



Aachener Berichte aus dem Leichtbau

Kopplung realer und virtueller Instanzen mittels struktureller Zustandsüberwachung zur Entwicklung Digitaler Zwillinge

Rebecca Richstein



Institut für
Strukturmechanik
und Leichtbau

RWTHAACHEN
UNIVERSITY

Kopplung realer und virtueller Instanzen mittels struktureller Zustandsüberwachung zur Entwicklung Digitaler Zwillinge

Coupling Real and Virtual Instances via Structural Health Monitoring to
Develop Digital Twins

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule
Aachen zur Erlangung des akademischen Grades einer Doktorin der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Rebecca Richstein

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Schröder
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Roßmann

Tag der mündlichen Prüfung: 24.07.2025

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Aachener Berichte aus dem Leichtbau
herausgegeben von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Schröder

Band 1/2026

Rebecca Richstein

**Kopplung realer und virtueller Instanzen mittels
struktureller Zustandsüberwachung zur Entwicklung
Digitaler Zwillinge**

Shaker Verlag
Düren 2026

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2025)

Copyright Shaker Verlag 2026

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

Print-ISBN	978-3-8191-0553-1
PDF-ISBN	978-3-8191-0603-3
ISSN	2509-663X
eISSN	2944-702X

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand unter anderem während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Strukturmechanik und Leichtbau der RWTH Aachen University im Zeitraum von September 2019 bis Dezember 2023. Darüber hinaus begleitete mich dieses Vorhaben bis nach Hamburg, wo ich im Januar 2024 meine Stelle bei Airbus antrat.

Sowohl während meiner Zeit in Aachen als auch in Hamburg durfte ich von vielen Seiten Hilfe und Unterstützung erfahren. Sie alle einzeln zu nennen, würde den Rahmen dieser Danksagung sprengen. Daher möchte ich mich zunächst aus ganzem Herzen bei allen bedanken, die mich auf kürzeren oder längeren Abschnitten dieses Weges begleitet haben, auch wenn sie nachfolgend nicht persönlich genannt werden.

Ein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Schröder, für die vielfältige Unterstützung auf fachlicher wie auch auf persönlicher Ebene. Das mir entgegengebrachte Vertrauen in meine Arbeit und in meine Person haben maßgeblich dazu beigetragen, dass ich diese Dissertation auch über meine Zeit am Institut hinaus erfolgreich fertigstellen konnte. Weiterhin danke ich Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Roßmann für die Übernahme des Korreferats sowie Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Broeckmann für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Die Arbeit an dieser Dissertation hat mich über mehrere Jahre intensiv begleitet und in vielerlei Hinsicht gefordert. Gleichzeitig war sie eine prägende und lehrreiche Zeit, die ich im Rückblick nicht missen möchte. Dies liegt vor allem an den Freundschaften, die in dieser Zeit entstanden sind, sowie an der vielfältigen Unterstützung, die ich auf diesem Weg erfahren durfte und die es mir ermöglicht hat, dieses Vorhaben erfolgreich zum Abschluss zu bringen.

Am Institut hatte ich das große Glück, meine Promotionszeit gemeinsam mit Kolleginnen und Kollegen zu verbringen, die diesen Lebensabschnitt nicht nur durch ihre fachliche Kompetenz, sondern auch durch ihre Herzlichkeit bereichert haben. Ein besonderer Dank gilt den morgendlichen Kaffeerunden, die sich über die Jahre in unterschiedlichsten Konstellationen gefunden haben. Ich danke jeder und jedem Einzelnen für die fachlichen wie auch persönlichen Gespräche, die Motivation geschenkt, Gedanken sortiert und den Arbeitsalltag erheitert haben. Hervorheben möchte ich an dieser Stelle auch mein Erfolgsteam, das in der letzten Phase aus Tobias, Sebastian, Dominik und Helena bestand. Eure Ratschläge und eure Motivation haben bis zuletzt, virtuell bis nach Hamburg, ihre Wirkung entfaltet und den Endspurt entscheidend beschleunigt. Ein besonderer Dank gilt zudem den Mitarbeitenden am Institut, die mir mit ihrer administrativen, technischen oder handwerklichen Arbeit stets hilfreich zur Seite standen.

Ein großer Platz in meinem Herzen gilt meinen Freunden und meiner Familie, die mich nicht nur durch die Promotionszeit sondern auch die vielen weiteren Jahre meines Lebens begleitet haben.

Mein Dank gilt meinen Aachener Freundinnen Janine und Anne für viele schöne Abende und Ablenkungen im Alltag, die immer wieder meine Batterie aufladen. Ebenso danke ich Miri, Katrin und Kristin von Herzen für eine Freundschaft, die Jahrzehnte und Distanzen überbrückt und dabei nie an Tiefe verloren hat. Eure Unterstützung in allen Lebensphasen hat mich stets getragen. Zu wissen, dass ihr immer an meiner Seite seid, ganz gleich, wohin der Wind mich trägt, ist ein großes Geschenk.

Ich danke Susanne, Christoph, Nicolas und Pauline von Herzen für die offenen Arme und den herzlichen Platz, den ich in eurer Familie finden durfte. Mein tief empfundener Dank gilt meinen Eltern, Jutta und Volker, sowie meinem Bruder Christian. Danke für euren Rückhalt, eure bedingungslose Unterstützung und für ein Zuhause, das mir Halt, Werte und Zuversicht fürs Leben geschenkt hat. Ihr seid immer mein sicherer Hafen, ohne euch wäre dieser Weg nicht möglich gewesen.

Mein abschließender und größter Dank gilt dir, Matthias, für deine Ruhe, die mir selbst oft fehlt, für deine Gutmütigkeit, deine Fröhlichkeit und dein großes Herz. Du hast mir in arbeitsintensiven Phasen den Rücken freigehalten und dich über jeden kleinen und großen Erfolg mit mir gefreut. Umso mehr freue ich mich auf die gemeinsame freie Zeit, die vor uns liegt. Danke, dass es dich gibt!

Hamburg, im Januar 2026

Rebecca Richstein

Kurzfassung

Die Digitalisierung revolutioniert technische Systeme und verändert grundlegend, wie diese entworfen, betrieben und überwacht werden. Ein zentraler Aspekt ist der Digitale Zwilling, häufig definiert als eine virtuelle Repräsentation eines realen Objekts, Prozesses oder Systems, die kontinuierlich mit ihrem physischen Gegenstück verbunden ist. In der Strukturmechanik kann er als Werkzeug zur Abbildung, Überwachung und Optimierung von Strukturen dienen.

Die systematische Literaturrecherche zeigt jedoch, dass der Digitale Zwilling in der Strukturmechanik bisher häufig nur in individualisierten Insellösungen und Demonstratoren umgesetzt wird, häufig mit einem Schwerpunkt auf der Zustands- und Strukturüberwachung. Für eine nachhaltige Weiterentwicklung ist ein übergeordnetes Rahmenkonzept erforderlich, das standardisierte Methoden bereitstellt, Wiederverwendbarkeit fördert und den Technologiereifegrad steigert. Zudem muss das zentrale Element für die Kopplung realer und virtueller Instanzen weiterentwickelt werden, einschließlich der Definition klarer Kopplungsgrade und der Integration von Technologien wie Modellierung, Sensorik und IoT, sowie der Skalierung bisheriger Ansätze.

Die zentrale Forschungshypothese dieser Arbeit lautet: SHM ist die notwendige Bedingung für die Kopplung von realen und virtuellen Instanzen und somit für die Erstellung eines Digitalen Zwillings für Strukturkomponenten im Betrieb. Die systematische Charakterisierung der Anforderungen an den Digitalen Zwilling über den gesamten Produktlebenszyklus liefert zwei Archetypen, die den Digitalen Zwilling in der Entwurfs- und Betriebsphase klassifizieren und die Bedeutung realer und virtueller Instanzen verdeutlichen. Darauf aufbauend wird SHM als zentrales Kopplungselement zwischen realen und virtuellen Instanzen erweitert, um Digitale Zwillings-Entitäten (DZE) für individuelle Strukturbauteile zu erzeugen. Die Validierung erfolgt anhand eines Kragarmbeispiels, das die Interaktion zwischen verschiedenen SHM-Ebenen sowie realen und virtuellen Strukturen demonstriert. Zusätzlich wird die Vernetzung der DZE über das Internet of Things (IoT) am Beispiel des Kragarms und der sogenannten DZ-Box verdeutlicht.

Die Ergebnisse zeigen, dass SHM in dieser Funktion als „Enabler-Technologie“ einen entscheidenden Mehrwert für die Nutzung und Weiterentwicklung des Digitalen Zwillings in der Strukturmechanik bietet. Dies eröffnet neue Möglichkeiten zur Verbesserung der Lebensdauer, Betriebseffizienz und Optimierung von Strukturbauteilen.

Abstract

Digitalization is revolutionizing technical systems and fundamentally changing how they are designed, operated, and monitored. A key aspect of this transformation is the Digital Twin, often defined as a virtual representation of a real object, process, or system that is continuously connected to its physical counterpart. In structural mechanics, it can serve as a tool for representing, monitoring, and optimizing structures.

However, systematic literature research reveals that Digital Twins in structural mechanics are often implemented as isolated, customized solutions or demonstrators, frequently focusing on condition and structural monitoring. For sustainable advancement, an overarching framework is required that provides standardized methods, promotes reusability, and increases the technological maturity of these solutions. Additionally, the central element for coupling real and virtual instances must be further developed. This includes defining clear coupling levels, integrating technologies such as modeling, sensors, and IoT, and scaling existing approaches.

The central research hypothesis of this work is that SHM is a necessary condition for the coupling of real and virtual instances and, therefore, for creating a Digital Twin for structural components in operation. The systematic characterization of the requirements for Digital Twins throughout the entire product lifecycle identifies two archetypes, classifying Digital Twins in the design and operational phases and highlighting the significance of real and virtual instances. Building on this, SHM is extended as a central coupling element between real and virtual instances to enable the creation of Digital Twin Entities (DTE) for individual structural components. Validation is carried out using a cantilever beam example, demonstrating the interaction between different SHM levels as well as real and virtual structures. Additionally, the networking of DTEs via the Internet of Things (IoT) is illustrated using the cantilever beam and the so-called DZ-Box.

The results confirm that SHM, in this role, acts as an enabler technology and provides significant added value for the application and further development of Digital Twins in structural mechanics. This opens up new possibilities for improving the lifespan, operational efficiency, and optimization of structural components.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik - Von Strukturen zu Systemen	5
2.1	Strukturen im Leichtbau	5
2.1.1	Betriebsüberwachung, SHM und Leichtbau 4.0	7
2.1.2	Konstruktionsprozesse und Entwurfsmethodiken	8
2.1.3	Wie kommt das alles zusammen? - Der Digitale Faden	16
2.2	Der Digitale Zwilling	18
2.2.1	Begriffsdefinitionen des Digitalen Zwillings	18
2.2.2	Charakterisierungsansätze des Digitalen Zwillings	21
2.3	Der Digitale Zwilling in der Strukturmechanik	28
2.3.1	Methodischer Aufbau der Literaturrecherche	29
2.3.2	Qualitative Auswertung	31
2.3.3	Quantitative Auswertung	34
2.4	Zusammenfassung und Hypothesen dieser Arbeit	39
3	Die zwei Archetypen des Digitalen Zwillings für Strukturen	43
3.1	Der Digitalen Zwilling der Struktur in der Entwurfsphase	44
3.1.1	Einordnung des Entwurfsprozess in die Methodik der VDI 2221	44
3.1.2	Ableiten von Anforderungen für den Digitalen Zwilling im Entwurf	48
3.2	Der Digitale Zwilling der Struktur in der Betriebsphase	54
3.2.1	Kalibrierung und Kopplung realer und digitaler Strukturen	54
3.2.2	Ableiten von Anforderungen für den Digitalen Zwilling im Betrieb	58
3.3	Zusammenhang von Design- und Betriebsphase	59
3.3.1	Datenfluss und Variantenmanagement für Digitale Zwillinge	59
3.3.2	Taxonomische Einordnung der Anforderungen	61
3.3.3	Ableiten der zwei Archetypen des Digitalen Zwillings für Strukturen	64
3.4	Diskussion der Unterhypothese 1	65
4	Verbindung der Instanzen - SHM als zentrales Kopplungselement	69
4.1	Von zwei Instanzen zur Entität des Digitalen Zwillings	69
4.1.1	Datengenerierung von Strukturen	71
4.1.2	Limitation der erreichbaren Kopplung	73
4.1.3	Strukturierung des Rekalibrierungsschrittes	75
4.2	Validierung für ein Kragarmbeispiel	77
4.2.1	Modellierung und Simulation	78

4.2.2	Auswahl des SHM-Systems	79
4.2.3	Messungen und Daten	82
4.3	Diskussion der Unterhypothese 2	86
5	Vernetzte Entitäten - Konnektivität via IoT	89
5.1	Vernetzungspotentiale via IoT	89
5.2	Der Digitale Kragarm in the IoT-basierten Umgebung	94
5.2.1	Kommunikationssetup	94
5.2.2	Auswertungs- und Simulationsmöglichkeiten	98
5.2.3	Erweiterungsmöglichkeiten des IoT-basierten SHM-Systems	100
5.3	Diskussion der Unterhypothese 3	102
6	Schlussfolgerung und Ausblick	105
	Literatur	109
A	Anhang - Glossar	119
B	Anhang - Übersicht Literaturrecherche	121

Abkürzungsverzeichnis

AAS	Asset Administration Shell (Verwaltungsschale)
ADT	Airframe Digital Twin
AR	Augmented Reality
BOM	Bill of Materials (Stückliste)
BOP	Bill of Process (Prozessbeschreibung)
CM	Condition Monitoring (Zustandsüberwachung)
CPS	Cyber-Physische Systeme
DM	Digitales Modell
DMS	Dehnungsmessstreifen
DS	Digitaler Schatten
DT	Digital Twin
DZ	Digitaler Zwilling
DZE	Digitale Zwillings Entität
EDZ	Experimentierbarer Digitaler Zwilling
FEM	Finite Elemente Methode
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
FKV	Faserverstärkte Kunststoffe
HMI	Human-Machine-Interface (Mensch-Maschine-Schnittstelle)
IDTA	International Digital Twin Association
IoT	Internet of Things
KI	Künstliche Intelligenz
LM	Lastmonitoring
MBSE	Model Based Systems Engineering
PHM	Product Health Management
SD	Standard Deviation (Standardabweichung)
SDI	Structural Damage Indicator (Struktureller Schadensindikator)
SE	Systems Engineering

SHM	Structural Health Monitoring
SysML	Systems Modeling Language
TRL	Technologie Readiness Level (Technologiereifegrad)
UH	Unterhypothese
UML	Unified Modeling Language
USDP	Unified Software Development Process
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VR	Virtuelle Realität
V & V	Validierung & Verifizierung
WDP	Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik
WSN	Wireless Sensor Network

Symbolverzeichnis

Zeichen	Einheit	Beschreibung
GRIECHISCHE ZEICHEN		
β	$^{\circ}$	Nulldehnungswinkel
ε	mm/mm	Allgemeine Dehnung
ε_{ND}	mm/mm	Dehnungswert in Richtung der Nulldehnungsrichtung
ε_{LM}	mm/mm	Dehnungswert des Lastmonitoring
ε_{ds}	mm/mm	Dehnungswert an der Sensorposition
μ	-	Beliebige strukturelle Eigenschaften einer Komponente
$\underline{\mu}$	-	Vektor aller betrachteten strukturellen Eigenschaften einer Strukturkomponente
$\underline{\mu}_{Design}$	-	Vektor aller betrachteten strukturellen Eigenschaften einer Strukturkomponente gemäß Designwert
$\underline{\mu}_{real}$	-	Vektor aller betrachteten strukturellen Eigenschaften einer Strukturkomponente, erfasst an der realen Komponente
$\underline{\mu}_{virtuell}$	-	Vektor aller betrachteten strukturellen Eigenschaften einer Strukturkomponente, hinterlegt in der virtuellen Instanz
ν	-	Querkontraktionszahl
σ_{max}	N/mm ²	Maximale Zugfestigkeit
σ_{zul}	N/mm ²	Zulässige Spannung
LATEINISCHE ZEICHEN		
b	mm	Breite
b_{riss}	mm	Breite an der Rissposition
d	mm	Dicke
d_S	mm	Sensorposition
D_{DZ}	-	Datenmenge des Digitalen Zwillings
D_{real}	-	Datenmenge der realen Instanz

Zeichen	Einheit	Beschreibung
D_{virtuell}	-	Datenmenge der initial kalibrierten virtuellen Instanz
E	MPa	Elastizitätsmodul
EI	N/mm ²	Biegesteifigkeit
F	N	Kraft
F_{zul}	N	Zulässige Kraft
$F_{\text{krit,D}}$	N	Zulässige Kraft für einen beschädigten Bauteilzustand
I	mm ⁴	Flächenträgheitsmoment
k	-	Anzahl der Messpunkte
K		Proportionalitätsfaktor
$K_{j,\text{SHM}}$	-	Sensitivität mit der ein SHM-System eine Messgröße j erfassen kann
l	mm	Länge
M	Nmm	Moment
N	-	Stückzahl
S	-	Sicherheitsfaktor
SD, SD_i	-	Standardabweichung, Standardabweichung einer Struktureigenschaft μ_i
t	s	Zeit bzw. Zeitpunkt
t_{R}	mm	Risstiefe
U		Messunsicherheit
w	mm	Durchbiegung
x_{F}	mm	Kraftangriffspunkt entlang der x-Koordinate

1 Einleitung

Die Digitalisierung hat die Art und Weise, wie technische Systeme entworfen, betrieben und überwacht werden, grundlegend verändert. Sie ermöglicht es, immense Datenmengen in kürzester Zeit zu verarbeiten und Systeme in einem Tempo und Umfang zu entwickeln, das vor wenigen Jahrzehnten noch als undenkbar galt. In der aktuellen wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Diskussion ist die Digitalisierung als Zielbild, Herausforderung und Forschungsfeld allgegenwärtig. Sie durchdringt nahezu jeden Aspekt unseres Lebens, von alltäglichen Routinen über die Arbeitswelt bis hin zu den grundlegenden Prozessen der Forschung. Das Themenfeld der Digitalisierung ist breit gefächert und umfasst zahlreiche Konzepte, Technologien und Methoden.

Fragt man ChatGPT „Was sind DIE Digitalisierungsthemen?“ erhält man eine schier unendlich Liste an Begriffen. Angefangen bei digitaler Infrastruktur (5G/6G und Cloudtechnologien) über Daten und Künstliche Intelligenz (Big Data Analytics und Machine Learning) und Digitale Geschäftsmodelle bis hin zu Zukunftstechnologien wie Quantencomputing, Blockchain, Augmented Reality und Metaverse. Auch Industrie 4.0 und Digitale Zwillinge, aufgeführt unter dem Themenblock Automatisierung, dürfen in dieser Auflistung nicht fehlen.

Insbesondere der Digitale Zwilling hat sich in diesem Zusammenhang zu einem zentralen Konzept entwickelt und in den letzten Jahren ein beachtliches wissenschaftliches Interesse geweckt. Seine wissenschaftliche Relevanz, trotz des vergleichsweise jungen Status als Forschungsthema, zeigt sich deutlich in der steigenden Anzahl an Veröffentlichungen, die den Digitalen Zwilling behandeln. Abbildung 1.1 zeigt den Anstieg an Veröffentlichungen mit dem Schlüsselwort „Digital Twin“ oder „Digitaler Zwilling“ im Titel bei der Suche in Scopus. Das Engineering stellt mit 30% den größten Anteil dieser Veröffentlichungen, gefolgt von den Computer Science mit ca. 25%.

Während das Interesse, gemessen an der Anzahl jährlicher Publikationen, von 2016 bis 2021 zunächst exponentiell und dann bis 2023 annähernd konstant gestiegen ist, scheint der Zuwachs seit 2024 abzunehmen. Diese Beobachtung scheint mit dem Modell des Hype Cycles neuer Technologie übereinzustimmen. Dieses Modell, entwickelt von der Marktforschungsfirma Gartner [1], beschreibt die Entwicklung einer Technologie von ihrer Entdeckung über Phasen überzogener Erwartungen und enttäuschter Hoffnungen bis hin zur Etablierung realistischer Anwendungen und breiter industrieller Nutzung. Gemäß dieses Modells kann die Reduktion an jährlichen Publikationen entweder auf enttäuschte Erwartungen oder die Breite industrielle Nutzung zurückgeführt werden, welche keine oder nur wenige wissenschaftliche Weiterentwicklung fordert. Wo stehen wir also mit dem Digitalen Zwilling?

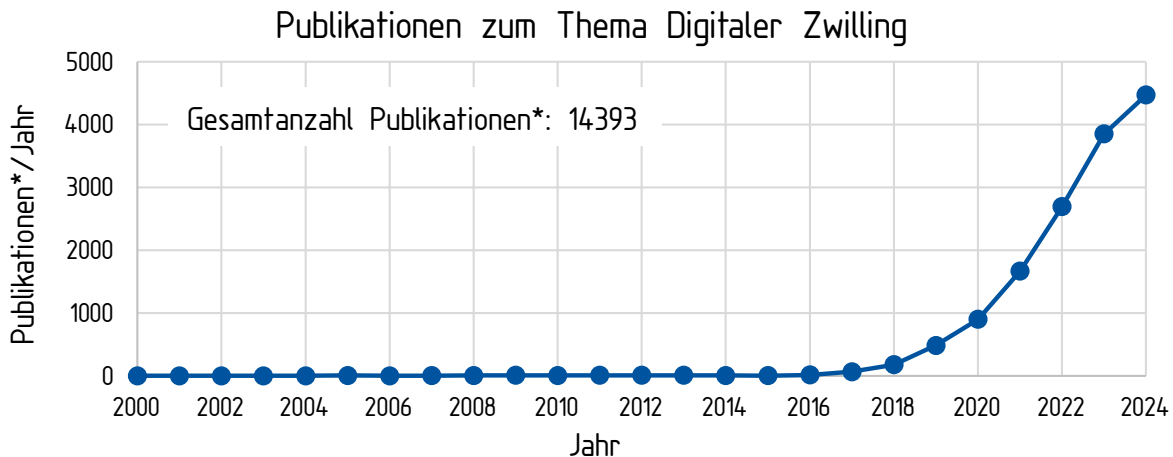


Abb. 1.1: Anzahl der Publikationen (*Limitiert auf Artikel, Reviews und Konferenzbeiträge) mit dem Schlüsselwort „Digital Twin“ oder „Digitaler Zwilling“ im Titel bei der Scopus-Suchanfrage, Anfrage 04.01.2025.

Bei oberflächlicher Betrachtung scheint der Digitale Zwilling ein universeller Alleskönner zu sein: Ob Nachhaltigkeit [2], Sicherheit [3] oder Zustandsüberwachung [4, 5], die Einsatzmöglichkeiten scheinen unbegrenzt. Trotz dieser universellen Einsetzbarkeit wird der Digitale Zwilling in der Praxis stark branchenspezifisch interpretiert. Jede Branche benötigt andere Lösungen, die auf ihre individuellen Prozesse und Ziele abgestimmt sind, wodurch eine universelle Nutzung begrenzt wird. Die Individualisierung des Konzepts spiegelt sich auch in der Vielzahl an Definitionen wieder, die den Digitalen Zwilling immer wieder neu charakterisieren und den daraus resultierenden Versuchen, die entstandenen Definitionen wieder zu vereinheitlichen [6, 7, 8].

Im Kontext dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Strukturmechanik, einem Bereich, in dem der Digitale Zwilling bereits in verschiedenen Anwendungen erfolgreich eingesetzt wird. In der Strukturmechanik hat die Digitalisierung die Herangehensweise an Entwurf, Überwachung und Optimierung grundlegend verändert. Strukturen, die früher lediglich als statische Komponenten verstanden wurden, werden heute zunehmend als intelligente, „fühlende“ Systeme betrachtet, die durch den Einsatz von Sensorik ihren Zustand (in Echtzeit) überwachen können.

Structural Health Monitoring (SHM) ist ein seit Jahren etablierter Forschungsbereich, um den Zustand von Strukturen über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg zu überwachen, Schäden frühzeitig zu erkennen und Wartungsmaßnahmen zu planen und zu optimieren. Mit dem Aufkommen des Digitalen Zwillings erweitert sich der Horizont der Möglichkeiten, den SHM bisher bot. Gerade in hochentwickelten SHM-Konzepten, die eine automatische Wartung und Predictive Maintenance anstreben, zeigt sich eine immer stärkere Annäherung an die oben genannten Zielsetzungen und Methoden des Digitalen Zwillings. Ein entscheidender Unterschied zwischen SHM und dem Digitalen Zwilling zeigt sich jedoch in ihrer jeweiligen Rolle im Lebenszyklus. Während SHM ausschließlich auf den Betrieb fokussiert ist, beginnt das Leben ei-

ner Struktur bereits im Entwurfsprozess. Hier setzen die Potentiale des Digitalen Zwillings an, da er nicht nur im Betrieb, sondern auch während der Planungs- und Entwicklungsphasen einen ganzheitlichen Einsatz ermöglicht. Die Integration des Digitalen Zwillings in den Entwurfsprozess eröffnet die Möglichkeit, Strukturen bereits vor ihrer Fertigung virtuell zu simulieren, zu optimieren und durchgehend zu überwachen. Dies schafft eine lebenszyklusübergreifende Lösung, die den Entwurf und Betrieb nahtlos miteinander verbindet.

Die Bedeutung dieser ganzheitlichen Sichtweise ist insbesondere in der Strukturmechanik offensichtlich. Hier stehen Ingenieur:innen vor der Herausforderung, Strukturen zu entwickeln, die nicht nur leicht und effizient, sondern auch sicher und langlebig sind. Der Entwurfsprozess erfordert daher umfassende Analysen und Simulationen, die das Verhalten der Struktur unter verschiedenen Betriebsbedingungen vorhersagen können. Der Digitale Zwilling kann in dieser Phase als zentrales Werkzeug dienen, um Entwurfsentscheidungen datenbasiert zu treffen und somit bereits in der Planungsphase potentielle Betriebsrisiken zu minimieren.

Im Rahmen dieser Arbeit wird untersucht, wie Digitale Zwillinge für Strukturen SHM-basiert aus der Verbindung von physischen und digitalen Instanzen entwickelt werden können. Diese Kopplung ist essenziell für die Erstellung von Digitalen Zwillingen, die speziell auf die Anforderungen von Strukturkomponenten im Betrieb abgestimmt sind. Diese Arbeit setzt sich das Ziel, eine lebenszyklusübergreifende Betrachtung von Entwurfs- und Betriebsphasen zu ermöglichen, um den Digitalen Zwilling als integratives Werkzeug in der Strukturmechanik zu etablieren. Zu Beginn wird in Kapitel 2 ein Überblick über den Stand der Technik zum Themenschwerpunkt „Strukturen und Systeme“ sowie „Digitale Zwillinge“ gegeben. Aufbauend auf den ermittelten Forschungsbedarfen werden anschließend in Abschnitt 2.4 eine zentrale Forschungshypothese sowie zugehörige Unterhypothesen formuliert. Die nachfolgenden Kapitel widmen sich jeweils der detaillierten Untersuchung einer Unterhypothese.

In Kapitel 3 wird der Begriff „Digitaler Zwilling“ im Kontext der Strukturmechanik umfassend erläutert und taxonomisch eingeordnet. Dabei werden sowohl die Entwurfs- als auch die Betriebsphase betrachtet, um den Bedarf an einer ganzheitlichen Lösung herauszuarbeiten. Diese Definition und Einordnung bilden die Grundlage, um den Digitalen Zwilling auf die spezifischen Anforderungen der Strukturmechanik auszurichten und seine Rolle über den gesamten Lebenszyklus einer Struktur hinweg zu definieren. In Kapitel 4 wird ein SHM-basiertes Rahmenkonzept entwickelt. Dieses Konzept beschreibt, wie die physische und digitale Welt über Methoden des SHM effizient miteinander verbunden werden können. Ziel ist es, Echtzeitüberwachung, datenbasierte Prognosen und eine kontinuierliche Optimierung von Strukturen zu ermöglichen. Dabei wird sichergestellt, dass die Stärken von SHM als Betriebstechnologie nahtlos in die umfassenderen Ansätze des Digitalen Zwillings integriert werden. Abschließend wird in Kapitel 5 die Erweiterung des Struktur-Digitalen Zwillings durch das Internet der Dinge (IoT) untersucht. Die Einbindung von IoT-Technologien ermöglicht eine umfassende Vernetzung realer Instanzen und generiert zusätzliches Wissen über die spezifischen Eigenschaften und Betriebsbedingungen einzelner Bauteile. Diese Integration führt zu einer neuen Ebene der Datenerfassung und -verarbeitung, die nicht nur die Effizienz steigert, sondern auch eine prä-

zisere Individualisierung und Prognose für Strukturen im Betrieb ermöglicht. Die abschließende Bewertung der zentralen Forschungshypothese erfolgt in Kapitel 6. Ziel der Arbeit ist es, durch die detaillierte Untersuchung dieser drei Aspekte einen Beitrag zur wissenschaftlichen und praktischen Weiterentwicklung des Digitalen Zwillings in der Strukturmechanik zu leisten und sein Potential als lebenszyklusübergreifendes Werkzeug umfassend darzustellen.

2 Stand der Technik - Von Strukturen zu Systemen

Die Definition allgemein gebräuchlicher Begriffe stellt oft eine besondere Herausforderung dar, besonders dann, wenn ihre Bedeutung stark vom Kontext abhängt. Dies zeigt sich eindrücklich am Begriff der „Struktur“. Seine Bedeutung ist so breit gefächert, dass eine präzise und universelle Definition kaum möglich erscheint. Noch komplexer wird es, wenn man bedenkt, dass der Begriff „Struktur“ in unterschiedlichen Disziplinen, von Organisationslehren bis hin zu technischen Anwendungen, verschiedene Bedeutungen haben kann.

Im alltäglichen Sprachgebrauch bezeichnet „Struktur“ oft die Anordnung von Elementen, wie beispielsweise in Organisationsstrukturen. Solche allgemeinen Strukturen bilden jedoch auch die Grundlage für spezifischere Betrachtungen in den Ingenieurwissenschaften. Hier wird der Begriff „Struktur“ deutlich enger gefasst und bezieht sich auf physische Konstruktionen, die gezielt entwickelt werden, um Lasten zu tragen und Kräfte abzuleiten.

Das Dictionary of Engineering [9] (dt: Wörterbuch des Ingenieurwesens) definiert eine Struktur aus der Perspektive des Bauingenieurwesens als „Something, (...) that is built or constructed and designed to sustain a load.“ Diese Definition unterstreicht die Funktionalität einer Struktur als tragendes Element und lässt sich mühelos auf andere Bereiche der Ingenieurwissenschaften übertragen. Im Maschinenbau, insbesondere im deutschsprachigen Raum, wird häufig der Begriff „Tragwerk“ synonym verwendet, um ähnliche Konzepte zu beschreiben [10].

2.1 Strukturen im Leichtbau

Eine besondere Herausforderung innerhalb der Ingenieurwissenschaften stellt der Leichtbau dar, bei dem Strukturen nicht nur tragfähig und funktional sein müssen, sondern zugleich Nebenfunktionen erfüllen müssen. Ziel des Leichtbaus ist es, Strukturen mit dem kleinstmöglichen Gewicht zu realisieren, ohne dass dabei Tragfähigkeit, Steifigkeit, Betriebsfestigkeit oder andere notwendige, für den jeweiligen Anwendungsfall relevante, Funktionen der Struktur beeinträchtigt werden [11]. Die Erfüllung einer isolierten Eigengewichtsaufgabe kommt jedoch praktisch nicht vor. Vielmehr formuliert der Leichtbau als Hauptaufgabe „Funktionserfüllung“, mit der stärksten Nebenbedingung „Gewichtsminimum“. Je nach Anwendungsfall grenzen weitere Bedingungen wie

- Sicherheit und Zuverlässigkeit,
- Herstellbarkeit, Montierbarkeit und Handhabbarkeit,
- Kontrollierbarkeit

- Kosten
- Inspizierbarkeit, Wartbarkeit und Instandsetzbarkeit,
- Umweltverträglichkeit und Recyclingfähigkeit

den Lösungsraum ein [12]. Die Gewichtsreduktion findet in der Regel nicht zum Selbstzweck statt, sondern ist das Resultat übergeordneter Ziele. Wiedemann [10] definiert hierzu drei Klassen:

- **Spar-Leichtbau:** Ziel ist die direkte Kosteneinsparung an Material und Herstellung, beispielsweise durch die Reduktion von Materialvolumen oder Herstellungsschritten.
- **Öko-Leichtbau:** Ziel ist die Energieeinsparung in der Nutzung der Struktur. Ein Maß zur Abschätzung dieser Zielgröße ist das Verhältnis von Gesamtgewicht zu Nutzlast.
- **Zweck-Leichtbau:** Massenreduktion kann zweckmäßig oder notwendig sein, um die Systemfunktionen zu ermöglichen oder zu erleichtern. Dies trifft beispielsweise auf Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt zu.

In den letzten Jahrzehnten hat sich der Leichtbau durch bedeutende Fortschritte in Auslegungsmethoden und -werkzeugen grundlegend weiterentwickelt [12]. Diese Entwicklung lässt sich in drei zentrale Phasen unterteilen:

- **Analytisches Design:** Zu Beginn basierte die Leichtbau-Entwicklung auf vereinfachten Gleichungen für dünnwandige Strukturen, die ein erstes gewichtseffizientes Design ermöglichten. Diese Phase legte den Grundstein für die moderne Leichtbauweise, in dem sie Leichtbaustrukturen berechenbar machte.
- **Numerische Methoden:** Der technologische Fortschritt in der Rechentechnik führte zu etablierten numerischen Ansätzen wie der Finite-Elemente-Methode (FEM). Diese Werkzeuge erlauben die präzise Berechnung und Auslegung komplexer Konstruktionslösungen.
- **Materialwissenschaftliche Innovationen:** Neue Werkstoffe wie Hochleistungslegierungen und Materialkombinationen, etwa faserverstärkte Kunststoffe (FVK) oder Hybride wie GLARE, erweiterten die Möglichkeiten des Leichtbaus erheblich und eröffneten neue Potenziale für gewichtseffizientere Konstruktionen.

Trotz dieser bedeutenden Fortschritte stand und steht der Leichtbau weiterhin vor zentralen Herausforderungen, welche die praktische Anwendung der Methoden und Materialien einschränken. Ein wesentlicher limitierender Faktor ist die Unsicherheit, die in verschiedenen Phasen des Auslegungsprozesses auftritt. Besonders in den frühen Entwurfsphasen ist oft unklar, welchen realen operativen Lasten die Struktur im späteren Produktlebenszyklus ausgesetzt sein wird. Hinzu kommen Einflüsse wie Schädigungen oder Ermüdung der Struktur, die während des Betriebs auftreten können und schwer vorhersehbar sind. Zur Bewältigung dieser Unsicherheiten wurden vier etablierte Designansätze entwickelt, die darauf abzielen, Sicherheit und Effizienz im Strukturentwurf zu gewährleisten [13]:

- **Safe-Life-Strukturen** werden unter konservativen Sicherheitsfaktoren so ausgelegt, dass sie die spezifische Lebensdauer unter allen erwarteten Lasten sicher erreichen.

- **Fail-Safe**-Strukturen zeichnen sich durch redundante Lastpfade aus. Selbst bei einem (partiellen) Versagen der Struktur bleibt die Funktionsfähigkeit erhalten.
- **Damage-Tolerant**-Strukturen erlauben Schädigungen in der Struktur, sofern diese vor Erreichen eines kritischen Zustands detektiert und behoben werden können.
- **Flaw Tolerant Safe-Life** schränkt diese Bedingung auf vordefinierte Fehler (Flaws) ein, die im Rahmen der designten Lebensdauer nicht wachsen dürfen.

Flaw Tolerant Safe-Life und Damage-Tolerant Strukturen ermöglichen gegenüber Safe-Life und Fail-Safe ausgelegten Strukturen eine weitere Optimierung des Strukturgewichts. Diese Reduktion der Strukturmasse bedingt jedoch eine Reduzierung der zulässigen kritischen Schadensgröße, was wiederum eine frühere Detektion von Schädigungen erfordert. Der damit steigende Inspektionsaufwand lässt den Bedarf an einem automatisierten und effizienten Schadenserkenennungssystem im Betrieb wachsen. Ein solcher Ansatz wird „Structural Health Monitoring“ (SHM) (dt: strukturelle Schadensüberwachung) genannt.

2.1.1 Betriebsüberwachung, SHM und Leichtbau 4.0

In der Auslegung von Strukturbauteilen werden eine Vielzahl an Annahmen, beispielsweise hinsichtlich Lasten, Lastwechsel und Nutzungsprofilen, gemacht. Eine tatsächliche Erfassung und damit Validierung der Annahmen kann mit der sogenannten Zustandsüberwachung erfolgen. Eine besondere Form der Zustandsüberwachung ist das SHM. SHM zielt darauf ab, Abweichungen eines bestimmten Messwerts zu einem Referenzzustand zu erkennen, welche eine frühzeitige Erkennung von Schäden im Betrieb der Struktur ermöglicht. Anspruchsvollere Systeme lokalisieren, qualifizieren und quantifizieren die erkannte Schädigung, um ausreichend Informationen für die Schadensbewertung und Prognose bereitzustellen. Rytter [14] klassifiziert Überwachungsmethoden in vier verschiedene Komplexitätsstufen:

- **Stufe 1** (Erkennung) liefert qualitative Informationen darüber, dass Schäden in der Struktur vorhanden sind.
- **Stufe 2** (Lokalisierung) bestimmt den Ort des Schadens.
- **Stufe 3** (Erfassung) ermittelt die Größe und Art des Schadens.
- **Stufe 4** (Bewertung) bewertet die tatsächliche (verbleibende) Sicherheit der Struktur.

Mit zunehmendem Diagnoselevel steigt die Komplexität. Stufe 4 entspricht einem entscheidungsfähigen SHM-System. Solche Systeme können feststellen, ob erkannte Schäden kritisch sind und sofortiges eingreifen erfordern. Im Falle eines nicht-kritischen Schadens ist eine Abschätzung der Restfestigkeit und der verbleibenden Lebensdauer möglich, was für die Planung von Wartungsarbeiten (Predictive Maintenance) erforderlich ist.

Unabhängig der Komplexitätsstufe ist eine automatisierte Interpretation von Messdaten erforderlich. Viechtbauer [15] identifiziert drei verschiedene Kategorien:

- **Datenbasierte Methoden** verwenden statistische Werkzeuge wie Mustererkennung, um abweichendes Verhalten zu erkennen. Diese Ansätze sind typischerweise mit großen Datenbanken verbunden.
- **Physikalisch Methoden** (auch als modellbasierte Methoden bezeichnet) verwenden Modelle und physikalische Beziehungen, um den Effekt von Schäden auf die gemessenen Größen zu charakterisieren.
- **Hybridmethoden** vereinen die Vorteile beider vorherigen Methoden. Sie basieren auf numerischen oder analytischen Modellen, die durch verfügbare Sensordaten aktualisiert und verbessert werden.

Egal ob Zustands- oder Schadensüberwachung, oder welche Kombination aus Komplexitätsstufe, Messsystem und Messdateninterpretation gewählt wird, erfordert die Implementierung eines Überwachungssystems die Applikation oder Integration von Sensoren. Die Struktur wird um eine Systemkomponente, das SHM-System bestehend aus Sensor und Auswertungseinheit, erweitert. Die Sensorierung stellt den ersten notwendigen Schritt zu Digitalisierung von Strukturen im Betrieb dar. Sinnvoll eingesetzt, erfasst und ausgewertet ermöglicht die Struktursensorierung eine individualisierte Erfassung und Abbildung von Bauteilen.

Die Einführung von Zustands- und Schadensüberwachungssystemen stellt einen wichtigen Schritt zur Verbesserung der strukturellen Integrität und Betriebsführung dar. Insbesondere die zunehmende Digitalisierung von Strukturen, unterstützt durch Sensorintegration und automatisierte Dateninterpretation, ermöglicht eine individualisierte Erfassung und Bewertung von Bauteilen. Um solche Systeme effizient zu gestalten, bedarf es einer systematischen Vorgehensweise bei der Konzeption und Umsetzung. Hierbei spielen Konstruktionsprozesse und Entwurfsmethodiken eine zentrale Rolle, da sie als strukturierter Ansatz zur Entwicklung technischer Systeme dienen.

2.1.2 Konstruktionsprozesse und Entwurfsmethodiken

Wiedemann [10] definiert Konstruktion als „Syntheseprozess“ zur Entwicklung eines technischen Systems, im Falle des Strukturentwurfs ein Tragwerk, das eine vorgegebene Mission erfüllt. Die Mission bezeichnet „die Aufgabe des Tragwerks, an gewissen Punkten, Linien oder Flächen (...) angreifende Kräfte zueinander oder zu einem Auflager hin materiell ins Gleichgewicht zu setzen.“ Dieser Syntheseprozess umfasst dabei alle Schritte von der Analyse der Anforderungen über die Lösungsfindung bis hin zur Realisierung und Optimierung eines Produkts oder Systems. Ziel ist es, durch strukturierte Vorgehensweisen und methodisches Arbeiten komplexe Entwicklungsprozesse überschaubar zu machen, die Qualität der Ergebnisse zu sichern und die Effizienz im Entwicklungsprozess zu steigern. Neben analytischen und bewertenden Verfahren stellt Wiedemann [10] auch den Anspruch an die „Kreativität und Beweglichkeit“ des entwerfenden Ingenieurs um „unkonventionelle Lösungen zu finden und zu bewerten“. Insbesondere die Phase des Konzipierens erfordere ein hohes Maß an Kreativität. Vor diesem Hintergrund steht bei Wiedemann [10] im Konstruktionsprozess der kreativ handelnde Mensch

im Mittelpunkt. Die Formalisierbarkeit und damit auch die Automatisierbarkeit wird nicht oder nur begrenzt angestrebt.

Neben den Ansätzen eines kreativen Konstruktionsprozesses steht der Wunsch die Tätigkeiten des Entwurfs zu systematisieren. Ziel ist es allgemein gültige methodenbezogene Techniken anstelle von produktbezogenen Vorgehensweisen zu lehren. Im Maschinenbau haben sich Entwurfmethodiken nach Pahl/Beitz [16], Ponn/Lindemann [17] sowie die VDI-Richtlinie 2221/2019 [18, 19] etabliert. Die VDI-Richtlinie 2221/2019 ist in der deutschen Konstruktionslandschaft weit verbreitet und wird von vielen Unternehmen und Institutionen als Standard verwendet. Sie ist auch international anerkannt und hat sich als bewährte Methodik für die systematische Durchführung des Konstruktionsprozesses im Maschinenbau etabliert. Da in den genannten Ansätzen der zuvor beschriebene Entwurfsprozess verallgemeinert und erweitert besprochen wird, wird der Begriff „Produktentwicklung“ verwendet. In diesem Sinne bedarf auch der Leichtbau keiner besonderen Konstruktionslehre, sondern es kommt ein modifiziertes Vorgehen bestehender Ansätze wie der VDI-Richtlinie 2221/2019 zum Tragen, welches die besonderen Gegebenheiten der Leichtbautechnologie berücksichtigt.

2.1.2.1 VDI-Richtlinie 2221/2019

Nach VDI-Richtlinie 2221/2019 (Blatt 1) [18] ist die Produktentwicklung ein „interdisziplinärer Unternehmensprozess zur Entwicklung eines marktfähigen Produkts, basierend auf der Definition initialer Ziele und Anforderungen an das Produkt, die im Lauf des Prozesses kontinuierlich weiterentwickelt und iterativ angepasst werden.“ Ein Produkt ist dabei „ein Erzeugnis oder eine Leistung materieller wie immaterieller Art, das oder die allein oder als System angeboten wird, um den Bedarf am Markt sowie die Bedürfnisse von Nutzern zielgruppengerecht zu befriedigen.“ Als System wird die „durch eine Systemgrenze abgegrenzte Anzahl von Elementen verstanden, die untereinander in Relation und Wechselwirkung stehen.“ Eine Funktion wird definiert als „allgemeiner und gewollter Zusammenhang zwischen Eingang und Ausgang eines Systems mit dem Ziel, eine Aufgabe zu erfüllen.“

Die VDI-Richtlinie 2221/2019 [18] stellt ein allgemeines Modell auf, siehe Abbildung 2.1, welches Aktivitäten nennt, die innerhalb einer Produktentwicklung zu durchlaufen sind. Ausgehend von den Zielen, welche in der Regel die Erfüllung des Entwicklungsauftrages einschließlich der zugehörigen Anforderungen darstellen, werden verschiedene Aktivitäten durchlaufen.

- Klären und präzisieren des Problems bzw. der Aufgabe
- Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen
- Bewerten und auswählen des Lösungskonzepts
- Gliedern in Module/ Schnittstellendefinitionen
- Gestalten der Module
- Integrieren des gesamten Produkts
- Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben
- Absichern der Anforderungserfüllung

Diese Aktivitäten liefern nach und nach (Zwischen-)Ergebnisse, wie beispielsweise Funktionsmodelle, Systemarchitektur oder den Gesamtentwurf. Liegen alle notwendigen Ergebnisse vor, kann der Entwicklungsauftrag durch die Freigabe des Produkts bzw. der Bauunterlagen abgeschlossen werden. Die zeitliche Staffelung der genannten Aktivitäten und die daraus folgende Bündelung zu übergeordneten Entwicklungsphasen sind vom jeweiligen Produkt und dessen sogenannten Kontextfaktoren abhängig und somit individuell festzulegen. VDI-Richtlinie 2221/2019 bietet eine strukturierte Herangehensweise an den Systementwurf, ohne jedoch konkrete Methoden für die Modellierung vorzuschreiben. Aufbauend auf den Entwicklungsschritten spezifiziert Klein [12] konkrete Handlungen speziellen für den Leichtbauentwurf, siehe Tabelle 2.1 bzw. Abbildung 2.2.

In anderen Fachbereichen haben sich andere Entwicklungsmethodiken etabliert. Beispielsweise das Y-Diagramm in der Elektrotechnik [20] oder der Unified Software Development Process (USDP) [21] und das V-Modell [22] in der Softwareentwicklung. Die Auflösung disziplinorientierter Vorgehensmodelle hin zur ganzheitlichen Betrachtung von technischen Produkten als System ist Aufgabe des Systems Engineering (SE) (dt.: Systementwicklung). SE basiert auf einem Top-Down-Ansatz, der von der Systemgrenze ausgeht und sukzessive die Systembeschreibung verfeinert. Klassische SE-Ansätze arbeiten mit dokumentenbasierten Methoden. Das Model-Based Systems Engineering (MBSE) (dt.: Modellbasierte Systementwicklung) löst sich von dokumentenbasierten Arbeiten, indem es eine modellzentrierte Herangehensweise an die Systementwicklung einführt. Anstelle von fragmentierten Informationen, die über verschiedene Dokumente verteilt sind, werden beim MBSE alle relevanten Daten und Beziehungen in einem zentralen, digitalen Modell verwaltet. Dieses Modell dient als einzige, konsistente Informationsquelle für das gesamte System.

Tabelle 2.1: Schritte des Leichtbauentwurfes nach Klein [12].

Thema	Aufgabe
Klären der Aufgabenstellung	Informationsbeschaffung über die Anforderungen einer Aufgabe und Erstellung einer Anforderungsliste; Eingrenzung bestehender Bedingungen und ihre Bewertung für die Lösungserfüllung; Festlegung einer Lösungsrichtung; technisch- wirtschaftliche Konsequenzen; Hinterfragung der Aufgabe und Sichten des Kernproblems
Konzeptfindung	Zerlegung des Kernproblems in untergeordnete Teilprobleme; Suche nach Lösungswegen zur Erfüllung der Teilprobleme; Kombination der Teilproblemlösungen zu Lösungsansätzen für das Kernproblem; Bewertung der Lösungen; Erstellung von Konzeptskizzen. Voraussetzungen einer sinnvollen Konzepterstellung sind Kenntnisse über die Größe und Richtung der wirkenden Kräfte, die Möglichkeiten des gewählten Werkstoffs, die Bauweiseigenschaften und eine angepasste Vordimensionierung.
Entwerfen	Gestalterische Konkretisierung einer Lösung: Maßstäbliche Konkretisierung der Konzeptskizzen zu Bauvarianten; Bewertung, Vereinfachung und Auswahl einer Variante; Überarbeitung zu einem Gesamtentwurf
Ausarbeiten	Fertigungs- und montagegerechte Festlegung einer Lösung: Endgültige Bestimmung der Geometrie, Dimensionen, Werkstoffe und Herstellung, um die notwendigen Fertigungsunterlagen erstellen zu können.
Prototypen-Herstellung	Kontrolle der Funktionen, Montage etc.
Testprozeduren	Überprüfung der Tragfähigkeit, Zuverlässigkeit, Lebensdauer
Freigabe (SOP)	Bereitstellung der erforderlichen Dokumentation (z.B. nach ISO 9000 bzw. ISO/TS 16949).

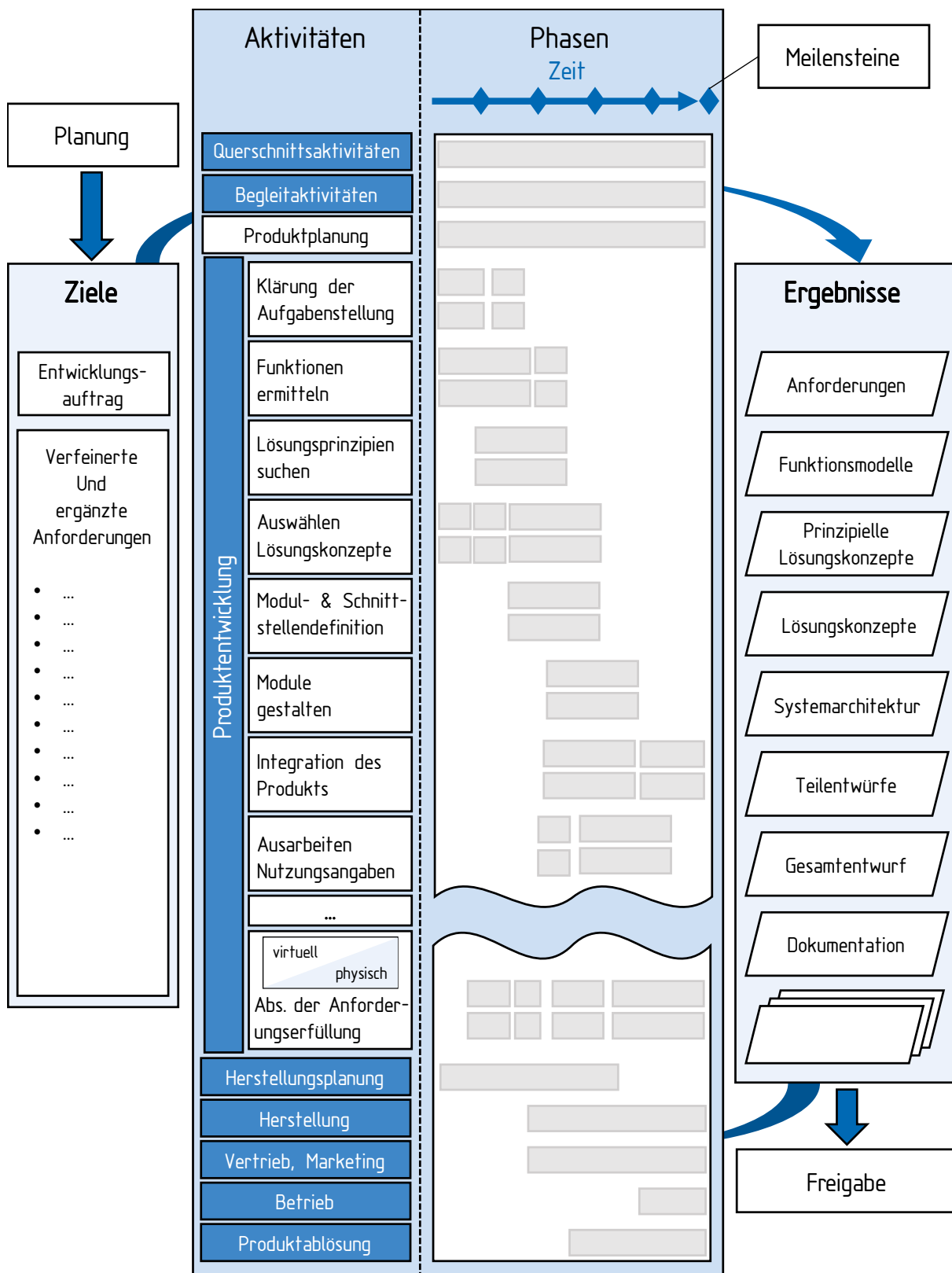


Abb. 2.1: Darstellung der Phasen des VDI-Entwurfprozesses nach VDI-Richtlinie 2221/2019 [18].

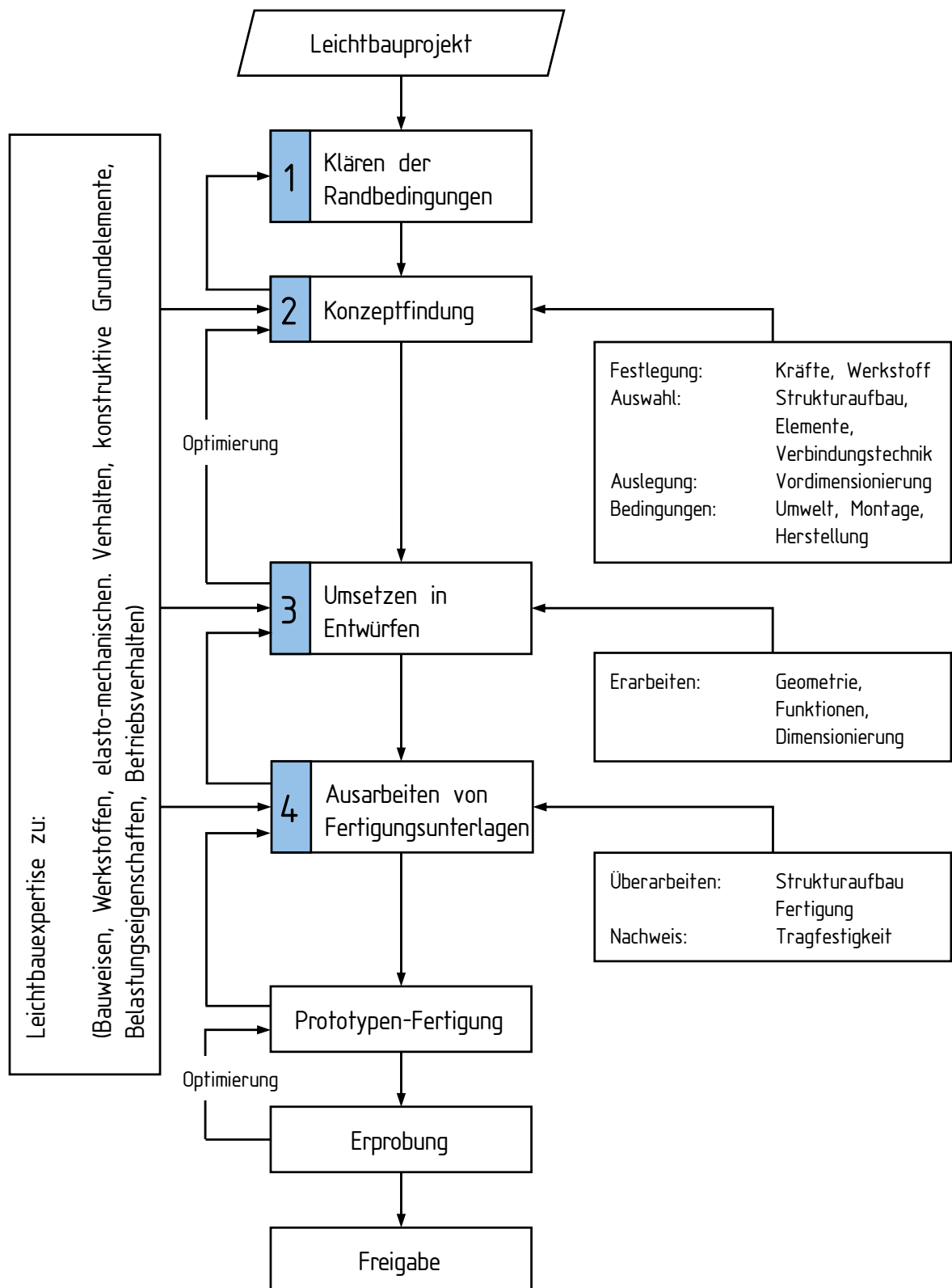


Abb. 2.2: Systematische Vorgehensweise des leichtbaugerechten Konstruierens nach Klein [12].

2.1.2.2 Model-Based Systems Engineering (MBSE)

Model-Based Systems Engineering (MBSE) hat sich in den letzten Jahren zu einer etablierten Methodik im Systementwicklungsprozess entwickelt. Anstatt sich auf textbasierte Dokumentationen zu verlassen, verwendet MBSE Modelle als zentrale Elemente, um die Anforderungen, die Architektur, das Verhalten und die Implementierung von Systemen zu beschreiben und zu analysieren [23]. Diese Modelle können in verschiedenen Phasen des Systementwurfs eingesetzt werden, von der Anforderungsanalyse bis zur Implementierung und Validierung. MBSE kann als unterstützende Methode zur Umsetzung der Phasen des Systementwurfs nach VDI-Richtlinie 2221/2019 eingesetzt werden. Modelle, die im Rahmen von MBSE erstellt werden, können dabei helfen, die Inhalte der einzelnen Phasen in der VDI-Richtlinie 2221/2019 [18] detailliert zu beschreiben und zu kommunizieren. Die Strukturierung des Systementwurfs nach VDI-Richtlinie 2221/2019 kann wiederum die Anwendung von MBSE in den jeweiligen Phasen erleichtern. MBSE verspricht gegenüber traditionellen, dokumentenbasierten Ansätzen mehrere Vorteile, darunter:

- **Verbesserte Kommunikation und Zusammenarbeit:** Modelle ermöglichen es allen Beteiligten im Systementwicklungsprozess, das System auf einem gemeinsamen Abstraktionsniveau zu verstehen und zu diskutieren. Dies kann zu einer verbesserten Kommunikation und Zusammenarbeit führen und somit Missverständnisse und Inkonsistenzen reduzieren [23, 24].
- **Frühere Fehlererkennung:** Modelle können helfen, Fehler und Inkonsistenzen im Systementwurf frühzeitig zu erkennen und zu beheben. Dies kann zu Kosteneinsparungen und einer verkürzten Entwicklungszeit führen [25, 26].
- **Verbesserte Qualität:** Modelle ermöglichen es, das Systemverhalten zu simulieren und zu analysieren, bevor es tatsächlich gebaut wird. Dies kann zu einer verbesserten Systemqualität und einer höheren Zuverlässigkeit des Produktes führen [23, 27].

Dennoch erfordert der vorteilbringende Einsatz von MBSE die Überwindung von Herausforderungen. Dazu können zählen [24, 26]:

- **Akzeptanz und Komplexität:** Der Wechsel von einem dokumentenbasierten zu einem modellbasierten Ansatz kann für erfahrene Ingenieur:innen und andere Beteiligte, die an traditionelle Arbeitsweisen gewöhnt sind, eine Umstellung erfordern. Die Erstellung und Verwaltung komplexer Modelle erfordert spezielles Fachwissen und Schulungen, was die Anfangsinvestitionen in Zeit und Ressourcen erhöhen kann.
- **Tool-Auswahl und Interoperabilität:** Die Auswahl geeigneter MBSE-Tools, die den spezifischen Anforderungen und dem Budget des Projekts entsprechen, kann eine Herausforderung sein. Die Sicherstellung der Interoperabilität zwischen verschiedenen MBSE-Tools und anderen Entwicklungsumgebungen ist wichtig, um einen reibungslosen Datenaustausch und die Zusammenarbeit zu ermöglichen.

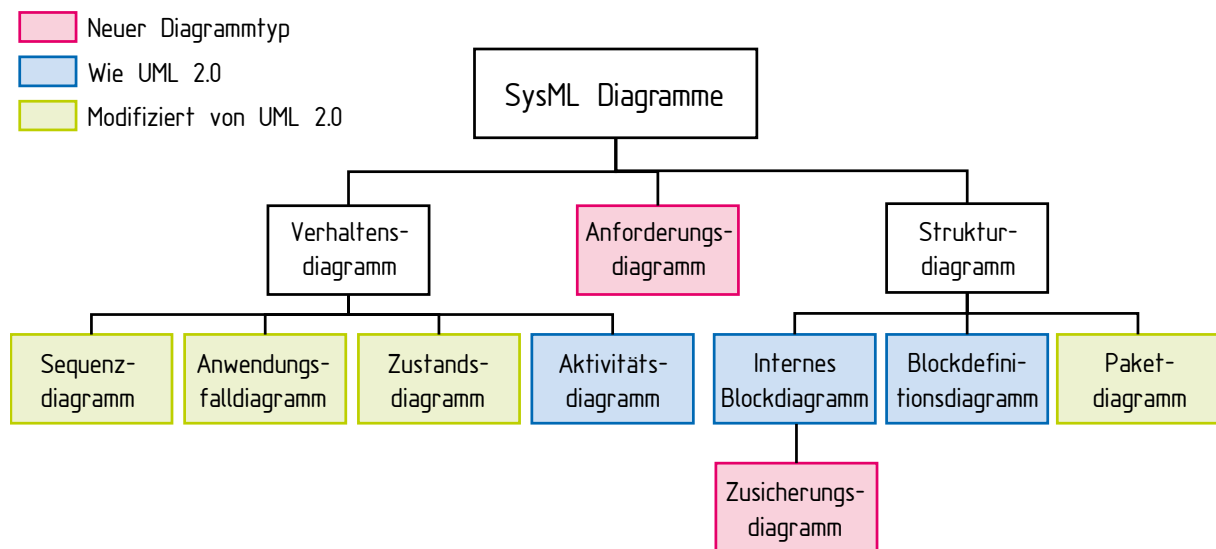


Abb. 2.3: Übersicht über die SysML Diagramme nach [28].

- **Skalierbarkeit und Validierung:** Die Skalierung von MBSE-Ansätzen auf große und komplexe Systeme kann aufgrund der zunehmenden Komplexität der Modelle und der erforderlichen Rechenleistung schwierig sein. Die Validierung von Modellen, um sicherzustellen, dass sie das System korrekt und vollständig abbilden, ist ein wichtiger, aber oft zeitaufwändiger und ressourcenintensiver Prozess.

Es werden regelmäßig neue Modellierungssprachen und -Methoden entwickelt, die die Möglichkeiten von MBSE erweitern. Zu den populären Modellierungssprachen im Bereich MBSE gehören SysML, UML und UPDM. Die führende Modellierungssprache für MBSE ist die SysML (Systems Modeling Language). SysML ist eine grafische Modellierungssprache, die speziell für die Systementwicklung entwickelt wurde. Sie basiert auf der Unified Modeling Language (UML) für die Softwareentwicklung und bietet eine Reihe von Erweiterungen, die für die Modellierung komplexer Systeme erforderlich sind. SysML-Diagramme können verschiedene Aspekte eines Systems darstellen, einschließlich seiner Struktur (z. B. Blockdefinitionsdiagramme), seines Verhaltens (z. B. Aktivitätsdiagramme) und seiner Anforderungen (z.B. Anforderungsdiagramme) [28].

MBSE kann in allen Phasen des systematischen Entwurfs von Bauteilen und Systemen eingesetzt werden, einschließlich:

- **Anforderungsanalyse:** Modelle können verwendet werden, um die Anforderungen an das System zu erfassen und zu analysieren. Dies kann mithilfe von Anforderungsmodellen erfolgen, die die funktionalen und nicht funktionalen Anforderungen an das System beschreiben.

- **Systementwurf:** Modelle können verwendet werden, um die Systemarchitektur und die Komponenten des Systems zu entwerfen. Dies kann mithilfe von Systementwurfmodellen erfolgen, die die Struktur und die Beziehungen zwischen den Systemkomponenten beschreiben.
- **Detaillentwurf:** Modelle können verwendet werden, um die Details der einzelnen Systemkomponenten zu entwerfen. Dies kann mithilfe von Detailentwurfmodellen erfolgen, die die internen Strukturen und Funktionen der Systemkomponenten beschreiben.
- **Implementierung:** Modelle können verwendet werden, um die Implementierung des Systems zu unterstützen. Dies kann mithilfe von Implementierungsmodellen erfolgen, die die Zuordnung zwischen den Modellelementen und den Implementierungsartefakten beschreiben.
- **Validierung und Verifizierung (V&V):** Modelle können verwendet werden, um das System zu validieren und zu verifizieren. Dies kann mithilfe von Validierungs- und Verifizierungsmodellen erfolgen, die die Testspezifikationen und die Testergebnisse beschreiben.

Häufig wird MBSE fälschlicherweise als reines Konzept der frühen Phase der Produktentwicklung verstanden. MBSE, genau wie SE, hat immer den Anspruch alle Phasen des Lebenszyklus abzudecken [29]. Hierfür wird, ausgehend vom Digitalen Modell als Ergebnis des MBSE, eine entwicklungsphasenübergreifende Verknüpfung postuliert - der Digitale Faden.

2.1.3 Wie kommt das alles zusammen? - Der Digitale Faden

Ergebnis des MBSE-Prozesses ist ein umfassendes Digitales Modell des zu beschreibenden Systems. Das Digitale Modell bildet sich aus Untermodellen, wie dem Anforderungsmodell, Simulationsmodellen (z.B. Finite-Elemente-Methode (FEM)) oder Produktionsplanungsmodellen. Die vertikale Verknüpfung der Untermodelle wird durch die hierarchische Strukturierung des MBSE sichergestellt. Die horizontale Verbindung bildet die Verknüpfung über den Entwicklungsprozess hinweg, siehe Abbildung 2.4. Die in der Abbildung verwendeten Abkürzungen beziehen sich auf die Ergebnisse der Entwicklungsschritte CAD-Design, V&V, Herstellungsprozessplanung und Betrieb. Eine BOM (Bill of Materials, dt.: Stückliste) ist eine strukturierte Auflistung aller Materialien, Komponenten, Baugruppen und gegebenenfalls auch Arbeitsgängen, die zur Herstellung eines Produkts erforderlich sind. Die sogenannte Engineering BOM (eBOM) beschreibt die Struktur des Produkts aus der Perspektive der Entwicklung. Die Manufacturing BOM (mBOM) konzentriert sich auf die Fertigung und berücksichtigt dabei Prozesse, Werkzeuge und andere Anforderungen. Die Service BOM wird verwendet, um die Wartung und Reparatur eines Produkts zu unterstützen.

Der Digitale Faden ist abstrakt gesprochen ein kontinuierlicher, nahtloser Datenstrang, der jede Phase des Produktlebenszyklus miteinander verbindet, von der Konstruktion über die Fertigung bis hin zur Nutzung im Einsatz. Er stellt den Kanal dar, durch den die Daten über den Entwicklungsprozess hinweg fließen. Diese Daten, ihre Speicherung, der einfache Zugriff, die Modellierung und Analyse, ermöglichen es, die Produktion zu modellieren und eine effiziente

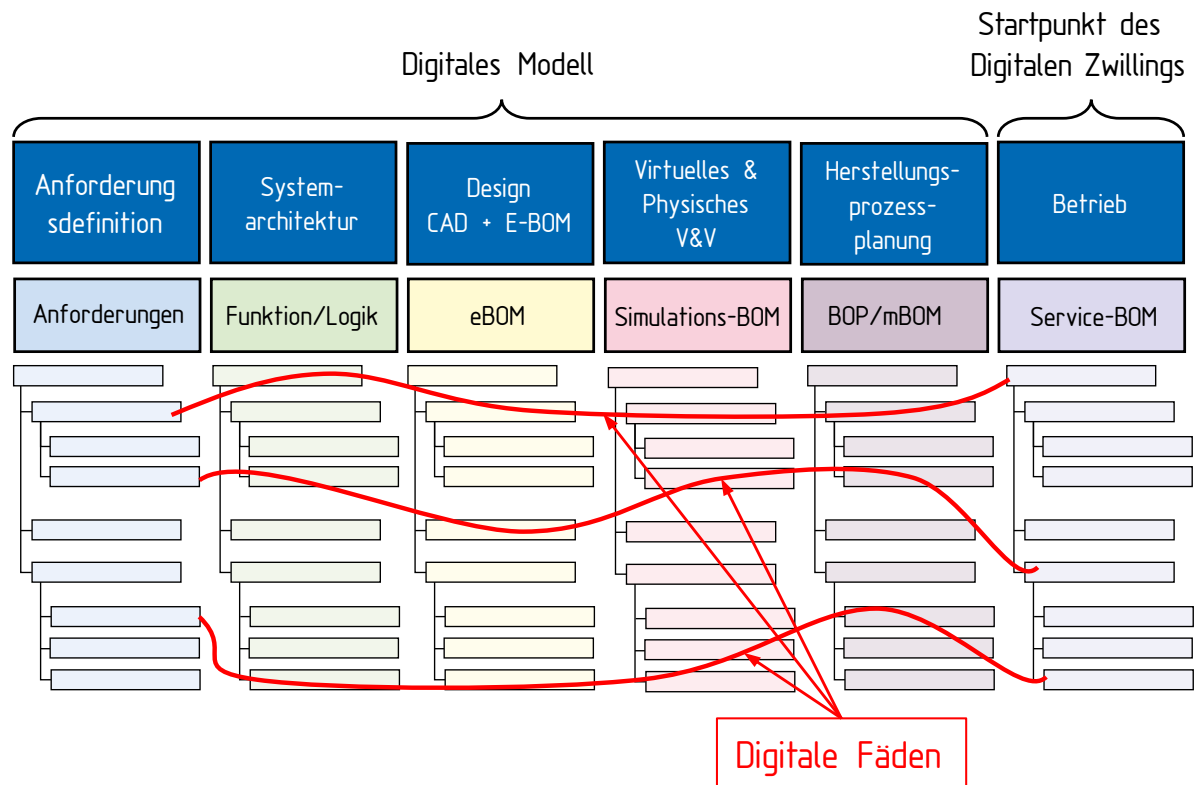


Abb. 2.4: Zusammenhang zwischen Digitalen Modellen (aus dem MBSE), dem Digitalen Zwilling und dem Digitale Faden nach Eigner et al. [29]. BOM (Bill of Materials) = Stückliste; BOP (Bill of Process) = Prozessbeschreibung.

Kommunikation entlang der Lieferkette voranzutreiben [30]. Der Digitale Faden kann dabei unterschiedliche Ausprägungen haben. Zum einen gibt es digitale Definitionen von Produkten und Prozessen, wie sie von den digitalen Modellen beschrieben werden. In zweiter Instanz können auch Daten, die nach Fertigung und Auslieferung des Produkts entstanden sind, beispielsweise von Sensoren gemessene Aktivitätsdaten sowie Daten zu Fertigungshistorie, Nutzung oder Garantieansprüchen, über den Digitalen Faden in den Produktentwicklungsprozess eingebunden werden. An dieser Stelle verzahnen sich das Digitale Modell und der Digitale Faden in das Konzept des Digitalen Zwillings. Das Konzept des Digitalen Zwillings wird im nächsten Abschnitt detaillierter betrachtet.

2.2 Der Digitale Zwilling

Seit der erstmaligen Vorstellung des Konzeptes 2002 durch Micheal Grieves [31], damals noch unter dem Namen „Conceptual Ideal for Product Lifecycle Management“ (dt.: Konzeptionelles Ideal des Produktlebenszyklusmanagements), hat sich die Idee des Digitalen Zwillings in eine Vielzahl von Anwendungsfeldern ausgebreitet. Im Zuge seines Erfolgs wurde die Idee des Digitalen Zwillings weiter geformt und hinsichtlich der Bedürfnisse verschiedener Anwendungen zugeschnitten. Die Heterogenität des Konzepts spiegelt sich auch in der vielfältigen Begriffsdefinition wieder. Nachfolgend werden einige Definitionen des Digitalen Zwillings aus verschiedenen Fachdisziplinen vorgestellt. Die vorgestellte Sammlung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern stellt lediglich ausgewählte Beispiele vor.

2.2.1 Begriffsdefinitionen des Digitalen Zwillings

Aufbauend auf seiner ersten Veröffentlichung [31] veröffentlicht Michael Grieves selbst 2014 sein viel zitiertes Whitepaper [32], in dem er dem „Conceptual Ideal for Product Lifecycle Management“ den Namen „Digitaler Zwilling“ gab. Zentrale Merkmale seiner Definition waren zu dem Zeitpunkt die bidirektionale Kopplung zwischen realer und virtueller Instanz. Die reale Instanz liefert Daten an ihr virtuelles Gegenstück, die virtuelle Instanz liefert ein Feedback an die reale Instanz. Die bidirektionale Kopplung als zentrales Element der Definition besteht auch in späteren Definitionen wie z.B. von Fuller et al. [33] oder Kritzinger et al. [34].

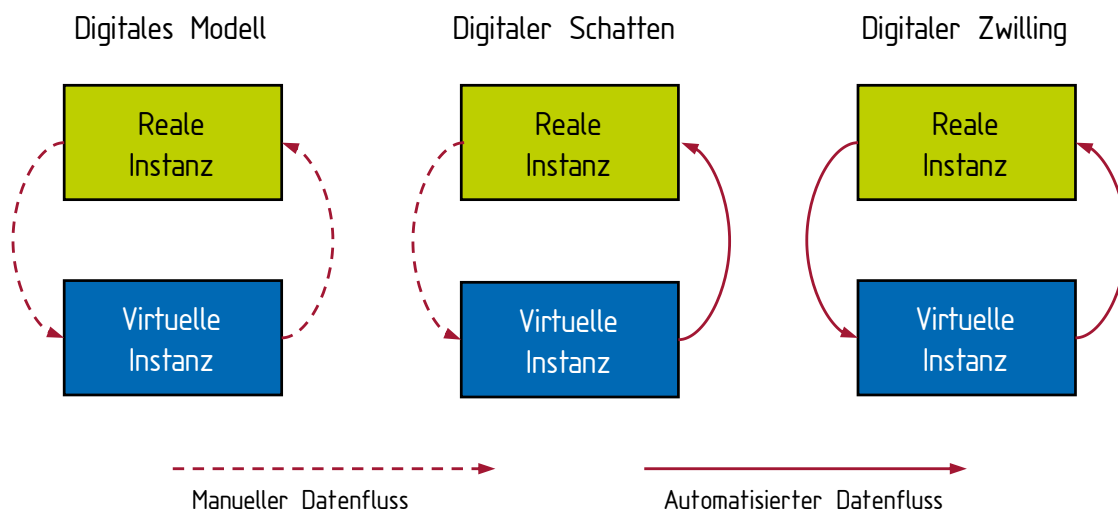


Abb. 2.5: Definition der Begriffe Digitales Modell, Digitaler Schatten und Digitaler Zwilling über den Kopplungsgrad in Form des Datenaustauschs nach Fuller et al. [33].

Abgrenzend zur bidirektionalen Kopplung werden der Digitale Schatten und das Digitale Modell eingeführt. Ihr Unterscheidungsmerkmal ist der Kopplungsgrad. Das Digitale Modell kann

keinen oder nur einen manuellen Datenfluss zum realen Gegenstück aufweisen. Der Digitale Schatten ist über einen Datenfluss vom realen Objekt mit seiner Digitalen Abbildung verbunden. Eine Änderung des physikalischen Objekts führt zu einer Änderung der digitalen Gegenstücks, jedoch nicht umgekehrt. Nur der Digitale Zwilling hat die von Grieves postulierte bidirektionale Kopplung. Auch Jones et al. [35] separiert in unterschiedliche Kopplungsgrade mit den Terminologien „physisch zu virtuell“ und „virtuell zu physisch“. Während der Kopplungsgrad zu Beginn des Digitalen Zwillings das zentrale Definitionselement darstellt, rücken mit der Ausbreitung des Konzeptes in verschiedene Anwendungsbereich weitere Aspekte in den Fokus der jeweiligen Definition.

Simulationstechnik

In Anwendungen wie der Simulationstechnik steht häufig die möglichst detaillierte Abbildung einer physikalischen Komponente in den digitalen Raum im Vordergrund der Definition. Vrabíč et al. [36] definieren: „Digital twins are digital representations of physical products or systems that consist of multiple models from various domains describing them on multiple scales.“ Weiter definieren Glaessgen und Stargel [37] den Digitalen Zwilling als „an integrated multiphysics, multiscale, probabilistic simulation of an as-built vehicle or system that uses the best available physical models, sensor updates, fleet history, etc., to mirror the life of its corresponding flying twin.“ Hier wird die Erfassung und damit Kopplung der realen Komponente via Sensoren an das Modell benannt. David Knezevic et al. [38] ergänzt: „Most likely, an initial good match will not be achieved and the numerical model will have to be updated to better represent real-world conditions.“ Gabor et al. [39] definieren den Digitalen Zwilling über „their ability to accurately simulate events on different scales of space and time.“

Weiter fokussiert die Definition des Experimentierbaren Digitalen Zwillings (EDZ) nach Schluse [40] die Möglichkeit, mithilfe von Simulation realitätsnahe Modelle zu erstellen und diese für Experimente und Analysen nutzbar zu machen. Ein EDZ ist eine unter gewählten Gesichtspunkten betrachtete virtuelle, digitale 1-zu-1-Repräsentation seines Realen Zwillings. Diese Repräsentation umfasst die Semantik, Struktur, Verhalten und Interaktion des Realen Zwillings und ermöglicht eine Interaktion auf Grundlage experimentierbarer Modelle. Ebenso wie ihre Realen Zwillinge können Experimentierbare Digitale Zwillinge in hierarchischen und heterarchischen Strukturen angeordnet und miteinander verbunden werden.

In der Logik der Systementwicklung, z.B. der MBSE Methodik, siehe Abschnitt 2.1.2.2, folgt der Digitale Zwilling als logische Konsequenz einer umfassenden Modellbildung. „A Digital Twin is a digital representation of a tangible or intangible product, process, and services from the real world in the digital world. It includes all the necessary information for a specific business model from the digital model (...). The nucleus results, for example, in the prototype construction through the current configuration status in development (...) and after delivery by the “as-built” or in-plant engineering through the “as-delivered” parts list.“ [29] Nach Schluse [40] ergänzen sich der EDZ und MBSE, indem sie die modellbasierten Entwürfe durch simulati-

ongestützte Analysen und Experimente validieren und optimieren, was eine durchgängige und iterative Entwicklung komplexer Systeme ermöglicht.

Überwachung

Die Abbildung einer Komponente oder eines Systems via (Echtzeit-) Daten wird häufig zur Definition des Digitalen Zwillings im Kontext der Produktüberwachung herangezogen. Tao et al. [41] definieren im Kontext des Product Health Management (PHM): „DTs [Digital Twins] can supply a cyber-physical manufacturing system with information about a real-world situation and operating status. Such information can enhance a manufacturing system’s intelligence regarding analytical assessment, predictive diagnosis, and performance optimization.“

Mit der Perspektive der Zustandüberwachung eines Flugzeuges definiert Tuegel [42]: „The ADT [Airframe Digital Twin], as an ultra-realistic model of the as-built and maintained airframe, is explicitly tied to the materials and manufacturing specifications, controls, and process used to build and maintain the aircraft. It is a consistent model of an individual airframe by tail number that includes all variation and uncertainty in that aircraft “.

Nach Glaessgen and Stargel [37] wird der Digitale Zwilling zentrales Verwaltungsinstrument für Health Monitoring und Management: „the Digital Twin integrates sensor data from the vehicle’s on-board integrated vehicle health management (IVHM) system, maintenance history and all available historical and fleet data“. Die Implementierung von SHM erfordert Netzwerke, die Sensoren, digitale Modelle, Auswertungsalgorithmen und Nutzer verbinden, wobei technologische Fortschritte und drahtlose Netzwerke eine Entwicklung von kabelgebundenen Methoden hin zu drahtlosen Sensornetzwerken ermöglicht haben.

Internet of Things (IoT) & Asset Administration Shell (AAS)

IoT-Technologien nutzen eine komplexe, hierarchische Architektur, die verschiedene Geräte, cloudbasierte Dienste und Nutzer integriert, um innovative Kommunikationslösungen und kontinuierliche Überwachung im SHM-Bereich zu fördern. Im Kontext des IoT dienen Digitale Zwillinge als Kommunikationsknoten mit einzigartiger, adressierbarer Identität und ermöglichen die Vernetzung sowohl untereinander als auch mit anderen IoT-Objekten und Endnutzern [43]. Chen et al. [44] benennen: „A digital twin is capable of communicating with the physical system it represents via real-time sensing devices, so as to keep it almost synchronized with the real-time status, working condition, position, and environment situation.“ Der Digitale Zwilling ist hiermit „a virtual entity, relying on the sensed and transmitted data of the IoT infrastructure [...], with the purpose to allow optimizations and decision-making“. Weiter geht ein Artikel des Unternehmens Deloitte [45], der das Internet der Dinge als „obligatorische Vorstufe des Digitalen Zwillings“ definiert.

Eine zentrale Rolle für die strukturierte Einbindung physischer Assets in solche IoT-Architekturen spielt die Asset Administration Shell (AAS) (dt.: Verwaltungsschale), die von der International Digital Twin Association (IDTA) vorangetrieben wird. Die AAS stellt die digitale Repräsentation eines Assets dar und wird in Industrie-4.0-Kontexten als einheitliche, standardisierte Schnittstelle zwischen physischen Objekten und der digitalen Welt verstanden [46]. Ein Asset bezeichnet hierbei ein eindeutig identifizierbares Objekt mit funktionalem oder wirtschaftlichem Wert, das physischer oder nicht-physischer Natur sein kann, etwa eine Maschine, ein Bauwerk, eine Komponente, Software oder ein Datenmodell. Die AAS fungiert als „Single Source of Truth“ über den gesamten Lebenszyklus eines Assets und kapselt dessen relevante Informationen in Form hierarchisch organisierter Submodelle. Diese Submodelle beschreiben sowohl statische Eigenschaften (z. B. Typdaten oder technische Spezifikationen) als auch dynamische Zustände und Schnittstellen zur Laufzeitintegration. [47]

Produktionstechnik

Insbesondere im deutschsprachigen Raum entwickelt sich der Begriff Industrie 4.0. Industrie 4.0 beschreibt die Vernetzung und Automatisierung von Produktionsprozessen durch moderne Technologien wie das Internet der Dinge, Künstliche Intelligenz (KI) und Big Data. Ziel ist es, effizientere, flexiblere und individuell anpassbare Fertigungsprozesse zu schaffen. Aus dieser Perspektive kann die Definition der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktionstechnik (WGP) verstanden werden, die den Digitalen Schatten als hinreichend genaues Abbild „der Prozesse in der Produktion, der Entwicklung und angrenzenden Bereichen mit dem Zweck, eine echtzeitfähige Auswertungsbasis aller relevanten Daten zu schaffen“ beschreibt [48]. Ähnlich lautet die Definition nach Rosen et al. [49], in der der Digitale Zwillinge als „very realistic models of the current state of the process and their own behavior in interaction with their environment in the real world“ beschrieben werden.

Die präsentierte Auswahl erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die dargestellten Definitionen und Anwendungsbereich sind aus der Perspektive der Ingenieurwissenschaften ausgewählt. Vielmehr stehen die gewählten Beispiele exemplarisch für ihre potentiellen Anwendungsbereiche, die Schnittstellen zu strukturmechanischen Anwendungen darstellen. Bereits in der präsentierten Auswahl wird die Vielzahl an gewählten Definitionen deutlich, die sich teilweise ähneln oder widersprechen. Das Ergebnis ist ein unscharfes und uneindeutiges Bild des Digitalen Zwillings. Die Unschärfe führt im Umkehrschluss dazu, dass regelmäßig neue Definitionen, zugeschnitten auf die individuelle Anwendung erstellt werden, was wiederum die Vereinheitlichung der Definition erschwert.

2.2.2 Charakterisierungsansätze des Digitalen Zwillings

Die Heterogenität der Definitionen ist immer wieder Thema in Reviews und Versuchen die Definitionslandschaft zu vereinheitlichen. Kühner et al. [50] reviewen in einem Meta-Review

24 Reviewpaper hinsichtlich der Definitionsfindung des Digitalen Zwillings. Dazu werden verschiedene definierende Elemente wie „virtuelle Representation“, „Bi-Directionale Connection“, „Simulation“ und „Connecting across lifecycle phases“ ausgewertet. Übereinstimmung kann in den 24 Reviews nur hinsichtlich der „virtuellen Repräsentation“ gefunden werden. Begriffe wie „Digital Model“ oder „Digital Shadow“ (dt.: Digitaler Schatten) werden teils synonym, teils abgrenzend zum Digitalen Zwilling verwendet.

Schweiger und Barth [8] untersuchen die Eigenschaften und Definitionen Digitaler Zwillinge in akademischer Literatur und Unternehmenskontexten, entwickeln eine Taxonomie und analysieren 90 Unternehmensdefinitionen mit Datenanalysen. Es zeigt, dass Forscher technologische Anforderungen betonen, während Unternehmen mehr auf wertorientierte Eigenschaften fokussieren, was eine Diskrepanz offenbart. Zur Überbrückung dieser Lücke wird eine praxisorientierte Definition vorgeschlagen, die Forschung und Praxis verbindet.

Jones et al. [35] werten 92 Publikationen zum Thema Digitaler Zwilling hinsichtlich der Konzepte, Terminologien und zugehörigen Prozesse aus. Ergebnis sind 13 Charakteristiken des Digitalen Zwillings. Beschrieben werden Physical Entity/Twin (dt.: Physische Entität/Zwilling) sowie Virtual Entity/Twin (Virtuelle Entität/Zwilling) als Instanzen, die jeweils in der physischen bzw. realen Umgebung existieren, sowie Physical-to-Virtual Connection/Twinning und Virtual-to-Physical Connection/Twinning.

Dahmen und Roßmann [46] streben eine sprachliche Grundlage für die Definition des Digitalen Zwillings an, die zudem ermöglicht charakteristische Eigenschaften zu identifizieren. Dies soll den Austausch über potentiell unterschiedliche Ansichten auf Digitale Zwillinge erleichtern. Das Paper identifiziert und charakterisiert drei Hauptvarianten des Digitalen Zwillings:

- **Virtual Test Object (dt.: Virtuelles Testobjekt):** Diese Variante dient hauptsächlich der Simulation und dem Testen. Sie wird verwendet, um das Verhalten von physischen Objekten unter verschiedenen Bedingungen zu modellieren und zu testen, ohne dass physische Prototypen benötigt werden. Das virtuelle Testobjekt ermöglicht es, Fehler zu identifizieren und Optimierungen durchzuführen, bevor physische Tests durchgeführt werden.
- **Mental Model (dt.: Mentales Modell):** Diese Variante stellt das Wissen und die Erfahrungen von Experten über ein physisches System digital dar. Es dient als Werkzeug zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen und zur Schulung. Das mentale Modell hilft dabei, komplexe Systeme besser zu verstehen und fundierte Entscheidungen zu treffen, indem es das Wissen und die Intuition der Fachleute digitalisiert und zugänglich macht.
- **Virtual Mirror (dt.: Virtueller Spiegel):** Diese Variante bietet eine nahezu Echtzeitrepräsentation eines physischen Objekts oder Systems. Der virtuelle Spiegel reflektiert den aktuellen Zustand des physischen Objekts und ermöglicht eine kontinuierliche Überwachung und Analyse. Diese Form des Digitalen Zwillings wird oft für die Zustandsüberwachung, Wartung und Optimierung von laufenden Prozessen verwendet.

Stark und Damerau [6] Klassifizierung anhand von acht Dimensionen, welche die zentralen Eigenschaften und Fähigkeiten Digitaler Zwillinge repräsentieren sollen. Abbildung 2.6 stellt die acht Dimensionen und ihre Gliederungen dar. Die **Integrationsbreite** reicht von der Maschinenebene über Produktionssysteme bis hin zur weltweiten Interaktion. Die **Konnektivitätsmodi** zeigen, wie Daten zwischen dem physischen und digitalen System fließen, von unidirektional bis bidirektional und kontextgesteuert. Die **Aktualisierungsfrequenz** variiert von Echtzeit-Updates bis hin zu täglichen oder wöchentlichen Intervallen, während die **CPS-Intelligenz** den Grad der Automatisierung beschreibt, von menschlicher Steuerung bis zu vollständig autonomen Systemen. Ergänzt wird dies durch die **Simulationsfähigkeiten**, die von statischen bis hin zu multiphysikalischen, dynamischen Modellen reichen, und den **digitalen Modellreichtum**, der die Tiefe der Modellinformationen darstellt. Schließlich werden in der Dimension **Menschliche Interaktion** Technologien zur Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine wie Virtuelle und Augmented Realität (VR/AR) oder hybride Systeme berücksichtigt, während in der Dimension des **Produktlebenszyklus** die vom Digitalen Zwilling berücksichtigten Phasen, von der Entwicklung bis zum Produktlebensende, erfasst.

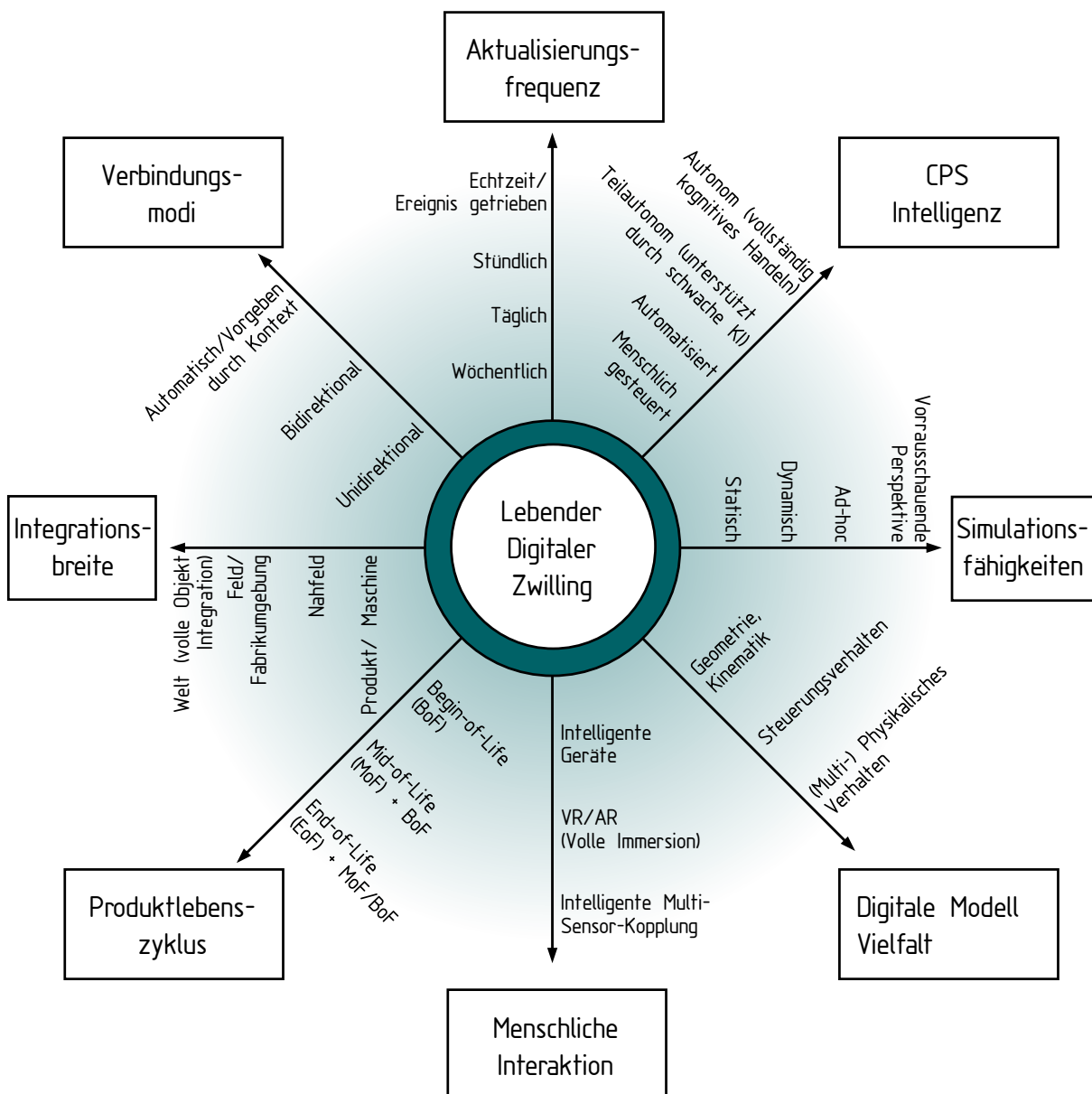


Abb. 2.6: Acht Dimensionen zur Klassifizierung von Digitalen Zwillingen nach Stark und Dame-rau [6].

Van der Valk et al. [7] adressieren den Wunsch einer klaren Unterscheidbarkeit verschiedener Digitaler Zwillingstypen, als sogenannte Archetypen. Grundlage ihrer Einordnung stellt die von van der Valk et al. [51] entwickelte Taxonomie dar, welche basierend auf Expert:inneninterviews adaptiert wurde, sodass sie die relevanten Charakteristiken Digitaler Zwillinge erfassen kann. Tabelle 2.3 zeigt die Taxonomie auf. Die Charakteristiken sind verschiedenen Dimensionen zugeordnet, die wiederum in Meta-Dimensionen zusammengefasst sind. Die Meta-Dimensionen sind: Datenerfassung, Datenverarbeitung und -verteilung und konzeptionelle Umsetzung.

Datenerfassung

Die Meta-Dimension „Datenerfassung“ beschreibt alle Prozesse zur Erfassung von Daten in einem Digitalen Zwilling. Diese Kategorie umfasst die Dimensionen Datenerhebung, Datenquellen, Synchronisation und Dateneingabe:

- **Datenerhebung:** Die Datenerhebung erfolgt entweder automatisiert, wobei Daten vollständig durch Systeme wie Sensoren erfasst werden, oder semi-manuell, was eine Kombination aus automatisierten und manuellen Prozessen durch menschliche Maschinen-Schnittstellen bedeutet.
- **Datenquellen:** Bei den Datenquellen können die Daten entweder aus einer einzelnen Quelle stammen, wie ausschließlich von Sensoren, oder aus mehreren Quellen, wie Sensoren, externen Datenbanken und Wetterdiensten, um eine umfassende Datenerfassung zu gewährleisten.
- **Synchronisation:** Die Synchronisation beschreibt die Notwendigkeit, die Daten zwischen dem Digitalen Zwilling und dem physischen Objekt zu synchronisieren. Dies kann mit einer notwendigen Synchronisation erfolgen, um die Aktualität und Genauigkeit der Daten sicherzustellen, oder in seltenen Fällen ohne Synchronisation, wenn dies nicht erforderlich ist.
- **Dateneingabe:** Die Dateneingabe kann sowohl rohe als auch vorverarbeitete Daten umfassen. Rohdaten sind unverarbeitet und ermöglichen eine direkte Abbildung der physischen Welt, während vorverarbeitete Daten bereits durch Software-Tools, analytische Werkzeuge oder intelligente Geräte verarbeitet wurden, um spezifische Analysen oder Anwendungen zu unterstützen.

Datenverarbeitung und -verteilung

Die Meta-Dimension „Datenverarbeitung und -verteilung“ befasst sich mit den Prozessen der Handhabung, Verwaltung und Verteilung von Daten innerhalb eines Digitalen Zwillings. Sie umfasst mehrere Dimensionen, die sicherstellen, dass Daten effizient und sicher genutzt werden können, um die volle Funktionalität und Interoperabilität des Digitalen Zwillings zu gewährleisten.

- **Daten-Governance:** Die Daten-Governance ist eine der wichtigsten Dimensionen im Umgang mit Daten. Sie umfasst Regeln und Richtlinien zu Themen wie Datensicherheit, Datenhoheit und Zugangskontrolle. Diese Dimension ist in zwei Hauptcharakteristiken unterteilt: Regeln angewendet und Regeln nicht angewendet. Die Anwendung von Daten-Governance-Richtlinien wird als notwendig erachtet, um die Integrität und Sicherheit der Daten im Digitalen Zwilling zu gewährleisten.

- **Datenverbindung:** Die Datenverbindung beschreibt die Art der Datenflüsse zwischen dem Digitalen Zwilling und dem physischen Objekt. Eine bidirektionale Datenverbindung, bei der der Digitale Zwilling sowohl Daten empfängt als auch an das physische Objekt zurücksendet, ist notwendig, um eine vollständige Interaktion und Rückkopplung zu ermöglichen. Eine unidirektionale Datenverbindung, die nur Daten vom physischen Objekt empfängt, erfüllt die Anforderungen an einen Digitalen Zwilling nicht vollständig.
- **Schnittstelle:** Die Schnittstelle definiert die Kommunikationswege, durch die Daten und Informationen den Digitalen Zwilling verlassen. Hier gibt es zwei relevante Charakteristiken: Mensch-Maschine-Schnittstelle (Human-Machine-Interface, HMI) und Maschine-zu-Maschine-Schnittstelle (M2M). Die HMI ermöglicht es Benutzern, auf die Ausgabedaten des Digitalen Zwillings zuzugreifen, während die M2M-Schnittstelle eine direkte Kommunikation zwischen dem Digitalen Zwilling und dem physischen Objekt ermöglicht. Beide Schnittstellen können gleichzeitig vorhanden sein, um sowohl manuelle als auch automatisierte Interaktionen zu unterstützen.
- **Interoperabilität:** Die Interoperabilität bezieht sich auf die Fähigkeit des Digitalen Zwillings, mit anderen Systemen zu kommunizieren und zu interagieren. Es gibt drei Charakteristiken: keine Interoperabilität, Interoperabilität über einen Übersetzer und vollständige Interoperabilität. Diese Dimension ist entscheidend für die Integration des Digitalen Zwillings in bestehende IT-Landschaften und ermöglicht die nahtlose Datenübertragung und -verarbeitung zwischen verschiedenen Systemen.
- **Zweck:** Der Zweck eines Digitalen Zwillings beschreibt, wofür die gesammelten und verarbeiteten Daten genutzt werden. Hier gibt es drei Hauptcharakteristiken: Verarbeitung, Übertragung und Speicherung. Die Verarbeitung umfasst die Analyse und Nutzung der Daten zur Optimierung und Steuerung des physischen Objekts. Die Übertragung bezieht sich auf die Weitergabe der Daten an andere Systeme oder Nutzer, während die Speicherung die langfristige Archivierung der Daten beinhaltet.

Konzeptionelle Umsetzung

Die Meta-Dimension „Konzeptionelle Umsetzung“ beschäftigt sich mit den konzeptionellen Aspekten eines Digitalen Zwillings und umfasst die Dimensionen Genauigkeit, konzeptionelle Elemente und Erstellungszeitpunkt. Diese Dimensionen definieren die grundsätzliche Zielsetzung und den Detaillierungsgrad des aufzubauenden oder existierenden Digitalen Zwillings.

- **Genauigkeit:** Die Genauigkeit beschreibt den Umfang des Modells eines Digitalen Zwillings. Diese Dimension umfasst die Charakteristiken „identisch“ und „teilweise Genauigkeit“. Identisch bedeutet, dass ein physisches Objekt vollständig und detailliert abgebildet wird, während teilweise Genauigkeit nur die wesentlichen Teile eines physischen Objekts umfasst. Die ideale Charakteristik identisch wird oft als nicht vollständig erreichbar betrachtet, weshalb sie in der Praxis seltener Anwendung findet.

- **Konzeptionelle Elemente:** Diese Dimension unterscheidet zwischen „physisch unabhängig“ und „physisch gebunden“. Physisch unabhängig beschreibt eine virtuelle Darstellung, die unabhängig von einem physischen Gegenstück existiert. Physisch gebunden bedeutet, dass das physische Objekt ein integraler Bestandteil des Digitalen Zwillings ist. Diese Unterscheidung beeinflusst die Definition des Digitalen Zwillings, jedoch nicht die umgesetzte Verbindung zwischen der physischen und realen Instanz.
- **Erstellungszeitpunkt:** Der Erstellungszeitpunkt eines Digitalen Zwillings wird durch die Charakteristiken „digital zuerst“, „physisch zuerst“ und „gleichzeitig“ beschrieben. Digital zuerst bedeutet, dass der Digitale Zwilling vor dem physischen Objekt entwickelt und einsatzbereit ist. Physisch zuerst bedeutet, dass das physische Objekt vor der digitalen Darstellung existiert. Gleichzeitig bezieht sich darauf, dass beide Objekte zur gleichen Zeit entwickelt und in Betrieb genommen werden. Dieser Zeitpunkt markiert die Fertigstellung und Inbetriebnahme des Digitalen Zwillings.

Die Taxonomie kann als Ausgangspunkt für weitere Forschung dienen. Sie ermöglicht es, archetypische Muster von Digitalen Zwillingen abzuleiten und die verschiedenen Ansichten zu diesem Konzept zu vereinheitlichen. In der Arbeit von van der Valk et al. [7] werden die genannten Charakteristika in vier Kategorien eingeteilt: verpflichtend (**Mandatory**), gegenseitig ausschließend (**Mutually Exclusive**), nicht relevant (**Not relevant**) und optional (**Optional**). Die Einordnung erfolgt anhand folgender Regeln: Charakteristika, die für die grundlegende Funktionalität und den Betrieb eines Digitalen Zwillings unerlässlich sind, werden als verpflichtend eingestuft. Diese Merkmale stellen sicher, dass der Digitale Zwilling seine Hauptaufgaben erfüllen kann. Charakteristika, die sich gegenseitig ausschließen und nicht gleichzeitig vorhanden sein können, werden als gegenseitig ausschließend klassifiziert. Diese Merkmale definieren spezifische Eigenschaften, die nur in einer bestimmten Ausprägung auftreten können. Charakteristika, die in der Praxis keine signifikante Rolle spielen oder selten angewendet werden, werden als nicht relevant eingestuft. Diese Merkmale sind für den spezifischen Anwendungsfall eines Digitalen Zwillings nicht von Bedeutung. Charakteristika, die zusätzliche Funktionen bieten und die Flexibilität des Digitalen Zwillings erhöhen, werden als optional klassifiziert. Diese Merkmale sind nicht zwingend erforderlich, können aber den Nutzen und die Anwendungsmöglichkeiten des Digitalen Zwillings erweitern.

Alle Mediatoransätze verfolgen das gemeine Ziel, die Kerneigenschaften des Konzepts „Digitaler Zwilling“ zu identifizieren und unterschiedliche Ansätze in ein zusammengehörendes Bild einzuordnen. Insgesamt kann festgehalten werden, dass der Digitale Zwilling vielschichtig und geprägt von diversen Anwendungsfeldern ist. Ein Überblick über die Anwendung von Digitalen Zwillingen in allen Anwendungsbereichen überschreitet den Fokus dieser Arbeit. Im nächsten Schritt wird daher die Anwendung des Konzepts Digitaler Zwilling eingegrenzt auf die Strukturmechanik vorgestellt.

Tabelle 2.3: Taxonomie Digitaler Zwillinge nach der Valk et al. [7].

Meta-Dimensionen	Dimension	Charakteristiken		
Datenerfassung	Datenerhebung	Automatisiert	Semi-Manuell	
	Datenquellen	Mehrere Quellen	Einfache Quelle	
	Synchronisation	Mit	Ohne	
	Dateneingabe	Rohdaten	Vorverarbeitet	
Datenverarbeitung	Data Governance	Angewendet	Nicht angewendet	
	Datenverknüpfung	Bidirektional	Unidirektional	
	Schnittstelle	HMI	M2M	
	Interoperabilität	Keine	Via Übersetzer	Voll
	Zweck	Verarbeiten	Übertragen	Speicher
Konzeptionelle Umsetzung	Genauigkeit	Identisch	Partiell	
	Bausteine	Unabhängig	Verbunden	
	Entstehungszeit	Digital-First	Physical-First	

2.3 Der Digitale Zwilling in der Strukturmechanik

Durch den schnellen Anstieg und die parallele Ausbreitung des Digitalen Zwilling in unterschiedlichsten Fachbereichen haben sich verschiedene Interpretationen des Konzepts verbreitet. Die Übersicht der Definitionen, siehe Abschnitt 2.2.1, zeigt, wie unterschiedliche Disziplinen mit unterschiedlichen Anforderungen und Schwerpunkten die Charakterisierung des Digitalen Zwilling beeinflussen. Zahlreiche Review-Paper fassen thematisch gebündelt Entwicklungen zusammen, einschließlich struktureller Aspekte wie beispielsweise Luftfahrt [52, 53, 54] oder Predictive Maintenance [55, 56]. Das Konzept des Digitalen Zwilling findet weiter darüber hinaus Anklang in vielen weiteren Bereichen, beispielsweise der Medizintechnik [57, 58, 59] oder der Stadt- und Infrastrukturplanung [60, 61]. Obwohl der Flugzeugbau, ein zentrales Feld im Bereich des Leichtbaus, als eine der ersten Domänen das Konzept des Digitalen Zwilling aufgriffen hat [42, 37], spielt der Digitale Zwilling im Leichtbau oder, allgemeiner gefasst, in der Strukturmechanik bisher eine untergeordnete Rolle.

Im folgenden Abschnitt wird der Stand der Technik für den Digitalen Zwilling in der Strukturmechanik ermittelt und analysiert. Das Vorgehen folgt einer systematischen Literaturrecherche. Im ersten Schritt werden Suchstrings ermittelt um passende Quellen zu identifizieren. Nach einer zweistufigen Filterung folgt eine quantitative und qualitative Auswertung. Ziel ist die

Tabelle 2.5: Verwendete Suchstrings zur Literaturrecherche für den Digitalen Zwilling mit dem Schwerpunkt in der Strukturmechanik, Suchergebnisse Stand August 2023, Suchstrings angegeben für Scopus-Schreibweise.

Thema	Suchstring	Scopus	Scholar	Web of Science	IEEEexplore
Allgemein	TITLE("digital twin" AND ("structural mechanics" OR "lightweight design" OR "lightweight" OR "structure"))	93	63	25	14
Auslegung	TITLE("digital twin" AND ("structure" OR "structural") AND ("design" OR "modelling" OR "modeling" OR "optimization" OR "optimisation"))	18	11	6	0
Betrieb	TITLE("digital twin" AND ("structural monitoring" OR "structural health monitoring" OR "shm" OR "load monitoring"))	18	23	4	0
Fatigue	TITLE("digital twin" AND ("structure" OR "structural") AND ("remaining useful life" OR "RUL" OR "fatigue"))	9	4	3	0

Ermittlung des aktuellen Anwendungs- und Wissensstandes zu Digitalen Zwilling in der Strukturauslegung und Überwachung, sowie ein Überblick über gewählte Lösungen und Umsetzungen.

2.3.1 Methodischer Aufbau der Literaturrecherche

Wie zu Beginn des Abschnitt 2.2 erkennbar, fächert sich das Thema Digitaler Zwilling in unterschiedlichste Fachdisziplinen und Anwendung auf. Um einen fokussierten Überblick über den Themenbereich der Strukturmechanik zu bekommen, muss die Suche weiter eingeschränkt werden. Wir konzentrieren uns im folgenden auf den Digitalen Zwilling in der Strukturmechanik und im Leichtbau, mit den Schwerpunkten Auslegung und Modellierung, SHM und Datenerfassung, Ermüdung und Restlebensdauerbewertung (Remaining Useful Life (RUL)). Tabelle 2.5 fasst die entwickelten Suchstrings für die genannten Themen zusammen. Sie sind in der Schreibweise der Scopus-Suche erstellt, wurden aber auch in adaptierter Schreibweise für die Suchen in Google Scholar, Web of Science und IEEEexplore verwendet. Die Suche wurde auf Publikationen ab dem Jahr 2013 und auf Literatur in englischer Sprache eingeschränkt.

Tabelle 2.7: Filterung der Suchergebnisse.

Filterung	Inklusionsmerkmal	Exklusionsmerkmal	Erg.
Formal	Volltext	Duplikate	129
	Konferenzartikel	nur Abstract	
	Journalartikel	Hochschulschriften	
Inhaltliche Detail- auswertung	Themenbezug: Strukturbauteil oder- system SHM, Luftfahrt	Fremdthemen wie: Finanzen, Gesundheit, Elektrische Systeme, Architektur, Bauwesen (Brücken), Facility Management Datenstrukturen <5 Textseiten Reviewartikel nicht Verfügbarer Volltext	36

Die Anzahl der Suchergebnisse in den jeweiligen Datenbanken sind ebenfalls Tabelle 2.5 zu entnehmen. Die Ergebnisse werden in unterschiedlichen Schritten vorgefiltert. Im ersten Schritt erfolgt eine formale Prüfung der Suchergebnisse. Es werden Duplikate und Quellen ohne Volltext (nur Abstract) entfernt. Weiter werden Hochschulschriften wie Masterarbeiten und Dissertationen, sowie Quellen die nur „submitted“ und damit nicht peer-reviewed, sind aussortiert. Im zweiten Schritt erfolgt eine inhaltliche Filterung. Dabei werden Titel und Abstracts untersucht und hinsichtlich ihrer thematischen Passung sortiert. Im letzten Schritt erfolgt eine detaillierte Auswertung anhand des Volltextes. In manchen Fällen konnte dieser, aus Verfügbarkeitsgründen nicht ausgewertet werden. Daher kam es auch hier nochmal zu einer Reduktion der zur Verfügung stehenden Quellen. Tabelle 2.7 fasst Inklusions- und Exklusionsmerkmale der Filterung zusammen.

In der Detailauswertung werden die 36 verbleibenden Publikation ausgewertet. Die Detailauswertung gliedert sich in eine quantitative und eine qualitative Betrachtung. Letztere schaut in die vorgestellten Publikationen und wertet individuelle Ergebnisse aus. In der quantitativen Auswertung werden die Ergebnisse anhand von drei Kategorien: Motivation und Problemstellung, Kopplungsgrad sowie Anwendungsfeld eingeordnet, um eine quantitative Übersicht über potentielle Schwerpunkte zu erhalten.

2.3.2 Qualitative Auswertung

Der erste Schritt in der Entwicklung von Strukturbauteilen ist die Auslegungs- und Designphase. Es finden sich drei Arbeiten, in denen der Einsatz des Digitalen Zwillings in dieser Phase betrachtet wird. Ryll et al. [62] beschäftigen sich in ihrer Arbeit mit der Entwicklung eines Digitalen Zwillings für hybride Leichtbaustrukturen, wobei sie den Schwerpunkt auf die Verwendung werkstoffübergreifender Materialkombinationen während der Designphase legen. Ihr Ansatz betont die ganzheitliche Betrachtung der Prozesskette, um die Verbindungen zwischen Prozessen, Parametern, Strukturen und Eigenschaften zu verstehen. Sie erproben diesen Ansatz anhand eines Demonstrators aus Aluminiumprofilen, der die Datenerfassung, -übertragung, -verarbeitung und -visualisierung vom realen zum digitalen Bauteil verdeutlicht. Kokkonen et al. [63] diskutieren die Berücksichtigung von Unsicherheiten und Wechselwirkungen verschiedener Faktoren bei der Konstruktion ermüdungskritischer Schweißverbindungen. Hierbei fließen Schwankungen in der Fertigungsqualität und Anforderungen an die Nachhaltigkeit mit ein. Der Digitale Zwilling im Entwurfsprozess ermöglicht laut Kokkonen et al. [63] die Übertragung von Informationen zwischen Ingenieursteams, sowie die fortlaufende Überprüfung und Validierung der verwendeten Modelle im robusten Designprozess. Der Digitale Zwillinge für die betriebsbegleitende Überwachung der ermüdungskritischen Schweißnähte könne aus den parametrischen Modellen abgeleitet werden, die während der modellbasierten Auslegung und Robustheitsoptimierung in der Designphase verwendet werden. Der Digitale Zwilling nach Kokkonen et al. [63] bezieht sich auf das digitale Modell. Zhu und Wang [64] stellen einen umfassenden Ansatz zur Analyse sicherheitsrelevanter Faktoren in vorgespannten Stahlkonstruktionen vor. Ihr Ziel ist die Verbesserung der Sicherheitsanalysen und Designentscheidungen durch ein besseres Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Design und mechanischen Parametern. Dabei wird eine bidirektionale Kopplung zwischen realen und digitalen Modellen realisiert, um sicherheitsrelevante Parameter zu identifizieren und zu optimieren.

In mehreren Veröffentlichungen untersucht eine Gruppe um Liu et al. am Beispiel einer vorgespannten Stahlkonstruktion unterschiedliche Aspekte des Digitalen Zwillings: Multidimensionale Modellierung [65], SHM und Wartungsaspekte [66], Impact-Antworten [67] und einen durch den Digitalen Zwilling begleiteten Aufbauprozess [68]. Ebenfalls im Bereich Infrastruktur und Gebäude sind Condemine et al. [69] einzuordnen. Beschrieben wird eine Echtzeitabschätzung der Ermüdung von hydraulischen Strukturen, mit dem Ziel, die Wartung zu optimieren und Kosten zu senken. Es handelt sich um eine unidirektionale Kopplung, bei der reale Sensordaten in ein digitales Modell integriert werden, um dynamische Vorhersagen und Bewertungen zu ermöglichen. Die Anwendung des Systems wird anhand einer Fallstudie an einem Schleusentor am Rhône-Fluss demonstriert. Die Betrachtung von Fatigue und die Nutzung des Digitalen Zwillings zur Ermittlung der Restlebensdauer wird auch in anderen Arbeiten [63, 70, 71, 72] betrachtet. Schmid et al. [73] nutzen den Experimentierbaren Digitalen Zwilling (EDZ) [40] zur Berücksichtigung des Ermüdungsverhaltens in der Planungsphase von Strukturen. Durch den einfachen und frühen Vergleich von Traglösungen können spätere Dimensionsierungsprobleme durch Ermüdungsanforderungen frühzeitig erfasst und vermieden werden.

Tygesen et al. [74] entwickeln einen Ansatz für die Vorhersage von Ermüdungsschäden an Offshore Ölplattformen. Dafür wird ein initiales Modell durch erfasste Last- bzw. Spannungsdaten aktualisiert, um die vorliegenden statischen und dynamischen Eigenschaften der Plattform abzubilden.

Eng verbunden mit den Betrachtungen um Ermüdung und Restlebensdauerbewertung sind Zustandsüberwachung (Condition Monitoring (CM)) und SHM Anwendungen. CM bezieht sich hier auf die Erfassung allgemeiner Betriebsdaten, während mit SHM explizit das Monitoring struktureller Eigenschaften gemeint ist. Auf die Nutzung des Digitalen Zwillings für das CM gehen einzelne Quellen ein [65, 66, 69, 64, 75]. Momber et al. [76] beschreiben beispielsweise die Entwicklung eines Digital-Twin-Konzepts zur Zustandsüberwachung und präskriptiven Wartungsplanung von Oberflächenschutzsystemen für Windturbinen unter Nutzung von realen Sensordaten und mathematischen Modellen. Der präsentierte Digitale Zwilling verwendet Daten von realen Sensoren zur Überwachung und Analyse, enthält jedoch keine Rückkopplung vom digitalen Modell zurück zum physischen System. Ebenfalls auf das CM von Windenergieanlagen bezogen beschreiben Liu et al. [77] die Entwicklung eines „Digital-Twin-Frameworks“ zur Simulation und Zustandsüberwachung schwimmender Windturbinenstrukturen während der Installations- und Betriebsphasen. Die angestrebte Anwendung umfasst die Integration von Echtzeit-Sensordaten und Simulationen zur Bewertung und Optimierung von Installationsprozessen sowie zur Überwachung und Analyse des Betriebszustands. Es wird eine bidirektionale Kopplung angestrebt, jedoch ist diese im Paper nicht vollständig umgesetzt; es bleibt bei einer unidirektionalen Kopplung von real zu digital. Revetria et al. [78] präsentieren die Erfassung von Verformungs- und Spannungsdaten belasteter Metallregale mittels Dehnungsmessstreifen, deren Daten in Echtzeit an die ThingSpeak-Plattform gesendet und analysiert werden, um ein digitales Modell zu aktualisieren. Die Ergebnisse werden über Augmented-Reality-Brillen visualisiert, wodurch den Betreibern der aktuelle Spannungszustand und die Belastungshistorie der Bauteile angezeigt werden, wobei eine unidirektionale Kopplung von real zu digital umgesetzt ist.

Richstein et al. [79] untersucht die Rolle des SHM in der Entwicklung von Digitalen Zwillingen für strukturelle Anwendungen. SHM wird als ein entscheidendes Element zur Erkennung und Bewertung von Schäden in realen Strukturen betrachtet, um eine kontinuierliche Anpassung des Digitalen Zwillings an den aktuellen Zustand der physischen Struktur zu ermöglichen. Anhand eines Kragträgers wird gezeigt, wie SHM-Methoden zur Modellanpassung des Digitalen Zwillings bei der Detektion von Schäden eingesetzt werden können, um die strukturelle Integrität während der Lebensdauer sicherzustellen. Während in wenigen Anwendungen nur ein Modell betrachtet wird [80, 81] beziehen sich viele auf die uni- [82, 83] oder bidirektionale [74, 84] Kopplung mit realen Strukturbauteilen. Ritto und Rochinha [85] stellen die Entwicklung eines Digitalen Zwillings für die Schadensdetektion in schwer zugänglichen Strukturen in rauen Umgebungen wie bei Offshore Anwendungen dar, indem physikbasierte Modelle mit maschinellem Lernen kombiniert werden. Der Digitale Zwilling nutzt reale Daten zur Kalibrierung und Vorhersage von Schäden, und seine Vorhersagen werden verwendet, um in Echtzeit Entscheidungen zur Steuerung und Schadensbewertung der realen Struktur zu treffen. Im Kon-

text der Schadensdetektion, wie sie auch im vorherigen Artikel behandelt wird, beschreibt der Artikel von Bartholomew et al. [86] die Entwicklung eines autonomen SHM-Systems für seismisch anfällige Offshore-Strukturen, das in Echtzeit die strukturelle Integrität überwacht. Das SHM-System integriert Hardware und Software mit IoT-Fähigkeiten, um Daten zu erfassen, zu analysieren und in ein physikbasiertes Modell zu interpretieren, das den Zustand der Offshore-Plattform nachbildet und zur Entscheidungsfindung dient. Es handelt sich um eine bidirektionale Kopplung, bei der reale Daten zur Aktualisierung des digitalen Modells verwendet werden, welches wiederum Handlungsempfehlungen für die reale Struktur gibt. Rølvåg et al. [87] beschreiben die Implementierung eines Digitalen Zwillings im SHM eines Offshore Kranauslegers, der zur Echtzeitüberwachung von Belastungen und Schäden eingesetzt wird. Es handelt sich um eine bidirektionale Kopplung, bei der physische Sensordaten (beispielsweise Länge des Kranauslegers, Neigungswinkel der Haupt- und Außenarme, Schwenkwinkel, Hydraulikdruck im Hauptzylinder sowie Bewegungsdaten des Schiffs) das digitale Modell aktualisieren und dieses wiederum Informationen über Belastungen, Spannungen und strukturelle Zustände an die reale Struktur zur Entscheidungsunterstützung und für Handlungsempfehlungen liefert.

Eine typische Anwendungsbranche ist z.B. die Luftfahrt [88, 70]. Mileanoski et al. [89] entwickeln und validieren einen Digitalen Zwilling zur Zustandsüberwachung eines „single-stringer panel“ aus FVK. Der Digitale Zwilling, basierend auf einem FE-Modell, wird durch experimentelle Daten wie Verschiebungs- und Dehnungsmessungen verifiziert und anschließend zur Überwachung von Schäden wie der Ablösungen von Haut und Stringern verwendet. Es handelt sich um eine unidirektionale Kopplung von real zu digital, bei der reale Daten zur Aktualisierung und Überwachung des digitalen Modells genutzt werden. Seshadri und Krishnamurthy [90] beschreiben die Entwicklung multidisziplinärer, integrierter Werkzeuge für das SHM von beschädigten Flugzeugstrukturen. Die Methoden kombinieren multiphysikalische Modelle, Sensorinformationen und Eingabedaten von einem in Betrieb befindlichen Flugzeug, um das Produktleben des entsprechenden physischen Zwillings zu spiegeln und vorherzusagen. Belastungsniveaus müssen unter einem reduzierten Tragfähigkeitsniveau gehalten werden, um einen sicheren Betrieb des Flugzeugs zu gewährleisten. Dies impliziert, dass das digitale Modell verwendet wird, um Echtzeitvorhersagen über die Schadensgröße und die sichere Tragfähigkeit zu liefern, was möglicherweise eine Anpassung der Belastung in der realen Struktur während des Flugs erfordert. Daher gibt es eine indirekte Rückkopplungsschleife, bei der die digitalen Vorhersagen genutzt werden, um die Belastung der realen Struktur zu steuern.

Neben Seshadri und Krishnamurthy [90] beschäftigen sich nur wenige Publikationen mit der tatsächlichen Steuerung und Regelung von strukturmechanisch relevanten Aspekten mit oder durch den Digitalen Zwilling. Borgo et al. [91] präsentieren die Entwicklung eines Digitalen Zwillings zur Steuerung in Dynamikanwendungen (aktive Vibrationskontrolle) anhand einer repräsentativen dreistöckigen Gebäudestruktur unter erdbebenartigen Bedingungen. Der Digitale Zwilling bietet in dieser Anwendung die Möglichkeiten, Modellparameter zuzuweisen oder abzuleiten sowie datenbasierter Komponenten hinzuzuziehen, um die Validität von Modellvorhersagen weiter zu erhöhen. Die Autoren nennen als Anwendungspotentiale die Bewertung der Reglerrobustheit bei bekannten Unsicherheitsniveaus und die Rekalibrierung des Reglers

während einer „Asset-Management-Phase“. Der genannte Kalibrierungsschritt sowie der Kontrollaspekt sprechen für eine bidirektionale Kopplung.

In nicht wenigen Fällen steht der Modellierungsaspekt des Digitalen Zwillings im Vordergrund [92, 71, 93, 94]. Phelps und Tessler [95] untersuchen die Anwendung der inversen Finite-Elemente-Methode (iFEM) zur Erstellung eines strukturellen Digitalen Zwillings eines vereinfachten Containerschiffmodells. Durch die Verwendung von iFEM können Verformungen und Spannungen basierend auf begrenzten Dehnungssensordaten rekonstruiert werden. Die Methode wird durch Vergleiche mit hochauflösenden FEM-Referenzmodellen validiert. Krause et al. [96] zeigen die Entwicklung einer neuen Methodik zur Echtzeitkopplung von Starrkörperdynamik und Strukturmechanik zur Simulation von Digitalen Zwillingen. Durch die Kombination der Transfermatrixmethode und des Prinzips der virtuellen Verschiebung können Verformungen und Spannungen effizient berechnet werden. Als Demonstrationsobjekt wird ein Leichtbauroboter vorgestellt, der mit einem fixierten Balken interagiert, um die Integration und Anwendung der Methode zu veranschaulichen. Diese Methodik ermöglicht eine präzise Simulation des Systemverhaltens unter realen Bedingungen, was für Digitale Zwillinge wichtig ist, um das Verhalten realer Bauteile genau zu modellieren und vorherzusagen.

2.3.3 Quantitative Auswertung

In der quantitative Auswertung steht die zahlenmäßige Auswertung der zuvor vorgestellten, verbleibenden 36 Publikationen im Vordergrund. Ziel der Auswertung ist es Interessenschwerpunkte in der Forschung zu Digitalen Zwillingen im Kontext „Strukturen“ und „Strukturmechanik“ zu identifizieren. Eine detaillierte Übersicht der Auswertung, inklusive der Zuordnung aller Quellen, ist in der Tabelle B.1 im Anhang zu finden.

Motivation und Problemstellung

Im Rahmen der Kategorie Motivation und Problemstellung werden die präsentierten Publikationen hinsichtlich ihrer Zielsetzung ausgewertet. Um diese zu Bündeln werden folgende Gruppen erstellt:

- **Design:** Anwendung des Digitalen Zwillings zur Entwicklung und Auslegung von Strukturen in der Entwurfsphase
- **Modellierung:** Entwicklung von Modellierungsansätzen (für Strukturen) im/für den Digitalen Zwillings (Entwurfs- und Betriebsphase)
- **Modellupdate:** Umsetzung von (Re-)Kalibrierung und Modellupdates für den Digitalen Zwillings
- **CM:** Umsetzung von Betriebs- und/oder allg. Zustandsüberwachung (CM)
- **SHM:** Umsetzung von SHM-Systemen für oder mit dem Digitalen Zwillings
- **Steuerung:** Einsatz des Digitalen Zwillings zur Steuerung oder Regelung von Strukturen oder deren Einflussgrößen
- **Wartung:** Nutzung des Digitalen Zwillings für die Instandhaltung oder Wartungsplanung

- **Fatigue:** Abbilden von Ermüdung oder Restlebensdauerbewertung (RUL) im/mit dem Digitalen Zwilling

Publikationen können einer oder mehreren Problemstellungen zugeordnet werden. Die meisten Veröffentlichung (27) widmen sich ganz oder teilweise der Betrachtung eines Überwachungsansatzes, davon 17 mit dem Schwerpunkt eines SHM-Systems, 10 weitere mit der allgemeineren Zustandsüberwachung. Zweitgrößter Themenschwerpunkt ist mit 17 Veröffentlichungen die Wahl oder Entwicklung einer geeigneten Modellierung für Strukturen im Digitalen Zwilling. Teilweise werden Überlegungen zur Modellierung mit der Betrachtung zu Modellupdates (10) erweitert. Auslegungs- und Designaspekt (3) sowie Steuerungs-/Regelungsaspekt (2) stehen seltener im Fokus.

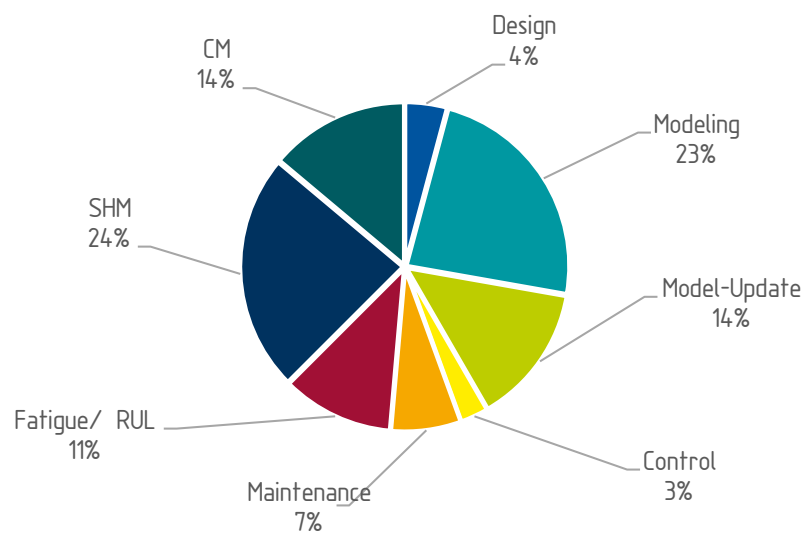


Abb. 2.7: Auswertung der Publikation zum Digitalen Zwilling der Struktur hinsichtlich ihrer Problemstellung, mehrfache Zuordnung möglich.

Kopplungsgrad

Bei der Auswertung der Umsetzung konzentrieren wir uns auf den Kopplungsgrad. Der Unterteilung nach Jones et al. [35] folgend unterteilen wir in:

- **Digitales Modell (DM):** Präsentiert wird nur ein Modell im digitalen Raum. Es wird keine Kopplung zu realem Bauteil realisiert.
- **Digitaler Schatten (DS):** Umsetzung einer unidirektionalen Kopplung real zu digital, beispielsweise durch die Erfassung und Verarbeitung von Sensorwerten und/oder Modellupdate.
- **Digitaler Zwilling:** Umsetzung einer bidirektionalen Kopplung von real zu digital und vice-versa, Umsetzung der unidirektionalen Kopplung real zu digital wie im Digitalen Schatten, ergänzt um Feedback von digital zu real, beispielsweise durch Handlungsempfehlungen, wie Steuerungssignale oder ein maßgeschneidertes Wartungsprofil.

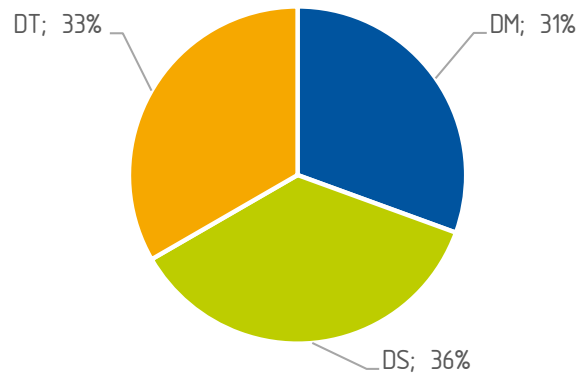


Abb. 2.8: Auswertung des Kopplungsgrades in der beschriebenen Literaturanalyse, einfache Zuordnung.

Jeder Publikation wurde genau eine Kopplungsart zugeordnet. Abbildung 2.8 zeigte die resultierende Verteilung. Nicht alle Veröffentlichungen nehmen selbst eine eindeutige Zuordnung ihres Kopplungsgrades vor, daher wurde häufig eine Einschätzung basierend auf den im Paper präsentierten Ergebnissen vorgenommen. Die Auswertung dient daher nur einer groben Einordnung. Die Auswertung zeigt eine gleichmäßige Verteilung der Kopplungsgrade zu jeweils circa ein Drittel.

Anwendungsfall

Neben Problemstellung und Kopplungsgrad wird der Anwendungsfall ausgesucht. Insgesamt konnten acht Anwendungsfälle zusammengefasst werden:

- Marine und Off-Shore Anwendung (Schiffe, Plattformen,...)
- Windkraftanlagen
- Luftfahrt
- Raumfahrt
- Allgemeiner Maschinenbau
- Gebäude und Infrastruktur mit klarem Bauteilbezug
- Demonstratoren und akademische Beispiele

Jeder Quelle wird genau eine Anwendung zugeordnet. Die Aufteilung der Anwendungen ist Abbildung 2.9 zu entnehmen. Neben diversen Demonstratoren stellen die Anwendungsfelder „Marine und Off-Shore“ sowie die „Luftfahrt“ Schwerpunkte in der Anwendung.

Die Heatmap in Abb. 2.10 fasst die kombinierte Analyse der Problemstellungen und technischen Anwendungen des Digitalen Zwillings zusammen. Aus der Darstellung lassen sich folgende zentrale Erkenntnisse ableiten:

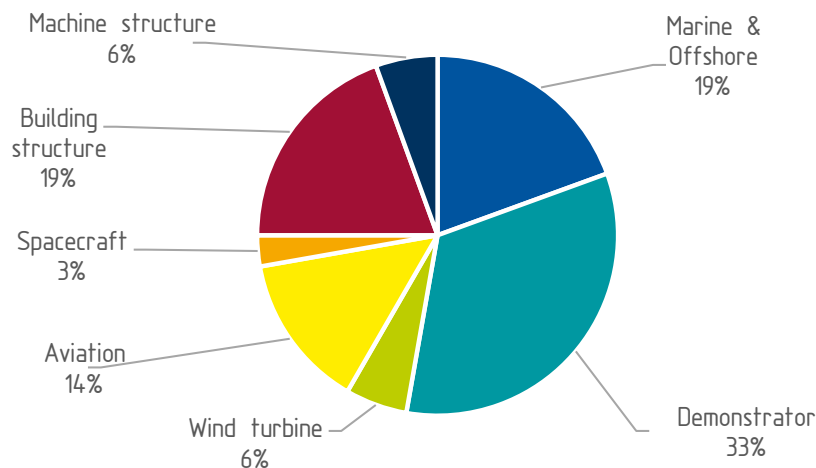


Abb. 2.9: Auswertung des (Ziel-) Anwendungsfeldes in der beschriebenen Literaturanalyse.

Nutzung des Digitalen Zwillings in der Entwurfs- und Auslegungsphase: Die Entwurfs- und Auslegungsphase zeigt selten eine direkte Motivation für den Einsatz des Digitalen Zwillings, insbesondere im Bereich strukturmechanischer Anwendungen. Ein möglicher Grund könnte darin liegen, dass in dieser Phase vor allem Modelle ohne die spezifischen Eigenschaften eines Digitalen Zwillings genutzt werden. Dabei bleibt der Digitale Zwilling in der Entwurfsphase definitionsgemäß unberücksichtigt. Eine weitere Erklärung könnte in der Verbindung mit MB-SE liegen, das als potentielle Vorstufe des Digitalen Zwillings angesehen wird, jedoch in der vorliegenden Literaturrecherche nicht explizit als Suchbegriff berücksichtigt wurde. Es ist auch denkbar, dass aufgrund der vergleichsweise geringeren Komplexität des Entwurfsprozesses der Mehrwert eines Digitalen Zwillings in dieser Phase als nicht relevant erachtet wird.

Relevanz der Modellentwicklung im Kontext des Digitalen Zwillings: Die Entwicklung geeigneter Modelle stellt hingegen eine zentrale Motivation dar, sobald digitale Aspekte einbezogen werden. Die hohe Relevanz der Modellentwicklung lässt sich durch die zentrale Funktion der Modelle im Digitalen Zwilling erklären. Sie bilden die Basis für Simulationen, Analysen und Entscheidungsprozesse. Die Ergebnisse der Heatmap zeigen, dass die Bedeutung der Modellentwicklung weit über die bloße Erstellung hinausgeht und sie als kontinuierlicher Prozess verstanden wird, der eng mit Modellkalibrierung und -aktualisierung verknüpft ist.

Häufigkeit von SHM und CM: Die Motivation durch SHM und CM zeigt eine besonders hohe Relevanz, insbesondere in den Anwendungsfeldern Marine & Offshore sowie Luftfahrt. Diese Häufung lässt sich durch die enge Verbindung zur Ermüdungsbewertung und zur Einschätzung der Restlebensdauer erklären, die beide in diesen Bereichen zentrale Rollen spielen. SHM und CM gehen zudem Hand in Hand und dominieren als Motivation für den Einsatz des Digitalen Zwillings. Insgesamt stechen die Anwendungsfelder Luftfahrt und Marine als treibende Kräfte hervor. Gründe hierfür könnten in den spezifischen Anforderungen dieser Bereiche liegen. In der Luftfahrt spielen Sicherheit und der hohe Wartungsaufwand eine Rolle, während im maritimen Bereich die eingeschränkte Zugänglichkeit von Strukturen eine potentielle Motivation

für die Implementierung Digitaler Zwillinge darstellt. Während Überwachungsszenarien (z.B. SHM und CM) intensiv betrachtet werden, zeigt die Heatmap, dass die Übertragung dieser Szenarien in konkrete **Steuerungs- und Wartungsaktivitäten** kaum thematisiert wird. Dies deutet auf eine Lücke hin, die durch eine stärkere Integration des Digitalen Zwillings in die Automatisierung der Strukturnutzung geschlossen werden könnte.

Technologiereifegrad (TRL) von Demonstratoren: Zum Zeitpunkt der Literaturlauswertung konzentrieren sich konkrete Umsetzungen auf Demonstratoren, die meist einen TRL von 4 aufweisen. Dies spiegelt den Entwicklungsstand wider, der sich vornehmlich im experimentellen und pilotierten Stadium befindet.

Unterschiedliche Kopplungen von Modellen: Die Betrachtung der Kopplungsarten (Modell, unidirektional, bidirektional) zeigt keine einheitlichen Trends. Vielmehr wird die Art der Kopplung von den spezifischen funktionalen und operationalen Anforderungen der jeweiligen Anwendungsfälle bestimmt. Während in einigen Fällen einfache Modellkopplungen ausreichen, erfordern andere Szenarien eine enge Interaktion und wechselseitige Datenintegration zwischen physikalischem und digitalem System. Auffällig ist, dass bei SHM-Anwendungen mindestens unidirektionale, oftmals jedoch bidirektionale Kopplungen dominieren. Dies kann durch die Natur der SHM-Systeme erklärt werden, bei der kontinuierliche Datenströme zwischen physikalischen Systemen und ihren digitalen Gegenständen entscheidend sind, um Echtzeitanalysen des strukturellen Zustandes und möglichen Anpassungen zu ermöglichen. Bidirektionale Kopplungen sind insbesondere dann relevant, wenn der Digitale Zwilling aktiv auf das physische System zurückwirkt, beispielsweise durch Modellupdates oder Steuerungsanpassungen. Auch bei Motivationen wie der Modellkalibrierung und dem Modellupdate wird die bidirektionale Kopplung bevorzugt. Dies liegt daran, dass für eine effektive Kalibrierung ein kontinuierlicher Informationsaustausch notwendig ist, bei dem gemessene Daten genutzt werden, um digitale Modelle zu aktualisieren, während diese wiederum Rückschlüsse auf den Zustand des physischen Systems liefern.

		Anwendungsfeld								Kopplung		
		Raumfahrt	Luffahrt	Marine & Offshore	Windenergieanlagen	Gebäudestrukturen	Allg. Maschinenbau	Demonstratoren			Modell	Unidirektional
Motivation	Design	0	0	0	0	1	0	2	Design	2	0	1
	Modellierung	0	1	5	1	3	2	5	Modellierung	9	4	4
	Modellupdate	1	1	2	0	2	0	4	Modellupdate	1	3	6
	CM	0	0	1	2	4	1	2	CM	3	5	2
	SHM	1	4	4	0	1	1	6	SHM	2	7	8
	Steuerung	0	1	0	0	0	0	1	Steuerung	0	1	1
	Wartung	1	0	2	1	1	0	0	Wartung	1	1	3
	Ermüdung	0	3	1	0	1	1	2	Ermüdung	2	4	2

Abb. 2.10: Darstellung der gesamten quantitativen Auswertung als Heatmap.

2.4 Zusammenfassung und Hypothesen dieser Arbeit

Strukturen und ihre Entwicklung haben sich in den letzten Jahrzehnten stetig weiterentwickelt. Multifunktionalität und Sensorintegration haben Strukturbauteile von passiven Elementen zu systemischen Komponenten entwickelt. Als solchen müssen sie auch im Entwurfsprozess durch, an ihre Komplexität angepasste, Herangehensweisen, wie beispielsweise MBSE, betrachtet werden. Die Kontinuität des virtuellen Prozesses stellt der Digitale Faden da. Mit Herstellung der realen Instanz eines Bauteils muss zum Zeitpunkt der Fertigung die Koexistenz der beiden Instanzen berücksichtigt werden.

Aus dieser Fragestellung wurde Anfang der 2000er das Konzept des Digitalen Zwillings geboren. Die Akzeptanz dieses Konzepts zeigt sich in der weiten Ausbreitung und Verwendung des Begriffs in zahlreichen Veröffentlichungen. Dennoch sind sich die verschiedenen Anwendungsbereiche nicht einig in der Definition und Abgrenzung des Begriffs. Das Ergebnis ist eine heterogene Begriffsdefinition, die Uneindeutigkeiten in den Anforderungen und Umfängen des Digitalen Zwillings lässt. Nichtsdestotrotz hat das Konzept des Digitalen Zwillings auch Einzug in den strukturmechanischen Fachbereich erhalten. Basierend auf der quantitativen und qualitativen Auswertung der systematischen Literaturrecherche konnten folgende Schlussfolgerungen

abgeleitet werden: Bisher spielt der Digitale Zwilling in der Entwurfs- und Auslegungsphase eine untergeordnete Rolle, da oft reine Modelle ohne digitale Interaktion betrachtet werden und keine explizite Weiterverwendung in der Betriebsphase angestrebt wird. Im Gegensatz dazu nimmt SHM eine zentrale Aufgabenstellung ein, insbesondere in sicherheitskritischen Bereichen wie der Luftfahrt und im maritimen Umfeld, wo Echtzeitüberwachung und Zustandsbewertung potentiellen Mehrwert bieten. Die Mehrheit der untersuchten Anwendungen befindet sich jedoch auf einem niedrigen TRL, was darauf hinweist, dass der Digitale Zwilling bisher vorwiegend im experimentellen Stadium bleibt und noch nicht in großem Maßstab implementiert wird, siehe Abbildung 2.10.

Die Analyse der Literatur offenbart mehrere zentrale Forschungs- und Entwicklungsbedarfe, die adressiert werden müssen, um die Anwendung und Weiterentwicklung des Digitalen Zwillings in der Strukturmechanik voranzutreiben. Ein zentraler Aspekt ist die Klärung und Einordnung des Begriffs „Digitaler Zwilling“. Dabei geht es weniger darum, neue Definition zu schaffen, sondern vielmehr darum, eine Ordnungsstruktur, beispielsweise eine Taxonomie, zu entwickeln oder anzuwenden, die bestehenden Ansätze einordnet und bündelt. Eine solche Taxonomie sollte die vielfältigen Zielsetzungen und Anforderungen der unterschiedlichen Anwendungen berücksichtigen, ohne diese durch eine enge Definition einzuschränken. Dies würde die Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit von Ansätzen fördern und eine gemeinsame Grundlage für zukünftige Entwicklungen schaffen.

Ein weiterer Bedarf liegt in der Schaffung eines übergeordneten Rahmenkonzepts, das Standards für die Entwicklung Digitaler Zwillinge bereitstellt und gleichzeitig genügend Flexibilität bietet, um Anforderungen verschiedener Anwendungsfälle zu berücksichtigen. Der aktuell niedrige Technologiereifegrad (TRL 4) vieler Digitaler Zwillinge für Strukturen kann unter anderem auf den hohen Entwicklungsaufwand und die geringe Wiederverwendbarkeit bestehender Lösungen zurückzuführen. Um diese Hürden zu überwinden, sind standardisierte Methoden erforderlich, die die Erstellung effizienter gestalten und bestehende Einzellösungen in ein übergreifendes, skalierbares Konzept integrieren. Eine solche Vereinheitlichung und Standardisierung würde nicht nur die Wiederverwendbarkeit gefundener Ansätze erhöhen, sondern auch die Grundlage schaffen, um höhere Technologiereifegrade zu erreichen und die praktische Anwendung des Digitalen Zwillings in der Strukturmechanik nachhaltig voranzutreiben.

Ein weiteres Defizit zeigt sich in der fehlenden verbundenen Betrachtung der Entwurfs- und Betriebsphase. Aktuell wird der Aufbau eines Digitalen Zwillings überwiegend als eine „After-Sales-Lösung“ angesehen, die sich auf den Einsatz in der Betriebsphase konzentriert. Um das Potenzial des Digitalen Zwillings vollständig auszuschöpfen, ist jedoch eine stärkere Integration in die Entwurfsphase erforderlich. Dadurch könnten neue Möglichkeiten zur Optimierung von Entwicklungsprozessen geschaffen und der Mehrwert des Digitalen Zwillings über den gesamten Lebenszyklus einer Struktur hinweg gesteigert werden. Die zentrale Herausforderung an dieser Stelle ist es, die deutlichen Unterschiede in der Entwurfs- und Betriebsphase erkennen und abzudecken.

Zusätzlich wird deutlich, dass viele der grundlegenden Bausteine, wie Modellierung, Sensorik, SHM und Datenvernetzung (IoT), bereits vorhanden sind, jedoch nicht einheitlich verwendet werden. Besonders die uneindeutige Umsetzung der Kopplungsgrade (z. B. Modell, unidirektional, bidirektional) erschwert die Integration und Weiterentwicklung. Die Zusammenführung bestehender Forschungsarbeiten zu SHM und Digitalen Zwillingen ist daher essenziell, da der Digitale Zwillings als logische Weiterentwicklung eines fortgeschrittenen SHM-Systems (Level 4) betrachtet werden kann. Eine eindeutige Definition der Kopplungsgrade kann für Klarheit und eine effizientere Nutzung der bestehenden Technologien sorgen.

Basierend auf den genannten Forschungsbedarfen widmet sich diese Dissertation der zentralen Forschungshypothese:

SHM ist die notwendige Bedingung zur Kopplung von realen und virtuellen Instanzen und somit für die Erstellung eines Digitalen Zwillings für Strukturkomponenten im Betrieb.

Zur Betrachtung dieser zentralen Forschungshypothese werden drei Aspekte vertieft diskutiert:

Unterhypothese 1: Die Entwurfs- und Betriebsphase unterscheiden sich grundlegend in ihren Anforderungen an den Digitalen Zwillings, da in der Entwurfsphase ausschließlich eine digitale Instanz in Form von Modellen vorliegt, während in der Betriebsphase sowohl digitale Modelle als auch eine reale Instanz existieren. Für eine durchgehende Abbildung eines Bauteils über den gesamten Produktlebenszyklus, vor und nach der eindeutigen Definition des Bauteils über die Bauunterlagen, sind daher zwei voneinander unabhängige, anwendungsbezogene Archetypen des Digitalen Zwillings erforderlich.

Unterhypothese 2: Zum Aufbau sowie zur kontinuierlichen Nutzung einer handlungsfähigen Digitalen Zwillings Entität im Betrieb benötigen wir SHM als notwendiges Kopplungselement zwischen realer und virtueller Instanz.

Unterhypothese 3: Die Vernetzung Digitaler Zwillings Entitäten generiert zusätzliches Wissen für jedes individuelle Bauteil.

Die nachfolgenden Kapitel betrachten jeweils eine Unterhypothese (UH). Die abschließenden Bewertung der zentralen Forschungshypothese erfolgt in Kapitel 6.

3 Die zwei Archetypen des Digitalen Zwillings für Strukturen

Die Entwicklung und Anwendung des Digitalen Zwillings hat sich in den letzten Jahren zu einem zentralen Thema in der Strukturmechanik entwickelt. Dennoch zeigen sich deutliche Lücken, insbesondere bei der Integration des Digitalen Zwillings über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg. Aktuell konzentriert sich die Forschung vor allem auf die Betriebsphase, während die Entwurfsphase häufig durch isolierte, statische Modelle ohne direkte Verknüpfung zur späteren Nutzung geprägt ist. Dies führt zu einer Diskontinuität zwischen den Phasen und verhindert eine effiziente Nutzung der digitalen Ressourcen über den gesamten Lebenszyklus. Um diese Lücke zu schließen, ist eine präzise Einordnung des Begriffs „Digitaler Zwilling“ in der Strukturmechanik sowie die Entwicklung eines flexiblen, übergeordneten Rahmenkonzepts erforderlich, das den unterschiedlichen Anforderungen von Entwurfs- und Betriebsphasen gerecht wird.

Dieses Kapitel widmet sich der Unterhypothese 1, welche besagt, dass die Entwurfs- und Betriebsphase grundlegend unterschiedliche Anforderungen an den Digitalen Zwilling stellen und daher zwei voneinander unabhängige, anwendungsbezogene Archetypen erforderlich sind. Ziel ist es, diese Unterschiede zu analysieren und darauf aufbauend eine strukturierte Einordnung der Bedarfe und Anforderungen zu ermöglichen. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Frage gelegt, wie eine kohärente Abbildung des Bauteils über den gesamten Lebenszyklus hinweg gelingen kann, um eine durchgängige und effektive Nutzung des Digitalen Zwillings sicherzustellen.

Die Grundlage dieser Analyse bildet die Taxonomie nach van der Valk et al. [7]. Im ersten Schritt, Abschnitt 3.1 und 3.2 werden die spezifischen Anforderungen und Nutzungspotenziale des Digitalen Zwillings in der Entwurfs- und Betriebsphase untersucht. Diese Analyse legt den Fokus auf die Identifikation der relevanten Bedarfe und Unterschiede zwischen beiden Phasen. Anschließend, Abschnitt 3.3, erfolgt die systematische Einordnung der Ergebnisse in den Rahmen der Taxonomie, um die archetypischen Merkmale des Digitalen Zwillings für jede Phase zu definieren. Abschließend werden in Abschnitt 3.4 die abgeleiteten Archetypen hinsichtlich ihrer Eignung zur Validierung der Unterhypothese 1 diskutiert, um die Grundlage für eine ganzheitliche Betrachtung des Digitalen Zwillings in der Strukturmechanik zu schaffen.

Wesentliche Teile dieses Kapitels werden in leicht veränderter Form unter den Bedingungen der Creative Commons Lizenz CC-BY 4.0 wiedergegeben aus:

Richstein, R.; Schröder, K.-U. Characterizing the Digital Twin in Structural Mechanics. *Designs* **2024**, *8*, 8.

3.1 Der Digitalen Zwilling der Struktur in der Entwurfsphase

Basierend auf den präsentierten Grundlagen aus Abschnitt 2.1.2, wird im folgenden der Strukturentwurfsprozess in die Produktentwicklung nach VDI-Richtlinie 2221/2019 [18] eingeordnet. Ziel ist eine abstrakte Beschreibung des Strukturentwurfsprozesses, welche als Grundlage für den formalisierten Entwurf im Digitaler Zwilling geeignet ist. Dabei meint Formalisierung explizit nicht die vollständige Automatisierung des Entwurfs. Zur weiteren Ausführung werden zunächst folgende Definitionen gemacht:

- Ein **Teilsystem** ist geometrisch unabhängig von anderen Teilsystemen. Dies bedeutet, dass Änderungen in Geometrie und Form sich nicht oder nur indirekt auf benachbarte (Teil-)Systeme auswirken.
- Eine **Baugruppe** stellt ein Modul des Teilsystems dar. Die Modularität kann durch die Montage, die Fertigung, den Transport oder die Handhabung motiviert sein. Die Baugruppe ist nicht geometrisch unabhängig von Nachbarbaugruppen.
- Ein **Bauteil** stellt die kleinste kontinuierliche, nicht gefügte Einheit eines Tragsystems dar.

3.1.1 Einordnung des Entwurfsprozess in die Methodik der VDI 2221

Zur Benennung der Aufgaben und Einsatzbereich des Digitalen Zwillings in der Designphase wird diese zunächst analysiert. Zu diesem Zweck werden die Aktivitäten der VDI-Richtlinie 2221/2019 [18], siehe Abschnitt 2.1.2.1, mit Aufgaben des Strukturentwurfsprozess nach Klein [12], siehe Tabelle 2.1, und Wiedemann [10] verknüpft und für die Anwendung im Digitalen Zwilling konkretisiert. Für die Definition der Phasen sind die Aktivitäten sinnvoll zusammenzufassen:

- **Konzeptionierung:** Festlegen von Lasten und Randbedingungen, sowie Bewertung und Festlegen der Tragwirkungslösung einschließlich der Technologie
 - Klären und Präzisieren des Problems bzw. der Aufgabe
 - Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen
 - Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen
 - Bewerten und Auswählen des Lösungskonzepts
- **Vorentwurf:** Topologie in Form der Teilsysteme, Baugruppen und -teile wird festgelegt und optimiert.
 - Gliedern in Module/Schnittstellendefinitionen
 - Gestalten der Module
- **Detailentwurf:** Die Bauteile werden formoptimiert und dimensioniert.
 - Integrieren des gesamten Produkts
 - Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben
 - Absichern der Anforderungserfüllung

3.1.1.1 Konzeptionierung

Das **Klären und Präzisieren des Problems bzw. der Aufgabe** ist der erste Schritt im Entwicklungsprozess, der darauf abzielt, die Ausgangssituation und Zielsetzung eines Projekts vollständig zu verstehen und eindeutig, für alle folgenden Schritte zu definieren. Dabei werden die Anforderungen, Randbedingungen und potenziellen Zielkonflikte systematisch analysiert und beschrieben. Unklarheiten und Wissenslücken, etwa zu spezifischen Anforderungen oder möglichen Lösungen, werden identifiziert und Maßnahmen zur Klärung geplant. Die Ergebnisse dieses Prozesses werden lösungsneutral dokumentiert, beispielsweise in Form eines Anforderungskatalogs oder visueller Darstellungen, und im Team abgestimmt, um ein gemeinsames Verständnis sicherzustellen.

Für den Strukturentwurf bedeutet dieser Schritt, spezifische Anforderungen wie Tragfähigkeit, Steifigkeit und Leichtbaukriterien sowie relevante Umgebungsbedingungen klar zu definieren. Zusätzlich müssen Randbedingungen, wie Belastungsszenarien oder normative Vorgaben (z.B. Bauraumrestriktionen), analysiert und potenzielle Zielkonflikte, etwa zwischen Gewicht und Stabilität, oder Gewicht und Kosten, identifiziert und priorisiert werden. Wissenslücken, etwa in Bezug auf Materialwahl oder die Integration zusätzlicher Funktionen wie SHM, werden identifiziert.

Der Entwurfsschritt **Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen** gemäß der VDI-Richtlinie 2221/2019 [18] bildet die Grundlage für die systematische Entwicklung technischer Produkte, indem er die Identifikation der Haupt- und Teilfunktionen sowie deren Beziehungen umfasst. Ziel ist es, die grundlegenden und unterstützenden Funktionen eines Systems lösungsneutral zu identifizieren und in einer strukturierten Form darzustellen. Diese Struktur dient als Grundlage für die spätere Konzeptentwicklung und gewährleistet, dass alle relevanten Anforderungen und Abhängigkeiten berücksichtigt werden.

Übertragen auf den Strukturentwurf, insbesondere im Leichtbau, beginnt dieser Prozess mit der Identifikation der Hauptfunktionen wie Tragfähigkeit und Stabilität, die in Teilfunktionen wie beispielsweise Lastverteilung oder Schwingungsdämpfung zerlegt werden. Ergänzend wird analysiert, welche zusätzlichen Funktionen, etwa ein SHM, die Struktur übernehmen soll. SHM erweitert die Funktionsstruktur um die Fähigkeit, Parameter wie Spannungen, Verformungen oder Rissbildung zu überwachen und diese Aufgaben nahtlos in die Gesamtstruktur zu integrieren.

Die **Suche nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen** ist ein zentraler Schritt im Entwicklungsprozess gemäß VDI-Richtlinie 2221/2019 [18]. Ziel ist es, auf Basis der zuvor ermittelten Funktionen und Anforderungen geeignete Lösungsprinzipien zu entwickeln und diese in eine funktionsgerechte Struktur zu überführen. Dabei werden kreative und systematische Methoden eingesetzt, um eine Vielzahl potenzieller Ansätze zu generieren und die am besten geeigneten auszuwählen.

Im Entwurfsprozess von Strukturbauteilen beginnt die Suche nach Lösungsprinzipien mit einer Analyse der Aufgabenstellung und der Identifikation des Kernproblems, das in Teilprobleme zerlegt wird, um eine gezielte Lösungsfindung zu ermöglichen. Für jedes Teilproblem werden spezifische Lösungsansätze entwickelt, die an die jeweiligen Anforderungen angepasst sind [12]. Eine zentrale Rolle spielt dabei die Zuordnung der Tragwirkung der Struktur zu Lösungsprinzipien wie Balken-, Platten- oder Schalenlösungen [10], die bereits die Bauweise und Materialwahl vorwegnehmen und so technologische Parameter frühzeitig festlegen. Die Teilproblemlösungen werden anschließend zu umfassenden Lösungsansätzen kombiniert, wobei systematische Methoden wie der morphologische Kasten zur Bewertung und Auswahl optimaler Prinzipien genutzt werden.

Das **Bewerten und Auswählen des Lösungskonzepts** stellt den letzten Schritt der Konzeptionierungsphase dar und dient dazu, aus verschiedenen Lösungsansätzen denjenigen auszuwählen, der die Anforderungen optimal erfüllt. Die Lösungsprinzipien sind gegenüber den definierten Anforderungen zu bewerten um geeignete Lösungsansätze systematisch auszuwählen. Zu den wichtigsten Methoden gehören: Nutzwertanalyse, PUGH-Matrix (Entscheidungsmatrix) oder Kosten-Nutzen-Analyse. Bewertungskriterien wie Tragfähigkeit, Kosten und Nachhaltigkeit werden festgelegt und gewichtet. Bewertungsgrößen können dabei qualitative sein, wie beispielsweise Umsetzbarkeit, Vorerfahrung oder Innovationsgrad, oder quantitativ bemessen werden, wie beispielsweise die Masse, die Steifigkeit (pro Masse), Festigkeit oder Kosten. Für die Ermittlung der quantitativen Bewertungsgrößen müssen erste vereinfachte Modelle zur überschlägigen Berechnung der Größen zur Verfügung stehen.

Das Ende der Konzeptionierungsphase im Entwurfsprozess markiert den Übergang von der abstrakten Problemlösung zur konkreten Ausarbeitung des Entwurfs. Das Ende der Konzeptionierungsphase ist somit durch eine deutliche Reduktion des Lösungsraums gekennzeichnet. Nach Pahl/Beitz [16] schließt die Konzeptionierungsphase mit einer Konzeptentscheidung ab, die eine detaillierte Beschreibung des gewählten Konzepts, eine Auflistung der wichtigsten Funktionen und eine grobe Spezifikation der Hauptkomponenten beinhaltet. Nach VDI/VDE 2206 [97] (für mechatronische Systeme) endet die Konzeptionierungsphase mit der Festlegung der Systemarchitektur, bei der die funktionalen und technischen Anforderungen in eine Struktur überführt werden, die als Basis für die spätere detaillierte Entwicklung dient. Am Ende der Konzeptionierungsphase sollte somit ein klarer, bewerteter und dokumentierter Lösungsansatz vorliegen, der alle wesentlichen Anforderungen erfüllt und als Grundlage für den folgenden Vorentwurf dient.

3.1.1.2 Vorentwurf

Das **Gliedern in Module und Definition der Schnittstellen** in der Produktentwicklung dient der Unterteilung von Lösungskonzepten in realisierbare Module, um eine klare Systemarchitektur mit definierten Teilsystemen und deren Schnittstellen zu schaffen. Dies erleichtert die Aufteilung der Entwicklungsarbeit und ermöglicht eine gezielte Fokussierung auf spezifische

Entwicklungsschwerpunkte. Schnittstellen zwischen den Modulen sind zentral, um Interoperabilität und Integration sicherzustellen. Die Darstellung kann durch Diagramme oder Modellierungssprachen wie UML und SysML unterstützt werden, siehe 2.1.2.2. Bezogen auf den Strukturentwurf erfolgt die Modularisierung in Teilsystem, Baugruppe und Bauteil, sowie deren jeweiligen Schnittstellen, gemäß der eingangs in dieses Kapitel eingeführten Definitionen.

Das **Gestalten der Module** gemäß VDI 2221 umfasst die Konkretisierung und Optimierung von Modulen als zentralen Bestandteil der Produktentwicklung. Dabei wird der Konkretisierungsgrad bewusst begrenzt („Vorgestalten“), um Flexibilität für Optimierungen und Anpassungen zu gewährleisten. Die Module können unabhängig voneinander gestaltet werden, was parallele Entwicklungsarbeit ermöglicht, insbesondere bei komplexen Produkten. Die Bauteile werden ausgestaltet, indem die Geometrie und Materialien festgelegt werden. Dies umfasst oft eine erste, aber noch nicht detaillierte Berechnung von Belastungen, Kräften und anderen physikalischen Größen, um die Machbarkeit des Konzepts sicherzustellen.

Der Abschluss des Vorentwurfs markiert den Übergang von der groben Konzeptphase zur detaillierten Entwurfsphase. Dieser Abschluss beginnt mit einer umfassenden Bewertung des Entwurfs, bei der die erarbeiteten Lösungen anhand der definierten Anforderungen geprüft werden. Methoden wie die FMEA (Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse) oder die Kosten-Nutzen-Analyse werden eingesetzt, um mögliche Schwachstellen zu identifizieren und die Eignung des Konzepts sicherzustellen. Parallel dazu liegen alle grundlegenden Informationen vor: Beispielweise Stücklisten, Materialentscheidungen sowie die Auswahl der Verbindungskonzepte. Bauteile, Baugruppen und Teilsysteme sind so definiert, dass sie in der nächsten Phase nur noch formoptimiert und dimensioniert werden müssen. In einer abschließenden Design- oder Review-Sitzung mit relevanten Stakeholdern wird der Vorentwurf freigegeben, wodurch das Konzept als ausgereift gilt. Diese Freigabe stellt sicher, dass keine Änderungen mehr an den grundlegenden Lösungsansätzen vorgenommen werden, sondern ausschließlich eine technische Ausarbeitung und Präzisierung erfolgt.

3.1.1.3 Detailentwurf

Gemäß VDI-Richtlinie 2221/2019 [18] stellt das **Integrieren des gesamten Produkts** die abschließende Phase der Produktgestaltung, in der die zuvor entworfenen Module und Teilsysteme zu einem vollständigen Produkt zusammengeführt werden, dar. Diese Phase wird auch als „Endgestalten“ oder „Feingestalten“ bezeichnet. Bereits vorgestaltete Module werden durch weitere Detailinformationen ergänzt (beispielsweise Verbinderauswahl oder finale Dimensionierung aller Bauteile). Das Arbeitsergebnis dieser Phase ist ein Gesamtentwurf, der alle wesentlichen gestalterischen Festlegungen zur Realisierung des Produkts enthält. Dies umfasst detaillierte CAD-Modelle oder finalisierte Stücklisten. Bezogen auf die Struktur ordnen wir dieser Aktivität die Nachweisführung zu. Das bedeutet, dass Gebrauchstauglichkeit sowie Tragsicherheit für sämtliche Bauteile, Baugruppen und Subsysteme für alle geforderten Lastfälle nachgewiesen werden.

Zur **Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben** zählt die Produktionsplanung und die Analyse von eventuell zu berücksichtigenden Bauzuständen. Ergebnisse dieses Arbeitsschritts werden in Form von Fertigungsunterlagen bereitgestellt.

Abschließend zum Detailentwurf, sowie des gesamten Entwurfsprozesses steht das **Absichern der Anforderungserfüllung**. Die Testpyramide zur Sicherstellung der Struktureigenschaften wird an dieser Stelle definiert. Festgelegte Test zur Verifikation und Validierung (V&V) sind hier durchzuführen.

3.1.2 Ableiten von Anforderungen für den Digitalen Zwilling im Entwurf

Mit Hilfe der in Abschnitt 3.1.1 abgeleiteten formalisierten Gliederung des Entwurfsprozesses besteht ein Grundgerüst, an das in diesem Schritt nun das Konzept des Digitalen Zwillings angehängt werden kann. In diesem Abschnitt werden bereits genannte Anforderungen an den Digitalen Zwilling zusammengefasst und basierend auf den beschriebenen Arbeitsschritten weitere Unterstützungsfunktionen und Elemente zusammengetragen, siehe Abbildung 3.1. Die einzelnen Bausteine sind im folgenden detaillierter beschrieben.

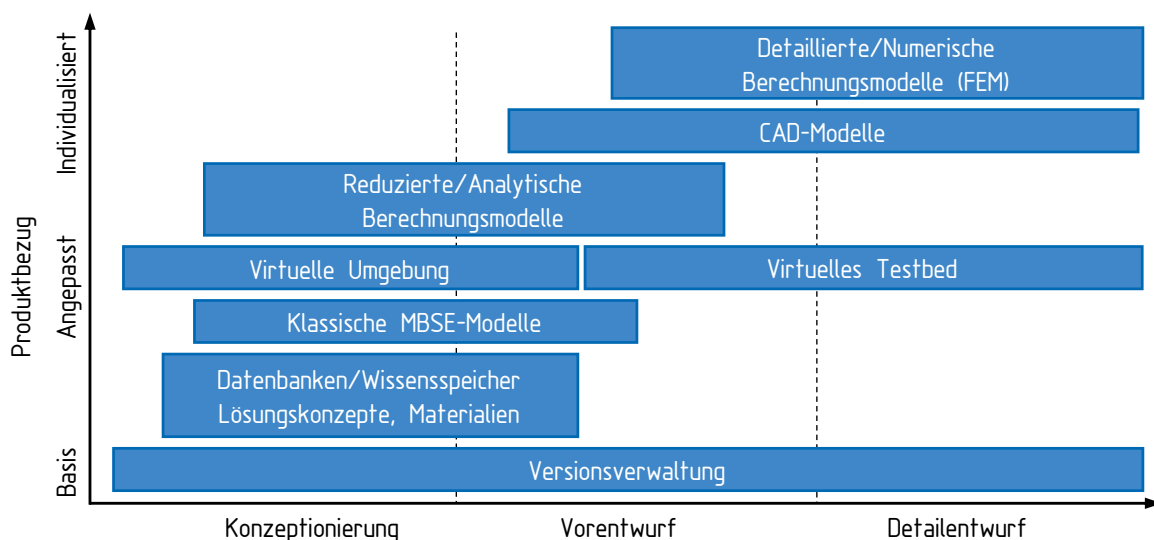


Abb. 3.1: Zusammenstellung der ermittelten Funktionen innerhalb des Entwurfsprozesses und der Konkretisierung des Digitalen Zwillings des Entwurfsprozesses.

Versionsverwaltung

Eine kontinuierliche digitale Versionierung des Entwurfes und später des Digitalen Zwillings kann zu einer verbesserten Nachverfolgbarkeit und Transparenz im Entwurfsprozess führen. Jede Änderung an der Spezifikation oder dem Modell des Digitalen Zwillings kann dokumentiert und versioniert werden. Dadurch entsteht ein klarer Verlauf aller Modifikationen und Entscheidungen, die zum aktuellen Zustand geführt haben [98]. Die Versionsverwaltung kann dabei kontinuierlich über den gesamten Entwicklungsprozess genutzt werden und ist nicht produktgebunden.

Datenbanken und Wissensspeicher

Die Bereitstellung von Datenbanken und Wissensspeichern ist ein wichtiger Bestandteil der Entwurfsphase. Sie ermöglicht es, auf die Ergebnisse vorheriger Entwicklungen zurückzugreifen und dadurch effizienter zu arbeiten. Der Digitale Zwilling kann die Suche nach Lösungsprinzipien durch den Zugriff auf Datenbanken mit bewährten Konstruktionslösungen, Materialien und Technologien, unterstützen. Statt mit einem „weißen Blatt“ zu beginnen, können Entwickler:innen auf bewährte Lösungskonzepte und vorhandenes Expertenwissen zugreifen. Parametrisierte Lösungskonzepte, wie beispielsweise Balken-, Platten- oder Schalenkonstruktionen, bieten einen Katalog wiederverwendbarer Ansätze, die auf spezifische Projektanforderungen angepasst werden können. Ergänzend dazu sind Materialdatenbanken von großer Bedeutung, da sie detaillierte Informationen zu Materialeigenschaften bereitstellen und so eine fundierte Entscheidungsgrundlage für die Auswahl geeigneter Werkstoffe schaffen.

Ein zentraler Vorteil liegt in der Erhöhung der Transparenz: Durch den zentralen Zugriff auf die Daten wird sichergestellt, dass alle Beteiligten über denselben aktuellen Wissensstand verfügen. Dies erleichtert die Kommunikation und Zusammenarbeit im Team und stellt sicher, dass Expert:innen-Wissen zugänglich gemacht und effektiv genutzt wird. Darüber hinaus fördert diese Herangehensweise den Wissenstransfer zwischen Projekten und Personen, da Erfahrungen und Lösungen aus früheren Arbeiten systematisch dokumentiert und für zukünftige Entwicklungen bereitgestellt werden.

Klassische MBSE-Modelle

Unterstützt werden kann dieser Entwicklungsschritt durch MBSE-Tools wie SysML, siehe Abschnitt 2.1.2.2, um beispielsweise Anforderungen in einer klaren und vernetzten Weise zu modellieren, siehe Abbildung 2.3. Ein solcher Schritt kann die Grundlage für die spätere Überführung in einen Digitalen Zwilling darstellen, die als Weiterentwicklung zu Digital Twin-Based Systems Engineering (DTBSE) bezeichnet wird [40].

Tabelle 3.1: Gegenüberstellung virtuelle Umgebung und virtuelles Testbed [40].

	Virtuelle Umgebung	Virtuelles Testbed
Hauptzweck	Visualisierung und Interaktion	Simulieren, Testen und Validieren
Zeithorizont	Echtzeit-Visualisierung oder Vergangenheit	Zukunftsszenarien und Prognosen
Interaktivität	Häufig interaktiv, realitätsnah	Primär analytisch, experimentell
Zielgruppe	Anwender:innen	Entwickler:innen, Ingenieur:innen

Virtuelle Umgebung

Eine virtuelle Umgebung ist eine realitätsgetreue digitale Nachbildung eines physischen Systems oder einer Umgebung. Sie wird häufig für Simulationen, Visualisierungen und Training genutzt. Die virtuelle Umgebung als Repräsentation des Zustands und Verhaltens eines physischen Systems in einer immersiven oder interaktiven Form kann die Erfassung des Istzustandes und/oder des späteren Einsatzgebietes erleichtern. In der Konzeptionierungsphase kann die virtuelle Umgebung die Entwicklung unterstützen, beispielsweise zur Beschreibung der Anwendung in ihrer Umgebung und Umwelt oder zur Prüfung von Bauraum, Schnittstellen und Integrationsmöglichkeiten.

Virtuelles Testbed

Wir unterscheiden das virtuelle Testbed von der virtuellen Umgebung durch die Integration von physikalischen Modellen. Im virtuellen Testbed können, über die Funktionen der virtuellen Umgebung hinaus, Funktionalitäten verschiedenster Varianten geprüft werden. Zu den Funktionalitäten zählen zum Beispiel: Kinematisches und kinetisches Verhalten (Mehrkörpersimulation), Temperaturverhalten oder mechanische Größen wie Verformung oder Spannung von Bauteilen. Für alle Eigenschaften muss eine geeignete Modellierung gefunden werden. Eine Gegenüberstellung von virtueller Umgebung und virtuellem Testbed ist in Tabelle 3.1 zu finden.

CAD-Modelle

CAD-Modelle spielen im Vorentwurf und Detailentwurf eines digitalen Zwillings eine zentrale Rolle, insbesondere bei der Erstellung von Subsystemen und der Definition von Schnittstellen. Im Vorentwurf ermöglichen sie eine präzise geometrische Darstellung der Bauteile und Baugruppen als Produktstruktur, wodurch die Positionierung und Integration von Subsystemen erleichtert wird. Gleichzeitig unterstützen sie die Definition und Abstimmung von Schnittstellen, indem sie die räumlichen Beziehungen und Passgenauigkeit zwischen den Komponenten visualisieren. Dies fördert eine klare Kommunikation und hilft, potenzielle Konflikte frühzeitig zu erkennen.

Im Detailentwurf bilden CAD-Modelle das Fundament der detaillierten Ausarbeitung von Bauteilen und werden abschließend in die Bauunterlagen überführt. Sie ermöglichen die Festlegung spezifischer Eigenschaften wie Toleranzen, Montagelösungen und Fertigungsanforderungen. Detailelemente wie z.B. Schrauben, Steckverbindungen oder Schweißstellen können im Modell so gestaltet werden, dass sie nahtlos in das Gesamtdesign integriert und an die praktischen Anforderungen der Fertigung und Montage angepasst sind.

Modellierung: Niedriger vs. hoher Detailgrad

Im Verlauf des Entwurfsprozesses kommen Berechnungsmodelle mit unterschiedlichem Detailgrad zum Einsatz. Diese Modelle spielen in verschiedenen Phasen des Entwurfs unterschiedliche Rollen und bringen spezifische Vor- und Nachteile mit sich.

Berechnungsmodelle mit niedrigem Detailgrad zeichnen sich durch eine implizite Darstellung der Struktur aus. Sie basieren häufig auf analytischen Methoden und eignen sich besonders für die frühen Phasen des Strukturentwurfs, wie die Konzeptionierung und den Vorentwurf. In diesen Phasen ist es wichtig, dass die Modellierung einfach und damit flexibel bleibt, da häufige Änderungen und Variantenstudien notwendig sind. Durch die Verwendung von parametergesteuerten Modellen können unterschiedliche Konfigurationen und Entwurfsvarianten effizient erstellt und untersucht werden. Diese Flexibilität ermöglicht eine systematische Variation und Optimierung der Struktur, ohne dass jedes Modell neu aufgesetzt werden muss. Änderungen an Geometrie, Material oder Lastannahmen lassen sich schnell und konsistent umsetzen, was die Iterationsgeschwindigkeit im Entwurfsprozess erhöht. Der geringe Rechenaufwand erlaubt es, eine Vielzahl von Varianten zu testen und unterschiedliche Lösungsansätze schnell zu evaluieren. Gleichzeitig bietet die Parametrisierung die Möglichkeit, automatisierte Optimierungsprozesse zu integrieren, bei denen Varianten gezielt auf ihre Leistungsfähigkeit hin untersucht werden. Allerdings geht diese Flexibilität mit einer höheren Anzahl an Annahmen einher, die stetig auf ihre Gültigkeit überprüft werden müssen. Die reduzierte Modellierung kann beispielsweise durch eine Homogenisierung von Material-, Geometrie- oder Steifigkeitseigenschaften über das Bauteil erreicht werden, was die lokale Genauigkeit beeinflusst, ohne jedoch zwangsläufig die Gesamtaussagekraft des Modells zu mindern.

Modelle mit hohem Detailgrad bieten eine explizite Darstellung der Struktur und werden in der Regel durch numerische Methoden, wie die Finite-Elemente-Methode (FEM), realisiert. Sie sind insbesondere in späteren Phasen, wie dem Detailentwurf und der abschließenden Nachweisführung, entscheidend. In diesen Phasen treten nur noch wenige Änderungen am Tragwerk auf, weshalb der höhere Modellierungsaufwand gerechtfertigt ist. Die höhere Komplexität der Modelle ermöglicht eine lokal präzise Auflösung von Material- und Strukturverhalten. Dies geht jedoch mit einem erhöhten Aufwand für Änderungen am Modell einher. Gleichzeitig verringert sich die Notwendigkeit, Annahmen zu treffen, da die Eigenschaften explizit abgebildet werden können. In der Modellierung führt dies zu einer stärkeren Heterogenisierung, wodurch die lokale Auswertbarkeit verbessert wird.

Der Wechsel zwischen Modellen mit unterschiedlichem Detailgrad erfordert eine bewusste Entscheidung hinsichtlich der Homogenisierung oder Heterogenisierung von Strukturparametern wie Material, Geometrie und Steifigkeit. Die Wahl des geeigneten Detailgrads hängt stark von den Anforderungen der jeweiligen Entwurfsphase ab. Die Wahl zwischen einem niedrigen und hohen Detailgrad eines Berechnungsmodells ist eine Abwägung zwischen Flexibilität und Genauigkeit. Während analytische Modelle in frühen Phasen des Entwurfsprozesses durch ihre Anpassungsfähigkeit und Effizienz überzeugen, bieten numerische Modelle in späteren Phasen die notwendige Präzision für den Nachweis und die Optimierung des Tragwerks. Wichtig ist, dass ein reduzierter Detailgrad nicht zwangsläufig eine geringere Genauigkeit bedeutet. Vielmehr beeinflusst er die Auswertbarkeit des lokalen Verhaltens, die stark von den getroffenen Annahmen zur Homogenisierung der Struktur abhängt. Die nachfolgende Tabelle 3.3 fasst Entwicklungsphasen, zugehörigen Daten und Informationen, sowie sich daraus ableitende Anforderungen für den sinnvollen Einsatz des Digitalen Zwillings im Entwurfsprozess zusammen.

In dem bisher beschriebenen Entwurfsprozess spielt sich die Entwicklung im digitalen Raum ab. Ein reales Gegenstück existiert in dieser Überlegung noch nicht. Zwar kann auch bei einem bereits existierenden Produkt ein Entwurfsprozess im Digitalen Zwilling stattfinden, hier würden die Rückkopplungen aus der physischen Welt in die digitale jedoch eher indirekt, in Form von (neuen) Anforderungen, eingespielt werden. Allgemein gesprochen ergibt sich die Herausforderung eine engen Kopplung erst im Betrieb der Struktur. Daher werden wir im folgenden Abschnitt die Anforderungsermittlung für die Betriebsphase vornehmen.

Tabelle 3.3: Übersicht über Entwurfsphasen, Daten und Informationen, sowie die abgeleiteten Anforderungen an den Digitalen Zwilling im Entwurfsprozess.

Phase	Informationen	Daten	Anforderungen DZ
Konzeptionierung	Randbedingungen	Position Freiheitsgrade Bauraum	MBSE Virtuelle Umgebung
	Lösungsprinzipien	./.	Konzeptdatenbank
	Konzeptionelles Tragsystem	./.	MBSE
	Material	Eigenschaften Kosten	Materialdatenbank
	Lasten	Art Richtung Angriffspunkt Größe	Virtuelles Testbed zur Generierung und Test von simulierten Lastfällen
Vorentwurf	Subsysteme	./.	Modelle mit niedrigem Detailgrad
	Schnittstellen	Position Freiheitsgrade	CAD-Modelle
	Komponentenart	Länge verschmierte Querschnittsfläche Orientierung	
Detailentwurf	Bauteilform	Ausdimensionierte Querschnittsfläche	Modelle mit hohem Detailgrad
	Dimensionierung	Wandstärken Sicherheitsfaktoren	CAD-Modelle
	Verbinder	Art Position	

3.2 Der Digitale Zwilling der Struktur in der Betriebsphase

Die zuvor in Abschnitt 3.1 beschriebene Entwurfsphase endet mit der Erstellung und Freigabe der Bauunterlagen. Die Fertigung stellt die Abspaltung des realen und des digitalen Zwillings der Entwurfsphase und damit den Beginn der Koexistenz zwischen beiden Instanzen dar.

3.2.1 Kalibrierung und Kopplung realer und digitaler Strukturen

Die Herstellung realer Bauteilinstanzen markiert den Beginn des Zusammenspiels zwischen realer und virtueller Instanz des Digitalen Zwillings. Wir gliedern den Übergang zur Betriebsphase in drei Schritte: Abschluss der Entwurfsphase, Herstellung der Strukturen und Kalibrierung der virtuellen Instanzen, siehe Abbildung 3.2.

Der Detailentwurf quantifiziert alle strukturellen Eigenschaften $\underline{\mu}$ wie Geometrie Größen (Höhe h , Breite b , Dicke d , ...) und Materialeigenschaften (E-Modul E , Zugfestigkeit $\sigma_{max, \dots}$) mit eindeutig definierten Zielwerten und hält sie in der Bauunterlage fest. Sie repräsentieren unsere erwarteten Designwerte nach der Herstellung der Struktur ($\underline{\mu}_{\text{Design}}$). In einer idealisierten Welt würde gelten:

$$\underline{\mu}_{\text{Design}} = \underline{\mu}_{\text{virtuell}} = \underline{\mu}_{\text{real}} \quad (3.1)$$

Tatsächlich muss jedoch davon ausgegangen werden, dass die erreichten Struktureigenschaften im Zuge der Herstellung, einer statistischen Verteilung um den Zielwert folgen. Die Qualität eines Herstellungsprozesses lässt sich anhand von diversen Kennzahlen wie z.B. der Fehlerquote oder dem Sigma Level beschreiben. Gehen wir für eine Stückzahl von N Bauteilen zum Fertigungszeitpunkt $t = 0$ aus ergibt sich für eine beliebige Struktureigenschaft μ_i die zu betrachtende Standardabweichung (Standard Deviation SD_i) zu:

$$SD_{i,t=0} = SD_{i,0} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N (\mu_{i,m,0} - \mu_{i,\text{Design}})^2} \quad (3.2)$$

Jede einzelne gefertigte reale Instanz des Bauteils weißt damit eine absolute Abweichung einer Struktureigenschaft $\mu_{i,0}$ gegenüber der Auslegungsgröße $\mu_{i,\text{Design}}$ auf:

$$\Delta\mu_{i,m,0} = |\mu_{i,m,0} - \mu_{i,\text{Design}}| \quad m \in \mathbb{Z} \mid 1 \leq m \leq N \quad (3.3)$$

Abweichungen der Struktureigenschaften zwischen den in der Entwurfsphase festgelegten Werten $\mu_{i,\text{Design}}$ und den tatsächlich im Fertigungsprozess erreichten Werten $\mu_{i,0}$ sind in der klassischen Nutzung technischer Strukturen zunächst unkritisch. Abweichungen dieser Art werden durch Sicherheitsfaktoren abgegolten.

Die Motivation zum Einsatz des Digitalen Zwillings besteht darin, die reale Instanz eines Produkts über dessen gesamten Lebenszyklus hinweg zu überwachen, indem deren tatsächliche Zustände und Eigenschaften kontinuierlich erfasst, in den virtuellen Raum übertragen und präzise gespiegelt werden, um spezifische Belastungen, Abnutzungen und dynamische Einflüsse zielgerichtet zu analysieren, siehe Abschnitt 2.3.

Ein zentrales Problem des Digitalen Zwillings liegt jedoch darin, dass häufig einer virtuellen Instanz mehrere reale Instanzen gegenüberstehen. Während probabilistische Ansätze versuchen, die Streuung der Eigenschaften durch statistische Verteilungen zu erfassen, bleibt dabei die individuelle Verbindung zwischen einer spezifischen realen Instanz und ihrer virtuellen Entsprechung unberücksichtigt. Dies führt dazu, dass individuelle Abweichungen einzelner realer Instanzen nicht präzise in die virtuelle Repräsentation einfließen.

Um die gewünschten Mehrwerte des Digitalen Zwillings tatsächlich zu realisieren, ist daher eine klare Verbindung zwischen der realen und der virtuellen Instanz notwendig. Zur Erstellung einer Digitalen Zwillings Entität für den weiteren Gebrauch im Betrieb, muss die vorliegende Abweichung $\Delta\mu_i$ erfasst werden. Um die notwendige Verbindung zwischen realer und virtueller Instanz aus der Entwurfsphase zu erreichen, ist immer eine anfängliche Kalibrierung der virtuellen Instanz erforderlich, siehe Abbildung 3.2.

Diese Kalibrierung ist eine notwendige Voraussetzung, um ein einfaches Modell in die virtuelle Instanz eines Digitalen Zwillings umzuwandeln und die Entwurfsphase mit der Betriebsphase zu verknüpfen. Die initialen Attribute der Digitalen Zwillings Entitäten werden an die initialen Eigenschaften der realen Instanzen angeglichen. Im Kalibrierungsschritt entstehen somit N Digitale Zwillings Entitäten für N erstellte Bauteile, um die realen Strukturen in ihren individuellen Betriebsphasen zu begleiten, siehe Abbildung 3.3. Eine Digitale Zwillings Entität ist definiert als individuelle, gekoppelte Einheit, bestehend aus einer realen Instanz und einer kalibrierten virtuellen Instanz, die durch kontinuierliche Rekalibrierung und Datenaustausch eine präzise und dynamische Repräsentation einer eindeutigen realen Instanz ermöglicht. Eine Übersicht über alle Definition ist im Anhang A zu finden.

Mit der Inbetriebnahme werden die individuellen realen Instanzen durch ihre Nutzung mit definierten Lastzyklen und Umwelteinflüsse konfrontiert. Jede reale Instanz kann dabei unterschiedliche Beanspruchungen bei individuellem Gebrauch erfahren. Der Digitale Zwilling im Betrieb hat die Aufgabe, die Individualisierung der Struktur während ihrer Nutzungsphase aufzuzeichnen und darzustellen sowie individuelle Bewertungen bezüglich einer weiteren Nutzung zu evaluieren. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die Struktureigenschaften über die Nutzungsdauer, durch Ermüdungs- und Schädigungsszenarien degradieren.

Abbildung 3.4 visualisiert die potenzielle Degradation einer strukturellen Eigenschaft μ_i , z. B. der Biegesteifigkeit EI , basierend auf der Verschiebung des erwarteten Werts vom ursprünglich kalibrierten Wert $\mu_{i,1,0}$ zu schlechteren Werten zu späteren Zeitpunkten t_n . Es gilt:

$$\underline{\mu} = \underline{\mu}(t) \quad (3.4)$$

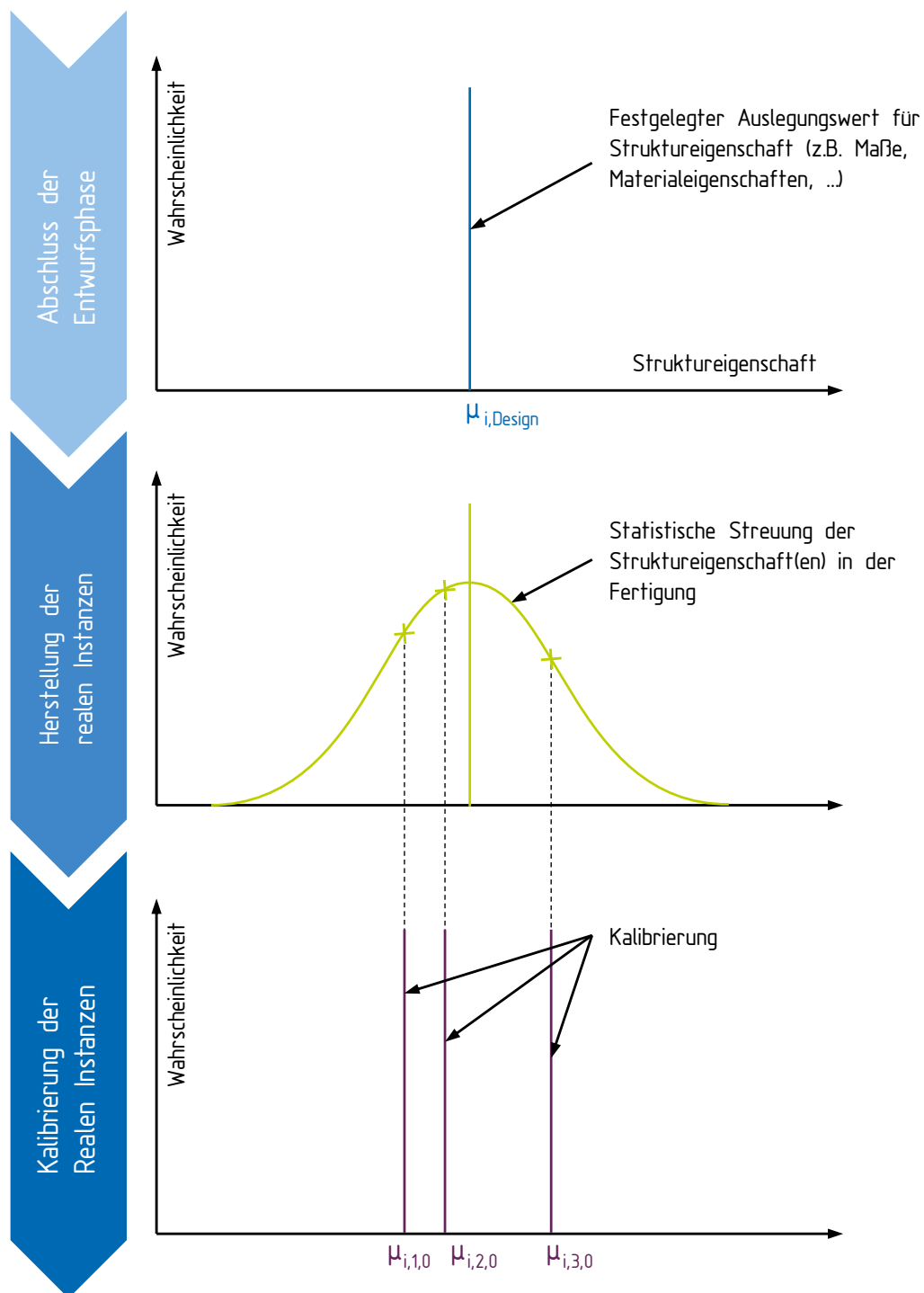


Abb. 3.2: Adaption der Erwartungswerte in der virtuellen Instanz.

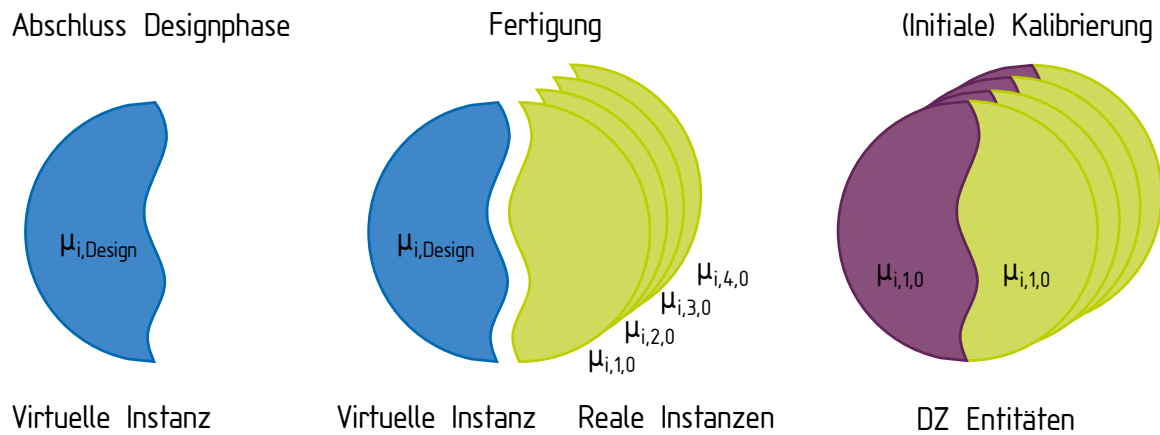


Abb. 3.3: Erstellen von Digitalen Zwillingen Entitäten durch die Kalibrierung der virtuellen Instanzen nach der Fertigung.

mit

$$\mu_{i,1,0} > \mu_{i,1,1} > \mu_{i,1,2} > \dots > \mu_{i,1,n} \quad (3.5)$$

Mit zunehmendem zeitlichem Abstand von der initialen Kalibrierung erwarten wir eine höhere Degradation der strukturellen Eigenschaften. Zusätzlich zur Reduktion nimmt die Unsicherheit bei der Vorhersage der tatsächlichen Eigenschaften zu, bedingt durch eine Zunahme der getroffenen Annahmen, z.B. bezüglich der erfahrenen Belastungen, potenziellen Schädigungen und Umwelteinflüsse. Je nach tatsächlicher Mission erfahren verschiedene Instanzen derselben Struktur unterschiedliche Produktleben beispielsweise in Form von erfahrenen Lasten. Diese höhere Unsicherheit bezüglich des tatsächlichen strukturellen Zustands bedeutet, dass die Verbindung zwischen den realen und virtuellen Instanzen während des Betriebs zunehmend abnehmend wird, wenn sie nicht ständig neu kalibriert werden. Ein SHM-System führt die notwendige kontinuierliche Überwachung, Bewertung und Anpassung im Fall von Strukturen durch. Das SHM-System ist das zentrale Koppellement zwischen der realen und digitalen Struktur im Betrieb. Neben der Verarbeitung der SHM-Daten muss ein Digitaler Zwilling über Nutzungs- und Betriebsdaten in das System integriert werden.

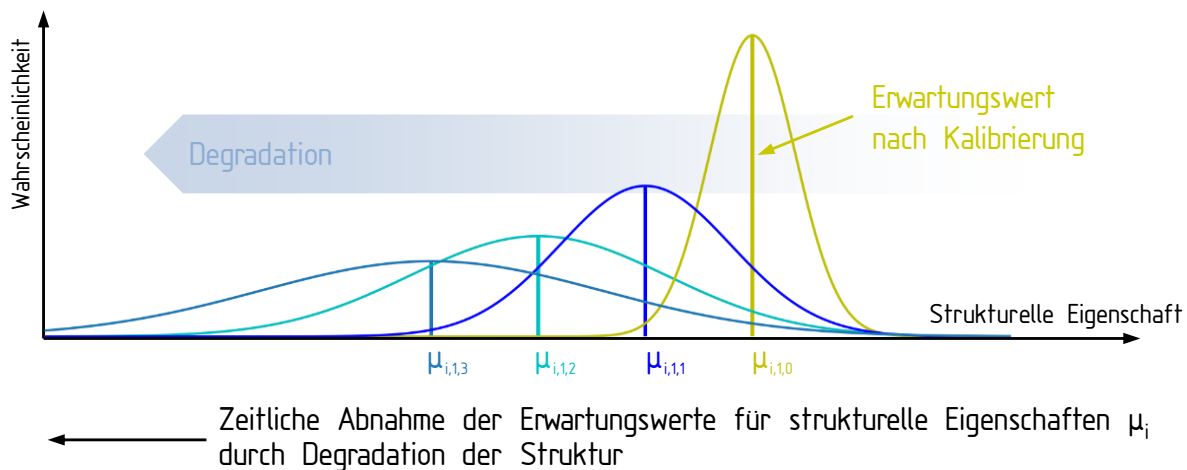


Abb. 3.4: Abnahme der erwarteten Werte struktureller Eigenschaften aufgrund von In-Service-Degradation, überlagert mit zunehmender Vorhersageunsicherheit aufgrund ungenauerer Annahmen bezüglich erfahrener Lasten, Schäden und Umwelteinflüsse.

3.2.2 Ableiten von Anforderungen für den Digitalen Zwilling im Betrieb

Ein Digitaler Zwilling muss geeignete Modelle bereitstellen, um alle Informationen aus der bereitgestellten Lastüberwachung, dem SHM-System und dem Betriebsstatus zu aggregieren und zu speichern. Die Eignung wird je nach Anwendung anhand von Anforderungen an lokale und globale Genauigkeit, Rechenzeit, Speicher, Automatisierungsfähigkeit und anderen Aspekten bestimmt. Um die Speicher- und Rechenanforderungen während des Betriebs gering zu halten, ist es vorzuziehen, nur die notwendige Modellierungstiefe auszuwählen. Weniger detaillierte Modelle können für globale Eigenschaften wie Steifigkeit, Verschiebung und Verformung ausgewählt werden. Detailliertere Modelle sind erforderlich, wenn Informationen über lokale Effekte wie Schäden oder Kraftanwendungspunkte benötigt werden. Die zentralen Anforderungen an den Digitalen Zwilling der Struktur im Betrieb können wie folgt zusammengefasst werden. Der Digitale Zwilling muss:

- Einen Synchronisierungsmechanismus in Form einer kontinuierlichen Neukalibrierung zwischen realen Komponenten und dem Modell bereitstellen
- Die Datenakquisition, -verarbeitung und -auswertung eines SHM-Systems der Struktur automatisieren
- Daten aus mehreren Datenquellen einschließlich des SHM-Systems, Umwelteinflüssen und Betriebsdaten zusammenführen und speichern
- Eine hierarchische Kopplung geeigneter struktureller mechanischer Modelle (implizit und explizit) unterstützen
- Rückkopplungsschleifen unterstützen, um eine bidirektionale Kopplung für die individuelle Bewertung der Struktur hinsichtlich Inspektionen wie bedarfsgerechter Wartung oder RUL zu ermöglichen

Abschließend soll herausgestellt werden, dass alle hier diskutierten Punkte sich auf den Digitalen Zwilling der Struktur und die Perspektive der Strukturmechanik beziehen. Wenn der Digitale Zwilling der Struktur auf ein ganzheitliches System erweitert wird, ergeben sich weitere Anforderungen, beispielsweise hinsichtlich kompatibler Schnittstellen oder der Vernetzung aller erfassten Daten. Wir haben zwei Hauptphasen im Lebenszyklus von Digitalen Zwillingen identifiziert: Den Entwurfsprozess der Struktur bis hin zur Herstellung und Inbetriebnahme sowie die kontinuierliche Überwachung einer oder mehrerer Strukturen während der Betriebsphase. Im folgenden Abschnitt werden wir die Verschmelzung beider Phasen diskutieren.

3.3 Zusammenhang von Design- und Betriebsphase

Bisher wurden Entwurfs- und Betriebsphase entkoppelt voneinander analysiert und hinsichtlich ihrer Anforderungen an den Digitalen Zwilling diskutiert. Der Entwurfsprozess der Struktur bis zur Herstellung und Inbetriebnahme und die kontinuierliche Überwachung einer oder mehrerer Strukturen in der Betriebsphase. Im nächsten Abschnitt werden wir die Zusammenhänge und Unterschiede beider Phasen diskutieren.

3.3.1 Datenfluss und Variantenmanagement für Digitale Zwillinge

Wir betrachten zunächst den Datenfluss in den beiden Phasen. In der Entwurfsphase existiert der reale Zwilling in der Regel noch nicht. Er wird zunächst durch seine Spezifikationen, die im Lastenheft festgehalten werden, sowie durch das erwartete Betriebsumfeld definiert. Diese Informationen werden in verarbeitbare Daten aufgeschlüsselt, siehe Tabelle 3.3. Der Prozess der Erstellung eines Digitalen Zwillings umfasst das Befolgen eines strukturierten digitalen Designprozesses bis zum endgültigen Entwurf. Sobald das Design abgeschlossen ist, werden die Informationen während der Herstellung und Kalibrierung auf den realen Zwilling übertragen. Da der reale Zwilling erst durch die Fertigung existiert, erfolgt der vorherige Datenaustausch sequentiell, unterstützt durch Iterationsschleifen, siehe Abbildung 3.5.

Abbildung 3.5 veranschaulicht die Unterschiede der Archetypen in der Design- und Betriebsphase und den Zusammenhang zwischen virtuellen und realen Instanzen, die in einem iterativen Prozess zur Optimierung von Strukturdesigns und -eigenschaften genutzt werden. Die virtuelle Instanz berücksichtigt dabei Randbedingungen wie Umweltfaktoren und strukturelle Anforderungen. Durch iterative Anpassungen werden zukünftige Designgenerationen kontinuierlich optimiert. Die reale Instanz bildet die physischen Eigenschaften und Betriebsbedingungen ab. Sie umfasst individuelle Lasthistorien sowie die Bestimmung der Restlebensdauer als passive Komponente und eine adaptive Lastregelung als aktive Komponente. Das Zusammenspiel von virtuellen Modellen und realen Daten ermöglicht die Kalibrierung der virtuellen Instanz, sodass eine enge Abstimmung zwischen Design und tatsächlichem Betrieb sichergestellt

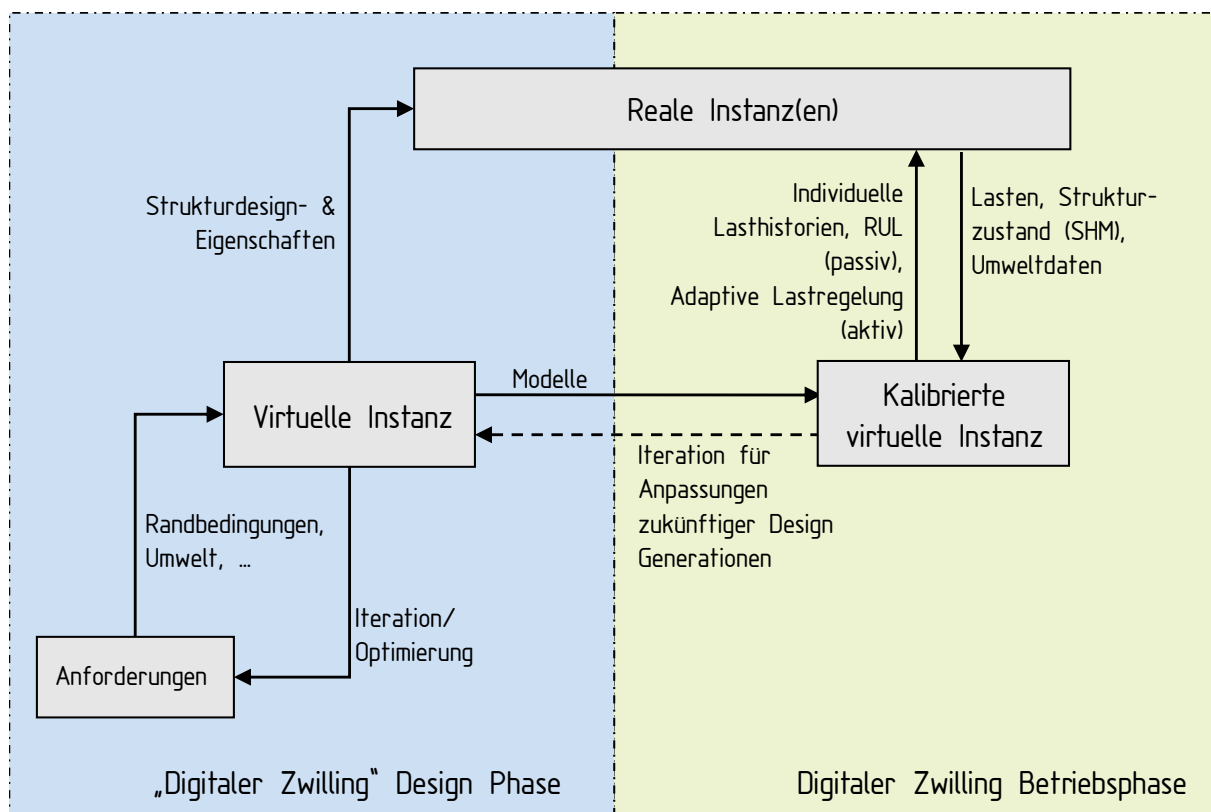


Abb. 3.5: Darstellung der Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Instanzen aufgeteilt auf Design- und Betriebsphase.

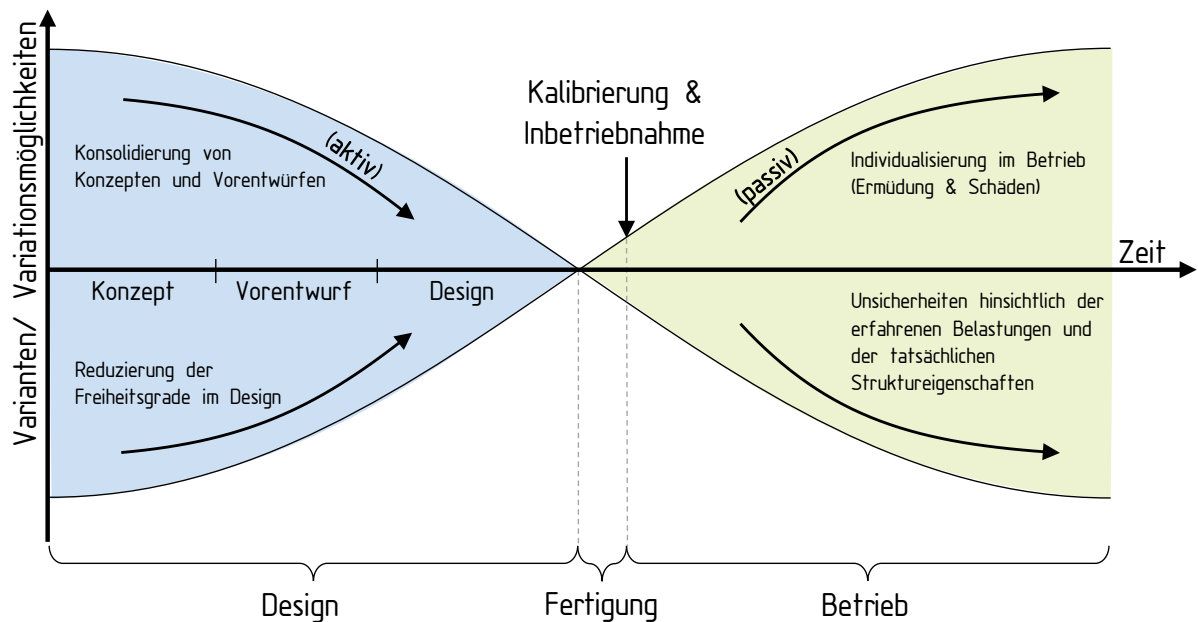


Abb. 3.6: Übersicht über die Varianten bzw. Variationsmöglichkeiten der (zu entwerfenden) realen Instanz.

wird. Ziel ist es, die Effizienz und Zuverlässigkeit von Strukturen durch eine kontinuierliche Rückkopplungsschleife zwischen virtuellen und realen Komponenten zu steigern.

Ein weiterer Aspekt im Vergleich von Design und Betriebsphase ist das Variantenmanagement. Abbildung 3.6 zeigt die Veränderung der Variantenvielfalt über die Design- und Betriebsphase eines Produkts. Die zeitliche Achse umfasst von links nach rechts die Abschnitte „Konzeption“, „Vorentwurf“, „Design“, „Fertigung“ und „Betrieb“. In der Designphase beginnt der Prozess mit einer großen Anzahl an Varianten in der Konzeptionsphase. Diese Varianten werden im Vorentwurf und Design durch schrittweise Reduzierung der Freiheitsgrade konsolidiert, bis ein einzelnes, finales Design festgelegt wird (Freigabe der Bauunterlagen). Im Fertigungsschritt entsteht der reale Zwilling. Aufgrund von Unsicherheiten und Streuungen in den Fertigungsprozessen nimmt die Vielfalt der Varianten in Form von unterschiedlichen realen Instanzen an diesem Punkt wieder zu. In der Betriebsphase erfolgt eine Individualisierung der Produkte, da jedes Produkt unterschiedlichen Belastungen, Ermüdungserscheinungen und Schäden ausgesetzt ist. Diese Phase ist zudem geprägt von Unsicherheiten in Bezug auf die tatsächlich erfahrenen Lasten und die strukturellen Eigenschaften.

3.3.2 Taxonomische Einordnung der Anforderungen

Die gesammelten Anforderungen werden nun gemäß der Taxonomie nach van der Valk et al. [7] zugeordnet; siehe Tabelle 2.3. Analog zu van der Valk et al. [7] werden die Merkmale als verpflichtend (**M**andatory), gegenseitig ausschließend (**M**utually **E**xclusive), nicht relevant (**N**ot

relevant), optional (**Optional**) oder nicht besprochen (-) klassifiziert. Die vorherigen Abschnitte haben die grundlegenden Unterschiede zwischen einem Digitalen Zwilling in der Entwurfs- und Betriebsphase herausgearbeitet. Daher wird die Klassifikation auch separat entsprechend dieser beiden Anwendungsfällen vorgenommen. Eine ausführliche Diskussion folgt in den nächsten Abschnitten.

Datenerfassung

Die Meta-Dimension Datenerfassung fasst die Bereiche **Datenerhebung**, **Datenquellen**, **Synchronisation** und **Dateneingabe** zusammen. In der Entwurfsphase benötigen wir zu unterschiedlichen Zeitpunkten verschiedene Informationen und Datensätze, wie in Tabelle 3.3 dargestellt. Die Bereitstellung der Daten kann automatisiert erfolgen, bei qualitativem Input jedoch wahrscheinlich semi-manuell durchgeführt werden. Daher ordnen wir der Datenerhebung eine semi-manuelle Ausführung zu, die optional vollständig automatisiert sein kann. Im Betrieb ist eine automatisierte Datenerfassung über Sensoren nahezu ausschließlich praktikabel für den Digitalen Zwilling der Struktur, da Änderungen im Betriebsmodus kontinuierlich aufgezeichnet werden müssen, um den Digitalen Zwilling aktuell zu halten [79]. Zusätzlich ist dies eine Voraussetzung für die Übernahme von Monitoring- und Predictive-Maintenance-Aufgaben durch den Digitalen Zwilling. Daher definieren wir die automatisierte Datenerfassung in der Betriebsphase als verpflichtend.

Als **Datenquellen** sind insbesondere strukturelle Daten (z. B. Deformation, Dehnung, Spannung) von Bedeutung, die in Verbindung mit Betriebs- und Umweltdaten erfasst werden. In der Entwurfs- und Betriebsphase werden daher mehrere Datenquellen benötigt. Insbesondere in der Betriebsphase ist es verpflichtend, mindestens eine Datenquelle zu haben, die den strukturellen Zustand im Betrieb überwacht. Eine einzelne Datenquelle wird daher in beiden Phasen als verpflichtend und mehrere Datenquellen als optional definiert.

Für die **Synchronisation** folgen wir den Definitionen des Digitalen Zwillings nach Grieves [31] und Fuller et al. [33], wobei der Schwerpunkt auf einer bidirektionalen Kopplung liegt. Diese wollen wir auch auf den Digitalen Zwilling der Struktur anwenden. Daher definieren wir die Synchronisation als verpflichtend. Dennoch muss diese Anforderung in der Entwurfsphase angepasst werden, da zu Beginn oft kein reales Gegenstück existiert. Daher wählen wir „ohne“ als optionale Eigenschaft in der Entwurfsphase.

Die **Dateneingabe** kann aus Roh- und vorverarbeiteten Daten bestehen. Sensordaten, und damit der wichtigste Input für strukturelle Daten im Betrieb, können als Rohdaten verstanden werden, die in nachfolgenden Schritten innerhalb des Digitalen Zwillings verarbeitet werden. Die Verarbeitung von Rohdaten wird daher als verpflichtend definiert. Der Input durch vorverarbeitete Daten, z. B. durch Software-Tools, ist zunächst für strukturelle Komponenten von sekundärer Bedeutung, kann jedoch optional berücksichtigt werden. In der Entwurfsphase hingegen arbeiten wir mit vorverarbeiteten Daten, z. B. aus Datenbanken, Simulationsprogrammen oder qualitativem Input von Ingenieur:innen. In diesem Kontext ist die Eingabe von vorverarbeiteten Daten verpflichtend und Rohdaten optional.

Datenverarbeitung und -verteilung

Die Meta-Dimension Datenverarbeitung und -verteilung fasst alle Eigenschaften zur Datenverknüpfung des Digitalen Zwillings zusammen. Van der Valk et al. [7] nennen hierbei **Daten-Governance, Interoperabilität, Schnittstelle, Datenverknüpfung** und **Zweck**. Die ersten drei Aspekte sollten im Kontext der Struktur nicht explizit behandelt werden. Übergeordnete Standards sind erforderlich, um Datensicherheit, -management und Schnittstellen zu vereinheitlichen. Der Digitale Zwilling der Struktur würde sich in jedem Fall in diese übergeordneten Standards integrieren. Analog zur Synchronisation ist eine bidirektionale **Datenverknüpfung** essenziell für das strukturelle Monitoring, insbesondere in der Betriebsphase. Dies definiert die bidirektionale Datenverknüpfung als verpflichtend.

Bezüglich des **Zwecks** sind die möglichen Anwendungen des Digitalen Zwillings vielfältig. Im Hinblick auf Strukturen lassen sich drei Hauptanwendungen klassifizieren:

- Entwurf und Optimierung von Leichtbaukonstruktionen
- Überwachung von Ermüdung und Schäden der Struktur zur Unterstützung von Predictive-Maintenance-Strategien
- Kopplung von Eingreifsteuerungen, um die strukturelle Nutzung während des Betriebs aktiv zu beeinflussen.

Allen Aufgaben ist gemein, dass sie Rückmeldungen an die reale Struktur geben. Daher wird die Datenverarbeitung und das Datenrepository im Hinblick auf eine dieser Aufgaben als verpflichtend definiert. Der Datentransfer wird optional hinzugefügt.

Konzeptuelle Reichweite

Die Meta-Dimension Konzeptuelle Reichweite umfasst Aspekte der konzeptionellen Umsetzung des Digitalen Zwillings in Bezug auf **Genauigkeit, Zeitpunkt der Erstellung** und **konzeptionelle Elemente**. Letztere werden in Analogie zu van der Valk et al. [7] nicht weiter betrachtet.

Für die **Genauigkeit** des Digitalen Zwillings, hier im Hinblick auf die Modellierung betrachtet, ergeben sich zwei Optionen:

- Der Digitale Zwilling der Struktur ist eine explizite, detaillierte und identische Darstellung einer strukturellen Komponente.
- Der Digitale Zwilling der Struktur ist eine ausreichend genaue, implizite und partielle Darstellung des Gesamtsystems.

Beide Optionen stellen Herausforderungen für unser System dar. Im ersten Fall muss die Komplexität des Gesamtmodells aufgrund der hohen Auflösung aller Phänomene hinsichtlich des Speicher- und Rechenaufwand sowie Echtzeitfähigkeit überarbeitet werden. Im zweiten Fall besteht die zentrale Herausforderung darin, die ausreichende Genauigkeit und Konsistenz der erforderlichen Teilmodelle sicherzustellen. Allgemein widerspricht der gewählte Detaillierungsgrad der Abstraktion eines Modells. Der Modellierungsaufwand steigt, wenn eine virtuelle Instanz detailliert, d.h. expliziter dargestellt wird. Detailliertere Modelle sind in der Regel numerische Modelle. Wird das Modell abstrahiert, wird das Verhalten der Struktur durch eine implizite Beschreibung erfasst, beispielsweise in Form von analytischen Modellen. Weniger detaillierte Modellierung muss jedoch nicht zwangsläufig zu geringerer Genauigkeit führen, solange die Annahmen zur Modellreduktion nicht verletzt werden. Ein analytisches Modell kann beispielsweise die Verformung eines Balkens oder einer balkenartigen Struktur ebenso genau erfassen wie eine explizite hochauflösende Finite-Elemente-(FE)-Simulation. Basierend auf dieser Argumentation treffen wir folgende Aussagen: Unabhängig von der Entwurfs- oder Betriebsanwendung ist der Einsatz von Teilmodellen, die das übergeordnete globale Verhalten der Struktur, z.B. Verformung, repräsentieren, verpflichtend. Eine identische Darstellung durch explizitere Modelle kann insbesondere im Entwurfsprozess erforderlich sein und wird als optional klassifiziert.

Abschließend betrachten wir den **Zeitpunkt der Erstellung**. Ein Digitaler Zwilling im Entwurfsprozess muss nutzbar sein, bevor die physische Komponente erstellt wird. Dies schließt ein „Digital-first“ Vorgehen im Entwurfsprozess ein. Die Weiterentwicklung einer bestehenden Komponente in einem neu etablierten Prozess mit einem Digitalen Zwilling kann jedoch auch eine „Physical-first“ Strategie ermöglichen. Umgekehrt lässt sich dieselbe Argumentation auf die Betriebsphase anwenden. Im Betrieb wird eine physische Komponente an ein vorbereitetes digitales Modell über Kalibrierung angepasst und initiiert so den Digitalen Zwilling. Es ist auch möglich, dass in der Betriebsphase ein Digitaler Zwilling bereits existiert und ältere Komponenten nachträglich integriert werden, was ein digitales-erstes Vorgehen ebenfalls möglich macht.

3.3.3 Ableiten der zwei Archetypen des Digitalen Zwillings für Strukturen

In den Abschnitten 3.1.2 bis 3.3.1 wurden die geeigneten Merkmale für die verschiedenen Meta-Dimensionen der Taxonomie in der Design- und Betriebsphase erörtert und ausgewählt. Die beiden Phasen haben je nach Dimension unterschiedliche Anforderungen, die in Abbildung 3.7 erneut dargestellt werden. Insgesamt wird auf Basis der Argumentation vorgeschlagen, zwei Archetypen für den Anwendungsfall der Strukturmechanik zu benennen:

Ein strukturgestaltender Digitaler Zwilling für die Entwicklungsphase.
&
Ein strukturüberwachender Digitaler Zwilling für die Betriebsphase.

Beide Anwendungsbereiche bringen Anforderungen an ihren Digitalen Zwilling mit, die sich teilweise grundlegend widersprechen. Dies wird durch den Datenfluss zwischen der realen und der digitalen Komponente sowie durch das Variantenmanagement in beiden Phasen verdeutlicht. Beide Phasen bilden jeweils einen Archetyp eines Digitalen Zwillings, die in einigen Aspekten übereinstimmen. Für die Implementierung eines strukturellen Digitalen Zwillings ist es entscheidend, beide Typen beim Eintritt in den Betrieb miteinander zu verknüpfen. Daher ist der Kalibrierungsprozess essenziell, um den Digitalen Zwilling ganzheitlich in den Produktlebenszyklus zu integrieren.

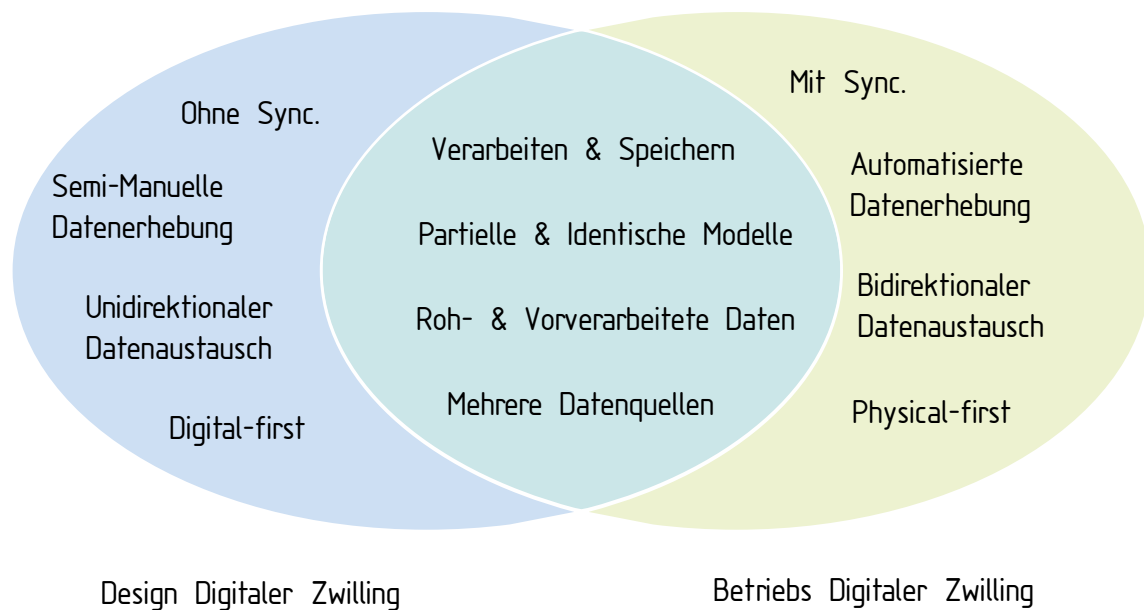


Abb. 3.7: Venndiagramm der zwei Archetypen des Digitalen Zwillings für Strukturen.

Die beiden definierten Archetypen stellen zwei Grundgerüste für die weitere Entwicklung der Digitalen Zwillings dar. Die Teilung soll dabei insbesondere helfen, die Komplexität gegenüber einem holistischen Digitalen Zwilling, der den gesamten Produktlebenszyklus umspannt, zu reduzieren.

3.4 Diskussion der Unterhypothese 1

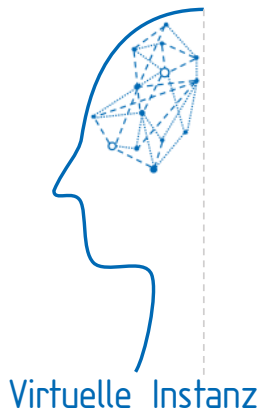
Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchung validieren die Unterhypothese 1: Die Anforderungen an den Digitalen Zwilling unterscheiden sich signifikant zwischen der Entwurfs- und Betriebsphase, was die Notwendigkeit zweier Archetypen bedingt. Die detaillierte Analyse der jeweiligen Anforderungen zeigt, dass sowohl die Nutzungspotenziale als auch die spezifischen Bedarfe in den beiden Phasen divergieren. Diese Divergenz spiegelt sich in den definierten Archetypen wider: Dem strukturgestaltenden Digitalen Zwilling für die Entwicklungsphase und dem strukturüberwachenden Digitalen Zwilling für die Betriebsphase.

Die Hypothese stützt sich auf die Annahme, dass die Entwicklungs- und Betriebsphasen unterschiedliche Ziele verfolgen. Während die Entwicklungsphase primär auf die Optimierung von Struktureigenschaften und Designlösungen abzielt, liegt der Schwerpunkt in der Betriebsphase auf der Überwachung, Analyse und der strukturellen Integrität. Die Ergebnisse der Analyse bestätigen diese Annahme. Der strukturgestaltende Digitale Zwilling operiert vollständig in der virtuellen Domäne. Sein Fokus liegt auf Simulationen, Variantenuntersuchungen und Optimierungen, ohne dass ein direktes Gegenstück in der physischen Welt existiert. Der strukturüberwachende Digitale Zwilling hingegen ist untrennbar mit einer realen Instanz gekoppelt, da er Zustandsdaten aus der physischen Struktur aufnimmt, verarbeitet und in Rückkopplungsschleifen für weitere Prognosen und Analysen verwendet. Diese Kopplung der beiden Instanzen, der virtuellen und der realen, ist eine essenzielle Herausforderung und ein zentraler Aspekt für die Weiterentwicklung des Konzepts.

Eine zentrale Schwierigkeit, die sich in der Betriebsphase zeigt, ist die effektive und nahtlose Kopplung zwischen der virtuellen und der realen Instanz. Diese Kopplung ist notwendig, um Echtzeitdaten aus der realen Welt in die virtuelle Domäne zu übertragen und gleichzeitig Simulationsergebnisse zurück in den realen Betrieb einfließen zu lassen. Die Qualität und Stabilität dieser bidirektionalen Schnittstelle entscheidet maßgeblich darüber, ob der Digitale Zwilling seine Funktion als integratives Werkzeug zwischen den beiden Phasen erfüllen kann. Probleme wie Dateninkonsistenz, Übertragungsfehler oder eine unzureichende Kalibrierung der virtuellen Modelle erschweren diese Interaktion und erfordern gezielte Lösungsansätze, die sich mit der Integration und Synchronisation von virtuellen und realen Elementen befassen.

Für die Veranschaulichung dieser Erkenntnis bedienen wir uns an dem Bild des Januskopfs. Der Januskopf entstammt der römischen Mythologie und hat sich über die Jahrhunderte hinweg als Metapher für viele Bereiche etabliert. Der Januskopf steht traditionell für den römischen Gott der Anfänge und Übergänge, der mit seinen zwei Gesichtern Vergangenheit und Zukunft, Anfang und Ende sowie Gegensätze und Wandel miteinander verbindet. Die Analogie des Januskopfes kann hier neu interpretiert werden: Sie symbolisiert nicht das getrennte Schauen in Vergangenheit und Zukunft, sondern die Dualität und Übergang unterschiedlicher Instanzen, die Multiperspektivität, sowie das Teilen eines gemeinsamen Wissens. In der Entwicklungsphase ist der Digitale Zwilling der Hüter des Wissens, der durch Simulationen und Optimierungen aufgebaut wird. In der Betriebsphase wiederum wird dieses Wissen mit der realen Instanz geteilt und umgekehrt – die reale Instanz liefert ihre Erfahrungen und Daten zurück an den Digitalen Zwilling, sodass beide Instanzen auf einem einheitlichen Wissensstand agieren können. Dieses Konzept des „geteilten Wissens“ stellt die Kopplung zwischen virtueller und realer Instanz in den Mittelpunkt. Das verbindende Element, welches sicherstellt, dass beide Instanzen jederzeit auf denselben Daten und Erkenntnissen basieren, rückt für das folgende Kapitel in den Vordergrund. Wie dieses Kopplungselement gestaltet, optimiert und implementiert werden kann, ist entscheidend für die erfolgreiche Nutzung des Digitalen Zwillings über den gesamten Lebenszyklus hinweg und wird im nächsten Kapitel eingehend untersucht.

Digitaler Zwilling im Design



Digitaler Zwilling im Betrieb

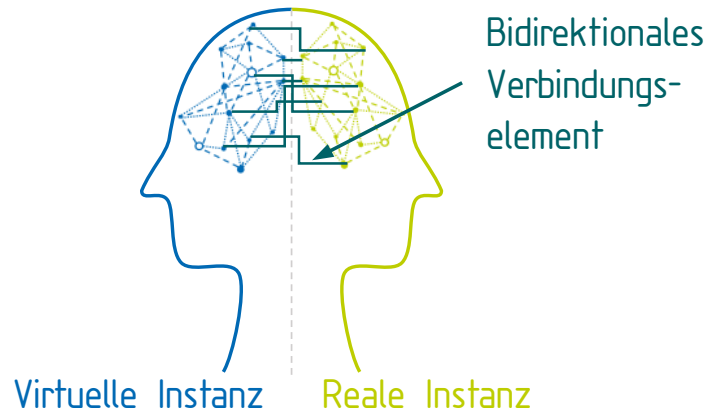


Abb. 3.8: Analogie der Archetypen zum Januskopf.

4 Verbindung der Instanzen - SHM als zentrales Kopplungselement

Die im vorhergehenden Kapitel analysierten Archetypen des strukturgestaltenden und strukturüberwachenden Digitalen Zwillings unterstreichen die zentrale Bedeutung der Kopplung zwischen virtueller und realer Instanz für eine effektive Nutzung im Betrieb. Dabei wurde deutlich, dass die bidirektionale Kopplung im Betrieb des Digitalen Zwillings essenziell ist, um ein gemeinsames Wissensfundament zwischen realer und virtueller Instanz zu schaffen und eine kontinuierliche Abstimmung zwischen Modell und Realität sicherzustellen.

Im Fokus des vorliegenden Kapitels steht die Unterhypothese 2, welche besagt, dass SHM das notwendige Kopplungselement für den Aufbau und die kontinuierliche Nutzung einer handlungsfähigen Digitalen Zwillings Entität im Betrieb darstellt. Ziel ist es, die Rolle von SHM als Brücke zwischen der realen und der virtuellen Instanz zu untersuchen und die praktischen Herausforderungen und Möglichkeiten dieser Kopplung zu analysieren.

Das Vorgehen gliedert sich in zwei zentrale Abschnitte. Zunächst erfolgt eine Diskussion der Hypothese anhand der drei Aspekte: (1) Analyse zur Entstehung von Daten, Informationen und Wissen innerhalb der Struktur, (2) Umsetzung und Limitationen von SHM als Kopplungselement sowie die (3) Strukturierung des Rekalibrierungsschritts, der sicherstellt, dass die virtuelle Instanz kontinuierlich an die reale Struktur angepasst wird. Abschließend wird die Hypothese anhand eines Kragarmbeispiels validiert. Teile dieses Kapitels sind Teil der Konferenzveröffentlichung zur EWSHM 2022 [79].

4.1 Von zwei Instanzen zur Entität des Digitalen Zwillings

In der weiteren Diskussion werden Begriffe wie Daten, Informationen und Wissen verwendet. Die Definition der Begriffe bedient sich der Darstellung nach North [99]. Die Wissenstreppe nach North ist ein Modell, das die Stufen von Zeichen bis hin zu wettbewerbsfähigen Wissensmanagement beschreibt, siehe Abbildung 4.1. Es zeigt, wie Daten durch Verarbeitung und Kontextualisierung über Informationen zu Wissen vernetzt werden, und wie dieses Wissen schließlich zur Gestaltung und Entscheidungsfindung genutzt werden kann. Zeichen sind die grundlegenden Träger von Informationen, wie Buchstaben oder Zahlen, die für sich genommen keine Bedeutung haben. Werden diese Zeichen in eine Syntax gebracht, entstehen Daten. Daten sind somit geordnete Zeichen, die ohne Kontext ebenfalls keine Aussagekraft besitzen.

Durch die Einbettung in einen Zusammenhang werden aus Daten Informationen. Informationen entstehen, wenn Daten interpretiert werden und Antworten auf sogenannte „W-Fragen“: Was?, Wie? oder Wo? liefern können. Erst durch die Verknüpfung mit Erfahrungen, Fähigkeiten und Einsichten werden Informationen zu Wissen. Wissen ist kontextabhängig, strukturiert und ermöglicht es, Entscheidungen zu treffen oder, wenn motiviert, ein zielgerichtetes Handeln einzuleiten.

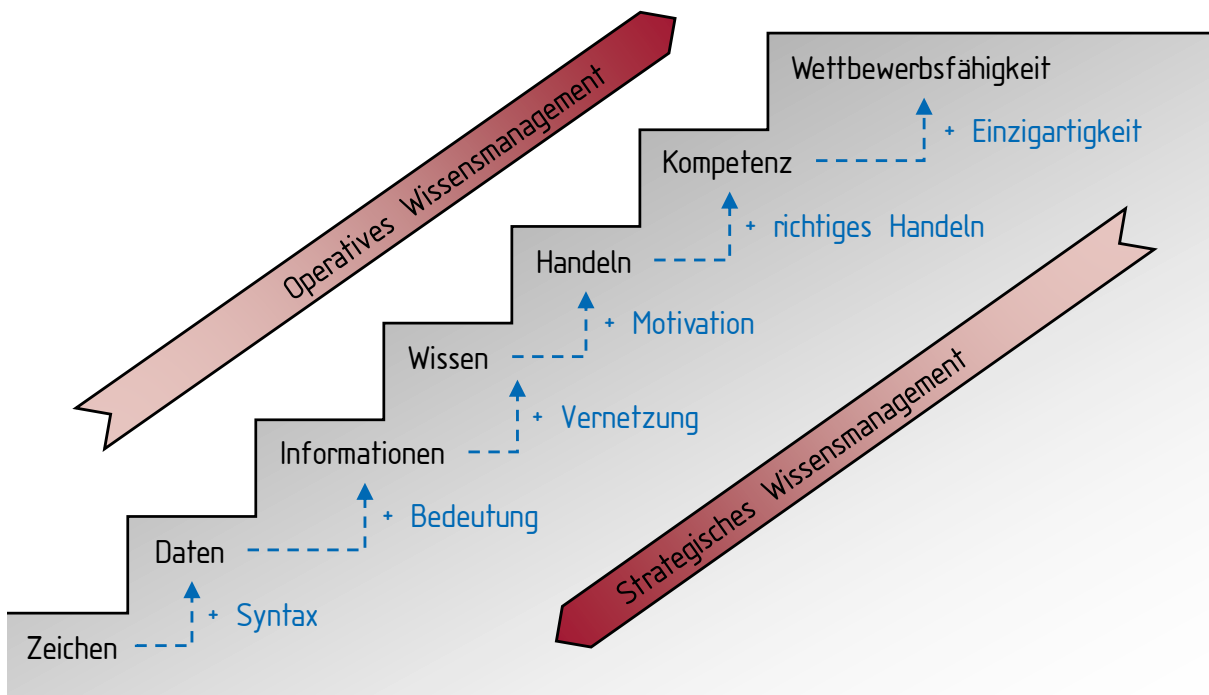


Abb. 4.1: Wissenstreppe nach North [99].

Die Wissenstreppe nach North und die SHM-Levels nach Rytter [14], siehe Abschnitt 2.1.1, können miteinander verbunden werden, um den Übergang von Daten über Informationen hin zu Wissen im Kontext von Überwachungs- und Diagnosesystemen zu verdeutlichen.

SHM Level 1 (Erkennung von Schäden): Auf diesem Level geht es darum, Rohdaten zu erfassen. Das entspricht der Stufe der Daten auf der Wissenstreppe. Sensoren sammeln Zeichen wie Schwingungen, Temperaturen oder Dehnungen, die zunächst nur als unstrukturierte Messwerte vorliegen. Diese Daten sind unverarbeitet und enthalten ohne Kontext noch keine für die Schadensbewertung relevante Information, können aber als einfacher Indikator zum Vorhandensein eines Schadens ($0/1 \equiv \text{nein/ja}$) genutzt werden.

SHM Level 2 und 3 (Lokalisierung und Bewertung von Schäden): Auf diesen Stufen werden die erfassten Daten analysiert und interpretiert, um daraus Informationen abzuleiten. Diese Informationen beantworten grundlegende Fragen, wie „Wo befindet sich der Schaden?“ (Level 2), „Was für ein Schadensmodus liegt vor?“ und „Wie stark ist der Schaden?“ (Level 3). Hier zeigt

sich die Verbindung zur Wissenstreppe: Daten werden in einen Kontext gebracht und werden so zu Informationen, die eine erste Grundlage für Entscheidungen bilden können.

SHM Level 4 (Schadensbasierte Entscheidung): Der Übergang von Informationen zu Wissen findet auf Level 4 statt. Hier werden die Informationen aus den vorherigen Stufen mit zusätzlichem Wissen über Materialeigenschaften, Belastungszyklen und Betriebsbedingungen kombiniert, um Vorhersagen zu treffen und fundierte Entscheidungen zu ermöglichen. Dies entspricht der Stufe des Wissens auf der Wissenstreppe, wo Informationen durch Erfahrung, Verknüpfung und Interpretation nutzbar gemacht werden. Das Ergebnis ist ein tiefes Verständnis des Zustands des Systems, das zur Prognose der Restlebensdauer und zur Planung von Wartungsmaßnahmen dient. In dieser Logik bleibend, bildet ein Level 4-SHM die Basis für ein zielführendes Handeln mit oder für den Digitalen Zwilling. Das Ziel dieser Handlung kann dabei unterschiedlich motiviert sein, z.B. in der Rekalibrierung der virtuellen Instanz, dem Einleiten einer Steuerung von Einflussgrößen (z.B. Geschwindigkeit oder Lasten) oder dem Melden eines Inspektionsbedarfs.

Zum Erreichen einer handlungsfähigen Digitalen Zwillings Entität wird ein Level 4 SHM-System benötigt.

4.1.1 Datengenerierung von Strukturen

Unabhängig von dem tatsächlich erreichten Level eines SHM-Systems beginnt jede Überwachung mit dem Sensorieren bzw. Vermessen der Struktur und damit der Datengenerierung zur realen Instanz. Daten werden jedoch nicht erst bei der Inbetriebnahme erzeugt, sondern kontinuierlich mit Beginn des Entwurfsprozesses. Zur Bewertung der Entstehung von Daten und ihrer Zuordnung zur virtuellen und/oder realen Instanz wird Abbildung 4.2 betrachtet. Dargestellt ist, angelehnt an Abbildung 3.6 zum Variantenmanagement, die zu erwartende Datenmenge für ein Bauteil über die Design-, Fertigungs- und Betriebsphase hinweg.

Im Designprozess werden maßgeblich Daten generiert, die der virtuellen Instanz zugeordnet sind. Dazu gehören Informationen zur Konfiguration, Systeme und Sub-Systeme, Geometriedaten, Materialdaten, Auslegungsannahmen, etc., siehe Abschnitt 3.1.2. Im Zuge der Konkretisierung des Entwurfs und der Detaillierung bis zur finalen Freigabe der Bauunterlagen nimmt die Menge an Daten und Informationen stetig zu, siehe blaue Linie Abbildung 4.2. Da die Daten sich auf die virtuelle Instanz der Auslegungsphase beziehen sind sie, sofern keine Variationen des Bauteils im Entwurf vorgesehen sind, für alle Bauteile der späteren Serie gültig. Die Daten, bzw. Informationen, bleiben durch Erstellung und Freigabe der Bauunterlagen, eingefroren. Die formalen Informationen über das Bauteil bleiben ab diesem Schritt konstant.

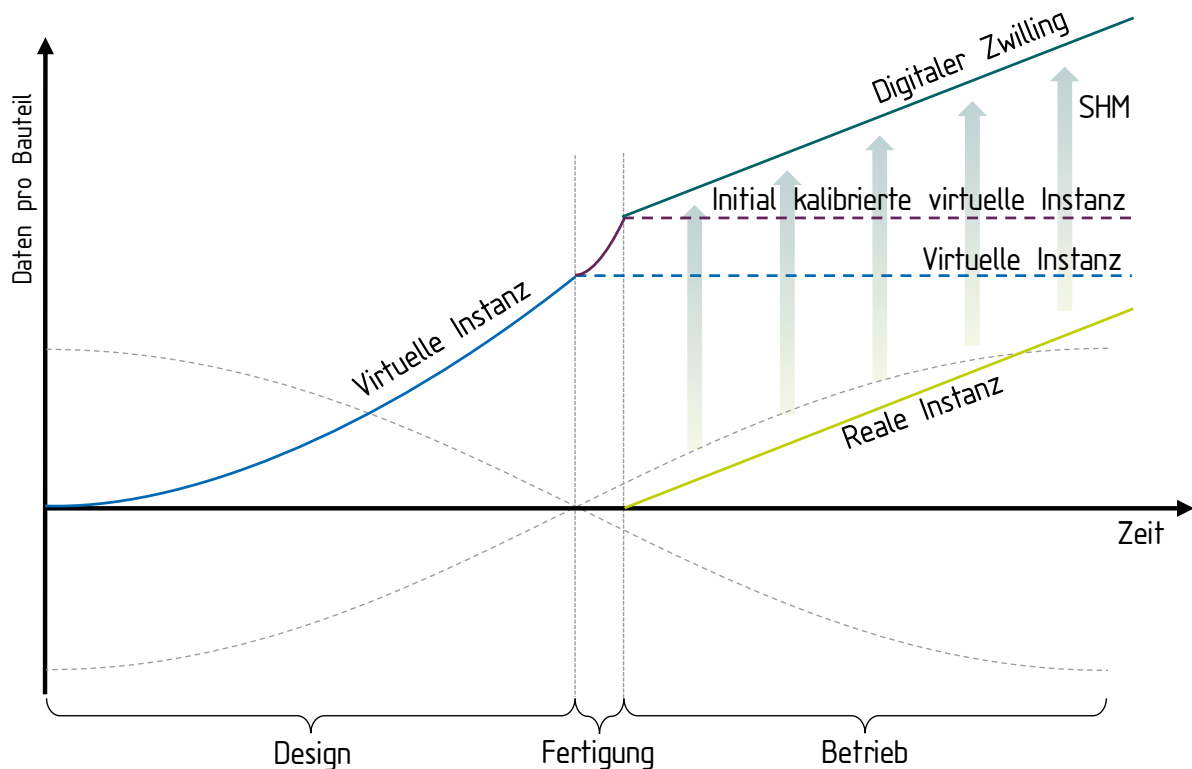


Abb. 4.2: Datenmenge pro Bauteil für virtuelle und reale Instanzen des Digitalen Zwillings.

Die Fertigung stellt den Entstehungspunkt der realen Instanzen dar. Werden im Zuge der Fertigung Daten, beispielsweise über die erreichten Materialeigenschaften oder Fertigungstoleranzen erhoben, können diese ergänzend zur virtuellen Instanz, zur Verfügung gestellt werden. Werden die Fertigungsdaten individuellen Bauteilen, beispielsweise verknüpft über eine Seriennummer zugeordnet, erhält jedes Bauteil damit einen initial verknüpften Digitalen Zwilling, der sich aus Informationen über die virtuelle Instanz (Modelle und individuelle Fertigungsdaten) und der realen Instanz des Bauteils zusammensetzt, siehe violette Linie Abbildung 4.2. Obwohl durch die initiale Kalibrierung zwischen realer und virtueller Instanz ein Digitaler Zwilling des Bauteils entsteht, kann die Bezeichnung formal nur für diesen Zeitpunkt betrachtet werden, da ohne fortlaufende (Re-) Kalibrierung die Verbindung der Instanzen nicht über den weiteren Betrieb generiert werden kann. Eine weiterführende Betrachtung der Kopplung in der Betriebsphase erfolgt in Abschnitt 4.1.3.

Fertigungsdaten sind an dieser Stelle noch der virtuellen Instanz zugeordnet, da sie in der Regel nicht von dem Bauteil selbst, sondern von den produzierenden Maschinen und Fertigungsstraßen erfasst werden und somit nicht „bauteilgebunden“ vorliegen. Mit der Inbetriebnahme des Bauteils, in der Regel eingebaut in ein Zielsystem, kann jede reale Instanz Daten sammeln, siehe grüne Linie Abbildung 4.2. Notwendige Bedingung dafür ist eine Sensorierung des Bauteils oder des übergeordneten Systems, welche Bauteildaten im Betrieb erfassen kann. So

können Bauteilzustandsüberwachungen (CM) wie Umwelteinflüsse, Nutzungsdauer und Einbauzustand oder SHM wie Lasthistorien, Ermüdungszustand, Schädigungsdetektion etc. durchgeführt werden. Erfolgt keine Ankopplung der Daten aus der realen Instanz an die (kalibrierte) virtuelle Instanz, fehlt die notwendige Kontextualisierung der Daten der virtuellen Instanz. Ohne diese Verbindung ist der Digitale Zwilling nicht in der Lage, aus den vorliegenden Daten aussagekräftige Informationen und Wissen zu generieren, welche die Grundlage für die Handlungskompetenz des Digitalen Zwillings bilden.

Die Kopplung über ein SHM-System stellt daher die notwendige Bedingung dar, um die Daten der virtuellen und der realen Instanz zu verbinden.

Nur durch diese Integration wird der Digitale Zwilling in die Lage versetzt, die fortlaufend erfassten Zustandsdaten der realen Struktur in seine bestehende Wissensbasis zu integrieren und daraus handlungsrelevante Informationen abzuleiten. Diese Kopplung bildet die Grundlage für die kontinuierliche Nutzung und Anpassung des Digitalen Zwillings im Betrieb.

Die Datenmenge D_{DZ} des Digitalen Zwillings zu einem Zeitpunkt t_n ist somit die Summe der Daten aus der initial kalibrierten virtuellen Instanz und den über das SHM-System erfassten Menge an Daten der realen Instanz, siehe Gleichung 4.1. Dabei ist D_{DZ} die Gesamtmenge der Daten des Digitalen Zwillings, D_{virtuell} die Datenmenge der initialen virtuellen Instanz und $\Delta D_{\text{real}}(t_i)$ die erfasste Datenmenge der realen Instanz zu jedem diskreten Zeitpunkt t_i für n Zeitpunkte, an denen Daten im Betrieb erfasst wurden.

$$D_{DZ}(t_n) = D_{\text{virtuell}} + \sum_{i=1}^n \Delta D_{\text{real}}(t_i) \quad (4.1)$$

Aufgrund der zentralen Rolle der Kopplung muss die Umsetzung hinsichtlich technischer und methodischen Herausforderungen des SHM-Systems untersucht werden. Im nachfolgenden Abschnitt werden die Anforderungen und Limitationen des Messsystems insbesondere hinsichtlich der Sensitivität des Messsystems betrachtet.

4.1.2 Limitation der erreichbaren Kopplung

Strukturelle Eigenschaften verändern sich über die Lebensdauer eines Bauteils. Wir gehen zunächst von einer kontinuierlichen Degradation eines Bauteils aus. Basierend auf den vorangegangenen Definitionen muss die Degradation zu jedem Zeitpunkt am physischen Bauteil erfasst und im digitalen Gegenstück angepasst werden. Abbildung 4.3 zeigt ein mögliches Szenario für die Verbindung zwischen realer und virtueller Instanz. Als Beispiel wird eine zulässige Belastung F_{zul} für eine Struktur über ihre Lebensdauer betrachtet. Diese zulässige Belastung ergibt sich aus der kritischen Auslegungslast und einem Sicherheitsfaktor. Die grüne Kurve der realen Instanz stellt einen möglichen Degradationsprozess für ein Bauteil, die petrolfarbene Kurve die Degradation eines entsprechenden Digitalen Zwillings dar.

Zu Beginn wird durch eine initiale Kalibrierung sichergestellt, dass beide Instanzen übereinstimmen, siehe gestrichelte violette Linie in Abbildung 4.3. Durch kontinuierliche Datenerfassung innerhalb des Überwachungssystems wird der Zustand des physikalischen Zwillings über die Lebensdauer erfasst. Je nach Sensitivität des verwendeten Monitoring-Systems K_{SHM} wird nach einer gewissen Zeit Δt_1 eine messbare Abweichung vom Ausgangszustand festgestellt. Je nach Verlauf der Degradation kann gelten $\Delta t_n < \Delta t_{n+1}$, $\Delta t_n = \Delta t_{n+1}$, oder $\Delta t_n > \Delta t_{n+1}$, wobei in dem in Abbildung 4.3 dargestellten Verlauf von einer zunehmend beschleunigten Degradation ausgegangen wird.

Um die notwendige Bedingung einer eindeutig zugeordneten Kombination aus realer und virtueller Instanz, in Form einer Digitalen Zwillings Entität zu erhalten, muss dieser rekaliert werden. Der Rekalibrierungsprozess muss kontinuierlich ablaufen um die Fähigkeit des Digitalen Zwillings zur korrekten Handlungsfähigkeit hinsichtlich der zulässigen Kraft aufrechtzuerhalten.

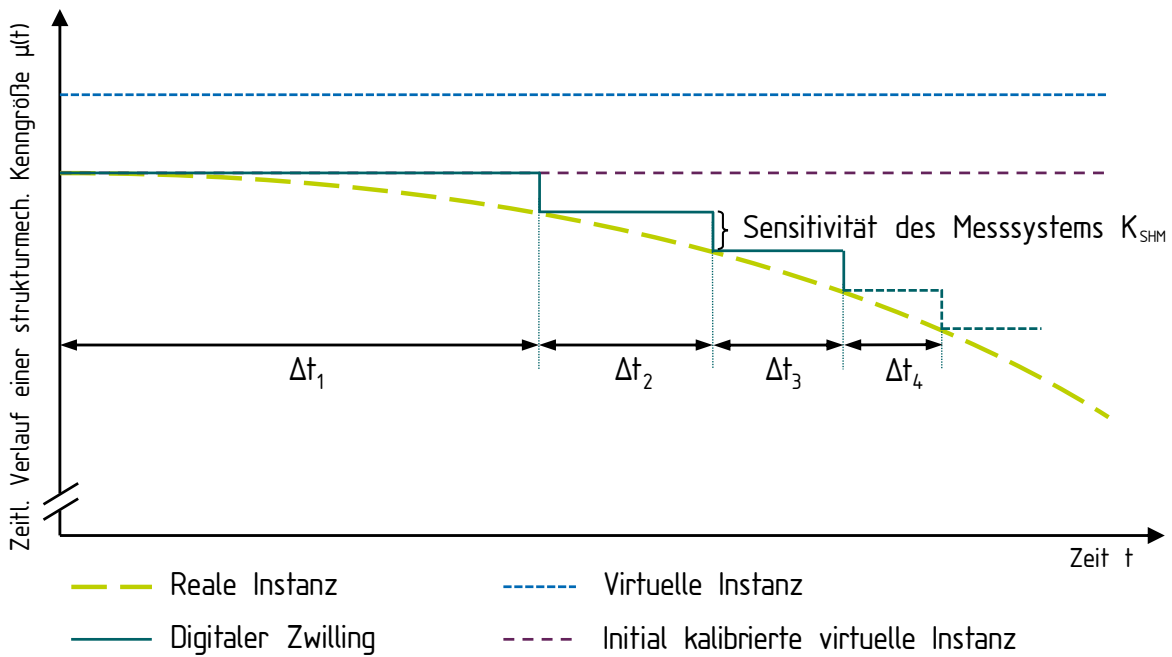


Abb. 4.3: Beziehung zwischen dem physischen Objekt und dem Digitalen Zwilling zur Darstellung der zulässigen Kraft F_{zul} , die auf eine Struktur ausgeübt werden kann, adaptiert nach [79].

Basierend auf den Überlegungen zu Abbildung 4.3 gilt:

$$|\mu_{i,real} - \mu_{i,virtuell}| = |\Delta\mu_i| \propto \frac{1}{K_{j,SHM}} \quad (4.2)$$

Die Genauigkeit eines Digitalen Zwillings, für eine oder mehrere strukturelle Größen $\Delta\mu_i$, ist beschrieben durch die Abweichung zwischen realer $\mu_{i,\text{real}}$ und virtueller $\mu_{i,\text{virtuell}}$ Kenngröße. Um die Abweichung der Größe μ_i zu bestimmen, kann diese entweder direkt gemessen werden, z.B. bei geometrischen Größen wie Höhe h oder Breite b , oder über eine korrelierte Messgröße j erfasst werden. Dies wäre z.B. bei der Ermittlung einer Biegesteifigkeit EI über die Dehnungsantwort bei bekannter Krafteinleitung der Fall. Die Sensitivität K , mit der ein SHM-System die, zur Ermittlung der Abweichung einer strukturellen Größe $\Delta\mu_i$, notwendige Messgröße j erfassen kann, wird mit $K_{j,\text{SHM}}$ bezeichnet. Es ist zu erkennen, dass die Abweichung $\Delta\mu_i$ kleiner wird, je höher die Sensitivität $K_{j,\text{SHM}}$ des SHM-Systems zur Erfassung der Messgröße ist. Wenn die Sensitivität steigt, kann das System präzisere Daten zur realen Instanz liefern, was die Abweichung zwischen realer und virtueller Instanz verringert und die Genauigkeit des Digitalen Zwillings verbessert.

Neben der Sensitivität des Messsystems ist auch die Messunsicherheit des verwendeten Systems ein limitierender Faktor für die maximal erreichbare Kopplung zwischen realer und virtueller Instanz. Damit wird Gleichung 4.2 um die Messunsicherheit $U_{\mu,i}$ einer Messgröße $\mu_{i,\text{real}}$ erweitert:

$$|(\mu_{i,\text{real}} \pm U_{\mu,i}) - \mu_{i,\text{virtuell}}| = |\Delta\mu_i \pm U_{\mu,i}| \quad (4.3)$$

Die Messunsicherheit $U_{\mu,i}$ stellt damit die untere Schranke der erreichbaren Genauigkeit eines Digitalen Zwillings für eine beliebige strukturelle Größe μ_i dar. Zusammenfassend kann festgehalten werden: Das SHM-System stellt sowohl die notwendige, als auch limitierende Bedingung für die Kopplung zwischen realer und virtueller Instanz dar. Die virtuelle Instanz kann sich im Rahmen der Randbedingungen Sensitivität und Messunsicherheit des SHM-Messsystems diskret an die reale Instanz annähern und diese rekalisieren.

4.1.3 Strukturierung des Rekalibrierungsschrittes

Bisher wurde der Kalibrierungsschritt als eine Stufe dargestellt. Im folgenden soll er detaillierter als stufenförmige, diskrete Annäherung betrachtet werden. Die Rekalibrierung fordert vom SHM-System verschiedene Aktionen:

- Messen und Erkennen von Abweichungen der aktuellen Sollgröße
- Bewertung der Art und Größe der Abweichung
- Einordnung der Ursache für Abweichung und Lokalisation der Abweichung
- Wahl einer geeigneten Anpassung zur Repräsentation der Abweichung im Modell

Diese Aktionen decken sich mit den Anforderungen an die SHM-Level nach Rytter [14], siehe Abschnitt 2.1.1. Die Komplexität der Aufgabe nimmt mit jedem Level zu. Um Rechenkapazität und Datenverarbeitung zu jedem Zeitpunkt so gering wie möglich zu halten, arbeitet das SHM-System nur mit dem maximal notwendigen Level. Mit anderen Worten: Bis zum Auslösen der Überwachungssensitivität $K_{j,SHM}$ für eine Messgröße, arbeitet das SHM-System nur mit einer Level 1 Auswertung, d.h. es wird nur das potentielle Vorliegen einer Abweichung registriert. Überschreitet eine Abweichung einen Schwellenwert, müssen zusätzlich die Level 2+3 aktiviert werden. So kann die festgestellte Abweichung bewertet und nach Bedarf lokalisiert werden. Ist das Ergebnis der Level 2+3 Bewertung eine Abweichung, die eine Korrektur erfordert ist die Konsequenz eine Modellanpassung durch eine Level 4 äquivalenten Einheit. Sobald die virtuelle Instanz rekaliert wurde, kann das Überwachungssystem auf eine Level 1 Überwachung zurückgesetzt werden. Die Verknüpfung der Level an den Stufenschritt ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

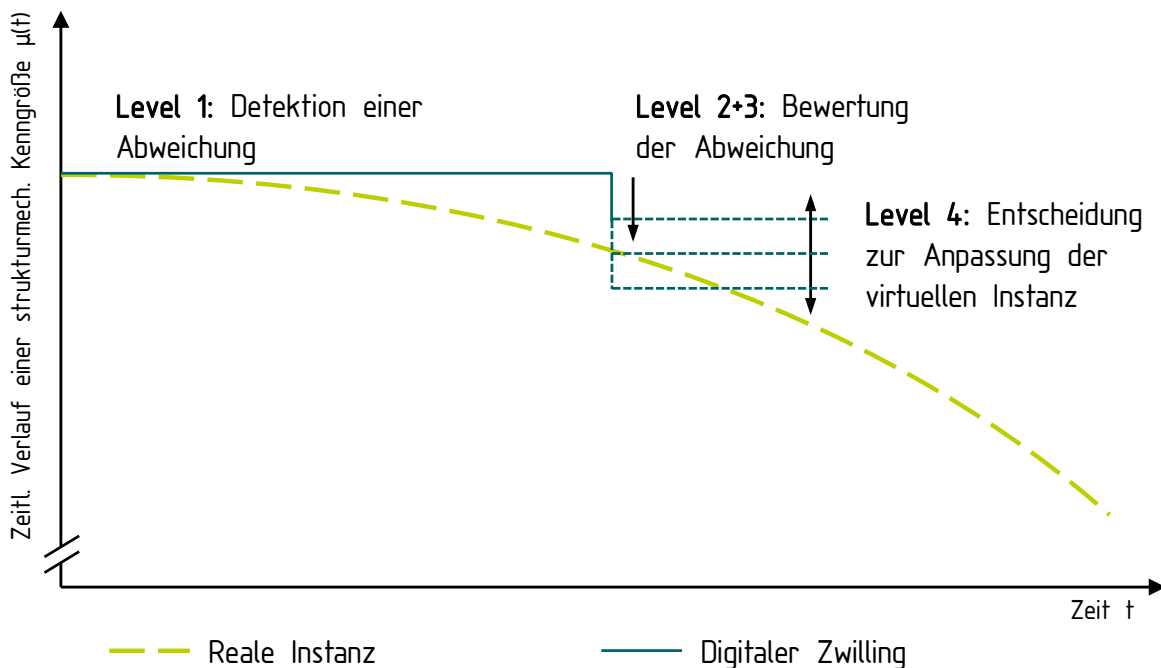


Abb. 4.4: Unterteilung der Anpassungsschritte im Digitalen Zwilling in die SHM-Stufen nach Rytter [14].

Zusammenfassend können drei Kernaussagen festgehalten werden:

- Die Datenmenge des Digitalen Zwillings ist die Summe der Daten und Informationen aus der initial kalibrierten virtuellen Instanz und den über das SHM-System erfassten Menge an Daten der realen Instanz.
- Die Sensitivität des SHM-Systems definiert den erreichbaren Kopplungsgrad zwischen realer und virtueller Instanz, wobei die Messunsicherheit die untere Schranke der Genauigkeit des Digitalen Zwillings ist.

- Für die Umsetzung eines Digital Zwillings ist ein Level 4 SHM-System notwendig, wobei die Level je nach Bewertungsphase adaptiv angepasst werden können.

Im nachfolgenden Abschnitt sollen die Aussagen, insbesondere zur Wahl der SHM Level, an einem Kragarmbeispiel demonstriert werden.

4.2 Validierung für ein Kragarmbeispiel

Im Folgenden wird die beschriebene Methode beispielhaft an einem Kragarm demonstriert. Der Digitale Zwilling in diesem Anwendungsfall ist ein realer Kragarm (links, Abb. 4.5) mit einer zugehörigen virtuellen Instanz in Form eines Modells mit graphischer Benutzeroberfläche (rechts, Abb. 4.5). Das verbindende Element ist ein SHM-System bestehend aus zwei Sensoren und dem zugehörigen Auswertungsalgorithmus. Im Rahmen des Beispiels soll der Digitale Zwilling genutzt werden, um die zulässige Last für das Bauteil an den Degradationszustand zu adaptieren, um beispielsweise ein Lastfeedback für die reale Instanz bereitzustellen. Zur Vereinfachung wird die kontinuierliche Degradation, die sich zu einem Schaden, z.B. in Form eines Risses akkumulieren würde, als diskretes Ereignis abstrahiert. Der Digitale Zwilling sollte diese diskrete Veränderung erkennen und innerhalb der virtuellen Instanz eine Modellanpassung vornehmen, die den Schaden darstellen kann. Anhand des Beispiels wird der Rekalibrierungsschritt, sowie die Staffelung der SHM Level exemplarisch demonstriert.

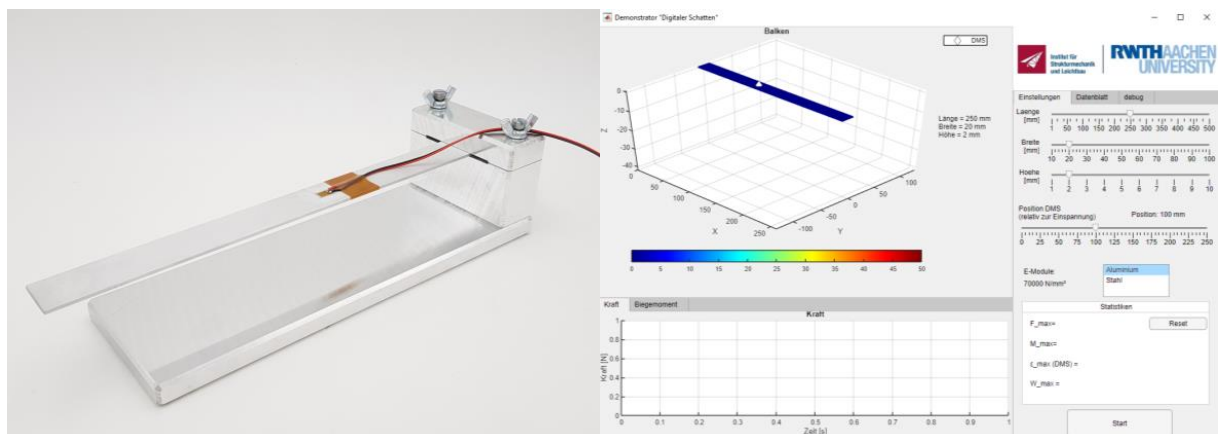


Abb. 4.5: Kragarmbeispiel bestehend aus einer realen Instanz (rechts) und einer virtuellen Instanz (links) dargestellt als graphische Benutzeroberfläche, [79].

Name	Symbol	Wert	Einheit
Breite	b	25	mm
Höhe	h	2	mm
Risstiefe	t_R	1	mm
Länge	l	230	mm
Kraftangriffspunkt	x_F	220	mm
Zulässige Spannung (AlMg ₃)	σ_{zul}	140	N/mm ²
Querkontraktionszahl	ν	0.3	
Sicherheitsfaktor	S	1.5	

Tabelle 4.1: Verwendete Variablen und Werte für die Simulation und den experimentellen Aufbau.

4.2.1 Modellierung und Simulation

Der verwendete Kragarm besteht aus einer Einspannung mit Standfuß, sowie einem rechteckigen Profil (Breite b , Höhe h) aus Aluminium (AlMg₃) der Länge l . Alle geometrischen Größen und Materialdaten können Tabelle 4.1 entnommen werden. Das wahrscheinlichste Schädigungsszenario ist eine Rissbildung an der am höchsten belasteten Stelle, der Einspannung. Die akkumulierte Schädigung wird in Form eines künstlichen Risses der Tiefe t_R und Breite $b_{\text{riss}} = b$ an der Einspannung dargestellt. Kerbwirkungseffekte, die ebenfalls durch die Schädigung verursacht werden, werden in diesem Szenario vernachlässigt. Die zulässige Kraft F_{zul} , die im Digitalen Zwilling für den Aufbau vorhersagt und gesteuert werden soll, wird unter Verwendung der kritischen Geometrie, der zulässigen Spannung σ_{zul} , des Materials und eines Sicherheitsfaktors S gemäß Gl. 4.4 als Bernoulli Balken [100] berechnet.

$$F_{\text{zul}} = \frac{\sigma_{\text{zul}} b (h - t_R)^2}{6 x_F S} \quad (4.4)$$

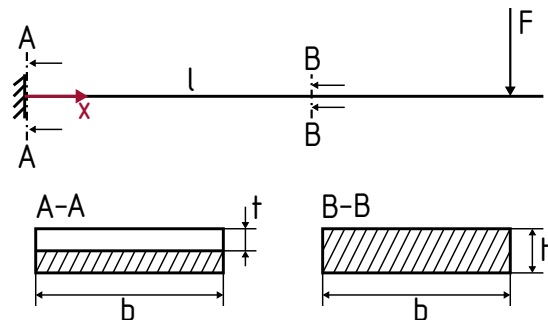


Abb. 4.6: Schematische Darstellung des Kragarmbeispiels und den Querschnittflächen für die Struktur (B-B), sowie der Schädigungsstelle (A-A) [79].

Zur Auslegung des Versuchsaufbaus und Konfiguration des Sensorsystems, wird der Kragarm in einer Finite-Elemente-Simulation (FE) untersucht. Der beschriebene Kragarm wird als rechteckiges 2D-Modell mit Schalenelementen in Abaqus modelliert. Dafür wird ein unbeschädigtes und ein beschädigtes Modell erzeugt. Zur Abbildung der Schädigung im Modell wird die erste Elementreihe mit einer um t_R reduzierten Dicke modelliert, siehe linker Rand in Abbildung 4.7.

4.2.2 Auswahl des SHM-Systems

Zur Wahl eines geeigneten Sensorsystems werden folgende Anforderungen an das System definiert:

- Zur Bewertung der angreifenden Last, muss ein schadensunabhängiges Lastmonitoring (LM) vorliegen.
- Änderungen vom initial kalibrierten, unbeschädigten Zustand (Index = UD) müssen lastunabhängig erfasst werden können.
- Die Schadensposition ist in dem gegebenen Fall bekannt und muss nicht ermittelt werden.
- Die Schadensgröße, hier in Form der Risstiefe t_R , muss aus den gegebenen Messgrößen ermittelt werden können, um eine korrigierte zulässige Last $F_{\text{krit},D}$ für den beschädigten Zustand (Index = D) bestimmen zu können.

Zur Erfassung einer schadensabhängigen Messgröße wird angelegt an den Schadensindikatoren (SDI) mit der Dehnung in eine rechnerische Nulldehnungsrichtung [13] gearbeitet. Basierend auf den Formeln des ebenen Dehnungszustands kann für den einachsigen Spannungszustand ein Nulldehnungswinkel β unter Verwendung der Poissonzahl ν des Materials als die Richtung, in der sich die Dehnungen gegenseitig kompensieren, bestimmt werden, siehe Gleichung 4.5. An dieser Stelle muss hervorgehoben werden, dass für diesen Anwendungsfall der genannte SDI nicht als lastunabhängiger Schadensindikator verwendet werden kann, sondern lediglich zur Konstruktion eines schadensbezogenen Messwerts bemüht wird. Das hier vorgestellte Beispiel ist kein SHM Demonstrator, sondern soll Änderungen in einer strukturmechanischen Messgröße zur Abbildung in der virtuellen Instanz erzeugen.

$$\beta = \pm \frac{1}{2} \arccos \left(\frac{\nu - 1}{\nu + 1} \right) \quad (4.5)$$

Für die gegebenen Werte, siehe Tabelle 4.1, ergibt sich der Nulldehnungswinkel β gemäß Gleichung 4.6. Die Messrichtung ist in Abbildung 4.10 rechts dargestellt.

$$\beta = \pm 61,4^\circ \quad (4.6)$$

Zur Auswahl geeigneter Messpunkte und -größen werden die Ergebnisse der 2D FE-Simulation ausgewertet. Dabei werden die Dehnungszustände der beschädigten und der unbeschädigten Probe sowie deren Differenz $\Delta\epsilon$ ausgewertet. Abbildung 4.7 zeigt die Änderung der Dehnung in die rechnerische Nulldehnungsrichtung $\Delta\epsilon_{ND}$ für eine aufgebrachte Last von $F = 2\text{ N}$ am Kraftangriffspunkt $x_F = 220\text{ mm}$. Bei der flächenhaften Auswertung zeigt sich, dass die Veränderungen durch die Schädigung $\Delta\epsilon_{ND}$ weiter oberhalb und unterhalb der Mittelachse verlaufen, wie in Abbildung 4.7 zu sehen ist. Die Dehnung in Nulldehnungsrichtung wird daher ober- bzw. unterhalb der Mittelachse genauer betrachtet. Ein beispielhafter Auswertungspfad ist in Abbildung 4.7 markiert. Für den dargestellten Auswertungspfad sind die Änderungen der Dehnung in Nulldehnungsrichtung entlang der x -Koordinate für unterschiedliche angreifenden Kräfte F aufgetragen, siehe Abbildung 4.8.

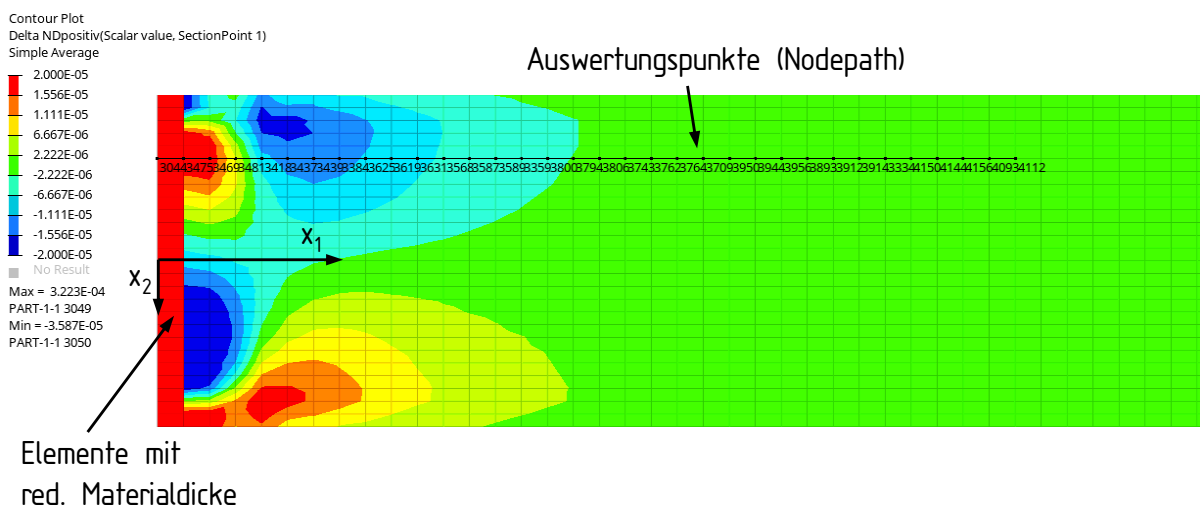


Abb. 4.7: Draufsicht zur Auswertung der Änderung der Dehnung in die berechnete Nulldehnungsrichtung ($\Delta\epsilon_{ND}$) für eine aufgebrachte Last von 2 N bei $x_F = 220\text{ mm}$, Darstellung abgeschnitten [79].

Zunächst ist zu erkennen, dass in einem Abstand von 60 mm von der Einspannung alle Randstörungen abgeklungen sind, so dass sich dieser Punkt für eine schadensunabhängige Lastüberwachung eignet. Betrachtet man weiter die Veränderung entlang des gewählten Knotenpfades, so sieht man, dass das größte $\Delta\epsilon_{ND}$ in einem Abstand von ca. 12 mm von der Einspannung auftritt. Große Messwerte zwischen $0 \leq x \leq 5\text{ mm}$, sind direkt auf den Sprung in der Dicke der Elemente zurückzuführen. Die Platzierung des Sensors an dieser Stelle, direkt an der Einspannung, ist aufgrund der Einbaubeschränkungen und der Störung des ebenen Spannungszustands durch die Einspannung zu vermeiden. Die Kurvenschar in Abbildung 4.8 zeigt, dass die Einflüsse auf Grund der Einspannungsstörung den SDI überlagern und deshalb in diesem Beispiel der Messwert keine lastunabhängige Messstelle ergibt. Die Störungen des uni-axialen Spannungszustands, sind auch in der unbeschädigten Probe als Abweichungen von null in Nulldehnungsrichtung messbar. Dies muss bei der Auswertung als kraftabhängiger Offset mit berücksichtigt

werden, siehe Gleichung 4.7. Die Ausschläge des Messwerts verhalten sich jedoch proportional zur angreifenden Last wie in Abbildung 4.9 dargestellt.

$$\Delta \epsilon_{ND} \propto F \Rightarrow \Delta \epsilon_{ND} = K_1 \cdot F \quad \text{mit} \quad K_1 = K_1(x) \quad (4.7)$$

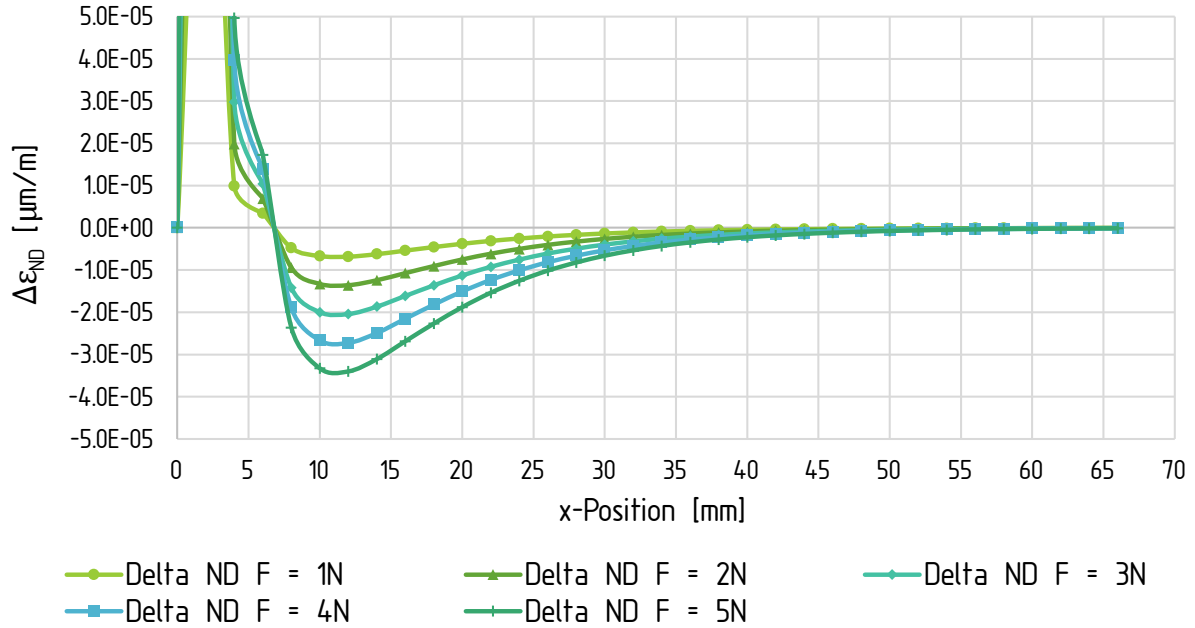


Abb. 4.8: Auswertung der Änderung der Dehnung in berechneter Nulldehnungsrichtung ($\Delta \epsilon_{ND}$) für eine aufgebrachte Last von 2N entlang des Knotenpfads, siehe Abbildung 4.7.

Auf der Grundlage der in der Simulation ermittelten Werte wird ein Versuchsaufbau mit den folgenden Sensoren erstellt. Zwei Dehnungsmessstreifen (DMS) werden zur Überwachung der physikalischen Struktur verwendet. Ein DMS, DMS_{ND} wird in der Nähe der Einspannung bei $x = 12 \text{ mm}$ in Nulldehnungsrichtung ($\beta = 61,4^\circ$) zur Schadenserkenkung angebracht, der zweite DMS, DMS_{LM} , wird in einem Abstand $x = 60 \text{ mm}$ von der Einspannung in Balkenrichtung platziert und zur Lastüberwachung verwendet. Die angreifende Last wird über das Signal ϵ_{LM} aus dem DMS_{LM} mit den Gleichungen des Bernoulli-Balken ermittelt [100]:

$$\sigma(x_{LM}) = \frac{M_y(x_{LM})}{I_y} \frac{h}{2} = \frac{F(x_F - x_{LM})}{I_y} \frac{h}{2} = E \epsilon_{LM} \quad (4.8)$$

$$\Rightarrow F(\epsilon_{LM}) = \underbrace{\frac{2 E I_y}{h(x_F - x_{LM})}}_{=K_2} \epsilon_{LM} \quad (4.9)$$

$$\Rightarrow F(\epsilon_{LM}) = K_2 \epsilon_{LM} \quad (4.10)$$

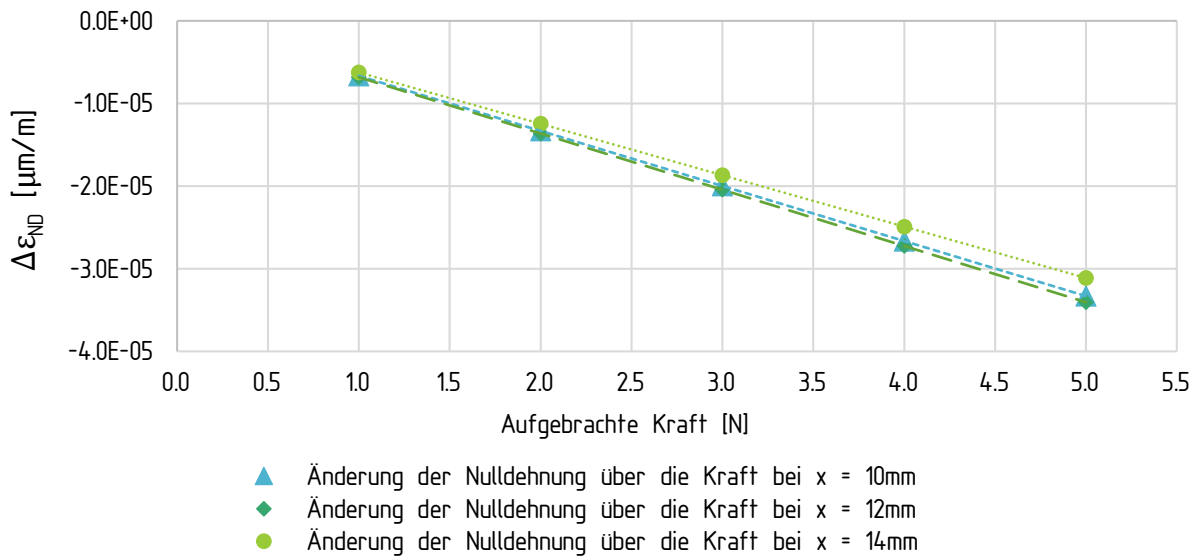


Abb. 4.9: Proportionaler Zusammenhang zwischen Kraft und Nulldehnung.

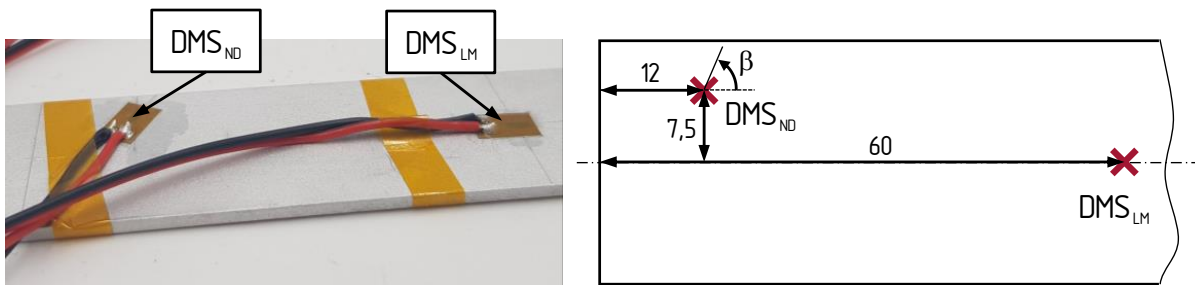
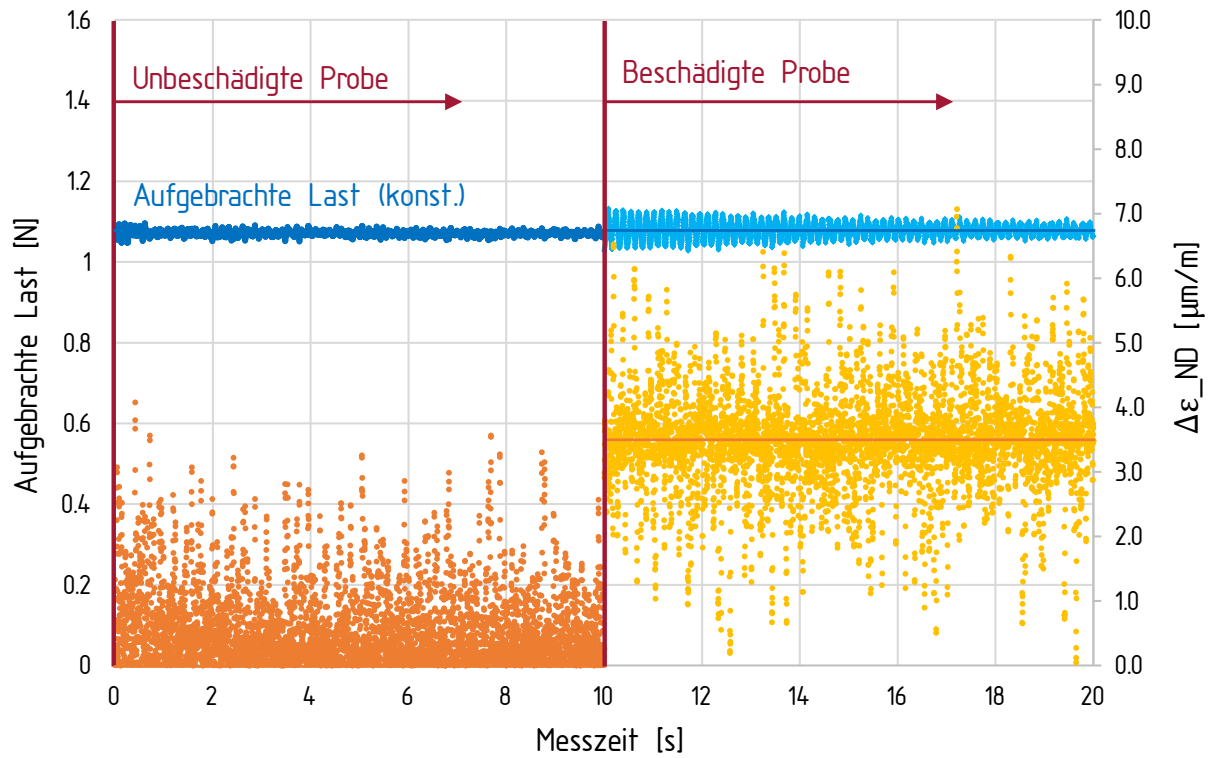


Abb. 4.10: Sensorkonfiguration auf dem Kragarm, rechte Skizze nicht maßstäblich.

Die Abmessungen und die Platzierung der Sensoren sind in Abbildung 4.10 zu sehen. Es werden zwei Probenkörper vorbereitet: Eine unbeschädigte Referenzprobe und eine beschädigte Probe.

4.2.3 Messungen und Daten

Beide Proben werden mit der gleichen Last von $F = 1,1\text{N}$ in Form eines Kalibrierungsgewichts am Kraftangriffspunkt x_F des Balkens belastet. Für den beschädigten und unbeschädigten Zustand werden die Daten des DMS in Nulldehnungsrichtung DMS_{ND} und des DMS zum Lastmonitoring DMS_{LM} erfasst. Die gemessenen Werte der DMS werden aufgetragen, siehe Abbildung 4.11.



- Last unbeschädigt • Last beschädigt • SDI $\Delta\epsilon_{ND}$ unbeschädigt • SDI $\Delta\epsilon_{ND}$ beschädigt

Abb. 4.11: Erfasste Messdaten zur Kraft (blau) und Änderung der Nulldehnungsrichtung $\Delta\epsilon_{ND}$ (orange). Links für den unbeschädigten und rechts für den beschädigten Zustand.

Der Messwert $\Delta\epsilon_{ND}$ wird ermittelt in dem die Differenz zwischen dem Dehnungssignal ϵ_{ND} des DMS_{ND} und einer zeitlich gemittelten Referenzwert $\bar{\epsilon}_{ND,ref}$ einer unbeschädigten Probe gebildet wird, siehe Gleichung 4.11. Der Mittelwert wird über k Messpunkte des unbeschädigten Zustands UD gebildet.

$$\Delta\epsilon_{ND} = |\epsilon_{ND} - \bar{\epsilon}_{ND,ref}| \quad \text{mit} \quad \bar{\epsilon}_{ND,ref} = \frac{\sum_{i=1}^k \epsilon_{ND,UD,i}}{k} \quad (4.11)$$

Wir sehen in Abbildung 4.11, dass bei konstanter Belastung der Messwert $\Delta\epsilon_{ND}$ für die beschädigte Probe von der Nullreferenz abweicht. Die beschädigte Probe kann somit identifiziert werden. Im dargestellten Beispiel wurde nur ein diskreter Schaden, mit einer vordefinierten Risstiefe t untersucht. Daher gilt für die Risstiefe t_R in diesem Beispiel:

$$t_R = \begin{cases} 0 \text{ mm}; & \Delta\epsilon_{ND} = 0 \\ 1 \text{ mm}; & \Delta\epsilon_{ND} \neq 0 \end{cases} \quad (4.12)$$

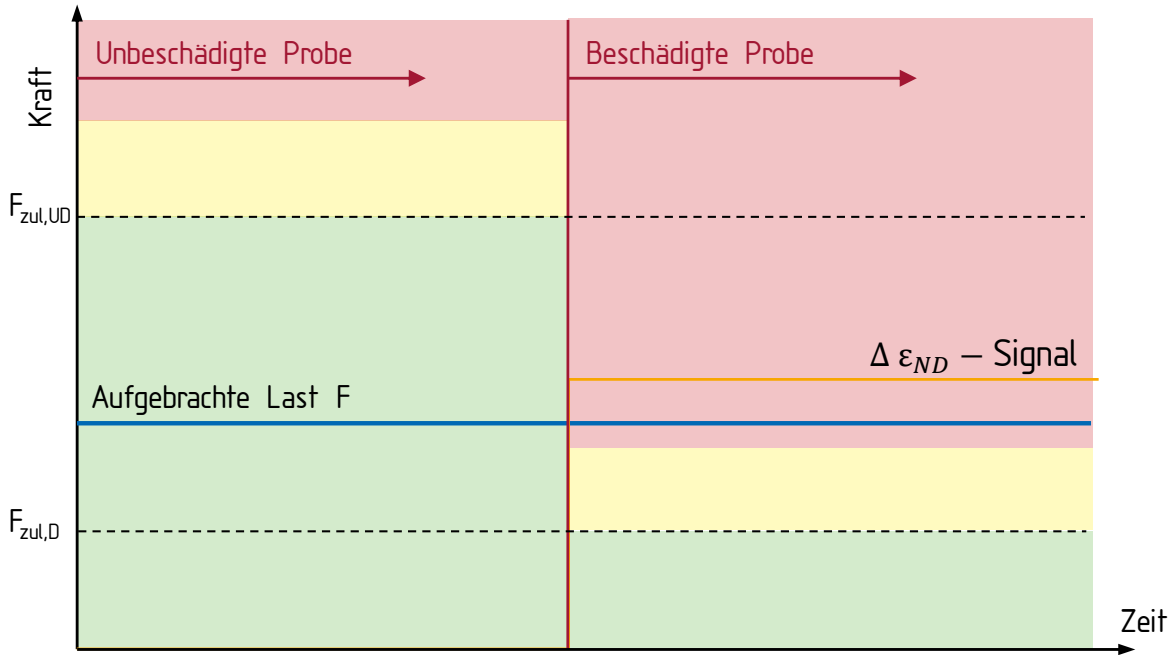


Abb. 4.12: Schemadarstellung des Lastanpassungsschritts.

Nach Gleichung 4.4 kann mit der ermittelten Risstiefe, die neue zulässige Kraft $F_{zul,D}$ für den beschädigten Zustand (D) errechnet werden. Abbildung 4.12 stellt das Ergebnis von Abbildung 4.11 noch einmal schematisch dar. Zu erkennen ist die Sprungfunktion in der Änderung der Dehnung in Nulldehnungsrichtung $\Delta \epsilon_{ND}$, sowie die konstant aufgebrachte Kraft F . Darüber hinaus sind die, nach Gleichung 4.4 ermittelten, zulässigen Kräfte der unbeschädigten $F_{zul,UD}$ und der beschädigten Probe $F_{zul,D}$ eingetragen. Im unbeschädigten Zustand gilt:

$$F_{zul,UD} < F \quad (4.13)$$

Im beschädigten Zustand gilt hingegen, dass die erfahrene Last der realen Instanz größer ist als die tatsächlich zulässige Kraft im beschädigten Zustand:

$$F_{zul,D} > F \quad (4.14)$$

Damit die virtuelle Instanz in der Lage ist, einen für die Struktur schädlichen Zustand zu verwalten, muss zu jedem Zeitpunkt gelten:

$$F_{zul,real} = F_{zul,virtuell} \quad (4.15)$$

Abbildung 4.13 fasst die Informationskette zwischen realer und virtueller Instanz zusammen. Am physischen Objekt werden Dehnungssignale als ϵ_{ND} und ϵ_{LM} aufgenommen. Das gewählte SHM-System der Stufe 1 verarbeitet diese Signale zu Kraft- und Dehnungsdaten um eine Aussage zur angreifenden Kraft F und zum aktuellen Zustand der Struktur, repräsentiert durch

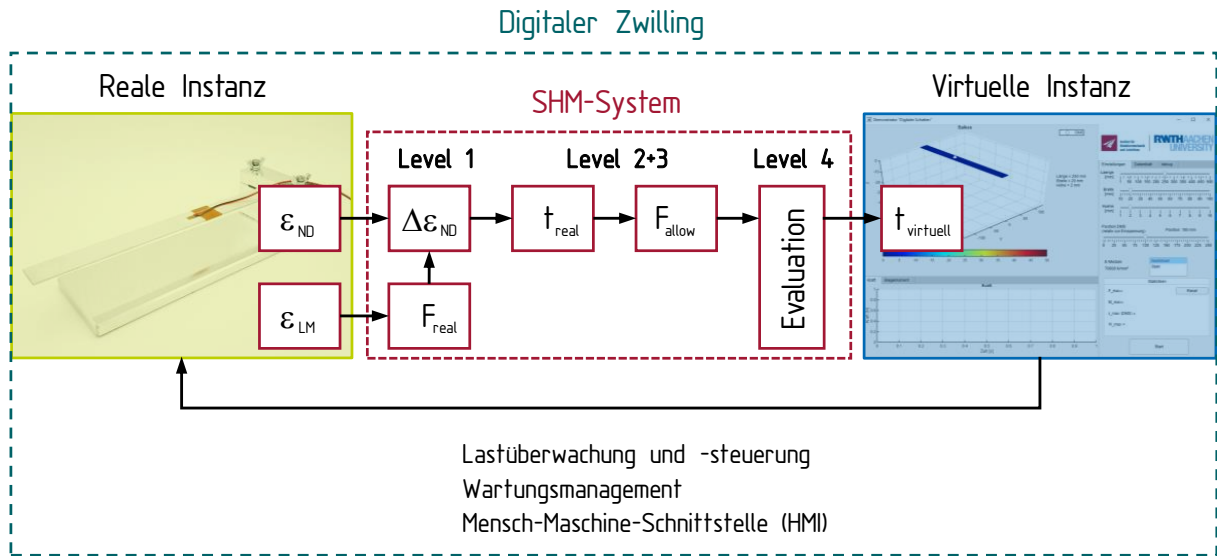


Abb. 4.13: Zusammenspiel von realer Instanz, SHM-System, virtueller Instanz und Digitalem Zwilling für das gegebene Fallbeispiel Kragarm.

$\Delta\epsilon_{ND}$, zu treffen. Wenn keine Schäden festgestellt werden können, verharrt das System in diesem Zustand. Schädigungen äußern sich in diesem Beispiel in Form eines Risses in der Einspannung, die als lokal Reduktion der Profildicke Δd modelliert wird.

$$\Delta d_{real,D} = d_{real,UD} - t_{R,real,D} \quad (4.16)$$

Wird ein solcher Riss $t_{real,D}$ basierend auf den Daten des Level 1 Systems vermutet, bewertet ein Level 2 und 3 SHM-System den in diesem Fall vorhandenen Riss $t_{real,D}$ und passt die zulässige Kraft gemäß Gleichung 4.4 an. Ein Level 4 System kann auf dieser Grundlage der neuen Randbedingungen Konsequenzen für die Struktur ableiten. Für den präsentierten Kragarm bedeutet dies eine Anpassung des Wertes $t_{R,virtuell}$.

$$t_{R,virtuell,D} = t_{R,virtuell,UD} + \Delta d_{real,D} \quad (4.17)$$

Die virtuelle Instanz bildet damit den beschädigten Zustand der realen Instanz ab und kann im weiteren Verlauf, an diesen Zustand angepasste Lastüberwachung und -steuerung vornehmen. Der in diesem Beispiel vereinfachte Anwendungsfall kann übertragen auf reale Anwendungsfälle zu einem (teilweise automatisierten) Wartungsmanagement beitragen. Weiter unterstützt ein solches System die Mensch-Maschinen-Schnittstelle von Strukturen, da eine bedienende Person anstelle von Sensordaten mit einer virtuellen Instanz interagieren kann und den Strukturzustand in aufbereiteter Form erfassen kann.

Das heißt die **minimal** notwendige Sensitivität des Messsystems muss so gewählt sein, dass sie Änderung der Struktur, die zum Unterschreiten eines zulässigen Zielwertes, in diesem Fall die Kraft führt, ausreichend früh, spätestens jedoch beim Eintreten erfassen kann und ausreichend

genau Messgrößen aufnehmen kann um die virtuelle Instanz so zu rekalisieren, dass sie den Zustand der realen Struktur, hinsichtlich des kritischen Zustandes abbilden kann.

4.3 Diskussion der Unterhypothese 2

Im Rahmen des Kapitels wurde die zentrale Rolle der Kopplung zwischen virtueller und realer Instanz für eine effiziente Nutzung des strukturüberwachenden Digitalen Zwillings im Betrieb analysiert. Dabei wurde insbesondere die Bedeutung einer bidirektionalen Kopplung hervorgehoben, die als essenziell betrachtet wird, um ein gemeinsames Wissensfundament zwischen realem und virtuellem System zu etablieren. Im Fokus des vorliegenden Kapitels steht die Unterhypothese 2, die postuliert, dass SHM das wesentliche Kopplungselement für den Aufbau und die kontinuierliche Nutzung des Digitalen Zwillings im Betrieb darstellt. Das Ziel besteht darin, die Funktion von SHM als Brücke zwischen realer und virtueller Instanz zu untersuchen sowie die praktischen Herausforderungen und Potentiale dieser Verbindung zu analysieren. Die Diskussion und Validierung der Hypothese erfolgt exemplarisch anhand eines Kragarmbeispiels.

Eine zentrale Voraussetzung für den Betrieb eines Digitalen Zwillings ist die umfassende Sensorik des betrachteten Bauteils oder Systems, um relevante Daten während des Betriebs zu erfassen. Dies ermöglicht eine Zustandsüberwachung (CM) hinsichtlich Umwelteinflüssen, Nutzungsdauer, Einbauzustand oder spezifischer SHM-Parameter wie Lasthistorien, Ermüdungszustände und Schädigungsdetektion.

Ohne eine Anbindung der realen Daten an die (kalibrierte) virtuelle Instanz fehlt die notwendige Kontextualisierung, sodass der Digitale Zwillings keine aussagekräftigen Informationen generieren kann. Diese Informationen bilden jedoch die Grundlage für die Handlungskompetenz des Systems. Eine Kopplung über ein SHM-System ist daher die unabdingbare Bedingung, um die Verbindung zwischen virtueller und realer Instanz sicherzustellen. Die Argumentation sowie die Validierung am Kragarmbeispiel bestätigen die Unterhypothese, dass SHM die essenzielle Rolle als Kopplungselement erfüllt.

Für SHM-Systeme, die Kopplungsfunktionen im Rahmen eines Digitalen Zwillings übernehmen, bedeutet dies, dass ein Level 4-System erforderlich ist, wobei dessen kontinuierlicher Betrieb nicht zwingend notwendig ist. Zur Effizienzsteigerung sollten unterschiedliche Überwachungsstufen definiert werden, z. B. durch einen Basismodus (Level 1), der stets aktiv ist. Die minimale Sensitivität des Messsystems muss so gewählt sein, dass strukturelle Veränderungen, die zu einem Unterschreiten zulässiger Zielwerte führen könnten, frühzeitig und hinreichend genau erfasst werden. Diese Messgrößen ermöglichen es, die virtuelle Instanz so zu rekalisieren, dass sie den Zustand der realen Struktur, insbesondere in kritischen Zuständen, präzise abbilden kann. Dabei stellen Messunsicherheiten die natürliche untere Schranke in der erreichbaren Kopplung zwischen realer und virtueller Instanz dar.

Die Betrachtung des Digitalen Zwillings erfolgte bislang auf der Ebene eines spezifischen Bauteils, Subsystems oder Systems. Dabei bildet das Bauteil seine eigene Referenz, und Abweichungen werden relativ zu dieser bewertet. Eine Möglichkeit zur Erweiterung dieses Ansatzes besteht in der Verwendung probabilistischer Modelle, die eine stochastische Vorhersage für das Bauteil ermöglichen. Eine weitergehende Perspektive im Kontext des Digitalen Zwillings bietet jedoch die Vernetzung unterschiedlicher Digitaler-Zwilling-Entitäten. Dies ermöglicht eine Interaktion und ein gegenseitiges Lernen zwischen Bauteil-bezogenen Digitalen Zwillingen im Betrieb. Eine Schlüsseltechnologie für diese Entwicklung stellt das Internet der Dinge (IoT) dar, dessen Potentiale im folgenden Kapitel untersucht werden.

5 Vernetzte Entitäten - Konnektivität via IoT

Im vorherigen Kapitel wurde die Kopplung von realer und virtueller Instanz mit SHM-Systemen untersucht. Die so entstandenen Digitalen Zwillinge Entitäten sind dabei zunächst für sich betrachtet worden, wobei jedes Bauteil als seine eigene Referenz diente und Abweichungen relativ zu dieser bewertet wurden. Eine weitreichendere Perspektive eröffnet jedoch die Vernetzung mehrerer Digitaler-Zwilling-Entitäten. Diese ermöglicht nicht nur eine Interaktion, sondern auch gegenseitiges Lernen zwischen den Digitalen Zwillingen. Das Internet der Dinge (IoT) stellt hierbei die Schlüsseltechnologie dar, die diese Vernetzung und die damit verbundenen Potentiale ermöglicht. Im Zentrum dieses Kapitels steht Unterhypothese 3: Die Vernetzung Digitaler Zwillinge Entitäten generiert zusätzliches Wissen für jedes individuelle Bauteil.

In diesem Kapitel liegt der Fokus auf der Entwicklung und Implementierung einer IoT- Infrastruktur, die reale, virtuelle Instanzen und Digitale Zwillinge miteinander verknüpft. Aufbauend auf einer Erweiterung dieser Infrastruktur hin zu einer hierarchischen Struktur wird das Konzept anhand eines konkreten Beispiels, dem Kragarm, demonstriert. Dabei werden die Möglichkeiten, die sich aus einer Bauteil-bezogenen Infrastruktur ergeben, analysiert und Erweiterungsperspektiven aufgezeigt. Abschließend wird die Unterhypothese 3 diskutiert und bewertet.

5.1 Vernetzungspotentiale via IoT

Bisher ist jede Digitale Zwilling Entität (DZE) als in sich geschlossene Einheit konzipiert, in der eine reale Instanz und eine virtuelle Instanz lokal gekoppelt agieren, siehe Abbildung 4.13). Dies bietet den Vorteil einer Offline-Fähigkeit, da die Einheit autark arbeiten kann. Jedoch bringt diese Struktur auch einen signifikanten Nachteil mit sich: Die Interoperabilität zwischen verschiedenen Entitäten ist eingeschränkt. Daraus ergibt sich das Problem, dass jede DZE nur auf sich selbst referenziert. Eine erweiterte Informationsgewinnung oder der Abgleich mit anderen Einheiten ist innerhalb dieser geschlossenen Struktur, bei gleich bleibender Anzahl an Messgrößen, nicht möglich.

Wesentliche Teile dieses Kapitels werden in leicht veränderter Form unter den Bedingungen der Creative Commons Lizenz CC-BY 4.0 wiedergegeben aus:

Chen, J.; Reitz, J.; Richstein, R.; Schröder, K.-U.; Roßmann, J.: IoT-Based SHM Using Digital Twins for Interoperable and Scalable Decentralized Smart Sensing Systems. *Information* **2024**, *15*, 121.

Eine Analogie zu diesem Problem existiert in der hierarchischen Modellierung von Strukturen, wo die Informationsmenge durch die Wahl eines bestimmten Modellierungsansatzes begrenzt ist. Analytische Methoden bieten beispielsweise schnelle und effiziente Abschätzungen für Standardfälle, sind jedoch nicht flexibel genug, um komplexe Geometrien oder nichtlineare Effekte zu erfassen. Um zusätzliche Informationen zu gewinnen, muss ein Wechsel oder eine Erweiterung des Modellierungsansatzes erfolgen. Numerische Methoden erweitern die Analysemöglichkeiten, sind jedoch rechenintensiv. Die Kombination beider Ansätze ermöglicht eine umfassendere Analyse, jedoch bleibt die Informationsmenge eines jeden Ansatzes für sich begrenzt.

Gleiches gilt für die Informationsgewinnung am realen Bauteil. Hier ist die Informationsmenge durch den gewählten SHM-Ansatz limitiert. Um mehr Informationen zu erhalten, gibt es zwei Möglichkeiten: Entweder wird der SHM-Ansatz am Bauteil durch zusätzliche oder alternative Messgrößen erweitert, was jedoch oft aus wirtschaftlichen und praktischem Sensorierungsaufwand nicht möglich ist. Alternative findet eine Vernetzung der verschiedenen Entitäten statt um zusätzliches Wissen zu generieren.

Die Vernetzung virtueller Instanzen ist technisch vergleichsweise einfach umsetzbar, insbesondere wenn die Daten entweder zentral gespeichert oder cloud-basiert abrufbar sind. Für viele technische Systeme gilt, dass nicht alle realen Instanzen an einem Ort eingesetzt werden. Sollen dennoch die Daten zentral gespeichert und verarbeitet werden bedeutet dies eine Kopplung von realen und virtuellen Instanzen durch eine dezentrale Infrastruktur notwendig. Existieren die virtuellen Instanzen lokal, über sogenannte Edge-Anwendungen, müssen die Edge-Anwendungen mit einander verbunden werden.

Um die notwendige Kopplung sicherzustellen, sind Technologien wie Wireless Sensor Networks (WSNs) oder das Internet der Dinge (IoT) erforderlich: WSNs bieten eine energieeffiziente Möglichkeit zur lokalen Datenerfassung und -übertragung, indem sie aus autonomen Sensorknoten bestehen, die Daten in spezifischen Bereichen sammeln und an zentrale Einheiten weiterleiten [101]. Diese geschlossenen Netzwerke sind besonders für Anwendungen geeignet, bei denen keine direkte Internetverbindung erforderlich ist. Das IoT geht einen Schritt weiter und ermöglicht eine globale Vernetzung von Geräten und Systemen, wodurch eine intelligente Interaktion zwischen verschiedenen Digitalen Zwillingen Entitäten realisiert werden kann. Mithilfe von Cloud-Diensten und einer Vielzahl von interoperablen Technologien ermöglicht das IoT die Übertragung, Verarbeitung und Analyse von Daten in einer dezentralen Umgebung.

Die Vernetzung der DZEs über eine IoT-Infrastruktur bietet damit entscheidende Vorteile: Es entsteht ein System, in dem DZE miteinander interagieren können. Diese Vernetzung ermöglicht eine umfassendere Informationsgewinnung und unterstützt die Umsetzung neuer Funktionen wie gegenseitiges Lernen und optimierte Entscheidungsfindung. Dies erweitert die Informationsbasis jedes Bauteils erheblich, da Daten aus unterschiedlichen Quellen verknüpft und Muster oder Anomalien im Gesamtsystem erkannt werden können.

Abbildung 5.1 beschreibt eine Architektur, in der die IoT-Infrastruktur das zentrale verbindende Element darstellt. Im Fokus stehen die DZE, die aus einer bidirektional gekoppelten Kombination von realen und virtuellen Instanzen bestehen. Die realen Bauteile sammeln Daten aus ihrer Umgebung, während ihre virtuellen Gegenstücke diese Daten nutzen, um Zustände zu analysieren, Simulationen durchzuführen und Steuerungsbefehle zurück an die physischen Bauteile zu senden. Diese enge Verbindung zwischen den physischen und virtuellen Instanzen ermöglicht eine kontinuierliche Synchronisation und Interaktion zwischen den beiden Welten.

Die IoT-Infrastruktur dient als zentrales Element, das diese DZEs miteinander vernetzt und den Datenaustausch insbesondere zwischen den virtuellen Instanzen ermöglicht. Sie stellt sicher, dass alle Informationen aus den physischen Bauteilen an die entsprechenden virtuellen Modelle weitergeleitet werden und umgekehrt. Gleichzeitig verknüpft die IoT-Infrastruktur die DZEs mit weiteren Systemkomponenten wie Apps und Simulationsdiensten. Die Nutzenden interagieren über die Apps mit dem System und greifen dabei indirekt auf die IoT-Infrastruktur zurück, die die Datenströme aus den physischen Bauteilen, den virtuellen Instanzen und den Simulationsdiensten miteinander verknüpft. Das Bild verdeutlicht, dass die IoT-Infrastruktur nicht nur die Verbindung zwischen den realen und virtuellen Instanzen sicherstellt, sondern auch als Plattform für den Austausch zwischen allen Beteiligten – physische Bauteile, virtuelle Zwillinge, Simulationsdienste und Nutzende – fungiert. So entsteht ein dynamisches, flexibles System, das ohne starre Hierarchie funktioniert, sondern auf der bidirektionalen Interaktion und Vernetzung aller Elemente basiert.

Die in Abbildung 5.1 dargestellte Infrastruktur wurde zunächst auf Bauteilebene formuliert, da sie aus der strukturmechanischen Perspektive den notwendigen Detailgrad abbildet. Für viele technische Anwendungen kann es jedoch sinnvoll sein auf Systemischer oder sogar auf mehrere Systeme, hier als Flotte bezeichnet zuzugreifen. In diesem Fall wären die realen Instanzen Systeme, denen kalibrierte virtuelle Instanzen auf Systemebene gegenüberstehen. Die DZE würde sich ebenfalls auf Systemebene koppeln. Der Rest der Infrastruktur bleibt unverändert und bedient die gleichen Schnittstellen, beispielsweise zu den Digitalen Modellen, Apps und Simulations Services.

Abbildung 5.2 fasst das so hierarchisch organisiert IoT-basierte SHM-System zusammen. Die Schichten sind nach zunehmender Abstraktion gegliedert und am Beispiel der Windenergieanlage illustriert. Jede Ebene bietet einzigartige Funktionalitäten und Erkenntnisse. Wie das Beispiel der Windenergie zeigt, beginnt dieses System auf der Bauteilebene, hier z.B. Rotorblätter, Türme und Gondeln. Diese Elemente bilden Systeme (Windturbinen), die dann in Flotten (Windparks) zusammengefasst werden. Die Abstraktion auf geeignete hierarchische Ebene ist Anwendungsbezogen und kann je nach Bedarf unterschiedlich unterteilt werden.

Für jede reale Instanz, ob Bauteil, System oder Flotte, bedeutet die Vernetzung eine Refinanzierungsmöglichkeit auf andere reale und virtuelle Instanzen und somit eine zusätzliche Vernetzungsmöglichkeit der Information, was zusätzliches Wissen generiert, siehe Abbildung 4.1.

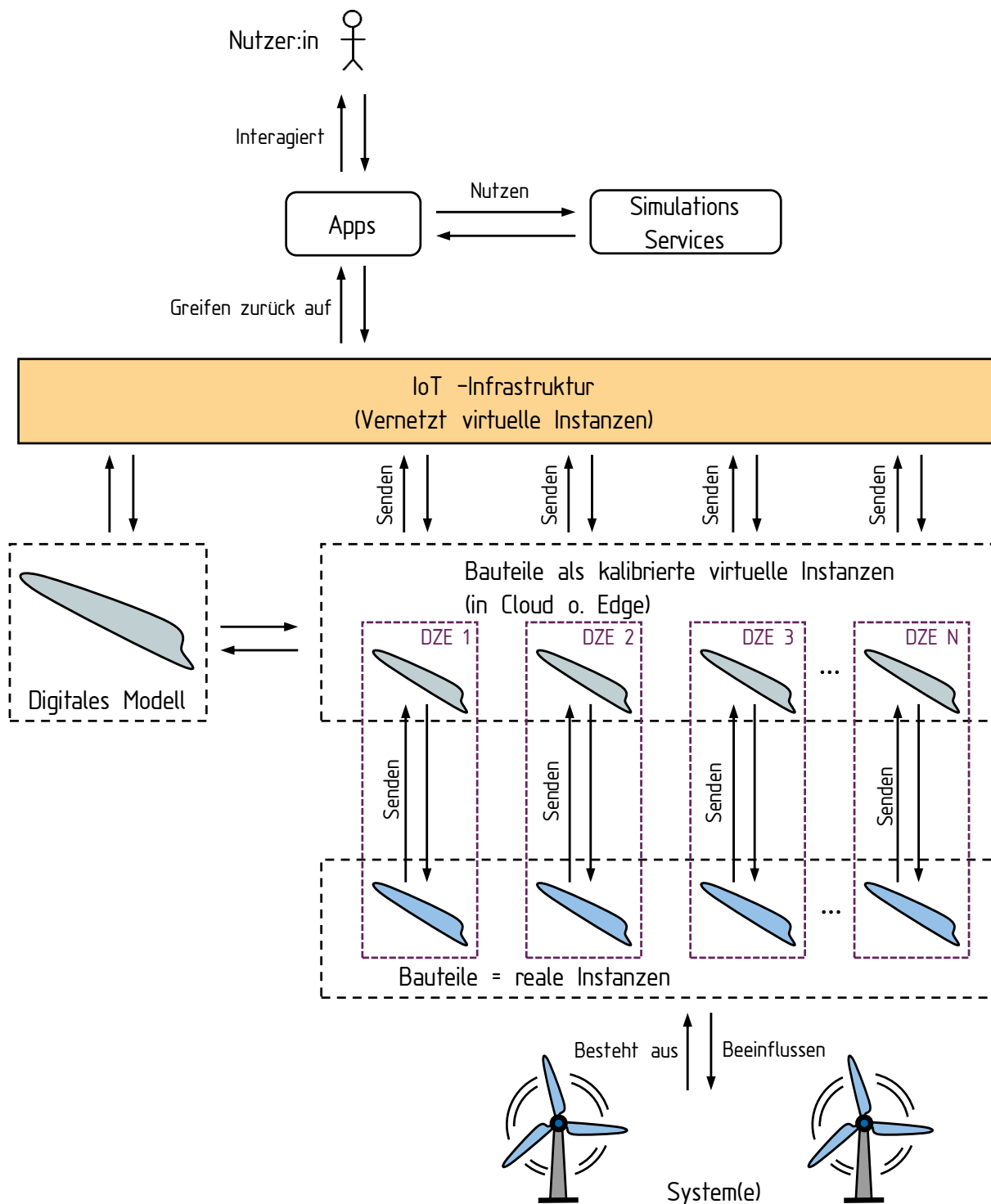


Abb. 5.1: Einbindung realer und virtueller Instanzen in das IoT.

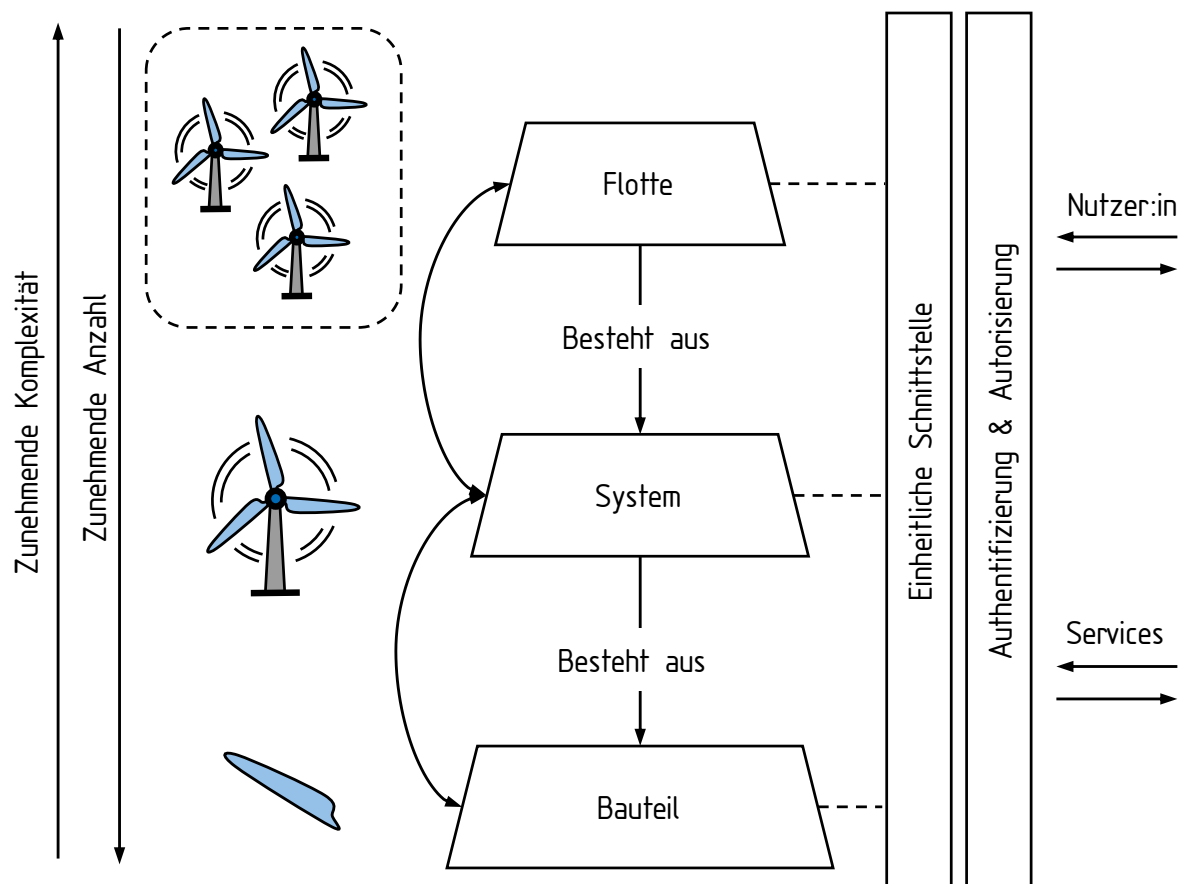


Abb. 5.2: Vision von physischen Objekten: Skalen in IoT-Netzwerken für SHM-Systeme.

5.2 Der Digitale Kragarm in the IoT-basierten Umgebung

Dieser Abschnitt stellt eine prototypische Anwendung für einen strukturellen Kragarm vor, der mit der IoT S3I-Infrastruktur [43] verbunden ist. Wir beschreiben den technischen Implementierungsprozess und ordnen den Kragarm in unserer entwickelten hierarchischen Infrastruktur auf der Komponentenebene ein. Zusätzlich stellen wir eine Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI) zur Verfügung, um eine intuitive Interaktion mit der überwachten Komponente zu ermöglichen. Wir beginnen mit einem einfachen Minimalbeispiel: Einem unbeschädigten einseitig eingespannten Kragarm, mit einem Messstützpunkt als DMS.

5.2.1 Kommunikationssetup

Die gesamte Kommunikationsarchitektur des Beispielszenarios ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Mithilfe des S3I sind der Kragarm, sein zugehöriger Digitaler Zwilling, ein Simulationsdienst und die Visualisierungs-App miteinander verbunden. Im Folgenden werden die Hardware- und Softwarekomponenten der Architektur vorgestellt.

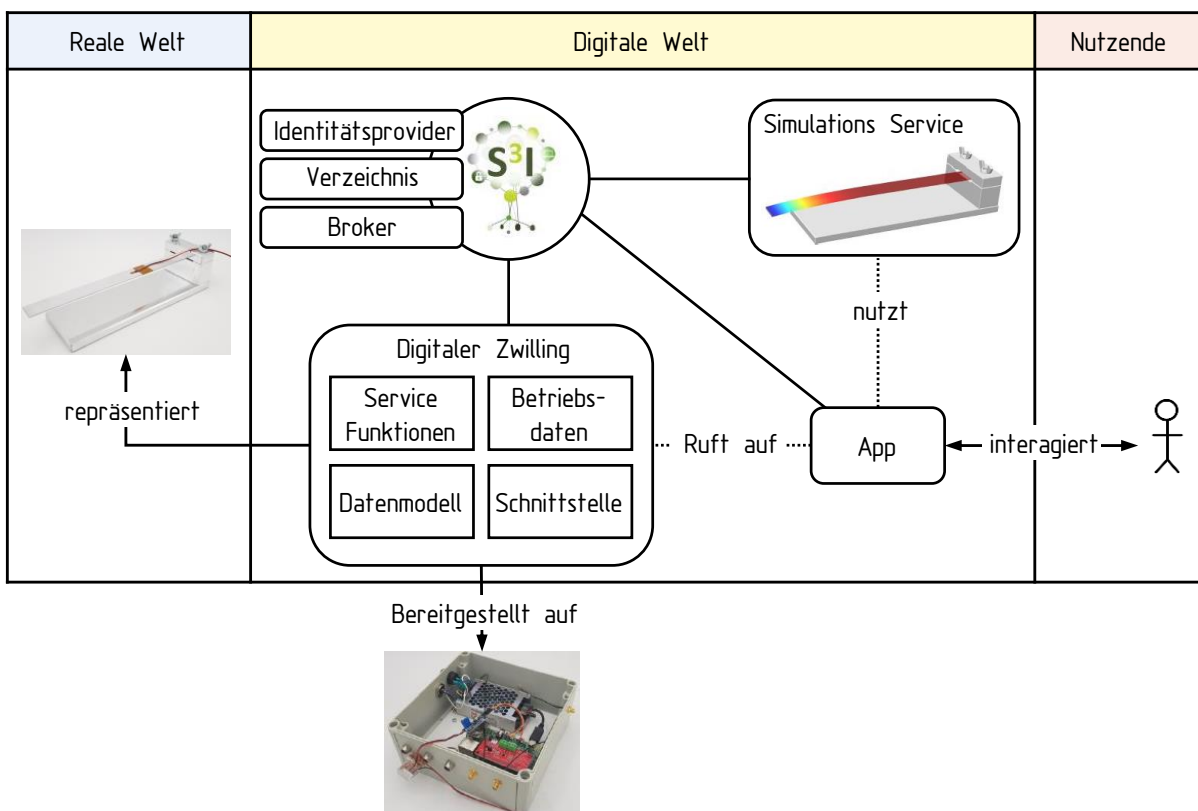


Abb. 5.3: Die Kommunikationsarchitektur zur Überwachung des Kragarms.

5.2.1.1 Reale Instanz

Das zu überwachende Bauteil ist eine Kragarm, dargestellt in Abbildung 5.4, ähnlich dem Validierungsbeispiel aus Abschnitt 4.2. Die Abmessungen für diesen Demonstrationsfall sind Tabelle 5.1 zu entnehmen. Zur Messung des Dehnungswertes wird ein Dehnungsmessstreifen auf dem Balken installiert. Sein Widerstand variiert mit der Verformung des Trägers. Wir gehen davon aus, dass der Auslegerbalken ein einfaches und homogenes strukturell-mechanisches Bauteil mit geringer Komplexität ist. Daher betrachten wir nur die Verformung entlang der x-Achse, siehe Abbildung 5.5. Erweiterte Sensorkonfigurationen und Anwendungen werden in Abschnitt 5.2.3 diskutiert.

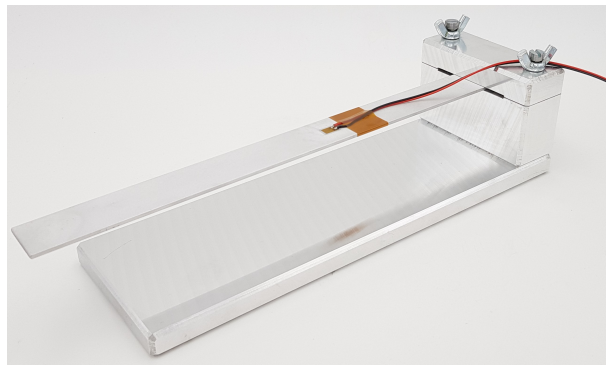


Abb. 5.4: Kragarm mit einem DMS.

5.2.1.2 Virtuelle Instanz und Berechnungsmodell

Die virtuelle Instanz des realen Kragarms umfasst ein analytisches Berechnungsmodell, Betriebsdatenerfassung, und Schnittstellen zur Daten und Simulationsabfragen. Zudem werden Struktureigenschaften wie Material und Geometrie, sowie die durch den DMS erfassten Dehnungswerte verwaltet. Basierend auf physikalischen Gleichungen kann der Digitale Zwilling aus den vorhandenen Dehnungswerten Kräfte und Verformungen berechnen. Diese Funktionen sind als Software-Services integriert und können über standardisierte Schnittstellen im IoT

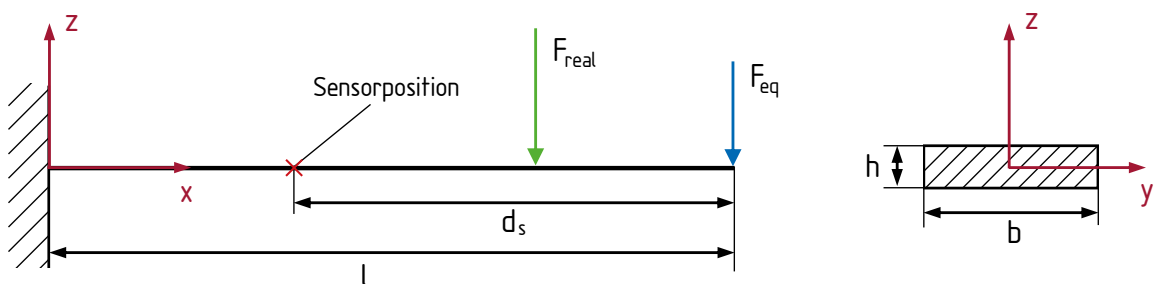


Abb. 5.5: Schemaskizze der realen Kragarm Instanz.

Tabelle 5.1: Verwendete Variablen und Werte des experimentellen Aufbaus.

Name	Symbol	Wert	Einheit
Breite	b	25	mm
Höhe	h	2	mm
Länge	l	220	mm
Sensorposition	d_s	100	mm
Zulässige Spannung (AlMg ₃)	σ_{zul}	140	N/mm ²

abgerufen werden. Zusätzlich bietet die virtuelle Instanz ein Ereignissystem: Wenn neue Dehnungswerte gemessen werden, generiert das Ereignissystem automatisch Nachrichten, die alle verbundenen Systeme über den aktuellen Zustand informieren.

Berechnungsmodell

Die Berechnung des Kragarms erfolgt nach den Bernoulli Gleichungen [100]. Nimmt man die Geometrie und Materialeigenschaften als eindeutig bekannt an, kann die Steifigkeit als Konstante hinterlegt werden. Kraft und Kraftangriffspunkt sind zwei Unbekannte und können bei der Verwendung von nur einem Sensor nicht unabhängig von einander ermittelt werden. Zur Auswertung wird jede angreifende Kraft F_{real} in eine äquivalent wirkende Kraft F_{eq} , angreifend am Balkenende, umgerechnet, siehe Abbildung 5.5.

Basierend auf den Annahmen für uniaxiale Biegung wird eine Beziehung zwischen den Dehnung $\epsilon(x)$ und der äquivalent wirkende Kraft F_{eq} hergeleitet:

$$\sigma(x) = \frac{M_y(x)h}{I_y} = \frac{F_{real}(l - \Delta x_F - x)h}{I_y} = \frac{F_{eq}(l - x)h}{I_y} = E \epsilon(x) \quad (5.1)$$

Der Dehnungswert ϵ_{ds} , entspricht der Dehnung an der Position $x = l - d_s$. Daher gilt für mit:

$$\epsilon_{ds} = \epsilon(x = l - d_s) \quad (5.2)$$

die folgende Gleichung 5.3:

$$E \epsilon(x) = E \epsilon_{ds} = \frac{F_{eq}h}{I_y} \quad (5.3)$$

Durch die an der Sensorposition d_s erfassten Dehnungswerte $\epsilon_{ds}(t)$ in Längsrichtung wird für jeden Zeitschritt t die äquivalente Kraft am Balkenende F_{eq} bestimmt, siehe Gleichung 5.4.

$$F_{eq}(t) = \frac{2EI_y}{hd_s} \epsilon_{ds}(t) \quad (5.4)$$

Dabei ist E das E-Modul des Materials und $I_y = \frac{bh^3}{12}$ das aus der Breite b und der Höhe h bestimmte Flächenträgheitsmoment. Mit der angegebenen äquivalenten Kraft F_{eq} können weitere Informationen für den Kragarm berechnet werden, z. B. (näherungsweise) die global Durchbiegung $w(x, t)$, siehe Gleichung 5.5 und die maximale Spannung in der Einspannung σ_{max} , siehe Gleichung 5.6. Alle Werte unterliegen einem, durch die Annahme des Lastangriffspunktes entstandenen Fehler.

$$w(x, t) = \frac{F_{eq}(t)}{6EI_y} (3lx^2 - x^3) \quad (5.5)$$

$$\sigma_{max}(t) = \sigma(x = 0, t) = \frac{F_{eq}(t)lh}{2I_y} \quad (5.6)$$

Genauigkeit

Die Einführung eines Fehlers im Rahmen einer so einfachen Struktur mag zunächst widersprüchlich erscheinen. Dennoch ist die Limitation von Messstützpunkten auch in komplexeren realen Anwendungsfällen durchaus geben. So können auf Grund von Zugänglichkeit oder Kosten ggf. nur wenige Messstützpunkte geschaffen werden. Dadurch sind gegebenenfalls nicht alle Einflussgrößen getrennt voneinander zu erfassen. Die Modellierung des Systems in einer Form, die für die Laufende Bewertung notwendige Größen in einer ausreichenden Genauigkeit bestimmt ist die Ingenieurstechnische Aufgabe.

In diesem Beispiel ist die Charakterisierung der Einspannung, als höchst belastete Stelle relevant. Darüber hinaus liefert der DMS unabhängig von seinen Absoluten Messwerten die Anzahl potentiellen Richtungswechseln der Belastung in Form eines Vorzeichenwechsels. Diese Informationen reichen aus um mit Hilfe der Palmgren-Miner-Regel ein einfaches Ermüdungsmodell zu implementieren [73]. Weitere Messpunkte liefern für diese Zielsetzung zunächst keinen Mehrwert. Die Definition der Anforderungen und an die Zielsetzung für den Digitalen Zwilling im Betrieb ist damit maßgeblich für den Sensorierungs- und Modellierungsaufwand und damit auch für die Kosten verantwortlich.

5.2.1.3 IoT Infrastruktur (S3I)

Das S3I (Smart Systems Service Infrastructure) ist eine offene IoT-Infrastruktur, die durch zentrale Dienste wie den S3I IdentityProvider (Authentifizierung/Autorisierung), das S3I Directory (Metadatenverwaltung) und den S3I Broker (Ende-zu-Ende-Kommunikation) sichere und dezentrale Vernetzung ermöglicht [43]. Ursprünglich für die Forstwirtschaft entwickelt, unterstützt es die Interoperabilität zwischen vernetzten Geräten und Software durch standardisierte Protokolle und strengen Datenschutz. Geräte wie Sensoren und Anwendungen erhalten eindeutige Client-IDs und Secrets als Zugangsdaten. Nutzer müssen sich mit einem S3I-Konto registrieren und Single-Sign-On nutzen, um über ein Zugriffstoken sichere Interaktionen zu

gewährleisten. Zusätzlich zu seiner dezentralen Struktur bietet das S3I Unterstützung für Metadatenmodelle auf zwei Ebenen: Metadaten werden im S3I Directory gespeichert und Laufzeitdaten in Edge Devices wie der DT Box verarbeitet. Diese zweifache Abbildung erleichtert die Interpretation von Geräten auf einer technischen und menschenlesbaren Ebene. Ein integriertes Ereignissystem erlaubt nahezu Echtzeit-Monitoring, bei dem Geräte wie der Digitale Zwilling eines Balkens Ereignismeldungen mit kritischen Zustandsinformationen generieren und senden können.

Edge Device

Ein Edge Device ist ein Gerät, das Daten direkt an der Quelle, also nahe bei einem Sensor oder einer Maschine, verarbeitet und speichert, ohne eine ständige Verbindung zum Internet zu benötigen. Im beschriebenen Beispiel beherbergt das Edge Device die virtuelle Instanz, realisiert durch einen kompakten Aufbau namens DZ-Box, die u.a. einen Raspberry Pi 4 als Rechen-einheit und diverse Hardware-Komponenten für die Spannungsversorgung, Messwertaufnahme und Kommunikation enthält. Diese Architektur ermöglicht zuverlässige Datenverarbeitung und Überwachung auch bei Internetausfällen, da die Funktionen lokal ausgeführt werden.

Simulation Service

Ein Simulation Service ist ein Werkzeug, das in level 4 SHM eingesetzt wird, um das Verhalten von Strukturen vorherzusagen und potentielle Probleme kosteneffizient zu identifizieren, bevor sie kritisch werden. In der prototypischen Anwendung werden zwei Simulation Services vorgestellt:

Lastabschätzung: Dieser Service simuliert die Verformung eines Kragträgers, wenn eine nach unten gerichtete Kraft an dessen Ende wirkt. Nach der Vorgabe einer bestimmten x-Koordinate schätzt der Service die an diesem Punkt wirkende Belastung.

Wartungsabschätzung: Hierbei wird, basierend auf der an einer bestimmten x-Koordinate angelegten Belastung, die verbleibende Nutzungsdauer des Kragträgers unter diesen Bedingungen geschätzt.

Beide Simulation Services agieren ähnlich wie Digitale Zwillinge als passive Kommunikationspartner in einem IoT-basierten SHM-System. Sie stellen standardisierte Schnittstellen bereit, über die andere Systemkomponenten interoperabel auf ihre Dienste zugreifen können, um z. B. Vorhersagen und Analysen durchzuführen.

5.2.2 Auswertungs- und Simulationsmöglichkeiten

Im Rahmen dieses Setups stehen verschieden Auswertungs- und Simulationsmöglichkeiten zur Verfügung, die exemplarisch für potentielle CM und SHM Anwendungen stehen.

Lastauswertung

Im Rahmen einer last-basierten Auswertung könnten verschiedene Anfragen an den Digitalen Zwilling gestellt werden, siehe Abbildung 5.6. Möglich wären z.B.:

- Plotten einer Lasthistorie von einer oder mehreren realen Instanzen in einem festgelegten Zeitraum
- Vergleich (mehrerer) Lasthistorien und einordnen in einen Referenzbereich (basierend auf Erfahrungswerten oder Datenbasis)
- Auslesen von Extremlastereignissen
- Auslesen von belastungsfreien Zeiträumen
- ...

Wartungsabschätzungen

Vor dem Hintergrund von Ermüdung und der Planung von Wartungsintervallen, wären folgende Anfragen an den Digitalen Zwilling denkbar, siehe Abbildung 5.6.

- Zählen von Extremlastereignissen bzw. Lastereignissen außerhalb des Referenzbereichs
- Zählen von Lastwechseln als Vorzeichenwechsel der berechneten äquivalenten Kraft F_{eq} , als relevanter Indikator für Ermüdung (z.B. überschreiten einer Anzahl an zulässigen Lastwechseln)
- Verlängerung des Wartungsintervalls um unbelastete Zeiträume
- Vorverlegen der Wartung nach dem Überschreiten einer kritischen „Standzeit“ $t_{Stand} > t_{Stand,krit}$
- ...

Simulationsanfragen

Nutzende haben über die App Zugriff auf die Simulations Services. Diese bieten die Möglichkeit die Berechnungsmodelle um simulierte Anfragen zu bitten. Im Rahmen des Szenarios wären beispielsweise folgende Anfragen denkbar:

- Wie hätte sich die Struktur, unter dem Lastprofil von $5\text{ s} < t < 20\text{ s}$, hinsichtlich ihrer Durchbiegung verhalten, wäre ein anderes Material (z.B. Stahl mit $E_{\text{Stahl}} = 210\text{ GPa}$) gewählt worden?
- Wie viele Lastwechsel wird die Struktur, bei gleich bleibender Belastungsintensität, nach $t = 1\text{ h}$ erfahren haben?
- Wie würde sich die maximale Spannung in der Einspannung, bei gleich bleibender Belastungsintensität, verändern wenn die Höhe des Profils um $x\%$ reduziert wird?

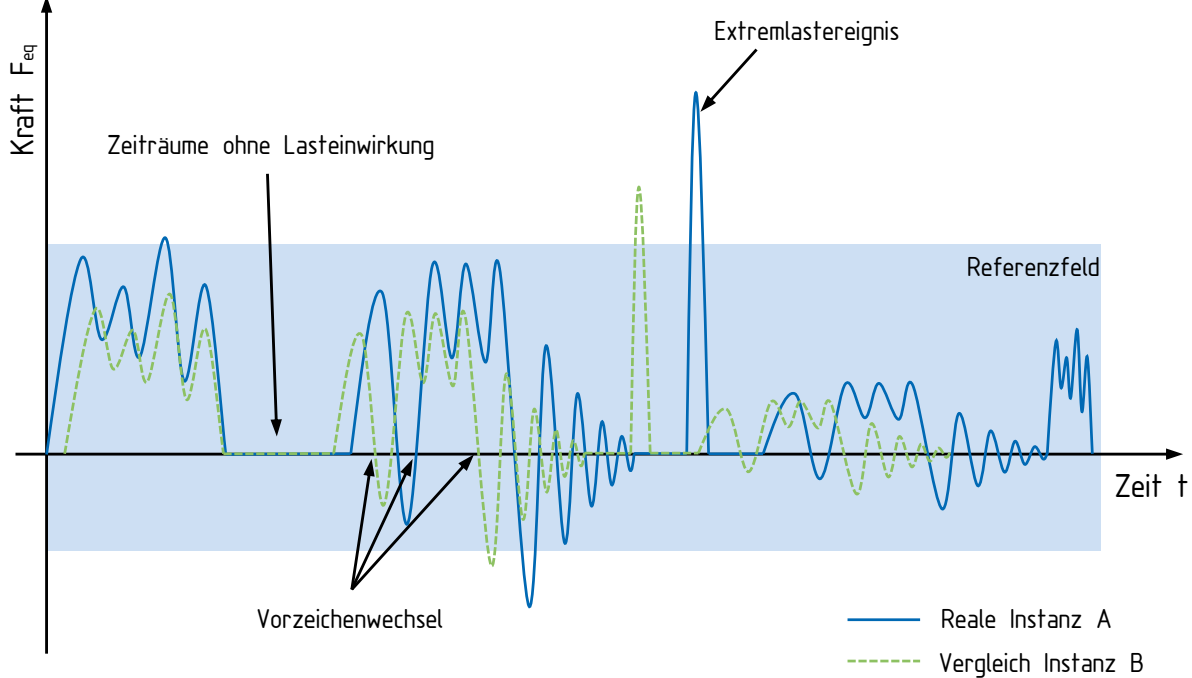


Abb. 5.6: Exemplarische lastbasierte Auswertungsmöglichkeiten für das Kragarmbeispiel.

Viele dieser Anfragen sind für strukturellmechanisch ausgebildete Personen auch ohne Simulationsanfrage einfach zu beantworten. Dennoch liegt der Vorteil in der einfachen Interaktion mit virtuellen Instanz und die Verknüpfung mit den real vorliegenden Messwerten. Insbesondere Anwender:innen kann es so leichter fallen, das Verhalten der realen Instanz besser zu verstehen.

5.2.3 Erweiterungsmöglichkeiten des IoT-basierten SHM-Systems

Aufbauend auf dem vorgestellten Beispiel sind verschiedene Varianten denkbar, um die Funktionalität und Einsatzmöglichkeiten des IoT-basierten SHM-Systems zu erweitern. Diese umfassen Anpassungen in der Sensoranordnung, der Art und Anzahl der Komponenten sowie den Ausführungsplattformen.

Sensorvariationen

Eine naheliegende Verbesserung ist das Hinzufügen weiterer DMS am Träger. Zum Beispiel könnte ein zusätzlicher DMS entlang der x-Achse des Trägers gleichzeitig die Erfassung von Kräften und deren Angriffspunkten ermöglichen. Dies würde den Anwendungsbereich von der reinen Lastüberwachung hin zur Schadensüberwachung erweitern. Sensible Indikatoren für strukturelle Schäden, wie Null-Dehnungs-Trajektorien könnten die Überwachungsfunktionen

erheblich verbessern, insbesondere für die Erkennung von Rissen oder anderen Schäden. Hierbei könnte eine Sensoranordnung wie in Abschnitt 4.2 beschrieben herangezogen werden.

Komponentenvariationen

Neben dem Beispiel des Kragarms ist es möglich, das IoT-basierte SHM-System auf andere strukturelle Komponenten auszuweiten. Dadurch können größere (balkenartige) Strukturen wie Baukräne oder Rotorblätter von Windenergieanlagen überwacht werden. Für die effektive Überwachung solcher großer Strukturen mittels eines dehnungsbasierten Ansatzes sind mehrere verteilte Messpunkte notwendig, da Schäden das Dehnungsfeld nur lokal beeinflussen. Ein Netzwerk von Sensoren wird benötigt, um diese lokalen Veränderungen zu erfassen.

Große Strukturen integrieren daher verteilte Sensoren, um komplexe, hierarchische Modelle zu erstellen, die Systeme auf der Anlagenebene bilden. Diese Systeme agieren als eigenständige Einheiten im IoT und ermöglichen die zentrale Verarbeitung der verteilten Dehnungsdaten. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 5.7 dargestellt: Ein emulierter Kran, der aus einer Anordnung von Kragarmen besteht. Verschiedene virtuelle Sensoren erfassen die Dehnungswerte während des Kranbetriebs. Der Digitale Zwilling des Krans verarbeitet diese zentral und berechnet Betriebsdaten wie Verformungen und Kräfte an den Enden des Krans. Über die IoT-Infrastruktur kann der Digitale Zwilling nahezu in Echtzeit überwacht werden, wie die App in Abbildung 5.7 zeigt. Ähnliche Konzepte können auch auf komplexere Systeme angewendet werden, deren Basiselemente Kragarme sind. Zusammenfassend bietet der Ansatz nicht nur eine verbesserte Verfügbarkeit von Informationen zum Zustand der Strukturen, sondern eröffnet auch Möglichkeiten für ein effizientes Management verschiedener Komponenten innerhalb eines größeren strukturellen Systems.

Ausführungsplattformen

Die Implementierung Digitaler Zwillinge (DZ) kann auf verschiedene technische Weisen erfolgen. Diese Flexibilität ermöglicht es, Digitale Zwillinge entweder (1) direkt auf einem edge-nahen Gerät (Edge DZ), (2) in einem Cloud-Dienst (Cloud DZ) oder (3) in einer hybriden Lösung (Fog DZ) auszuführen. Dabei bleibt die Wahl der Plattform bewusst offen. Reale Instanzen mit begrenzten Rechen- und Kommunikationsressourcen nutzen Digitale Zwillinge, die auf Edge-Geräten laufen. Virtuelle Instanzen, wie Datensätze oder Algorithmen, verwenden hingegen Cloud-DZs. Neben der in Abschnitt 5.2 vorgestellten Anwendung kann der Digitale Zwilling des Kragarms auch in einen Cloud-Dienst ausgelagert werden. Hierfür müsste lediglich eine Schnittstelle integriert werden, die die Synchronisierung zwischen dem realen Kragarm und seinem Cloud-DZ sicherstellt. Diese Lösung bietet sich besonders für Anwendungen an, die eine hohe Rechenleistung erfordern. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, den Digitalen Zwilling in zwei Teile aufzuteilen. Der erste Teil läuft auf einem Edge-Gerät und übernimmt das Sammeln und Vorverarbeiten der Dehnungswerte. Der zweite Teil, der das Datenmodell sowie Berechnungsdienste für Kräfte und Verschiebungen umfasst, wird in einem Cloud-Dienst ausgeführt. Diese Dual-Aufteilung ermöglicht einen verteilten Ansatz, der die Vorteile von Edge-

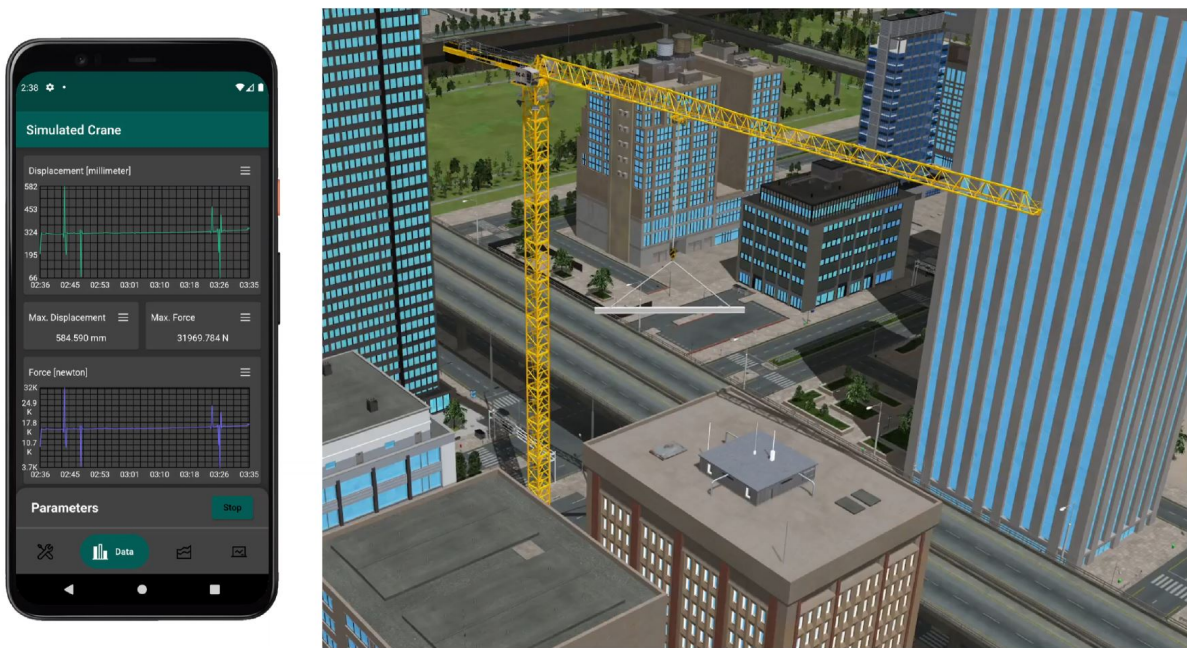


Abb. 5.7: Ein emulierter Kran (rechts), erstellt in einer 3D-Simulationssoftware (links), der die Betriebsdaten des simulierten Krans visualisiert [43].

und Cloud-Computing kombiniert. Fog-DZs stellen somit eine Lösung für Anwendungen dar, die eine Balance zwischen Echtzeitverarbeitung und Rechenkomplexität benötigen.

5.3 Diskussion der Unterhypothese 3

Das Kapitel thematisiert die Herausforderungen und Potentiale der Vernetzung von Digitalen Zwillingen-Entitäten (DZE), die im Ausgangsszenario als lokale, ungekoppelte Einheiten vorliegen. In diesem isolierten Zustand basiert die Bewertung von Struktureigenschaften ausschließlich auf den Daten des SHM-Systems, dessen Informationsgehalt durch die gewählten Sensorik- und Messgrößen begrenzt ist. Um diesen zu erweitern, wurden zwei Lösungsansätze diskutiert: Die Ergänzung des SHM-Systems durch zusätzliche oder alternative Sensoren, was jedoch oft aufgrund hoher Kosten und praktischer Umsetzungsbarrieren nicht realisierbar ist, sowie die Vernetzung verschiedener Entitäten, die im Rahmen des Kapitels näher untersucht wurde.

Die Vernetzung erfordert eine IoT-basierte Konnektivität, welche die Grundlage für die Verbindung von realen, virtuellen Instanzen und Digitalen Zwillingen bildet. Die diskutierte Hypothese, dass diese Vernetzung zusätzliches Wissen für jedes individuelle Bauteil generieren kann, wurde durch die Entwicklung und Validierung einer entsprechenden IoT-Infrastruktur überprüft. Anhand des Kragarms als Beispiel wurde das Konzept einer hierarchischen Infrastruktur demonstriert. Dabei wurden die Auswertungs- und Interaktionsmöglichkeiten, die sich

aus einer bauteilbezogenen Vernetzung ergeben, analysiert und Perspektiven für Erweiterungen aufgezeigt.

Die Ergebnisse bestätigen die Unterhypothese 3, dass durch die Vernetzung Digitaler Zwilling-Entitäten neues Wissen generiert wird, indem Informationen zwischen verschiedenen Instanzen geteilt und integriert werden. Für jede reale Instanz – ob Bauteil, System oder Flotte – bietet diese Vernetzung nicht nur eine Möglichkeit zur Wissensgenerierung, sondern auch zur Refinanzierung durch die Verbindung mit anderen realen und virtuellen Entitäten. Diese Erkenntnisse verdeutlichen die Relevanz einer umfassenden IoT-Infrastruktur als zentrales Element für die Weiterentwicklung und Optimierung Digitaler Zwillinge.

6 Schlussfolgerung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde das Konzept des Digitalen Zwillings und dessen Relevanz für die Strukturmechanik umfassend untersucht. Im Rahmen der Arbeit wurde gezeigt, dass die Einbindung von SHM und die Kopplung von realen und digitalen Strukturen enorme Potentiale für die Wartung und Effizienzsteigerung moderner Struktursysteme bietet. Die Betrachtung von Strukturen im Kontext der Digitalisierung zeigt, dass eine kontinuierliche Überwachung und eine effektive Integration Digitaler Zwillinge eine entscheidende Rolle in der Zukunft des Leichtbaus einnehmen.

Ergebnisse

Kapitel 3 untersucht, basierend auf der Unterhypothese 1, die unterschiedlichen Anforderungen an den Digitalen Zwilling in der Entwurfs- und Betriebsphase und leitet die **zwei Archetypen des Digitalen Zwillings für Strukturen** ab: Ein strukturgestaltender Digitaler Zwilling für die Entwicklungsphase und ein strukturüberwachender Digitaler Zwilling für die Betriebsphase. In der Entwicklungsphase stehen die Optimierung von Struktureigenschaften, Simulationen und Variantenuntersuchungen im Vordergrund, wobei der strukturgestaltende Digitale Zwilling ausschließlich in der virtuellen Instanz agiert und keinen direkten Bezug zu einer realen Instanz aufweist. Im Gegensatz dazu liegt der Schwerpunkt in der Betriebsphase auf der Überwachung und Analyse der strukturellen Integrität, wobei der strukturüberwachende Digitale Zwilling als Entität bestehend aus einer realen Instanz und einer angekoppelten, auf die reale Instanz kalibrierten, virtuellen Instanz besteht.

Zur Veranschaulichung wird die Analogie des Januskopfs aus der römischen Mythologie für die Dualität und Übergänge des Digitalen Zwillings interpretiert, siehe Abbildung 6.1. Sie steht für die Verbindung zwischen realer und virtueller Instanzen und das Teilen eines gemeinsamen Wissens. In der Entwicklungsphase fungiert der Digitale Zwilling als Hüter von Wissen, das durch Simulationen und Optimierungen entsteht, während er in der Betriebsphase dieses Wissen mit der realen Instanz teilt. Umgekehrt liefert die reale Instanz Daten und Erfahrungen zurück, sodass beide auf einem einheitlichen Wissensstand agieren. Dieses Konzept des „geteilten Wissens“ rückt die Kopplung zwischen virtueller und realer Instanz in den Mittelpunkt.

Kapitel 4 widmet sich der Untersuchung der Kopplung zwischen virtueller und realer Instanz als SHM-basierte Verbindung, basierend auf der zentralen Forschungshypothese und Unterhypothese 2. Hierzu werden das Wissensmanagementmodell nach North [99] und die SHM-Level nach Rytter [14] integriert und an die Anforderungen des Digitalen Zwillings angepasst. Die Validierung erfolgt exemplarisch am Kragarmmodell. Die Ergebnisse zeigen, dass die Datenmenge des Digitalen Zwillings aus der initial kalibrierten virtuellen Instanz sowie den, durch

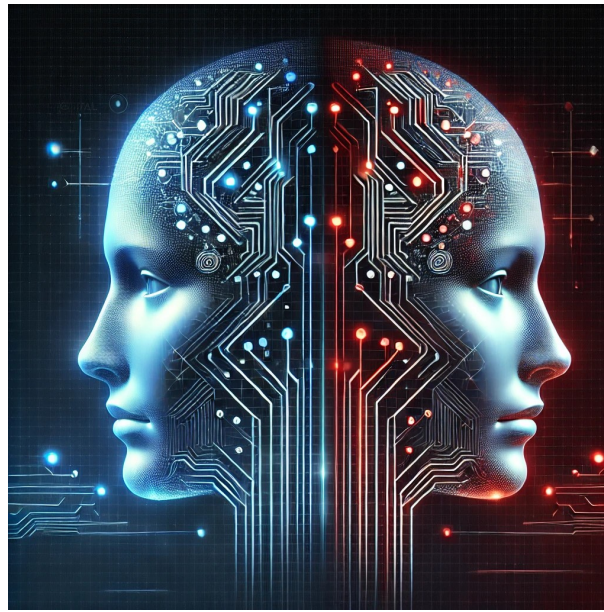


Abb. 6.1: Symbolbild zur Verschmelzung von virtueller und realer Instanz im Digitalen Zwilling als Januskopf, Abbildung KI generiert.

das SHM-System erfassen, Daten der realen Instanz besteht. Für eine handlungsfähige Digitale Zwillings-Entität ist ein SHM-System auf Level 4 erforderlich, wobei die Level je nach Bewertungsphase adaptiv angepasst werden können. Das SHM-System erweist sich dabei als sowohl notwendige, als auch limitierende Bedingung für die Kopplung der Instanzen. Die erreichbare Genauigkeit des Digitalen Zwillings wird durch die Messunsicherheit begrenzt, welche die untere Schranke für beliebige Kenngrößen darstellt. Die Betrachtung des Digitalen Zwillings erfolgt zu diesem Zeitpunkt auf der Ebene eines spezifischen Bauteils, Subsystems oder Systems. Dabei bildet das Bauteil bzw. System seine eigene Referenz, und Abweichungen werden relativ zu dieser bewertet.

Eine weitergehende Perspektive im Kontext des Digitalen Zwillings bietet jedoch die Vernetzung unterschiedlicher Digitaler-Zwilling-Entitäten. Dies ermöglicht eine Entität-übergreifende Betrachtung, welche in Kapitel 5 untersucht wird. Das Kapitel thematisiert die zentrale Rolle einer IoT-basierten Konnektivität für die Vernetzung von Digitalen Zwillings-Entitäten. Es wird gezeigt, wie durch eine entsprechende IoT-Infrastruktur Informationen zwischen realen und virtuellen Instanzen geteilt und integriert werden können, um zusätzliches Wissen und neue Auswertungsmöglichkeiten zu generieren, wie am Beispiel des Kragarms verdeutlicht.

Basierend auf allen dargestellten Ergebnissen wird die eingehende Forschungshypothese, welche SHM als notwendige Bedingung zur Kopplung von realen und virtuellen Instanzen und somit für die Erstellung eines Digitalen Zwillings für Strukturkomponenten postuliert, als validiert betrachtet.

Ausblick

Zukünftig sind verschiedene Forschungsrichtungen denkbar, die auf den Erkenntnissen dieser Arbeit aufbauen. Zentraler Punkt sollte die Ausrichtung und Entwicklung von **SHM-Systemen** explizit für ihre **Verwendung als Kopplungselement** im Digitalen Zwilling sein. Sie birgt erhebliche Forschungspotenziale, da SHM in dieser Funktion als „Enabler-Technologie“ einen zentralen Mehrwert für die Nutzung und Weiterentwicklung des Digitalen Zwillings in der Strukturmechanik bietet. Während SHM-Systeme in ihrer heutigen Form oft nur begrenzt industriell eingesetzt werden, liegt so ihr Potential nicht allein im Selbstzweck, sondern vielmehr in ihrer Rolle als integrativer Bestandteil des Digitalen Zwillings. Durch diese Verbindung können SHM-Systeme als Kopplungselemente agieren, indem sie Echtzeitdaten zur Schadensdetektion, Strukturbewertung und Lebenszyklusprognose liefern, die den Digitalen Zwilling dynamisch und kontinuierlich aktualisieren.

Der entscheidende Mehrwert ergibt sich aus der Fähigkeit des Digitalen Zwillings, die durch SHM gewonnenen Daten in umfassende Simulationen, Analysen und Prognosen zu übersetzen. Diese Kombination ermöglicht nicht nur eine präzisere Zustandsüberwachung und vorausschauende Wartung (**Predictive Maintenance**), sondern auch eine optimierte Ressourcennutzung und eine verlängerte Lebensdauer von Strukturen. Damit wird SHM in seiner Ausrichtung auf den Digitalen Zwilling wirtschaftlich und technologisch attraktiver als der isolierte Einsatz.

Damit SHM-Systeme diese Schlüsselrolle effizient erfüllen können, ist es erforderlich, ihre Funktionen und Schnittstellen klar auf die Anforderungen des Digitalen Zwillings auszurichten. Dies erfordert die Entwicklung **standardisierter Protokolle und Implementierungen**, um Interoperabilität und Skalierbarkeit sicherzustellen. Diese Arbeit legt einen Grundstein für die notwendige Standardisierung und Weiterentwicklung, um SHM in dieser Form als unverzichtbaren Bestandteil des Digitalen Zwillings zu etablieren. Durch diese Ausrichtung wird SHM von einer oft wenig genutzten Technologie zu einem zentralen Element, das die Integration und den Mehrwert des Digitalen Zwillings erheblich steigert. Insbesondere die Erweiterung durch IoT bietet viele Möglichkeiten, die Effizienz und Genauigkeit von SHM-Systemen zu verbessern. Durch die IoT-Vernetzung können Digitale Zwillinge in Echtzeit und unabhängig von Standortbedingungen mit ihren realen Gegenständen interagieren und kontinuierlich Daten austauschen.

Für die erfolgreiche Integration von IoT in den Digitalen Zwilling der Strukturmechanik ist eine robuste Daten-Governance unerlässlich, die **Standards für Datenqualität, Sicherheit und Interoperabilität** gewährleistet. Es müssen klare Richtlinien zur Erfassung, Speicherung und Verarbeitung von Daten etabliert werden, um konsistente und zuverlässige Ergebnisse zu erzielen, während gleichzeitig strenge Maßnahmen zur Datensicherheit wie Verschlüsselung und Zugriffskontrollen implementiert werden. Darüber hinaus ist die **Klärung der Datenhoheit** zwischen beteiligten Akteuren essenziell, um Missbrauch und Konflikte zu vermeiden, und eine langfristige Archivierung der Daten sichert Rückverfolgbarkeit und optimiert Wartungsprozessen.

Wie in vielen anderen Anwendungsgebieten bietet die Integration spezifischer **KI-Methoden** in den Digitalen Zwilling der Strukturmechanik Forschungs- und Entwicklungspotentiale. In der Designphase bietet der Einsatz von Generativen Algorithmen die Möglichkeit Strukturdesigns effizient zu optimieren. Für virtuelle Tests und Simulationen bieten sich neuronale Netzwerke und physik-informierte Modelle an, die nichtlineare physikalische Effekte und Materialeigenschaften präzise abbilden können. Auch ist denkbar die Erstellung von MBSE-Modellen oder Modellen für die Anwendung im Digitalen Zwilling KI-gestützt zu automatisieren. In der Betriebsphase unterstützt KI die Nutzung des Digitalen Zwillings durch die effiziente Analyse von Echtzeitdaten zur Schadensdetektion und Strukturbewertung beispielsweise durch frühzeitige Erkennung von Anomalien. Durch das präzise prognostizieren von Schäden und Ausfällen kann Predictive Maintenance weiterentwickelt und Wartungskosten reduziert werden.

Insgesamt eröffnet die Arbeit eine Vielzahl von Anknüpfungspunkten, die sowohl für die akademische Forschung als auch für die industrielle Anwendung von Bedeutung sind. Der Digitale Zwilling und die zugehörigen Technologien stehen am Anfang einer dynamischen Entwicklung, die langfristig zu intelligenteren, effizienteren und robusteren Strukturen führen kann.

Literatur

- [1] GARTNER, INC. Gartner Hype Cycle. 2025. URL: <https://www.gartner.com/en/research/methodologies/gartner-hype-cycle>.
- [2] J. HUANG, P. WU, W. LI, J. ZHANG und Y. XU. Exploring the Applications of Digital Twin Technology in Enhancing Sustainability in Civil Engineering: A Review. In: *Structural Durability & Health Monitoring*, 18 (5) (2024), S. 577–598. DOI: 10.32604/sdhm.2024.050338.
- [3] E. ZIO und L. MIQUELES. Digital twins in safety analysis, risk assessment and emergency management. In: *Reliability Engineering & System Safety*, 246 (2024), S. 110040. DOI: 10.1016/j.ress.2024.110040.
- [4] J. W. CHIA, W. J. VERHAGEN, J. M. SILVA und I. S. COLE. A review and outlook of airframe digital twins for structural prognostics and health management in the aviation industry. In: *Journal of Manufacturing Systems*, 77 (2024), S. 398–417. DOI: 10.1016/j.jmsy.2024.09.024.
- [5] M. SAKR und A. SADHU. Recent progress and future outlook of digital twins in structural health monitoring of civil infrastructure. In: *Smart Materials and Structures*, 33 (3) (2024), S. 033001. DOI: 10.1088/1361-665X/ad2bd7.
- [6] R. STARK und T. DAMERAU. Digital Twin. In: *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2019, S. 1–8. DOI: 10.1007/978-3-642-35950-7_16870-1.
- [7] H. VAN DER VALK, H. HASSE, F. MÖLLER und B. OTTO. Archetypes of Digital Twins. In: *Business & Information Systems Engineering*, 64 (3) (2022), S. 375–391. DOI: 10.1007/s12599-021-00727-7.
- [8] L. SCHWEIGER und L. BARTH. Properties and Characteristics of Digital Twins: Review of Industrial Definitions. In: *SN Computer Science*, 4 (5) (2023). DOI: 10.1007/s42979-023-01937-4.
- [9] MCGRAW-HILL. Dictionary of Engineering: More than 18,000 essential terms, covers every discipline of engineering, provides synonyms, acronyms, and abbreviations. 2. Auflage. New York: McGraw-Hill, 2003. ISBN: 0071410503.
- [10] J. WIEDEMANN. Leichtbau: Elemente und Konstruktion. 3. Auflage. Klassiker der Technik. Berlin und Heidelberg: Springer, 2007. ISBN: 978-3-540-33657-0. DOI: 10.1007/978-3-540-33657-0.

- [11] C. MITTELSTEDT. Rechenmethoden des Leichtbaus: Grundlagen, Stäbe und Balken, Energiemethoden. 1. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021. ISBN: 978-3-662-62720-4.
- [12] B. KLEIN. Leichtbau-Konstruktion: Berechnungsgrundlagen und Gestaltung. 10. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013. ISBN: 978-3-658-02272-3.
- [13] A. PREISLER. Efficient damage detection and assessment based on structural damage structural damage indicators. Dissertation. Aachen: RWTH Aachen University, 2019. ISBN: 978-3-8440-7203-7. DOI: 10.2370/9783844072037.
- [14] A. RYTTER. Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures. Dissertation. Aalborg: Aalborg University, 1993. URL: <https://vbn.aau.dk/en/publications/vibrational-based-inspection-of-civil-engineering-structures>.
- [15] C. VIECHTBAUER. Structural Health Control (SHC): A novel approach to monitor and assess damages in lightweight structures. Dissertation. Linz: Johannes Kepler Universität, 2014.
- [16] B. BENDER und K. GERICKE. Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021. ISBN: 978-3-662-57302-0. DOI: 10.1007/978-3-662-57303-7.
- [17] J. PONN und U. LINDEMANN. Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte: Optimierte Produkte - systematisch von Anforderungen zu Konzepten. VDI-Buch. Berlin und Heidelberg: Springer, 2008. ISBN: 978-3-540-68563-0.
- [18] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. VDI-Richtlinie 2221 Blatt 1: Entwicklung technischer Produkte und Systeme: Modell der Produktentwicklung. In: VDI-Richtlinien (2019). URL: <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-2221-blatt-1-entwicklung-technischer-produkte-und-systeme-modell-der-produktentwicklung>.
- [19] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. VDI-Richtlinie 2221 Blatt 2: Entwicklung technischer Produkte und Systeme: Gestaltung individueller Produktentwicklungsprozesse. In: VDI-Richtlinien (2019). URL: <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-2221-blatt-2-entwicklung-technischer-produkte-und-systeme-gestaltung-individueller-produktentwicklungsprozesse>.
- [20] R. A. WALKER und D. E. THOMAS. A Model of Design Representation and Synthesis. In: (1985), S. 453–459. DOI: 10.1109/dac.1985.1585981.
- [21] I. JACOBSON, G. BOOCH und J. RUMBAUGH. The unified process. In: IEEE Software, 16 (3) (1999), S. 96. URL: <https://people.eecs.ku.edu/~saiedian/810/readings/rup-unified-process.pdf>.
- [22] R. HÖHN, A. RAUSCH, M. BROY, S. HÖPPNER, R. PETRASCH, S. BIFFL, R. WAGNER, W. HESSE und K. BERGNER. Das V-Modell XT: Grundlagen, Methodik und Anwendungen. eXamen.press. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. ISBN: 9783540302506. DOI: 10.1007/978-3-540-30250-6.

- [23] S. FRIEDENTHAL, A. MOORE und R. STEINER. A practical guide to SysML: The systems modeling language. 3. Auflage. Amsterdam, 2015. ISBN: 9780128008003.
- [24] J. RYAN, S. SARKANI und T. MAZZUCHI. Leveraging Variability Modeling Techniques for Architecture Trade Studies and Analysis. In: *Systems Engineering*, 17 (1) (2014), S. 10–25. DOI: 10.1002/sys.21247.
- [25] J. M. BORKY und T. H. BRADLEY. *Effective Model-Based Systems Engineering*. Cham: Springer International Publishing, 2019. ISBN: 978-3-319-95668-8. DOI: 10.1007/978-3-319-95669-5.
- [26] T. HULDT und I. STENIUS. State-of-practice survey of model-based systems engineering. In: *Systems Engineering*, 22 (2) (2019), S. 134–145. DOI: 10.1002/sys.21466.
- [27] A. M. MADNI, N. AUGUSTINE und M. SIEVERS. *Handbook of Model-Based Systems Engineering*. Cham: Springer International Publishing, 2023. ISBN: 978-3-030-93581-8. DOI: 10.1007/978-3-030-93582-5.
- [28] S. FRIEDENTHAL, A. MOORE und R. STEINER. *OMG Systems Modeling Language (OMG SysML) Tutorial*. Hrsg. von INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING. 2024. URL: <http://www.omgsysml.org/INCOSE-OMGSysML-Tutorial-Final-090901.pdf>.
- [29] M. EIGNER. Engineering 4.0—Foundations of the Digitalization of Engineering. In: *System Lifecycle Management*. Hrsg. von M. EIGNER. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden und Springer Vieweg, 2021, S. 27–100. DOI: 10.1007/978-3-658-33874-9_3.
- [30] A. PARROTT und L. WARSHAW. Industry 4.0 and the digital twin: Manufacturing meets its match. Hrsg. von DELOITTE UNIVERSITY PRESS. 2024. URL: <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/industry-4-0/digital-twin-technology-smart-factory.html>.
- [31] M. GRIEVES und J. VICKERS. Origins of the Digital Twin Concept. In: *Working Paper* (2016). DOI: 10.13140/RG.2.2.26367.61609.
- [32] M. GRIEVES. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. In: *White Paper* (2014). URL: <https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS-SERVICES/DELMIA/PDF/Whitepaper/DELMIA-APRISO-Digital-Twin-Whitepaper.pdf>.
- [33] A. FULLER, Z. FAN, C. DAY und C. BARLOW. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. In: *IEEE Access*, 8 (2020), S. 108952–108971. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998358.
- [34] W. KRITZINGER, M. KARNER, G. TRAAR, J. HENJES und W. SIHN. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. In: *IFAC-PapersOnLine*, 51 (11) (2018), S. 1016–1022. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.

- [35] D. JONES, C. SNIDER, A. NASSEHI, J. YON und B. HICKS. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29 (2020), S. 36–52. DOI: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002.
- [36] R. VRABIČ, J. A. ERKOYUNCU, P. BUTALA und R. ROY. Digital twins: Understanding the added value of integrated models for through-life engineering services. In: *Procedia Manufacturing*, 16 (2018), S. 139–146. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.10.167.
- [37] E. H. GLAESSGEN und D.S. STARGEL. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. In: *Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference* (2012). URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20120008178/downloads/20120008178.pdf>.
- [38] D. J. KNEZEVIC, H. KANG, P. SHARMA, G. MALINOWSKI und T. T. NGUYEN. Structural integrity management of offshore structures via RB-FEA and fast full load mapping based digital twins: Sapporo, Japan. In: (2018). URL: <https://tethys-engineering.pnnl.gov/events/28th-international-ocean-polar-engineering-conference>.
- [39] T. GABOR, L. BELZNER, M. KIERMEIER, M. T. BECK und A. NEITZ. A Simulation-Based Architecture for Smart Cyber-Physical Systems. In: *IEEE International Conference on Autonomic Computing (ICAC)* (2016), S. 374–379. DOI: 10.1109/ICAC.2016.29.
- [40] M. SCHLUSE. Experimentierbare Digitale Zwillinge: Konvergenz von Simulation und Realität. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2024. ISBN: 9783658444457. DOI: 10.1007/978-3-658-44445-7.
- [41] F. TAO, H. ZHANG, A. LIU und A. Y. C. NEE. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. In: *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15 (4) (2019), S. 2405–2415. DOI: 10.1109/TII.2018.2873186.
- [42] E. TUEGEL. The Airframe Digital Twin: Some Challenges to Realization. In: *53rd AIAA / ASME / ASCE / AHS / ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference* (2012). DOI: 10.2514/6.2012-1812.
- [43] J. CHEN, J. REITZ, R. RICHSTEIN, K.-U. SCHRÖDER und J. ROSSMANN. IoT-Based SHM Using Digital Twins for Interoperable and Scalable Decentralized Smart Sensing Systems. In: *Information*, 15 (3) (2024), S. 121. DOI: 10.3390/info15030121.
- [44] Y. CHEN. Integrated and Intelligent Manufacturing: Perspectives and Enablers. In: *Engineering*, 3 (5) (2017), S. 588–595. DOI: 10.1016/J.ENG.2017.04.009.
- [45] DELOITTE. Grenzenlos vernetzt: Digital Twins: Smarte Digitalisierung durch IoT, Digitale Zwillinge und die Supra-Plattform. Hrsg. von DELOITTE. 2017. URL: <https://www2.deloitte.com/de/de/pages/technology-media-and-telecommunications/articles/digital-twins.html>.

- [46] U. DAHMEN und J. ROSSMANN. What is a Digital Twin – A Mediation Approach. In: IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT) (2021), S. 165–172. DOI: 10.1109/EIT51626.2021.9491883.
- [47] J. ZHANG, C. ELLWEIN, M. HEITHOFF, J. MICHAEL und A. WORTMANN. Digital twin and the asset administration shell. In: Software and Systems Modeling, 24 (3) (2025), S. 771–793. DOI: 10.1007/s10270-024-01255-0.
- [48] T. BAUERNHANSL, J. KRÜGER, G. REINHART und G. SCHUH. WGP-Standpunkt Industrie 4.0. Hrsg. von WISSENSCHAFTLICHE GESELLSCHAFT FÜR PRODUKTIONSTECHNIK WGP E.V. 2016. URL: <https://wgp.de/de/wgp-standpunktpapier-fuehrt-durchs-schluesselloch-zu-industrie-4-0/>.
- [49] R. ROSEN, G. von WICHERT, G. LO und K. D. BETTENHAUSEN. About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. In: IFAC-PapersOnLine, 48 (3) (2015), S. 567–572. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141>.
- [50] K. J. KUEHNER, R. SCHEER und S. STRASSBURGER. Digital Twin: Finding Common Ground – A Meta-Review. In: Procedia CIRP, 104 (2021), S. 1227–1232. DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.206.
- [51] H. van der VALK, H. HASSE, F. MÖLLER, M. ARBTER, J.-L. HENNING und B. OTTO. A Taxonomy of Digital Twins. In: 26th Americas Conference on Information Systems (AMCIS) (2020). URL: https://aisel.aisnet.org/amcis2020/org_transformation_is/org_transformation_is/4/.
- [52] M. XIONG und H. WANG. Digital twin applications in aviation industry: A review. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 121 (9-10) (2022), S. 5677–5692. DOI: 10.1007/s00170-022-09717-9.
- [53] R. K. PHANDEN, P. SHARMA und A. DUBEY. A review on simulation in digital twin for aerospace, manufacturing and robotics. In: Materials Today: Proceedings, 38 (2021), S. 174–178. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.06.446.
- [54] H. AYDEMIR, U. ZENGİN und U. DURAK. The digital twin paradigm for aircraft review and outlook. In: AIAA Scitech 2020 Forum, Orlando, FL (2020). URL: <https://doi.org/10.2514/6.2020-0553>.
- [55] R. VAN DINTER, B. TEKINERDOĞAN und C. CATAL. Predictive maintenance using digital twins: A systematic literature review. In: Information and Software Technology, 151 (2022), S. 107008. DOI: 10.1016/j.infsof.2022.107008.
- [56] I. ERRANDONEA, S. BELTRÁN und S. ARRIZABALAGA. Digital Twin for maintenance: A literature review. In: Computers in Industry, 123 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103316>.
- [57] T. EROL, A. F. MENDİ und D. DOĞAN. The Digital Twin Revolution in Healthcare. In: 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT) (2020), S. 1–7. DOI: 10.1109/ISMSIT50672.2020.9255249.

- [58] G. COOREY, G. A. FIGTREE, D. F. FLETCHER, V. J. SNELSON, S. T. VERNON, D. WINLAW, S. M. GRIEVE, A. MCEWAN, J. Y. H. YANG, P. QIAN, K. O'BRIEN, J. ORCHARD, J. KIM, S. PATEL und J. REDFERN. The health digital twin to tackle cardiovascular disease-a review of an emerging interdisciplinary field. In: *npj Digital Medicine*, 5 (1) (2022), S. 126. DOI: 10.1038/s41746-022-00640-7.
- [59] O. BJELLAND, B. RASHEED, H. G. SCHAATHUN, M. D. PEDERSEN, M. STEINERT, A. I. HELLEVIK und R. T. BYE. Toward a Digital Twin for Arthroscopic Knee Surgery: A Systematic Review. In: *IEEE Access*, 10 (2022), S. 45029–45052. DOI: 10.1109/access.2022.3170108.
- [60] T. DENG, K. ZHANG und Z.-J. SHEN. A systematic review of a digital twin city: A new pattern of urban governance toward smart cities. In: *Journal of Management Science and Engineering*, 6 (2) (2021), S. 125–134. DOI: 10.1016/j.jmse.2021.03.003.
- [61] M. JAFARI, A. KAVOUSI-FARD, T. CHEN und M. KARIMI. A Review on Digital Twin Technology in Smart Grid, Transportation System and Smart City: Challenges and Future. In: *IEEE Access*, 11 (2023), S. 17471–17484. DOI: 10.1109/access.2023.3241588.
- [62] T. RYLL, M. KUHTZ, L. QUIRIN, M. NGUYEN, M. GUDE und A. FILIPPATOS. Design approach for the development of a digital twin of a generic hybrid lightweight structure. In: *MATEC Web of Conferences*, 349 (2021), S. 03004. DOI: 10.1051/mateconf/202134903004.
- [63] P. KOKKONEN, B. HEMMING, E. MIKKOLA, L. TEIR, V. LÄMSÄ und J. JUNTILA. Robust lightweight design and digital twins considering manufacturing quality variation and sustainability requirements. In: *Rakenteiden Mekaniikka*, 55 (3) (2022), S. 66–80. DOI: 10.23998/rm.120693.
- [64] H. ZHU und Y. WANG. Key Component Capture and Safety Intelligent Analysis of Beam String Structure Based on Digital Twins. In: *Symmetry*, 14 (6) (2022), S. 1152. DOI: 10.3390/sym14061152.
- [65] Z. LIU, W. BAI, X. DU, A. ZHANG, Z. XING und A. JIANG. Digital Twin-based Safety Evaluation of Prestressed Steel Structure. In: *Advances in Civil Engineering*, 2020 (2020), S. 1–10. DOI: 10.1155/2020/8888876.
- [66] Z. LIU, G. SHI, Z. JIAO und L. ZHAO. Intelligent Safety Assessment of Prestressed Steel Structures Based on Digital Twins. In: *Symmetry*, 13 (10) (2021), S. 1927. DOI: 10.3390/sym13101927.
- [67] Z. LIU, C. YUAN, Z. SUN und C. CAO. Digital Twins-Based Impact Response Prediction of Prestressed Steel Structure. In: *Sensors*, 22 (4) (2022). DOI: 10.3390/s22041647.
- [68] Z. LIU, A. JIANG, A. ZHANG, Z. XING und X. DU. Intelligent Prediction Method for Operation and Maintenance Safety of Prestressed Steel Structure Based on Digital Twin Technology. In: *Advances in Civil Engineering*, 2021 (2021), S. 1–17. DOI: 10.1155/2021/6640198.

- [69] C. CONDEMINÉ, L. GRAU, Y. MASSON und S. AUBRY. Live Digital Twin for Hydraulic Structures Fatigue Estimation. In: *Proceedings of PIANC Smart Rivers (2022)*. Hrsg. von Y. LI, Y. HU, P. RIGO, F. E. LEFLER, G. ZHAO, S. 494–505. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-19-6138-0_43.
- [70] T. YAGCI, K. HOESCHLER, S. PANNIER und S. von ENDE. A Structural Health Monitoring (SHM) Approach Using a Multidisciplinary Digital Twin for High-Pressure Turbine Discs in Civil Aviation. In: *Proceedings IRF2020 (2020)*. Hrsg. von J.F. SILVA GOMES und S.A. MEGUID, S. 491–502. URL: https://fe.up.pt/irf/Proceedings_IRF2020/data/papers/16534.pdf.
- [71] T. HE, N. SHEN, J. SHEN, J. WU, J. LI, H. LI und J. MAO. Real-time mechanical performance analysis of pusher structure of packaging machine based on digital twin system. In: *5th World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing (WCMEIM) (2022)*, S. 111–116. DOI: 10.1109/WCMEIM56910.2022.10021340.
- [72] R. GORAJ. Digital twin of the rotor-shaft of a lightweight electric motor during aerobatics loads. In: *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 92 (9) (2020), S. 1319–1326. DOI: 10.1108/AEAT-11-2019-0231.
- [73] S. SCHMID, R. RICHSTEIN und K.-U. SCHRÖDER. Integration of Fatigue Estimation into Experimentable Digital Twins for Structural Applications. In: *European Workshop European Workshop on Structural Health Monitoring (2022)*. Hrsg. von P. RIZZO und A. MILAZZO. DOI: doi.org/10.1007/978-3-031-07254-3_43.
- [74] U. TYGESEN, M. JEPSEN, J. VESTERMARK, N. DOLLERUP und A. PEDERSEN. The True digital Twin Concept for Fatigue Re-Assessment of Marine Structures. In: *Proceedings of the ASME 218*. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1115/OMAE2018-77915>.
- [75] J. ZUO, L. ZHOU, L. QIAO, X. DING, Q. WU, X. HE und X. PENG. A New General Framework for Response Prediction of Composite Structures Based on Digital Twin with Three Effective Error Correction Strategies. In: *Applied Composite Materials*, 30 (2) (2023), S. 449–483. DOI: 10.1007/s10443-022-10096-3.
- [76] A. W. MOMBER, T. MÖLLER, D. LANGENKÄMPER, T. W. NATTKEMPER und D. BRÜN. A Digital Twin concept for the prescriptive maintenance of protective coating systems on wind turbine structures. In: *Wind Engineering*, 46 (3) (2022), S. 949–971. DOI: 10.1177/0309524X211060550.
- [77] Y. LIU, J.-M. ZHANG, Y.-T. MIN, Y. YU, C. LIN und Z.-Z. HU. A digital twin-based framework for simulation and monitoring analysis of floating wind turbine structures. In: *Ocean Engineering*, 283 (2023), S. 115009. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.115009.
- [78] R. REVETRIA, F. TONELLI, L. DAMIANI, M. DEMARTINI, F. BISIO und N. PERUZZO. A Real-Time Mechanical Structures Monitoring System Based On Digital Twin, IoT and Augmented Reality. In: (2019), S. 1–10. DOI: 10.23919/SpringSim.2019.8732917.

- [79] R. RICHSTEIN, S. SCHMID und K.-U. SCHRÖDER. Using SHM for the Representation of Structural Components over Their Service Life Within Digital Twins. In: *European Workshop on Structural Health Monitoring. Lecture Notes in Civil Engineering* 253 (2023). Hrsg. von P. RIZZO und A. MILAZZO, S. 433–442. DOI: 10.1007/978-3-031-07254-3_44.
- [80] Y. YE, Q. YANG, J. ZHANG, S. MENG, J. WANG und X. TANG. A reconfigurable dynamic Bayesian network for digital twin modeling of structures with multiple damage modes. In: *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 13 (4) (2023), S. 100440. DOI: 10.1016/j.taml.2023.100440.
- [81] S. STERNINI, A. BOTTERO und W. A. KUPERMAN. Acoustic digital twin for passive structural health monitoring. In: *JASA express letters*, 2 (2) (2022), S. 025601. DOI: 10.1121/10.0009610.
- [82] Y. C. ZHU, D. WAGG, E. CROSS und R. BARTHORPE. Real-Time Digital Twin Updating Strategy Based on Structural Health Monitoring Systems. In: *Model Validation and Uncertainty Quantification*, 3 (2020). Hrsg. von Z. MAO, S. 55–64. DOI: doi.org/10.1007/978-3-030-47638-0_6.
- [83] X. HE, X. LAI, L. YANG, F. ZHANG, D. ZHOU, X. SONG und W. SUN. M-LFM: A multi-level fusion modeling method for shape-performance integrated digital twin of complex structure. In: *Frontiers of Mechanical Engineering*, 17 (4) (2022). DOI: 10.1007/s11465-022-0708-0.
- [84] Z. CHENG, E. TAN, M. CAI und A. R. MAGEE. Concept design of a digital twin architecture for ship structural health management. In: *Journal of Physics: Conference Series*, 2311 (1) (2022), S. 012010. DOI: 10.1088/1742-6596/2311/1/012010.
- [85] T. G. RITTO und F. A. ROCHINHA. Digital twin, physics-based model, and machine learning applied to damage detection in structures. In: *Mechanical Systems and Signal Processing*, 155 (2) (2021), S. 107614. DOI: 10.1016/j.ymssp.2021.107614.
- [86] E. K. BARTHOLOMEW, E. S. LIM, I. TOLOUE, M. S. LIEW, K. U. DANYARO, K. M. CHAN und S. W. LING. Physics-Based Structural Health Monitoring Digital Twin for Seismically Vulnerable Fixed Offshore Structures. In: *Offshore Technology Conference Asia* (2022). DOI: 10.4043/31377-MS.
- [87] T. RØLVÅG und Ø. STRANDEN. Digital Twin Based Structural Health Monitoring of Offshore Crane. In: *Proceedings of the ASME 41st International Conference on Ocean, Offshore & Arctic Engineering* (2022). DOI: <https://doi.org/10.1115/OMAE2022-85896>.
- [88] T. WANG, Z. LIU, M. LIAO und N. MRAD. Life prediction for aircraft structure based on Bayesian inference: Towards a digital twin ecosystem. In: *Annual Conference of the PHM Society*, 12 (1) (2020). DOI: <https://doi.org/10.36001/phmconf.2020.v12i1.1261>.

- [89] D. P. MILANOSKI, G. K. GALANOPOULOS und T. H. LOUATAS. Digital-Twins of composite aerostructures towards Structural Health Monitoring. In: IEEE 8th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace) (2021), S. 613–618. DOI: 10.1109/MetroAeroSpace51421.2021.9511653.
- [90] B. R. SESHADRI und T. KRISHNAMURTHY. Structural Health Management of Damaged Aircraft Structures Using Digital Twin Concept. In: AIAA 2017-1675 (2017). URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20170001027/downloads/20170001027.pdf>.
- [91] M. DAL BORGO, P. GARDNER, Y. ZHU, D. J. WAGG, S.-K. AU und S. J. ELLIOTT. On the development of a digital twin for the active vibration control of a three-storey structure. In: International Conference on Noise and Vibration Engineering, Leuven, Belgium (2020). URL: https://past.isma-isaac.be/downloads/isma2020/proceedings/Contribution_558_proceeding_3.pdf.
- [92] X. LAI, X. HE, S. WANG, X. WANG, W. SUN und X. SONG. Building a Lightweight Digital Twin of a Crane Boom for Structural Safety Monitoring Based on a Multifidelity Surrogate Model. In: Journal of Mechanical Design, 144 (6) (2022). DOI: 10.1115/1.4053606.
- [93] P. SHARMA, D. KNEZEVIC, P. HUYNH und G. MALINOWSKI. RB-FEA Based Digital Twin for Structural Integrity Assessment of Offshore Structures. In: Offshore Technology Conference (2018). DOI: <https://doi.org/10.4043/29005-MS>.
- [94] D. A. KNEZEVIC, E. FAKAS und H. J. RIBER. Predictive Digital Twins for Structural Integrity Management and Asset Life Extension – JIP Concept and Results. In: SPE Offshore Europe Conference, Aberdeen, UK (2019). DOI: <https://doi.org/10.2118/195762-MS>.
- [95] C. PHELPS und A. TESSLER. iFEM for Marine Structure Digital Twins - Effective Modeling Strategies. In: SNAME Maritime Convention (2020). URL: <https://onepetro.org/SNAMESMC/proceedings-pdf/SMC20/3-SMC20/D033S014R002/2256571/sname-smc-2020-072.pdf>.
- [96] M. KRAUSE, K.-U. SCHRÖDER, D. KAUFMANN, T. OSTERLOH und H.-J. ROSSMANN. Coupling of rigid body dynamics with structural mechanics to include elastic deformations in a real-time capable holistic simulation for digital twins. In: European Simulation and Modelling Conference, ESM (2018), S. 77–81. URL: <https://publications.rwth-aachen.de/record/750293>.
- [97] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. VDI/VDE 2206: Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme. In: Programme zu VDI-Richtlinien (2021). URL: <https://www.vdi.de/richtlinien/programme-zu-vdi-richtlinien/vdi-2206>.

- [98] F. BORDELEAU, B. COMBEMALE, R. ERAMO, M. VAN DEN BRAND und M. WIMMER. Towards Model-Driven Digital Twin Engineering: Current Opportunities and Future Challenges. In: Ö. Babur, J. Denil und B. Vogel-Heuser (eds) Systems Modelling and Management. ICSMM 2020. Communications in Computer and Information Science (2020), S. 43–54. DOI: 10.1007/978-3-030-58167-1_4.
- [99] K. NORTH. Wissensorientierte Unternehmensführung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021. ISBN: 978-3-658-32770-5. DOI: 10.1007/978-3-658-32771-2.
- [100] C. SPURA. Einführung in die Balkentheorie nach Timoshenko und Euler-Bernoulli. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. ISBN: 978-3-658-25215-1. DOI: 10.1007/978-3-658-25216-8.
- [101] A. B. NOEL, A. ABDAOUI, T. ELFOULY, M. H. AHMED, A. BADAWY und M. S. SHEHATA. Structural Health Monitoring Using Wireless Sensor Networks: A Comprehensive Survey. In: IEEE Communications Surveys & Tutorials, 19 (3) (2017), S. 1403–1423. DOI: 10.1109/COMST.2017.2691551.
- [102] H. ZHU und Y. WANG. Intelligent Analysis for Safety-Influencing Factors of Prestressed Steel Structures Based on Digital Twins and Random Forest. In: Metals, 12 (4) (2022), S. 646. DOI: 10.3390/met12040646.

A Anhang - Glossar

Reale Instanz	Ein physisches Objekt, System oder Prozess, das in der realen Welt existiert und beobachtbar ist.
Virtuelle Instanz	Eine nicht kalibrierte virtuelle Instanz ist ein idealisiertes Modell, das die physische Instanz auf Basis ihrer Auslegungsparameter und Struktureigenschaften beschreibt, ohne durch Echtzeitdaten oder spezifische Zustandsinformationen einer individuellen realen Instanz angepasst zu sein. Es repräsentiert den geplanten, idealen Zustand des Systems und ist unabhängig von realen Betriebsdaten.
Kalibrierte virtuelle Instanz	Ein auf die reale Instanz kalibriertes Modell, das deren Verhalten, Eigenschaften und Zustände in der digitalen Welt repräsentiert.
Digitale Zwillings Entität	Eine individuelle, gekoppelte Einheit, bestehend aus einer realen Instanz und einer kalibrierten virtuellen Instanz, die durch kontinuierliche Rekalibrierung und Datenaustausch eine präzise und dynamische Repräsentation einer eindeutigen realen Instanz ermöglicht.
SHM im Digitalen Zwilling	SHM ist das zentrale Kopplungselement zwischen realer und virtueller Instanz, das Zustandsdaten erfasst und analysiert, um die virtuelle Instanz präzise zu kalibrieren.
Level-4 SHM-System	Überwachungssystem, das strukturelle Zustandsdaten erfasst und aufbereitet, um dem Digitalen Zwilling die Handlungskompetenz zu verleihen, aus den Daten verlässliches Wissen zu generieren. Es sichert die präzise Kalibrierung der virtuellen Instanz, ermöglicht fundierte Zustandsprognosen und gewährleistet eine kontinuierliche Abstimmung zwischen realer und virtueller Instanz.

B Anhang - Übersicht Literaturrecherche

Tabelle B.1.1: Literature Overview.

Jahr	Titel	Quelle	Anwendung					Kopplung		Anwendung
			Design	Modellierung	Modellupd.	CM	SHM	Controlling	Maintenance	Fatigue
			keine	unidirektional	bidirektional					
2017	Structural health management of damaged aircraft structures using the digital twin concept	[90]			x	x	x	x		
2018	Coupling of rigid body dynamics with structural mechanics to include elastic deformations in a real-time capable holistic simulation for digital twins	[96]	x							
2018	RB-FEA based digital twin for structural integrity assessment of Offshore structures	[93]	x							
2018	Structural integrity management of offshore structures via RB-FEA and fast full load mapping based digital twins	[38]	x							

Jahr	Titel	Quelle	Design	Modellierung	Modellupd.	CM	SHM	Controlling	Maintenance	Fatigue	keine unidirektional bidirektional	Anwendung
2018	The true digital twin concept for fatigue re-assessment of marine structures	[74]			x		x		x		x	Marine
2019	A real-time mechanical structures monitoring system based on digital twin, iot and augmented reality	[78]				x					x	Demonstrator
2020	Digital twin of the rotor-shaft of a lightweight electric motor during aerobatics loads	[72]		x					x			Luftfahrt
2020	A structural health monitoring (SHM) approach using a multidisciplinary Digital Twin for high-pressure turbine discs in civil aviation	[70]					x		x		x	Luftfahrt
2020	Digital Twin-based Safety Evaluation of Prestressed Steel Structure	[65]		x		x					x	Gebäude
2020	iFEM for marine structure digital twins – Effective modeling strategies	[95]		x		x					x	Marine
2020	Life prediction for aircraft structure based on Bayesian inference: towards a digital twin ecosystem	[88]					x		x		x	Luftfahrt
2020	On the development of a digital twin for the active vibration control of a three-storey structure	[91]			x			x			x	Demonstrator
2020	Real-time digital twin updating strategy based on structural health monitoring systems.	[82]			x		x				x	Demonstrator

Jahr	Titel	Quelle	Design	Modellierung	Modellupd.	CM	SHM	Controlling	Maintenance	Fatigue	keine	unidirektional	bidirektional	Anwendung
2021	Design approach for the development of a digital twin of a generic hybrid lightweight structure	[62]	x	x							x			Demonstrator
2021	Digital twin, physics-based model, and machine learning applied to damage detection in structures	[85]		x			x					x		Demonstrator
2021	Digital-twins of composite aerostructures towards structural health monitoring	[89]			x		x					x		Luftfahrt
2021	Intelligent Prediction Method for Operation and Maintenance Safety of Prestressed Steel Structure Based on Digital Twin Technology	[68]					x		x				x	Gebäude
2021	Intelligent safety assessment of prestressed steel structures based on digital twins	[66]			x	x							x	Gebäude
2022	A Digital Twin concept for the prescriptive maintenance of protective coating systems on wind turbine structures	[76]				x			x			x		Windenergie
2022	Acoustic digital twin for passive structural health monitoring	[81]				x			x			x		Windenergie
2022	Building a Lightweight Digital Twin of a Crane Boom for Structural Safety Monitoring Based on a Multifidelity Surrogate Model	[92]		x			x						x	Demonstrator
2022	Concept design of a digital twin architecture for ship structural health management	[84]		x	x		x						x	Marine

Jahr	Titel	Quelle	Design	Modellierung	Modellupd.	CM	SHM	Controlling	Maintenance	Fatigue	keine unidirektional	bidirektional	Anwendung
2022	Digital Twin Based Structural Health Monitoring of Offshore Crane	[87]		x			x		x		x		Marine
2022	Digital Twins-Based Impact Response Prediction of Prestressed Steel Structure	[67]		x							x		Gebäude
2022	Intelligent Analysis for Safety-Influencing Factors of Prestressed Steel Structures Based on Digital Twins and Random Forest	[102]	x	x							x		Gebäude
2022	Key Component Capture and Safety Intelligent Analysis of Beam String Structure Based on Digital Twins	[64]			x	x					x		Gebäude
2022	M-LFM: a multi-level fusion modeling method for shape-performance integrated digital twin of complex structure	[83]		x			x			x	x		Maschinenbau
2022	Physics-Based Structural Health Monitoring Digital Twin for Seismically Vulnerable Fixed Offshore Structures	[86]					x		x		x		Marine
2022	Real-time mechanical performance analysis of pusher structure of packaging machine based on digital twin system	[71]		x		x					x		Maschinenbau

Jahr	Titel	Quelle	Design	Modellierung	Modellupd.	CM	SHM	Controlling	Maintenance	Fatigue	keine	unidirektional	bidirektional	Anwendung
2022	Robust lightweight design and digital twins considering manufacturing quality variation and sustainability requirements	[63]	x	x						x	x			Demonstrator
2023	A digital twin-based framework for simulation and monitoring analysis of floating wind turbine structures	[77]		x		x					x			Windenergie
2023	A New General Framework for Response Prediction of Composite Structures Based on Digital Twin with Three Effective Error Correction Strategies	[75]			x	x						x		Demonstrator
2023	A reconfigurable dynamic Bayesian network for digital twin modeling of structures with multiple damage modes	[80]			x		x	x			x			Raumfahrt
2023	Integration of Fatigue Estimation into Experimental Digital Twins for Structural Applications	[73]					x			x			x	Demonstrator
2023	Live Digital Twin for Hydraulic Structures Fatigue Estimation	[69]								x	x			Gebäude
2023	Using SHM for the Representation of Structural Components over Their Service Life Within Digital Twins	[79]			x		x						x	Demonstrator

