen von Ganzheiten und Teilen [35].

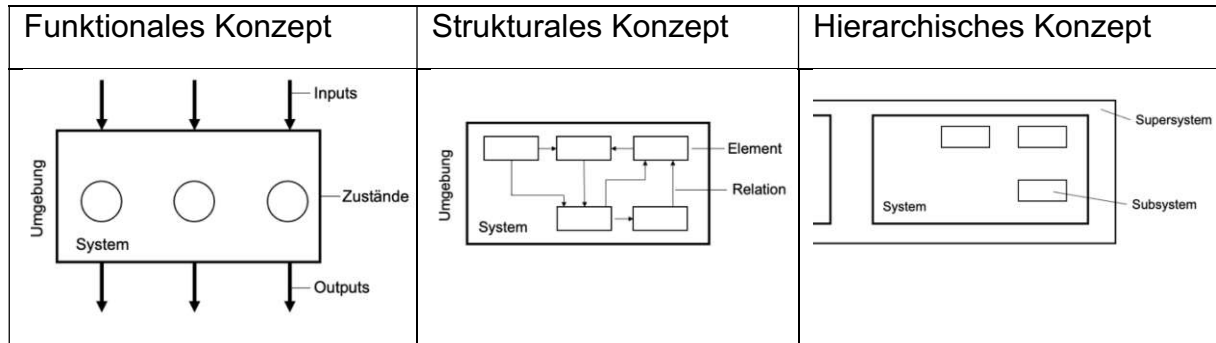


Abbildung 2.2: Konzepte der Systemtheorie [35], [36].

Eine weitere Komponente, welche in diesen Definitionen noch keine Anwendung findet, ist der zeitliche Bezug. Eine zeitnahe Übertragung ist unter dem Namen Echtzeitübertragung bekannt. Siemers versteht unter Echtzeit die Anforderung an ein Rechensystem, innerhalb einer kürzesten definierten Zeitspanne korrekt zu reagieren [37]. Diese Systeme müssen innerhalb einer möglichst kleinen definierten Zeitspanne eine Antwort produzieren [37].

In der DIN Norm 44300 wird der Begriff Echtzeit wie folgt beschrieben [37]:

Unter **Echtzeit** (engl. real time) versteht man den Betrieb eines Rechensystems, bei dem Programme zur Verarbeitung anfallender Daten ständig betriebsbereit sind, so dass die Verarbeitungsergebnisse innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne verfügbar sind. Die Daten können je nach Anwendungsfall, nach einer zeitlich zufälligen Verteilung oder zu vorherbestimmten Zeitpunkten anfallen.

Für Ulbrich [38] bedeutet **Echtzeitbetrieb Rechtzeitigkeit**. Somit reicht funktionale Korrektheit nicht für korrektes Systemverhalten aus, sondern rechtzeitige Bereitstellung der Ergebnisse sind mitentscheidend [38].

Der entscheidende Bereich wird durch den Eintrittspunkt des Ereignisses und den sogenannten Termin definiert [38]. Durch das **Überschreiten von Terminen** können folgende Konsequenzen auftreten [37], [38]:

- **Weiche Echtzeit:**
Ergebnis verliert mit zunehmender Überschreitung an Wert. Es entstehen Qualitätsverluste, jedoch keine Beschädigungen oder Gefährdungen. Die Überschreitung des Termins ist in diesem Fall **tolerierbar**.
- **Feste Echtzeit:**

Durch eine Terminüberschreitung wird das Ergebnis wertlos und muss verworfen werden. Ein Beispiel hierfür ist der Abgabetermin einer Übungsaufgabe. Die Nichteinhaltung des Termins führt zum Arbeitsabbruch.

- **Harte Echtzeit:**

Eine Terminüberschreitung führt zu einem Systemversagen und kann eine Katastrophe auslösen, zum Beispiel der Airbag in einem Auto. Eine Terminüberschreitung ist deswegen unter keinen Umständen tolerierbar.

Um ein **System** in die Informatik zu überführen, muss dieses als nächstes in einem **Modell abgebildet** werden [30]. Jedoch ist das Konzept der Modellierung weitaus älter als die moderne Informatik und lässt sich laut Zauner et al. [34] wie folgt definieren:

„Ein Modell ist allgemein eine auf bestimmte Zwecke ausgerichtete, vereinfachende Beschreibung der Wirklichkeit“.

Anders ausgedrückt werden nicht alle Eigenschaften eines System in einem Modell abgebildet, sondern nur die für die spätere Simulation elementaren Bestandteile werden möglichst exakt modelliert [30]. In allen Phasen des Engineerings von automatisierten Anlagen und Maschinen wird auf modellbasierte Verfahren zurückgegriffen [39]. Dies zieht sich von der Konzeption, Implementierung und Validierung hin zum Betrieb, Service und den Um- und Rückbau des Systems oder Teilen davon vor allem im Bereich der Automatisierungstechnik [39]. Für diese Modellbildung existieren mehrere Konzepte, welche im Folgenden erläutert werden.

2.3.2 Black-Box, White Box und Grey Box Ansatz

Die **White-Box** ermöglicht die Erstellung von Modellen, deren **innere Logik**, Arbeitsweise und Programmierschritte **transparent** sind [40]. Diese Logik wird durch die Systemstruktur dargestellt und bildet die Basis für die Modellbildung. Somit verfolgt dieses Konzept einen deduktiven Ansatz [41] die logische Schlussfolgerung gegebener Prämissen. Um diese Annahmen bilden zu können, werden **spezifische Informationen** benötigt, welche die innere Struktur eines Systems spiegeln.

Das Pendant zur White-Box, die **Black-Box** bietet keinen Einblick in das Entscheidungsmodell [41], sondern analysiert ausschließlich die **wesentlichsten Aspekte**, siehe Abbildung 2.3. Bei dieser Betrachtungsweise ist der **innere Aufbau** des Modells **nicht bekannt** und wird somit als eher unwichtig betrachtet [42]. Das System wird als Ganzes definiert und es werden ausschließlich der Input und Output betrachtet, weswegen Buchholz dieses Vorgehen als induktiv bezeichnet [41].

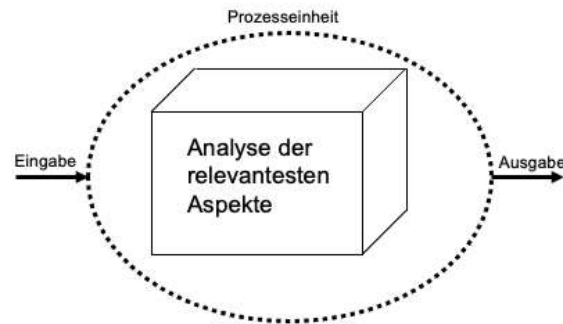


Abbildung 2.3: Black-Box Modell [43].

In der **Realität** finden jedoch oftmals **Kombinationen aus beiden Konzepten**, die sowohl Details als auch starke Vereinfachungen besitzen, sogenannte Grey-Box Modelle, Verwendung [43]. Bei diesem Konzept wird ein Black-Box Ansatz angewendet, der vereinzelt spezifisches Detailwissen erfordert.

Unabhängig von der Art der Betrachtungsweise ist das primäre Ziel der Modellierung, im Bereich der IT ein Abbild des zu untersuchenden Systems darzustellen [44]. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit beziehen sich Digitale Modelle (DM) immer auf ein physisches Objekt. Dieses spezifische Modellierungskonzept wird im nächsten Abschnitt vorgestellt.

2.3.3 Das Digitale Modell für physische Objekte

Das Digitale Modell bezieht sich auf die digitale Darstellung, die eine umfassende Beschreibung des physischen Gegenstücks gewährleistet [15]. Ein Digitales Modell ist eine **digitale Darstellung** eines bestehenden oder geplanten physischen Objekts, welches **keine Form des automatisierten Datenaustauschs** zwischen dem physischen Objekt und dem digitalen Objekt verwendet [15]. Ein entscheidendes charakteristisches Merkmal dieses Modells ist es, dass sich Änderungen an einem der beiden Objekte nicht direkt auf das Gegenstück auswirken. Damit sich Überarbeitungen auf das Pendant auswirken, sind manuelle Anweisungen notwendig siehe Abbildung 2.4.

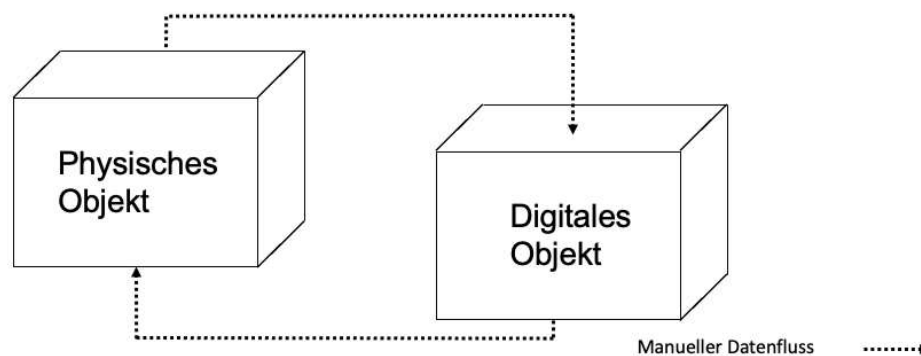


Abbildung 2.4: Datenfluss in einem Digitalen Modell [15].

Die digitale Modellbildung von physischen Objekten ist in zwei verschiedenen Ausprägungen möglich, auf Basis des White-Box bzw. des Black-Box Konzepts. Die gängigsten Ausprägungen dieser Ansätze sind das physikalische und datengetriebene Modell, welche in den nächsten Abschnitten eingeführt werden.

2.3.4 Physikalische Modellierung

Physikalische Modelle beschreiben ein bestimmtes Phänomen eines realen Produktionssystems in einer Simulation, indem sie auf bekanntes Vorwissen zurückgreifen [45]. Dieser Bezug ist oftmals durch **physikalische Gleichungen** gegeben, wodurch das Wissen über die innere Logik entsteht und sich dieser Ansatz dem Konzept der **White-Box-Modelle** zuordnen lässt. Dieses Konzept besteht somit darin, ein physikalisches Phänomen von Interesse zu beobachten, ein **partielles Verständnis** dafür zu entwickeln und dieses in Form von mathematischen Gleichungen zu formulieren und diese abschließend zu lösen [46].

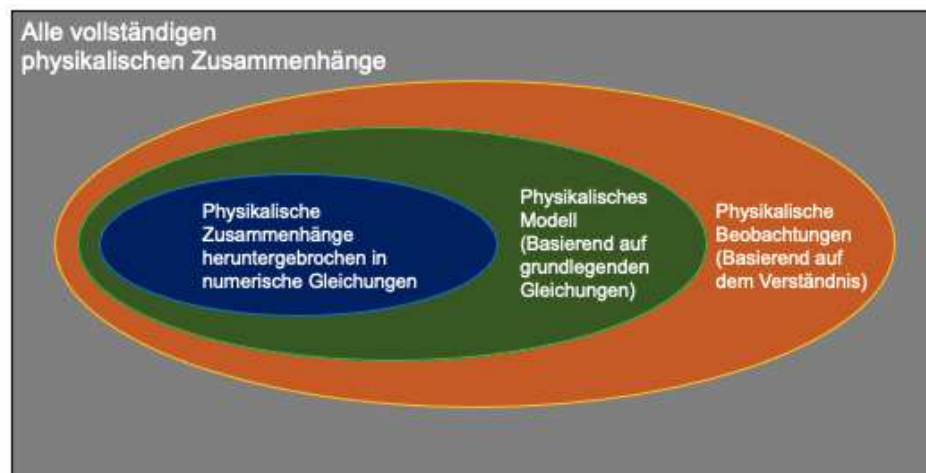


Abbildung 2.5: Die physikalische Modellbildung basiert auf vereinfachten Annahmen [46].

Wie in Abbildung 2.5 dargestellt, ist es möglich aufgrund der Annahmen in den verschiedenen Phasen nur ein Teil der physikalischen Zusammenhänge zu modellieren.

Da physikalische Modelle auf der Grundlage von physikalischen Beschreibungen des zu untersuchenden Systems und dem Fachwissen gebildet werden, stellen diese **idealtypische Simulationsmodelle** dar [45]. Daraus lässt sich schließen, dass physikalische Modelle von einem **definierten Soll-Zustand** ausgehen und keine Rückschlüsse auf unentdeckte Systemveränderungen zulassen [45]. Diesem Ansatz steht das Konzept der datengetriebenen Modelle gegenüber, welches im nächsten Abschnitt vorgestellt wird.

2.3.5 Datengetriebene Modellierung

Datengetriebene Modelle untersuchen **historische oder Echtzeitdaten** mithilfe bestimmter Algorithmen [45]. Die Bedeutung von datengetriebenen Modellen ist in den letzten Jahren deutlich angestiegen [46]. Auslöser dafür sind vor allem innovative und einfach zu verwendende Open-Source-Bibliotheken (Tensorflow, Torch, OpenAI), preiswerte Recheninfrastruktur (CPU, GPU und TPU) und hochwertige, leicht verfügbare Trainingsressourcen [46]. Bei diesem Modellierungsansatz werden die **Daten direkt aus dem Produktionssystem abgelesen** und zumeist werden dafür Sensoren an den Maschinen oder RFID Lesegeräten verwendet [45].

Laut Schweiger et al. [47] sind für die Erstellung datengetriebener Modelle im Gegensatz zu physikalischen Modellen **nicht so spezifische Kenntnisse** notwendig, denn es ist nicht erforderlich, die Zusammenhänge detailliert zu beschreiben [45]. Rasheed et al. [46] sehen im Vergleich zum physikalischen Modellierungsansatz wie in Abbildung 2.6 dargestellt, dass man durch die Entwicklung eines datengesteuerten Modells die gesamte Physik berücksichtigen kann, da die Daten eine Manifestation sowohl bekannter als auch unbekannter Physik sind.

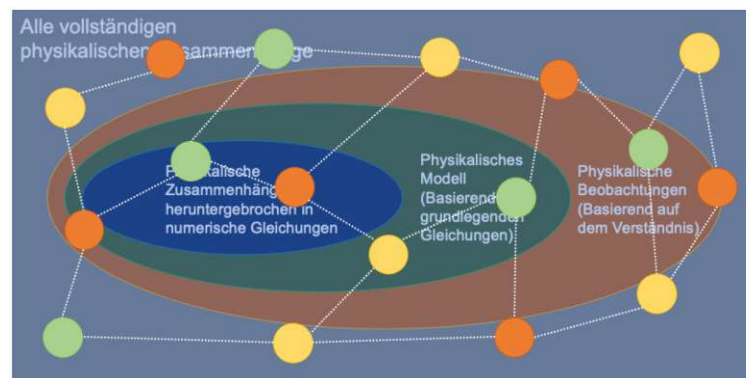


Abbildung 2.6: Datengetriebene Modellierung stellen eine Kombination aus bekannter und unbekannter Physik dar [46].

Laut Rasheed, San und Kvamsdal [46] sind insbesondere folgende Faktoren bei der datengetriebenen Modellierung zu beachten:

1. Datengenerierung
2. Datenvorverarbeitung, -verwaltung und -eigentum
3. Datenschutz und ethische Fragen
4. Maschinelles Lernen und künstliche Intelligenz

Datengetriebene Modelle nutzen zudem als Input die historischen oder in Echtzeit gemessenen Prozessdaten [45]. Durch eine Auswahl an Prozessparametern lässt sich das zu untersuchende System analysieren [45]. Im Gegensatz zu den physikalischen Modellen lassen sich so atypische Vorgänge aufdecken, die von dem definierten Soll-Zustand abweichen, ohne dabei über explizites Fachwissen zu verfügen [45].

2.3.6 Echtzeitfähigkeit versus Detailierungsgrad

Ein wesentliches Kriterium bei der Erstellung von Modellen ist der Detailierungsgrad, da dieser die Grenzen und die Realitätsnähe eines Modells definiert [39]. Denn eine **steigende Modellierungstiefe**, welche zumeist mit einer zunehmenden Anzahl von Gleichungen, Parametern und Unbekannten oder einer Erhöhung der mathematischen Ordnung einhergeht, bedeutet einen **Anstieg des Rechenaufwands** [39]. Dadurch entsteht die **Gefahr des Verlusts der geforderten Echtzeitfähigkeit** [39]. Daraus lässt sich schließen, dass eine Erhöhung der Parameter nicht zwangsläufig mit einer Verbesserung der Qualität des Modells einhergeht.

Auf Basis von Technologien aus dem Bereich Industrie 4.0 ist es nun möglich, eine automatische Verbindung vom physischen zum digitalen Objekt zu erstellen. Für diesen Vorgang gibt es ein gängiges Konzept.

2.4 Digitaler Schatten

In dieser Arbeit werden Simulationen, die auf einem Digitalen Modell aufbauen, nicht zwangsläufig unter dem Begriff Digitaler Zwilling betrachtet. Dieses Kapitel stellt den Ansatz Digitaler Schatten vor, welcher medial oftmals als Digitaler Zwilling bezeichnet wird, und grenzt die beiden Begriffe entscheidend voneinander ab. Somit wird eine essenzielle Grundlage für das Verständnis des Begriffs DZ in dieser Arbeit gelegt.

2.4.1 Das Konzept Digitaler Schatten

Der Digitale Schatten basiert auf dem Prinzip des Digitalen Modells und erweitert dieses um einen **automatisierten, einseitigen Datenfluss** zwischen dem Zustand eines bestehenden physischen Objekts und einem digitalen Objekt [15]. Somit führt eine Zustandsänderung des physischen Objekts zu einer Zustandsänderung des digitalen Objekts (Abbildung 2.7) aber nicht umgekehrt [15].

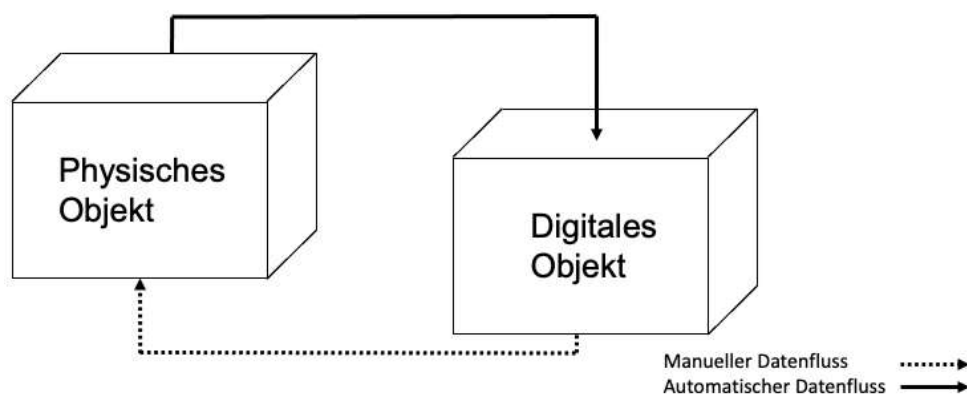


Abbildung 2.7: Datenfluss in einem Digitalen Schatten [15].

Aus einer theoretischen Perspektive zielt der Digitale Schatten darauf ab, eine umfassende **Strukturierung heterogener Arten von Daten** zu erreichen [48]. Im Anschluss werden die Daten dann mit ihrer jeweiligen Semantik verbunden. Der

Duden beschreibt das Wort Semantik als die Bedeutung oder den Inhalt eines Wortes, Satzes oder Textes [49]. Durch festgelegte Bedeutung der Daten wird das **Auffinden**, die **Interpretation** und die **Nutzung** der **Daten erleichtert** [48]. Die Rolle des Digitalen Schattens eines Produktionssystems besteht darin, das digitale Abbild der Maschinen und Montagestationen in der Fabrik mit Hilfe von Informationstechnologien zu verbessern und zu automatisieren [48]. Dementsprechend bildet der DS das fehlende Bindeglied zwischen der digitalen Fabrik und einem ganzheitlichen digitalen Abbild der Produktion (Abbildung 2.8) [50]. Der Digitale Schatten ist somit in **Echtzeit** mit dem Fertigungssystem verbunden und erzeugt eine **Datenbank** [51].

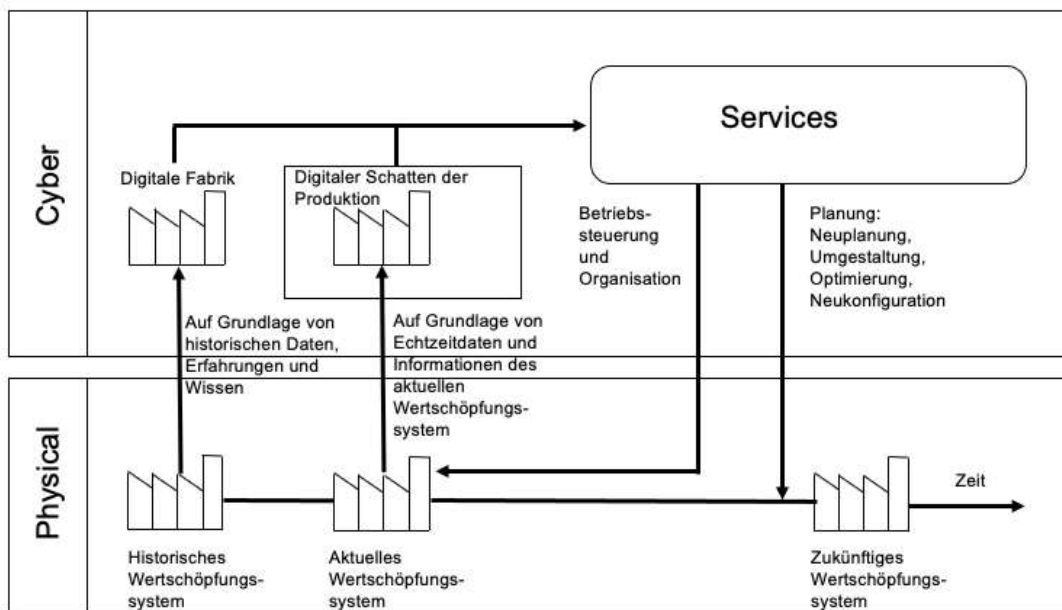


Abbildung 2.8: Der Digitale Schatten im Kontext der Produktion [50].

Durch die Verwirklichung von Industrie 4.0 entsteht ein kontinuierliches **Zusammenwachsen der digitalen und der physischen Domäne** [50]. Für die technische Umsetzung dieses Konzepts werden cyber-physische Produktionssysteme (CPPS) genutzt.

2.4.2 Cyber-physische Produktionssysteme

Das Konzept der CPPS basiert auf den Grundlagen der cyber-physical systems (CPS). Vogel-Heuser et al. [52] bezeichnen CPS „**als Systeme, in denen rechentechnische Komponenten mit physischen Prozessen interagieren und mit offenen Netzwerken kommunizieren**“. Die physische Komponente besteht aus mechanischen Systemen, welche durch Software zu mechatronischen Systemen erweitert werden. Der Fokus solcher mechatronischen Systeme liegt laut Peschke und Eckardt [53] auf den internen Schnittstellen. Die vorgestellte Definition der CPS hebt jedoch zusätzlich die Kommunikation über offene Netzwerke hervor, also den Fokus auf **externe Schnittstellen**. Die Abgrenzungen und Unterschiede zwischen

mechanischen, mechatronischen und cyber-physischen Systemen sind in Abbildung 2.9 dargestellt.

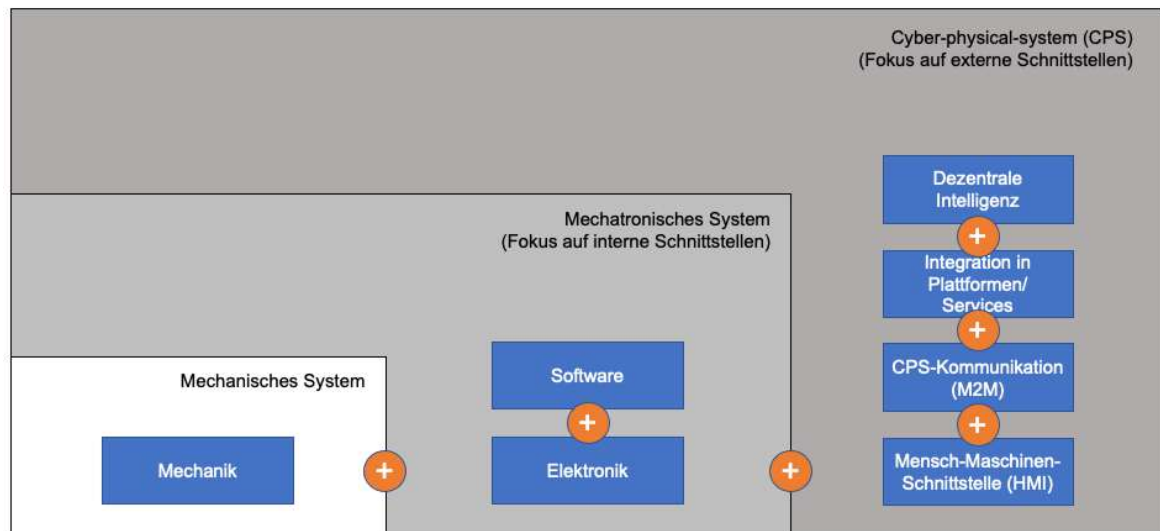


Abbildung 2.9: Vom eingebetteten System hin zum cyber-physischen System [53].

Der Begriff der cyber-physischen Systeme ist heute eng mit dem Konzept Industrie 4.0 verbunden bei dem **Steuerung, Kommunikation** und **Berechnung** zusammenfließen [54]. Im Gegensatz zu den traditionell eingebetteten Systemen, die sich hauptsächlich auf Computerelemente konzentrieren, berücksichtigen CPS vor allem die Interaktion zwischen den physischen Elementen in der realen Welt und den Computerelementen im Cyberspace [54]. Ein Schlüsselement für die CPS ist daher eine Informations- und Kommunikationstechnologie Komponente (IKT-Komponente) als Kommunikationsmedium, welche die rechnenden und physischen Elemente durch Informationsaustausch miteinander verbindet [54].

Die Umsetzung eines cyber-physischen Systems wird nach Lee, Bagheri und Kao [55] auf Basis der **5C-Architektur** durchgeführt [56], [57]:

Tabelle 2.2: 5C CPS Architektur [55], [56].

Level	Beschreibung
1 „Connection“	CPS stellen Daten mithilfe von Sensorik bzw. IT-Systemen zur Produktionsplanung und -steuerung bereit.
2 „Conversion“	CPS selektieren ausschlaggebende Informationen aus den ermittelten Daten.
3 „Cyber“	CPS schaffen eine gemeinsame Informationsbasis aller miteinander vernetzten Komponenten durch Datenaustausch.

4	CPS analysieren und visualisieren Informationen, um ihren eigenen Zustand zu beschreiben.
„Cognition“	
5	CPS passen sich wechselnden Umgebungen durch Selbstoptimierung an.
„Configuration“	

In der vorgestellten 5C-Architektur gilt laut Klein et al. [56] das Prinzip, dass höhere Ebenen auf niedrigeren Ebenen aufbauen. Darüber hinaus ist zu beachten, dass die Stufen 4 und 5 bisher noch geringe Anwendung in der Industrie finden [56].

CPPS bestehen aus **autonomen und kooperativen Elementen und Subsystemen**, die kontextabhängig innerhalb und über alle Ebenen der Produktion von Prozessen über Maschinen bis hin zu Produktions- und Logistiknetzwerken verbunden sind [58]. Damit soll die **Agilität** durch Internettechnologien zur Kommunikation und Interaktion zwischen den Maschinen und Komponenten eines Fertigungssystems unterstützt werden [59]. Laut Monostori et al. [58] stechen dabei vor allem drei Hauptmerkmale heraus:

- **Intelligenz** (engl. smartness): Die Elemente sind in der Lage, Informationen aus ihrer Umgebung aufzunehmen und autonom zu handeln.
- **Vernetzung**: Die Fähigkeit, Verbindungen zu den anderen Elementen des Systems einschließlich der Menschen für die Zusammenarbeit und Kooperation herzustellen. Außerdem besteht die Eignung, eine Verbindung zu den im Internet verfügbaren Kenntnissen und Diensten herzustellen und diese zu nutzen.
- **Reaktionsfähigkeit**: Diese bezieht sich sowohl auf interne als auch externe Veränderungen.

Damit die Intelligenz und die Vernetzung der CPPS umsetzbar wird, sind sowohl interne als auch externe Aspekte der Internet of Things (IoT) Kommunikation verantwortlich.

2.4.3 Externe Aspekte der IoT Kommunikation - Sensoren und Aktoren

Das Wort Sensor leitet sich laut dem Duden [60] von den lateinischen Wörtern sensus und sensuell ab. Sensuell steht unter anderem für „die Sinnesorgane betreffend“ und „sinnlich wahrnehmbar“ [61]. Ein Sensor wandelt physikalische Größen auf Basis eines physikalischen Effekts in elektrische Signale um [62] und ist somit im übertragenen Sinne für die Wahrnehmungen einer Maschine verantwortlich. Die Wirkkette eines Sensors besteht im Wesentlichen aus den drei Funktionen des Sensorelements: **Aufnehmer, Wandler und Verstärker** und wird in Abbildung 2.10 dargestellt.

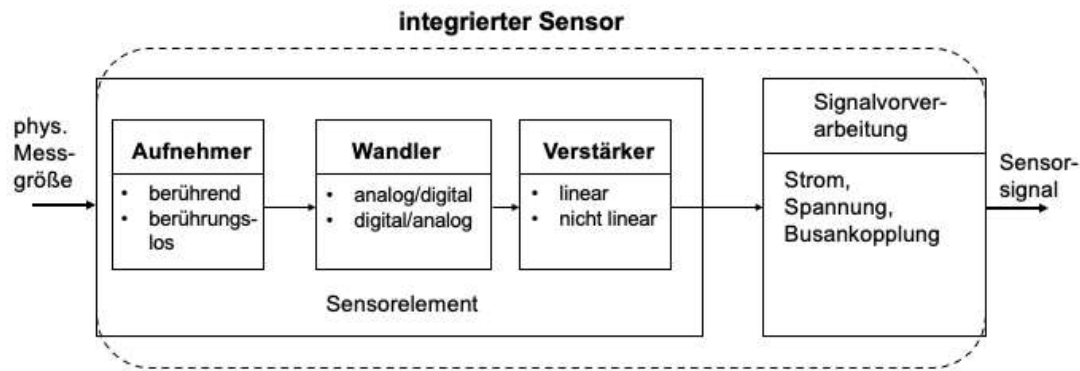


Abbildung 2.10: Aufbau eines Sensorelements [62].

Moderne Sensoren integrieren diese Funktionen durch elektronische Schaltungen [62]. Die dabei entstehenden Ausgangssignale sind genormt und steuern die Aktoren an, wobei im Maschinenbau mithilfe einer SPS zumeist das Bindeglied zwischen Sensorik und Aktorik gebildet wird [62].

Essentiell sind im Maschinenbau Weg- und Positionssensoren für die Fertigungssteuerung [62]. Gängig sind dabei insbesondere die beiden folgenden Varianten:

1. Positionserfassung durch Schalter und
2. Positionserfassung durch Wegbeobachtung.

Aktoren wandeln eine Funktion der SPS durch den Impuls eines **elektrischen Signals** in eine **mechanische Aktion** um [62]. Alle Aktoren agieren dabei nach dem gleichen Arbeitsprinzip: ein elektrischer Schaltvorgang erzeugt einen physikalischen Effekt [62]. In Abbildung 2.11 wird eine Übersicht der physikalischen Effekte vorgestellt.

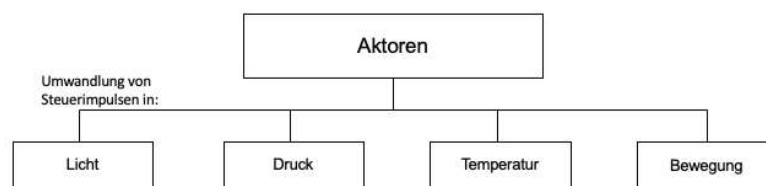


Abbildung 2.11: Aktoren und deren Möglichkeit zur Umformung in physikalische Größen [62].

Damit Einheiten wie Sensoren und Aktoren Intelligenz erlangen und die von ihnen erfassten Daten selbstständig und dezentral verarbeiten, bedarf es der Erweiterung um einige Attribute. Zu solchen zählen leistungsstarke Recheneinheiten, welche sich durch die Integration von Mikroprozessoren auf den Sensor oder Aktor integrieren lassen [63]. Für eine vollständige Integration an das IoT benötigen solche intelligenten Sensoren und Aktoren Schnittstellen, mit denen Daten direkt ins Netz gesendet oder aus diesem empfangen werden können [63]. Konzepte dazu werden im nächsten Abschnitt vorgestellt.

2.4.4 Interne Aspekte der IoT Kommunikation - Kommunikationsprotokolle

Die internen Aspekte des IoT beziehen sich in erster Linie auf die Kommunikationsprotokolle [64]. In diesen ist das Regelwerk der Kommunikationstechnik zusammengefasst. Um die Einordnung der Kommunikationsprotokolle in die Netzwerkstrukturen zu verdeutlichen, wird im Weiteren das Open Systems Interconnections (OSI) -Referenzmodell vorgestellt.

Der Auslöser für die Einführung dieses Modells ist auf die **Normungsproblematik** zurückzuführen [65]:

- Erstens besteht das Problem der Rechnernetznormung darin, dass die Kommunikation in stark heterogenen Umgebungen stattfindet.
- Zweitens existieren offizielle (de-jure) und praktisch bewährte Normen (de-facto) sowie ein unübersichtliches „Dickicht“ an internationalen Normungsorganisationen.

Letzteres Problem steht oftmals in Zusammenhang mit dem Konzept der Interoperabilität. Die umfangreiche und auf unterschiedliche Branchen bezogene Anwendung führt zu einer Vielzahl an Definitionen für Interoperabilität. Der Duden charakterisiert **Interoperabilität** als die „Fähigkeit unterschiedlicher Systeme, möglichst nahtlos zusammenzuarbeiten“ [66], [67]. Laut Weiß [66], sind offene Standards das ausschlaggebende, charakteristische Merkmal für die Fähigkeit der Interoperabilität. Denn es existieren grundsätzlich mehrere mögliche Ausprägungen für Geräteverbände [66]:

- **Kompatibilität:** Zwei Geräte bzw. Systeme sind in der Lage Daten zueinander auszutauschen.
- **De- facto-/Industriestandard:** Alle Teilnehmer eines Systems sind mit einem Akteur kompatibel. Oftmals entsteht dieses Szenario, wenn ein Marktteilnehmer über einen besonders hohen Marktanteil verfügt. Dieser Akteur steuert in solchen Fällen oftmals den Nachrichtenaustausch.
- **Interoperabilität:** Alle Teilnehmer sind in einem System zueinander kompatibel, und es wird ein unabhängiger Datenaustausch gewährleistet. Essenziell für dieses Konzept sind offene Standards, welche durch ihre offene Zugänglichkeit von jedem Marktteilnehmer eingesetzt werden können.

Zur deutlicheren Veranschaulichung werden diese Konzepte in Abbildung 2.12 visuell dargestellt.

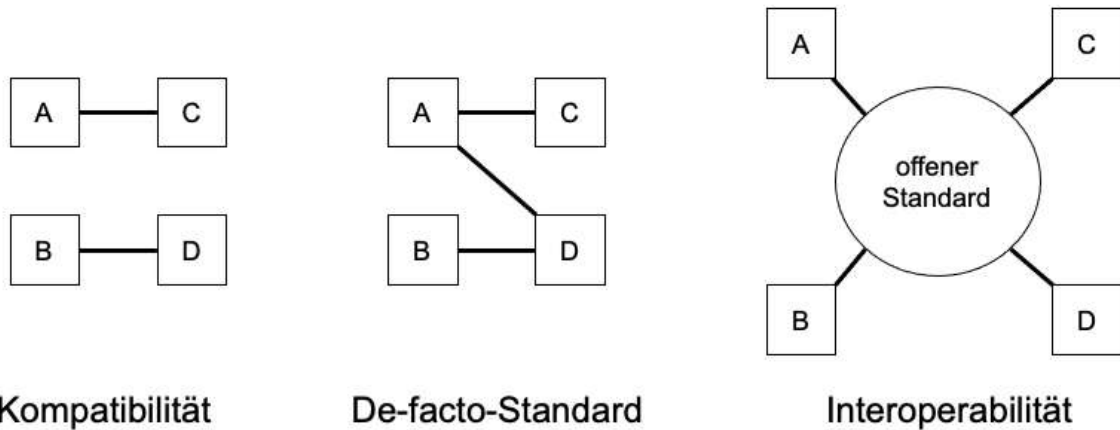


Abbildung 2.12: Operabilitätsgrade [66].

Diese Thematik lässt sich bis in die 1970er Jahre zurückführen. In dieser Zeit fanden in erster Linie proprietäre, firmenspezifische Lösungen Anwendung [65]. Deshalb begann die International Standardization Organization (ISO) mit der Entwicklung von Standards für offene, firmenunabhängige Rechnernetze [65]. 1983 spezifizierte die ISO ein Referenzmodell, mit welchem unterschiedliche Ebenen und Funktionen der Netzkommunikation beschrieben werden [68]. Die Aufteilung dieses Modells in Schichten vereinfacht die Komplexität der Netzkommunikation, da die Gesamtaufgabe in viele kleinere Teilaufgaben unterteilt wird [68]. Im Folgenden wird ein IoT Stack in das OSI Schichtenmodell überführt und speziell auf die 5. Schicht die Kommunikationssteuerungsschicht, welche die Kommunikationsprotokolle beinhaltet, eingegangen [69]. Zusätzlich wird dieser mit einem Web Stack verglichen, um allgemeine Unterschiede zu verdeutlichen [69]:

Tabelle 2.3: IoT Stack im Vergleich zum klassischen Web Stack [69].

OSI-Schicht	Bezeichnung	Web Stack	IoT Stack
7	Anwendung	Web Application	IoT Application / Device Management
6	Darstellung	HTML, XML, JSON	Binär, JSON, XML
5	Sitzung/ Kommunikationssteuerung	HTTPS, DHCP, TLS	CoAP, MQTT, OPC UA
4	Transport	TCP (TLS), UDP, ICMP	UDP (DTLS)
3	Vermittlung-/Paket	IPv4, IPv6, IPSec	IPv6, RPL

2	Sicherung	Ethernet (IEEE 802.3) WiFi(IEEE 802.11)	6LoWPAN IEEE 802.15.4 MAC
1	Bitübertragung	Ethernet (IEEE 802.3) WiFi(IEEE 802.11)	IEEE 802.15.4 PHY

Die niedrigeren Schichten arbeiten im IoT ebenfalls wie die auf dem Web basierenden Protokolle auf IP und TCP/UDP Basis. Unterschiede entstehen in den obersten drei Ebenen, welche sich im OSI-Schichtenmodell auf die Anwendung beziehen. Die Sitzungsschicht, auch als Kommunikationssteuerungsschicht bezeichnet, ist die erste datenverarbeitungsorientierte Schicht, welche ausschließlich auf Endsystemen realisiert wird [65]. Auf dieser Ebene wurden für das IoT und somit auch für den Digitalen Schatten Protokolle entwickelt, um optimale Voraussetzungen für die Kommunikation in der Industrie zu schaffen. Zu diesen Bedingungen zählen unter anderem Performance, Ressourcennutzung, Konsistenz, Verfügbarkeit, Sicherheit und die Komplexität [70].

Ein gängiges Protokoll im IoT Umfeld ist das Message Queue Telemetry Transport Protokoll (MQTT), welches dazu entwickelt wurde, um an Orten mit limitierten Infrastrukturnetzen und energiesparenden Geräten eine sichere Nachrichtenübertragung zu gewährleisten [71]. MQTT basiert auf dem publish/subscribe Prinzip. Dieses Konzept ermöglicht allen Clients, Nachrichten zu empfangen und zu versenden (Abbildung 2.13).

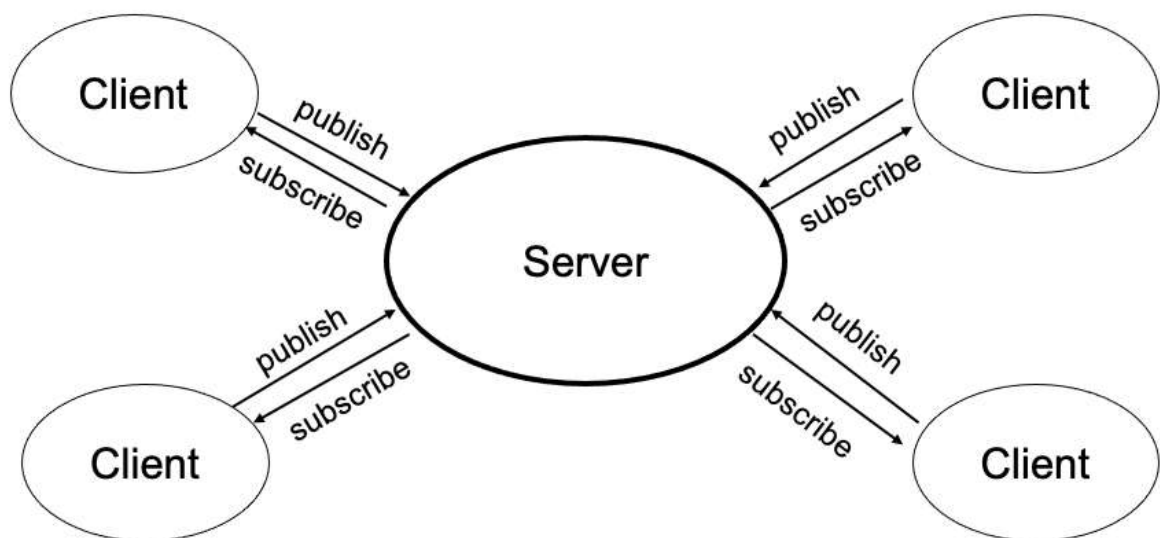


Abbildung 2.13: Publish/subscribe Modell [72]

Ein weiterer Stützpfeiler des Konzepts Industrie 4.0 ist die intelligente Nutzung von Daten mit möglichst kurzen Latenzzeiten, um ein digitales Echtzeit-Abbild der physischen Produktion zu erzeugen [50]. Damit dies gelingen werden die vorhandenen Modelle in Simulationen überführt.

2.5 Simulation

Nach Ortloff [42] lässt sich verallgemeinert sagen, dass das Prinzip der Simulation so alt ist wie das Probieren an sich und somit ist ein Training im Sport eine Simulation auf einen Wettkampf. Auch in den Ingenieurwissenschaften ist das Simulieren ein altbewährtes Konzept und verfügt daher über eine feste Definition im Verein Deutscher Ingenieure (VDI), die VDI 3633 [34]:

„Simulation ist das **Nachbilden eines Systems** mit seinen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind. Insbesondere werden die Prozesse über die Zeit entwickelt.“

In dieser Definition kommen die Begriffe System und Modell wieder auf und zeigen, wie sich diese auf die aus ihnen resultierende Simulation auswirken. Entscheidend ist es, Modelle und deren Simulation als **Untersuchungsmethode** zu verstehen, welche jedoch nicht in der Lage sind, exakt genaue Vorhersagen über die Wirklichkeit zu treffen [30]. Um möglichst genaue Prognosen zu erhalten, ist es entscheidend, die richtige Strategie zu wählen, um ein gewähltes System zielgerichtet zu simulieren [30]. Dafür gibt es eine Vielzahl von Ansätzen, von denen einige im nächsten Abschnitt vorgestellt werden.

2.5.1 Simulationsprinzipien

In diesem Absatz werden die Konzepte ereignisorientierte Simulation, zeitgesteuerte Simulation und stochastische Simulation vorgestellt.

Ereignisorientierte Simulation [30]

Bei der ereignisorientierten Simulation werden die Ereignisse durch Zustandsänderungen hervorgerufen. Durch das Auslösen eines Ereignisses werden alle Folgeereignisse aufgerufen. Die Simulation arbeitet sich somit Schritt für Schritt von Ereignis zu Ereignis.

Zeitgesteuerte Simulation [30]

Bei diesem Prinzip werden die einzelnen Epochen durch Zeitschritte vorgegeben. Das Simulieren nach diesem Zeitschritt läuft kontinuierlich ab und es werden keine Schritte übersprungen. Ein Beispiel dafür sind Wettermodelle.

Stochastische Simulation [30]

Bei diesem Konzept werden die Ereignisse, durch Zufallswerte und deren Eintrittswahrscheinlichkeit ermittelt.

Der Unterschied der jeweiligen Strategie ist der Auslöser für die Simulation eines Ereignisses. Die Wahl des optimalen Konzeptes wird sich stark auf die Qualität der Simulation auswirken. Einsatzgebiete sowie Popularität der Simulation werden im nächsten Abschnitt erläutert.

2.5.2 Die vier Wellen der Computersimulation

Rosen et al. [22] unterteilen die Entstehungsgeschichte der Simulation in der IT in vier Wellen siehe Abbildung 2.14. Bis in die 1960er Jahre war die Simulation in der IT eine Technologie, welche in erster Linie von Computerexperten und Mathematikern genutzt wurde [22]. Ab Mitte der 80er Jahre hat sich dieses Verfahren jedoch zu einem Standardwerkzeug entwickelt, welches von der Mehrheit der Ingenieure zur Beantwortung vielfältiger Design- und Konstruktionsfragen eingesetzt wurde [73]. In erster Linie wurden damit in Ingenieursdisziplinen auf Basis von optimal genutzten Modellen [15] realitätsnahe Prüfscenarien erzeugt [42]. Es wurde mithilfe von simulationsgestützten Ansätzen das Verhalten von Systemen und Prozessen angenähert und somit deren Effizienz verbessert oder als Basis für die Erstellung eines neuen Systems genutzt [74]. Nach der Jahrtausendwende entstand das Problem, welches sich durch die meisten Bereiche zieht, in denen simulationsgestützte Entwicklungen zum Einsatz kommen, die zunehmende Größe und Komplexität der zu betrachtenden Systeme sowie die Vielzahl an interagierenden Systemen [74]. Diese Trends bringen die etablierten Methoden der Modellierung und Simulation an ihre Grenzen. Ein Konzept, welches eine umfangreiche Simulation ermöglicht und die Vernetzung mit anderen Systemen erlaubt, ist der Digitale Zwilling.

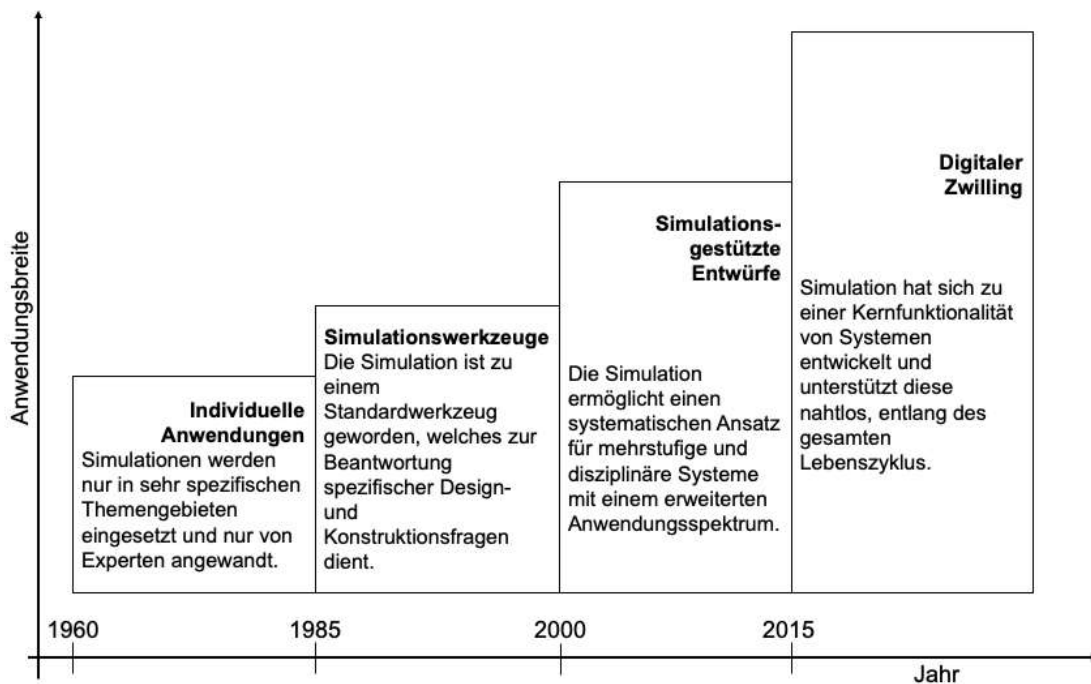


Abbildung 2.14: Der Digitale Zwilling als aktuellster Level der Simulation [22].

Rosen et al. [14] beschreiben den digitalen Zwilling als höchsten Level der Simulation, welche in der Lage ist, den nächsten großen Trend in diesem Bereich zu bewältigen, die Ausweitung der Simulation auf sämtliche Lebenszyklusphasen. Ein Beispiel hierfür ist die Optimierung des laufenden Betriebs durch simulationsgestützte Hilfen. Die logische Folge ist der zunehmende Einsatz dieser Technologie.

2.5.3 Virtuelle Inbetriebnahme

Die virtuelle Inbetriebnahme von Anlagen ist durch die Konzepte Software-in-the-Loop (SiL) und Hardware-in-the-Loop (HiL) realisierbar. SiL simuliert die Inbetriebnahme ausschließlich auf Basis von Software [75]. Somit sind keine physischen Geräte notwendig, und das Digitale Modell und die Emulation der Steuerung befinden sich bereits auf demselben Rechner [75]. Dadurch ist es möglich, die Systemumgebung virtuell zu ändern und verschiedene Gerätestrategien zu untersuchen und gegenüber Umgebungsänderungen zu beurteilen [34]. SiL findet in den frühen Phasen der Produktentwicklung Anwendung.

HiL basiert auf einer realen Steuerung, welche mit dem PC über eine Schnittstellenkarte verbunden ist [75]. Im Gegensatz zu dem altbekannten Konzept der Simulation ist es mithilfe von HiL möglich, Hardware Signale in die Simulation zu integrieren [76]. Außerdem läuft HiL in Echtzeit, und die eingebettete Software läuft auf der „echten Hardware“, die letztendlich in dem Produkt eingebaut wird und nicht mehr wie zuvor auf einer Workstation mitläuft [76]. Deswegen findet das Konzept HiL in den fortgeschrittenen Phasen der Produktentwicklung Anwendung, bei der zumindest ein Prototyp vorhanden ist [34].

Bevor das Konzept und der Aufbau des DZ vorgestellt werden, schließt der Modellbildungs- und Simulationsprozess als Zusammenfassung die Kapitel Modellierung und Simulation ab.

2.5.4 Zusammenfassung des Modellbildungs- und Simulationsprozess

In diesem Kapitel wird der komplette Modellbildungs- und Simulationsprozess auf mehrere Schritte heruntergebrochen, und diese werden kurz zusammengefasst. Das Konzept, welches in dieser Arbeit vorgestellt wird, stammt von Schrempf und Zauner [34] und besteht im Wesentlichen aus folgenden Schritten:

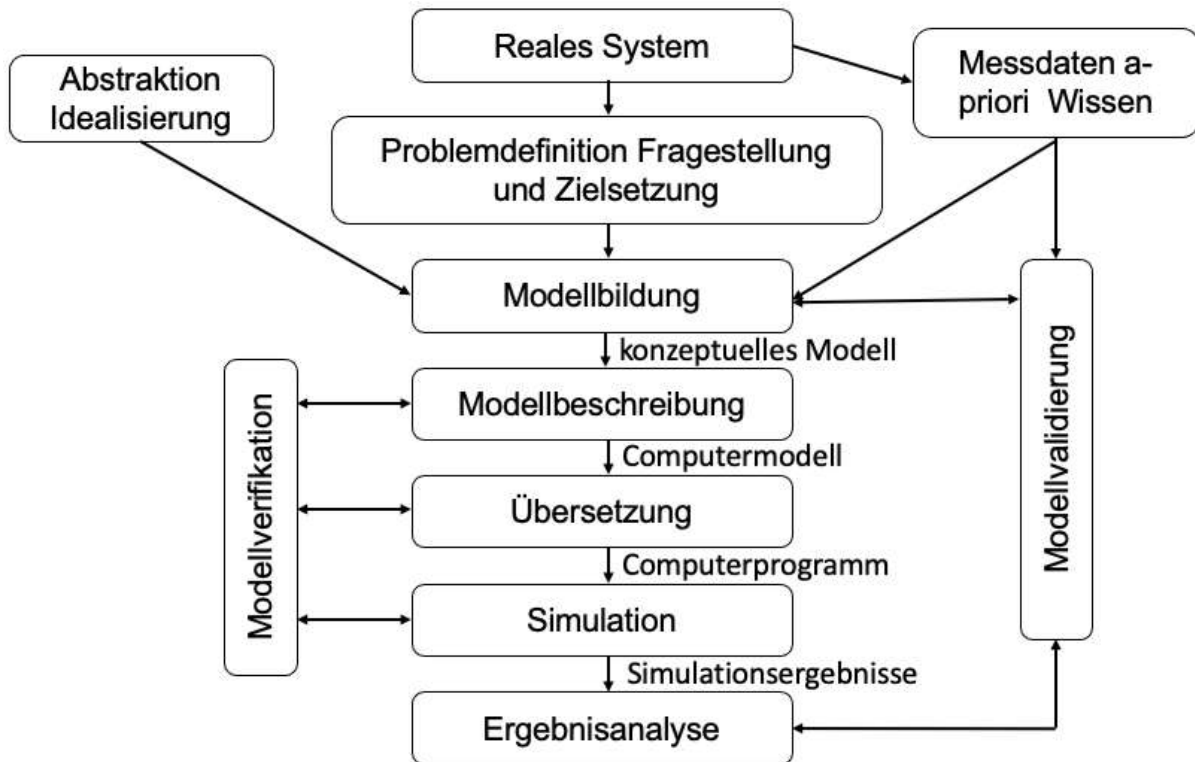


Abbildung 2.15: Modellbildungs- und Simulationsprozess nach Schrempf und Zauner [34].

Ausgangslage: Es ist ein reales System vorhanden, auf dessen Basis Fragestellung und Zielsetzung der Modellbildung und Simulation definiert werden.

Modellbildung: Die Fragestellung ist das Fundament für die Einleitung der Modellbildung. Eine annähernde Abbildung ist durch eine Komplexitätsreduktion des realen Systems zu erreichen. Bei diesem Prozess finden zwei Konzepte Anwendung: die Abstraktion und die Idealisierung. Wenn ausschließlich die für die Fragestellung und Zielsetzung relevanten Eigenschaften abgebildet werden, spricht man von einer Abstraktion. Eine Vernachlässigung von Nebensächlichkeiten wird als Idealisierung bezeichnet. Das Resultat dieser Modellbildung ist ein **konzeptuelles Modell**, zum Beispiel als Modelldiagramm.

Modellbeschreibung: Im nächsten Schritt wird das konzeptuelle Modell in einer für den Computer verständlichen Sprache ausgedrückt, wodurch das Computermodell entsteht.

Übersetzung: Damit die Simulation durchgeführt werden kann, muss das Computermodell in ein durch Logik verknüpftes Modell überführt werden und als lauffähiges Computerprogramm abgebildet werden.

Simulation: Die Ausführung des Computerprogramms führt zu den Simulationsergebnissen.

Ergebnisanalyse: Es wird ein Bezug zur ursprünglichen Fragestellung gezogen und dadurch werden die Simulationsergebnisse interpretiert. Oftmals werden unterschiedliche Simulationsabläufe mit wechselnden Parametern durchgeführt und die Ergebnisse auf die ursprünglichen Eingabewerte bezogen.

Modellverifikation und -validierung:

Modelle werden hinsichtlich der korrekten Abbildung als Computerprogramm (Verifizierung) sowie auf Gültigkeit und Kompatibilität zur anfänglichen Fragestellung bewertet. Dies findet parallel zu allen Phasen der Modellbildung statt. Für die Modellvalidierung sind unterschiedliche Daten notwendig, unter anderem Messdaten des realen Systems oder a-priori Daten, die auf bekanntem Wissen beruhen.

Nachdem die Konzepte Modellbildung und Simulation erläutert wurden, wird als abschließender Abschnitt der Grundlagen dieser Arbeit die nächste Welle der Computersimulation der DZ vorgestellt.

2.6 Der Digitale Zwilling

Ein digitales Zwillingsmodell ist in der Lage, sich dem gesamten Produktlebenszyklus anzupassen. Der digitale Zwilling enthält Informationen aus verschiedenen Quellen über den Lebenszyklus, die ständig aktualisiert und auf vielfältige Weise visualisiert werden, um aktuelle und zukünftige Bedingungen vorherzusagen [77], [78]. Auslöser dafür sind technische Änderungen an seinem physischen Gegenstück oder Änderungen an den Modellierungsinteressen während des Lebenszyklus [79]. Um die Übersicht und ein einfacheres Verständnis zu gewährleisten, werden verschiedene Ansätze zu diesem Konzept vorgestellt.

2.6.1 Ein Begleiter entlang des gesamten Produktlebenszyklus

In den frühen Phasen des Lebenszyklus besteht der DZ primär aus den Elementen, die zur Optimierung der Produktfunktionalität verwendet werden [80]. Die digitalen Modelle werden verwendet, um Entwurfsalternativen zu prüfen und die Produktfunktionalitäten anhand der Anforderungen mit Hilfe von virtuellen Prototypen zu testen [80]. Dieses Konzept entspricht dem **Digital Twin Prototyp** (DTP). Die dabei entstehenden Informationssätze umfassen Anforderungen, vollständig kommentierte 3D-Modelle, Stücklisten, Prozesslisten und Leistungsverzeichnisse [18]. Dieser Ansatz trägt wesentlich dazu bei, Zeit und Kosten bei der Produktentwicklung zu reduzieren [80].

Die **Digital Twin Instance** (DTI) beschreibt ein bestimmtes physisches Produkt, mit dem ein einzelner Digitaler Zwilling während der gesamten Lebensdauer dieses physischen Produkts verknüpft bleibt [18]. Mit jeder einzelnen physischen Einheit werden somit Informationen über den gesamten Lebenszyklus gesammelt [80]. Die DTI enthält mitunter folgende Informationen: Ein vollständig kommentiertes 3D-Modell, das die Geometrie der physischen Instanz und ihrer Komponenten beschreibt, eine

Materialliste, die die aktuellen und alle früheren Komponenten auflistet, eine Prozessliste, welche Vorgänge auflistet, die bei der Erstellung dieser physischen Instanz durchgeführt wurden, ein Serviceprotokoll, das die in der Vergangenheit durchgeführten Serviceleistungen aufzeigt [18]. Da sich der DTP auf das allgemeine Verhalten der Einheit konzentriert, kann dieser als gemeinsamer Teil jeder DTI betrachtet werden und für die Entwicklung von Lösungen genutzt werden [80].

Der Digital Twin Aggregate (DTA) ist die Zusammenfassung aller Digitaler Zwillinge [18]. Im Gegensatz zum DTI ist das DTA keine unabhängige Datenstruktur. Es kann ein Computerkonstrukt sein, das Zugang zu allen DTIs hat und diese entweder ad hoc oder proaktiv abfragt [18].

2.6.2 Das Konzept

Aufgrund der in Kapitel 2.2 vorgestellten Definitionen liegt die Annahme nahe, dass es sich bereits bei einem digitalen Gegenstück zu einem physischen Objekt um einen Digitalen Zwilling handelt. Dies ist bei einer Vielzahl an Publikationen der Fall, wird jedoch in dieser Arbeit anders betrachtet. Die digitale Darstellung eines bestehenden oder geplanten physischen Objekts, wie in Kapitel 2.3.3, beschrieben wird als Digitales Modell eingeordnet. Auch ein automatisierter einseitiger Datenfluss zwischen dem Zustand eines bestehenden physischen Objekts und einem digitalen Objekt entspricht in dieser Arbeit nicht der Bezeichnung DZ, sondern einem Digitalen Schatten.

Als Konkretisierung der bereits aufgelisteten Definitionen gilt für den weiteren Verlauf der konstitutive Aspekt für einen DZ, dass die Datenflüsse zwischen einem bestehenden physischen Objekt und einem digitalen Objekt in **beiden Richtungen vollständig automatisiert** sind [15]. Dieses Konzept ist in Abbildung 2.16 bildlich veranschaulicht.

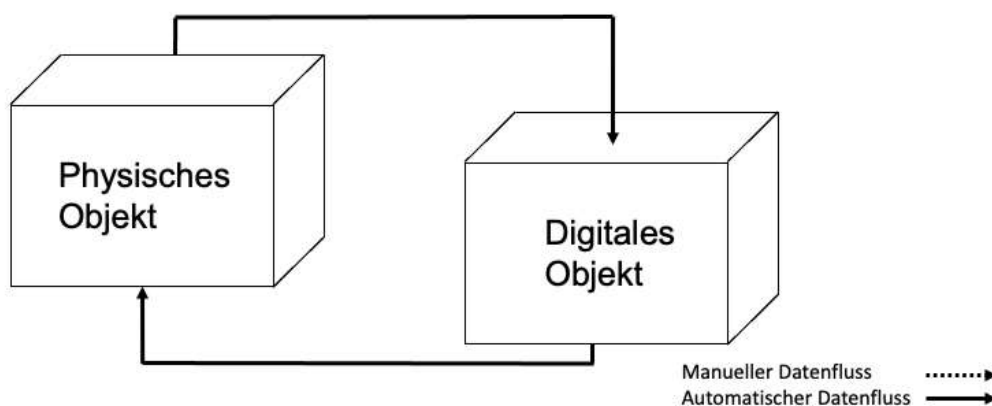


Abbildung 2.16: Datenfluss bei einem Digitalen Zwilling [15].

Somit führt eine **Zustandsänderung des physischen Objekts direkt zu einer Zustandsänderung des digitalen Objekts und umgekehrt**. Um diese Funktion zu realisieren, muss ein Digitaler Zwilling, laut Tao et al. [81], in der Lage sein, das CPPS

zu steuern, indem simulationsbasierte Anweisungen an die entsprechenden Elemente im CPS zurückübertragen werden. Durch die Nutzung eines Transmission Control Protocol (TCP) ist die Kommunikation sowohl über das Internet als auch über ein industrielles Netzwerk möglich [82]. Durch die **Datenrückkopplung** ist der DZ im Gegensatz zum Digitalen Schatten, in der Lage als **steuernde Instanz** zu agieren [15].

2.6.3 Aufbau Digitaler Zwillinge

In Kapitel 2.1 wurde der Aufbau des DZ von Grieves mit 3-Komponenten beschrieben. Diese Ansicht wurde von Tao et al. [81] einige Jahre später zu einem **5-dimensionalen Modell** weiterentwickelt und um die Dimensionen Daten und Services erweitert. Somit besteht ein DZ aus Folgenden Bausteinen [83]:

- einem physischen Gegenstand
- Aufteilung in einen Geometrieraum und Simulationsraum
- Aufteilung in einen Service-Raum und Berechnungsraum
- einem Datenraum
- den Verbindungen für die Kommunikation

Dieses Modell ist in Abbildung 2.17 visualisiert und zeigt eindeutig, dass der Digitale Zwilling eine **Kopplung zwischen realen Systemen und deren virtuellen Repräsentanz** darstellt, welche in Echtzeit miteinander kommunizieren [19].

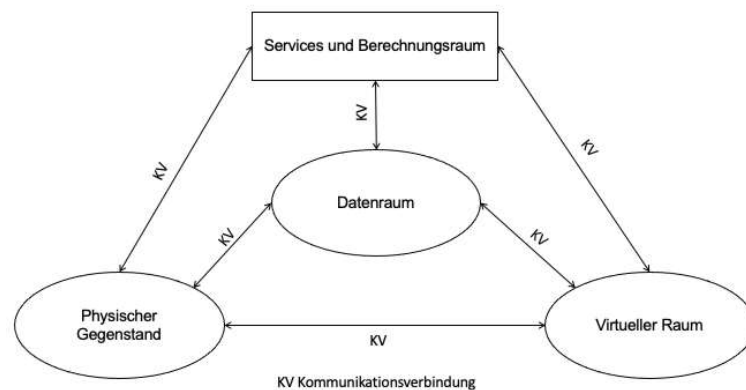


Abbildung 2.17: Fünfdimensionaler Digitaler Zwilling nach Grieves [19].

Dieser DZ enthält laut Ladj et al. [48] das gesamte Wissen, das sich aus den Modellierungsaktivitäten im Engineering (Digitales Modell) und aus den im realen Betrieb gesammelten Arbeitsdaten (Digitaler Schatten) ergibt. Darauf aufbauend ist es mithilfe geeigneter Simulationsalgorithmen möglich, eine "experimentierbare digitale Zwillingsfabrik" und somit ein ganzheitliches, digitales Bild der Produktion zu erhalten (Abbildung 2.18) [50].

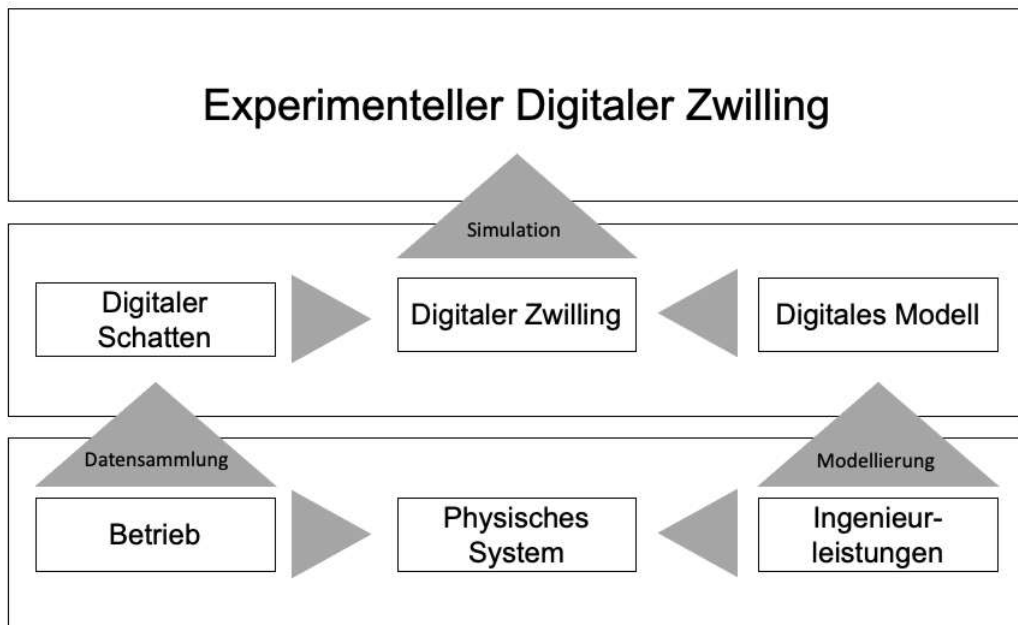


Abbildung 2.18: Vom physischen System hin zum Digitalen Zwilling [48].

Der DZ besteht also aus DM und DS, welche durch eine Simulation visualisiert werden. Ein etwas vereinfachter Aufbau für einen Digitalen Zwilling besteht nach Stark und Damerau [84] aus einer einzigartigen universellen Instanz des Digitalen Master, einem Digitalen Schatten und der Verbindung dieser beiden Komponenten siehe Abbildung 2.19. Dieser digitale Master, setzt sich aus Daten und Modellen zusammen [85] und entspricht dem in Kapitel 2.3.3 vorgestellten Digitalen Modell. Somit setzt sich der Digitale Zwilling aus einem DM und dem DS, also den vom Gerät erfassten Daten zusammen.

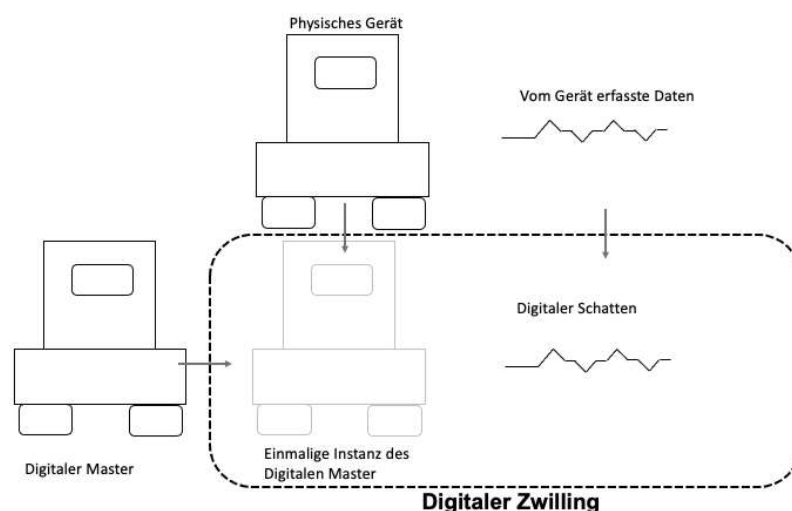


Abbildung 2.19: Allgemeine Struktur von Digitalen Zwillingen in Anlehnung an Weigold und Metternich [29].

2.6.4 Erster Standardisierungsansatz für den Aufbau von DZ

Ein formalisierter Aufbau für einen Digitalen Zwilling ist noch in einem frühen Stadium und aktuell existiert noch **keine VDI Norm**, jedoch ein erster Entwurf der ISO/DIS 23247-2 Automation systems and integration – Digital Twin framework for manufacturing [19]. Dieses Konzept unterteilt den DZ in vier Einheiten [86]:

- Die Einheit Data Collection and Device Control sammelt und bereitet Daten auf. Über diese Einheit werden auch die physischen Objekte mit dem Zwilling gekoppelt und synchronisiert.
- Der Bereich Digital Twin Entity stellt die verschiedenen Prozesse zur Datenverarbeitung (Simulation) bereit.
- Über die dritte Einheit User Entity werden die Verbindungen zu anderen Systemen wie MES, ERP und anderen Zwillingen hergestellt.
- Die Cross-System Entity regelt den Datenverkehr zwischen den drei Einheiten.

Zum besseren Verständnis wird das Konzept der ISO/DIS 23247 in Abbildung 2.20 zusätzlich graphisch veranschaulicht.

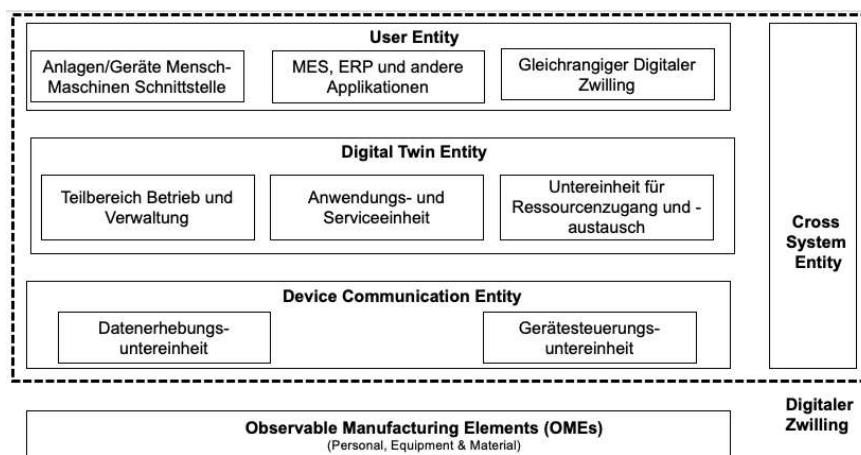


Abbildung 2.20: Entitätsbasiertes digitales Zwillingreferenzmodell für die Fertigung [86].

Dieser Ansatz erweitert die bisher rein technisch vorgestellten Perspektiven, um den Anwender und mögliche weitere Auswertungen der Daten mithilfe von MES und ERP Systemen. In dieser Arbeit wird jedoch die User Entity und die spezifischen Möglichkeiten für Unternehmen nicht in den Vordergrund gerückt, sondern der Fokus auf die Realisierung der Kopplung zwischen realen und physischen Objekten sowie die Steuerung des physischen Zwillings mithilfe des DZ.

3 Entwicklung eines Digitalen Schattens in der Pilotfabrik Industrie 4.0

In diesem Kapitel wird der Digitale Schatten auf Basis der vorgestellten Grundlagen mit der Simulationssoftware RobotStudio entwickelt. Die Basis dafür bildet ein Digitales Modell, in welchem die Kinematik verankert ist. Anschließend wird die automatische Übertragung der Positionsdaten in dieses Modell mit der Middleware Node-RED eingepflegt, wodurch der Digitale Schatten entsteht.

3.1 Physische Komponenten, Aufbau und Ablauf des Produktionsprozesses

Der in dieser Arbeit betrachtete Produktionsprozess wird in der Pilotfabrik Industrie 4.0 in Wien durchgeführt. Die Pilotfabrik wird von mehreren Instituten der TU Wien gestaltet und beinhaltet eine Vielzahl von Maschinen und Anlagen, an denen erforscht wird, wie die Industrie von morgen aussehen soll. Für diese Arbeit wird nur ein kleiner Bereich des Instituts für Fertigungstechnik (IFT) in Anspruch genommen, welcher in diesem Abschnitt vorgestellt wird.

3.1.1 Anordnung der Maschinen und Anlagen

In Abbildung 3.1 ist die Anordnung der Maschinen und Roboter grafisch dargestellt. Darin wird außerdem der genutzte Fertigungsbereich vorgestellt (in blau eingegrenzt). Innerhalb dieses Bereichs ist nur das automated guided vehicle (AGV) in der Lage, sich vollständig entlang der X- und Y-Achse frei im Raum zu bewegen. Das Regal ist fest platziert und verändert somit seine Koordinaten nicht. Der Roboter und die CNC-Fräse sind ebenfalls fest positioniert, jedoch sind der Greifarm des Roboters und das Schneidewerkzeug der CNC-Fräse in der Lage, sich in X, Y und Z Richtung zu bewegen. Der Werkzeuttisch der CNC-Fräse rotiert um die B- und C-Achse und die Arme des Roboters um die A-, B- und C-Achse.

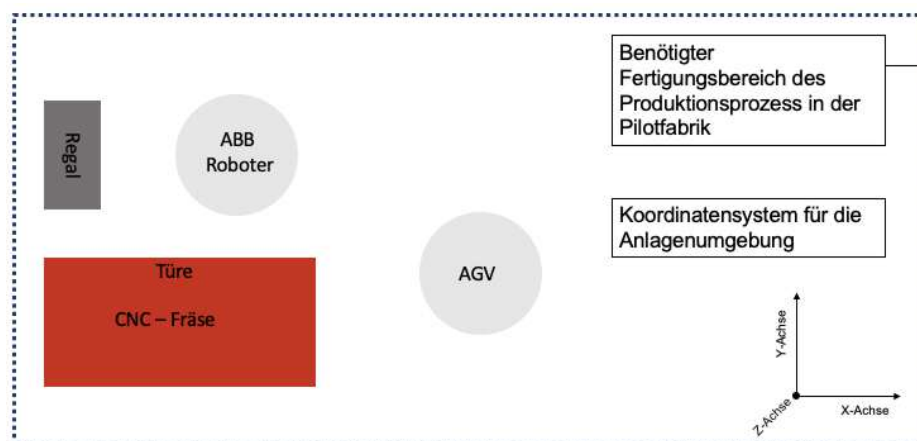


Abbildung 3.1: Anordnung der Maschinen und Anlagen in der Pilotfabrik der TU Wien.

Im Folgenden werden alle Maschinen und Anlagen, die in dieser Arbeit behandelt werden, vorgestellt.

3.1.2 Vorstellung der Maschinen und Anlagen

In diesem Abschnitt erfolgt die Beschreibung der Anlagen und Roboter. Dies beinhaltet eine kurze Übersicht zur jeweiligen Anlage sowie eine Beschreibung der für diese Arbeit wichtigsten Eigenschaften. Die Anlagen und Roboter wurden bereits in mehreren Abschlussarbeiten an der TU Wien miteingebunden und dort auch vorgestellt. Die im Folgenden dargestellten Daten der Anlagen und Roboter orientieren sich an dem Konzept von Seisenbacher [87].

1) ABB IRB6620 Bestückungsroboter:

Tabelle 3.1: Daten des ABB IRB6620 Roboters.

Hersteller:	ABB Robotics
Typ:	IRB 6620
Maschinen-Nr.:	6620-101699
Baujahr:	2017

Laut dem Hersteller [88] ist der Roboter mit einer IRC5-Steuerung und der Robotersteuerungssoftware RobotWare ausgestattet. RobotWare unterstützt sämtliche Aspekte des Robotersystems, unter anderem die Bewegungssteuerung, die Entwicklung und Ausführung von Anwendungsprogrammen sowie die Kommunikation.

2) Palettenkupplung Schunk

Tabelle 3.2: Daten der Schunk Palettenkupplung.

Hersteller:	Schunk
Typ:	NSR 160
Maschinen-Nr.:	0471915

Die Schunk Palettenkupplung ist fest auf dem Handgelenk des ABB Roboters mithilfe einer Adapterpalette montiert und wird für diesen Produktionsprozess als Greifer verwendet. Durch die pneumatische Ansteuerung dieses Greifers werden die Nullpunktspannsystempaletten transportiert.

3) AGV – Neobotix MP400:

Tabelle 3.3: Daten des Neobotix MP400 AGV.

Hersteller:	Neobotix GmbH
Typ:	Mobiler Roboter MP-400 V1.0
Maschinen-Nr.:	20140715-1
Baujahr:	2014

Das fahrerlose Transportsystem ist für den Transport des Werkstücks innerhalb der Produktionshalle die Intralogistik verantwortlich. Das Neobotix MP400 hat die Maße 590x559x411 (mm) und fährt mit einer Geschwindigkeit von bis zu 1,5 m/s. Die Energieversorgung erfolgt über einen Akku mit einer Laufzeit von 8-10 Stunden mit einer dazugehörigen Ladestation. Das AGV ist in der Lage, vollautonom an die Ladestation zu fahren und dort die Batterie aufzuladen. In dieser Arbeit wird das AGV auch oftmals unter seinem englischen Synonym AGV bezeichnet.

4) Emco Maxxmill MM 500 - CNC Fräse:

Tabelle 3.4: Daten der Maxxmill MM 500.

Hersteller:	EMCO FAMUP s.r.l.
Typ:	MM 500
Maschinen-Nr.:	M-06520017
Baujahr:	2017

Die 5-achsige CNC Fräse führt alle spanenden Arbeitsgänge durch. Innerhalb der CNC Fräse wird das Werkstück auf einem Tisch mithilfe eines Nullpunktspannsystems fixiert. Der Frästisch rotiert um die B- und C-Achse. Das Schneidewerkzeug, welches zur Bearbeitung des Werkstücks dient, bewegt sich linear entlang der X-, Y- und Z-Achse. Das Werkzeugmagazin beinhaltet bis zu 40 verschiedene Werkzeuge, welche selbständig auswechselbar sind. Eine vollautomatisch öffnende und schließende Türe ermöglicht es, das Werkstück in die CNC Fräse einzuführen und wieder auszuführen.

5) Nullpunktspannstation in Emco Maxxmill 500

Tabelle 3.5: Daten des Nullpunktspannsystems der Emco Maxxmill 500.

Hersteller:	Schunk	
Typ:	Spannstation Standard	Nullpunktspannsystem
Maschinen-Nr.:	VERO-S NSL PLUS 400	
Baujahr:	2017	

Das Nullpunktspannsystem ist fest auf dem Palettentisch befestigt und bietet laut dem Hersteller eine bis auf das μ -genaue Positionierung der Ausgangsposition des Werkstücks.

6) Palettenregal:

Das Regal dient als Aufbewahrungsort für die Palettenwerkstücke.

3.1.3 Ablauf des Produktionsprozesses und Pfad des Werkstücks

Abbildung 3.2 veranschaulicht den Produktionsprozess, der im weiteren Verlauf dieser Arbeit simuliert wird. Damit ein übersichtliches und nachvollziehbares Bild entsteht, wird dafür ein Flussdiagramm verwendet. Die Ausgangsposition des Materialflusses ist als feste Stelle definiert, an die in regelmäßigen Abschnitten ein Werkstück gebracht wird. Dieses Werkstück ist auf einer Palette angebracht, die mit dem Spannsystem des ABB Roboters und der Spannstation innerhalb der CNC Fräse kompatibel ist. Das AGV ist bereits so eingestellt, dass das Werkstück direkt darauf platziert werden kann.

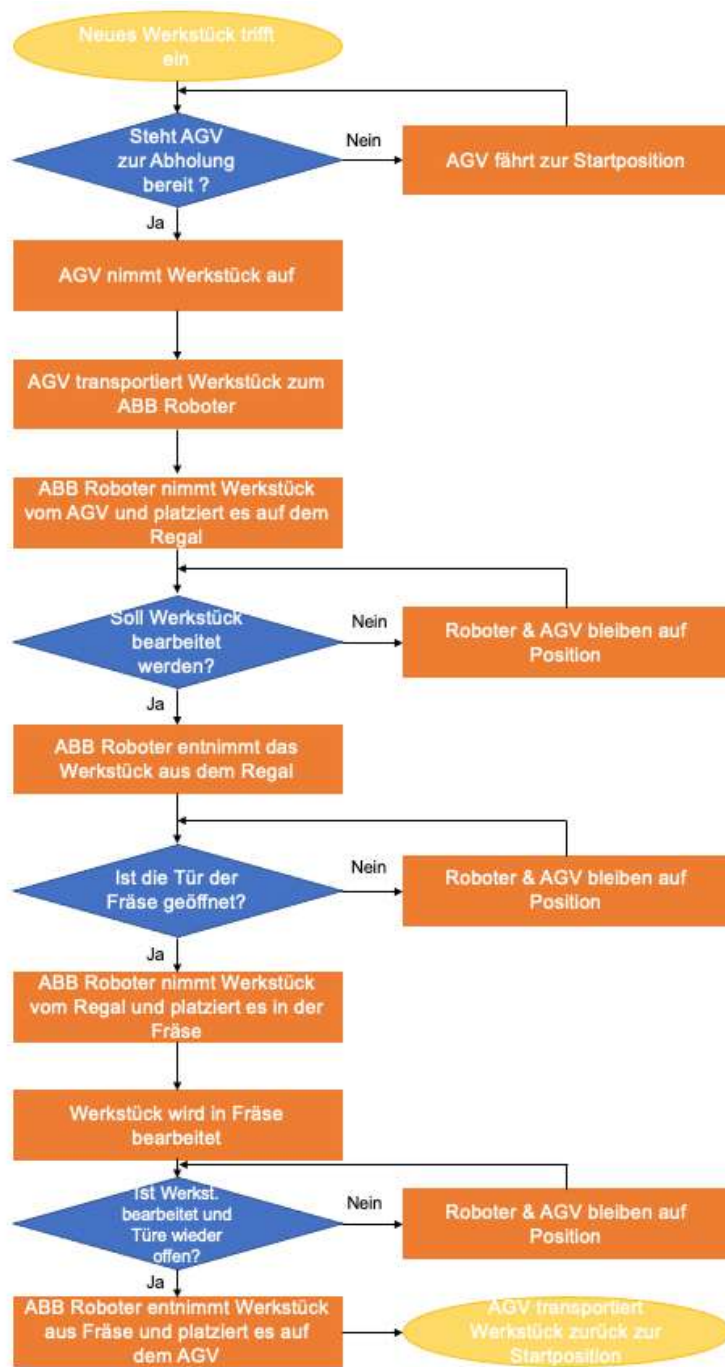


Abbildung 3.2: Flussdiagramm des Produktionsprozesses.

3.2 Digitales Modell

Die Erstellung des Digitalen Modells ist verbunden mit dem praktischen Einstieg in die Simulationssoftware. Verwendet wird dazu die Simulationssoftware RobotStudio von der Firma ABB, welche laut dem Hersteller unter anderem folgende Features bietet

- Aufbau von Roboterzellen in einer vollständigen 3D-Umgebung
- die Offline-Programmierung von Robotern
- und das Testen des gesamten Betriebsprozesses in einer virtuellen Umgebung.

Um das Digitale Modell im Weiteren als geeignete Grundlage für den Digitalen Schatten zu nutzen, wird das in Kapitel 2.3.5 vorgestellte Konzept für datengetriebene Modelle angewendet. Um die Basis dafür zu schaffen, werden im nächsten Schritt die Ein- und Ausgänge definiert.

Das Digitale Modell ist wie im Grundlagenteil bereits erläutert, die Basis für den darauf aufbauenden Digitalen Schatten und Digitalen Zwilling. Denn im DM ist bereits die Logik für die mechanischen Abläufe verankert. Damit dies in der praktischen Ausarbeitung dieser Arbeit gelingt, wird nach dem Import aller notwendigen Dateien die Kinematik ausführlich ermittelt. Abschließend wird diese mit einer Logik ausgestattet, so dass die Positionen im DM manuell veränderbar sind.

3.2.1 Import der Dateien für das Digitale Modell

Der erste Schritt auf dem Weg hin zum Digitalen Modell ist der Import aller physischen Objekte, welche den Produktionsprozess definieren. Dieser Vorgang war in dieser Arbeit nicht mehr notwendig, da bereits eine andere Simulation in der Pilotfabrik vorhanden war, welche alle notwendigen Dateien beinhaltet. Dadurch war das Digitale Modell des ABB IRB 6620 bereits in der Simulation integriert.

Um eine geeignete Basis für die Simulation der anderen Maschinen zu erreichen, war es erforderlich, alle bestehenden Verknüpfungen im Digitalen Modell zu lösen und die bestehende Logik sowie Mechanik zu löschen. Die daraus resultierende Positionierung erfolgt analog zu dem Aufbau in der Pilotfabrik 4.0 der TU Wien, siehe Kapitel 3.1.1. und enthält eine Abbildungslegende (Tabelle 3.6).

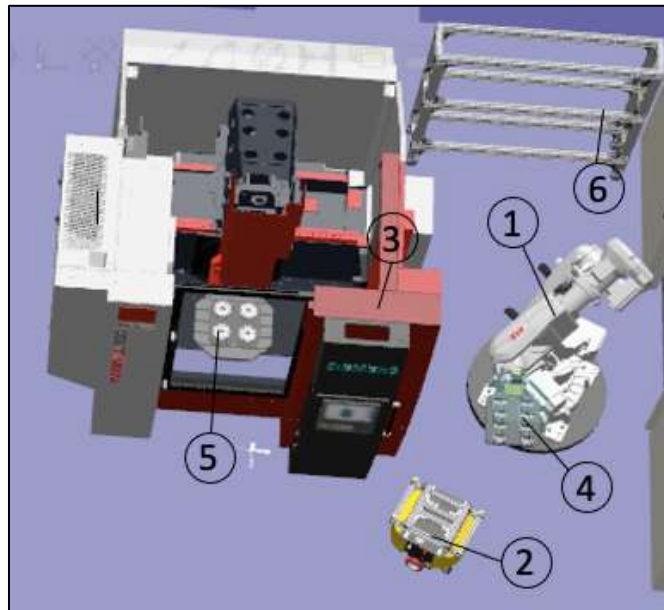


Abbildung 3.3: Importierte Dateien in RobotStudio.

Nummerierung	Bezeichnung
1	ABB IRB6620 Roboter
2	AGV – Neobotix MP400
3	Emco Maxxmill 500 - CNC Fräse
4	Palettenkupplung Schunk
5	Nullpunktspannstation in Emco Maxxmill 500
6	Palettenregal

Tabelle 3.6: Abbildungslegende der importierten Dateien.

3.2.2 Systemkonzepte

Der nächste Schritt bei der Erstellung eines Modells ist die Definition eines Systems zur Beschreibung des Modells. Dazu werden die Systemkonzepte aus Kapitel 2.3.1 angewendet. Als erstes werden die unterschiedlichen Elemente/Geräte den jeweiligen Systemen zugeordnet, wodurch eine Hierarchie entsteht. Außerdem werden die Beziehungen zwischen den einzelnen Geräten ermittelt.

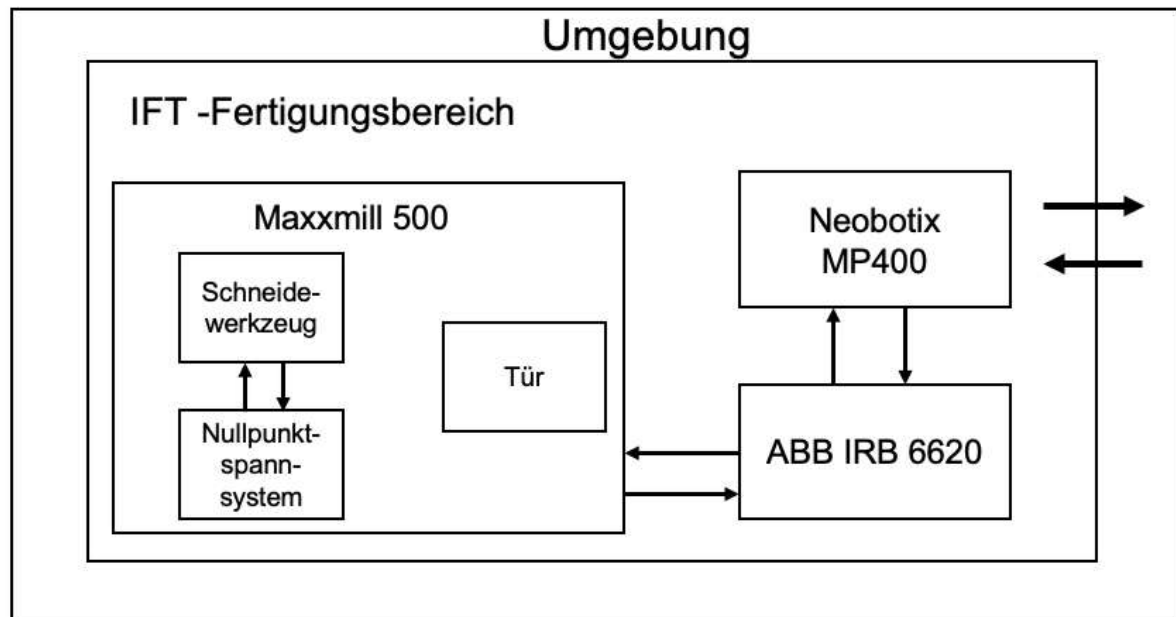


Abbildung 3.4: Struktureles und hierarchisches Konzept für die Modellierung.

Damit langfristig die korrekten Ein- und Ausgänge für das Modell schlüssig sind, wird das Systemkonzept noch um das funktionale System ergänzt. In diesem Schritt werden für jedes System die Ein- und Ausgaben ermittelt und in Tabelle 3.7 dargestellt.

Tabelle 3.7: Funktionales Systemkonzept des Fertigungsprozesses.

System	Input	Output
IFT-Fertigungsbereich	Unbearbeitetes Werkstück	Bearbeitetes Werkstück
Neobotix MP400	Positionsdaten	Bewegung zu den Positionsdaten
ABB IRB 6620	Positionsdaten	Bewegung zu den Positionsdaten
Maxxmill 500	Unbearbeitetes Werkstück	Bearbeitetes Werkstück
Tür	Positionsdaten	Bewegung zu den Positionsdaten
Nullpunktspannsystem	Positionsdaten	Bewegung zu den Positionsdaten
Schneidewerkzeug	Positionsdaten	Bewegung zu den Positionsdaten

3.2.3 Implementierung der Logik

Grundsätzlich existieren sowohl für Ein- als auch für Ausgänge eine digitale und eine analoge Variante. Die digitalen Eingänge bekommen entweder das Signal 0 oder 1. Die analogen Eingänge sind hingegen in der Lage Fließkommazahlen zu übertragen.

Der einzige Zustand, der über ein digitales Signal ermittelt wird, ist der Zustand der Tür. Dieser ist entweder offen oder geschlossen. Es existieren folglich nur zwei Status. Für die Darstellung im Digitalen Modell wird dafür eine Mechanik benötigt, welche die beiden Zustände der Tür repräsentiert. In Tabelle 3.8 werden die Eingänge vorgestellt.

Tabelle 3.8: Eingangssignale.

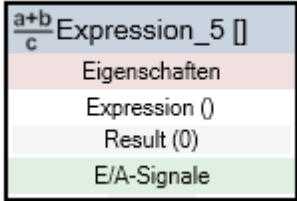
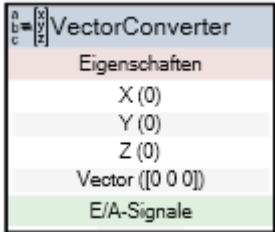
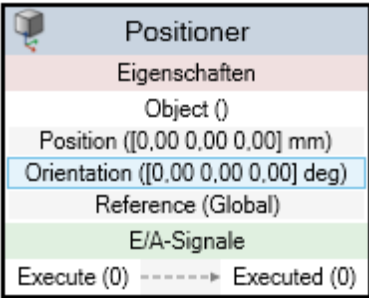
Physisches Objekt	Kinematik	Signalart	Bezeichnung
AGV	X – Achse (prismatisch)	Analog Input	ai_AGV_X_Achse
AGV	Y – Achse (prismatisch)	Analog Input	ai_AGV_Y_Achse
AGV	C – Achse (drehend)	Analog Input	ai_AGV_C_Achse
Tür	Z – Achse (offen)	Digital Input	di_Tuer_offen
Tür	Z – Achse (geschlossen)	Digital Input	di_Tuer_zu
Werkzeugtisch	B – Achse (drehend)	Analog Input	ai_WT_B_Achse
Werkzeugtisch	C – Achse (drehend)	Analog Input	ai_WT_C_Achse
Schneidewerkzeug	X – Achse (prismatisch)	Analog Input	ai_SW_X_Achse
Schneidewerkzeug	Y – Achse (prismatisch)	Analog Input	ai_SW_Y_Achse
Schneidewerkzeug	Z – Achse (prismatisch)	Analog Input	ai_SW_Z_Achse

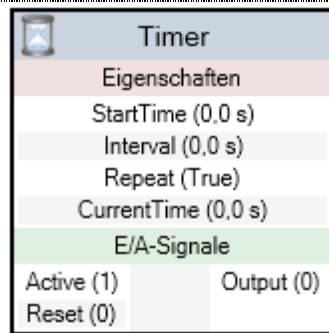
Die Eingangssignale bilden die Grundlage für die datengetriebene Modellbildung. Damit die kinematischen Abläufe auch auf das Modell übertragbar sind, werden dazu logische Verknüpfungen in RobotStudio erstellt.

In diesem Kapitel wird die Logik der Kinematik für das Digitale Modell in RobotStudio beschrieben. Um die Eingangssignale in das Digitale Modell zu überführen und die Logik der Mechanik zu implementieren, werden in RobotStudio Smart Components eingesetzt. ABB stellt dafür ein Baukastensystem zur Verfügung, mit dem die Eingangssignale in die Logik der Mechanik überführt werden und sich dann entsprechend auf das Digitale Modell auswirken.

Damit die Logik des Baukastenmodells besser nachvollziehbar ist, werden alle Baukastenelemente, die in der Simulation Anwendung finden, vorgestellt:

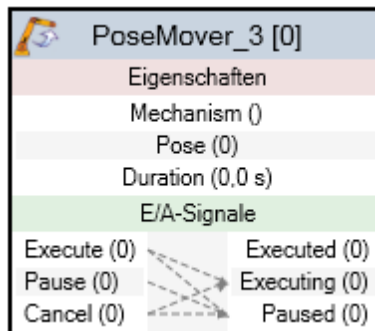
Tabelle 3.9: Erläuterung der Bauelemente der Smart Components.

Smart Component Objekt	Bezeichnung und Erläuterung
	<p>Expression</p> <p>Führt mathematische Berechnungen durch.</p>
	<p>Vektor</p> <p>Stellt einzelne Werte als Vektor dar.</p>
	<p>Positionselement</p> <p>Positioniert Objekte auf Basis eines Eingangsvektor.</p>



Timer

Schaltet Funktionen in beliebigen Zeitintervallen.



PoseMover

Stellt einen Positionszustand auf Basis einer Mechanik dar.

Den Hauptteil der Modellierung bildet die Implementierung der Logik in RobotStudio. Damit dieser Teil der Arbeit nachvollziehbar ist, wird im Folgenden jede einzelne Logik vorgestellt.

- **AGV - Smart Component**

Zur Übertragung der Eingangssignale für die Bewegung entlang der X- und Y-Achse und des Drehwinkel um die C-Achse in das Modell dient folgende Logik:

- Umrechnung der Eingangswerte der Winkel durch Division mit dem Faktor 58,1. Dieser Faktor wurde experimentell ermittelt.
- Umrechnung der Eingangswerte von Millimeter in Meter durch eine Division mit dem Faktor 1000.
- Ablegen der Werte in Vektoren.
- Übertragen der Vektorwerte in das Positionsbaulement.
- Aktualisierung der Position in einem geeigneten Zeitintervall mithilfe des Timer.

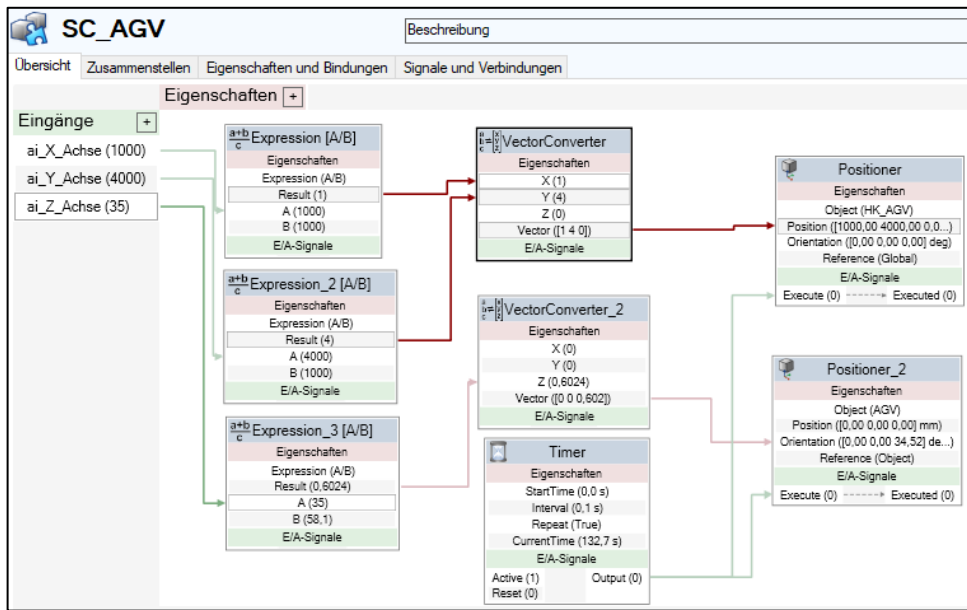


Abbildung 3.5: Smart Component für das AGV.

- **Motor Tisch (CNC-Fräse) – Smart Component**

Zur Übertragung der Eingangssignale der Drehung um die B- bzw. C-Achse in das Modell dient folgende Logik:

- Umrechnung der Eingangswerte der Winkel durch Division mit dem Faktor 58,1. Dieser Faktor wurde experimentell ermittelt.
- Ablegen der Werte in Vektoren.
- Übertragen der Vektorwerte in das Positionsbaulement.
- Aktualisierung der Position in einem geeigneten Zeitintervall mithilfe des Timer.

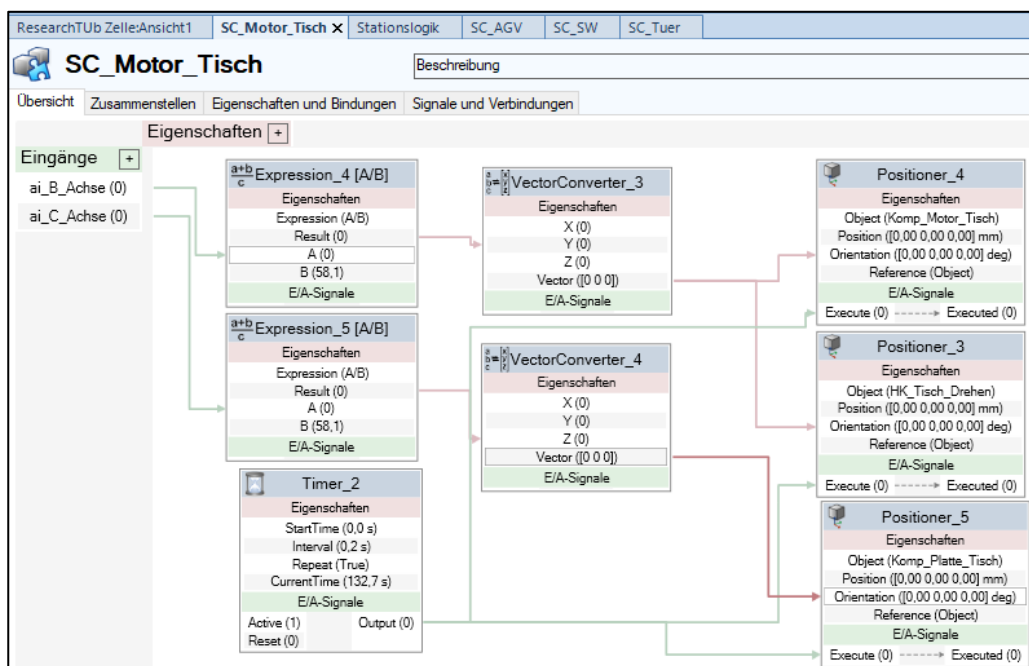


Abbildung 3.6: Smart Component für den Motor Frästisch mit Nullpunktspannstation.

- **Schneidewerkzeug – Smart Component**

Zur Übertragung der Eingangssignale für die Bewegung entlang der X-, Y- und Z-Achse in das Modell dient folgende Logik:

- Umrechnung der Eingangswerte von Millimeter in Meter durch eine Division mit dem Faktor 1000.
- Ablegen der Werte in Vektoren.
- Übertragen der Vektorwerte in die Position.
- Aktualisierung der Position in einem geeigneten Zeitintervall mithilfe des Timer.

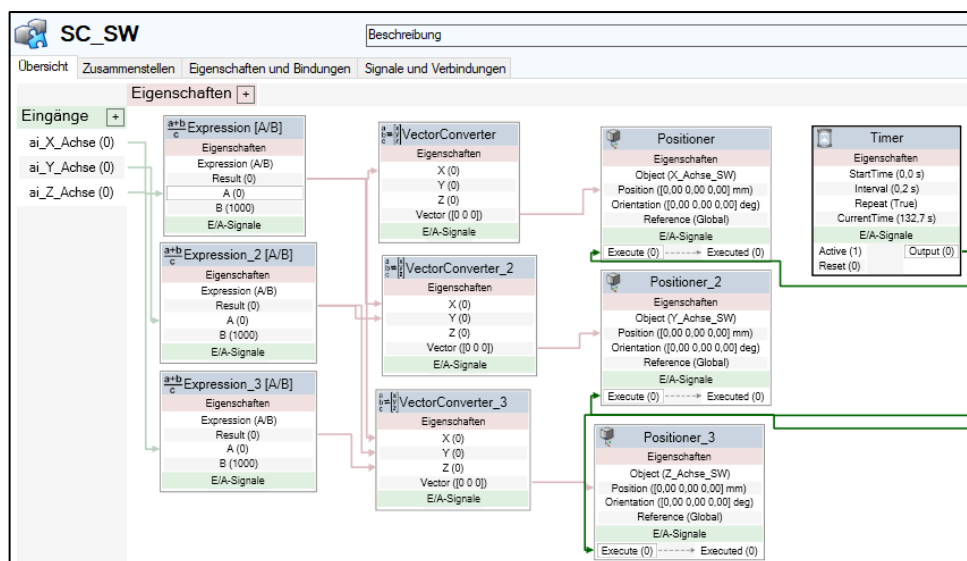


Abbildung 3.7: Smart Component für das Schneidewerkzeug.

- **Tuer (CNC-Fräse) – Smart Component**

Damit die Übertragung der Eingangssignale für die Bewegung entlang der Z-Achse zur Darstellung der Zustände „Tür auf“ und „Tür zu“ in das Modell übertragbar sind, wurde zuerst eine Mechanik dafür erstellt. Wenn der Impuls für eine Änderung im Modell durch einen digitalen Eingang erfolgt, müssen die Positionsdaten davor festgelegt werden. Anschließend lässt sich über die Signale 0 oder 1 eine der beiden Positionen ansteuern.

- Das Signal „Tür auf“ wird an den PoseMover „Tür auf“ übergeben.
- Das Signal „Tür zu“ wird an den PoseMover „Tür zu“ übergeben.

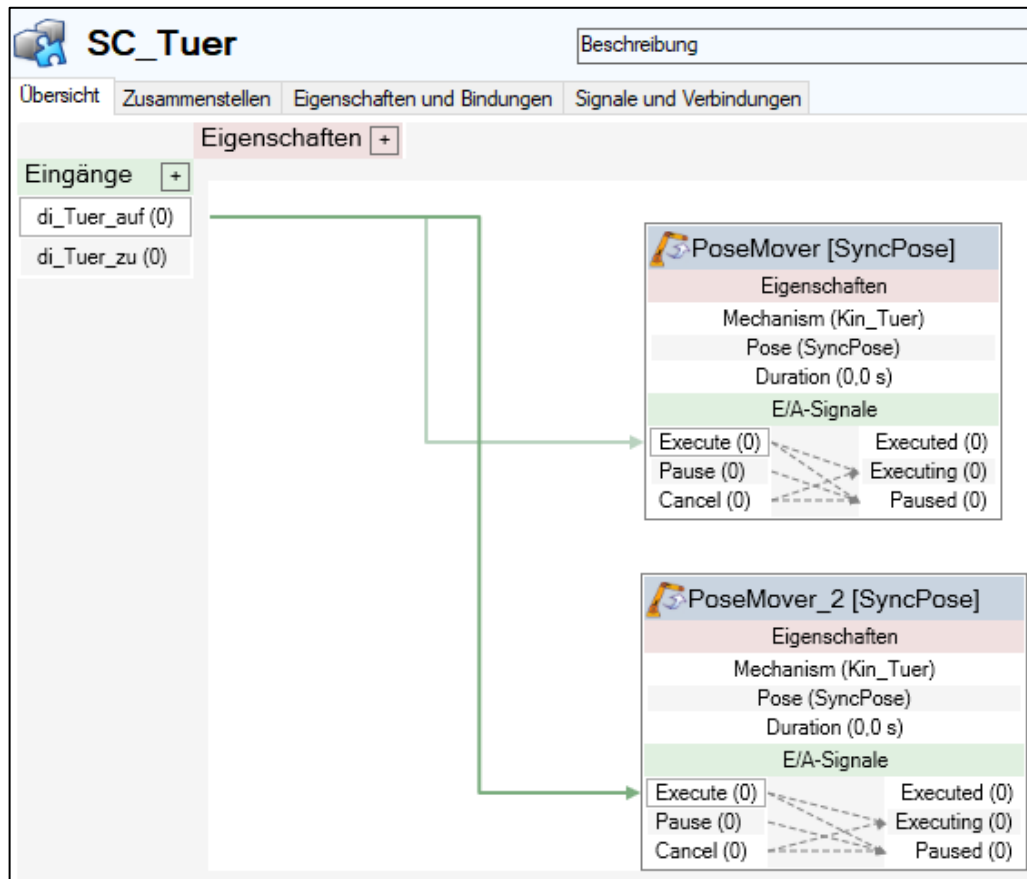


Abbildung 3.8: Smart Component für die Seitentür der Fräse.

Den Abschluss bei der Implementierung des Schemas bildet die Stationslogik. Damit es gelingt die Positionen und Drehwinkel der Komponenten der Maxxmill 500 und des AGV in die Smart Components zu übertragen, bedarf es neuer Ausgangssignale für den virtuellen Controller. Diese Ausgangssignale werden in der Stationslogik mit den Smart Components verbunden, siehe Abbildung 3.9.

Tabelle 3.10: Digitale und analoge Ausgangssignale.

Physisches Objekt	Kinematik	Art des Signals	Bezeichnung
AGV	X – Achse (prismatisch)	Analog Output	ao_AGV_X_Achse
AGV	Y Achse(prismatisch)	Analog Output	ao_AGV_Y_Achse
AGV	C – Achse (drehend)	Analog Output	ao_AGV_C_Achse
Tür	Z – Achse (offen)	Digital Output	do_Tuer_offen

Tür	Z	–	Achse	Digital Output	do_Tuer_zu (geschlossen)
Werkzeugtisch	B	–	Achse	Analog Output	ao_WT_B_Achse (drehend)
Werkzeugtisch	C	–	Achse	Analog Output	ao_WT_C_Achse (drehend)
Schneidewerkzeug	X	–	Achse	Analog Output	ao_SW_X_Achse (prismatisch)
Schneidewerkzeug	Y	–	Achse	Analog Output	ao_SW_Y_Achse (prismatisch)
Schneidewerkzeug	Z	–	Achse	Analog Output	ao_SW_Z_Achse (prismatisch)

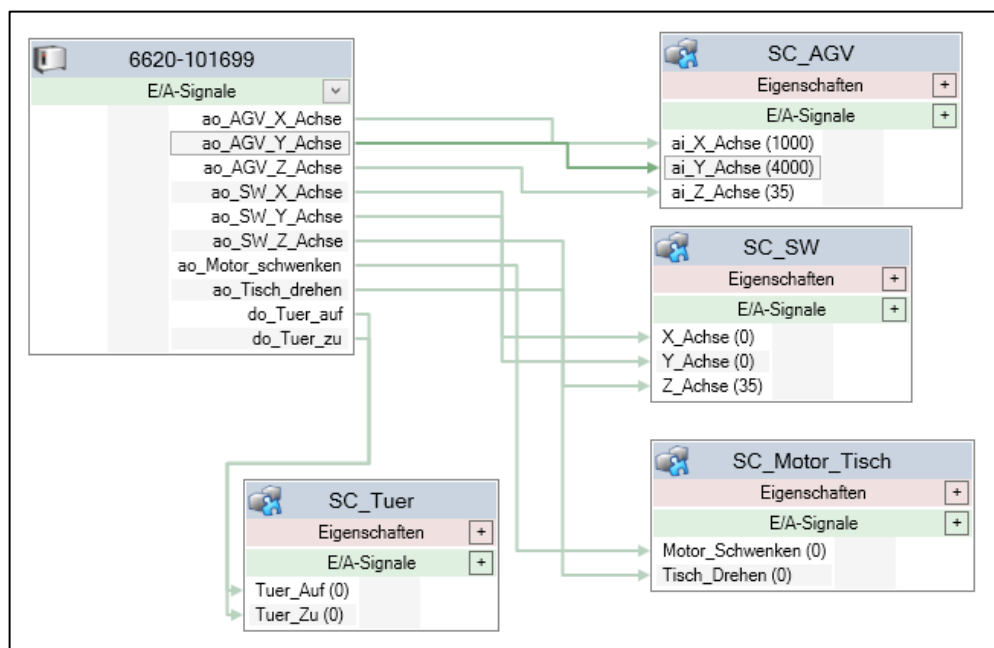


Abbildung 3.9: Die Stationslogik bildet die Verbindung zwischen der virtuellen Steuerung und den Smart Components.

Auf Basis des in RobotStudio erstellten Digitalen Modells werden im nächsten Abschnitt erste Varianten zur Simulation des Produktionsprozesses vorgestellt.

3.2.4 Virtuelle Inbetriebnahme auf Basis eines SiL und HiL Ansatzes

Auf Basis des geplanten Produktionsprozesses sowie des erstellten Digitalen Modells mit eingepflegter Kinematik besteht die Möglichkeit, die Anlage virtuell in Betrieb zu nehmen. Dadurch ist es möglich, den Produktionsvorgang zu justieren und anschließend zu optimieren, bevor die reale Anlage in Betrieb genommen wird. Wie in

Kapitel 2.5.3 bereits beschrieben, existieren dazu zwei technisch unterschiedliche Herangehensweisen, SiL und HiL. Da bei einem Software-in-the-Loop Ansatz auch die echte Steuerung simuliert wird, ist es sinnvoll diesen als erstes durchzuführen.

Der SiL Ansatz lässt sich mit der virtuellen Steuerung in RobotStudio umsetzen (Abbildung 3.10). Bei diesem Konzept wird weder Hardware noch ein reales Gerät/Anlage in Betrieb genommen. Anstatt dessen wird der Bewegungsablauf der Maschinen in RobotStudio auf einer virtuellen Steuerung simuliert.

Dies erfolgt jedoch nur sehr bedingt durch den Einsatz von Programmiercode in Rapid. Vielmehr wird der Bewegungsablauf graphisch in RobotStudio modelliert und dabei automatisch als Code in der virtuellen Steuerung hinterlegt. Die Geschwindigkeiten der Bewegungen lassen sich mithilfe von Funktionen im Rapid Code ergänzen, wodurch der Bewegungsablauf optimiert wird. Das Digitale Modell gleicht bei diesem Konzept einem virtuellen Prototyp. Ein Vorteil der virtuellen Simulation besteht unter anderem darin, das Modell schneller als in Echtzeit laufen zu lassen.

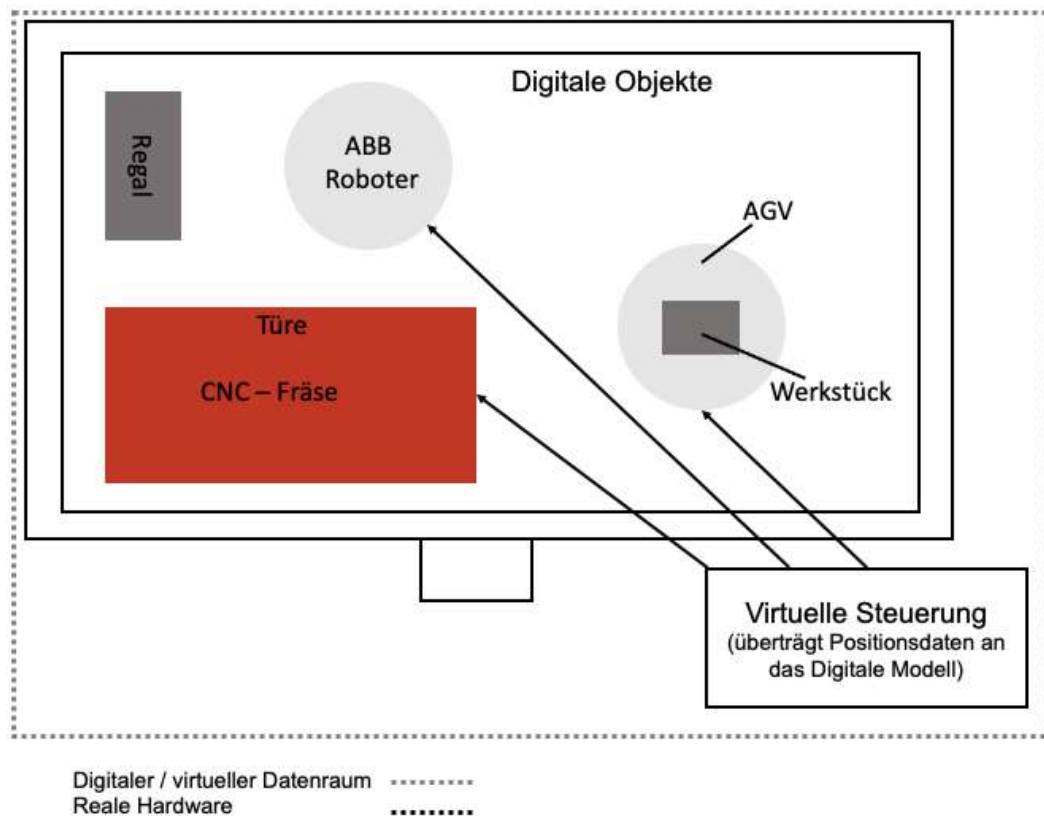


Abbildung 3.10: Virtuelle Inbetriebnahme mit einem SiL Ansatz.

Eine weitere Möglichkeit für eine virtuelle Inbetriebnahme basiert auf dem Konzept HiL. In diesem Fall würde der ABB IRB 6620 virtuell mit einer echten ABB Steuerung in Betrieb genommen werden. Das Digitale Modell bildet dabei den digitalen Raum. Der Programmcode für die Steuerung lässt sich aus dem bereits erstellten Code des SiL Ansatzes auf die reale Steuerung übertragen. Da sowohl die Steuerung als auch die Simulationssoftware vom selben Hersteller sind, entfällt der Einsatz einer

Hardwarechnittstelle. Somit findet im Gegensatz zu dem Konzept SiL ein physischer Hardwareeinsatz statt. Allerdings werden ebenfalls keine Roboter oder Anlagen in Betrieb genommen.

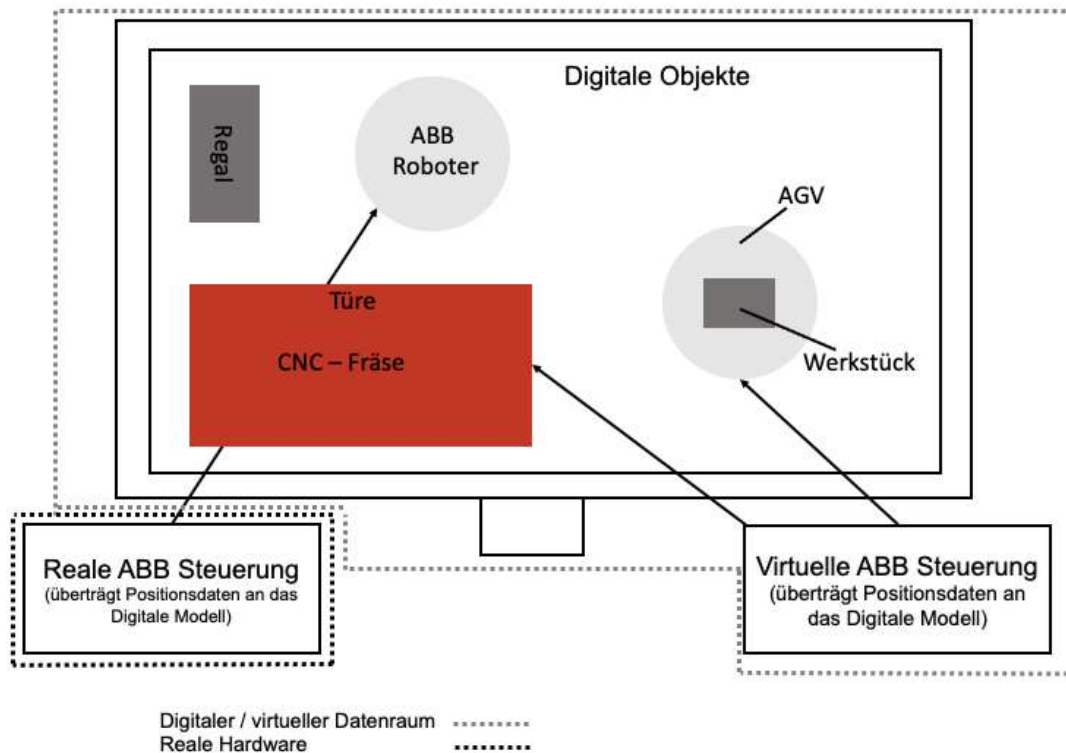


Abbildung 3.11: Virtuelle Inbetriebnahme mit einem HiL Ansatz.

Mit keinem der beiden Simulationsansätze besteht in Robotstudio die Option, den Energieverbrauch des Prozesses zu simulieren. Somit entfällt zum einen die Möglichkeit, herauszufinden, wann das AGV zurück an die Ladestation muss, zum anderen ist es nicht möglich, den ökologischen Fußabdruck des Produktionsprozesses zu ermitteln. Durch den Verzicht auf physische Testaufbauten ist jedoch davon auszugehen, dass sich die Integrationszeit deutlich verringern wird.

3.3 Digitaler Schatten

Damit die Daten nicht mehr manuell, sondern automatisch auf das Digitale Modell übertragen werden, wird ein Digitaler Schatten für den Produktionsprozess entwickelt. Der automatische Datenfluss von den realen Objekten ins virtuelle Modell besteht aus zwei unterschiedlichen Übertragungswegen. Denn die Steuerung des ABB IRB 6620 ist direkt mit der virtuellen Steuerung in RobotStudio gekoppelt, wodurch bereits die automatische Datenzufuhr gewährleistet ist und ein Digitaler Schatten für den ABB Roboter entsteht.

Die Positionsdaten des AGV und der Maxxmill 500 werden hingegen durch Sensoren bereitgestellt. Die gesammelten Daten werden für jede Bewegungsachse beziehungsweise jeden Drehwinkel auf einem eigenen Thema an einen Broker gesendet. Von dort aus werden die Werte mit einer Middleware ausgelesen und über

einen Webservice in die Logik des Digitalen Modells eingepflegt. Der Prozess dieser Datenübertragung wird in diesem Kapitel ausführlich beschrieben.

3.3.1 Kopplung der virtuellen und realen Steuerung für den ABB IRB 6620

Bereits beim Import des Roboters wurde eine virtuelle Steuerung bereitgestellt. Dieser Vorgang wurde in dieser Arbeit nicht durchgeführt, da der Import bereits vollständig erfolgt war. Damit der Roboter anschließend den für den Produktionsprozess notwendigen Bewegungsablauf durchführt, wird dazu ein Programm in der ABB Programmiersprache Rapid aufgesetzt. Der Produktionsprozess war bereits vor der Ausarbeitung dieser Arbeit modelliert, weswegen der Roboter nicht mehr neu programmiert wurde.

Durch die Kopplung aus realer und virtueller Steuerung entsteht für den ABB IRB 6620 bereits ein Digitaler Schatten. Das Einpflegen der Positionsdaten aller weiteren für den Produktionsprozess relevanten Daten in RobotStudio wird in den nächsten Abschnitten ausgearbeitet.

3.3.2 Übertragung der Maschinendaten in die virtuelle Steuerung

Die Positionsdaten und Drehwinkel werden in diesem Abschnitt auf Basis von Sensorsignalen erfasst. Die aufgenommenen Daten werden über das Kommunikationsprotokoll MQTT an einen Mosquitto Broker weitergeleitet. Jede Achse bzw. jeder Drehwinkel wird auf einem eigenen Thema (engl. Topic) publiziert (Tabelle 3.11).

Tabelle 3.11: Bezeichnung und Inhalt der MQTT Topics.

Bewegungsachse/-winkel	MQTT Topic
AGV – X-Achse	Neobotix/position/x
AGV – Y-Achse	Neobotix/position/y
AGV – C-Achse	Neobotix/position/a
Schneidewerkzeug der CNC-Fräse: X-Achse	MaxxMill500/Axis/X/aaLeadP
Schneidewerkzeug der CNC-Fräse: Y-Achse	MaxxMill500/Axis/Y/aaLeadP

Schneidewerkzeug der CNC-Fräse: Z- MaxxMill500/Axis/Z/aaLeadP
Achse

Frästisch mit Nullpunktspannsystem: B- MaxxMill500/Axis/B/aaLeadP
Achse

Frästisch mit Nullpunktspannsystem: C- MaxxMill500/Axis/C/aaLeadP
Achse

Seitentür Maxxmill500: Status offen MaxxMill500/SideDoor/Opened

Seitentür Maxxmill500: Status MaxxMill500/SideDoor/Closed
geschlossen

Im nächsten Schritt übermittelt die Middleware Node-RED die Daten an einen Webservice, welcher abschließend die Werte in das Digitale Modell überträgt. Der Node-RED Flow besteht aus drei Bauelementen.

- 1) Abonnieren der Topics auf dem Broker
- 2) Ein Funktionselement, welches einen einmaligen Login ermöglicht, um den Webservice bereitzustellen und anschließend den URL für die Positionsdaten bereitstellt.
- 3) Der http request überträgt die URLs in den Webservice.



Abbildung 3.12: Node-RED Flow.

Der Webservice schließt den Datenfluss ab, indem die analogen und digitalen Signale in den virtuellen Controller gesetzt werden. Dadurch entsteht der in Abbildung 3.12 dargestellte Datenfluss, bei dem die Signale in die Smart Components übertragen werden.

3.3.3 Kommunikationsübersicht

In Abbildung 3.13 wird der Datenfluss zur übersichtlicheren Darstellung nochmals aufgezeigt. Jedoch ist es nur für die Emco Maxxmill und das AGV notwendig den automatischen Datenfluss zu erstellen, denn der IRB 6620 ist bereits direkt mit der virtuellen Steuerung gekoppelt und überträgt seine Positionsdaten automatisch.

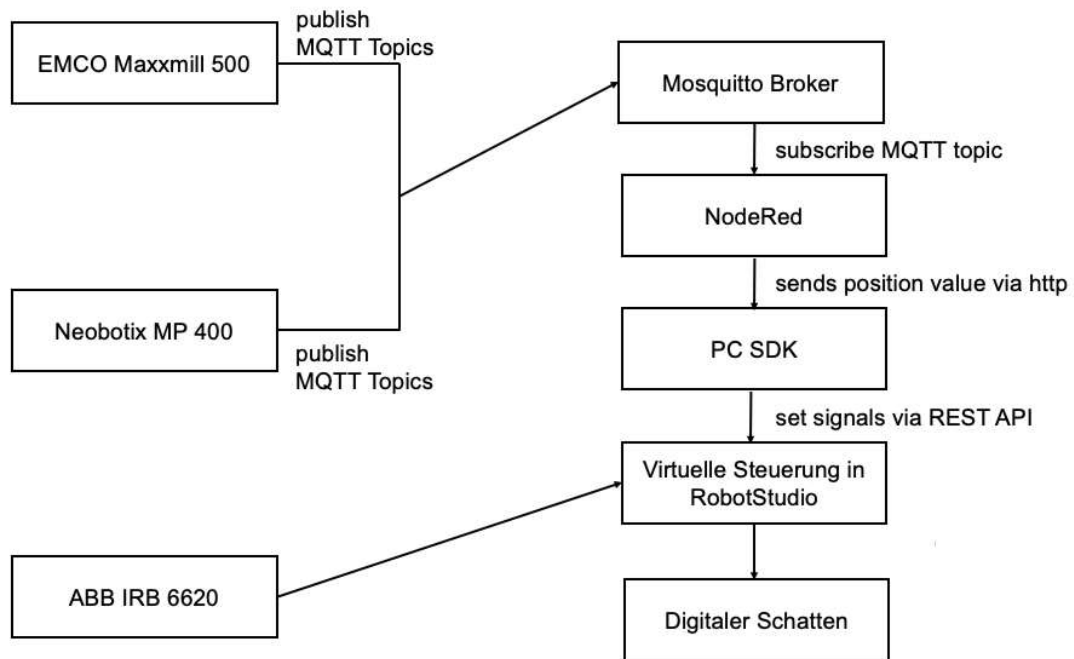


Abbildung 3.13: Datenkommunikation: vom physischen Objekt in die Simulation.

3.3.4 Zusammenfassung und Beurteilung des Digitalen Schattens

Letztendlich ist es gelungen auf Basis eines Digitalen Modells, einen Digitalen Schatten zu entwickeln. Der Fokus lag dabei vor allem auf der Erstellung der korrekten Logik für die Kinematik des Digitalen Modells. Diese Durchführung war geprägt von Experimenten, da unter anderem die Erstellung von Smart Components für zwei zusammenhängende Drehungen nicht in der am Anfang dieser Arbeit durchgeführten Recherche gefunden wurde. Um diesem Problem entgegenzuwirken, wurden die praktisch durchgeführten Aufgaben besonders detailliert vorgestellt.

Die Entwicklung des einseitig automatisierten Datenflusses vom realen hin zum digitalen Objekt verlief unkompliziert. Mit Node-RED existiert eine kostenlose und sehr gut dokumentierte Middleware. Das Baukastenprinzip und die dadurch entstehende Vernetzung der Nodes sind ohne Vorkenntnisse schnell erlernbar.

Alles in allem ist es gelungen, eine echtzeitfähige Auswertungsbasis für den Produktionsprozess in der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0 zu implementieren. Grundsätzlich wäre es möglich, die gewonnenen Daten aus der Feldebene in vertikal höher angesiedelte Schichten der Automatisierungspyramide zu integrieren. Darauf wird jedoch in dieser Arbeit nicht detaillierter eingegangen.

Der erstellte Digitale Schatten entspricht dem im Grundlagenteil vorgestellten Black-Box Modell Ansatz, aus dem Schlüsse auf beobachtete Vorgänge gezogen werden können. Durch die digitale Visualisierung des Prozesses lässt sich der Bearbeitungsvorgang auch außerhalb der TU Wien beobachten. Außerdem bietet die Software die Möglichkeit, einzelne Objekte auszublenden und somit den Fokus auf Bereiche zu richten, welche vor Ort nur schwer einsehbar sind.

Es hat sich außerdem gezeigt, dass der Digitale Schatten sich nicht dazu eignet, den Produktionsprozess zu steuern oder in einer anderen Form echtzeitnah zu optimieren. Damit dies gelingt, werden im nächsten Abschnitt die dafür bestehenden Möglichkeiten der Simulationssoftware RobotStudio aufgezeigt.

4 Digitale Zwillingskonzepte mit RobotStudio

Damit eine digitale Steuerung des Produktionsprozesses möglich wird, muss die Rückkopplung des Digitalen Schattens auf den realen Prozess erfolgen. Im Folgenden werden mehrere Ansätze vorgestellt, welche mithilfe von RobotStudio und den in dieser Arbeit entwickelten Digitalen Modell und Digitalen Schatten umsetzbar sind.

4.1.1 Zonen mit spezifisch definierten Eigenschaften

RobotStudio bietet mit dem Konzept SafeMove eine Überwachung der Roboterbewegungen. Zu diesem Zweck ist es notwendig, den sich bewegenden Arm des Roboters als eine Zone einzukapseln und die Zonen im Fertigungsbereich, denen spezifische Eigenschaften zugewiesen werden, entsprechend zu definieren [89]. Damit dieses Konzept funktioniert, muss zuerst die SafeMove Konfiguration in die Steuerung übertragen werden.

In Abbildung 4.1 sind die Ummantelung des Arms mit Palettenkupplung des ABB IRB 6620 und die Zonen in der Maxxmill 500 dargestellt. Mithilfe dieses Konzepts wird in diesem Beispiel im virtuellen Raum festgelegt, dass der Roboter mit keinen anderen Anlagen oder physischen Gegenständen kollidiert. Denn die virtuelle Steuerung kennt den Bewegungsablauf des Roboters und erkennt dadurch frühzeitig, wenn sich zwei definierte Zonen überschneiden würden, und leitet rechtzeitig entsprechende Maßnahmen ein. So lassen sich bereits vor der Ausführung Abläufe optimieren, da die Probleme in der virtuellen Welt aufgedeckt werden.

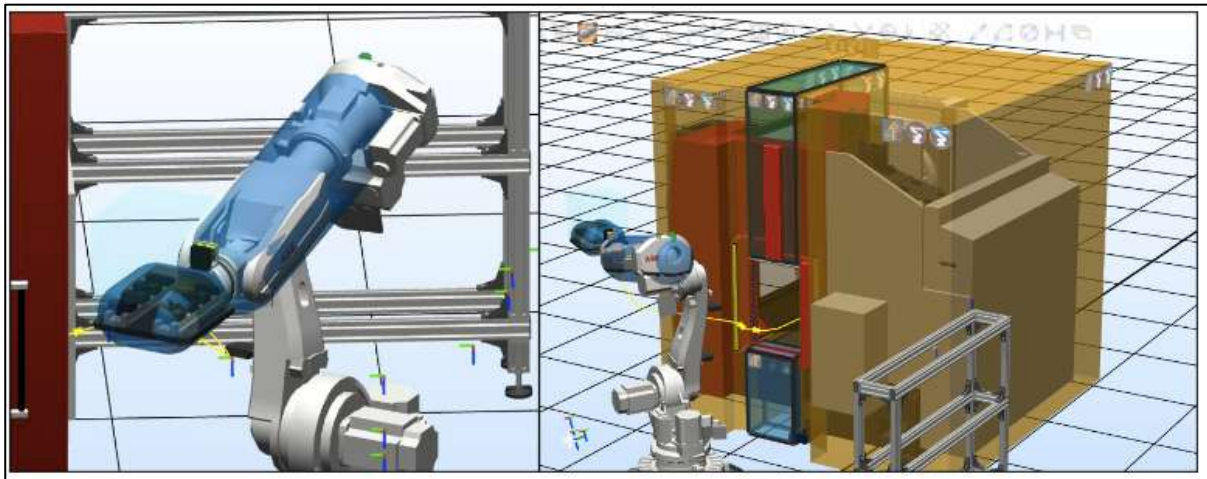


Abbildung 4.1: Umhauster Oberarm mit Palette sowie definierte Zonen der Maxxmill 500 [89].

Durch die Installation von Lichtschranken im Produktionsbereich lassen sich unter anderem Signale setzen [87]. Somit lässt sich darüber hinaus ermitteln, wann Personen den Produktionsbereich betreten [89]. Ist dies der Fall, besteht die Möglichkeit, dass der Roboter in einen anderen Modus wechselt. Dieser Modus sollte im Optimalfall so gestaltet sein, dass die Sicherheit der Person, die bei laufendem

Betrieb die Anlage betritt, gewährleistet ist. Die Geschwindigkeit des ABB Roboters lässt sich dann reduzieren bzw. der Roboter stoppt den Produktionsprozess. Somit lässt sich das Konzept des Digitalen Zwillings auch zur Erhöhung der Sicherheit in der Produktion integrieren.

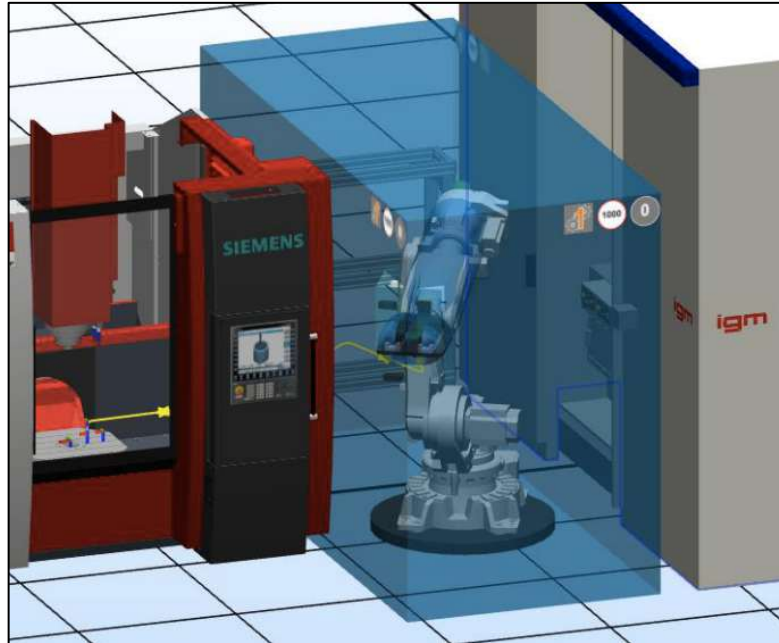


Abbildung 4.2 Zone mit definierter Geschwindigkeit [89].

4.1.2 Roboter und Anlagen für Produktionsvorgang justieren

Nachdem Abschließen eines Produktionsvorgangs befinden sich die Maschinen, Anlagen und Werkstücke häufig nicht mehr in ihrer Ausgangsposition.

Somit fehlen unter anderem die Informationen über den genauen Zustand eines Werkstücks. Der Digitale Zwilling bietet die Möglichkeit die durchgeführten Tätigkeiten zu hinterlegen. Falls das Werkstück noch an anderen Stationen weiterbearbeitet werden soll, lässt sich der Zustand weiterleiten und der nächste Schritt in der Produktion ist somit planbar.

Damit ein Prozess grundsätzlich ohne Komplikationen durchführbar ist, besteht die Möglichkeit, dass sich die Maschinen sobald der Prozess startet in ihre Ausgangsposition begeben. Dabei werden die realen Daten der Maschinen und Roboter zu Beginn des Ablaufs mit einem definierten Ausgangszustand im Digitalen Modell abgeglichen. Die realen Echtzeitdaten werden mithilfe des Digitalen Zwillings geliefert. Daraufhin werden virtuelle Befehle an die realen Geräte übertragen, woraufhin sich diese in ihre Ausgangsposition bewegen. Dadurch lassen sich Kollisionen und Fehler bei der Bearbeitung von Werkstücken vermeiden. Daraus resultiert ein großer Schritt in der permanenten Sicherung der Qualität von Produkten. Wenn der Prozess bereits sauber virtuell in Betrieb genommen wurde und dabei keine

Fehler auftreten, lässt sich der Vorgang auf den realen Bereich übertragen jedoch nur, wenn sich die Maschinen in der gleichen Ausgangsposition befinden.

Dadurch lässt sich auch die Gesamtflexibilität in der Fertigung erhöhen. Denn Prozesse, welche bei einer virtuellen Inbetriebnahme erfolgreich anlaufen, lassen sich unkompliziert auf die reale Produktion übertragen. Durch die in der virtuellen Inbetriebnahme definierten Ausgangszustände ist es möglich, einen Plug & Produce Ansatz zu implementieren, in dem neue Maschinen unkompliziert hinzugefügt oder ausgetauscht werden können. Jedoch ist es dafür zwangsläufig notwendig, für jedes Gerät ein Digitales Modell und einen Digitalen Schatten zu erstellen.

5 Ist der Digitale Zwilling die Schlüsselkomponente in der Industrie 4.0?

Die intelligente Vernetzung von Menschen, Maschinen und Produkten entwickelte sich unter dem Begriff Industrie 4.0 zu einem vielversprechenden Ansatz, um den Herausforderungen in der Industrie erfolgreich zu begegnen. Der Austausch und die Einbindung bisher ungenutzter Daten durch Technologien wie das Internet der Dinge sollen der europäischen Industrie die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber der Konkurrenz aus dem Ausland sichern. Jedoch ist für den Einsatz dieser neuen Technologien oftmals spezifisches Fachwissen notwendig. Durch die stark vom demographischen Wandel geprägte Altersstruktur in der Industrie stehen entsprechend wenige IT-Spezialisten mit zusätzlichem Know-how im Produktionsbereich zur Verfügung. Der Einsatz solcher Technologien auf Basis altbewährter Konzepte wie der Simulation und Methoden, die nur geringe Programmierkenntnisse voraussetzen wie das Baukastenprinzip, sind die Hauptmotivation dieser Arbeit.

5.1 Zusammenfassung

In Kapitel 2 wurden zuerst verschiedene Definitionen zu dem Begriff Digitaler Zwilling vorgestellt und aus den dabei festgestellten großen Unterschieden und der Tatsache, dass der Begriff nicht ausreichend genormt ist, schlussgefolgert, dass es sich dabei nicht um ein einheitliches Konzept handelt. Daraufhin wurden mehrere Konzepte vorgestellt, die Inhalt dieser Definitionen waren. Die Basis für jede 3D-Simulationen bildet das Digitale Modell. Dieses ermöglicht es ein virtuelles Abbild einer Produktionsanlage zu erstellen, welches manuell an Veränderung der Anlagen anpassbar ist. Auf dessen Grundlage lässt sich eine virtuelle Inbetriebnahme realisieren. Die zwei dafür in Frage kommenden Konzepte sind Software-in-the-Loop und Hardware-in-the-Loop. Der Digitale Schatten erweitert das Digitale Modell, um einen einseitigen, vollautomatisierten Datenfluss von den realen Objekten in das virtuelle Modell. Dafür notwendige Grundkonzepte, welche die Kommunikation ermöglichen, wurden vorgestellt. Abgeschlossen wurde der Grundlagenteil mit Konzepten zur digitalen Steuerung, welche durch einen vollautomatischen bidirektionalen Datenfluss ermöglicht werden. Diese Ansätze wurden im weiteren Verlauf dieser Arbeit als Digitaler Zwilling bezeichnet.

Im nächsten Abschnitt, in Kapitel 3 wurde mit der praktischen Umsetzung der Konzepte aus dem Grundlagenteil begonnen. Der erste Schritt wurde mit dem Digitalen Modell als Basis für alle weiteren darauf aufbauenden Konzepte gelegt. Diese Modellbildung hat sich als besonders profunde Arbeit herausgestellt. Insbesondere die genaue Ermittlung der Kinematik wurde zu einer der größten Herausforderungen in der Simulationsbildung, denn nur durch eine korrekte

Übertragung der Signale in das Modell entsteht ein realistisches Abbild. Auf Basis des Digitalen Modells ist es möglich, eine virtuelle Inbetriebnahme durchzuführen und somit Zeit und Kosten bei der Planung der Anlage sowie der korrekten Ermittlung der Programmierung für die Steuerung zu sparen. Anschließend wäre es möglich, den Code des SiL Ansatzes direkt auf die echte Steuerung zu übertragen und einen HiL Ansatz auszuführen. Das umgesetzte Digitale Modell hat sich als exzellente Arbeitsgrundlage für die Entwicklung des Digitalen Schattens herausgestellt. Denn die Übertragung der Positionsdaten von den Sensoren in die Simulationssoftware war mithilfe der Middleware Node-RED und dem Webservice für RobotStudio auf Basis eines Baukastenprinzips einfach zu realisieren. Der Digitale Schatten stellt nun den Produktionsprozess dar, ist jedoch nicht dazu geeignet, diesen zu steuern. Deswegen wurden digitale Zwillingskonzepte vorgestellt, welche eine digitale Steuerung des Produktionsprozesses ermöglichen sollen. Besonderer Fokus lag dabei auf dem Konzept SafeMove, welches es ermöglicht, im digitalen Bereich Zonen mit spezifischen Eigenschaften zu definieren. Dadurch ist es unter anderem möglich Kollisionen zwischen Maschinen zu vermeiden und die Geschwindigkeiten der Anlagen zu reduzieren, wenn Personen den Fertigungsbereich betreten. Außerdem lässt sich durch das Festlegen von Ausgangspositionen bei Prozessen der einzelnen Maschinen die Flexibilität in der Produktion erhöhen.

Für die Umsetzung war es nicht notwendig, eine Programmiersprache von Grund auf neu zu erlernen. Die dreidimensionale Simulation, mit der das Digitale Modell erstellt wurde, basiert auf Modellierungskonzepten, die im Maschinenbau im Bereich der Konstruktion gängig sind. Lediglich bei der Implementierung der Middleware in Node-RED mussten einige Zeilen Code in das Baukastenprinzip eingepflegt werden.

5.2 Kritik

Die dreidimensionale digitale Steuerung in RobotStudio ist nur mit Robotern und Steuerungen der Firma ABB möglich. Denn damit die SafeMove Funktionen in der Simulation angewandt werden können, müssen diese zuerst in die Steuerung integriert werden. Das Hinzufügen eines Roboters von einem anderen Hersteller mit einer anderen Steuerung ist nicht mit der Simulationssoftware RobotStudio kompatibel. Um einen solchen Roboter in eine Simulation mit Robotstudio zu integrieren, ist es notwendig, die Sensorsignale aufzugreifen und über eine Middleware und einen Webservice in Node-RED einzupflegen.

Außerdem ist zu berücksichtigen, dass bei hohen Qualitätsansprüchen bei der Visualisierung ein Konflikt mit der Echtzeitfähigkeit auftreten kann. Diese Schwierigkeit wurde bereits im Grundlagenteil in Kapitel 2.3.6 aufgegriffen. Genaue Anforderungen an die Rechnerleistungen gilt es vor dem Einsatz mehrerer Steuerungen entweder individuell zu prüfen oder mit dem Hersteller abzusprechen.

Zuletzt ist noch zu erwähnen, dass die Einsatzmöglichkeiten der digitalen Steuerung bei RobotStudio stark limitiert sind. Denn die vom Hersteller zur Verfügung gestellten Funktionen zielen vor allem darauf ab, die Sicherheit in der Produktion zu erhöhen.

5.3 Ausblick

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Entwicklung eines Digitalen Zwillings auf Basis einer 3D-Simulation ohne spezifische Programmierkenntnisse umsetzbar ist. Jedoch sind die daraus resultierenden Anwendungsmöglichkeiten stark begrenzt. Folglich sind die Vorteile der dreidimensionalen Simulation vor allem im Bereich der Produktionsplanung anzusiedeln. Das Konzept der virtuellen Inbetriebnahme ermöglicht kürzere Startzeiten sowie geringere Entwicklungs- und Umsetzungsaufwände und senkt zum einen die Kosten in den frühen Phasen des Produktlebenszyklus und kann außerdem zu einer höheren Qualität in den späten Phasen beitragen.

Um die digitale Steuerung in einer 3D-Simulation für komplexere Anlagen oder Prozesse zu realisieren, bedarf es einer Software, die das Zusammenspiel verschiedener Maschinen und Steuerungen unterschiedlichster Produzenten beherrscht. Zweckmäßig wäre ein herstellerübergreifendes Konzept, um die unterschiedlichen Entwicklungsstränge zum Thema digitale Steuerung zu bündeln. Besonders sinnvoll wäre es, Open Source Softwarelösungen zu entwickeln, damit alle Interessenten die Gestaltung mitvorantreiben können. Die daraus resultierende Software ist im Optimalfall besonders intuitiv für das Personal im Bereich der Fertigungsplanung zu bedienen. Denn so wäre es möglich, das vorhandene Wissen in der Planung mit einem überschaubaren Aufwand in die Simulation zu übertragen. Außerdem liegt es nahe, keine 3D-Simulation zu entwickeln, sondern den Digitalen Schatten als Datenbank zu nutzen und auf Basis der gewonnenen Daten mithilfe von künstlicher Intelligenz Entscheidungen auf den realen Bereich zu übertragen.

Durch digitale Steuerungen wird es gelingen, die Agilität in der Produktion bei hoher Automatisierung zu erhöhen. Um neben den Vorteilen der vertikalen Integration auch die Vorzüge der horizontalen Integration zu nutzen, geht es vor allem darum, kleine Unternehmen von diesen Konzepten zu überzeugen. Dadurch wäre es möglich, Wertschöpfungsketten flexibler zu gestalten und den Schritt hin zu digitalen Wertschöpfungsnetzwerken zu gehen. Der Begriff Digitaler Zwilling könnte dabei von kleinen Unternehmen genutzt werden, um einen Marketingeffekt in der Außendarstellung vor allem auf die Innovationskraft im Bereich der Digitalisierung zu erzielen. Aktuell scheint die Einbindung kleinerer Unternehmen in Konzepte der Industrie 4.0 zwar oftmals noch in weiter Ferne zu stehen, jedoch gilt es dabei zu bedenken, dass es Mitte des letzten Jahrhunderts kaum jemand für möglich hielt, Menschen auf den Mond zu bewegen. Der Einsatz einer Zwillingssimulation ermöglichte dies jedoch einige Jahre später.

6 Literaturverzeichnis

- [1] T. Bauernhansl and R. Mieke, *Auftragsmanagement*. Stuttgart: Springer Verlag, 2020.
- [2] “Erwerbstätige nach Wirtschaftssektoren | bpb.de.” [Online]. Available: <https://www.bpb.de/kurz-knapp/zahlen-und-fakten/soziale-situation-in-deutschland/61698/erwerbstaetige-nach-wirtschaftssektoren/>. [Accessed: 30-Jun-2022].
- [3] Statista, “Österreich - Bruttowertschöpfung Sektoren 2021,” 2021. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/217604/umfrage/anteile-der-wirtschaftssektoren-am-bruttoinlandsprodukt-oesterreichs/>. [Accessed: 20-Oct-2022].
- [4] W. Boos *et al.*, *Industrie 4.0: Implement it!* Aachen: RWTH Aachen, 2018.
- [5] S. König, “Industrie 4.0 sorgt für mehr Nachhaltigkeit in der Produktion,” 2022. [Online]. Available: <https://www.produktion.de/wirtschaft/industrie-40-sorgt-fuer-mehr-nachhaltigkeit-in-der-produktion-685.html>. [Accessed: 28-Jun-2022].
- [6] M. M. Gunal, *Simulation for Industry 4.0 Past, Present, and Future*. Birmingham: Springer Verlag, 2019.
- [7] A. Deuter and F. Pethig, “The Digital Twin Theory - Eine neue Sicht auf ein Modewort,” 2018. [Online]. Available: <https://www.industrie-management.de/node/254>. [Accessed: 09-Jan-2022].
- [8] C. Rybski and R. Jochem, “Entwicklung eines Empfehlungsassistenten zur Integration von Industrie 4.0-Elementen in Ganzheitliche Produktionssysteme,” in *Qualitätsmanagement in den 20er Jahren - Trends und Perspektiven*, Berlin: TU Berlin, 2021.
- [9] B. Vogel-Heuser, C. Diedrich, A. Fay, and P. Göhner, “Anforderungen an das Datenmanagement in der Mechatronik,” *Industriemanager*, pp. 1–9.
- [10] B. Vogel-Heuser, C. Diedrich, and M. Broy, “Anforderungen an CPS aus Sicht der Automatisierungstechnik,” *Auto*, vol. 61, no. 10, pp. 669–676, 2013, doi: 10.1515/auto.2013.0061.
- [11] S. Schütz, A. Rütting, C. Henke, and A. Trächtler, “Echtzeitfähige Planung optimierter Trajektorien für sensorgeführte, kinematisch redundante Robotersysteme auf einer Industriesteuerung,” - *Autom.*, vol. 69, no. 3, pp. 231–241, 2021, doi: 10.1515/auto-2020-0124.
- [12] A. Fleischmann, S. Oppl, W. Schmidt, and C. Sary, *Ganzheitliche Digitalisierung von Prozessen Perspektivenwechsel-Design Thinking-Wertgeleitete Interaktion*. Springer Vieweg, 2018.
- [13] S. Fritz, “Ein Assistenzsystem zur kontextsensitiven Unterstützung des

- anforderungsbasierten Wissensmanagements,” Karlsruher Institut für Technologie, 2021.
- [14] R. Rosen, G. Von Wichert, G. Lo, and K. D. Bettenhausen, “About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing,” *IFAC-PapersOnLine*, 2015, doi: 10.1016/j.ifacol.2015.06.141.
- [15] W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, and W. Sihn, “Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, pp. 1016–1022, 2018, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
- [16] M. Bennulf, F. Danielsson, and B. Svensson, “Identification of resources and parts in a Plug and Produce system using OPC UA,” *Procedia Manuf.*, vol. 38, no. 2019, pp. 858–865, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2020.01.167.
- [17] S. Waffenschmidt, “„Ich nannte ihn Doubleganger”,” *Best-Practice*, vol. 03, 2018.
- [18] M. Grieves, “Origins of the Digital Twin Concept,” *Rev. Obstet. y Ginecol. Venez.*, vol. 23, no. August, pp. 889–896, 2016, doi: 10.13140/RG.2.2.26367.61609.
- [19] M. Krack, S. Burri, and M. Fischer, “Der Digitale Zwilling – Kern der Fabrik der Zukunft - Themen auf topsoft.” [Online]. Available: <https://www.topsoft.ch/themen/der-digitale-zwilling-kern-der-fabrik-der-zukunft/>. [Accessed: 29-Sep-2021].
- [20] M. Shafto *et al.*, “DRAFT Modeling, Simulation, information Technology & Processing Roadmap - Technology Area 11,” *Natl. Aeronaut. Sp. Adm.*, p. 27, 2010.
- [21] M. Shafto *et al.*, “Modeling, Simulation, information Technology & Processing Roadmap,” *Technol. Area 11*, pp. 1–38, 2012.
- [22] R. Rosen, G. Von Wichert, G. Lo, and K. D. Bettenhausen, “About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 28, no. 3, pp. 567–572, 2015, doi: 10.1016/j.ifacol.2015.06.141.
- [23] A. Deuter and F. Pethig, “The digital twin theory,” Lemgo, 2019.
- [24] E. J. Tuegel, “The airframe digital twin: Some challenges to realization,” *Collect. Tech. Pap. - AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Struct. Struct. Dyn. Mater. Conf.*, no. April 2012, 2012, doi: 10.2514/6.2012-1812.
- [25] S. Datta, “Emergence of Digital Twins Is this the march pf reason?,” Cambridge, 2016.
- [26] M. Grieves and J. Vickers, “Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems Michael,” in *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, Melbourne (Florida): Springer International Publishing Switzerland, 2017, pp. 85–113.
- [27] P. D. S. Grösser, “Definition » Digitaler Zwilling « | Gabler Wirtschaftslexikon.”

- [Online]. Available: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/digitaler-zwilling.html>. [Accessed: 18-Sep-2021].
- [28] D. E. Jones, C. Snider, L. Kent, and B. Hicks, "Early stage digital twins for early stage engineering design," *Proc. Int. Conf. Eng. Des. ICED*, pp. 2557–2566, 2019, doi: 10.1017/dsi.2019.262.
- [29] M. Weigold and J. Metternich, "Data Driven Production - Application Fields, Solutions and Benefits," Darmstadt, 2021.
- [30] H. Trampe, "Modellierung und Simulation Übersicht," Universität Hamburg, 2013.
- [31] P. Bastian, "Lecture notes at the University of Stuttgart," *Lecture: Grundlagen der Modellbildung und Simulation*. Universität Stuttgart, Stuttgart, 2008.
- [32] "Duden | Entität | Rechtschreibung, Bedeutung, Definition, Herkunft." [Online]. Available: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Entitaet>. [Accessed: 20-Sep-2021].
- [33] W. L. Oberkampff and C. J. Roy, "Verification and validation in scientific computing," *Cambridge Univ. Press*, no. January 2010, 2011, doi: 10.1017/CBO9780511760396.
- [34] M. Zauner and A. Schrempf, "Modellbildung und Simulation," in *Informatik in der Medizintechnik*, Vienna: Springer Verlag, 2009, pp. 223–247.
- [35] G. Ropohl, *Allgemeine Technologie Eine Systemtheorie der Technik*. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe, 2020.
- [36] B. Schwaiger, "Strukturelle und dynamische Modellierung von Gebaeudebestaenden," Universität Karlsruhe (TH), 2002.
- [37] C. Siemers, *Handbuch Embedded Systems Engineering*. Clausthal: TU Clausthal, 2011.
- [38] P. Ulbrich, "Echtzeitsysteme Einleitung Das erste Echtzeitrechensystem." Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, 2019.
- [39] R. (Siemens A. Rosen *et al.*, "Simulation und digitaler Zwilling im Anlagenlebenszyklus Standpunkte und Thesen VDI-Statusreport Februar 2020," *VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Autom.*, no. Technical Report, 2020.
- [40] E. Pintelas, I. E. Livieris, and P. Pintelas, "A Grey-Box ensemble model exploiting Black-Box accuracy and White-Box intrinsic interpretability," *Algorithms*, vol. 13, no. 1, pp. 1–17, 2020, doi: 10.3390/a13010017.
- [41] P. Buchholz, "Modellierung und Simulation diskreter und kontinuierlicher Systeme." TU Dortmund, Dortmund, pp. 1–40, 2006.
- [42] M. Mondo *et al.*, "Methoden , Prozesse , Tools." Zentrum Digitalisierung Bayern, pp. 12–19.
- [43] E. Khan and F. Khan, "A Comparative Study of White Box, Black Box and Grey Box

- Testing Techniques,” *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 3 Issue 6, pp. 148–162, 2012.
- [44] S. Quing Quing Chen, “Datenbasierte Modellierung und Optimierung von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen,” Universität Bremen, 2017.
- [45] P. Langlotz, M. Glatt, F. J. P. Sousa, and J. C. Aurich, “Modelle als Grundlage für den Digitalen Zwilling,” *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetr.*, vol. 115, no. 5, pp. 340–343, 2020, doi: 10.3139/104.112281.
- [46] A. Rasheed, O. San, and T. Kvamsdal, “Digital Twin: Values, Challenges and Enablers,” pp. 1–31, 2019.
- [47] M. Grömer, T. Schranz, W. Birk, and G. Schweiger, “DigitalTwin – Computational methods zur Analyse und Optimierung von Cyber-Physical Systems.,” in *16. Symposium Energieinnovation*, 2020, pp. 0–10.
- [48] A. Ladj, Z. Wang, O. Meski, F. Belkadi, M. Ritou, and C. Da Cunha, “A knowledge-based Digital Shadow for machining industry in a Digital Twin perspective,” *J. Manuf. Syst.*, vol. 58, no. PB, pp. 168–179, 2021, doi: 10.1016/j.jmsy.2020.07.018.
- [49] Duden, “Duden | Semantik | Rechtschreibung, Bedeutung, Definition, Herkunft,” 2022. [Online]. Available: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Semantik>. [Accessed: 24-Jul-2022].
- [50] M. Landherr, U. Schneider, and T. Bauernhansl, “The Application Center Industrie 4.0 - Industry-driven Manufacturing, Research and Development,” *Procedia CIRP*, vol. 57, pp. 26–31, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.11.006.
- [51] F. Albrecht, O. Kleine, and E. Abele, “Planning and optimization of changeable production systems by applying an integrated system dynamic and discrete event simulation approach,” *Procedia CIRP*, vol. 17, pp. 386–391, 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.01.039.
- [52] B. Vogel-Heuser and S. Kowalewski, “Cyber-physische Systeme,” *At-Automatisierungstechnik*, vol. 61, no. 10, pp. 667–668, 2013, doi: 10.1515/auto.2013.9010.
- [53] F. Peschke and C. Eckardt, *Flexible Produktion durch Digitalisierung : Entwicklung von Use Cases*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2019.
- [54] K. J. Park, R. Zheng, and X. Liu, “Cyber-physical systems: Milestones and research challenges,” *Comput. Commun.*, vol. 36, no. 1, pp. 1–7, 2012, doi: 10.1016/j.comcom.2012.09.006.
- [55] J. Lee, B. Bagheri, and H. A. Kao, “A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems,” *Manuf. Lett.*, vol. 3, pp. 18–23, 2014, doi:

- 10.1016/j.mfglet.2014.12.001.
- [56] M. Klein *et al.*, “Architektur und Technologiekomponenten eines digitalen Zwillings,” *VDI Berichte*, vol. 2019, no. 2351, pp. 89–102, 2019, doi: 10.51202/9783181023518-89.
- [57] H. Stern, “Integration der Human Factors in die Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen in cyber-physischen Produktionssystemen,” Universität Bremen, 2020.
- [58] L. Monostori *et al.*, “Cyber-physical systems in manufacturing,” *CIRP Ann.*, vol. 44, no. 2, pp. 621–641, 2016, doi: 10.1016/j.cirp.2016.06.005.
- [59] T. F. Trautner, “Agile Automatisierung von Fertigungszellen - Semiotische Interoperabilität zustandsbehaffeter, deterministischer Anlagenkomponenten,” TU Wien, 2021.
- [60] Duden, “Duden | Sensor | Rechtschreibung, Bedeutung, Definition, Herkunft.” [Online]. Available: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Sensor>. [Accessed: 10-May-2022].
- [61] Duden, “Duden | sensuell | Rechtschreibung, Bedeutung, Definition, Herkunft.” [Online]. Available: <https://www.duden.de/rechtschreibung/sensuell>. [Accessed: 10-May-2022].
- [62] E. Hering, R. Martin, J. Gutekunst, and J. Kempkes, *Elektrotechnik und Elektronik*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012.
- [63] W. Jakoby, *Das Internet der Dinge als Basis der digitalen Automation: Beiträge zu den Bachelor- und Masterseminaren 2018 im Fachbereich Technik der Hochschule Trier*. Books on Demand, 2018.
- [64] A. A. O. Bahashwan and S. Manickam, “A brief review of messaging protocol standards for Internet of Things (IoT),” *J. Cyber Secur. Mobil.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–13, 2019, doi: 10.13052/jcsm2245-1439.811.
- [65] A. Luntovskyy and D. Gütter, *Moderne Rechnernetze*. Dresden: Springer Vieweg Wiesbaden, 2020.
- [66] M. Weiß, “Die Bedeutung der Interoperabilität für das Internet der Dinge | Institut für Automatisierungs-technik und Softwaresysteme | Universität Stuttgart,” *Universität Stuttgart*, 2018. [Online]. Available: <https://www.ias.uni-stuttgart.de/service/begriffslexikon/bedeutung-der-interoperabilitaet-fuer-das-internet-der-dinge/>. [Accessed: 13-Nov-2021].
- [67] Duden, “Duden | Interoperabilität | Rechtschreibung, Bedeutung, Definition, Herkunft,” 2021. [Online]. Available: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Interoperabilitaet>. [Accessed: 13-Nov-2021].
- [68] P.-B. Bök, A. Noack, M. Müller, and D. Behnke, *Computernetze und Internet of Things*.

- Springer Vieweg Wiesbaden, 2020.
- [69] N. Gronau, “Industrial Internet of Things Protokolle und Standards.” Universität Potsdam, Potsdam, 2018.
- [70] N. Schmidt, “Vergleich und Bewertung von Kommunikationskonzepten für Microservices im Bereich des Internet of Things,” Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, 2021.
- [71] M. Sallat, “Das Anwendungsprotokoll MQTT im Internet of Things,” Hochschule Offenburg, 2018.
- [72] L. Schulz, “Datenübertragung mittels MQTT,” Universität Ulm, 2017.
- [73] S. Boschert and R. Rosen, “Digital Twin—The Simulation Aspect,” in *Mechatronic Futures Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and their Designers*, Springer Verlag, 2016, pp. 59–74.
- [74] G. Schweiger, H. Nilsson, J. Schoeggel, W. Birk, and A. Posch, “Modeling and simulation of large-scale systems: A systematic comparison of modeling paradigms,” *Appl. Math. Comput.*, vol. 365, 2020, doi: 10.1016/j.amc.2019.124713.
- [75] I. Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen Universität Stuttgart, V. Forum Industrie 4.0, and R. Institut für Forschung und Transfer e.V., “Best Practices zur Virtuellen Inbetriebnahme,” *VDMA Verlag GmbH*, 2020.
- [76] M. Gomez, “Hardware-in-the-Loop Simulation,” vol. 2001, pp. 1–10, 2001.
- [77] M. Savastano, C. Amendola, F. Bellini, and F. D’Ascenzo, “Contextual impacts on industrial processes brought by the digital transformation of manufacturing: A systematic review,” *Sustain.*, vol. 11, no. 3, 2019, doi: 10.3390/su11030891.
- [78] X. Li, J. Cao, Z. Liu, and X. Luo, “Sustainable business model based on digital twin platform network: The inspiration from haier’s case study in China,” *Sustain.*, vol. 12, no. 3, pp. 1–26, 2020, doi: 10.3390/su12030936.
- [79] Y. Lu, C. Liu, K. I. K. Wang, H. Huang, and X. Xu, “Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 61, no. July 2019, p. 101837, 2020, doi: 10.1016/j.rcim.2019.101837.
- [80] S. Boschert and R. Rosen, “Digital twin: a Second Life for Engineering Models,” *Environ. Plan. B Urban Anal. City Sci.*, vol. 45, no. 5, pp. 817–820, 2018, doi: 10.1177/2399808318796416.
- [81] F. Tao, J. Cheng, Q. Qi, M. Zhang, H. Zhang, and F. Sui, “Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 94,

- pp. 3563–3576, 2018, doi: 10.1007/s00170-017-0233-1.
- [82] M. Glatt, C. Sinnwell, L. Yi, S. Donohoe, B. Ravani, and J. C. Aurich, “Modeling and implementation of a digital twin of material flows based on physics simulation,” *J. Manuf. Syst.*, vol. 58, no. October 2019, pp. 231–245, 2021, doi: 10.1016/j.jmsy.2020.04.015.
- [83] F. Tao, M. Zhang, and A. Y. C. Nee, “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, 2019, pp. 3–28.
- [84] R. Stark and T. Damerau, “Digital Twin,” in *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, S. Chatti and T. Tolio, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, pp. 1–8.
- [85] T. C. Zimmermann, C. Masuhr, and R. Stark, “MBSE-Entwicklungsfähigkeit für digitale Zwillinge,” *ZWF Zeitschrift fuer Wirtschaftlichen Fabrikbetr.*, vol. 115, no. June, pp. 51–54, 2020, doi: 10.3139/104.112312.
- [86] ISO, “Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing,” vol. Part 2: Re, 2021.
- [87] L. Seisenbacher, “Konzept, Planung und Umsetzung der funktionalen Sicherheitstechnik für eine flexible Fertigungszelle mit Roboterbeschickung,” TU Wien, 2019.
- [88] ABB, “Produktspezifikation IRB 6620 - 150/2.2.” ABB, 2021.
- [89] L. Seisenbacher, “Implementierung von ABB SafeMove an einer Fertigungszelle,” TU Wien.

7 Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 2.1: Geschlossenes und offenes System [30].</i>	15
<i>Abbildung 2.2: Konzepte der Systemtheorie [34], [35].</i>	16
<i>Abbildung 2.3: Black-Box Modell [42].</i>	18
<i>Abbildung 2.4: Datenfluss in einem Digitalen Modell [14].</i>	18
<i>Abbildung 2.5: Die physikalische Modellbildung basiert auf vereinfachten Annahmen [45].</i>	19
<i>Abbildung 2.6: Datengetriebene Modellierung stellen eine Kombination aus bekannter und unbekannter Physik dar [45].</i>	20
<i>Abbildung 2.7: Datenfluss in einem Digitalen Schatten [14].</i>	21
<i>Abbildung 2.8: Der Digitale Schatten im Kontext der Produktion [49].</i>	22
<i>Abbildung 2.9: Vom eingebetteten System hin zum cyber-physischen System [52].</i>	23
<i>Abbildung 2.10: Aufbau eines Sensorelements [61].</i>	25
<i>Abbildung 2.11: Aktoren und deren Möglichkeit zur Umformung in physikalische Größen [61].</i>	25
<i>Abbildung 2.12: Operabilitätsgrade [65].</i>	27
<i>Abbildung 2.13: Publish/subscribe Modell [71].</i>	28
<i>Abbildung 2.14: Der Digitale Zwilling als aktuellster Level der Simulation [21].</i>	30
<i>Abbildung 2.15: Modellbildungs- und Simulationsprozess nach Schrempf und Zauner [33].</i>	32
<i>Abbildung 2.16: Datenfluss bei einem Digitalen Zwilling [14].</i>	34
<i>Abbildung 2.17: Fünfdimensionaler Digitaler Zwilling nach Grieves [18].</i>	35
<i>Abbildung 2.18: Vom physischen System hin zum Digitalen Zwilling [47].</i>	36
<i>Abbildung 2.19: Allgemeine Struktur von Digitalen Zwillingen in Anlehnung an Weigold und Metternich [28].</i>	36
<i>Abbildung 2.20: Entitätsbasiertes digitales Zwillingreferenzmodell für die Fertigung [85].</i>	37
<i>Abbildung 3.1: Anordnung der Maschinen und Anlagen in der Pilotfabrik der TU Wien.</i>	38
<i>Abbildung 3.2: Flussdiagramm des Produktionsprozesses.</i>	42
<i>Abbildung 3.3: Importierte Dateien in RobotStudio.</i>	44
<i>Abbildung 3.4: Strukturales und hierarchisches Konzept für die Modellierung.</i>	45

<i>Abbildung 3.5: Smart Component für das AGV.....</i>	<i>49</i>
<i>Abbildung 3.6: Smart Component für den Motor Frästisch mit Nullpunktspannstation.</i>	<i>49</i>
<i>Abbildung 3.7: Smart Component für das Schneidewerkzeug.....</i>	<i>50</i>
<i>Abbildung 3.8: Smart Component für die Seitentür der Fräse.</i>	<i>51</i>
<i>Abbildung 3.9: Die Stationslogik bildet die Verbindung zwischen der virtuellen Steuerung und den Smart Components.....</i>	<i>52</i>
<i>Abbildung 3.10: Virtuelle Inbetriebnahme mit einem SiL Ansatz.....</i>	<i>53</i>
<i>Abbildung 3.11: Virtuelle Inbetriebnahme mit einem HiL Ansatz.</i>	<i>54</i>
<i>Abbildung 3.12: Node-RED Flow.</i>	<i>56</i>
<i>Abbildung 3.13: Datenkommunikation: vom physischen Objekt in die Simulation..</i>	<i>57</i>
<i>Abbildung 4.1: Umhauster Oberarm mit Palette sowie definierte Zonen der Maxxmill 500 [88].</i>	<i>59</i>
<i>Abbildung 4.2 Zone mit definierter Geschwindigkeit [88].</i>	<i>60</i>

8 Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 2.1: Definitionen von Digitalen Zwillingen.....</i>	12
<i>Tabelle 2.2: 5C CPS Architektur [55], [56].</i>	23
<i>Tabelle 2.3: IoT Stack im Vergleich zum klassischen Web Stack [69]......</i>	27
<i>Tabelle 3.1: Daten des ABB IRB6620 Roboters.</i>	39
<i>Tabelle 3.2: Daten der Schunk Palettenkupplung.</i>	39
<i>Tabelle 3.3: Daten des Neobotix MP400 AGV.</i>	40
<i>Tabelle 3.4: Daten der Maxxmill MM 500.</i>	40
<i>Tabelle 3.5: Daten des Nullpunktspannsystems der Emco Maxxmill 500.</i>	41
<i>Tabelle 3.6: Abbildungslegende der importierten Dateien.</i>	44
<i>Tabelle 3.7: Funktionales Systemkonzept des Fertigungsprozesses.</i>	45
<i>Tabelle 3.8: Eingangssignale.</i>	46
<i>Tabelle 3.9: Erläuterung der Bauelemente der Smart Components.</i>	47
<i>Tabelle 3.10: Digitale und analoge Ausgangssignale.</i>	51
<i>Tabelle 3.11: Bezeichnung und Inhalt der MQTT Topics.</i>	55

9 Abkürzungsverzeichnis

AGV	Automated Guided Vehicle
BIP	Bruttoinlandsprodukt
CAD	Computer-Aided Design
CPPS	Cyber – Physical production system
CPS	Cyber – Physical system
DM	Digitales Modell
DS	Digitaler Schatten
DTA	Digital Twin Aggregate
DTI	Digital Twin Instance
DTP	Digital Twin Prototype
DZ	Digitaler Zwilling
HiL	Hardware in the Loop
IFT	Institut für Fertigungstechnik
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
IoT	Internet of Things / Internet der Dinge
IP	Internet-Protokoll
ISO	International Standardization Organisation
KMU	Kleinere und mittlere Unternehmen
MQTT	Message Queue Telemetry Transport
NASA	National Aeronautics and Space Administration
OSI	Open Systems Interconnection
P&P	Plug and Produce
SiL	Software in the Loop
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TCP	Transmission Control Protocol
VDI	Verein Deutscher Ingenieure