

Erstellt Oktober 2022, Update April 2025

## Whitepaper

# Cyber-physische Systeme: Wegbereiter einer smarten Instandhaltung

Von Hartmut Steck-Winter

#AICHELIN, #ConditionMonitoring, #cps, #digitaltwin, #HeatTreatment, #jakob, #Maintenance, #PredictiveMaintenance, #service, #SmartMaintenance, #Thermoprozess, #Thermoprozessstechnik, #Wärmebehandlung, #Wärmebehandlungstechnik

## Inhalt

Inhalt.....	1
Abkürzungsverzeichnis .....	2
1 Einleitung .....	3
2 Begriffe für physische Objekte.....	4
3 Physisches Objekt mit Baugruppensystematik.....	5
3.1 Eigenschaften eines realen Objekts.....	5
3.1.1 Mathematische Objektbeschreibung am Beispiel eines einfachen Förderbands .....	6
4 Reale Objekte Erkennen und Identifizieren.....	6
4.1.1 Betriebsmittelkennzeichen (BmKz).....	7
4.1.2 Austauschbaugruppen.....	7
5 Digitaler Zwilling .....	8
6 DT-Arten .....	8
6.1 Bauteil-Zwilling oder Teile-Zwilling.....	9
6.1.1 Ausfallkritische mechanische Bauteile.....	9
6.1.2 Elektromechanische Bauteile.....	9
6.1.3 Elektronische Bauteile .....	9
6.2 Baugruppen-Zwilling .....	10
6.3 System-Zwilling.....	10
6.4 Prozess-Zwilling .....	10
7 DT-Level .....	10
7.1 DT-Level 0: Digitaler Schatten.....	11
7.1.1 Mindestanforderungen an einen Digitalen Schatten .....	12
7.2 DT-Level 1: Monitoring und periodische Wartung .....	13
7.3 DT-Level 2: Prognosen und Szenarien .....	13
7.3.1 Virtuelle Tests neuer Betriebsparameter .....	14
7.3.2 Schulung des Wartungspersonals .....	14
7.4 DT-Level 3: Simulationen und Prognosen.....	15

7.4.1	Predictive Maintenance .....	15
7.4.2	Simulation eines Wärmebehandlungsprozesses .....	16
7.4.3	Virtuelle Inbetriebnahme .....	16
7.4.4	Simulationsgestützte Analysen zur Bewertung von Wartungsstrategien?.....	16
8	Exkurs: Die Rolle des Data Science .....	17
8.1	Vorteile durch Anlagen- und Firmenübergreifende- Datenerfassung.....	18
8.2	Effizienzsteigerung durch präzisere Vorhersagen und Optimierungen. ....	18
9	Plattformen .....	19
9.1	Kosten für die Speicherung eines digitalen Zwillingen in Cloud-Diensten .....	19
10	Schnittstellen .....	19
10.1	Schnittstelle Physisches Objekt – DT (Plattform) .....	20
10.2	Schnittstelle Steuerungsprogramm (SPS) – DT-Plattform .....	21
10.3	Schnittstelle DT (Plattform) – CMMS und andere Terminals (Internet) .....	21
11	CMMS: Das Instandhalter Terminal .....	21
11.1.1	Rückmeldungen zur Betriebsdatenerfassung .....	22
11.1.2	Rückmeldungen von Zustandsinspektionen.....	22
12	Stores mit digitalen Zwillingen .....	23
13	Fazit.....	24
14	Literatur .....	24
15	Autor.....	25

## Abkürzungsverzeichnis

AR	Augmented Reality
CAD	Computer Aided Design
CMMS	Computerized Maintenance Management System
CNC	Computerized Numerical Control
CPU	Central Processing Unit
DTaaS	Digital Twin as a Service
DZ	Digitaler Zwilling
EZF	Echtzeitfaktor
FE	Finite Elemente
HLI	High Level Interface
HMI	Human Machine Interface
IBN	Inbetriebnahme
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
MiLS	Model-in-the-Loop Simulation
ML	Maschinelles Lernen
MR	Mixed Reality
MRiLS	Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation
NC	Numerical Control
PC	Personal Computer
PLC	Programmable logic controller

RTF	Real-Time-Factor
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.
VIBN	Virtuelle Inbetriebnahme
VR	Virtual Reality

## 1 Einleitung

Eric Yuan, der Chef des Videokonferenz-Diensts Zoom, hat eine Vision: Er will virtuelle Klone von Individuen erschaffen, die einen in verschiedenen Situationen vertreten. Während man am Strand liegt, schickt man einfach einen KI-Klon in die Videokonferenz, eine digitale Version des Selbst, die die PowerPoint-Folien auch um sieben Uhr morgens voller Elan präsentiert [Lobe, 2024].

Wobei das vorgenannte noch eine nicht ganz unrealistische Zukunftsvision ist, befindet sich die Industrie zusammen mit der industriellen Instandhaltung schon mitten in einer technischen Revolution. Sie wird durch cyber-physische Systeme (CPS)<sup>1</sup>, Computerized Maintenance Management Systeme (CMMS)<sup>2</sup>, digitale Zwillinge (Digital Twins, DT)<sup>3</sup>, Predictive Maintenance (PdM)<sup>4</sup> Künstliche Intelligenz (KI)<sup>5</sup> und das Internet der Dinge (IoT)<sup>6</sup> vorangetrieben. Unterstützt werden CPS durch ein umfangreiches „Standard-Softwareangebot für die Szenario Planung und für Simulationen, von Szenario Planungen bis zur virtuellen Inbetriebnahme (VIBN). Kurz gesagt, die Instandhaltung wird smart<sup>7</sup>.“

Cyber-physische Systeme (CPS) spielen in der Industrie 4.0 eine zentrale Rolle, da sie nicht nur die traditionellen Aufgaben der Instandhaltung, wie Wartung, Instandsetzung, präventive Instandhaltung, Zustandsüberwachung, Reparaturmanagement, Ersatzteilversorgung und kontinuierliche Verbesserung, unterstützen, sondern diese sogar erweitern und optimieren [Steck-Winter, 2018], [Kritzinger, 2018].

Insbesondere:

- Zugriff auf Echtzeitdaten von überall wo es Internet gibt, was eine schnelle Reaktion auf kritische Zustände ermöglicht
- Lückenlose Überwachung des Lebenszyklus werthaltiger und ausfallkritischer Bauteile von ihrer Entstehung bis zur Optimierung von Ersatzteilmanagement und Wartungsstrategien
- Datenbasierte Entscheidungsfindung, die Wartungsmaßnahmen effizienter und wirtschaftlicher macht
- Jederzeit aktuelle Dokumentation und Transparenz, um Wartungshistorien, Betriebsdaten und Fehleranalysen nachvollziehbar zu machen
- Präventive und vorausschauende Instandhaltung (Predictive Maintenance), um Ausfälle durch KI-gestützte Analysen rechtzeitig zu verhindern

---

<sup>1</sup> Ein cyber-physisches System (CPS) ist ein vernetztes System, das die physische und die digitale Welt durch Sensoren, Aktoren und Datenverarbeitungstechnologien miteinander verbindet.

<sup>2</sup> Ein CMMS (Computerized Maintenance Management System) ist eine softwarebasierte Lösung zur Verwaltung und Optimierung von Wartungs- und Instandhaltungsprozessen in Unternehmen.

<sup>3</sup> Ein Digitaler Zwilling (Digital Twin) ist ein virtuelles Modell eines physischen Objekts, Prozesses oder Systems, das kontinuierlich mit Echtzeitdaten aus der realen Welt aktualisiert wird.

<sup>4</sup> Predictive Maintenance (vorausschauende Instandhaltung) ist eine Instandhaltungsstrategie, die den Zustand von Maschinen und Anlagen mithilfe von Sensoren, IoT-Technologien und Datenanalysen kontinuierlich überwacht, um Wartungsmaßnahmen proaktiv durchzuführen, bevor ein Ausfall auftritt.

<sup>5</sup> Künstliche Intelligenz (KI) bezeichnet die Fähigkeit von Computern und Maschinen, menschenähnliche Intelligenzleistungen zu erbringen.

<sup>6</sup> Das Internet der Dinge (IoT – Internet of Things) bezeichnet die Vernetzung physischer Geräte mit dem Internet, um Daten zu sammeln, auszutauschen und automatisierte Prozesse zu ermöglichen.

<sup>7</sup> Smart Maintenance ist ein Konzept, das moderne digitale Technologien nutzt, um Wartungsprozesse effizienter, vorausschauender und kostengünstiger zu gestalten. Sie basiert auf Datenanalyse, Sensorik, künstlicher Intelligenz (KI) und vernetzten Systemen, um den Zustand von Maschinen und Anlagen in Echtzeit zu überwachen und optimale Wartungsmaßnahmen abzuleiten.

- Schulung des Wartungspersonals in einer sicheren virtuellen Umgebung, um Prozesse effizienter zu gestalten und Fehler zu minimieren
- Virtuelle Tests neuer Betriebsparameter ohne Risiko für reale Maschinen, um deren Leistungsfähigkeit zu optimieren
- Ermöglichung simulationsgestützte Analysen zur Bewertung von Wartungsstrategien und zur Optimierung der Anlagenleistung

Die Kombination aus CMMS und DT ermöglichen eine intelligente, datengetriebene Instandhaltung mit vielfältigen Möglichkeiten moderner Data Science<sup>8</sup>.

Unternehmen profitieren von reduzierten Stillstandszeiten und optimierten Wartungsstrategien. Durch die kontinuierliche Datenerfassung wird der Übergang von präventiver zu vorausschauender Instandhaltung ermöglicht, was sowohl die Betriebskosten senkt als auch die Anlagenverfügbarkeit maximiert.

Wie genau CMMS und digitale Zwillinge Hand in Hand arbeiten, und welchen konkreten Nutzen sie für die betriebliche Instandhaltung haben, soll in diesem Beitrag beschrieben werden.

Darüber hinaus, und dies soll an dieser Stelle auch hervorgehoben werden, entfalten DT ihr volles Potential aber nur, wenn sie über den gesamten Produktlebenszyklus verwendet werden. Direkt am DT beteiligte Rollen sind der Komponentenlieferant, der Systemlieferant (Systemintegrator, Maschinen- und Anlagelieferant) sowie der Betreiber des Produktionssystems. Die gesamte Zulieferkette wird durch den Softwareanbieter des DT begleitet, der dadurch den generierbaren Nutzen der jeweiligen Rollen maßgeblich beeinflusst [Verl, et al, 2024]. Aber auf diesen wichtigen Zusammenhang wird in diesem Whitepaper wegen seiner Fokussierung auf die Instandhaltung nur am Rande eingegangen.

## 2 Begriffe für physische Objekte

Vorab, zur besseren Einordnung worum es bei einem DT geht sein mehr bekanntes physisches Gegenüber: Im Maschinenbau gibt es klare Definitionen für die Begriffe Teil, Komponente, Bauteil, Baugruppe, Anlagenteil, System und Anlage. Sie sind in Normen wie DIN 199, DIN EN ISO 9000 oder VDI 2860 teilweise genauer definiert. Je nach Branche oder Unternehmen können individuelle Begriffsverwendungen abweichen.

In diesem Whitepaper werden folgende Begriffe für physische Objekte verwendet:

**Teil:** Ein einzelnes, nicht weiter zerlegbares Element eines technischen Produkts. Beispiele: Schraube, Mutter, Welle.

**Bauteil (Komponente):** Ein aus einem oder mehreren Teilen bestehendes Element mit einer spezifischen Funktion, meist innerhalb einer Baugruppe. Beispiele: Elektromotor, Getriebe, Pneumatikzylinder, Ventil. Ein Bauteil ist in Kontext dieses Fachaufsatzes ein Produkt, das selbst hergestellt oder zugekauft wird, um einen bestimmten Nutzen zu bieten. Ein Bauteil durchläuft typischerweise verschiedene Phasen im Lebenszyklus, darunter Entwicklung, Produktion, Nutzung und Entsorgung oder Recycling.

**Baugruppe (Einheit, Modul):** Eine funktionale Zusammenstellung mehrerer Bauteile, die gemeinsam eine bestimmte Aufgabe erfüllen. Beispiel: Gasumwälzer, Hydraulikaggregat, Türantrieb, Pumpeneinheit. In industriellen Anwendungen sind Bauteile oft Teil einer Baugruppe oder eines Systems.

**Anlagenteil (Aggregat, Subsystem, System):** Ein definierter Abschnitt einer Anlage mit einer bestimmten Teilfunktion bestehend aus mehreren Baugruppen die miteinander interagieren. Beispiel: Anlassofen, Härteofen, Ölhärtebad innerhalb einer Produktionsanlage.

**Anlage:** Ein technisches Gesamtsystem, das aus mehreren Anlagenteilen besteht und eine bestimmte industrielle oder technische Aufgabe erfüllt. Beispiel: Kraftwerk, Produktionslinie, chemische Prozesanlage.

---

<sup>8</sup> Data Science ist ein interdisziplinäres Feld, das Methoden, Prozesse, Algorithmen und Systeme nutzt, um Wissen und Erkenntnisse aus strukturierten und unstrukturierten Daten zu gewinnen. Es kombiniert Techniken aus Statistik, Informatik, maschinellem Lernen und Domänenwissen, um Muster zu erkennen, Vorhersagen zu treffen und datengetriebene Entscheidungen zu ermöglichen.

**System:** Eine organisierte Anordnung von Bauteilen, Baugruppen und Anlagenteilen, die miteinander interagieren, um eine übergeordnete Funktion zu erfüllen.

### 3 Physisches Objekt mit Baugruppensystematik

Das physische Objekt wurde bereits durch die vorgenannten Begriffe beschrieben. Die Baugruppensystematik in der mechanischen Konstruktion von Maschinen und Anlagen mit Ansich hohem Standardisierungsgrad basiert auf der strukturierten Zerlegung eines Gesamtsystems in funktionale, wiederverwendbare Module. Dieses Prinzip ermöglicht eine effiziente Entwicklung, Fertigung und Wartung, insbesondere wenn kundenspezifische Anpassungen erforderlich sind oder DT in den Konstruktions- und Betriebsprozess integriert werden sollen.

Ein zentrales Prinzip der Baugruppensystematik ist die Modularisierung. Dabei wird die Maschine oder Anlage in einzelne Baugruppen unterteilt, die jeweils eine definierte Funktion erfüllen und teilweise auch eigenständig getestet werden können. Dies reduziert die Variantenvielfalt und erleichtert sowohl die Konstruktion als auch die Fertigung. Gleichzeitig bleibt die Flexibilität erhalten, um auf spezifische Kundenanforderungen reagieren zu können.

Ein weiterer Vorteil dieser Systematik liegt in der verbesserten Effizienz der Konstruktion. Durch die Wiederverwendung bewährter Module verkürzt sich die Entwicklungszeit erheblich, während der Konstruktionsaufwand für kundenspezifische Anpassungen minimiert wird. Standardisierte Baugruppen ermöglichen zudem eine Reduzierung der Fertigungs- und Lagerhaltungskosten, da sie in größeren Stückzahlen produziert und bevorratet werden können. Dies erleichtert nicht nur die Ersatzteilversorgung, sondern führt auch zu einer höheren Wartungsfreundlichkeit.

Darüber hinaus trägt die Baugruppensystematik zur Qualitätssteigerung bei. Erprobte Module verringern das Risiko von Konstruktions- und Fertigungsfehlern, während eine einheitliche Dokumentation und Verwaltung die Wiederverwendbarkeit der Baugruppen optimiert. Durch die Verwendung parametrischer Modelle können individuelle Anpassungen schnell umgesetzt werden, ohne die gesamte Konstruktion neu entwickeln zu müssen.

Besonders in Verbindung mit Industrie 4.0 und DT bietet die Baugruppensystematik entscheidende Vorteile. Jedes Modul kann mit einer digitalen Entsprechung versehen werden, die CAD-Modelle, Simulationsdaten, Sensordaten, etc. umfasst. Dies ermöglicht eine präzise Echtzeit-Überwachung im Betrieb sowie eine datenbasierte Optimierung durch Predictive Maintenance. Die Integration von IoT-Sensorik und CM auf Baugruppenebene erlaubt es, Verschleiß frühzeitig zu erkennen und Wartungsmaßnahmen gezielt zu planen.

Insgesamt bietet die Baugruppensystematik eine ideale Balance zwischen Standardisierung und Flexibilität. Sie ermöglicht es Unternehmen, kundenspezifische Anforderungen effizient umzusetzen, gleichzeitig Kosten zu senken und die Qualität zu steigern. Die systematische Modularisierung bildet zudem die Grundlage für zukunftsweisende Technologien wie DT, die eine weitergehende Optimierung von Betrieb und Wartung ermöglichen.

#### 3.1 Eigenschaften eines realen Objekts

Physische Daten sind messbare Eigenschaften eines realen Objekts, Systems oder Prozesses, wie unten im Kapitel 7.1 DT-Level 0: Digitaler Schatten beschrieben. Sie beschreiben dessen Struktur, Materialeigenschaften und Betriebsbedingungen. Allein mit physischen Daten kann die Funktion eines physischen Objekts aber nicht vollständig nachgebildet werden. Damit ein Objekt realistisch simuliert werden kann, sind zusätzlich dynamische Echtzeit-Daten erforderlich, etwa Sensorwerte zu Temperatur, Druck oder Bewegung sowie Informationen zu Betriebszuständen und Umwelteinflüssen, wie unten im Kapitel 7.2 DT-Level 1: Monitoring und periodische Wartung beschrieben. Zudem spielen Regeln und Algorithmen eine entscheidende Rolle, da physikalische Gesetze, Steuerungslogiken und Regelungssysteme das Verhalten eines Objekts bestimmen. Auch historische Daten, beispielsweise zur Wartungshistorie oder zu früheren Ausfällen, tragen zur Modellierung bei, indem sie Simulationen zu Verschleiß, Alterung oder Optimierung ermöglichen. Erst durch die Kombination all dieser Elemente –

physische Daten, Echtzeit-Daten und Regelmodelle – kann ein DT das tatsächliche Verhalten eines physischen Systems realitätsnah abbilden.

### 3.1.1 Mathematische Objektbeschreibung am Beispiel eines einfachen Förderbands

Um das physische Verhalten in einem DT nachzubilden, müssen verschiedene physikalische Eigenschaften mit mathematischen Formeln beschrieben werden. Die mechanischen Eigenschaften eines Förderbands lassen sich beispielsweise durch das Newtonsche Gesetz erfassen, das die Beschleunigung eines Objekts unter einer bestimmten Kraft beschreibt<sup>9</sup>. Ebenso spielt die Reibung zwischen dem Fördergurt und dem Transportgut eine wichtige Rolle, die durch das Produkt aus Reibungskoeffizienten ( $\mu$ ) und Normalkraft bestimmt wird<sup>10</sup>. Ein weiteres zentrales Element ist die Gurtspannung<sup>11</sup>, die sich aus der Antriebsleistung, der Geschwindigkeit und dem Eigengewicht des Gurts berechnet. Zudem muss die Durchbiegung des Förderbands<sup>12</sup> berücksichtigt werden, die von der aufgebrachten Last, der Länge des Trägers sowie dem Elastizitätsmodul und dem Flächenträgheitsmoment des Materials abhängt.

Neben den mechanischen Eigenschaften sind auch dynamische Aspekte wichtig. So ergibt sich das Drehmoment des Antriebsmotors aus dem Verhältnis von Leistung zur Winkelgeschwindigkeit<sup>13</sup>. Das Anfahr- und Bremsverhalten hängt vom Trägheitsmoment des Systems ab, wobei die benötigte Beschleunigungszeit durch das Verhältnis von Trägheitsmoment, Drehzahl und Drehmoment bestimmt wird<sup>14</sup>. Der Energieverbrauch wiederum lässt sich als Produkt aus Leistung und Betriebszeit berechnen<sup>15</sup>.

Zusätzlich müssen thermische Eigenschaften erfasst werden, da sie das Verhalten des Förderbands beeinflussen können. Beispielsweise entsteht durch den elektrischen Widerstand Wärme, die von der Stromstärke, dem Widerstand des Materials und der Zeit abhängt<sup>16</sup>. Zudem dehnen sich Materialien bei Temperaturänderungen aus, was durch den Wärmeausdehnungskoeffizienten, die ursprüngliche Länge und die Temperaturdifferenz bestimmt wird<sup>17</sup>.

Durch die Kombination dieser mechanischen, dynamischen und thermischen Berechnungen kann der DT das Verhalten des Förderbands präzise simulieren. Dies ermöglicht nicht nur eine bessere Vorhersage von Belastungen und Verschleiß, sondern auch eine Optimierung des Energieverbrauchs und eine frühzeitige Erkennung potenzieller Fehlerquellen.

## 4 Reale Objekte Erkennen und Identifizieren

Damit diese Verbindung zwischen dem realen Objekt und seinem digitalen Gegenstück zuverlässig funktioniert, muss klar sein, welches reale Objekt genau gemeint ist. Technisch gibt es verschiedene Möglichkeiten zur eindeutigen Identifikation. Zu den klassischen Verfahren gehören Markierungen wie Barcodes oder DataMatrix-Codes.

Beim Erkennen geht es darum, ein Objekt überhaupt als solches wahrzunehmen und es einer bestimmten Kategorie zuzuordnen. So kann man etwa einen Getriebemotor erkennen, indem man als elektromechanisches Bauteil wahrnimmt. In ähnlicher Weise erkennt man auf einem Parkplatz ein Auto

---

<sup>9</sup> Das Newton'sches Gesetz beschreibt die Beschleunigung eines Objekts ( $a$ ) mit der Masse ( $m$ ) unter einer Kraft ( $F$ ) als  $F = m \cdot a$

<sup>10</sup> Reibung zwischen Fördergurt und Transportgut  $F_{\text{Reibung}} = \mu \cdot F_{\text{Normalkraft}}$ , wobei  $\mu$  = Reibungskoeffizient

<sup>11</sup>  $T = v/P + \mu \cdot m \cdot g$ , wobei  $T$  = Gurtspannung,  $P$  = Antriebsleistung,  $v$  = Geschwindigkeit,  $m$  = Masse des Gurts,  $g$  = Erdbeschleunigung

<sup>12</sup> Biegung und Durchbiegung des Förderbands:  $y = (F L^3) / (48 E I)$ , wobei  $F$  = Balkenkonstruktion mit Last,  $L$  = Länge,  $E$  = Elastizitätsmodul,  $I$  = Flächenträgheitsmoment.

<sup>13</sup>  $M = P/\omega$ , wobei  $M$  = Drehmoment,  $P$  = Leistung,  $\omega$  = Winkelgeschwindigkeit.

<sup>14</sup>  $T = (J \omega) / M$ , wobei  $\tau$  = Beschleunigungszeit,  $J$  = Trägheitsmoment des Systems,  $\omega$  = Enddrehzahl,  $M$  = Drehmoment

<sup>15</sup>  $E = P \cdot t$ , wobei  $E$  =Energieverbrauch,  $P$  = Leistung,  $t$  = Betriebszeit

<sup>16</sup>  $Q = I^2 R \cdot t$ , wobei  $Q$  = Wärmeentwicklung im Antrieb,  $R$  = Wärmeverlust durch elektrischen Widerstand,  $I$  = Strom,  $t$  = Zeit

<sup>17</sup>  $\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T$ , wobei  $\Delta L$  = Ausdehnung des Förderbands bei Temperaturänderung,  $\alpha$  = Wärmeausdehnungskoeffizient,  $L$  = ursprüngliche Länge,  $\Delta T$  = Temperaturänderung

als solches und ordnet es möglicherweise einem bestimmten Fahrzeugtyp oder einer Marke zu – etwa als „Limousine“ oder „VW Golf“.

Das Identifizieren hingegen geht einen Schritt weiter. Hier wird das Objekt nicht nur allgemein erkannt, sondern eindeutig bestimmt – es wird einem konkreten Datensatz zugeordnet. Bei dem Getriebemotor bedeutet das beispielsweise, dass er anhand eines Typenschildes eindeutig identifiziert wird – etwa als Exemplar 12345 aus einer bestimmten Baureihe. Ebenso lässt sich das erkannte Auto über das Nummernschild identifizieren: Man erkennt zunächst, dass es sich um ein Fahrzeug des Typs VW Golf handelt, und stellt dann durch das Nummernschild fest, dass es sich um das eigene Auto handelt.

Kurz gesagt: Beim Erkennen stellt man fest, was ein Objekt ist – beim Identifizieren hingegen, welches genau es ist.

#### **4.1.1 Betriebsmittelkennzeichen (BmKz)**

Ein weiterer, häufig übersehener Aspekt bei der eindeutigen Identifikation physischer Objekte – insbesondere elektromechanischer und elektrotechnischer Bauteile – ist die Nutzung von Betriebsmittelkennzeichen. Dabei handelt es sich um strukturierte alphanumerische Codes, die technische Objekte innerhalb eines Systems eindeutig bezeichnen. Sie erfüllen nicht nur eine organisatorische Funktion in der elektrotechnischen Dokumentation, sondern eignen sich auch hervorragend zur automatisierten Identifikation und zur Verknüpfung mit digitalen Zwillingen.

Bei elektromechanischen Bauteilen – wie Schützen, Relais, Motoren oder Sensoren – dienen Betriebsmittelkennzeichen der systematischen und konsistenten Benennung jedes einzelnen Bauteils, sowohl im Schaltschrank als auch auf Maschinenebene. Diese Kennzeichen sind in der Regel dauerhaft und eindeutig, meist direkt neben dem Bauteil auf gravierten Schildern und auf den Anschlusskabeln angebracht. So ermöglichen sie eine zuverlässige und beständige Zuordnung zum jeweiligen Bauteil.

Da es in der Praxis kaum rein mechanische Baugruppen ohne elektromechanische Komponenten gibt, ist eine Identifikation der Baugruppe – auch indirekt über die mechanische Stückliste – möglich.

Ein besonderer Vorteil der Betriebsmittelkennzeichnung liegt in ihrer Normbasiertheit und Systematik. Dadurch ist gewährleistet, dass die Kennzeichnung über Anlagen, Standorte und Lebenszyklen hinweg verständlich und konsistent bleibt. Im Sinne von Industrie 4.0 wird das Betriebsmittelkennzeichen somit zu einem zentralen Identifikator im Lebenslauf eines Objekts – von der Konstruktion über die Inbetriebnahme und den Betrieb bis hin zur Wartung und Außerbetriebnahme.

#### **4.1.2 Austauschbaugruppen**

Einige Baugruppen wie Gasumwälzer, werden im Wechsel getauscht, um die Wartungszeiten zu verkürzen. Dabei wird eine bestimmte Anzahl dieser Baugruppen instandgesetzt und in einem ordnungsgemäßen Zustand ausgetauscht. Durch diesen Prozess verlieren sowohl die physische Baugruppe als auch ihr DT die direkte Zuordnung zum ursprünglichen Einbauort. Um eine lückenlose Nachverfolgbarkeit zu gewährleisten, können diese Bauteile mit einem maschinenlesbaren Code, etwa in Form eines Barcodes oder RFID-Tags, versehen werden. Dies ermöglicht eine eindeutige Identifikation und Zuordnung innerhalb der DT, unabhängig vom aktuellen Einbauort. Als Konkretisierung der bislang genannten Definitionen ist die Lebenszeit eines DZ also nicht auf die physische Existenz des betrachteten Systems begrenzt [VDI/VDE, 2020].

Der Einbauort eines im Wechsel getauschten Bauteils bleibt trotz dezentraler Datenerfassung von Bedeutung, da Betriebsbedingungen, Belastungen und Umwelteinflüsse je nach Standort variieren können. Diese Faktoren beeinflussen die Lebensdauer, den Wartungsbedarf und das Verschleißverhalten des Bauteils. Ein DT sollte daher nicht nur die Identität und Historie eines Bauteils verwalten, sondern auch dessen Einsatzorte dokumentieren. Dadurch lassen sich standortspezifische Einflüsse analysieren, Wartungsstrategien optimieren und mögliche Schwachstellen gezielt identifizieren. Die Nachverfolgbarkeit in Verbindung mit den jeweiligen Betriebsdaten ermöglicht präzisere Lebensdauerprognosen und eine fundierte Entscheidungsgrundlage für die vorausschauende Instandhaltung.

## 5 Digitaler Zwilling

Ein digitaler Zwilling (engl. Digital Twin, DT) ist eine virtuelle Repräsentation eines physischen Objekts oder Systems<sup>18</sup> und spielt eine zentrale Rolle in der Industrie 4.0 sowie der vorausschauenden Instandhaltung. Man unterscheidet zwischen digitalem Modell (DM), digitalem Schatten (DS) und digitalem Zwilling (DT). Eine einheitliche Definition des Begriffs existiert allerdings nicht [VDI/VDE, 2020]. Das Konzeptmodell des DT besteht aus drei Hauptkomponenten: dem physischen Produkt im realen Raum, dem virtuellen Produkt im digitalen Raum sowie den Daten- und Informationsverbindungen, die beide miteinander verknüpfen. Siehe auch Kapitel 10.1 Schnittstelle Physisches Objekt – DT (Plattform).

Die Grundidee eines DT ist simpel: Jedes funktionale und werthaltige Bauteil soll über seinen gesamten Lebenszyklus hinweg einen „Lebenslauf“ erhalten. Dieser dokumentiert seine physischen und funktionalen Eigenschaften sowie relevante Nutzungs- und Umwelteinflüsse kontinuierlich und macht sie abrufbar. Ziel ist es, das physische Produkt mithilfe seines virtuellen Gegenstücks in allen Lebensphasen zu simulieren, zu analysieren und zu optimieren. Ein wichtiger Aspekt von DZ ist dabei, dass sie eine Kombination von Modellen (z. B. Simulationsmodellen) und Daten enthalten.

Der Lebenszyklus eines Produkts, der sich in seinem DT widerspiegelt, umfasst unter anderem Entwicklung, Herstellung, Inbetriebnahme, Betrieb, Schulung, Qualitätssicherung, Instandhaltung und Entsorgung. Dabei tragen Hersteller, Betreiber und Serviceanbieter zur Wertschöpfung bei. Diese umfassende Integration macht deutlich, warum das Konzept des DT als revolutionäres Kernstück der Industrie 4.0 betrachtet wird.

Das Konzept wurde bereits 2003 im Kontext des Produktlebenszyklusmanagements (PLM) eingeführt. Seitdem hat sich die Informationstechnologie rasant weiterentwickelt – sowohl in der Entwicklung und Wartung physischer Produkte als auch beim Design und der Simulation ihrer virtuellen Gegenstücke. Virtuelle Modelle sind heute hochdetaillierte Abbilder physischer Objekte. Zudem hat sich die Datenerfassung von manuellen, papierbasierten Methoden zu sensorgestützten, digitalen Verfahren gewandelt [Grieves, 2015].

Im Maschinen- und Anlagenbau, aber auch in vielen anderen Bereichen, gibt es zahlreiche Anwendungen für DT. In der vorausschauenden Wartung von CNC-Maschinen beispielsweise überwachen sie Verschleiß und Betriebsbedingungen, um Wartungsintervalle zu optimieren und ungeplante Ausfälle zu vermeiden. In der Produktionsoptimierung analysieren sie Materialflüsse, Energieverbrauch und Effizienz, um Produktionsanlagen gezielt zu verbessern. Ein weiteres Beispiel ist die 3D-Visualisierung von Robotersystemen, bei der DT Bewegungsabläufe simulieren, Kollisionen vermeiden und Prozesse optimieren. Diese Anwendungen steigern die Effizienz, senken Kosten und erhöhen die Betriebssicherheit. Auch in Thermoprosessanlagen gewinnen DT an Bedeutung.

## 6 DT-Arten

Je nach Detailgrad und Komplexität des abzubildenden physischen Objekts bieten verschiedene Arten von DT – wie in **Abbildung 1** dargestellt – unterschiedliche funktionale Möglichkeiten. Der größte Unterschied zwischen diesen DT liegt in ihrem jeweiligen Anwendungsbereich. Häufig existieren zudem verschiedene Arten von DT innerhalb eines Systems oder Prozesses nebeneinander.

---

<sup>18</sup> Ein DT ist primär ein digitales Modell, das physische Systeme widerspiegelt, während ein CPS ein umfassendes System ist, das physische und digitale Komponenten direkt koppelt. In der Praxis können CPS und DTs zusammenwirken: Der Digitale Zwilling kann als Bestandteil eines CPS fungieren, indem er Daten bereitstellt und Simulationen durchführt, während das CPS die Echtzeitsteuerung übernimmt.

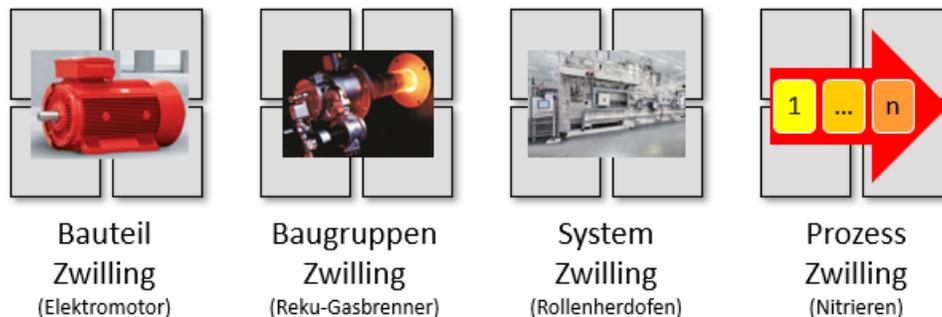


Abbildung 1: Arten des DT

## 6.1 Bauteil-Zwilling oder Teile-Zwilling

Bauteil-Zwillinge sind die Grundeinheit eines DT, die das kleinste Beispiel eines funktionierenden Systems darstellt. Teile-Zwillinge sind grob damit vergleichbar, beziehen sich aber auf Bauteile mit einer untergeordneten Bedeutung. Für Thermoprozessanlagen ist ein digitaler Bauteil-Zwilling vor allem für die Nutzungsphase relevant.

### 6.1.1 Ausfallkritische mechanische Bauteile

Besonders wertvolle oder ausfallkritische mechanische Bauteile werden durch DT überwacht, um ihr Verhalten, ihre Belastbarkeit und Lebensdauer zu analysieren. Ein Bauteil gilt insbesondere dann als ausfallkritisch, wenn ein Defekt gravierende wirtschaftliche Verluste nach sich zieht, beispielsweise durch Produktionsausfälle.

Ein Beispiel ist ein Durchstoßer, dessen DT Kräfte, Reibung und den Verschleiß der Zahnräder erfasst (Level 1) und so die Lebensdauer optimiert. Bei einer Wälzlagerung überwacht der DT Belastungen, Temperatur und Schmierungsbedingungen (Level 2), um Ausfälle frühzeitig zu erkennen. Eine Turbinenschaukel eines Gasumwälers wird hinsichtlich Strömungsdynamik, Materialermüdung und thermischer Belastung simuliert (Level 3), um Leistung und Langlebigkeit zu gewährleisten.

Diese DT optimieren Wartungsintervalle, verhindern Ausfälle und verbessern die Konstruktion mechanischer Bauteile.

### 6.1.2 Elektromechanische Bauteile

Elektromechanische Bauteile sind beispielsweise Servoantriebe, deren DT die Bewegungssteuerung, Regelparameter und Verschleißanalyse modelliert um präzise und zuverlässige Steuerungen in automatisierten Prozessen zu gewährleisten. Ein weiteres Beispiel sind asynchrone Elektromotoren (vgl. Abbildung 1), deren DT den Stromverbrauch, das Drehmoment und die Temperaturentwicklung überwachen, um Effizienz und Wartungsbedarf zu optimieren. Ein drittes Beispiel sind Last-Schaltrelais, deren DT die Schaltzyklen, Stromflüsse und mögliche Kontaktabnutzung simulieren, um eine längere Lebensdauer und eine verbesserte Betriebssicherheit zu ermöglichen.

### 6.1.3 Elektronische Bauteile

DT für elektronische Bauteile sind für die Instandhaltung von Thermoprozessanlagen meist uninteressant, da elektronische Bauteile in der Regel keinem mechanischen Verschleiß unterliegen und, wenn überhaupt, eher zufällig ausfallen. Zudem steht der erforderliche Aufwand für ihre Überwachung meist in keinem wirtschaftlichen Verhältnis zum Nutzen. Eine Ausnahme sind Leistungstransistoren, bei denen der DT das Schaltverhalten, den Stromfluss und die Wärmeentwicklung überwacht, um Energieverluste zu minimieren und die Betriebssicherheit zu erhöhen.

Der eigentliche Nutzen von DT für elektronische Bauteile liegt eher in deren Entwicklung. Durch Simulationen können elektronische Bauteile präziser ausgelegt, ihre Zuverlässigkeit erhöht und ihre Wartungsstrategien gezielter geplant werden.

## 6.2 Baugruppen-Zwilling

Wenn zwei oder mehr mechanische, elektromechanische oder elektronische Bauteile zusammenarbeiten, bilden sie eine Baugruppe. Mit Baugruppen-Zwillingen kann man die Interaktion dieser Bauteile untersuchen und eine Fülle von Leistungsdaten erstellen, die verarbeitet und dann in umsetzbare Erkenntnisse umgewandelt werden können. Baugruppen-Zwillinge bieten als System Transparenz in Bezug auf die Interaktion von Bauteilen und können Leistungsverbesserungen vorschlagen. Für Thermoprossanlagen ist ein digitaler Baugruppen-Zwilling vor allem für die Nutzungsphase relevant. Baugruppen Zwillinge in Thermoprossanlagen sind beispielsweise Gasumwälzer, Transport- und Türantriebe oder rekuperative Gasbrenner (vgl. Abbildung 1).

## 6.3 System-Zwilling

Ein System-Zwilling bildet eine Baugruppe, ein gesamtes funktionelles System von zwei oder mehreren Baugruppen oder eine Anlage digital ab, indem er die Interaktionen zwischen mehreren Baugruppen integriert. Er ermöglicht in DT-Level 2 - vgl. Kapitel 7.3 DT-Level 2: Prognosen und Szenarien - eine umfassende Analyse der Systemdynamik, Optimierung der Abläufe und Vorhersage von potenziellen Ausfällen oder Engpässen. System Zwillinge in Thermoprossanlagen sind beispielsweise, wenn in einem Ölhärtebad eine Pendelbewegung und eine Ölumlagerung zusammen ein System bilden.

## 6.4 Prozess-Zwilling

Ein Prozess-Zwilling ist die digitale Abbildung eines aller Bauteile, Baugruppen und Systeme eines Prozesses, beispielsweise einen Härteprozesses eines metallischen Bauteils.

Er ermöglicht in Level 3 - vgl. Kapitel 7.4 DT-Level 3: Simulationen und Prognosen - die Simulation, Analyse und Optimierung von Abläufen in Echtzeit, um Effizienzsteigerungen und Qualitätsverbesserungen zu erzielen. Prozess Zwillinge sind beispielweise ein Härteofen der zusammen mit der Temperatur- und C-Pegelregelung und eines variablen Transportantriebs oder einer variablen Verweilzeit gestaltenden Einfluss auf einen Prozess ausüben und dieser Prozess durch Veränderung der einzelnen Parameter im DT simuliert und optimiert werden kann.

## 7 DT-Level

Der DT-Level beschreibt den Reifegrad oder die Funktionalität eines DT. Ob eine Einteilung in DT-Level sinnvoll ist, bleibt eine Ermessenssache. In diesem Beitrag dienen die DT-Level dazu, ihre Unterschiede deutlicher herauszuarbeiten. Wie in **Abbildung 2** dargestellt, unterscheidet die überwiegende Literatur mehrere Level, wobei ein niedrigerer Level die Voraussetzung für einen höheren bildet.

Level 0 Digitaler Schatten<sup>19</sup>: Statische digitale Repräsentation ohne Echtzeitdaten oder Interaktion.

Level 1 Monitoring: Echtzeit-Datenübertragung von der physischen zur digitalen Welt zur Überwachung von Zuständen.

Level 2 Szenarien: Analyse von Daten mit Was-wäre-wenn-Szenarien zur Entscheidungsunterstützung.

Level 3 Simulationen: Hochentwickelte Simulationen mit bidirektionaler Interaktion zur Vorhersage und Optimierung.

---

<sup>19</sup> Der Begriff „digitaler Schatten“ wird in der Literatur uneinheitlich definiert. Dem Autor erscheint es jedoch zumindest plausibel, dass der digitale Schatten hierarchisch unterhalb des DT steht, da er gewissermaßen keine eigenständige Existenz besitzt.

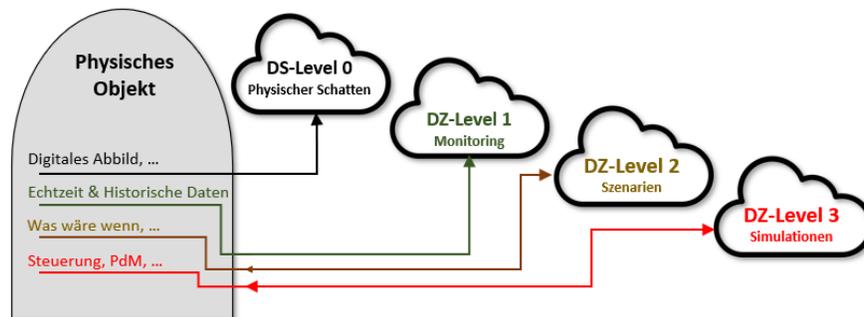


Abbildung 2: DT-Level

Kennzeichnend für alle DT-Level ist die Verwendung von „Standardsoftware, beispielsweise für Was-wäre-wenn-Szenarien und Simulationen. An dieser Stelle ist es auch wichtig hervorzuheben, dass Funktionen auf Level 2 und 3 in häufig die Mitwirkung von Data Scientisten (vgl. Kapitel 8 Exkurs: Die Rolle des Data Science) erfordern, um ihr Potenzial vollständig auszuschöpfen. Zum heutigen Stand sind Level-2- und Level-3-Funktionen – abgesehen von wenigen Ausnahmen – jedenfalls eher nicht automatisiert.

## 7.1 DT-Level 0: Digitaler Schatten

Der Digitale Schatten (DS) ist unter den DT eine Ausnahme. Er bildet zwar den Zustand eines realen physischen Systems digital ab, erfasst aber keine Betriebs- und Maschinendaten. Ein DS ist insofern eine Vorstufe des ersten Levels eines DT mit geringer Funktionalität. Er ist in der Regel auf Ersatzteilinformationen beschränkt. Dies umfasst auch Betriebsanleitungen, Zeichnungen und Zertifikate. Er findet insbesondere in der Instandhaltung Verwendung und beinhaltet alle wichtigen Daten zum Betrieb, Wartung, Reparatur und Ersatz in der Regel von Bauteilen und Baugruppen. Verallgemeinert könnte man auch sagen, dass ein digitaler Schatten einer heute üblichen Bauteilinformation genügt<sup>20</sup>. Ein DS kann in jeden DT integriert werden.

Für die Wartung, Instandhaltung und als Ersatzteilinformation sind vor allem bestimmte Aspekte der digitalen Repräsentation eines elektromechanischen Bauteils von Bedeutung. Zunächst spielen geometrische Daten wie 3D-Modelle und 2D-Zeichnungen eine zentrale Rolle. Sie ermöglichen eine präzise Identifikation und den Austausch von Bauteilen. Diese Daten erleichtern sowohl Reparaturen als auch die Montage von Ersatzteilen. Zudem sind Materialinformationen wichtig, da sie Aufschluss darüber geben, welche Materialien für das Bauteil verwendet wurden. Dies ist entscheidend, um bei einem Austausch die richtigen Ersatzmaterialien auszuwählen und sicherzustellen, dass das Bauteil über die richtigen mechanischen Eigenschaften verfügt. Auch Informationen zur Oberflächenbehandlung, wie etwa Korrosionsschutz oder Lackierungen, sind relevant, da sie Hinweise zur Pflege und Wartung des Bauteils liefern. Ebenso bedeutend sind die elektrischen Eigenschaften des Bauteils, da diese Kennwerte das Verhalten des Bauteils im Stromkreis bestimmen. Sie sind essentiell für die Fehlerdiagnose und zur Identifikation von Problemen. Schaltpläne sind ebenfalls von hoher Bedeutung. Sie erleichtern die Fehlersuche und helfen bei der Wartung. Funktionale Informationen wie die maximal zulässige Leistung, Effizienz und Betriebsbedingungen sind für die Wartung ebenfalls wichtig, um sicherzustellen, dass das Bauteil nicht überlastet wird und die richtigen Betriebsbedingungen eingehalten werden. Diese Daten helfen auch bei der Auswahl von alternativen Ersatzteilen, die den gleichen Leistungsanforderungen entsprechen.

<sup>20</sup> Anders als hier beschrieben, wird als ein digitaler Schatten eines Maschinenbauteils häufig auch als eine datengestützte Darstellung seines aktuellen Zustands, die ausschließlich auf bereits erfassten und gespeicherten Messdaten beruht, bezeichnet. Während der digitale Zwilling eine interaktive, bidirektionale Verbindung zwischen dem physischen Objekt und seinem virtuellen Modell ermöglicht, bildet der digitale Schatten bei dieser Interpretation vergangenheitsbezogene Daten ab, ohne direkten Einfluss auf das reale Bauteil zu nehmen. Dabei werden über Sensoren Parameter wie Temperatur, Vibrationen, Lastwechsel oder Verschleiß in Echtzeit oder in festgelegten Intervallen aufgezeichnet.

### 7.1.1 Mindestanforderungen an einen Digitalen Schatten

Ein Digitaler Schatten, d.h. ein DT in Level 0 sollte für die Instandhaltung alle relevanten Daten enthalten, um eine effiziente Wartung und Ersatzteilbevorratung zu ermöglichen.

Die Asset-Typen definieren standardisierte Parameter für Bauteile (z. B. Motor, Pumpe, Ventil). Dazu gehören zunächst identifikationsbezogene Informationen wie die eindeutige Artikelnummer, Hersteller- und Lieferantenangaben, Produktbezeichnung sowie ggf. Serien- oder Chargennummern. Um eine kontinuierliche Verfügbarkeit zu gewährleisten, sollten auch Nachbestellmengen, Lieferzeiten und bevorzugte Lieferanten hinterlegt sein, sowie Informationen zu alternativen oder kompatiblen Ersatzteilen. Zusätzlich sollten Kosteninformationen berücksichtigt werden, darunter Stückpreis, Einkaufshistorie, Garantiebedingungen und Rückgabeoptionen. Schnittstellen zu ERP- Systemen erleichtern die automatische Disposition und Bestellung.

Weitere wichtige Informationen sind Abmessungen, Gewicht, Befestigungsoptionen, Materialeigenschaften. Ergänzt werden diese durch digitale Modelle (z. B. CAD-Daten) sowie zugehörige Dokumentationen wie technische Zeichnungen, Hersteller-Bedienungsanleitungen und Zertifizierungen .

Für elektromechanische und elektronische Bauteile auch elektrische Eigenschaften wie Betriebsspannung, Nennstrom, Leistung berücksichtigt werden. Weitere essenzielle Informationen sind Betriebsbedingungen wie zulässige Temperaturen und Schutzart (IP-Klasse)

Darüber hinaus sollte eine DT-Level 1 die zulässigen Umgebungsbedingungen, besonders die Umgebungstemperatur und die Luftfeuchtigkeit enthalten.

Für die vorbeugende Wartung essenzielle Informationen sind bauteilspezifisch vorgegebene Wartungsmaßnahmen und -Intervalle.

Zustandsveränderungen sind sowohl ein Kennzeichen als auch der Namensgeber der zustandsorientierten Instandhaltung. Sie können teilweise indirekt über Zustandssensoren, beispielsweise durch die Messung von Schwingungen, erfasst werden, oft ist dies jedoch nur im Rahmen einer Zustandsinspektion möglich. Zustandsrückmeldungen wie in Kapitel 11.1.2 Rückmeldungen von Zustandsinspektionen beschrieben sind essentiell. Dabei stellt sich die Frage, worauf es bei einer solchen Inspektion ankommt und wie sichergestellt werden kann, dass Instandhalter die richtigen Merkmale von Abnutzung und Verschleiß identifizieren und diese nachvollziehbar bewerten. Entsprechende bauteilspezifische Abnutzungsmerkmale müssen als Vorgabe für die Instandhaltung spezifiziert werden.

Statistische Lebensdauerdaten sind entscheidend für die Beurteilung der Zuverlässigkeit und Lebensdauer von Bauteilen. Zu den wichtigsten Kennzahlen gehört die mittlere Zeit bis zum Ausfall (MTTF – Mean Time to Failure), die beschreibt, wie lange ein nicht reparierbares Bauteil im Durchschnitt funktionsfähig bleibt. Für reparierbare Systeme ist hingegen die mittlere Zeit zwischen zwei Ausfällen (MTBF – Mean Time Between Failures) von Bedeutung, da sie die durchschnittliche Betriebszeit zwischen zwei Störungen angibt. Eine weitere wichtige Kenngröße ist die B10-Lebensdauer, die angibt, nach welcher Betriebszeit zehn Prozent der Bauteile ausgefallen sind, sowie die B50-Lebensdauer, die die Medianlebensdauer beschreibt.

Zur Modellierung der Lebensdauerverteilung wird häufig die Weibull-Verteilung verwendet, da sie verschiedene Arten von Ausfällen abbilden kann. Je nach Formparameter  $\beta$  unterscheidet man zwischen Frühausfällen, zufälligen Ausfällen mit konstanter Ausfallrate und verschleißbedingten Ausfällen mit steigender Ausfallrate. Die Exponentialverteilung eignet sich für Bauteile mit konstanter Ausfallrate, während die Log-Normal-Verteilung oft dann verwendet wird, wenn die Lebensdauer durch mehrere zufällige Einflussfaktoren bestimmt wird [Steck-Winter, 2024].

Ein weiteres zentrales Merkmal ist die Ausfallrate ( $\lambda$ , Hazard Rate), die beschreibt, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass ein Bauteil in einem bestimmten Zeitintervall ausfällt. In diesem Zusammenhang ist auch die Zuverlässigkeit  $R(t)$  relevant, die angibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Bauteil bis zu einem bestimmten Zeitpunkt noch funktionsfähig ist.

Für eine genauere Lebensdaueranalyse sind Methoden zur Prognose der Restlebensdauer (Remaining Useful Life, RUL) von Bedeutung. Diese ermöglichen eine vorausschauende Wartung auf Basis von Zustandsdaten und historischen Ausfallmustern<sup>21</sup>.

Zusammenfassend sind statistische Lebensdauerdaten essenziell für die Optimierung von Wartungsstrategien, die Reduzierung von Stillstandszeiten und die Erhöhung der Betriebssicherheit. Durch die Kombination von Kennzahlen wie MTTF, MTBF, Ausfallrate und Zuverlässigkeitswahrscheinlichkeit können Unternehmen die Lebensdauer ihrer Bauteile präzise analysieren und gezielt verbessern. Allerdings stehen statistische Lebensdauerdaten nur selten zur Verfügung. Es mangelt auch an statistischen Daten, weil es meist nur wenige gleiche Bauteile in einer Anlage mit vergleichbaren Einsatzbedingungen gibt. Siehe hierzu auch Absatz „Statistische Vorteile durch Anlagen- und Firmenübergreifende- Datenerfassung“ weiter hinten in diesem Beitrag.

Ebenso wichtig sind Schnittstellen zur Kommunikation (vgl. Kapitel 10 Schnittstellen) und deren Parametrierung.

Für elektronische Bauteile wie Mikrocontroller, Frequenzumrichter und elektronische Regler spielen zudem programmierbare Parameter eine wichtige Rolle.

Die Kenntnis der verwendeten Firmware oder Software ist wichtig, um sicherzustellen, dass bei der Wartung die richtigen Versionen verwendet werden und das Bauteil korrekt in das System integriert bleibt. Kommunikationsprotokolle zwischen Bauteilen und Steuerungseinheiten sind ebenfalls notwendig, um einen reibungslosen Austausch von Informationen und die Integration von Ersatzteilen zu gewährleisten.

## 7.2 DT-Level 1: Monitoring und periodische Wartung

Ein Level-1-DT dient in erster Linie dem Monitoring und der Zustandsüberwachung eines physischen Objekts oder Systems in Echtzeit, der von jedem Ort über das Internet erreicht werden kann. Die Hauptfunktionen eines Level-1-DT bestehen in der Echtzeit-Datenerfassung, der Überwachung von Betriebszuständen und der Fehlererkennung. Er ermöglicht eine transparente Sicht auf den aktuellen Zustand eines Systems, bietet aber noch keine tiefgehenden Analysen oder Simulationen, wie sie in höheren Levels verfügbar sind. Ein DT-Level 1 beinhaltet daher in kontinuierlicher Echtzeit Aufzeichnung aller variablen Daten und Information seines digitalen Schattens. Er muss diese Daten integrieren und verarbeiten, eine visuelle Überwachung des Anlagenzustands ermöglichen, Abweichungen automatisch erkennen und entsprechende Warnmeldungen ausgeben sowie das digitale Modell der Anlage dynamisch aktualisieren, sodass stets eine präzise, aktuelle und zuverlässige Abbildung des realen Betriebs gewährleistet ist.

Ebenso muss der DT auf Level 1 verschiedene Daten und Informationen erfassen. Dazu gehören die Betriebsstunden seit der Inbetriebnahme, Aufzeichnungen über durchgeführte Wartungsmaßnahmen sowie historische Daten über die Zeit. Zudem müssen die Anzahl und Häufigkeit von Starts und Stopps sowie gegebenenfalls Drehrichtungsumkehr erfasst werden. Ergänzend sind Informationen über ausgetauschte Bauteile und deren jeweilige Austauschzeitpunkte zu dokumentieren.

Ein Level-1-DT ermöglicht eine auf Betriebsdauern basierende Wartung statt fester Zeitpläne, indem er den idealen Zeitpunkt für Instandhaltungsmaßnahmen bestimmt und so Kosten sowie Ressourcen spart.

## 7.3 DT-Level 2: Prognosen und Szenarien

Im Vergleich zu einem Level-1-DT erweitert ein Level-2-DT das Monitoring um prognostische Fähigkeiten<sup>22</sup>, ohne eine vollständige bidirektionale Interaktion wie in Level 3 zu ermöglichen. Ein Level-

---

<sup>21</sup> In der mechanischen Beanspruchungsanalyse werden zudem Wöhlerkurven (S-N-Kurven) verwendet, um die Lebensdauer eines Bauteils unter zyklischer Belastung vorherzusagen. Die Restlebensdauer kann auch durch temperatur- und lastabhängige Modelle, wie die Arrhenius-Gleichung oder die Miner-Regel, ermittelt werden.

<sup>22</sup> Prognose hat das Ziel, zukünftige Ereignisse oder Entwicklungen basierend auf bestehenden Daten und Trends vorherzusagen. Sie nutzt in der Regel statistische Modelle oder Algorithmen, um die wahrscheinlichste Entwicklung zu schätzen.

2-DT nutzt Echtzeit- und historische Daten, um Was-wäre-wenn-Szenarien<sup>23</sup> zu analysieren und Prognosen zu erstellen. Sie ermöglichen eine präzise, virtuelle Nachbildung physischer Anlagen und Maschinen und integrieren Echtzeitdaten sowie historische Informationen. Diese digitalen Repräsentationen bieten die Möglichkeit, Wartungsstrategien in einer risikobasierten und datengestützten Weise zu optimieren. Durch die kontinuierliche Überwachung von Betriebsparametern wie Temperatur und Vibration können vorausschauende Wartungsmaßnahmen präzise geplant werden. Die Hauptfunktionen umfassen Datenanalyse, Simulation von Alternativen und Entscheidungsunterstützung. Hierfür stehen beispielhaft die beiden nachfolgend beschriebenen Szenarien:

### 7.3.1 Virtuelle Tests neuer Betriebsparameter

Virtuelle Tests neuer Betriebsparameter mit einem Level-2-DT bieten zahlreiche Vorteile gegenüber traditionellen Tests an physischen Objekten. Der größte Vorteil ist die Sicherheit: Da virtuelle Tests in einer risikofreien digitalen Umgebung durchgeführt werden, besteht keine Gefahr für physische Anlagen oder Unfälle. Besonders bei der Erprobung neuer Betriebsparameter, die die reale Anlage beeinträchtigen könnten, ist dies von Bedeutung.

Ein weiterer Vorteil ist die Kosteneffizienz. Traditionelle Tests erfordern den Einsatz realer Anlagen, was mit hohen Kosten für Energie, Verschleiß und Material verbunden ist. Virtuelle Tests benötigen keine physischen Ressourcen und können mehrfach ohne zusätzliche Kosten durchgeführt werden.

Virtuelle Tests sparen zudem Zeit, da Testumgebung und Parameter schnell angepasst werden können. Im Gegensatz dazu erfordern physische Tests langwierige Vorbereitungen und sind anfällig für Verzögerungen.

Die Flexibilität virtueller Tests ermöglicht es, verschiedene Szenarien schnell zu testen. Änderungen können sofort vorgenommen werden, während physische Tests jede Änderung manuell erfordern.

Ein weiterer Vorteil ist die präzisere Datenanalyse und -prognose. Virtuelle Tests ermöglichen eine detaillierte Sammlung und Auswertung von Daten, was genauere Vorhersagen des Systemverhaltens erlaubt. Dies ist bei traditionellen Tests oft nur mit hohem Aufwand möglich.

Abschließend bietet die Skalierbarkeit virtueller Tests den Vorteil, dass sie auf verschiedene Systeme gleichzeitig angewendet werden können, während bei physischen Tests jede Anlage individuell getestet werden muss.

### 7.3.2 Schulung des Wartungspersonals

Die Mitarbeiterschulung mit einem DT-Level 2 bietet zahlreiche Vorteile gegenüber traditionellen Schulungen an physischen Objekten. Eine der größten Stärken ist die risikofreie Lernumgebung: Es entstehen keine Schäden oder Unfälle, da keine echten Maschinen oder Systeme verwendet werden. Zudem entfallen hohe Kosten für Ausrüstungen und Materialien, und Betriebszeiten, die bei traditionellen Schulungen verloren gehen würden, können effizienter genutzt werden.

Ein weiterer Vorteil ist die Flexibilität: Schulungen können jederzeit und von jedem Ort aus erfolgen, wodurch Reisen und teure Aufenthalte entfallen. Der DT ermöglicht realistische Simulationen, die mit physischen Objekten schwer reproduzierbar wären. Szenarien wie extreme Fehlerzustände oder Notfälle können sicher und mehrfach geübt werden, ohne Gefahren.

Die Schulung kann an die individuellen Bedürfnisse der Mitarbeitenden angepasst werden, indem Lerninhalte in verschiedenen Schwierigkeitsgraden angeboten werden. Echtzeit-Feedback erlaubt eine sofortige Analyse und Verbesserung der Leistung, was bei physischen Objekten schwieriger wäre. Der DT liefert detaillierte Einblicke in den Lernfortschritt.

Ein weiteres Plus ist die Skalierbarkeit: Ein DT kann vielen Mitarbeitenden gleichzeitig zugänglich gemacht werden, was die Effizienz und Reichweite der Schulung erhöht. Im Gegensatz dazu sind traditionelle Schulungen oft auf eine begrenzte Teilnehmerzahl angewiesen, was die Effektivität

---

<sup>23</sup> Szenarien beschreiben verschiedene mögliche zukünftige Zustände, die sich unter bestimmten Annahmen oder Bedingungen entwickeln könnten. Sie werden verwendet, um verschiedene Handlungsmöglichkeiten zu erforschen und die Auswirkungen von unterschiedlichen Entscheidungen oder Ereignissen zu verstehen.

einschränken kann. Schließlich ermöglicht der DT eine nahezu unbegrenzte Wiederholbarkeit von Übungen, ohne zusätzliche Ressourcen zu erfordern, was bei physischen Schulungen teuer und aufwendig wäre.

## 7.4 DT-Level 3: Simulationen und Prognosen

Ein Level-3-DT geht über die reine Analyse hinaus und ermöglicht dynamische Simulationen<sup>24</sup> und Prognosen sowie eine bidirektionale Interaktion zwischen physischer und digitaler Welt.

Die Hauptfunktionen eines Level-3-DT liegen in der präzisen Simulation komplexer Systeme, der Optimierung durch Echtzeit-Feedback, der Vorhersage von Systemverhalten unter verschiedenen Bedingungen und der teilweisen oder vollständigen Automatisierung von Entscheidungen und Prozessen. Im Vergleich zu Level 2 ermöglicht Level 3 nicht nur die Analyse von Szenarien, sondern auch deren direkte Umsetzung in die physische Welt.

Laut VDI-Statusreport vom Februar 2020 werden Simulationen „integraler Bestandteil im gesamten Lebenszyklus, von der Planung über Design und Implementierung bis zum Betrieb und Service“ und erweitern bestehende Wertschöpfungsketten, schaffen neue Netzwerke und ermöglichen innovative Geschäftsmodelle. Aktuell bestehen jedoch noch Einschränkungen: Während detaillierte Analysemöglichkeiten auf Komponentenebene vorhanden sind, sind die Fähigkeiten auf Systemebene begrenzt. Modelle und Simulationen werden nur eingeschränkt wiederverwendet, und spätere Änderungen im Engineering werden in früheren Modellen nicht nachgepflegt. Zudem sind Simulationen nur partiell und isoliert in den Konstruktionsprozess integriert, eine direkte Verbindung zwischen Modellen, Simulationen und realen physischen Systemen fehlt. Betriebsparallele Simulationen kommen bislang kaum oder gar nicht zum Einsatz [VDI/VDE, 2020].

### 7.4.1 Predictive Maintenance

Predictive Maintenance (PdM) kombiniert Condition Monitoring, manuelle Rückmeldungen, Lebensdauerdaten, Statistik und maschinelles Lernen, um Verschleißmuster zu analysieren und Ausfälle präzise vorherzusagen [Steck-Winter, 2024]. In Verbindung mit einem Level-3-DT und einem Computerized Maintenance Management System (CMMS) entsteht ein leistungsfähiges Instandhaltungsmanagementsystem. Der DT wird kontinuierlich mit Echtzeit- und Lebensdauerdaten aktualisiert, wodurch eine präzise Zustandsüberwachung und Simulationen zur Vorhersage von Verschleiß und Restlebensdauer (RUL) ermöglicht werden.

Neben automatisch erfassten Sensordaten sind manuelle Zustandsrückmeldungen essenziell (vgl. Kapitel 11.1.2 Rückmeldungen von Zustandsinspektionen, da nicht alle Verschleißerscheinungen messtechnisch erfassbar sind. Diese Rückmeldungen ergänzen die Datenbasis des DT, verbessern die Diagnosegenauigkeit und helfen, versteckte Abnutzungsmuster zu identifizieren. PdM verarbeitet diese Sensordaten, Lebensdauerdaten und manuellen Rückmeldungen, um den optimalen Wartungszeitpunkt zu bestimmen. Das CMMS nutzt die Prognosen zur automatischen Erstellung von Wartungsaufträgen, optimiert die Ersatzteilverfügbarkeit und dokumentiert alle Maßnahmen systematisch.

Durch diese Integration werden ungeplante Stillstandzeiten minimiert, da Probleme frühzeitig erkannt werden. Wartungsmaßnahmen erfolgen bedarfsgerecht statt nach festen Intervallen, wodurch Ressourcen effizienter genutzt und Kosten gesenkt werden. Die kontinuierliche Analyse aller verfügbaren Daten maximiert die Anlagenverfügbarkeit und verbessert die Wartungsstrategie langfristig. Predictive Maintenance nutzt die volle Funktionalität eines Level-3-DT, indem es Echtzeitüberwachung, Simulationen und vorausschauende Wartungsstrategien miteinander verknüpft.

---

<sup>24</sup> Eine Simulation ist eine Nachbildung von Prozessen oder Systemen, die unter bestimmten Bedingungen ablaufen, um das Verhalten des Systems zu verstehen oder zu testen. Sie kann verschiedene Szenarien einbeziehen und verwendet mathematische Modelle oder digitale Zwillinge, um das System in einer kontrollierten, virtuellen Umgebung nachzubilden.

#### 7.4.2 Simulation eines Wärmebehandlungsprozesses

Ein weiteres Beispiel für einen DT auf Level 3 ist die Simulation des gesamten thermischen Prozesses, von der Wärmeübertragung bis zur Temperaturverteilung. Der kontinuierliche Abgleich von realen Betriebsdaten mit dem digitalen Modell erlaubt die frühzeitige Erkennung von Abweichungen und das Identifizieren von Optimierungspotenzialen.

#### 7.4.3 Virtuelle Inbetriebnahme

Die virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) mit einem DT ermöglicht es, Maschinen, Anlagen oder Produktionssysteme bereits vor der physischen Implementierung in einer digitalen Umgebung zu testen, zu optimieren und mögliche Fehler frühzeitig zu identifizieren. Dies reduziert den Aufwand für die reale Inbetriebnahme, verkürzt Stillstandszeiten und minimiert Kosten. Dabei wird ein dynamischer, simulationsfähiger DT des geplanten Systems erstellt, der mechanische, steuerungstechnische und elektrische Komponenten umfasst. Durch die Integration von Echtzeit-Simulationen mit der geplanten Steuerungssoftware lassen sich sämtliche Automatisierungsprozesse bereits vor der physischen Umsetzung testen [Bitcom, 2015], [Scheifele, 2019], [VDI/VDE 3693, 2016], [Verl, et al, 2024]. Nach einer Befragung des VDMA in 2017 lag der Anteil der Unternehmen mit wachsendem und stark wachsendem Bedarf VIBN schon damals bei 56% und damit an erster Stelle des zukünftigen Bedarfs<sup>25</sup> [VDMA, 2017].

Zu den wichtigsten Vorteilen zählt die frühzeitige Fehlererkennung, da Steuerungslogik, Sensorik und Aktorik bereits im virtuellen Modell geprüft werden. Dadurch können Fehler in der SPS-Programmierung oder Kollisionen in der Mechanik behoben werden, bevor sie in der Realität auftreten. Dies verkürzt die reale Inbetriebnahme erheblich und spart Kosten, da Änderungen in der Simulation deutlich günstiger sind als an physischen Maschinen. Zudem ermöglicht die Simulation eine Optimierung von Taktzeiten, Materialflüssen und Bewegungsabläufen, bevor die Anlage aufgebaut wird. Auch die Qualität der Software steigt, da SPS-Programme und HMI-Logiken unter realistischen Bedingungen getestet werden. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, Bediener und Wartungspersonal bereits vor der realen Inbetriebnahme an der simulierten Anlage zu schulen.

Die virtuelle Inbetriebnahme mit DT wird in zahlreichen Branchen eingesetzt. In der Automobilindustrie werden Montagelinien und Robotersysteme vorab getestet, im Maschinenbau erfolgt die Validierung von Maschinensteuerungen und Bewegungsabläufen.

#### 7.4.4 Simulationsgestützte Analysen zur Bewertung von Wartungsstrategien?

Simulationsgestützte Analysen spielen eine entscheidende Rolle bei der Bewertung von Wartungsstrategien, da sie fundierte Entscheidungen über Instandhaltungsmaßnahmen ermöglichen.

Zur Bewertung der Effizienz und Wirtschaftlichkeit kommen verschiedene Simulationsmethoden zum Einsatz. Die Monte-Carlo-Simulation<sup>26</sup> ermöglicht die stochastische Modellierung<sup>27</sup> von Ausfallzeiten und Wartungsprozessen, während agentenbasierte Simulationen<sup>28</sup> das Verhalten einzelner Komponenten im

---

<sup>25</sup> Da nicht zwischen Serien- und kundenspezifischen Maschinen unterschieden wird, stellt sich die Frage, welche Herstellergruppe den größten Nutzen erwartet. Serienhersteller haben aufgrund der hohen Wiederverwendbarkeit ihrer DT zwar den geringsten Aufwand, aber auch den geringsten Nutzen, da ihnen das physische Verhalten ihrer Maschinen bereits bekannt ist. Daher ist anzunehmen, dass insbesondere Sonderanlagenhersteller einen hohen Nutzen aus der VIBN ziehen.

<sup>26</sup> Eine Monte-Carlo-Simulation ist eine stochastische Methode zur numerischen Lösung komplexer Probleme, bei der durch wiederholte Zufallsexperimente Wahrscheinlichkeitsverteilungen und erwartete Ergebnisse ermittelt werden.

<sup>27</sup> Stochastische Modellierung ist eine Methode zur mathematischen Beschreibung von Systemen oder Prozessen, die zufällige Variablen und Wahrscheinlichkeitsverteilungen einbezieht, um Unsicherheiten und Variabilitäten realitätsnah abzubilden.

<sup>28</sup> Eine agentenbasierte Simulation ist ein Modellierungsansatz, bei dem individuelle autonome Einheiten (Agenten) mit bestimmten Regeln und Verhaltensweisen interagieren, um komplexe Systeme und emergente Phänomene realitätsnah zu simulieren

System nachbilden. Systemdynamische Modelle<sup>29</sup> analysieren langfristige Wechselwirkungen zwischen Systemelementen, und die diskrete Ereignissimulation<sup>30</sup> bildet Wartungsabläufe als eine Abfolge von Ereignissen ab. Wichtige Einflussfaktoren in der Simulation sind Fehlerraten, Lebensdauerprognosen, Ausfallkosten, Ersatzteilverfügbarkeit und Produktionsverluste durch Stillstände.

DT ermöglichen es, „Was-wäre-wenn“-Szenarien zu simulieren, um verschiedene Wartungsstrategien zu testen und ihre Auswirkungen auf die Gesamtverfügbarkeit und Kosten zu analysieren.

DT bieten außerdem eine gemeinsame Datenbasis für Ingenieure, Instandhaltungsteams und Management, was die Zusammenarbeit und Entscheidungsfindung verbessert. Sie integrieren IoT-Technologien und KI-gestützte Datenanalysen, um Wartungsstrategien in Echtzeit zu optimieren.

## 8 Exkurs: Die Rolle des Data Science

Data Science ist ein interdisziplinäres Feld zur Analyse großer Datenmengen, um Erkenntnisse zu gewinnen und fundierte Entscheidungen zu treffen. Es kombiniert Statistik, Mathematik, Informatik und Künstliche Intelligenz (KI) zur Erfassung, Verarbeitung und Interpretation von Daten. Wichtige Methoden sind maschinelles Lernen, Deep Learning<sup>31</sup>, Datenvisualisierung und prädiktive Analysen<sup>32</sup>. Data Science findet Anwendung in zahlreichen Bereichen, um Muster zu erkennen, Prozesse zu optimieren und neue Geschäftsmodelle zu entwickeln.

In Verbindung mit DT eröffnen sich weitreichende Möglichkeiten. Als virtuelle Abbilder physischer Systeme generieren DT enorme Datenmengen, deren Analyse Prozesse effizienter gestaltet, Wartung optimiert und zukünftige Entwicklungen simuliert. So ermöglicht Machine Learning in DT die vorausschauende Wartung (Predictive Maintenance), indem Daten analysiert und Muster erkannt werden, die auf mögliche Ausfälle hinweisen. Simulationsbasierte Szenarien helfen zudem, Betriebsstrategien zu testen und die Lebensdauer von Maschinen zu maximieren.

Die für DT und Data Science relevanten Daten stammen aus verschiedenen Quellen. SPS und IoT-Geräte liefern Echtzeitdaten zu Betriebszuständen, Umgebungsbedingungen und Belastungen, während historische Daten aus Datenbanken und ERP-Systemen Einblicke in vergangene Betriebszustände und Wartungshistorien bieten. Externe Daten, etwa aus Wetterdiensten oder Marktentwicklungen, helfen, externe Einflussfaktoren in die Analysen einzubeziehen. Die Integration dieser Datenquellen ermöglicht detaillierte Modellierungen und präzise Vorhersagen des Systemverhaltens.

Die Erstellung DT erfordert interdisziplinäres Fachwissen. Data Scientists spielen dabei eine wichtige, aber nicht alleinige Rolle. DT entstehen durch die Kombination von Sensordaten, physikalischen Modellen und Simulationen, weshalb Experten aus Ingenieurwissenschaften, Informatik, Datenanalyse und Systemarchitektur zusammenarbeiten. Data Scientists sind besonders gefragt, wenn es darum geht, gesammelte Daten zu analysieren, Muster zu erkennen und Anomalien zu identifizieren. Ihre Algorithmen für maschinelles Lernen und KI sind essenziell für Predictive Maintenance, Prozessoptimierung und zur Entscheidungsunterstützung.

Neben der Entwicklung eigener Modelle passen Data Scientists auch bestehende Analyse- und Simulationssoftware an den jeweiligen Anwendungsfall an. Durch die gezielte Parametrisierung und Erweiterung bestehender Werkzeuge können sie individuelle Anforderungen berücksichtigen und so optimale Lösungen für spezifische Problemstellungen entwickeln. Zudem sind sie in der Lage, ad hoc

---

<sup>29</sup> Systemdynamische Modelle sind mathematische Modelle, die die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Variablen in einem dynamischen System mithilfe von Rückkopplungsschleifen, Beständen und Flüssen beschreiben, um langfristige Entwicklungen und komplexe Zusammenhänge zu analysieren

<sup>30</sup> Eine diskrete Ereignissimulation ist eine Modellierungsmethode, bei der ein System als eine Abfolge diskreter Ereignisse simuliert wird, die zu bestimmten Zeitpunkten auftreten und den Zustand des Systems verändern

<sup>31</sup> Deep Learning ist ein Teilbereich des maschinellen Lernens, der künstliche neuronale Netze mit vielen Schichten verwendet, um komplexe Muster und Zusammenhänge in großen Datenmengen zu erkennen und zu verarbeiten

<sup>32</sup> Prädiktive Analysen sind datengetriebene Methoden, die statistische Algorithmen und maschinelles Lernen nutzen, um auf Basis historischer Daten zukünftige Ereignisse oder Trends vorherzusagen

über Standardanalysen hinausgehende Simulationen und Auswertungen zu erstellen, wenn besondere Fragestellungen eine flexible und datengetriebene Herangehensweise erfordern.

Für die eigentliche Erstellung eines komplexen DT sind jedoch manchmal weitere Fachkräfte erforderlich. Systemingenieure und Domänenexperten modellieren das physische System, Softwareentwickler und IoT-Spezialisten setzen die technische Infrastruktur um, während Simulations- und Regelungstechniker für mathematische Modelle und physikalische Simulationen verantwortlich sind. Ein bedeutender Fortschritt in diesem Bereich sind Stores mit DT auf DT-Level 3 (vgl. Kapitel 12 Stores mit digitalen Zwillingen), die eine Wiederverwendung bereits geprüfter DT ermöglichen und so erheblich zur Zeit- und Kostenreduktion beitragen.

Zusammenfassend sind Data Scientists nicht zwingend für die Erstellung DT erforderlich, spielen aber eine zentrale Rolle bei deren Analyse, Optimierung und intelligenter Nutzung. Ihre Expertise ist besonders wertvoll, wenn KI-gestützte Entscheidungsmechanismen und datengetriebene Simulationen integriert werden sollen.

## **8.1 Vorteile durch Anlagen- und Firmenübergreifende- Datenerfassung**

Die anlagen- und firmenübergreifende Datenerfassung bei der Lebensdaueranalyse von Maschinenbauteilen bietet erhebliche statistische Vorteile, insbesondere im Hinblick auf die Datenqualität, Genauigkeit und Vorhersagegenauigkeit von Ausfallmustern. Durch die Erfassung großer Datenmengen aus unterschiedlichen Anlagen und Unternehmen entsteht eine breitere Datenbasis, die es ermöglicht, statistisch belastbare Aussagen über die Zuverlässigkeit und Lebensdauer von Bauteilen zu treffen.

Ein wesentlicher Vorteil besteht in der höheren Datenvielfalt, da Bauteile unter verschiedenen Betriebsbedingungen, Belastungsprofilen und Umwelteinflüssen analysiert werden können. Dadurch lassen sich generalisierbare Modelle für die Lebensdauerabschätzung entwickeln, die nicht nur für einzelne Unternehmen, sondern für ganze Branchen relevant sind. Zudem werden extreme Betriebsbedingungen und seltene Ausfallereignisse besser erfasst, die in einzelnen Unternehmen möglicherweise nicht häufig genug auftreten, um zuverlässige statistische Analysen zu ermöglichen.

Ein weiterer Vorteil ist die verbesserte Prognosegenauigkeit für Wartungsstrategien. Durch die große Datenbasis lassen sich präzisere Weibull-Analysen, Ausfallratenberechnungen und Restlebensdauerprognosen (RUL – Remaining Useful Life) durchführen. Predictive-Maintenance-Modelle profitieren von einer besseren Erkennung von Mustern, wodurch ungeplante Stillstände reduziert und Wartungsintervalle optimiert werden können. Unternehmen können so von einer effizienteren Instandhaltungsstrategie profitieren, die Stillstands Kosten minimiert und die Anlagenverfügbarkeit maximiert.

Jedoch gibt es auch Herausforderungen und Nachteile. Eine übergreifende Datenerfassung erfordert einheitliche Standards für Datenformate, Schnittstellen und Erfassungsmethoden, um Inkonsistenzen und ungenaue Vergleiche zu vermeiden. Zudem bestehen Datenschutz- und Wettbewerbsbedenken, da Unternehmen möglicherweise nicht bereit sind, sensible Betriebs- und Lebensdauerinformationen mit externen Partnern zu teilen. Die Anonymisierung und sichere Verwaltung der Daten ist daher eine essenzielle Voraussetzung für eine erfolgreiche Umsetzung.

Ein weiterer möglicher Nachteil ist die Heterogenität der Daten, da Maschinen und Bauteile in verschiedenen Unternehmen und Anlagen unter unterschiedlichen Belastungen, Wartungsstrategien und Produktionsprozessen eingesetzt werden. Dies kann dazu führen, dass sich Erkenntnisse nicht immer direkt übertragen lassen, wenn sie nicht ausreichend differenziert betrachtet werden.

## **8.2 Effizienzsteigerung durch präzisere Vorhersagen und Optimierungen.**

Ein DT ermöglicht eine erhebliche Effizienzsteigerung durch präzisere Vorhersagen und Optimierungen in verschiedenen Bereichen. Durch die kontinuierliche Erfassung und Analyse von Echtzeitdaten können Unternehmen den Zustand und die Leistung von Maschinen, Anlagen oder Prozessen genau überwachen. Dies führt zu einer besseren Planbarkeit von Wartungen, da Predictive-Maintenance-Algorithmen

frühzeitig Verschleiß oder potenzielle Ausfälle erkennen und notwendige Maßnahmen einleiten können, bevor es zu Produktionsunterbrechungen kommt.

Darüber hinaus erlaubt ein DT eine optimierte Ressourcennutzung, indem er den Energieverbrauch, Materialeinsatz und Prozessabläufe analysiert und Anpassungsvorschläge liefert. Beispielsweise kann durch Simulationen ermittelt werden, wie sich verschiedene Parameter auf die Produktionsqualität auswirken, sodass gezielt Optimierungen vorgenommen werden können. Dies reduziert Ausschuss, senkt Kosten und steigert die Gesamteffizienz.

Ein weiterer Vorteil ist die Beschleunigung von Entwicklungs- und Testprozessen. Produkte können digital simuliert und getestet werden, bevor physische Prototypen gefertigt werden, was sowohl Zeit als auch Material spart. Unternehmen profitieren zudem von einer verbesserten Entscheidungsfindung, da datenbasierte Analysen genauere Prognosen ermöglichen, etwa zur Produktionsauslastung oder zu Marktanforderungen.

## 9 Plattformen

Die Daten eines DT werden je nach Sicherheits-, Skalierungs- und Verfügbarkeitsanforderungen entweder lokal, in der Cloud oder in einer hybriden Umgebung gespeichert. Die Speicherung on-premises, also auf firmeneigenen Servern oder in dedizierten Rechenzentren, bietet zwar maximale Kontrolle über die Daten, erfordert jedoch höheren Wartungsaufwand und kann Skalierungsprobleme mit sich bringen.

Für DT existieren mittlerweile etablierte Plattformen, beispielsweise Microsoft Azure Digital Twins, AWS IoT TwinMaker, Siemens MindSphere<sup>33</sup> bzw. Insights Hub oder 3DEXPERIENCE PTC ThingWorx. Viele Unternehmen setzen zunehmend auf solche spezialisierten Cloud-Speicherlösungen, um von der Flexibilität, Skalierbarkeit und globalen Verfügbarkeit zu profitieren. Diese ermöglichen nicht nur die Speicherung großer Datenmengen, sondern auch leistungsfähige Analysen durch künstliche Intelligenz und Big Data-Technologien. In der Praxis kommen häufig hybride Lösungen zum Einsatz, bei denen sensible Daten lokal gespeichert werden, während weniger kritische oder aggregierte Informationen in die Cloud übertragen werden. Dieser Ansatz kombiniert die Vorteile der Sicherheit mit der Möglichkeit, moderne Cloud-Analyse- und Simulationsfunktionen zu nutzen.

### 9.1 Kosten für die Speicherung eines digitalen Zwillings in Cloud-Diensten

Die Kosten für die Speicherung eines digitalen Zwillings in Cloud-Diensten wie AWS, MindSphere oder Azure hängen von verschiedenen Faktoren ab, darunter die Anzahl der Entitäten, die Menge der gespeicherten und verarbeiteten Daten sowie die Häufigkeit der API-Aufrufe und Abfragen. AWS IoT TwinMaker berechnet die Nutzung basierend auf API-Aufrufen, der Anzahl der digitalen Entitäten und den ausgeführten Abfragen, wobei verschiedene Preisstufen angeboten werden. Siemens MindSphere stellt eine Plattform zur Verfügung, deren Kosten je nach Projektumfang variieren. Microsoft Azure Digital Twins richtet seine Preisgestaltung an der Anzahl der gesendeten Nachrichten und der ausgeführten Abfragen aus. Da die tatsächlichen Kosten stark von den individuellen Anforderungen und der Datenverarbeitung abhängen, empfiehlt es sich, die Preisrechner der jeweiligen Anbieter zu nutzen oder ein individuelles Angebot einzuholen.

Trotz der möglichen Kosten lohnt sich in der Regel ein digitaler Zwilling aufgrund der zahlreichen Vorteile, die er bietet, insbesondere dann, wenn man sich bei umfangreichen DT auf ausfallkritische Bauteile beschränkt.

## 10 Schnittstellen

DT in Plattformen wie MindSphere sind eng mit industriellen IT-Systemen verbunden, insbesondere ERP-, MES-, SCADA- und CMMS-Systemen. Die Integration mit ERP-Systemen ermöglicht eine nahtlose Verbindung zwischen Maschinen- und Unternehmensprozessen. Echtzeitdaten aus dem digitalen Zwilling

---

MindSphere wurde im Juni 2023 in Insights Hub umbenannt. Somit existiert der Name MindSphere nicht mehr. Für die in diesem Whitepaper beschriebenen Beispiele wird noch der ursprüngliche Name MindSphere verwendet.

fließen in die Bestandsverwaltung, Auftragsplanung und Ressourcensteuerung ein, wodurch Produktionsabläufe optimiert werden.

Mit MES-Systemen erfolgt eine direkte Anbindung an die Fertigungssteuerung. Produktionsdaten werden in Echtzeit analysiert, um Qualitätssicherung, Rückverfolgbarkeit und Effizienzsteigerung zu unterstützen. Kennzahlen wie OEE, Taktzeiten und Ausschussraten lassen sich dadurch präzise auswerten.

SCADA-Systeme profitieren von der Integration mit digitalen Zwillingen, da Sensordaten kontinuierlich erfasst und für die Prozesssteuerung genutzt werden. Dies ermöglicht eine verbesserte Fernüberwachung, Alarmmanagement sowie eine detaillierte Analyse historischer Trends zur Optimierung von Betriebszuständen.

In der Instandhaltung sind digitale Zwillinge eng mit CMMS-Systemen verknüpft. Sensordaten und KI-gestützte Analysen unterstützen die vorausschauende Wartung, indem sie Wartungsaufträge automatisch generieren, Verschleißzustände überwachen und Ersatzteilmanagement optimieren. Die Kombination dieser Systeme mit digitalen Zwillingen führt zu einer effizienteren Nutzung von Anlagen, reduziert ungeplante Stillstände und verbessert die Gesamtanlageneffektivität.

### 10.1 Schnittstelle Physisches Objekt – DT (Plattform)

Eine Schnittstelle für einen DT muss vielseitig und leistungsfähig sein, um verschiedene Arten von Daten effizient zu erfassen, zu verarbeiten und bereitzustellen. Sie sollte eine hohe Datenkompatibilität aufweisen und unterschiedliche Formate unterstützen. Zudem ist eine nahtlose Integration in bestehende Systeme erforderlich, um strukturierte und unstrukturierte Daten einbinden zu können.

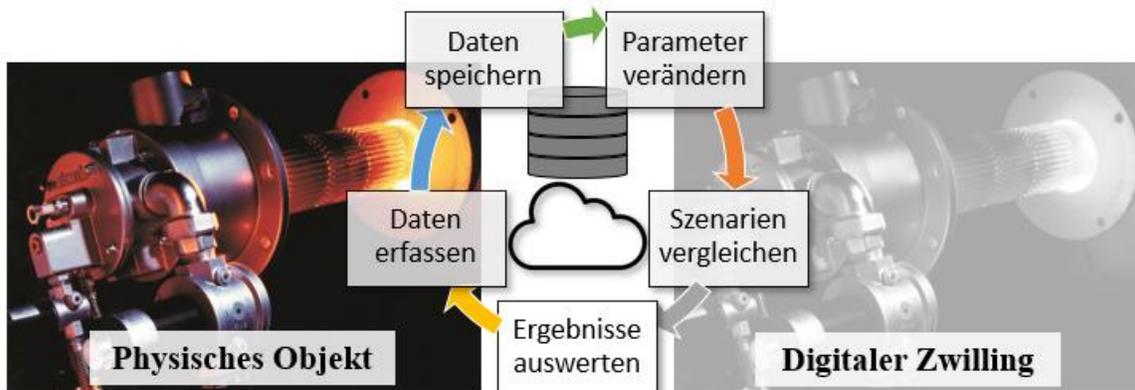


Abbildung 3: Schnittstelle zwischen einem physischen Objekt und seinem DT

Für die Echtzeit-Datenerfassung und -verarbeitung muss die Schnittstelle in der Lage sein, kontinuierlich Betriebsdaten über IoT-Sensoren<sup>34</sup> und/oder besonders SPS aufzunehmen und hohe Datenraten mit minimaler Latenz zu verarbeiten. Eine Vorverarbeitung und Aggregation der Daten können helfen, die Effizienz zu steigern. Ebenso wichtig ist die Unterstützung gängiger um eine zuverlässige Kommunikation zwischen verschiedenen Systemen zu ermöglichen.

Sicherheitsaspekte spielen eine zentrale Rolle, weshalb die Schnittstelle über ein detailliertes Berechtigungsmanagement verfügen sollte. Zusätzlich sind eine lückenlose Protokollierung und eine revisions sichere Nachverfolgbarkeit von Änderungen essenziell, um Audit-Anforderungen zu erfüllen.

Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Skalierbarkeit und Flexibilität der Schnittstelle. Sie sollte modular aufgebaut sein, um problemlos neue Datenquellen integrieren zu können. Zudem muss sie sowohl mit verschiedenen Hardware-Plattformen und Betriebssystemen als auch in Cloud- oder Edge-Umgebungen kompatibel sein.

---

<sup>34</sup> Ein IoT-Sensor ist ein Sensor, der in das Internet of Things (IoT) eingebunden ist. Das bedeutet, dass er Daten erfasst, verarbeitet und über ein Netzwerk an andere Geräte oder eine Cloud sendet.

Schließlich sind Standardisierung und Interoperabilität essenziell, um eine langfristige Nutzbarkeit sicherzustellen. Offene Schnittstellen ermöglichen zudem die Integration mit Drittanwendungen, wodurch die Funktionalität des DT weiter ausgebaut werden kann.

## 10.2 Schnittstelle Steuerungsprogramm (SPS) – DT-Plattform

Die Nutzung eines bestehenden SPS-Programms oder die Neuprogrammierung der Steuerlogik im DT hängt von dessen Zielsetzung ab. Wenn eine realitätsnahe Simulation erforderlich ist, kann das vorhandene SPS-Programm direkt eingebunden werden. Moderne Simulationsplattformen oder SPS-Emulatoren ermöglichen die Verwendung realer Steuerprogramme, wodurch das Verhalten des physischen Objekts unter tatsächlichen Betriebsbedingungen, einschließlich Sicherheitsverriegelungen und Signalen, getestet werden kann. Soll der DT jedoch zusätzliche Funktionalitäten bieten, beispielsweise die Simulation von Fehlerzuständen, Optimierungsalgorithmen oder KI-basierte Steuerungen, kann es notwendig sein, die Steuerlogik separat zu implementieren. Eine separate Programmierung ist ebenfalls erforderlich, wenn der digitale Zwilling unabhängig von der SPS für virtuelle Inbetriebnahmen (vgl. Kapitel 7.4.3 Virtuelle Inbetriebnahme) oder simulationsgestützte Analysen (vgl. Kapitel 7.4 DT-Level 3: Simulationen und Prognosen) genutzt werden soll.

## 10.3 Schnittstelle DT (Plattform) – CMMS und andere Terminals (Internet)

Die Schnittstelle zwischen der Plattform für DT und einem CMMS (vgl. Kapitel 11 CMMS: Das Instandhalter Terminal) muss eine zuverlässige und effiziente Integration gewährleisten. Zentrale Anforderungen sind Datenkompatibilität und reibungsloser Austausch, idealerweise durch standardisierte Formate und semantische Interoperabilität, sodass Zustände, Wartungsereignisse und Bauteile einheitlich benannt sind.

Echtzeitfähigkeit ist entscheidend. Eine API-basierte Anbindung ermöglicht bidirektionale Kommunikation, sodass Warnungen automatisch Wartungsaufträge im CMMS auslösen. Ein Mechanismus zur Offline-Synchronisation stellt sicher, dass Daten auch bei Netzwerkausfällen erfasst und später synchronisiert werden.

Die Schnittstelle sollte Condition Monitoring unterstützen und Machine-Learning-Modelle für Predictive Maintenance einbinden. Ein effizientes Fehlermanagement erkennt Abweichungen sofort und eskaliert sie als Wartungsaufträge, während abgeschlossene Wartungsarbeiten zurückgespielt werden.

Sicherheit erfordert ein rollenbasiertes Benutzer- und Rechtekonzept mit Authentifizierungsmethoden. Skalierbarkeit und Flexibilität sind essenziell, um zukünftige Erweiterungen und die Anbindung von ERP- oder MES-Systemen zu ermöglichen. Cloud- und On-Premise-Unterstützung berücksichtigt unterschiedliche IT-Strategien, während Performance-Optimierung eine effiziente Datenverarbeitung sicherstellt.

Verschiedene Nutzergruppen, etwa Instandhaltungsmanagement oder Bediener, erhalten über Terminals stationär oder mobil Zugriff auf relevante Daten. Bediener können Echtzeit-Zustandsdaten einsehen und Störungen melden, während das Instandhaltungsmanagement Wartungspläne und Ersatzteilverfügbarkeiten verwaltet.

Ein Webbrowser-Zugriff ermöglicht flexible Nutzung ohne Softwareinstallation, abgesichert durch Authentifizierung. So können Wartungsteams oder externe Dienstleister ortsunabhängig Daten abrufen und Wartungsmaßnahmen dokumentieren. Je nach IT-Strategie ist eine Cloud-, hybride oder On-Premise-Lösung denkbar, wobei Letztere für sicherheitskritische Infrastrukturen vorteilhaft ist.

## 11 CMMS: Das Instandhalter Terminal

CMMS (Computerized Maintenance Management System) und eine Plattform für DT (vgl. Kapitel 9 Plattformen) arbeiten Hand in Hand, um die Instandhaltung von Anlagen effizienter und intelligenter zu gestalten. Das CMMS enthält eine strukturierte Stückliste, die alle Bauteile und Baugruppen bzw. deren DT in einem Anlagenteil benutzerfreundlich in einer logischen Anordnung auflistet, so dass Instandhalter schnell auf DT und weitere relevante Informationen zugreifen können. Die baumartige Struktur erlaubt eine intuitive schnelle Navigation.

Für den Zugriff auf Bauteildokumentationen und gesammelte Instandhaltungsdaten eignen sich robuste, flexible und einfach bedienbare mobile Geräte. Tablets mit Industriegehäuse sind aufgrund ihrer großen Displays ideal für die Visualisierung komplexer Daten wie CAD-Zeichnungen oder Sensordaten. Sie ermöglichen eine intuitive Touch-Bedienung und präzise Eingaben für Zustandsbewertungen. Smartphones sind kompakt, leicht und stets griffbereit. Mit leistungsfähigen Sensoren, Kameras und Spracherkennung erleichtern sie die schnelle Erfassung und Weiterleitung von Zustandsmeldungen, insbesondere in Kombination mit Instandhaltungs-Apps.



Abbildung 4: Mobiles Terminal für die Instandhaltung

Für anspruchsvolle Industrieumgebungen bieten robuste Handheld-Computer und Industrie-Smartphones zusätzlichen Schutz gegen Staub, Wasser und Stöße. Ihre integrierten Barcodescanner oder RFID-Leser ermöglichen eine schnelle Identifikation von Bauteilen und eine lückenlose Dokumentation. Augmented-Reality-Brillen projizieren DT direkt ins Sichtfeld des Technikers, wodurch Bauteilinstruktionen oder Live-Daten in Echtzeit angezeigt werden. Dies erleichtert komplexe Wartungsarbeiten, da beide Hände frei bleiben. Smartwatches und Wearables gewinnen an Bedeutung, insbesondere für Benachrichtigungen über Maschinenzustände oder die sprachgesteuerte Eingabe von Wartungsberichten.

Die Geräte werden über verschiedene Schnittstellen mit der Plattform für DT verbunden. WLAN bietet eine stabile und schnelle Übertragung, insbesondere in abgesicherten Industrie-Netzwerken. Mobilfunk eignet sich für den Außeneinsatz. In Innenbereichen oder schwer zugänglichen Anlagen sind Bluetooth und NFC sinnvoll, etwa zur Identifikation per RFID-Tag oder für den Datenaustausch mit Sensoren.

Zur effizienten Kommunikation zwischen Maschinen und IT-Systemen kommen IoT-Protokolle zum Einsatz. Diese ermöglichen eine standardisierte, zuverlässige Übertragung von Sensordaten.

Der Zugriff auf die Plattform erfolgt entweder über Webanwendungen für eine plattformunabhängige Nutzung oder über native Apps, die optimierte Performance und Offline-Funktionen bieten. Die Wahl der Verbindungstechnologie hängt von den spezifischen Anforderungen ab: Während WLAN und Mobilfunk für die meisten Szenarien geeignet sind, bieten Bluetooth und NFC Vorteile für Nahbereichsanwendungen, und IoT-Protokolle sowie Edge-Computing ermöglichen eine effiziente Datenübertragung in industriellen Prozessen.

### 11.1.1 Rückmeldungen zur Betriebsdatenerfassung

Rückmeldungen zur servicebezogenen Betriebsdatenerfassung (BDE) erfassen organisatorische und wirtschaftliche Aspekte. Dazu gehören Informationen wie Stillstandszeiten, Reparaturzeiten sowie der Personaleinsatz. Diese Daten dienen vor allem der Planung, Steuerung und Optimierung und werden entweder manuell von Mitarbeitern oder automatisch über ERP- und CMMS-Systeme erfasst.

### 11.1.2 Rückmeldungen von Zustandsinspektionen

Eine Zustandsinspektion erfordert standardisierte Prüfverfahren, um eine objektive Bewertung zu gewährleisten. Instandhalter müssen Abnutzungsmerkmale erkennen und deren Bedeutung richtig einschätzen. Eine systematische Dokumentation ermöglicht es, Trends und Entwicklungen über die Zeit

nachzuvollziehen. Der Einsatz moderner Sensorik und Diagnosewerkzeuge wie Schwingungsanalysen oder Thermografie verbessert die Beurteilung. Klare Entscheidungsrichtlinien mit definierten Grenzwerten oder Handlungsempfehlungen (vgl. Kapitel 7.1.1 Mindestanforderungen an einen Digitalen Schatten) legen fest, wann Maßnahmen erforderlich sind.

Da viele mechanische oder akustische Veränderungen nicht durch Sensoren erfasst werden können, sind manuelle Zustandsrückmeldungen essenziell. Während automatisierte Systeme Parameter wie Temperatur oder Vibration messen, erkennen erfahrene Techniker subtile Abweichungen frühzeitig. Zudem sind spezialisierte Sensoren oft teuer und wirtschaftlich nicht immer sinnvoll. Manuelle Rückmeldungen schließen diese Lücken, liefern Kontext und validieren Diagnoseergebnisse, was eine präzisere Wartungsplanung und höhere Anlageneffizienz ermöglichen.

Eine bauteilbezogene Anleitung hilft, kritische Veränderungen korrekt zu bewerten und Fehleinschätzungen zu vermeiden. So lässt sich systematisch bestimmen, ob eine Abweichung auf normalen Verschleiß oder einen drohenden Defekt hinweist. Dies sorgt für eine konsistente Dokumentation und verbessert die Wartungsstrategie. Ein Ampelsystem erleichtert die Zustandsbewertung: Grün steht für „gut“, Gelb für „kritisch“, Rot für „akut problematisch“. Diese intuitive Kennzeichnung ermöglicht schnelle Entscheidungen, erfordert jedoch klare Kriterien, um subjektive Interpretationen zu vermeiden. Ergänzend können Freitextfelder oder standardisierte Auswahloptionen genutzt werden, um Auffälligkeiten zu dokumentieren und Analysen zu erleichtern.

Ein solches System unterstützt weniger erfahrene Techniker bei der strukturierten Bewertung, fördert die Wissensweitergabe und schafft eine einheitliche Entscheidungsgrundlage für das Instandhaltungsmanagement.

## 12 Stores mit digitalen Zwillingen

Die bisher nicht gestellte Frage ist die nach dem Aufwand, den die Erstellung eines DT mit sich bringt. Es wäre vermessen zu behaupten, dass kein Mehraufwand entsteht – zumindest solange, bis eine Basis an DTs zur Wiederverwendung zur Verfügung steht und die Vorteile von Standardsoftware zum Tragen kommen. Auch eine Beschränkung der DT auf die Instandhaltung alleine steht einem effizienten Einsatz im Wege.

Bauteildatenbanken bzw. Stores helfen, die hohen Kosten für die Entwicklung eines eigenen DTs zu reduzieren und erweitern somit auch das verfügbare Spektrum an DT. Daher bieten viele Hersteller ihre DT über Plattformen wie beispielsweise CADENAS (PartCommunity) an. Dadurch können Ingenieure direkt auf digitale Modelle zugreifen und sie in ihre Konstruktionssoftware integrieren. Bauteil-, Maschinen- und Anlagenhersteller werden in solchen Stores zu Systemintegratoren. Durch die Bereitstellung intelligenter MCAD- und ECAD-Daten, die auf die jeweiligen Kundenbedürfnisse zugeschnitten sind, bieten Komponentenhersteller einen wertvollen Service. Ingenieure möchten sich in erster Linie auf die Entwicklung innovativer Produkte konzentrieren, weshalb sie in der Regel Hersteller bevorzugen, die hochwertige Produktdaten mit allen notwendigen Informationen bereitstellen. Dies erspart sowohl eine zeitintensive Recherche als auch aufwendige Rückfragen zur korrekten Produktkonfiguration beim Anbieter [<https://www.cadenas.de/>].

Darüber hinaus stellt beispielsweise Siemens DT für verschiedene Bauteile, wie Elektromotoren, Frequenzumrichter und Steuerungskomponenten zur Verfügung. Es gibt auch einen sogenannten Application Store, der vorkonfigurierte Lösungen, einschließlich DT, anbietet. Dieser Store enthält eine Sammlung von Anwendungen, die speziell entwickelt wurden, um bestimmte Industrieanforderungen zu erfüllen, und bietet Benutzern vorgefertigte Modelle, Tools und Konfigurationen, die den Aufbau und die Implementierung von DT erleichtern. Im Application Store können Anwender auf Standard-Assets und vorkonfigurierte DT zugreifen, die auf verschiedene Maschinen und Anlagen zugeschnitten sind. Diese DT beinhalten häufig vorgefertigte Modelle zur Überwachung von Maschinenzuständen, zur Durchführung von Predictive Maintenance und zur Analyse von Betriebsdaten.

Bosch Rexroth bietet DT für seine Hydraulik-, Antriebs- und Steuerungssysteme an. Festo stellt DT für pneumatische und elektrische Antriebe bereit, etc..

Ein besonderes Angebot macht TwinStore. TwinStore ermöglicht die virtuelle Inbetriebnahme von Automatisierungslösungen aus vorgefertigten und echtzeitfähigen 4D-Modellen, die das reale Verhalten eingesetzter Hardwarekomponenten abbilden. Der Einsatz vorgefertigter Simulationsmodelle spart Zeit bei der Erstellung von DT und somit auch bei der Simulation bzw. VIBN [TwinStore].

Zusätzlich zu den vorkonfigurierten Modellen bietet der Store auch eine breite Palette von Anwendungen für die Zustandsüberwachung, Datenanalyse, Energie-Management und viele weitere Industriebereiche. Diese Lösungen können je nach den spezifischen Bedürfnissen angepasst und erweitert werden.

## 13 Fazit

Digitale Zwillinge (DT) gewinnen im Maschinen- und Anlagenbau zunehmend an Bedeutung. Laut einer Bitkom-Umfrage (2023) nutzen bereits 44 Prozent der deutschen Industrieunternehmen DT, 8 Prozent planen den Einsatz, und 14 Prozent ziehen ihn in Betracht. 10 Prozent lehnen DT ab, während 20 Prozent sich noch nicht damit beschäftigt haben. Nur 17 Prozent sehen darin einen kurzlebigen Hype [Bitkom, 2023].

Auch nach VDI/VDE werden modellbasierte Verfahren immer wichtiger und finden Anwendung in allen Phasen des Engineerings – von der Konzeption über Implementierung und Validierung bis hin zu Betrieb, Service und Modernisierung. DT entwickeln sich dabei zu essenziellen Bestandteilen realer Produkte. Digitale Artefakte wie Simulationsmodelle werden über Produkt- und Anlagengrenzen hinweg weiterentwickelt, verfeinert und wiederverwendet. Dies ermöglicht eine baureihen-, baugruppen-, modul- oder plattformübergreifende Nutzung, was sowohl im Produktlebenszyklus als auch unternehmensweit Vorteile bringt. Simulationen werden integraler Bestandteil aller Phasen, erweitern Wertschöpfungsketten, schaffen neue Netzwerke und ermöglichen innovative Geschäftsmodelle. Entscheidend für die wirtschaftliche Akzeptanz ist die kontinuierliche Weiterentwicklung und Wiederverwendung von Daten und Modellen [VDI/VDE, 2020].

DT und CPS sind ein wesentlicher Schritt in Richtung Industrie 4.0. Sie ermöglichen den ortsunabhängigen Zugriff auf Echtzeitdaten, wodurch schnelle Reaktionen auf kritische Zustände möglich werden. Die lückenlose Überwachung werthaltiger und ausfallkritischer Bauteile erstreckt sich von der Produktion über die Optimierung des Ersatzteilmanagements bis hin zur Wartungsstrategie. Durch kontinuierliche Zustandsüberwachung lassen sich Verschleißerscheinungen frühzeitig erkennen, während datenbasierte Entscheidungen Wartungsmaßnahmen effizienter und wirtschaftlicher gestalten. Gleichzeitig sorgen DT für Transparenz, indem Wartungshistorien, Betriebsdaten und Fehleranalysen jederzeit nachvollziehbar bleiben. Predictive Maintenance nutzt KI-gestützte Analysen, um ungeplante Ausfälle rechtzeitig zu verhindern. Virtuelle Tests neuer Betriebsparameter ermöglichen eine risikofreie Optimierung der Maschinenleistung, während simulationsgestützte Analysen Wartungsstrategien bewerten und die Anlagenleistung verbessern. Eine detaillierte Fehlerursachenanalyse hilft, Stillstände gezielt zu reduzieren und wiederkehrende Probleme zu vermeiden. Zudem senken Bauteildatenbanken die Entwicklungskosten eines DT und erweitern dessen Anwendungsmöglichkeiten.

## 14 Literatur

[Bitkom, 2015] BITKOM e.V., VDMA e.V., ZVEI e.V. (2015). Umsetzungsstrategie Industrie 4.0: Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0.

[Bitkom, 2023] Digitale Zwillinge werden in der Industrie zum Standard. Presseinformation April 2023.

[Grieves, 2015] Grieves, M.: Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. White Paper, Research Gate, 2015

[Kritzinger, 2018] Kritzinger, W. et al. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. ScienceDirect IFAC Papers On Line 51-11 (2018) 1016–1022

[Lobe, 2024] Lobe, A.: Kann das nicht die Maschine machen? Philosophie Magazin, 2024

[Scheifele, 2019] Scheifele, C. (2019). Plattform zur Echtzeit-Co-Simulation für die virtuelle Inbetriebnahme. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.

[Siemens, 2024] Siemens AG. Whitepaper: Die Transformation der Industrie beschleunigen – mit dem umfassenden Digitalen Zwilling, 2024

[Steck-Winter, 2018] Steck-Winter, H.; Unger, G.: Eine Statusbestimmung für die Thermoprozesstechnik auf dem Weg in die Fabrik der Zukunft. atp edition DIV Deutscher Industrieverlag, 1-2/2018, 60. Jahrgang, 2018 pp. 26-33.

[Steck-Winter, 2024] Steck-Winter, H.; Unger, G.: Vorausschauende Instandhaltung von Thermoprozessanlagen, Handbuch Härtereipraxis Vulkan Verlag GmbH, 4. Ausgabe 2024, Modernisierung und Instandhaltung pp. 228-255.

[TwinStore] TwinStore – Online Plattform für digitale Zwillinge. Abgerufen von: <http://www.twinstore.de>

[VDI/VDE 3693, 2016] VDI/VDE 3693 Blatt 1. (2016). Virtuelle Inbetriebnahme – Modellarten und Glossar. VDI: [www.beuth.de](http://www.beuth.de)

[VDI/VDE, 2020] VDI/VDE. (2020). VDI-Statusreport Februar 2020: Simulation und digitaler Zwilling im Anlagenlebenszyklus: Standpunkte und Thesen.

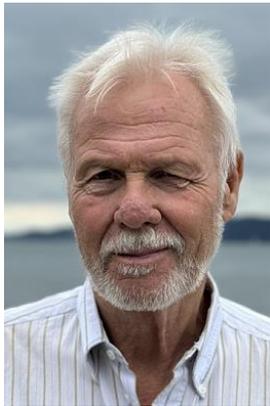
[VDMA, 2017] Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA) (2017) IT-Report Simulation + Visualisierung 2017; Einsatz von Simulationswerkzeugen, Einbindung in die Organisation und Entwicklungstendenzen. VDMA Verlag, Frankfurt a. M.

[VDMA, 2018] VDMA. (2018). Wege zum Digitalen Zwilling: Simulation und Visualisierung im Produktlebenszyklus; Anwendungs- und Nutzenbeispiele aus dem Maschinen- und Anlagenbau. Frankfurt, VDMA Verlag.

[Verl, et al, 2024] Verl, A.; Röck, S.; Scheifele, C.: Echtzeitsimulation in der Produktionsautomatisierung. Beiträge zu Virtueller Inbetriebnahme, Digitalem Engineering und Digitalen Zwillingen, 2024.

## 15 Autor

Dr. Hartmut Steck-Winter, MBA



Bis 2013 technischer Leiter bei AICHELIN Service GmbH,  
jetzt im Ruhestand.

Tel.: 0176-9787 3726

[steck-winter@gmx.de](mailto:steck-winter@gmx.de)

[www.steck-winter.de](http://www.steck-winter.de)